

การใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกในเครื่องยนต์ CI ชนิด DIRECT INJECTION

นายยุทธนา ชาญณรงค์ชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

THE USE OF WASTE PLASTIC SYNTHETIC DIESEL IN A DIRECT INJECTION CI ENGINE

Mr. Yutthana Charnnarongchai

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 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกใน
	เครื่องยนต์ CI ชนิด DIRECT INJECTION
โดย	นายยุทธนา ชาญณรงค์ชัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต วัฒนวิเชียร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภสิทธิ์ นุ่มวงษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต วัฒนวิเชียร)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(พลเรือตรี ดร.สมัย ใจอินทร์.น.)

ยุทธนา ชาญณรงค์ชัย : การใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกในเครื่องยนต์ CI ชนิด DIRECT INJECTION. (THE USE OF WASTE PLASTIC SYNTHETIC DIESEL IN A DIRECT INJECTION CI ENGINE) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.คณิต วัฒนวิเชียร

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผลของการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกที่มีต่อสมรรถนะ ปรากฏการณ์ การเผาไหม้รวมถึงค่าควันดำของเครื่องยนต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทดสอบกับเครื่องยนต์ Kubota รุ่น RT 140 DI โดยสามารถแบ่งการ ทดสอบออกได้เป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่หนึ่งเป็นการทดสอบเพื่อดูค่าสมรรถนะที่สภาวะคงตัว ความเร็วรอบคงที่ ตั้งแต่ 1000 – 2400 รอบ/นาที ทั้งที่สภาวะภาระสูงสุดและภาระบางส่วนของเครื่องยนต์ พบว่า ที่ภาระสูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล สังเคราะห์จากขยะพลาสติกสามารถสร้างค่าแรงบิดเบรกและกำลังเบรกได้น้อยกว่าเชื้อเพลิงดีเซลเนื่องจากมีอัตราการสิ้นเปลือง เชื้อเพลิงน้อยกว่าซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่น้อยกว่า แม้จะมีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่สูงกว่าจึงมีค่าอัตราการ สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกและค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกดีกว่า และที่สภาวะภาระบางส่วนของ เครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก ค่าประสิทธิภาพการ เปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกดีกว่าการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสอดคล้องกับผลที่ภาระสูงสุด ส่วนที่สองเป็นการทดสอบค่าสมรรถนะของ เครื่องยนต์และค่าควันดำที่จุดทดสอบตามมาตรฐาน ESC test cycle พบว่า เครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะ พลาสติกมีค่าสมรรถนะที่ดีกว่า ส่วนควันดำมีค่าเดียวกับเชื้อเพลิงดีเซล ส่วนที่สามเป็นผลการวิเคราะห์การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ในการทดสอบจะทำการวัดความดันในห้องเผาไหม้ ความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้า หัวฉีดและองศาเพลาค้อเหวี่ยง โดยบันทึกข้อมูลทุก ๆ 2 องศาเพลาค้อเหวี่ยง จำนวน 200 วัฏจักรต่อจุดทดสอบ ที่จุดทดสอบตาม มาตรฐาน ESC test cycle พบว่า จุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงจะเข้าใกล้ศูนย์ตายบนเมื่อความเร็วรอบมากขึ้น ความดันในห้องเผา ไหม้สูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระการทดสอบมากขึ้น ส่วนอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดและการปล่อยความร้อนสุทธิมีค่า เพิ่มขึ้นเมื่อภาระการทดสอบมากขึ้น โดยมีค่าสัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้อยู่ในช่วง 0.732 – 0.866 ซึ่งไม่ต่างจากเชื้อเพลิงดีเซล

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกสามารถนำไปใช้ในเครื่องยนต์ CI ชนิด Direct Injection ได้โดยไม่ต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์ โดยมีค่าประสิทธิภาพต่าง ๆ ที่ดีกว่าและค่าควันดำใกล้เคียงกับการใช้ เชื้อเพลิงดีเซล

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5870226121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD: WASTE PLASTIC SYNTHETIC DIESEL, PERFORMANCE, COMBUSTION

Yutthana Charnnarongchai : THE USE OF WASTE PLASTIC SYNTHETIC DIESEL IN A DIRECT INJECTION CI ENGINE. Advisor: Assoc. Prof. Kanit Wattanavichien, Ph.D.

This research was conducted to study the effect of using waste plastic synthetic diesel on performance and combustion phenomenon including the black smoke value of the engine. In this research, it will be tested with the Kubota RT 140 DI engine. The test can be divided into 3 parts. The first part is the test to determine the performance of stable conditions. Fixed speed from 1000 - 2400 rpm, both with the full load and partial load of the engine. At the full load when using waste plastic synthetic diesel, the engine can generate braking torque and braking power less than diesel fuel. Due to less fuel consumption, which is a result of lower density. The break specific fuel consumption and fuel conversion efficiency better than diesel due to the higher heating value. And at partial load conditions of the engine when using waste plastic synthetic diesel, there will be a break specific fuel consumption and fuel conversion efficiency better than diesel fuel. The second part is the performance of the engine and the black smoke at the test point according to the ESC test cycle. The engine when using waste plastic synthetic diesel has better performance. The black smoke is comparable to diesel fuel. The third part is the analysis of the combustion of the engine when using waste plastic synthetic diesel. In the test, the pressure in the main combustion chamber is measured. Fuel pressure at the nozzle entrance and crankshaft degrees by recording data every 2 degrees, the crankshaft is 200 cycles per test point. At the test point according to the ESC test cycle, it was found that the starting point of the fuel injection of the engine will approach the top dead center when the speed is greater. The maximum pressure in the combustion chamber increases as the test load increases. The maximum heat release rate and net heat release were increased when the test load increased and the mass fraction burn in the range of 0.732 – 0.866, which is not difference with diesel

Based on the results of the test, it can be concluded that waste plastic synthetic diesel can be used in the CI engine with direct injection type without having to adjust the engine. With better performance values and black smoke values like diesel fuel usage

Field of Study: Mechanical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต วัฒนวิเชียร อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำ ร่วมติดตามการทดสอบอย่างใกล้ชิดในทุกขั้นตอนจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณศูนย์พลังงานและเชื้อเพลิงจากชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบและส่งเจ้าหน้าที่มาช่วยในการทดสอบเครื่องยนต์

ขอขอบคุณบริษัทสยามคูโบต้าคอร์ปอเรชั่น จำกัดที่ช่วยสนับสนุนเครื่องยนต์ อะไหล่และส่งเจ้าหน้าที่มาช่วยในการทดสอบเครื่องยนต์

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ พ่อ คุณแม่ พี่และน้องที่ให้การสนับสนุนในทุกด้านทั้งค่าปรึกษาและกำลังใจจนผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา

ยุทธนา ชาญณรงค์ชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญรูป.....	4
บทที่ 1 บทนำ	10
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	10
1.2 วัตถุประสงค์	11
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	11
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	12
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	13
บทที่ 2 เชื้อเพลิงและทบทวนวรรณกรรม	14
2.1 เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป (Commercial Diesel)	14
2.1.1 เลขซีเทน (Cetane Number).....	14
2.1.2 ค่าการระเหย (Volatility).....	15
2.1.3 ความหนาแน่น (Density).....	16
2.1.4 ความหนืด (Viscosity).....	16
2.1.5 คุณสมบัติการหล่อลื่น (Lubricity).....	17
2.1.6 คุณสมบัติที่อุณหภูมิต่ำของเชื้อเพลิงดีเซล.....	17
2.1.7 เสถียรภาพของเชื้อเพลิงดีเซล	17

2.1.8 ปริมาณซัลเฟอร์ (Sulphur Content).....	18
2.1.9 ปริมาณอะโรมาติก (Aromatic Content).....	18
2.1.10 ปริมาณน้ำและตะกอน (Water and Sediment Content).....	18
2.1.11 จุดวาบไฟ (Flash Point)	19
2.2 เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก (Waste Plastic Synthetic Diesel).....	19
2.2.1 วัตถุดิบ	20
2.2.2 กระบวนการผลิต	20
2.2.3 คุณสมบัติเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกที่ใช้ในการทดสอบ	22
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการนำเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล	24
บทที่ 3 กระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลและการวิเคราะห์การเผาไหม้.....	31
3.1 เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (Compression Ignition Engine).....	31
3.2 การเผาไหม้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดแบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงและระบบการฉีดเชื้อเพลิง	32
3.3 แผนภาพรูปแบบการเผาไหม้ (LASER IMAGE BASED CONCEPTUAL COMBUSTION MODEL)	36
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้	39
3.5 การพิจารณาเลือกจุดฉีดเชื้อเพลิงและจุดเริ่มต้นการเผาไหม้.....	41
3.6 การคำนวณอัตราการฉีดเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้	42
3.7 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้กำหนดสมรรถนะของเครื่องยนต์.....	43
3.8 แผนภูมิสมรรถนะ (Performance Map) ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด	44
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัยและอุปกรณ์	49
4.1 ภาพรวมในการดำเนินการวิจัย	49
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	50
4.2.1 เครื่องยนต์.....	50

4.2.2 ไตนาโมมิเตอร์และชุดควบคุมการทำงาน	52
4.2.3 การวัดอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง	53
4.2.4 การวัดอุณหภูมิ	53
4.2.5 การวัดอัตราการไหลของอากาศ.....	55
4.2.6 การวัดอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ (Ambient Conditions).....	55
4.2.7 การวัดค่าควันดำ.....	57
4.2.8 การวัดค่าความดันในห้องเผาไหม้และความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีด.....	59
4.2.9 เครื่อง DEWE-Book.....	61
4.2.10 Charge Amplifier.....	61
4.2.11 Crank Angle Encoder.....	65
4.3 การทดสอบสมรรถนะ	65
4.3.1 วิธีการทดสอบสมรรถนะ.....	66
4.3.1.1 การ Run in	66
4.3.1.2 การทดสอบที่ภาระสูงสุด (Full Load Performance Test).....	66
4.3.1.3 การทดสอบที่ภาระบางส่วน (Part Load Performance Test).....	66
4.4 การทดสอบวัดความดันในห้องเผาไหม้	67
4.4.1 วิธีการทดสอบวัดความดันในห้องเผาไหม้.....	68
4.4.1.1 การทดสอบวัดความดันในห้องเผาไหม้ที่องค์การฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐาน	68
4.4.1.2 การวิเคราะห์สภาวะการเผาไหม้จากอัตราการปล่อยความร้อน	69
บทที่ 5 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	70
5.1 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์	70
5.1.1 สภาวะภาระสูงสุด (Full Load Conditions).....	70
5.1.1.1 ผลของแรงบิดเบรก (Brake Torque)	70
5.1.1.2 ผลของกำลังเบรก (Brake Power).....	71

5.1.1.3 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel consumption).....	72
5.1.1.4 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (bsfc)	73
5.1.1.5 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรก (Brake Fuel Conversion Efficiency).....	74
5.1.1.6 อุณหภูมิไอเสีย.....	75
5.1.1.7 อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น.....	76
5.1.1.8 อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น	76
5.1.2 สภาวะภาระบางส่วน (Part Load Conditions)	77
5.1.2.1 ค่าอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก	77
5.1.2.2 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานเบรก	78
5.1.2.3 อุณหภูมิไอเสีย.....	78
5.1.2.4 อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น.....	79
5.1.2.5 อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น	79
5.2 แผนภูมิแสดงสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ (Performance Map)	85
5.2.1 แผนภูมิอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก.....	85
5.2.2 แผนภูมิอุณหภูมิไอเสีย	87
5.2.3 แผนภูมิอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น	88
5.2.4 แผนภูมิอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น.....	90
5.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์การเผาไหม้จากความดันในห้องเผาไหม้	91
5.3.1 สมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปที่จุดทดสอบการวิเคราะห์การเผาไหม้.....	91
5.3.1.1 ค่าอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก	91
5.3.1.2 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรก	96
5.3.1.3 อุณหภูมิไอเสีย.....	99

5.3.1.4	อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น.....	99
5.3.1.5	อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น	99
5.3.1.6	ค่าควันดำ.....	99
5.3.2	การวิเคราะห์การเผาไหม้ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะ พลาสติก	104
5.3.2.1	การวิเคราะห์หาจุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (Start of injection, SOI)	104
5.3.2.2	การคำนวณหาอัตราการฉีดเชื้อเพลิง (Fuel injection rate)	107
5.3.2.3	การคำนวณหาปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงต่อวัฏจักร.....	107
5.3.2.4	ข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้.....	110
5.3.2.5	การคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยพลังของเชื้อเพลิง (Heat release rate)	112
5.3.2.6	การคำนวณหาการปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิง (Accumulate of heat release)	115
5.3.2.7	การคำนวณหาสัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้.....	117
5.3.2.8	การวิเคราะห์หาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดการเผาไหม้	119
5.3.2.9	ช่วงล่าช้าการจุดระเบิด (Ignition delay).....	120
5.3.2.10	ช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Burn duration)	121
บทที่ 6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	123
6.1	สรุปผลการวิจัย.....	123
6.1.1	สรุปผลการทดสอบสมรรถนะ	123
6.1.2	สรุปผลการทดสอบสมรรถนะ การวิเคราะห์การเผาไหม้จากความดันในห้องเผาไหม้และ ค่ามลพิษ (ควันดำ) ที่จุดทดสอบซึ่งดัดแปลงมาจากมาตรฐาน ESC Test Cycle	124
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	124
6.3	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป	125
บรรณานุกรม	126

ภาคผนวก ก	มาตรฐาน ISO 3046 ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเครื่องยนต์.....	128
ภาคผนวก ข	การวัดอัตราการไหลของอากาศ	145
ภาคผนวก ค	มาตรฐานการทดสอบเครื่องยนต์ ESC Test Cycle[26].....	149
ภาคผนวก ง	ข้อมูลผลการทดสอบวัดความดันในห้องเผาไหม้และสมรรถนะ.....	153
ภาคผนวก จ	ผลการทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง	174
ประวัติผู้เขียน.....		178

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2 - 1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปที่ใช้ทดสอบ	24
ตารางที่ 4 - 1 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ทดสอบ	51
ตารางที่ 4 - 2 ข้อมูลไดนาโมมิเตอร์	52
ตารางที่ 4 - 3 ข้อมูลชุดควบคุม	53
ตารางที่ 4 - 4 ข้อมูลอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	56
ตารางที่ 4 - 5 ข้อมูลอุปกรณ์วัดความดัน	57
ตารางที่ 4 - 6 คุณสมบัติของ Pressure Transducer ยี่ห้อ AVL รุ่น GU12P	60
ตารางที่ 4 - 7 คุณสมบัติของ Pressure Transducer ยี่ห้อ Kistler รุ่น 607C1	60
ตารางที่ 4 - 8 คุณสมบัติของเครื่อง DEWE-Book.....	62
ตารางที่ 4 - 9 ข้อมูลทางเทคนิค Amplifier รุ่น DAQP-CHARGE- A	63
ตารางที่ 4 - 10 ข้อมูลทางเทคนิคของ Crank Angle Encoder ยี่ห้อ DEWETRON รุ่น CA-RIE 360	65
ตารางที่ 5 - 1 แสดงอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปที่องค์การฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐาน.....	94
ตารางที่ 5 - 2 จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุด ปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงต่อวัฏจักรของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก	106
ตารางที่ 5 - 3 ความดันในห้องเผาไหม้สูงสุดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก.....	112
ตารางที่ ง - 1 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ที่สภาวะภาระสูงสุด	154

ตารางที่ ง - 15 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ความเร็วรอบ 1800 rpm	168
ตารางที่ ง - 16 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ความเร็วรอบ 2000 rpm	169
ตารางที่ ง - 17 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ความเร็วรอบ 2200 rpm	170
ตารางที่ ง - 18 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ความเร็วรอบ 2400 rpm	171
ตารางที่ ง - 19 ผลการทดสอบสมรรถนะที่จุดทดสอบวัดความดันในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซล ทั่วไป	172
ตารางที่ ง - 20 ผลการทดสอบสมรรถนะที่จุดทดสอบวัดความดันในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซล สังเคราะห์จากขยะพลาสติก	173

สารบัญรูป

รูปที่ 2 - 1	โค้งการกลั่น (Distillation Curve) ของเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป (Eran Sher 1998)	16
รูปที่ 2 - 2	เตาไฟโรไลซิส	22
รูปที่ 2 - 3	หอกกลั่นลำดับส่วนขั้นต้น	22
รูปที่ 2 - 4	แผนภูมิการผลิตเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก	22
รูปที่ 2 - 5	โค้งการกลั่นของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล	23
รูปที่ 2 - 6	เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป (ซ้าย) และเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก (ขวา)	23
รูปที่ 3 - 1	ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ CI แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง [24]	31
รูปที่ 3 - 2	ความดันในกระบอกสูบ (p), การยกเข็มหัวฉีด (I_N), และความดันเชื้อเพลิงในระบบการฉีดเชื้อเพลิงเทียบกับองศาเพลลาข้อเหวี่ยงในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กแบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง	32
รูปที่ 3 - 3	ความดันในกระบอกสูบ p , อัตราการฉีดเชื้อเพลิง mfi , และอัตราการปล่อยความร้อนสุทธิ Q_n ซึ่งคำนวณจากความดันในกระบอกสูบ ของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบ/นาที, $bmep = 620$ kPa [24]	33
รูปที่ 3 - 4	อัตราการปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงและช่วงการเผาไหม้แบบต่าง ๆ [24]	34
รูปที่ 3 - 5	ลักษณะการฉีดเชื้อเพลิงและอัตราการปลดปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซลของเครื่องยนต์ดีเซลทั้ง 3 แบบ [24]	35
รูปที่ 3 - 6	Schematic of quasi-steady burning jet from laser measurements.[25]	37
รูปที่ 3 - 7	Schematics of early flame images from laser measurements.[25]	38
รูปที่ 3 - 8	ขอบเขตของระบบเปิด สำหรับห้องเผาไหม้เพื่อใช้วิเคราะห์การปล่อยความร้อน	39
รูปที่ 3 - 9	อัตราการเปลี่ยนแปลงความดัน จุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง จุดเริ่มต้นการเผาไหม้และความดันในห้องเผาไหม้ [27]	42
รูปที่ 3 - 10	แผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง [25]	44

รูปที่ 3 - 11 แผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง แบบ M [25]	45
รูปที่ 3 - 12 แผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมแบบ ห้องเผาไหม้ล่วงหน้าที่มีการไหลวน [25].....	46
รูปที่ 3 - 13 แผนภูมิแสดงปัจจัยที่เพิ่มประสิทธิภาพบ่งชี้ของเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดโดยตรงเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมแบบห้องเผาไหม้ก่อนไหลวนซึ่งเป็นฟังก์ชันของ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงหรือภาวะ [25]	47
รูปที่ 4 - 1 แผนภูมิขั้นตอนภาพรวมการดำเนินการวิจัย	49
รูปที่ 4 - 2 แผนผังการทดสอบ	50
รูปที่ 4 - 3 เครื่องยนต์ Kubota รุ่น RT 140.....	50
รูปที่ 4 - 4 ไดนาโมมิเตอร์ที่ใช้ทดสอบ ยี่ห้อ T-T Electric	52
รูปที่ 4 - 5 ชุดควบคุม ยี่ห้อ BOALEECO.....	52
รูปที่ 4 - 6 อุปกรณ์วัดปริมาณเชื้อเพลิงโดยมวล Gravimetric Fuel Gauge	53
รูปที่ 4 - 7 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิอากาศไอดี	54
รูปที่ 4 - 8 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น.....	54
รูปที่ 4 - 9 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น	54
รูปที่ 4 - 10 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิไอเสีย.....	55
รูปที่ 4 - 11 ถังพักอากาศและการติดตั้ง Orifice	55
รูปที่ 4 - 12 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ	56
รูปที่ 4 - 13 ป้อนชุดไอเสีย รุ่น ETD 020.00.....	58
รูปที่ 4 - 14 เครื่องอ่านค่าควันท้า รุ่น ETD 020.50.....	58
รูปที่ 4 - 15 ตัวอย่างกระดาษกรองที่ใช้ในการวัดค่าควันท้าเปรียบเทียบกับ Bosch Unit Number 59	
รูปที่ 4 - 16 Pressure Transducer สำหรับวัดความดันในห้องเผาไหม้	60
รูปที่ 4 - 17 Pressure Transducer สำหรับวัดความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีด	60

รูปที่ 4 - 18 ตำแหน่งการติดตั้ง Pressure Transducer สำหรับวัดความดันในห้องเผาไหม้และความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีด	61
รูปที่ 4 - 19 เครื่อง DEWE-Book.....	63
รูปที่ 4 - 20 Amplifier รุ่น DAQP-CHARGE- A.....	63
รูปที่ 4 - 21 Crank Angle Encoder ยี่ห้อ DEWETRON รุ่น CA-RIE360.....	65
รูปที่ 4 - 22 Matrix ที่ใช้ในการทดสอบ	67
รูปที่ 4 - 23 จุดที่ใช้ทดสอบความดันในห้องเผาไหม้.....	68
รูปที่ 5 - 1 แรงบิดเบรกของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล.....	71
รูปที่ 5 - 2 กำลังเบรกของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล.....	72
รูปที่ 5 - 3 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล.....	73
รูปที่ 5 - 4 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล.....	74
รูปที่ 5 - 5 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรก ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป.....	75
รูปที่ 5 - 6 อุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป	76
รูปที่ 5 - 7 อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป	76
รูปที่ 5 - 8 อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป	77
รูปที่ 5 - 9 อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกกับแรงบิดเบรกของเครื่องยนต์ ที่ความเร็วรอบคงที่เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล	80

รูปที่ 5 - 25 ค่าอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่ความเร็วรอบ 1400 1700 และ 2100 rpm ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล	101
รูปที่ 5 - 26 ค่าอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ความเร็วรอบ 1400 1700 และ 2100 rpm ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล	102
รูปที่ 5 - 27 ค่าควันท้าของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป.....	103
รูปที่ 5 - 28 ความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1400 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ.....	105
รูปที่ 5 - 29 ความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1700 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ.....	105
รูปที่ 5 - 30 ความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 2100 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ.....	106
รูปที่ 5 - 31 อัตราการฉีดเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1400 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ	108
รูปที่ 5 - 32 อัตราการฉีดเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1700 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ	108
รูปที่ 5 - 33 อัตราการฉีดเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 2100 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ	109
รูปที่ 5 - 34 ความดันในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1400 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ	110
รูปที่ 5 - 35 ความดันในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1700 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ	111
รูปที่ 5 - 36 ความดันในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 2100 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ	111
รูปที่ 5 - 37 อัตราการปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1400 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ	113

รูปที่ 5 - 38 อัตราการปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1700 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ	113
รูปที่ 5 - 39 อัตราการปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 2100 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ	114
รูปที่ 5 - 40 การปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 2100 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ	115
รูปที่ 5 - 41 การปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 2100 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ	116
รูปที่ 5 - 42 การปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 2100 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ	116
รูปที่ 5 - 43 สัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1400 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ.....	118
รูปที่ 5 - 44 สัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1700 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ.....	118
รูปที่ 5 - 45 สัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 2100 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ.....	119
รูปที่ 5 - 46 ช่วงล่าช้าในการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก.....	121
รูปที่ 5 - 47 ช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก	122

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากในปัจจุบันเชื้อเพลิงดีเซลซึ่งผลิตมาจากน้ำมันดิบได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงชนิดนี้เป็นเชื้อเพลิงสิ้นเปลืองที่ใช้แล้วหมดไป อีกทั้งยังมีแนวโน้มราคาที่ไม่แน่นอน และส่วนใหญ่ประเทศไทยต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้ในอนาคตหากเกิดปัญหาการขาดแคลนเชื้อเพลิงชนิดนี้ก็จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของเศรษฐกิจของประเทศโดยตรง เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ในภาคการขนส่งและอุตสาหกรรมบางประเภท ดังนั้นการหาวัตถุดิบทดแทนภายในประเทศที่สามารถนำมาแปรรูปเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาการขาดแคลนและช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจากต่างประเทศในอนาคตได้ จึงได้มีแนวคิดในการนำขยะพลาสติกที่มีอยู่เป็นปริมาณมากและเป็นแหล่งวัตถุดิบที่มีประสิทธิภาพในการนำมาแปรรูปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงเนื่องจากมีค่าความร้อนสูงและมีปริมาณอยู่อย่างมากมาย

พลาสติกเป็นแหล่งพลังงานในอุดมคติเนื่องจากมีค่าความร้อนสูงและมีอยู่เป็นจำนวนมาก [1-3] ตามแหล่งกำจัดขยะทั่วไป จากการสำรวจปริมาณขยะมูลฝอยของประเทศไทยพบว่า ในปี 2559 [4] มีขยะมูลฝอยชุมชนเกิดขึ้น 27.06 ล้านตัน ซึ่งคิดเป็นอัตราการเกิดขยะมูลฝอยที่ 1.14 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี โดยปริมาณขยะมูลฝอยที่ถูกนำไปกำจัดอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ และปริมาณขยะมูลฝอยที่ถูกนำกลับมาใช้ประโยชน์ก็มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน โดยในปี 2559 นี้ มีปริมาณขยะมูลฝอยที่ถูกนำกลับมาใช้ประโยชน์ทั้งสิ้น 5.81 ล้านตัน หรือคิดเป็น 21 % เนื่องจากองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นและประชาชนมีความใส่ใจในการดำเนินการคัดแยกขยะมูลฝอยเพิ่มมากขึ้น แต่ยังมีขยะมูลฝอยที่ยังไม่ได้นำกลับมาใช้ประโยชน์อีกมาก ขยะมูลฝอยเหล่านี้จะถูกนำไปทำลายด้วยวิธีการฝังกลบหรืออื่น ๆ เช่น ขยะพลาสติก จึงมีแนวความคิดที่จะนำขยะพลาสติกเหล่านี้มาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด โดยศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี ได้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาเทคนิคการแปรรูปขยะพลาสติกให้เป็นเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350-500 องศาเซลเซียส เพื่อให้โครงสร้างโมเลกุลของพลาสติกแตกตัวออกมาเป็นน้ำมัน จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการกลั่นลำดับส่วนเพื่อแยกน้ำมันดีเซลคุณภาพดีที่ต้องการออกมา โดยเชื้อเพลิงชนิดนี้จัดเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงดีเซลที่ผลิตมาจากน้ำมันดิบมาก สามารถนำมาใช้แทนเชื้อเพลิงดีเซลได้โดยไม่ต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์ [3] จึงเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจและมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นพลังงานเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงดีเซลสำหรับภาคเกษตรกรรมของประเทศไทย อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณ

ขยะพลาสติกก็ได้อีกทางหนึ่งด้วย อย่างไรก็ตามการที่จะนำเชื้อเพลิงชนิดนี้มาใช้กับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (Compression Ignition Engine, CI Engine) จำเป็นต้องมีการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ในหลายด้าน เพราะคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อเครื่องยนต์ในด้านต่าง ๆ อาทิ ลักษณะการเผาไหม้ มลภาวะ และประสิทธิภาพที่ได้ ฯลฯ

ในวิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นการศึกษาเปรียบเทียบผลของการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกที่มีต่อสมรรถนะ การเผาไหม้และการปลดปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ CI เปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จะนำไปใช้ในการออกแบบปรับแต่งเครื่องยนต์ และเพื่อพิจารณาว่าการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกนั้นเหมาะสมที่จะนำมาใช้กับเครื่องยนต์ CI หรือไม่ โดยเราจะพิจารณาจากค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง ค่ามลภาวะ (ควันดำ) และการเผาไหม้จากข้อมูลความดันภายในกระบอกสูบเพื่อศึกษาช่วงการจุดระเบิดล่าช้า และการปลดปล่อยความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่จุดทำงานต่าง ๆ รวมไปถึงปริมาณมลพิษต่าง ๆ ที่สำคัญของเชื้อเพลิงเมื่อใช้ในเครื่องยนต์ CI

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาและเปรียบเทียบการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกกับเชื้อเพลิงดีเซลที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ CI ชนิด Direct Injection

1.2.2 ศึกษาและเปรียบเทียบมลพิษ (ควันดำ) เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกกับเชื้อเพลิงดีเซลที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ CI ชนิด Direct Injection

1.2.3 ศึกษาผลของการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกที่มีต่อปรากฏการณ์การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ CI ชนิด Direct Injection

1.2.4 เพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาในประเด็นต่าง ๆ มาสรุปเป็นแนวทางในการนำเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมาใช้ในเครื่องยนต์ CI ชนิด Direct Injection

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ศึกษาและเปรียบเทียบค่าสมรรถนะที่จุดทำงานต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ CI ชนิด Direct Injection เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกกับเชื้อเพลิงดีเซล โดยให้อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นไปตามการทำงานของเครื่องยนต์

1.3.2 สร้าง Performance map ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกและเชื้อเพลิงดีเซล

1.3.3 ศึกษาและวิเคราะห์การเผาไหม้และการปลดปล่อยความร้อนเนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจากข้อมูลความดันในกระบอกสูบที่จุดทำงานที่กำหนดให้ครอบคลุมย่านการใช้งาน

1.3.4 เปรียบเทียบผลของการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก และเชื้อเพลิงดีเซลที่มีต่อเครื่องยนต์ CI ชนิด Direct Injection ในด้านสมรรถนะและการเผาไหม้

1.3.5 เปรียบเทียบผลของการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกผสมเชื้อเพลิงดีเซลและเชื้อเพลิงดีเซลที่มีต่อเครื่องยนต์ CI ชนิด Direct Injection ในด้านการปลดปล่อยมลพิษ (ควันดำ)

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 การทดสอบโดยใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป (Commercial Diesel, CD)

1.4.1.1 ทดสอบเครื่องยนต์ CI ชนิด Direct Injection โดยควบคุมค่าพารามิเตอร์คือ แรงบิด อัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ อุณหภูมิเครื่องยนต์ อุณหภูมิน้ำมันเครื่อง และอุณหภูมิไอเสีย โดยให้อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นไปตามการทำงานของเครื่องยนต์ ส่วนอุณหภูมิ ความชื้น และความดันของอากาศขาเข้าเครื่องยนต์แปรผันตามสภาพแวดล้อม ที่สภาวะคงตัว อัตราความเร็วรอบต่าง ๆ แล้วบันทึกข้อมูลตัวแปรการทำงาน อาทิ แรงบิด ความดันในห้องเผาไหม้ องศาเพลาช้อเหวี่ยง อัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ ความดันท่อส่งเชื้อเพลิง อัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศ ที่จุดทำงานต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ ณ การทำงานที่สภาวะภาระบางส่วน และการทำงานที่สภาวะภาระสูงสุด

1.4.1.2 คำนวณและสร้าง performance map ของเครื่องยนต์ เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลโดยใช้ข้อมูลจากข้อ 1.4.1.1

1.4.1.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่จุดทดสอบตามมาตรฐาน ESC test Cycle

1.4.1.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบด้านการปลดปล่อยมลพิษ (ควันดำ) ของเครื่องยนต์ที่จุดทดสอบตามมาตรฐาน ESC test Cycle

1.4.2 การทดสอบโดยใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก (Waste Plastic Synthetic Diesel, WPSD)

1.4.2.1 ทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 1.4.1.1 โดยเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก

1.4.2.2 คำนวณและสร้าง performance map ของเครื่องยนต์ เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกโดยใช้ข้อมูลจากข้อ 1.4.2.1

1.4.2.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่จุดทดสอบตามมาตรฐาน ESC test Cycle

1.4.2.4 วิเคราะห์การเผาไหม้และการปล่อยความร้อนเนื่องจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ที่จุดทดสอบตามมาตรฐาน ESC test Cycle

1.4.2.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบด้านการปลดปล่อยมลพิษ (ควันดำ) ของเครื่องยนต์ที่จุดทดสอบตามมาตรฐาน ESC test Cycle

1.4.3 เปรียบเทียบผลของการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกและเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปในด้านสมรรถนะ การเผาไหม้เชื้อเพลิงและการปลดปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ CI ชนิด Direct Injection

1.4.4 เรียบเรียงทฤษฎี ผลการทดลอง อภิปรายผลและสรุปผลส่งเป็นวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากการศึกษาจะช่วยให้ทราบผลของการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปที่มีผลต่อสมรรถนะ การเผาไหม้เชื้อเพลิงและการปลดปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ CI ชนิด Direct Injection เพื่อเป็นแนวทางประกอบการพิจารณาถึงความเหมาะสมในการนำเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกไปใช้งานกับเครื่องยนต์ CI ชนิด Direct Injection ต่อไป

บทที่ 2

เชื้อเพลิงและทบทวนวรรณกรรม

2.1 เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป (Commercial Diesel)

เชื้อเพลิงดีเซลที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นเชื้อเพลิงดีเซลที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ซึ่งได้มาจากการนำน้ำมันดิบซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลากหลายชนิดปะปนกันอยู่รวมถึงสารประกอบอื่น ๆ เช่น กำมะถัน ไนโตรเจน ออกซิเจน เป็นต้น จึงทำให้ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทันทีจึงต้องนำมาผ่านกระบวนการกลั่นลำดับส่วนและกระบวนการอื่น ๆ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าต่าง ๆ ออกมาใช้ประโยชน์รวมถึงเชื้อเพลิงดีเซลคุณภาพดีที่มีองค์ประกอบและคุณสมบัติเป็นไปตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล พ.ศ.2556 ซึ่งเหมาะกับการใช้งานในเครื่องยนต์

คุณสมบัติทั่วไปของเชื้อเพลิงดีเซลที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดประกอบด้วย

2.1.1 เลขซีเทน (Cetane Number)

เลขซีเทนเป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงดีเซล ซึ่งสามารถวัดได้โดยการนำเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์อ้างอิง 2 ชนิด คือ Cetane (n-hexadecane) ซึ่งกำหนดให้มีเลขซีเทนเป็น 100 เนื่องจากมีคุณสมบัติการจุดระเบิดสูงและ Isocetane หรือ Heptamethyl Nonane ซึ่งกำหนดให้มีเลขซีเทนเป็น 15 เนื่องจากเป็นสารประกอบพาราฟินที่มีกิ่งก้านสาขามากทำให้มีคุณสมบัติการจุดระเบิดต่ำมาผสมกัน โดยในการทดสอบเพื่อหาค่าเลขซีเทนจะอ้างอิงมาตรฐาน ASTM D613 ในการทดสอบและมีใช้การคำนวณตามสมการที่ 2-1

$$\text{Cetane Number} = \% \text{ n-Cetane} + 0.15 (\% \text{ Heptamethyl Nonane}) \quad (2-1)$$

จากการที่เชื้อเพลิงมีเลขซีเทนที่ต่างกันจะส่งผลต่อคุณสมบัติของเชื้อเพลิงและการทำงานของเครื่องยนต์ เช่น การสตาร์ทเครื่องยนต์ มลภาวะที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ความดันในห้องเผาไหม้ และเสียงของเครื่องยนต์ เป็นต้น โดยเชื้อเพลิงที่มีเลขซีเทนสูงจะส่งผลดีต่อการทำงานของเครื่องยนต์ ได้แก่ เครื่องยนต์มีสมรรถนะสูง เพิ่มคุณสมบัติการสตาร์ทเครื่องยนต์ในขณะที่เครื่องยนต์เย็น ลดควันดำในช่วงการอุ่นเครื่องยนต์ ลดเสียงดัง ลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและมลพิษ จึงต้องมีการกำหนดค่าซีเทนที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยประกาศกรมธุรกิจพลังงานระบุว่าเลขซีเทนของเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 50 ตามมาตรฐาน ASTM D613 [2]

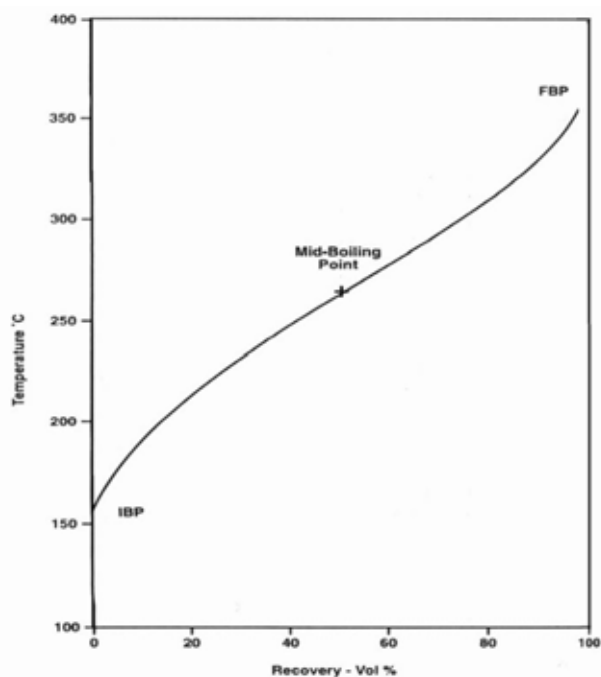
แต่การทดสอบเพื่อหาค่าเลขซีเทนนั้นมีค่าใช้จ่ายสูงในการดำเนินการสูง จึงได้มีการคำนวณค่า Cetane Index (CI) ขึ้นมาเพื่อประมาณค่าคุณสมบัติการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงแทน โดยดูจากค่า API Gravity และ Mid-Boiling Temperature (50% Evaporated) ตามมาตรฐาน ASTM D976

2.1.2 ค่าการระเหย (Volatility)

รายละเอียดที่ได้จากการจำลองการกลั่นเชื้อเพลิง ได้แก่ จุดเริ่มต้นการเดือด (IBP) จุดสิ้นสุดการเดือด (FBP) และสัดส่วนการระเหยที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยเส้นโค้งการกลั่นตัวของเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปแสดงในรูปที่ 2-1 ซึ่งตามประกาศกรมธุรกิจพลังงานอุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตรในอัตราร้อยละ 90 ของเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปต้องไม่เกิน 357 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D86 [2]

การกลั่นหรือช่วงการเดือดของเชื้อเพลิง มีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของเชื้อเพลิงดีเซล เช่น ความหนาแน่น จุดวาบไฟ อุณหภูมิการจุดระเบิดด้วยตัวเอง ความหนืดและเลขซีเทน เป็นต้น โดยเชื้อเพลิงมีค่าการระเหยสูงจะทำให้มีจุดวาบไฟต่ำส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “Vapor Lock” เนื่องจากค่าการระเหยที่สูงจะทำให้เชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ระเหยได้มากเกินไปจนทำให้อากาศไม่สามารถไหลเข้าไปผสมได้จึงทำให้เครื่องยนต์เกิดความล้มเหลวในการติดเครื่องยนต์ใหม่ หลังจากดับเครื่องยนต์ลงในช่วงเวลาสั้นๆ ในขณะที่เครื่องยนต์ร้อน และในส่วนที่มีจุดเดือดสูงหรือระเหยยากของเชื้อเพลิงก็อาจเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์ก่อให้เกิดการสะสมและรวมตัวกันในเครื่องยนต์ผลที่ได้คือค่าควันดำที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม หากช่วงการระเหยของเชื้อเพลิงที่มีจุดเดือดสูงหรือระเหยยากยังอยู่ภายในช่วง 350°C ถึง 400°C ผลกระทบที่เกิดกับไอเสียก็จะมีค่าไม่สูงมากนัก

จากรูปที่ 2 - 1 สามารถอธิบายได้ว่า ค่าการระเหยที่สูงของเชื้อเพลิงซึ่งอยู่ระหว่างจุดเริ่มต้นการกลั่นตัว (Initial boil point, IBP) ถึงจุดกึ่งกลางการกลั่นตัว (Mid-Boiling Point) เป็นช่วงของเชื้อเพลิงที่ระเหยง่ายจึงช่วยในการติดเครื่องยนต์ขณะเครื่องเย็นและการอุ่นเครื่องยนต์ แต่ในส่วนช่วงของเชื้อเพลิงที่เกิดหลังจาก Mid-Boiling Point ถึงจุดสิ้นสุดการกลั่นตัว (Finish boil point, FBP) จะส่งผลให้เชื้อเพลิงระเหยยากทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้การสะสมรวมตัวของคราบเขม่าและควันดำเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 2 - 1 โค้งการกลั่น (Distillation Curve) ของเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป [5]

2.1.3 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงสามารถบอกถึงองค์ประกอบและคุณลักษณะของเชื้อเพลิงดีเซลซึ่งมีผลต่อค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ เช่น ประสิทธิภาพการจุดระเบิด กำลัง การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง คุณสมบัติการทำงานที่อุณหภูมิต่ำ และแนวโน้มของการเกิดควัน โดยอาจแสดงค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงในรูปของค่าความถ่วงจำเพาะ หรือ API Gravity ได้

สำหรับในประเทศไทย ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงานระบุค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงในรูปของค่าความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6/15.6 องศาเซลเซียส โดยในเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.81 และไม่สูงกว่า 0.87 ตามมาตรฐาน ASTM D 1298 [2]

2.1.4 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดในที่นี้แสดงถึงความต้านทานการไหลของเชื้อเพลิงซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่ง เนื่องจากความหนืดของเชื้อเพลิงมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบการฉีดเชื้อเพลิง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำงานที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากเชื้อเพลิงที่มีความหนืดเพิ่มสูงจะส่งผลการสเปรย์ของเชื้อเพลิงที่ฉีดออกไปไม่ทำให้ฝุมกรวยที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลง ทำให้การกระจายตัวเชื้อเพลิงและการพุ่งของสเปรย์ (Spray Penetration) ลดลงไปด้วย ในขณะที่การเกิดหยดเชื้อเพลิง (Droplet) ก็มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นความหนืดจึงมีผลต่อช่วงเวลาการฉีดเชื้อเพลิงที่เหมาะสมของเครื่องยนต์และปริมาณการฉีดเชื้อเพลิง เนื่องจากความหนืดจะส่งผลโดยตรงต่อการทำงานของระบบฉีดเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์

เชื้อเพลิงดีเซลมักจะมีการกำหนดค่าความหนืดสูงสุดเอาไว้เพื่อให้แน่ใจว่าจะมีปริมาณการไหลของเชื้อเพลิงที่เพียงพอต่อการติดเครื่องยนต์ขณะเย็น อีกทั้งยังมีการกำหนดค่าความหนืดต่ำสุดเอาไว้ด้วยเพื่อป้องกันการสูญเสียกำลังเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิสูงด้วย เนื่องจากเชื้อเพลิงเมื่อมีค่าความหนืดต่ำมากเกินไปจะทำให้ความยาวของสเปรย์ที่พุ่งออกไปมากเกินไปเปียกผนังห้องเผาไหม้ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียกำลังของเครื่องยนต์ โดยประกาศกรมธุรกิจพลังงานระบุว่าค่าความหนืดของเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 1.8 เซนติสโตกส์ และไม่สูงกว่า 4.1 เซนติสโตกส์ ตามมาตรฐาน ASTM D445 [2]

2.1.5 คุณสมบัติการหล่อลื่น (Lubricity)

เนื่องจากรัฐบาลกำหนดให้มีปริมาณกำมะถันในเชื้อเพลิงดีเซลได้ไม่เกิน 0.005 % โดยน้ำหนัก ซึ่งการลดปริมาณกำมะถันในเชื้อเพลิงดีเซลลงทำให้คุณสมบัติการหล่อลื่นโดยธรรมชาติลดลงไปมาก ส่งผลให้ปั๊มหัวฉีด หัวฉีดสึกหรอและติดตายได้ในระยะยาว สำหรับประเทศไทยได้มีการกำหนดให้น้ำมันดีเซลต้องมีการเติมไบโอดีเซลซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารช่วยเพิ่มการหล่อลื่นในน้ำมันอยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารเพิ่มคุณสมบัติการหล่อลื่นเพิ่มเติมลงในน้ำมันอีก โดยคุณสมบัติการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงดีเซลจะทดสอบด้วยวิธี High Frequency Reciprocating Rig (HFRR) ตามวิธีการทดสอบของ CEC F-06-A-96 ซึ่งจะทดสอบคุณสมบัติการหล่อลื่นของเชื้อเพลิง

2.1.6 คุณสมบัติที่อุณหภูมิต่ำของเชื้อเพลิงดีเซล

เนื่องจากสารประกอบพาราฟินจำพวก Heavy Paraffinic Hydrocarbons ซึ่งอาจผสมอยู่ในเชื้อเพลิงดีเซลซึ่งมีความสามารถในการละลายที่จำกัด ทำให้ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำสารประกอบเหล่านี้จะสะสมและรวมตัวกันเป็นไข (Wax) ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานจะก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ กับเครื่องยนต์ เช่น การอุดตันในระบบจ่ายเชื้อเพลิง เป็นต้น

2.1.7 เสถียรภาพของเชื้อเพลิงดีเซล

ความเสถียรภาพและไม่เปลี่ยนแปลงระหว่างช่วงเวลาระหว่างการผลิต การนำไปใช้งานในเครื่องยนต์ และระหว่างการเก็บรักษาในระยะยาวเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเชื้อเพลิง เนื่องจากการที่เชื้อเพลิงมีไฮโดรเจนและสารประกอบที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบมักจะส่งผลต่อกระบวนการเสื่อมสภาพของเชื้อเพลิง เนื่องจากองค์ประกอบเหล่านี้มักจะรวมตัวกันเป็นตะกอนเชื้อเพลิง โดยมีกลไกของการเกิดหลายขั้นตอน เริ่มต้นด้วยการเกิดห่วงโซ่ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดอนุมูลอิสระ เมื่อมีอนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอนก่อตัวขึ้น มันจะสามารถรวมตัวกับออกซิเจนเพื่อก่อให้เกิดอนุมูล Peroxide ในทางกลับกันก็สามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนอื่นได้โดยการกำเนิดอนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอนและ Hydro peroxide ดังนั้นกระบวนการเผาไหม้จึงไม่สูญเสียไปได้ด้วยตัวเอง อนุมูลอิสระยังสามารถเป็นเหตุให้เกิด Polymerization และปฏิกิริยาการเผาไหม้ก่อให้เกิดวัสดุที่น้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งสามารถสะสมรวมตัวกันในระบบเชื้อเพลิง ขั้นตอนสุดท้ายคือ

Chain Termination โดยเมื่อ Antioxidant หายไปจะเกิดเป็นปฏิกิริยาซึ่งนำไปสู่ผลิตภัณฑ์ที่ไร้อนุภาคลิสรระ

เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นด้วยตัวเองส่งผลต่อความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของเชื้อเพลิงในถังเก็บ ซึ่งทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยทั่วไปมี 2 ชนิด คือ Soluble gum ที่เป็นสารจำพวก Non-volatile และ Insoluble gum ซึ่งมีลักษณะเป็นตะกอน สิ่งเหล่านี้จะส่งผลโดยตรงต่อการเสื่อมสภาพของเชื้อเพลิงในถังเก็บ เมื่อนำไปใช้งานในเครื่องยนต์จะเกิดการอุดตันขึ้นที่ไส้กรองหรือไปรวมตัวสะสมที่ระบบการฉีดเชื้อเพลิงในรูปของสารเหนียว (Gum) เนื่องจากเชื้อเพลิงดีเซลจะทำหน้าที่เป็นสารหล่อเย็นของหัวฉีดเชื้อเพลิงซึ่งทำให้เกิดการเสื่อมสภาพได้ที่อุณหภูมิสูง ส่วนในถังเก็บนั้นเมื่อเชื้อเพลิงเย็นลงและถูกทำให้ร้อนขึ้นอีกครั้งจากการนำไปใช้งานซ้ำไปมาเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่องอาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของเชื้อเพลิงดีเซลที่ไม่มีเสถียรภาพทางความร้อนได้

2.1.8 ปริมาณซัลเฟอร์ (Sulphur Content)

การลดระดับอนุภาคที่ปะปนอยู่ในไอเสียหรือ Particulate Matter (TPM) จากเครื่องยนต์ดีเซลสามารถทำได้โดยการใช้เชื้อเพลิงดีเซลที่มีกำมะถันต่ำ (<0.05% โดยน้ำหนัก) ระหว่างกระบวนการเผาไหม้ กำมะถันส่วนใหญ่ในเชื้อเพลิงถูกเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ซึ่งส่วนมากถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเพิ่มเติมนำไปสู่มลภาวะทางอากาศ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เหลือจะถูกเผาไหม้ในไอเสียดีเซลที่มีออกซิเจนหนา และเกิดเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) อุณหภูมิไอเสียดีเซลที่สูงจะรักษาสภาพของซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ให้อยู่ในสถานะไอและจะทำปฏิกิริยากับน้ำ โดยปฏิกิริยาคายความร้อนก่อให้เกิดละอองกรดกำมะถันในอากาศ ซึ่งเมื่อรวมตัวกับน้ำโดยพันธะทางเคมีจะถูกปล่อยออกมาเป็น Particulate Matter

ประโยชน์ด้านอื่น ๆ ของการลดปริมาณกำมะถันในเชื้อเพลิงดีเซลคือ ลดการกัดกร่อนเนื่องจากปริมาณกำมะถันที่สูงในเชื้อเพลิงทำให้เกิดการกัดกร่อนที่แหวนลูกสูบและ Liners ของกระบอกสูบ โดยการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับระดับกำมะถันของเชื้อเพลิงและสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์โดยตรง สำหรับในประเทศไทยค่ามากที่สุดของกำมะถันในดีเซลถูกกำหนดไว้คือ 0.005% โดยน้ำหนัก ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน [2]

2.1.9 ปริมาณอะโรมาติก (Aromatic Content)

สารประกอบอะโรมาติกในเชื้อเพลิงมีส่วนช่วยในการหล่อลื่นของเครื่องยนต์โดยช่วยป้องกันการสึกหรอของปั๊มหัวฉีดน้ำมัน แต่มีผลเสียคือเมื่อเผาไหม้แล้วจะทำให้เกิดการปล่อยมลพิษ

2.1.10 ปริมาณน้ำและตะกอน (Water and Sediment Content)

เนื่องจากน้ำที่ปะปนอยู่ในเชื้อเพลิงดีเซลเป็นสิ่งที่ยากต่อการกำจัดซึ่งสามารถปะปนเข้ามาได้ตลอดเวลา เช่น ระหว่างกระบวนการผลิต ระหว่างการขนส่งและการจัดเก็บในถัง ซึ่งก่อให้เกิดการ

เดบิตของเชื้อราและแบคทีเรีย ซึ่งส่งผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบเชื้อเพลิง เช่น เกิดการอุดตันที่ไส้กรอง เป็นต้น และน้ำยังช่วยเพิ่มสภาวะกรดของเชื้อเพลิงทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนและความสึกหรอในเครื่องยนต์และระบบฉีดเชื้อเพลิง โดยประกาศกรมธุรกิจพลังงานระบุว่าปริมาณน้ำและตะกอนในเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 0.05 โดยปริมาตร ตามมาตรฐาน ASTM D2709 [2]

ตะกอนส่วนใหญ่ที่พบในเชื้อเพลิงดีเซลเป็นสารอินทรีย์โดยกำเนิด เช่น สนิม อนุภาคโลหะ และฝุ่นละออง มีบางส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพของเชื้อเพลิงที่ไม่มีความเสถียร เกิดจากแบคทีเรียที่ร่อยต่อของน้ำมันกับน้ำ หรือไขจากเชื้อเพลิง ส่งผลให้เกิดการอุดตันไส้กรองในยานพาหนะ โดยสามารถทดสอบมาตรฐานสำหรับปริมาณน้ำและตะกอนได้โดยวิธีการเหวี่ยง

2.1.11 จุดวาบไฟ (Flash Point)

จุดวาบไฟ คือ อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่จะทำให้เชื้อเพลิงระเหยกลายเป็นไอที่มีปริมาณมากพอจะเกิดการลุกไหม้ได้จากแหล่งกำเนิดประกายไฟภายใต้สภาวะห้องปฏิบัติการที่ได้มาตรฐาน โดยประกาศกรมธุรกิจพลังงานระบุว่าจุดวาบไฟในเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 52 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D 93 [2] ซึ่งจุดวาบไฟนี้จะมีผลต่อเชื้อเพลิงในการพิจารณาด้านการขนส่ง รูปแบบการจัดเก็บ และการระมัดระวังรักษา

2.2 เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก (Waste Plastic Synthetic Diesel)

ในการเปลี่ยนขยะเป็นเชื้อเพลิงนั้น [6] การที่จะย่อยสลายขยะพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกไปเป็นพลังงานนั้นต้องอาศัยกระบวนการทางความร้อนโดยเปลี่ยนขยะพลาสติกให้ไปอยู่ในรูปของสารปิโตรเคมีขั้นต้นหรือพลังงานในรูปแบบต่างๆ โดยวิธีการที่จะเปลี่ยนขยะพลาสติกเหล่านี้ให้เป็นพลังงานแปรรูปที่มีค่าความร้อนที่สูงกว่าอย่างก๊าซเชื้อเพลิงและน้ำมัน คือ กระบวนการที่เรียกรวมกันว่า กระบวนการพีจีแอล (PGL Process) ซึ่งย่อมาจากกระบวนการย่อย 3 กระบวนการ คือ กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) แกสซิฟิเคชัน (Gasification) และลิกวิแฟกชัน (Liquefaction) โดยทั้ง 3 มีความเหมือนกันก็คือ เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนแก่สารใดสารหนึ่ง เพื่อย่อยสลายโมเลกุลของสารนั้นให้มีขนาดเล็กลงในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนหรือมีออกซิเจนน้อย แต่ด้วยกระบวนการผลิตและสถานะที่แตกต่างกันทำให้การไพโรไลซิสจะให้ก๊าซและน้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์ กระบวนการแกสซิฟิเคชันจะให้ก๊าซสังเคราะห์ (ไฮโดรเจนรวมกับคาร์บอนมอนอกไซด์) และการทำลิกวิแฟกชันนั้นอาจจะมีการเติมตัวทำละลายเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเพื่อวัตถุประสงค์ในการผลิตน้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์หลัก แต่เนื่องจากงานวิจัยเน้นการผลิต “น้ำมัน” ดังนั้นกระบวนการไพโรไลซิสจึงเป็นกระบวนการที่เหมาะสมเป็นที่นิยมมากที่สุด [1, 7] สำหรับการผลิตน้ำมันจากขยะปิโตรเคมี โดยให้ได้มาซึ่งเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 วัตถุดิบ

พลาสติก [8] เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์วัสดุโดยกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งมีมวลโมเลกุลสูงและอาจมีสารอื่น ๆ เติมแต่งเข้าไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและ/หรือลดต้นทุนการผลิต โดยพอลิเมอร์เหล่านี้สามารถขึ้นรูปเป็นลักษณะต่าง ๆ ที่ต้องการได้ ซึ่งพลาสติกที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ เทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตติง

เทอร์โมพลาสติก เป็นพลาสติกที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยสามารถทำให้อ่อนตัวและหลอมละลายได้อีกถ้าได้รับความร้อนที่เพียงพอและแข็งตัวเมื่อเย็นลง โดยพลาสติกประเภทนี้จะมีลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลเป็นโซ่ตรงยาวและมีการเชื่อมต่อกันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์น้อยมากจึงสามารถหลอมเหลวได้หรือเมื่อผ่านการอัดด้วยแรงมาก ๆ จะไม่ทำลายโครงสร้างเดิม ดังนั้นจึงสามารถนำมาผลิตเป็นพลาสติกชิ้นใหม่ได้อีก เช่น พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีน และพอลิโพรพิลีน เป็นต้น

เทอร์โมเซตติง เป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติพิเศษ เนื่องจากสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้ดีจึงมีคุณสมบัติคงรูปสูง โดยสามารถหลอมละลายและขึ้นรูปได้เพียงครั้งเดียว จึงไม่อ่อนตัวหรือเปลี่ยนรูปร่าง และเมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงเพียงก็จะแตกและไหม้เป็นขี้เถ้าสีดำ เนื่องจากโมเลกุลจะเชื่อมโยงกันเป็นร่างแหจึงมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูง ทำให้ไม่สามารถนำกลับมาหลอมใหม่ได้หลังจากเปลี่ยนรูปเป็นของแข็ง เช่น phenol formaldehyde และ urea formaldehyde เป็นต้น ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกได้

วัตถุดิบที่ใช้เป็นขยะพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกแบบที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น ถุงพลาสติกบรรจุอาหารต่าง ๆ เนื่องจากมีความสกปรก ทำให้ไม่คุ้มค่าต่อการนำกลับมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นพลาสติกใหม่ได้ ซึ่งต้องกำจัดโดยการฝังกลบหรือเผาทำลาย ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก

2.2.2 กระบวนการผลิต

กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis Process) [3] เป็นกระบวนการแตกตัวหรือสลายตัวของสารประกอบ หรือวัสดุต่างๆ ด้วยความร้อนปานกลาง ที่อุณหภูมิประมาณ 400 – 800 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน หรือมีออกซิเจนในปริมาณที่น้อยมาก โดยทั่วไปผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามสภาวะ คือ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซ ของเหลว (ซึ่งโดยทั่วไปมีคุณสมบัติคล้ายน้ำมัน) และของแข็ง (Char) เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิ (Primary product) อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ เช่น อุณหภูมิ อัตราเร็วในการให้ความร้อน เป็นต้น แต่โดยตัวกระบวนการไพโรไลซิสเองแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมากที่สุด คือ ของเหลวหรือน้ำมัน

ความร้อนที่ให้แก่กระบวนการไพโรไลซิสนั้นจะเป็นการให้พลังงานความร้อนทางอ้อมแก่เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส แล้วถ่ายเทไปให้กับวัตถุที่อยู่ข้างใน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ก๊าซ ของเหลว และของแข็ง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิ และจะใช้ผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมินี้มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น การนำเอาน้ำมันที่เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมินี้มาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง เพื่อผลิตคาร์บอนแบล็ก หรือนำมากลั่นแยกเป็นน้ำมันเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นทุติยภูมิ

ปฏิกิริยาที่เกิดในกระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วย ขั้นแรก การสลายตัวของสารที่ระเหยง่ายออกจากวัตถุดิบ (Devolatilization) ขั้นที่สอง เป็นการแตกตัวของวัตถุดิบเอง โดยที่องค์ประกอบที่สามารถแตกตัวได้ที่สภาวะที่ใช้ก็จะแตกตัวออกมาเป็นโมเลกุลที่เล็กลง และเล็กลงเรื่อยๆ ตามเวลาที่ใช้ หรืออุณหภูมิที่กำหนด จนกระทั่งเกิดการแตกตัวที่สมบูรณ์ของวัตถุดิบ โดยอุณหภูมิแต่ละขั้นแตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ แต่อย่างไรก็ตาม ถ้ามีการให้ความร้อนและเวลามากเกินไป สารที่ได้จากการแตกตัวของวัตถุดิบจะกลับมารวมตัวกัน เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งอาจจะกลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าออกจากกระบวนการ หรือเป็นของแข็งชั้นเหนียวติดอยู่ตามอุปกรณ์ต่างๆ ได้ ดังนั้น ภาวะที่ใช้ในการไพโรไลซิสจะต้องขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ด้วย การมีความรู้ที่ดีเกี่ยวกับวัตถุดิบที่ป้อนเข้ากระบวนการ จะทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพในปริมาณที่สูง และไม่ก่อให้เกิดผลผลิตที่ไม่ต้องการ หรือก่อให้เกิดผลผลิตที่ทำให้ต้องหยุดการผลิตชั่วคราว เพื่อทำการซ่อมแซมอุปกรณ์

การกลั่นลำดับส่วน (Fractional distillation) เป็นกระบวนการแยกสารประกอบที่สามารถระเหยได้ออกจากกันให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบย่อยแต่ละตัว (fractions) โดยเป็นการแยกสารประกอบทางเคมีด้วยการให้ความร้อนกับสารประกอบนั้นเพื่อใช้ความแตกต่างของจุดเดือด (boiling point) ซึ่งสารประกอบแต่ละตัวจะมีค่าไม่เท่ากันและจะถูกแยกออกมาที่ความดันไอแตกต่างกัน การกลั่นลำดับส่วนนี้จัดเป็นการกลั่นชนิดพิเศษ โดยทั่วไปจะใช้แยกส่วนประกอบของสารเคมีที่มีจุดเดือดต่างกันไม่มากนักประมาณ 25 องศาเซลเซียส หากจุดเดือดของสารผสมที่จะนำมากลั่นมากกว่า 25 องศาเซลเซียสก็สามารถกลั่นได้โดยใช้วิธีการกลั่นแบบธรรมดา (simple distillation)

โดยส่วนใหญ่แล้วการกลั่นลำดับส่วนจะประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการกลั่นปิโตรเลียม (petroleum refineries) ปิโตรเคมี (petrochemical) อุตสาหกรรมเคมีอื่น (chemical plants) และกระบวนการผลิตก๊าซธรรมชาติ (natural gas processing plants) เพื่อแยกสารประกอบที่มีค่าออกมาใช้ประโยชน์

2.2.3 คุณสมบัติเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกที่ใช้ในการทดสอบ

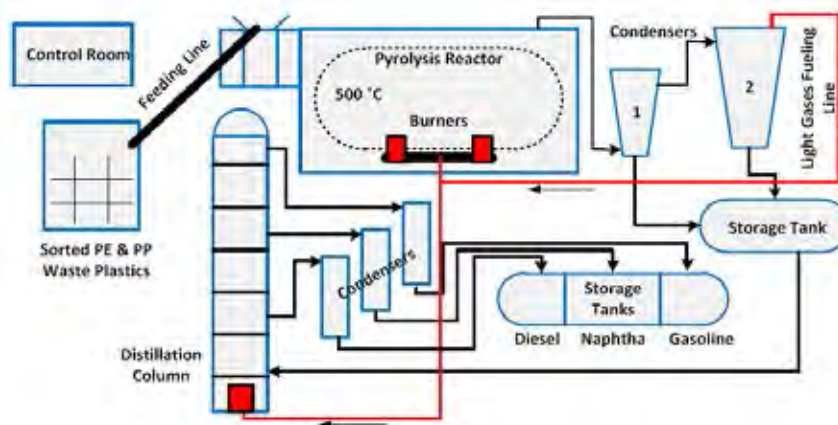
เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นเชื้อเพลิงเหลวซึ่งผลิตมาจากขยะพลาสติกประเภทที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของโพลีโอเลฟิน โดยใช้เตาไพโรไลซิสแสดงดังรูปที่ 2 - 2 ซึ่งเป็นกระบวนการชนิดดูดความร้อนที่อุณหภูมิปานกลาง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยลดอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาลงมาอยู่ที่ 350-500 องศาเซลเซียส โดย เพื่อให้โครงสร้างโมเลกุลของโพลีเมอร์มีขนาดเล็กลงและได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมากขึ้น [9] โดยทั่วไปเชื้อเพลิงที่ได้จะมีค่าซีเทนต่ำ ค่าความหนืดและมีสิ่งแปลกปลอมตกค้างสูง จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมาผ่านกระบวนการกลั่นลำดับส่วนที่หอกันลำดับส่วนขั้นต้น แสดงดังรูปที่ 2 - 3 โดยควบคุมอุณหภูมิของช่วงชั้นหอกันที่ต้องการเชื้อเพลิงให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลให้มีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 290 องศาเซลเซียส ซึ่งเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกที่ได้จะมีคุณภาพที่ดีขึ้นและมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล [10-12] ดังมีแผนภูมิการผลิตแสดงไว้ในรูปที่ 2 - 4



รูปที่ 2 - 2 เตาไพโรไลซิส



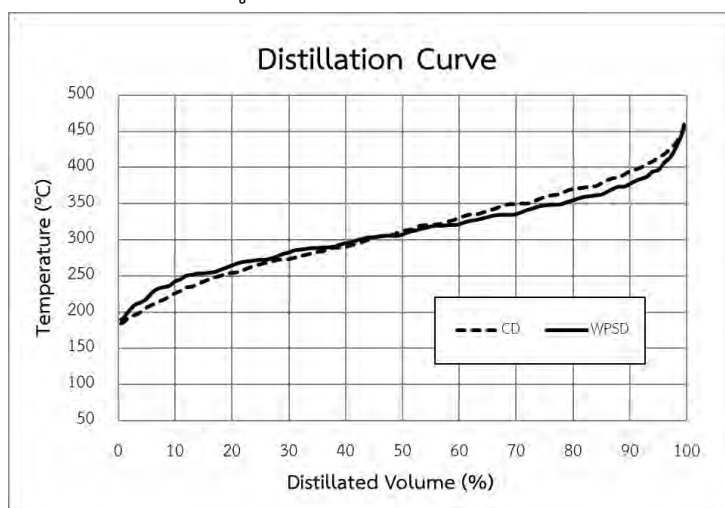
รูปที่ 2 - 3 หอกันลำดับส่วนขั้นต้น



รูปที่ 2 - 4 แผนภูมิการผลิตเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก

เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกที่ผลิตได้จากการนำไปวิเคราะห์ด้วยกระบวนการต่าง ๆ พบว่า มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงดีเซลหลายประการ เช่น ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความร้อน ค่าความหนืด และจุดวาบไฟ ดังแสดงในตารางที่ 2 - 1 และมีการแสดงคุณสมบัติการระเหยแสดงเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกกับเชื้อเพลิงดีเซลไว้ด้วยเส้นโค้งการกลั่นดังรูปที่ 2 - 5

โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการกลั่น เพื่อให้ได้ค่าคุณสมบัติการกลั่นตัวของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกที่ได้มีความใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปมากที่สุด ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้มีด้วยกันทั้งสิ้น 2 ชนิด คือ เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปและดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก โดยมีสีของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจะมีสีดำน้ำตาลเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลที่มีสีเหลืองแสดงดังรูปที่ 2 - 6



รูปที่ 2 - 5 โค้งการกลั่นของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล



รูปที่ 2 - 6 เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป (ซ้าย) และเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก (ขวา)

ตารางที่ 2 - 1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปที่ใช้ทดสอบ

Properties	Method	WPSD	CD
Density at 15 °C (g/cm ³)	ASTM D 4052	0.8118	0.8328
Viscosity cSt (mm ² /s)	ASTM D 445	2.93	3.19
Heating value (MJ/kg)	ASTM 5865-07	45.41	44.87
CHN Elements			
Carbon (%wt)	ASTM D5373	85.04	85.13
Hydrogen (%wt)		13.39	13.32
Nitrogen (%wt)		0.08	-
Flash Point (oC)	ASTM D 93	55.67	64.33
Distillation (°C)			
IBP	ASTM D86	107	112
T10		198	187
T50		300	304
T90		464	469
FBP		551	552

*ผลการทดสอบแสดงในภาคผนวก จ ผลการทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการนำเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล

การศึกษาเกี่ยวกับการนำเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงดีเซลนั้น ได้รับความสนใจมากขึ้นในปัจจุบันเนื่องจากปริมาณที่น้อยลงและราคาที่สูงขึ้นของน้ำมันดีเซล โดย VP. Mohana Jeya Valli et al. (2012) [8] ได้รวบรวมข้อมูลและนำเสนอว่าขยะพลาสติกในปัจจุบันนั้นมีปริมาณมาก อีกทั้งยังมีความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงมากที่สุด เนื่องจากมีค่าความร้อนสูงและสามารถหาได้ตามแหล่งชุมชนทั่วไป ไม่เหมือนกับกระดาษหรือเศษไม้ต่าง ๆ ซึ่งมีความชื้นปะปนอยู่ ส่วนกระบวนการเปลี่ยนขยะพลาสติกให้เป็นเชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของขยะพลาสติกและเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับท้องถิ่นนั้น ๆ โดยทั่วไปการเปลี่ยนขยะพลาสติกให้กลายเป็นเชื้อเพลิงนั้นต้องใช้วัตถุดิบที่ไม่เป็นอันตรายและสามารถจุดติดไฟได้ เนื่องจากพลาสติกบาง

ชนิดอาจมีสารไม่พึงประสงค์ เช่น สารทนไฟซึ่งมีส่วนประกอบของโบรมีนและสารประกอบฟลูออรีน หรือมีส่วนประกอบของไนโตรเจน ฮาโลเจน ซัลเฟอร์หรือสารอื่นๆ ซึ่งก่อให้เกิดอันตรายกับมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้ กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการหนึ่งที่น่าสนใจโดยเป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของคาร์บอนที่ใช้ปริมาณออกซิเจนต่ำ ๆ ซึ่งพลาสติกที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันดีเซลสังเคราะห์นั้นต้องเป็นขยะพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกซึ่งสามารถหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อนซึ่งมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน

เนื่องจากการเปลี่ยนขยะไปเป็นพลังงานที่นั่นเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้การจัดการขยะเพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายประเภท โดย Ampaitepin Singhabhandhu และ Tetsuo Tezuka (2010) [13] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการแปรรูปขยะให้เป็นพลังงานซึ่งประกอบไปด้วย น้ำมันพีซใช้แล้ว น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว และขยะพลาสติก เนื่องจากขยะเหล่านี้มีค่าความร้อนสูง พบว่า ปริมาณที่มีอยู่อย่างมากมายของน้ำมันพีซแล้วและขยะพลาสติกมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบหลักในการผลิตน้ำมันจากกระบวนการไพโรไลซิส

Achyut K. และคณะ (2010) [11] ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการทางความร้อนที่ใช้เปลี่ยนขยะพลาสติกไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง โดยหากระบวนการที่เหมาะสมในการจัดการขยะพลาสติกและการเพิ่มมูลค่า พบว่า จำนวนที่มากขึ้นของขยะพลาสติกน่าจะสามารถแก้ไขได้โดยนำมาเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงทดแทนพลังงานจากฟอสซิล ซึ่งกระบวนการที่เหมาะสมในการเปลี่ยนขยะพลาสติกไปเป็นเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนโดยไม่มีการปลดปล่อยมลพิษนั้นในแต่ละประเทศจะมีขั้นตอนและกระบวนการที่แตกต่างกันไป อย่างไรก็ตามกระบวนการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายประเทศเนื่องจากมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

จากการที่กระบวนการไพโรไลซิสมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย Bidhya Kunwar และคณะ (2016) [9] จึงได้ศึกษาและสรุปเกี่ยวกับกระบวนการไพโรไลซิสพบว่าประกอบไปด้วยกระบวนการ 2 แบบ คือ แบบใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวกับแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวเวลานั้นพลาสติกจะสลายตัวด้วยความร้อนและได้ผลิตภัณฑ์ออกมา 3 ชนิด คือ ก๊าซ น้ำมันดิบและกากที่เหลือจากกระบวนการสลายตัว ซึ่งน้ำมันดิบที่ได้จากกระบวนการนี้โดยปกติสารประกอบของไฮโดรคาร์บอนที่ได้จะมีค่าอุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีการพัฒนากระบวนการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำมันที่มีองค์ประกอบของน้ำมันเบนซินและดีเซลให้สูงขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดพลังงานที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC หรือ ซีโอไลท์ เป็นต้น ส่วนการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับวัตถุดิบยังช่วยเพิ่มปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้อีกด้วย

Jerzy Walendziewski (2002) [14] ได้ศึกษาเกี่ยวกับเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ที่ได้มาจากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการทางความร้อน พบว่า กระบวนการทางความร้อนทั้งแบบที่ใช้และไม่ใช้

ตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อใช้พอลิเอทิลีน พอลิสไตรีน พอลิโพรไพลีนและพลาสติกผสมอื่นๆ เป็นวัตถุดิบสามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันและก๊าซมากกว่า 95% โดยเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสจะทำให้อุณหภูมิที่ใช้ลดลงและได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันมากขึ้น แต่ไม่มีผลกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซ เนื่องจากก๊าซที่ได้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของพลาสติกและเงื่อนไขของกระบวนการ นอกจากการใช้กระบวนการไพโรไลซิสในการเปลี่ยนขยะพลาสติกให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวแล้วยังมีการใช้กระบวนการ liquefaction ด้วย ซึ่ง Paul T. Williams และ Edward Slaney (2007) [15] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเปรียบเทียบกับกระบวนการ liquefaction เมื่อใช้พลาสติกทั้งแบบเดี่ยวและแบบผสม พบว่า ทั้งสองกระบวนการให้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่แตกต่างกันมากนักซึ่งประกอบไปด้วยของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยเมื่อใช้พลาสติกเดี่ยว เช่น พอลิเอทิลีนและพอลิโพรไพลีนเป็นวัตถุดิบในทั้งสองกระบวนการ ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จะเป็นของเหลวหรือน้ำมัน แต่เมื่อใช้พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นวัตถุดิบจะได้ก๊าซ Hydrogen chloride และของแข็งซึ่งเป็นเศษเหลือจากกระบวนการผลิต ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้พลาสติกผสมเป็นวัตถุดิบนั้นพบว่ามีความเข้มข้นของ alkanes สูงและยังมีสารระเหยชนิดวงแหวนเดี่ยวสูงด้วย

ในประเทศไทย ธีัญญพิชชา เอกบุศย์ และคณะ [16] ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับศักยภาพในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก ซึ่งใช้ขยะพลาสติกประเภท PP และ PE เป็นวัตถุดิบ จากผู้ประกอบการเอกชนและโครงการส่งเสริมการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นน้ำมันที่ขนาดกำลังการผลิตต่าง ๆ ทั้งแบบกะและแบบต่อเนื่อง พบว่า ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากพลาสติก 1 ตันเฉลี่ย ที่ทุกขนาดกำลังการผลิตจะได้น้ำมัน 600 ลิตร โดยมีค่าความชื้นร้อยละ 5 - 40 และมีค่าความปนเปื้อนร้อยละ 5 - 40 โดยจะให้ผลตอบแทนสูงสุดเมื่อวัตถุดิบที่ใช้คือขยะพลาสติกที่ได้จากหลุมฝังกลบ ซึ่งในแต่ละพื้นที่ก็จะมีกำลังการผลิตที่แตกต่างกัน

ในส่วนของการนำมาทดสอบกับเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันจากขยะพลาสติกซึ่งผลิตด้วยกระบวนการไพโรไลซิสนั้น M. mani และคณะ (2009) [17] ได้ทำการทดสอบเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดซึ่งไม่มีการดัดแปลงเครื่องยนต์ เพื่อทดสอบผลกระทบที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันจากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ที่ความเร็วรอบคงที่ 1500 รอบต่อนาที ภาระการทดสอบ 25%, 50%, 75% และ 100 % พบว่า เครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันจากขยะพลาสติกจะมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนใกล้เคียงกับเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซล (จนถึง 75 % ของช่วงการทดสอบ) ยกเว้นที่ภาระสูงสุดเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันจากขยะพลาสติกจะมีค่าต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซล ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจาก heat loss ที่สูงกว่า

ในส่วนของอุณหภูมิไอเสีย เครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันจากขยะพลาสติกจะมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันจากขยะพลาสติกมีสัดส่วนของเชื้อเพลิงต่ออากาศที่สูงกว่าจึงทำให้มีการปลดปล่อยความร้อนที่สูงกว่า

เนื่องจากค่าความหนืด (Viscosity) ในน้ำมันเชื้อเพลิงจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์และการระบายการเป็นไอของเชื้อเพลิง รวมไปถึงกระบวนการเผาไหม้ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการปลดปล่อยมลพิษและการบริโภคเชื้อเพลิง ดังนั้น การผสมกับเชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลคือหนึ่งในเทคนิคที่ใช้เชื้อเพลิงที่มีความหนืดสูงและนำไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งในที่นี้คือเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลยกเว้นค่าความหนืด โดยปัญหาหลักของการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกในเครื่องยนต์ดีเซล คือ มีค่าควันดำสูงและมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ต่ำเนื่องจากค่าความหนืดและกาคาร์บอนที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล [18] จึงได้มีการนำเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมาผสมกับเชื้อเพลิงดีเซลเพื่อลดความหนืด

โดยในงานวิจัยของ M.Mani และคณะ (2011) [18] ได้ทดสอบสมรรถนะ การเผาไหม้และการปลดปล่อยมลพิษในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดเมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกผสมเชื้อเพลิงดีเซล พบว่า เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกในเครื่องยนต์จะได้ค่าความดันสูงสุดในห้องเผาไหม้สูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซลเพราะการระเหยตัวภายในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจะดูดซับความร้อนจากผนังห้องเผาไหม้ อัตราการปลดปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจะสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล เนื่องจากการเผาไหม้ที่ดีกว่า ด้านการเพิ่มสัดส่วนของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกลงในเชื้อเพลิงผสม จะส่งผลให้ปริมาณการปลดปล่อย NOx เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปลดปล่อยความร้อนที่สูงขึ้นแลอุณหภูมิการเผาไหม้ การปลดปล่อยควันดำสูงขึ้นประมาณ 30-40 % ตลอดช่วงการทดสอบ ส่วนค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนนั้นเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจะมีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกผสมเชื้อเพลิงดีเซลและเชื้อเพลิงดีเซล ตามลำดับ

งานวิจัยของ Rajesh Guntur และคณะ (2011) [19] ที่ได้นำน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมาผสมกับน้ำมันดีเซลมาใช้ในการทดสอบในเครื่องยนต์เพื่อศึกษาผลกระทบต่อสมรรถนะและการปลดปล่อยมลพิษ โดยทดสอบในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดขนาดเล็กที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที ที่สภาวะการต่างๆของเครื่องยนต์ พบว่า การทดสอบที่สภาวะการบางส่วนเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนน้ำมันจากขยะพลาสติก 50 % และ 70 % จะมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าน้ำมันดีเซล และมีการเผาไหม้ที่ดีกว่าน้ำมันดีเซลโดยดูจากปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่า แต่มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสูงกว่าน้ำมันดีเซล

จากการที่ขยะพลาสติกส่วนใหญ่มีความหลากหลายของประเภทซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำมันที่ผลิตได้ ดังนั้น Sachin Kumar และคณะ (2013) [7] จึงได้ศึกษาเกี่ยวกับน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเปลี่ยนมาใช้ HDPE เพียงอย่าง

เดียวเป็นวัตถุดิบ โดยนำน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ได้ผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วน 10%, 20%, 30% และ 40% ของน้ำมันจากขยะพลาสติก ไปใช้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ ที่ความเร็วรอบคงที่ 1500 รอบ/นาที ที่ภาระการทดสอบต่างๆ พบว่า ที่ทุกภาระที่ทดสอบเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันจากขยะพลาสติกผสมน้ำมันดีเซลจะมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลเนื่องจากมีค่าความร้อนที่ต่ำกว่าของเชื้อเพลิง ส่วนค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (BSEC) นั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของน้ำมันจากขยะพลาสติกลงในน้ำมันที่ใช้ทดสอบ ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิไอเสียซึ่งเครื่องยนต์ที่ใช้เมื่อน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมน้ำมันดีเซลจะมีค่าสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลเนื่องจากการประสิทธิภาพการเปลี่ยนเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานที่ต่ำกว่า ส่วนค่าประสิทธิภาพทางกลนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังเบรกเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้ว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันจากขยะพลาสติกผสมน้ำมันดีเซลในสัดส่วนน้ำมันขยะพลาสติก 10 % จะมีค่าประสิทธิภาพทางกลสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลตลอดช่วงภาระที่ทดสอบ

ส่วนงานวิจัยของ Viswanath K. Kaimal และ P. Vijayabalan (2015) [20] ได้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลจากขยะพลาสติกผสมน้ำมันดีเซลในสัดส่วนต่าง ๆ กับเครื่องยนต์ดีเซล แบบ DI พบว่า ความดันในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์เมื่อนำน้ำมันจากขยะพลาสติกมีค่าสูงที่สุดและจะลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของน้ำมันดีเซลเนื่องจากค่าความหนืดของน้ำมันจากขยะพลาสติกที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลซึ่งทำให้มีช่วงล่าช้าการจุดระเบิดที่สูงกว่าทำให้เชื้อเพลิงที่ระเหยในช่วงการผสมล่วงหน้ามีความเข้มข้นสูง ดังนั้นเมื่อเกิดการจุดระเบิดความดันในห้องเผาไหม้จึงสูงกว่า ด้านอัตราการปล่อยความร้อนก็เช่นเดียวกัน เนื่องมาจากค่าความร้อน การมีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบ และการที่มีค่าความหนืดที่สูงกว่าจึงส่งผลให้อัตราการปล่อยความร้อนของน้ำมันจากขยะพลาสติกสูงที่สุดและจะลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนน้ำมันดีเซล แต่ในส่วนการปล่อยความร้อนสุทธิน้ำมันจากขยะพลาสติกก็ยังมีค่าสูงสุด ยกเว้นเมื่อนำน้ำมันจากขยะพลาสติกไปผสมกับน้ำมันดีเซลจะมีค่าการปล่อยความร้อนสุทธิต่ำกว่าน้ำมันดีเซลเนื่องจากการเผาไหม้ในช่วงที่สองลดลงเพราะการผสมที่ไม่เหมาะสมของเชื้อเพลิงและค่าซีเทนที่ต่ำกว่าของเชื้อเพลิง

Ioannis Kalargaris, Guohong Tian และ Sai Gu (2017) [1] ได้นำน้ำมันจากพลาสติกไปทดสอบในเครื่องยนต์ดีเซล แบบ DI 4 สูบ เพื่อศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการเผาไหม้ ค่าสมรรถนะที่ได้และการปลดปล่อยมลพิษของน้ำมันจากพลาสติกและน้ำมันจากพลาสติกผสมน้ำมันดีเซลในสัดส่วนต่าง ๆ เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล พบว่า เครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันจากพลาสติกสามารถทำงานได้อย่างราบรื่นที่ภาระสูงกว่า 75 % และเครื่องยนต์จะทำงานได้ดีที่ทุกภาระการทดสอบเมื่อมีสัดส่วนของน้ำมันจากพลาสติกในปริมาณที่ต่ำ โดยน้ำมันจากพลาสติกจะส่งผลต่อลักษณะการเผาไหม้ เช่น ทำให้ช่วงล่าช้าการจุดระเบิดยาวนานขึ้น ความดันสูงสุดในห้องเผาไหม้สูงขึ้นและมีการปลดปล่อย

ความร้อนสูงขึ้นเนื่องจากมีค่าซีเทนต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ด้านสมรรถนะที่ได้นั้น พบว่า อัตราส่วนการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันจากพลาสติกที่ทุกสัดส่วนการผสมมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซลตลอดช่วงการทดสอบเนื่องจากค่าความร้อนที่ต่ำกว่าของน้ำมันจากพลาสติก ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันจากพลาสติกที่ทุกสัดส่วนการผสมจะต่ำกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ 3-4 % ส่วนการปลดปล่อยมลพิษนั้น พบว่า มีการปลดปล่อย NO_x, UHC, CO และ CO₂ เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนการผสมน้ำมันจากพลาสติก

นอกจากนี้ Ioannis Kalargaris, Guohong Tian และ Sai Gu (2017) [21] ยังได้ศึกษาผลกระทบต่อเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันพลาสติก 75% กับน้ำมันดีเซล 25% ในเครื่องยนต์ดีเซลแบบ DI 4 สูบ พบว่า เครื่องยนต์ทำงานไม่เสถียร และเสียหายหลังจากผ่านไป 36 ชั่วโมง โดยในชั่วโมงสุดท้ายของการทดสอบนั้น ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ลดลงอย่างมากซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของ knock effect และไอเสีย เมื่อวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นและองค์ประกอบของลูกสูบ พบว่าในห้องเผาไหม้มีการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และมีการสึกหรออย่างมากในชิ้นส่วนของเครื่องยนต์

และยังมีการนำน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสชนิดใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามาผสมกับน้ำมันดีเซลชนิดที่มีสารซัลเฟอร์ต่ำไปใช้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดขนาดเล็กแบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงที่สัดส่วนการผสมต่าง ๆ เพื่อศึกษาลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้น โดย Preetham Reddy Churkunti และคณะ (2015) [22] พบว่า ค่าซีเทนที่สูงของเชื้อเพลิงนี้เมื่อรวมกับน้ำมันพลาสติกจะช่วยลดค่าความหนืดของเชื้อเพลิงลงได้ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ แต่อย่างไรก็ตามอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงยังคงไม่เปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นผลมาจากค่าพลังงานที่มากกว่าของน้ำมันพลาสติก ส่วนการเผาไหม้ พบว่า อุณหภูมิในห้องไหม้สูงกว่าแต่มีการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ต่ำกว่าที่ภาวะสูงเมื่อใช้น้ำมันพลาสติกผสมน้ำมันดีเซลชนิดที่มีสารซัลเฟอร์ต่ำ (CynDiesel) นอกจากนี้ปริมาณสารอะโรมาติกที่ลดลงและการเปลี่ยนเป็นพันธะอิ่มตัวโดยการผสมส่งผลให้เกิดไฮโดรคาร์บอน (HC) และคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง (CO) ถึงแม้ว่าจะมีการปล่อยมลพิษของอนุภาค (PM) เพิ่มขึ้นจากการเผาไหม้ที่แพร่กระจายมากขึ้นก็ตาม โดยที่สัดส่วนการผสมน้ำมันพลาสติกต่ำๆ จะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ แต่ก็ยังส่งผลต่อการปลดปล่อยมลพิษอยู่

สำหรับในประเทศไทย MANSOUR NAGIB ELHEMRI [23] ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมรรถนะ การเผาไหม้และการปลดปล่อยมลพิษในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดชนิดสูบเดี่ยวเมื่อใช้เชื้อเพลิงสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เชื้อเพลิงสังเคราะห์จากน้ำมันพืชใช้แล้วซึ่งผลิตโดยศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี และไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มซึ่งผลิตโดยมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปที่จุดทดสอบซึ่งดัดแปลงมาจากมาตรฐาน ESC test cycle พบว่า ด้านสมรรถนะ เครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค (BSFC), อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

เบรค (BSEC), ประสิทธิภาพความร้อน (BTE) และอุณหภูมิไอเสียใกล้เคียงกับเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ด้านการเผาไหม้ เครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจะมีช่วงล่าช้าการจุดระเบิดต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซลเล็กน้อยซึ่ง ส่วนค่าความดันในห้องเผาไหม้และการปลดปล่อยความร้อนมีลักษณะของเส้นโค้งที่ใกล้เคียงกัน ด้านการปลดปล่อยมลพิษ เครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจะมีการปลดปล่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ต่ำกว่า แต่มีการปลดปล่อย NOx, CO2 และควันดำที่สูงกว่า ส่วนการปลดปล่อย CO นั้นไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป

เนื่องจากน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ได้จากระบวนการไพโรไลซิสนั้นจะมีองค์ประกอบของน้ำมันที่หลากหลาย เช่น Naphtha, Kerosene, Diesel, Long residual เป็นต้น ซึ่งมีทั้งส่วนที่ระเหยง่ายและยาก ดังนั้น ในงานวิจัยที่ทำนี้จึงนำน้ำมันไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกไปผ่านกระบวนการกลั่นลำดับส่วนเพื่อแยกเอาเฉพาะส่วนที่อุณหภูมิการกลั่นตัวเช่นเดียวกับน้ำมันดีเซลทำให้น้ำมันที่ได้จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากขึ้นซึ่งเราเรียกน้ำมันชนิดนี้ว่าน้ำมันดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก และเมื่อนำมาใช้ในเครื่องยนต์คาดว่าจะได้ค่าสมรรถนะที่ได้ใกล้เคียงหรือสูงกว่าน้ำมันดีเซล

บทที่ 3

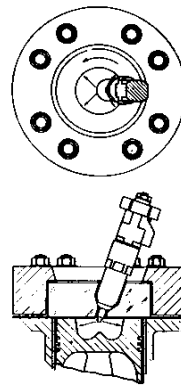
กระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลและการวิเคราะห์การเผาไหม้

3.1 เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (Compression Ignition Engine)

กระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด สามารถสรุปได้ดังนี้ กระบวนการทำงานจะเริ่มจากวาล์วไอดีเปิดเพื่อนำอากาศจากภายนอกเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่จังหวะดูดและปิดเมื่อเข้าสู่จังหวะอัด จากนั้นเชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าห้องเผาไหม้ที่ปลายจังหวะอัด ณ ตำแหน่งก่อนศูนย์ตายบน (Before Top Death Center) เล็กน้อย ซึ่งเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าไปจะมีความดันสูงมากเมื่อผ่านพ้นปลายหัวฉีดและแตกเป็นละอองฝอยเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จากนั้นจะระเหยตัวอย่างรวดเร็วและผสมกับอากาศที่อยู่ภายในกระบอกสูบ หลังจากนั้นจะเกิดการจุดระเบิดด้วยตัวเองของเชื้อเพลิงและอากาศที่ผสมกันในอัตราส่วนที่สามารถติดไฟได้เนื่องจากอุณหภูมิและความดันสูงในห้องเผาไหม้ซึ่งเพียงพอต่อการจุดระเบิดด้วยตัวเอง เมื่อเกิดการเผาไหม้จะทำให้ความดันและอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงขึ้นซึ่งช่วยให้เชื้อเพลิงในส่วนที่เหลือระเหยและผสมกับอากาศได้เร็วมากขึ้นจนเกิดการเผาไหม้ที่รวดเร็วและรุนแรงต่อเนื่องจนกระทั่งเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าห้องเผาไหม้ถูกเผาไหม้จนหมดและไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ถูกดันออกจากห้องเผาไหม้สู่สิ่งแวดล้อมผ่านทางท่อไอเสียที่จังหวะคาย

ระบบการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดของเครื่องยนต์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งตามลักษณะการฉีดเชื้อเพลิงและการออกแบบห้องเผาไหม้ได้ 2 แบบ คือ แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง (Direct-Injection or DI Systems) และระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม (Indirect-Injection System, IDI Systems) โดยในที่นี้จะอธิบายเกี่ยวกับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดแบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงซึ่งใช้เป็นเครื่องยนต์ในงานวิจัยนี้

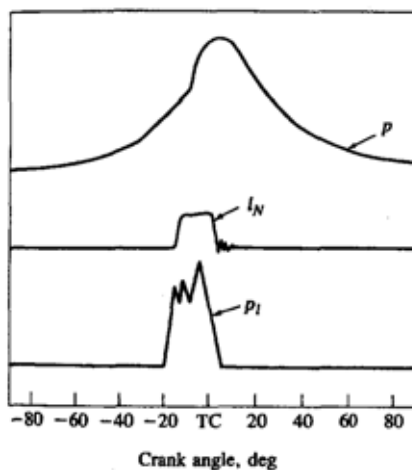
ระบบนี้จะมีห้องเผาไหม้แบบเปิดห้องเดียว (open chamber) โดยเชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยตรง แสดงดังรูปที่ 3 - 1



รูปที่ 3 - 1 ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ CI แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง [24]

3.2 การเผาไหม้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดแบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงและระบบการฉีดเชื้อเพลิง

ข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์การเผาไหม้ แสดงดังรูปที่ 3 - 2 ซึ่งจะทำให้การวัดตลอดช่วงการอัดและการขยายตัวของเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง อัตราการฉีดเชื้อเพลิงสามารถหาได้จากความดันเชื้อเพลิง ความดันในกระบอกสูบ โครงสร้างของหัวฉีดและรูปแบบการยกของเข็มหัวฉีดมาใช้ในการพิจารณา ซึ่งจากรูป พบว่า จะมีช่วงความล่าช้าอยู่ที่ 9 องศาเพลลาข้อเหวี่ยง ซึ่งเป็นช่วงที่เริ่มจากจุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงไปจนถึงเริ่มต้นการเผาไหม้ (ในการพิจารณาจะดูจากการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นโค้ง $p(\theta)$) ความดันในห้องเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในไม่กี่องศาเพลลาข้อเหวี่ยงจากนั้นสัดส่วนการเพิ่มขึ้นจะช้าลงโดยความดันจะมีค่าสูงสุดที่ 5 องศาเพลลาข้อเหวี่ยงหลัง TC กระบวนการฉีดเชื้อเพลิงจะยังดำเนินต่อไปหลังเริ่มต้นการเผาไหม้



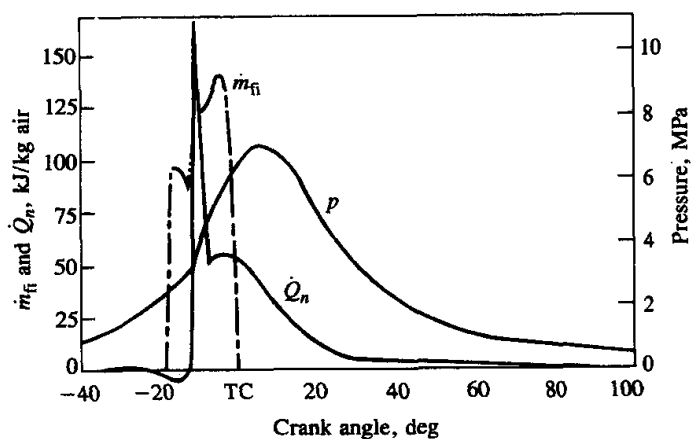
รูปที่ 3 - 2 ความดันในกระบอกสูบ (p), การยกเข็มหัวฉีด (I_N), และความดันเชื้อเพลิงในระบบการฉีดเชื้อเพลิงเทียบกับองศาเพลลาข้อเหวี่ยงในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กแบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง

ค่าที่ได้จากการวัดความดันในกระบอกสูบและความดันเชื้อเพลิงซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 3 - 2 จะถูกนำมาใช้สร้างกราฟอัตราการปล่อยความร้อนซึ่งแสดงดังรูปที่ 3 - 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการสูญเสียพลังงานเล็กน้อยในช่วงล่าช้าการจุดระเบิด (เกิดจากการถ่ายเทความร้อนสู่ผนังห้องเผาไหม้และใช้ในการระเหยตัวของเชื้อเพลิง) โดยในกระบวนการเผาไหม้จะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงที่ 1 Premixed Combustion Phase อัตราการเผาไหม้จะสูงมากและเกิดในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ซึ่งจะตรงกับช่วงที่ความดันในกระบอกสูบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ช่วงที่ 2 Mixing-controlled Combustion Phase จะตรงกับช่วงที่อัตราการปล่อยความร้อนจะค่อย ๆ ลดลง (ในช่วงเริ่มต้นอาจมีอัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดเป็นค่าที่สองได้แต่จะต่ำกว่าค่าแรกมาก) ซึ่งช่วงนี้จะเป็นช่วงของการเผาไหม้หลัก โดยความร้อนที่ปล่อยออกมาในช่วงที่ 1 และ 2 จะมีค่าประมาณ 80 % ของพลังงานทั้งหมด

ช่วงที่ 3 Late Combustion Phase จะอยู่ที่ปลายของเส้นอัตราการปล่อยความร้อนและจะเกิดขึ้นตลอดช่วงจังหวะการขยายตัว โดยความร้อนที่ปล่อยออกมาในช่วงนี้จะมีค่าประมาณ 20 % ของพลังงานทั้งหมด



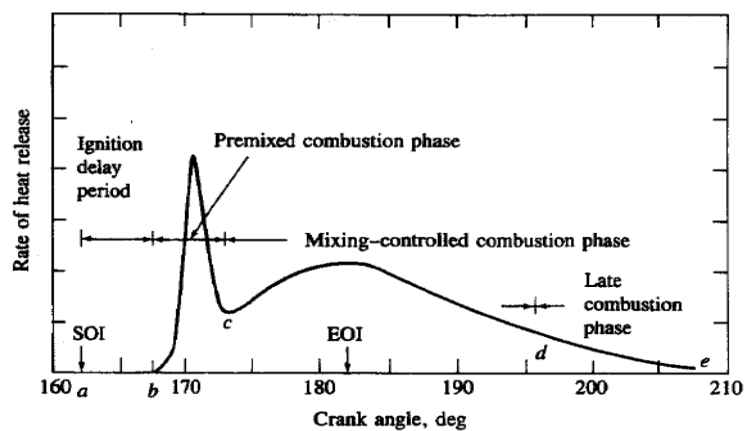
รูปที่ 3 - 3 ความดันในกระบอกสูบ p , อัตราการฉีดเชื้อเพลิง \dot{m}_{fi} , และอัตราการปล่อยความร้อนสุทธิ \dot{Q}_n ซึ่งคำนวณจากความดันในกระบอกสูบ ของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก แบบฉีดเชื้อเพลิง โดยตรง ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบ/นาที, bmep = 620 kPa [24]

อัตราการปล่อยความร้อน (Heat-Release rate) เป็นหลักการสำคัญที่นำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์การเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ ซึ่งอัตราการปล่อยความร้อนนี้ก็คือพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงที่ปล่อยออกมาของเชื้อเพลิงขณะที่เกิดการเผาไหม้ โดยสามารถแบ่งกระบวนการของการปล่อยความร้อนได้ออกเป็น 4 ช่วง คือ ช่วงล่าช้าการจุดระเบิด, ช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ผสมไว้ก่อนแล้ว, ช่วงการเผาไหม้ที่ควบคุมโดยการผสมและช่วงการเผาไหม้ช้า ซึ่งแต่ละช่วงจะถูกควบคุมโดยกระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีที่แตกต่างกัน ดังเช่นรูปที่ 3 - 4 แสดงแผนภูมิอัตราการปล่อยความร้อนในเครื่องยนต์แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง (DI) โดยสามารถอธิบายขั้นตอนการเกิดได้ดังนี้

- ช่วงล่าช้าการจุดระเบิด (Ignition delay, a-b) เริ่มต้นตั้งแต่เชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ (SOI, Start of injection) จนถึงจุดที่เชื้อเพลิงเริ่มเผาไหม้ (SOC, Start of combustion)
- ช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ผสมกันล่วงหน้า (Premixed combustion phase, b-c) เป็นช่วงของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ผสมกับอากาศในช่วงล่าช้าการจุดระเบิด ซึ่งจะเกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็วและรุนแรงพร้อมกัน ส่งผลให้ช่วงนี้มีอัตราการปล่อยความร้อนมีค่าสูงสุดของการเผาไหม้
- ช่วงการเผาไหม้ที่ควบคุมโดยการผสม (Mixing combustion phase, c-d) เมื่อเชื้อเพลิงและอากาศที่ผสมกันล่วงหน้าถูกเผาไหม้จนหมดอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้จะถูก

ควบคุมโดยอัตราการเกิดของสารผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่พร้อมจะเผาไหม้ โดยจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นแต่ไม่เกินช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ผสมกันล่วงหน้าและลดลงเมื่อกระบวนการเผาไหม้ดำเนินต่อไป

- ช่วงการเผาไหม้ล่าช้า (Late combustion phase, d-e) เป็นช่วงที่เกิดในจังหวะที่ลูกสูบเคลื่อนที่ลง (จังหวะขยายตัว) และมีการอัตราการปล่อยความร้อนที่ต่ำ ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เหลืออยู่เล็กน้อยและเป็นการเผาไหม้ในส่วนของเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ของส่วนผสมที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้



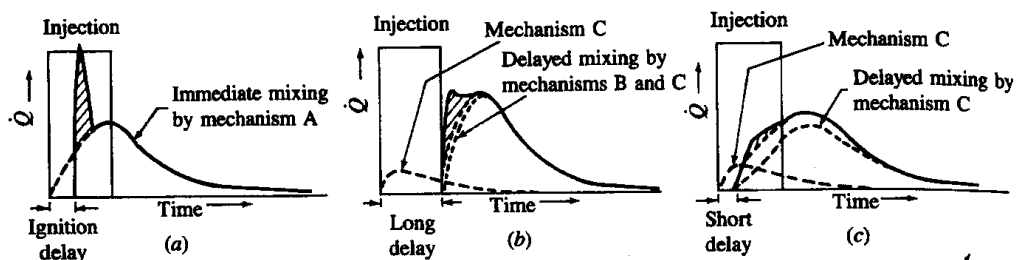
รูปที่ 3 - 4 อัตราการปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงและช่วงการเผาไหม้แบบต่าง ๆ [24]

Lyn [24] ได้สรุป 3 ส่วนพื้นฐานเกี่ยวกับรูปแบบการฉีดเชื้อเพลิง การผสมและการเผาไหม้ที่สำคัญของเครื่องยนต์ดีเซล ดังนี้

1. การฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ด้วยแรงที่มีโมเมนตัมมากพอสมควร จะเกิดกระบวนการผสมขึ้นทันทีที่เชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และได้รับผลกระทบเล็กน้อยจากการเผาไหม้
2. การสะสมของเชื้อเพลิงที่ผนังห้องเผาไหม้ และการผสมกันเล็กน้อยของเชื้อเพลิงและอากาศที่เกิดระหว่างช่วงล่าช้าเนื่องจากการระเหยที่จำกัดของเชื้อเพลิงนั้น หลังจากการจุดระเบิดจะเกิดการระเหยอย่างรวดเร็วและถูกควบคุมโดยการเข้าถึงผนังห้องเผาไหม้ของก๊าซร้อน เกิดการผสมในแนวรัศมีจากแรงที่ต่างกัน ซึ่งการเผาไหม้จะถูกทำให้ช้าโดยความล่าช้าการจุดระเบิด

3. เชื้อเพลิงที่กระจายตัวใกล้ผนังห้องเผาไหม้ จะเกิดกระบวนการผสมที่ล่าช้าแต่ด้วยอัตราที่ต่ำกว่ารูปแบบ (a) หลังจากการจุดระเบิด อัตราการผสมเชื้อเพลิงจะถูกเร่งขึ้นเหมือนรูปแบบ (b)

สำหรับในระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงแบบ M (ระบบที่มีห้องเผาไหม้แบบหลุมในลูกสูบ) และระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม (IDI) นั้นอัตราการปล่อยความร้อนจะต่างจากระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงดังในรูปที่ 3 - 5



รูปที่ 3 - 5 ลักษณะการฉีดเชื้อเพลิงและอัตราการปลดปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซลของเครื่องยนต์ดีเซลทั้ง 3 แบบ [24]

- (a) แสดงอัตราการปลดปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซลชนิดฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงที่ใช้หัวฉีดแบบหลายรู ติดไว้ตรงกลาง
- (b) แสดงอัตราการปลดปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซลชนิดฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงแบบ M ที่ฉีดเชื้อเพลิงเข้าผนัง
- (c) แสดงอัตราการปลดปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซลชนิดฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมแบบห้องเผาไหม้ก่อนไหลวน

จากการศึกษารูปแบบการปลดปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซลในแบบต่าง ๆ ได้มีการนำเสนอกลไกหรือรูปแบบการฉีด การผสมและการเผาไหม้ที่สำคัญในเครื่องยนต์ดีเซลไว้ 3 รูปแบบ คือ รูปแบบ a เกิดจากการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปทันทีโดยโมเมนตัมที่มากพอควรที่จะเกิดการผสมทันทีของเชื้อเพลิงกับอากาศทำให้เกิดส่วนผสมล่วงหน้า (Premixed) รูปแบบ b เชื้อเพลิงจะไปเกาะที่ผนังการผสมในช่วงล่าช้าการจุดระเบิดเกือบจะไม่มีเนื่องจากการระเหยของเชื้อเพลิงถูกจำกัด แต่หลังการจุดระเบิดจะเกิดการระเหยอย่างรวดเร็วและจะถูกควบคุมโดยอัตราการเข้าถึงผิวของแก๊สร้อน (เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับผิวซึ่งจะทำให้เชื้อเพลิงระเหยเร็วขึ้น) และจะเกิดการผสมกันในแนวรัศมีจากแรงหนีศูนย์กลางที่ต่างกัน รูปแบบ c เชื้อเพลิงถูกกระจายไปใกล้กับผนัง และมีเกิดการผสมในช่วงล่าช้าการจุดระเบิดแต่ในอัตราที่น้อยกว่าแบบ a และเมื่อเกิดการจุดระเบิดขึ้นจะเกิดการผสมอย่างรวดเร็วของเชื้อเพลิงกับอากาศเช่นเดียวกับรูปแบบ b สำหรับเครื่องยนต์แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงจะมี

รูปแบบตามรูปแบบ a ส่วนระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงแบบ M นั้นจะมีรูปแบบตามรูปแบบ b และ c ซึ่งจะช่วยให้อัตราการเผาไหม้ในช่วงแรกไม่สูงเกินไป ส่วนระบบการฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม จะมีลักษณะของช่วงล่าช้าการจุดระเบิดจะสั้นหลังจากนั้นจะมีรูปแบบการผสมแบบ c

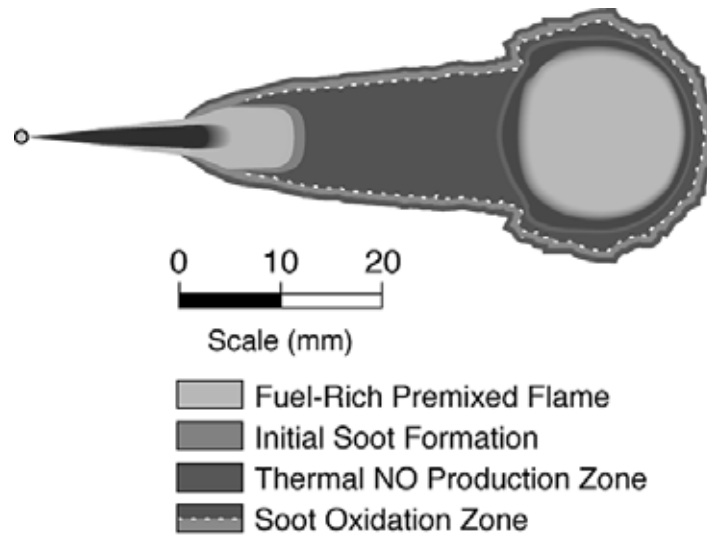
3.3 แผนภาพรูปแบบการเผาไหม้ (LASER IMAGE BASED CONCEPTUAL COMBUSTION MODEL)

ปัจจุบันมีการพัฒนาแผนภาพรูปแบบการเผาไหม้เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์รายละเอียดของกระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซล การใช้การบวนการวิเคราะห์นี้มีวิธีการที่หลากหลายทั้งแบบที่ทำปฏิกิริยาและไม่ทำปฏิกิริยาในกระบวนการฉีดเชื้อเพลิงจริงในเครื่องยนต์ดีเซล และในแบบจำลองที่มีความดันและอุณหภูมิสูง โดย Dec. [25] ได้รวบรวมข้อมูลจากการตรวจสอบการถ่ายภาพด้วยเลเซอร์นี้ ซึ่งนำไปสู่ความเข้าใจใหม่ๆ หรือที่เรียกว่า “รูปแบบแนวคิดของการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล”

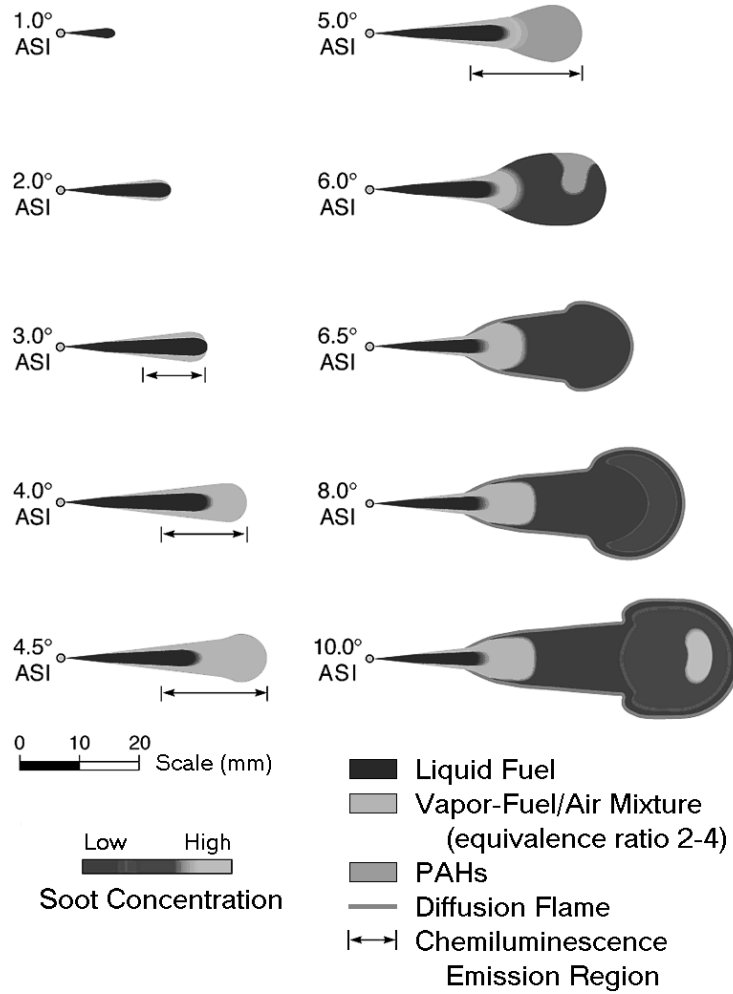
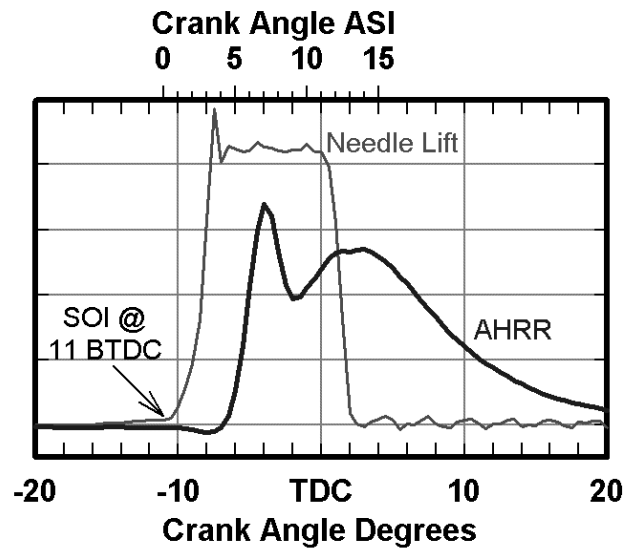
รูปแบบแนวคิดของการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลแสดงดังรูปที่ 3-6 และ 3-7 โดยรูปที่ 3-6 แสดงลำดับขั้นของโครงสร้างอุดมคติของการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล โดยรูปจะแสดงขั้นตอนเริ่มต้นอย่างช้า ๆ หลังจากเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงและต่อเนื่องไปจนถึงการเผาไหม้ส่วนผสมล่วงหน้าของกระบวนการเผาไหม้ (quasi-steady)

หลังจากเริ่มต้นการเผาไหม้ได้ไม่นานเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปจะเข้าสู่ระยะที่เรียกว่า “quasi-steady” ซึ่งคุณสมบัติโดยทั่วไปของ Jet จะยังคงอยู่แม้ว่าจะมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นตามการพุ่งตัวของเชื้อเพลิงเข้าไปสู่ห้องเผาไหม้ สำหรับสภาวะการทำงานที่แสดงดังรูปที่ 3-7 คือที่สภาวะ quasi-steady ที่องศาเพลลาข้อเหวี่ยง 8-10 องศา หลังจากเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง

รูปที่ 3 - 8 แสดงแผนผังการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลช่วง quasi-steady โดย Dec. [25] ได้ อธิบายไว้ว่าแผนผังนี้แสดงสมมติฐานที่ใช้ในการพิจารณาแผนภาพซึ่งโดยทั่วไปจะใช้อธิบายรูป Jet ของการเผาไหม้ โดยเริ่มจากเชื้อเพลิงเหลวพุ่งออกจากหัวฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้อย่างรวดเร็วในรูปแบบ Jet ซึ่งจะดูดซับความร้อนของอากาศในกระบอกสูบ ทำให้เชื้อเพลิงเริ่มแตกตัวและระเหยกลายเป็นไอและเริ่มการผสมกับอากาศที่ผิวด้านนอกของ Jet จากนั้นจะเริ่มกระบวนการออกซิเดชันของเชื้อเพลิงที่ผสมกับอากาศ สุดท้ายก็จะเกิดการออกซิเดชันโดยรอบพื้นที่ผิวของ Jet ซึ่งทั้ง 2 กระบวนการนี้เป็นกระบวนการหลักของการเกิดออกซิเดชันของเชื้อเพลิงกับอากาศ



รูปที่ 3 - 6 Schematic of quasi-steady burning jet from laser measurements.[25]



รูปที่ 3 - 7 Schematics of early flame images from laser measurements.[25]

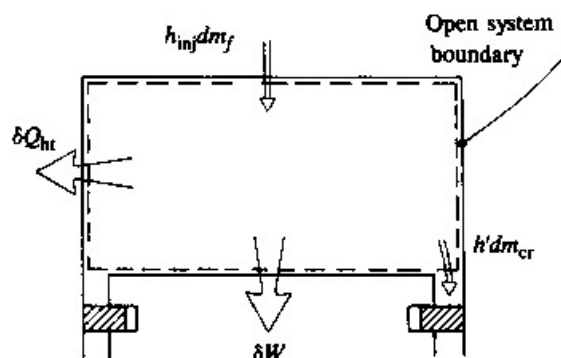
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้

ข้อมูลความดันภายในกระบอกสูบซึ่งสัมพันธ์กับองศาเผาไหม้ที่จุดการทำงานต่างๆ ตลอดช่วงจังหวะอัดและขยายตัวของเครื่องยนต์ สามารถนำไปใช้วิเคราะห์หาค่าอัตราการปลดปล่อยความร้อนหรืออัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง เพื่อใช้อธิบายถึงลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ CI ซึ่งสามารถหาได้จากการใช้กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบเปิด เมื่อพิจารณาให้ขอบเขตภายในห้องเผาไหม้อยู่ในสภาวะความดันและอุณหภูมิคงที่ (Quasi Static) แสดงดังรูปที่ 3 - 8 ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [24]

$$\frac{dQ}{dt} - p \frac{dV}{dt} + \sum \dot{m}_f h_f = \frac{dU}{dt} \quad 3-1$$

โดยที่

$\frac{dQ}{dt}$	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านขอบเขตภายในระบบ
$p \frac{dV}{dt}$	คือ อัตราการถ่ายเทงานโดยระบบ เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงขอบเขตของระบบ
\dot{m}_i	คือ อัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิงผ่านขอบเขตเข้าไปในระบบ
h_f	คือ Enthalpy ของเชื้อเพลิงที่เข้าหรือออกจากระบบ
$\frac{dU}{dt}$	คือ พลังงานภายในของสารที่อยู่ภายในขอบเขตของระบบ



รูปที่ 3 - 8 ขอบเขตของระบบเปิด สำหรับห้องเผาไหม้เพื่อใช้วิเคราะห์การปล่อยความร้อน

ในการวิเคราะห์การปลดปล่อยความร้อน (Heat release) ถ้า U และ h_f ในสมการที่ 3-1 เป็นพลังงานภายในของระบบและเอนทาลปีของเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ตามลำดับ ดังนั้น $\frac{dQ}{dt}$

ผลต่างระหว่างพลังงานเคมีหรือการปลดปล่อยความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (มีค่าเป็นบวก) กับการแลกเปลี่ยนความร้อนจากระบบ (ในเครื่องยนต์ การถ่ายเทความร้อนจากระบบซึ่งมีค่าเป็นลบ) เมื่อ $h_f \approx 0$ สมการ 3 - 1 จะกลายเป็น

$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{dQ_{ch}}{dt} - \frac{dQ_{ht}}{dt} = p \frac{dV}{dt} + \frac{dU_s}{dt} \quad 3-2$$

จะเห็นว่าอัตราการปลดปล่อยความร้อนสุทธิ $\frac{dQ_n}{dt}$ ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างอัตราการปลดปล่อยความร้อนรวม $\frac{dQ_{ch}}{dt}$ กับอัตราการถ่ายเทความร้อนไปที่ผนัง $\frac{dQ_{ht}}{dt}$ ซึ่งเท่ากับอัตราการทำงานของลูกสูบรวมกับอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของกระบอกสูบ

ถ้าสมมติว่าในกระบอกสูบเป็นก๊าซในอุดมคติ ดังนั้นสมการ 3 - 2 จะกลายเป็น

$$\frac{dQ_n}{dt} = p \frac{dV}{dt} + mc_v \frac{dT}{dt} \quad 3-3$$

จาก ideal gas law $pV=mRT$ โดย R เป็นค่าคงที่ ซึ่งเป็นไปตาม

$$\frac{dp}{p} + \frac{dV}{V} = \frac{dT}{T} \quad 3-4$$

สามารถใช้สมการ 3-4 กำจัด T ออกจากสมการ 3-3 ได้

$$\frac{dQ_n}{dt} = \left(1 + \frac{c_v}{R}\right)p \frac{dV}{dt} + \frac{c_v}{R}V \frac{dp}{dt} \quad 3-5$$

หรือ

$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}p \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma - 1}V \frac{dp}{dt} \quad 3-6$$

โดย γ คือ อัตราส่วนระหว่าง c_p/c_v โดยช่วงที่เหมาะสมของค่า γ สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การปลดปล่อยความร้อน คือ 1.3 ถึง 1.35 ซึ่งโดยปกติสมการที่ 3-6 จะใช้ค่าคงที่ของ γ ภายในช่วงนี้ในการคำนวณ ค่า γ ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์การปลดปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์กับอากาศที่สิ้นสุดการบีบอัดก่อนเกิดการเผาไหม้คือประมาณ 1.35 และก๊าซที่เกิดหลังจากการเผาไหม้ที่สัดส่วนสมบูรณ์ คือประมาณ 1.26 - 1.3 โดยการเลือกใช้ค่า γ ที่เหมาะสมจะทำให้สามารถคำนวณค่าการปลดปล่อยความร้อนได้อย่างแม่นยำ

ค่าความร้อนสุทธิในระบบซึ่งเริ่มจากจุดองศาเพลลาข้อเหวี่ยงที่เริ่มการเผาไหม้ไปจนถึงจุดองศาเพลลาข้อเหวี่ยงแสดงจุดสิ้นสุดการเผาไหม้ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q = \int_{\theta_{start}}^{\theta_{end}} \frac{dQ}{dt} d\theta \quad 3-7$$

Mass Fraction Burned (X_b) หมายถึง สัดส่วนของมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้แล้ว ซึ่งแปรผันกับความร้อนที่ปล่อยออกมาจากเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้ต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ใน 1 วัฏจักร สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$X_b = \frac{Q}{m_f \times LHV} \quad 3-8$$

โดยที่

m_f คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ใน 1 วัฏจักร (1 kg/cycle)

LHV คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงซึ่งใช้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีการกำหนดลักษณะของช่วงการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ดังนี้

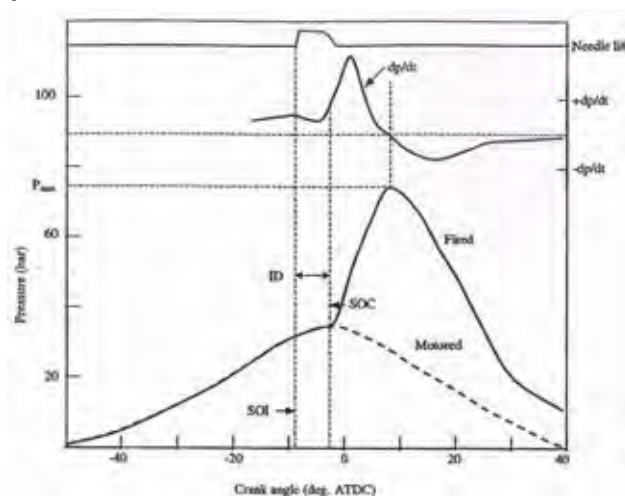
1. จุดเริ่มต้นการเผาไหม้ คือ จุดที่อัตราการปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงมีค่ามากกว่าศูนย์ครั้งแรกหลังจากผ่านจุดเริ่มต้นฉีดเชื้อเพลิง ($\frac{dQ}{d\theta} = 0$)
2. ช่วงล่าช้าในการจุดระเบิด หมายถึง ช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้จนถึงจุดเริ่มต้นการเผาไหม้
3. จุดสิ้นสุดการเผาไหม้ คือ จุดที่อัตราการปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงมีค่าน้อยกว่าศูนย์หลังจากผ่านจุดเริ่มต้นการเผาไหม้ ($\frac{dQ}{d\theta} = 0$)
4. ช่วงการเผาไหม้ หมายถึง ช่วงเวลาระหว่างจุดเริ่มต้นการเผาไหม้จนถึงจุดสิ้นสุดการเผาไหม้

3.5 การพิจารณาเลือกจุดฉีดเชื้อเพลิงและจุดเริ่มต้นการเผาไหม้

สำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้ที่องค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่าง ๆ หรือ dP/dCA นั้น สามารถนำมาพิจารณาเพื่อหาจุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงและจุดเริ่มต้นการเผาไหม้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3 - 9 การพิจารณาหาจุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงจะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้ที่องค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่าง ๆ โดยจะพิจารณาได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้ที่จุดสูงสุดจุดแรกคือจุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง เนื่องจากในจังหวะการอัดตัวของลูกสูบนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ แต่เมื่อมีการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปภายในห้องเผาไหม้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความดัน เนื่องจากเชื้อเพลิงเหล่านั้นต้องการ

พลังงานส่วนหนึ่งในการระเหยเพื่อไปผสมกับอากาศ จึงทำให้ความดันภายในห้องเผาไหม้ตกลงเล็กน้อย และเมื่อเริ่มมีการเผาไหม้ก็จะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นอีกครั้ง

สำหรับการพิจารณาจุดเริ่มต้นการเผาไหม้นั้น จะพิจารณาโดยดูจากอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้ คือ เมื่อมีการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้จะลดลงและเมื่อมีการเผาไหม้เกิดขึ้นจะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจุดแรกที่มีการเพิ่มขึ้นของอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้จะถูกพิจารณาให้เป็นจุดเริ่มต้นการเผาไหม้



รูปที่ 3 - 9 อัตราการเปลี่ยนแปลงความดัน จุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง จุดเริ่มต้นการเผาไหม้และความดันในห้องเผาไหม้ [27]

3.6 การคำนวณอัตราการฉีดเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้

การคำนวณอัตราการฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ผ่านหัวฉีดสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{dm_f}{d\theta} = C_d A_n \sqrt{2\rho_f \Delta p} \quad 3-9$$

โดยที่ C_d คือ Discharge Coefficient ของหัวฉีด

A_n คือ พื้นที่ที่เล็กที่สุดของหัวฉีด (m^2)

ρ_f คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/m^3)

Δp คือ Pressure Drop across Nozzle ในที่นี้คือผลต่างระหว่างความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีด (Fuel Line Pressure) กับ ความดันในห้องเผาไหม้หลัก

ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ต่อ 1 วัฏจักรต่อสูบ สำหรับเครื่องยนต์ 1 สูบสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$m_f = \dot{m}_f \times 120/N \quad 3-10$$

โดยที่ m_f คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ต่อ 1 วัฏจักรต่อสูบ (kg/cycle)
 \dot{m}_f คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ได้จากการทดสอบ (kg/s)
 N คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rpm)

สำหรับค่า Discharge Coefficient สามารถคำนวณได้จากการอินทิเกรตอัตราการฉีดเชื้อเพลิงตลอดช่วงของการฉีด ดังสมการ

$$\int_{\theta_{Start}}^{\theta_{end}} \frac{dm_f}{d\theta} = \dot{m}_f \times 120/N \quad 3-11$$

โดยที่ θ_{Start} คือ องศาเพลลาข้อเหวี่ยงที่เริ่มฉีดเชื้อเพลิง
 θ_{end} คือ องศาเพลลาข้อเหวี่ยงที่สิ้นสุดการฉีดเชื้อเพลิง

ซึ่งเราสามารถทราบช่วงการฉีดของหัวฉีดได้โดยดูจากผลต่างระหว่างความดันท่อจ่ายเชื้อเพลิง (Fuel Line Pressure) กับความดันในห้องเผาไหม้หลัก เมื่อเชื้อเพลิงถูกบีบเชื้อเพลิงอัดให้มีความดันมากเกินกว่าค่า Opening Pressure ของหัวฉีด เข็มหัวฉีดจะเริ่มยกตัวในขณะที่ความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีดจะลดลงเล็กน้อย และความดันจะเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อเชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ เชื้อเพลิงจะยังคงถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่ความดันในท่อจ่ายเชื้อเพลิงมากกว่าความดันในห้องเผาไหม้หลัก เชื้อเพลิงก็จะถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้จนกระทั่งสิ้นสุดการฉีดเชื้อเพลิงเมื่อความดันในท่อจ่ายเชื้อเพลิงเริ่มลดลงจนไม่สามารถเอาชนะแรงดันสปริงที่กดเข็มหัวฉีดได้

3.7 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้กำหนดสมรรถนะของเครื่องยนต์

ในการกำหนดค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์มีตัวแปรต่าง ๆ และสมการที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้
 กำลังเบรกของเครื่องยนต์ (Break Power)

$$P_b = T_b \omega = \frac{2\pi N T_b}{60000} \quad 3-9$$

ประสิทธิภาพการแปลงเชื้อเพลิงเป็นพลังงานเบรก (Brake Fuel Conversion Efficiency)

$$\eta_{fb} = \frac{P_b}{\dot{m}_f Q_{HV}} \quad 3-10$$

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Break specific fuel consumption, bsfc)

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \quad 3-11$$

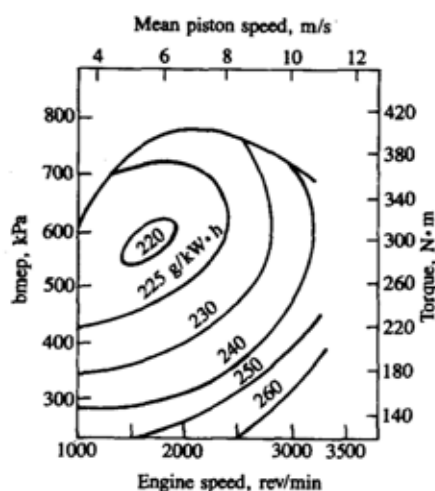
โดยที่

P_b	=	กำลังเบรก (kW)
T_b	=	แรงบิดเบรก (N-m)
$bmep$	=	Brake Mean Effective Pressure (kPa)
N	=	ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rev/min)
Q_{HV}	=	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)
\dot{m}_f	=	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (g/s)
$bsfc$	=	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (mg/J)
η_{fb}	=	Brake Fuel Conversion Efficiency
ω	=	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

3.8 แผนภูมิสมรรถนะ (Performance Map) ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด

ตัวแปรที่สำคัญซึ่งส่งผลต่อเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ทั้งในด้านสมรรถนะและประสิทธิภาพ คือ ภาระและความเร็วรอบของเครื่องยนต์

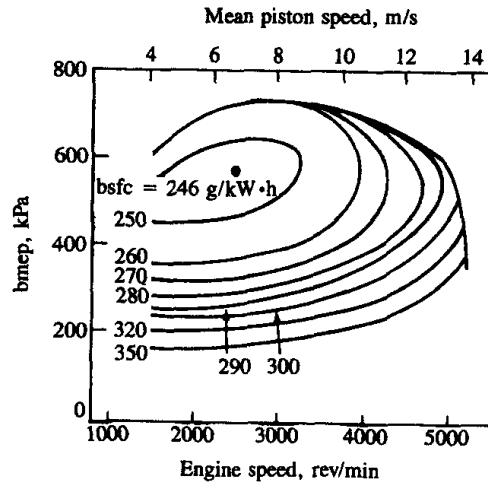
สมรรถนะและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดที่ภาระและความเร็วรอบต่างๆ สามารถแสดงในรูปของแผนภูมิสมรรถนะดังตัวอย่างในรูปที่ 3 - 10 ซึ่งแสดงค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (bsfc) บนกราฟความสัมพันธ์ของความดันยังผลเฉลี่ยเบรก (bmep) ค่าแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (หรือความเร็วเฉลี่ยของลูกสูบ)



รูปที่ 3 - 10 แผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง [25]

รูปที่ 3 - 10 แสดงแผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง ส่งอากาศเข้าโดยธรรมชาติมีการไหลวนปานกลาง ระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยจากรูปแสดงให้เห็นว่ามีค่าความดันยังผลเฉลี่ย (bmep) สูงสุด 784 kPa ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อ

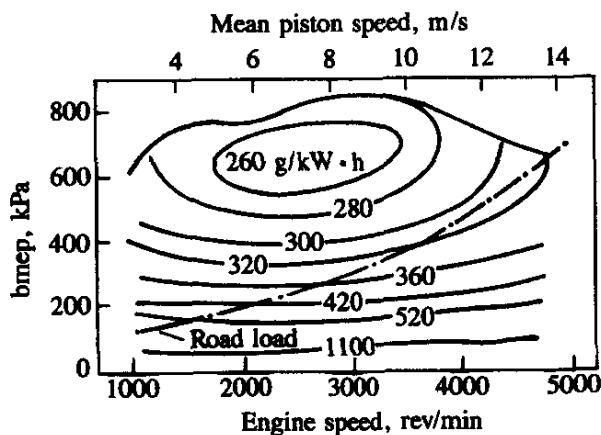
นาที่ และค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (bsfc) ต่ำสุดเท่ากับ 220 g/kW-h ที่ความเร็วรอบ 1600 รอบต่อนาที และมีค่าความดันยังผลเฉลี่ย (bmep) ประมาณ 580 kPa



รูปที่ 3 - 11 แผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง แบบ

M [25]

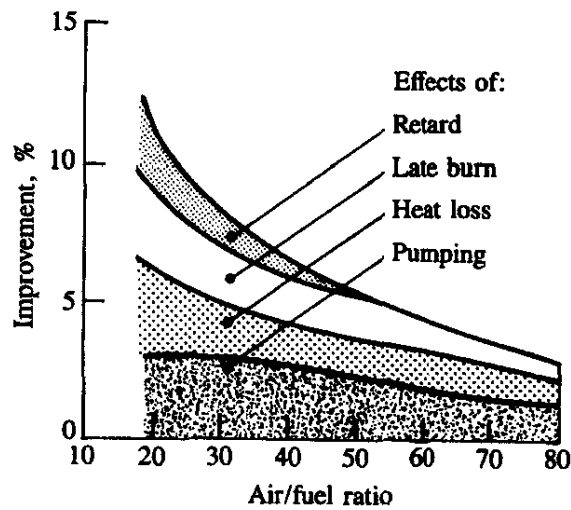
รูปที่ 3 - 11 แสดงแผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง แบบ M ซึ่งเชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าไปในแนวสัมผัสกับผนังของหลุมในลูกสูบไปในอากาศที่ไหลวน เนื่องจากการที่มีความเร็วและการไหลวนสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงซึ่งแสดงดังรูปที่ 3 - 10 ทำให้ค่าความดันยังผลเฉลี่ย (bmep) สูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อเปรียบเทียบกับระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงแบบปกติ ดังรูปที่ 3 - 11 พบว่ามีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยและค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรก (bsfc) ที่ดีที่สุดมีค่าสูงกว่าประมาณร้อยละ 10 เนื่องจากมีค่า Friction mean effective pressure สูงกว่า โดยส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการสูญเสียความร้อนที่สูงกว่า ซึ่งเกิดจากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่แยกกว่าของเครื่องยนต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบเล็กกว่าและการไหลวนสูง รวมถึงอัตราการปล่อยความร้อนที่ต่ำกว่าของระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง แบบ M



รูปที่ 3 - 12 แผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมแบบ ห้องเผาไหม้ล่วงหน้าที่มีการไหลวน [25]

รูปที่ 3 -12 แสดงแผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม แบบห้องเผาไหม้ล่วงหน้าที่มีการไหลวน ส่งอากาศเข้าโดยธรรมชาติ โดยปกติเครื่องยนต์ชนิดนี้จะมีค่าความดันยังผลเฉลี่ย (bmep) สูงสุดมากกว่าของเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงแบบปกติขนาดเท่ากัน เนื่องจากไม่จำเป็นต้องทำให้เกิดการไหลวนในช่วงจังหวะการดูด ซึ่งมีการกีดขวางโดยช่องไอดีและวาล์วไอดีน้อยกว่า ทำให้มีประสิทธิภาพเชิงปริมาตรสูงกว่า โดยเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมสามารถทำงานได้ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงต่ำกว่าระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง ทั้งยังมีค่าควันดำน้อยกว่าและมีค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (bsfc) ที่ดีกว่า โดยปกติจะสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงที่ขนาดเดียวกันประมาณร้อยละ 15 ส่วนประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานเชื้อเพลิงเบรกที่ดีที่สุดของเครื่องยนต์จะมีค่าเท่ากับร้อยละ 32.5

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงและระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมที่นำอากาศเข้าโดยธรรมชาติที่มีการออกแบบและขนาดใกล้เคียงกัน พบว่า เครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงจะมีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมเสมอ ซึ่งประสิทธิภาพที่ได้จะแปรผันตรงกับภาระ โดยที่ภาระสูงสุดความแตกต่างของค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (bsfc) ของเครื่องยนต์ทั้งสองแบบจะสูงถึงร้อยละ 20 และลดลงเหลือประมาณร้อยละ 10 ที่ภาระบางส่วน



รูปที่ 3 - 13 แผนภูมิแสดงปัจจัยที่เพิ่มประสิทธิภาพบ่งชี้ของเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดโดยตรงเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมแบบห้องเผาไหม้ก่อนไหลวนซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงหรือภาวะ [25]

รูปที่ 3 - 13 แสดงปัจจัยที่ทำให้เกิดความแตกต่างของประสิทธิภาพบ่งชี้ของเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงกับระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม พบว่าที่ภาวะสูงสุด (อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง เท่ากับ 18 ถึง 20) เครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงจะมีประสิทธิภาพบ่งชี้สูงกว่าประมาณร้อยละ 15 ถึง 17 ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมมีการฉีดเชื้อเพลิงที่ล่าช้ากว่า จึงมีช่วงการเผาไหม้ที่ยาวส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนที่มากกว่า โดยที่ภาวะบางส่วนเมื่อเป็นเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงจะมีค่าความดันยังผลเฉลี่ยเบรก มีค่าประมาณ 300 kPa (อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 50) แต่เครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมจะมีประสิทธิภาพบ่งชี้ย่อยกว่าประมาณร้อยละ 5 ถึง 7 ซึ่งเป็นผลมาจากการสูญเสียความร้อนที่สูงกว่าจากพื้นที่ผิวที่ใหญ่กว่าและความเร็วในการไหลผ่านช่องที่ต่อระหว่างห้องเผาไหม้หลักกับห้องเผาไหม้ล่วงหน้าที่สูงกว่า รวมทั้งมาจากการสูญเสียความดันในการอัดอากาศระหว่างห้องเผาไหม้หลักและห้องเผาไหม้ล่วงหน้า

โดยทั่วไปแผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลทุกแบบจะมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยเมื่อเขียนแทนด้วยความเร็วเฉลี่ยของลูกสูบก็จะมีค่าสมมูลกัน การเพิ่มขึ้นของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (bsfc) จากค่าต่ำสุดเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นที่ภาวะคงตัวจะเป็นผลมาจากการเพิ่มของ friction mean effective pressure แต่ส่วนหนึ่งจะถูกชดเชยโดยผลจากการลดความสำคัญของการสูญเสียความร้อนต่อวัฏจักรลง การเพิ่มขึ้นของอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (bsfc) กับภาวะที่ลดลงที่ความเร็วคงตัวจะเป็นผลมาจากการลดลงของประสิทธิภาพเชิงกลเมื่อความดันยังผลเฉลี่ย

(bmep) ลดลงเป็นหลัก แต่ส่วนหนึ่งจะถูกชดเชยด้วยประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงบ่งชี้ที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงต่ออากาศลดลง

การเพิ่มของอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (bsfc) จากค่าต่ำสุดจะไม่มากนักเมื่อภาระเพิ่มขึ้นที่ความเร็วคงตัวและเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นที่ภาระคงตัวโดยจะเป็นผลสุทธิของ

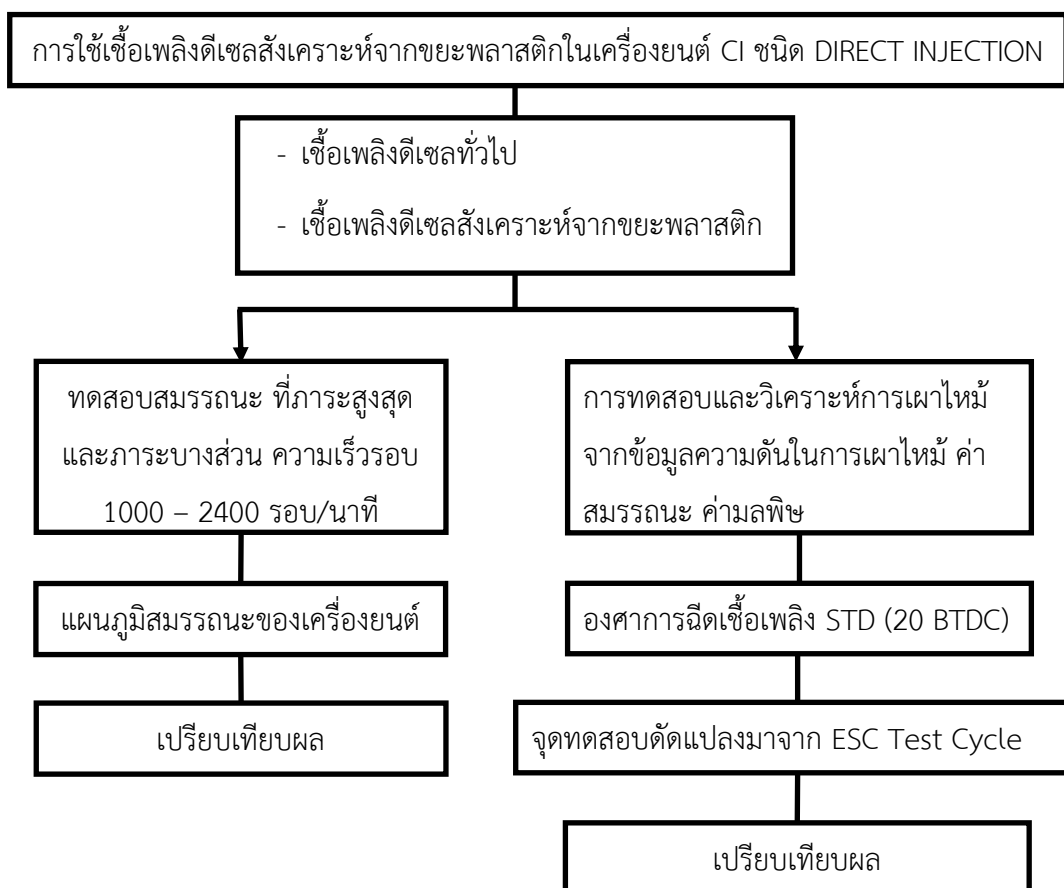
1. การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพเชิงกลและการลดลงของประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงบ่งชี้เมื่อภาระมากขึ้น
2. การลดลงของประสิทธิภาพบ่งชี้เนื่องจากการทวีความสำคัญของการสูญเสียความร้อนและการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกลเนื่องจากความเร็วลดลง

บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัยและอุปกรณ์

4.1 ภาพรวมในการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนการทำวิจัยออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ตามแผนภาพในรูปที่ 4 - 1



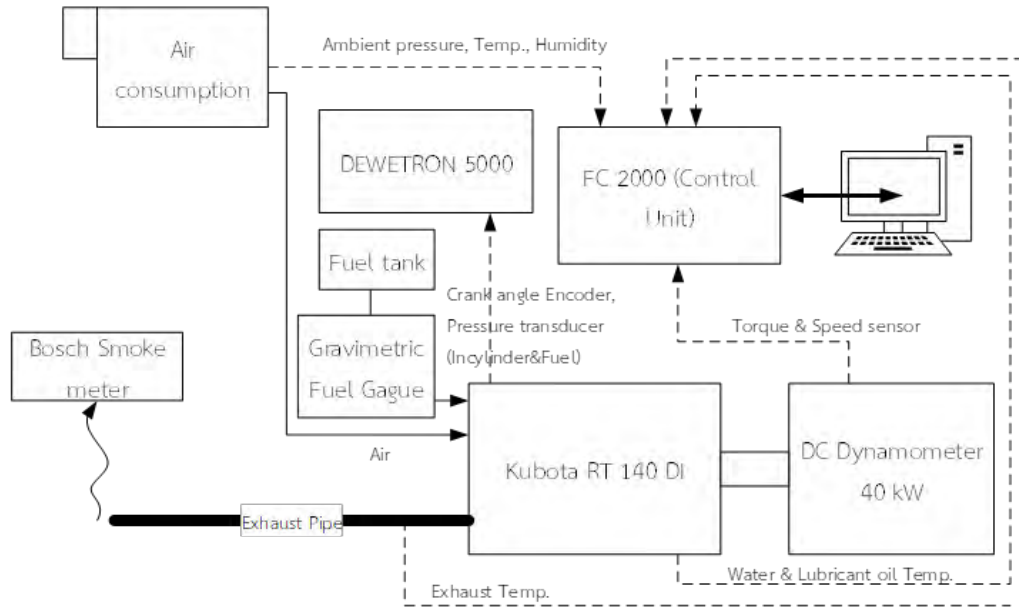
รูปที่ 4 - 1 แผนภูมิขั้นตอนภาพรวมการดำเนินการวิจัย

ส่วนที่ 1 เป็นการทดสอบสมรรถนะ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกและเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป โดยนำผลการทดสอบที่ได้มาสร้างแผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

ส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบและวิเคราะห์การเผาไหม้จากข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้ ค่าสมรรถนะและค่ามลพิษของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกและเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ที่องศาการฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐาน ซึ่งการทดสอบจะใช้จุดทดสอบที่ดัดแปลงมาจากวัฏจักรการทดสอบตามมาตรฐาน ESC Test Cycle [26] (ดูภาคผนวก) แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดสอบค่าสมรรถนะ การเผาไหม้และค่ามลพิษจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมในการวัดค่าต่าง ๆ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังแผนผังในรูปที่ 4 - 2



รูปที่ 4 - 2 แผนผังการทดสอบ

4.2.1 เครื่องยนต์

เครื่องยนต์ทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องยนต์ CI ชนิด DI ยี่ห้อ Kubota รุ่น RT-140 แสดงดังแสดงในรูปที่ 4 - 3 โดยแสดงข้อมูลทางเทคนิคในตารางที่ 4 - 1



รูปที่ 4 - 3 เครื่องยนต์ Kubota รุ่น RT 140

ตารางที่ 4 - 1 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ทดสอบ

เครื่องยนต์	Kubota
รุ่น	RT140
แบบ	เครื่องยนต์ดีเซลแบบสูบนอน 4 จังหวะ ระบายความร้อนด้วยน้ำ
จำนวนลูกสูบ	1
ขนาดกระบอกสูบ (bore)	97 mm.
ช่วงชัก (stroke)	96 mm.
ปริมาตรกระบอกสูบ	709 cc.
กำลังเครื่องยนต์สูงสุด	10.3 kW / 2400 rpm
แรงบิดสูงสุด	5.0 kgf-m / 1600 rpm
ระบบห้องเผาไหม้	ฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง
อัตราส่วนกำลังอัด	18 : 1
หัวฉีด	หัวฉีดแบบ Multi-injection port (รูฉีดน้ำมันหลายรู) ขนาดรูฉีด 0.27 mm. แบบ 4 ทิศทาง
ปั้มน้ำมันเชื้อเพลิง	สามารถสร้างแรงดันได้สูงสุด 230 kg/cm ²
ระบบหล่อลื่น	ขับเคลื่อนน้ำมันหล่อลื่นโดยปั้มไทรคอยด์ ใช้น้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE 40 API CF, SAE 30 API CF ความจุ 2.8 ลิตร
ระบบระบายความร้อน	หม้อน้ำแบบรังผึ้ง ระบายความร้อนแบบ Natural Convection ความจุ 2.2 ลิตร
หม้อกรองอากาศ	แบบเปียก

4.2.2 ไตนาโมมิเตอร์และชุดควบคุมการทำงาน

ไตนาโมมิเตอร์แบบ DC ของ BOALEECO ขนาด 40 kW ทำหน้าที่ด้านการหมุน หรือเป็นภาระทางกลให้กับเครื่องยนต์ที่จะนำมาทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4 - 4 ซึ่งควบคุมการทำงานโดยชุดควบคุมของ BOALEECO รุ่น FC2000 Engine Measuring System มีความแม่นยำในการวัดแรงบิด $\pm 0.1\%FS$ แสดงดังรูปที่ 4 - 5 เครื่องยนต์ที่ทดสอบจะถูกนำมาต่อกับไตนาโมมิเตอร์โดยใช้เพลลาในการเชื่อมต่อร่วมกับ Universal Joint 2 ชุด ความเร็วรอบของเครื่องยนต์วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดความเร็วที่ไตนาโมมิเตอร์ ความแม่นยำในการวัดอัตราเร็วแบบดิจิทัลคือ ± 1 rpm ต่อ ± 1 ความเร็วรอบ โดยข้อมูลเกี่ยวกับไตนาโมมิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4 - 2 และชุดควบคุมดังตารางที่ 4 - 3



รูปที่ 4 - 4 ไตนาโมมิเตอร์ที่ใช้ทดสอบ ยี่ห้อ T-T
Electric



รูปที่ 4 - 5 ชุดควบคุม ยี่ห้อ
BOALEECO

ตารางที่ 4 - 2 ข้อมูลไตนาโมมิเตอร์

ผู้ผลิต	T-T Electric
ประเภทของไตนาโมมิเตอร์	DC Regenerative Dynamometer
ชนิด	LAK 4180-AA
ขนาดมอเตอร์	62.2 kW
ความเร็วรอบสูงสุด	4500 รอบ/นาที
ฉนวนมอเตอร์	Class F

ตารางที่ 4 - 3 ข้อมูลชุดควบคุม

ผู้ผลิต	BOALEECO
รุ่น	CDC
ความแม่นยำในการวัดความเร็วรอบ	$\pm 1 \text{ rpm} \pm 1 \text{ word}$
ความแม่นยำในการวัดแรงบิด	$\pm 1\% \text{FS}$
ความแม่นยำในการควบคุมความเร็วรอบ	5 rpm (constant speed mode)
ความแม่นยำในการควบคุมแรงบิด	$\pm 0.2\% \text{FS}$

4.2.3 การวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

การวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Gravimetric Fuel Gauge แสดงดังรูปที่ 4 - 6 ซึ่งอ้างอิงอัตราการไหลของเชื้อเพลิงจากการประเมินอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ลดลงเทียบกับเวลา หน่วยที่ได้ออกมาจะเป็น kg/h



รูปที่ 4 - 6 อุปกรณ์วัดปริมาณเชื้อเพลิงโดยมวล Gravimetric Fuel Gauge

4.2.4 การวัดอุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมิจะใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด Type K (Chromel-Alumel, CA) ต่อเข้ากับกล่องรับสัญญาณ DAQ ซึ่งจะรวบรวมสัญญาณของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความดันต่างๆส่งต่อไปยังชุดควบคุม FC2000 เพื่ออ่านค่าและเก็บข้อมูล โดยมีจุดที่วัดอุณหภูมิดังนี้

1. อุณหภูมิที่ไหลเข้าที่อากาศไอดีก่อนเข้าห้องเผาไหม้ โดยติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลไว้ที่ท่ออากาศระหว่างเครื่องยนต์กับถังพักอากาศ ดังรูปที่ 4 - 7



รูปที่ 4 - 7 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิอากาศไอดี

2. อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น โดยติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลไว้ที่ปลั๊กถ่ายน้ำหล่อเย็นซึ่งอยู่บริเวณด้านล่างของฝาสูบ ดังรูปที่ 4 - 8



รูปที่ 4 - 8 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น

3. อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น โดยติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลแทนที่ก้านวัดระดับน้ำมันหล่อลื่น โดยให้จุดวัดอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแช่อยู่ในน้ำมันหล่อลื่นตลอดเวลา และไม่สัมผัสกับผิวของเสื้อสูบที่เป็นอ่างน้ำมันหล่อลื่น ดังรูปที่ 4 - 9



รูปที่ 4 - 9 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น

4. อุณหภูมิไอเสีย โดยติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลไว้ที่ท่อไอเสียใกล้กับทางออกของไอเสียจากห้องเผาไหม้ โดยให้จุดวัดอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลอยู่บริเวณจุดศูนย์กลางของหน้าตัดวงกลมท่อไอเสีย ดังรูปที่ 4 - 10



รูปที่ 4 - 10 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิไอเสีย

4.2.5 การวัดอัตราการไหลของอากาศ

การวัดอัตราการไหลของอากาศที่ไหลเข้าเครื่องยนต์ จะวัดโดยอาศัยการไหลของอากาศผ่านแผ่น Orifice ซึ่งติดตั้งอยู่ที่บริเวณทางเข้าถึงพักอากาศ ดังรูปที่ 4 - 11 โดยถึงพักอากาศมีหน้าที่ลดการกระเพื่อมของอากาศที่ไหลผ่าน Orifice เข้าสู่เครื่องยนต์เนื่องจากจังหวะการทำงาน ซึ่งจะวัดความดันตกคร่อม Orifice Plate และนำไปใช้คำนวณหาค่าอัตราการไหลของอากาศ



รูปที่ 4 - 11 ถังพักอากาศและการติดตั้ง Orifice

4.2.6 การวัดอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ (Ambient Conditions)

ในระหว่างการทดสอบสมรรถนะจะมีการวัดอุณหภูมิ และความดันบรรยากาศด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4 - 12 โดยผลที่ได้จะแสดงที่ระบบบันทึกข้อมูล



รูปที่ 4 - 12 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ใช้ยี่ห้อ ColliHigh Automation รุ่น JWSL-2 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ส่งสัญญาณอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งจะแปลงค่าของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศให้อยู่ในรูปของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ (4-20 mA) สำหรับระบบควบคุมอัตโนมัติหรือระบบเก็บข้อมูลระยะไกล ซึ่งถูกใช้อย่างกว้างขวางในที่ต่างๆ เช่น อาคารที่ทันสมัย การสื่อสารโทรคมนาคม โรงไฟฟ้า เป็นต้น โดยแสดงข้อมูลของอุปกรณ์ดังตารางที่ 4 - 4 ส่วนการวัดความดันใช้อุปกรณ์ยี่ห้อ Dwyer รุ่น MS-111 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ส่งสัญญาณความดันและความเร็วของอากาศ ซึ่งจะแปลงค่าให้อยู่ในรูปของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ (4-20 mA) โดยแสดงข้อมูลของอุปกรณ์ดังตารางที่ 4 - 5

ตารางที่ 4 - 4 ข้อมูลอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

Power voltage	24VDC (18-30V)
Accuracy (25 องศาเซลเซียส)	±0.5 องศาเซลเซียส (0-50 องศาเซลเซียส)
Output	4-20 mA
Response time	<15s (wind speed >1m/s)
Long-term	Temperature: <0.1 องศาเซลเซียส/ปี
Operating environment	-10~60 องศาเซลเซียส
Mounting dimension	84 mm x 90 mm x 35 mm (White Color ABS)

ตารางที่ 4 - 5 ข้อมูลอุปกรณ์วัดความดัน

Selectable Ranges	1", 2", 5" w.c. (250, 500, 1250 Pa)
Accuracy	±0.1% for 2"(500 Pa), 5"(1250 Pa) และ ±0.2% for 1"(250 Pa)
Stability	±1% / ปี
Temperature Limits	-18 ถึง 66 องศาเซลเซียส
Pressure Limits	สูงสุด 1 psi
Power Requirements	10 ถึง 35 VDC
Output	4-20 mA
Response time	สามารถปรับตั้งได้ตั้งแต่ 0.5 ถึง 15 วินาที
Zero & Span Adjustments	แบบปุ่มกดปรับค่าดิจิทัล
Display (optional)	จอ LCD แสดงตัวเลขดิจิทัล 4 หลัก

4.2.7 การวัดค่าควันดำ

เครื่องมือวัดค่าควันดำเป็นแบบกระดาษกรอง ยี่ห้อ BOSCH ประกอบด้วย

ปั๊มดูดไอเสีย รุ่น ETD 020.00 เป็นเครื่องมือเก็บตัวอย่างค่าควันดำจากท่อ ไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลแสดงดังแสดงในรูปที่ 4 - 13 ภายในตัวปั๊มจะประกอบด้วย

1. ครอบอกปั๊ม ภายในมีลูกสูบที่มีปลายช่องสำหรับใส่กระดาษกรอง
2. สปริงคั่นชกต่อจากลูกสูบ (ตัวสปริงถูกหุ้มด้วยปลอกยาง)
3. ลูกยางบีบ มีท่อต่อลมเข้ากับตัวล้อคสปริง ที่หัวครอบอกปั๊ม
4. หัวดูดไอเสีย (Exhaust – Sample Pickup) ประกอบด้วยอุปกรณ์ยึดติดกับท่อ

ไอเสีย และท่อลมสำหรับแก๊สไอเสียผ่านเข้าครอบอกสูบ



รูปที่ 4 - 13 ปืนดูดไอเสีย รุ่น ETD 020.00

รูปที่ 4 - 14 เครื่องอ่านค่าควัน
ค่า รุ่น ETD 020.50

เครื่องอ่านค่าควันค่า รุ่น ETD 020.50 แสดงดังแสดงในรูปที่ 4 - 14 เป็นเครื่องอ่านค่าความเข้มของเขม่าดำบนกระดาษกรอง แสดงค่าด้วยตัวเลขดิจิทัลเรืองแสง มีสเกลอยู่ระหว่าง 0-10 Bosch Unit Number ความละเอียด 0.1 เมื่อตัวเลขแสดงค่า 0 มีความหมายว่าฝิวัวตฤที่ทดสอบนั้นขาวบริสุทธิ์ ถ้าตัวเลขแสดงค่า 10 หมายความว่าฝิวัวตฤที่ทดสอบนั้น ดำสนิท หรือมีความดำ 100% ในหัวอ่านค่าควันดำ ภายในจะประกอบด้วย Photo Element รูปวงแหวนตรงกลางมีหลอดไฟ และมีสายสัญญาณส่งเข้าเครื่องอ่านค่า หลักการทำงานคือเมื่อกดสวิทซ์อ่านค่า หลอดไฟจะติด แสงที่พุ่งออกไปเมื่อกระทบกับฝิวัวตฤ (กระดาษกรอง) จะมีการสะท้อนกลับ Photo Element จะรับแสงสะท้อนนั้นแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าผ่านตามสายไฟฟ้าไปยังตัวอ่านค่าควันดำและแสดงค่าออกมาเป็นตัวเลขเรืองแสง ในกรณีที่กระดาษกรองขาวบริสุทธิ์ แสงจะสะท้อนกลับมาหมด Photo Element จะส่งสัญญาณเป็นกระแสไฟเต็มที ตัวเลขจะแสดงค่า 0 ถ้ากระดาษกรองดำสนิทจะดูดกลืนแสงไว้ทั้งหมด ไม่มีการสะท้อนกลับ จึงไม่มีสัญญาณไฟส่งไปยังเครื่องวัด ตัวเลขจะแสดงค่า 10 ในการวัดค่าจากกระดาษกรองจะทำการวัด 5 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งบน, กลาง, ล่าง, ซ้าย และขวา ของกระดาษ จากนั้นจะหาค่าเฉลี่ยจาก 5 จุดที่วัดค่า อีกทั้งในการวัดค่าแต่ละจุดทดสอบ จะทำการวัดค่าควันดำถึง 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ยต่อหนึ่งจุดทดสอบ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด



รูปที่ 4 - 15 ตัวอย่างกระดาศกรงที่ใช้ในการวัดค่าควันดำเปรียบเทียบกับ Bosch Unit Number

4.2.8 การวัดค่าความดันในห้องเผาไหม้และความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีด

ในการวัดความดันจะใช้ Piezoelectric Pressure Transducer เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความดันในห้องเผาไหม้และความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีด โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างจะประกอบด้วยผลึกควอทซ์อยู่ในกลุ่มทรานสดิวเซอร์ประเภทแอคทีฟ ทำงานโดยอาศัยปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectricity effect) คือ เมื่อมีแรงมากระทำกับผลึกคริสตอลจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างและขนาดของผลึกและเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า (รูป ก.) โดยแรงที่กระทำกับผลึกต้องมีลักษณะเป็นห้วง ๆ ทรานสดิวเซอร์ชนิดนี้เหมาะสำหรับการวัดความดัน (pressure measurement) ที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาหรือความดันพลวัต (dynamics pressure) หากแรงที่กระทำเป็นแรงคงที่หรือความดันแบบสถิต จะไม่เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น ในทางกลับกันของปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (inverse piezoelectricity effect) เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับผลึกคริสตอลจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดตามทิศทางที่กระแสไฟฟ้ากระทำ (รูป ข.) ซึ่งจะจ่ายประจุไฟฟ้าออกมาเมื่อมีแรงมากระทำบนผลึก โดยมีค่าแปรผันตามแรงหรือความดันที่มากระทำ ในการทดสอบวัดความดันในห้องเผาไหม้จะใช้อุปกรณ์วัดความดัน ยี่ห้อ AVL รุ่น GU12P ดังรูปที่ 4 - 16 ติดตั้งที่บนฝาสูบของเครื่องยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4 - 18 ซึ่งมีรายละเอียดคุณสมบัติของอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 4 - 6

ในการวัดความดันที่ท่อจ่ายเชื้อเพลิงจะใช้ Pressure Transducer ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 607C1 ดังรูปที่ 4 - 17 โดย Pressure Transducer จะถูกติดตั้งอยู่บนท่อจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงช่วงระหว่างปั้มน้ำมันเชื้อเพลิงกับหัวฉีด ดังแสดงในรูปที่ 4 - 18 ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 4 - 7

ตารางที่ 4 - 6 คุณสมบัติของ Pressure Transducer ยี่ห้อ AVL รุ่น GU12P

ช่วงการวัดตั้งแต่	0-20 Mpa
Overload	25 Mpa
Sensitivity	150 pC/MPa
Linearity	< $\pm 0.3\%$ FSO
Acceleration Sensitivity	< 0.001 bar/g
Shock Resistance	> 2000 g
ช่วงอุณหภูมิใช้งานได้ถึง	400°C
Insulation Resistance ที่	> 10 ¹³ Ω
ค่า Capacitance	7 pF
Thermal Sensitivity Shift	
ช่วง 20-400°C	< $\pm 2\%$
ช่วง 200-300°C	< $\pm 0.5\%$

ตารางที่ 4 - 7 คุณสมบัติของ Pressure Transducer ยี่ห้อ Kistler รุ่น 607C1

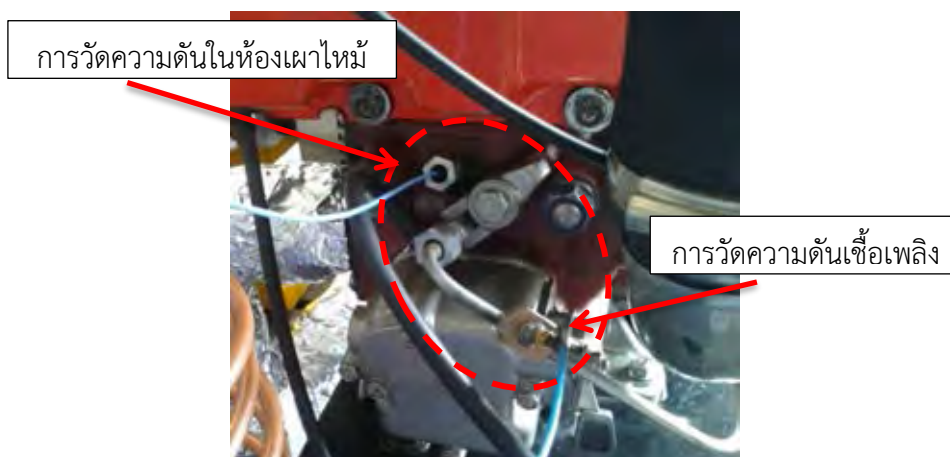
ช่วงการใช้งาน	0-482,633 kPa
ความดันที่วัดได้สูงสุด	698,476 kPa
ค่า Sensitivity	-0.0174 pC/kPa
อุณหภูมิให้อยู่ในช่วง	-196-260°C
ทนอุณหภูมิ Intermittent Gas Temperature	1650°C
ค่า Temperature Coefficient of Sensitivity	0.02%/°C



รูปที่ 4 - 16 Pressure Transducer สำหรับวัดความดันในห้องเผาไหม้



รูปที่ 4 - 17 Pressure Transducer สำหรับวัดความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีด



รูปที่ 4 - 18 ตำแหน่งการติดตั้ง Pressure Transducer สำหรับวัดความดันในห้องเผาไหม้และความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีด

4.2.9 เครื่อง DEWE-Book

เครื่อง DEWE-Book เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้และความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีดที่ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงต่าง ๆ โดยวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Combustion Analyzer Version 6 ทำให้สามารถเก็บข้อมูลความดันแบบ Real-time ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4 - 19 ซึ่งมีข้อมูลทางเทคนิคดังตารางที่ 4 - 8

4.2.10 Charge Amplifier

ทำหน้าที่แปลงสัญญาณประจุไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากอุปกรณ์วัดความดันในห้องเผาไหม้ (Piezoelectric Pressure Transducer) ให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเพื่อนำไปแสดงผลหรือประมวลผลให้อยู่ในรูปแบบที่ต้องการต่อไป โดยใช้ Amplifier รุ่น DAQP-CHARGE-A 2 ตัว เพื่อแปลงสัญญาณที่วัดได้จาก Fuel Line และ Main Chamber ดังแสดงในรูปที่ 4 - 20 โดยมีข้อมูลทางเทคนิคดังตารางที่ 4 - 9

ตารางที่ 4 - 8 คุณสมบัติของเครื่อง DEWE-Book

General Specification	
Resolution	-0.1 degree with crank angle encoder at up to 8000 rpm on 1 channel -0.2 degree resolution with 4 channel up to 6000 rpm
Result Display	Online mathematics and statistics Fast online displays (pressure diagram, P/V diagram...)
Function	Powerful knocking recognition capability
Fast stream to disk mode Z1 MS/s)	
Input Specification	
Max. Channels	32
Internal Amplifier Slot	16
Sampling Rate	Up to 1 MS/s total
Resolution	12 bit
Input ± 10 V ± 50 V (Isolated) Charge	Standard DAQP-V modules DAQP-CHARGE-X modules
Crank or CA Input	Isolated



รูปที่ 4 - 19 เครื่อง DEWE-Book



รูปที่ 4 - 20 Amplifier รุ่น DAQP-CHARGE- A

ตารางที่ 4 - 9 ข้อมูลทางเทคนิค Amplifier รุ่น DAQP-CHARGE- A

DAQP-CHARGE-A	
Supported sensors:	ICP [®] and charge sensor
Sensor type selection:	Push button or software
Input ranges:	
ICP [®] input:	0, 20, 40, 60 dB
Charge input:	0.1, 1, 10, 100, 1000 mV/pC
Gain accuracy:	1% F.S.
Input range fine tuning:	Programmable
Range selection:	Push button (fixed) or software (all)
Integration:	Single (velocity), double (displacement)

ตารางที่ 4 – 9 ข้อมูลทางเทคนิค Amplifier รุ่น DAQP-CHARGE- A (ต่อ)

LED indicators:	
Range and filter:	5 LEDs
ICP LED:	Active with connected ICP [®] sensor, inactive for charge input
OVL LED:	Overload control (output voltage > 5 V)
A, V and D LED:	Indicator for acceleration, velocity and displacement output
Constant current source:	3.8 to 5.6 mA, > 26 V
Filters (high pass):	0.1 Hz, 1 Hz, 10 Hz (± 2 dB @ f_0)
Filters (low pass):	100 Hz, 1, 3, 10, 50 kHz (± 2 dB @ f_0)
Filter selection:	Push button or software
Filter characteristics:	Butterworth 80 dB / decade (24 dB / octave)
Bandwidth, -3 dB	0.1 Hz to 50 kHz (± 2 dB @ f_0)
Typ. SNR @ max. bandwidth:	
Gain 0.1 and 1	90 dB
Gain 10	87 dB
Gain 100	73 dB
Gain 1000	54 dB
Gain 10000	60 dB @ 10 kHz
Output voltage:	± 5 V (± 6 V peak voltage)
Output noise:	< 8 mV (all ranges with 50 kHz filter)
RS-485 interface:	Yes
Power supply:	± 9 VDC (± 10 %)
Power consumption:	0.6 W to 1.2 W (depending on sensor)

4.2.11 Crank Angle Encoder

Crank Angle Encoder เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดมุมข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ เพื่อส่งข้อมูลให้ DEWE-Book ทราบถึงมุมข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์และความเร็วรอบเครื่องยนต์ โดย Crank Angle Encoder ที่ใช้เป็นยี่ห้อ DEWETRON รุ่น CA-RIE360 มีลักษณะดังรูปที่ 4 - 21 โดยได้แสดงรายละเอียดไว้ดังตารางที่ 4 - 10



รูปที่ 4 - 21 Crank Angle Encoder ยี่ห้อ DEWETRON รุ่น CA-RIE360

ตารางที่ 4 - 10 ข้อมูลทางเทคนิคของ Crank Angle Encoder ยี่ห้อ DEWETRON รุ่น CA-RIE 360

หลักการทำงาน	แบบ Infrared beam is Emitted and received at the sensor unit
Pulses per revolution	360
Resolution	1 degree
Diameter of disc	121.6 mm (4.79 in.)
Max. RPM	12000
Max. Output freq. [kHz]	125
Temp. Range	-10 °C to 60 °C

4.3 การทดสอบสมรรถนะ

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ เป็นการศึกษ่าเบื้องต้นถึงสมรรถนะและอุณหภูมิการทำงานที่ได้จากเครื่องยนต์เครื่องเดียวกันเมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกและเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป โดยดำเนินการที่สภาวะภาระสูงสุด (Full Load) และสภาวะภาระบางส่วน (Part Load)

4.3.1 วิธีการทดสอบสมรรถนะ

4.3.1.1 การ Run in

หลังจากการเปลี่ยนชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์ใหม่ จะต้องทำการ Run in เครื่องยนต์โดยใช้ภาระตามที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำ ซึ่งสำหรับเครื่องยนต์ KUBOTA (DI) ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. ไม่มีภาระ (No load) ความเร็วรอบ 2400 rpm เวลา 30 นาที
2. ภาระ 50% ของ rated power ความเร็วรอบ 2400 rpm เวลา 30 นาที
3. ภาระ 100% ของ rated power ความเร็วรอบ 2400 rpm เวลา 20 ชั่วโมง

หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการ Run in จะมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องใหม่ก่อนเริ่มทำการทดสอบ โดยการทดสอบสมรรถนะจะเริ่มจากการใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปก่อน จากนั้นต่อด้วยเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ซึ่งหลังจากการทดสอบเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องก่อนทุกครั้งและเดินเครื่องยนต์ช่วงระยะเวลาหนึ่งเพื่อเป็นการไล่น้ำมันเชื้อเพลิงที่ทดสอบก่อนหน้าออกไปให้หมดก่อนจากนั้นจึงเริ่มการทดสอบเพื่อเก็บข้อมูล

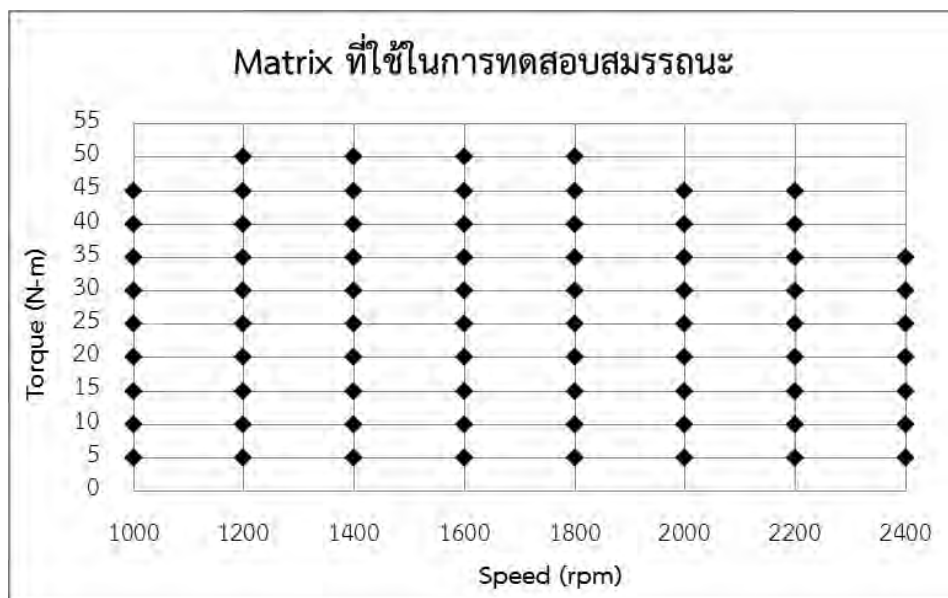
4.3.1.2 การทดสอบที่ภาระสูงสุด (Full Load Performance Test)

การทดสอบที่สภาวะภาระสูงสุด จะต้องมีการ Warm up เครื่องยนต์จนถึงอุณหภูมิการทำงานก่อนเสมอ ซึ่งก็คืออุณหภูมิน้ำหล่อเย็นและน้ำมันหล่อลื่นต้องไม่ต่ำกว่า 90°C จากนั้นจึงเริ่มการทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ของค่าแรงบิดกับความเร็วนรอบ ที่สภาวะภาระสูงสุด (Full Load) โดยเริ่มจากปรับระบบควบคุมให้ไดนาโมมิเตอร์ควบคุมความเร็วนรอบคงที่ที่ 1000 rpm จากนั้นจึงปรับชุดควบคุมให้ตั้งค่าน้ำหนักของเครื่องยนต์จนถึง 100 % รอให้เครื่องยนต์อยู่ในสภาวะคงตัว แล้วจึงบันทึกผลค่าแรงบิด อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าอุณหภูมิและความดันต่าง ๆ จากนั้นเพิ่มความเร็วของไดนาโมมิเตอร์ให้มีค่าคงที่ที่ 1200 rpm รอให้เครื่องยนต์อยู่ในสภาวะคงตัวแล้วจึงบันทึกค่า และกระทำเช่นเดียวกันที่ความเร็วนรอบ 1400, 1600, 1700, 1800, 2000, 2100, 2200 และความเร็วนรอบ 2400 rpm จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วนรอบที่สภาวะภาระสูงสุด (Full Load)

4.3.1.3 การทดสอบที่ภาระบางส่วน (Part Load Performance Test)

จากความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะภาระสูงสุดจึงสามารถนำมากำหนดจุดในการทดสอบ (Matrix) ที่ความเร็วนรอบและที่แรงบิดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4 - 22

โดยการทดสอบสมรรถนะที่สภาวะภาระบางส่วน ณ จุดทำงานตามจุดทดสอบบน Matrix ที่กำหนดในรูปที่ 4 - 22 เริ่มจากความเร็วรอบต่ำ โดยปรับชุดควบคุมไดนาโมมิเตอร์ให้ทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ แล้วปรับคันเร่งให้ได้ภาระตามที่ต้องการ



รูปที่ 4 - 22 Matrix ที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบจะทำตามจุดทดสอบที่กำหนดในรูปที่ 4 - 22 เริ่มที่ความเร็วรอบ 1000 rpm ที่ค่าแรงบิด 5 N-m เมื่อปรับเครื่องยนต์จนตรงตามจุดทำงานที่ต้องการแล้ว รอให้เครื่องยนต์อยู่ที่สภาวะคงตัว จึงเริ่มทำการวัดอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง พร้อมกับบันทึกค่าอุณหภูมิ ความดันต่าง ๆ จากนั้นจะเปลี่ยนจุดทดสอบโดยปรับชุดควบคุมเพื่อเพิ่มคันเร่งของเครื่องยนต์หรือแรงบิดทีละ 5 N-m จนถึงค่าแรงบิดสูงสุด และเพิ่มความเร็วในการทดสอบจาก 1200 rpm จนถึง 2400 rpm นำค่าแรงบิดและอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงไปคำนวณปรับค่าที่สภาวะอากาศมาตรฐาน ISO 3046 [27] แล้วนำค่าที่ปรับแล้วมาแสดงในรูปแผนภูมิสมรรถนะ (Performance Map) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด ความเร็วรอบ และอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

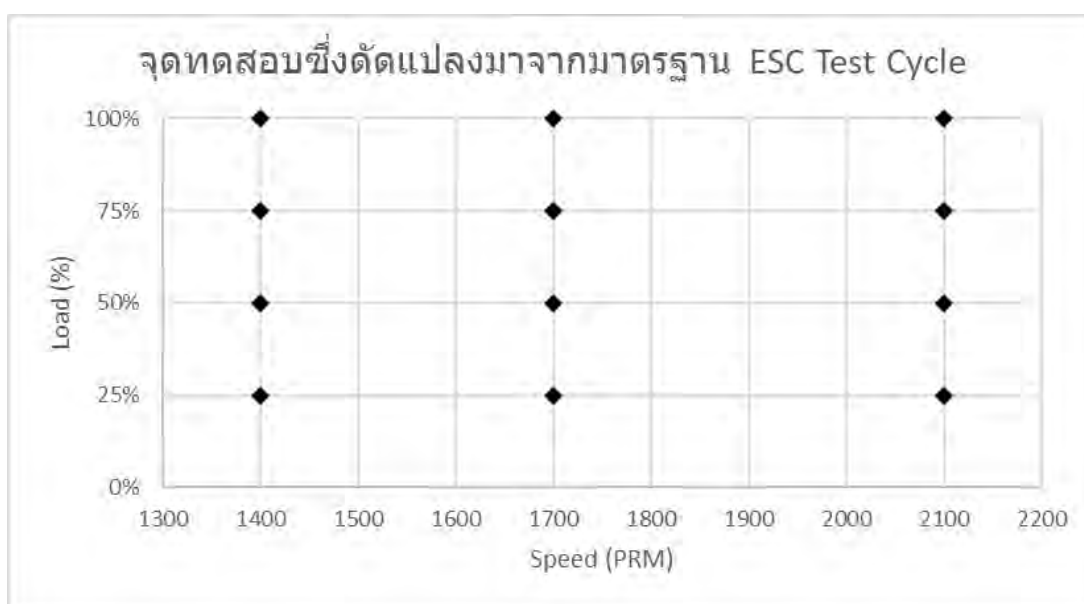
4.4 การทดสอบวัดความดันในห้องเผาไหม้

การทดสอบวัดความดันในห้องเผาไหม้ เป็นการศึกษาการเผาไหม้และการปลดปล่อยความร้อนเนื่องจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์ และเชื้อเพลิงดีเซล ที่องค์การนิคมเชื้อเพลิงมาตรฐาน ซึ่งแสดงแผนผังการทดสอบความดันในห้องเผาไหม้ไว้ในรูปที่ 4 - 23

4.4.1 วิธีการทดสอบวัดความดันในห้องเผาไหม้

4.4.1.1 การทดสอบวัดความดันในห้องเผาไหม้ที่องค์การฉีดยานยนต์มาตรฐาน

การทดสอบความดันในห้องเผาไหม้ที่องค์การฉีดยานยนต์มาตรฐานของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด ที่สภาวะคงตัว ภาระและความเร็วรอบคงที่ ทีละจุดทดสอบ ซึ่งจุดทดสอบที่ใช้นั้น ดัดแปลงมาจากวัฏจักรการทดสอบตามมาตรฐาน ESC Test Cycle [26] (ดูภาคผนวก ค) กล่าวคือ ทำการทดสอบที่ความเร็วรอบ 1400, 1700 และ 2100 rpm ที่ภาระทดสอบสามระดับ ได้แก่ ที่ 25% Load (11 N-m), ที่ 50% Load (23 N-m) และที่ 75% Load (35 N-m) ดังนั้นจุดทดสอบที่เลือกในการทดสอบนี้ จึงมีทั้งหมด 9 จุด ดังรูปที่ 4 - 24



รูปที่ 4 - 23 จุดที่ใช้ทดสอบความดันในห้องเผาไหม้

ในการทดสอบจะทำการวัดความดันในห้องเผาไหม้หลัก ความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีด และองศาเพลลาข้อเหวี่ยง โดยบันทึกข้อมูลทุก ๆ 2 องศาเพลลาข้อเหวี่ยง จำนวน 200 วัฏจักรต่อจุดทดสอบ ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาอัตราการปล่อยความร้อนสามารถคำนวณโดยใช้สมการ (3-4) ปริมาณการปล่อยความร้อนสุทธิสามารถหาได้จากสมการ (3-5) และสัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ (3-6) อัตราการฉีดยานยนต์ได้โดยใช้สมการ (3-7) ซึ่งผลที่ได้ทั้งหมดจะถูกนำไปวิเคราะห์ต่อไป เช่น มุมข้อเหวี่ยงที่เริ่มต้นการฉีดยานยนต์ มุมข้อเหวี่ยงที่เริ่มต้นการเผาไหม้ มุมข้อเหวี่ยงที่สิ้นสุดการเผาไหม้ ช่วงล่าช้าของการเผาไหม้ (Ignition Delay) และอัตราการเผาไหม้ รวมไปถึงจะเก็บข้อมูลค่าสมรรถนะ ค่ามลพิษต่าง ๆ และค่าควันทันที่ปล่อยออกมา ณ จุดทดสอบนี้ด้วย

4.4.1.2 การวิเคราะห์สภาวะการเผาไหม้จากอัตราการปล่อยความร้อน

การบ่งชี้สภาวะการเผาไหม้กระทำโดยพิจารณาอัตราการปล่อยความร้อนที่คำนวณได้จากผลการทดสอบ โดยกำหนดเงื่อนไขจากนิยามต่อไปนี้

1. มุมข้อเหวี่ยงที่เริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง พิจารณาจากมุมข้อเหวี่ยงที่ความดันในท่อจ่ายเชื้อเพลิงเข้าหัวฉีดมีค่าสูงกว่า Opening Pressure ของหัวฉีด
2. การบ่งชี้มุมข้อเหวี่ยงที่เริ่มต้นการเผาไหม้ พิจารณาจากมุมข้อเหวี่ยงที่ค่าอัตราการปล่อยความร้อนเพิ่มขึ้นมากกว่าศูนย์ครั้งแรก
3. การบ่งชี้มุมข้อเหวี่ยงที่สิ้นสุดการเผาไหม้ พิจารณาจากมุมข้อเหวี่ยงที่อัตราการปล่อยความร้อนลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ครั้งแรก
4. ช่วงล่าช้าของการเผาไหม้ (Ignition Delay) บ่งชี้จากช่วงมุมข้อเหวี่ยงระหว่างจุดเริ่มฉีดเชื้อเพลิงถึงจุดเริ่มต้นการเผาไหม้
5. อัตราการเผาไหม้ บ่งชี้จากอัตราการปล่อยความร้อน

บทที่ 5

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดสอบและวิเคราะห์เครื่องยนต์ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นผลจากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป แสดงค่าแรงบิดเบรก ค่ากำลัง อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรก อุณหภูมิไอเสีย อุณหภูมิ น้ำมันหล่อลื่นและอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น ที่ความเร็วรอบคงที่และสภาวะคงตัวบนแท่นทดสอบเครื่องยนต์ ส่วนที่สองเป็นผลการทดสอบและวิเคราะห์การเผาไหม้จากความดันในห้องเผาไหม้สมรรถนะ และค่าควันทำของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก โดยจุดทดสอบที่ดัดแปลงมาจากมาตรฐานการทดสอบเครื่องยนต์ ESC Test Cycle

ผลการทดสอบในบัทนี้อาติแรงบิดเบรก กำลังเบรก และอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก ได้มีการปรับชดเชยค่าโดยหักลบค่าความชื้นในอากาศ และอุณหภูมิที่เข้าไปยังห้องเผาไหม้ให้เทียบเท่าอุณหภูมิอ้างอิงให้ได้ตามมาตรฐาน ISO 3046 [27]

5.1 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

สมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกและเชื้อเพลิงดีเซลวัดเปรียบเทียบโดยใช้เครื่องยนต์ตามมาตรฐานตามที่ได้ผลิตได้แนะนำ เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิง โดยจะทดสอบเก็บค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ทั้งที่สภาวะภาระสูงสุดและสภาวะภาระบางส่วน อาทิ ค่าแรงบิดเบรก กำลังเบรก อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ค่าอุณหภูมิ ของเครื่องยนต์ระหว่างการทำงาน ซึ่งสามารถเสนอผลทางด้านสมรรถนะได้ดังนี้

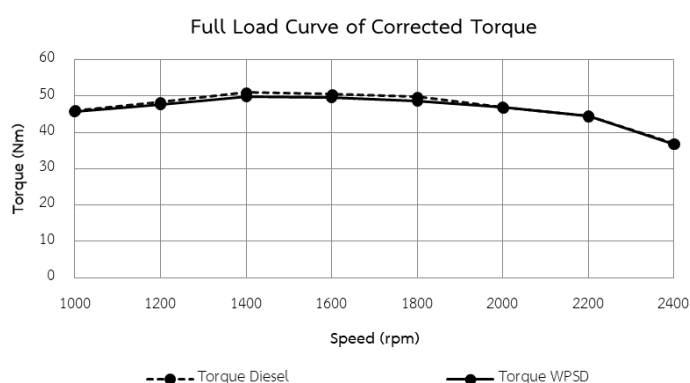
5.1.1 สภาวะภาระสูงสุด (Full Load Conditions)

5.1.1.1 ผลของแรงบิดเบรก (Brake Torque)

ผลของแรงบิดเบรก (Brake Torque) ที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล แสดงในรูปที่ 5 - 1 พบว่า ที่ทุกความเร็วรอบที่ทดสอบเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกสามารถสร้างแรงบิดเบรกสูงสุดได้ต่ำเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล โดยแรงบิดสูงสุดที่สามารถสร้างได้เมื่อเครื่องยนต์ใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เท่ากับ 49.7 Nm ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบ/นาที และเชื้อเพลิงดีเซลเท่ากับ 51.0 Nm เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบ 1400 รอบ/นาที เช่นเดียวกันซึ่งมีค่าแตกต่างกันประมาณร้อยละ 2.44

เครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกสามารถสร้างแรงบิดเบรกสูงสุดได้ต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลคิดเป็น 0.01 – 1.25 N-m หรือร้อยละ 0.02 – 2.44 ตลอดช่วงความเร็วในการทดสอบ คือ 1000 – 2400 รอบ/นาที

การที่แรงบิดเบรกสูงสุดของเชื้อเพลิงดีเซลมีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเป็นผลมาจากเชื้อเพลิงดีเซลมีปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงที่มากกว่าเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจึงสามารถสร้างแรงบิดเบรกได้มากกว่าที่ภาวะสูงสุด

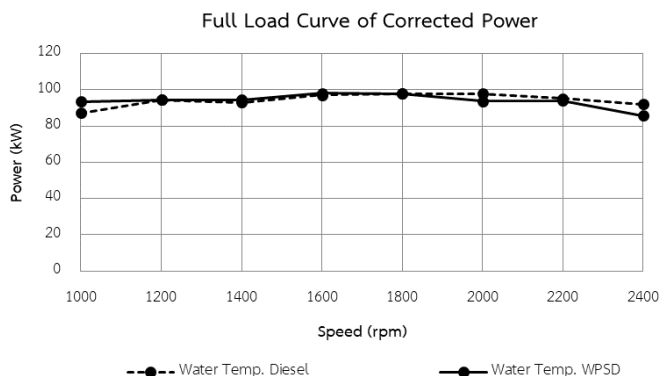


รูปที่ 5 - 1 แรงบิดเบรกของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล

5.1.1.2 ผลของกำลังเบรก (Brake Power)

ผลของกำลังเบรก (Brake Power) ที่สภาวะภาวะสูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล แสดงในรูปที่ 5 – 2 พบว่า ที่ทุกความเร็วรอบที่ทดสอบเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกสามารถสร้างกำลังเบรกสูงสุดต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซล โดยกำลังสูงสุดที่สามารถสร้างได้เมื่อเครื่องยนต์ใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เท่ากับ 10.04 kW ที่ความเร็วรอบ 2200 รอบ/นาที และเชื้อเพลิงดีเซลเท่ากับ 10.24 kW ที่ความเร็วรอบ 2200 รอบ/นาที เช่นเดียวกัน ซึ่งแตกต่างกันประมาณร้อยละ 1.98

เครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกสามารถสร้างกำลังเบรกสูงสุดได้ต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลคิดเป็น 0.002 – 0.23 kW หรือร้อยละ 0.02 – 2.44 ตลอดช่วงความเร็วในการทดสอบ คือ 1000 – 2400 รอบ/นาที



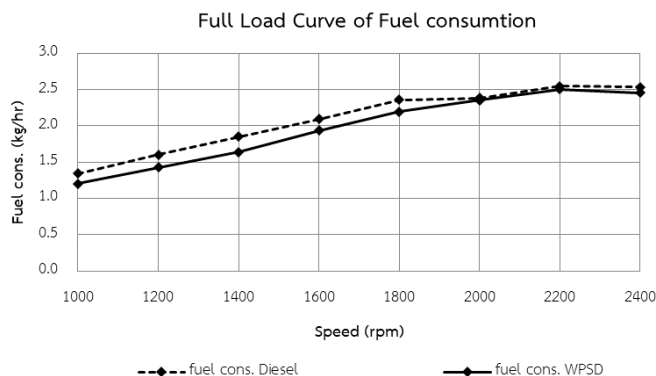
รูปที่ 5 - 2 กำลังเบรกของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล

5.1.1.3 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel consumption)

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล แสดงในรูปที่ 5 - 3 พบว่า ทุกความเร็วรอบที่ทดสอบเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจะใช้เชื้อเพลิงน้อยกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซล โดยอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงสุดเมื่อเครื่องยนต์ใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เท่ากับ 2.503 kg/hr ที่ความเร็วรอบ 2200 รอบ/นาที ส่วนเชื้อเพลิงดีเซล เท่ากับ 2.545 kg/hr ที่ความเร็วรอบ 2200 รอบ/นาที เช่นเดียวกัน ซึ่งแตกต่างกันประมาณ 0.042 kg/hr หรือคิดเป็นร้อยละ 1.65

เครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลคิดเป็น 0.032 - 0.214 kg/hr หรือร้อยละ 1.34 - 11.56 ตลอดช่วงความเร็วในการทดสอบ คือ 1000 - 2400 รอบ/นาที

การที่เครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อยกว่าเป็นผลมาจากความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่น้อยกว่า ส่งผลให้กำลังเบรกสูงสุดที่สร้างได้ของเครื่องยนต์มีค่าต่ำกว่าเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลตลอดช่วงความเร็วในการทดสอบ



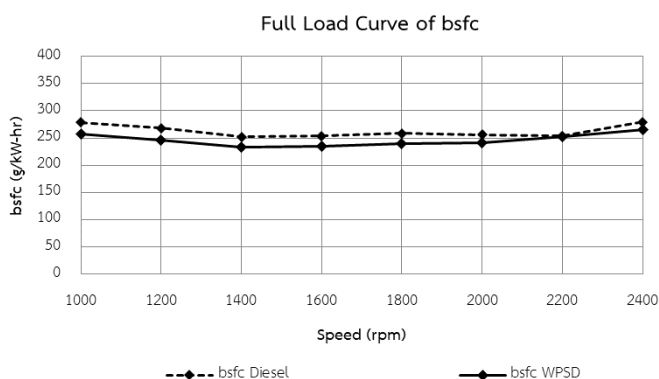
รูปที่ 5 - 3 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล

5.1.1.4 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (bsfc)

ผลของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก ที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล แสดงในรูปที่ 5 - 4 พบว่าที่ทุกความเร็วรอบที่ทดสอบเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซล โดยอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกต่ำสุดของเครื่องยนต์ใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เท่ากับ 230 g/kW-hr ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบ/นาที และเชื้อเพลิงดีเซล เท่ากับ 250 g/kW-hr ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบ/นาที เช่นเดียวกัน ซึ่งแตกต่างกันประมาณ 20 g/kW-hr หรือคิดเป็นร้อยละ 7.74

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจะมีค่าต่ำกว่าของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปที่ทุกความเร็วรอบ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 3.64 – 27.21 g/kW-hr หรือร้อยละ 1.10 – 9.39 ตลอดช่วงความเร็วรอบในการทดสอบ คือ 1000 – 2400 รอบ/นาที

การที่เครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่ต่ำกว่าเนื่องมาจากเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่สูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป จึงทำให้มีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกน้อยกว่าเพื่อให้ได้พลังงานออกมาในปริมาณที่เท่ากันเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล



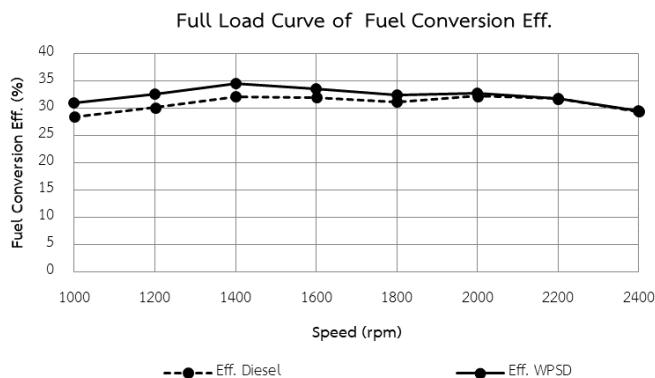
รูปที่ 5 - 4 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล

5.1.1.5 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานเชื้อเพลิงเบรก (Brake Fuel Conversion Efficiency)

สำหรับผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกกับเชื้อเพลิงดีเซล ซึ่งแสดงในรูปที่ 5 - 5 พบว่า ที่ทุกความเร็วรอบในการทดสอบตั้งแต่ 1000 - 2400 รอบ/นาที ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลประมาณร้อยละ 0.25 - 9.32 โดยค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานเชื้อเพลิงสูงสุดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าร้อยละ 34.5 ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบ/นาที ส่วนเชื้อเพลิงดีเซลมีค่าร้อยละ 32.2 ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที และต่ำสุดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าร้อยละ 29.4 ส่วนเชื้อเพลิงดีเซลมีค่าร้อยละ 29.3 ที่จุดทดสอบเดียวกัน คือที่ความเร็วรอบ 2400 รอบ/นาที

ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานเชื้อเพลิง (Brake Fuel Conversion Efficiency) ของเครื่องยนต์ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ เช่น ค่าความหนืดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกซึ่งมีค่าต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซลจึงส่งผลให้การแตกตัวเป็นฝอยของละอองเชื้อเพลิงทำได้ดีกว่า ทำให้กระบวนกลั่นเผาไหม้ดีกว่า จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกดีกว่าเชื้อเพลิงดีเซล

เมื่อนำประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานเชื้อเพลิงได้ไปพิจารณาร่วมกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกจะพบว่านอกจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงที่ส่งผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่แตกต่างกันแล้ว ก็ยังมีค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันด้วย

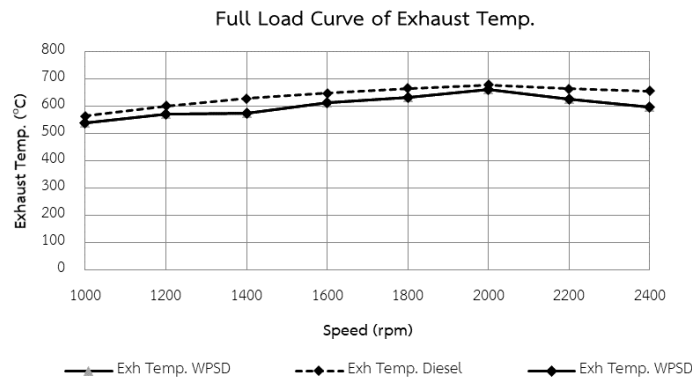


รูปที่ 5 - 5 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรก ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป

5.1.1.6 อุณหภูมิไอเสีย

อุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกกับเชื้อเพลิงดีเซล ซึ่งแสดงในรูปที่ 5 - 6 พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์สูงขึ้น และจะลดลงเมื่อมีความเร็วรอบสูงกว่า 2000 รอบ/นาที ซึ่งที่ทุกความเร็วรอบที่ทดสอบตั้งแต่ 1000 - 2400 รอบ/นาที อุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซลประมาณ 17 - 58 องศาเซลเซียส หรือคิดเป็นร้อยละ 2.51 - 8.85 โดยที่เครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจะมีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 660 องศาเซลเซียสและเชื้อเพลิงดีเซลอยู่ที่ 677 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที ทั้งสองเชื้อเพลิง

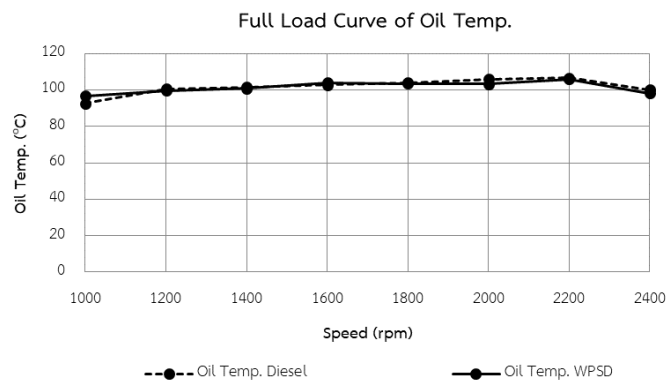
สำหรับการที่อุณหภูมิไอเสียของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าต่ำอุณหภูมิไอเสียของเชื้อเพลิงดีเซลที่จุดทดสอบเดียวกัน คาดว่าเกิดจากปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงที่มากกว่าของเชื้อเพลิงดีเซล อีกทั้งความหนืดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ซึ่งทำให้กระบวนการกลายเป็นละอองฝอยของเชื้อเพลิงเมื่อถูกฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ของการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกดีกว่าเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป และเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจะมีค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานเชื้อเพลิงที่ดีกว่าก็ตาม อุณหภูมิไอเสียของเชื้อเพลิงดีเซลก็ยังสูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก



รูปที่ 5 - 6 อุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก
เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป

5.1.1.7 อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น

อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป แสดงไว้ในรูปที่ 5 - 7 พบว่า ที่ทุกความเร็วรอบที่ทดสอบตั้งแต่ 1000 - 2400 รอบ/นาที อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดไม่มีความแตกต่างกัน โดยมีอุณหภูมิการทำงานอยู่ในช่วงระหว่าง 90 °C ถึง 110 °C

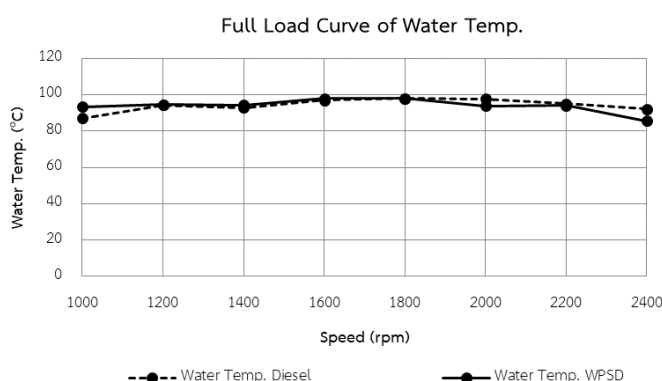


รูปที่ 5 - 7 อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก
เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป

5.1.1.8 อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น

อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป แสดงไว้ในรูปที่ 5 - 8 พบว่า ที่ทุกความเร็วรอบที่ทดสอบตั้งแต่ 1000 - 2400 รอบ/นาที อุณหภูมิอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่สภาวะภาระสูงสุดของการใช้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดไม่มีความแตกต่างกัน โดยมีอุณหภูมิอยู่ 85 - 100 °C ตลอดช่วงการทดสอบ

จากข้อมูลอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นและอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์ แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิงไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิการทำงานของเครื่องยนต์ เนื่องจากอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นและน้ำหล่อเย็นยังใกล้เคียงกัน แสดงว่าความสามารถในการระบายความร้อนของเครื่องยนต์ยังทำงานได้ตามปกติเมื่อใช้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดนี้



รูปที่ 5 - 8 อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป

5.1.2 สภาวะภาระบางส่วน (Part Load Conditions)

5.1.2.1 ค่าอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก

อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่สภาวะบางส่วนเปรียบเทียบระหว่างเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกกับเชื้อเพลิงดีเซล โดยความสัมพันธ์ที่แสดงในรูปที่ 5 - 9 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกกับแรงบิดเบรกในแต่ละความเร็วรอบที่สภาวะคงที่ เริ่มตั้งแต่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200 และ 2400 รอบต่อนาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกจากการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าใกล้เคียงกับการใช้เชื้อเพลิงดีเซลในทุก ๆ ความเร็วรอบและแรงบิดที่ทดสอบ

ค่าอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกต่ำสุดเมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าประมาณ 215 g/kW-hr เกิดขึ้นที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที ที่แรงบิดเบรก 35 N-m ส่วนค่าอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกต่ำสุดเมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลมีค่าประมาณ 223 g/kW-hr เกิดขึ้นที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที ที่แรงบิด 35 N-m เช่นเดียวกัน

เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกมีแนวโน้มเดียวกันทั้งหมด กล่าวคือ เครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกต่ำกว่าเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปประมาณร้อยละ 1.5 - 8.3

5.1.2.2 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานเบรก

ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกในสภาวะบางส่วนเปรียบเทียบระหว่างการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกและเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ในแต่ละความเร็วรอบโดยความสัมพันธ์ที่แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกเปรียบเทียบกับแรงบิดเบรก ในแต่ละความเร็วรอบคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 5 - 10

จากรูปที่ 5 - 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกกับแรงบิดเบรก ที่ค่าความเร็วคงที่ ตั้งแต่ 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200 และ 2400 รอบต่อนาที ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกจากการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก มีค่าใกล้เคียงกับการใช้เชื้อเพลิงดีเซลที่ทุก ๆ ความเร็วรอบและแรงบิดที่ทดสอบ

ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกสูงสุดเมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าประมาณร้อยละ 36.6 เกิดขึ้นที่ความเร็ว 1200 rpm ที่แรงบิด 35 N-m ส่วนประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกสูงสุดเมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปมีค่าประมาณร้อยละ 35.9 เกิดขึ้นที่ความเร็ว 1200 rpm ที่แรงบิดประมาณ 35 N-m ซึ่งที่จุดทดสอบอื่น ๆ ค่าทั้งสองมีความใกล้เคียงกันอย่างมาก ทั้งตำแหน่งที่เกิดและค่าประสิทธิภาพ เนื่องจากคุณสมบัติต่าง ๆ ของเชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ประสิทธิภาพและอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกใกล้เคียง

ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าสูงกว่าดีเซลทุกช่วงการทดสอบ โดยความแตกต่างของประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเมื่อเปรียบเทียบกับดีเซล จะอยู่ในช่วงร้อยละ 0.2 - 8.2

5.1.2.3 อุณหภูมิไอเสีย

อุณหภูมิไอเสียที่สภาวะบางส่วนเปรียบเทียบระหว่างเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกกับเชื้อเพลิงดีเซลที่แต่ละความเร็วรอบ โดยความสัมพันธ์ของทั้งสองเชื้อเพลิงที่แสดงในรูปที่ 5 - 11 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไอเสียกับแรงบิดเบรกในแต่ละความเร็วรอบที่สภาวะคงที่ เริ่มตั้งแต่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200 และ 2400 รอบต่อนาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิไอเสียจากการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าใกล้เคียงกับการใช้เชื้อเพลิงดีเซลในทุก ๆ ความเร็วรอบและแรงบิดที่ทดสอบ โดยอุณหภูมิไอเสียมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระการทดสอบที่เพิ่มขึ้นในแต่ละจุดทดสอบที่ความเร็วรอบเดียวกัน

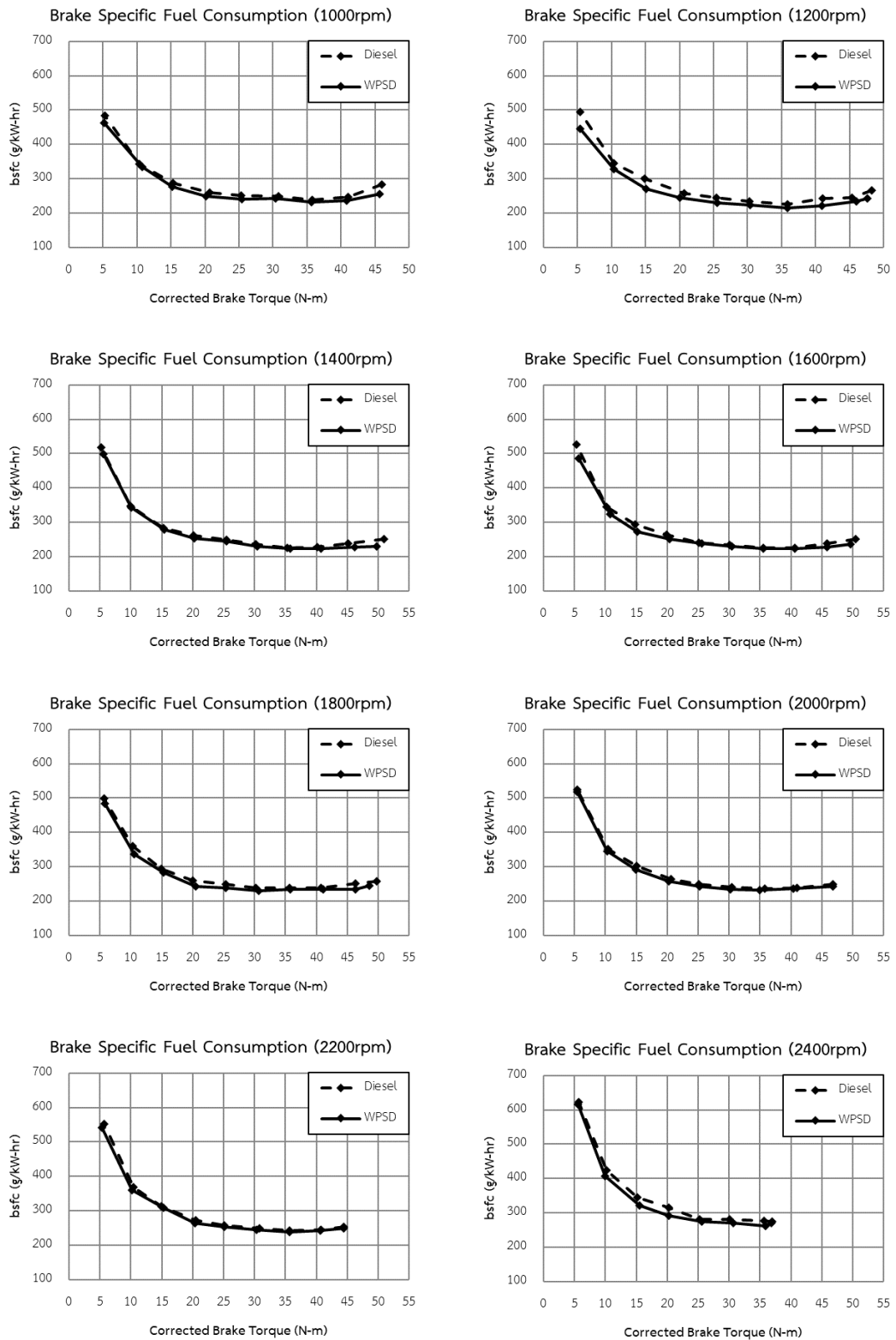
อุณหภูมิไอเสียสูงสุดเมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่า 573 องศาเซลเซียส เกิดขึ้นที่ความเร็ว 2400 รอบต่อนาที ที่แรงบิดเบรก 35 N-m ส่วนอุณหภูมิไอเสียสูงสุดเมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลมีค่า 635 องศาเซลเซียส เกิดขึ้นที่ความเร็ว 2400 รอบต่อนาที ที่แรงบิด 35 N-m ซึ่งค่าทั้งสองมีความใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจุดนี้ยังเป็นจุดที่อุณหภูมิไอเสียที่แตกต่างกันมากที่สุดสำหรับการทดสอบที่สภาวะภาระบางส่วน โดยส่วนต่างระหว่างเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกกับเชื้อเพลิงดีเซลมีค่าเท่ากับ 62 องศาเซลเซียส คิดเป็น 9.8 %

5.1.2.4 อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น

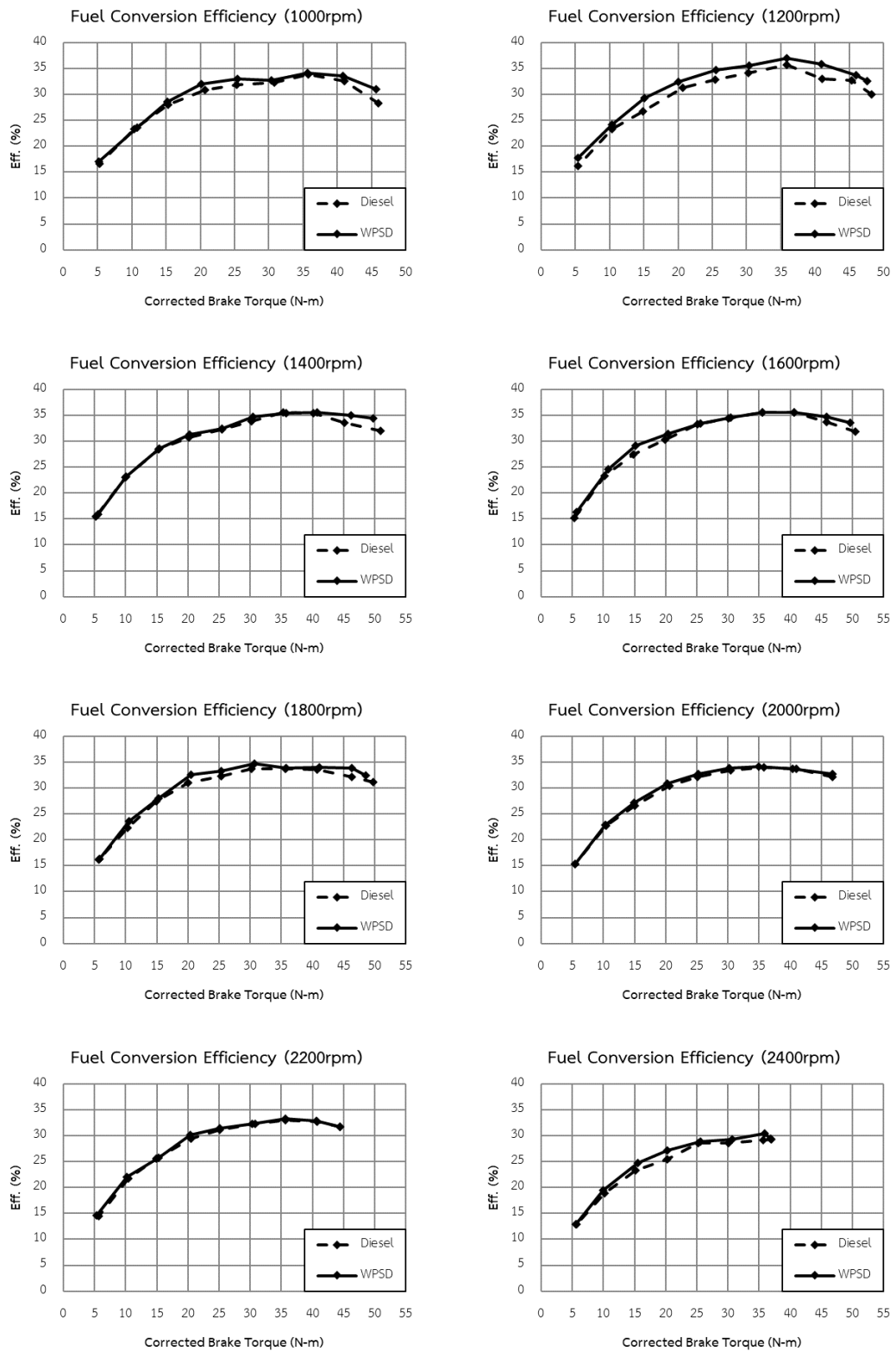
อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นในสภาวะบางส่วนเปรียบเทียบระหว่างการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกและเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ในแต่ละความเร็วรอบโดยความสัมพันธ์ที่แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นเปรียบเทียบกับแรงบิดเบรก ในแต่ละความเร็วรอบคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 5 – 12 พบว่าเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด จะมีค่าอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นใกล้เคียงกัน โดยที่ความเร็วรอบเดียวกันอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อภาระในการทดสอบเพิ่มขึ้น

5.1.2.5 อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น

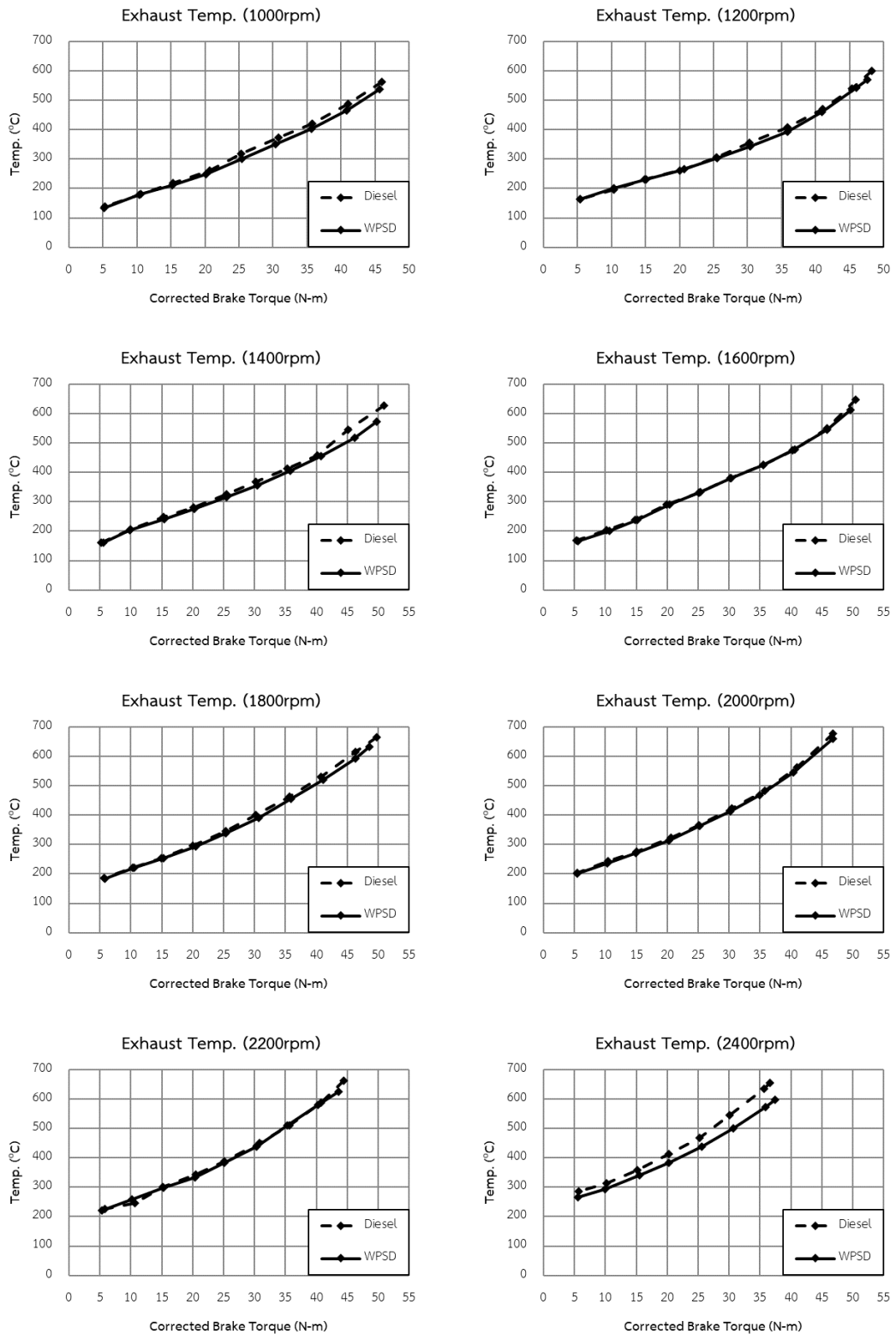
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นในสภาวะบางส่วนเปรียบเทียบระหว่างการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกและเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ในแต่ละความเร็วรอบโดยความสัมพันธ์ที่แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเปรียบเทียบกับแรงบิดเบรก ในแต่ละความเร็วรอบคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 5 – 13 พบว่าเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด จะมีค่าอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นใกล้เคียงกัน โดยที่ความเร็วรอบเดียวกันอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นจะเพิ่มขึ้นเมื่อภาระในการทดสอบเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น



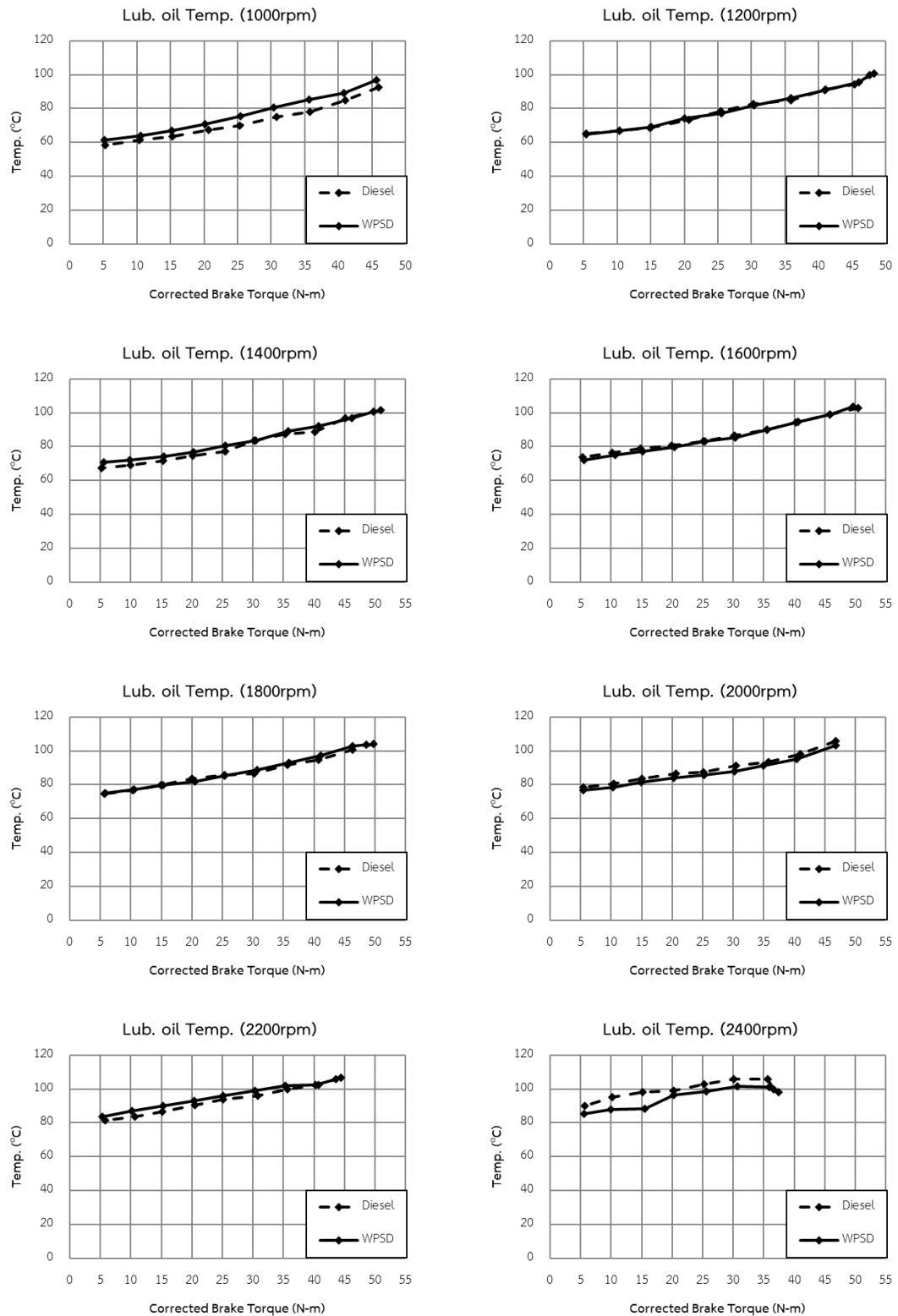
รูปที่ 5 - 9 อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกกับแรงบิดเบรกของเครื่องยนต์ ที่ความเร็วรอบคงที่
เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล



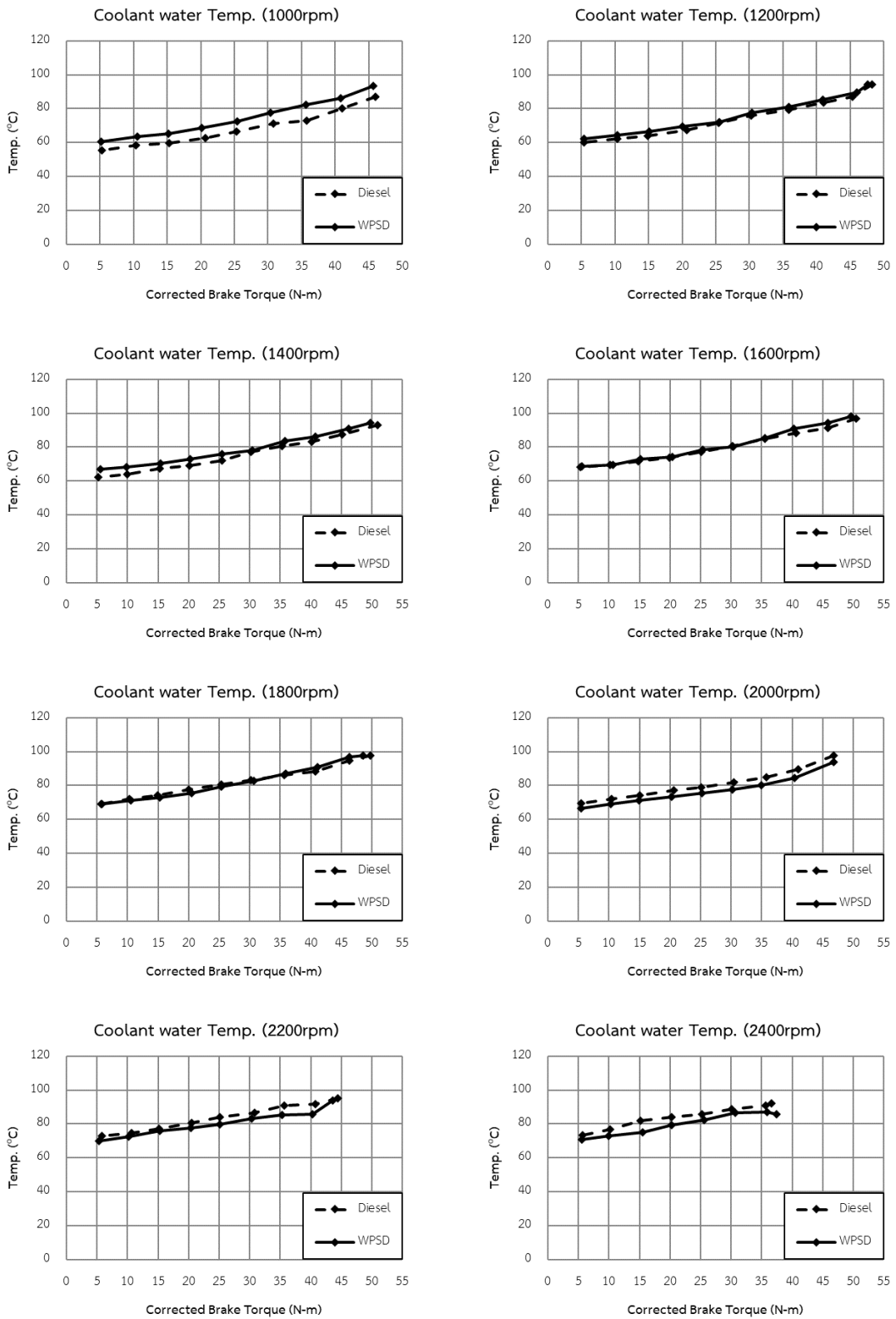
รูปที่ 5 - 10 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานเบรกกับแรงบิดเบรกของเครื่องยนต์ ที่ ความเร็วรอบคงที่ เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล



รูปที่ 5 - 11 อุณหภูมิไอเสียกับแรงบิดเบรกของเครื่องยนต์ ที่ความเร็วรอบคงที่ เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล
 สังกะหรณ์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล



รูปที่ 5 - 12 อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นกับแรงบิดเบรกของเครื่องยนต์ ที่ความเร็วรอบคงที่ เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล



รูปที่ 5 - 13 อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นกับแรงบิดเบรกของเครื่องยนต์ ที่ความเร็วรอบคงที่ เมื่อใช้เชื้อเพลิง ดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล

5.2 แผนภูมิแสดงสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ (Performance Map)

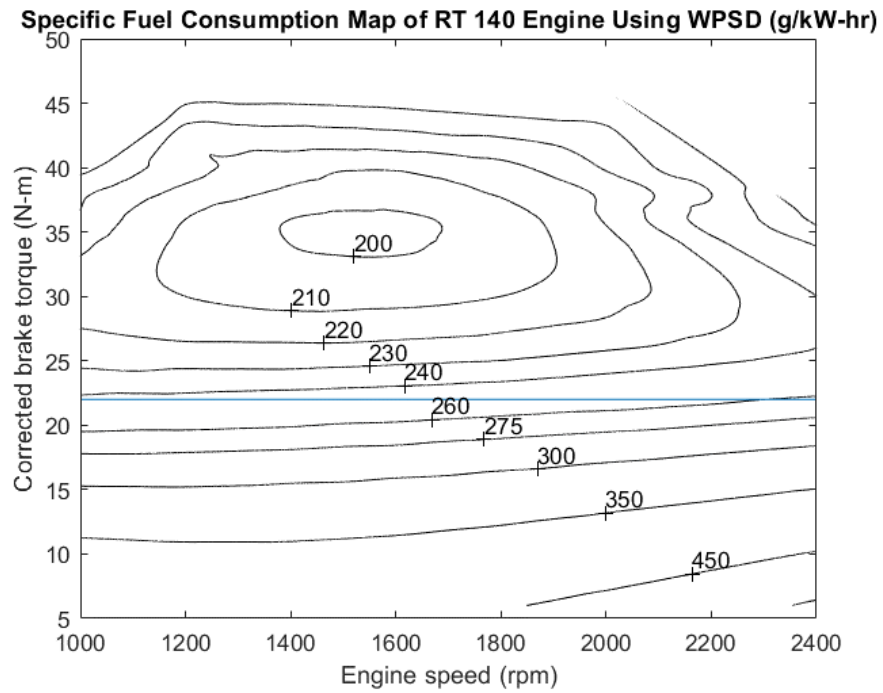
เมื่อทราบค่าการทำงานของเครื่องยนต์ ที่สภาวะสูงสุด สภาวะบางส่วนแล้ว สามารถทำค่าที่ได้มาแสดงในรูปของแผนภูมิแสดงสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์เพื่อให้เห็นภาพรวมของสภาวะการทำงานได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น เนื่องจากแผนภูมิแสดงสภาวะการทำงานจะแสดงค่าที่ทุกความเร็วรอบและที่ทุกสภาวะการทำงาน โดยเราแสดงแผนภูมิต่าง ๆ ดังนี้

5.2.1 แผนภูมิอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก

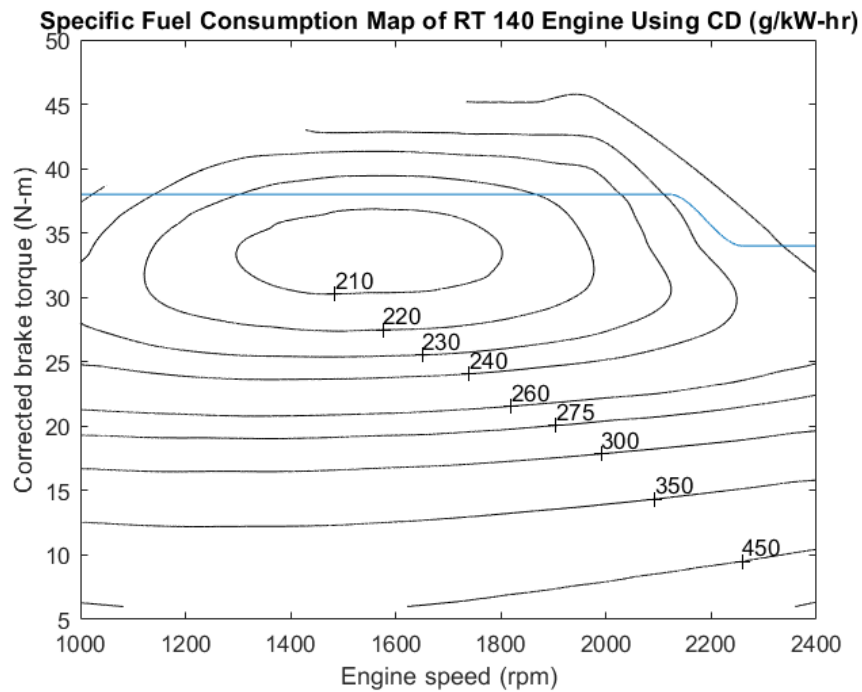
จากค่าอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่ภาระสูงสุด และที่ภาระบางส่วนทำให้สามารถนำมาสร้างแผนภูมิสมรรถนะของอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกและเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปได้ ดังรูปที่ 5 – 14 และรูปที่ 5 – 15 ตามลำดับ

จากแผนภูมิอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกในรูปที่ 5 - 14 และเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปในรูปที่ 5 - 15 จะเห็นความแตกต่างของผลจากการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เปรียบเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป โดยการใช้ดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจะมีอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่ต่ำที่สุดมีค่า 200 g/kW-hr อยู่ในย่านความเร็ว 1400-1600 rpm ที่แรงบิด 35 N-m ส่วนการใช้เชื้อเพลิงดีเซลมีอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่ต่ำที่สุดมีค่า 210 g/kW-hr อยู่ในย่านความเร็ว 1400-1800 rpm อยู่ที่แรงบิดช่วง 30-35 N-m โดยมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นออกจากจุดต่ำสุดเป็นวงออกไปคล้ายคลึงกัน ทั้งของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกและเชื้อเพลิงดีเซล

จากแผนภูมิอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกในรูปที่ 5 - 14 และรูปที่ 5 - 15 เราจะสามารถพิจารณาความคล้ายคลึงและความแตกต่างของผลจากการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกและเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปได้ ซึ่งจากแผนภูมิจะเห็นได้ว่าลักษณะของแผนภูมิที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายคลึงกันมาก โดยมีจุดต่ำสุดของอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกและเพิ่มขึ้นออกไปเป็นวง โดยที่ช่วงแรงบิดน้อยกว่า 25 N-m ที่ความเร็ว 1000 - 2400 rpm มีลักษณะของวงในแผนภูมิเว้าลงมากคล้ายคลึงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นลักษณะเฉพาะของแผนภูมิอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของการใช้เชื้อเพลิงทั้งสอง



รูปที่ 5 - 14 แผนภูมิอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล
สังเคราะห์จากขยะพลาสติก

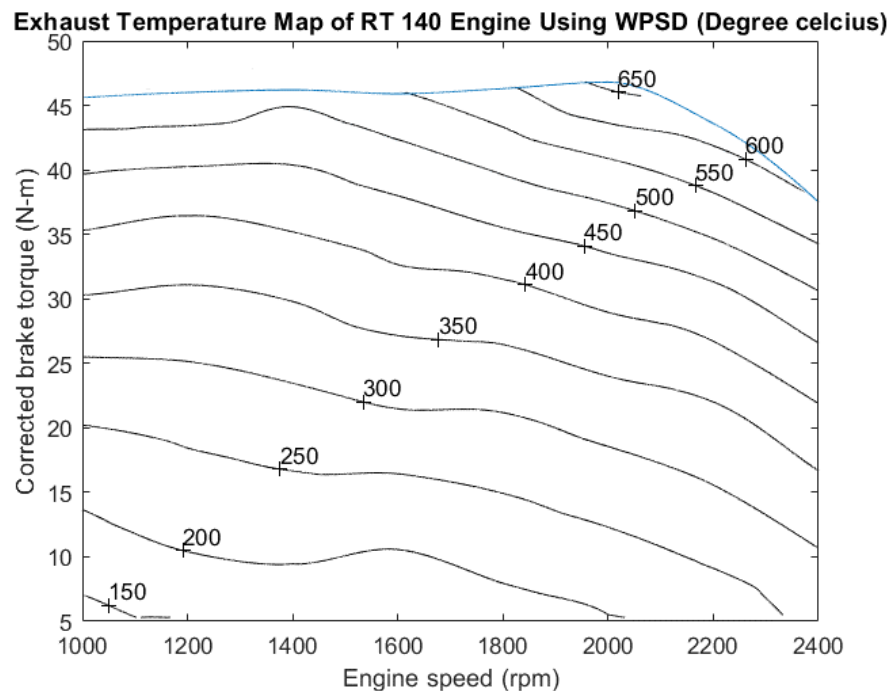


รูปที่ 5 - 15 แผนภูมิอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล

5.2.2 แผนภูมิอุณหภูมิไอเสีย

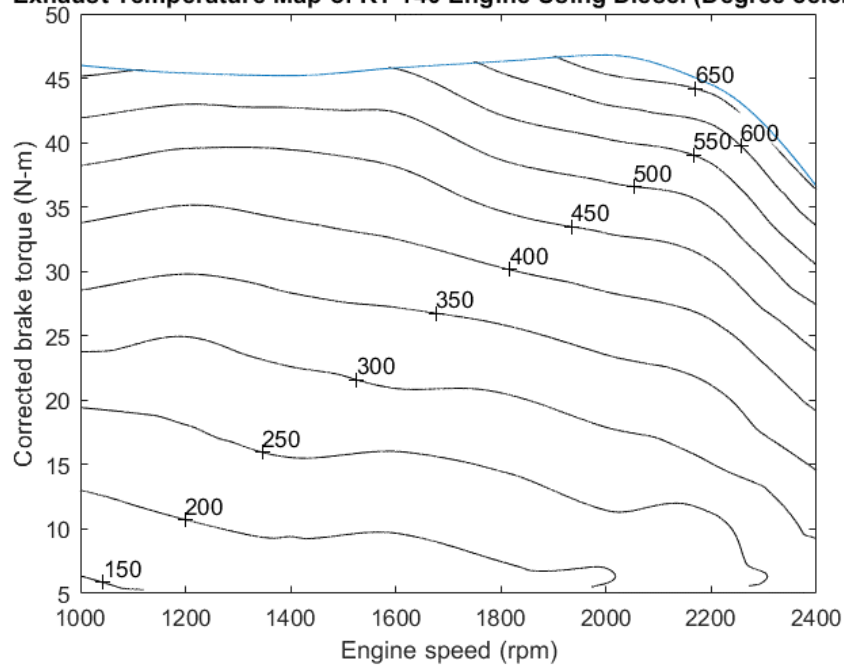
จากค่าอุณหภูมิไอเสียที่ภาระสูงสุด และที่ภาระบางส่วนทำให้สามารถนำมาสร้างแผนภูมิอุณหภูมิไอเสียของการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกและเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปได้ ดังรูปที่ 5 - 16 และรูปที่ 5 - 17 ตามลำดับ

จากแผนภูมิอุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกและเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิของไอเสียเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบและแรงบิดของเครื่องยนต์ ซึ่งทั้งเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทั้งหมด



รูปที่ 5 - 16 แผนภูมิอุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก

Exhaust Temperature Map of RT 140 Engine Using Diesel (Degree celcius)



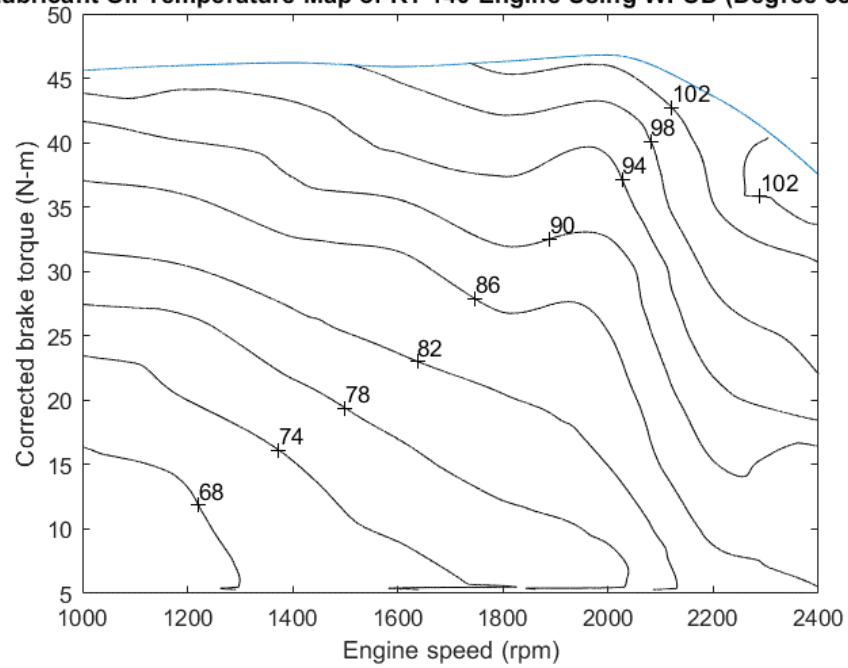
รูปที่ 5 - 17 แผนภูมิอุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล

5.2.3 แผนภูมิอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น

จากค่าอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่ภาระสูงสุด และที่ภาระบางส่วนทำให้สามารถนำมาสร้างแผนภูมิอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นของการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกและเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปได้ ดังรูปที่ 5 - 18 และรูปที่ 5 - 19 ตามลำดับ

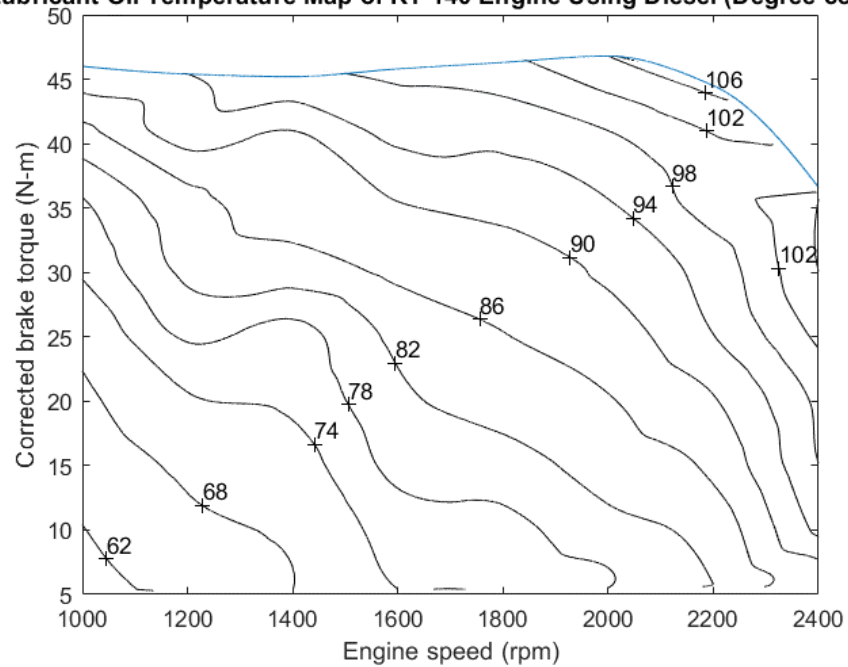
จากแผนภูมิอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกและเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบและแรงบิดของเครื่องยนต์ ซึ่งทั้งเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทั้งหมด

Lubricant Oil Temperature Map of RT 140 Engine Using WPSD (Degree celcius)



รูปที่ 5 - 18 แผนภูมิอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก

Lubricant Oil Temperature Map of RT 140 Engine Using Diesel (Degree celcius)



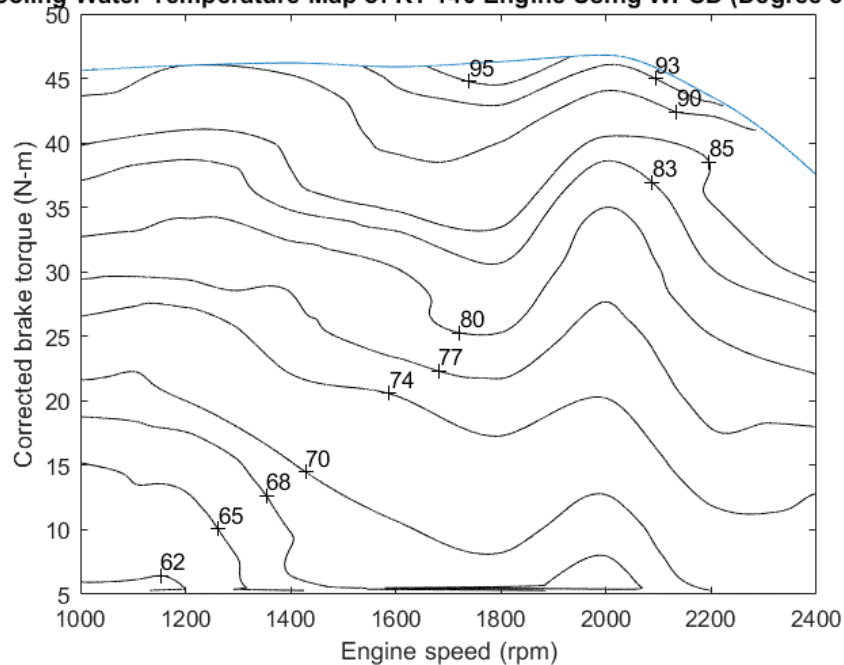
รูปที่ 5 - 19 แผนภูมิอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล

5.2.4 แผนภูมิอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น

จากค่าอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ภาระสูงสุด และที่ภาระบางส่วนทำให้สามารถนำมาสร้างแผนภูมิอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกและเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปได้ ดังรูปที่ 5 - 20 และรูปที่ 5 - 21 ตามลำดับ

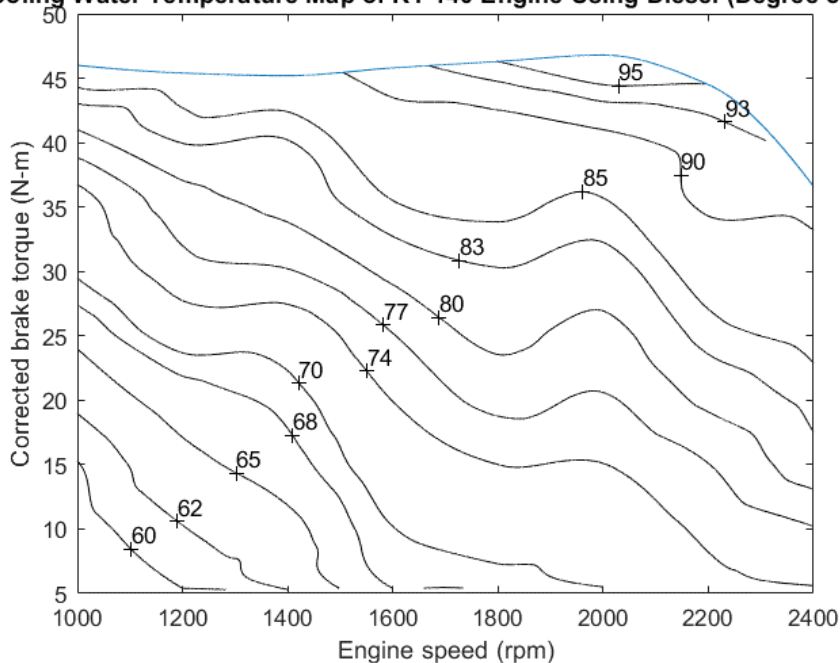
จากแผนภูมิอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกและเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบและแรงบิดของเครื่องยนต์ ซึ่งทั้งเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทั้งหมด

Cooling Water Temperature Map of RT 140 Engine Using WPSD (Degree celcius)



รูปที่ 5 - 20 แผนภูมิอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก

Cooling Water Temperature Map of RT 140 Engine Using Diesel (Degree celcius)



รูปที่ 5 - 21 แผนภูมิอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล

5.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์การเผาไหม้จากความดันในห้องเผาไหม้

ในส่วนนี้จะเป็นการนำเสนอผลการทดสอบเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบกับน้ำมันดีเซล โดยจะพิจารณาเลือกจุดทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ESC Test Cycle ที่องศาการฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐาน (STD) ซึ่งทางผู้ผลิตปรับตั้งไว้ที่ 20 องศา ก่อนศูนย์ตายบน สำหรับเชื้อเพลิงดีเซลโดยทั่วไป โดยมีการทดสอบสมรรถนะทั้งหมด 12 จุดทดสอบโดยแสดงดังรูปที่ 4 - 23 ซึ่งผลการทดสอบจะประกอบไปด้วย ค่าอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรก อุณหภูมิไอเสีย อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น และค่าควันท่ำของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป

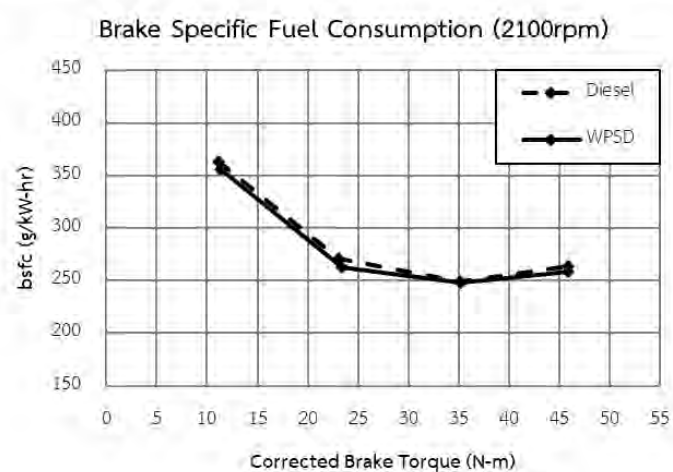
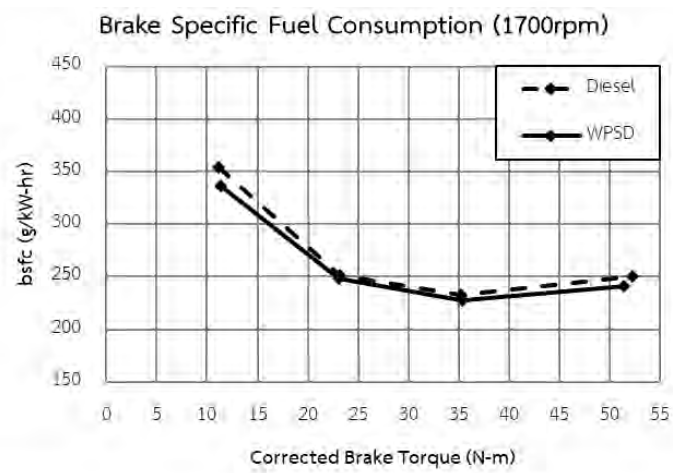
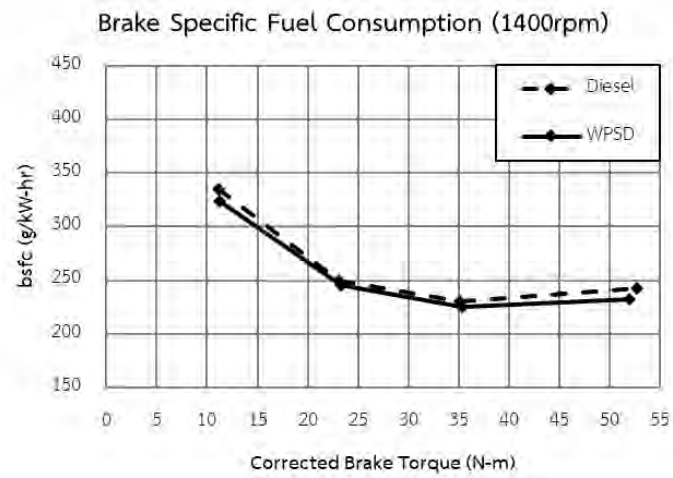
5.3.1 สมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปที่จุดทดสอบการวิเคราะห์การเผาไหม้

5.3.1.1 ค่าอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก

จากรูปที่ 5 - 22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะกับค่าแรงบิดเบรกที่ความเร็วรอบคงที่ พบว่า ที่ทุกค่าแรงบิดและความเร็วรอบที่ทดสอบของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจะมีค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำกว่า

ตารางที่ 5 - 1 แสดงอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปที่องค์การนิคมอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงมาตรฐาน

Speed	Torque	WPSD	CD	ความแตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับ CD	
rpm	N-m	g/kW-hr	g/kW-hr	g/kW-hr	%
1400	11	324	335	-11	-3.3
	23	245	249	-4	-1.6
	35	225	230	-5	-2.1
	Full Load	233	242	-9	-3.9
1700	11	336	354	-18	-5.1
	23	248	251	-3	-1.2
	35	227	233	-5	-2.4
	Full Load	241	251	-9	-3.8
2100	11	356	363	-7	-1.9
	23	262	271	-9	-3.3
	35	248	250	-2	-0.8
	Full Load	259	263	-5	-1.8



รูปที่ 5 - 22 อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่ความเร็วรอบ 1400 1700 และ 2100 rpm ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล

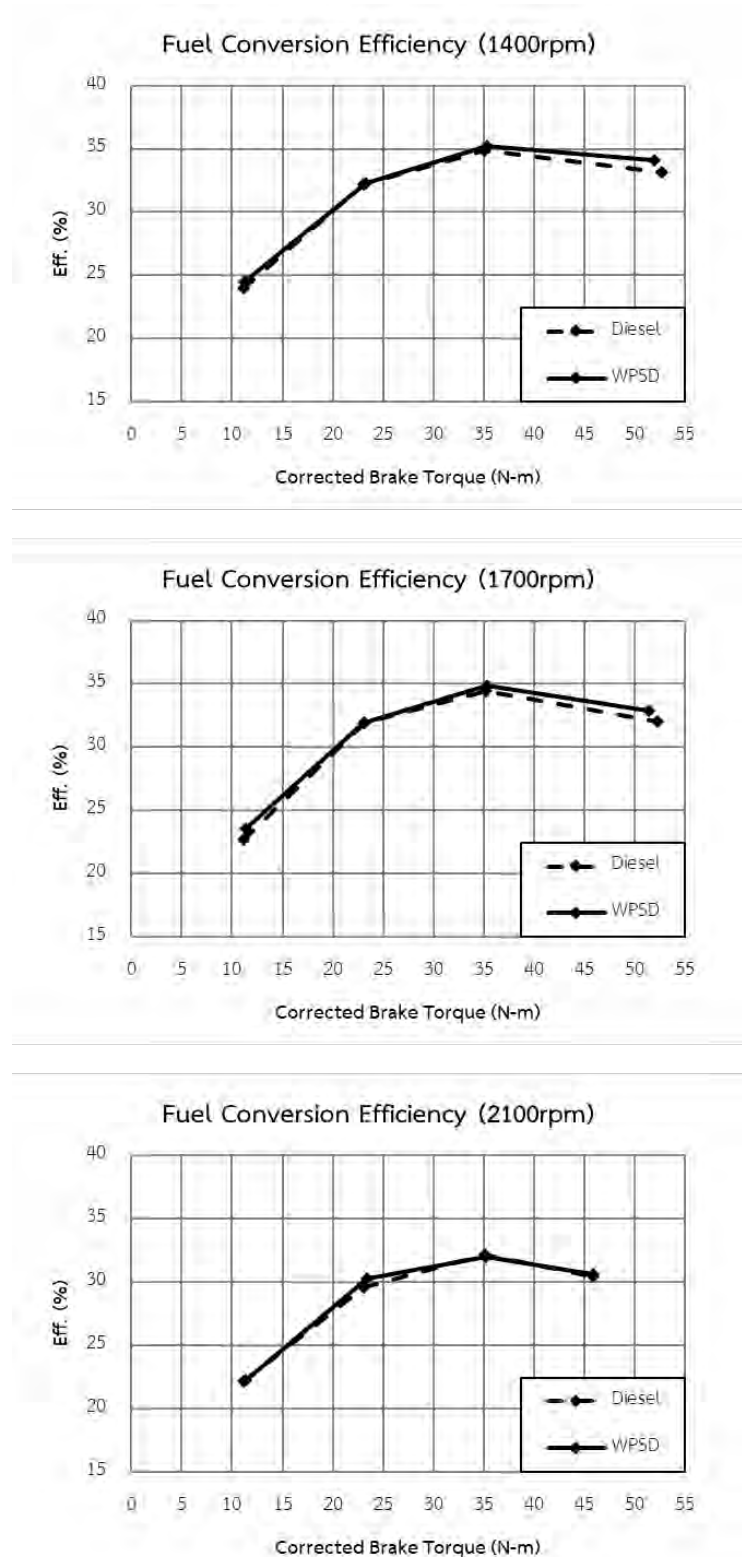
ที่ความเร็วรอบ 2100 rpm ภาระ 11 N-m ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิง
เบรกของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก มีค่าเท่ากับ 22.3 % ส่วนของ
เครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล มีค่าเท่ากับ 22.1 %

ที่ความเร็วรอบ 2100 rpm ภาระ 23 N-m ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิง
เบรกของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก มีค่าเท่ากับ 30.2 % ส่วนของ
เครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล มีค่าเท่ากับ 29.6 %

ที่ความเร็วรอบ 2100 rpm ภาระ 35 N-m ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิง
เบรกของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก มีค่าเท่ากับ 32.0 % ส่วนของ
เครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล มีค่าเท่ากับ 32.1 %

ที่ความเร็วรอบ 2100 rpm ภาระสูงสุด ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรก
ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก มีค่าเท่ากับ 30.7 % ส่วนของ
เครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล มีค่าเท่ากับ 30.5 %

จะเห็นว่าที่ความเร็วรอบคงที่ แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยน
พลังงานเชื้อเพลิงเบรก มีลักษณะเช่นเดียวกันกับอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ



รูปที่ 5 - 23 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกที่ความเร็วรอบ 1400 1700 และ 2100 rpm ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล

5.3.1.3 อุณหภูมิไอเสีย

จากรูปที่ 5 - 24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไอเสียกับค่าแรงบิดเบรกที่ความเร็วรอบคงที่ พบว่า อุณหภูมิไอเสียที่แต่ละจุดทดสอบของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

5.3.1.4 อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น

จากรูปที่ 5 - 25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำมันกับค่าแรงบิดเบรกที่ความเร็วรอบคงที่ พบว่า อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่แต่ละจุดทดสอบของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด มีค่าที่ใกล้เคียงกัน และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าแรงบิดเบรกและรอบการทำงานของเครื่องยนต์ให้สูงขึ้น

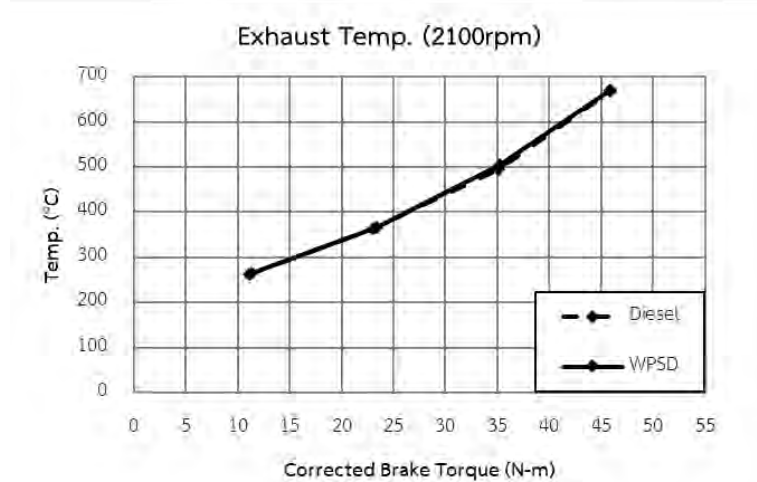
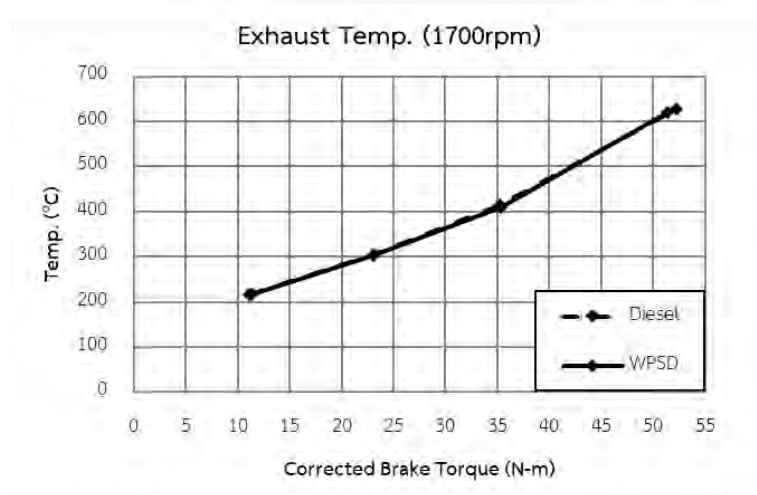
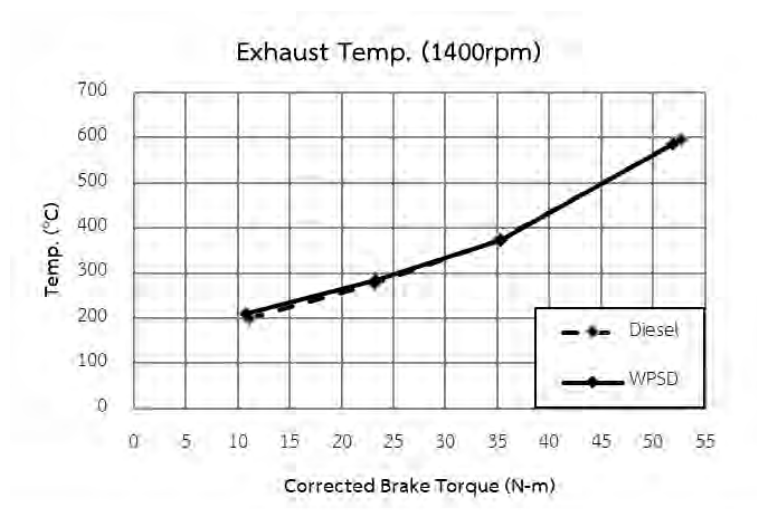
5.3.1.5 อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น

จากรูปที่ 5 - 26 แสดงกราฟสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นกับค่าแรงบิดเบรกที่ความเร็วรอบคงที่ พบว่า อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่แต่ละจุดทดสอบของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

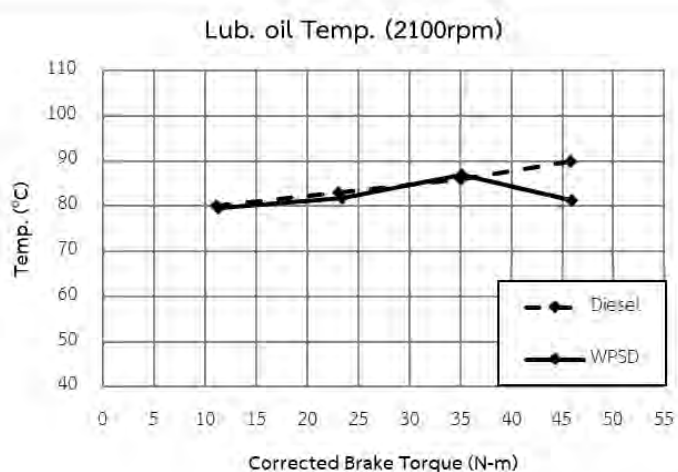
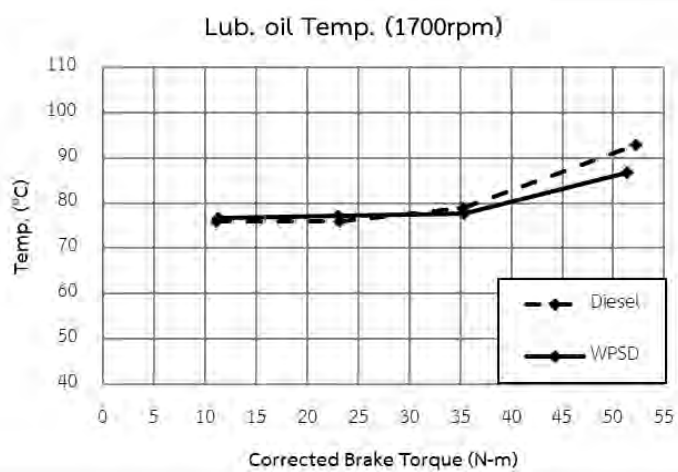
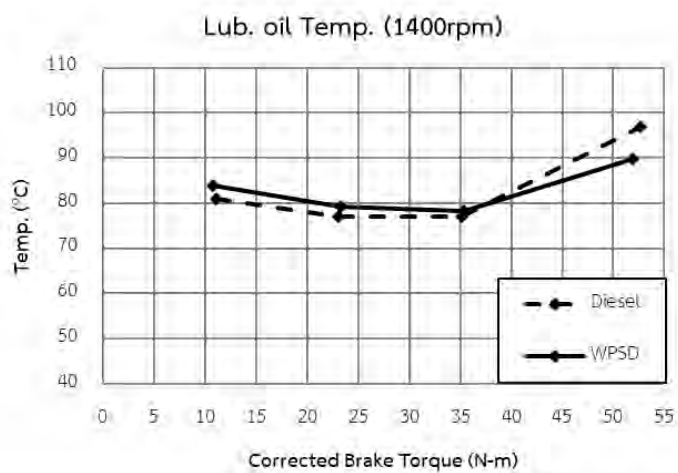
5.3.1.6 ค่าควันดำ

ควันดำ คืออนุภาคของแข็งที่ปะปนอยู่ในไอเสียซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง โดยการที่ค่าควันดำของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าต่ำกว่าเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป หนึ่งในเหตุผลสำคัญมาจากการผสมกับของเชื้อเพลิงและอากาศก่อนการเผาไหม้ทำได้ดี จึงมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า อีกเหตุผลหนึ่งมาจากการระเหยได้ดีของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก

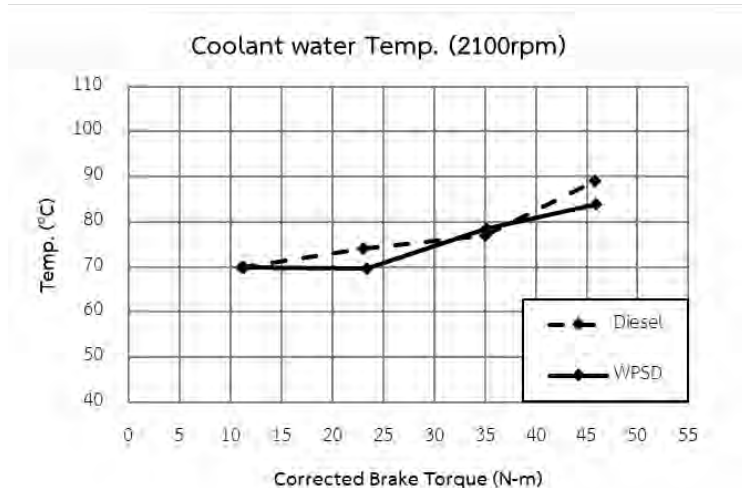
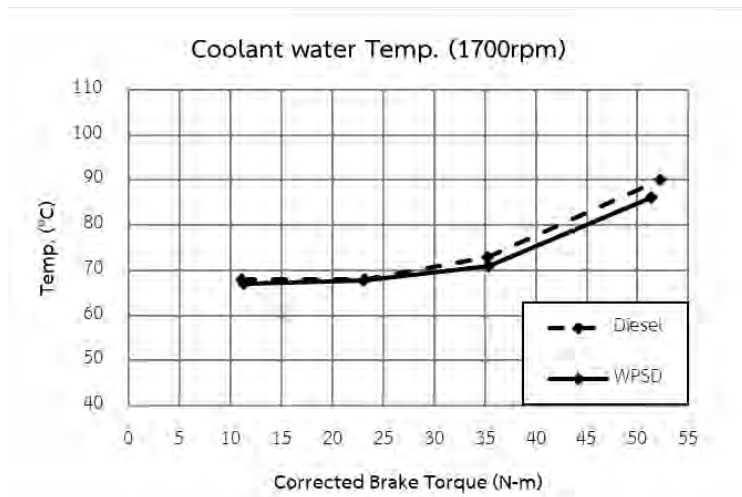
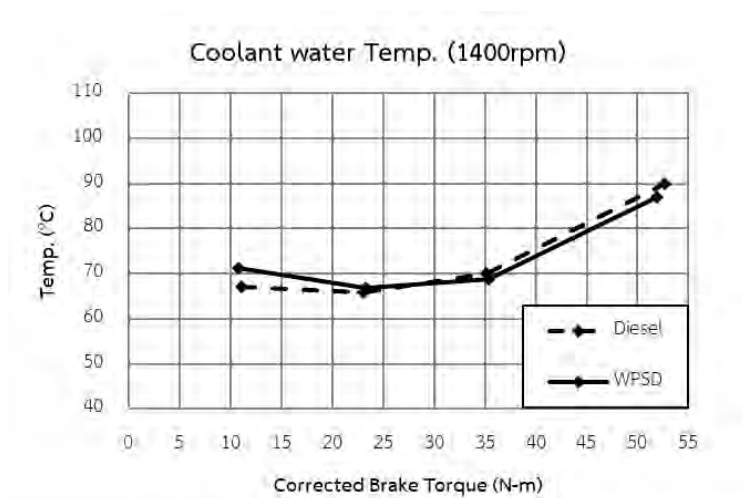
รูปที่ 5 - 27 แสดงความแปรปรวนของค่าควันดำของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ที่สภาวะคงตัว ความเร็วรอบคงที่ พบว่า เครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจะมีค่าควันดำต่ำกว่าเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปเล็กน้อย ยกเว้นที่ความเร็วรอบสูง คือ 2100 รอบต่อนาที ที่ภาระสูงสุด เครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจะมีค่าควันดำสูงกว่าเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป



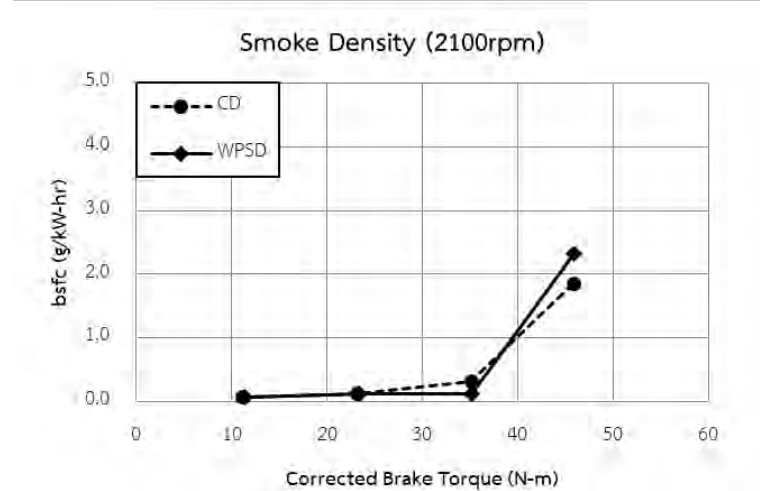
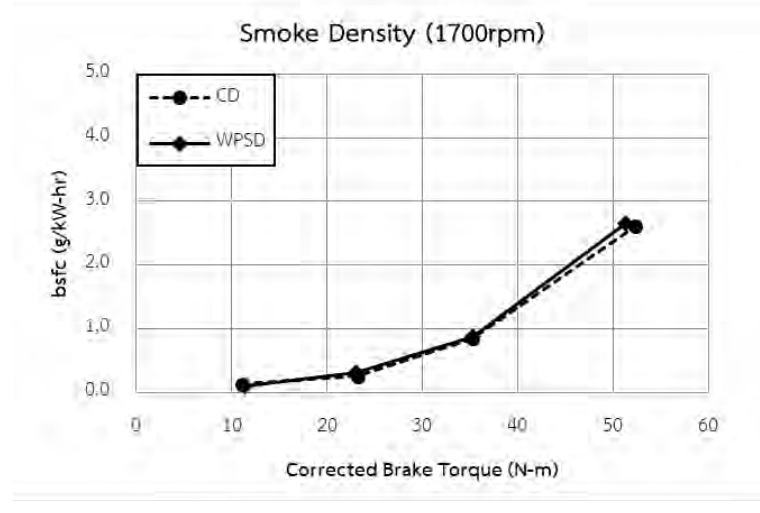
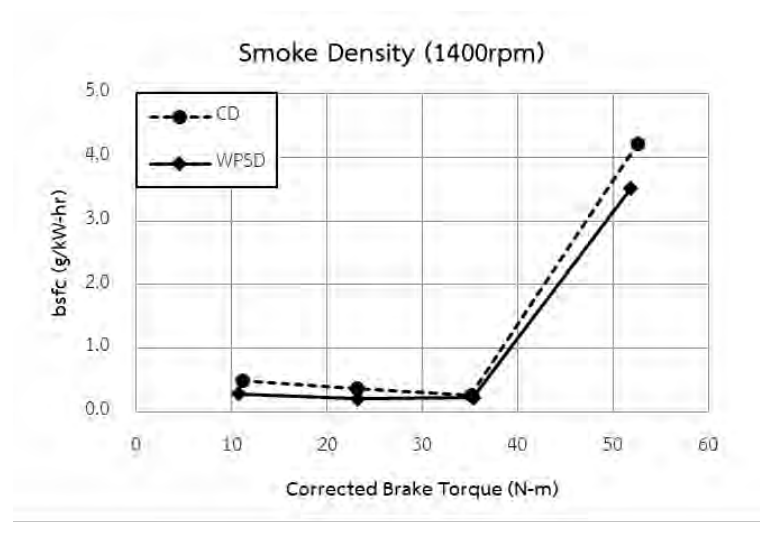
รูปที่ 5 - 24 ค่าอุณหภูมิไอเสียที่ความเร็วรอบ 1400 1700 และ 2100 rpm ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล



รูปที่ 5 - 25 ค่าอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่ความเร็วรอบ 1400 1700 และ 2100 rpm ของเครื่องยนต์
เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล



รูปที่ 5 - 26 ค่าอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ความเร็วรอบ 1400 1700 และ 2100 rpm ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล



รูปที่ 5 - 27 ค่าควันท่ำของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป

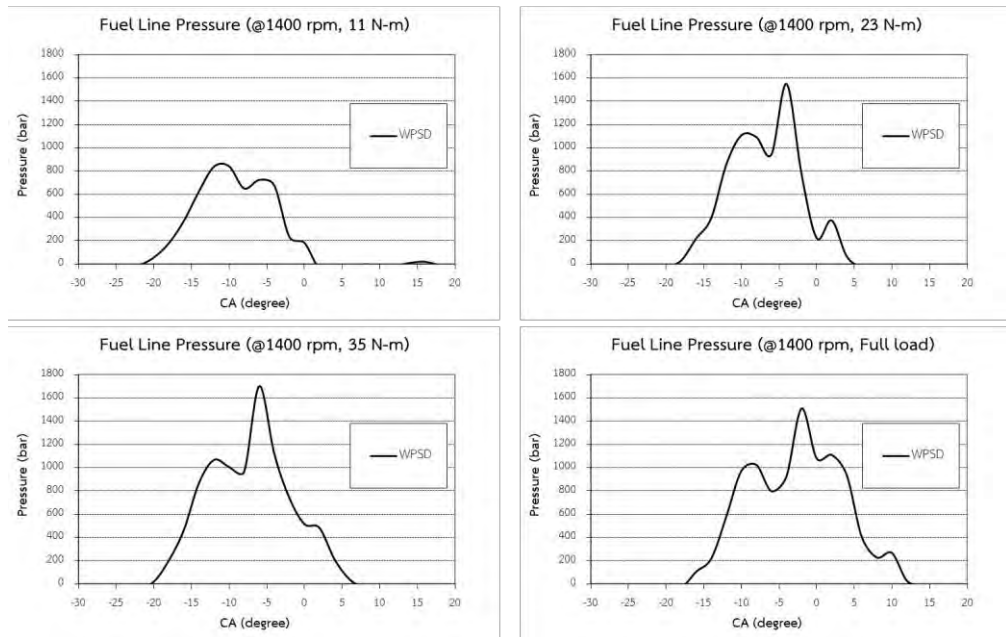
5.3.2 การวิเคราะห์การเผาไหม้ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก

การทดสอบเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่องค์การฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐาน ที่จุดทดสอบซึ่งดัดแปลงมาจากมาตรฐาน ESC Test Cycle โดยมีทั้งหมด 12 จุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 4 – 23 ซึ่งประกอบไปด้วยการวัดความดันที่ท่อทางเข้าหัวฉีดและการวัดความดันในห้องเผาไหม้เปรียบเทียบกับของเสาเพลาคือของเครื่องยนต์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยข้อมูลค่าความดันในท่อทางเข้าหัวฉีดที่วัดได้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาจุดฉีดเชื้อเพลิง (Start of injection) อัตราการฉีดเชื้อเพลิง ปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงต่อวัฏจักร ส่วนข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดการเผาไหม้ อัตราการปลดปล่อยพลังงาน (Heat release rate) การปลดปล่อยพลังงานสุทธิ (Accumulate of Heat release) สัดส่วนการเผาไหม้เชื้อเพลิง (Mass fraction burn) ช่วงล่าช้าการจุดระเบิด (Ignition delay) และช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Burn duration)

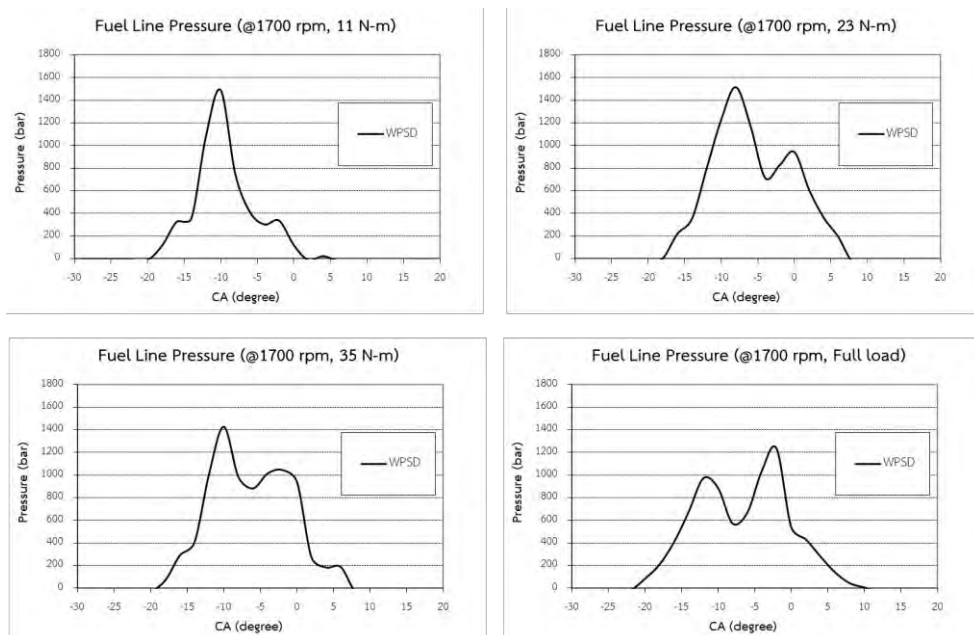
5.3.2.1 การวิเคราะห์หาจุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (Start of injection, SOI)

ในการหาจุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง ทำได้โดยพิจารณาใช้การข้อมูลความดันที่ท่อทางเข้าหัวฉีด เนื่องจากเมื่อมีการเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงจะทำให้ความดันภายในท่อทางเข้าหัวฉีดลดลงซึ่งจะแสดงออกมาในรูปของเส้นกราฟที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการเพิ่มของความดันที่ลดลงแสดงดังรูปที่ 5 - 31 ความดันที่ท่อทางเข้าหัวฉีดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่องค์การฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐานแสดงดังรูปที่ 5 - 28 ถึงรูปที่ 5 - 30 พบว่า จุดฉีดเชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงตามความเร็ว ซึ่งจากกราฟความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีดนี้ เราสามารถนำมาใช้ทำนายเพื่อหาจุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (SOI) ของเชื้อเพลิงได้ ซึ่งจุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (SOI) ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก แสดงดังตารางที่ 5 - 2 โดยจุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงคือจุดที่อัตราการฉีดเชื้อเพลิงมีค่ามากกว่า 0 mg/degree เป็นครั้งแรก จากการทดสอบเครื่องยนต์ที่องค์การฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐาน พบว่า ในบางกรณีจะมีการฉีดเชื้อเพลิงสองช่วงในวัฏจักรเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดคลื่นในท่อส่งน้ำมันเชื้อเพลิงจึงส่งผลให้ความดันในท่อน้ำมันเชื้อเพลิงลดต่ำและสูงขึ้นอีกครั้งจนเกิน กว่าค่า Opening Pressure ของหัวฉีดเป็นครั้งที่สอง ส่งผลให้เชื้อเพลิงถูกฉีดออกไปอีกครั้งในวัฏจักรเดียวกัน

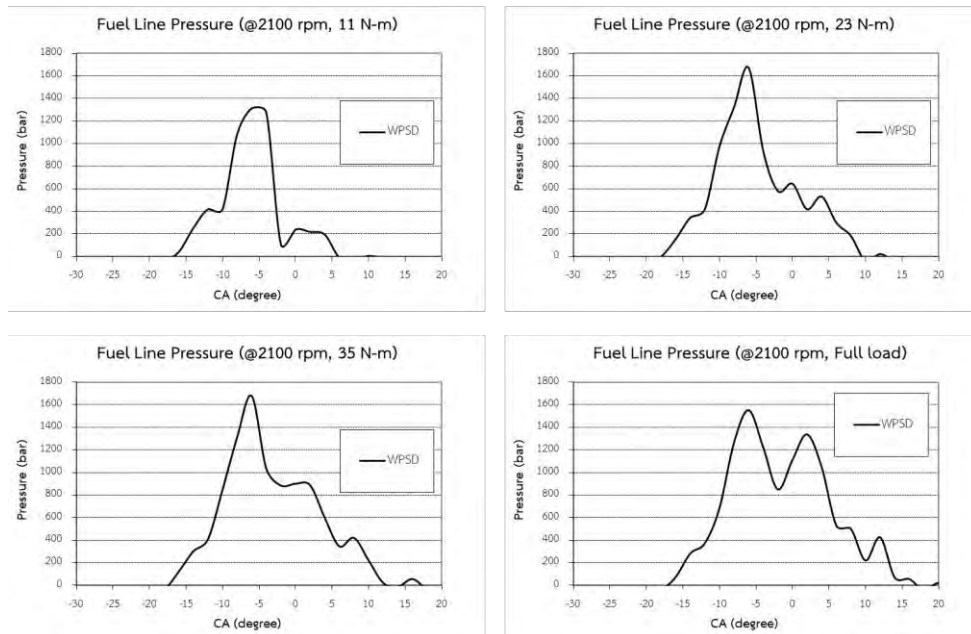
ตารางที่ 5 - 2 จะแสดงจุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก พบว่า ที่ความเร็วรอบคงที่ของเครื่องยนต์จุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงจะคงที่ และเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น จุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงจะมีแนวโน้มเข้าใกล้ศูนย์ตายบนมากขึ้น



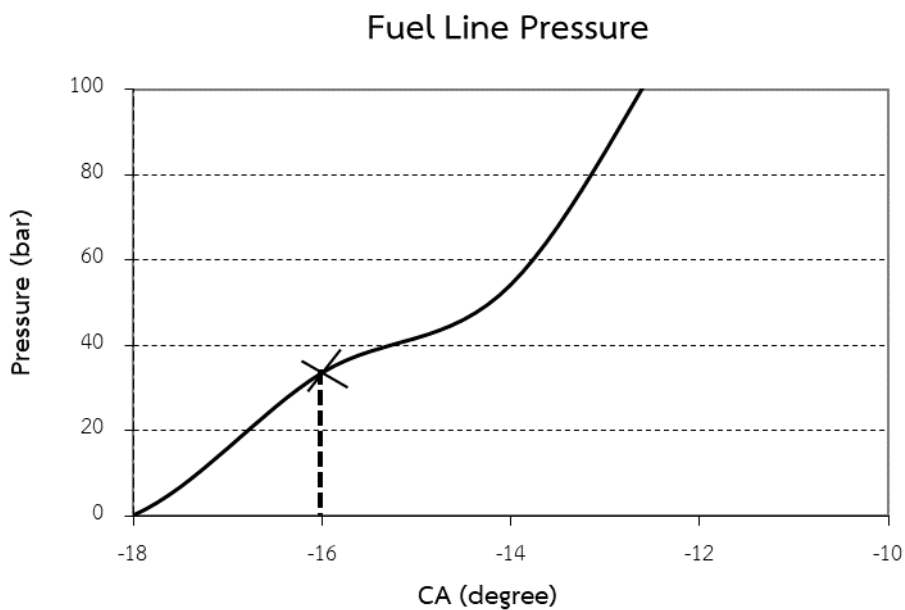
รูปที่ 5 - 28 ความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1400 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ



รูปที่ 5 - 29 ความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1700 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ



รูปที่ 5 - 30 ความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 2100 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ



รูปที่ 5 - 31 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความดันที่ท่อทางเข้าหัวฉีดเนื่องจากเกิดการฉีดเชื้อเพลิง

ตารางที่ 5 - 2 จุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก

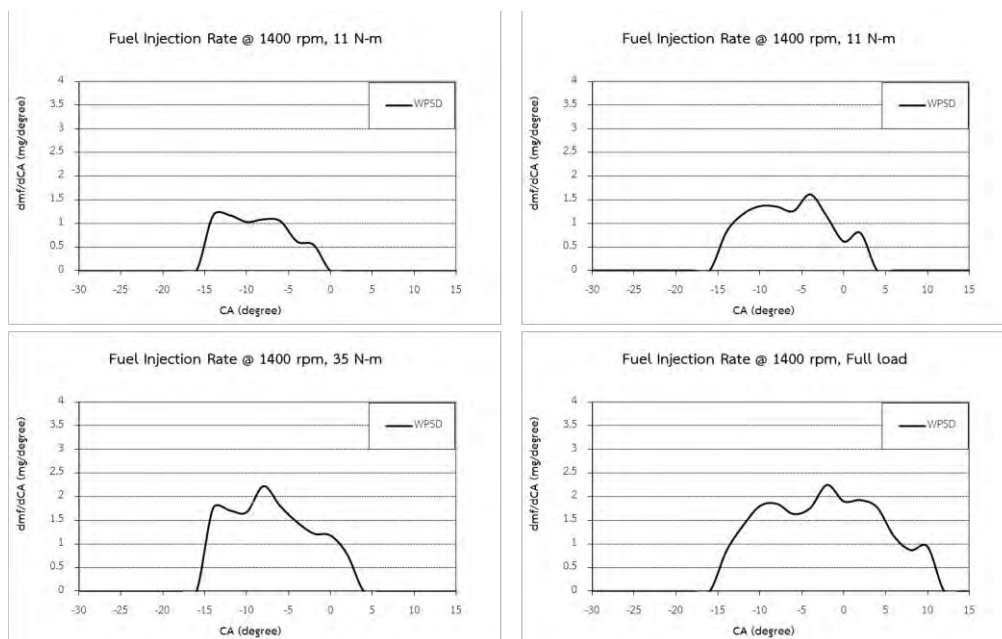
Speed	Torque	SOI
rpm	Nm	CA
1400	11	-16.0
	23	-16.0
	35	-16.0
	Full load	-16.0
1700	11	-16.0
	23	-16.0
	35	-16.0
	Full load	-16.0
2100	11	-14.0
	23	-14.0
	35	-14.0
	Full load	-14.0

5.3.2.2 การคำนวณหาอัตราการฉีดเชื้อเพลิง (Fuel injection rate)

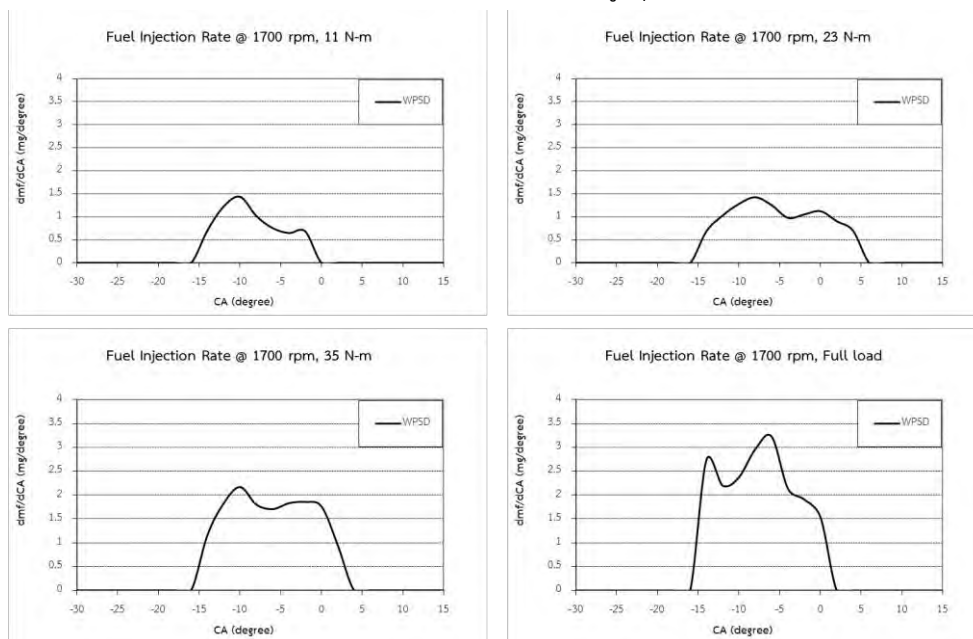
การคำนวณหาอัตราการฉีดเชื้อเพลิงทำได้โดยใช้ข้อมูลความดันที่ท่อทางเข้าหัวฉีดมาคำนวณโดยใช้สมการที่ 3 – 9 จากรูปที่ 5 – 32 ถึง 5 – 34 ซึ่งแสดงอัตราการฉีดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก พบว่า ที่ความเร็วรอบคงที่เดียวกันจุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงจะคงที่และไม่เปลี่ยนแปลงตามภาระการทดสอบที่เพิ่มขึ้น

5.3.2.3 การคำนวณหาปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงต่อวัฏจักร

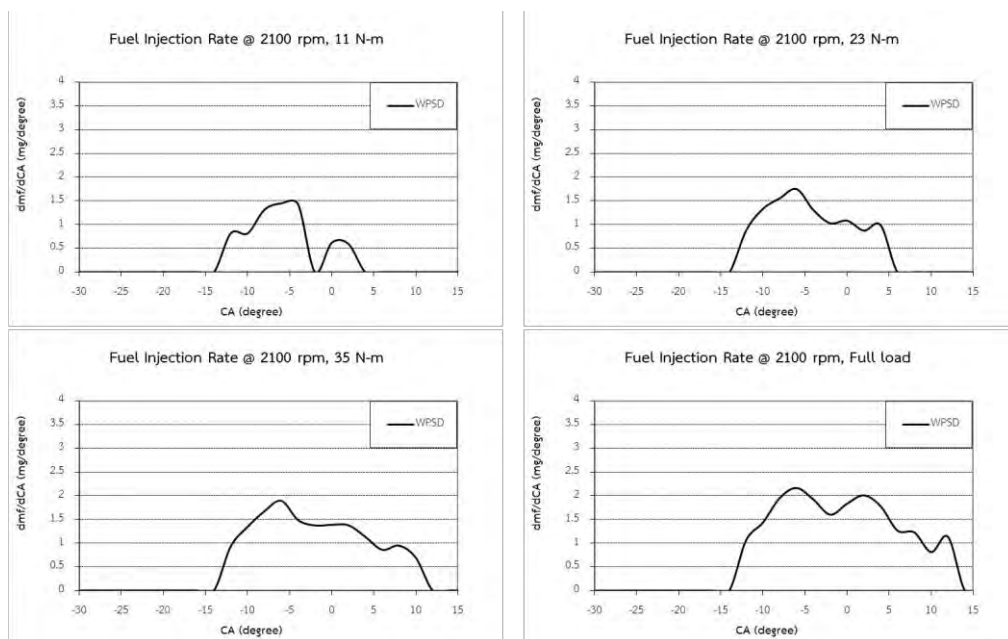
ปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงต่อวัฏจักรของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่องค์การฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐาน ซึ่งแสดงในตารางที่ 5 - 3 สามารถหาได้จากการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟของอัตราการฉีดเชื้อเพลิง พบว่า เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงต่อวัฏจักรต่ำสุดที่ 6.656 mg/cycle ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบ/นาที ภาระ 14 Nm และสูงสุดที่ 20.120 mg/cycle ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบ/นาที ภาระสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่วัดได้จากอุปกรณ์ โดยที่ความเร็วรอบคงที่นั้นปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงต่อวัฏจักรจะเพิ่มขึ้นเมื่อภาระเพิ่มขึ้น โดยจุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงจะมีค่าคงที่และไม่เปลี่ยนแปลงตามภาระการทดสอบที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5 - 32 อัตราการฉีดเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1400 rpm
ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ



รูปที่ 5 - 33 อัตราการฉีดเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1700 rpm
ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ



รูปที่ 5 - 34 อัตราการฉีดเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 2100 rpm
ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ

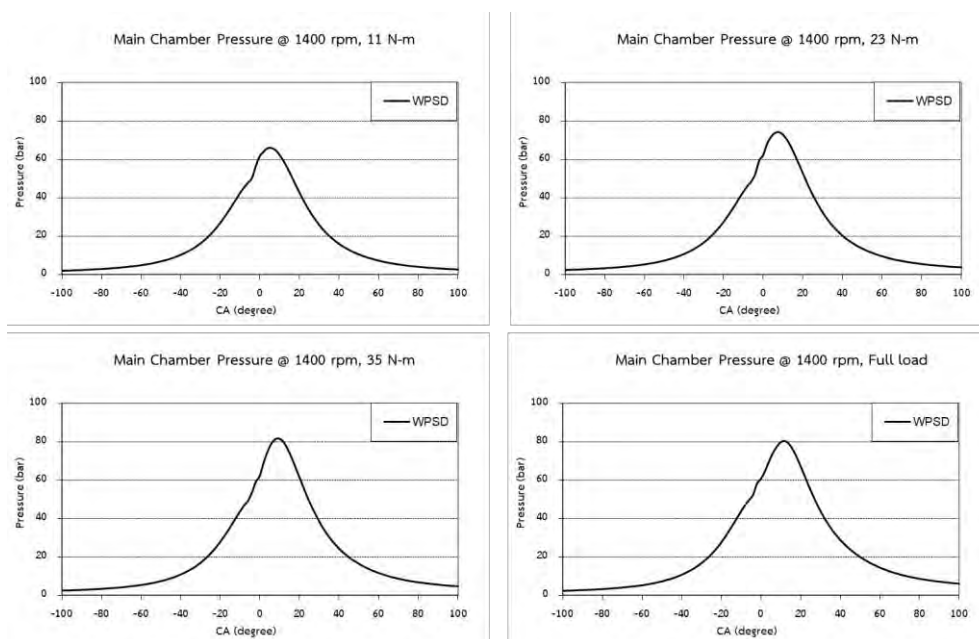
ตารางที่ 5 - 3 แสดงปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงต่อวัฏจักรของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก

ปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงต่อวัฏจักร		
Speed	Torque	dmf/dCA
rpm	Nm	mg/cycle
1400	11	6.656
	23	10.119
	35	13.847
	Full load	20.117
1700	11	6.812
	23	10.422
	35	14.894
	Full load	19.119
2100	11	7.031
	23	10.817
	35	15.037
	Full load	20.120

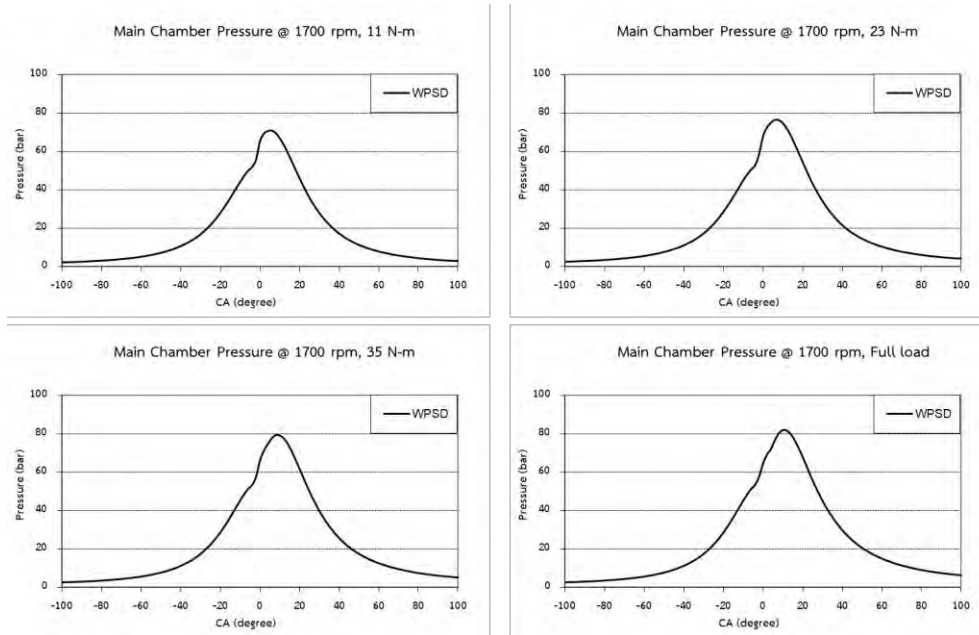
5.3.2.4 ข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้

รูปที่ 5 – 35 ถึงรูปที่ 5 – 37 แสดงความดันในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่องค์การฉีดยาเชื้อเพลิงมาตรฐาน พบว่า ทุกจุดทดสอบที่ความเร็วรอบคงที่ ความดันในห้องเผาไหม้สูงสุดมีค่าสูงขึ้นตามภาระการทดสอบที่สูงขึ้น เนื่องจากปริมาณการฉีดยาเชื้อเพลิงต่อวัฏจักรเพิ่มขึ้น โดยความดันในห้องเผาไหม้สูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเกิดขึ้นที่ความเร็วรอบ 1700 rpm ภาระสูงสุด โดยมีค่าความดันในห้องเผาไหม้ 82 บาร์

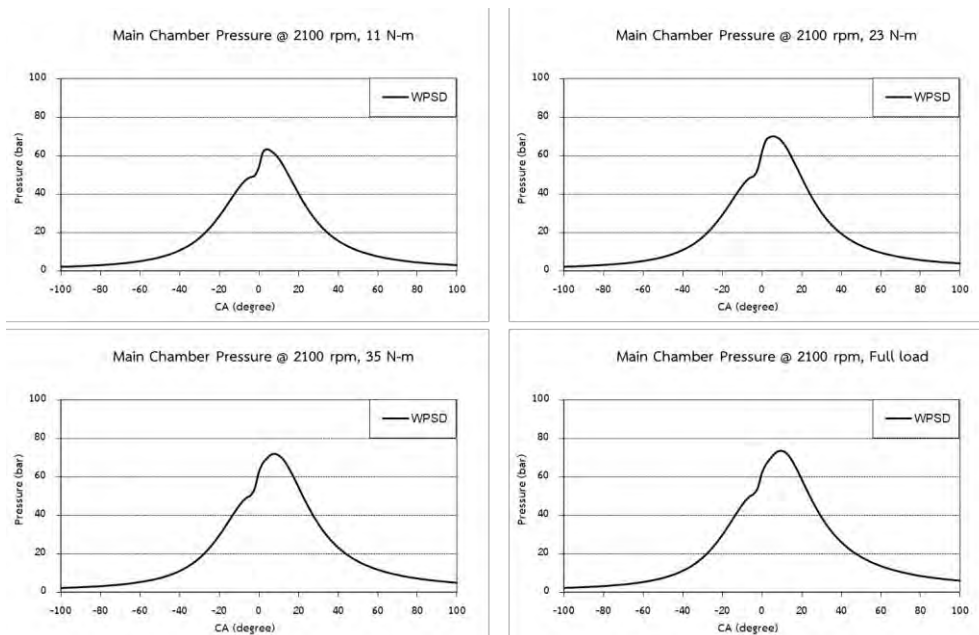
ข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ เช่น อัตราการปลดปล่อยความร้อน การปลดปล่อยความร้อนสุทธิ สัดส่วนการเผาไหม้เชื้อเพลิง จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดการเผาไหม้ ช่วงล่าช้าการจุดระเบิดและช่วงเวลาการเผาไหม้



รูปที่ 5 - 35 ความดันในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1400 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ



รูปที่ 5 - 36 ความดันในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1700 rpm
ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ



รูปที่ 5 - 37 ความดันในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 2100 rpm
ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ

ตารางที่ 5 - 4 ความดันในห้องเผาไหม้สูงสุดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก

ความดันในห้องเผาไหม้สูงสุด			
Speed	Torque	Pressure	@CA
rpm	Nm	bar	
1400	11	65.9	6
	23	74.1	8
	35	81.5	10
	Full load	80.4	12
1700	11	70.9	6
	23	76.4	6
	35	79.2	8
	Full load	82.0	10
2100	11	63.5	6
	23	70.0	8
	35	72.0	10
	Full load	73.8	12

5.3.2.5 การคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยพลังของเชื้อเพลิง (Heat release rate)

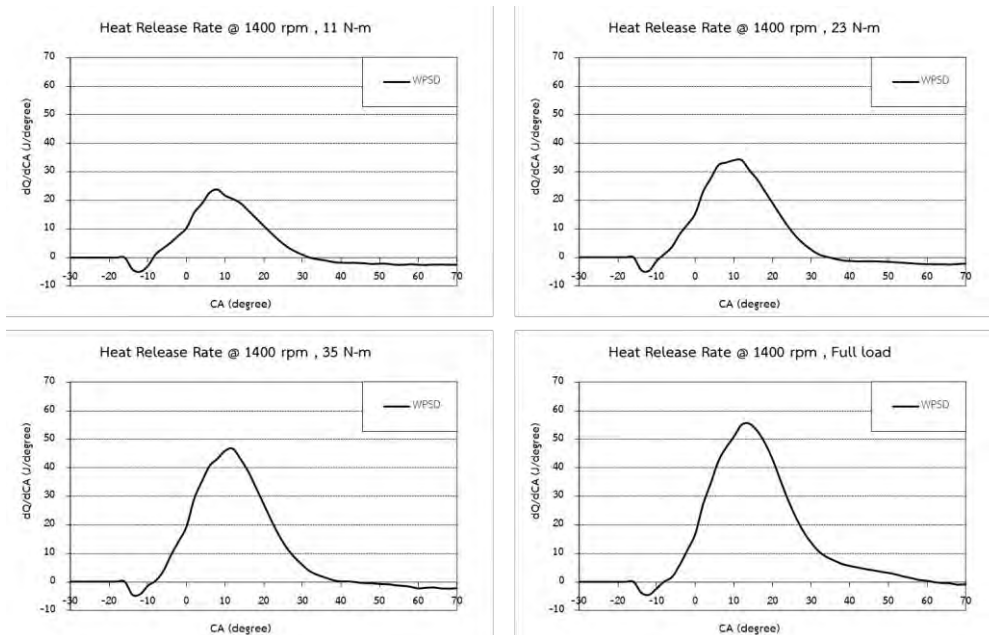
การคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยพลังของเชื้อเพลิงสามารถทำได้โดยใช้ข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้มาคำนวณเพื่อหาอัตราการปลดปล่อยพลังงานทุก ๆ องศาเซลเซียส

กราฟอัตราการปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป แสดงดังรูปที่ 5- 38 ถึงรูปที่ 5 - 40 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 3 - 6 ซึ่งจากกราฟอัตราการปล่อยความร้อนจะทำให้ทราบถึงจุดเริ่มต้นการเผาไหม้ (SOC) และจุดสิ้นสุดการเผาไหม้ (EOC) และสามารถนำไปคำนวณหาช่วงการเผาไหม้ (Burn Duration) ได้

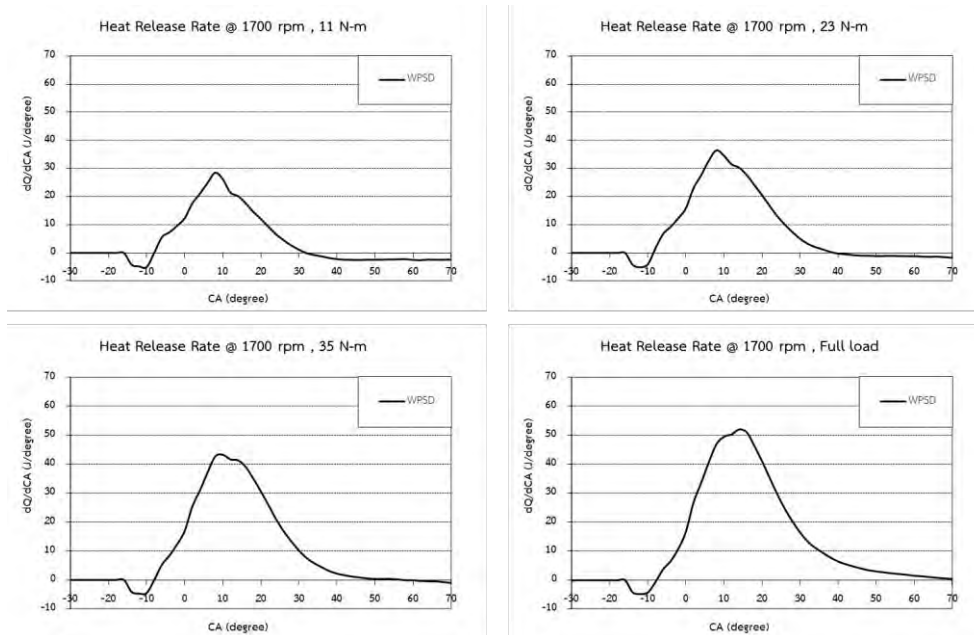
รูปที่ 5 - 38 ถึงรูปที่ 5 - 40 แสดงอัตราการปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกที่องค์การฉีดยาเชื้อเพลิงมาตรฐาน พบว่า อัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจะอยู่ในช่วงของ Mixing Controlled Combustion แทน ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่เชื้อเพลิงถูกฉีดออกมาเกิดการแตกเป็นละอองฝอยไม่ดี การผสมกันของเชื้อเพลิงกับอากาศจึงทำได้ไม่ดี ส่งผลให้อัตราการปล่อยความร้อนช่วง Premixed Combustion Phase ต่ำกว่าช่วง Mixing Controlled Combustion

ช่วงแรกของกราฟอัตราการปล่อยความร้อนจะตกลงไปเล็กน้อย เนื่องจากเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิต่ำกว่าห้องเผาไหม้ ทำให้พลังงานส่วนหนึ่งที่อยู่ในห้องเผาไหม้ส่วนหนึ่งถูกใช้ไปกับการเพิ่มอุณหภูมิให้กับเชื้อเพลิง และเปลี่ยนสถานะเชื้อเพลิงให้กลายเป็นไอ

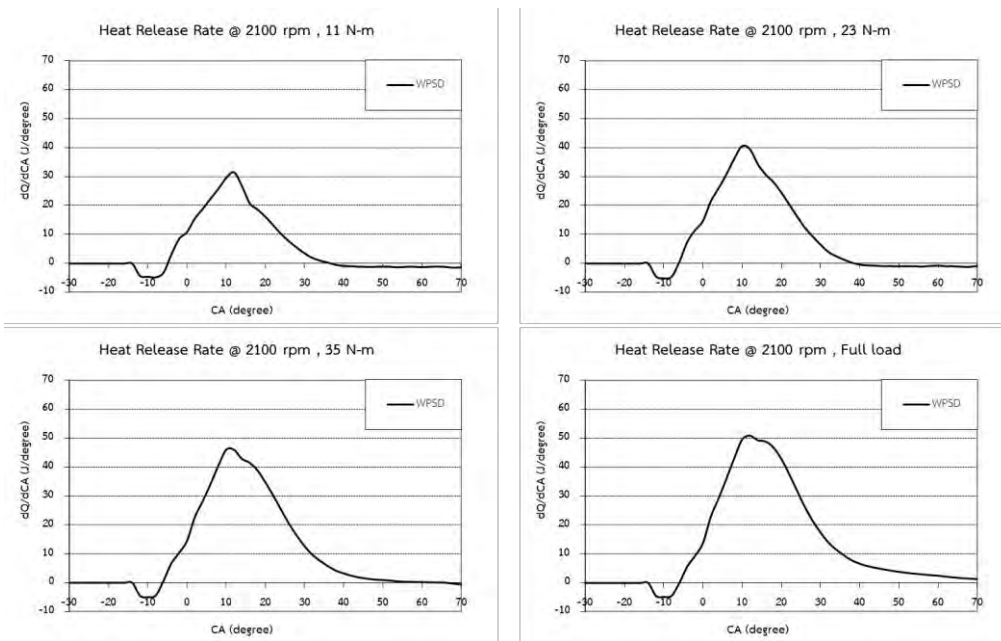
ตารางที่ 5 - 5 แสดงอัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกที่องศาการฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐาน พบว่า อัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าสูงสุด 55.5 J/degree ที่ความเร็วรอบ 1400 rpm ภาระสูงสุด



รูปที่ 5 - 38 อัตราการปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1400 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ



รูปที่ 5 - 39 อัตราการปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1700 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ



รูปที่ 5 - 40 อัตราการปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 2100 rpm
ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ

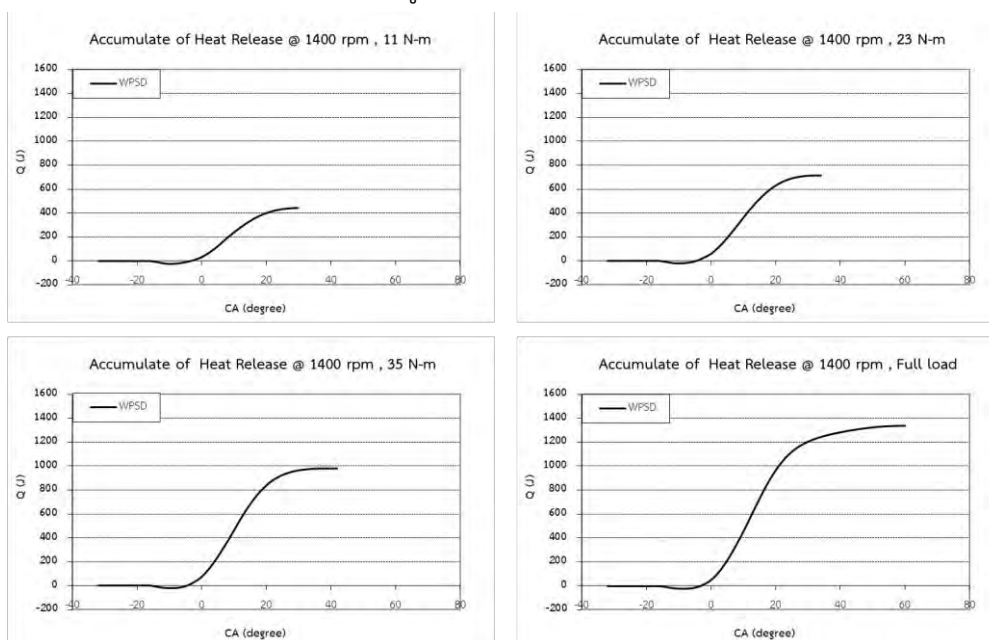
ตารางที่ 5 - 5 อัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก

อัตราการปล่อยความร้อนสูงสุด			
Speed	Torque	dQ/dCA	@CA
rpm	Nm	J/degree	
1400	11	23.8	8
	23	34.1	12
	35	46.6	12
	Full load	55.5	14
1700	11	28.5	8
	23	36.5	8
	35	43.3	10
	Full load	51.9	14
2100	11	31.5	12
	23	40.5	10
	35	46.0	12
	Full load	50.9	12

5.3.2.6 การคำนวณหาการปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิง (Accumulate of heat release)

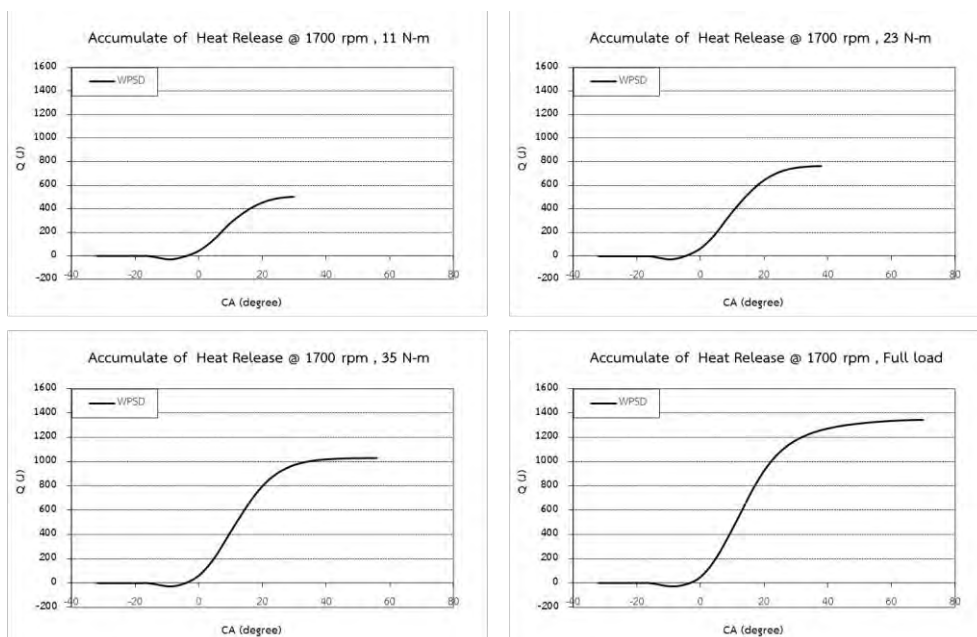
การคำนวณหาการปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงสามารถหาได้จากสมการที่ 3 – 7 หรือคำนวณได้จากการอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้กราฟอัตราการปลดปล่อยความร้อน โดยกราฟการปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก แสดงดังรูปที่ 5 - 41 ถึงรูปที่ 5 - 43

ตารางที่ 5 - 6 และรูปที่ 5 - 41 ถึงรูปที่ 5 - 43 แสดงการปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ห้องศากการฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐาน พบว่า เครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกที่ห้องศากการฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐาน พบว่า มีค่าสูงสุด 1345.1 J ที่ความเร็วรอบ 1700 rpm ภาระสูงสุด และเมื่อพิจารณาที่ความเร็วรอบเดียวกันการปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้มากขึ้น

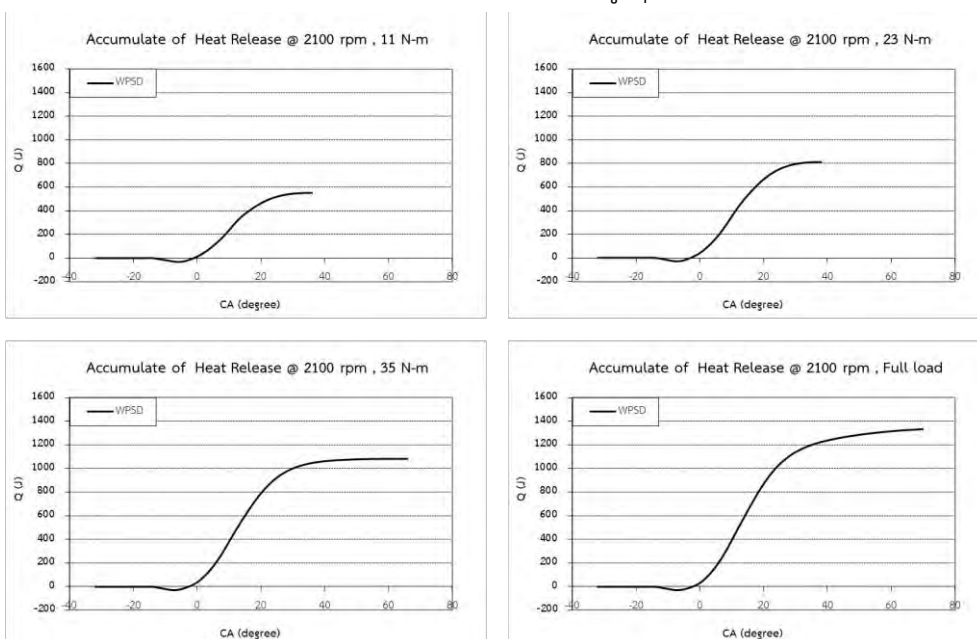


รูปที่ 5 - 41 การปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1400 rpm

ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ



รูปที่ 5 - 42 การปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1700 rpm
ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ



รูปที่ 5 - 43 การปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 2100 rpm
ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ

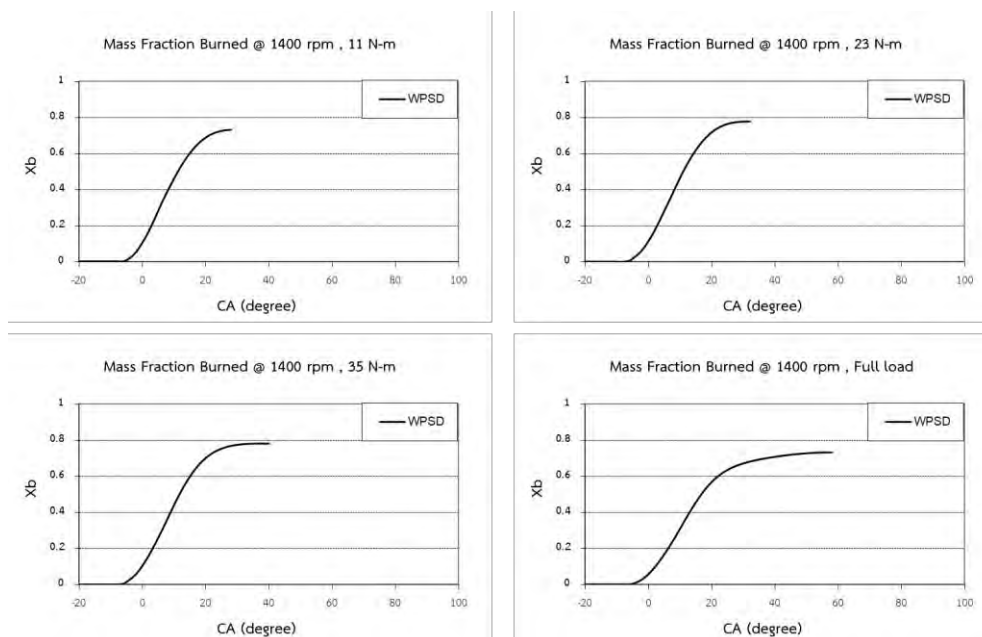
ตารางที่ 5 - 6 การปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก

การปล่อยความร้อนสุทธิ		
Speed	Torque	Q
rpm	Nm	J
1400	11	443.0
	23	713.6
	35	980.6
	Full load	1336.7
1700	11	501.2
	23	762.6
	35	1027.9
	Full load	1345.1
2100	11	552.9
	23	810.9
	35	1080.2
	Full load	1338.1

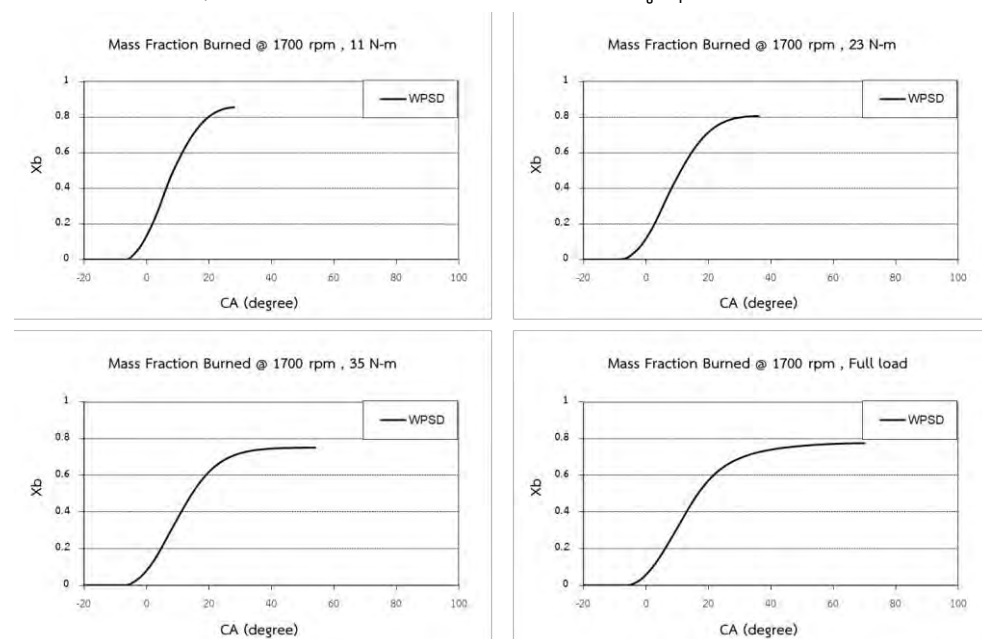
5.3.2.7 การคำนวณหาสัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้

การคำนวณหาสัดส่วนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 - 8 โดยกราฟสัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ของเชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก แสดงในรูปที่ 5 - 44 ถึงรูปที่ 5 - 46

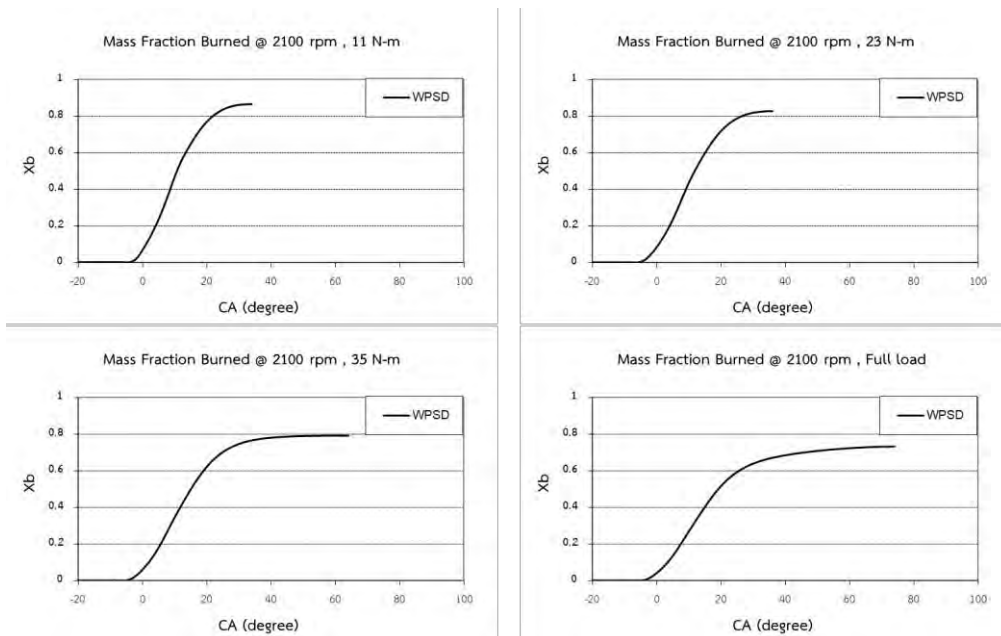
รูปที่ 5-44 ถึงรูปที่ 5-46 และตารางที่ 5 - 7 แสดงสัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก พบว่า ที่ความเร็ว 1400 รอบต่อนาที สัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่า 0.732 - 0.780 ที่ความเร็ว 1700 รอบต่อนาที สัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่า 0.752 - 0.854 ความเร็ว 2100 รอบต่อนาที สัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่า 0.732 - 0.866 ดังที่แสดงในตารางที่ 5 - 7



รูปที่ 5 - 44 สัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1400 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ



รูปที่ 5 - 45 สัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 1700 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ



รูปที่ 5 - 46 สัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ 2100 rpm ภาระ 11, 23 , 35 N-m และภาระสูงสุดตามลำดับ

ตารางที่ 5 - 7 สัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก

สัดส่วนเชื้อเพลิงที่เผาไหม้		
Speed	Torque	WPOSD
rpm	Nm	Xb
1400	11	0.733
	23	0.776
	35	0.780
	Full load	0.732
1700	11	0.854
	23	0.806
	35	0.752
	Full load	0.775
2100	11	0.866
	23	0.825
	35	0.791
	Full load	0.732

5.3.2.8 การวิเคราะห์หาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดการเผาไหม้

การวิเคราะห์หาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดการเผาไหม้ทำได้โดยพิจารณาข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้ ซึ่งจุดเริ่มต้นการเผาไหม้จะสามารถดูได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้จะ

เพิ่มขึ้นสูงสุดอีกครั้งหลังจากการเปลี่ยนแปลงความดันเนื่องจากการฉีดเชื้อเพลิง ซึ่งจะเป็นจุดเดียวกันกับจุดที่อัตราการปลดปล่อยพลังงานของเชื้อเพลิงซึ่งจะกลับมามีค่าเป็นบวกอีกครั้งหลังจากสูญเสียพลังงานในระบบให้กับเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ระบบ

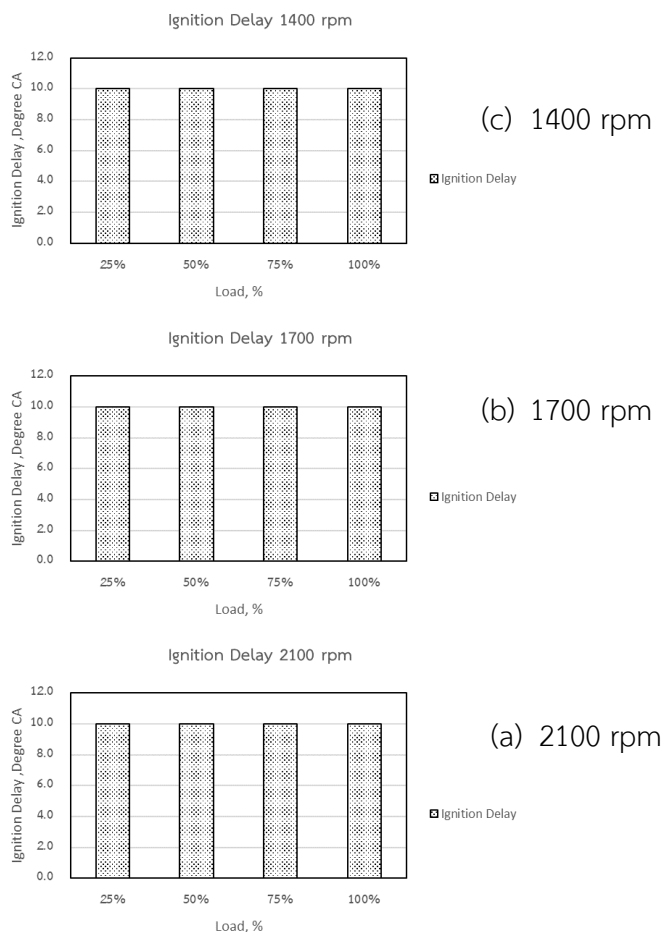
ตารางที่ 5 - 8 แสดงจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก พบว่า การเกิดการฉีดเชื้อเพลิงล่าช้ามีแนวโน้มที่จะทำให้จุดเริ่มต้นการเผาไหม้เข้าใกล้ศูนย์ตายบนมากขึ้น และเมื่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้จุดเริ่มต้นการเผาไหม้มีแนวโน้มเข้าใกล้ศูนย์ตายบนมากขึ้น ในส่วนของจุดสิ้นสุดการเผาไหม้จะใช้สำหรับการพิจารณาเพื่อหาช่วงการเผาไหม้

ตารางที่ 5 - 8 จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก

Torque	WPSD	
	SOC	EOC
Nm	CA	CA
11	-6.0	30.0
23	-6.0	34.0
35	-6.0	42.0
Full load	-6.0	60.0
11	-6.0	30.0
23	-6.0	38.0
35	-6.0	56.0
Full load	-6.0	72.0
11	-4.0	36.0
23	-4.0	38.0
35	-4.0	66.0
Full load	-4.0	76.0

5.3.2.9 ช่วงล่าช้าการจุดระเบิด (Ignition delay)

รูปที่ 5 - 47 แสดงช่วงล่าช้าในการจุดระเบิด ซึ่งสามารถหาได้จากระยะเวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นฉีดเชื้อเพลิงถึงจุดเริ่มต้นการเผาไหม้ และแสดงช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Burn Duration) ซึ่งสามารถหาได้จากระยะเวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นการเผาไหม้จนถึงจุดสิ้นสุดการเผาไหม้ ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก พบว่า ช่วงล่าช้าในการจุดระเบิดของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าเท่ากันคือ 10 CA ที่ภาระ 11, 23 และ 35 N-m และภาระสูงสุด

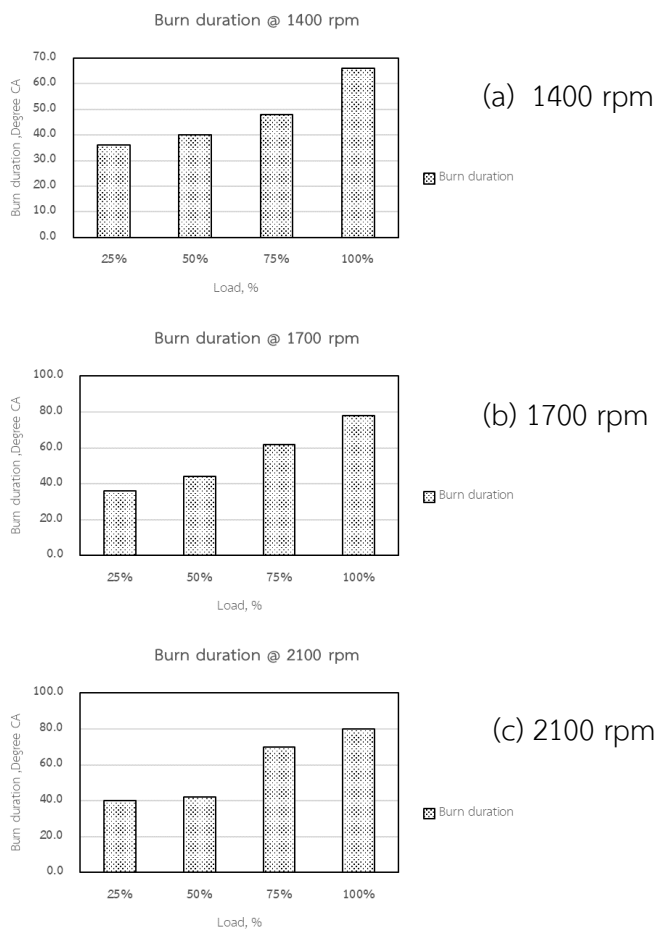


รูปที่ 5 - 47 ช่วงล่าช้าในการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ความเร็วรอบ

(a) 1400 rpm (b) 1700 rpm (c) 2100 rpm

5.3.2.10 ช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Burn duration)

รูปที่ 5 - 48 แสดงช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง พบว่า เครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ที่ความเร็วรอบคงที่ ช่วงเวลาการเผาไหม้จะยาวขึ้นเมื่อภาระการทดสอบมากขึ้น เนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่มากขึ้น อีกสาเหตุหนึ่ง อาจเป็นเพราะองค์ประกอบของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกซึ่งมีสัดส่วนของเชื้อเพลิงที่ระเหยง่ายที่น้อยจึงใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้ที่นานขึ้น



รูปที่ 5 - 48 ช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ความเร็วรอบ

(a) 1400 rpm (b) 1700 rpm (c) 2100 rpm

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกที่มีต่อสมรรถนะ ปรากฏการณ์การเผาไหม้ของเครื่องยนต์และมลพิษที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป โดยสรุปผลได้ดังนี้

6.1.1 สรุปผลการทดสอบสมรรถนะ

1. ที่สภาวะภาระสูงสุด เครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกสามารถสร้างแรงบิดเบรกได้น้อยกว่าเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล โดยสาเหตุหนึ่งเป็นผลมาจากเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่น้อยกว่า
2. ที่สภาวะภาระสูงสุด อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าต่ำกว่าเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล เนื่องจากเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าพลังงานความร้อนที่สูงกว่า
3. ที่สภาวะภาระสูงสุด ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกที่สูงที่สุดของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่า สูงกว่าเมื่อใช้เครื่องเชื้อเพลิงดีเซล
4. ที่สภาวะภาระสูงสุด อุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าต่ำกว่าเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล เนื่องจากประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าสูงกว่า จึงมีการปลดปล่อยพลังงานที่เหลือออกมาในรูปของอุณหภูมิไอเสียที่น้อยกว่า
5. ที่สภาวะภาระสูงสุด อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลมีค่าใกล้เคียงกัน จึงไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการทำงานของเครื่องยนต์ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิง
6. ที่สภาวะภาระบางส่วน ค่าอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซล
7. ที่สภาวะภาระบางส่วน ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกที่เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าต่ำกว่าดีเซล

8. ที่สภาวะภาระบางส่วน อุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าต่ำกว่าเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล
9. ที่สภาวะภาระบางส่วน อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นและอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป มีค่าใกล้เคียงกัน

6.1.2 สรุปผลการทดสอบสมรรถนะ การวิเคราะห์การเผาไหม้จากความดันในห้องเผาไหม้และค่ามลพิษ (ควันดำ) ที่จุดทดสอบซึ่งดัดแปลงมาจากมาตรฐาน ESC Test Cycle

1. ค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่จุดทดสอบซึ่งดัดแปลงมาจากมาตรฐาน ESC Test Cycle เมื่อใช้เชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกัน
2. ค่าควันดำของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระที่ทดสอบและมีค่าใกล้เคียงกับเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซล
3. จุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกจะเข้าใกล้ศูนย์ตายบนเมื่อความเร็วรอบมากขึ้น
4. ความดันในห้องเผาไหม้สูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระการทดสอบมากขึ้น
5. อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดและการปลดปล่อยความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระการทดสอบมากขึ้น

จากผลการทดสอบสมรรถนะและการวิเคราะห์การเผาไหม้จากความดันในห้องเผาไหม้และค่ามลพิษ (ควันดำ) สามารถสรุปแนวทางในการนำเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกมาใช้ในเครื่องยนต์ CI ชนิด Direct Injection ได้ว่าสามารถนำเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกไปใช้ในเครื่องยนต์ได้โดยไม่ต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์ โดยมีค่าประสิทธิภาพต่าง ๆ และการปลดปล่อยควันดำใกล้เคียงกับการใช้เชื้อเพลิงดีเซล

6.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกที่ผลิตได้เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลที่ใช้น้ำมันโดยทั่วไปคือสารเติมแต่งให้กับน้ำมันเชื้อเพลิง

- เพิ่มประสิทธิภาพให้กับเชื้อเพลิง เช่น
 - สารเพิ่มค่าซีเทน เพื่อช่วยให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงทำได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น

- สารชะล้างทำความสะอาด เพื่อลดการเกิดคราบสกปรกหรือคราบยางเหนียวเกาะติดบริเวณหัวฉีดเชื้อเพลิงซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของหัวฉีดลดลง
- สารเพิ่มคุณสมบัติการหล่อลื่น เพื่อลดการสึกหรอของเครื่องยนต์ในระยะยาว เนื่องจากการมีปริมาณของกำมะถันซึ่งเป็นสารหล่อลื่นตามธรรมชาติที่ต่ำในน้ำมันเชื้อเพลิง
- ป้องกันสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ที่จะเกิดขึ้นกับเชื้อเพลิง เช่น
 - สารลดการเกิดฟอง
 - สารลดจุดไหลเท ซึ่งจะช่วยให้น้ำมันไม่แข็งตัวในสภาพอากาศเย็น
 - สารเพิ่มการนำไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้ถ่ายเทประจุและป้องกันอันตรายเวลาเคลื่อนย้ายถ่ายเทน้ำมันเชื้อเพลิง
 - สารต้านหรือการชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งจะช่วยให้น้ำมันคงตัวและไม่เสื่อมสภาพระหว่างการเก็บรักษา
 - สารควบคุมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และเชื้อรา เนื่องจากจุลินทรีย์หรือเชื้อราสามารถเติบโตได้ในชั้นน้ำอิมัลชันที่แยกออกจากน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งน้ำเหล่านี้จะปนเปื้อนเข้าไปในระหว่างกระบวนการ

6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป

1. ควรมีการศึกษาด้านการสึกหรอของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกเป็นระยะเวลานาน เพื่อดูผลกระทบที่มีต่อเครื่องยนต์
2. ควรมีการศึกษาถึงการนำเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติกไปผสมกับเชื้อเพลิงทางเลือกอื่นนอกเหนือจากเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป เพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิงในอนาคต

บรรณานุกรม

1. Kalargaris, I., G. Tian, and S. Gu, Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil. *Fuel Processing Technology*, 2017. 157: p. 108-115.
2. ราชกิจจานุเบกษา, กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล, กรมธุรกิจพลังงาน, Editor. 2556. p. 70-72.
3. กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. เทคโนโลยีการผลิตพลังงานเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก. Available from: www.dpim.go.th/service/download?articleid=3499&F=6509.
4. กรมควบคุมมลพิษ, ส.ส., รายงานสถานการณ์ขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2559. 2559.
5. Eran Sher, Handbook of air pollution from internal combustion engines – Pollutant formation and control. 1998, United States of America: Academic Press.
6. จิตรการคำ, ศ., น้ำมันจากขยะพลาสติกและยางรถยนต์เก่า. 2553, เศรษฐกิจพอเพียง. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
7. Kumar, S., et al., Performance and emission analysis of blends of waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste HDPE with diesel in a CI engine. *Energy Conversion and Management*, 2013. 74: p. 323-331.
8. VP. Mohana Jeya Valli, et al., Alternate Fuel from Synthetic Plastics Waste - Review *INTERNATIONAL JOURNAL OF PHARMACEUTICAL AND CHEMICAL SCIENCES* 2012. 1(3): p. 720-724.
9. Kunwar, B., et al., Plastics to fuel: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. 54: p. 421-428.
10. Siddiqui, M.N. and H.H. Redhwi, Catalytic coprocessing of waste plastics and petroleum residue into liquid fuel oils. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2009. 86(1): p. 141-147.
11. Panda, A.K., R.K. Singh, and D.K. Mishra, Thermolysis of waste plastics to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of

- value added products—A world prospective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010. 14(1): p. 233-248.
12. Pawar Harshal R and Lawankar Shailendra M., Waste plastic Pyrolysis oil Alternative Fuel for CI Engine – A Review *Research Journal of Engineering Sciences* 2013. 2(2): p. 26-30.
 13. Singhabhandhu, A. and T. Tezuka, The waste-to-energy framework for integrated multi-waste utilization: Waste cooking oil, waste lubricating oil, and waste plastics. *Energy*, 2010. 35(6): p. 2544-2551.
 14. Walendziewski, J., Engine fuel derived from waste plastics by thermal treatment. *Fuel*, 2002. 81(4): p. 473-481.
 15. Williams, P.T. and E. Slaney, Analysis of products from the pyrolysis and liquefaction of single plastics and waste plastic mixtures. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007. 51(4): p. 754-769.
 16. ธีัญญ์พิชชา เอกบุศย์, ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ, and ว. อุตตมะปรากรม, การศึกษา ศักยภาพการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกในประเทศไทย. *วารสารวิจัยพลังงาน*, 2557. 11(1): p. 38-49.
 17. Mani, M., C. Subash, and G. Nagarajan, Performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine using waste plastic oil. *Applied Thermal Engineering*, 2009. 29(13): p. 2738-2744.
 18. Mani, M., G. Nagarajan, and S. Sampath, Characterisation and effect of using waste plastic oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. *Energy*, 2011. 36(1): p. 212-219.
 19. Rajesh Guntur, M.L.S. Deva Kumar, and Vijaya Kumar Reddy, Experimental evaluation of a diesel engine with blends of diesel-plastic pyrolysis oil. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 2011. 3: p. 5033-5040.
 20. Kaimal, V.K. and P. Vijayabalan, A detailed study of combustion characteristics of a DI diesel engine using waste plastic oil and its blends. *Energy Conversion and Management*, 2015. 105: p. 951-956.

21. Kalargaris, I., G. Tian, and S. Gu, Investigation on the long-term effects of plastic pyrolysis oil usage in a diesel engine. *Energy Procedia*, 2017. 142: p. 49-54.
22. Churkunti, P.R., et al., Combustion analysis of pyrolysis end of life plastic fuel blended with ultra low sulfur diesel. *Fuel Processing Technology*, 2016. 142: p. 212-218.
23. ELHEMRI, M.N., Effects of Synthetic Diesel Fuels on Performance, Combustion and Emissions of a Single Cylinder DI Diesel Engine: A Comparative Study, in *MECHANICAL ENGINEERING*. 2013, INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG.
24. J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 1988, Singapore: McGraw-Hill.
25. Dec., J.E., et al., *Diesel Combustion: An Integrated View Combining Laser Diagnostics, Chemical Kinetics, And Empirical Validation*. Society of Automotive Engineers, 1999: p. 14.
26. DieselNet, European Stationary Cycle (ESC), in *Emission Test Cycles*. 1997-2005.
27. ISO, 3046, in *Internal Combustion Engines - Performance Part 1 - Engines for land, railtraction and marine use - Standard reference conditions and declamations of power, fuel consumption and lubricating oil consumption*.
28. Standard., B., *Measurement of Fluid Flow in Closed Conduits, in Section 1.1, Specification for Square-edged Orifice plates, Nozzles and Venturi Tubes inserted in Circular cross-section; Conduits running full*. 1992, 2nd ed. BIS standard,.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

มาตรฐาน ISO 3046 ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเครื่องยนต์

มาตรฐาน ISO 3046 ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเครื่องยนต์ [27]

International Combustion Engines - Performance

Part 1 - Engines for land, rail-traction and marine use - Standard reference conditions and declarations of power, fuel consumption and lubricating oil consumption

ก.1 Scope

This report of ISO 3046 specifies the standard reference conditions and the methods of declaring of power, fuel consumption and lubricating oil consumption for reciprocating internal combustion engines using liquid or gaseous for particular engine applications.

ก.2 Field of application

This part of ISO 3046 covers reciprocating internal combustion engines for land, rail-traction and marine use, excluding engines to propel agricultural tractors, road vehicles and aircraft.

This part of ISO 3046 may be applied to engines used to proper road construction and earth-moving machines, industrial trucks and for other applications where no suitable International Standard for these engines exist.

ก.3 References

ISO1000, SI units and recommendation for the use of their multiples and of certain other units.

ISO 1204, Reciprocating internal combustion engines - Designation of the direction of rotation.

ISO 1205, Reciprocating internal combustion engines - Designation of the direction of cylinders.

ISO 1585, Road vehicles - Engine test code - Net power.

ISO 2534, Road vehicles - Engine test code - Gross power.

ISO 2710, Reciprocating internal combustion engines - General definitions.

ISO 3046/2, Reciprocating internal combustion engines - Performance - Part 2 :
Engine tests.

ISO 3046/4, Reciprocating internal combustion engines - Performance - Part 4 :
Speed governing.

ISO 3046/6, Reciprocating internal combustion engines - Performance - Part 6 :
Over speed protection

n.4 Units and terms

n.4.1 The units used are those of the International System of Units (SI Unit) described in ISO 1000.

n.4.2 The general engine terms used are as defined in ISO 2710.

n.5 Standard reference conditions

For the purpose of determining the power and fuel consumption of engines, the following standard reference conditions shall be used:

Total barometric pressure:

$$P_r = 100 \text{ kPa}$$

Air temperature :

$$T_r = 300 \text{ K (27°C)}$$

Relative humidity :

$$\phi_r = 60 \%$$

Charge air coolant temperature :

$$T_{cr} = 300 \text{ K (27°C)}$$

If other reference conditions are chosen, these shall be stated.

NOTES

1. Relative humidity of 60% corresponds to a water vapor pressure of 2,133 kPa (16 mmHg) at a temperature of 300 K.

2. The air density at the standard reference conditions is equivalent to that at 98 kPa (376 mmHg) and 20°C and to that at 101 kPa (760 mmHg) and 30°C
3. For automotive type inboard and outboard marine propulsion engines, the standard reference conditions in ISO 1585 and ISO 2534 may be applied but they shall be stated.

n.6. Auxiliaries

n.6.1 Introduction

In order to show alertly the conditions under which a power is determined, it is necessary to distinguish those auxiliaries which affect the final shaft output of the engine and also those which are necessary for the continuous or repeated use of the engine. Items of equipment fitted to the engine and without which the engine could not in any circumstance operate at its declared power are considered to be engine components and are not therefore, classed as auxiliaries.

(Such as fuel injection pump, exhaust turbocharger and charge air cooler are in this category of engine components.)

n.6.2 dependent auxiliary : Item of equipment, the presence or absence of which affects the final shaft output of the engine.

n.6.3 independent auxiliary : Item of equipment which uses power supplied from a source other than the engine.

n .6.4 essential auxiliary : Item of equipment which is essential for the continued or repeated operation of the engine.

n.6.5 non-essential auxiliary : Item of equipment which is not essential for the continued or repeated operation of the engine.

n.7 Declarations of power

n.7.1 Introduction

n.7.1.1 Purpose of statement of power

Statements of power are required for two main purposes:

a) The declaration by a manufacturer of the value of the power which his engine will deliver under a given set of circumstances. This declared value is known as the “rated power”.

b) The verification by measurement that the engine delivers the power which has been declared in a), under the same set of circumstances or after proper allowance has been made for any difference in circumstance.

To specify the set of circumstances under which the declared value of a power would be achieved, the declaration shall state:

a) The kind of statement of power (see 7.4) and of necessary, the ambient and operating condition (see 7.4.2).

b) The kind of power output (see 7.3).

c) The kind of power (see 7.3).

d) The corresponding engine speed.

NOTE

1. The term used in a) to c) may be combined, for example, continuous net brake fuel stop power.

2. Where appropriate to the engine application and the method of manufacture, the power achieved may be subject to a tolerance on the declared power. The existence of and its magnitude shall be stated by the manufacturer.

3. Measurement of the powers referred to in this International Standard shall be determined in accordance with ISO 3046/2.

n.7.1.2 Unit of power

Power shall be expressed in kilowatts (kW). The addition of the equivalent metric or imperial “horsepower” is permitted for a transitional period.

n.7.1.3 Power and torque

For engines delivering power by a shaft or shafts, any power in this International Standard is a quantity proportional to the mean torque, calculated on shafts transmitting this torque.

For engines delivering power other than by a shaft or shafts, reference shall be made to the appropriate International Standard for the driven for the driven machine.

n.7.1.4 Engine speed

The speed of an engine is the mean rotational speed of its crankshaft or crankshafts in revolution per minute, except in the case of “free piston” engines where the speed is the number of cycles per minute of the reciprocating components.

n.7.1.5 Engine with integral gearing

When stating the power of an engine fitted with an integral (built-in) speed increasing or reducing device, the speed of the driving shaft extremity shall also be given at the declared engine speed.

n.7.2 Kinds of power

n.7.2.1 Indicated power

The total power developed in the working cylinders by the gases on the combustion side of the working pistons.

n.7.2.2 Brake power

The power of the sum of the powers measured at the extremity of the engine driving shaft or shafts.

n.7.2.2.1 Any statement of brake powers shall be supported by the following list of auxiliaries :

- a) essential dependent auxiliaries as defined in 6.2 and 6.4;

b) essential independent as define in 6.3 and 6.4;

c) non-essential dependent auxiliaries as defined in 6.2 and 6.5.

The power absorbed by the independent and the non-essential dependent auxiliaries may be significant, in such cases, their power requirement shall be declared.

Note - Examples of typical auxiliaries are listed in annex A for guidance purposes. These lists are not necessary complete.

n.7.2.3 Net brake power

The brake power measured when the engine is using only the auxiliaries listed in 7.2.2 a).

n.7.3 Kinds of power output

n.7.3.1 continuous power

Power which an engine is capable of delivering continuous, between the normal maintenance intervals stated by the manufacturer, at stated speed and under stated ambient conditions, the maintenance prescribed by the manufacturer being carried out.

n.7.3.1 Overload power

Power which an engine may be permitted to deliver, at stated ambient conditions, immediately after working at the continuous power.

The duration and frequency of use of overload power which is permitted will depend on the service application but adequate allowance shall be made in setting the engine fuel stop permit the overload power shall be expressed as a percentage of the continuous power, together with the duration and frequency permitted and the appropriate engine speed.

Unless otherwise stated an overload power of 110% of the continuous power at a speed corresponding to the engine application is permitted for a period of 12 hours of operation.

NOTES

1. The power of marine main propulsion engines is normally limited to continuous power, so that the overload power cannot be given in service. However, for special applications, marine main propulsion engines may develop overload power in service.
2. If the engine application is not determined, the engine manufacturer shall specify the overload power and the corresponding engine speed.

n.7.3.2 Fuel stop power

Power which an engine is capable of delivering during a stated period corresponding to its application, and at stated speed and under stated ambient conditions, with the fuel limit so that the fuel stop power cannot exceeded.

n.7.4 Kinds of statements of power

n.7.4.1 ISO powers

n.7.4.1.1 ISO power

Power determined under the operating conditions of the manufacturer's test bed and adjusted to the standard reference conditions in clause 5.

n.7.4.1.2 ISO standard power

The name given of the continuous net brake power which the engine manufacturer declares that an engine is capable of delivering continuously, between the normal maintenance intervals stated by the manufacturer, and under the following conditions:

- a) at a stated speed under the operating conditions of the engine manufacturer's test bed;
- b) with the declared power adjusted to the standard reference conditions given in clause 5;

c) the maintenance prescribed by the engine manufacturer being carried out.

n.7.4.2 Service power

Power determined under the ambient and operating conditions of an engine application.

To establish service power, the following conditions shall be taken into account:

- a) the ambient conditions, or any nominal ambient conditions according to the special requirements of inspecting and/or legislative authorities and/or classification societies, as specified by the customer (see clause 12);
- b) the normal duty of the engine;
- c) the expected interval between maintenance periods;
- d) the nature and amount of the supervision required;
- e) all information relevant to the operation of the engine in service (see clauses 12 and 13).

n.8. Declarations of fuel consumption

n.8.1 Definitions

n.8.1.1 Fuel consumption

The quantity of fuel consumed by an engine per unit of time at a state power and under stated conditions.

The quantity of liquid fuels shall be expressed in mass units (kg).

The quantity of gaseous fuels shall be expressed in energy units (J).

n.8.1.2 Specific fuel consumption

The fuel consumption per unit of power.

n.8.1.3 ISO specific fuel consumption

The name given in the specific fuel consumption at the ISO standard power.

If not otherwise specified by the manufacturer, a declared specific fuel consumption shall be considered to be the ISO specific fuel consumption.

n.8.2 Reference calorific value of fuels

n.8.2.1 Liquid fuel engines

The declared specific fuel consumption of a liquid fuel engine shall be related to a reference lower calorific value of 42,000 kJ/kg (10,030 kcal/kg).

n.8.2.2 Gas engines

The declared specific fuel consumption of a gas engines shall be related to a stated lower calorific value the gas. The type of gas shall be declared.

n.8.2.3 Specific fuel consumption declarations

The specific fuel consumption of an engine shall be declared at :

- a) the ISO standard power;
- b) (if required by special agreement) at any other declared powers and at specific engine speeds appropriate to the particular engine application.

Unless otherwise states, a deviation of +5% is permitted for the specific fuel consumption for the declared power.

n.9. Declarations of lubricating oil consumption 1 Lubricating oil consumption

n.9.1 Lubricating oil consumption

The quantity of lubricating oil consumed by an engine per unit of time. This quantity is used for guidance. It shall be expressed in liters or kilograms per engine operating hour at the declared power and engine speed.

n.9.2 The lubricating oil consumption after a stated period of running-in shall be declared.

n .9.3 The oil discarded during an engine oil change shall be not included in the lubricating oil consumption declaration.

n.10. Adjustment of net brake power for ambient conditions

n.10.1 When it is required to operate the engine under conditions difference from the standard reference conditions given in clause 5, the net brake power output shall be adjusted to or from the standard reference conditions by the following formulae (see note 1) :

$$P_x = \alpha P_r \quad (\text{n-1})$$

$$\alpha = k - 0.7(1 - k) \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \quad (\text{see note 2}) \quad (\text{n-2})$$

$$k = \left(\frac{p_x - a\phi_x p_{sx}}{p_r - a\phi_r p_{sr}} \right)^m \left(\frac{T_r}{T_x} \right)^n \left(\frac{T_{cr}}{T_{cx}} \right)^q \quad (\text{n-3})$$

n.10.2 In the case of turbocharged engines in which the limits of turbocharger speed and turbocharger turbine inlet temperature have not been reached at the declared power under standard reference conditions, the manufacturer may declare substitute reference conditions to or from which power adjustments is to be made.

The following formulae (4) and (5) will then be used instead of formula (3)

$$k = \left(\frac{p_x}{p_r} \right)^m \left(\frac{T_r}{T_x} \right)^n \left(\frac{T_{cr}}{T_{cx}} \right)^q \quad (\text{n-4})$$

$$P_{ra} = P_r \times \left(\frac{\pi_r}{\pi_{max}} \right) \quad (\text{n-5})$$

Where :

P_r is the brake power;

p_r is the standard reference total barometric pressure;

p_{sr} is the saturation vapor pressure under standard reference conditions;

ϕ_r is the standard reference relative humidity;

T_r is the standard reference absolute air temperature;

T_{cr} is the standard reference absolute charge or coolant temperature;

P_{ra} is the substitute reference total barometric pressure given by formula (5);

T_{ra} is the substitute reference absolute air temperature to be stated by the manufacturer;

π_r is the boost pressure ratio at declared power under standard reference conditions to be stated by the manufacturer;

π_{\max} is the maximum available boost pressure ratio to be stated by the manufacturer;

α is the power adjustment factor;

k is the ratio of indicated power;

η_m is the mechanical efficiency (see note 4);

P_x is the brake power under the conditions being considered;

p_x is the total barometric pressure condition being considered;

p_{sx} is the saturation vapor pressure under pressure the conditions being considered;

ϕ_x is the relative humidity condition being considered;

T_x is the absolute air temperature being considered;

T_{cx} is the absolute charge air coolant temperature at charge air cooler inlet being considered.

The factor a and exponent m , n , and q have the numerical value given in table 1 (see note 5).

NOTES

1. For the convenience of users of these formulae, reference may be made to tables and nomograms in annexes B to O, which also include numerical examples.
2. When the ambient conditions are more favorable than the standard reference conditions, the declared power under the ambient conditions may be limited by the manufacturer to the declared power at the standard reference conditions.
3. If the relative humidity is not known, a value of 60% should be assumed in formulae references A, E and G in table 1.

For all other formulae references the power adjustment is independent of humidity ($a = 0$).

4. The value of mechanical efficiency shall be stated by the engine manufacturer. In the absence of any such statement, the value of $\eta_m = 0.80$ will be assumed.

5. When declaring the ISO standard power the engine manufacturer shall state which of the formulae references in table 1 is applicable.

n.11 Adjustment of fuel consumption for ambient conditions

n.11.1 When it is required to operate the engine under conditions different from the standard reference conditions given in clause 5, the fuel consumption will differ from that declared for the standard reference conditions and shall be adjusted to or from the standard reference conditions.

The following formulae shall be used if other methods are not declared by the engine manufacturers:

$$b_x = \beta b_r \quad (n-6)$$

where

$$\beta = \frac{k}{\alpha} \quad (n-7)$$

where:

b is the specific fuel consumption

β is the fuel consumption adjustment factor

α is the power adjustment factor (see 10.1)

k is the ratio of indicated power (see 10.1)

Subscript r corresponds to values under the standard reference conditions.

Subscript x corresponds to values the conditions being considered.

NOTE - For the convenience of users of these formulae, reference may be made to the tables and nomograms in annexes B to 0, which also include numerical examples.

Table n-1 - Numerical values for power adjustment

Engine type	Condition		Formula reference	Factor	Exponents		
				a	m	n	q
Compression ignition oil engine and dual-fuel engines	Non - turbocharged	Power limited by air excess	A	1	1	0.75	0
		Power limited by thermal reason	B	0	1	1	0
	Turbocharged without charge air cooling	Low and medium speed four-stroke engine	C	0	0.7	2	0
				Turbocharged with charge air cooling	D	0	0.7
Spark ignition engines using gaseous fuel	Non - turbocharged		E	1	0.86	0.56	0
	Turbocharged with charge air cooling	Low and medium speed four-speed engine	F	0	0.57	0.55	1.75
Spark ignition engines using liquid fuel	Naturally aspirated		G	1	1	0.5	0

NOTE - The factors and exponents given in table 1 have been established by tests on a number of engines to be generally representative and shall be used in the absence of any other specific information; for example in formula reference D, for an engine with the charge air cooled by engine jacket water, the value for exponent q could be zero. At present, they apply only to the type of engines specified but table 1 will be extended to include other types when sufficient are available.

n.12 Information to be supplied by the customer

The customer shall supply the following information concerning the required power:

- a) The application and the power required from the engine and details arising therefrom.
- b) The expected frequency and duration of the required powered and the corresponding engine speeds.
- c) Site conditions
 - 1) Site barometric pressure (highest and lowest reading available; if no pressure data are available the altitude above sea level).
 - 2) The monthly mean minimum and maximum air temperatures during the hottest and coldest months of the year.
 - 3) The highest and lowest ambient air temperatures around the engine.
 - 4) The relative humidity (or alternatively the water vapor pressure or the wet and dry bulb temperature) ruling at the maximum temperature conditions.
 - 5) The maximum and minimum temperature of the cooling water available.
- d) The specification and lower calorific value of the fuel available.
- e) Whether the engine is to comply with the requirements of any classification society or with special requirements.
- f) The probable period for which the engine will be running continuously, and the duration of maximum and minimum load.
- g) Any other information appropriate to the particular engine application.

n.13 Information to be supplied by the engine manufacturer

The engine manufacturer shall supply the following information:

- a) The declared powers.
- b) The corresponding crankshaft and output shaft speeds.

NOTE - For certain applications of variable engines it is common practice to supply a power/speed diagram covering the ranges of power over which the engine can be used in continuous and in short period operation.

- c) The direction of rotation (see ISO 1204).
- d) The number and arrangement of cylinders (see ISO 1205).
- e) Whether the engine is two-stroke or four-stroke, naturally aspirated, mechanically pressure charge or turbocharged and whether with or without charge air cooler.
- f) The quantity of air required for the operation of the engine for:
 - 1) Combustion and scavenging;
 - 2) Cooling and ventilation.
- g) The method of starting, apparatus supplied and additional apparatus required.
- h) The type and grade of lubricating oil(s) recommended.
- j) The type of governing, with speed drop of required (see ISO 3046/4 and ISO 3046/6).

If for variable speed duties, the working speed range and the idling speed.

If necessary, the critical speed range shall be indicated.

k) The method of cooling and the capacity of the cooling system with the rates of circulation of the cooling fluids.

m) (From air cooled engines only.) Whether hot air discharge ducting can be fitted.

- n) A schedule recommended maintenance and overhaul periods.
- p) Specifications and lower calorific values of fuels recommended.
- q) Maximum permissible back-pressure in the exhaust system and the maximum permissible intake depression.
- r) Any other information appropriate to the particular engine application.

ภาคผนวก ข

การวัดอัตราการไหลของอากาศ

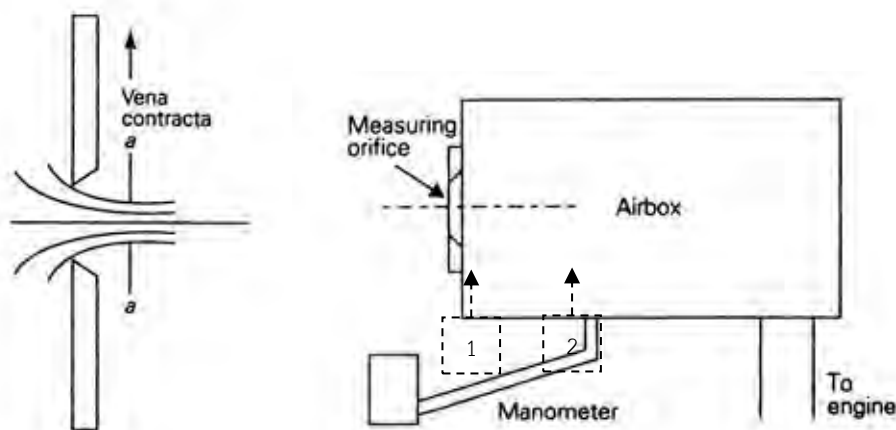
การวัดอัตราการไหลของอากาศด้วยวิธี Air Box Method [28]

การวัดอัตราการไหลของอากาศด้วยวิธี Air Box Method เป็นการวัดโดยใช้แผ่นออริฟิซ ประกอบกับถังพักอากาศ ซึ่งถังพักอากาศจะช่วยลดการกระเพื่อมของอากาศที่ถูกดูดตามจังหวะการทำงานของเครื่องยนต์ ทำให้อากาศที่ไหลผ่านออริฟิซมีอัตราการไหลที่สม่ำเสมอสามารถวัดความดันตกคร่อมได้ถูกต้องมากขึ้น

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นออริฟิซโดยประมาณ ที่อัตราการไหลต่างๆ แสดงดังตาราง ข-1

ตาราง ข-1 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของออริฟิซโดยประมาณที่อัตราการไหลต่างๆ

Orifice Diameter (mm.)	Air Flow Rate (m ³ /s)	Mass Flow Rate (kg/s)
10	0.002	0.002
20	0.008	0.009
50	0.048	0.057
100	0.19	0.23
150	0.43	0.51



รูปที่ ข-1 แสดงภาพการวัดอัตราการไหลของอากาศด้วยวิธี Air Box Method [27]

ภาพถ่ายแสดงการไหลของอากาศผ่านแผ่น Orifice Plate

ภาพขวาแสดงภาพ Orifice Flow Meter

ปริมาตรของถังที่เล็กที่สุดที่จะทำให้ไม่เกิดการกระเพื่อมของอากาศที่ไหล ได้ถูกวิเคราะห์โดย Kastner [27] ดังสมการ (ข-1)

$$V_b = \frac{417 \times 10^6 K^4 d^2}{N_c V_s n_{\min}^2} \quad (\text{ข-1})$$

- โดยที่ V_b คือ ปริมาตรถังพักอากาศที่เล็กที่สุด (m^3)
- K คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับเครื่องยนต์ 2 จังหวะ และ
มีค่าเท่ากับ 2 สำหรับเครื่องยนต์ 4 จังหวะ
- d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของ Orifice Plate (m)
- N_c คือ จำนวนกระบอกสูบของเครื่องยนต์
- V_s คือ ปริมาตรช่วงชักลูกสูบ (m^3)
- n_{\min} คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่น้อยที่สุด (rpm)

สมมติให้อากาศที่ไหลผ่าน Orifice Plate เป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow) และพิจารณาให้ความหนาแน่นของอากาศคงที่ จากสมการเบอร์นูลลี จะได้ว่า

$$\frac{p_1}{\gamma_{\text{air}}} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma_{\text{air}}} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (\text{ข-2})$$

- โดยที่ p คือ ความดัน (kPa)
- v คือ ความเร็วอากาศ (m/s)
- γ_{air} คือ น้ำหนักจำเพาะของอากาศ ($\text{kg/m}^2\text{-s}^2$) = $\rho_{\text{air}} g$
- ρ_{air} คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3) เท่ากับ 1.165 kg/m^3 ที่ 30°C
- z คือ ระดับความสูง (m)
- g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2) เท่ากับ 9.807 m/s^2

หมายเหตุ ตัวห้อย 1 และ 2 คือตำแหน่งสถานะ 1 และ 2 ในรูป ข-1 ขวา ตามลำดับ

เนื่องจากสถานะ 1 เป็นอากาศนิ่ง และทั้งสองสถานะอยู่ในระดับความสูงเดียวกัน ดังนั้นจะได้ความเร็วของอากาศ ตามสมการที่ (ข-3)

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{\text{air}}}} \quad (\text{ข-3})$$

การไหลผ่าน Orifice จะเกิด Vena Contracta ซึ่งจะทำให้การไหลจริงน้อยกว่าทฤษฎีเสมอ ดังนั้นเมื่อคิดการไหลแบบคงตัว จะได้อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ คือ

$$m_a = C_{DO} \rho_{air} v A_O \quad (\text{ข-4})$$

โดยที่ C_{DO} คือ Discharge Coefficient ของ orifice plate

A_O คือขนาดของ Orifice (m^2)

การวัดผลต่างความดันตกร้อม Orifice Plate จะวัดโดยใช้मानอมิเตอร์ ซึ่งจะได้ค่า Head ในหน่วย mmH_2O ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาผลต่างความดันตกร้อม Orifice Plate ได้จากสมการ

$$\Delta p = \rho_{H_2O} g \Delta h \quad (\text{ข-5})$$

โดยที่ Δh คือ ผลต่าง Head ที่อ่านได้จากमानอมิเตอร์ (mmH_2O)

ρ_{H_2O} คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3) เท่ากับ $997 kg/m^3$

เมื่อนำสมการ (ข-3) และ (ข-5) มาแทนลงในสมการ (ข-4) จะได้สมการที่นำไปใช้งาน คือ

$$m_a = C_{DO} A_O \sqrt{2 \rho_{air} \rho_{H_2O} g \Delta h} \quad (\text{ข-6})$$

ดังนั้นจากสมการ (ข-7) และ (ข-8) จะสามารถหาอัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงต่ออากาศ และ Equivalent ratio ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$F/A = \frac{\rho_f V/t}{C_{DO} A_O \sqrt{2 \rho_{air} \rho_{H_2O} g \Delta h}} \quad (\text{ข-7})$$

$$\text{Equivalent ratio} = \frac{(F/A)}{(F/A)_s} \quad (\text{ข-8})$$

ภาคผนวก ค

มาตรฐานการทดสอบเครื่องยนต์ ESC Test Cycle[26]

The ESC test cycle (also known as OICA/ACEA cycle) has been introduced, together with the ETC (European Transient Cycle) and the ELR (European Load Response) tests, for emission certification of heavy-duty diesel engines in Europe starting in the year 2000 (Directive 1999/96/EC of December 13, 1999). The ESC is a 13-mode, steady-state procedure that replaces the R-49 test. The engine is tested on an engine dynamometer over a sequence of steady-state modes (Table 1, Figure 1). The engine must be operated for the prescribed time in each mode, completing engine speed and load changes in the first 20 seconds. The specified speed shall be held to within ± 50 rpm and the specified torque shall be held to within $\pm 2\%$ of the maximum torque at the test speed. Emissions are measured during each mode and averaged over the cycle using a set of weighting factors. Particulate matter emissions are sampled on one filter over the 13 modes. The final emission results are expressed in g/kWh.

During emission certification testing, the certification personnel may request additional random testing modes within the cycle control area (Figure 1). Maximum emissions at these extra modes are determined by interpolation between results from the neighboring regular test modes.

Mode	Engine Speed	% Load	Weight factor, %	Duration
1	Low idle	0	15	4 minutes
2	A	100	8	2 minutes
3	B	50	10	2 minutes
4	B	75	10	2 minutes
5	A	50	5	2 minutes
6	A	75	5	2 minutes
7	A	25	5	2 minutes
8	B	100	9	2 minutes
9	B	25	10	2 minutes
10	C	100	8	2 minutes
11	C	25	5	2 minutes
12	C	75	5	2 minutes
13	C	50	5	2 minutes

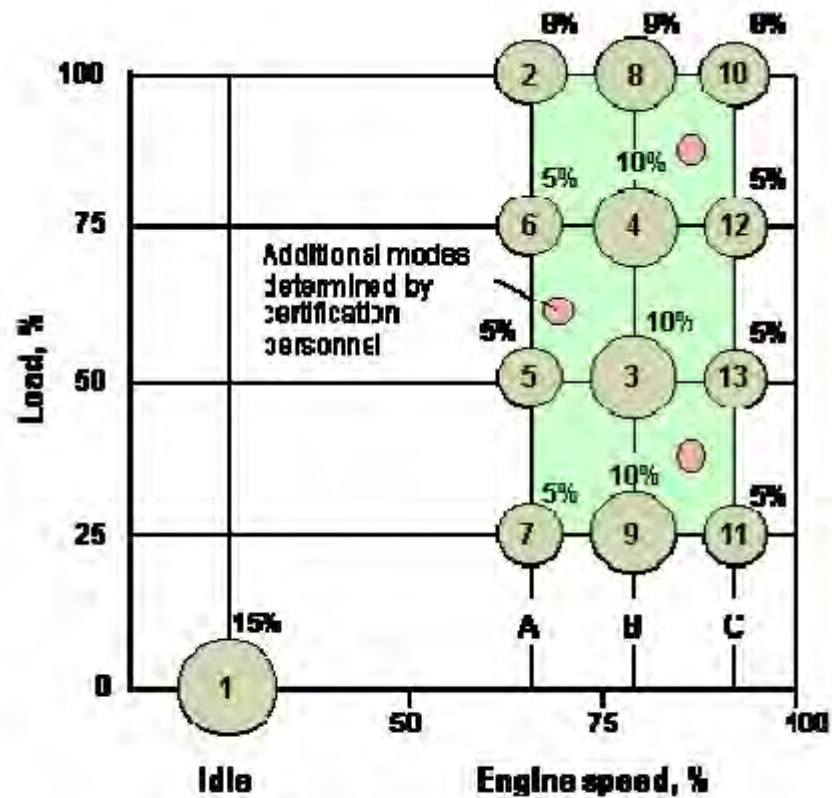


Figure 1. European Stationary Cycle (ESC)

The engine speeds are defined as follows:

1. The high speed n_{hi} is determined by calculating 70% of the declared maximum net power. The highest engine speed where this power value occurs (i.e. above the rated speed) on the power curve is defined as n_{hi} .
2. The low speed n_{lo} is determined by calculating 50% of the declared maximum net power. The lowest engine speed where this power value occurs (i.e. below the rated speed) on the power curve is defined as n_{lo} .
3. The engine speeds A, B, and C to be used during the test are then calculated from the following formulas:

$$A = n_{lo} + 0.25(n_{hi} - n_{lo})$$

$$B = n_{lo} + 0.50(n_{hi} - n_{lo})$$

$$C = n_{lo} + 0.75(n_{hi} - n_{lo})$$

The ESC test is characterized by high average load factors and very high exhaust gas temperatures. As Euro I ... V. Sometimes Arabic numerals are also used (Euro 1 ... 5). We will use Roman numerals when referencing standards for heavy-duty engines, and reserve Arabic numerals for light-duty vehicle standards. The heavy-duty engine regulations were originally introduced by the Directive 88/77/EEC, followed by a number of amendments. In 2005, the regulations were re-cast and consolidated by the Directive 05/55/EC. The emission standards apply to all motor vehicles with a “technically permissible maximum laden mass” over 3,500 kg, equipped with compression ignition engines or positive ignition natural gas or LPG engines.

ภาคผนวก ง

ข้อมูลผลการทดสอบวัดความดันในห้องเผาไหม้และสมรรถนะ

ตารางที่ ง - 1 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ที่สภาวะภาระสูงสุด

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature		
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil
		px	Tx		k	α	β					mf	P	Px		sfc	η_f	Ex
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)				kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C
1000	45.1	100.7	34.3	307	0.983	0.980	1.003	1.141	0.005967	1.341	4.72	4.82	46.0	283	28.3	563	93	87
1200	47.7	100.9	33.1	306	0.989	0.987	1.002	1.148	0.007815	1.602	5.99	6.07	48.3	267	30.1	600	101	94
1400	50.4	101	33.0	306	0.990	0.988	1.002	1.150	0.008835	1.852	7.39	7.48	51.0	250	32.1	627	102	93
1600	49.5	101	34.9	308	0.984	0.981	1.003	1.140	0.010402	2.090	8.29	8.45	50.4	251	31.9	647	103	97
1800	48.4	100.9	37.0	310	0.976	0.972	1.004	1.135	0.010737	2.359	9.12	9.38	49.8	257	31.2	664	104	98
2000	45.5	100.9	37.3	310	0.976	0.971	1.004	1.132	0.012454	2.386	9.53	9.81	46.8	249	32.2	677	106	98
2200	43.5	101.1	36.0	309	0.982	0.978	1.003	1.139	0.012625	2.545	10.02	10.24	44.5	253	31.7	663	107	95
2400	36.8	100.8	30.4	303	0.997	0.996	1.001	1.157	0.013366	2.533	9.25	9.28	36.9	274	29.3	655	100	92

ตารางที่ ง - 2 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ที่ความเร็วรอบ 1000 rpm

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature			
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil	Water
		px	Tx		k	α	β												
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)				kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C	
1000	45.1	100.7	34.3	307	0.983	0.980	1.003	1.141	0.005967	1.341	4.72	4.82	46.0	283.1	28.3	563	93	87	
1000	40.2	100.7	34.4	307	0.983	0.980	1.003	1.142	0.006580	1.039	4.21	4.30	41.0	246.1	32.6	487	85	80	
1000	35.1	100.8	34.3	307	0.984	0.981	1.003	1.142	0.006790	0.874	3.68	3.75	35.8	237.1	33.8	421	78	73	
1000	30.3	100.8	34	307	0.985	0.982	1.003	1.143	0.006690	0.790	3.17	3.23	30.8	248.3	32.3	372	75	71	
1000	24.9	100.7	33.7	307	0.985	0.982	1.003	1.143	0.006792	0.658	2.61	2.65	25.3	251.7	31.9	318	70	66	
1000	20.3	100.7	33.5	307	0.986	0.983	1.003	1.144	0.006796	0.555	2.13	2.16	20.6	260.4	30.8	261	67	63	
1000	15.1	100.7	33.2	306	0.987	0.984	1.002	1.145	0.006693	0.454	1.58	1.61	15.3	286.4	28.0	218	64	60	
1000	10.2	100.7	33	306	0.987	0.985	1.002	1.146	0.006800	0.368	1.07	1.08	10.4	343.7	23.3	179	62	59	
999	5.2	100.7	32.7	306	0.988	0.986	1.002	1.146	0.006541	0.264	0.54	0.55	5.3	484.3	16.6	138	58	55	

ตารางที่ ง - 3 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ที่ความเร็วรอบ 1200 rpm

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature		
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil
		px	Tx		k	α	β					mf	P	Px	sfc	η_f	Ex	OT
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)				kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C
1200	47.7	100.9	33.1	306	0.989	0.987	1.002	1.148	0.007815	1.602	5.99	6.07	48.3	267	30	600	101	94
1200	44.7	100.9	33.5	307	0.988	0.985	1.002	1.146	0.007720	1.379	5.62	5.70	45.4	245	33	540	94	87
1200	40.4	100.9	33.5	307	0.988	0.985	1.002	1.148	0.007993	1.236	5.08	5.15	41.0	243	33	470	92	84
1200	35.4	100.9	33.0	306	0.989	0.987	1.002	1.148	0.008083	1.000	4.45	4.51	35.9	224	36	408	85	79
1200	29.9	100.9	33.0	306	0.989	0.987	1.002	1.148	0.008183	0.884	3.76	3.81	30.3	235	34	355	83	76
1200	25.1	100.8	33.1	306	0.988	0.986	1.002	1.147	0.008033	0.771	3.15	3.20	25.5	244	33	305	79	72
1200	20.4	100.8	32.9	306	0.989	0.987	1.002	1.147	0.007903	0.660	2.56	2.60	20.7	257	31	267	74	67
1200	14.7	100.8	32.7	306	0.989	0.987	1.002	1.148	0.008380	0.555	1.85	1.87	14.9	300	27	231	69	64
1200	10.2	100.8	32.6	306	0.990	0.988	1.002	1.148	0.008169	0.442	1.28	1.30	10.3	344	23	197	67	62
1199	5.3	100.8	32.5	306	0.990	0.988	1.002	1.149	0.008298	0.330	0.67	0.67	5.4	495	16	164	65	60

ตารางที่ ง - 4 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ที่ความเร็วรอบ 1400 rpm

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature		
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil
		px	Tx		k	α	β					mf	P	Px	sfc	η_f	Ex	OT
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)				kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C
1400	50.4	101	33.0	306	0.990	0.988	1.002	1.150	0.008835	1.852	7.39	7.48	51.0	250	32	627	102	93
1400	44.6	101.1	33.6	307	0.989	0.987	1.002	1.148	0.008463	1.565	6.54	6.62	45.2	239	34	545	97	88
1400	39.6	101	33.8	307	0.988	0.985	1.002	1.146	0.009136	1.318	5.81	5.89	40.2	227	35	459	89	83
1400	34.8	100.9	33.5	307	0.988	0.985	1.002	1.146	0.009210	1.153	5.10	5.18	35.3	225	36	412	88	81
1400	29.8	100.9	33.4	306	0.988	0.986	1.002	1.147	0.008942	1.037	4.37	4.43	30.2	237	34	367	84	77
1400	25.2	100.9	33.1	306	0.989	0.987	1.002	1.148	0.009330	0.920	3.69	3.74	25.5	249	32	325	77	72
1400	19.9	100.9	33.0	306	0.989	0.987	1.002	1.148	0.009218	0.763	2.92	2.95	20.2	261	31	281	75	69
1400	15.1	100.9	32.8	306	0.990	0.988	1.002	1.148	0.009445	0.627	2.21	2.24	15.3	283	28	248	72	67
1400	9.9	101	32.7	306	0.991	0.990	1.002	1.150	0.009377	0.506	1.45	1.47	10.0	348	23	206	69	64
1398	5.2	101	32.8	306	0.991	0.989	1.002	1.150	0.009489	0.395	0.76	0.77	5.3	518	15	162	68	62

ตารางที่ 5 - ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ที่ความเร็วรอบ 1600 rpm

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature		
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil
		px	Tx		k	α	β					mf	P	Px		sfc	η_f	Ex
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)				kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C
1600	49.5	101	34.9	308	0.984	0.981	1.003	1.140	0.010402	2.090	8.29	8.45	50.4	251	32	647	103	97
1600	44.8	101	35.9	309	0.981	0.978	1.003	1.138	0.010403	1.794	7.51	7.68	45.8	238	34	551	99	92
1600	39.8	101	35.6	309	0.982	0.979	1.003	1.140	0.010402	1.509	6.67	6.81	40.7	226	36	478	95	88
1600	34.8	100.9	35.1	308	0.982	0.979	1.003	1.141	0.010290	1.320	5.83	5.95	35.5	226	36	426	90	85
1600	29.6	101	34.2	307	0.986	0.984	1.002	1.144	0.010620	1.158	4.96	5.04	30.1	233	34	380	87	81
1600	24.8	101	33.7	307	0.988	0.986	1.002	1.146	0.010714	1.002	4.16	4.22	25.2	241	33	331	83	77
1600	19.6	101	33.3	306	0.989	0.987	1.002	1.147	0.010710	0.871	3.28	3.33	19.9	265	30	292	81	74
1600	14.6	101	32.8	306	0.991	0.989	1.002	1.150	0.010651	0.717	2.45	2.47	14.8	293	27	238	79	72
1600	10.1	101	32.6	306	0.991	0.990	1.002	1.150	0.010820	0.585	1.69	1.71	10.2	345	23	204	76	70
1600	5.3	101	33.0	306	0.990	0.988	1.002	1.150	0.010679	0.468	0.89	0.90	5.4	526	15	168	74	68

ตารางที่ ง - 6 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ที่ความเร็วรอบ 1800 rpm

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature		
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil
		px	Tx		k	α	β					mf	P	Px	sfc		η_f	Ex
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)				kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C
1800	48.4	100.9	37.0	310	0.976	0.972	1.004	1.135	0.010737	2.359	9.12	9.38	49.8	257	31	664	104	98
1800	45	100.9	37.2	310	0.976	0.972	1.004	1.133	0.010682	2.130	8.48	8.73	46.3	250	32	614	101	95
1800	39.7	100.9	36.4	309	0.978	0.975	1.004	1.135	0.010138	1.796	7.48	7.68	40.7	239	34	529	95	88
1800	34.8	100.9	36.1	309	0.979	0.976	1.004	1.137	0.009794	1.566	6.56	6.72	35.7	238	34	462	92	86
1800	29.6	100.9	35.4	308	0.982	0.978	1.003	1.140	0.009450	1.332	5.58	5.70	30.3	238	34	400	87	83
1800	24.9	100.9	34.6	308	0.984	0.981	1.003	1.142	0.009326	1.168	4.69	4.78	25.4	248	32	345	86	81
1800	19.7	100.9	34.4	307	0.985	0.982	1.003	1.143	0.009349	0.965	3.71	3.78	20.1	259	31	296	84	78
1800	14.7	100.9	34.1	307	0.986	0.983	1.003	1.144	0.009236	0.813	2.77	2.82	15.0	293	27	254	80	74
1800	10.1	101	34.7	308	0.985	0.982	1.003	1.143	0.009246	0.688	1.90	1.94	10.3	360	22	222	77	72
1800	5.6	101	35.1	308	0.983	0.981	1.003	1.142	0.009036	0.527	1.06	1.08	5.7	498	16	186	75	69

ตารางที่ ง - 7 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ที่ความเร็วรอบ 2000 rpm

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature		
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil
		px	Tx		k	α	β					mf	P	Px		sfc	η_f	Ex
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)				kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C
2000	45.5	100.9	37.3	310	0.976	0.971	1.004	1.132	0.012454	2.386	9.53	9.81	46.8	249	32	677	106	98
2000	39.8	100.9	37.5	311	0.975	0.970	1.005	1.131	0.011982	1.993	8.34	8.59	41.0	238	34	562	98	90
2000	34.7	100.9	37.4	310	0.975	0.971	1.004	1.132	0.012544	1.722	7.27	7.49	35.7	236	34	483	94	85
2000	29.8	101	35.5	309	0.982	0.979	1.003	1.140	0.012313	1.500	6.24	6.37	30.4	240	33	422	91	82
2000	24.7	101	34.5	308	0.985	0.983	1.003	1.144	0.012616	1.292	5.17	5.26	25.1	249	32	365	88	79
2000	20.3	101	33.7	307	0.988	0.986	1.002	1.147	0.012498	1.125	4.25	4.31	20.6	264	30	324	86	77
2000	14.9	101	33.5	307	0.989	0.987	1.002	1.147	0.012113	0.943	3.12	3.16	15.1	302	27	276	84	74
2000	10.3	101	33.4	306	0.989	0.987	1.002	1.148	0.012689	0.761	2.16	2.19	10.4	352	23	243	81	72
2000	5.4	101	33.8	307	0.988	0.985	1.002	1.146	0.012363	0.595	1.13	1.15	5.5	525	15	203	78	70

ตารางที่ ง - 8 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ที่ความเร็วรอบ 2200 rpm

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature			
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil	Water
		px	Tx		k	α	β												
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)				kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C	
2200	43.5	101.1	36.0	309	0.982	0.978	1.003	1.139	0.012625	2.545	10.02	10.24	44.5	253	32	663	107	95	
2200	39.8	101.1	36.3	309	0.981	0.977	1.003	1.138	0.012752	2.255	9.17	9.38	40.7	245	33	587	102	92	
2200	34.9	101	35.9	309	0.981	0.978	1.003	1.138	0.012749	1.962	8.04	8.22	35.7	243	33	511	100	91	
2200	30.2	101	35.4	308	0.982	0.979	1.003	1.140	0.012810	1.735	6.96	7.10	30.8	249	32	450	96	87	
2200	24.7	101	34.8	308	0.984	0.982	1.003	1.142	0.012622	1.470	5.69	5.80	25.2	258	31	389	94	84	
2200	20.1	101	34.5	308	0.985	0.983	1.003	1.144	0.012826	1.267	4.63	4.71	20.5	273	29	344	90	81	
2200	14.7	101.1	34.6	308	0.986	0.984	1.002	1.144	0.012855	1.065	3.39	3.44	14.9	314	26	300	87	77	
2200	10.3	101.1	35.0	308	0.985	0.982	1.003	1.143	0.012800	0.876	2.37	2.42	10.5	368	22	245	84	75	
2200	5.6	101.1	35.6	309	0.983	0.980	1.003	1.141	0.012696	0.716	1.29	1.32	5.7	553	15	227	82	73	

ตารางที่ ง - 9 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ที่ความเร็วรอบ 2400 rpm

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature			
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil	Water
		px	Tx		k	α	β												
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)				kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C	
2400	36.8	100.8	30.4	303	0.997	0.996	1.001	1.157	0.013366	2.533	9.25	9.28	36.9	274	29	655	100	92	
2400	35.4	100.8	31.4	304	0.993	0.992	1.001	1.153	0.013360	2.455	8.90	8.97	35.7	276	29	635	106	91	
2400	29.8	100.8	31.8	305	0.992	0.991	1.001	1.151	0.013348	2.103	7.49	7.56	30.1	280	29	544	106	89	
2400	25	100.8	32.1	305	0.991	0.990	1.002	1.150	0.013342	1.767	6.28	6.35	25.3	281	29	468	103	86	
2400	20.1	100.8	32.1	305	0.991	0.990	1.002	1.150	0.013342	1.595	5.05	5.10	20.3	315	25	412	99	84	
2400	15	100.8	32.1	305	0.991	0.990	1.002	1.150	0.013342	1.299	3.77	3.81	15.2	344	23	357	98	82	
2400	10.1	100.7	32.0	305	0.990	0.989	1.002	1.151	0.013344	1.077	2.54	2.57	10.2	424	19	312	95	77	
2400	5.5	100.7	36.0	309	0.978	0.974	1.004	1.151	0.013344	0.865	1.38	1.42	5.6	623	13	286	90	74	

ตารางที่ ง - 10 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่สภาวะภาระสูงสุด

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature		
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil
		px	Tx		k	α	β					mf	P	Px		sfc	η_f	Ex
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)				kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C
1000	44.9	101	34.2	307	0.986	0.984	1.002	1.145	0.005978	1.206	4.70	4.78	45.6	256	31.0	538	97	93
1200	46.6	100.9	35.3	308	0.982	0.979	1.003	1.140	0.008051	1.429	5.86	5.98	47.6	243	32.6	569	100	95
1400	48.4	100.8	36.5	310	0.977	0.973	1.004	1.134	0.009605	1.638	7.10	7.29	49.7	230	34.5	573	101	94
1600	48.8	100.8	33.6	307	0.986	0.984	1.002	1.145	0.01019	1.936	8.18	8.31	49.6	236	33.6	612	104	98
1800	47.4	100.9	36.1	309	0.979	0.976	1.004	1.137	0.011493	2.196	8.93	9.16	48.6	245	32.4	632	104	98
2000	46.3	100.9	32.7	306	0.990	0.988	1.002	1.150	0.011738	2.354	9.70	9.81	46.8	242	32.7	660	103	94
2200	43.4	100.6	34.7	308	0.981	0.977	1.003	1.138	0.012514	2.503	10.00	10.23	44.4	249	31.8	625	106	94
2400	36.1	100.6	34.1	307	0.983	0.980	1.003	1.141	0.013285	2.454	9.07	9.26	36.8	270	29.4	597	98	86

ตารางที่ ง - 11 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ความเร็วรอบ 1000 rpm

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature		
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil
		px	Tx		k	α	β					mf	P	Px		sfc	η_f	Ex
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)				kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C
1000	44.9	101	34.2	307	0.986	0.984	1.002	1.145	0.005978	1.206	4.70	4.78	45.6	256	31.0	538	97	93
1000	40.2	101	34.2	307	0.986	0.984	1.002	1.145	0.007002	0.998	4.21	4.28	40.9	236	33.5	466	89	86
1000	35.1	101	33.8	307	0.988	0.985	1.002	1.145	0.006804	0.856	3.68	3.73	35.6	232	34.1	403	85	82
1000	30.0	101	33.3	306	0.989	0.987	1.002	1.148	0.006556	0.763	3.14	3.18	30.4	242	32.7	351	81	78
1000	25.2	101	32.8	306	0.991	0.989	1.002	1.150	0.006803	0.635	2.64	2.67	25.5	240	33.0	300	76	73
1000	19.9	101.1	32.9	306	0.992	0.990	1.002	1.151	0.006777	0.518	2.08	2.10	20.1	248	31.9	249	71	69
1000	15.0	101.1	33.2	306	0.991	0.989	1.002	1.150	0.006879	0.436	1.57	1.59	15.2	277	28.6	210	67	65
1000	10.6	101.1	34.2	307	0.987	0.985	1.002	1.146	0.006836	0.373	1.11	1.13	10.8	335	23.6	180	64	64
999	5.1	101.1	35.1	308	0.984	0.982	1.003	1.143	0.006938	0.248	0.53	0.54	5.2	464	17.1	134	62	60

ตารางที่ ง - 12 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ความเร็วรอบ 1200 rpm

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature		
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil
		px	Tx		k	α	β					mf	P	Px	sfc	η_f	Ex	OT
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)				kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C
1200	46.6	100.9	35.3	308	0.982	0.979	1.003	1.140	0.008051	1.429	5.86	5.98	47.6	243	32.6	569	100	95
1200	45.1	100.9	34.9	308	0.983	0.980	1.003	1.141	0.007969	1.335	5.67	5.78	46.0	235	33.8	542	96	90
1200	40.2	100.8	34.4	307	0.984	0.981	1.003	1.142	0.007884	1.120	5.05	5.15	41.0	221	35.9	461	91	85
1200	35.3	100.8	33.9	307	0.985	0.983	1.003	1.144	0.008021	0.953	4.44	4.51	35.9	214	37.0	394	86	81
1200	29.9	100.8	33.3	306	0.987	0.985	1.002	1.146	0.008030	0.838	3.76	3.81	30.4	223	35.6	344	82	78
1200	25.2	100.9	32.9	306	0.990	0.988	1.002	1.148	0.008083	0.725	3.17	3.21	25.5	229	34.7	303	77	72
1200	19.8	100.9	32.9	306	0.990	0.988	1.002	1.148	0.008339	0.609	2.49	2.52	20.0	244	32.4	260	74	70
1200	14.9	100.9	33.4	306	0.988	0.986	1.002	1.147	0.008416	0.507	1.87	1.90	15.1	270	29.3	231	69	66
1200	10.2	100.9	34.2	307	0.985	0.983	1.003	1.144	0.008280	0.421	1.28	1.30	10.4	328	24.2	200	67	64
1201	5.3	100.9	34.7	308	0.984	0.981	1.003	1.142	0.007972	0.298	0.67	0.68	5.4	446	17.8	163	65	62

ตารางที่ ง - 13 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ความเร็วรอบ 1400 rpm

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature		
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil
		px	Tx		k	α	β					mf	P	Px	sfc	η_f	Ex	OT
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)			kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C	
1400	48.4	100.8	36.5	310	0.977	0.973	1.004	1.134	0.009605	1.638	7.10	7.29	49.7	230	34.5	573	101	94
1400	44.9	100.8	36.7	310	0.976	0.972	1.004	1.133	0.008928	1.497	6.58	6.77	46.2	226	35.0	517	97	91
1400	39.8	100.8	35.9	309	0.979	0.975	1.004	1.136	0.009395	1.307	5.83	5.98	40.8	223	35.5	455	92	86
1400	35.0	100.8	35.5	309	0.980	0.977	1.004	1.138	0.009940	1.154	5.13	5.25	35.8	224	35.4	406	89	84
1400	29.8	100.7	34.8	308	0.981	0.978	1.003	1.139	0.009947	1.002	4.37	4.47	30.5	229	34.7	356	84	78
1400	24.9	100.7	34.5	308	0.982	0.979	1.003	1.140	0.009917	0.896	3.65	3.73	25.4	245	32.4	315	81	76
1400	20.1	101	32.8	306	0.991	0.989	1.002	1.150	0.009781	0.749	2.95	2.98	20.3	254	31.2	277	77	73
1400	15.2	101	32.5	306	0.992	0.990	1.001	1.151	0.009785	0.620	2.23	2.25	15.3	278	28.5	240	74	70
1400	10.0	100.9	32	305	0.992	0.991	1.001	1.152	0.008883	0.503	1.47	1.48	10.1	343	23.1	203	72	68
1399	5.5	100.9	31.9	305	0.993	0.992	1.001	1.152	0.009498	0.403	0.81	0.81	5.5	500	15.9	160	71	67

ตารางที่ ง - 14 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ความเร็วรอบ 1600 rpm

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature		
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil
		px	Tx		k	α	β					mf	P	Px		sfc	η_f	Ex
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)				kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C
1600	48.8	100.8	33.6	307	0.986	0.984	1.002	1.145	0.01019	1.936	8.18	8.31	49.6	236	33.6	612	104	98
1600	45.0	100.7	34.1	307	0.984	0.981	1.003	1.142	0.010207	1.724	7.54	7.69	45.9	228	34.8	546	99	94
1600	39.9	100.8	33.9	307	0.985	0.983	1.003	1.144	0.010475	1.493	6.69	6.80	40.6	223	35.6	476	95	91
1600	35.0	100.8	33.7	307	0.986	0.984	1.002	1.144	0.010492	1.309	5.86	5.96	35.6	223	35.6	425	90	86
1600	30.0	100.9	34.1	307	0.986	0.983	1.003	1.144	0.010347	1.157	5.03	5.11	30.5	230	34.5	381	85	80
1600	25.1	100.9	34.8	308	0.983	0.981	1.003	1.141	0.010860	1.001	4.21	4.29	25.6	237	33.4	333	83	79
1600	20.0	100.9	35.1	308	0.982	0.979	1.003	1.140	0.010126	0.847	3.35	3.42	20.4	252	31.5	291	80	74
1600	14.8	100.9	36	309	0.980	0.976	1.004	1.137	0.010515	0.676	2.48	2.54	15.2	272	29.2	238	77	73
1600	10.5	100.8	36.1	309	0.978	0.975	1.004	1.135	0.009896	0.570	1.76	1.81	10.8	323	24.6	201	75	70
1600	5.5	100.8	36.9	310	0.976	0.972	1.004	1.133	0.010259	0.450	0.92	0.95	5.7	486	16.3	165	72	69

ตารางที่ ง - 15 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ความเร็วรอบ 1800 rpm

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature			
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil	Water
		px	Tx		k	α	β					Px		sfc		η_f	Ex	OT	WT
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)				kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C	
1800	47.4	100.9	36.1	309	0.979	0.976	1.004	1.137	0.011493	2.196	8.93	9.16	48.6	245	32.4	632	104	98	
1800	45.1	100.8	36.2	309	0.978	0.974	1.004	1.135	0.011062	2.001	8.50	8.73	46.3	234	33.8	592	103	97	
1800	40.1	100.8	36.2	309	0.978	0.974	1.004	1.135	0.010400	1.770	7.56	7.76	41.2	233	34.0	521	97	91	
1800	34.9	100.8	35.7	309	0.980	0.976	1.004	1.137	0.010891	1.545	6.58	6.74	35.8	234	33.9	456	93	87	
1800	30.0	100.9	35.9	309	0.980	0.976	1.004	1.138	0.010574	1.298	5.65	5.79	30.7	229	34.7	391	89	83	
1800	24.7	100.9	36.3	309	0.979	0.975	1.004	1.137	0.010158	1.113	4.66	4.78	25.3	238	33.3	339	85	80	
1800	20.0	100.9	36.5	310	0.978	0.974	1.004	1.135	0.009970	0.920	3.77	3.87	20.5	243	32.6	294	82	76	
1800	14.9	100.9	36.5	310	0.978	0.974	1.004	1.135	0.009780	0.799	2.81	2.88	15.3	283	28.0	253	80	73	
1800	10.3	100.9	37.2	310	0.976	0.972	1.004	1.133	0.009101	0.656	1.94	2.00	10.6	336	23.6	220	77	71	
1800	5.6	100.8	37.1	310	0.975	0.971	1.004	1.132	0.008771	0.514	1.06	1.09	5.8	485	16.4	184	75	69	

ตารางที่ ง - 16 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ความเร็วรอบ 2000 rpm

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature		
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil
		px	Tx		k	α	β					mf	P	Px		sfc	η_f	Ex
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)				kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C
2000	46.3	100.9	32.7	306	0.990	0.988	1.002	1.150	0.011738	2.354	9.70	9.81	46.8	242	32.7	660	103	94
2000	40.2	101	31.7	305	0.994	0.993	1.001	1.154	0.011679	1.980	8.42	8.48	40.5	235	33.7	544	95	85
2000	34.8	100.9	31.2	304	0.995	0.994	1.001	1.155	0.012141	1.691	7.29	7.33	35.0	232	34.2	468	92	80
2000	30.1	100.9	30.7	304	0.997	0.996	1.001	1.157	0.012010	1.475	6.30	6.33	30.2	234	33.9	413	88	78
2000	25.2	100.8	30.4	303	0.997	0.996	1.001	1.156	0.011932	1.281	5.28	5.30	25.3	243	32.7	363	86	76
2000	20.2	100.8	29.8	303	0.999	0.998	1.000	1.159	0.012239	1.089	4.23	4.24	20.2	257	30.8	314	84	74
2000	14.9	100.8	29.6	303	0.999	0.999	1.000	1.160	0.011951	0.912	3.12	3.12	14.9	292	27.1	270	82	71
2000	10.3	100.8	29.3	302	1.000	1.000	1.000	1.162	0.012107	0.746	2.16	2.16	10.3	346	22.9	235	79	69
2000	5.5	100.9	29.4	302	1.001	1.001	1.000	1.162	0.012146	0.596	1.15	1.15	5.5	517	15.3	200	77	67

ตารางที่ ง - 17 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ความเร็วรอบ 2200 rpm

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature		
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil
		px	Tx		k	α	β					mf	P	Px		sfc	η_f	Ex
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)				kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C
2200	43.4	100.6	34.7	308	0.981	0.977	1.003	1.138	0.012514	2.503	10.00	10.23	44.4	249	31.8	625	106	94
2200	39.8	100.6	34.3	307	0.982	0.979	1.003	1.140	0.012429	2.224	9.17	9.37	40.7	242	32.8	572	103	86
2200	34.9	100.6	34.3	307	0.982	0.979	1.003	1.140	0.012489	1.919	8.04	8.21	35.6	238	33.3	509	102	85
2200	29.7	100.6	34.1	307	0.983	0.980	1.003	1.141	0.012535	1.685	6.84	6.98	30.3	246	32.3	437	99	83
2200	24.6	100.6	34	307	0.983	0.980	1.003	1.141	0.012401	1.435	5.67	5.78	25.1	252	31.4	384	96	80
2200	20.0	100.6	33.9	307	0.983	0.980	1.003	1.141	0.012813	1.217	4.61	4.70	20.4	263	30.1	334	93	78
2200	15.0	100.6	34	307	0.983	0.980	1.003	1.141	0.012647	1.070	3.46	3.53	15.3	309	25.7	298	90	76
2200	10.0	100.6	34	307	0.983	0.980	1.003	1.141	0.012528	0.833	2.30	2.35	10.2	360	22.0	259	87	73
2200	5.2	100.6	34.1	307	0.983	0.980	1.003	1.141	0.012969	0.650	1.20	1.22	5.3	541	14.7	222	84	70

ตารางที่ ง - 18 ผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ที่ความเร็วรอบ 2400 rpm

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature		
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil
		px	Tx		k	α	β					mf	P	Px	sfc	η_f	Ex	OT
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)				kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C
2400	36.1	100.6	34.1	307	0.983	0.980	1.003	1.141	0.013285	2.454	9.07	9.26	36.8	270	29.4	597	98	86
2400	35.1	100.6	34.7	308	0.981	0.977	1.003	1.139	0.013275	2.307	8.82	9.02	35.9	261	30.4	573	101	87
2400	30.0	100.6	34.9	308	0.980	0.977	1.004	1.138	0.013268	2.051	7.54	7.72	30.7	271	29.2	501	102	86
2400	25.0	100.6	35	308	0.980	0.976	1.004	1.137	0.013266	1.736	6.28	6.44	25.6	275	28.8	439	99	82
2400	19.8	100.6	34.9	308	0.980	0.977	1.004	1.138	0.013233	1.455	4.98	5.09	20.3	291	27.2	384	97	79
2400	15.2	100.6	35	308	0.980	0.976	1.004	1.137	0.013266	1.231	3.82	3.91	15.6	321	24.7	341	89	75
2400	9.7	100.6	34.8	308	0.981	0.977	1.003	1.138	0.013270	0.995	2.44	2.50	9.9	407	19.5	294	88	73
2400	5.4	100.6	34.7	308	0.981	0.977	1.003	1.138	0.013273	0.838	1.36	1.39	5.5	615	12.9	265	86	71

ตารางที่ ง - 19 ผลการทดสอบสมรรถนะที่จุดทดสอบวัดความดันในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	Fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature			SD
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil	
		px	Tx		k	α	β							mf	P	Px			η_f
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)			kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C		
1400	11.1	100.8	29.7	303	0.9990	0.9988	1.0002	1.159	0.009513	0.545	1.63	1.63	11.1	335	24.0	201	81	67	0.49
1400	23.1	100.8	29.6	303	0.9993	0.9992	1.0001	1.160	0.009607	0.845	3.39	3.39	23.1	249	32.2	277	77	66	0.37
1400	35.1	100.8	29.5	303	0.9997	0.9996	1.0001	1.160	0.009700	1.183	5.15	5.15	35.1	230	34.9	374	77	70	0.27
1400	52.6	100.8	29.6	303	0.9993	0.9992	1.0001	1.160	0.009341	1.868	7.71	7.72	52.6	242	33.1	596	97	90	4.22
1700	11.1	100.8	29.5	303	0.9997	0.9996	1.0001	1.160	0.011245	0.700	1.98	1.98	11.1	354	22.7	216	76	68	0.13
1700	23.2	100.8	29.5	303	0.9997	0.9996	1.0001	1.160	0.011168	1.038	4.13	4.13	23.2	251	31.9	305	76	68	0.25
1700	35.2	100.8	29.6	303	0.9993	0.9992	1.0001	1.160	0.011099	1.459	6.27	6.27	35.2	233	34.5	415	79	73	0.85
1700	52.3	100.8	29.2	302	1.0007	1.0008	0.9999	1.161	0.108090	2.335	9.31	9.30	52.3	251	32.0	628	93	90	2.61
2100	11.1	100.8	29.5	303	0.9997	0.9996	1.0001	1.160	0.123650	0.886	2.44	2.44	11.1	363	22.1	262	80	70	0.07
2100	23.1	100.8	29.1	302	1.0010	1.0012	0.9998	1.161	0.121050	1.377	5.08	5.07	23.1	271	29.6	365	83	74	0.13
2100	35.1	100.8	29.1	302	1.0010	1.0012	0.9998	1.162	0.012301	1.927	7.72	7.71	35.1	250	32.1	496	86	77	0.32
2100	45.9	100.8	29.0	302	1.0013	1.0016	0.9998	1.163	0.012188	2.658	10.09	10.08	45.8	263	30.5	669	90	89	1.86

ตารางที่ ง - 20 ผลการทดสอบสมรรถนะที่จุดทดสอบวัดความดันในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก

Speed	Torque	Relative			Correction			Air density	Air Flowrate	Fuel cons.	Power	Corrected			Fuel Conv.	Temperature			SD
		condition			factor							Power	Torque	sfc		Efficiency	Exhaust	Oil	
		px	Tx		k	α	β												
(rpm)	(N-m)	(kPa)	(C)	(K)				kg/m ³	kg/s	(kg/hr)	(kW)	(kW)	(N-m)	(g/kW-hr)	%	°C	°C	°C	
1400	11.2	100.7	30.9	304	0.9941	0.9930	1.0010	1.154	0.009904	0.532	1.64	1.65	11.3	324	24.5	211	83.9	71.2	0.28
1400	23.1	100.7	30.8	304	0.9944	0.9934	1.0010	1.154	0.009580	0.832	3.39	3.41	23.3	245	32.3	284	79.2	66.9	0.21
1400	35.1	100.7	30.8	304	0.9944	0.9934	1.0010	1.154	0.009080	1.159	5.15	5.18	35.3	225	35.2	374	78.3	68.8	0.22
1400	51.5	100.7	31	304	0.9938	0.9927	1.0011	1.153	0.008849	1.759	7.55	7.61	51.9	233	34.1	585	89.7	87.1	3.51
1700	11.3	100.7	30.9	304	0.9941	0.9930	1.0010	1.154	0.011333	0.677	2.01	2.03	11.4	336	23.6	217	76.7	67.1	0.09
1700	22.9	100.7	31	304	0.9938	0.9927	1.0011	1.153	0.011174	1.013	4.08	4.11	23.1	248	31.9	303	77.2	67.8	0.31
1700	35.1	100.7	31	304	0.9938	0.9927	1.0011	1.153	0.011269	1.422	6.25	6.29	35.4	227	34.9	410	77.8	71.0	0.87
1700	51.0	100.7	30.9	304	0.9941	0.9930	1.0010	1.154	0.010921	2.194	9.08	9.14	51.4	241	32.8	620	86.7	86.3	2.65
2100	11.3	100.7	30.9	304	0.9941	0.9930	1.0010	1.154	0.012115	0.886	2.48	2.50	11.4	356	22.3	264	79.6	70	0.07
2100	23.2	100.7	30.8	304	0.9944	0.9934	1.0010	1.154	0.011941	1.339	5.10	5.14	23.4	262	30.2	366	81.7	69.8	0.13
2100	35.0	100.7	30.6	304	0.9951	0.9942	1.0009	1.155	0.011945	1.909	7.70	7.74	35.2	248	32.0	504	87	78.4	0.13
2100	45.6	100.7	30.8	304	0.9944	0.9934	1.0010	1.154	0.012176	2.596	10.03	10.09	45.9	259	30.7	671	81.3	84.0	2.33

ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2019-087	ลำดับกรมแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 2 สิงหาคม 2562

รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

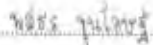
เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์


- ผู้ส่งตัวอย่าง : นายอุทธรณ์ ชาญณรงค์ชัย
ชนิดตัวอย่าง : ปิโตรลียมดีเซล
วันที่รับตัวอย่าง : 9 เมษายน 2561

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

Test Item	Test Method	Unit	Result
Density @ 15 °C	ASTM D 4052	g/cm ³	0.8328
Flash Point	ASTM D 93	°C	64.33
Viscosity @ 50 °C	ASTM D 445	cSt	3.19

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง


.....
(นางสาวพนัสกร พงษ์อินทร์)
นักวิทยาศาสตร์
วันที่ 2 สิงหาคม 2562


.....
(ศาสตราจารย์ ดร.อุทธรณ์ ชาญณรงค์ชัย)
ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล
วันที่ 2 สิงหาคม 2562

- หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ใช้บังคับสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น
2. ห้ามทำสำเนาหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2019-088	ลำดับการแก้ไข 0
	ฉบับรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 2 สิงหาคม 2562

รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ


เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์


- ผู้ส่งตัวอย่าง : นายอุทธรณ์ ชาญณรงค์ชัย
ชนิดตัวอย่าง : น้ำมันพลาสติก
วันที่รับตัวอย่าง : 9 เมษายน 2561

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

Test Item	Test Method	Unit	Result
Density @ 15 ° C	ASTM D 4052	g/cm ³	0.8118
Flash Point	ASTM D 93	°C	55.67
Viscosity @ 50 ° C	ASTM D 445	cSt	2.93

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง


.....
(นางสาวพัชร์ พันธ์ทอง)
นักวิทยาศาสตร์
วันที่ 2 สิงหาคม 2562


.....
(ศาสตราจารย์ ดร.อุทธรณ์ ชาญณรงค์ชัย)
ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล
วันที่ 2 สิงหาคม 2562

- หมายเหตุ :
1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ใช้ได้จริงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น
 2. ห้ามทำสำเนา รายงานฉบับนี้เพื่อแจกจ่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2019-089	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 2 สิงหาคม 2562

รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Ultimate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : นายสุทธน ชาญณรงค์ชัย
ชนิดตัวอย่าง : น้ำมัน
วันที่รับตัวอย่าง : 9 เมษายน 2561
เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHN รุ่น CHN 628 ยี่ห้อ Leco
มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ : ASTM D5373

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

ตัวอย่าง	รายการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ
น้ำมันดีเซล	Carbon Content	wt. %	84.57
	Hydrogen Content	wt. %	13.22
	Nitrogen Content	wt. %	N.D.
น้ำมันพลาสติก	Carbon Content	wt. %	85.04
	Hydrogen Content	wt. %	13.34
	Nitrogen Content	wt. %	0.04

*N.D. = Not detected (ตรวจเจือไม่พบค่า)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

.....
พณิณี ชูโอบุญ
(นางสาวพณิณี ชูโอบุญ)
นักวิทยาศาสตร์
วันที่ 2 สิงหาคม 2562

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตรานันท์)
ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล
วันที่ 2 สิงหาคม 2562

- หมายเหตุ :
- ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น
 - ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพื่อบางส่วนโดยมิได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ยุทธนา ชาญณรงค์ชัย
วัน เดือน ปี เกิด	25 พฤษภาคม 2528
สถานที่เกิด	ระยอง
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ที่อยู่ปัจจุบัน	39/2 หมู่ 3 ต.วังจันทร์ อ.วังจันทร์ จ.ระยอง 21210
ผลงานตีพิมพ์	ความแปรปรวนของการเผาไหม้น้ำมันดีเซลสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ME-NETT 2016