

การศึกษาแนวทางที่เหมาะสมในการใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลระบบเชื้อเพลิงคู่



นายกริชชัย คชพลายุกต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2981-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE STUDY OF USING BIOGAS IN A DUAL-FUEL DIESEL ENGINE

Mr. Kritchai Cojchaplayuk

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

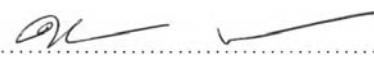
Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-53-2981-9

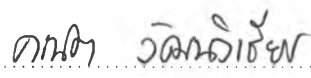
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาแนวทางที่เหมาะสมในการใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงใน เครื่องยนต์ดีเซลระบบเชื้อเพลิงคู่
โดย	นายกริชชัย คชพลายุกต์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิต วัฒนวิเชียร

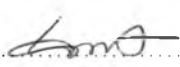
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

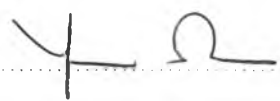

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

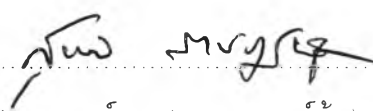
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สถาพร สุปรีชากร)


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


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฉัตรชัย หงษ์อุเทน)


..... กรรมการ
(ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ราชภูมิคุ้ม)

นายกรีชชัย คชพลายุกต์ : การศึกษาแนวทางที่เหมาะสมในการใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลระบบเชื้อเพลิงคู่. (THE STUDY OF USING BIOGAS IN A DUAL-FUEL DIESEL ENGINE) อ.ที่ปรึกษา:ผศ.ดร.คณิต วัฒนวิเชียร, 287 หน้า. ISBN 974-53-2981-9

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางที่เหมาะสมในการใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงคู่ (ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ) กับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้า (KUBOTA RT 120) รวมไปถึงนำเสนอผลกระทบต่างๆ ต่อเครื่องยนต์ โดยแบ่งการทดสอบเป็น 3 ส่วนคือ หนึ่งการออกแบบมิกเซอร์ผสมก๊าซชีวภาพกับอากาศเพื่อสามารถใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงคู่ให้กับเครื่องยนต์ได้ สองวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วนคือที่สภาวะภาระสูงสุดและที่ภาระบางส่วน และสามวิเคราะห์ผลกระทบต่อเครื่องยนต์เมื่อใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงคู่ต่อเนื่องระยะยาว

จากผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลพบว่าสามารถใช้มิกเซอร์เป็นอุปกรณ์ผสมชีวภาพกับอากาศเพื่อเป็นเชื้อเพลิงคู่ให้กับเครื่องยนต์ทำงานตามจุดทดสอบที่กำหนดได้ ซึ่งพบว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพสามารถให้แรงบิดเบรกสูงสุดเทียบเท่ากับเมื่อใช้น้ำมันดีเซลในทุกลูกสูบ โดยสามารถแทนที่น้ำมันดีเซลได้ 36-95 เปอร์เซ็นต์แต่อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพที่แรงบิดเบรกต่ำมีค่าสูงกว่า เมื่อใช้น้ำมันดีเซล 50- 93 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลต่างจะลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับการใช้ดีเซลเมื่อแรงบิดเบรกมีค่าเพิ่มขึ้นจนเข้าใกล้ค่าที่แรงบิดเบรกสูงสุด และที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาทีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพมีค่าต่ำกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลเล็กน้อย ค่าอัตราส่วนสมมูลที่แรงบิดเบรกต่ำเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพมีค่าสูงกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลประมาณ 0.2-0.3 และลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกันที่แรงบิดเบรกสูงที่สุด อุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพมีค่าใกล้เคียงกับเมื่อใช้น้ำมันดีเซลที่แรงบิดเบรกต่ำ และต่ำกว่าดีเซลเมื่อแรงบิดเบรกสูงขึ้น โดยต่ำกว่าประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ที่ภาระสูงสุดของความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาทีและต่ำกว่าประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ที่ภาระสูงสุดของความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นและน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพมีค่าสูงกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์ในทุกจุดการทำงาน จากการวิเคราะห์ผลกระทบต่อเครื่องยนต์เมื่อใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงคู่ต่อเนื่องพบว่า ที่ภาระสูงสุดของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที เกิดปัญหาด้านภาระทางความร้อนก่อให้เกิดความเสียหายกับฝาสูบและลูกสูบ เนื่องจากเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้มีค่าสูงกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซล ถึงแม้ว่าอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นและน้ำหล่อเย็นจะเพิ่มขึ้นเพียง 1-3 เปอร์เซ็นต์(1-3 องศาเซลเซียส) ก็ตาม เมื่อลดภาระลงที่ 6.7 กิโลวัตต์ซึ่งเป็นภาระที่เครื่องยนต์สามารถทำงานต่อเนื่องได้อย่างปกติ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงซึ่งเป็นผลทำให้อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นลดลงในช่วงการทดสอบการทดสอบความทนทาน เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพพบว่าปริมาณโลหะในน้ำมันหล่อลื่นสูงกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซล โดยเฉพาะโครเมียม (ซึ่งเป็นส่วนประกอบของแหวนลูกสูบ) และอลูมิเนียม (ซึ่งเป็นส่วนประกอบของลูกสูบ) ซึ่งสอดคล้องกับผลการชั่งน้ำหนักของชิ้นส่วนทั้งสอง

สรุปคือสามารถนำก๊าซชีวภาพมาใช้เป็นเชื้อเพลิงคู่ให้กับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้าได้ แต่ควรหลีกเลี่ยงช่วงการทำงานที่ภาระ 90- 100 เปอร์เซ็นต์ของภาระสูงสุดที่ความเร็วรอบ 2000 และ2400 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นภาระที่ก่อให้เกิดความเสียหายเมื่อใช้งานต่อเนื่อง โดยมีจุดทำงานที่เหมาะสมที่สุดที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาที เนื่องจากที่ภาระใช้งานส่วนใหญ่พบว่าความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาทีมีต้นทุนค่าเชื้อเพลิงต่ำที่สุดซึ่งสามารถลดลงได้ร้อยละ 42-68 เมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซล

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2548.....

4570205421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: BIOGAS / DUAL FUEL / PERFORMANCE / DURABILITY / SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION / DIESEL REPLACEMENT

KRITCHAI COJCHAPLAYUK : THE STUDY OF USING BIOGAS IN A DUAL-FUEL DIESEL ENGINE. THESIS ADVISOR :

ASSIST. PROF. KANIT WATTANAVICHIEEN, Ph.D., 287 pp. ISBN: 974-53-2981-9

In this research, the use of biogas in a dual-fuel diesel engine (which released energy in its operating cycle comes from two fuels) was studied in order to evaluate effects of the biogas-diesel dual fuel operation on a single-cylinder, small indirect injection diesel engine KUBOTA RT120. The research could be divided into three parts: First, to design the gas mixture for mixing biogas and air. Second, to study the engine performance at full load and part load conditions. And third, to investigate engine durability when it is operated with dual fuel.

With the designed gas mixer, the engine could operated with biogas dual fuel mode and could obtained the same maximum torque as diesel fuel at every engine speeds. The bio-gas could be replaced the diesel fuel around 36-39% but the specific energy consumption at low corrected brake torque was found higher than the use of diesel about 50-93%. As the engine was operated close to maximum brake torque (excepted at engine speed 1800 rev/min) the specific energy consumption of dual-fuel was slightly lower than diesel. Air/Fuel equivalence ratio of used dual-fuel was higher than with diesel around 0.2-0.3% at close to low and high brake torque. At all test points and engine speeds, dual-fuel's exhaust gas temperature were lower than diesel. The exhaust temperature were close to diesel at low brake torque but at high break torque the exhaust temperature was higher around 45% at engine speed 1000 rev/min and 5% at 2400 rev/min. The temperature of lubricant oil and cooling water were also higher compared with the use of diesel fuel around 1-3%.

The biogas dual fuel engine durability test at engine speed of 2400 rev/min showed that with high thermal load the engine parts (cylinder and piston) were damaged even though lubricant oil and cooling water temperature were higher than diesel only 1-3 °C. Therefore, test maximum engine load was decreased to 6.7 kW that the engine was smoothly and continuously operated. In this durability test, the lubricant oil consumption was high that caused the decreasing of lubricant oil temperature. The metal in lubricant oil was higher compared to diesel operation especially chromium (material of piston ring) and aluminium (material of piston). The results agreed well with the result of weight loss on both parts.

The study could be concluded that using of biogas in a dual-fuel small IDI diesel engine should not be operated at engine operation range of 90-100% maximum load at engine speed of 2000 and 2400 rev/min which the engine damage could be occurred. The best operating point of biogas dual fuel engine is around 1800 rev/min because it was the optimum point of fuel cost which could reduce diesel fuel consumption around 42-68%.

Department...Mechanical Engineering..... Student's signature.....*Kritchai Cojchaplak*
 Field of study...Mechanical Engineering..... Advisor's signature...*Kanit Wattanavichien*
 Academic year.....2005.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิต วัฒนวิเชียร อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่
ให้คำแนะนำ ร่วมติดตามการทดสอบอย่างใกล้ชิดในทุกขั้นตอนจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง
ไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัทสยามคูโบต้าอุตสาหกรรม จำกัด ที่เอื้อเฟื้ออะไหล่และให้คำแนะนำ
เกี่ยวกับเครื่องยนต์ที่ใช้ในงานวิจัย คุณธนันต์ สิริสิทธิโชติ ผู้จัดการใหญ่ บริษัท โฟคัสแลบบอรา
ทอรีส์ จำกัด ที่สละเวลาในการให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาในข้อมูลเกี่ยวกับการวิเคราะห์
น้ำมันหล่อลื่นตลอดจนอำนวยความสะดวกระหว่างการตรวจวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่น, คุณ สมชาย
นิติกาญจนา เจ้าของฟาร์มสุกร SPM FARM ที่ได้ให้ความกรุณาอำนวยความสะดวกสถานที่พัก
และแหล่งก๊าซชีวภาพ

ขอขอบคุณ คุณธิดารัตน์ ธีระกุลชัยกิจ, คุณพิชญ์ ปริญญาจารย์, คุณเยาวลักษณ์
ถมปัทม์, Mr. Phan Minh Duc, คุณกาญจน์ ร่มพล, จักรกฤษ ตั้งรัตนโสภณ, สุพิชญ์ ไตรภพภูมิ,
มนตรี สี่พยัคฆ์, สุวิษ คำแฝด, พงศธร บวรสิน และ ป๊อปป รุ่งน้องที่ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์
สันดาปภายในทุกคนที่ช่วยติดตั้งเครื่องยนต์และทำการทดสอบเครื่องยนต์และให้การช่วยเหลือ
อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการงานวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำตีปฏิบัติการภาควิชา
วิศวกรรมเครื่องกลที่ช่วยให้คำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ที่
ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ให้ผู้วิจัยยืมเครื่องมือและช่วยเหลือในด้าน
ต่างๆ

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้กำลังใจและความรักรวมไปถึงการ
สนับสนุนทางด้านทุนทรัพย์ และคำปรึกษา ตลอดเสมอมาจนผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ถ
สารบัญคำย่อและสัญลักษณ์.....	ม
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.5 คำจำกัดความที่ใช้.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีเครื่องยนต์ CI และเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่.....	4
2.1 ทฤษฎีเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด CI (Compression Ignition Engine).....	4
2.1.1 แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง (Direct-Injection or DI Systems).....	4
2.1.2 แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม (Indirect-Injection or IDI Systems).....	4
2.2 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด.....	5
2.3 การเผาไหม้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดระบบเชื้อเพลิงคู่.....	7
2.3.1 ผลของการใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่เปรียบเทียบกับใช้น้ำมันดีเซลปกติในเครื่องยนต์แบบ Indirect Injection.....	8
2.3.1.1 กระบวนการในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซล.....	8
2.3.1.2 กระบวนการเผาไหม้ของระบบเชื้อเพลิงคู่.....	9
2.3.1.3 ค่าอัตราการผลิตพลังงานเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (bsfc).....	10

บทที่ 2 ทฤษฎีเครื่องยนต์ CI และเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่(ต่อ)	
2.4 สรุปการใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่เทียบกับการใช้เครื่องยนต์ดีเซลแบบ Indirect Injection	12
2.5 การเกิดน็อกในเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่	12
2.6 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้กำหนดสมรรถนะของเครื่องยนต์.....	14
บทที่ 3 ทฤษฎีระบบจ่ายเชื้อเพลิงที่ใช้มิกเซอร์ (Mixer) และอุปกรณ์วัดอัตราการไหล	
ของก๊าซชีวภาพ (Orifice Flow Meter).....	17
3.1 การคำนวณปริมาณการไหลในท่อเวนจูรีและมิกเซอร์	17
3.1.1 สัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล	17
3.1.2 การไหลผ่านท่อเวนจูรี	18
3.1.3 การไหลผ่าน orifice ของเชื้อเพลิง.....	21
3.1.4 สมรรถนะของคาร์บูเรเตอร์แบบพื้นฐาน.....	21
3.1.5 การประมาณค่าของ discharge coefficient	22
3.2 การคำนวณหาขนาด Mixer.....	23
3.3 มาตรฐานและการออกแบบอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ	29
3.3.1 มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ	29
3.3.2 ข้อกำหนดเบื้องต้นของมาตรฐาน.....	30
3.3.2.1 ข้อกำหนดทั่วไป.....	30
3.3.2.2 ข้อกำหนดในการออกแบบ.....	30
3.2.2.2.1 Corner Tap.....	30
3.2.2.2.2 Flange Tap.....	31
3.2.2.2.3 Orifice plate	32
3.3.3 สมการที่ใช้และวิธีการออกแบบ	33
บทที่ 4 คุณสมบัติเชื้อเพลิง, สารหล่อลื่น และทบทวนวรรณกรรม	36
4.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซล	36
4.1.1 เลขซีเทน (Cetane Number, CN)	36
4.1.2 ค่าการระเหย (Volatility)	36
4.1.3 ความหนาแน่น (Density).....	38

บทที่ 4 คุณสมบัติเชื้อเพลิง, สารหล่อลื่น และทบทวนวรรณกรรม (ต่อ)	
4.1.4 ความหนืด (Viscosity).....	38
4.1.5 คุณสมบัติการหล่อลื่น (Lubricity)	39
4.1.6 คุณสมบัติที่อุณหภูมิต่ำของเชื้อเพลิงดีเซล.....	39
4.1.7 เสถียรภาพของเชื้อเพลิงดีเซล.....	39
4.1.8 ปริมาณซัลเฟอร์ (Sulphur Content).....	40
4.1.9 ปริมาณอะโรมาติก (Aromatic Content).....	40
4.1.10 ปริมาณน้ำและตะกอน (Water and Sediment Content)	41
4.1.11 จุดวาบไฟ (Flash Point)	41
4.2 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)	41
4.2.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของก๊าซชีวภาพ.....	42
4.2.2 Flame Velocities.....	43
4.2.3 Flammability Limit	43
4.2.4 Flame Temperature	44
4.2.5 Fuel Energy Value.....	45
4.2.6 Fuel Mixture	47
4.2.7 Water Vapor	48
4.2.8 Hydrogen Sulphide (H ₂ S)	48
4.3 การเสื่อมสภาพของเครื่องจักร	49
4.3.1 ประเภทของการเสื่อมสภาพ	49
4.3.1.1 การเสื่อมสภาพตามเวลา (Time dependent degradation).....	49
4.3.1.2 การเสื่อมสภาพที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Time independent degradation) .	50
4.3.2 การจำแนกกลไกการสึกหรอ.....	51
4.3.2.1 กลไกการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear)	52
4.3.2.2 กลไกการสึกหรอแบบขูดขีด (Abrasive wear)	53
4.3.2.3 กลไกการสึกหรอจากการล้าตัวของวัสดุ (Fatigue wear)	54
4.3.2.4 กลไกการสึกหรอแบบปฏิกิริยาไทรโบเคมี (Tribochemical reaction)	54

บทที่ 4 คุณสมบัติเชื้อเพลิง, สารหล่อลื่น และทบทวนวรรณกรรม (ต่อ)	
4.4 สารหล่อลื่น	55
4.4.1 คุณสมบัติที่สำคัญของสารหล่อลื่น.....	56
4.4.1.1 ความหนืด (Viscosity).....	56
4.4.1.2 การต่อต้านการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation resistance)	57
4.5 การวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว.....	58
4.5.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจากเครื่องยนต์.....	58
4.5.1.1 การสุ่มตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์.....	58
4.5.1.2 วิธีการตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้น	58
4.5.1.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ	58
4.5.2 การทดสอบหาค่าความหนืด.....	59
4.5.3 ค่าตัวเลขความเป็นด่างรวม (TBN)	60
4.5.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปคโตรมิเตอร์	60
4.5.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีเฟอร์โรกราฟี (Ferrography).....	61
4.5.5.1 การวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอ (Wear Particle Analysis).....	63
4.5.5.2 การศึกษาอนุภาคการสึกหรอเชิงจุลภาค (Wear Particle Microscopic Examination)	63
4.5.5.3 ชนิดของอนุภาคการสึกหรอ.....	64
4.5.6 การวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy).....	69
4.6 งานวิจัยเกี่ยวกับการนำก๊าซชีวภาพมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลในระบบเชื้อเพลิงคู่.....	72
4.6.1 ผลกระทบของสัดส่วนระหว่างก๊าซชีวภาพกับน้ำมันดีเซล	73
4.6.2 ผลกระทบของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	73
บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย	74
5.1 อุปกรณ์และการติดตั้งสำหรับการดำเนินงานวิจัย.....	74
5.1.1 เครื่องยนต์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	74
5.1.2 อุปกรณ์สร้างภาระให้กับเครื่องยนต์	76
5.1.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)	76

บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย (ต่อ)

5.1.2.2 Pulley และสายพาน	76
5.1.2.3 แผงหลอดไฟ (Lamps load)	78
5.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบก๊าซชีวภาพ	78
5.1.3.1 บ่อหมักก๊าซชีวภาพ	78
5.1.3.2 เกจวัดความดันก๊าซชีวภาพ(Pressure gauge)	79
5.1.3.3 เรกกูเลเตอร์ (Regulator)	80
5.1.3.4 วาล์วปรับอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ	80
5.1.3.5 อุปกรณ์ผสมก๊าซชีวภาพกับอากาศหรือมิกเซอร์ (Mixer).....	81
5.1.4 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล	82
5.1.4.1 อุปกรณ์การวัดอัตราการไหลของอากาศ.....	82
5.1.4.2 อุปกรณ์การวัดอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ	82
5.1.4.3 มานอมิเตอร์แบบเอียง (Incline manometer).....	83
5.1.5 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบและอุณหภูมิต่างๆ	84
5.1.5.1 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ.....	84
5.1.5.2 การวัดอุณหภูมิไอเสีย	84
5.1.5.3 การวัดอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น	85
5.1.5.4 การวัดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น.....	85
5.1.5.5 การวัดอุณหภูมิก๊าซชีวภาพ	86
5.1.5.6 การวัดอุณหภูมิอากาศ.....	86
5.1.6 อุปกรณ์วัดกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้า.....	87
5.1.6.1 อุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (Current Transformer).....	87
5.1.6.2 อุปกรณ์วัดความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage Transmitter)	87
5.1.7 อุปกรณ์การวัดสภาวะบรรยากาศ	88
5.1.8 ระบบน้ำมันดีเซล.....	88
5.1.8.1 การวัดอัตราการบริโภคน้ำมันดีเซล	88
5.1.9 เครื่องวัดควันดำ	90
5.1.10 อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำหล่อเย็นที่ระบายจากหม้อน้ำรังผึ้ง.....	91
5.1.11 อุปกรณ์รับและแปลงสัญญาณ.....	91

บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย (ต่อ)	
5.1.11.1 อุปกรณ์แปลงสัญญาณเป็นสัญญาณอนาล็อก (Transmitter)	92
5.1.11.2 อุปกรณ์แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ไอซี).....	93
5.1.12 อุปกรณ์การสูดตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น.....	94
5.2 ขั้นตอนวิธีการดำเนินการวิจัย	95
5.2.1 อธิบายแผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	95
5.2.2 อธิบายรายละเอียดการทดสอบแต่ละขั้นตอน	96
5.2.2.1 การทดสอบสมรรถนะที่ภาระสูงสุด (Full Load Test)	96
5.2.2.2 การทดสอบสมรรถนะที่ภาระบางส่วน (Performance Test at Part Load).....	97
5.2.2.3 การ RUN IN	99
5.2.2.4 การทดสอบความทนทาน (Durability Test)	100
5.2.2.5 การสูดตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น	102
บทที่ 6 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	104
6.1 ผลการทดสอบสมรรถนะ	104
6.1.1 ผลของแรงบิดเบรกแก้ไข (Corrected Brake Torque) กับอัตราสิ้นเปลือง เชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (bsfc) ที่สภาวะภาระสูงสุด	104
6.1.2 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงรวมจำเพาะ (Specific Total Energy Conversion Efficiency) ที่สภาวะภาระสูงสุด	106
6.1.3 อุณหภูมิไอเสียที่สภาวะภาระสูงสุด.....	110
6.1.4 อุณหภูมิหล่อเย็นและอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น.....	111
6.1.5 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่ความเร็วรอบคงที่.....	113
6.1.6 แผนภูมิสมรรถนะ (Performance Map)	114
6.1.7 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและอัตราส่วนการแทนที่น้ำมันดีเซลที่สภาวะ ความเร็วรอบคงที่	116
6.1.8 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและค่าร้อยละของอัตราส่วนการแทนที่ น้ำมันดีเซลที่สภาวะภาระบางส่วน	117

บทที่ 6 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล (ต่อ)

6.1.9 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงร่วมจำเพาะที่สภาวะ ความเร็วรอบคงที่	119
6.1.10 แผนภูมิประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงร่วมจำเพาะ	121
6.1.11 ค่าอัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงกับอากาศที่สภาวะความเร็วรอบคงที่.....	122
6.1.12 แผนภูมิอัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงกับอากาศ	123
6.1.13 อุณหภูมิไอเสียที่สภาวะความเร็วรอบคงที่	125
6.1.14 แผนภูมิอุณหภูมิไอเสีย.....	126
6.1.15 อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่สภาวะความเร็วรอบคงที่	127
6.1.16 แผนภูมิอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น	128
6.1.17 ต้นทุนเชื้อเพลิงที่ลดลงเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพเปรียบเทียบกับ น้ำมันดีเซล	130
6.2 ผลการทดสอบความทนทาน	141
6.2.1 ค่ากำลังไฟฟ้า	141
6.2.2 อุณหภูมิไอเสีย	144
6.2.3 อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น	145
6.2.4 ปริมาณการสิ้นเปลืองน้ำมันหล่อลื่น.....	147
6.3 ผลการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่น	148
6.3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นและปริมาณการปนเปื้อน.....	149
6.3.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะจากการสึกหรอ	153
6.3.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารเติมแต่ง.....	158
6.4 ผลการตรวจพินิจชิ้นส่วน.....	160
6.4.1 แบริ่งก้านสูบ	161
6.4.2 ลูกสูบ	163
6.4.3 ผนังกระบอกสูบ	167
6.4.4 ฝาสูบ	169
6.4.5 บ่าวาล์วไอดีและบ่าวาล์วไอเสียที่ฝาสูบ.....	170
6.4.6 วาล์วไอดีและวาล์วไอเสีย.....	173

บทที่ 6 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล (ต่อ)	
6.4.7 หัวฉีด	176
6.5 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบ	
ความทนทาน	178
6.6 การทดสอบค่าควันทา.....	181
บทที่ 7 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	182
7.1 สรุปผล	182
7.1.1 เปรียบเทียบผลระหว่างการใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	
กับน้ำมันดีเซลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์.....	182
7.1.2 เปรียบเทียบผลจากการใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงคู่ มาใช้ในเครื่องยนต์อย่างต่อเนื่องภายใต้ภาวะจำลอง	183
7.1.3 ผลการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่น.....	183
7.1.4 ผลการพินิจชิ้นส่วน.....	183
7.1.5 ผลการชั่งน้ำหนักชิ้นส่วน.....	184
7.1.6 ผลความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์.....	184
7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ.....	184
7.3 ข้อเสนอแนะ.....	185
7.4 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อเนื่อง.....	186
รายการอ้างอิง	187
บรรณานุกรม	191
ภาคผนวก	193
ภาคผนวก ก มาตรฐาน ISO 2046 ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ.....	194
ภาคผนวก ข การวัดอัตราการไหลของอากาศ.....	210
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	212
ภาคผนวก ง ข้อมูลก๊าซชีวภาพ.....	217
ภาคผนวก จ ข้อมูลผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซล	
และใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	221
ภาคผนวก ฉ ตัวอย่างข้อมูลการทดสอบความทนทาน.....	242
ภาคผนวก ช ข้อมูลผลการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่น.....	273

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 287

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4-1 แสดงส่วนประกอบและคุณสมบัติบางประการของ Biogas (Biogas ที่ $\text{CH}_4 \approx 65\%$, $\text{CO}_2 \approx 35\%$)	42
4-2 แสดงปริมาณค่าความร้อนของก๊าซชนิดต่างๆ	46
4-3 แสดงปริมาณค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ.....	46
4-4 แสดงคุณสมบัติของอนุภาคการสีกหรือจากวัสดุชนิดอื่นๆ ที่ไม่ใช่โลหะ และ อโลหะอสังฐาน	69
5-1 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ	75
5-2 แสดงรายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	76
5-3 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ Pulleys ตามอัตรารอบที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	77
5-4 แสดงรายละเอียดของเรกกูเลเตอร์	80
5-5 แสดงจักรของการ Run In.....	99
5-6 แสดงหนึ่งวัฏจักรของการทดสอบความทนทาน.....	100
5-7 แสดงรายละเอียดวัฏจักรการทดสอบความทนทานและการสูดตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น..	103
6-1 แสดงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซล (L/hr.) ของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซล	131
6-2 แสดงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซล (L/hr.) ของเครื่องยนต์ เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	132
6-3 แสดงอัตราการสิ้นเปลืองก๊าซชีวภาพ ($\text{m}^3/\text{hr.}$)ของเครื่องยนต์ เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	133
6-4 แสดงต้นทุนค่าเชื้อเพลิง (Baht/hr.) ของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซล	134
6-5 แสดงต้นทุนค่าเชื้อเพลิง (Baht/hr.) ของเครื่องยนต์ เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	135
6-6 แสดงต้นทุนค่าเชื้อเพลิงที่ลดลง (Baht/hr.) ของเครื่องยนต์ เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	136
6-7 แสดงเปอร์เซ็นต์ของราคาค่าเชื้อเพลิงที่ลดลง (Baht/hr.)ของเครื่องยนต์ เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	137
6-8 แสดงค่าระดับการเตือนที่พบระหว่างการทดสอบความทนทาน 242 ชั่วโมง แสดงช่วงการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น ค่า C-Caution และค่า A-Abnormal	156
6-9 แสดงวัฏจักรการทดสอบความทนทานของเครื่องยนต์คูโบต้า ET 115 โดยใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง	161

ตาราง	หน้า
6-10 แสดงข้อมูลความดันที่ใช้ในการฉีดเชื้อเพลิง	178
6-11 แสดงผลการชั่งน้ำหนักแบ็งก์น้ำมันเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	178
6-12 แสดงผลการชั่งน้ำหนักของวาล์วไอดีและวาล์วไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ.....	179
6-13 แสดงผลการชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนในเครื่องยนต์.....	179
6-14 แสดงผลการชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนหัวฉีด.....	179
6-15 แสดงผลการชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนปั๊มเชื้อเพลิง	180
ก-1 Numerical values for power adjustment.....	204
ข-1 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของออร์ฟิชโดยประมาณที่อัตราการไหลต่างๆ	209
ค-1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเจเนเนอเรเตอร์.....	213
จ-1 แสดงตารางทดสอบสมรรถนะที่ ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที สำหรับเชื้อเพลิงดีเซล.....	222
จ-2 แสดงตารางทดสอบสมรรถนะที่ ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที สำหรับเชื้อเพลิงดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ.....	223
จ-3 แสดงตารางทดสอบสมรรถนะที่ ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที สำหรับเชื้อเพลิงดีเซล.....	224
จ-4 แสดงตารางทดสอบสมรรถนะที่ ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที สำหรับเชื้อเพลิงดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ.....	225
จ-5 แสดงตารางทดสอบสมรรถนะที่ ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที สำหรับเชื้อเพลิงดีเซล.....	226
จ-6 แสดงตารางทดสอบสมรรถนะที่ ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที สำหรับเชื้อเพลิงดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ.....	228
จ-7 แสดงตารางทดสอบสมรรถนะที่ ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาที สำหรับเชื้อเพลิงดีเซล.....	230
จ-8 แสดงตารางทดสอบสมรรถนะที่ ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาที สำหรับเชื้อเพลิงดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ.....	232
จ-9 แสดงตารางทดสอบสมรรถนะที่ ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที สำหรับเชื้อเพลิงดีเซล.....	234

ตาราง	หน้า
จ-10 แสดงตารางทดสอบสมรรถนะที่ ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที สำหรับเชื้อเพลิงดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ.....	236
จ-11 แสดงตารางทดสอบสมรรถนะที่ ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที สำหรับเชื้อเพลิงดีเซล.....	238
จ-12 แสดงตารางทดสอบสมรรถนะที่ ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที สำหรับเชื้อเพลิงดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ.....	240
ฉ-1 แสดงตัวอย่างของข้อมูลการทดสอบความทานวันที่ 19 มี.ค. 2549	243

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2-1 แสดงอัตราการปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซล แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงและช่วงต่างๆ ของการเผาไหม้ (SOI:Start of injection, EOI:End of injection)	5
2-2 แสดงอัตราการฉีดเชื้อเพลิงและอัตราการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล 3 แบบ	7
2-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับองศาข้อเหวี่ยงภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล	8
2-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับองศาข้อเหวี่ยงภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่	9
2-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง bsfc และ η th กับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ภาระต่างๆ a) 1/4 load b) half load c) full load	10
2-6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent ratio กับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ภาระต่างๆ a) half load b) full load	11
2-7 แสดงบริเวณการกระจายตัวของน้ำมันที่ถูกฉีดเข้ามาผสมกับก๊าซ	12
2-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับมุมเพลลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่เมื่อเกิดการน็อค	13
3-1 ผังการไหลของของเหลวผ่านออริฟิซ	18
3-2 ความดันที่เกิดในคอคออดระหว่างก๊าซในอุดมคติกับก๊าซที่เกิดขึ้นจริง	19
3-3 ค่าของผลของการยุบตัวที่มีต่ออัตราการไหลของมวล	20
3-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่ลดลงที่คอคออดเทียบกับอัตราส่วนสมมูล	22
3-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์เพื่อประมาณสมการของ C_{DA} และ C_{DF}	22
3-6 โมเดลจำลองแบบ Mixer	23
3-7 กราฟแสดงค่าของ $\frac{P_T}{P_i}$ ที่ขนาดของคอคออดต่างๆ ที่ความเร็ว 2000 rpm	25
3-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความดันกับความเร็วรอบที่ขนาดคอคออดต่างๆ	26
3-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของ orifice กับขนาดคอคออดต่างๆตามปริมาณก๊าซชีวภาพที่ต้องการ	27
3-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ orifice กับจำนวนรูออริฟิซในขนาดคอคออดต่างๆตามปริมาณก๊าซชีวภาพที่ต้องการ	28
3-11 กราฟแสดงค่าของ m_f เทียบกับความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่ขนาดของคอคออด 0.03 m....	28
3-12 รูปและขนาดของ Venturi mixer ที่ใช้ในการทดสอบ	29

ภาพประกอบ	หน้า
3-13 ลักษณะและการติดตั้ง Orifice แบบ Corner Tap	31
3-14 ลักษณะและการติดตั้ง Orifice แบบ Flange Tap	32
3-15 ลักษณะและตัวแปรต่างๆ ของ Orifice plate.....	33
3-16 ลักษณะและตัวแปรต่างๆ ของหน้าแปลน Orifice plate	35
3-17 ลักษณะและตัวแปรต่างๆ ของ Orifice plate.....	35
4-1 โค้งการกลั่น(Distillation curve) ของเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป	37
4-2 แสดง Flame Velocities ที่เปอร์เซ็นต์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และส่วนผสมกับ อากาศที่ต่างๆ กัน	43
4-3 แสดง UEL กับ LEL ของ Flammability Limit ที่เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนและปริมาณ ไอน้ำในก๊าซชีวภาพต่างกัน	44
4-4 แสดง Flame Temperature ที่เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนและปริมาณไอน้ำในก๊าซ ชีวภาพต่างกัน	45
4-5 แสดง low heating value ที่เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนและปริมาณไอน้ำในก๊าซชีวภาพ ต่างกัน	47
4-6 แสดง Air-to-Fuel Ratio ที่เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนและปริมาณไอน้ำในก๊าซชีวภาพ ต่างกัน	48
4-7 กราฟแสดงการเสื่อมสภาพตามเวลา	49
4-8 กราฟแสดงการเสื่อมสภาพที่ไม่ขึ้นกับเวลา.....	50
4-9 แสดงกลไกการสึกหรอแบบต่างๆ	51
4-10 แสดงพื้นผิวที่แท้จริงในระดับจุลภาค	52
4-11 แสดงลักษณะการสึกหรอแบบยึดติด	53
4-12 แสดงลักษณะการสึกหรอแบบขูดขีด	53
4-13 แสดงการสึกหรอแบบปฏิกิริยาไทรโบเคมี (Tribocchemical reaction)	55
4-14 ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นกับการใช้งาน.....	56
4-15 แสดงเครื่องมือวัดความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น (ASTM D-445).....	59
4-16 แสดงกระบวนการเฟอโรกราฟี	61
4-17 แสดงแผ่นสไลด์ที่ใช้ในกระบวนการเฟอโรแกรม	62
4-18 แสดงอนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการเสียดสีกันของโลหะกับโลหะ.....	64
4-19 แสดงอนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการเสียดสมดุลงในเครื่องจักร (Severe Sliding Wear Particle)	65

ภาพประกอบ	หน้า
4-20 แสดงอนุภาคการสึกหรอแบบ Cutting Wear.....	65
4-21 แสดงอนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการล้าบนเฟือง (Gear Fatigue Particle)	66
4-22 แสดงอนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการล้าตัวของวัสดุ (Rolling Fatigue Wear Particle)	67
4-23 แสดงอนุภาคการสึกหรอของทองแดง.....	68
4-24 แสดงปริมาณการดูดซับรังสีอินฟราเรดในแต่ละช่วงความถี่ ของน้ำมันหล่อลื่น	70
4-25 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับของน้ำมันใหม่กับน้ำมันที่มีเชื้อเพลิงปนเปื้อน	71
4-26 แสดงช่วงความถี่จำเพาะที่น้ำสามารถดูดซับรังสีอินฟราเรดได้	72
5-1 แสดงภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	74
5-2 แสดงเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย (คูโบต้า RT120).....	75
5-3 แสดงการติดตั้งเครื่องยนต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	77
5-4 แสดงแผงหลอดไฟที่ใช้เป็นภาระของเครื่องยนต์	78
5-5 แสดงบ่อหมักก๊าซชีวภาพภายในฟาร์มเลี้ยงสุกรซึ่งเป็นสถานที่ใช้ทำการทดสอบ เครื่องยนต์	79
5-6 แสดงเกจวัดความดัน ก) วัดความดันก่อนเข้าเรกกูเลเตอร์ ข) วัดความดันออกจาก เรกกูเลเตอร์.....	79
5-7 แสดงเรกกูเลเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	80
5-8 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งวาล์วก่อนเข้ามิกเซอร์.....	81
5-9 แสดงมิกเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัย	81
5-10 แสดงถังพักอากาศและการติดตั้ง orifice plate.....	82
5-11 แสดงภาพ orifice ที่ใช้วัดอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ.....	83
5-12 แสดงภาพ incline manometer ที่ได้ทำขึ้นเพื่อวัดความดันตกคร่อม orifice ของก๊าซและที่ orifice ของอากาศ	83
5-13 แสดงอุปกรณ์วัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์.....	84
5-14 แสดงตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลที่ท่อไอเสีย	84
5-15 แสดงการติดตั้งตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลที่ตัวกรองน้ำมันหล่อลื่น.....	85
5-16 แสดงตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่วาล์วถ่ายน้ำหล่อเย็นด้านล่างของฝาสูบ.....	85
5-17 แสดงตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ท่อก๊าซชีวภาพ.....	86
5-18 แสดงจุดที่ติดตั้งหัววัดเทอร์โมมิเตอร์ในถังพักอากาศ.....	86
5-19 แสดงอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ Nitech.....	87
5-20 แสดงอุปกรณ์แปลงความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ Primus	87

ภาพประกอบ	หน้า
5-21 แสดงบอโรมิเตอร์และเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้ในการวัดความดันและอุณหภูมิบรรยากาศขณะทำการทดสอบ	88
5-22 แสดงอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำมันดีเซล.....	89
5-23 แสดงแผนผังการต่อระบบน้ำมันดีเซล.....	90
5-24 แสดงชุดเครื่องมือวัดค่าควันดำ ภาพซ้ายแสดงภาพบีบดูดไอเสีย รุ่น ETD 020.00 ภาพขวา แสดงภาพ เครื่องอ่านค่าควันดำ รุ่น ETD 020.50	90
5-25 แสดงขอบบอกริมาณน้ำหล่อเย็นที่ไหลทางช่องระบายน้ำจากหม้อน้ำ.....	91
5-26 แสดงตู้รับและแปลงสัญญาณ	92
5-27 แสดงอุปกรณ์แปลงสัญญาณเป็นสัญญาณอนาลอก Primus	92
5-28 แสดงแผนผัง (Flow Chart) การทำงานของระบบการวัด อ่าน และบันทึกค่า.....	93
5-29 แสดงโปรแกรม Biogas-Diesel Engine Test	94
5-30 แสดงอุปกรณ์และภาชนะที่ใช้ในการลุ่มตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น.....	94
5-31 แสดงแผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	95
5-32 แสดงจุดทดสอบทั้งหมด(Matrix test)ของการทดสอบสมรรถนะที่สภาวะภาระบางส่วน.....	98
6-1 เปรียบเทียบผลของแรงบิดเบรก (Corrected Brake Torque) และอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงดีเซลจำเพาะเบรก (bsfc) ที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลและใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	105
6-2 เปรียบเทียบผลของอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงดีเซลและเปอร์เซ็นต์ของอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงดีเซลที่ลดลงเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพและใช้น้ำมันดีเซลที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์	106
6-3 แสดงผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงรวมจำเพาะที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลและใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	107
6-4 แสดงผลเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลและใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพที่สภาวะภาระสูงสุด	108
6-5 แสดงผลเปรียบเทียบอัตราส่วนสมมูลรวมของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลและใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพที่สภาวะภาระสูงสุด	109
6-6 แสดงผลเปรียบเทียบอุณหภูมิไอเสียที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลและใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ.....	110

ภาพประกอบ	หน้า
6-7 แสดงผลเปรียบเทียบอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์ เมื่อใช้น้ำมันดีเซลและใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ.....	112
6-8 แสดงผลเปรียบเทียบอุณหภูมิ น้ำมันหล่อลื่นที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์ เมื่อใช้น้ำมันดีเซลและใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ.....	112
6-9 แสดงผลการเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะของเครื่องยนต์ เมื่อใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพที่ความเร็วรอบคงที่.....	113
6-10 แสดงแผนภูมิอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซล แสดงค่า contour ของค่าคงที่ specific total energy consumption (MJ/kW-hr)	114
6-11 แสดงแผนภูมิอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะเมื่อใช้น้ำมันดีเซล ร่วมกับก๊าซชีวภาพแสดงค่า contour ของค่าคงที่ specific total energy consumption (MJ/kW-hr).....	115
6-12 แสดงผลเปรียบเทียบของอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซลและคาร์บอน ของอัตราส่วนการแทนที่น้ำมันดีเซลเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ เปรียบเทียบกับใช้น้ำมันดีเซลที่แรงบิดเบรคความเร็วรอบคงที่ต่างๆ.....	117
6-13 แสดงแผนภูมิอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซลเมื่อใช้น้ำมันดีเซลแสดงค่า contour ของค่าคงที่ Specific Diesel Consumption (cc./min.)	118
6-14 แสดงแผนภูมิอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซลเมื่อใช้น้ำมันดีเซล ร่วมกับก๊าซชีวภาพแสดงค่า contour ของค่าคงที่ Specific Diesel Consumption (cc./min.).....	118
6-15 แสดงแผนภูมิร้อยละของอัตราส่วนการแทนที่น้ำมันดีเซลของเครื่องยนต์ เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับเมื่อใช้น้ำมัน ดีเซล แสดง contour ของค่าคงที่ของ diesel substitution (เปอร์เซ็นต์)	119
6-16 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะ ที่ความเร็วคงที่ของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพและน้ำมันดีเซล	120
6-17 แสดงแผนภูมิประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงรวมจำเพาะ ของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลแสดง contour ของค่าคงที่ของ Specific Total Energy Conversion Efficiency (%)	121
6-18 แสดงแผนภูมิประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงรวม จำเพาะของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ แสดง contour ของค่าคงที่ของ Specific Total Energy Conversion Efficiency (%)	122

ภาพประกอบ	หน้า
6-19 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนสมมูลรวมที่ความเร็วคงที่ ของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	123
6-20 แสดงแผนภูมิอัตราส่วนสมมูลรวมเชื้อเพลิงกับอากาศของเครื่องยนต์ เมื่อใช้น้ำมันดีเซล แสดง contour ของค่าคงที่ของ Fuel Air Equivalent Ratio	124
6-21 แสดงแผนภูมิอัตราส่วนสมมูลรวมเชื้อเพลิงกับอากาศของเครื่องยนต์ เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ แสดง contour ของค่าคงที่ของ Fuel Air Equivalent Ratio	124
6-22 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิต่อเนื่องกับแรงบิดเบรกแก้ไข ที่ความเร็วคงที่ของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	125
6-23 แสดงแผนภูมิอุณหภูมิต่อเนื่องของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซล แสดง contour ของค่าคงที่ของ Exhaust Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	126
6-24 แสดงแผนภูมิอุณหภูมิต่อเนื่องของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซล ร่วมกับก๊าซชีวภาพแสดง contour ของค่าคงที่ของ Exhaust Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	127
6-25 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นกับแรงบิดเบรก ที่ความเร็วรอบคงที่ของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซล และน้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ.....	128
6-26 แสดงแผนภูมิอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ เมื่อใช้น้ำมันดีเซล แสดง contour ของค่าคงที่ของ Oil Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	130
6-27 แสดงแผนภูมิอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซล ร่วมกับก๊าซชีวภาพ แสดง contour ของค่าคงที่ของ Oil Temperature ($^{\circ}\text{C}$).....	130
6-28 แสดงแผนภูมิอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซลของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซล แสดงค่า contour ของค่าคงที่ Specific Diesel Consumption (L/hr.)	138
6-29 แสดงแผนภูมิอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซลของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซล ร่วมกับก๊าซชีวภาพ แสดงค่า contour ของค่าคงที่ Specific Diesel Consumption (L/hr.).....	138
6-30 แสดงแผนภูมิอัตราการสิ้นเปลืองก๊าซชีวภาพของเครื่องยนต์ เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพแสดงค่า contour ของค่าคงที่ Biogas Consumption ($\text{m}^3/\text{hr.}$).....	139
6-31 แสดงแผนภูมิตันทุนเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซล แสดง contour ของค่าคงที่ Cost of Fuel Consumption (Baht/hr.).....	139

ภาพประกอบ	หน้า
6-32 แสดงแผนภูมิต้นทุนเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	
แสดง contour ของค่าคงที่ Cost of Fuel Consumption (Baht/hr.)	140
6-33 แสดงแผนภูมิต้นทุนเชื้อเพลิงที่ลดลงของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซล	
ร่วมกับก๊าซชีวภาพ แสดงค่า contour ของค่าคงที่	
Saving of DDF Over Diesel (Baht/hr.)	140
6-34 แสดงแผนภูมิเปอร์เซ็นต์ของต้นทุนเชื้อเพลิงที่ลดลงของเครื่องยนต์	
เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ แสดงค่า contour ของค่าคงที่	
Percentage of Fuel Cost Saving (%)	141
6-35 แสดงค่ากำลังของเครื่องยนต์ระหว่างทำการทดสอบความทนทาน	
รวมทั้ง 3 สภาวะการทำงาน	142
6-36 แสดงค่ากำลังของเครื่องยนต์ระหว่างทำการทดสอบความทนทานที่	
สภาวะการทำงานที่ 1	142
6-37 แสดงค่ากำลังของเครื่องยนต์ระหว่างทำการทดสอบความทนทานที่	
สภาวะการทำงานที่ 2	143
6-38 แสดงค่ากำลังของเครื่องยนต์ระหว่างทำการทดสอบความทนทานที่	
สภาวะการทำงานที่ 3	143
6-39 แสดงค่าอุณหภูมิไอเสียตลอดช่วงการทดสอบความทนทาน	144
6-40 แสดงค่าอุณหภูมิไอเสียตลอดช่วงการทดสอบเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล	
ร่วมกับก๊าซชีวภาพที่สภาวะการทำงานที่ 1	144
6-41 แสดงค่าอุณหภูมิไอเสียตลอดช่วงการทดสอบเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล	
ร่วมกับก๊าซชีวภาพที่สภาวะการทำงานที่ 2	145
6-42 แสดงค่าอุณหภูมิไอเสียตลอดช่วงการทดสอบเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล	
ร่วมกับก๊าซชีวภาพที่สภาวะการทำงานที่ 3	145
6-43 แสดงค่าอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นตลอดช่วงการทดสอบความทนทาน	146
6-44 แสดงอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นตลอดช่วงการทดสอบของเครื่องยนต์	
ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพที่สภาวะการทำงานที่ 1	146
6-45 แสดงอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นตลอดช่วงการทดสอบของเครื่องยนต์	
ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพที่สภาวะการทำงานที่ 2	147
6-46 แสดงอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นตลอดช่วงการทดสอบของเครื่องยนต์	

ภาพประกอบ	หน้า
ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพที่สภาวะการทำงานที่ 3	147
6-47 แสดงปริมาณการสิ้นเปลืองน้ำมันหล่อลื่นตลอดช่วงการทดสอบความทนทาน.....	148
6-48 แสดงค่าคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างทดสอบความทนทาน ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	150
6-49 แสดงปริมาณการปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นตลอดการทดสอบความทนทาน ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	151
6-50 แสดงปริมาณโลหะสะสมในน้ำมันหล่อลื่นระหว่างทดสอบความทนทานระหว่าง น้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	152
6-51 แสดงปริมาณการปนเปื้อนที่เพิ่มขึ้นในน้ำมันหล่อลื่นตลอดการทดสอบความทนทานของ เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ.....	152
6-52 แสดงปริมาณโลหะสะสมในน้ำมันหล่อลื่นระหว่างทดสอบความทนทาน ระหว่างน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	154
6-53 แสดงปริมาณเหล็ก โครเมียม ตะกั่ว ทองแดง ซิลิกอน และอะลูมิเนียม เพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงการทดสอบความทนทานของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซ ชีวภาพ.....	157
6-54 แสดงปริมาณโมลิบดีนัม, สังกะสี ฟอสฟอรัส โซเดียม แมกนีเซียม และ แคลเซียม ที่สะสมในน้ำมันหล่อลื่นน้ำมันหล่อลื่นระหว่างการทดสอบความทนทาน ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	158
6-55 แสดงปริมาณโมลิบดีนัม, สังกะสี ฟอสฟอรัส โซเดียม แมกนีเซียมและแคลเซียมที่เพิ่มในแต่ละ ช่วงการทดสอบความทนทานของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	160
6-56 แสดงภาพถ่ายแบร้งก์้านสูบจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลหลังผ่านการทดสอบความ ทนทาน 320 ชั่วโมง.....	162
6-57 แสดงภาพถ่ายแบร้งก์้านสูบจากการใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพหลังผ่านการทดสอบ ความทนทาน 242 ชั่วโมง	162
6-58 แสดงภาพถ่ายละเอียดแบร้งก์้านสูบจากการใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพหลังผ่านการ ทดสอบความทนทาน 242 ชั่วโมง.....	163
6-59 แสดงภาพถ่ายลูกสูบจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลในแต่ละด้านและภาพขยายใน ภาพฝั่ง ขวา หลังผ่านการทดสอบความทนทาน 320 ชั่วโมง.....	164
6-60 แสดงภาพถ่ายลูกสูบจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพในแต่ละด้านและ ภาพขยายในภาพฝั่งขวา หลังผ่านการทดสอบความทนทาน 242 ชั่วโมง.....	165

ภาพประกอบ	หน้า
6-61 แสดงภาพถ่ายด้านหน้าและด้านหลังหัวลูกสูบจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพหลังผ่านการทดสอบความทนทาน 242 ชั่วโมง.....	166
6-62 แสดงภาพถ่ายผนังกระบอกสูบจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลหลังผ่านการทดสอบความทนทาน 320 ชั่วโมง.....	168
6-63 แสดงภาพถ่ายผนังกระบอกสูบจากการใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพหลังผ่านการทดสอบความทนทาน 242 ชั่วโมง.....	168
6-64 แสดงภาพถ่ายฝาสูบหลังผ่านการทดสอบความทนทาน 320 ชั่วโมงของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล.....	169
6-65 แสดงภาพถ่ายฝาสูบหลังผ่านการทดสอบความทนทาน 242 ชั่วโมงของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ.....	169
6-66 แสดงภาพถ่ายวาล์วไอดีบนฝาสูบจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล.....	171
6-67 แสดงภาพถ่ายวาล์วไอดีบนฝาสูบจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ.....	171
6-68 แสดงภาพถ่ายวาล์วไอเสียบนฝาสูบจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล.....	172
6-69 แสดงภาพถ่ายวาล์วไอเสียบนฝาสูบ จากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ.....	172
6-70 แสดงภาพถ่ายวาล์วไอดีจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล.....	174
6-71 แสดงภาพถ่ายวาล์วไอดีบนฝาสูบจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ....	174
6-72 แสดงภาพถ่ายวาล์วไอเสียจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล.....	175
6-73 แสดงภาพถ่ายวาล์วไอเสียจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ.....	175
6-74 แสดงภาพถ่ายหัวฉีดที่ผ่านการทดสอบความทนทานโดยใช้น้ำมันดีเซล 320 ชั่วโมง.....	176
6-75 แสดงภาพถ่ายหัวฉีดที่ผ่านการทดสอบความทนทานโดยใช้น้ำมันดีเซลที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ 242 ชั่วโมง.....	177
6-76 แสดงภาพถ่าย spray ของหัวฉีดหัวฉีดใหม่และหัวฉีดที่ผ่านการทดสอบความทนทานโดยใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ 242 ชั่วโมง.....	177
6-77 แสดงค่าควันท้าจากการวัดที่สภาวะภาระต่างๆ ระหว่างการทดสอบความทนทานทดสอบโดยใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพเปรียบเทียบกับใช้น้ำมันดีเซล.....	181
7-1 แสดงแผนภูมิเปอร์เซ็นต์การแสดงค่า contour ของค่าเปอร์เซ็นต์คงที่ของอุณหภูมิ น้ำมันหล่อลื่น และตำแหน่งที่ควรหลีกเลี่ยงเมื่อเครื่องยนต์ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงคู่เป็นระยะเวลานาน.....	185

ภาพประกอบ	หน้า
ข-1 แสดงภาพการวัดอัตราการไหลของอากาศโดยวิธี Air box method	209
ค-1 แสดงกราฟเปรียบเทียบกำลังที่เข้าเจนเนอเรเตอร์และกำลังที่ออกจากเจนเนอเรเตอร์ พร้อมแสดงค่าประสิทธิภาพ.....	214
ค-2 แสดงกราฟเปรียบเทียบกำลังที่ออกจากเจนเนอเรเตอร์ และกำลังที่โหลดไฟได้รับ พร้อมแสดง ค่าประสิทธิภาพ.....	215
ค-3 แสดงกราฟเปรียบเทียบกำลังที่โหลดไฟได้รับ กับค่าประสิทธิภาพ	216
ง-1 แสดงบ่อนักก๊าซชีวภาพที่ เอส.พี.เอ็ม. ฟาร์ม.....	218
ข-1 แสดงใบรายงานผลการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นใหม่ ยี่ห้อ ช้าง มาตรฐาน SAE 40 API CF (54326)	274
ข-2 แสดงใบรายงานผลการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซ ชีวภาพ NEW OIL ชั่วโมง 0 (55009).....	275
ข-3 แสดงใบรายงานผลการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซ ชีวภาพ หลังผ่านการทดสอบความทนทาน 10 ชั่วโมง (55060)	276
ข-4 แสดงใบรายงานผลการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซ ชีวภาพ หลังผ่านการทดสอบความทนทาน 25 ชั่วโมง (55066)	277
ข-5 แสดงใบรายงานผลการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซ ชีวภาพ หลังผ่านการทดสอบความทนทาน 50 ชั่วโมง (55187)	278
ข-6 แสดงใบรายงานผลการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซ ชีวภาพ หลังผ่านการทดสอบความทนทาน 75 ชั่วโมง (55188)	279
ข-7 แสดงใบรายงานผลการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซ ชีวภาพ หลังผ่านการทดสอบความทนทาน 80 ชั่วโมง (55189)	280
ข-8 แสดงใบรายงานผลการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซ ชีวภาพ NEW OIL ชั่วโมงที่ 0(55190), 105(55525), 130(55539) ชั่วโมง	281
ข-9 แสดงใบรายงานผลการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซ ชีวภาพหลังผ่านการทดสอบความทนทาน 155(55694), 180(55695), NEW OIL 0(55696) ชั่วโมง	282
ข-10 แสดงใบรายงานผลการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซ ชีวภาพหลังผ่านการทดสอบความทนทาน 205 (55756) ชั่วโมง	283
ข-11 แสดงใบรายงานผลการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซ ชีวภาพหลังผ่านการทดสอบความทนทาน 230(55805) ชั่วโมง	284

ภาพประกอบ

หน้า

- ช-12 แสดงใบรายงานผลการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซ
ชีวภาพหลังผ่านการทดสอบความทนทาน 255(55954), 280(55955) ชั่วโมง..... 285
- ช-13 แสดงใบรายงานผลการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซ
ชีวภาพหลังผ่านการทดสอบความทนทาน 290(55997), 300(55955) ชั่วโมง..... 286

สารบัญคำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
A	Abnormal	
A_T	Throat Area	m^2
A_0	Orifice Area	m^2
A_R	Reference Area	m^2
A_E	Effective Area	m^2
A/F	Air/fuel Ratio	kg air / kg fuel
ASTM	American Society Testing of Material	
$(A/F)_s$	Air/fuel Ratio ที่ stoichiometric	kg air / kg fuel
abs	absorbance unit	
BDC	ตำแหน่งจุดศูนย์ตายล่าง	
BFCE	Brake Fuel Conversion Efficiency	
BSFC	Brake Specific Fuel Consumption	g/kW-h
bmep	Brake mean effective pressure	kPa
bsfc	Brake specific fuel consumption	g/kW-h
C	Caution	
CH ₄	Methane	
CO	Carbon monoxide	
CO ₂	Carbon dioxide	
CI	เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด	
CN	เลขซีเทน	
CCI	Cetane index	
CPO	Crude Palm Oil	
C_{do}	Discharge Coefficient ของ orifice plate	
Cd	สัมประสิทธิ์แรงต้าน	
Crtd T.	Corrected Torque	Nm
$\cos \phi$	Power factor ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	
$\cos \theta$	Power factor ของมอเตอร์	
D	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ	m

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
DI	ฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง	
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของ orifice plate	m
DDF	Diesel Dual Fuel	
e	expansion factor	
E	Orifice plate thickness	m
EOI	End of Injection	
EP	End point	
ECEf_DDF	Energy Conversion Efficiency of DDF	MJ/kW.h
ECEf_D	Energy Conversion Efficiency of Diesel	MJ/kW.h
EMA	Engine Manufacturers Association	
FBP	Final Boiling Point	
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy	
g	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก เท่ากับ 9.807	m/s ²
H ₂	Hydrogen	
H ₂ S	Hydrogensulphide	
H ₂ O	น้ำ	
HRR	Heat Release Rate	
HFRR	High Frequency Reciprocating Rig	
HHV	High Heating Value	
Δh	ผลต่าง Head ที่อ่านได้จากมานอมิเตอร์	mm H ₂ O
I	ค่ากระแสไฟฟ้า	A
IBP	Initial Boiling Point	
IDI	ฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม	
I _m	ค่ากระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์	A
I _G	ค่ากระแสไฟฟ้าที่เจนเนอเรเตอร์เตอร์	A
I _{exite}	Excited current	A
K	ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับเครื่องยนต์ 2 จังหวะ และ เท่ากับ 2 สำหรับเครื่องยนต์ 4 จังหวะ	

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
k	Isentropic exponent, (C_p / C_v)	
LHV	Lower Heating Value	
LEL	Lower Explosive Limit	
\dot{m}_a	อัตราไหลเชิงมวลของอากาศ	kg/s
\dot{m}_{fc}	อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมันดีเซล	kg/s
\dot{m}_{fb}	อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซชีวภาพ	kg/s
\dot{m}_f	อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง	kg/s
$\dot{m}_{Methane}$	อัตราไหลเชิงมวลของมีเทน	kg/s
\dot{m}_{ideal}	อัตราการไหลของมวลในอุดมคติผ่านออริฟิซ	kg/s
m_{Diesel}	อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมันดีเซล	kg/s
M	Molecular Weight	kg
N	ความเร็วรอบของเครื่องยนต์	rev/min
N_c	จำนวนกระบอกสูบของเครื่องยนต์	
N_2	Nitrogen	
n_R	จำนวนรอบของเพลาช้อเหวี่ยงต่อวัฏจักร	
P_T	Pressure at Throat	N/m^2
P_o	Pressure at Orifice	N/m^2
P_b	กำลังเบรก	kW
$P_{in,G}$	กำลังที่เข้าเจนเนอเรเตอร์	kW
$P_{in,m}$	กำลังที่เข้ามอเตอร์	kW
$P_{out,m}$	กำลังที่ออกจากมอเตอร์	kW
$P_{out,G}$	กำลังที่เข้าเจนเนอเรเตอร์	kW
P_{loss}	กำลังสูญเสีย	kW
ppm	part per million	
Q_{HV}	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (heating value)	MJ/kg fuel
q_m	อัตราไหลเชิงมวล	kg/s
$Q_{HVDiesel}$	ค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงดีเซล	MJ/kg
$Q_{HVMethane}$	ค่าพลังงานความร้อนของมีเทน	MJ/kg

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
Q_{air}	อัตราไหลเชิงปริมาตรของอากาศ	m^3/s
R	Gas Constant	$kg/kmol.K$
R_{ed}	Reynolds Number	
SAE	Society of Automotive	
SI	เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ	
SF	Safety Factor	
STLE	Society of Tribologists and Lubrication Engineers	
SO_2	Sulphur dioxide	
SO_3	Sulphur Trioxide	
SEM	scanning electron microscope	
STEC	Specific Total Energy Consumption	$MJ/kW.h$
STECE	Specific Total Energy Conversion Efficiency	
STEC_B	Specific Total Energy Consumption of Biogas	$MJ/kW.h$
STEC_D	Specific Total Energy Consumption of Diesel	$MJ/kW.h$
SOC	จุดสิ้นสุดการเผาไหม้	$^{\circ}CA$
SOI	จุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง	$^{\circ}CA$
SUB	น้ำมันดีเซลที่ถูกก๊าซชีวภาพแทนที่	% by mass
TPM	total particulate matter	
T_{max}	แรงบิดเบรกสูงสุด	N-m
T_b	แรงบิดเบรก	N-m
T_o	อุณหภูมิบรรยากาศ	K
TBN	Total Base Number	
TDC	ตำแหน่งจุดศูนย์ตายบน	
t	เวลา	s
UEL	Upper Explosive Limit	
$V_{DDF,biogas}$	อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซลเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ	L/hr.

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
V	ปริมาตรที่ใช้วัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	ml
V	ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า	volts
V _m	ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มอเตอร์	volts
V _G	ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เจนเนอเรเตอร์	volts
V _b	ปริมาตรถังพักอากาศที่เล็กที่สุด	m ³
V _d	Displaced volume	dm ³
V _s	ปริมาตรช่วงชักลูกสูบ	m ³
V̇	อัตราการไหลโดยปริมาตร	ml/s
W _c	work per cycle	kW/cycle
X _{diesel}	ราคาน้ำมันดีเซล	Baht/L
X _{biogas}	ราคาน้ำมันก๊าซชีวภาพ	Baht/m ³
μ	ความหนืดสัมบูรณ์	Pa.s
v	ปริมาตรจำเพาะ	m ³ /kg
φ	Equivalent Ratio	
φ _t	Total Equivalent Ratio	
ω	ความเร็วเชิงมุม	rad/s
β	Diameter ratio d/D	
ε	Expansion factor	
η _{brake fuel}	Brake Fuel conversion efficiency	%
η _v	volumetric efficiency	%
η ₀	ประสิทธิภาพมอเตอร์ที่ไม่มีภาระ	%
η _{0.5}	ประสิทธิภาพมอเตอร์ที่ครึ่งหนึ่งของภาระสูงสุด	%
η ₁₀₀	ประสิทธิภาพมอเตอร์ที่ภาระสูงสุด	%
η _f	Fuel conversion efficiency	%
η _g	Efficiency of Generator	%
ρ	ความหนาแน่น	kg/m ³

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
$\rho_{a,l}$	ความหนาแน่นของอากาศ	kg/m^3
ρ_f	ความหนาแน่นของน้ำมันดีเซล	kg/m^3
γ_{air}	น้ำหนักจำเพาะของอากาศ	$\text{kg/m}^2\text{-s}^2$
Φ	ฟังก์ชันของการไหลแบบยุบตัว	