บทที่ 4

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

หลังจากดัดแปลงระบบจ่ายเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์แกสโซลีนเป็นระบบจ่ายเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนแล้ว และได้ปรับแต่งเครื่องยนต์โดยการตั้งระยะห่างของลิ้นไอดี, ลิ้นไอเสีย, และตั้งระยะห่างของเขี้ยวหัวเทียนใหม่ เพื่อให้เครื่องยนต์ไฮโดรเจนสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นจะทำการทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องยนต์ และวัดปริมาณแกสไอเสียเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์ที่ใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเครื่องยนต์

จากการดัดแปลงระบบจ่ายเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์แกสโซลีนไปเป็นระบบจ่ายเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนนั้น ทำให้มีความแตกต่างกันในส่วนของระบบเชื้อเพลิง ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้วัดหาปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้จึงแตกต่างกัน แต่สำหรับอุปกรณ์วัดอื่นจะเหมือนกัน แต่ในที่นี้จะแยกกล่าวถึงอุปกรณ์ในการวัดของเครื่องยนต์ทั้งสองออกจากกัน ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

สำหรับเครื่องยนต์แกสโซลีนมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาสมรรถนะและวัดปริมาณแกสไอเสีย (ดังรูปที่ 4.1) ประกอบด้วย

1. Air box
2. Manometer
3. Fuel tank
4. Fuel oil measuring flask
5. Engine
6. Hydraulic dynamometer
7. Engine brake load reading

8. Tachometer
9. Thermocouple for measure cooling water temperature
10. Thermocouple for measure exhaust gas temperature
11. Barometer
12. Thermometer for measure ambient temperature
13. Exhaust gas analyzer

สำหรับเครื่องยนต์ไฮโดรเจน อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบหาสมรรถนะ และวัดปริมาณแกสไอเสีย (ดังรูปที่ 4.2) ประกอบด้วย

1. Air box
2. Manometer
3. Hydrogen cylinder
4. Hydrogen flow meter
5. Engine
6. Hydraulic dynamometer
7. Engine brake load reading
8. Tachometer
9. Thermocouple for measure cooling water temperature
10. Thermocouple for measure exhaust gas temperature
11. Barometer
12. Thermometer for measure ambient temperature
13. Exhaust gas analyzer

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้วัดดังกล่าวข้างต้น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)

ไดนาโมมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์วัดกำลังม้าขาออก (Brake hourse power) ของเครื่องยนต์ ไดนาโมมิเตอร์ที่ใช้เป็นแบบไฮดรอลิก (Hydraulic dynamometer) ของยี่ห้อ Heenan & Froude

รุ่นDPX-2 (ดังรูปที่ 4.3) การควบคุมภาระของเครื่องยนต์จะทำได้โดยการปรับโหลดของไดนาโม-มิเตอร์ การวัดค่าแรงบิดจะสามารถหาความสัมพันธ์ได้จากลูกตุ้มน้ำหนักและตาชั่งสปริง เมื่อทราบแรงบิดของเครื่องยนต์ จะสามารถหากำลังม้าเบรคของเครื่องยนต์จากสมการ[10]

$$P = \frac{Tn}{9549.3}$$

เมื่อ

P = กำลังม้าขาออก (Brake hourse power) kW

T = แรงบิดของเครื่องยนต์ (Brake torque) N-m

n = ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (Speed) rpm

เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Air flow meter)

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศที่เข้าเครื่องยนต์ (ดังรูปที่ 4.4) ที่ใช้เป็นแบบ Alcock viscous air flow meter ยี่ห้อ RICARDO Model P7012 461H/72 ปริมาณการไหลของอากาศที่วัดจะใช้ Manometer เป็นอุปกรณ์อ่านค่าความดันแตกต่างของอากาศที่ไหลผ่าน Orifice (ดังรูปที่ 4.5) และเพื่อให้การวัดเป็นไปอย่างถูกต้อง จึงได้ทำการ Calibrated flow meter ใหม่ ดังแสดงผลการ Calibrated ในรูปที่ จ-1 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ[จ-2]

$$m = 32.29 \times \Delta h$$

เมื่อ

m = อัตราการไหลของอากาศ (m^3/hr)

Δh = แรงดันตกคร่อม Orifice meter วัดได้จาก manometer (cm of water)

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแกสไฮโดรเจน (Hydrogen flow meter)

อุปกรณ์วัดปริมาณของแกสไฮโดรเจนที่ไหลเข้าเครื่องยนต์ (ดังรูปที่ 4.6) เป็นแบบ Variable area flow meter ของบริษัท Fischer & Porter รุ่น 10A 3225CA2AOA1 และเพื่อให้

การวัดเป็นไปอย่างถูกต้อง จึงได้ทำการ Calibrated flow meter ใหม่ ดังแสดงผลการ Calibrated ในรูปที่ จ-2

อุปกรณ์วิเคราะห์แกสไอเสีย (Exhaust gas anslyzer)

เครื่องมือนี้เป็นอุปกรณ์การวัดและวิเคราะห์ไอเสียของเครื่องยนต์ (ดังรูปที่ 4.7) โดยจะทำการวัดค่า CO และ HC อุปกรณ์วิเคราะห์แกสไอเสียนี้เป็นของยี่ห้อ Electra control รุ่น MGA 4000-T โดยมีช่วงการวัดของแกสต่าง ๆ ดังนี้

CO = 0.00 - 10.00 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร

HC = $0.00 - 9999 \times 10^{-6}$ โดยปริมาตร (ppm)

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์แกสโซลีน

วิธีการทดสอบ

การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์แกสโซลีนนี้จะทำการหาค่ากำลังขาออกสูงสุด (Maximum Power) โดยจะทำการทดสอบเครื่องยนต์ที่ตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อเปิดกว้างสุด (Full Throttle) ตามวิธีการทดสอบเครื่องยนต์แกสโซลีนทั่วไป ซึ่งมีวิธีการ คือ ทำการเดินเครื่องที่ความเร็วรอบสูงสุด โดยเปิดปีกผีเสื้อให้กว้างสุด อุ่นเครื่องประมาณ 5 นาที หลังจากนั้นเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์ โดยการปรับโหลดที่ไดนาโมมิเตอร์ โดยเพิ่มโหลดไปจนกระทั่งเครื่องยนต์มีความเร็วรอบ 6000 รอบต่อนาที เพราะว่ากำลังขาออกสูงสุดของเครื่องยนต์รุ่นนี้จะอยู่ที่ความเร็วรอบประมาณ 5500 รอบต่อนาที และรอจนกระทั่งเครื่องยนต์ทำงานอยู่ในสภาวะที่คงที่ จึงทำการบันทึกค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ภาระของเครื่องยนต์ (Load)
2. ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (Speed)
3. ความดันตกคร่อม Orifice meter
4. ปริมาณ CO และ HC ในแกสไอเสีย
5. ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง

6. อุณหภูมิแกสไอเสีย
7. อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น
8. เวลาที่เครื่องยนต์ใช้น้ำมัน
9. ปริมาณอากาศที่ใช้

เมื่อบันทึกค่าต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว จะทำการทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบอื่น ๆ โดยการเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์อีก เพื่อให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ลดลงครั้งละ 500 รอบต่อนาที และทำการบันทึกค่าเช่นเดิมโดยทำเช่นเดียวกันนี้จนกระทั่งความเร็วรอบเหลือ 1000 รอบต่อนาที

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน

วิธีการทดสอบ

การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ไฮโดรเจนนี้ จะทำการหาค่ากำลังสูงสุด (Maximum Power) ของเครื่องยนต์ขณะเดินเครื่องยนต์เต็มกำลัง แต่เนื่องจาก ได้ดัดแปลงระบบบรรจุส่วนผสมอากาศกับแกสไฮโดรเจนเป็น 2 แบบ คือ การจ่ายแกสไฮโดรเจนกับอากาศแบบผสมกัน ภายนอกกระบอกสูบ (External mixture formation) และการจ่ายแกสไฮโดรเจนกับอากาศเข้าไปผสมกันภายในกระบอกสูบ (Internal mixture formation) ดังนั้นจึงแยกการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือการผสมแบบภายนอกกระบอกสูบกับแบบผสมแบบภายในกระบอกสูบ โดยในขณะทำการทดสอบจะทำการปรับปริมาณแกสไฮโดรเจนที่พอเหมาะ เพื่อให้เครื่องยนต์มีกำลังขาออกมากที่สุด และในขณะทำการทดสอบจะทำการปรับองศาการจุดระเบิดไปในตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อสังเกตกำลังของเครื่องยนต์ที่เปลี่ยนแปลง เพื่อเลือกองศาการจุดระเบิดที่ดีที่สุด ส่วนสาเหตุที่จะปรับองศาการจุดระเบิดเพราะว่าเชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับน้ำมันเบนซินมีความเร็วในการเผาไหม้ไม่เท่ากัน ซึ่งองศาการจุดระเบิดของเครื่องยนต์แกสโซลีนนั้นจะจุดระเบิดที่ 5°BTDC แต่เครื่องยนต์ไฮโดรเจนนั้นองศาการจุดระเบิดที่ดีที่สุดจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของเชื้อเพลิงและปริมาณของส่วนผสม สำหรับวิธีการทดสอบแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

วิธีการทดสอบแบบภายนอกกระบอกสูบ

ก่อนการทดสอบหาสมรรถนะเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะต้องมีการทดลองติดเครื่องยนต์เพื่อดูการทำงานของเครื่องยนต์เสียก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์นั้น จะทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้เต็มกำลังจริง ดังนั้นการทดลองติดเครื่องยนต์ไฮโดรเจนวิธีนี้ ในตอนแรกได้ทำเช่นเดียวกับการทดสอบเครื่องยนต์แกสโซลีน คือ จะทำการทดสอบที่ตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อเปิดกว้างสุด (Full throttle) โดยจะทำการปรับปริมาณแกสไฮโดรเจนที่เข้าเครื่องยนต์เพื่อควบคุมให้เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างเต็มกำลังและมีกำลังขาออกสูงสุด สาเหตุที่ทำการปรับปริมาณแกสไฮโดรเจนเนื่องจากคุณสมบัติของแกสไฮโดรเจนมีช่วงการติดไฟที่กว้างทำให้สามารถปรับปริมาณส่วนผสมได้กว้าง (หนา-บาง) ดังนั้นความหนา-บางของส่วนผสมนี้สามารถใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนได้ ซึ่งในการทดสอบสมรรถนะนั้นพบว่าเครื่องยนต์สามารถทำงานได้ที่ความเร็วรอบต่ำระหว่าง 1000-1500 รอบต่อนาที และเครื่องยนต์ไม่มีกำลัง ถ้าเพิ่มปริมาณแกสไฮโดรเจนให้ความเร็วรอบเครื่องยนต์สูงกว่านี้จะเกิดการ Flashback ออกมาที่คาร์บูเรเตอร์ เครื่องยนต์จะไม่สามารถทำงานต่อไปได้ ซึ่งปัญหาการเกิด Flashback นี้ ได้วิเคราะห์ว่าเกิดจากการรั่วของลิ้นไอดีตัวเล็ก(เครื่องยนต์แบบ Startified charge spark ignition engine) ทำให้ในจังหวะระเบิดของเครื่องยนต์มีประกายไฟรั่วออกมาติดที่ส่วนผสมไอดีในท่อร่วมไอดีเล็กจึงทำให้เกิดการ Flashback ขึ้น จากสาเหตุนี้จึงได้แก้ไขโดยการอุดรูที่ท่อร่วมไอดีเล็กนี้เพื่อปิดกั้นไม่ให้ไอดีไหลเข้าไป เปลวไฟจากห้องเผาไหม้จึงไม่สามารถสัมผัสไอดีได้ และได้ลองทดสอบเครื่องยนต์ใหม่แต่ไม่ได้ทำให้ทำงานดีขึ้น จึงแก้ปัญหาโดยทำการลองปรับองศาการจุดระเบิดไปในตำแหน่งต่างๆ เพื่อสังเกตการทำงานของเครื่องยนต์ แต่วิธีนี้ไม่ได้ทำให้ทำงานได้ดีขึ้น จากนั้นจึงได้ทำการปรับตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อไปในตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อลดปริมาณอากาศที่ไหลเข้าเครื่องยนต์ โดยจากการทดสอบพบว่าการลดปริมาณอากาศนี้ทำให้เครื่องยนต์รับภาระได้สูงขึ้นและสามารถเร่งความเร็วของเครื่องยนต์ได้สูงขึ้นดีกว่าการเปิดลิ้นปีกผีเสื้อเปิดกว้างสุด สำหรับตำแหน่งปีกผีเสื้อที่เครื่องยนต์มีกำลังขาออกสูงสุดจะอยู่ในช่วงเปิดครึ่งหนึ่ง (Half throttle) จากสาเหตุนี้ทำให้สรุปได้ว่าที่ตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อเปิดสุดนั้นทำให้อากาศเข้าเครื่องยนต์มากไป ส่วนผสมไอดีจึงบางมากจนเครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานได้ และจากการที่เกิด Flashback สามารถสรุปได้ว่า ปริมาณส่วนผสมไอดีที่บางนี้เมื่อเข้ากระบอกสูบในจังหวะดูดจะไปสัมผัสกับลิ้นไอดีหรือแกสร้อนที่เหลือจากการเผาไหม้ในวัฏจักรก่อนทำให้เกิดการลุกไหม้ไอดีจึงเกิด Flashback ออกมาที่คาร์บูเรเตอร์ ดังนั้นในการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะเปิดลิ้นปีกผีเสื้อไปในตำแหน่งเปิดครึ่งหนึ่ง (Half throttle)เพื่อให้เครื่องยนต์ทำงานได้เต็มกำลัง นอกจากนั้นจะทำการปรับองศาการจุดระเบิด

ไปในตำแหน่งต่าง ๆ ได้แก่ 0°BTDC, 5°BTDC และ 10°BTDC เป็นต้น เพื่อสังเกตการทำงานที่เปลี่ยนแปลงของเครื่องยนต์จะทำให้สามารถเลือกองศาการจุดระเบิดที่เหมาะสมของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ทำให้มีกำลังสูงสุดได้ดีกว่า สำหรับการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะทำการทดสอบในช่วงความเร็วรอบ 1000-4000 รอบต่อนาที และการบันทึกค่าต่าง ๆ จะรอให้เครื่องยนต์อยู่ในสภาวะที่คงที่ก่อน จึงจะบันทึกค่าต่าง ๆ ดังนี้

วิธีการทดสอบแบบภายในกระบอกสูบ

การทดสอบเครื่องยนต์ไฮโดรเจนวิธีนี้ ในตอนแรกได้ทำการทดสอบเครื่องยนต์ที่ตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อเปิดกว้างสุด (Full throttle) โดยปรับปริมาณแกสไฮโดรเจนที่เข้าเครื่องยนต์เพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์ จากการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์พบว่าสามารถให้กำลังขาออกได้สูงขึ้น และสามารถเร่งเครื่องยนต์ให้มีความเร็วรอบได้สูงขึ้นกว่าวิธีการผสมแบบภายนอกกระบอกสูบโดยไม่เกิดการ Flashback จากนั้นลองทดสอบด้วยการปรับตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อไปในตำแหน่งต่าง ๆ พบว่าที่ตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อเปิดครึ่งหนึ่ง (Half throttle) เครื่องยนต์ทำงานได้เต็มกำลังมากกว่าหรือมีกำลังขาออกมากกว่าการเปิดลิ้นปีกผีเสื้อกว้างสุด ซึ่งเหมือนกับวิธีการผสมแบบภายนอกกระบอกสูบ ดังนั้นวิธีการทดสอบเครื่องยนต์วิธีนี้จะปรับลิ้นปีกผีเสื้อไปในตำแหน่งเปิดครึ่งหนึ่งเช่นเดียวกับวิธีการทดสอบแบบภายนอกกระบอกสูบและมีวิธีการบันทึกค่าต่าง ๆ เช่นเดียวกัน

การวิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์

การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์เป็นการหาสมรรถนะที่เครื่องยนต์ทำงานแบบเต็มกำลัง หรือมีกำลังขาออกมากที่สุดโดยที่ยังไม่เกิดการ Flashback หรือ Knocking จากเครื่องยนต์ โดยจะแสดงผลการทดสอบของเครื่องยนต์แกสโซลีนที่ทดสอบแบบลิ้นปีกผีเสื้อเปิดกว้างสุด (Full throttle) และเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะแสดงสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ดัดแปลงระบบบรรจุเชื้อเพลิงแบบการผสมภายในกระบอกสูบ (Internal mixture formation) เนื่องจากวิธีบรรจุเชื้อเพลิงแบบนี้จะให้สมรรถนะที่ดีกว่าระบบบรรจุเชื้อเพลิงแบบภายนอกกระบอกสูบ (External mixture formation) และจะทดสอบที่ตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อเปิดครึ่งหนึ่ง (Half throttle) และทดสอบที่ตำแหน่งองศาการจุดระเบิดที่ 0°BTDC, 5°BTDC และ 10°BTDC

สำหรับผลการทดสอบเครื่องยนต์แกสโซลีนจะแสดงในตาราง ก-1 และผลการทดสอบเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะแสดงในตาราง ก-2 ถึง ก-7 ซึ่งข้อมูลต่างๆ ที่อยู่ในตารางดังกล่าวจะแสดงตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ข และข้อมูลต่าง ๆ ที่อยู่ในตาราง ก-1 ถึง ก-7 สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบเครื่องยนต์ทั้งสองแบบด้วยกราฟรูปที่ 4.8 ถึง รูปที่ 4.25

สมรรถนะเครื่องยนต์

แรงบิด และกำลังของเครื่องยนต์

พิจารณารูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์ จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าเครื่องยนต์แกสโซลีนมีค่าแรงบิดสูงกว่าเครื่องยนต์ไฮโดรเจนทุกความเร็วรอบ และถ้าเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ไฮโดรเจนด้วยกัน พบว่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะอยู่ที่องศาการจุดระเบิด 0°BTDC และที่องศาการจุดระเบิด 5°BTDC และ 10°BTDC จะให้แรงบิดน้อยกว่าตามลำดับ โดยที่เครื่องยนต์แกสโซลีนมีค่าแรงบิดสูงสุดเท่ากับ 113 นิวตัน-เมตร ที่ความเร็วรอบ 2750 รอบต่อนาที และเครื่องยนต์ไฮโดรเจนมีค่าแรงบิดสูงสุดที่ตำแหน่งองศาการจุดระเบิดเท่ากับ 0°BTDC มีค่าเท่ากับ 60 นิวตัน-เมตร ที่ความเร็วรอบ 1750 รอบต่อนาที โดยที่เครื่องยนต์ไฮโดรเจนมีค่าแรงบิดสูงสุดน้อยกว่าเครื่องยนต์แกสโซลีนเท่ากับ 46.37 เปอร์เซ็นต์ แต่เครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่องศาการจุดระเบิดเท่ากับ 5°BTDC จะมีค่าแรงบิดสูงสุดเท่ากับ 58 นิวตัน-เมตร ที่ความเร็วรอบ 1750 รอบต่อนาที ซึ่งมีค่าแรงบิดสูงสุดน้อยกว่าที่องศาการจุดระเบิด 0°BTDC เท่ากับ 3.33 เปอร์เซ็นต์ และที่องศาการจุดระเบิดเท่ากับ 10°BTDC จะมีค่าแรงบิดสูงสุดเท่ากับ 56 นิวตัน-เมตร ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที ซึ่งมีค่าแรงบิดสูงสุดน้อยกว่าที่องศาการจุดระเบิด 0°BTDC เท่ากับ 6.66 เปอร์เซ็นต์

การที่แรงบิดของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนต่ำกว่าเครื่องยนต์แกสโซลีน เนื่องจากแกสไฮโดรเจนถูกป้อนสู่เครื่องยนต์ในลักษณะเป็นไอสมบรูณ์ ดังนั้นไอเชื้อเพลิงบางส่วนนี้จะไปแทนที่อากาศที่จะเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิง เพื่อเป็นส่วนผสมสำหรับการเผาไหม้ เป็นเหตุให้ปริมาณส่วนผสมที่จะถูกจุดระเบิดเพื่อให้ลุกไหม้มีปริมาณที่น้อยลงกว่าเมื่อต้องใช้เชื้อเพลิงเป็นของเหลว ส่วนผสมที่มีปริมาณน้อยกว่านี้หรือบางกว่า ทำให้ได้แรงบิดที่ต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F) และค่า

ความร้อนของเชื้อเพลิงสูงสุด (HHV) ดังจะเห็นได้ว่า เครื่องยนต์ไฮโดรเจนนี้จะใช้อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงที่บางกว่าอัตราส่วนผสมทางทฤษฎีมาก (Stoichiometric mixture) ถึงแม้ว่าอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงทางทฤษฎีของไฮโดรเจนจะมีค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สูงกว่าอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงทางทฤษฎีของน้ำมันเบนซินก็ตาม แต่เครื่องยนต์ไฮโดรเจนนี้ใช้ A/F ที่บางกว่าเครื่องยนต์แกสโซลีน จึงจะให้ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนต่ำกว่าเครื่องยนต์แกสโซลีน ค่าแรงบิดของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะต่ำกว่ามาก และจากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าแรงบิดของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะสูงสุดที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่ำระหว่าง 1000 ถึง 2000 รอบต่อนาที ส่วนเครื่องยนต์แกสโซลีนจะมีแรงบิดสูงสุดที่ความเร็วรอบสูงกว่าระหว่าง 2500 ถึง 3000 รอบต่อนาที ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องยนต์ไฮโดรเจนมี A/F ในช่วงความเร็วรอบดังกล่าวที่ทำให้เกิดการเผาไหม้แล้วได้ค่าความร้อนสูงสุด ส่วนเครื่องยนต์แกสโซลีนมี A/F ในช่วงความเร็วรอบดังกล่าว ที่ทำให้เกิดการเผาไหม้แล้วได้ค่าความร้อนสูงสุด และสาเหตุที่ทำให้เครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ 0°BTDC มีค่าแรงบิดสูงกว่าที่ 5°BTDC และ 10°BTDC ตามลำดับนั้น เนื่องจากจุดติดไฟหรือความไวไฟของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนมีจุดติดไฟที่ต่ำน้ำมันเบนซิน ทำให้ความล่าช้าแห่งการจุดระเบิดจะมีค่าน้อยกว่า การเผาไหม้จึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เครื่องยนต์ไฮโดรเจนมีองศาการจุดระเบิดดีที่สุดเท่ากับ 0°BTDC ในขณะที่เครื่องยนต์แกสโซลีนมีองศาการจุดระเบิดเท่ากับ 5°BTDC

พิจารณารูป 4.9 จะเห็นว่าเครื่องยนต์แกสโซลีนมีค่ากำลังสูงกว่าเครื่องยนต์ไฮโดรเจนทุกความเร็วรอบ และเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่องศาการจุดระเบิด 0°BTDC จะมีค่ากำลังสูงที่สุด กำลังสูงสุดของเครื่องยนต์แกสโซลีนมีค่าเท่ากับ 52.4 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที และกำลังสูงสุดของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ 0°BTDC, 5°BTDC และ 10°BTDC มีค่าเท่ากับ 17 กิโลวัตต์ ที่ 3500 รอบต่อนาที, 16 กิโลวัตต์ ที่ 3250 รอบต่อนาที และ 15 กิโลวัตต์ ที่ 3250 รอบต่อนาที ตามลำดับ จะเห็นว่ากำลังสูงสุดของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ 0°BTDC มีค่าน้อยกว่าเครื่องยนต์แกสโซลีน เท่ากับ 67.56 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสาเหตุที่กำลังของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนน้อยกว่าเครื่องยนต์แกสโซลีนนั้น จะเหมือนกับเหตุผลที่อธิบายในค่าแรงบิดของเครื่องยนต์

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์

พิจารณากราฟรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับความเร็วรอบและกำลังของเครื่องยนต์ ตามลำดับ จากรูปที่ 4.10 จะเห็นประสิทธิ

ภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์แกสโซลีนกับเครื่องยนต์ไฮโดรเจนมีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบปานกลางเหมือนกัน โดยที่เครื่องยนต์แกสโซลีนมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดที่ 28.8 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2250 รอบต่อนาที ในขณะที่เครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่องศาการจุดระเบิด 0°BTDC มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 30.2 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2750 รอบต่อนาที และองศาการจุดระเบิดที่ 5°BTDC และ 10°BTDC มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 28.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที และ 27.4 เปอร์เซ็นต์ ที่ 2750 รอบต่อนาที จะเห็นได้ว่า เครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ 0°BTDC มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดสูงกว่าเครื่องยนต์แกสโซลีนเท่ากับ 4.46 เปอร์เซ็นต์ แต่ในขณะเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ 5°BTDC และ 10°BTDC มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดต่ำกว่าเครื่องยนต์แกสโซลีนเท่ากับ 1.04 และ 4.86 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สาเหตุที่เครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ 0°BTDC มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเครื่องยนต์แกสโซลีนเนื่องจากการควบคุมปริมาณส่วนผสมระหว่างอากาศต่อแกสไฮโดรเจนที่เข้าเครื่องยนต์เป็นปริมาณส่วนผสมที่ทำให้การเผาไหม้สมบรูณ์ ฉะนั้นพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จึงสูง ทำให้กำลังของเครื่องยนต์ที่ได้เมื่อเทียบกับน้ำหนักเชื้อเพลิงหนึ่งหน่วยสูงขึ้น และถ้านำไปคิดกับค่าความร้อนสูงสุดของเชื้อเพลิงแกสไฮโดรเจนมีค่าสูงกว่าน้ำมันเบนซิน จึงทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ 0°BTDC นี้สูงกว่าเครื่องยนต์แกสโซลีน นอกจากนั้นจะเห็นว่าค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดของเครื่องยนต์ทั้ง 2 ชนิด จะอยู่ช่วงความเร็วรอบระหว่าง 1000 - 3000 รอบต่อนาที ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของเครื่องยนต์ที่ออกแบบมา โดยจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพเชิงปริมาตรดูดของเครื่องยนต์

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์

พิจารณากราฟรูปที่ 4.12 และ 4.13 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเทียบกับความเร็วรอบ และกำลังของเครื่องยนต์ ตามลำดับ และกราฟรูปที่ 4.14 และ 4.15 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเทียบกับความเร็วรอบและกำลังของเครื่องยนต์ ตามลำดับ จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าเครื่องยนต์แกสโซลีนมีค่าความสิ้นเปลืองจำเพาะต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0.3 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที ในขณะที่เครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ 0°BTDC มีค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำสุดเท่ากับ 0.1 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 2750 รอบต่อนาที และเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ 5°BTDC และ 10°BTDC มีค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำสุดเท่ากับ 0.105 กิโลกรัมต่อ

กิโลวัตต์-ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที และ 0.11 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 2750 รอบต่อนาที โดยที่เครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ 0°BTDC มีค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะน้อยกว่าเครื่องยนต์แกสโซลีนเท่ากับ 66 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุที่เครื่องยนต์ไฮโดรเจนมีค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะน้อยกว่านั้นเนื่องจาก คุณสมบัติของไฮโดรเจนมีค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงหนึ่งหน่วยมากกว่าของน้ำมันเบนซิน แต่เครื่องยนต์แกสโซลีนและเครื่องยนต์ไฮโดรเจนต้องการค่าพลังงานความร้อนที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากเป็นเครื่องยนต์ตัวเดียวกัน ดังนั้นแกสโซลีนที่มีค่าพลังงานความร้อนสูงกว่าในขณะที่ปริมาณเชื้อเพลิงเท่ากัน ดังนั้นที่ค่าพลังงานความร้อนเท่ากัน ปริมาณของแกสไฮโดรเจนที่ใช้จึงน้อยกว่าปริมาณของน้ำมันเบนซิน และอีกสาเหตุหนึ่งคือ ในขณะที่การใช้น้ำมันเบนซินนั้น ต้องการปริมาณเชื้อเพลิงบางส่วนมาชดเชยในส่วนที่ไม่ระเหย เพื่อให้ได้ค่าความร้อนในการเผาไหม้ที่สูงพอ เชื้อเพลิงที่สูญเสียนี้ จึงมีผลทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

อุณหภูมิและแกสไอเสีย

พิจารณารูปที่ 4.16 ถึง รูปที่ 4.20 เป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิไอเสีย, ปริมาณคาร์บอนมอนน็อคไซด์, ปริมาณไฮโดรคาร์บอน จากรูปที่ 4.16 พบว่าอุณหภูมิไอเสียรถยนต์ของเครื่องยนต์แกสโซลีนและไฮโดรเจนในช่วงความเร็วรอบต่ำนั้น อุณหภูมิไอเสียจะใกล้เคียงกันมาก แต่ในช่วงความเร็วรอบสูงขึ้น อุณหภูมิจะแตกต่างกันมากขึ้น สำหรับเครื่องยนต์ไฮโดรเจนมีอุณหภูมิไอเสียสูงสุดเท่ากับ 858 องศาเซลเซียส ที่ 6000 รอบต่อนาที ส่วนเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ 0°BTDC มีอุณหภูมิไอเสียสูงสุดเท่ากับ 690 องศาเซลเซียส ที่ 4000 รอบต่อนาที ถ้าพิจารณาที่ความเร็วรอบเดียวกันนั้น อุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์แกสโซลีนจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน เพราะว่า ปริมาณอัตราส่วนผสมแกสไฮโดรเจนกับอากาศที่เครื่องยนต์ไฮโดรเจนใช้นั้นจะมีค่าที่บางมากกว่าน้ำมันเบนซิน ทำให้ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนต่ำ ทำให้อุณหภูมิแกสไอเสียต่ำ ถ้าความเร็วรอบสูงขึ้นเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะใช้ส่วนผสมที่บางมากขึ้น อุณหภูมิไอเสียจึงต่ำกว่าน้ำมันเบนซินมาก เพราะว่าเครื่องยนต์แกสโซลีนนั้น มีระบบการปรับอัตราส่วนผสมน้ำมันกับอากาศให้เหมาะสมกับการทำงานทุกความเร็วรอบ และจะเห็นได้ว่าที่ความเร็วรอบต่ำ อุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์ทั้งสองจะมีค่าใกล้เคียงกัน นั่นแสดงว่าที่ความเร็วรอบต่ำเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะใช้ส่วนผสมที่หนาขึ้น ปริมาณแกสไฮโดรเจนที่ใช้มากขึ้น ทำให้ค่าความร้อนที่ได้สูงขึ้น การที่ส่วนผสมหนาขึ้นทำให้ใช้แกสไฮโดรเจนมากขึ้น แต่กำลังที่ได้นั้นต่ำเพราะว่า การอกแบบเครื่องยนต์นั้นจะสร้างให้มีประสิทธิ

ภาพเชิงปริมาตรดูดดีที่สุดในช่วงความเร็วรอบปานกลาง ดังนั้นที่ความเร็วรอบต่ำหรือสูงเครื่องยนต์จึงมีประสิทธิภาพต่ำกว่า ทำให้ใช้เชื้อเพลิงต่อกิโลวัตต์สูงกว่า

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

พิจารณารูปที่ 4.21 และ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (โดยน้ำหนัก) กับความเร็วรอบ และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ จากรูป 4.21 จะเห็นว่า อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่สามารถทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้มีช่วงที่กว้างกว่าอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันเบนซิน โดยอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศต่อไฮโดรเจนที่ทำให้เครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ 0°BTDC ทำงานได้อย่างเต็มกำลังตลอดช่วงความเร็วมีค่าระหว่าง 58.0 - 76.0 และอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศต่อน้ำมันเบนซินที่ทำให้เครื่องยนต์แกสโซลีนทำงานได้อย่างเต็มกำลังตลอดช่วงความเร็วมีค่าระหว่าง 15.0 - 16.5 จะเห็นได้ว่ามีค่าเกือบจะคงที่สาเหตุที่ทำให้เครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับแกสไฮโดรเจนที่แตกต่างกันได้มากเนื่องจาก คุณสมบัติของแกสไฮโดรเจนที่มีช่วงการติดไฟที่กว้าง 4 - 75 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร จึงทำให้เครื่องยนต์สามารถทำงานได้ในช่วงนี้ ดังเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจึงสามารถใช้การทำงานโดยการควบคุมปริมาณส่วนผสมนี้ได้ และสำหรับเครื่องยนต์แกสโซลีนมีอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศต่อน้ำมันเบนซินเกือบจะคงที่ เพราะว่าน้ำมันเบนซินมีช่วงการติดไฟที่น้อยกว่าแกสไฮโดรเจน และเครื่องยนต์แกสโซลีนนี้ได้ออกแบบมาสำหรับเชื้อเพลิงน้ำมันเบนซิน ดังนั้นเครื่องยนต์จึงมีระบบการปรับอัตราส่วนผสมไอดีนี้ได้ด้วยตัวเอง เพื่อให้ส่วนผสมไอดีนี้สามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ในทุกสภาวะการเดินเครื่อง

องศาจุดระเบิดที่เหมาะสมของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน

ในการพิจารณาเพื่อหาองศาการจุดระเบิดที่เหมาะสมของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน มีสิ่งที่ต้องพิจารณาคือ กำลังสูงสุดจากเครื่องยนต์ และการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำสุด

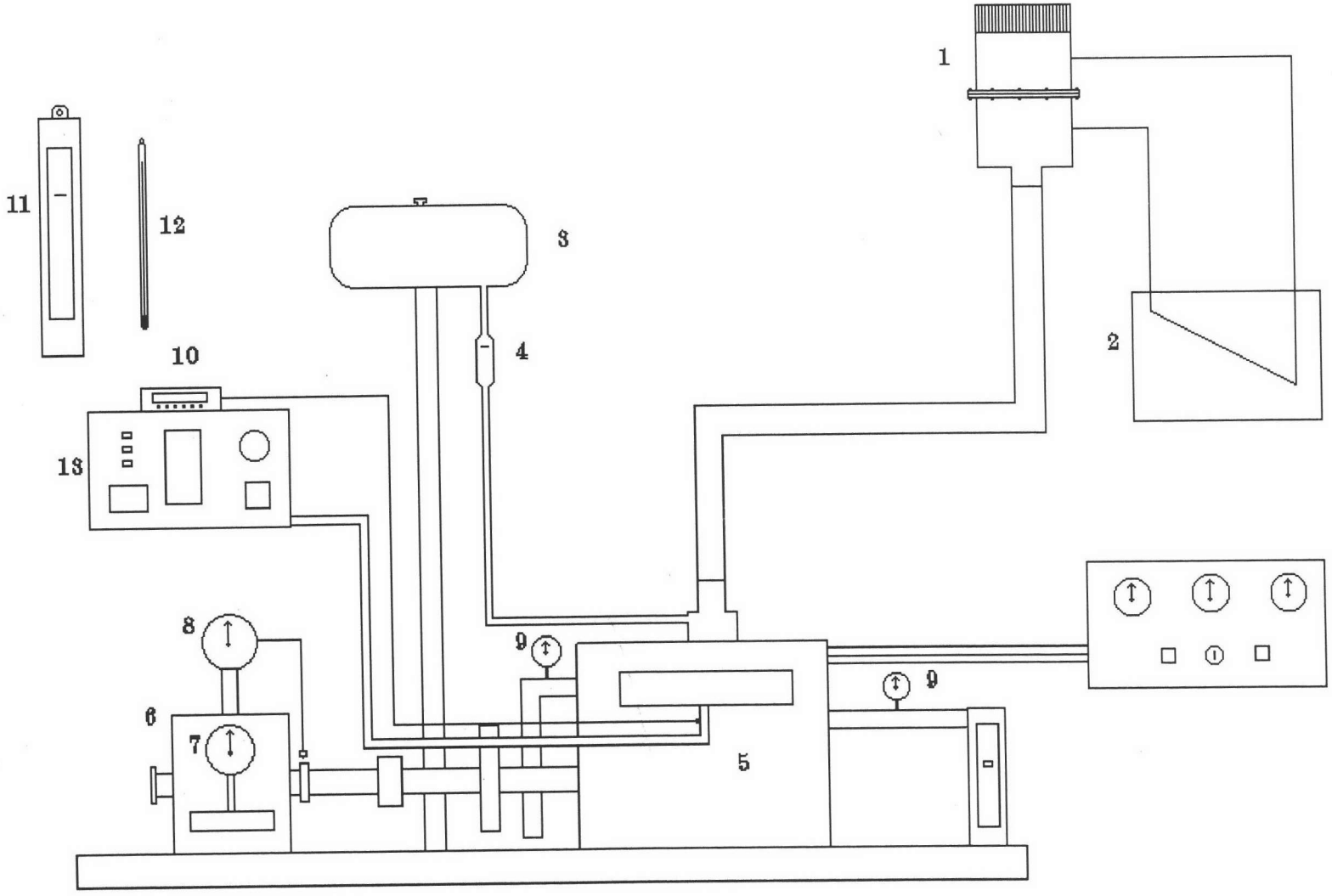
จากกราฟรูปที่ 4.9 พบว่า กำลังของเครื่องยนต์ขึ้นอยู่กับองศาการจุดระเบิด ซึ่งมีผลต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งที่ 0°BTDC จะเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ที่สุด ส่วนที่ 5°BTDC และ 10°BTDC เกิดการจุดระเบิดล่วงหน้ามากขึ้น กำลังที่ได้จะต่ำกว่าตามลำดับ เนื่องจากมีการเผาไหม้ที่ตรงจังหวะทำให้เกิดการน็อคของเครื่องยนต์

พิจารณากราฟรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) กับกำลังของเครื่องยนต์ (B_p) พบว่า η_{th} มีค่าสูงสุดที่องศาการจุดระเบิด 0°BTDC แต่ที่ 5°BTDC และ 10°BTDC จะมีค่าน้อยกว่าตามลำดับ ซึ่งที่ 0°BTDC สามารถเปลี่ยนพลังงานในรูปเชื้อเพลิงเป็นกำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพดีที่สุด

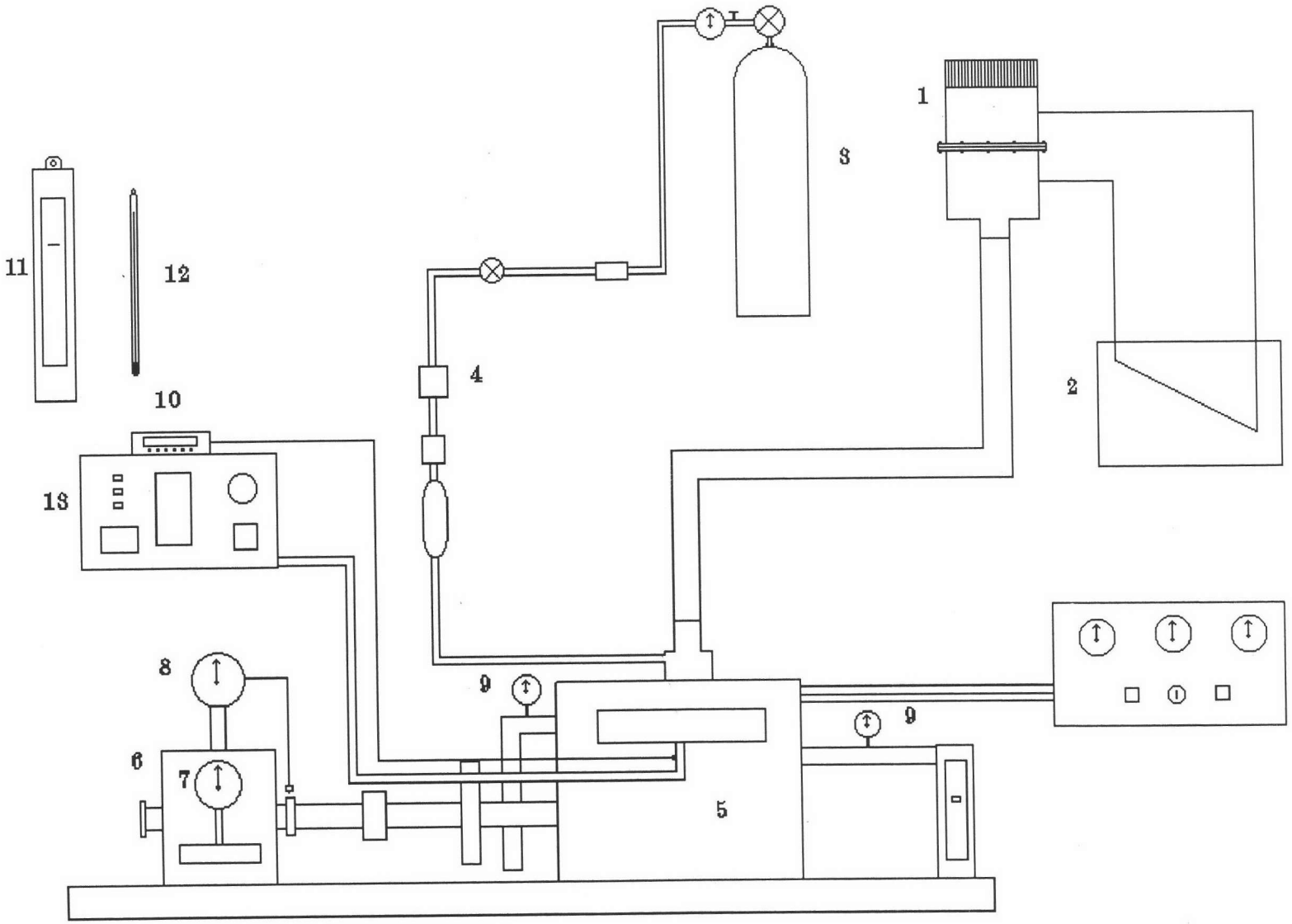
เมื่อพิจารณาความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (bsfc) ที่ต่ำที่สุดดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.14 โดยพิจารณาร่วมกับกราฟที่ 4.11 พบว่าที่ 0°BTDC จะมีค่า bsfc ลดลงในขณะที่ η_{th} เพิ่มขึ้น และ bsfc จะต่ำสุดเมื่อ η_{th} สูงสุด ในองศาการจุดระเบิดค่านี้ เครื่องยนต์จะมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานจากเชื้อเพลิงเป็นกำลังได้ดีที่สุด ใช้เชื้อเพลิงน้อยที่สุด โดยให้กำลังสูงสุด เมื่อเครื่องยนต์เริ่มมีอาการน๊อคภายหลังการเพิ่มองศาการจุดระเบิด η_{th} จะลดลงจึงทำให้ bsfc มีค่าเพิ่มขึ้น

ดังนั้นสรุปได้ว่า องศาการจุดระเบิดที่เหมาะสมของการใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์แกสโซลีนจะมีค่าที่ 0°BTDC โดยให้กำลังสูงสุด ประหยัดที่สุดและไม่เกิดการน๊อค

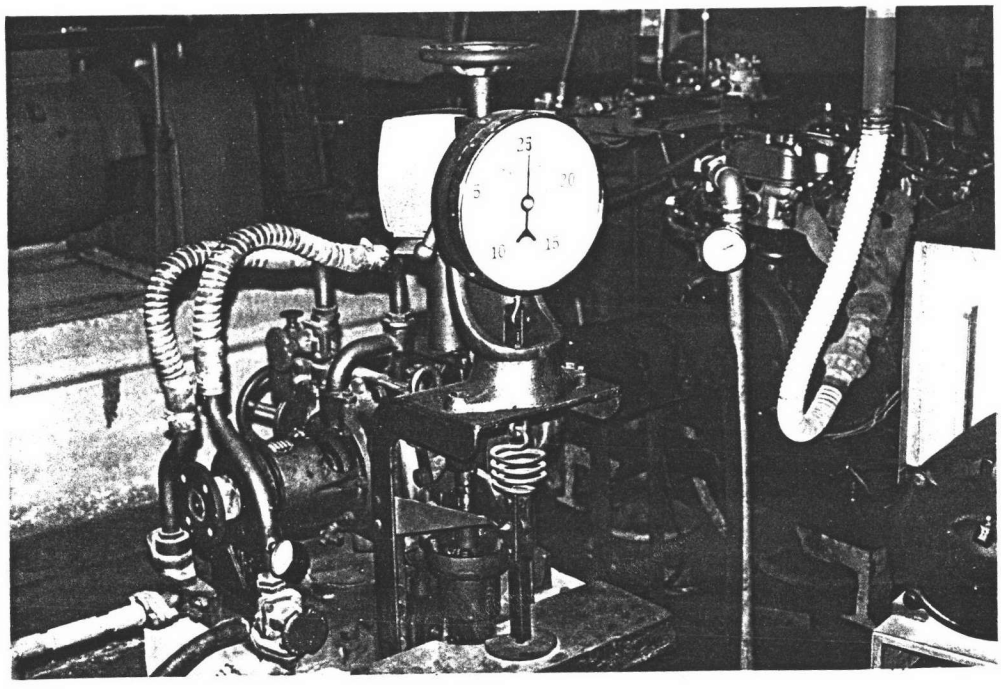
เมื่อเปรียบเทียบ η_{th} ระหว่างการใช้น้ำมันเบนซินที่ 5°BTDC กับเมื่อใช้ไฮโดรเจนที่ 0°BTDC พบว่าการใช้แกสไฮโดรเจนสามารถเพิ่ม η_{th} ได้ถึง 3.45 ถึง 3.57 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำให้ bsfc ลดลง



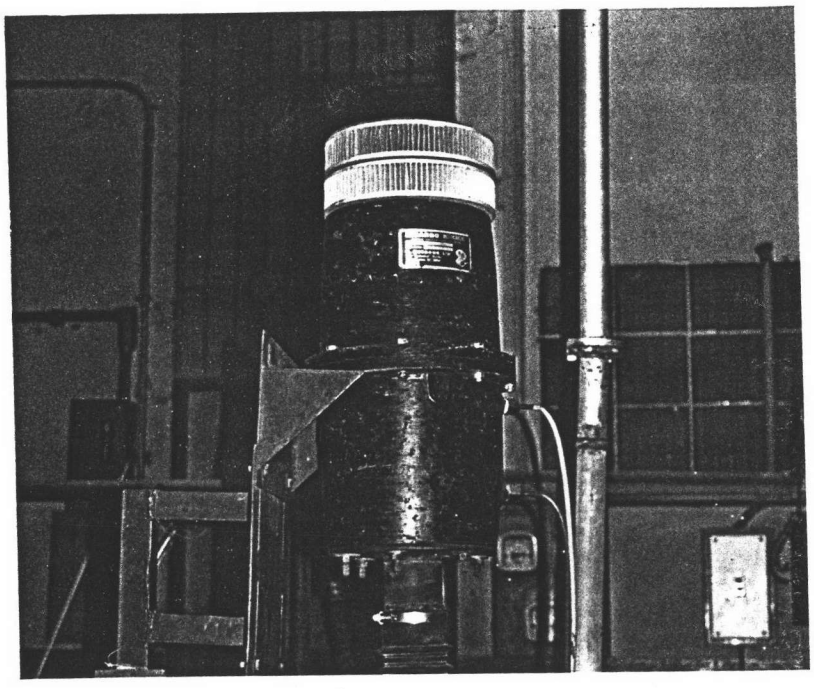
รูปที่ 4.1 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดสอบเครื่องยนต์แกสโซลีน



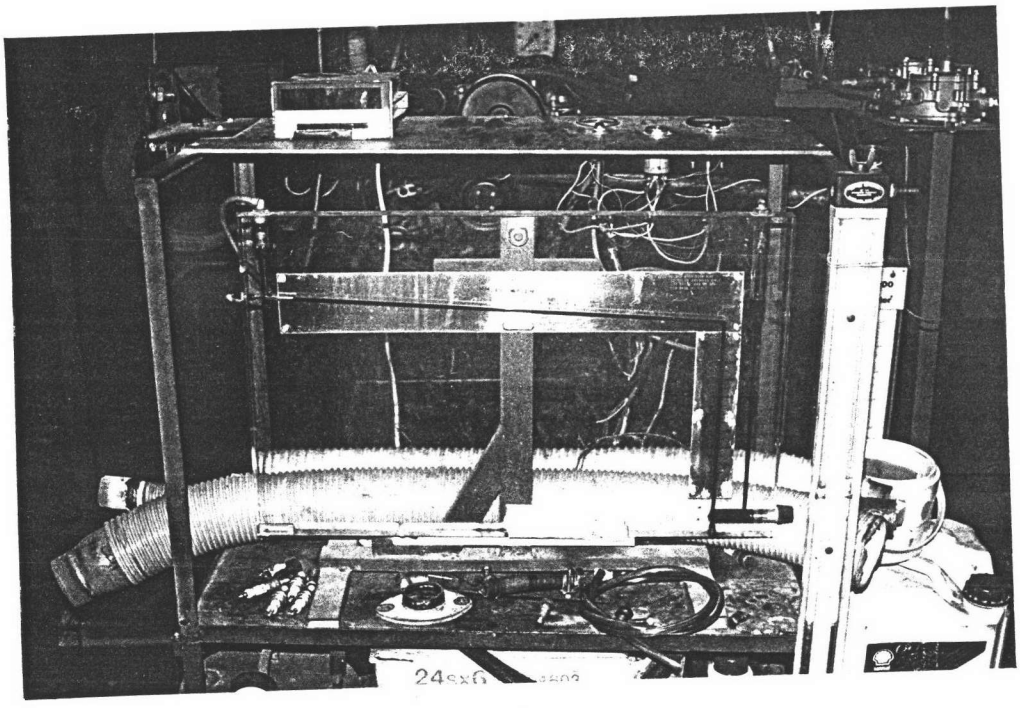
รูปที่ 4.2 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดสอบเครื่องยนต์ไฮโดรเจน



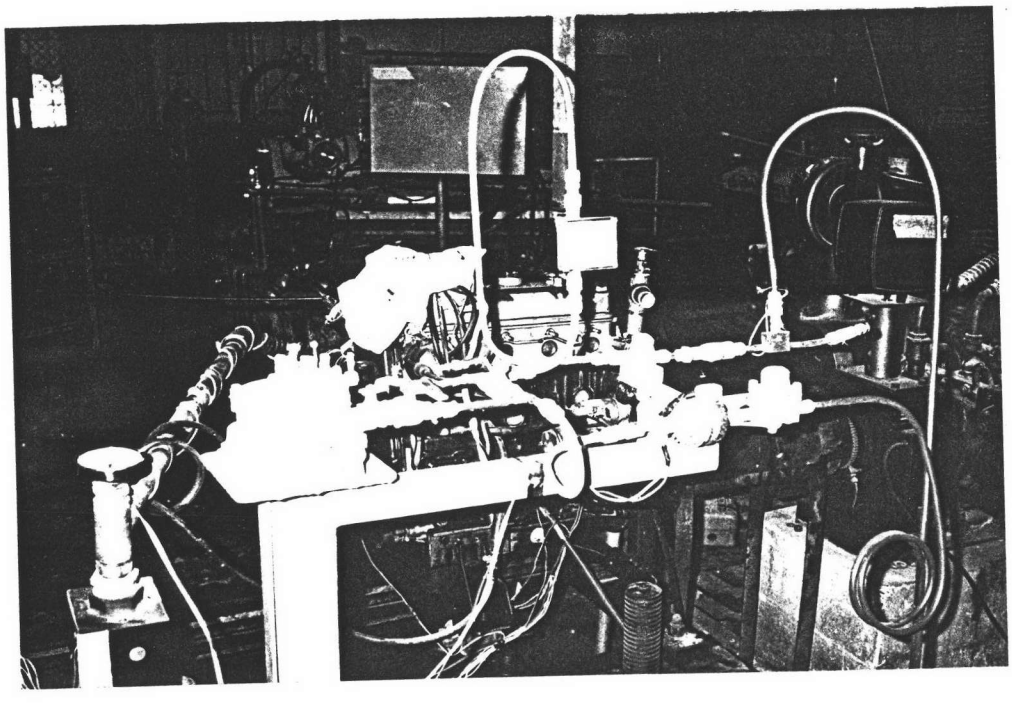
รูปที่ 4.3 แสดง Hydraulic dynamometer



รูปที่ 4.4 แสดงเครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ

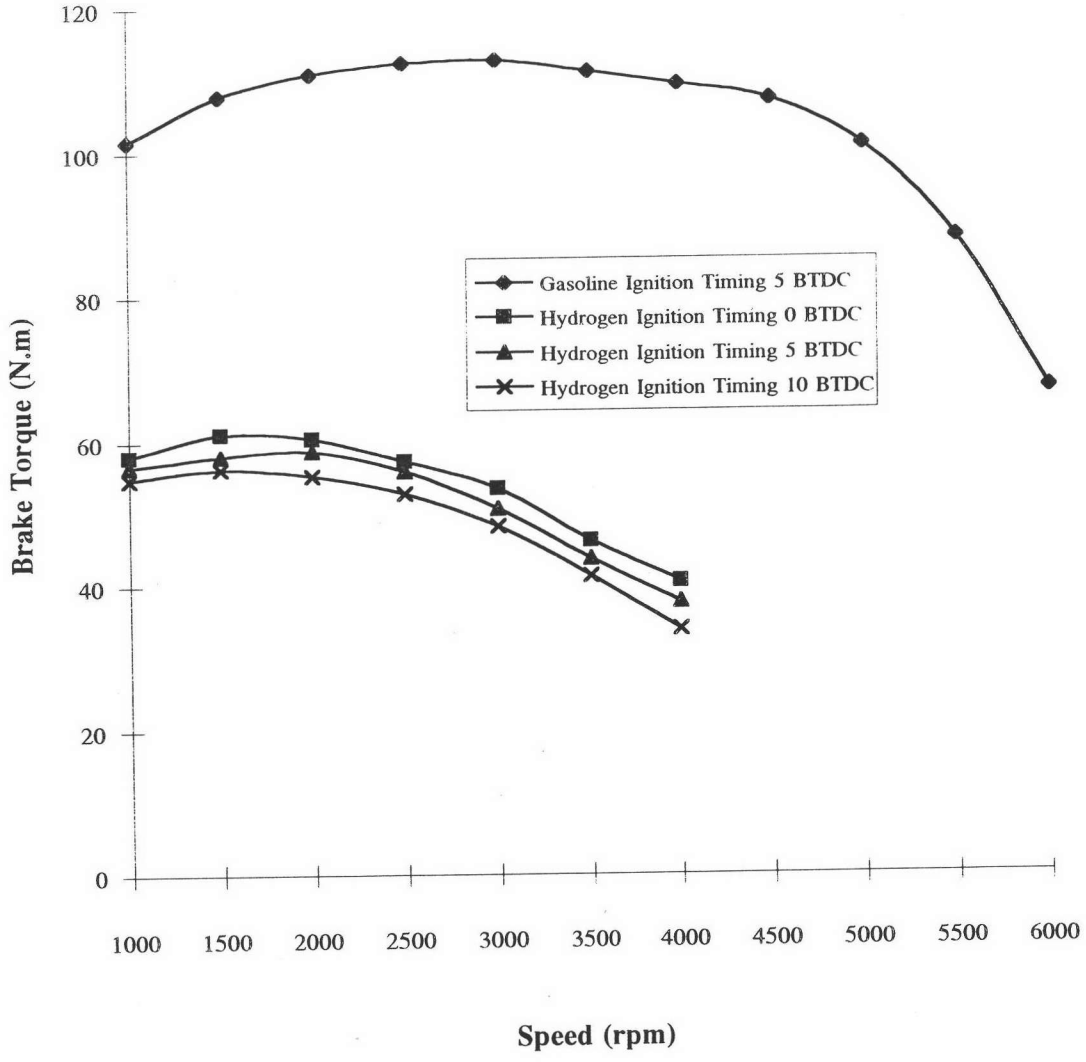


รูปที่ 4.5 แสดงมาโนมิเตอร์

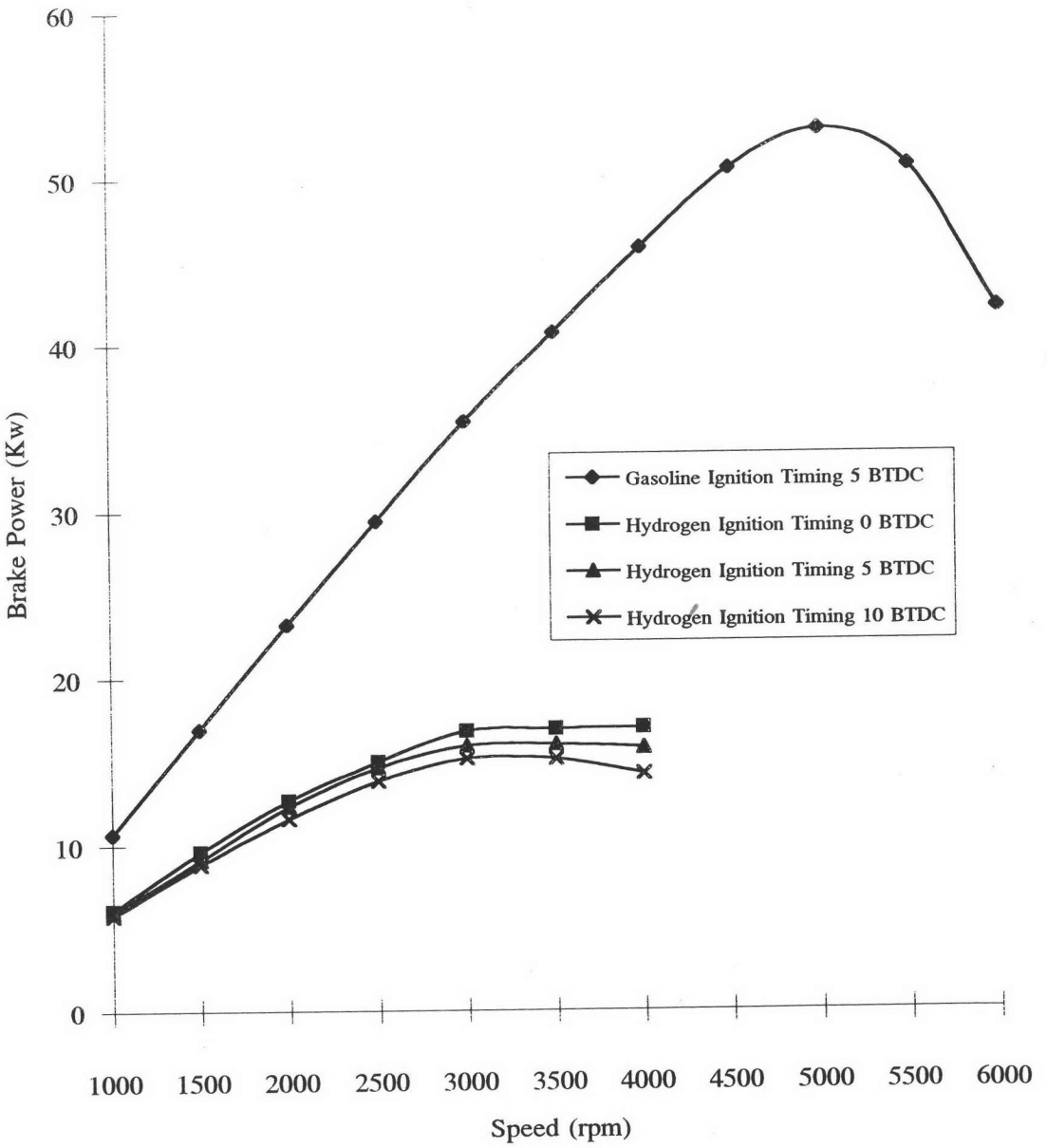


รูปที่ 4.6 แสดงเครื่องวัดอัตราการไหลของแกสไฮโดรเจน

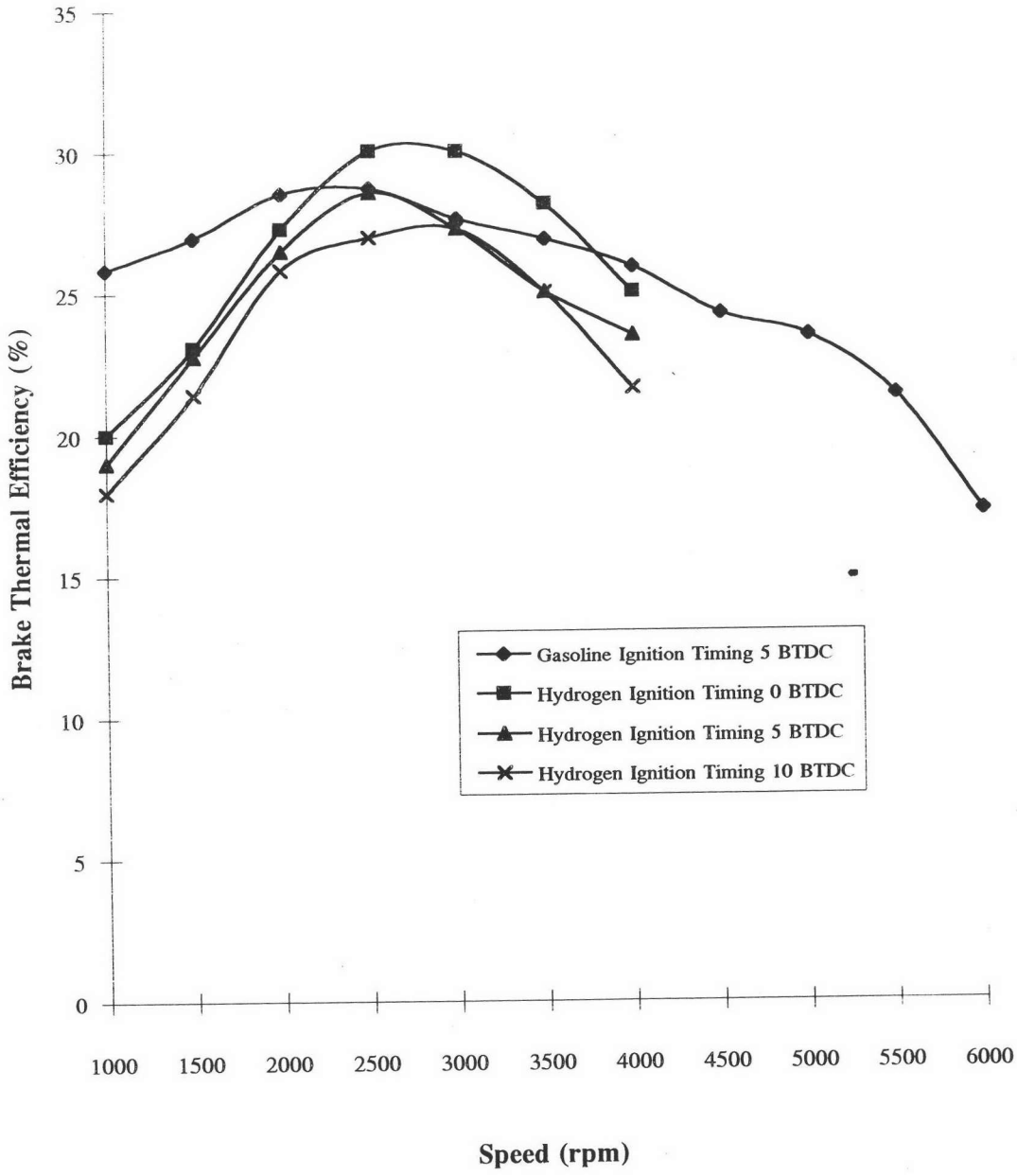
รูปที่ 4.7 แสดงเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย



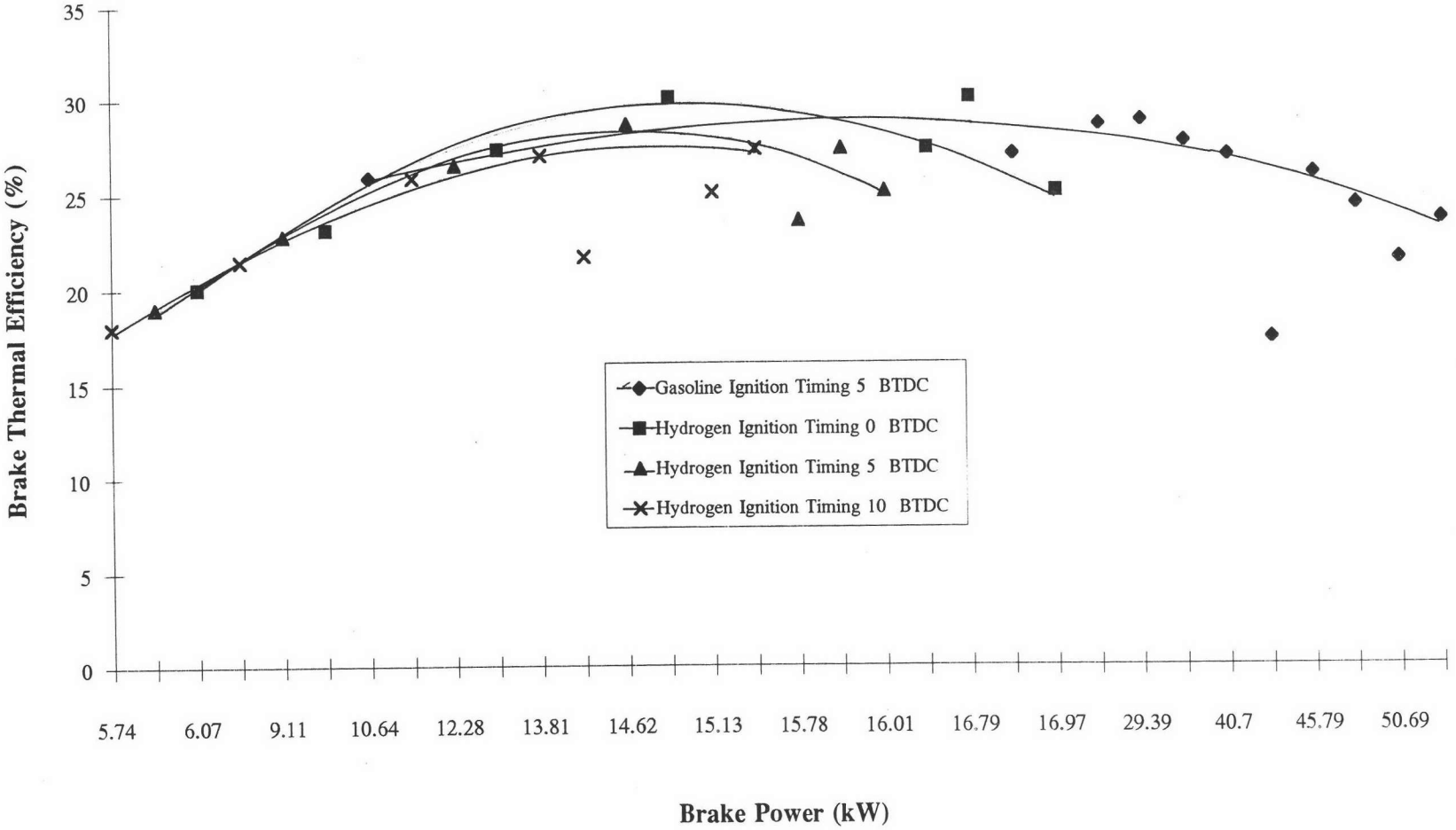
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ



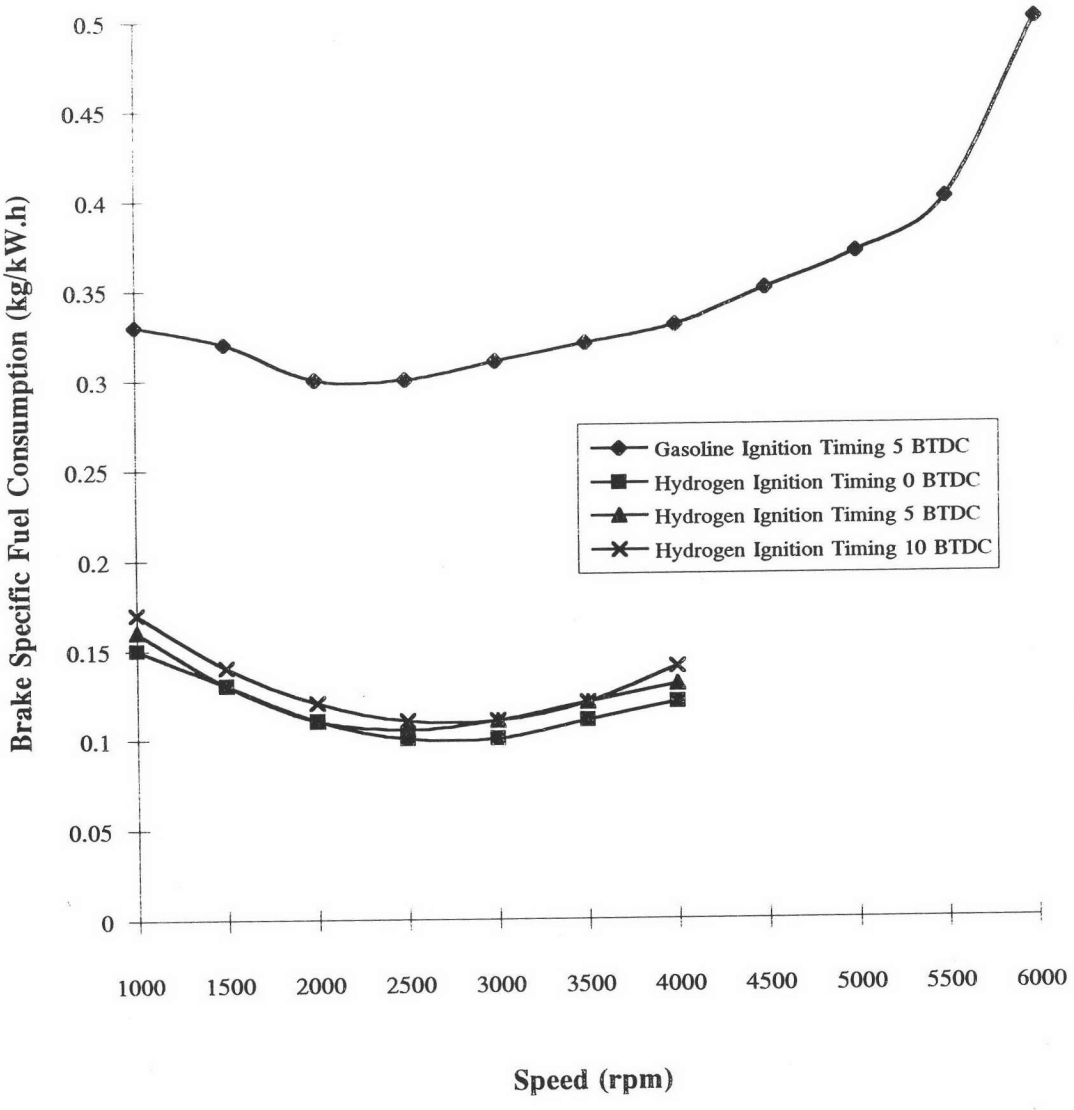
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความเร็วรอบ



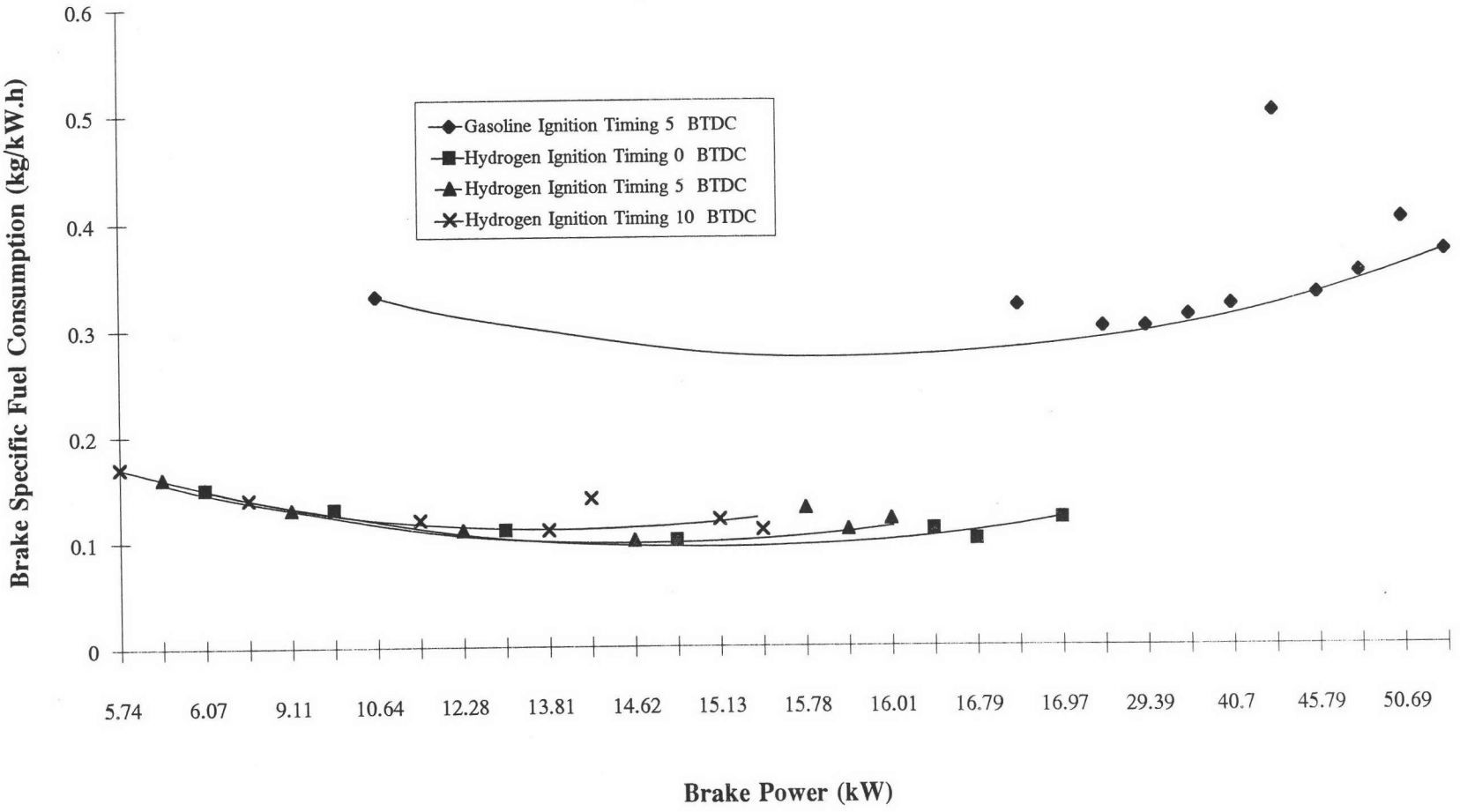
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับความเร็ว



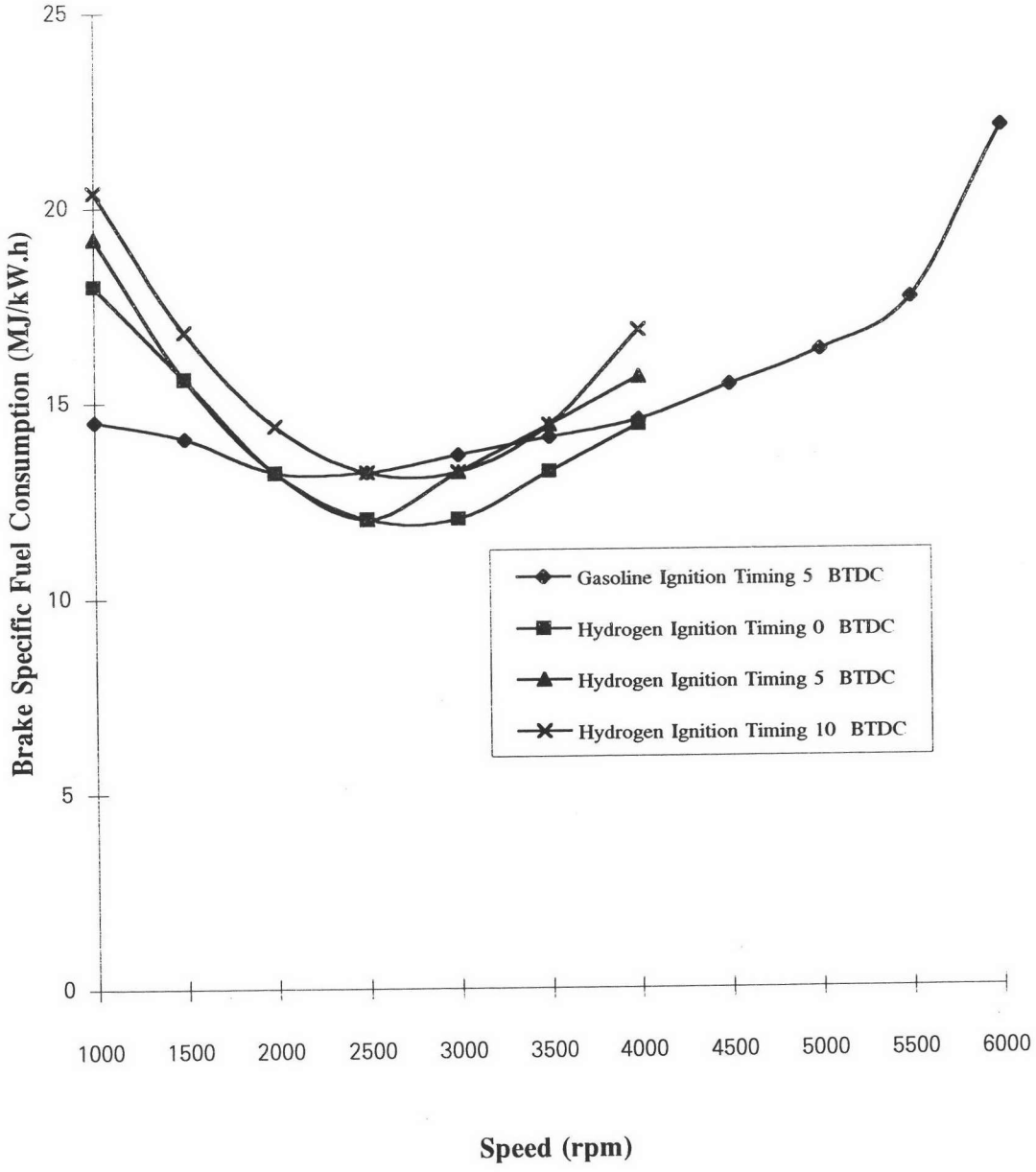
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับกำลัง



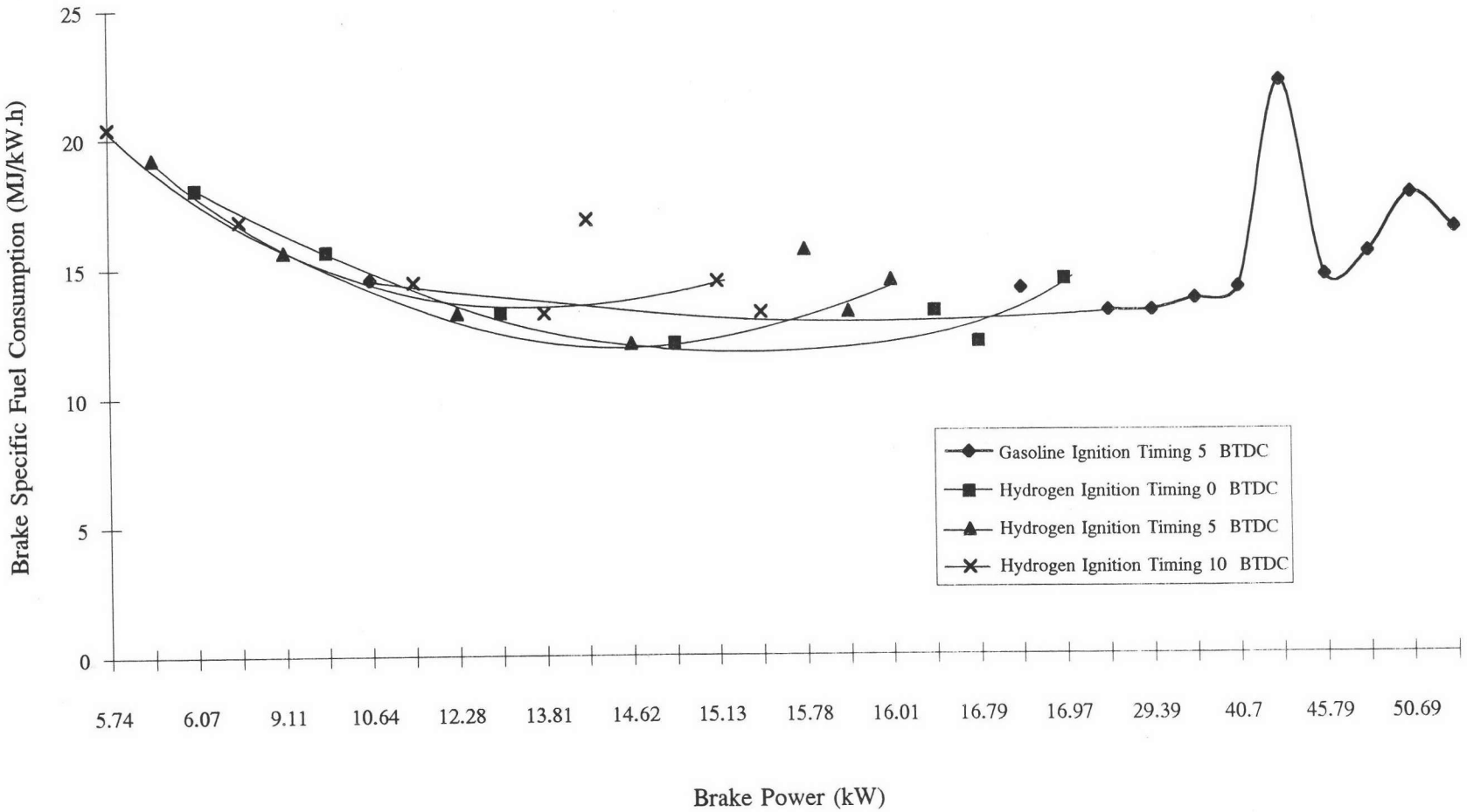
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะกับความเร็วรอบ



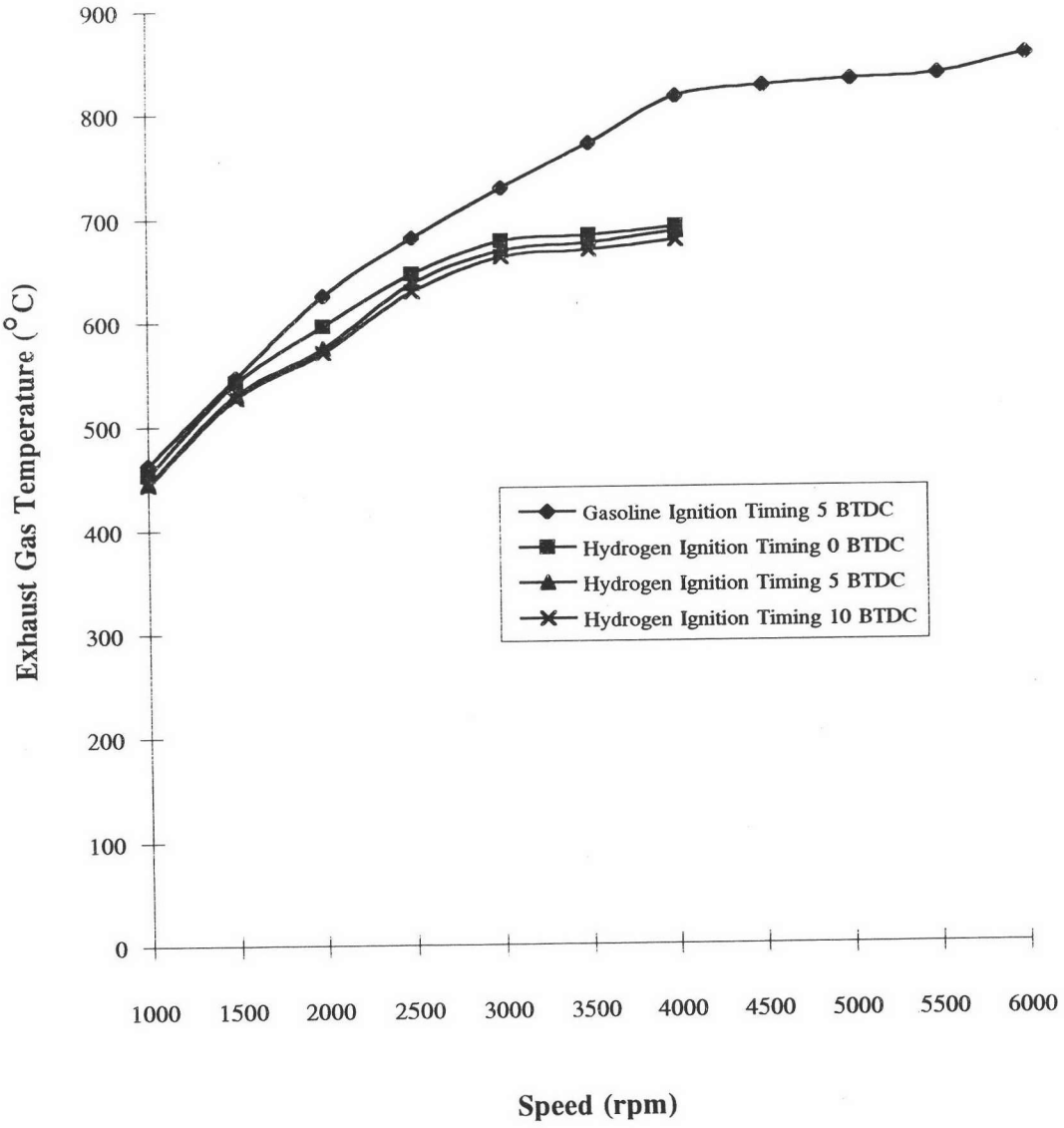
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะกับกำลัง



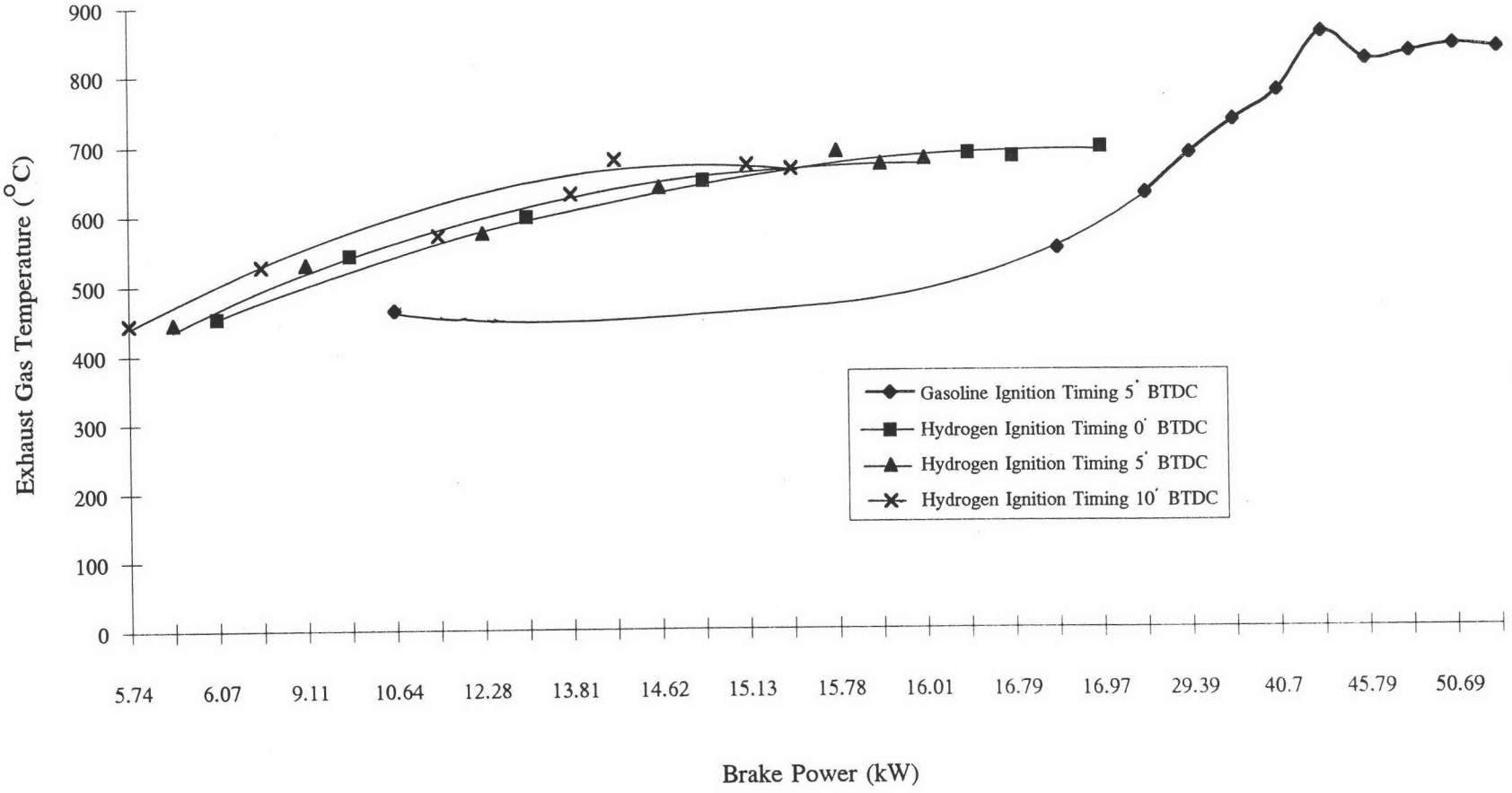
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (เมื่อคิดเป็นค่าความร้อน)กับความเร็วรอบ



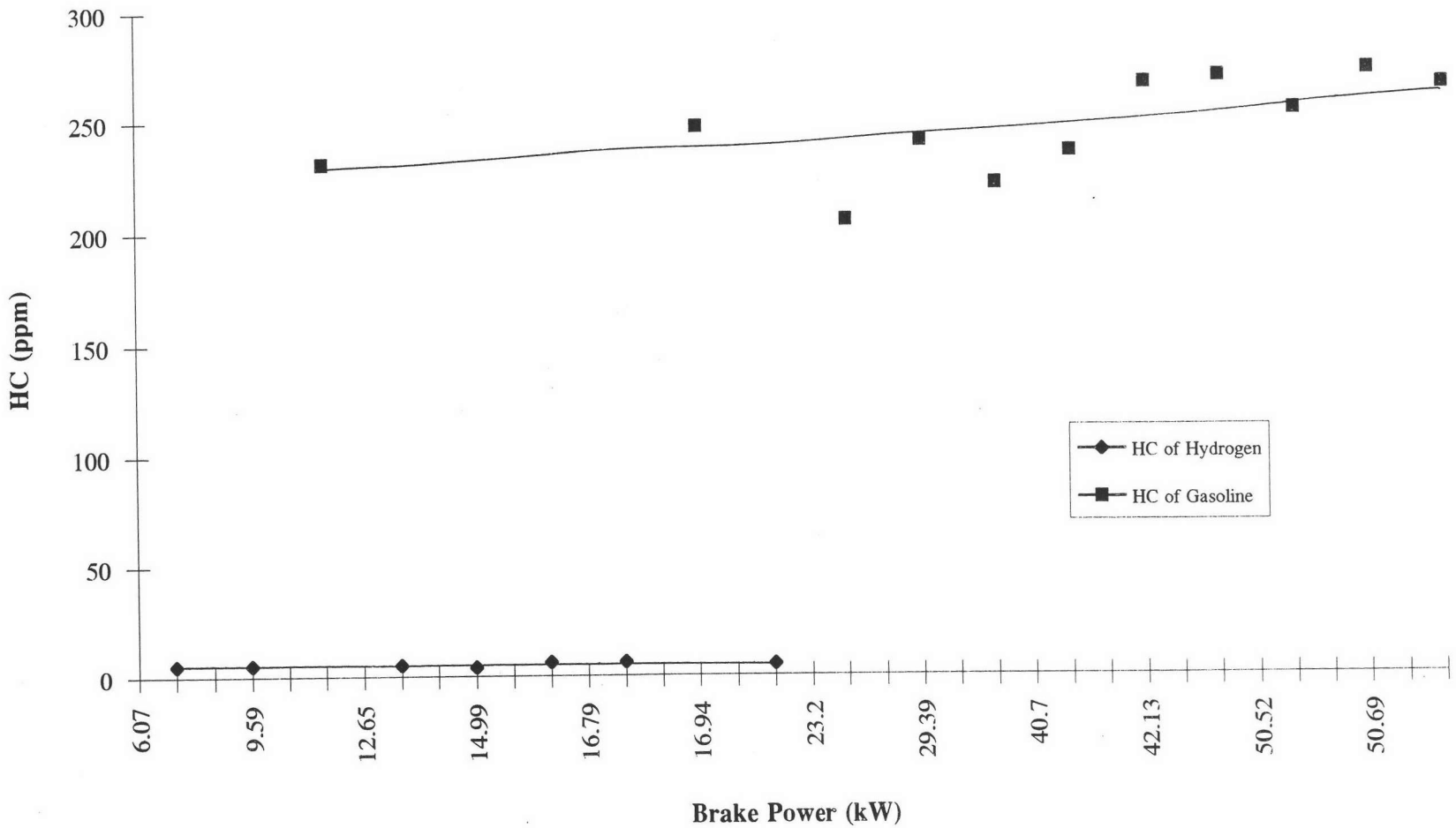
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ(เมื่อคิดเป็นค่าความร้อน)กับกำลัง



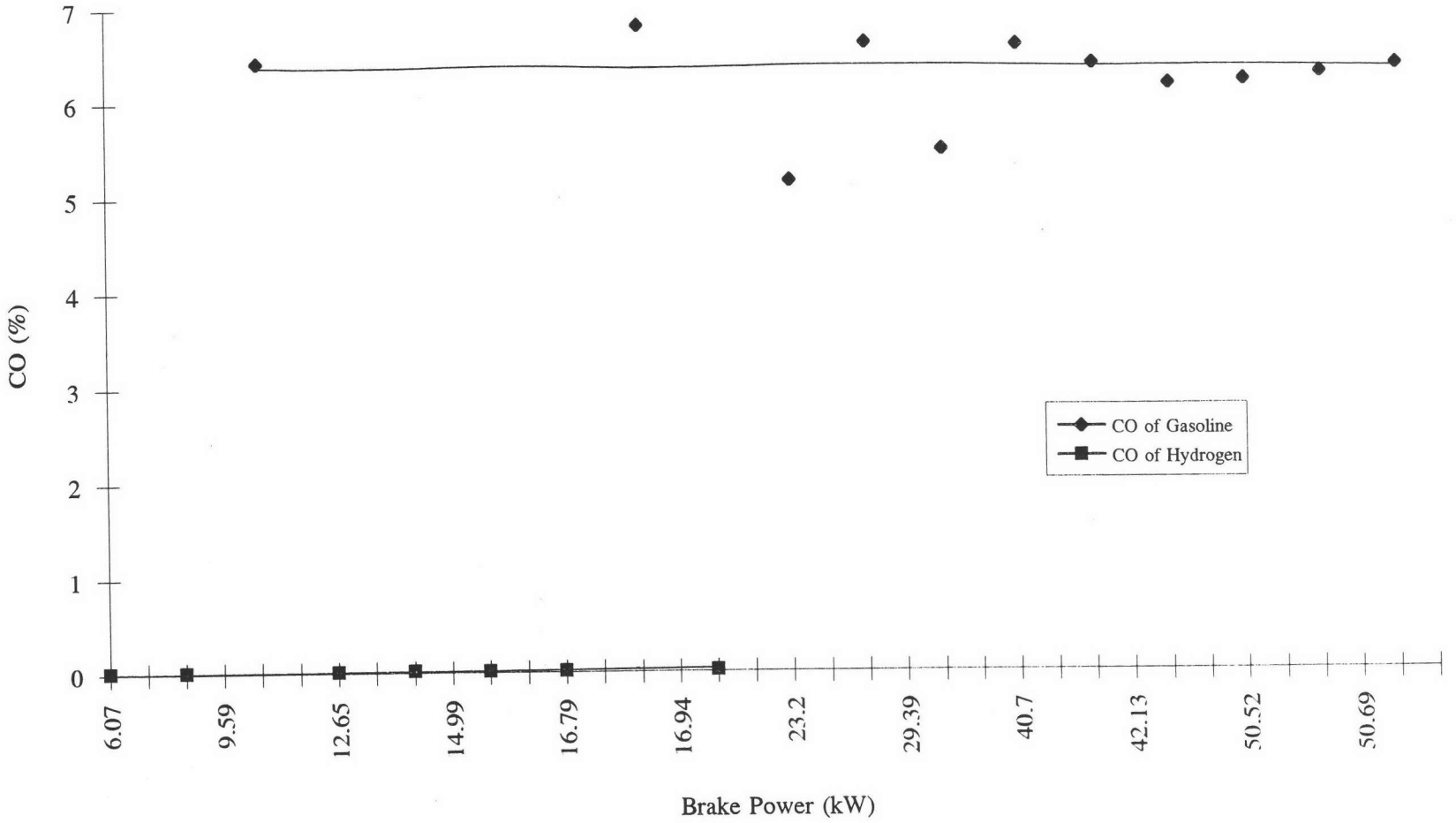
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแกสไอเสียกับความเร็ว



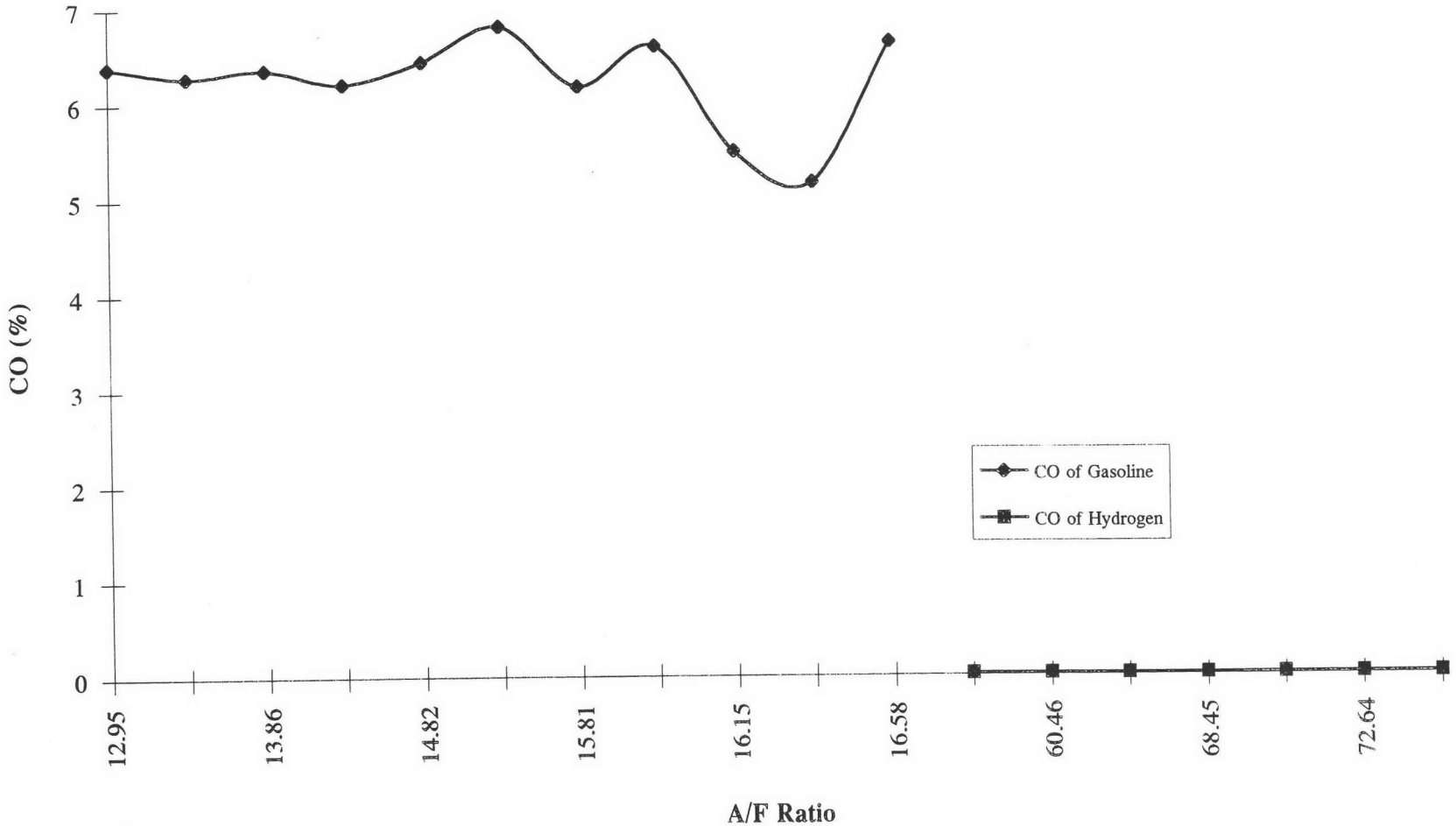
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแกสไอเสียกับกำลัง



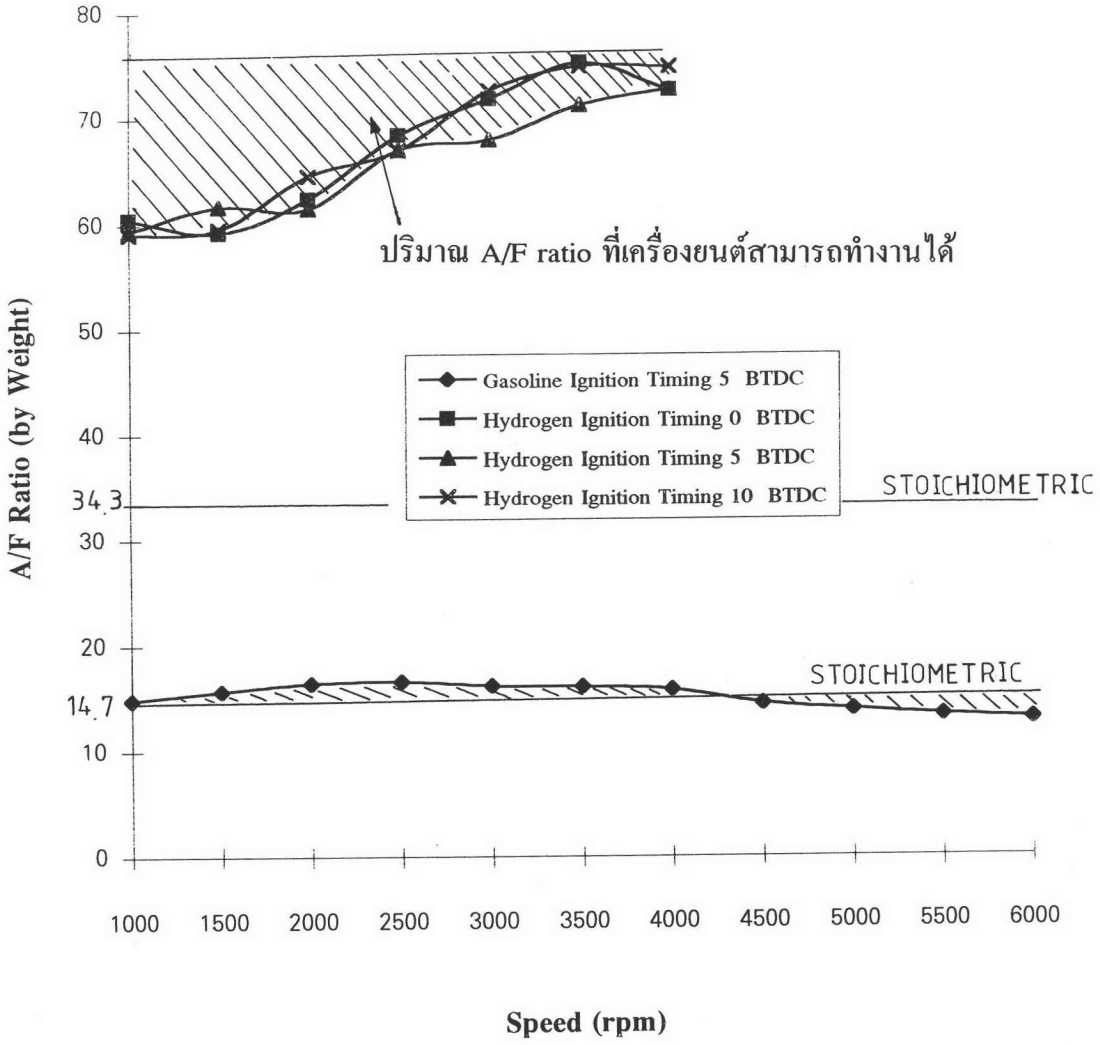
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างHCกับกำลัง



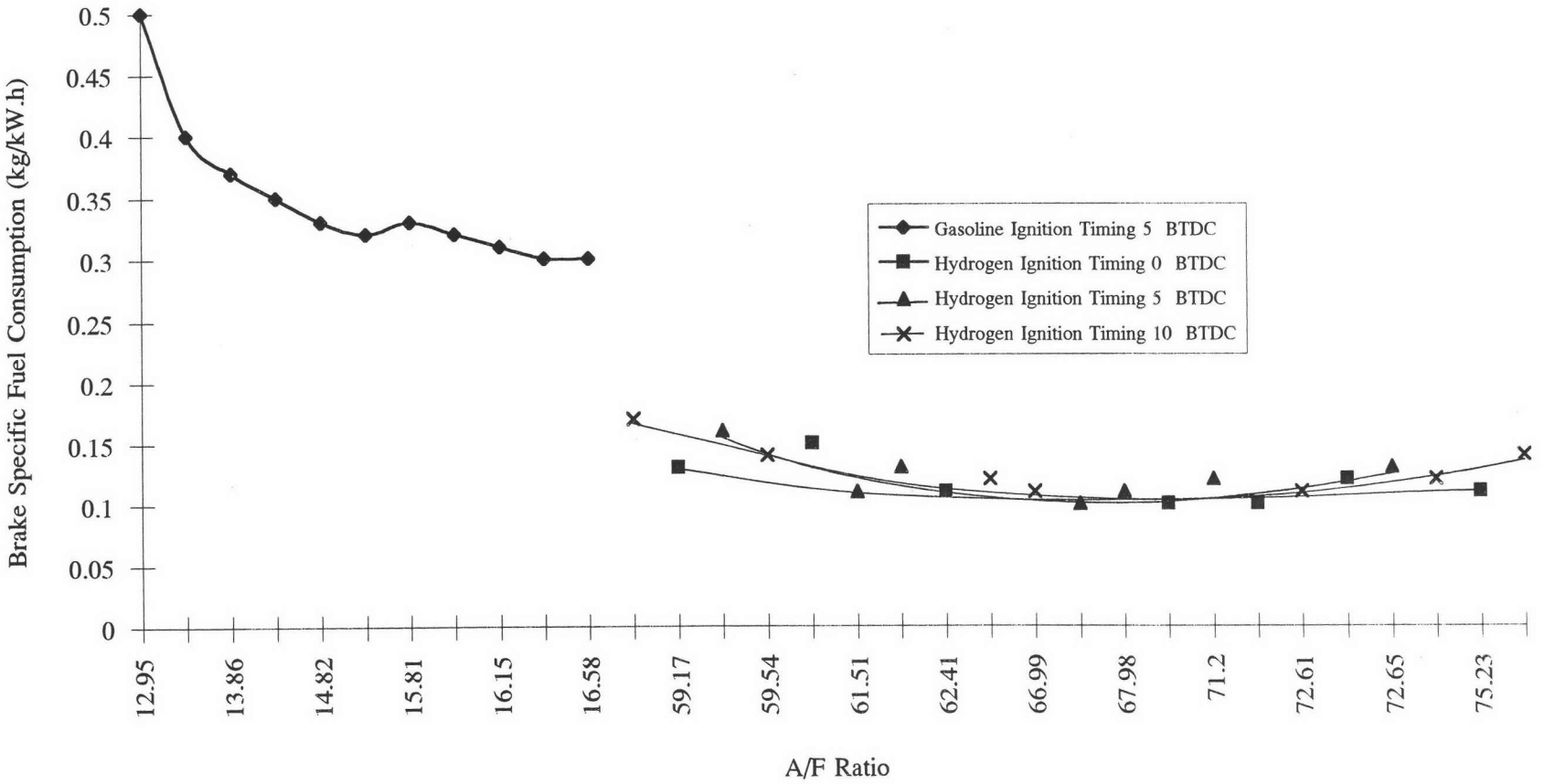
รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างCOกับกำลัง



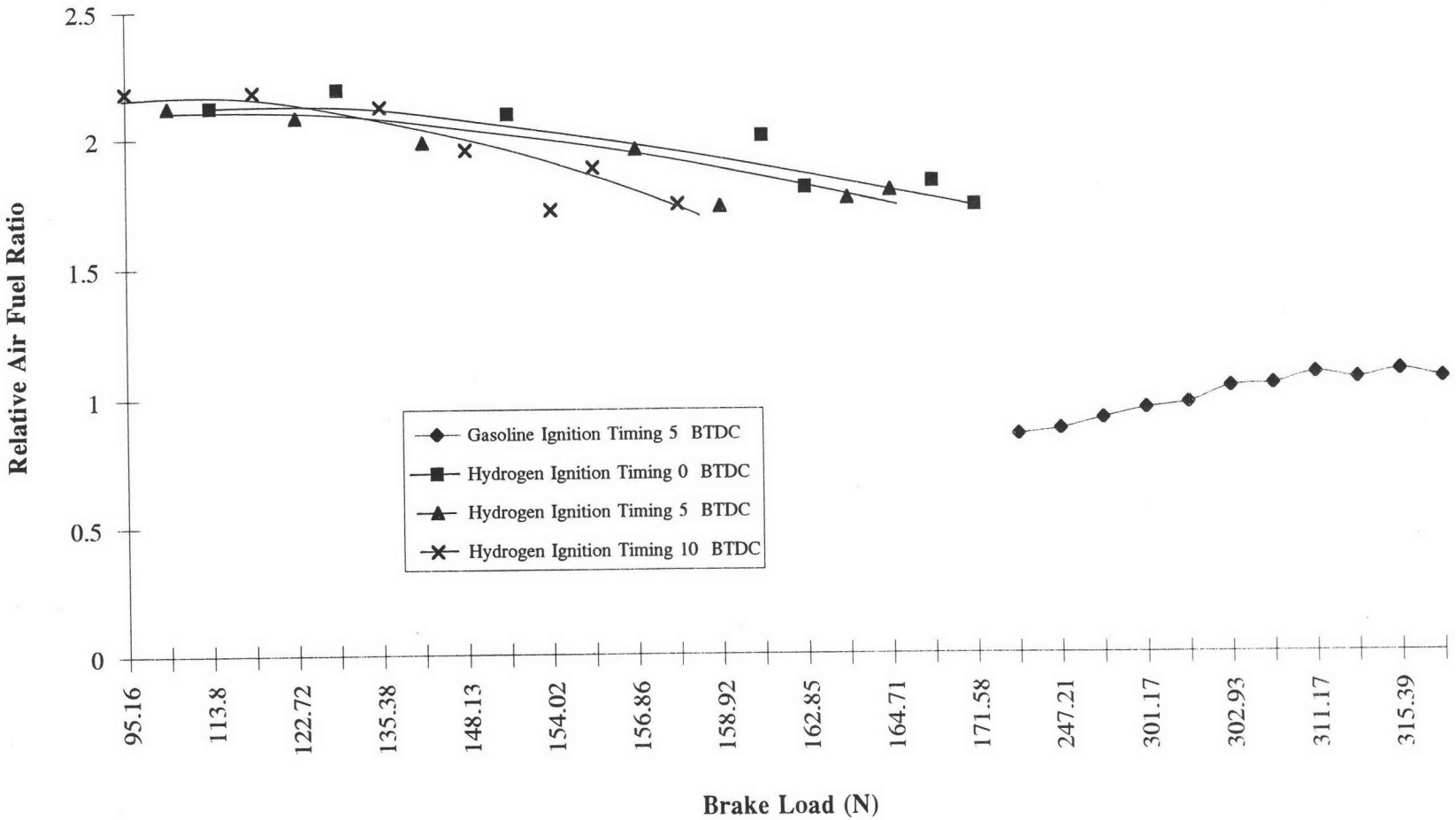
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างCOกับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง



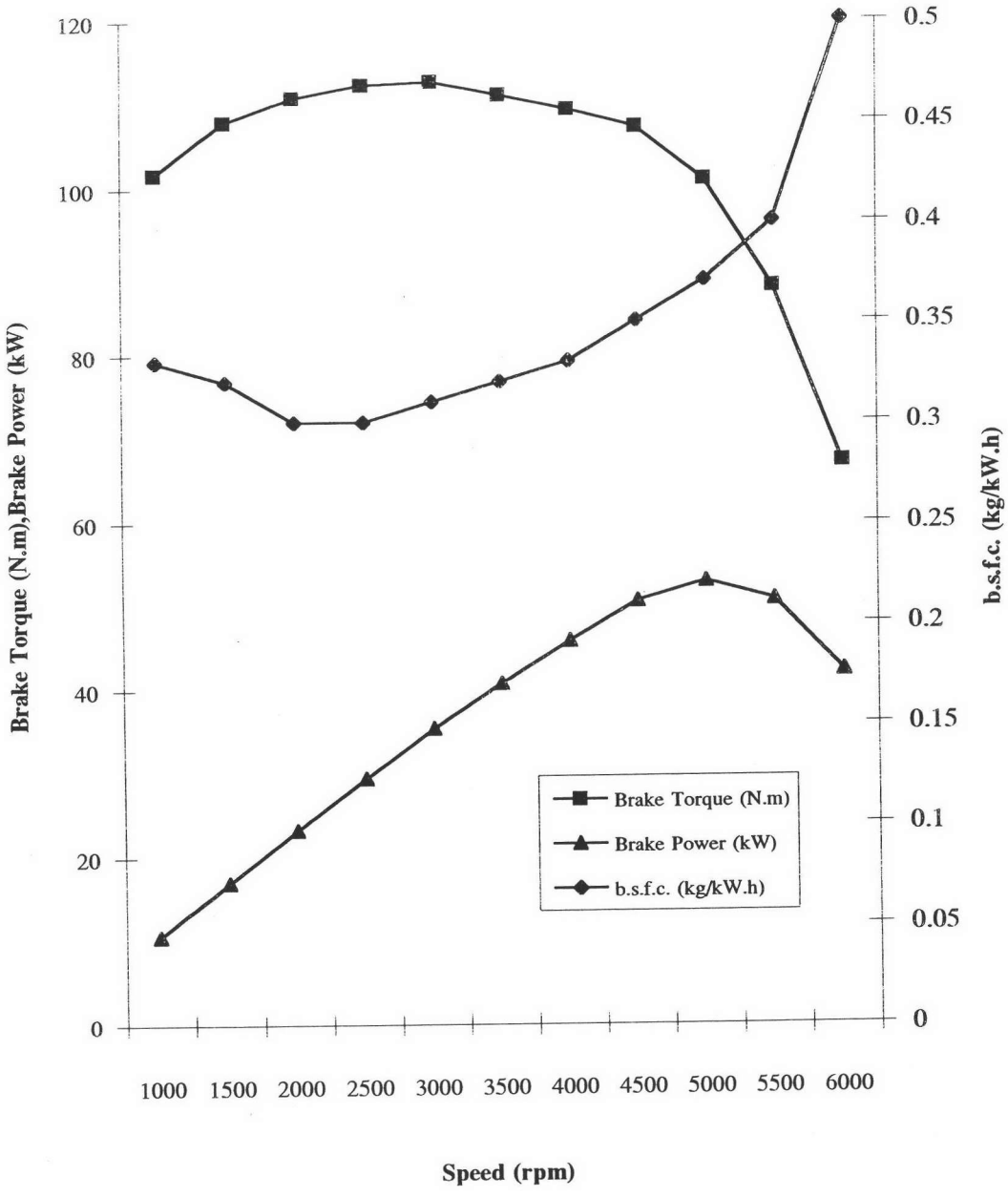
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง
กับความเร็วรอบ



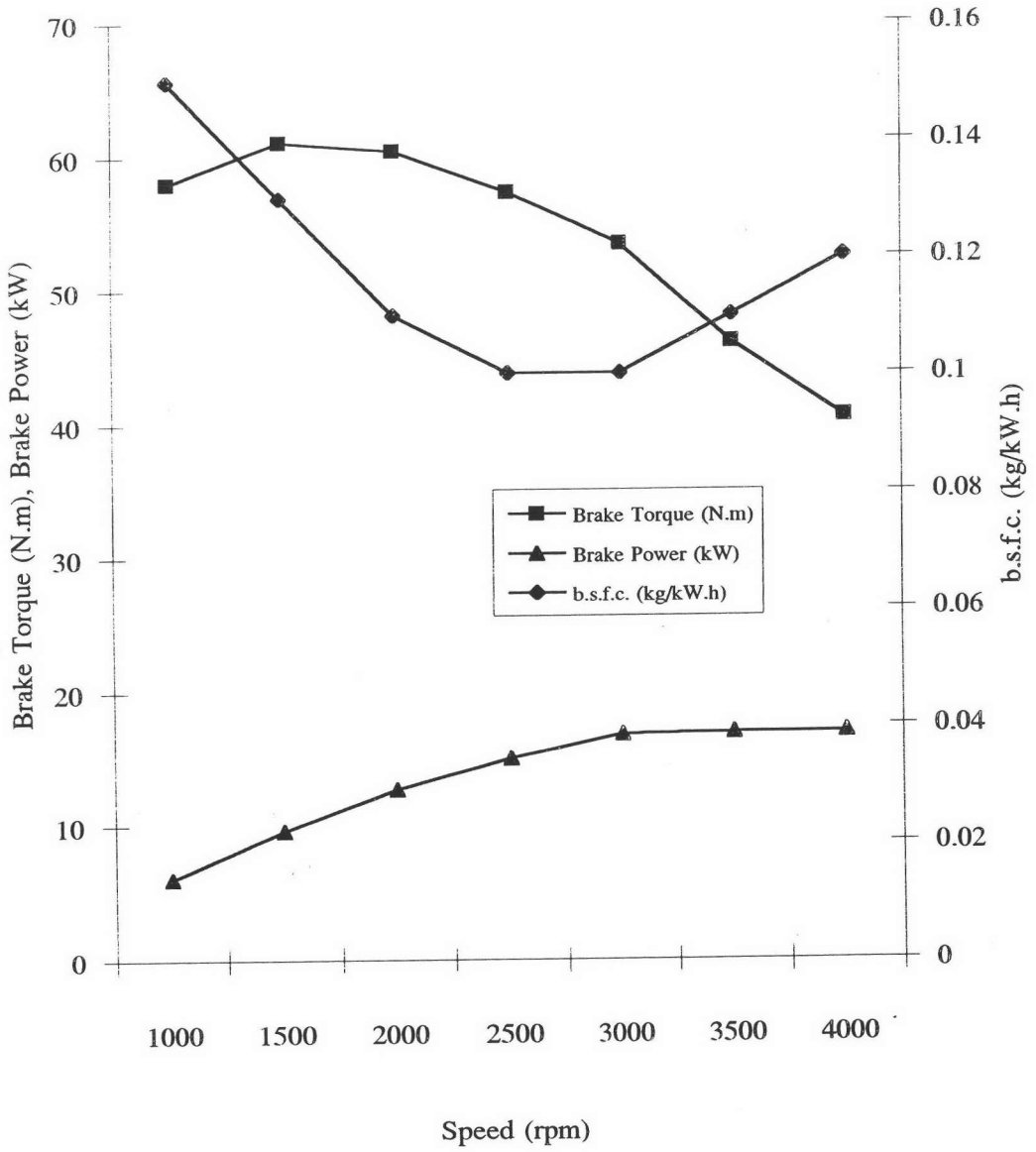
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะกับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงกับภาระ



รูปที่ 4.24 แสดงสมรรถนะเครื่องยนต์แกสโซลีน



รูปที่ 4.25 แสดงสมรรถนะเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ 0°BTDC