

การใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิง
ในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวที่ไม่มีการปรับแต่ง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

UTILIZATION OF WASTE PLASTIC OIL AS FUEL
IN AN UNMODIFIED SINGLE CYLINDER
DIESEL ENGINE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Mechatronics Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

การใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวที่ไม่มีการปรับแต่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบบัณฑิตวิทยาลัย



(รศ. ดร.กัมปนาท เทียนน้อย)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาบัณฑิตวิทยาลัย)



(ผศ. ดร.ธีทัต ดลวิชัย)

กรรมการ



(ผศ. ดร.เอกรงค์ สุขจิต)

กรรมการ



(ผศ. ดร.ไตรฎา แข็งการ)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

คชา วาทกิจ : การใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวที่ไม่มีการปรับแต่ง (UTILIZATION OF WASTE PLASTIC OIL AS FUEL IN AN UNMODIFIED SINGLE CYLINDER DIESEL ENGINE) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 182 หน้า.

คำสำคัญ: เชื้อเพลิงทางเลือก/น้ำมันขยะพลาสติก/เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยว

งานวิจัยเรื่องนี้ศึกษาผลของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกที่มีต่อสมรรถนะ การเผาไหม้ มลพิษ และผลการใช้งานกับเครื่องยนต์ในระยะยาว เพื่อที่จะศึกษาผลของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวที่ไม่มีการปรับแต่ง ซึ่งมุ่งเน้นการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย น้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการแปรรูปเป็นพลังงานด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่ยังไม่ผ่านขั้นตอนการกลั่นลำดับส่วน ในงานวิจัยได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกแบบผสม น้ำมันจากขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผลิตจากฝาขวดและน้ำมันจากขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนเทอร์พทาเลตที่ผลิตจากขวดใส เพื่อทำการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวชนิดสี่จังหวะโดยไม่มีการปรับแต่งเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 1,500 รอบต่อนาที ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระกรรมของเครื่องยนต์ และทำการทดสอบการใช้งานระยะยาวจำนวน 200 ชั่วโมงการทำงานเพื่อศึกษาผลของการสึกหรอของชิ้นส่วนต่างๆ ภายในเครื่องยนต์

จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติกพบว่าคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญของน้ำมันขยะพลาสติกดีด้อยกว่าน้ำมันดีเซลที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ในหลายๆ ปัจจัย เช่น ค่าดัชนีซีเทน ความหนืดจลนศาสตร์ความหนาแน่น และค่าความร้อนเชื้อเพลิง ผลจากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์พบว่า ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของน้ำมันขยะพลาสติกมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซลทุกภาระกรรมและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

เนื่องจากการเผาไหม้ของน้ำมันขยะพลาสติกจากกระบวนการไพโรไลซิสมีคุณลักษณะที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซลเนื่องมาจากองค์ประกอบทางเคมีที่ค่อนข้างแตกต่างกัน เพื่อเป็นการศึกษาคุณลักษณะของการเผาไหม้ งานวิจัยจึงได้มีการศึกษาถึงผลของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์อัตราส่วนกำลังอัดแปรผัน จากผลการทดสอบกับเครื่องยนต์อัตราส่วนกำลังอัดแปรผันที่ความเร็วรอบคงที่ 1,500 รอบต่อนาที ภาระกรรม 25% 50% และ 75% ของกำลังสูงสุด และทดสอบที่อัตราส่วนการอัด 16:1 17:1 และ 18:1 พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนการอัดส่งผลต่อ

สมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลและน้ำมันผสมมีการประสิทธิภาพที่ดีขึ้น อีกทั้งการเพิ่มอัตราส่วนการอัดยังสามารถปรับปรุงความล่าช้าจุดระเบิดของน้ำมันให้สั้นลงได้ เมื่อพิจารณาความดันในกระบอกสูบสูงสุดและอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดของน้ำมันขยะพลาสติกแสดงให้เห็นว่า น้ำมันจากขยะพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลต มีความล่าช้าในการจุดระเบิดค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามในน้ำมันขยะพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง พบว่าคุณลักษณะการเผาไหม้มีลักษณะใกล้เคียงกับการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลโดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาผลของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากพลาสติกขวดใสประเภทโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลตผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 10%, 20%, 30% และ 50% กับเครื่องยนต์ พบว่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเชื้อเพลิงที่ส่งผลต่อโดยตรงการเผาไหม้ จากผลการทดสอบมลพิษไอเสียพบว่าน้ำมันขยะพลาสติกมีปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตาม พบว่าการใช้เครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนกำลังอัดที่สูงขึ้นจะเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนของเบรกและลดความล่าช้าในการจุดระเบิด ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพความร้อนของเบรกและการปล่อยมลพิษ

แหล่งที่มาของขยะพลาสติกที่แตกต่างกันส่งผลโดยตรงต่อองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมัน ในกรณีที่ไม่ได้มีการควบคุมแหล่งที่มาของขยะพลาสติกที่จะนำมาผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงจำเป็นต้องใช้กระบวนการกลั่นลำดับส่วนเพื่อควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงที่สกัดได้จากน้ำมันพลาสติกให้มีคุณสมบัติพื้นฐานใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล การนำน้ำมันขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผลิตจากฝาขวดหรือน้ำมันจากขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลตจากขวดใสมาใช้กับเครื่องยนต์ที่ไม่มีการปรับแต่งยังขาดความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ จากเหตุปัจจัยทางด้านราคาต้นทุนของขยะพลาสติก ขณะที่การนำน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมที่ไม่ผ่านการกลั่นมาใช้ในเครื่องยนต์ระยะยาวยังพบปัญหาหลายประการ เช่น การสึกหรอของชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์ที่สูง และส่งผลต่อคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นในเครื่องยนต์ซึ่งอาจส่งผลต่อความเสียหายของเครื่องยนต์หากไม่มีการปรับปรุงชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์หรือคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกให้มีความเหมาะสม

สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 

KHATHA WATHAKIT : UTILIZATION OF WASTE PLASTIC OIL AS FUEL IN AN UNMODIFIED SINGLE CYLINDER DIESEL ENGINE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. JIRAPHON SRISERTPOL, Ph.D., 182 PP.

Keywords: ALTERNATIVE FUEL/WASTE PLASTIC OIL/SINGLE CYLINDER DIESEL ENGINE

This research study investigates the effects of using waste plastic oil on engine performance, combustion characteristics, emissions and long-term operation for unmodified single cylinder diesel engines using fuel derived from plastic waste. The study focuses on comparing the basic physical and chemical properties of the fuel, engine performance, combustion characteristics and exhaust emissions of waste plastic oil that has been converted to energy through the pyrolysis process without fractional distillation. The research examines the physical and chemical properties of blended waste plastic oil, high-density polyethylene (HDPE) bottle cap plastic and polyethylene terephthalate (PET) bottle plastic. An unmodified 4-stroke single cylinder diesel engine was tested at a constant engine speed of 1,500 revolutions per minute under varying engine load conditions. Long-term operation tests of 200 working hours are also conducted to study the effects of wear on various engine components.

From the test results of the waste plastic oil's fuel properties, it was found that the significant fundamental physical and chemical properties of waste plastic oil are inferior to commercially available diesel fuel in several aspects, such as cetane index, kinematic viscosity, density, and heating value. The engine performance tests revealed that the brake specific fuel consumption (BSFC) of waste plastic oil is higher than that of diesel fuel under all load conditions, and the brake thermal efficiency (BTE) is lower when compared to diesel fuel.

Due to the combustion characteristics of waste plastic oil from the pyrolysis process being different from diesel fuel, resulting from their distinct chemical compositions, this research study examines the combustion properties and effects of using waste plastic oil as fuel in variable compression ratio engines. From the test results with variable compression ratio engines at a constant speed of 1,500 rpm and load levels of 25%, 50%, and 75% of maximum power, and at compression ratios of

16:1, 17:1 and 18:1 it was found that increasing the compression ratio improved the performance of engines using diesel fuel and blended oil. Moreover, increasing the compression ratio could also reduce the ignition delay of the fuel. When considering the maximum cylinder pressure and maximum heat release rate of waste plastic oil, it was observed that the polyethylene terephthalate (PET) bottle plastic oil had a considerably longer ignition delay. However, in waste plastic oil produced from high-density polyethylene (HDPE) bottle cap plastic, it was found that the combustion characteristics of the waste plastic oil from bottle caps are similar to those of diesel fuel without engine modification. Furthermore, this research also investigated the effects of using polyethylene terephthalate (PET) bottle waste plastic oil blended with diesel fuel at ratios of 10%, 20%, 30%, and 50% on engine performance. It was found that the mixed fuel increase the BSFC and BTE, which can be attributed to the physical and chemical properties of the fuel directly affecting combustion. The results of exhaust emission measurements showed that waste plastic oil has higher amounts of nitrogen oxides (NO_x), hydrocarbons (HC), and carbon monoxide (CO) than diesel fuel. However, it was found that using engines with higher compression ratios increase brake thermal efficiency and reduces the ignition delay, which directly contributes to improved brake thermal efficiency and emissions.

The different sources of plastic waste directly affect the chemical composition of the oil. In cases where there is no control over the source of plastic waste used for fuel production, a fractional distillation process is necessary to control the chemical composition of the fuel oil obtained from the plastic waste, ensuring its basic properties are similar to diesel fuel. Using high-density polyethylene or polyethylene terephthalate waste plastic oil in unmodified engines is not economically viable due to the cost factors of waste plastic. Meanwhile, using unrefined waste plastic oil blends in engines in the long term has been found to cause various problems, such as increased wear and tear of engine components and affecting the properties of the engine lubricant oil. This may lead to engine damage if the components of the engine or the quality of the waste plastic oil are not appropriately improved.

School of Mechatronics Engineering
Academic Year 2022

Student's Signature.....*Kuwatnit*.....

Advisor's Signature.....*Sirapol J.*.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับโอกาสและความกรุณาอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ ทั้งในด้านวิชาการ การดำเนินการวิจัย การใช้ชีวิตและการทำงาน ตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำ ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ ขอบกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อัจหาญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรษา ลิบลับ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้และข้อมูลด้านวิชาการสำหรับการดำเนินการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรงค์ สุขจิต อาจารย์ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ด้าน วิชาการสำหรับการดำเนินการวิจัยและสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัยมาโดย ตลอด

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล และ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ สำหรับดำเนินการวิจัย รวมถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณ ว่าที่ร้อยตรี ดร.สมเกียรติ หมายถมกลาง นายนิติ กลิ่นแก้ว และน้อง ๆ ทีมงาน นักวิจัยที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณภรรยาและครอบครัวที่เข้าใจและเป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด และเป็น แรงผลักดันที่สำคัญให้แก่ผู้วิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จลุล่วงไปด้วยดี

ศธา วาทกิจ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	5
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง.....	6
2.1.1 ความถ่วงจำเพาะ.....	6
2.1.2 ความหนืดจลนศาสตร์.....	6
2.1.3 ช่วงอุณหภูมิการกลั่น.....	7
2.1.4 จุดวาบไฟ.....	8
2.1.5 จุดไหลเท.....	8
2.1.6 ปริมาณกำมะถัน.....	8
2.1.7 การกัดกร่อนแผ่นทองแดง.....	8
2.1.8 ปริมาณน้ำและตะกอน.....	8
2.1.9 กากถ่านหรือกากคาร์บอน.....	9

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.10 ปริมาณเก่า.....	9
2.1.11 สี.....	9
2.1.12 เลขซีเทนและดัชนีซีเทน.....	9
2.1.13 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง.....	10
2.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะของเครื่องยนต์.....	11
2.2.1 แรงบิด.....	11
2.2.2 กำลังเบรก.....	12
2.2.3 ความดันประสิทธิผลผลเฉลี่ย.....	12
2.2.4 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ.....	13
2.2.5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน.....	13
2.2.6 ความดันในกระบอกสูบ.....	14
2.2.7 อัตราการปลดปล่อยความร้อน.....	15
2.2.8 สัมประสิทธิ์ของความแปรผัน.....	17
2.3 น้ำมันขยะพลาสติก.....	17
2.3.1 การเตรียมวัตถุดิบสำหรับผลิตน้ำมันขยะพลาสติก.....	18
2.3.2 เทคโนโลยีการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติก.....	19
2.3.3 กระบวนการไพโรไลซิส.....	24
2.3.4 สมรรถนะของเครื่องยนต์และคุณลักษณะการเผาไหม้.....	27
2.3.5 มลพิษไอเสียของเครื่องยนต์.....	28
2.3.6 การปรับแต่งเครื่องยนต์เพื่อใช้งานกับน้ำมันขยะพลาสติก.....	29
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
3.1 กรอบการดำเนินการวิจัย.....	32
3.2 การตรวจวัดคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง.....	34
3.2.1 ความถ่วงจำเพาะและความถ่วงเอพีไอ.....	34
3.2.2 ความหนืดจลนศาสตร์.....	34
3.2.3 อุณหภูมิการกลั่น.....	34
3.2.4 จุดวาบไฟ.....	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.5	ดัชนีซีเทน.....35
3.2.6	ค่าความร้อนเชื้อเพลิง.....36
3.2.7	องค์ประกอบทางเคมี.....36
3.3	การผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติก.....38
3.3.1	น้ำมันขยะพลาสติกแบบผสม.....38
3.3.2	น้ำมันจากขยะพลาสติกประเภทขวดและฝาขวดพลาสติก.....39
3.4	เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ.....41
3.4.1	เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยว.....41
3.4.2	เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวอัตราส่วนกำลังอัดแปรผัน.....44
3.4.3	ไดนาโมมิเตอร์.....45
3.4.4	เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย.....47
3.4.5	ชุดเครื่องมือวิเคราะห์การเผาไหม้ในเครื่องยนต์.....52
3.5	การติดตั้งและทดสอบเครื่องยนต์.....53
3.5.1	การติดตั้งและการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวทางการเกษตร.....53
3.5.2	การติดตั้งและทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยว อัตราส่วนกำลังอัดแปรผัน.....54
3.5.3	การทดสอบระยะยาวเพื่อดูการสึกหรอของเครื่องยนต์.....57
3.6	การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....59
3.6.1	การวิเคราะห์ผลการตรวจวัดคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง.....59
3.6.2	การวิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์.....59
3.6.3	การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณลักษณะการเผาไหม้.....59
3.6.4	การวิเคราะห์ผลการทดสอบตรวจวัดการปล่อยมลพิษไอเสีย.....60
4	ผลกระทบของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกแบบผสมจากกระบวนการไพโรไลซิส
	ต่อสมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษของเครื่องยนต์.....61
4.1	บทนำ.....61
4.2	วิธีดำเนินการวิจัย.....61
4.3	ผลการทดสอบและอภิปรายผล.....63

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
4.3.1	คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง.....	63
4.3.2	องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง.....	64
4.3.3	สมรรถนะของเครื่องยนต์.....	69
4.3.4	คุณลักษณะการเผาไหม้.....	71
4.3.5	มลพิษไอเสีย.....	73
4.4	สรุปผลการวิจัย.....	82
5	ผลกระทบของการใช้น้ำมันขยะจากพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ต่อสมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษของเครื่องยนต์.....	80
5.1	บทนำ.....	80
5.2	วิธีดำเนินการวิจัย.....	81
5.3	ผลการทดสอบและอภิปรายผล.....	82
5.3.1	คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง.....	82
5.3.2	องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง.....	86
5.3.3	สมรรถนะของเครื่องยนต์.....	95
5.3.4	คุณลักษณะการเผาไหม้.....	97
5.3.5	มลพิษไอเสีย.....	101
5.4	ปัจจัยเชิงเศรษฐศาสตร์ที่มีผลต่อการเลือกใช้วัสดุดิบในการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติก.....	106
5.5	สรุปผลการวิจัย.....	107
6	ผลการทดสอบระยะยาวของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม.....	109
6.1	ผลการทดสอบระยะยาว.....	109
6.1.1	คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง.....	109
6.1.2	ผลการทดสอบแรงบิดของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม.....	111
6.1.3	ผลการตรวจสอบน้ำมันเครื่อง.....	114
6.1.4	ผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น.....	119

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2 ผลการวัดชิ้นส่วนและชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนเครื่องยนต์ก่อน และหลังการทดสอบระยะยาว.....	122
6.2.1 ผลการชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนในเครื่องยนต์.....	122
6.2.2 ผลการวัดระยะช่องว่างแหวนลูกสูบในเครื่องยนต์ก่อน และหลังการทดสอบระยะยาว.....	124
6.2.3 ผลการวัดระยะของวาล์วไอดีและไอลีในเครื่องยนต์ก่อน และหลังการทดสอบระยะยาว.....	126
6.2.4 ผลการถ่ายรูปชิ้นส่วนก่อนและหลังการทดสอบระยะยาว ของเครื่องยนต์.....	127
6.3 สรุปผลการวิจัย.....	133
7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	136
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	136
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	137
รายการอ้างอิง.....	139
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล.....	144
ภาคผนวก ข. ผลการตรวจวิเคราะห์น้ำมันเครื่อง.....	148
ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	150
ประวัติผู้เขียน.....	182

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	การวิเคราะห์แบบประมาณของพลาสติก..... 19
2.2	กระบวนการไพโรไลซิสภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ..... 23
2.3	องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติก..... 25
2.4	คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติก..... 26
2.5	สรุปผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำมันขยะพลาสติก..... 31
3.1	ข้อมูลสภาวะการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี..... 37
3.2	ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยว..... 43
3.3	ข้อมูลการทดสอบปั้มน้ำ..... 44
3.4	ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวแบบแปรผันอัตราส่วนกำลังอัด..... 45
3.5	ข้อมูลจำเพาะของของไดนาโมมิเตอร์ชนิดใช้น้ำเป็นตัวเบรก..... 46
3.6	ข้อมูลจำเพาะของไดนาโมมิเตอร์ใช้กระแสเหนี่ยวนำ..... 47
3.7	ข้อมูลด้านเทคนิคและข้อมูลทั่วไปของเครื่องมือวัด TESTO รุ่น TESTO 308..... 49
3.8	ข้อมูลจำเพาะของเครื่องมือวัด TESTO รุ่น TESTO 350..... 50
3.9	ข้อมูลจำเพาะของเครื่องมือวัด HORIBA รุ่น MEXA-584L..... 51
3.10	ข้อมูลทั่วไปของเครื่องมือวัดควินด้า MAHA รุ่น MDO 2 LON..... 51
3.11	ข้อมูลจำเพาะเครื่องมือวิเคราะห์การเผาไหม้..... 52
3.12	ตารางซ่อมบำรุงเครื่องยนต์ตามคำแนะนำบริษัท..... 59
4.1	การกำหนดรหัสน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ..... 62
4.2	คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ..... 64
4.3	องค์ประกอบของน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกที่ใช้ในการทดสอบ..... 68
4.4	สัดส่วนเปอร์เซ็นต์พื้นที่ใต้กราฟขององค์ประกอบน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล และน้ำมันขยะพลาสติกที่ใช้ในการทดสอบ..... 69
5.1	การกำหนดรหัสน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ..... 81
5.2	คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ..... 85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.3	ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันดีเซล.....89
5.4	ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใส (WPOB).....90
5.5	ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีน้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวด (WPBCO).....93
5.6	สัดส่วนเปอร์เซ็นต์พื้นที่ได้กราฟขององค์ประกอบน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล และน้ำมันขยะพลาสติกที่ใช้ในการทดสอบ.....95
6.1	คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ.....110
6.2	อนุภาคเศษโลหะปนเปื้อนขนาดเล็กที่เวลา 20, 100 และ 200 ชั่วโมงการทำงาน.....115
6.3	อนุภาคเศษโลหะปนเปื้อนขนาดใหญ่ที่เวลา 20, 100 และ 200 ชั่วโมงการทำงาน.....116
6.4	คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ช่วงเวลา 20, 100 และ 200 ชั่วโมงการทำงาน.....121
6.5	ผลการชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบระยะยาว 200 ชั่วโมง ของน้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO).....123
6.6	ผลรวมของอนุภาคโลหะขนาดเล็กและขนาดใหญ่ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล และน้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 0-200.....123
6.7	ระยะช่องว่างแหวนลูกสูบในเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบระยะยาว ในการใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง.....124
6.8	ระยะช่องว่างแหวนลูกสูบในเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบระยะยาว ในการใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) เป็นเชื้อเพลิง.....125
6.9	เปรียบเทียบผลต่างของช่องว่างแหวนลูกสูบของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล และน้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO)126
6.10	ระยะห่างวาล์วไอดีก่อนและหลังการทดสอบที่ 100 และ 200 ชั่วโมงการทำงาน ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด.....126
6.11	ระยะห่างวาล์วไอเสียก่อนและหลังการทดสอบที่ 100 และ 200 ชั่วโมงการทำงาน ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด.....127
6.12	ภาพถ่ายลูกสูบหลังการทดสอบที่ 200 ชั่วโมงการทำงานของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด.....128

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.13	ภาพถ่ายผ่าสับหลังการทดสอบที่ 200 ชั่วโมงการทำงานของเครื่องยนต์ ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด..... 129
6.14	ภาพถ่ายบ่าวาล์วไอดีหลังการทดสอบที่ 200 ชั่วโมงการทำงานของเครื่องยนต์ ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด..... 130
6.15	ภาพถ่ายบ่าวาล์วไอเสียหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมงการทำงานของเครื่องยนต์ ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด..... 130
6.16	ภาพถ่ายวาล์วไอดีหลังการทดสอบที่ 200 ชั่วโมงการทำงานของเครื่องยนต์ที่ ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด.....131
6.17	ภาพถ่ายวาล์วไอเสียหลังการทดสอบที่ 200 ชั่วโมงการทำงานของเครื่องยนต์ ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด..... 132
6.18	ภาพถ่ายหัวฉีดหลังการทดสอบที่ 200 ชั่วโมงการทำงานของเครื่องยนต์ ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด..... 133

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	อุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันดีเซล.....	7
2.2	หลักการวัดแรงบิดด้วยไดนาโมมิเตอร์.....	11
2.3	ความดันในกระบอกสูบของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด.....	14
2.4	อัตราการปลดปล่อยความร้อนในเครื่องยนต์แบบฉีดเชื้อเพลิง.....	17
2.5	กระบวนการเปลี่ยนขยะเป็นพลังงานและผลผลิตที่ได้.....	20
2.6	กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis Process).....	21
2.7	โรงงานผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกและกระบวนการไพโรไลซิส ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	22
2.8	การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกด้วยเครื่อง GC-MS.....	24
3.1	กรอบการดำเนินการวิจัย.....	33
3.2	โนโมกราฟ (Nomograph) สำหรับการหาค่าดัชนีซีเทน.....	35
3.3	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS).....	35
3.4	การผลิตน้ำมันขยะพลาสติกผสมด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	39
3.5	การผลิตน้ำมันขยะพลาสติกด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดคงที่ขนาดเล็ก.....	40
3.6	การผลิตน้ำมันขยะพลาสติกด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดคงที่ ขนาดกำลังการผลิต 100 กิโลกรัมต่อครั้ง.....	41
3.7	เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ.....	42
3.8	การติดตั้งเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวใช้ในการทดสอบระยะยาว.....	42
3.9	กราฟสมรรถนะปั้มน้ำที่ติดตั้งเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวใช้ในการทดสอบ.....	43
3.10	เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวแบบแปรผันอัตราส่วนกำลังอัดที่ใช้ในการทดสอบ.....	45
3.11	ไดนาโมมิเตอร์ชนิดใช้น้ำเป็นตัวเบรก.....	46
3.12	ไดนาโมมิเตอร์ใช้กระแสเหนี่ยวนำ.....	46
3.13	เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Flue Gas Analyzer).....	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 เครื่องมือวิเคราะห์แก๊สไอเสีย HORIBA รุ่น MEXA - 584L.....	48
3.15 เครื่องมือวัดค่าดัชนีเขม่า MAHA รุ่น MDO 2 LON.....	48
3.16 เครื่องขยายสัญญาณความดันในกระบอกสูบ.....	52
3.17 การติดตั้งเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวทางการเกษตรเข้ากับไดนาโมมิเตอร์.....	54
3.18 การติดตั้งเครื่องยนต์อัตราส่วนกำลังอัดแปรผันเข้ากับไดนาโมมิเตอร์.....	55
3.19 วิธีการปรับอัตราส่วนการอัด.....	56
3.20 ชีตแสดงอัตราส่วนการอัด.....	56
3.21 การปรับโหลดและความเร็วรอบเครื่องยนต์.....	57
4.1 % Volume Recovered ที่อุณหภูมิการกลั่นตัวของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ.....	65
4.2 GC-MS chromatogram ของน้ำมันเชื้อเพลิง.....	67
4.3 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกกับภาระกรรม.....	70
4.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกกับภาระกรรม.....	71
4.5 การเปลี่ยนแปลงของความดันในกระบอกสูบและอัตราการผลิตปล่อยความร้อน เทียบกับจังหว่องศาการหมุนเพลลาข้อเหวี่ยงเครื่องยนต์ที่สภาวะการทดสอบ ภาระกรรมและอัตราส่วนกำลังอัดค่าต่าง ๆ.....	72
4.6 การเปลี่ยนแปลงของความดันในกระบอกสูบและอัตราการผลิตปล่อยความร้อน เทียบกับจังหว่องศาการหมุนเพลลาข้อเหวี่ยงเครื่องยนต์ที่สภาวะการทดสอบ ภาระกรรม 75% และอัตราส่วนกำลังอัดค่าต่าง ๆ.....	73
4.7 ออกไซด์ของไนโตรเจนกับภาระกรรม.....	74
4.8 คาร์บอนมอนอกไซด์กับภาระกรรม.....	77
4.9 ไฮโดรคาร์บอนกับภาระกรรม.....	77
4.10 ค่าดัชนีเขม่าของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ.....	78
5.1 GC-MS chromatogram ของน้ำมันเชื้อเพลิง.....	88
5.2 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกกับภาระกรรมของเครื่องยนต์ ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวดและน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใส.....	96

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกกับภาระกรรมของเครื่องยนต์ ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวดและน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใส.....97
5.4	การเปลี่ยนแปลงของความดันในกระบอกสูบและอัตราการผลิตปล่อยความร้อน ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใส.....99
5.5	การเปลี่ยนแปลงของความดันในกระบอกสูบและอัตราการผลิตปล่อยความร้อน ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสผสมกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....100
5.6	การเปลี่ยนแปลงของความดันในกระบอกสูบและอัตราการผลิตปล่อยความร้อน ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวด.....102
5.7	ออกไซด์ของไนโตรเจนกับภาระกรรมของเครื่องยนต์ ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวดและน้ำมันขยะพลาสติก.....104
5.8	คาร์บอนมอนอกไซด์กับภาระกรรมของเครื่องยนต์ ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวดและน้ำมันขยะพลาสติก.....105
5.9	ไฮโดรคาร์บอนกับภาระกรรมของเครื่องยนต์ ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวดและน้ำมันขยะพลาสติก.....105
5.10	ค่าดัชนีเขม่ากับภาระกรรมของเครื่องยนต์ ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวดและน้ำมันขยะพลาสติก.....106
6.1	กราฟแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบระยะยาว เมื่อใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง.....112
6.2	กราฟแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบระยะยาว เมื่อใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(WPO) เป็นเชื้อเพลิง.....112
6.3	กราฟแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์ก่อนการทดสอบระยะยาว.....113
6.4	กราฟแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์หลังการทดสอบระยะยาว.....113

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

API	=	สถาบันปิโตรเลียมของอเมริกา
ASTM	=	มาตรฐานการทดสอบของสมาคมการทดสอบและวัสดุประเทศ สหรัฐอเมริกา
BSFC	=	ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก
BTE	=	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก
C	=	ธาตุคาร์บอน
CI	=	เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด
CO	=	คาร์บอนมอนอกไซด์
CO ₂	=	คาร์บอนไดออกไซด์
CO ₂	=	คาร์บอนไดออกไซด์
CWPO	=	น้ำมันขี้ชะพลูแบบผสมที่ไม่ได้ผ่านการกลั่นลำดับส่วน
D	=	ความหนาแน่น
Fe	=	ธาตุเหล็ก
FT-IR	=	ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี
GC-MS	=	แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี
H	=	ธาตุไฮโดรเจน
HC	=	ไฮโดรคาร์บอน
HDPE	=	โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง
HHV	=	ค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูง
ICE	=	เครื่องยนต์สันดาปภายใน
ICP	=	ความดันในกระบอกสูบ
ICP-AES	=	Inductively Coupled Plasma- Atomic Emission Spectrometer
LHV	=	ค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ
N	=	ธาตุไนโตรเจน
NO	=	ไนตริกออกไซด์
NO ₂	=	ไนโตรเจนไดออกไซด์
NO _x	=	ออกไซด์ของไนโตรเจน

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

O	=	ธาตุออกซิเจน
P _b	=	กำลังเบรก
PET	=	โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต
PM	=	ฝุ่นละออง
PP	=	โพลีโพรพิลีน
PQ index	=	ดัชนีปริมาณรวมของอนุภาคเล็ก (Particle quantifier index)
ppm	=	หนึ่งในล้านส่วน
PS	=	โพลิสไตรีน
Q _{HV}	=	ค่าความร้อนเชื้อเพลิง
RFS-AES	=	Rotrode Filter Spectroscopy-Atomic Emission Spectrometer
RH	=	ความชื้นสัมพัทธ์
RoHR	=	อัตราการปลดปล่อยความร้อน
S	=	ธาตุกำมะถัน
SG	=	ความถ่วงจำเพาะ
Si	=	ธาตุซิลิกา
SO ₂	=	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์
T	=	แรงบิด
V _d	=	ปริมาตรกระบอกสูบ
HDPE	=	น้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกประเภทฝาขวดพลาสติก
PET	=	น้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกประเภทขวดพลาสติก
WPO	=	น้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นลำดับส่วน
WPOB	=	น้ำมันขยะพลาสติกผลิตจากพลาสติกขวดใส ที่ไม่ได้ผ่านการกลั่นลำดับส่วน
WPBCO	=	น้ำมันขยะพลาสติกผลิตจากพลาสติกฝาขวด ที่ไม่ได้ผ่านการกลั่นลำดับส่วน

บทที่ 1

บทนำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวที่ไม่มีการปรับแต่งสำหรับนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือก โดยในบทนี้กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และสถานที่ดำเนินงานวิจัย

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวนับเป็นต้นกำลังหลักที่นำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการทำการเกษตร อาทิเช่น ใช้เป็นเครื่องต้นกำลังของเครื่องสูบน้ำ เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า รถไถเดินตาม รถบรรทุกผลิตผลทางการเกษตร ฯลฯ เนื่องมาจากข้อดีในด้านการให้กำลัง แรงบิด มีความทนทาน ตลอดจนราคาของเชื้อเพลิงที่ใช้ต่ำกว่าเครื่องยนต์ประเภทที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซโซลีน เครื่องยนต์ประเภทดังกล่าวส่วนใหญ่มีหลักการทำงานที่ไม่ซับซ้อนและอาศัยชิ้นส่วนกลไกในระบบการทำงานต่าง ๆ ของเครื่องยนต์เป็นหลัก ซึ่งทำให้ง่ายต่อการบำรุงรักษาและการซ่อมแซม โดยมีขนาดกำลังเครื่องยนต์ตั้งแต่ 3 แรงม้าไปจนถึง 20 แรงม้า

ปัจจุบันแนวโน้มในการใช้พลังงานในภาคเกษตรมีความต้องการใช้อัตราเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยพลังงานที่ใช้กันอยู่ส่วนใหญ่ในภาคการเกษตรนั้นเป็นพลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงมากกว่าพลังงานไฟฟ้า ข้อมูลในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคการเกษตรมีสัดส่วนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงประเภทดีเซลหมุนเร็วกว่า 97% จากสัดส่วนการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายในภาคการเกษตรทั้งหมด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2559) ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 3.7 ของการใช้พลังงานภายในประเทศทั้งหมด ถึงแม้สัดส่วนดังกล่าวจะไม่สูงนักแต่ราคาต้นทุนน้ำมันเชื้อเพลิงก็ยังนับเป็นปัจจัยพื้นฐานของต้นทุนในการทำการเกษตร ซึ่งทุกครั้งที่เกิดวิกฤตการณ์น้ำมัน อาทิเช่น การลดกำลังการผลิตของประเทศผู้ส่งออกน้ำมัน หรือเกิดความผันผวนของราคาน้ำมันในตลาดโลกก็จะส่งผลให้ประเทศไทยได้รับผลกระทบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงถือเป็นความต้องการพื้นฐานสำหรับการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศรวมไปถึงภาคการเกษตร

เทคโนโลยีการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis Waste Plastic Oil) เป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ในการแปรรูปจากขยะพลาสติกที่มีอยู่ในปัจจุบันให้เปลี่ยนสภาพกลับเป็นน้ำมันดิบซึ่งสามารถนำไปผ่านกระบวนการกลั่นและนำไปใช้กับเครื่องยนต์

สันดาปภายในได้โดยตรง จากข้อมูลในปี 2557 ปัจจุบันประเทศไทยมีปริมาณขยะกว่า 26.17 ล้านตัน/ปี ในจำนวนนี้มีการกำจัดแบบถูกต้องเพียงร้อยละ 19 ทำให้มีขยะมูลฝอยตกค้างสะสมสูงถึง 19.9 ล้านตัน/ปี ทั้งยังมีขยะเก่าสะสมตามหลุมขยะอีกไม่น้อยกว่า 300 ล้านตัน เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบขยะโดยทั่วไปจะประกอบด้วยขยะพลาสติกประมาณร้อยละ 18 คิดเป็นปริมาณ 3.75 ล้านตัน/ปี และอีกปริมาณ 25.79 ล้านตันจากหลุมขยะ ในส่วนนี้เป็นขยะพลาสติกประเภทภาชนะบรรจุ ขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำอัดลม และขวดเครื่องปรุงอาหารต่าง ๆ ซึ่งเป็นพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-density polyethylene, HDPE) และชนิดโพลีเอทิลีนเทเรพทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) ซึ่งมีปริมาณมากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ของขยะพลาสติกทั้งหมดที่เกิดขึ้น ส่วนที่เหลือเป็นขยะพลาสติกผสมที่ประกอบไปด้วยพลาสติกประเภท PP และ PS และ PE ซึ่งหากนำขยะพลาสติกมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจะได้เป็นปริมาณมหาศาล โดยปกติน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากการแปรรูปขยะพลาสติกจะมีอัตราการแปรรูป 500 - 600 ลิตร/ตัน ขยะพลาสติก น้ำมันที่ผลิตได้ดังกล่าวสามารถใช้ทดแทนน้ำมันเตาและน้ำมันดีเซลรอบต่ำได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปัจจัยทางด้านราคาและความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์ของการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกในเครื่องยนต์กับต้นทุนการผลิตน้ำมันจากขยะพบว่า ที่ระยะเวลาการดำเนินโครงการ 15 ปี อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ร้อยละ 6.5 ราคาขยะพลาสติกเฉลี่ยประมาณ 2,000 บาทต่อตัน และความสามารถผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกเฉลี่ยที่ 1.3 ล้านลิตรต่อปี ราคาต้นทุนน้ำมันจากขยะพลาสติกจะอยู่ที่ประมาณ 11.27 - 17.76 บาท/ลิตร (สำนักนโยบายและแผนพลังงาน, 2558) จากตัวเลขราคาต้นทุนดังกล่าวจะเห็นได้ว่าหากเปรียบเทียบกับราคาน้ำมันดิบเฉลี่ยในช่วงเดือนมกราคมถึงมิถุนายน 2558 ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 11.93 บาทต่อลิตร (57 เหรียญสหรัฐต่อบาร์เรล) ในขณะที่ต้นทุนจากการผลิตน้ำมันขยะเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 14.50 บาทต่อลิตร (69 เหรียญสหรัฐต่อบาร์เรล) ซึ่งราคาต้นทุนดังกล่าวไม่สามารถแข่งขันกับราคาน้ำมันดิบได้หากไม่ได้รับการสนับสนุนจากทางภาครัฐ ทั้งนี้ ต้นทุนต่าง ๆ ดังกล่าวขึ้นอยู่กับราคาน้ำมันดิบและปริมาณความต้องการใช้น้ำมันในตลาดโลกในช่วงเวลานั้น ๆ เป็นหลัก

นอกเหนือจากปัจจัยทางด้านราคาและความเหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์แล้ว ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกในงานวิจัยต่าง ๆ ยังแสดงให้เห็นว่าน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกที่ยังไม่ผ่านกระบวนการกลั่นสามารถนำไปใช้ทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลในเครื่องยนต์ได้โดยผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วนต่าง ๆ โดยผลการทดสอบในระยะสั้นแสดงให้เห็นว่า กำลังและสมรรถนะของเครื่องยนต์จะลดต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลลงเล็กน้อย ในขณะที่ค่ามลพิษมีปริมาณสูงขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้ในรายงานผลการวิจัยยังพบว่า ปัจจัยที่สำคัญและมีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ คือชนิดของขยะพลาสติกที่ใช้เป็นวัตถุดิบ

การใช้น้ำมันที่ผลิตจากขยะพลาสติกผสมหรือขยะพลาสติกจากวัตถุดิบประเภทขวดพลาสติก และฝาขวดพลาสติกนั้น ให้สมรรถนะและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ในระยะสั้นใกล้เคียงกันกับน้ำมันดีเซล

ทั้งนี้ ยังไม่มีรายงานถึงปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดจากผลของการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก ร่วมกับเครื่องยนต์ทางการเกษตรในระยะยาว เช่น ความเสียหายเนื่องจากการสึกหรอของชิ้นส่วนต่าง ๆ เมื่อใช้งานร่วมกับเครื่องยนต์อย่างต่อเนื่องในระยะยาว ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้อาจส่งผลต่อการตัดสินใจของผู้บริโภคในการเลือกใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงทางเลือก

หากพิจารณารูปแบบที่เหมาะสมในการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกเพื่อเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในปัจจุบันแล้วจะพบว่าการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกกับเครื่องยนต์ในภาคการเกษตรน่าจะเป็นแนวทางที่เหมาะสมกว่าการนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรม สาเหตุเนื่องมาจาก

1. ราคาและค่าซ่อมแซมบำรุงรักษาของเครื่องยนต์ ชิ้นส่วนอะไหล่ของเครื่องยนต์สำหรับการเกษตรมีราคาถูกกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์หรือภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากขนาดกำลังเครื่องยนต์ที่ต่ำกว่ารวมไปถึงไม่มีชิ้นส่วนและกลไกการทำงานที่ซับซ้อนส่งผลให้มีต้นทุนราคาชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ถูกกว่า หากเกิดความเสียหายและจำเป็นต้องเปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่ซึ่งเป็นผลจากการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิง

2. สภาพะการใช้งานของเครื่องยนต์ทางการเกษตร มีรูปแบบการใช้งานที่สภาวะโหลดค่อนข้างคงที่ เช่น การนำไปใช้เป็นต้นกำลังของเครื่องสูบน้ำหรือการผลิตกระแสไฟฟ้า ส่งผลให้ความต้องการทางด้านสมรรถนะและเสถียรภาพของเครื่องยนต์ รวมถึงข้อกำหนดทางด้านมลพิษที่เกิดขึ้นไม่เข้มงวดเท่ากับเครื่องยนต์ที่ใช้งานในเชิงพาณิชย์

3. การใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงสามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตในภาคการเกษตรเนื่องจากราคาของน้ำมันดิบที่ยังไม่ผ่านกระบวนการกลั่นจะมีราคาถูกกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลแบบหมุนเร็วที่จำหน่ายอยู่ในปัจจุบันกว่า 50 เปอร์เซ็นต์

4. การใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกช่วยแก้ปัญหาการจัดการขยะพลาสติก ช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกและเพิ่มความมั่นคงทางด้านพลังงานในภาคการเกษตรให้กับประเทศได้อีกทางหนึ่ง

การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกร่วมกับเครื่องยนต์ทางการเกษตรในระยะยาวอาจต้องพิจารณาประเด็นต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสภาวะการทำงาน อาทิเช่น การปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันจากขยะพลาสติก ความเสียหายเนื่องจากการสึกหรอของชิ้นส่วนต่าง ๆ เมื่อใช้งานร่วมกับเครื่องยนต์อย่างต่อเนื่องในระยะยาว การปรับแต่งชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ให้มีความเหมาะสมต่อการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกเพื่อให้สามารถใช้งานได้โดยมีสมรรถนะที่ใกล้เคียงกับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลโดยส่งผลกระทบต่อราคาต้นทุนการผลิตของเครื่องยนต์ให้น้อยที่สุด

จากสาเหตุและปัจจัยต่าง ๆ ดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาผลของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกที่มีต่อสมรรถนะ การเผาไหม้ มลพิษ และผลการใช้งานกับเครื่องยนต์ในระยะยาว รวมไปถึง

การพิจารณาปัจจัยทางด้านราคาและความเหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อที่จะศึกษาแนวทางที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์ทางการเกษตรในการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกซึ่งจะช่วยให้เครื่องยนต์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในระดับที่ใกล้เคียงกับเครื่องยนต์ซึ่งใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลแบบปกติ อีกทั้งยังจะเป็นการสนับสนุนให้เกิดการใช้พลังงานทางเลือกด้านการเกษตร ช่วยลดต้นทุนจากปัจจัยการผลิตให้กับเกษตรกรและยังสามารถช่วยแก้ปัญหาเรื่องการจัดการขยะและเพิ่มความมั่นคงในการจัดหาพลังงานให้ประเทศได้อีกทางหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกผสมต่อสมรรถนะการทำงาน คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวทางการเกษตร ภายใต้เงื่อนไขและสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้น้ำมันที่ผลิตจากวัตถุดิบพลาสติกฝาขวดประเภทโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและพลาสติกขวดใสประเภทโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ต่อสมรรถนะการทำงาน คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวทางการเกษตร

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกระยะยาวที่มีต่อการสึกหรอของเครื่องยนต์ทางการเกษตรและเสนอแนวใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันขยะพลาสติกที่ไม่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวทางการเกษตรโดยไม่มีการปรับแต่ง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ในการทดสอบเครื่องยนต์ระยะยาว 220 ชั่วโมง ใช้เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวทางการเกษตรแบบสี่จังหวะ ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ เพื่อดูการสึกหรอโดยทดสอบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่และไม่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด

1.3.2 ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ ใช้ไดนาโมมิเตอร์ชนิดใช้น้ำและไดนาโมมิเตอร์ชนิดใช้กระแสเหนี่ยวนำ เป็นตัวสร้างภาระกรรมให้กับเครื่องยนต์

1.3.3 ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ ภายใต้เงื่อนไขและการปรับแต่งสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ทดสอบกับเครื่องยนต์ 1 สูบแบบแปรผันอัตราส่วนกำลังอัด มีปริมาตรกระบอกสูบ ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

1.3.4 น้ำมันดีเซลที่ใช้ในการทดสอบใช้น้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ ตามมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงาน

1.3.5 ใช้วัตถุดิบประเภทขวดพลาสติก ฝาขวดพลาสติกและน้ำมันขยะพลาสติกผสมที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจากโรงงานแปรรูปขยะเป็นน้ำมันของศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3.6 ตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีภายใต้มาตรฐานการทดสอบของสมาคมการทดสอบและวัสดุประเทศสหรัฐอเมริกา (ASTM)

1.3.7 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะของเครื่องยนต์สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก

1.3.8 ตรวจสอบคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ได้แก่ ความดันในกระบอกสูบ อัตราการปลดปล่อยความร้อนและสัมประสิทธิ์ความแปรผันของความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้

1.3.9 ตรวจสอบการปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอน (HC) ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และควันดำ (Smoke)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันจากขยะพลาสติกจากกระบวนการไพโรไลซิสที่ไม่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนของน้ำมันที่ผลิตจากขยะพลาสติกผสมและขยะพลาสติกจากวัตถุดิบประเภทขวดพลาสติก ฝาขวดพลาสติก

1.4.2 ทราบถึงผลกระทบในด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์สูบเดี่ยวทางการเกษตรที่ใช้น้ำมันที่ผลิตจากขยะพลาสติกผสมและขยะพลาสติกฝาขวดประเภทโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงและพลาสติกขวดใสประเภทโพลีเอทิลีนเทเรพทาเลต

1.4.3 ทราบถึงแนวทางในการนำน้ำมันขยะพลาสติกไปใช้เป็นพลังงานทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลทางการเกษตรโดยไม่มีการปรับแต่งได้อย่างเหมาะสม

1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

1.5.1 อาคารเครื่องมือ 4 (F4) อาคารเครื่องมือ 5 (F5) และอาคารเครื่องมือ 10 (F10) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5.2 อาคารปฏิบัติการพื้นฐานด้านวิศวกรรมศาสตร์ (F11) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5.3 ห้องปฏิบัติการศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะของเครื่องยนต์ งานวิจัยที่ผ่านมาจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด การผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติก คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติก สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย

2.1 คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง

ความสำคัญของคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยในการประเมินคุณภาพเชื้อเพลิงจากผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการแปรรูปเพื่อใช้ในกระบวนการต่าง ๆ นอกจากพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีแล้ว ต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อประเมินผลจากการนำเชื้อเพลิงดังกล่าวไปใช้งานอย่างเหมาะสมด้วย โดยคุณสมบัติดังกล่าว ได้แก่

2.1.1 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, SG) คือ อัตราความหนาแน่นของสารต่อความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ที่มีปริมาตรเท่ากันและที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D1298 ซึ่งเป็นการวัดความหนักเบาของน้ำมันที่อุณหภูมิ 15.6 องศาเซลเซียส ถ้าน้ำมันหนักมากค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักจะลดลง ค่าซีเทนจะลดลงทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และเกิดเป็นเขม่าคาร์บอนสะสมได้มาก

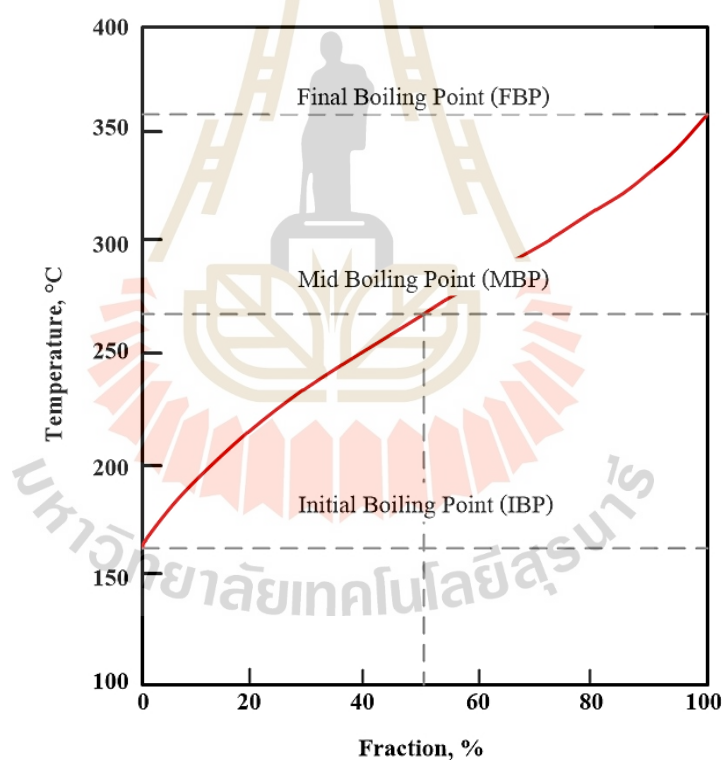
2.1.2 ความหนืดจลนศาสตร์

ความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic Viscosity) เป็นค่าที่วัดความต้านทานของน้ำมันเชื้อเพลิงต่อการไหล โคนคำนวณจากอัตราส่วนของความหนืดพลวัต (Dynamic Viscosity) ต่อความหนาแน่นของของไหล ตามมาตรฐาน ASTM D445 ความหนืดจลนศาสตร์เป็นคุณสมบัติสำคัญของน้ำมันเชื้อเพลิงเพราะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ฉีดเชื้อเพลิง ที่อุณหภูมิต่ำค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้มุมกระจายสเปรย์และการกระจายตัวของน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นละอองลดลง ดังนั้น ความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิงต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบฉีดเชื้อเพลิงสามารถสร้างฝอยละอองที่ละเอียด หากความหนืดสูงเกินไปจะทำให้ฝอยละอองกระจายได้ไม่ดี แต่หากความหนืดต่ำเกินไปอาจจะทำให้หัวฉีดไม่สามารถทำงานได้และอาจทำให้เสียหายกับ

อุปกรณ์ฉีดเชื้อเพลิง การระบุค่าความหนืดจลนศาสตร์จำเป็นต้องระบุควบคู่กับอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ

2.1.3 ช่วงอุณหภูมิการกลั่น

ช่วงอุณหภูมิการกลั่น (Distillation) คือ อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้ 90 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร โดยทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D86 เช่น อุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันดีเซล ดังรูปที่ 2.1 อุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันดีเซลโดยทั่วไปอยู่ในช่วงประมาณ 250 – 350 องศาเซลเซียส (482 – 662 องศาฟาเรนไฮต์) ขึ้นอยู่กับสมบัติของน้ำมันดีเซลและกระบวนการกลั่นที่ใช้ การกลั่นเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกส่วนประกอบของน้ำมันดีเซลจากน้ำมันดิบโดยอาศัยความแตกต่างของจุดเดือดของส่วนประกอบต่าง ๆ ในน้ำมันดิบ การกลั่นทำให้สามารถสกัดน้ำมันดีเซลที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับใช้ในเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยการอัดได้



รูปที่ 2.1 อุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันดีเซล
(N.K. Giri, 2011)

2.1.4 จุดวาบไฟ

จุดวาบไฟ (Flash Point) คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่สารเคมีหรือน้ำมันเชื้อเพลิงจะได้รับความร้อนจนระเหยกลายเป็นไอ และลุกติดไฟขึ้นเมื่อถูกเปลวไฟ โดยทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D93 จุดวาบไฟถือเป็นปัจจัยที่สำคัญในการประเมินความปลอดภัยของสารเคมีหรือน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับน้ำมันดีเซล จุดวาบไฟอยู่ในช่วงประมาณ 52-96 องศาเซลเซียส (126- 205 องศาฟาเรนไฮต์) ขึ้นอยู่กับสมบัติของน้ำมันดีเซล จุดวาบไฟไม่มีผลโดยตรงต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ การทราบจุดวาบไฟเป็นสิ่งสำคัญเพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุจากไฟไหม้หรือการระเบิดที่อาจเกิดขึ้นจากการจัดเก็บหรือใช้งานน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นๆ

2.1.5 จุดไหลเท

จุดไหลเท (Pour Point) คือ คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันเชื้อเพลิงหรือสารเคมียังสามารถไหลได้ ณ ความดันปกติ ขณะที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดไหลเท น้ำมันเชื้อเพลิงหรือสารเคมีจะเริ่มเข้าสู่สภาพข้น ทำให้การไหลลำบากและส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์หรืออุปกรณ์ที่ใช้ น้ำมันเชื้อเพลิง จุดไหลเทสำคัญสำหรับการใช้งานน้ำมันเชื้อเพลิงในสภาพอากาศที่ติดลบ เพราะหากน้ำมันเชื้อเพลิงมีจุดไหลเทสูงเกินไป อาจทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงแข็งและทำให้เครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานได้ ในกรณีของน้ำมันดีเซล จุดไหลเทอยู่ในช่วงประมาณ -20 ถึง 10 องศาเซลเซียส (-4 ถึง 50 องศาฟาเรนไฮต์) ขึ้นอยู่กับคุณภาพและสมบัติของน้ำมันดีเซล

2.1.6 ปริมาณกำมะถัน

ปริมาณกำมะถัน (Sulphur Content) คือ ปริมาณกำมะถันที่เกิดขึ้นในน้ำมันดีเซลเมื่อเกิดการเผาไหม้กับอากาศจะกลายเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ซึ่งปริมาณกำมะถันที่สูงเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ เนื่องจากซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เกิดการรวมตัวกันกับน้ำกลายเป็นกรดกำมะถันกัดกร่อนเครื่องยนต์ส่งผลทำให้เครื่องยนต์เกิดการสึกหรอ โดยปริมาณกำมะถันทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D5453

2.1.7 การกัดกร่อนแผ่นทองแดง

การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion) คือ การวัดการกัดกร่อนแผ่นทองแดงที่เกิดจากน้ำมันเชื้อเพลิง เพื่อดูการกัดกร่อนของน้ำมันเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ที่จะส่งผลต่อระบบทางเดินน้ำมัน ซึ่งอาจเกิดการกัดกร่อนและสึกหรอได้จากปริมาณกำมะถัน โดยทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D130

2.1.8 ปริมาณน้ำและตะกอน

ปริมาณน้ำและตะกอน (Water and Sediment) เป็นการทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D2709 โดยปริมาณน้ำจะทำให้เกิดตะกอนในเครื่องยนต์ และจะขัดขวางการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงจากถังเก็บไปยังห้องเผาไหม้ ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนภายในถังบรรจุและอุปกรณ์เชื่อมต่อ

ต่าง ๆ ถ้ามีเกินมาตรฐานจะเป็นผลทำให้เกิดการอุดตันที่หม้อกรองน้ำมันได้ ซึ่งการมีน้ำอยู่เป็นอันตรายต่อระบบปั๊มเชื้อเพลิงและหัวฉีดได้ เพราะเป็นบริเวณที่ไม่มีคุณสมบัติการหล่อลื่น

2.1.9 กากถ่านหรือกากคาร์บอน

กากถ่านหรือกากคาร์บอน (Carbon Residue) คือ สิ่งตกค้างที่เป็นคาร์บอนที่เหลืออยู่หลังจากน้ำมันเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ในเครื่องยนต์ กากคาร์บอนมักเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันเชื้อเพลิง ทำให้คาร์บอนสะสมอยู่บนส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์ เช่น วาล์ว, หัวสูบ, หัวฉีดเชื้อเพลิง กากคาร์บอนที่สะสมเป็นปัญหาสำหรับเครื่องยนต์เพราะสามารถส่งผลให้เกิดการสึกหรอ, การเสียหายของอุปกรณ์, การทำงานที่ไม่มีประสิทธิภาพการวัดปริมาณสารคาร์บอนที่เหลือตกค้างหลังการเผาไหม้ทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D524 ซึ่งคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.1

$$\text{Carbon Residue} = \frac{A \times 100}{W} \quad (2.1)$$

โดยที่ A คือ มวลของกากถ่านหรือกากคาร์บอน (กรัม)
W คือ มวลของตัวอย่างทดสอบ (กรัม)

2.1.10 ปริมาณเถ้า

ปริมาณเถ้า (Ash) คือ ปริมาณสารอนินทรีย์ต่าง ๆ ที่เหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้หมด โดยทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D482 ซึ่งถ้าในน้ำมันดีเซลอาจจะอยู่ในรูปของแข็งหรือสบู่จำพวกโลหะ (Metallic Soap) ที่ละลายน้ำมันได้ ในส่วนที่อยู่ในรูปของแข็งอาจส่งผลทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนผิวโลหะของเครื่องยนต์ และส่วนที่เป็นสารประเภทสบู่จำพวกโลหะที่ละลายน้ำมันได้จะทำให้เกิดคราบตะกอนเกาะติด ในเครื่องยนต์

2.1.11 สี

สี (Color) โดยทั่วไปน้ำมันดีเซลมีสีขุ่นหรือบางครั้งสีอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปบ้างขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำมันดิบที่นำมาผ่านกระบวนการกลั่น ซึ่งสีไม่ได้เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการพิจารณาคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง แต่ได้ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM D1500 เพื่อควบคุมการปนเปื้อนกับน้ำมันเตา

2.1.12 เลขซีเทนและดัชนีซีเทน

เลขซีเทน (Cetane Number) คือ ค่าที่ใช้ในการวัดคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงในด้านของคุณสมบัติการติดไฟ บ่งบอกถึงความสามารถในการติดไฟของน้ำมันดีเซล เมื่อเปรียบเทียบกับสารอ้างอิง คือ แอลฟาเมทิลแนฟทาลีน (Alpha Methyl naphthalene) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเลข

ซีเทนเท่ากับ 0 และ นอร์มอลซีเทน (Cetane (n-hexadecane)) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเลขซีเทนเท่ากับ 100 ในทั่วไป น้ำมันดีเซลที่มีเลขซีเทนหรือดัชนีซีเทนสูงจะทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น ลดการสั่นสะเทือน ลดเสียงดัง และเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งน้ำมันเชื้อเพลิงที่เลือกใช้ควรมีค่าเลขซีเทนที่เหมาะสมกับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ซึ่งจะช่วยให้เครื่องยนต์ได้ง่าย ไม่เกิดการน็อก (Knock) ของเครื่องยนต์ ปกติแล้วน้ำมันดีเซลที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีค่าเลขซีเทนอยู่ในช่วงประมาณ 40 - 60

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบหาค่าตัวเลขซีเทนของน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นใช้เครื่องยนต์มาตรฐานชนิดสูบเดี่ยวที่สามารถปรับอัตราส่วนการอัดตัวได้ โดยวิธีการทดสอบนั้นจะนำน้ำมันเชื้อเพลิงที่ต้องการหาค่าเลขซีเทนมาทำการเดินเครื่องยนต์มาตรฐานชนิดสูบเดี่ยว แล้วจึงนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิงมาตรฐานที่มีส่วนผสมของนอร์มอลซีเทนกับแอลฟาเมทิลแนพธาลิน

โดยค่าเลขซีเทนของน้ำมันเชื้อเพลิงยังมีค่าสูงนั้นก็หมายความว่าช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิดของน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นยังมีค่าต่ำหรือสามารถที่จะติดไฟได้ง่ายนั่นเอง ถ้าน้ำมันเชื้อเพลิงมีค่าเลขซีเทนต่ำกว่า 40 เมื่อเกิดการเผาไหม้ในเครื่องยนต์จะทำให้เกิดควันไอเสียในปริมาณมาก แต่เนื่องจากการวัดค่าเลขซีเทนต้องใช้เครื่องยนต์ดีเซลมาตรฐานสูบเดี่ยวของ CFR Engine เปรียบเทียบคุณภาพในการจุดติดไฟกับเชื้อเพลิงมาตรฐานซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงมาก และสิ้นเปลืองเวลาในการทดสอบ ดังนั้น จึงนิยมใช้วิธีคำนวณออกมาเป็นค่าดัชนีซีเทนแทน (Calculated Cetane Index : CCI) หรือสามารถอ่านค่าดัชนีซีเทนได้จากโนโมกราฟ (Nomograph) คำนวนจากสมบัติทางกายภาพของน้ำมันดีเซล เช่น ความหนาแน่นและความหนืด ดัชนีซีเทนเป็นวิธีการประเมินเลขซีเทนโดยไม่ต้องทำการทดสอบทางห้องปฏิบัติการ

2.1.13 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Heating Value : HV) คือ ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากเชื้อเพลิงต่อหนึ่งหน่วยมวล โดยทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D240 ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีของเชื้อเพลิงในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ หมายถึง คาร์บอนทั้งหมดถูกเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนทั้งหมดถูกเปลี่ยนไปเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทั้งนี้ ค่าความร้อนเชื้อเพลิงดังกล่าวนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- 1) ค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value : HHV) คือ ค่าปริมาณพลังงานความร้อนที่ถูกปลดปล่อยออกจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีการสันดาปอย่างสมบูรณ์ และสารจากการเผาไหม้มีอุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิเริ่มต้นอีกครั้ง น้ำที่มีอยู่ในสารจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะกลั่นตัวอยู่ในสถานะของเหลว

- 2) ค่าความร้อนต่ำ (Lower Heating Value : LHV) คือ ค่าปริมาณพลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ น้ำที่มีอยู่ในสาร

จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะอยู่ในสถานะไอ ซึ่งสามารถคำนวณค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงได้จากสมการที่ 2.2 (ชัยยง ศิริพรมงคชชัย, 2558)

$$\text{LHV} = \text{HHV} - (\dot{m}_f) h_{fg} \quad (2.2)$$

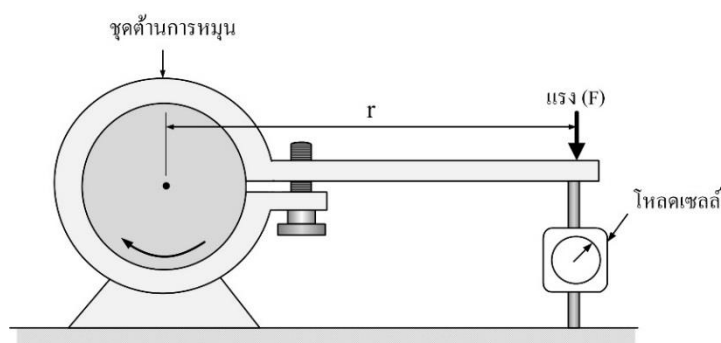
โดยที่	LHV	คือ	ค่าความร้อนต่ำ (kJ/kg)
	HHV	คือ	ค่าความร้อนสูง (kJ/kg)
	\dot{m}_f	คือ	มวลของน้ำในสารจากการเผาไหม้ต่อ 1 หน่วยมวลเชื้อเพลิง (kg/kg _{fuel})
	h_{fg}	คือ	เอนทัลปีของการกลายเป็นไอที่อุณหภูมิการเผาไหม้ขณะนั้น (kJ/kg)

2.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องจักรที่ใช้แปลงพลังงาน โดยนำพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงมาเปลี่ยนเป็นพลังงานกล ซึ่งให้กำลังออกมาในรูปของแรงบิด เพื่อนำไปใช้ในการขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่าง ๆ ตัวแปรที่บ่งบอกถึงสมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์ที่เกี่ยวข้องและกล่าวถึงมีดังนี้

2.2.1 แรงบิด

แรงบิด (Torque) เป็นปัจจัยสำคัญที่บ่งบอกถึงความสามารถในการขับเคลื่อนของเครื่องยนต์ วัดในหน่วยนิวตันเมตร (N·m) หรือ ปอนด์-ฟุต (lb-ft) แรงบิดแสดงถึงแรงกดหมุนที่เครื่องยนต์สามารถสร้างขึ้นเพื่อขับเคลื่อนยานพาหนะ รวมถึงอุปกรณ์ต่อเนืองต่าง ๆ สามารถวัดได้โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า ไดนาโมมิเตอร์ ซึ่งมีอยู่หลายประเภท เช่น ไฮดรอลิกไดนาโมมิเตอร์ หรือไดนาโมมิเตอร์แบบไฟฟ้า เป็นต้น เพื่อวัดค่าแรงบิดของเครื่องยนต์ โดยมีหลักการดังรูปที่ 2.2 สร้างภาระกรรมให้ด้านการหมุนและวัดขนาดของแรงที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องมือวัดแรง (Load Cell) และคำนวณหาแรงบิดจากสมการที่ 2.3



รูปที่ 2.2 หลักการวัดแรงบิดด้วยไดนาโมมิเตอร์

$$T = Fr \quad (2.3)$$

โดย T คือ แรงบิด (N-m)
 F คือ แรง (N)
 r คือ ระยะจากจุดกึ่งกลางของแกนหมุนถึงแนวแรง (m)

2.2.2 กำลังเบรก

กำลังเบรก (Brake Power) คือ กำลังของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นจากการวัดแรงบิดที่เพลาคือเหวี่ยงของเครื่องยนต์ โดยการวัดกำลังเบรกจะใช้ไดนาโมมิเตอร์ต่อเข้ากับเครื่องยนต์ เพื่อวัดแรงบิดของเครื่องยนต์ ซึ่งสามารถคำนวณกำลังเบรกได้จากสมการที่ 2.4

$$P_b = \frac{2p NT}{60000} \quad (2.4)$$

โดยที่ P_b คือ กำลังเบรก (kW)
 T คือ แรงบิด (N-m)
 N คือ รอบการหมุนของเพลาคือเหวี่ยง (RPM)

2.2.3 ความดันประสิทธิผลเฉลี่ย

ความดันประสิทธิผลเฉลี่ย (Mean Effective Pressure : MEP) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงสมรรถนะของเครื่องยนต์ เมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่สภาวะเดียวกัน โดยการวัดเทียบกำลังของเครื่องยนต์ต่อปริมาตรกระบอกสูบหนึ่งหน่วย เครื่องยนต์จะสามารถผลิตงานได้มากน้อยเพียงใดสำหรับเครื่องยนต์สี่ไซเคิล 4 จังหวะ แบบนำไอดีเข้าโดยธรรมชาติจะมีความดันผลเฉลี่ยสูงสุดอยู่ในช่วงประมาณ 700 - 900 kPa หากพิจารณาจากกำลังเบรกเรียกว่า ความดันยังผลเฉลี่ยเบรก (Brake Mean Effective Pressure : BMEP) ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.5

$$BMEP = \frac{P_b n_R}{V_d N} \quad (2.5)$$

โดยที่ BMEP คือ ความดันยังผลเฉลี่ยเบรก (kPa)
 V_d คือ ปริมาตรกระบอกสูบ (m^3)
 n_R คือ จำนวนรอบการหมุนของเพลาคือเหวี่ยงที่ได้กำลัง 1 ครั้งต่อสูบ

2.2.4 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption : SFC) คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยมวลต่อกำลังหนึ่งหน่วยที่ผลิตได้จากเครื่องยนต์ภายในระยะเวลาหนึ่งหน่วย (ชัยยง ศิริพรมงคชชัย, 2558) โดยการทดสอบเครื่องยนต์ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ ถูกวัดเป็นอัตราการไหลของมวล ซึ่งเครื่องยนต์ขนาดใหญ่จะมีการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมาก ดังนั้น การเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่มีขนาดแตกต่างกันในรูปแบบของความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake Specific Fuel Consumption : BSFC) ซึ่งเป็นอัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิงต่อหน่วยกำลังเบรกที่ผลิตออกมา โดยคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.6

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \quad (2.6)$$

โดยที่ BSFC คือ ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (g/kW-hr)

\dot{m}_f คือ อัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิง (kg/s)

2.2.5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency : η_{th}) คือ ความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานกล (ชัยยง ศิริพรมงคชชัย, 2558) หรือ อัตราส่วนของงานที่ส่งออกต่อพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นส่วนที่มีสำคัญอีกอย่างหนึ่งสำหรับการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดหรือเครื่องยนต์ดีเซล ทั้งนี้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสามารถที่คำนวณจากค่ากำลังเบรกเรียกว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (Brake Thermal Efficiency : η_b) ดังแสดงในสมการที่ 2.7

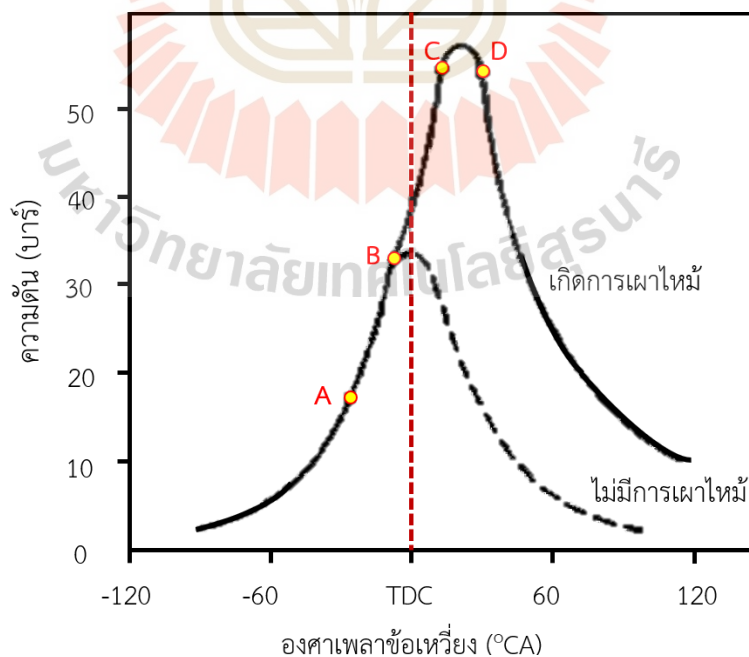
$$\eta_b = \frac{P_b}{\dot{m}_f Q_{HV}} \quad (2.7)$$

โดยที่ η_b คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก

Q_{HV} คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (kJ/kg)

2.2.6 ความดันในกระบอกสูบ

ความดันภายในห้องเผาของเครื่องยนต์ (In-cylinder pressure, ICP) คือ แรงดันที่เกิดขึ้นในส่วนของกระบอกสูบเปรียบเทียบกับองศาเพลลาการหมุนข้อเหวี่ยง ขณะเครื่องยนต์ทำงานตามวัฏจักร ทั้งในช่วงจังหวะอัดและจังหวะคาย ความดันภายในห้องเผาของเครื่องยนต์ เป็นปัจจัยสำคัญในการวิเคราะห์ลักษณะการเผาไหม้ และเป็นวิธีที่เหมาะสมในการตรวจสอบปริมาณการปล่อยพลังงานความร้อนจากพลังงานเคมีของเชื้อเพลิง การวัดนี้สามารถทำได้โดยติดตั้งเซนเซอร์ความดันเพื่อตรวจสอบแรงดันภายในห้องเผา ความดันภายในกระบอกสูบมี 2 ประเภท คือ ความดันจากการลดปริมาตรในจังหวะอัด และความดันเนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ดังรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่า กรณีที่เครื่องยนต์ไม่มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะแสดงลักษณะความดันในกระบอกสูบดังเส้นประ (สีดำ) กล่าวคือ เมื่อปริมาตรกระบอกสูบของเครื่องยนต์ลดลงมีผลให้ความดันในกระบอกสูบสูงขึ้นในจังหวะการอัดจนลูกสูบเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งจุดศูนย์ตายบน (Top dead center) และเกิดการ ลดลงของความดันในกระบอกสูบในจังหวะการคาย ทั้งนี้ กรณีที่เครื่องยนต์มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะเห็นได้ว่าความดันหลังลูกสูบหลังเคลื่อนที่ถึงจุด TDC หรือตำแหน่งจุด B ความดันในกระบอกสูบจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และเกิดการลดลงของความดันเมื่อเครื่องยนต์เข้าสู่จังหวะการคายและอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงลดลง ดังแสดงตามแนวเส้นทึบ (สีดำ)



รูปที่ 2.3 ความดันในกระบอกสูบของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (Stone, R., 2012)

2.2.7 อัตราการปลดปล่อยความร้อน

อัตราการปลดปล่อยความร้อน (Rate of Heat Release : ROHR) คือ อัตราที่พลังงานเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ของความดันในกระบอกสูบ และปริมาตรที่มุมมองศาเพลลาข้อเหวี่ยงต่าง ๆ ด้วยกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ภายใต้สมมติฐานกระบวนการโพลิโทรปิก (Polytropic) ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ 2.8

$$\frac{dQ}{dq} = \frac{g}{g-1} P \frac{dV}{dq} + \frac{1}{g-1} V \frac{dP}{dq} \quad (2.8)$$

โดยที่	Q	คือ อัตราการปลดปล่อยความร้อน
	γ	คือ อัตราส่วนของค่าความร้อนจำเพาะ (c_p/c_v)
	θ	คือ องศาเพลลาข้อเหวี่ยง ($^{\circ}\text{CA}$)
	P	คือ ความดันในห้องเผาไหม้ (Bar)
	V	คือ ปริมาตรในห้องเผาไหม้ (m^3)

การเผาไหม้เชื้อเพลิงในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ สามารถแบ่งช่วงการทำงานได้เป็น 4 ระยะ ได้แก่ (1) ช่วงตำแหน่งจุด A-B เป็นช่วงความล่าช้าการจุดระเบิด (ตำแหน่งจุด A คือ การเริ่มต้นของการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้) (2) ช่วงตำแหน่งจุด B-C ช่วงการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (3) ช่วงตำแหน่งจุด C-D ช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุม และ (4) ตำแหน่งจุด D จุดสิ้นสุดการเผาไหม้ ดังรูปที่ 2.4 โดยมีรายละเอียดกระบวนการที่เกิดขึ้นดังนี้

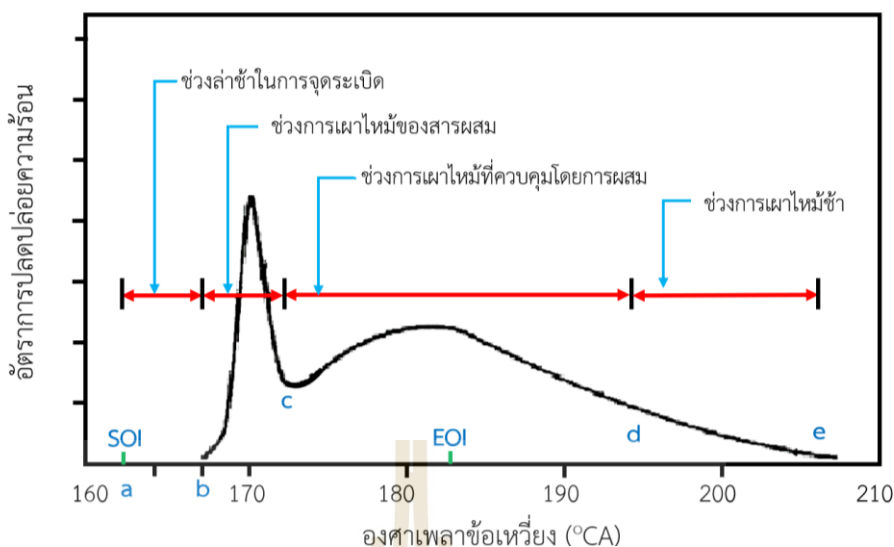
1. ระยะที่ 1 เริ่มต้นจากจุด A เมื่อหัวฉีดเริ่มฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้แต่ยังไม่เกิดการเผาไหม้จนถึงจุด B ซึ่งระยะนี้ถูกเรียกว่า “ช่วงล่าช้าการจุดระเบิด (Ignition delay)” ระยะนี้ความดันในห้องเผาไหม้จะสูงขึ้น เนื่องจากลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ขึ้นเพื่ออัดอากาศ น้ำมันเชื้อเพลิงยังคงถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ตลอดเวลา และเมื่อละอองน้ำมันเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดมีปริมาณที่มากพอและบางส่วนจะระเหยเป็นไอพร้อมที่จะเผาไหม้ ในช่วงนี้ปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงจะส่งผลต่อการจุดระเบิดที่ล่าช้า ตัวอย่างปัจจัยทางกายภาพ (Physical processes) ได้แก่ การกระจายตัวเป็นละอองฝอยของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไป ไอของน้ำมันเชื้อเพลิงและการผสมกันระหว่างอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิง การแตกตัวของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ติดจะต้องการแรงดันในการฉีดที่สูง รูของหัวฉีดที่มีขนาดเล็ก น้ำมันเชื้อเพลิงมีความหนืดที่ต่ำ เครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดที่สูง และองศาการฉีดเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ ตัวอย่างปัจจัยทางเคมี (Chemical processes) เป็น

ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการจุดระเบิดด้วยตัวเองของน้ำมันเชื้อเพลิง ดังนั้นสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงจึงมีผลต่อความล่าช้าในการจุดระเบิด และสมบัติของการจุดระเบิดสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลจะใช้เป็นค่าเลขซีเทนหรือดัชนีซีเทน ซึ่งเลขซีเทนที่ต่ำน้ำมันเชื้อเพลิงจะเกิดความล่าช้าในการจุดระเบิด และในกรณีที่น้ำมันเชื้อเพลิงมีค่าเลขซีเทนที่สูงเวลาในการจุดระเบิดจะสั้นลงและใช้เชื้อเพลิงน้อยในการจุดระเบิด โดยที่อัตราการปลดปล่อยความร้อนจะขึ้นอยู่กับอัตราการฉีดเชื้อเพลิงและการผสมกันระหว่างอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิง

2. ระยะที่ 2 เมื่อไอน้ำมันเริ่มติดไฟและเกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดความดันภายในห้องเผาไหม้ที่สูงทันทีทันใดจากจุด B ไปยังจุด C ระยะนี้เรียกว่า “ช่วงการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (Rapid combustion period)” หรือ ช่วงการเผาไหม้ของสารผสม (Premixed combustion phase, b-c) ในช่วงนี้เป็นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ผสมกับอากาศในช่วงล่าช้าในการจุดระเบิด โดยการเผาไหม้ก็จะเผาไหม้เกือบพร้อมกัน ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็วและเป็นผลให้มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนในช่วงนี้สูง

3. ระยะที่ 3 ต่อจากจุด C น้ำมันเชื้อเพลิงที่ยังไม่ได้เผาไหม้ร่วมกับน้ำมันเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดออกมาจากหัวฉีดอย่างต่อเนื่องจะเกิดการเผาไหม้ขึ้น ความรุนแรงของการเผาไหม้ในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงประกอบกับการแพร่กระจายของออกซิเจนที่เหลืออยู่ ระยะจุด C ไปจุด D นี้เรียกว่า “ช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุม (Controlled combustion period)” ซึ่งสิ้นสุดลงที่จุด D พร้อมกับสิ้นสุดการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง ช่วงควบคุมการเผาไหม้นี้ความดันอาจสูงขึ้นหรือคงที่หรือต่ำลงก็ได้ โดยจะเกิดการเผาไหม้หลังจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ถูกผสมกับอากาศในช่วงล่าช้าในการจุดระเบิดได้ถูกเผาไหม้จนหมด ในช่วงนี้ถูกควบคุมโดยปริมาณเชื้อเพลิงที่พร้อมเผาไหม้ อัตราการปลดปล่อยความร้อนช่วงนี้จะต่ำกว่าในช่วงการเผาไหม้ของสารผสม แล้วจะลดลงเมื่อการเผาไหม้ดำเนินต่อไป

4. ระยะที่ 4 หลังจากจุด D ถูกเรียกว่า “ช่วงหลังการเผาไหม้ (Period of after burning)” หรือ ช่วงการเผาไหม้ช้า (Late combustion phase, d-e) หลังจากหัวฉีดหยุดฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงแล้ว น้ำมันเชื้อเพลิงที่ยังคงเหลืออยู่ในห้องเผาไหม้จะรวมตัวกับออกซิเจนที่หลงเหลืออยู่แล้วเกิดการเผาไหม้ต่อ เล็กน้อยและเป็นการเผาไหม้ของเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ของส่วนผสมหนาที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนที่ต่ำในจังหวะที่มีการขยายตัวภายในกระบอกสูบ การเผาไหม้ในช่วงนี้จะไม่ปรากฏบนเส้นกราฟเพราะเป็นเวลาเดียวกันกับที่ลูกสูบเคลื่อนที่ลง ปริมาตรในห้องเผาไหม้จะขยายกว้างขึ้นทำให้ความดันในห้องเผาไหม้ลดลง



รูปที่ 2.4 อัตราการปลดปล่อยความร้อนในเครื่องยนต์แบบฉีดเชื้อเพลิง

2.2.8 สัมประสิทธิ์ของความแปรผัน

สัมประสิทธิ์ของความแปรผัน (Coefficient of Variation : COV) เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญที่ใช้วัดความแปรผันของวัฏจักร ซึ่งได้จากข้อมูลความดันในกระบอกสูบ โดยเป็นสัมประสิทธิ์ของความแปรผันของความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ (Indicated Mean Effective Pressure : IMEP) (John B. Heywood, 1998) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.9

$$COV = \frac{s_{imep}}{imep} \cdot 100 \quad (2.9)$$

2.3 น้ำมันขยะพลาสติก

การใช้พลาสติกทั่วโลกนั้นมีอัตราที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากการสำรวจที่ผ่านมาพบว่า ในแต่ละปีทั่วโลกมีอัตราการใช้พลาสติกเพิ่มสูงขึ้น 4 เปอร์เซ็นต์ (Miandad et al., 2017) และหากพิจารณาในช่วง 40 ปีที่ผ่านมา อุตสาหกรรมพลาสติกทั่วโลกนั้นมีการเติบโตเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์จำพวกพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น โพลีเอทิลีน (PE) โพลีโพรพิลีน (PP) โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โพลิสไตรีน (PS) และโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเกือบ 100 เท่าตลอดระยะเวลา 4 ทศวรรษ ซึ่งพลาสติกเหล่านี้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในชีวิตประจำวัน อาทิ เช่น แพ้ชั้น บรรจุภัณฑ์ เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้าน ผลิตภัณฑ์ยานยนต์ และอากาศยาน เป็นต้น (Othman et al., 2017) เนื่องจากพลาสติกมีคุณสมบัติที่มีความทนทาน น้ำหนักเบา และราคาถูก

จากสถานการณ์ดังกล่าวจึงก่อให้เกิดปริมาณขยะพลาสติกขึ้นเป็นจำนวนมากศาลซึ่งขยะพลาสติกเหล่านี้เป็นขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ และต้องใช้เวลาหลายร้อยปีในการย่อยสลาย ดังนั้น วิธีการจัดการขยะพลาสติกส่วนใหญ่จึงเป็นการฝังกลบในหลุมฝังกลบหรือเผาทำลายในเตาเผาขยะ ซึ่งเป็นวิธีการที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ในปัจจุบันได้มีการนำขยะพลาสติกบางประเภทมาคัดแยกเพื่อนำกลับไปผ่านกระบวนการรีไซเคิลเป็นเม็ดพลาสติกสำหรับเป็นวัตถุดิบในโรงงานผลิตพลาสติก แต่การจัดการดังกล่าวยังมีอัตราส่วนไม่มากเมื่อเทียบกับปริมาณของขยะพลาสติกที่เกิดขึ้น สำหรับประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2551 – 2559 พบว่า มีปริมาณขยะมูลฝอยที่ถูกกำจัดอย่างถูกต้องร้อยละ 22 – 35 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณขยะมูลฝอยที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์เพียงร้อยละ 14 – 21 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2559)

อย่างไรก็ตาม ขยะพลาสติกบางส่วนถูกนำมาแปรรูปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงหรือที่เรียกว่า น้ำมันขยะพลาสติก เนื่องจากผลิตภัณฑ์พลาสติกมีแหล่งกำเนิดจากปิโตรเลียมซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน สำหรับการแปรรูปขยะเป็นพลังงานนั้นมีการดำเนินการโดยใช้เทคโนโลยีอยู่หลายวิธี ได้แก่ กระบวนการทางความร้อน กระบวนการทางชีวเคมี และกระบวนการทางเคมี ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีมีข้อดีและข้อจำกัดที่ต่างกันไปขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของปัจจัยต่าง ๆ เช่น ประเภทของขยะ สถานที่ที่ใช้จัดการขยะ ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม สังคม และความพร้อมด้านการลงทุน ซึ่งตั้งแต่ราคาน้ำมันมีราคาสูงขึ้น การผลิตเชื้อเพลิงจากขยะได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในประเทศไทย มีผู้ประกอบการหลายรายได้นำเอากระบวนการดังกล่าวไปใช้ในการผลิตพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ส่วนใหญ่มักจะเป็นระดับเครื่องต้นแบบที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อทดสอบการผลิต บางแห่งมีการผลิตในโรงงานขนาดเล็ก และผลผลิตที่ได้นั้นก็ถูกขายเป็นน้ำมันทดแทนน้ำมันเตาหรือใช้เป็นพลังงานทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิง (ศิริรัตน์ จิตการคำ, 2551) และเทคโนโลยีที่นิยมกันมากที่สุด คือ กระบวนการทางความร้อนเพื่อผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงเหลว

2.3.1 การเตรียมวัตถุดิบสำหรับผลิตน้ำมันขยะพลาสติก

การเตรียมวัตถุดิบเป็นตัวแปรสำคัญต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นพลังงานเชื้อเพลิง ซึ่งขยะพลาสติกมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเช่นเดียวกับน้ำมัน แต่มีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า โดยที่น้ำมันดีเซลมีจำนวนคาร์บอนที่ 12 – 20 อะตอม และน้ำมันเบนซินที่ 6 – 12 อะตอม ซึ่งพลาสติกเป็นโซ่ที่ยาวมากมีจำนวนคาร์บอนเป็นพันเป็นหมื่นอะตอมขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์นั้น ๆ การที่จะทำให้พลาสติกเป็นน้ำมันได้จำเป็นต้องตัดโซ่พันธะให้สั้นลง ขยะพลาสติกทั่วไปมีหลายประเภทที่สามารถนำมาผลิตน้ำมันได้ โดยอาจให้ปริมาณและผลผลิตที่แตกต่างกัน

โดยพื้นฐานแล้ววัตถุดิบพลาสติกแต่ละประเภทจะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จากผลรายงานการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) ซึ่งเป็นวิธีในการตรวจวัดคุณสมบัติ

ทางเคมีขององค์ประกอบพลาสติก ได้แก่ ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) และปริมาณเถ้า (Ash Content) (Anuar Sharuddin et al., 2016) ดังตารางที่ 2.1 โดยปริมาณสารระเหยและปริมาณเถ้าเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันเหลวในกระบวนการไพโรไลซิส กล่าวคือ ถ้ามีปริมาณสารระเหยที่สูงจะช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันเหลว ในทางกลับกันถ้ามีปริมาณเถ้ามากจะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันเหลวลดลง ดังนั้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เกิดเป็นก๊าซและของแข็งเพิ่มขึ้น (Abnisa et al., 2014)

ตารางที่ 2.1 การวิเคราะห์แบบประมาณของพลาสติก (Anuar Sharuddin et al., 2016)

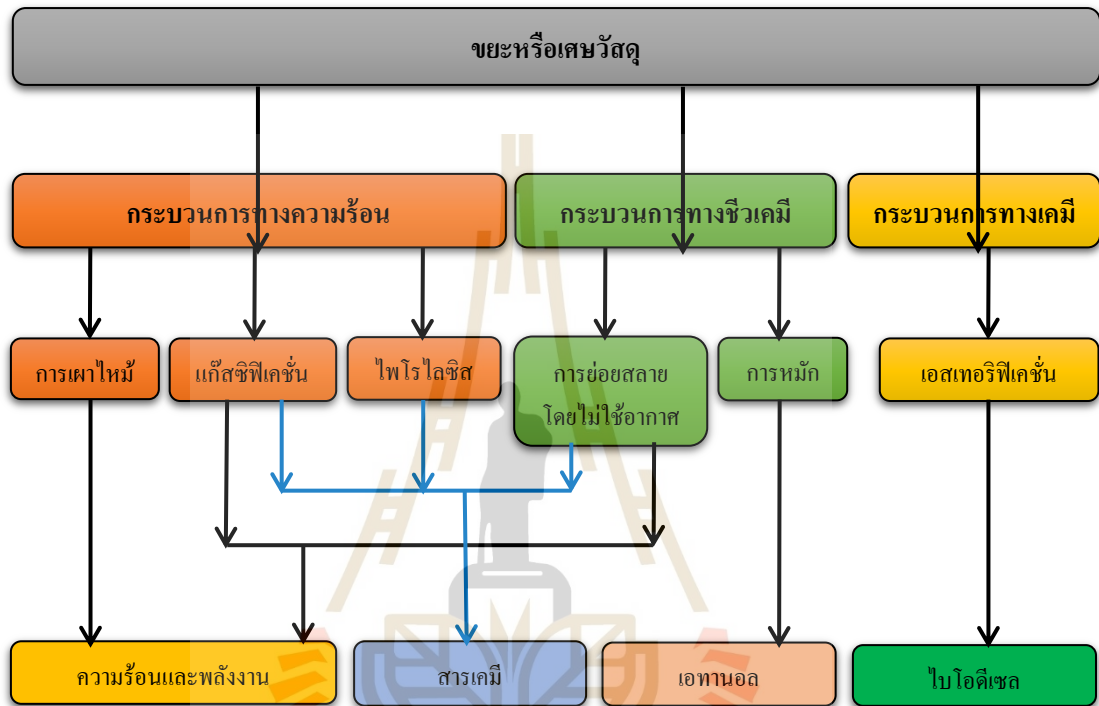
ประเภทของพลาสติก	Moisture Content (%wt)	Fixed Carbon (%wt)	Volatile Matter (%wt)	Ash Content (%wt)
โพลีเอทิลีนเทเรพทาเลต	0.61	13.17	86.83	0.00
โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง	0.00	0.03	98.57	1.40
โพลีไวนิลคลอไรด์	0.74	5.19	94.82	0.00
โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ	0.30	0.00	99.70	0.00
โพลีโพรไพลีน	0.18	0.16	97.85	1.99
โพลีสไตรีน	0.30	0.20	99.50	0.00
โพลีเอทิลีน	0.10	0.04	98.87	0.99

ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่า ปริมาณสารระเหยของพลาสติกทั้งหมดมีปริมาณสูงมาก ขณะที่ปริมาณเถ้ามีปริมาณค่อนข้างต่ำ คุณลักษณะเช่นนี้บ่งบอกถึงพลาสติกมีศักยภาพที่สูงในการนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิส

2.3.2 เทคโนโลยีการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติก

กระบวนการเปลี่ยนขยะให้เป็นพลังงานนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ กระบวนการทางความร้อน กระบวนการทางชีวเคมี และกระบวนการทางเคมี ดังรูปที่ 2.5 โดยกระบวนการทางความร้อนนั้น แบ่งแยกย่อยออกเป็นการเผาไหม้ (Combustion) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) กระบวนการทางชีวเคมีเป็นการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยขยะโดยผ่านปฏิกิริยาเชิงชีวเคมี ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นกระบวนการย่อยสลายโดยไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) และการหมัก (Fermentation) ส่วนกระบวนการ

เชิงเคมีนั้นเป็นการเปลี่ยนขยะให้เป็นผลผลิตโดยผ่านปฏิกิริยาเคมี ซึ่งปฏิกิริยาที่เห็นได้ชัดคือปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันที่ใช้เปลี่ยนน้ำมันพืชหรือน้ำมันพืชใช้แล้วให้เป็นไบโอดีเซล ทั้งนี้ ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการเปลี่ยนขยะพลาสติกไปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงโดยผ่านกระบวนการในเชิงความร้อนด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

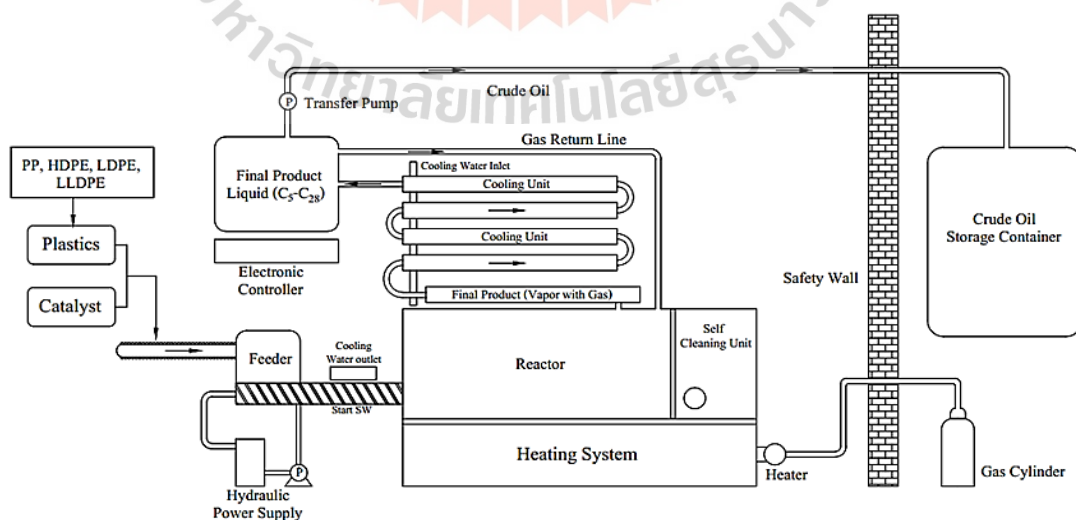


รูปที่ 2.5 กระบวนการเปลี่ยนขยะเป็นพลังงานและผลผลิตที่ได้
(ศิริรัตน์ จิตการคำ, 2551)

กระบวนการผลิตเริ่มจากการที่ขยะพลาสติกจะถูกอัดและส่งไปยังเตาหลอมพร้อมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนแก่พลาสติกในอ่างโลหะหลอมเหลว ความร้อนที่ใช้มีขนาดปานกลางที่อุณหภูมิ 400 – 800 องศาเซลเซียส ซึ่งถูกให้ความร้อนโดยแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและพลาสติกหลอมเหลวจะเกิดการแตกตัวให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส หรือไอออกมาที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา (350 – 450 องศาเซลเซียส) หลังจากพลาสติกสลายตัวเป็นแก๊สแล้วก็จะถูกกักเก็บจากส่วนบนของเตาไปสู่หน่วยให้ความเย็น เพื่อควบแน่นไอกลายเป็นน้ำมันเหลวที่มีขนาดโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนมากกว่า 5 อะตอม (มากกว่า C_5) ส่วนแก๊สที่ไม่ควบแน่น ($C_1 - C_4$) จะถูกส่งกลับไปเผาไหม้ให้ความร้อนกับเตาหลอมต่อไป สิ่งปนเปื้อนที่ตกค้างที่ไม่หลอมเหลวหรือหลอมเหลวไม่หมดจะถูกกำจัดออกทางสายพานลำเลียง ดังรูปที่ 2.6

ความร้อนที่ให้แก่กระบวนการไพโรไลซิส เป็นความร้อนทางอ้อมที่ให้แก่เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแล้วถ่ายเทไปให้กับวัตถุดิบข้างใน อุณหภูมิโดยทั่วไปของกระบวนการ ไพโรไลซิส คือประมาณ 400 – 800 องศาเซลเซียส นั้น จะส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 วัฏภาค คือ ก๊าซของเหลว และของแข็ง ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วย ขั้นแรก คือ การสลายตัวของสารที่ละลายง่ายออกจากวัตถุดิบ ขั้นที่สอง คือ เป็นการแตกตัวของวัตถุดิบเอง โดยที่องค์ประกอบที่สามารถแตกตัวได้ที่สภาวะที่ใช้ก็จะแตกตัวออกมาเป็นโมเลกุลที่เล็กลง และเล็กลงเรื่อย ๆ ตามเวลาที่ให้หรืออุณหภูมิที่กำหนด จนกระทั่งเกิดการแตกตัวที่สมบูรณ์ของวัตถุดิบ โดยอุณหภูมิในแต่ละขั้นตอนแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ แต่การให้ความร้อนและเวลาที่มากเกินไปสารที่ได้จากการแตกตัวของวัตถุดิบจะกลับมารวมตัวกันเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ดังนั้น สภาวะที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสจะต้องขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาใช้ (ศิริรัตน์ จิตการคำ, 2551)

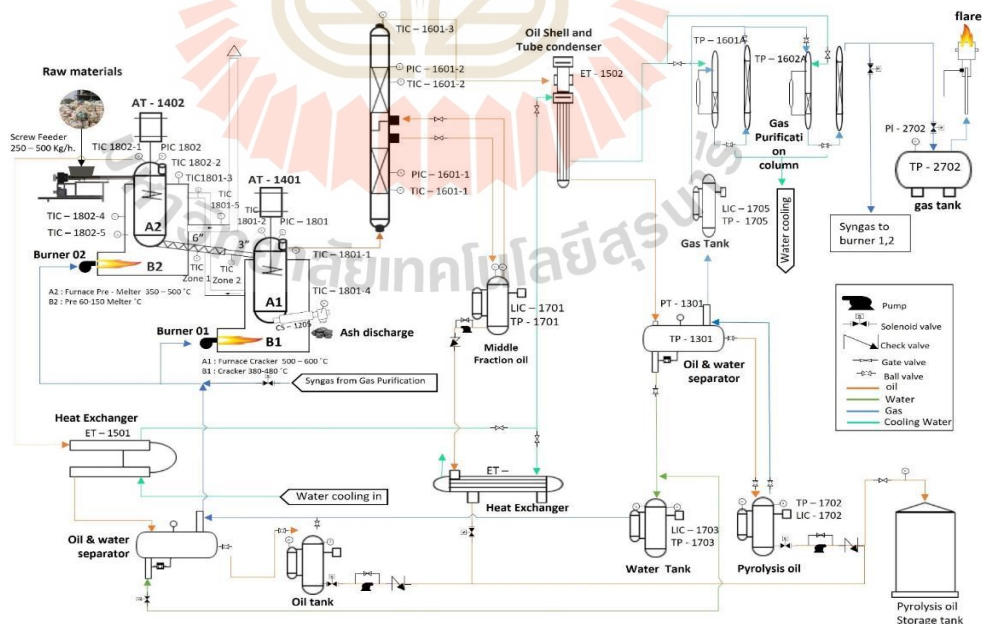
การไพโรไลซิสแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ การไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis) แบบเร็ว (Fast Pyrolysis) และการไพโรไลซิสแบบเร็วมาก (Flash pyrolysis) การไพโรไลซิสแบบช้าจะเกิดสมดุลในบริเวณช่วงแคบ โดยอัตราการให้ความร้อนจะช้าพอที่จะทำให้เกิดความสมดุลในบริเวณช่วงแคบ ในกรณีนี้ปริมาณและการกระจายของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับแนวของอุณหภูมิเดิม (Temperature History) ส่วนการไพโรไลซิสแบบรวดเร็วจะคำนึงถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงการให้ความร้อน ไพโรไลซิสแบบเร็วมาก (Flash pyrolysis) คือ กระบวนการไพโรไลซิสที่มีอัตราการให้ความร้อนสำหรับกระบวนการมากกว่า 100 °C/min อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอุณหภูมิที่ใช้ สูงถึง 1,000 °C ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จะเป็นแก๊สและเชื้อเพลิงเหลว ทั้งนี้ ปัจจัยหลักที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิส ดันในการทำปฏิกิริยา ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการให้ความร้อน และชนิดของวัตถุดิบ (Yaqoob, H. et al., 2021)



รูปที่ 2.6 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis Process)

โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามสถานะ คือ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ของเหลว และของแข็ง ซึ่งอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้ เช่น ระบบการป้อนวัตถุดิบ อุณหภูมิ ความดัน อุณหภูมิสุดท้าย อัตราเร็วในการให้ความร้อน และบรรยากาศในปฏิกรณ์ เป็นต้น โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.2 เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมากลั่นลำดับส่วนเพื่อแยกองค์ประกอบตามกรรมวิธีการกลั่นน้ำมันดิบแล้วจะให้องค์ประกอบที่เป็นแนฟทา น้ำมันก๊าด น้ำมันแก๊สออยล์ชนิดเบา น้ำมันแก๊สออยล์ชนิดหนัก และกากน้ำมัน

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากโรงงานผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสของศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังรูปที่ 2.7



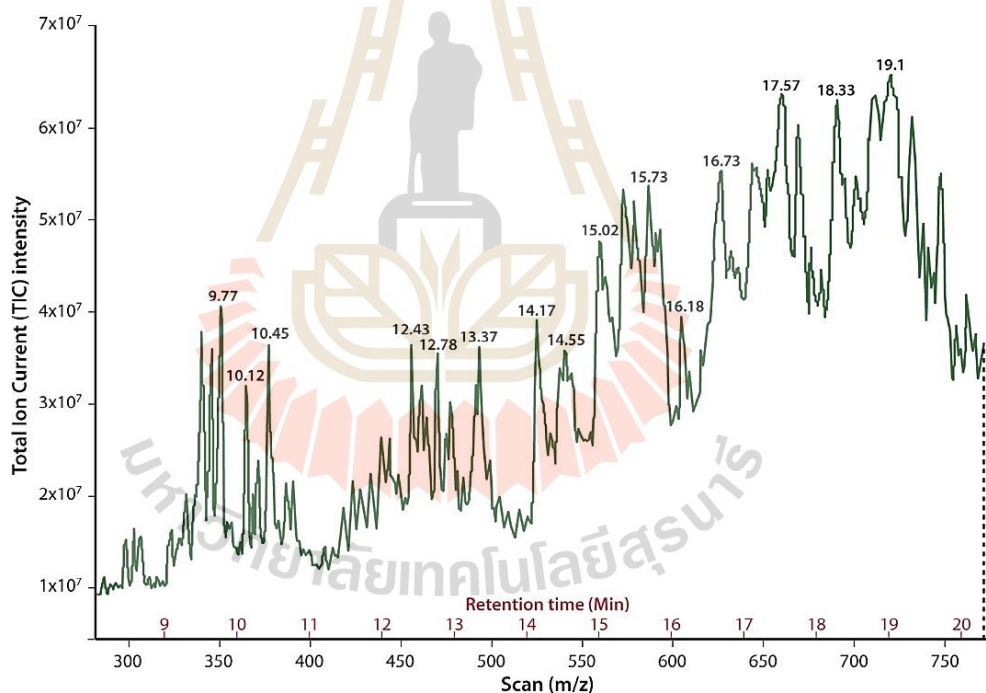
รูปที่ 2.7 โรงงานผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกและกระบวนการไพโรไลซิส ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.2 กระบวนการไพโรไลซิสภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ (Anuar Sharuddin et al., 2016; Miandad et al., 2017; Othman et al., 2017)

ประเภทของขยะพลาสติก	เครื่องปฏิกรณ์	สภาวะที่ใช้ในกระบวนการ				ผลผลิตสูงสุด		
		อุณหภูมิ (°C)	ความดัน	อัตราการให้ความร้อน (°C/min)	เวลา (min)	น้ำมัน (%wt)	แก๊ส (%wt)	ของแข็ง (%wt)
Polyethylene Terephthalate : PET	-	500	1 atm	6	-	38.89	52.13	8.98
High-Density Polyethylene : HDPE	Horizontal steel	350	-	20	30	80.88	17.24	1.88
Polyvinyl Chloride : PVC	Vacuum Batch	520	2 kPa	10	-	12.79	0.34	28.13
Polystyrene : PS	Pressurized Batch	425	0.31-1.6 MPa	10	60	97.00	2.50	0.50
Low-Density Polyethylene : LDPE	Pressurized Batch	425	0.8-4.3 MPa	10	60	89.50	10.00	0.50
Polyethylene : PE	-	450	-	10	75	25.00	62.00	13.00
Polypropylene : PP	Horizotal Steel	300	-	20	30	69.82	28.84	1.34
Mixed Plasetics (PS / PP)	-	450	-	10	75	25.00	69.90	5.10
Mixed Plasetics (PS / PE)	-	450	-	10	75	54.00	38.30	7.70
Mixed Plasetics (PP / PE)	-	450	-	10	75	24.00	51.20	24.80
Mixed Plasetics (PS / PE / PP)	-	450	-	10	75	49.00	47.10	3.90
Mixed Plasetics (PS / PE / PP / PET)	-	450	-	10	75	40.00	42.00	18.00
Mixed Plasetics (Over all)	-	400	1 atm	-	240	80.00	5.00	15.00

2.3.3 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

น้ำมันเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการไพโรไลซิส นั้น โดยทั่วไปแล้วจะมีองค์ประกอบคล้ายกับน้ำมันดิบ (รัตนยาภรณ์ ฉายศรี, 2555) ซึ่งจากการศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติก โดยการนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatograph – Mass Spectrometer : GC-MS) พบว่า น้ำมันขยะพลาสติกจะมีองค์ประกอบสารประกอบอินทรีย์อยู่ในช่วง $C_{10} - C_{30}$ หากพิจารณาสัดส่วนโดยประมาณแล้วสามารถจำแนกเป็น C_{10} (61%), $C_{10} - C_{13}$ (2.4%), $C_{13} - C_{16}$ (8.5%), $C_{16} - C_{20}$ (4.1%), $C_{20} - C_{23}$ (7.6%), $C_{23} - C_{30}$ (16.4%) (Mani et al., 2011) ทั้งนี้ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันขยะพลาสติกประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดจำนวน 15 ชนิด และมีเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบอะโรมาติกอยู่ถึง 39 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกด้วยเครื่อง GC – MS (Damodharan et al., 2017)

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติก (Damodharan et al., 2017)

Chemical Compounds	Molecular Formula	Molecular Weight (g/mole)	Retention Time (min)	Composition (%)
2, 2, 9 -Trimethyldec-5-ene-3, 8-dione	C ₁₃ H ₂₂ O ₂	210.3126	9.77	5.934
Ethyl dodecyl ether	C ₁₄ H ₃₀ O	214.3874	10.12	4.411
1-Dodecanol, 3, 7, 11-trimethyl	C ₁₃ H ₃₂ O	228.4140	10.45	10.905
1- Hexadecanol, 2-methyl	C ₁₇ H ₃₆ O	256.4671	12.43	2.472
3-Chloropropionic acid, octadecyl ester	C ₂₁ H ₄₁ ClO ₂	361.0020	12.78	3.141
4-Octadecanal	C ₁₈ H ₃₆ O	268.4778	13.37	11.025
2,5-Dimethyl-4-benzyl-pyridine	C ₁₄ H ₁₇ N	199.2884	14.17	10.691
2-Hexadecanol	C ₁₆ H ₃₄ O	242.4406	14.55	4.972
4-[1, 5-dimethylhexyl]-1-cyclohexenecarboxylic acid	C ₁₃ H ₂₆ O ₂	238.4100	15.02	7.484
Z-5-Methyl-6-heneicosen-11-one	C ₂₂ H ₄₂ O	322.5683	15.73	8.057
cis- 1-Chloro-9-octadecene	C ₁₈ H ₃₅ Cl	286.9230	17.57	9.836
1-Methyl [tetramethylsilyloxyundec-2-ene	C ₁₆ H ₃₂ OSi	268.5100	16.73	4.448
Sprio [7H-cyclohepta[b]furan-7, 2'(5'H)-furan]-2, 5'(3H)-dione, octahydro-8-hydroxy-6, 8-dimethyl-3-methylene-(9Cl)	C ₁₅ H ₂₀ O ₅	280.3200	17.57	9.836
Xylofuranose, cyclic 1, 2:3, 5-bis[butylbonate]	C ₁₃ H ₂₄ B ₂ O ₅	281.9487	18.33	9.207
Toluene-4-sulfonic acid, 2, 7-dioxatricyclo-dec-10-yl ester	C ₁₅ H ₁₈ O ₅ S	310.3650	19.10	3.996

นอกจากนี้ คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของน้ำมันขยะพลาสติกที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส โดยใช้วัตถุดิบพลาสติกประเภทต่าง ๆ นั้น พบว่า มีผลทำให้คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เนื่องจากโครงสร้างพื้นฐานทางเคมีของวัตถุดิบและสภาวะที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวได้มีการศึกษาและวิจัยคุณสมบัติของน้ำมันขยะพลาสติกจากการใช้วัตถุดิบประเภทต่าง ๆ โดยทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของ

น้ำมันขยะพลาสติก อาทิเช่น ค่าความร้อนเชื้อเพลิง ความถ่วงเอพีไอ ความหนืด ความหนาแน่น ปริมาณเถ้า เลขออกเทน จุดไหลเท จุดวาบไฟ จุดอะนิลิน และดัชนีดีเซล โดยใช้วัตถุดิบที่เป็นขยะพลาสติกประเภทต่าง ๆ ได้แก่ โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โพลีโพรพิลีน (PP) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และโพลิสไตรีน (PS) ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติก (Damodharan et al., 2017)

คุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง	ประเภทของขยะพลาสติก					
	PET	HDPE	LDPE	PVC	PP	PS
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (MJ/kg)	28.2	40.50	39.50	21.10	40.80	43.00
ความถ่วงเอพีไอ ที่ 60 °F	N.A	27.48	47.75	38.98	33.03	N.A
ความหนืด (mm ² /s)	0.90	5.08	5.56	6.36	4.09	1.4
ความหนาแน่น ที่ 15 °C (g/cm ³)	N.A	0.89	0.78	0.84	0.86	0.85
ปริมาณเถ้า (%wt)	N.A	0.00	0.02	N.A	0.00	0.006
เลขออกเทน MON (min)	N.A	85.30	N.A	N.A	87.60	N.A
เลขออกเทน RON (min)	N.A	95.30	N.A	N.A	97.80	90-98
จุดไหลเท (°C)	N.A	-5	N.A	N.A	-9	-67
จุดวาบไฟ (°C)	N.A	48	41	40	30	26.1
จุดอะนิลิน (°C)	N.A	45	N.A	N.A	40	N.A
ดัชนีดีเซล	N.A	31.05	N.A	N.A	34.35	N.A

หมายเหตุ N.A หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ (Not Analysis)

คุณลักษณะของน้ำมันไพโรไลซิสหรือน้ำมันขยะพลาสติกเมื่อทำการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น จุดไหลเท จุดวาบไฟ และค่าความร้อนเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง

ตารางที่ 2. แสดงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจากพลาสติกประเภทต่าง ๆ พบว่า พลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง โพลีโพรพิลีน และโพลีเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงมากกว่า 40 MJ/kg โดยถือว่าเป็นค่าพลังงานที่สูงและยังพบว่าความหนาแน่น (0.78 – 0.89 g/cm³) ความหนืด (0.90 – 5.56 mm²/s) และความถ่วง เอพีไอ (27.48 - 47.75) มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญเป็น

อย่างมากต่อการกระจายตัวเป็นละอองฝอยในการฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติกบางส่วนยังคงมีค่าที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ น้ำมันดีเซล อาทิเช่น จุดไหลเท จุดวาบไฟ จุดอะลีนิน และดัชนีดีเซล เป็นต้น

2.3.4 สมรรถนะของเครื่องยนต์และคุณลักษณะการเผาไหม้

การนำผลิตภัณฑ์น้ำมันขยะพลาสติกที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลนั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสมรรถนะและคุณลักษณะการเผาไหม้ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า กำลังของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากการใช้น้ำมันดีเซลโดยทั่วไป (Hürdoğan et al., 2017) และน้ำมันขยะพลาสติกมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนมากกว่าเมื่อเทียบกับ น้ำมันดีเซล เนื่องจากน้ำมันขยะพลาสติกมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล ในทางตรงกันข้าม น้ำมันขยะพลาสติกมีความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากกว่าน้ำมันดีเซล (R. Kumar et al., 2016; Mani et al., 2010, 2011) อย่างไรก็ตาม นักวิจัยบางส่วนพบว่าน้ำมันขยะพลาสติกนั้นมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากความหนาแน่นและค่าความหนืดที่มากกว่าของน้ำมันขยะพลาสติกเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล (Kaimal et al., 2015; V. K. Kaimal et al., 2016; Kalargaris et al., 2017)

นอกจากนี้ ผลของคุณลักษณะการเผาไหม้พบว่า ความดันในกระบอกสูบสูงสุด และอัตราการปลดปล่อยความร้อนของน้ำมันขยะพลาสติกมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล โดยมีสาเหตุมาจากคุณสมบัติของน้ำมันขยะพลาสติกที่มีค่าความหนืดที่สูงส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) ที่ยาวกว่าน้ำมันดีเซล รวมถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีกว่าของน้ำมันขยะพลาสติก (Kaimal and Vijayabalan, 2015; Senthilkumar et al., 2016) ซึ่งช่วงความล่าช้าการเผาไหม้ที่ยาวกว่าของน้ำมันขยะพลาสติกนั้นเป็นสาเหตุทำให้ความดันในกระบอกสูบสูงสุดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 5 บาร์ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล (Mani, Subash, et al., 2009) และอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดของน้ำมันขยะพลาสติกมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศมีค่าสูงกว่า (Othman et al., 2017) แสดงผลการวิจัยที่ผ่านมา อาทิเช่น

S. Kumar et al. (2013) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์ และมลพิษ จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกที่เป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด 4 จังหวะ 2 สูบ ระบบฉีดเชื้อเพลิงตรงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) ของน้ำมันขยะพลาสติกมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซลทุก ภาวะกรรม เนื่องจากน้ำมันขยะพลาสติกมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล หากพิจารณาความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) ของน้ำมันขยะพลาสติกจะมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล และมีค่า

เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของน้ำมันขยะพลาสติก ทั้งนี้ ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก็มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มภาระกรรมให้กับเครื่องยนต์

Kaimal and Vijayabalan (2015) ได้ศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้น้ำมันขยะพลาสติก ซึ่งน้ำมันขยะพลาสติกสังเคราะห์จากวัตถุดิบขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นในชุมชนโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิส สำหรับการทดสอบจะทำการผสมน้ำมันขยะพลาสติกกับน้ำมันดีเซลที่ร้อยละ 25, 50 และ 75 โดยปริมาตร อ้างอิงกับน้ำมันดีเซล โดยการทดสอบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงภาระกรรม จากผลการทดสอบบ่งชี้ให้เห็นว่า น้ำมันขยะพลาสติกและน้ำมันขยะพลาสติกผสมทุกอัตราส่วนผสมมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำกว่าน้ำมันดีเซล และหากพิจารณาที่ภาระกรรมสูงสุดความดันในกระบอกสูบสูงสุด อัตราการปลดปล่อยความร้อน ระยะเวลาการเผาไหม้ และความล่าช้าในการเผาไหม้ของน้ำมันขยะพลาสติกและน้ำมันขยะพลาสติกผสมมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่า คุณลักษณะการเผาไหม้นั้นมีสาเหตุหลักมาจากคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง

Kalargaris et al. (2017) ได้ศึกษาการเผาไหม้ สมรรถนะของเครื่องยนต์ และวิเคราะห์มลพิษของเครื่องยนต์ดีเซล โดยใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติกประเภทต่าง ๆ ทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ ระบบฉีดเชื้อเพลิงตรงเข้าห้องเผาไหม้ ซึ่งการทดสอบใช้น้ำมันเชื้อเพลิงผสมระหว่างน้ำมันไพโรไลซิสกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ คือร้อยละ 25, 50, 75 และ 90 โดยปริมาตร ทดสอบที่ความเร็วรอบคงที่ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนภาระกรรมที่ 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ของภาระกรรม ตามลำดับ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าที่ภาระกรรมสูงสมรรถนะของเครื่องยนต์ใกล้เคียงกันกับการใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของน้ำมันไพโรไลซิสมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซลเล็กน้อย

2.3.5 มลพิษไอเสียของเครื่องยนต์

โดยทั่วไปแล้วเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดหรือเครื่องยนต์ดีเซลจะทำงานภายใต้การผสมบาง (Lean Mixture) ดังนั้น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จึงควรมีปริมาณที่ต่ำ ซึ่งคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน และถือว่าเป็นสารพิษที่ต้องได้รับการควบคุม โดยเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า คาร์บอนมอนอกไซด์ของน้ำมันขยะพลาสติกมีปริมาณสูงกว่าน้ำมันดีเซล เหตุผลเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ดังกล่าวไปข้างต้น เนื่องจากอุณหภูมิในห้องเผาไหม้มีค่าลดลงและไฮโดรคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นในสภาวะภาระกรรมสูงขึ้น จากอัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่มากขึ้นสำหรับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) น้ำมันขยะพลาสติกมีปริมาณสูงกว่าน้ำมันดีเซล เพราะการเผาไหม้ที่ล่าช้าส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ไม่สมบูรณ์ของคาร์บอนมอนอกไซด์

ทั้งนี้ การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในกระบอกสูบ ปริมาณออกซิเจน และช่วงเวลาของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งพบว่า ออกไซด์ของไนโตรเจนมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อใช้น้ำมันขยะพลาสติก โดยเหตุผลที่ออกไซด์ของไนโตรเจน เพิ่มขึ้นนั้น เนื่องจากอัตราการปลดปล่อยความร้อน และอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงขึ้น (Mani and Nagarajan, 2009; Mani et al., 2010) และไฮโดรคาร์บอน (HC) ประกอบด้วยเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งในส่วนของไฮโดรคาร์บอนนั้นหมายถึงสารประกอบอินทรีย์ในสถานะแก๊ส และไฮโดรคาร์บอนในสถานะที่เป็นของแข็ง คือ ฝุ่นละออง จากผลการวิจัยสังเกตได้ว่า ไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันขยะพลาสติกจะสูงกว่าน้ำมันดีเซล (Mani and Nagarajan, 2009) ซึ่งแสดงผลการวิจัยที่ผ่านมาดังต่อไปนี้

Murugan et al. (2008) ได้ทดสอบเพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องยนต์ มลพิษไอเสีย และคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยว ระบบฉีดเชื้อเพลิงตรงเข้าห้องเผาไหม้ โดยใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากยางรถยนต์ผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ คือ 10, 30 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลจากการทดสอบพบว่า ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ไฮโดรคาร์บอน (HC) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และควันดำ (Smoke) มีปริมาณสูงกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากปริมาณอะโรมาติกที่สูงและความล่าช้าในการจุดระเบิดที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

V. K. Kaimal et al. (2016) ได้ศึกษาพลังงานเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก และการประเมินศักยภาพในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ โดยทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลผลการทดสอบพบว่า ปริมาณมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์มีปริมาณลดลงเมื่อใช้น้ำมันพลาสติกผสม โดยเปรียบเทียบกับน้ำมันจากขยะพลาสติก รวมถึงเขม่าและ NO_x ลดลงถึง 22% และ 17.8% ตามลำดับ

2.3.6 การปรับแต่งเครื่องยนต์เพื่อใช้งานกับน้ำมันขยะพลาสติก

งานวิจัยส่วนหนึ่งได้ศึกษาวิธีการต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความเป็นไปได้ในการนำน้ำมันจากพลาสติกมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล โดยการปรับเปลี่ยนกลไกและอุปกรณ์ของเครื่องยนต์ด้วยตัวแปรต่าง ๆ อาทิเช่น ระยะเวลาการฉีดเชื้อเพลิง การเปลี่ยนแปลงองศาและความดันการฉีดเชื้อเพลิง อัตราส่วนการอัด และการหมุนเวียนไอเสีย (EGR) เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและลดการปล่อยมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์

Ananthakumar, S. et al. (2016) ได้ศึกษาการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กภายใต้ปัจจัยการเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดในช่วง 12:1 ถึง 20:1 เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ อีกทั้งยังเป็นเทคนิคที่ช่วยลดความล่าช้าในการฉีดเชื้อเพลิงเพื่อลดการสูญเสียประสิทธิภาพทางความร้อนที่เกิดจากการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติก

Sharma, A., et al. (2015) ที่ได้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนกำลังอัดจากการนำน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมกับไบโอดีเซล ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าสามารถช่วยลดความล่าช้าในการจุดระเบิดและลดระยะเวลาการเผาไหม้ นอกจากนี้ ยังส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ความดันในกระบอกสูบ อัตราการปลดปล่อยความร้อน และการปลดปล่อยมลพิษไอเสีย (NOX) สูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในกระบอกสูบที่สูงขึ้น ประกอบกับการเพิ่มอัตราส่วนการอัดสามารถช่วยลดมลพิษไอเสีย HC, CO และเขม่าที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง

Pal, S., et al. (2019) ได้ศึกษาผลกระทบของการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงแบบฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้าและการฉีดเชื้อเพลิงแบบล่าช้าของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงานพบว่า การฉีดเชื้อเพลิงแบบล่วงหน้าช่วยให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สูงขึ้นในทุก ๆ ภาระงานที่ทำการทดสอบ และยังสามารถช่วยลดมลพิษไอเสีย HC, CO และเขม่าที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ได้ อย่างไรก็ตาม การปล่อยมลพิษไอเสีย NOX กลับมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ฉีดเชื้อเพลิงแบบล่าช้า

Khatha W., et al. (2018) ได้ทำการปรับแต่งองศาการฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 1 สูบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและกำลังของเครื่องยนต์ โดยผลการปรับแต่งเครื่องยนต์พบว่าส่งผลต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิงที่สูงขึ้นเมื่อปรับองศาการฉีดเชื้อเพลิงแบบล่วงหน้ามากขึ้น

โดยจากการศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านมาในปัจจุบันด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย จากการใช้ น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลที่ภาระกรรมและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ต่าง ๆ ผู้วิจัยสามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สรุปผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำมันขยะพลาสติก

ชนิดของ น้ำมันเชื้อเพลิง	สมรรถนะของ เครื่องยนต์		คุณลักษณะการเผาไหม้		มลพิษไอเสีย				อ้างอิง
	BSFC	BTE	ICP	RoHR	NO _x	CO	HC	Smoke	
Mixed plastics oil	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	Devaraj et al. (2015)
Mixed plastics oil	↑	↑	-	↓	↓	↑	↑	-	R. Kumar et al. (2016)
Waste PP oil	↑	↓	-	-	↑	↑	↑	↑	Panda, A et al. (2016)
WPO–Diesel	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	-	Kalargaris et al. (2017c)
WPO–Diesel	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	-	Kalargaris et al. (2017a)
WPO–Diesel	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↓	Somkiat et al. (2017)
WPO–Diesel	↓	↑	-	-	↑	↑	↑	↓	Damodharan, D., et al. (2017)
WPO–Diesel	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	Bridjesh, P. et al. (2018)
WPO–Diesel	↓	↑	↑	↑	↑	↑	-	↓	Geo, V. E. et al. (2018)
WPO–Diesel	↑	↓	-	-	↑	↑	-	-	Verma, C. (2018)
Mixed plastics oil	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↓	Kaewbuddee, C. et al., 2020
Mixed plastics oil	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	Khatha W., et al., 2021

↓ หมายถึง ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ↑ หมายถึง เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

บทที่ 3

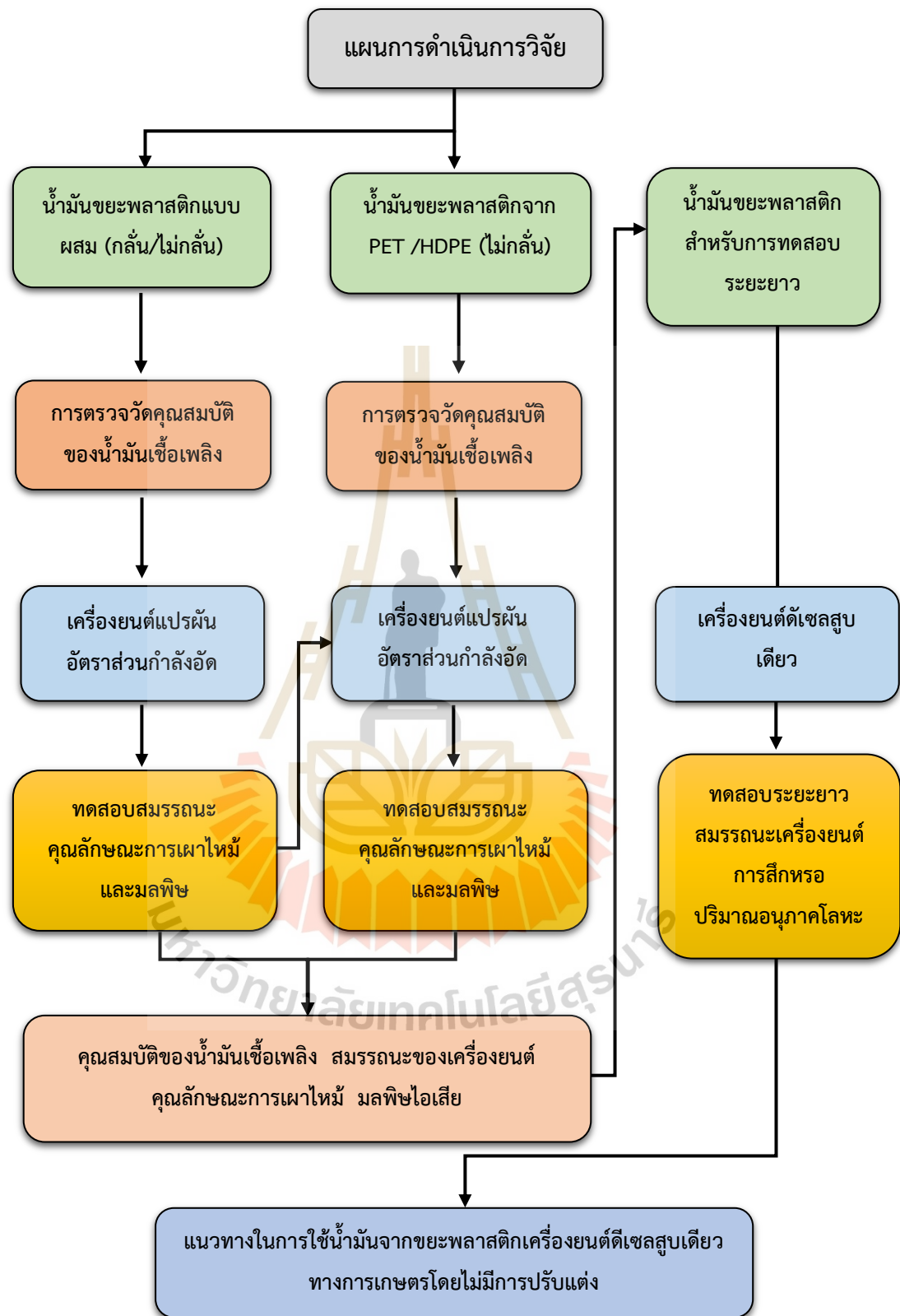
วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วยกรอบการดำเนิน การวิจัย การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง การผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติก เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ การติดตั้งและทดสอบเครื่องยนต์ รวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 กรอบการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ น้ำมันขยะพลาสติกที่ถูกแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ในการใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันดีเซลกับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยแรงอัดหรือเครื่องยนต์ดีเซล โดยศึกษาและวิจัยข้อมูลในด้านต่าง ๆ ของน้ำมันจากขยะพลาสติก เช่น คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ การปล่อยมลพิษทางอากาศ นอกจากนี้ ยังศึกษาการใช้ น้ำมันจากพลาสติกฝาขวดประเภทโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงและพลาสติกขวดใสประเภทโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลต ที่ยังไม่ผ่านการกลั่น สำหรับเป็นแนวทางในการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวที่ไม่มีการปรับแต่งโดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ดังรูปที่ 3.1

ขั้นตอนแรกของการวิจัยเป็นการเตรียมน้ำมันขยะพลาสติกจากแหล่งที่มาต่างๆ เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ในการศึกษาวิจัย ได้แก่ น้ำมันขยะพลาสติกแบบผสมทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการกลั่น ลำดับส่วน น้ำมันจากพลาสติกฝาขวดและพลาสติกขวดใส ที่ไม่ผ่านการกลั่นลำดับส่วน จากนั้นทำการตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เพื่อนำไปทดสอบกับเครื่องยนต์โดยแบ่งแนวทางการวิจัยช่วงแรกออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) การศึกษาผลกระทบของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสมทั้งแบบกลั่นและไม่กลั่นลำดับส่วน 2) การศึกษาผลกระทบของการใช้น้ำมันจากพลาสติกประเภทขวดและฝาขวดพลาสติกที่ไม่กลั่นลำดับส่วน เพื่อหาข้อสรุปพิจารณาเลือกชนิดของน้ำมันขยะพลาสติกสำหรับนำไปทดสอบในระยะยาว โดยพิจารณาถึง คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ มลพิษไอเสียและการสึกหรอ และข้อมูลเชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อหาข้อสรุปแนวทางในการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกโดยไม่ปรับแต่งเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยว



รูปที่ 3.1 กรอบการดำเนินการวิจัย

3.2 การตรวจวัดคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง

การทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง โดยคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ทำการตรวจวัด ประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น ความหนืดจลนศาสตร์ การกลั่น จุดวาบไฟ ดัชนีซีเทน ค่าความร้อนเชื้อเพลิง การประเมินคุณสมบัติการหล่อลื่น ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการทดสอบดังนี้

3.2.1 ความถ่วงจำเพาะและความถ่วงเอพีไอ

การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity : SG) ของน้ำมันเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM D1298 และการคำนวณความถ่วงเอพีไอ (API Gravity) โดยใช้เครื่องมือ Density API & Specific Gravity – Tempering Bath เพื่อทำการระบุความหนักเบาของน้ำมันทดสอบที่อุณหภูมิ 15.6 องศาเซลเซียส อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดประกอบไปด้วยไฮโดรมิเตอร์ (สเกลระดับ 0.700 - 1.000 มีความละเอียดเท่ากับ 0.005) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ กระจกตวง และนาฬิกาจับเวลา

ค่าที่อ่านได้สามารถนำมาคำนวณเป็นมาตราความถ่วงเอพีไอ (API Gravity) โดยเทียบเท่าความถ่วงจำเพาะ ซึ่งหน่วยความถ่วงเอพีไอมีความละเอียดกว่าความถ่วงจำเพาะและไม่ต้องอ่านตัวเลขหลังจุดทศนิยมหลายตำแหน่ง สามารถคำนวณหาค่าได้ดังสมการที่ 3.1

$$\text{ความถ่วงเอพีไอ (API Gravity)} = \frac{141.5}{\text{ความถ่วงจำเพาะ } 15.6 / 15.6 \text{ } ^\circ\text{C}} - 131.5 \quad (3.1)$$

3.2.2 ความหนืดจลนศาสตร์

การทดสอบความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic Viscosity) ของน้ำมันเชื้อเพลิง ภายใต้มาตรฐาน ASTM D445 โดยใช้เครื่องมือวัด Viscosity - Kinematic Capillary Tempering Bath High Temperature ซึ่งประกอบด้วยหลอดแก้วรูเล็กสำหรับวิเคราะห์ความหนืด ขायึดหลอดแก้วรูเล็ก อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิสำหรับวิเคราะห์ความหนืด และนาฬิกาจับเวลา

3.2.3 อุณหภูมิการกลั่น

การทดสอบอุณหภูมิการกลั่น (Distillation) ของน้ำมันเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM D86 โดยใช้เครื่องมือ Distillation at Atmospheric Pressure DU 4 - Economy (Manual) ประกอบด้วยชุดวัดค่าอุณหภูมิการกลั่น ขวดการกลั่น กระจกตวง นาฬิกาจับเวลา เทอร์โมมิเตอร์ และจุกยางซิลิโคน

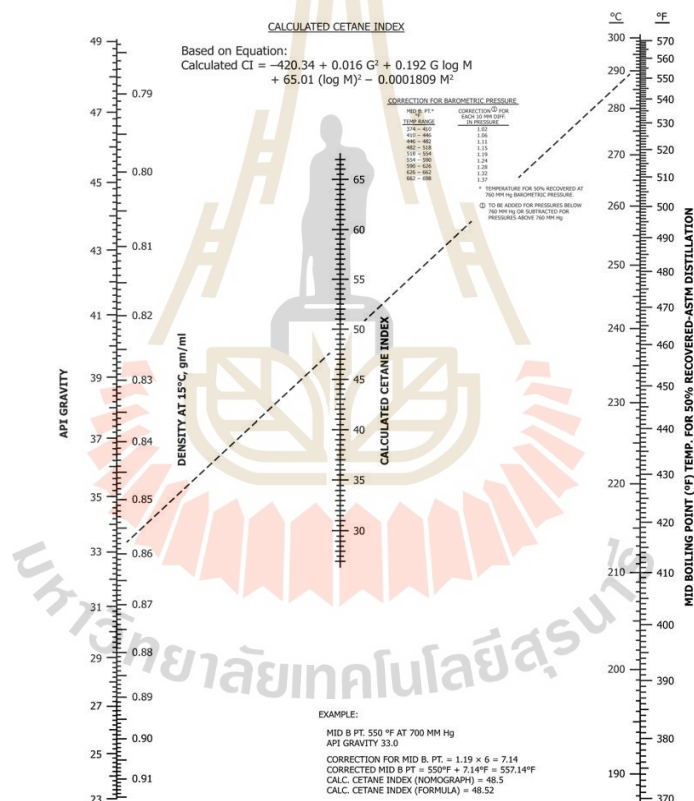
3.2.4 จุดวาบไฟ

การทดสอบจุดวาบไฟ (Flash Point) เป็นการทดสอบภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D93 เป็นการวัดอุณหภูมิขณะที่เชื้อเพลิงเกิดวาบไฟในภาชนะปิด เครื่องมือที่ใช้สำหรับการ

ทดสอบประกอบด้วย เครื่องมือทดสอบจุดวาบไฟแบบ Pensky – Marten Close Cup Apparatus ถ้วยใส่ตัวอย่างน้ำมันทดสอบ เทอร์มิเตอร์ และแก๊สหุงต้ม โดยตรวจวัดน้ำมันทดสอบที่มีอุณหภูมิจุดวาบไฟอยู่ในช่วง 40 ถึง 360 องศาเซลเซียส

3.2.5 ดัชนีซีเทน

การทดสอบหาค่าดัชนีซีเทน (Calculated Cetane Index: CCI) ของน้ำมันเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM D976 โดยได้มาจากความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการกลั่นที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร หรือจุดกึ่งกลางของการเดือด (Mid Boiling Point) และความหนาแน่นหรือความถ่วงเอพิโอที่อุณหภูมิ 15.6 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าดัชนีซีเทนสามารถหาได้จากโนโมกราฟ ดังรูปที่ 2 หรือคำนวณได้จากสมการที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โนโมกราฟ (Nomograph) สำหรับการหาค่าดัชนีซีเทน

$$CCI = -420.34 + 0.016G^2 + 0.192G \log M + 65.01(\log M)^2 - 0.0001809M^2 \quad (3.2)$$

- โดย CCI คือ ดัชนีซีเทน (Calculated Cetane Index)
 G คือ ความถ่วงเอพีไอ (API Gravity)
 M คือ อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของการเดือดที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร
 มีหน่วยเป็น °F

3.2.6 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง

การทดสอบค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Heating Value) ทำการทดสอบภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D240 โดยใช้เครื่องมือบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) ยี่ห้อ IKA รุ่น C5000 PKG 1/12 วิธีการทดสอบนี้จะวัดเป็นค่าความร้อนสูงหรือค่าความร้อนมวลรวม กล่าวคือ ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้รวมเข้ากับค่าความร้อนแฝงของการกลั่นตัวกลายเป็นไอของน้ำ

3.2.7 องค์ประกอบทางเคมี

การวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS) ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์หาสารประกอบทางเคมีในสารผสมทั้งในสถานะของแข็งของเหลว และแก๊ส ด้วยการวิเคราะห์ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ โดยอาศัยคุณสมบัติในการละลายและความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกันของสารแต่ละชนิดบนวัฏภาคเคลื่อนที่ (Mobile phase) และวัฏภาคคงที่ (Stationary phase) ซึ่งส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี จะประกอบไปด้วย แก๊สพา (Carrier gas), ส่วนฉีดสาร (Injector port), คอลัมน์และตู้อบคอลัมน์ (Column and Column oven), ตัวตรวจวัด (Detector) และคอมพิวเตอร์ที่มีซอฟต์แวร์สำหรับการประมวลผล ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS)

สำหรับขั้นตอนในการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันเชื้อเพลิงสามารถกล่าวได้โดยสังเขปคือ ภายในระบบแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) จะมีแก๊สพาที่เคลื่อนที่อยู่ในระบบ โดยตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าสู่ระบบ GC ทางส่วนฉีดสารที่อยู่ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิและเป็นระบบปิด ซึ่งภายใต้อุณหภูมิที่สูงของส่วนฉีดสารน้ำมันเชื้อเพลิงจะถูกทำให้เปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ และเคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์พร้อมแก๊สพาภายในคอลัมน์ ซึ่งมีวัฏภาคคงที่เคลือบอยู่บนของแข็งรองรับหรือเคลือบอยู่บนท่อ สารอินทรีย์ในตัวอย่างจะเกิดแรงกระทำกับวัฏภาคคงที่ ด้วยสมบัติของสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันทำให้สารอินทรีย์แต่ละชนิดมีแรงกระทำที่แตกต่างกัน เป็นผลให้วัฏภาคคงที่เหนี่ยวรั้งสารอินทรีย์แต่ละชนิดได้ไม่เท่ากัน สารอินทรีย์จึงเกิดการแยกออกจากกันภายในคอลัมน์นี้และสุดท้ายสารอินทรีย์จะเดินทางออกจากคอลัมน์เข้าสู่ตัวตรวจวัดในเวลาที่แตกต่างกัน สัญญาณที่ตรวจวัดได้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์และส่งผลไปยังส่วนประมวลผลและบันทึกผล สารอินทรีย์เมื่อเดินทางผ่านตัวตรวจวัดสัญญาณก็จะถูกระบายทิ้งออกจากระบบ GC ไปพร้อมกับแก๊สพา โดยระบบ GC ที่กล่าวมานั้นจะทำงานภายใต้การควบคุมและประมวลผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งข้อมูลเงื่อนไขของสถานะการวิเคราะห์ที่ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลสถานะการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี

แก๊สโครมาโทกราฟี (GC condition)	
อุณหภูมิตู้อบคอลัมน์ (Column oven temperature)	50 °C
โหมดการฉีด (Injection mode)	Split
อัตราส่วนการแยก (Split ratio)	20 : 1
ปริมาตรการฉีด (Injection volume)	1 μ l
อุณหภูมิการฉีด (Injection temperature)	350 °C
ขนาดและความยาวของคอลัมน์ (Diameter & length column)	0.25 mm / 60 m
อัตราการไหลในคอลัมน์ (Column flow)	1.0 mL/min
แก๊สพา (Carrier gas)	Helium
แมสสเปกโตรเมตรี (MS condition)	
ชนิดการสแกน (Scan type)	MS1 scan
อุณหภูมิ (Source temperature)	250 °C
ช่วงมวลต่อประจุของตัวตรวจวัด (Mass to charge range)	35-550 m/z

3.3 การผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติก

น้ำมันจากขยะพลาสติกที่ใช้ในการทดสอบแบ่ง ออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) น้ำมันขยะพลาสติกแบบผสมจากโรงงานผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสของศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2) น้ำมันจากพลาสติกประเภทขวดและฝาขวดพลาสติกที่ผลิตจากชุดผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดคงที่ (Pyrolysis Fixed-Bed Reactors) ขนาดเล็กและชุดผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดคงที่ขนาดกำลังการผลิต 100 กิโลกรัม

3.3.1 น้ำมันขยะพลาสติกแบบผสม

น้ำมันขยะพลาสติกแบบผสมใช้น้ำมันที่ได้จากโรงงานผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติก ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี กระบวนการผลิตน้ำมันขยะพลาสติกเริ่มต้นจากการนำวัตถุดิบเชื้อเพลิงขยะพลาสติกที่ผ่านการเตรียม ลำเลียงเข้าสู่เครื่องป้อนแบบเกลียวที่อัตราประมาณ 250 กิโลกรัมต่อชั่วโมงโดยที่ตัวสกรูจะมีการให้ความร้อนเพื่อทำให้พลาสติกหลอมเหลวและระเหยออกเป็นไอเมื่อได้รับความร้อนสูงขึ้นหลังจากนั้นพลาสติกเหลวจะไหลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์แบบถังกวนที่มีใบกวนทำงานอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 350 -400 องศาเซลเซียส เมื่อพลาสติกเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอจะไหลขึ้นไปสู่หอกลั่นที่อุณหภูมิประมาณ 340 องศาเซลเซียสและที่หอกลั่นจะทำหน้าที่แยกไอน้ำมัน โมเลกุลหนักและเบาออกจากกันหลังจากนั้นไอน้ำมันจะเข้าสู่เครื่องควบแน่นแล้วไหลลงสู่ถังแยกน้ำออกจากน้ำมัน โดยน้ำจะแยกส่วนลงด้านล่างและน้ำมันจะลอยขึ้นด้านบนของถังเมื่อน้ำมันที่ได้มีปริมาณที่พอแล้วจะไหลข้ามไปสู่ถังพักส่วนก๊าซที่เหลือที่ยังไม่ควบแน่นจะไหลลงสู่เครื่องควบแน่นชุดถัดไปที่ติดตั้งอยู่เหนือถังพักน้ำมันซึ่งจะทำหน้าที่ควบแน่นไอน้ำมันที่เหลือและลดอุณหภูมิของแก๊สที่เหลือจะเป็นแก๊สธรรมชาติและจะถูกนำกลับมาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการให้ความร้อนแก่เตาปฏิกรณ์ต่อไปโดยน้ำมันที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวจะเป็นน้ำมันผสมซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ น้ำมันดีเซลร้อยละ 50-60 แนฟทาร้อยละ 15 หรือ 20 น้ำมันเตาร้อยละ 5 - 10 ซึ่งสามารถนำไปกลั่นอีกรอบหนึ่งเพื่อให้ได้น้ำมันที่สามารถนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์ได้ ส่วนสุดท้ายที่ไม่ระเหยในเตาปฏิกรณ์จะได้เป็นกากคาร์บอนร้อยละ 10 - 25 ซึ่งสามารถนำไปใช้ทดแทนถ่านหินในงานอุตสาหกรรมได้ จากข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ต้นทุนในการผลิตน้ำมันขยะพลาสติกแบบผสมด้วยกระบวนการไพโรไลซิสของศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล พบว่า น้ำมันจากขยะพลาสติกผสมที่กลั่นและยังไม่ผ่านกระบวนการกลั่นมีต้นทุนอยู่ที่ 10.9 และ 8.4 บาทต่อลิตร ตามลำดับ โดยคิดเป็นต้นทุนการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมต่อปริมาณขยะพลาสติกผสมอยู่ที่ 6 - 7 บาทต่อกิโลกรัม



รูปที่ 3.4 การผลิตน้ำมันขยะพลาสติกผสมด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้าน
ชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

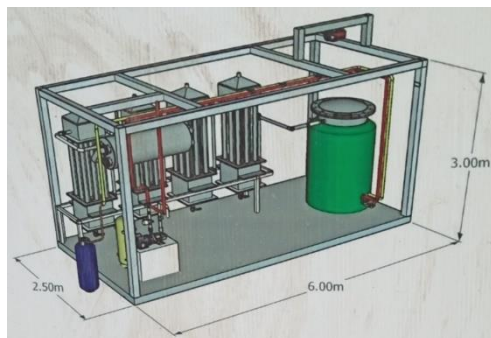
3.3.2 น้ำมันจากพลาสติกฝาขวดประเภทโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงและพลาสติก ขวดใสประเภทโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลต

น้ำมันจากขยะพลาสติกฝาขวดและขวดพลาสติก ผลิตจากชุดผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดคงที่ (Fixed-Bed Reactors) ขนาดเล็ก กระบวนการผลิตน้ำมันที่ผลิตจากวัตถุดิบประเภทขวดพลาสติก ฝาขวดพลาสติกต้องนำขยะพลาสติกทั้ง 2 ประเภทที่คัดแยกออกมาแล้วและนำมาทำการบดย่อย ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ ภายในมีลักษณะเป็นถัง 2 ชั้น ชั้นในเป็นถังปฏิกรณ์แบบ Fixed Bed ปริมาตร 10 ลิตร มีลักษณะเป็นถังมีฝาปิดและซีลกันอากาศ มีเกจวัดอุณหภูมิ สำหรับบรรจุขยะพลาสติก HDPE /PET ที่บดย่อย ชั้นนอกมีลักษณะเป็นเปลือกเพื่อนำความร้อนจากขดลวดไฟฟ้าถ่ายเทแลกเปลี่ยนความร้อนไปยังเศษขยะพลาสติก HDPE /PET ที่บดย่อยภายในถังปฏิกรณ์ โดยสามารถบรรจุขยะพลาสติกสูงสุดได้ครั้งละ 5 กิโลกรัม เมื่อความร้อนถึงจุดที่ขยะพลาสติกละลายเป็นไอในสภาวะอับอากาศแล้ว ไอที่เกิดขึ้นซึ่งมีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนจะลอยขึ้นผ่านเข้าสู่ชุดควบแน่น โดยภายในชุดควบแน่นมีลักษณะเป็นท่อ 2 ชั้น ชั้นในเป็นท่อที่รับไอมาจากถังปฏิกรณ์ ชั้นนอกเป็นเปลือกเพื่อนำน้ำหล่อเย็นวิ่งผ่าน เข้า-ออก เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนและทำให้เกิดการควบแน่นจากไอก๊าซเป็นน้ำมันดิบไหลล้นจากท่อออกมาด้านใต้ชุดควบแน่นลงสู่ภาชนะบรรจุ



รูปที่ 3.5 การผลิตน้ำมันขยะพลาสติกด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส แบบเบดคงที่ (Fixed-Bed Reactors) ขนาดเล็ก

การผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกประเภทขวดและฝาขวดพลาสติก ที่ผลิตจากชุดผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดคงที่ขนาดกำลังการผลิต 100 กิโลกรัมต่อครั้ง มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับชุดผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดคงที่ (Fixed-Bed Reactors) ขนาดเล็กเพียงแต่ขยายขนาดถึงปฏิกรณ์และชุดควบแน่นให้มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยมีปริมาตรถึงประมาณ 350 ลิตรและบรรจุขยะพลาสติกสูงสุดได้ครั้งละ 100 กิโลกรัม โดยอาศัยความร้อนของการเผาไหม้จากชุดหัวพ่นซึ่งใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ผลิต จากข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ต้นทุนในการผลิตน้ำมันขยะพลาสติกแบบผสมด้วยกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดคงที่ พบว่าน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมที่ยังไม่ผ่านกระบวนการกลั่นมีต้นทุนอยู่ที่ 15 บาทต่อลิตร ตามลำดับ โดยคิดเป็นต้นทุนการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมต่อปริมาณขยะพลาสติกผสมอยู่ที่ 8 - 10 บาทต่อกิโลกรัม



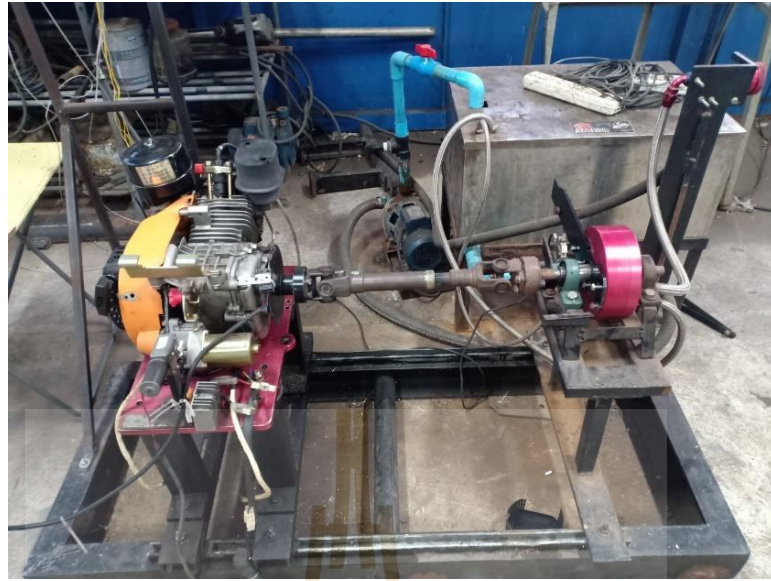
รูปที่ 3.6 การผลิตน้ำมันขยะพลาสติกด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิส แบบเบดคงที่ (Fixed-Bed Reactors) ขนาดกำลังการผลิต 100 กิโลกรัมต่อครั้ง

3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลจะทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวทางการเกษตร และเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวที่สามารถรับอัตราส่วนกำลังอัดแปรผันได้โดยเครื่องยนต์จะติดตั้งเข้ากับไดนาโมมิเตอร์และทำการติดตั้งอุปกรณ์การวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ แรงบิด อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ความเร็วรอบ อุณหภูมิไอดี และอุณหภูมิไอเสีย โดยมีข้อมูลรายละเอียดเครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบที่สำคัญดังต่อไปนี้

3.4.1 เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยว

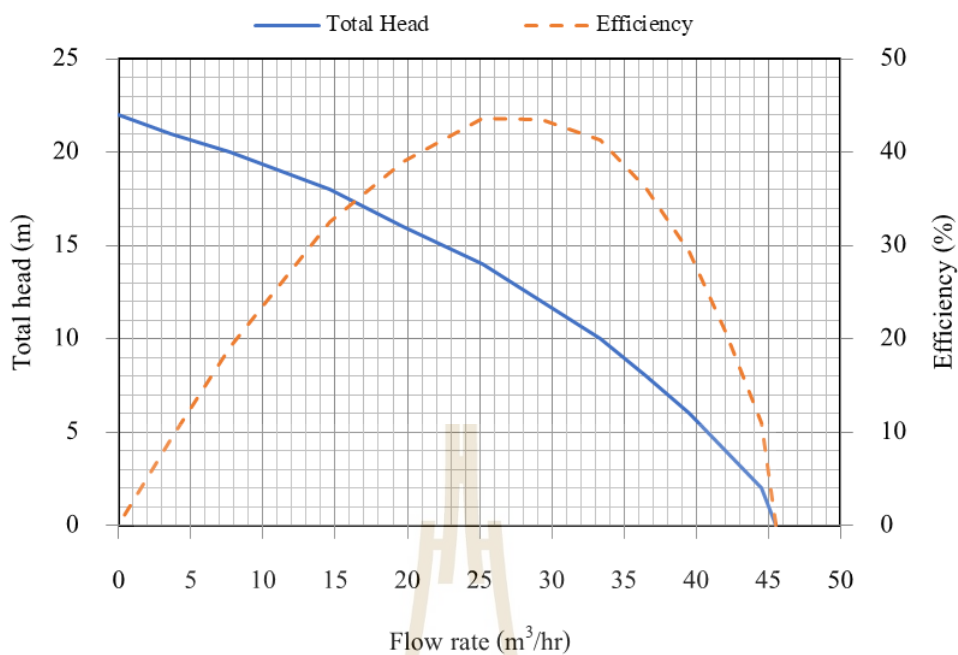
เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวเป็นเครื่องยนต์ที่ใช้ในทางการเกษตรขนาดความจุของเครื่องยนต์ 196 ซีซี ระบายความร้อนด้วยอากาศ ดังตารางที่ 3.2 แสดงข้อมูลและรายละเอียดเครื่องยนต์ KAWAMA 500D โดยเครื่องยนต์สูบเดี่ยวนี้จะใช้ทำการทดสอบทั้งหมด 2 การทดสอบ คือ การทดสอบระยะสั้นแสดงดังรูปที่ 3.7 และการทดสอบระยะยาวแสดงดังรูปที่ 3.8 ในการทดสอบระยะยาวจะจำลองการปั้มน้ำเป็นระบบปิดกราฟสมรรถนะของปั้มน้ำแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 และตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.7 เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.8 การติดตั้งเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวใช้ในการทดสอบระยะยาว



รูปที่ 3.9 กราฟสมรรถนะปั้มน้ำที่ติดตั้งเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว

Engine	Specification
Engine Model	KAWAMA 500D
Engine type	4-Stroke, 1 cylinder, Air Cooled, Direct injection
Bore x Stroke	68 × 54 mm
Total piston displacement	196 cc
Compression ratio	22:1
Rated power	3 hp @3,000 rpm

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลการทดสอบปั้มน้ำ

รุ่น	QR168F	
กำลังเครื่องยนต์	2.9 แรงม้า	
ข้อมูลเพิ่มเติม	ปั้มน้ำขนาด 3 นิ้ว ความสูงใบพัดเท่ากับ 27 มม. จำนวน 4 ครีบ	
Head (m)	Flow rate (m ³ /h)	Efficiency (%)
0	45.5	0.00
2	44.5	11.01
4	42	20.79
6	39.5	29.33
8	36.5	36.13
10	33.4	41.33
12	29.3	43.51
14	25.2	43.65
16	19.7	39.00
18	14.6	32.52
20	7.7	19.06
21	3.6	9.35
22	0	0.00

3.4.2 เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวอัตราส่วนกำลังอัดแปรผัน

เครื่องยนต์ทดสอบเป็นเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวที่สามารถปรับอัตราส่วนกำลังอัดได้จาก 12:1 ถึง 18:1 โดยขนาดความจุของเครื่องยนต์เท่ากับ 661.5 ซีซี ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ดังรูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของเครื่องยนต์และการติดตั้ง ตารางที่ 3.4 แสดงข้อมูลและรายละเอียดเครื่องยนต์



รูปที่ 3.10 เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวแบบแปรผันอัตราส่วนกำลังอัดที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวแบบแปรผันอัตราส่วนกำลังอัด

Engine	Specification
Engine Model	240PE
Engine type	4-Stroke, 1-cylinder, Water Cooled, Direct injection
Bore x Stroke	87.5 × 110 mm
Total piston displacement	661.5 cc
Compression ratio	12:1-18:1
Rated Power	3.5 kW @1500 rpm
Fuel injection timing (BTDC)	23 degree

3.4.3 ไตนาโมมิเตอร์

ไตนาโมมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองภาระของเครื่องยนต์ ซึ่งอาศัยหลักการของการดูดกลืนพลังงานจากเครื่องยนต์ ไตนาโมมิเตอร์หากแบ่งตามการพิจารณาวิธีการดูดกลืนพลังงานสามารถแบ่งออกได้หลายชนิด โดยในงานวิจัยนี้จะใช้อยู่ 2 ชนิด ได้แก่ ไตนาโมมิเตอร์ชนิดใช้น้ำ (Water brake) และไตนาโมมิเตอร์ใช้กระแสเหนี่ยวนำ (Eddy current brake) และ โดยข้อมูลรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

1) ไดนาโมมิเตอร์ชนิดใช้น้ำเป็นตัวเบรก (Water brake) สำหรับทดสอบกับเครื่องยนต์สูบเดียวทางการเกษตร



รูปที่ 3.11 ไดนาโมมิเตอร์ชนิดใช้น้ำเป็นตัวเบรก

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลจำเพาะของไดนาโมมิเตอร์ชนิดใช้น้ำเป็นตัวเบรก

Model/Type	DYNOMITE/ Water Brake
Maximum power	7.5 kW (10 bhp)
Maximum speed	10,000 rpm
Cooling system	Water Cooling

2) ไดนาโมมิเตอร์ชนิดใช้กระแสเหนี่ยวนำเป็นตัวเบรก (Eddy current brake) ที่ใช้กับเครื่องยนต์อัตราส่วนกำลังอัดแปรผัน



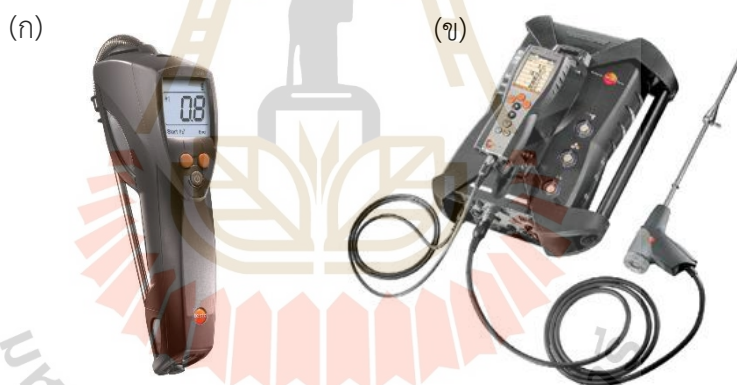
รูปที่ 3.12 ไดนาโมมิเตอร์ใช้กระแสเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 3.6 ข้อมูลจำเพาะของไดนาโมมิเตอร์ใช้กระแสเหนี่ยวนำ

Model	AG10
Maker	Saj Test Plant Pvt. Ltd.
Hot coil voltage max.	60 VDC
Continuous current amps	5.0 A
Speed max	10,000 rpm

3.4.4 เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย

เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Flue Gas Analyzer) สำหรับการทดสอบจะใช้ประกอบด้วยเครื่องมือวัด TESTO รุ่น TESTO 350 เครื่องมือวัด HORIBA รุ่น MEXA - 584L เครื่องมือวัดเขม่า MAHA รุ่น MDO 2 LON และเครื่องมือวัดดัชนีเขม่า TESTO รุ่น TESTO 308 โดยรายละเอียดข้อมูลเครื่องมือวัดดังนี้



รูปที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Flue Gas Analyzer)

(ก) เครื่องมือวัด TESTO รุ่น TESTO 308

(ข) เครื่องมือวัด TESTO รุ่น TESTO 350



รูปที่ 3.14 เครื่องมือวิเคราะห์แก๊สไอเสีย HORIBA รุ่น MEXA - 584L



รูปที่ 3.15 เครื่องมือวัดค่าดัชนีเขม่า MAHA รุ่น MDO 2 LON

ตารางที่ 3.7 ข้อมูลจำเพาะเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Testo 350

Measurement Parameter	Measurement Range	Accuracy	Resolution
O ₂	0 – 25 vol.%	± 2 vol%	0.01 vol%
CO, H ₂ -comp.	0 – 10000 ppm	± 10 ppm (0-199 ppm) ± 5 ppm of reading (200-2000 ppm) ± 10 ppm of reading (rest of range)	1 ppm
CO _{low} , H ₂ -comp.	0 – 500 ppm	± 2 ppm (0-39.9 ppm) ± 5 ppm of reading (rest of range)	0.1 ppm
NO	0 – 4000 ppm	± 5 ppm (0-99 ppm) ± 5 ppm of reading (100-1999 ppm) ± 10 ppm of reading (rest of range)	1 ppm
NO _{low}	0 – 300 ppm	± 2 ppm (0-39.9 ppm) ± 5 ppm of reading (rest of range)	
NO ₂	0 – 500 ppm	± 5 ppm (0-99 ppm) ± 5 ppm of reading (rest of range)	0.1 ppm
CO ₂ (IR)	0 – 50 vol.%	± 0.3 vol.% (0-39.9 vol. %) ± 0.5 vol. % ± 0.5 vol. % of reading (rest of range)	0.01 vol% (0-25 vol %) 0.1 vol% (>25 vol %)

ตารางที่ 3.7 ข้อมูลจำเพาะเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Testo 350 (ต่อ)

Measurement Parameter	Measurement Range	Accuracy	Resolution
HC	Natural gas: 100 – 40000 ppm Propane: 100 – 21000 ppm Butane: 100 – 18000 ppm	± 400 ppm (100-4000 ppm) $\pm 10\%$ of reading (rest of range)	10 ppm

ตารางที่ 3.8 ข้อมูลจำเพาะเครื่องมือวัดดัชนีเขม่าควัน Testo 308

Technical Data	
Sensor Type	Photodiode
Measuring Range	0 to 6 RZ
Accuracy ± 1 digit	± 0.2 RZ
Resolution	0.1 RZ
General Technical Data	
Pump Capacity	1.63 ± 0.1 l
Reference Filter	At 990 mbar and +20 °C Ambient Temperature
Display	Segment display with background illumination
Norms and Tests	1.BImSchV, METAS, EU-Guideline 2004/108/EG
Operating Temperature	+5 to +45 °C
Storage Temperature	-20 to +50 °C
Protection Class	IP40
Interfaces	IR / IRDA Interface
Gas Sampling	Stainless Steel Pipe ca. 220 mm, Rubber Hose 100 mm

ตารางที่ 3.9 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องมือวัด HORIBA รุ่น MEXA-584L

Items	Specification
Model	Opacimeter - MAHA MDO2-LON
Measurement principle	Absorption photometry
Wave length of the spotlight	567 nm
Measurement chamber length	430 mm
External/Internal diameter of test chamber	28 mm / 25mm
Warm-up time of the measurement chamber approx.	180 s
Measurement range turbidity	0 – 100 %
Measuring range absorption coefficient	0 – m ⁻¹

ตารางที่ 3.10 ข้อมูลทั่วไปของเครื่องมือวัดเขม่า MAHA รุ่น MDO 2 LON

Items	Specification
Model	Horiba MEXA-584L
Standard norm	ISO3930 / OIML R99 (2000) Klasse 0, CE
Measure the composition	CO: 0.00% Vol. – 10.00% Vol. HC: 0 ppm Vol. – 10.000 ppm Vol. 0 ppm Vol. – 20.000 ppm Vol.
Measure the composition	CO ₂ : 0.00% Vol. – 20.00% Vol. Lambda: 0.000 – 9.999
Option	O ₂ : 0.00% Vol. – 25.00% Vol. NO: 0 ppm Vol. – 5.000 ppm Vol.
Precision	CO: 0.01% Vol. HC: 1 ppm Vol. CO ₂ : 0.02% Vol. Lambda: 0.001

3.4.5 ชุดเครื่องมือวิเคราะห์การเผาไหม้ในเครื่องยนต์

เครื่องมือวิเคราะห์การเผาไหม้ในเครื่องยนต์จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ชุดเครื่องมือวัดความดันในกระบอกสูบ (In-cylinder pressure) ซึ่งจะประกอบด้วยเซนเซอร์วัดความดัน (Pressure sensor) และเครื่องขยายสัญญาณ (Amplifier) และ ชุดเครื่องมือวัดองศาเพลาคือข้อเหวี่ยงซึ่งจะทำหน้าที่วัดความเร็วรอบ องศาการหมุนและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงบนของเครื่องยนต์ ข้อมูลที่ได้จากการวัดจะสามารถนำไปวิเคราะห์การเผาไหม้ในเครื่องยนต์ได้ โดยรายละเอียดข้อมูลของเครื่องมือ แสดงดังตารางที่ 3.11



รูปที่ 3.16 เครื่องขยายสัญญาณความดันในกระบอกสูบ

ตารางที่ 3.11 ข้อมูลจำเพาะเครื่องมือวิเคราะห์การเผาไหม้

Pressure Sensor	
Items	Specification
Measuring range	0 – 250/0 – 300* bar
Sensitivity	≈ -20/ ≈ -19*
Natural frequency	≈ 160 kHz
Linearity	≤ ± 0.3 / ≤ ± 0.5*
Temperature range	-20 – 350
Mounting bore	

ตารางที่ 3.11 ข้อมูลจำเพาะเครื่องมือวิเคราะห์การเผาไหม้ (ต่อ)

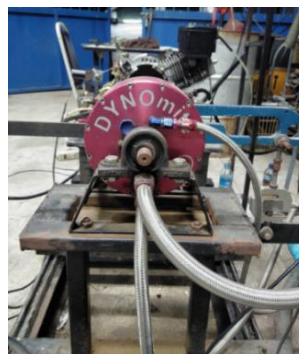
Crank Angel Encoder	
Model	Crank Angle Encoder Type 2614C11
Crank angle signal	720 x 0.5 degree
Speed range	0 – 12000 1/min
Temperature range	-40 – 85 °C
Mechanical Interface/Mounting diameter (mounting compatibility to Type 2614B1)	60 mm.
Encoder Electronics	
Model	Encoder Electronics Type 2614C21
Control & Indication LED's	Power, Rotation CW ¹ /CCW ² , Trigger, Synchronization
Output signal to Indicating System	LVDS - Signal TTL - Signal
Temperature range	-30 – 70 °C

3.5 การติดตั้งและทดสอบเครื่องยนต์

การติดตั้งและทดสอบเครื่องยนต์จะแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) การติดตั้งและทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวทางการเกษตร 2) การติดตั้งและทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวแบบแปรผันอัตราส่วนกำลังอัด ในการทดสอบเครื่องยนต์จะทำการวัดค่าสมรรถนะเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสียที่ปล่อยจากเครื่องยนต์ดีเซล และ 3) การทดสอบระยะยาวเพื่อดูการสึกหรอของเครื่องยนต์

3.5.1 การติดตั้งและทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวทางการเกษตร

การติดตั้งและทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวทางการเกษตรจะเป็นการทดสอบเพื่อศึกษาถึงผลของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ โดยศึกษาผลของสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย จากการใช้ น้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการแปรรูปเป็นพลังงานด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่ยังไม่ผ่านขั้นตอนการกลั่นลำดับส่วนผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ โดยขั้นตอนการติดตั้งและทดสอบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



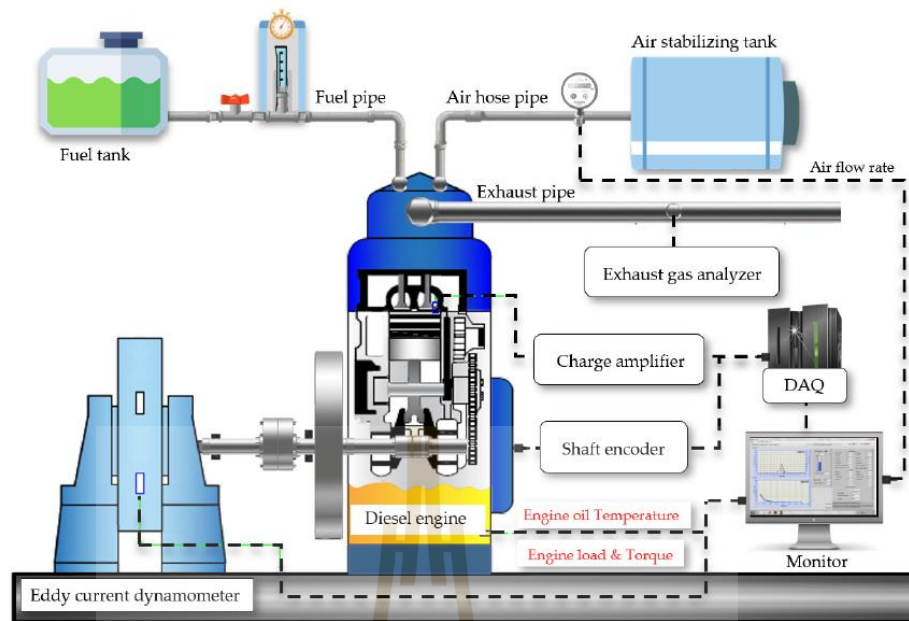
รูปที่ 3.17 การติดตั้งเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวทางการเกษตรเข้ากับไดนาโมมิเตอร์

- 1) ติดเครื่องยนต์แล้วปล่อยให้เครื่องยนต์เดินเบาประมาณ 10 นาที จึงเริ่มการทดสอบ
- 2) ทดสอบด้วยการปรับโหลดให้กับเครื่องยนต์ที่ 25% ของกำลังสูงสุด และคงความเร็วรอบเครื่องยนต์อยู่ที่ 1,500 รอบต่อนาที
- 3) ทำการเพิ่มโหลดโดยปรับให้อัตราการไหลเข้าของน้ำที่ไหลเข้าสู่ไดนาโมมิเตอร์เพิ่มขึ้น จากนั้น ปรับการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อให้รอบกลับมาคงที่ แล้วจึงจดบันทึกค่าต่าง ๆ
- 4) ทำการทดสอบซ้ำตามขั้นตอนการปฏิบัติจากข้อที่ (1) ถึงข้อที่ (3) โดยปรับความเร็วรอบที่ 1,500 รอบต่อนาที และเปลี่ยนแปลงภาระกรรมที่ทดสอบเป็น 50%, 75% ของกำลังสูงสุดตามลำดับ

3.5.2 การติดตั้งและทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวอัตราส่วนกำลังอัดแปรผัน

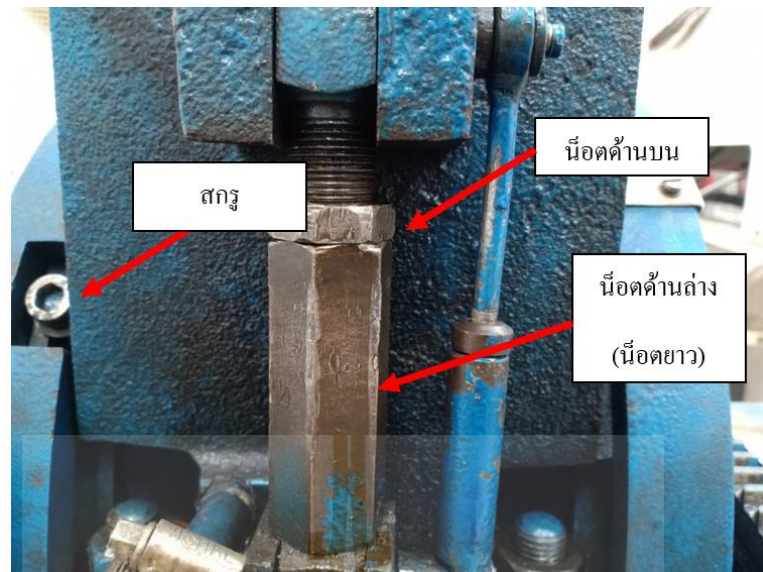
การติดตั้งและทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวอัตราส่วนกำลังอัดแปรผันจะใช้สำหรับการทดสอบเพื่อศึกษาถึงผลของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์แบบแปรผันอัตราการอัด สำหรับเป็นแนวทางการปรับแต่งเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวทางการเกษตรจากการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติก โดยขั้นตอนการติดตั้งและทดสอบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ทำการติดตั้งเครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบเข้ากับไดนาโมมิเตอร์โดยใช้เพลาส่งกำลังเชื่อมต่อต่อระหว่างเครื่องยนต์กับแกนของไดนาโมมิเตอร์
- 2) ติดตั้งระบบการวัดค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ของเครื่องยนต์ ได้แก่ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง อุณหภูมิอากาศเข้าเครื่องยนต์ อุณหภูมิไอเสีย และอัตราการไหลของอากาศ

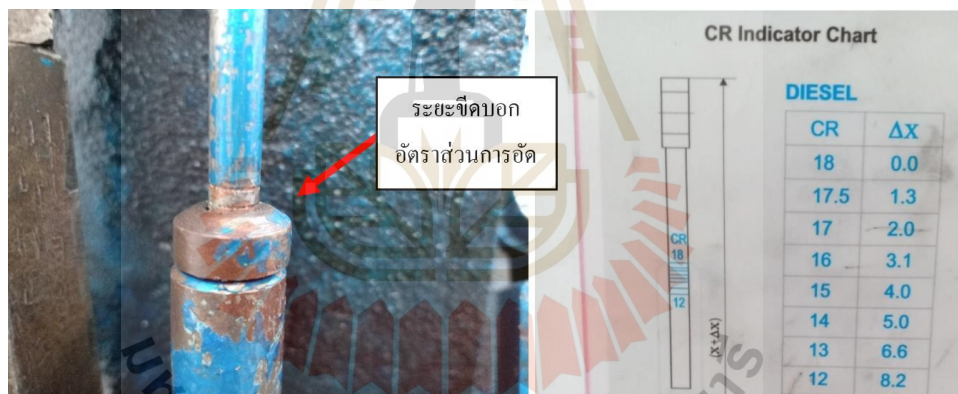


รูปที่ 3.18 การติดตั้งเครื่องยนต์อัตราส่วนกำลังอัดแปรผันเข้ากับไดนามิเตอร์

- 3) ติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดคุณลักษณะการเผาไหม้ โดยเซนเซอร์วัดความดันจะติดตั้งเข้าที่ฝาสูบที่ทำการเจาะเพื่อติดตั้งเซนเซอร์วัดความดันมาโดยเฉพาะ และติดตั้งเซนเซอร์วัดตำแหน่งองศาเพลาค้อเหวี่ยงเข้าที่เพลาค้อเหวี่ยง สัญญาณของเซนเซอร์ทั้งสองจะผ่านตัวขยายสัญญาณและเข้าโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้
- 4) ติดตั้งอุปกรณ์วิเคราะห์แก๊สไอเสียที่ปลายท่อไอเสีย เพื่อวัดค่าไอเสียจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์
- 5) ทำการปรับอัตราส่วนกำลังอัดเป็น 16:1 โดยการคลายสกรูและน็อตล็อคด้านบนจากนั้นให้ทำการใช้ประแจหมุนน็อตยาวจนกว่าจะถึงเส้นสีขาวแสดง ดังรูปที่ 3.19 ซึ่งเส้นสีขาวแสดงถึงอัตราส่วนกำลังอัดที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตแสดง ดังรูปที่ 3.20 เมื่อปรับอัตราส่วนการอัดเสร็จให้ทำการขันน็อตล็อคให้เรียบร้อย



รูปที่ 3.19 วิธีการปรับอัตราส่วนการอัด



รูปที่ 3.20 ชีตแสดงอัตราส่วนการอัด

6) เริ่มติดเครื่องยนต์โดยให้ทำงานที่รอบเดินเบาประมาณ 10 นาที เพื่อให้เครื่องยนต์อยู่ในช่วงอุณหภูมิการทำงาน

7) เริ่มทำการทดสอบด้วยการปรับโวลต์ให้กับเครื่องยนต์ที่ 25% ของกำลังสูงสุดหรือมีค่าเท่ากับ 3.75 นิวตันเมตร และคงความเร็วรอบเครื่องยนต์อยู่ที่ 1,500 รอบต่อนาที โดยการปรับค่าความเร็วรอบยอมรับค่าความผิดพลาดได้ ± 10 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.21 การปรับโหลดและความเร็วรอบเครื่องยนต์

- 8) ทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ แรงบิด ความเร็วรอบและจับเวลา อัตราการกินน้ำมันเชื้อเพลิงโดยปริมาตรที่ในกาวัดจะอยู่ที่ 10 มิลลิลิตร ทำการเก็บค่าทั้งหมด 3 ครั้ง
- 9) ทำการเก็บค่ามลพิษด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ไอเสีย ได้แก่ NO_x , CO, HC และ Smoke
- 10) ทำการเก็บค่าตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์การเผาไหม้ ได้แก่ ค่าความดันในกระบอกสูบและองศาเพลาช้อเหวี่ยง
- 11) ทำการทดสอบซ้ำตามขั้นตอนการปฏิบัติจากข้อที่ (1) ถึงข้อที่ (10) โดยปรับความเร็วรอบที่ 1,500 รอบต่อนาที และเปลี่ยนแปลงภาระกรรมที่ทดสอบเป็น 50%, 75% ของกำลังสูงสุดตามลำดับ
- 12) เมื่อทดสอบที่อัตราส่วนการอัด 16:1 เสร็จ ทำการเปลี่ยนอัตราส่วนการอัดเป็น 17:1 และ 18:1 จากนั้นให้ทำการทดสอบซ้ำตามขั้นตอนการปฏิบัติจากข้อที่ (1) ถึงข้อที่ (11)

3.5.3 การทดสอบระยะยาวเพื่อดูการสึกหรอของเครื่องยนต์

ขั้นตอนวิธีการทดสอบระยะยาว

- 1) ถอดชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ได้แก่ แหวนลูกสูบ ลูกสูบ วาล์ว เพลาช้อเหวี่ยง และสลักสูบออกมาวัดขนาด ชั่งน้ำหนักและถ่ายรูปชิ้นส่วนต่าง ๆ ก่อนทำการทดสอบระยะยาว 220 ชั่วโมงการทำงาน

- 2) ประกอบเครื่องยนต์เตรียมนำไปทดสอบสมรรถนะ
- 3) นำเครื่องยนต์ไปทดสอบสมรรถนะหากราฟแรงบิดและกำลังก่อนที่จะนำเครื่องยนต์ไปทดสอบระยะยาว โดยวิธีการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ทำได้ ซึ่งขั้นตอนแรกให้สตาร์ทเครื่องยนต์ที่รอบเดินเบาและรอให้อุณหภูมิน้ำมันเครื่องไม่ต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเพิ่มคันเร่งไปที่ตำแหน่งเปิดสุด เพื่อให้อากาศเข้าเครื่องยนต์ได้มากที่สุด (ความเร็วรอบเครื่องยนต์อยู่ที่ 3,200 รอบต่อนาที) เมื่อเครื่องยนต์อยู่สภาวะคงตัว ให้ทำการจ่ายโหลดให้ความเร็วเครื่องยนต์ตกมาที่ 3,000 รอบต่อนาที ให้อ่านค่าโหลดที่แสดงและจดบันทึกค่าไว้ ให้ทำซ้ำแบบเดียวกันที่ความเร็วรอบ 2,800, 2,600, 2,400, 2,200 และ 2,000 รอบต่อนาที
- 4) นำเครื่องยนต์ไปติดตั้งกับชุดทดสอบระยะยาว เมื่อติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้วให้ทำการอุ่นเครื่องยนต์โดยสตาร์ทเครื่องยนต์ที่รอบเดินเบา 2,000 รอบต่อนาที ให้อุณหภูมิ น้ำมันเครื่องเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิการทำงาน of เครื่องยนต์
- 5) ปรับอัตราการไหลของน้ำให้มีค่าเท่ากับ 557 ลิตรต่อนาที เฮดเท่ากับ 10 เมตร ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 3,000 รอบต่อนาที ทดสอบเครื่องต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง
- 6) ทำการทดสอบวันละ 12 ชั่วโมงโดยแบ่งการทดสอบครั้งละ 3 ชั่วโมง และหยุดพัก 1 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการเสียหายของเครื่องยนต์ ทำต่อเนื่องแบบนี้ต่อไปจนระยะเวลาทดสอบครบ 220 ชั่วโมงชั่วโมงการทำงาน
- 7) เมื่อทดสอบครบ 20 ชั่วโมงชั่วโมงการทำงาน ให้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันเครื่อง เพื่อเตรียมส่งทดสอบ และทำเช่นเดียวกับที่ 120 และ 220 ชั่วโมงการทำงาน
- 8) เมื่อทดสอบครบ 220 ชั่วโมงการทำงาน นำเครื่องยนต์ไปทดสอบสมรรถนะเพื่อหาค่าแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์หลังทดสอบ
- 9) ถอดชิ้นส่วนเครื่องยนต์ได้แก่ แหวนลูกสูบ ลูกสูบ วาล์ว เฟลาข้อเหวี่ยง และสลักสูบออกมาวัดขนาด ชั่งน้ำหนักและถ่ายรูปชิ้นส่วนต่าง ๆ หลังการทดสอบระยะยาว 220 ชั่วโมง ชั่วโมงการทำงาน

ในการทดสอบระยะยาวได้มีการซ่อมบำรุงตามคู่มือการใช้งานเครื่องยนต์ โดยมีการตั้งระยะห่างวาล์วตามค่ามาตรฐานของโรงงาน และทำความสะอาดกรองอากาศทุก ๆ 100 ชั่วโมงการทำงาน ตามที่มีการเปลี่ยนน้ำมันเครื่องตอนที่ระยะเวลา 20 ชั่วโมงการทำงาน เพื่อชำระล้างเศษเหล็กหรือสิ่งสกปรกในช่วงการทำงานเริ่มต้นของเครื่องยนต์หลังจากนั้นจะเปลี่ยนน้ำมันเครื่องทุก ๆ 100 ชั่วโมงการทำงาน

ตารางที่ 3.12 ตารางซ่อมบำรุงเครื่องยนต์ตามคำแนะนำบริษัท

รายการตรวจสอบ	ระยะเวลา			
	ก่อนเริ่มทดสอบ	ทุก ๆ 20 ชั่วโมง	ทุก ๆ 50 ชั่วโมง	ทุก ๆ 100 ชั่วโมง
ระดับน้ำมันเครื่อง	✓			
ระดับน้ำมันเครื่องในกรองอากาศ	✓			
เปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่อง		✓		✓
ทำความสะอาดกรองอากาศ			✓	
ปรับตั้งระยะห่างวาล์ว				✓

3.6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในการทดสอบได้แบ่งการวิเคราะห์ผลเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง และทำการวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะของการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.6.1 การวิเคราะห์ผลการตรวจวัดคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง

ตรวจวัดคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงที่นำมาทดสอบ และทำการเปรียบเทียบผลการตรวจวัด ซึ่งประกอบไปด้วยการตรวจวัดความถ่วงจำเพาะ ความถ่วงเอพไอ ความหนืดจลนศาสตร์ อุณหภูมิการกลั่น จุดวาบไฟ ดัชนีซีเทน ค่าความร้อนเชื้อเพลิง และความหนาแน่น

3.6.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

เปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์ระหว่างน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่นำมาทดสอบ โดยทำการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่ทำการวัด คือ แรงบิด กำลังเบรก และอัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) และความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ (IMEP)

3.6.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณลักษณะการเผาไหม้

เปรียบเทียบคุณลักษณะการเผาไหม้ระหว่างน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่นำมาทดสอบ โดยการใช้ผลของข้อมูลความดันในกระบอกสูบ และอัตราการปลดปล่อยความร้อน ตำแหน่งมุมองศาเพลลาข้อเหวี่ยงต่าง ๆ รวมทั้ง การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรผัน (Coefficient of Variable : COV) ของเครื่องยนต์ ด้วยสมการที่ 2.9 ซึ่งทำการหาผลเฉลี่ยของค่าดังกล่าวจำนวน 120 วิถุจักร ก่อนการนำผลไปทำการเปรียบเทียบต่อไป

3.6.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบตรวจวัดการปล่อยมลพิษไอเสีย

เปรียบเทียบปริมาณการปล่อยมลพิษไอเสียระหว่างน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่นำมาทดสอบ ซึ่งประกอบไปด้วยออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอน (HC) และควันดำ (Smoke)



บทที่ 4

ผลกระทบของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกแบบผสมจากกระบวนการไพโรไลซิส ต่อสมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้และมลพิษของเครื่องยนต์

4.1 บทนำ

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่มุ่งเน้นการศึกษาผลของการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกร่วมกับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวทางการเกษตร เนื้อหาในบทนี้จึงเริ่มต้นจากการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์ โดยนำน้ำมันขยะพลาสติกแบบผสมซึ่งได้จากกระบวนการไพโรไลซิสทั้งที่ผ่านการกลั่นและยังไม่ได้ผ่านการกลั่นลำดับส่วน มาวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง จากนั้นนำมาทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงภาระกรรมและอัตราส่วนกำลังอัดของเครื่องยนต์ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์และคุณลักษณะการเผาไหม้ ได้แก่ ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก ความดันในกระบอกสูบ อัตราการปลดปล่อยความร้อนรวมไปถึงพิจารณาปริมาณการปล่อยมลพิษไอเสีย ได้แก่ ออกไซด์ของไนโตรเจน ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์ และค่าดัชนีเขม่า สำหรับประเมินผลกระทบของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกที่มีต่อสมรรถนะ การเผาไหม้ มลพิษ และเสถียรภาพของเครื่องยนต์ต่อไป

4.2 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยในบทนี้สามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ๆ ได้แก่ 1) ขั้นตอนการเตรียมน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับการทดสอบ 2) การตรวจวัดคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง 3) การทดสอบเครื่องยนต์เพื่อทดสอบพารามิเตอร์ในด้านต่าง ๆ ประกอบไปด้วยสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ การปล่อยมลพิษไอเสีย และ 4) การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบซึ่งมีรายละเอียดของขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

4.2.1 การเตรียมน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับการทดสอบ

เตรียมน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันดีเซล น้ำมันจากขยะพลาสติกแบบผสมที่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนและยังไม่ได้ผ่านการกลั่นลำดับส่วน โดยนำน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิด ได้มาจากโรงงานผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งส่วนใหญ่เป็นขยะพลาสติก

หลากหลายประเภทผสมกัน เช่น ถูพลาสติก ภาชนะหรือขวดน้ำพลาสติก ฯลฯ จากนั้น นำน้ำมันเชื้อเพลิงที่จะทดสอบไปตรวจวัดคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงและทดสอบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งในการทดสอบจะกำหนดรหัสของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การกำหนดรหัสของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ

ชนิดที่	รหัสน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ	ความหมายรหัสน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ
1	DF	น้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ B7 ตามมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงาน
2	CWPO	น้ำมันขยะพลาสติกที่ยังไม่ได้ผ่านการกลั่นลำดับส่วน (crude waste plastic oil)
3	WPO	น้ำมันขยะพลาสติกที่ยังผ่านการกลั่นลำดับส่วน (waste plastic oil)

4.2.2 การตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ

ตรวจวัดคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบของสมาคมการทดสอบและวัสดุประเทศสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials : ASTM) ประกอบไปด้วย ความหนืดจลนศาสตร์ ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น จุดวาบไฟ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง ค่าดัชนีซีเทนและอุณหภูมิที่ 10, 50 และ % Volume Recovered นอกจากนี้ ยังนำน้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิดไปวิเคราะห์อุณหภูมิการกลั่นและองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีการ GC-MS Gas Chromatography-Mass Spectrometry โดยมีขั้นตอนและวิธีการตรวจวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ในเนื้อหาบทที่ 3

4.2.3 การทดสอบเครื่องยนต์

การทดสอบเครื่องยนต์เพื่อหาสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย โดยทำการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวแบบแปรผันอัตราส่วนกำลังอัดและใช้ไดนาโมมิเตอร์ชนิดใช้กระแสเหนี่ยวนำเป็นตัวเบรกเพื่อสร้างภาระกรรมให้กับเครื่องยนต์ กำหนดความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 1,500 รอบต่อนาที และเปลี่ยนแปลงภาระกรรมที่ทดสอบกับเครื่องยนต์ที่ 25%, 50%, และ 75% ของโหลดสูงสุด และอัตราส่วนกำลังอัดที่ 16:1, 17:1 และ 18:1 ตามลำดับ เครื่องมือที่ใช้วัดความดันในกระบอกสูบประกอบด้วยเซนเซอร์วัดความดัน ตัวขยายสัญญาณ และชุดวัดองศาเพลาค้อเหวี่ยง ทำการวัดและบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ระหว่างการทดสอบ ได้แก่ อัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิง ความดันในกระบอกสูบ องศาเพลาค้อเหวี่ยง อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ และการ

ปล่อยมลพิษไอเสีย ซึ่งประกอบด้วยออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอน (HC) และดัชนีเขม่า (Smoke index) โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่ชื่อ Testo รุ่น Testo 350 และเครื่องมือวัดดัชนีเขม่าที่ชื่อ Testo รุ่น Testo 308 โดยมีขั้นตอนและวิธีการทดสอบได้กล่าวไว้ในเนื้อหาบทที่ 3

4.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การวิเคราะห์ผลการทดสอบประกอบด้วย การนำผลการวัดอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงมาคำนวณเพื่อหาสมรรถนะของเครื่องยนต์ในปัจจุบันด้านความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก ดังสมการที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ และนำข้อมูลการทดสอบความดันในกระบอกสูบ อัตราการปลดปล่อยความร้อน มาคำนวณหาผลเฉลี่ย 100 วัฏจักร เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบแต่ละชนิดรวมถึงการหาค่าเฉลี่ยจากการวัดปริมาณการปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์

4.3 ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

4.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง

การตรวจวัดคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ ซึ่งประกอบไปด้วย น้ำมันดีเซล น้ำมันจากขยะพลาสติกแบบผสมที่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนและน้ำมันจากขยะพลาสติกแบบผสมที่ยังไม่ได้ผ่านการกลั่นลำดับส่วน ตามมาตรฐานการทดสอบของสมาคมการทดสอบและวัสดุประเทศสหรัฐอเมริกา (ASTM) ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความหนืดจลนศาสตร์ อุณหภูมิจุดวาบไฟ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง ค่าดัชนีซีเทนและอุณหภูมิการกลั่นตัวของน้ำมันขยะพลาสติกทั้งที่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนและยังไม่ได้ผ่านการกลั่นลำดับส่วนมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ขณะที่ค่าความหนืดจลนศาสตร์ อุณหภูมิจุดวาบไฟและอุณหภูมิการกลั่นตัวของน้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นมีค่าสูงกว่าของน้ำมันขยะพลาสติกที่ยังไม่ผ่านการกลั่น จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นว่าคุณสมบัติของน้ำมันขยะพลาสติกที่ยังไม่ผ่านการกลั่นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันก๊าดโซลิน อย่างไรก็ตามค่าความหนืดจลนศาสตร์ ค่าความหนาแน่น ค่าความร้อนเชื้อเพลิงและอุณหภูมิการกลั่นตัวของน้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

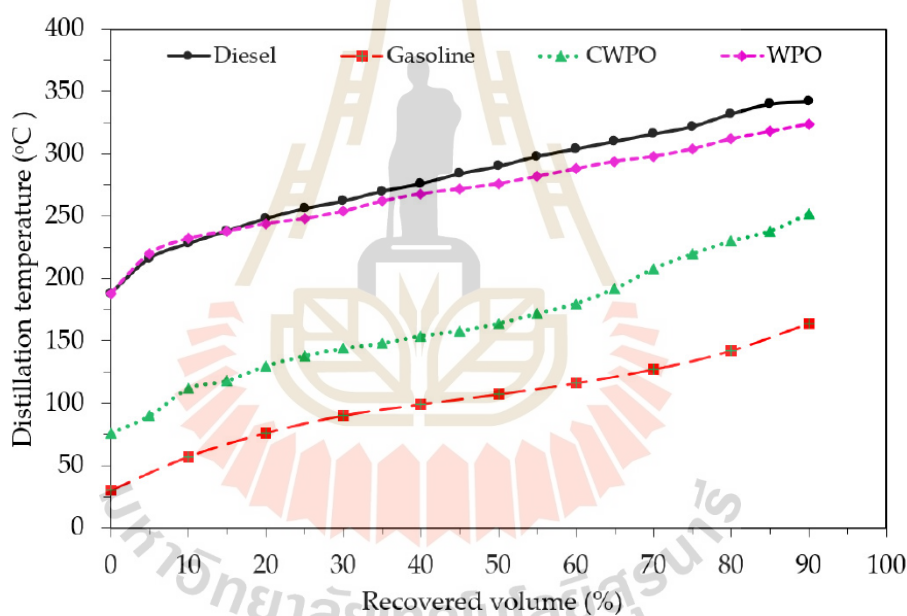
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ

คุณสมบัติน้ำมัน เชื้อเพลิง	หน่วย การวัด	มาตรฐานการ ทดสอบ	น้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ		
			DF	CWPO	WPO
ความหนืดจลนศาสตร์ ณ อุณหภูมิ 40 °C	cSt	ASTM D445	3.44	1.66	3.11
ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6 °C	-	ASTM D1298	0.835	0.900	0.824
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15.6 °C	kg/m ³	ASTM D1298	834	899	823
จุดวาบไฟ	°C	ASTM D93	66	35	54
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง	MJ/kg	ASTM D240	45.56	37.72	45.24
ดัชนีซีเทน	-	ASTM D976	56.57	-	46.7
อุณหภูมิที่ 10 % Volume Recovered	°C	ASTM D86	228	112	232
อุณหภูมิที่ 50 %Volume Recovered	°C	ASTM D86	290	164	276
อุณหภูมิที่ 90 %Volume Recovered	°C	ASTM D86	348	252	324

4.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง

เมื่อทำการทดสอบหาอุณหภูมิกลั่นตัวของน้ำมันขยะพลาสติกจากกระบวนการไพโรไลซิสในห้องปฏิบัติการ จะได้ข้อมูลสัดส่วน % Volume Recovered ที่อุณหภูมิการกลั่นในช่วงต่าง ๆ ของน้ำมันแต่ละชนิดแสดงดังเส้นกราฟในรูปที่ 4.1 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ มลพิษไอเสียและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก การทดสอบดังกล่าวยังได้วิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงน้ำมันก๊าดโซลีนและน้ำมันดีเซลเพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับ

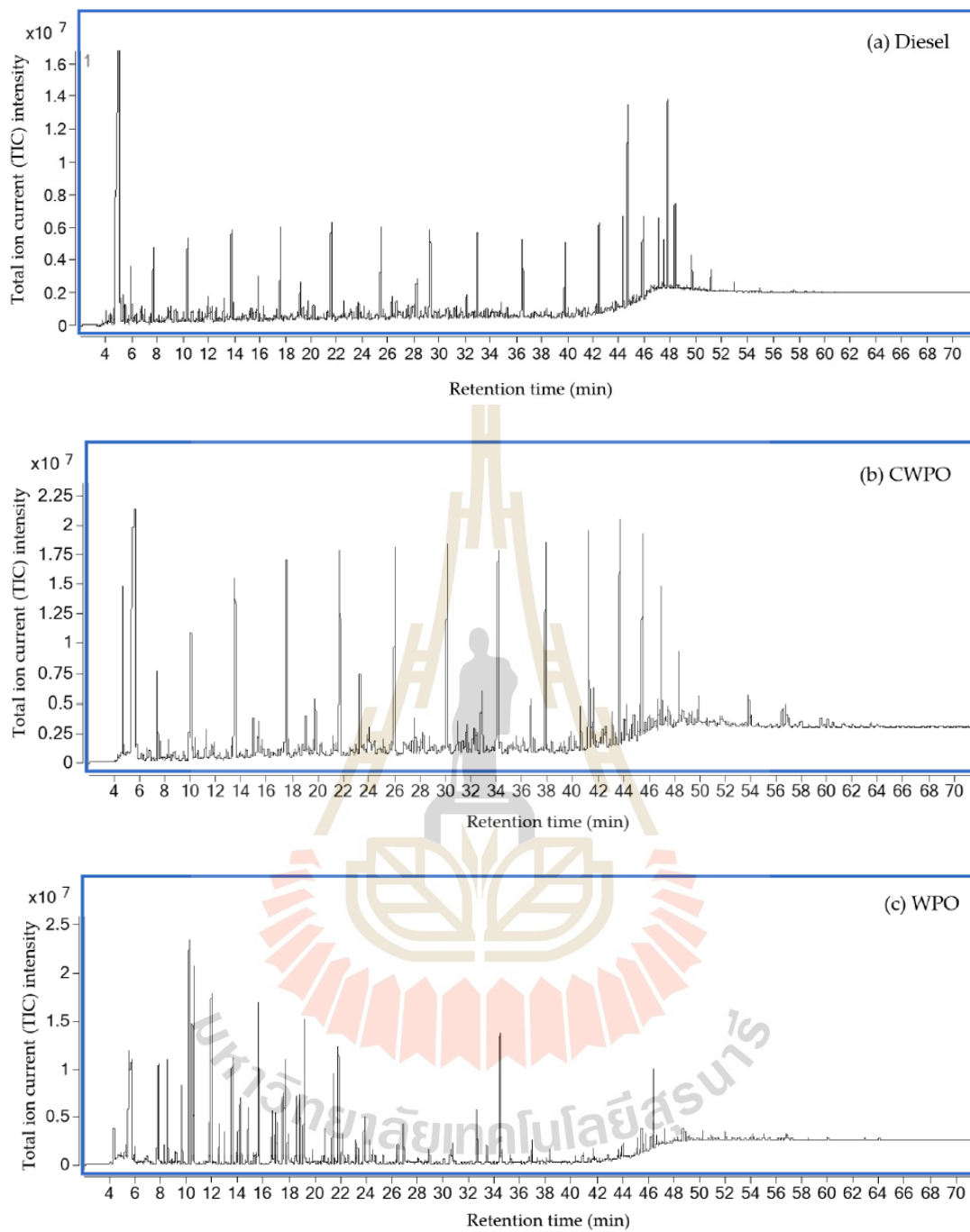
คุณสมบัติของน้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนและที่ยังไม่ได้ผ่านการกลั่นลำดับส่วน จากเส้นกราฟจะเห็นว่าน้ำมันขยะพลาสติกที่ยังไม่ได้ผ่านการกลั่นลำดับส่วนจะมีลักษณะเส้นกราฟที่ใกล้เคียงกับน้ำมันก๊าซโซลีน โดยมีช่วงอุณหภูมิการกลั่นตัวอยู่ระหว่าง 76 °C ถึง 252 °C ในทางตรงกันข้าม ช่วงอุณหภูมิการกลั่นตัวของน้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนแล้ว มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลขณะที่ % Volume Recovered เพิ่มขึ้น โดยมีช่วงอุณหภูมิการกลั่นตัวอยู่ระหว่าง 188 °C ถึง 324 °C จากข้อมูลดังกล่าวจะสังเกตว่าน้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนแล้วสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในเครื่องยนต์ดีเซลได้ ซึ่งโดยทั่วไปช่วงอุณหภูมิการกลั่นตัวสำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ จะอยู่ในช่วง 35 °C ถึง 185 °C สำหรับน้ำมันก๊าซโซลีน และระหว่าง 180 °C ถึง 350 °C สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล (Sharma, B.K. et. al., 2014)



รูปที่ 4.1 % Volume Recovered ที่อุณหภูมิการกลั่นตัวของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ

จากผลการวิเคราะห์ด้วย GC-MS ของน้ำมันขยะพลาสติกจากกระบวนการไพโรไลซิสทั้ง 2 ชนิด เปรียบเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลโดยมีสัดส่วนเปอร์เซ็นต์พื้นที่ใต้กราฟขององค์ประกอบต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 เชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่นำมาทดสอบประกอบด้วยสัดส่วนปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่แตกต่างกัน ซึ่งจะถูกแยกออกสัดส่วนตามน้ำหนักของคาร์บอนอะตอม ตั้งแต่คาร์บอนอะตอมต่ำ (C4) ถึงคาร์บอนอะตอมสูงสุด (>C20) และซึ่งสามารถจัดแยกประเภทได้เป็นกลุ่มช่วงคาร์บอนอะตอม C4-C11 C12-C20 หรือสูงกว่า C20 กลุ่มของช่วงคาร์บอนอะตอม C4-C12

แทนไฮโดรคาร์บอนกลุ่มเบา (น้ำมันก๊าซโซลีน) ซึ่งโดยทั่วไปประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนระหว่าง C5 และ C9 กลุ่ม C12-C20 แทนไฮโดรคาร์บอนกลุ่มกลาง (น้ำมันดีเซล) ซึ่งโดยทั่วไปประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนระหว่าง C16 และ C20 จากข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันเชื้อเพลิงที่นำมาทดสอบในตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบของน้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นลำดับส่วน มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันกับน้ำมันดีเซลมาตรฐาน โดยน้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนและน้ำมันดีเซลมีคาร์บอนอะตอมอยู่ในกลุ่ม C12-C20 อย่างไรก็ตาม น้ำมันขยะพลาสติกที่ไม่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนมีเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนอะตอมสูงในกลุ่ม C4-C11 โดยจากข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่า น้ำมันขยะพลาสติกที่ไม่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนมีองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกับน้ำมันเชื้อเพลิงในประเภทของกลุ่มก๊าซโซลีนและน้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนจะมีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซล องค์ประกอบทางเคมีที่ได้จาก GC-MS ยังสอดคล้องกับข้อมูลเส้นกราฟอนุกรมกัลันตัว โดยเส้นกราฟอนุกรมกัลันตัวของน้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนและน้ำมันดีเซลมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน ด้วยสาเหตุดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงเลือกนำน้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนมาใช้ในการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวแบบแปรผันอัตราส่วนกำลังอัด เพื่อประเมินคุณลักษณะการเผาไหม้ ค่ามลพิษไอเสีย และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เทียบกับการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล



รูปที่ 4.2 GC-MS chromatogram ของน้ำมันเชื้อเพลิง

(a) น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล

(b) น้ำมันขยะพลาสติกแบบผสมที่ไม่ผ่านการกลั่นลำดับส่วน

(c) น้ำมันขยะพลาสติกแบบผสมที่ผ่านการกลั่นลำดับส่วน

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกที่ใช้ในการทดสอบ

คาร์บอนอะตอม	น้ำมันดีเซล	น้ำมันขยะพลาสติกที่ยังไม่ได้ผ่านการกลั่นลำดับส่วน	น้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นลำดับส่วน
C4	ND	2.77	ND
C5	ND	0.84	ND
C6	ND	3.76	ND
C7	ND	5.38	ND
C8	2.54	34.02	1.03
C9	5.61	19.94	0.73
C10	5.23	28.49	2.28
C11	4.18	0.53	5.71
C12	7.08	0.75	9.78
C13	6.39	ND	10.08
C14	8.09	ND	11.03
C15	5.66	0.67	10.48
C16	5.95	0.19	8.71
C17	15.8	0.26	7.90
C18	4.30	0.32	8.88
C19	16.11	0.36	7.86
C20	3.90	0.24	8.10
C21	3.19	0.36	3.63
C22	ND	0.27	2.29
C23	2.36	0.20	1.08
C24	ND	0.18	0.43
C25	1.19	0.19	ND
C26	1.13	0.20	ND
C27	0.62	ND	ND
C28	0.34	0.08	ND
C29	0.33	0.08	ND

ตารางที่ 4.4 สัดส่วนเปอร์เซ็นต์พื้นที่ได้กราฟขององค์ประกอบน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกที่ใช้ในการทดสอบ

คาร์บอนอะตอม	สัดส่วนเปอร์เซ็นต์พื้นที่ได้กราฟ		
	น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล	น้ำมันขยะพลาสติกที่ยังไม่ได้ผ่านการกลั่นลำดับส่วน	น้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นลำดับส่วน
C4 – C11	13.38	95.72	9.74
C12 – C20	75.00	2.79	82.83
>C20	11.62	1.49	7.43

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวยังแสดงให้เห็นว่าแหล่งที่มาของขยะพลาสติกที่แตกต่างกัน เมื่อนำมาผลิตน้ำมันด้วยกระบวนการไพโรไลซิส อาจจะทำให้ได้องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันที่แตกต่างกัน ดังตัวอย่างข้อมูลองค์ประกอบของน้ำมันขยะพลาสติกที่วิเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผลสมรรถนะของเครื่องยนต์ในรูปแบบที่แตกต่างกัน ข้อมูลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaewbuddee, C. et. al. (2020) ซึ่งได้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกที่ได้จากส่วนผสมของน้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นและน้ำมันไบโอดีเซล จากเหตุผลดังกล่าวจึงอาจจำเป็นต้องใช้กระบวนการกลั่นลำดับส่วนเพื่อควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงที่สกัดได้จากน้ำมันพลาสติก ในกรณีที่ไม่ได้มีการควบคุมแหล่งที่มาของขยะพลาสติกที่จะนำมาผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง

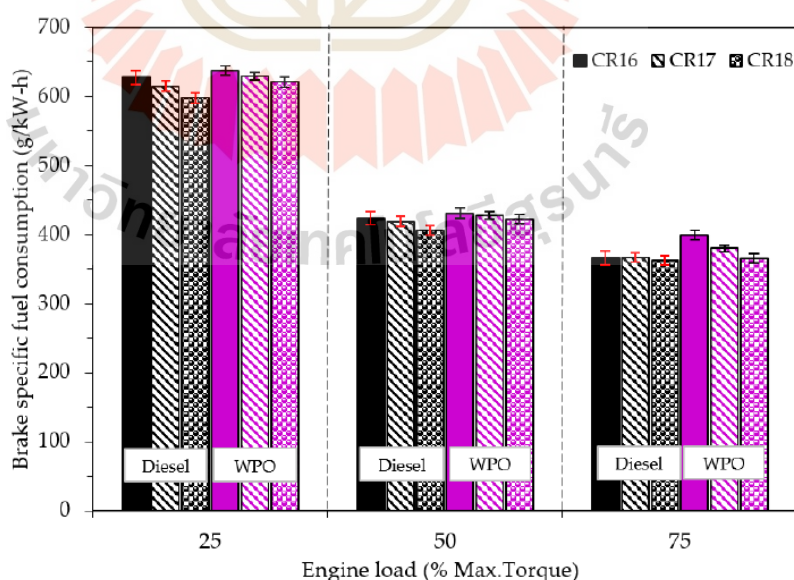
4.3.3 สมรรถนะของเครื่องยนต์

การประเมินผลกระทบของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกต่อสมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้และมลพิษของเครื่องยนต์ ได้ทำการทดสอบโดยการใช้น้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นกับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวแบบแปรผันอัตราส่วนกำลังอัดเปรียบเทียบกับการใช้น้ำมันน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล โดยสมรรถนะของเครื่องยนต์จะประเมินจาก ค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (brake-specific fuel consumption, BSFC) และค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (brake thermal efficiency, BTE) โดยมีข้อมูลผลการทดสอบที่ได้ดังนี้

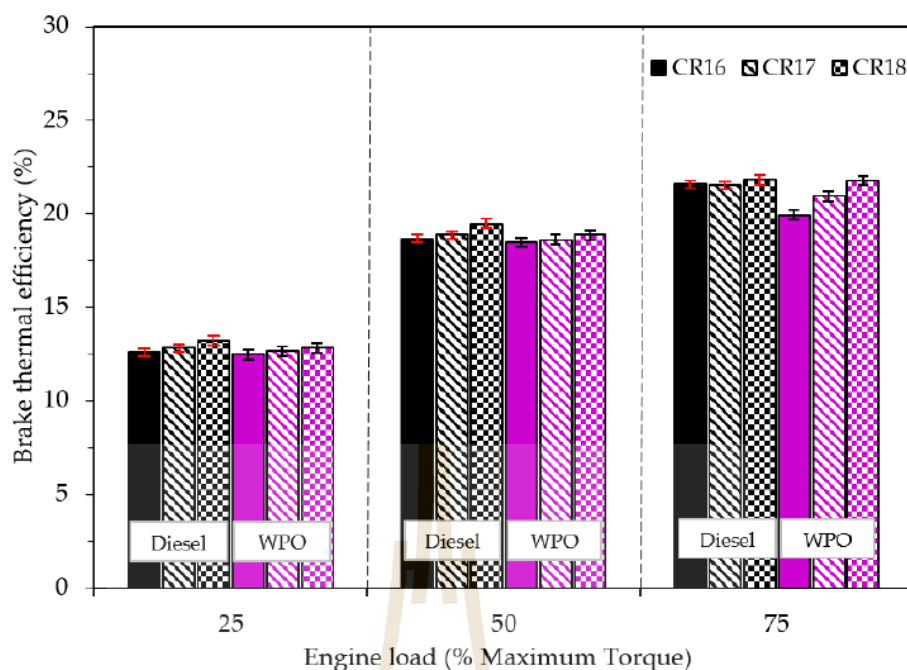
จากรูปที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่ภาระกรรมของเครื่องยนต์และอัตราส่วนกำลังอัดต่าง ๆ จากข้อมูลจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดหรือเพิ่มภาระกรรมให้กับเครื่องยนต์ ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกมีแนวโน้มที่จะลดลง เนื่องจากเครื่องยนต์มีอัตราการเพิ่มของกำลังเบรกที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง เป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในกระบอกสูบเมื่อมีภาระกรรมของเครื่องยนต์และอัตราส่วนกำลังอัดที่สูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มช่วงเวลาของการเผาไหม้และ

ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ให้สูงขึ้น และหากเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของน้ำมันขยะพลาสติกกับน้ำมันดีเซลพบว่า น้ำมันขยะพลาสติกมีความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกมากกว่าน้ำมันดีเซลทุกภาระกรรมและทุก ๆ ค่าอัตราส่วนกำลังอัด เนื่องจากน้ำมันขยะพลาสติกมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงน้อยกว่าน้ำมันดีเซลจึงจำเป็นต้องใช้ปริมาณของน้ำมันเชื้อเพลิงมากขึ้นเพื่อให้ได้กำลังเครื่องยนต์ที่เท่ากันเมื่อเปรียบเทียบกับการเผาไหม้น้ำมันดีเซล (S. Kumar et al., 2013)

จากรูปที่ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกที่ภาระกรรมของเครื่องยนต์และอัตราส่วนกำลังอัดต่าง ๆ โดยพบว่าการเปลี่ยนแปลงของภาระกรรมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของน้ำมันเชื้อเพลิงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น จากข้อมูลจะเห็นว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของน้ำมันขยะพลาสติกจะมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซลเมื่อภาระกรรมของเครื่องยนต์และอัตราส่วนกำลังอัดที่สูงขึ้นโดยสาเหตุมาจากองค์ประกอบของน้ำมันขยะพลาสติกที่ต้องการพลังงานในการสลายพันธะไฮโดรคาร์บอนกลุ่มหนัก (C13 – C22) ที่มากกว่าน้ำมันดีเซลส่งผลให้ปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ลดลง (Kaimal and Vijayabalan, 2015) นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิภายในกระบอกสูบที่เพิ่มสูงขึ้นและส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเผาไหม้ให้สูงขึ้นด้วย แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hirkude, J.; Padalkar, A.S. (2014) ที่พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดของเครื่องยนต์ จะช่วยลดช่วงเวลาหน่วงก่อนการเผาไหม้และส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก



รูปที่ 4.3 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกกับภาระกรรม



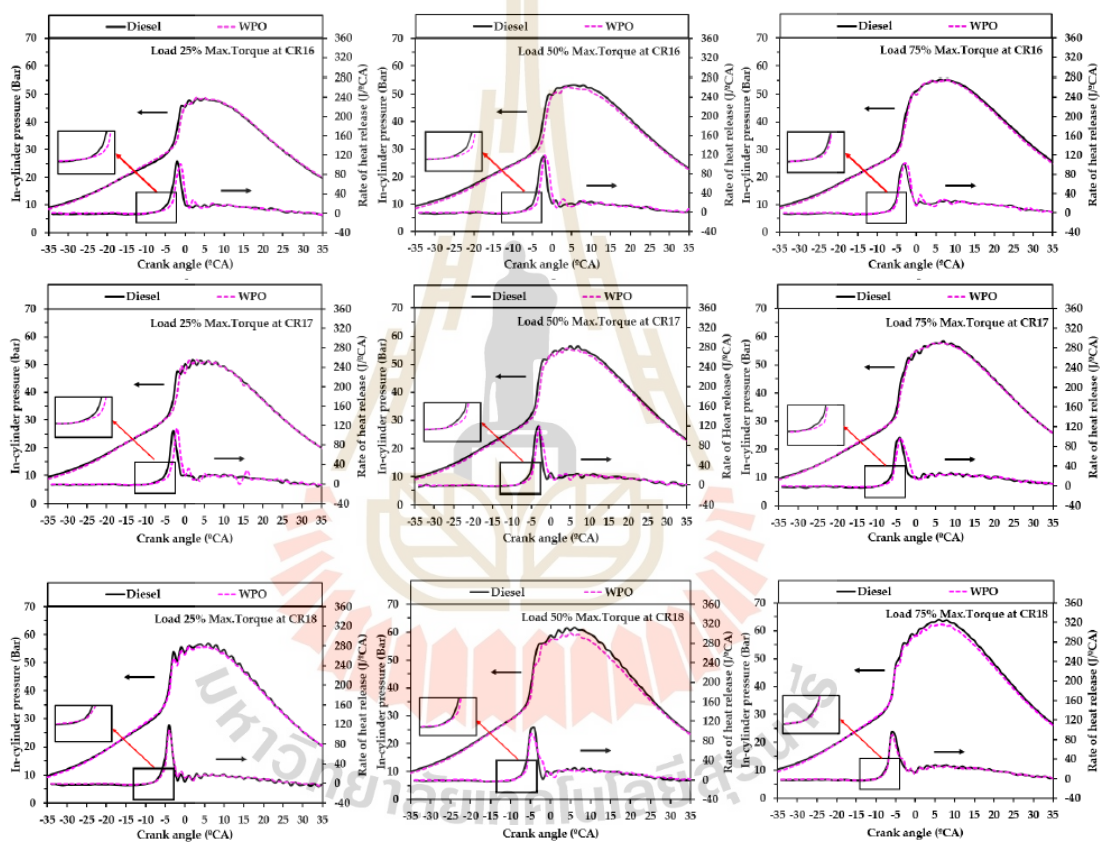
รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกกับภาระกรรม

4.3.4 คุณลักษณะการเผาไหม้

การวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกกับกับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวแบบแปรผันอัตราส่วนกำลังอัด ได้ทำการทดสอบโดยการใช้ น้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นกับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวแบบแปรผันอัตราส่วนกำลังอัดเปรียบเทียบกับ การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล โดยคุณลักษณะการเผาไหม้จะประเมินจากค่าความดันในกระบอกสูบ (in-cylinder pressure, ICP) และอัตราการปลดปล่อยความร้อน (rate of heat release, RoHR) ซึ่งเป็นปัจจัยตัวแปรที่สำคัญในการบ่งชี้ถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ โดยมีการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบที่ได้ดังนี้

จากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบกับจังหวะองศาการหมุนของเพลาลูกเบี้ยวที่ภาระกรรมของเครื่องยนต์ระดับต่าง ๆ จากข้อมูลจะเห็นได้ว่าค่าความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อภาระกรรมเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้น เป็นที่สังเกตว่าเมื่อทำการทดสอบโดยปรับอัตราส่วนกำลังอัดของเครื่องยนต์ที่ 18:1 น้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นจะมีค่าความดันในกระบอกสูบในขณะที่เกิดการเผาไหม้ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลอย่างชัดเจนที่สภาวะการทดสอบภาระกรรมเครื่องยนต์ 50 % และ 75% ของโหลดสูงสุด นอกจากนี้จังหวะการเริ่มต้นในการเผาไหม้เชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติก

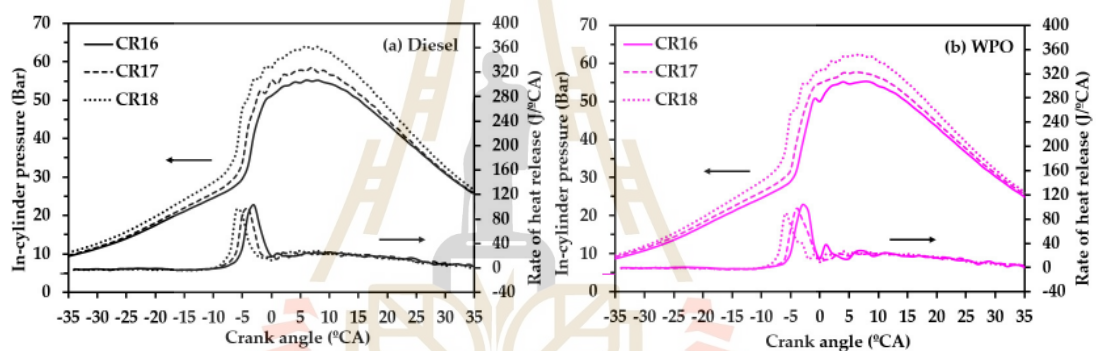
หวังมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากค่าความหนาแน่นของน้ำมันขยะพลาสติกที่มีค่าต่ำกว่าส่งผลให้มีความอดูดกลืนเชิงปริมาตร (bulk modulus) ที่ต่ำกว่า (อัดตัวได้มาก) เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล นอกจากนั้นจากคุณสมบัติของน้ำมันขยะพลาสติกที่มีค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำกว่ายังส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการผสมกันระหว่างน้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศน้อยลง อีกทั้งภาระกรรมของเครื่องยนต์ที่สูงขึ้นส่งผลโดยตรงต่ออุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่สูงขึ้น ทั้ง 2 ปัจจัยหลักดังกล่าวจึงส่งผลให้ช่วงระยะเวลาความล่าช้าในการจุดระเบิด (ignition delay) ที่สั้นลง และมีช่วงเวลาเผาไหม้ที่ยาวขึ้น



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนเทียบกับจังหวะองศาการหมุนเพลาช้อเหวี่ยงเครื่องยนต์ที่สภาวะการทดสอบภาระกรรมและอัตราส่วนกำลังอัดค่าต่าง ๆ

เมื่อเปรียบเทียบความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนกับจังหวะองศาการหมุนเพลาช้อเหวี่ยงเครื่องยนต์ที่สภาวะการทดสอบภาระกรรม 75% ของโหลดสูงสุดระหว่างน้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกในอัตราส่วนกำลังอัดค่าต่างๆ ดังรูปที่ 4.6 จากข้อมูลจะ

พบว่าค่าความดันในกระบอกสูบจะมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนกำลังอัด 18:1 โดยทั่วไปค่าความดันในกระบอกสูบสูงสุดจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเชื้อเพลิง ช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิง ช่วงระยะเวลาการจุดระเบิดและการแตกเป็นฝอยละอองของเชื้อเพลิง จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่า เมื่ออัตราส่วนกำลังอัดเพิ่มขึ้น ค่าความดันในกระบอกสูบจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย การเพิ่มขึ้นของค่าความดันในกระบอกสูบอาจเป็นผลจากการผสมกันของอากาศและเชื้อเพลิงที่ดีขึ้นในช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้ ในทางกลับกันเมื่ออัตราส่วนกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสูงสุดของอัตราการปลดปล่อยความร้อนมีแนวโน้มที่จะลดลง เนื่องมาจากอัตราส่วนกำลังอัดที่สูงจะส่งผลให้อุณหภูมิและความดันภายในกระบอกสูงขึ้น ส่งผลโดยตรงต่อการแตกตัวเป็นฝอยละอองและการระเหยเป็นไอของเชื้อเพลิงที่มากขึ้น ด้วยสาเหตุดังกล่าวจึงมีโอกาที่เชื้อเพลิงจะเกิดการชิงจุดระเบิดก่อนหรือช่วงระยะเวลาความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นลง ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการปลดปล่อยความร้อนของการเผาไหม้มีค่าลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนเทียบกับ จังหวะองศาการหมุนเพลาคือเหียงเครื่องยนต์ที่สภาวะการทดสอบภาระกรรม 75% และอัตราส่วนกำลังอัดค่าต่าง ๆ a) น้ำมันดีเซล b) น้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่น

4.3.5 มลพิษไอเสีย

การวิเคราะห์มลพิษไอเสียจากการเผาไหม้ของการใช้น้ำมันขยะพลาสติก ได้ทำการทดสอบโดยการใช้ น้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นกับเครื่องยนต์ดีเซลแบบแปรรูป อัตราส่วนกำลังอัดเปรียบเทียบกับใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล โดยทำการตรวจวัดปริมาณการปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ซึ่งประกอบไปด้วย การตรวจวัดออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ไฮโดรคาร์บอน (HC) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และค่าดัชนีเขม่า (Smoke) โดยมีการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบที่ได้ดังนี้

จากรูปที่ 4.7 แสดงปริมาณการปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่ภาระกรรมของเครื่องยนต์และค่าอัตราส่วนกำลังอัตราระดับต่าง ๆ โดยจากข้อมูลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วนปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนต่อกำลังงานจากเครื่องยนต์มีค่าลดลงเมื่อภาระกรรมของเครื่องยนต์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากกำลังงานจากเครื่องยนต์ที่เพิ่มมากขึ้นกว่าสัดส่วนของปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดขึ้น โดยมีปัจจัยหลักเนื่องมาจากปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้มีปริมาณสัดส่วนที่ลดลงเมื่อสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิและความดันในกระบอกสูบที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดจากการเผาไหม้น้ำมันขยะพลาสติกจะมีปริมาณมากกว่าน้ำมันดีเซลในทุกภาระกรรม เนื่องมาจากช่วงจังหวะเริ่มต้นในการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันขยะพลาสติกหน่วงมากกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงน้ำมันขยะพลาสติกที่มีโครงสร้างคาร์บอนอะตอมยาวกว่า นอกจากนั้นจะสังเกตเห็นได้ว่าทั้งน้ำมันขยะพลาสติกและน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล เมื่อทดสอบกับเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนกำลังอัตราสูงจะส่งผลให้เกิดปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากผลของอุณหภูมิและความดันในการเผาไหม้ที่สูงขึ้นจะเอื้อให้มีโอกาสเกิดการจับตัวเกิดเป็นโครงสร้างออกไซด์ของไนโตรเจนได้ง่ายขึ้น อีกทั้งค่าอัตราส่วนกำลังอัตราที่สูงจะส่งผลให้เชื้อเพลิงมีโอกาสเกิดการชิงจุดระเบิดก่อนและมีช่วงเวลาเผาไหม้ที่ยาวขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนเพิ่มสูงขึ้นได้จากกระบวนการเผาไหม้

จากรูปที่ 4.8 แสดงปริมาณการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ภาระกรรมของเครื่องยนต์และค่าอัตราส่วนกำลังอัตราระดับต่าง ๆ โดยทั่วไปการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องยนต์ดีเซลเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง เนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนที่ไม่เพียงพอ นอกจากนั้นการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเผาไหม้ และช่วงเวลาของเชื้อเพลิงภายในกระบอกสูบ จากข้อมูลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จะลดลงเมื่อเมื่อภาระกรรมของเครื่องยนต์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีสาเหตุเช่นเดียวกับการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน นอกจากนั้นปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันขยะพลาสติกมีปริมาณมากกว่าน้ำมันดีเซลทุกภาระกรรม ค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำของน้ำมันขยะพลาสติกส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ล่าช้าและเวลาที่เชื้อเพลิงผสมกับอากาศในกระบวนการเผาไหม้ที่สั้นลง เป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูงขึ้นเมื่อใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิง โดยปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์นี้อาจเพิ่มมากขึ้นเมื่อเครื่องยนต์ทำงานในภาระกรรมต่ำ เนื่องมาจากอุณหภูมิการเผาไหม้ในกระบอกสูบไม่สูงพอในการระเหยเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ให้กลายเป็นไอ นอกจากนั้น

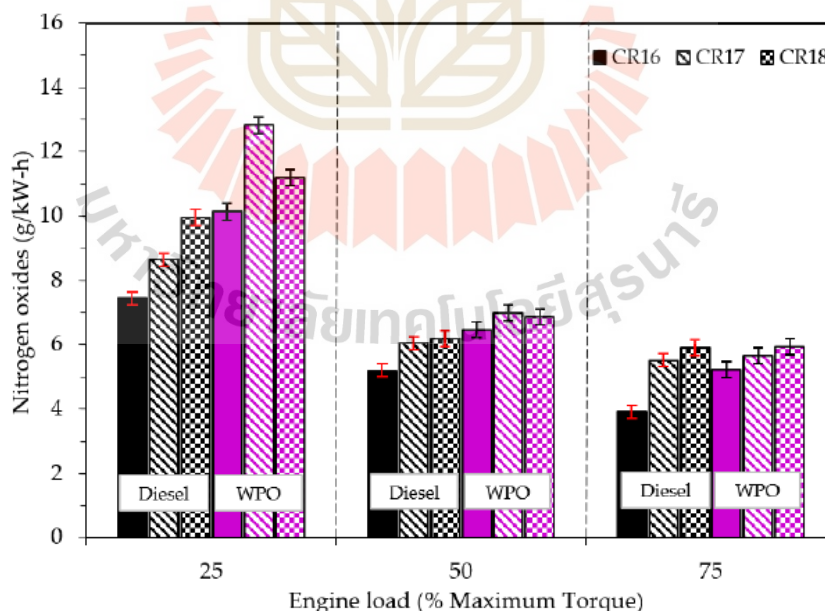
ปริมาณขององค์ประกอบคาร์บอนสายยาว ($\text{C}_{12}\text{-C}_{20}$) ที่มีสัดส่วนที่มากกว่าในน้ำมันขยะพลาสติกส่งผลให้การเผาไหม้ยากขึ้น นำไปสู่การเพิ่มปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ ปริมาณ

คาร์บอนมอนอกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนกำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 16:1 ไปเป็น 17:1 อย่างไรก็ตาม ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะลดลงสูงสุดเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่อัตราส่วนกำลังอัด 18:1 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะภาระกรรมต่ำ อย่างไรก็ตามปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จากการเผาไหม้ของน้ำมันขยะพลาสติกมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่ออัตราส่วนกำลังอัดเพิ่มขึ้นและเครื่องยนต์ทำงานในสภาวะโหลดสูง สาเหตุเนื่องจากอัตราส่วนกำลังอัดที่สูงจะส่งผลให้อุณหภูมิและความดันภายในกระบอกสูงขึ้นทำให้การคลุกเคล้าผสมกันของอากาศ-เชื้อเพลิงดีขึ้นและเกิดการระเหยของไอเชื้อเพลิงที่เร็วขึ้น ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น

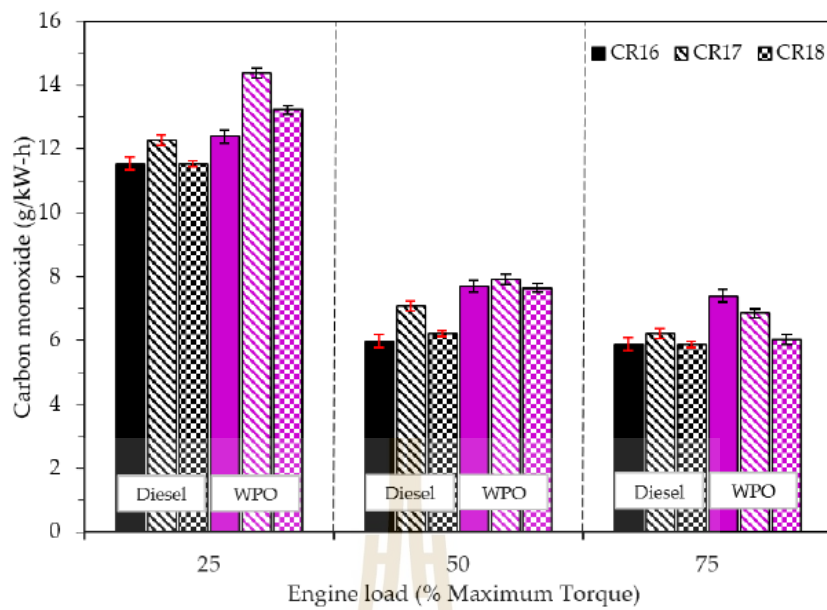
จากรูปที่ 4.9 แสดงปริมาณการปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) ที่ภาระกรรมของเครื่องยนต์และค่าอัตราส่วนกำลังอัดระดับต่าง ๆ โดยทั่วไปไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบของน้ำมันเชื้อเพลิงที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ลักษณะเช่นเดียวกับคาร์บอนมอนอกไซด์ จากข้อมูลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ปริมาณการปล่อยไฮโดรคาร์บอนจะเพิ่มขึ้น เมื่อสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นจาก 25% เป็น 50% ของโหลดสูงสุด อย่างไรก็ตาม ในสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่ 75% ของโหลดสูงสุดกลับพบว่า ปริมาณการปล่อยไฮโดรคาร์บอนจะมีค่าลดลงเนื่องมาจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบเชื้อเพลิงทดสอบ การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกมีปริมาณการปล่อยไฮโดรคาร์บอนสูงกว่า เมื่อเทียบกับการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการที่น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลมีส่วนของไบโอดีเซล 7% ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์จึงมีส่วนช่วยทำให้มีกระบวนการเผาไหม้นอกจากนั้นการที่น้ำมันขยะพลาสติกมีค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล อีกทั้งยังมีสัดส่วนองค์ประกอบของสารประกอบคาร์บอนสายยาว (C12-C20) ที่มากกว่า ซึ่งส่งผลต่อช่วงระยะเวลาการจุดระเบิดที่นานขึ้นในการเผาไหม้ จึงเป็นสาเหตุให้ปริมาณการปล่อยไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันขยะพลาสติกจึงมีค่าสูงกว่าปริมาณการปล่อยไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันดีเซล นอกจากนี้ปริมาณการปล่อยไฮโดรคาร์บอนจากการเผาไหม้ของน้ำมันขยะพลาสติกมีแนวโน้มที่จะลดลง เมื่ออัตราส่วนกำลังอัดเพิ่มขึ้นและเครื่องยนต์ทำงานในสภาวะโหลดสูง ซึ่งเป็นผลมาจากความดันและอุณหภูมิภายในกระบอกสูบเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.6) ทำให้การคลุกเคล้าผสมกันของอากาศ-เชื้อเพลิงดีขึ้นส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น ค่าอัตราส่วนกำลังอัดที่สูงขึ้นยังส่งผลให้เชื้อเพลิงมีช่วงระยะเวลาความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นลงและมีช่วงเวลาเผาไหม้ที่ยาวขึ้น จึงพบว่าปริมาณการปล่อยไฮโดรคาร์บอนจากการเผาไหม้มีแนวโน้มที่จะมีปริมาณลดลง

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่าดัชนีเขม่าที่ภาระกรรมของเครื่องยนต์และค่าอัตราส่วนกำลังอัดระดับต่าง ๆ ค่าดัชนีเขม่าเป็นตัวบ่งชี้ถึงการไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งเกิดจากสัดส่วนอากาศ-เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ที่มีค่าสูงเกินไป โดยปกติเขม่าจากการเผาไหม้มีค่าจะเพิ่มขึ้นตามภาระกรรมที่เพิ่มขึ้นของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมหนาในการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองพบว่าการ

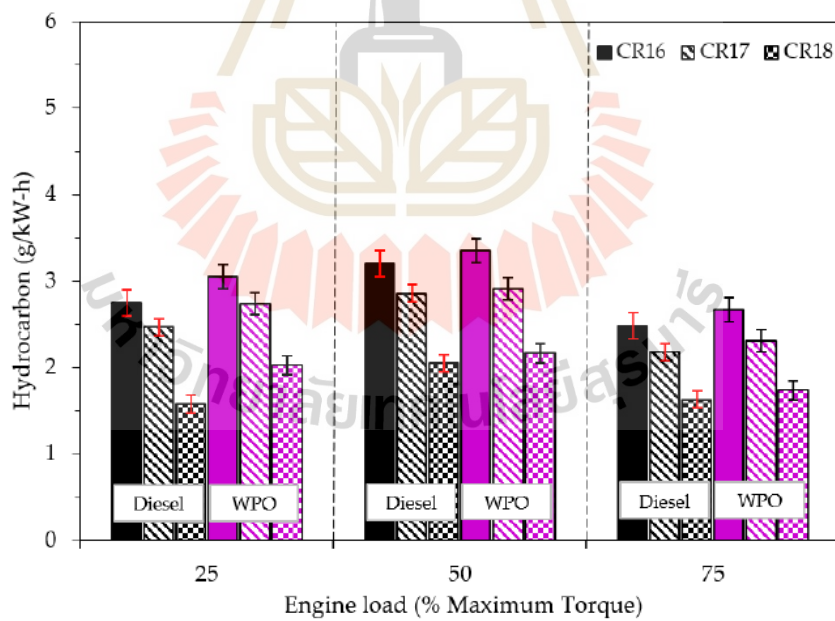
เผาไหม้ของน้ำมันขยะพลาสติกมีค่าดัชนีเขม่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล เป็นที่น่าสังเกตว่าน้ำมันดีเซลที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้มีส่วนประกอบของน้ำมันไบโอดีเซลอยู่ 7% ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนในเชื้อเพลิงน่าจะมีส่วนช่วยทำให้กระบวนการเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น ดังนั้นน้ำมันดีเซลจึงควรจะมีค่าดัชนีเขม่าต่ำกว่าน้ำมันขยะพลาสติก เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติของน้ำมันขยะพลาสติกที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ซึ่งมีความหนืดและอุณหภูมิการกลั่นตัวที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล (รูปที่ 4.1) ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักที่มีผลต่อการแตกเป็นฝอยละอองของเชื้อเพลิงที่จะช่วยส่งผลให้เกิดกระบวนการเผาไหม้ดีขึ้น ปัจจัยเหล่านี้อาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งซึ่งช่วยทำให้ค่าดัชนีเขม่าสำหรับเชื้อเพลิงน้ำมันขยะพลาสติกมีค่าที่ต่ำเมื่อเครื่องยนต์ทำงานในสภาวะโหลดต่ำและปานกลางที่อัตราส่วนกำลังอัดสูง โดยจากข้อมูลจะสังเกตเห็นว่าเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนกำลังอัดสูงขึ้น ค่าดัชนีเขม่าที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิดจะมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิเผาไหม้ที่สูงขึ้นและช่วงระยะเวลาความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นลง(มีช่วงเวลาเผาไหม้ที่ยาวขึ้น) อย่างไรก็ตามผลของการเผาไหม้น้ำมันขยะพลาสติกซึ่งมีส่วนผสมหนาแน่นเกินไปมีแนวโน้มที่จะส่งผลให้มีค่าดัชนีเขม่าจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเครื่องยนต์ใช้อัตราส่วนกำลังอัดและทำงานที่ภาระกรรมสูงขึ้น ซึ่งผลการทดสอบนี้บ่งบอกเป็นนัยว่าผลของความหนืดและอุณหภูมิการกลั่นตัวของน้ำมันขยะพลาสติกไม่สามารถช่วยลดการปล่อยเขม่าในสภาวะโหลดเครื่องยนต์และอัตราส่วนกำลังอัดที่มีค่าสูงได้



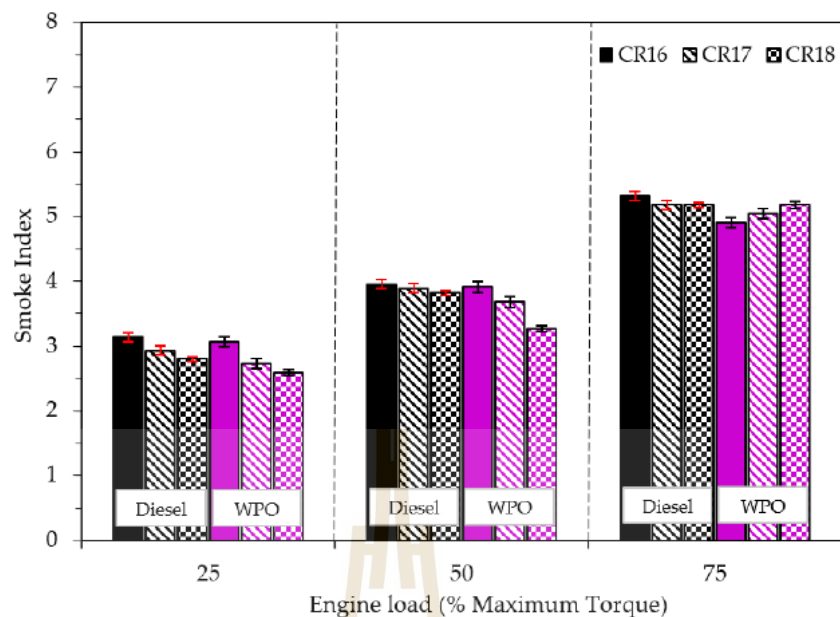
รูปที่ 4.7 ออกไซด์ของไนโตรเจนกับภาระกรรม



รูปที่ 4.8 คาร์บอนมอนอกไซด์กับภาระกรรม



รูปที่ 4.9 ไฮโดรคาร์บอนกับภาระกรรม



รูปที่ 4.10 ค่าดัชนีเขม่าของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ

4.4 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลกระทบของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากกระบวนการไพโรไลซิสต่อสมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้และมลพิษของเครื่องยนต์ โดยการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง เพื่อนำไปทดสอบและประเมินสมรรถนะของเครื่องยนต์ภายใต้ภาระกรรมต่าง ๆ ศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ และตรวจวัดค่ามลพิษไอเสีย โดยใช้น้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล สามารถวิเคราะห์และสรุปผลโดยสังเขปได้ดังนี้

- 1) น้ำมันขยะพลาสติกที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่ผ่านขั้นตอนการกลั่นลำดับส่วนสามารถใช้เป็นพลังงานทางเลือกและนำไปใช้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดได้โดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ เนื่องจากมีคุณสมบัติพื้นฐานใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล
- 2) จากคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญของน้ำมันขยะพลาสติกที่ใช้ในการศึกษาพบว่า ค่าดัชนีซีเทน ความหนืดจลนศาสตร์ความหนาแน่น จุดวาบไฟ และค่าความร้อนเชื้อเพลิง มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล
- 3) ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) ของน้ำมันขยะพลาสติกมีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซลทุกภาระกรรมการทำงานของเครื่องยนต์เนื่องจากน้ำมันขยะพลาสติกมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงน้อยกว่าน้ำมันดีเซลจึงต้องใช้ปริมาณของน้ำมันเชื้อเพลิงที่มากขึ้นเพื่อให้ได้กำลังเครื่องยนต์ที่เท่ากัน

4) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) ของน้ำมันขยะพลาสติกมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลทุกภาวะกรรม โดยมีสาเหตุมาจากองค์ประกอบของน้ำมันขยะพลาสติกที่ต้องการพลังงานในการสลายพันธะไฮโดรคาร์บอนกลุ่มหนัก (C13 – C22) ที่มากกว่าน้ำมันดีเซล

5) การเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกมีค่าเพิ่มขึ้นและมีส่วนช่วยลดช่วงเวลาหน่วงก่อนการเผาไหม้และส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก

6) น้ำมันขยะพลาสติกทำให้เกิดความล่าช้าในการจุดระเบิด และอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดมีแนวโน้มที่จะลดลง เมื่อใช้งานกับเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนกำลังอัดที่สูง

7) น้ำมันขยะพลาสติกมีแนวโน้มทำให้ปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ไฮโดรคาร์บอน (HC) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้มีปริมาณมากกว่าน้ำมันดีเซล ในขณะที่น้ำมันขยะพลาสติกมีค่าดัชนีเขม่าที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ค่ามลพิษไอเสียจากการเผาไหม้น้ำมันขยะพลาสติกมีค่าลดลงเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ภาวะกรรมและอัตราส่วนกำลังอัดที่สูงขึ้น

8) แหล่งที่มาของขยะพลาสติกที่แตกต่างกัน ส่งผลโดยตรงต่อองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมัน ในกรณีที่ไม่ได้มีการควบคุมแหล่งที่มาของขยะพลาสติกที่จะนำมาผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง จำเป็นต้องใช้กระบวนการกลั่นลำดับส่วนเพื่อควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงที่สกัดได้จากน้ำมันพลาสติกให้มีคุณสมบัติพื้นฐานใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล



บทที่ 5

ผลกระทบของการใช้น้ำมันขยะจากพลาสติกโพลีเอทิลีน ความหนาแน่นสูง (HDPE) และโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ต่อสมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษของเครื่องยนต์

5.1 บทนำ

จากผลการศึกษาในงานวิจัยในบทที่ 4 ได้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของแหล่งที่มาขยะพลาสติกซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติก ซึ่งในกรณีที่ไม่ได้มีการควบคุมแหล่งที่มาของขยะพลาสติกที่จะนำมาผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงจำเป็นต้องใช้กระบวนการกลั่นลำดับส่วนเพื่อควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงที่สกัดได้จากน้ำมันพลาสติกให้มีคุณสมบัติพื้นฐานใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตามจากวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยที่ต้องการจะศึกษาแนวทางในการใช้น้ำมันขยะพลาสติกที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการกลั่นลำดับส่วนสำหรับใช้กับเครื่องยนต์ทางการเกษตรเพื่อให้สามารถใช้งานได้โดยมีสมรรถนะที่ใกล้เคียงกับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลและส่งผลต่อราคาต้นทุนการใช้งานของเครื่องยนต์ให้น้อยที่สุด ในบทนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาการใช้น้ำมันที่ผลิตจากขยะพลาสติกประเภทฝาขวดและขวดใสซึ่งส่วนใหญ่เป็นพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-density polyethylene, HDPE) และชนิดโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) สำหรับใช้กับเครื่องยนต์ทางการเกษตร การศึกษาแนวทางการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกทั้ง 2 ประเภทนี้ จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาเปรียบเทียบและวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมี สมรรถนะของเครื่องยนต์และคุณลักษณะการเผาไหม้ ซึ่งประกอบด้วยความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก ความดันในกระบอกสูบ อัตราการปลดปล่อยความร้อน และการปล่อยมลพิษไอเสีย ได้แก่ ออกไซด์ของไนโตรเจน ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์ และเขม่าควัน โดยทำการทดสอบกับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดหรือเครื่องยนต์ดีเซลที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงภาระกรรมของเครื่องยนต์

5.2 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยในบทนี้สามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ๆ ได้แก่ 1) ขั้นตอนการเตรียมน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับการทดสอบ 2) การตรวจวัดคุณสมบัติพื้นฐานทางกายและทางเคมี ของน้ำมันเชื้อเพลิง 3) การทดสอบเครื่องยนต์เพื่อทดสอบพารามิเตอร์ในด้านต่าง ๆ ประกอบไปด้วยสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ การปล่อยมลพิษไอเสีย และ 4) การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบซึ่งมีรายละเอียดของขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

5.2.1 การเตรียมน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับการทดสอบ

เตรียมน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันดีเซล น้ำมันจากขยะพลาสติกฝาขวดและขวดใสที่ยังไม่ได้ผ่านการกลั่นลำดับส่วน โดยน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิด ได้มาจากกระบวนการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดคงที่ (Fixed-Bed Reactors) ซึ่งแยกพลาสติกประเภทก่อนทำการผลิต จากนั้นนำน้ำมันเชื้อเพลิงที่จะทดสอบไปตรวจวัดคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงและทดสอบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งในการทดสอบจะกำหนดรหัสของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การกำหนดรหัสของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ

ชนิดที่	รหัสน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ	ความหมายรหัสน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ
1	DF	น้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ B7 ตามมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงาน
2	WPOB	น้ำมันขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนเทเรพทาเลต (PET) ผลิตจากขวดใส ที่ไม่ได้ผ่านการกลั่นลำดับส่วน (crude waste plastic oil from bottle)
3	WPBCO	น้ำมันขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ผลิตจากฝาขวด ที่ไม่ได้ผ่านการกลั่นลำดับส่วน (crude waste plastic oil from bottle cap)

5.2.2 การตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ

ตรวจวัดคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบของสมาคมการทดสอบและวัสดุประเทศสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials : ASTM) ประกอบไปด้วย ความหนืดจลนศาสตร์ ความถ่วงจำเพาะ

ความหนาแน่น จุดวาบไฟ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง ค่าดัชนีซีเทนและอุณหภูมิที่ 10% 50% และ 90 % Volume Recovered นอกจากนั้น ยังนำน้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิดไปวิเคราะห์อุณหภูมิการกลั่นและองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีการ GC-MS Gas Chromatography-Mass Spectrometry) โดยมีขั้นตอนและวิธีการตรวจวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ในเนื้อหาบทที่ 3

5.23 การทดสอบเครื่องยนต์

ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) การทดสอบเครื่องยนต์โดยใช้น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกขวดใสและน้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกขวดใสผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วน 10%, 20%, 30%, 50% ตามลำดับ และ 2) การทดสอบเครื่องยนต์โดยใช้น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกฝาขวด โดยในการทดสอบเครื่องยนต์เพื่อหาสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสียได้ทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวที่อัตราส่วนกำลังอัดแปรผัน 18 : 1 และใช้ไดนาโมมิเตอร์ชนิดใช้กระแสเหนี่ยวนำเป็นตัวเบรกเพื่อสร้างภาระกรรมให้กับเครื่องยนต์ กำหนดความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 1,500 รอบต่อนาที และเปลี่ยนแปลงภาระกรรมที่ทดสอบกับเครื่องยนต์ ที่ 25%, 50%, และ 75% ของโหลดสูงสุด ตามลำดับ เครื่องมือที่ใช้วัดความดันในกระบอกสูบประกอบด้วยเซนเซอร์วัดความดัน ตัวขยายสัญญาณ และชุดวัดองศาเพลาค้อเหวี่ยง ทำการวัดและบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ระหว่างการทดสอบ ได้แก่ อัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิง ความดันในกระบอกสูบ องศาเพลาค้อเหวี่ยง อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ปริมาณอนุภาค PM (particulate matter) และการปล่อยมลพิษไอเสีย ซึ่งประกอบด้วยออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอน (HC) ดัชนีเขม่า (Smoke index) โดยมีขั้นตอนและวิธีการทดสอบได้กล่าวไว้ในเนื้อหาบทที่ 3

5.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การวิเคราะห์ผลการทดสอบประกอบด้วย การนำผลการวัดอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงมาคำนวณเพื่อหาสมรรถนะของเครื่องยนต์ในปัจจุบันด้านความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก ดังสมการที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ และนำข้อมูลการทดสอบความดันในกระบอกสูบ อัตราการปลดปล่อยความร้อน มาคำนวณหาผลเฉลี่ย 100 วัฏจักร เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบแต่ละชนิดและคำนวณหาค่าเฉลี่ยจากการวัดปริมาณการปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์จากเชื้อเพลิงแต่ละชนิด

5.3 ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

5.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง

การตรวจวัดคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบซึ่งประกอบไปด้วย น้ำมันดีเซล น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกขวดใส (WPOB)

และน้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกฝาขวด (WPBCO) ที่ยังไม่ได้ผ่านการกลั่นลำดับส่วน ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.2

จากข้อมูลค่าความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic Viscosity) ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิด พบว่ามีค่าความหนืดจลนศาสตร์อยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งจากค่าความหนืดจลนศาสตร์ที่ต่ำนี้อาจเป็นสาเหตุหนึ่งส่งผลให้เกิดการสึกหรอของชิ้นส่วนภายในห้องเผาไหม้สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การสึกหรอจากการใช้น้ำมันดีเซล (Kaewbuddee, C. et al., 2020) อย่างไรก็ตาม ความหนืดจลนศาสตร์ที่ต่ำของน้ำมันขยะพลาสติก 2 ชนิด แสดงถึงความสามารถในการระเหยที่สูงและมีผลต่อการฉีดเชื้อเพลิง ให้การกระจายตัวเป็นฝอยละอองได้ดี (Kuszewski, H., 2018; Keera, S. T. et al., 2018; Srithar, K. et al, 2014)

จากข้อมูลค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิดพบว่าน้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกฝาขวด (WPBCO) มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันดีเซล ในขณะที่น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกขวดใส (WPOB) มีความถ่วงจำเพาะที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีโดยส่วนใหญ่ของพลาสติกขวดใส (PET) เป็นสารประกอบอะโรเมติกส์ ซึ่งสารประกอบอะโรเมติกส์โดยส่วนใหญ่จะมีความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 0.8 - 0.9

จากข้อมูลค่าความถ่วงเอพีไอ (API Gravity) ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิด พบว่าน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิด และน้ำมันดีเซล มีค่าความถ่วงเอพีไอบางครั้งมากกว่าช่วงค่าความถ่วงเอพีไอของกลุ่มน้ำมันเบา ($API > 31.1^\circ$) ซึ่งบ่งบอกถึงองค์ประกอบโดยส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว หรืออัลเคน (Alkane) ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนแบบสายตรงและแบบกิ่งที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนสูง (Gaurh, P., & Pramanik, H., 2018)

จากข้อมูลค่าความหนาแน่น (Density) ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิดพบว่า น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกฝาขวด (WPBCO) มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าค่าความหนาแน่นของน้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกขวดใส (WPOB) และค่าความหนาแน่นของน้ำมันดีเซล เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้น โดยองค์ประกอบทางเคมีโดยส่วนใหญ่ของพลาสติกขวดใส (PET) เป็นสารประกอบอะโรเมติกส์ ซึ่งมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วงระหว่าง $800 - 850 \text{ kg/m}^3$ โดยที่น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูงจะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่น้อยกว่า น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นต่ำ (Khan, M. Z. H. et al, 2016; Sarikoc, S., 2020)

จากข้อมูลอุณหภูมิจุดวาบไฟ (Fire Point) ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิดพบว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิด มีจุดวาบไฟต่ำกว่าน้ำมันดีเซล จึงจำเป็นต้องมีความระมัดระวังในการกักเก็บและขนส่งเพื่อป้องกันการเกิดอัคคีภัย จุดวาบไฟที่ต่ำของน้ำมันขยะพลาสติกบ่งชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการระเหยกลายเป็นไอของเชื้อเพลิงขยะพลาสติกมีการระเหยกลายเป็นไอที่สูงกว่า

น้ำมันดีเซลซึ่งเป็นผลดีต่อการติดเครื่องยนต์และการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ (Gaurh, P., & Pramanik, H., 2018)

จากข้อมูลค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Calorific value) ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิด พบว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิดมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่สูงเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดโดยค่าความร้อนเชื้อเพลิงดังกล่าวยังมีค่าที่ต่ำกว่าค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซลอยู่เล็กน้อย โดยปกติค่าความร้อนเชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจนในองค์ประกอบเชื้อเพลิง รวมไปถึงความหนาแน่นของน้ำมันเชื้อเพลิง กล่าวคือ อัตราส่วนคาร์บอนและไฮโดรเจนที่สูงมีผลให้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่สูงด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ ค่าความร้อนเชื้อเพลิงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนอะตอมคาร์บอนและความยาวโซ่โมเลกุลที่เพิ่มขึ้น (Fernández-Rodríguez, D., et al., 2021; Keera, S. T. et al., 2018)

จากข้อมูลค่าดัชนีซีเทน (Cetane index) ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิด พบว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิด มีค่าดัชนีซีเทนอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าค่าดัชนีซีเทนของน้ำมันดีเซล โดยน้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกฝาขวด (WPBCO) มีความดัชนีซีเทนที่สูงกว่าน้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกขวดใส (WPOB) ซึ่งเป็นผลจากการมีองค์ประกอบของสารประกอบอะโรมาติกส์ในน้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกขวดใส (WPOB) ส่งผลให้มีค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำ (Mangesh, V. L. et al, 2020) ด้วยผลจากค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำของน้ำมันขยะพลาสติก อาจเป็นสาเหตุที่ส่งผลต่อความล่าช้าในการจุดระเบิดในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งเป็นช่วงระหว่างการเริ่มต้นของการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้และการเริ่มต้นการเผาไหม้ เนื่องจากดัชนีซีเทนเป็นสมบัติทางเชื้อเพลิงที่แสดงคุณภาพการจุดติดไฟของน้ำมันเชื้อเพลิงและผลดังกล่าวนี้ส่งผลกระทบต่อตรงต่อการปลดปล่อยมลพิษไอเสีย เสีย และเสถียรภาพในการทำงานของเครื่องยนต์ โดยทั่วไปแล้วเครื่องยนต์ที่มีช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิดที่ยาวก่อให้เกิดการปลดปล่อยมลพิษไอเสียประเภทไฮโดรคาร์บอนและเขม่าที่สูง (El-Hagar, M., 2020; Srithar, K. et al, 2014)

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ

คุณสมบัติน้ำมัน เชื้อเพลิง	หน่วย การวัด	มาตรฐานการ ทดสอบ	น้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ		
			DF	WPOB	WPBCO
ความหนืดจลนศาสตร์ ณ อุณหภูมิ 40 °C	cSt	ASTM D445	3.37	1.70	1.30
ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6 °C	-	ASTM D1298	0.830	0.825	0.770
ความถ่วงเอพီไอ	o	ASTM D1298	39	40	52
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15.6 °C	kg/m ³	ASTM D1298	829	824	769
จุดวาบไฟ	°C	ASTM D93	78	28	32
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง	MJ/kg	ASTM D240	43.48	39.45	36.98
ดัชนีซีเทน	-	ASTM D976	61.09	28.77	51.78
อุณหภูมิที่ 10 % Volume Recovered	°C	ASTM D86	228	140	144
อุณหภูมิที่ 50 %Volume Recovered	°C	ASTM D86	290	196	198
อุณหภูมิที่ 90 %Volume Recovered	°C	ASTM D86	342	294	294

จากข้อมูลค่าอุณหภูมิการกลั่น (Distillation temperature) ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิดพบว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิด มีอุณหภูมิการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ที่ร้อยละ 90 โดยปริมาตร(90% Recovered) อยู่ในช่วงอุณหภูมิการกลั่นมาตรฐาน (ไม่เกิน 357 °C ตามข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงาน) โดยอุณหภูมิ ณ จุดดังกล่าวนี้เป็นจุดเดือดสุดท้ายที่กำหนดไว้เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำมันเชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้เกิดการไหลหรือแทรกซึมลงไปยังส่วนที่เป็นอ่างน้ำมันเครื่อง ซึ่งส่งผลให้คุณภาพของน้ำมันเครื่องเสื่อมลงได้

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตร (10% Recovered) หรือ อุณหภูมิเริ่มกลั่นตัว (Initial boiling point, IBP) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ช่วยประเมินการติดเครื่องยนต์และบ่งบอกถึงพฤติกรรมการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิง โดยน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความสามารถในการระเหยช้าส่งผลให้เครื่องยนต์ติดยากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความสามารถในการระเหยที่เร็ว แต่อย่างไรก็ตาม การระเหยที่เร็วเกินไปจะส่งผลให้อิทธิพลของน้ำมันเชื้อเพลิงอัดแน่นอยู่ในห้องเผาไหม้ทำเครื่องยนต์เกิดการน็อคได้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิด พบว่าน้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกขวดใส (WPOB) มีช่วงอุณหภูมิของ IBP และ 10% Recovered ที่ต่ำกว่าน้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกฝาขวด (WPBCO) สาเหตุน่าจะมาจากการที่มีสัดส่วนของสารประกอบอะโรมาติกส์(ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีจุดเดือดต่ำในองค์ประกอบน้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกขวดใส (WPOB) ค่อนข้างมาก

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร (50% Recovered) หรือ Mid-range ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิดพบว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิด มีอุณหภูมิการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตรต่ำกว่าน้ำมันดีเซล อุณหภูมิ ณ จุดดังกล่าวเป็นอุณหภูมิของส่วนที่ระเหยได้มากขึ้นและเป็นช่วงอุณหภูมิที่ช่วยให้เครื่องยนต์ร้อน (Warm up) ได้เร็ว อุณหภูมิการกลั่นที่ 10%, 50% และ 90% ของส่วนที่กลั่นได้ สามารถนำไปใช้เป็นตัวแปรในการคำนวณค่าดัชนีซีเทน ซึ่งเป็นสมบัติหนึ่งที่ยังบ่งบอกถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์

5.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง

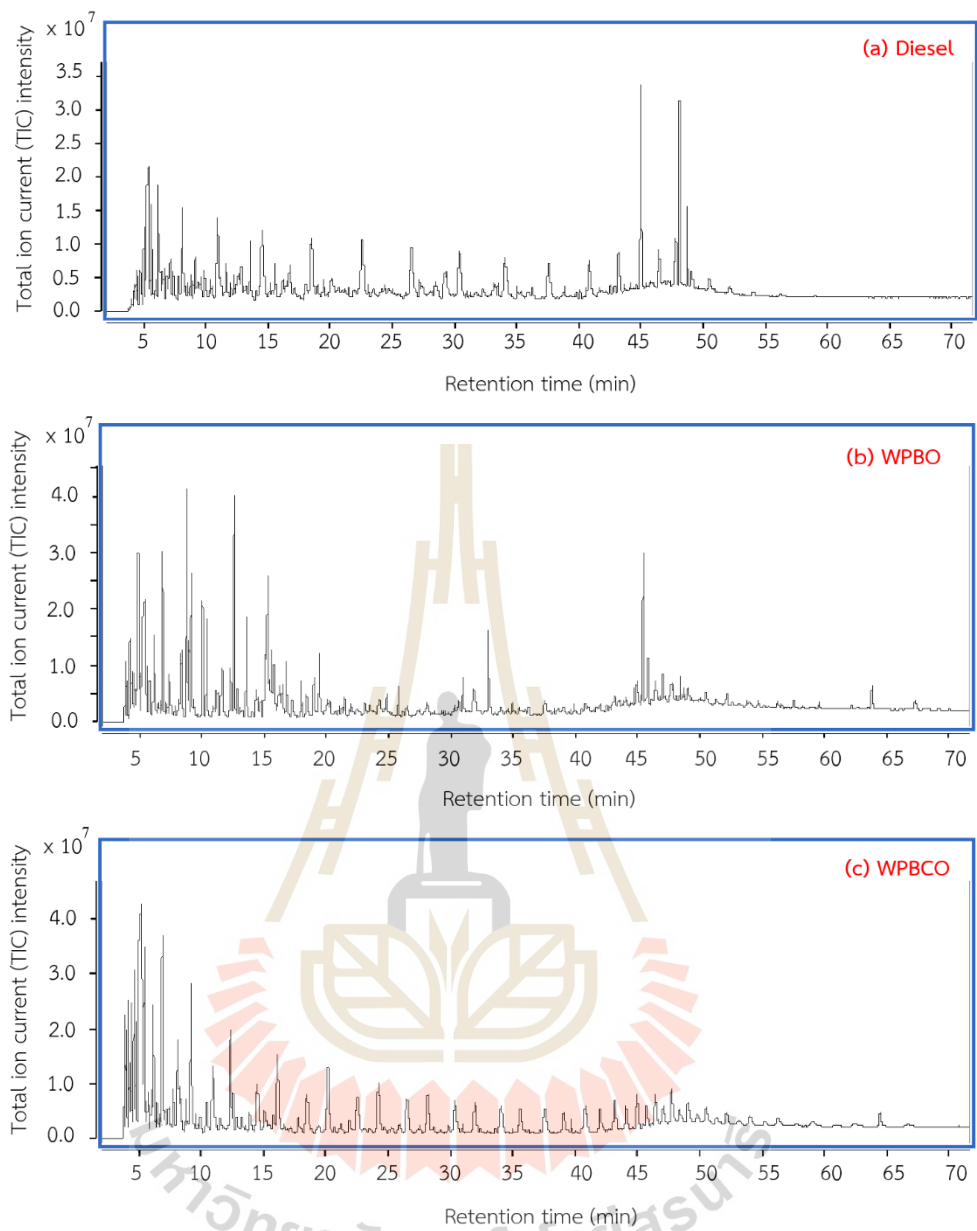
การวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีของน้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิด โดยใช้เครื่อง GC-MS ซึ่งผลการวิเคราะห์สารประกอบของตัวอย่างน้ำมันทั้ง 3 ชนิด แสดงดังรูปที่ 5.1 ข้อมูลผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันดีเซล น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกขวดใส (WPOB) และน้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกฝาขวด (WPBCO) แสดงดังตารางที่ 5.3 – 5.5 จากผลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมี โดยสรุปข้อมูลที่สำคัญได้ดังนี้

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีของน้ำมันดีเซลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 5.3 พบว่า น้ำมันดีเซลมีองค์ประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนส่วนใหญ่เป็น

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว หรือพาราฟิน ซึ่งเป็นสารประกอบหลักที่พบในน้ำมันปิโตรเลียม และแก๊สธรรมชาติ รองลงมาเป็นสารประกอบเมทิลเอสเทอร์ โอลิฟินและอะโรมาติกส์ ตามลำดับ ทั้งนี้ การตรวจพบสารประกอบเมทิลเอสเทอร์ในน้ำมันดีเซล เนื่องจากน้ำมันดีเซลที่นำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์นั้นเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ที่มีสัดส่วนการผสมไบโอดีเซล 7 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

จากผลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ตัวอย่างในเชิงคุณภาพพบว่าโครมาแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกขวดใส (WPOB) ดังรูปที่ 5.2 (b) พบว่าน้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกขวดใส (WPOB) มีองค์ประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนส่วนใหญ่เป็นประเภทอะโรมาติกส์ (48.72%) รองลงมาเป็นพาราฟิน (26.34%), โอลิฟิน (10.46%) และอื่น ๆ (14.48%) ตามลำดับ ในขณะที่ น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกฝาขวด (WPBCO) มีสารไฮโดรคาร์บอนส่วนใหญ่เป็นประเภทพาราฟิน (49.91%) รองลงมาเป็นโอลิฟิน (46.96%) และอื่น ๆ (3.13%) ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสอดคล้องกับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง

เมื่อนำข้อมูลจากข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันดีเซล และน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิด มาวิเคราะห์สัดส่วนเปอร์เซ็นต์พื้นที่ใต้กราฟขององค์ประกอบตามจำนวนคาร์บอน ได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 5.6 โดยพิจารณาช่วงจำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วง C6 – C31 พบว่า น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกขวดใส (WPOB) มีสารประกอบโดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วงจำนวนคาร์บอน C6 ถึง C12 ประมาณ 69.33% ซึ่งจัดว่าอยู่ในกลุ่มน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียมประเภทน้ำมันแก๊สโซลีน ในขณะที่น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกฝาขวด (WPBCO) มีสารประกอบโดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วงจำนวนคาร์บอน C13 ถึง C18 (43.77%) ซึ่งเป็นช่วงจำนวนคาร์บอนของกลุ่มน้ำมันดีเซลและเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์น้ำมันดีเซลที่มีช่วงจำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วง C13 ถึง C18 ถึงกว่า 46.18%



รูปที่ 5.1 GC-MS chromatogram ของน้ำมันเชื้อเพลิง

(a) น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล

(b) น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกขวดใส (WPOB)

(c) น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกฝาขวด (WPBCO)

ตารางที่ 5.3 ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันดีเซล

เวลา (นาที)	ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (g/mol)	พื้นที่ (%)
4.35	Octane	C ₈ H ₁₈	114.1409	0.78
4.49	Cyclohexane, 1, 4-dimethyl-	C ₈ H ₁₆	112.1252	0.82
5.05	Nonane	C ₉ H ₂₀	128.1565	1.67
5.58	Nonane, 4-methyl-	C ₁₀ H ₂₂	142.1722	1.61
6.16	Decane	C ₁₀ H ₂₂	142.1722	3.62
8.10	Undecane	C ₁₁ H ₂₄	156.1878	4.18
9.13	p-Xylene	C ₈ H ₁₀	106.0783	0.94
9.88	trans-2-Dodecen-1-ol	C ₁₂ H ₂₄ O	184.1827	1.09
10.93	Dodecane	C ₁₂ H ₂₆	170.2035	5.99
11.62	Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	C ₉ H ₁₂	120.0939	0.92
13.55	Benzene, 1,2,3-trimethyl-	C ₉ H ₁₂	120.0939	1.62
14.50	Tridecane	C ₁₃ H ₂₈	184.2191	6.39
15.56	Benzene, 1,2,4-trimethyl-	C ₉ H ₁₂	120.0939	1.40
18.49	Tetradecane	C ₁₄ H ₃₀	198.2348	6.52
20.11	1-Tetradecene	C ₁₄ H ₂₈	196.2191	1.57
22.55	Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂	212.2504	5.66
26.53	Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄	226.2661	5.95
30.37	Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆	240.2817	5.69
34.05	Octadecane	C ₁₈ H ₃₈	254.2974	4.30
37.55	Nonadecane	C ₁₉ H ₄₀	268.3130	4.01
40.80	Eicosane	C ₂₀ H ₄₂	282.3287	3.90
43.18	Heneicosane	C ₂₁ H ₄₄	296.3443	3.19
44.96	Hexadecanoic acid, methyl ester	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	270.2559	10.11
46.43	Tricosane	C ₂₃ H ₄₈	324.3756	2.36
47.79	Methyl stearate	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	298.2872	2.06
48.07	11-Octadecenoic acid, methyl ester	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	296.2715	7.59

ตารางที่ 5.3 ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันดีเซล (ต่อ)

เวลา (นาที)	ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (g/mol)	พื้นที่ (%)
48.68	Linoleic acid, methyl ester	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	294.2559	2.45
49.03	Pentacosane	C ₂₅ H ₅₂	352.4069	1.19
50.44	Hexacosane	C ₂₆ H ₅₄	366.4226	1.13
52.10	Heptacosane	C ₂₇ H ₅₆	380.4382	0.62
53.97	Octacosane	C ₂₈ H ₅₈	394.4539	0.34
56.22	Nonacosane	C ₂₉ H ₆₀	408.4695	0.33

ตารางที่ 5.4 ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใส (WPOB)

เวลา (นาที)	ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (g/mol)	พื้นที่ (%)
3.91	Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	84.09	1.51
4.00	Heptane	C ₇ H ₁₆	100.12	1.68
4.21	Heptane, 4-methyl-	C ₈ H ₁₈	114.14	2.05
4.39	Heptane, 2,4-dimethyl-	C ₉ H ₂₀	128.15	1.89
4.86	2,3-Dimethyl-3-heptene	C ₉ H ₁₈	126.14	2.09
5.59	Nonane, 4-methyl-	C ₁₀ H ₂₂	142.17	1.40
5.70	6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	C ₉ H ₁₆	124.12	3.80
5.79	Cyclohexene, 3,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₆	124.12	3.07
6.16	Octane, 3,5-dimethyl-	C ₁₀ H ₂₂	142.17	4.97
6.84	Toluene	C ₇ H ₈	92.06	3.04
7.38	Acetic acid, butyl ester	C ₆ H ₁₂ O ₂	116.08	0.56
8.11	Undecane	C ₁₁ H ₂₄	156.18	5.05
8.35	1-Decene, 2,4-dimethyl-	C ₁₂ H ₂₄	168.18	3.43
8.80	Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	106.07	4.51
8.97	o-Xylene	C ₈ H ₁₀	106.07	0.82
9.14	p-Xylene	C ₈ H ₁₀	106.07	3.45

ตารางที่ 5.4 ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีน้ำมันขี้เฒ่าพลาสติกจากขวดใส(WPOB) (ต่อ)

เวลา (นาที)	ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (g/mol)	พื้นที่ (%)
10.04	Benzene, (1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₂	120.09	3.86
10.36	m-Xylene	C ₈ H ₁₀	106.07	3.11
11.11	Benzene, propyl-	C ₉ H ₁₂	120.09	4.30
11.25	1-Methoxy-2-propyl acetate	C ₆ H ₁₂ O ₃	132.07	3.09
11.63	Benzene, 1-ethyl-4-methyl-	C ₉ H ₁₂	120.09	3.60
12.28	Benzene, 1,2,4-trimethyl-	C ₉ H ₁₂	120.09	2.92
12.61	Styrene	C ₈ H ₈	104.06	2.46
12.84	Benzene, 1-ethyl-2-methyl-	C ₉ H ₁₂	120.09	2.39
13.56	Benzene, 1,2,3-trimethyl-	C ₉ H ₁₂	120.09	2.16
14.36	Benzene, 1-methyl-3-propyl-	C ₁₀ H ₁₄	134.10	2.38
15.27	α -Methylstyrene	C ₉ H ₁₀	118.07	1.48
15.57	Benzene, 1,2,4-trimethyl-	C ₉ H ₁₂	120.09	2.14
16.19	Benzene, 2-ethyl-1,4-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₄	134.10	1.26
16.46	Benzene, 1-ethyl-3,5-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₄	134.10	1.71
16.77	Benzene, 1-ethyl-2,4-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₄	134.10	1.07
17.97	Ethanol, 2-butoxy-	C ₆ H ₁₄ O ₂	118.09	2.03
18.40	Benzene, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₄	134.10	1.32
18.98	Benzene, 1,2,4,5-tetramethyl-	C ₁₀ H ₁₄	134.10	1.84
19.41	Benzene, 1,2,3,4-tetramethyl-	C ₁₀ H ₁₄	134.10	1.08
20.27	Benzene, (3-methyl-3-butenyl)-	C ₁₁ H ₁₄	146.10	1.61
20.99	Benzene, 4-ethenyl-1,2-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₂	132.09	0.90
21.47	Benzene, 1,2,3,5-tetramethyl-	C ₁₀ H ₁₄	134.10	1.82
24.83	Benzene, heptyl-	C ₁₃ H ₂₀	176.15	0.47
25.78	Benzonitrile	C ₇ H ₅ N	103.04	1.10
30.96	Naphthalene	C ₁₀ H ₈	128.06	0.50
31.83	1-Decanol, 2-hexyl-	C ₁₆ H ₃₄ O	242.26	1.04

ตารางที่ 5.4 ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใส (WPOB) (ต่อ)

เวลา (นาที)	ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (g/mol)	พื้นที่ (%)
33.02	Ethanol, 1-(2-butoxyethoxy)-	C ₈ H ₁₈ O ₃	162.12	0.39
34.85	Ethanol, 2-(2-butoxyethoxy)-, acetate	C ₁₀ H ₂₀ O ₄	204.13	0.85
34.99	Naphthalene, 2-methyl-	C ₁₁ H ₁₀	142.07	0.33
37.50	Nonadecane	C ₁₉ H ₄₀	268.31	0.77
44.68	Phenol, 2-(1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₂ O	136.08	0.67
44.92	Docosane	C ₂₂ H ₄₆	310.36	0.48
45.31	1,3-Diphenylbutane	C ₁₆ H ₁₈	210.14	0.48
45.43	1,3-Diphenylpropane	C ₁₅ H ₁₆	196.12	0.76
45.81	N-Methylphthalimide	C ₉ H ₇ NO ₂	161.04	0.30
46.38	Tricosane	C ₂₃ H ₄₈	324.37	1.08
47.01	1,4-Diphenylbutane	C ₁₆ H ₁₈	210.14	1.61
47.69	Tetracosane	C ₂₄ H ₅₀	338.39	0.90
47.84	18-Norabieta-8,11,13-triene	C ₁₉ H ₂₈	256.21	1.82
48.38	α-N-Normethadol	C ₂₀ H ₂₇ NO	297.20	0.47
49.04	Pentacosane	C ₂₅ H ₅₂	352.40	1.10
50.45	Hexacosane	C ₂₆ H ₅₄	366.42	0.50
52.18	Naphthalene, 1-phenyl-	C ₁₆ H ₁₂	204.09	1.04
56.22	Anthracene, 2-methyl-	C ₁₅ H ₁₂	192.09	0.39
57.51	Naphthalene, 2-phenyl-	C ₁₆ H ₁₂	204.09	0.85
59.56	Phenanthrene, 3,6-dimethyl-	C ₁₆ H ₁₄	206.10	0.33
62.20	9-Phenyl-5H-benzocycloheptene	C ₁₇ H ₁₄	218.10	0.77
63.80	Retene	C ₁₈ H ₁₈	234.14	0.67
67.26	Strychane, 1-acetyl-20α-hydroxy-16-methylene-	C ₂₁ H ₂₆ N ₂ O ₂	338.19	0.48

ตารางที่ 5.5 ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีน้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวด (WPBCO)

เวลา (นาที)	ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (g/mol)	พื้นที่ (%)
3.92	Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	84.0939	1.51
4.02	Heptane	C ₇ H ₁₆	100.1252	1.68
4.14	1-Heptene	C ₇ H ₁₄	98.1096	2.05
4.38	Octane	C ₈ H ₁₈	114.1409	1.89
4.62	1-Octene	C ₈ H ₁₆	112.1252	2.09
4.76	2,3-Dimethyl-3-heptene	C ₉ H ₁₈	126.1409	1.40
5.42	Cyclopropane, 1-methyl-2-pentyl-	C ₉ H ₁₈	126.1409	3.80
6.16	Decane	C ₁₀ H ₂₂	142.1722	3.07
6.88	1-Decene	C ₁₀ H ₂₀	140.1565	4.97
8.10	Undecane	C ₁₁ H ₂₄	156.1878	3.04
8.75	Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	106.0783	0.56
9.19	1-Undecene	C ₁₁ H ₂₂	154.1722	5.05
10.94	Dodecane	C ₁₂ H ₂₆	170.2035	3.43
12.34	1-Dodecene	C ₁₂ H ₂₄	168.1878	4.51
12.57	Styrene	C ₈ H ₈	104.0626	0.82
14.49	Tridecane	C ₁₃ H ₂₈	184.2191	3.45
16.11	1-Tridecene	C ₁₃ H ₂₆	182.2035	3.86
18.48	Tetradecane	C ₁₄ H ₃₀	198.2348	3.11
20.16	1-Tetradecene	C ₁₄ H ₂₈	196.2191	4.30
22.52	Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂	212.2504	3.09
24.21	1-Pentadecene	C ₁₅ H ₃₀	210.2348	3.60
26.51	Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄	226.2661	2.92
28.14	1-Hexadecene	C ₁₆ H ₃₂	224.2504	2.46
30.33	Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆	240.2817	2.39
31.94	1-Heptadecene	C ₁₇ H ₃₄	238.2661	2.16
34.02	Octadecane	C ₁₈ H ₃₈	254.2974	2.38

ตารางที่ 5.5 ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีน้ำมันขี้เฒ่าพลาสติกจากฝาขวด (WPBCO) (ต่อ)

เวลา (นาที)	ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (g/mol)	พื้นที่ (%)
35.57	1-Octadecene	C ₁₈ H ₃₆	252.2817	1.48
37.52	Nonadecane	C ₁₉ H ₄₀	268.3130	2.14
39.06	1-Nonadecene	C ₁₉ H ₃₈	266.2974	1.26
40.79	Eicosane	C ₂₀ H ₄₂	282.3287	1.71
41.96	1-Eicosene	C ₂₀ H ₄₀	280.3130	1.07
43.15	Heneicosane	C ₂₁ H ₄₄	296.3443	2.03
44.04	1-Heneicosanol	C ₂₁ H ₄₄ O	312.3392	1.32
44.94	Docosane	C ₂₂ H ₄₆	310.3600	1.84
45.68	1-Docosene	C ₂₂ H ₄₄	308.3443	1.08
46.40	Tricosane	C ₂₃ H ₄₈	324.3756	1.61
47.03	1-Tricosene	C ₂₃ H ₄₆	322.3600	0.90
47.69	Tetracosane	C ₂₄ H ₅₀	338.3913	1.82
48.35	n-Tetracosanol-1	C ₂₄ H ₅₀ O	354.3862	0.47
49.05	Pentacosane	C ₂₅ H ₅₂	352.4069	1.10
49.74	1-Pentacosanol	C ₂₅ H ₅₂ O	368.4018	0.50
50.48	Hexacosane	C ₂₆ H ₅₄	366.4226	1.04
51.33	1-Hexacosene	C ₂₆ H ₅₂	364.4069	0.39
52.09	Heptacosane	C ₂₇ H ₅₆	380.4382	0.85
53.10	1-Heptacosanol	C ₂₇ H ₅₆ O	396.4331	0.33
53.99	Octacosane	C ₂₈ H ₅₈	394.4539	0.77
56.27	Nonacosane	C ₂₉ H ₆₀	408.4695	0.67
59.06	triacontane	C ₃₀ H ₆₂	422.4852	0.48
62.38	Hentriacontane	C ₃₁ H ₆₄	436.5008	0.48

ตารางที่ 5.5 ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีน้ำมันขยะพลาสติกจากฝาชวด (WPBCO) (ต่อ)

เวลา (นาท)	ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (g/mol)	พื้นที่ (%)
64.44	Bis(2-ethylhexyl) phthalate	C ₂₄ H ₃₈ O ₄	390.2770	0.76
66.67	Dotriacontane	C ₂₅ H ₅₂	352.4069	0.30

ตารางที่ 5.6 สัดส่วนเปอร์เซ็นต์พื้นที่ได้กราฟขององค์ประกอบน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกที่ใช้ในการทดสอบ

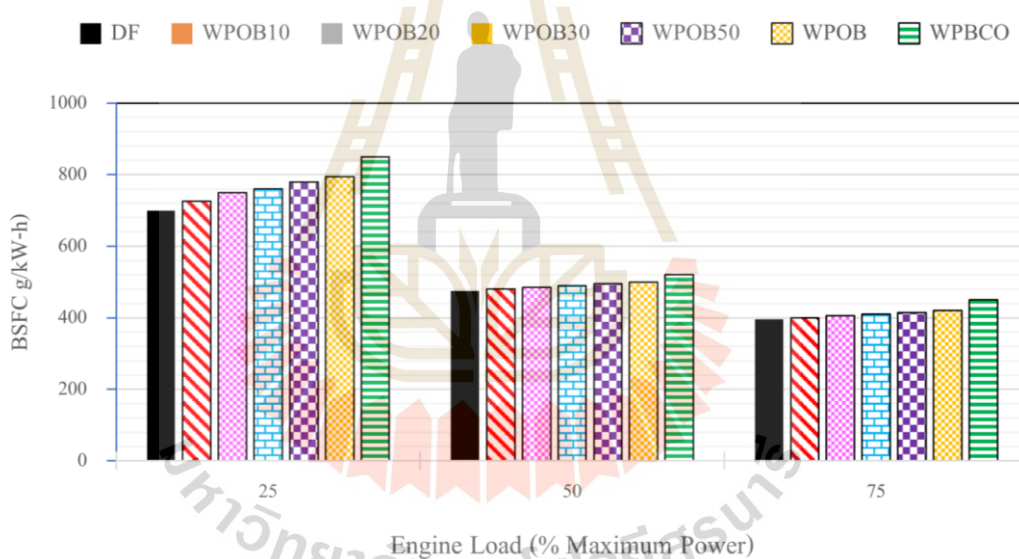
คาร์บอนอะตอม	สัดส่วนเปอร์เซ็นต์พื้นที่ได้กราฟ		
	น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล	น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกขวดใส (WPOB)	น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกฝาชวด (WPBCO)
C6-C12	24.65	69.33	21.82
C13-C18	46.18	13.95	43.77
C19-C23	25.56	9.01	26.66
>C24	3.61	7.71	7.75

5.3.3 สมรรถนะของเครื่องยนต์

ในการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์จะประกอบด้วย 1) การทดสอบเครื่องยนต์โดยใช้น้ำมันขยะพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ที่ผลิตจากขวดใส และน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 10%, 20%, 30% และ 50% ตามลำดับ และ 2) การทดสอบเครื่องยนต์โดยใช้น้ำมันขยะพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ผลิตจากฝาชวด โดยสมรรถนะของเครื่องยนต์จะประเมินจาก ค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (brake-specific fuel consumption, BSFC) และค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (brake thermal efficiency, BTE) โดยมีข้อมูลผลการทดสอบที่ได้ดังนี้

รูปที่ 5.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่ภาระกรรมของเครื่องยนต์ระดับต่าง ๆ จากข้อมูลจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มภาระกรรมให้กับเครื่องยนต์ ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกมีแนวโน้มที่จะลดลง เนื่องจากเครื่องยนต์มีอัตราการเพิ่มของกำลังเบรกที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง เป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในกระบอกสูบเมื่อมีภาระกรรมของเครื่องยนต์ที่สูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มช่วงเวลา

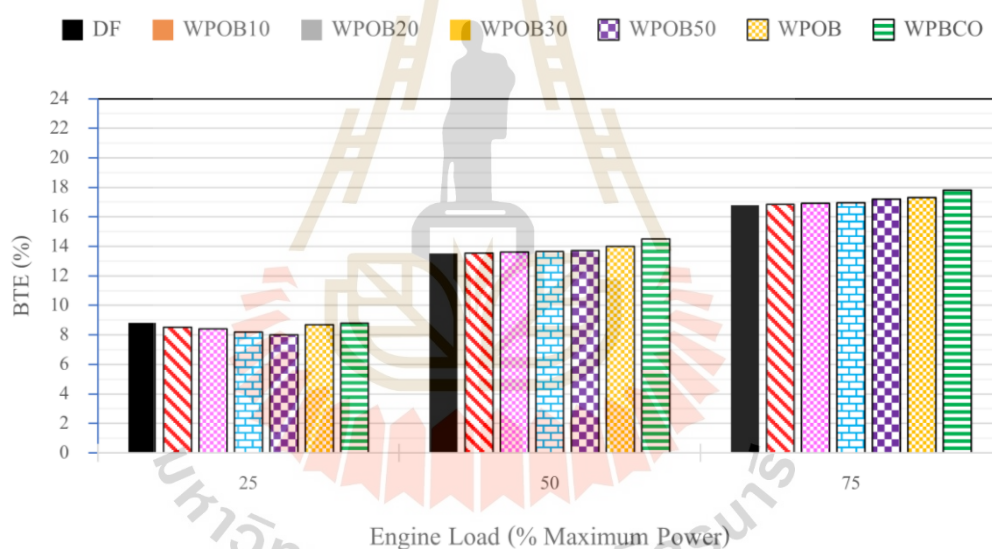
ของการเผาไหม้และประสิทธิภาพในการเผาไหม้ให้สูงขึ้น หากเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของน้ำมันขยะพลาสติกทุกชนิดกับน้ำมันดีเซลพบว่า น้ำมันขยะพลาสติกมีความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกมากกว่าน้ำมันดีเซลทุกภาระกรรม เนื่องจากน้ำมันขยะพลาสติกมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงน้อยกว่าน้ำมันดีเซลจึงจำเป็นต้องใช้ปริมาณของน้ำมันเชื้อเพลิงมากขึ้นเพื่อให้ได้กำลังเครื่องยนต์ที่เท่ากันเมื่อเปรียบเทียบกับการเผาไหม้น้ำมันดีเซล (S. Kumar et al., 2013) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าการใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสผสมกับน้ำมันดีเซลจะส่งผลต่ออัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกให้สูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมน้ำมันขยะพลาสติก ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากค่าความร้อนเชื้อเพลิงผสมที่ลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Damodharan, D. (2017) เป็นที่น่าสังเกตว่าที่ภาระกรรมเครื่องยนต์สูงกว่า 50% ของกำลังสูงสุด อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันแต่ละชนิดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 5.2 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกกับภาระกรรมของเครื่องยนต์ ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวดและน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใส

รูปที่ 5.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกที่ภาระกรรมของเครื่องยนต์ระดับต่าง ๆ โดยพบว่า การเปลี่ยนแปลงของภาระกรรมของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของน้ำมันเชื้อเพลิงทุกชนิดมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้มากขึ้นเป็นสาเหตุให้เกิดการเผาไหม้ที่รุนแรงส่งผลให้อุณหภูมิภายในกระบอกสูบสูงขึ้น น้ำมันเชื้อเพลิงจึงมีอัตราการระเหยกลายเป็นไอได้ดีขึ้น (Singh, R. K. et al,

2020; Yaqoob, H. et al, 2021) อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของน้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวดมีค่าสูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น ทุกกรณีซึ่งสาเหตุอาจจะมาจากองค์ประกอบของออกซิเจนในสารประกอบน้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวด อีกทั้งการที่มีค่าความหนืดและความหนาแน่นที่ต่ำกว่าจึงอาจส่งผลต่อการเผาไหม้ของส่วนผสมอากาศ-เชื้อเพลิงที่ดีกว่า เมื่อพิจารณาสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า การใช้ น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสผสมกับน้ำมันดีเซลจะส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกให้ลดต่ำลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมน้ำมันขยะพลาสติกในช่วงโหลดต่ำ แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าที่ภาระกรรมเครื่องยนต์สูงกว่า 50% ของกำลังสูงสุด ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขวดใสผสมกับน้ำมันดีเซลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เป็นผลเนื่องจากอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่สูงขึ้น



รูปที่ 5.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกกับภาระกรรมของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวดและน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใส

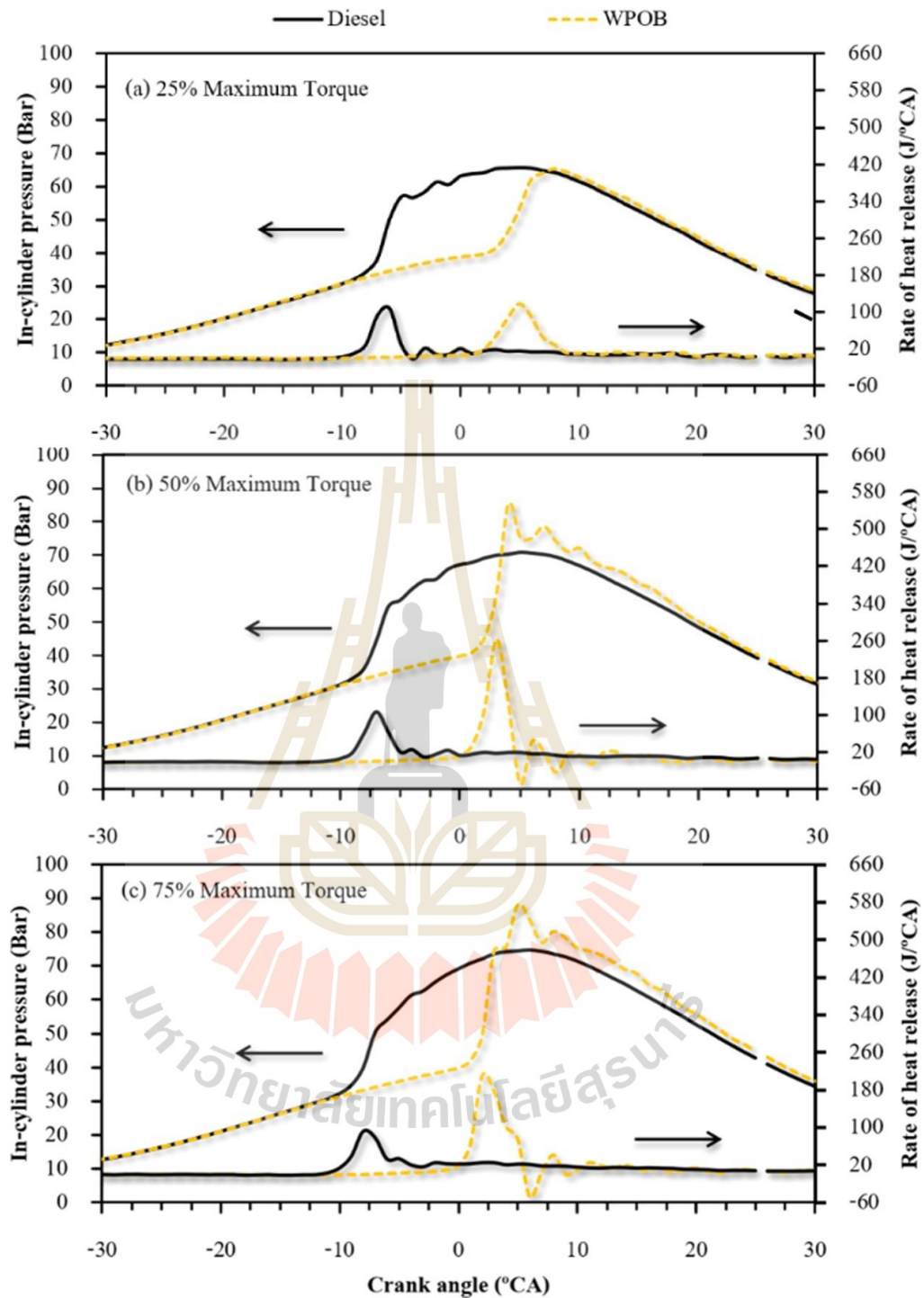
5.3.4 คุณลักษณะการเผาไหม้

การวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกกับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวแบบแปรผันอัตราส่วนกำลังอัด ทำการทดสอบโดยการใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใส น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 10%, 20%, 30% และ 50% และน้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกฝาขวด ตามลำดับ โดยคุณลักษณะการเผาไหม้จะประเมินจาก

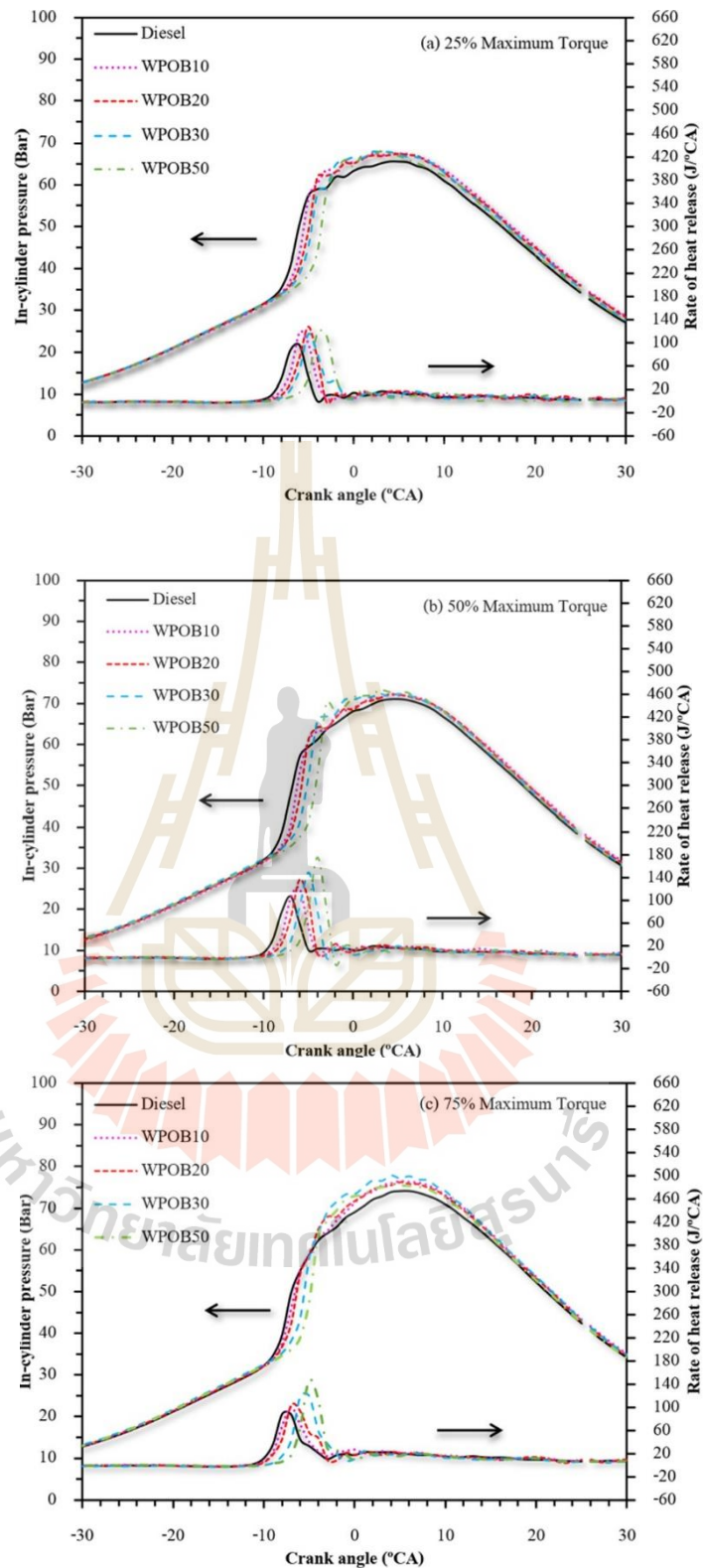
ค่าความดันในกระบอกสูบ (in-cylinder pressure, ICP) และอัตราการปลดปล่อยความร้อน (rate of heat release, RoHR) ซึ่งเป็นปัจจัยตัวแปรที่สำคัญในการบ่งชี้ถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ โดยมีการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบที่ได้ดังนี้

รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ของความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนของน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสเทียบกับจังหวะองศาการหมุนของเพลาค้อเหวี่ยงที่ภาระกรรมของเครื่องยนต์ระดับต่าง ๆ จากข้อมูลจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสเกิดความล่าช้าในการจุดระเบิดในทุกช่วงภาระกรรม ซึ่งสาเหตุหลักน่าจะมาจากสมบัติทางเชื้อเพลิงและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสที่มีส่วนประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนประเภทอะโรมาติกส์ (เบนซีน) ซึ่งมีอัตราการสลายตัวที่ต่ำทำให้เกิดการหน่วงในการจุดระเบิด (Kee, S. et al, 2005) ผลดังกล่าวทำให้มีน้ำมันเชื้อเพลิงที่รอการเผาไหม้ในปริมาณมาก เมื่อเกิดการเผาไหม้จึงส่งผลให้มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนที่สูง ทั้งนี้ RoHR สูงสุดของน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสเกิดขึ้นหลังจากลูกสูบเคลื่อนผ่านศูนย์ตายบนไปถึง 12-20 องศาเพลาค้อเหวี่ยง ซึ่งเป็นช่วงที่ลูกสูบกำลังเคลื่อนที่สู่จุดศูนย์ตายล่างในจังหวะคาย พฤติกรรมดังกล่าวนี้อาจส่งผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์ที่ไม่ราบเรียบ อย่างไรก็ดีตามเมื่อภาระกรรมเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น ความล่าช้าในการจุดระเบิดจะสั้นลง เนื่องจากการเพิ่มภาระงานทำให้ก๊าซตกค้างและอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้น

รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ของความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนของน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 10%, 20%, 30% และ 50% พบว่าเชื้อเพลิงมีลักษณะการเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลในทุกช่วงภาระกรรม อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นว่าค่าความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนในขณะที่เกิดการเผาไหม้สูงกว่าน้ำมันดีเซลอย่างชัดเจนที่ทุกสภาวะการทดสอบภาระกรรมเครื่องยนต์อีกทั้งมีความล่าช้าในการจุดระเบิดช้ากว่ามากขึ้นเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใส ที่อัตราส่วนผสมน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใส 10% การเผาไหม้ของน้ำมันมีลักษณะใกล้เคียงกันกับลักษณะการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซล



รูปที่ 5.4 การเปลี่ยนแปลงของความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใส



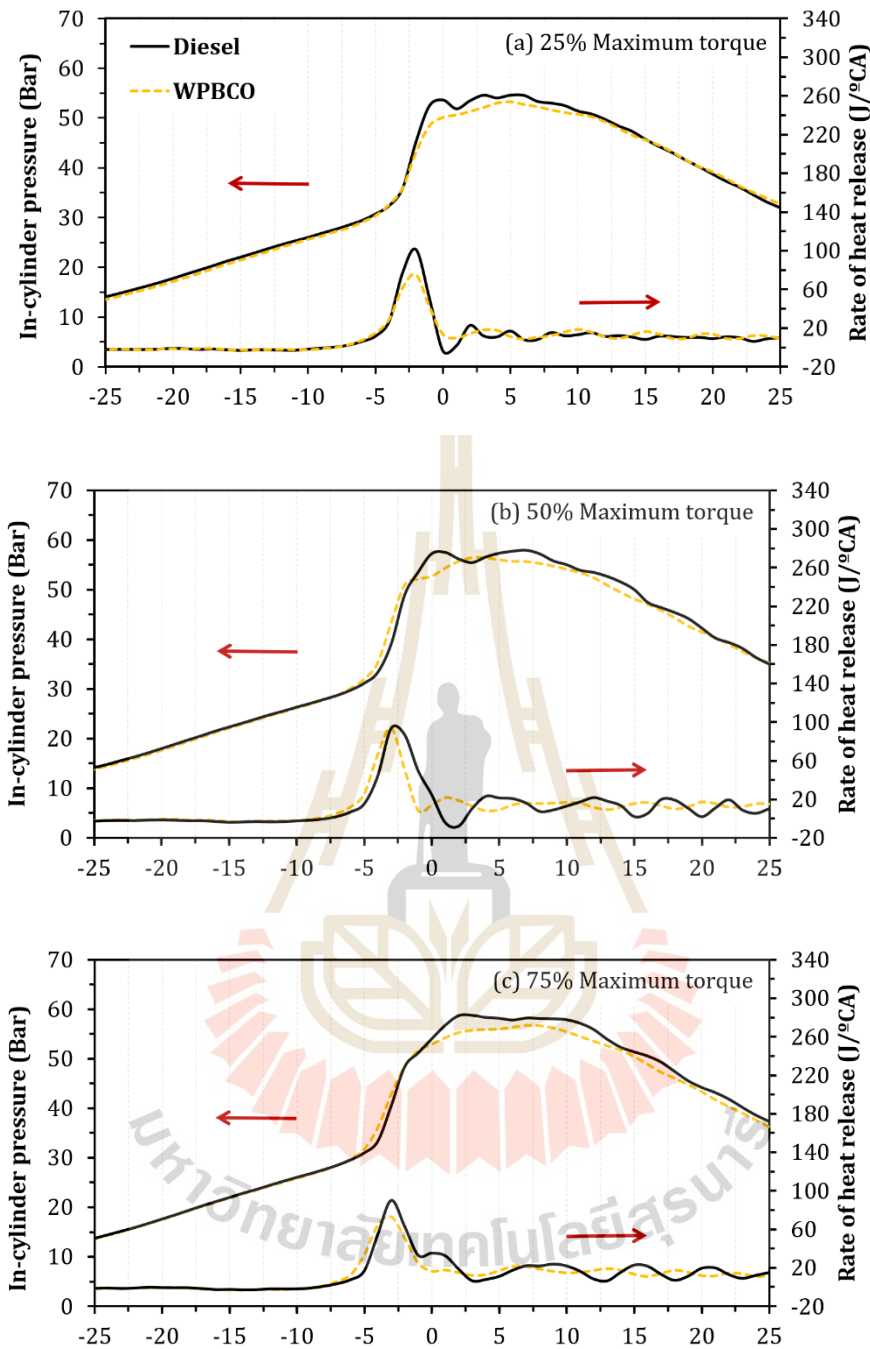
รูปที่ 5.5 การเปลี่ยนแปลงของความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใส่ผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนต่าง ๆ

รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ของความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนของน้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวดที่เทียบกับจังหวะองศาการหมุนของเพลาค้อเหวี่ยงที่ภาระกรรมของเครื่องยนต์ระดับต่าง ๆ จากข้อมูลจะเห็นว่าลักษณะการเผาไหม้ของน้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวดมีลักษณะใกล้เคียงกันกับลักษณะการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซล แต่น้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวดจะเกิดการจุดระเบิดล่วงหน้าทุกภาระกรรมเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ถึงแม้ว่าสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวดจะมีค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งน่าจะทำให้เกิดความหน่วงในการจุดระเบิด แต่เนื่องจากผลของความหนืดน้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวดที่ต่ำมากจึงส่งผลให้เกิดการกระจายตัวเป็นละอองฝอยคลุกเคล้ากับอากาศและเกิดการลุกไหม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

5.3.5 มลพิษไอเสีย

การวิเคราะห์มลพิษไอเสียจากการเผาไหม้ของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกได้ทำการทดสอบโดยการใช้ น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใส น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสผสมกับน้ำมันดีเซล ในอัตราส่วน 10%, 20%, 30% และ 50% และน้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกฝาขวดตามลำดับ โดยทำการตรวจวัดปริมาณการปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ซึ่งประกอบไปด้วย การตรวจวัดออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ไฮโดรคาร์บอน (HC) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และค่าดัชนีเขม่า (Smoke) โดยมีการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบที่ได้ดังนี้

จากรูปที่ 5.7 แสดงปริมาณการปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่ภาระกรรมของเครื่องยนต์ระดับต่าง ๆ จากข้อมูลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของภาระกรรมของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนต่อกำลังงานที่ได้รับจากเครื่องยนต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในน้ำมันเชื้อเพลิงทุกชนิด ซึ่งเป็นผลจากอุณหภูมิในกระบอกสูบที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยเสริมให้เกิดการก่อตัวของ NO_x มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับภาระกรรมของเครื่องยนต์ที่ระดับเดียวกันจะพบว่าระดับออกไซด์ของไนโตรเจนของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากขวดใส มีปริมาณที่สูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุจากการที่น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากขยะพลาสติกจากขวดใส มีการจุดระเบิดที่ล่าช้าทำให้ก๊าซตกค้าง เมื่อเกิดการเผาไหม้จึงส่งผลให้มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนที่สูงและอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.6 การเปลี่ยนแปลงของความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากฟางขูด

เมื่อพิจารณาปริมาณการปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจนของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากขูดฝอยผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า การใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากขูดฝอยผสมกับน้ำมันดีเซลจะส่งผลต่อปริมาณการปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจนให้เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตรา

ส่วนผสมน้ำมันขยะพลาสติกในทุกช่วงภาระกรรมซึ่งเป็นผลมาจากความล่าช้าในการจุดระเบิดของน้ำมันเชื้อเพลิงขยะพลาสติกผสมที่มีสัดส่วนมากขึ้นในน้ำมันดีเซล

จากรูปที่ 5.8 แสดงปริมาณการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ภาระกรรมของเครื่องยนต์ระดับต่าง ๆ จากข้อมูลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของภาระกรรมของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อกำลังงานที่ได้รับจากเครื่องยนต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในน้ำมันเชื้อเพลิงทุกชนิด โดยทั่วไปการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องยนต์ดีเซลเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง เนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนที่ไม่เพียงพอ ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มภาระกรรมของเครื่องยนต์ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับภาระกรรมของเครื่องยนต์ที่ระดับเดียวกันจะพบว่าระดับคาร์บอนมอนอกไซด์ของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากขวดใสมีปริมาณที่สูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ อันเนื่องมาจากค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำของน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใส ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ล่าช้าและช่วงเวลาที่เชื้อเพลิงผสมกับอากาศในกระบวนการเผาไหม้ที่สั้นลง เป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูงขึ้นเมื่อใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสเป็นเชื้อเพลิง

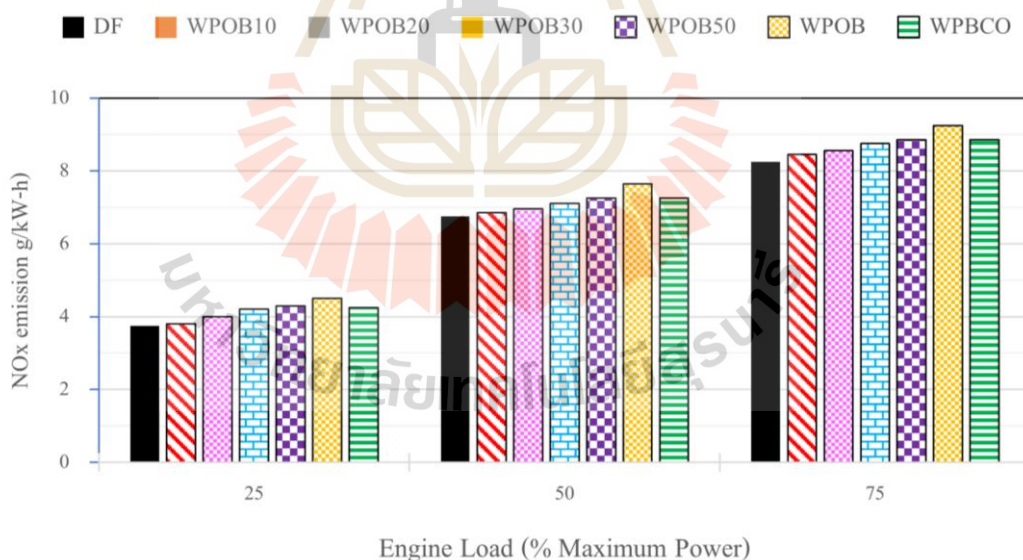
เมื่อพิจารณาปริมาณการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ ของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า การใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสผสมกับน้ำมันดีเซลจะส่งผลต่อปริมาณการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ให้เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมน้ำมันขยะพลาสติกในทุกช่วงภาระกรรมซึ่งเป็นผลมาจากความล่าช้าในการจุดระเบิดของน้ำมันเชื้อเพลิง นอกจากนี้สมบัติทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสซึ่งทำจากพลาสติกประเภท PET มีสารประกอบส่วนใหญ่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนประเภทอะโรมาติกส์ซึ่งส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Miron, L. et al, 2021)

จากรูปที่ 5.9 แสดงปริมาณการปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) ที่ภาระกรรมของเครื่องยนต์ระดับต่าง ๆ โดยทั่วไปไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบของน้ำมันเชื้อเพลิงที่เกิดจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ลักษณะเช่นเดียวกับคาร์บอนมอนอกไซด์ จากข้อมูลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของภาระกรรมของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนปริมาณไฮโดรคาร์บอนต่อกำลังงานที่ได้รับจากเครื่องยนต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในน้ำมันเชื้อเพลิงทุกชนิด นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับภาระกรรมของเครื่องยนต์ที่ระดับเดียวกันจะพบว่าระดับไฮโดรคาร์บอนของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากขวดใสมีปริมาณที่สูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ โดยสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้ล่าช้าและช่วงเวลาที่เชื้อเพลิงผสมกับอากาศในกระบวนการเผาไหม้ที่สั้นลง

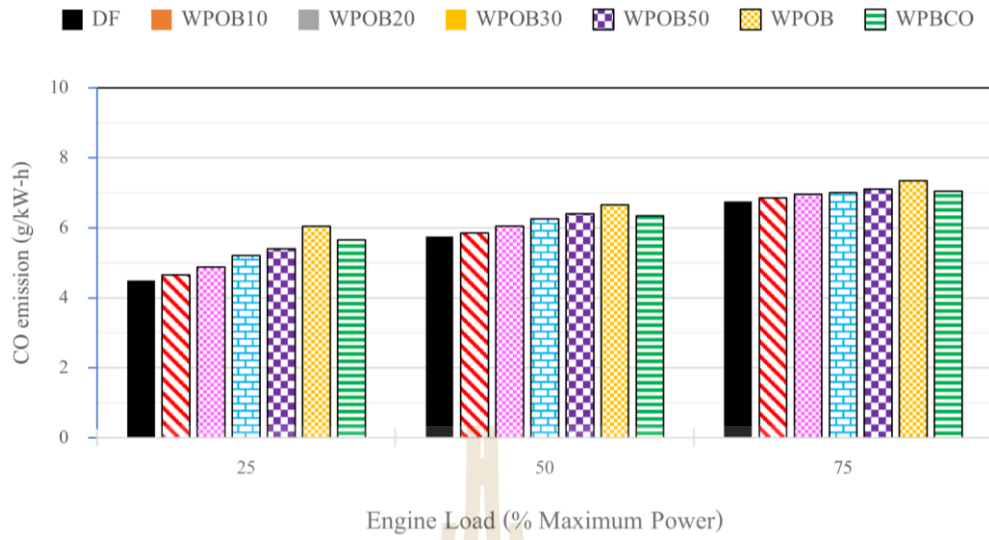
เมื่อพิจารณาปริมาณการปล่อยไฮโดรคาร์บอน ของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า การใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใส

ผสมกับน้ำมันดีเซลจะส่งผลต่อปริมาณการปล่อยไฮโดรคาร์บอนให้เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมน้ำมันขยะพลาสติกในทุกช่วงภาระกรรมซึ่งเป็นผลมาจากความล่าช้าในการจุดระเบิดของน้ำมันเชื้อเพลิง

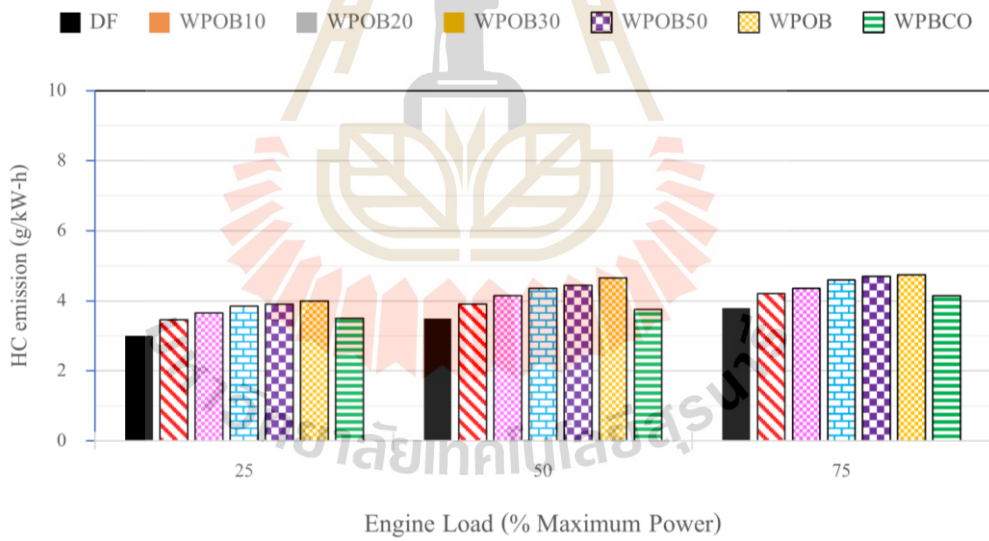
จากรูปที่ 5.10 แสดงค่าดัชนีเขม่าภาระกรรมของเครื่องยนต์ระดับต่าง ๆ จากข้อมูลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของภาระกรรมของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีเขม่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในน้ำมันเชื้อเพลิงทุกชนิด ค่าดัชนีเขม่าเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งเกิดจากสัดส่วนอากาศ-เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ที่มีค่าสูงเกินไป ซึ่งมักจะเพิ่มขึ้นตามภาระกรรมที่เพิ่มขึ้นของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมหนาในการเผาไหม้ เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับภาระกรรมของเครื่องยนต์ที่ระดับเดียวกันจะพบว่าระดับไฮโดรคาร์บอนของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากขวดใสมีปริมาณที่สูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ และเมื่อพิจารณาค่าดัชนีเขม่าของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า การใช้ น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสผสมกับน้ำมันดีเซลจะส่งผลต่อค่าดัชนีเขม่าให้เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมน้ำมันขยะพลาสติกในทุกช่วงภาระกรรมโดยสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้ล่าช้าและช่วงเวลาที่เชื้อเพลิงผสมกับอากาศในกระบวนการเผาไหม้ที่สั้นเช่นเดียวกับการเกิดมลพิษอื่น ๆ



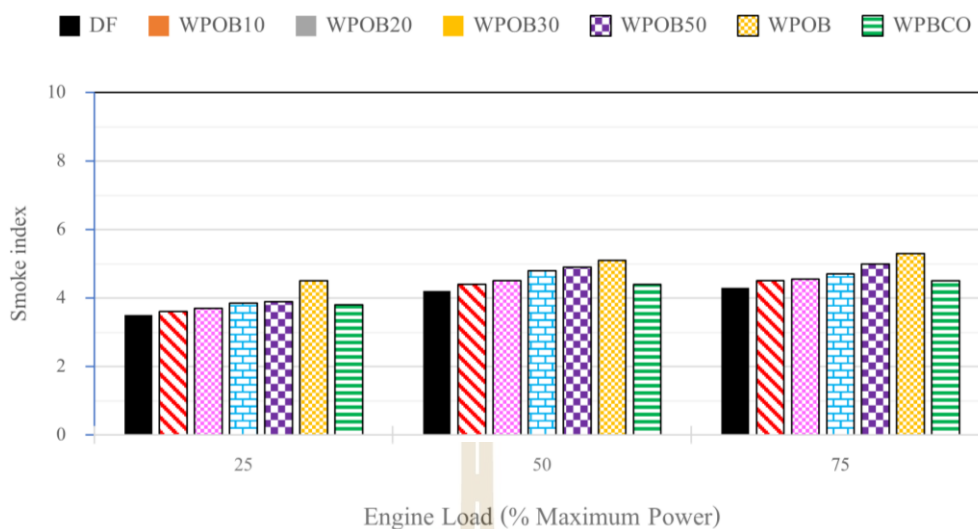
รูปที่ 5.7 ออกไซด์ของไนโตรเจนกับภาระกรรมของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสและน้ำมันขยะพลาสติก



รูปที่ 5.8 คาร์บอนมอนอกไซด์กับภาระกรรมของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวดและน้ำมันขยะพลาสติก



รูปที่ 5.9 ไฮโดรคาร์บอนกับภาระกรรมของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวดและน้ำมันขยะพลาสติก



รูปที่ 5.10 ค่าดัชนีเขม่าของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวด และน้ำมันขยะพลาสติก

5.4 ปัจจัยเชิงเศรษฐศาสตร์ที่มีผลต่อการเลือกใช้วัตถุดิบในการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติก

การเลือกใช้วัตถุดิบในการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกไม่เพียงส่งผลต่อคุณสมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากกระบวนการผลิตเท่านั้น แต่ยังส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนในการผลิตอีกด้วย เนื่องจากขยะพลาสติกแต่ละชนิดนอกจากจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันแล้วยังมีความแตกต่างกันในด้านราคาของต้นทุนวัตถุดิบ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจจะส่งผลต่อต้นทุนการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติก อาทิ เช่น ราคาของเครื่องจักร ค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ค่าใช้จ่ายการเตรียมวัตถุดิบ ปริมาณการผลิต แหล่งที่มา ฯลฯ เป็นต้น

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลในเชิงเศรษฐศาสตร์ระหว่าง น้ำมันที่ผลิตจากขยะพลาสติกผสมน้ำมันขยะที่ผลิตจากพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และน้ำมันขยะที่ผลิตจากพลาสติกโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET) แล้วจะพบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อต้นทุนในการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติก คือ ต้นทุนการผลิตและมูลค่าของวัตถุดิบ โดยจากข้อมูลของศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่า น้ำมันจากขยะพลาสติกผสมที่กลั่นและยังไม่ผ่านกระบวนการกลั่นมีต้นทุนอยู่ที่ 10.9 และ 8.4 บาทต่อลิตร ตามลำดับ โดยคิดเป็นต้นทุนการผลิตน้ำมันต่อปริมาณขยะพลาสติกผสมอยู่ที่ 6 – 7 บาทต่อกิโลกรัม ขณะที่การผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมที่ผลิตด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดคงที่ขนาดกำลังการผลิต 100 กิโลกรัมต่อครั้ง มีต้นทุนของน้ำมันที่ยังไม่ผ่านกระบวนการกลั่นอยู่ที่ 20 บาทต่อลิตร โดยคิดเป็นต้นทุนการผลิต

น้ำมันต่อปริมาณขยะพลาสติกผสมอยู่ที่ 10 - 12 บาทต่อกิโลกรัม และเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตน้ำมันขยะพลาสติกจากวัตถุดิบประเภทขวดและฝาขวดพลาสติกที่ผลิตด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดคงที่ขนาดเล็ก มีต้นทุนของน้ำมันที่ยังไม่ผ่านกระบวนการกลั่นอยู่ที่ 20 บาทต่อลิตร โดยคิดเป็นต้นทุนการผลิตน้ำมันต่อปริมาณขยะพลาสติกอยู่ที่ 12 - 15 บาทต่อกิโลกรัม จากข้อมูลดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกในแต่ละประเภทจะพบว่า ขยะพลาสติกผสมเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติก เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด ทั้งต่อปริมาณขยะพลาสติกและต่อลิตร อีกทั้งยังสามารถนำขยะพลาสติกผสมจากแหล่งต่าง ๆ มาใช้ในกระบวนการผลิตโดยไม่ต้องผ่านการคัดแยกเตรียมวัตถุดิบ ซึ่งแตกต่างจาก พลาสติกประเภท HDPE และ PET ที่มีมูลค่าในการรับซื้อสูง อย่างไรก็ตามในการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกผสมกับเครื่องยนต์ที่ไม่มีการปรับแต่งจำเป็นต้องมีการศึกษาผลกระทบที่มีต่อเครื่องยนต์ในระยะยาวในแง่ของสมรรถนะ ประสิทธิภาพและการสึกหรอของชิ้นส่วนต่าง ๆ

5.5 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลกระทบของการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผลิตจากฝาขวดและน้ำมันจากขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนเทเรพทาเลตที่ผลิตจากขวดใส ต่อสมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้และมลพิษของเครื่องยนต์ โดยการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง เพื่อนำไปทดสอบและประเมินสมรรถนะของเครื่องยนต์ภายใต้ภาระกรรมต่าง ๆ สามารถวิเคราะห์และสรุปผลโดยสังเขปได้ดังนี้

1) จากผลการวิเคราะห์ด้วย GC-MS สารประกอบที่พบในไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ ใน น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากจากพลาสติกฝาขวดใส(WPBCO) ส่วนใหญ่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนระหว่าง C7 - C28 ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อนกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล โดยมีสัดส่วนโมเลกุลที่มีจำนวนคาร์บอนระหว่าง C13 - C18 ซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกันกับเชื้อเพลิงดีเซลอยู่ที่ประมาณ 44% ขณะที่น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากจากพลาสติกขวดใส(WPOB) ส่วนใหญ่มีสัดส่วนโมเลกุลที่มีจำนวนคาร์บอนระหว่าง C6 - C12 ซึ่งอยู่ในกลุ่ม benzene, heptane, toluene

2) การใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผลิตจากฝาขวดในเครื่องยนต์ดีเซลทำให้ BSFC ลดลง ในทุก ๆ ภาระกรรมของเครื่องยนต์ ในขณะที่ BTE เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเชื้อเพลิง ซึ่งส่งผลต่อการเผาไหม้

3) คุณลักษณะการเผาไหม้ของน้ำมันจากขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผลิตจากฝาขวดมีลักษณะใกล้เคียงกับลักษณะการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซล แต่จะเกิดการจุดระเบิดล่วงหน้าทุกภาระกรรม ขณะที่คุณลักษณะในการเผาไหม้ของน้ำมันจากขยะพลาสติกชนิด

โพลีเอทิลีนเทรฟทาเลตที่ผลิตจากขวดใส เกิดความล่าช้าในการจุกระเบิดในทุกช่วงภาระกรรม ซึ่งสาเหตุหลักมาจากคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติก

4) การใช้ น้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตจากขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิดเพิ่มการปล่อยมลพิษของ NO_x , CO, HC และเขม่าควัน โดยมีสาเหตุหลักคือ ความล่าช้าในการจุกระเบิด ช่วงการเผาไหม้ที่สั้น รวมไปถึงค่าดัชนีซีเทนและค่าความร้อนที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซล

5) การใช้ น้ำมันจากขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลตที่ผลิตจากขวดใสผสมกับน้ำมันดีเซลช่วยปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงส่งผลให้เชื้อเพลิงมีลักษณะการเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลในทุกช่วงภาระกรรม โดยส่งผลให้ BSFC และ BTE เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเชื้อเพลิง ซึ่งส่งผลต่อการเผาไหม้

6) การผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกทั้ง 2 ชนิด มาใช้กับเครื่องยนต์ที่ไม่มีการปรับแต่ง ยังขาดความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์จากเหตุปัจจัยทางด้านราคาต้นทุนของขยะพลาสติกที่จะนำมาใช้ในการผลิต



บทที่ 6

ผลการทดสอบระยะยาวของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม

6.1 ผลการทดสอบระยะยาว

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบระยะยาวของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสมที่ไม่ผ่านการกลั่น (CWPO) การวิเคราะห์ประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่ (1) คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง (2) ผลการทดสอบแรงบิดของเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบระยะยาวที่ 200 ชั่วโมงการทำงาน (3) ผลตรวจวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่น (4) ผลการชั่งน้ำหนักและวัดชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์ และ (5) ภาพถ่ายชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์ ข้อมูลในแต่ละส่วนจะนำไปวิเคราะห์ความสอดคล้องกับผลการทดสอบระยะยาวของเครื่องยนต์

6.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง

การตรวจวัดคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบซึ่งประกอบไปด้วย น้ำมันดีเซลและน้ำมันจากขยะพลาสติกแบบผสมที่ไม่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 6.1 จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความหนืดจลนศาสตร์ ความถ่วงจำเพาะ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง ค่าดัชนีซีเทนมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ขณะที่ช่วงอุณหภูมิ 10% Recovered มีค่าที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลซึ่งอาจมาจากการที่ในองค์ประกอบน้ำมันขยะพลาสติกมีส่วนของสารประกอบอะโรมาติกส์ (ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีจุดเดือดต่ำ) ในองค์ประกอบน้ำมันค่อนข้างมาก เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ที่ร้อยละ 50 และร้อยละ 90 ของน้ำมันขยะพลาสติกพบว่า น้ำมันขยะพลาสติก มีอุณหภูมิการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตรต่ำกว่าน้ำมันดีเซลอยู่เล็กน้อย ซึ่งปัจจัยดังกล่าวส่งผลให้น้ำมันจากขยะพลาสติกแบบผสมมีค่าดัชนีซีเทนมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกจากที่ผ่านมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกที่ไม่ได้ผ่านการกลั่น จะสังเกตได้ว่าคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของพลาสติกหรือแหล่งที่มาซึ่งเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ค่อนข้างยาก

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ

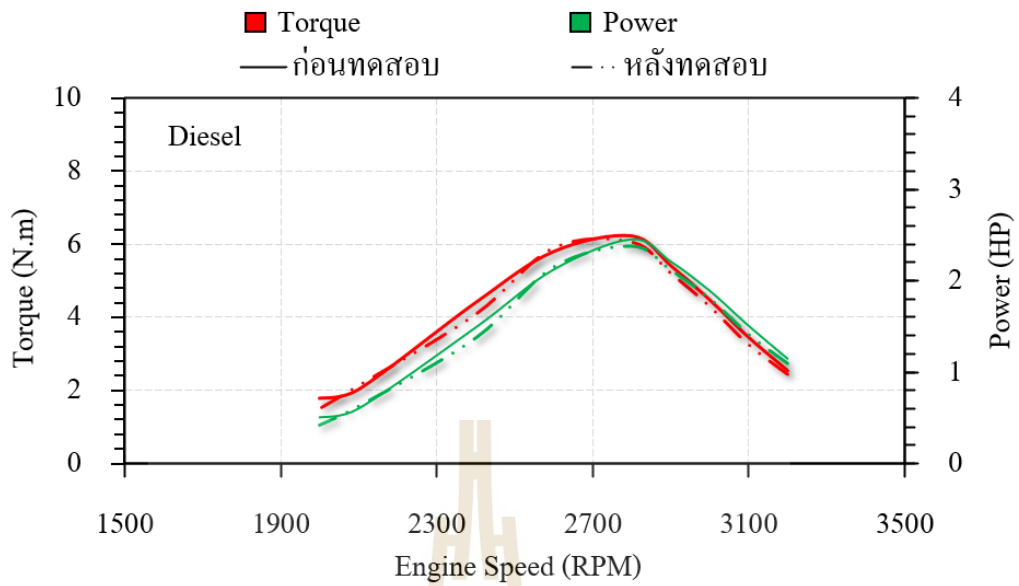
คุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง	หน่วยการวัด	มาตรฐานการทดสอบ	น้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ	
			DF	CWPO
ความหนืดจลนศาสตร์ ณ อุณหภูมิ 40 °C	cSt	ASTM D445	3.44	3.16
ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6 °C	-	ASTM D1298	0.835	0.820
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15.6 °C	kg/m ³	ASTM D1298	834	819
จุดวาบไฟ	°C	ASTM D93	66	78
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง	MJ/kg	ASTM D240	45.56	45.39
ดัชนีซีเทน	-	ASTM D976	56.57	55.28
อุณหภูมิที่ 10 % Volume Recovered	°C	ASTM D86	228	183
อุณหภูมิที่ 50 %Volume Recovered	°C	ASTM D86	290	256
อุณหภูมิที่ 90 %Volume Recovered	°C	ASTM D86	348	330

จากข้อมูลช่วงอุณหภูมิการกลั่นตัวของน้ำมันขยะพลาสติกที่ไม่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนแล้ว มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลขณะที่ % Volume Recovered เพิ่มขึ้น โดยมีช่วงอุณหภูมิการกลั่นตัวอยู่ระหว่าง 183 °C ถึง 330 °C จากข้อมูลดังกล่าวจะสังเกตว่าน้ำมันขยะพลาสติกที่ไม่ผ่านการกลั่นลำดับส่วน สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในเครื่องยนต์ดีเซลได้ ซึ่งโดยทั่วไปช่วงอุณหภูมิการกลั่นตัวสำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ จะอยู่ในช่วงระหว่าง 180 °C ถึง 350 °C สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล (Sharma, B.K. et. al., 2014) ดังนั้น การใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสมที่ไม่ได้ผ่านการกลั่นเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์จึงควรที่จะต้องวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงที่จะใช้ก่อนเสมอ

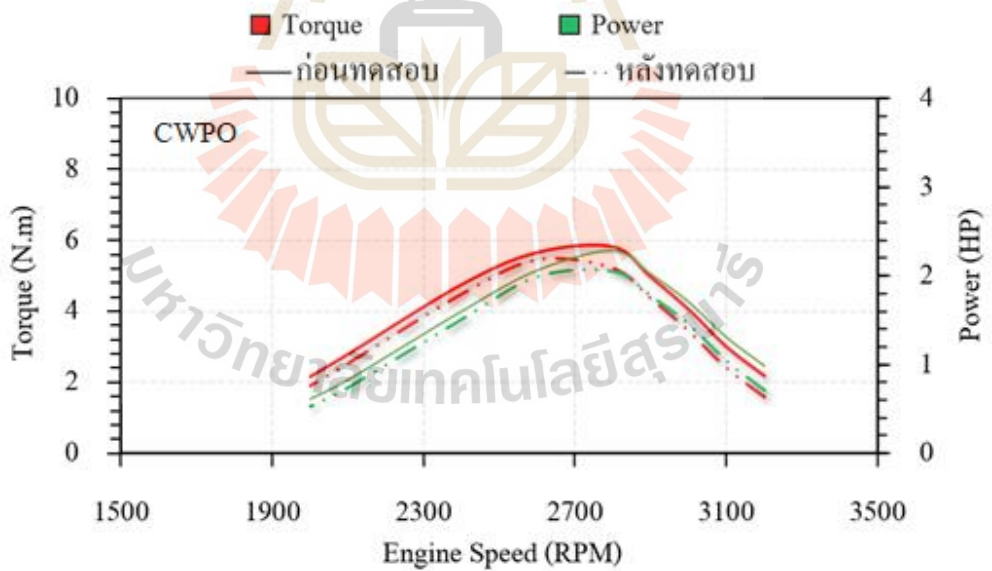
6.1.2 ผลการทดสอบแรงบิดของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO)

จากรูปที่ 6.1 กราฟแรงบิดของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลก่อนและหลังการทดสอบระยะยาว พบว่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลหลังการทดสอบ มีค่าต่ำกว่าก่อนทดสอบเล็กน้อย โดยค่าแรงบิดสูงสุดลดลงประมาณ 0.17 Nm (-2.73 %) ขณะที่กราฟแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) หลังการทดสอบระยะยาว (รูปที่ 6.2) พบว่าแรงบิดของเครื่องยนต์หลังการทดสอบมีค่าลดลงต่ำกว่าก่อนทดสอบอย่างชัดเจนโดยค่าแรงบิดสูงสุดลดลงประมาณ 0.36 Nm (-6.20 %) ซึ่งเป็นผลมาจากการสึกหรอของเครื่องยนต์และคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ลดลงภายหลังการทดสอบระยะยาว

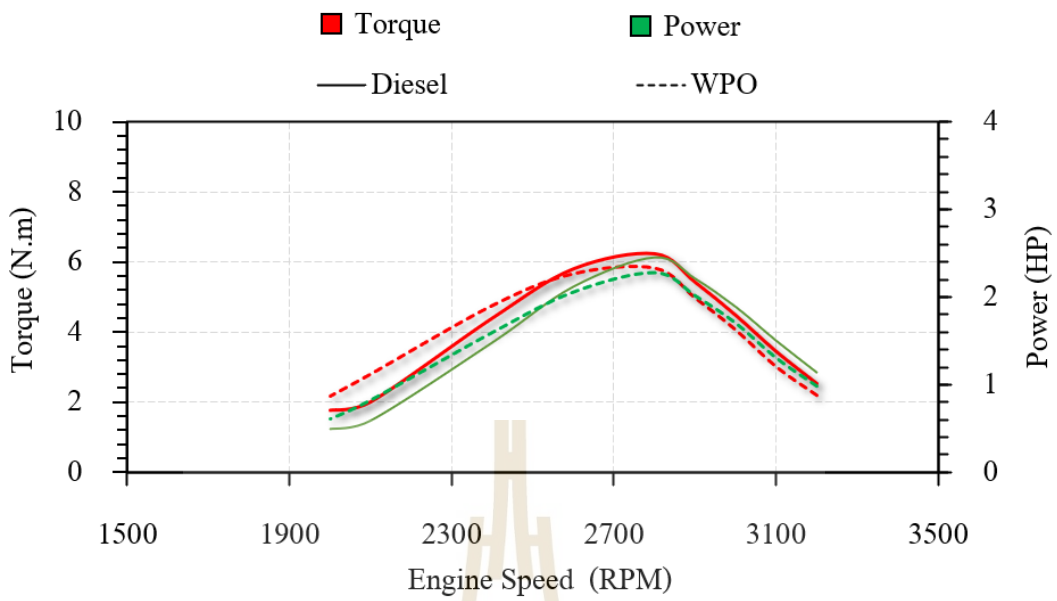
เมื่อเปรียบเทียบแรงบิดของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลกับน้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) พบว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) มีค่าแรงบิดที่ต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลทั้งช่วงก่อนและหลังการทดสอบระยะยาว (รูปที่ 6.3 และ 6.4) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่คุณสมบัติของน้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) มีค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลจึงส่งผลให้กำลังที่ออกมามีค่าน้อยกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลอยู่เล็กน้อย



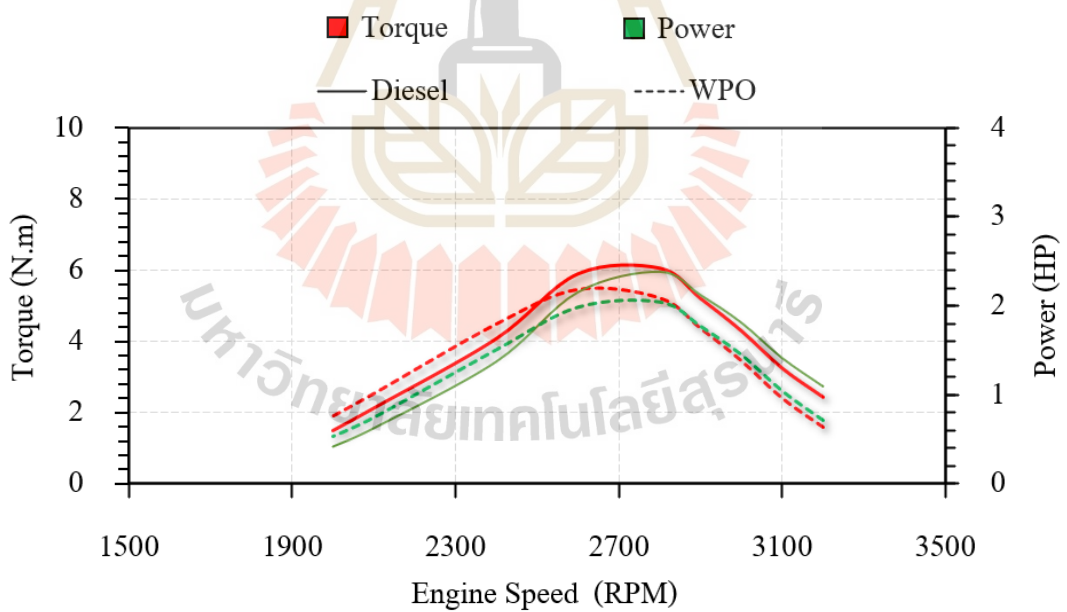
รูปที่ 6.1 กราฟแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบระยะยาวเมื่อใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง



รูปที่ 6.2 กราฟแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบระยะยาวเมื่อใช้น้ำมันขะพลาสติกผสม(CWPO) เป็นเชื้อเพลิง



รูปที่ 6.3 กราฟแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์ก่อนการทดสอบระยะยาว



รูปที่ 6.4 กราฟแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์หลังการทดสอบระยะยาว

6.1.3 ผลการตรวจสอบน้ำมันเครื่อง

การตรวจวัดสภาพการสึกหรอของอนุภาคโลหะในน้ำมันหล่อลื่น ใช้สำหรับเป็นแนวทางในการวิเคราะห์สภาพการทำงานของเครื่องยนต์ การตรวจอนุภาคโลหะจะแบ่งเป็น 2 ขนาด ได้แก่ การตรวจอนุภาคโลหะขนาดเล็ก (ขนาดน้อยกว่า 3 ไมครอน) และการตรวจอนุภาคโลหะขนาดใหญ่ (ขนาดประมาณ 5 ถึง 100 ไมครอน) โดยใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma- Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES) สำหรับการตรวจอนุภาคโลหะขนาดเล็ก และ Rotrode Filter Spectroscopy-Atomic Emission Spectrometer (RFS-AES) สำหรับการตรวจอนุภาคโลหะขนาดใหญ่ การตรวจพบการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะแต่ละชนิดในน้ำมันหล่อลื่นซึ่งมีแหล่งที่มาที่แตกต่างกันจากชิ้นส่วนต่าง ๆ ภายในเครื่องยนต์สามารถใช้ประเมินการเกิดการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องยนต์นั้น ๆ แต่ยังไม่สามารถบอกถึงระดับความรุนแรงการเกิดการสึกหรอได้

การวัดดัชนีปริมาณรวมของอนุภาคเหล็ก (Particle quantifier index, PQ index) ควบคู่กันจะสามารถช่วยระบุถึงระดับความรุนแรงในการเกิดการสึกหรอได้ โดยกำหนดค่าขีดจำกัดเพื่อระบุระดับความรุนแรงไว้ 2 ระดับได้แก่ ระดับที่ควรระวัง (Caution) ระดับที่อาจจะมีอันตรายต่อเครื่องยนต์ (Warning) สำหรับการตรวจวิเคราะห์ปริมาณของอนุภาคโลหะในน้ำมันหล่อลื่นตามมาตรฐาน ASTM การวัดของวิธีการ PQ index สามารถวัดขนาดอนุภาคโดยรวมของเหล็กได้ตั้งแต่ 2-1,000 ไมครอน ซึ่งวิธีการวัดค่า PQ index จะใช้สนามแม่เหล็กโดยเครื่องมือวัดจะตอบสนองเฉพาะวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็น Ferromagnetic อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวทั้งหมดนี้ยังไม่สามารถใช้ระบุประเภทของการสึกหรอได้โดยตรง จากการตรวจสอบน้ำมันเครื่องเพื่อตรวจวัดสภาพการสึกหรอโดยตรวจสอบจากการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะเพื่อดูการสึกหรอของชิ้นส่วนต่าง ๆ ในเครื่องยนต์ที่พบในตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น ได้ผลการวิเคราะห์อนุภาคโลหะขนาดเล็กที่ปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้กับน้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิดแสดงดังตารางที่ 6.2 และ 6.3

ตารางที่ 6.2 อนุภาคเศษโลหะปนเปื้อนขนาดเล็กที่เวลา 20, 100 และ 200 ชั่วโมงการทำงาน

ชนิดเหล็กปนเปื้อน อนุภาคเล็ก (ICP-AES)	หน่วย	PTT D3 Plus SAE 40	ระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างน้ำมันเครื่อง (ชั่วโมงการทำงาน)						ค่าขีดจำกัด		มาตรฐาน อ้างอิง
			Diesel			CWPO			Caution	Warning	
			20	100	200	20	100	200			
Iron	PPM	1.2	136.0	367.5	141.13	202.6	206.6	156.1	>100	>100	D-5185
Chromium	PPM	0.1	8.0	7.5	3.6	13.7	12.8	10.8	>5	>15	D-5185
Lead	PPM	0.0	0.0	0.0	0.1	0	0	0	>20	>50	D-5185
Copper	PPM	0.0	2.1	1.7	0.8	4.2	7.4	3.7	>10	>25	D-5185
Tin	PPM	0.0	2.4	1.0	0.7	5.4	4.9	4.1	>10	>25	D-5185
Aluminum	PPM	0.8	28.4	21.1	17.1	28.9	65.7	41	>10	>20	D-5185
Nickel	PPM	0.0	0.2	0.3	0.2	0.3	0.5	0.3	>5	>10	D-5185
Silver	PPM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.2	0.2	-	-	D-5185
Molybdenum	PPM	0.1	76.9	42.4	32.1	0	0.2	0.2	-	-	D-5185
itanium	PPM	0.1	0.7	0.3	0.2	0.9	1	0.7	-	-	D-5185
PQ Index	Index	1	206	36	14	179	44	39	>15	>20	D-8184

ตารางที่ 6.3 อนุภาคเศษโลหะปนเปื้อนขนาดใหญ่ที่เวลา 20, 100 และ 200 ชั่วโมงการทำงาน

ชนิดเหล็กปนเปื้อน อนุภาคใหญ่ (RFS-AES)	หน่วย	PTT D3 Plus SAE 40	ระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างน้ำมันเครื่อง (ชั่วโมงการทำงาน)						ค่าขีดจำกัด		มาตรฐาน อ้างอิง
			Diesel			CWPO			Caution	Warning	
			20	100	200	20	100	200			
Iron	PPM	0.6	29.5	155.2	22.4	1079. 1	77.7	48.7	>100	>100	D-5185
Chromium	PPM	0.0	0.6	2.5	0.3	18.6	4.6	2.9	>5	>15	D-5185
Lead	PPM	0.0	3.5	2.7	3.4	5.7	4	7.2	>20	>50	D-5185
Copper	PPM	0.1	0.2	0.4	0.1	3.1	2	1.3	>10	>25	D-5185
Tin	PPM	0.0	0.5	0.0	0.0	3.4	2.3	5.5	>10	>25	D-5185
Aluminum	PPM	0.3	5.4	12.4	4.8	41.5	32.9	15.6	>10	>20	D-5185
Nickel	PPM	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	>5	>10	D-5185
Silver	PPM	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	-	-	D-5185
Molybdenum	PPM	0.0	0.0	0.9	0.0	0	0	0	-	-	D-5185
Titanium	PPM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0	0.5	-	-	D-5185
Q Index	Index	1	206	36	14	179	44	39	-	-	D-8184

จากข้อมูลในตารางที่ 6.2 และ 6.3 ในช่วง 0 - 20 ชั่วโมงการทำงาน ปริมาณของอนุภาคเหล็กขนาดเล็กในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงอยู่ในเกณฑ์ระดับที่ควรระวัง ขณะที่ปริมาณของอนุภาคเหล็กขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นอยู่ในเกณฑ์ปกติ เมื่อพิจารณาปริมาณของอนุภาคเหล็กขนาดเล็กและขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) พบว่าอยู่ในเกณฑ์ระดับที่อาจจะมียันตรายต่อเครื่องยนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อค่า PQ Index ในช่วง 0 - 20 ชั่วโมงการทำงานมีค่ามากกว่าเกณฑ์แจ้งเตือนอันตรายจึงอาจมีโอกาสเกิดความรุนแรงจากการสึกหรอได้สูงสาเหตุที่มีการสึกหรอรุนแรงในช่วงเริ่มต้น เนื่องจากเครื่องยนต์ยังไม่ผ่านการใช้งานระยะช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ยังชิดกันเมื่อเกิดการเสียดสีกันของชิ้นส่วนจึงเกิดการสึกหรออย่างรุนแรง

ในช่วง 20 - 100 ชั่วโมงการทำงาน ปริมาณของอนุภาคเหล็กขนาดเล็กและขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงอยู่ในเกณฑ์ระดับที่อาจจะมียันตรายต่อเครื่องยนต์ เช่นเดียวกับกับปริมาณของอนุภาคเหล็กขนาดเล็กในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) พบว่าอยู่ในเกณฑ์ระดับที่อาจจะมียันตรายต่อเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตามปริมาณของอนุภาคเหล็กขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปกติ เมื่อพิจารณาค่า PQ Index ในช่วง 20 - 100 ชั่วโมงการทำงานซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับในช่วง 0 - 20 ชั่วโมงการทำงานจึงมีโอกาที่จะเกิดความรุนแรงจากการสึกหรอได้น้อยกว่าช่วงแรก

ในช่วง 100 - 200 ชั่วโมงการทำงาน ปริมาณของอนุภาคเหล็กขนาดเล็กในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงอยู่ในเกณฑ์ระดับที่ควรระวัง เช่นเดียวกับกับปริมาณของอนุภาคเหล็กขนาดเล็กในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) ขณะที่ปริมาณของอนุภาคเหล็กขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด อยู่ในเกณฑ์ปกติ ขณะที่ค่า PQ Index ในช่วง 100 - 200 ชั่วโมงการทำงานซึ่งมีค่าลดลงเล็กน้อย

ปริมาณอนุภาคโครเมียมสามารถพบได้ในแหวนลูกสูบ ปลอดภัยที่มี การชุบด้วยโครเมียม จากข้อมูลในตารางที่ 6.2 และ 6.3 พบปริมาณของอนุภาคโครเมียมขนาดเล็กและขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) สูงกว่าในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลโดยอยู่ในระดับที่ควรระวัง ขณะที่ปริมาณของอนุภาคโครเมียมขนาดเล็กในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลอยู่ในระดับที่ควรระวัง ในช่วง 0-100 ชั่วโมงการทำงาน

ตะกั่วพบได้ในการสึกหรอของตลับลูกปืน จากข้อมูลในตารางที่ 6.1 และ 6.2 ไม่พบปริมาณของอนุภาคตะกั่วขนาดเล็กทั้งในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) เป็นเชื้อเพลิง แต่พบปริมาณของอนุภาคตะกั่วขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่น

เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) เพียงเล็กน้อย โดยปริมาณอนุภาคตะกั่วขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลมีค่าต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) อย่างไรก็ตามปริมาณของอนุภาคตะกั่วขนาดเล็กและขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด อยู่ในเกณฑ์การสึกหรอปกติ

ทองแดงพบได้ในการสึกหรอของตลับลูกปืน บุชชิง บีมน้ำมันเชื้อเพลิง จากข้อมูลในตารางที่ 6.2 และ 6.3 พบปริมาณของอนุภาคทองแดงขนาดเล็กและขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) สูงกว่าในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล แต่มีปริมาณเพียงเล็กน้อย ปริมาณของอนุภาคทองแดงขนาดเล็กและขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด อยู่ในเกณฑ์การสึกหรอปกติ

ดีบุกพบได้ในการสึกหรอของตลับลูกปืน (Bearing) จากข้อมูลในตารางที่ 6.1 และ 6.2 พบปริมาณของอนุภาคดีบุกขนาดเล็กและขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) สูงกว่าในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล แต่มีปริมาณเพียงเล็กน้อย ปริมาณของอนุภาคดีบุกขนาดเล็กและขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด อยู่ในเกณฑ์การสึกหรอปกติ

อลูมิเนียมพบได้จากการสึกหรอของตลับลูกปืน เสื่อสูบ ลูกสูบ จากข้อมูลในตารางที่ 6.2 และ 6.3 พบว่าปริมาณของอนุภาคอลูมิเนียมขนาดเล็กและขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) มีค่าสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลในทุกชั่วโมงการทำงาน โดยอยู่ในระดับที่อาจจะมีอันตรายต่อเครื่องยนต์ ขณะที่ปริมาณของอนุภาคอลูมิเนียมขนาดเล็กในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลมีค่าสูงกว่าเกณฑ์การแจ้งเตือนอันตรายในช่วง 20 และ 100 ชั่วโมงการทำงาน และลดระดับลงเหลืออยู่ในระดับที่ควรระวังภายหลังการทดสอบที่ 200 ชั่วโมงการทำงาน ทั้งนี้เนื่องจากช่วงชั่วโมงการทำงานแรกๆ จะเป็นช่วงที่เครื่องยนต์เริ่มต้นการทำงาน ระยะห่างช่องว่างของชิ้นส่วนยังมีความแน่นจึงอาจทำให้เกิดการสึกหรอของชิ้นส่วนที่สูง ปริมาณของอนุภาคอลูมิเนียมขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลอยู่ในเกณฑ์การสึกหรอปกติในช่วง 20 และ 200 ชั่วโมงการทำงาน อย่างไรก็ตามในช่วง 100 ชั่วโมงการทำงาน ปริมาณของอนุภาคอลูมิเนียมขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลสูงกว่าเกณฑ์การแจ้งเตือนจึงจำเป็นต้องได้รับการตรวจสอบหาสาเหตุ

นิกเกิลพบได้จากการสึกหรอของโลหะชุบแข็ง สแตนเลส วาล์ว จากข้อมูลในตารางที่ 6.2 และ 6.3 พบปริมาณของอนุภาคนิกเกิลขนาดเล็กทั้งจากในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) ในทุกชั่วโมงการทำงาน แต่ไม่พบอนุภาคนิกเกิลขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด

เงินสามารถพบได้จากการสึกหรอของโลหะผสม ตลับลูกปืนบางชนิด วาล์ว ปลอกสูบ จากข้อมูลในตารางที่ 6.2 และ 6.3 พบปริมาณของอนุภาคโลหะเงินขนาดเล็กและขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) เล็กน้อย แต่ไม่พบการปนเปื้อนอนุภาคโลหะเงินในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล

โมลิตินัมสามารถพบได้จากการสึกหรอของแหวนลูกสูบ จากข้อมูลในตารางที่ 6.2 และ 6.3 พบว่า ปริมาณของอนุภาคโมลิตินัมขนาดเล็กในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลมีค่าสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) ในทุกชั่วโมงการทำงาน บ่งบอกถึงโอกาสเกิดการสึกหรอของชิ้นส่วนแหวนหรือลูกสูบในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล แต่ไม่มีนัยสำคัญมาก เนื่องจากในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลอนุภาคโมลิตินัมขนาดใหญ่ที่สึกหรอมีปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบการสึกหรออนุภาคโมลิตินัมขนาดเล็ก

ไทเทเนียมสามารถพบได้จากการสึกหรอของโลหะผสมคุณภาพสูงของชิ้นส่วนพวกเกียร์และแบริ่ง จากข้อมูลในตารางที่ 6.2 และ 6.3 พบว่าปริมาณของอนุภาคไทเทเนียมขนาดเล็กและขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) มีค่าสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลในทุกชั่วโมงการทำงาน และไม่พบการปนเปื้อนอนุภาคไทเทเนียมขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล

6.1.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น (Oil Condition)

ตารางที่ 6.4 แสดงข้อมูลการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นในเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) จากการทดสอบระยะยาวที่ช่วงเวลา 20, 100 และ 200 ชั่วโมงการทำงาน โดยประกอบด้วย ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส การออกซิเดชันไนเตรชันและเบสเน็บบอร์ ซึ่งค่าคุณสมบัติเหล่านี้จะบ่งบอกถึงการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น

ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส หลังการทดสอบที่ 200 ชั่วโมงการทำงาน พบว่าค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นตามจำนวนชั่วโมงการทำงานที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) เป็นเชื้อเพลิงพบว่า ค่าความหนืดน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) เป็นเชื้อเพลิงมีค่าสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทุกช่วงชั่วโมงการทำงาน ค่าความหนืดน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงมีค่าความหนืดอยู่ในเกณฑ์ปกติตามค่ามาตรฐาน ขณะที่ค่าความหนืดน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) เป็นเชื้อเพลิงที่ 0-20 ชั่วโมงการทำงานพบว่าค่าความหนืดน้ำมันหล่อลื่นอยู่ในเกณฑ์ปกติ แต่ที่ 20-200 ชั่วโมงการทำงานมีค่าความหนืดน้ำมันหล่อลื่นอยู่ในระดับที่อาจจะมีอันตรายต่อเครื่องยนต์

ค่าออกซิเดชันของน้ำมันหล่อลื่นหลังการทดสอบที่ 200 ชั่วโมงการทำงาน พบว่าค่าออกซิเดชันของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) มีค่าเพิ่มขึ้นสูงตามระยะเวลาการใช้งาน เมื่อเปรียบเทียบค่าออกซิเดชันของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) เป็นเชื้อเพลิงพบว่า ค่าออกซิเดชันของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) มีค่าสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในช่วง 20-200 ชั่วโมงการทำงาน ค่าออกซิเดชันในชั่วโมงการทำงาน ที่ 20-100 และ 100-200 ของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงมีค่าสูงอยู่ในระดับที่อาจจะมีอันตรายต่อเครื่องยนต์ เช่นเดียวกับกับค่าออกซิเดชันของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) เป็นเชื้อเพลิง



ตารางที่ 6.4 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ช่วงเวลา 20, 100 และ 200 ชั่วโมงการทำงาน

คุณสมบัติ (หน่วย)	หน่วย	PTT D3 Plus SAE 40	ระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างน้ำมันเครื่อง (ชั่วโมงการทำงาน)						ค่าขีดจำกัด		มาตรฐานอ้างอิง
			Diesel			CWPO			Caution	Warning	
			20	100	200	20	100	200			
Viscosity @100 °C	cst	14.9	13.5	13.9	14.4	14.7	19	17.5	>15.6	>16.3	D-445
Oxidation	Abs	3.6	6.7	8.5	8.2	4.5	14.4	11.4	>7.2	>8.1	D-7414
Nitration	Abs/cm	2.0	3.6	9.2	9.8	2.5	14.1	13.3	>10	>25	D-7624
Base Number	mg KOH/g	12.2	11.2	11.2	11.1	11.7	11.2	11.4	<2	<6.1	D-4739



ค่าไนเตรชันของน้ำมันหล่อลื่นหลังการทดสอบที่ 200 ชั่วโมงการทำงาน พบว่าค่าไนเตรชันของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาใช้งาน เมื่อเปรียบเทียบค่าไนเตรชันของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) เป็นเชื้อเพลิงพบว่า ค่าไนเตรชันของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) มีค่าสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในช่วง 20-200 ชั่วโมงการทำงาน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเฉพาะในช่วง 20-200 ชั่วโมงการทำงาน ค่าไนเตรชันของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์การแจ้งเตือน ขณะที่ค่าไนเตรชันของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) มีค่าอยู่ในระดับที่ควรระวัง

ค่าความเป็นด่างของน้ำมันหล่อลื่นหลังการทดสอบที่ 200 ชั่วโมงการทำงาน พบว่าค่าความเป็นด่างของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) มีค่าค่อนข้างคงที่และยังอยู่ในเกณฑ์ปกติ

6.2 ผลการวัดชิ้นส่วนและชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบระยะยาว

เครื่องยนต์ที่ผ่านการใช้งานมาจะเกิดการสึกหรอ เนื่องจากการเสียดสีกันของโลหะชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์ วิธีการวัดและชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์เป็นวิธีการตรวจสอบที่ง่ายและสะดวกเพื่อทราบถึงผลการสึกหรอเบื้องต้นในเครื่องยนต์

6.2.1 ผลการชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนในเครื่องยนต์

ข้อมูลผลการชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนในเครื่องยนต์แสดงดังตารางที่ 6.5 จากข้อมูลพบว่าการสึกหรอของชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) ที่มีค่ามากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลได้แก่ ชิ้นส่วนแหวนอัด 1 และแหวนอัด 2 ในขณะที่วัดการสึกหรอของชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลที่มีค่ามากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) ได้แก่ ชิ้นส่วนแหวนน้ำมัน สลักสูบ ลูกสูบ วาล์วไอดีและวาล์วไอเสีย จากตารางที่ 6.6 การสึกหรอของอนุภาคน้อยกว่า 3 ไมครอนของเหล็กและอลูมิเนียมของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลมีปริมาณมากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) ขณะที่การสึกหรอของอนุภาคขนาด 5-100 ไมครอน ของเหล็กและอลูมิเนียมของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) มีปริมาณมากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล แต่น้ำหนักที่สึกหรอของแหวนน้ำมัน สลักสูบ ลูกสูบ วาล์วไอดีและไอเสีย หายไปน้อยกว่า แสดงให้เห็นถึงเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลมีอนุภาคการสึกหรอของเหล็กและอลูมิเนียมขนาดน้อยกว่า 3 ไมครอน ในขณะที่เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) มีการสึกหรอของอนุภาคเหล็กขนาด 5-100ไมครอน ในปริมาณที่มาก อีกทั้ง PQ index ที่สูงรวมกับการสึกหรอของแหวนอัดที่สูง (ดูจากมวลที่หายไป)สามารถระบุได้ว่ามีอนุภาคการสึกหรออนุภาคของ

เหล็กที่ใหญ่กว่า 5-100 ไมครอนในน้ำมันหล่อลื่น จากข้อมูลดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่าการสึกหรอของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) มีการสึกหรอมากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซล

ตารางที่ 6.5 ผลการชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบระยะยาว 200 ชั่วโมงของน้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO)

ชิ้นส่วน เครื่องยนต์	น้ำหนัก (กรัม)					
	น้ำมันดีเซล			CWPO		
	ก่อนเริ่ม ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	%น้ำหนัก ที่หายไป	ก่อนเริ่ม ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	%น้ำหนัก ที่หายไป
แหวนอัด 1	6.1611	6.1414	0.320%	6.2507	6.2243	0.422%
แหวนอัด 2	6.1603	6.1294	0.502%	6.1125	6.0797	0.537%
แหวนน้ำมัน	8.8493	8.8369	0.140%	9.0936	9.083	0.117%
สลักสูบ	58.7466	58.7293	0.029%	59.4123	59.4024	0.017%
ลูกสูบ	153.5836	153.3908	0.126%	158.2089	158.189	0.013%
วาล์วไอดี	26.6414	26.6319	0.036%	26.6073	26.6007	0.025%
วาล์วไอเสีย	24.0047	23.9829	0.091%	23.9495	23.9393	0.043%

ตารางที่ 6.6 ผลรวมของอนุภาคโลหะขนาดเล็กและขนาดใหญ่ของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 0-200

ผลรวมปริมาณขนาด อนุภาคโลหะตั้งแต่ ชั่วโมงที่ 0-200	อนุภาคขนาดเล็ก กว่า 3 ไมครอน (PPM)		อนุภาคขนาดใหญ่ 5-100 ไมครอน (PPM)	
	Diesel	CWPO	Diesel	CWPO
Iron	644.63	231.7	207.1	1005.5
Chromium	19.1	42.6	3.4	26.1
Lead	0.1	0	9.6	16.9
Copper	4.6	3	0.7	6.4
Tin	4.1	15.5	0.5	11.2
Aluminum	66.6	53.8	22.6	90
Nickel	0.7	0.4	0	0

ตารางที่ 6.6 ผลรวมของอนุภาคโลหะขนาดเล็กและขนาดใหญ่ของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลและ น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 0-200 (ต่อ)

ผลรวมปริมาณขนาด อนุภาคโลหะตั้งแต่ ชั่วโมงที่ 0-200	อนุภาคขนาดเล็ก กว่า 3 ไมครอน (PPM)		อนุภาคขนาดใหญ่ 5-100 ไมครอน (PPM)	
	Diesel	CWPO	Diesel	CWPO
Silver	0	1.1	0	0.3
Molybdenum	151.4	4.4	0.9	0
Titanium	1.2	2.9	0	1.2
PQ Index	256	309	256	262

6.2.2 ผลการวัดระยะช่องว่างแหวนลูกสูบในเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบระยะยาว

ข้อมูลผลการวัดระยะช่องว่างแหวนลูกสูบในเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลและ น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) ก่อนและหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 6.7 และ 6.8 เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาเปรียบเทียบผลต่างของช่องว่างแหวนลูกสูบในเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลและ น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) ได้ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 6.9 จากข้อมูลพบว่าภายหลังการทดสอบ ผลต่างของช่องว่างระยะห่างปากแหวนอัดที่ 1 และแหวนน้ำมันของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) มีค่ามากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตามระยะช่องว่างแหวนลูกสูบของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันทั้งสองชนิดยังอยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐาน

ตารางที่ 6.7 ระยะช่องว่างแหวนลูกสูบในเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบระยะยาวในการใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง

ชิ้นส่วนเครื่องยนต์	ระยะ Clearance ชิ้นส่วน (มิลลิเมตร)			
	Diesel			
	ก่อนเริ่ม ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ผลต่าง (มิลลิเมตร)	ค่ามาตรฐาน (มิลลิเมตร)
Piston ring end Gap (แหวนอัดที่ 1)	0.229	0.254	0.025	ไม่เกิน 0.7
Piston ring end Gap (แหวนอัดที่ 2)	0.254	0.381	0.127	ไม่เกิน 0.7
Piston ring end Gap (แหวนน้ำมัน)	0.305	0.330	0.025	ไม่เกิน 1.8

ตารางที่ 6.7 ระยะช่องว่างแหวนลูกสูบในเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบระยะยาวในการใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง (ต่อ)

ชิ้นส่วนเครื่องยนต์	ระยะ Clearance ชิ้นส่วน (มิลลิเมตร)			
	Diesel			
	ก่อนเริ่ม ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ผลต่าง (มิลลิเมตร)	ค่ามาตรฐาน (มิลลิเมตร)
Ring groove clearance (แหวนอัดที่ 1)	0.064	0.076	0.012	ไม่เกิน 0.12
Ring groove clearance (แหวนอัดที่ 2)	0.051	0.064	0.013	ไม่เกิน 1.8
Ring groove clearance (แหวนน้ำมัน)	0.051	0.051	0	-

ตารางที่ 6.8 ระยะช่องว่างแหวนลูกสูบในเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบระยะยาวในการใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) เป็นเชื้อเพลิง

ชิ้นส่วนเครื่องยนต์	ระยะ Clearance ชิ้นส่วน (มิลลิเมตร)			
	CWPO			
	ก่อนเริ่ม ทดสอบ	หลัง ทดสอบ	ผลต่าง (มิลลิเมตร)	ค่ามาตรฐาน (มิลลิเมตร)
Piston ring end Gap (แหวนอัดที่ 1)	0.102	0.152	0.05	ไม่เกิน 0.7
Piston ring end Gap (แหวนอัดที่ 2)	0.152	0.279	0.127	ไม่เกิน 0.7
Piston ring end Gap (แหวนน้ำมัน)	0.127	0.178	0.051	ไม่เกิน 1.8
Ring groove clearance (แหวนอัดที่ 1)	0.064	0.076	0.012	ไม่เกิน 0.12
Ring groove clearance (แหวนอัดที่ 2)	0.064	0.076	0.012	ไม่เกิน 1.8
Ring groove clearance (แหวนน้ำมัน)	0.038	0.051	0.013	-

ตารางที่ 6.9 เปรียบเทียบผลต่างของช่องว่างแหวนลูกสูบของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO)

ชิ้นส่วนเครื่องยนต์	ผลต่าง (มิลลิเมตร)	
	Diesel	CWPO
Piston ring end Gap (แหวนอัดที่ 1)	0.025	0.05
Piston ring end Gap (แหวนอัดที่ 2)	0.127	0.127
Piston ring end Gap (แหวนน้ำมัน)	0.025	0.051
Ring groove clearance (แหวนอัดที่ 1)	0.012	0.012
Ring groove clearance (แหวนอัดที่ 2)	0.013	0.012
Ring groove clearance (แหวนน้ำมัน)	0	0.013

6.2.3 ผลการวัดระยะห่างของวาล์วไอดีและไอเสียของเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบระยะยาว

ข้อมูลผลการวัดระยะห่างของวาล์วไอดีและไอเสียของเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบระยะยาว แสดงดังตารางที่ 6.10 และ 6.11 โดยในการทดสอบได้มีการตรวจสอบและปรับตั้งระยะห่างวาล์วไอดีและไอเสียที่ 100 ชั่วโมงการทำงาน ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต จากข้อมูลพบว่าที่ 100 และ 200 ชั่วโมงการทำงาน ระยะห่างของวาล์วไอดีและไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) มีระยะห่างที่มากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซล โดยระยะห่างของวาล์วที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากคราบเขม่าจากการเผาไหม้ที่เกาะสะสมบริเวณป่าวาล์ว

ตารางที่ 6.10 ระยะห่างวาล์วไอดีก่อนและหลังการทดสอบที่ 100 และ 200 ชั่วโมงการทำงานของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด

	วาล์วไอดี							
	Diesel				CWPO			
	ชั่วโมงที่เริ่มทำการวัดวาล์ว (ชั่วโมง)				ชั่วโมงที่เริ่มทำการวัดวาล์ว (ชั่วโมง)			
	100		200		100		200	
ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	
Gap (mm)	0.178	0.203	0.203	0.254	0.178	0.279	0.203	0.280

ตารางที่ 6.11 ระยะห่างวาล์วไอเสียก่อนและหลังการทดสอบที่ 100 และ 200 ชั่วโมงการทำงานของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด

วาล์วไอเสีย								
	Diesel				CWPO			
	ชั่วโมงที่เริ่มทำการวัดวาล์ว (ชั่วโมง)				ชั่วโมงที่เริ่มทำการวัดวาล์ว (ชั่วโมง)			
	100		200		100		200	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
Gap (mm)	0.203	0.381	0.203	0.254	0.203	0.381	0.203	0.279

6.2.4 ผลการถ่ายรูปชิ้นส่วนหลังการทดสอบระยะยาวของเครื่องยนต์

การถ่ายรูปชิ้นส่วนในเครื่องยนต์เพื่อสังเกตลักษณะของการสึกหรอและลักษณะร่องรอยบนชิ้นส่วนที่เกิดขึ้นเนื่องจากพฤติกรรมการเผาไหม้เพื่อใช้ประกอบเป็นข้อมูล นอกเหนือจากผลการทดสอบการชั่งน้ำหนักและข้อมูลการวิเคราะห์ห้องคัพประกอบของอนุภาคจากชิ้นส่วนที่สึกหรอ การถ่ายรูปชิ้นส่วนเครื่องยนต์จะกระทำหลังจากทดสอบเครื่องยนต์ที่ 200 ชั่วโมงการทำงาน เมื่อใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด โดยชิ้นส่วนที่ถ่ายรูป ได้แก่ ลูกสูบ ฝาสูบ บ่าวาล์วไอดีและไอเสีย วาล์วไอดีและไอเสีย หัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง โดยมีรายละเอียดแสดงดังต่อไปนี้

1) ลูกสูบ

ตารางที่ 6.12 แสดงภาพเปรียบเทียบชิ้นส่วนลูกสูบของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) จากรูปจะสังเกตเห็นคราบเขม่าบนผิวลูกสูบของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลมีปริมาณเขม่าเกาะบริเวณผิวด้านบนเล็กน้อยบริเวณกระโปรงลูกสูบมีรอยขีดขูด ซึ่งแสดงถึงร่องรอยการสึกหรอและบริเวณด้านข้างของร่องแหวนลูกสูบพบคราบเขม่าอย่างชัดเจน คราบเขม่าที่เกาะบริเวณด้านข้างของร่องแหวนลูกสูบแสดงถึงการรั่วไหลของ Blowby-Gas ส่งผลต่อการปนเปื้อนของเขม่าในน้ำมันหล่อลื่นซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลซึ่งพบการเจือปนของเขม่าในน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ดีเซลมีค่าสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) ในส่วนของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) พบปริมาณเขม่าที่เกาะสะสมด้านบนลูกสูบในปริมาณที่สูง ลักษณะเขม่าที่ติดบนลูกสูบมีลักษณะเป็นแผ่น โดยพบคราบเขม่าสีขาวยบริเวณเหนือแนวสเปรย์การฉีดเชื้อเพลิง บริเวณด้านข้างของลูกสูบพบคราบเขม่าเล็กน้อยในร่องแหวนลูกสูบไม่พบคราบเขม่า

ตารางที่ 6.12 ภาพถ่ายลูกสูบหลังการทดสอบที่ 200 ชั่วโมงการทำงานของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด

เชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ	
Diesel	CWPO
	
	
	

2) ฝาสูบ

ตารางที่ 6.12 แสดงภาพเปรียบเทียบชิ้นส่วนฝาสูบของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) หลังการทดสอบเครื่องยนต์ที่ 200 ชั่วโมงการทำงานพบว่าฝาสูบของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลมีเขม่าหนาตามบริเวณขอบของฝาสูบสีของเขม่ามีความเข้มที่

บริเวณตรงกลางฝาสูบบริเวณด้านล่างวาล์วไอดีมีเขม่าหนาเล็กน้อย เมื่อสังเกตฝาสูบของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) พบว่ามีคราบเขม่าเกาะหนาทั่วบริเวณพื้นที่ฝาสูบ บริเวณพื้นที่ด้านล่างของฝาสูบซึ่งเป็นพื้นที่อยู่ในแนวการฉีดของน้ำมันเชื้อเพลิงมีเขม่าเกาะติดอยู่หนาและพบคราบเขม่าสีขาวในบริเวณหน้าวาล์วไอดี และวาล์วไอเสีย พื้นที่ในแนวการฉีดของน้ำมันเชื้อเพลิงบางส่วนไม่มีเขม่าเกาะติดอยู่ โดยการจับตัวของปริมาณเขม่าบนฝาสูบในเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) มีค่ามากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซล

ตารางที่ 6.13 ภาพถ่ายฝาสูบหลังการทดสอบที่ 200 ชั่วโมงการทำงานของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด

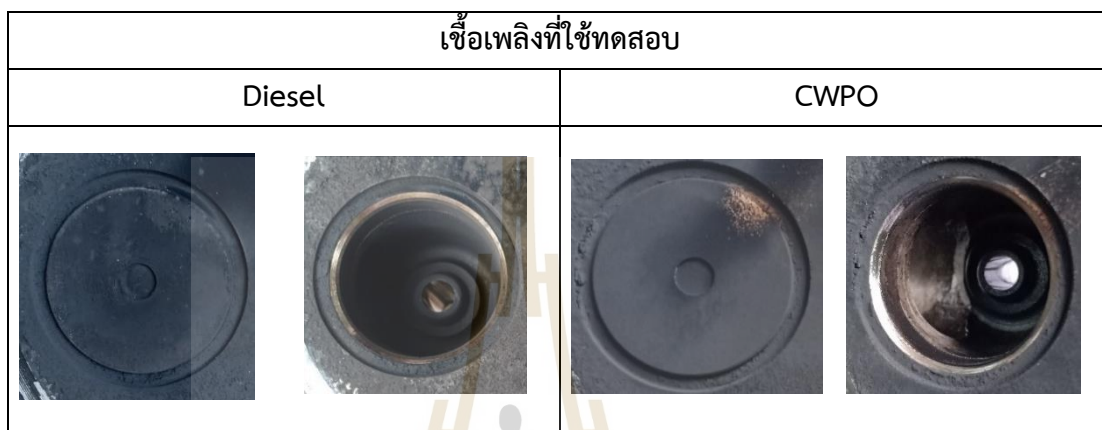


3) บ่าวาล์วไอดีและบ่าวาล์วไอเสีย

ตารางที่ 6.14 และ 6.15 แสดงภาพเปรียบเทียบชิ้นส่วนบ่าวาล์วไอดีและไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลและ น้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) หลังการทดสอบพบว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลมีปริมาณเขม่าที่เกาะบริเวณบ่าวาล์วไอดีไม่มากนัก ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจากตารางที่ 6.12 ที่พบว่าระยะห่างของวาล์วไอดีหลังการทดสอบการทำงานมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาบ่าวาล์วไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) พบว่ามีคราบเขม่าเกาะเป็นก้อนและมีปริมาณสูงที่บริเวณหลังบ่าวาล์วซึ่งเป็นสาเหตุให้ระยะห่างวาล์วไอเสียมีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับข้อมูลจากตารางที่ 6.11 ที่พบว่าระยะห่างของวาล์วไอเสียหลังการทดสอบการทำงานมี

ค่าเพิ่มขึ้น การจับตัวของปริมาณเขม่าบนบ่าวาล์วไอดีและบ่าวาล์วไอเสียเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) มีค่ามากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล

ตารางที่ 6.14 ภาพถ่ายบ่าวาล์วไอดีหลังการทดสอบที่ 200 ชั่วโมงการทำงานของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด



ตารางที่ 6.15 ภาพถ่ายบ่าวาล์วไอเสียหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมงการทำงานของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด



4) วาล์วไอดีและวาล์วไอเสีย

ตารางที่ 6.16 และ 6.17 แสดงภาพเปรียบเทียบชิ้นส่วนวาล์วไอดีและไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) หลังการทดสอบ เครื่องยนต์ที่ใช้



น้ำมันดีเซลพบปริมาณเขม่าเล็กน้อยบนหน้าวาล์วไอดี บริเวณหลังวาล์วและก้านวาล์วพบปริมาณเขม่าหนา เนื่องจากการรั่วไหลของ Blow by gas เข้าสู่ห้องน้ำมันเครื่องไหลย้อนกลับขึ้นไปฝาสูบและท่อไอดี เมื่อพิจารณาวาล์วไอดีของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) พบคราบเขม่าสีขาวที่บริเวณหน้าวาล์วและคราบเขม่าหนาเกาะบริเวณที่หลังวาล์วเป็นจำนวนมาก

เมื่อพิจารณาวาล์วไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) พบว่าวาล์วไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลมีเขม่าบริเวณหน้าวาล์วหนาเป็นบางจุดและบริเวณหลังวาล์วมีปริมาณคราบเขม่าเกาะหนาเฉพาะบริเวณขอบก้านวาล์วมีเขม่าเกาะเล็กน้อย เมื่อพิจารณาวาล์วไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) พบปริมาณเขม่าหนาบริเวณหน้าวาล์วและหลังวาล์วไอเสีย การจับตัวของเขม่าบนวาล์วไอดีและวาล์วไอเสียในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม(CWPO) สังเกตได้ชัดเจนกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง

ตารางที่ 6.16 ภาพถ่ายวาล์วไอดีหลังการทดสอบที่ 200 ชั่วโมงการทำงานของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด

เชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ			
Diesel		CWPO	
			
			

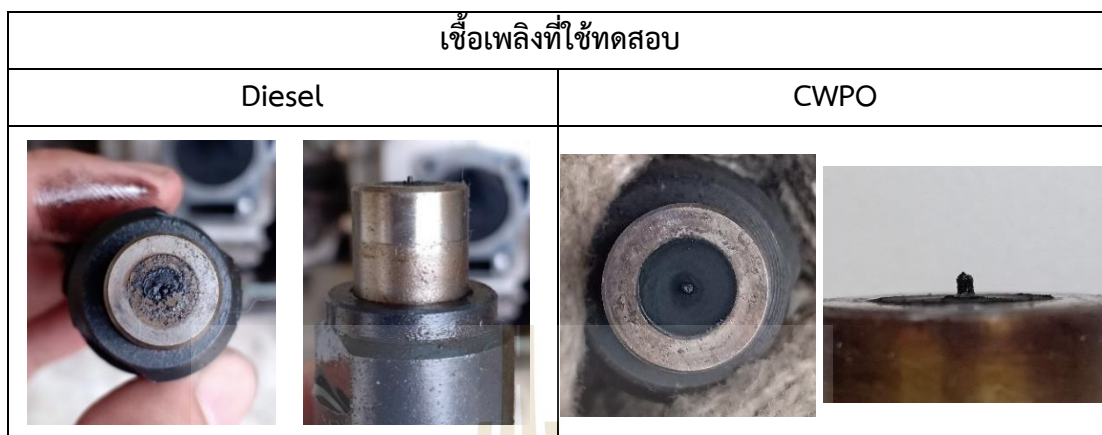
ตารางที่ 6.17 ภาพถ่ายวาล์วไอเสียหลังการทดสอบที่ 200 ชั่วโมงการทำงานของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด

เชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ	
Diesel	CWPO
	

5) หัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง

จากตารางที่ 6.18 แสดงภาพเปรียบเทียบชิ้นส่วนหัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) หลังการทดสอบ เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลพบปริมาณเขม่าหนาเกาะบริเวณโดยรอบรูหัวฉีด บริเวณโดยรอบที่ไม่มีเขม่าเกาะมีน้ำมันเชื้อเพลิงเปียกชุ่ม เมื่อพิจารณาหัวฉีดของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) มีปริมาณเขม่าหนาเกาะบริเวณโดยรอบรูหัวฉีดมากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล โดยสังเกตเห็นเขม่าบริเวณเข็มหัวฉีดมีปริมาณเขม่ามากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลอย่างชัดเจน

ตารางที่ 6.18 ภาพถ่ายหัวฉีดหลังการทดสอบที่ 200 ชั่วโมงการทำงานของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด



6.3 สรุปผลการวิจัย

การนำน้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) ไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยทำการทดสอบเครื่องยนต์ระยะยาวที่ 200 ชั่วโมงการทำงาน โดยวิเคราะห์ข้อมูลประกอบ 4 ส่วน ได้แก่ (1) ผลการทดสอบแรงบิดของเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบระยะยาวที่ 200 ชั่วโมงการทำงาน (2) ผลตรวจวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่น (3) ผลการชั่งน้ำหนักและวัดชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์ และ (4) ภาพถ่ายชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์นำไปประเมินการทดสอบระยะยาวของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม

1) ค่าแรงบิดสูงสุดหลังการทดสอบระยะยาวของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสมมีค่าลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการของเครื่องยนต์และคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ลดลงภายหลังการทดสอบระยะยาว เมื่อเปรียบเทียบแรงบิดของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสมกับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลพบว่าแรงบิดของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสมค่าน้อยกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลในทุก ๆ ความเร็วรอบเนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกผสม

2) การสึกหรอของโลหะในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสมพบว่าปริมาณโลหะการสึกหรอในเครื่องยนต์ส่วนใหญ่เป็นหลัก โครเมียม และอลูมิเนียม การปนเปื้อนของโลหะจำพวกดีบุกและทองแดงเพียงเล็กน้อย และการปนเปื้อนโลหะจำพวก ไทเทเนียม เงิน นิกเกิล และตะกั่ว น้อยมาก การสึกหรอของโลหะโมลิบดีนัมจะพบมากในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล แต่เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสมจะพบปริมาณโมลิบดีนัมค่อนข้างน้อย ในขณะที่อนุภาคอลูมิเนียมจะถูกพบในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสมมากกว่า

3) เมื่อพิจารณาค่าปริมาณการสึกหรอของเหล็กโดยรวม (PQ index) พบว่า เครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสมมีค่า PQ index ที่ต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลอยู่เล็กน้อย การทดสอบ ในช่วง 20 ชั่วโมงการทำงานแรกจะมีการสึกหรอของเครื่องยนต์ที่สูงในเกณฑ์ระดับที่อาจจะมียันตราย ต่อเครื่องยนต์ เนื่องจากระยะห่างช่องว่างของชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ยังมีความแน่น จากนั้นในช่วง 100 ไปจนถึง 200 ชั่วโมงการทำงานแรกจะมีการสึกหรอที่น้อยลง

4) ค่าคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นในเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสมและน้ำมันดีเซล หลังการทดสอบ 200 ชั่วโมง พบว่าค่าความหนืดน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่เครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลมีค่าความหนืดน้ำมันหล่อลื่นค่อนข้างคงที่

5) ปฏิบัติการเกิดออกซิเดชันและไนเตรชันของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสมมีค่าสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซล ในทุกช่วงของชั่วโมงการทำงาน ซึ่งส่งผลต่อค่าความหนืดที่สูงขึ้น ของน้ำมันหล่อลื่นในเครื่องยนต์

6) ค่าความเป็นต่างของน้ำมันหล่อลื่นในเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสมอยู่ในเกณฑ์ที่ปกติ แต่ค่าความเป็นต่างของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลมีค่าต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสมอยู่เล็กน้อยซึ่งบ่งบอกว่าน้ำมันหล่อลื่นมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น

7) ผลการชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนเครื่องยนต์พบว่า น้ำหนักของ แหวนอัดที่ 1 และแหวนอัดที่ 2 ของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสมมีน้ำหนักที่หายไปมากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซล ในขณะที่ชิ้นส่วน แหวนน้ำมัน สลักสูบ ลูกสูบ วาล์วไอดีและวาล์วไอเสีย ของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลมีน้ำหนักที่หายไปมากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสม

8) เครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) มีการสึกหรอของอนุภาคเหล็กขนาด 5-100 ไมครอน ในปริมาณที่มาก อาจกล่าวได้ว่าการสึกหรอของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสม (CWPO) มีการสึกหรอมากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซล

9) ผลการวัดขนาดชิ้นส่วนในเครื่องยนต์พบว่า ระยะห่างของชิ้นส่วนต่าง ๆ ในเครื่องยนต์ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่พบระยะห่างวาล์วไอดีและวาล์วไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสมมีระยะห่างวาล์วที่มากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลเนื่องจากมีการบวมเข้าไปเกาะในบริเวณป่าวาล์วที่สูง

10) พบการเกาะติดของคราบเขม่าสูงในบริเวณด้านบนลูกสูบของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสมสีเขม่ามีลักษณะเป็นสีขาวที่บริเวณเหนือหัวฉีดและเขม่าสีดำบริเวณรอบ ๆ ลูกสูบ ซึ่งบ่งบอกถึงการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ ขณะที่เครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลมี ร่องรอยการสึกหรอ และบริเวณด้านข้างของร่องแหวนลูกสูบพบคราบเขม่าอย่างชัดเจน ซึ่งส่งผลต่อการรั่วไหลของ Blowby-Gas เครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันขยะพลาสติกผสมการสึกหรอบริเวณฝากระโปรงลูกสูบพบรอยขีดขีดมากกว่าในเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน

11) พบคราบเขม่าสูงในชิ้นส่วน ฝาสูบ บ่าวาล์ว หน้าวาล์วไอตี และหน้าวาล์วไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสม โดยเฉพาะบริเวณด้านหลังบ่าวาล์วไอเสียพบเขม่าจับตัวกัน เป็นก้อนหากทดสอบเป็นระยะเวลาที่นานกว่า 200 ชั่วโมง มีโอกาสที่เขม่าจะไปสะสมบริเวณบ่าวาล์ว จนทำให้วาล์วไอเสียไม่สามารถปิดได้สนิท ส่วนเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลพบเขม่าในปริมาณปกติ



บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินการวิจัยเพื่อที่จะศึกษาผลของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวที่ไม่มีการปรับแต่ง โดยศึกษาผลกระทบของการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทีลีนความหนาแน่นสูงที่ผลิตจากฝาขวดและน้ำมันจากขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทีลีนเทรฟทาเลตที่ผลิตจากขวดใส ต่อสมรรถนะการทำงาน คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวทางการเกษตร โดยทดสอบด้วยเครื่องยนต์ดีเซลภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงานที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ จากนั้นได้ศึกษาผลของการใช้น้ำมันขยะพลาสติกระยะยาวที่มีต่อการสึกหรอของเครื่องยนต์ทางการเกษตร เป็นระยะเวลา 200 ชั่วโมงการทำงาน เพื่อแนวทางการปรับแต่งเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวทางการเกษตรเพื่อใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันขยะพลาสติก สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

จากการวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกพบว่า คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญของน้ำมันขยะพลาสติกด้อยกว่าน้ำมันดีเซลที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ในหลาย ๆ ปัจจัย เช่น ค่าดัชนีซีเทน ความหนืดจลนศาสตร์ความหนาแน่น จุดวาบไฟ และค่าความร้อนเชื้อเพลิง มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ซึ่งผลของคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซล ส่งผลต่อคุณลักษณะการเผาไหม้สมรรถนะการทำงาน และมลพิษไอเสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันขยะพลาสติกแบบผสมที่ยังไม่ผ่านการกลั่น ซึ่งไม่สามารถควบคุมคุณภาพและความสม่ำเสมอของน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส เนื่องจากแหล่งที่มาของขยะพลาสติกที่แตกต่างกันจะส่งผลโดยตรงต่อองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมัน ในกรณีที่ไม่ได้มีการควบคุมแหล่งที่มาของขยะพลาสติกที่จะนำมาผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงจำเป็นต้องใช้กระบวนการกลั่นลำดับส่วนเพื่อควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงที่สกัดได้จากขยะพลาสติกให้มีคุณสมบัติพื้นฐานใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

ในงานวิจัยได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันจากขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทีลีนความหนาแน่นสูงที่ผลิตจากฝาขวดและน้ำมันจากขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทีลีนเทรฟทาเลตที่ผลิตจากขวดใสที่ยังไม่ได้ผ่านการกลั่นลำดับส่วน เพื่อควบคุมคุณภาพของน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งผลการศึกษารูปได้ว่า น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากพลาสติกฝาขวดมีคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกันกับน้ำมันดีเซลและสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ที่จุด

ระเบิดด้วยการอัดได้ ซึ่งต่างจากน้ำมันขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทีลีนเทรฟทาเลตที่ผลิตจากขวดใสซึ่งส่วนใหญ่มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในกลุ่มอะโรมาติกส์ การนำน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดใสไปใช้งานกับเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยการอัดจำเป็นต้องผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนที่เหมาะสม

ในการนำน้ำมันขยะพลาสติกไปใช้งานจะส่งผลกระทบต่อเครื่องยนต์ทั้งในแง่ของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ ซึ่งโดยทั่วไปการใช้น้ำมันขยะพลาสติกกับเครื่องยนต์จะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่สูงกว่า เครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลอย่างชัดเจน เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกแต่ละชนิด ซึ่งมีผลต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการจุดระเบิดและช่วงระยะเวลาในการเผาไหม้ที่สั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันจากขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทีลีนเทรฟทาเลตที่ผลิตจากขวดใส ที่มีความล่าช้าในการจุดระเบิดค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามในน้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากฝาขวดพบว่ามีคุณลักษณะการเผาไหม้ของน้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวดมีลักษณะใกล้เคียงกันกับลักษณะการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลโดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์

ในการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกแบบผสมเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ พบว่าการใช้เครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนกำลังอัดสูงกว่ามีส่วนช่วย เพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกและมีส่วนช่วยลดช่วงเวลาก่อนการเผาไหม้ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก การลดมลพิษได้ นอกจากนี้การปรับตั้งจิ้งหะการฉีดเพื่อชดเชยความล่าช้าในการจุดระเบิดของน้ำมันขยะพลาสติกก็อาจจะเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการปรับแต่งเครื่องยนต์ให้มีความเหมาะสมในการใช้งานกับน้ำมันขยะพลาสติก

ในแง่ของการปล่อยมลพิษ การนำน้ำมันขยะพลาสติกแต่ละชนิดไปใช้งาน พบว่าเครื่องยนต์มีแนวโน้มที่จะปล่อยมลพิษสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล เนื่องจากผลของคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีที่ส่งผลต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการปล่อยมลพิษ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการใช้งานในระยะยาวเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกมีแนวโน้มที่จะเกิดการสึกหรอมากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล โดยการใช้งานน้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงส่งผลเสียโดยตรงต่อคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นในเครื่องยนต์ และการเกิดเขม่าที่สูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลก็ส่งผลต่อการสึกหรอของชิ้นส่วนต่าง ๆ ค่อนข้างสูง

7.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เชื้อเพลิงน้ำมันขยะพลาสติกจากกระบวนการไพโรไลซิส เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวทางการเกษตรที่ไม่มีมีการปรับแต่ง โดยจากการดำเนินการวิจัยสังเกตว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงาน คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันขยะ

พลาสติก คือ สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการแปรรูปและสถานะต่าง ๆ ในการผลิตน้ำมันจากกระบวนการไพโรไลซิส ดังนั้น งานวิจัยในอนาคต จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมในปัจจัยต่าง ๆ ดังกล่าวในการผลิตน้ำมันจากกระบวนการไพโรไลซิส รวมถึงการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติก โดยปรับปรุงลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกให้มีความเหมาะสม โดยการเติมสารปรับปรุงคุณภาพ การนำน้ำมันขยะพลาสติกไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติทางเชื้อเพลิงให้มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน หรือ การพัฒนาคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ให้เหมาะสมต่อการใช้งานกับเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันขยะพลาสติก นอกจากนี้แนวทางการศึกษาการออกแบบและพัฒนาชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ให้มีความทนทานหรือเหมาะสมต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ หรือการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อช่วยลดการปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ก็นับเป็นอีกปัจจัยที่จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในการนำน้ำมันจากขยะพลาสติกมาใช้งาน เพื่อเป็นแนวทางในการนำน้ำมันขยะพลาสติกไปใช้งานกับเครื่องยนต์ได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่อไป



รายการอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2559). **สถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2559**. กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมธุรกิจพลังงาน. (2556). **ประกาศกรมธุรกิจพลังงานเรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของ น้ำมันดีเซล**. กระทรวงพลังงาน.
- กรมธุรกิจพลังงาน. (2556). **ประกาศกรมธุรกิจพลังงานเรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของ ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน**. กระทรวงพลังงาน.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2559). **แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 - 2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2015)**. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- ชัชวาล ชเลิศเพ็ชร์ (2552). การศึกษาการผลิตไดเอทิลอีเทอร์จากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันโดยใช้กรดที่ เหลือจากโรงงานผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ชัยยง ศิริพรมงคชัย (2558). **เครื่องยนต์สันดาปภายใน** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- นฤมล ชูบัวทอง (2550). ผลขององค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลต่อไพโรไลซิสและการเผาไหม้. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัตน์ยาภรณ์ ฉายศรี (2555). การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันขยะพลาสติกให้ได้มาตรฐานไบโอดีเซล ชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- วรวิฑูมิ จุฬาลักษณ์านุกุล (2558). **เชื้อเพลิงชีวภาพด้วยตัวเร่งชีวภาพ**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริรัตน์ จิตการคำ (2551). **จากขยะสู่น้ำมัน : เทคโนโลยีผลิตพลังงานทางเลือกที่ดูแลสิ่งแวดล้อม** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศูนย์พยากรณ์และสารสนเทศพลังงาน (2559). **สถานการณ์พลังงานไทย ปี พ.ศ. 2559**. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.

- Aleme, H., & Barbeira, P. (2012). Determination of flash point and cetane index in diesel using distillation curves and multivariate calibration. *Fuel*, 102, 129–134.
- Awang, M. S. N., Mohd Zulkifli, N. W., Abbas, M. M., Mohd Yusoff, M. N. A., Ahmad, M. H., & Daud, W. (2021). Effect of addition of plastic pyrolytic oil and waste cooking oil biodiesel in palm oil biodiesel-commercial diesel blends on diesel engine performance, emission, and lubricity. *Energy & Environment*. 1-29.
- Awang, M. S. N., Mohd Zulkifli, N. W., Zulkifli, S., Kalam, M. A., Mohd Yusoff, M. N. A., Daud, W., Abbas, M. M. (2022). Effect of diesel-palm biodiesel fuel with plastic pyrolysis oil and waste cooking biodiesel on tribological characteristics of lubricating oil. *AEJ - Alexandria Engineering Journal*. 1-11.
- Azad, K., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., & Sharma, S. C. (2019). *12 - Ecofuel and its compatibility with different automotive metals to assess diesel engine durability*. In K. Azad (Ed.), *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment* (pp. 337-351): Woodhead Publishing.
- Bakri, M. K., Rahman, M., Law Nyuk Khui, P., Jayamani, E., & Khan, A. (2020). Use of Sustainable Polymers to Make Green Composites. In M.R. Rahman (Ed.), *Advances in Sustainable Polymers Composites: Woodhead Publishing*. pp. 109-129.
- Bint-E-Naser, S. F., Hossain, L., Debnath, M., Barua, P. P., & Khan, M. S. (2017). Analyzing Physico-Chemical Properties of Bioethanol and Bioethanol Blended Fuels. *Journal of Nature Science and Sustainable Technology*, 11(4), 331-339.
- El-Hagar, M. (2020). Effect of Fuel Cetane Numbers on Reducing the Ignition Delay Period and Exhaust Emissions from DI Diesel Engine. *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer*, 15, 99-105.
- Farias, A., Medeiros, J., & Alves, S. (2014). Micro and Nanometric Wear Evaluation of Metal Discs Used on Determination of Biodiesel Fuel Lubricity. *Materials Research*, 17, 89-99.
- Fernández-Rodríguez, D., Lapuerta, M., & German, L. (2021). Progress in the Use of Biobutanol Blends in Diesel Engines. *Energies*, 14(11), 3215.

- Fidyayuningrum, H., Fatoni, R., & Harismah, K. (2020). Characteristics of Cetane index of traditional diesel oil in Wonocolo district, Bojonegoro. *AIP Conference Proceedings*, 2223(1), 040003.
- Gaurh, P., & Pramanik, H. (2018). Production and characterization of pyrolysis oil using waste polyethylene in a semi batch reactor. *Indian Journal of Chemical Technology*, 25, 336-344.
- Hariadi, D., Saleh, S. M., Anwar Yamin, R., & Aprilia, S. (2021). Utilization of LDPE plastic waste on the quality of pyrolysis oil as an asphalt solvent alternative. *Thermal Science and Engineering Progress*, 23, 100872.
- Hazar, H. (2010). Cotton methyl ester usage in a diesel engine equipped with insulated combustion chamber. *Applied Energy*, 87(1), 134-140.
- Hossain, A., & Davies, P. (2013). Pyrolysis liquids and gases as alternative fuels in internal combustion engines – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 165-189.
- Joseph I. Goldstein. (1992). *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*, 2nd ed. New York: Plenum Press.
- Kaewbuddee, C., Sukjit, E., Srisertpol, J., Maithomklang, S., Wathakit, K., Klinkaew, N., . . . Arjharn, W. (2020). Evaluation of Waste Plastic Oil-Biodiesel Blends as Alternative Fuels for Diesel Engines. *Energies*, 13(11), 2823.
- Keera, S. T., El Sabagh, S. M., & Taman, A. R. (2018). Castor oil biodiesel production and optimization. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 979-984.
- Khan, M. Z. H., Sultana, M., Al-Mamun, M. R., & Hasan, M. R. (2016). Pyrolytic Waste Plastic Oil and Its Diesel Blend: Fuel Characterization. *Journal of Environmental and Public Health*, 2016, 7869080.
- Kuszewski, H. (2018). Physical and Chemical Properties of 1-Butanol-Diesel Fuel Blends. *Energy & Fuels*, 32(11).
- Lapuerta, M., Sánchez-Valdepeñas, J., Bolonio, D., & Sukjit, E. (2016). Effect of fatty acid composition of methyl and ethyl esters on the lubricity at different humidities. *Fuel*, 184, 202-210.

- Lehto, J., Oasmaa, A., Solantausta, Y., Kytö, M., & Chiaramonti, D. (2014). Review of fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils from lignocellulosic biomass. *Applied Energy*, 116, 178-190.
- Lopes, S., & Geng, P. (2013). Estimation of Elemental Composition of Diesel Fuel Containing Biodiesel. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 6, 668-676.
- Luning Prak, D., Cooke, J., Dickerson, T., McDaniel, A., & Cowart, J. (2021). Cetane number, derived cetane number, and cetane index: When correlations fail to predict combustibility. *Fuel*, 289, 119963.
- Mangesh, V. L., Perumal, T., Subramanian, S., & Padmanabhan, S. (2020). Clean Energy from Plastic: Production of Hydroprocessed Waste Polypropylene Pyrolysis Oil Utilizing a Ni–Mo/Laponite Catalyst. *Energy & Fuels*, 34(7), 8824-8836.
- Mondal, S., Kumar, R., Bansal, V., & Patel, M. B. (2015). A ¹H NMR method for the estimation of hydrogen content for all petroleum products. *Journal of Analytical Science and Technology*, 6(1), 24.
- Musa, U., Mohammed, I. A., Sadiq, M. M., Aberuagba, F., Olurinde, A. O., & Obamina, R. (2015). Synthesis and characterization of trimethylolpropane-based bio lubricants from castor oil. In *Proceedings of the 45th annual conference of NSCHE*, Warri, Nigeria, pp. 5-7.
- Saiyakitpanich, P., Lu, M., Keener, T. C., Liang, F., & Khang, S.-J. (2005). The Effect of Diesel Fuel Sulfur Content on Particulate Matter Emissions for a Nonroad Diesel Generator. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55(7), 993-998.
- Sarikoc, S. (2020). Fuels of the Diesel-Gasoline Engines and Their Properties. In *Diesel and Gasoline Engines*, IntechOpen: London, UK. pp.1-16.
- Shojaei, T.R., & Azhari, S. (2018). Chapter 16-Fabrication, functionalization, and dispersion of carbon nanotubes. In A. Barhoum & A.S.H. Makhlof (Eds.), *Emerging Applications of Nanoparticles and Architecture Nanostructures*: Elsevier. pp. 501-531.
- Srithar, K., & Arun Balasubramanian, K. (2014). Dual biodiesel for diesel engine -Property, performance and emission analysis. *International Energy Journal*, 14, 107-120.

- Sukjit, E., & Dearn, K. (2011). Enhancing the lubricity of an environmentally friendly Swedish diesel fuel MK1. 1772-1777. Paper presented at 18th International Conference on Wear of Materials (WOM), Apr 03-07, 2011. Philadelphia, Pa.
- Sukjit, E., & Dearn, K. D. (2011). Enhancing the lubricity of an environmentally friendly Swedish diesel fuel MK1. *Wear*, 271(9), 1772-1777.
- Sukjit, E., Herreros, J. M., Dearn, K. D., García-Contreras, R., & Tsolakis, A. (2012). The effect of the addition of individual methyl esters on the combustion and emissions of ethanol and butanol-diesel blends. *Energy*, 42(1), 364-374.
- Sukjit, E., Poapongsakorn, P., Dearn, K. D., Lapuerta, M., & Sánchez-Valdepeñas, J. (2017). Investigation of the lubrication properties and tribological mechanisms of oxygenated compounds. *Wear*, 376-377, 836-842.
- Uchôa, I., Dantas Neto, A., Santos, E., Lima, L., & Neto, E. (2017). Evaluation of Lubricating Properties of Diesel Based Fuels Micro Emulsified with Glycerin. *Materials Research*. 701-708.
- Uzochukwu, W., Umunakwe, R., Obasi, H., Ugbaja, M., Cosmas, C., Uche, . . . Madufor, I. (2021). Plastics waste management: A review of pyrolysis technology. *Journal Energy Institute*, 1, 50-69.
- W. Gis, A. Íóátowski, & A. Bocheeska (2011). Properties of the Rapeseed Oil Methyl Esters and Comparing Them with the Diesel Oil Properties. *J. KONES Powertrain Transp.*, 18(4).
- Yaqoob, H., Teoh, Y. H., Jamil, M. A., Rasheed, T., & Sher, F. (2020). An Experimental Investigation on Tribological Behaviour of Tire-Derived Pyrolysis Oil Blended with Biodiesel Fuel. *Sustainability*, 12(23), 9975.
- Yuan, W., Hansen, A., & Zhang, Q. (2004). The specific gravity of biodiesel fuels and their blend with diesel fuel. *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal of Scientific Research and Development*, 6.



ภาคผนวก ก

ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางหมายเลข ๑ ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล
 แบบท้ายประกาศกรมธุรกิจพลังงาน
 เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล
 พ.ศ. ๒๕๖๒

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ ^๑	
			หมุนเร็ว		หมุนช้า		
			ธรรมดา	ปี ๒๐			
๑	ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ ๑๕.๖/๑๕.๖ องศาเซลเซียส (Specific gravity at 15.6/15.6 °C)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	๐.๘๑ ๐.๘๗	๐.๘๑ ๐.๘๗	- ๐.๙๒๐	ASTM D ๑๒๙๘	
๒	จำนวนซีเทน (Cetane number) หรือ ดัชนีซีเทน (Calculated cetane index)	ไม่ต่ำกว่า	๕๐	๕๐	๔๕	ASTM D ๖๑๓ ASTM D ๙๗๖	
๓	ความหนืด (Viscosity)	เซนติสโตกส์ cSt				ASTM D ๔๔๕	
	๓.๑ ณ อุณหภูมิ ๔๐ องศาเซลเซียส หรือ (at 40 °C)	ไม่ต่ำกว่า และ	๑.๘	๑.๘	-		
	๓.๒ ณ อุณหภูมิ ๕๐ องศาเซลเซียส (at 50 °C)	ไม่สูงกว่า ไม่สูงกว่า	๔.๑ -	๔.๑ -	๘.๐ ๖.๐		
๔	จุดไหลเท (Pour point)	องศาเซลเซียส °C	ไม่สูงกว่า	๑๐	๑๐	๑๖	ASTM D ๙๗
๕	กำมะถัน (Sulphur)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๐๐๕	๐.๐๐๕	๑.๕	ASTM D ๒๖๒๒
๖	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper strip corrosion)		ไม่สูงกว่า	หมายเลข ๑	หมายเลข ๑	-	ASTM D ๑๓๐
๗	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation stability)						
		กรัม/ลูกบาศก์เมตร g/m ³	ไม่สูงกว่า	๒๕	๒๕	-	ASTM D ๒๒๗๔
		ชั่วโมง hours	ไม่ต่ำกว่า	๓๕	๓๕	-	EN ๑๕๗๕๑
๘	กากถ่าน จากร้อยละ ๑๐ ของส่วนที่เหลือ จากการกลั่น (Carbon residue on 10% distillation residue)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๓๐	๐.๓๐	-	ASTM D ๔๕๓๐
๙	น้ำและตะกอน (Water and sediment)	ร้อยละโดยปริมาตร % vol.	ไม่สูงกว่า	-	-	๐.๓	ASTM D ๒๗๐๙
๑๐	น้ำ (Water)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม mg/kg	ไม่สูงกว่า	๓๐๐	๓๐๐	-	EN ISO ๑๒๙๓๗
๑๑	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total contamination)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม mg/kg	ไม่สูงกว่า	๒๔	๒๔	-	EN ๑๒๖๖๒
๑๒	เถ้า (Ash)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๐๑	๐.๐๑	๐.๐๒	ASTM D ๔๘๒

(ต่อ -๒-)

-๒-

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ ^๑	
			หมุนเร็ว		หมุนช้า		
			ธรรมดา	ปี ๒๐			
๑๓	จุดวาบไฟ (Flash point)	องศาเซลเซียส °C	ไม่ต่ำกว่า	๕๒	๕๒	๕๒	ASTM D ๙๓
๑๔	การกลั่น (Distillation)	องศาเซลเซียส °C					ASTM D ๘๖
	อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตรในอัตราร้อยละเก้าสิบ (90% Recovered)		ไม่สูงกว่า	๓๕๗	๓๕๗	-	
๑๕	โพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbon)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๑๑	๑๑	-	IP ๓๙๑
๑๖	สี (Colour)						
	๑๖.๑ ชนิดของสี (Hue)			เหลือง	แดง	น้ำตาล	
	๑๖.๒ ความเข้มของสี (Intensity)		ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	- ๔.๐	เทียบเท่าสี มาตรฐาน ^๒	๔.๕ ๗.๕	(๑) น้ำมันดีเซล หมุนเร็วธรรมดาและ น้ำมันดีเซลหมุนช้า ให้เปรียบเทียบ ความเข้มของสีตาม มาตรฐาน ASTM D ๑๕๐๐ (๒) น้ำมันดีเซล หมุนเร็วปี ๒๐ ให้ เปรียบเทียบความ เข้มของสีกับน้ำมัน มาตรฐานที่เตรียม ขึ้นใหม่ โดยใช้สี ละลายในน้ำมันก่อน การย้อมสีให้มี ปริมาณเท่ากับ ที่กำหนด แล้วนำมา บรรจุแยกกันใน ภาชนะที่ใช้ในการ วัดสีตามวิธีทดสอบ ASTM D ๑๕๐๐ แล้วตรวจพินิจด้วย สายตา หรือตาม มาตรฐาน ASTM D ๒๓๙๒
๑๗	ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ ของกรดไขมัน (Methyl ester of fatty acids)	ร้อยละโดยปริมาตร % vol.	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	๖.๖ ๗	๑๙ ๒๐	- -	EN ๑๔๐๗๘

(ต่อ -๓-)

-๓-

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงค่า	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ ^๓	
			หมุนเร็ว		หมุนช้า		
			ธรรมดา	ปี ๒๐			
๑๘	คุณสมบัติการหล่อลื่น รอยขีดข่วน (Lubricity wear scar)	ไมโครเมตร μm	ไม่สูงกว่า	๔๖๐	๔๖๐	-	CEC F - ๐๖ - ๙๖
๑๙	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additives, if any)			ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจาก อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน			

หมายเหตุ ๑/ ให้ใช้วิธีทดสอบที่กำหนดในตารางแนบท้ายนี้หรือวิธีอื่นใดที่ให้ผลเทียบเท่า ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในตารางแนบท้ายนี้
๒/ สیمانตราเตรียมได้จากการนำน้ำมันดีเซลหมุนเร็วปี ๒๐ ที่มีความเข้มข้นของสีก่อนการย้อม วัดตามมาตรฐาน ASTM D ๑๕๐๐ เท่ากับ ๒.๐ มาย้อมด้วยสีแดงที่เป็นสารประกอบจำพวก 2-naphthalenol [(phenylazo) phenyl] azo alkyl derivatives ปริมาณ ๒๐ มิลลิกรัมต่อลิตร





ภาคผนวก ข

ผลการตรวจวิเคราะห์น้ำมันเครื่อง

Code : 28223
Name : Suranaree University of Technology
Address : 111 University Avenue,
 Muang District,
 Nakhon Ratchasima 30000
Site :
Location :
Test code : E804
Unit ID : QR168F-4151202766 Overhaul for WPO
Unit Type : Engine Diesel
Unit Make : KAWAMA
Unit Model : 50GD
Oil type / Viscosity : PTT D3 PLUS SAE 40
Oil System Capacity : 0.7 Liters



Notes (Finding, Evaluation, Interpretation, Suggestion and Recommendation)

Abnormal wear metals may indicate cylinder, piston and ring wear.
 Dirt (silicon) is present and resulting in abrasive wear.
 Note oxidation detected and increase in viscosity.
 Recommend check to determine how dirt is entering the system and correct the problem to prevent further dirt entry (Proactive).

		Current Sample			Previous Sample			Baseline and Alarm Limit								
		Wear	Oil	Cont.	Wear	Oil	Cont.	Wear	Oil	Cont.	Alarm Limit					
		▲	■	■	■	■	■	■	■	■	Alarm Limit Matrix -Set Name (Equipment type / oil type)					
Condition History											Engine Diesel General PTT D3 Plus SAE 40 (Suranaree)					
Lab ID	Test Method	Result														
Bottle ID			21042397		21042396		21042395									
Date Sampled			139171		139172		139173									
Oil Hours (Kms)			02-Apr-21		23-Mar-21		25-Jan-21									
Unit Hours (Kms)			100		100		20									
Oil Change			220		120		20									
Oil Added (Liters)																
Filters Hours (Kms)																
Wear Condition												The New Oil (TNO)	Fine Wear (ICP)	Coarse Wear (RFS)		
Wear Element	Method	Unit	Fine Wear (ICP-AES)	Coarse Wear (RFS-AES)	Fine Wear (ICP-AES)	Coarse Wear (RFS-AES)	Fine Wear (ICP-AES)	Coarse Wear (RFS-AES)								
Iron	D-5185	PPM	156.1 C	48.7	206.6 W	77.7	202.6 W	1079.1 W	0	>100	>200	>100	>200			
Chromium	D-5185	PPM	10.8 C	2.9	12.8 C	4.6	13.7 C	18.6 W	0	>5	>15	>5	>15			
Lead	D-5185	PPM	0.0	7.2	0.0	4.0	0.0	5.7	0	>20	>50	>20	>50			
Copper	D-5185	PPM	3.7	1.3	7.4	2.0	4.2	3.1	0	>10	>25	>10	>25			
Tin	D-5185	PPM	4.1	5.5	4.9	2.3	5.4	3.4	0	>10	>25	>10	>25			
Aluminum	D-5185	PPM	41.0 W	15.6 C	65.7 W	32.9 W	28.9 W	41.5 W	0	>10	>20	>10	>20			
Nickel	D-5185	PPM	0.3	0.0	0.5	0.0	0.3	0.0	0	>5	>10	>5	>10			
Silver	D-5185	PPM	0.2	0.1	0.2	0.1	0.4	0.1	0							
Molybdenum	D-5185	PPM	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0							
Titanium	D-5185	PPM	0.7	0.5	1.0	0.0	0.9	0.7	0							
PQ Index	D-8184	Index	39		44		179			>15	>20					
Oil Condition												TNO	L-Warning	L-Caution	U-Caution	U-Warning
Viscosity @ 40°C	D-445	cSt														
Viscosity @ 100°C	D-445	cSt	17.5 W		19.0 W		14.7		14.9	<12.5	<13.7	>15.6	>16.3			
Oxidation	D-7414	Abs	11.4 W		14.4 W		4.5		3.6			>7.2	>8.1			
Nitration	D-7624	Abs/cm	13.3 C		14.1 C		2.5		2.0			>10	>25			
Acid Number	D-974	mg KOH/g														
Base Number	D-4739	mg KOH/g	11.4		11.2		11.7		12.2	<2	<6.1					
Contamination												TNO	L-Warning	L-Caution	U-Caution	U-Warning
Water	E-2412	% (V/L)	0.064		0.079		0.090		0.040			>0.15	>0.25			
Fuel	In-house	% (V/L)	0.10		0.10		0.10					>2	>5			
Glycol	E-2412	Abs	N/A		N/A		N/A									
Soot in oil	E-2412	% (V/L)	1.05		1.70		0.45					>3	>6			
Soot Dispersiony (100-6)	D7859M	Index	60		60		80					<50	<30			
Vanadium	D-5185	PPM	0		0		0		0							
Sodium	D-5185	PPM	6		12		9		0							
Silicon	D-5185	PPM	73.0 W	36.9 C	98.0 W	29.4 C	75.4 W	67.5 W	9	>25	>50	>25	>50			
Additive Element												TNO				
Boron	D-5185	PPM	1		1		2		0							
Magnesium	D-5185	PPM	19		22		15		8							
Calcium	D-5185	PPM	5093		5911		4269		3941							
Barium	D-5185	PPM	0		0		0		0							
Phosphorus	D-5185	PPM	1034		1155		1103		905							
Zinc	D-5185	PPM	1288	248	1485	313	1220	313	1090							
Additional Test												TNO	L-Warning	L-Caution	U-Caution	U-Warning
Flash Point	D-3828	°C														
Viscosity Index	D-2270															

Note: Alarm Limits are variable and dependent upon dataset size and to be used as general guideline.
 No Sign or (●) : NORMAL , C or (▲) : CAUTION (first level warning limit) , W or (■) : Warning (second level warning limit)
 Accuracy of interpretation and recommendation are based on representatives sample and information supplied. No warranty is expressed or implied for this report.
 Focuslab Ltd. Bangkok Thailand www.focuslab.co.th focuslab@focuslab.co.th FL-6.8

ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

- Wathakit, K., Sukjit, E., Kaewbuddee, C., Maithomklang, S., Klinkaew, N., Liplap, P., Srisertpol, J. (2021). Characterization and Impact of Waste Plastic Oil in a Variable Compression Ratio Diesel Engine. *Energies*, 14(8), 2230.
- Wathakit, K., Ekarong, S., Somkiat, M., & Srisertpol, J. (2020). Fuel Properties, Performance and Emission of Alternative Fuel from Pyrolysis of Waste Plastics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 717, 012001.
- Wathakit, K., Ekarong, S., Somkiat, M., & Srisertpol, J. (2020). Fuel Properties, Performance and Emission of Alternative Fuel from Pyrolysis of Waste Plastics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 717, 012001.
- Wathakit, K., Ekarong, S., & Srisertpol, J. (2018). Effect of injection timing on performance and emissions characteristics of a single cylinder diesel engine fuelled with waste plastic oil. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1074 (2018) 012041

Article

Characterization and Impact of Waste Plastic Oil in a Variable Compression Ratio Diesel Engine

Khatha Wathakit ¹, Ekarong Sukjit ¹, Chalita Kaewbuddee ², Somkiat Maithomklang ¹, Niti Klinkaew ¹, Pansa Liplap ¹, Weerachai Arjharn ¹ and Jiraphon Srisertpol ^{1,*} 

¹ Institute of Engineering, School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, Muang Nakhon Ratchasima District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand; vkata@sut.ac.th (K.W.); ekarong@g.sut.ac.th (E.S.); somkiatmaithomklang@gmail.com (S.M.); niti_klinkaew@g.sut.ac.th (N.K.); pansa@sut.ac.th (P.L.); arjharn@g.sut.ac.th (W.A.)

² Faculty of Industrial Technology, Surindra Rajabhat University, 186 Moo 1 Surin-Prasat Road, Nokmuang Sub-District, Muang District, Surin 32000, Thailand; chalita.k@sru.ac.th

* Correspondence: jiraphon@sut.ac.th



Citation: Wathakit, K.; Sukjit, E.; Kaewbuddee, C.; Maithomklang, S.; Klinkaew, N.; Liplap, P.; Arjharn, W.; Srisertpol, J. Characterization and Impact of Waste Plastic Oil in a Variable Compression Ratio Diesel Engine. *Energies* **2021**, *14*, 2230. <https://doi.org/10.3390/en14082230>

Academic Editor: Constantine D. Rakopoulos

Received: 1 March 2021

Accepted: 14 April 2021

Published: 16 April 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: The characterization of pyrolysis oil obtained from mixed waste plastics and its utilization in a compression ignition engine were investigated. The chemical compositions and physicochemical properties of distilled waste plastic oil (WPO) and crude waste plastic oil (CWPO) were analyzed. The experiment was conducted with a variable compression ratio diesel engine at various loads and compression ratios to evaluate combustion characteristics, exhaust emissions, and engine performance. The experimental results show that CWPO contains the highest percentage of carbon atoms in the C4–C11 group, while WPO contains the highest percentage of carbon atoms in the C12–C20 group, similar to the main compositions of diesel fuel. According to the preliminary study in chemical compositions and physicochemical properties, WPO and diesel fuel were selected for the engine test at different compression ratios of 16, 17, and 18 and different engine operating loads of 25%, 50%, and 75% of maximum engine torque at an engine speed of 1500 rpm. It was found that increasing the engine operating load and the compression ratio tends to increase the brake thermal efficiency. Increasing the compression ratio results in a significantly shorter delay time in a combustion state. A lower cetane index and a higher percentage of long chain carbon compounds (C12–C20) could be the main factors affecting higher NO_x, CO, and HC emissions with the combustion characteristics of WPO, compared to diesel fuel. The disadvantage of emissions by the use of WPO can be alleviated when the engine is running at maximum load and a high compression ratio.

Keywords: waste plastic oil; compression ratio; emission; diesel engine

1. Introduction

Fuels for energy is very important to industry, transportation, and agriculture. Currently, the fluctuation of fuel price conditions affects the cost of production and the country's development in various fields. Therefore, the government has promoted the use of renewable energy as an alternative to incentivize people to use other fuels, to replace diesel fuel and to reduce the demand for oil. Thailand mainly relies on imported energy from abroad, because it is unable to increase the domestic production of petroleum to meet demand. The development of renewable energy will seriously reduce the dependence on and import of fuels [1]. Thailand has continued to increase the use of renewable energy as a result of alternative energy development policies with the goal of increasing the use of renewable energy in all sectors of society and reducing the consumption of energy from fossil fuels. This will also reduce the import of energy from abroad [2,3]. Moreover, Thailand is faced with a large amount of solid waste. Large, medium, and small cities all face unsanitary waste management issues that affect the environment. Data on the situation of waste in Thailand show that, in 2018, there were approximately 27.93 million

tons of waste, with a rate of solid waste of 1.15 kg per person per day. Approximately 39% of the total solid waste (10.85 million tons) and 35% of solid waste (about 9.76 million tons) generated has been properly disposed. Approximately 7.32 million tons of solid waste have been improperly handled [4]. Generated plastics are about 12% of the total waste and take a long time to decompose [5]. Therefore, engineering waste management is necessary because, at present, there is technology to effectively manage this waste. One technology that has received attention is oil production technology from plastic waste through the pyrolysis process, due to its potential to convert plastic waste to energy in petroleum-based fuel. This is in line with the National Energy Integration Framework of the Ministry of Energy, devised to develop energy strategic plans in the name of the TIEB (Thailand Integrated Energy Blueprint) 2015–2036, which pays attention to energy security, economic, and environmental aspects of society [3].

Pyrolysis is the process of chemically cycle-debasement long chain polymer particles into small chain hydrocarbons in the absence of air or oxygen at the relatively high temperature range of 300–500 °C [6]. The three significant products from those pyrolysis methodologies are liquid, gas, and char, while the quantity of each product largely depends on such parameters as the type of feedstock and on pyrolysis procedure parameters, such as temperature, the type of reactor, pressure, residence time, heating rate, and the type of catalyst [7]. With respect to the feedstock, plastic waste mainly consists of high-density polyethylene (HDPE), low-density polyethylene (LDPE), polyethylene terephthalate (PET), polyethylene (PE), polystyrene (PS), polypropylene (PP), and polyvinyl chloride (PVC). Studies on the thermal degradation temperature of common plastic materials under thermogravimetric analysis have revealed that degradation begins at a temperature depending on the plastic type and the heating rate. The breakage of carbon chains was induced at a temperature above 325 °C for HDPE and was completed at about 470 °C. Additionally, the degradation process was accelerated at a higher heating rate. The lowest temperature of the starting degradation was obtained with PS. It has been suggested that all plastics initiate degradation at a temperature below 400 °C [8]. The liquid oil derived from the pyrolysis of various types of plastic waste contain physical and chemical properties similar to those of fossil fuel [9–12]. Therefore, waste plastic oil (WPO) is favorably appropriate to be developed as an alternative fuel in internal combustion engines [13].

Several experiments have been conducted on the use of plastic waste derived as a fuel in compression ignition diesel engines. Previous investigations of using WPO in diesel engines compared with diesel fuel operation are summarized in Table 1. Most of the investigations show similar trends of increase in brake-specific fuel consumption and brake thermal efficiency, with increasing concentrations of WPO in blends of diesel and WPO. Moreover, oxides of nitrogen (NO_x), unburnt hydrocarbon (HC), and carbon monoxide (CO) tend to increase with the use of WPO. In a recent work, Kalargaris et al. [14] studied the effect of pyrolysis oil from polypropylene on the characteristics of combustion, exhaust emissions, and engine performance at different temperatures of the pyrolysis process in a diesel engine. The experiments showed that the pyrolysis oil promoted steady engine operation with a longer combustion duration, a lower engine performance, a higher NO_x and HC, and lower CO emissions when compared with the engine operating on diesel fuel. Venkatesan et al. [15] studied the combustion characteristics and the engine performance of a diesel engine fueled with WPO blends. The brake thermal efficiency (BTE) for the WPO blends was found to be slightly higher than that of the diesel fuel. The engine performance and combustion characteristics of the diesel engine were significantly affected by the physical and chemical properties of WPO. Furthermore, at the highest load conditions, WPO blends yield better results in comparison to diesel fuel with respect to peak pressure, the rate of pressure rise, in-cylinder pressure, and the rate of heat release. The use of WPO as an alternative fuel in diesel engines tends to result in an increase in BTE, NO_x, and smoke emissions, while BSFC, CO, and HC emissions decrease with an increasing engine load [16–22].

Table 1. Summary of previous investigations on using waste plastic oil (WPO) in diesel engines compared with diesel fuel operation.

Diesel Engine Specifications	Types of Fuel	Performance		Combustion		Emissions				Ref.
		BSFC	BTE	ICP	RoHR	NO _x	CO	HC	Smoke	
AKSA-A4CRX46TI, 4-cylinder, 4-stroke, 68 kW at 1500 rpm	WPO	-	↓	↑	↑	↑	↑	↑	-	[14]
Kirloskar AV1, DI, 1-cylinder, 4-stroke, 3.7 kW at 1500 rpm	WPO	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	[16]
AKSA1-A4CRX46TI, 4-cylinder, 4-stroke, 68 kW at 1500 rpm	WPO	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	[17]
4JA1, DI, 4-cylinder, 4-stroke, 68 kW at 1500 rpm	WPO	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↓	[18]
Kirloskar TAF1, DI, 1-cylinder, 4-stroke, 4.4 kW at 1500 rpm	WPO	↓	↑	-	-	↑	↑	↑	-	[19]
Eicher E483, DI, 4-cylinder, 4-stroke, Max. Power 70 kW	WPO	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	[20]
Kirloskar TV1, DI, 1-cylinder, 4-stroke, 5.2 kW at 1500 rpm	WPO	↓	↑	-	-	↑	↑	↑	↑	[21]
DI, Turbocharger, 4-cylinder in line T/C, 4-stroke, 70 kW	WPO	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	[22]
DI, 1-cylinder, 4-stroke, 3.7 kW at 1500 rpm	WPO	-	↓	↑	↑	-	-	-	-	[23]
Lombardini-Kohler FOCS 1.4, IDI, 1-cylinder, 4-stroke,	WPO	↓	↑	↓	↓	-	-	-	↓	[24]
Kirloskar TAF1, DI, 1-cylinder, 4-stroke, 4.4 kW at 1500 rpm	WPO	-	↓	↑	↑	↑	-	↑	↑	[25]
AKSA-A4CRX46TI, 4-cylinder, 4-stroke, 68 kW at 1500 rpm	WPO	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	-	[26]
DI, 1-cylinder, 4-stroke, 3.7 kW at 1500 rpm	WPO-RME	↑	↑	↓	↓	-	-	-	-	[27]
Kirloskar TV1, DI, 1-cylinder, 4-stroke, 3.5 kW at 1500 rpm	WPO-POME WPO-COME	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↓	↑	[28]
Kirloskar TAF1, DI, 1-cylinder, 4-stroke, 4.4 kW at 1500 rpm	WPO-BU	↓	↑	-	-	↑	↑	↑	↓	[29]

↑—increases, ↓—decreases, WPO—waste plastic oil, RME—rice bran methyl ester, POME—palm methyl ester, COME—castor methyl ester, BU—Butanol, DI—Direct injection.

Currently, there is an increasing amount of research on alternative fuels for engines, and due to energy, environmental, and economic problems, it is necessary to encourage studies on alternative fuels to reduce the amount of primary fuel consumption. For the adoption of WPO gained from the pyrolysis process for compression ignition engines, it is necessary to study the effects of various factors. Therefore, this research aims to investigate the effects of changes in the compression ratio on the characteristics of combustion, exhaust emissions, and engine performance when using WPO as an alternative fuel in a variable compression ratio diesel engine. The outcome of this research can promote WPO as an alternative fuel for diesel engines and accords with alternative energy development plans in Thailand.

2. Materials and Methods

2.1. Fuels

In this work, crude waste plastic oil (CWPO) and distilled waste plastic oil (WPO) obtained by fractional distillation were studied. The mixed plastic waste used as feedstock in the pyrolysis process was collected from Nakhon Ratchasima, Thailand, and included bags, bottles, and other products made of plastic. The diesel fuel was commercial diesel fuel (B7), which is diesel fuel containing 7% biodiesel by volume, according to the Ministry of Energy. The master plant that processes mixed waste plastic into fuel by pyrolysis is located at Suranaree University of Technology.

Pyrolysis is the thermal decomposition of plastics in the absence of air or oxygen. Waste plastics are gently cracked by adding a catalyst, and the gases are condensed in a series of condensers to yield a low-sulphur distillate [28]. The pyrolysis reactor system is of a continuous vertical type. The plastic waste from the MBT system was used as a raw material for fuel production. The principle of operation is that the plastic scraps are conveyed to a screw feeder at a rate of approximately 250 kg/h, where the screws are preheated to allow the plastic to melt and be ready to evaporate as a vapor when heated up. After that, the liquid plastic flows into the reactor and then the continuous stirred tank reactor, where the reactor is temperature-controlled at 350–400 °C. When the plastic changes from liquid to vapor, it flows into the fractional distillation tower at a temperature of 340 °C, and at this distillation tower, it separates the heavy and light oil vapor molecules. After that, the oil vapor enters the condenser and flows into the oil/water separator, and the oil that is produced, i.e., CWPO, will flow into the storage tank. We used an oil distillation system to improve the quality of liquid fuels from plastic waste by using a vacuum separation tower to separate the mixtures into the form of individual elements (fractions). The middle fraction or diesel fuel, i.e., WPO, is taken from the center of the distillation tower, and the lighter part (the light fraction) or gasoline is released from the top of the distillation tower.

2.2. Gas Chromatography Analysis

Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC–MS) is extensively used as a method for the chemical characterization of the fuels. The presence of the compound identification of test fuels was used to determine the chemical compositions. One microliter was injected into a GC–MS system equipped with a DB-wax capillary column of a length of 60 m, an internal diameter of 0.25 mm, and a film thickness of 0.25 µm. The operating conditions were as follows: The helium gas flow rate of approximately 1.0 mL/min was utilized as a carrier gas. The temperature of the GC oven was performed in a temperature-programmed mode at 70 °C for 3 min, raised at 3 °C/min to 180 °C, and finally ramped to 250 °C (held for 25 min) at a heating rate of 10 °C/min. The inlet gas temperature was maintained at 250 °C with a separation ratio of 20:1. The mass spectra detector was operated in a mass range from 35 to 550 m/z with a 250 °C source [28]. GC–MS data are often demonstrated as total ion current (TIC) intensity. The data obtained from TIC can be used to identify the chemical composition of the test fuels.

2.3. Experimental Setup and Procedure

The study on combustion and emissions characteristics was conducted using a variable compression ratio (VCR) diesel engine, a single-cylinder and four-stroke engine with a direct fuel injection system. The air was naturally induced to the combustion chamber, while water and a water-cooling system were used to control the temperature of the engine. The engine was coupled with an eddy current dynamometer to provide the engine load. The technical specifications of the engine used for the investigations are described in [28]. A schematic diagram of the experimental installation is shown in Figure 1. The engine operated at 1500 rpm with three different engine loads (25%, 50%, and 75% of the maximum engine torque) under compression ratios of 16, 17, and 18. The fuel consumption of the engine was calculated by the fuel volume and testing time, which were recorded by a burette and stopwatch, respectively.

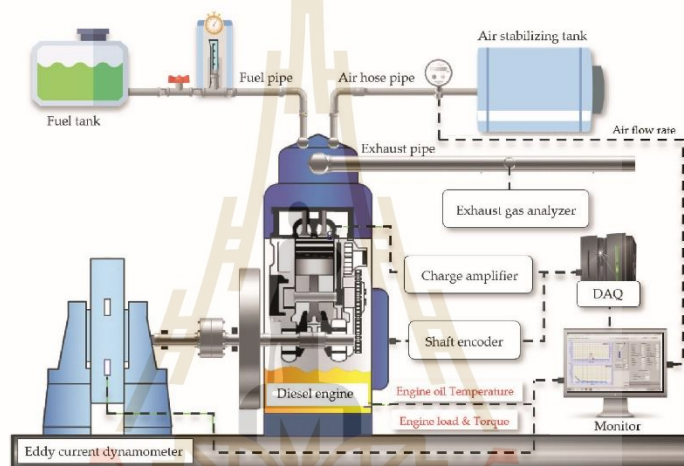


Figure 1. A schematic diagram of the experimental installation.

EngineSoft software was used to analyze the combustion characteristics. A data acquisition card (DAQ) placed between the engine and computer converted the analog signal to a digital value. The PCB Piezotronics pressure transducer was mounted on the cylinder head for the measurement of the in-cylinder pressure. A Kubler crank angle sensor was used to detect the engine crank angle. The in-cylinder pressure data were averaged for 100 cycles in succession at each crank angle. A Testo 308 smoke tester was used to determine smoke emissions, and a Testo 350 flue gas analyzer was applied to determine carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), and hydrocarbon (HC). The technical specifications of the exhaust gas analyzer are shown in Table 2.

Table 2. Specifications of the engine exhaust gas analyzer.

Parameter	Measuring Techniques	Measuring Range	Resolution	Accuracy
<i>TESTO 350</i>				
NO	Chemiluminescence	0–4000 ppm	1 ppm	±5 <100 ppm
NO ₂	Chemiluminescence	0–500 ppm	0.1 ppm	±5 <100 ppm
CO	Nondispersive Infrared	0–10,000 ppm	1 ppm	±10 <200 ppm
HC	Flame Ionization Detector	0–40,000 ppm	10 ppm	±400 ppm
<i>TESTO 308</i>				
Smoke index	Photodiode (filter paper)	0–6	0.1	±0.2

The measurements of the various parameters were recorded only after the engine attained the steady state. To assure the reproducibility of the experimental data, each test was duplicated three times, and the average value of the reported parameters was then evaluated. The statistical significance of the experimental data was provided using the confidence interval with a 95% confidence level to consider the trends of the results.

3. Results and Discussion

3.1. Test Fuels

The physicochemical properties of distilled WPO and CWPO obtained by fractional distillation were studied. Analysis of fuel properties is essential, as it can ensure the suitability of a fuel for use with a compression ignition engine. Standard grade diesel fuel with 7% biodiesel (B7) was used for our baseline study. This percentage of biodiesel present in the diesel fuel was prescribed by the Thailand Energy Business Department in January 2019.

3.1.1. Chemical Compositions

The distillation characteristics of hydrocarbon fuel have an important effect on their safety, combustion characteristics, exhaust emissions, and engine performance, especially in the case of waste fuels. The WPO from pyrolysis and the diesel fuel were tested by performing a simple batch fractional distillation on a laboratory scale. The distillation curves of the test fuels were tested according to the standard ASTM distillation apparatus. The distillation curves of the test fuels obtained under standardized conditions of temperature with a percentage of recovered volume and distillation curves of standard gasoline by Lobato et al. [30] are compared in Figure 2. The distillation curves of CWPO were closer to those of gasoline, with a distillation temperature between 76 and 252 °C. On the contrary, the distillation temperature of distilled WPO was much closer to that of diesel fuel as the recovered volume increased, with a distillation temperature between 188 and 324 °C. Lines in Figure 2 also confirm that WPO can be used as an alternative fuel in diesel engines. This is due to the distillation temperature that is desired to produce motor engines. This can be done with hydrocarbon fuel with boiling point ranges between 35 and 185 °C for gasoline, between 180 and 350 °C for diesel fuel, and between 180 and 350 °C for vacuum gas oil [31].

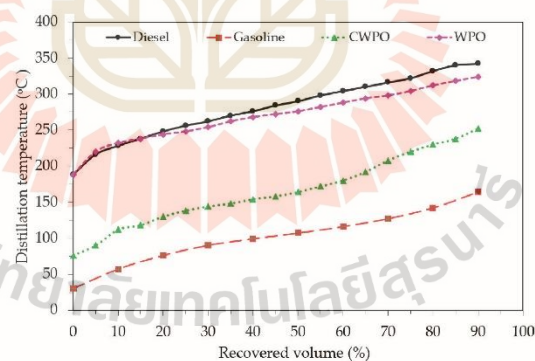


Figure 2. Distillation curves of test fuels obtained by fractional distillation.

GC-MS (compare with Section 2.2) for the test fuels was done to its chemical composition and is shown in Figure 3. The area percentage (%Area) is presented in Table 3. The test fuels consist of different amounts of hydrocarbons, which were separated by their carbon atomic weight from the minimum carbon atom (C4) to the maximum carbon atom

(>C₂₀) and can be categorized as C₄–C₁₁, C₁₂–C₂₀, or higher than C₂₀. The C₄–C₁₂ group represents light hydrocarbons (gasoline fuel), which generally contain hydrocarbons between C₅ and C₉. The C₁₂–C₂₀ group represents middle hydrocarbons (diesel fuel), which generally contain hydrocarbons between C₁₆ and C₂₀. Table 4 compares the test fuels and shows that there was a similar trend between WPO and the standard-grade diesel fuel. Both WPO and diesel fuel have carbon atoms in the C₁₂–C₂₀ group [13,28]. However, CWPO has a high percentage of carbon atoms in the C₄–C₁₁ group. Based on the results of the chemical composition tests, CWPO was estimated to have a similar chemical composition to fuel in the category of the gasoline group, and the WPO has a chemical composition similar to diesel fuel. The chemical compositions obtained by GC–MS are consistent with the distillation curves, and the distillation curves of WPO and diesel fuel are similar. As a result of this finding, WPO was used on a VCR diesel engine to evaluate combustion characteristics, exhaust emissions, and engine performance in comparison to diesel fuel. Different plastic sources used in the pyrolysis process to produce oil resulted in different chemical compositions of CWPO, which may have affected the result of the engine tests in different ways. This can be supported by the chemical compositions (by GC–MS analysis) of WPO derived from the mixtures of plastic waste used in our current study and in previous studies [28]. In addition, different GC–MS results of liquid oil from pyrolysis of different types of plastic waste were reported in [32]. Therefore, the distillation process may be needed to control the chemical compositions of fuels derived from plastic oil.

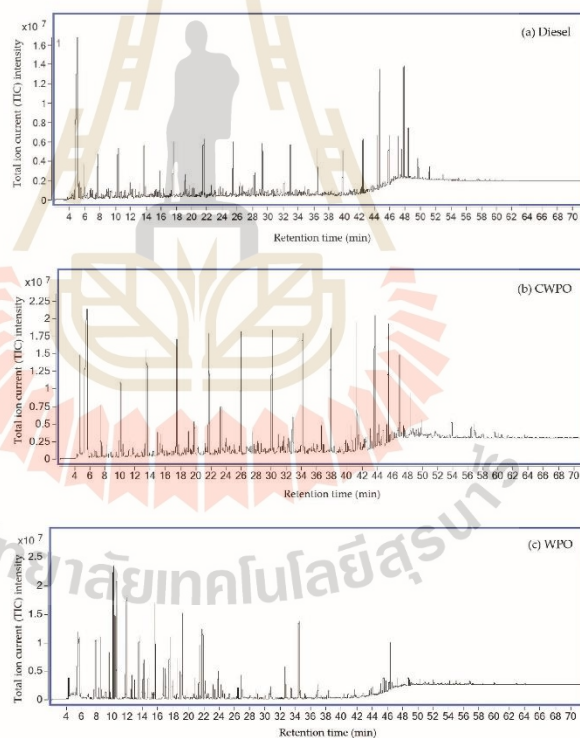


Figure 3. GC–MS chromatogram for (a) Diesel, (b) CWPO, and (c) WPO.

Table 3. Components of diesel and WPO by GC–MS analysis.

Carbon Content	Diesel	CWPO	WPO
C4	ND	2.77	ND
C5	ND	0.84	ND
C6	ND	3.76	ND
C7	ND	5.38	ND
C8	2.54	34.02	1.03
C9	5.61	19.94	0.73
C10	5.23	28.49	2.28
C11	4.18	0.53	5.71
C12	7.08	0.75	9.78
C13	6.39	ND	10.08
C14	8.09	ND	11.03
C15	5.66	0.67	10.48
C16	5.95	0.19	8.71
C17	15.80	0.26	7.90
C18	4.30	0.32	8.88
C19	16.11	0.36	7.86
C20	3.90	0.24	8.10
C21	3.19	0.36	3.63
C22	ND	0.27	2.29
C23	2.36	0.20	1.08
C24	ND	0.19	0.43
C25	1.19	0.20	ND
C26	1.13	0.18	ND
C27	0.62	ND	ND
C28	0.34	0.08	ND
C29	0.33	0.08	ND

ND—Not detected.

Table 4. Carbon content of the test fuel compared with diesel fuel by GC–MS analysis.

Carbon Content	Area Percentage		
	Diesel	CWPO	WPO
C4–C11	13.38	95.72	9.74
C12–C20	75.00	2.79	82.83
>C20	11.62	1.49	7.43

3.1.2. Chemical and Physical Properties of the Test Fuels

The physicochemical properties of CWPO, WPO, and diesel were tested according to the American Standard of Testing Methods (ASTM). The characteristic properties of the test fuels are shown in Table 5. The kinematic viscosity, flash point, calorific value, cetane index, and distillation temperature of CWPO and WPO were lower than they were in diesel fuel. In addition, the kinematic viscosity, surface tension, flash point, and distillation temperature of WPO were higher than those of CWPO. Thus, the characteristic properties of CWPO were more similar to those of gasoline. However, the kinematic viscosity, specific gravity, density, gross calorific value, and distillation temperature of WPO were closer to those of diesel fuel.

Table 5. Basic physicochemical properties of CWPO, WPO, and diesel fuel.

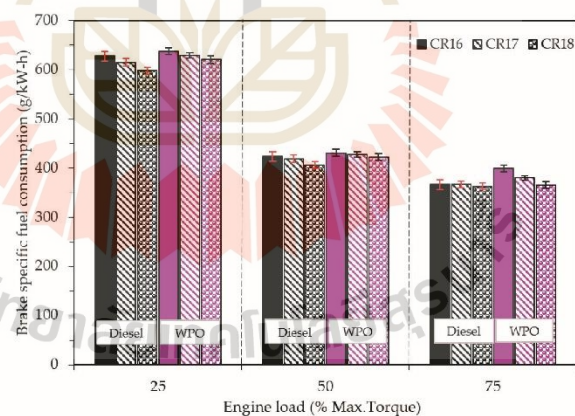
Properties	Test Method	Diesel	CWPO	WPO
Kinematic viscosity at 40 °C (cSt)	ASTM D445	3.44	1.66	3.11
Surface tension (mN/m)	ASTM D971	-	27.77	27.85
Specific gravity at 15.6 °C	ASTM D1298	0.835	0.900	0.824
Density at 15.6 °C (kg/m ³)	ASTM D1298	834	899	823
Flash point (°C)	ASTM D93	66	35	54
Gross calorific value (MJ/kg)	ASTM D240	45.56	37.72	45.24
Cetane index	ASTM D976	56.57	-	46.7
Distillation temperature (°C)	ASTM D86			
10% Recovered (°C)	ASTM D86	228	112	232
50% Recovered (°C)	ASTM D86	290	164	276
90% Recovered (°C)	ASTM D86	348	252	324

3.2. Engine Tests

We investigated the use of WPO in a VCR diesel engine. WPO was compared with diesel fuel. The present study focuses on engine performance, the characteristics of combustion, and engine exhaust emissions.

3.2.1. Engine Performance

The variation in brake-specific fuel consumption (BSFC) with engine loads at different compression ratios is shown in Figure 4. BSFC is the fuel flow rate needed by the engine to produce unit power. The BSFC decreases with any increase in engine operating loads or compression ratio. This may be due to the efficiency increase caused by the cylinder temperature increase, the reduced ignition delay period, or the total timing increases, which bring about the better combustion at higher engine loads and higher compression ratios [33,34]. Moreover, the BSFC of WPO was higher than that of diesel at all compression ratios due to its lower gross calorific value, as can be seen in Table 5, showing that more fuel is needed in the combustion process to obtain the same power output as diesel fuel [16,29,35].

**Figure 4.** Variation in brake specific fuel consumption (BSFC) with engine loads.

The variation of brake thermal efficiency (BTE) with engine loads at different compression ratios is shown in Figure 5. BTE indicates the conversion of the energy in the fuel to brake power output. Increasing the engine operating loads tends to result in more BTE.

The BTE of WPO was found to be lower than that of diesel fuel at all engine loads and all compression ratios. More energy is needed to break down the heavy hydrocarbon chains (C13 to C22) in WPO, which might explain the lower BTE of WPO [29]. BTE also increased with the increase in compression ratio for all test fuels, since the increase in compression ratio also increases the in-cylinder temperatures, which improves combustion and thermal efficiency [36,37]. This improvement in BTE could also be attributed to the reduction in ignition delay as the compression ratio increases [38].

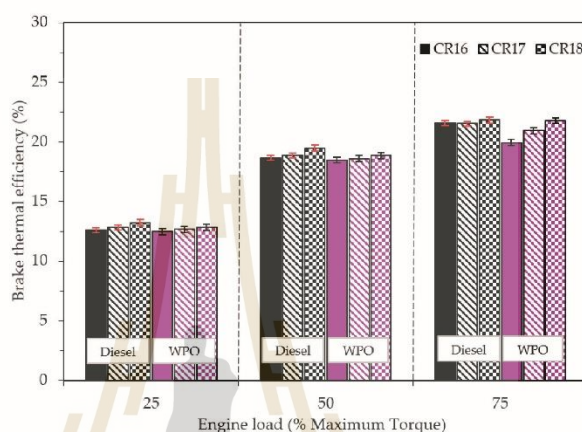


Figure 5. Variation of the brake thermal efficiency (BTE) with engine loads.

3.2.2. Combustion Characteristics

The variation in heat release rate and in-cylinder pressure is summarized as follows.

The variation in the rate of heat release (RoHR) and in-cylinder pressure (ICP) with the crank angle for WPO and diesel fuel at different engine loads is presented in Figure 6. ICP measurements play a key role in combustion analysis of the thermal energy produced during the fuel combustion process in each engine cycle. The RoHR was calculated using the in-cylinder pressure, which is measured according to the first law of thermodynamics and isentropic relations [39]. ICP and RoHR were found to increase as the engine load increased in all tests due to the higher charge of the mixture that was carried to the cylinder [40]. Compared with diesel fuel, a lower in-cylinder pressure was obtained with WPO at medium and high engine loads for CR18. In addition, the start of the combustion of WPO, compared to that of the diesel fuel, was more delayed. This may be due to the lower density of WPO, which can result in a lower bulk modulus. In addition, the lower cetane index of WPO could explain the delay time in combustion with WPO [18,41]. A higher engine load leads to a shorter ignition delay period and longer combustion periods. This is due to the increase in temperature inside the combustion chamber, which tends to improve the quality of the air–fuel mixture, leading to a decrease in the ignition delay [42].

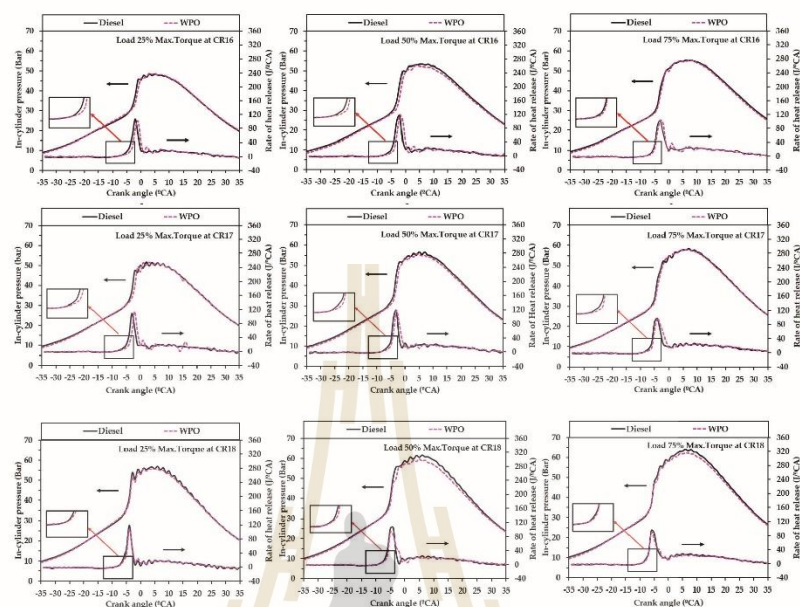


Figure 6. Variation in heat release rate and in-cylinder pressure with the crank angle.

The ICP and RoHR variation with the crank angle for WPO and diesel fuel at different compression ratios are illustrated in Figure 7. The maximum ICP was found at CR18. Maximum ICP mainly depends on the quality of the fuel oil, injection timing, ignition timing, and the atomization of fuel [26]. From Figure 7, it can be seen that, as compression ratio increases, ICP also increases. This increase in ICP may be attributed to the better mixing of air and fuel during the initial stage of combustion [42]. On the other hand, as the compression ratio increases, the peak of the RoHR decreases. In general, a higher accumulation of injected fuel over a longer delay period can result in a higher RoHR in the premixed combustion [43]. A higher compression ratio leads to an advance at the start of combustion because of the higher in-cylinder temperature and pressure, which results in better atomization with a higher fuel vaporization rate, leading to an earlier ignition or a shorter ignition delay [44].

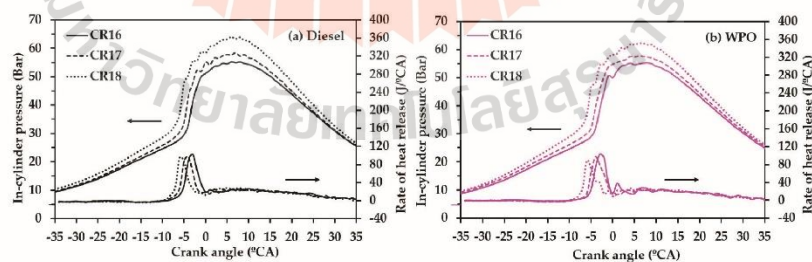


Figure 7. Variation in the rate of heat release (RoHR) and in-cylinder pressure (ICP) with the crank angle at different compression ratios at a 75% maximum engine torque: (a) diesel; (b) WPO.

3.2.3. Emission Characteristics

The engine-out emissions comprised carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), unburned hydrocarbon (HC), and smoke, which were produced by the combustion of distilled WPO and diesel fuel, were investigated under different engine operating loads and compression ratios. The specific emissions that relate to the mass flow rate of emissions per unit power output were calculated for carbon monoxide, nitrogen oxides, and unburned hydrocarbon.

The variation in specific nitrogen oxide (NO_x) emissions with engine loads at different compression ratios is shown in Figure 8. Nitrogen oxide (NO_x) is nitric oxide (NO) and nitrogen dioxide (NO₂) in the exhaust of internal combustion engines [45]. The experiment showed that the NO_x emissions decreased as the engine operating load increased for all test fuels. In general, specific quantities can decrease as power output increases. A lower oxygen availability can be taken into account for a reduction in NO_x when an engine is run at a high engine load. As compared with diesel fuel, the NO_x emissions of WPO were higher than those of diesel fuel. This was due to the longer ignition delay owing to the long chain carbon compounds in the WPO [46]. In addition, the increase in the compression ratio increased the NO_x emissions of WPO and diesel fuel. Increasing the cylinder pressure at a higher combustion temperature tends to be conducive to NO_x formation. Furthermore, the advance in the combustion state due to a higher compression ratio can increase the combustion duration, leading to improvements in the combustion process that result in higher NO_x emissions. Evidence of the advance at the start of combustion and the higher in-cylinder pressure as the compression ratio increases is shown in Figure 7.

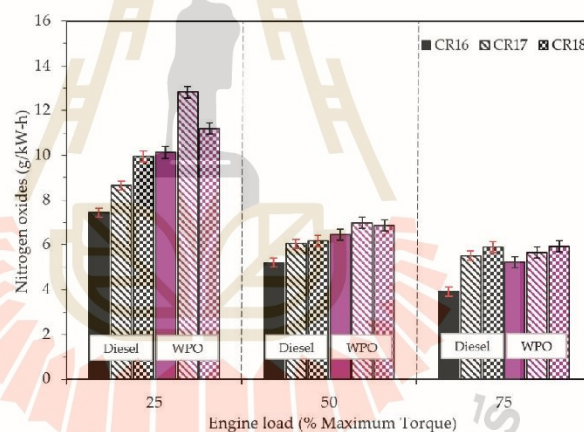


Figure 8. Variation in the nitrogen oxide (NO_x) emissions with engine loads.

The variation in carbon monoxide (CO) emissions with engine loads at different compression ratios is shown in Figure 9. CO emission is an intermediate product in the combustion of hydrocarbon fuels that contain no oxygen in their molecular structure [47]. It is formed mainly due to incomplete combustion, which is exacerbated by a lack of oxygen, the in-cylinder temperature, and the residence time of combustion [45]. We observed that increasing the engine operating loads resulted in a decrease in CO emissions for all test fuels. The reason behind these decreased CO emissions may be due to the increase in combustion efficiency as engine operating load increases [34,48]. Comparing the test fuels, higher CO emissions were found due to the combustion of WPO. The lower cetane index of WPO, which tended to delay the combustion state, resulting in a reduction in the residence time of combustion, can explain the higher CO emissions from the use of WPO. This can

be more effective in increasing CO emissions when the engine is run at a low engine load condition, where the ICT is not high enough to convert the injected fuel to vapor. In addition, a higher amount of long chain carbon compounds (C12–C20) in WPO tended to cause more difficulty in combustion, leading to an increase in CO emissions [48]. The CO emissions increased as the compression ratio changed from CR16 to CR17. However, the CO emissions were considerably reduced when the engine operated at CR18, especially at a low engine load. The CO emissions of WPO tended to decrease as the compression ratio increased and the engine was run at a maximum load. A higher combustion efficiency was found at a higher compression ratio due to a higher charged air temperature, leading to improved air–fuel mixtures and faster fuel vaporization, resulting in more complete combustion (Figure 5).

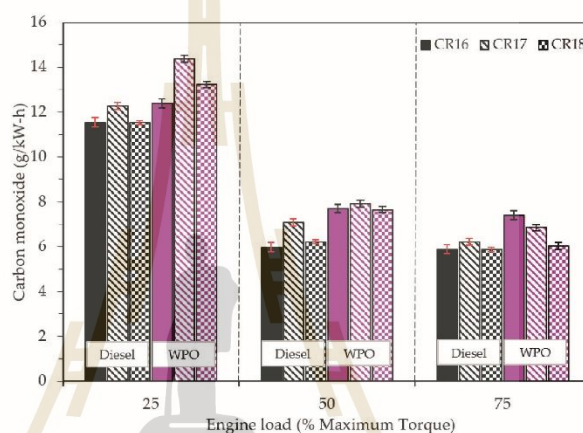


Figure 9. Variation in the carbon monoxide (CO) emissions with engine loads.

The variation in unburned hydrocarbon (HC) emissions with engine loads at different compression ratios is shown in Figure 10. In general, HC emissions indicate a very similar qualitative behavior to CO emissions. Both HC and CO emissions are useful for evaluating combustion efficiency. It was found that, as the engine operating load increased, the HC emission increased for all test fuels, at low and medium engine loads. However, at a high engine load, the HC emissions tended to decrease due to a more complete combustion. Comparing the test fuels, more HC emissions were obtained with the combustion of WPO compared to diesel fuel. The presence of 7% biodiesel present in standard diesel fuel enhanced the combustion process due to the oxygen content of the fatty acid methyl ester. Moreover, a lower cetane index and a higher amount of long chain carbon compounds (C12–C20) led to a longer ignition period and more difficulty in combustion, which can explain the higher CO emissions of WPO [18,27]. As compression ratio increased, in-cylinder pressure and temperature increased (Figure 7). This improved the air–fuel mixture, leading to a more complete combustion. In addition, a shorter delay at the start of combustion with an increasing compression ratio led to a longer combustion process, where lower CO emissions were found at higher compression ratios.

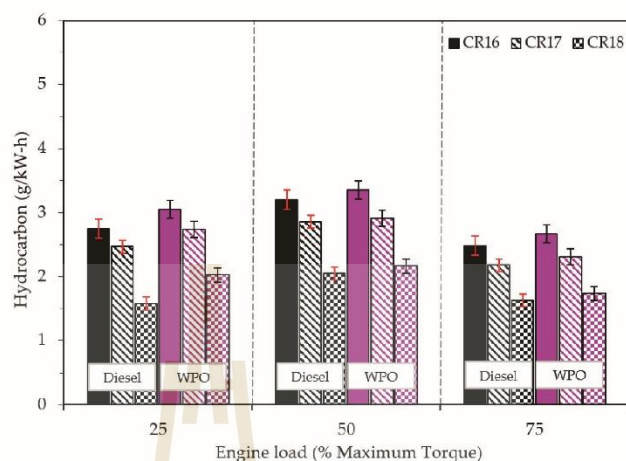


Figure 10. Variation in the unburned hydrocarbon (HC) emissions with engine loads.

The variation in smoke emissions with engine loads at different compression ratios is shown in Figure 11. Smoke emission is an indication of poor combustion caused by an over rich air-fuel mixture [45]. Smoke emissions increase with increases in engine operating loads when a rich mixture is burnt in the cylinder [33]. Compared with diesel fuel, a lower smoke emission was found with the combustion of WPO. It is noted that the diesel fuel used in this study is standard grade and contains 7% biodiesel. In general, the presence of oxygen in biodiesel is evidently associated with an improvement of smoke emissions. It was expected that the smoke emissions from standard diesel fuel would be lower than those of WPO. These lower smoke emissions could be explained by the lower viscosity and lower distillation temperature of WPO (Figure 2), which can improve fuel atomization, resulting in an enhancement in the combustion process. These two factors were more likely to contribute to the reduction in smoke emissions with WPO when the engine was run at low and medium loads, together with a high compression ratio. As the compression ratio increased, smoke emissions tended to decrease for all test fuels. The higher combustion temperature and shorter delay time of combustion could explain the lower smoke emissions at higher compression ratios. However, the combustion of WPO with an overly rich air-fuel ratio, when the engine was run at the highest load, tended to increase smoke emissions as the compression ratio increased. This implies that the effect of lower viscosity and distillation temperature cannot reduce emissions at the highest engine load and compression ratio.

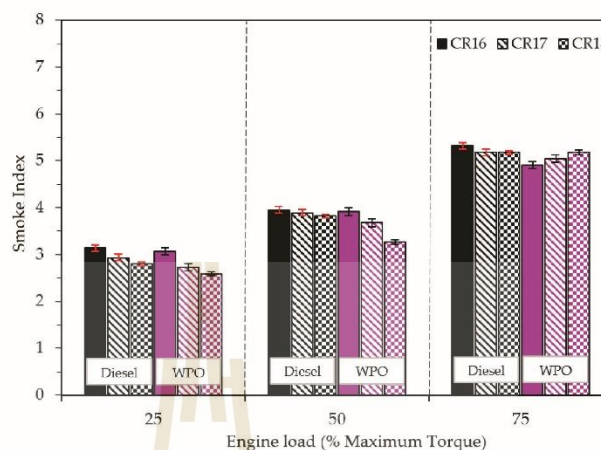


Figure 11. Variation in smoke emissions with engine loads.

4. Conclusions

The effects of compression ratio on combustion characteristics, exhaust emissions, and engine performance using WPO obtained from the pyrolysis process as an alternative fuel for compression ignition engines were studied. The results of GC–MS show that CWPO in this study contains the highest percentage of carbon atoms in the C4–C11 group and cannot be directly used as fuel in a compression ignition engine. WPO was prepared by distillation to improve the quality of the pyrolysis oil, and its properties were very close to those of diesel fuel. It is notable that different plastic sources used in the pyrolysis process can result in different chemical compositions of CWPO. Thus, the distillation process may be needed to control the chemical compositions of fuels derived from plastic waste.

The WPO was tested in the variable compression ignition diesel engine to evaluate combustion characteristics, exhaust emissions, and engine performance. Diesel fuel was also tested in the engine as a baseline fuel. The findings from the engine test can be summarized as follows.

- A lower cetane index and a higher percentage of long chain carbon compounds (C12–C20) resulted in higher NO_x, CO, and HC emissions caused by the combustion of WPO.
- The disadvantage of emissions by the use of WPO can be alleviated when the engine operates at a high engine operating load and a high compression ratio.

Author Contributions: Conceptualization, E.S. and J.S.; experimental tests and post-processing, K.W., N.K. and S.M.; writing—original draft paper preparation, K.W., C.K. and S.M.; writing—review and editing, K.W. and E.S.; supervision, J.S.; resources, P.L. and W.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: Financial support was provided by the Innovation Technology Assistance Program (ITAP: Research Fund Code 2564/0266) under the National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Thailand, and the Suranaree University of Technology (SUT) Assistant Research Fund.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors gratefully acknowledge K.PR Plastics Packaging Co., Ltd., and the Center of Excellence in BioMass, Suranaree University of Technology, Thailand, for the raw materials and equipment used for experiments.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Nomenclature

BSFC	brake-specific fuel consumption
BTE	brake thermal efficiency
CO	carbon monoxide
CWPO	crude waste plastic oil
CR	compression ratio
GC-MS	gas chromatography-mass spectrometry
HC	hydrocarbon
ICP	in-cylinder pressure
NO	nitric oxide
NO ₂	nitrogen dioxide
NO _x	nitrogen oxides
RoHR	rate of heat release
TDC	top dead center
VCR	variable compression ratio
WPO	distilled waste plastic oil

References

- Suthiwong, R. Renewable Energy policy. In *NDC Security Review*; Thailand National Defence College: Bangkok, Thailand, 2017; Volume 1, p. 12.
- Alternative Energy and Efficiency Information Center, Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of energy. *Thailand Alternative Energy Situation 2017*; Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of energy: Bangkok, Thailand, 2017; Volume 15, ISSN 1686-5170.
- Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy, Thailand. *Thailand Integrated Energy Blueprint 2015–2036*. 2015. Available online: <http://www.eppo.go/index.php/th/plan-policy/tieb> (accessed on 10 December 2020).
- Pollution Control Department. *Municipal Solid Waste Situation of Thailand Report 2018*; PCD—Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment: Bangkok, Thailand, 2018. Available online: <http://infofile.pcd.go.th/Waste/Wst2018.pdf> (accessed on 9 November 2020).
- Pollution Control Department. *Draft Integrated Plastic Waste Management Plan (2017–2021)*. 2017. Available online: <http://infofile.pcd.go.th/law/DraftWastePlan60-64.pdf?CFID=1835558&CFTOKEN=98563117> (accessed on 23 November 2020).
- Hopewell, J.; Dvorak, R.; Kosior, E. Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **2009**, *364*, 2115–2126. [CrossRef]
- Sharuddin, S.D.A.; Abrnisa, F.; Daud, W.M.A.W.; Aroua, M.K. A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Convers. Manag.* **2016**, *115*, 308–326. [CrossRef]
- Al-Salem, S.; Antelava, A.; Constantinou, A.; Manos, G.; Dutta, A. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). *J. Environ. Manag.* **2017**, *197*, 177–198. [CrossRef]
- Traivivatana, S.; Wangjiraniran, W. Thailand Integrated Energy Blueprint (TIEB): One Step towards Sustainable Energy Sector. *Energy Procedia* **2019**, *157*, 492–497. [CrossRef]
- Singh, R.K.; Ruj, B.; Sadhukhan, A.K.; Gupta, P.; Tigga, V.P. Waste plastic to pyrolytic oil and its utilization in CI engine: Performance analysis and combustion characteristics. *Fuel* **2020**, *262*, 116539. [CrossRef]
- Phetyim, N.; Pivsa-Art, S. Prototype Co-Pyrolysis of Used Lubricant Oil and Mixed Plastic Waste to Produce a Diesel-Like Fuel. *Energies* **2018**, *11*, 2973. [CrossRef]
- Khairil; Riayatsyah, T.M.I.; Bahri, S.; Sofyan, S.E.; Jalaluddin, J.; Kusumo, F.; Silitonga, A.S.; Padli, Y.; Jihad, M.; Shamsuddin, A.H. Experimental Study on the Performance of an SI Engine Fueled by Waste Plastic Pyrolysis Oil–Gasoline Blends. *Energies* **2020**, *13*, 4196. [CrossRef]
- Pratama, N.N.; Saptoadi, H. Characteristics of Waste Plastics Pyrolytic Oil and Its Applications as Alternative Fuel on Four Cylinder Diesel Engines. *Int. J. Renew. Energy Dev.* **2014**, *3*, 13–20.
- Kalargaris, I.; Tian, G.; Gu, S. The utilisation of oils produced from plastic waste at different pyrolysis temperatures in a DI diesel engine. *Energy* **2017**, *131*, 179–185. [CrossRef]
- Venkatesan, H.; Sivamani, S.; Bhutoria, K.; Vora, H.H. Experimental study on combustion and performance characteristics in a DI CI engine fuelled with blends of waste plastic oil. *Alex. Eng. J.* **2018**, *57*, 2257–2263. [CrossRef]

16. Devaraj, J.; Robinson, Y.; Ganapathi, P. Experimental investigation of performance, emission and combustion characteristics of waste plastic pyrolysis oil blended with diethyl ether used as fuel for diesel engine. *Energy* **2015**, *85*, 304–309. [CrossRef]
17. Kalargaris, I.; Tian, G.; Gu, S. Experimental evaluation of a diesel engine fuelled by pyrolysis oils produced from low-density polyethylene and ethylene-vinyl acetate plastics. *Fuel Process. Technol.* **2017**, *161*, 125–131. [CrossRef]
18. Sukjit, E.; Liplap, P.; Maithomklang, S.; Arjarn, W. Experimental Investigation on a DI Diesel Engine Using Waste Plastic Oil Blended with Oxygenated Fuels. *SAE Tech. Pap.* **2017**, *1*. [CrossRef]
19. Mani, M.; Nagarajan, G.; Sampath, S. Characterisation and effect of using waste plastic oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. *Energy* **2011**, *36*, 212–219. [CrossRef]
20. Mangesh, V.L.; Padmanabhan, S.; Tamizhdurai, P.; Narayanan, S.; Ramesh, A. Combustion and emission analysis of hydrogenated waste polypropylene pyrolysis oil blended with diesel. *J. Hazard. Mater.* **2020**, *386*, 121453. [CrossRef]
21. Das, A.K.; Hansdah, D.; Mohapatra, A.K.; Panda, A.K. Energy, Exergy and Emission Analysis on a DI Single Cylinder Diesel engine using pyrolytic waste plastic oil diesel blend. *J. Energy Inst.* **2020**, *93*, 1624–1633. [CrossRef]
22. Mangesh, V.L.; Padmanabhan, S.; Tamizhdurai, P.; Ramesh, A. Experimental investigation to identify the type of waste plastic pyrolysis oil suitable for conversion to diesel engine fuel. *J. Clean. Prod.* **2020**, *246*, 119066. [CrossRef]
23. Kaimal, V.K.; Vijayabalan, P. A detailed study of combustion characteristics of a DI diesel engine using waste plastic oil and its blends. *Energy Convers. Manag.* **2015**, *105*, 951–956. [CrossRef]
24. Rinaldini, C.A.; Mattarelli, E.; Savioli, T.; Cantore, G.; Garbero, M.; Bologna, A. Performance, emission and combustion characteristics of a IDI engine running on waste plastic oil. *Fuel* **2016**, *183*, 292–303. [CrossRef]
25. Kumar, P.S.; Sankaranarayanan, G. Investigation on environmental factors of waste plastics into oil and its emulsion to control the emission in DI diesel engine. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **2016**, *134*, 440–444. [CrossRef]
26. Kalargaris, I.; Tian, G.; Gu, S. Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil. *Fuel Process. Technol.* **2017**, *157*, 108–115. [CrossRef]
27. Kaimal, V.K.; Vijayabalan, P. A detailed investigation of the combustion characteristics of a DI diesel engine fuelled with plastic oil and rice bran methyl ester. *J. Energy Inst.* **2017**, *90*, 324–330. [CrossRef]
28. Kaewbuddee, C.; Sukjit, E.; Srisertpol, J.; Maithomklang, S.; Wathakit, K.; Klinkaew, N.; Liplap, P.; Arjarn, W. Evaluation of waste plastic oil-biodiesel blends as alternative fuels for diesel engines. *Energies* **2020**, *13*, 2823. [CrossRef]
29. Damodharan, D.; Sathiyagnanam, A.P.; Rana, D.; Kumar, B.R.; Saravanan, S. Extraction and characterization of waste plastic oil (WPO) with the effect of n-butanol addition on the performance and emissions of a DI diesel engine fueled with WPO/diesel blends. *Energy Convers. Manag.* **2017**, *131*, 117–126. [CrossRef]
30. Lobato, J.; Rodríguez, J.F.; Jiménez, C.; Llanos, J.; Nieto-Márquez, A.; Inarejos, A.M. Consequence analysis of an explosion by simple models: Texas refinery gasoline explosion case. *Afinidad* **2009**, *66*, 372–379.
31. Sharma, B.K.; Moser, B.R.; Vermillion, K.E.; Doll, K.M.; Rajagopalan, N. Production, characterization and fuel properties of alternative diesel fuel from pyrolysis of waste plastic grocery bags. *Fuel Process. Technol.* **2014**, *122*, 79–90. [CrossRef]
32. Miandad, R.; Barakat, M.A.; Aburizaiza, A.S.; Rehan, M.; Ismail, I.M.L.; Nizami, A.S. Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* **2017**, *119*, 239–252. [CrossRef]
33. Ananthakumar, S.; Jayabal, S.; Thirumal, P. Investigation on performance, emission and combustion characteristics of variable compression engine fuelled with diesel, waste plastics oil blends. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* **2016**, *39*, 19–28. [CrossRef]
34. Verma, A.; Raghuvansi, A.; Quraishi, M.A.; Tirkey, J.V.; Verma, C. Engine Fuel Production from Waste Plastic Pyrolysis (WPO) and Performance Evaluation in a CI engine with Diesel Blend. *J. Mater. Environ. Sci.* **2018**, *9*, 1712–1721.
35. Bridjesh, P.; Geetha, N.K. Effect of Diethyl Carbonate as Additive to Waste Plastic Oil on Performance and Emission of a Diesel Engine. *Orient. J. Chem.* **2020**, *36*, 189–194. [CrossRef]
36. Rao, B.G.; Bharadwaz, Y.D.; Virajitha, C.; Rao, V.D. Effect of injection parameters on the performance and emission characteristics of a variable compression ratio diesel engine with plastic oil blends—An experimental study. *Energy Environ.* **2018**, *29*, 492–510.
37. Syamsiro, M.; Saptoadi, H.; Kismurtono, M.; Mufrodi, Z.; Yoshikawa, K. Utilization of waste polyethylene pyrolysis oil as partial substitute for diesel fuel in a DI diesel engine. *Int. J. Smart Grid Clean Energy* **2019**, *8*, 38–47. [CrossRef]
38. Hirkude, J.; Padalkar, A.S. Experimental investigation of the effect of compression ratio on performance and emissions of CI engine operated with waste fried oil methyl ester blend. *Fuel Process. Technol.* **2014**, *128*, 367–375. [CrossRef]
39. Heywood, J.B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1988; p. 508.
40. Uyumaz, A.; Aydoğan, B.; Solmaz, H.; Yılmaz, E.; Hopa, D.Y.; Bahtli, T.A.; Solmaz, Ö.; Aksoy, F. Production of waste tyre oil and experimental investigation on combustion, engine performance and exhaust emissions. *J. Energy Inst.* **2019**, *92*, 1406–1418. [CrossRef]
41. Kobori, S.; Kamimoto, T.; Aradi, A.A. A study of ignition delay of diesel fuel sprays. *Int. J. Engine Res.* **2000**, *1*, 29–39. [CrossRef]
42. Vasudeva, M.; Sharma, S.; Mohapatra, S.K.; Kundu, K. Performance and exhaust emission characteristics of variable compression ratio diesel engine fuelled with esters of crude rice bran oil. *SpringerPlus* **2016**, *5*, 293. [CrossRef]
43. Ramalingam, S.; Rajendran, S. Assessment of performance, combustion, and emission behavior of novel annona biodiesel-operated diesel engine. In *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment*; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2019; pp. 391–405.
44. Saravanan, S.; Nagarajan, G.; Sampath, S. A Correlation for the Ignition Delay of a CI Engine Fuelled with Diesel and Biodiesel. *Int. J. Green Energy* **2014**, *11*, 542–557. [CrossRef]

45. Majewski, W.A.; Khair, M.K. *Diesel Emissions and Their Control*; Society of Automotive Engineers: Wallendale, PA, USA, 2006; pp. 109–110.
46. Panda, A.K.; Murugan, S.; Singh, R.K. Performance and emission characteristics of diesel fuel produced from waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste polypropylene. *Energy Sources Part A Recovery Util. Environ. Eff.* **2016**, *38*, 568–576. [[CrossRef](#)]
47. Sukjit, E.; Herreros, J.M.; Dearn, K.D.; García-Contreras, R.; Tsolakis, A. The effect of the addition of individual methyl esters on the combustion and emissions of ethanol and butanol -diesel blends. *Energy* **2012**, *42*, 364–374. [[CrossRef](#)]
48. Ashok, B.; Nanthagopal, K. Eco friendly biofuels for CI engine applications. In *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment*; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2019; pp. 407–440.



Fuel Properties, Performance and Emission of Alternative Fuel from Pyrolysis of Waste Plastics

W Khatha, S Ekarong, M Somkiat and S Jiraphon

Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000 Thailand

vkata@sut.ac.th; ekarong@sut.ac.th; somkiat_mai@outlook.co.th; jiraphon@sut.ac.th

Abstract. Increase in energy demand, stringent emission norms and depletion of oil resources have led the researchers to find alternative fuels for internal combustion engines. Pyrolysis oil extracted from waste plastics, by pyrolysis, as a fuel for internal combustion engines has been demonstrated to be one of the best available waste management methods. This research aimed to study and compare fuel properties, engine performance and emission of alternative fuel from pyrolysis of waste plastics, which focused on physical and chemical properties of waste plastic crude oil (WPCO) and waste plastic oil (WPO) obtained by fractional distillation process. The result shows that the physical and chemical properties of WPCO are quite different from commercial diesel while the fuel properties of WPO were found to be similar to that of diesel. The experimental results showed that the use of WPO led to an increase in brake specific fuel consumption but the slightly reduction in the brake thermal efficiency was founded with respect to diesel fuel. The combustion of WPO tended to increase NOX while a reduction in smoke was obtained compared with the pure diesel fuel.

1. Introduction

Plastic waste is a big issue in Thailand, because the amount of recycled plastic remains low due to the high investment requirements for recycling and the high operating costs of recycling facilities [1]. Plastic waste is an ideal source of energy due to its high heating value and abundance. Therefore, in recent years, various plastic to fuel (PTF) or waste to fuel (WTE) technologies such as gasification, pyrolysis, refuse derived fuel (RDF), and plasma arc gasification have gained significant attention for the management of plastic waste. The most attractive technique for chemical feedstock recycling is pyrolysis. Pyrolysis is a decomposition process of long-chain hydrocarbon (polymer) molecules into smaller sizes (monomer) with the use of high heat (450-800 °C), in a shorter duration and a condition with the absence of oxygen, generating products in form of carbon, as residues and volatile hydrocarbons which can be condensate as fuel and non-condensable as gaseous fuel. In addition, researchers showed that the properties of the liquid fuel from waste plastics are practically like diesel fuel and the engine could be operated using neat pyrolysis oil from waste plastics. Experimental engine results from previous studies have been reported that pyrolysis oil exhibited higher brake thermal efficiency and higher regulated exhaust emissions such as nitrogen oxides, hydrocarbon, and carbon monoxide with respect to diesel combustion [2]. In this study, it is aimed to study the characterization and fuel properties of alternative fuel from pyrolysis of waste plastics, which focused on physical and chemical properties of the fuel and compare engine performance and emissions.



2. Methodology

2.1. Materials

The raw materials utilized in this study were derived from waste plastics such as plastic bag waste collected from scavengers around Suranaree Subdistrict, Nakhon Ratchasima, Thailand. The compositions of the plastics were categorized as polyethylene (PE), and polystyrene (PS) of which approximately 70% were organic contaminated contents.

2.2. Conversion process

Pyrolysis process is the chemical decomposition of organic substances by heating in the absence of oxygen. The waste plastics is gently cracked by adding catalyst and the gases are condensed in a series of condensers to give a low sulphur content distillate. All this happens continuously to convert the waste plastics into fuel. All the gases from this process are treated before it is let out in atmosphere. The flue gas is treated through scrubbers and water/chemical treatment for neutralization. The non-condensable gas goes through water before it is used for burning. Since the plastics waste is processed about 300-350 °C and there is no oxygen in the processing reactor, most of the toxics are burnt.

2.3. Experimental setup

The engine used for this study is a four-stroke, single-cylinder, water-cooled, direct injection compression ignition engine. An eddy current dynamometer with a load cell was used to load the engine. The tests were performed at rated speed of 1500 rpm and three different engine loads (25%, 50% and 75% of maximum engine torque). Commercial diesel fuel was used as a baseline comparison with WPO for the engine run tests. An air box was used to measure the air flow rate to the engine and volumetric fuel flow rate was measured using a burette and stopwatch. The TESTO 350 analyzer was employed to measure nitrogen oxide (NOX) and TESTO 308 was used to evaluate smoke index. At every load, readings were taken after the engine reached steady state. For every refueling, engine was kept running for 10 minutes such that it consumes entire fuel entangled in fuel pipe lines. Repeatability of readings was guaranteed by duplicating the investigations thrice. The technical specifications of the engine are given in Table 1.

Table 1. Specifications of diesel engine.

Engine	Specifications
Model	Kirloskar TV1
Engine type	1 cylinder, 4 strokes, Water cooled, Direct injection
Bore x Stroke	87.5 x 110 mm
Swept volume	661 cc
Rate output	3.5 kW at 1500 rpm
Compression ratio	12:1-18:1
Dynamometer	Eddy current

3. Results

3.1. Chemical characterization

The pyrolysis oil or waste plastic crude oil (WPCO) and waste plastic oil (WPO) obtained by the fractional distillation used in this study is extracted from waste plastic. Gas chromatography mass spectrometry (GC-MS) was used to analyze the chemical compounds present in the WPCO compared with WPO. The GC-MS results of WPCO and WPO were presented in Figure 1. The major chemical compounds present in WPCO and WPO and their percentage area were listed in Table 2.

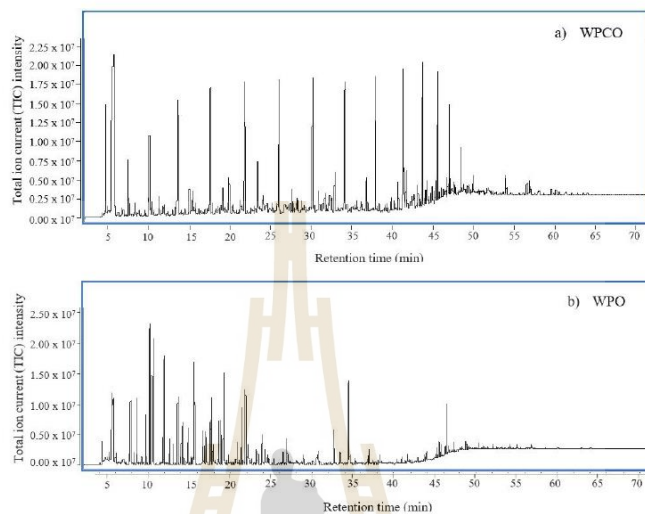


Figure 1. Total ion current chromatogram for WPCO and WPO.

Table 2. Principle constituents (area %) identified by GC-MS

Carbon content	WPCO	WPO
C4	2.77	Not detected
C5	0.84	Not detected
C6	3.76	Not detected
C7	5.38	Not detected
C8	34.02	1.03
C9	19.94	0.73
C10	28.49	2.28
C11	0.53	5.71
C12	0.75	9.78
C13	Not detected	10.08
C14	Not detected	11.03
C15	0.67	10.48
C16	0.19	8.71
C17	0.26	7.90
C18	0.32	8.88
C19	0.36	7.86
C20	0.24	8.10
C21	0.36	3.63
C22	0.27	2.29
C23	0.20	1.08
C24	0.19	0.43
C25	0.20	Not detected
C26	0.18	Not detected
C27	Not detected	Not detected
C28	0.08	Not detected

The WPCO and WPO contain many hydrocarbon compounds both light and heavy fractions and from the lowest carbon atom number (C4-C5) to the highest one (> C20). It could be classified into 3 groups to easily identify. C4-C11 group represents light or gasoline fraction due to the tendency that the largest percentage of carbon atom number in the gasoline is commonly around C7, C8, and C9. C11-C20 group could represent medium and heavy fractions, including diesel fraction. The diesel fuel fraction mostly contains high percentage of the atom number C16-C20 [3]. The result of this study showed that waste plastics composition strongly influences propensity formation of certain hydrocarbons group. The WPCO of this study leads to form mostly C12-C20 fraction. While the fractional distillation led to the trend of similarity between WPO and diesel fuel. It can be seen that chemical compounds were found to be closer to diesel fuel.

3.2. Physical and chemical properties

The basic physical and chemical properties of WPCO, WPO and commercial diesel fuel as reference fuels were measured according to ASTM standards and were shown in Table 3. The experimental results showed that WPCO possessed lower kinematic viscosity, flash point, distillation temperature, and gross calorific value while density and specific gravity were higher with respect to those of WPO. However, the fuel characteristics of WPO such as density, viscosity, and gross calorific value have similar properties with those of fossil fuels. Therefore, WPCO can't be used as alternative fuel for compression ignition engines due to the properties of WPCO were found to be closer to gasoline.

Table 3. Physical and chemical properties of test fuels.

Fuel property	Method (ASTM)	Diesel	CWPO	WPO
Density at 15.6 °C (kg/m ³)	D1298	834	899	823
Specific gravity at 15.6 °C	D4052	0.835	0.900	0.824
Kinematic viscosity at 40 °C (cSt)	D445	3.44	1.66	3.11
Flash point (°C)	D93	66	35	54
Distillation 90% vol. (°C)	D86	348	164	276
Calculate cetane index	D976	56.57	-	46.7
Gross calorific value (MJ/kg)	D240	45.56	37.72	45.24

3.3. Engine performance

In present section, performance parameters such as brake specific fuel consumption (BSFC) and brake thermal efficiency (BTE) of the engine according to operation load for all the test fuels are presented and analyzed. The results showed in the plots correspond to an average of three different measurements. The variations of BSFC and BTE as a function of engine load for test fuels are shown in Figure 2. It can be seen that the BSFC decreased as the engine operating loads increased for all fuels. The lower BSFC implies that less amount of fuel is needed to generate unit power output. WPO presented higher BSFC than commercial diesel fuel due to its lower calorific value that required more quantity of oil to be burnt to produce the same power output similar to commercial diesel fuel (see Table 3) [4]. BTE indicates the ability of combustion system to accept the experimental fuel and provides a comparable means of assessing how efficiently the fuel was converted into mechanical output [5]. WPO showed a drop-in efficiency, since more energy is spent to breakdown the heavy hydrocarbon chains (C13 to C22) [4]. Besides, higher BSFC was obtained from the combustion of waste plastic oil, resulted in the lower BTE with respect to commercial diesel fuel for all engine loads tested.

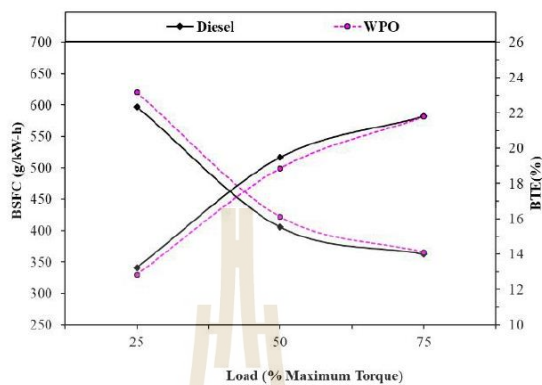


Figure 2. Variation of BSFC and BTE with load

3.4. Emissions

The emissions emitted from the engine, measured at tail pipe corresponding to variation of load are measured. The results showed in the plots correspond to an average of three different measurements. The variation of the NOX emissions and smoke opacity with engine loads and test fuels was shown in Figure 3.

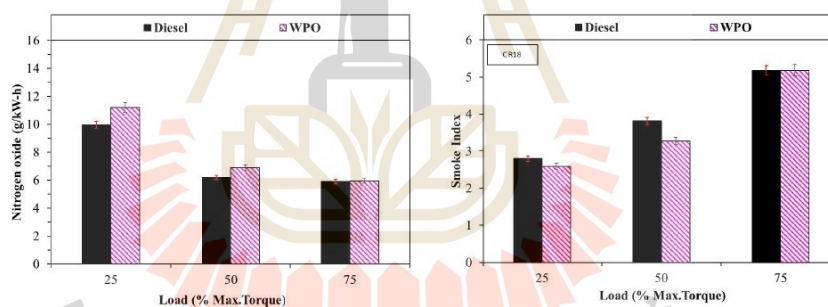


Figure 3. Variation of nitrogen oxide and smoke index with load.

Oxides of nitrogen present in emissions is the combination of nitric oxide (NO) and nitrogen dioxide (NO₂). In diesel engines the mechanism that produces the majority of NOX is the thermal mechanism due to availability of oxygen, reaction time and combustion temperature [6,7]. It can be seen that the NOX emissions for WPO operation is higher than that for commercial diesel fuel. The reason that NOX emissions is the higher nitrogen content in the fuel that promotes the NOX formation by fuel mechanism. The variation of smoke opacity is attributed to the high overall equivalence ratio and the number of fuel rich regions in the combustion chamber when the engine is operated at high load, resulting in the high critical conditions for soot formation which relates to the increase in smoke emissions [8]. The lower smoke emissions were found for the combustion of WPO compared to diesel fuel. The reason for reduced smoke for WPO can be early evaporation of fuel leading to premixed or homogeneous charge inside the cylinder [6].

4. Conclusion

Pyrolysis oil or waste plastic crude oil (WPCO) and waste plastic oil through the fractional distillation (WPO) were extracted from waste plastics by pyrolysis process and its chemical composition was characterized by using GC-MS. Later, this study sets out to investigate the effects of WPO in a single cylinder on engine performance of a DI diesel engine was then compared with commercial diesel fuel. The following conclusions were drawn from the investigation.

- The properties of WPCO were found to be closer to gasoline. GC-MS characterization revealed that WPCO consists of 22 chemical compounds with light hydrocarbon chains.
- The properties of WPO were found to be closer to commercial diesel fuel. GC-MS characterization revealed that WPO consists of 17 chemical compounds with heavy hydrocarbon chains.
- The physical and chemical properties of WPCO and WPO were analyzed and compared with commercial diesel fuel and found that it has properties difference to that of diesel fuel for WPCO. While fuel properties of WPO was found to be closer to commercial diesel fuel.
- The use of WPO tended to increase brake specific fuel consumption, resulting in the decrease in brake thermal efficiency when compared with commercial diesel fuel.
- The combustion of waste plastic oil tended to increase NOX while a reduction in smoke was obtained with respect to diesel fuel combustion.
- WPO has been shown a feasible alternative for used as fuel in compression ignition engines.

5. References

- [1] Janyalertadun, A., Santaweesuk, C., & Sanongraj, S. (2017). Fuel production, performance, and emission of a CI engine using waste plastics oil. *World Journal of Engineering* **14** 114-120.
- [2] Thahir, R., Altway, A., Juliastuti, S. R., & Susianto. (2019). Production of liquid fuel from plastic waste using integrated pyrolysis method with refinery distillation bubble cap plate column. *Energy Reports* **5** 70-77.
- [3] Nugroho Pratama, N., & Saptoadi, H. (2014). Characteristics of Waste Plastics Pyrolytic Oil and Its Applications as Alternative Fuel on Four Cylinder Diesel Engines. *International Journal of Renewable Energy Development (IJRED)* **3**(1) 13-20.
- [4] Damodharan, D., Sathiyagnanam, A. P., Rana, D., Rajesh Kumar, B., & Saravanan, S. (2017). Extraction and characterization of waste plastic oil (WPO) with the effect of n-butanol addition on the performance and emissions of a DI diesel engine fueled with WPO/diesel blends. *Energy Conversion and Management* **131** 117-126.
- [5] Devaraj, J., Robinson, Y., & Ganapathi, P. (2015). Experimental investigation of performance, emission and combustion characteristics of waste plastic pyrolysis oil blended with diethyl ether used as fuel for diesel engine. *Energy* **85** 304-309.
- [6] Geo, V. E., Sonthalia, A., Aloui, F., & Femilda Josephin, J. S. (2018). Study of engine performance, emission and combustion characteristics fueled with diesel-like fuel produced from waste engine oil and waste plastics. *Frontiers of Environmental Science & Engineering* **12**(4) 8.
- [7] Sukjit, E., Liplap, P., Maithomklang, S., and Arjham, W. (2017) "Experimental Investigation on a DI Diesel Engine Using Waste Plastic Oil Blended with Oxygenated Fuels" *SAE Technical Paper* **2017-24-0116**.
- [8] Sukjit, E., Herreros, J. M., Piaszyk, J., Dearn, K. D., & Tsolakis, A. (2013). Finding Synergies in Fuels Properties for the Design of Renewable Fuels-Hydroxylated Biodiesel Effects on Butanol-Diesel Blends. *Environmental Science & Technology* **47**(7) 3535-42.

Effect of injection timing on performance and emissions characteristics of a single cylinder diesel engine fuelled with waste plastic oil

Khatha Wathakit, Ekarong Sukjit and Jiraphon Srisertpol¹

Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima
30000 Thailand

¹ E-mail: jiraphon@sut.ac.th

Abstract. This research was aimed to study the effect of injection timing on performance and emissions characteristics of a single cylinder diesel engine using waste plastic oil as an alternative fuel. The injection timing was set up to 15°, 20° (factory default) and 25° CA BTDC position by directly adjusting the camshaft profile angle. The engine was loaded at 50%, 75% and 100% of full load with constant engine speeds of 3,600 rpm. The experimental results showed that retarding the fuel injection led to the improvement of brake specific fuel consumption and NOx emissions when the engine was operated with waste plastic oil at all engine operating loads tested. The slightly reduction in the maximum brake power was obtained by the use of waste plastic oil with respect to diesel fuel. To meet benefits of using waste plastic oil as a feasible alternative for next generation fuels in compression ignition engines, the retard of fuel injection was recommended to adjust the injection timing of the engine operated with waste plastic oil.

1. Introduction

Waste plastic can be considered as a very serious environment issues because of their disposal problems all over the world. According to the Ministry of Natural Resources and Environment's record, Thailand plastic waste of 2.7 million tons was generated in 2015 (approximately 7,000 tons per day) and only 30 % of them was recycled, while the rest of them was dumped and burned. Nowadays, by utilizing pyrolysis techniques, waste plastics can be successfully converted into fuel oil as an alternative energy source for internal combustion engine. Most of research works have been done to investigate the performance, emission and combustion characteristics of the engine operated with waste plastic oil [1, 2]. Almost all the literature it was reported that the crude waste plastic pyrolysis oil can be used directly in the engine without any engine modification [3, 4]. However, the main pollutant emissions especially NOx are higher compared to diesel fuel due to their properties and combustion characteristics.

In order to control NOx, the fuel injection timing was retarded from the original injection timing. Many researches of injection timing effects on emission characteristics have been studied with diesel fuels [5-7]. However only few publications have been found for the waste plastic oil. Consequently, the effect of injection timing on the engine performance and emission characteristics of a single cylinder diesel engine fuelled with waste plastic oil are investigated in this study.

2. Methodology

Waste plastic oil produced from pyrolysis process was carried out in this experiment. table 1 shows the basic physical and chemical properties of waste plastic oil and bio diesel compared to commercial diesel fuel. Waste plastic oil possesses slightly lower calorific value while its cetane index and flash point are higher with respect to those of diesel fuel.

Table 1. Basic physical and chemical properties of waste plastic oil, bio diesel and diesel fuel..

Properties	Waste Plastic Oil (WPO)	Bio Diesel B40	Diesel
Color	Black	Clear Orange	Yellow
Specific gravity at 15.6 °C	0.800	0.859	0.828
Gross calorific value [MJ/kg]	44.98	40.1	45.39
Kinematic viscosity [cSt] at 40 °C	3.065	3.85	3.439
Cetane index	68.98	-	60.18
Flash point [°C]	36	120	78

Figure 1 below shows the schematic diagram of the experimental setup. A 15-hp eddy current dynamometer was coupled to the engine to simulate the operating load. The research engine is a four stroke single cylinder air-cooled diesel engine and the specifications are given in table 2. The fuel flow rate was measured on mass basis using an electronic weighing scale and a stopwatch. Thermocouples were used to measure the exhaust gas temperature and oil temperature. A TDC encoder was used to detect the engine crank angle.

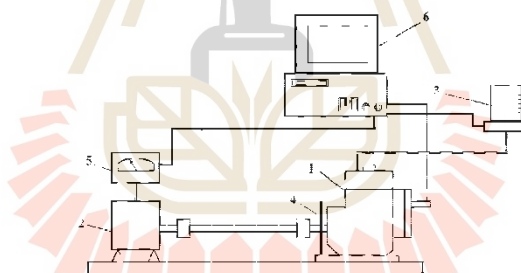


Figure 1. A schematic diagram of the experimental setup.

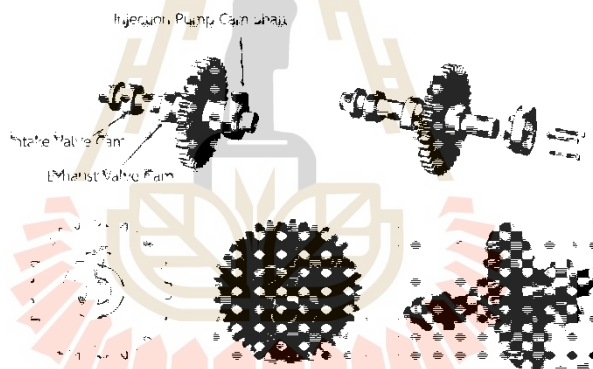
1: Dynamometer 2: Tested Engine 3: Weighing Scale 4: Encoder Wheel 5: Load cell 6: Control Unit

An exhaust gas analyser was used to measure NO_x emissions in the exhaust. The engine was loaded at 50 %, 75 % and 100 % of full load with constant engine speeds of 3,600 rpm. All the tests were conducted by starting the engine with diesel fuel and then switched over to run with waste plastic oil. At the end of the test, the engine was run for some time with diesel to flush out the waste plastic oil from the fuel line and the injection system.

Table 2. Detailed specifications of the tested engine.

Engine Model	Kawama 500D
Type	four stroke single cylinder air-cooled diesel engine
Bore x Stroke [mm]	68 x 54
Displacement [cc]	196
Compression ratio	22 : 1
Rated output power [kW]@3400 rpm	2.42
Torque [N.m]@3400 rpm	6.48
Lubrication oil	10W30

The camshaft profile of fuel injection pump was modified to obtain the early fuel injection of 25° CA bTDC and the late fuel injection of 15° CA bTDC compared to the standard injection timing of the engine (20° CA bTDC) so that the influence of injection timing on engine performance and emissions was studied. Figure 2 shows the detail of the modified camshaft. The camshaft profile can be switched between ± 10 degree from the normal position and then the injection timing can be adjusted for advanced or retarded injection timing from the default factory position.

**Figure 2.** Modification of fuel injection pump camshaft.

3. Results

A series of performance and emission tests were carried out on the research engine using diesel fuel and waste plastic oil at different engine operating conditions and the results are presented.

3.1. Engine performance

Figure 3 below shows the variation of torque and brake power. It can be observed that the maximum brake power is 2.5 kW at rated speed for diesel fuel which was exceeded the rated engine power claimed by the manufacturer. This may be due to the variation of diesel fuel properties and testing environment conditions. The reduction in the brake power was obtained by the use of waste plastic oil. The engine operated with waste plastic oil decreases the maximum brake power about 8% with respect to that of diesel fuel. It is clear that the brake power of the waste plastic oil is closer to diesel up to

75% of rated power, beyond which it starts decreasing. At higher load, more fuel was injected to combustion chamber to produce the power needed so the difference in calorific value can play more important role to generate different brake powers when diesel fuel and waste plastic oil were used to operate the engine. As a consequence of lower calorific value than diesel fuel, the engine fuelled with waste plastic oil showed the lower maximum brake power. This may be due to the fact that at full load, the exhaust gas temperature and the heat release rate are marginally higher for waste plastic oil compared to diesel. This may result in higher heat losses and lower brake power in the case of waste plastic oil [8].

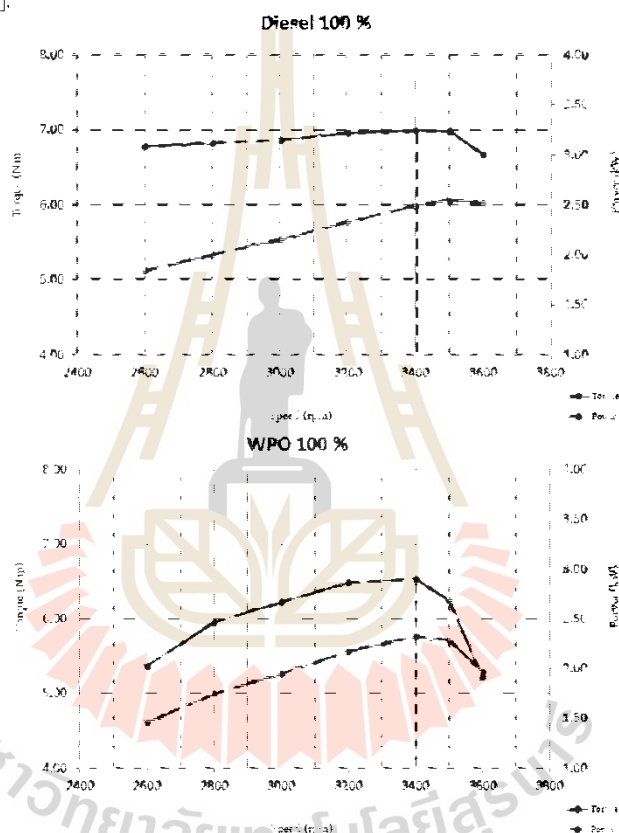


Figure 3. Performance curve of tested engine with (a) diesel and (b) waste plastic oil.

3.2. Brakes

The brake specific fuel consumption (BSFC) at different injection timings tested with waste plastic oil is shown in figure 4. It is clearly seen that BSFC increased by 3.11% on advancing the injection timing to 25°C A bTDC while reduced by 5% on retarding to 15°C A bTDC from the original injection timing of 20° CA bTDC. Because of advancing the injection timing of fuel to 25°C A bTDC, more complete combustion would have been taken place that results in higher BSFC. While retarding the injection to

15°C**A** bTDC, the less time for combustion process can result in more incomplete combustion leading to the lower BSFC. The improvement of BSFC was obtained as the engine operating loads was increased. The higher fuel conversion efficiency can be used to justify such reduction in BSFC, when the engine was operated at higher engine loads.

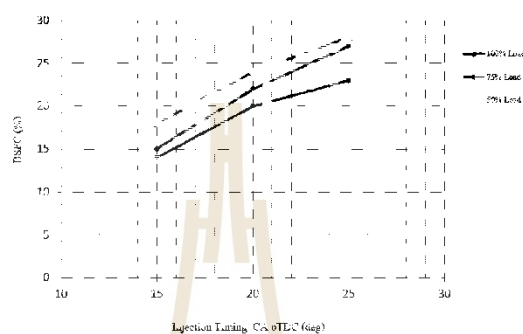


Figure 4. Variation of brake specific fuel consumption at different injection timings and engine loads for waste plastic oil.

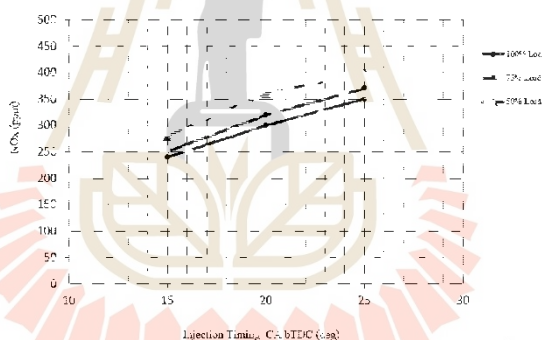


Figure 5. Variation of NOx emissions at different injection timings and engine loads for waste plastic oil.

3.3. NOx emissions

Figure 5 shows NOx emissions from the combustion of waste plastic oil at different injection timings and engine loads. The results showed that the advanced injection timing tended to increase NOx emissions for all engine operating loads tested. This can be attributed to more available time for the combustion process with advanced injection timing where mostly all the injected fuel can be burnt near TDC to produce more complete combustion, resulting in higher combustion temperature which favours NOx formation [3, 9]. When the injection timing was retarded, less fuel was burnt before TDC while the remaining fuel was burnt in early expansion stroke resulting in less combustion temperature related to the reduction in NOx emissions [6, 7]. With the same injection timing, the reduction in NOx emissions was found as the engine loads increased. The higher amount of fuel injected to the

combustion chamber may participate in the reduction in combustion temperature, as a consequence of higher heat needed to vaporize more fuel molecules during the mixing process with the air leading to lower combustion temperature and lower NOx emissions.

4. Conclusions

The effects of injection timing on the engine performance and NOx emissions by the use of waste plastic oil as an alternative fuel for a compression ignition engine without any other engine modifications was investigated in the study. The penalty of NOx emissions from the combustion of waste plastic oil seems to be controlled by the fuel injection timing. To reduce NOx emission, the retard of fuel injection may be needed to delay the start of combustion obtained by waste plastic oil. The experimental results on engine test showed that the reduction in NOx emissions was found with the retarded injection timing at all engine operating loads tested. In addition, the retarded injection timing with the use of waste plastic oil can improve the brake specific fuel consumption. As the benefits mentioned, the retard of fuel injection can be considered for the engine operated with waste plastic oil.

References

- [1] Kalargaris I., Tian G. and Gu S 2017 Experimental evaluation of a diesel engine fuelled by pyrolysis oils produced from low-density polyethylene and ethylene-vinyl acetate plastics. *Fuel Processing Technology* **161** 125-131
- [2] Kumar S, Prakash R., Murugan S and Singh R. K 2013 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* **74** 323-331
- [3] Mani M., Subash C and Nagarajan. G 2009 Performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine using waste plastic oil. *Applied Thermal Engineering* **29** 2738-2744
- [4] Mani M., Nagarajan G and Sampath S 2011 Characterisation and effect of using waste plastic oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. *Energy* **36**(1)212-219
- [5] Sittichompoo S. et al. 2013 Design and Development of Electronic Fuel Injection Control System Program for Single Cylinder Diesel Engine *AUSTPME* **6**(1) 11-17
- [6] Theinnoi, K. et. al. 2010 The Development Prototype of High Pressure Common Rail Injection System for Single Cylinder Agricultural Diesel Engine *ME-NEET. 26th, THAILAND*
- [7] Mani M and Nagarajan G 2009 Influence of injection timing on performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine running on waste plastic oil. *Energy* **34**(10) 1617-1623
- [8] Walendziwski J. 2005 Continuous flow cracking of waste plastics *Fuel Processing Technology* **86** 1265-1278.
- [9] Kalargaris I., Tian G and Gu S 2017 Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil *Fuel Processing Technology* **157** 108-115

ประวัติผู้เขียน

ศธา วาทกิจ เกิดเมื่อวันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2518 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมตอนต้นและมัธยมตอนปลายจากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีในสาขาวิศวกรรมเกษตร จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปีการศึกษา 2540 ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน ปีการศึกษา 2545 ระหว่างการศึกษาได้รับทุนพัฒนาคุณภาพเพื่อศึกษาต่อและกลับมาบรรจุเป็นอาจารย์ประจำที่สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี 2551 โดยสอนรายวิชาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ ได้แก่ วิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร วิศวกรรมรถแทรกเตอร์ การออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมระบบต้นกำลัง และได้สมัคร เข้าศึกษา ต่อ ใน ระดับบัณฑิตศึกษาในสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2559

ระหว่างการศึกษาได้มีงานวิจัยร่วมกับคณาจารย์จนมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 4 เรื่อง ได้แก่

Wathakit, K., Sukjit, E., Kaewbuddee, C., Maithomklang, S., Klinkaew, N., Liplap, P., Srisertpol, J. (2021). Characterization and Impact of Waste Plastic Oil in a Variable Compression Ratio Diesel Engine. *Energies*, 14(8), 2230.

Wathakit, K., Ekarong, S., Somkiat, M., & Srisertpol, J. (2020). Fuel Properties, Performance and Emission of Alternative Fuel from Pyrolysis of Waste Plastics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 717, 012001.

Wathakit, K., Ekarong, S., Somkiat, M., & Srisertpol, J. (2020). Fuel Properties, Performance and Emission of Alternative Fuel from Pyrolysis of Waste Plastics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 717, 012001.

Wathakit, K., Ekarong, S., & Srisertpol, J. (2018). Effect of injection timing on performance and emissions characteristics of a single cylinder diesel engine fuelled with waste plastic oil. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1074 (2018) 012041.