บทที่ 4

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

เมื่อได้ทำการดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซล ที่จะนำมาทดลองใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง จนเครื่องยนต์สามารถทำงานได้ จึงทำการปรับแต่งเครื่องยนต์ เช่น ตั้งระยะห่างของวาล์วไอดี, วาล์วไอเสียใหม่ ตั้งเวลาการจุดระเบิด ตั้งระยะห่างของเขี้ยวหัวเทียน เป็นต้น เพื่อให้เครื่องยนต์สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นจึงทำการติดตั้งเครื่องยนต์เพื่อทดสอบสมรรถนะ และวัดปริมาณแกสไอเสีย เปรียบเทียบระหว่างเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง และเครื่องยนต์ซึ่งใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเครื่องยนต์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะ และวัดปริมาณแกสไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล แสดงดังรูปที่ 16 ประกอบด้วย

1. Orifice meter
2. Surge tank
3. Fuel (diesel) tank
4. Fuel oil measuring flask
5. Engine
6. Fly wheel
7. Electric dynamometer
8. Engine brake load reading
9. Tachameter
10. Controller borad
11. Electric control load

12. Thermocouple for measure cooling water temperature
13. Thermocouple for measure exhaust gas temperature
14. CO_2, O_2 Gas analyzer
15. Air dryer
16. Air compressure
17. CO, HC Gas analyzer
18. Exhaust gas analyzer
19. Heat tube

ในกรณีของการทดสอบเครื่องยนต์ ที่ได้รับการดัดแปลงให้ใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง จะใช้อุปกรณ์เช่นเดียวกับการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซล แตกต่างกันเฉพาะระบบเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ แผนภาพแสดงการทดสอบเครื่องยนต์ไฮโดรเจน แสดงดังรูปที่ 17 ประกอบด้วย

1. Orifice meter
2. Surge tank for air flow
3. Hydrogen tank
4. Pressure regulator
5. Flashback arrestor
6. Hydrogen tube
7. Hydrogen mass flow meter
8. Surge tank for hydrogen flow
9. Hydrogen injector
10. Engine
11. Engine flywheel
12. Electric dynamometer
13. Engine brake load reading
14. Tachometer

15. Electric control load
16. Thermocouple for measure cooling water temperature
17. Thermocouple for measure exhaust gas temperature
18. CO_2, O_2 Gas analyzer
19. CO, HC Gas analyzer
20. Exhaust gas smoke analyzer
21. Air dryer
22. Air compressure
23. Heat tube

ไดนาโมมิเตอร์ (Dynmometer)

ไดนาโมมิเตอร์ ซึ่งจะใช้วัดกำลังม้าขาออก (Brake hourse power) ของเครื่องยนต์ ในการทดสอบครั้งนี้จะใช้ไดนาโมมิเตอร์แบบไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. Electric Dynamometer) ของบริษัท Techquipment ไดนาโมมิเตอร์ชนิดนี้สามารถใช้เป็นมอเตอร์ช่วยสตาทย์เครื่องยนต์ในช่วงแรก และเมื่อต้องการวัดแรงบิดของเครื่องยนต์จะเปลี่ยนเป็นไดนาโม การควบคุมภาระของเครื่องยนต์จะทำได้โดยปรับค่าความต้านทางภายในไดนาโม การวัดค่าแรงบิดจะใช้ลูกตุ้มน้ำหนักและตาชั่งสปริง เมื่อทราบแรงบิดของเครื่องยนต์จะสามารถหากำลังม้าเบรคของเครื่องยนต์จากสมการ

$$P = \frac{0.6\pi FN}{60} \quad \text{watt}$$

เมื่อ

P = กำลังม้าขาออก (Brake hourse power)

F = แรงบิดของเครื่องยนต์ (Engine brake load)

N = ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (Engine Speed)

เครื่องมือวัดอัตราการไหลของอากาศ (Air flow meter)

Orifice meter เป็นอุปกรณ์ซึ่งใช้วัดอัตราการไหลของอากาศซึ่งเครื่องยนต์ใช้ โดยจะมี surge tank ช่วยปรับสภาพการไหลของอากาศให้สม่ำเสมอเพื่อช่วยให้การวัดถูกต้อง ปริมาณการไหลของอากาศที่วัดโดยใช้ Orifice meter สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{m} = 7.625\sqrt{\Delta h}$$

เมื่อ

$\dot{m}$ = อัตราการไหลของอากาศ (kg/hr)

Δh = แรงดันตกคร่อม orifice meter วัดได้จาก manometer

เครื่องมือวัดอัตราการไหลของแกสไฮโดรเจน (Hydrogen-flow meter)

ในการทดสอบเครื่องยนต์ใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงปริมาณแกสไฮโดรเจน ที่เครื่องยนต์ใช้ จะวัดได้โดยใช้ flow meter ชนิด Varible area flow meter ของบริษัท BAILEYFischer & Porter model 10A3225CA2AOA1A1และเพื่อให้การวัดทำได้ถูกต้องที่สุดจะใช้ surge tank ช่วยปรับสภาพการไหลของแกสไฮโดรเจน ซึ่งเข้าสู่เครื่องยนต์สม่ำเสมอ

เครื่องมือวิเคราะห์แกสไอเสีย (Exhaust-gas analyzer)

การวัดและวิเคราะห์แกสไอเสียของเครื่องยนต์ในการทดลองครั้งนี้ แกสที่ต้องการวัดปริมาณที่มีอยู่ในแกสไอเสียประกอบด้วย แกสคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แกสออกซิเจน (O_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจนคาร์บอน (HC) และปริมาณควันดำ โดยเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะทำการวิเคราะห์แกส CO_2, O, CO, HC และควันดำ ส่วนเครื่องยนต์ดีเซลจะทำการวัดแกส CO, HC และควันดำ เครื่องวิเคราะห์แกสไอเสียเหล่านี้จะใช้ทั้งหมด 3 เครื่อง โดยแต่ละเครื่องจะสามารถวิเคราะห์แกสไอเสียได้แตกต่าง ดังต่อไปนี้คือ

1. เครื่องวิเคราะห์ไอเสียของ บริษัท Servomex Model 01400 B4 SPX 9211011013212 ซึ่งสามารถวิเคราะห์แกสไอเสียได้ 2 ชนิด คือ CO_2 และ O_2 โดย CO_2 ใช้ระบบแสงอินฟราเรด (infrared) สามารถเลือกวัดได้ 2 scale คือ 0-5 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร สามารถวัดได้ละเอียดถึง 0.01 เปอร์เซนต์ และ sclce 0-25 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร วัดได้ละเอียดถึง 0.1 เปอร์เซนต์ ส่วนการวิเคราะห์แกส O_2 จะใช้การวัดด้วยระบบแม่เหล็กชนิด Magnetic auto-balance สามารถเลือกวัดได้ 2 scale เช่นเดียวกับ CO_2 โดย scale แรกจะวัดได้ตั้งแต่ 0-25 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร และ scale 0-100 เปอร์เซนต์โดยปริมาณทั้งสอง scale วัดได้ละเอียดถึง 0.1 เปอร์เซนต์

2. เครื่องมือวิเคราะห์แกสไอเสียของบริษัท Tecnotest model 483 สามารถวิเคราะห์แกสไอเสียได้ 2 ชนิดคือ CO และ HC โดยแกสทั้งสองชนิดจะวัดโดยใช้ระบบแสงอินฟราเรด โดยปริมาณ CO จะวัดได้ตั้งแต่ 0-9.99 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร อ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.01 เปอร์เซนต์ ส่วนปริมาณ HC จะวัดได้ตั้งแต่ 0-10,000 PPM อ่านค่าได้ละเอียดถึง 10 PPM

3. เครื่องมือวัดปริมาณควันดำในแกสไอเสียของบริษัท Tecnotest model 490 สามารถวิเคราะห์ปริมาณควันดำในแกสไอเสีย โดยอ่านค่าเป็นเปอร์เซนต์ ควันดำตั้งแต่ 0-100 เปอร์เซนต์

เครื่องมือวัดแกสไอเสียทั้ง 3 แบบ แสดงดังรูปที่ 21

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล

<u>รายละเอียดของเครื่องยนต์</u>

เครื่องยนต์ที่ใช้	:	KUBOTA MODEL ET 115
ชนิดของเครื่องยนต์	:	4 จังหวะ ระบายความร้อนด้วยน้ำ
จำนวนสูบ	:	1 สูบ ชนิดสูบนอน

เส้นผ่าศูนย์กลางกระบอกสูบ	:	94 ม.ม.
ระยะชัก	:	90 ม.ม.
ปริมาตรกระบอกสูบ	:	624 CC
อัตราส่วนกำลังอัด	:	21 : 1
ชนิดของห้องเผาไหม้	:	Direct injection
หัวฉีด	:	แบบเข็มบานปลาย (NP-DN 15SD NK1)
แรงดันในการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง	:	12-12.5 MPa
จังหวะการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง	:	20 องศาก่อนศูนย์ตายบน
แรงม้าสม่ำเสมอ	:	10.5/2400 แรงม้า
แรงม้าสูงสุด	:	11.5/2400 แรงม้า

<u>วิธีการทดสอบ</u>

ในการศึกษาครั้งนี้ จะทำการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อหาค่าภาระสูงสุด (Maximum Load) ของเครื่องยนต์ ดังนั้นวิธีการทดสอบคือ ทำการเดินเครื่องที่ความเร็วรอบสูงสุด โดยโยกคันเร่งน้ำมันไปยังตำแหน่งเร่งสุด อุ่นเครื่องประมาณ 5 นาที หลังจากนั้นจึงเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์ โดยเพิ่มครั้งแรก 30 นิวตัน และรอจนกระทั่งความเร็วรอบของเครื่องยนต์คงที่ จึงทำการบันทึกค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ภาระของเครื่องยนต์ (Load)
2. ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (speed)
3. แรงดันตกคร่อม Orifice meter
4. ปริมาณ HC และ CO ในแกสไอเสีย
5. เปอร์เซนต์ควันดำในแกสไอเสีย
6. อุณหภูมิแกสไอเสีย
7. อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น
8. เวลาที่เครื่องยนต์ใช้น้ำมัน 15 CC

เมื่อบันทึกค่าดังกล่าวข้างต้นแล้ว จึงเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์ โดยเพิ่มครั้งละประมาณ 30 นิวตัน ทำเช่นเดิมจนกระทั่งเครื่องยนต์รับภาระสูงสุดแล้ว (เครื่องยนต์มีความเร็วรอบต่ำจนเกือบดับ) จึงเสร็จสิ้นการทดสอบ

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน

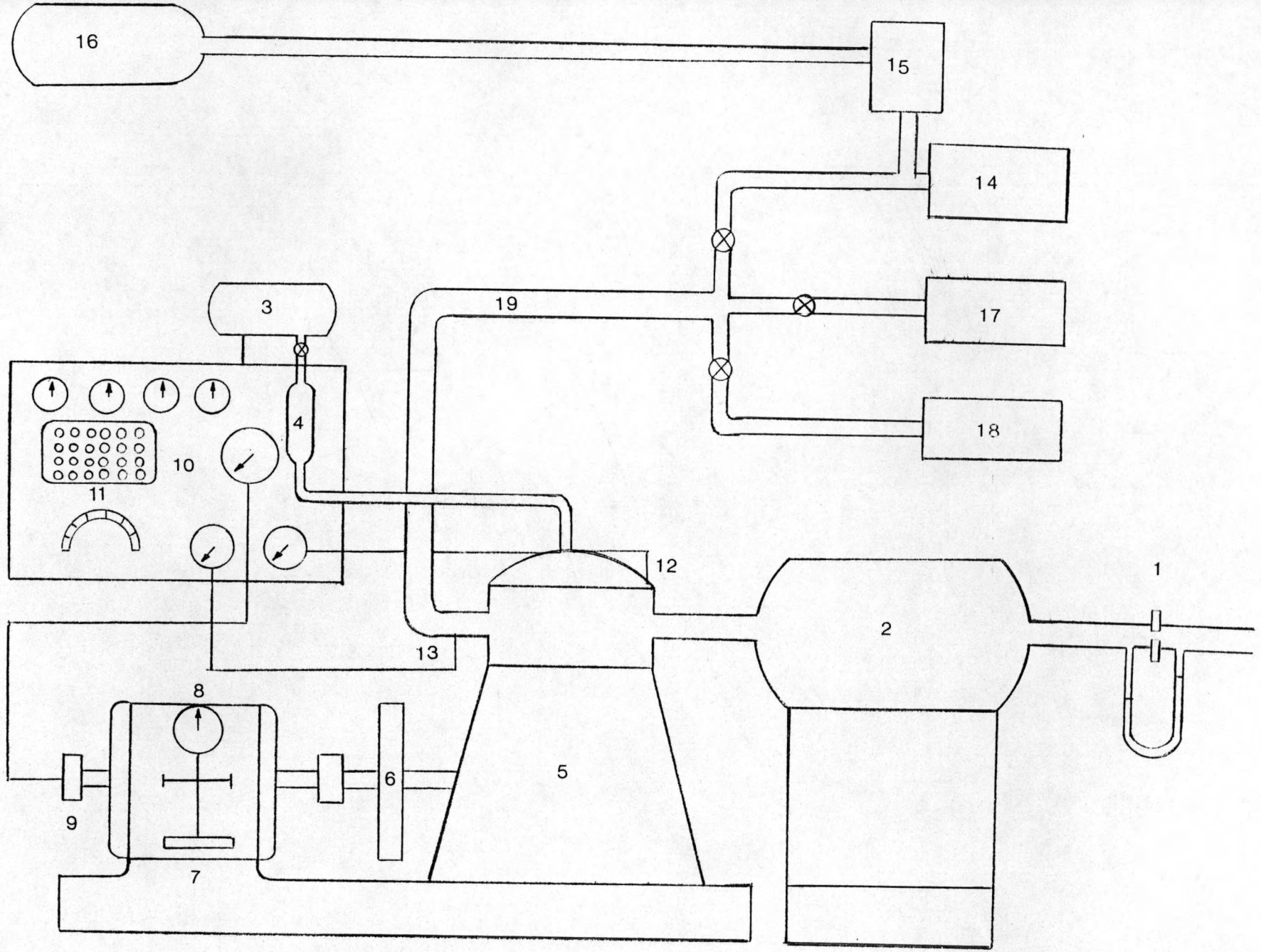
เครื่องยนต์ใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งได้รับการดัดแปลงจากเครื่องยนต์ดีเซล จะมีรายละเอียดซึ่งแตกต่างจากเครื่องยนต์เดิม ดังต่อไปนี้

อัตราส่วนกำลังอัด	11 : 1
ชนิดของห้องเผาไหม้	Indirect ชนิด (Swirl Chamber)
หัวฉีด	หัวฉีดแกสไฮโดรเจน
แรงดันในการฉีดแกสไฮโดรเจน	2-4 MPa
จังหวะการฉีดแกสไฮโดรเจน	50 องศาก่อนศูนย์ตายบน 50°BTDC
ระบบจุดระเบิด	จานจ่าย คอล์ย แบตเตอรี่ และหัวเทียน (NGK D7E)
จังหวะจุดระเบิด	ศูนย์ตายบน (TDC)

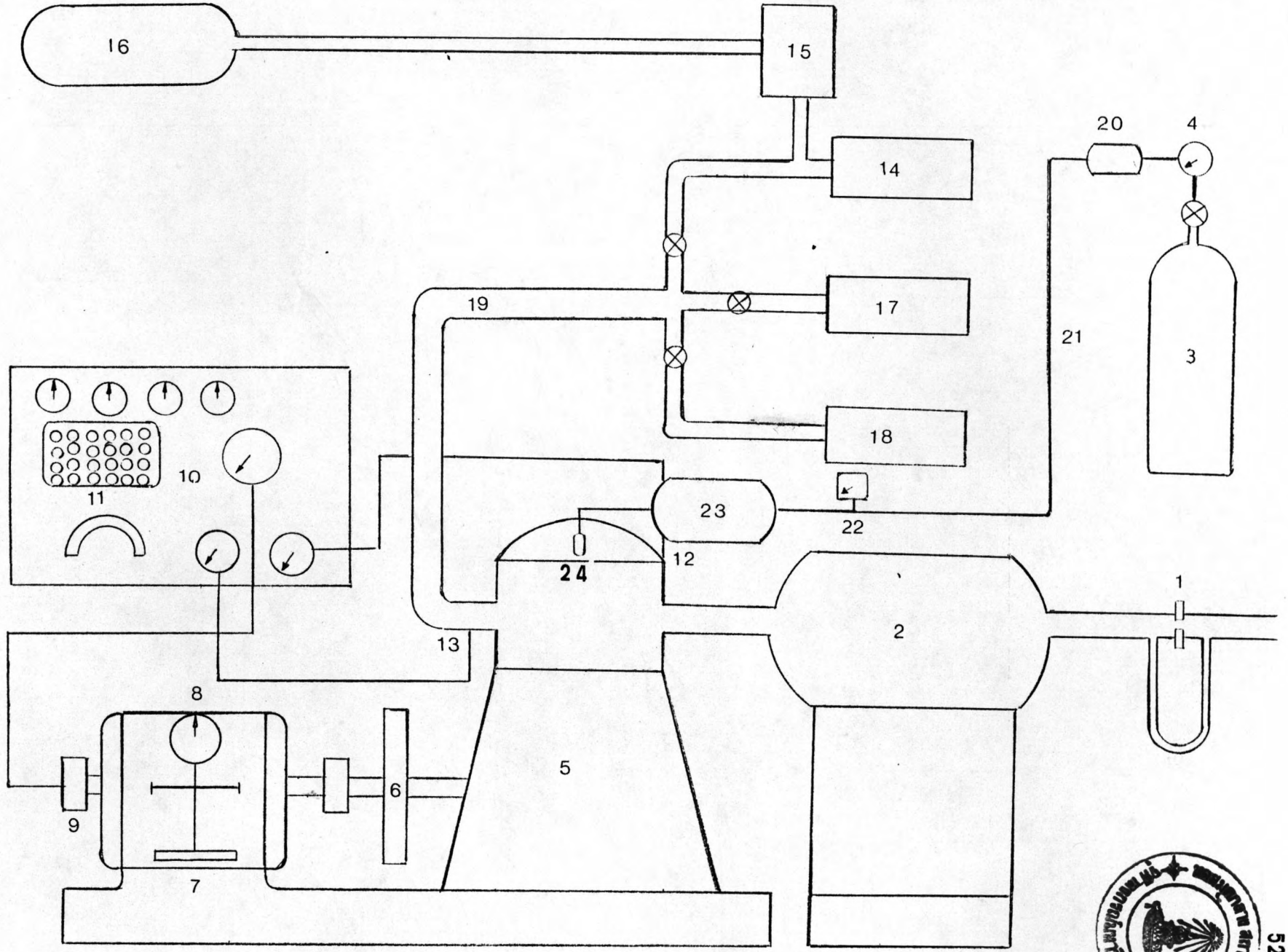
<u>วิธีการทดสอบ</u>

การควบคุมกำลังและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ซึ่งใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง สามารถทำได้โดยเพิ่มแรงดันในการฉีด ดังนั้นในการทดสอบเครื่องยนต์ จะกระทำโดยควบคุมแรงดันในการฉีดแกสไฮโดรเจนให้คงที่ โดยก่อนเดินเครื่องยนต์จะปรับแรงดันของแกสไฮโดรเจนให้ได้ 20 บาร์ หลังจากนั้นจึงเพิ่มภาระ (Load) ให้กับเครื่องยนต์อย่างสม่ำเสมอครั้งละประมาณ 30 นิวตัน เมื่อความเร็วรอบคงที่จึงบันทึกค่าต่าง ๆ ดังนี้

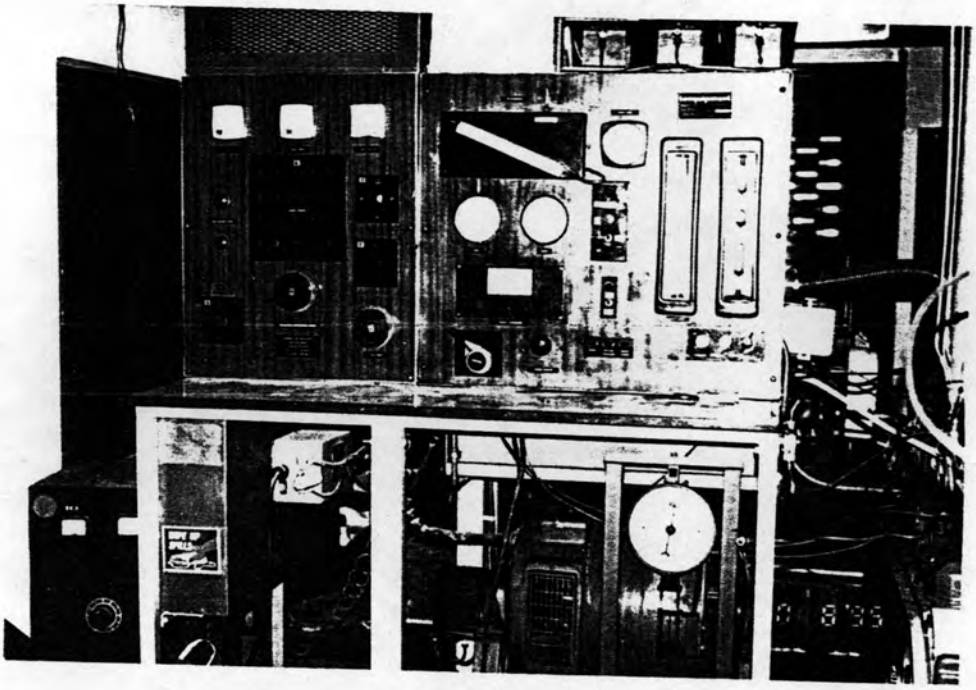
1. แรงดันที่ใช้ในการฉีดแกสไฮโดรเจน
2. ภาระของเครื่องยนต์ (Load)
3. ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (Speed)
4. อัตราการไหลของแกสไฮโดรเจน



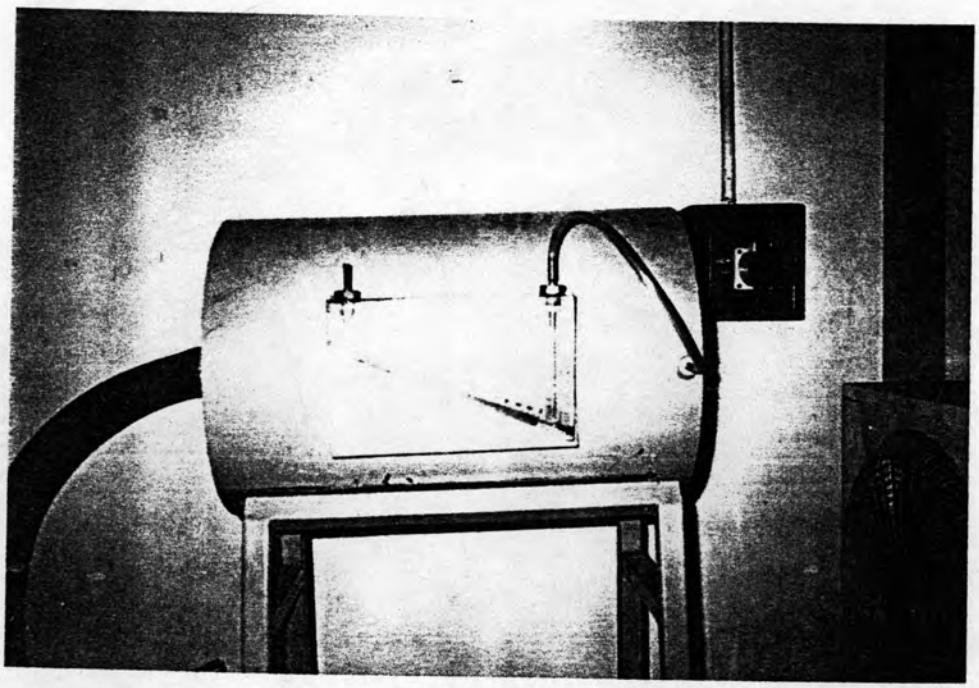
รูปที่ 16 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดสอบเครื่องยนต์ดีเซล



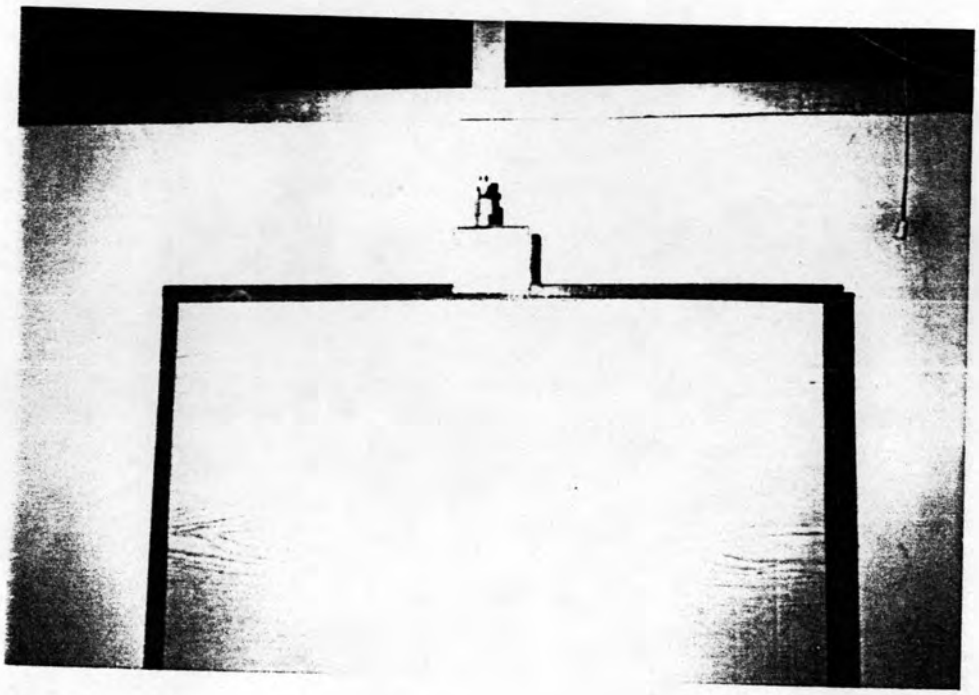
รูปที่ 17 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดสอบเครื่องยนต์ไฮโดรเจน



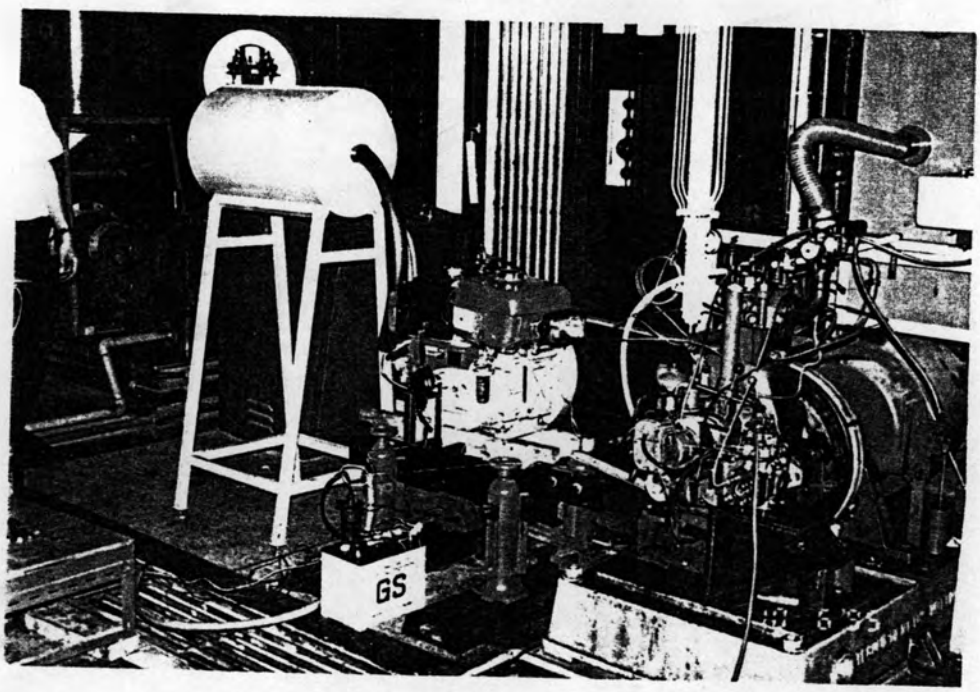
รูปที่ 18 แสดงไดนาโมมิเตอร์และแผงควบคุม



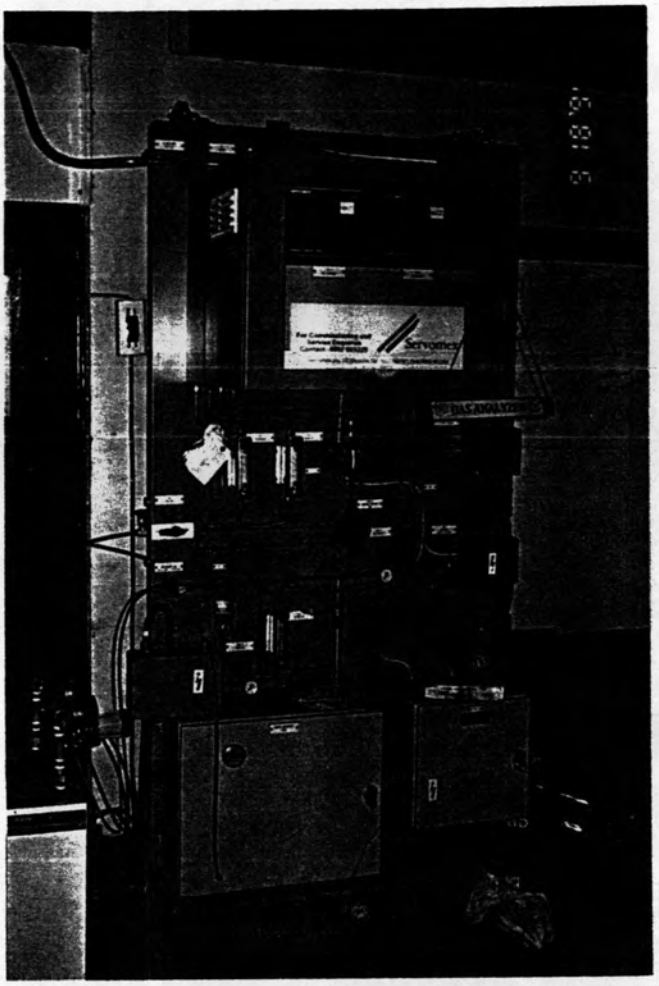
รูปที่ 19 แสดงเครื่องมือวัดอัตราการไหลของอากาศ

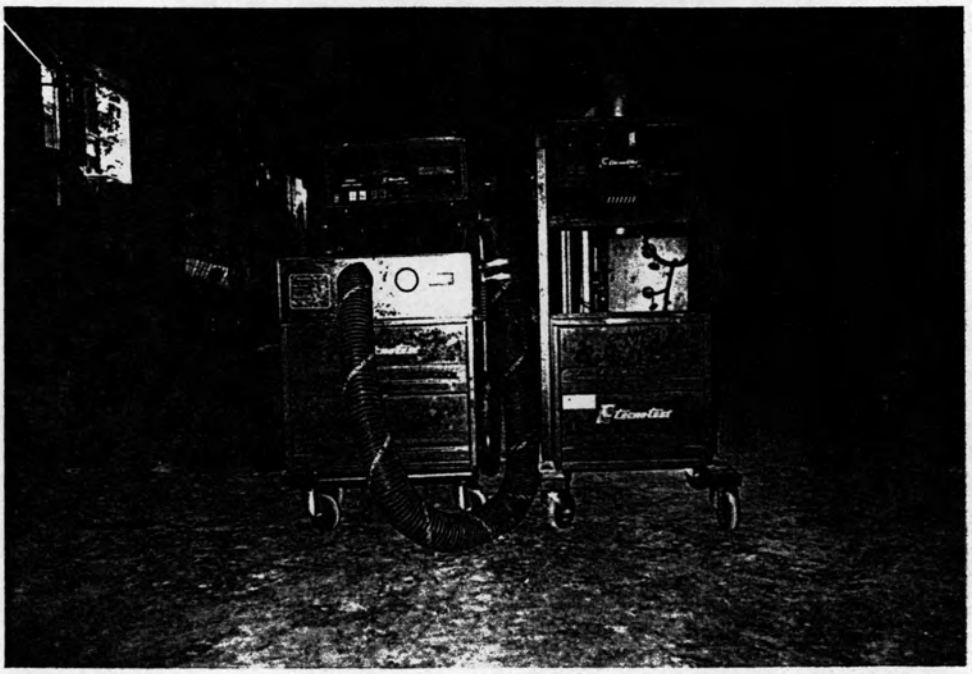


รูปที่ 20 แสดงเครื่องมือวัดอัตราการไหลของแกสไฮโดรเจน



รูปที่ 21 แสดงภาพการทดสอบเครื่องยนต์





รูปที่ 22 แสดงเครื่องมือวัดและวิเคราะห์แกส

5. แรงดันตกคร่อม Orifice meter
6. ปริมาณแกส CO_2, CO, O_2 และ HC ในแกสไอเสีย
7. ปริมาณควันดำ
8. อุณหภูมิแกสไอเสีย
9. อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น

เมื่อทำการบันทึกค่าดังกล่าวแล้ว ก็เพิ่มภาระของเครื่องอีก 30 นิวตัน ทำเช่นเดิมจนกระทั่งถึงภาระสูงสุดที่เครื่องยนต์รับได้ จึงเปลี่ยนแรงดันในการฉีดเป็น 2.5 MPa, 3 MPa, 3.5 MPa และ 4 MPa ตามลำดับ ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับที่แรงดันในการฉีดเท่ากับ 2 MPa

ผลการทดสอบเครื่องยนต์และการวิเคราะห์

การศึกษาการนำเชื้อเพลิงไฮโดรเจนมาใช้ทดแทนน้ำมันในครั้งนี้ เป็นการศึกษาพื้นฐานของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน วัตถุประสงค์คือ ดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซลให้สามารถใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงได้ ส่วนการทดสอบเครื่องยนต์จะทดสอบเฉพาะคุณสมบัติพื้นฐานของเครื่องยนต์เท่านั้น ดังนั้นการทดสอบสำหรับการทดลองครั้งนี้คือ การหาค่าภาระสูงสุดที่เครื่องยนต์สามารถรับได้ โดยจะทำการเดินเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบสูงสุด หลังจากนั้นจึงเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์อย่างสม่ำเสมอครั้งละประมาณ 30 นิวตัน และหลังจากรอจนเครื่องยนต์มีความเร็วรอบคงที่ ก็จะสามารถหาคุณสมบัติของเครื่องยนต์ที่ภาระและความเร็วรอบขณะนั้นได้ เมื่อเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์จนเครื่องยนต์ไม่สามารถรับภาระได้ต่อไปอีก (เครื่องยนต์รอบต่ำจนเกือบดับ) ก็จะได้ภาระสูงสุดที่เครื่องยนต์สามารถรับได้ในที่สุด

ผลการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลแสดงในตารางที่ ผ-1 ส่วนผลการทดสอบเครื่องยนต์ไฮโดรเจนแสดงในตารางที่ ผ-2 ถึง ผ-6 ค่าต่าง ๆ ที่อยู่ในตารางจะแสดงตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวกที่ 1 และการเปรียบเทียบผลการทดสอบเครื่องยนต์ทั้งสองชนิดแสดงด้วยกราฟรูปที่ 25 ถึง 42

<u>กำลังม้าขาออกและภาระสูงสุดที่เครื่องยนต์รับได้</u>

พิจารณากราฟรูปที่ 25 แสดงความเร็วรอบสูงสุด ภาระสูงสุดและกำลังม้าสูงสุดของเครื่องยนต์ ส่วนกราฟรูปที่ 26 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของเครื่องยนต์กับกำลังม้าขาออก โดยกราฟทั้งสองจะเปรียบเทียบระหว่างเครื่องยนต์ดีเซลและเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่แรงดันในการฉีดแกส H_2 ต่าง ๆ ซึ่งในกราฟรูปที่ 25 จะพบว่าเครื่องยต์ดีเซลจะมีความเร็วรอบสูงสุดและกำลังม้าขาออกสูงที่สุด และสามารถรับภาระได้มากที่สุดด้วย โดยเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ไฮโดรเจน พบว่าเครื่องยนต์ดีเซลมีความเร็วรอบสูงสุด 2550 รอบ/นาที ในขณะที่เครื่องยนต์ไฮโดรเจนมีความเร็วรอบสูงสุดที่ 2400 รอบ/นาที ที่แรงดันในการฉีดแกส H_2 เท่ากับ 35 บาร์ และ 40 บาร์ หรือมีความเร็วรอบสูงสุดต่ำกว่า 5.88 เปอร์เซนต์ ส่วนกำลังม้าขาออกสูงสุดของเครื่องยนต์ดีเซลเท่ากับ 9.43 แรงม้า ในขณะที่เครื่องยนต์ไฮโดรเจนมีกำลังม้าขาออกสูงสุดเท่ากับ 5.98 แรงม้า ที่แรงดันในการฉีดแกส H_2 เท่ากับ 35 บาร์ ซึ่งจะต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซล 36.58 เปอร์เซนต์ ภาระสูงสุดของเครื่องยนต์ดีเซลเท่ากับ 148 N ส่วนเครื่องยนต์ไฮโดรเจนรับภาระสูงสุดได้เท่ากับ 114 นิวตัน ที่แรงดันในการฉีดแกส H_2 เท่ากับ 3.5 บาร์ ต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซล 44.14 เปอร์เซนต์ พิจารณากราฟรูปที่ 26 จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงระหว่างกำลังกับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ของเครื่องยนต์ดีเซลกับเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะเหมือนกัน โดยดูจากลักษณะเส้นโค้งของกราฟจะต่างกันก็คือ กำลังม้าสูงสุดของเครื่องยนต์ดีเซลจะสูงกว่าเครื่องยนต์ไฮโดรเจน ดังแสดงในกราฟรูปที่ 25 ในขณะเดียวกันเครื่องยนต์ที่แรงดันในฉีดแกส H_2 แตกต่างกันจะมีเส้นโค้งของกราฟใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะที่ภาระของเครื่องยนต์สูง ๆ เส้นกราฟเกือบจะทับกัน แต่ที่ภาระน้อย ๆ กำลังของเครื่องยนต์จะแตกต่างกันชัดเจน

ถ้าพิจารณาเฉพาะเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่แรงดันในการฉีดแกส H_2 แตกต่างกัน พบว่า เมื่อแรงดันในการฉีดแกสสูงขึ้น กำลังม้าขาออกของเครื่องยนต์จะสูงขึ้น โดยเฉพาะที่แรงดันในการฉีด 25 บาร์ 30 บาร์ และ 35 บาร์ จะมีกำลังเพิ่มสูงขึ้นมาก ซึ่งสาเหตุที่กำลังของเครื่องยนต์สูงขึ้นเมื่อแรงดันในการฉีดเพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้คือ เมื่อแรงดันในการฉีดสูงขึ้นจะทำให้มวลของไฮโดรเจนที่ฉีดเข้าไปในกระบอกสูบเพิ่มขึ้นตามสมการ

$$PV = mRT$$

เมื่อ

P คือ แรงดันขณะฉีดแกส H_2 ลงในกระบอกสูบ

V คือ ปริมาตรของแกส H_2 ในหัวฉีด

R คือ ค่าคงที่ของแกส H_2

T คือ อุณหภูมิของแกส H_2 ขณะฉีด

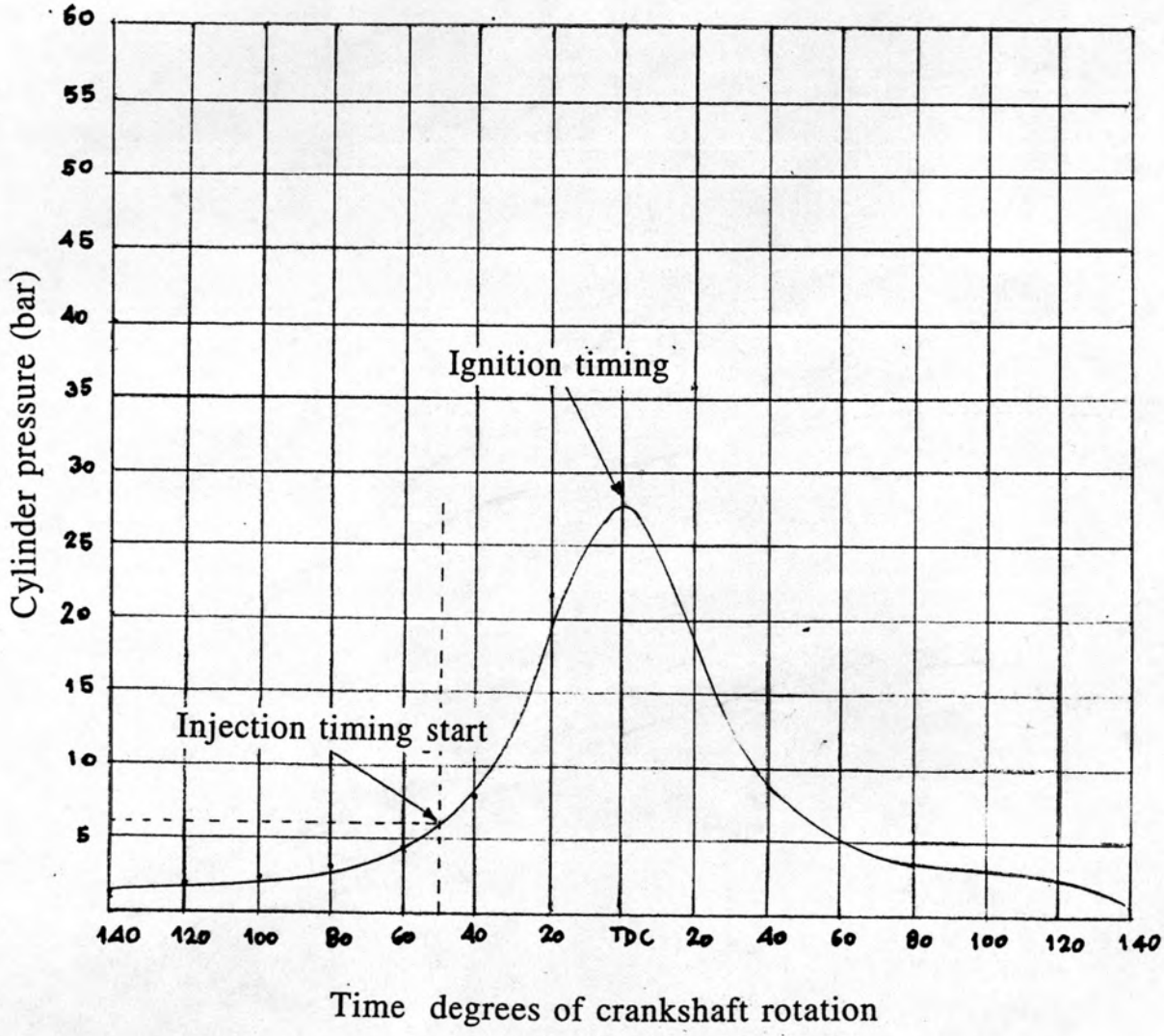
ซึ่งถ้า V, R และ T คงที่แล้วเมื่อ P เพิ่มขึ้น จะทำให้ m หรือมวลของไฮโดรเจนที่ฉีดลงในกระบอกสูบเพิ่มขึ้น เมื่อมวลเพิ่มค่าความร้อนจากการสันดาปก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้กำลังของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น นอกจากแรงดันในการฉีดแกส H_2 สูงจะทำให้มวลเพิ่มขึ้นแล้วยังทำให้การกระจายของแกสทั่วถึงทุกที่ในห้องเผาไหม้การเผาไหม้จึงสมบูรณ์

เมื่อพิจารณากราฟรูปที่ 26 จะพบว่า ที่แรงดันในการฉีดแกส H_2 เท่ากับ 35 บาร์ มีกำลังสูงกว่าที่แรงดันเท่ากับ 40 บาร์ เมื่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์อยู่ระหว่าง 1400-2300 รอบ/นาที และเท่ากันในช่วงความเร็วรอบ 600-1400 รอบ/นาที ซึ่งโดยปกติแล้วที่แรงดันในการฉีด H_2 เท่ากับ 40 บาร์ ควรจะมีกำลังสูงกว่าที่ 35 บาร์ ดังเหตุผลที่กล่าวในเบื้องต้น ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ว่า เกิดจากแรงดันของแกส H_2 ที่ฉีดลงไปในกระบอกสูบในจังหวะอัดเข้าไปต้านการเคลื่อนที่ของลูกสูบขณะเคลื่อนที่ขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง การที่แรงดันของแกส H_2 ที่ฉีดลงไปในกระบอกสูบเข้าไปต้านการเคลื่อนที่ของลูกสูบ เนื่องจากในการทดลองเครื่องยนต์ไฮโดรเจนในครั้งนี้ดัดแปลงให้จังหวะการฉีดเชื้อเพลิงอยู่ที่ประมาณ 1 ใน 3 ของระยะชัก หรือที่เพลาข้อเหวี่ยง

หมุน 50 องศาก่อนศูนย์ตายบน ซึ่งในตำแหน่งขณะนั้นสามารถคำนวณแรงดันภายในกระบอกสูบได้ 6 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 23 เมื่อแรงดันที่ฉีดลงไปอยู่ในช่วงไม่ถึง 40 บาร์ แรงดันภายในกระบอก และแรงเหวี่ยงของเพลาข้อเหวี่ยงยังสามารถเอาชนะแรงดันของแกสที่ฉีดลงไป เครื่องยนต์จึงทำงานตามปกติ แต่เมื่อแรงดันในการฉีดสูงถึง 40 บาร์ ปรากฏว่าเกิดแรงต้าน ภายในกระบอกสูบ กำลังของเครื่องยนต์ที่ตำแหน่งนี้จึงลดต่ำลงและจากการทดลองเพิ่มแรงดัน ในการฉีดเพิ่มกว่า 40 บาร์ ปรากฏว่าเครื่องยนต์มีอาการสะดุด และไม่สามารถทำงานได้ แสดงว่าแรงดันของแกส H_2 ที่ฉีดลงไปสูงเกินกว่าที่ลูกสูบจะเอาชนะและเคลื่อนที่ขึ้นมาได้

<u>ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์</u>

ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับความเร็วรอบ และภาระของเครื่องยนต์ แสดงดังกราฟที่ 27 และ 28 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับกำลังม้าขาออกของเครื่องยนต์ แสดงในกราฟรูปที่ 29 พิจารณากราฟรูปที่ 27 และ 28 พบว่า เส้นโค้งของกราฟประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซล และเครื่องยนต์ ไฮโดรเจนจะมีรูปร่างเหมือนกันคือ เมื่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์สูงหรือเครื่องยนต์มีภาระน้อย ๆ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะต่ำ เมื่อเครื่องยนต์มีความเร็วรอบและภาระปานกลาง ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะสูง และเมื่อเครื่องยนต์มีภาระสูงประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะลดลง จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซลกับเครื่องยนต์ไฮโดรเจน เครื่องยนต์ดีเซลจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเครื่องยนต์ไฮโดรเจน โดยเฉพาะในช่วงความเร็วรอบสูง ๆ และภาระมาก ๆ โดยเมื่อเครื่องยนต์มีความเร็วรอบ 1200 รอบ/นาที หรือภาระประมาณ 90 นิวตันขึ้นไป เครื่องยนต์ดีเซลจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเครื่องยนต์ไฮโดรเจนโดยตลอด แต่เมื่อเครื่องยนต์มีภาระน้อยและความเร็วรอบลดลง ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซลจะต่ำกว่าเครื่องยนต์ไฮโดรเจน ถ้าแรงดันในการฉีดแกสไฮโดรเจนลงในกระบอกสูบสูง ๆ (30, 35, 40 บาร์) และยังคงสูงกว่าถ้าแรงดันในการฉีดต่ำ ๆ (20, 25 บาร์) ในการทดลองครั้งนี้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดของเครื่องยนต์ดีเซลเท่ากับ 26.31 เปอร์เซนต์ที่ความเร็วรอบ



รูปที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาเพลาข้อเหวี่ยงกับแรงดันในกระบอกสูบที่ได้จากการคำนวณ

1800-1900 รอบ/นาที และเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 25.17 เปอร์เซนต์ ที่ความเร็วรอบ 1800-1900 รอบ/นาที โดยที่แรงดันในการฉีดแกส H_2 เท่ากับ 35 บาร์ ถ้าพิจารณาเฉพาะเครื่องยนต์ไฮโดรเจน พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับกำลังของเครื่องยนต์คือ เมื่อแรงดันในการฉีดแกส H_2 เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์จะเพิ่มขึ้น และที่แรงดันในการฉีดแกส H_2 เท่ากับ 40 บาร์ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์จะต่ำกว่าที่แรงดันในการฉีดแกสเท่ากับ 35 บาร์ ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันกับในกรณีกำลังก็คือ แรงดันที่ 40 บาร์ จะทำให้ลูกสูบถูกต้านการเคลื่อนที่ในจังหวะอัด จึงทำให้กำลังที่ได้จากเครื่องยนต์ลดลง ในขณะที่เชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าไปมีขนาดเท่าเดิม ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจึงลดลง

เมื่อพิจารณากราฟรูปที่ 29 ซึ่งแสดงค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับกำลังของเครื่องยนต์ จะพบว่า กราฟที่ได้จะแตกต่างจากกราฟที่ 27 และ 28 คือ ในกราฟรูปที่ 29 พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซลจะต่ำกว่าเครื่องยนต์ไฮโดรเจน เมื่อกำลังของเครื่องยนต์ต่ำกว่า 6 แรงม้า และจะสูงกว่าเมื่อกำลังของเครื่องยนต์สูงกว่า 6 แรงม้า ปรากฏการณ์นี้จะอธิบายได้ว่า เนื่องจากเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีกำลังสูงสุดต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซลโดยต่ำกว่าถึง 3.45 แรงม้า และจากการพิจารณากราฟรูปที่ 29 จะพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามกำลังที่เพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดของเครื่องยนต์ทั้งสองชนิดไม่ต่างกันมากคือ เพียง 1.14 เปอร์เซนต์ ในขณะที่กำลังม้าสูงสุดต่างกันถึง 3.45 แรงม้า ดังนั้น เครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะมีช่วงกำลังม้าต่ำ (0-6 แรงม้า)ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์จึงถึงจุดสูงสุดเร็ว ในขณะที่เครื่องยนต์ดีเซลมีช่วงกำลังม้าสูง (0-9.5 แรงม้า) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจึงถึงจุดสูงสุดช้ากว่าเครื่องยนต์ไฮโดรเจน ดังนั้นขณะที่กำลังม้าเท่ากันเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจึงมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่า ซึ่งถ้ากำลังสูงสุดของเครื่องยนต์ใกล้เคียงกัน เส้นกราฟประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ เครื่องยนต์ทั้งสองชนิดควรจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกันด้วย

เมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนกำลังอัดของเครื่องยนต์พบว่า เครื่องยนต์ดีเซลมีอัตราส่วนกำลังอัด 22 ต่อ 1 ในขณะที่เครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ได้รับการดัดแปลงมีอัตราส่วนกำลังอัด 11 ต่อ 1 ซึ่งโดยปกติแล้วเครื่องยนต์สันดาปภายในจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงถ้ามีอัตราส่วนกำลังอัดสูง ดังนั้นจึงอธิบายได้ว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซลเนื่องจากมีอัตราส่วนกำลังอัดต่ำกว่า ถ้าเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนให้สูง และเหมาะสมประสิทธิภาพเชิงความของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนก็จะสูงขึ้นด้วย

<u>ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์</u>

กราฟรูปที่ 30 ถึงรูปที่ 35 แสดงความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์ โดยกราฟรูปที่ 30-32 เป็นความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเมื่อเทียบกับน้ำหนักของเชื้อเพลิง ส่วนกราฟรูปที่ 33-35 เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ถ้าพิจารณาจากกราฟรูปที่ 30-32 จะพบว่า เครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะมีค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซล ทุกสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ โดยค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำสุดของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนคือ 0.089 ก.ก./แรงม้า-ชั่วโมง โดยมีค่าความเร็วรอบเท่ากับ 1900 รอบ/นาที กำลังของเครื่องยนต์ 5.98 แรงม้า-ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 25.17 เปอร์เซนต์ และแรงดันในการฉีดแกส H_2 คือ 35 บาร์ ในขณะที่ค่าความสิ้นเปลืองจำเพาะต่ำสุดของเครื่องยนต์ดีเซลคือ 0.2401 ก.ก./แรงม้า-ชั่วโมง ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที กำลังของเครื่องยนต์เท่ากับ 9.32 แรงม้า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 26.31 เปอร์เซนต์ ซึ่งสามารถอธิบายได้คือ ไฮโดรเจนมีค่าความร้อนในการเผาไหม้สูงกว่าน้ำมันดีเซล นอกจากนั้นแล้วการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน จะมีอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงสูง หรือมีการเผาไหม้ที่เชื้อเพลิงบาง (Lean burned) กว่าเครื่องยนต์ดีเซล จึงทำให้ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซล ถึงแม้ว่ากำลังและประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะต่ำกว่าก็ตาม แต่ถ้าเปรียบเทียบค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนกับเครื่องยนต์ดีเซล โดยใช้ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง โดยพิจารณาจากกราฟรูปที่ 33-35 จะพบว่า เส้นกราฟจะแตกต่างจากกราฟรูปที่ 30-32 กล่าวคือ ถ้าแรงดันในการฉีดแกสไฮโดรเจนลงในกระบอกสูบมีค่าต่ำ (20, 25 บาร์) เครื่องยนต์

ไฮโดรเจนจะใช้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซล ทุกสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ แต่ถ้าแรงดันในการฉีดแกสไฮโดรเจนสูงขึ้น (30, 35, 40 บาร์) เมื่อพิจารณาจากกราฟรูปที่ 34 ในช่วงที่เครื่องยนต์มีภาระน้อย ๆ (0-90 นิวตัน) เครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะใช้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซล แต่เมื่อภาระของเครื่องยนต์สูงขึ้น (90 นิวตันขึ้นไป) จะได้ค่าสูงกว่า ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเครื่องยนต์กับความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะในรูปของค่าความร้อน จากรูปที่ 35 ในช่วงที่เครื่องยนต์มีกำลังต่ำ ๆ (0-6 แรงม้า) เครื่องยนต์ดีเซลจะสิ้นเปลืองสูงกว่าเครื่องยนต์ไฮโดรเจน แต่เมื่อกำลังของเครื่องยนต์ดีเซลสูงขึ้น (มากกว่า 6 แรงม้า) ซึ่งเครื่องยนต์ไฮโดรเจนมีกำลังไม่ถึงเครื่องยนต์ดีเซลก็จะสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้คือ ช่วงกำลังของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะต่ำกว่า (0-6 แรงม้า) ช่วงกำลังของเครื่องยนต์ดีเซล (0-9.5 แรงม้า) ลักษณะเช่นเดียวกันกับกราฟรูป 29

การเปรียบเทียบค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลกับไฮโดรเจน โดยใช้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ กล่าวคือ ในช่วงที่เครื่องยนต์สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในรูปของค่าความร้อนสูง ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์จะต่ำ และถ้าสิ้นเปลืองต่ำประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะสูง เช่น ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในรูปของค่าความร้อนของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ของเครื่องยนต์ดีเซลจะต่ำที่สุดที่ 0.240 kg/ps-hr เทียบเป็นค่าความร้อน 10.56 MJ/ps-hr โดยมีค่าความเร็วรวบเท่ากับ 2000 รอบ/นาที กำลัง 9.32 แรงม้า และประสิทธิภาพเชิงความร้อน 26.31 เปอร์เซนต์ ในขณะที่เครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะมีค่าต่ำสุดที่ 0.089 kg/ps-hr คิดเป็นค่าความร้อน 10.68 MJ/ps-hr ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1900 รอบ/นาที กำลัง 5.98 แรงม้า และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 25.17 เปอร์เซนต์

ในกรณีพิจารณาเฉพาะเครื่องยนต์ไฮโดรเจนพบว่า ค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์จะลดลงเมื่อแรงดันในการฉีดแกสไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน นอกจากนั้นเมื่อแรงดันของแกสไฮโดรเจนเพิ่มถึง 40 บาร์ ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากกำลังของเครื่องยนต์ลดลง ซึ่งมีผลมาจากการต้านการเคลื่อนที่ของลูกสูบดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

<u>แกสไอเสียของเครื่องยนต์</u>

การทดสอบแกสไอเสียของเครื่องยนต์ สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลจะทำการวัดปริมาณแกสคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แกสไฮโดรเจนคาร์บอน (HC) และปริมาณควันดำ (SMOKE) ในแกสไอเสียของเครื่องยนต์ ผลการวัดแสดงในตารางที่ 4 และกราฟรูปที่ 36-38 ซึ่งจะได้ว่าปริมาณแกสทั้ง 3 ชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับภาระของเครื่องยนต์ โดยเมื่อภาระเพิ่มขึ้นปริมาณแกส CO และปริมาณควันดำจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อจะลดลงทำให้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ไม่เพียงพอ การเผาไหม้จึงไม่สมบูรณ์ ในแกสไอเสียจึงมีแกส CO และควันดำมาก แต่ถ้าเป็นแกส HC เมื่อภาระเพิ่มขึ้นปริมาณจะลดลง เนื่องจาก HC เป็นองค์ประกอบของน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งจะถูกเผาไหม้เพิ่มขึ้นเมื่อเครื่องยนต์มีภาระเพิ่มขึ้น ในส่วนของการทดสอบเครื่องยนต์ไฮโดรเจน ซึ่งจะทำการวัดปริมาณแกสคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 ออกซิเจน (O_2) CO, HC และปริมาณควันดำ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4-8 และกราฟรูปที่ 36-38 พบว่า ในการวัดวิเคราะห์ไอเสียของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนในการทดลองครั้งนี้ ปริมาณแกส CO_2, CO, HC และปริมาณควันดำจะมีค่าเท่ากับ 0 ตลอด ไม่ว่าการทำงานของเครื่องยนต์จะเปลี่ยนไปอย่างไร ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจากไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่มีส่วนประกอบของคาร์บอน (C) ดังนั้นเมื่อเผาไหม้กับอากาศ แกสไอเสียของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจึงไม่มีแกส CO_2, CO, HC และควันดำผสมอยู่

<u>อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น</u>

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นกับความเร็วรอบ ภาระ และกำลังของเครื่องยนต์ แสดงดังรูปที่ 39-41 ซึ่งจากกราฟจะพบว่า อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์ดีเซล และเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะมีความแตกต่างกันกล่าวคือ อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งจากกราฟรูปที่ 40 และ 41 พบว่า ที่ภาระหรือกำลังของเครื่องยนต์เท่ากัน อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซล โดยอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์ดีเซลภายหลังการอุ่นเครื่องก่อนการทดสอบประมาณ 5 นาที จะอยู่ที่ 52°C หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นจะเพิ่มสูงขึ้น จนเมื่อภาระของเครื่องยนต์ประมาณ 80 นิวตัน หรือกำลังประมาณ 6 แรงม้า อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นจะค่อนข้างคงที่ โดยจะเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 66-68°C ในกรณีของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่แรงดันในการฉีดต่ำสุดคือ 20 บาร์ ภายหลังการอุ่นเครื่องประมาณ 5 นาที พบว่า อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเท่ากับ 56°C และเมื่อเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์หรือเครื่องยนต์มีกำลังเพิ่มขึ้นอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นจะเพิ่มสูงขึ้น โดยจะพบว่า ในการทดลองเครื่องยนต์ไฮโดรเจนในครั้งนี้ อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจนเครื่องยนต์รับภาระสูงสุด แล้วอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นก็ยังไม่คงที่ และอุณหภูมิสูงสุดวัดได้ 88°C ผลที่ได้นี้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า เครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะมีการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำหล่อเย็นมากกว่าเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะมีค่าความร้อนสูงกว่าน้ำมันดีเซล แต่ความร้อนที่เพิ่มขึ้นมานั้นไม่สามารถเปลี่ยนเป็นกำลังให้กับเครื่องยนต์ได้ จึงถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็นเพิ่มขึ้น อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นจึงสูง ส่วนกรณีที่อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนไม่คงที่นั้น เนื่องมาจากเครื่องยนต์ดีเซลที่นำมาดัดแปลงทดลองในครั้งนี้ ระบบระบายความร้อนเป็นระบบอ่างน้ำระบายความร้อนด้วยพัดลม โดยที่น้ำไม่มีการไหลเวียน ดังนั้นปริมาณน้ำที่อยู่ในอ่างน้ำจึงเหมาะสมกับการระบายความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซล อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์ดีเซลจึงคงที่ ในขณะที่เมื่อเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจน ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำมีค่าสูงกว่า น้ำจึงไม่สามารถระบายความร้อนได้ทัน อุณหภูมิของน้ำจึงเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ไม่คงที่

ถ้าพิจารณาเฉพาะเครื่องยนต์ไฮโดรเจนพบว่า เมื่อแรงดันในการฉีดแกสเพิ่มขึ้น อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นจะสูงขึ้น เนื่องมาจากเมื่อแรงดันในการฉีดสูง มวลของแกสจะเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นแล้วยังกระจายได้ดีทำให้ค่าความร้อนในการเผาไหม้เพิ่มขึ้น จึงถ่ายเทให้กับน้ำเพิ่มขึ้น อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นจึงสูงขึ้น

<u>อุณหภูมิแกสไอเสีย</u>

อุณหภูมิแกสไอเสียของเครื่องยนต์ เมื่อความเร็วเปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 42 และเมื่อภาระกับกำลังเปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 43 และ 44 ซึ่งแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแกสไอเสีย จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น เนื่องจากมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกัน ดังนั้นกราฟที่ได้จึงมีลักษณะเช่นเดียวกันคือ อุณหภูมิแกสไอเสียของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซล โดยสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันกับกรณีของน้ำหล่อเย็น แต่อุณหภูมิของแกสไอเสียของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่สูงเนื่องจากค่าความร้อนในการเผาไหม้ของแกสไฮโดรเจนสูงแล้ว ยังอาจเกิดจากการจุดระเบิดในท่อไอเสีย เนื่องจากหัวฉีดแกสไฮโดรเจนอาจเกิดการรั่วซึมและเข้ามาในท่อไอเสีย และเกิดการจุดระเบิดขึ้นได้ในบางจังหวะ อุณหภูมิของแกสไอเสียจึงสูงขึ้น และถ้าเปรียบเทียบเฉพาะเครื่องยนต์ไฮโดรเจน อุณหภูมิของแกสไอเสียจะเปลี่ยนแปลงลักษณะเดียวกันกับอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น โดยมีเหตุผลเช่นเดียวกัน

<u>อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง</u>

ค่าอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ซึ่งจะทำให้เกิดการเผาไหม้ดี (Stoichiomatric) ของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนคือ 34.4 ส่วนของน้ำมันดีเซลคือ 14.5 ดังนั้น ถ้าจะเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ทั้งสองชนิด จึงต้องใช้ค่าซึ่งสามารถเปรียบเทียบกันได้ ค่าดังกล่าวได้แก่อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ (Relative air-fuel ratio λ) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\text{Relative air-fuel ratio } (\lambda) = \frac{[\text{air-fuel ratio}]_{\text{actual}}}{[\text{air-fuel ratio}]_{\text{stoichiometric}}}$$

เมื่อ $[\text{air-fuel ratio}]_{\text{actual}} = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}}$

$[\text{air-fuel ratio}]_{\text{stoichiometric}}$ สำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรเจน = 34.4

$[\text{air-fuel ratio}]_{\text{stoichiometric}}$ สำหรับน้ำมันดีเซล = 14.5

เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ทั้งสองชนิดโดยใช้ค่า λ พบว่า เครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะมีค่า λ สูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซล ดังแสดงในกราฟรูปที่ 45 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อภาระของเครื่องยนต์เท่ากันเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะมีค่า λ สูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซล หมายความว่า เครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะเกิดการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงบาง (Lean burn) กว่าเครื่องยนต์ดีเซล และจากการพิจารณากำลังสูงสุดของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนในการทดลองครั้งนี้คือ 5.98 แรงม้า จะมีค่า λ = 2.01 ดังนั้นถ้าสามารถเพิ่มปริมาณแกสไฮโดรเจนในส่วนผสมก็จะทำให้กำลังของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น

<u>ปัญหาของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนในการทดลองครั้งนี้</u>

การทดลองนำเชื้อเพลิงไฮโดรเจนมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลในครั้งนี้ เมื่อดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซลเดิม จนสามารถใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงได้แล้ว นำเครื่องยนต์มาทดสอบเพื่อศึกษาสภาพการทำงานของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3-8 และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลด้วยกราฟรูปที่ 25-45 ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า เครื่องยนต์ไฮโดรเจนมีกำลัง ประสิทธิภาพเชิงความร้อนภาระที่เครื่องยนต์สามารถรับได้ ต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซล แต่ในการทดลองครั้งนี้ การดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซลเดิมเพื่อเปลี่ยนมาใช้แกสไฮโดรเจนทำได้ไม่สมบูรณ์ ปัญหาที่เกิดขึ้นกับเครื่องยนต์ไฮโดรเจนซึ่งมีผลทำให้เครื่องยนต์ไฮโดรเจนมีกำลังต่ำ สามารถวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้คือ

1. ไม่สามารถเพิ่มแรงดันในการฉีดแกสไฮโดรเจน

จากผลการทดสอบเครื่องยนต์ไฮโดรเจน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ถ้าแรงดันในการฉีดแกส H_2 ลงในกระบอกสูบเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังม้า, ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น เครื่องยนต์สามารถรับภาระได้เพิ่มขึ้น และอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง จำเพาะต่ำลง แต่เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ไม่สามารถฉีดแกส H_2 ด้วยแรงดันเกินกว่า 40 บาร์ เนื่องจาก

1.1 แรงดันที่ฉีดเข้าไปในกระบอกสูบจะต้านการเคลื่อนที่ของลูกสูบขณะที่เคลื่อนที่จากศูนย์ตายล่างมายังศูนย์ตายบนในจังหวะอัด เนื่องจากจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงไม่ได้ฉีดที่ตำแหน่งศูนย์ตายบน แต่ฉีดที่จังหวะเพลาข้อเหวี่ยงหมุนในตำแหน่ง 50 องศาก่อนศูนย์ตายบน เหตุผลที่จำเป็นต้องฉีดที่ตำแหน่งนี้เนื่องจาก เครื่องยนต์ดีเซลที่นำมาดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์สูบเดียวฝาสูบมีข้อจำกัด จึงมีความจำเป็นที่จะต้องติดตั้งหัวฉีดแกส H_2 ให้อยู่ห่างหัวเทียนที่ใช้ช่วยจุดระเบิด นอกจากนั้นแล้วหัวเทียนยังติดตั้งอยู่ในห้องเผาไหม้ช่วย (Swirl chamber) ดังรูปที่ 4 ดังนั้นเมื่อแกส H_2 ถูกฉีดออกจากหัวฉีดจะต้องมีเวลาเพียงพอที่แกส H_2 จะเข้าไปในห้องเผาไหม้เพื่อจุดระเบิด ดังนั้นจึงต้องฉีดแกส H_2 ก่อนที่ ลูกสูบจะเคลื่อนที่ถึงศูนย์ตายบน ซึ่งมีผลทำให้ไม่สามารถฉีดที่แรงดันสูงกว่า 40 บาร์ เพราะแรงดันของแกส H_2 จะต้องการเคลื่อนที่ของลูกสูบ ขณะเคลื่อนที่จากศูนย์ตายล่าง (BDC) ขึ้นมายังศูนย์ตายบน (TDC) ในจังหวะอัด

1.2 ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิสันดาปสูงถึง 580 °C ดังนั้นเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจึงต้องมีอุปกรณ์ช่วยจุดระเบิด ในการทดลองครั้งนี้ใช้หัวเทียนโดยเป็นหัวเทียนมาตรฐาน ซึ่งใช้ในเครื่องยนต์แกสโซลีนทั่วไป ซึ่งโดยปกติจะทนแรงดันได้ไม่เกิน 50 บาร์ ดังนั้นถ้าแรงดันในการฉีดสูงเกินไป หัวเทียนจะไม่สามารถจุดระเบิดได้ ถ้าต้องการฉีดแกส H_2 ที่แรงดันสูง ๆ จึงต้องใช้หัวเทียนชนิดพิเศษ ซึ่งทนแรงดันได้สูง

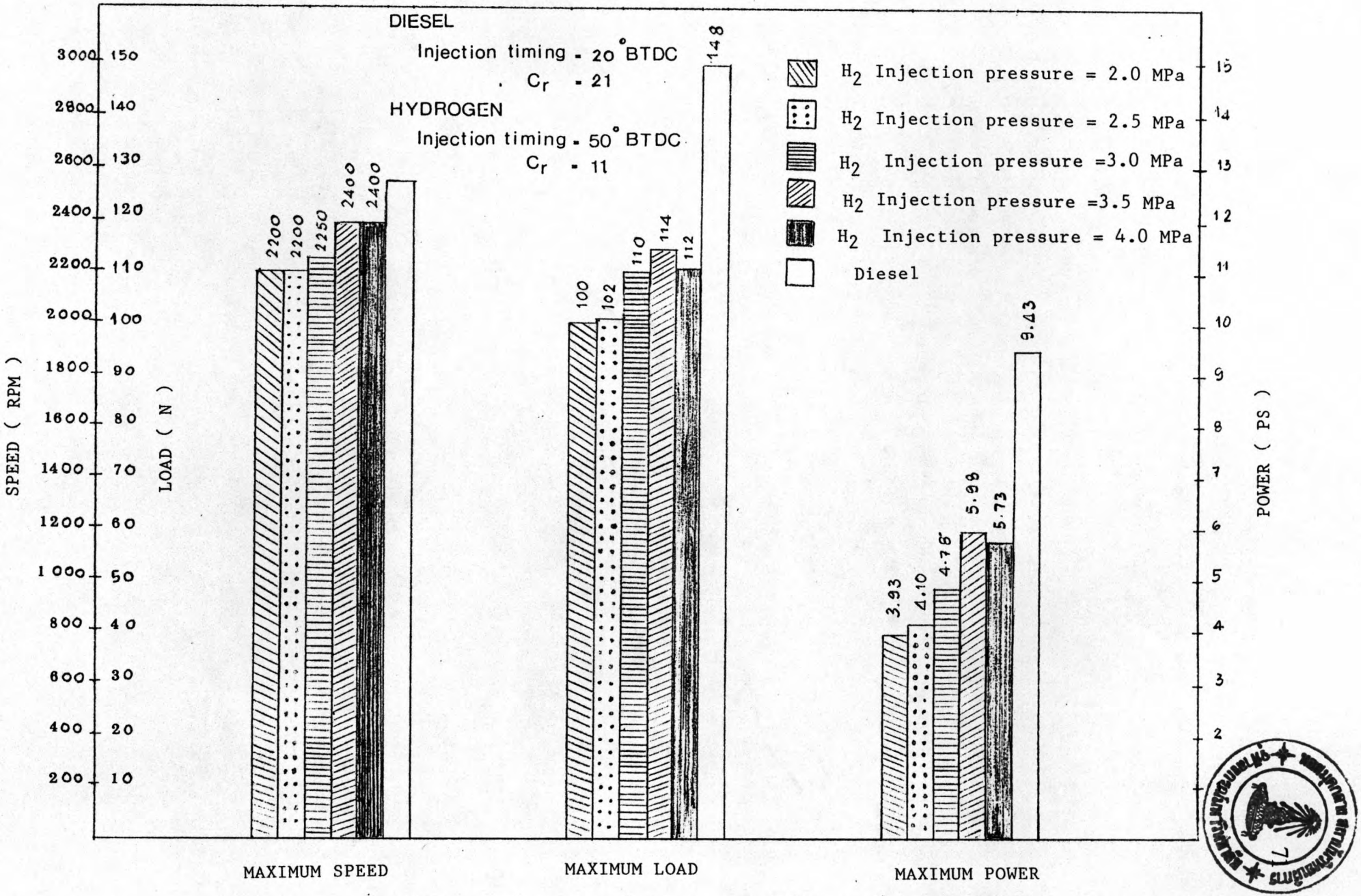
1.3 หัวฉีดแกส H_2 ซึ่งใช้ในการทดลองครั้งนี้มีข้อจำกัดในการทำงาน เนื่องจากลักษณะการทำงานของหัวฉีด จะใช้สปริงในการควบคุมจังหวะการปิดเปิดของลิ้นไฮโดรเจน สปริงที่นำมาใช้กับหัวฉีดจะต้องมีขนาดที่สามารถจะใส่ลงในหัวฉีดซึ่งมีขนาดเล็กได้ ดังนั้นการออกแบบสปริงจึงมีข้อจำกัด เช่น สปริงที่ใช้ในการทดลองนี้ จะสามารถทนแรงกดของแกสได้ไม่เกิน 40 บาร์ ถ้าแรงดันเกินกว่านี้ สปริงจะไม่สามารถทนได้ และจะยุบตัวลง ทำให้ลิ้นไฮโดรเจนเปิดตลอดเวลา แกส H_2 จะไหลเข้ากระบอกสูบตลอดเวลาเครื่องยนต์จึงไม่สามารถทำงานได้

นอกจากปัญหาเรื่องสปริงที่ใช้ในหัวฉีดแล้ว การเพิ่มแรงดันในการฉีดแกส H_2 จะทำให้เกิดปัญหาการรั่วซึมของแกส H_2 ที่หัวฉีด เช่น ตามข้อต่อต่าง ๆ เนื่องจากแกส H_2 มีคุณสมบัติในการแทรกซึมได้ดี และถ้าแรงดันของแกสสูงมากการรั่วซึมก็จะเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นถ้าจะฉีดที่แรงดันสูง ๆ ก็จะต้องป้องกันการรั่วซึมให้ดีเพิ่มขึ้นด้วย

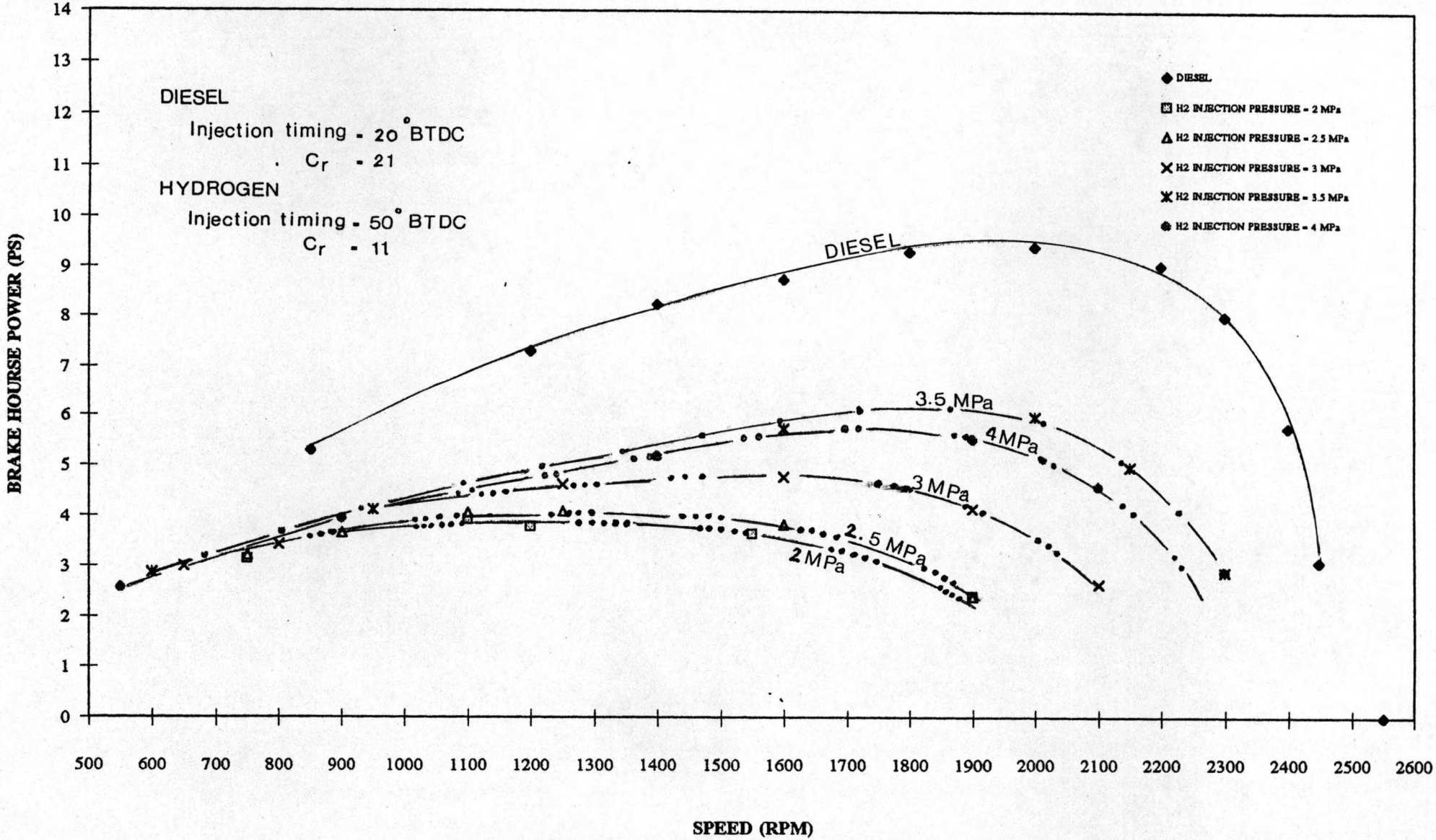
2 <u>ไม่สามารถเพิ่มปริมาณแกสไฮโดรเจน</u>

โดยปกติเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อภาระของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ลดลง กำลังของเครื่องยนต์จึงลดลง ถ้าต้องการให้ความเร็วรอบคงที่จะต้องเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์ เพื่อทำให้เครื่องยนต์มีกำลังเพิ่มขึ้น แต่เครื่องยนต์ไฮโดรเจนซึ่งทดลองในครั้งนี้ เมื่อแรงดันในการฉีดแกสคงที่จะไม่สามารถเพิ่มปริมาณแกส H_2 ได้ เนื่องจากหัวฉีดแกส H_2 ซึ่งออกแบบเพื่อใช้กับเครื่องยนต์ไฮโดรเจนในครั้งนี้ จังหวะของการเปิดปิดลิ้น H_2 จะถูกควบคุมด้วยจังหวะการฉีดน้ำมันของปั๊มดีเซล ซึ่งจะฉีดน้ำมันมายังหัวฉีดดีเซล และทำให้เข็มของหัวฉีดดีเซลเคลื่อนที่ลงมากดสปริงทำให้ลิ้นไฮโดรเจนเปิดออก แต่เนื่องจากหัวฉีดดีเซลที่เคลื่อนที่ลงมากดลิ้น H_2 จะเคลื่อนที่ด้วยระยะคงที่ ดังนั้นลิ้นของหัวฉีดแกส H_2 ก็จะเปิดด้วยระยะที่คงที่ตลอด ถ้าแรงดันในการฉีดคงที่ ปริมาณแกสที่ถูกฉีดออกมาจะคงที่หรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก กำลังและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ จึงไม่สามารถควบคุมด้วยปริมาณเชื้อเพลิงเช่นเดียวกับเครื่องยนต์ดีเซล เมื่อแรงดันในการฉีดแกสคงที่จึงไม่สามารถเพิ่มกำลังของเครื่องยนต์ทำให้

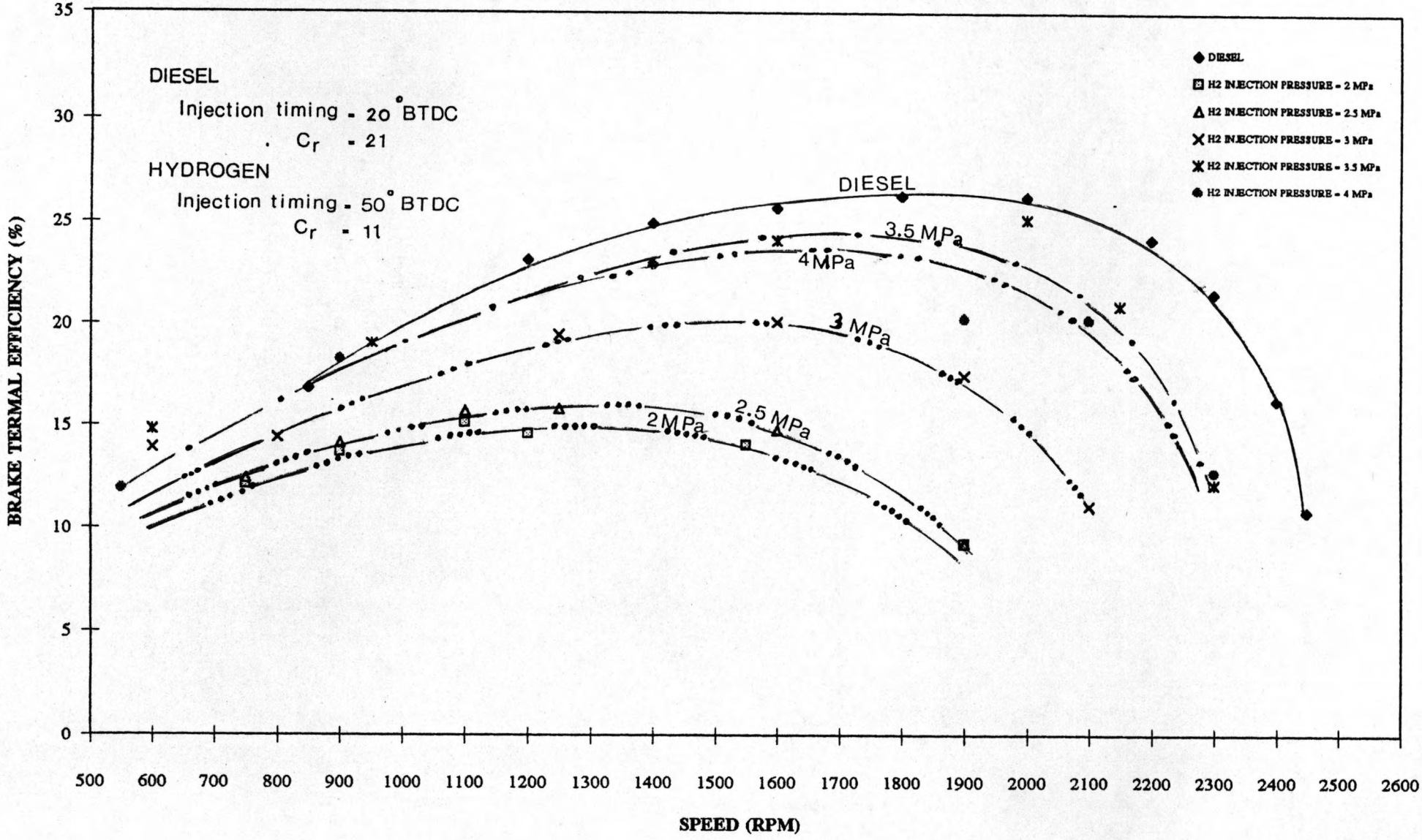
เครื่องยนต์รับภาระได้น้อย หัวฉีดแกส H_2 จึงควรจะต้องออกแบบให้สามารถควบคุมการเปิดปิดลิ้น H_2 ตามกำลัง ความเร็วรอบ และภาระที่เครื่องยนต์ต้องการ และหัวฉีดแกส H_2 ดังกล่าวนี้จะทำให้การควบคุมเครื่องยนต์ทำได้ง่าย กล่าวคือจะฉีดแกส H_2 ลงในกระบอกสูบด้วยแรงดันคงที่ โดยเป็นแรงดันที่ทำให้เครื่องยนต์มีกำลังสูงสุด หลังจากนั้นจึงควบคุมกำลัง ความเร็วรอบ และภาระของเครื่องยนต์โดยควบคุมปริมาณการเปิดปิดของลิ้น H_2 เพื่อควบคุมปริมาณแกส H_2 ตามปริมาณที่เครื่องยนต์ต้องการ



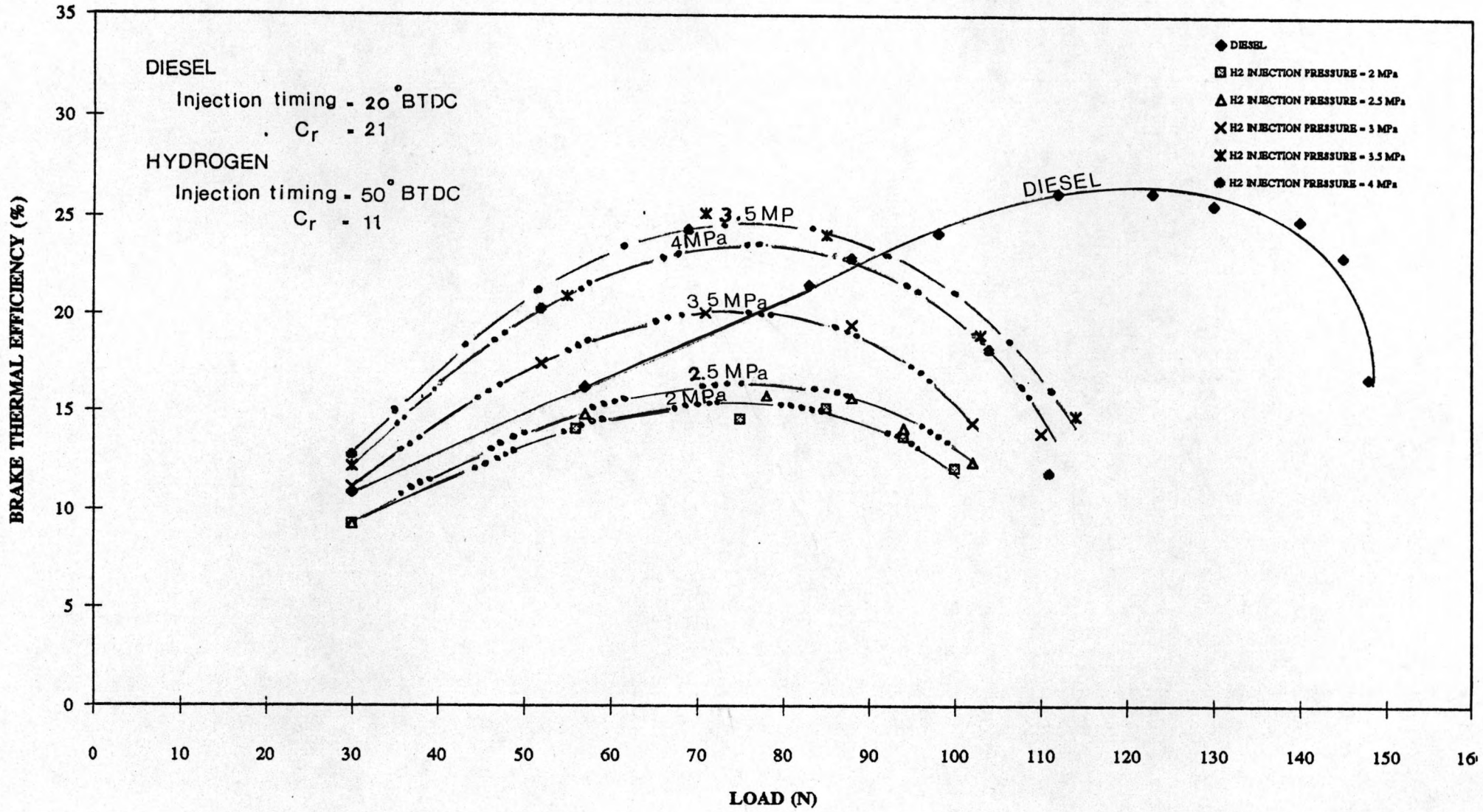
24 กราฟแสดงความเร็วรอบ, ภาระ และกำลังของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน
เมื่อแรงดันในการฉีดเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล



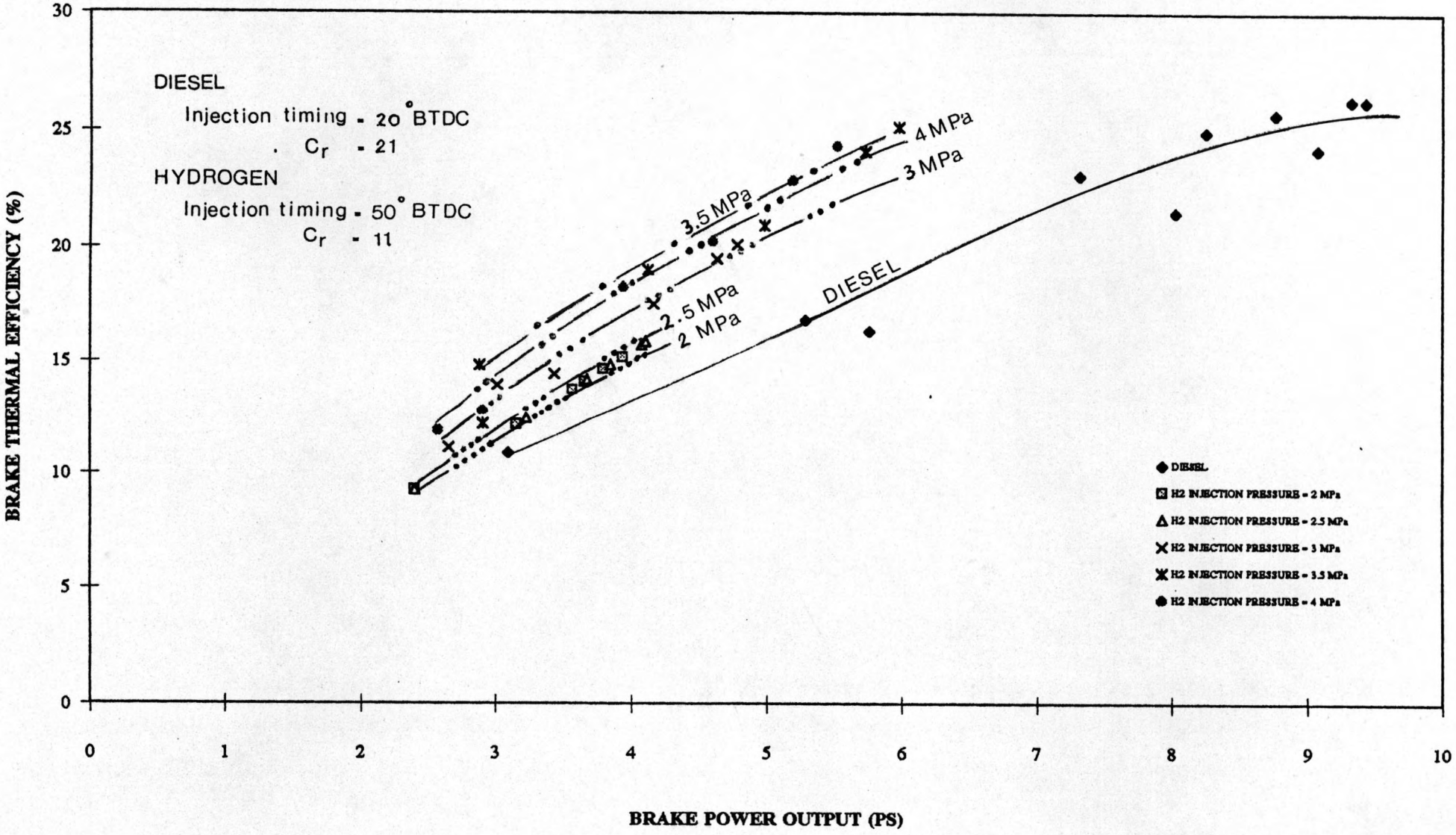
รูปที่ 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกำลังของเครื่องยนต์ของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อแรงดันในการฉีดเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล



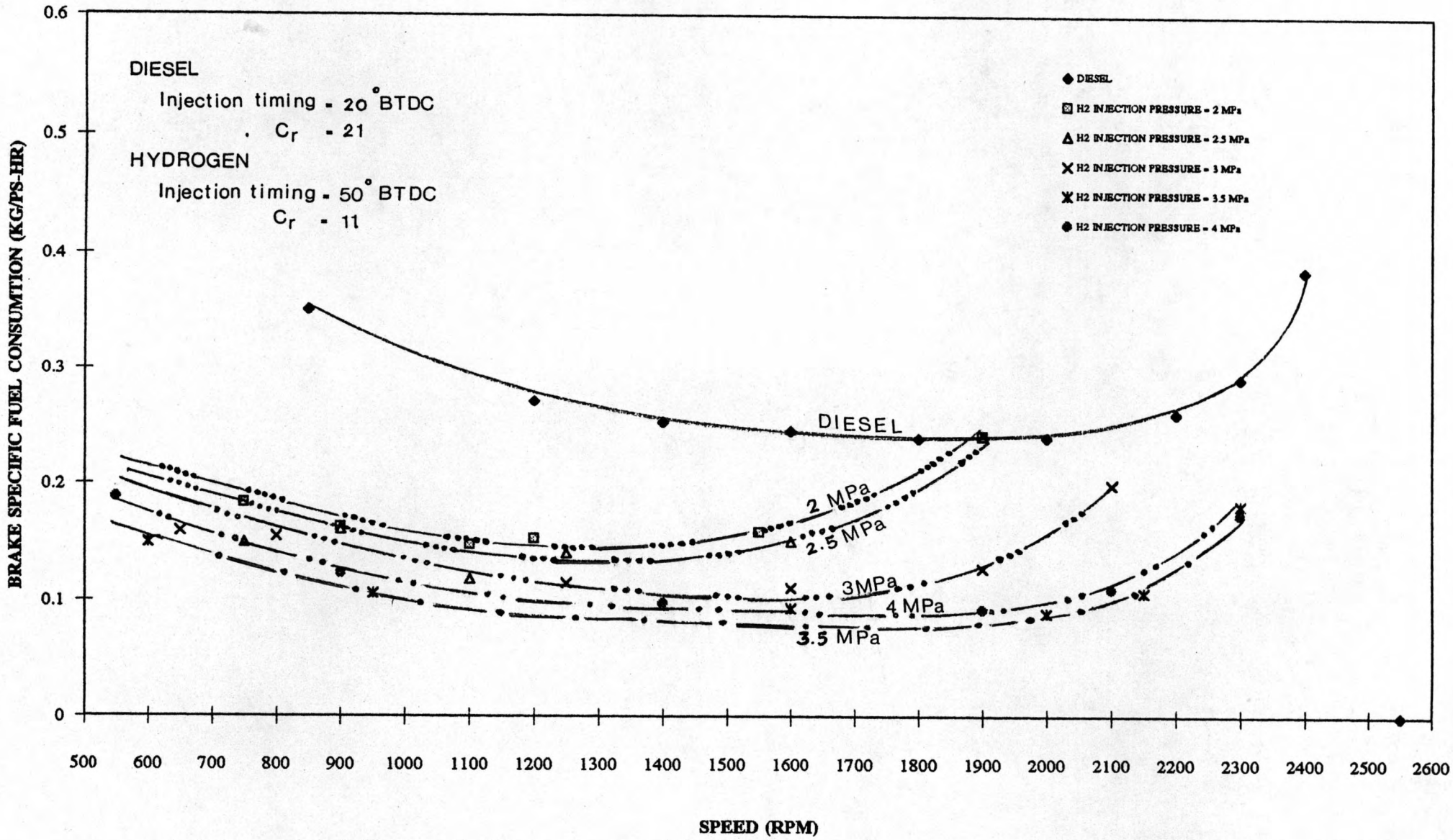
รูปที่ 26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับประสิทธิภาพเชิงความร้อน ไฮโดรเจนเมื่อแรงดันในการฉีดเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล



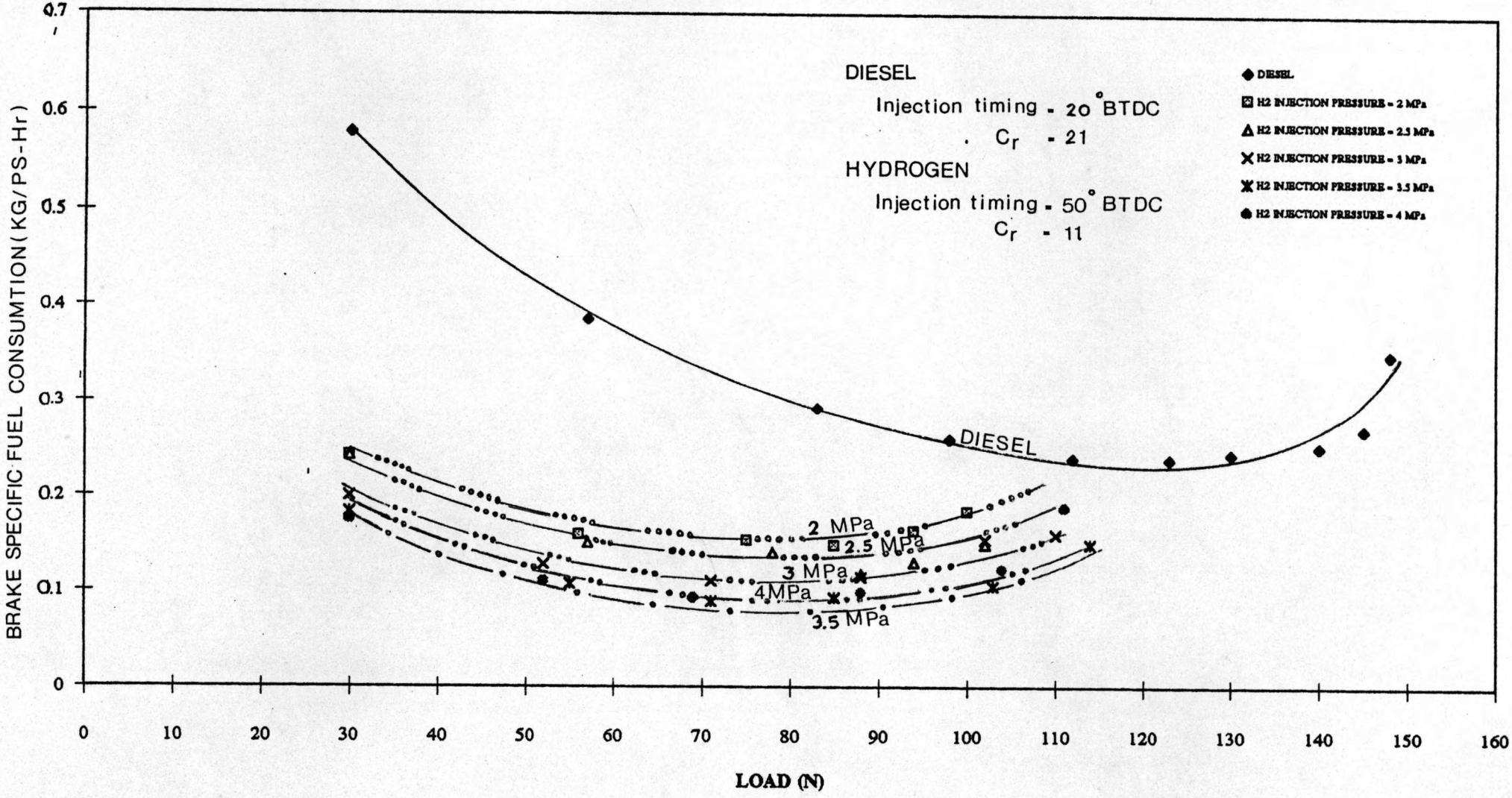
รูปที่ 27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อแรงดันในการฉีดเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล



รูปที่ 28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อแรงดันในการฉีดเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล

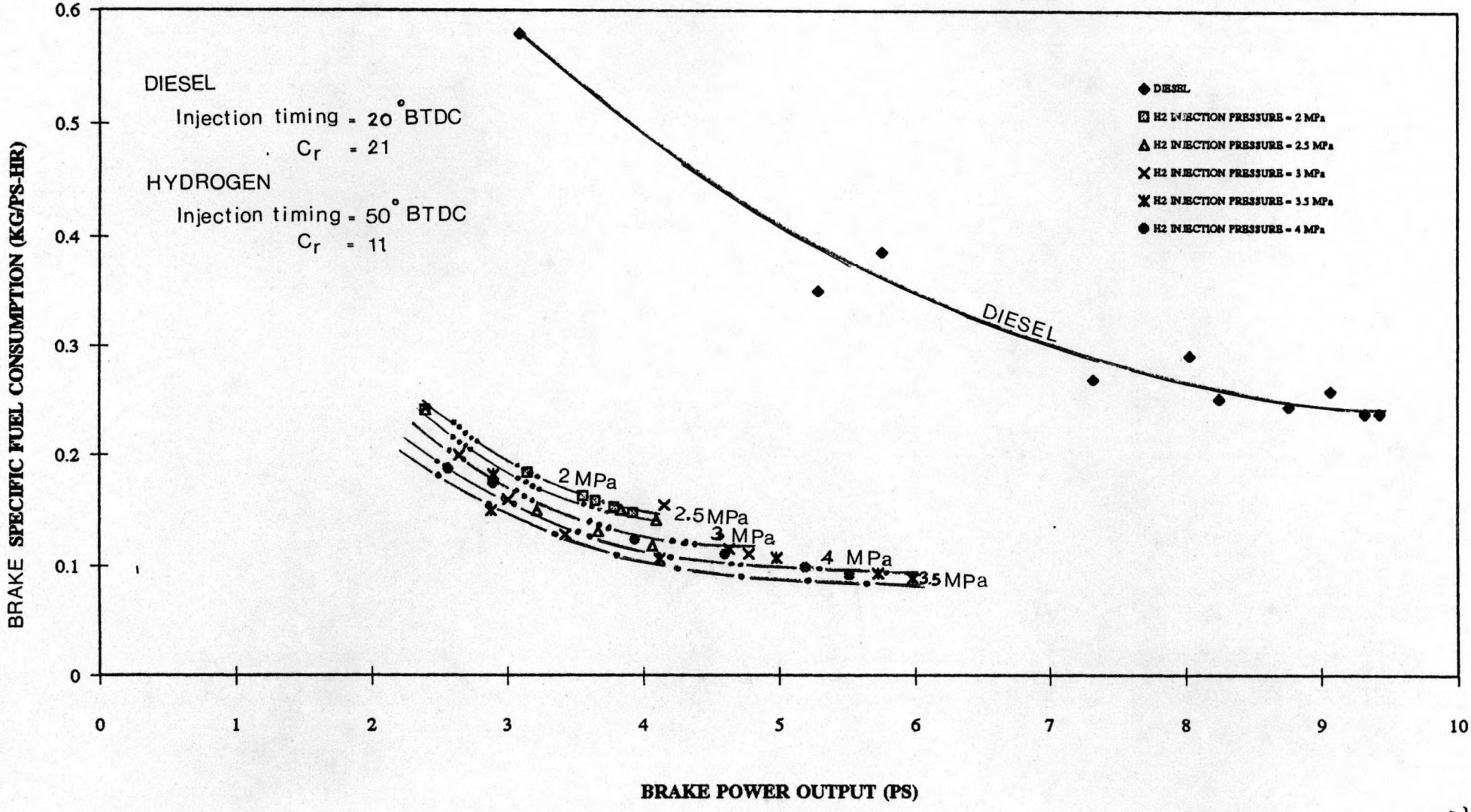


รูปที่ 29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/Ps-hr) ของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อแรงดันในการฉีดเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล

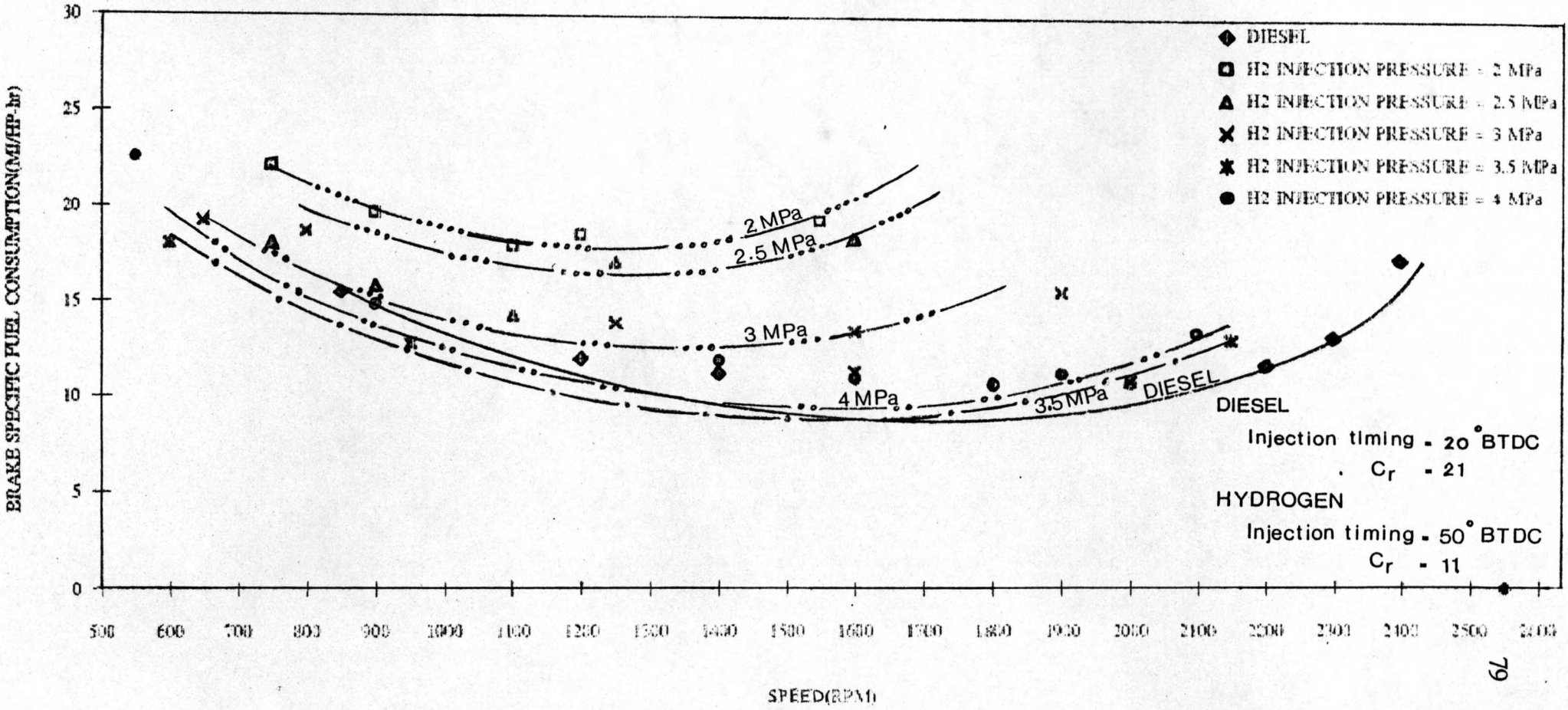


77

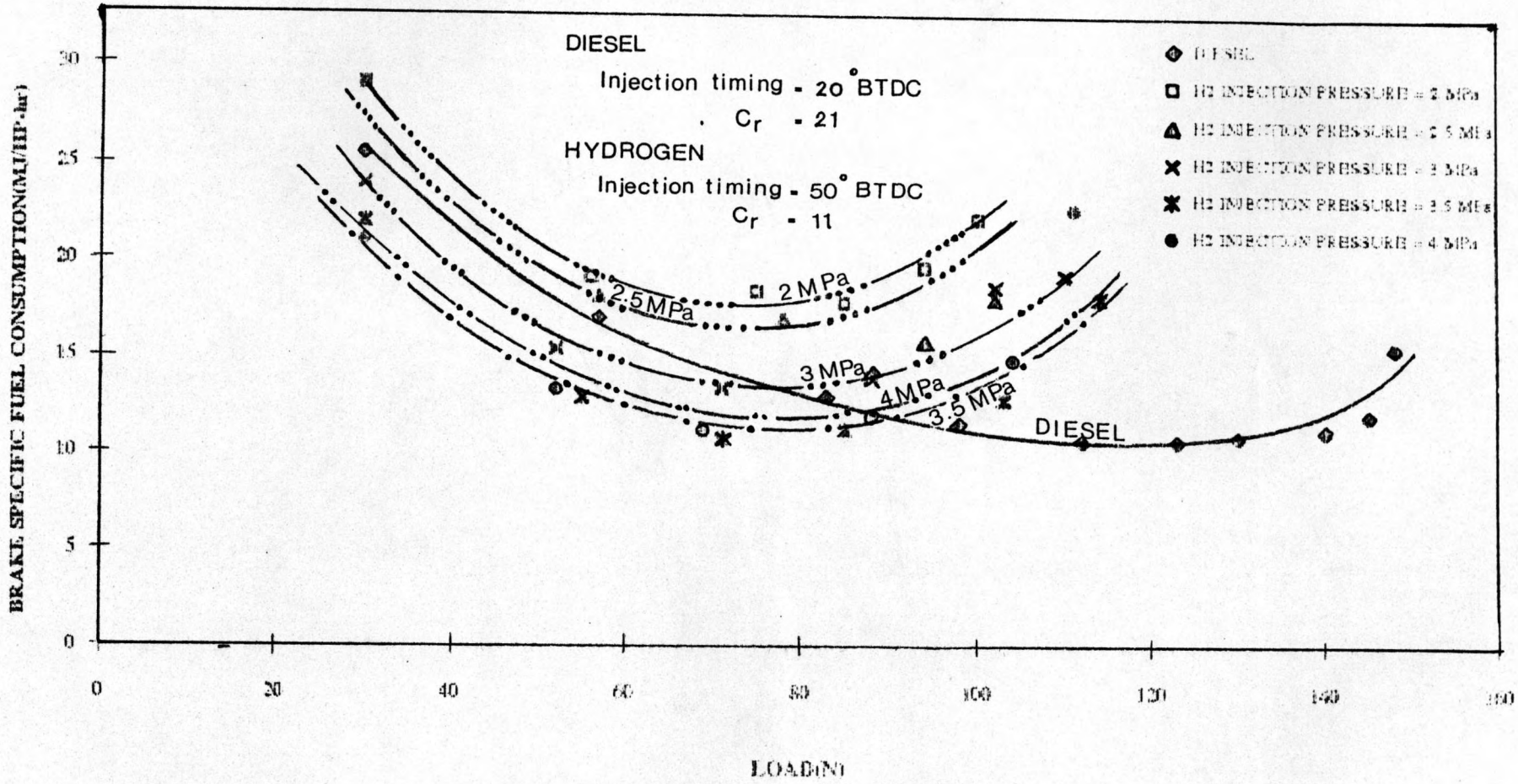
รูปที่ 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/Ps-hr)
ของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อแรงดันในการฉีด เปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล



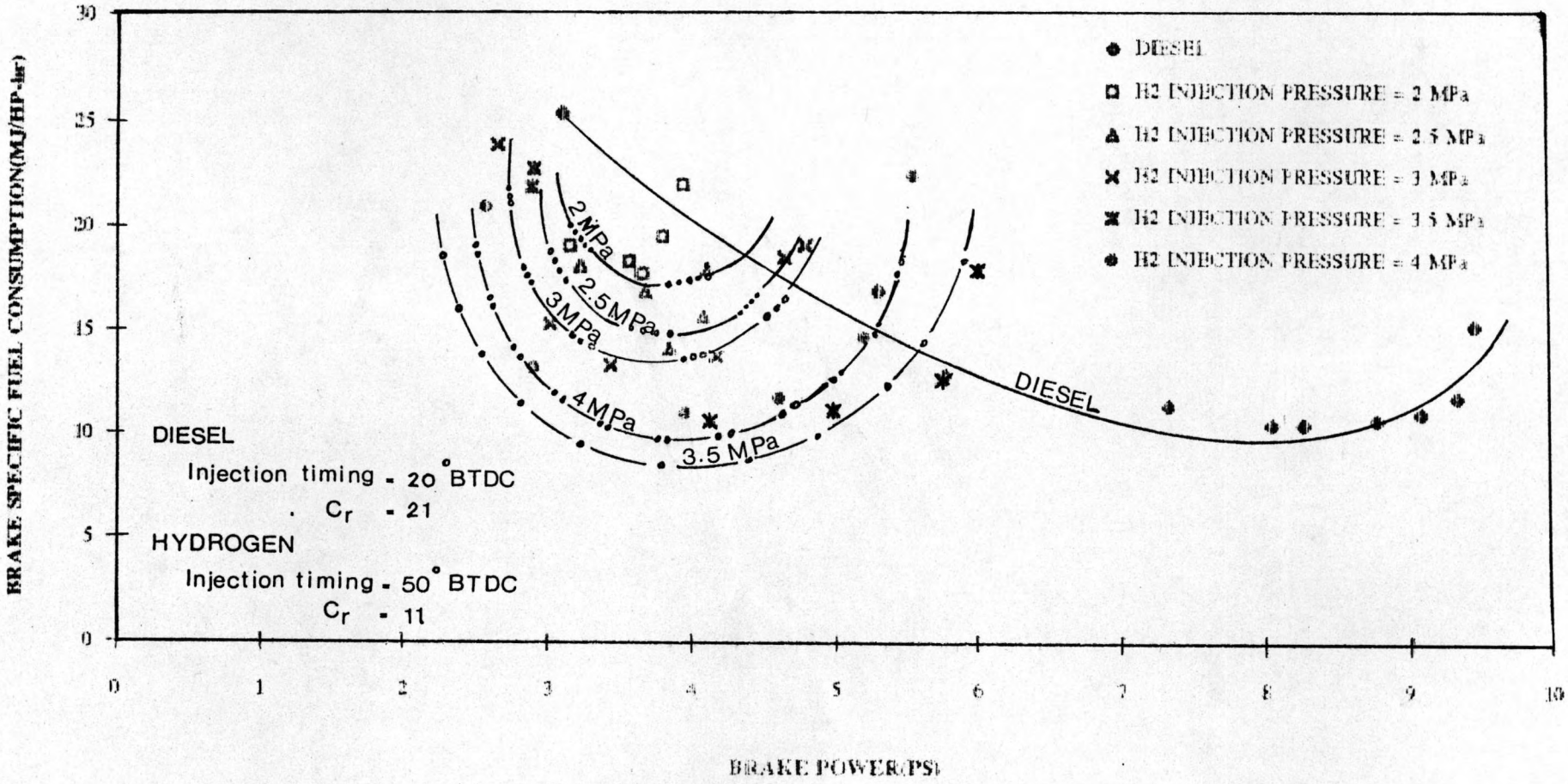
รูปที่ 31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/Ps-hr)
ของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อแรงดันในการฉีด เปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล



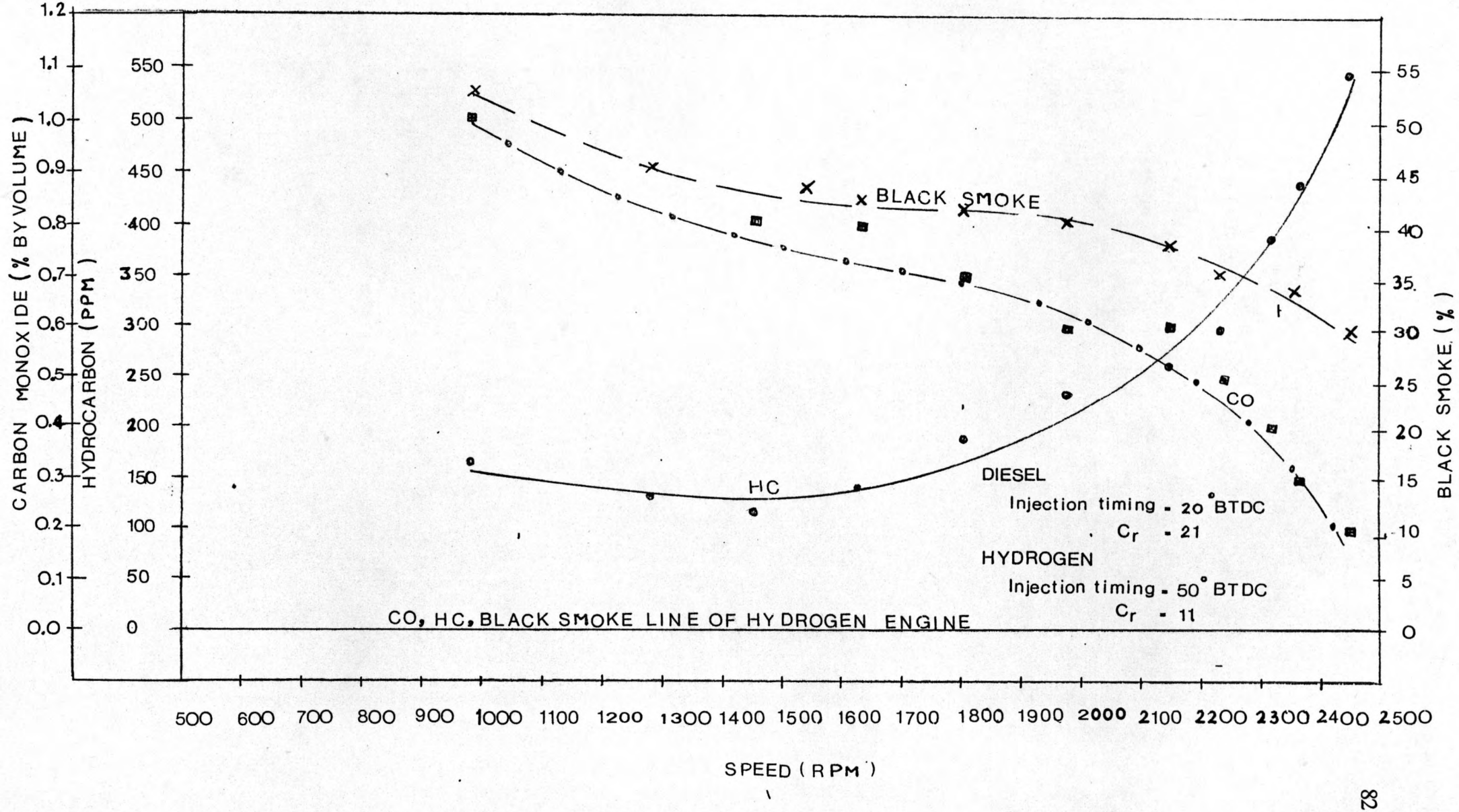
รูปที่ 32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/Ps-hr) ของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน เมื่อแรงดันในการฉีด เปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล



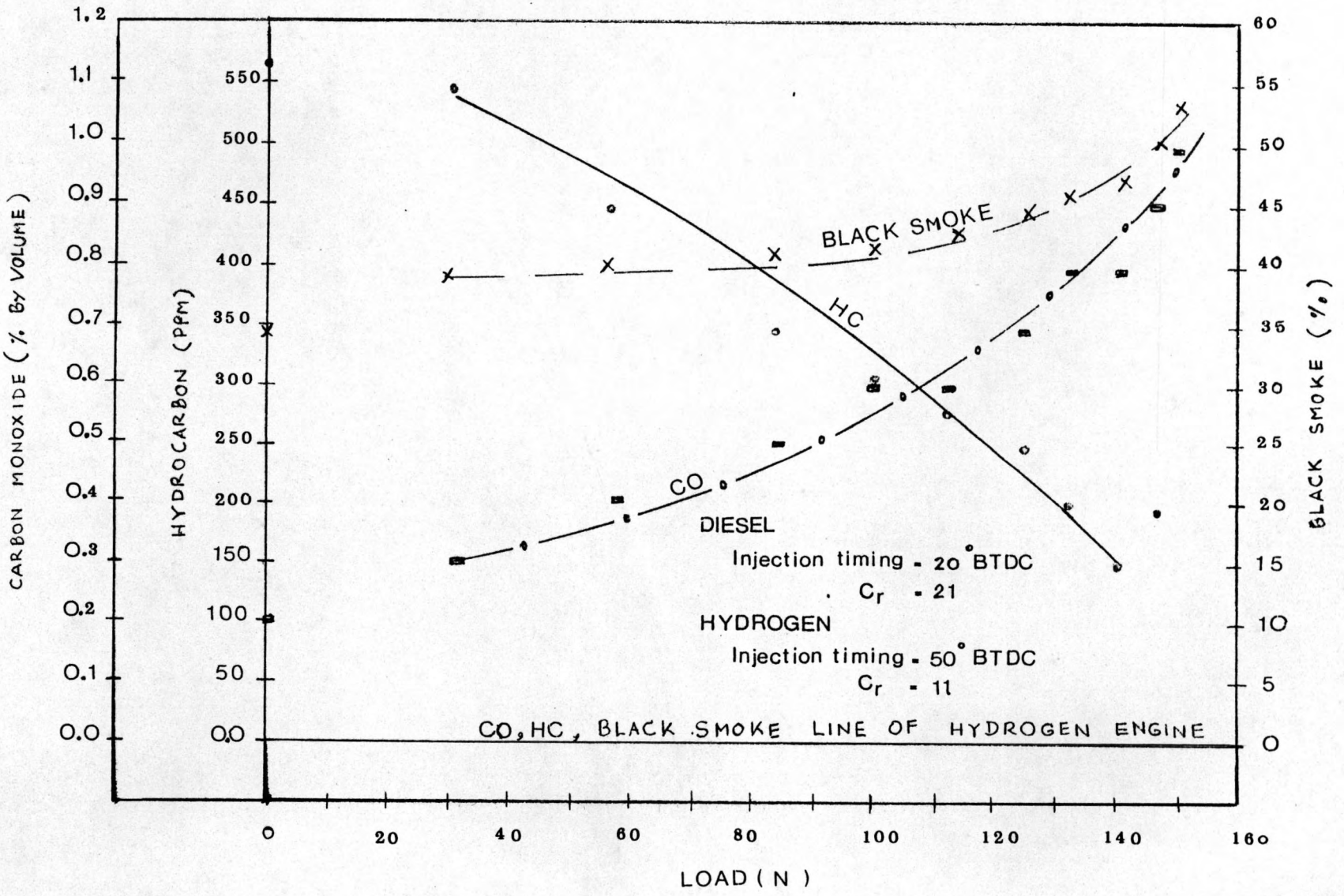
รูปที่ 33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ(MJ/Ps-hr) ของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อแรงดันในการฉีดเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล



รูปที่ 34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (MJ/Ps-hr) ของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อแรงดันในการฉีดเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล

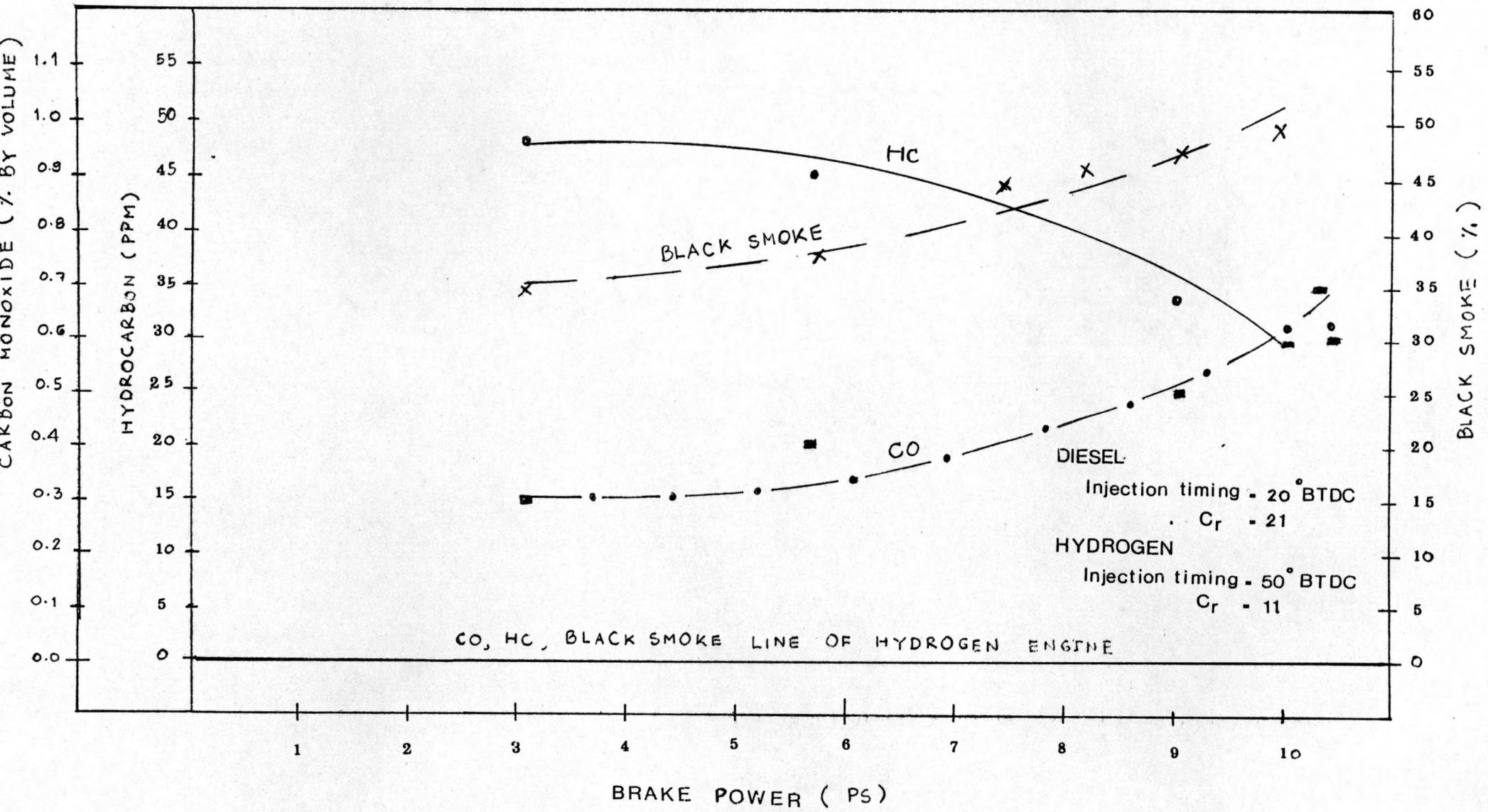


รูปที่ 35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับปริมาณ CO, HC, และ Black Smoke ในแกสไอเสียของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนและเครื่องยนต์ ดีเซล

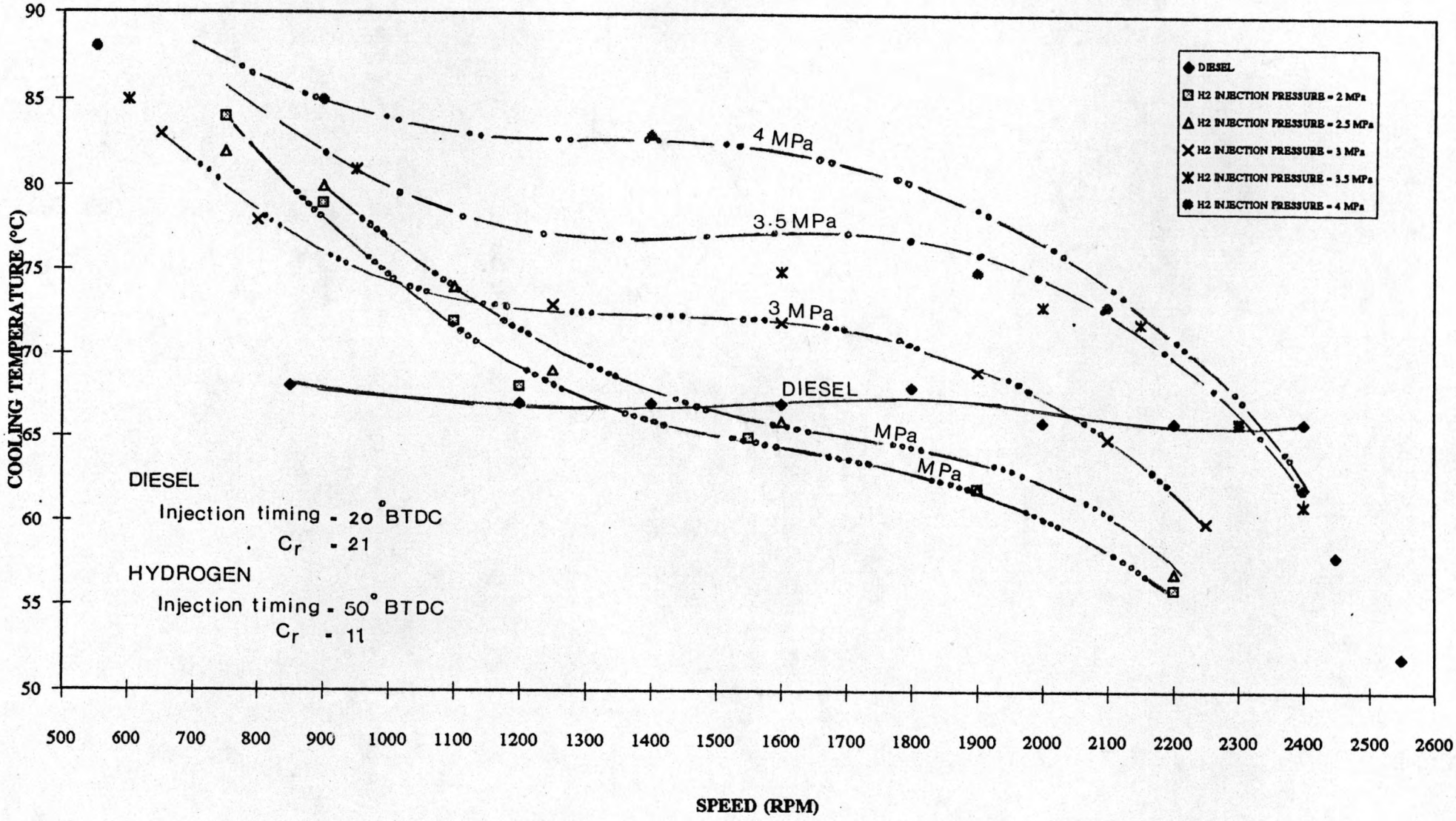


รูปที่ 36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับปริมาณ CO, HC, และ Smoke

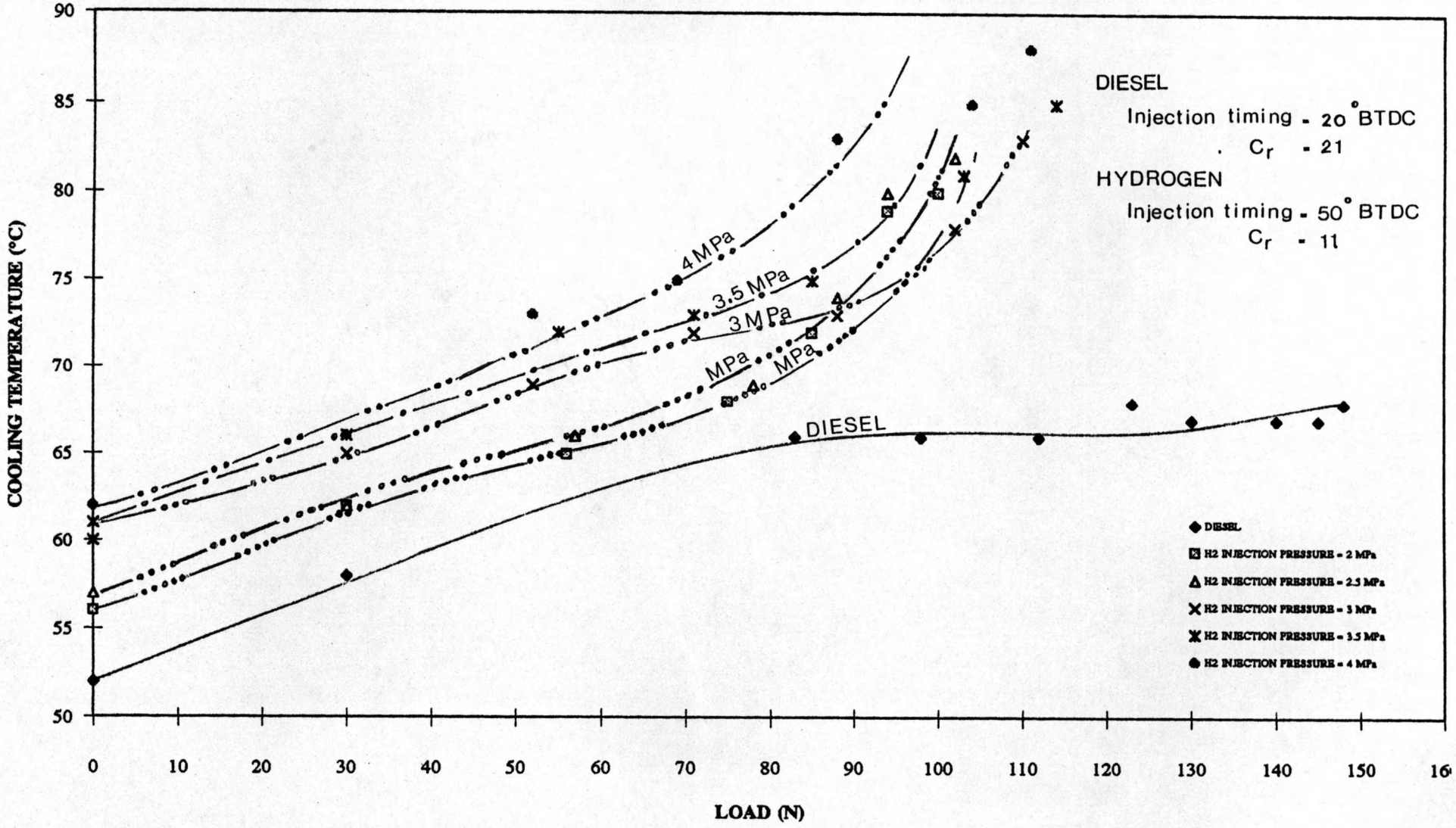
ในแกสไอเสียของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนและเครื่องยนต์ ดีเซล



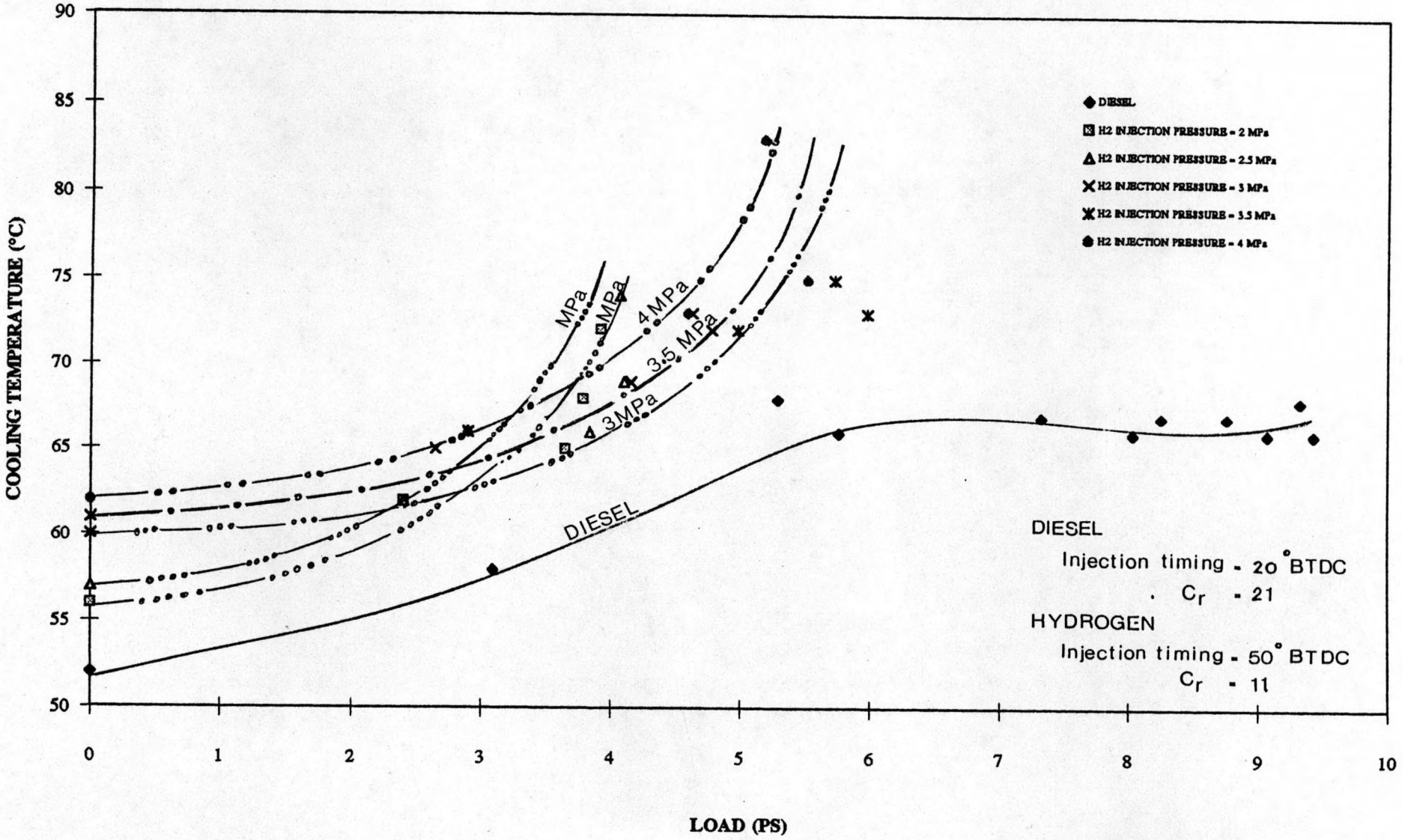
รูปที่ 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับปริมาณ CO, HC, และ Smoke
ในแกสไอเสียของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนและเครื่องยนต์ดีเซล



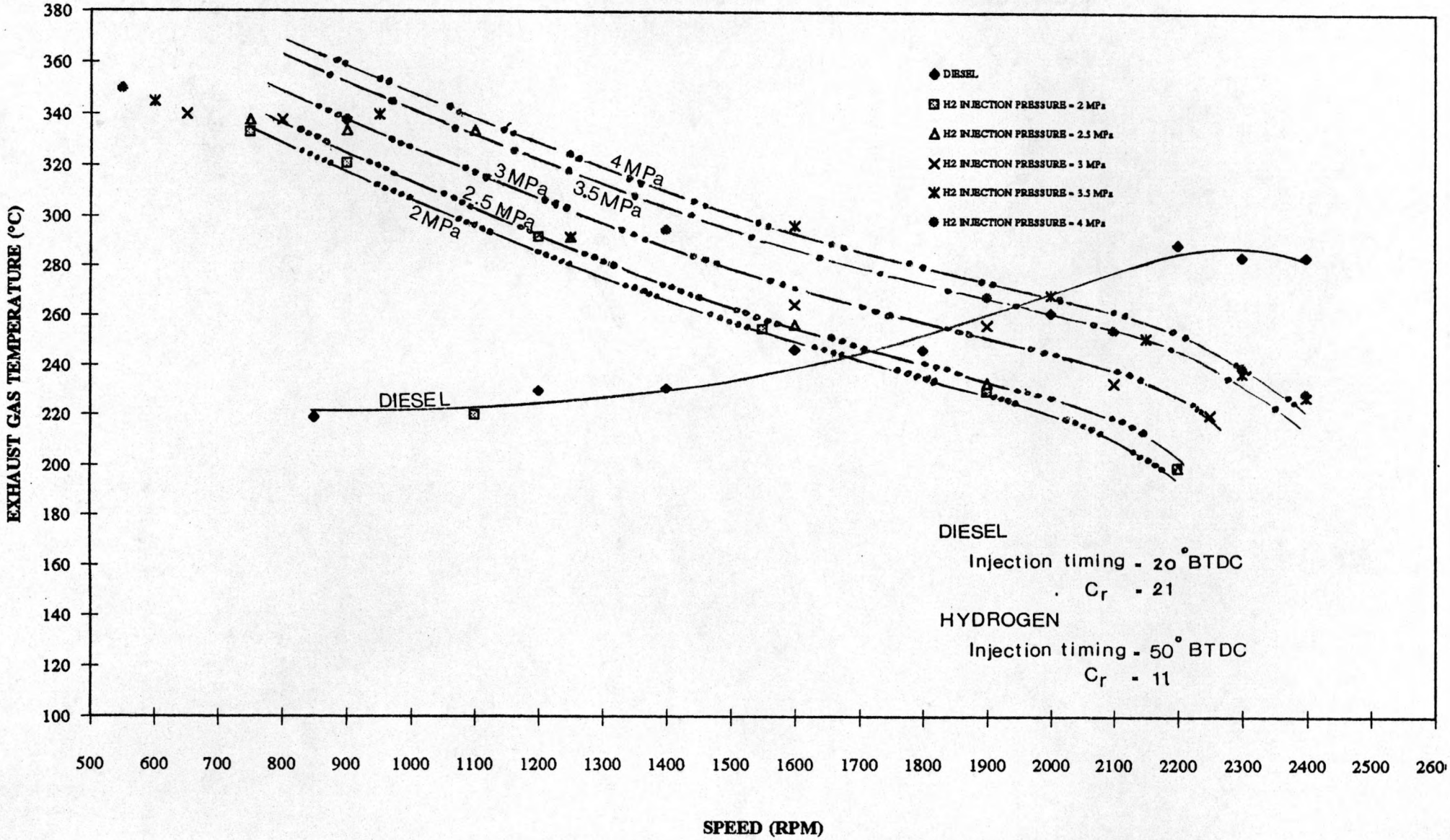
รูปที่ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของ เครื่องยนต์ไฮโดรเจน เมื่อแรงดันในการฉีดเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบ กับเครื่องยนต์ดีเซล



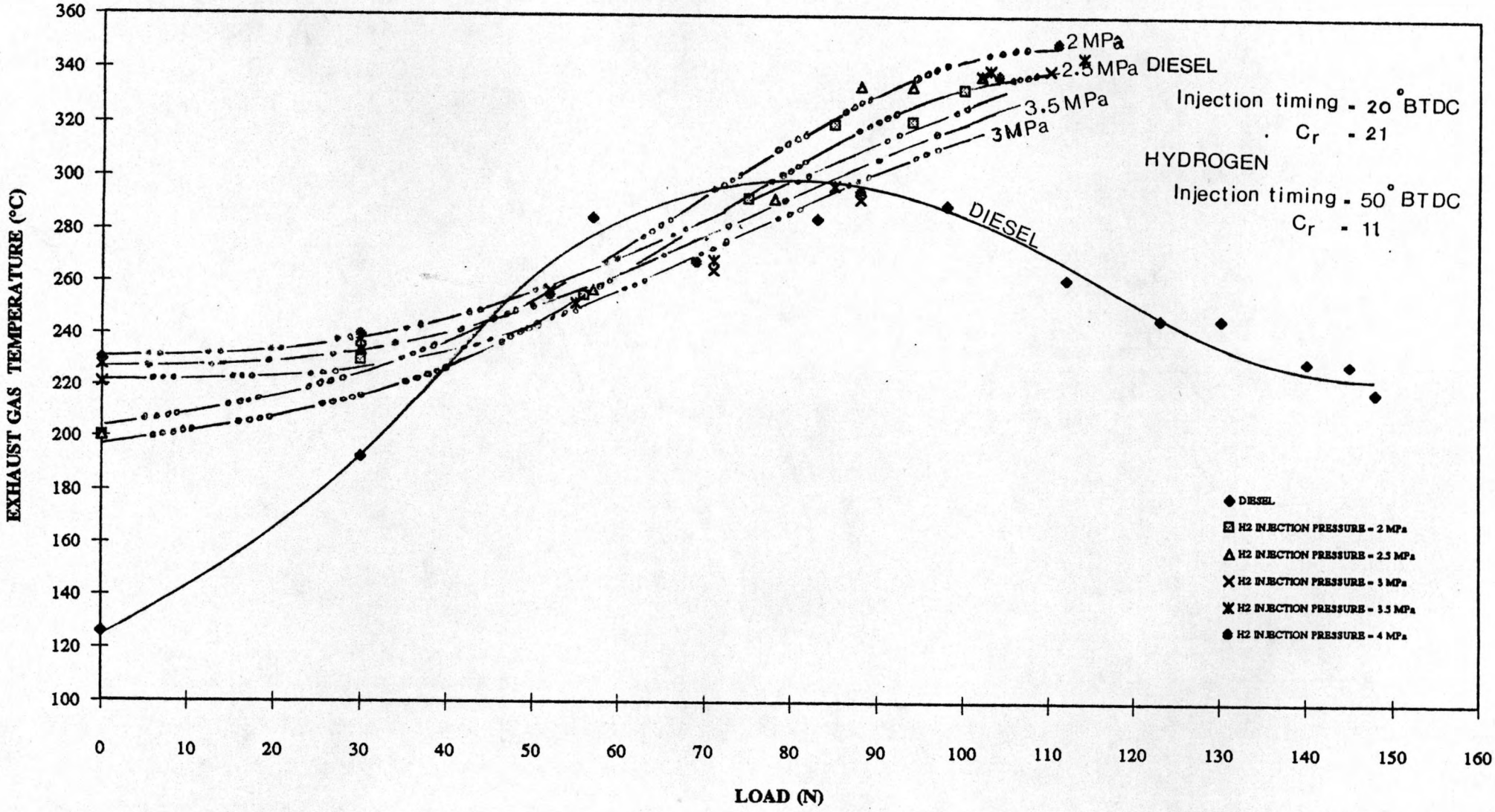
รูปที่ 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของ เครื่องยนต์ไฮโดรเจน
เมื่อแรงดันในการฉีดเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล



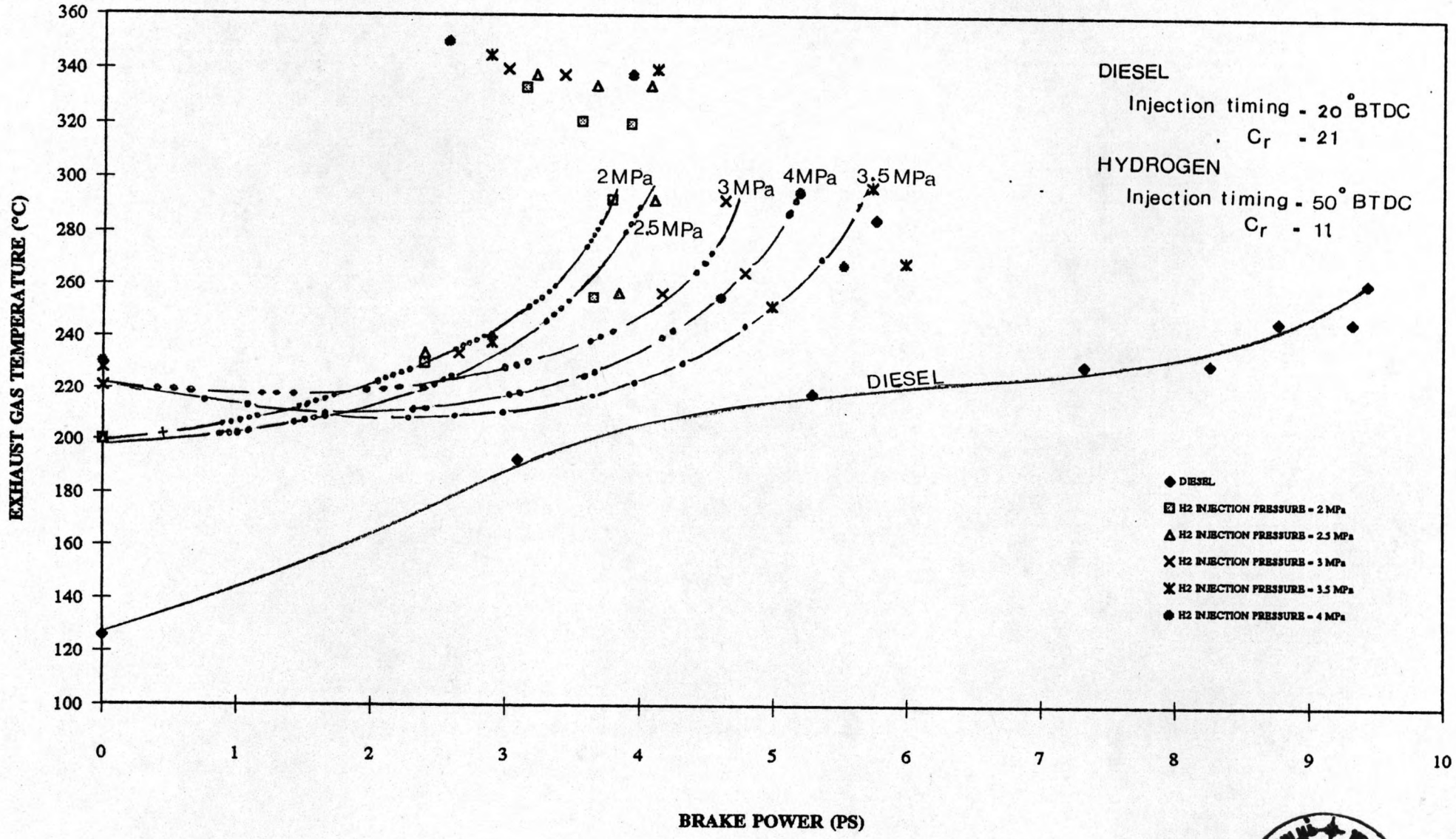
รูปที่ 40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน เมื่อแรงดันในการฉีดเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบ กับเครื่องยนต์ดีเซล



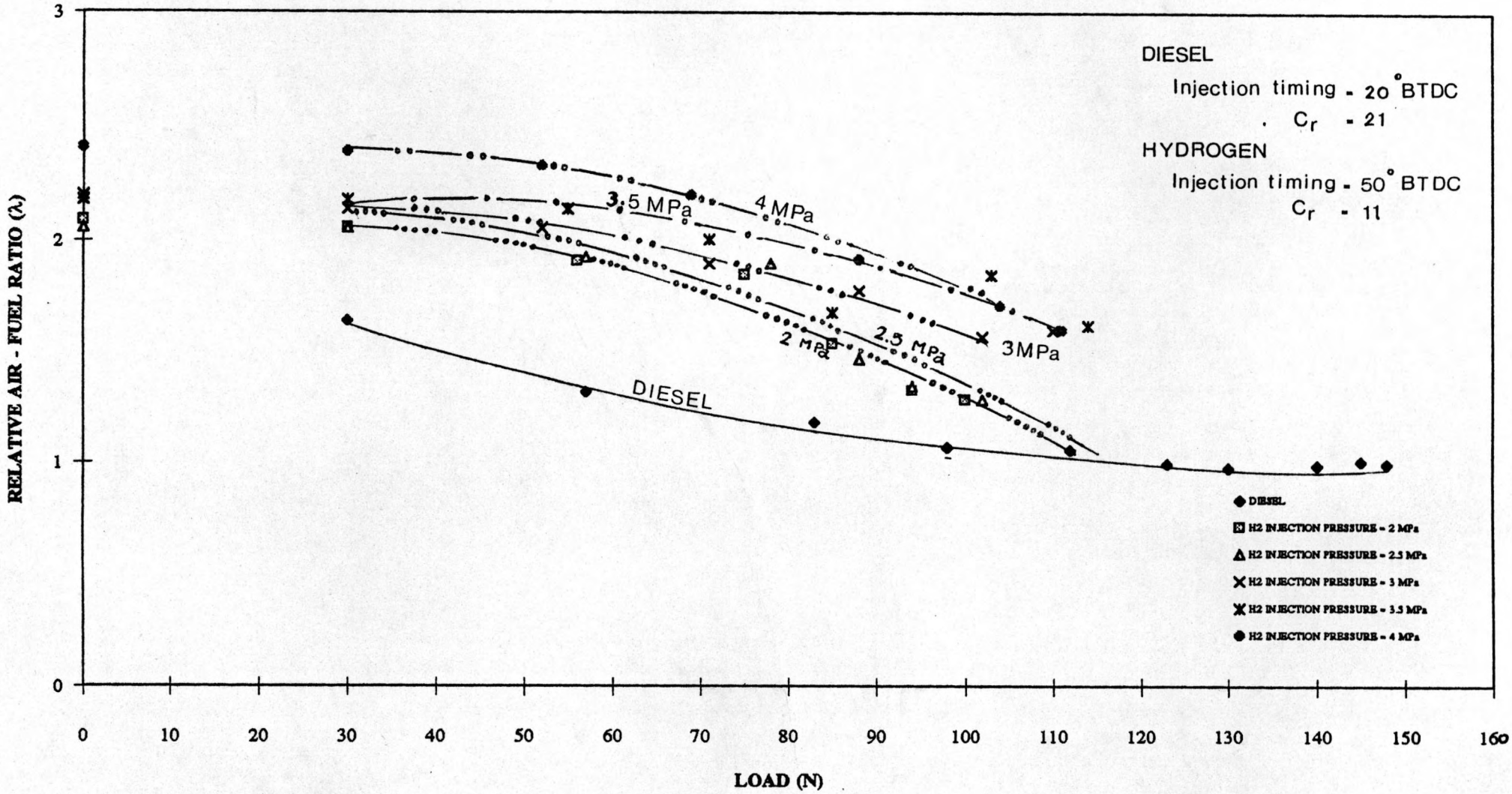
รูปที่ 41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับอุณหภูมิแกสไอเสียของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน เมื่อแรงดันในการฉีดเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบ กับเครื่องยนต์ดีเซล



รูปที่ 42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับอุณหภูมิแกสไอเสียของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน
เมื่อแรงดันในการฉีดเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล



รูปที่ 43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับอุณหภูมิแกสไอเสียของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน เมื่อแรงดันในการฉีดเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับ เครื่องยนต์ดีเซล



รูปที่ 44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relative air fuel ratio (λ) ของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อแรงดันในการฉีดเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล