การออกแบบระบบควบคุมเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มชนิดวาริเอเปิลเวนทูรีสำหรับเครื่องยนต์เอสไอสองจังหวะ

นาย สิทธิโชค ผูกพันธุ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544
ISBN 974-17-0026-1
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN OF VARIABLE VENTURI TYPE LPG METERING SYSTEM FOR TWO STROKE SI ENGINES

Mr.Sittichoke Pookpunt

ศูนย์วิทยทรัพยากร
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 974-17-0026-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบควบคุมเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มชนิดวาริเอเปิลเวนทูรี สำหรับเครื่องยนต์เอสไอสองจังหวะ
โดย	นายสิทธิโชค ผูกพันธุ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิต วัฒนวิเชียร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิต วัฒนวิเชียร)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดำรงศักดิ์ มลิลา)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชิต เหล่าวัฒนา)

.....กรรมการ

(นายนิโรจน์ อัครปัญญาวิทย์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สิทธิโชค ผูกพันธุ์ : การออกแบบระบบควบคุมเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มชนิดวาริเอเบิลเวนทูรีสำหรับเครื่องยนต์เอสไอสองจังหวะ. (Design of Variable Venturi Type LPG Metering System for 2-Stroke SI Engine) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิต วัฒนวิเชียร ;145 หน้า. ISBN 974-17-0026-1

ก๊าซหุงต้มหรือ LPG ถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในเครื่องยนต์เอสไอสองจังหวะของรถรับจ้างชนิดสามล้อเครื่องหรือรถตุ๊กตุ๊กเป็นเวลานานแล้ว แต่พบว่ายังไม่มีการศึกษาถึงสมรรถนะและปรับปรุงให้ใช้ประโยชน์สูงสุดกันอย่างจริงจัง ทั้งนี้เนื่องจากไม่มีระบบควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิง LPG ให้กับเครื่องยนต์เอสไอสองจังหวะที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้มุ่งที่จะศึกษาตัวแปรที่สำคัญเพื่อใช้ในการออกแบบและทดสอบหาคุณลักษณะด้านสมรรถนะของระบบควบคุมปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิง LPG ชนิด variable venturi สำหรับเครื่องยนต์เอสไอสองจังหวะ พบว่าพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิงที่ต้องการด้วยระบบ variable venturi ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้คือความดันจากเรกูเรเตอร์ซึ่งมีความสัมพันธ์กับระยะเปิด-ปิดลิ้นควบคุมเรกูเรเตอร์ และขนาดพื้นที่เปิดให้ก๊าซไหลผ่านของเวนทูรีซึ่งการควบคุมพื้นที่เปิดอาศัยการปรับระยะขจัดตามแนวแกนระหว่างตัวเข็มกับบ่าวาล์วด้วย stepper motor actuator โดยระบบดังกล่าวสามารถจ่ายเชื้อเพลิงตามความต้องการของเครื่องยนต์สองจังหวะให้ทำงานตามแนว optimum efficiency path ได้เกือบทุกจุดทำงานที่ความเร็วรอบต่างๆยกเว้นที่ตำแหน่ง WOT ของความเร็ว 4000 rev/min เนื่องจากข้อจำกัดของความดันสูงสุดของเครื่องมือที่ใช้วัดอัตราการไหลของก๊าซ

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้ชุด variable venturi ที่พัฒนาขึ้นนี้เพื่อควบคุมปริมาณส่วนผสมให้เครื่องยนต์ทำงานบนแนว optimum efficiency path กับผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ Conventional LPG และสมรรถนะของเครื่องยนต์ OEM ที่ใช้แก๊สโซลีน พบว่าที่ทุกตำแหน่งความเร็วรอบและภาระของเครื่องยนต์ การควบคุมเครื่องยนต์โดยใช้ระบบ variable venturi สามารถให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) สูงสุดสูงกว่าทั้งเครื่องยนต์ conventional LPG และเครื่องยนต์ OEM ที่ใช้แก๊สโซลีนโดยค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดที่ได้มีค่ามากกว่าค่าที่เครื่องยนต์ conventional LPG ทำได้ 9.5% และมากกว่าค่าที่เครื่องยนต์ OEM ที่ใช้แก๊สโซลีนทำได้ 15.2% อย่างไรก็ตามค่าแรงบิดสูงสุดที่ได้มีค่าต่ำกว่าแรงบิดสูงสุดที่ได้จากเครื่องยนต์ conventional LPG 4% และต่ำกว่าแรงบิดสูงสุดที่ได้จากเครื่องยนต์ OEM 14% และพบว่าการควบคุมให้เครื่องยนต์ทำงานด้วย LPG บนแนว optimum efficiency path ด้วยระบบ variable venturi ที่พัฒนาขึ้นนี้ต้องการส่วนผสมที่บางกว่าในทุกจุดทำงานอีกด้วย

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

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

ปีการศึกษา.....2544.....

4170583221 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: LPG/ 2 STROKE ENGINE/ VARIABLE VENTURI/ OPTIMUM EFFICIENCY

SITTICHOKE POOKPUNT: THESIS TITLE. (DESIGN OF VARIABLE VENTURI TYPE LPG METERING SYSTEM FOR 2-STROKE SI ENGINE) THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. KANIT WATTANAVICHIEN,Ph.D.,146 pp. ISBN 974-17-0026-1

Liquefied Petroleum Gas (LPG) has long been used as an alternative fuel in 2-stroke SI engine of "Tuk-Tuk" which is the local name of three-wheel taxi in Thailand. However, there was not efficiently operated because the un-matched conventional LPG metering system does not always provide corrected mixture throughout their normal operating range.

This research was aimed to investigate the design parameters and the performance characteristics of in-house developed LPG variable venturi metering system for a two stroke SI engine. Using this developed unit, the engine required equivalent ratio and MBT timing were calibrated for an optimum efficiency path. It was found that, using the developed metering unit, the optimum equivalent ratio can be achieved by controlling two control parameters; namely regulating pressure and venturi opening area. The regulating pressure can be altered by means of adjusting a regulator valve. The venturi opening area can be adjusted by means of adjusting an pintle position by a stepping motor. This metering system can almost provide required LPG for engine to operate along its optimum efficiency path except at engine speed of 4000 rev/min at WOT. This is because of the maximum limited operating pressure of gas meter that was employed for the LPG flow measurement.

The optimum performance obtained by this developed system were compared to the performance and efficiency obtained from either the conventional LPG or OEM gasoline engine. It was found that the engine with variable venturi metering system can give the highest thermal efficiency for all load and speed of the testing range. Its maximum efficiency was 9.5% and 15.2% higher than that of conventional LPG engine and OEM engine respectively. However, the brake torque of engine with this system are 4% and 14% lower than that of conventional LPG and OEM engine. Moreover, it should be noted that, with this variable venturi LPG metering system, the operating mixture was leaner at all engine testing conditions.

Department ....Mechanical.engineering..... Student's signature Sittichoke Pookpunt

Field of study ...Mechanical.engineering.....Advisor's signature Kanit Wattanavichien

Academic year .....2001.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิต วัฒนวิเชียร อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำ ,ช่วยเหลือในด้านต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้ใคร่ขอกราบขอบคุณอาจารย์ท่านอื่นๆ ของภาควิชาเครื่องกลที่ให้คำปรึกษาด้านข้อมูล และวิชาการแก่ผู้วิจัย

ขอกราบขอบคุณ อ.ศรินทร์ทิพย์ แทนธานี และ อ.มัทนี สงวนเสริมศรี ที่ให้โอกาสผู้วิจัยให้ได้รับทุน 700 ปีของมหาวิทยาลัยนเรศวร และทุน UDC ขอบคุณ คุณประพันธ์ ดลวิชัย, คุณธนกร สุไวศยวรรณ และคุณวิสุทธิ์ กวยรักษา ที่ช่วยในการติดตั้งเครื่องยนต์, การทดสอบ รวมไปถึงการให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ ขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาทางด้านเทคนิคต่างๆ เกี่ยวกับเครื่องยนต์ รวมถึงเพื่อนนิสิตปริญญาโทและรุ่นพี่ที่สำเร็จการศึกษาแล้วทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจในระหว่างทำวิทยานิพนธ์ ขอบคุณครอบครัว ธรชาติดำรงวิทย์ ที่อนุเคราะห์ให้ที่พัก รวมถึงการดูแลให้คำปรึกษาด้านต่างๆ ขอบคุณ คุณพินธัส ปราบโรค ที่ช่วยตรวจทานคำผิดและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาและให้กำลังใจเสมอมาจนผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ..... ฒ

สารบัญคำย่อและสัญลักษณ์..... ท

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 2

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์..... 2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน..... 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3

บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีเกี่ยวข้อง..... 4

2.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของ LPG 4

2.1.1 องค์ประกอบของ LPG 4

2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของ LPG 4

2.1.3 คุณสมบัติการสันดาปของ LPG 6

2.2 ความสัมพันธ์ของ Wobbe index และ fuel metering 9

2.3 เทคโนโลยีที่ใช้กับเครื่องยนต์ LPG 11

2.3.1 ระบบ LPG carburetion 11

2.3.2 ระบบ LPG carburetion ควบคุมด้วยอุปกรณ์อิเลคโทรนิคส์ 12

2.3.3 ระบบการฉีด LPG 13

2.4 ข้อดีของการใช้ LPG ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน..... 16

2.5 เครื่องยนต์สองจังหวะและการจัดเตรียมสารผสม 18

2.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำงานของเครื่องยนต์ 20

หน้า

2.7 ส่วนผสมในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ
(Spark-Ignition Engine Fuel Metering) 22
2.8 การคาร์บูเรชั่นเชื้อเพลิง LPG 24
2.9 คาร์บูเรเตอร์หรือมิกเซอร์สำหรับ LPG 24
2.9.1 คาร์บูเรเตอร์หรือมิกเซอร์ชนิดคอคอดคงที่ 25
2.9.2 คาร์บูเรเตอร์แก๊สชนิด Variable venturi
หรือ air valve carburetor 25

บทที่ 3 แนวคิดในการออกแบบระบบควบคุม LPG ชนิด Variable venturi 28
3.1 ความต้องการสารผสมในเครื่องยนต์เอสไอ 28
3.2 แนวคิดในการออกแบบ 29

บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ 30
4.1 เครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบ 31
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้วัดแรงบิด (Torque) จากเครื่องยนต์ 31
4.3 อุปกรณ์ในการดัดแปลงเครื่องยนต์เพื่อใช้เชื้อเพลิง LPG 32
4.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการ metering เชื้อเพลิง 35
4.5 อุปกรณ์การวัดอัตราการไหลอากาศ 37
4.6 อุปกรณ์ที่ใช้วัดการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิง LPG และน้ำมันหล่อลื่น 38
4.6 ขั้นตอนการทดสอบ 39
4.6.1 การทดสอบเบื้องต้น 39
4.6.2 ระบบการทำงานของเครื่องยนต์สองจังหวะที่ใช้ LPG 40
4.6.3 การทดสอบ mixture loop test 40
4.6.4 การวิเคราะห์หาแนวสมรรถนะที่เหมาะสม 40

บทที่ 5 ผลการทดสอบ 42
5.1 สมรรถนะของเครื่องยนต์ OEM 42
5.1.1 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนOEM (Thermal efficiency, η_{th}) 44
5.1.2 ค่าแรงบิดเครื่องยนต์ OEM (Brake torque, T_b) 44

หน้า

5.1.3 ค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ OEM (bsfc) 45
5.1.4 ตัวแปรการทำงานของเครื่องยนต์ OEM 46
5.2 การทดสอบเบื้องต้นของเครื่องยนต์สองจังหวะ conventional LPG 47
5.2.1 ค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์สองจังหวะ conventional LPG 47
5.2.2 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ conventional LPG (η_{th}) 48
5.2.3 ค่าแรงบิดเครื่องยนต์ของ conventional LPG (T_b) 49
5.2.4 ค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ conventional LPG (bsfc) 49
5.2.5 ตัวแปรการทำงานของเครื่องยนต์ conventional LPG 50
5.3 ผลการทดสอบและการศึกษาสมรรถนะที่เหมาะสมโดยวิธี
mixture loop test 52
5.3.1 ค่าแรงบิดเครื่องยนต์ (T_b) ที่รอบคงที่ 52
5.3.2 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ที่รอบคงที่ 56
5.3.3 ค่าสมรรถนะที่เหมาะสมของเครื่องยนต์สองจังหวะ LPG 60
5.3.4 แนวสมรรถนะที่เหมาะสมที่ความเร็วรอบคงที่
(Constant speed optimum performance path) 63
5.3.5 แผนภูมิสมรรถนะที่เหมาะสมของเครื่องยนต์ (Engine map) 64
5.3.6 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ที่ optimum performance 64
5.3.7 ค่าแรงบิดเครื่องยนต์ (T_b) ที่ optimum performance 65
5.3.8 ค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (bsfc)
ที่ optimum performance 65
5.3.9 ตัวแปรการทำงานของเครื่องยนต์ optimum LPG 66
5.4 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบ Engine performance path
ที่ความเร็วรอบคงที่ 67
5.5 อิทธิพลของอัตราส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงที่มีต่อเครื่องยนต์ 70
5.6 ตารางเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์สองจังหวะ 71

บทที่ 6 LPG Variable venturi 74
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล

หน้า

ของอากาศกับเชื้อเพลิงที่ Optimum A/F 74
6.2 รูปร่างของ LPG variable venturi 75
6.3 การออกแบบระบบควบคุมเชื้อเพลิงก๊าซชนิด gas variable venturi 76
6.3.1 แบบจำลองของระบบควบคุมเชื้อเพลิงก๊าซ 76
6.3.2 พารามิเตอร์ในการควบคุมปริมาณก๊าซ
ของระบบ gas variable venturi 77
6.4 การควบคุม gas variable venuri โดย Stepper motor actuator 78
6.4.1 รายละเอียด stepper motor actuator 78
6.4.2 Interface controller และการใช้งาน 78
6.5 การติดตั้งและทดสอบปรับเทียบ (calibration)
gas variable venuri กับ burner 80
6.6 การติดตั้งระบบควบคุม gas variable venturi
เพื่อใช้งานบนเครื่องยนต์ 82
6.6.1 สภาวะเริ่มต้น (initial condition) 82
6.6.2 การสตาร์ทและเดินเบาเครื่องยนต์ 82
6.6.3 การทำงานที่สภาวะ steady state ที่ความเร็วคงที่ 83

บทที่ 7 การทดสอบเครื่องยนต์เมื่อใช้ gas variable venturi 86
7.1 System characteristic 86
7.1.1 system characteristic เมื่อเกิดการเปลี่ยนตำแหน่ง
ระยะกดบนสปริงของเรกูเรเตอร์ 87
7.1.2 system characteristic เมื่อเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งวาล์วก๊าซ 90
7.2 การทดสอบ gas variable venturi บน mixture loop path 93
7.3 เทียบการทำงานตามแนว optimum path 98
7.4 พารามิเตอร์และตัวแปรในการควบคุม
gas variable venturi ที่นำมาใช้งานจริง 101

บทที่ 8 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 104

หน้า

ภาคผนวก ข คุณสมบัติ LPG ในทางทฤษฎี 118
ข.1 คุณสมบัติของสารผสม 119
ข.2 เอนทัลปีของการรวมตัว (Enthalpy of formation, ΔH°_{f}) 120
ข.3 Energy of reactant, ΔH_{R} 120
ข.4 Heat of combustion of LPG 120
ข.5 Lean limit 121
ภาคผนวก ค Source code สำหรับควบคุม Gas variable venturi 123
ค.1 source code 124
ภาคผนวก ง ตารางข้อมูลการทดสอบ 127
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 146

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

รายการ	หน้า
2-1 แสดงคุณสมบัติขององค์ประกอบใน LPG	4
2-2 แสดงค่า MON ขององค์ประกอบแต่ละชนิดใน LPG	8
2-3 แสดงค่าพิสัยของอัตราส่วนผสมระหว่างโพรเพนกับบิวเทน เมื่อกำหนดค่า nominal	10
2-4 แสดงการเปรียบเทียบระบบการจ่ายเชื้อเพลิง LPG	15
2-5 แสดงการเปรียบอัตราส่วนกำลังอัดที่ critical กับเชื้อเพลิงแก๊ส	17
5-1 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนร้อยละของเครื่องยนต์ OEM กับแก๊สโซลีนออกเทน 91 ซึ่งทดสอบตามจุดเมตริกซ์ทดสอบ โดยพิจารณาปริมาณ air flow rate (%) ที่ค่าต่างๆ กัน	44
5-2 แสดงแรงบิดแก้ไข (corrected torque, N-m) ของเครื่องยนต์ OEM กับแก๊สโซลีนออกเทน 91 ซึ่งทดสอบตามจุดเมตริกซ์ทดสอบ โดยพิจารณาปริมาณ air flow rate (%) ที่ค่าต่างๆ กัน	45
5-3 แสดง bsfc (g/kW-hr) ของเครื่องยนต์ OEM กับแก๊สโซลีนออกเทน 91 ซึ่งทดสอบ ตามจุดเมตริกซ์ทดสอบโดยพิจารณาปริมาณ air flow rate (%) ที่ค่าต่างๆกัน	45
5-4 แสดง Equivalence ratio ของเครื่องยนต์ OEM กับแก๊สโซลีนออกเทน 91 ซึ่งทดสอบ ตามจุดเมตริกซ์ทดสอบโดยพิจารณาตามปริมาณ Air flow rate (%) ค่าต่างๆกัน	46
5-5 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนร้อยละของเครื่องยนต์ Conventional LPG ซึ่งทดสอบตามจุดเมตริกซ์ทดสอบโดยพิจารณาปริมาณ air flow rate(%) ที่ค่าต่างๆ	49
5-6 แสดงแรงบิดแก้ไข (corrected torque, N-m) ของเครื่องยนต์ Conventional LPG ซึ่งทดสอบตามจุดเมตริกซ์ทดสอบโดยพิจารณาปริมาณ air flow rate (%) ที่ค่าต่างๆ	49
5-7 แสดง bsfc (g/kW-hr) ของเครื่องยนต์ Conventional LPG ทดสอบตามจุดเมตริกซ์ โดยพิจารณาปริมาณ air flow rate (%) ที่ค่าต่างๆ	50
5-8 แสดง Equivalence ratio ของเครื่องยนต์ Conventional LPG โดยทดสอบ ตามจุดเมตริกซ์ โดยพิจารณาตามปริมาณ Air flow rate (%) ค่าต่างๆกัน	51
5-9 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนร้อยละของเครื่องยนต์ LPG ที่ optimum performance ซึ่งทดสอบตามจุดเมตริกซ์ทดสอบโดยพิจารณาปริมาณ air flow rate (%) ที่ค่าต่างๆ	65
5-10 แสดงแรงบิดแก้ไข (N-m) ของเครื่องยนต์ LPG ที่ optimum performance ซึ่งทดสอบตามจุดเมตริกซ์ทดสอบโดยพิจารณาปริมาณ air flow rate (%) ที่ค่าต่างๆ	65

รายการ หน้า

ง-4 แสดงผลการทดสอบ mixture loop test กับเครื่องยนต์สองจังหวะ
Daihatsu 9KX-356cc. ที่ความเร็วรอบ 2500 rev/min กับเชื้อเพลิง LPG 134

ง-5 แสดงผลการทดสอบ mixture loop test กับเครื่องยนต์สองจังหวะ
Daihatsu 9KX-356cc. ที่ความเร็วรอบ 3000 rev/min กับเชื้อเพลิง LPG 137

ง-6 แสดงผลการทดสอบ mixture loop test กับเครื่องยนต์สองจังหวะ
Daihatsu 9KX-356cc. ที่ความเร็วรอบ 3500 rev/min กับเชื้อเพลิง LPG 140

ง-7 แสดงผลการทดสอบ mixture loop test กับเครื่องยนต์สองจังหวะ
Daihatsu 9KX-356cc. ที่ความเร็วรอบ 4000 rev/min กับเชื้อเพลิง LPG 142

ง-8 แสดงผลการทดสอบของค่า optimum performance กับเครื่องยนต์สองจังหวะ
Daihatsu 9KX-356cc. กับเชื้อเพลิง LPG 145

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รายการ	หน้า
2-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ, อัตราส่วนผสมที่มีต่อความดันไอ	6
2-2 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของ LPG ที่มีต่อ wobbe index	10
2-3 แสดงส่วนประกอบของระบบคาร์บูเรชั่นใน first generation	12
2-4 แสดงส่วนประกอบของเครื่องยนต์ LPG ระบบคาร์บูเรชั่นควบคุมด้วย อิเล็กทรอนิคส์ใน second generation	13
2-5 แสดงไดอะแกรมของเครื่องยนต์ระบบการฉีดไอ LPG แบบหลายจุด (multi-point dry gas injection system)	14
2-6 แสดงการทำงานของเครื่องยนต์สองจังหวะ	18
2-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตร ในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ SI สองจังหวะ	20
2-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมกับช่วงภาระและ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์	23
2-9 แสดงรูปแบบและการติดตั้งคาร์บูเรเตอร์หรือมิกเซอร์ LPG ชนิด Fixed venturi	25
2-10 แสดงส่วนประกอบของคาร์บูเรเตอร์ชนิด Variable venturi	26
2-11 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและการสูญเสียของคาร์บูเรเตอร์แต่ละชนิด	27
3-1 แสดงความต้องการสารผสมในเครื่องยนต์เอสไอที่ความเร็วรอบต่างๆ กัน	29
4-1 แสดงไดอะแกรมและอุปกรณ์การทดสอบ	30
4-2 แสดงภาพตัดขวางของ Froude Hydraulic Dynamometer: Type G	32
4-3 แสดงการทำงานของเวเปอร์ไรเซอร์ที่ใช้งาน	33
4-4 แสดงระบบจุดระเบิดด้วยคอยล์	34
4-5 แสดงการเปรียบแรงดันที่ต้องการในการจุดระเบิดของเครื่องยนต์เอสไอ (a) และองศาการจุดระเบิด (b) ระหว่างแก๊สโซลีนกับ LPG	35
4-6 แสดงมิกเซอร์แบบ Local made ที่ใช้ในเครื่องยนต์รถตุ๊กตุ๊ก (a) และลักษณะการติดตั้งเข้ากับคาร์บูเรเตอร์แก๊สโซลีน (b)	36
4-7 แสดงการติดตั้งระบบ LPG metering ชนิดสกรูวาล์วเพื่อใช้ในการทดสอบ mixer loop test	36
4-8 แสดงอุปกรณ์วัดการไหลของแก๊ส LPG และการติดตั้ง	37
4-9 แสดงหลอดแก้วที่ใช้วัดการสิ้นเปลืองน้ำมันหล่อลื่น	37

รายการ หน้า

4-10 แสดงอุปกรณ์วัดอัตราการไหลอากาศ 38

4-11 แสดงจุดทำงานที่จะทดสอบในรูป Test matrix
บนแกนความเร็วรอบกับมวลอากาศ 39

4-12 แสดงการวิเคราะห์หาแนวสมรรถนะที่ประหยัดที่สุด ที่ความเร็วรอบคงที่ 41

5-1 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับแรงบิดที่แก้ไข
ของเครื่องยนต์ OEM Daihatsu ZM 356 cc.ที่ 24.5 °CA BTDC
โดยใช้แก๊สโซลีนออกเทน 91 เป็นเชื้อเพลิง 42

5-2 แสดง engine efficiency MAP ของเครื่องยนต์ OEM Daihatsu ZM 356 cc.
โดยแสดงค่า % thermal efficiency ในฟังก์ชันของแรงบิด
และความเร็วรอบเครื่องยนต์ ทดสอบกับเชื้อเพลิงแก๊สโซลีนออกเทน 91 43

5-3 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับแรงบิดที่แก้ไข
ของเครื่องยนต์ Daihatsu ZM356 cc. ที่ 35 °CA BTDC โดยใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง 47

5-4 แสดง engine efficiency MAP ของเครื่องยนต์ Conventional LPG โดยแสดงค่า
% thermal efficiency ในฟังก์ชันของแรงบิดและความเร็วรอบเครื่องยนต์ 48

5-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูล (ϕ) ต่อแรงบิด (brake torque) เมื่อกำหนด
ปริมาณการไหลของอากาศเข้าเครื่องยนต์ต่างกัน ที่ความเร็วรอบคงที่ 2000 rev/min 53

5-6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูล (ϕ) ต่อแรงบิด (brake torque) เมื่อกำหนด
ปริมาณการไหลของอากาศเข้าเครื่องยนต์ต่างกัน ที่ความเร็วรอบคงที่ 2500 rev/min 53

5-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูล (ϕ) ต่อแรงบิด (brake torque) เมื่อกำหนด
ปริมาณการไหลของอากาศเข้าเครื่องยนต์ต่างกัน ที่ความเร็วรอบคงที่ 3000 rev/min 54

5-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูล (ϕ) ต่อแรงบิด (brake torque) เมื่อกำหนด
ปริมาณการไหลของอากาศเข้าเครื่องยนต์ต่างกัน ที่ความเร็วรอบคงที่ 3500 rev/min 54

5-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูล (ϕ) ต่อแรงบิด (brake torque) เมื่อกำหนด
ปริมาณการไหลของอากาศเข้าเครื่องยนต์ต่างกัน ที่ความเร็วรอบคงที่ 4000 rev/min 55

5-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูล (ϕ) ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน
เมื่อกำหนดปริมาณการไหลของอากาศเข้าเครื่องยนต์ต่างกัน
ที่ความเร็วรอบคงที่ 2000 rev/min 57

5-11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูล (ϕ) ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน

รายการ หน้า

เมื่อกำหนดปริมาณการไหลของอากาศเข้าเครื่องยนต์ต่างกัน
ที่ความเร็วรอบคงที่ 2500 rev/min 57

5-12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูล (ϕ) ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน
เมื่อกำหนดปริมาณการไหลของอากาศเข้าเครื่องยนต์ต่างกัน
ที่ความเร็วรอบคงที่ 3000 rev/min 58

5-13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูล (ϕ) ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน
เมื่อกำหนดปริมาณการไหลของอากาศเข้าเครื่องยนต์ต่างกัน
ที่ความเร็วรอบคงที่ 3500 rev/min 58

5-14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูล (ϕ) ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน
เมื่อกำหนดปริมาณการไหลของอากาศเข้าเครื่องยนต์ต่างกัน
ที่ความเร็วรอบคงที่ 4000 rev/min 59

5-15 แสดงการเขียนเส้น optimum path จากความสัมพันธ์ของแรงบิด
และประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ภาระต่างๆ เมื่อความเร็วคงที่ 2000 rev/min 60

5-16 แสดงการเขียนเส้น optimum path จากความสัมพันธ์ของแรงบิด
และประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ภาระต่างๆ เมื่อความเร็วคงที่ 2500 rev/min 61

5-17 แสดงการเขียนเส้น optimum path จากความสัมพันธ์ของแรงบิด
และประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ภาระต่างๆ เมื่อความเร็วคงที่ 3000 rev/min 61

5-18 แสดงการเขียนเส้น optimum path จากความสัมพันธ์ของแรงบิด
และประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ภาระต่างๆ เมื่อความเร็วคงที่ 3500 rev/min 62

5-19 แสดงการเขียนเส้น optimum path จากความสัมพันธ์ของแรงบิด
และประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ภาระต่างๆ เมื่อความเร็วคงที่ 4000 rev/min 62

5-20 แสดง optimum path ของความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อน
กับแรงบิดที่แก้ไขของเครื่องยนต์สองจังหวะ Daihatsu ZM356 cc.
กับ LPG ที่ MBT spark advance 63

5-21 แสดงแผนภูมิสมรรถนะที่เหมาะสมของเครื่องยนต์สองจังหวะ
เมื่อใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง 64

5-22 แสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์ ระหว่างแรงบิดที่แก้ไขกับ
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ที่ความเร็วรอบคงที่ 2000 rev/min 67

รายการ หน้า

5-23 แสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์ ระหว่างแรงบิดที่แก้ไขกับ
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ที่ความเร็วรอบคงที่ 2500 rev/min 68

5-24 แสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์ ระหว่างแรงบิดที่แก้ไขกับ
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ที่ความเร็วรอบคงที่ 3000 rev/min 68

5-25 แสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์ ระหว่างแรงบิดที่แก้ไขกับ
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ที่ความเร็วรอบคงที่ 3500 rev/min 69

5-26 แสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์ ระหว่างแรงบิดที่แก้ไขกับ
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ที่ความเร็วรอบคงที่ 4000 rev/min 69

6-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศ
กับอัตราการการไหลของ LPG ที่ Optimum performance path 74

6-2 แสดงรายละเอียดของส่วนประกอบใน gas variable venturi 75

6-2 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของ gas variable venturi 76

6-3 แสดง block diagram สำหรับการควบคุม
gas variable venturi เพื่อใช้ในเครื่องยนต์เอสไอสองจังหวะ 77

6-4 แสดงไดอะแกรมของวงจรควบคุมการทำงานของวาล์วก๊าซ 79

6-5 แสดงหน้าต่างของโปรแกรมควบคุมการทำงาน DLA 79

6-6 แสดงองค์ประกอบและการควบคุม gas variable venturi ในการ calibration 80

6-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลที่ความดันคงที่
เมื่อมีการเปลี่ยนตำแหน่งวาล์วก๊าซ 81

7-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูลกับแรงบิดที่ได้การทดสอบ
gas variable venturi ที่ความเร็วรอบคงที่ 2000 rev/min 86

7-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูลกับแรงบิดที่ได้การทดสอบ
gas variable venturi ที่ความเร็วรอบคงที่ 2500 rev/min 87

7-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูลกับแรงบิดที่ได้การทดสอบ
gas variable venturi ที่ความเร็วรอบคงที่ 3000 rev/min 87

7-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูลกับแรงบิดที่ได้การทดสอบ
gas variable venturi ที่ความเร็วรอบคงที่ 3500 rev/min 88

7-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูลกับแรงบิดที่ได้การทดสอบ

รายการ หน้า

gas variable venturi ที่ความเร็วรอบคงที่ 4000 rev/min 88

7-6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูลกับประสิทธิภาพเชิงความร้อน ที่ได้การทดสอบ gas variable venturi ที่ความเร็วรอบคงที่ 2000 rev/min 89

7-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูลกับประสิทธิภาพเชิงความร้อน ที่ได้การทดสอบ gas variable venturi ที่ความเร็วรอบคงที่ 2500 rev/min 89

7-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูลกับประสิทธิภาพเชิงความร้อน ที่ได้การทดสอบ gas variable venturi ที่ความเร็วรอบคงที่ 3000 rev/min 90

7-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูลกับประสิทธิภาพเชิงความร้อน ที่ได้การทดสอบ gas variable venturi ที่ความเร็วรอบคงที่ 3500 rev/min 90

7-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสมมูลกับประสิทธิภาพเชิงความร้อน ที่ได้การทดสอบ gas variable venturi ที่ความเร็วรอบคงที่ 4000 rev/min 91

7-11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้การทดสอบ gas variable venturi บน Optimum path ที่ความเร็วรอบคงที่ 2000 rev/min 92

7-12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้การทดสอบ gas variable venturi บน Optimum path ที่ความเร็วรอบคงที่ 2500 rev/min 92

7-13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้การทดสอบ gas variable venturi บน Optimum path ที่ความเร็วรอบคงที่ 3000 rev/min 93

7-14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้การทดสอบ gas variable venturi บน Optimum path ที่ความเร็วรอบคงที่ 3500 rev/min 93

7-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้การทดสอบ gas variable venturi บน Optimum path ที่ความเร็วรอบคงที่ 4000 rev/min 94

ก-1 แสดง Orifice flow meter 114

ก-2 แสดงปรากฏการณ์ Vena contracta 115

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
LPG	Liquidfied Petroleum Gaseous	
λ	Relative air/fuel ratio	
ϕ	Equivalence ratio	
A/F	Air-Fuel ratio	kg air / kg fuel
$(A/F)_s$	Air-Fuel ที่ stoichiometric	kg air / kg fuel
Pb	Brake Power	kW
Tb	Brake Torque	N-m
Cr	Compression ratio	
γ	Specific heat ratio	
C_V	Specific heat at constant volume	kJ/(kg-K)
C_P	Specific heat at constant pressure	kJ/(kg-K)
Q_{HV}	Heating value	MJ/kg fuel
ΔP	Head different of airflow through orifice plate	Inch. H_2O
m_a	Air mass flow rate	g/sec
m_f	Fuel mass flow rate	g/sec
bsfc	Brake specific fuel consumption	g/(kW-hr)
θ_s	Spark advance timing	Degree - Crank Angle.
MBT timing	Minimum spark advance for best torque	Degree – Crank Angle
T	Temperature	°C
P_{atm}	Atmospheric pressure	mmHg
R	Gas constant	kJ/kg-K
N	ความเร็วรอบเครื่องยนต์	Rev/min
η_{th}	Thermal efficiency; Fuel conversion efficiency	
η_{ch}	Charging efficiency	
WOT	Wide open throttle	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

X	ระยะกดบนเรกูเรเตอร์	mm.
L	ตำแหน่งวาล์วก๊าซ	step
Ao	พื้นที่ช่องเปิดวาล์ว	mm^2
Av	พื้นที่วาล์วก๊าซ	mm^2
Cd	coefficient of drag	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย