บทที่ 3

วิธีการดัดแปลงเครื่องยนต์

การศึกษาเกี่ยวกับ การนำแกสไฮโดรเจนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซล เครื่องยนต์ดีเซลที่จะนำมาทดลองใช้แกสไฮโดรเจน จะต้องได้รับการดัดแปลง เพื่อให้สามารถใช้แกสไฮโดรเจนได้ โดยการดัดแปลงจะทำการดัดแปลงระบบหลัก ๆ ของเครื่องยนต์ เช่น ดัดแปลงกำลังอัดของเครื่องยนต์ ดัดแปลงระบบเชื้อเพลิง ระบบจุดระเบิด ระบบความปลอดภัย เป็นต้น

การดัดแปลงกำลังอัด

เครื่องยนต์ดีเซลที่จะนำมาทดลองเป็นเครื่องยนต์ 4 จังหวะ ระบายความร้อนด้วยน้ำ ชนิดอ่างน้ำอยู่นิ่ง มีรายละเอียดที่สำคัญคือ

บริษัทผู้ผลิต	KUBOTA MODEL ET 115
จำนวนสูบ	1 สูบ ชนิดสูบนอน
เส้นผ่าศูนย์กลาง × ระยะชัก	94 × 90 mm.
ความจุกระบอกสูบ	624 cm^3
อัตราส่วนกำลังอัด	21
ชนิดของการจ่ายเชื้อเพลิง	ฉีดตรงห้องเผาไหม้แบบเปิด

จากข้อมูลของเครื่องที่แสดงข้างต้น พบว่า กำลังอัดของเครื่องยนต์เท่ากับ 21 : 1 ซึ่งเป็นกำลังอัดซึ่งสูง เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลจุดระเบิดด้วยแรงอัด ซึ่งต้องใช้กำลังอัดสูง ๆ แต่เครื่องยนต์ไฮโดรเจนไม่สามารถจุดระเบิดด้วยแรงอัดได้ จำเป็นต้องมีอุปกรณ์จุดระเบิดซึ่งได้แก่หัวเทียน กำลังอัดของเครื่องอัดจึงไม่จำเป็นต้องสูง และถ้ากำลังอัดสูงอาจทำให้หัวเทียนไม่ทำงาน เครื่องยนต์ไฮโดรเจนจึงต้องมีกำลังอัดต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซล

เมื่อพิจารณาฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซลที่นำมาทดลอง ซึ่งเป็นฝาสูบของเครื่องยนต์ชนิดฉีดเชื้อเพลิงตรง (Direct injection) มีห้องเผาไหม้อยู่บนหัวลูกสูบ การดัดแปลงกำลังอัดของเครื่องยนต์จึงทำได้ยาก แต่เนื่องจากเครื่องยนต์รุ่นนี้สามารถเปลี่ยนฝาสูบ โดยใช้ฝาสูบของเครื่องยนต์ซึ่งมีระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบ Indirect injection โดยมีห้องเผาไหม้ช่วยแบบหมุนวน (Swirl or Turbulent combustion chamber) อยู่บนฝาสูบ ซึ่งเมื่อใช้ฝาสูบของรุ่นนี้แล้วเครื่องยนต์จะมีห้องเผาไหม้ 2 ห้อง คือ อยู่บนหัวลูกสูบ และอยู่บนฝาสูบอย่างละห้อง ซึ่งผลจากการเปลี่ยนฝาสูบจะทำให้กำลังอัดของเครื่องยนต์ลดลง และสามารถคำนวณหากำลังอัดใหม่ของเครื่องยนต์ได้ต่อไปนี้

พิจารณาเครื่องยนต์ก่อนการดัดแปลงฝาสูบ

$$V_d = 624 \quad cm^3$$

จากสมการ $$r_c = \frac{V_d + V_c}{V_c}$$

$$21 = \frac{624 + V_c}{V_c}$$

$$22\ V_c = 624$$

$$V_c = 31.2 \quad cm^3$$

พิจารณาเครื่องยนต์หลังการเปลี่ยนฝาสูบ

V_d = 624 cm^3

V_c = V_c ของเครื่องยนต์ก่อนการเปลี่ยนฝาสูบ + V_c ของเครื่องยนต์หลังการเปลี่ยนฝาสูบ

จากภาพหน้าตัดฝาสูบของเครื่องยนต์ indirect ซึ่งมีห้องเผาไหม้รองชนิด swirl chamber และห้องเผาไหม้หลักเหนือลูกสูบดังรูปที่ 4 ซึ่งสามารถหาปริมาตรของห้องเผาไหม้รวมได้

$$= \frac{4\pi}{6}(1.64)^3 + [\pi(37)^2]\ 2.04$$

$$= \quad 9.24 + 21.93$$

$$= \quad 31.17 \quad cm^3$$

ดังนั้น V_c ของเครื่องยนต์หลังจากการเปลี่ยนฝาสูบ $= \quad 31.2 + 31.17$

$$= \quad 62.37 \quad cm^3$$

กำลังอัดของเครื่องยนต์ภายหลังการดัดแปลง $= \quad \frac{624 + 62.37}{62.37}$

$$= \quad 11.0$$

ดังนั้นกำลังอัดของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนในการทดลองครั้งนี้เท่ากับ 11 : 1

การดัดแปลงระบบเชื้อเพลิง

ระบบเชื้อเพลิง เป็นระบบที่สำคัญอีกระบบหนึ่งของเครื่องยนต์ที่ จะต้องทำการดัดแปลง เนื่องจากจะต้องใช้ไฮโดรเจนซึ่งเป็นเชื้อเพลิงซึ่งอยู่ในสถานะแกส ทดแทนน้ำมันดีเซล ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลว ดังนั้นอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งอยู่ในระบบเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลเดิม จึงต้องทำการดัดแปลงและต้องติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เพิ่ม เพื่อให้เครื่องยนต์สามารถใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงได้ การดัดแปลงระบบเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลเดิมประกอบด้วย

1. <u>การดัดแปลงฝาสูบของเครื่องยนต์</u>

ฝาสูบ เป็นชิ้นส่วนที่สำคัญสำหรับเครื่องยนต์โดยเฉพาะในเครื่องยนต์ดีเซล บนฝาสูบจะมีหัวฉีดดีเซลติดตั้งอยู่ ในการดัดแปลงฝาสูบจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อติดตั้งหัวฉีดแกสไฮโดรเจนซึ่งได้ทำการออกแบบ และสร้างเรียบร้อยแล้วแทนหัวฉีดดีเซล ซึ่งขั้นตอนการดัดแปลงฝาสูบ มีดังต่อไปนี้

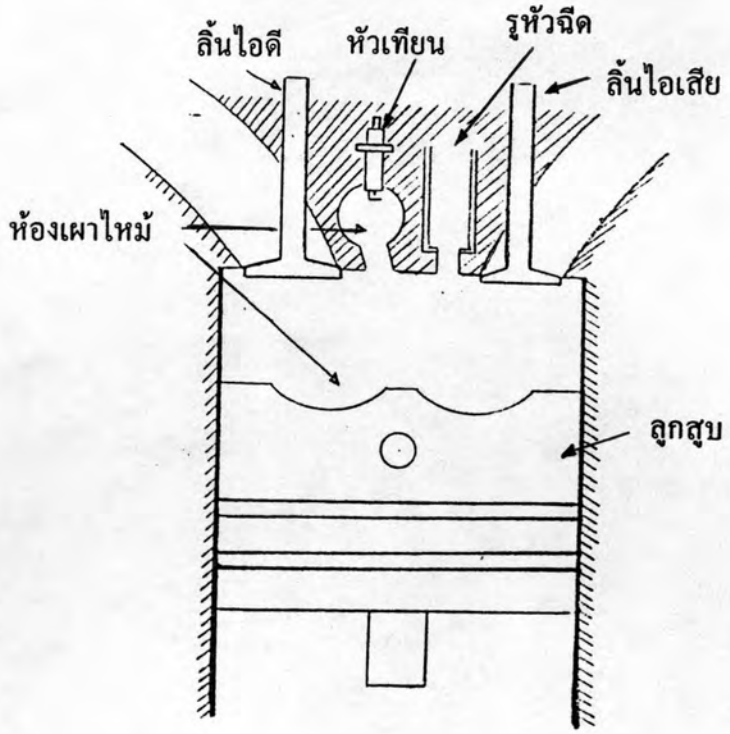
1.1 ถอดหัวฉีดดีเซลบนฝาสูบ ซึ่งได้ทำการดัดแปลงอัตราส่วนกำลังอัดเรียบร้อยแล้ว

1.2 เจาะรูบนฝาสูบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ม.ม. เพื่อจะใช้เป็นรูหัวฉีดแกสไฮโดรเจน

1.3 ทำปลอกเหล็กหล่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 20.2 ม.ม. เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 18 ม.ม. ทาน้ำยาป้องกันน้ำรั่วซึมที่ผิวด้านนอกของปลอก ทำการสวมอัดปลอกเหล็กหล่อดังกล่าวลงบนฝาสูบ เพื่อเป็นปลอกสำหรับใส่หัวฉีดแกสไฮโดรเจน

1.4 ใส่หัวฉีดแกสไฮโดรเจน ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 18 ม.ม. ลงในปลอกเหล็กหล่อ หลังจากนั้นจึงทำแผ่นเหล็กประกบหัวฉีดไฮโดรเจน เพื่อยึดหัวฉีดแกสไฮโดรเจนเข้ากับฝาสูบให้แน่นด้วยนอตขนาด M8 เพื่อป้องกันหัวฉีดขยับและกำลังอัดของเครื่องยนต์รั่ว

1.5 ทดสอบการรั่วซึมของน้ำหล่อเย็น โดยใส่น้ำลงในช่องน้ำหล่อเย็นซึ่งอยู่บนฝาสูบ และใช้แรงดันอัดเพื่อตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำหล่อเย็นบนฝาสูบ ซึ่งถ้าพบการรั่วซึมจะต้องทำการแก้ไข แต่ถ้าไม่พบฝาสูบที่ได้รับการดัดแปลงก็สามารถนำไปใช้งานได้



รูปที่ 4 แสดงภาพหน้าตัดฝาสูบของเครื่องยนต์ที่ได้รับการดัดแปลง

2. ติดตั้งระบบเชื้อเพลิงไฮโดรเจน

ระบบเชื้อเพลิงไฮโดรเจน เป็นระบบซึ่งสำคัญระบบหนึ่ง โดยเป็นระบบซึ่งจะต้องติดตั้งเข้ากับเครื่องยนต์ ซึ่งจะใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากเป็นระบบซึ่งไม่มีในเครื่องยนต์ดีเซลเดิม ระบบเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ไฮโดรเจนประกอบด้วย

2.1 ถังบรรจุแกสไฮโดรเจน (Hydrogen tank) เป็นถังเหล็กเหนียวบรรจุแกสไฮโดรเจนแรงดันประมาณ 130 บาร์ ซึ่งจะมีค่าประมาณ 70 เปอร์เซนต์ของแรงดันซึ่งถังสามารถรับได้ ปริมาตรของแกสที่แรงดันในการบรรจุประมาณ อุณหภูมิเท่ากับและน้ำหนักของแกส

2.2 วาล์วควบคุมแรงดันของแกส (Pressure regulator)ของบริษัท CROMET model500 เป็นอุปกรณ์ซึ่งใช้ควบคุมแรงดันของแกสไฮโดรเจน วาล์วควบคุมแรงดันของแกสสามารถบอกแรงดันของแกสที่อยู่ในถัง และควบคุมแรงดันของแกสที่ปล่อยออกมาใช้งานได้

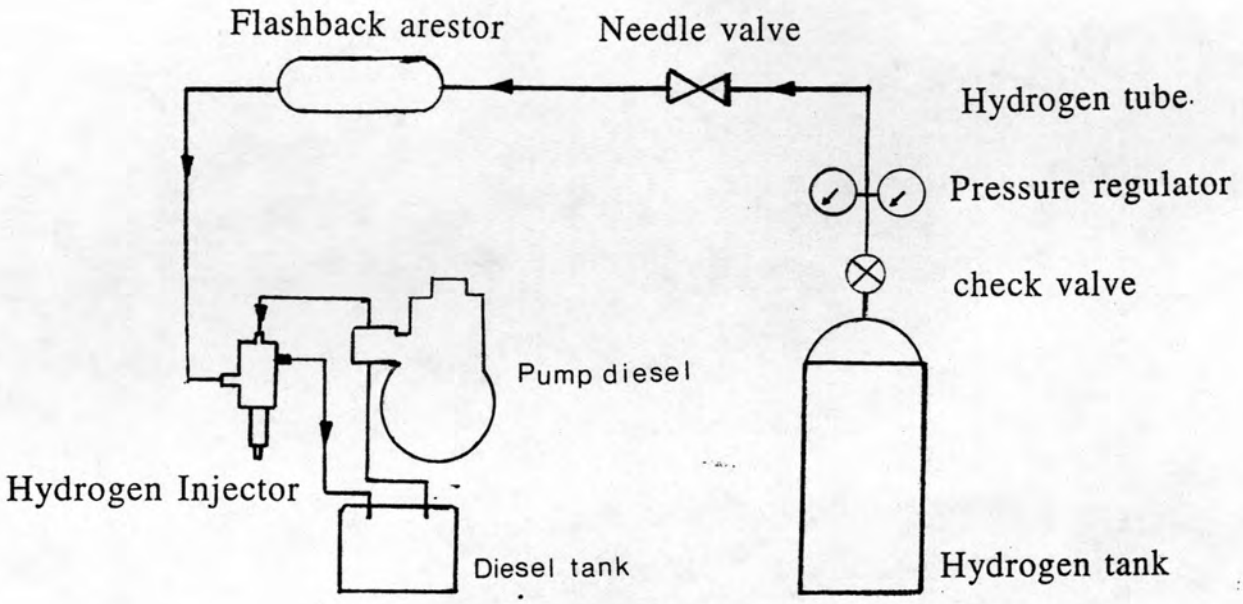
2.3 ท่อทางเดินแกสไฮโดรเจน (Hydrogen tube) เป็นท่อนำแกสไฮโดรเจนจากถังไปยังเครื่องยนต์ ท่อที่ใช้เป็นท่อแสตนเลส เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 6 ม.ม. ความหนา 1 ม.ม.

2.4 วาล์วควบคุมการจ่ายแกสไฮโดรเจน เป็นวาล์วชนิดวาล์วเข็ม (Needle valve) ใช้ควบคุมปริมาณแกสไฮโดรเจนจากถังเข้าสู่เครื่องยนต์

2.5 อุปกรณ์ป้องกันไฟย้อนกลับ (Flashback arrestor)WITT modelBF83DN ติดตั้งเพื่อ ป้องกันไม่ให้เปลวไฟ ซึ่งอาจเกิดขึ้นที่เครื่องยนต์ย้อนกลับเข้าสู่ถังไฮโดรเจน

2.6 ข้อต่อ (connecting) จะใช้ในการต่อเชื่อมท่อนำแกสไฮโดรเจนเข้ากับถังวาล์วควบคุมแรงดัน วาล์วควบคุมการจ่ายแกสไฮโดรเจน อุปกรณ์ป้องกันไฟย้อนกลับและหัวฉีดแกสไฮโดรเจนเข้าด้วยกัน

แผนผังแสดงการติดตั้งระบบเชื้อเพลิงแกสไฮโดรเจนสำหรับการทดลองครั้งนี้แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงแผนผังการติดตั้งระบบเชื้อเพลิงแกสไฮโดรเจน

การดัดแปลงระบบจุดระเบิด

เนื่องจาก เครื่องยนต์ที่นำมาทดลองใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงเป็นเครื่องยนต์ดีเซลมีกำลังอัดสูง และนอกจากนั้นน้ำมันดีเซลยังมีอุณหภูมิในการสันดาปต่ำ (340 °C) จึงสามารถจุดระเบิดได้ด้วยตัวเอง ไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วยจุดระเบิด แต่ในกรณีของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนนอกจากกำลังของเครื่องยนต์จะถูกดัดแปลงจนต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซลแล้ว อุณหภูมิการสันดาปของแกสไฮโดรเจนยังสูงกว่าน้ำมันดีเซล (580 °C) ดังนั้นเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจึงต้องมีอุปกรณ์ช่วยจุดระเบิด ซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะใช้หัวเทียน สำหรับจุดระเบิดเชื้อเพลิง ระบบจุดระเบิดที่ใช้คือ ระบบจุดระเบิดของเครื่องยนต์แกสโซลีน โดยจะทดลองเลือกใช้ระบบจุดระเบิด 2 ระบบ ทำการเปรียบเทียบการทำงานของระบบทั้งสองระบบดังกล่าวได้แก่

1. ระบบจุดระเบิดแบบ CDI (Capacitive Discharge Ignition System) ซึ่งเป็นระบบจุดระเบิดซึ่งนิยมในเครื่องยนต์แกสโซลีน 2 จังหวะ สูบเดียว ลักษณะการติดตั้งระบบจุดระเบิดแบบ CDI เข้ากับเครื่องยนต์ที่นำมาทดลองแสดงดังรูปที่ 10

2. ระบบจุดระเบิดแบบใช้จานจ่ายและคอล์ยเป็นระบบจุดระเบิด ซึ่งใช้ในเครื่องยนต์แกสโซลีนขนาดใหญ่ ในการทดลองครั้งนี้จะใช้จานจ่ายอีเลคทรอนิกส์ของเครื่องยนต์ 4 สูบ และทำการตัดระบบไฟให้เหลือการทำงานเพียงสูบเดียว รูปที่ 11 แสดงการติดตั้งระบบจุดระเบิดแบบใช้จานจ่ายเข้ากับเครื่องยนต์ที่นำมาทดลอง

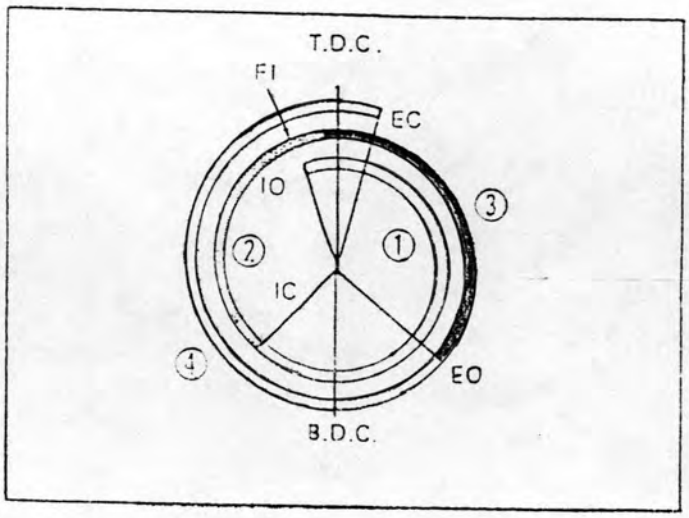
จากการติดตั้งระบบจุดระเบิดทั้งสองระบบเข้ากับเครื่องยนต์ที่นำมาทดลอง พบว่าระบบจุดระเบิดทั้งสองชนิดดังกล่าวจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้ว่า ระบบจุดระเบิดแบบ CDI จะมีข้อดีคือ มีอุปกรณ์ในการทำงานน้อย ดัดแปลงและติดตั้งเข้ากับเครื่องยนต์ที่จะนำมาทดลองได้ง่าย ไม่ต้องใช้แบตเตอรี ข้อเสียของระบบจุดระเบิดแบบนี้คือ เนื่องจากเป็นระบบจุดระเบิดของเครื่องยนต์ 2 จังหวะ ดังนั้นจึงจุด ระเบิดทุกครั้งที่เพลาข้อเหวี่ยงหมุน 1 รอบ ในขณะที่เครื่องยนต์ที่นำมาทดลองเป็นเครื่องยนต์ 4 จังหวะ ดังนั้นจะมีการจุดระเบิดในจังหวะคายไอเสียด้วย นอกจากนั้นระบบจุดระเบิดแบบ CDI จะทำงานโดยอาศัยหลักการของการหมุนให้ขดลวดตัดสนามแม่เหล็กอย่างรวดเร็ว จึงเหมาะกับเครื่องยนต์รอบสูงเช่น เครื่องยนต์แกสโซลีน 2 จังหวะ ส่วนในกรณีของระบบจุดระเบิดแบบใช้แบตเตอรี คอล์ย และจานจ่าย พบว่า ข้อดีคือ เพลาข้อเหวี่ยงหมุน 2 รอบ จะจุดระเบิดเพียงครั้งเดียวสามารถตั้งจังหวะจุดระเบิดได้ ทำงานสม่ำเสมอทั้งที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ต่ำและสูง ส่วนข้อเสียคือ มีอุปกรณ์ในระบบมาก ติดตั้งยาก และต้องใช้แบตเตอรีในระบบ ซึ่งในการทดลองเครื่องยนต์ไฮโดรเจนในครั้งนี้ เมื่อทำการทดสอบระบบจุดระเบิดทั้ง 2 แบบ พบว่าระบบจุดระเบิดแบบมีจานจ่าย จะทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้ดีกว่าระบบจุดระเบิดระบบ CDI เนื่องจากมีการจุดระเบิดสม่ำเสมอ หัวเทียนมีประกายไฟดีกว่า และไม่มีการจุดระเบิดที่ปกติ เช่น จุดระเบิดในท่อไอดี หรือท่อไอเสีย เครื่องยนต์จึงเดินเรียบกว่าระบบ CDI ดังนั้นในการวิจัยเกี่ยวกับเครื่องยนต์ไฮโดรเจนในครั้งนี้ จึงเลือกใช้จานจ่ายคอล์ย แบตเตอรี่ และหัวเทียน เป็นระบบจุดระเบิด

การดัดแปลงจังหวะฉีดเชื้อเพลิง

เนื่องจากการทดลองนำแกสไฮโดรเจนมาใช้กับเครื่องยนต์ในครั้งนี้ ใช้วิธีฉีดแกสไฮโดรเจนลงในกระบอกสูบโดยตรง ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับเครื่องยนต์ดีเซล โดยเครื่องยนต์ดีเซลที่นำมาทดลองจะฉีดเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งเพลาข้อเหวี่ยง 20 องศาก่อนศูนย์ตายบน (20° BTDC) แต่เมื่อเปลี่ยนมาใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง จังหวะการฉีดแกสไฮโดรเจนลงในกระบอกสูบ จะต้องทำการดัดแปลงเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรเจน

หัวฉีดแกสไฮโดรเจน ซึ่งออกแบบสำหรับใช้ในการทดลองเครื่องยนต์ไฮโดรเจนในครั้งนี้ จะทำงานสัมพันธ์กับจังหวะการฉีดน้ำมันของปั๊มดีเซล โดยเมื่อปั๊มดีเซลฉีดน้ำมันจะทำให้ลิ้นไฮโดรเจนถูกกดและเปิด ทำให้แกสไฮโดรเจนในหัวฉีดไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ หรือกล่าวได้ว่าปั๊มดีเซลจะสามารถควบคุมจังหวะการฉีดไฮโดรเจนได้ โดยใช้จังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลควบคุม ดังนั้นถ้าทำการดัดแปลงให้ปั๊มดีเซลของเครื่องยนต์ฉีดน้ำมันดีเซลที่ตำแหน่งเพลาข้อเหวี่ยงต่าง ๆ ได้ ก็จะสามารถควบคุมการฉีดแกสไฮโดรเจนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเพลาข้อเหวี่ยงได้เช่นกัน

พิจารณาการปิดเปิดของวาล์วไอดีและไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลที่นำมาทดลอง พบว่า ในจังหวะดูดวาล์วไอดีของเครื่องยนต์จะเปิดเมื่อตำแหน่งเพลาข้อเหวี่ยงอยู่ที่ 20 องศาก่อนศูนย์ตายบน และจะปิดในจังหวะอัด โดยตำแหน่งเพลาข้อเหวี่ยงอยู่ที่ 135 องศาก่อนศูนย์ตายบน จากลักษณะการเปิดปิดของวาล์วไอดี จะได้ว่า จังหวะการฉีดเชื้อเพลิงไฮโดรเจนอยู่ในช่วงที่ตำแหน่งเพลาข้อเหวี่ยงอยู่ที่ 135° BTDC ถึง 20°BTDC ดังรูปที่ 6



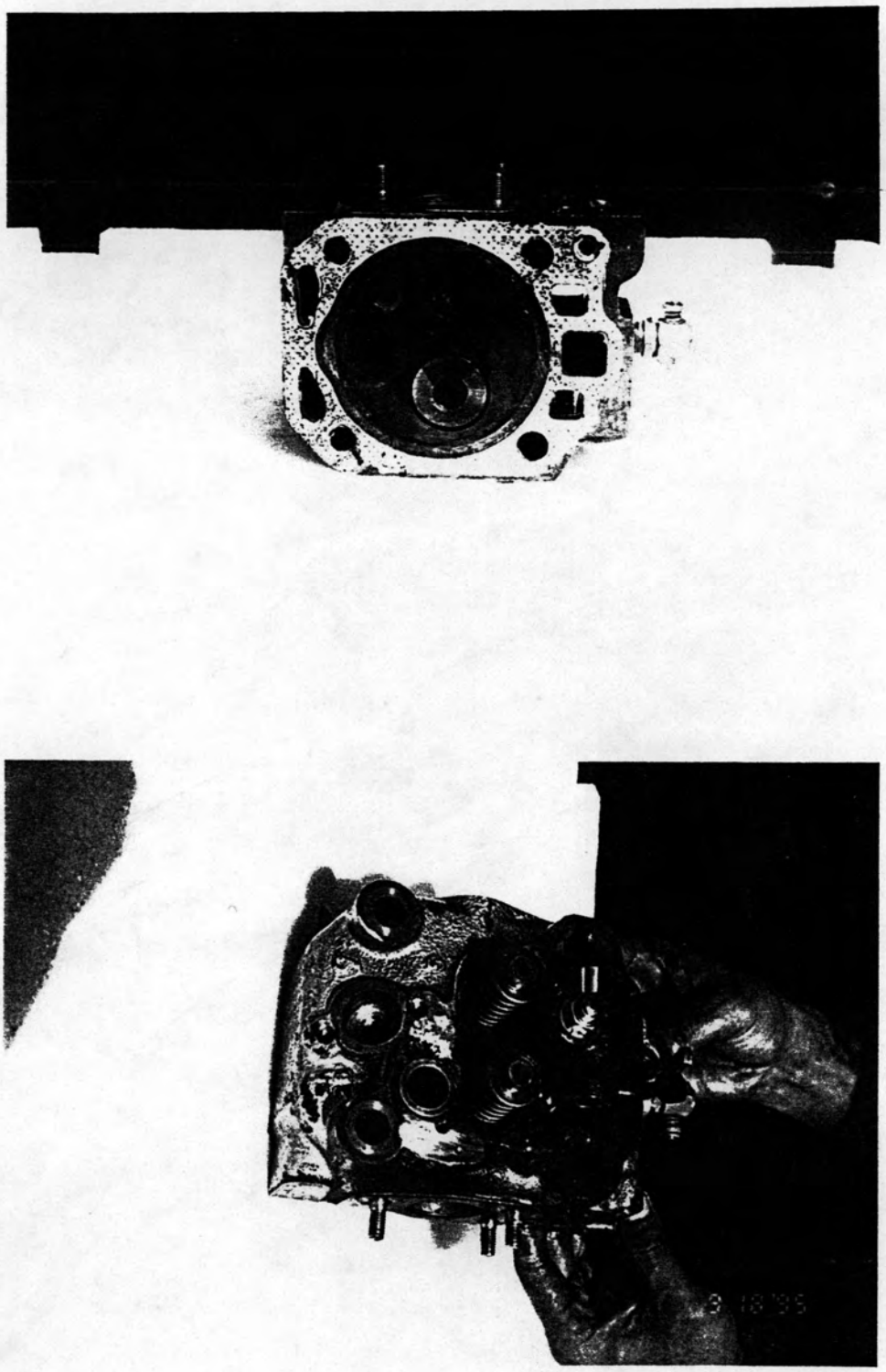
1. จังหวะดูด
2. จังหวะอัด
3. จังหวะระเบิด
4. จังหวะคาย

รูปที่ 6 แสดงจังหวะการปิด-เปิดวาล์วไอดี-ไอเสียของเครื่องยนต์

เนื่องจากปั๊มดีเซลซึ่งใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลที่นำมาทดลอง จะทำงานโดยใช้ลูกเบี้ยว ซึ่งติดอยู่กับเพลาลูกเบี้ยวหมุนกระทบกับลูกปั๊ม โดยเมื่อถึงจังหวะฉีดเชื้อเพลิงลูกเบี้ยวจะหมุนกระทบกับลูกปั๊ม ซึ่งจะทำให้น้ำมันดีเซลถูกฉีดออกจากปั๊ม ดังนั้นถ้าต้องการปรับจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลของปั๊มก็ทำได้ โดยปรับจังหวะที่ลูกเบี้ยวจะหมุนมากระทบลูกปั๊ม โดยถ้าต้องการให้ปั๊มฉีดน้ำมันช้าลง ก็ปรับให้ลูกเบี้ยวกระทบลูกปั๊มช้า ด้วยวิธีการดังกล่าว จะสามารถดัดแปลงจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลของปั๊มได้ และเมื่อควบคุมจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลได้ ก็จะทำให้สามารถควบคุมจังหวะการฉีดแกสไฮโดรเจนได้เช่นกัน

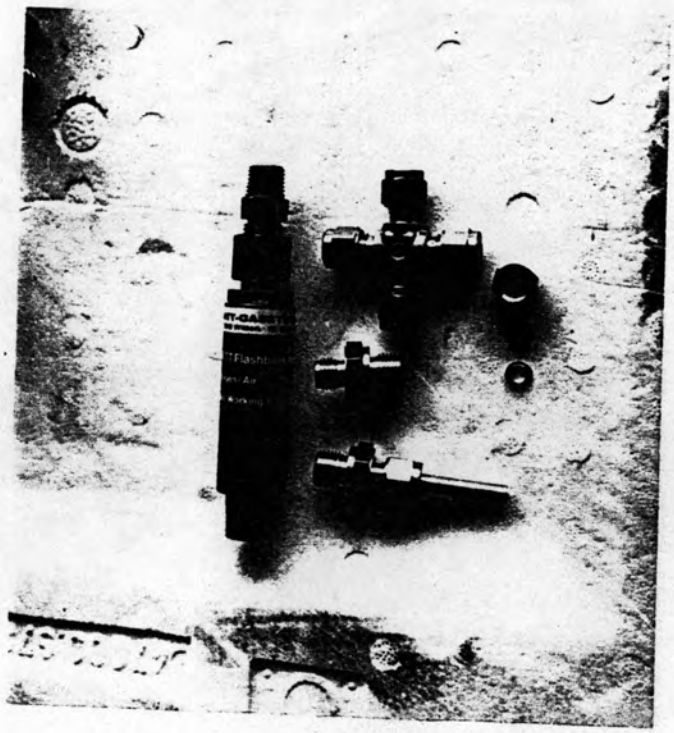
ระบบความปลอดภัยของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน

เนื่องจากแกสไฮโดรเจนเป็นแกสที่ความสามารถในการติดไฟสูง นอกจากนั้นยังถูกบรรจุอยู่ในถังด้วยแรงดันสูง จึงอาจเกิดปัญหาไฟไหม้และการระเบิดได้ ดังนั้นเครื่องยนต์ซึ่งใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบเชื้อเพลิง ซึ่งช่วยทำให้การทำงานของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนมีความปลอดภัย อุปกรณ์ดังกล่าว ได้แก่

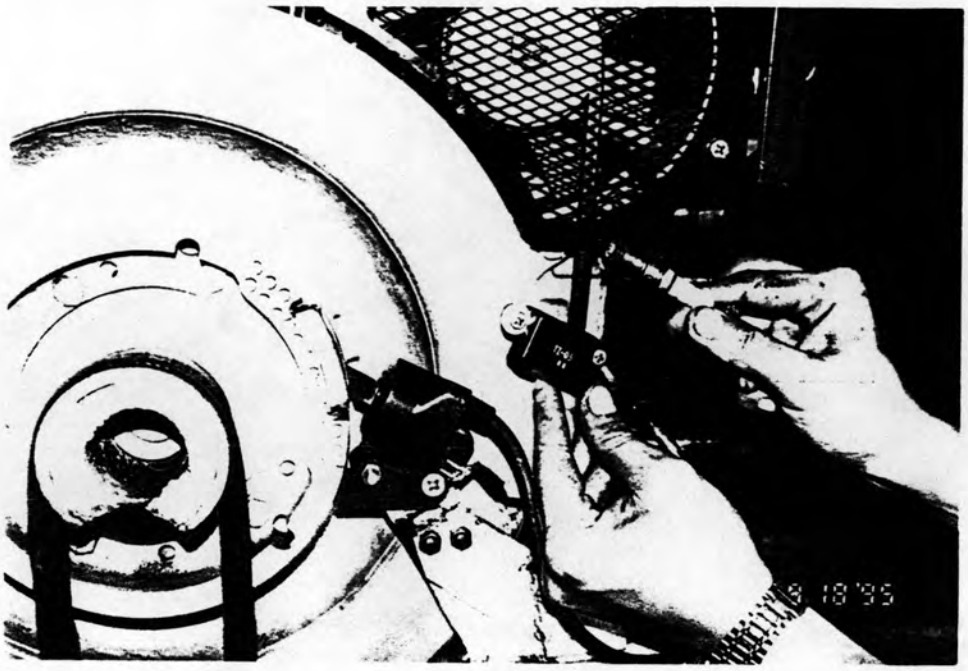


รูปที่ 7 แสดงฝาสูบของเครื่องยนต์ที่ได้รับการดัดแปลงให้ใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง

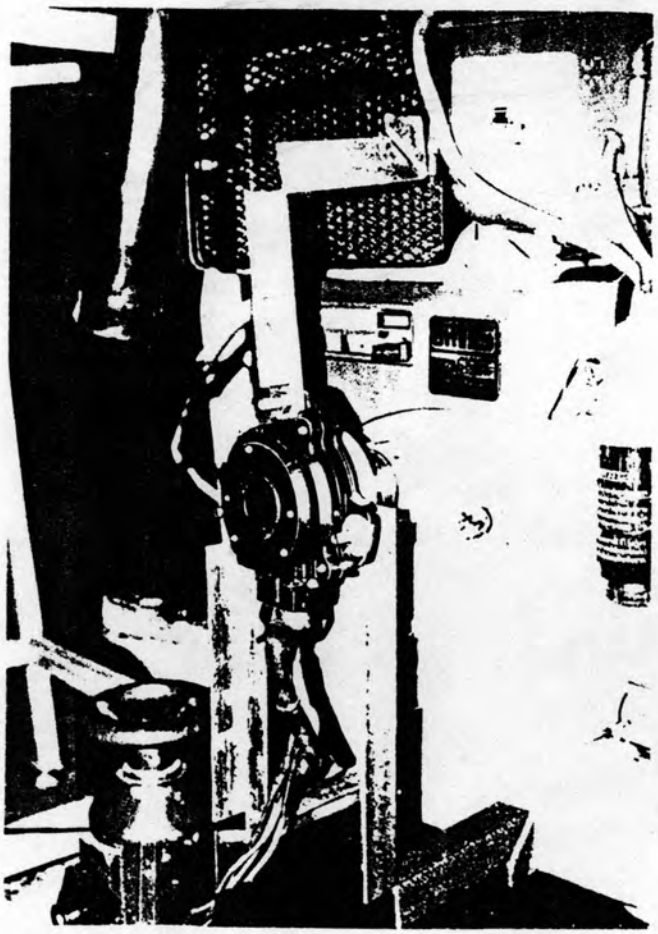
รูปที่ 8 แสดงถังบรรจุแกสไฮโดรเจน, วาล์วควบคุมแรงดัน และท่อทางเดินแกสไฮโดรเจน



รูปที่ 9 แสดงอุปกรณ์ป้องกันไฟย้อนกลับ และข้อต่อที่ใช้



รูปที่ 10 แสดงการติดตั้งระบบจุดระเบิดแบบ CDI เข้ากับเครื่องยนต์



รูปที่ 11 แสดงการติดตั้งระบบจุดระเบิดแบบจานจ่ายเข้ากับเครื่องยนต์

1. วาล์วนิรภัย (Safety valve) เป็นวาล์วซึ่งติดมากับถังแกสไฮโดรเจนใช้เป็นวาล์วควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิง และสามารถป้องกันแรงดันย้อนกลับสู่ถังได้

2. อุปกรณ์ป้องกันไฟย้อนกลับ (Flashback arrestor) เป็นอุปกรณ์ซึ่งสามารถป้องกันไม่ให้เปลวไฟ ซึ่งอาจเกิดลุกไหม้ขึ้นย้อนกลับเข้าไปในถังแกสไฮโดรเจน ซึ่งทำให้สามารถป้องกันการระเบิดของถังบรรจุแกสไฮโดรเจนได้

นอกจากอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิด ซึ่งสามารถป้องกันการระเบิดของถังแกสไฮโดรเจนแล้ว ในระบบเชื้อเพลิงไฮโดรเจน เช่น ท่อ ข้อต่อ วาล์วควบคุมแรงดัน ในการทดลองครั้งนี้ใช้อุปกรณ์ซึ่งมีคุณภาพสูง ซึ่งสามารถช่วยป้องกันการรั่วซึมของแกสไฮโดรเจน นอกจากนั้นแล้วเพื่อความปลอดภัยของผู้ทดลองในขณะทดลองเครื่องยนต์ จะใช้พัดลมขนาดใหญ่เป่าบริเวณที่ทดลอง ซึ่งถ้าเกิดการรั่วซึมขึ้นพัดลมจะเป่าแกสไฮโดรเจน ซึ่งมีน้ำหนักเบาลอยขึ้นสู่ด้านบนอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะสามารถป้องกันไฟลุกไหม้ได้

ระบบ START เครื่องยนต์

เครื่องยนต์ดีเซลที่นำมาทดลอง จะ START เครื่องยนต์โดยใช้มือหมุน เมื่อดัดแปลงมาใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงจะติดตั้งมอเตอร์เพื่อช่วยSTART เครื่องยนต์แทนการใช้มือหมุน

หัวฉีดแกสไฮโดรเจน

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับ การนำไฮโดรเจนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมัน สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในในครั้งนี้จะใช้วิธีฉีดเชื้อเพลิงลงในห้องเผาไหม้ ดังนั้นนอกจากจะต้องทำการดัดแปลงเครื่องยนต์ที่จะนำมาทดลองแล้ว ชิ้นส่วนที่สำคัญที่สุดอีกชิ้นส่วนหนึ่งซึ่งจะต้องออกแบบขึ้นมาใหม่ ชิ้นส่วนดังกล่าวได้แก่ หัวฉีดแกสไฮโดรเจน เนื่องจากการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจากน้ำมัน ซึ่งเป็นของเหลวมาใช้ไฮโดรเจนซึ่งอยู่ในสถานะแกส จึงต้องมีอุปกรณ์ซึ่งใช้สำหรับฉีดแกสไฮโดรเจนลงในห้องเผาไหม้ ซึ่งจะใช้ทดแทนหัวฉีดดีเซลของเครื่องยนต์ดีเซล

หัวฉีดแกสไฮโดรเจนซึ่งจะนำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้ นำหลักการทำงานมาจากสถาบันเทคโนโลยีมุซาชิ ประเทศญี่ปุ่น และจะทำการออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อจะนำมาใช้กับเครื่องยนต์ที่จะนำมาทดลองใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงในครั้งนี้ หลักการออกแบบหัวฉีดแกสไฮโดรเจน มีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1. ปริมาณเชื้อเพลิงที่เครื่องยนต์ต้องการสูงสุด โดยจะเทียบจากค่าความร้อนของน้ำมันที่เครื่องยนต์เดิมต้องใช้ และหาปริมาณของแกสไฮโดรเจนซึ่งให้ค่าความร้อนเท่ากัน
2. แรงดันสูงสุดในการฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้
3. รูปร่างและขนาดของหัวฉีดจะต้องเหมาะสมกับเครื่องยนต์ที่นำมาทดลอง
4. ความแข็งแรงทนทานของหัวฉีด
5. ความปลอดภัยขณะใช้งาน

รายละเอียดของการคำนวณ เพื่อใช้ในการออกแบบหัวฉีดแกสไฮโดรเจน ประกอบด้วย

1. <u>การคำนวณแรงดันสูงสุดในกระบอกสูบและแรงดันที่ใช้ในการฉีดแกสไฮโดรเจน</u>

เนื่องจากการทดลองใช้แกสไฮโดรเจนทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงในครั้งนี้ ใช้การฉีดแกสไฮโดรเจนลงในกระบอกสูบโดยตรง ดังนั้นแรงดันในการฉีดจะต้องสูงกว่าแรงดันภายในกระบอกสูบ จึงมีความจำเป็นต้องคำนวณแรงดันภายในกระบอกสูบ เพื่อที่จะสามารถกำหนดแรงดันในการฉีดแกสไฮโดรเจนลงในกระบอกสูบได้

การคำนวณแรงดันภายในกระบอกสูบ ประกอบด้วย

ก. คำนวณแรงดันสูงสุดภายในกระบอกสูบ

กำหนดให้

1. การอัดตัวของแกสภายในกระบอกสูบเป็นแบบอะเดียบาติก
2. ค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะของอากาศ (k) = 1.4

3. P_1, V_1 แรงดันและปริมาตรของแกสในกระบอกสูบเมื่อลูกสูบอยู่ที่ศูนย์ตายล่าง
4. P_2, V_2 แรงดันและปริมาตรของแกสในกระบอกสูบเมื่อลูกสูบอยู่ที่ศูนย์ตายบน
5. กำลังอัดของเครื่องยนต์ = 11
6. P_1 = 1 bar

จากสมการ

$$\frac{P_1}{P_2} = \left[\frac{V_2}{V_1}\right]^k$$

$$P_2 = P_1\left[\frac{V_1}{V_2}\right]^k$$

$$P_2 = 1[11]^{1.4}$$

$$P_2 = 28.70 \text{ bar}$$

ดังนั้นแรงดันสูงสุดภายในกระบอกสูบที่ได้จากการคำนวณคือ 28.70 bar

ข. การคำนวณหาแรงดันภายในกระบอกสูบในจังหวะฉีดแกสไฮโดรเจน

การทดลองใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ในครั้งนี้ กำหนดจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงที่ประมาณหนึ่งในสามของระยะชัก หรือที่ตำแหน่งเพลาข้อเหวี่ยงหมุน 50 ° ก่อนศูนย์ตายบน (50 ° BTDC) ซึ่งจะสามารถหาแรงดันภายในกระบอกสูบได้ดังต่อไปนี้

กำหนดให้

1. ระยะชักที่มุมเพลาข้อเหวี่ยง 50° ก่อนศูนย์ตายบน L = 25 mm
2. P_2, V_2 แรงดันและปริมาตรของแกสในกระบอกสูบที่ตำแหน่งเพลาข้อเหวี่ยง 50° ก่อนศูนย์ตายบน

3. เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกสูบ $D = 94$ mm

หาค่า V_2 จากสมการ $V_2 = \frac{\pi D^2 L}{4}$

$$V_2 = \frac{\pi (94)^2 . 25}{4}$$

$$V_2 = 173494.45 \quad mm^3$$

$$= 0.173 \quad dm^3$$

หาค่า P_2 จากสมการ $P_2 = P_1\left[\frac{V_1}{V_2}\right]^k$

$$= 1\left[\frac{0.624}{0.173}\right]^{1.4}$$

$$= 6.00 \quad bar$$

ดังนั้นแรงดันภายในกระบอกสูบในจังหวะฉีดเชื้อเพลิงที่ได้จากการคำนวณคือ 6.00 bar

2. <u>การคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงที่เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดลองต้องการสูงสุด</u>

พิจารณาคุณสมบัติของเครื่องยนต์ดีเซลที่จะนำมาทดลองใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง พบว่า เครื่องยนต์จะสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะสูงสุด 200 g/ps-hr และมีกำลังสูงสุด 12 ps ดังนั้นเครื่องยนต์จะต้องการน้ำมันเชื้อเพลิงสูงสุด 2400 g/hr

ค่าความร้อนของน้ำมันดีเซล	=	44	Mj/kg
น้ำมันดีเซล 2400 g	=	105.60	Mj
ค่าความร้อนของแกสไฮโดรเจน	=	120	mj/kg
ปริมาณแกสไฮโดรเจนที่ใช้ค่าความร้อน เท่ากับน้ำมันดีเซล	=	0.888	kg
ดังนั้นเครื่องยนต์ที่จะนำมาทดลองจะต้องการ ปริมาณไฮโดรเจนสูงสุด	=	0.888	kg/hr
	=	888.0	g/hr
	=	0.244	g/sec

พิจารณาเวลาที่วาล์วไฮโดรเจนในจังหวะฉีดเชื้อเพลิง

จากความเร็วรอบของเครื่องยนต์ = 2400 rpm

เพลาข้อเหวี่ยงหมุน 1 รอบ ใช้เวลา = $\frac{60}{2400}$

= 0.025 sec

เพลาข้อเหวี่ยงหมุน 360 องศา ใช้เวลา = 0.025 sec

เวลาที่หัวฉีดดีเซลฉีดน้ำมันดีเซล = 20 องศา

เวลาที่วาล์วไฮโดรเจนเปิด = เวลาที่หัวฉีดดีเซลฉีดน้ำมันดีเซล

= 20 องศา

จากเพลาข้อเหวี่ยงหมุน 360 องศา ใช้เวลา = 0.025 sec

เพลาข้อเหวี่ยงหมุน 20 องศา ใช้เวลา = 1.338 msec

ถ้าเครื่องยนต์มีความเร็วรอบ = 2400 rpm

จังหวะฉีดเชื้อเพลิง = 1200 ครั้ง

เวลาที่วาล์วไฮโดรเจนเปิด = 1.666 sec

อัตราการไหลของแกสไฮโดรเจนผ่านวาล์วขณะฉีดเชื้อเพลิง

= 8.888 g/sec

3.<u>การคำนวณขนาดของหัวฉีด</u>

จากการคำนวณอัตราการไหลของแกสไฮโดรเจนที่เครื่องยนต์ต้องการสูงสุด และกำหนดแรงดันที่จะใช้ในการฉีดแกสไฮโดรเจนลงในกระบอกสูบแล้ว จะสามารถคำนวณหาขนาดของหัวฉีดได้ดังต่อไปนี้

พิจารณาสมการการไหลของของไหลผ่านวาล์ว

$$\dot{m} = \frac{C_D A_T P_O}{(RT_O)^{1/2}} \left[\frac{P_T}{P_O}\right]^{1/k} \left\{ \frac{2k}{k-1} \left[1 - \left[\frac{P_T}{P_O}\right]^{(k-1)/k} \right] \right\}^{1/2}$$

โดยถ้า

$$\frac{P_T}{P_O} \leq \left[\frac{2}{k+1}\right]^{k/k-} \quad \text{การไหลผ่านวาล์วจะเป็นการไหลแบบ choked}$$

และจะได้ว่า

$$\dot{m} = \frac{C_D A_T P_O}{\sqrt{RT_O}} K^{1/2} \left[\frac{2}{k+1}\right]^{(k+1)/2(k-1}$$

เมื่อ

$\dot{m}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของแกสไฮโดรเจนผ่านวาล์วของหัวฉีดแกสไฮโดรเจน

C_D = สัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านวาล์ว

A_T = พื้นที่ของวาล์วหัวฉีดขณะที่วาล์วเปิด

P_O = แรงดันที่ใช้ในการฉีดแกสไฮโดรเจนลงในกระบอกสูบ

P_T = แรงดันที่วาล์วไฮโดรเจน

T_O = อุณหภูมิของแกสไฮโดรเจนที่ฉีดลงในกระบอกสูบ

R = ค่าคงที่ของแกสไฮโดรเจน

k = อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ

ในการคำนวณขนาดของหัวฉีดจะกำหนดให้

$\dot{m}$ = 0.247×10^{-3} kg/sec

R = 4.124×10^{3} J/kg-k

k = 1.40

C_D = 0.6

T_O = 303 k

พิจารณาแรงดันในการฉีดแกสไฮโดรเจนผ่านวาล์วจะเริ่มฉีดที่ 1×10^6 N/m^2 และขณะฉีดแรงดันในกระบอกสูบเท่ากับ 6×105 N/m^2

ดังนั้น $$\frac{P_T}{P_O} = \frac{6 \times 10^5}{10^6}$$

$$= 0.6$$

จาก $$\frac{P_T}{P_O} \leq \left[\frac{2}{(K+1)}\right]^{K/K-1}$$

$$\frac{P_T}{P_O} \leq 0.528$$

สรุปได้ว่าถ้าฉีดแกสไฮโดรเจนลงในกระบอกสูบด้วยแรงดัน 1.0×10^6 N/m^2 การไหลผ่านวาล์วยังไม่เกิด choked แต่ถ้าแรงดันในการฉีดสูงเกินกว่า 1.2×10^6 N/m^2 จะเกิด choked เนื่องจาก

$$\frac{P_T}{P_O} = \frac{6 \times 10^5}{1.2 \times 10^6}$$

$$= 0.5 < 0.528$$

ดังนั้นถ้าแรงดันในการฉีด = 10^6 N/m^2 จะสามารถหาขนาดของหัวฉีดได้ดังต่อไปนี้คือ

$$8.889 \times 10^{-3} = \frac{0.6 A_T \times 10^6}{\sqrt{4.124 \times 10^3 \times 303}} [0.6]^{1/1.40} \left\{\frac{2k}{k-1}\left[1-0.6^{k-1/k}\right]\right\}^{1/2}$$

$$A_T = \frac{8.889 \times 10^{-3} \times \sqrt{4.124 \times 10^3 \times 303}}{0.6 \times 10^6 \times [0.6]^{1/1.40} \times \left\{\frac{2 \times 1.4}{1.4 - 1} \times \left[1-0.6^{1.4-1/1.4}\right]\right\}^{1/2}}$$

$$A_T = 2.446 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

จาก $$A_T = \pi d_v l_v$$

$$d_v = \frac{A_T}{}$$

$$\pi l_v$$

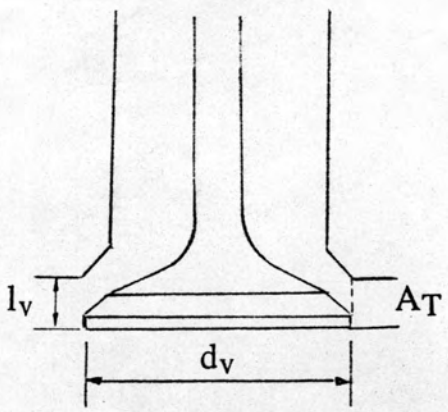
เมื่อ

d_v = เส้นผ่าศูนย์กลางของวาล์ว

l_v = ระยะที่วาล์วถูกกด = 1 mm

$$d_v = \frac{2.446 \times 10^{-5}}{\pi \times 1 \times 10^{-3}}$$

d_v = 7.785 mm.



รูปที่ 12 แสดงขนาดของหัวฉีดแกสไฮโดรเจน

4. <u>การคำนวณขนาดของสปริงที่ใช้ในหัวฉีด</u>

สปริงเป็นชิ้นส่วนซึ่งมีความสำคัญสำหรับการทำงานของหัวฉีดแกสไฮโดรเจน เนื่องจากมีหน้าที่ควบคุมการเปิดปิดของลิ้นไฮโดรเจน ซึ่งจะต้องสัมพันธ์กับจังหวะการทำงานของเครื่องยนต์ นอกจากนั้นสปริงยังต้องรับแรงอยู่ตลอดเวลา โดยจะมีแรงกดของแกสไฮโดรเจนกระทำกับสปริง และจะต้องรับแรงกระทำจากแรงดันของน้ำมันดีเซลจากปั๊มดีเซลในจังหวะฉีดเชื้อเพลิง ดังนั้นการคำนวณขนาดของสปริงจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งสำหรับการออกแบบหัวฉีด

ขั้นตอนการออกแบบสปริง

1. หาแรงที่กระทำต่อสปริง ประกอบด้วย
   F_i = แรงดันที่แกสไฮโดรเจนกระทำ
   F_o = แรงดันที่แกสไฮโดรเจนกระทำ + แรงดันจากปั๊มดีเซลในจังหวะฉีดเชื้อเพลิง
2. หาค่าความยาวของสปริง
   L_f = ความยาวขณะที่ไมมีแรงกระทำต่อสปริง = 35 mm.
   L_o = ความยาวขณะที่แรงกระทำสูงสุด = 29.5 mm.
3. กำหนดวัสดุที่ใช้ทำสปริง
   ลวด music wirc ASTM A228 steel
   τ = 79.3×10^9 N/m^2
   L_d = 1.033×10^9 N/m^2
4. หาค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของสปริง D_m = 10 mm.
5. หาค่าคงที่ของสปริง k

6. หาค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดที่ใช้ทำสปริง D_w

7. หาค่าจำนวนขดของสปริง N

<u>วิธีการคำนวณ</u>

กำหนดแรงดันของแกสไฮโดรเจนที่ใช้ในการออกแบบสปริง = 4×10^6 N/m^2

จะได้ $F_i = (4 \times 10^6) \times \pi\frac{(0.002)^2}{4}$

$= 50.26$ N

F_o = แรงดันเนื่องจากแกสไฮโดรเจน + แรงดันเนื่องจากหัวฉีดปั๊มดีเซล

$= (4 \times 10^6) \times \pi\frac{(0.002)^2}{4} + (12 \times 10^6) \times \frac{\pi(0.003)^3}{4}$

$= 50.26 + 83.21$

$= 133.47$ N

$L_f = 35$ mm

$L_o = 29$ mm

$k = \frac{F_o}{L_f - L_o}$

$= \frac{133.47}{35-29}$

$= 22.24$ kN/m

$Dw = \frac{8 K F_o D_M}{\pi\tau d}$

$= \frac{8 \times 6 \times 133.47 \times 10 \times 10^{-3}}{\pi \times 1.033 \times 10^9}$

$= 2.51$ mm

$N = \frac{G\ Dw}{8\ kC}$

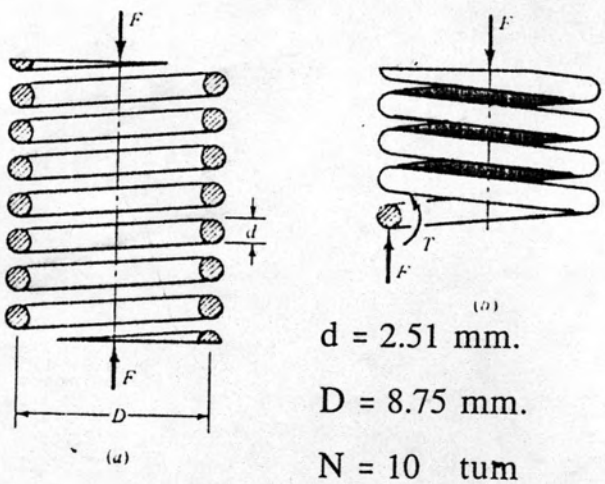
เมื่อ $C = \frac{D_m}{D_w}$

$= \frac{10}{2.51} = 4.98$

$N = \frac{79.3 \times 10^9 \times 2.51 \times 10^{-3}}{8 \times 22.24 \times 4.98}$

$N = 10$ turn

ดังนั้นสปริงที่ใช้ในหัวฉีดแกสไฮโดรเจนในครั้งนี้จะมีขนาดดังรูป 13



d = 2.51 mm.

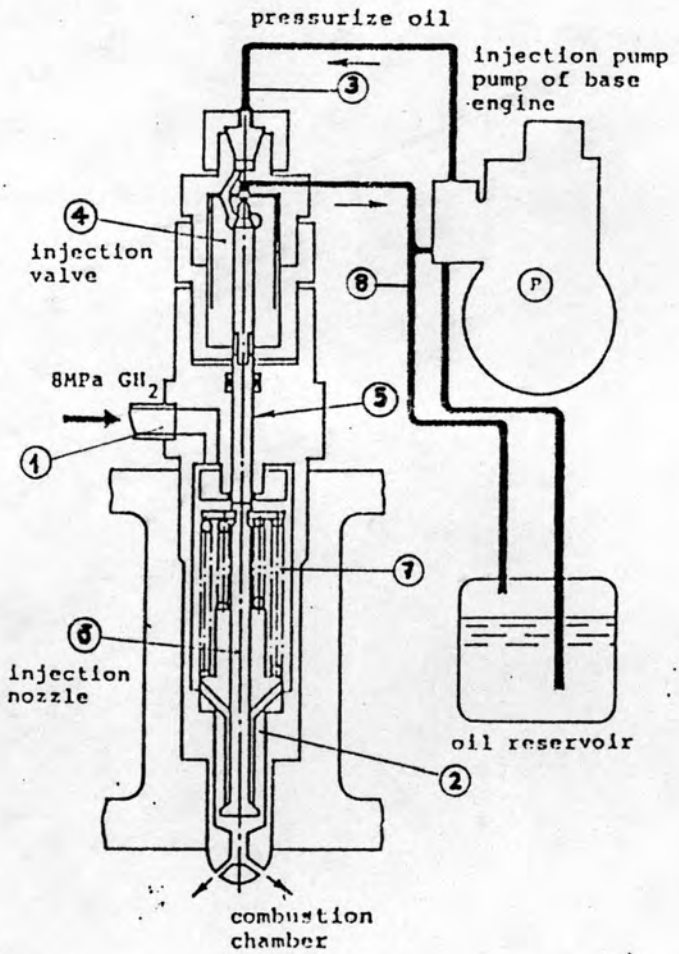
D = 8.75 mm.

N = 10 tum

รูปที่ 13 แสดงขนาดของสปริงที่ใช้ในหัวฉีดแกสไฮโดรเจน

5. การทำงานของหัวฉีดแกสไฮโดรเจน

รูป 14 แสดงภาพหน้าตัดของหัวฉีดแกสไฮโดรเจนซึ่งใช้ในการทดลองครั้งนี้ ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานได้คือ แกสไฮโดรเจนซึ่งมีแรงดันสูง จะเข้าทางท่อ (1) หลังจากนั้นจะเข้ามาอยู่ในบริเวณ (2) โดยจะไม่สามารถขึ้นไปยังด้านบนของหัวฉีดได้ เมื่อถึงจังหวะฉีดเชื้อเพลิง ปั๊มดีเซลจะฉีดน้ำมันแรงดันสูงเข้าทางท่อ (3) และน้ำมันแรงดันสูงดังกล่าวจะกดแกนหัวฉีด ดีเซล (4) ให้ลงมากดแกนกระทุ้ง (5) ต่อจากนั้นก้านวาล์วไฮโดรเจน (6) ก็จะถูกกดทำให้วาล์วเปิดออก แกสไฮโดรเจนบริเวณ (2) จะไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในกระบอก เมื่อแรงดันของน้ำมันหมดสปริง (7) ก็จะดึงทำให้วาล์วไฮโดรเจนปิด ส่วนน้ำมันดีเซลที่ฉีดออกมาจะไหลกลับทางท่อ (8) และไหลไปยังถังน้ำมันดีเซล ซึ่งก็จะครบการทำงานในหนึ่งวัฏจักร



รูปที่ 14 แสดงภาพหน้าตัดของหัวฉีดแกสไฮโดรเจน

รูปที่ 15 แสดงหัวฉีดแกสไฮโดรเจน

6. <u>การทดสอบหัวฉีดแกสไฮโดรเจน</u>

หัวฉีดแกสไฮโดรเจนเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของเครื่องยนต์ที่ได้รับการดัดแปลงให้สามารถใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ซึ่งได้รับการออกแบบขึ้นมาใหม่ โดยที่ไม่มีใช้ในเครื่องยนต์เดิม และมีกลไกการทำงานค่อนข้างซับซ้อน นอกจากนั้นแล้วในการทดลองเครื่องยนต์ ต้องใช้แรงดันในการฉีดแกสไฮโดรเจนเข้าสู่ห้องเผาไหม้สูง (ประมาณ 2-4 MPa) และยังต้องรับแรงกระทำจากหัวฉีดดีเซลแรงดันสูงประมาณ 12.5 MPa ซึ่งใช้ควบคุมจังหวะการปิดเปิดวาล์วไฮโดรเจน จากการที่ต้องรับแรงดันที่สูงมาก ดังนั้นหัวฉีดแกสไฮโดรเจนจะต้องแข็งแรง และการทำงานจะต้องมีความปลอดภัยเชื่อถือได้ เนื่องจากถ้ามีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่หัวฉีดเครื่องยนต์อาจจะทำงาน

ผิดปกติ และเกิดอันตรายขึ้นได้เนื่องจากเหตุผลดังที่ได้กล่าวมา ก่อนที่จะนำหัวฉีดแกสไฮโดรเจนมาใช้งาน จึงต้องทำการทดสอบด้วยการจำลองสภาพการทำงานจริงของหัวฉีดจนแน่ใจว่าหัวฉีดทำงานอย่างไม่มีปัญหาใด ๆ จึงจะนำไปใช้งานในเครื่องยนต์ต่อไป

ขั้นตอนการทดสอบหัวฉีด

1. ทดสอบสภาพการทำงานเบื้องต้น โดยการประกอบชิ้นส่วนของหัวฉีดแต่ละชิ้นเข้าด้วยกัน ตรวจสอบความเรียบร้อยของหัวฉีด และตรวจสอบความบกพร่องของชิ้นส่วนแต่ละชิ้น เพื่อทำการแก้ไขให้ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นมีความสมบูรณ์ที่สุด เพื่อให้ได้หัวฉีดที่สมบูรณ์ที่สุดด้วย

2. ทดสอบความแข็งแรงของสปริงและทดสอบรอยรั่วตามข้อต่อต่าง ๆ โดยทำการปล่อยแกสเข้าสู่หัวฉีด ซึ่งแกสที่ใช้ในครั้งนี้คือ แกสไนโตรเจน เนื่องจากเป็นแกสเฉื่อย หลังจากนั้นจะทำการเพิ่มแรงดันขึ้นเรื่อย ๆ จาก 1 MPa จนถึงประมาณ 6 MPa เพื่อทดสอบดูว่า สปริงจะสามารถทนแรงดันของแกสได้สูงสุดเท่าไร ถ้าถึง 6 MPa แล้วสปริงยังสามารถทนอยู่ได้ไม่ยุบตัวก็แสดงว่าสามารถนำมาใช้งานได้ (เนื่องจากในการทดลองจะใช้แรงดันของแกสไฮโดรเจนไม่เกิน 4 MPa ฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้) ในขณะที่ทดสอบสปริงก็ทำการตรวจสอบรอยรั่วซึมของแกสตามข้อต่อต่าง ๆ ซึ่งจะมีแหวนทองแดง และโอริง (o-ring) เป็นอุปกรณ์ป้องกันการรั่วซึม ถ้าเกิดการรั่วซึมก็จะต้องทำการแก้ไขต่อไป

3. ทดสอบการรั่วซึมภายใน เมื่อมีแกสไฮโดรเจนเข้าสู่หัวฉีด โดยปกติการทำงานของหัวฉีดจะยอมให้แกสไฮโดรเจนผ่านไปยังลิ้นไฮโดรเจน ซึ่งจะเปิดเข้าสู่ห้องเผาไหม้เท่านั้น ดังนั้นการป้องกันการรั่วซึมขึ้นมาด้านบนของหัวฉีดจะต้องป้องกัน โดยการออกแบบจะใช้โอริง (o-ring) เป็นอุปกรณ์ป้องกันการรั่วซึม การทดสอบขั้นนี้จึงเป็นการทดสอบการทำงานของโอริง ถ้าเกิดการรั่วซึมขึ้นทางด้านบนและบริเวณที่ไม่ใช่ข้อต่อ แสดงว่าการทำงานของโอริงผิดปกติจะต้องทำการแก้ไข

4. ทดสอบการปิด-เปิดของวาล์วไฮโดรเจน โดยจะทดลองปิด-เปิดวาล์วไฮโดรเจนด้วยมือ เพื่อตรวจสอบดูว่าวาล์วไฮโดรเจนทำงานปกติหรือไม่ เช่น การเปิดของวาล์วเท่ากันทุกด้านหรือไม่ เวลาปิด-ปิดสนิทหรือไม่ ต้องทำการบดวาล์วกับบ่าวาล์วเพิ่มหรือไม่ เพราะถ้าวาล์วไม่สนิทจะทำให้แกสไฮโดรเจนรั่ว และจะทำให้การทำงานของเครื่องยนต์ผิดปกติ เกิดจุดระเบิดในท่อไอเสียหรือในท่อไอดี

5. ทดสอบสภาพการทำงานขั้นสุดท้าย ในขั้นนี้จะทำการทดสอบหัวฉีดโดยให้มีสภาพเหมือนกับการทำงานจริง ๆ โดยจะทำการต่อแกสไฮโดรเจนเข้ากับหัวฉีด ต่อหัวฉีดเข้ากับปั๊มดีเซลของเครื่องยนต์ หลักจากนั้นจะเพิ่มแรงดันของก๊าซให้เท่ากับขณะที่ทำงานจริง (ประมาณ 1 MPa - 4 MPa) หมุนเครื่องยนต์ด้วยมอเตอร์เพื่อให้ปั๊มดีเซลทำงาน โดยจะทำการทดสอบเป็นช่วงเวลา เริ่มตั้งแต่ 10 นาที จึงหยุดแล้วตรวจสอบสภาพของหัวฉีด โดยเริ่มตั้งแต่วาล์วไฮโดรเจนและบ่าวาล์ว สปริง โอริง โดยเฉพาะสปริงเมื่อต้องรับแรงกระทำจากปั๊มดีเซลเพิ่มเกิดการยุบตัวหรือไม่ วาล์วไฮโดรเจนกับบ่าวาล์วยังสัมผัสกันสนิทหรือไม่ โอริงฉีดขาดหรือหลุดจากร่องหรือไม่ ถ้าการตรวจสอบมีปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นก็จะต้องทำการแก้ไข แต่ถ้าไม่มีปัญหาก็จะเพิ่มเวลาการทดสอบเป็น 20 นาที 30 นาที 60 นาที จึงนำหัวฉีดไปใช้ในเครื่องยนต์ต่อไป