

การวิเคราะห์การเผาไหม้และภาพปรากฏการณ์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก
ในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้า

นายจักรกฤษ ตั้งรัตนโสภณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF ENGINE COMBUSTION AND VISUALIZED COMBUSTION PHENOMENA OF
A SMALL CI ENGINE FUELED WITH ALTERNATIVE DIESEL FUEL

Mr. Jakrit Tangrattanasophon

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

500748

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์การเผาไหม้และภาพปรากฏการณ์การเผาไหม้ของ
เชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ชนิดห้องเผาไหม้
ล่วงหน้า

โดย

นาย จักรกฤษ ตั้งรัตนโสภณ

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิต วัฒนวิเชียร


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยอนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวันวิศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สถาพร สุปรัชชากร)


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


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฉัตรชัย หงษ์อุเทน)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินดา เจริญพรพาณิชย์)


..... กรรมการ
(ดร. เรืองศักดิ์ สุทธิรัตน์สกุล)

นายจักร์กฤษ ตั้งรัตนโสภณ : การวิเคราะห์การเผาไหม้และภาพปรากฏการณ์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้า.

(ANALYSIS OF ENGINE COMBUSTION AND VISUALIZED COMBUSTION PHENOMENA OF A SMALL CI ENGINE FUELED WITH ALTERNATIVE DIESEL FUEL)

อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.คณิต วัฒนวิเชียร, 245 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบผลของการใช้เชื้อเพลิงดีเซลและเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก (น้ำมันเตา 30 % ผสม เควอซีน 70 % โดยปริมาตร) ต่อการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้า โดยทดสอบกับเครื่องยนต์ Kubota รุ่น RT 120 ขนาด 0.624 ลิตร โดยแบ่งงานออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรก การหาสมรรถนะของเครื่องยนต์ ส่วนที่สองคือ การวิเคราะห์ผลจากการวัดข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้และความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีด แล้ววิเคราะห์หาอัตราการฉีดเชื้อเพลิง, ช่วงล่าช้าการจุดระเบิด อัตราการปล่อยความร้อน, การปล่อยความร้อนสุทธิ และสัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ ส่วนที่สาม คือ การศึกษาปรากฏการณ์การเผาไหม้ของสเปรย์เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ล่วงหน้า จากภาพที่ถ่ายด้วยระบบ Engine Visioscope ตลอดจนการวิเคราะห์การแจกแจงความน่าจะเป็นของปรากฏการณ์เปลวไฟ การเปรียบเทียบผลการศึกษาปรากฏการณ์การเผาไหม้กับผลการวิเคราะห์ข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้

จากผลการศึกษาพบว่า ค่าแรงบิดเบรกของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกมีค่าใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงดีเซล ค่าอัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกมีค่าต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซลเล็กน้อย องศาการฉีดเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกล่าช้ากว่าเชื้อเพลิงดีเซลในช่วง 0.4 ถึง 1.2 องศาเพลลาข้อเหวี่ยง ความดันในห้องเผาไหม้สูงสุดของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกมีแนวโน้มน้อยกว่าเชื้อเพลิงดีเซล 0.04 ถึง 1.23 bar อัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกมีแนวโน้มน้อยกว่าเชื้อเพลิงดีเซล 0.2 ถึง 9.9 จูลต่อองศาเพลลาข้อเหวี่ยง และสัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้สูงสุดของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกน้อยกว่าเชื้อเพลิงดีเซล 0 ถึง 0.03 ในส่วนของการศึกษาภาพถ่ายภายในห้องเผาไหม้ล่วงหน้าพบว่าภาพถ่ายสเปรย์และการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกและเชื้อเพลิงดีเซลที่ได้สอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์การเผาไหม้จากข้อมูลความดันโดยภาพปรากฏการณ์ที่ถ่ายได้แสดงให้เห็นว่าค่าองศาการฉีดเชื้อเพลิงจุดสิ้นสุดการฉีดเชื้อเพลิง จุดเริ่มต้นการเผาไหม้ ช่วงล่าช้าการจุดระเบิด และจุดสิ้นสุดการเผาไหม้อยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลความดัน อาจสรุปได้ว่าเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้าได้

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....จักร์กฤษ ตั้งรัตนโสภณ.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....กนก วิวัฒน์.....

ปีการศึกษา.....2550.....

4670669021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: FUEL OIL / PERFORMANCE / COMBUSTION / VISUALIZATION / ALTERNATIVE

JAKRIT TANGRATTANASOPHON: ANALYSIS OF ENGINE COMBUSTION AND VISUALIZED COMBUSTION PHENOMENA OF A SMALL CI ENGINE FUELED WITH ALTERNATIVE DIESEL FUEL. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. KANIT WATTANAVICHIEEN, Ph.D., 245 pp.

This thesis aims to investigate comparative results of using Alternative diesel (30% Fuel oil blend with 70% Kerosene by volume) and diesel fuel on engine combustion and performance of a small CI IDI swirl chamber engine. The experiments, conducted on a Kubota RT120 0.624 liters engine, were composed of 3 parts. First, to determine engine performance. Second, to measure in-cylinder pressure and fuel injection line pressure and analyze fuel injection rate, Ignition delay, rate of heat release, net heat release and mass fraction burned. Third, to investigate spray combustion images of fuels in the swirl chamber by means of engine visioscope. These include the investigation for probability distribution of combustion phenomena as well as comparing results between visualized combustion phenomena and those that estimated from in-cylinder pressure information.

The results showed that the Alternative diesel gave similar torque to the diesel but have higher fuel consumption, thus gave lower fuel conversion efficiency than diesel fuel over its operating range. The injection timing of Alternative diesel were retarded within the range between 0.4 to 1.2 °CA. The maximum in-cylinder pressure of alternative diesel fuel were lower than diesel about 0.04 to 1.23 bar. The maximum heat released rate of Alternative diesel fuel were lower than diesel 0.2 to 9.9 J/°CA with the maximum mass fraction burned of Alternative diesel fuel were lower than diesel up to 0.03. With the visualized combustion phenomena, it was found that the spray and combustion of Alternative diesel and diesel were conformed to the result from pressure data. The images of spray showed that the Start of Injection, End of Injection, Start of Combustion, Ignition Delay and End of Combustion located at the same point with ones from the results of pressure data. As the differences found from the results were not significant, it can be concluded that the Alternative diesel can be used in small CI IDI diesel engines.

DepartmentMechanical Engineering..... Student's signature..... *Jakrit Tangrattanasophon*.....

Field of studyMechanical Engineering.... Advisor's signature..... *Kanit Wattanavichien*.....

Academic year2007.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คณิต วัฒนวิเชียร อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำแนะนำ ช่วยเหลือและร่วมติดตามการทดสอบอย่างใกล้ชิดในทุกขั้นตอน ทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัท สยามคูโบต้าอุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องยนต์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ อุปกรณ์ และทุนสนับสนุนต่าง ๆ ขอขอบคุณ บริษัท ระยองเพียวริฟายเออร์ จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุน ด้านเชื้อเพลิงทดสอบในงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณ Mr. Duc, คุณสุวัช คำแฝด, คุณวาทิต ตั้งพิสิฐโยธิน, บอย ,อาร์ท, กิม, รวมถึงเพื่อนนิสิตปริญญาโทและ รุ่นพี่ที่สำเร็จการศึกษาแล้ว ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านการติดตั้งเครื่องยนต์, การทดสอบ, การเก็บข้อมูล และในส่วนบุคคลย่อยอื่นๆ ขอขอบคุณ นางนอม อุดม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาทางด้านเทคนิคต่างๆ เกี่ยวกับเครื่องยนต์ ที่ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณบุคคลท่านอื่นๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องซึ่งอาจไม่ได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสุวิทย์ คุณแม่โสภา, สมาชิกในครอบครัวตั้งรัตนโสภณ และครอบครัวธนิกุล ทุกท่านที่ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในทุกๆด้าน ขอขอบคุณ วนิตา ธนิกุลและ ธีรธาดา ธนิกุล ที่เป็นกำลังใจและทุกๆ อย่างของข้าพเจ้า จนทำให้ผู้วิจัยสามารถทำการวิจัยจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ณ
สารบัญคำย่อและสัญลักษณ์.....	ผ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีเครื่องยนต์ดีเซลและการเผาไหม้.....	4
2.1 กระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ CI.....	4
2.1.1 ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง (Direct Injection or DI Systems).....	4
2.1.2 ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม (Indirect Injection or IDI Systems).....	5
2.2 แบบจำลองของกระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ CI.....	6
2.2.1 การใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์การเผาไหม้ในเครื่องยนต์ CI.....	7
2.2.1.1 การเผาไหม้ในเครื่องยนต์ DI ที่ใช้หัวฉีดหลายรู.....	7
2.2.1.2 การเผาไหม้ในเครื่องยนต์ IDI แบบ Swirl Chamber.....	8
2.3 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้กำหนดสมรรถนะของเครื่องยนต์.....	10
2.4 แผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด.....	11
2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้.....	15
2.6 การคำนวณอัตราการฉีดเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้.....	20

	หน้า
บทที่ 3 ทฤษฎีเกี่ยวกับ Visualization	22
3.1 แบบจำลองเชิงปรากฏการณ์สำหรับการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ CI	22
3.1.1 การศึกษาภาพถ่ายการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ CI	22
3.1.2 การศึกษาโครงสร้างของดีเซลสเปรย์	24
3.1.2.1 โครงสร้างสเปรย์ทั้งหมด	24
3.1.2.2 การแตกตัวเป็นละออง	26
3.1.2.3 Spray Penetration	31
3.1.2.4 การระเหยของสเปรย์	34
3.1.2.5 การกระจายของขนาดหยดเชื้อเพลิง	37
3.1.2.6 กระบวนการจุดระเบิดของสเปรย์ดีเซล	40
3.1.3 การวิเคราะห์การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลโดยวิธีการถ่ายภาพ	45
บทที่ 4 ทฤษฎีเชื้อเพลิงและทบทวนวรรณกรรม	66
4.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซล	66
4.1.1 เลขซีเทน(Cetane Number)	66
4.1.2 ค่าการระเหย(Volatility)	66
4.1.3 ความหนาแน่น(Density)	67
4.1.4 ความหนืด(Viscosity)	68
4.1.5 คุณสมบัติการหล่อลื่น(Lubricity)	68
4.1.6 คุณสมบัติที่อุณหภูมิต่ำของเชื้อเพลิงดีเซล	68
4.1.7 เสถียรภาพของเชื้อเพลิงดีเซล	69
4.1.8 ปริมาณซัลเฟอร์ (Sulphur Content)	69
4.1.9 ปริมาณอะโรมาติก (Aromatic Content)	70
4.1.10 ปริมาณน้ำและตะกอน (Water and Sediment Content)	70
4.1.11 จุดวาบไฟ (Flash Point)	70
4.2 เชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก (Alternative Diesel)	71
4.2.1 น้ำมันเตา (Fuel Oil)	71
4.2.1.1 คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันเตา	71
4.2.1.1.1 ความถ่วงจำเพาะ (Gravity)	71

4.2.1.1.2 จุดวาบไฟ (Flash point)	71
4.2.1.1.3 ความหนืด (Viscosity).....	71
4.2.1.1.4 จุดหยุดไหลเท (Pour Point)	71
4.2.1.1.5 ปริมาณของตะกอนและน้ำ (Sediment and water content).....	72
4.2.1.1.6 ปริมาณกำมะถัน (Sulfur Content)	72
4.2.1.1.7 ปริมาณเถ้า (Ash Content)	72
4.2.1.2 การรักษาความปลอดภัย.....	72
4.2.1.3 อันตรายต่อร่างกาย.....	72
4.2.2 น้ำมันก๊าด (Kerosene).....	72
4.2.2.1 คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันก๊าด	72
4.2.2.1.1 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity. API Gravity)	72
4.2.2.1.2 จุดควันหรือให้ควัน (Smoke Point)	72
4.2.2.1.3 จุดวาบไฟ (Flash Point)	73
4.2.2.1.4 ปริมาณกำมะถัน (Sulfur Content)	73
4.2.2.2 การรักษาความปลอดภัย.....	73
4.2.2.3 อันตรายต่อร่างกาย	73
4.3 ทบทวนวรรณกรรม	73
4.3.1 งานวิจัยศึกษาวิเคราะห์การเผาไหม้ในเครื่องยนต์	73
4.3.2 งานวิจัยศึกษาปรากฏการณ์การเผาไหม้ในเครื่องยนต์ในประเทศไทย.....	75
4.3.3 งานวิจัยเกี่ยวกับน้ำมันเตา	82
บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย.....	83
5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะ	83
5.1.1 เครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบสมรรถนะ	83
5.1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)	84
5.1.3 มู่เล่ และสายพาน.....	85
5.1.4 แผงหลอดไฟ.....	86
5.1.5 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ	86

	หน้า
5.1.6 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ	87
5.1.7 ตัวแปลงสัญญาณ (Data Logger)	88
5.1.8 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ	94
5.1.9 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ (Ambient Condition).....	94
5.1.10 อุปกรณ์วัดค่าควันดำ (Smoke Meter)	95
5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวัดความดันห้องเผาไหม้	96
5.2.1 ไดนาโมมิเตอร์	96
5.2.2 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบเครื่องยนต์	98
5.2.3 Piezoelectric pressure transducer	101
5.2.4 อุปกรณ์เก็บข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้	103
5.2.5 Dynamic signal amplifier	104
5.2.6 Crank angle encoder	106
5.2.7 อุปกรณ์วัดอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง	106
5.3 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทดสอบการถ่ายภาพปรากฏการณ์การเผาไหม้	108
5.3.1 เครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบการถ่ายภาพห้องเผาไหม้.....	108
5.3.2 CCD Camera	109
5.3.3 Endoscope.....	109
5.3.4 Combustion chamber window.....	110
5.3.5 Strobe Gun.....	110
5.3.6 Light Unit.....	111
5.3.7 ระบบระบายความร้อน Endoscope	111
5.3.8 PC และ VisioScope Software.....	112
5.4 แผนผังโดยรวมของอุปกรณ์ต่างๆในห้องทดสอบ.....	113
5.4.1 แผนผังการจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบสมรรถนะ	113
5.4.2 แผนผังการต่อระบบการถ่ายภาพ.....	114
5.5 เชื้อเพลิงทดสอบ	114
5.5.1 เชื้อเพลิงดีเซลอ้างอิง (Base Diesel).....	114
5.5.2 เชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก (Alternative Diesel).....	114
5.5.3 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทดสอบ.....	118

	หน้า
5.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	118
5.6.1 การทดสอบสมรรถนะ	118
5.6.1.1 การ Run in	118
5.6.1.2 การทดสอบที่ภาระสูงสุด (Full-Load Performance Test).....	119
5.6.1.3 Engine Performance Test	120
5.6.2 การวัดความดันในห้องเผาไหม้	121
5.6.2.1 การทดสอบ.....	121
5.6.2.2 การวิเคราะห์สภาวะการเผาไหม้จากอัตราการปล่อยความร้อน	121
5.6.3 การถ่ายภาพในห้องเผาไหม้.....	122
5.6.4 การวิเคราะห์ความเชื่อมโยงระหว่างภาพปรากฏการณ์การเผาไหม้ และอัตราการปล่อยความร้อนในห้องเผาไหม้.....	124
บทที่ 6 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	125
6.1 ผลการทดสอบสมรรถนะ.....	125
6.1.1 ผลของแรงบิดเบรก (Brake Torque) กับอัตราสิ้นเปลืองพลังงานรวม จำเพาะ (STEC) ที่สภาวะภาระสูงสุด.....	125
6.1.2 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรก (Brake Fuel Conversion Efficiency) ที่สภาวะภาระสูงสุด.....	126
6.1.3 อุณหภูมิไอเสียที่สภาวะภาระสูงสุด.....	127
6.1.4 อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่สภาวะภาระสูงสุด	127
6.1.5 อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่สภาวะภาระสูงสุด.....	128
6.1.6 ค่าควันดำที่สภาวะภาระสูงสุด.....	129
6.1.7 ค่าอัตราสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะ ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ สภาวะภาระบางส่วน	129
6.1.8 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกที่ความเร็วรอบ เครื่องยนต์คงที่สภาวะภาระบางส่วน.....	131
6.1.9 ค่าอุณหภูมิไอเสียที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ สภาวะภาระบางส่วน....	132
6.1.10 ค่าอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ สภาวะภาระบางส่วน.....	134

	หน้า
6.1.11 ค่าอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ สภาวะภาระบางส่วน	135
6.1.12 ค่าวันดำที่สภาวะภาระบางส่วน	136
6.1.13 แผนภูมิแสดงสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ (Engine Map)	137
6.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ความดันในห้องเผาไหม้	145
6.2.1 ความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีด	146
6.2.2 แสดงผลอัตราการปล่อยความร้อน การปล่อยความร้อนสุทธิ และสัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้	157
6.2.3 ผลกระทบของความเร็วรอบเครื่องยนต์ ที่มีต่ออัตราการปล่อยความร้อน เมื่อแรงบิดคงที่	169
6.3 ผลการถ่ายภาพปรากฏการณ์เผาไหม้	172
6.3.1 ผลการวิเคราะห์ความดันห้องเผาไหม้	174
6.3.2 ภาพถ่ายสเปกโตรมิเตอร์เชื้อเพลิง	177
6.3.3 ปรากฏการณ์การเผาไหม้และการแจกแจงความน่าจะเป็น	178
6.3.4 เปรียบเทียบผลของความดันห้องเผาไหม้กับการถ่ายภาพปรากฏการณ์การ เผาไหม้	184
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	186
7.1 สรุปผลการวิจัย	186
7.1.1 สรุปผลการวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์	186
7.1.2 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลความดัน	186
7.1.3 สรุปผลการถ่ายภาพปรากฏการณ์การเผาไหม้	189
ข้อเสนอแนะ	192
รายการอ้างอิง	193
บรรณานุกรม	198
ภาคผนวก	199
ภาคผนวก ก มาตรฐาน ISO 2046 ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเครื่องยนต์	200
ภาคผนวก ข การวัดอัตราการไหลของอากาศ	214
ภาคผนวก ค ESC TEST Cycle	218

	หน้า
ภาคผนวก ง ข้อมูลผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์.....	222
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	245

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3-1 แสดงการแปลความหมายรูปถ่ายสีจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ CI.....	23
5-1 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ทดสอบสมรรถนะ	83
5-2 แสดงรายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	84
5-3 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ มู่เล่ ตามอัตราทดรอบที่ความเร็วรอบของ เครื่องยนต์ค่าต่างๆ.....	85
5-4 แสดงข้อมูลไดนาโมมิเตอร์	96
5-5 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของ proximity ที่ใช้วัดความเร็วรอบเครื่องยนต์.....	99
5-6 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของ Pulse meter ที่ใช้ในการแสดงผล ความเร็วรอบเครื่องยนต์	101
5-7 แสดงคุณสมบัติของ pressure transducer ยี่ห้อ AVL รุ่น GU12P	101
5-8 แสดงคุณสมบัติของ pressure transducer ยี่ห้อ Kistler รุ่น 607C1	102
5-9 แสดงคุณสมบัติเครื่อง DEWETRON BOOK	103
5-10 แสดงข้อมูลเทคนิค Amplifier รุ่น DAQP-CHARGE-A	105
5-11 ข้อมูลทางเทคนิคของ crank angle encoder ยี่ห้อ Kistler รุ่น 2613B	106
5-12 ข้อมูลทางเทคนิคของตราซังที่ใช้วัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	107
5-13 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ทดสอบถ่ายภาพห้องเผาไหม้.....	108
5-14 ข้อมูลทางเทคนิคของ endoscope	110
5-15 ข้อมูลทางเทคนิคของ light unit.....	111
5-16 ข้อมูลทางเทคนิคของ PC.....	112
5-17 แสดงผลการผสมเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนต่างๆ	116
5-18 ผลการทดลองเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมต่างๆมาใช้กับเครื่องยนต์	117
5-19 แสดงคุณสมบัติของน้ำมันดีเซล, น้ำมันดีเซลทางเลือก, น้ำมันเตา, และเคโรซีน.....	118
5-20 ตารางแสดงจุดที่ทดสอบ.....	121
6-1 แสดงผลสมรรถนะที่จุดทดสอบวัดข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซล	145
6-2 แสดงผลสมรรถนะที่จุดทดสอบวัดข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซล ทางเลือก.....	146
6-3 แสดงผลของ SOI EOI Ignition delay และ SOC	167
6-4 แสดงผลสมรรถนะเมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล	173
6-5 แสดงผลสมรรถนะเมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกที่จุดทดสอบ	173
6-6 ลักษณะของสเปรย์เชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกและเชื้อเพลิงดีเซล ณ องศาข้อเหวี่ยงต่างๆ.....	177

ตาราง	หน้า
6-7 ภาพปรากฏการณ์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกและเชื้อเพลิงดีเซล.....	179
6-8 แสดงการแจกแจงความน่าจะเป็นของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกและเชื้อเพลิงดีเซล	181
6-9 แสดงผลของ SOI EOI และ SOI ของเชื้อเพลิงดีเซล.....	184
6-10 แสดงผลของ Ignition delay EOC และ Burn duration ของเชื้อเพลิงดีเซล	184
6-11 แสดงผลของ SOI EOI และ SOI ของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก.....	184
6-12 แสดงผลของ Ignition delay EOC และ Burn duration ของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ...	184
7-1 แสดงผลของ SOI, Ignition delay และ SOC	187
7-2 แสดงผลการวิเคราะห์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซล.....	187
7-3 แสดงผลการวิเคราะห์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก	188
7-4 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก กับเชื้อเพลิงดีเซล	188
7-5 แสดงผลของ SOI, EOI และ SOC เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล.....	190
7-6 แสดงผลของ EOC Ignition delay และ Burn Duration เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล	190
7-7 แสดงผลของ SOI, EOI และ SOC เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก.....	191
7-8 แสดงผลของ EOC Ignition delay และ Burn Duration เมื่อใช้เชื้อเพลิง ดีเซลทางเลือก	191
ก-1 Numerical values for power adjustment.....	210
ข-1 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของออร์ฟิชโดยประมาณที่อัตราการไหลต่างๆ.....	215
ง-1 แสดงข้อมูลจากการทดสอบและผลการคำนวณจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน Diesel ที่ ความเร็วรอบ 1000 rev/min	223
ง-2 แสดงข้อมูลจากการทดสอบและผลการคำนวณจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน Diesel ที่ ความเร็วรอบ 1200 rev/min	224
ง-3 แสดงข้อมูลจากการทดสอบและผลการคำนวณจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน Diesel ที่ ความเร็วรอบ 1500 rev/min	226
ง-4 แสดงข้อมูลจากการทดสอบและผลการคำนวณจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน Diesel ที่ ความเร็วรอบ 1800 rev/min	228
ง-5 แสดงข้อมูลจากการทดสอบและผลการคำนวณจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน Diesel ที่ ความเร็วรอบ 2000 rev/min	230
ง-6 แสดงข้อมูลจากการทดสอบและผลการคำนวณจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน Diesel ที่ ความเร็วรอบ 2400 rev/min	232

ตาราง	หน้า
ง-7 แสดงข้อมูลจากการทดสอบและผลการคำนวณจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน Alternative Diesel ที่ความเร็วรอบ 1000 rev/min.....	234
ง-8 แสดงข้อมูลจากการทดสอบและผลการคำนวณจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน Alternative Diesel ที่ความเร็วรอบ 1200 rev/min.....	235
ง-9 แสดงข้อมูลจากการทดสอบและผลการคำนวณจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน Alternative Diesel ที่ความเร็วรอบ 1500 rev/min.....	237
ง-10 แสดงข้อมูลจากการทดสอบและผลการคำนวณจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน Alternative Diesel ที่ความเร็วรอบ 1800 rev/min.....	239
ง-11 แสดงข้อมูลจากการทดสอบและผลการคำนวณจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน Alternative Diesel ที่ความเร็วรอบ 2000 rev/min.....	241
ง-12 แสดงข้อมูลจากการทดสอบและผลการคำนวณจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน Alternative Diesel ที่ความเร็วรอบ 2400 rev/min.....	243

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2-1 แสดงห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ CI แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง.....	5
2-2 แสดงห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ CI แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมชนิด swirl chamber.....	6
2-3 แสดงผังอัตราการปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ CI แบบฉีดตรงโดยทั่วไป.....	7
2-4 แสดงข้อมูลของความดันในระบบอกสูบ (P) ระยะยกของวาล์วเข็มในหัวฉีด (injector needle lift, l_n) และความดันเชื้อเพลิงในท่อส่งเชื้อเพลิง (P_f) ที่มุมข้อเหวี่ยงต่างๆ ตลอดจังหวะอัดและจังหวะขยายตัวของเครื่องยนต์ DI.....	7
2-5 แสดงค่าความดันในระบบอกสูบ (p), อัตราการฉีดเชื้อเพลิง (\dot{m}_{fi}) และอัตราการปล่อยความร้อนสุทธิ (\dot{Q}_n) จากเครื่องยนต์ CI แบบฉีดตรง ความเร็วรอบ 1000 rev/min, Brake mean effective pressure 620 kPa	8
2-6 แสดงอัตราการฉีดเชื้อเพลิงและอัตราการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล 3 แบบ (ก) แสดงอัตราการเผาไหม้ของระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงที่ใช้หัวฉีดแบบหลายรูติดไว้ตรงกลาง (ข) แสดงอัตราการเผาไหม้ของระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงแบบ M ที่ฉีดเชื้อเพลิงเข้าผนัง (ค) แสดงอัตราการเผาไหม้ของระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมแบบห้องเผาไหม้ก่อนไหลวน....	9
2-7 แสดงแผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง.....	11
2-8 แสดงแผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง แบบ M.....	12
2-9 แสดงแผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมแบบห้องเผาไหม้ก่อนแบบไหลวน	13
2-10 แผนภูมิแสดงปัจจัยที่เพิ่มประสิทธิภาพบ่งชี้ของเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมแบบห้องเผาไหม้ก่อนไหลวนซึ่งเป็นฟังก์ชันของ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงหรือภาวะ.....	14
2-11 แสดงขอบเขตของระบบเปิดสำหรับห้องเผาไหม้เพื่อวิเคราะห์การปล่อยความร้อน.....	15
2-12 แสดงตัวแปรในการวิเคราะห์การปล่อยความร้อนในเครื่องยนต์แบบ IDI.....	16
2-13 อัตราการปล่อยความร้อนสุทธิสำหรับเครื่องยนต์ CI แบบ Indirect Injection ที่ภาวะ คงที่ ($0.29 \leq \phi \leq 0.32$) รูป (a) หน่วย kW, รูป (b) หน่วย J/degree.....	18
2-14 อัตราการปล่อยความร้อนรวมที่คำนวณได้ใน IDI swirl-chamber diesel ที่ engine full load 1. คือที่ห้องเผาไหม้หลัก และ 2. คือที่ห้องเผาไหม้ล่วงหน้า รูปบนคือการปล่อยความร้อนรวม ส่วนรูปล่างคืออัตราการปล่อยความร้อน.....	19

ภาพประกอบ	หน้า
3-1 แสดงภาพถ่ายจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ CI แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม	23
3-2 แผนผังสเปรย์เชื้อเพลิงดีเซลที่ได้นิยามตัวแปรหลักๆ.....	25
3-3 ภาพร่างขอบเขตไอรอบนอกของสเปรย์เชื้อเพลิงดีเซลจากภาพถ่ายแบบ shadow graph ความเร็วสูง 12 รูปของเครื่องอัดความเร็วสูง ซึ่งแสดงถึงการกระทำต่อกันของสเปรย์ที่กำลังระเหยกับผนังทรงกระบอกของห้องเผาไหม้ ความดันในการฉีด 60 MPa เวลาระหว่างรูป 0.14 ms	25
3-4 แผนผังของสเปรย์เชื้อเพลิงที่ถูกฉีดในแนวรัศมีออกจากแกนห้องเผาไหม้เข้าสู่อากาศ หมุนรอบรูปร่างของการกระจายอัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง/อากาศ (ϕ) ภายใน jet.....	26
3-5 ภาพถ่ายแสดงปรากฏการณ์เริ่มต้นและสภาวะคงตัว (ขวาล่าง) ของสเปรย์เหลว ความดันสูงเวลาระหว่างรูป 2.1 μ s ของเหลว : น้ำ แก๊สไนโตรเจนที่ 1380 kPa โดยมี Δp คร่อมหัวฉีด 11 MPa เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 0.34 mm	27
3-6 แสดงผลของความเร็วการฉีดที่มีต่อ break-up length.....	28
3-7 แสดงโครงสร้างภายในของสเปรย์แบบ Incomplete และ complete.....	29
3-8 แสดงผลของขนาดรูหัวฉีดที่มีต่อ break-up length	29
3-9 แสดงผลของ length/diameter ของรูหัวฉีดที่มีต่อ break-up length.....	30
3-10 แสดงผลของความดันการฉีดที่มีต่อ spray angle.....	30
3-11 แสดงผลของความเร็วการฉีดที่มีต่อ spray angle และ break-up length	31
3-12 (a) ขอบเขตภายนอกที่วัดได้ของสเปรย์ที่ถูกฉีดเข้าไปในอากาศหมุน (b) tip penetration ของสเปรย์เป็นฟังก์ชันของเวลาสำหรับอัตราของอากาศหมุน ต่างๆ เส้นทึบแสดงสมการ (3-2).....	32
3-13 แสดง spray tip penetration ที่ความดันการฉีดต่างกัน.....	33
3-14 แสดงผลของ valve opening pressure ที่มีต่อ spray tip penetration.....	33
3-15 แสดงผลของขนาดรูหัวฉีดที่มีต่อ spray tip penetration.....	34
3-16 การเปรียบเทียบฟิล์ม 3 ชนิดระหว่างการระเหยของสเปรย์ (หัวฉีดเดี่ยว)	35
3-17 ภาพถ่ายแสดงการพัฒนาของสเปรย์ที่ความดันแวดล้อม $P_g = 1.53$ MPa	36
3-18 การพัฒนาของ tip penetration ของสเปรย์ตามเวลา	37
3-19 แสดงผลของ length/diameter ของรูหัวฉีดที่มีต่อ Sauter mean diameter	37
3-20 แสดงผลของความดันการฉีดที่มีต่อ Sauter mean diameter.....	38

ภาพประกอบ	หน้า
3-21 แสดงผลของความหนืดและความดันการฉีดที่มีต่อ Sauter mean diameter.....	38
3-22 แสดงภาพถ่ายแบบ shadowgraph และแบบ back-illuminated ของสเปรย์ที่กำลัง ระเหย ซึ่งถูกฉีดเข้าสู่แก๊สไนโตรเจนที่ความดัน 3.4 MPa อุณหภูมิ 670 K ใน rapid compression machine โดยรูปบนแสดงทั้งส่วนที่เป็นของเหลว และส่วนที่เป็นไอ ส่วนรูปล่างแสดงเฉพาะส่วนที่เป็นของเหลว.....	39
3-23 แสดงภาพถ่ายของสเปรย์เชื้อเพลิง ซึ่งถูกฉีดเข้าสู่อากาศไหลวนในห้องเผาไหม้ล่วงหน้า แบบโปร่งแสงของเครื่องยนต์ IDI แบบพิเศษ โดยภาพด้านซ้าย เป็นภาพที่ถ่ายด้วย ความไวสูงแสดงถึงขอบเขตของบริเวณที่เป็นไอของสเปรย์ ภาพด้านขวาเป็นภาพที่ถ่าย ด้วยความไวต่ำแสดงถึงบริเวณที่เป็นแกนของเหลว (สีเข้ม) ในความสัมพันธ์กับ บริเวณที่เป็นไอ (สีจาง).....	40
3-24 Penetration ของสเปรย์ก่อนการจุดระเบิด.....	42
3-25 รูปภาพโดยละเอียดของสเปรย์เริ่มต้น.....	42
3-26 แสดงแบบจำลองกระบวนการการเผาไหม้ในสเปรย์ดีเซลแบบเรียงตามลำดับมุม ข้อเหวี่ยง ซึ่งประกอบด้วย การเผาไหม้ในช่วง auto-ignition และ premixed combustion.....	45
3-27 แสดงแบบจำลองการเผาไหม้ของสเปรย์ดีเซลในช่วง quasi-steady	45
3-28 Penetration ของสเปรย์เชื้อเพลิงเหลว สำหรับกรณีทดสอบมาตรฐาน (O1).....	47
3-29 Flame lift-off สำหรับกรณีทดสอบมาตรฐาน (O1)	48
3-30 Flame length สำหรับกรณีทดสอบมาตรฐาน (O1).....	48
3-31 ค่าสัมพัทธ์กับอุณหภูมิที่ค่า $k_{s,0}$ ต่างๆ	49
3-32 Processing points distribution.....	51
3-33 การเปรียบเทียบกระบวนการเผาไหม้โดย Long Zhang และคณะ.....	51
3-34 การเปรียบเทียบเวกเตอร์ความเร็วเปลวไฟโดย Long Zhang และคณะ	52
3-35 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเปลวไฟโดย Long Zhang และคณะ	53
3-36 ภาพถ่ายความเร็วสูงโดยตรงของเปลวไฟ S	55
3-37 อัตราการปลดปล่อยความร้อนสำหรับเปลวไฟ S และเปลวไฟ L.....	55
3-38 ชุดของภาพถ่ายขณะใดขณะหนึ่งของสเปรย์ที่ไม่ระเหย, สเปรย์ที่ระเหย, เปลวไฟ S และเปลวไฟ L.....	56
3-39 ภาพวาดแสดงแนวคิดของการก่อตัวของเขม่าในเปลวไฟดีเซล.....	58

ภาพประกอบ	หน้า
3-40 ภาพถ่ายความเร็วสูงโดยตรงของเปลวไฟ.....	59
3-41 ที่มาของระยะยกเข็มหัวฉีด, ความดันในกระบอกสูบ, อัตราการปลดปล่อยความร้อนและ integrated heat release.....	60
3-42 ภาพถ่ายโดยตรง, รูปภาพของอุณหภูมิเปลวไฟ และรูปภาพของ KL factor ในห้องเผาไหม้ swirl.....	61
3-43 ภาพถ่ายโดยตรง, รูปภาพของอุณหภูมิเปลวไฟ และรูปภาพของ KL factor ในห้องเผาไหม้หลัก (Injection timing : 4°CA BTDC – 8°CA ATDC)	62
3-44 ภาพถ่ายโดยตรง, รูปภาพของอุณหภูมิเปลวไฟ และรูปภาพของ KL factor ในห้องเผาไหม้หลัก (Injection timing : 12°CA BTDC – TDC)	63
3-45 ที่มาของการกระจายของพื้นที่ทุก 100 K ในอุณหภูมิเปลวไฟและพื้นที่ทุก 0.05 ใน KL factor ในห้องเผาไหม้หลักและห้องเผาไหม้ swirl	64
3-46 ที่มาของการกระจายของพื้นที่ทุก 100 K ในอุณหภูมิเปลวไฟและพื้นที่ทุก 0.05 ใน KL factor ในห้องเผาไหม้หลักและห้องเผาไหม้ swirl ช่วงการฉีด : 12°CA BTDC – TDC	64
4-1 โค้งการกลั่น(Distillation curve) ของเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป	67
4-2 (a) In-cylinder pressure (b) Fuel line pressure (c) Fuel injection rate (d) Heat release rate (e) Net heat release (f) Mass fraction burned ที่ 2250 rev/min, 80 Nm	75
4-3 ภาพถ่ายสเปรย์ในห้องเผาไหม้ล่วงหน้าของเชื้อเพลิงดีเซลและดีโซฮอลที่ 2000 rev/min,30 Nm	76
4-4 ภาพถ่ายการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ล่วงหน้าของเชื้อเพลิงดีเซลและดีโซฮอลที่ 2000 rev/min,30 Nm	77
4-5 ภาพของอุณหภูมิเปลวไฟในห้องเผาไหม้ล่วงหน้าของเชื้อเพลิงดีเซลและดีโซฮอลที่ 2000 rev/min,30 Nm	77
4-6 ภาพของ Soot distributionในห้องเผาไหม้ล่วงหน้าของเชื้อเพลิงดีเซลและดีโซฮอลที่ 2000 rev/min,30 Nm.....	77
4-7 ภาพถ่ายสเปรย์ในห้องเผาไหม้ล่วงหน้าของเชื้อเพลิงดีเซล.....	78
4-8 ภาพถ่ายสเปรย์ในห้องเผาไหม้ล่วงหน้าของเชื้อเพลิงปาล์มดิบดีเซล	79

ภาพประกอบ	หน้า
4-9 ภาพถ่ายภาพเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ล่วงหน้าของเชื้อเพลิงดีเซลและปาล์มดิบดีเซล (a) รอบเดินเบา (b) 2000 rev/min, 30 Nm (c) 2000 rev/min, 50 Nm	80
4-10 ภาพของอุณหภูมิเปลวไฟในห้องเผาไหม้ล่วงหน้าของเชื้อเพลิงดีเซลและ ปาล์มดิบดีเซล.....	81
4-11 ภาพของ Soot distributionในห้องเผาไหม้ล่วงหน้าของเชื้อเพลิงดีเซลและ ปาล์มดิบดีเซล	81
5-1 แสดงเครื่องยนต์ทดสอบสมรรถนะ.....	83
5-2 แสดงการติดตั้งเครื่องยนต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	85
5-3 แสดงแผงหลอดไฟที่ใช้เป็นภาระของเครื่องยนต์.....	86
5-4 แสดงตัวตรวจจับวัดความเร็วรอบ และตำแหน่งการติดตั้ง	86
5-5 แสดงจุดที่ติดตั้งหัววัดเทอร์โมคัปเปิลในถังพักอากาศ.....	87
5-6 แสดงการติดตั้งหัววัดเทอร์โมคัปเปิลที่ปลั๊กถ่ายน้ำหล่อเย็นบริเวณด้านล่างของฝาสูบ	87
5-7 แสดงการติดตั้งหัววัดของเทอร์โมคัปเปิลที่กรองน้ำมันหล่อลื่น	88
5-8 แสดงหัววัดของเทอร์โมคัปเปิลที่ท่อไอเสีย	88
5-9 แสดงตู้แปลงสัญญาณ (Data Logger).....	89
5-10 แสดงอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ Nitech	89
5-11 แสดงอุปกรณ์แปลงสัญญาณเป็นสัญญาณอนาล็อก Primus	90
5-12 แสดงอุปกรณ์วัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง.....	91
5-13 แสดงแผนผังการต่อระบบน้ำมันดีเซลและอุปกรณ์วัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	92
5-14 แสดงแผนผัง (Flow Chart) การทำงานของระบบการวัด อ่าน และบันทึกข้อมูลการวัด ...	93
5-15 แสดงหน้าจอแสดงผลจากการวัดโดยโปรแกรม Innovative Diesel Engine Test	93
5-16 แสดงถังพักอากาศและการติดตั้ง orifice plate	94
5-17 แสดง inclined manometer	94
5-18 แสดงภาพบารอมิเตอร์ (ซ้าย) และเทอร์โมมิเตอร์ (ขวา)	95
5-19 ชุดเครื่องมือวัดค่าวันดำ.....	95
5-20 แสดงภาพไดนาโมมิเตอร์	97
5-21 แสดงภาพตัดขวางภายในของไดนาโมมิเตอร์แบบไฮดรอลิค	97
5-22 แสดง Proximity (ซ้าย) และ Pulse meter (ขวา)	99
5-23 แสดงส่วนประกอบภายในตัวเรือนของ Proximity แบบ inductive	100

ภาพประกอบ	หน้า
5-24 แสดงภาพของ Pressure transducer สำหรับวัดความดันในห้องเผาไหม้.....	102
5-25 แสดงภาพของ Pressure transducer สำหรับวัดความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีด	102
5-26 แสดงตำแหน่งการติดตั้ง Pressure transducer สำหรับวัดความดันในห้องเผาไหม้ และความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีด	103
5-27 เครื่อง DEWETRON	104
5-28 แสดง Amplifier รุ่น SAQP-CHARGE-A.....	105
5-29 แสดง crank angle encoder ยี่ห้อ Kistler รุ่น 2613B	106
5-30 แสดงอุปกรณ์การวัดอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง	107
5-31 แสดงเครื่องยนต์ทดสอบถ่ายภาพห้องเผาไหม้	108
5-32 CCD camera และเลนส์.....	109
5-33 แสดง endoscope แบบที่ต้องการอากาศหล่อเย็น.....	109
5-34 แสดง endoscope แบบมุมมอง 30°	110
5-35 แสดง combustion chamber window ที่ใช้กับ endoscope ที่มีมุมมอง 30°	110
5-36 แสดง Light Unit	111
5-37 แสดงระบบกรองอากาศที่ใช้หล่อเย็น endoscope และปั๊มลม.....	112
5-38 แสดง AVL VisioScope Software	113
5-39 แสดงแผนผังการจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบสมรรถนะ	113
5-40 แผนผังการต่อระบบการถ่ายภาพ	114
5-41 แสดงหม้อต้มที่ใช้ในการทดสอบ.....	115
5-42 แสดงบีกเกอร์ตวงที่ใช้ขนาด 5,000 ml	115
5-43 แสดงกรองเชื้อเพลิงใหม่ (ซ้าย) และกรองเชื้อเพลิงที่อุดตัน (ขวา).....	117
5-44 แสดง matrix ที่ใช้ในการทดสอบเครื่องยนต์.....	120
5-45 แสดงโครงสร้างการบันทึกภาพ.....	122
5-46 การแบ่งพื้นที่เป็น 8 ส่วนเพื่อพิจารณาแนวโน้มของทิศทางการเคลื่อนที่ของเปลวไฟ	124
6-1 เปรียบเทียบผลของแรงบิดเบรก (Brake Torque) และอัตราสิ้นเปลืองพลังงานรวม จำเพาะ (STEC) ที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อน้ำมันดีเซลและ น้ำมันดีเซลทางเลือก	125
6-2 แสดงผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกที่สภาวะภาระ สูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อน้ำมันดีเซล และน้ำมันดีเซลทางเลือก	126

ภาพประกอบ	หน้า
6-3 แสดงผลเปรียบเทียบอุณหภูมิไอเสียที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์ เมื่อนำน้ำมันดีเซลและน้ำมันดีเซลทางเลือก	127
6-4 แสดงผลเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์ เมื่อนำน้ำมันดีเซล และน้ำมันดีเซลทางเลือก.....	128
6-5 แสดงผลเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์ เมื่อนำน้ำมันดีเซล และน้ำมันดีเซลทางเลือก.....	128
6-6 แสดงผลเปรียบเทียบค่าวันดำที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อนำน้ำมันดีเซลและน้ำมันดีเซลทางเลือก	129
6-7 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าอัตราสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ค่าต่างๆ ของเครื่องยนต์เมื่อนำน้ำมันดีเซลและน้ำมันดีเซลทางเลือก	130
6-8 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ค่าต่าง ๆ เมื่อนำน้ำมันดีเซลและน้ำมันดีเซลทางเลือก.....	131
6-9 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิไอเสียที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ค่าต่าง ๆ เมื่อนำน้ำมันดีเซล และน้ำมันดีเซลทางเลือก.....	133
6-10 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่ค่าต่าง ๆ เมื่อนำน้ำมันดีเซล และน้ำมันดีเซลทางเลือก.....	134
6-11 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ค่าต่างๆ เมื่อนำเชื้อเพลิงดีเซล และเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก	135
6-12 แสดงผลเปรียบเทียบค่าวันดำที่สภาวะภาระสูงสุดและที่สภาวะภาระบางส่วนเมื่อนำเชื้อเพลิงดีเซล และเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก	136
6-13 แสดงแผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อนำเชื้อเพลิงดีเซลแสดงค่า contour ของค่าคงที่ Specific Total Energy Consumption หน่วยเป็น MJ/kW-hr	138
6-14 แสดงแผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อนำเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกแสดงค่า contour ของค่าคงที่ Specific Total Energy Consumption หน่วยเป็น MJ/kW-hr.....	138
6-15 แผนภูมิสมรรถนะแสดงค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานเชื้อเพลิงเบรกที่สภาวะภาระบางส่วนของเครื่องยนต์เมื่อนำเชื้อเพลิงดีเซล.....	139
6-16 แผนภูมิสมรรถนะแสดงค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกที่สภาวะภาระบางส่วนของเครื่องยนต์เมื่อนำเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก	140
6-17 แผนภูมิอุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์เมื่อนำเชื้อเพลิงดีเซล.....	141

ภาพประกอบ	หน้า
6-18 แผนภูมิอุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก.....	141
6-19 แผนภูมิอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล	142
6-20 แผนภูมิอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก.....	143
6-21 แผนภูมิอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล	144
6-22 แผนภูมิอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก	144
6-23 (ก)แสดงผลความดันเชื้อเพลิงทางเข้าหัวฉีด ของเชื้อเพลิงดีเซลและเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ที่ 1400 rpm แรงบิด 10, 20 และ 30 Nm	147
6-23 (ข)แสดงผลความดันเชื้อเพลิงทางเข้าหัวฉีด ของเชื้อเพลิงดีเซลและเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ที่ 1800 rpm แรงบิด 10, 20 และ 30 Nm	148
6-23 (ค)แสดงผลความดันเชื้อเพลิงทางเข้าหัวฉีด ของเชื้อเพลิงดีเซลและเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ที่ 2100 rpm แรงบิด 10, 20 และ 30 Nm	149
6-24 (ก)แสดงอัตราการฉีดเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงดีเซล และเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ที่ 1400 rpm ภาระ 10, 20 และ 30 Nm.....	151
6-24 (ข)แสดงอัตราการฉีดเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงดีเซล และเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ที่ 1800 rpm ภาระ 10, 20 และ 30 Nm.....	152
6-24 (ค)แสดงอัตราการฉีดเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงดีเซล และเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ที่ 2100 rpm ภาระ 10, 20 และ 30 Nm.....	153
6-25 (ก)แสดงความดันในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซล และเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ที่ 1400 rpm ภาระ 10,20 และ 30 Nm.....	154
6-25 (ข)แสดงความดันในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซล และเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ที่ 1800 rpm ภาระ 10,20 และ 30 Nm.....	155
6-25 (ค)แสดงความดันในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซล และเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ที่ 2100 rpm ภาระ 10,20 และ 30 Nm.....	156
6-26 (ก)แสดงอัตราการปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงดีเซล และเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ที่ 1400 rpm ภาระ 10,20 และ 30 Nm.....	158
6-26 (ข)แสดงอัตราการปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงดีเซล และเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ที่ 1800 rpm ภาระ 10,20 และ 30 Nm.....	159
6-26 (ค)แสดงอัตราการปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงดีเซล และเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ที่ 2100 rpm ภาระ 10,20 และ 30 Nm.....	160

ภาพประกอบ	หน้า
6-27 (ก)แสดงการปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงดีเซล และเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ที่ 1400 rpm ภาระ 10,20 และ 30 Nm.....	161
6-27 (ข)แสดงการปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงดีเซล และเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ที่ 1800 rpm ภาระ 10,20 และ 30 Nm.....	162
6-27 (ค)แสดงการปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงดีเซล และเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ที่ 2100 rpm ภาระ 10,20 และ 30 Nm.....	163
6-28 (ก)แสดงการปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงดีเซล และเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ที่ 1400 rpm ภาระ 10,20 และ 30 Nm.....	164
6-28 (ข)แสดงการปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงดีเซล และเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ที่ 1800 rpm ภาระ 10,20 และ 30 Nm.....	165
6-28 (ค)แสดงการปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงดีเซล และเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ที่ 2100 rpm ภาระ 10,20 และ 30 Nm.....	166
6-29 แสดงผลัตราการปล่อยความร้อนที่แรงบิด 10 Nm ความเร็วรอบ 1400 rpm, 1800 rpm และ 2100 rpm ของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกและเชื้อเพลิงดีเซล.....	169
6-30 แสดงผลัตราการปล่อยความร้อนที่แรงบิด 20 Nm ความเร็วรอบ 1400 rpm, 1800 rpm และ 2100 rpm ของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกและเชื้อเพลิงดีเซล.....	170
6-31 แสดงผลัตราการปล่อยความร้อนที่แรงบิด 30 Nm ความเร็วรอบ 1400 rpm, 1800 rpm และ 2100 rpm ของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกและเชื้อเพลิงดีเซล.....	171
6-32 แสดงผลการความดันทางเข้าหัวฉีดของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกและเชื้อเพลิงดีเซล ที่ความเร็วรอบ 1100 rpm 1200 rpm ที่แรงบิด 10 Nm	174
6-33 แสดงผลัตราการฉีดเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก และเชื้อเพลิงดีเซล ที่ความเร็วรอบ 1100 rpm และ 1200 rpm แรงบิด 10 Nm	175
6-34 แสดงัตราการปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก และเชื้อเพลิงดีเซล ที่ความเร็วรอบ 1100 rpm และ 1200 rpm แรงบิด 10 Nm	176

สารบัญคำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
A	ค่าคงที่สำหรับรูปร่างหัวฉีด	
(A/F)	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง	kg air / kg fuel
(A/F) _{stoi}	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เผาไหม้สมบูรณ์	kg air / kg fuel
$a(\lambda)$	สัมประสิทธิ์การดูดซับเชิงสเปกตรัม	m^{-1}
A_n	พื้นที่ที่เล็กที่สุดของหัวฉีด	m^2
ASI	หลังจากจุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง	
ATDC	หลังจุดศูนย์ตายบน	
BBDC	ก่อนจุดศูนย์ตายล่าง	
BDC	จุดศูนย์ตายล่าง	
bmep	Brake Mean Effective Pressure	Pa
bsfc	Brake specific fuel consumption	g/kW-hr
BTDC	ก่อนจุดศูนย์ตายบน	
c_1	ค่าคงที่ตัวที่ 1 ของ Planck	Wm^2
c_2	ค่าคงที่ตัวที่ 2 ของ Planck	K.m
C_d	Discharge coefficient ของหัวฉีด	
CI	เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (Compress Ignition)	
c_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่	kJ/kg-K
c_v	ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่	kJ/kg-K
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง	mm
DI	ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง (Direct Injection)	
d_n	Fuel-injection-nozzle orifice diameter	mm
$\frac{dm}{dt}$	อัตราการไหลของมวล	kg/s
$\frac{dQ}{dt}$	อัตราการปล่อยความร้อนสุทธิ	kJ/s
$\frac{dV}{dt}$	อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายในกระบอกสูบ	dm^3/s
EOC	จุดสิ้นสุดการเผาไหม้	$^{\circ}CA$

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
EOI	จุดสิ้นสุดการฉีดเชื้อเพลิง	$^{\circ}\text{CA}$
EP	end point	
FBP	final boiling point	
f MEP	Friction mean effective pressure	Pa
G_{th}	ความเข้มของแถบสีเขียว	W/m^2
H	enthalpy	kJ
HFRR	วิธีทดสอบคุณสมบัติการหล่อลื่น High frequency reciprocating rig	
h_i	Enthalpy ของมวล i ที่เข้าสู่ระบบ	kJ/kg
h_f	Sensible enthalpy ของเชื้อเพลิง	kJ/kg
IBP	initial boiling point	
IDI	ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม (Indirect Injection)	
IHR	integrated heat release	J
$I_{e,\lambda}$	รังสีสเปกตรัม	W/m
$I_{e,\lambda,0}$	เป็นรังสีสเปกตรัมที่จุดเริ่มต้น	W/m
I_N	ระยะยกของวาล์วเข็มในหัวฉีด (injector needle lift)	μm
k	ตัวแปรที่ขึ้นกับความเข้มชั้นเขม่า	
KL factor	ผลคูณของค่า absorption coefficient กับ geometric thickness ของ flame ตาม optical axis	
k_{ks}	KL factor	
k_{opt}	optical correction factor	
$L_{e, meas}$	ค่าการแผ่รังสีที่วัดได้ทั้งหมด	W/m^2
$L_{e,\lambda}$	รังสีสเปกตรัมของตัวทำความร้อนใดๆ	W/m^3
$L_{e,\lambda,Black}$	รังสีของวัตถุดำ	W/m^3
LED	Light Emitting Diode	
LHV	ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง	kJ/kg
L_n	Fuel-injection-nozzle orifice length	mm
L_n/D_n	อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของรูหัวฉีด	

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
m	มวล	kg
\dot{m}_a	อัตราการไหลของมวลอากาศ	kg/s
\dot{m}_i	อัตราการไหลของมวลเข้าไปในระบบผ่านขอบเขตของระบบที่ตำแหน่ง i	kg/s
m_f	มวลของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ต่อ 1 cycle ต่อสูบ	kg/cycle
\dot{m}_{fi}	อัตราการฉีดเชื้อเพลิง	kg/deg
N	ความเร็วรอบของเครื่องยนต์	rev/min
P	ความดันกระบอกสูบ	Pa
P_a	ความดันที่ได้จากการทดสอบซึ่งอัดอากาศโดยไม่มีการฉีด	Pa
P_{amb}	ความดันแวดล้อม	Pa
P_b	กำลังเบรคสุทธิ	kW
PC	Personal Computer	
P_f	ความดันที่ได้จากการทดสอบการเผาไหม้ปกติ	Pa
P_i	ความดันในการฉีด	Pa
Q	ค่าการปล่อยความร้อนสุทธิรวม	kJ
Q_{HV}	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง	kJ/kg
\dot{Q}_n	อัตราการปล่อยความร้อนสุทธิ	kJ/deg
R	ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant)	kJ/kmol-K
RCM	เครื่องอัดความเร็วสูง (Rapid Compression Machine)	
rg_{th}	ค่าความเข้มสัมพัทธ์ของสี่เหลี่ยมต่อสี่แดง	
R_{th}	ความเข้มของแถบสีแดง	W/m^2
R_s	อัตราส่วนอากาศหมุน (swirl ratio)	
R_{th}	ความเข้มของแถบสีแดง	W/m^2
S	ระยะพุ่งของสเปรย์ที่ไม่สัมพันธ์กับอากาศหมุน	m
SOC	จุดเริ่มต้นการเผาไหม้	$^{\circ}CA$
SOI	จุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง	$^{\circ}CA$

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
S_s	ระยะพุ่งของสเปรย์ที่สัมพันธ์กับอากาศหมุน	m
t	เวลา	s
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์	K
TDC	จุดศูนย์ตายบน	
T_b	แรงบิดเบรกสุทธิ	Nm
T_g	อุณหภูมิก๊าซ	K
U	พลังงานภายใน	kJ
UHC	ไฮโดรคาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้ (Unburned Hydrocarbon)	
V	ปริมาตร	m^3
V_d	Displacement Volume	dm^3
v_j	ความเร็วลำเชื้อเพลิงเริ่มต้น	m/s
X_b	สัดส่วนของมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้	
α	Absorptivity	
ϵ	Emissivity	
ϕ	อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง/อากาศ	
$^{\circ}CA$	มุมข้อเหวี่ยง	
ΔP	ความดันที่ตกคร่อมหัวฉีด	Pa
θ	องศาเพลลาข้อเหวี่ยง	deg
θ	Spray angle	deg
θ_{start}	องศาเพลลาข้อเหวี่ยงที่เริ่มฉีดเชื้อเพลิง	$^{\circ}CA$
θ_{end}	องศาเพลลาข้อเหวี่ยงที่สิ้นสุดการฉีดเชื้อเพลิง	$^{\circ}CA$
η_i	ประสิทธิภาพปั๊มเชื้อ	
η_{ii}	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนปั๊มเชื้อ	
η_c	ประสิทธิภาพเชิงวัฏจักร	
η_{bt}	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก	
η_m	ประสิทธิภาพเชิงกล	
η_{fb}	ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรก	

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
η_v	ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร	
λ	ความยาวคลื่น	nm
ρ	Reflectance	
ρ_g	ความหนาแน่นก๊าซ	kg/m ³
ρ_l	ความหนาแน่นของเหลว	kg/m ³
$\rho_{a,i}$	ความหนาแน่นของอากาศที่ไหลเข้าเครื่องยนต์	kg/m ³
ρ_f	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง	kg/m ³
γ	อัตราส่วนค่าความจุความร้อนจำเพาะ	
τ	Transmissivity	
τ_i	illumination delay	ms
τ_p	pressure recovery delay	ms
$\tau_s(\lambda)$	ค่า Transmissivity ที่ทราบค่า ณ ความยาวคลื่น λ	
τ_R	spectral sensitivity สีแดงของกล้อง	
τ_G	spectral sensitivity สีเขียวของกล้อง	
ω	ความเร็วเชิงมุม	rad/s