

ระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน



นางสาวชิวาภรณ์ หงสวินตกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-17-0057-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A COMPUTERIZED CONTROL SYSTEM OF HYDROGEN FUEL FLOW RATE IN AN INTERNAL
COMBUSTION ENGINE



Miss Wachiraporn Hongsawinitkul

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-17-0057-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับ เครื่องยนต์สันดาปภายใน
โดย	นางสาวชัชวราภรณ์ หงสวินิตกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กุลธร ศิลปบรรเลง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จีระศักดิ์ เมฆอัมพรพงศ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฉัตรชัย หงษ์อุเทน)

นางสาว วชิราภรณ์ หงสวินิตกุล : ระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนด้วย
คอมพิวเตอร์สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (A COMPUTERIZED CONTROL SYSTEM OF
HYDROGEN FUEL FLOW RATE IN AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE) อ.ที่ปรึกษา :
รศ.ดร. วิทยา ยงเจริญ , 105 หน้า. ISBN 974-17-0057-1

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนด้วย
คอมพิวเตอร์สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน

เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องยนต์แก๊สโซลีนี่ห้อ MITSUBISHI รุ่น4G32
B2AW 5841 ตั้งองศาการจุดระเบิดไว้คงที่ที่ศูนย์ตายบน จากผลการทดสอบเครื่องยนต์ไฮโดรเจน
บนแท่นทดสอบ ความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงในช่วง 2000-3200 รอบต่อนาที ที่ตำแหน่งปีกผีเสื้อ
50%, 75% และ 100% ปรับปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจนได้แรงบิดสูงสุดที่แต่ละความเร็วรอบ
ทำให้ทราบถึงปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่เครื่องยนต์ต้องการในแต่ละสภาวะการขับขี่ ในงานวิจัย
นี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล MCS-51 เป็นตัวควบคุม รับสัญญาณตำแหน่งปีกผีเสื้อ
จากตัวตรวจจับตำแหน่งปีกผีเสื้อและความเร็วรอบของเครื่องยนต์จากคอยล์จุดระเบิด ควบคุม
ปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนด้วยการเปิดปิดของโซลินอยด์วาล์วแบบ PWM การเขียนโปรแกรม
ควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1. ใช้สัญญาณตำแหน่งปีกผีเสื้อเพียงสัญญาณเดียวในการกำหนดปริมาณเชื้อเพลิง
ไฮโดรเจน

2. ใช้สัญญาณตำแหน่งปีกผีเสื้อร่วมกับสัญญาณความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในการ
กำหนดปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจน

เมื่อนำไปติดตั้งเข้ากับรถยนต์ไฮโดรเจนเพื่อทดสอบสมรรถนะในการขับขี่พบว่าระบบจ่าย
เชื้อเพลิงสามารถทำงานได้ ที่ความเร็วได้ไม่เกิน 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2544.....

##4170492821 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD : ELECTRONIC FUEL INJECTION / HYDROGEN ENGINE / AUTOMOTIVE CONTROL

WACHIRAPORN HONGSAWINITKUL : A COMPUTERIZED CONTROL SYSTEM OF HYDROGEN FUEL FLOW RATE IN AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. WITHAYA YONGCHAROEN, Ph.D. 105 pp. ISBN 974-17-0057-1

The purpose of this research is to study the computerized control system of hydrogen fuel flow rate in an internal combustion engine

In this research, the engine used is a MITSUBISHI gasoline engine model 4G32 B2AW 5841 and ignition timing is constant at TDC. The engine was tested on the engine test bed. The engine speed varied between 2000-3200 rpm at throttle position 50%, 75% and 100%, hydrogen flow rate was adjusted until the engine reached the maximum torque at each speed. The result showed the hydrogen fuel flow rate that the engine needed for different driving conditions. In this research, the controller is MCS-51 microcontroller, the input signals are both throttle position from throttle position sensor and engine speed from ignition coil and use the PWM on-off control of solenoid valve to control hydrogen fuel flow rate. The control method is divided into 2 types

1. Use the throttle position signal only to control the flow rate of hydrogen fuel
2. Use the throttle position signal with engine speed signal to control the flow rate of hydrogen fuel

After the installation of the electronic hydrogen fuel control system in the car, the system can work properly but only at low speed up to 40 km/hr.

Department.....Mechanical Engineering..... Student's signature.....

Field of study.....Mechanical Engineering..... Advisor's signature.....

Academic year...2001.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากรองศาสตราจารย์วิทยา ยงเจริญ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งได้ให้ทั้งคำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ทั้งยังช่วยดูแลการทดลองต่าง ๆ ที่ค่อนข้างอันตรายอย่างใกล้ชิด ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ฉัตรชัย หงษ์อุเทนซึ่งให้ความรู้และคำแนะนำดี ๆ มากมาย ขอขอบคุณ ครูสนธิ , ครูดิเรก และลุงถนอม ซึ่งให้ความช่วยเหลืออย่างมากต่องานวิจัยนี้ รวมถึงเจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสฟช. ซึ่งช่วยสนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลซึ่งสนับสนุนอุปกรณ์และห้องปฏิบัติการ ขอขอบคุณ อ.นวพันธ์ และอ.ประสาทพรจากโรงเรียนนายเรืออากาศสำหรับคำแนะนำ และเพื่อน ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณบิดามารดา รวมถึงคุณป้าสำหรับคำปรึกษาและกำลังใจที่มีให้เสมอมา และขอบพระคุณครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้สั่งสอนอบรมผู้วิจัยมาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
ความเป็นมาของโครงการ.....	3
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
ขอบเขตและวิธีการศึกษา.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	5
2. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไฮโดรเจนและระบบควบคุมเชื้อเพลิง.....	6
คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของก๊าซไฮโดรเจน.....	6
คุณสมบัติของก๊าซไฮโดรเจนและปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการใช้งาน.....	7
ระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงแบบอิเล็กทรอนิกส์.....	8
3. งานวิจัยที่ผ่านมา.....	17
ระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบลูกเบี้ยว.....	17
งานวิจัยเกี่ยวกับระบบควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิงแบบอิเล็กทรอนิกส์.....	19
ระบบควบคุมคอมพิวเตอร์ของบริษัทเจเนอรัลมอเตอร์.....	19
ระบบฉีดเชื้อเพลิงของโตโยต้า.....	22
4. การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์.....	35
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	35
การจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเข้าสู่กระบอกสูบ.....	40
การตั้งองศาการจุดระเบิด.....	41
การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน.....	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
วิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์.....	43
สรุปผลการทดลอง.....	48
5. การสร้างระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบอิเล็กทรอนิกส์.....	49
ส่วนตรวจจับสัญญาณ.....	49
ตัวตรวจจับตำแหน่งปีกผีเสื้อ.....	49
ตัวตรวจจับความเร็วรอบ.....	51
ส่วนควบคุม.....	53
ส่วนตัวกระตุ้น.....	56
ส่วนโปรแกรมควบคุม.....	61
การดัดแปลงระบบจ่ายเชื้อเพลิง ติดตั้งและทดสอบระบบควบคุม เชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบอิเล็กทรอนิกส์กับรถยนต์.....	66
การทดสอบระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบอิเล็กทรอนิกส์.....	68
ผลการทดสอบ.....	68
6. สรุปและเสนอแนะ.....	70
รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก. การทดสอบโซลีนอยด์วาล์ว.....	74
ภาคผนวก ข. การสอบเทียบมาตรวัดอัตราการไหลของไฮโดรเจนแบบเข็ม.....	82
ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์.....	84
ภาคผนวก ง. ผลการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน.....	90
ภาคผนวก จ. โปรแกรมควบคุมที่ใช้.....	93
ภาคผนวก ฉ. ข้อมูลทั่วไปของเครื่องยนต์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	105

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของไฮโดรเจน.....	15
5.1 ตารางค่าระยะเวลาที่จะให้โซลีนอยด์วาล์วเปิดในโปรแกรมควบคุมแบบที่ 1.....	63
5.2 ตารางค่าระยะเวลาที่จะให้โซลีนอยด์วาล์วเปิดในโปรแกรมควบคุมแบบที่ 2.....	65
ก.1 แสดงผลการทดสอบอัตราการไหลของอากาศผ่านโซลีนอยด์วาล์ว ซึ่งเปิดปิดเป็นพัลส์.....	79
ค.1 แสดงผลการทดสอบเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ความเร็ว 2000 rpm.....	84
ค.2 แสดงผลการทดสอบเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ความเร็ว 2400 rpm.....	86
ค.3 แสดงผลการทดสอบเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ความเร็ว 2800 rpm.....	88
ค.4 แสดงผลการทดสอบเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่ความเร็ว 3200 rpm.....	89

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงการทำงานของส่วนประกอบของระบบควบคุมปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิงเมื่อใช้สัญญาณตำแหน่งปีกผีเสื้อและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ควบคุมปริมาณเชื้อเพลิง.....	8
2.2	แสดงโครงสร้างของชุดควบคุม.....	9
2.3	แสดงตัวอย่างของส่วนอุปกรณ์ชุดควบคุม.....	10
2.4	แสดงโครงสร้างของโปรแกรมควบคุมเครื่องยนต์.....	10
2.5	แสดง Block diagram ของ Actuator controller.....	11
2.6	แสดงลักษณะของสัญญาณมุมของเพลาช้อเหวี่ยงและสัญญาณ Missing teeth.....	12
2.7	แสดง Block diagram การทำงานของ Synchronizer.....	13
2.8	แสดงการอ่านสัญญาณ T_{cs} และการตรวจจับ Missing teeth.....	13
2.9	State diagram ของการสร้างสัญญาณ Synchronizer สำหรับการฉีดเชื้อเพลิง.....	14
2.10	สัญญาณ MT และ S_p ที่ตรวจจับได้ในแต่ละจังหวะการทำงาน และการสร้างสัญญาณ S_{inj} ซึ่งเป็นสัญญาณ Synchronizer สำหรับการฉีดเชื้อเพลิง.....	14
2.11	แสดง State diagram ของ Fuel flow driver.....	15
3.1	แสดงระบบจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนของรถยนต์ไฮโดรเจน.....	17
3.2	แสดงหลักการทำงานของลูกเบี้ยวที่ใช้ควบคุมปริมาณเชื้อเพลิง.....	18
3.3	แสดงภาพถ่ายลูกเบี้ยวเมื่อติดตั้งเข้ากับรถยนต์.....	18
3.4	แสดงสัญญาณ input และ output สำหรับระบบ CCC.....	19
3.5	แสดงการควบคุมแบบวงจรมิด (Closed-loop).....	20
3.6	แสดงหลักการทำงานของระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบ D-EFI.....	22
3.7	แสดงหลักการทำงานของระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบ L-EFI.....	23
3.8	แสดงแผนภูมิระบบควบคุมการฉีดเชื้อเพลิงพื้นฐาน.....	24
3.9	แสดงการบรรจุอากาศเข้ากระบอกลูกสูบ.....	26
3.10	แสดงการเปิดลิ้นของมาตรวัดอากาศที่ความเร็วเดินเบาและความเร็วสูง.....	26
3.11	แสดงลักษณะของหัวฉีด.....	27
3.12	แสดงแผนภูมิการทำงานของระบบการปรับแก้อัตราส่วนผสมของอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิงโดยใช้ ECU.....	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.13	แสดงการเปลี่ยนสัญญาณจุดระเบิดจากวงจรไฟแรงต่ำเป็นสัญญาณ การฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ 6 สูบ และ 4 สูบ.....	29
3.14	แสดงแผนภูมิการป้อนสัญญาณเข้า ECU เพื่อควบคุมปริมาณการฉีดเชื้อเพลิง.....	30
3.15	กราฟแสดงการเพิ่มเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิของเครื่องยนต์ต่ำ.....	31
3.16	กราฟแสดงอัตราการเพิ่มเชื้อเพลิงเพื่อการอุ่นเครื่องยนต์.....	32
3.17	กราฟแสดงอัตราการเพิ่มเชื้อเพลิงเพื่อการเร่งเครื่องยนต์ขณะเครื่องเย็น.....	33
3.18	กราฟแสดงการตัดการฉีดเชื้อเพลิงที่ความเร็วต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ.....	33
4.1	แสดงการต่อชุดอุปกรณ์ทดสอบเครื่องยนต์.....	35
4.2	แสดงมาตรวัดปริมาตรไฮโดรเจนมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ.....	36
4.3	แสดงมาตรวัดอัตราการไหลของไฮโดรเจนแบบเข็ม.....	36
4.4	แสดงมาตรวัดอัตราการไหลของอากาศแบบ orifice ที่ใช้ในการทดสอบ.....	37
4.5	แสดง incline manometer ที่ใช้วัดความดันตกคร่อม orifice.....	38
4.6	แสดง Dynamometer ที่ใช้เป็นภาระ (load) ของเครื่องยนต์.....	38
4.7	แสดงการต่อเพลลาของเครื่องยนต์เข้ากับ dynamometer.....	39
4.8	แสดงตัวควบคุมตำแหน่งปีกผีเสื้อ.....	39
4.9	แสดงการติดตั้งเครื่องยนต์.....	39
4.10	แสดงคอมพิวเตอรืควบคุม.....	40
4.11	แสดงห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์แบบ Stratified charge.....	40
4.12	แสดงอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซไฮโดรเจน.....	42
4.13	แสดงตำแหน่งการอ่านค่าความดันของก๊าซไฮโดรเจน.....	42
4.13	กราฟแสดงค่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่แต่ละความเร็วรอบ.....	44
4.14	กราฟแสดงค่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่แต่ละความเร็วรอบ.....	46
4.15	กราฟแสดงอัตราการไหลของไฮโดรเจนซึ่งทำให้เกิดแรงบิดสูงสุดที่แต่ละ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์.....	47
5.1	ลักษณะของตัววัดตำแหน่งปีกผีเสื้อ.....	50
5.2	แสดงภาพ schematic ของตัววัดตำแหน่งปีกผีเสื้อ.....	50
5.3	แสดงสัญญาณที่ออกจากตัวตรวจจับตำแหน่งปีกผีเสื้อ.....	51
5.4	แสดงการติดตั้งอุปกรณ์วัดตำแหน่งปีกผีเสื้อ.....	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
5.5	แสดงวงจรจุดระเบิดของเครื่องยนต์.....	52
5.6	แสดงลักษณะของวงจรควบคุม.....	53
5.7	แสดงรูป Schematic diagram ของวงจรควบคุม.....	54
5.8	แสดงวงจร LTC1298.....	54
5.9	แสดงขาต่าง ๆ และการต่อความต้านทานในวงจรมิตทริกเกอร์.....	55
5.10	แสดงสัญญาณที่เข้าและออกจากวงจรมิตทริกเกอร์.....	55
5.11	แสดงการต่อวงจรจับเวลา 555 Timer IC.....	56
5.12	แสดงสัญญาณที่ออกจาก 555 Timer IC.....	56
5.13	แสดงลักษณะบอร์ดควบคุม.....	57
5.14	แสดงวงจร LED.....	58
5.15	แสดงโซลีนอยด์วาล์ว.....	58
5.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไฮโดรเจนผ่านโซลีนอยด์วาล์ว และระยะเวลาในการเปิดโซลีนอยด์วาล์วที่ความดัน 30 psi.....	59
5.17	แสดงการต่อวงจรขยายกระแสเพื่อขับโซลีนอยด์วาล์ว.....	58
5.18	แสดงสัญญาณที่ผ่าน LM1949 และวงจรขยายกระแสทั้งหมด.....	60
5.19	แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุมแบบที่ 1.....	62
5.20	แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุมแบบที่ 2.....	64
5.21	แสดงแผนผังการติดตั้งอุปกรณ์.....	66
5.22	แสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์ควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงแบบอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับ รถยนต์.....	66
5.23	แสดงลักษณะถังและมาตรวัดความดันที่ติดตั้งเพิ่มเติม.....	67
5.24	แสดงระบบจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ดัดแปลงแล้ว.....	67
ก.1	แสดง Schematic Diagram ของการทดสอบโซลีนอยด์วาล์ว.....	74
ก.2	แสดงมาตรวัดอัตราการไหลของอากาศแบบ Orifice ที่ใช้ในการทดลอง.....	75
ก.3	แสดงภาพการไหลของของไหลผ่านโซลีนอยด์วาล์ว.....	76
ก.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการเปิดโซลีนอยด์วาล์วกับ อัตราการไหลของอากาศ.....	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ก.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการเปิดโซลีนอยด์วาล์วกับ อัตราการไหลของไฮโดรเจน.....	81
ข.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านได้จากมาตรวัดอัตราการไหลแบบเข็ม กับอัตราการไหลโดยปริมาตรของไฮโดรเจน.....	83
ง.1	แสดงอุปกรณ์วัดความดัน.....	90
ง.2	แสดงการต่ออุปกรณ์วัดความดันและวงจรรขยาย.....	90
ง.3	แสดงการต่อชุดอุปกรณ์เพื่อสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน.....	91
ง.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดความดัน กับความดันสูญญากาศ.....	92

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

สภาพแวดล้อมของประเทศไทยอยู่ในขั้นวิกฤติที่ต้องได้รับการแก้ไขโดยเร่งด่วน โดยเฉพาะในกรุงเทพมหานคร มลภาวะทางอากาศในกรุงเทพมหานครนั้นมีขีดความรุนแรงสูงขึ้นทุกวันโดยมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัยด้วยกัน ไอเสียจากรถยนต์นับว่าเป็นเหตุปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่ง เนื่องจากกรุงเทพมหานครมีปัญหามลภาวะจราจรติดขัด รถที่อยู่บนท้องถนนจึงมีการปลดปล่อยควันพิษจากการสันดาปมาก

มลภาวะทางอากาศที่เกิดจากการสันดาปของเครื่องยนต์นั้นเกิดจากก๊าซหลายตัวด้วยกัน เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ , คาร์บอนมอนอกไซด์ , ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ , ไนโตรเจนออกไซด์ , สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ฯลฯ ทั้งหมดนี้เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

สารพิษในอากาศที่เกิดอยู่ทุกวันนี้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลมาจากสันดาปในเครื่องยนต์เท่านั้น ดังนั้นบริษัทผู้ผลิตรถยนต์จึงพยายามหามาตรการต่าง ๆ เพื่อควบคุมมลภาวะนี้ เช่น การเพิ่มอุปกรณ์ควบคุมมลภาวะเช่น Catalytic converter, ปรับปรุงระบบการเผาไหม้ให้มีการเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น, การออกแบบเครื่องยนต์ใหม่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการสันดาป

นอกจากปัญหามลภาวะในอากาศแล้ว การเตรียมหาแหล่งพลังงานทดแทนแหล่งอื่น ๆ จะมีความจำเป็นมาก ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ทั้งน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาตินั้นเกิดจากการทับถมของซากฟอสซิลเป็นเวลานานนับล้านปี ซึ่งธรรมชาติไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่ให้เพียงพอกับปริมาณที่มนุษย์ใช้งาน ดังนั้นปริมาณสำรองน้ำมันทั่วโลกจึงลดน้อยลงทุกที จึงจำเป็นต้องมีการค้นคว้าหาแหล่งพลังงานทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงแหล่งปิโตรเลียมนี้เพื่อเป็นแนวทางสำหรับแก้ไขปัญหามลภาวะขาดแคลนเชื้อเพลิงในอนาคต

เชื้อเพลิงทดแทนที่มีการพิจารณากันอย่างกว้างขวางมีอยู่ด้วยกันหลายตัว เช่นผลิตภัณฑ์จากก๊าซธรรมชาติ เช่น CNG, LPG หรือผลิตภัณฑ์พวกแอลกอฮอล์เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันก็มีการนำมาใช้งานจริงแล้ว เชื้อเพลิงไฮโดรเจนก็เป็นเชื้อเพลิงอีกชนิดหนึ่งที่กำลังมีการศึกษาถึงความเหมาะสมที่จะมาใช้กับเครื่องยนต์

ไฮโดรเจน (H_2) เป็นธาตุที่ไม่มีส่วนประกอบของคาร์บอน (C) เมื่อเกิดการเผาไหม้ ผลผลิตที่ได้จึงไม่มีมลพิษซึ่งเกิดจากสารประกอบคาร์บอนต่าง ๆ แต่จะได้น้ำเป็นส่วนประกอบหลัก ในไอเสียจะมีก๊าซที่เป็นพิษน้อยมาก จึงกล่าวได้ว่าไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด และเป็นเชื้อเพลิงที่

สามารถหมุนเวียนได้ ทั้งนี้เนื่องจากไฮโดรเจนสามารถผลิตได้จากการแยกธาตุที่เป็นองค์ประกอบของน้ำ ดังนั้นการนำไฮโดรเจนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์จึงสามารถแก้ไขปัญหาได้ทั้งในเรื่องมลภาวะและการขาดแคลนเชื้อเพลิง

การนำไฮโดรเจนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายในได้มีการศึกษาวิจัยมาเป็นเวลานานในหลายประเทศทั่วโลก ในปี ค.ศ. 1930 ประเทศเยอรมันนี่เริ่มศึกษาระบบฉีดพ่นไฮโดรเจนลงในกระบอกสูบ โดย R.A.Erren และในปี ค.ศ. 1946 Oehmichen ได้พัฒนาประสิทธิภาพระบบหัวฉีดของ R.A.Erren ทำให้แรงดันในการฉีดเพิ่มขึ้น ทำให้เครื่องยนต์มีกำลังสูงขึ้น และสามารถแก้ปัญหา Pre-ignition และ Flashback ได้ ปัจจุบันการวิจัยเกี่ยวกับการนำไฮโดรเจนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในประเทศเยอรมันนี่มีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก บริษัทผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่เช่น BENZ, BMW สามารถผลิตรถต้นแบบที่ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงได้ และยังทำการวิจัยเพื่อผลิตให้งานต่อไป

ในประเทศสหรัฐอเมริกา NASA ได้ทำการคิดค้นเครื่องยนต์ที่ใช้ไฮโดรเจนเหลวและออกซิเจนเหลวที่มีกำลัง 3 กิโลวัตต์ เพื่อนำไปใช้กับเครื่องยนต์ของยานสำรวจดวงจันทร์ แต่ประสบปัญหาออกซิเจนเหลวกัดเนื้อโลหะทำให้สึกกร่อนเร็ว จึงไม่สามารถนำไปใช้ได้ แต่ก็นับว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการนำไฮโดรเจนเหลวมาใช้เป็นครั้งแรก ต่อมาในปี 1972 ที่ University of California Los Angeles (UCLA) ก็สามารถผลิตรถยนต์ที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงได้เป็นผลสำเร็จ และได้มีการวิจัยพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

ในส่วนของประเทศญี่ปุ่นซึ่งเป็นชาติผู้นำในการผลิตรถยนต์ในแถบเอเชีย ในปี 1970 Prof. Furuhamo เป็นผู้ทำการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับเครื่องยนต์ไฮโดรเจน และได้ทำการวิจัยต่อเนื่องมาจนปัจจุบัน สามารถทดลองรถยนต์ที่ใช้ทั้งก๊าซไฮโดรเจน และไฮโดรเจนเหลวเป็นเชื้อเพลิง และมีการทดลองหาวิธีต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนให้ดียิ่งขึ้น

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องยนต์ไฮโดรเจนในประเทศไทย มีผู้สนใจศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำไฮโดรเจนมาใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายในหลายคน เช่นคุณวัชร ทยอยสมุทร ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ไฮโดรเจนในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว โดยใช้ระบบหัวฉีดก๊าซไฮโดรเจนได้เป็นผลสำเร็จ โดยใช้แรงดันในการฉีดก๊าซไฮโดรเจนสูง 35 บาร์ เครื่องยนต์มีกำลังขาออกสูงสุดเท่ากับ 4.46 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ คุณขวัญชัย จ้อยเจริญ ซึ่งทำการทดลองเพื่อหาองศาจุดระเบิดที่เหมาะสมของเครื่องยนต์แก๊สโซลีนเมื่อใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ผลการทดลองแสดงว่าองศาจุดระเบิดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องยนต์ไฮโดรเจนคือ 0° BTDC

สถาบันพลังงานแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้เสนอผลงานวิจัยต่อเนื่องจากงานวิจัยของคุณขวัญชัย จ้อยเจริญ โดยมีการนำเครื่องยนต์ไฮโดรเจนไปใช้ในรถยนต์จริง ๆ แล้วทดสอบ

สมรรถนะการขับที่ พบว่ารถยนต์ที่ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงมีสมรรถนะการขับที่สูงพอสมควร โดยมีความเร็วสูงสุด 103 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความสามารถในการเร่งเครื่องยนต์จากความเร็ว 0 ถึง 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมงใช้เวลาประมาณ 15 วินาที และสามารถไต่ทางชันได้ถึงประมาณ 1:10 ที่ความเร็ว 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ความเป็นมาของโครงการ

ในงานวิจัยของสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยนั้น ระบบการจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเข้าสู่เครื่องยนต์อาศัยลูกเบี้ยวของเหลือเป็นอุปกรณ์ควบคุมปริมาณ ลูกเบี้ยวของเหลือต่อตรงกับคันเร่ง เมื่อเหยียบคันเร่งมาก ลูกเบี้ยวก็จะกดให้วาล์วเปิดมากขึ้น (รายละเอียดแสดงในบทที่ 3) ระบบควบคุมเชิงกลเช่นนี้สามารถทำงานได้ดีพอสมควร แต่การปรับเปลี่ยนปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงนั้นทำได้ยาก เนื่องจากต้องสร้างลูกเบี้ยวขึ้นใหม่

เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยียานยนต์ในปัจจุบัน จะเห็นว่ารถยนต์ส่วนใหญ่ใช้หัวฉีดอิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิง ทั้งนี้เนื่องจากระบบอิเล็กทรอนิกส์นั้นมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วและให้ประสิทธิภาพสูง สามารถเพิ่มสัญญาณที่จะนำมาใช้ในการควบคุมได้ง่าย นอกจากนี้การปรับเปลี่ยนปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงยังทำได้ง่าย เพียงแต่แก้ไขโปรแกรมควบคุมเท่านั้น

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง และปรับเปลี่ยนระบบจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบลูกเบี้ยวของเหลือเดิมมาเป็นระบบจ่ายเชื้อเพลิงแบบคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ง่ายต่อการปรับเปลี่ยนปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยเรื่องระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในนี้มีวัตถุประสงค์คือ

1. ศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน โดยเน้นที่ประมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่เครื่องยนต์ต้องการสำหรับแต่ละสภาวะการทำงาน

2. สร้างระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบคอมพิวเตอร์แล้วทำการติดตั้งเข้ากับรถยนต์

3. ทดสอบการควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อน

ขอบเขตและวิธีการศึกษา

การสร้างระบบจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบคอมพิวเตอร์จำเป็นจะต้องทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เสียก่อน เพื่อที่จะให้ทราบว่าเครื่องยนต์ที่จะนำระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงแบบคอมพิวเตอร์ไปติดตั้งนั้นมีสมรรถนะเพียงใด และต้องการปริมาณไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงเท่าใด ข้อมูลจากการทดสอบเครื่องยนต์บนแท่นทดสอบทำให้สามารถกำหนดสัญญาณที่จะนำมาใช้ในการควบคุม นอกจากนี้ยังช่วยในการกำหนดปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงที่จะเขียนโปรแกรมในเบื้องต้น

หลังจากทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์แล้วจึงทำการเลือกสัญญาณที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการควบคุม จากนั้นเลือกอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณและอุปกรณ์ที่จะใช้จ่ายเชื้อเพลิงแล้วจึงเขียนโปรแกรมควบคุม

เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการสร้างระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงที่นำไปติดตั้งบนรถยนต์จริง ดังนั้นจึงเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ในการควบคุม เนื่องจากมีขนาดกระทัดรัด ใช้เนื้อที่ติดตั้งน้อย และไม่มีปัญหาในเรื่องจากจ่ายกระแสไฟฟ้า

หลังจากสร้างชุดอุปกรณ์เรียบร้อยแล้วได้ทำการติดตั้งเข้ากับรถยนต์แล้วทำการวิ่งทดสอบเพื่อทดสอบว่าระบบสามารถใช้งานได้หรือไม่ จากนั้นจึงวิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย รวมทั้งเสนอแนะแนวทางการศึกษาขั้นต่อไป

จากขอบเขตดังกล่าวสามารถสรุปขั้นตอนการทดลองได้เป็นลำดับดังนี้

1. เตรียมการทดสอบเครื่องยนต์ไฮโดรเจนบนแท่นทดสอบเพื่อวัดสมรรถนะด้านต่าง ๆ ของเครื่องยนต์
2. ทดสอบเครื่องยนต์ไฮโดรเจนบนแท่นทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนที่เครื่องยนต์ต้องการกับสภาวะของเครื่องยนต์ เพื่อกำหนดสัญญาณที่จะนำมาใช้ในการควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจน
3. นำข้อมูลจากการทดสอบเครื่องยนต์มาสร้างระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบคอมพิวเตอร์

4. นำระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงแบบคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นติดตั้งเข้ากับรถยนต์แล้ว
ทดสอบการใช้งาน

5. วิเคราะห์และสรุปผลของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้คือ

1. เพื่อให้ทราบสมรรถนะของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน
2. เพื่อเป็นต้นแบบของระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบคอมพิวเตอร์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไฮโดรเจนและระบบควบคุมเชื้อเพลิง

ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ส่วนใหญ่ใช้ในการขับเคลื่อนยานพาหนะเช่น เครื่องบิน จรวด ยานอวกาศ หรือใช้ในกิจการอุตสาหกรรม โดยทั่วไปจะใช้ในสถานะก๊าซหรือของเหลว ในงานวิจัยนี้จะใช้ไฮโดรเจนในสถานะก๊าซเพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ดังนั้นจึงขอกล่าวถึงความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไฮโดรเจนและเครื่องยนต์ไว้พอสังเขปดังนี้

1. คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของก๊าซไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนเป็นธาตุทางเคมีที่มีคุณสมบัติคือที่อุณหภูมิปกติจะไม่มีสี, กลิ่น และไม่เป็นพิษ ไฮโดรเจนในสถานะก๊าซมีความสามารถในการกระจายตัวได้สูงมาก สัมประสิทธิ์การกระจายตัวของไฮโดรเจนในอากาศมีการประมาณ 3 เท่าของสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของมีเทน, ออกซิเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนมีสัมประสิทธิ์มวลพลังงานสูงมากกว่าเชื้อเพลิงทางเคมีทั้งหมด และมวลพลังงานจะสิ้นเปลืองน้อยกว่าเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนประมาณ 3 เท่า มากกว่าแอลกอฮอล์ 5-6 เท่า และมากกว่าแอมโมเนียถึง 7 เท่า เป็นต้น

คุณสมบัติพื้นฐานของไฮโดรเจนแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ท้ายบทที่ 2

กำลังที่ได้จากการเผาไหม้ส่วนผสมไฮโดรเจนกับอากาศจะน้อยกว่ากำลังที่ได้จากการเผาไหม้ของส่วนผสมแก๊สโซลีนกับอากาศประมาณ 10 เท่า และอุณหภูมิของการจุดระเบิดด้วยตัวเอง (self-ignition) ขึ้นกับความหนาบางของส่วนผสม

เมื่อเครื่องยนต์ทำงานด้วยไฮโดรเจนจะมีข้อดีคือ ส่วนผสมไฮโดรเจนกับอากาศมีช่วงการติดไฟที่กว้าง สามารถผสมกับอากาศเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่าเชื้อเพลิงที่เป็นของเหลวกับอากาศมาก ปราศจากเขม่าจากการเผาไหม้, สารประกอบไฮโดรคาร์บอน, คาร์บอนมอนนอกไซด์, คาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งไม่มีกลิ่นเหม็นของไอเสีย

นอกจากนี้เครื่องยนต์ไฮโดรเจนไม่ต้องการส่วนผสมหนาเมื่อเริ่มติดเครื่องยนต์ที่รอบเดินเบาและระหว่างการเร่งเครื่องยนต์ ซึ่งทำให้เครื่องยนต์ประหยัดเชื้อเพลิงมากขึ้น และเนื่องจาก

ช่วงการเผาไหม้ของไฮโดรเจนมีมากกว่าน้ำมันเบนซิน อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจะเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 0.13-10.2 ซึ่งคิดเป็นปริมาณส่วนผสมของไฮโดรเจนกับอากาศที่ 4-75 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจึงไม่ต้องการการควบคุมส่วนผสมเช่นเดียวกับกรณีของเครื่องยนต์แก๊สโซลีน

2. คุณสมบัติของก๊าซไฮโดรเจนและปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการใช้งาน

1. ความปลอดภัยต่อการเกิดอัคคีเพลิง จากคุณสมบัติของไฮโดรเจนที่มีความหนาแน่นน้อยมากจึงมีผลทำให้ไฮโดรเจนมีน้ำหนักเบามาก โดยเบากว่าอากาศถึง 14 เท่า (ที่ความดันและอุณหภูมิปกติ) ดังนั้นจึงลอยตัวขึ้นสู่บรรยากาศอย่างรวดเร็ว โอกาสที่จะเกิดการลุกไหม้ที่ระดับพื้นดินจึงมีน้อยมาก ส่วนโอกาสที่จะมีการลุกไหม้ขึ้นได้คือจะต้องเกิดการรั่วซึมอย่างรวดเร็วจนความหนาแน่นของไฮโดรเจนที่สะสมในบริเวณนั้นมีปริมาณเพียงพอที่จะลุกไหม้ได้

2. การเกิดเปลวไฟย้อนกลับ (Backfiring) สามารถเกิดขึ้นได้ในท่อร่วมไอเสียของเครื่องยนต์ หากฉีดไฮโดรเจนผสมกับอากาศที่คาร์บูเรเตอร์ เนื่องจากความสามารถในการทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนมีสูง เมื่อเครื่องยนต์เกิดการสันดาป มีอุณหภูมิสูง อาจเกิดเปลวไฟขึ้นในคาร์บูเรเตอร์

3. เปลวไฟที่เกิดขึ้นในคาร์บูเรเตอร์นี้อธิบายได้ว่าเกิดจากพลังงานที่ใช้ในการจุดระเบิดไฮโดรเจนมีค่าต่ำ สามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้ส่วนผสมของอากาศกับไฮโดรเจนที่บาง (Lean fuel-air mixture) การใช้ไอเสียไหลกลับ (Recirculation of exhaust gases) หรือการฉีดน้ำเข้ากระบอกสูบของเครื่องยนต์ (Water injection) ทั้ง 3 วิธีนี้จะทำให้อัตราการแพร่กระจายของเปลวไฟต่ำลง และดังนั้นจึงต้องเพิ่มพลังงานที่จำเป็นสำหรับการจุดส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ นอกจากนี้ยังสามารถแก้ไขด้วยการฉีดไฮโดรเจนเข้าผสมกับอากาศภายในกระบอกสูบโดยตรงซึ่งจะทำให้ภายนอกกระบอกสูบไม่มีก๊าซไฮโดรเจนที่ผสมกับอากาศพร้อมที่จะติดไฟ

4. ความปลอดภัยต่อสุขภาพ ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด , ไม่มีสี , ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษต่อมนุษย์ , สัตว์ , พืช และสิ่งแวดล้อม

5. การกักดักก่อน โดยปกติไฮโดรเจนจะไม่กักดักก่อนโลหะ ยกเว้นแต่รวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นน้ำ จะทำให้เกิดสนิมและกักดักก่อนเหล็กได้

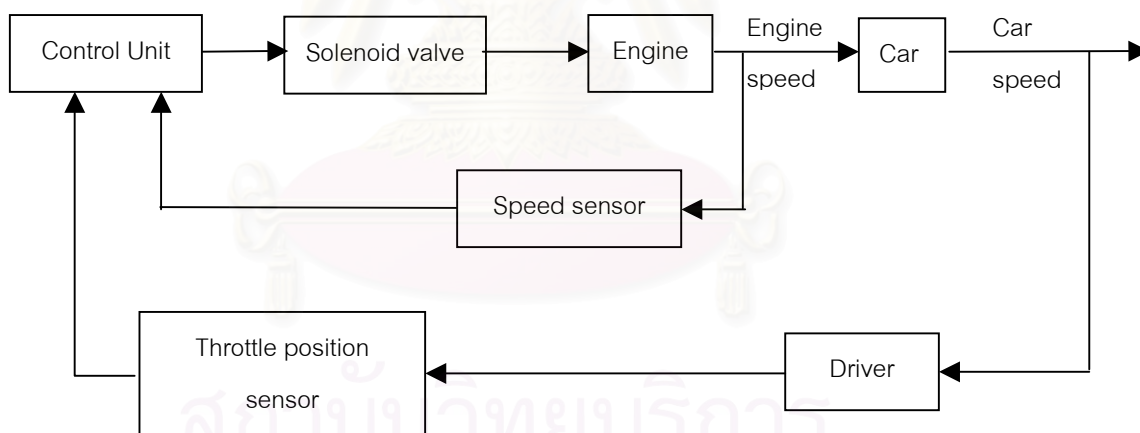
3. ระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงแบบอิเล็กทรอนิกส์

ระบบควบคุมประกอบด้วยการทำงานของอุปกรณ์ 3 ส่วนได้แก่

1. ตัวรับสัญญาณ (Sensor) ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณตามสภาพต่าง ๆ ของเครื่องยนต์และสัญญาณที่บอกความต้องการของผู้ขับขี่ เช่น ความเร็วรอบ, ปริมาณออกซิเจนในไอเสีย, อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น, ตำแหน่งปีกผีเสื้อ ฯลฯ เพื่อส่งไปยังชุดควบคุม

2. ชุดควบคุม (Control Unit) ทำหน้าที่รับสัญญาณจากตัวรับสัญญาณ คำนวณปริมาณเชื้อเพลิงที่จะจ่ายให้กับเครื่องยนต์ และสร้างสัญญาณส่งไปยังตัวกระตุ้นให้ทำงานตามต้องการ

3. ตัวกระตุ้น (Actuator) ทำหน้าที่กระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามคำสั่งที่ได้รับจากชุดควบคุม ได้แก่ หัวฉีดหรือโซลินอยด์วาล์วที่เปิดปิดเพื่อควบคุมปริมาณเชื้อเพลิง เป็นต้น



รูปที่ 2.1 แสดงการทำงานของส่วนประกอบของระบบควบคุมปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิงเมื่อใช้สัญญาณตำแหน่งปีกผีเสื้อและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ควบคุมปริมาณเชื้อเพลิง

การทำงานของชุดควบคุม (Control Unit)

จะเห็นได้ว่าชุดควบคุม (Control Unit) จะเป็นส่วนที่เป็น “สมอง” ของระบบควบคุมทั้งหมด ทำหน้าที่ในการตัดสินใจสั่งการระบบต่าง ๆ ในงานด้านการควบคุมเครื่องยนต์นั้น หน่วยงาน

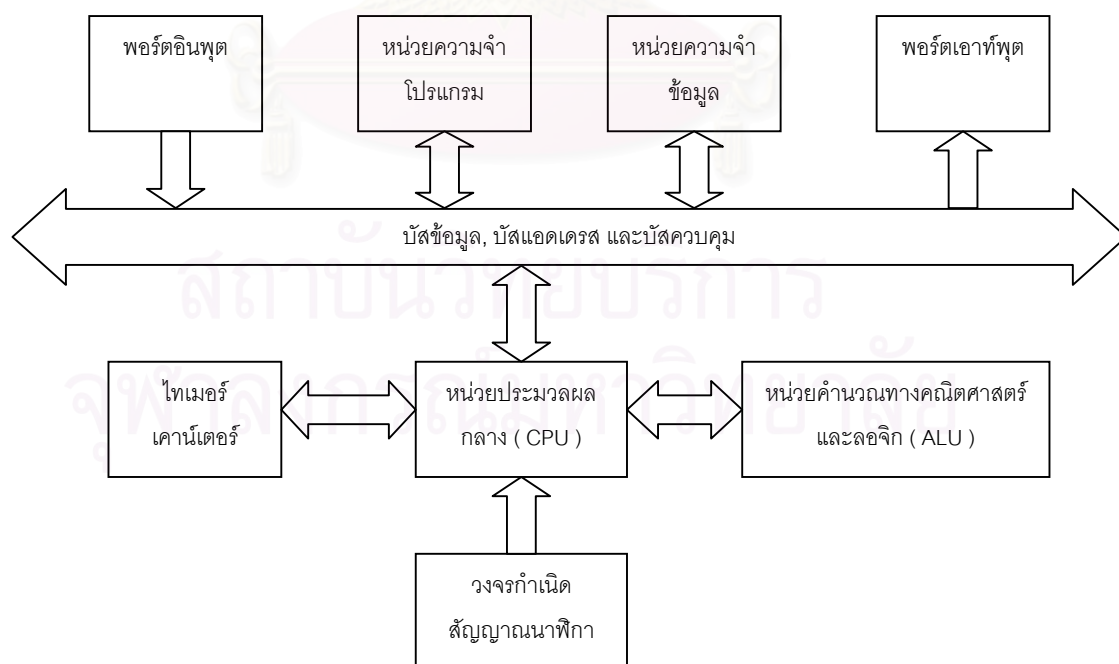
ควบคุมที่ใช้เรียกว่า Electronic Control Module หรือ ECU ซึ่งนอกจากจะใช้ในการควบคุมระบบการจ่ายเชื้อเพลิงแล้วยังทำหน้าที่ในการควบคุมระบบอื่น ๆ ด้วย ไม่ว่าจะเป็นระบบจุดระเบิด, ระบบประจุอากาศ หรือแม้กระทั่ง accessory ต่าง ๆ ภายในรถยนต์

ชุดควบคุมจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนที่เป็นอุปกรณ์ (Hardware) และส่วนที่เป็นโปรแกรม(Software)

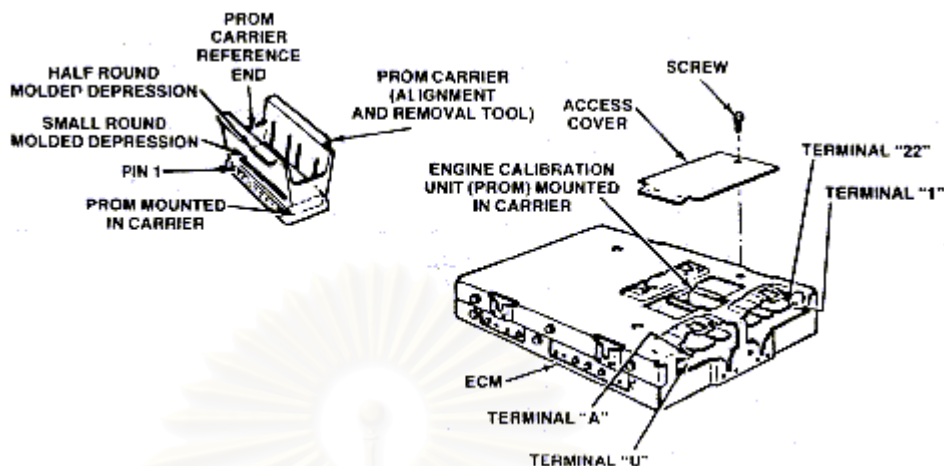
ส่วนอุปกรณ์ (Hardware) ของชุดควบคุม

ส่วนที่เป็นอุปกรณ์ของชุดควบคุมของรถยนต์แต่ละรุ่นจะมีลักษณะและส่วนประกอบโดยรวมคล้ายคลึงกัน แต่อาจจะมีรายละเอียดปลีกย่อยที่แตกต่างกันอยู่บ้าง โครงสร้างของชุดควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

พอร์ตอินพุตจะเชื่อมต่อกับวงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่อ่านค่าต่าง ๆ จากตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor) ส่วนพอร์ตเอาต์พุตจะใช้ในการส่งค่าไปยังวงจรควบคุมตัวกระตุ้น (Actuator) จะสังเกตเห็นหน่วยความจำโปรแกรมซึ่งเป็นส่วนที่เก็บโปรแกรมควบคุม เป็นส่วนที่แตกต่างกันไปในแต่ละรุ่นของเครื่องยนต์ หากต้องการปรับเปลี่ยนการทำงานของระบบควบคุมก็ต้องเข้าไปแก้ไขโปรแกรมที่ส่วนนี้ ตัวอย่างของส่วนอุปกรณ์ของชุดควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



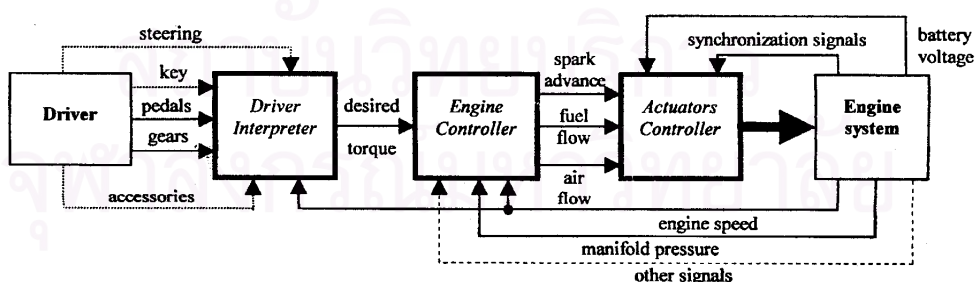
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของชุดควบคุม



รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของส่วนอุปกรณ์ชุดควบคุม

ทฤษฎีพื้นฐานในการวางโครงสร้างโปรแกรมควบคุม

โปรแกรมควบคุมเป็นส่วนที่ทำให้หน่วยควบคุมทำงานตามความต้องการของผู้ขับขี่อย่างเหมาะสม การจัดลำดับขั้นโครงสร้างของโปรแกรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบย่อย ๆ อนุกรมกัน แต่ระบบย่อย ๆ จะทำงานในลำดับขั้นที่ต่างกัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 โครงสร้างโปรแกรมที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นโปรแกรมที่ใช้ควบคุมระบบจ่ายเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเครื่องยนต์แกสโซลีน เมื่อนำมาใช้กับเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างบ้างเพื่อให้เหมาะสม แต่ลักษณะของการวางโครงสร้างโปรแกรมโดยรวมยังคงคล้ายคลึงกัน



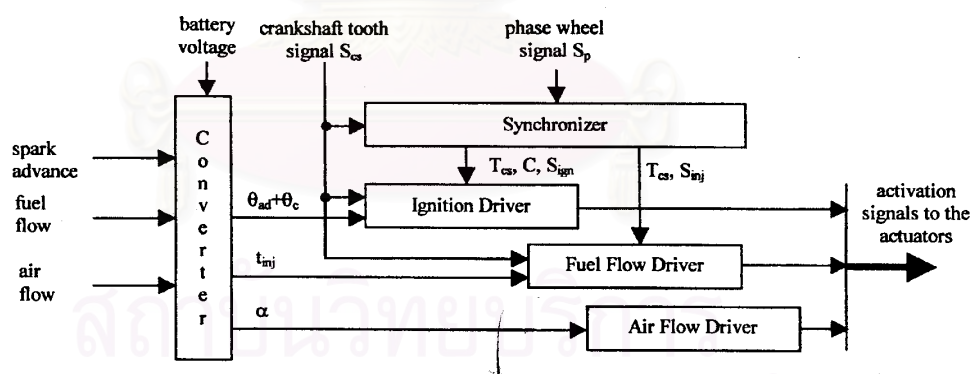
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมควบคุมเครื่องยนต์

- Driver Interpreter เป็นส่วนที่มีการติดต่อกันระหว่างผู้ขับขี่กับหน่วยควบคุม มีหน้าที่ในการแปลสัญญาณที่ผู้ขับขี่สั่งงานให้เป็นค่าแรงบิดที่ต้องการ เพื่อให้หน่วยควบคุมได้ทราบถึงความต้องการของผู้ขับขี่ สัญญาณที่อ่านเช่นคันเร่ง, เกียร์, อุปกรณ์ accessory ต่าง ๆ,

สัญญาณสตาร์ท สำหรับสัญญาณจากอุปกรณ์ accessory ต่าง ๆ และพวงมาลัยนั้นจะถือเป็นสัญญาณรบกวนที่ไม่เกี่ยวข้องก็ได้เนื่องจากไม่ได้เป็นความต้องการของผู้ขับขี่ที่มีต่อการทำงานของเครื่องยนต์โดยตรง

- **Engine Controller** รับสัญญาณว่าต้องการแรงบิดเท่าใด แล้วสร้างสัญญาณควบคุมไปยังเครื่องยนต์เพื่อให้ได้ค่าแรงบิดตามนั้น สัญญาณควบคุมที่สร้างขึ้นมี 3 ตัวคือองศาการจุดระเบิดล่วงหน้า (Spark Advance) , ปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิง (Fuel Flow) และปริมาณอากาศเข้ากระบอกสูบ (Air Flow) และเพื่อให้สัญญาณควบคุมขึ้นมาได้ หน่วยควบคุมจะต้องทราบสถานะการทำงานในปัจจุบันของเครื่องยนต์ ประมาณได้อย่างหยาบ ๆ จากค่าความดันในท่อไอดีและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ สัญญาณอื่น ๆ จะใช้ในการควบคุมในขั้นตอนที่ซับซ้อนขึ้นไป (เช่นอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น , สัญญาณการน็อกของเครื่องยนต์ เป็นต้น) จากนั้นจะส่งสัญญาณควบคุมไปยัง Actuator

- **Actuator Controller** รับสัญญาณควบคุมมาแล้วจัดการแปลงจนเป็นสัญญาณที่จะจ่ายให้กับ Actuator ซึ่งเป็นสัญญาณที่มีจังหวะการทำงาน synchronize กับจังหวะการทำงานของแต่ละสูบและสถานะการทำงานอื่น ๆ ของเครื่องยนต์ การทำงานของ Actuator controller สามารถแสดงเป็น Block diagram ได้ดังรูปที่ 2.5

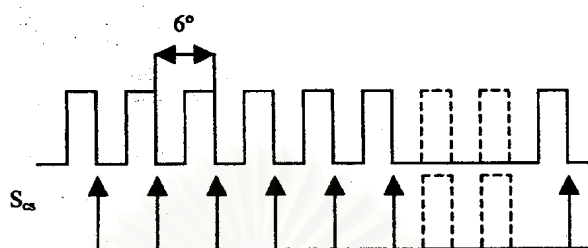


รูปที่ 2.5 แสดง Block diagram ของ Actuator controller

เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีขอบเขตเพียงการควบคุมปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงจะขอกล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิงเท่านั้น

สัญญาณอินพุตที่ Actuator controller รับมาคือสัญญาณควบคุม (Control signal) , ค่าความต่างศักย์จากแบตเตอรี่และสัญญาณอีก 2 สัญญาณที่ใช้ในการกำหนดจังหวะการทำงานให้สอดคล้องกับจังหวะการทำงานของเครื่องยนต์แต่ละสูบ สัญญาณทั้งสองนี้คือมุมของเพลลาข้อเหวี่ยง (Crankshaft) หรือ S_{cs} ลักษณะของสัญญาณนี้จะเป็นพัลส์ต่อเนื่อง 1 รอบของเพลลา

ข้อเหวี่ยงจะให้พัลส์ทั้งหมด $60-2=58$ พัลส์ พัลส์ที่หายไป 2 พัลส์เรียกว่า Missing teeth เป็นตำแหน่งที่ใช้อ้างอิงของเพลลาข้อเหวี่ยง ลักษณะของสัญญาณแสดงได้ดังรูปที่ 2.6

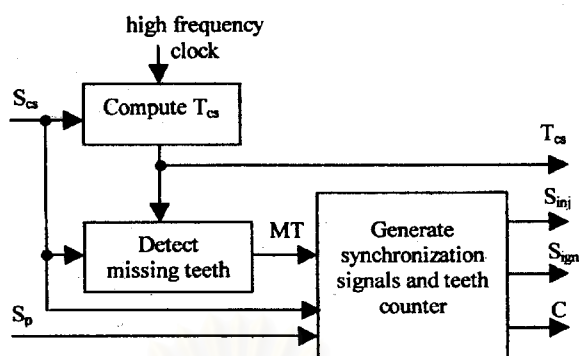


รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของสัญญาณมุมของเพลลาข้อเหวี่ยง และสัญญาณ Missing teeth

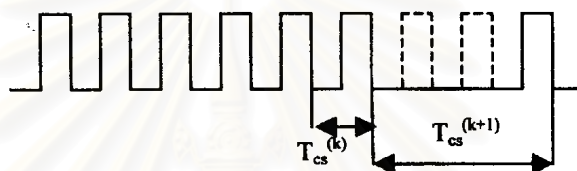
ส่วนสัญญาณอีกสัญญาณหนึ่งคือมุมของเพลาลูกเบี้ยว (Camshaft signal) หรือ S_p ซึ่งจะเป็นพัลส์ 1 พัลส์ต่อ 1 รอบการเคลื่อนที่ของเพลาลูกเบี้ยว (ความเร็วเป็นครึ่งหนึ่งของเพลลาข้อเหวี่ยง) ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งอ้างอิงตำแหน่งหนึ่งบนเพลาลูกเบี้ยว สัญญาณทั้งสองนี้จะถูกส่งไปยังส่วน actuator controller ดังภาพที่ 2.5

1. ส่วนแปลงสัญญาณ (Converter) เป็นส่วนที่แปลงสัญญาณองศาการจุดระเบิดล่วงหน้า , อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงที่ต้องการ และอัตราการไหลของอากาศที่ต้องการซึ่ง ECU ส่งการมา แปลงให้เป็นสัญญาณที่จะสั่งตัว actuator สำหรับในส่วนของการควบคุมปริมาณเชื้อเพลิง จะแปลงค่าปริมาณเชื้อเพลิงที่เครื่องยนต์ต้องการเป็นระยะเวลาที่ต้องการให้หัวฉีดเปิด หรือ t_{inj} ดังนั้นหากมีการเปลี่ยนแปลงตัว actuator เช่นเปลี่ยนหัวฉีดที่มีขนาดต่างจากเดิมจะเปลี่ยนแปลงโปรแกรมเฉพาะส่วนนี้เท่านั้น

2. ส่วน Synchronizer เป็นส่วนที่ค่อนข้างซับซ้อน มีหน้าที่กำหนดจังหวะการจ่ายเชื้อเพลิงให้เหมาะสมกับจังหวะการทำงานของเครื่องยนต์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 ประกอบด้วยส่วนย่อย ๆ 3 ส่วน ส่วนแรกได้แก่ส่วนที่ทำหน้าที่วัดระยะเวลา T_{cs} (แสดงได้ดังรูปที่ 2.8) โดยอาศัยสัญญาณนาฬิกาความถี่สูง ส่วนที่สองคือส่วนที่ทำหน้าที่ให้การตรวจจับ Missing Teeth โดยอาศัยการจับเวลาระหว่างขอบของสัญญาณพัลส์ลูกที่อยู่ติดกันว่าเกินกว่า 2 เท่าของช่วงเวลาที่ยับได้จากพัลส์คู่ก่อนหรือไม่ (ดูรูปที่ 2.8 ประกอบ) ส่วนสุดท้ายคือการสร้างสัญญาณสำหรับกำหนดจังหวะการทำงานให้กับวงจรขับตัวกระตุ้น (Actuator Driver)



รูปที่ 2.7 แสดง Block Diagram การทำงานของ Synchronizer

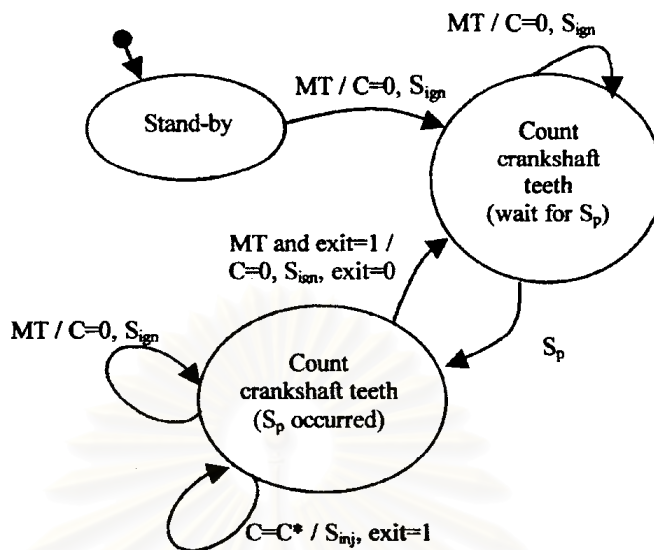


รูปที่ 2.8 แสดงการอ่านค่าสัญญาณ T_{cs} และการตรวจจับ Missing Teeth จะเห็นว่า

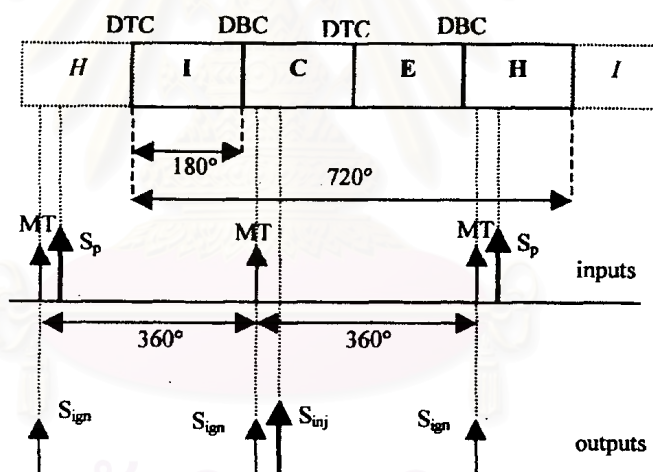
$$\text{ในจังหวะที่เกิด MT นั้น } T_{cs}^{(k)} > 2T_{cs}^{(k+1)}$$

แต่ละส่วนของ Synchronizer จะทำงานด้วยความถี่ไม่เท่ากัน โดยมีเฉพาะส่วนที่ใช้ในการจับเวลา T_{cs} เท่านั้นที่ต้องทำงานด้วยความถี่สูง อีก 2 ส่วนที่เหลือนั้นทำงานโดยอาศัยสัญญาณ S_{cs} เป็นตัวกระตุ้น

การทำงานของโปรแกรมควบคุมในส่วน synchronizer สามารถแสดงในรูปแบบ state diagram ได้ดังรูปที่ 2.9 ระบบจะออกจากสถานะ stand-by เมื่อตรวจพบสัญญาณ missing teeth หรือ MT ครั้งแรก ตัวนับ(counter) ที่ใช้ในการนับพัลส์ของสัญญาณ S_{cs} (crankshaft angle) จะรีเซ็ตเป็น 0 แล้วเริ่มนับใหม่จนกว่าจะถึงพัลส์แรกของสัญญาณ S_p (camshaft angle) พิจารณาจากสัญญาณดังภาพ 2.10 จะเห็นว่าเมื่อตรวจพบสัญญาณ MT ลูกสูบอาจจะทำงานในจังหวะอัดหรือคายก็ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบจังหวะการทำงานร่วมกับสัญญาณ S_p โดยถ้าหากตรวจพบสัญญาณ MT และ S_p ตามลำดับแสดงว่าเป็นจังหวะคาย เมื่อถึงสัญญาณ MT พัลส์ถัดไปจะเป็นจังหวะอัด โปรแกรมจะส่งสัญญาณ S_{inj} เพื่อให้ระบบฉีดเชื้อเพลิงเริ่มทำงานหลังจากนั้นเล็กน้อย ซึ่งกำหนดเป็นจำนวนพัลส์ของสัญญาณ C ซึ่งเริ่มนับหลังสัญญาณ MT ของจังหวะอัด



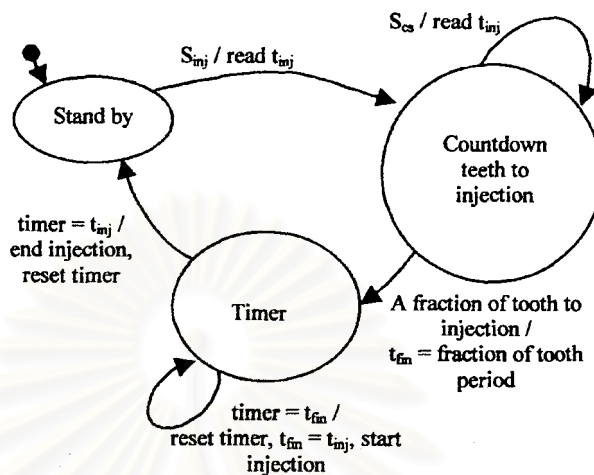
รูปที่ 2.9 State diagram ของการสร้างสัญญาณ synchronizer สำหรับการฉีดเชื้อเพลิง



รูปที่ 2.10 สัญญาณ MT และ S_p ที่ตรวจจับได้ในแต่ละจังหวะการทำงาน และการสร้างสัญญาณ S_{inj} ซึ่งเป็นสัญญาณ synchronizer สำหรับการฉีดเชื้อเพลิง (สัญญาณ S_{inj} เป็นสัญญาณ synchronizer สำหรับการจุดระเบิดซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้)

3. ส่วน Fuel Flow Driver มีหน้าที่แปลงระยะเวลาที่ต้องการให้หัวฉีดเปิดเป็นสัญญาณที่จะส่งให้กับหัวฉีด ข้อควรระวังอย่างหนึ่งเกี่ยวกับการฉีดเชื้อเพลิงคือ ควรหลีกเลี่ยงการฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่กระบอกสูบในจังหวะดูด ดังนั้นจึงมักสั่งให้เริ่มเปิดหัวฉีดหลังจากผ่านจังหวะดูดไปแล้ว

เล็กน้อย (ดูรูปที่ 2.10 ประกอบ) การทำงานของ Fuel Flow Driver สามารถเขียนเป็น State diagram ได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดง State diagram ของ Fuel flow driver

เมื่อได้รับสัญญาณ S_{inj} ข้อมูลระยะเวลาที่จะต้องเปิดหัวฉีดซึ่งถูกส่งมาจากส่วน converter (t_{inj}) จะถูกแปลงเป็นจำนวนพัลส์ของ T_{cs} และเศษส่วนของ T_{cs} คือ

$$t_{inj} = NT_{cs} + \Delta t_{inj}$$

ทุก ๆ พัลส์ของสัญญาณ S_{cs} (เพลาข้อเหวี่ยงหมุนไป 6°) ส่วน Fuel injection driver นี้ อาจจะอ่านค่า t_{inj} ซ้ำ และจะตัดสินใจว่าควรจะเริ่มให้หัวฉีดเปิดเมื่อใดภายในช่วงพัลส์ของ S_{cs} นั้น (successive tooth period) จากนั้นจะตั้งค่าตัวจับเวลา (Timer) เท่ากับ

$$t_{fin} = T_{cs} - \Delta t_{inj}$$

เพื่อจับเวลาให้หัวฉีดรอก่อนที่จะเริ่มฉีด หลังจากสิ้นสุดระยะเวลารอแล้ว ตัวจับเวลาตัวเดิมจะถูกเซตค่าเป็น $t_{fin} = t_{inj}$ แล้วเปิดหัวฉีด ด้วยวิธีการนี้จะทำให้หัวฉีดเปิดตามเวลาที่ต้องการโดยมีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของไฮโดรเจน

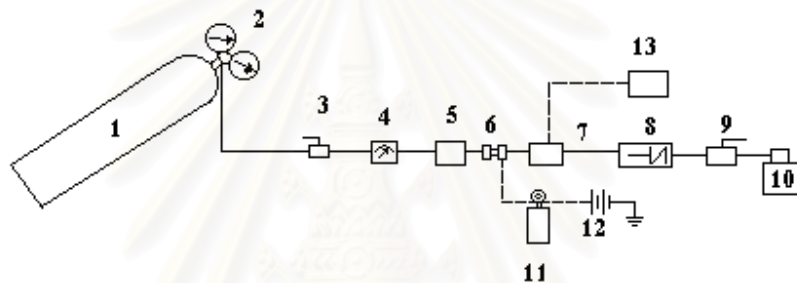
Property	Hydrogen	
	gaseous	liquid
1. Molecule mass	2.106	2.106
2. Density , g/cm ³ (20°C,760 mmHg)	83.764x10 ⁻⁶	0.0708
3. Specific heat absorption , J g ⁻¹ K	14.89	9.69
4. Dynamic viscosity , g cm ⁻¹ s	0.0000875	0.000133
5. Heat conduction , mW cm ⁻¹ K	1.987	1.00
6. Range of combustion in air in volume , %	4-75	-
7. Stoichiometric content in volume , %	29.63	-
8. Minimum ignition energy in air , mJ	0.02	-
9. Self-ignition temperature , K	858	-
10. Flame temperature in air , K	2318	-
11. Amount of heat energy in percentage emitted by the flame in environment	17-25	-
12. Combustion speed in air at normal conditions , cm s ⁻¹	265-325	-
13. Detonation rate in air at normal conditions , Km s ⁻¹	1.48-2.15	-
14. Diffusion coefficient in air at normal condition ,cm ² s ⁻¹	0.61	-
15. Rate of diffusion in air at normal conditions, cm s ⁻¹	2.00	-
16. Rate of rise in air at normal conditions , m s ⁻¹	1.2-9	-
17. Working mixture content-ratio of amount of air and fuel		
a) ratio of air and fuel (in units of weight)	364.8-4.8	-
b) ratio of air and fuel (in units of volume)	24-0.3	-
18. Theoretical content of the working mixture		
a) ratio of air and fuel (in units of weight)	34.3	
b) ratio of air and fuel (in units of volume)	2.38	
19. Low heat of combustion		
a) in mass kJ kg ⁻¹	120,000	-
b) in volume kJ cm ⁻²	-	8,496

บทที่ 3

งานวิจัยที่ผ่านมา

ระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบลูกเบี้ยว [5]

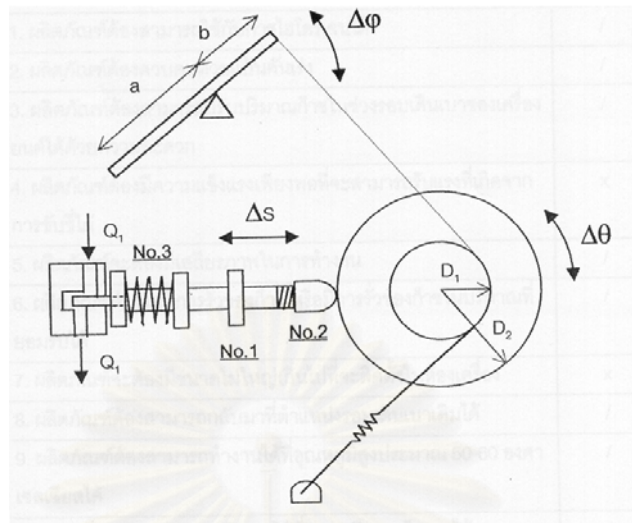
ในระบบการจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบเดิมที่ติดตั้งไว้ในรถยนต์ไฮโดรเจนของสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ. 2538 ปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนถูกควบคุมโดยการเหยียบคันเร่งด้วยวิธีเชิงกล ระบบเชื้อเพลิงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



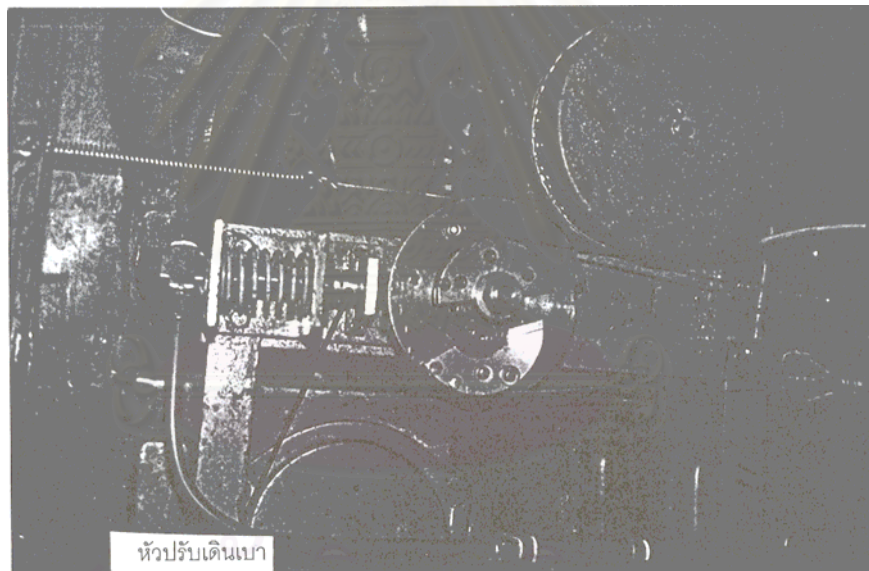
- | | | |
|----------------------|----------------------------|---------------------|
| 1. Hydrogen cylinder | 6. Solenoid valve | 10. Engine |
| 2. Regulator | 7. ชุดควบคุมปริมาณไฮโดรเจน | 11. Ignition switch |
| 3. Ball valve | 8. Check valve | 12. Battery |
| 4. Flowmeter | 9. Ball valve | 13. แปร้นคันเร่ง |
| 5. Filter | | |

รูปที่ 3.1 แสดงระบบจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนของรถยนต์ไฮโดรเจน

ตัวอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงเป็นลูกเบี้ยวของเหล็ก มีสายเชื่อมต่อกับคันเร่ง เมื่อมีการเหยียบคันเร่งจะทำให้ลูกเบี้ยวหมุน กดเข็มของวาล์วเข็ม (Needle valve) เปิดมากขึ้นทำให้เกิดการจ่ายไฮโดรเจนมากขึ้นตามไปด้วย ลักษณะของชุดควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.2 แสดงหลักการทำงานของลูกเบี้ยวที่ใช้ควบคุมปริมาณเชื้อเพลิง



รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายลูกเบี้ยวเมื่อติดตั้งเข้ากับรถยนต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

งานวิจัยเกี่ยวกับระบบควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิงแบบอิเล็กทรอนิกส์

ในเครื่องยนต์แก๊สโซลีนแบบเดิม ๆ นั้นจะอาศัยคาร์บูเรเตอร์ในการควบคุมอัตราส่วนผสมของอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งอาจจะควบคุมส่วนผสมได้ไม่เที่ยงตรง อาจจะทำให้ส่วนผสมหนาเกินไป ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียมาก หรืออาจจะบางเกินไปทำให้สมรรถนะของเครื่องยนต์ลดต่ำลง ดังนั้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมาจึงได้มีการนำเอาระบบควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Engine Control System; EEC) มาใช้แทน

ระบบควบคุมคอมพิวเตอร์ของบริษัทเจเนอรัลมอเตอร์ [6]

ระบบ Computer Command Control หรือ CCC ของบริษัทเจเนอรัลมอเตอร์พัฒนาขึ้นมาใช้ในรถยนต์ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1981 ใช้ได้ทั้งกับคาร์บูเรเตอร์แบบพีดีแบ็กและหัวฉีดเชื้อเพลิง

การทำงานของระบบ CCC จะทำงานโดยการตรวจจับสัญญาณต่าง ๆ และสร้างสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 3.4

Inputs	Codes	ECM	Codes	Outputs
Coolant Temperature Sensor	14, 15	ROM and PROM process information (inputs) and issue commands (outputs). RAM monitors indicated circuits, sets codes, and reads codes out when put in diagnostics.	23	Fuel Mixture
Vacuum Sensor	34		42	Electronic Spark Timing
Barometric Pressure Sensor (if used)	32		Electronic Spark Retard (if used)	
Throttle Position Sensor	21		Idle Speed	
Distributor Reference (crank position—engine speed)	12, 41		AIR Management	
Oxygen Sensor	13, 44, 45		EGR	
Vehicle Speed Sensor	24		Canister Purge	
Ignition On			Torque Converter Clutch (or shift light on manual transmission)	
Air Conditioner On/Off			Air Conditioner	
Park/Neutral Switch			Early Fuel Evaporation Diagnosis (check engine light)	
System Voltage			(test terminal)	
Transmission Gear Position Switch(es)			(serial data)	
Spark Knock Sensor (if used)	43			
EGR Vacuum Indicator Switch (only on 1984 and later models)	53			
Idle Speed Control Switch	35			

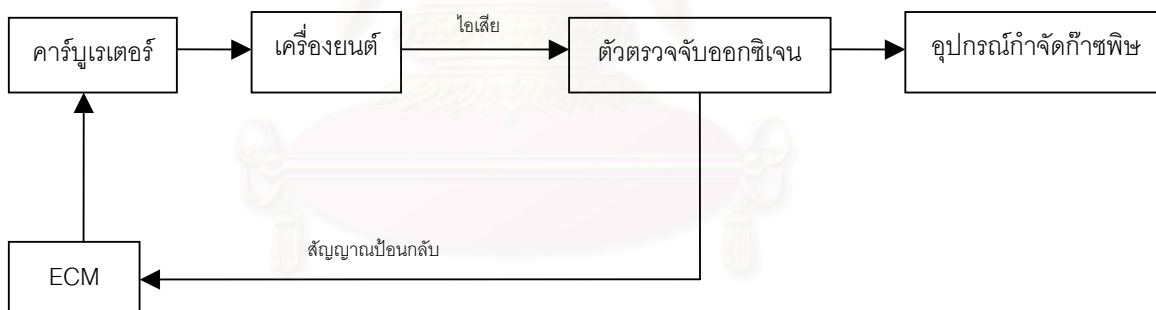
รูปที่ 3.4 แสดงสัญญาณ input และ output สำหรับระบบ CCC

หน่วยควบคุมของระบบเรียกว่าแผงควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Control Module; ECM) ทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณต่าง ๆ ที่ตรวจรับมาจากเครื่องยนต์แล้วมาทำการประมวลผลและสั่งงานระบบต่าง ๆ ต่อไป ภายใน ECM จะมีหน่วยความจำโปรแกรม (PROM) ซึ่งบรรจุข้อมูลแตกต่างกันตามชนิดของเครื่องยนต์ รถแต่ละรุ่นจะมี PROM เป็นของตัวเองและไม่สามารถเปลี่ยนกับรุ่นอื่น ๆ ได้

การทำงานของระบบ CCC มีอยู่ 2 โหมดพื้นฐานคือแบบวงจรมืด (Open-loop) และแบบวงจรมืด (Closed-loop)

การทำงานแบบวงจรมืด (Closed-loop)

ก่อนที่ระบบควบคุมจะเข้ามาทำงานในโหมดวงจรมืดได้นั้น อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นจะต้องสูงพอ (ประมาณ 65 องศาเซลเซียส) อุณหภูมิไอเสียต้องสูงถึงประมาณ 300 องศาเซลเซียส และต้องผ่านการสตาร์ทเครื่องยนต์ไปแล้วช่วงเวลาหนึ่งซึ่งช่วงเวลานี้จะแตกต่างกันไปตามชนิดของเครื่องยนต์ อาจใช้เวลาเพียงไม่กี่วินาที หรืออาจจะนานถึง 2-3 นาที การทำงานแบบวงจรมืดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงการควบคุมแบบวงจรมืด (Closed-loop)

ตัวตรวจจับออกซิเจนจะทำหน้าที่วัดปริมาณออกซิเจนในไอเสีย หากส่วนผสมระหว่างอากาศและน้ำมันหนาเกินไป ปริมาณออกซิเจนในไอเสียจะมีน้อย ตัวตรวจจับออกซิเจนจะส่งสัญญาณไปยัง ECM เพื่อให้สั่งการให้จ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงน้อยลงให้ส่วนผสมบางลง ในทำนองเดียวกันหากส่วนผสมบางเกินไป ตัวตรวจจับออกซิเจนก็จะส่งสัญญาณไปยัง ECM ให้ฉีดน้ำมันมากขึ้น

ระบบควบคุมจะออกจากการทำงานในโหมดวงจรปิดนี้เมื่อเครื่องยนต์ทำงานในสถานะปีกผีเสื้อเปิดสุด หรือเมื่ออุณหภูมิหล่อเย็นลดต่ำกว่าที่กำหนดไว้ หรือเมื่อเกิดการผิดปกติของอุปกรณ์ต่าง ๆ

การทำงานแบบวงจรเปิด (Open-loop)

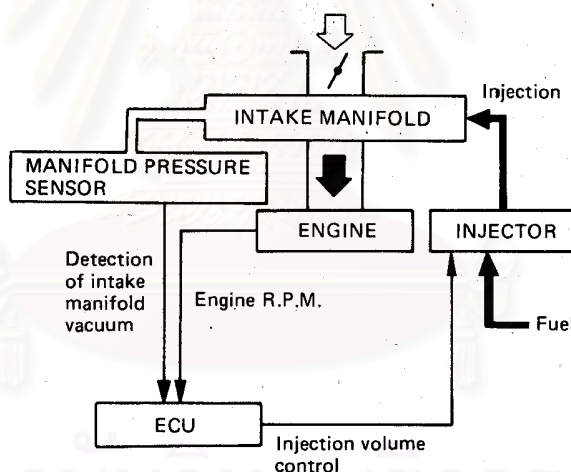
การทำงานแบบวงจรเปิดนี้จะไม่มีการป้อนกลับของสัญญาณจากตัวตรวจจับออกซิเจน ดังนั้น ECM จึงไม่สามารถทราบได้ว่าปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่จ่ายออกไปทำให้ได้ความหนาบางของส่วนผสมตรงตามที่ต้องการหรือไม่ ในโหมดการทำงานแบบวงจรเปิดนี้จะแบ่งออกเป็นโหมดย่อย ๆ อีกหลายโหมดคือ

- **ส่วนผสมหนาตอนสตาร์ท** ECM จะสั่งฉีดน้ำมันมากเป็นพิเศษในช่วงระยะเวลาหนึ่งหลังการสตาร์ทเครื่องยนต์ ช่วงเวลานี้จะนานเท่าใดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเครื่องยนต์ ซึ่งจะทราบได้จากอุณหภูมิของสารหล่อเย็น หากเป็นการสตาร์ทขณะที่เครื่องเย็น ช่วงเวลานี้จะนานกว่าปกติ
- **Blend Enrichment** การทำงานในโหมดนี้จะเกิดขึ้นระหว่างที่เครื่องยนต์ทำการ warm-up อุณหภูมิของสารหล่อเย็นและตัวตรวจจับออกซิเจนยังไม่เข้าสู่อุณหภูมิทำงาน ECM จะทำหน้าที่ควบคุมส่วนผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันโดยอาศัยข้อมูลจากอุณหภูมิสารหล่อเย็น, ตำแหน่งปีกผีเสื้อ, ความดันในท่อร่วมไอดี, ความดันบรรยากาศ และความเร็รรอบของเครื่องยนต์ โดยเมื่ออุณหภูมิของเครื่องยนต์สูงขึ้น ECM จะสั่งส่วนผสมบางลง การทำงานในโหมดนี้ ECM จะใช้ข้อมูลจาก PROM เท่านั้น หากส่วนผสมบางหรือหนาเกินไป ECM จะไม่ทราบและไม่มีการปรับแก้ไขจนกว่าจะได้ค่าที่ถูกต้อง
- **ส่วนผสมหนาขณะเร่งเครื่อง (Power Enrichment)** การทำงานในโหมดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อปีกผีเสื้อเปิดจนเกือบสุด ความดันในท่อร่วมไอดีเกือบจะเท่ากับความดันบรรยากาศ ECM จะสั่งให้ส่วนผสมหนากว่าปกติ
- **Shut Down** การทำงานในโหมดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วรอบต่ำกว่า 200 rpm หรือค่าแรงดันของแบตเตอรี่ที่จ่ายให้กับ ECM มีค่าต่ำกว่า 9 โวลต์
- **ระบบสำรอง** การทำงานในโหมดนี้จะสั่งงานให้เครื่องยนต์ทำงานต่อไปได้ถึงแม้ว่าระบบจะเกิดความเสียหาย ไม่ว่าจะเป็นที่ตัวตรวจจับสัญญาณใด ๆ หรือแม้กระทั่งเกิดความผิดปกติขึ้นกับ ECM เอง

ระบบฉีดเชื้อเพลิงของโตโยต้า [7]

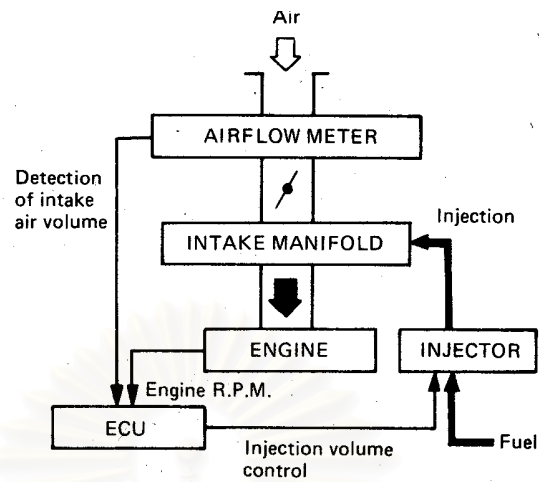
ระบบฉีดเชื้อเพลิงของโตโยต้าพัฒนามาจากระบบฉีดเชื้อเพลิงของบอช (Bosch) โตโยต้าได้พัฒนาระบบควบคุมโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเรียกว่าระบบ EFI (Electronic fuel injection) ระบบนี้แบ่งเป็นแบบต่าง ๆ ดังนี้

1. **แบบ D-EFI หรือ Manifold pressure control type** ระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบนี้ควบคุมปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงด้วยความดันในท่อไอดี ในขณะที่เครื่องยนต์ทำงาน ความดันในท่อไอดีจะต่ำกว่าความดันบรรยากาศ หรือเป็นสุญญากาศ สัญญาณจากความดันในท่อไอดีจะถูกส่งไปยังอุปกรณ์ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเรียกว่า ECU (Electronic Control Unit) นอกจากนี้ยังมีสัญญาณความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ถูกส่งไปยัง ECU เพื่อคำนวณปริมาณของอากาศที่เข้าสู่เครื่องยนต์ ECU จะทำหน้าที่คำนวณเวลาที่หัวฉีดควรจะฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าไปในท่อไอดีในปริมาณที่จะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์พอดี หลักการทำงานของระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบ D-EFI สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงหลักการทำงานของระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบ D-EFI

2. **แบบ L-EFI หรือ Air flow control type** ระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบนี้มีมาตรวัดปริมาณอากาศ (Air flow meter) วัดปริมาณอากาศซึ่งไหลอยู่ในท่อไอดีโดยตรง สัญญาณจากมาตรวัดอากาศและความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะถูกส่งไปยัง ECU เพื่อคำนวณเวลาที่หัวฉีดจะฉีดน้ำมันเข้าไปผสมกับอากาศในท่อไอดีในอัตราส่วนที่เผาไหม้สมบูรณ์พอดี หลักการทำงานของระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบ L - E F I สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 . 7

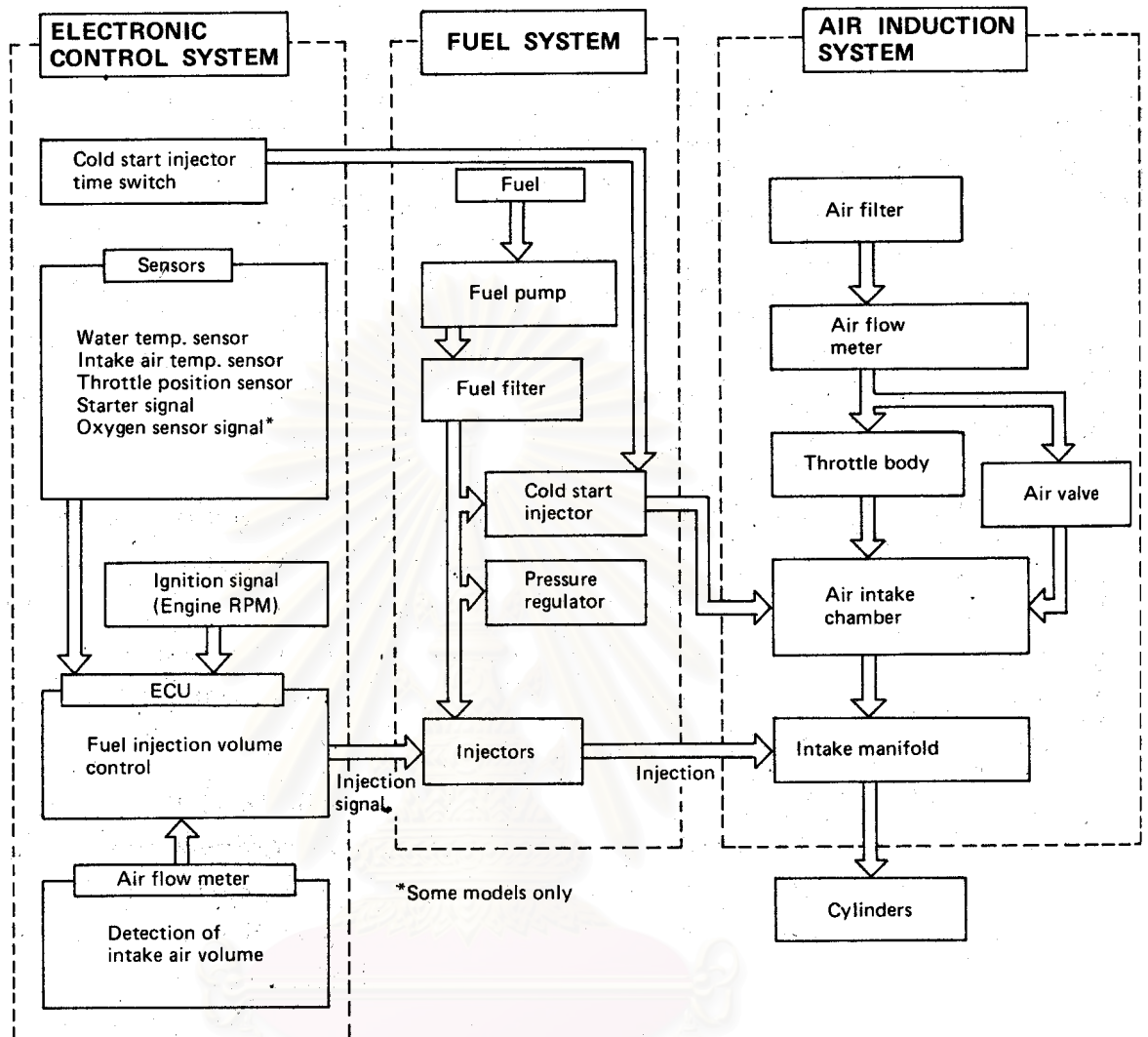


รูปที่ 3.7 แสดงหลักการทำงานของระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบ EFI-L

การควบคุมปริมาณการฉีดเชื้อเพลิง

ในระบบฉีดเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์ (EFI) มีระบบควบคุมพื้นฐานอยู่ 3 ระบบดังรูปที่ 3.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 แสดงแผนภูมิระบบควบคุมการฉีดเชื้อเพลิงพื้นฐาน

1. ระบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic control system) ระบบนี้ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์หรือหน่วยควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (ECU) ซึ่งจะรับสัญญาณไฟฟ้าจากหน่วยส่งสัญญาณต่าง ๆ เช่น มาตรวัดอากาศ (Air flow meter) ส่งสัญญาณบอกปริมาณของอากาศที่ไหลผ่านท่อไอดี สัญญาณจากคอยล์จุดระเบิด (Ignition signal) ซึ่งจะบอกความเร็วรอบเครื่องยนต์ สัญญาณจากหน่วยส่งอื่น ๆ (Sensor) ซึ่งจะทำหน้าที่ปรับแก้อัตราส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิง เช่นอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น อุณหภูมิอากาศที่ไหลผ่านท่อไอดี ตำแหน่งของคันเร่ง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ช่วยอื่น ๆ เช่นสวิตช์จำกัดเวลา (Time switch) สำหรับฉีดเชื้อเพลิงช่วยสตาร์ทขณะเครื่องยนต์เย็น (Cold start)

เป็นต้น สัญญาณไฟฟ้าจะถูกส่งเข้า ECU เพื่อคำนวณเวลาให้หัวฉีดฉีดเชื้อเพลิงเข้าในท่อไอดีในปริมาณที่เหมาะสมกับสภาพการทำงานของเครื่องยนต์

2. ระบบเชื้อเพลิง (Fuel system) ระบบนี้จะทำหน้าที่ส่งน้ำมันเชื้อเพลิงจากถังเก็บไปยังหัวฉีด น้ำมันเชื้อเพลิงจากถังจะถูกปั๊มน้ำมัน (Fuel pump) ขับให้เกิดความดันไปตามท่อ ผ่านไส้กรองน้ำมัน (Fuel Filter) โดยมีอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน (Pressure regulator) เป็นตัวควบคุม ส่วน ECU ซึ่งรับสัญญาณจากอุปกรณ์ควบคุมต่าง ๆ จะเป็นตัวควบคุมให้เข็มของหัวฉีดฉีดเชื้อเพลิงในจังหวะและปริมาณที่เหมาะสม ในระบบเชื้อเพลิงจะมีหัวฉีดช่วยสตาร์ทขณะเครื่องยนต์เย็น (Cold start injection) ทำหน้าที่ช่วยฉีดเชื้อเพลิงขณะที่สตาร์ทเครื่องยนต์

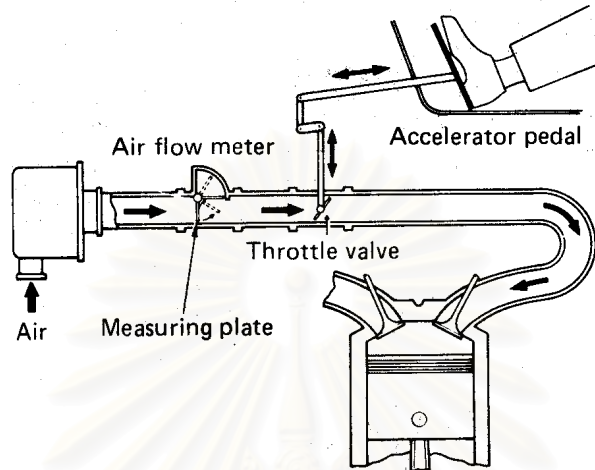
3. ระบบประจุอากาศ (Air induction system) อากาศจะถูกดูดเข้าไปในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ ผ่านอุปกรณ์ต่าง ๆ คือหม้อกรองอากาศ (Air filter) มาตรวัดอากาศ (Air flow meter) เรือนลิ้นคั่นแรง (Throttle valve body) ห้องไอดี (Air intake chamber) ท่อไอดี (Intake manifold)

ระบบควบคุมทั้ง 3 ระบบนี้จะทำงานประสานกันทำให้สามารถกำหนดปริมาณเชื้อเพลิงที่เหมาะสมฉีดเข้าไปในท่อไอดี ทำให้อัตราส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิงพอดีสำหรับการทำงานตามสภาวะการใช้งานของเครื่องยนต์ ซึ่งมีสภาวะการทำงานเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

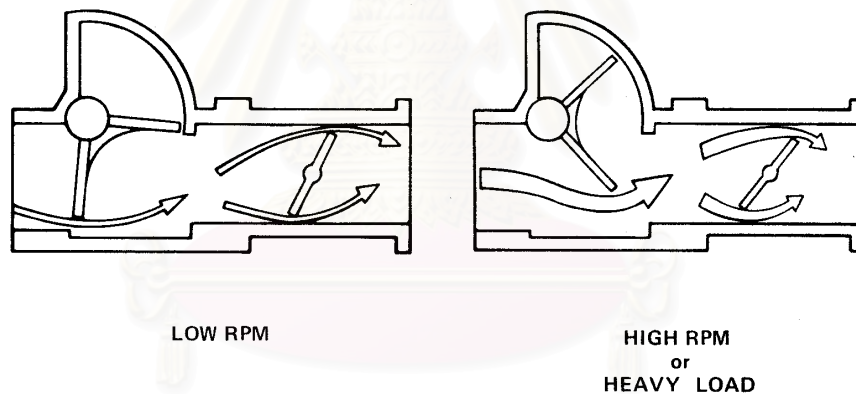
การควบคุมปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงพื้นฐาน (Basic inject volume control) อัตราส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิงที่เผาไหม้สมบูรณ์โดยทางทฤษฎีจะเป็น 15:1 โดยน้ำหนัก นั่นคืออากาศหนัก 15 กรัมจะต้องใช้เชื้อเพลิง 1 กรัมเป็นส่วนผสม หน่วยหลักที่จะควบคุมให้อัตราส่วนผสมของอากาศและน้ำมันเชื้อเพลิงได้สัดส่วนพอดีทางทฤษฎีคือปริมาณอากาศที่ไหลเข้าสู่กระบอกสูบซึ่งวัดโดยมาตรวัดอากาศ (สำหรับระบบ EFI-L) หรือความดันในท่อไอดี (สำหรับระบบ EFI-D) และความเร็วยรอบของเครื่องยนต์ซึ่งส่งสัญญาณมาจากคอยล์จุดระเบิด

1. **การวัดปริมาณอากาศที่เข้าสู่เครื่องยนต์** เนื่องจากในการควบคุมปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงพื้นฐานเป็นการควบคุมอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงให้มีค่าคงที่ ดังนั้นจึงต้องมีการวัดปริมาณอากาศที่เข้าสู่เครื่องยนต์ ทั้งระบบ EFI-D และ EFI-L มีการวัดปริมาณอากาศด้วยวิธีต่างกัน ในระบบ EFI-D อาศัยหลักการทำงานของปีกผีเสื้อในการวัดปริมาณอากาศ กล่าวคือเมื่อปีกผีเสื้อเปิดน้อย ความดันในท่อไอดีจะมีค่าเกือบเป็นสุญญากาศ เมื่อเหยียบคันเร่ง ปีกผีเสื้อจะเปิดมากขึ้นทำให้ความดันในท่อไอดีมีค่าเกือบเท่ากับบรรยากาศ ดังนั้นระบบ EFI-D จึงอาศัยการวัดความดันในท่อไอดีเป็นตัวบอกปริมาณของอากาศที่ไหลเข้าสู่เครื่องยนต์

ส่วนในระบบ EFI-L นั้นวัดอัตราการไหลของอากาศโดยอาศัยมาตรวัดอากาศโดยตรง มาตรวัดอากาศที่ใช้มีหลายแบบ ดังแสดงตัวอย่างไว้ในรูปที่ 3.9 และ 3.10

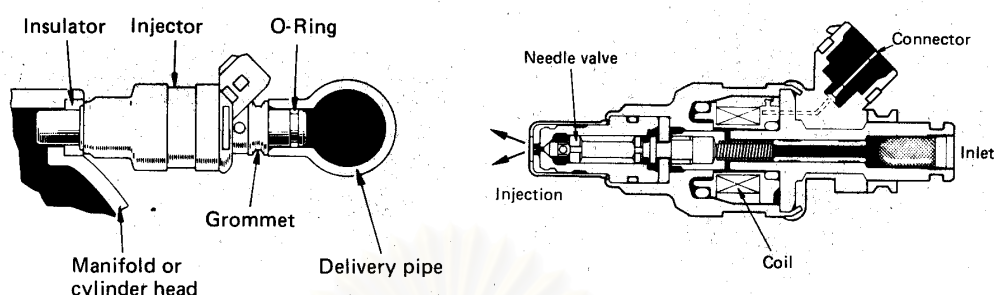


รูปที่ 3.9 แสดงการบรรจ้อากาศเข้ากระบอกลูกสูบ



รูปที่ 3.10 แสดงการเปิดลิ้นของมาตรวัดอากาศที่ความเร็วเดินเบาและความสูง

2. การไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง สำหรับวงจรน้ำมันเชื้อเพลิงนั้น น้ำมันจากถังจะถูกอัดความดันโดยปั้มน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel pump) ไปสู่อหัวฉีด (Injector) ผ่านได้กรองน้ำมัน แต่กระบอกลูกสูบของเครื่องยนต์จะมีหัวฉีดสูบละหัว น้ำมันเชื้อเพลิงในระบบจะมีความดันคงที่โดยการควบคุมของตัวควบคุมความดัน (Pressure regulator) หัวฉีดเป็นแบบเข็มลมหนูไฟฟ้า (Solenoid valve) ซึ่งเข็มลมหนูจะยกขึ้นจากบ่าให้น้ำมันเชื้อเพลิงฉีดออกไปเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดทำให้เกิดแม่เหล็กไฟฟ้า เข็มลมหนูจะยกขึ้นในจังหวะและเวลาที่เหมาะสม รูปที่ 3.11 แสดงหัวฉีด



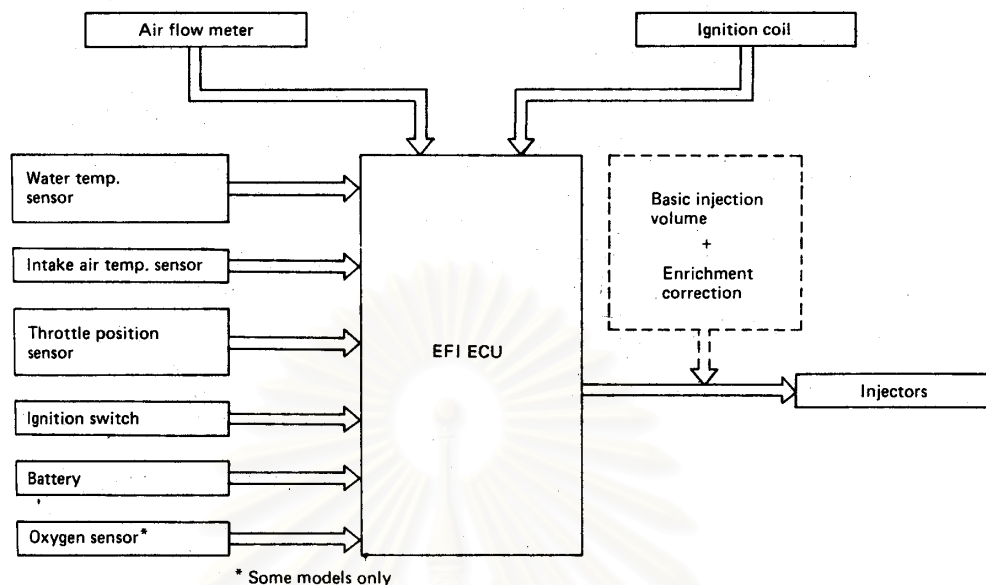
รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะของหัวฉีด

3. **จังหวะและเวลาในการฉีดเชื้อเพลิง** ปริมาตรของอากาศที่ไหลเข้าสู่เครื่องยนต์ไม่ว่าจะวัดโดยอาศัยความดันในท่อไอดี หรือวัดจากมาตรวัดอากาศโดยตรง จะถูกเปลี่ยนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าส่งเป็นสัญญาณให้กับ ECU หรือหน่วยควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ ในเวลาเดียวกันสัญญาณไฟแรงดันต่ำจากคอยล์จุดระเบิดก็จะถูกป้อนเข้า ECU ด้วยเพื่อบอกความเร็วรอบของเครื่องยนต์และจังหวะการจุดระเบิดของแต่ละกระบอกสูบ ECU จะคำนวณเวลาที่จะให้เข็มนมหนูหัวฉีดยกขึ้นว่าจะยกนานเท่าไรในช่วงเวลาใด

การควบคุมหัวฉีดสามารถทำได้หลายแบบ เช่นอาจจะแบ่งหัวฉีดเป็นกลุ่ม หรือควบคุมทุกหัวฉีดพร้อม ๆ กัน ทั้งนี้ขึ้นกับรุ่นของเครื่องยนต์ ตัวอย่างเช่นการควบคุมหัวฉีดสำหรับเครื่องยนต์ 4 สูบ อาจจะแบ่งหัวฉีดเป็น 2 กลุ่ม ๆ ละ 2 ตัว เป็นต้น

การปรับแก้อัตราส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศ ในการควบคุมปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงขึ้นพื้นฐานนั้นจะให้อัตราส่วนผสมที่เผาไม่สมบูรณ์ตามทฤษฎีเท่านั้น ในการใช้งานจริงเครื่องยนต์ทำงานในสภาพที่แตกต่างกันอยู่ตลอดเวลา จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับปรับแก้เพื่อให้อัตราส่วนผสมเหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริงแต่ละขณะ เช่นในขณะเครื่องยนต์อุณหภูมิต่ำหรือใช้งานหนักจะต้องใช้ส่วนผสมหนา (Rich mixture) ระบบฉีดเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์ก็มีการปรับแก้อัตราส่วนผสมเช่นเดียวกับคาร์บูเรเตอร์

การปรับแก้อัตราส่วนผสมของอากาศและน้ำมันเชื้อเพลิงในระบบฉีดเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์มี 2 วิธีคือวิธีควบคุมโดยใช้ ECU และการใช้อุปกรณ์ช่วยที่ไม่ต้องควบคุมโดย ECU



รูปที่ 3.12 แสดงแผนภูมิการทำงานของระบบการปรับแก้สัดส่วนผสมของอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิง โดยใช้ ECU

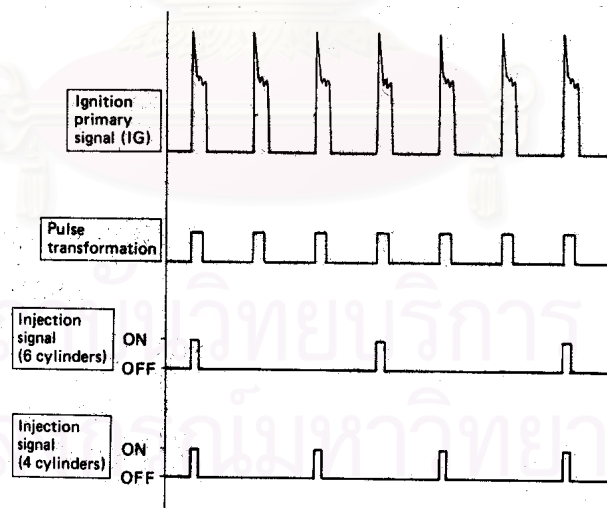
- ตัวตรวจจับอุณหภูมิน้ำ (Water temperature sensor) ECU จะสั่งการให้จ่ายเชื้อเพลิงมากกว่าปกติถ้าหากน้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิต่ำ
- ตัวตรวจจับอุณหภูมิของอากาศ (Air temperature sensor) ECU จะสั่งให้จ่ายเชื้อเพลิงให้เหมาะสมกับอุณหภูมิอากาศ หากอากาศมีอุณหภูมิต่ำจะจ่ายเชื้อเพลิงมาก และถ้าอากาศมีอุณหภูมิสูงจะจ่ายเชื้อเพลิงน้อย
- ตัวตรวจจับตำแหน่งลิ้นเร่ง (Throttle position sensor) ECU จะสั่งให้เพิ่มระยะเวลาการฉีดเชื้อเพลิงให้เหมาะสมกับความเร็วรอบ เช่นขณะเดินเบา , ขณะเร่งเครื่องยนต์หรือขณะรับภาระสูงสุด (Full load)
- สัญญาณสตาร์ท (Starting signal) ECU จะสั่งให้ฉีดเชื้อเพลิงด้วยอัตราส่วนผสมมากกว่าปกติ ขณะที่เริ่มสตาร์ทเครื่องยนต์ในช่วงแรก ๆ

หน้าที่ของ ECU ในการควบคุมการฉีดเชื้อเพลิงจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือควบคุมปริมาณการฉีดเชื้อเพลิง (Injection volume control) และควบคุมจังหวะการฉีดเชื้อเพลิง (Injection timing) จังหวะการฉีดเชื้อเพลิงคือการกำหนดเวลาให้หัวฉีดแต่ละหัวฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปในท่อไอดี ECU จะควบคุมจังหวะโดยอาศัยสัญญาณการจุดระเบิดจากไฟแรงดันต่ำของคอยล์จุดระเบิด (IG) ปริมาณ

เชื้อเพลิงที่จะฉีดเข้าไปในระบบถูกกำหนดโดยสัญญาณการฉีดพื้นฐาน (Basic injection signal) และสัญญาณจากการปรับแก้ส่วนผสม (Injection volume signal) นอกจากนี้ยังมีวงจรถูกปรับช่วย ซึ่งจะช่วยการทำงานของหัวฉีด

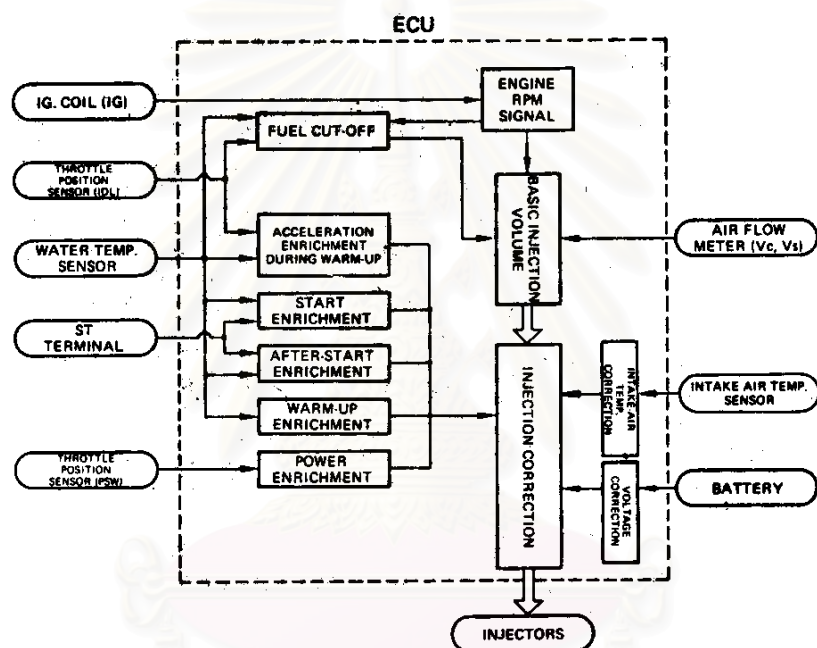
สัญญาณการฉีดเชื้อเพลิงพื้นฐานกำหนดโดยสัญญาณความเร็วรอบของเครื่องยนต์และสัญญาณปริมาณอากาศที่ไหลเข้าสู่เครื่องยนต์ (สำหรับระบบ EFI-D จะอาศัยความดันในท่อไอดี ส่วนในระบบ EFI-L จะใช้มาตรวัดปริมาณอากาศโดยตรง) ส่วนสัญญาณในการปรับแก้ส่วนผสมได้มาจากสัญญาณอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น, สัญญาณอุณหภูมิของไอดี, สัญญาณตำแหน่งของคันเร่ง, สัญญาณจากมอเตอร์สตาร์ท ฯลฯ ซึ่งจะช่วยให้ส่วนผสมหนาขึ้นกว่าปกติเมื่อเครื่องยนต์เข้าสู่สภาวะที่ต้องการแล้ว

- **การควบคุมการฉีดเชื้อเพลิง** หัวฉีดแต่ละหัวของระบบฉีดเชื้อเพลิงจะฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง 2 ครั้งต่อวงจรการทำงาน คือจะฉีดในรอบการหมุนของเพลลาข้อเหวี่ยง การฉีดเชื้อเพลิงจะกำหนดโดยสัญญาณจากการจุดระเบิด ในเครื่องยนต์ 4 สูบจะมีการฉีดเชื้อเพลิง 1 ครั้งต่อการเกิดไฟแรงสูงที่คอยล์ 2 ครั้ง สำหรับเครื่องยนต์ 6 สูบ หัวฉีดแต่ละหัวจะฉีดเชื้อเพลิง 1 ครั้งต่อการเกิดไฟแรงสูงที่คอยล์ 3 ครั้ง การกำหนดการฉีดเชื้อเพลิงทำได้โดยการเปลี่ยนสัญญาณจุดระเบิดจากวงจรไฟแรงดันต่ำของคอยล์เป็นพัลส์ แล้วเปลี่ยนพัลส์เป็นสัญญาณการฉีดเชื้อเพลิงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงการเปลี่ยนสัญญาณจุดระเบิดจากวงจรไฟแรงต่ำเป็นสัญญาณการฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ 6 สูบและ 4 สูบ

- การควบคุมปริมาณการฉีดเชื้อเพลิง รูปที่ 3.14 เป็นแผนภูมิการป้อนสัญญาณเข้า ECU เพื่อควบคุมปริมาณการฉีดเชื้อเพลิง สัญญาณจากคอยล์จุดระเบิด (IG) ที่ป้อนเข้ามาถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณบอกความเร็วรอบเครื่องยนต์ (Engine rpm) และสัญญาณจากมาตรวัดอากาศ (หรือความดันในท่อไอดี) จะถูกแปลเป็นสัญญาณปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงพื้นฐาน (Basic injection volume) จากนั้นสัญญาณจากหน่วยปรับปรุงอัตราส่วนผสมต่าง ๆ จะถูกป้อนเข้าไปเพื่อปรับปริมาณเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปในท่อไอดีให้เหมาะสมกับสภาพการทำงานแต่ละขณะ โดยกำหนดเวลาให้หัวฉีดแต่ละหัวฉีดเชื้อเพลิงเป็นเวลาที่เหมาะสม



รูปที่ 3.14 แสดงแผนภูมิการป้อนสัญญาณเข้า ECU เพื่อควบคุมปริมาณการฉีดเชื้อเพลิง

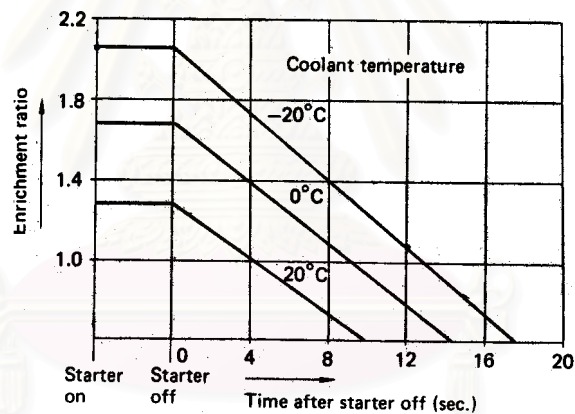
- ปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงพื้นฐาน สำหรับระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบ EFI-L ปริมาณเชื้อเพลิงพื้นฐานกำหนดโดยความเร็วรอบของเครื่องยนต์และปริมาณอากาศที่เข้าสู่กระบอกสูบ โดยความสัมพันธ์จะเป็นดังสมการ

$$\text{ปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงพื้นฐาน} = K \frac{\text{ปริมาณของอากาศที่บรรจุเข้ากระบอกสูบ}}{\text{ความเร็วรอบของเครื่องยนต์}}$$

เมื่อ K = ค่าสัมประสิทธิ์

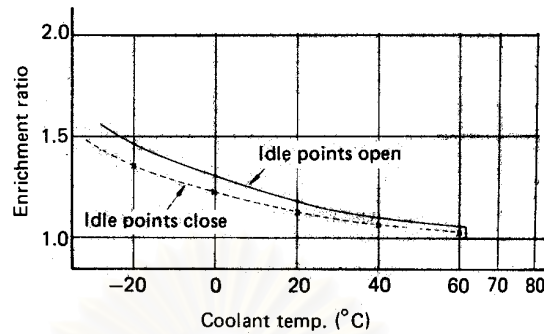
ส่วนในระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบ EFI-D ปริมาณเชื้อเพลิงจะถูกควบคุมโดยความดันในท่อไอดีและความเร็วรอบ ลักษณะของการกำหนดปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงพื้นฐานจะเป็นในลักษณะการกำหนดค่าในตาราง

- การปรับแก้อัตราส่วนผสม เพื่อให้เครื่องยนต์ทำงานได้ดีทุกสภาพการทำงานจึงได้ปรับแก้อัตราส่วนผสมให้เหมาะสม ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้
 1. การทำให้ส่วนผสมหนาในขณะสตาร์ทเครื่องและหลังจากสตาร์ทเครื่อง ในขณะที่เครื่องยังเย็นอยู่การสตาร์ทเครื่องจะติดได้ยาก และเมื่อเครื่องยนต์ติดแล้วเครื่องยนต์ก็ยังมีกำลังไม่ดี เพราะน้ำมันเชื้อเพลิงระเหยได้ยากทำให้การเผาไหม้ไม่ดี เพื่อแก้ปัญหานี้จะต้องฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปผสมกับอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้ส่วนผสมหนาขึ้น ปัจจัยที่ควบคุมให้ฉีดเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นคืออุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นและมอเตอร์สตาร์ท



รูปที่ 3.15 กราฟแสดงการเพิ่มเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิของเครื่องยนต์ต่ำ

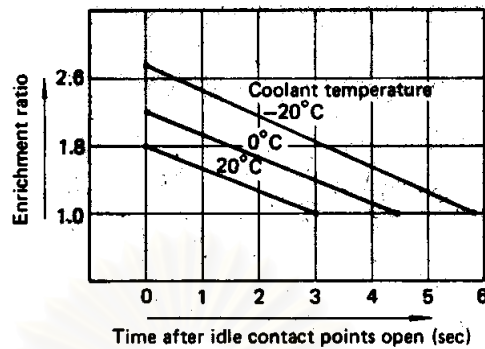
2. การทำให้ส่วนผสมหนาเพื่ออุ่นเครื่องยนต์ เพื่อให้เครื่องยนต์มีกำลังดีเมื่อขับที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 20°C) ปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับอุณหภูมิดังรูปที่ 3.16 เพื่อประหยัดเชื้อเพลิงขณะอุ่นเครื่องจึงไม่ควรเหยียบคันเร่ง เพราะเมื่อคันเร่งอยู่ที่ตำแหน่งเดินเบา อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะลดลง สัญญาณที่บ่งชี้ให้ ECU จะส่งมาจากตัวตรวจจับอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น



รูปที่ 3.16 กราฟแสดงอัตราการผลิตเชื้อเพลิงเพื่อการอุ่นเครื่องยนต์

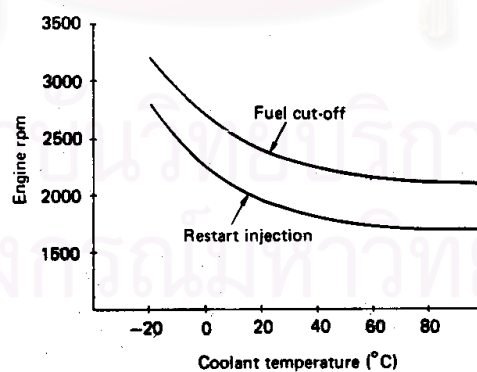
- การปรับแก้อัตราส่วนผสมเนื่องจากอุณหภูมิของไอดี ขณะที่อุณหภูมิต่ำอากาศจะมีความหนาแน่นมาก ปริมาณอากาศจะมากกว่าเมื่ออุณหภูมิสูงเมื่อมีปริมาตรเท่ากัน ฉะนั้นขณะอากาศเย็นน้ำมันเชื้อเพลิงจะต้องฉีดเพิ่มมากขึ้น และเมื่ออากาศร้อนต้องฉีดน้ำมันลดลงเพื่อให้อัตราส่วนผสมเหมาะสมกับสภาพการทำงาน ECU แก้ปัญหาอัตราส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงโดยใช้สัญญาณจากหน่วยส่งสัญญาณอุณหภูมิไอดี ในการทำงานจะกำหนดให้อุณหภูมิ 20 °C ใช้เป็นอุณหภูมิมาตรฐาน จะต้องฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่านี้ และฉีดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่านี้
- การเพิ่มส่วนผสมให้หนาขณะอุ่นเครื่องยนต์เพื่อปรับปรุงการขับให้ดีขึ้น ขณะเครื่องยนต์เย็นจะต้องเพิ่มส่วนผสมให้หนาในช่วงอุ่นเครื่องยนต์ เมื่อเริ่มเหยียบคันเร่ง ตัวตรวจจับตำแหน่งปีกผีเสื้อจะตรวจพบว่าเครื่องยนต์ไม่อยู่ในสภาวะเดินเบา (Idle) จากนั้น ECU จะสั่งให้เพิ่มปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงนานช่วงเวลาหนึ่ง สัญญาณที่ ECU ใช้ในการกำหนดคำสั่งคือระยะเวลาหลังจากที่ปีกผีเสื้อไม่ได้อยู่ในตำแหน่งเดินเบา สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.17

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.17 กราฟแสดงอัตราการเพิ่มเชื้อเพลิงเพื่อการเร่งเครื่องยนต์ขณะเครื่องเย็น

5. การเพิ่มอัตราส่วนผสมเพื่อให้กำลังสูง เครื่องยนต์ที่ใช้คาร์บูเรเตอร์จะมีวงจรถูกปรับเพื่อให้ส่วนผสมหนาเมื่อเหยียบคันเร่งมาก ในระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบอิเล็กทรอนิกส์ก็เช่นเดียวกัน เมื่อคันเร่งเปิดกว้างเกินกว่า 50-60 องศาจากตำแหน่งปิด ซึ่งเป็นตำแหน่งภาระสูงสุด (Full load) ตัวตรวจจับตำแหน่งของปีกผีเสื้อจะส่งสัญญาณบอกไปยัง ECU แล้ว ECU จะสั่งให้ฉีดเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น
6. การตัดการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง ในขณะที่เบรก ปีกผีเสื้อจะอยู่ในตำแหน่งเดินเบา ถ้าความเร็วของเครื่องยนต์สูงเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ ECU จะสั่งให้หยุดฉีดน้ำมันเพื่อลดมลพิษจากไอเสียและประหยัดน้ำมัน ถ้าอุณหภูมิของเครื่องยนต์ต่ำ ความเร็วที่จะตัดน้ำมันเชื้อเพลิงจะสูงขึ้นเพื่อป้องกันเครื่องยนต์สั่น การตัดการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 กราฟแสดงการตัดการฉีดเชื้อเพลิงที่ความเร็วต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ

7. การตรวจแก้แรงเคลื่อนไฟฟ้า ECU จะคำนวณเวลาสำหรับฉีดเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้อัตราส่วนผสมที่ถูกต้องตรงตามความต้องการของเครื่องยนต์ แล้วส่งสัญญาณให้หัวฉีดทำงาน ในหัวฉีดจะมีเข็มมนหนูซึ่งยกเปิดปิดด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า การยกของเข็มนี้จะช้ากว่าสัญญาณที่ส่งไปจาก ECU ดังนั้นจึงต้องเสียเวลาไปชั่วขณะหนึ่ง ทำให้ส่วนผสมบางกว่าที่คำนวณไว้ เหตุนี้ ECU จึงต้องคำนวณเวลาที่เสียไปนี้ด้วย

เนื่องจากเข็มมนหนูหัวฉีดทำงานด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า ฉะนั้นเวลาที่เสียไปจึงขึ้นกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วย เวลาที่เสียไปจะมากถ้าแรงเคลื่อนจากแบตเตอรี่ต่ำ และเสียเวลาน้อยหากแรงเคลื่อนของแบตเตอรี่สูง แรงเคลื่อนมาตรฐานที่กำหนดไว้คือ 14 โวลต์ หากแบตเตอรี่มีแรงเคลื่อนมากหรือน้อยกว่านี้ ECU ก็จะทำการคำนวณเวลาที่ตรงชดเชยให้กับหัวฉีด

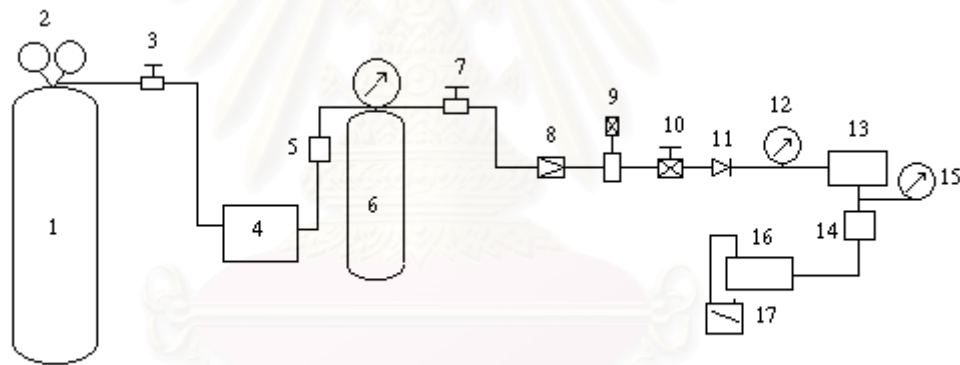
8. การเพิ่มอัตราส่วนผสมเพื่อการเร่งเครื่องยนต์ เพื่อให้เครื่องยนต์เร่งเครื่องได้ทันทีทันใดเมื่อเหยียบคันเร่งอย่างรวดเร็ว จะต้องฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงมากกว่าปรกติ จึงต้องมีการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของปีกผีเสื้อ

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

ก่อนที่จะมีการสร้างระบบการฉีดเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเข้าสู่เครื่องยนต์ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ก่อน เพื่อให้ทราบถึงปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่เครื่องยนต์ต้องการในแต่ละสภาวะของการขับขี่ การทดสอบวัดสมรรถนะของเครื่องยนต์ในงานวิจัยนี้ทำขึ้นบนแท่นทดสอบเครื่องยนต์ รายละเอียดของการทดสอบและผลการทดสอบเป็นดังนี้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบเครื่องยนต์ทำขึ้นบนแท่นทดสอบ โดยมีอุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 และมีรายละเอียดของอุปกรณ์วัดที่เกี่ยวข้องดังนี้



- | | | |
|--|-------------------|--------------------------------|
| 1. ถังก๊าซไฮโดรเจน | 7. Ball Valve | 13. Engine Test Bed |
| 2. Pressure Regulator | 8. Filter | 14. Carburator |
| 3. Ball Valve | 9. Solenoid Valve | 15. อุปกรณ์วัดความดันในท่อไอดี |
| 4. Hydrogen Flow Meter แบบวัดปริมาตร | 10. Needle Valve | 16. Orifice |
| 5. Hydrogen Flow Meter แบบเข็ม Manometer | 11. Check Valve | 17. Inclined |
| 6. ถังพักก๊าซไฮโดรเจนและ Pressure gage | 12. Pressure gage | |

รูปที่ 4.1 แสดงการต่อชุดอุปกรณ์ทดสอบเครื่องยนต์

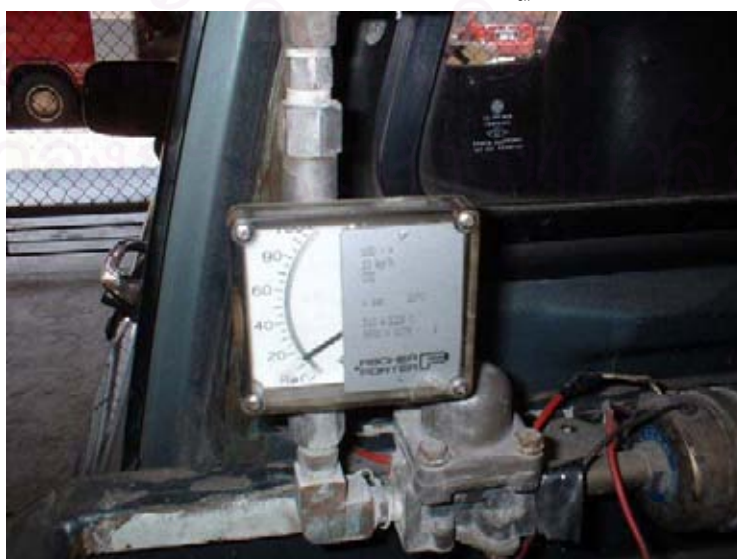
มาตรวัดอัตราการไหลของไฮโดรเจน

ในการทดสอบนี้ใช้มาตรวัดอัตราการไหลของไฮโดรเจน 2 ตัว (หมายเลข 4 และ 5 ที่แสดงไว้ใน schematic diagram) ได้แก่

- มาตรวัดปริมาตรไฮโดรเจน (หมายเลข 4 ใน schematic diagram) ใช้ร่วมกับนาฬิกาจับเวลาเพื่อวัดอัตราการไหลโดยปริมาตรของไฮโดรเจน นอกจากนี้ยังใช้เป็นอุปกรณ์มาตรฐานในการสอบเทียบกับมาตรวัดอัตราการไหลของไฮโดรเจนแบบเข็ม แสดงรูปที่ 4.2
- มาตรวัดอัตราการไหลแบบเข็ม (หมายเลข 5 ใน schematic diagram) แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 เป็นมาตรวัดอัตราการไหลโดยปริมาตร แสดงหน่วยเป็น % ซึ่งมีการสอบเทียบกับมาตรฐานไว้ก่อนที่จะนำมาใช้ ผลการสอบเทียบมาตรวัดอัตราการไหลแบบเข็มนี้แสดงไว้ในภาพผนวก ข.



รูปที่ 4.2 แสดงมาตรวัดปริมาตรไฮโดรเจนมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4.3 แสดงมาตรวัดอัตราการไหลของไฮโดรเจนแบบเข็ม
มาตรวัดอัตราการไหลของอากาศ (Air Flow Meter)

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศที่เข้าเครื่องยนต์ (หมายเลขที่ 15 ใน schematic diagram) แสดงดังรูปที่ 4.4 เป็นแบบ orifice ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของ orifice เป็น 24.5 mm. ซึ่งใช้ประกอบกับ manometer แบบ inclined (แสดงดังรูปที่ 4.5) เพื่อให้อ่านค่าความดันแตกต่าง คำนวณหาอัตราการไหลโดยปริมาตรได้ดังสมการ

$$\dot{V} = 14.1109 \sqrt{h_0}$$

เมื่อ h_0 คือ ความดันแตกต่าง (Pressure drop) ที่อ่านได้จาก inclined manometer (cm. WG)

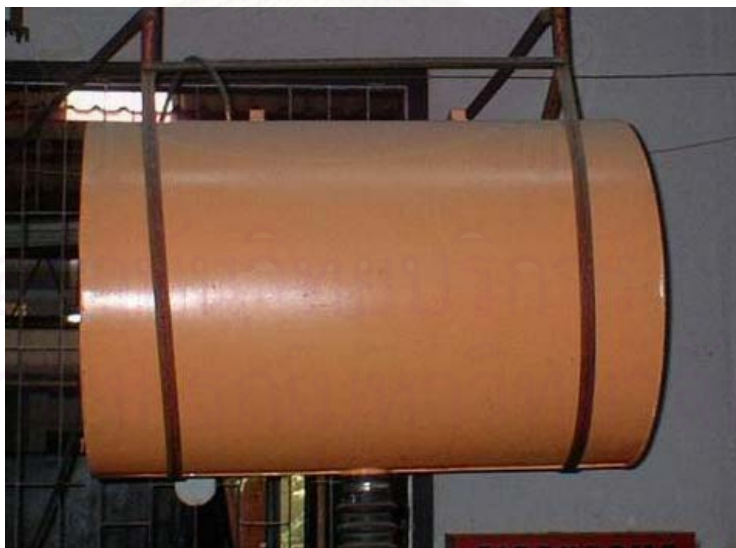
\dot{V} คือ อัตราการไหลโดยปริมาตร (liter / sec)

ส่วนอัตราการไหลโดยมวล สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{m} = 16.39 \sqrt{h_0}$$

เมื่อ h_0 คือ ความดันแตกต่าง (Pressure drop) ที่อ่านได้จาก inclined manometer (cm. WG)

\dot{m} คือ อัตราการไหลโดยมวล (g / sec)



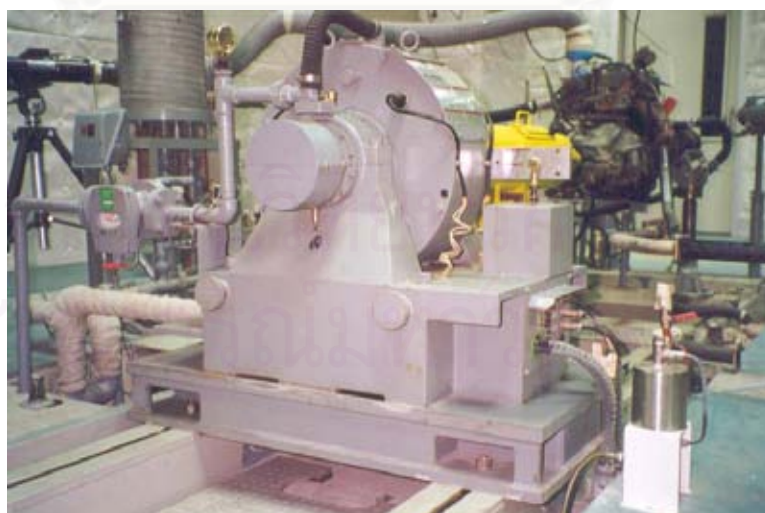
รูปที่ 4.4 แสดงมาตรวัดอัตราการไหลของอากาศแบบ orifice ที่ใช้ในการทดสอบ



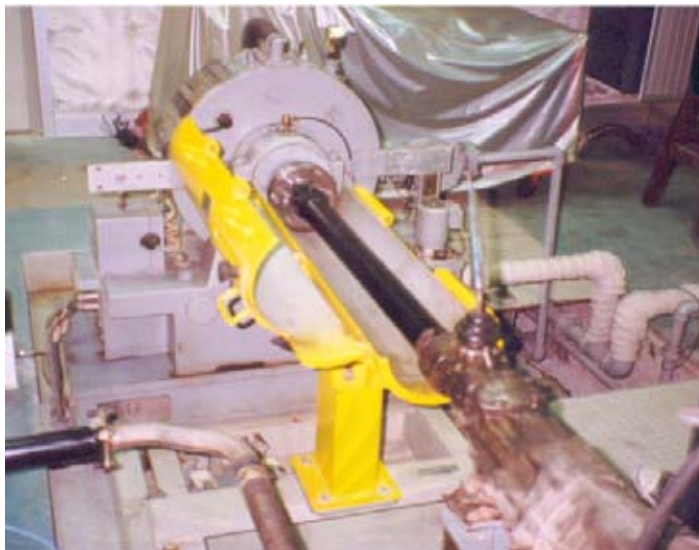
รูปที่ 4.5 แสดง incline manometer ที่ใช้ในการวัดความดันตกคร่อม orifice

แท่นทดสอบ

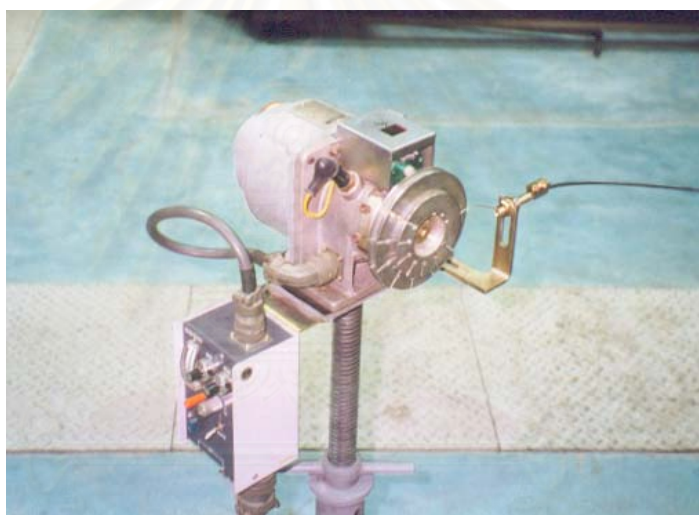
แท่นทดสอบที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแท่นทดสอบอัตโนมัติประกอบด้วย dynamometer , ระบบน้ำหล่อเย็น , ระบบไอเสีย , ระบบควบคุมตำแหน่งของปีกผีเสื้อ และตัวตรวจวัดสัญญาณต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ สามารถอ่านค่าแรงบิด , ความเร็วรอบ , ตำแหน่งปีกผีเสื้อ , อุณหภูมิไอเสีย , อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น ฯลฯ ได้ทางคอมพิวเตอร์ ลักษณะของแท่นทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ถึง



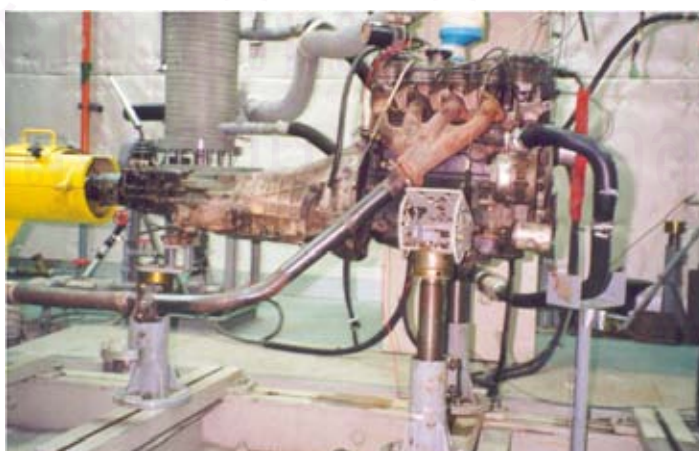
รูปที่ 4.6 แสดง dynamometer ที่ใช้เป็นภาระ (load) ของเครื่องยนต์



รูปที่ 4.7 แสดงการต่อเพลลาของเครื่องยนต์เข้ากับ dynamometer



รูปที่ 4.8 แสดงตัวควบคุมตำแหน่งปีกผีเสื้อ



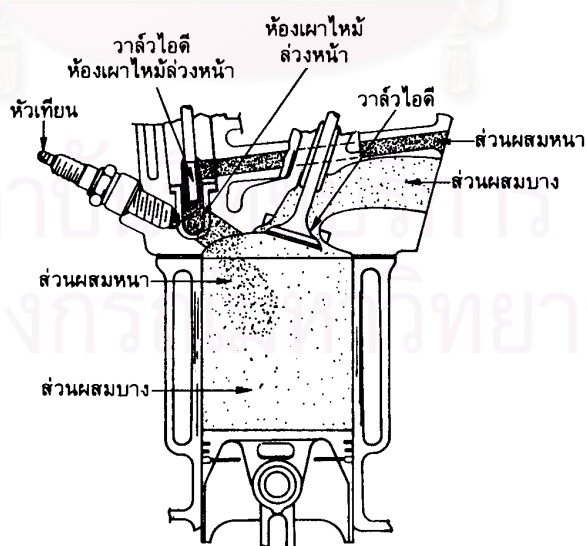
รูปที่ 4.9 แสดงการติดตั้งเครื่องยนต์



รูปที่ 4.10 แสดงคอมพิวเตอร์ควบคุม

การจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเข้าสู่ระบบอกสูบ

เนื่องจากเครื่องยนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องยนต์แบบส่วนผสมแยกชั้น (Stratified charge engine) ซึ่งมีห้องเผาไหม้ 2 ส่วนคือส่วนห้องเผาไหม้หลัก (Main chamber) และห้องเผาไหม้ล่วงหน้า (Precombustion chamber) ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งแต่ละห้องเผาไหม้มีวาล์วไอดีและท่อไอดีแยกจากกัน ดังนั้นการดัดแปลงเครื่องยนต์ประเภทนี้จึงสามารถจะดัดแปลงให้ก๊าซไฮโดรเจนผสมกับอากาศภายนอกหรือภายในระบบอกสูบก็ได้



รูปที่ 4.11 แสดงห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์แบบ Stratified charge

สำหรับการผสมแบบภายนอกจะจ่ายก๊าซไฮโดรเจนให้ผสมกับอากาศที่บริเวณคาร์บูเรเตอร์ ส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจากคาร์บูเรเตอร์จะเข้าสู่ระบบอกสูบทางวาล์วไอดีทั้งวาล์วไอดีของห้องเผาไหม้หลัก และวาล์วไอดีของห้องเผาไหม้ล่วงหน้า

ส่วนการผสมภายในนั้นสามารถดัดแปลงโดยแยกให้ก๊าซไฮโดรเจนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทางท่อไอดีและวาล์วไอดีของห้องเผาไหม้ล่วงหน้า ส่วนอากาศเข้าสู่ระบบอกสูบทางท่อไอดีและวาล์วไอดีของห้องเผาไหม้หลัก ไฮโดรเจนและอากาศจะเข้าไปผสมกันและเกิดการเผาไหม้ในระบบอกสูบ

จากงานวิจัยของนายขวัญชัย จ้อยเจริญ [1] พบว่าการผสมแบบภายนอกจะทำให้เกิดปัญหาการ Flashback เนื่องจากส่วนผสมของไฮโดรเจนกับอากาศซึ่งพร้อมจะเผาไหม้จะต้องสัมผัสกับวาล์วไอดีและแก๊สที่ไหลจากการเผาไหม้ในรอบการทำงานก่อนหน้า ซึ่งมีอุณหภูมิสูงทำให้ติดไฟแล้วเกิดเปลวไฟย้อนกลับมาที่คาร์บูเรเตอร์ ส่วนการผสมแบบภายในระบบอกสูบจะไม่เกิดปัญหานี้ขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การผสมแบบภายในระบบอกสูบ

การตั้งองศาการจุดระเบิด

ในการทดสอบเครื่องยนต์นี้ จะตั้งองศาจุดระเบิดไว้ที่ศูนย์ตายบน (TDC) ตลอดเวลา โดยอ้างถึงผลการทดสอบหาองศาจุดระเบิดที่เหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์ไฮโดรเจนในงานวิจัยของนายขวัญชัย จ้อยเจริญ [1] ซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าองศาจุดระเบิดที่ทำให้เครื่องยนต์ไฮโดรเจนมีสมรรถนะสูงสุดคือที่ TDC

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน

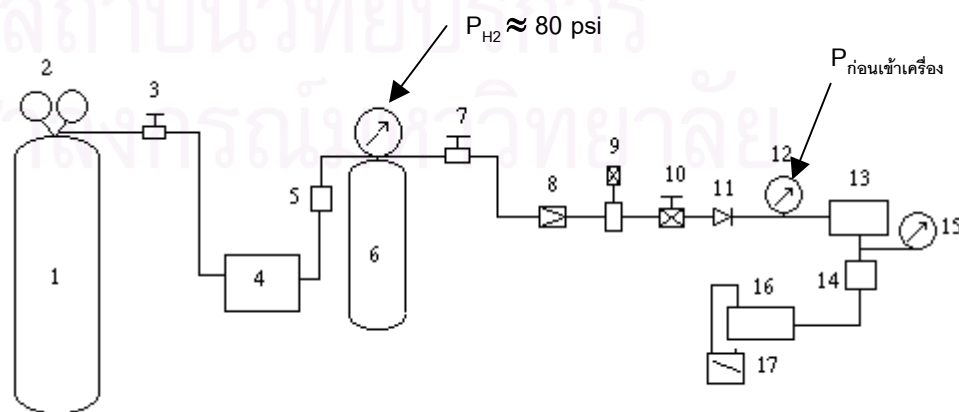
หลังจากที่ติดตั้งอุปกรณ์ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 เรียบร้อยแล้ว ก่อนที่จะเริ่มทำการทดสอบจะต้องตรวจสอบการรั่วของก๊าซไฮโดรเจนตามข้อต่อต่าง ๆ เสียก่อนโดยใช้ฟองสบู่ หลังจากนั้นสตาร์ทเครื่องยนต์ ปรับความดันของก๊าซไฮโดรเจนที่จ่ายไฮโดรเจนดังรูปที่ 4.11 จนกระทั่งได้ความดันที่ถังพักไฮโดรเจน 80 psi จากนั้นจึงปรับตำแหน่งของปีกผีเสื้อไปยังตำแหน่งที่ต้องการคือ 50%, 75% และ 100% ตามลำดับ และตั้งค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ให้คงที่ ซึ่งทั้งตำแหน่งของปีกผีเสื้อและความเร็วรอบของเครื่องยนต์สามารถควบคุมได้จากระบบควบคุมคอมพิวเตอร์ของแท่นทดสอบอัตโนมัติ พยายามควบคุมค่าความดันของไฮโดรเจนที่ถังพักก๊าซให้มีค่าคงที่ 80 psi ตลอดการทดลองโดยการปรับที่วาล์วควบคุมความดัน จากนั้นจึงทำการปรับเปลี่ยนปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่จ่ายให้แก่เครื่องยนต์โดยปรับวาล์วเข็ม (needle valve) แล้วจด

บันทึกค่าต่าง ๆ จนกระทั่งได้แรงบิดมากที่สุดโดยที่ยังไม่เกิดการ Flashback หรือ การน็อกของเครื่องยนต์ที่ตำแหน่งปีกผีเสื้อและความเร็วรอบแต่ละค่า ค่าที่ทำการบันทึกมีดังนี้

1. ภาระของเครื่องยนต์ (load)
2. ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (speed)
3. ความดันตกคร่อม orifice ที่ใช้ในการวัดอัตราการไหลของอากาศ
4. อัตราการไหลของไฮโดรเจนที่อ่านได้จากมาตรวัดอัตราการไหลแบบเข็มและจับเวลา เพื่ออ่านอัตราการไหลของไฮโดรเจนจากมาตรวัดปริมาตรก๊าซไฮโดรเจน
5. คุณณภูมิขาเข้าและขาออกของน้ำหล่อเย็น
6. ความดันของก๊าซไฮโดรเจนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.12
7. คุณณภูมิไอเสีย
8. ความดันอากาศหลังปีกผีเสื้อ



รูปที่ 4.12 แสดงอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซไฮโดรเจน



รูปที่ 4.13 แสดงตำแหน่งการอ่านค่าความดันของก๊าซไฮโดรเจน

วิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์

จากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเพื่อหาปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการควบคุมปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่เครื่องยนต์ต้องการกับแรงบิดและความเร็วรอบ จากข้อมูลในตารางที่ ค.1 ถึง ค.4 แรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องมีความสัมพันธ์กับปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ต้องจ่ายให้แก่เครื่องยนต์ดังสมการ

$$M_f = 1.101 \times 10^{-3} (T) + 1.004 \times 10^{-4} (n) + 1.193 \times 10^{-8} (n)^2 + 5.920 \times 10^{-5} (T)^2 - 0.171$$

โดยมีค่า $R^2 = 0.902$

เมื่อ M_f = อัตราการไหลโดยมวลของไฮโดรเจน (กรัม/วินาที)

T = แรงบิดของเครื่องยนต์ (Nm)

n = ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (รอบต่อวินาที)

2. อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air/Fuel Ratio) จากผลการทดลองพบว่าเครื่องยนต์ไฮโดรเจนสามารถทำงานโดยมีค่า relative A/F Ratio (λ) กว้างมาก คืออยู่ระหว่าง $\lambda = 2-6$ ต่างกับเครื่องยนต์แก๊สโซลีนซึ่งทำงานที่ค่า λ ใกล้เคียงกับ 1 เกือบตลอดเวลา ดังนั้นในการกำหนดปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจึงไม่ใช้การควบคุม A/F Ratio คงที่ โดยใช้ปิกพีเสื่อเป็นตัวกำหนดปริมาณอากาศที่เข้าสู่เครื่องยนต์เหมือนกับเครื่องยนต์แก๊สโซลีน แต่ใช้การควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ไหลเข้าสู่เครื่องยนต์โดยตรง

3. ความดันในท่อไอดี (Manifold Pressure) ความดันในท่อไอดีนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอากาศที่ไหลเข้าสู่เครื่องยนต์ จากข้อมูลในตารางที่ ค.1 ถึง ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันในท่อไอดีกับปริมาณอากาศที่ไหลเข้าสู่เครื่องยนต์สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$M_a = 1.032 \times 10^{-2} (n) - 10.566 (\text{MAP})^{1/2} + 4.955$$

โดยมีค่า $R^2 = 0.822$

เมื่อ $MAP =$ ความดันในท่อไอดีในหน่วยโวลต์ ซึ่งสามารถแปลงเป็นค่าความดันได้ตามภาคผนวก ง.

$M_a =$ อัตราการไหลของอากาศโดยมวล (กรัม/วินาที)

$n =$ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (รอบต่อนาที)

เมื่อเปรียบเทียบกับระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบ EFI-D ของเครื่องยนต์แก๊สโซลีนซึ่งใช้ความดันในท่อไอดีและความเร็วรอบเป็นปัจจัยหลักในการกำหนดปริมาณเชื้อเพลิงพบบในเครื่องยนต์แก๊สโซลีนนั้นใช้ปีกผีเสื้อเป็นตัวควบคุมปริมาณอากาศที่เข้าสู่เครื่องยนต์ แล้วกำหนดให้ A/F Ratio มีค่าคงที่ แต่ในการควบคุมเครื่องยนต์ไฮโดรเจนค่า λ เปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง ดังนั้นสัญญาณ MAP นี้จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กำหนดปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์

4. ตำแหน่งของปีกผีเสื้อ (Throttle Position) จากผลการทดลอง (แสดงในภาคผนวก ค.) พบว่าตำแหน่งของปีกผีเสื้อไม่ได้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงบิดของเครื่องยนต์ไฮโดรเจน ทั้งนี้สังเกตได้จากการที่ตำแหน่งปีกผีเสื้อต่างกันคือ 50% , 75% และ 100% ที่ความเร็วรอบหนึ่ง ๆ ค่าแรงบิดสูงสุดที่ได้ในแต่ละกรณีไม่แตกต่างกันเลย ทั้งนี้เนื่องจากในเครื่องยนต์ไฮโดรเจนไม่ได้ใช้ปีกผีเสื้อในการจำกัดปริมาณอากาศที่เข้าสู่เครื่องยนต์ (ไม่เกิดการใช้คของอัตราการไหลของอากาศผ่านปีกผีเสื้อในคาร์บูเรเตอร์) ดังนั้นในการควบคุมเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจึงน่าจะสมารถตัดปีกผีเสื้อทิ้งได้เช่นเดียวกับในกรณีของเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งจะทำให้ลดความยุ่งยากในการควบคุมได้ แต่อย่างไรก็ตามการใช้ปีกผีเสื้อจะช่วยให้เครื่องยนต์สตาร์ทติดได้ง่ายกว่าเพราะปีกผีเสื้อช่วยกันอากาศไม่ให้ไหลเข้าเครื่องยนต์มากเกินไป นอกจากการติดตั้งตัวตรวจจับตำแหน่งปีกผีเสื้อยังสะดวกกว่าการติดตั้งตัวตรวจจับตำแหน่งคันเร่งอีกด้วย

5. แรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ จากผลการทดลองพบว่าค่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ที่แต่ละความเร็วรอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14

จากกราฟพบว่าเครื่องยนต์มีแรงบิดสูงประมาณ 68 Nm ที่ความเร็วรอบประมาณ 2000 รอบต่อนาที และค่าแรงบิดสูงสุดมีความสัมพันธ์กับความเร็วยังสมการ

$$T_{\max} = -1.075 \times 10^{-5} (n)^2 + 4.544 \times 10^{-2} (n) + 16.477$$

โดยมีค่า $R^2 = 0.879$

เมื่อ $T_{\max} =$ แรงบิดสูงสุดที่แต่ละความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (Nm)

$n =$ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (รอบต่อนาที)

จากความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนสูงสุดที่เครื่องยนต์ต้องการเพื่อให้ได้เกิดแรงบิดสูงสุด (สภาวะ Full load) ที่แต่ละความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เพื่อนำไปให้การการเขียนโปรแกรมควบคุมต่อไป

6. อัตราการไหลของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนสูงสุดที่แต่ละความเร็วรอบ จากผลการทดลองพบว่าอัตราการไหลของไฮโดรเจนสูงสุดและทำให้เกิดแรงบิดสูงสุดที่แต่ละความเร็วรอบของเครื่องยนต์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.15

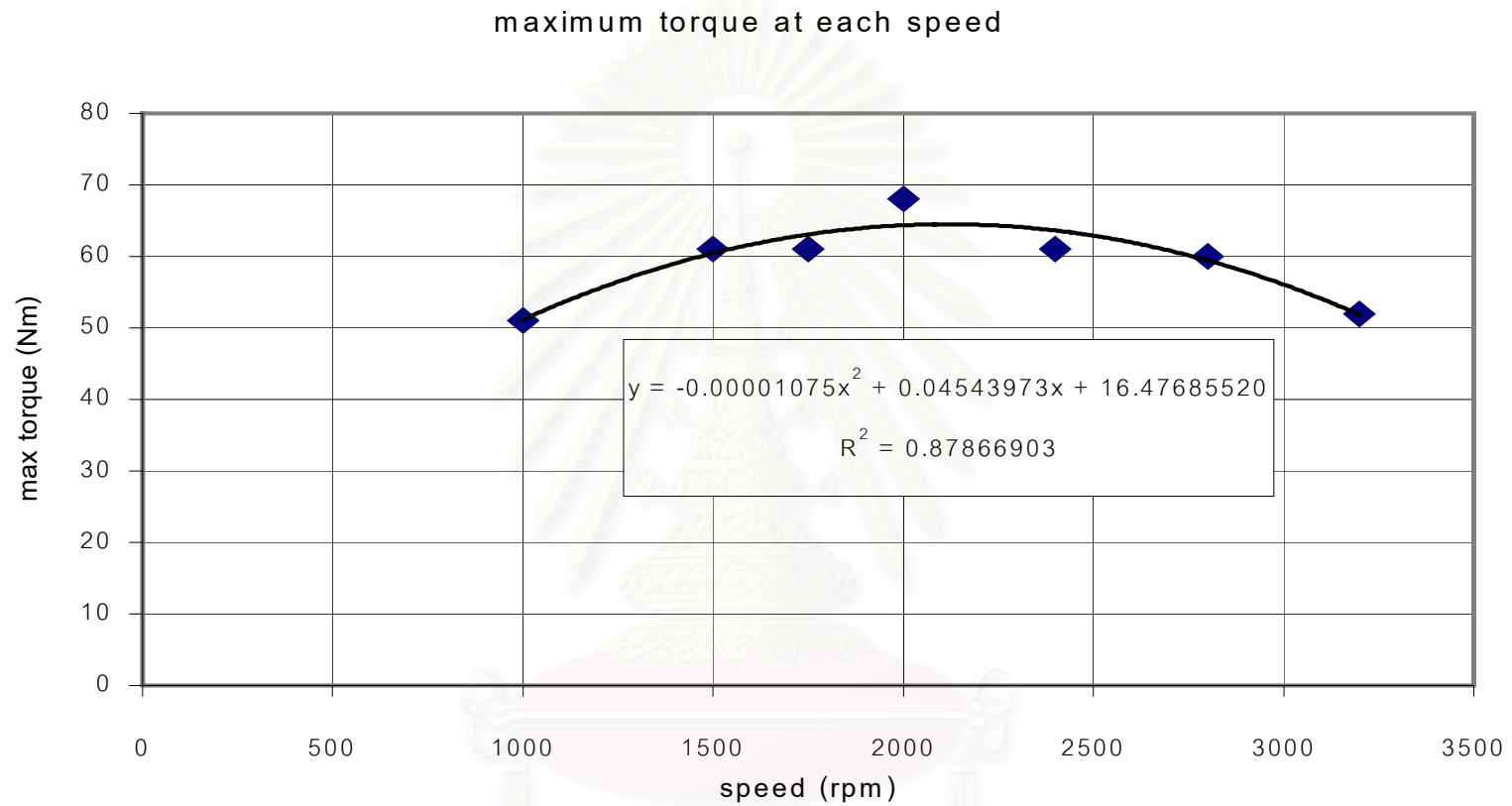
$$M_{f \max} = 0.00000004 (n)^2 + 0.00029584 (n) - 0.01651500$$

โดยมีค่า $R^2 = 0.879$

เมื่อ $M_{f \max}$ = ปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนสูงสุดที่แต่ละความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (litre/sec)

n = ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (รอบต่อนาที)

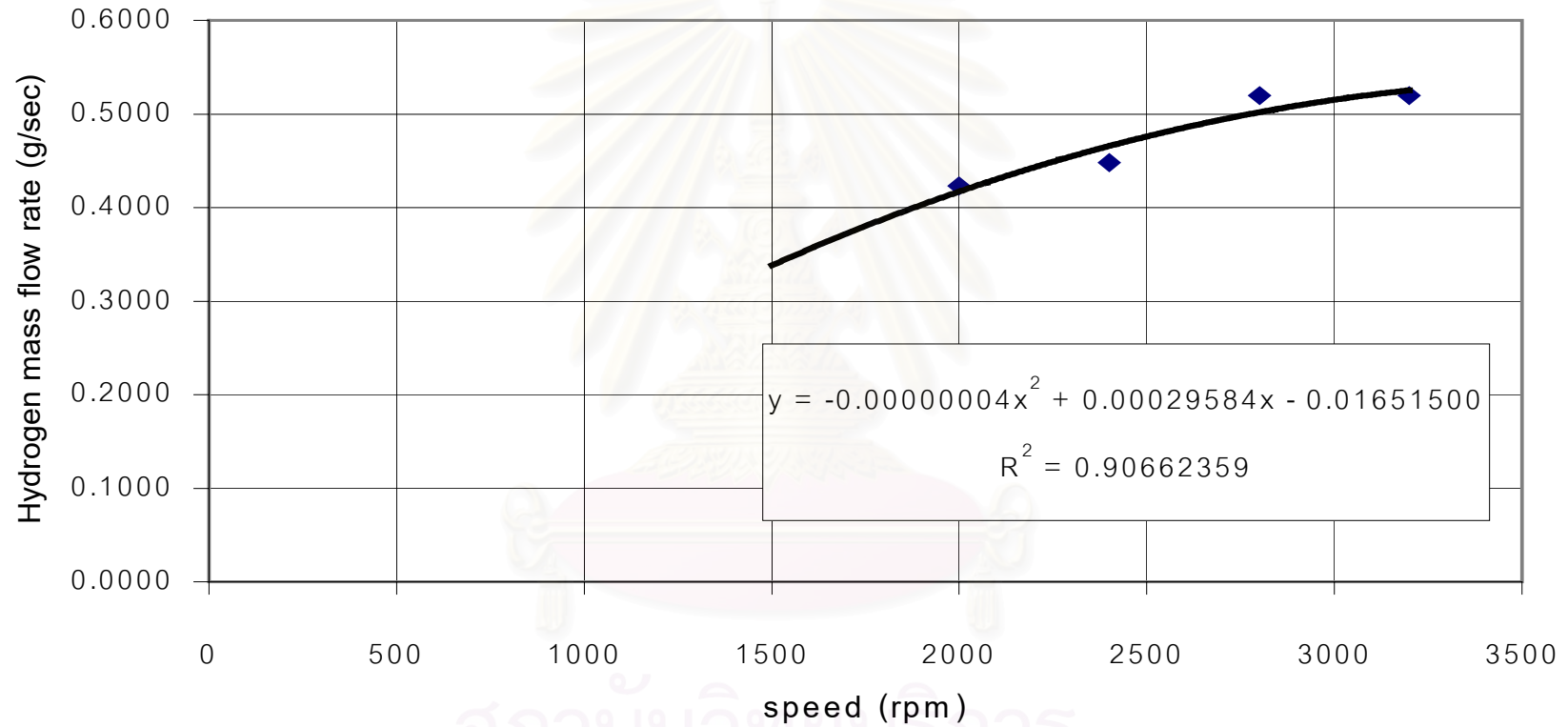
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่แต่ละความเร็วรอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลโดยมวลของไฮโดรเจนที่ให้แรงบิดสูงสุด
ที่แต่ละความเร็วรอบ



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงอัตราการไหลของไฮโดรเจนซึ่งทำให้เกิดแรงบิดสูงสุดที่แต่ละความเร็วรอบของเครื่องยนต์

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนสามารถเลือกสัญญาณที่จะนำมาใช้ในการควบคุมปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนได้ 2 แบบ

แบบที่ 1 ใช้สัญญาณตำแหน่งของปีกผีเสื้อเพียงสัญญาณเดียวในการควบคุม คล้ายกับงานวิจัยเดิมซึ่งใช้การเทียบเป็นคั่นเร่งเป็นตัวควบคุมปริมาณเชื้อเพลิง ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องยนต์ไฮโดรเจนสามารถทำงานได้ในช่วง λ กว้าง ทำให้การควบคุมไม่จำเป็นต้องควบคุมให้ส่วนผสมมีค่า A/F Ratio คงที่ เมื่อผู้ขับขี่ต้องการให้เครื่องยนต์มีความเร็วรอบสูงขึ้นก็จะเหยียบคั่นเร่งเพิ่มขึ้นปีกผีเสื้อเปิดมากขึ้น โปรแกรมควบคุมต้องสั่งการให้จ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนมากขึ้น ข้อดีของระบบควบคุมซึ่งใช้สัญญาณตำแหน่งปีกผีเสื้อเพียงสัญญาณเดียวในการควบคุมคือเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน แต่ข้อเสียคือเมื่อใช้สัญญาณปีกผีเสื้อเพียงสัญญาณเดียวจะสามารถกำหนดค่าอัตราการจ่ายไฮโดรเจนสูงสุด ($M_{f_{max}}$) ได้เพียงตัวเดียวเท่านั้น ถ้าหากเครื่องยนต์ทำงานในสภาวะแรงบิดสูง ๆ ความเร็วรอบจะต่ำ ทำให้ผู้ขับขี่พยายามเหยียบคั่นเร่งมาก แต่ความเร็วรอบยังคงต่ำอากาศก็จะเข้าสู่เครื่องยนต์ได้น้อยอาจทำให้เกิด Backfire ได้ แก้ไขโดยการกำหนดค่า $M_{f_{max}}$ ให้มีค่าต่ำ ๆ แต่เมื่อกำหนดค่า $M_{f_{max}}$ ต่ำ ๆ ก็จะทำให้สมรรถนะการขับขี่ลดต่ำลงกว่าที่เครื่องยนต์ควรทำได้ ดังนั้นจึงแก้ไขโดยการใช้โปรแกรมควบคุมแบบที่ 2

แบบที่ 2 ใช้ 2 สัญญาณคือสัญญาณความเร็วรอบ (rpm) และสัญญาณตำแหน่งของปีกผีเสื้อ (TP) ในการกำหนดปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่จะจ่ายให้แก่เครื่องยนต์ วิธีนี้ใช้สัญญาณความเร็วรอบเป็นตัวกำหนดค่า $M_{f_{max}}$ โดยค่า $M_{f_{max}}$ นี้จะเปลี่ยนไปตามความเร็วรอบของเครื่องยนต์

สำหรับรายละเอียดของโปรแกรมจะกล่าวถึงในบทที่ 5 ในส่วนการสร้างโปรแกรมควบคุม

บทที่ 5

การสร้างระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบคอมพิวเตอร์

ระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบคอมพิวเตอร์แบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่

1. ส่วนตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor) ประกอบด้วยอุปกรณ์วัดความเร็วรอบและตัวตรวจจับตำแหน่งปีกผีเสื้อ
2. ส่วนควบคุม ประกอบด้วยส่วนที่ใช้ในการรับและแปลงสัญญาณที่ตัวตรวจจับสัญญาณวัดได้ให้เป็นสัญญาณที่ตัวควบคุม (Controller) จะนำมาใช้ได้ต่อไป , ส่วนโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมโซลินอยด์วาล์วให้มีขนาดพัลส์ตามต้องการ
3. ส่วนตัวขับ (Actuator) ได้แก่ส่วนโซลินอยด์วาล์วและวงจรถูกใช้ในการขับโซลินอยด์วาล์ว

แต่ละส่วนของระบบควบคุมมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

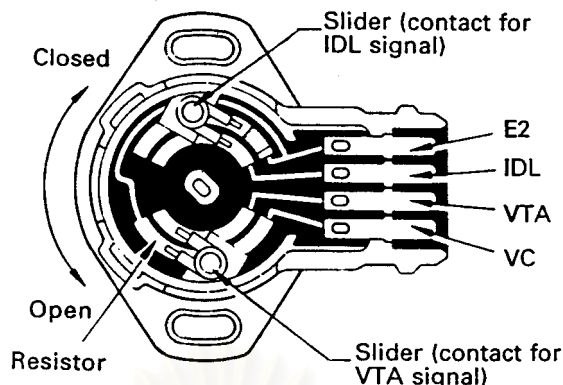
ส่วนตรวจจับสัญญาณ (Sensor)

ประกอบด้วยตัวตรวจจับตำแหน่งปีกผีเสื้อและตัวตรวจจับความเร็วรอบ

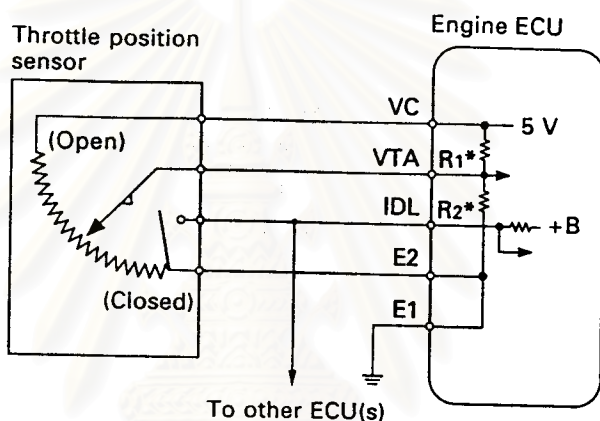
ตัวตรวจจับตำแหน่งปีกผีเสื้อ (Throttle Position Sensor)

ตัวตรวจจับตำแหน่งปีกผีเสื้อติดตั้งอยู่ที่เสื้อลิ้นคั่นแรง ซึ่งจะเปลี่ยนมุมการเปิดของปีกผีเสื้อเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือแบบ On-off และแบบ Linear แบบ On-off จะประกอบด้วยสัญญาณเดินเบา (IDL) และสัญญาณการใช้กำลังสูง (PSW) เท่านั้น ไม่สามารถบอกตำแหน่งของปีกผีเสื้อเป็นองศาได้ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกตัวตรวจจับตำแหน่งปีกผีเสื้อแบบ Linear

ตัวตรวจจับตำแหน่งปีกผีเสื้อแบบ Linear ประกอบด้วยหน้าสัมผัสที่เลื่อนได้ (Sliding Contact) 2 ตัว โดยแบ่งเป็นการตรวจจับสัญญาณ IDL 1 ตัว และอีก 1 ตัวในการวัดสัญญาณ VTA ซึ่งบอกตำแหน่งของปีกผีเสื้อเป็นองศา ลักษณะของตัวตรวจจับตำแหน่งปีกผีเสื้อสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 5.1 และ 5.2

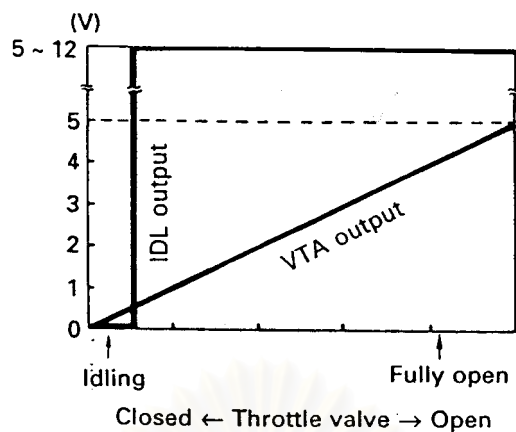


รูปที่ 5.1 ลักษณะของตัววัดตำแหน่งปีกผีเสื้อ



รูปที่ 5.2 แสดงภาพ schematic ของตัววัดตำแหน่งปีกผีเสื้อ

การใช้งานตัวตรวจจับตำแหน่งปีกผีเสื้อต้องจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 5 โวลต์จาก ECU เข้าที่ขั้ว VC เมื่อมีการเปลี่ยนองศาการเปิดปีกผีเสื้อ หน้าสัมผัสจะเลื่อนไป ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกจะขั้ว VTA มีการเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนกัน ส่วนสัญญาณที่ออกจากขั้ว IDL นั้นเมื่อปีกผีเสื้ออยู่ในตำแหน่งปิดสนิท หน้าสัมผัสอีกชุดจะเลื่อนมาจนสุดทำให้ขั้ว IDL เชื่อมกับ E2 ซึ่งเป็น Ground ของวงจร ลักษณะของสัญญาณที่ออกจากตัวตรวจจับตำแหน่งปีกผีเสื้อสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงสัญญาณที่ออกจากตัวตรวจจับตำแหน่งปีกผีเสื้อ

การติดตั้งตัววัดตำแหน่งปีกผีเสื้อ

การติดตั้งตัววัดตำแหน่งปีกผีเสื้อจะติดตั้งไว้ที่บริเวณปีกผีเสื้อของคาร์บูเรเตอร์ ลักษณะดัง

รูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์วัดตำแหน่งปีกผีเสื้อ

ตัวตรวจจับความเร็วรอบ

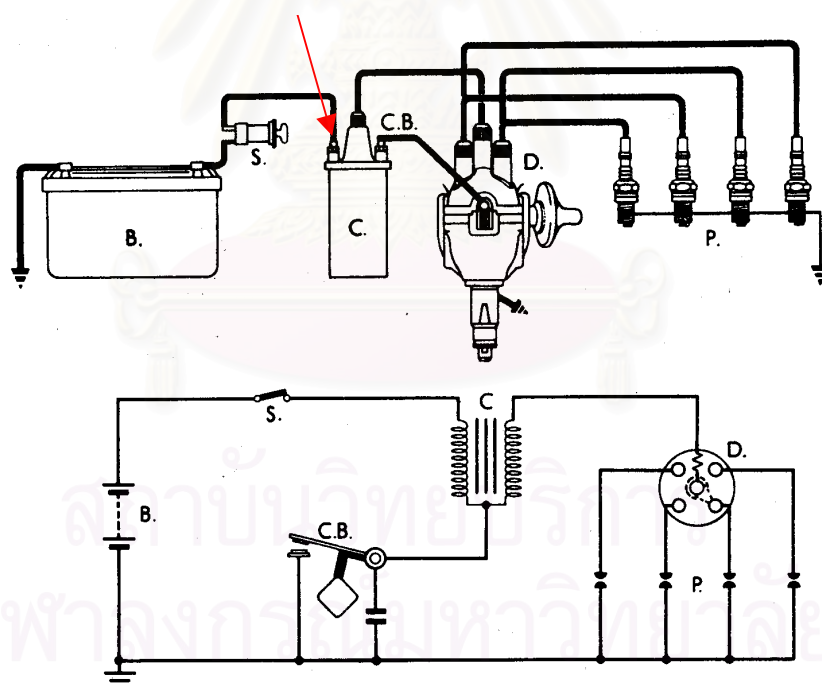
ในการตรวจจับสัญญาณความเร็วรอบจะใช้สัญญาณจากวงจรถูกกระตุ้นของเครื่องยนต์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5

แบตเตอรี่เป็นต้นกำเนิดกำลังของระบบจุดระเบิด จะจ่ายกระแสไฟฟ้าแรงดันต่ำ ประมาณ 12 โวลต์ให้กับขดลวดปฐมภูมิของคอยล์จุดระเบิด คอนแทคจะทำหน้าที่ตัดต่อวงจรให้เป็นพัลส์ ทำให้ขดลวดทุติยภูมิของคอยล์มีแรงดันไฟฟ้าสูงมาก อาจสูงถึง 20-30 กิโลโวลต์ เพื่อให้เกิดการจุดระเบิดขึ้นที่หัวเทียน ส่วนจานจ่ายทำหน้าที่จ่ายไฟไปยังหัวเทียนเพื่อให้เกิดประกายไฟที่หัวเทียนในจังหวะจุดระเบิดของแต่ละสูบ

จะเห็นว่าระบบจุดระเบิดประกอบด้วยวงจรไฟฟ้าแรงดันสูงและวงจรไฟฟ้าแรงดันต่ำ เนื่องจากจานจ่ายจะจ่ายไฟเป็นจังหวะ ดังนั้นคอยล์จึงต้องมีการตัดต่อวงจรไฟฟ้าแรงดันต่ำเป็นจังหวะเดียวกับการจุดระเบิด สัญญาณที่วัดได้ที่ด้านวงจรแรงดันต่ำของคอยล์จะมีลักษณะเป็นพัลส์ ซึ่งมีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่รอบ เนื่องจากการจุดระเบิดเกิดขึ้น 2 ครั้งต่อการหมุนของเพลลาข้อเหวี่ยง 1 รอบ ตำแหน่งที่ใช้ในการจับสัญญาณพัลส์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.8

การวัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์สามารถทำได้โดยการนับสัญญาณพัลส์จากวงจรแรงดันต่ำของคอยล์ ใช้ร่วมกับการจับเวลา ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไปในส่วนของหน่วยควบคุม

ตำแหน่งที่ใช้วัดความเร็วรอบ



B = แบตเตอรี่

C.B. = คอนแทค

S = สวิตช์จุดระเบิด

D = จานจ่าย

C = คอยล์จุดระเบิด

P = หัวเทียน

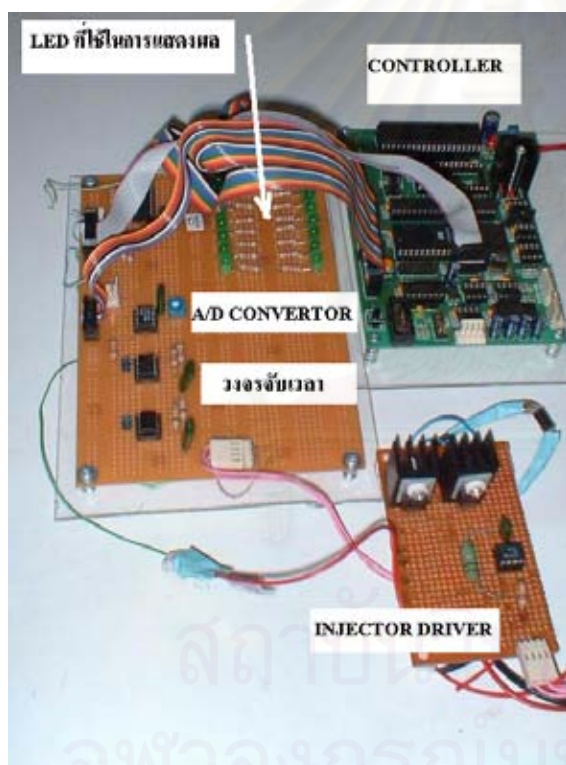
รูปที่ 5.5 แสดงวงจรจุดระเบิดของเครื่องยนต์

ส่วนควบคุม

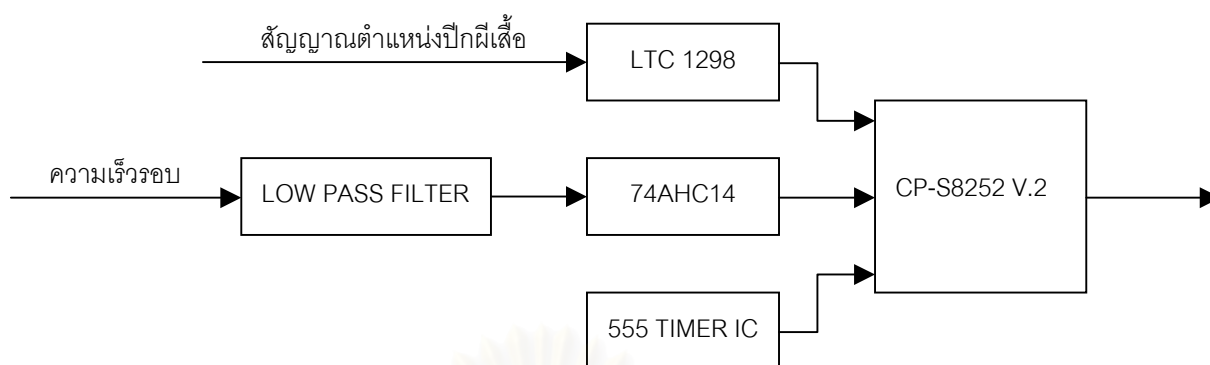
ส่วนควบคุมหรือ Controller ทำหน้าที่ให้การรับสัญญาณจากตัวตรวจจับสัญญาณทั้ง 2 แล้วทำการแปลงให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปคำนวณต่อได้ แล้วนำไปสร้างสัญญาณไปควบคุมโซลินอยด์วาล์ว ในส่วนนี้ประกอบด้วยส่วนที่เป็นอุปกรณ์ (Hardware) และส่วนที่เป็นโปรแกรม (Software) ซึ่งรายละเอียดในแต่ละส่วนมีดังนี้

ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรควบคุม (Hardware)

วงจรควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 และ 5.7

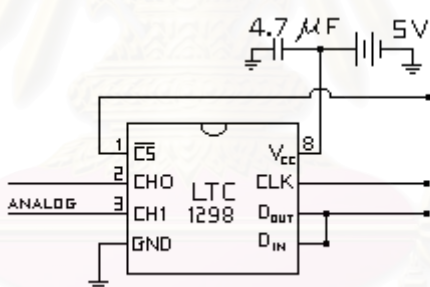


รูปที่ 5.6 แสดงลักษณะของวงจรควบคุม



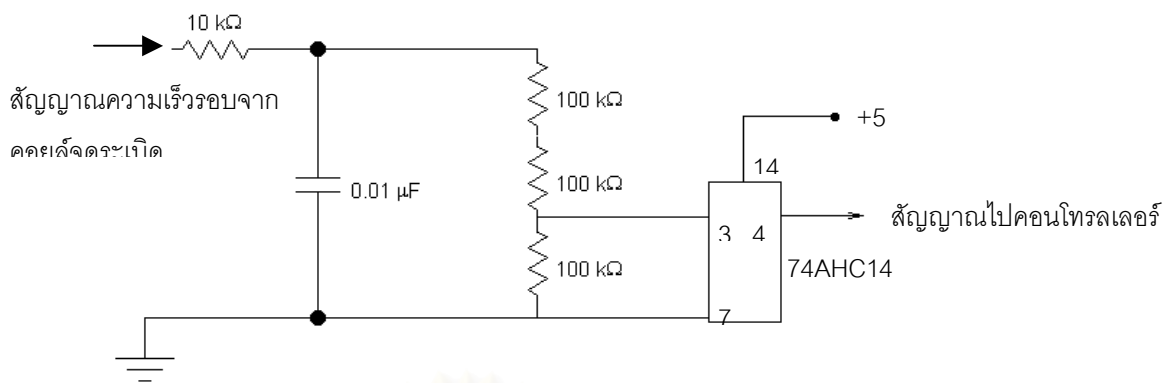
รูปที่ 5.7 แสดงรูป Schematic diagram ของวงจรควบคุม

LTC 1298 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณจากสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีความละเอียดสูงสุดถึง 12 บิต มีการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม (Serial) ชาติต่าง ๆ ของวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 ส่วนการตั้งงานและการอ่านค่าจากวงจรจะต้องตั้งจากโปรแกรมของ controller



รูปที่ 5.8 แสดงวงจร LTC 1298

74AHC14 เป็นวงจรขมิตทริกเกอร์ ใช้ในการเปลี่ยนสัญญาณพัลส์จากความเร็วนรอบซึ่งมีขนาด 12 โวลต์ซึ่งมีสัญญาณรบกวนมากและไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยมซึ่งไม่เหมาะกับการทำงานร่วมกับ controller โดยจะต้องมีการเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมขนาด 3.5-5 โวลต์ ชาติต่าง ๆ ของวงจร 74AHC14 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.9 ส่วนตัวต้านทานที่ต่ออยู่ในวงจรมีหน้าที่ในการลดขนาดสัญญาณจาก 12 โวลต์ให้เหลือประมาณ 4 โวลต์ นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มเติมวงจรกรองผ่านต่ำ (Low Pass Filter) เพื่อกรองสัญญาณรบกวนซึ่งมีความถี่สูงออกอีกด้วย สัญญาณที่เข้าและออกจากวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.10



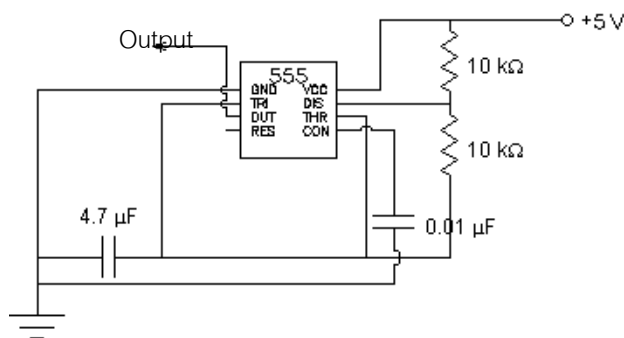
รูปที่ 5.9 แสดงขาต่าง ๆ และการต่อความต้านทานในวงจรขมิตทริกเกอร์



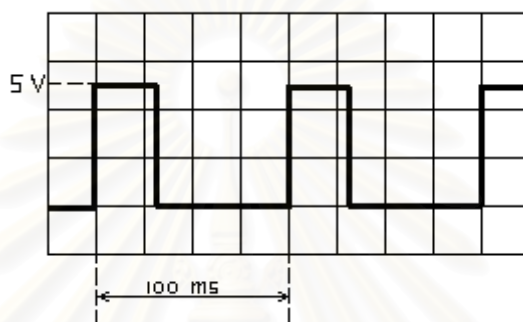
รูปที่ 5.10 แสดงสัญญาณที่เข้าและออกจากวงจรมิตทริกเกอร์

ข้อควรระวังในการใช้สัญญาณจุดระเบิดในการวัดความเร็วรอบคือสำหรับเครื่องยนต์ 4 สูบ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของสัญญาณจุดระเบิด เนื่องจากเครื่องยนต์จุดระเบิด 2 ครั้งต่อการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยง 1 รอบ

555 Timer IC ใช้ในการจับเวลาซึ่งใช้ทั้งในการหาความเร็วรอบและในการกำหนดจังหวะการฉีดให้กับโซลินอยด์วาล์วด้วย เนื่องจากเป็นระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนในงานวิจัยนี้เป็นแบบ Asynchronous หรือจังหวะการฉีดไฮโดรเจนไม่ขึ้นกับความเร็วรอบ โดยกำหนดให้เริ่มเปิดโซลินอยด์วาล์วทุก 100 มิลลิวินาที การต่อวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.11 ส่วนสัญญาณที่ออกจากวงจรมิตทริกเกอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.11 แสดงการต่อวงจรจับเวลา 555 Timer IC



รูปที่ 5.12 แสดงสัญญาณที่ออกจาก 555 Timer IC

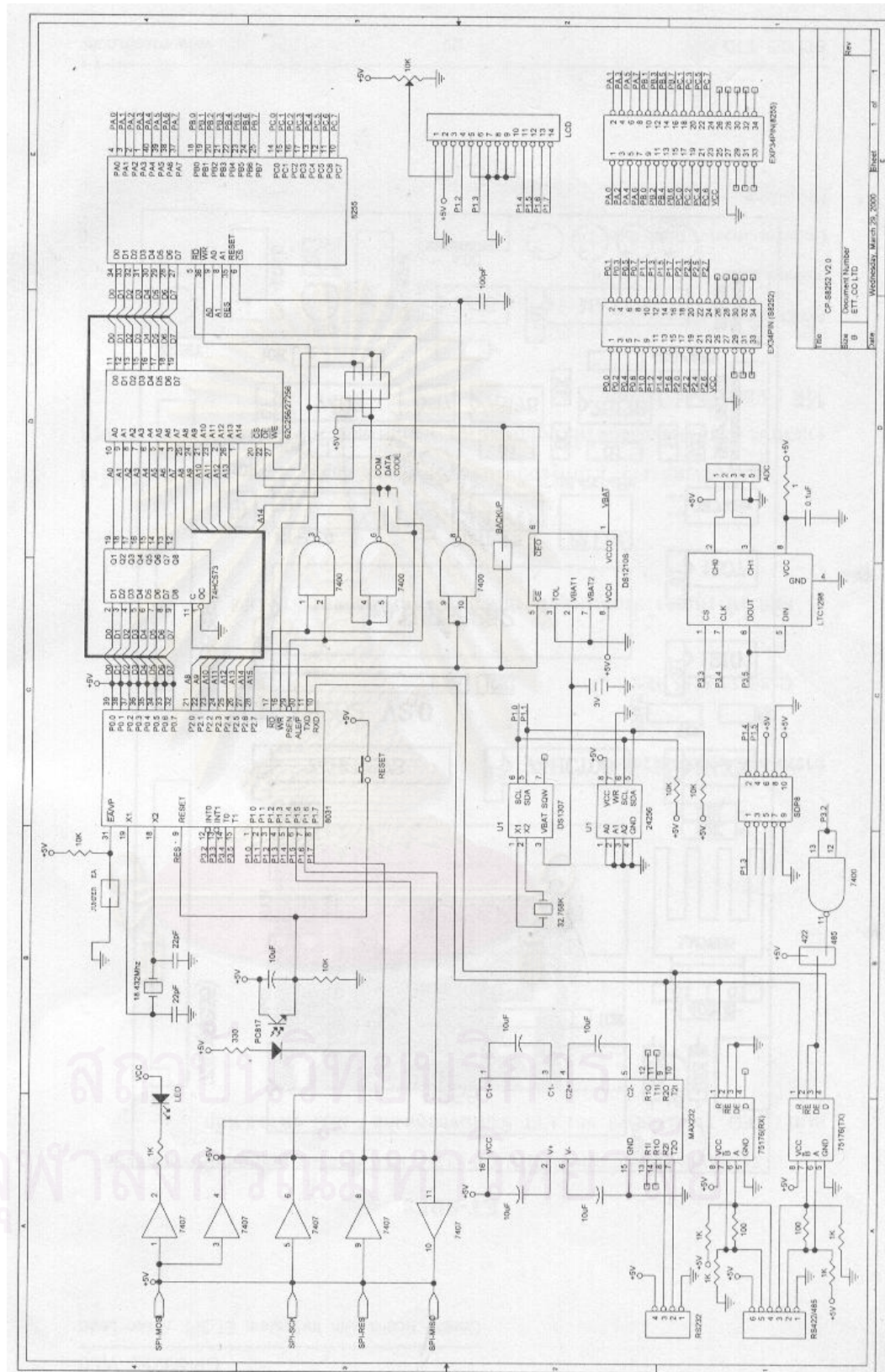
CP-S8252 V.2 เป็นบอร์ดควบคุม ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89S8252 ซึ่งอยู่ในตระกูล MCS-51 เป็นตัวคอนโทรลเลอร์ รายละเอียดของบอร์ดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.13

ส่วนตัวกระตุ้น (Actuator)

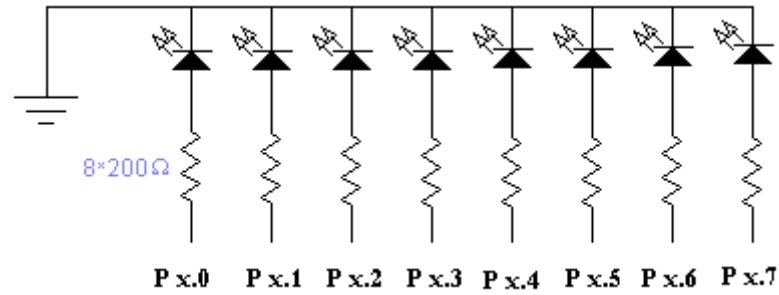
ได้แก่ส่วนที่เป็นโซลินอยด์วาล์วและวงจรสำหรับขับโซลินอยด์วาล์ว และส่วนของ LED สำหรับแสดงผลค่าความเร็วรอบและตำแหน่งปีกผีเสื้อ รายละเอียดของแต่ละส่วนเป็นดังนี้

LED เป็นส่วนที่ใช้ในการแสดงผลค่าความเร็วรอบและตำแหน่งปีกผีเสื้อแบบตัวเลขฐานสอง (Binary) โดยค่าตำแหน่งปีกผีเสื้อจะต่อกับวงจร LED ทางพอร์ต 1 ส่วนค่าความเร็วรอบจะต่อกับวงจร LED ทางพอร์ต 2 การต่อวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.14

โซลินอยด์วาล์ว (Solenoid Valve) เป็นวาล์วที่เปิดปิดด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ทำหน้าที่เปิดปิดเพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนไหลผ่าน ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่ไหลผ่านวาล์วขึ้นอยู่กับระยะเวลาการเปิดของวาล์ว ลักษณะของวาล์วที่ใช้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.15 ส่วนปริมาณการไหลของไฮโดรเจนผ่านโซลินอยด์วาล์วที่ระยะเวลาในการเปิดต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 5.16 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.)



รูปที่ 5.13 แสดงภาพบอร์ดควบคุม

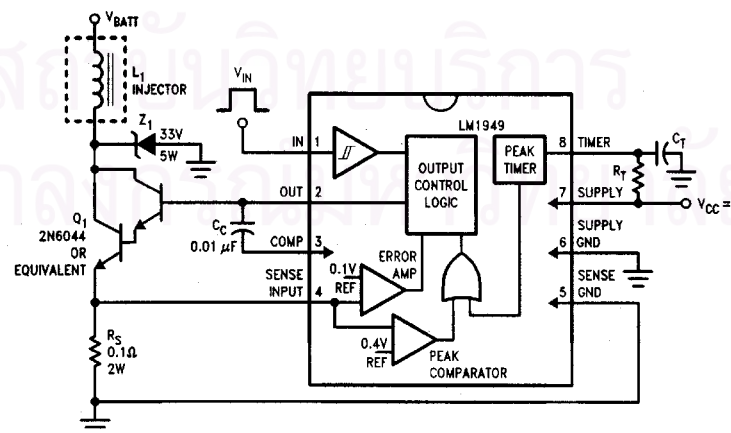


รูปที่ 5.14 แสดงวงจร LED



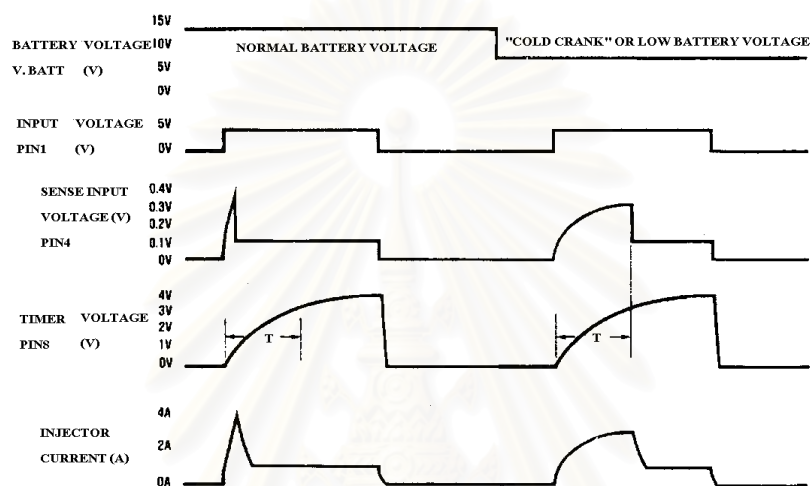
รูปที่ 5.15 แสดงโซลินอยด์วาล์ว

วงจรขับโซลินอยด์วาล์ว เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่หน่วยควบคุมสร้างขึ้นสำหรับไปควบคุมการเปิดปิดของโซลินอยด์วาล์วนั้นมีขนาดเล็ก ไม่สามารถสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพียงพอที่จะทำให้โซลินอยด์วาล์วเปิดได้ ดังนั้นจึงต้องมีวงจรเพื่อขยายกระแส ลักษณะของวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.17

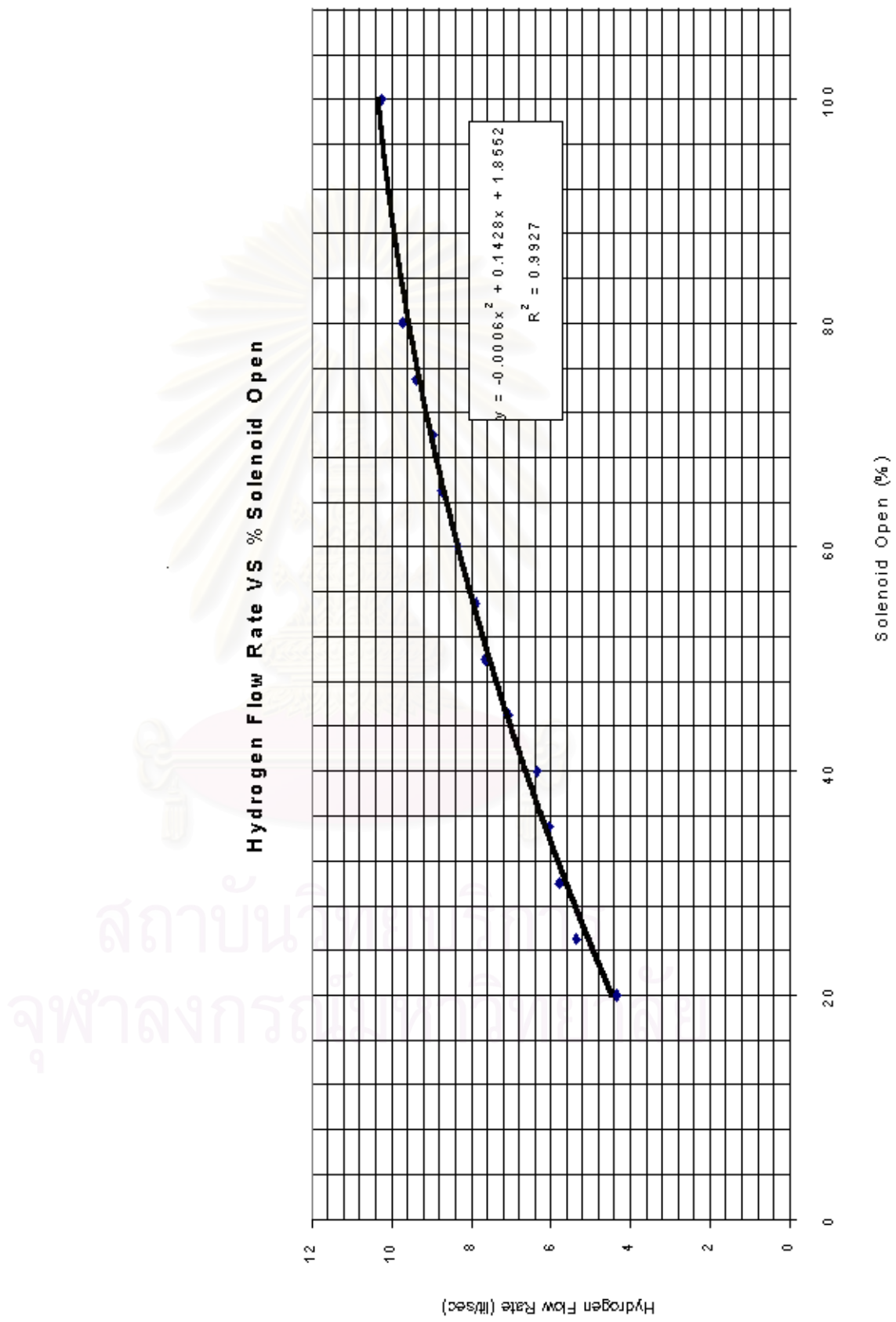


รูปที่ 5.17 แสดงการต่อวงจรขยายกระแสเพื่อขับโซลินอยด์วาล์ว

วงจรรยายกระแสประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการขยายกระแสและ LM1949 ซึ่งเป็นไอซีที่เรียกว่า Injector Drive Controller ไอซีตัวนี้มีหน้าที่ในการลดกระแสเมื่อโซลีนอยด์วาล์วเปิดแล้ว ทั้งนี้เนื่องจากกระแสที่ต้องใช้ในการทำให้เข็มในโซลีนอยด์วาล์วเปิดขึ้นจากตำแหน่งปิดมีค่าสูงกว่ากระแสโซลีนอยด์วาล์วต้องการเพื่อคงตำแหน่งเปิดเอาไว้มาก ดังนั้นถ้าจ่ายกระแสเท่ากับกระแสที่ทำให้โซลีนอยด์วาล์วเริ่มเปิดตลอดเวลาจะทำให้ต้องจ่ายกระแสสูงมาก ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนสูงที่โซลีนอยด์วาล์ว ทำให้ไม่ปลอดภัยเนื่องจากไฮโดรเจนอาจเกิดการลุกไหม้ขึ้น ลักษณะของกระแสเมื่อผ่านวงจรอซี LM1949 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 แสดงสัญญาณที่ผ่าน LM1949 และวงจรรยายกระแสทั้งหมด



ส่วนโปรแกรมควบคุม

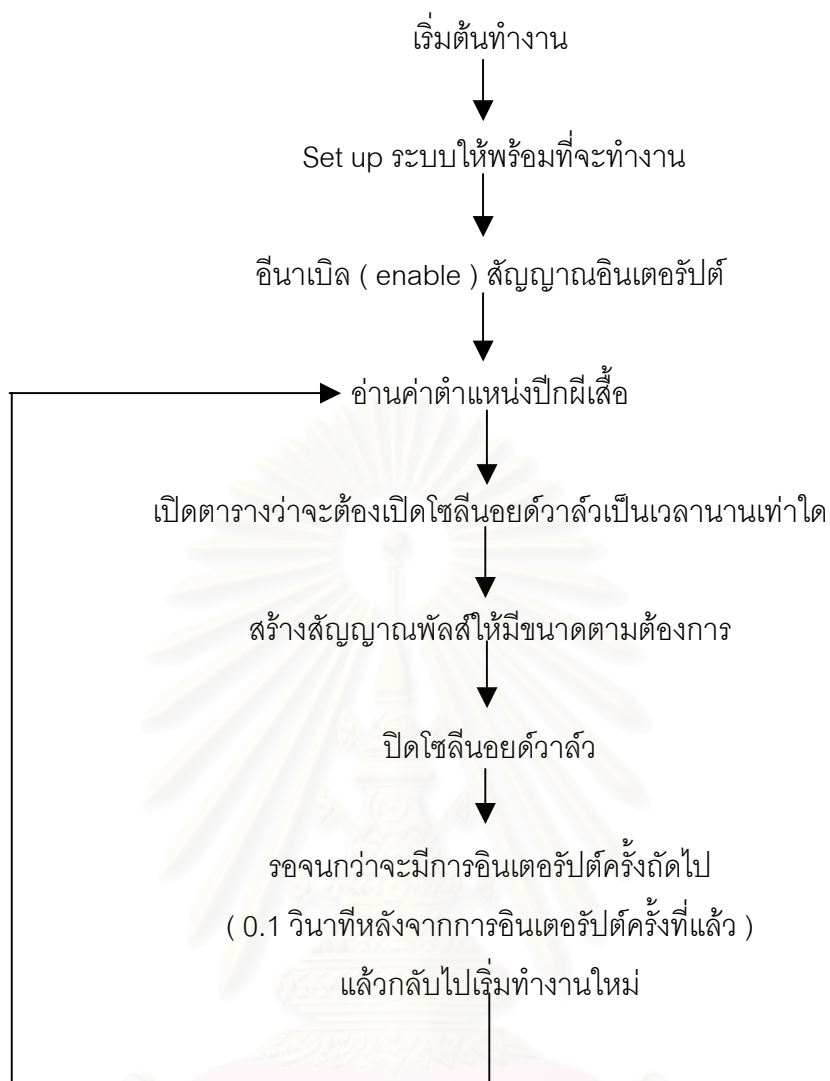
ดังที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 4 แล้วว่าโปรแกรมควบคุมสามารถทำได้ทั้งแบบใช้สัญญาณตำแหน่งปีกผีเสื้อเพียงอย่างเดียว หรือใช้ร่วมกับสัญญาณความเร็วรอบ ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของโปรแกรมทั้ง 2 แบบ

โปรแกรมทั้ง 2 มีส่วนที่เหมือนกันคือจะสั่งเปิดปิดโซลินอยด์วาล์วแบบ Asynchronous คือจังหวะการเปิดปิดไม่สัมพันธ์กับจังหวะการทำงานของเครื่องยนต์ แต่จะเปิดทุก 100 มิลลิวินาที ดังนั้นจะเห็นว่าการสั่งงานจะใช้สัญญาณอินเทอร์รัปต์ทุก 100 มิลลิวินาทีจากวงจร 555Timer IC เป็นสัญญาณให้เริ่มทำงาน

การที่สั่งให้โซลินอยด์เปิดปิดแบบ Asynchronous นั้นเนื่องมาจากการจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเข้าสู่เครื่องยนต์จะจ่ายไปยังจุดเดียว ในลักษณะคล้าย Throttle body injection ไม่ได้ส่งแยกไปแต่ละกระบอกสูบ กระบอกสูบแต่ละสูบจะใช้เวลาหัวไอดีเป็นตัวควบคุมจังหวะการดูดเชื้อเพลิงเข้าสู่กระบอกสูบเอง การสั่งงานแบบ Asynchronous จึงช่วยลดความซับซ้อนของโปรแกรมได้มาก

แบบที่ 1 ใช้สัญญาณตำแหน่งปีกผีเสื้อเพียงอย่างเดียวในการควบคุม

สำหรับโปรแกรมควบคุมแบบที่ 1 นี้ใช้สัญญาณปีกผีเสื้อเพียงอย่างเดียวในการกำหนดปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิง โดยเมื่อผู้ขับขี่ต้องการให้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นก็จะเหยียบคันเร่งมากขึ้นปีกผีเสื้อจะเปิดกว้างขึ้น โปรแกรมจะตรวจจับตำแหน่งปีกผีเสื้อแล้วเปิดโซลินอยด์วาล์วให้เพิ่มขึ้นตาม ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.19 ส่วนตัวโปรแกรมจะเขียนเป็นภาษาแอสเซมบลี สามารถอ่านได้ในภาคผนวก จ. ส่วนตารางกำหนดระยะเวลาที่จะให้โซลินอยด์วาล์วเปิดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 ตำแหน่งปีกผีเสื้อที่แสดงในตารางซึ่งอ่านค่าได้ระหว่าง 0-31 มาจากการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 5 บิต



รูปที่ 5.19 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุมแบบที่ 1

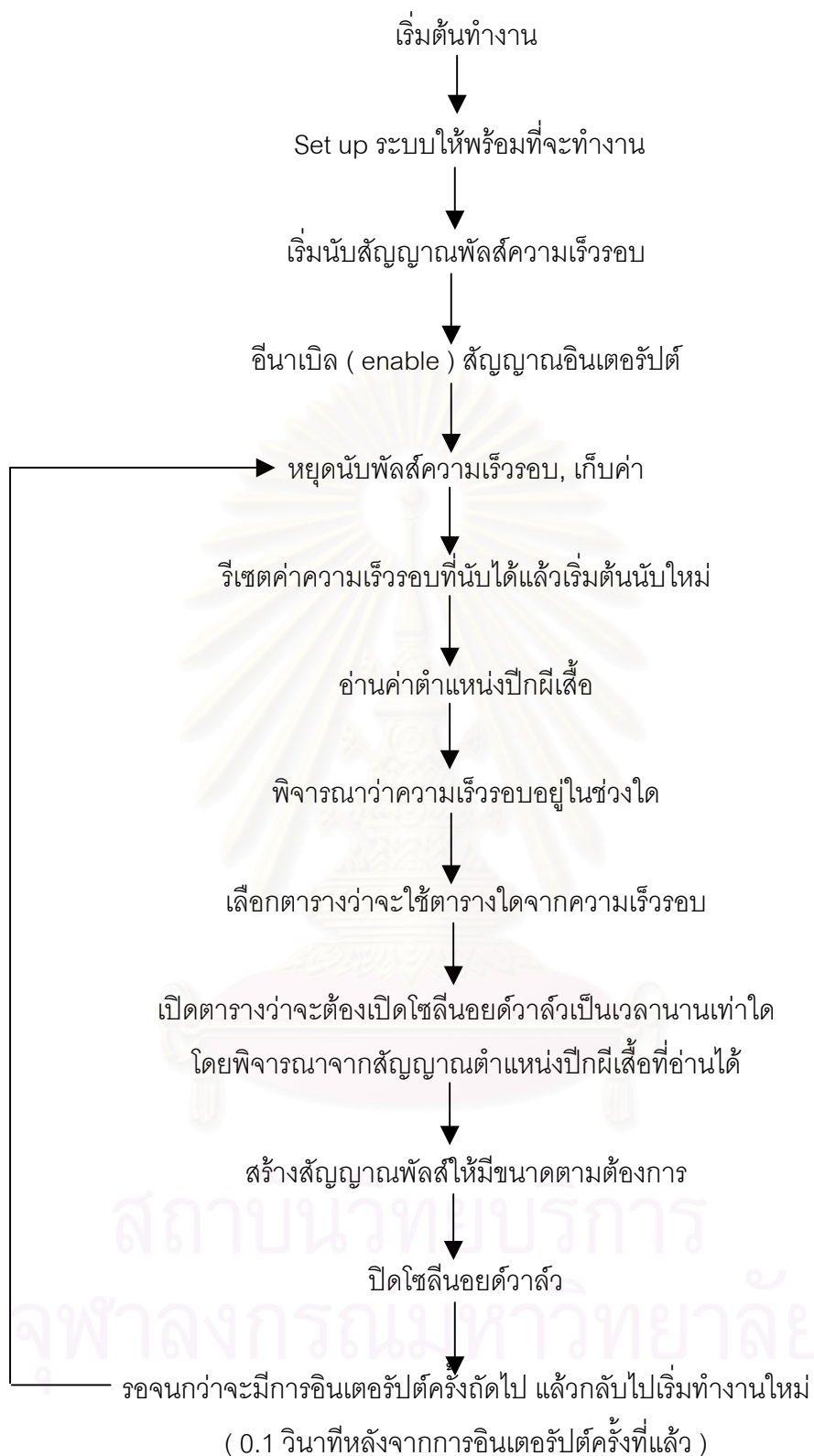
แบบที่ 2 ใช้สัญญาณตำแหน่งปีกผีเสื้อร่วมกับความเร็วรอบของเครื่องยนต์

เนื่องจากโปรแกรมแบบที่ 1 มีข้อจำกัดอยู่บ้างดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 ดังนั้นจึงได้เพิ่มสัญญาณความเร็วรอบเข้ามาช่วย โดยสัญญาณความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะเป็นตัวกำหนดค่าอัตราการไหลสูงสุดของไฮโดรเจน เมื่อปีกผีเสื้อเปิดกว้างที่สุดซึ่งเป็นตำแหน่ง Full Load

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 5.20 และตัวโปรแกรมจริงซึ่งเขียนไว้เป็นภาษาแอสเซมบลีสามารถอ่านได้ในภาคผนวก จ. ส่วนตารางระยะเวลาที่จะให้โซลินอยด์วาล์วเปิดนั้นสามารถแสดงได้ดังตาราง 5.2

ค่าตำแหน่งปีกมีเสื่อที่ คอนโทรลเลอร์อ่านได้	แอดเดรสที่ใช้เก็บค่า	ระยะเวลาที่ให้โซลินอยด์ วาล์วเปิด (ms)
0	040H	0
1	041H	5
2	042H	8
3	043H	12
4	044H	16
5	045H	20
6	046H	23
7	047H	26
8	048H	29
9	049H	32
10	04AH	35
11	04BH	38
12	04CH	40
13	04DH	42
14	04EH	44
15	04FH	46
16	050H	48
17	051H	50
18	052H	52
19	053H	54
20	054H	56
21	055H	58
22	056H	60
23	057H	62
24	058H	64
25	059H	66
26	05AH	68
27	05BH	70
28	05CH	72
29	05DH	74
30	05EH	76
31	05FH	78

ตารางที่ 5.1 ตารางค่าระยะเวลาที่จะให้โซลินอยด์วาล์วเปิด
ในโปรแกรมควบคุมแบบที่ 1



รูปที่ 5.20 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุมแบบที่ 2

โปรแกรมแบบที่ 2 นี้ยังแตกต่างจากแบบที่ 1 อีกเล็กน้อยที่การอ่านค่าตำแหน่งปีกผีเสื้อ โดยในโปรแกรมแบบที่ 2 นี้จะอ่านสัญญาณดิจิทัลที่มีความละเอียด 4 บิต จึงอ่านค่าได้ระหว่าง 0-15

ตำแหน่ง ปีกผีเสื้อ	TABLE 1		TABLE 2		TABLE 3	
	ความเร็วรอบไม่เกิน 1200 rpm		ความเร็วรอบ 1200-2400 rpm		ความเร็วรอบเกิน 2400 rpm	
	แอดเดรส	ระยะเวลาเปิด (ms)	แอดเดรส	ระยะเวลาเปิด (ms)	แอดเดรส	ระยะเวลาเปิด (ms)
0	070H	0	060H	0	040H	0
1	071H	5	061H	5	041H	3
2	072H	9	062H	10	042H	6
3	073H	12	063H	14	043H	9
4	074H	15	064H	18	044H	12
5	075H	17	065H	22	045H	15
6	076H	19	066H	25	046H	18
7	077H	21	067H	28	047H	21
8	078H	23	068H	31	048H	24
9	079H	24	069H	34	049H	27
10	07AH	25	06AH	37	04AH	30
11	07BH	26	06BH	40	04BH	33
12	07CH	27	06CH	43	04CH	35
13	07DH	28	06DH	46	04DH	37
14	07EH	29	06EH	48	04EH	39
15	07FH	30	06FH	50	04FH	80

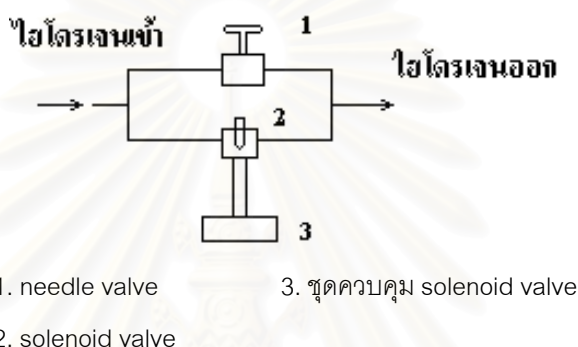
ตารางที่ 5.2 ตารางค่าระยะเวลาที่จะให้โซลินอยด์วาล์วเปิด

ในโปรแกรมควบคุมแบบที่ 2

ระยะเวลาที่จะให้โซลินอยด์วาล์วเปิดในตารางที่ 5.1 และ 5.2 สามารถคำนวณได้จากผลการทดลองในภาคผนวก ก. อย่างไรก็ตามเนื่องจากความดันด้านขาออกของโซลินอยด์วาล์วเมื่อติดตั้งเข้ากับเครื่องยนต์จริงมีค่าไม่คงที่ และมีค่ามากกว่าในการทดสอบโซลินอยด์วาล์วโดยใช้อากาศ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มระยะเวลาการเปิดโซลินอยด์วาล์วให้นานขึ้น ในที่นี้เลือกให้ระยะเวลาการเปิดโซลินอยด์วาล์วเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า

การดัดแปลงระบบจ่ายเชื้อเพลิง ติดตั้งและทดสอบระบบควบคุมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบอิเล็กทรอนิกส์กับรถยนต์

ในการติดตั้งระบบควบคุมเชื้อเพลิงแบบอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับรถยนต์มีการเปลี่ยนจากลูกเบี้ยวของเครื่องที่ใช้ควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเป็นโซลินอยด์วาล์วซึ่งควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนด้วยระยะเวลาในการเปิด-ปิด นอกจากนี้ยังเพิ่มเติมอุปกรณ์ขึ้นอีกตัวหนึ่งคือวาล์วเข็มหรือ needle valve เพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนปริมาณไฮโดรเจนขณะเดินเบา (Idle) การติดตั้งอุปกรณ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.21 และ 5.22



รูปที่ 5.21 แสดงแผนผังการติดตั้งอุปกรณ์



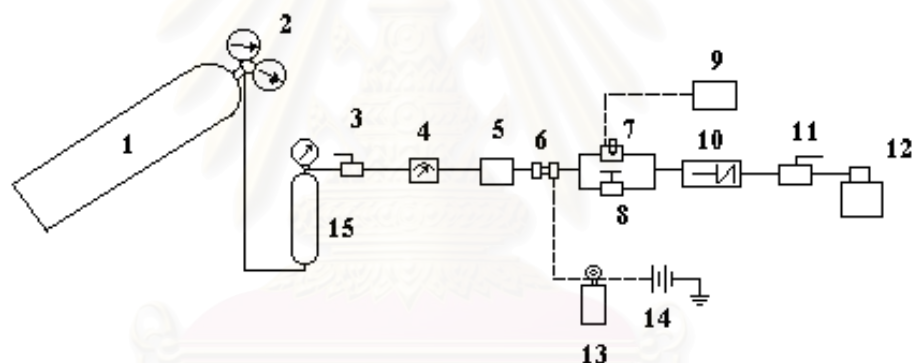
รูปที่ 5.22 แสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์ควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงแบบอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับรถยนต์

นอกจากนี้ยังเพิ่มเติมถังเก็บไฮโดรเจน (Serge tank) พร้อมด้วยมาตรวัดความดันเข้าไปในระบบจ่ายเชื้อเพลิง หลังออกจาก Pressure regulator ก่อนเข้า Solenoid valve ตัวที่หนึ่ง เพื่อ

รักษาความดันให้มีค่าคงที่ขณะจ่ายเชื้อเพลิงแบบเป็นพัลส์ ดังที่ติดเพิ่มเติมเข้าไปมีลักษณะดังรูปที่ 5.23 และระบบจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.23 แสดงลักษณะถังและมาตรวัดความดันที่ติดเพิ่มเติม



- | | | |
|----------------------|---|---------------------------------|
| 1. Hydrogen cylinder | 6. Solenoid valve ตัวที่ 1 | 11. Ball valve |
| 2. Regulator | 7. Solenoid valve ตัวที่ 2 สำหรับควบคุมปริมาณไฮโดรเจน | 12 Engine |
| 3. Ball valve | 8. Needle valve สำหรับปรับรอบเดินเบา | 13. Ignition switch |
| 4. Flowmeter | 9. ชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ | 14. Battery |
| 5. Filter | 10. Filter และ check valve | 15. Surge tank & Pressure gauge |

รูปที่ 5.24 แสดงระบบจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ดัดแปลงแล้ว

การทดสอบระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบอิเล็กทรอนิกส์

หลังจากทำการติดตั้งระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบอิเล็กทรอนิกส์เรียบร้อยแล้ว จะทำการทดสอบระบบโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ตรวจสอบรอยรั่วที่อ่านเกิดขึ้นโดยใช้ฟองสบู่
2. ตั้งค่าความดันให้บริเวณ serge tank อ่านค่าได้ประมาณ 35 psi
3. สตาร์ทเครื่องโดยยังไม่เปิดโซลินอยด์วาล์วตัวที่ 2 สำหรับควบคุมส่วนผสม ใช้เฉพาะวาล์วเข็ม (needle valve) ในการตั้งรอบเดินเบา
4. ลองเร่งเครื่องอยู่กับที่ก่อน โดยใช้โปรแกรมแบบที่ 1 คือใช้เฉพาะสัญญาณตำแหน่งปีกผีเสื้อในการกำหนดปริมาณเชื้อเพลิง แล้วดูผลการทดสอบ
5. ทดลองขับรถยนต์ แล้วดูผลการวิ่ง
6. ลองเพิ่มความดันและแก้ไขโปรแกรมค่าระยะเวลาที่จะให้โซลินอยด์วาล์วเปิด
7. เปลี่ยนเป็นโปรแกรมแบบที่ 2 คือใช้สัญญาณตำแหน่งปีกผีเสื้อร่วมกับสัญญาณความเร็วรอบในการกำหนดปริมาณเชื้อเพลิง

ผลการทดสอบ

เมื่อนำระบบควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ติดตั้งเข้ากับรถยนต์จริงแล้วทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรมแบบที่ 1 พบว่าความดันที่ใช้ในการฉีดเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเข้าสู่เครื่องยนต์ที่อ่านได้ที่บริเวณ serge tank ต้องมีค่าสูงประมาณ 50 psi จึงจะสามารถเร่งความเร็วของเครื่องยนต์ได้ อย่างไรก็ตามในการทดสอบนี้ไม่อาจที่จะตั้งความดันสูงกว่า 50 psi ได้เนื่องจากการทดสอบอัตราการไหลของอากาศโซลินอยด์วาล์ว (แสดงในภาคผนวก ก.) แสดงว่าโซลินอยด์วาล์วทำงานที่ความดันของอากาศเพียง 35 psi เท่านั้น เมื่อเปลี่ยนมาใช้ไฮโดรเจนแทนแล้วทดลองปรับเพิ่มความดันปรากฏว่าโซลินอยด์วาล์วยังคงสามารถทำงานได้จึงได้ตั้งความดันให้สูงขึ้น แต่เนื่องจากไม่มีข้อมูลทดสอบยืนยันว่าโซลินอยด์วาล์วสามารถทำงานได้จริง การตั้งความดันสูงเกินไปสำหรับโซลินอยด์วาล์วอาจทำให้เข็มของโซลินอยด์วาล์วค้าง และทำให้เกิดอันตรายขึ้นได้ เมื่อตั้งความดันได้เพียง 50 psi การเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงจึงต้องอาศัยการปรับแก้ค่าระยะเวลาที่จะให้โซลินอยด์วาล์วเปิดโดยการแก้ไขค่าในโปรแกรมเท่านั้น

ในการทดสอบการวิ่งของรถยนต์พบว่ารถยนต์สามารถวิ่งได้ แต่ความเร็วค่อนข้างต่ำคือความเร็วสูงสุดที่รถยนต์ทำได้มีค่าประมาณ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เนื่องจากข้อจำกัดของ

โซลีนอยด์วาล์วที่เลือกมาใช้เป็นตัวจ่ายเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงไม่ได้ทดสอบโปรแกรมแบบที่ 2 ต่อไป เนื่องจากโปรแกรมแบบที่ 1 และ 2 จะมีความแตกต่างกันเมื่อความเร็วสูง แต่ที่ความเร็วต่ำนั้นจะให้ผลเหมือนกัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนและสร้างระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้กับรถยนต์ที่ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นผลงานวิจัยของสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [5]

จากผลการทดสอบเครื่องยนต์บนแท่นทดสอบทำให้ลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง และปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่เครื่องยนต์ต้องการในแต่ละสภาวะการขับขี่ ทำให้สามารถเลือกสัญญาณที่จะนำมาใช้เป็นตัวควบคุมปริมาณไฮโดรเจน 2 สัญญาณคือสัญญาณตำแหน่งของปีกผีเสื้อและสัญญาณความเร็วรอบของเครื่องยนต์

ระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงแบบคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นใช้ระยะเวลาการเปิดปิดโซลีนอยด์วาล์วเป็นตัวควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่จ่ายให้กับเครื่องยนต์ ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ส่วนการตรวจจับสัญญาณ (Sensor) ประกอบด้วยตัวตรวจจับตำแหน่งปีกผีเสื้อและคอยล์จุดระเบิดสำหรับวัดความเร็วรอบ
2. ส่วนควบคุมประกอบด้วย
 - 2.1 บอร์ดควบคุม CPS8252 v2.0 ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล MCS 51 เป็นตัวควบคุม สาเหตุที่เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมเนื่องจากความสะดวกในการติดตั้งระบบ เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์มีขนาดเล็ก ใช้เนื้อที่ในการติดตั้งน้อย และสะดวกในการจ่ายกระแสไฟ
 - 2.2 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ช่วยในการควบคุมประกอบด้วยวงจรแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิตอล (A/D Converter) สำหรับการอ่านสัญญาณตำแหน่งปีกผีเสื้อ , วงจรกรองสัญญาณและวงจรมิตทริกเกอร์สำหรับการอ่านสัญญาณความเร็วรอบ และวงจรจับเวลา
3. ส่วนตัวกระตุ้น (Actuator) ประกอบด้วยโซลีนอยด์วาล์วและวงจรขยายกระแสสำหรับโซลีนอยด์วาล์ว โดยอาศัยระยะเวลาในการเปิดปิดของโซลีนอยด์วาล์วในการควบคุมปริมาณเชื้อเพลิง

ส่วนตัวโปรแกรมควบคุมแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1. ใช้สัญญาณปีกผีเสื้อเพียงสัญญาณเดียวในการควบคุมปริมาณเชื้อเพลิง
2. ใช้สัญญาณปีกผีเสื้อร่วมกับสัญญาณความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในการควบคุมปริมาณเชื้อเพลิง

เมื่อนำไปทดสอบกับรถยนต์จริงพบว่าระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงแบบอิเล็กทรอนิกส์สามารถทำงานได้ แต่ความเร็วของรถยนต์ที่ได้ยังมีค่าต่ำเนื่องจากข้อจำกัดของโซลินอยด์วาล์วที่นำมาใช้ในการจ่ายเชื้อเพลิงซึ่งไม่สามารถทำงานได้ที่ความดันสูงกว่า 50 psi และมีอัตราการไหลไม่เพียงพอ ในงานวิจัยต่อเนื่องจึงควรเปลี่ยนโซลินอยด์วาล์วซึ่งสามารถทำงานได้ที่ความดันสูงกว่า 50 psi และสามารถให้อัตราการไหลสูงขึ้น รวมทั้งควรมีการตอบสนองที่รวดเร็วขึ้น และเนื่องจากเครื่องยนต์ทำความเร็วได้ต่ำดังนั้นจึงไม่เห็นความแตกต่างระหว่างโปรแกรมแบบที่ 1 และแบบที่ 2

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการเปลี่ยนโซลินอยด์วาล์วที่สามารถทำงานได้ที่ความดันสูง อัตราการไหลมาก และมีการตอบสนองไวกว่าแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากพบว่าเครื่องยนต์ไม่สามารถทำความเร็วได้สูงเนื่องจากอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนไม่เพียงพอ
2. ควรมีการทดสอบการทำงานของเครื่องยนต์ที่ใช้โซลินอยด์วาล์วเป็นตัวควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงบนแท่นทดสอบ เนื่องจากการทดสอบโซลินอยด์วาล์วกับอัตราการไหลของอากาศนั้นทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนมาก เพราะมีการเปลี่ยนชนิดของก๊าซที่ไหลผ่านและไม่สามารถควบคุมความดันที่ทางออกของโซลินอยด์วาล์วได้เหมือนกับสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์จริง

รายการอ้างอิง

1. ขวัญชัย จ้อยเจริญ. การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายใน.
ปริญญาามหาบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2539.
2. วัชระ ลอยสมุทร. การใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ปริญญาามหาบัณฑิต
วิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2539.
3. ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล, วรพจน์ กรแก้ววัฒนกุล. เรียนรู้และปฏิบัติการไมโครคอนโทรลเลอร์
MCS-51
4. บุญทัน สมเน็ก เครื่องยนต์ พิมพ์ครั้งที่ 7 บริษัท อมรินทร์พริ้นติ้งกรุ๊ป จำกัด,2537.
5. สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. การศึกษาดัดแปลงใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับ
ยานพาหนะ , 2538.
6. Dick H. King. Computerized Engine Control 2nd edition USA:Delmar Publishers
Inc.,1991.
7. Toyota. Toyota Computer-Controlled System Training Manual Japan: Toyota Service
Training
8. Heywood J.B. Internal Combustion Engine Fundamental 2nd edition Singapore :
McGraw.hill.Co, 1988.
9. F.B. Simpson, D.R.Swope, J.H.Lofthouse. A Guide For The Conversion to and
Maintenance of Hydrogen Fuel, Spark Ignition Engines IDAHO National
Engineering Laboratory, IDAHO Falls, IDAHO and D.I.Menriksen, Billings
Energy Research Corporation, Provo. Utah

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

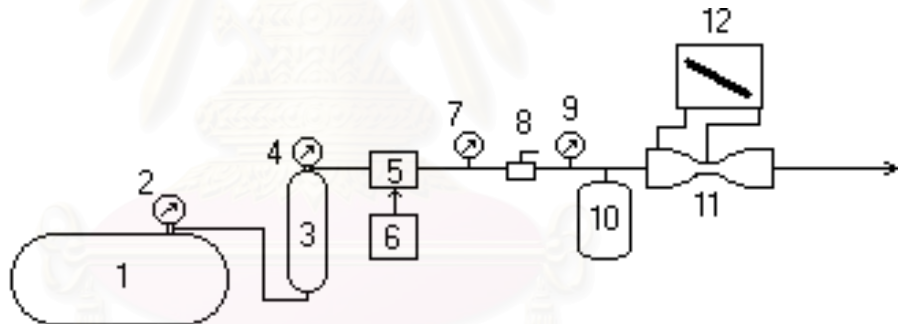
การทดสอบโซลินอยด์วาล์ว

ในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะปรับเปลี่ยนระบบการจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจาก needle valve แบบเดิมซึ่งมีการจ่ายเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง เป็นแบบหัวฉีดหรือโซลินอยด์วาล์ว ซึ่งควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิงแบบ on-off control ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบอัตราการไหลผ่านโซลินอยด์วาล์วเมื่อมีการเปิดปิดเป็นพัลส์

การทดสอบอัตราการไหลผ่านโซลินอยด์วาล์วจะใช้อากาศแทนไฮโดรเจน เนื่องจากมีความปลอดภัยมากกว่า จากนั้นจึงแปลงเป็นอัตราการไหลของไฮโดรเจนในภายหลัง

ชุดอุปกรณ์ทดสอบ

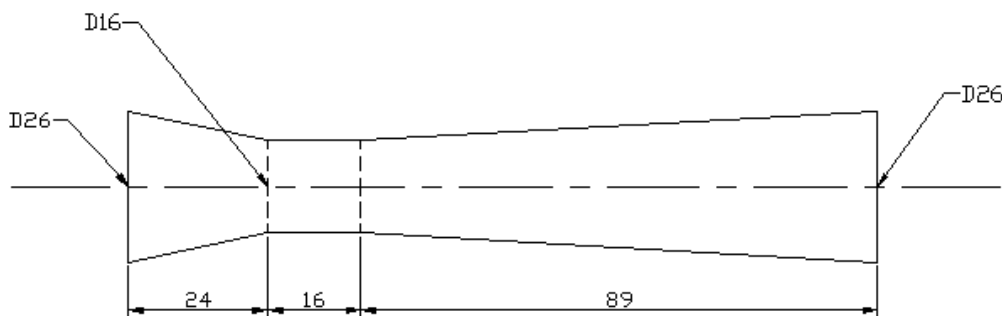
การทดสอบอัตราการไหลผ่านโซลินอยด์วาล์วประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ดังรูปที่ ก.1



- | | | |
|-----------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| 1. Air Compressor | 5. Solenoid Valve | 9. Pressure gauge |
| 2. Pressure Regulator | 6. ชุดควบคุม Solenoid Valve | 10. ถังพักอากาศเพื่อให้ความดันคงที่ |
| 3. ถังพักอากาศ | 7. Pressure gauge | 11. Venturi meter |
| 4. Pressure gauge | 8. Ball Valve | 12. Inclined Manometer |

รูปที่ ก.1 แสดง Schematic Diagram ของการทดสอบโซลินอยด์วาล์ว

มาตรวัดอัตราการไหลของอากาศแบบ Orifice ที่มีลักษณะพื้นที่หน้าตัดดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 แสดงมาตรวัดอัตราการไหลของอากาศแบบ Orifice ที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อดำเนินการโดยใช้ค่า $\rho_{\text{AIR}} = 1.172 \text{ kg/m}^3$ จะได้

$$V = C_d (\Delta P)^{1/2}$$

เมื่อ $C_d = 0.887953$

V = อัตราการไหลของอากาศโดยปริมาตร (lit/sec)

ΔP = ความดันแตกต่างคร่อม orifice (mmWG)

วิธีการทดลอง

การทดสอบอัตราการไหลผ่านโซลินอยด์วาล์วเป็นดังนี้

1. ติดตั้งเครื่องมือทดสอบตามรูปและตรวจสอบการรั่วด้วยฟองสบู่
2. เปิด Ball valve จนสุด
3. เปิด Solenoid valve แบบเปิดตลอดเวลาแล้วปรับค่าความดันที่ถึงพักอากาศ (อ่านจาก Pressure gauge หมายเลข 4 ใน Schematic Diagram) ให้มีค่า 30 psi
4. ควบคุมให้ Solenoid valve เปิดเป็นพัลส์
5. บันทึกค่า P_1 (อ่านจาก Pressure gauge หมายเลข 4) , P_2 (อ่านจาก อ่านจาก Pressure gauge หมายเลข 7) , P_3 (อ่านจาก Pressure gauge หมายเลข 9) และค่า ΔP ตกคร่อม orifice จาก inclined manometer

ผลการทดลอง

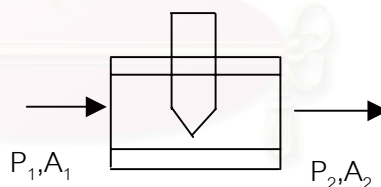
ผลการทดลองอัตราการไหลของอากาศผ่านโซลินอยด์วาล์วที่เปิดปิดด้วย pulse ขนาดต่าง ๆ กันสามารถแสดงได้ดังตารางที่ ก.1 และรูปที่ ก.4

ข้อจำกัดในการสร้างพัลส์เพื่อจ่ายให้กับโซลินอยด์วาล์วคือ

1. การสั่งให้โซลินอยด์วาล์วเปิดหรือปิดตามคำสั่งที่ได้รับ โซลินอยด์วาล์วจะต้องใช้เวลาประมาณ 20 ms จึงจะทำการเปิดหรือปิดได้ ดังนั้นขนาดพัลส์ต่ำสุดที่จะสั่งให้เปิดหรือปิดโซลินอยด์วาล์วต้องมีขนาดมากกว่า 20 ms
2. โซลินอยด์วาล์วจะสามารถเปิดหรือปิดได้ที่ความดันไม่เกิน 35 psi หากความดันเกินกว่านี้แรงแม่เหล็กของโซลินอยด์วาล์วจะไม่เพียงพอที่จะดันให้เข็มเปิดปิดได้

วิเคราะห์ผลการทดลอง

เนื่องจากการทดสอบนี้ใช้อากาศแทนไฮโดรเจนในการทดสอบอัตราการไหล เนื่องจากมีความปลอดภัยมากกว่า ดังนั้นเมื่อต้องการนำผลที่ได้ไปใช้กับไฮโดรเจน จึงต้องมีการปรับแก้ไขอัตราการไหลเสียก่อน วิธีการที่ใช้ในการประมาณอัตราการไหลของไฮโดรเจนเป็นดังนี้



รูปที่ ก.3 แสดงภาพการไหลของของไหลผ่านโซลินอยด์วาล์ว

จากสมการ Bernoulli Equation โดยสมมติให้เป็นการไหลแบบไม่อัดตัว และเป็นารไหลสม่ำเสมอ

$$P_1 + \rho gh_1 + 0.5\rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + 0.5\rho v_2^2$$

เมื่อ P คือความดัน (Pa)

g คือค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/sec²)

h คือความสูงจากระดับอ้างอิง (m)

v คือความเร็วของการไหล (m/sec)

เมื่อจัดรูปสมการต่อไปจะได้

$$\dot{V} = A_1 A_2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}}$$

เมื่อ \dot{V} = อัตราการไหลโดยปริมาตร (m³/sec)

เมื่อเปลี่ยนจากอากาศเป็นไฮโดรเจน A_1 และ A_2 มีค่าคงที่ ส่วน ΔP กำหนดให้มีค่าเท่าเดิม ค่าที่เปลี่ยนแปลงคือความหนาแน่น (ρ) เท่านั้น

สำหรับอากาศ
$$\dot{V}_A = A_1 A_2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_A(A_1^2 - A_2^2)}}$$

สำหรับไฮโดรเจน
$$\dot{V}_H = A_1 A_2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_H(A_1^2 - A_2^2)}}$$

จะได้

$$\frac{\dot{V}_H}{\dot{V}_A} = \sqrt{\frac{\rho_H}{\rho_A}}$$

แต่ผลที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนในการนำมาใช้ประมาณค่าอัตราการไหลของไฮโดรเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำไปใช้ในการประมาณค่าอัตราการไหลจริงในระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงแบบอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งนี้เนื่องจาก

1. ในการประมาณค่าอัตราการไหลของไฮโดรเจนจากอัตราการไหลของอากาศผ่านโซลินอยด์วาล์วนั้นไม่ได้คำนึงถึงสภาวะการอัดตัวได้ของก๊าซ ซึ่งจะมีผลให้ค่าที่ได้ผิดพลาด
2. การใช้สมการ Bernoulli Equation ใช้กับการไหลแบบต่อเนื่องแต่การไหลผ่านโซลินอยด์วาล์วนั้นเป็นการไหลแบบไม่ต่อเนื่อง ทำให้ค่าที่ได้อาจมีความผิดพลาด
3. ในการนำไปใช้กับเครื่องยนต์จริงนั้น ความดันด้านขาออกมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา และเปลี่ยนแปลงเป็นช่วงกว้าง และมีค่ามากกว่าในการทดสอบนี้ (แสดงในภาคผนวก ค.) ดังนั้นหากเปิดปิดโซลินอยด์วาล์วด้วยพัลส์ขนาดเท่า ๆ กัน และจ่ายไฮโดรเจนที่ความดันเท่ากัน อัตราการไหลเมื่อนำไปติดตั้งที่เครื่องยนต์จริงจะน้อยกว่าที่แสดงในตารางนี้

อย่างไรก็ตามการทดสอบโซลินอยด์วาล์วนี้ยังมีประโยชน์ในการให้ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับอัตราการไหลของไฮโดรเจนผ่านโซลินอยด์วาล์ว และแสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการ

ไหลของไฮโดรเจนผ่านโซลีนอยด์วาล์วกับขนาดของพัลส์ที่โซลีนอยด์วาล์วเปิด ค่าของอัตราการไหลของไฮโดรเจนผ่านโซลีนอยด์วาล์วที่ประมาณขึ้นนี้แสดงดังกราฟรูปที่ ก.5

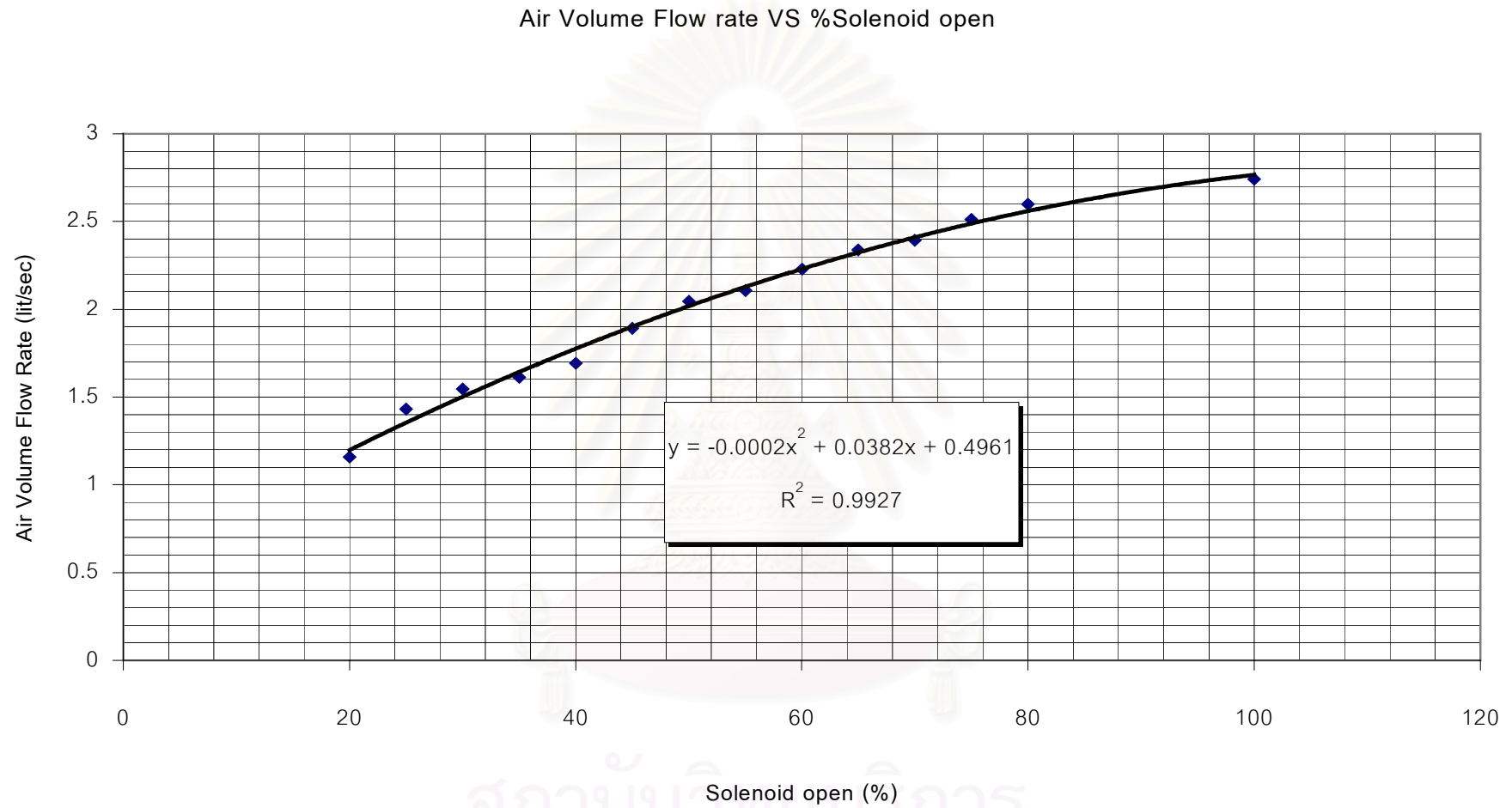
เนื่องจากความผิดพลาดในการประมาณค่าซึ่งเกิดมาจากหลายสาเหตุดังกล่าวแล้ว ดังนั้นเมื่อนำไปเขียนโปรแกรมควบคุม การกำหนดขนาดของพัลส์ที่ใช้เปิดโซลีนอยด์วาล์วจึงควรกำหนดให้มีค่าน้อย ๆ ไว้ก่อน เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายขึ้นระหว่างทดลอง หากอัตราการไหลไม่เพียงพอจึงแก้ไขค่าในโปรแกรมให้เพิ่มขึ้นตามลำดับ



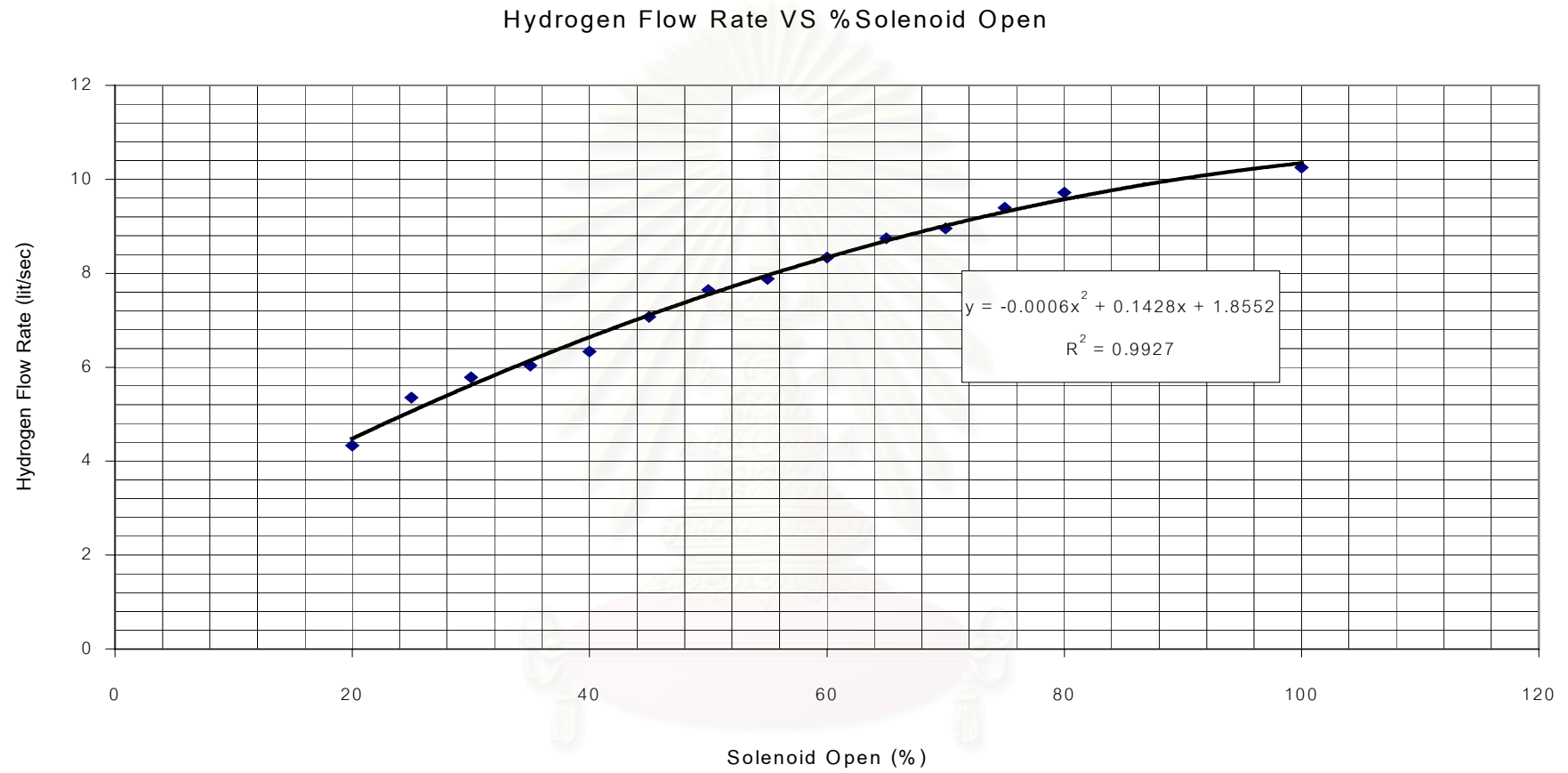
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางบันทึกผลการทดลอง																		
		ครั้งที่ 1				ครั้งที่ 2				ครั้งที่ 3				เฉลี่ย				Volume Flow Rate
PULSE WIDTH (ms)		P1	P2	P3	ΔP	P1	P2	P3	ΔP	P1	P2	P3	ΔP	P1	P2	P3	ΔP	(lit/sec)
OPEN	CLOSE	(psi)	(psi)	(psi)	mmWG	(psi)	(psi)	(psi)	mmWG	(psi)	(psi)	(psi)	mmWG	(psi)	(psi)	(psi)	mmWG	Air
เปิดตลอด		30	6.5	6	9.5	30	6.5	6.25	9.5	30	6.5	6	9.6	30.0	6.5	6.1	9.53	2.74
20	80	35	1.5	1	1.6	35	1.75	1.5	1.7	35	1.5	1.25	1.8	35.0	1.6	1.3	1.70	1.16
25	75	34	2.5	2	2.6	34	2.5	2	2.6	34	2.5	2	2.6	34.0	2.5	2.0	2.60	1.43
30	70	34	3	2.5	3.1	33	3.25	2.75	3	34	3	2.5	3	33.7	3.1	2.6	3.03	1.55
35	65	33	3.25	3	3.4	33	3.5	3	3.3	33	3.5	3	3.2	33.0	3.4	3.0	3.30	1.61
40	60	33	3.75	3.25	3.7	33	3.6	3.25	3.6	33	3.5	3.25	3.6	33.0	3.6	3.3	3.63	1.69
45	55	32	4.1	4	4.5	32	4.25	4	4.6	33	4.25	4	4.5	32.3	4.2	4.0	4.53	1.89
50	50	32	4.75	4.5	5.4	32	4.75	4.5	5.3	32	4.75	4.5	5.2	32.0	4.8	4.5	5.30	2.04
55	45	32	5	5	5.6	32	5	5	5.7	32	5	5	5.6	32.0	5.0	5.0	5.63	2.11
60	40	32	5.1	5.1	6.4	32	5	5	6.3	32	5	5	6.2	32.0	5.0	5.0	6.30	2.23
65	35	31	5.5	5.5	6.8	32	5.75	5.75	7	32	5.75	5.75	7	31.7	5.7	5.7	6.93	2.34
70	30	31	5.75	5.75	7.3	32	5.75	5.75	7.3	31	5.75	5.75	7.2	31.3	5.8	5.8	7.27	2.39
75	25	31	6	5.9	8.1	31	6	6	7.9	32	6	6	8	31.3	6.0	6.0	8.00	2.51
80	20	30.5	6.25	6	8.6	30.5	6.25	6	8.6	31	6.25	6.25	8.5	30.7	6.3	6.1	8.57	2.60

ตารางที่ ก.1 แสดงผลการทดสอบอัตราการไหลของอากาศผ่านโซลินอยด์วาล์วซึ่งเปิดปิดเป็นพัลส์



รูปที่ ก. 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการระยะเวลาในการเปิดโซลินอยด์วาล์วกับอัตราการไหลของอากาศ



รูปที่ ก. 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการระยะเวลาในการเปิดโซลินอยด์วาล์วกับอัตราการไหลของไฮโดรเจน

ภาคผนวก ข.

การสอบเทียบมาตรวัดอัตราการไหลของไฮโดรเจนแบบเข็ม

ในการทดสอบเครื่องยนต์ไฮโดรเจนบนแท่นทดสอบมีการใช้มาตรวัดอัตราการไหลของไฮโดรเจน 2 ตัว ตัวหนึ่งคือมาตรวัดอัตราการไหลแบบเข็ม อ่านค่าตามสเกลบนหน้าปัดเป็น % ซึ่งจะต้องมีการสอบเทียบเสียก่อนว่าเทียบเป็นอัตราการไหลของไฮโดรเจนโดยปริมาตรเป็นเท่าใด การสอบเทียบในภาคผนวกนี้ทำพร้อมกับการทดสอบเครื่องยนต์ โดยการติดตั้งมาตรวัดอัตราการไหลแบบเข็มและมาตรวัดอัตราการไหลแบบนับปริมาตรซึ่งใช้เป็นมาตรฐานในการทดสอบไว้คู่กัน (รายละเอียดการติดตั้งแสดงไว้แล้วในบทที่ 4) ความดันที่ใช้ในการสอบเทียบมีค่าประมาณ 80 psi ผลการสอบเทียบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ข.1

ผลการสอบเทียบ

จากการทดลองพบว่าสเกล (หน่วยเป็น %) ที่อ่านได้จากหน้าปัดของมาตรวัดอัตราการไหลของไฮโดรเจนแบบเข็มมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของไฮโดรเจนโดยปริมาตรในเชิงเส้นตรง ความสัมพันธ์สามารถเขียนเป็นสมการ

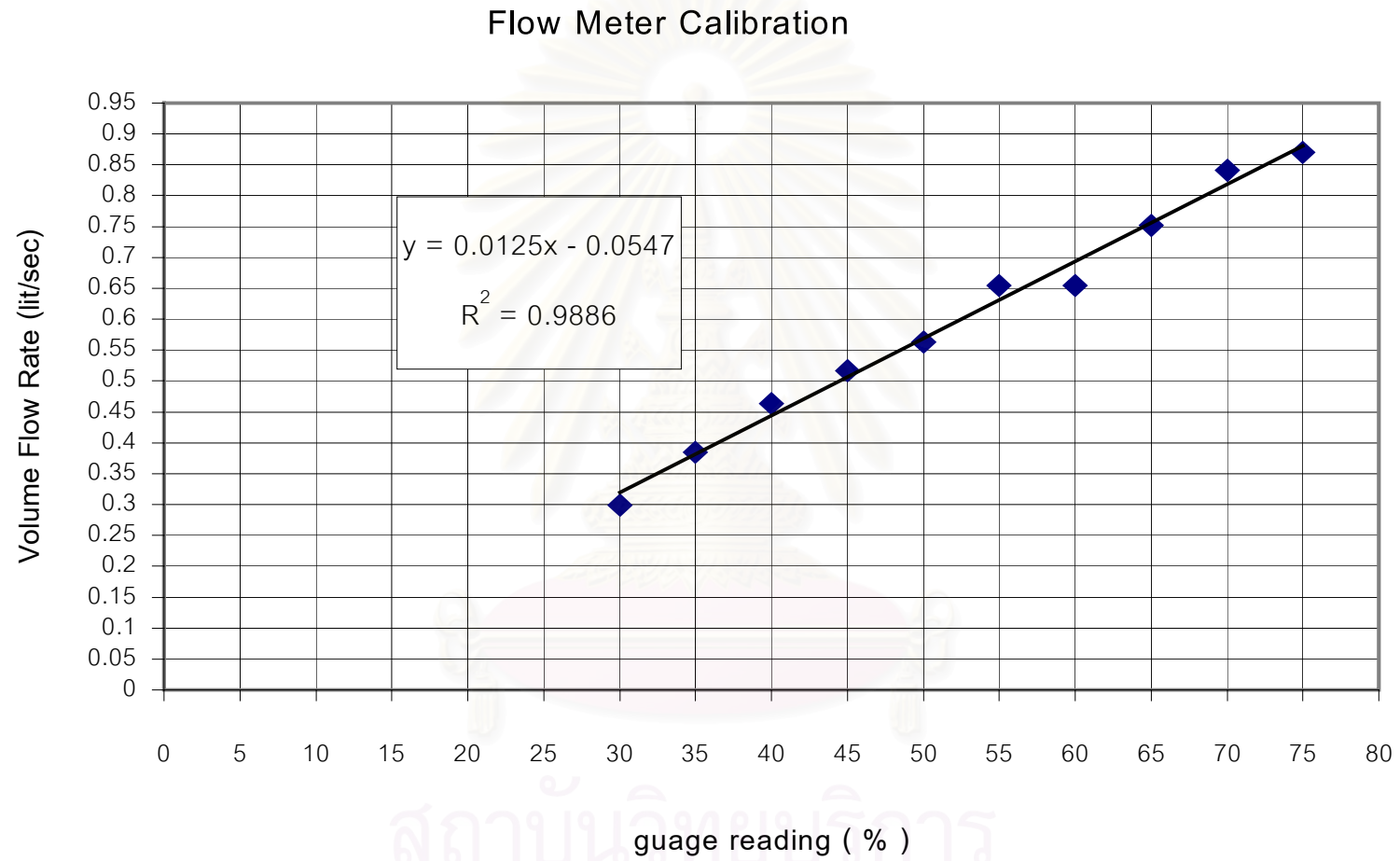
$$V_f = 0.0125 (S) - 0.0547$$

โดยมีค่า $R^2 = 0.9886$

เมื่อ V_f = อัตราการไหลของไฮโดรเจนโดยปริมาตร (litre/sec)

S = ค่าที่อ่านได้จากมาตรวัดอัตราการไหลแบบเข็ม (%)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านได้จากมาตรวัดอัตราการไหลแบบเข็มกับอัตราการไหลโดยปริมาตรของไฮโดรเจน

ภาคผนวก ค. ตารางบันทึกผลการทดสอบเครื่องยนต์

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

speed 2000 rpm			throttle 50%											TEMP (C)		
% H2 Flow	Torque (Nm)	Air (mmWG)	H2 volume (lit)	time (sec)	P H2 (psi)	P (manifold) (V)	P ก่อนเข้า เครื่อง(psi)	Power (Nm)	H2 flow (lit/s)	H2 mass flow (g/s)	Air (lit/s)	Air (g/s)	A/F relative	exh.	water in	water out
30	17	20.6	10	30.97	80	0.225	3	3.56	0.3229	0.1664	20.2530	23.5241	4.1814	258	31	34
40	36	18.8	10	24.72	80	0.21	5	7.54	0.4045	0.2085	19.3479	22.4728	3.1884	297	32	35
50	53	16	10	18.51	80	0.189	8	11.09	0.5402	0.2785	17.8490	20.7319	2.2025	364	34	39
55	56	15.2	10	17.79	80	0.185	8	11.72	0.5621	0.2898	17.3971	20.2069	2.0632	387	35	41
60	58	14.5	10	17.11	80	0.176	10	12.14	0.5845	0.3013	16.9918	19.7362	1.9381	396	35	40
speed 2000 rpm			Throttle 75%											TEMP (C)		
% H2 Flow	Torque (Nm)	Air (mmWG)	H2 volume (lit)	time (sec)	P H2 (psi)	P (manifold) (V)	P ก่อนเข้า เครื่อง(psi)	Power (Nm)	H2 flow (lit/s)	H2 mass flow (g/s)	Air (lit/s)	Air (g/s)	A/F relative	exh.	water in	water out
35	38	21.2	-	-	80	0.124	4.5	7.95	0.3828	0.1973	20.5458	23.8642	3.5780	340	34	38
40	49	18.5	-	-	80	0.118	6.5	10.26	0.4453	0.2295	19.1929	22.2928	2.8733	360	34	39
50	58	17.3	-	-	80	0.116	8.5	12.14	0.5703	0.2940	18.5600	21.5577	2.1695	372	33	39
70	68	13.2	-	-	80	0.107	14	14.23	0.8203	0.4229	16.2122	18.8307	1.3175	413	34	40

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที (ต่อ)

speed 2000 rpm		Throttle 100%											TEMP (C)			
% H2 Flow	Torque (Nm)	Air (mmWG)	H2 volume (lit)	time (sec)	P H2 (psi)	P (manifold) (V)	P ก่อนเข้าเครื่อง (psi)	Power (Nm)	H2 flow (lit/s)	H2 mass flow (g/s)	Air (lit/s)	Air (g/s)	A/F relative	exh.	water in	water out
30	17	24.2	10	36.43	80	0.106	3	3.56	0.2745	0.1415	21.9514	25.4969	5.3311	274	31	34
35	34	23.1	10	26.03	82	0.104	5	7.12	0.3842	0.2022	21.4467	24.9106	3.6446	358	31	34
40	40	21.5	10	23.06	80	0.102	5.5	8.37	0.4337	0.2235	20.6906	24.0325	3.1807	304	31	34
45	47	20.9	10	19.34	80	0.101	7	9.84	0.5171	0.2665	20.3999	23.6947	2.6301	312	32	36
50	56	17.5	10	18.47	80	0.096	8.5	11.72	0.5414	0.2791	18.6670	21.6819	2.2984	350	49	52
50	53	16	10	18.51	80	0.098	8	11.09	0.5402	0.2785	17.8490	20.7319	2.2025	364	34	39
55	60	16.4	10	13.38	80	0.094	9	12.56	0.7474	0.3853	18.0708	20.9894	1.6119	373	47	51
60	62	16.2	10	13.63	80	0.094	10.5	12.98	0.7337	0.3782	17.9602	20.8611	1.6319	394	32	38
65	64	15.1	10	12.4	80	0.093	22	13.40	0.8065	0.4157	17.3398	20.1404	1.4334	419	33	39

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที

speed 2400 rpm			throttle 50%											TEMP (C)		
% H2 Flow	Torque (Nm)	Air (mmWG)	H2 volume (lit)	time (sec)	P H2 (psi)	P (manifold) (V)	P ก่อนเข้าเครื่อง (psi)	Power (Nm)	H2 flow (lit/s)	H2 mass flow (g/s)	Air (lit/s)	Air (g/s)	A/F relative	exh.	water in	water out
30	8	26	-	-	80	0.266	3	2.01	0.3203	0.1651	22.7531	26.4281	4.7356	284	32	35
40	31	25.1	10	19.62	80	0.255	5	7.79	0.5097	0.2627	22.3559	25.9666	2.9240	320	32	35
50	42	23	10	16.44	80	0.239	7.5	10.55	0.6083	0.3136	21.4002	24.8567	2.3454	343	32	36
60	52	20.8	10	15.62	80	0.223	9.5	13.06	0.6402	0.3300	20.3510	23.6380	2.1191	384	33	38
70	60	18	10	12.56	80	0.204	13.5	15.07	0.7962	0.4104	18.9318	21.9895	1.5852	438	34	40
75	60	16.8	10	11.5	80	0.197	15	15.07	0.8696	0.4482	18.2898	21.2439	1.4022	467	35	41
speed 2400 rpm			Throttle 75%											TEMP (C)		
% H2 Flow	Torque (Nm)	Air (mmWG)	H2 volume (lit)	time (sec)	P H2 (psi)	P (manifold) (V)	P ก่อนเข้าเครื่อง (psi)	Power (Nm)	H2 flow (lit/s)	H2 mass flow (g/s)	Air (lit/s)	Air (g/s)	A/F relative	exh.	water in	water out
40	32	29.6	-	-	80	0.151	5.5	8.04	0.4453	0.2295	24.2773	28.1984	3.6345	340	34	38
50	46	26.5	-	-	80	0.145	8	11.56	0.5703	0.2940	22.9709	26.6810	2.6851	360	34	38
60	54	24.4	-	-	80	0.14	10.5	13.56	0.6953	0.3584	22.0419	25.6020	2.1133	380	34	39
70	60	22.2	-	-	80	0.136	12.5	15.07	0.8203	0.4229	21.0248	24.4205	1.7086	400	35	40

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที (ต่อ)

speed 2400 rpm		Throttle 100%											TEMP (C)			
% H2 Flow	Torque (Nm)	Air (mmWG)	H2 volume (lit)	time (sec)	P H2 (psi)	P (manifold) (V)	P ก่อนเข้าเครื่อง (psi)	Power (Nm)	H2 flow (lit/s)	H2 mass flow (g/s)	Air (lit/s)	Air (g/s)	A/F relative	exh.	water in	water out
40	30	30.8	10	21.31	80	0.122	6	7.54	0.4693	0.2419	24.7645	28.7643	3.5181	325	32	36
50	45	27.9	10	17.53	80	0.118	8.5	11.30	0.5705	0.2941	23.5698	27.3767	2.7544	350	32	37
60	56	24.9	10	16.59	80	0.115	10.5	14.07	0.6028	0.3107	22.2666	25.8630	2.4626	381	33	38
65 **	55	25.2	10	14.34	80	0.114	11	13.82	0.6974	0.3595	22.4004	26.0183	2.1414	359	32	36
70	61	22.1	10	13.66	80	0.111	11.5	15.32	0.7321	0.3774	20.9774	24.3655	1.9103	385	34	38

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ 2800 รอบต่อนาที

speed 2800 rpm			Throttle 50%											TEMP (C)		
% H2 Flow	Torque (Nm)	Air (mmWG)	H2 volume (lit)	time (sec)	P H2 (psi)	P (manifold) (V)	P ก่อนเข้า เครื่อง(psi)	Power (Nm)	H2 flow (lit/s)	H2 mass flow (g/s)	Air (lit/s)	Air (g/s)	A/F relative	exh.	water in	water out
35	9	32	-	-	80	0.323	4	2.64	0.3828	0.1973	25.2423	29.3193	4.3959	318	33	36
40	20	31	10	19.97	80	0.316	4.5	5.86	0.5008	0.2581	24.8448	28.8576	3.3076	330	33	37
50	33	30.2	10	17.31	80	0.299	8	9.67	0.5777	0.2978	24.5221	28.4828	2.8298	359	34	37
60	46	27.5	10	14.03	80	0.279	11	13.48	0.7128	0.3674	23.4003	27.1797	2.1886	365	34	38
70	47	26.5	10	11.75	80	0.273	11.5	13.77	0.8511	0.4387	22.9709	26.6810	1.7993	-	-	-
speed 2800 rpm			Throttle 75%											TEMP (C)		
% H2 Flow	Torque (Nm)	Air (mmWG)	H2 volume (lit)	time (sec)	P H2 (psi)	P (manifold) (V)	P ก่อนเข้า เครื่อง(psi)	Power (Nm)	H2 flow (lit/s)	H2 mass flow (g/s)	Air (lit/s)	Air (g/s)	A/F relative	exh.	water in	water out
50	28	39.6	-	-	80	0.175	8	8.21	0.5703	0.2940	28.0803	32.6157	3.2824	325	33	36
60	42	36.5	-	-	80	0.167	10	12.31	0.6953	0.3584	26.9588	31.3131	2.5848	360	33	37
70	52	33.6	-	-	80	0.16	13	15.24	0.8203	0.4229	25.8657	30.0434	2.1021	396	34	38
80	58	30.8	-	-	80	0.154	15	17.00	0.9453	0.4873	24.7645	28.7643	1.7464	434	35	40
85	60	28.6	-	-	80	0.149	17	17.58	1.0078	0.5195	23.8637	27.7180	1.5785	450	36	41

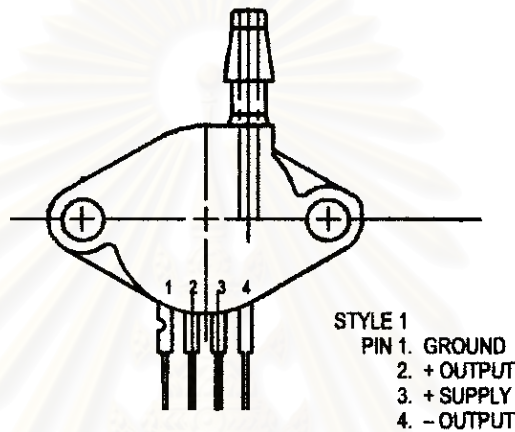
ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ 3200 รอบต่อนาที

speed 3200 rpm			Throttle 50%											TEMP (C)		
% H2 Flow	Torque (Nm)	Air (mmWG)	H2 volume (lit)	time (sec)	P H2 (psi)	P (manifold) (V)	P ก่อนเข้าเครื่อง (psi)	Power (Nm)	H2 flow (lit/s)	H2 mass flow (g/s)	Air (lit/s)	Air (g/s)	A/F relative	exh.	water in	water out
40	8	38.5	-	-	80	0.38	4	2.68	0.4453	0.2295	27.6876	32.1595	4.1450	325	34	37
50	17	38.3	-	-	80	0.371	5.5	5.69	0.5703	0.2940	27.6156	32.0759	3.2281	349	34	37
60	31	36.2	-	-	80	0.352	9	10.38	0.6953	0.3584	26.8478	31.1841	2.5741	383	34	38
70	40	34	-	-	80	0.332	11.5	13.40	0.8203	0.4229	26.0192	30.2217	2.1145	412	35	39
80	46	32.1	-	-	80	0.314	14.5	15.41	0.9453	0.4873	25.2818	29.3651	1.7829	448	36	40
85	52	30.2	-	-	80	0.3	16.5	17.42	1.0078	0.5195	24.5221	28.4828	1.6221	465	37	41
speed 3200 rpm			Throttle 75%											TEMP (C)		
% H2 Flow	Torque (Nm)	Air (mmWG)	H2 volume (lit)	time (sec)	P H2 (psi)	P (manifold) (V)	P ก่อนเข้าเครื่อง (psi)	Power (Nm)	H2 flow (lit/s)	H2 mass flow (g/s)	Air (lit/s)	Air (g/s)	A/F relative	exh.	water in	water out
50	21	50	-	-	80	0.197	8	7.03	0.5703	0.2940	31.5529	36.6492	3.6883	343	34	37
60	35	47.6	-	-	80	0.19	10.5	11.72	0.6953	0.3584	30.7863	35.7588	2.9517	375	35	38
70	41	45.2	-	-	80	0.183	12.5	13.73	0.8203	0.4229	30.0002	34.8456	2.4381	390	35	39
80	52	41.8	-	-	80	0.174	16	17.42	0.9453	0.4873	28.8498	33.5094	2.0345	435	35	39
85	55	39.7	-	-	80	0.168	17.5	18.42	1.0078	0.5195	28.1158	32.6568	1.8598	473	36	41

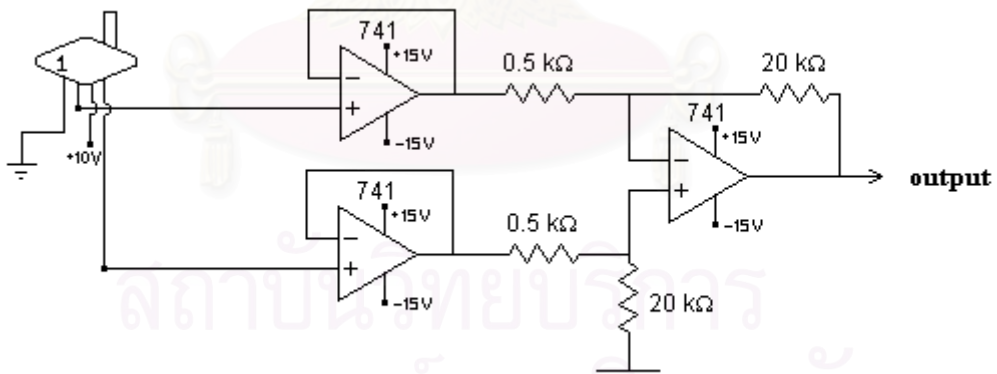
ภาคผนวก ง

ผลการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน

ในการทดสอบเครื่องยนต์บินแทนทดสอบมีการใช้อุปกรณ์วัดความดัน MPX2101 เพื่อวัดความดันในท่อไอดี (Manifold Absolute Pressure : MAP) ซึ่งเป็นความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ลักษณะของอุปกรณ์วัดความดันพร้อมทั้งวงจรรขยายสัญญาณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ง.1 และ ง.2



รูปที่ ง.1 แสดงอุปกรณ์วัดความดัน



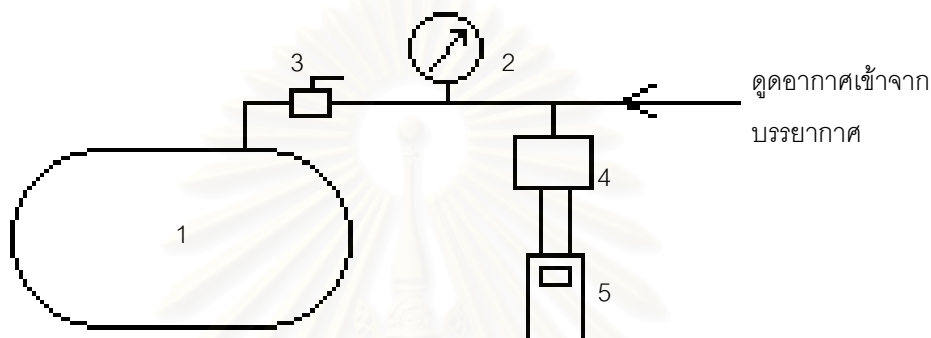
รูปที่ ง.2 แสดงการต่ออุปกรณ์วัดความดันและวงจรรขยาย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดันมีการเตรียมชุดอุปกรณ์ดังรูปที่ ง.3

วิธีการทดลอง

1. ปรับวาล์วไปยังตำแหน่งต่าง ๆ
2. บันทึกค่าความดันที่อ่านได้จาก Pressure gauge และค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จาก โวลต์มิเตอร์
3. ทำการทดลองซ้ำแล้วนำมาพลอตกราฟ



1 = Vacuum Pump

2 = Pressure gauge

3 = วาล์วเพื่อปรับค่าความดัน

4 = อุปกรณ์วัดความดันที่จะทำการสอบเทียบ

5 = โวลต์มิเตอร์เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้

รูปที่ ง.3 แสดงการต่อชุดอุปกรณ์เพื่อสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน

ผลการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน

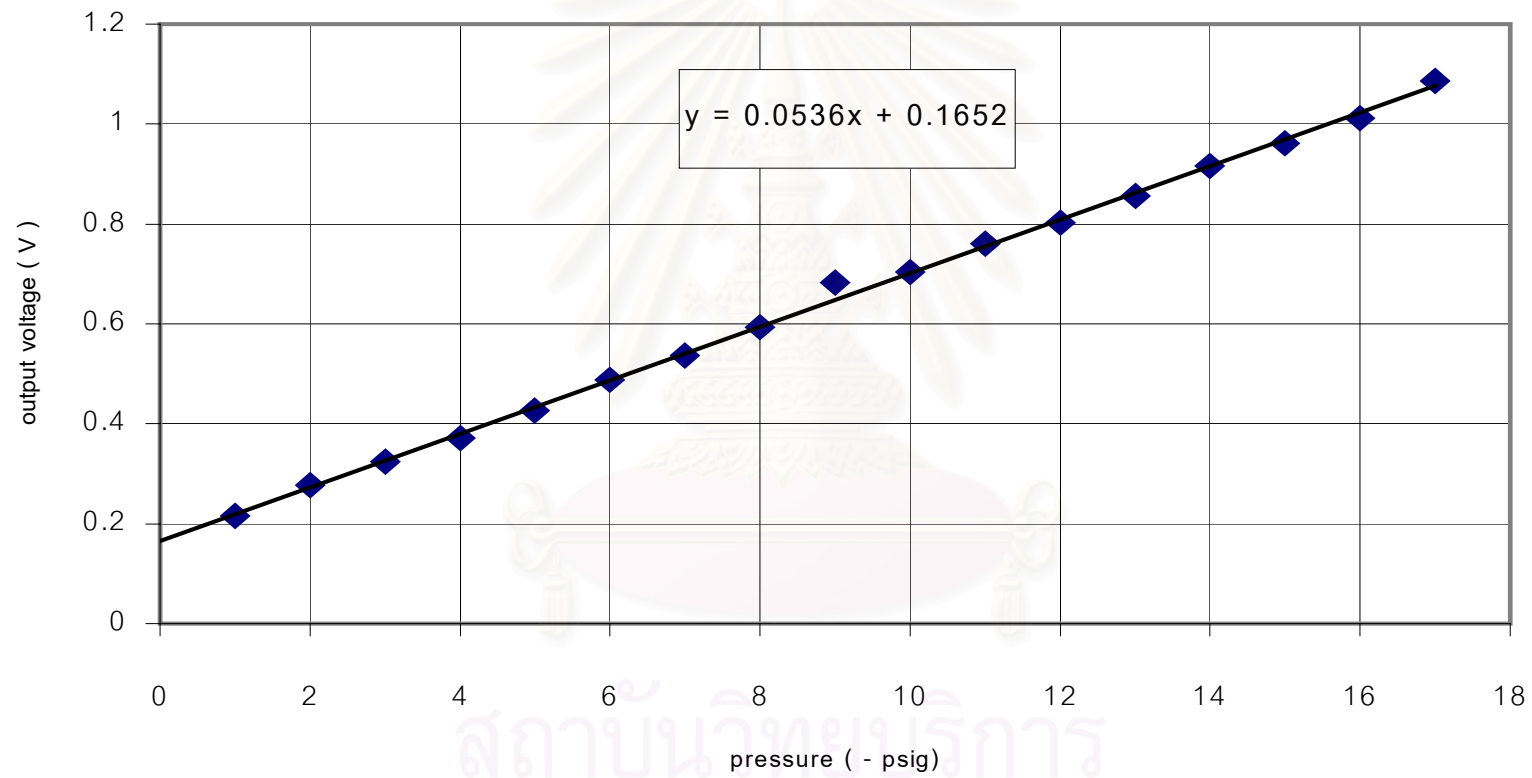
การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดันให้ผลดังรูปที่ ง.4 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้มีความสัมพันธ์กับความดันที่เป็นสุญญากาศแบบเส้นตรง หากความดันใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อย หากความดันเป็นสุญญากาศมากขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้ก็จะมีค่ามากขึ้น สมการความสัมพันธ์เป็น

$$V = 0.0536P + 0.1652$$

เมื่อ V คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้

P คือค่าความดันเป็นสุญญากาศ (-psig)

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความดันสุญญากาศ



รูปที่ ง.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดความดันกับความดันสุญญากาศ

ภาคผนวก จ.

โปรแกรมควบคุมที่ใช้

โปรแกรมควบคุมงานวิจัยนี้เขียนเป็นภาษาแอสเซมบลี เพื่อสั่งงานไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล MCS51 มี 2 โปรแกรมคือ

โปรแกรมที่ใช้สัญญาณปีกผีเสื้อเพียงสัญญาณเดียว

```
*****  
;  
; TEST LTC1298  
;use to test LTC1298 chip with external  
;delay (use interupt every 100 ms)  
*****  
CHANEL EQU 030H  
TPS EQU 031H  
RPM EQU 033H  
PORT_LTC EQU P1  
CS BIT P0.0 ;chip select  
CLK BIT P0.1 ;clock  
DIO BIT P0.2 ;data in & data out  
INT_0 BIT P3.2 ;interupt every 100 ms  
TO_PIN BIT P0.7 ;pulse generated  
PW_ON_DATA EQU 032H  
FLAG EQU 02FH  
OVER BIT FLAG.0  
  
ORG 0000H  
LJMP MAIN  
ORG 0003H  
LJMP INTERRUPT  
  
MAIN: MOV SP,#256-32  
MOV PORT_LTC,#00000000B  
MOV CHANEL,#11111111B
```

```

MOV   TPS,#00000000B
SETB  ITO
MOV   IE,#10000001B      ;enable only EX0
LCALL MEMORY
LOOP: LJMP $

```

```

INTERUPT:  LCALL RD_LTC
           MOV   PORT_LTC,TPS
           LCALL TABLE
           LCALL PULSE
           RETI

```

```

,*****
;

```

```

;          READ LTC1298
,*****
;

```

```

RD_LTC:    SETB  CS          ;disable LTC1298

```

```

           CLR   CS          ;start LTC1298

```

```

           MOV   A,CHANEL    ;ch1 MSB first

```

```

           MOV   R2,#04H

```

```

LOOP1:    RLC   A

```

```

           CLR   CLK

```

```

           MOV   DIO,C

```

```

           SETB  CLK

```

```

           DJNZ  R2,LOOP1

```

```

           SETB  DIO          ;use DIO as input

```

```

           MOV   A,#00000000B

```

```

           CLR   C

```

```

           MOV   R2,#06H

```

```

LOOP2:    CLR   CLK

```

```

           MOV   C,DIO

```

```

           RLC   A

```

```

           SETB  CLK

```

```

           DJNZ  R2,LOOP2

```

```

           MOV   TPS,A

```

```

           RET

```

```

*****
;
;           LOOK-UP TABLE
*****
TABLE: MOV  A,TPS
        ADD  A,#040H
        MOV  R0,A
        MOV  PW_ON_DATA,@R0
        RET

*****
;
;           GENERATE PULSE
*****
PULSE: MOV  R2,PW_ON_DATA
        SETB T0_PIN
LOOP_P: LCALL DELAY_1MS
        DJNZ R2,LOOP_P
        CLR  T0_PIN
        RET

*****
;
;           DELAY 1 MS
*****
DELAY_1MS: MOV  R7,#03H
DLY1:     MOV  R6,#7FH
DLY2:     NOP
          NOP
          DJNZ R6,DLY2
          DJNZ R7,DLY1
          RET

*****
;
;           PW_ON_DATA
*****
MEMORY: MOV  040H,#20
        MOV  041H,#40
        MOV  042H,#60
        MOV  043H,#80
        MOV  044H,#90

```

MOV 045H,#90
MOV 046H,#90
MOV 047H,#90
MOV 048H,#90
MOV 049H,#90
MOV 04AH,#90
MOV 04BH,#90
MOV 04CH,#90
MOV 04DH,#90
MOV 04EH,#90
MOV 04FH,#90
MOV 050H,#90
MOV 051H,#90
MOV 052H,#90
MOV 053H,#90
MOV 054H,#90
MOV 055H,#90
MOV 056H,#90
MOV 057H,#90
MOV 058H,#90
MOV 059H,#90
MOV 05AH,#90
MOV 05BH,#90
MOV 05CH,#90
MOV 05DH,#90
MOV 05EH,#90
MOV 05FH,#90

RET

END

โปรแกรมแบบใช้สัญญาณปีกผีเสื้อร่วมกับสัญญาณความถี่รอบ

```
*****
;
```

```
; GENERATE PULSE FROM 2 SIG
```

```
*****
;
```

```
T0_PIN BIT P3.4
```

```
T1_PIN BIT P3.5
```

```
INT_PIN BIT P3.2
```

```
FLAG EQU 02FH
```

```
RPM_TAB EQU 02EH
```

```
OVER BIT FLAG.0
```

```
CNT_LED EQU P2
```

```
LTC_LED EQU P1
```

```
CHANEL EQU 030H
```

```
TPS EQU 031H
```

```
RPM EQU 032H
```

```
PW_ON_DATA EQU 033H
```

```
CS EQU P0.0
```

```
CLK EQU P0.1
```

```
DIO EQU P0.2
```

```
ORG 0000H
```

```
LJMP RESET_VEC
```

```
ORG 0003H
```

```
LJMP INTERRUPT
```

```
ORG 000BH
```

```
SETB OVER
```

```
RETI
```

```
RESET_VEC: MOV SP,#256-32
```

```
LCALL MEMORY
```

```
MOV CHANEL,#11111111B
```

```

MOV  CNT_LED,#00000000B
MOV  LTC_LED,#00000000B
MOV  TMOD,#00100110B

SETB  EA
SETB  IT0
SETB  EX0
MOV  TH0,#000H
MOV  TL0,#000H
CLR  OVER
SETB  ET0
SETB  TR0
LOOP: SJMP LOOP

INTERUPT: CLR  TR0
MOV  RPM,TL0
MOV  TH0,#000H
MOV  TL0,#000H
CLR  OVER
SETB  TR0
MOV  CNT_LED,RPM
LCALL RD_LTC
MOV  LTC_LED,TPS
LCALL SELECT
LCALL TABLE
LCALL PULSE
RETI

;
;          READ LTC1298
;
;*****
RD_LTC:   SETB  CS
          CLR  CS

```

```

MOV A,CHANEL
MOV R2,#04H
LOOP1:   RLC  A
        CLR  CLK
        MOV  DIO,C
        SETB CLK
        DJNZ R2,LOOP1
        SETB DIO
        MOV  A,#00000000B
        CLR  C
        MOV  R2,#05H
LOOP2:   CLR  CLK
        MOV  C,DIO
        RLC  A
        SETB CLK
        DJNZ R2,LOOP2
        MOV  TPS,A
        RET

```

```

,*****
,
;      SELECT 3 TABLE
,*****
,

```

```

SELECT:  CLR  C
        MOV  A,RPM
        SUBB A,#00000010B
        MOV  P1.6,C
        MOV  RPM_TAB.6,C
        CLR  C
        MOV  A,RPM
        SUBB A,#00000100B
        MOV  P1.5,C
        MOV  RPM_TAB.5,C

```

```

        CLR    C
        MOV    A,RPM
        SUBB   A,#00000110B
        MOV    P1.4,C
        MOV    RPM_TAB.4,C
        CLR    C
        RET

;*****
;
;          LOOK UP TABLE
;*****
TABLE:    MOV    A,RPM_TAB
          ADD    A,TPS
          MOV    R0,A
          MOV    PW_ON_DATA,@R0
          RET

;*****
;
;          GENERATE PULSE
;*****
PULSE:    MOV    R2,PW_ON_DATA
          SETB   T1_PIN

LOOP_P:   LCALL  DELAY_1MS

          DJNZ   R2,LOOP_P
          CLR    T1_PIN
          RET

;*****
;
;          DELAY 1 MS
;*****
DELAY_1MS: MOV    R7,#03H
DLY1:     MOV    R6,#7FH
DLY2:     NOP
          NOP

```



```
DJNZ R6,DLY2
```

```
DJNZ R7,DLY1
```

```
RET
```

```
*****  
;
```

```
; PW_ON_DATA
```

```
*****  
;
```

```
MEMORY:  MOV  040H,#0  
          MOV  041H,#3  
          MOV  042H,#6  
          MOV  043H,#9  
          MOV  044H,#12  
          MOV  045H,#15  
          MOV  046H,#18  
          MOV  047H,#21  
          MOV  048H,#24  
          MOV  049H,#27  
          MOV  04AH,#30  
          MOV  04BH,#33  
          MOV  04CH,#35  
          MOV  04DH,#37  
          MOV  04EH,#39  
          MOV  04FH,#40  
          MOV  060H,#0  
          MOV  061H,#2  
          MOV  062H,#3  
          MOV  063H,#4  
          MOV  064H,#5  
          MOV  065H,#6  
          MOV  066H,#8  
          MOV  067H,#10  
          MOV  068H,#12
```

MOV 069H,#14
MOV 06AH,#16
MOV 06BH,#18
MOV 06CH,#20
MOV 06DH,#22
MOV 06EH,#23
MOV 06FH,#24
MOV 070H,#20
MOV 071H,#60
MOV 072H,#90
MOV 073H,#90
MOV 074H,#90
MOV 075H,#90
MOV 076H,#90
MOV 077H,#90
MOV 078H,#90
MOV 079H,#90
MOV 07AH,#90
MOV 07BH,#90
MOV 07CH,#90
MOV 07DH,#90
MOV 07EH,#90
MOV 07FH,#90

RET

END

ภาคผนวก จ

ข้อมูลทั่วไปของเครื่องยนต์ที่ใช้ในงานวิจัย

ยี่ห้อเครื่องยนต์	MITSUBISHI	
รุ่น	4G32 B2AW 5841	
จำนวนและการจัดเรียงกระบอกสูบ	4 สูบ เรียงเดี่ยวแบบตั้ง	
รูปทรงห้องเผาไหม้	ครึ่งทรงกลม	
การจัดวางลิ้น	ติดตั้งบนฝาสูบ	
การจัดวางเพลาลูกเบี้ยว	บนฝาสูบ	
ปริมาตรจุด	1597	cc
เส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ×ระยะชัก	79.6×86.0	mm
อัตราส่วนอัด	8.5:1	
ลิ้นไอดีเปิด/ปิด	20°BTDC/48°ABDC	
ลิ้นไอเสียเปิด/ปิด	51°BBDC/17°ATDC	
ลำดับการจุดระเบิด	1-3-4-2	
ระยะห่างลิ้นขณะร้อน	ไอดี	0.15 mm
	ไอเสีย	0.25 mm
องศาการจุดระเบิดที่เดินเบา	5°BTDC	
รอบเดินเบา	700±50	rpm
ขนาดลิ้นไอดี	38	mm
ขนาดลิ้นไอเสีย	31	mm
ลิ้นสปริงสูงอิสระ	45.9	mm
ลิ้นสปริงรับโหลด	275	N
เส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ	79.6	mm
ช่องว่างลูกสูบกับกระบอกสูบ	0.03-0.05	mm
ช่องว่างของลิ้นอัด	0.2-0.4	mm
ชนิดคาร์บูเรเตอร์	ดูดลงช่องทางเดียว	
ทิศทางการหมุนของจานจ่าย	ตามเข็มนาฬิกา	
ช่องห่างหน้าทองขาว	0.4-0.5	mm
องศาลูกเบี้ยวจานจ่าย	49-55	องศา

การปรับองศาการจุดระเบิดล่วงหน้า
เบอร์หัวเทียนที่ใช้

คงที่ที่ 0° ทุกความเร็วรอบ

BP5ES(NGK)

W16EP(ND)

W16EX-U(ND)

ช่องว่างเขี้ยวหัวเทียน

0.7-0.8

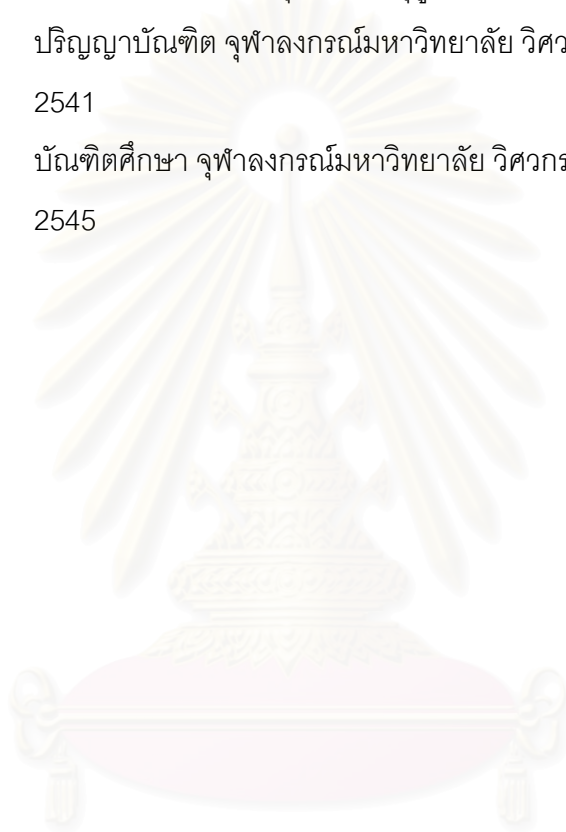
mm



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-นามสกุล	นางสาววชิราภรณ์ หงสวินตกุล
วันเดือนปีเกิด	10 พฤศจิกายน พ.ศ. 2520
ที่อยู่	79/240 อาคารปทุมวันวีรสอร์ท ถนนพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400
ประวัติการศึกษา	มัธยมศึกษา โรงเรียนอุดรพิทยานุกูล ปี 2537 ปริญญาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ปี 2541 บัณฑิตศึกษา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ปี 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย