

ผลกระทบของตัวแปรการทำงานของเครื่องยนต์ต่อลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ SI



นาย ธนกร สุไควยวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0477-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 19937921

20 พ.ย. 2543

# EFFECTS OF SI ENGINE'S OPERATING PARAMETERS ON COMBUSTION CHARACTERISTICS

Mr. Thanakorn Suwaisayawan

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

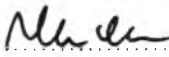
Academic Year 2000

ISBN 974-13-0471-4

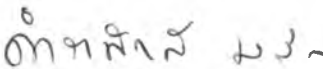
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของตัวแปรการทำงานของเครื่องยนต์ต่อลักษณะการเผาไหม้  
ของเครื่องยนต์ SI  
โดย นาย ธนกร สุไวยวรรณ  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คณิต วัฒนวิเชียร

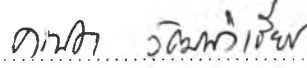
---


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

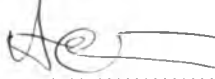
 ..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ดี มลิลดา)

 ..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คณิต วัฒนวิเชียร)

 ..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฉัตรชัย หงษ์อุเทน)

 ..... กรรมการ  
(นาย นิโรจน์ อัครปัญญาวิทย์)

ธนกร สุไวดุขวรรณ : ผลกระทบของตัวแปรการทำงานของเครื่องยนต์ต่อลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ SI . (EFFECTS OF SI ENGINE'S OPERATING PARAMETERS ON COMBUSTION CHARACTERISTICS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.คณิต วัฒนวิเชียร, จำนวนหน้า 142 หน้า. ISBN 974-13-0471-4.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรการทำงานของเครื่องยนต์ อันได้แก่ ความเร็วรอบเครื่องยนต์, equivalence ratio และองศาการจุดระเบิดล่วงหน้า ต่อลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ SI การทดสอบกระทำบนเครื่องยนต์ 4 จังหวะ สูบเดี่ยว ยี่ห้อ Ricardo รุ่น E6 บนไดนาโมมิเตอร์แบบ swinging field โดยทดสอบที่ความเร็วรอบคงที่ 1500, 1800 และ 2100 rev./min. ที่อัตราการใช้เชื้อเพลิง 100%, 75% และ 50% ของอัตราไหลที่ WOT ที่แต่ละความเร็วรอบ โดยมีการปรับ equivalence ratio ระหว่าง 0.8 ถึง 1.1 และองศาการจุดระเบิดล่วงหน้าในช่วงระหว่าง 20-60 องศา ก่อนศูนย์ตายบน แล้วทำการวัดค่าทางสมรรถนะ และวัดค่าความดันในกระบอกสูบที่แต่ละองศาเพลาข้อเหวี่ยง ข้อมูลความดันในกระบอกสูบที่ได้จะนำไปวิเคราะห์หา MFB curve (mass fraction burned) ด้วยวิธีของ Rassweiler and Withrow เพื่อวิเคราะห์ถึงผลของตัวแปรการทำงานต่อ Flame development angle ( $\Delta\theta_b$ ) และ Rapid burned angle ( $\Delta\theta_r$ )

จากผลการทดสอบดังกล่าวพบว่า การเพิ่มองศาจุดระเบิดล่วงหน้า มีผลให้  $\Delta\theta_b$  เพิ่มขึ้น ขณะที่  $\Delta\theta_r$  มีแนวโน้มที่ลดลง

ส่วนผลของ equivalence ratio จะพบว่า เมื่อเพิ่ม equivalence ratio ให้มากขึ้น จะทำให้  $\Delta\theta_b$  และ  $\Delta\theta_r$  มีแนวโน้มลดลง กว่าที่ส่วนผสมบาง

สำหรับการวิเคราะห์ผลของความเร็วยรอบเครื่องยนต์นั้น จะพบว่าความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้นมีผลให้  $\Delta t_b$  และ  $\Delta t_r$  น้อยลง

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล .....ลายมือชื่อนิสิต .....ธนกร สุไวดุขวรรณ.....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล .....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....ดร.คณิต วัฒนวิเชียร.....

ปีการศึกษา 2543.....

# # 4070291921 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: SI ENGINE / OPERATING PARAMETERS / COMBUSTION CHARACTERISTICS / MASS FRACTION BURNED / BURN RATE / FLAME DEVELOPMENT PERIOD / RAPID BURNED PERIOD

THANAKORN SUWAIYAWAN : EFFECTS OF SI ENGINE'S OPERATING PARAMETERS ON COMBUSTION CHARACTERISTICS. (THESIS TITLE) THESIS ADVISOR : ASSIST.PROF.KANIT WATTANAVICHIEEN , Ph.D. , 142 pp. ISBN 974-13-0471-4.

This research studied the effects of engine's operating parameters; ie. engine speed, equivalence ratio, spark advance; on combustion characteristic of SI engine. In this study, single cylinder, 4-stroke, SI engine Ricardo E6 coupled with swinging field dynamometer was used. The experiments were conducted at constant engine speed of 1500, 1800, 2100 rev./min.; each at air flow rate 100%, 75% and 50% of the WOT. Equivalence ratio and spark timing were varied between 0.8 to 1.1 and 20 to 60 °CA bt/dc, respectively. At each testing point, the engine performance parameters and in-cylinder pressure data were recorded. In order to investigate the effects of engine operating parameters on flame development angle ( $\Delta\theta_d$ ) and rapid burned angle ( $\Delta\theta_b$ ), Rassweiler and Withrow's method was employed to obtain MFB curve from the obtained in-cylinder pressure.

The results were found that the more the spark advance the longer the  $\Delta\theta_d$  but the shorter the  $\Delta\theta_b$ . The richer the mixture the shorter the  $\Delta\theta_d$  as well as the shorter the  $\Delta\theta_b$ . The higher the engine speed the shorter the  $\Delta t_d$  as well as the shorter the  $\Delta t_b$ .

Department.....Mechanical Engineering.....

Student's signature.....*Thanakorn Suwaiyawan*.....

Field of study.....Mechanical Engineering.....

Advisor's signature.....*Kanit Wattanavichien*.....

Academic year.....2000.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จออกมาเป็นรูปเล่มมิได้เลย หากขาดซึ่งบุคคลหลายๆ ท่านให้ความช่วยเหลือ เริ่มจากอาจารย์ ดร.คณิต วัฒนวิเชียร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง ที่ท่านอาจารย์ได้ทุ่มเทให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์แก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างดี ยิ่งไปกว่านั้น ท่านยังได้อบรมสั่งสอนและดูแลข้าพเจ้ามาโดยตลอด ข้าพเจ้าได้ประสบการณ์ ได้เรียนรู้สิ่งต่างๆ จากท่านมากมาย ทั้งทางตรงและทางอ้อม

ขอขอบคุณ นายประพันธ์ ดลวิชัย และ นายวิสุทธิ กวश्यकษา เพื่อนและน้อง ที่ช่วยข้าพเจ้าในระหว่างทำการทดสอบ ขอขอบคุณเพื่อนและน้องทุกคนในห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์สันดาปภายใน และห้องพิกนิติต ป.โท สำหรับคำปรึกษาและกำลังใจ ขอพระคุณคุณน้าและคุณอาที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา กราบขอพระคุณและขอโทษคุณพ่อคุณแม่ ที่ลูกทำให้ท่านต้องลำบากในระหว่างนี้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากทุกท่านดังกล่าว หากแต่มีข้อผิดพลาดประการใดนั้นเพราะข้าพเจ้าด้อยความสามารถเอง

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ท
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 บทนำ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	1
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์ .....	1
1.4 ขั้นตอนในการทำวิทยานิพนธ์ .....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1 กระบวนการสันดาปในเครื่องยนต์ SI .....	3
2.2 การวัดและการวิเคราะห์ข้อมูลแรงดันภายในกระบอกสูบ .....	3
2.3 อัตราการสันดาป .....	5
2.4 ความสัมพันธ์ของตัวแปรการทำงานกับอัตราการสันดาป .....	8
2.5 ความสำคัญของอัตราการสันดาปต่อสมรรถนะและการควบคุมมลพิษ .....	11
2.6 แบบจำลองการสันดาป .....	13
บทที่ 3 เครื่องยนต์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ .....	16
3.1 เครื่องยนต์ทดสอบ Ricardo E6 .....	16
3.1.1 รายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องยนต์ทดสอบ .....	17
3.1.2 ไตนาโมมิเตอร์และหน่วยควบคุม .....	19
3.1.3 ระบบน้ำหล่อเย็น .....	19

3.2 อุปกรณ์วัดที่ใช้ในการทดสอบเครื่องยนต์ .....	20
3.2.1 แรงบิดของเครื่องยนต์ .....	20
3.2.2 Air flow meter .....	21
3.2.3 การวัดอัตราการใช้เชื้อเพลิง .....	21
3.2.4 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ .....	21
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและเก็บค่าความดันในระบบอกสูบ .....	21
3.3.1 Piezo electric pressure transducer .....	21
3.3.2 Charge Amplifier .....	22
3.3.3 Shaft Encoder .....	23
3.3.4 Autoscan .....	23
บทที่ 4 การทดสอบ ผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ .....	25
4.1 การทดสอบเครื่องยนต์ และผลการทดสอบ .....	25
4.2 การวิเคราะห์ผลขององศาการจุดระเบิดล่วงหน้าและ equivalence ratio .....	30
4.2.1 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ Ricardo E6 ที่อัตราเร็วรอบ .....	31
1500 rev./min. อัตราไหลอากาศ 100% (WOT)	
4.2.2 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ Ricardo E6 ที่อัตราเร็วรอบ .....	36
1500 rev./min. อัตราไหลอากาศ 75% ของ WOT	
4.2.3 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ Ricardo E6 ที่อัตราเร็วรอบ .....	49
1500 rev./min. อัตราไหลอากาศ 50% ของ WOT	
4.2.4 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ Ricardo E6 ที่อัตราเร็วรอบ .....	61
1800 rev./min. อัตราไหลอากาศ 100% (WOT)	
4.2.5 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ Ricardo E6 ที่อัตราเร็วรอบ .....	69
1800 rev./min. อัตราไหลอากาศ 75% ของ WOT	
4.2.6 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ Ricardo E6 ที่อัตราเร็วรอบ .....	81
1800 rev./min. อัตราไหลอากาศ 50% ของ WOT	
4.2.7 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ Ricardo E6 ที่อัตราเร็วรอบ .....	91
2100 rev./min. อัตราไหลอากาศ 100% (WOT)	
4.2.8 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ Ricardo E6 ที่อัตราเร็วรอบ .....	95
2100 rev./min. อัตราไหลอากาศ 75% (WOT)	



4.2.9 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ Ricardo E6 ที่อัตราเร็วรอบ .....	105
2100 rev./min. อัตราไหลอากาศ 50% (WOT)	
4.3 การวิเคราะห์ผลของความเร็วยรอบเครื่องยนต์ .....	116
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	122
5.1 ผลสรุปงานวิจัย .....	122
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	123
รายการอ้างอิง .....	124
ภาคผนวก .....	125
ภาคผนวก ก ตัวอย่างข้อมูลดิบที่ได้จากการวัดแรงดันในกระบอกสูบ 1 cycle.....	126
ภาคผนวก ข โปรแกรมที่ใช้คำนวณหา Mass Fraction Burned .....	139
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	142

## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	แสดงค่า imep และ $\eta_{ii}$ ของ Ideal cycle , Fast ,Medium และ Slow burn cycle	11
4.1	แสดงจุดที่ทำการทดสอบ .....	26
4.2	ตารางสรุปผลการทดสอบและสรุปผลการวิเคราะห์การวัดความดันใน กระบอกสูบที่ความรอบเครื่องยนต์ 1500 rev./min.	27
4.3	ตารางสรุปผลการทดสอบและสรุปผลการวิเคราะห์การวัดความดันใน กระบอกสูบที่ความรอบเครื่องยนต์ 1800 rev./min.	28
4.4	ตารางสรุปผลการทดสอบและสรุปผลการวิเคราะห์การวัดความดันใน กระบอกสูบที่ความรอบเครื่องยนต์ 2100 rev./min.	29

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ

หน้า

2.1	แสดงความดันในกระบอกสูบในวัฏจักรที่มีการสันดาป (เส้นทึบ) และในวัฏจักร ..... 3 ที่ไม่มีการสันดาป (เส้นประ)
2.2	แสดง (a) Pressure-Volume diagram ; (b) กราฟ $\log p - \log(V/V_{max})$ ..... 5
2.3	เส้นโค้งแสดงตัวประกอบมวลที่ถูกสันดาปแล้วเทียบกับองค์ประกอบ ..... 6
2.4	กราฟเปอร์เซ็นต์มวลที่ถูกสันดาปที่แต่ละองค์ประกอบเชื้อเพลิงเปรียบเทียบ ..... 7 ระหว่างกรณีที่ใช้หัวเทียน 1 หัวเทียบกับกรณีที่ใช้ 2 หัวเทียน
2.5	แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์มวลที่ถูกสันดาปที่แต่ละองค์ประกอบเชื้อเพลิงเปรียบเทียบ ..... 8 ระหว่างกรณีที่อัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิงเป็น 12.9 (ได้กำลังสูงสุด) กับกรณีที่ Lean กว่าคือมีอัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิงเป็น 14.7
2.6	แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์มวลที่ถูกสันดาปที่แต่ละองค์ประกอบเชื้อเพลิงเปรียบเทียบ ..... 8 ระหว่างกรณีที่ความสูงระดับต่างๆ ได้แก่ ระดับพื้นดิน และที่ความสูง 5,000 , 15,000, 25,000 ฟุตจากระดับพื้นดิน
2.7	แสดงกราฟความดันกับองค์ประกอบเชื้อเพลิงที่ส่วนผสมเชื้อเพลิงอากาศ ..... 9 0.054 - 0.118 (equivalence ratio 0.79 - 1.73) องค์การจุดระเบิด 16 °CA btdc
2.8	ไดอะแกรมความสัมพันธ์ความดันกับปริมาตร ..... 11
2.9	ผลการทำนายการประหยัดเชื้อเพลิงจากแบบจำลองวัฏจักรซึ่งอาศัย ..... 12 หลักเทอร์โมไดนามิค
2.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ความแปรปรวน ของ $\Delta\theta_u$ และ ความแปรปรวน ..... 12 ของช่วง $\Delta\theta_b$ กับ $\Delta\theta_b$ จากข้อมูลของเครื่องยนต์ที่มีห้องเผาไหม้และ สภาวะการทำงานต่างๆกัน
2.11	แสดงผลกระทบของอัตราการสันดาปต่อความสัมพันธ์ของ EGR ต่อ $NO_x$ , ..... 13 HC และความแปรปรวนของวัฏจักร ของเครื่องยนต์ SI ที่ทำงานที่ 1400 รอบต่อนาที , imep 324 kPa , equivalent ratio = 1.0 , MBT timing

3.1	ภาพของแท่นเครื่องยนต์ทดสอบ Ricardo E6 และไดนาโมมิเตอร์ .....	16
3.2	แผนภาพแสดงจังหวะการเปิดปิดลิ้นไอดีและไอเสีย .....	17
3.3	แผนภาพและตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับห้องเผาไหม้ของ เครื่องยนต์ทดสอบ Ricardo E6 .....	18
3.4	แผนภาพแสดงระบบหล่อเย็นของเครื่องยนต์ทดสอบ Ricardo E6 .....	19
3.5	แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้วัดแรงบิด .....	20
3.6	ภาพประกอบวิธีการวัดแรงบิด .....	20
3.7	แสดงแผนภาพการวัดอัตราการใช้เชื้อเพลิง .....	21
3.8	แสดงแผนภาพหลักการทำงานของ piezo electric transducer .....	22
3.9	Charge Amplifier ที่ใช้ในการทดสอบ .....	22
3.10	แสดงภาพของ Autoscan .....	23
4.1	แสดงกราฟผลการทดสอบ ที่ความเร็วรอบ 1500 rev./min. อัตราการไหล อากาศ 100 % .....	31
4.2	แสดงกราฟผลการทดสอบ ที่ความเร็วรอบ 1500 rev./min. อัตราการไหล อากาศ 75 % ของ WOT .....	36
4.3	แสดงกราฟผลการทดสอบ ที่ความเร็วรอบ 1500 rev./min. อัตราการไหล อากาศ 50 % ของ WOT .....	49
4.4	แสดงกราฟผลการทดสอบ ที่ความเร็วรอบ 1800 rev./min. อัตราการไหล อากาศ 100 % .....	61
4.5	แสดงกราฟผลการทดสอบ ที่ความเร็วรอบ 1800 rev./min. อัตราการไหล อากาศ 75 % ของ WOT .....	69
4.6	แสดงกราฟผลการทดสอบ ที่ความเร็วรอบ 1800 rev./min. อัตราการไหล อากาศ 50 % ของ WOT .....	81
4.7	แสดงกราฟผลการทดสอบ ที่ความเร็วรอบ 2100 rev./min. อัตราการไหล อากาศ 100 % .....	91
4.8	แสดงกราฟผลการทดสอบ ที่ความเร็วรอบ 2100 rev./min. อัตราการไหล อากาศ 75 % ของ WOT .....	95

4.9	แสดงกราฟผลการทดสอบ ที่ความเร็วรอบ 2100 rev./min. อัตราการไหล ..... 105 อากาศ 50 % ของ WOT	
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของช่วงองศาเพลลาข้อเหวี่ยงที่เกิดการสันดาปจาก ..... 116 0 ถึง 10% ( $\Delta t_p$ ) และ จาก 10% ถึง 90% ( $\Delta t_p$ ) กับองศาจุดระเบิดล่วงหน้า	

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a, m	Adjustable parameters for wiebe function
A/F	Air / Fuel ratio
bsfc.	Brake specific fuel consumption
EGR	Exhaust gas recycle
EVC	Exhaust valve close
EVO	Exhaust valve open
IVC	Intake valve close
IVO	Intake valve open
imep	Indicated mean effective pressure
MAP	Manifold absolute pressure
MBT	Maximum brake torque
MFB	Mass fraction burned
n	Polytropic exponent
P	Pressure
pC	Pico coulomb
Q	Heat transfer
R	Gas constant
$R$	Connecting rod length / crank radius
$r_c$	Compression ratio
rev./min.	Revolutions per minute
SA	Spark advance
SI	Spark ignition
T	Temperature
V	Volume
WOT	Wide open throttle
°CA	Degree crank angle
atdc	After top dead center
btdc	Before top dead center

tdc	Top dead center
bdc	Bottom dead center
$\phi$	Equivalence ratio
$\Delta\theta_d$	ช่วงองศาเพลลาข้อเหวี่ยงตั้งแต่จุดระเบิดจนกระทั่งเผาไหม้ได้ 10%
$\Delta\theta_b$	ช่วงองศาเพลลาข้อเหวี่ยงที่ใช้ในการเผาไหม้ส่วนผสมตั้งแต่ 10% ถึง 90 %
$\Delta t_d$	ช่วงเวลาตั้งแต่จุดระเบิดจนกระทั่งเผาไหม้ได้ 10%
$\Delta t_b$	ช่วงเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ส่วนผสมตั้งแต่ 10% ถึง 90 %
$\gamma_b, \gamma_u$	Specific heat ratio $c_p/c_v$ of burned and unburned mixture
$c_p, c_v$	Specific heat at constant pressure and constant volume
$\eta_{f,i}$	Indicated fuel conversion efficiency