

การใช้ประโยชน์จากของเสียเป็นเชื้อเพลิงทดแทนสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล



ว่าที่ร้อยตรีสมเกียรติ หมายถมกลาง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2565

# UTILIZATION OF WASTE AS RENEWABLE FUELS FOR DIESEL ENGINE

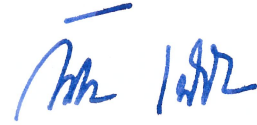


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of  
Doctoral of Philosophy in Mechanical and Process System Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2022

## การใช้ประโยชน์จากของเสียเป็นเชื้อเพลิงทดแทนสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทศึกษาศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.กัมปนาท เทียนน้อย)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



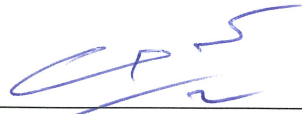
(ผศ. ดร.เอกรงค์ สุขจิต)

กรรมการ



(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำนาจ)

กรรมการ



(ผศ. ดร.ไชยธร ธรรมแท้)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สมเกียรติ หมายถมกลาง : การใช้ประโยชน์จากของเสียเป็นเชื้อเพลิงทดแทนสำหรับ  
เครื่องยนต์ดีเซล (UTILIZATION OF WASTE AS RENEWABLE FUELS FOR DIESEL  
ENGINE) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 215 หน้า.

คำสำคัญ: น้ำมันขยะพลาสติก/เชื้อเพลิงทดแทน/เครื่องยนต์ดีเซล

งานวิจัยเรื่องนี้เพื่อศึกษาการใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากพลาสติกต่างชนิดสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในเครื่องยนต์ดีเซล โดยทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางเชื้อเพลิงภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ASTM ที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้และมลพิษไอเสีย รวมถึงพฤติกรรมการสันของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของน้ำมันจากขยะพลาสติก โดยการใช้น้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการแปรรูปเป็นพลังงานด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่ยังไม่ผ่านขั้นตอนการกลั่นลำดับส่วน โดยทำการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก 1 สูบ 4 จังหวะ ระบายความร้อนด้วยน้ำ ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงาน ผลจากการดำเนินการวิจัยพบว่า การวิเคราะห์สารประกอบเคมีของน้ำมันจากขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีสารประกอบทางเคมีโดยส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่มน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียม โดยที่สารประกอบทางเคมีของ PET อยู่ในกลุ่มน้ำมันแก๊สโซลีน ในขณะที่ HDPE และ Mixed Plastics นั้นมีสัดส่วนของสารประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับกลุ่มของน้ำมันดีเซล นอกจากนี้ ยังพบว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มีหมู่ฟังก์ชันและองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซล และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันจากขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า ค่าความหนืดจลนศาสตร์ จุดวาบไฟ และจุดติดไฟมีค่าที่ต่ำกว่ามาตรฐานที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด ประกอบกับสมบัติทางเชื้อเพลิงอื่น ๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ ดัชนีซีเทน อุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันจากขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีค่าที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของ PET, HDPE และ Mixed Plastics พบว่า มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่สูงใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ทั้งนี้ จากการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านไดรโบลีย์ น้ำมันจากขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่ามีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดีกว่าน้ำมันดีเซล

จากผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์พบว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มีค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) มากกว่าน้ำมันดีเซล ยกเว้นในกรณี BTE ของ PET ที่มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซลในทุกภาระงาน และผลการวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ยังพบว่า การใช้ PET, HDPE และ Mixed Plastics ส่งผลกระทบต่อ ICP และ RoHR ที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตาม PET กลับพบว่ามี RoHR ที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล ประกอบกับมีความล่าช้าในการจุดระเบิดที่มากกว่า น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ในขณะที่ HDPE และ Mixed Plastics มีคุณลักษณะที่เกิดการจุดระเบิดล่วงหน้า นอกจากนี้ ยังพบว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มีเสถียรภาพในการเผาไหม้ที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล โดยพิจารณาได้จากค่า  $COV_{P_{max}}$  ที่มีค่าสูง ทั้งนี้ การใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกนั้นส่งผลให้แนวโน้มการปล่อยมลพิษ  $NO_x$ , CO, HC และเขม่าที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นในกรณีของ  $NO_x$  ที่พบว่า มีปริมาณการปล่อยมลพิษไอเสียที่ต่ำกว่า HDPE, Mixed Plastics และน้ำมันดีเซล ประกอบกับจาก

คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์บ่งชี้ให้เห็นว่า การใช้น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ส่งผลกระทบต่อความดันในกระบอกสูบ (ICP) และอัตราการปลดปล่อยความร้อน (RoHR) ที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตาม กรณีของ PET กลับพบว่ามี RoHR ที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล และเกิดความล่าช้าในการจุดระเบิดในกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ในขณะที่ HDPE และ Mixed Plastics มีคุณลักษณะการเผาไหม้ที่เกิดการจุดระเบิดล่วงหน้า นอกจากนี้ น้ำมันขยะพลาสติก ยังมีเสถียรภาพในการเผาไหม้ที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล โดยพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของความดันสูงสุด ( $COV_{Pmax}$ ) ที่มีค่าสูง ทั้งนี้ การใช้น้ำมันขยะพลาสติกนั้นส่งผลให้แนวโน้มการปล่อยมลพิษ  $NO_x$ , CO, HC และเขม่าที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นในกรณีของ PET ที่พบว่ามีปริมาณการปล่อย  $NO_x$  ที่ต่ำกว่า HDPE, Mixed Plastics และน้ำมันดีเซล ประกอบกับจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองพบว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics ก่อให้เกิดฝุ่นละอองที่มากกว่าน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการสลายตัวขององค์ในฝุ่นละอองพบว่า อุณหภูมิอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงสุดของ PET, HDPE และ Mixed Plastics มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งผลดังกล่าวนี้บ่งบอกถึงการใช้พลังงานในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ต่ำและง่ายสำหรับการสลายฝุ่นละอองที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ การวิเคราะห์พฤติกรรมการสันดาปของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติก บ่งชี้ให้เห็นว่า การทำงานของเครื่องยนต์จากการใช้ PET, HDPE และ Mixed Plastics เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง มีขนาดการสันดาปที่สูงกว่าการทำงานของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตาม ขนาดการสันดาปเนื่องจากการเผาไหม้มีแนวโน้มเพิ่มลดลงตามภาระงานของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้น

จากการดำเนินการวิจัยนี้บ่งชี้ได้ว่า ชนิดของขยะพลาสติกที่นำมาแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงมีผลต่อกระทบต่อสมบัติทางเชื้อเพลิงและคุณลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตาม น้ำมันขยะพลาสติกถือได้ว่าเป็นหนึ่งในเชื้อเพลิงทดแทนที่มีศักยภาพเพียงพอสำหรับนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิล

SOMKIAT MAITHOMKLANG : UTILIZATION OF WASTE AS RENEWABLE FUELS FOR DIESEL ENGINE. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. ASSOC. PROF. JIRAPHON SRISERTPOL, Ph.D., 200 PP.

Keyword: WASTE PLASTIC OIL/ RENEWABLE FUELS/DIESEL ENGINE

This research aim to study the use of waste plastic oil from different types of plastics waste as an alternative fuel in diesel engines. The waste plastic oil that has been converted into fuel oil by pyrolysis process. The chemical composition and fuel properties of teste fuels were measured under ASTM standard. The engine performance, combustion charecteristics and exhaust gas emissions belong with the vibration behavior of the engine caused by the combustion of waste plastic oil were investigated. The results showed found that the chemical composition of waste plastic oil contained most of the chemical compounds in the petroleum fuel. The chemical compounds of PET belong to gasoline while HDPE and Mixed Plastics have similar proportions of the chemical compounds to diesel fuel. The fuel properties results of waste plastic oil, it was found that the kinematic viscosity, flash point and fire point were lower than the standards. In addition to other fuel properties such as density, specific gravity, cetane index, the distillation temperature of the waste plastic oil have lower than diesel fuel. However, the gross calorific value of PET, HDPE and Mixed Plastics, which is one of the factors helped to indicate the potential of fuel, found that it had a high energy content. In addition, tribological of the waste plastic oil, it was found that the lubricating properties were inferior to diesel fuel. Initially considering the wear scar diameter and a greater coefficient of friction than diesel fuel.

The engine performance, combustion characteristics and exhaust gas emissions were analyzed and compared with diesel fuel operation. The experimental results found that the use of HDPE and Mixed Plastics led to an increase in brake specific fuel consumption (BSFC) and brake thermal efficiency (BTE). However, the use of PET was lower BTE than those of diesel fuel for all engine loads. Moreover, the experimental results of combustion characteristics show that use of PET, HDPE and Mixed Plastics, the maximum cylinder pressure and maximum heat release rate decrease, which result in an increase in HC, CO, NO<sub>x</sub> and smoke emissions. In addition, the difference of PM-loaded filter weight obtained with test fuels. It is clear that the combustion of PET, HDPE and Mixed Plastics produced higher PM content compared to diesel fuel. This increase in PM emissions is in an agreement with the increase in smoke emissions caused by the combustion of PET, HDPE and Mixed Plastics with respect to diesel fuel.

the size of the wear scar diameter. It was showed that PET, HDPE, and Mixed Plastics have a poor lubricating properties when compared with diesel fuel.

The use of waste plastic oil used in diesel engine for all engine load condition showed the 1.28– 24.95% higher brake-specific fuel consumption (BSFC) and the 0.01–1.21% higher brake thermal efficiency (BTE) than diesel fuel for HDPE and Mixed Plastics, whereas in the case of PET, BTE which is lower than diesel fuel by 0.08–1.03%. While the combustion characteristics of the engine indicate that the use of three waste plastic oil samples resulted in lower in-cylinder pressure (ICP) and rate of heat release (RoHR) as compared to diesel fuel. However, PET was found to have higher RoHR than diesel fuel. Furthermore, it can be noticed that the combustion of HDPE and Mixed Plastics starts in advance compared to diesel fuel. The longer ignition delay at the start of combustion was obtained with PET resulting in a higher peak of RoHR compared to diesel fuel at full engine load. In addition, three waste plastic oil samples have lower combustion stability than diesel fuel. This is determined by a high coefficient of maximum pressure variation ( $COV_{P_{max}}$ ). The use of waste plastic oil has led to an increase in the  $NO_x$ , CO, HC, and smoke emissions, whereas in the case of PET, it has found lower  $NO_x$  emissions than HDPE, Mixed Plastics and diesel fuel. In addition, in the analysis of particulate matter (PM), it was found that the combustion of PET, HDPE, and Mixed Plastics produced higher PM content compared to diesel fuel. The temperature to reach the maximum soot oxidation rate was lower with PET, HDPE and Mixed Plastics combustion, which implied that the energy used to oxidize soot was lower and soot was easier to decompose. The vibration analysis of a diesel engine using waste plastic oil indicate that engine operation using PET, HDPE and Mixed Plastics as fuel has a higher vibration magnitude than engine operation from diesel fuel. However, the vibration magnitude due to combustion tends to decrease with an increase in engine load.

As the results indicate that type of plastic waste has an impact on the fuel properties and engine charecteristics. However, waste plastic oil can be considered as one of the potentials as an alternative fuel for diesel engines.

School of Mechanical Engineering  
Academic year 2022

Student's Signature

Advisor's Signature


## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับโอกาสและความกรุณาเป็นอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริมผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาคำแนะนำ ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินการวิจัย ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง ต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริง ความทุ่มเทของอาจารย์ และ ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรงค์ สุขจิต อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรม เครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ด้านวิชาการ และให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาคำแนะนำสำหรับการดำเนินการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศธา วาทกิจ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัย

ขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่ให้ทุนร่วมกับบริษัท พลวัชรเครื่องยนต์ จำกัด ในโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่อพัฒนา อุตสาหกรรม (พวอ.) ให้เข้าศึกษาในระดับปริญญาเอก ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่อาคารเครื่องมือ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับดำเนินการวิจัย รวมถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ ในการดำเนินการวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณอารมณ์พรรณ ศรีอักษรวิทยา และคุณสายฝน สิบพลกรัง เจ้าหน้าที่ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อำนวยความสะดวกเอกสาร ต่าง ๆ ในระหว่างศึกษา

ขอขอบคุณ นายนิติ กลิ่นแก้ว นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และพี่ ๆ น้อง ๆ System and Control Engineering (SCE) Laboratory ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและให้ความรู้ในการดำเนินการวิจัย มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ ผอ.เพื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบิดา มารดา และ สมาชิกในครอบครัวทุกท่าน ที่คอยเป็นกำลังใจมาโดยตลอด และเป็นแรงผลักดันที่สำคัญให้แก่ผู้วิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จลุล่วงไปด้วยดี

สมเกียรติ หมายถมกลาง



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ค
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญรูป .....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ฐ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	4
1.4 กรอบแนวคิดการวิจัย .....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
1.6 สถานที่ดำเนินงานวิจัย .....	5
1.7 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ .....	6
1.8 รายการอ้างอิง .....	6
<b>2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>8</b>
2.1 บทนำ .....	8
2.2 พลาสติก .....	10
2.2.1 เทอร์โมพลาสติก .....	11
2.2.2 เทอร์โมเซตติงพลาสติก .....	11
2.3 กระบวนการไฟโรไลซิส .....	12
2.3.1 ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ .....	14
2.3.2 เวลาที่ใช้ในกระบวนการ .....	15
2.3.3 อุณหภูมิและความดันการทำปฏิกิริยา .....	16
2.3.4 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา .....	17
2.3.5 อัตราการให้ความร้อน .....	17
2.3.6 ชนิดของวัตถุดิบ .....	19
2.4 ทฤษฎีพื้นฐานเครื่องยนต์ดีเซล .....	20

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.1	หลักการดำเนินงานเบื้องต้นของเครื่องยนต์ดีเซล .....	20
2.4.2	วัฏจักรการทำงาน of เครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ .....	21
2.4.3	กระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล .....	23
2.4.3.1	ความดันในกระบอกสูบ .....	23
2.4.3.2	อัตราการปลดปล่อยความร้อน .....	25
2.4.3.3	สัมประสิทธิ์ความแปรผัน .....	27
2.4.4	มลพิษไอเสียจากเครื่องยนต์ดีเซล .....	28
2.4.4.1	มลพิษไนโตรเจนออกไซด์ .....	29
2.4.4.2	มลพิษไฮโดรคาร์บอน .....	31
2.4.4.3	มลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ .....	32
2.4.4.4	ฝุ่นละอองและเขม่า .....	33
2.5	การวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การสั่นของเครื่องยนต์ .....	34
2.5.1	การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นบนโดเมนเวลา .....	34
2.5.2	การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นบนโดเมนความถี่ .....	35
2.5.3	การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นบนโดเมนเวลาและความถี่ .....	35
2.6	การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกจากขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิง ในเครื่องยนต์ดีเซล .....	36
2.6.1	องค์ประกอบทางเคมีของพลาสติก .....	36
2.6.2	สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันจากขยะพลาสติก .....	38
2.6.3	ผลกระทบจากการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกในเครื่องยนต์ดีเซล .....	39
2.7	รายการอ้างอิง .....	44
3	วิธีดำเนินการวิจัย .....	52
3.1	บทนำ .....	52
3.2	วิธีดำเนินการวิจัย .....	52
3.2.1	การวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิง .....	53
3.2.2	การทดสอบการใช้น้ำมันขยะพลาสติกต่างชนิดในเครื่องยนต์ดีเซล .....	54
3.2.3	การวิเคราะห์ฝุ่นละออง .....	55
4	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมัน เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกต่างชนิด .....	57
4.1	บทคัดย่อ .....	57
4.2	บทนำ .....	58
4.3	วิธีดำเนินการวิจัย .....	59

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1	การวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี .....	61
4.3.2	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรสโคปี .....	62
4.3.3	การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในน้ำมันจากขยะพลาสติก .....	63
4.3.4	การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง .....	64
4.3.4.1	การวิเคราะห์ความหนืดจลนศาสตร์ .....	64
4.3.4.2	การวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะ ความถ่วงเอพီไอและความหนาแน่น .....	66
4.3.4.3	การวิเคราะห์จุดวาบไฟและจุดติดไฟ .....	67
4.3.4.4	การวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิง .....	68
4.3.4.5	การวิเคราะห์อุณหภูมิการกลั่น .....	69
4.3.4.6	การวิเคราะห์ดัชนีซีเทน .....	70
4.3.5	การวิเคราะห์ด้านไตรโบโลยีของน้ำมันเชื้อเพลิง .....	71
4.3.5.1	การวิเคราะห์คุณสมบัติการหล่อลื่น .....	71
4.3.5.2	การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบ .....	73
4.4	ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผลสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันจากขยะพลาสติก .....	74
4.4.1	ผลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS) .....	74
4.4.2	ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยเทคนิคฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR) .....	84
4.4.3	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในน้ำมันจากขยะพลาสติก .....	85
4.4.4	ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันจากขยะพลาสติก .....	86
4.4.4.1	ผลการวิเคราะห์ความหนืดจลนศาสตร์ .....	86
4.4.4.2	ผลการวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะและความถ่วงเอพီไอ .....	87
4.4.4.3	ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น .....	89
4.4.4.4	ผลการวิเคราะห์จุดวาบไฟและจุดติดไฟ .....	90
4.4.4.5	ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิง .....	91
4.4.4.6	ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการกลั่น .....	92
4.4.4.7	ผลการวิเคราะห์ดัชนีซีเทน .....	95
4.5	ผลการวิเคราะห์ไตรโบโลยีของน้ำมันจากขยะพลาสติก .....	96

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6	สรุปผลการวิจัย..... 98
4.7	รายการอ้างอิง..... 99
<b>5</b>	<b>ผลกระทบจากการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกต่างชนิดต่อประสิทธิภาพและ</b>
	<b>พฤติกรรมการทำงานของเครื่องยนต์..... 103</b>
5.1	บทคัดย่อ..... 103
5.2	บทนำ ..... 104
5.3	วิธีดำเนินการวิจัย..... 105
5.3.1	การดำเนินการทดสอบเครื่องยนต์ ..... 105
5.3.2	การดำเนินการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ฝุ่นละออง..... 109
5.4	ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดสอบเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมัน
	จากขยะพลาสติกต่างชนิด..... 110
5.4.1	สมรรถนะของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกต่างชนิด ..... 110
5.4.1.1	ผลการวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก..... 111
5.4.1.2	ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก..... 112
5.4.2	คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันขยะ
	พลาสติกต่างชนิด ..... 113
5.4.2.1	ความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อน..... 113
5.4.2.2	สัมประสิทธิ์ความแปรผันของความดันสูงสุด ..... 116
5.4.3	มลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกต่างชนิด ..... 117
5.4.3.1	มลพิษไนโตรเจนออกไซด์..... 117
5.4.3.2	มลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์..... 118
5.4.3.3	มลพิษไฮโดรคาร์บอน..... 120
5.4.3.4	มลพิษเขม่า..... 121
5.5	ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิเคราะห์ฝุ่นละอองของเครื่องยนต์
	จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกต่างชนิด..... 122
5.6	ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของเครื่องยนต์
	จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกต่างชนิด ..... 124
5.7	สรุปผลการวิจัย..... 126
5.8	รายการอ้างอิง..... 127
<b>6</b>	<b>บทสรุปและข้อเสนอแนะ ..... 130</b>
6.1	สรุปผลการวิจัย..... 130
6.1.1	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางเชื้อเพลิง..... 130

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.1.2 การวิเคราะห์ผลกระทบต่อเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันจากขยะ พลาสติกเป็นเชื้อเพลิง .....	130
6.1.3 การวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกเป็น เชื้อเพลิง.....	131
6.1.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมการสิ้นของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมัน จากขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิง .....	132
6.2 ข้อเสนอแนะ .....	132
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล .....	133
ภาคผนวก ข. ผลการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติการหล่อลื่น .....	137
ภาคผนวก ค. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	140
ประวัติผู้เขียน .....	219

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เวลาที่ใช้ในกระบวนการของกระบวนการไพโรไลซิสแต่ละประเภท ..... 16
2.2	อุณหภูมิการสลายตัวของพลาสติกด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก..... 16
2.3	อัตราการให้ความร้อนในกระบวนการของกระบวนการไพโรไลซิสแต่ละประเภท..... 18
2.4	สมบัติทางเคมีของสารประกอบไนตริกออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์ ..... 29
2.5	การวิเคราะห์โดยประมาณของพลาสติกชนิดต่าง ๆ ..... 37
2.6	สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของน้ำมันขยะพลาสติกจากพลาสติกชนิดต่าง ๆ..... 37
2.7	สมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกจากการใช้ ขยะพลาสติกประเภทต่าง ๆ..... 39
2.8	สรุปผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำมันขยะพลาสติกในเครื่องยนต์ดีเซล..... 43
3.1	ข้อมูลเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี..... 54
3.2	ข้อมูลเครื่องมือและอุปกรณ์การวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิง..... 54
3.3	ข้อมูลเทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านไทรโบโลยี ..... 54
3.4	ข้อมูลเทคนิคการวิเคราะห์คุณลักษณะฝุ่นละออง..... 56
4.1	คำย่อและคำอธิบายน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับการทดสอบ ..... 60
4.2	ข้อมูลเงื่อนไขของสถานะการวิเคราะห์เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี..... 62
4.3	ค่าคงที่ของหลอดแก้วรูเล็ก (Cannon-Fenske capillary tube)..... 65
4.4	คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของลูกบอลและแผ่นดิสก์..... 71
4.5	เงื่อนไขการทดสอบคุณสมบัติการหล่อลื่น..... 72
4.6	ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันดีเซล (Diesel)..... 77
4.7	ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันขยะพลาสติกจากขวดพลาสติก (PET) ..... 78
4.8	ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันขยะพลาสติกจากฝาขวดพลาสติก (HDPE)..... 80
4.9	ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันขยะพลาสติกจากพลาสติกผสม (Mixed Plastics)..... 81
4.10	ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกด้วยเทคนิค FT-IR..... 85
4.11	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในน้ำมันขยะพลาสติก ..... 85
5.1	ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์และไดนาโมมิเตอร์ ..... 108
5.2	ข้อมูลเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย ..... 108
5.3	เงื่อนไขการวิเคราะห์ฝุ่นละอองด้วยเครื่อง TGA ..... 110
5.4	ผลการวิเคราะห์ผลต่างน้ำหนักของฝุ่นละอองบนแผ่นกรอง ..... 123

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	การผลิตพลังงานทางเลือกโดยการเปลี่ยนขยะพลาสติกเป็นแหล่งพลังงาน .....2
1.2	กรอบแนวคิดการวิจัย.....5
2.1	ปริมาณขยะมูลฝอยชุมชน การนำไปใช้ประโยชน์ การกำจัดอย่างถูกต้อง และขยะมูลฝอยที่ได้รับการจัดการอย่างไม่ถูกต้อง พ.ศ. 2552-2561 .....9
2.2	โครงสร้างโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติก ..... 11
2.3	โครงสร้างโมเลกุลของเทอร์โมเซตติงพลาสติก ..... 12
2.4	การผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ..... 13
2.5	เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่..... 14
2.6	เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไชน์เบด..... 15
2.7	เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไชน์เบด..... 18
2.8	สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้พลาสติกชนิดต่าง ๆ..... 19
2.9	กลไกของเครื่องยนต์แบบลูกสูบ (เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด)..... 21
2.10	วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ ..... 23
2.11	ความดันในกระบอกสูบของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ..... 24
2.12	อัตราการปลดปล่อยความร้อนในเครื่องยนต์แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง ..... 26
2.13	ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการปล่อยมลพิษในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล ..... 28
2.14	ขนาดอนุภาคฝุ่นละอองของเครื่องยนต์ดีเซล ..... 33
3.1	แผนภูมิการดำเนินการวิจัย..... 53
4.1	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย..... 59
4.2	ขยะพลาสติกที่ใช้วัตถุดิบในงานวิจัยสำหรับใช้แปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิง ..... 60
4.3	ตัวอย่างน้ำมันขยะพลาสติกจากพลาสติกต่างชนิดที่ใช้ในงานวิจัย..... 60
4.4	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS)..... 61
4.5	เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR)..... 63
4.6	เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณธาตุของน้ำมันเชื้อเพลิง ..... 64
4.7	เครื่องมือวิเคราะห์ความหนืดแบบหลอดแก้วรูเล็ก..... 65
4.8	เครื่องมือวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะและความถ่วงเอพีไอ ..... 66
4.9	เครื่องมือวิเคราะห์จุดวาบไฟและจุดติดไฟ ..... 68
4.10	เครื่องมือวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิง..... 68
4.11	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิการกลั่น ..... 69
4.12	เงื่อนไขสภาพแวดล้อมห้องวิเคราะห์คุณสมบัติการหล่อลื่นด้วยเครื่อง HFRR..... 72

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 การวิเคราะห์คุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยเครื่อง HFRR .....	72
4.14 ตัวอย่างการวัดขนาดรอยการสึกหรอบนลูกบอล.....	73
4.15 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบ (SEM-EDS).....	75
4.16 โครมาแกรมของน้ำมันขยะพลาสติกและน้ำมันดีเซลโดยใช้เครื่อง GC-MS.....	76
4.17 จำนวนคาร์บอนของน้ำมันจากขยะพลาสติก .....	83
4.18 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกด้วยเทคนิค FT-IR.....	84
4.19 ความหนืดจลนศาสตร์ของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล.....	87
4.20 ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล .....	88
4.21 ความถ่วงเอพีไอของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล .....	88
4.22 ความหนาแน่นของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล.....	89
4.23 จุดวาบไฟของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล.....	91
4.24 จุดติดไฟของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล .....	91
4.25 ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล .....	92
4.26 อุณหภูมิการกลั่นที่ 90 เปอร์เซนต์ ของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล.....	93
4.27 เส้นอุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันเชื้อเพลิงขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล.....	94
4.28 ค่าดัชนีซีเทนของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล.....	95
4.29 ขนาดรอยสึกหรอของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล.....	96
4.30 ฟิล์มหล่อลื่นของน้ำมันจากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล.....	96
4.31 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของน้ำมันจากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล .....	97
5.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิเคราะห์ผลการทดสอบเครื่องยนต์ .....	105
5.2 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบเครื่องยนต์.....	106
5.3 ชุดทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลติดตั้งเข้ากับไดนาโมมิเตอร์ชนิดกระแสเหนี่ยวนำ .....	107
5.4 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์การสั่นของเครื่องยนต์ .....	107
5.5 เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสียและเครื่องมือวัดเขม่า .....	108
5.6 การชั่งน้ำหนักแผ่นกรองก่อน-หลังการเก็บตัวอย่างเขม่า .....	109
5.7 การชั่งน้ำหนักแผ่นกรองก่อน-หลังการเก็บตัวอย่างเขม่า .....	110
5.8 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงาน.....	111
5.9 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงาน .....	112
5.10 ความดันในกระบอกสูบสูงสุดภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงาน.....	114
5.11 อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงาน.....	114



## สารบัญรูป (ต่อ)

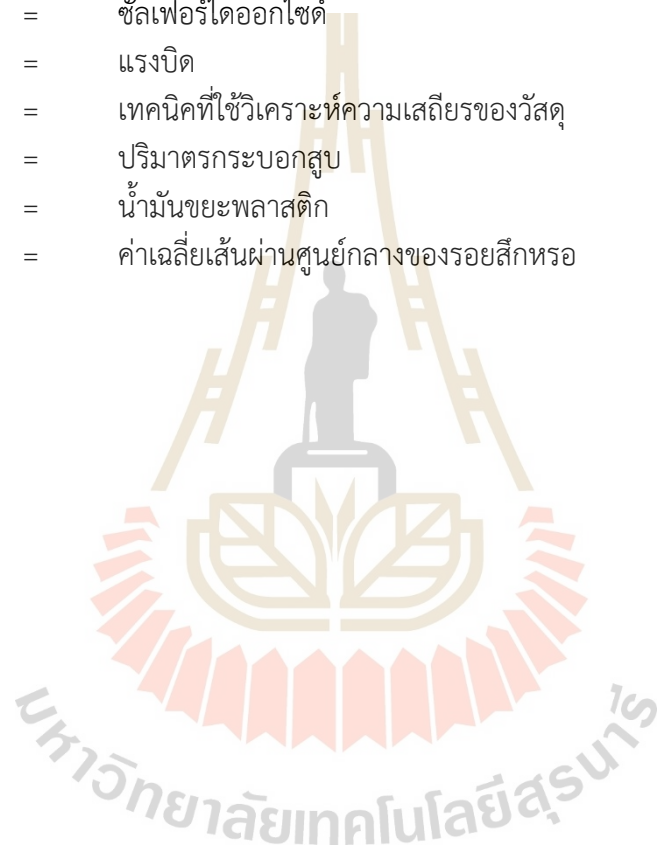
รูปที่	หน้า
5.12 ความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนภายใต้การเปลี่ยนแปลง ภาระงาน .....	112
5.13 สัมประสิทธิ์ความแปรผันของความดันสูงสุดภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงาน .....	117
5.14 มลพิษไอเสียไนโตรเจนออกไซด์ที่ภาระงานต่าง ๆ .....	118
5.15 มลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ภาระงานต่าง ๆ .....	119
5.16 มลพิษไฮโดรคาร์บอนที่ภาระงานต่าง ๆ .....	120
5.17 เขม่าที่ภาระงานต่าง ๆ .....	121
5.18 ลักษณะแผ่นกรองหลังการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ ของเครื่องยนต์ .....	122
5.19 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมสลายตัวของฝุ่นละอองด้วยเครื่อง TGA.....	123
5.20 ขนาดการสันสะท้อนของเครื่องยนต์ดีเซลจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติก ตามแนวแกน .....	128
5.21 ขนาดการสันสะท้อนของเครื่องยนต์ดีเซลจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติก ที่ภาระงานต่าง ๆ .....	128
ข.1 ผลการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติการหลอมของน้ำมันดีเซล .....	138
ข.2 ผลการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติการหลอมของ PET .....	138
ข.3 ผลการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติการหลอมของ HDPE .....	139
ข.4 ผลการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติการหลอมของ Mixed Plastics .....	139

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

API	=	สถาบันปิโตรเลียมของอเมริกา
ASTM	=	มาตรฐานการทดสอบของสมาคมการทดสอบและวัสดุประเทศสหรัฐอเมริกา
BSFC	=	ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค
BTE	=	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค
C	=	ธาตุคาร์บอน
CI	=	ดัชนีซีเทน
CO	=	คาร์บอนมอนอกไซด์
CO <sub>2</sub>	=	คาร์บอนไดออกไซด์
COF	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
COV	=	สัมประสิทธิ์ความแปรผัน
D	=	ความหนาแน่น
FT-IR	=	ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี
GC-MS	=	แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี
H	=	ธาตุไฮโดรเจน
HC	=	ไฮโดรคาร์บอน
HDPE	=	โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง
HFRR	=	High Frequency Reciprocating Rig
HHV	=	ค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูง
ICE	=	เครื่องยนต์สันดาปภายใน
ICP	=	ความดันในกระบอกสูบ
LDPE	=	โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
LHV	=	ค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ
N	=	ธาตุไนโตรเจน
NO	=	ไนตริกออกไซด์
NO <sub>2</sub>	=	ไนโตรเจนไดออกไซด์
NO <sub>x</sub>	=	ออกไซด์ของไนโตรเจน
O	=	ธาตุออกซิเจน
P <sub>b</sub>	=	กำลังเบรค
PET	=	โพลีเอทิลีนเทเรพทาเลต
PM	=	ฝุ่นละออง
PP	=	โพลีโพรพิลีน
ppm	=	หนึ่งในล้านส่วน

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

PS	=	โพลิสไตรีน
$Q_{HV}$	=	ค่าความร้อนเชื้อเพลิง
RH	=	ความชื้นสัมพัทธ์
RoHR	=	อัตราการปลดปล่อยความร้อน
S	=	ธาตุกำมะถัน
SG	=	ความถ่วงจำเพาะ
SO <sub>2</sub>	=	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์
T	=	แรงบิด
TGA	=	เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุ
V <sub>d</sub>	=	ปริมาตรกระบอกสูบ
WPO	=	น้ำมันขยะพลาสติก
WSD	=	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยสึกหรอ



# บทที่ 1

## บทนำ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากพลาสติกชนิดต่าง ๆ สำหรับเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่นิยมใช้งานในภาคการเกษตร โดยเบื้องต้นบทนำในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึง ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตการวิจัย กรอบแนวคิดการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และสถานที่ดำเนินการวิจัย

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

เป็นที่ทราบกันดีว่าประเทศไทยนั้นกำลังประสบกับปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจากปริมาณขยะพลาสติกสะสมที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ด้วยสาเหตุจากการเพิ่มขึ้นของประชากรและการขยายตัวทางเศรษฐกิจในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ประกอบกับสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (โควิด-19) ในปัจจุบัน ส่งผลให้มีปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากประชาชนมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมในการใช้บริการสั่งซื้อสินค้าและอาหารผ่านระบบออนไลน์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งบรรจุภัณฑ์ที่ใช้เป็นพลาสติกประเภทใช้ครั้งเดียวทิ้งจึงเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการสะสมของปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มมากขึ้น โดยจากข้อมูลปริมาณขยะพลาสติกของกรมควบคุมมลพิษในรายงานสถานการณ์ที่กำจัดขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2563 พบว่า ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ จากปริมาณขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นทั้งหมด หรือเฉลี่ยเป็นจำนวน 2 ล้านตันต่อปี โดยแบ่งเป็นขยะพลาสติกที่นำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ 0.5 ล้านตัน และขยะพลาสติกอีก 1.5 ล้านตัน เป็นขยะพลาสติกปนเปื้อนที่ยากต่อการนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีก (กรมควบคุมมลพิษ, 2563) การนำขยะพลาสติกที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ประโยชน์นั้นยังมีปริมาณที่น้อยมาก เนื่องจากต้องผ่านการคัดแยกชนิดของพลาสติกที่มีต้นทุนสูง และการกำจัดขยะพลาสติกด้วยวิธีการอื่น ๆ เช่น การฝังกลบหรือการเผาทำลาย ซึ่งวิธีการเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศและสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามขยะพลาสติกนั้นจัดเป็นทรัพยากรที่มีมูลค่าในตัวเอง เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสามารถนำมาแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้ (Pal, S. et al, 2019) และการนำขยะพลาสติกมาแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถก่อให้เกิดประโยชน์ เพื่อจัดการปัญหาขยะพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงสามารถช่วยแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 1.1 การผลิตพลังงานทางเลือกโดยการเปลี่ยนขยะพลาสติกเป็นแหล่งพลังงาน

จากผลงานวิจัยในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา กลุ่มนักวิจัยด้านพลังงานทดแทนได้ศึกษาและวิจัยการนำขยะพลาสติกเป็นวัตถุดิบสำหรับแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งเป็นกระบวนการกลั่นสลายหรือเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี โดยใช้ความร้อนในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน เพื่อย่อยสลายโมเลกุลให้มีขนาดเล็กกลายเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของแข็ง ของเหลว และแก๊ส (Dharmaraj, S. et al, 2021) เป็นการจัดการที่เหมาะสมและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งผลจากการวิจัยส่วนใหญ่พบว่า การนำขยะพลาสติกชนิดต่าง ๆ เช่น โพลีโพรพิลีน (PP), โพลิสไตรีน (PS), โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET), โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการแปรรูปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นมีสมบัติทางเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงปิโตรเลียม รวมถึงมีศักยภาพเพียงพอในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์จู่ดระเปิดด้วยการอัด (Miandad et al., 2017; Singh, R. K. et al, 2020; Anuar Sharuddin, S. D. et al, 2016) ด้วยเหตุนี้ การวิจัยโดยใช้ขยะพลาสติกเพื่อแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงทดแทนการใช้น้ำมันดีเซลจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสถานะของปัญหาที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถช่วยลดการพึ่งพาการใช้้ำมันเชื้อเพลิงจากฟอสซิลที่มีราคาค่อนข้างสูงและมีความผันผวนเป็นอย่างยิ่งในปัจจุบัน ถึงแม้ว่าจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลมีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ในด้านประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ลดลงและมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้้ำมันดีเซล รวมถึงมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ เช่น ไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ), ไฮโดรคาร์บอน (HC), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และเขม่า (Smoke) มีปริมาณการปลดปล่อยที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล (Kalargaris, I. et al, 2017; Mangesh, V. L., et al, 2020) แต่ในทางตรงกันข้าม กลุ่มนักวิจัยบางส่วนกลับพบว่า การใช้น้ำมันขยะพลาสติกในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นสามารถช่วยลดการปลดปล่อยมลพิษไอเสียดังกล่าวได้ เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันขยะพลาสติกมีออกซิเจนเป็น

องค์ประกอบเป็นปัจจัยที่ช่วยปรับปรุงการเผาไหม้ของเครื่องยนต์และลดมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้น (Singh, R. K. et al, 2020; Damodharan, D. et al, 2017; Mani, M. et al, 2010; Ellappan, S. et al, 2019) จากผลการวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญและมีผลกระทบต่อสมรรถนะและมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นคือ ชนิดของขยะพลาสติกที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิง เนื่องจากพลาสติกในแต่ละชนิดมีคุณลักษณะทางเคมีที่แตกต่างกัน ในทำนองเดียวกันเมื่อนำไปแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงจึงเป็นสาเหตุให้เกิดความแตกต่างด้านสมบัติทางเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ที่ได้ และเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซล

ดังนั้น จากการปรัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีความมุ่งเน้นศึกษาและวิจัยการนำน้ำมันขยะพลาสติกจากพลาสติกต่างชนิด เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังสำหรับเครื่องจักรกลการเกษตร อีกทั้งยังเป็นเครื่องยนต์ที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจากมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงและให้แรงบิดที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยชนิดของขยะพลาสติกที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบนั้น ได้แก่ PET, HDPE และขยะพลาสติกผสมที่ประกอบไปด้วย PET, PP, PS และ PE ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติกที่นิยมนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ภาชนะบรรจุ ขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำอัดลม และขวดเครื่องปรุงอาหารต่าง ๆ นอกจากนี้ ยังพบว่าปริมาณมากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ของขยะพลาสติกทั้งหมดที่เกิดขึ้น โดยผู้วิจัยทำการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง และศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อเครื่องยนต์ดีเซล ได้แก่ สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย ทั้งนี้ จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมานงานวิจัยโดยส่วนใหญ่เน้นยังขาดการวิเคราะห์การสันสเทือนของเครื่องยนต์เมื่อนำน้ำมันขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการวิเคราะห์พฤติกรรมการสันสเทือนของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง เพื่อประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นกับเครื่องยนต์เมื่อใช้งานในระยะยาว ซึ่งผลจากการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการนำน้ำมันขยะพลาสติกไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่นิยมใช้งานในภาคการเกษตร ก่อให้เกิดองค์ความรู้และความเข้าใจในการนำน้ำมันขยะพลาสติกไปใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือก เพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากฟอสซิลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมและพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกที่มีแหล่งวัตถุดิบภายในประเทศ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาการใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากพลาสติกต่างชนิด ซึ่งประกอบไปด้วยขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลต โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพลาสติกผสม สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย รวมถึงพฤติกรรมการสันสเทือนของเครื่องยนต์

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้เครื่องยนต์ดีเซลขนาด 1 สูบ 4 จังหวะ ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ และระบบฉีดเชื้อเพลิงตรงเข้าสู่ห้องเผาไหม้เป็นเครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ โดยไม่มีปรับแต่งหรือดัดแปลงเครื่องยนต์

1.3.2 ใช้น้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตจากขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนเทเรพทาเลต โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพลาสติกผสม ซึ่งผ่านกระบวนการแปรรูปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการไพโรไลซิสโดยไม่ผ่านขั้นตอนการกลั่นลำดับส่วน

1.3.3 ตรวจสอบและวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS) ฟลูออโรสเปกโตรสโกปี-อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR) และ CHNS Analyzer

1.3.4 ตรวจสอบและวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ภายใต้มาตรฐานการทดสอบของสมาคมการทดสอบและวัสดุประเทศสหรัฐอเมริกา (ASTM) ซึ่งประกอบไปด้วย ความหนืดจลนศาสตร์ ความถ่วงจำเพาะ ความถ่วงเอพีไอ ความหนาแน่น จุดวาบไฟ จุดติดไฟ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง อุณหภูมิการกลั่น ดัชนีซีเทน และคุณสมบัติการหล่อลื่น

1.3.5 ตรวจสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติด้านไดรฟ์โพลีของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง High Frequency Reciprocating (HFRR)

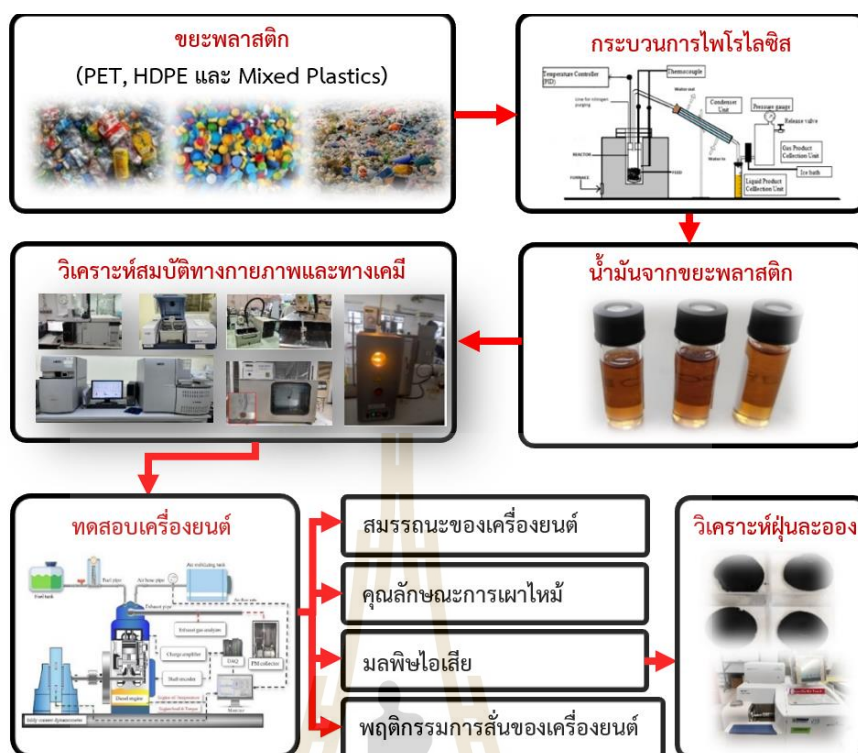
1.3.6 ทดสอบและวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย รวมถึงการวิเคราะห์ฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ในเครื่องยนต์ดีเซล ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงานที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่

1.3.7 ทดสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมการสลายตัวของฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์ด้วยสมบัติทางความร้อน (TGA)

1.3.8 ทดสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมการสันดาปของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงานที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่

### 1.4 กรอบแนวคิดการวิจัย

จากการทบทวนปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำน้ำมันขยะพลาสติกชนิดต่าง ๆ มาใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับจุดระเบิดด้วยการอัดหรือเครื่องยนต์ดีเซล ผู้วิจัยจึงเกิดความสนใจในการศึกษาและวิจัยถึงการนำน้ำมันขยะพลาสติกจากวัตถุดิบประเภทขวดพลาสติก ฝาขวดพลาสติก และขยะพลาสติกผสม สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นต้นกำลังสำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ในภาคการเกษตร เช่น เครื่องสูบน้ำ รถไถเดินตาม เครื่องปั่นไฟ และเครื่องจักรกลต่าง ๆ เป็นต้น โดยรายละเอียดของกรอบแนวคิดของงานวิจัยนี้แสดงเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 กรอบแนวคิดการวิจัย

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลจากการศึกษาและวิจัยนี้ก่อให้เกิดองค์ความรู้และความเข้าใจในการนำน้ำมันขยะพลาสติกไปใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือก เพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากฟอสซิลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมและพัฒนาพลังงานทดแทนที่มาจากแหล่งวัตถุดิบที่เป็นของเสียภายในประเทศ นอกจากนี้ยังช่วยให้ทราบถึงคุณลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์และผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกต่างชนิดเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาถึงความเหมาะสมในการนำน้ำมันขยะพลาสติกไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกเป็นต้นกำลังสำหรับเครื่องจักรกลและอุปกรณ์ในภาคการเกษตร เครื่องสูบน้ำ รถไถเดินตาม เครื่องปั่นไฟ และเครื่องจักรกลต่าง ๆ เป็นต้น

## 1.6 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

1.5.1 อาคารเครื่องมือ 1, อาคารเครื่องมือ 2, อาคารเครื่องมือ 4, อาคารเครื่องมือ 5 และอาคารเครื่องมือ 10 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5.2 อาคารปฏิบัติการพื้นฐานด้านวิศวกรรมศาสตร์ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## 1.7 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถแบ่งเนื้อหาออกเป็น 7 บท ซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นบทที่กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตการวิจัย กรอบแนวคิดการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และสถานที่ดำเนินการวิจัย

บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นบทที่กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพลาสติก กระบวนการไพโรไลซิส ทฤษฎีพื้นฐานเครื่องยนต์ดีเซล และผลกระทบการใช้จากน้ำมันขยะพลาสติกชนิดต่าง ๆ ที่แปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการไพโรไลซิส สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในเครื่องยนต์ดีเซล

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย เป็นบทที่กล่าวถึงภาพรวมในขั้นตอนการดำเนินการวิจัยในหัวข้อต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิง การวิเคราะห์ผลกระทบจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ในเครื่องยนต์ดีเซล ที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ มลพิษไอเสีย รวมถึงพฤติกรรมการสันดาปที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์

บทที่ 4 เป็นบทที่กล่าวถึงผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี และคุณสมบัติด้านไทรโบโลยีของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ภายใต้มาตรฐานการทดสอบคุณลักษณะทางเชื้อเพลิง

บทที่ 5 เป็นบทที่กล่าวถึงผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ พฤติกรรมการสันดาป และมลพิษไอเสีย รวมถึงการวิเคราะห์พฤติกรรมการสลายตัวของฝุ่นละอองจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยอาศัยคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

## 1.8 รายการอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2563). รายงานสถานการณ์ที่กำจัดขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2563. กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- Anuar Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & Aroua, M. K. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, 115, 308-326.
- 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.
- Dharmaraj, S., Ashokkumar, V., Pandiyan, R., Halimatul Munawaroh, H. S., Chew, K. W., Chen, W.-H., & Ngamcharussrivichai, C. (2021). Pyrolysis: An effective technique for degradation of COVID-19 medical wastes. *Chemosphere*, 275, 130092.
- Ellappan, S., & Pappula, B. (2019). Utilization of unattended waste plastic oil as fuel in low heat rejection diesel engine. *Sustainable Environment Research*, 29(1), 2.

- Kalargaris, I., Tian, G., & Gu, S. (2017). Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil. *Fuel Processing Technology*, 157, 108-115.
- Mani, M., Nagarajan, G., & Sampath, S. (2010). An experimental investigation on a DI diesel engine using waste plastic oil with exhaust gas recirculation. *Fuel*, 89(8), 1826-1832.
- Mangesh, V. L., Padmanabhan, S., Tamizhdurai, P., & Ramesh, A. (2020). Experimental investigation to identify the type of waste plastic pyrolysis oil suitable for conversion to diesel engine fuel. *Journal of Cleaner Production*, 246, 119066.
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Rehan, M., Ismail, I. M. I., & Nizami, A. S. (2017). Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, 239-252.
- Pal, S., Chintala, V., Kumar Sharma, A., Ghodke, P., Kumar, S., & Kumar, P. (2019). Effect of injection timing on performance and emission characteristics of single cylinder diesel engine running on blends of diesel and waste plastic fuels. *Materials Today: Proceedings*, 17, 209-215.
- Singh, R. K., Ruj, B., Sadhukhan, A. K., Gupta, P., & Tigga, V. P. (2020). Waste plastic to pyrolytic oil and its utilization in CI engine: Performance analysis and combustion characteristics. *Fuel*, 262, 116539.



## บทที่ 2

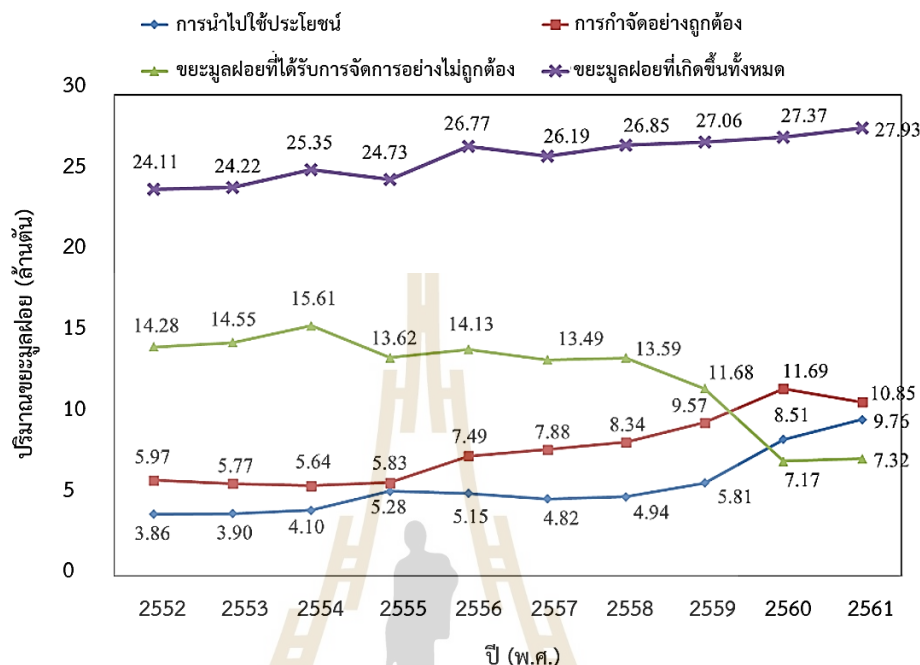
### ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

จากสถานการณ์การผลิตและการใช้พลาสติกทั่วโลกที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์จากพลาสติกสังเคราะห์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ความยืดหยุ่นสูง ไม่เกิดสนิม ทนต่อสารเคมี ราคาถูก และสามารถผลิตได้ในปริมาณมาก พลาสติกจึงกลายเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่ง ที่เข้ามามีบทบาทสำคัญและถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในชีวิตประจำวัน ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 มีการผลิตพลาสติกทั่วโลกเพิ่มมากขึ้นโดยเฉลี่ยถึง 10 เปอร์เซ็นต์ต่อปี พลาสติกที่ผลิตขึ้นสำหรับใช้ในชีวิตประจำวันโดยส่วนใหญ่เป็นประเภทใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งและมีอายุการใช้งานที่สั้น ซึ่งจากข้อมูล ในปี ค.ศ. 2018 พบว่า ทั่วโลกมีปริมาณการใช้พลาสติกสูงถึง 335 พันล้านตัน ซึ่งคาดการณ์ว่าภายใน ปี ค.ศ. 2050 ขยะพลาสติกกว่า 12 พันล้านตัน ถูกทับถมอยู่ในหลุมขยะฝังกลบและปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม ส่งผลให้ทั่วโลกจะต้องประสบปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจากขยะพลาสติก โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศที่มีระบบจัดการขยะมูลฝอยที่ไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากพลาสติกหลายประเภท ใช้เวลาในการย่อยสลายที่ยาวนานและพลาสติกบางประเภทไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ (Singh, M. V., 2019; Tulashie, S. K. et al., 2019) นอกจากนี้ พลาสติกยังสามารถแตกตัวกลายเป็นไมโครพลาสติกที่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม แนวทางในการแก้ไขปัญหาจากขยะพลาสติกนั้นมีอยู่หลายวิธี อาทิเช่น การลดการใช้ การนำกลับมาใช้ใหม่ และการรีไซเคิล รวมถึงการนำขยะพลาสติกสังเคราะห์ไปเผาในเตาเผามาตรฐานที่มีการควบคุม เพื่อแปรรูปเป็นพลังงาน ความร้อนมาใช้งานในด้านต่าง ๆ แต่การแก้ไขปัญหาตามแนวทางที่กล่าวมานั้นยังมีปริมาณที่น้อย เมื่อเทียบกับอัตราการผลิตและการใช้ขยะพลาสติก ซึ่งนักวิจัยคาดการณ์ว่าปริมาณขยะพลาสติก ทั่วโลกที่นำกลับมาใช้ใหม่มีปริมาณเพียง 9 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น โดยส่วนใหญ่จะสะสมในแหล่งฝังกลบหรือตกค้างในสิ่งแวดล้อมบนบกและในทะเล (Geyer, R. et al., 2017)

สำหรับประเทศไทยยังถูกจัดให้อยู่อันดับ 6 ของประเทศที่ทิ้งขยะพลาสติกมากที่สุดในโลก รองจากประเทศจีน อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ เวียดนาม และศรีลังกา (Jambeck, J. R. et al., 2015) ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาประเทศไทยได้มีการนำขยะพลาสติกบางประเภทมาคัดแยก เพื่อนำกลับไปผ่านกระบวนการรีไซเคิลเป็นเม็ดพลาสติกสำหรับเป็นวัตถุดิบในโรงงานผลิตพลาสติก ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยแก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจากขยะประเภทพลาสติก แต่การจัดการด้วยวิธีการดังกล่าว ยังมีอัตราส่วนที่น้อย โดยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2552–2561 พบว่า มีปริมาณขยะมูลฝอยที่ถูกกำจัดอย่างถูกต้องร้อยละ 5.97–10.85 และปริมาณขยะมูลฝอยที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์เพียงร้อยละ 3.86–9.76

เท่านั้น ซึ่งถือว่ายังมีปริมาณสัดส่วนที่น้อยเมื่อเทียบกับปริมาณขยะทั้งหมดที่เกิดขึ้นในแต่ละปีที่มีปริมาณถึงร้อยละ 24.11–27.93 ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (กรมควบคุมมลพิษ, 2562)



รูปที่ 2.1 ปริมาณขยะมูลฝอยชุมชน การนำไปใช้ประโยชน์ การกำจัดอย่างถูกต้องและขยะมูลฝอยที่ได้รับการจัดการอย่างไม่ถูกต้อง พ.ศ. 2552–2561 (กรมควบคุมมลพิษ, 2562)

จากข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษพบว่า มีปริมาณขยะพลาสติกปะปนขยะมูลฝอยอยู่ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งขยะพลาสติกเหล่านี้ประกอบไปด้วยพลาสติกชนิดโพลีสไตรีน (PS) โพลีโพรพิลีน (PP) โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยขยะพลาสติกที่ปะปนอยู่ส่วนใหญ่เป็นขยะพลาสติกชนิด PP, PET, HDPE และ LDPE เนื่องจากเป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์และผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน อย่างไรก็ตาม ด้วยสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (โควิด-19) ในปัจจุบันทำให้สัดส่วนของขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นกว่า 36 เปอร์เซ็นต์ โดยแบ่งออกเป็นขยะพลาสติกสภาพดี 7.04 เปอร์เซ็นต์ และขยะพลาสติกอีก 29.58 เปอร์เซ็นต์ เป็นพลาสติกที่ไม่สามารถนำมารีไซเคิลได้ (อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ สถาบันพลาสติก, 2564)

กลุ่มนักวิจัยทั่วโลกได้เล็งเห็นถึงปัญหาที่เกิดขึ้นได้ทำการวิจัยและพัฒนา เพื่อหาวิธีแก้ไข ปัญหาและหาแหล่งพลังงานทางเลือกสำหรับทดแทนการใช้พลังงานที่ใช้แล้วหมดไปอย่างเช่น น้ำมันเชื้อเพลิงจากฟอสซิล เนื่องจากพลาสติกมีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักที่มีศักยภาพในการนำมาแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้ ทั้งนี้ เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปพลังงานจากขยะพลาสติกเป็นพลังงานเชื้อเพลิงในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ กระบวนการ

ทางความร้อน กระบวนการทางชีวเคมี และกระบวนการทางเคมี โดยแต่ละกระบวนการมีข้อดี และข้อจำกัดที่ต่างกันไปขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของปัจจัยต่าง ๆ กระบวนการที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ “กระบวนการไพโรไลซิส” ซึ่งเป็นกระบวนการให้อุณหภูมิแก่พลาสติกจนถึงจุดหลอมเหลวของพลาสติกและเกิดการแตกตัวของสายพอลิเมอร์ที่สั้นลงในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน และกลั่นตัวตามจำนวนคาร์บอนที่แตกต่างกันจนได้เป็นผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นของเหลว ของแข็ง และแก๊ส โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ในสถานะที่เป็นของเหลวเรียกว่า “น้ำมันขยะพลาสติก” หรือ “น้ำมันไพโรไลซิส” โดยข้อดีของกระบวนการไพโรไลซิสคือ สามารถเปลี่ยนของเหลือทิ้งที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบในสถานะของแข็งให้อยู่ในรูปของพลังงานเชื้อเพลิงได้ (ศิริรัตน์ จิตการคำ, 2551)

ปัจจุบันกระบวนการไพโรไลซิสในประเทศไทยได้มีการวิจัยและพัฒนาเพื่อให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริงในเชิงพาณิชย์ โดยการนำมาใช้งานในการกำจัดขยะประเภทขยะพลาสติกและยางรถยนต์ใช้แล้ว เพื่อผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับใช้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดหรือเป็นแหล่งพลังงานให้กับเครื่องจักรกลในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งผู้ประกอบการเอกชนและโครงการส่งเสริมของภาครัฐของประเทศไทยมีศักยภาพในการผลิตตั้งแต่ 0.8–16 ตันต่อวัน สามารถแปรรูปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้ถึง 200–10,400 ลิตรต่อวัน ทั้งนี้ จากผลการวิจัยโดยใช้วัตถุดิบประเภทยางรถยนต์ใช้แล้วได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่าน 26–49 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันเชื้อเพลิง 25–75 เปอร์เซ็นต์ และแก๊ส 5–57 เปอร์เซ็นต์ และในส่วนของการใช้ขยะพลาสติกเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสามารถผลิตได้ถึง 4,000–5,000 ลิตรต่อวัน (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2558) ประกอบกับการส่งเสริมของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ได้ส่งเสริมโครงการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงให้กับชุมชนตัวอย่างที่มีศักยภาพในการจัดการขยะ ได้แก่ พื้นที่ชุมชนตัวอย่างในเขตเทศบาลเมืองของจังหวัดพิษณุโลก จังหวัดอุบลราชธานี จังหวัดขอนแก่น และจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เป็นต้น ซึ่งมีกำลังการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกโดยรวมอยู่ที่วันละ 23,900 ลิตร (กุลนันท์ วีรณรงค์กร และคณะ, 2558; ธัญญ์พิชชา เอกบุศย์ และคณะ, 2557) จากข้อมูลข้างต้นการศึกษาและวิจัยการนำขยะพลาสติกมาแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยในการแก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นได้ อีกทั้งยังเป็นการลดการพึ่งพาพลังงานจากแหล่งใช้แล้วหมดไปอย่างเช่นน้ำมันเชื้อเพลิงจากฟอสซิล

## 2.2 พลาสติก

พลาสติก (Plastic) ตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน หมายถึง สารประกอบอินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้แทนวัสดุธรรมชาติ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วยการสังเคราะห์จากวัตถุดิบไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากน้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน เป็นต้น หรือสามารถอธิบายในทางวิทยาศาสตร์ได้ว่า “พลาสติก” คือ วัสดุสังเคราะห์ที่มีสารประกอบของไฮโดรคาร์บอน ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลซ้ำ ๆ ต่อกันเป็นโมเลกุลสายยาวประกอบด้วยธาตุสำคัญ 3 ชนิด คือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) หรืออาจมีธาตุอื่น ๆ เจือปน เพื่อให้คุณสมบัติเด่นในด้านอื่น ๆ เช่น ไนโตรเจน (N), ฟลูออรีน (F), คลอรีน (Cl) และกำมะถัน (S) เป็นต้น พลาสติกเป็นวัสดุที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ทั้งใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ของใช้ภายในบ้านและภายนอกบ้าน รวมไปถึงในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทำให้มีอัตราการผลิตทั่วโลกเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตาม พลาสติกนั้นก็นำมาซึ่งปัญหาสิ่งแวดล้อมด้วยเช่นกัน

เนื่องจากอัตราการย่อยสลายต้องใช้เวลายาวนานหลายสิบปี โดยพลาสติกนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ ตามคุณสมบัติทางความร้อน ได้แก่ เทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตติงพลาสติก (Callister, W. D. et al., 2011; Smith, W. F. et al., 2004)

### 2.2.1 เทอร์โมพลาสติก

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เป็นพลาสติกชนิดที่สามารถทำให้หลอมเหลวเป็นของเหลวหนืดหรือเปลี่ยนรูปร่างได้เมื่อได้รับความร้อน และเมื่อความร้อนลดลงพลาสติกประเภทนี้จะกลับไปแข็งตัวตามเดิม โดยพฤติกรรมนี้ไม่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของพลาสติก เนื่องจากมีโครงสร้างโมเลกุลแบบโซ่ตรงหรือแบบกิ่งสั้นสายยาวด้วยพันธะเคมีประเภทโคเวเลนต์ ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาที่เรียกว่า “โพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)” พลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกมีอยู่หลายชนิด ได้แก่ โพลีเอทิลีน โพลีโพรพิลีน โพลีสไตรีน โพลีเอทิลีนเทเรพทาเลต โพลีไวนิลคลอไรด์ และโพลีคาร์บอนเนต เป็นต้น ซึ่งพลาสติกเหล่านี้เป็นพลาสติกที่นิยมใช้กันแพร่หลายในชีวิตประจำวัน



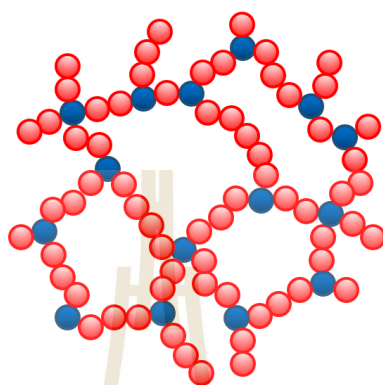
รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติก

พลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกสามารถขึ้นรูปได้โดยการฉีดขึ้นรูปในขณะที่พลาสติกถูกทำให้หลอมเหลวด้วยความร้อนและความดันเข้าไปในแม่แบบ เมื่อถูกทำให้เย็นตัวจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะรูปร่างตามต้องการ นอกจากนี้ เทอร์โมพลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการบิดและหลอมด้วยความร้อนเพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้อีก แต่ข้อจำกัดของการใช้งานพลาสติกประเภทนี้คือ ไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ เนื่องจากอาจเกิดการบิดเบี้ยวหรือเสียรูปทรงไป ตัวอย่างเช่น ขวดน้ำดื่ม ซึ่งไม่เหมาะสำหรับใช้บรรจุน้ำเดือดหรือร้อนจัด

### 2.2.2 เทอร์โมเซตติงพลาสติก

เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting plastic) เป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติพิเศษทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี เมื่อหลอมเหลวเป็นรูปแบบใดจะคงรูปร่างถาวรและไม่สามารถนำมาหลอมใช้เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่อีก พลาสติกประเภทนี้โมเลกุลจะเชื่อมโยงกันเป็นร่างแหเกิดการเชื่อมต่อข้ามไปมาระหว่างสายโซ่โมเลกุลโพลิเมอร์ ดังรูปที่ 2.3 โดยมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแข็งแรงมากจึงเป็นสาเหตุที่ไม่สามารถนำกลับมาหลอมเหลวได้อีก

ทั้งนี้ เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการสลายตัวโดยพันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลแตกออกหรือเกิดการใหม่เป็นซ้ำแล้ว ซึ่งพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงพลาสติกมีอยู่หลายชนิด ได้แก่ เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ ฟีนอลิกฟอร์มัลดีไฮด์ ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน อีพ็อกซีเรซิน โพลียูรีเทน โพลีเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว และซิลิโคน เป็นต้น



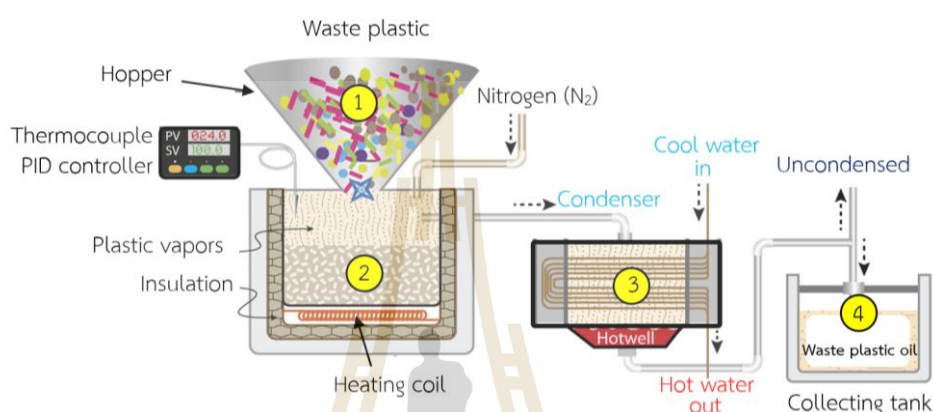
รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของเทอร์โมเซตติงพลาสติก

การผลิตพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตติงจะแตกต่างจากพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก คือ ในขั้นตอนแรกต้องทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันเพียงบางส่วน มีการเชื่อมโยงโมเลกุลเกิดขึ้นบ้างเล็กน้อยและยังสามารถหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน จึงสามารถขึ้นรูปภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงได้ เมื่อผลิตภัณฑ์มีรูปร่างตามต้องการแล้วให้คงอุณหภูมิไว้ประมาณ 200–300 °C เพื่อให้ได้โครงสร้างแบบร่างแหที่เสถียรและแข็งแรง สามารถนำผลิตภัณฑ์ออกจากแบบโดยไม่ต้องรอให้เย็น เนื่องจากผลิตภัณฑ์จะแข็งตัวอยู่ในแม่พิมพ์ ดังนั้นการให้ความร้อนในกระบวนการผลิตพลาสติกเทอร์โมเซตติงกลับทำให้วัสดุแข็งขึ้น ต่างจากกระบวนการผลิตพลาสติกเทอร์โมพลาสติกที่การให้ความร้อนจะทำให้พลาสติกนิ่มและหลอมเหลว พลาสติกเทอร์โมเซตติงเมื่อใช้งานเสร็จไม่สามารถนำมาผ่านการหลอมและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หรือรีไซเคิลได้อีก และถ้าให้ความร้อนมากเกินไปจะทำให้พลาสติกเกิดการสลายตัวหรือไหม้

## 2.3 กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) เป็นกระบวนการสลายตัวของสารประกอบหรือวัสดุต่าง ๆ ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 300–900 °C ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนหรือมีออกซิเจนอยู่น้อยมาก (Rehan, M. et al., 2017) ในกรณีวัสดุที่เป็นพลาสติกนั้นกระบวนการนี้จะพิจารณาจากกระบวนการย้อนกลับของพอลิเมอร์ แสดงขั้นตอนของกระบวนการไพโรไลซิส ดังรูปที่ 2.4 ขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมวัสดุโดยการตัด/สับวัสดุเป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อนำมาใส่ในส่วนที่ 1 ซึ่งเป็นส่วนของถังในการป้อนวัสดุต่าง ๆ ที่จะใช้ในกระบวนการสำหรับลำเลียงขยะพลาสติกลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบระบบปิด (ส่วนที่ 2) ที่มีอุปกรณ์ให้ความร้อนและชุดควบคุม

พารามิเตอร์ เช่น ความดัน อุณหภูมิ และอัตราการให้ความร้อน เป็นต้น โดยเครื่องปฏิกรณ์จะปล่อยความร้อนเพื่อหลอมพลาสติก เมื่อผ่านกระบวนการดังกล่าวแก๊สที่ไหลออกจากเครื่องปฏิกรณ์จะผ่านไปยังส่วนที่ 3 คือ ส่วนของเครื่องควบแน่นเพื่อเปลี่ยนสถานะของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สให้เป็นของเหลวหรือเชื้อเพลิงเหลว และไหลเข้าสู่ถังกักเก็บในส่วนที่ 4 โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ของเหลว และของแข็ง ซึ่งสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับสถานะของกระบวนการและประเภทของวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการ



รูปที่ 2.4 การผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (Damodharan, D. et al., 2018)

อย่างไรก็ตาม กระบวนการของไพโรไลซิสเองผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมากที่สุด คือ ของเหลว (น้ำมันเชื้อเพลิง) ในขณะที่กระบวนการไพโรไลซิสนั้นมีผลทำให้เกิดแก๊สไอเสียขึ้นในระหว่างกระบวนการ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) แอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>) ซัลเฟอร์ (SO<sub>x</sub>) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ดังนั้น การบำบัดแก๊สไอเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง (Ghosh, P. et al., 2020; D. Damodharan et al., 2018) นอกจากนี้ กระบวนการไพโรไลซิสแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ ไพโรไลซิสแบบช้า ไพโรไลซิสแบบเร็ว และไพโรไลซิสแบบเร็วมาก ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยสังเขปดังนี้

1. ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) คือ กระบวนการไพโรไลซิสที่มีอัตราการให้ความร้อนสำหรับกระบวนการไม่เกิน 10 °C/min อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 400–600 °C ซึ่งผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้จะเป็นของแข็ง (น้ำมันดินและถ่านไม้) และบางส่วนจะเป็นเชื้อเพลิงเหลวและแก๊ส

2. ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) คือ กระบวนการไพโรไลซิสที่มีอัตราการให้ความร้อนสำหรับกระบวนการอยู่ในช่วง 10–100 °C/min อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 600–650 °C ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นเชื้อเพลิงเหลวประมาณ 50–60% ของแข็งประมาณ 25–30% และแก๊สประมาณ 15–20%



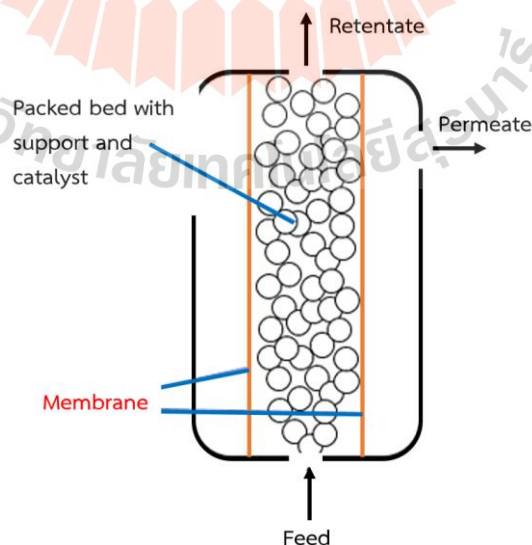
3. ไพโรไลซิสแบบเร็วมาก (Flash pyrolysis) คือ กระบวนการไพโรไลซิสที่มีอัตราการให้ความร้อนสำหรับกระบวนการมากกว่า  $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอุณหภูมิที่ใช้สูงถึง  $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$  ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จะเป็นแก๊สและเชื้อเพลิงเหลว

ทั้งนี้ ปัจจัยหลักที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิสที่ต้องพิจารณาประกอบไปด้วย ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิและความดันในการทำปฏิกิริยา ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการให้ความร้อน และชนิดของวัตถุดิบ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้ (Yaqoob, H. et al., 2021)

### 2.3.1 ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์

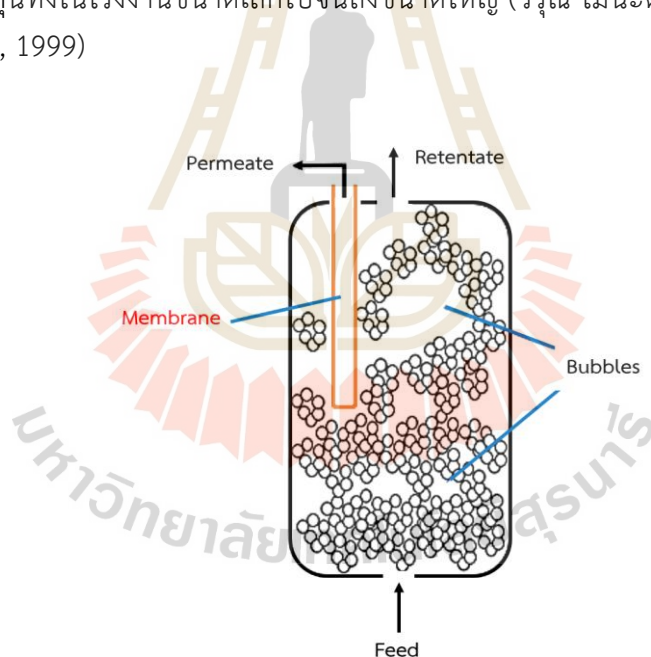
เครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) เป็นองค์ประกอบหลักของระบบในกระบวนการไพโรไลซิส และเป็นส่วนในการทำปฏิกิริยา ซึ่งสามารถแบ่งออกตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่และเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิด

1. เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Fixed-bed reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีหลักการทำงานคือ เมื่อป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์วัตถุดิบดังกล่าวจะไม่มีเคลื่อนที่และเมื่อให้ความร้อนวัตถุดิบจะเกิดปฏิกิริยาอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ จนได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของผสมระหว่างแก๊สและไอระเหย ซึ่งไหลออกจากระบบโดยแก๊สพาด้วยความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์หรือจากการดูดด้วยปั๊มสุญญากาศ แสดงดังรูปที่ 2.5 นักวิจัยส่วนหนึ่งเลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้เนื่องจากมีความง่ายในการออกแบบระบบ เหมาะสำหรับการใช้ในระดับการทดลองในห้องปฏิบัติการ และง่ายต่อการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีข้อเสียที่จำเป็นต้องมีการเปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ทุกครั้งหลังเสร็จกระบวนการ เพื่อนำเอาผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้น ระบบของการผลิตจึงเป็นในรูปแบบกึ่งต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องเท่านั้น (วิรุณ โมนะตระกูล และคณะ, 2560; Fogler, H. S., 2005)



รูปที่ 2.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Michele Ongis, 2020)

2. เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไชน์เบด (Fluidized Bed Reactors) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีหลักการทำงานคือ เมื่อป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์โดยจะมีแก๊สนำพาอยู่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อได้รับความร้อนวัตถุดิบจะเกิดการแตกตัวทั้งหมดและไหลเวียนภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นป่วน หลังจากนั้นผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊สจะถูกแยกออกจากเครื่องปฏิกรณ์ แสดงดังรูปที่ 2.6 โดยเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้เหมาะสำหรับการผลิตขนาดใหญ่ เนื่องจากสามารถรองรับปริมาณวัตถุดิบได้ในปริมาณมากและก่อให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ นอกจากนี้ ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไชน์เบดสำหรับกระบวนการผลิตพลังงานเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกคือ (1) วัตถุดิบเกิดการรวมตัวกันเป็นอย่างดีจากการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนภายในเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและเกิดการแตกตัวได้ดี เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิได้ทั่วถึงส่งผลให้ง่ายต่อการควบคุมระบบ (2) ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทำงานค่อนข้างต่ำกว่าเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น ๆ (3) การเพิ่มลดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนตัวของของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นเหมือนตัวพาในขณะที่เกิดการเคลื่อนที่ (4) ระบบมีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งสามารถใช้แก๊สพาและช่วงอุณหภูมิที่หลากหลาย อีกทั้งยังสะดวกในการปรับเวลาที่วัตถุดิบอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ และ (5) ใช้เวลาในการซ่อมบำรุงน้อยจึงเหมาะสมสำหรับการลงทุนทั้งในโรงงานขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ (วีรุณ โมนะตระกูล และคณะ, 2560; Li, A. M. et al., 1999)



รูปที่ 2.6 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไชน์เบด (Michele Ongis, 2020)

### 2.3.2 เวลาที่ใช้ในกระบวนการ

เวลาที่ใช้ในกระบวนการ (Residence time) คือ ระยะเวลาของวัตถุดิบที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งเวลาที่ใช้ในกระบวนการสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสนั้นมีการกำหนดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส โดยในไพโรไลซิสแบบเร็วเวลาดังกล่าวจะถูกกำหนดจากระยะเวลาสัมผัส

ของวัตถุดิบกับพื้นผิวที่ร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ และไนโฟโรไลซิสแบบช้าระยะเวลาตั้งแต่เริ่มต้นการให้ความร้อนวัตถุดิบจนถึงการนำผลิตภัณฑ์ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ เวลาที่ใช้ในกระบวนการที่นานขึ้นจะสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีความเสถียรทางความร้อนมากขึ้น โดยในแต่ละประเภทของกระบวนการไพโรไลซิสจะมีเวลาที่ต่างกัน (Jung, C., & Fontana, A., 2006) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เวลาที่ใช้ในกระบวนการของกระบวนการไพโรไลซิสแต่ละประเภท

ประเภทกระบวนการ	เวลาที่ใช้ในกระบวนการ	ผลิตภัณฑ์ที่ได้
ไพโรไลซิสแบบช้า	มากกว่า 30 นาที	แก๊ส ของเหลว และของแข็ง
ไพโรไลซิสแบบเร็ว	10-20 วินาที	แก๊ส ของเหลว และของแข็ง
ไพโรไลซิสแบบเร็วมาก	น้อยกว่า 1 วินาที	แก๊ส ของเหลว และของแข็ง

### 2.3.3 อุณหภูมิและความดันการทำปฏิกิริยา

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งในกระบวนการไพโรไลซิสจะใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของวัตถุดิบ เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวของพลาสติกแต่ละประเภทจะมีอุณหภูมิที่ต่างกันดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้ในงานวิจัยของ Ghosh, P. et al. (2020) ได้อธิบายว่า “อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่สูงนั้นผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้จะเป็นเชื้อเพลิงเหลว ในขณะที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส” นอกจากนี้ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยายังส่งผลต่อสมบัติทางเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ที่เป็นเชื้อเพลิงเหลว ยกตัวอย่างเช่น การใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ต่ำ (500 °C) จะส่งผลให้ได้เชื้อเพลิงเหลวที่มีความหนืดต่ำ ในทางตรงกันข้ามในสภาวะการใช้อุณหภูมิที่สูง (มากกว่า 700 °C) จะทำให้ได้เชื้อเพลิงเหลวที่มีความหนืดสูงและเกิดการก่อตัวของอะโรเมตริกส์ในน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวด้วยเช่นเดียวกันสาเหตุเพราะการเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิ (Nizami, A. et al., 2015) ดังนั้น อุณหภูมิจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีคุณภาพสำหรับนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงทางเลือก

ตารางที่ 2.2 อุณหภูมิการสลายตัวของพลาสติกด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก

ประเภทของพลาสติก	ช่วงอุณหภูมิการสลายตัว (°C)	อ้างอิง
โพลีโพรพิลีน (PP)	240–425	Miandad, R. et al, (2017)
โพลีสไตรีน (PS)	350–480	Lee, K.-H. et al. (2007)
โพลีเอทิลีน (PE)	270–510	Miandad, R. et al, (2017)
โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)	400–550	Miandad, R. et al, (2019)
โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC)	243–461	Fathy, E. s. et al, (2018)

ความดันในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยที่ไม่นิยมทำการปรับเปลี่ยน ด้วยสาเหตุที่กระบวนการไพโรไลซิสโดยส่วนใหญ่จะนิยมใช้ความดันในการทำปฏิกิริยาที่ความดันบรรยากาศหรือ

ความดันที่สูงกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ความดันยังถือว่ามีความสำคัญในกระบวนการไพโรไลซิส เนื่องจากจะส่งผลต่อจุดเดือดของพอลิเมอร์และพลาสติกจะใช้เวลามากขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งภายใต้ความดันสูงจุดเดือดของพลาสติกจะเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าวัสดุจะถูกไพโรไลซิสเพิ่มเติมแทนที่จะกลายเป็นไอที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มความดันในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นและลดปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เป็นเชื้อเพลิงเหลว (Murata, K. et al, 2004)

### 2.3.4 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

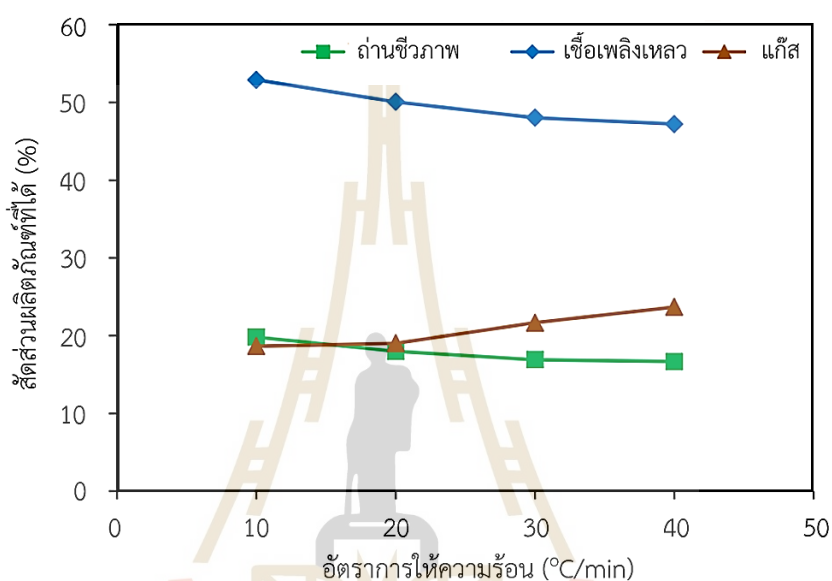
ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เป็นสารที่เติมลงไปในการปฏิกิริยาเพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาทางเคมีของพอลิเมอร์เกิดได้เร็วขึ้นหรือทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะไปลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาให้ต่ำลง แต่พลังงานของสารตั้งต้นและของสารผลิตภัณฑ์ยังคงที่ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ (1) ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว (Homogeneous catalyst) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเนื้อเดียวกันถือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในวัฏภาคเดียวกันกับสารตั้งต้นหรือสารผลิตภัณฑ์ (วัสดุที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส) โดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นสารละลายที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นละลายอยู่ด้วยกัน เช่น อะลูมิเนียมไตรคลอไรด์ ( $AlCl_3$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเนื้อเดียวกันที่พบบ่อยที่สุดที่ใช้สำหรับไพโรไลซิสของโพลีโอเลฟิน (Stelmachowski, M., 2010) และ (2) ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม (Heterogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประหยัดกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในวัฏภาคที่แตกต่างกับสารตั้งต้นหรือสารผลิตภัณฑ์ และสามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมที่นิยมใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส ได้แก่ ซีโอไลต์ (Zeolite) และซิลิกา-อะลูมินา (Silica-Alumina) เป็นต้น (Aguado, J. et al., 2006; Kalargaris, I., 2017)

การควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสให้คงที่และการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นไฮโดรคาร์บอนที่สั้นลง งานวิจัยส่วนหนึ่งได้บ่งชี้ให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาบางชนิดสามารถเพิ่มความเสถียรของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ และมีสมบัติทางเชื้อเพลิงใกล้เคียงน้ำมันเชื้อเพลิงในกลุ่มน้ำมันดีเซลหรือน้ำมันแก๊สโซลีน (Anuar Sharuddin, S. D. et al., 2016) นอกจากนี้ ตัวเร่งปฏิกิริยายังเป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยขจัดสิ่งเจือปน ลดอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา อีกทั้งยังสามารถช่วยเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์และเพิ่มค่าความร้อนเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ (เชื้อเพลิงเหลว) แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสส่งผลกระทบต่อสมบัติทางเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงเหลวมีค่าดัชนีซีเทนและความชื้นของเชื้อเพลิงเหลวลดลง รวมถึงกรณีการใช้ซีโอไลต์มีส่วนทำให้จุดไหลเท ความหนาแน่น จุดวาบไฟ และช่วงของจุดเดือดลดลง (Oyeleke, O. O., et al., 2021) นอกจากนี้ จากผลการวิจัยของ Singh, R. K. et al. (2020) พบว่า ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นไฮโดรคาร์บอนหนัก (Heavy hydrocarbon) ในขณะที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเป็นไฮโดรคาร์บอนเบา (Lighter hydrocarbon)

### 2.3.5 อัตราการให้ความร้อน

อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไพโรไลซิส โดยการเพิ่มอัตราการให้ความร้อน

ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและของแข็งมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ที่ช่วงอุณหภูมิที่พิจารณาเดียวกัน ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการให้ความร้อน โดยแก๊สดังกล่าวนี้ประกอบไปด้วย ไฮโดรเจน ( $H_2$ ), มีเทน ( $CH_4$ ), คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) ซึ่งบ่งชี้ได้จากงานวิจัยของ Sarkar, J. K., & Wang, Q., (2020) ที่ได้ศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการให้ความร้อน ได้แก่ 10, 20, 30 และ 40  $^{\circ}C/min$  ภายใต้เงื่อนไขของการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 900  $^{\circ}C$  ดังแสดงผลการศึกษาในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบต (Michele Ongis, 2020)

ทั้งนี้ จากผลการศึกษาและวิจัยของ Safdari, M.-S. et al. (2019) ได้แสดงข้อมูลช่วงอัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิที่เหมาะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในแต่ละประเภท ดังตารางที่ 2.3 เพื่อใช้เป็นข้อมูลในใช้พิจารณาและกำหนดสถานะของกระบวนการไพโรไลซิสสำหรับแปรรูปพลังงานเชื้อเพลิงจากวัตถุดิบต่าง ๆ

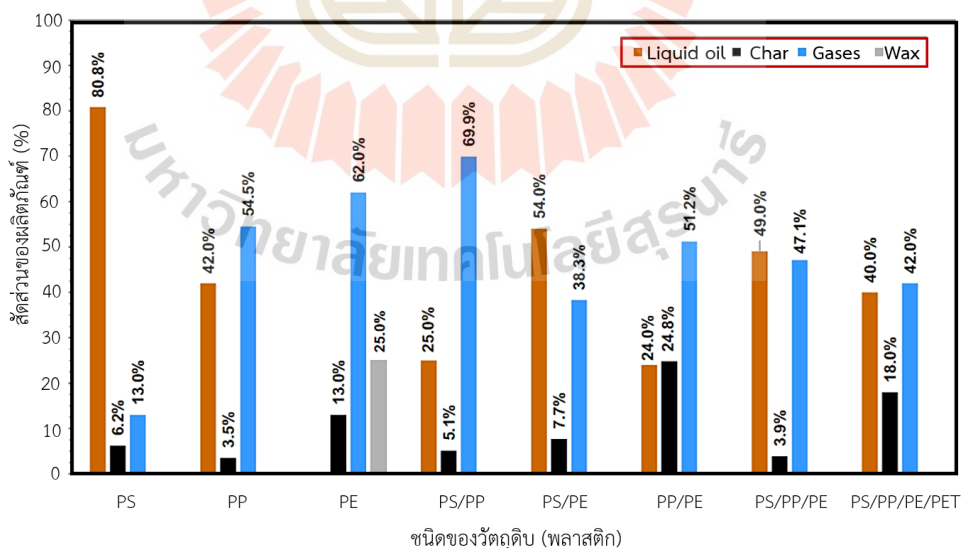
ตารางที่ 2.3 อัตราการให้ความร้อนในกระบวนการของกระบวนการไพโรไลซิสแต่ละประเภท

ประเภทกระบวนการ	อัตราการให้ความร้อน ( $^{\circ}C/s$ )	อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )
ไพโรไลซิสแบบช้า	0.1–1.0	300–500
ไพโรไลซิสแบบเร็ว	1–100	500–900
ไพโรไลซิสแบบเร็วมาก	มากกว่า 1,000	500–900

### 2.3.6 ชนิดของวัตถุดิบ

ชนิดของวัตถุดิบ (Types of feedstocks) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นพลังงานเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการไพโรไลซิส เนื่องจากพลาสติกในแต่ละชนิดจะมีคุณลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน เมื่อนำไปแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงสมบัติทางเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีความแตกต่างกัน และเป็นสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ จากงานวิจัยในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา นักวิจัยทั่วโลกได้ทำการศึกษาและวิจัยการใช้ขยะพลาสติกชนิดต่าง ๆ เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นพลังงานเชื้อเพลิง โดยผลการวิจัยส่วนใหญ่บ่งชี้ให้ว่า การใช้พลาสติกต่างชนิดเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงมีผลต่อคุณภาพและสมบัติทางเชื้อเพลิงอย่างเห็นได้ชัด อีกทั้งยังมีผลต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้พลาสติกชนิดต่าง ๆ ดังปรากฏเห็นในงานวิจัยของ Miandad, R. et al, (2017) ที่ได้ศึกษาอิทธิพลของการใช้พลาสติกชนิด PS, PP และ PE รวมถึงพลาสติกผสมระหว่างพลาสติกชนิด PS/PP, PS/PE, PS/PP/PE และ PS/PP/PE/PET เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่ส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์คุณภาพและสมบัติทางเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 นอกจากนี้ สมบัติทางเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์มีความหนืดพลวัตอยู่ในช่วง 1.92–2.09 cSt, ความหนาแน่นอยู่ที่ 910–920 kg/m<sup>3</sup>, จุดไหลเทอยู่ที่ -11 ถึง -60 °C จุดแข็งตัวอยู่ที่ -15 ถึง -65 °C จุดวาบไฟอยู่ที่ 28.10–30.20 °C และค่าความร้อนเชื้อเพลิงอยู่ที่ 41.40–41.80 MJ/kg

ด้วยสาเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาและวิจัยผลกระทบจากการใช้ขยะพลาสติกชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อคุณภาพและสมบัติทางเชื้อเพลิง รวมถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์และมลพิษไอเสียจากการใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก



รูปที่ 2.8 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้พลาสติกชนิดต่าง ๆ (Miandad, R. et al, 2017)

## 2.4 ทฤษฎีพื้นฐานเครื่องยนต์ดีเซล

เครื่องยนต์ หมายถึง เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีที่ได้จากเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานความร้อน โดยการเผาไหม้ของอากาศกับเชื้อเพลิงแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานกล โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของการหมุนของเพลาส่งกำลัง เครื่องยนต์ความร้อนหรือเครื่องยนต์เผาไหม้นี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ เครื่องยนต์สันดาปภายนอกและเครื่องยนต์สันดาปภายใน

1. เครื่องยนต์สันดาปภายนอก เป็นเครื่องยนต์ที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายนอกตัวเครื่องยนต์ โดยนำเอาผลจากการเผาไหม้ของอากาศกับเชื้อเพลิงให้ถ่ายเทความร้อนไปยังของไหลชนิดที่สองซึ่งให้เป็นสารทำงานสำหรับผลิตกำลัง ดังนั้น สารทำงานและสารที่เกิดการเผาไหม้จึงเป็นของไหลคนละชนิดและถูกแยกออกจากกันโดยผนังนำความร้อนสารที่เกิดการเผาไหม้จึงไม่สัมผัสกับชิ้นส่วนที่เกิดการเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์

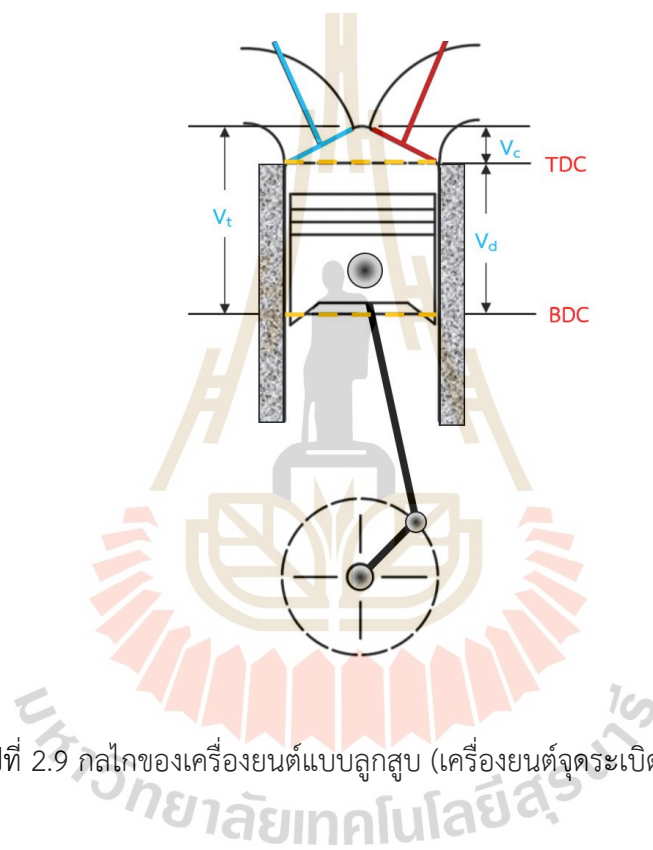
2. เครื่องยนต์สันดาปภายใน เป็นเครื่องยนต์ที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในตัวเครื่องยนต์ โดยนำเอาผลจากการเผาไหม้ของอากาศกับเชื้อเพลิงไปใช้เป็นสารทำงานสำหรับผลิตกำลังโดยตรง เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นเครื่องยนต์ความร้อน ซึ่งแปลงพลังงานเคมีในเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานกล โดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของการหมุนของเพลาส่งกำลัง ในขั้นแรกเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับออกซิไดเซอร์ภายในเครื่องยนต์ แล้วคายความร้อนหรือปล่อยพลังงาน พลังงานความร้อนนี้จะถูกเพิ่มอุณหภูมิและความดันของแก๊สในเครื่องยนต์ แล้วแก๊สความดันสูงนี้ก็จะผลักดันกลไกของเครื่องยนต์เป็นการแปลงการขยายตัวของแก๊สโดยอาศัยชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ให้เป็นการหมุนเพลาช้อเหวี่ยงเพลาช้อเหวี่ยงจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับเกียร์หรือระบบส่งกำลัง เพื่อส่งผ่านพลังงานกลในรูปของการหมุนไปใช้งานตามความประสงค์ขั้นสุดท้าย ส่วนใหญ่แล้วเครื่องยนต์สันดาปภายในจะเป็นเครื่องยนต์ลูกสูบที่สลับทิศ ซึ่งเคลื่อนที่สลับทิศไปมาอยู่ภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ อาทิเช่น เครื่องยนต์ดีเซล

เครื่องยนต์ดีเซล เป็นเครื่องยนต์สันดาปภายในชนิดหนึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดย รูดอล์ฟ ดีเซล (Rudolf Diesel) ซึ่งใช้หลักการทำงานด้วยการจุดระเบิดโดยความร้อนจากการอัดอากาศในโมเลกุลมีความหนาแน่นขึ้นในกระบอกสูบ เมื่อโมเลกุลถูกบีบอัดก็จะเกิดพลังงานความร้อนขึ้น และฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อให้เกิดการเผาไหม้จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (Compression ignition engine)” ทั้งนี้เครื่องยนต์ดีเซลได้มีพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นไม่ว่าจะเป็นด้านวัสดุ กำลัง แรงบิด และการประหยัดเชื้อเพลิง ในปัจจุบันได้มีการนำเครื่องยนต์ดีเซลไปใช้อย่างกว้างขวางในงานประเภทต่าง ๆ เช่น ภาคการคมนาคมขนส่ง ภาคอุตสาหกรรม และภาคเกษตรกรรม เป็นต้น ทั้งนี้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ที่จะถูกนำมาใช้งานสำหรับทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย รวมถึงพฤติกรรมการณ์ที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกประเภทต่าง ๆ ดังจะกล่าวถึงในบทที่ 4

### 2.4.1 หลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่องยนต์ดีเซล

เครื่องยนต์ดีเซลหรือเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดล้วนทำงานด้วยวัฏจักรอย่างใดอย่างหนึ่งคือ วัฏจักร 4 จังหวะ หรือวัฏจักร 2 จังหวะ ยกเว้นเฉพาะบางแบบที่มีการออกแบบเป็นพิเศษเฉพาะตัวเท่านั้น โดยขณะที่เครื่องยนต์แบบลูกสูบทำงานนั้นลูกสูบจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในกระบอกสูบ และถ่ายเทกำลังผ่านก้านสูบไปยังเพลาช้อเหวี่ยง ซึ่งการเคลื่อนที่กลับไปกลับมานี้จะถูกเปลี่ยนไปเป็นการหมุนของเพลาช้อเหวี่ยง เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งบนสุดหรือตำแหน่ง

ศูนย์ตายบน (Top dead center, TDC) ทำให้ปริมาตรในห้องเผาไหม้มีค่าน้อยที่สุดซึ่งเรียกปริมาตรนี้ว่า “ปริมาตรอัด (Clearance volume,  $V_c$ )” และเมื่อลูกสูบเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งล่างสุดหรือตำแหน่งศูนย์ตายล่าง (Bottom dead center, BDC) ทำให้ปริมาตรในห้องเผาไหม้มีค่ามากที่สุดซึ่งเรียกปริมาตรนี้ว่า “ปริมาตรรวม (Total volume,  $V_t$ )” โดยปริมาตรที่กวาดโดยลูกสูบระหว่างปริมาตรรวมและปริมาตรอัดคือ “ปริมาตรกระจัด (Displacement volume or Swept volume,  $V_d$ )” ซึ่งอัตราส่วนระหว่างปริมาตรสูงสุดและปริมาตรต่ำสุดเรียกว่า “อัตราส่วนการอัด (Compression ratio,  $r_c$ )” ดังแสดงในสมการที่ 2.1 ส่วนระยะระหว่างตำแหน่งศูนย์ตายบนและศูนย์ตายล่างคือ ระยะชักหรือช่วงชัก (Stroke) ของลูกสูบ แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 2.9 (Heywood, John B., 1988)



รูปที่ 2.9 กลไกของเครื่องยนต์แบบลูกสูบ (เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด)

$$r_c = \frac{V_d + V_c}{V_c} \quad (2.1)$$

โดยที่  $r_c$  คือ อัตราส่วนการอัด  
 $V_c$  คือ ปริมาตรอัด ( $\text{cm}^3$ )  
 $V_d$  คือ ปริมาตรกระจัด ( $\text{cm}^3$ )

#### 2.4.2 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ

Heywood, John B., (1988) และ Pulkrabek, W. W., (2004) ได้อธิบายถึงวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ ในแต่ละกระบอกสูบของเครื่องยนต์จะต้องใช้จังหวะ



การเคลื่อนที่ของลูกสูบ 4 จังหวะ หรือเพลาค้อเหวี่ยงหมุน 2 รอบ ซึ่งได้จังหวะกำลัง 1 จังหวะนั้น สมบูรณ์ หรือให้ครบ 1 วัฏจักรการทำงาน สามารถอธิบายได้โดยสังเขปดังนี้

1. จังหวะดูด (Intake stroke) จังหวะดูดลูกสูบเคลื่อนที่จากศูนย์ตายบน (TDC) ไปยังศูนย์ตายล่าง (BDC) ขณะที่ลิ้นไอดีเปิดและลิ้นไอเสียปิด เป็นการขยายปริมาตรห้องเผาไหม้และทำให้เกิดความดันต่ำกว่าบรรยากาศ อากาศภายนอกจึงถูกดันไหลเข้าสู่กระบอกสูบ จนกระทั่งลูกสูบเคลื่อนที่ถึงศูนย์ตายล่าง (BDC) ดังรูปที่ 2.10 (ก)

2. จังหวะอัด (Compression stroke) จังหวะอัดลิ้นไอดีจะเปิดเมื่อเคลื่อนที่ถึงศูนย์ตายล่าง (BDC) ลูกสูบเคลื่อนที่ไปยังศูนย์ตายบน (TDC) ในขณะที่ลิ้นไอดีและลิ้นไอเสียปิดสนิท ไอดีจะถูกกดปริมาตรทั้งความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากลิ้นไอดีไม่สามารถปิดได้ทันที เพราะฉะนั้นการอัดไอดีจะเริ่มเมื่อลิ้นไอดีปิดสนิทหลังศูนย์ตายล่าง (BDC) โดยอากาศภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลจะถูกอัดให้เหลือปริมาตรประมาณ 1:17-1:23 ซึ่งในช่วงสุดท้ายของจังหวะอัด เชื้อเพลิงจะถูกฉีดเป็นละอองฝอยเข้าสู่ห้องเผาไหม้และผสมกับอากาศร้อน ทำให้เชื้อเพลิงเกิดการระเหยตัวอย่างรวดเร็วและลุกไหม้ เป็นการเริ่มต้นของกระบวนการเผาไหม้ ดังรูปที่ 2.10 (ข)

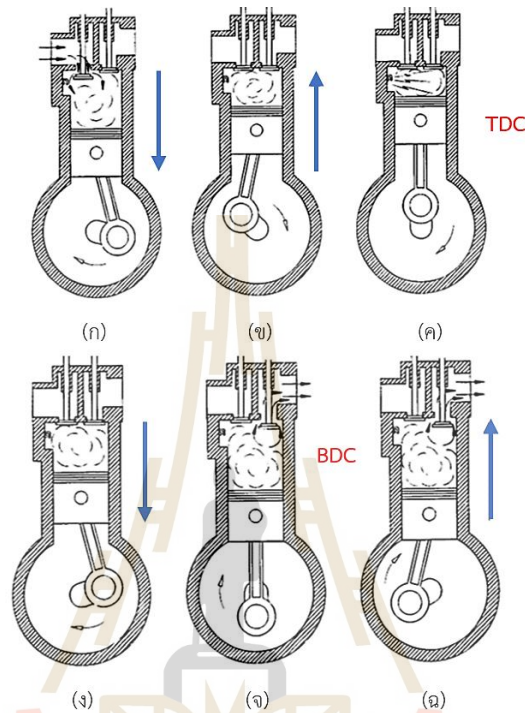
3. การเผาไหม้ (Combustion) การเผาไหม้ของส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นก่อนลูกสูบเคลื่อนที่ถึงศูนย์ตายบน (bTDC) การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างเต็มที่ที่ศูนย์ตายบน (TDC) ซึ่งเป็นการเผาไหม้ที่ความดันคงที่ (Constant pressure) จนสิ้นสุดการฉีดเชื้อเพลิง และลูกสูบเคลื่อนที่ลงสู่ศูนย์ตายล่าง (TDC) ดังรูปที่ 2.10 (ค) การเผาไหม้ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบแก๊สให้กลายเป็นไอเสีย และเพิ่มอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ให้สูงมากขึ้นส่งผลให้ความดันของแก๊สในห้องเผาไหม้สูงตามไปด้วย

4. จังหวะกำลังหรือจังหวะขยายตัว (Power stroke) จังหวะกำลังหรือจังหวะขยายนี้เป็นช่วงที่ลิ้นไอดีและลิ้นไอเสียปิดสนิทและจากกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ทำให้เกิดความดันสูงในห้องเผาไหม้ดันลูกสูบให้เคลื่อนที่ลงจากตำแหน่งศูนย์ตายบน (TDC) ไปยังศูนย์ตายล่าง (BDC) ซึ่งเป็นจังหวะที่เครื่องยนต์ให้กำลังและงานการขยายตัวของห้องเผาไหม้ส่งผลให้ความดันและอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ลดลง ดังรูปที่ 2.10 (ง)

5. การระบายไอเสีย (Exhaust blowdown) ช่วงท้ายของจังหวะกำลังโดยลิ้นไอเสียจะเปิดเพื่อระบายไอเสียความดันและอุณหภูมิในกระบอกสูบยังมีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับบรรยากาศภายนอกกระบอกสูบ ด้วยเหตุนี้ไอเสียส่วนใหญ่ที่อยู่ในกระบอกสูบจะคายออกจากกระบอกสูบตั้งแต่ลูกสูบยังเคลื่อนที่ลงมาไม่ถึงศูนย์ตายล่าง (BDC) ดังรูปที่ 2.10 (จ) ซึ่งเป็นไอเสียที่มีเอนทัลปี (Enthalpy) สูงทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรลดลง ทั้งนี้การเปิดลิ้นไอเสียก่อนถึงศูนย์ตายล่างแม้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน แต่ด้วยความจำเป็นเนื่องจากการระบายไอเสียที่ต้องใช้เวลา

6. จังหวะคายไอเสีย (Exhaust stroke) จังหวะคายไอเสียเป็นช่วงที่ลูกสูบเคลื่อนที่ถึงศูนย์ตายล่าง (BDC) ในกระบอกสูบยังเต็มไปด้วยไอเสียความดันต่ำที่ใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศ เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นจากศูนย์ตายล่าง (BDC) ในขณะที่ลิ้นไอดีเปิดและลิ้นไอเสียเปิดอยู่ ไอเสียจะถูกไล่ออกจากกระบอกสูบจนเหลือตกค้างเพียงปริมาตรอัด (Clearance volume) ดังรูปที่ 2.10 (ฉ) เมื่อลูกสูบถึงศูนย์ตายบน (TDC) ก่อนลูกสูบจะถึงศูนย์ตายบนลิ้นไอดีจะเริ่มเปิด และเปิดสุดที่หลังศูนย์ตายบน (aTDC) เป็นการเริ่มต้นจังหวะแรกของวัฏจักรต่อไป ส่วนลิ้นไอเสียจะเริ่ม

ปิดก่อนศูนย์ตายบน และปิดสนิทหลังศูนย์ตายบนเล็กน้อย ช่วงก่อนและหลังศูนย์ตายบนเล็กน้อย ในช่วงจังหวะสุดท้ายของจังหวะคายไอเสีย และช่วงเริ่มต้นของจังหวะดูดจึงเป็นช่วงที่ลิ้นไอดีและไอเสียเปิดอยู่ด้วยกัน ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า “มุมลิ้นซ้อนเหลื่อม (Valve overlap)”



รูปที่ 2.10 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ (Heywood, John B., 1988)

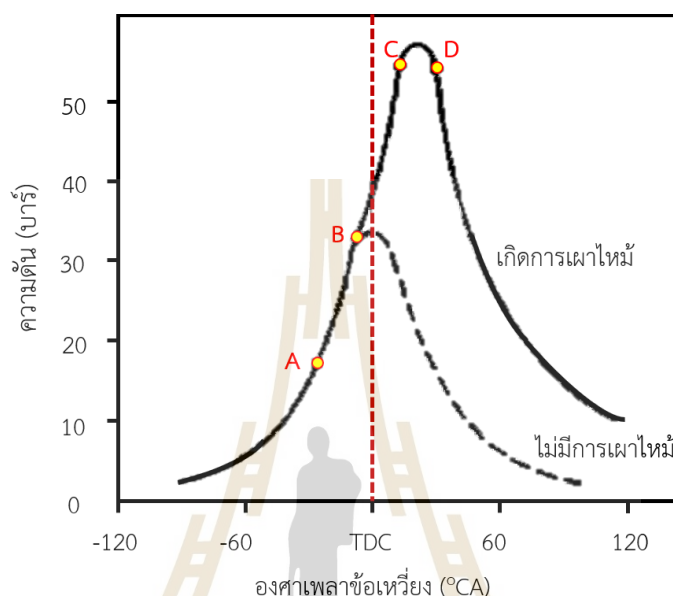
### 2.4.3 กระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล

กระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อน

#### 2.4.3.1 ความดันในกระบอกสูบ

ความดันในกระบอกสูบ (In-cylinder pressure, ICP) คือ ความดันที่เกิดขึ้นภายในกระบอกสูบเปรียบเทียบกับองศาเพลาคือองศาต่างๆ ในช่วงจังหวะการอัดและจังหวะการคายของวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้และเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวัดอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนของพลังงานเคมีในน้ำมันเชื้อเพลิง สามารถวัดได้ด้วยการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ความดันเพื่อวัดความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ โดยลักษณะของความดันในกระบอกสูบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ความดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากการลดลงของปริมาตรในกระบอกสูบในจังหวะการอัด และความดันที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่า กรณีที่เครื่องยนต์ไม่มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะแสดงลักษณะความดันในกระบอกสูบดังเส้นประ (สีดำ) กล่าวคือ เมื่อปริมาตรกระบอกสูบของเครื่องยนต์เกิดการลดลงมีผลให้ความดันในกระบอกสูบสูงขึ้นในจังหวะการอัดจนลูกสูบเคลื่อนที่ถึง TDC และเกิดการลดลงของความดันในกระบอกสูบในจังหวะการคาย ทั้งนี้ กรณีที่เครื่องยนต์มี

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะเห็นได้ว่าความดันหลังลูกสูบหลังเคลื่อนที่ถึงจุด TDC หรือตำแหน่งจุด B ความดันในกระบอกสูบจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และเกิดการลดลงของความดันเมื่อเครื่องยนต์เข้าสู่จังหวะการคายและอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงลดลง ดังแสดงตามแนวเส้นทึบ (สีดำ)



รูปที่ 2.11 ความดันในกระบอกสูบของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (Stone, R., 2012)

นอกจากนี้ จากลักษณะของความดันในกระบอกสูบที่แสดงดังรูปที่ 2.11 สามารถแบ่งช่วงการทำงานของเครื่องยนต์ได้เป็น 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 ทั้งนี้ กล่าวโดยละเอียดถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

1. ระยะที่ 1 เริ่มต้นจากจุด A เมื่อหัวฉีดเริ่มฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้แต่ยังไม่เกิดการเผาไหม้จนถึงจุด B ซึ่งระยะนี้ถูกเรียกว่า “ช่วงล่าช้าการจุดระเบิด (Ignition delay)” ระยะนี้ความดันในห้องเผาไหม้จะสูงขึ้นเรื่อย ๆ เพราะลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ขึ้นเพื่ออัดอากาศ น้ำมันเชื้อเพลิงยังคงถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ตลอดเวลา และเมื่อละอองน้ำมันเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดมีปริมาณที่มากพอและบางส่วนจะระเหยเป็นไอพร้อมที่จะเผาไหม้

2. ระยะที่ 2 เมื่อไอน้ำมันเริ่มติดไฟและเกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดความดันภายในห้องเผาไหม้ที่สูงทันทีทันใดจากจุด B ไปยังจุด C ระยะนี้เรียกว่า “ช่วงการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (Rapid combustion period)”

3. ระยะที่ 3 ต่อจากจุด C น้ำมันเชื้อเพลิงที่ยังไม่ได้เผาไหม้รวมกับน้ำมันเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดออกมาจากหัวฉีดอย่างต่อเนื่องจะเกิดการเผาไหม้ขึ้น ความรุนแรงของการเผาไหม้ในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงประกอบกับการแพร่กระจายของออกซิเจนที่เหลืออยู่ ระยะจุด C ไปจุด D นี้เรียกว่า “ช่วงการเผาไหม้ที่ถูควบคุม (Controlled combustion period)” ซึ่งสิ้นสุดลงที่จุด D พร้อมกับสิ้นสุดการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง ช่วงควบคุมการเผาไหม้มีความดันอาจสูงขึ้นหรือคงที่หรือต่ำลงก็ได้

4. ระยะที่ 4 หลังจากจุด D ถูกเรียกว่า “ช่วงหลังการเผาไหม้ (Period of after burning)” หลังจากหัวฉีดหยุดฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงแล้ว น้ำมันเชื้อเพลิงที่ยังคงเหลืออยู่ในห้องเผาไหม้จะรวมตัวกับออกซิเจนที่หลงเหลืออยู่แล้วเกิดการเผาไหม้ต่อ การเผาไหม้ในช่วงนี้จะไม่ปรากฏบนเส้นกราฟเพราะเป็นเวลาเดียวกันกับที่ลูกสูบเคลื่อนที่ลง ปริมาตรในห้องเผาไหม้จะขยายกว้างขึ้นทำให้ความดันในห้องเผาไหม้ลดลง

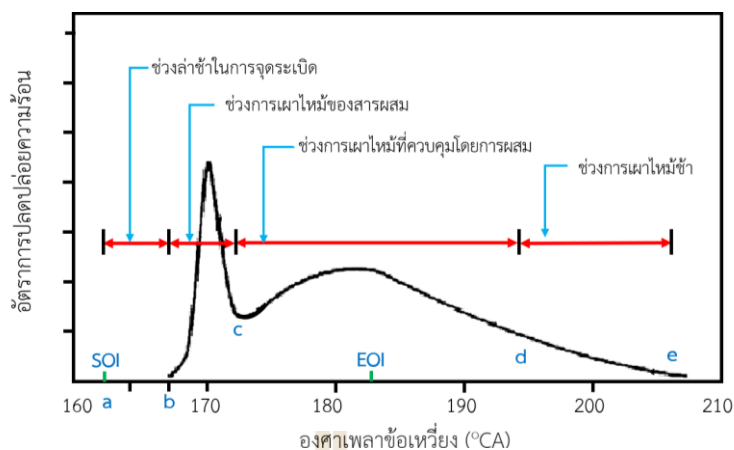
#### 2.4.3.2 อัตราการปลดปล่อยความร้อน

อัตราการปลดปล่อยความร้อน (Rate of heat release, ROHR) เป็นหลักการสำคัญที่นำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์การเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ ซึ่งอัตราการปลดปล่อยความร้อนคือ อัตราที่พลังงานเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ของความดันในกระบอกสูบและปริมาตรที่มุมมองศาลาข้อเหวี่ยงต่าง ๆ ตามกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบเปิดโดยไม่พิจารณามวลที่ไหลเข้าออกภายใต้สมมติฐานกระบวนการโพลีโทรปิก (Polytropic) ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ 2.2

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot p \frac{dV}{d\theta} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot V \frac{dp}{d\theta} \quad (2.2)$$

โดยที่	$\frac{dQ}{d\theta}$	คือ อัตราการปลดปล่อยความร้อน
	$\gamma$	คือ อัตราส่วนของค่าความร้อนจำเพาะของอากาศในอุดมคติ
	$\theta$	คือ องศาของเพลลาข้อเหวี่ยง ( $^{\circ}\text{CA}$ )
	$P$	คือ ความดันในห้องเผาไหม้ (Bar)
	$V$	คือ ปริมาตรในห้องเผาไหม้ ( $\text{m}^3$ )

อัตราการปลดปล่อยความร้อนแบ่งกระบวนการของอัตราการปลดปล่อยความร้อนออกเป็น 4 ช่วง คือ (1) ช่วงล่าช้าการจุดระเบิด (2) ช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ผสมไว้ก่อนแล้ว (3) ช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ควบคุมโดยการผสม และ (4) ช่วงการเผาไหม้ซ้ำซึ่งในแต่ละช่วงถูกควบคุมโดยกระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.12 แสดงแผนภูมิอัตราการปลดปล่อยความร้อนในเครื่องยนต์แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง โดยสามารถอธิบายพอสังเขปได้ดังนี้



รูปที่ 2.12 อัตราการผลิตปล่อยความร้อนในเครื่องยนต์แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง  
(ดัดแปลงจาก Heywood, John B., 1988)

1. ช่วงล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition delay period, a-b) เป็นช่วงระหว่างการเริ่มต้นของการฉีดเชื้อเพลิง (Start of injection, SOI) เข้าสู่ห้องเผาไหม้และการเริ่มต้นการเผาไหม้ ซึ่งสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงมีผลต่อการจุดระเบิดที่ล่าช้า โดยอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

ผลจากสมบัติทางกายภาพ (Physical processes) คือ การกระจายตัวเป็นละอองฝอยของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไป ไอของน้ำมันเชื้อเพลิง และการผสมกันระหว่างอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิง การแตกตัวของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ดีจะต้องการแรงดันในการฉีดที่สูง รูของหัวฉีดที่มีขนาดเล็ก น้ำมันเชื้อเพลิงมีความหนืดที่ต่ำ เครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดที่สูง และองศาการฉีดเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์โดยทั่วไปค่าที่น้อยที่สุดสำหรับเริ่มฉีดเชื้อเพลิงคือ 10-15 องศา ก่อนถึงศูนย์ตายบน

ผลจากสมบัติทางเคมี (Chemical processes) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการจุดระเบิดด้วยตัวเองของน้ำมันเชื้อเพลิง ดังนั้นสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงจึงมีผลต่อความล่าช้าในการจุดระเบิด และสมบัติของการจุดระเบิดสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลจะใช้เป็นค่าเลขซีเทนหรือดัชนีซีเทน ซึ่งเลขซีเทนที่ต่ำน้ำมันเชื้อเพลิงจะเกิดความล่าช้าในการจุดระเบิด และในกรณีที่น้ำมันเชื้อเพลิงมีค่าเลขซีเทนที่สูงเวลาในการจุดระเบิดจะสั้นลงและใช้เชื้อเพลิงน้อยในการจุดระเบิด โดยที่อัตราการปลดปล่อยความร้อนจะขึ้นอยู่กับอัตราการฉีดเชื้อเพลิงและการผสมกันระหว่างอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิง

2. ช่วงการเผาไหม้ของสารผสม (Premixed combustion phase, b-c) ในช่วงนี้เป็นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ผสมกับอากาศในช่วงล่าช้าในการจุดระเบิด โดยการเผาไหม้ก็จะเผาไหม้เกือบพร้อมกัน ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็วและเป็นผลให้มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนในช่วงนี้สูง

3. ช่วงการเผาไหม้ที่ควบคุมโดยการผสม (Mixing-Controlled combustion phase, c-d) เป็นการเผาไหม้หลังจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ถูกผสมกับอากาศในช่วงล่าช้าใน

การจุดระเบิดได้ถูกเผาไหม้จนหมด ในช่วงนี้จะถูกควบคุมโดยปริมาณเชื้อเพลิงที่พร้อมเผาไหม้อัตราการปลดปล่อยความร้อนช่วงนี้จะต่ำกว่าในช่วงการเผาไหม้ของสารผสม แล้วจะลดลงเมื่อการเผาไหม้ดำเนินต่อไป

4. ช่วงการเผาไหม้ช้า (Late combustion phase, d-e) เป็นช่วงที่การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ยังคงหลงเหลืออยู่ภายในห้องเผาไหม้เล็กน้อยและเป็นการเผาไหม้ของเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ของส่วนผสมหนาที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนที่ต่ำในจังหวะที่มีการขยายตัวภายในกระบอกสูบ

#### 2.4.3.3 สัมประสิทธิ์ความแปรผัน

สัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient of variation, COV) ถือว่าเป็นคุณลักษณะอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์สันดาปภายใน และเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในการประเมินเสถียรภาพในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในแต่ละวัฏจักร ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากการเปลี่ยนแปลงของความดันสูงสุดในกระบอกสูบที่เกิดขึ้นในแต่ละวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ นอกจากนี้ ยังสามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะการเผาไหม้ในแต่ละวัฏจักรด้วยความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ ซึ่งสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ไม่สม่ำเสมอทำให้ความดันสูงสุดในกระบอกสูบไม่คงที่ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันนี้ควรมีค่าไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากหากค่าความแปรผันที่สูงจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์และการปลดปล่อยมลพิษไอเสียที่สูงขึ้น (Heywood, John B., 1988; Shi, J., 2019) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.3–2.5

$$COV_{P_{max}} = \frac{\sigma_{P_{max}}}{P_{max}} \times 100 \quad (2.3)$$

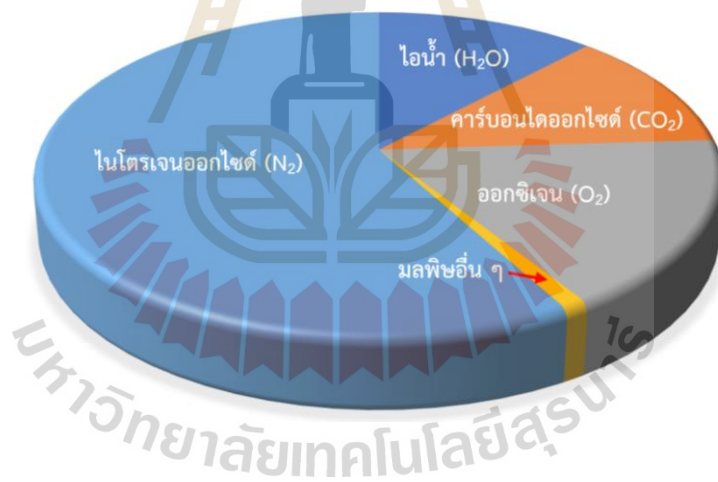
$$\sigma_{P_{max}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{N-1}^N (P_{max,i} - \bar{P}_{max})^2} \quad (2.4)$$

$$\bar{P}_{max} = \frac{1}{N} \sum_{N-1}^N P_{max,i} \quad (2.5)$$

โดยที่  $COV_{P_{max}}$  คือ สัมประสิทธิ์ความแปรผันของความดันสูงสุดใน N วัฏจักร  
 $\sigma_{P_{max}}$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความดันสูงสุดใน N วัฏจักร  
 $\bar{P}_{max}$  คือ ค่าเฉลี่ยของความดันสูงสุดใน N วัฏจักร  
 N คือ จำนวนวัฏจักรที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์

#### 2.4.4 มลพิษไอเสียจากเครื่องยนต์ดีเซล

เครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องยนต์ที่นิยมนำมาใช้ในการขับเคลื่อนยานพาหนะหรือใช้เป็นต้นกำลังให้กับเครื่องจักรกลต่าง ๆ โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากพลังงานเคมีที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (สารไฮโดรคาร์บอน) ในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ให้กลายเป็นพลังงานทางกลภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่สูง ซึ่งในทางทฤษฎีผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) แต่ในความเป็นจริงแล้วกลับพบว่ามลพิษไอเสียที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้โดยส่วนใหญ่แล้วจะประกอบไปด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และออกซิเจนส่วนเกิน ซึ่งปริมาณการปลดปล่อยมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ประเภทของเครื่องยนต์ สภาพการทำงานของเครื่องยนต์ (ภาระงานของเครื่องยนต์, ความเร็วรอบเครื่องยนต์, คุณสมบัติการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง และสมบัติทางเชื้อเพลิง เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอน เช่น พาราฟิน โอเลฟิน และอะโรมาติกส์ (Heywood, John B., 1988) โดยปกติแล้วของการปล่อยมลพิษในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล คือ ไอน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ประมาณ 2–12 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ประมาณ 2–12 เปอร์เซ็นต์ ออกซิเจน ( $\text{O}$ ) ประมาณ 3–17 เปอร์เซ็นต์ มลพิษไอเสียอื่น ๆ ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่เหลือของมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจะเป็นไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{N}_2$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการปล่อยมลพิษในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล

จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลดังที่กล่าวมาข้างต้นเป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญแหล่งหนึ่งที่ทำให้เกิดมลพิษไอเสียที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมลพิษไอเสียมีองค์ประกอบของซัลเฟอร์ ไนโตรเจน และไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมลพิษเหล่านี้มีสารที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งปะปนอยู่ด้วย เช่น เบนซิน, ฟอร์มาลดีไฮด์, โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น นอกจากนี้ สารประกอบซัลเฟอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลจะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำหรือไอน้ำในอากาศจะสามารถเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟูริกที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดยมลพิษไอเสียหลัก ๆ ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล ได้แก่ ไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) ไฮโดรคาร์บอน (HC) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

และฝุ่นละอองหรือเขม่า (Particulate matter, PM or Smoke) ซึ่งมลพิษไอเสียส่วนใหญ่ที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลคือ  $\text{NO}_x$  และ PM อีกทั้งยังเป็นมลพิษไอเสียที่ยากต่อการควบคุมให้มีปริมาณการปลดปล่อยให้อยู่ในระดับต่ำ ด้วยสาเหตุนี้ มาตรฐานการปลดปล่อยมลพิษไอเสียจากเครื่องยนต์จึงถูกกำหนดขึ้นโดยการกำหนดให้  $\text{NO}_x$ , HC, CO และ PM เป็นมลพิษควบคุม (Heywood, John B., 1988; Majewski, W. A., et al., 2006) ซึ่งสามารถอธิบายถึงปรากฏการณ์การเกิดมลพิษไอเสียเหล่านี้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ได้โดยสังเขปดังนี้

#### 2.4.4.1 มลพิษไนโตรเจนออกไซด์

ไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen oxide,  $\text{NO}_x$ ) เป็นมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบไนตริกออกไซด์ (NO) ประมาณ 80–90 เปอร์เซ็นต์ และอีกประมาณ 10–20 เปอร์เซ็นต์เป็นไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $\text{NO}_2$ ) โดยสมบัติทางเคมีของสารประกอบทั้งสองแสดงดังตารางที่ 2.4 โดยปกติแล้วมลพิษไอเสียในเครื่องยนต์ดีเซลจะมีปริมาณ  $\text{NO}_x$  อยู่ระหว่าง 50 ถึง 1,000 ppm การก่อตัวของมลพิษ  $\text{NO}_x$  ในเครื่องยนต์นั้นเกิดขึ้นจากการออกซิเดชันของไนโตรเจนในอากาศระหว่างการเผาไหม้ของอากาศและเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง อีกทั้งยังเกิดขึ้นได้ในระหว่างช่วงเริ่มต้นการเผาไหม้และในช่วงเวลาสั้น ๆ ภายหลังจากเกิดความดันสูงสุดภายในกระบอกสูบ ซึ่งลักษณะปฏิกิริยาการเกิดไนตริกออกไซด์มีหลายรูปแบบ

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางเคมีของสารประกอบไนตริกออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์

สมบัติทางเคมี	สารประกอบ	
	ไนตริกออกไซด์	ไนโตรเจนไดออกไซด์
สูตรโมเลกุล	NO	$\text{NO}_2$
น้ำหนักโมเลกุล	30.01	46.01
ลักษณะปรากฏ	ไม่มีสี	น้ำตาลแดง
ความหนาแน่น	1.0367	-
จุดหลอมเหลว	-161 °C	-9.3 °C
จุดเดือด	-151 °C	21.3 °C

มลพิษ  $\text{NO}_x$  นับได้ว่าเป็นแก๊สพิษที่มีผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม กล่าวคือ เมื่อร่างกายได้รับ  $\text{NO}_x$  เข้าไปในร่างกายแล้ว ไนโตรเจนออกไซด์จะไปจับตัวกับเฮโมโกลบิน เกิดเป็นเมธเฮโมโกลบิน ซึ่งทำให้เฮโมโกลบินในร่างกายไม่สามารถรับออกซิเจนได้ เมื่อร่างกายรับเข้าไปเป็นปริมาณมากจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอย่างร้ายแรง โดยจากข้อมูลของกรมส่งเสริมสุขภาพสิ่งแวดล้อมระบุว่า ร่างกายมนุษย์สามารถรับ  $\text{NO}_x$  ได้ที่ความเข้มข้นไม่เกิน  $320 \mu\text{g}/\text{m}^3$  หรือ 0.17 ppm เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเท่านั้น นักวิจัยทั่วโลกจึงได้พยายามนำเสนอวิธีการลดและควบคุมปริมาณ  $\text{NO}_x$  ที่เกิดขึ้นให้อยู่ภายใต้มาตรฐานการควบคุมปริมาณมลพิษ ดังนั้น การพัฒนาและวิจัยการบำบัดมลพิษไอเสียหรือหาแหล่งพลังงานสะอาดจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว (Majewski & Khair, 2006; Perry, R.H., 1984)



นอกจากปัจจัยที่ก่อให้เกิด  $\text{NO}_x$  ดังที่กล่าวมาข้างต้นยังมีปัจจัยการก่อกำเนิดอื่น ๆ โดยกลไกการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลไกหลัก ๆ ได้แก่

1. กลไก Prompt NO เป็นกลไกที่ถูกระบุโดย Charles P. Fenimore ซึ่งอธิบายว่า “กลไกนี้เป็นกลไกการก่อตัวของ  $\text{NO}_x$  ในสภาพแวดล้อมการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำกว่ากลไกความร้อน” หรือเป็นกลไกที่เกิดจากโมเลกุลของไนโตรเจนในอากาศทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอนเมื่อมีการเผาไหม้ โดยจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเผาไหม้ที่ส่วนผสมเชื้อเพลิงที่หนา โดยชื่อ “Prompt” ได้มาจากการก่อตัวอย่างรวดเร็วของ  $\text{NO}_x$  ในเขตเปลวไฟ ตามกลไกที่รวดเร็ว โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนเพื่อสร้างเอมีน ( $\text{NH}_x$ ) และโมเลกุลไซยาโน ( $\text{CN}$ ) สารประกอบที่เกิดขึ้นเหล่านี้ทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมผ่านปฏิกิริยาระดับกลาง เพื่อสร้าง  $\text{NO}_x$  ปฏิกิริยาต่อไปนี้ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.6-2.11 (Turns, S. R., 2012)



2. กลไก Fuel NO เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของออกซิเจนกับไนโตรเจนที่จับกับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง กระบวนการนี้มีความซับซ้อนเนื่องจากมีสปีชีส์จำนวนมากและปฏิกิริยาย้อนกลับได้ อย่างไรก็ตาม น้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกมีไนโตรเจนในปริมาณต่ำมาก เป็นสาเหตุที่ทำให้กลไกนี้มีความสำคัญเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกลไกอื่น ๆ (Kalargaris, I., 2017)

3. กลไก Thermal NO หรือกลไกที่เรียกว่า “เซลโดวิช (Zeldovich)” เป็นกลไกทางเคมีที่อธิบายการเกิดออกซิเดชันของไนโตรเจนและการก่อตัวของ NO (ดังสมการที่ 2.12 และสมการที่ 2.13) ซึ่งเสนอเป็นครั้งแรกโดยนักฟิสิกส์ชาวรัสเซียชื่อ Yakov Borisovich Zel'dovich และในเวลาต่อมา Lavoie, G. A., et al. (1970) ได้เพิ่มปฏิกิริยาซึ่งเรียกว่า “กลไกเซลโดวิชแบบขยาย

(Extended Zeldovich)” แสดงดังสมการที่ 2.14 ซึ่งเป็นปฏิกิริยามีส่วนสำคัญเป็นอย่างมากต่อการก่อตัวของ NO เนื่องจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงโมเลกุลออกซิเจนบางส่วนจะแยกตัวกับอะตอม จากนั้นจึงเกิดการรวมตัวกันเป็นโมเลกุลไนโตรเจน และก่อตัวเป็น NO การเกิดออกซิเดชันของโมเลกุลไนโตรเจน (ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิด NO) เริ่มต้นที่สภาวะอุณหภูมิประมาณ 1,000 °C และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจาก 1,300 °C (สำหรับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทุก ๆ 100 °C จะเกิดการก่อตัวของ NO เป็น 2 เท่า) (Hsu, B. D., 2002) ทั้งนี้ ไนโตรเจนในอากาศเมื่ออยู่ในที่อุณหภูมิสูงอย่างห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ บางส่วนของไนโตรเจนอะตอมคู่ (N<sub>2</sub>) จะเกิดการแตกตัวเป็นไนโตรเจนอะตอมเดี่ยว (N) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ง่ายกว่า ดังนั้น เมื่อเกิดอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้มีการเกิด NO<sub>x</sub> ที่สูงขึ้น ทั้งนี้ NO<sub>x</sub> ในเครื่องยนต์ดีเซลโดยส่วนใหญ่เกิดจากกลไก Thermal NO



หลังจากการเกิดมลพิษไอเสียไนตริกออกไซด์ (NO) บางส่วนจะถูกเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) เมื่อถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ โดยที่ NO เกิดปฏิกิริยากับไอน้ำและออกซิเจนอย่างต่อเนื่อง ดังสมการที่ 2.15–2.16



#### 2.4.4.2 มลพิษไฮโดรคาร์บอน

ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbons, HC) เป็นสารอินทรีย์ที่ปลดปล่อยจากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลในรูปของแก๊ส ซึ่งประกอบไปด้วยไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ ที่เกิดจากน้ำมันเชื้อเพลิงและน้ำมันหล่อลื่น คุณสมบัติของไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันเชื้อเพลิงจะเป็นคาร์บอนชนิดโซ่สั้น ส่วนไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันหล่อลื่นประกอบไปด้วยโลหะหนัก ซึ่งไฮโดรคาร์บอนในไอเสียที่เกิดขึ้นนั้นจะส่งกลิ่นและทำให้อวัยวะต่าง ๆ ในร่างกายเกิดการระคายเคือง อีกทั้งยังทำปฏิกิริยากับอากาศเกิดเป็นหมอกควัน โดยสังเกตได้จากควันขาวที่ปล่อยออกมาจากท่อไอเสียเป็นตัวบ่งบอกถึงความเข้มข้นของ HC ที่สูง ซึ่งมลพิษ HC โดยปกติแล้วจะเกิดขึ้นเนื่องจากสารประกอบของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ได้แก่ เชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้หรือถูกเผาไหม้เพียงบางส่วน ส่วนใหญ่จะเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กที่แตกตัวจากโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ถูกเผาไหม้แต่เผาไหม้ไม่หมด

ลักษณะไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันไปตามการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วนผสมและประเภทของเชื้อเพลิงที่ต่างกัน โดยอัตราส่วนของอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อการเกิดมลพิษไฮโดรคาร์บอนในเครื่องยนต์ดีเซล เช่น กรณีในจังหวัดการจตุระเปิดล่าช้า มีอัตราส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงที่เจือจางมากเกินไป และกรณีอัตราส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงในปริมาณที่ไม่เหมาะสมในช่วงการเผาไหม้ จึงเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดไฮโดรคาร์บอนในไอเสียเพิ่มขึ้น และน้ำมันหล่อลื่นที่เคลือบอยู่บริเวณผนังของกระบอกสูบยังเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดไฮโดรคาร์บอนมากขึ้น (Heywood, 1988; Majewski & Khair, 2006) สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลโดยทั่วไปแล้วมีปริมาณมลพิษไฮโดรคาร์บอนอยู่ระหว่าง 20 ถึง 300 ppm ทั้งนี้ สาเหตุที่ก่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นจะเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ อาทิเช่น

1. ภายในห้องเผาไหม้ที่มีชอกหรือช่องแคบ ๆ ที่เชื้อเพลิงหรือไอดีสามารถเข้าไปอยู่ตามชอกต่าง ๆ เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นในจังหวะการอัดความดันในกระบอกสูบจะดันให้น้ำมันเชื้อเพลิงเข้าไปติดตามชอกหรือช่องต่าง ๆ เมื่อเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงในส่วนนี้จะไม่เกิดการเผาไหม้หรือเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

2. บริเวณผนังกระบอกสูบเมื่อเปลวไฟลามไปถึงผนังสูบกระบอกสูบซึ่งบริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิต่ำเนื่องจากอยู่ใกล้ระบบระบายความร้อนจึงส่งผลให้เปลวไฟดับ ซึ่งทำให้เชื้อเพลิงบางส่วนไม่ถูกเผาไหม้

3. ไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นจากสารหล่อลื่นนั้นสามารถดูดซับและปล่อยไฮโดรคาร์บอนได้เป็นผลให้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนนั้นไม่สามารถเผาไหม้ได้

#### 2.4.4.3 มลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์

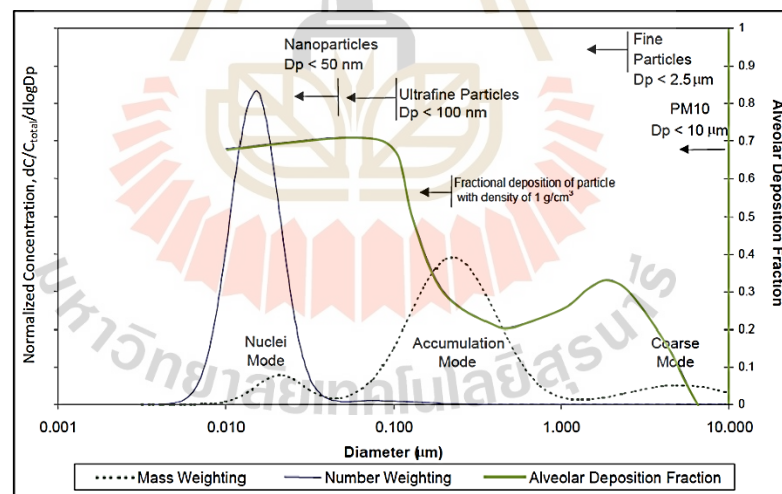
คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide, CO) เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ทำให้เกิดการฟุกร้อน และแก๊สพิษมีผลเสียต่อระบบการหายใจของมนุษย์ เนื่องจากเมื่อหายใจเข้าไปปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์จะรวมตัวกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดและเกิดเป็นคาร์บอกซีฮีโมโกลบินส่งผลให้คุณภาพการลำเลียงออกซิเจนที่ลดลงทำให้เกิดภาวะขาดอากาศหายใจ (พิมพินันท์ เอื้ออวยพร และคณะ, 2557) นอกจากนี้ ยังส่งผลต่อระดับโอโซนในชั้นบรรยากาศซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน ทั้งนี้ คาร์บอนมอนอกไซด์นั้นเป็นมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ โดยส่วนใหญ่พบในสภาวะการเผาไหม้ภายใต้การผสมบางซึ่งเกิดจากที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอหรือมีอากาศน้อยเกินไปในการทำปฏิกิริยากับคาร์บอนระหว่างกระบวนการเผาไหม้ ดังนั้น ปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถควบคุมได้โดยอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศผสมมูล สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลโดยทั่วไปแล้วจะการปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ต่ำประมาณ 10 ถึง 500 ppm เนื่องจากลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลจะมีปริมาณออกซิเจนที่มากและเพียงพอต่อการเผาไหม้จึงทำให้อัตราส่วนสัมพัทธ์อากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F ratio) มากกว่าทฤษฎี (มากกว่า 1) อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิในการเผาไหม้ที่สูงส่งผลให้เกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

ในปัจจุบันการลดหรือการกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกจากเครื่องยนต์นั้นสามารถทำได้โดยการใช้เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic converter) ซึ่งมีแพลทินัม (Platinum) หรือแพลเลเดียม (Palladium) ซึ่งจะเคลือบอยู่บนส่วนรองรับที่ทำมาจากเซรามิคและทำการขึ้นรูปเป็นรูปร่างสำหรับใช้เป็นตัวเร่งทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์ทำปฏิกิริยากับ

ออกซิเจน เพื่อให้เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการเคมี  $[2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2]$  โดยอุปกรณ์ดังกล่าวนี้จะถูกติดตั้งไว้ในท่อไอเสียรถยนต์ (เครื่องยนต์) ในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของแก๊สไอเสีย เมื่อไอเสียเดินทางผ่านเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยาการกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (Heywood, John B., 1988; กัมปนาท เทียนน้อย, 2555)

#### 2.4.4.4 ฝุ่นละอองและเขม่า

ฝุ่นละอองหรือเขม่า (Particulate matter, PM & Smoke) คือ อนุภาคคาร์บอนในวัฏภาคที่เป็นของแข็งและของเหลวที่ถูกปล่อยออกมาจากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ เช่น ไนโตรเจน โลหะ ซัลเฟต และไฮโดรเจน ซึ่งฝุ่นละอองสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลอยู่ในรูปเขม่าคาร์บอนแข็ง โดยมีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 15 ถึง 30 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแบ่งฝุ่นละอองได้ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ได้แก่ โหมดนิวเคลียส (Nuclei mode) โหมดการสะสม (Accumulation mode) และโหมดหยาบ (Coarse mode) โดยอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 50 นาโนเมตร (อนุภาคนาโน) เรียกว่า “โหมดนิวเคลียส” ในขณะที่อนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 50 นาโนเมตร ถึง 1,000 นาโนเมตร จัดเป็นโหมดสะสม และสุดท้ายอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1 ไมโครเมตร จัดเป็นโหมดหยาบ แสดงดังรูปที่ 2.14 ซึ่งฝุ่นละอองที่ได้จากการเผาไหม้เครื่องยนต์ดีเซลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 100 นาโนเมตร (PM10)



รูปที่ 2.14 ขนาดอนุภาคฝุ่นละอองของเครื่องยนต์ดีเซล

ฝุ่นละอองหรือเขม่าดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจากโมเลกุลของเชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้หรือถูกเผาไหม้บางส่วนในเปลวไฟชนิดแพร่ผสมและเปลวไฟชนิดผสมก่อนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งมีสาเหตุมาจากน้ำมันเชื้อเพลิงบางส่วนไม่สามารถระเหยกลายเป็นไอและถูกเผาไหม้ได้หมด ก่อให้เกิดฝุ่นละอองขึ้นและถูกปล่อยออกมาพร้อมกับมลพิษไอเสียในรูปของฝุ่นละอองหนักหรือเขม่าคาร์บอนในรูปของแข็ง ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าในรูปของควันดำที่ออกมาจากท่อไอเสีย

ของเครื่องยนต์ นอกจากนี้อาจเกิดจากน้ำมันหล่อลื่นบริเวณผนังกระบอกสูบบางส่วนถูกเผาไหม้และรวมตัวกันกลายเป็นฝุ่นละอองของแข็ง โดยปกติแล้วละอองน้ำมันที่เหลือจากการเผาไหม้และไอของน้ำมันหล่อลื่นจะอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ระเหย (Volatile organic fraction) หรือสารอินทรีย์ละลาย (Soluble organic fraction) (กัมปนาท เทียนน้อย, 2555) ซึ่งองค์ประกอบของฝุ่นละอองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ (1) ส่วนประกอบของอนุภาคคาร์บอน (2) ส่วนประกอบของสารระเหยอินทรีย์ และ (3) ส่วนประกอบของสาร ซึ่งองค์ประกอบทั้งหมดขึ้นอยู่กับกลไกการเผาไหม้และระบบไอเสียของเครื่องยนต์ปัจจัยหลักคือ อุณหภูมิการเผาไหม้ ขนาดและปริมาณของฝุ่นละอองในเครื่องยนต์ดีเซล

## 2.5 การวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของเครื่องยนต์

ในปัจจุบันการตรวจสอบสถานะหรือพฤติกรรมการทำงานของเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลต่าง ๆ ได้มีการพัฒนาอุปกรณ์และเครื่องมือวัดขึ้น อาทิเช่น ตัววัดสัญญาณการสั่นสะเทือน ตัววัดอุณหภูมิห้องเครื่อง และไมโครโฟน เป็นต้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์และประเมินความผิดปกติในการทำงานของเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกล รวมถึงช่วยป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นได้ในอนาคต อุปกรณ์และเครื่องมือเหล่านี้ใช้สำหรับการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลต่าง ๆ เพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปอธิบายและวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานที่เกิดขึ้น ปกติแล้วการวัดพฤติกรรมการทำงานของเครื่องยนต์จะนิยมใช้ตัววัดสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นอุปกรณ์ในการตรวจวัด เนื่องจากติดตั้งง่ายและมีความสามารถในการวัดที่ดี โดยที่การสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์นั้นเกิดขึ้นจากการเคลื่อนไหวของเครื่องยนต์ ได้แก่ การเคลื่อนไหวแบบหมุนและการเคลื่อนที่ไหวกลับไปมา ส่วนใหญ่จะมีแหล่งกำเนิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ด้วยสาเหตุนี้การนำน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมสั่นที่เกิดขึ้น เพื่อประเมินและป้องกันความเสียหายของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องยนต์เมื่อใช้งานในระยะยาว อีกทั้งยังช่วยบ่งชี้ถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ในแต่ละวัฏจักรได้อีกด้วย

เทคนิคในการตรวจวัดพฤติกรรมการทำงานของเครื่องยนต์ด้วยการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนประกอบด้วย การวิเคราะห์บนโดเมนเวลา การวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ และการวิเคราะห์บนโดเมนเวลาและความถี่ เป็นต้น โดยสามารถอธิบายเทคนิคการวัดสัญญาณต่าง ๆ ได้ดังนี้

### 2.5.1 การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นบนโดเมนเวลา

การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นบนโดเมนเวลา (Time domain analysis) โดยแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดในแนวแกนตั้งและเวลาในแนวแกนนอน การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลานิยมใช้สำหรับวิเคราะห์ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ ได้แก่ ค่าสัมบูรณ์ของสัญญาณเฉลี่ย ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความเบ้ ค่าความโด่ง เป็นต้น งานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้เทคนิคนี้ เช่น Heidary, B., et al. (2013) และ Taghizadeh Alisaraei, A., et al. (2012) ได้ศึกษาขนาดการสั่นของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันดีเซลผสมไบโอดีเซลที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นบนโดเมนเวลา ซึ่งเทคนิคดังกล่าวสามารถช่วยบ่งบอกได้ว่าแกนในการวัดสัญญาณที่มีความสำคัญต่อขนาดการสั่น โดยที่การสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ในแนวตั้ง (Vertical) มีขนาดการสั่นที่สูงกว่าขนาดการสั่นของเครื่องยนต์ในแนวแกนนอนตามยาว (Longitudinal) และแนวแกนนอนขวาง (Lateral) และอิทธิพลจากอัตราส่วนผสมน้ำมันเชื้อเพลิง

และความเร็วรอบของเครื่องยนต์ส่งผลโดยตรงต่อขนาดการสั่นของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ Jaikumar, S., et al. (2020) ได้นำเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นบนโดเมนเวลาไปเป็นตัวแปรหนึ่งสำหรับวิเคราะห์การสั่นของเครื่องยนต์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์

### 2.5.2 การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นบนโดเมนความถี่

การตรวจสอบเครื่องจักรกลหรือเครื่องยนต์ด้วยการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ (Frequency domain analysis) นิยมใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast fourier transform, FFT) ซึ่งจะใช้แปลงสัญญาณบนโดเมนเวลาให้เป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่ในแนวแกนตั้งเป็นค่าแอมพลิจูดและในแนวแกนนอนเป็นความถี่ งานวิจัยที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ เช่น Karanjikar, et al. (2015) ใช้ FFT พร้อมกับตัววัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในการวิเคราะห์สัญญาณของเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการหล่อเย็นต่อเสียงและการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์เครื่องยนต์ เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Yang, T., et al. (2018) ที่ทำการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ดีเซลจากการเผาไหม้ โดยใช้น้ำมันดีเซลผสมเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากกระบวนการฟิสเซอร์โทรปด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ FFT รวมถึงใช้ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยและเวฟเล็ตสำหรับการประกอบวิเคราะห์ นอกจากนี้ S. Chomphan et al. (2014) ใช้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FFT เพื่อแยกความแตกต่างระหว่างเสียงของเครื่องยนต์ที่ทำงานปกติกับเครื่องยนต์ที่ทำงานผิดปกติ ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถใช้แยกลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.5.3 การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นบนโดเมนเวลาและความถี่

การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นบนโดเมนเวลาและความถี่เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับแก้ไขข้อจำกัดของการแปลงฟูเรียร์ที่ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านเวลาได้ คือการแปลงเวฟเล็ต (Wavelet transform) คณิตศาสตร์ที่ใช้สังเคราะห์และวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณที่ได้รับการพัฒนามาจากการแปลงฟูเรียร์ โดยจะอธิบายโครงสร้างของสัญญาณที่เกิดจากการรวมตัวของสัญญาณเฉพาะ ซึ่งสัญญาณเฉพาะนั้นเป็นรูปคลื่นที่มีขนาดเล็กที่เรียกว่า “เวฟเล็ต” และแต่ละเวฟเล็ตจะมีโครงสร้างฟังก์ชันกำเนิดเดียวกันที่เรียกว่า “เวฟเล็ตแม่ (Mother wavelet)” การแปลงเวฟเล็ตนั้นมีหลายรูปแบบ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้นำเทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนเวลาและความถี่ไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ในลักษณะแยกและการประเมินสภาพของความผิดพลาดของเครื่องยนต์ดีเซลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการแปลงเวฟเล็ตวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน (Gravalos, I. et al., 2013) รวมถึง Moosavian, A. et al., (2016) ได้ทำการวิจัยโดยการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นบนโดเมนเวลา โดเมนความถี่และโดเมนเวลา และการแปลงเวฟเล็ต ผลกระทบจากการขูดลูกสูบโดยผลการวิจัยบ่งชี้ให้เห็นว่า การขูดลูกสูบส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ลดลง นอกจากนี้งานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว เทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนเวลาและความถี่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนต่าง ๆ ได้หลายรูปแบบ อาทิเช่น การตรวจสอบระยะเวลาการเผาไหม้ที่สามารถกำหนดได้จากสัญญาณการสั่นสะเทือนของฝาสูบ และการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงในระบบไฟฟ้า โดยมีการแปลงเวฟเล็ตและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก เป็นต้น

## 2.6 การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกจากขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล

พลาสติกเป็นวัสดุที่เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมากและมีแนวโน้มการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น ถึงแม้ว่าการรีไซเคิลพลาสติกจะสามารถช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นได้ แต่ก็ยังมีปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับปริมาณขยะพลาสติกที่เกิดขึ้น ซึ่งปัจจุบันการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งจากนักวิจัยทั่วโลก เพื่อที่จะลดการพึ่งพาพลังงานจากฟอสซิลที่อาจอาจหมดสิ้นไปในอนาคต โดยงานวิจัยที่นำขยะพลาสติกมาแปรรูปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นได้เกิดขึ้นมาแล้วเกือบ 2 ทศวรรษ ด้วยการแปรรูปด้วยกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ กระบวนการทางความร้อน กระบวนการทางชีวเคมี และกระบวนการทางเคมี โดยกระบวนการทางความร้อนนั้นแบ่งแยกย่อยออกเป็นการเผาไหม้ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน และกระบวนการไพโรไลซิสหรือกระบวนการลิกวิแฟกชัน กระบวนการทางชีวเคมีเป็นการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยขยะโดยผ่านปฏิกิริยาเชิงชีวเคมี ซึ่งแบ่งออกได้เป็นกระบวนการย่อยสลายโดยไม่ใช้อากาศ และการหมัก ส่วนกระบวนการเชิงเคมีนั้นเป็นการเปลี่ยนขยะให้เป็นผลผลิตโดยผ่านปฏิกิริยาเคมี (ศิริรัตน์ จิตการคำ, 2551) ผลิตรถยนต์ที่ได้จากกระบวนการเหล่านี้ถูกเรียกว่า “น้ำมันจากขยะพลาสติกหรือน้ำมันไพโรไลซิส” ทั้งนี้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาบ่งชี้ให้เห็นว่าน้ำมันจากขยะพลาสติกนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลทั้งเครื่องยนต์ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ได้ (Khan, et al., 2016; Damodharan, D., 2019) ด้วยการนำน้ำมันจากขยะพลาสติกทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลภายใต้เงื่อนไขและคุณลักษณะของเครื่องยนต์ประเภทต่าง ๆ โดยที่สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันจากขยะพลาสติก, สมรรถนะของเครื่องยนต์, คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย เป็นกลุ่มปัจจัยที่มีความสำคัญในการค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับพลังงานทางเลือกหรือพลังงานทดแทนต่าง ๆ ซึ่งสามารถกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้โดยสังเขปได้ดังนี้

### 2.6.1 องค์ประกอบทางเคมีของพลาสติก

พลาสติกแต่ละประเภทยังมีคุณสมบัติและองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งส่งผลต่อการนำไปแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิง ทั้งนี้ การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของพลาสติกนั้นประกอบไปด้วย ความชื้น คาร์บอนคงตัว สารระเหย และเถ้า ดังตารางที่ 2.5 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) ของประเภทพลาสติกที่ต่างชนิดกัน การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีมีผลต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส หากในพลาสติกมีปริมาณสารระเหยสูงผลผลิตที่เป็นเชื้อเพลิงเหลวจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณเถ้าสูงผลผลิตที่เป็นของแข็งจะเพิ่มขึ้น และปริมาณเถ้าถือว่ามีปริมาณที่ต่ำสำหรับพลาสติกทุกชนิด และในกรณีที่พลาสติกมีปริมาณสารระเหยที่สูง คุณสมบัติเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของพลาสติกในการนำมาแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการไพโรไลซิส นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ขั้นสุดท้าย (Ultimate analysis) ของพลาสติกชนิดต่าง ๆ แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนคาร์บอน (C) โดยน้ำหนักของพลาสติกชนิด PET, HDPE, PVC, LDPE, PP และ PS คือ คือ 63.94%, 86.99%, 37.24%, 85.60%, 86.88% และ 91.57% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณคาร์บอนสูงบ่งชี้ว่าสามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายที่มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูง (Anuar, S. D. et al, 2017; Anuar, S. D. et al, 2016) ผลผลิตของน้ำมันขยะพลาสติกจากพลาสติกชนิดต่าง ๆ จากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 การวิเคราะห์โดยประมาณของพลาสติกชนิดต่าง ๆ (Anuar, S. D. et al, 2017)

ชนิดของพลาสติก	การวิเคราะห์โดยประมาณ (wt%)			
	ความชื้น	คาร์บอนคงตัว	สารระเหย	เถ้า
PET	< 0.7	6–14	85–92	< 0.1
HDPE	< 0.3	~ 0	94–99.8	< 1.5
LDPE	< 0.3	~ 0	99–99.8	< 0.4
PP	< 0.4	< 1.2	95–99.6	1–4
PS	< 0.3	< 0.2	99–99.8	< 0.5
PVC	< 0.8	5-7	85–94.8	< 0.1
อื่น ๆ	< 0.2	< 3	97–99.8	< 0.1

ตารางที่ 2.6 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของน้ำมันขยะพลาสติกจากพลาสติกชนิดต่าง ๆ

ชนิดพลาสติก	สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (%wt)			อ้างอิง
	แก๊ส	ของเหลว	ของแข็ง	
PP	5.00–54.50	42.00–95.00	0.00–10.00	[1], [2], [3], [4], [5], [6]
PS	2.00–9.90	71.00–90.00	0.50–27.00	[3], [6], [7], [8]
PE	7.00–55.80	30.70–93.00	0.54–33.05	[1], [2], [3], [6]
PET	32.00–76.90	15.00–29.14	5.74–53.00	[3], [9], [10]
Mixed plastic	12.00–42.00	40.00–82.00	1.40–23.00	[6], [2], [11]

หมายเหตุ <sup>[1]</sup> Ahmad, I. et al. (2014), <sup>[2]</sup> Miandad, R. et al. (2017), <sup>[3]</sup> Williams, P. T. et al. (2007), <sup>[4]</sup> Panda, A. K. et al. (2011), <sup>[5]</sup> Kalargaris, I. et al. (2018), <sup>[6]</sup> Demirbas, A. (2004), <sup>[7]</sup> Lee, K.-H., et al. (2002), <sup>[8]</sup> Onwudili, J. A. et al. (2009), <sup>[9]</sup> Çepelip ulla, et al. (2013), <sup>[10]</sup> FakhrHoseini, S. M. et al. (2013), <sup>[11]</sup> Heydariaraghi, M. et al. (2016)

จากข้อมูลผลผลิตของน้ำมันจากขยะพลาสติกของพลาสติกชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่า ความแตกต่างของวัตถุดิบนั้นมีผลต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส โดยที่ขยะพลาสติกประเภท PP, PS, PE และขยะพลาสติกผสมมีสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นเชื้อเพลิงเหลว แต่อย่างไรก็ตาม สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่กล่าวถึงนี้ส่วนหนึ่งมีความสัมพันธ์กับปัจจัยอื่น ๆ เช่น ปัจจัยด้านอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ซึ่งจากงานวิจัยของ Sogancioglu, M., (2017) ที่ได้ทำการศึกษาการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นพลังงานเชื้อเพลิงโดยใช้กระบวนการไพโรไลซิส ภายใต้อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาระหว่าง 300–700 °C สำหรับขยะพลาสติกประเภท HDPE, PET, PP และ PS ผลการวิจัยพบว่า ขยะพลาสติกประเภท HDPE ให้ผลผลิตของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวมากที่สุด ในขณะที่ขยะพลาสติกประเภท PET และ PP ให้ผลผลิตของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม ผลจากการตรวจวัดค่าความร้อนเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้นั้นมีค่าที่สูงกว่าไม้และ



ถ่านหินบางชนิด ซึ่งเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงศักยภาพของการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่จากพลาสติกประเภทต่าง ๆ

### 2.6.2 สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันจากขยะพลาสติก

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแปรรูปพลังงานจากขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส นั้น โดยทั่วไปแล้วจะมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับน้ำมันปิโตรเลียม จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาสารประกอบทางเคมีในน้ำมันขยะพลาสติกทั้งในเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่ง ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์หาสารประกอบทางเคมีในสารผสม โดยผลการวิเคราะห์ของงานวิจัย Sarker et al. (2012) และ Damodharan et al. (2017) บ่งชี้ให้เห็นว่าน้ำมันจากขยะพลาสติก มีสารประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันและพบว่า น้ำมันจากขยะพลาสติกมีองค์ประกอบสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอยู่ในช่วง  $C_{10}-C_{30}$  ซึ่งมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนส่วนใหญ่เป็นกลุ่มอะโรมาติกส์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาผลิต เมื่อพิจารณาโดยแบ่งตามจำนวนคาร์บอนของน้ำมันจากขยะพลาสติกประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำนวนมากทั้งที่เป็นส่วนเบา (Light fractions) และส่วนหนัก (Heavy fractions) ตั้งแต่เลขอะตอมไฮโดรคาร์บอนต่ำสุด ( $C_4-C_5$ ) ไปจนถึงจำนวนสูงสุด ( $>C_{20}$ ) น้ำมันจากขยะพลาสติกสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กลุ่ม เพื่อให้ง่ายต่อการระบุแนวโน้มของความคล้ายคลึงกันระหว่างน้ำมันจากขยะพลาสติกและน้ำมันเชื้อเพลิงในเชิงพาณิชย์ (น้ำมันดีเซลหรือน้ำมันแก๊สโซลีน) โดยกลุ่มที่ 1  $C_4-C_{11}$  เป็นส่วนของน้ำมันเบาหรือน้ำมันแก๊สโซลีนเพราะเปอร์เซ็นต์สูงสุดของคาร์บอนอะตอมในน้ำมันแก๊สโซลีนมักจะอยู่ใกล้กับ  $C_7-C_9$  กลุ่มที่ 2  $C_{11}-C_{20}$  เป็นส่วนของกลุ่มน้ำมันขนาดกลางรวมถึงน้ำมันดีเซลมีเปอร์เซ็นต์สูงสุดของตัวเลขอะตอม  $C_{16}-C_{20}$  ผลการศึกษาพบว่า องค์ประกอบทางเคมีของขยะพลาสติกมีผลต่อแนวโน้มการเกิดกลุ่มไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันจากขยะพลาสติก (Pratama, N. et al, 2014) นอกจากนี้ จากงานวิจัยของ Ibrahim, H., (2018) พบว่า น้ำมันจากขยะพลาสติกมีองค์ประกอบของแอลเคน และแอลคีนอยู่ถึงเปอร์เซ็นต์ 95% และเมื่อนำไปการกลั่นลำดับส่วนในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ ประกอบด้วยช่วงส่วนที่ 1 เป็นส่วนที่มีอะตอมไฮโดรคาร์บอนสายสั้นจาก  $C_5-C_{11}$  ซึ่งเหมาะสำหรับการผลิตน้ำมันก๊าด ส่วนที่ 2 มีส่วนผสมของส่วนเบาและหนักบางส่วนจาก  $C_8-C_{30}$  ซึ่งเหมาะสำหรับการผลิตน้ำมันเบนซินเบา (น้ำมันเบนซิน) และส่วนที่ 3 เป็นส่วนที่มีแอลคีนของไฮโดรคาร์บอนสายยาวที่สูงจาก  $C_8-C_{36}$  เหมาะสำหรับน้ำมันดีเซล

จากผลวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์พบว่า น้ำมันจากขยะพลาสติกประกอบด้วย อะโรมาติกส์ แอลเคน แอลคีน อัลคิล และกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งประกอบไปด้วยโพลดการสั้น C-H stretching, C-H asymmetrical stretching, C-H symmetrical stretching, C=C stretching, C-H scissoring, C-H symmetrical bending และ C-H symmetrical bending ที่เลขคลื่น  $3,080\text{ cm}^{-1}$ ,  $2,956\text{ cm}^{-1}$ ,  $2,871\text{ cm}^{-1}$ ,  $1,630\text{ cm}^{-1}$ ,  $1,456\text{ cm}^{-1}$ ,  $1,376\text{ cm}^{-1}$  และ  $1,647\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ โดยผลดังกล่าวนี้มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซล (Khan, et al., 2016; Ibrahim, H. et al, 2018)

นอกจากนี้ สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันจากขยะพลาสติกโดยใช้วัตถุดิบจากพลาสติกประเภทต่าง ๆ นั้นพบว่า สมบัติทางเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง

มีสมบัติที่แตกต่างกัน เนื่องจากโครงสร้างพื้นฐานทางเคมีของวัตถุดิบและสภาวะที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันจากขยะพลาสติก จากการใช้วัตถุดิบประเภทต่าง ๆ ได้แก่ โพลีเอทิลีนเทเรพทาเลต (PET) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โพลีโพรพิลีน (PP) และโพลิสไตรีน (PS) โดยทดสอบสมบัติพื้นฐานของน้ำมันขยะพลาสติก แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 สมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกจากการใช้ขยะพลาสติกประเภทต่าง ๆ

สมบัติทางเชื้อเพลิง	ประเภทของขยะพลาสติก				
	PET	HDPE	LDPE	PP	PS
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (MJ/kg)	28.2	46.23	48.17	44.98	38.87
ความหนืดจลนศาสตร์ (cSt)	0.90	10.12	4.98	1.72	1.83
ความหนาแน่น ที่ 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	-	800	799	771	940
จุดไหลเท (°C)	-6	24	26	< -30	< -30
จุดวาบไฟ (°C)	-	24	20	20	32
จุดติดไฟ (°C)	-	34	30	30	42
ปริมาณเถ้า (wt%)	0.037		0.01	0.01	0.01
ปริมาณคาร์บอน (wt%)		0.03	0.06	0.10	1.38
ดัชนีซีเทน	-	0.37	68	60	10

หมายเหตุ Mangesh, V. L. et al., 2020; Khan, et al., 2016; Gaurav, M, M., 2014; Nugroho Pratama et al., 2014; Kumar, S. et al, 2013

### 2.6.3 ผลกระทบจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกในเครื่องยนต์ดีเซล

การดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการนำขยะพลาสติกมาแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กและเครื่องจักรกลในอุตสาหกรรมนั้นมีมายาวนานเกือบ 2 ทศวรรษ และเป็นแนวทางการวิจัยหนึ่งที่มีบทบาทในการลดปัญหาจากขยะพลาสติกที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในทางบกและทางทะเลในปัจจุบัน โดยการศึกษาผลกระทบที่มีต่อการทำงานของเครื่องยนต์จากการใช้เชื้อเพลิงทางเลือกจากขยะพลาสติกต่าง ๆ เป็นสิ่งที่มีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการประเมินประสิทธิภาพและความเหมาะสมในการนำมาใช้งาน เนื่องจากพลาสติกแต่ละชนิดนั้นมีสมบัติและคุณลักษณะทางเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน โดยส่วนใหญ่แล้วนักวิจัยนิยมศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์ด้วยตัวแปรของกำลังเครื่องยนต์ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ รวมถึงศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้และมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้น ภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่สภาวะต่าง ๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงภาระงาน และความเร็วรอบเครื่องยนต์ เป็นต้น ซึ่งจากปัจจัยต่าง ๆ ดังที่กล่าวมานั้นการนำน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อ

การทำงานของเครื่องยนต์ในด้านต่าง ๆ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและค้นคว้างานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาเพื่อใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัย ซึ่งสามารถสรุปได้โดยสังเขปดังนี้

การนำน้ำมันขยะพลาสติกที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมายใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลนั้นมีความจำเป็นต้องผลกระทบต่อสมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย รวมถึงวิเคราะห์การสึกหรอชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ ซึ่งจากการศึกษาของงานวิจัยที่ผ่านมาบ่งชี้ให้เห็นว่า การใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลส่งผลต่อกำลังของเครื่องยนต์ที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล (Hürdoğuş et al., 2017; Khatha W., et al., 2018) และจากงานวิจัยของ Kumar et al. (2016) ยังพบว่า น้ำมันจากขยะพลาสติกนั้นมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าน้ำมันดีเซล ด้วยสาเหตุจากน้ำมันจากขยะพลาสติกมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตาม นักวิจัยบางส่วนกลับพบว่า น้ำมันจากขยะพลาสติกนั้นมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ดังเห็นได้จากผลการวิจัยของ Kaimal et al. (2015) และ Kalargaris et al. (2017) ได้ทำการศึกษาผลกระทบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ผลการทดสอบบ่งชี้ให้เห็นว่าที่ความดันในกระบอกสูบสูงสุด อัตราการปลดปล่อยความร้อน ระยะเวลาการเผาไหม้ และความล่าช้าในการจุดระเบิดของน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากความหนาแน่นและค่าความหนืดที่มากกว่าของน้ำมันขยะพลาสติกเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ประกอบกับน้ำมันจากขยะพลาสติกมีความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากสมบัติทางเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำกว่าน้ำมันดีเซล จึงส่งผลต่ออัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่มากขึ้น (Singh, R. K., et al., 2020; Kalargaris et al., 2017 V. K. Kaimal et al., 2016) นอกจากนี้ การใช้ น้ำมันจากขยะพลาสติกในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นส่งผลต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ โดยที่ความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล สาเหตุส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันจากขยะพลาสติกที่มีค่าความหนืดที่สูง รวมถึงมีค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำจึงส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการจุดระเบิดเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล อีกทั้งการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกทำให้เกิดความล่าช้าในการจุดระเบิด ซึ่งช่วงความล่าช้าการเผาไหม้ที่ยาวของน้ำมันจากขยะพลาสติกนั้นส่งผลทำให้ความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนของน้ำมันขยะพลาสติกมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงที่รอการเผาไหม้ที่มีปริมาณมากเมื่อเกิดการเผาไหม้จึงส่งผลให้มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนที่สูง

จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลโดยปกติแล้วจะก่อให้เกิดมลพิษไอเสียไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอน (HC) ฝุ่นละอองและเขม่ามลพิษไอเสียเหล่านี้จึงเป็นมลพิษไอเสียที่ถูกควบคุม เนื่องจากส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ซึ่งเครื่องยนต์ดีเซลโดยทั่วไปจะทำงานภายใต้การผสมบางจึงมีการปล่อยมลพิษไอเสีย CO ที่ต่ำ ซึ่ง คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน และถือว่าเป็นสารพิษที่ต้องได้รับการควบคุม โดยเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า คาร์บอนมอนอกไซด์ของน้ำมันขยะพลาสติกมีปริมาณสูงกว่าน้ำมันดีเซล เหตุผลเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ดังกล่าวไปข้างต้น เนื่องจากอุณหภูมิในห้องเผาไหม้มีค่าลดลงและไฮโดรคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นในสภาวะภาระกรรมสูงขึ้น จากอัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่มากขึ้น

สำหรับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) น้ำมันขยะพลาสติกมีปริมาณสูงกว่าน้ำมันดีเซล เพราะการเผาไหม้ที่ล่าช้าส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ไม่สมบูรณ์ของคาร์บอนมอนอกไซด์

ทั้งนี้ การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในกระบอกสูบ ปริมาณออกซิเจน และช่วงเวลาของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งพบว่า ออกไซด์ของไนโตรเจนมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อใช้น้ำมันขยะพลาสติก โดยเหตุผลที่ออกไซด์ของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นนั้น เนื่องจากอัตราการปลดปล่อยความร้อนและอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงขึ้น (Mani and Nagarajan, 2009; Mani et al., 2010) และไฮโดรคาร์บอน (HC) ประกอบด้วยเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งในส่วนของไฮโดรคาร์บอนนั้นหมายถึงสารประกอบอินทรีย์ในสถานะแก๊ส และไฮโดรคาร์บอนในสถานะที่เป็นของแข็งคือ ฝุ่นละออง จากผลการวิจัยสังเกตได้ว่า ไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันขยะพลาสติกจะสูงกว่าน้ำมันดีเซล (Mani and Nagarajan, 2009) ซึ่งจากการวิจัยของ V. K. Kaimal et al. (2016) ได้ศึกษาพลังงานเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก และการประเมินศักยภาพในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ โดยทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลผลการทดสอบพบว่า ปริมาณมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์มีปริมาณลดลงเมื่อใช้น้ำมันพลาสติกผสม โดยเปรียบเทียบกับน้ำมันจากขยะพลาสติก รวมถึงเขม่าและ NO<sub>x</sub> ลดลงถึง 22% และ 17.8% ตามลำดับ

นอกจากนี้ งานวิจัยส่วนหนึ่งได้ศึกษาวิธีการต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความเป็นไปได้ในการนำน้ำมันจากพลาสติกมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล โดยการปรับเปลี่ยนกลไกและอุปกรณ์ของเครื่องยนต์ด้วยตัวแปรต่าง ๆ อาทิเช่น ระยะเวลาการฉีดเชื้อเพลิง การเปลี่ยนแปลงองศาและความดันการฉีดเชื้อเพลิง อัตราส่วนการอัด และการหมุนเวียนไอเสีย (EGR) เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและเพิ่มกำลังของเครื่องยนต์ รวมถึงเพื่อลดการปล่อยมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ ทั้งนี้ เครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องยนต์ที่ใช้การจุดระเบิดด้วยการอัด โดยมีอัตราส่วนการอัดสูงกว่าเครื่องยนต์เบนซิน อัตราส่วนการอัดโดยทั่วไปสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดตรงจะอยู่ระหว่าง 14 : 1 ถึง 23 : 1 และสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลหัวฉีดทางอ้อมจะอยู่ระหว่าง 18 : 1 ถึง 23 : 1 ซึ่งตัวแปรนี้เป็นตัวแปรหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในการนำมาศึกษา โดยที่ Ananthakumar, S. et al. (2016) และ Khatha W. et al. (2020) ได้ศึกษาการใช้ น้ำมันจากขยะพลาสติกในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กภายใต้ปัจจัยการเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดในช่วง 12 ถึง 20 เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ อีกทั้งยังเป็นเทคนิคที่ช่วยลดความล่าช้าในการฉีดเชื้อเพลิง (Hsu, B. D., 2002) เพื่อลดการสูญเสียประสิทธิภาพทางความร้อนที่เกิดจากการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติก ซึ่งผลการวิจัยสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎี กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกำลังของเครื่องยนต์เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่สูงขึ้น และส่งผลให้เกิดการลดลงของมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้น ได้แก่ HC และ CO ในขณะที่มลพิษไอเสีย NO<sub>x</sub> และ CO<sub>2</sub> มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัด เช่นเดียวกับ Sharma, A., et al. (2015) ที่ได้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนกำลังอัดจากการนำน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมกับไบโอดีเซล ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าสามารถช่วยลดความล่าช้าในการจุดระเบิดและลดระยะเวลาการเผาไหม้ นอกจากนี้ ยังส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ความดันในกระบอกสูบ อัตราการปลดปล่อยความร้อน และการปล่อยมลพิษไอเสีย (NO<sub>x</sub>) สูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในกระบอกสูบที่สูงขึ้น ประกอบกับการเพิ่มอัตราส่วนการอัดสามารถช่วยลดมลพิษไอเสีย HC, CO และเขม่าที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็น

น้ำมันเชื้อเพลิง และสืบเนื่องมาจากงานวิจัยโดยส่วนใหญ่บ่งชี้ให้เห็นว่าการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการจุดระเบิด ดังนั้น การศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลจึงเป็นเหตุปัจจัยหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจ ซึ่งจากการวิจัยของ Pal, S., et al. (2019) ได้ศึกษาผลกระทบของการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงแบบฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้า และการฉีดเชื้อเพลิงแบบล่าช้าของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงานพบว่า การฉีดเชื้อเพลิงแบบล่วงหน้าช่วยให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สูงขึ้นในทุก ๆ ภาระงานที่ทำการทดสอบ และยังสามารถช่วยลดมลพิษไอเสีย HC, CO และเขม่าที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ได้ อย่างไรก็ตาม การปล่อยมลพิษไอเสีย NO<sub>x</sub> กลับมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ที่ฉีดเชื้อเพลิงแบบล่าช้า ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Khatha W., et al. (2018) ได้ทำการปรับแต่งองศาการฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 1 สูบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและกำลังของเครื่องยนต์ โดยผลการปรับแต่งเครื่องยนต์พบว่าส่งผลต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิงที่สูงขึ้นเมื่อปรับองศาการฉีดเชื้อเพลิงแบบล่วงหน้ามากขึ้น นอกจากนี้ การหมุนเวียนไอเสีย (EGR) เป็นแนวทางหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการชะลออัตราการเผาไหม้และลดการปลดปล่อย NO<sub>x</sub> ซึ่งเป็นหนึ่งในมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ หลักการทำงานของระบบ EGR นั้นทำงานโดยการหมุนเวียนไอเสียบางส่วนกลับมาผสมกับไอดีก่อนที่จะเข้าไปยังห้องเผาไหม้ ทั้งนี้ ผลกระทบของระบบ EGR ต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) ผลของความร้อนจากอุณหภูมิอากาศที่สูงขึ้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลต่อประสิทธิภาพเชิงปริมาณและเพิ่มค่าความจุความร้อนจำเพาะ เนื่องจาก CO<sub>2</sub> และน้ำ H<sub>2</sub>O บางส่วนแทนที่ O<sub>2</sub> และ N<sub>2</sub> (2) ผลกระทบทางเคมีจากการแยกตัวของ CO<sub>2</sub> และ H<sub>2</sub>O เนื่องจากอุณหภูมิสูงระหว่างห้องเผาไหม้ หลังจากการแยกตัวออกผลิตภัณฑ์ใหม่จะมีส่วนร่วมในการเผาไหม้ และ (3) ผลการเจือจางที่เป็นผลมาจากการลดความเข้มข้นของออกซิเจนและชนิดปฏิกิริยาในกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งจากการวิจัยของ Punitharani, K., et al. (2017) ได้ทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลที่มีระบบ EGR โดยใช้น้ำมันดีเซลผสมน้ำมันขยะพลาสติกที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเชื้อเพลิงในการทดสอบ ผลจากการทดสอบพบว่า การใช้ระบบ EGR ในเครื่องยนต์ดีเซลสามารถลดการปลดปล่อยมลพิษไอเสีย NO<sub>x</sub> ได้ถึง 14% เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ที่ไม่มีการใช้ระบบ EGR สาเหตุเนื่องจากอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำ อย่างไรก็ตาม ผลจากการใช้ระบบ EGR กลับพบว่าการเกิดมลพิษ CO และ HC ในไอเสียที่สูงขึ้น ด้วยสาเหตุนี้ Chandran, M., et al. (2020) จึงได้ทำการวิจัยโดยใช้ระบบ EGR ร่วมกับการเปลี่ยนองศาการฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงพบว่า สามารถลดการปลดปล่อย NO<sub>x</sub> ได้ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งยังลดมลพิษไอเสีย CO และ HC ได้ถึง 8-16 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาถึงคุณลักษณะการเผาไหม้เมื่อมีการเพิ่มอัตราของระบบ EGR มีผลทำให้ความดันและอัตราการปลดปล่อยความร้อนลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากการลดลงของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกสามารถนำมาสรุปผลกระทบที่มีต่อเครื่องยนต์ได้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 สรุปผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกในเครื่องยนต์ดีเซล

ชนิดของ น้ำมันเชื้อเพลิง	สมรรถนะของเครื่องยนต์		คุณลักษณะการเผาไหม้		มลพิษไอเสีย			อ้างอิง	
	BSFC	BTE	ICP	RoHR	NO <sub>x</sub>	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)
Waste PP oil	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	Mangesh et al., 2020
Mixed plastics oil	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↓	Kaewbuddee, C. et al., 2020
Waste LDPE oil	↑	↓	↓	-	↓	-	-	↑	Singh, T. S. et al., 2021
Mixed plastics oil	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	Khatha W., et al., 2021

## 2.7 รายการอ้างอิง

- กุลนันท์ วีรณรงค์กร และอมรชัย อารณวิธานพ. (2558). ไพโรไลซิส (Pyrolysis). *พลังงานและสิ่งแวดล้อม (Energy and Environmental)*, 42(241), 61-64.
- ฉัญญ์พิชชา เอกบุศย์, ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และวลัยรัตน์ อุตตมะปรากรม. (2557). การศึกษาศักยภาพการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกในประเทศไทย. *วารสารวิจัยพลังงาน ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 (มกราคม-มิถุนายน)*, 38-49.
- พิมพ์พันธ์ เอื้ออวยพร, เลิศธรรมไชย รัตนเศรษฐโสภณ และวีรานันท์ พงศาภักดี. (2557). ปัจจัยเสี่ยงที่มีผลกระทบต่อระดับอันตรายของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากรถจักรยานยนต์ภายใต้ตัวแบบลอจิสต์ 2 กลุ่ม และ 3 กลุ่ม. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 เมษายน-มิถุนายน 2557*. 207-216.
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. (2558). *มทส. โชว์ผลงานการผลิตน้ำมันจากเชื้อเพลิงขยะพลาสติก โดยกระบวนการไพโรไลซิส: Pyrolysis process*. สืบค้นจาก: [http://www.sut.ac.th/2012/portal\\_news/detail/9/news20140610](http://www.sut.ac.th/2012/portal_news/detail/9/news20140610)
- แม้น อมรสิทธิ์, สมชัย อัครทิวา, ธรรมบุญ อุดมมัน. (2551). *วัสดุวิศวกรรม : Foundations Of Materials Science and Engineering 4th Edition*.
- วิรุณ โมณะตระกูล, รัชพล สันติวารากร และพจน์ศิริรินทร์ ลิ้มปิ่นนท. (2562). โครงการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงโดยกระบวนการไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกชุมชน กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม. *รายงานการวิจัยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและสถาบันวิจัยและพัฒนา*. หน้า 6-8.
- ศิริรัตน์ จิตการคำ (2551). *จากขยะสู่น้ำมัน : เทคโนโลยีผลิตพลังงานทางเลือกที่ดูแลสิ่งแวดล้อม*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อบ นิลผาย. (2563). ผลกระทบของการใช้อะซิโตน-บิวทานอล-เอทานอลผสมดีเซลเป็นเชื้อเพลิงต่อเสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, 6(2). 89-103.
- อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ สถาบันพลาสติก. (2564). *สรุปการเสวนาขยะพลาสติก: การจัดการและโอกาส Post COVID-19 หาทางออกเพิ่มโอกาส สร้างรูปแบบที่สมดุล มุ่งสู่เศรษฐกิจหมุนเวียนอย่างยั่งยืน*. สืบค้นจาก: [https://www.thaiplastics.org/activities\\_page.php?id=991&Hits=98](https://www.thaiplastics.org/activities_page.php?id=991&Hits=98)
- Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., & Sahu, J. N. (2014). Pyrolysis of mixtures of palm shell and polystyrene: An optional method to produce a high-grade of pyrolysis oil. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(3), 1026-1033.
- Aguado, J., Serrano, D., & Escola, J. (2006). Catalytic Upgrading of Plastic Wastes. In *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics*, J. Scheirs and W. Kaminsky, Eds. John Wiley & Sons, Ltd. 73-110.
- Ahmad, I., Khan, M., Khan, H., Ishaq, M., Tariq, R., Gul, K., & Ahmad, W. (2014). Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene into Premium Oil Products. *International Journal of Green Energy*, 12, 140303064405005.

- Ananthakumar, S., Jayabal, S., & Pattabi, T. (2016). Investigation on performance, emission and combustion characteristics of variable compression engine fuelled with diesel, waste plastics oil blends. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39.
- Anuar Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & Aroua, M. K. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, 115, 308-326.
- Anuar Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & Aroua, M. K. (2017). Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste. *Energy Conversion and Management*, 148, 925-934.
- Anuar Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & Aroua, M. K. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, 115, 308-326.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2011). *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*, 4th Edition: An Integrated Approach: Wiley.
- Çepelip ullah, Ö., & Pütün, A. e. E. (2013). Utilization of Two Different Types of Plastic Wastes from Daily and Industrial Life. *Journal of Selcuk University Natural and Applied Science*, 694-706.
- Chandran, M., Chinnappan, R., & Kit Ang, C. (2020). Effect of combined exhaust gas recirculation and retarded injection timing on diesel engine operated distilled waste plastic oil blend. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-13.
- 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.
- Damodharan, D., B. R., Gopal, Sethuramasamyraja, B., & Depoures, M. (2019). Utilization of waste plastic oil in diesel engines: a review. *Review in Environmental Science and Biotechnology*, 1-17.
- Damodharan, D., Sathiyagnanam, A. P., Rana, D., Kumar, B. R., & Saravanan, S. (2018). Combined influence of injection timing and EGR on combustion, performance and emissions of DI diesel engine fueled with neat waste plastic oil. *Energy Conversion and Management*, 161, 294-305.
- 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.



- Demirbas, A. (2004). Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72(1), 97-102.
- FakhrHoseini, S. M., & Dastanian, M. (2013). Predicting Pyrolysis Products of PE, PP, and PET Using NRTL Activity Coefficient Model. *Journal of Chemistry*, 2013, 487676.
- Fathy, E. s., Elnaggar, M., & Hassan, M. (2018). Thermo-mechanical properties of poly vinyl chloride/vulcanized nitrile butadiene rubber blends cured by gamma irradiation. *Egyptian Journal of Radiation Sciences and Applications*. 31(1). 1-11.
- Fogler, H. S. (2005). *Elements of Chemical Reaction Engineering (4th Edition)*. Prentice Hall. ISBN: 0130473944
- Gaurav, M, M., K N, A., & Lingegowda, N. s. (2014). CONVERSION OF LDPE PLASTIC WASTE INTO LIQUID FUEL BY THERMAL DEGRADATION. *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, 2, 104-107.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, 3(7), e1700782.
- Ghosh, P., Sengupta, S., Singh, L., & Sahay, A. (2020). *Chapter 8 - Life cycle assessment of waste-to-bioenergy processes: a review*. In L. Singh, A. Yousuf, & D. M. Mahapatra (Eds.), *Bioreactors* (pp. 105-122): Elsevier.
- Gravalos, I., Loutridis, S., Moshou, D., Gialamas, T., Kateris, D., Tsiropoulos, Z., & Xyradakis, P. (2013). Detection of fuel type on a spark ignition engine from engine vibration behaviour. *Applied Thermal Engineering*, 54, 171–175.
- Güngör, C., Serin, H., Özcanlı, M., Serin, S., & Aydın, K. (2015). Engine Performance and Emission Characteristics of Plastic Oil Produced from Waste Polyethylene and Its Blends with Diesel Fuel. *International Journal of Green Energy*, 12(1), 98-105.
- Heidary, B., Hassan-Beygi, R., Ghobadian, B., & Taghizadeh Alisarai, A. (2013). Vibration analysis of a small diesel engine using diesel-biodiesel fuel blends. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15, 117-126.
- Heikkinen, J. M., Hordijk, J. C., de Jong, W., & Spliethoff, H. (2004). Thermogravimetry as a tool to classify waste components to be used for energy generation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71(2), 883-900.
- Heydariaraghi, M., Ghorbanian, S., Hallajisani, A., & Salehpour, A. (2016). Fuel properties of the oils produced from the pyrolysis of commonly-used polymers: Effect of fractionating column. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 121, 307-317.
- Heywood, John B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill.
- Hsu, B. D. (2002). *Practical Diesel-engine Combustion Analysis*. Society of Automotive Engineers.

- Ibrahim, H., Ramadanmohammed, Mohamed Ahmed, H., Ahmed, S., Abualsoud, R., & Motawie, A. (2018). Thermal Degradation of mixed Plastic Solid Waste HDPE, LDPE, PP and PS. 1-13.
- Jaikumar, S., Bhatti, S. K., Srinivas, V., Rajasekhar, M., & Santosh Kumar, L. (2020). Combustion and vibration characteristics of variable compression ratio direct injection diesel engine fuelled with diesel-biodiesel and alcohol blends. *Engineering Reports*, 2(7), e12195.
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., . . . Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771.
- Jung, C., & Fontana, A. (2006). *Production of Gaseous and Liquid Fuels by Pyrolysis and Gasification of Plastics: Technological Approach in Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics*. J. Scheirs and W. Kaminsky, Eds. John Wiley & Sons, Ltd. 249-283.
- Kalargaris, I. (2017). Pyrolysis of waste plastics and utilisation of the produced oils in diesel engines. *University of Surrey*, 11.
- Kalargaris, I., Tian, G., & Gu, S. (2018). Experimental characterisation of a diesel engine running on polypropylene oils produced at different pyrolysis temperatures. *Fuel*, 211, 797-803.
- 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*, 7869080.
- Kumar, S., & Singh, R. (2013). Thermolysis of high-density polyethylene to petroleum products. *Journal of Petroleum Engineering*, 1-7.
- Lavoie, G. A., Heywood, J. B., & Keck, J. C. (1970). Experimental and theoretical study of nitric oxide formation in internal combustion engines. *Combustion science and technology*, 1(4), 313-326.
- Lee, K.-H., & Shin, D.-H. (2007). Characteristics of liquid product from the pyrolysis of waste plastic mixture at low and high temperatures: Influence of lapse time of reaction. *Waste Management*, 27(2), 168-176.
- Lee, K.-H., Noh, N.-S., Shin, D.-H., & Seo, Y. (2002). Comparison of plastic types for catalytic degradation of waste plastics into liquid product with spent FCC catalyst. *Polymer Degradation and Stability*, 78(3), 539-544.
- Li, A. M., Li, X. D., Li, S. Q., Ren, Y., Chi, Y., Yan, J. H., & Cen, K. F. (1999). Pyrolysis of solid waste in a rotary kiln: influence of final pyrolysis temperature on the pyrolysis products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 50(2), 149-162.

- Majewski, W. A., & Khair, M. K. (2006). *Diesel emissions and their control*. Warrendale, Pa: SAE International.
- Mangesh, V. L., Padmanabhan, S., Tamizhdurai, P., & Ramesh, A. (2020). Experimental investigation to identify the type of waste plastic pyrolysis oil suitable for conversion to diesel engine fuel. *Journal of Cleaner Production*, 246, 119066.
- Mangesh, V. L., Tamizhdurai, P., Santhana Krishnan, P., Narayanan, S., Umasankar, S., Padmanabhan, S., & Shanthi, K. (2020). Green energy: Hydroprocessing waste polypropylene to produce transport fuel. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124200.
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Rehan, M., Ismail, I. M. I., & Nizami, A. S. (2017). Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, 239-252.
- Miandad, R., Rehan, M., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Khan, H., Ismail, I. M. I., . . . Nizami, A.-S. (2019). Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste: Moving Toward Pyrolysis Based Biorefineries. *Frontiers in Energy Research*, 7(27).
- Moosavian, A., Najafi, G., Ghobadian, B., Mirsalim, M., Jafari, S. M., & Sharghi, P. (2016). Piston scuffing fault and its identification in an IC engine by vibration analysis. *Applied Acoustics*, 102, 40-48.
- Murata, K., Sato, K., & Sakata, Y. (2004). Effect of pressure on thermal degradation of polyethylene. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71(2), 569-589.
- Nizami, A., Rehan, M., Ouda, O., Shahzad, K., Sadeq, Y., Iqbal, T., & Ismail, I. (2015). An Argument for Developing Waste-to-Energy Technologies in Saudi Arabia. *Chemical Engineering Transactions*, 45, 337-342.
- Nugroho Pratama, N., & Saptoadi, H. (2014). Characteristics of Waste Plastics Pyrolytic Oil and Its Applications as Alternative Fuel on Four Cylinder Diesel Engines. 2014, 3(1), 8.
- Onwudili, J. A., Insura, N., & Williams, P. T. (2009). Composition of products from the pyrolysis of polyethylene and polystyrene in a closed batch reactor: Effects of temperature and residence time. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 86(2), 293-303.
- Oyeleke, O. O., Ohunakin, O. S., & Adelekan, D. S. (2021). Catalytic Pyrolysis in Waste to Energy Recovery Applications: A Review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1107(1), 012226.
- Pal, S., Chintala, V., Kumar Sharma, A., Ghodke, P., Kumar, S., & Kumar, P. (2019). Effect of injection timing on performance and emission characteristics of single cylinder diesel engine running on blends of diesel and waste plastic fuels. *Materials Today: Proceedings*, 17, 209-215.

- Panda, A. K., & Singh, R. K. (2011). Catalytic performances of kaoline and silica alumina in the thermal degradation of polypropylene. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 39(3), 198-202.
- Panda, A., Murugan, S., & Singh, R. K. (2016). Performance and emission characteristics of diesel fuel produced from waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste polypropylene. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38, 577-585.
- Park, S. S., Seo, D. K., Lee, S. H., Yu, T.-U., & Hwang, J. (2012). Study on pyrolysis characteristics of refuse plastic fuel using lab-scale tube furnace and thermogravimetric analysis reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 97, 29-38.
- Perry, R.H. (1984). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 6<sup>th</sup> ed. McGraw Hill: New York.
- 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.
- Pulkrabek, W. W. (2004). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, 2nd Ed.* Published Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall.
- Punitharani, K., & Parameshwaran, V. (2017). Effect of Exhaust Gas Recirculation on Performance of a Diesel Engine Fueled with Waste Plastic Oil / Diesel Blends. *Journal of Mechanical Engineering*, 67(2). 91-100.
- Rehan, M., Miandad, R., Barakat, M. A., Ismail, I. M. I., Almeelbi, T., Gardy, J., ... & Nizami, A. S. (2017). Effect of zeolite catalysts on pyrolysis liquid oil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, 162-175.
- S. Chomphan & T. Kingrattanaset. (2014). An analysis of sound for fault engine. *American Journal of Applied Sciences*, 11(6). 1,005-1,009.
- Safdari, M.-S., Amini, E., Weise, D. R., & Fletcher, T. H. (2019). Heating rate and temperature effects on pyrolysis products from live wildland fuels. *Fuel*, 242, 295-304.
- Sarkar, J. K., & Wang, Q. (2020). Characterization of Pyrolysis Products and Kinetic Analysis of Waste Jute Stick Biomass. *Processes*, 8(7), 837.
- Sarker, P. M. F. M. M. M., Rashid, M., Rahman, M., & Molla, M. (2012). Production of Valuable Heavy Hydrocarbon Fuel Oil by Thermal Degradation Process of Post-Consumer Municipal Polystyrene (PS) Waste Plastic in Steel Reactor. *Energy and Power*, 2, 89-95.
- Sharma, A., & Murugan, S. (2015). Potential for using a tyre pyrolysis oil-biodiesel blend in a diesel engine at different compression ratios. *Energy Conversion and Management*, 93.

- Shi, J., Wang, T., Zhao, Z., Wu, Z., & Zhang, Z. (2019). Cycle-to-Cycle Variation of a Diesel Engine Fueled with Fischer–Tropsch Fuel Synthesized from Coal. *Applied Sciences*, 9, 2032.
- Singh, M. V. (2019). Deformation of virgin HD-PE, PP and waste PP Plastics into green fuel via a Pyrolysis-catalytic using a NiCO<sub>3</sub> catalyst. *Indian Chemical Engineer*, 61(3), 254-268.
- Singh, R. K., Ruj, B., Sadhukhan, A. K., Gupta, P., & Tigga, V. P. (2020). Waste plastic to pyrolytic oil and its utilization in CI engine: Performance analysis and combustion characteristics. *Fuel*, 262, 116539.
- Singh, R. K., Ruj, B., Sadhukhan, A. K., Gupta, P., & Tigga, V. P. (2020). Waste plastic to pyrolytic oil and its utilization in CI engine: Performance analysis and combustion characteristics. *Fuel*, 262, 116539.
- Singh, T. S., Rajak, U., Dasore, A., Muthukumar, M., & Verma, T. N. (2021). Performance and ecological parameters of a diesel engine fueled with diesel and plastic pyrolyzed oil (PPO) at variable working parameters. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101491.
- Smith, W. F., & Hashemi, J. (2004). *Foundations of materials science and engineering*. Boston Mass.: McGraw-Hill.
- Sogancioglu, M., Ahmetli, G., & Yel, E. (2017). A Comparative Study on Waste Plastics Pyrolysis Liquid Products Quantity and Energy Recovery Potential. *Energy Procedia*, 118, 221-226.
- Stelmachowski, M. (2010). Thermal conversion of waste polyolefins to the mixture of hydrocarbons in the reactor with molten metal bed. *Energy Conversion and Management*, 51(10), 2016-2024.
- Stone, R. (2012). *Introduction to Internal Combustion Engines*. Palgrave Macmillan.
- Suraj R. Karanjikar, & D.S. Supekar. (2015). Vibrational Analysis of Four Stroke Diesel Engine using FFT Analyzer. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4(6). 359-364.
- Taghizadeh Alisarai, A., Ghobadian, B., Hashjin, T., & Mohtasebi, S. (2012). Vibration analysis of a diesel engine using biodiesel and petrodiesel fuel blends. *Fuel*, 102, 414-422.
- Tulashie, S. K., Boadu, E. K., & Dapaah, S. (2019). Plastic waste to fuel via pyrolysis: A key way to solving the severe plastic waste problem in Ghana. *Thermal Science and Engineering Progress*, 11, 417-424.
- Turns, S. R. (2012). *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*, 6<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill.

- Williams, P. T., & Slaney, E. (2007). Analysis of products from the pyrolysis and liquefaction of single plastics and waste plastic mixtures. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(4), 754-769.
- Yaqoob, H., Teoh, Y. H., Jamil, M. A., & Gulzar, M. (2021). Potential of tire pyrolysis oil as an alternate fuel for diesel engines: A review. *Journal of the Energy Institute*, 96, 205-221.
- Zannikos, F., Kalligeros, S., Anastopoulos, G., & Lois, E. (2013). Converting Biomass and Waste Plastic to Solid Fuel Briquettes. *Journal of Renewable Energy*, 2013, 360368.



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

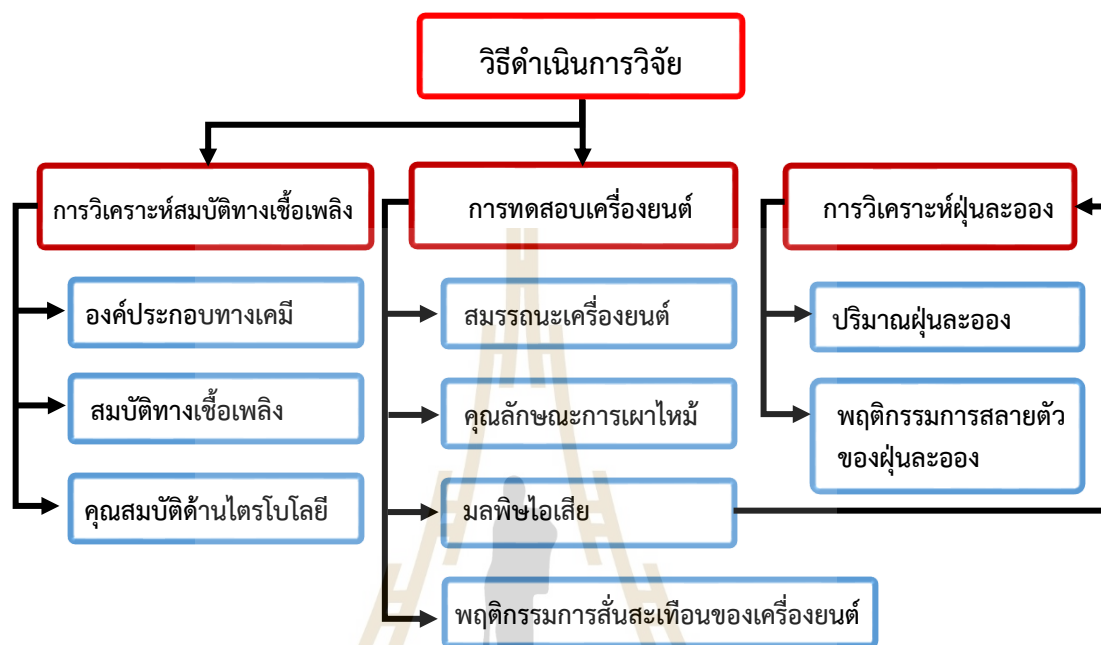
#### 3.1 บทนำ

จากความมุ่งหมายของผู้วิจัยที่สนใจศึกษาและวิจัยการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกต่างชนิด ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นพลังงานเชื้อเพลิง อาทิเช่น คุณภาพและสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเชื้อเพลิง คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมี เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาน้ำมันขยะพลาสติกที่แปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ไม่ผ่านกระบวนการกลั่นลำดับส่วนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือก สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่นิยมนำมาใช้เป็นต้นกำลังในเครื่องจักรกลในภาคการเกษตร เพื่อเป็นแนวทางในการนำน้ำมันเชื้อเพลิงดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งาน ทั้งนี้ การดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับน้ำมันขยะพลาสติกประเภทขวดพลาสติก (พลาสติกชนิด PET) ฝาขวดพลาสติก (พลาสติกชนิด HDPE) และพลาสติกผสม (พลาสติกผสมชนิด PET, PP, PS และ PE) ตามข้อมูลการรายงานของกรมควบคุมมลพิษขยะพลาสติกเหล่านี้ถือว่าเป็นขยะประเภทหนึ่งที่ยังปนอยู่เป็นจำนวนมากไม่น้อยในขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้น เนื่องจากเป็นพลาสติกประเภทใช้ครั้งเดียวทิ้งและเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีบทบาทต่อการดำเนินชีวิตในยุคปัจจุบัน จากปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในบทที่ 2 ผู้วิจัยจึงมีกรอบแนวคิดในการดำเนินการวิจัยโดยการศึกษาผลกระทบในด้านต่าง ๆ จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกต่างชนิด ซึ่งประกอบไปด้วยการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ มลพิษไอเสีย และพฤติกรรมการสันดาปของเครื่องยนต์ รวมถึงศึกษาฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกและคุณสมบัติด้านไทรโบโลยี ซึ่งเป็นตัวแปรเหล่านี้สามารถประเมินถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับเครื่องยนต์และชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องยนต์เมื่อใช้งานในระยะยาว

#### 3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เริ่มต้นด้วยการเตรียมตัวอย่างน้ำมันขยะพลาสติก ทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่ผ่านแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการไพโรไลซิส และนำตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงดังกล่าวไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี หลังจากนั้นนำตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงไปทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสมรรถนะเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย รวมถึงพฤติกรรมการสันดาปของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ภายใต้สภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่กำหนด

เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล (B7) ที่ใช้กันโดยทั่วไปในเชิงพาณิชย์ ซึ่งขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ดังที่กล่าวมาข้างต้นแสดงเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 3.1 ผู้วิจัยได้แบ่งการดำเนินการวิจัยออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ โดยสามารถอธิบายขั้นตอนโดยสังเขปดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนภูมิการดำเนินการวิจัย

### 3.2.1 การวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิง

การดำเนินการวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยสมบัติทางเคมีของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงที่ทำการวิเคราะห์ประกอบไปด้วย การวิเคราะห์สารประกอบทางเคมี หมู่ฟังก์ชัน และองค์ประกอบธาตุ ซึ่งเทคนิคที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.1 และในส่วนการวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิง ได้แก่ ความหนืดจลนศาสตร์ ความถ่วงจำเพาะ ความถ่วงเอพิไอ ความหนาแน่น จุดวาบไฟ จุดติดไฟ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง อุณหภูมิการกลั่น และดัชนีซีเทน วิเคราะห์ภายใต้มาตรฐานการทดสอบของสมาคมการทดสอบและวัสดุประเทศสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials, ASTM) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กรมธุรกิจพลังงานได้บังคับใช้ เพื่อเป็นข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล (ดังแสดงในภาคผนวก ก) รวมถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านไทรโบโลยีของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ได้แก่ ขนาดรอยสึกหรอ फिल्मการหล่อลื่น และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ซึ่งรายละเอียดการวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงและคุณสมบัติด้านไทรโบโลยีแสดงได้ดังตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 ตามลำดับ



ตารางที่ 3.1 ข้อมูลเทคนิคการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมี

สมบัติทางเคมี	เทคนิคการวิเคราะห์
สารประกอบทางเคมี	แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS)
หมู่ฟังก์ชัน	ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR)
องค์ประกอบธาตุ	CHNS Analyzer

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลเครื่องมือและอุปกรณ์การวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิง

สมบัติทางเชื้อเพลิง	มาตรฐานการทดสอบ	เครื่องมือและอุปกรณ์
ความหนืดจลนศาสตร์	ASTM D445	หลอดแก้วรูเล็ก (Capillary tube)
ความถ่วงจำเพาะ	ASTM D1298	ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer)
ความถ่วงเอพีไอ	ASTM D1298	คำนวณด้วยสมการดังอธิบายในบทที่ 4
ความหนาแน่น	ASTM D1298	คำนวณด้วยสมการดังอธิบายในบทที่ 4
จุดวาบไฟ	ASTM D93	Pensky martin closed cup (PMCC)
จุดติดไฟ	ASTM D93	Pensky martin closed cup (PMCC)
อุณหภูมิการกลั่น	ASTM D86	Distillation at atmospheric pressure-DU 4
ดัชนีซีเทน	ASTM D4737	คำนวณด้วยสมการดังอธิบายในบทที่ 4
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง	ASTM D240	บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb calorific meter)
คุณสมบัติการหล่อลื่น	ASTM D6097	High frequency reciprocating rig (HFRR)

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลเทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านไทรโบโลยี

คุณสมบัติด้านไทรโบโลยี	เทคนิคการวิเคราะห์
ขนาดรอยสึกหรอ	High frequency reciprocating rig (HFRR) & Microscope
ฟิล์มการหล่อลื่น	High frequency reciprocating rig (HFRR)
สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	High frequency reciprocation rig (HFRR)

ทั้งนี้ การดำเนินการวิจัยในขั้นตอนนี้ได้ถูกกล่าวถึงในบทที่ 4 ในหัวข้อการวิจัย “การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันเชื้อเพลิงขยะพลาสติกต่างชนิด” โดยอธิบายขั้นตอนและวิธีการวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงต่าง ๆ ของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงดังที่กล่าวไปข้างต้น รวมถึงอภิปรายและสรุปผลการวิจัยที่ได้จากการศึกษาสำหรับใช้ประเมินศักยภาพการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ดังจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

### 3.2.2 การทดสอบการใช้น้ำมันขยะพลาสติกต่างชนิดในเครื่องยนต์ดีเซล

การทดสอบเครื่องยนต์เป็นขั้นตอนการดำเนินการวิจัยเพื่อใช้ประเมินการทำงานของเครื่องยนต์ด้วยตัวแปรพื้นฐานจากการนำน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงานที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ เพื่อศึกษาผลกระทบ

ที่เกิดขึ้นต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ มลพิษไอเสีย และพฤติกรรมการสันสเทือนของเครื่องยนต์ โดยตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ได้แก่

1. ตัวแปรในด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ทำการตรวจวัดและวิเคราะห์ผลประกอบไปด้วย อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก และประสิทธิภาพเชิงความร้อนจำเพาะเบรก ซึ่งเป็นตัวแปรพื้นฐานที่ใช้ประเมินสมรรถนะของเครื่องยนต์ โดยการติดตั้งเครื่องยนต์เข้ากับไดนาโมมิเตอร์สำหรับวัดแรงบิดและอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นที่สภาวะต่าง ๆ รวมถึงนำข้อมูลดังกล่าวไปคำนวณเพื่อวิเคราะห์ผลด้านสมรรถนะในลำดับถัดไป

2. ตัวแปรในด้านคุณลักษณะการเผาไหม้ที่ทำการตรวจวัดและวิเคราะห์สำหรับประกอบไปด้วย ความดันในกระบอกสูบ ความดันในกระบอกสูบสูงสุด อัตราการปลดปล่อยความร้อน อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุด สัมประสิทธิ์ความแปรผันความดัน ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมหรือคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือก โดยการติดตั้งเซนเซอร์วัดความดันภายในกระบอกสูบและชุดวัดดองศาเพลลาข้อเหวี่ยง เพื่อเก็บข้อมูลสำหรับนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

3. ตัวแปรในด้านมลพิษไอเสียที่ทำการตรวจวัดและวิเคราะห์ประกอบไปด้วย ไนโตรเจนออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์ และเขม่า ซึ่งมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เหล่านี้เป็นมลพิษที่ถูกควบคุม เนื่องจากเป็นมลพิษไอเสียที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยนี้ทำการตรวจวัดมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสียภายใต้สภาวะต่าง ๆ ที่กำหนดขึ้นในการทดสอบ เพื่อใช้ประเมินผลกระทบด้านมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง

4. การวิเคราะห์พฤติกรรมการสันสเทือนของเครื่องยนต์เป็นการศึกษาที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในด้านการใช้งานในระยะยาว เนื่องจากการสันสเทือนของเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลต่าง ๆ เป็นหนึ่งสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานและชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายได้เมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานาน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์การสันสเทือนของเครื่องยนต์ที่สภาวะการทำงานที่ภาระงานต่าง ๆ ภายใต้ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ ด้วยการติดตั้งเซนเซอร์วัดการสันสเทือนที่บริเวณใกล้ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ โดยเปรียบเทียบกับสันสเทือนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซล

ทั้งนี้ การดำเนินการวิจัยในขั้นตอนนี้จะกล่าวถึงในบทที่ 5 ในหัวข้อการวิจัย “การศึกษาผลกระทบจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกต่างชนิดต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ มลพิษไอเสีย และพฤติกรรมการทำงานของเครื่องยนต์” โดยกล่าวถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัยและอธิบายวิธีการทดสอบเครื่องยนต์ รวมถึงอภิปรายและสรุปผลการวิจัยที่ได้จากการศึกษา

### 3.2.3 การวิเคราะห์ฝุ่นละออง

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยนี้เป็นการเก็บตัวอย่างของฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ โดยการใช้แผ่นกรองละเอียดในการเก็บตัวอย่างด้วยใต้เงื่อนไขที่กำหนด และนำตัวอย่างแผ่นกรองที่มีฝุ่นละอองไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังการเก็บตัวอย่าง รวมถึงนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมการสลายตัวขององค์ประกอบในฝุ่นละอองด้วยหลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนหรือที่เรียกว่า “Thermogravimetry analysis

(TGA)” ภายใต้สภาวะควบคุม ซึ่งแสดงเทคนิคการวิเคราะห์ที่ได้ดังตารางที่ 3.4 และกล่าวถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัยและอธิบายวิธีการทดสอบเครื่องยนต์ รวมถึงอภิปรายและสรุปผลการวิจัยที่ได้จากการศึกษาในบทที่ 5

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลเทคนิคการวิเคราะห์คุณลักษณะฝุ่นละออง

สมบัติทางเคมี	เทคนิคการวิเคราะห์
การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของฝุ่นละออง	เครื่องชั่งดิจิทัล 4 ตำแหน่ง
การสลายตัวขององค์ประกอบในฝุ่นละออง	Thermogravimetry analysis (TGA)



## บทที่ 4

### การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางเชื้อเพลิง ของน้ำมันขยะพลาสติกต่างชนิด

#### 4.1 บทคัดย่อ

งานวิจัยในบทนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี สมบัติพื้นฐานทางเชื้อเพลิง และวิเคราะห์คุณสมบัติด้านไตรโบโลยีของน้ำมันขยะพลาสติกต่างชนิด ซึ่งประกอบไปด้วย น้ำมันขยะพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET) น้ำมันขยะพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และน้ำมันขยะพลาสติกชนิดขยะพลาสติกผสม (Mixed Plastics) โดยเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการไพโรไลซิสโดยไม่ผ่านขั้นตอนการกลั่นลำดับส่วน ซึ่งในบทนี้ผู้วิจัยได้วิเคราะห์สารประกอบทางเคมี หมู่ฟังก์ชัน และองค์ประกอบธาตุของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS), เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR) และ CHNS Analyzer ตามลำดับ และวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานทางเชื้อเพลิงภายใต้มาตรฐานการทดสอบของสมาคมการทดสอบและวัสดุประเทศสหรัฐอเมริกา (ASTM) รวมถึงการวิเคราะห์ด้านไตรโบโลยี

จากการดำเนินการวิจัยพบว่า การวิเคราะห์สารประกอบเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง เมื่อพิจารณาจากจำนวนคาร์บอนบ่งชี้ให้เห็นว่า สารประกอบทางเคมีโดยส่วนใหญ่ของ PET เป็นสารไฮโดรคาร์บอนประเภทอะโรมาติกส์และจัดอยู่ในกลุ่มน้ำมันแก๊สโซลีน ( $C_6-C_{12}$ ) แต่อย่างไรก็ตาม HDPE และ Mixed Plastics พบว่า มีสัดส่วนของสารประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับกลุ่มของน้ำมันดีเซล เนื่องจากสารไฮโดรคาร์บอนส่วนใหญ่เป็นประเภทพาราฟิน ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนหลัก ๆ ที่พบในน้ำมันดีเซล นอกจากนี้ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและองค์ประกอบธาตุโดยภาพรวมแล้ว PET, HDPE และ Mixed Plastics มีหมู่ฟังก์ชันและองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซล และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า ความหนืดจลนศาสตร์ จุดวาบไฟ จุดติดไฟ ความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ ดัชนีซีเทน อุณหภูมิการกลั่นน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีค่าที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของ PET, HDPE และ Mixed Plastics ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งช่วยบ่งชี้ให้เห็นถึงศักยภาพความเป็นเชื้อเพลิงพบว่ามีค่าพลังงานที่สูง

นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติด้านไตรโบโลยีน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า มีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดีกว่าน้ำมันดีเซล โดยพิจารณาเบื้องต้นจากขนาดของรอยสึกหรอและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่มากกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากองค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง เมื่อพิจารณาถึงภาพรวมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง สามารถกล่าวสรุปโดยสังเขปได้ว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีคุณลักษณะและมีศักยภาพเพียงพอที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ เพื่อศึกษาผลกระทบในด้านต่าง ๆ ที่มีต่อเครื่องยนต์เมื่อนำไปใช้งาน

## 4.2 บทนำ

พลาสติกถือว่าเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีความสนใจในการนำมาศึกษาและวิจัยเพื่อนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกทดแทนการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิล ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานใช้แล้วหมดไป อีกทั้งยังสามารถช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจากปริมาณขยะพลาสติกสะสมที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน ทั้งบนบกและในทะเล เนื่องจากพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีโดยมีไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน ดังนั้น พลาสติกจึงจัดว่าเป็นแหล่งพลังงานชั้นดีที่สามารถนำไปแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้ ซึ่งพลังงานเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญในการตอบสนองความต้องการในหลายภาคส่วนไม่ว่าจะเป็นภาคธุรกิจ ภาคอุตสาหกรรม หรือแม้กระทั่งในภาคการเกษตร โดยมีแนวโน้มของความต้องการที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงหลักของประเทศไทยที่นิยมนำมาใช้งาน เช่น การใช้งานเป็นต้นกำลังให้กับยานพาหนะ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องสูบน้ำ และเครื่องจักรกลต่าง ๆ ประกอบกับปัจจุบันประเทศไทยยังต้องพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ ด้วยสาเหตุนี้ การวิจัยหาแหล่งพลังงานทางเลือกจากขยะพลาสติกจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจและมีบทบาทที่สำคัญเพื่อใช้ลดปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล รวมถึงลดปริมาณการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ แต่การที่นำน้ำมันขยะพลาสติกมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลนั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ เช่น องค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางเชื้อเพลิง สมรรถนะของเครื่องยนต์ เป็นต้น

จากผลการวิจัยของนักวิจัยทั่วโลกในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้นำขยะพลาสติกมาแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งผลการวิจัยโดยส่วนใหญ่ชี้ให้เห็นว่าน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกนั้นสามารถนำมาทดแทนการใช้ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจากฟอสซิลได้ เนื่องจากน้ำมันขยะพลาสติกนั้นมีสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่อย่างไรก็ตาม ในการวิจัยส่วนหนึ่งพบว่า สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกเมื่อใช้วัตถุดิบจากพลาสติกต่างชนิดกันส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ ซึ่งสาเหตุหลักเกิดจากองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบและสภาวะที่ใช้ในกระบวนการผลิต จากเหตุผลดังกล่าว Damodharan et al. (2017) ได้มีการศึกษาและวิจัยสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกจากการใช้วัตถุดิบชนิดที่ต่างกัน ได้แก่ โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โพลีโพรพิลีน (PP) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และโพลิสไตรีน (PS) โดยวิเคราะห์หาสารประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค GC-MS พบว่า กลุ่มน้ำมันขยะพลาสติกดังกล่าวมีสารประกอบทางเคมีอยู่ในช่วง  $C_{10}-C_{30}$  ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งยืนยันว่ามีองค์ประกอบที่สำคัญที่จัดว่าเป็นเชื้อเพลิงปิโตรเลียม รวมถึงมีค่าพลังงานที่สูง ทั้งนี้ ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงกลับพบว่า พลาสติกแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันในสัดส่วนของผลิตภัณฑ์และสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ได้สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนจากการศึกษาทางวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ซึ่งผลดังกล่าวเป็นสาเหตุหนึ่งที่มีผลกระทบต่อเครื่องยนต์ในหลาย ๆ ด้าน เช่น คุณลักษณะการเผาไหม้ มลพิษไอเสีย เป็นต้น ดังนั้น การควบคุมวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการแปรรูปพลังงานเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการนำมาพิจารณาสำหรับการวิจัย

ในงานวิจัยบทนี้ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาและวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง เพื่อใช้เป็นตัวแปรหนึ่งในการประเมินศักยภาพและผลกระทบที่จะส่งผลต่อการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่นิยมนำมาใช้ในงานในภาคการเกษตร

### 4.3 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยในบทนี้เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของตัวอย่างน้ำมันขยะพลาสติกเทียบกับน้ำมันดีเซล ซึ่งแบ่งการดำเนินการวิจัยออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ (1) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (2) การวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิง และ (3) การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านไทรโบโลยี โดยแสดงการดำเนินการวิจัยเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยวิเคราะห์คุณลักษณะทางเชื้อเพลิง

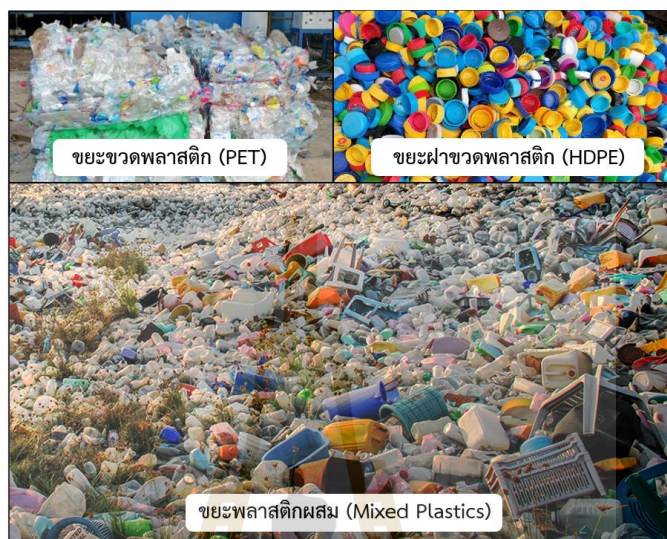
ในการวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ซึ่งประกอบไปด้วย น้ำมันขยะพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนเทเรพทาเลต (PET), น้ำมันขยะพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และน้ำมันขยะพลาสติกชนิดขยะพลาสติกผสม (Mixed Plastics) ที่ผ่านกระบวนการแปรรูปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการไพโรไลซิส โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ภายใต้เงื่อนไขช่วงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาระหว่าง 450 °C ซึ่งงานวิจัยนี้ขยะพลาสติกที่นำมาใช้สำหรับการแปรรูปเป็นน้ำมันขยะพลาสติกสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

ขยะพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนเทเรพทาเลต (PET) เป็นผลิตภัณฑ์ชนิดขวดพลาสติก เช่น ขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำอัดลม ขวดน้ำมันพืช และขวดเครื่องปรุงอาหารต่าง ๆ โดยจัดอยู่ในกลุ่มขยะพลาสติกรีไซเคิลหมายเลข 1

ขยะพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นฝาของขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำอัดลม ขวดน้ำมันพืช และขวดเครื่องปรุงอาหารต่าง ๆ โดยจัดอยู่ในกลุ่มขยะพลาสติกรีไซเคิลหมายเลข 2

ขยะพลาสติกชนิดขยะพลาสติกผสม (Mixed Plastics) เป็นขยะพลาสติกจากแหล่งชุมชน โดยทั่วไปประกอบไปด้วยผลิตภัณฑ์จำพวกถุงพลาสติก ขวดน้ำดื่ม ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้ในครัวเรือน

และบรรจุภัณฑ์ใส่อาหาร ซึ่งขยะพลาสติกผสมเป็นพลาสติกชนิด HDPE, LDPE, PS, PP, PET และอื่น ๆ ที่ปะปนกันอยู่ โดยแสดงคำย่อและคำอธิบายน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้แสดง ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.2 ขยะพลาสติกที่ใช้เป็นวัตถุดิบในงานวิจัยสำหรับใช้แปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิง

ตารางที่ 4.1 คำย่อและคำอธิบายตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับการทดสอบ

คำย่อ	คำอธิบาย
Diesel	น้ำมันดีเซลที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ (B7)
PET	น้ำมันจากขยะพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)
HDPE	น้ำมันจากขยะพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE)
Mixed Plastics	น้ำมันจากขยะพลาสติกประเภทพลาสติกผสม



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างน้ำมันขยะพลาสติกจากพลาสติกชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัย

#### 4.3.1 การวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี

การวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS) ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่ยิยมใช้ในการวิเคราะห์หาสารประกอบทางเคมีในสารผสมทั้งในสถานะของแข็งของเหลว และแก๊ส ด้วยการวิเคราะห์ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ โดยอาศัยคุณสมบัติในการละลายและความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกันของสารแต่ละชนิดบนวัฏภาคเคลื่อนที่ (Mobile phase) และวัฏภาคคงที่ (Stationary phase) ซึ่งส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจะประกอบไปด้วย แก๊สพา (Carrier gas), ส่วนฉีดสาร (Injector port), คอลัมน์และตู้อบคอลัมน์ (Column and Column oven), ตัวตรวจวัด (Detector) และคอมพิวเตอร์ที่มีซอฟต์แวร์สำหรับใช้ในการประมวลผล งานวิจัยนี้วิเคราะห์โดยใช้ Agilent Technologies 7890A เชื่อมต่อกับตัวตรวจวัด Agilent Technologies 7693 ALS ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS)

สำหรับขั้นตอนในการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันเชื้อเพลิงสามารถกล่าวได้โดยสังเขปคือ ภายในระบบแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) จะมีแก๊สพาที่เคลื่อนที่อยู่ในระบบ โดยตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าสู่ระบบ GC ทางส่วนฉีดสารที่อยู่ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิ และเป็นระบบปิด ซึ่งภายใต้อุณหภูมิที่สูงของส่วนฉีดสารน้ำมันเชื้อเพลิงจะถูกทำให้เปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ และเคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์พร้อมแก๊สพาภายในคอลัมน์ ซึ่งมีวัฏภาคคงที่เคลือบอยู่บนของแข็งรองรับหรือเคลือบอยู่บนท่อ สารอินทรีย์ในตัวอย่างจะเกิดแรงกระทำกับวัฏภาคคงที่ ด้วยสมบัติของสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันทำให้สารอินทรีย์แต่ละชนิดมีแรงกระทำที่แตกต่างกันเป็นผลให้วัฏภาคคงที่เหนี่ยวรั้งสารอินทรีย์แต่ละชนิดได้ไม่เท่ากัน สารอินทรีย์จึงเกิดการแยกออกจากกันภายในคอลัมน์นี้และสุดท้ายสารอินทรีย์จะเดินทางออกจากคอลัมน์เข้าสู่ตัวตรวจวัดในเวลาที่แตกต่างกัน สัญญาณที่ตรวจวัดได้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าด้วย



ระบบอิเล็กทรอนิกส์และส่งผลไปยังส่วนประมวลผลและบันทึกผล สารอินทรีย์เมื่อเดินทางผ่านตัวตรวจวัดสัญญาณก็จะถูกระบายทิ้งออกจากระบบ GC ไปพร้อมกับแก๊สพา โดยระบบ GC ที่กล่าวมานั้นจะทำงานภายใต้การควบคุมและประมวลผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งข้อมูลเงื่อนไขของสภาวะการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลเงื่อนไขของสภาวะการวิเคราะห์เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี

แก๊สโครมาโทกราฟี (GC condition)	
อุณหภูมิตู้อบคอลัมน์ (Column oven temperature)	50 °C
โหมดการฉีด (Injection mode)	Split
อัตราส่วนการแยก (Split ratio)	20 : 1
ปริมาตรการฉีด (Injection volume)	1 $\mu$ 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
แมสสเปกโตรเมทรี (MS condition)	
ชนิดการสแกน (Scan type)	MS1 scan
อุณหภูมิ (Source temperature)	250 °C
ช่วงมวลต่อประจุของตัวตรวจวัด (Mass to charge range)	35-550 m/z

#### 4.3.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ที่สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างทดสอบได้ทั้งสถานะที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยอาศัยหลักการดูดกลืนคลื่นรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น 4,000  $\text{cm}^{-1}$  ถึง 400  $\text{cm}^{-1}$  กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนในพันธะที่ไวต่อรังสีอินฟราเรดดูดกลืนพลังงานความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับการสั่นของพันธะในโมเลกุลของสารอินทรีย์ซึ่งเป็นพันธะโคเวเลนต์ ส่งผลให้อิเล็กตรอนอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้นทำให้พันธะเกิดการสั่นมากขึ้น จากนั้นอิเล็กตรอนจะกลับสู่สถานะพื้นพร้อมคายพลังงานออกมาเท่ากับพลังงานที่ดูดกลืนเข้าไป โดยที่เครื่องมือวัดจะวัดค่าความเข้มแสงต่อความถี่หรือเลขคลื่น (Wave number) ได้เป็นสเปกตรัมที่เรียกว่า “อินเทอร์เฟโรแกรม (Interferogram)” ซึ่งในแต่ละพันธะของหมู่ฟังก์ชันจะแสดงค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกันตามคุณสมบัติเฉพาะโมเลกุลของตัวอย่างทดสอบ (Bakri, M. K. et al, 2020; Shojaei, T.R. et al, 2021)



รูปที่ 4.5 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR)

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคดังที่กล่าวมาข้างต้นในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ Fourier Transform Infrared Microscope spectrophotometry ยี่ห้อ Bruker รุ่น TENSOR 27-Hyperion แสดงดังรูปที่ 4.5 ภายใต้ช่วงเลขคลื่นที่สแกนระหว่าง  $4,000\text{ cm}^{-1}$  ถึง  $400\text{ cm}^{-1}$  ที่ความละเอียด  $4\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งหลักการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR สามารถอธิบายขั้นตอนโดยสังเขปได้ว่า เมื่อรังสีอินฟราเรดผ่านเข้าไปยังอินเทอร์โพโรมิเตอร์ลำแสงจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่เป็นตัวแยกลำแสง ลำแสงครึ่งหนึ่งจะผ่านไปยังกระจกที่ถูกตรึงอยู่กับที่ และกระจกที่เคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วคงที่เมื่อลำแสงสะท้อนกลับมาที่ตัวแยกลำแสงจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันหรือแทรกสอดแบบหักล้างของแต่ละความยาวคลื่นเมื่อแสงผ่านไปยังตัววัดสัญญาณที่อ่านได้ทุกความถี่พร้อมกับช่วงสแกนกระจก โดยที่อัตราการสุ่มสัญญาณและความเร็วของกระจกที่เคลื่อนที่ได้จะถูกควบคุมให้มีความถูกต้องและคงที่ โดยแสดงสัญญาณที่อ่านได้จะแสดงเป็นกราฟที่พล็อตเทียบระหว่างแสงที่ผ่านตัวอย่างทดสอบออกมาด้วยการคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การส่งสัญญาณ (%Transmittance) อัตราส่วนระหว่างความเข้มของแสงที่ผ่านตัวอย่างทดสอบออกมาต่อความเข้มของแสงที่ตกกระทบตัวอย่างทดสอบคูณ 100 แสดงในแกน Y และเลขคลื่นแสดงในแกน X (ศรันย์ธรรม ภูริจารูยางกูร, 2559)

#### 4.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในน้ำมันขยะพลาสติก

การวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์หรือที่เรียกว่า “CHNS/O Analyzer” เป็นเทคนิคการระบุปริมาณของธาตุคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ไนโตรเจน (N), กำมะถัน (S) และออกซิเจน (O) ที่อยู่ในสารตัวอย่าง การวิเคราะห์ดังกล่าวนี้เป็นเทคนิคที่มีความน่าเชื่อถือในการประเมินองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบต่าง ๆ และสามารถนำไปใช้กับตัวอย่างประเภทต่าง ๆ เช่น สารที่เป็นของแข็ง ของเหลว และสารระเหย เป็นต้น โดยอาศัยหลักการเผาสารตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอนในเตาเผา ณ อุณหภูมิสูงให้กลายเป็นแก๊สผสม ภายใต้บรรยากาศของฮีเลียมแล้วมีการเติมแก๊สออกซิเจนจะเกิดเป็นแก๊สผสมของ  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{SO}_2$  จะพาเคลื่อนที่เข้าไปในคอลัมน์โดยแก๊สพา เพื่อเกิดการแยกภายในด้วยปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนเป็นแก๊สบริสุทธิ์และวัดปริมาณด้วยตัวตรวจวัด ในส่วนการวิเคราะห์ธาตุออกซิเจนจะแตกต่างในกระบวนการเผาไหม้

จะไม่มี การเติมแก๊สออกซิเจน ทั้งนี้ สารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์จะต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงเป็นโครมาโตแกรมของพีค C, H, N, S และ O โดยจะเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานได้ข้อมูลเป็นเปอร์เซ็นต์ สำหรับงานวิจัยนี้วิเคราะห์ห้องประกอบธาตุที่อยู่ในน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ชนิด และน้ำมันดีเซล โดยใช้เครื่อง CHNS Analysis ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN628/628S ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.6 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุของน้ำมันเชื้อเพลิง

#### 4.3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพภายใต้มาตรฐาน ASTM ที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนดทั้งหมด 10 รายการ คือ ความหนืดจลนศาสตร์ ความถ่วงจำเพาะและความถ่วงเอพีไอ ความหนาแน่น จุดวาบไฟและจุดติดไฟ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง อุณหภูมิการกลั่น ดัชนีซีเทน และคุณสมบัติการหล่อลื่น ซึ่งทำการวิเคราะห์ดังรายละเอียดต่อไปนี้

##### 4.3.4.1 การวิเคราะห์ความหนืดจลนศาสตร์

การวิเคราะห์ความหนืด (Viscosity) ของน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นการวัดสมบัติต้านทานการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งความหนืดที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความหนืดมีค่าลดลง ดังนั้นการแสดงผลค่าความหนืดจำเป็นต้องระบุอุณหภูมิที่ทำการวิเคราะห์ โดยที่ความหนืดนั้นเป็นสมบัติทางเชื้อเพลิงมีความสำคัญต่อการนำผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ เนื่องจากความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิงมีผลกระทบต่อระบบการฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ ทั้งนี้ความหนืดแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic viscosity) และความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity) โดยความหนืดที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็นความหนืดจลนศาสตร์ ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

เครื่องมือวัดความหนืดแบบหลอดแก้วรูเล็กเป็นการวิเคราะห์ความหนืดภายใต้มาตรฐาน ASTM D445 วิเคราะห์ในหน่วยเซนติสโตก (cSt) ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ค่าความหนืดนั้นประกอบไปด้วย (1) หลอดแก้วรูเล็ก (Cannon-Fenske capillary tube), (2) ขायืดหลอดแก้วรูเล็ก, (3) อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Petrotest-Visco bath), (4) นาฬิกาจับเวลา, (5) จุกยาง และ (6) เทอร์โมมิเตอร์



รูปที่ 4.7 เครื่องมือวิเคราะห์ความหนืดแบบหลอดแก้วรูเล็ก

ในขั้นตอนการวิเคราะห์ความหนืดจลนศาสตร์ทำได้โดยการเติมตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงที่ต้องการวิเคราะห์ลงในหลอดแก้วรูเล็ก (ดังรูปที่ 4.7) รวมถึงบันทึกข้อมูลอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงก่อนลงแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ( $T_F$ ) โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ ตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงก่อนการเติมตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงลงในหลอดแก้วรูเล็กดังกล่าวประกอบด้วยขายึดและแช่ลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ถูกตั้งอุณหภูมิการทดสอบให้คงที่  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_T$ ) โดยแช่ตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงทิ้งไว้ 10 นาที เพื่อให้ตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิการทดสอบตามที่กำหนด เมื่อครบเวลากำหนดใช้จุกยางอุดตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงให้สูงถึงระดับ A และเริ่มจับเวลาเมื่อตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงไหลลงมาที่ระดับ B และหยุดจับเวลาเมื่อตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงไหลลงมาที่ระดับ C ทำการบันทึกเวลาที่จับได้ในหน่วยวินาที และทำการทดสอบซ้ำจนครบ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยของเวลาที่จับได้เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความหนืดจลนศาสตร์โดยใช้ค่าคงที่ของหลอดแก้วรูเล็ก ดังตารางที่ 4.3 สำหรับแทนค่าตัวแปรในสมการที่ 4.1 ซึ่งเป็นสมการสำหรับใช้คำนวณค่าความหนืดจลนศาสตร์ที่วัดด้วยหลอดแก้วรูเล็ก Cannon-Fenske

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของหลอดแก้วรูเล็ก (Cannon-Fenske capillary tube)

เบอร์หลอดแก้วรูเล็ก	ค่าคงที่ C (cSt/s)	ค่าคงที่ B ( $1/^{\circ}\text{C}$ )
75	0.00767	$76 \times 10^{-6}$
100	0.01401	$77 \times 10^{-6}$
150	0.03619	$78 \times 10^{-6}$
200	0.0968	$81 \times 10^{-6}$
300	0.02571	$79 \times 10^{-6}$

$$\nu = C \times t [1 - B \times (T_T - T_F)] \quad (4.1)$$

โดยที่	$V$	คือ ความหนืดจลนศาสตร์ (cSt)
	C	คือ ค่าคงที่ของหลอดแก้วรูเล็ก (ดังตารางที่ 4.3)
	t	คือ เวลาที่จับได้จากการทดสอบ (s)
	B	คือ ค่าคงที่สำหรับการปรับค่า (ดังตารางที่ 4.3)
	$T_T$	คือ อุณหภูมิทดสอบ ( $^{\circ}\text{C}$ )
	$T_F$	คือ อุณหภูมิตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงก่อนการทดสอบ ( $^{\circ}\text{C}$ )

#### 4.3.4.2 การวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะ ความถ่วงเอพีไอ และความหนาแน่น

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) นิยามได้โดยอัตราความหนาแน่นของสารต่อความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ ณ อุณหภูมิเดียวกัน สามารถกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า เป็นอัตราส่วนของน้ำหนักเชื้อเพลิงที่มีปริมาตรหนึ่งต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิกำหนด (ความถ่วงจำเพาะเป็นสมบัติที่ไม่มีหน่วย) ซึ่งเป็นสมบัติทางกายของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการบ่งชี้ถึงความหนักเบาของน้ำมันเชื้อเพลิง อีกทั้งยังมีประโยชน์ในเชิงการค้า ถ้าน้ำมันหนักมาก ค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักจะลดลง ค่าซีเทนจะลดลงทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และเกิดเป็นเขม่าคาร์บอนสะสมได้มาก

การวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงภายใต้มาตรฐาน ASTM D1298 โดยเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดประกอบไปด้วย (1) ไฮโดรมิเตอร์สเกลระดับ 0.700–1.000 ที่ความละเอียด 0.005 (2) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ และ (3) กระจกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ในขั้นตอนการวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะเริ่มต้นจากการตั้งค่าอุณหภูมิอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่  $15^{\circ}\text{C}$  รอจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ถัดไปทำการเทตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงลงในกระจกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วนำกระจกตวงแช่ลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้อุณหภูมิ น้ำมันเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของน้ำในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ขั้นตอนสุดท้ายเมื่อครบเวลาที่กำหนดให้นำไฮโดรมิเตอร์จุ่มลงไปใ้ในกระจกตวงแล้วปล่อยให้ลอย เมื่อไฮโดรมิเตอร์นิ่งแล้วทำการอ่านค่าและบันทึกผล ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยจากผลการวิเคราะห์ ซึ่งการวิเคราะห์



รูปที่ 4.8 เครื่องมือวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะและความถ่วงเอพีไอ

ความถ่วงเอพีไอ (API Gravity) เป็นหน่วยวัดที่ได้มีการพัฒนามาจากสถาบันปิโตรเลียมของอเมริกา (America Petroleum Institute, API) และเป็นอีกวิธีหนึ่งในการพิจารณาความหนักเบาของน้ำมันเชื้อเพลิงในส่วนที่เกี่ยวข้องกับน้ำ กล่าวคือ ถ้าความถ่วงเอพีไอมีค่ามากกว่า 10 น้ำมันเชื้อเพลิงจะเบากว่าและลอยอยู่บนน้ำ แต่กรณีที่มีค่าน้อยกว่า 10 น้ำมันเชื้อเพลิงก็หนักและจม ซึ่งความถ่วงเอพีไอเป็นการวัดผกผันของความหนาแน่นของน้ำมันเชื้อเพลิงที่สัมพันธ์กับน้ำหรือที่เรียกว่า “ความถ่วงจำเพาะ” และความถ่วงเอพีไอยังเป็นสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ใช้ในการจำแนกประเภทของน้ำมันเชื้อเพลิง แม้ความถ่วงเอพีไอจะเป็นปริมาณที่ไร้มิติในทางคณิตศาสตร์ แต่ก็เรียกว่าอยู่ในหน่วย “องศา (°)” ซึ่งน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียมจะมีค่าความถ่วงเอพีไออยู่ในช่วง 10–70° (Bint-E-Naser, S. F., 2016) การคำนวณความถ่วงเอพีไอของน้ำมันเชื้อเพลิงจะใช้ความสัมพันธ์จากความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM D1298 โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2

$$\text{ความถ่วงเอพีไอ} = (141.5/\text{ความถ่วงจำเพาะที่ } 15^{\circ}\text{C}) - 131.5 \quad (4.2)$$

ความหนาแน่น (Density) สามารถนิยามได้โดยอัตราส่วนของมวลเชื้อเพลิงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเชื้อเพลิงดังกล่าวที่อ้างอิงอุณหภูมิเดียวกัน และถือว่าเป็นสมบัติทางเชื้อเพลิงที่มีความสำคัญที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ รวมถึงมีความสำคัญต่อการคำนวณคุณภาพในการจุดระเบิด ซึ่งถูกวิเคราะห์ภายใต้มาตรฐาน ASTM D1298 (กรมธุรกิจพลังงาน, 2562) ด้วยอุปกรณ์ที่ชื่อว่า “ไฮโดรมิเตอร์” อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ความหนาแน่นด้วยการนำค่าความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15 °C ที่ได้จากการวิเคราะห์ดังกล่าวมาข้างต้นคูณด้วยค่าความหนาแน่นของน้ำ ณ อุณหภูมิ 15 °C โดยมีค่าเท่ากับ 999.016 kg/m<sup>3</sup> (อ้างอิงข้อมูลตามมาตรฐาน ASTM D1250)

#### 4.3.4.3 การวิเคราะห์จุดวาบไฟและจุดติดไฟ

จุดวาบไฟ (Flash point) เป็นอุณหภูมิที่น้ำมันเชื้อเพลิงได้รับความร้อนจนเกิดการระเหยกลายเป็นไอและสามารถลุกวาบไฟขึ้นเมื่อไอดังกล่าวถูกเปลวไฟ ตามหลักในทางปฏิบัติแล้วจุดวาบไฟไม่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ แต่มีความสำคัญในด้านการป้องกันอันตรายจากอัคคีภัยในการขนส่งและการเก็บสำรองน้ำมัน การวิเคราะห์จุดวาบไฟของน้ำมันเชื้อเพลิงสามารถทำได้โดยการใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “Pensky martin closed cup (PMCC)” เป็นอุปกรณ์การวัดจุดวาบไฟแบบภาชนะปิด โดยทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D93 ด้วยการนำตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงใส่ในถ้วยใส่ตัวอย่างให้มีปริมาตรเท่ากับตามเส้นระดับที่ปรากฏอยู่ในถ้วยใส่ตัวอย่าง (ประมาณ 70 มิลลิลิตร) และถูกติดตั้งกับเทอร์โมมิเตอร์ ดังรูปที่ 4.9 จากนั้นทำการให้ความร้อนแก่ถ้วยใส่ตัวอย่างเพื่อให้ น้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น และปล่อยหัวเปลวไฟ (โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.2–4.8 มิลลิเมตร) ให้เข้าไปล่อให้เกิดการวาบไฟ เมื่อเกิดจุดวาบไฟจะสามารถสังเกตเห็นเปลวไฟวาบขึ้นบริเวณผิวหน้าของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเปลวไฟนี้ขึ้นเรียกว่าอุณหภูมิจุดวาบไฟของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ทำการวิเคราะห์ นอกจากนี้ทำให้ความร้อนต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงจุดติดไฟได้แต่การติดไฟนั้นจะต้องต่อเนื่องกันไปไม่ต่ำกว่า 5 วินาที โดยปกติแล้วอุณหภูมิของจุดติดไฟ (Fire point) จะสูงกว่าจุดวาบไฟประมาณ 5–35 °C



รูปที่ 4.9 เครื่องมือวิเคราะห์จุดวาบไฟและจุดติดไฟ

#### 4.3.4.4 การวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Heating value) เป็นปริมาณพลังงานความร้อนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากการทำปฏิกิริยาเคมีของเชื้อเพลิงในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ในหนึ่งมวล (สำหรับเชื้อเพลิงในสถานะของแข็งและของเหลว) หรือหนึ่งหน่วยปริมาตร (สำหรับเชื้อเพลิงในสถานะแก๊ส) โดยทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D240 ทั้งนี้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามสถานะของน้ำที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาไหม้หรือค่าความร้อนแฝงของการควบแน่นของไอน้ำที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ โดยค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูง (Higher heating value หรือ Gross calorific value) น้ำที่มีอยู่ในสารจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะกลั่นตัวอยู่ในสถานะของของเหลว และค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ (Lower heating value) น้ำที่มีอยู่ในสารจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะอยู่ในสถานะไอ เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงที่ทดสอบในงานวิจัยไม่ใช่สารประกอบบริสุทธิ์ ทำให้ไม่สามารถคำนวณได้จากความร้อนของปฏิกิริยาได้ (กุลยา กนกจาร์วิจิตร, 2558) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูง ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิงกล่าวโดยสังเขปได้ดังนี้



รูปที่ 4.10 เครื่องมือวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิง

ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิง งานวิจัยนี้เริ่มต้นโดยการตั้งค่าโปรแกรมให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D240 ที่ใช้ในการอ้างอิง แล้วทำการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยการตวงน้ำมันโดยใช้หลอดหยดสารหยดลงในถ้วยจุดระเบิดและชั่งบนเครื่องชั่งดิจิทัลความละเอียด 4 ตำแหน่ง ให้ได้น้ำหนัก  $0.5 \pm 0.02$  กรัม (หมายเลข 1) เมื่อเสร็จขั้นตอนดังกล่าวทำการติดตั้งถ้วยที่ใส่ตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงลงบนแกนอลูมิเนียมที่ได้ทำการมัดเส้นด้ายให้ติดกับหลอด จากนั้นนำปลายของเส้นด้ายที่พันไว้จุ่มลงในถ้วยจุดระเบิด (หมายเลข 2) และประกอบเข้ากับลูกบอมบ์ให้เรียบร้อยพร้อมทำการอัดอากาศเข้าไปยังลูกบอมบ์ (หมายเลข 3 และ 4) และติดตั้งลูกบอมบ์เข้ากับเครื่องวิเคราะห์ (หมายเลข 5) ขั้นตอนสุดท้ายทำการสั่งการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนบนโปรแกรม ACWIN เครื่องวิเคราะห์จะเริ่มทำงาน (หมายเลข 6)

#### 4.3.4.5 การวิเคราะห์อุณหภูมิการกลั่น

อุณหภูมิการกลั่น (Distillation temperature) เป็นสมบัติทางเชื้อเพลิงที่บ่งบอกถึงความสามารถในการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งมีความสำคัญทั้งทางด้านความปลอดภัยในการกักเก็บ และแสดงถึงพฤติกรรมการทำงานของเครื่องยนต์ โดยอุณหภูมิการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตร เป็นอุณหภูมิที่ช่วยประเมินเครื่องยนต์ว่าติดง่ายหรือยาก (ถ้ามีอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะส่งผลให้เครื่องยนต์ติดได้ยาก ในทางกลับกันถ้ามีอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปก็อาจทำให้เกิดเวเปอร์ล็อกในระบบเชื้อเพลิงได้เช่นกัน) อุณหภูมิการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร เป็นอุณหภูมิที่บ่งบอกว่าการอุ่นเครื่องยนต์ทำได้เร็วหรือช้าเพียงใด (ถ้าการกระจายตัวของไอน้ำมันเชื้อเพลิงเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอจะทำให้อุ่นเครื่องยนต์ได้เร็ว และส่งผลดีต่อกำลังของเครื่องยนต์ที่สูงขึ้น) และอุณหภูมิการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ที่ร้อยละ 90 โดยปริมาตร เป็นอุณหภูมิที่กำหนดไว้สำหรับบ่งชี้ถึงความเหมาะสมในการใช้งานให้ได้พลังงานสูงสุด อีกทั้งยังเป็นตัวแปรหนึ่งที่ช่วยประเมินถึงผลกระทบที่มีต่อเครื่องยนต์ในด้านสมรรถนะและมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ (Aleme, H. et al., 2012; ศิริรัตน์ จิตการคำ, 2551) สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิการกลั่นประกอบไปด้วย (1) ชุดวัดอุณหภูมิการกลั่น (2) ขวดการกลั่น (3) กระจกตวง (4) นาฬิกาจับเวลา (5) เทอร์โมมิเตอร์ และ (6) จุกยางซิลิโคน ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิการกลั่น



ขั้นตอนแรกในการวิเคราะห์คือการเตรียมตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงปริมาตร 100 มิลลิลิตร และทำการเทในใส่ขวดกลั่นที่ติดตั้งไว้กับชุดวิเคราะห์การกลั่นโดยส่วนด้านบนของขวดกลั่นจะติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์สำหรับอ่านค่าอุณหภูมิการกลั่น ขั้นตอนถัดไปเป็นการให้ความร้อนแก่น้ำมันเชื้อเพลิงด้วยจับเวลาและควบคุมการให้ความร้อนกับขวดกลั่น เพื่อควบคุมอัตราการกลั่นให้อยู่ในช่วง 4–5 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงในขวดกลั่นเริ่มเดือดทำการสังเกตเพื่อบันทึกผลอุณหภูมิที่ตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงถูกกลั่นออกมาเป็นหยดแรก โดยการบันทึกอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ที่ติดตั้งไว้ที่ขวดกลั่น ทั้งนี้ทำการบันทึกผลของอุณหภูมิทุก ๆ 5 มิลลิลิตรของปริมาตรที่กลั่นได้จนถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ไม่สามารถกลั่นได้ โดยทั่วไปจะกลั่นถึงร้อยละ 90 โดยปริมาตร

#### 4.3.4.6 การวิเคราะห์ดัชนีซีเทน

ดัชนีซีเทน (Cetane index) คือ สมบัติที่ใช้ในการบ่งชี้คุณภาพการติดไฟและความสามารถในการผสมระหว่างอากาศและน้ำมันเชื้อเพลิง ดัชนีซีเทนควรมีค่าที่เหมาะสมกับความเร็วยรอบของเครื่องยนต์ เพื่อช่วยให้เครื่องยนต์ติดไฟง่ายไม่เกิดการน็อกในเครื่องยนต์และเป็นการประหยัดเชื้อเพลิง ซึ่งค่าดัชนีซีเทนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบเชิงโมเลกุลของน้ำมันเชื้อเพลิง โดยน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีโมเลกุลประเภทไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรงนั้นจะมีความสามารถในการติดไฟได้ดีหรือมีค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดที่ต่ำ ส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีไฮโดรคาร์บอนประเภทอะโรมาตริกส์จะมีความสามารถในการติดไฟที่ช้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเภทที่มีวงแหวนหลายวง (ศิริรัตน์ จิตการคำ, 2551)

ดัชนีซีเทนเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณภายใต้มาตรฐาน ASTM D4737 ด้วยสมการที่ 4.3 โดยใช้ความสัมพันธ์จากผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการกลั่นที่ 10, 50 และ 90 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ และความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะที่ 15 °C (B.P. Pundir, 2010; Fidyayuningrum, H., et al, 2020)

$$CI = 45.2 + 0.0892T_{10N} + [0.131 + 0.901] T_{50N} + [0.0523 + 0.420B]T_{90N} + 0.00049[T_{10N}^2 - T_{90N}^2] + 107B + 60B^2 \quad (4.3)$$

โดยที่	CI	คือ ดัชนีซีเทน
	D	คือ ความหนาแน่นที่ 15 °C (g/ml)
	B	คือ $[\exp\{-3.5(D - 0.85)\}] - 1$
	T <sub>10</sub>	คือ อุณหภูมิการกลั่นที่ 10% (°C) ทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D86
	T <sub>10N</sub>	คือ T <sub>10</sub> - 215 (°C)
	T <sub>50</sub>	คือ อุณหภูมิการกลั่นที่ 50% (°C) ทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D86
	T <sub>50N</sub>	คือ T <sub>50</sub> - 260 (°C)
	T <sub>90</sub>	คือ อุณหภูมิการกลั่นที่ 90% (°C) ทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D86
	T <sub>90N</sub>	คือ T <sub>90</sub> - 310 (°C)

#### 4.3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านไตรโบโลยีของน้ำมันเชื้อเพลิง

ไตรโบโลยี (Tribology) เป็นส่วนหนึ่งของศาสตร์ทางวิศวกรรม วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีที่ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างการเสียดทาน (Friction) การสึกหรอ (Wear) และการหล่อลื่น (Lubricant) ของพื้นผิวสัมผัสของวัตถุที่มีการเคลื่อนที่สัมผัสกันที่หลากหลาย อาทิเช่น การลื่นไถล การเคลื่อนที่กลับไปกลับมา หรือการหมุน เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้้นำการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านไตรโบโลยีของน้ำมันจากขยะพลาสติกต่างชนิด เพื่อประเมินผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

##### 4.3.5.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติการหล่อลื่น

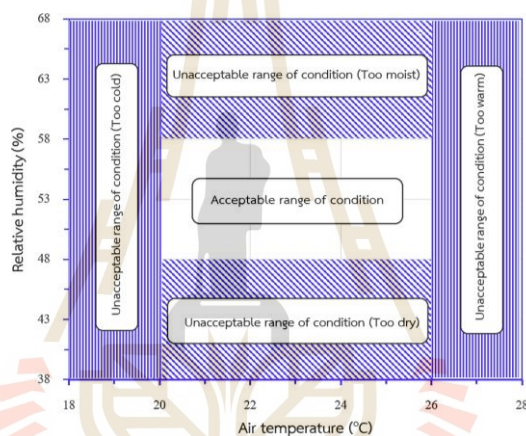
การทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติการหล่อลื่นของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิง ภายใต้มาตรฐาน ASTM D6079 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ High Frequency Reciprocating Rig (HFRR) ประกอบกับชิ้นงานทดสอบ 2 ชิ้น ที่มีลักษณะเป็นลูกบอลและแผ่นดิสก์ แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีดังตารางที่ 4.4 โดยในขณะที่ทำการทดสอบลูกบอลจะเคลื่อนที่แบบกลับไปมาบนแผ่นดิสก์ที่ถูกยึดไว้ในภาชนะที่มีตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงที่ทำการวิเคราะห์ และเงื่อนไขการทดสอบคุณสมบัติการหล่อลื่นแสดงดังตารางที่ 4.5 ก่อนการทดสอบลูกบอลและแผ่นดิสก์จะถูกทำความสะอาดโดยใช้เครื่องล้างอัลตราโซนิกด้วยอะซิโตนเป็นเวลา 5 นาที และปล่อยให้แห้งอุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งเทคนิคดังกล่าวใช้สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติการหล่อลื่นโดยพิจารณาจากขนาดการสึกหรอบนลูกบอล รวมถึงการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานและฟิล์มการหล่อลื่นที่ได้จากการทดสอบ (Sukjit, E. et al., 2017; Uchôa, I., et al., 2017)

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของลูกบอลและแผ่นดิสก์

พารามิเตอร์	ลูกบอล	แผ่นดิสก์				
ขนาด	Ø = 6 mm	Ø = 10 mm				
วัสดุ	AISI E-52100	AISI E-52100				
ความแข็ง	Rockwell C 58-66 (570-750)	Vickers HV30 (190-210)				
ความยาวผิว	R <sub>a</sub> ต่ำกว่า 0.05 µm	R <sub>a</sub> ต่ำกว่า 0.02 µm				
<b>ธาตุประกอบ AISI E-52100 (wt%)</b>						
C	Cr	Mn	P	Si	S	Fe
0.95-1.10	1.30-1.60	0.25-0.45	≤0.025	0.15-0.30	≤0.025	Balance

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขการทดสอบคุณสมบัติการหล่อลื่น

พารามิเตอร์	ค่ากำหนด
ปริมาตรตัวอย่าง (Fluid volume)	$2 \pm 0.20$ มิลลิลิตร
ระยะชัก (Stroke length)	$1 \pm 0.02$ มิลลิเมตร
ความถี่ (Frequency)	$50 \pm 1$ เฮิรตซ์
สภาพแวดล้อมห้องทดสอบ (Temperature & Humidity)	ดังรูปที่ 4.12
อุณหภูมิตัวอย่าง (Fluid temperature)	$60 \pm 2$ องศาเซลเซียส
มวลทดสอบ (Load)	$200 \pm 1$ กรัม
ระยะเวลาการทดสอบ (Test duration)	$75 \pm 0.1$ นาที
พื้นที่ผิวอ่าง (Bath surface area)	$600 \pm 100$ ตารางมิลลิเมตร

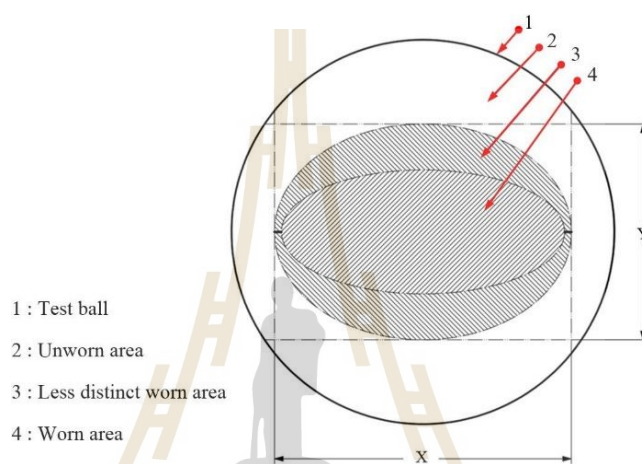


รูปที่ 4.12 เงื่อนไขสภาพแวดล้อมห้องวิเคราะห์คุณสมบัติการหล่อลื่นด้วยเครื่อง HFRR



รูปที่ 4.13 การวิเคราะห์คุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยเครื่อง HFRR

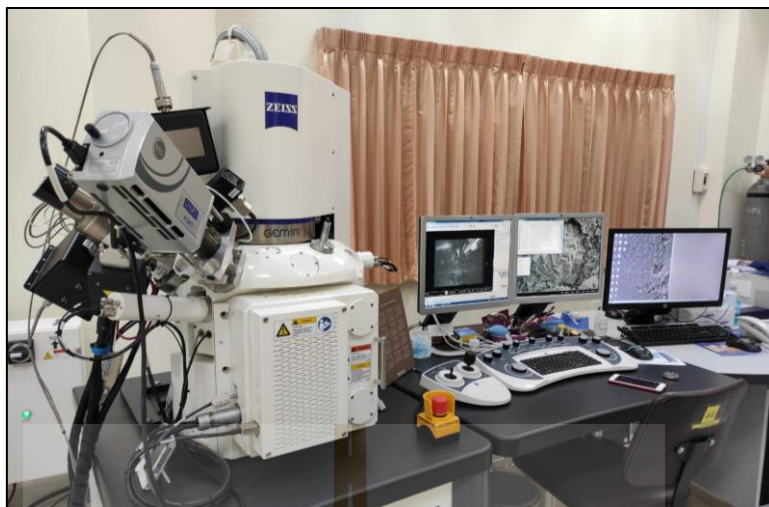
ภายหลังการทดสอบรอยสึกหรอบนลูกบอลจะถูกนำวัดขนาดของความยาวในแนวการเคลื่อนที่ของลูกบอล (แนวแกน X) และแนวที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลูกบอล (แนวแกน Y) ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า (MEIJI TECHNO, Japan) ดังรูปที่ 4.13 (ฉ) และรายงานผลการวัดเป็นค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอ (Wear Scar Diameter, WSD) โดยแสดงลักษณะการวัดระยะได้ดังรูปที่ 4.14 นอกจากนี้ รอยการสึกหรอบนแผ่นดิสก์ก็จะถูกนำไปวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบดังจะกล่าวถึงในลำดับถัดไป (Lapuerta, M., et al, 2016; Sukjit, E., & Dearn, K. D., 2011)



รูปที่ 4.14 ตัวอย่างการวัดขนาดรอยการสึกหรอบนลูกบอล

#### 4.3.5.2 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบ

การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS) ที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) โดยหลักการทำงานของ EDS เมื่อตัวอย่างทดสอบถูกชนด้วยลำอิเล็กตรอนทำให้สามารถเกิดการแตกตัวเป็นไอออนด้วยการผลักให้อิเล็กตรอนของตัวอย่างทดสอบให้หลุดออกจากอะตอม ดังนั้นอิเล็กตรอนที่อยู่วงโคจรชั้นถัดไปจะลงเข้ามาแทนที่ เพื่อเป็นการรักษาเสถียรภาพและปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ โดยพลังงานของรังสีเอกซ์ชนิดนี้มีค่าเฉพาะตามชนิดของธาตุจากนั้นเมื่อรังสีเอกซ์เข้าสู่ตัววัดและสร้างสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ตกกระทบ และนำสัญญาณที่ได้มาวิเคราะห์สัญญาณส่งไปยังระบบคอมพิวเตอร์เพื่อรายงานผลเป็นค่าสเปกตรัมรังสีเอกซ์ (Joseph I. Goldstein., 1992) โดยค่าสเปกตรัมที่ได้นั้นจะแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสัญญาณของรังสีเอกซ์ที่ตรวจวัดได้ในแนวแกน Y และพลังงานของรังสีเอกซ์ในหน่วยของ keV ในแนวแกน X ซึ่งพีคที่เกิดขึ้นสามารถบ่งบอกได้ถึงธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่างทดสอบ รวมถึงสามารถวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณที่แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4.15 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบ (SEM-EDS)

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบบนแผ่นดิสก์ที่ได้จากการวิเคราะห์ HFRR ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM-EDS) โดยเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ของน้ำมันดีเซล ณ ห้องปฏิบัติการกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงดังรูปที่ 4.15

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผลสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติก

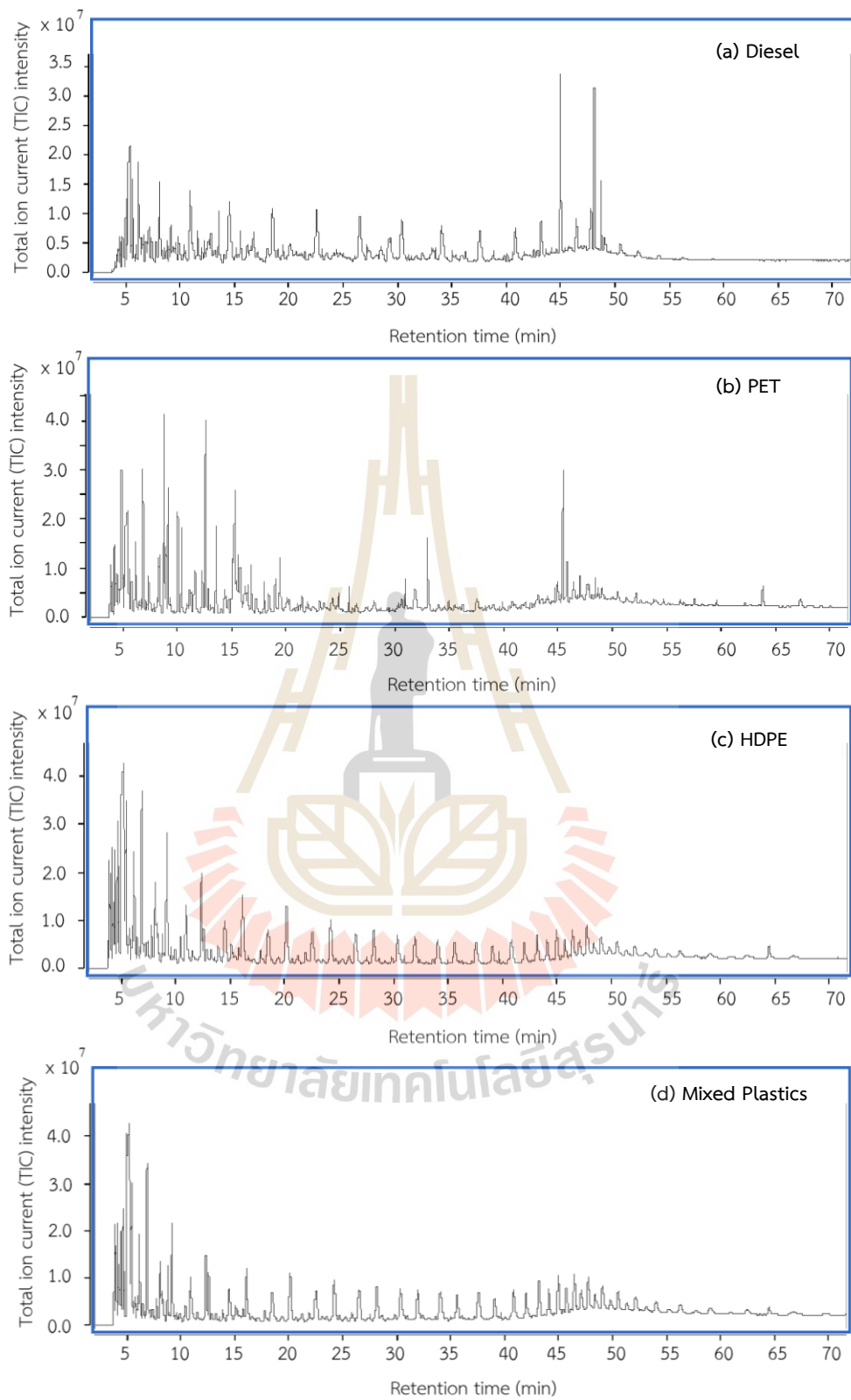
##### 4.4.1 ผลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันขยะพลาสติกด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS)

การวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีของน้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ประกอบไปด้วย PET, HDPE และ Mixed Plastics โดยใช้เครื่อง GC-MS ซึ่งผลการวิเคราะห์สารประกอบของตัวอย่างน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ในเชิงคุณภาพถูกบันทึกออกมาในรูปแบบของโครมาแกรมที่แสดงเวลาและขนาดของสัญญาณของสารประกอบแต่ละชนิด โดยเรียกขนาดสัญญาณที่พบ ณ เวลาหนึ่ง ๆ ว่า “พีค (Peak)” และวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณเป็นขนาดของสัญญาณ (พื้นที่ใต้พีคหรือความสูงของพีคของสารมาตรฐานที่ความเข้มข้นมาสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้น เพื่อหาความเข้มข้นของสารประกอบในตัวอย่าง) โดยช่วงเวลาที่ใช้ในการแยกสารประกอบอยู่ในช่วง 0–70 นาที ดังรูปที่ 4.16 และสารประกอบทางเคมีที่ตรวจพบแสดงดังตารางที่ 4.6–4.9 จากผลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีสามารถอภิปรายได้ดังนี้

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีของน้ำมันดีเซลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า น้ำมันดีเซลมีองค์ประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนส่วนใหญ่เป็นประเภทพาราฟิน (69.43%) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักที่พบในน้ำมันปิโตรเลียมและแก๊สธรรมชาติ รองลงมาเป็นสารประกอบเมทิลเอสเทอร์ (20.15%) โอลิฟิน (2.39%) และอะโรเมติกส์ (4.88%)

ตามลำดับ ทั้งนี้ การตรวจพบสารประกอบเมทิลเอสเทอร์ในน้ำมันดีเซล เนื่องจากน้ำมันดีเซลที่นำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์นั้นเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ที่มีสัดส่วนการผสมไบโอดีเซล 7 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยสารประกอบเมทิลเอสเทอร์เป็นสารประกอบที่มีองค์ประกอบของออกซิเจน ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดกระบวนการเผาไหม้สมบูรณ์ในเครื่องยนต์และลดมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ (Hazar, H, 2010) นอกจากนี้ น้ำมันดีเซลมีค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ที่ 299.99 กรัมต่อโมล โดยทั่วไปแล้วน้ำหนักโมเลกุลจะอยู่ในช่วง 150–250 กรัมต่อโมล สำหรับน้ำมันดีเซล และช่วง 60–150 กรัมต่อโมล สำหรับน้ำมันแก๊สโซลีน

จากผลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่างในเชิงคุณภาพพบว่า โครมาแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ PET, HDPE และ Mixed Plastics มีพีคที่เกิดขึ้นมากกว่า 100 พีค ดังรูปที่ 4.15 (b) – (d) โดยที่ PET มีองค์ประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนส่วนใหญ่เป็นประเภทอะโรมาติกส์ (48.72%) รองลงมาเป็นพาราฟิน (26.34%), โอลิฟิน (10.46%) และอื่น ๆ (14.48%) ตามลำดับ ในขณะที่ HDPE มีสารไฮโดรคาร์บอนส่วนใหญ่เป็นประเภทประเภทพาราฟิน (49.91%) รองลงมาเป็นโอลิฟิน (46.96%) และอื่น ๆ (3.13%) ตามลำดับ และ Mixed Plastics มีสารไฮโดรคาร์บอนส่วนใหญ่เป็นประเภทประเภทพาราฟิน (53.61%) รองลงมาเป็นโอลิฟิน (43.92%) และอื่น ๆ (2.47%) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของ PET, HDPE และ Mixed Plastics อยู่ที่ 167.50 กรัมต่อโมล, 251.34 กรัมต่อโมล และ 251.34 กรัมต่อโมล ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 โครมาแกรมของน้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกโดยใช้เครื่อง GC-MS

ตารางที่ 4.6 ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันดีเซล (Diesel)

เวลา (นาที)	ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (g/mol)	พื้นที่ (%)
4.35	Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.1409	0.78
4.49	Cyclohexane, 1, 4-dimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	112.1252	0.82
5.05	Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	128.1565	1.67
5.58	Nonane, 4-methyl-	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142.1722	1.61
6.16	Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142.1722	3.62
8.10	Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	156.1878	4.18
9.13	p-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.0783	0.94
9.88	trans-2-Dodecen-1-ol	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O	184.1827	1.09
10.93	Dodecane	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	170.2035	5.99
11.62	Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.0939	0.92
13.55	Benzene, 1,2,3-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.0939	1.62
14.50	Tridecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	184.2191	6.39
15.56	Benzene, 1,2,4-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.0939	1.40
18.49	Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	198.2348	6.52
20.11	1-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>	196.2191	1.57
22.55	Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	212.2504	5.66
26.53	Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	226.2661	5.95
30.37	Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	240.2817	5.69
34.05	Octadecane	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	254.2974	4.30
37.55	Nonadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	268.3130	4.01
40.80	Eicosane	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	282.3287	3.90
43.18	Heneicosane	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	296.3443	3.19
44.96	Hexadecanoic acid, methyl ester	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	270.2559	10.11
46.43	Tricosane	C <sub>23</sub> H <sub>48</sub>	324.3756	2.36
47.79	Methyl stearate	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	298.2872	2.06
48.07	11-Octadecenoic acid, methyl ester	C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	296.2715	7.59
48.68	Linoleic acid, methyl ester	C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	294.2559	2.45
49.03	Pentacosane	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub>	352.4069	1.19
50.44	Hexacosane	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>	366.4226	1.13
52.10	Heptacosane	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub>	380.4382	0.62
53.97	Octacosane	C <sub>28</sub> H <sub>58</sub>	394.4539	0.34
56.22	Nonacosane	C <sub>29</sub> H <sub>60</sub>	408.4695	0.33



ตารางที่ 4.7 ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันขยะพลาสติก (PET)

เวลา (นาที)	ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (g/mol)	พื้นที่ (%)
3.91	Cyclohexane	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.09	1.51
4.00	Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.12	1.68
4.21	Heptane, 4-methyl-	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.14	2.05
4.39	Heptane, 2,4-dimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	128.15	1.89
4.86	2,3-Dimethyl-3-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	126.14	2.09
5.59	Nonane, 4-methyl-	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142.17	1.40
5.70	6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>	124.12	3.80
5.79	Cyclohexene, 3,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>	124.12	3.07
6.16	Octane, 3,5-dimethyl-	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142.17	4.97
6.84	Toluene	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92.06	3.04
7.38	Acetic acid, butyl ester	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	116.08	0.56
8.11	Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	156.18	5.05
8.35	1-Decene, 2,4-dimethyl-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>	168.18	3.43
8.80	Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.07	4.51
8.97	o-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.07	0.82
9.14	p-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.07	3.45
10.04	Benzene, (1-methylethyl)-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.09	3.86
10.36	m-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.07	3.11
11.11	Benzene, propyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.09	4.30
11.25	1-Methoxy-2-propyl acetate	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub>	132.07	3.09
11.63	Benzene, 1-ethyl-4-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.09	3.60
12.28	Benzene, 1,2,4-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.09	2.92
12.61	Styrene	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	104.06	2.46
12.84	Benzene, 1-ethyl-2-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.09	2.39
13.56	Benzene, 1,2,3-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.09	2.16
14.36	Benzene, 1-methyl-3-propyl-	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	134.10	2.38
15.27	α-Methylstyrene	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub>	118.07	1.48
15.57	Benzene, 1,2,4-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.09	2.14
16.19	Benzene, 2-ethyl-1,4-dimethyl-	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	134.10	1.26
16.46	Benzene, 1-ethyl-3,5-dimethyl-	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	134.10	1.71
16.77	Benzene, 1-ethyl-2,4-dimethyl-	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	134.10	1.07
17.97	Ethanol, 2-butoxy-	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	118.09	2.03
18.40	Benzene, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	134.10	1.32
18.98	Benzene, 1,2,4,5-tetramethyl-	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	134.10	1.84

ตารางที่ 4.7 ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันขยะพลาสติก (PET) (ต่อ)

เวลา (นาที)	ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (g/mol)	พื้นที่ (%)
19.41	Benzene, 1,2,3,4-tetramethyl-	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	134.10	1.08
20.27	Benzene, (3-methyl-3-butenyl)-	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub>	146.10	1.61
20.99	Benzene, 4-ethenyl-1,2-dimethyl-	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub>	132.09	0.90
21.47	Benzene, 1,2,3,5-tetramethyl-	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	134.10	1.82
24.83	Benzene, heptyl-	C <sub>13</sub> H <sub>20</sub>	176.15	0.47
25.78	Benzonitrile	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N	103.04	1.10
30.96	Naphthalene	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	128.06	0.50
31.83	1-Decanol, 2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O	242.26	1.04
33.02	Ethanol, 1-(2-butoxyethoxy)-	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O <sub>3</sub>	162.12	0.39
34.85	Ethanol, 2-(2-butoxyethoxy)-, acetate	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>4</sub>	204.13	0.85
34.99	Naphthalene, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>10</sub>	142.07	0.33
37.50	Nonadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	268.31	0.77
44.68	Phenol, 2-(1-methylethyl)-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O	136.08	0.67
44.92	Docosane	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>	310.36	0.48
45.31	1,3-Diphenylbutane	C <sub>16</sub> H <sub>18</sub>	210.14	0.48
45.43	1,3-Diphenylpropane	C <sub>15</sub> H <sub>16</sub>	196.12	0.76
45.81	N-Methylphthalimide	C <sub>9</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	161.04	0.30
46.38	Tricosane	C <sub>23</sub> H <sub>48</sub>	324.37	1.08
47.01	1,4-Diphenylbutane	C <sub>16</sub> H <sub>18</sub>	210.14	1.61
47.69	Tetracosane	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>	338.39	0.90
47.84	18-Norabieta-8,11,13-triene	C <sub>19</sub> H <sub>28</sub>	256.21	1.82
48.38	$\alpha$ -N-Normethadol	C <sub>20</sub> H <sub>27</sub> NO	297.20	0.47
49.04	Pentacosane	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub>	352.40	1.10
50.45	Hexacosane	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>	366.42	0.50
52.18	Naphthalene, 1-phenyl-	C <sub>16</sub> H <sub>12</sub>	204.09	1.04
56.22	Anthracene, 2-methyl-	C <sub>15</sub> H <sub>12</sub>	192.09	0.39
57.51	Naphthalene, 2-phenyl-	C <sub>16</sub> H <sub>12</sub>	204.09	0.85
59.56	Phenanthrene, 3,6-dimethyl-	C <sub>16</sub> H <sub>14</sub>	206.10	0.33
62.20	9-Phenyl-5H-benzocycloheptene	C <sub>17</sub> H <sub>14</sub>	218.10	0.77
63.80	Retene	C <sub>18</sub> H <sub>18</sub>	234.14	0.67
67.26	Strychane, 1-acetyl-20 $\alpha$ -hydroxy-16-methylene-	C <sub>21</sub> H <sub>26</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	338.19	0.48

ตารางที่ 4.8 ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันขยะพลาสติก (HDPE)

เวลา (นาที)	ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (g/mol)	พื้นที่ (%)
3.92	Cyclohexane	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.0939	1.51
4.02	Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.1252	1.68
4.14	1-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	98.1096	2.05
4.38	Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.1409	1.89
4.62	1-Octene	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	112.1252	2.09
4.76	2,3-Dimethyl-3-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	126.1409	1.40
5.42	Cyclopropane, 1-methyl-2-pentyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	126.1409	3.80
6.16	Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142.1722	3.07
6.88	1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>	140.1565	4.97
8.10	Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	156.1878	3.04
8.75	Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.0783	0.56
9.19	1-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>	154.1722	5.05
10.94	Dodecane	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	170.2035	3.43
12.34	1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>	168.1878	4.51
12.57	Styrene	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	104.0626	0.82
14.49	Tridecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	184.2191	3.45
16.11	1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>	182.2035	3.86
18.48	Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	198.2348	3.11
20.16	1-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>	196.2191	4.30
22.52	Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	212.2504	3.09
24.21	1-Pentadecene	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>	210.2348	3.60
26.51	Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	226.2661	2.92
28.14	1-Hexadecene	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>	224.2504	2.46
30.33	Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	240.2817	2.39
31.94	1-Heptadecene	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub>	238.2661	2.16
34.02	Octadecane	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	254.2974	2.38
35.57	1-Octadecene	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub>	252.2817	1.48
37.52	Nonadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	268.3130	2.14
39.06	1-Nonadecene	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>	266.2974	1.26
40.79	Eicosane	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	282.3287	1.71
41.96	1-Eicosene	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub>	280.3130	1.07
43.15	Heneicosane	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	296.3443	2.03
44.04	1-Heneicosanol	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub> O	312.3392	1.32
44.94	Docosane	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>	310.3600	1.84

ตารางที่ 4.8 ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันขยะพลาสติก (HDPE) (ต่อ)

เวลา (นาที)	ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (g/mol)	พื้นที่ (%)
45.68	1-Docosene	C <sub>22</sub> H <sub>44</sub>	308.3443	1.08
46.40	Tricosane	C <sub>23</sub> H <sub>48</sub>	324.3756	1.61
47.03	1-Tricosene	C <sub>23</sub> H <sub>46</sub>	322.3600	0.90
47.69	Tetracosane	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>	338.3913	1.82
48.35	n-Tetracosanol-1	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub> O	354.3862	0.47
49.05	Pentacosane	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub>	352.4069	1.10
49.74	1-Pentacosanol	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub> O	368.4018	0.50
50.48	Hexacosane	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>	366.4226	1.04
51.33	1-Hexacosene	C <sub>26</sub> H <sub>52</sub>	364.4069	0.39
52.09	Heptacosane	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub>	380.4382	0.85
53.10	1-Heptacosanol	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub> O	396.4331	0.33
53.99	Octacosane	C <sub>28</sub> H <sub>58</sub>	394.4539	0.77
56.27	Nonacosane	C <sub>29</sub> H <sub>60</sub>	408.4695	0.67
59.06	triacontane	C <sub>30</sub> H <sub>62</sub>	422.4852	0.48
62.38	hentriacontane	C <sub>31</sub> H <sub>64</sub>	436.5008	0.48
64.44	Bis(2-ethylhexyl) phthalate	C <sub>24</sub> H <sub>38</sub> O <sub>4</sub>	390.2770	0.76
66.67	dotriacontane	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub>	352.4069	0.30

ตารางที่ 4.9 ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันขยะพลาสติก (Mixed Plastics)

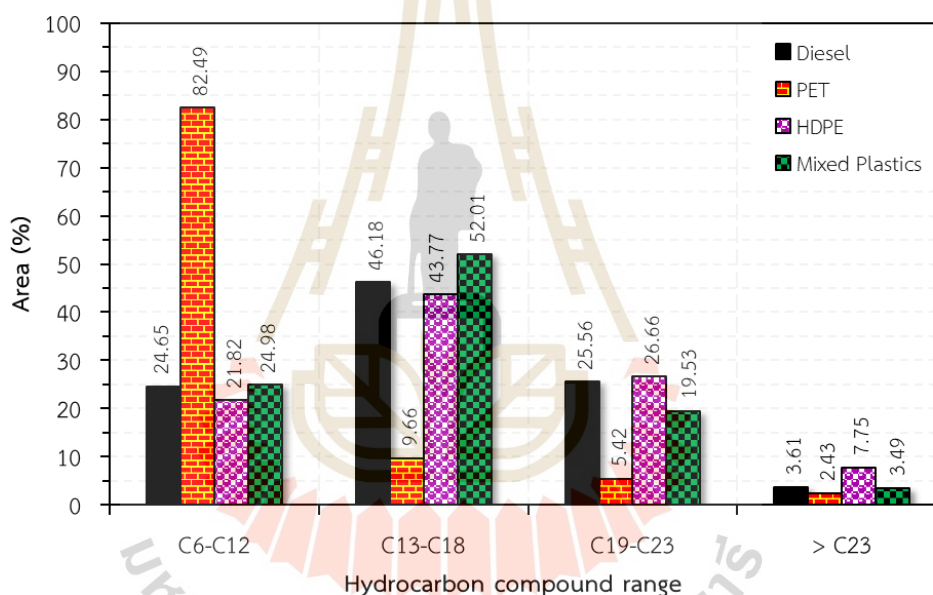
เวลา (นาที)	ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (g/mol)	พื้นที่ (%)
3.92	Cyclohexane	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.0939	1.49
4.03	Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.1252	1.67
4.15	1-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	98.1096	1.74
4.37	Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.1409	1.52
4.61	1-Octene	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	112.1252	1.83
4.92	2,3-Dimethyl-3-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	126.1409	2.00
5.42	Cyclopropane, 1-methyl-2-pentyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	126.1409	3.56
6.15	Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142.1722	2.27
6.87	1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>	140.1565	4.15
8.08	Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	156.1878	2.09

ตารางที่ 4.9 ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันขยะพลาสติก (Mixed Plastics) (ต่อ)

เวลา (นาที)	ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (g/mol)	พื้นที่ (%)
8.75	Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.0783	1.24
9.16	1-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>	154.1722	3.69
10.90	Dodecane	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	170.2035	2.49
12.30	1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>	168.1878	2.84
12.56	Styrene	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	104.0626	1.23
14.47	Tridecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	184.2191	2.88
16.08	1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>	182.2035	2.85
18.45	Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	198.2348	2.75
20.12	1-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>	196.2191	3.59
22.53	Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	212.2504	3.02
24.19	1-Pentadecene	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>	210.2348	3.36
26.51	Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	226.2661	3.31
28.13	1-Hexadecene	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>	224.2504	2.57
30.34	Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	240.2817	3.09
31.96	1-Heptadecene	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub>	238.2661	2.41
34.02	Octadecane	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	254.2974	2.95
35.58	1-Octadecene	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub>	252.2817	1.85
37.57	Nonadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	268.3130	2.70
39.09	1-Nonadecene	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>	266.2974	1.38
40.80	Eicosane	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	282.3287	2.43
41.97	1-Eicosene	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub>	280.3130	1.28
43.16	Heneicosane	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	296.3443	2.80
44.05	1-Heneicosanol	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub> O	312.3392	1.32
44.94	Docosane	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>	310.3600	2.47
45.68	1-Docosene	C <sub>22</sub> H <sub>44</sub>	308.3443	1.38
46.42	Tricosane	C <sub>23</sub> H <sub>48</sub>	324.3756	2.06
47.05	1-Tricosene	C <sub>23</sub> H <sub>46</sub>	322.3600	0.95
47.73	Tetracosane	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>	338.3913	2.08
48.38	n-Tetracosanol-1	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub> O	354.3862	0.64
49.06	Pentacosane	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub>	352.4069	1.70
49.75	1-Pentacosanol	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub> O	368.4018	0.73
50.49	Hexacosane	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>	366.4226	1.32
51.29	1-Hexacosene	C <sub>26</sub> H <sub>52</sub>	364.4069	0.57
52.12	Heptacosane	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub>	380.4382	1.18

ตารางที่ 4.9 ผลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในน้ำมันขยะพลาสติก (Mixed Plastics) (ต่อ)

เวลา (นาที)	ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (g/mol)	พื้นที่ (%)
53.08	1-Heptacosanol	$C_{27}H_{56}O$	396.4331	0.40
54.00	Octacosane	$C_{28}H_{58}$	394.4539	1.00
56.27	Nonacosane	$C_{29}H_{60}$	408.4695	0.94
58.98	Triacontane	$C_{30}H_{62}$	422.4852	0.79
62.38	Hentriacontane	$C_{31}H_{64}$	436.5008	0.60
64.46	Bis(2-ethylhexyl) phthalate	$C_{24}H_{38}O_4$	390.2770	0.43
66.72	Dotriacontane	$C_{25}H_{52}$	352.4069	0.41

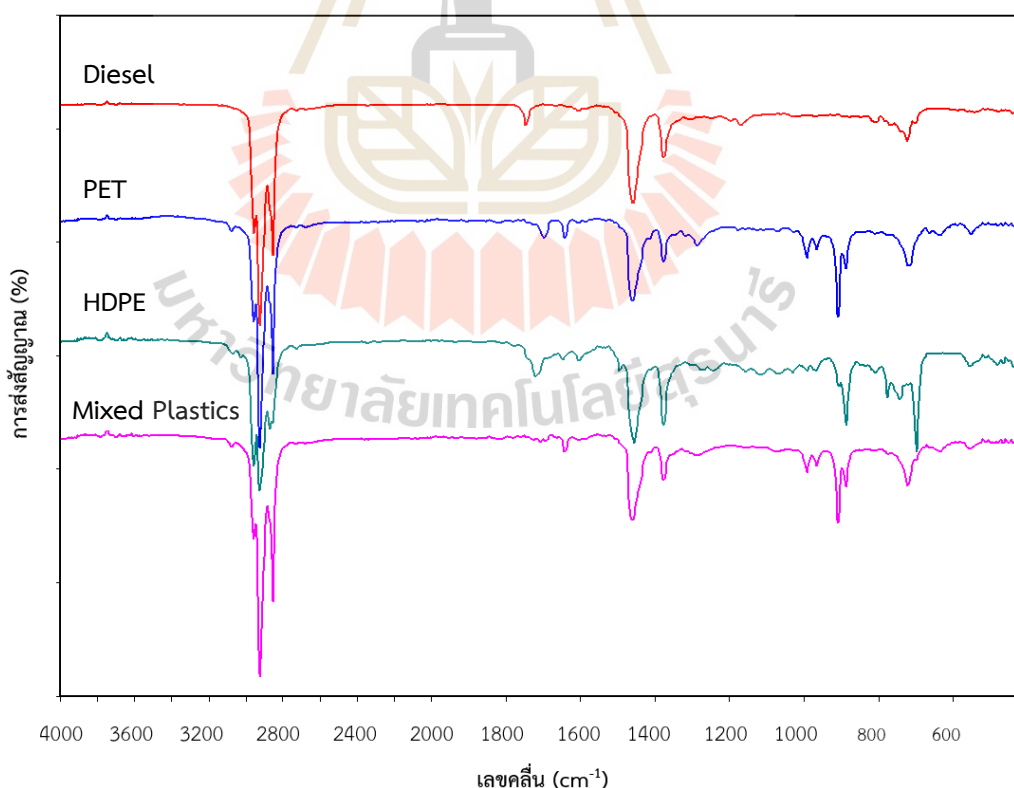


รูปที่ 4.17 จำนวนคาร์บอนของน้ำมันขยะพลาสติก

จากรูปที่ 4.17 แสดงผลการวิเคราะห์จำนวนคาร์บอนและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ด้วย GC-MS พบว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มีช่วงจำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วง  $C_6$  ถึง  $C_{31}$  อย่างไรก็ตาม กลับพบว่า PET สารประกอบโดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วงจำนวนคาร์บอน  $C_6$  ถึง  $C_{12}$  ประมาณ 82.49% ซึ่งจัดว่าอยู่ในกลุ่มน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียมประเภทน้ำมันแก๊สโซลีน ในขณะที่ HDPE และ Mixed Plastics มีสารประกอบโดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วงจำนวนคาร์บอน  $C_{13}$  ถึง  $C_{18}$  ประมาณ 43.77% และ 43.77% ตามลำดับ ซึ่งเป็นช่วงจำนวนคาร์บอนของกลุ่มน้ำมันดีเซลและเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์น้ำมันดีเซลที่มีช่วงจำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วง  $C_{13}$  ถึง  $C_{18}$  ประมาณ 46.18%

#### 4.4.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันขยะพลาสติกด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR)

การวิเคราะห์น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ได้แก่ PET, HDPE และ Mixed Plastics ด้วยเทคนิค FT-IR เป็นเทคนิคที่สำคัญการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของสารประกอบ ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ของน้ำมันดีเซล โดยผลจากการวิเคราะห์ที่แสดงดังรูปที่ 4.18 บ่งชี้ให้เห็นว่า น้ำมันดีเซลปรากฏพีก FT-IR ที่เลขคลื่นต่าง ๆ ประกอบไปด้วย  $2,954\text{ cm}^{-1}$ ,  $2,922\text{ cm}^{-1}$ ,  $2,853\text{ cm}^{-1}$ ,  $1,746\text{ cm}^{-1}$ ,  $1,605\text{ cm}^{-1}$ ,  $1,460\text{ cm}^{-1}$ ,  $1,377\text{ cm}^{-1}$ ,  $1,169\text{ cm}^{-1}$ ,  $806\text{ cm}^{-1}$ ,  $766\text{ cm}^{-1}$ ,  $722\text{ cm}^{-1}$ ,  $539\text{ cm}^{-1}$ ,  $437\text{ cm}^{-1}$  และ  $409\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งของพันธะ C-H stretching, C-H bending, C=C stretching, C-H bending, C=C bending และ C-Br stretching ในขณะที่เลขคลื่น  $1,746\text{ cm}^{-1}$  และ  $1,169\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ (C=O และ C-O) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ GC-MS ดังกล่าวไปก่อนหน้าที่ตรวจพบสารประกอบเมทิลเอสเทอร์ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชันของ PET, HDPE และ Mixed Plastics แสดงให้เห็นพีกของ FT-IR มากกว่า 20 พีก โดยที่หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่ามีพันธะของหมู่ฟังก์ชันที่คล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซล ยกเว้นที่เลขคลื่นในช่วง  $3,100\text{--}3,000\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงหมู่ฟังก์ชัน C-H stretching (alkene) ที่ตรวจพบเฉพาะในน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกด้วยเทคนิค FT-IR

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันขยะพลาสติกด้วยเทคนิค FT-IR

ช่วงเลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )	หมู่ฟังก์ชัน	Diesel	PET	HDPE	Mixed Plastics
3,100–3,000	C–H stretching (alkene)	-	✓	✓	✓
3,000–2,840	C–H stretching (alkane)	✓	✓	✓	✓
2,830–2,695	C–H stretching (aldehyde)	-	✓	-	-
2,000–1,650	C–H bending (aromatic compound)	✓	✓	✓	✓
1,750–1,735	C=O stretching (ester)	✓	-	-	-
1,670–1,600	C=C stretching (alkene)	✓	✓	✓	✓
1,465–1,380	C–H bending (alkane)	✓	✓	✓	✓
1,310–1,250	C–O stretching (aromatic ester)	-	✓	✓	✓
1,210–1,163	C–O stretching (ester)	✓	✓	-	-
1,000–665	C=C bending (alkene)	✓	✓	✓	✓
690-515	C-Br stretching (halo compound)	✓	✓	✓	✓

#### 4.4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในน้ำมันขยะพลาสติก

การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์ปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่ทำปฏิกิริยาแล้วให้พลังงานความร้อน ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน ส่วนออกซิเจนเป็นระหว่าง 100 กับผลรวมของธาตุต่าง ๆ โดยคิดเป็นร้อยละ ซึ่งองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมรรถนะและคุณลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบทางเคมี (Lopes, S., 2013) ซึ่งผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยละเอียดของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง และน้ำมันดีเซลแสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในน้ำมันขยะพลาสติก

น้ำมันเชื้อเพลิง	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, wt%)				H/C
	C	H	N	S	
Diesel	83.230	11.020	0.018	0.000	1.578
PET	80.740	11.912	N.D.	0.769	1.758
HDPE	66.899	11.096	N.D.	0.699	1.976
Mixed Plastics	77.934	10.682	0.336	0.419	1.633

หมายเหตุ N.D. หมายถึง ตรวจสอบไม่พบ (Not detected)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุดังตารางที่ 4.11 บ่งชี้ให้เห็นว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีปริมาณธาตุคาร์บอน (C) และธาตุไฮโดรเจน (H) เป็นธาตุประกอบหลัก



ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่บ่งบอกถึงความเป็นเชื้อเพลิง โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจน อยู่ที่ประมาณ 66.899–80.740 wt% และ 10.682–11.912 wt% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาปริมาณธาตุคาร์บอนโดยเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลพบว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มีปริมาณคาร์บอนที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ 2.99 %, 19.62 % และ 6.36 % ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ปริมาณธาตุไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง กลับพบว่ามีปริมาณที่สูงและมีศักยภาพที่เพียงพอสำหรับการนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง นอกจากนี้ การวิเคราะห์ยังตรวจพบธาตุกำมะถันในน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง อยู่ที่ประมาณ 0.419–0.769 wt% และกรณีธาตุไนโตรเจนตรวจพบเฉพาะใน Mixed Plastics โดยมีปริมาณประมาณ 0.336 wt% ธาตุกำมะถันที่มีอยู่ในน้ำมันเชื้อเพลิงนี้หลังเกิดการเผาไหม้ในเครื่องยนต์จะก่อให้เกิดเป็นซัลเฟตและจับตัวกับมลพิษไอเสียอื่น ๆ ทำให้เกิดเป็นฝุ่นละอองขนาดเล็ก ซึ่งฝุ่นละอองเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามภาระงานของเครื่องยนต์และปริมาณธาตุกำมะถันในน้ำมันเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น (Saiyasitpanich, P. et al, 2005) รวมถึงก่อให้เกิดซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO<sub>x</sub>) เมื่อทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) และรวมตัวกับไอน้ำในบรรยากาศทำให้เกิดฝนกรดที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Uzochukwu, W. et al, 2021) โดยพื้นฐานแล้วการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบหลักเป็นไฮโดรคาร์บอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ โดยปริมาณของพลังงานที่ปล่อยออกมาระหว่างการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับ การออกซิเดชันของคาร์บอนในน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัมพันธ์กับอัตราส่วน H/C โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อน้ำมันเชื้อเพลิงมีอัตราส่วน H/C ที่มาก การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันก็จะยิ่งต่ำลง และพลังงานที่จะถูกปล่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยาออกซิเดชันก็จะยิ่งมากขึ้นด้วย (Mondal, S., 2015)

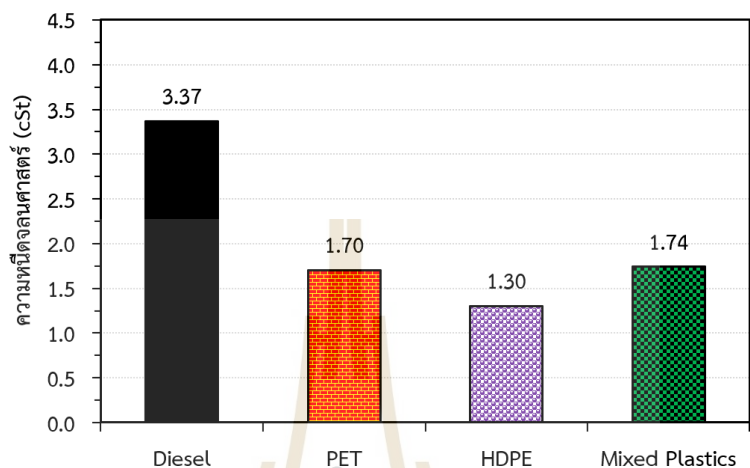
#### 4.4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติก

ผลการดำเนินงานวิจัยในการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง (PET, HDPE และ Mixed Plastics) ซึ่งประกอบไปด้วย ความหนืดจลนศาสตร์, ความหนาแน่น, ความถ่วงจำเพาะและความถ่วงเอพไอ, จุดวาบไฟ, จุดติดไฟ, ดัชนีซีเทน, ค่าความร้อนเชื้อเพลิง, อุณหภูมิการกลั่น และคุณสมบัติการหล่อลื่น โดยทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM และเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่มีสมบัติทางเชื้อเพลิงตามมาตรฐานที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด ซึ่งวิเคราะห์และอภิปรายผลได้ดังนี้

##### 4.4.4.1 ผลการวิเคราะห์ความหนืดจลนศาสตร์

ความหนืด (Viscosity) คือ แรงต้านทานภายในตัวของของไหล เนื่องจากการยึดเกาะกันระหว่างโมเลกุลในของเหลว แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของของไหลนี้ถูกเรียกว่า “แรงหนืด” ซึ่งสังเกตได้จากเมื่อของไหลที่มีความหนืดสูงจะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าของไหลที่มีความหนืดต่ำ โดยความหนืดเป็นสมบัติทางเชื้อเพลิงที่มีความสำคัญต่อการนำน้ำมันขยะพลาสติกไปใช้ในเครื่องยนต์ เนื่องจากมีผลโดยตรงกับระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ โดยเฉพาะผลกระทบที่มีต่อหัวฉีดและปั๊มเชื้อเพลิง เนื่องจากความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวเป็นละอองฝอยและการระเหยกลายเป็นไอในระหว่างการทำงานของเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และเกิดคราบเขม่าภายในห้องเผาไหม้ (บริเวณหัวฉีด วาล์วไอดี วาล์วไอเสีย และลูกสูบ) รวมถึงอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ (Lehto, J. et al., 2014; Musa, U. et al., 2015) ดังนั้น ความหนืดต้องมีความเหมาะสมเพื่อให้ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงสามารถ

ฉีดเชื้อเพลิงได้เป็นละอองฝอยได้ดี ซึ่งข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงานภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D445 ค่าความหนืดจลนศาสตร์ของน้ำมันดีเซลที่ 40 °C มีค่าไม่ต่ำกว่า 1.8 cSt และไม่สูงกว่า 4.1 cSt (กรมธุรกิจพลังงาน, 2562)



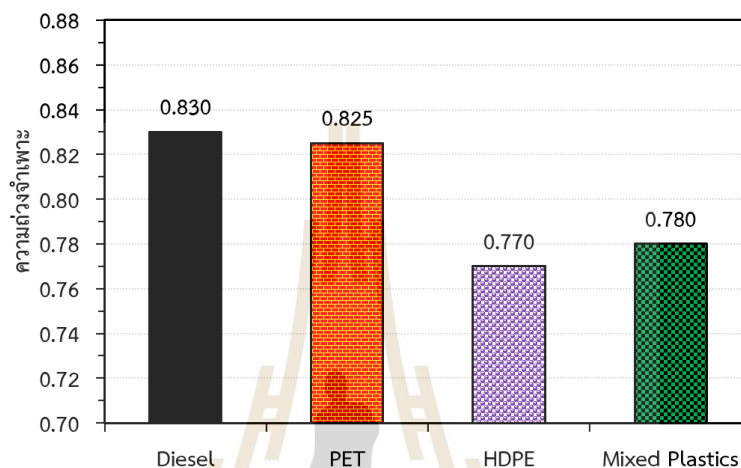
รูปที่ 4.19 ความหนืดจลนศาสตร์ของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

จากผลการวิเคราะห์ความหนืดจลนศาสตร์พบว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีค่าความหนืดจลนศาสตร์อยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ โดย PET, HDPE และ Mixed Plastics มีค่าเท่ากับ 1.70 cSt, 1.30 cSt และ 1.74 cSt ตามลำดับ อีกทั้งยังมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล (4.06 cSt) ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ซึ่งจากค่าความหนืดจลนศาสตร์ที่ต่ำของ PET, HDPE และ Mixed Plastics เป็นสาเหตุหนึ่งซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกหรอของชิ้นส่วนภายในห้องเผาไหม้สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การสึกหรอจากการใช้น้ำมันดีเซล (Kaewbuddee, C. et al., 2020) นอกจากนี้ ยังมีโอกาสที่จะทำให้เกิดการรั่วไหลในระบบการฉีดเชื้อเพลิงและส่งผลกระทบต่อความเสถียรของกระบวนการเผาไหม้ภายในห้องไหม้ เนื่องจากสภาวะการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงที่ไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ (Chandran, M. et al., 2019) อย่างไรก็ตาม ความหนืดจลนศาสตร์ที่ต่ำของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง แสดงถึงความสามารถในการระเหยที่สูงและมีผลช่วยให้ง่ายต่อการฉีดเชื้อเพลิง อีกทั้งน้ำมันเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดมีคุณภาพในการกระจายตัวเป็นละอองฝอยได้ดี (Kuszewski, H., 2018; Keera, S. T. et al., 2018; Srithar, K. et al., 2014)

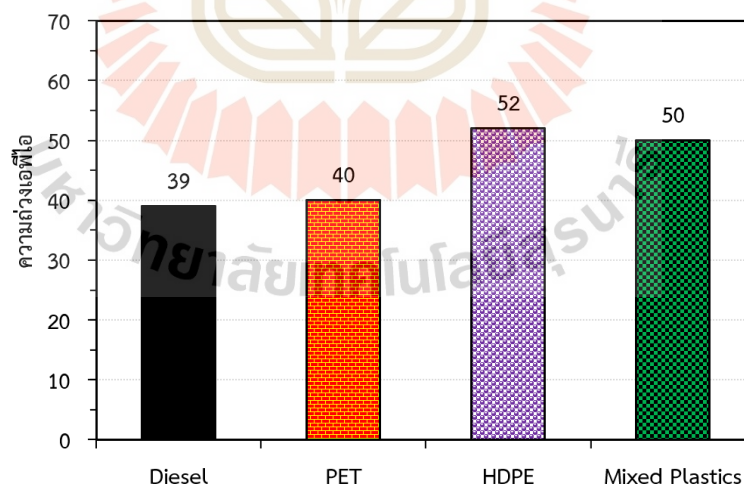
#### 4.4.4.2 ผลการวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะและความถ่วงเอพียอ

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) เป็นสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ช่วยบ่งบอกถึงความหนักเบาของน้ำมันเชื้อเพลิง โดยที่น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความถ่วงจำเพาะที่สูงจะมีผลต่อค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่อหน่วยน้ำหนักลดลง ซึ่งข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงานภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D1298 ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันดีเซลที่ 15 °C ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.810 และไม่สูงกว่า 0.870 ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะมีค่าลดลง (Yuan, W. et al., 2004) ทั้งนี้ จากผลการวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะ

ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า ความถ่วงจำเพาะของ PET, HDPE และ Mixed Plastics มีค่าเท่ากับ 0.825, 0.770 และ 0.780 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันดีเซล (0.830) นอกจากนี้ ยังพบว่า HDPE และ Mixed Plastics มีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ ในขณะที่ PET มีความถ่วงจำเพาะที่สูง เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีโดยส่วนใหญ่ของ PET เป็นแบบอะโรเมติกส์ ซึ่งสารอะโรเมติกส์นี้โดยรวมแล้วจะมีความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 0.800–0.900



รูปที่ 4.20 ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล



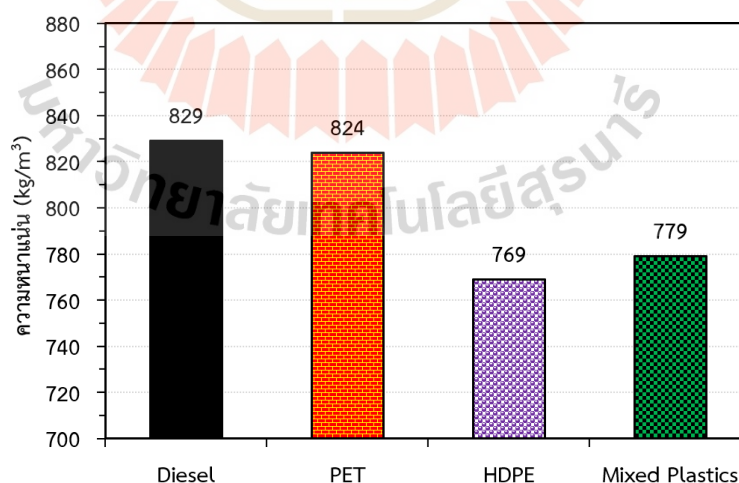
รูปที่ 4.21 ความถ่วงเอพีไอของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

ความถ่วงเอพีไอ (API Gravity) ของน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ช่วยในการช่วยจำแนกประเภทของน้ำมันดิบตามช่วงค่าความถ่วงเอพีไอออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ๆ ได้แก่ น้ำมันหนัก ( $API < 22.3^\circ$ ) น้ำมันขนาดกลาง ( $22.3^\circ < API < 31.1^\circ$ ) และน้ำมันเบา ( $API > 31.1^\circ$ )

ซึ่งโดยปกติน้ำมันดีเซลจะมีค่าความถ่วงเอพียอยู่ในช่วง 25–45° (Sarikos, S., 2020) และความถ่วงเอพียก็ยังช่วยบ่งบอกถึงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง โดยที่น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีค่าความถ่วงเอพียที่สูงจะมีองค์ประกอบของพาราฟิน ในทางตรงกันข้ามน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีค่าความถ่วงเอพียที่ต่ำจะมีองค์ประกอบของแนฟทีน อย่างไรก็ตาม การจำแนกประเภทของน้ำมันดีเซลด้วยความถ่วงเอพียนั้นไม่มีนิยามที่ชัดเจนขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาและประเทศที่กำหนด จากผลการวิเคราะห์ความถ่วงเอพียพบว่า PET, HDPE, Mixed Plastics และน้ำมันดีเซลอยู่ในกลุ่มน้ำมันเบา โดยมีค่าความถ่วงเอพียมากกว่า 31.1° บ่งบอกถึงองค์ประกอบของพาราฟิน ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนแบบสายตรงและแบบกิ่งที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนสูง (Gaurh, P., & Pramanik, H., 2018)

#### 4.4.4.3 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น

ความหนาแน่น (Density) เป็นสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อสมรรถนะและพฤติกรรมการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ โดยทั่วไปแล้วความหนาแน่นของน้ำมันเชื้อเพลิงมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุล ซึ่งความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันเชื้อเพลิง (Bint-E-Naser, S. F., 2016; ตีฉฉฉฉ ฉฉฉฉ, 2560) รวมถึงมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของน้ำมันเชื้อเพลิงจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสถานะที่อุณหภูมิสูงขึ้นโมเลกุลในน้ำมันเชื้อเพลิงจะเกิดการเรียงตัวชิดติดกันเป็นระเบียบส่งผลให้พลังงานจลน์โดยรวมของระบบเพิ่มขึ้น จากผลดังกล่าวทำให้น้ำหนักต่อหนึ่งปริมาตรลดลงจึงทำให้ความหนาแน่นลดลง ปัจจุบันเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ถูกควบคุมเป็นปริมาตรหรือเวลาด้วยหัวฉีดอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้น การลดลงของความหนาแน่นของน้ำมันเชื้อเพลิงจะส่งผลให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง (Kuszewski, H., 2018) โดยความหนาแน่นที่เหมาะสมของน้ำมันดีเซลควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 810 kg/m<sup>3</sup> และไม่สูงเกิน 870 kg/m<sup>3</sup>



รูปที่ 4.22 ความหนาแน่นของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

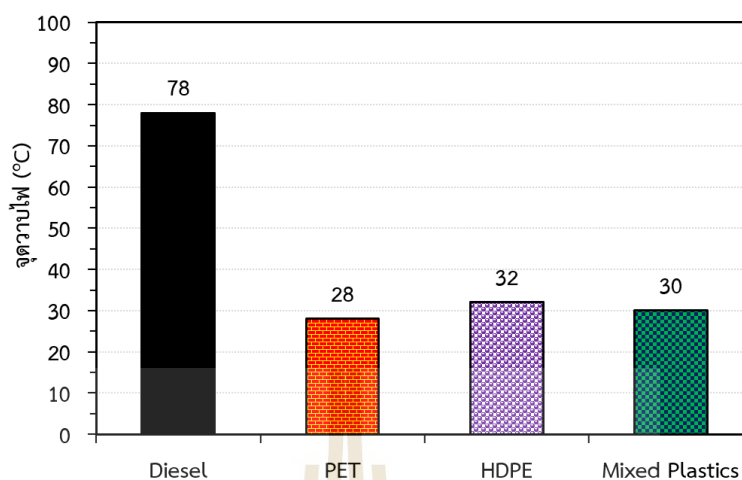
จากผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำมันดีเซล โดยที่ค่าความหนาแน่น PET, HDPE

และ Mixed Plastics มีค่าเท่ากับ  $824 \text{ kg/m}^3$ ,  $769 \text{ kg/m}^3$  และ  $779 \text{ kg/m}^3$  ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวยังพบว่า HDPE และ Mixed Plastics มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าช่วงค่าที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซลตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ สาเหตุหนึ่งน่าจะมาจากองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้นที่นำมาใช้แปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของ PET ที่มีค่าสูงนั้นเป็นผลมาจากสารประกอบโดยส่วนใหญ่เป็นประเภทอะโรมาติกส์ ซึ่งมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วงระหว่าง  $800\text{--}850 \text{ kg/m}^3$  ทั้งนี้ จากผลการวิเคราะห์ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นบ่งชี้ได้ว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มีความหนาแน่นที่อยู่ในกลุ่มเชื้อเพลิงปิโตรเลียม อีกทั้งยังเป็นตัวแปรหนึ่งที่สามารถช่วยประเมินถึงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง โดยที่น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูงจะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่น้อยกว่า น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นต่ำ (Khan, M. Z. H. et al, 2016; Sarikoc, S., 2020)

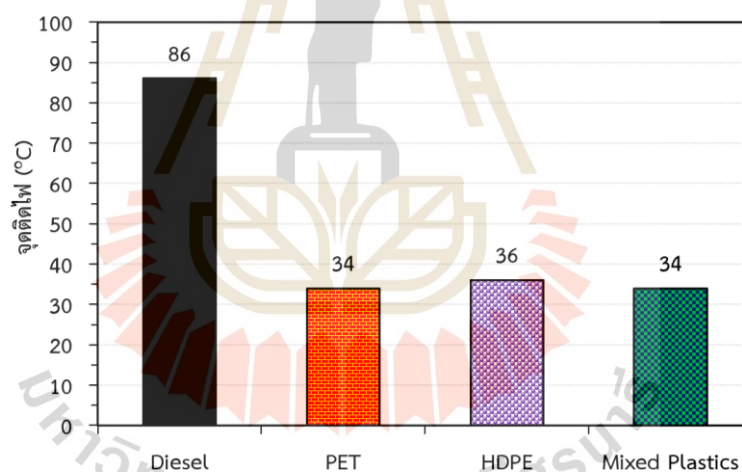
#### 4.4.4.4 ผลการวิเคราะห์จุดวาบไฟและจุดติดไฟ

จุดวาบไฟและจุดติดไฟ (Flash point and Fire point) เป็นอุณหภูมิของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้รับความร้อนจนเกิดการระเหยกลายเป็นไอ เมื่อไอที่ระเหยนี้ถูกเปลวไฟจะลุกวาบขึ้นและทำให้มีเปลวไฟลุกขึ้นอย่างต่อเนื่องอย่างน้อยไม่ต่ำกว่า 5 วินาที โดยทั่วไปจุดติดไฟจะสูงกว่าจุดวาบไฟประมาณ  $5\text{--}35 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (Patel et al., 2015) ซึ่งค่าที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนดไว้ภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D93 ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า  $52 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (กรมธุรกิจพลังงาน, 2562) ในทางปฏิบัติจุดวาบไฟเป็นสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ไม่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ แต่สมบัตินี้มีความสำคัญในด้านการเก็บสำรองและการขนส่งเพื่อป้องกันการอันตรายจากอัคคีภัย

จากผลการวิเคราะห์จุดวาบไฟและจุดติดไฟดังแสดงในรูปที่ 4.23–4.24 พบว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีค่าจุดวาบไฟและจุดติดไฟต่ำกว่าน้ำมันดีเซล และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำมันดีเซลของกรมธุรกิจพลังงานเห็นได้อย่างชัดเจนว่า น้ำมันขยะพลาสติกมีค่าจุดวาบไฟต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด โดยที่ PET, HDPE และ Mixed Plastics มีอุณหภูมิจุดวาบไฟอยู่ที่ช่วง  $28\text{--}30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิบรรยากาศและผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Eze, W.U. et al. (2021) ดังนั้น จำเป็นต้องมีความระมัดระวังในการกักเก็บและขนส่งเพื่อป้องกันการเกิดอัคคีภัย ทั้งนี้ จุดวาบไฟและจุดติดไฟที่ต่ำของน้ำมันขยะพลาสติกนั้นบ่งชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการระเหยกลายเป็นไอของ PET, HDPE และ Mixed Plastics มีการระเหยกลายเป็นไอที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล (Chandran, M. et.al., 2019) และเห็นได้อย่างชัดเจนจากผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการกลั่นช่วงการกลั่นเริ่มต้นของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล (ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.4.4.6) อย่างไรก็ตามจุดวาบไฟและจุดติดไฟที่ต่ำของน้ำมันขยะพลาสติกนี้กลับพบว่ามีผลดีต่อการติดเครื่องยนต์และการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ (Gaurh, P., & Pramanik, H., 2018)



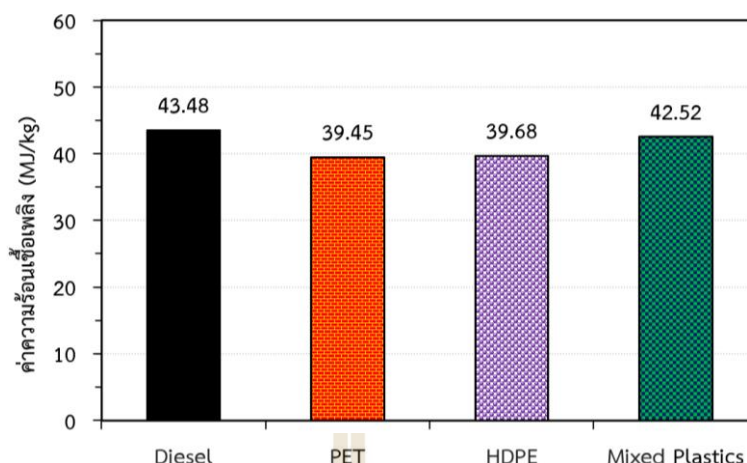
รูปที่ 4.23 จุดวาบไฟของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล



รูปที่ 4.24 จุดติดไฟของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

#### 4.4.4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Calorific value หรือ Heating value) เป็นปริมาณพลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของน้ำมันเชื้อเพลิง และยังเป็นสมบัติหนึ่งที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพในเชิงการค้าและเศรษฐกิจ เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ใช้หาอัตราการใช้เชื้อเพลิง (Khan, M. Z. H. et al., 2016) โดยค่าความร้อนเชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและความหนาแน่นของน้ำมันเชื้อเพลิง กล่าวคือ อัตราส่วนคาร์บอนและไฮโดรเจนที่สูงมีผลให้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่สูงด้วยเช่นกัน เนื่องจากคาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 120 MJ/kg และ 32.7 MJ/kg ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

นอกจากนี้ ค่าความร้อนเชื้อเพลิงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนอะตอมคาร์บอนและความยาวโซ่โมเลกุลที่เพิ่มขึ้น รวมถึงการลดลงของสารประกอบที่ไม่อิ่มตัวในองค์ประกอบเชิงโมเลกุลของน้ำมันเชื้อเพลิง (Fernández-Rodríguez, D., et al., 2021; Keera, S. T. et al., 2018) ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นได้จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค GC-MS นอกจากนี้ น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนมีแนวโน้มที่ส่งผลให้มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ลดลง (W. Gis, et.al., 2011; Hossain, A. et al., 2013)

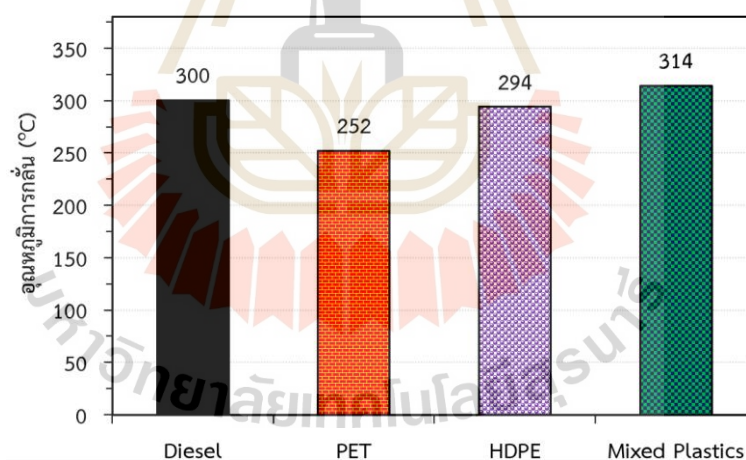
ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง และน้ำมันดีเซลด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ดังรูปที่ 4.25 พบว่า น้ำมันจากขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่สูงเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงทางเลือกในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด โดยที่ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของ PET, HDPE และ Mixed Plastics มีค่าเท่ากับ 39.45 MJ/kg, 39.68 MJ/kg และ 42.52 MJ/kg ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความร้อนเชื้อเพลิงดังกล่าวยังมีค่าที่ต่ำกว่าค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซล (43.48 MJ/kg) ที่ประมาณ 9.26%, 8.74% และ 2.21% ตามลำดับ ซึ่งผลค่าความร้อนเชื้อเพลิงของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงดังที่กล่าวมานี้เป็นผลที่สืบเนื่องมาจากองค์ประกอบในเชิงโมเลกุลของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีช่วงจำนวนอะตอมคาร์บอนที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ดังพิจารณาได้จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง GC-MS ในหัวข้อที่ 4.4.1 และผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถประเมินในเบื้องต้นได้ว่าน้ำมันจากขยะพลาสติกนั้นจะมีอัตราการสิ้นเปลืองที่มากกว่าน้ำมันดีเซลเมื่อถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล

#### 4.4.4.6 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการกลั่น

อุณหภูมิการกลั่น (Distillation temperature) เป็นสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรมการระเหยตัวของน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นอีกหนึ่งในสมบัติทางเชื้อเพลิงที่สำคัญที่ช่วยบ่งชี้ถึงคุณลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์ อุณหภูมิการกลั่นในงานวิจัยนี้วิเคราะห์

โดยใช้วิธีวิเคราะห์การกลั่นเชื้อเพลิงปิโตรเลียมตามมาตรฐาน ASTM D86 เพื่อวัดเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงที่กลั่นได้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่สถานะความดันบรรยากาศ ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์เป็นอุณหภูมิการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ที่ร้อยละ 90 โดยปริมาตร ดังรูปที่ 4.26 รวมถึงแสดงการวิเคราะห์เป็นความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของส่วนที่กลั่นได้และอุณหภูมิ ดังแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 4.27

อุณหภูมิการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ที่ร้อยละ 90 โดยปริมาตร ตามข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงานได้กำหนดไว้สูงสุดที่อุณหภูมิไม่เกิน 357 °C โดยอุณหภูมิ ณ จุดดังกล่าวนี้เป็นจุดเดือดสุดท้ายที่กำหนดไว้ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำมันเชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้เกิดการไหลหรือแทรกซึมลงไปยังส่วนที่เป็นอ่างน้ำมันเครื่อง ซึ่งส่งผลให้คุณภาพของน้ำมันเครื่องเสื่อมลงจากวิเคราะห์อุณหภูมิการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ที่ร้อยละ 90 โดยปริมาตร พบว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีอุณหภูมิการกลั่นอยู่ในช่วงที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ โดยที่ Mixed Plastics มีอุณหภูมิ ณ จุดดังกล่าวสูงสุด (314 °C) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่ได้ทำการวิเคราะห์ ในส่วน HDPE และ PET มีอุณหภูมิ ณ จุดเดียวกันเท่ากับ 294 °C และ 252 °C ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบว่า HDPE และ PET มีค่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล (300 °C) ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ที่ได้นี้เป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยประเมินสมรรถนะของเครื่องยนต์ได้ เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่บ่งบอกถึงการให้พลังงานกับเครื่องยนต์และการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง

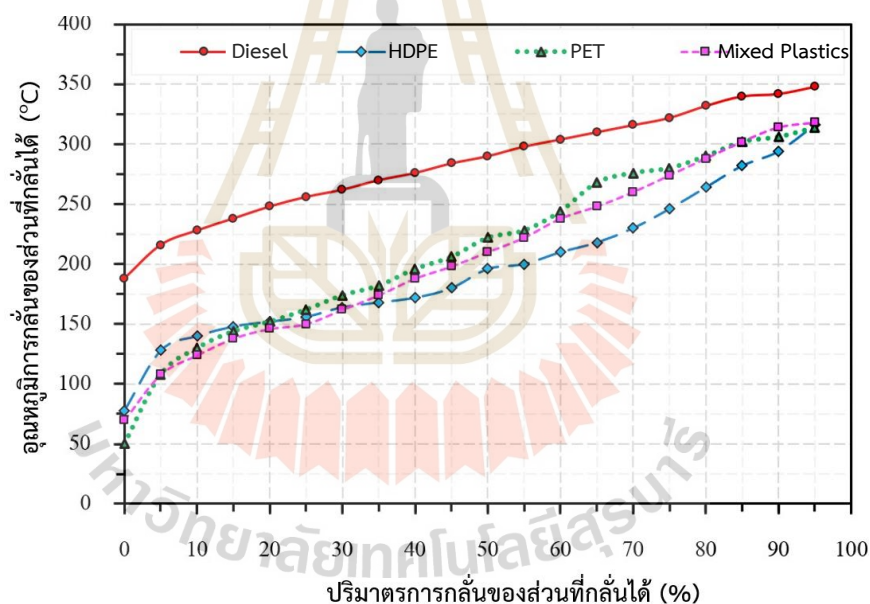


รูปที่ 4.26 อุณหภูมิการกลั่นที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

น้ำมันปิโตรเลียมเป็นสารผสมไฮโดรคาร์บอนหลายชนิดที่มีจุดเดือดแตกต่างกัน เมื่อนำมากลั่นภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D86 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจุดเดือดและเปอร์เซ็นต์ปริมาตรการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ ดังรูปที่ 4.27 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์เส้นอุณหภูมิการกลั่น (Distillation curve) ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลพบว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มีช่วงอุณหภูมิการกลั่นอยู่ที่ 50–314 °C, 78–316 °C และ 70–318 °C ตามลำดับ โดยที่ช่วงอุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง



3 ตัวอย่าง ที่ค่าต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันดีเซล (ช่วงน้ำมันดีเซล 188–248 °C) และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิเริ่มกลั่นตัว (Initial boiling point, IBP) และอุณหภูมิการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตร (10% Recovered) หรือเรียกว่า “Front end” ซึ่งเป็นส่วนเบาที่ระเหยได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำและเป็นอุณหภูมิที่ช่วยประเมนการติดเครื่องยนต์และบ่งบอกถึงพฤติกรรมการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิง โดยน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความสามารถในการระเหยช้าส่งผลให้เครื่องยนต์ติดยากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความสามารถในการระเหยที่เร็ว แต่อย่างไรก็ตาม การระเหยที่เร็วเกินไปจะส่งผลให้ไอของน้ำมันเชื้อเพลิงอัดแน่นอยู่ในห้องเผาไหม้ทำเครื่องยนต์เกิดการน็อคได้จากผลวิเคราะห์ช่วงอุณหภูมิการกลั่นพบว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีช่วงอุณหภูมิ IBP และ 10% Recovered ที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล (ประมาณ 85–140 °C) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง จะเห็นได้ว่า PET มีช่วงอุณหภูมิของ IBP และ 10% Recovered ที่ต่ำกว่า HDPE และ Mixed Plastics ตามลำดับ สาเหตุน่าจะมาจากสัดส่วนของน้ำมันเชื้อเพลิงในกลุ่มน้ำมันแก๊สโซลีนของ PET (ซึ่งเป็นกลุ่มน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีจุดเดือดต่ำ) มีสัดส่วนที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ HDPE และ Mixed Plastics จึงส่งผลให้มีของช่วงอุณหภูมิดังกล่าวที่ต่ำ



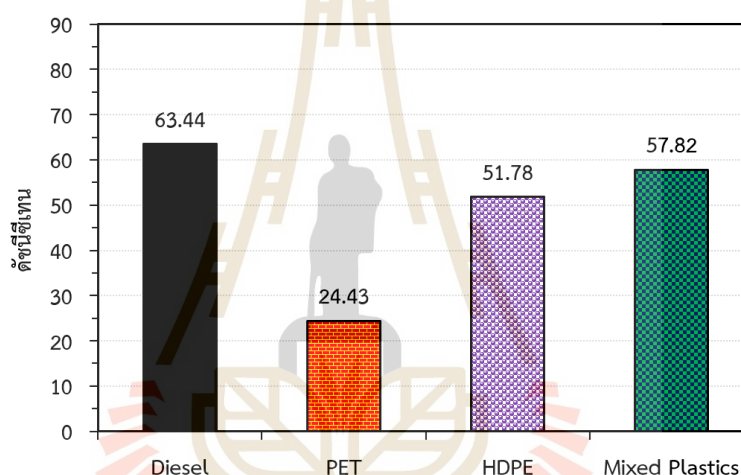
รูปที่ 4.27 เส้นอุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

นอกจากนี้ อุณหภูมิการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร (50% Recovered) หรือเรียกว่า “Mid-range” เป็นอุณหภูมิของส่วนที่ระเหยได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นและเป็นช่วงอุณหภูมิที่ช่วยให้เครื่องยนต์ร้อน (Warm up) ได้เร็ว และอุณหภูมิการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ที่ร้อยละ 90 โดยปริมาตร (90% Recovered) หรือเรียกว่า “Back end” ซึ่งผลจากการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิการกลั่นตลอดทั้ง 2 ช่วง ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีอุณหภูมิการกลั่นที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล และมีช่วงอุณหภูมิการกลั่นอยู่ที่ช่วงประมาณ 50–318 °C

ในขณะที่ของน้ำมันดีเซลจะอยู่ที่ช่วงประมาณ 188–348 °C ทั้งนี้ อุณหภูมิการกลั่นที่ 10%, 50% และ 90% ของส่วนที่กลั่นได้ สามารถนำไปใช้เป็นตัวแปรในการคำนวณค่าดัชนีซีเทน ซึ่งเป็นสมบัติหนึ่งที่บ่งบอกถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์

#### 4.4.4.7 ผลการวิเคราะห์ดัชนีซีเทน

ดัชนีซีเทน (Cetane index) เป็นสมบัติทางเชื้อเพลิงที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน เนื่องจากดัชนีซีเทนเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย รวมถึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการผสมกันระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ โดยที่ค่าดัชนีซีเทนนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.3 โดยใช้ความสัมพันธ์จากผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการกลั่นและความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะ



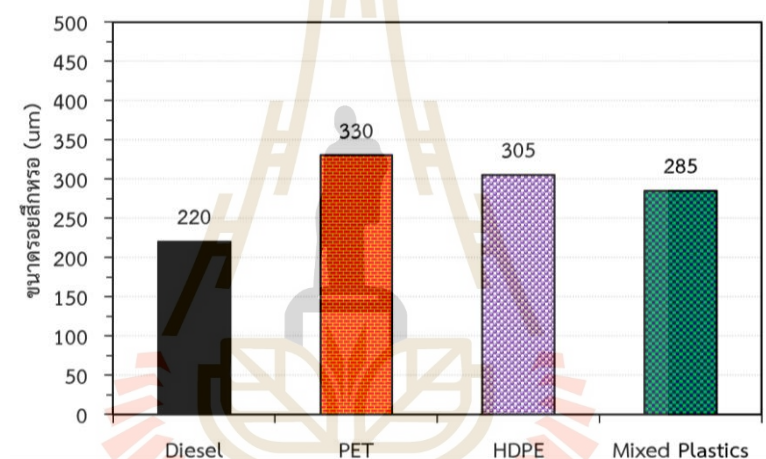
รูปที่ 4.28 ค่าดัชนีซีเทนของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

จากผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล (63.44) โดยที่ PET, HDPE และ Mixed Plastics มีค่าดัชนีซีเทนเท่ากับ 24.43, 51.78 และ 57.82 ตามลำดับ อีกทั้งยังสังเกตเห็นได้ชัดว่า PET มีค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลเกือบ 3 เท่า ซึ่งเป็นผลจากการมีสารอะโรเมทริกส์ในน้ำมันขยะพลาสติกส่งผลให้มีค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำ (Mangesh, V. L. et al, 2020) ด้วยผลจากค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่างนี้ อาจเป็นสาเหตุที่ส่งผลต่อความล่าช้าในการจุดระเบิดในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งเป็นช่วงระหว่างการเริ่มต้นของการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้และการเริ่มต้นการเผาไหม้ เนื่องจากดัชนีซีเทนเป็นสมบัติทางเชื้อเพลิงที่แสดงคุณภาพการจุดติดไฟของน้ำมันเชื้อเพลิง รวมถึงเป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงความสามารถในการผสมระหว่างอากาศและน้ำมันเชื้อเพลิง (Luning Prak, D. et al, 2021; Fidyayuningrum, H., et al, 2020) และผลดังกล่าวนี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการปลดปล่อยมลพิษไอเสีย เสียง และเสถียรภาพในการทำงานของเครื่องยนต์ โดยทั่วไปแล้วเครื่องยนต์ที่มีช่วงความล่าช้า

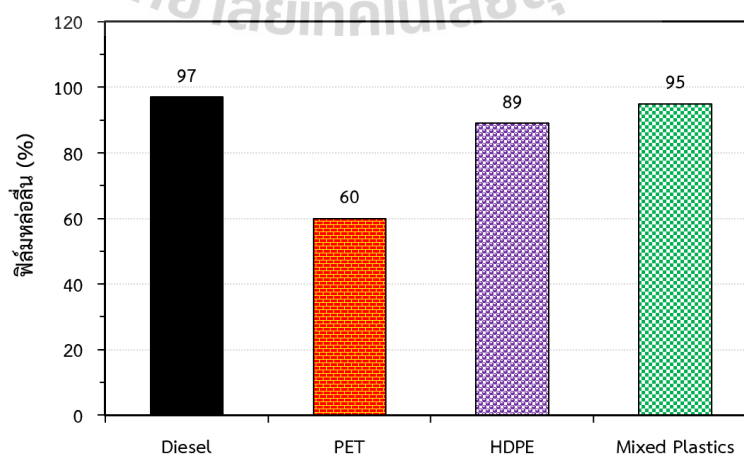
ในการจู่ระเบิดที่ยาวก่อให้เกิดการปลดปล่อยมลพิษไอเสียประเภทไฮโดรคาร์บอนและเขม่าที่สูง (El-Hagar, M., 2020; Srithar, K. et al, 2014)

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านไตรโบโลยีของน้ำมันขยะพลาสติก

จากผลการดำเนินการวิจัยดังหัวข้อที่ 4.3.5 ในการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านไตรโบโลยีของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง (PET, HDPE และ Mixed Plastics) โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ร่วมกับน้ำมันดีเซล ซึ่งการวิเคราะห์ด้านไตรโบโลยีนี้เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการบ่งบอกถึงคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยขนาดรอยสึกหรอ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และฟิล์มการหล่อลื่น โดยสามารถการวิเคราะห์ผลด้านไตรโบโลยีของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่างได้ดังนี้

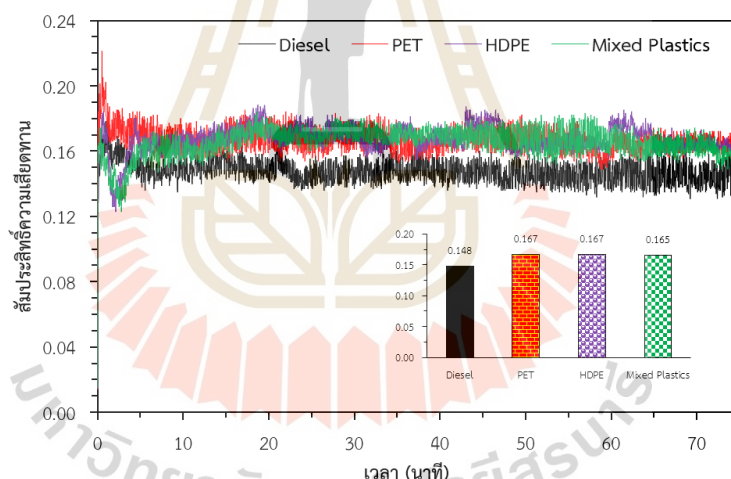


รูปที่ 4.29 ขนาดรอยสึกหรอของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล



รูปที่ 4.30 ฟิล์มหล่อลื่นของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง HFRR ในการวิเคราะห์ภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D6079 และวัดขนาดรอยสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า พบว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มีขนาดรอยสึกหรอเท่ากับ 330  $\mu\text{m}$ , 305  $\mu\text{m}$  และ 285  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ชนิดนั้นมีคุณสมบัติการสึกหรอที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ดังเห็นได้จากขนาดรอยสึกหรอที่มากกว่าน้ำมันดีเซล (220  $\mu\text{m}$ ) เนื่องจากปริมาณธาตุกำมะถันที่มีอยู่ในน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ดังแสดงในผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในหัวข้อที่ 4.4.3 เป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งช่วยทำให้เกิดการกัดกร่อนหรือรอยการสึกหรอ (Awang et al, 2022) ประกอบกับน้ำมันดีเซลที่ใช้สำหรับอ้างอิงในการวิจัยนี้มีสารประกอบเมทิลเอสเทอร์จากส่วนผสมของไบโอดีเซล (ดังผลการวิเคราะห์ GC-MS) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ช่วยให้มีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดี (Farias, A., 2014) โดยผลการวิเคราะห์ช่วยสนับสนุนเหตุผลนี้ดังเห็นได้จากฟิล์มการหล่อลื่นในรูปที่ 4.30 ของน้ำมันดีเซลที่ค่าสูง (97 %) ในขณะที่ฟิล์มการหล่อลื่น PET, HDPE และ Mixed Plastics มีค่าเท่ากับ 60, 89 และ 95 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ขนาดรอยสึกหรอของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่างดังกล่าวนี้ยังมีค่าที่อยู่ภายใต้ค่ามาตรฐานที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนดไว้ (ไม่สูงกว่า 460  $\mu\text{m}$ )



รูปที่ 4.31 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of friction, COF) เป็นตัวเลขไร้มิติที่ใช้บ่งบอกปริมาณแรงเสียดทานระหว่างสองพื้นผิว ซึ่งกำหนดโดยอัตราส่วนระหว่างแรงเสียดทานและแรงกระทำแนวตั้งฉาก และถือว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมด้านไดรฟ์โบลีย์ของน้ำมันเชื้อเพลิง จากผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.31 แสดงผลระหว่าง COF และช่วงระยะเวลาการวิเคราะห์ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ซึ่งผลในช่วงแรกในการวิเคราะห์เป็นช่วงก่อนการวิเคราะห์จริง (Run-in period) ในช่วงเวลานี้ COF นั้นจะไม่เสถียรและมีระดับสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากฟิล์มหล่อลื่นเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวสัมผัสและความขรุขระของพื้นผิวระหว่างพื้นผิวเสียดทานจะราบเรียบขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยขั้นตอนของการวิเคราะห์

ช่วงดังกล่าวเรียกว่า “สภาวะคงตัว (Steady-state condition)” (Awang et al, 2021) ผลจากการวิเคราะห์ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่างพบว่า ช่วงก่อนการวิเคราะห์จริงและในช่วงสภาวะคงตัวของ HDPE มีค่าที่ต่ำที่สุด ประกอบในช่วงสภาวะคงตัวเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของ Mixed Plastics มีลักษณะที่มีความราบเรียบมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ PET และ HDPE ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้บ่งชี้ให้เห็นถึงความมีเสถียรภาพ สาเหตุหนึ่งน่าจะมาจากอิทธิพลของความหนืดและความหนาแน่น (Azad, K. et al, 2019 Yaqoob, H. et al, 2020) นอกจากนี้ น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ยังมีค่า COF ที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ 11.49–12.84% โดยที่ PET, HDPE และ Mixed Plastics มีค่าเท่ากับ 0.167, 0.167 และ 0.165 ตามลำดับ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่สูงนี้บ่งชี้ได้ว่าแรงที่จำเป็นสำหรับการเคลื่อนที่จะต้องมากกว่าแรงที่ต้องการเมื่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ผลดังที่กล่าวนี้มีอิทธิพลต่อการสึกหรอของชิ้นส่วนและอุปกรณ์ภายในเครื่องยนต์เมื่อใช้งานในระยะยาว อีกทั้งยังอาจทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลงเนื่องจากการเสียดทานการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบได้อีกด้วย

#### 4.6 สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี สมบัติพื้นฐานทางเชื้อเพลิง และวิเคราะห์ด้านไทรโบโลยีของน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกต่างชนิดที่ประกอบไปด้วย PET, HDPE และ Mixed Plastics ซึ่งเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยไม่ผ่านขั้นตอนการกลั่นลำดับส่วน ซึ่งในบทนี้ผู้วิจัยได้วิเคราะห์สารประกอบทางเคมี หมู่ฟังก์ชัน และองค์ประกอบธาตุของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงโดยใช้เทคนิค GC-MS, FT-IR และ CHNS Analyzer ตามลำดับ และวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานทางเชื้อเพลิงภายใต้มาตรฐาน ASTM และการวิเคราะห์ด้านไทรโบโลยี ผลจากการดำเนินการวิจัยพบว่า การวิเคราะห์สารประกอบเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีสารประกอบทางเคมีโดยส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่มน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียม โดยที่สารประกอบทางเคมีของ PET อยู่ในกลุ่มน้ำมันแก๊สโซลีน ในขณะที่ HDPE และ Mixed Plastics นั้นมีสัดส่วนของสารประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับกลุ่มของน้ำมันดีเซล นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและองค์ประกอบธาตุยังพบว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มีผลที่ได้จากการวิเคราะห์คล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซล

นอกจากนี้ การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการนำเชื้อเพลิงทางเลือกมาใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ซึ่งผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ASTM ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลบ่งชี้ให้เห็นว่า ความหนืดจลนศาสตร์ของ PET, HDPE และ Mixed Plastics นั้นมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ประกอบกับมีค่าที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานกำหนดไว้ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า HDPE มีความหนืดจลนศาสตร์ต่ำสุดที่ 1.30 cSt ในส่วนความหนืดจลนศาสตร์ของ PET และ Mixed Plastics มีค่าเท่ากับ 1.70 cSt และ 1.74 cSt ตามลำดับ ขณะที่ความถ่วงจำเพาะของ PET, HDPE และ Mixed Plastics มีค่าเท่ากับ 0.825, 0.770 และ 0.780 ตามลำดับ รวมถึงความหนาแน่นมีค่าอยู่ในช่วง 769–824 kg/m<sup>3</sup> และเป็นค่าที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งจากสมบัติทางเชื้อเพลิงเหล่านี้มีความสำคัญต่อระบบเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์สันดาปภายในและเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ โดยหลักทฤษฎี

แล้วความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ต่ำจะช่วยให้เกิดการกระจายตัวเป็นละอองฝอยและการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงได้ดี และเมื่อก้าวถึงผลการวิเคราะห์จุดวาบไฟและจุดติดไฟของ PET, HDPE และ Mixed Plastics พบว่า มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซลโดยจุดวาบไฟและจุดติดไฟมีค่าอยู่ระหว่าง 28–32 °C และ 34–36 °C ตามลำดับ ผลดังกล่าวนี้บ่งบอกถึงความสำคัญในการเก็บสำรองหรือการขนส่งน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่จำเป็นต้องมีความระมัดระวัง เพื่อป้องกันการเกิดอัคคีภัย แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของ PET, HDPE และ Mixed Plastics ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งช่วยบ่งชี้ให้เห็นถึงศักยภาพความเป็นเชื้อเพลิงแสดงให้เห็นว่ามีค่าพลังงานที่สูงใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

เมื่อวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติด้านไดรโบลอยีของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่ามีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดีกว่าน้ำมันดีเซล โดยพิจารณาเบื้องต้นจากขนาดรอยสึกหรอและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่มากกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง เมื่อพิจารณาถึงภาพรวมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง สามารถกล่าวสรุปโดยสังเขปได้ว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีคุณลักษณะและมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ และเพื่อศึกษาผลกระทบในด้านต่าง ๆ ที่มีต่อเครื่องยนต์

#### 4.7 รายการอ้างอิง

- กุลยา กนกจรรูจิตร. (2558). *พื้นฐานการสันดาป (Fundamentals of Combustion)*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยพิมพ์ ครั้งที่ 1.
- ติณณภพ จุ่มอิน, พิศิษฐ์ แซ่ตัน, สุพรรณา พราวแดง และสุริยา พันธุ์โกศล. (2560). การพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและน้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์. *วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม 2560)*. 64-77.
- 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*, 2<sup>nd</sup> ed. New York: Plenum Press.
- Kaewbuddee, C., Sukjit, E., Srisertpol, J., Maithomklang, S., Wathakit, K., Klinkaew, N., . . . Arjham, 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.
- Saiyasitpanich, 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.

## บทที่ 5

### ผลกระทบจากการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกต่างชนิดต่อประสิทธิภาพ และพฤติกรรมการทำงานของเครื่องยนต์

#### 5.1 บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ในบทนี้มีจุดประสงค์เพื่อประเมินและวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล รวมถึงพฤติกรรมการสันดาปของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกต่างชนิด ซึ่งประกอบไปด้วย PET, HDPE และ Mixed Plastics ดำเนินการทดสอบโดยใช้เครื่องยนต์ดีเซลขนาด 1 สูบ 4 จังหวะ ปริมาตรกระบอกสูบ 661 ซีซี ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ และระบบฉีดเชื้อเพลิงตรงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 1,500 รอบต่อนาที และเปลี่ยนแปลงภาระงานที่ 25%, 50%, 75% และ 100% ของแรงบิดสูงสุดตามลำดับ ผลจากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์โดยใช้ PET, HDPE และ Mixed Plastics เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งพิจารณาจากความสัมพันธ์ของเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) ระหว่างน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ผลการวิจัยบ่งชี้ให้เห็นว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีค่า BSFC ที่มากกว่าน้ำมันดีเซลทุก ๆ ภาระการทำงานของเครื่องยนต์ โดยที่ PET มีค่า BSFC ที่มากกว่า HDPE และ Mixed Plastics ตามลำดับ นอกจากนี้ ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สำหรับ PET, HDPE และ Mixed Plastics เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลพบว่า HDPE และ Mixed Plastics มี BTE ที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล โดยที่ HDPE นั้นเป็นน้ำมันขยะพลาสติกที่มี BTE สูงสุด ในขณะที่ PET มีค่า BTE ที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล และในส่วนการวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ด้วยตัวแปรความดันในกระบอกสูบ (ICP) อัตราการปลดปล่อยความร้อน (RoHR) และสัมประสิทธิ์ความแปรผันของความดันสูงสุด ( $COV_{P_{max}}$ ) แสดงให้เห็นว่า การใช้น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง นั้นมีผลต่อ ICP และ RoHR ที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตาม PET กลับพบว่ามี RoHR ที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล ประกอบกับมีความล่าช้าในการจุดระเบิดที่มากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่ทดสอบ ในขณะที่ HDPE และ Mixed Plastics มีคุณลักษณะที่เกิดการจุดระเบิดล่วงหน้า นอกจากนี้ การวิเคราะห์เสถียรภาพในการเผาไหม้ในแต่ละวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ด้วยตัวแปร  $COV_{P_{max}}$  พบว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ส่งผลเสียต่อเสถียรภาพในการเผาไหม้ และเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีของ PET ที่มีค่า  $COV_{P_{max}}$  สูงถึง 9.05% ที่ภาระงานต่ำสุด ทั้งนี้ การใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกนั้นส่งผลให้แนวโน้มการปล่อยมลพิษไอเสีย ( $NO_x$ , CO, HC และเขม่า) ที่เพิ่มขึ้น โดยที่การเผาไหม้ของเครื่องยนต์จากการใช้ PET เป็นเชื้อเพลิงนั้นก่อให้เกิดการปล่อยมลพิษไอเสียสูงกว่า HDPE และ Mixed Plastics ยกเว้นในกรณีของ  $NO_x$  ที่พบว่า มีปริมาณการปล่อยมลพิษไอเสียที่ต่ำกว่า HDPE, Mixed Plastics และน้ำมันดีเซล

จากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ โดยการใช้แผ่นกรองละเอียดในการเก็บตัวอย่างด้วยไ้เจ็อนไซท์ที่กำหนด และนำตัวอย่างฝุ่นละอองไปวิเคราะห์พฤติกรรมของการสลายตัวขององค์ประกอบในฝุ่นละอองด้วยเครื่อง TGA ภายใต้สภาวะควบคุมพบว่า ผลการวิเคราะห์ผลต่างน้ำหนักของฝุ่นละอองบนแผ่นกรองสำหรับ PET, HDPE และ Mixed Plastics ค่ามากกว่าน้ำมันดีเซล ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า PET มีผลต่างน้ำหนักของฝุ่นละอองที่มากกว่า HDPE และ Mixed Plastics ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจวัดเขม่าของเครื่องยนต์ที่ภาระงานต่าง ๆ โดยผลดังกล่าวนี้เป็นผลที่สืบเนื่องมาจากสมบัติทางเชื้อเพลิงและคุณลักษณะการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจากการใช้ PET เป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของการสลายตัวขององค์ประกอบในฝุ่นละอองพบว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง นั้นมีอุณหภูมิการสลายตัวของฝุ่นละอองที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล โดยที่ Mixed Plastics, PET และ HDPE ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 448 °C, 460 °C และ 509 °C ตามลำดับ ในขณะที่น้ำมันดีเซลมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 519 °C ผลดังกล่าวนี้บ่งบอกถึงการใช้พลังงานในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ต่ำและง่ายสำหรับการสลายฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งผลของอุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งช่วยในการออกแบบอุปกรณ์ดักจับฝุ่นหรือเขม่าขนาดเล็ก (Diesel particulate filter, DPF) เพื่อกำจัดฝุ่นละอองในไอเสียของเครื่องยนต์ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการสันดาปของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง บ่งชี้ให้เห็นว่า การใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงนั้นส่งผลให้เครื่องยนต์มีขนาดการสันดาปมีสูงกว่าน้ำมันดีเซล โดยที่ขนาดการสันดาปมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามภาระงานของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า PET มีขนาดการสันดาปในแต่ละภาระงานที่มากกว่า HDPE และ Mixed Plastics

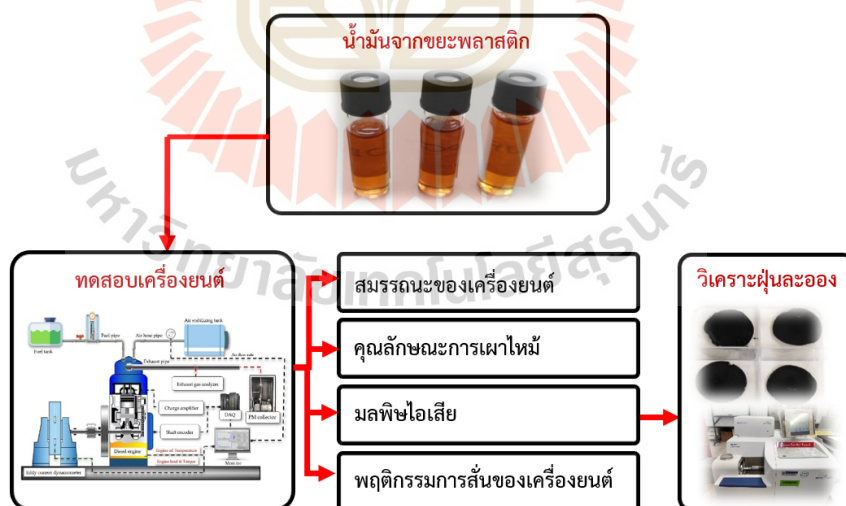
## 5.2 บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าการวิจัยเพื่อหาแหล่งพลังงานทางเลือกหรือแหล่งพลังงานทดแทนนั้น นอกจากการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงแล้ว การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์และการปล่อยมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์ก็เป็นสิ่งจำเป็นที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ เพื่อศึกษาผลกระทบที่จะเกิดขึ้นเมื่อนำมาใช้ งาน ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการศึกษาการใช้ น้ำมันจากขยะพลาสติกต่างชนิด ซึ่งประกอบด้วย PET, HDPE และ Mixed Plastics เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก 1 สูบ 4 จังหวะ ที่ได้รับความนิยมนำมาใช้งานในภาคการเกษตร โดยผู้วิจัยมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล รวมถึงพฤติกรรมการสันดาปของเครื่องยนต์ เพื่อใช้ประเมินความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องยนต์เมื่อใช้งานในระยะยาว โดยทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงภาระการทำงานของเครื่องยนต์ และทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ซึ่งตัวแปรด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์และคุณลักษณะการเผาไหม้สำหรับการวิเคราะห์นั้นในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย ความสิ้นเปลือง

เชื้อเพลิงจำเพาะเบรก ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก ความดันในกระบอกสูบ อัตราการปลดปล่อยความร้อน และสัมประสิทธิ์ความแปรผันของความดันในกระบอกสูบ รวมถึงตรวจวัดการปล่อยมลพิษไอเสียจากเครื่องยนต์ ได้แก่ ไนโตรเจนออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์ และเขม่า ซึ่งมลพิษไอเสียเหล่านี้ถือว่าเป็นมลพิษไอเสียที่ถูกควบคุมสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด โดยเนื้อหาที่จะกล่าวถึงในบทนี้คือ วิธีดำเนินการวิจัย ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ ผลการวิเคราะห์ฝุ่นละออง ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การสันเสีของเครื่องยนต์ และสรุปผลการวิจัย ตามลำดับ

### 5.3 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยในบทนี้เป็นการศึกษาทดสอบเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง เพื่อประเมินและวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ มลพิษไอเสีย และพฤติกรรมการณ์การสันของเครื่องยนต์ รวมถึงการวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การสลายตัวขององค์ประกอบในฝุ่นละอองจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยอาศัยคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อนโดยการเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ซึ่งแบ่งการดำเนินการวิเคราะห์ผลออกเป็น 5 ส่วนหลัก ๆ คือ (1) การวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์ (2) คุณลักษณะการเผาไหม้ (3) มลพิษไอเสีย (4) พฤติกรรมการณ์การสันเสีของเครื่องยนต์ และ (5) การวิเคราะห์ฝุ่นละออง ดังแสดงในรูปที่ 5.1

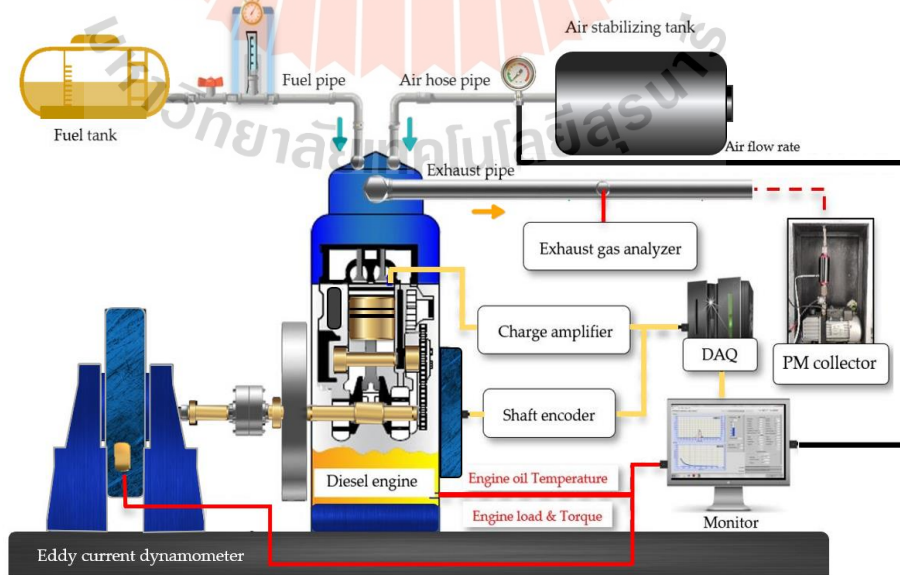


รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิเคราะห์ผลการทดสอบเครื่องยนต์

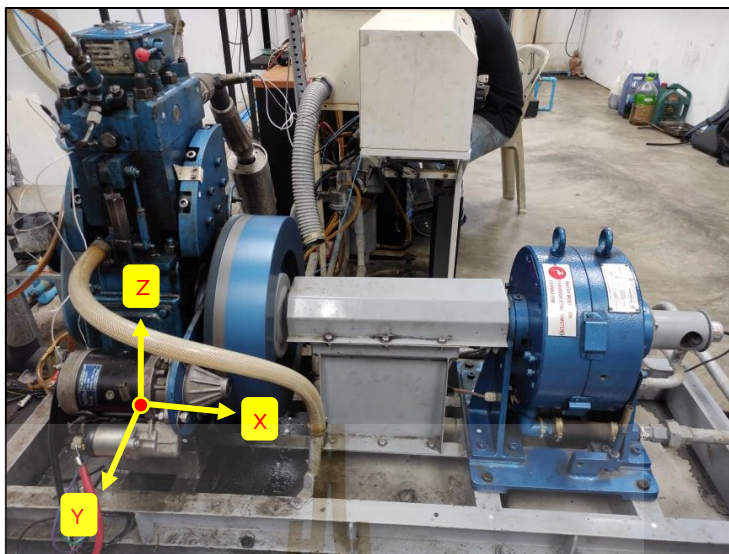
#### 5.3.1 การดำเนินการทดสอบเครื่องยนต์

การทดสอบเครื่องยนต์เพื่อประเมินและวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย รวมถึงพฤติกรรมการณ์การสันเสีของเครื่องยนต์ โดยทดสอบ

ด้วยเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 1 สูบ 4 จังหวะ ปริมาตรกระบอกสูบ 661 ซีซี ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ระบบฉีดเชื้อเพลิงตรงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ติดตั้งเข้ากับไดนาโมมิเตอร์ชนิดกระแสเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับสร้างภาระงานให้กับเครื่องยนต์ ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์และไดนาโมมิเตอร์แสดงดังตารางที่ 5.1 และต่อเข้ากับวงจรควบคุมที่ใช้การควบคุมความเร็วรอบและภาระงานของเครื่องยนต์ รวมทั้งการวัดอัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงวัดด้วยชุดตรวจวัดเทียบกับเวลา เครื่องมือที่ใช้วัดความดันในกระบอกสูบประกอบด้วย เซนเซอร์วัดความดันต่อเข้ากับตัวขยายสัญญาณ และวัดองศาเพลลาข้อเหวี่ยงด้วยชุดวัดองศาเพลลาข้อเหวี่ยงที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์คงที่ 1,500 รอบต่อนาที ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงภาระงานที่ 25%, 50%, 75% และ 100% ของแรงบิดสูงสุดตามลำดับ โดยใช้น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วย PET, HDPE, Mixed Plastics และน้ำมันดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับการเปรียบเทียบผลการทดสอบ รวมถึงเก็บข้อมูลและบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ระหว่างการทดสอบ ได้แก่ อัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง ความดันในกระบอกสูบ องศาเพลลาข้อเหวี่ยง อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ และตรวจวัดการปล่อยมลพิษไอเสีย โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสียยี่ห้อ Testo รุ่น Testo 350 สำหรับวิเคราะห์มลพิษไนโตรเจนออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอน ซึ่งวัดมลพิษไนโตรเจนออกไซด์ด้วยหลักการ Chemiluminescence (CLD), มลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยหลักการ Nondispersive infrared (NDIR) รวมถึงมลพิษไฮโดรคาร์บอนด้วยหลักการ Flame ionization detector (FID) และเครื่องมือวัดเขม่ายี่ห้อ Testo รุ่น Testo 308 ซึ่งใช้หลักการวัดแบบ Photodiode (Filter paper) ดังรูปที่ 5.5 และแสดงข้อมูลดังตารางที่ 5.2 รวมถึงวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์แสดงดังรูปที่ 5.4 โดยการติดตั้งตัววัดสัญญาณการสั่นสะเทือนชนิด 3 แกน บริเวณด้านบนฝาสูบของเครื่องยนต์และต่อเข้ากับแปลงสัญญาณและซอฟต์แวร์สำหรับการอ่านค่าและวิเคราะห์ผลด้วยการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นบนโดเมนเวลาและความถี่ (Omar, F. K. et al, 2017)



รูปที่ 5.2 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบเครื่องยนต์



รูปที่ 5.3 ชุดทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลติดตั้งเข้ากับไดนามิเตอร์ชนิดกระแสเหนี่ยวนำ



รูปที่ 5.4 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์

ในการทดสอบเครื่องยนต์นั้นก่อนการทดสอบได้ดำเนินการติดเครื่องยนต์และอุ่นเครื่องยนต์เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่รอบเดินเบา (1,000–1,200 rpm) ไม่มีภาระงานกระทำ เพื่อให้เครื่องยนต์อยู่ในสภาวะพร้อมทำงานและช่วงอุณหภูมิและความชื้นห้องทดสอบอยู่ระหว่าง 28–30 °C และ 50–55 %RH ตามลำดับ นอกจากนี้ ข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบนั้นจะทำการบันทึกจำนวน 3 ครั้ง และแสดงผลการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ย



รูปที่ 5.5 เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสียและเครื่องมือวัดเขม่า

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์และไดนาโมมิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

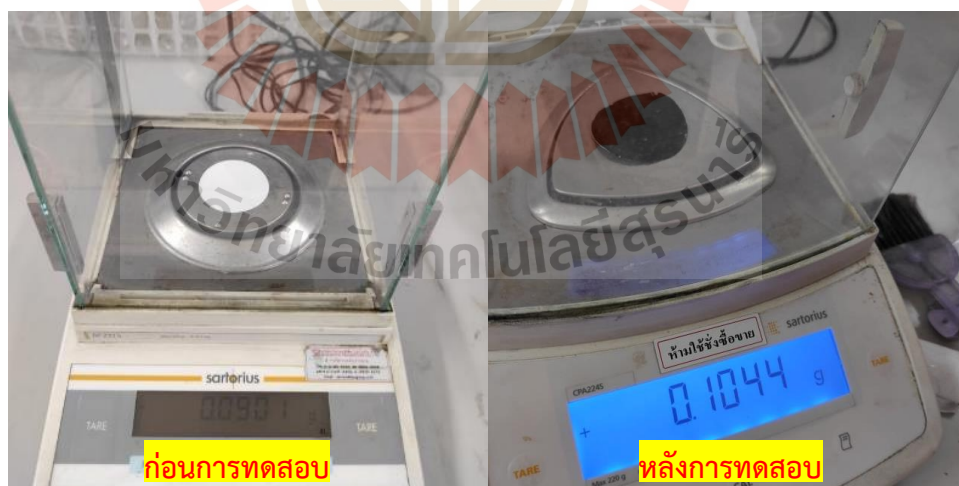
พารามิเตอร์	รายละเอียด
<b>เครื่องยนต์ดีเซล</b>	
ยี่ห้อ/รุ่น	Kirloskar/TV1
ขนาดลูกสูบ × ช่วงชัก	87.5 มิลลิเมตร × 110 มิลลิเมตร
ปริมาตรกระบอกสูบ	661 ซีซี
กำลังสูงสุด	5.2 กิโลวัตต์ (7 แรงม้า) ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที
อัตราส่วนการอัด	12-18 : 1
ชนิดน้ำมันหล่อลื่น	SAE 10W30
<b>ไดนาโมมิเตอร์</b>	
ยี่ห้อ/รุ่น	Technomech/TMEC10
ประเภทไดนาโมมิเตอร์	ไดนาโมมิเตอร์ชนิดกระแสเหนี่ยวนำ
โหลดเซลล์	สเตรนเกจ, ชนิด S Beam, ช่วงการวัด 0-50 กิโลกรัม
ช่วงการวัดโหลด	0-50 กิโลกรัม

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย

พารามิเตอร์	ช่วงการวัด	ความละเอียด	ความแม่นยำ
<b>TESTO 350</b>			
NO	0-4000 ppm	1 ppm	± 5 < 100 ppm
NO <sub>2</sub>	0-500 ppm	0.1 ppm	± 5 < 100 ppm
CO	0-10,000 ppm	1 ppm	± 10 < 200 ppm
HC	0-40,000 ppm	10 ppm	± 400 ppm
<b>TESTO 308</b>			
Smoke index	0-6	0.1	± 0.2

### 5.3.2 การดำเนินการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ฝุ่นละออง

การวิเคราะห์คุณลักษณะของฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์ของน้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ซึ่งประกอบไปด้วย การวิเคราะห์ผลต่างน้ำหนักของฝุ่นละอองและพฤติกรรมสลายตัวขององค์ประกอบในฝุ่นละออง ซึ่งดำเนินการโดยการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองที่ปลายท่อไอเสียของเครื่องยนต์ด้วยชุดเก็บฝุ่นละอองที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการสร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.3 โดยเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองด้วยแผ่นกรองไมโครไฟเบอร์ยี่ห้อ Whatman GF/C ขนาด 47 มิลลิเมตร (1.6 ไมครอน) ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบ/นาที ที่ภาระงาน 50% ของแรงบิดสูงสุดเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยควบคุมอัตราการไหลของไอเสียอยู่ที่ประมาณ 15 ลิตร/นาที และอุณหภูมิทดสอบที่ช่วง 25–30 °C ทั้งนี้ สำหรับการวิเคราะห์ผลต่างน้ำหนักของฝุ่นละอองบนแผ่นกรองที่เกิดขึ้นทั้งก่อนและหลังการทดสอบ ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องชั่งดิจิทัล (ความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ดังแสดงในรูปที่ 5.6 และนำแผ่นกรองดังกล่าวไปวิเคราะห์พฤติกรรมสลายตัวขององค์ประกอบในฝุ่นละอองด้วยเครื่อง TGA โดยการตัดตัวอย่างแผ่นกรองที่มีฝุ่นละอองติดอยู่เป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดพื้นที่ประมาณ 5 ตารางมิลลิเมตร (บริเวณกรอบสี่เหลี่ยมที่แสดงในรูปที่ 5.15) และน้ำหนักตัวอย่างของฝุ่นละอองที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ประมาณ 5 มิลลิกรัม ซึ่งเงื่อนไขที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ฝุ่นละอองแสดงได้ดังตารางที่ 5.3 ทั้งนี้ จากเงื่อนไขการวิเคราะห์ฝุ่นละอองด้วยเครื่อง TGA นั้น อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ปริมาณ และสภาพของตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการวิเคราะห์ กล่าวคือ การเพิ่มอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะเป็นลดความละเอียดของผลการวิเคราะห์และพื้นที่ของพีคจะกว้างขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอยู่ที่ 5 °C/min



รูปที่ 5.6 การชั่งน้ำหนักแผ่นกรองก่อน-หลังการเก็บตัวอย่างเขม่า





รูปที่ 5.7 การชั่งน้ำหนักแผ่นกรองก่อน-หลังการเก็บตัวอย่างเขม่า

ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขการวิเคราะห์ฝุ่นละอองด้วยเครื่อง TGA

ขั้นตอนที่	เงื่อนไขการวิเคราะห์
1	Initial atmosphere of oxygen 60.0 mL/min
2	Ramp 35 °C – 110 °C : 5.00 °C/min
3	Isothermal for 5.00 min at 110 °C
4	Ramp 110 °C - 700 °C : 5.00 °C/min
5	Isothermal for 5.00 min at 700 °C

#### 5.4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดสอบเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกต่างชนิด

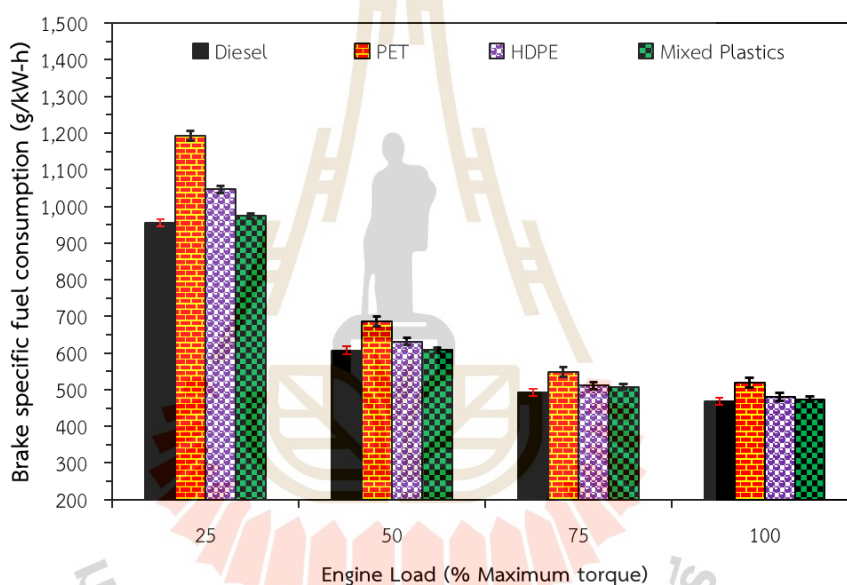
การทดสอบเครื่องยนต์โดยใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกต่างชนิด เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย รวมถึงพฤติกรรมการสั่นของเครื่องยนต์ ภายใต้สภาวะเงื่อนไขการทดสอบเดียวกัน สามารถวิเคราะห์และอภิปรายผลการดำเนินการวิจัยได้ดังนี้

##### 5.4.1 สมรรถนะของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกต่างชนิด

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกต่างชนิด เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลโดยการเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์ประกอบไปด้วย ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก ซึ่งตัวแปรดังกล่าวนี้สามารถวัดและคำนวณได้จากการทดสอบเครื่องยนต์โดยตรงจากการดำเนินการวิจัยวิเคราะห์ผลการทดสอบได้ดังนี้

#### 5.4.1.1 ผลการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake specific fuel consumption, BSFC) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญสำหรับใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ประเมินการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ (BSFC ที่ต่ำบ่งบอกถึงความประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง) โดยแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยมวลต่อหนึ่งหน่วยกำลังที่ผลิตได้จากเครื่องยนต์ (Heywood, John B., 1988) หน่วยการวัดของ BSFC นิยมแสดงในหน่วยกรัมต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง (g/kW-h) ซึ่งสมบัติทางเชื้อเพลิง เช่น ค่าความร้อนเชื้อเพลิง, ความหนาแน่น, ความหนืดของเชื้อเพลิง และการออกแบบระบบการฉีดเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อ BSFC ของเครื่องยนต์ (Wu, G. et al, 2020) ซึ่งผลจากการทดสอบ BSFC ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลสามารถอภิปรายผลได้ดังนี้



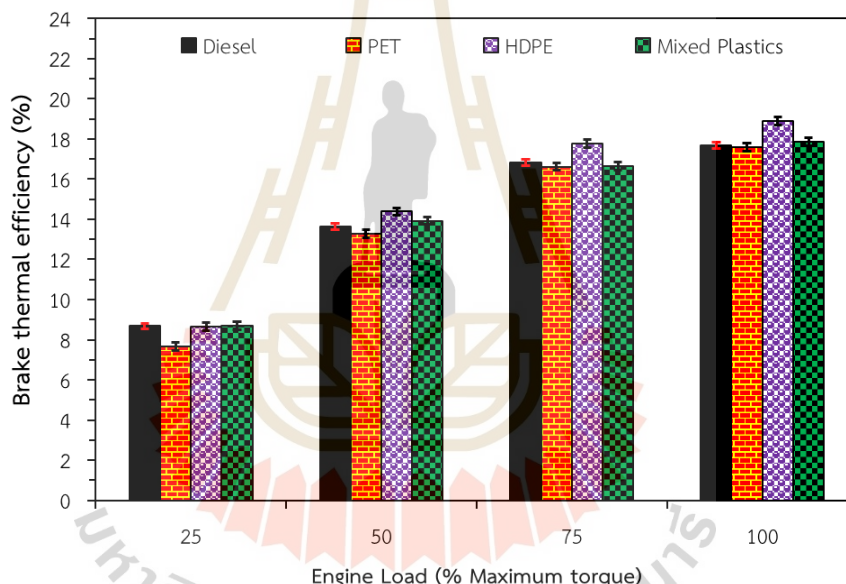
รูปที่ 5.8 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงาน

การเปลี่ยนแปลงความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงาน โดยเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลแสดงดังรูปที่ 5.8 ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่า BSFC ของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบทั้งหมดมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อภาระงานของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น สาเหตุเนื่องจากประสิทธิภาพในการเผาไหม้ที่สูงขึ้นและการสูญเสียความร้อนที่ลดลงของเครื่องยนต์ ประกอบกับอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังเบรกที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการเพิ่มขึ้นของความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยมวล (Charoensaeng, A. et al, 2018; Maawa, W. N. et al, 2015) และหากเปรียบเทียบ BSFC ระหว่างน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง และน้ำมันดีเซลพบว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มี BSFC มากกว่าน้ำมันดีเซลทุก ๆ ภาระงาน โดยค่า BSFC ของ PET, HDPE และ Mixed Plastics อยู่ในช่วง 518–1,192 g/kW-h, 480–1,046 g/kW-h และ 474–973 g/kW-h ตามลำดับ ในขณะที่น้ำมันดีเซลค่า BSFC อยู่ที่ช่วง

468–954 g/kW-h นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ในทุกภาระงาน แสดงให้เห็นว่า PET นั้นมี BSFC ที่มากกว่า HDPE และ Mixed Plastics ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่น้อยกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบอื่น ๆ ที่ทดสอบจึงจำเป็นต้องใช้ปริมาณของน้ำมันเชื้อเพลิงมากขึ้นเพื่อให้ได้ปริมาณงานที่ได้เท่ากัน (Sekar, M. et al., 2021)

#### 5.4.1.2 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (Brake thermal efficiency, BTE) เป็นตัวแปรที่ใช้บ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานกลสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน ซึ่งประสิทธิภาพเชิงความร้อนขึ้นอยู่กับการทำงานของเครื่องยนต์ ชนิดน้ำมันเชื้อเพลิง สมบัติทางเชื้อเพลิง และสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ เป็นต้น ซึ่งผลจากการทดสอบ BTE ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลสามารถอภิปรายผลได้ดังนี้



รูปที่ 5.9 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงาน

การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงาน โดยเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลแสดงได้ดังรูปที่ 5.9 ซึ่งผลจากการวิจัยพบว่า การเพิ่มภาระงานให้กับเครื่องยนต์ส่งผลให้ BTE ของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดลงของการสูญเสียความร้อนและปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้มากขึ้นเป็นสาเหตุให้เกิดการเผาไหม้ที่รุนแรงจึงส่งผลให้อุณหภูมิภายในกระบอกสูบสูงขึ้น และน้ำมันเชื้อเพลิงมีอัตราการระเหยกลายเป็นไอได้ดีขึ้นเมื่อเพิ่มภาระงานให้กับเครื่องยนต์ (Singh, R. K. et al, 2020; Yaqoob, H. et al, 2021) เมื่อพิจารณา BTE ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า HDPE และ Mixed Plastics มีค่าสูง

กว่าน้ำมันดีเซลที่ทุกภาระงาน โดยที่ HDPE และ Mixed Plastics มี BTE อยู่ที่ 8.67–18.88% และ 8.70–18.75% ตามลำดับ ในขณะที่ PET มีค่า BTE ที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งมี BTE อยู่ที่ประมาณ 7.65–17.59% โดยสาเหตุน่าจะมาจากอิทธิพลของความล่าช้าในการจุดระเบิดที่ภาระงานดังกล่าวของ PET และสารประกอบของ PET ที่ใช้พลังงานในการสลายพันธะอะโรเมติกส์ที่มากกว่าส่งผลให้ปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ลดลง (Sekar, M. et al., 2021; Kaimal and Vijayabalan, 2015) ทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงลดลง ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบ BTE ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า HDPE มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซลในภาระงาน โดยที่ภาระงานสูงสุด HDPE มี BTE ค่าสูงกว่า PET, Mixed Plastics และน้ำมันดีเซลถึง 5.45–6.83%

#### 5.4.2 คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกต่างชนิด

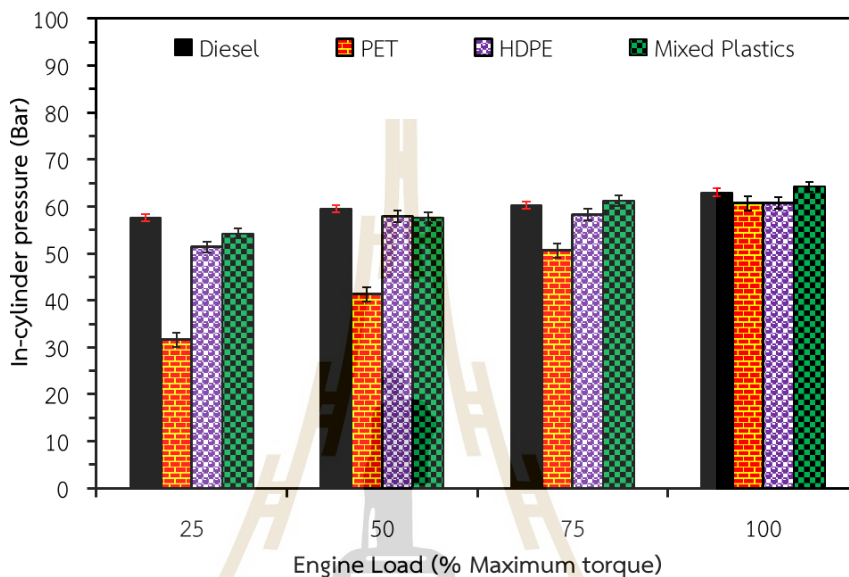
การวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ประกอบไปด้วย PET, HDPE และ Mixed Plastics สำหรับเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล โดยการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลด้วยความดันในกระบอกสูบที่องศาเพลาคือ ๑๕ องศา ต่าง ๆ จำนวน 100 วัฏจักรการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ซึ่งตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์การเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลสำหรับงานวิจัยนี้ ได้แก่ ความดันในกระบอกสูบ อัตราการปลดปล่อยความร้อนที่คำนวณด้วยสมการกฎการอนุรักษ์พลังงาน ตามกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ และสัมประสิทธิ์ความแปรผันของความดันสูงสุด โดยแสดงผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

##### 5.4.2.1 ความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อน

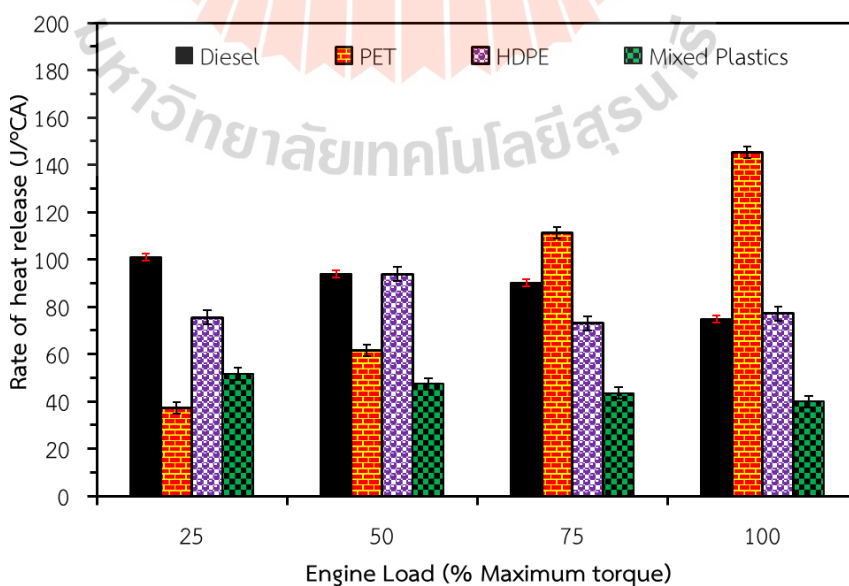
ความดันในกระบอกสูบ (In-cylinder pressure, ICP) และอัตราการปลดปล่อยความร้อน (Rate of heat release, RoHR) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญสำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงโดยการประเมินและวิเคราะห์ผลที่สภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล ณ ความเร็วรอบคงที่ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงานสามารถอธิบายผลได้ดังนี้

จากผลการวิเคราะห์ความดันในกระบอกสูบ (In-cylinder pressure, ICP) และอัตราการปลดปล่อยความร้อน (Rate of heat release, RoHR) ของ PET, HDPE และ Mixed Plastics ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงภาระงานโดยเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลพบว่า เมื่อเพิ่มภาระการทำงานให้กับเครื่องยนต์มีผลทำให้ ICP มีแนวโน้มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.10 เนื่องจากความดันในกระบอกสูบสูงสุดมีสัมพันธ์กับปริมาณของเชื้อเพลิงที่เตรียมไว้ในช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิด โดยที่น้ำมันเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้มีปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามภาระงานของเครื่องยนต์จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ความดันภายในห้องเผาไหม้สูงขึ้น (Singh, T. S., 2020) ประกอบกับการได้รับอิทธิพลจากสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีผลกระทบต่อความดันในกระบอกสูบ (Hwang, J. et al, 2014) ในทางกลับกันพบว่า RoHR กลับมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเพิ่มภาระงานให้กับเครื่องยนต์สำหรับ HDPE, Mixed Plastics และน้ำมันดีเซล ดังแสดงในรูปที่ 5.11 ซึ่งสมบัติทางเชื้อเพลิงปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณลักษณะที่เกิดขึ้นดังกล่าวมาข้างต้น แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดของ PET นั้นกลับมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มภาระงานให้กับเครื่องยนต์ สาเหตุหลักน่าจะมาจากความล่าช้าในการจุดระเบิดที่ทำให้มีน้ำมันเชื้อเพลิงที่รอ

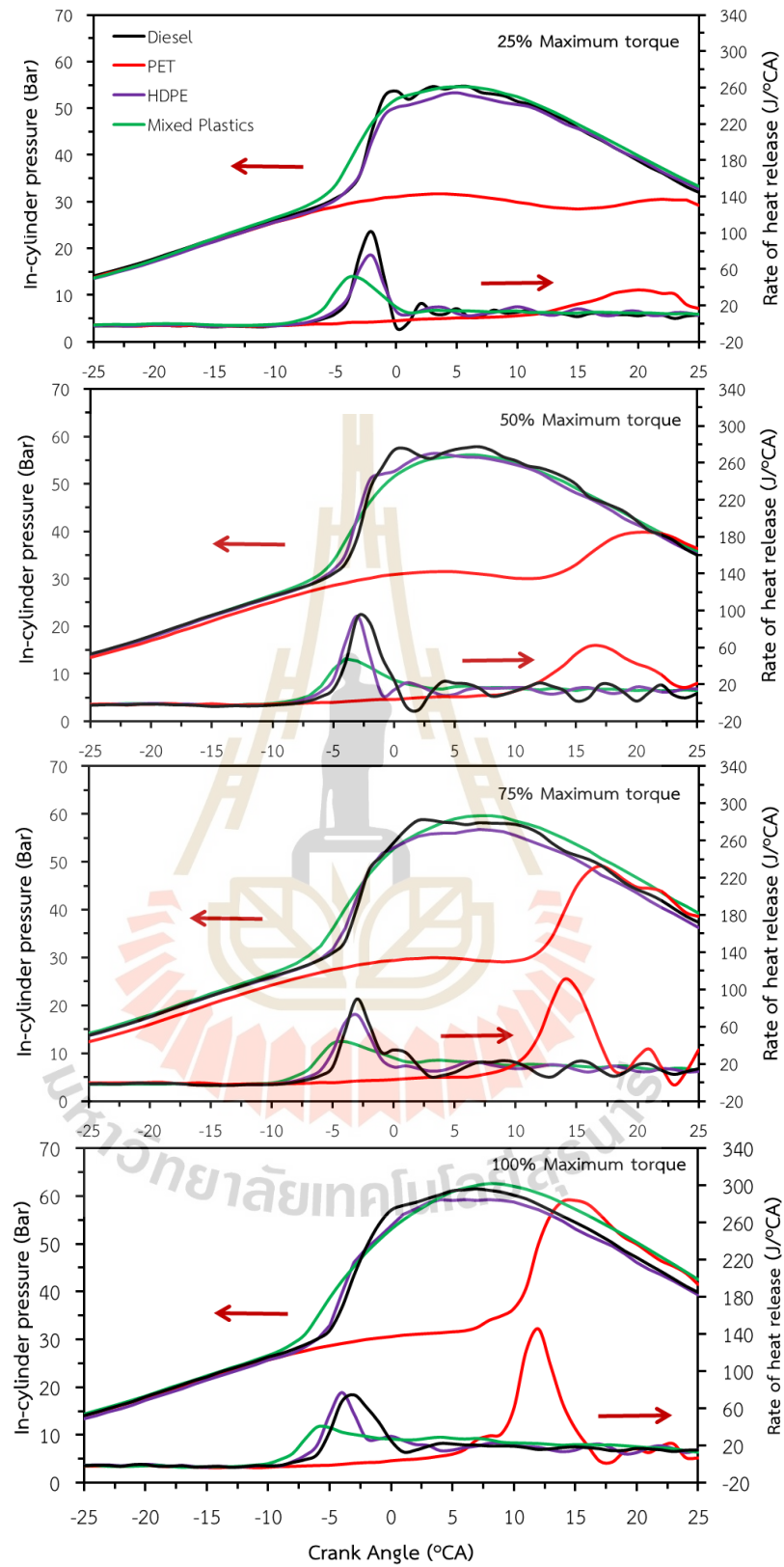
การเผาไหม้ในปริมาณมาก เมื่อเกิดการเผาไหม้จึงส่งผลให้มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนที่สูง ทั้งนี้ RoHR สูงสุดของ PET เกิดขึ้นหลังจากลูกสูบเคลื่อนผ่านศูนย์ตายบนไปถึง 12-20 องศาเฟลาข้อเหวี่ยง ซึ่งเป็นช่วงที่ลูกสูบกำลังเคลื่อนที่สู่จุดศูนย์ตายล่างในจังหวะคาย จากพฤติกรรมดังกล่าวนี้อาจส่งผลต่อกำลังของเครื่องยนต์ที่มีค่าลดลงหรืออาจเกิดการทำงานของเครื่องยนต์ที่ไม่ราบเรียบ (ดังจะกล่าวถึงด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันและพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์)



รูปที่ 5.10 ความดันในกระบอกสูบสูงสุดภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงาน



รูปที่ 5.11 อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงาน



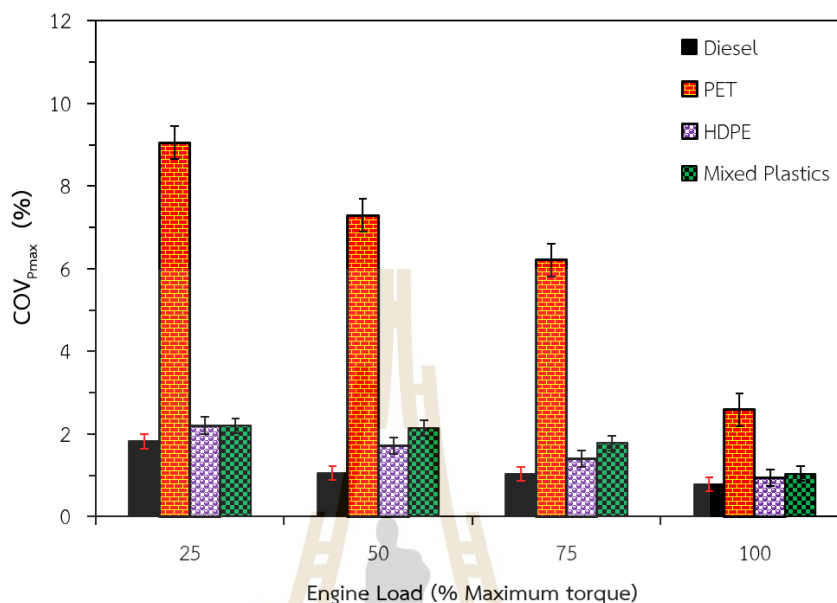
รูปที่ 5.12 ความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงาน

นอกจากนี้ จากผลการวิจัยดังรูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ICP และ RoHR ที่องศาเพลลาข้อเหวี่ยงใด ๆ ที่ภาระงาน 25%, 50%, 75% และ 100% แรงบิดสูงสุด ซึ่งผลจากการวิจัยพบว่า เมื่อเพิ่มภาระงานให้กับเครื่องยนต์ส่งผลต่อความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นลง เนื่องจากการเพิ่มภาระงานทำให้ก๊าซตกค้างและอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น ทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ได้ดีส่งผลให้ความล่าช้าในการจุดระเบิดลดลง (Raheman, H. et al, 2014) ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง PET, HDPE และ Mixed Plastics กับน้ำมันดีเซลจะเห็นได้ว่า HDPE และ Mixed Plastics เกิดการจุดระเบิดล่วงหน้าทุกภาระงานเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ถึงแม้ว่าสมบัติทางเชื้อเพลิงของ WPCBO และ Mixed Plastics ที่มีค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งทำให้เกิดความหน่วงในการจุดระเบิด แต่ด้วยอิทธิพลจากความหนืดที่ต่ำเป็นสาเหตุให้เกิดการกระจายตัวเป็นละอองฝอยได้ดีส่งผลให้เกิดการลุกไหม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่คุณลักษณะการเผาไหม้ของ PET กลับพบว่า มีความล่าช้าในการจุดระเบิดเมื่อเปรียบเทียบกับ HDPE, Mixed Plastics และน้ำมันดีเซลในทุกภาระงาน ซึ่งสาเหตุหลักน่าจะมาจากสมบัติทางเชื้อเพลิงและองค์ประกอบทางเคมีของ PET ที่มีค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำประกอบกับสารประกอบหลักใน PET เป็นสารไฮโดรคาร์บอนประเภทอะโรมาติกส์ ซึ่งมีโครงสร้างหลักเป็นวงเบนซีน ภายในวงแหวนเบนซีนจะมีคาร์บอน 6 อะตอมต่อกันเป็นวง โดยมีพันธะเดี่ยวและพันธะคู่สลับกันไปอีกทั้งยังมีอัตราการสลายตัวที่ต่ำทำให้เกิดการหน่วงในการจุดระเบิดหลังศูนย์ตายบนเป็นอย่างมาก (aTDC) (Kee, S. et al, 2005)

#### 5.4.2.2 สัมประสิทธิ์ความแปรผันของความดันสูงสุด

การวิเคราะห์ความแปรผันในการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้แสดงในรูปของสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient of variation, COV) จากผลการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 5.13 แสดงถึงสัมประสิทธิ์ความแปรผันของความดันในกระบอกสูบสูงสุด ( $COV_{P_{max}}$ ) ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาที่มีผลทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ลดลงและการปล่อยมลพิษไอเสียสูงขึ้น อีกทั้งยังแสดงถึงเสถียรภาพของการเผาไหม้ในแต่ละวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ (Kyrtatos, P., et al, 2016) โดยวิเคราะห์จากความดันในกระบอกสูบสูงสุดในแต่ละภาระงานของเครื่องยนต์เป็นจำนวน 100 วัฏจักร จากค่า  $COV_{P_{max}}$  ของน้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า มีแนวโน้มลดลงเมื่อภาระงานของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความมีเสถียรของกำลังที่ได้จากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิง (Geng, L. et al, 2021) และยังพบอีกว่า  $COV_{P_{max}}$  มีค่าไม่เกินค่าที่เครื่องยนต์สามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ โดยถูกกำหนดไว้ที่ค่าไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ (Heywood, 1998) เมื่อพิจารณา  $COV_{P_{max}}$  ของ PET, HDPE และ Mixed Plastics ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงานโดยเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลจะเห็นได้ว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มีค่า  $COV_{P_{max}}$  ที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลในทุกภาระงาน นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง PET, HDPE และ Mixed Plastics ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดว่าการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กโดยใช้ PET เป็นเชื้อเพลิงนั้นจะส่งผลต่อเสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์มากกว่า HDPE และ Mixed Plastics โดยมีค่า  $COV_{P_{max}}$  สูงสุด ณ ภาระงานต่ำสุดที่ 9.05% ขณะที่  $COV_{P_{max}}$  ของ HDPE และ Mixed Plastics อยู่ในช่วง 0.95–2.21% และ 1.07–2.20% ซึ่งปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดผลดังกล่าวนี้สืบเนื่องมาจากองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติ

ทางเชื้อเพลิงของ PET ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่มีเสถียรภาพจากความล่าช้าในการจุดระเบิด ดังแสดงในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.13 สัมประสิทธิ์ความแปรผันของความดันสูงสุดภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงาน

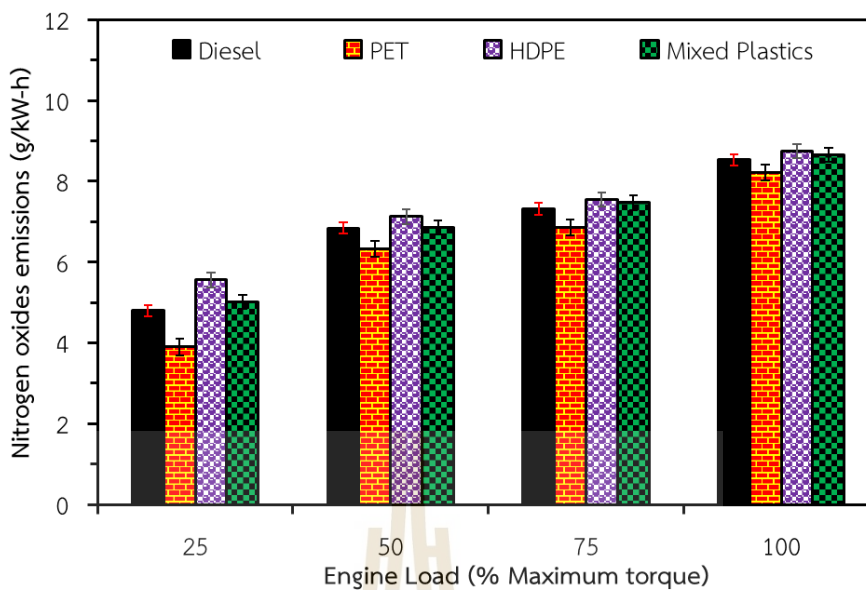
#### 5.4.3 มลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกต่างชนิด

การตรวจวัดมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์จากการใช้ PET, HDPE และ Mixed Plastics เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงภาระงาน ณ ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสียและเครื่องวัดดัชนีเขม่า สำหรับการตรวจวัดปริมาณการปล่อยมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย ไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen oxide), คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide), ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) และเขม่า (Smoke) โดยอภิปรายและวิเคราะห์ผลการตรวจวัดได้ดังนี้

##### 5.4.3.1 มลพิษไนโตรเจนออกไซด์

ไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen oxide,  $\text{NO}_x$ ) เป็นมลพิษไอเสียหลักจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล โดยที่  $\text{NO}_x$  เกิดจากการรวมตัวของไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $\text{NO}_2$ ) ที่เกิดขึ้นจากการออกซิเดชันของไนโตรเจนในอากาศระหว่างการเผาไหม้ของอากาศและน้ำมันเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ การก่อกำเนิด  $\text{NO}_x$  ในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นปัจจัยหลัก ๆ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ โดยที่อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ยิ่งสูงยิ่งสนับสนุนให้เกิดการก่อกำเนิดของ  $\text{NO}_x$  (Majewski, W.A. et al, 2006) ซึ่งผลจากการตรวจวัด  $\text{NO}_x$  จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลแสดงดังรูปที่ 5.14





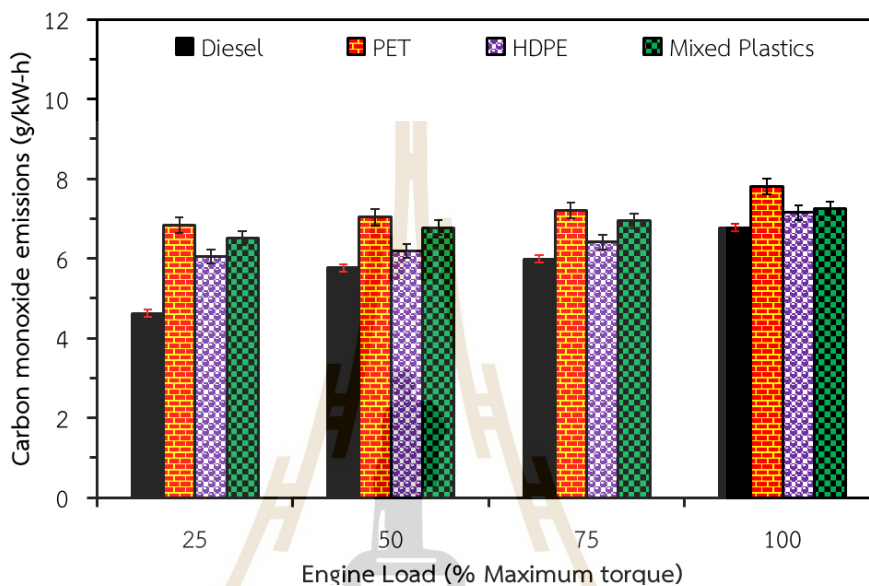
รูปที่ 5.14 มลพิษไอเสียไนโตรเจนออกไซด์ที่ภาระงานต่าง ๆ

การเปลี่ยนแปลงมลพิษไอเสียไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง (PET, HDPE และ Mixed Plastics) ภายใต้ภาระงานต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลดังรูปที่ 5.14 พบว่า เมื่อภาระงานของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นส่งผลให้  $\text{NO}_x$  ของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สืบเนื่องมาจากอุณหภูมิและความดันในกระบอกสูบที่สูงขึ้น เมื่อเพิ่มภาระงานให้กับเครื่องยนต์ ดังสังเกตได้จากผลการตรวจวัดความดันในกระบอกสูบที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงรูปที่ 5.12 ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลพบว่า HDPE และ Mixed Plastics มีการปล่อย  $\text{NO}_x$  มากกว่าน้ำมันดีเซลในทุกภาระงาน โดยที่ภาระงานสูงสุด HDPE และ Mixed Plastics มีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซล 2.65% และ 1.45% ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุน่าจะมาจากการจุดระเบิดล่วงหน้าของ HDPE และ Mixed Plastics ทำให้มีระยะเวลาในการเผาไหม้ที่นานกว่าน้ำมันดีเซล ถึงแม้ว่าน้ำมันเชื้อเพลิงดังกล่าวจะมีค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำ แต่เนื่องด้วยสมบัติทางเชื้อเพลิงของ HDPE และ Mixed Plastics มีค่าความหนืดที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลเป็นสาเหตุช่วยให้ น้ำมันเชื้อเพลิงเกิดการกระจายตัวเป็นละอองฝอยได้ดี (Kumar, P. S. et al., 2016) แต่อย่างไรก็ตาม การเผาไหม้ของ PET ในเครื่องยนต์ดีเซลปล่อย  $\text{NO}_x$  ที่ต่ำกว่า HDPE, Mixed Plastics และน้ำมันดีเซลในทุกภาระงาน เนื่องจากคุณลักษณะการเผาไหม้ของ PET ที่มีความล่าช้าในการจุดระเบิด ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากสมบัติทางเชื้อเพลิงของ PET ที่มีดัชนีซีเทนที่ต่ำประกอบกับโดยส่วนใหญ่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนประเภทอะโรเมติกส์ (เชื้อเพลิงกลุ่มน้ำมันแก๊สโซลีน) ที่มีความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล (Supramani, S. et al, 2015)

#### 5.4.3.2 มลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์

คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide, CO) เป็นมลพิษไอเสียที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งก่อตัวขึ้นเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ ในสภาวะที่ออกซิเจนไม่เพียงพอ ระยะเวลาการเผาไหม้ที่สั้น

รวมถึงการผสมกันระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ที่แย่ (Kumar, S. et al, 2013) ในสภาวะดังกล่าวนี้เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิด CO ขึ้น โดยทั่วไปแล้วการปลดปล่อย CO ของเครื่องยนต์ดีเซลจะมีปริมาณที่ต่ำ เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลทำงานภายใต้การผสมอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิงบาง (Chintala, V. et al, 2014) ซึ่งผลจากการตรวจวัด CO จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่างเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลแสดงได้ดังรูปที่ 5.15

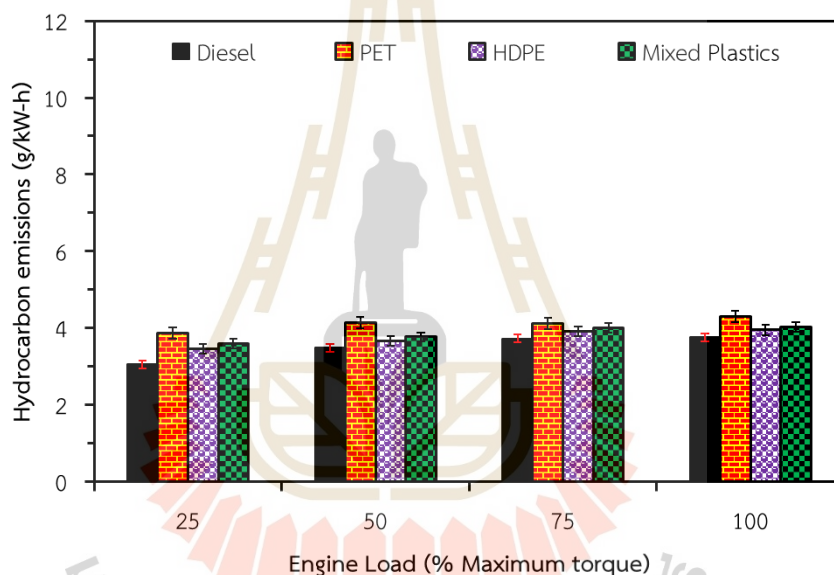


รูปที่ 5.15 มลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ภาระงานต่าง ๆ

การเปลี่ยนแปลงมลพิษไอเสียคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง (PET, HDPE และ Mixed Plastics) ภายใต้ภาระงานต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลดังรูปที่ 5.15 พบว่า เมื่อภาระงานของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ CO ของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สาเหตุหลักมาจากการเพิ่มภาระงานให้กับเครื่องยนต์ส่งผลให้อัตราส่วนอากาศและเชื้อเพลิงลดลง (A/F) (Sarin, A., 2012) จากงานวิจัยนี้เมื่อเพิ่มภาระงานพบว่า A/F มีค่าลดลงจาก 32, 25, 20 และ 16 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลพบว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มีการปล่อย CO มากกว่าน้ำมันดีเซลในทุกภาระงาน โดยที่ภาระงานสูงสุด PET, HDPE และ Mixed Plastics มีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซล 15.50%, 5.78% และ 6.99% ตามลำดับ เนื่องจากค่าร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลทำให้พลังงานที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเผาไหม้มีค่าน้อยกว่า และทำให้มีโอกาสสูงในการเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Kumar, P. S. et al., 2016) นอกจากนี้ อิทธิพลของความล่าช้าในการจุดระเบิดก็เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิด CO ที่สูง ซึ่งอิทธิพลนี้เห็นได้อย่างชัดเจนกับ PET ที่มีการปล่อย CO มากที่สุดในทุกภาระงานเมื่อเปรียบเทียบกับ HDPE, Mixed Plastics และน้ำมันดีเซล

### 5.4.3.3 มลพิษไฮโดรคาร์บอน

ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon, HC) เป็นมลพิษไอเสียที่ปลดปล่อยจากเครื่องยนต์ดีเซลในรูปของแก๊ส ซึ่งมลพิษ HC จะก่อตัวขึ้นเมื่อเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ด้วยปัจจัยต่าง ๆ เช่น การผสมกันระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงที่ไม่เพียงพอหรือมากเกินไป การดับของเปลวไฟบริเวณผนังห้องเผาไหม้ เป็นต้น สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลจะมีปริมาณมลพิษ HC ที่ต่ำกว่าเครื่องยนต์แก๊สโซลีน สาเหตุเพราะเครื่องยนต์ดีเซลทำงานที่ส่วนผสมระหว่างมวลอากาศกับมวลเชื้อเพลิงเจือจาง (Lean mixture) และการก่อตัวของมลพิษ HC จะเกิดขึ้นที่ส่วนผสมมวลอากาศกับมวลเชื้อเพลิงสูง (Rich mixture) ทั้งนี้ สำหรับปริมาณการปลดปล่อยมลพิษ HC ของเครื่องยนต์ดีเซลนั้นจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัจจัยสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ ซึ่งผลจากการตรวจวัด HC จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลแสดงได้ดังรูปที่ 5.16



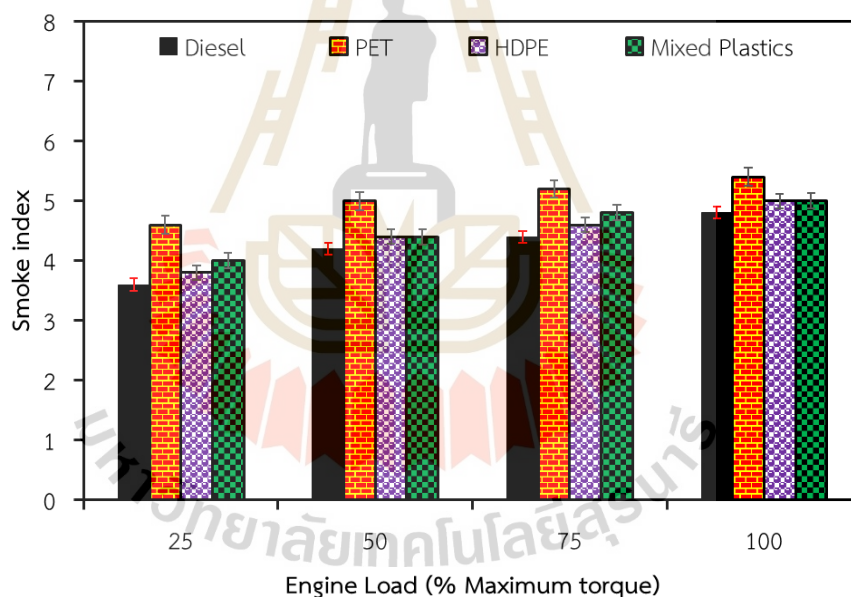
รูปที่ 5.16 มลพิษไฮโดรคาร์บอนที่ภาระงานต่าง ๆ

การเปลี่ยนแปลงมลพิษไอเสียไฮโดรคาร์บอน (HC) ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง (PET, HDPE และ Mixed Plastics) ภายใต้ภาระงานต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลดังรูปที่ 5.16 เห็นได้ว่า ปริมาณการปล่อย HC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มภาระงานให้กับเครื่องยนต์เนื่องจากการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มภาระงานให้กับเครื่องยนต์ นำไปสู่ส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิงที่เข้มข้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลพบว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มีการปล่อย HC มากกว่าน้ำมันดีเซลในทุกภาระงาน ซึ่งผลของการปล่อยมลพิษ HC ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่างที่สูงนี้อาจเกิดจากการรั่วไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ผ่านการฉีดของหัวฉีด สืบเนื่องมาจากสมบัติทางเชื้อเพลิงที่มีความหนืดต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล และอีกหนึ่งปัจจัยเนื่องจากน้ำมันดีเซลมีสารประกอบเมทิลเอสเทอร์ที่มีองค์ประกอบออกซิเจนช่วยให้การเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลในห้องเผาไหม้นั้นเกิดการเผาไหม้ได้

ดีกว่าน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง (Abed, K. A. et al, 2019; Devaraj, J. et al, 2015) โดยที่ภาระงานสูงสุด PET, HDPE และ Mixed Plastics มีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซล 14.79%, 5.21% และ 7.12% ตามลำดับ ประกอบกับในกรณีของ PET เห็นได้อย่างชัดเจนถึงการปล่อยมลพิษ HC ที่สูงที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากความล่าช้าการจุดระเบิดที่มากกว่าของ PET เนื่องจากสมบัติทางเชื้อเพลิงจากค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำประกอบกับสมบัติทางเคมีของ PET ที่มีสารประกอบส่วนใหญ่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนประเภทอะโรมาติกส์ก่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Miron, L. et al, 2021)

#### 5.4.3.4 มลพิษเขม่า

เขม่า (Smoke) เป็นอนุภาคคาร์บอนในวัฏภาคที่เป็นของแข็งและของเหลวที่ถูกปล่อยออกมาจากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล โดยสังเกตเห็นด้วยตาเปล่าในลักษณะที่เป็นควันสีดำ เขม่าดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจากน้ำมันเชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้หรือถูกเผาไหม้บางส่วนในเปลวไฟชนิดแพร่ผสมและเปลวไฟชนิดผสมก่อนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งผลจากการตรวจวัดเขม่าจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ด้วยดัชนีเขม่าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 เขม่าที่ภาระงานต่าง ๆ

การเปลี่ยนแปลงเขม่าของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง (PET, HDPE และ Mixed Plastics) ภายใต้ภาระงานต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ดังรูปที่ 5.17 เห็นได้ว่ามีลักษณะเดียวกันกับการปล่อยมลพิษ CO และ HC กล่าวคือ เมื่อเพิ่มภาระงานให้กับเครื่องยนต์ปริมาณการปล่อยเขม่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่มากขึ้นเมื่อภาระงานสูงขึ้นจึงส่งผลต่อการผสมที่หนาทำให้เกิดเขม่าที่สูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง PET, HDPE, Mixed Plastics และน้ำมันดีเซล พบว่า PET, HDPE, Mixed Plastics นั้นมีการปล่อยเขม่าที่สูง

กว่าน้ำมันดีเซลในทุกภาระงานอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ PET, HDPE และ Mixed Plastics มีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซล 12.50%, 4.17% และ 4.17% ตามลำดับ ทั้งนี้ PET มีการปล่อยเขม่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง สาเหตุเนื่องจากว่าสารประกอบหลักที่อยู่ใน PET เป็นสารไฮโดรคาร์บอนประเภทอะโรมาติกส์ ซึ่งมีโครงสร้างหลักเป็นวงเบนซีนเป็นสารประกอบไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่มากเมื่อเกิดการเผาไฟจึงก่อให้เกิดเขม่ามาก อีกทั้งยังมีสาเหตุจากคุณลักษณะการเผาไหม้ของ PET ที่มีความล่าช้าในการจุดระเบิดที่มากทำให้การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ได้แก่กว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ

## 5.5 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิเคราะห์ฝุ่นละอองของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกต่างชนิด

จากการดำเนินการวิจัยโดยการเก็บตัวอย่างของฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์ โดยการใช้แผ่นกรองละเอียดในการเก็บตัวอย่างด้วยเงื่อนไขที่กำหนด และนำตัวอย่างแผ่นกรองที่มีฝุ่นละอองไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังการเก็บตัวอย่าง รวมถึงนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมการสลายตัวขององค์ประกอบในฝุ่นละอองด้วยหลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (TGA) ภายใต้สภาวะควบคุม ซึ่งผลการเก็บฝุ่นละอองด้วยแผ่นกรองที่ปลายท่อไอเสียสามารถแสดงแผ่นกรองที่ใช้เก็บตัวอย่างได้ดังรูปที่ 5.18



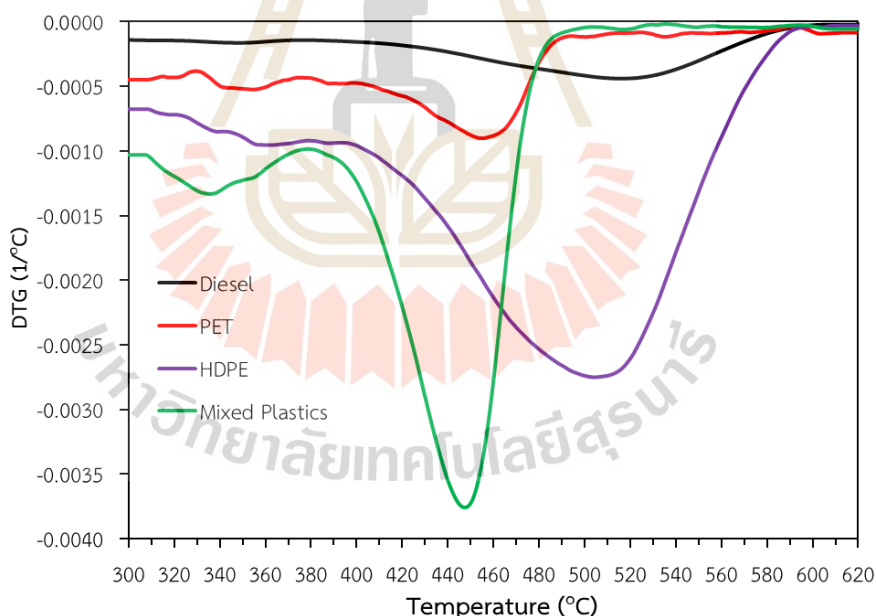
รูปที่ 5.18 ลักษณะแผ่นกรองหลังการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์

ซึ่งจากรูปที่ 5.18 ที่แสดงแผ่นกรองที่ได้หลังการเก็บฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง และน้ำมันดีเซล โดยแผ่นกรองดังกล่าวนี้เมื่อนำไปวิเคราะห์ผลต่างน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งดิจิตอล (ความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง) แสดงผลการวิเคราะห์

ดังตารางที่ 5.4 พบว่า ผลการวิเคราะห์ผลต่างน้ำหนักของฝุ่นละอองบนแผ่นกรองสำหรับ PET, HDPE และ Mixed Plastics มีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซล ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันจากขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่างพบว่า น้ำหนักฝุ่นละอองของ PET มีผลต่างที่มากกว่า HDPE และ Mixed Plastics ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจวัดเขม่าดังกล่าวอภิปรายก่อนหน้า โดยผลดังกล่าวนี้เป็นผลที่สืบเนื่องมาจากสมบัติทางเชื้อเพลิงและคุณลักษณะการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นส่งผลให้การเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และสนับสนุนให้เกิดฝุ่นละอองมากขึ้น

ตารางที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์ผลต่างน้ำหนักของฝุ่นละอองบนแผ่นกรอง

ตัวอย่าง น้ำมันเชื้อเพลิง	น้ำหนักแผ่นกรอง (g)		ผลต่างของน้ำหนัก (%)
	น้ำหนักก่อนการทดสอบ	น้ำหนักหลังการทดสอบ	
Diesel	0.0901	0.1044	+ 15.87
PET	0.0907	0.1856	+ 104.63
HDPE	0.0923	0.1612	+ 74.64
Mixed Plastics	0.0913	0.1686	+ 84.67



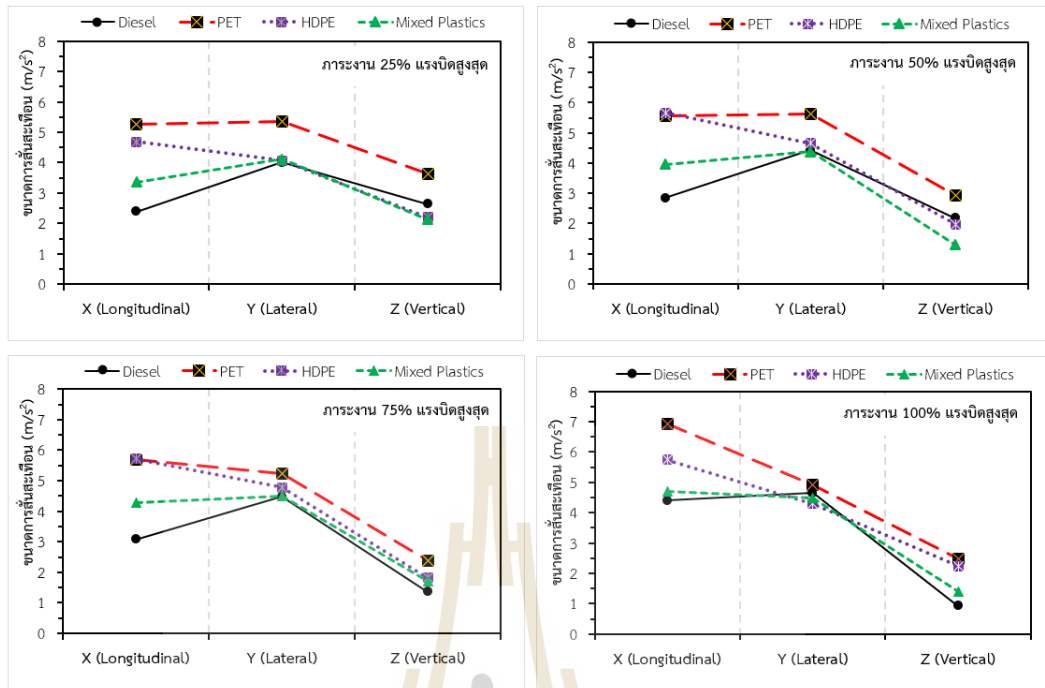
รูปที่ 5.19 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมสลายตัวของฝุ่นละอองด้วยเครื่อง TGA

นอกจากนี้ แผ่นกรองดังกล่าวเมื่อนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมสลายตัวด้วยความร้อนด้วยเครื่อง TGA ของฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง และน้ำมันดีเซล จากผลการวิเคราะห์แสดงในรูปของเทอร์โมแกรมที่แสดงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (Derivative thermogram, DTG) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียมวลเทียบกับเวลา

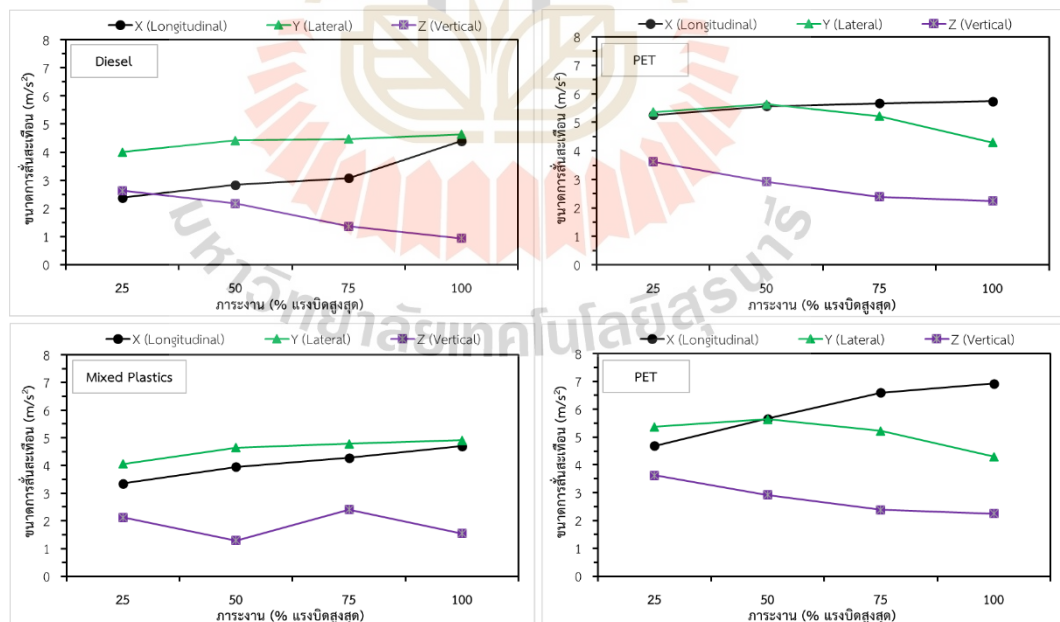
( $dm/dt$ ) ที่ช่วงอุณหภูมิ 300–620 °C ดังแสดงในรูปที่ 5.19 จากเทอร์โมแกรมที่แสดงของ PET, HDPE, Mixed Plastics และน้ำมันดีเซล บ่งชี้ให้เห็นว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมแกรมเพียงขั้นตอนเดียว โดยที่อุณหภูมิการสลายตัวขององค์ประกอบในฝุ่นละอองของ Mixed Plastics, PET และ HDPE มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 448 °C, 460 °C และ 509 °C ตามลำดับ ในขณะที่น้ำมันดีเซลมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 519 °C ผลดังกล่าวนี้บ่งบอกถึงการใช้พลังงานในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ต่ำและง่ายสำหรับการสลายฝุ่นละอองที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น-สุดท้ายของการเปลี่ยนแปลงมวล (Onset-End temperature) หรือช่วงอัตราการสลายตัวสูงสุด (Maximum weight loss) ของ PET, HDPE และ Mixed Plastics และน้ำมันดีเซล อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 425–496 °C, 405–574 °C, 401–473 °C และ 416–583 °C ตามลำดับ ซึ่งพฤติกรรมของการสลายตัวที่ต่างกันนี้อาจเป็นสาเหตุมาจากโครงสร้างทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการแปรรูปเป็นพลังงานและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง

## 5.6 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์สันสะเทือนของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกต่างชนิด

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์ทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ด้วยขนาดการสันสะเทือนในสภาวะการทำงาน ของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบคงที่ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงภาระงานของเครื่องยนต์ สำหรับประเมินผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ บ่งชี้ให้เห็นว่า การทำงานของเครื่องยนต์จากการใช้ PET, HDPE และ Mixed Plastics เป็น น้ำมันเชื้อเพลิงมีขนาดการสันสะเทือนที่สูงกว่าการทำงานของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันดีเซล และขนาดการสันสะเทือนในแนวแกน X และแนวแกน Y มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามภาระงานของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ขนาดการสันสะเทือนในแนวแกน Z มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ทำให้ขนาดการสันสะเทือนลดลง โดยขนาดการสันสะเทือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z ของ PET, HDPE และ Mixed Plastics มีค่าเท่ากับ 3.62  $m/s^2$ , 2.47  $m/s^2$  และ 2.13  $m/s^2$  ตามลำดับ และในกรณีของน้ำมันดีเซลนั้นมีขนาดสูงสุดประมาณ 2.63  $m/s^2$  ซึ่งผลดังกล่าวส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากสมบัติทางเชื้อเพลิงของ น้ำมันขยะพลาสติก ส่งผลให้เกิดคุณลักษณะการเผาไหม้ที่ไม่ราบเรียบ ทั้งนี้ พฤติกรรมการณ์สันสะเทือนที่เกิดขึ้นพบได้ว่า ขนาดการสันสะเทือนในแนวแกน Y (ด้านซ้าย-ขวาของเครื่องยนต์) มีขนาดการสันสะเทือนที่มากกว่าแนวแกนอื่น ๆ ซึ่งสาเหตุหลักน่าจะมาจากกลไกการเคลื่อนที่ของเพลลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า PET มีขนาดการสันสะเทือนในแต่ละภาระงานที่มากกว่า HDPE และ Mixed Plastics ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังรูปที่ 5.20-5.21 แสดงขนาดการสันสะเทือนของเครื่องยนต์ในแนวแกน X, Y และ Z ที่ภาระงานสูงสุดจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง และน้ำมันดีเซล



รูปที่ 5.20 ขนาดการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ดีเซลจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกตามแนวแกน



รูปที่ 5.21 ขนาดการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ดีเซลจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกที่ภาระงานต่าง ๆ



## 5.7 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบเครื่องยนต์โดยการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกต่างชนิด ซึ่งประกอบด้วย PET, HDPE และ Mixed Plastics เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย รวมถึงพฤติกรรมการสันดาปของเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 1 สูบ 4 จังหวะ ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์คงที่ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงภาระงาน โดยจากผลการวิเคราะห์และอภิปรายผลสามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) ระหว่างน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง และน้ำมันดีเซล ผลการวิจัยบ่งชี้ให้เห็นว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มี BSFC ที่มากกว่าน้ำมันดีเซลทุก ๆ ภาระงาน ซึ่งสาเหตุหลักเป็นผลสืบเนื่องจากสมบัติทางเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า PET นั้นมี BSFC ที่มากกว่า HDPE และ Mixed Plastics ตามลำดับ นอกจากนี้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สำหรับ PET, HDPE และ Mixed Plastics เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลพบว่า HDPE และ Mixed Plastics มี BTE ที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลในทุกภาระงาน โดยที่ HDPE นั้นเป็นน้ำมันขยะพลาสติกที่มี BTE สูงสุด ในขณะที่ PET มีค่า BTE ที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งสมบัติทางเชื้อเพลิงและสารประกอบทางเคมีในน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างกันของประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

การวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกด้วยการพิจารณาจากความดันในกระบอกสูบ (ICP) อัตราการปลดปล่อยความร้อน (RoHR) และสัมประสิทธิ์ความแปรผันของความดันสูงสุด ( $COV_{Pmax}$ ) แสดงให้เห็นว่า การใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลนั้นมีผลกระทบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ โดยที่ PET, HDPE และ Mixed Plastics ส่งผลต่อ ICP และ RoHR ที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตาม PET กลับพบว่ามี RoHR ที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล ประกอบกับมีความล่าช้าในการจุดระเบิดที่มากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่ทดสอบ ในขณะที่ PET และ HDPE มีคุณลักษณะที่เกิดการจุดระเบิดล่วงหน้า นอกจากนี้ เมื่อกล่าวถึง  $COV_{Pmax}$  ซึ่งเป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงความมีเสถียรภาพในการเผาไหม้ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มีค่าที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล โดยอธิบายผลดังกล่าวได้ว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มีเสถียรภาพในการเผาไหม้ที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลและเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีของ PET

การปล่อยมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยจากผลการวิจัยพบว่า การใช้น้ำมันขยะพลาสติกนั้นส่งผลให้แนวโน้มการปล่อยมลพิษไอเสียซึ่งประกอบด้วย  $NO_x$ , CO, HC และเขม่าที่เพิ่มขึ้น โดยการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จากการใช้ PET เป็นเชื้อเพลิงนั้นก่อให้เกิดการปล่อยมลพิษสูงกว่า HDPE และ Mixed Plastics ยกเว้นในกรณีของ  $NO_x$  ที่พบว่าปริมาณการปล่อยที่ต่ำกว่า HDPE, Mixed Plastics และน้ำมันดีเซล สาเหตุน่าจะมาจากความล่าช้าในการจุดระเบิดที่เกิดขึ้นทำให้การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์

นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์โดยการใช้แผ่นกรองละเอียดในการเก็บตัวอย่างด้วยใต้เงื่อนไขที่กำหนด และนำตัวอย่างฝุ่นละอองไป

วิเคราะห์พฤติกรรมของการสลายตัวขององค์ประกอบในฝุ่นละอองด้วยหลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (TGA) ภายใต้สภาวะควบคุมผลการวิเคราะห์ผลต่างน้ำหนักของฝุ่นละอองบนแผ่นกรองสำหรับน้ำมันขยะพลาสติกค่ามากกว่าน้ำมันดีเซล ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า PET มีผลต่างน้ำหนักของฝุ่นละอองที่มากกว่า HDPE และ Mixed Plastics ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจวัดเข้ามาของเครื่องยนต์ที่ภาระงานต่าง ๆ โดยผลดังกล่าวนี้เป็นผลที่สืบเนื่องมาจากสมบัติทางเชื้อเพลิงและคุณลักษณะการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจากการใช้ PET เป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของการสลายตัวขององค์ประกอบในฝุ่นละอองพบว่า น้ำมันขยะพลาสติกนั้นมีอุณหภูมิการสลายตัวของฝุ่นละอองที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล โดยที่ PET, HDPE และ Mixed Plastics มีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 454 °C, 447 °C และ 503 °C ตามลำดับ ในขณะที่น้ำมันดีเซลมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 552 °C ซึ่งผลดังกล่าวนี้บ่งบอกถึงการใช้พลังงานในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ต่ำและง่ายสำหรับการสลายฝุ่นละอองที่เกิดขึ้น

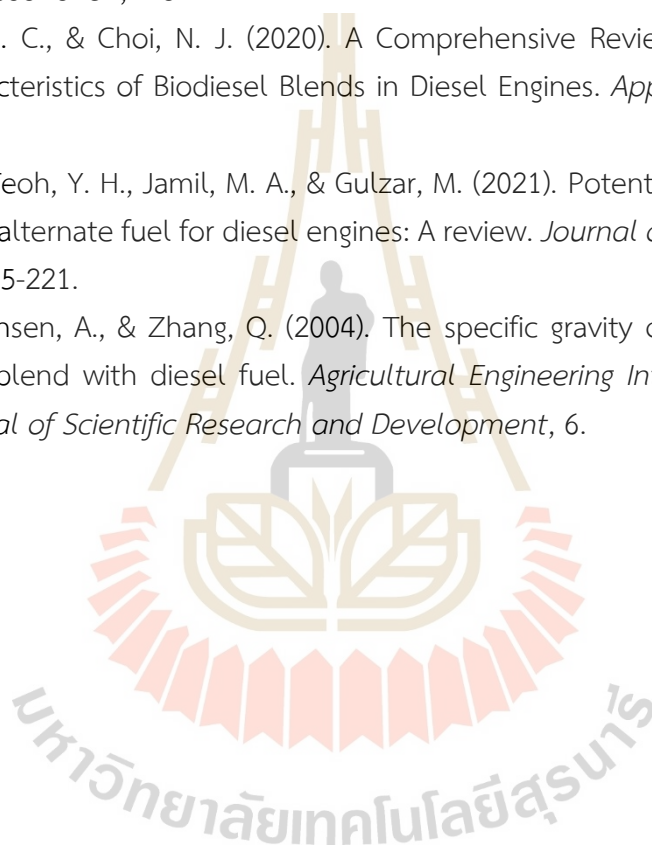
จากผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการสันสเทือนของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นจากการใช้ น้ำมันขยะพลาสติกโดยเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลบ่งชี้ให้เห็นว่า การใช้ น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงนั้นส่งผลให้เครื่องยนต์มีขนาดการสันสเทือนมีมากกว่าน้ำมันดีเซล โดยที่ขนาดการสันสเทือนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามภาระงานของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า PET มีขนาดการสันสเทือนในแต่ละภาระงานที่มากกว่า HDPE และ Mixed Plastics

## 5.8 รายการอ้างอิง

- Abed, K. A., Gad, M. S., El Morsi, A. K., Sayed, M. M., & Elyazeed, S. A. (2019). Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Egyptian Journal of Petroleum*, 28(2), 183-188.
- Charoensaeng, A., Khaodhiar, S., Sabatini, D. A., & Arpornpong, N. (2018). Exhaust emissions of a diesel engine using ethanol-in-palm oil/diesel microemulsion-based biofuels. *Environmental Engineering Research*, 23(3), 242-249.
- Chintala, V., & Subramanian, K. A. (2014). Hydrogen energy share improvement along with NO<sub>x</sub> (oxides of nitrogen) emission reduction in a hydrogen dual-fuel compression ignition engine using water injection. *Energy Conversion and Management*, 83, 249-259.
- 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.
- Geng, L., Bi, L., Li, Q., Chen, H., & Xie, Y. (2021). Experimental study on spray characteristics, combustion stability, and emission performance of a CRDI diesel engine operated with biodiesel-ethanol blends. *Energy Reports*, 7, 904-915.

- Hwang, J., Qi, D., Jung, Y., & Bae, C. (2014). Effect of injection parameters on the combustion and emission characteristics in a common-rail direct injection diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel. *Renewable Energy*, 63, 9-17.
- Kee, S.-S., Mohammadi, A., Kidoguchi, Y., & Miwa, K. (2005). Effects of Aromatic Hydrocarbons on Fuel Decomposition and Oxidation Processes in Diesel Combustion.
- Kumar, P. S., & Sankaranarayanan, G. (2016). Investigation on environmental factors of waste plastics into oil and its emulsion to control the emission in DI diesel engine. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 134, 440-444.
- Kumar, S., Prakash, R., Murugan, S., & 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.
- Kyrtatos, P., Brückner, C., & Boulouchos, K. (2016). Cycle-to-cycle variations in diesel engines. *Applied Energy*, 171, 120-132.
- Maawa, W. N., Mamat, R., Najafi, G., Ali, O., & Aziz, A. (2015). Engine performance and emission of compression ignition engine fuelled with emulsified biodiesel-water. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 100, 012061.
- Majewski, W.A.; Khair, M.K. *Diesel Emissions and Their Control; Society of Automotive Engineers*: Wallendale, PA, USA, 2006; pp. 109–110.
- Miron, L., Chiriac, R., Brabec, M., & Bădescu, V. (2021). Ignition delay and its influence on the performance of a Diesel engine operating with different Diesel–biodiesel fuels. *Energy Reports*, 7, 5483-5494.
- Omar, F. K., Selim, M. Y. E., & Emam, S. A. (2017). Time and frequency analyses of dual-fuel engine block vibration. *Fuel*, 203, 884-893.
- Raheman, H., & Padhee, D. (2014). Combustion characteristics of diesel engine using producer gas and blends of Jatropha methyl ester with diesel in Mixed Plasticsfuel mode. *International Journal of Renewable Energy Development (IJRED)*, 3.
- Sarin, A. (2012). *Biodiesel: Production and Properties*: Royal Society of Chemistry.
- Sekar, M., Praveenkumar, T. R., Dhinakaran, V., Gunasekar, P., & Pugazhendhi, A. (2021). Combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with nanocatalyst and pyrolysis oil produced from the solid plastic waste using screw reactor. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128551.

- Singh, R. K., Ruj, B., Sadhukhan, A. K., Gupta, P., & Tigga, V. P. (2020). Waste plastic to pyrolytic oil and its utilization in CI engine: Performance analysis and combustion characteristics. *Fuel*, 262, 116539.
- Singh, T. S., Verma, T. N., & Singh, H. N. (2020). A lab scale waste to energy conversion study for pyrolysis of plastic with and without catalyst: Engine emissions testing study. *Fuel*, 277, 118176.
- Supramani, S., Pitchandi, K., & Suresh, S. (2015). An experimental study on preMixed Plasticscharge compression ignition-direct ignition engine fueled with ethanol and gasohol 54, 1-8.
- Wu, G., Ge, J. C., & Choi, N. J. (2020). A Comprehensive Review of the Application Characteristics of Biodiesel Blends in Diesel Engines. *Applied Sciences*, 10(22), 8015.
- Yaqoob, H., Teoh, Y. H., Jamil, M. A., & Gulzar, M. (2021). Potential of tire pyrolysis oil as an alternate fuel for diesel engines: A review. *Journal of the Energy Institute*, 96, 205-221.
- 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.



## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินการวิจัยโดยการศึกษาและวิจัยการใช้น้ำมันขยะพลาสติกจากพลาสติกต่างชนิด คือ น้ำมันขยะพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET), น้ำมันขยะพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และน้ำมันขยะพลาสติกชนิดขยะพลาสติกผสม (Mixed Plastics) เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่นิยมใช้งานในภาคการเกษตร โดยผู้วิจัยทำการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติก ทั้ง 3 ตัวอย่าง และศึกษาผลกระทบด้านต่าง ๆ ได้แก่ สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย รวมถึงการวิเคราะห์พฤติกรรมการสันดาปของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง เมื่อนำไปใช้งานโดยทดสอบด้วยเครื่องยนต์ดีเซลภายใต้ การเปลี่ยนแปลงภาระงานที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

##### 6.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี สมบัติพื้นฐานทางเชื้อเพลิง และวิเคราะห์ด้าน ไตรโบโลยีของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง (PET, HDPE และ Mixed Plastics) โดยวิเคราะห์ สารประกอบทางเคมี หมู่ฟังก์ชัน องค์ประกอบธาตุ สมบัติทางเชื้อเพลิง และคุณสมบัติด้านไตรโบโลยี จากการดำเนินการวิจัยพบว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีสารประกอบทางเคมีอยู่ใน กลุ่มน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียม โดยที่สารประกอบทางเคมีของ PET อยู่ในกลุ่มน้ำมันแก๊สโซลีน ในขณะที่ HDPE และ Mixed Plastics มีสัดส่วนของสารประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับกลุ่มของ น้ำมันดีเซล และหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง คล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซล เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า ความหนืดจลนศาสตร์ จุดวาบไฟ และจุดติดไฟมีค่าที่ต่ำกว่ามาตรฐานที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด ประกอบกับสมบัติ ทางเชื้อเพลิงอื่น ๆ เช่น ความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ ดัชนีซีเทน อุณหภูมิการกลั่นของ น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีค่าที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งช่วยบ่งชี้ให้เห็นถึงศักยภาพความเป็นเชื้อเพลิงพบว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มีค่าพลังงานที่สูงและมีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นพลังงาน เชื้อเพลิง นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติด้านไตรโบโลยีน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดีกว่าน้ำมันดีเซล โดยพิจารณาจากขนาดรอยสึกหรอและสัมประสิทธิ์ ความเสียดทานที่มากกว่าน้ำมันดีเซล ประกอบกับฟิล์มการหล่อลื่นที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตาม ขนาดรอยการสึกหรอดังกล่าวยังมีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐานที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด

##### 6.1.2 การวิเคราะห์ผลกระทบต่อเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิง

การทดสอบเครื่องยนต์โดยการใช้น้ำมันขยะพลาสติก (PET, HDPE และ Mixed Plastics) ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส เมื่อนำมาทดสอบถึงสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะ

การเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย รวมถึงพฤติกรรมการสันเสเทือนของเครื่องยนต์ของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้น โดยทดสอบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงภาระงาน ซึ่งผลการทดสอบความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) ของ PET, HDPE และ Mixed Plastics พบว่ามี BSFC และ BTE ที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะพลาสติกมีค่าความร้อนและความหนืดที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์ระหว่างน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า HDPE มีสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ดีกว่า PET และ Mixed Plastics เนื่องจาก BTE มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบการใช้ PET, Mixed Plastics เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล และน้ำมันดีเซลในทุกภาระงาน นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า การใช้น้ำมันขยะพลาสติกมีผลกระทบต่อความล่าช้าในการจุดระเบิด โดยที่ PET มีเกิดความล่าช้าในการจุดระเบิดมากกว่า HDPE และ Mixed Plastics โดยผลดังกล่าวนี้สาเหตุส่วนหนึ่งเป็นมาจากค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำของ PET ในขณะที่การใช้ HDPE และ Mixed Plastics ส่งผลให้เกิดการจุดระเบิดล่วงหน้าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนความดันในกระบอกสูบสูงสุดเห็นได้อย่างชัดเจนว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มีค่าที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ซึ่งผลดังกล่าวสื่อได้ว่า PET, HDPE และ Mixed Plastics มีเสถียรภาพในการเผาไหม้ที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล อีกทั้งยังเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีของ PET นอกจากนี้ การใช้น้ำมันขยะพลาสติกนั้นส่งผลให้แนวโน้มการปล่อยมลพิษไอเสียเพิ่มสูงขึ้น โดยที่การเผาไหม้ของเครื่องยนต์จากการใช้ PET เป็นเชื้อเพลิงนั้นก่อให้เกิดการปล่อยมลพิษสูงกว่า HDPE และ Mixed Plastics ยกเว้นในกรณีของ  $\text{NO}_x$  ที่พบว่า มีปริมาณการปล่อยที่ต่ำกว่า HDPE, Mixed Plastics และน้ำมันดีเซล สาเหตุน่าจะมาจากคุณลักษณะการเผาไหม้ที่มีความล่าช้าในการจุดระเบิดทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์

### 6.1.3 การวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิง

จากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองขนาดเล็กโดยการเก็บตัวอย่างของฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ โดยการใช้แผ่นกรองละเอียดสำหรับการเก็บตัวอย่างด้วยใต้เงื่อนไขที่กำหนด และนำตัวอย่างแผ่นกรองที่มีฝุ่นละอองไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังการเก็บตัวอย่าง รวมถึงนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมการสลายตัวขององค์ประกอบในฝุ่นละอองด้วยเครื่อง TGA ภายใต้สภาวะควบคุมผลการวิเคราะห์ผลต่างน้ำหนักของฝุ่นละอองบนแผ่นกรองสำหรับ PET, HDPE และ Mixed Plastics ค่าที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ทั้งนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า PET มีผลต่างน้ำหนักของฝุ่นละอองที่มากกว่า HDPE และ Mixed Plastics ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจวัดเขม่าของเครื่องยนต์ที่ภาระงานต่าง ๆ โดยผลดังกล่าวนี้เป็นผลที่สืบเนื่องมาจากสมบัติทางเชื้อเพลิงและคุณลักษณะการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจากการใช้ PET เป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการสลายตัวขององค์ประกอบในฝุ่นละอองพบว่า น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่างนั้น โดยที่อุณหภูมิการสลายตัวขององค์ประกอบในฝุ่นละอองของ Mixed Plastics, PET และ HDPE มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 448 °C, 460 °C และ 509 °C ตามลำดับ ในขณะที่น้ำมันดีเซลมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 519 °C ซึ่งผลดังกล่าวนี้บ่งบอกถึงการใช้พลังงานในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ต่ำและง่ายสำหรับการสลายฝุ่นละอองที่เกิดขึ้น

#### 6.1.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมการสั่นของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิง

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการสั่นของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับน้ำมันดีเซลจากขนาดการสั่นสะเทือนในสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบคงที่ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงภาระงานของเครื่องยนต์ เพื่อใช้สำหรับประเมินผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์บ่งชี้ให้เห็นว่า การทำงานของเครื่องยนต์จากการใช้ PET, HDPE และ Mixed Plastics เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงมีขนาดการสั่นสะเทือนที่สูงกว่าการทำงานของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันดีเซล และขนาดการสั่นสะเทือนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามภาระงานของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ พฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นพบได้ว่า ขนาดการสั่นสะเทือนในแนวแกน Y (ด้านซ้าย-ขวาของเครื่องยนต์) มีขนาดการสั่นสะเทือนที่มากกว่าแนวแกนอื่น ๆ เนื่องจากเป็นพฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการหมุนของเพลาคือเหวี่ยงของเครื่องยนต์ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างน้ำมันขยะพลาสติกทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า PET มีขนาดการสั่นสะเทือนในแต่ละภาระงานที่มากกว่า HDPE และ Mixed Plastics ซึ่งจากพฤติกรรมของเครื่องยนต์ที่มีขนาดการสั่นสะเทือนที่สูงนี้เป็นเหตุปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นส่วนหรือโครงสร้างต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ได้

#### 6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้น้ำมันขยะพลาสติกต่างชนิดประกอบไปด้วย ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยยังไม่ผ่านขั้นตอนการกลั่นลำดับส่วนเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก โดยจากการดำเนินการวิจัยสังเกตได้ว่า ลักษณะทางกายภาพของน้ำมันขยะพลาสติกที่นำมาทดสอบมีกลิ่นค่อนข้างฉุนและสีของน้ำมันขยะพลาสติกมีสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลต่อความเชื่อมั่นในการนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์ ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมในปัจจัยดังกล่าว รวมถึงการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันขยะพลาสติก โดยเพิ่มขั้นตอนการกลั่นลำดับส่วน เพื่อปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของน้ำมันขยะพลาสติกให้มีความเหมาะสม หรือการนำน้ำมันขยะพลาสติกไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติทางเชื้อเพลิงให้มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน ซึ่งสามารถแสดงผลจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจในการศึกษาและวิจัย โดยแสดงผลการวิจัยเพิ่มเติมดังภาคผนวก ค

นอกจากนี้ ในการตรวจวัดมลพิษไอเสียในระหว่างการทดสอบเครื่องยนต์โดยใช้ PET ผู้วิจัยพบว่า PET มีผลให้มลพิษไอเสียที่ก่อให้เกิดการระคายเคืองที่ดวงตา ด้วยสาเหตุนี้จึงเป็นที่น่าสนใจสำหรับการวิจัยจากสิ่งที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ เครื่องยนต์อีกประเภทหนึ่งที่ได้รับนิยมนำมาใช้งานในภาคการเกษตรคือเครื่องยนต์ที่มีระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ซึ่งส่วนนี้อีกอีกปัจจัยที่จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในการนำน้ำมันจากขยะพลาสติกมาใช้งาน เพื่อเป็นแนวทางในการนำน้ำมันขยะพลาสติกไปใช้งานกับเครื่องยนต์ได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ



ภาคผนวก ก

ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ตารางหมายเลข ๑ ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล  
แบบท้ายประกาศกรมธุรกิจพลังงาน  
เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล  
พ.ศ. ๒๕๖๒

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ <sup>๑</sup>
			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	๐.๘๑	-	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 ไม่สูงกว่า	๑.๘	๑.๘	-	
	๓.๒ ณ อุณหภูมิ ๕๐ องศาเซลเซียส (at 50 °C)	ไม่สูงกว่า	๔.๑	๔.๑	๘.๐	
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 <sup>3</sup> )	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 ๒๗๐๔
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	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ <sup>๙</sup>	
			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	-	เทียบเท่าสี มาตรฐาน <sup>๖</sup>	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	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ <sup>๑</sup>	
			หมุนเร็ว		หมุนช้า		
			ธรรมดา	ปี ๒๐			
๑๘	คุณสมบัติการหล่อลื่น รอยขีดข่วน (Lubricity wear scar)	ไมโครเมตร $\mu m$	ไม่สูงกว่า	๔๖๐	๔๖๐	-	CEC F - ๐๖ - ๙๖
๑๙	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additives, if any)			ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจาก อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน			

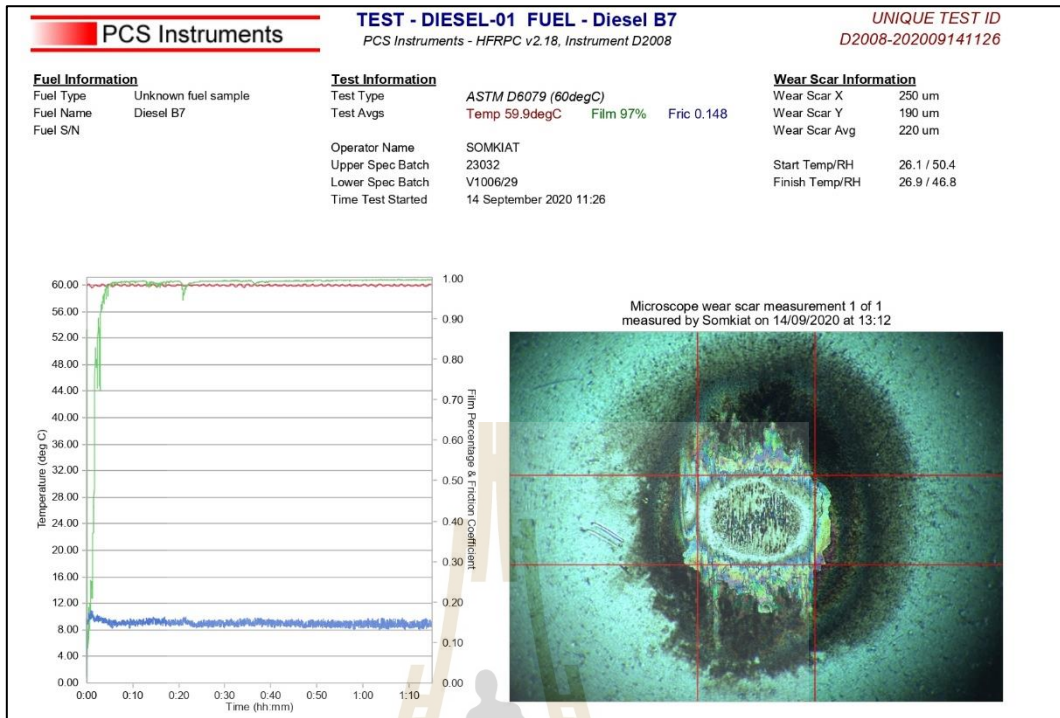
หมายเหตุ ๑/ ให้ใช้วิธีทดสอบที่กำหนดในตารางแนบท้ายนี้หรือวิธีอื่นใดที่ให้ผลเทียบเท่า ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในตารางแนบท้ายนี้  
๒/ สีมาตรฐานเตรียมได้จากการนำน้ำมันดีเซลหมุนเร็วปี ๒๐ ที่มีความเข้มข้นของสีก่อนการย้อม วัดตามมาตรฐาน ASTM D ๑๕๐๐ เท่ากับ ๒.๐ มาย้อมด้วยสีแดงที่เป็นสารประกอบจำพวก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



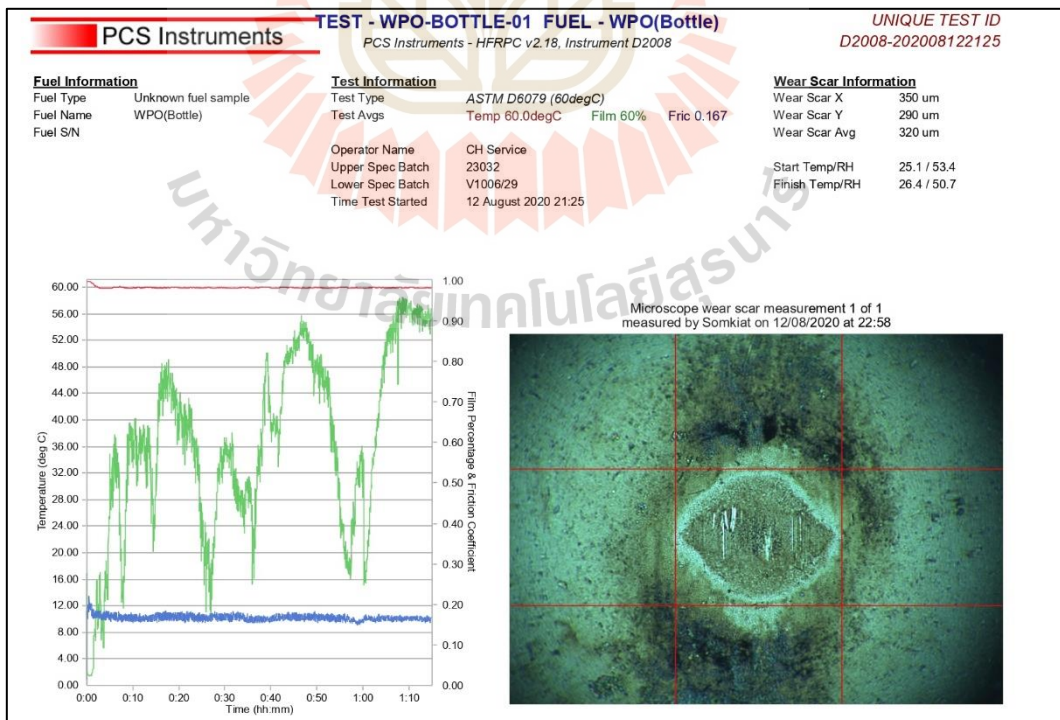
ภาคผนวก ข

ผลการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติการหล่อลื่น

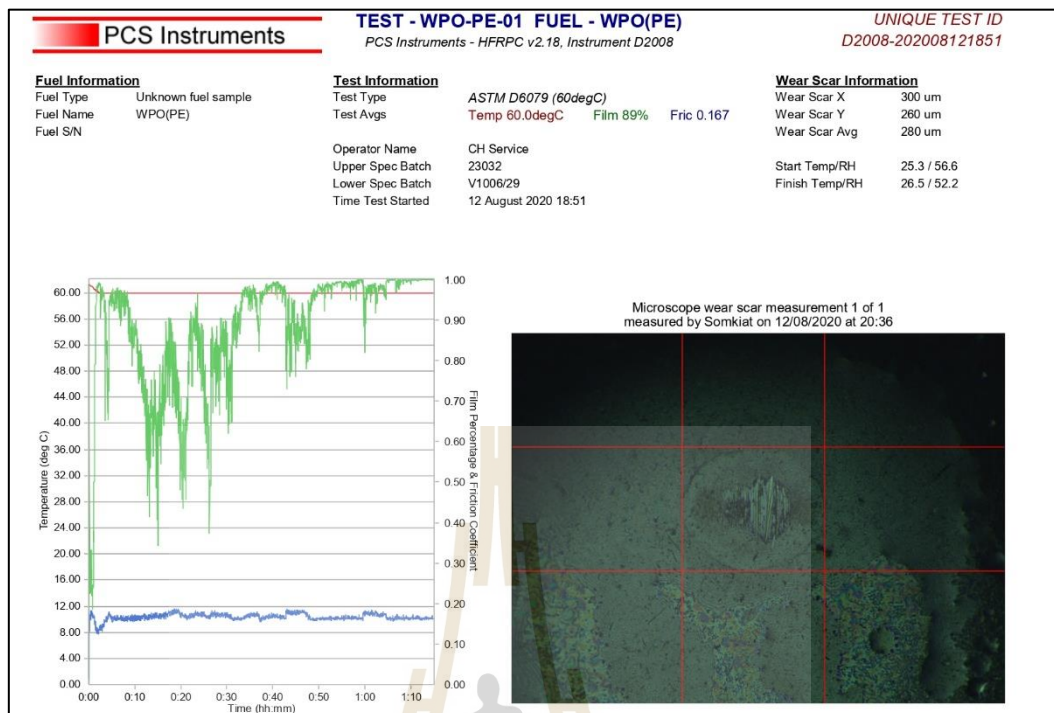




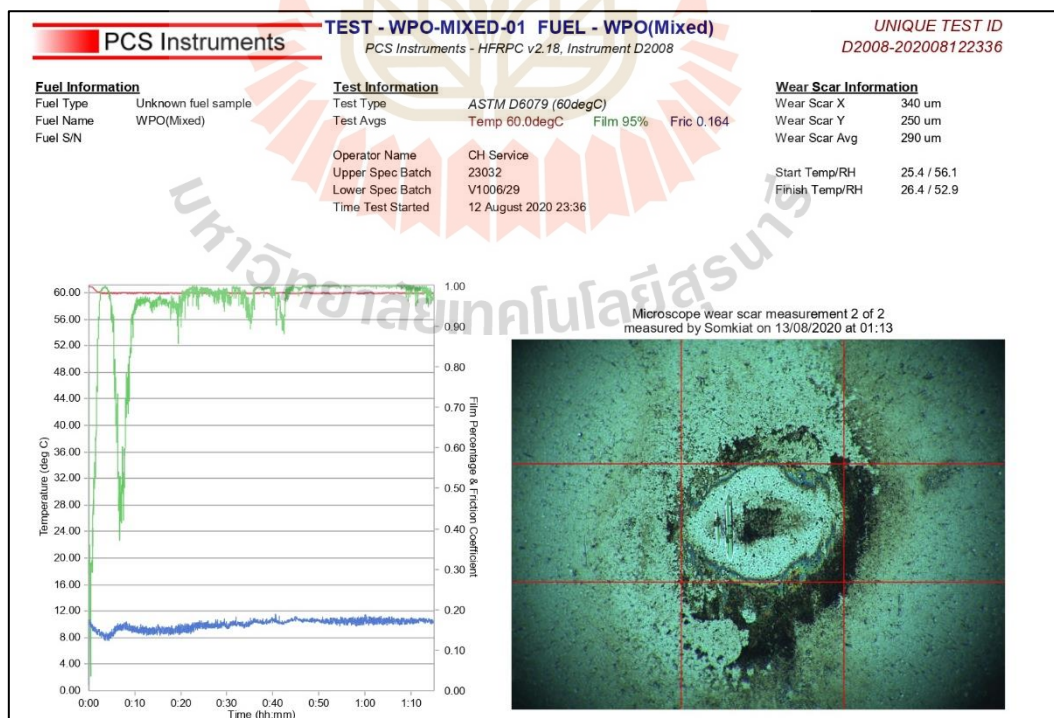
รูปที่ ข.1 ผลการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันดีเซล



รูปที่ ข.2 ผลการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติการหล่อลื่นของ WPBO



รูปที่ ข.3 ผลการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติการหล่อลื่นของ WPBCO



รูปที่ ข.4 ผลการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติการหล่อลื่นของ WMPO



ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

- Maithomklang, S., Wathakit, K., Sukjit, E., Sawatmongkhon, B., & Srisertpol, J. (2022). Utilizing Waste Plastic Bottle-Based Pyrolysis Oil as an Alternative Fuel. *ACS Omega*.
- Maithomklang, S., Sukjit, E., & Srisertpol, J. (2020). Experimental Investigation of Ethanol Blended with Waste Plastic Oil as An Alternative Biofuel in a Diesel Engine. *Suranaree Journal of Science & Technology*. 27(4). 1-7.
- Arjham, W., Liplap, P., Maithomklang, S., Thammakul, K., Chuepeng, S., & Sukjit, E. (2022). Distilled Waste Plastic Oil as Fuel for a Diesel Engine: Fuel Production, Combustion Characteristics, and Exhaust Gas Emissions. *ACS Omega*, 7(11), 9720-9729.
- 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.
- Pakdeekeaw, A., Maithomklang, S., Klinkaew, N., Junpirom, S. & Sukjit, E. (2021). The Utilization of Biodiesel from Palm Oil and Palm Kernel Oil by Using Reactor with Different Stirred Method in a Diesel Engine. *The 30<sup>th</sup> TICHE Conference (TICHE2021)*, May 6-7, 2021, Nakhon Ratchasima, Thailand, 89-103.
- Kaewbuddee, C., Sukjit, E., Srisertpol, J., Maithomklang, S., Wathakit, K., Klinkaew, N., . . . Arjham, W. (2020). Evaluation of Waste Plastic Oil-Biodiesel Blends as Alternative Fuels for Diesel Engines. *Energies*, 13(11), 2823.
- Wathakit, K., Ekaron, 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.

## ผลงานที่ได้รับการจดสิทธิบัตร

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับสำหรับการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์แบบระยะยาว, คำขอสิทธิบัตร เลขที่คำขอ 2001002302 ยื่นคำขอวันที่ 15 เมษายน 2563, (จิระพล ศรีเสริฐผล, สมเกียรติ หมายถมกลาง และสยาม ดิลกธรรมานุกูล)



## Utilizing Waste Plastic Bottle-Based Pyrolysis Oil as an Alternative Fuel

Somkiat Maithomklang, Khatha Wathakit, Ekarong Sukjit, Boonlue Sawatmongkhon, and Jiraphon Srisertpol\*

Cite This: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c07345>

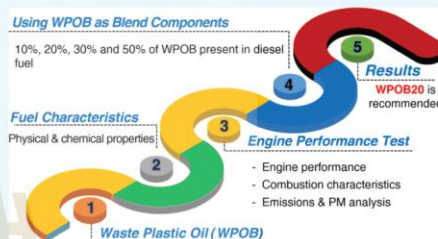
Read Online

ACCESS |

Metrics & More

Article Recommendations

**ABSTRACT:** In the present work, an experimental investigation is carried out on the use of waste plastic oil produced from waste poly(ethylene terephthalate) (PET) bottles (WPOB) as an alternative fuel for diesel engines. The physical and chemical properties of WPOB were analyzed, and it was found that it has fuel properties similar to those of petroleum fuels. The WPOB was tested in a diesel engine to evaluate the effect of WPOB on combustion and emissions characteristics. In addition, particulate matter (PM) emissions generated by the combustion of WPOB were analyzed. The combustion of WPOB was retarded with respect to diesel fuel, resulting in higher carbon-based emissions. The thermogravimetric analysis (TGA) results show that the temperature to reach the maximum rate of soot oxidation was lower with WPOB combustion. Because of the significant delay at the start of combustion and increase in emissions, the direct use of WPOB in the diesel engine is not recommended. It is suggested that WPOB can be used as a blend component to reduce the amount of diesel fuel used in diesel engines. Thus, further study on the effect of diesel fuel blended with WPOB on the combustion and emissions characteristics was performed. The results reveal that the maximum WPOB present in diesel fuel to avoid the increase in carbon-based emissions is 20% by volume to keep combustion and emissions characteristics similar to those of diesel fuel.



### 1. INTRODUCTION

Thailand has been facing the problem of environmental pollution, especially in the form of the huge amount of plastic waste, which increased manifold during the Covid-19 pandemic due to the increased use of plastic products resulting from online food delivery and take-away packaging during this period. This results in a significant impact on human health and causes environmental pollution due to the fact that plastic waste cannot be degraded by natural organisms and requires hundreds of years for decomposition. This situation results in a high quantity of plastic waste. According to the Pollution Control Department of Thailand Report, plastic waste of approximately two million tons was generated in 2020, which is about 12% of the total municipal solid waste (MSW) by weight.<sup>1–3</sup> Plastic materials like poly(ethylene terephthalate) (PET) are widely used for beverage packaging (especially drinking water and soft drinks) due to their excellent combination of properties, which make them suitable for containers. The extensive use of plastic PET bottles causes a high quantity of collected PET waste in landfills.<sup>4</sup> In addition, waste PET bottles comprise one of the municipal plastic waste components. Currently, the amount of plastic PET bottles used in Thailand amounts to more than 4000 million bottles per year. Therefore, a waste management

technique is necessary to address the plastic waste problem, which includes reducing, reusing, recycling, recovering, and disposal. In fact, only 0.5 million ton could be recovered for recycling, while the remaining plastic waste containers eventually ended up in landfills. This situation originates from an ineffective management system.<sup>5</sup> The technique of energy recovery from plastic waste is of great interest in converting waste to fuel for energy resources since it can help decrease the plastic waste problem and rehabilitate the environment in Thailand.

According to the literature review, many researchers have studied the use of plastic waste in fuel production as an alternative fuel in compression ignition (CI) engines. This is because plastic waste is a petrochemical product that contains mainly carbon and hydrogen atoms and has a high energy content.<sup>4,6,7</sup> Fuel produced from plastic waste can be extracted

Received: January 4, 2022

Accepted: May 19, 2022

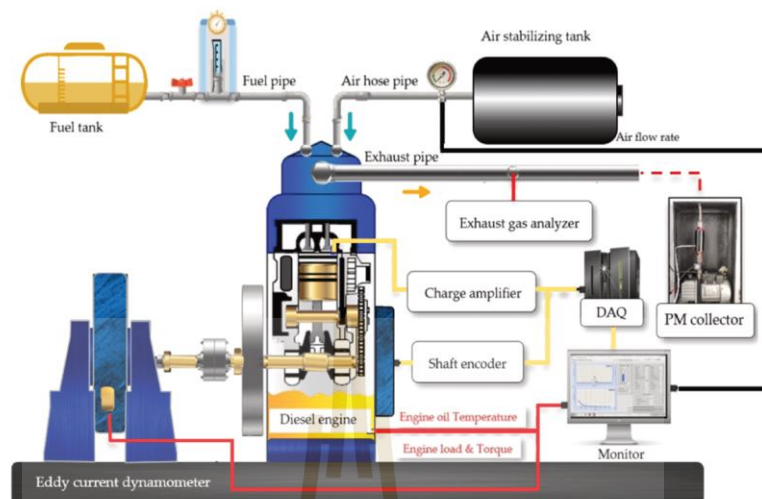


Figure 1. Schematic diagram of the experimental setup.

by the pyrolysis process, which is the most appropriate technology to convert polymer waste into fuel. Previous research had found that the fuel characteristic of waste plastic oil (WPO) was similar to that of diesel fuel,<sup>8</sup> notably, the physical and chemical property characteristics of WPO, depending on the feedstock type and pyrolysis process parameters (e.g., reaction temperature, pressure, residence time, heating rate, and type of catalyst). Sharuddin et al.<sup>9</sup> reported the production of fuel derived from the pyrolysis process for various plastic waste types including polystyrene (PS), polypropylene (PP), high-density polyethylene (HDPE), low-density polyethylene (LDPE), poly(vinyl chloride) (PVC), poly(ethylene terephthalate) (PET), and mixed plastics. It can be concluded that the plastic type influenced the characteristic and quality of the fuel produced due to its difference in composition.

On the other hand, the experimental result of many investigators demonstrated that the utilization of WPO in diesel engines exhibited an increasing trend in brake-specific fuel consumption (BSFC) and brake thermal efficiency (BTE) when compared with those of diesel fuel. However, the exhaust emissions resulting from the combustion of WPO, including nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ), unburnt hydrocarbon (HC), carbon monoxide (CO), and smoke emission, tend to increase with the use of WPO. In addition, WPO has significant influences on combustion characteristics of the engine, wherein the use of WPO leads to an increase in the ignition delay period along with an increased rate of heat release (RoHR) and in-cylinder pressure (ICP), which are important parameters in the combustion characteristics of CI engines.<sup>10,11</sup> However, some researchers found that the engine performance using WPO as a fuel in CI engines was higher than when using diesel fuel along with a reduction in  $\text{NO}_x$ , CO, and smoke emissions. This is due to the chemical compounds in WPO.<sup>12–16</sup> Furthermore, characteristics of particulate matter (PM) emissions caused by the combustion of alternative fuel in CI engines were also

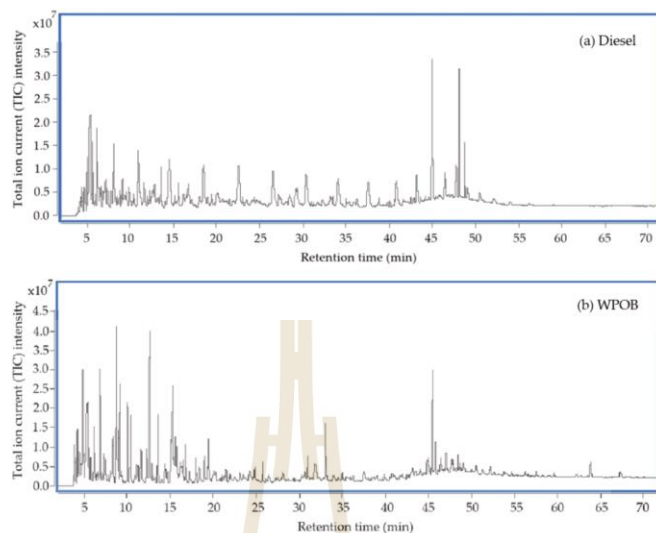
investigated for an explanation of PM compositions. Adam et al.<sup>17</sup> characterized volatile matters and soot as compositions of PM of waste source fuel by thermogravimetric analysis (TGA), which characterizes volatile matters and soot as compositions of PM by monitoring the mass loss with temperature increase. Therefore, the TGA technique is particularly interesting for the PM emission analysis of diesel engines operating with WPO.

The purpose of this research is to study the possibility of the use of waste plastic oil (WPOB) derived from the pyrolysis of waste poly(ethylene terephthalate) (PET) bottles as an alternative fuel for replacing fossil diesel fuel used in CI engines. Its effects on engine performance, combustion characteristics, and exhaust gas emissions were analyzed. Moreover, the soot oxidation temperature of PM generated by the combustion of WPO was also investigated.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Preparation of the Test Fuel and Its Characterization.

The waste plastic oil (WPOB) used in this study was produced from waste plastic bottles (PET bottles) using the pyrolysis process, which is a thermochemical degradation reaction at high temperatures to decompose plastics in the absence of oxygen or a low-oxygen environment to produce liquid and gaseous fuel. The experiment was carried out in a laboratory at Suranaree University of Technology, Thailand. The waste PET bottles were reduced in size by cutting into smaller pieces of around  $1 \text{ cm}^2$ . The reactor was loaded with about 1000 g of waste PET bottles with 25 g of  $\text{CaSiO}_2$  catalyst. The pyrolysis process was carried out using a small fixed-bed reactor. It was heated to reach a temperature of about  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ , using a heating rate of  $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  and a reaction time of 30 min.<sup>18</sup> The products of this process are gas vapor, and these products go through a condenser to produce liquid fuel (waste plastic oil). These conditions produce a yield of an average of 70–80% of crude oil and 20–30% of solid residue. The diesel



**Figure 2.** GC–MS chromatogram results for (a) diesel and (b) WPOB.

fuel used as a baseline fuel was a commercial-grade one available in public fuel stations (blends of 7% biodiesel, mainly using crude palm oil as the feedstock). The physical and chemical properties of test fuels were measured according to the American Society for Testing and Materials (ASTM) standard. The chemical compound and functional group of WPOB and the diesel fuel were characterized by gas chromatography–mass spectrometer (GC–MS) and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) techniques.

**2.1.1. Chemical Characteristic Analysis of the Test Fuel.** The chemical compound and functional group were obtained by GC–MS and FT-IR techniques. GC–MS is a chemical analysis instrument for separation and identification at the molecular level of chemical composition in a complex chemical mixture of the produced fuel. The test fuels used in this study were characterized by GC–MS using an Agilent Technologies 7890A coupled to an Agilent Technologies 7693 ALS mass selective detector. The techniques of GC–MS used for the analysis have been detailed in ref 19. FT-IR is a technique that is used to recognize the various characteristic functional groups present in the produced fuel. Upon interaction of infrared light with the produced fuel, chemical bonds can absorb infrared radiation in specific wavelength ranges regardless of the structure of the rest of the molecules. FT-IR analysis of the test fuels was performed using Bruker (TENSOR27-Hyperion) and was scanned in the range of  $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$  with a resolution of  $4\text{ cm}^{-1}$ . Moreover, elemental analysis of test fuels was analyzed by a CHNS elemental analyzer (LECO CHN628/628S) to investigate the carbon, hydrogen, nitrogen, and sulfur contents of the fuels.

**2.1.2. Physical and Chemical Properties of Test Fuels.** The investigation of the physical and chemical properties is very important for the possible application as an alternative fuel in internal combustion engines (ICEs). The results showed that the physical and chemical properties of the test fuels assessed

corresponded to the ASTM standard. The physical and chemical properties of test fuels used in this study, such as kinematic viscosity, specific gravity, density, flash point, fire point, gross calorific value, cetane index, and distillation temperature, were compared to those of diesel fuel. In addition, the lubricity of test fuels was evaluated using a high-frequency reciprocating rig (HFRR). The test conditions were based on the ASTM D6079 standard.<sup>20</sup>

**2.2. Experimental Setup and Procedure for the Engine Test.** The experimental investigation was performed to evaluate and compare the result of the engine performance, combustion characteristics, and emissions of WPOB with diesel fuel. A single-cylinder, four-stroke, and water-cooled DI diesel engine with a rate power of 3.5 kW at 1500 rpm was used.<sup>19</sup> The engine load was accomplished using a water-cooled eddy current dynamometer. The experimental setup is shown in Figure 1.

The engine was operated at a constant speed of 1500 rpm and at three different engine operating loads of 25, 50, and 75% of the maximum engine torque conditions for all test fuels. The fuel consumption was measured on a volumetric basis with the help of a burette and using a digital stopwatch (resolution of 0.01 s). Meanwhile, the in-cylinder pressure was measured by a PCB piezotronics pressure sensor mounted on the cylinder head connected to a charge amplifier to a data acquisition board (DAQ). The Kubler crank angle sensor was used to detect the engine crank angle during the combustion process of the engine. EngineSoft software was used to analyze the combustion characteristics of the engine. The exhaust gas emissions comprising unburned hydrocarbons (HCs), carbon monoxide (CO), and nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ) were measured with a gas analyzer (Testo 350 flue gas analyzer), which measures HC emissions by the flame ionization detector (FID), CO emissions by the nondispersive infrared (NDIR) method,  $\text{NO}_x$  emissions by the chemiluminescence method, and smoke emissions in the

C

<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c07345>  
ACS Omega XXXX, XXX, XXX–XXX

exhaust gas with the photodiode (filter paper) method (Testo 308 smoke meter). The technical details of the exhaust gas analyzers are presented in ref 19.

For the test condition, the engine was first warmed up with the test fuel with no engine load until the engine oil temperature reached 70 °C, indicating that the engine was ready for collecting the data. Also, the values of all test parameters were replicated three times, and the values were taken on average to ensure the reproducibility of experimental data. The experimental data was provided using the confidence interval, which was considered statistically significant with a 95% confidence level to consider the trends of the results.

**2.3. Experimental Setup and Procedure for Particulate Matter (PM) Analysis.** Particulate matter (PM) characteristics produced during the combustion process of test fuels were investigated under the same conditions. PM was collected using a PM collector, as equipped with an exhaust pipe of the diesel engine, with a constant exhaust gas flow rate of 15 L/min. The time for loading PM on the filter paper was 30 min, and the engine was operated at a constant speed of 1500 rpm and 50% engine load. The Whatman glass microfiber filter paper-grade GF/C (47 mm diameter, with 1.2 micron pore size) was used to load PM caused by the combustion of test fuels. An analytical balance (Sartorius BP221S) was used to evaluate the weight of the PM emissions loaded on the filter paper by weighing the filter paper before and after the PM collection. Thermogravimetry (TGA) analysis (Mettler Toledo, TGA/DSC1) was applied to characterize soot as the composition of PM. All samples of the PM-loaded filter were cut into small pieces of about 5 mm<sup>2</sup>, and the weight of PM collected on the loaded filter used for TGA was in the range of 2.0–5.0 mg, which was placed into the sample basket of the thermogravimetric analyzer for heating in the TGA according to the following program. The first step in the heating program is the initial atmosphere of oxygen with a constant flow rate of 60.0 mL/min. In the second step, the PM-loaded filter was heated from 35 to 110 °C at a heating rate of 5.00 °C/min under an oxygen atmosphere. Then, the temperature was kept at 110 °C for 5 min. The PM-loaded filter was heated up again from 110 to 700 °C at a heating rate of 5.00 °C/min under an oxygen atmosphere. Finally, the temperature was kept at 700 °C for 5.00 min.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

**3.1. Analysis of Gas Chromatography–Mass Spectrometry.** The quantitative analysis of test fuels by GC–MS based on the percentage of peak results, which was calculated from the total ion current (TIC) area, is presented in Figure 2. The identified compounds present in diesel fuel are shown in Table 1. The GC–MS analysis was performed for each batch under identical pyrolysis operating conditions to ensure its reproducibility for chemical composition in waste plastic oil produced from waste PET bottles, and the chemical compositions are shown in Table 2. The chemical composition of fuels is very complicated because they contain different types of compounds. Nevertheless, the results shown in Table 2 indicate that the average molecular weight of WPOB was 186.52 g/mol, which was lower than that of diesel fuel (229.99 g/mol), and its chemical compounds distributed in the hydrocarbon compounds range of C<sub>6</sub>–C<sub>26</sub> with a H/C molar ratio of 1.758, which is close to the range of petroleum fuel. Moreover, the main hydrocarbon compounds present in WPOB were in a group of C<sub>6</sub>–C<sub>12</sub>, as presented in Table 3, and commonly contain major chemical compounds of benzene, ethylbenzene, heptane,

**Table 1. Identified Compounds Present in Diesel Fuel**

compound name	chemical information		
	area (%)	formula	MW
octane	0.78	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.14
cyclohexane, 1,4-dimethyl-	0.82	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	112.12
nonane	1.67	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	128.15
nonane, 4-methyl-	1.61	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142.17
decane	3.62	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142.17
undecane	4.18	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	156.18
<i>p</i> -xylene	0.94	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.07
<i>trans</i> -2-dodecen-1-ol	1.09	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O	184.18
dodecane	5.99	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	170.20
benzene, 1-ethyl-3-methyl-	0.92	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.09
benzene, 1,2,3-trimethyl-	1.62	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.09
tridecane	6.39	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	184.21
benzene, 1,2,4-trimethyl-	1.40	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.09
tetradecane	6.52	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	198.23
1-tetradecene	1.57	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>	196.21
pentadecane	5.66	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	212.25
hexadecane	5.95	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	226.26
heptadecane	5.69	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	240.28
octadecane	4.30	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	254.29
nonadecane	4.01	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	268.31
eicosane	3.90	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	282.32
heneicosane	3.19	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	296.34
hexadecanoic acid, methyl ester	10.11	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	270.25
tricosane	2.36	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>	324.37
methyl stearate	2.06	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	298.28
11-octadecenoic acid, methyl ester	7.59	C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	296.27
linoleic acid, methyl ester	2.45	C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	294.25
pentacosane	1.19	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub>	352.40
hexacosane	1.13	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>	366.42
heptacosane	0.62	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub>	380.43
octacosane	0.34	C <sub>28</sub> H <sub>58</sub>	394.45
nonacosane	0.33	C <sub>29</sub> H <sub>60</sub>	408.46

toluene, and xylene, which represent light hydrocarbons similar to gasoline fuel,<sup>21</sup> while diesel fuel was found to possess a high hydrocarbon content of approximately 46.18% in the hydrocarbon compound range of C<sub>13</sub>–C<sub>18</sub>.

The FT-IR spectra of diesel fuel and WPOB are shown in Figure 3. The FT-IR spectra results showed that similar main peaks of FT-IR spectra were seen for WPOB compared to that of the diesel fuel, which indicated similar functional groups for both fuels. The main peaks were observed at the wavelengths of 2954, 2922, 2853, 1746, 1605, 1460, and 722 cm<sup>-1</sup> for diesel fuel. The presence of a large intense bond was observed for C–H stretching at 2954, 2922, and 2853 cm<sup>-1</sup>; C=O stretching at 1746 cm<sup>-1</sup>; C–H bending at 1605 and 1460 cm<sup>-1</sup>; and C=C bending at 722 cm<sup>-1</sup>. The FT-IR spectra of WPOB show the C–H stretching at 2956, 2923, and 2855 cm<sup>-1</sup>; C=O stretching at 1720 cm<sup>-1</sup>; C–H bending at 1456 and 1377 cm<sup>-1</sup>; C=C bending at 887 cm<sup>-1</sup>; and C–Br stretching at 697 cm<sup>-1</sup>. The results of both fuels indicated that the diesel fuel shows the presence of mostly alkene and alkane compounds, while the presence of aromatics with some alkenes and alkanes was observed for WPOB, which further confirmed the GC–MS results.<sup>22</sup>

Carbon (C) and hydrocarbon (H) contents are the parameters for the quality of fuel. The results obtained after the elemental analysis results of WPOB and diesel fuel are shown in Table 4. It shows that C and H contents of diesel fuel are

D

https://doi.org/10.1021/acs.omega.1c07345  
ACS Omega XXXX, XXX, XXX–XXX

Table 2. Identified Compounds Present in Waste Plastic Oil Produced from PET Bottles

compound name	area (%)			chemical information	
	batch 1	batch 2	batch 3	formula	MW
cyclohexane	0.87	0.00	0.00	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.09
heptane	0.84	0.00	0.00	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.12
heptane, 4-methyl-	1.63	1.25	1.25	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.14
heptane, 2,4-dimethyl-	1.07	5.92	5.83	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	128.15
2,3-dimethyl-3-heptene	6.57	0.00	0.00	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	126.14
nonane, 4-methyl-	0.60	0.00	0.00	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142.17
6,6-dimethylhepta-2,4-diene	0.46	0.00	0.00	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>	124.12
cyclohexene, 3,3,5-trimethyl-	0.53	0.00	0.00	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>	124.12
octane, 3,5-dimethyl-	2.10	0.00	0.00	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142.17
toluene	5.10	3.50	3.53	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92.06
acetic acid, butyl ester	0.82	0.00	0.00	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	116.08
undecane	0.58	0.00	0.00	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	156.18
1-decene, 2,4-dimethyl-	2.04	0.00	0.00	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>	168.18
ethylbenzene	8.59	11.40	11.96	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.07
<i>o</i> -xylene	2.25	0.00	0.00	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.07
<i>p</i> -xylene	3.75	0.00	0.00	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.07
benzene, (1-methylethyl)-	3.16	3.19	3.22	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.09
<i>m</i> -xylene	2.43	2.16	2.12	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.07
benzene, propyl-	0.85	0.00	0.00	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.09
1-methoxy-2-propyl acetate	0.63	0.00	0.00	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub>	132.07
benzene, 1-ethyl-4-methyl-	1.30	2.32	2.27	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.09
benzene, 1,2,4-trimethyl-	1.35	0.00	0.00	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.09
styrene	7.38	7.83	8.01	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	104.06
benzene, 1-ethyl-2-methyl-	0.64	0.00	0.00	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.09
benzene, 1,2,3-trimethyl-	3.01	3.28	3.28	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.09
benzene, 1-methyl-3-propyl-	0.96	2.25	2.23	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	134.10
$\alpha$ -methyl styrene	4.94	6.69	6.49	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub>	118.07
benzene, 1,2,4-trimethyl-	2.20	0.00	0.00	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.09
benzene, 2-ethyl-1,4-dimethyl-	0.85	2.17	2.11	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	134.10
benzene, 1-ethyl-3,5-dimethyl-	1.08	0.00	0.00	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	134.10
benzene, 1-ethyl-2,4-dimethyl-	1.62	2.38	2.31	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	134.10
ethanol, 2-butoxy-	0.99	0.00	0.00	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	118.09
benzene, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	0.76	0.00	0.00	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	134.10
benzene, 1,2,4,5-tetramethyl-	1.08	0.00	0.00	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	134.10
benzene, 1,2,3,4-tetramethyl-	2.23	3.51	3.48	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	134.10
benzene, (3-methyl-3-butenyl)-	0.52	0.00	0.00	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub>	146.10
benzene, 4-ethenyl-1,2-dimethyl-	0.35	0.00	0.00	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub>	132.09
benzene, 1,2,3,5-tetramethyl-	0.59	0.00	0.00	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	134.10
benzene, heptyl-	0.69	0.00	0.00	C <sub>13</sub> H <sub>20</sub>	176.15
hexadecane	0.00	1.34	1.41	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	226.27
benzotrile	0.80	0.00	0.00	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> N	103.04
naphthalene	1.02	2.19	2.11	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	128.06
1-decanol, 2-hexyl-	2.07	0.00	0.00	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O	242.26
heptadecane	0.00	1.37	1.36	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	240.28
octadecane	0.00	1.76	1.71	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	254.30
ethanol, 1-(2-butoxyethoxy)-	2.42	2.63	2.60	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>3</sub>	162.12
ethanol, 2-(2-butoxyethoxy)-, acetate	0.24	0.00	0.00	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>4</sub>	204.13
naphthalene, 2-methyl-	0.34	0.00	0.00	C <sub>11</sub> H <sub>10</sub>	142.07
nonadecane	1.05	1.28	1.26	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	268.31
icosane	0.00	2.52	2.52	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	282.33
heneicosane	0.00	2.59	2.64	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	296.34
phenol, 2-(1-methylethyl)-	0.29	0.00	0.00	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O	136.08
docosane	1.69	2.57	2.56	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>	310.36
benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl)bis-	0.00	6.56	6.57	C <sub>13</sub> H <sub>16</sub>	196.13
1,3-diphenylbutane	0.46	0.00	0.00	C <sub>18</sub> H <sub>18</sub>	210.14
1,3-diphenylpropane	3.14	0.00	0.00	C <sub>15</sub> H <sub>16</sub>	196.12
<i>N</i> -methyl phthalimide	0.66	0.00	0.00	C <sub>9</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	161.04
tricosane	0.95	1.84	1.84	C <sub>23</sub> H <sub>48</sub>	324.37
1,4-diphenylbutane	0.53	0.00	0.00	C <sub>16</sub> H <sub>18</sub>	210.14

Table 2. continued

compound name	area (%)			chemical information	
	batch 1	batch 2	batch 3	formula	MW
tetracosane	1.02	2.70	2.67	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>	338.39
18-norabieta-8,11,13-triene	0.54	0.00	0.00	C <sub>19</sub> H <sub>28</sub>	256.21
$\alpha$ -N-normethadol	0.49	0.00	0.00	C <sub>20</sub> H <sub>32</sub> NO	297.20
pentacosane	0.63	2.07	2.03	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub>	352.41
hexacosane	0.78	1.83	1.89	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>	366.42
heptacosane	0.00	1.04	1.04	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub>	380.44
naphthalene, 1-phenyl-	0.38	0.00	0.00	C <sub>16</sub> H <sub>12</sub>	204.09
octacosane	0.00	1.48	1.44	C <sub>28</sub> H <sub>58</sub>	394.45
nonacosane	0.00	0.59	0.57	C <sub>29</sub> H <sub>60</sub>	408.47
anthracene, 2-methyl-	0.41	0.00	0.00	C <sub>15</sub> H <sub>12</sub>	192.09
naphthalene, 2-phenyl-	0.29	0.94	0.91	C <sub>16</sub> H <sub>12</sub>	204.09
triacontane	0.00	0.69	0.68	C <sub>30</sub> H <sub>62</sub>	422.49
phenanthrene, 3,6-dimethyl-	0.26	0.80	0.79	C <sub>15</sub> H <sub>14</sub>	206.10
9-phenyl-5H-benzocycloheptene	0.18	0.00	0.00	C <sub>17</sub> H <sub>14</sub>	218.10
retene	1.25	3.36	3.32	C <sub>18</sub> H <sub>18</sub>	234.14
1-acetyl-20 $\alpha$ -hydroxy-16-methylene-	0.69	0.00	0.00	C <sub>21</sub> H <sub>28</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	338.19

Table 3. Range of Hydrocarbon and Carbon Number Distribution of WPOB and Diesel Fuel

carbon number distribution	percentage of area	
	diesel	WPOB
C <sub>6</sub> –C <sub>12</sub> (gasoline/light fraction)	24.65	69.33 $\pm$ 11.40
C <sub>13</sub> –C <sub>18</sub> (diesel/middle fraction)	46.18	13.95 $\pm$ 3.72
C <sub>19</sub> –C <sub>23</sub> (fuel oil/middle fraction)	25.56	9.01 $\pm$ 3.11
>C <sub>24</sub> (residual fuel/heavy fraction)	3.61	7.71 $\pm$ 4.58

Table 4. Elemental Analyses of Diesel Fuel and WPOB

elements	composition (wt %)	
	diesel	WPOB
carbon (C)	83.230	80.740
hydrogen (H)	11.020	11.912
nitrogen (N)	0.018	
sulfur (S)	0.000	0.769

83.230 and 11.020 wt %, respectively, while C and H contents of WPOB are 80.740 and 11.912 wt %, respectively. This carbon content was also lower with respect to diesel fuel, which indicates a low energy content when compared to diesel fuel. Moreover, the sulfur (S) content is high in WPOB, making it unsuitable for use as a fuel in compression ignition engines, resulting in increased SO<sub>x</sub> emissions.<sup>2,3</sup>

**3.2. Analysis of Fuel Properties.** The results of physical and chemical properties are shown in Table 5. It can be indicated that the kinematic viscosity of WPOB was comparably lower than that of diesel fuel, and these values were lower than the minimum value for the diesel fuel standard due to the lower molecular weight of WPOB, resulting in a lower viscosity.<sup>24</sup> The specific gravity and density for WPOB are 0.825 and 824 kg/m<sup>3</sup>, respectively. These values were also lower with respect to those of diesel fuel. These properties are associated with the efficiency

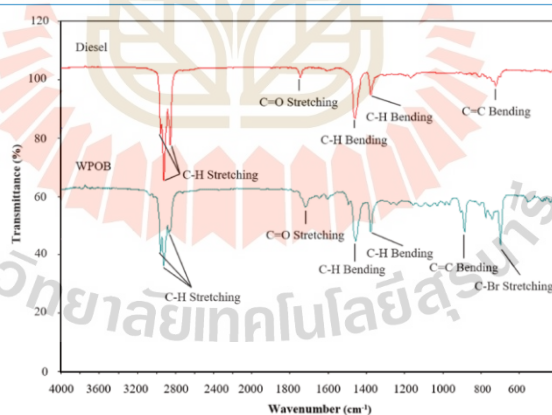


Figure 3. FT-IR spectra analyses of diesel fuel and WPOB.

Table 5. Physical and Chemical Properties of Test Fuels

fuel properties	test method	diesel	WPOB
kinematic viscosity@40 °C (cSt)	ASTM D445	3.37	1.70
specific gravity at 15 °C	ASTM D1298	0.830	0.825
density@15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM D1298	829	824
flash point (°C)	ASTM D93	78	28
fire point (°C)	ASTM D93	86	34
gross calorific value (MJ/kg)	ASTM D240	43.48	39.45
cetane index	ASTM D4737	61.09	28.77
lubricity (μm)	ASTM D6079	220	330
distillation temperature (°C)	ASTM D86		
IBP (°C)		188	50
10% recovered (°C)		228	140
50% recovered (°C)		290	196
90% recovered (°C)		342	294
FBP (°C)		348	314

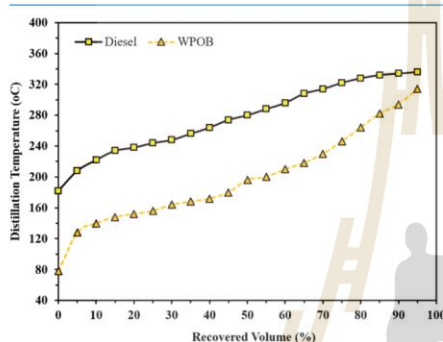


Figure 4. Distillation characteristic of WPOB compared to those of diesel fuel.

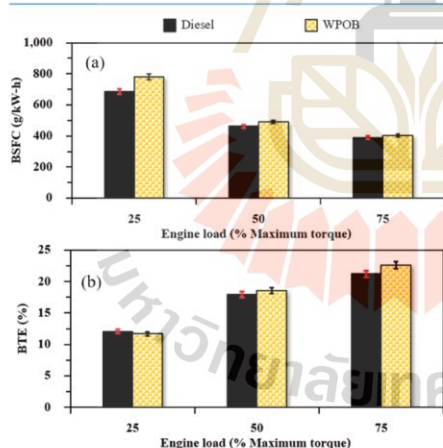


Figure 5. Comparison of the engine performance of WPOB as compared to diesel fuel: (a) BSFC and (b) BTE.

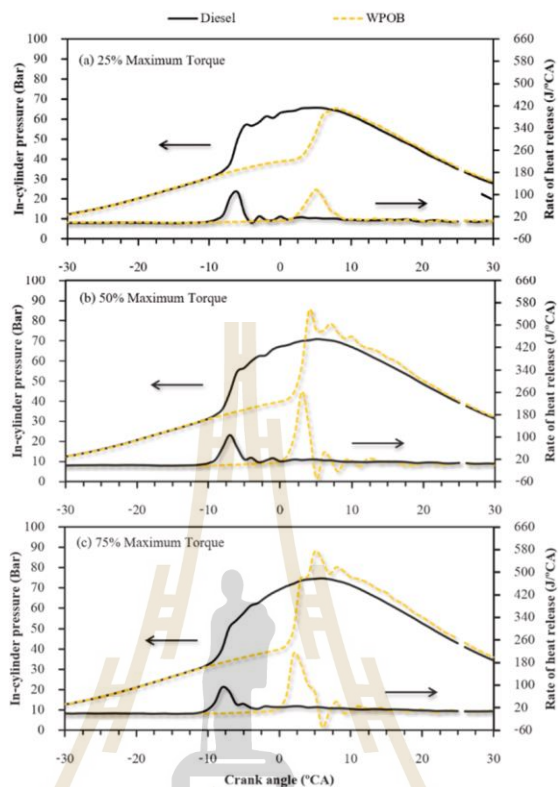
of fuel atomization, which directly relates to the quality of air–fuel mixing. However, the very low viscosity of fuel can result in high consumption of fuel.<sup>25,26</sup> A low flash point and fire point were found with WPOB because of the high content of C<sub>4</sub>–C<sub>11</sub> (light hydrocarbons) and the low boiling point, which had a worse effect on safe storage and handling.<sup>10</sup> On the other hand, the gross calorific value and the cetane index of WPOB were less than those of diesel fuel. The cetane index of test fuels was calculated by the empirical equation as a function of distillation temperature values of 10, 50, and 90% recovered and of the density or API gravity at 15 °C.<sup>27</sup> The difference in properties of test fuels is expected to result in different combustion and emission characteristics, leading to a difference in engine performance.

Meanwhile, the lubricity of WPOB was evaluated using HFRR. It was observed that WPOB possesses poor lubricating properties with respect to diesel fuel, as can be found from the wear scar diameter values of test fuels. This may be due to the lower viscosity of WPOB.<sup>8,28</sup> The distillation characteristics of test fuels were tested according to the ASTM D86 standard method. The experimental results of the distillation temperature of both fuels show that the lower front-end volatility (10% recovered), mid-boiling point (50% recovered), and back-end volatility (90% recovered) were found with WPOB than with those of diesel fuel. Moreover, WPOB showed a 57% recovered percentage fall within the boiling point temperature range of gasoline (40–200 °C) and a 43% fall within the boiling point temperature range of diesel fuel (200–325 °C) (see Table 5 and Figure 4). This characteristic could be related to the chemical composition of the test fuels and can impact the combustion characteristics of the engine.<sup>29</sup> However, the final boiling point of WPOB was within the acceptable maximum limit of the ASTM standard.

Some studies have recently been published on improving the physical and chemical properties of waste plastic oil by various methods such as refining or blending with diesel fuel to make the waste plastic oil suitable to be used as an alternative fuel in diesel engines. The distillation process is one of the methods to improve the fuel characteristics of WPOB using a refinery unit. However, the disadvantages of the distillation process are its high energy usage and increasing cost of fuel production. Therefore, blending with diesel fuel is interesting to improve the fuel characteristics because of its simple method and easy usage along with reducing exhaust gas emissions from IC engines.<sup>30–32</sup>

**3.3. Analysis of Engine Performance.** The experimental results were analyzed to determine the engine performance of the diesel engine by running on WPOB compared with diesel fuel operation. Generally, important engine parameters such as specific fuel consumption and thermal efficiency were evaluated based on the engine characteristics in IC engines.

In this study, the brake-specific fuel consumption (BSFC) can be calculated as the mass flow rate of fuel per unit of engine brake power at the engine speed of 1500 rpm. The BSFC of the engine is an important parameter to evaluate the engine performance. The variation of BSFC against engine operating loads for WPOB and diesel fuel is shown in Figure 5a. The experimental results showed that the BSFC of WPOB and diesel fuel decreased with the increase in engine operating load. The BSFC of the test engine in the case of using WPOB was higher than that in the case of using diesel fuel for all engine operating loads, which perhaps resulted from the lower viscosity and gross calorific value of WPOB. More fuel may be required to produce the same engine power output.<sup>33,34</sup>



**Figure 6.** Comparison of combustion characteristics of WPOB as compared to those of diesel fuel at (a) 25% maximum torque, (b) 50% maximum torque, and (c) 75% maximum torque.

Additionally, the brake thermal efficiency (BTE) indicates the ratio of the brake power output established by the fuel energy supplied to the engine. The variation of BTE against engine operating loads for diesel fuel and WPOB is shown in Figure 5b. The BTE increased with the increase in applied engine load significantly with both fuels. This may be attributed to the reduction in heat loss in the combustion chamber as the engine load increases, and also the quantity of injected fuel affects the rise of the cylinder temperature.<sup>13,35</sup> Comparing the BTEs of the engine, the results show that the BTE of WPOB was lower than that of diesel fuel for low engine load operation. Owing to their higher aromatic content when compared to diesel fuel, more energy may be required for the breaking of aromatic bonds. Another reason that may contribute to the lower BTE of WPOB when compared to diesel fuel is the longer ignition delay period of combustion with WPOB.<sup>36,37</sup> However, the BTE of WPOB was found to be higher than that of diesel fuel during middle and high engine load operations. This may be due to the better mixing preparation of air and fuel, which resulted in better combustion.<sup>38</sup>

**3.4. Analysis of Combustion Characteristics.** In this section, analysis of combustion characteristics of WPOB and diesel fuel was carried out on the diesel engine. The combustion characteristics from fuel combusted within the combustion chamber of the engine are directly affected by fuel properties and engine design parameters. Combustion characteristics of test fuels in this study were investigated based on the cylinder pressure to analyze the combustion process. The cylinder pressure data of 100 cycles were measured and analyzed. The important parameters in the combustion phenomenon of the CI engine are the in-cylinder pressure (ICP) and the rate of heat release (RoHR). RoHR can be derived from energy conservation according to the first law of thermodynamics where products of combustion were assumed to be ideal gases.<sup>39</sup> The combustion characteristics obtained under this study are summarized as follows.

The experimental results in Figure 6 show the variation of ICP and RoHR against the crank angle for WPOB as compared to that for diesel fuel at different engine operating loads. It can be observed that the ICP and RoHR increase as the engine



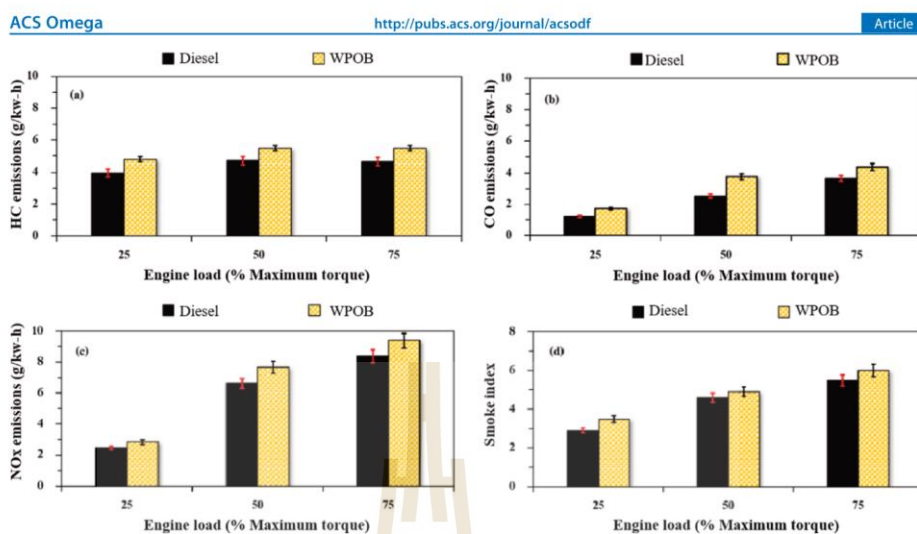


Figure 7. Comparison of exhaust gas emission characteristics of WPOB as compared to those of diesel fuel: (a) HC emissions, (b) CO emissions, (c) NO<sub>x</sub> emissions, and (d) smoke index.

Table 6. Difference in PM-Loaded Filter Weight for WPOB and Diesel Fuel

test fuels	weight of filter paper (g)		
	before	after	percentage
diesel	0.0921	0.1211	+31.49
WPOB	0.0905	0.1732	+91.38

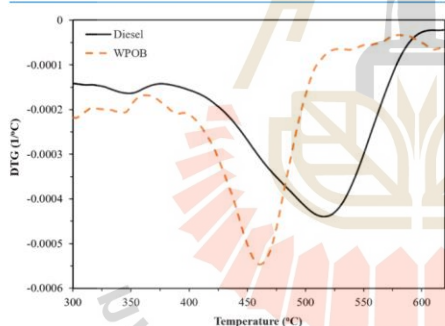


Figure 8. TGA analysis for PM emissions of WPOB and diesel fuel.

operating load increases for both fuels. The reason for increasing ICP and RoHR is due to high amounts of fuel supplied to the engine with an increase in engine operating load. In addition, the pressure in the combustion chamber of the engine depends on the burning rate of the fuel during the premixed burning phase.<sup>40</sup> Obviously, a longer ignition delay at the start of combustion was obtained with WPOB, resulting in the higher peak of ICP and RoHR compared to that of diesel fuel.<sup>41</sup> Such combustion characteristics of WPOB are not favorable to the ideal

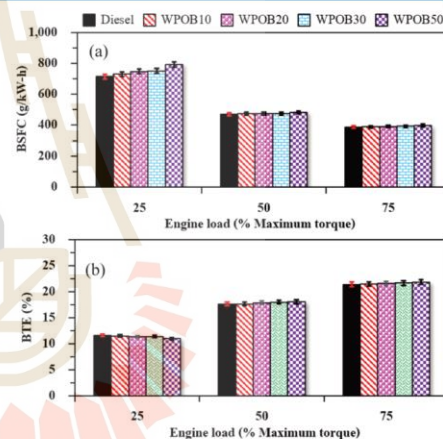
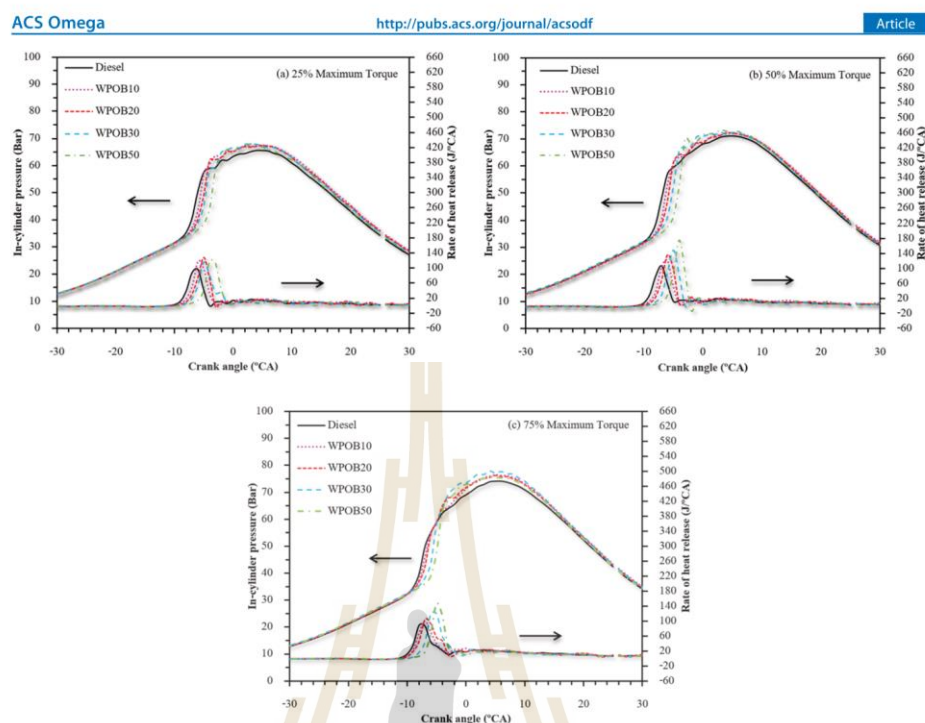


Figure 9. Comparison of engine performances for WPOB blends: (a) BSFC and (b) BTE.

combustion process and can have adverse effects on exhaust gas emissions. The main reason that can justify the long ignition delay at the start of combustion was the lower cetane index of WPOB.<sup>42</sup>

**3.5. Analysis of Emission Characteristics.** The total hydrocarbon (HC) emissions of the CI engine are a result of the incomplete combustion caused by the unburned fuel inside the combustion chamber due to overmixing of the fuel and overpenetration of the fuel spray during ignition delay.<sup>43</sup> The variations of the HC emissions under various engine operating



**Figure 10.** Comparison of combustion characteristics of WPOB blends as compared to those of diesel fuel at (a) 25% maximum torque, (b) 50% maximum torque, and (c) 75% maximum torque.

loads for WPOB and diesel fuel are illustrated in Figure 7a. It can be seen that as the engine operating load increased, HC emissions tended to increase for both fuels. Comparing WPOB and diesel fuel, the HC emissions of WPOB were higher than those of diesel fuel for all engine operating loads. This is mainly due to the longer ignition delay of WPOB, which results in less available time for complete combustion leading to higher HC formation.<sup>44</sup> However, the oxygen content of the methyl ester present in diesel fuel can participate in better complete combustion.<sup>45</sup>

Carbon monoxide (CO) emissions in the CI engine are formed mainly due to the incomplete combustion of the fuel during the combustion process, which is exacerbated by the deficiency of oxygen, the poor mixture preparation, and the residence time. Usually, the CO emissions from diesel engine combustion are low because the diesel engine is normally operated with a lean air–fuel mixture.<sup>46,47</sup> Figure 7b represents the variation of the CO emissions under various engine load conditions for diesel fuel and WPOB. It is observed that the CO emissions increase as the engine operating load increases for both fuels. On comparing WPOB and diesel fuel, the CO emissions of WPOB were found to be higher than those of diesel fuel for all engine load operations. This may be due to the lower gross calorific value of WPOB tending to produce less energy during the combustion process, resulting in the higher

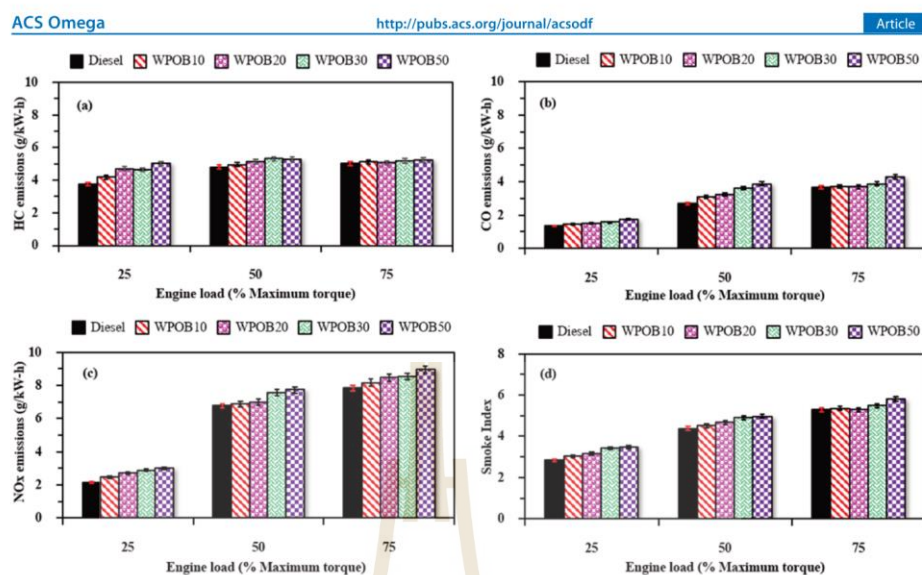
possibility of incomplete combustion.<sup>48</sup> Also, the longer ignition time can justify such higher CO emissions when WPOB was used to operate the engine.

The nitrogen oxide ( $\text{NO}_x$ ) emission in exhaust gas emissions of CI engines is the combination of two components, namely, nitric oxide (NO) and nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ).<sup>49</sup> The variation of  $\text{NO}_x$  emissions under various engine operating loads for diesel fuel and WPOB is illustrated in Figure 7c. It was observed that  $\text{NO}_x$  emissions increase as the engine operating load increases for both fuels. A higher in-cylinder pressure and temperature were found as the engine operating load increased. The  $\text{NO}_x$  formation in diesel engines is mainly dependent on the temperature of combustion inside the cylinder, where a higher in-cylinder temperature was more favorable to form  $\text{NO}_x$ .<sup>50,51</sup> The  $\text{NO}_x$  emissions of WPOB were higher than those of diesel fuel for all engine operating loads. The main reason for the increased  $\text{NO}_x$  emissions is the higher peak of RoHR during the premixed combustion caused by the longer ignition delay of WPOB, leading to a stronger combustion and a higher heat release rate.<sup>52</sup>

The variation of smoke emissions under various engine operating loads for diesel fuel and WPOB is illustrated in Figure 7d. It was observed that smoke emissions increased with the increase of engine operating load for both fuels. On comparing

J

<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c07345>  
ACS Omega XXXX, XXX, XXX–XXX



**Figure 11.** Comparison of exhaust gas emission characteristics for WPOB blends as compared to diesel fuel: (a) HC emissions, (b) CO emissions, (c) NO<sub>x</sub> emissions, and (d) smoke index.

WPOB and diesel fuel, the smoke emissions of WPOB were higher than those of diesel fuel for all engine load operations. This is mainly due to the less available time for the combustion process and also the high aromatic content, which contributes to PM formation, resulting in higher smoke emissions obtained with WPOB.<sup>5</sup>

**3.6. Analysis of PM Emissions.** The difference in the PM-loaded filter weight obtained with test fuels is shown in Table 6. It is clear that the combustion of WPOB produced a higher PM content compared to diesel fuel. This increase in PM emissions is in agreement with the increase in smoke emissions caused by the combustion of WPOB with respect to diesel fuel. In addition, the TGA results in Figure 8 present the percentage of weight loss and its first derivative (DTG) profiles related to the heating program of TGA. It was found that the temperature to reach the maximum rate of soot oxidation (second peak of DTG) was lower with WPOB combustion, which implied that the energy used to oxidize soot was lower and soot was easier to decompose. This is the benefit of using WPOB as an alternative fuel, as was found in the study.

**3.7. Possibility of Using WPOB as a Blend Component in Diesel Engines.** The significant delay at the start of combustion and the increase in NO<sub>x</sub>, HC, CO, and smoke emissions make the direct use of WPOB in diesel engines unsuitable without any engine modification. It is suggested that WPOB can be used as a blend component to reduce the amount of diesel fuel used in diesel engines. To accomplish the objective of the study related to the possibility of using WPOB in diesel engines, an experimental investigation was carried out with four blend ratios of WPOB and diesel fuel, namely, WPOB10, WPOB20, WPOB30, and WPOB50, where the numbers refer to 10, 20, 30, and 50% of the WPOB present in diesel fuel, respectively. Further study on the effect of diesel fuel blended

with WPOB on engine performance, combustion characteristics, and emissions was performed and has been discussed.

**3.7.1. Analysis of Engine Performance.** The comparison of the engine performance characteristics obtained with the four fuel blends versus diesel fuel for all engine operating loads is shown in Figure 9. From the experimental results obtained, it can be seen that the BSFC increases with an increase in concentration of WPOB in diesel fuel due to the lower heating value of fuel blends compared to that of diesel fuel,<sup>14</sup> whereas the BTE decreased slightly when increasing the concentration of WPOB in diesel fuel at a low engine load operation. However, the BTE tended to increase as the presence of WPOB increased at middle and high engine load operations. No significant change in BSFC and BTE was found when less than 50% WPO was blended with diesel fuel. The presence of 10% WPOB in the fuel blend shows very similar BSFC and BTE compared to diesel fuel.

**3.7.2. Analysis of Combustion Characteristics.** The experimental results in Figure 10 present the variation of ICP and RoHR with the crank angle degree for fuel blends. It is an important observation that increasing the concentration of WPOB tended to increase the ignition delay period when compared with diesel fuel for all engine operating loads. This is mainly due to the poor ignition of WPOB during the early stage of the combustion process, resulting from the lower cetane index of WPOB.<sup>35</sup> The higher percentage of WPOB in the fuel blend tended to increase the peak of the in-cylinder pressure and heat release. The longer ignition with increasing amounts of WPOB in the fuel blend can be used to justify the higher peak.<sup>12,38</sup> However, the combustion characteristics of WPOB10 were found to be similar to those of diesel fuel in terms of ICP and RoHR.

K

<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c07345>  
ACS Omega XXXX, XXX, XXX–XXX

**3.7.3. Analysis of Emission Characteristics.** The comparison of the exhaust gas emissions characteristics for fuel blends compared to diesel fuel for all engine operating loads is shown in Figure 11. It can be observed that the exhaust gas emissions of the engine comprising HC, CO, NO<sub>x</sub>, and smoke tended to increase on increasing the concentration of WPOB in the diesel fuel. This is mainly due to the longer ignition delay period of WPOB blends along with the less available time for the combustion process. Also, the higher aromatic content present in WPOB can be the reason for the higher smoke and PM emissions compared to diesel fuel.<sup>53</sup>

#### 4. CONCLUSIONS

In conclusion, an experimental investigation was carried out to evaluate the effect of pyrolytic plastic oil derived from waste PET bottle (WPOB) on engine performances, combustion characteristics, exhaust gas emissions, and soot oxidation temperature. The summary of this study can be discussed as follows.

- The chemical compositions of WPOB and diesel fuel were characterized by GC–MS. It was found that the main hydrocarbons present in WPOB were in a group of C<sub>6</sub>–C<sub>12</sub> with the major chemical compounds of benzene, ethylbenzene, heptane, toluene, and xylene, while diesel fuel possessed a high content of C<sub>13</sub>–C<sub>18</sub>. In addition, similar FT-IR spectra were seen for the diesel fuel and WPOB. However, WPOB shows the presence of mostly aromatic compounds. The fuel property characterization, including a lower kinematic viscosity, specific gravity, density, flash point, fire point, gross calorific value, cetane index, distillation temperature, and lubricity, of WPOB was compared to that of diesel fuel. The API gravity of WPOB was higher when compared to that of diesel fuel.
- The engine characteristics show that using WPOB in the diesel engine tends to increase the BSFC and BTE. Moreover, the combustion characteristics of WPOB were retarded during the start of combustion with respect to those in diesel fuel, which result in an increase in HC, CO, NO<sub>x</sub>, and smoke emissions. However, the TGA results show that the temperature to reach the maximum rate of soot oxidation was lower with WPOB combustion. This result shows that the direct use of WPOB in diesel engines is not recommended. Therefore, it is suggested that WPOB can be used as a blend component to reduce the amount of diesel fuel used in diesel engines.
- The results of this study further demonstrate that the maximum WPOB that should be present in the diesel fuel to avoid the long ignition delay during the start of combustion and the increase in HC, CO, and smoke emissions is 20% by volume to keep the engine characteristics and emissions similar to those in diesel fuel, especially when the engine was operated at middle and high loads.

#### AUTHOR INFORMATION

##### Corresponding Author

**Jiraphon Srisertpol** – School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand; [orcid.org/0000-0002-4341-3708](https://orcid.org/0000-0002-4341-3708); Email: [jiraphon@sut.ac.th](mailto:jiraphon@sut.ac.th)

#### Authors

**Somkiat Maithomklang** – School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

**Khatha Wathakit** – School of Agricultural and Food Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

**Ekarong Sukjit** – School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand; [orcid.org/0000-0003-4641-2580](https://orcid.org/0000-0003-4641-2580)

**Boonlue Sawatmongkhon** – College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800, Thailand; Research Centre for Combustion and Alternative Energy (CTAE), Science and Technology Research Institute, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800, Thailand; [orcid.org/0000-0001-8972-4387](https://orcid.org/0000-0001-8972-4387)

Complete contact information is available at:

<https://pubs.acs.org/10.1021/acsomega.1c07345>

#### Notes

The authors declare no competing financial interest.

#### ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the Research and Researcher for Industry (RRI) under the Thailand Research Fund (TRF) of Thailand, grant number PHD6110050. The authors are indebted to the Suranaree University of Technology (SUT) and Polawat Engine Co., Ltd., for their generous support and their valuable comments. The authors would like to thank Kittithat Hongchoo, Kunakorn Klaylang, and Natseth Namsawangrungrueng, Ratchasima Wittayalai School, SCIUS-Suranaree University of Technology, for their assistance in the experiment.

#### NOMENCLATURE

ASTM American Society for Testing and Materials  
 BSFC brake-specific fuel consumption  
 BTE brake thermal efficiency  
 CO carbon monoxide  
 DI direct injection  
 DTG derivative thermogravimetry  
 FT-IR Fourier transform infrared spectroscopy  
 GC–MS gas chromatography–mass spectrometry  
 HC hydrocarbon  
 HFRR high-frequency reciprocating rig  
 ICP in-cylinder pressure  
 ICE internal combustion engines  
 MW molecular weight  
 NO nitric oxide  
 NO<sub>2</sub> nitrogen dioxide  
 NO<sub>x</sub> nitrogen oxides  
 PET poly(ethylene terephthalate)  
 PM particulate matter  
 RoHR rate of heat release  
 TGA thermogravimetry analysis  
 WPOB waste plastic oil bottle  
 WPO waste plastic oil

L

<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c07345>  
 ACS Omega XXXX, XXX, XXX–XXX

## REFERENCES

- (1) Janairo, J. I. B. Unsustainable plastic consumption associated with online food delivery services in the new normal. In *Cleaner and Responsible Consumption*; Elsevier, 2021; Vol. 2, p00014.
- (2) Pollution Control Department. Thailand's Roadmap on Plastic Waste Management 2018–2030. [https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2021/10/pcdnew-2021-10-20\\_03-49-42\\_906382.pdf](https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2021/10/pcdnew-2021-10-20_03-49-42_906382.pdf) (accessed October 31, 2021).
- (3) Law, K. L.; Starr, N.; Siegler, T. R.; Jambeck, J. R.; Mallos, N. J.; Leonard, G. H. The United states' contribution of plastic waste to land and ocean. *Sci. Adv.* **2020**, *6*, No. eabd0288.
- (4) Al-Salem, S. M.; Antelava, A.; Constantinou, A.; Manos, G.; Dutta, A. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). *J. Environ. Manage.* **2017**, *197*, 177–198.
- (5) Kaimal, V. K.; Vijayabalan, P. A study on synthesis of energy fuel from waste plastic and assessment of its potential as an alternative fuel for diesel engines. *Waste Manage.* **2016**, *51*, 91–96.
- (6) Pal, S.; Chintala, V.; Kumar Sharma, A.; Ghodke, P.; Kumar, S.; Kumar, P. Effect of injection timing on performance and emission characteristics of single cylinder diesel engine running on blends of diesel and waste plastic fuels. *Mater. Today: Proc.* **2019**, *17*, 209–215.
- (7) Antelava, A.; Jablonska, N.; Constantinou, A.; Manos, G.; Salaudeen, S. A.; Dutta, A.; Al-Salem, S. M. Energy Potential of Plastic Waste Valorization: A Short Comparative Assessment of Pyrolysis versus Gasification. *Energy Fuels* **2021**, *35*, 3558–3571.
- (8) Awang, M. S. N.; Mohd Zulkifli, N. W.; Abbas, M. M.; Amzar Zulkifli, S.; Kalam, M. A.; Ahmad, M. H.; Mohd Yusoff, M. N. A.; Yusoff, M. N. A. M.; Mazlan, M.; Daud, W. M. A. W. Effect of Addition of Palm Oil Biodiesel in Waste Plastic Oil on Diesel Engine Performance, Emission, and Lubricity. *ACS Omega* **2021**, *6*, 21655–21675.
- (9) Sharuddin, S. D. A.; Abnisa, F.; Wan Daud, W. M. A.; Aroua, M. K. A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Convers. Manage.* **2016**, *115*, 308–326.
- (10) 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.
- (11) 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. Cleaner Prod.* **2020**, *246*, No. 119066.
- (12) 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.
- (13) 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*, No. 116539.
- (14) Damodharan, D.; Sathiyagnanam, A. P.; Rana, D.; Rajesh Kumar, B.; 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. Manage.* **2017**, *131*, 117–126.
- (15) Mani, M.; Nagarajan, G.; Sampath, S. An experimental investigation on a DI diesel engine using waste plastic oil with exhaust gas recirculation. *Fuel* **2010**, *89*, 1826–1832.
- (16) Ellappan, S.; Pappula, B. Utilization of unattended waste plastic oil as fuel in low heat rejection diesel engine. *Sustainable Environ. Res.* **2019**, *29*, No. 2.
- (17) Adam, A.; Ramlan, N. A.; Jaharudin, N. F.; Hamzah, H.; Othman, M. F.; Mrwan, A. A. G. Analysis of combustion characteristics, engine performance and exhaust emissions of diesel engine fueled with upgraded waste source fuel. *Int. J. Hydrogen Energy* **2017**, *42*, 17993–18004.
- (18) Das, P.; Tiwari, P. Thermal degradation study of waste poly(ethylene terephthalate) (PET) under inert and oxidative environments. *Thermochim. Acta* **2017**, *679*, No. 178340.
- (19) Wathakit, K.; Sukjit, E.; Kaewbuddee, C.; Maithomklang, S.; Klinkaew, N.; Liplap, P.; Arjarn, W.; Srisertpol, J. Characterization and Impact of Waste Plastic Oil in a Variable Compression Ratio Diesel Engine. *Energies* **2021**, *14*, No. 2230.
- (20) ASTM. ASTM D6079-18 *Standard Test Method for Evaluating Lubricity of Diesel Fuels by the High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR)*; ASTM International: West Conshohocken, PA, 2018. <https://www.astm.org/>.
- (21) Eze, W. U.; Madufor, I.; Onyeagoro, G.; Obasi, H. The effect of Kankara zeolite-Y-based catalyst on some physical properties of liquid fuel from mixed waste plastics (MWP) pyrolysis. *Polym. Bull.* **2020**, *77*, 1399–1415.
- (22) Quesada, L.; Calero, M.; Martín-Lara, M. Á.; Pérez, A.; Blázquez, G. Production of an Alternative Fuel by Pyrolysis of Plastic Wastes Mixtures. *Energy Fuels* **2020**, *34*, 1781–1790.
- (23) Saini, P.; Gupta, C.; Shankar, R. Characterization of corn oil biodiesel and its application in diesel engine. *Energy Sources, Part A* **2019**, *41*, 1–15.
- (24) Miandad, R.; Barakat, M. A.; Aburiazaiza, A. S.; Rehan, M.; Nizami, A. S. Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Saf. Environ. Prot.* **2016**, *102*, 822–838.
- (25) Kumar, S. L.; Radjarejseri, S.; Jawahar, R. R. Characterization of waste plastic oil as biodiesel in IC engines. *Mater. Today: Proc.* **2020**, *33*, 833–838.
- (26) Iáñez-Rodríguez, I.; Martín-Lara, M. A.; Blázquez, G.; Calero, M. Effect of different pre-treatments and addition of plastic on the properties of bio-oil obtained by pyrolysis of greenhouse crop residue. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* **2021**, *153*, No. 104977.
- (27) ASTM. ASTM D4737-09 *Standard Test Method for Calculated Cetane Index by Four Variable Equations*; ASTM International: West Conshohocken, PA, 2009. <https://www.astm.org/>.
- (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*, No. 2823.
- (29) Zheng, Z.; Dong, F.; Guo, Y.; Liu, X.; Yang, Y.; Liu, H. Effect of Fuels with Different Distillation Temperatures on Performance and Emissions of a Diesel Engine Run at Various Injection Pressures and Timings. *J. Energy Eng.* **2017**, *143*, No. 04016061.
- (30) Arjarn, W.; Liplap, P.; Maithomklang, S.; Thammakul, K.; Chuepeng, S.; Sukjit, E. Distilled Waste Plastic Oil as Fuel for a Diesel Engine: Fuel Production, Combustion Characteristics, and Exhaust Gas Emissions. *ACS Omega* **2022**, *7*, 9720–9729.
- (31) Palos, R.; Gutiérrez, A.; Vela, F. J.; Olazar, M.; Arandes, J. M.; Bilbao, J. Waste Refinery: The Valorization of Waste Plastics and End-of-Life Tires in Refinery Units. A Review. *Energy Fuels* **2021**, *35*, 3529–3557.
- (32) Rehan, M.; Miandad, R.; Barakat, M. A.; Ismail, I. M. I.; Almeelbi, T.; Gardy, J.; Hassanpour, A.; Khan, M. Z.; Demirbas, A.; Nizami, A. S. Effect of zeolite catalysts on pyrolysis liquid oil. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* **2017**, *119*, 162–175.
- (33) Sekar, M.; Praveenkumar, T. R.; Dhinakaran, V.; Gunasekar, P.; Pugazhendhi, A. Combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with nanocatalyst and pyrolysis oil produced from the solid plastic waste using screw reactor. *J. Cleaner Prod.* **2021**, *318*, No. 128551.
- (34) 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.
- (35) Yaqoob, H.; Teoh, Y. H.; Jamil, M. A.; Gulzar, M. Potential of tire pyrolysis oil as an alternate fuel for diesel engines: A review. *J. Energy Inst.* **2021**, *96*, 205–221.
- (36) Kalargaris, I.; Tian, G.; Gu, S. Experimental characterisation of a diesel engine running on polypropylene oils produced at different pyrolysis temperatures. *Fuel* **2018**, *211*, 797–803.
- (37) 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.
- (38) 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. *Alexandria Eng. J.* **2018**, *57*, 2257–2263.

(39) Heywood, J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*; McGraw-Hill International: Singapore, 1988.

(40) Singh, T. S.; Verma, T. N.; Singh, H. N. (2020). A lab scale waste to energy conversion study for pyrolysis of plastic with and without catalyst: Engine emissions testing study. *Fuel* **2020**, *277*, No. 118176.

(41) Padmanaba Sundar, S. S.; Vijayabalan, P. Pyrolysis of disposed plastic food containers and its potential in diesel engine by doping with nano particle at optimum injection timing. *Sustain. Energy Technol. Assess.* **2021**, *47*, No. 101537.

(42) Sukjit, E.; Liplap, P.; Maithomklang, S.; Arjharn, W. *Experimental Investigation on a DI Diesel Engine Using Waste Plastic Oil Blended with Oxygenated Fuels*, No. 2017-24-0116; SAE Technical Paper, 2017.

(43) Koci, C. P.; Fitzgerald, R. P.; Ikonomou, V.; Sun, K. The effects of fuel-air mixing and injector dribble on diesel unburned hydrocarbon emissions. *Int. J. Engine Res.* **2019**, *20*, 105–127.

(44) Rajasekaran, S.; Damodharan, D.; Gopal, K.; Rajesh Kumar, B.; De Poures, M. V. Collective influence of 1-decanol addition, injection pressure and EGR on diesel engine characteristics fueled with diesel/LDPE oil blends. *Fuel* **2020**, *277*, No. 118166.

(45) Yoon, S. H.; Lee, C. S. Experimental investigation on the combustion and exhaust emission characteristics of biogas-biodiesel dual-fuel combustion in a CI engine. *Fuel Process. Technol.* **2011**, *92*, 992–1000.

(46) Chintala, V.; Godkhe, P.; Phadtare, S.; Tadpatrikar, M.; Pandey, J. K.; Kumar, S. A comparative assessment of single cylinder diesel engine characteristics with plasto-oils derived from municipal mixed plastic waste. *Energy Convers. Manage.* **2018**, *166*, 579–589.

(47) Mani, M.; Govindan, N.; Sampath, S. An experimental investigation on a DI diesel engine using waste plastic oil with exhaust gas recirculation. *Fuel* **2010**, *89*, 1826–1832.

(48) 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.

(49) Ayodhya, A. S.; Lamani, V. T.; Bedar, P.; Kumar, G. N. Effect of exhaust gas recirculation on a CRDI engine fueled with waste plastic oil blend. *Fuel* **2018**, *227*, 394–400.

(50) Majewski, W. A.; Khair, M. K. *Diesel Emissions and Their Control*; Society of Automotive Engineers: Wallendale, PA, USA, 2006.

(51) Chintala, V.; Subramanian, K. A. Hydrogen energy share improvement along with NO<sub>x</sub> (oxides of nitrogen) emission reduction in a hydrogen dual-fuel compression ignition engine using water injection. *Energy Convers. Manage.* **2014**, *83*, 249–259.

(52) Mani, M.; Subash, C.; Nagarajan, G. Performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine using waste plastic oil. *Appl. Therm. Eng.* **2009**, *29*, 2738–2744.

(53) 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.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ETHANOL BLENDED WITH WASTE PLASTIC OIL AS AN ALTERNATIVE BIOFUEL IN A DIESEL ENGINE

Somkiat Maithomklang, Ekarong Sukjit, and Jiraphon Srisertpol\*

Received: May 21, 2019; Revised: September 02, 2019; Accepted: September 03, 2019

### Abstract

The present study aimed to investigate and compare the effects of waste plastic oil/ethanol blends focusing on physical-chemical properties of the fuel and performance, combustion characteristics, and emissions of a diesel engine. Waste plastic oil produced by the pyrolysis process was mixed with ethanol. Experiments were conducted on WE10 (10% ethanol and 90% waste plastic oil, v/v) at four engine loads and a constant engine speed of 2,500 rpm. The experimental results showed that the blended fuel possessed higher cetane index, lower viscosity, density, flash point, and heating value when compared with diesel fuel. The engine test revealed that the use of WE10 led to an increase in indicated specific fuel consumption and a reduction in indicated thermal efficiency. The addition of ethanol to waste plastic oil led to increase in peak of heat release rate in consequence of the retarded start of combustion. The WE10 tended to increase NOX, CO, and HC with respect to diesel fuel. However, lower NOX was found for the combustion of WE10 when compared with WPO.

**Keywords:** Waste plastic oil, ethanol, diesel engine, performance, emissions

### Introduction

Plastic waste has become an indelible component of municipal solid waste (MSW), as being used in a wide range of products due to its durability, light weight, and low cost. It is a mixture of various plastic products, mainly made from polyvinyl chloride (PVC), polystyrene

(PS), polyethylene-terephthalate (PET), low density polyethylene (LDPE), high density polyethylene (HDPE), and polypropylene (PP) plastics. Polyethylene (PE) and PS are the most available plastic types among municipal plastic waste (MPW). From the onset of invention of

*School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand. Tel. 0-4422-4410; Fax. 0-4422-4613; E-mail: jiraphon@sut.ac.th; somkiat\_mai@outlook.co.th; ekarong@sut.ac.th*

\* Corresponding author

plastics, accumulation of plastic wastes gives rise to environmental problems. It may take billions of years for plastic to degrade naturally (Miandad *et al.*, 2016; Bridjesh *et al.*, 2018).

Plastic waste is managed by different techniques such as reducing, reusing, recycling, waste-to-energy (WTE), and disposal at landfill sites. Conventional mechanical recycling techniques such as sorting, grinding, washing, and extrusion can only recycle 15-20% of all plastic waste types. Beyond this level, the plastic becomes contaminated with materials like soil, dirt, aluminum foils, food wastes, and paper labels. The uncontrolled incineration and open burning of plastic waste have caused air and waterborne pollutants. Therefore, in recent years, various plastic-to-fuel (PTF) or WTE technologies such as gasification, pyrolysis, refuse derived fuel (RDF), and plasma arc gasification along with chemical recycling methods have gained significant attention for the management of MPW (Miandad *et al.*, 2017). Plastic waste is an ideal source of energy due to its high heating value and abundance. It can be converted into oil through the pyrolysis process and utilized in internal combustion engines to produce power and heat. Some researchers showed that the properties of the waste plastic oil (WPO) are practically like diesel fuel and the engine could be operated using neat WPO. Experimental engine results from previous studies have been reported that WPO exhibited higher brake thermal efficiency (BTE) and higher regulated exhaust emissions such as nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), hydrocarbon (HC), and carbon monoxide (CO) with respect to diesel fuel combustion (Kalargaris *et al.*, 2017; Maithomklang *et al.*, 2017).

It is known that biofuel tends to improve combustion efficiency and emissions. Among oxygenated fuels, bioalcohol and biodiesel are widely used as alternative fuels in spark ignition engines and compression ignition engines, respectively. To extend the use of alcohol in compression ignition engines, alcohol is used as blend component in diesel fuel. Many studies have shown that combustion of biofuels is likely to reduce concentration of

toxic compounds in engine exhaust, particularly nitrogen oxide, and carbon dioxide that leads to the greenhouse effect. However, the use of blends containing very high percentages of alcohol in diesel engines can be limited by some poor properties of alcohol such as lubricity, viscosity, cetane number, and blending stability (Jamrozik, 2017; Sukjit *et al.*, 2017).

In this study, the effect of waste plastic oil blended with ethanol on physical-chemical properties of the fuel and performance, combustion characteristics, and emissions of a diesel engine characteristics were studied. The physical and chemical properties of test fuels were measured according to ASTM standards and engine experiments were conducted on a four-cylinder and naturally aspirated diesel engine to evaluate the performance, combustion characteristics, and emissions.

## Materials and Methods

### Test Fuels

To study the effects of the alternative biofuel on engine performance, combustion characteristics, and emissions. Ethanol was blended with waste plastic oil. It was previously reported that the presence of 10% ethanol in diesel fuel showed the emission benefits to improve NO<sub>x</sub> and soot trade-off without any engine modification (Sukjit *et al.*, 2017). So, 10% ethanol was selected to blend with waste plastic oil (WE10) and its fuel properties, engine performance, combustion characteristics, and emissions were investigated. The basic physical and chemical properties of tested fuels and commercial diesel fuel as reference fuels were measured according to ASTM standards and was shown in Table 1.

### Experimental Setup

The experiments were conducted on four-cylinder, four-stroke, naturally aspirated, water cooled, and direct injection (DI) diesel engine. The specifications of the engine are shown in Table 2. The schematic diagram of the experimental set up is presented in Figure 1. The tests were performed at a rated speed of 2,500 rpm and 4 different engine loads (50, 70,



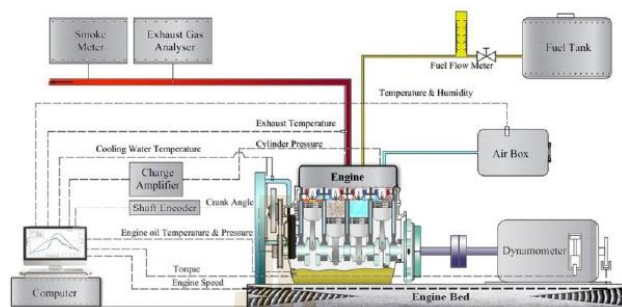


Figure 1. Schematic diagram of the experimental installation

Table 1. Physical-chemical properties of test fuels

Properties	Method	Diesel	WPO	Ethanol	WE10
Kinematic viscosity at 40°C (cSt)	ASTM D445	4.63	3.07	1.26	2.54
Specific gravity at 15.6°C	ASTM D1298	0.830	0.800	0.789	0.795
Density at 15.6°C (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM D1298	829	799	789	794
Flash point (°C)	ASTM D93	76	36	13.5	26
Gross calorific value (MJ/kg)	ASTM D240	45.39	44.90	29.7	43.13
Cetane index	ASTM D613	60.18	68.98	8*	68.03
Latent heat of vaporization (kJ/kg)	-	260	-	840	-

\* Cetane number

Table 2. Specifications of diesel engine

Engine	Specification
Engine model	4JA1
Engine type	water cooled, 4-cylinder, 4-cycle, direct injection
Bore	93 mm
Stroke	92 mm
Compression ratio	18.4
Displacement	2449 cc
Rated power	64.9 kW at 4,000 rpm
Max. torque	171.5 N-m at 2,000 rpm

90, and 110 N-m). To record cylinder pressure traces, a Kistler 6052C pressure transducer mounted at glow plug adapter and connected was via a Kistler 5064C charge amplifier to a data acquisition board. The crankshaft position was measured using a Kistler 2164C crank angle encoder set. Other standard engine test rig instrumentation was used to monitor temperatures (intake air and exhaust gas), pressure (lubricating oil), humidity (intake air),

and mass flow rate (intake air and fuel). A Testo 350 analyzer was employed to measure CO and NO<sub>x</sub> and Horiba MEXA-584L was used to evaluate HC. The specifications of the gas analyzing device is shown in Table 3.

## Results and Discussion

### Engine Performance

In present section, performance parameters such as ISFC and ITE of the engine according to operation load for all the test fuels are presented and analyzed.

The variations of ISFC as a function of engine load for test fuels are shown in Figure 2. ISFC is a measure of how much fuel is consumed per power output. It can be seen that the ISFC decreased as the engine operating loads increased for all fuels. The waste plastic oil (WPO) showed higher ISFC when compared with diesel fuel, while the blended fuel (WE10) showed higher ISFC than the corresponding

010022-4

Experimental Investigation of Ethanol Blended with Waste Plastic Oil...

Table 3. Specifications of the gas analyzing device

Measured quantity	Measuring range	Resolution	Accuracy
<b>TESTO 350</b>			
NO	0 to 4,000 ppm	1 ppm	±5 ppm
NO <sub>2</sub>	0 to 500 ppm	0.1 ppm	±5 ppm
CO	0 to 10,000 ppm	1 ppm	±5 ppm
<b>HORIBA MEXA-584L</b>			
HC	0 to 20,000 ppmvol	1 ppmvol	-

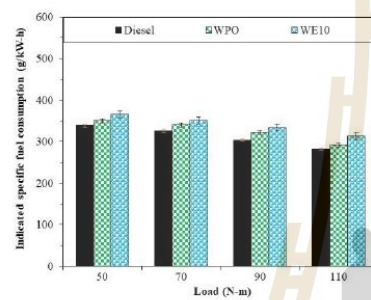


Figure 2. Indicated specific fuel consumption (ISFC)

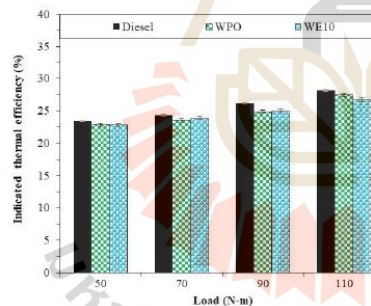


Figure 3. Indicated thermal efficiency (ITE)

waste plastic oil because of the lower calorific values of ethanol (Wei *et al.*, 2018).

The ITE which is inversely proportional to ISFC is shown in Figure 3. Higher ISFC was obtained from the combustion of waste plastic oil, resulted in the lower indicated thermal efficiency with respect to diesel fuel for all engine loads tested. With the addition of ethanol to waste plastic oil, it can be noticed that ITE

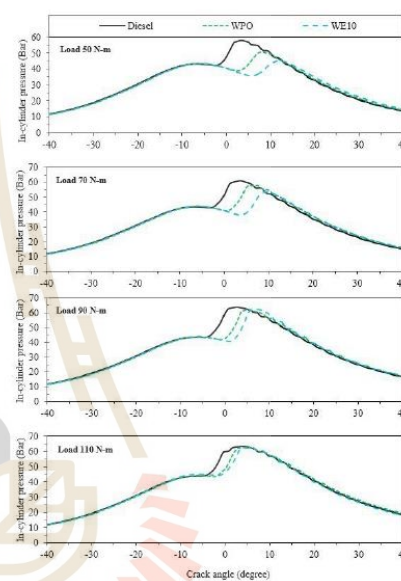


Figure 4. In-cylinder pressure (ICP)

obtained by WPO and WE10 was slightly different.

#### Combustion Characteristics

In-cylinder pressure (ICP) and rate of heat release (ROHR) for all engine operating loads are depicted in Figures 4 and 5, respectively. The first law of thermodynamics was used to calculate the heat release rate with Equations (1) (Sukjit *et al.*, 2018)

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{d\theta} \quad (1)$$

where  $dQ/d\theta$  is the rate of heat release,  $p$  is the in-cylinder pressure,  $V$  is the combustion chamber volume, and  $\theta$  is the crank angle. The constant specific heat ratio ( $\gamma$ ) of 1.35 was used for the calculation.

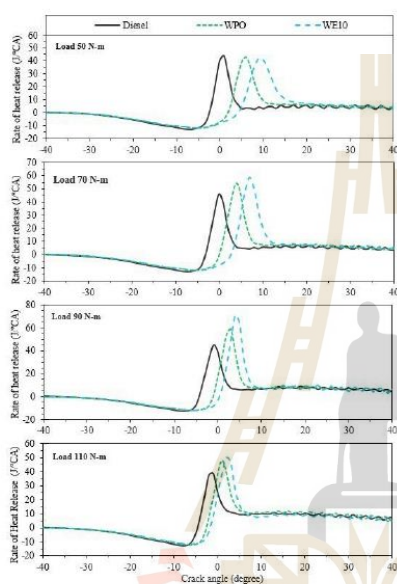


Figure 5. Rate of heat release (ROHR)

The start of combustion refers to the crank angle at which heat is released at the beginning of the premixed combustion phase. The results in Figure 5 reveal that the start of combustion decreased (shorter ignition delay) as the engine operating loads increased for WPO compared with diesel fuel. The addition of ethanol to waste plastic oil tended to delay the start of combustion, resulting in longer ignition delay. The lower cetane number of ethanol can be used to justify such increase in ignition delay (Choi and Jiang, 2015). In addition, the higher latent heat of vaporization of ethanol tended to increase mixing time between air and fuel, leading to the delay in the start of combustion. This longer ignition delay tended to reduce the temperature of in-cylinder

gas mixture. With longer ignition delay, there was higher volume of premixed mixture ready to combust when combustion started. Consequently, the higher peak of premixed combustion than in case of diesel fuel due to the longer ignition delay of the ethanol blend was observed (Sukjit *et al.*, 2017).

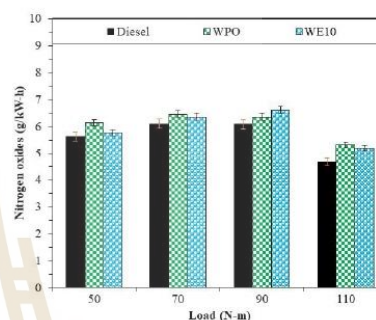


Figure 6. Nitrogen oxides emissions (NOX)

### Emissions

In this section regulated emissions such as  $\text{NO}_x$ , CO, and HC by the combustion of test fuels were discussed.

$\text{NO}_x$  emissions are shown in Figure 6. Oxides of nitrogen present in emissions is the combination of nitric oxide (NO) and nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ). The formation of  $\text{NO}_x$  is highly dependent on high combustion temperature, long residence time, and high oxygen content. Comparing WPO with diesel fuel, there was an increase in  $\text{NO}_x$  emissions. However, the presence of ethanol in WPO was beneficial to reduce  $\text{NO}_x$  emissions because of the higher latent heat of evaporation of ethanol which needed more energy to vaporize before mixing with the air, resulting in the lower in-cylinder temperature during the combustion process (Yilmaz and Davis, 2016; Sukjit *et al.*, 2017; Jeevahan *et al.*, 2018). In addition, the lower heating value of ethanol can be another reason of the lower combustion temperature which lower  $\text{NO}_x$  emissions can be obtained.

CO and HC emissions are shown in Figures 7 and 8. The formation of CO emissions

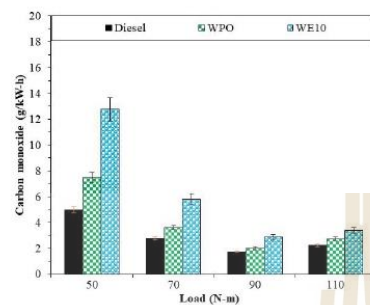


Figure 7. Carbon monoxides emissions (CO)

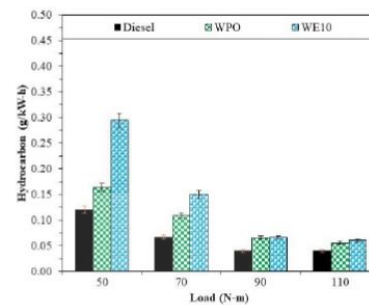


Figure 8. Hydrocarbon emissions (HC)

is due to the insufficient oxygen level during the combustion. This lesser oxygen molecule reacts with the carbon molecules within the low temperature combustion process. In a diesel engine, the formation of CO emission is the symptom of an incomplete combustion process. Also, the air-fuel rich zone and improper mixing of the charge are the other factors for the formation of CO emissions. The formation of hydrocarbons is mainly depending on the air-fuel ratio, chemical properties of tested fuels, spray characteristics, and operating conditions (López *et al.*, 2015; Gowtham *et al.*, 2019). It can also be noticed that the CO and HC for WPO and WE10 were higher than for diesel fuel, which may be apart from the delay of combustion, the high latent heat of vaporization of ethanol which tended to promote incomplete combustion can be used to justify the increase in CO and HC (Sukjit *et al.*, 2012).

### Conclusions

The effects of waste plastic oil/ethanol blends on basic physical-chemical properties of test fuels, performance, combustion characteristics, and emissions were studied. According to the experiment outcomes, the following conclusions were drawn:

i) The blended fuels (WE10) possessed higher cetane index, lower viscosity, density, flash point, and heating value when compared with diesel fuel.

ii) The use of WE10 led to an increase in indicated specific fuel consumption and a reduction in indicated thermal efficiency.

iii) The addition of ethanol to waste plastic oil lead to increase in peak of rate of heat release in consequence of the retarded start of combustion due to higher latent heat of vaporization and lower cetane number of ethanol.

The WE10 tended to increase  $\text{NO}_x$ , CO, and HC was obtained with respect to diesel fuel. However, lower  $\text{NO}_x$  was found for the combustion of WE10 when compared with WPO.

### Acknowledgments


This research was funded by Research and Researcher for Industry (RRI) under the Thailand Research Fund (TRF) of Thailand, grant number PHD61I0050. The authors are indebted to Suranaree University of Technology (SUT) and the Polawat Engine Co., Ltd., for their generous support and their valuable comments.

## References

- Bridjesh, P., Periyasamy, P., Krishna Chaitanya, A. V., and Geetha, N.K. (2018). MEA and DEE as additives on diesel engine using waste plastic oil diesel blends. *Sustain. Environ. Res.*, 28(3):142-147.
- Choi, B. and Jiang, X. (2015). Individual hydrocarbons and particulate matter emission from turbocharged CRDI diesel engine fueled with n-butanol/diesel blends. *Fuel*, 154:188-195.
- Gowtham, M., Mohan, C. G., and Prakash, R. (2019). Effect of n-butanol fumigation on the regulated and unregulated emission characteristics of a diesel engine. *Fuel*, 242:84-95.
- Jamrozik, A. (2017). The effect of the alcohol content in the fuel mixture on the performance and emissions of a direct injection diesel engine fueled with diesel-methanol and diesel-ethanol blends. *Energ. Convers. Manage.*, 148:461-476.
- Jeevahan, J., Sriramanjaneyulu, G., Durairaj, R. B., and Mageshwaran, G. (2018). Experimental investigation of the suitability of 1-butanol blended with biodiesel as an alternative biofuel in diesel engines. *Biocatal. Agr. Biotec.*, 15:72-77.
- Kalargaris, I., Tian, G., and Gu, S. (2017). Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil. *Fuel Process. Technol.*, 157:108-115.
- López, A. F., Cadrazco, M., Agudelo, A. F., Corredor, L. A., Vélez, J. A., and Agudelo, J. R. (2015). Impact of n-butanol and hydrous ethanol fumigation on the performance and pollutant emissions of an automotive diesel engine. *Fuel*, 153:483-491.
- Maithomklang, S., Sukjit, E., Liplap, P., and Arjham, W. (2017). Combustion and emission characteristics of a diesel engine filled with waste plastic oil-oxygenated blends. *Proceeding of the 11<sup>th</sup> South East Asian Technical University Consortium*, March 13-14, 2017, Ho Chi Minh City, Vietnam., p. 1-6.
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburiazaiza, A. S., Rehan, M., and Nizami, A. S. (2016). Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Saf. Environ. Prot.*, 102:822-838.
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburiazaiza, A. S., Rehan, M., Ismail, I.M.I., and Nizami, A.S. (2017). Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. *Int. Biodeter. Biodeg.*, 119:239-252.
- Sukjit, E., Herreros, J.M., Dearn K.D., Garcia Contreras, R., and 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., Liplap, P., Maithomklang, S., and Arjham, W. (2017). Experimental investigation on a DI diesel engine using waste plastic oil blended with oxygenated fuels. In: *Proceeding of the 13<sup>th</sup> International Conference on Engines & Vehicles*, Sept 10-14, 2017, Capri, Napoli, Italy, p. 1-6.
- Sukjit, E., Maithomklang, S., Trirak, N., and Klinkaew, N. (2018). Emission Benefits from the use of castor oil in a compression ignition engine fuelled with diesel-ethanol blends. *Int. J. Electr. Energy*, 6(2):57-63.
- Wei, L., Cheung, C. S., and Ning, Z. (2018). Effects of biodiesel-ethanol and biodiesel-butanol blends on the combustion, performance and emissions of a diesel engine. *Energy*, 155:957-970.
- Yilmaz, N. and Davis, S.M. (2016). Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) formation in a diesel engine fueled with diesel, biodiesel and biodiesel/ n-butanol blends. *Fuel*, 181:729-740.

Article

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

Khatha Wathakit <sup>1</sup>, Ekarong Sukjit <sup>1</sup>, Chalita Kaewbuddee <sup>2</sup>, Somkiat Maithomklang <sup>1</sup>, Niti Klinkaew <sup>1</sup>, Pansa Liplap <sup>1</sup>, Weerachai Arjharh <sup>1</sup> and Jiraphon Srisertpol <sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> 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.); arjharh@g.sut.ac.th (W.A.)

<sup>2</sup> 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

**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<sub>x</sub>, 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



**Citation:** Wathakit, K.; Sukjit, E.; Kaewbuddee, C.; Maithomklang, S.; Klinkaew, N.; Liplap, P.; Arjharh, 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/>).

### 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<sub>x</sub>), 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<sub>x</sub> 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<sub>x</sub>, 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 <sub>x</sub>	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.

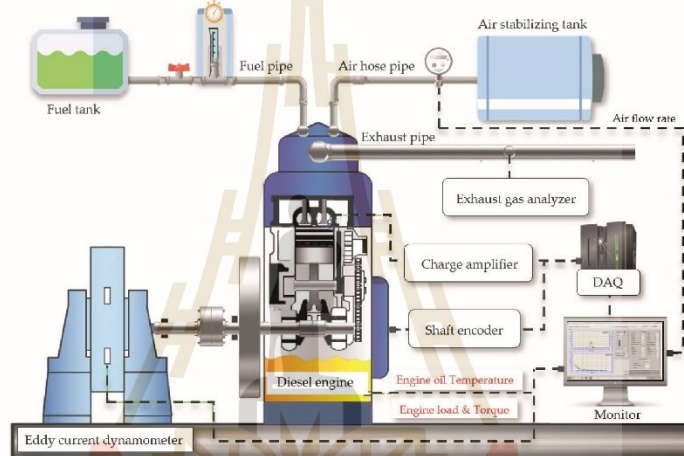


Figure 1. A schematic diagram of the experimental installation.

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<sub>x</sub>), 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 <sub>2</sub>	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].

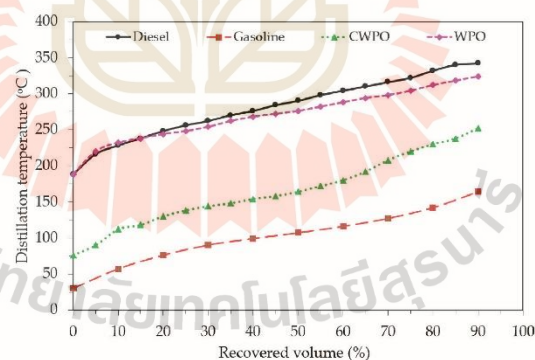


Figure 2. Distillation curves of test fuels obtained by fractional distillation.

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.

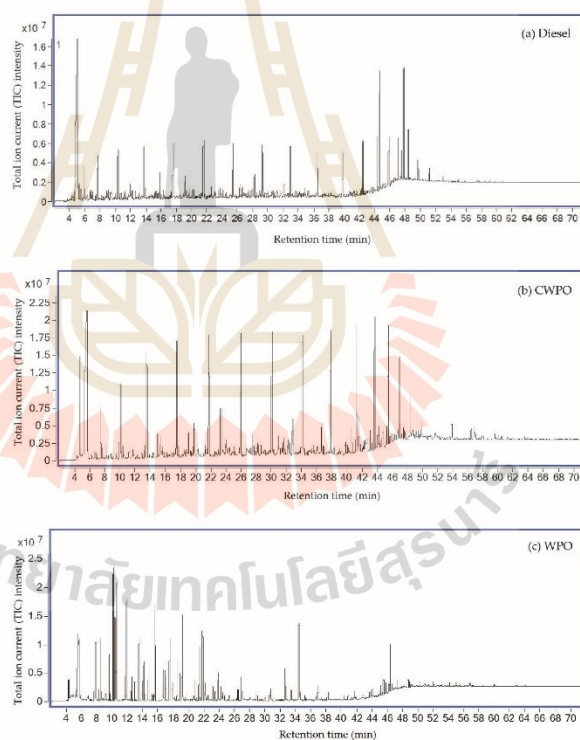


Figure 3. GC–MS chromatogram for (a) Diesel, (b) CWPO, and (c) WPO.

**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.

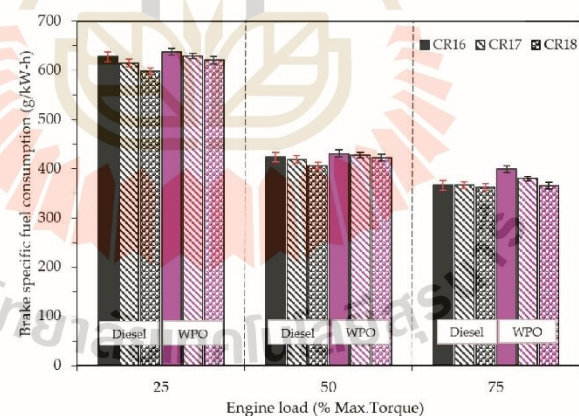
Properties	Test Method	Diesel	CWPO	WPO
Kinematic viscosity at 40 °C (cSt)	ASTM D445	3.44	1.66	3.11
Surface tension (mN/m)	ASTM D971	-	27.77	27.85
Specific gravity at 15.6 °C	ASTM D1298	0.835	0.900	0.824
Density at 15.6 °C (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM D1298	834	899	823
Flash point (°C)	ASTM D93	66	35	54
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].

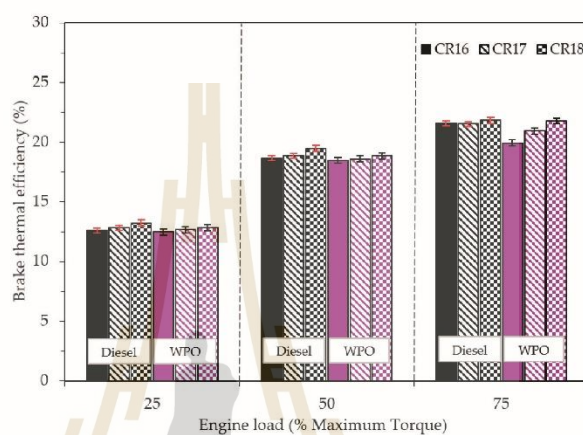


Figure 5. Variation of the brake thermal efficiency (BTE) with engine loads.

### 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].

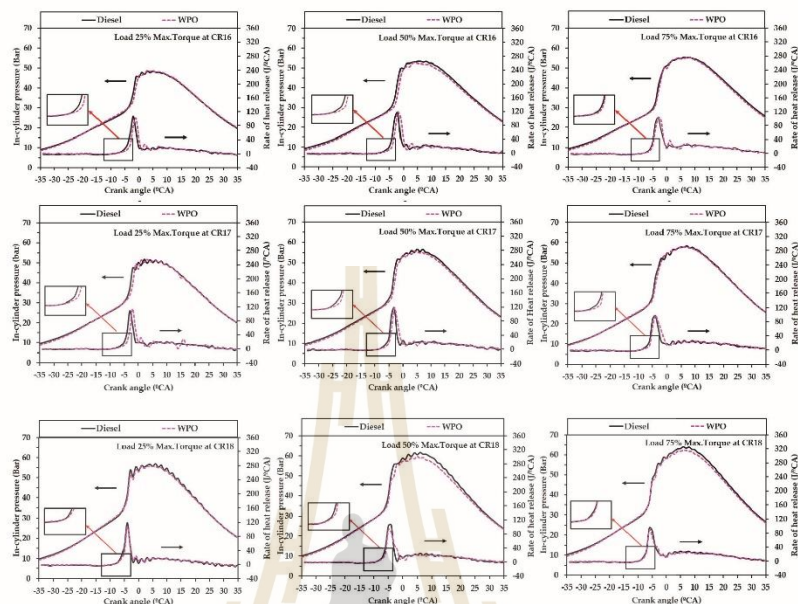


Figure 6. Variation in heat release rate and in-cylinder pressure with the crank angle.

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 and a shorter ignition delay [44].

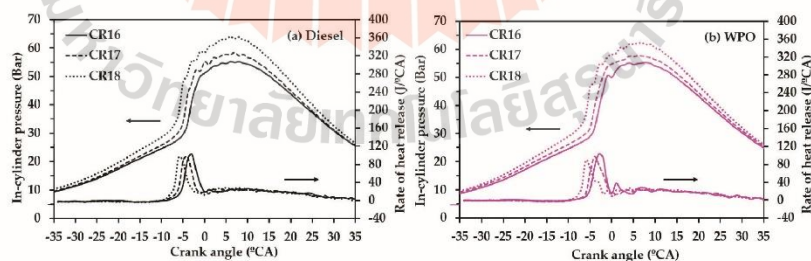


Figure 7. Variation in the rate of heat release (RoHR) and in-cylinder pressure (ICP) with the crank angle at different compression ratios at a 75% maximum engine torque: (a) diesel; (b) WPO.



### 3.2.3. Emission Characteristics

The engine-out emissions comprised carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), 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<sub>x</sub>) emissions with engine loads at different compression ratios is shown in Figure 8. Nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) is nitric oxide (NO) and nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) in the exhaust of internal combustion engines [45]. The experiment showed that the NO<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> when an engine is run at a high engine load. As compared with diesel fuel, the NO<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> emissions of WPO and diesel fuel. Increasing the cylinder pressure at a higher combustion temperature tends to be conducive to NO<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> 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.

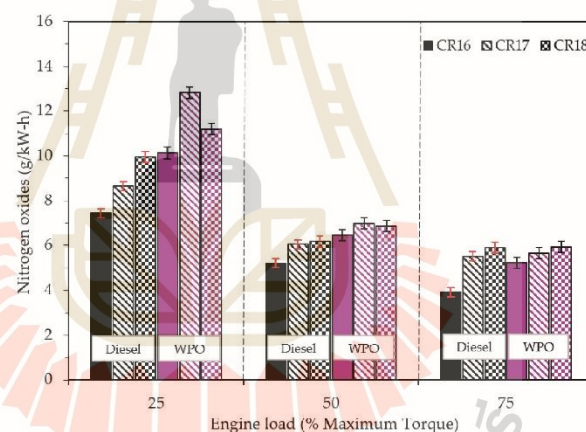


Figure 8. Variation in the nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) emissions with engine loads.

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).

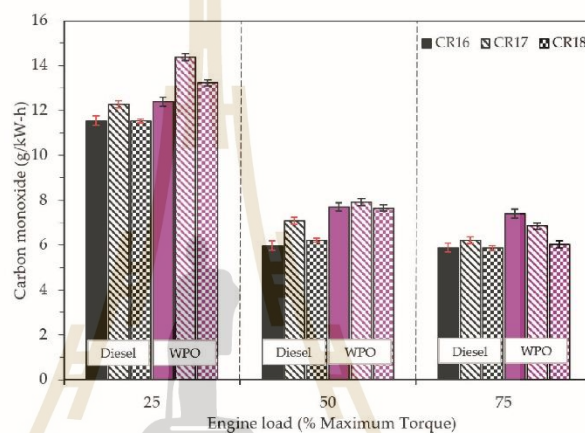


Figure 9. Variation in the carbon monoxide (CO) emissions with engine loads.

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.

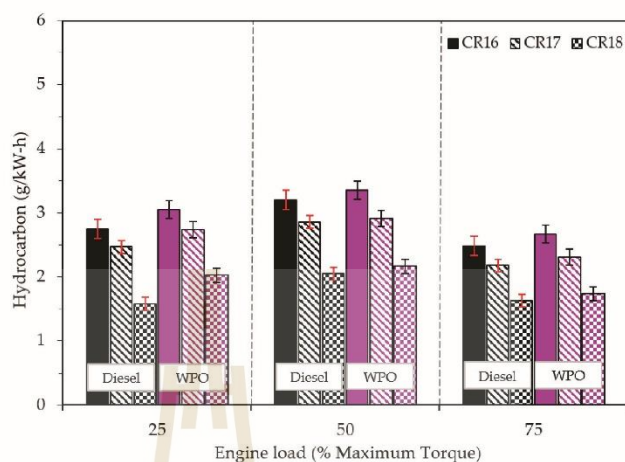


Figure 10. Variation in the unburned hydrocarbon (HC) emissions with engine loads.

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.

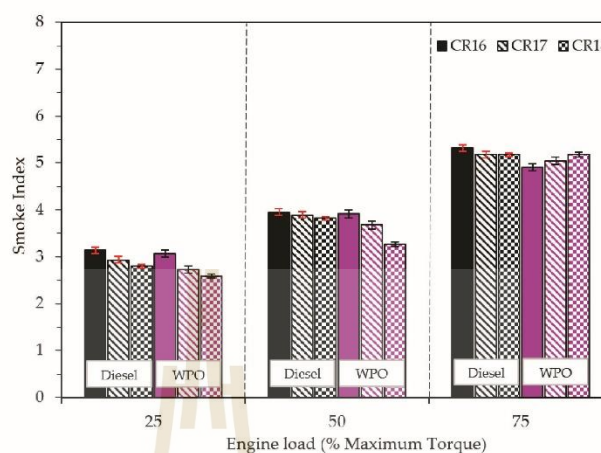


Figure 11. Variation in smoke emissions with engine loads.

#### 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<sub>x</sub>, 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.P.R 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 <sub>2</sub>	nitrogen dioxide
NO <sub>x</sub>	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.; Abnisa, 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.; Raj, 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.; Siltonga, 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.I.; 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.





**TICHe**  
The Thai Institute of  
Chemical Engineering  
and Applied Chemistry

**TICHe**  
Sustainable Development for Better Lives  
**2021**  
Nakhon Ratchasima, Thailand



**The 30<sup>th</sup> TICHe Conference (TICHe2021)**  
“Sustainable Development for Better Lives”

Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, May 6-7, 2021

**BIE 16**

*Article*

## The Utilization of Biodiesel from Palm Oil and Palm Kernel Oil by Using Reactor with Different Stirred Method in a Diesel Engine

Aphisik Pakdeekeaw<sup>1,a</sup>, Somkiat Maithomklang<sup>1,b</sup>, Niti Klinkaew<sup>1,c</sup>, Supunnee Junpirom<sup>2,d</sup> and Ekarong Sukjit<sup>1,e\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

<sup>2</sup>School of Chemical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

E-mail: <sup>a</sup>aphisik.pdk@gmail.com, <sup>b</sup>somkiat\_mai@outlook.co.th, <sup>c</sup>niti\_nick@hotmail.com,

<sup>d</sup>supunnee@sut.ac.th, <sup>e</sup>ekarong@sut.ac.th

**Abstract.** This research was to investigate the production of biodiesel from palm oil and palm kernel oil by using transesterification process in a reactor with different stirred method i.e., mechanical-stirred (MS) and ultrasonic (US). The conditions for transesterification process were operated at a methanol to oil ratio of 12:1, KOH loading of 1.5% wt of oil with different reaction time of 60, 90 and 120 minutes. Moreover, the purpose of the present work is to evaluate the potential of produced biodiesel in diesel engines on performance and emissions. The result showed that the maximum biodiesel production yield of 82.61% and lowest kinematic viscosity of 4.78 cSt were found in the batch of palm oil using MS with reaction time of 60 minutes. However, the palm kernel oil gave the highest biodiesel yield of 92.59% and lowest kinematic viscosity 3.39 cSt using US with reaction time of 90 minutes. The biodiesel from palm oil (POME) and palm kernel oil (PKOME) were analyzed for fuel properties and found to be within acceptable limits of ASTM standards. The POME and PKOME were then tested in a single cylinder diesel engine, and their engine performance, combustion characteristics and exhaust emissions were analyzed and compared with diesel fuel operation. The experimental results show that the POME and PKOME provided increasing in brake specific fuel consumption whereas brake thermal efficiency was decreased. According to the effect of POME and PKOME on combustion characteristics, it was found that POME and PKOME leads to lower in-cylinder pressure and rate of heat release together with start of combustion decreased when were compared to diesel fuel. Moreover, the results of exhaust emissions showed that POME and PKOME were higher carbon monoxide (CO), unburned hydrocarbon (HC) emissions in comparison to diesel fuel while nitrogen oxide (NOX) emissions were observed lower. However, PKOME gave results of lower HC and smoke than POME. The use of biodiesel from palm oil and palm kernel oil can be a potential substitute for diesel fuel and could also be helpful for circumstances of fuel energy crisis as a renewable energy source.

**Keywords:** Biodiesel production, palm oil, palm kernel oil, diesel engine, engine performance.

TICHe2021



## 1. Introduction

Nowadays, the rapid growth of population and economy has resulted in the substantial increase in energy demand. The recent years, the energy consumption increased 1.8% which was reported by the Energy Policy and Planning Office Thailand [1]. Moreover, the energy sources from fossil fuel have been gradually depleted and are one of main causes of pollution. As a result, searching for alternative fuel sources has become initial importance in the energy production field. Vegetable oils are renewable and potentially illimitable sources of energy such as biomass, biodiesel, bioalcohol and other biofuels [2]. Vegetable oils are mainly composed of triacylglycerols consisting of long chain fatty acids chemically bound to a glycerol backbone [3]. They are also obtained from renewable sources, biodegradable, nontoxic and reduction of many harmful exhaust emissions. In the last decade, various studies have investigated the use of biodiesel in diesel engines. The studies have reported that biodiesel can provide a decrease in hydrocarbons (HC), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), carbon monoxide (CO) and a slight increase in nitrogen oxides emissions (NO<sub>x</sub>) because of an advanced combustion process [4]. Biodiesel is a biodegradable fuel which contains fatty acid methyl or ethyl esters. It can be produced from many different raw materials such as vegetable crops, animal fats, algae or waste cooking oil. In Thailand, palm oil is the most readily available oil for producing biodiesel. It has been reported the average rate of annual palm oil production increased approximately 13.18% per year for palm oil production in during 2017-2020 [5].

The biodiesel production is widely conducted through transesterification reaction between raw materials and alcohol in presence of a catalysts or without catalysts [6]. This process reduces the viscosity and improves fuel characteristics of raw materials to enable their use in diesel engines. Alcohols used in transesterification reaction are those of short chain carbon such as methanol (CH<sub>3</sub>OH) and ethanol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O). The most primary alcohol used in biodiesel production is methanol mainly due to it is less expensive than ethanol [7]. The main factors affecting transesterification reaction and the rate of production are raw materials, molar ratio of alcohol to raw materials, reaction time, types of catalyst, catalyst concentration, mass-transfer rate, reaction temperature and types of reactor [8-9]. The biodiesel production process confronts different problems related to the reaction reversibility and immiscibility of raw materials and alcohol, which result in low quantity and quality of produced biodiesel. At present, this problem can be solved by using ultrasonic, microwave, and hydrodynamic for biodiesel production which helps to improve transesterification rate and increase biodiesel yield [10].

Ultrasonic reactor is one of the methods recently used for biodiesel production. The use of ultrasonic has gained significance over the years, because of ultrasonic can promote homogeneous mixture between the raw materials and alcohol through acoustic cavitation. Acoustic cavitation is the growth and brutal collapse of pre-existing microbubbles under the influence of an ultrasonic field in liquids, which generate an increase in temperature in the reaction medium when exploded. This phenomenon is able to reduce the reaction time and increase the reaction speed [11-12]. Several researchers have performed transesterification reactions by using ultrasonic reactor. Manickam et al. [13] conducted the transesterification of palm oil and reached the highest yield of 93% by using ultrasonic reactor, compared with the mechanical stirred reactor. Ultrasonic has been used by numerous researchers to decrease reaction time and energy consumption. Consequently, the yield of biodiesel production was higher when ultrasound was applied. The reason is that the increasing of mass transfer of immiscible reactants [14-15].

Even though, studies of biodiesel production, research and development of different stirred method of biodiesel production to adapt them for high quality of produced biodiesel, there are a few studies related to the effect of mechanical-stirred and ultrasonic reactor on quality of produced biodiesel from palm oil and palm kernel oil. Therefore, the topic in the present work is to determine the effect of different stirred method on quality of produced biodiesel. As comparison between different stirred methods for biodiesel production from palm oil and palm kernel oil i.e., mechanical-stirred and ultrasonic. Due to chemical compositions and properties of both palm oil and palm kernel oil are suitable as raw materials of biodiesel. Palm kernel oil is characterized by its high content of lauric acid fatty acid (C12) and the fatty acids of biodiesel from palm oil are high content of palmitic acid (C16). To get the most benefit in utilizing the product derived from the palm fruit in Thailand. Furthermore, this study aims to investigate physicochemical properties of the biodiesels according to ASTM standard and their effect on engine performances, combustion characteristics and exhaust emissions in a diesel engine at different engine operating loads.

## 2. Methodology

### 2.1. Biodiesel production

#### 2.1.1. Transesterification reaction

In this research, experiments were carried out to prepare biodiesel from palm oil and palm kernel oil by using reactor with different stirred method. The purpose of these experiments was to compare stirred method and reaction times for biodiesel production with the higher oil yield under the same conditions. Palm oil and palm kernel oil are commercial vegetable oils for food grade. Available in department stores in Thailand. Both types are 100% purity, according to the available information by manufacturer. Methanol and potassium hydroxide (KOH) used in this study are analytical grade. The experiment was performed in a chemical laboratory at Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. The experimental setup for biodiesel production is showed in Fig. 1.

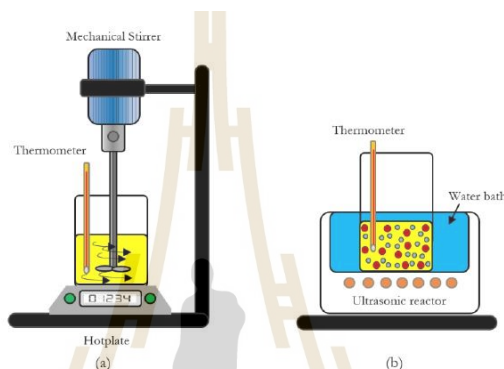


Fig. 1. Experimental setup for biodiesel production (a) mechanical stirrer and (b) ultrasonic.

Transesterification reaction was carried out in beaker glass equipped with thermometer, mechanical-stirred and ultrasonic reactor. The palm oil and palm kernel oil were reacted with methanol using granulated KOH as catalyst through mechanical-stirred method (MS) with a constant stirring speed of 400 rpm and ultrasonic method (US) with operating frequency of 40 kHz under the same reaction conditions: reaction temperature of 60 °C, oil-methanol ratio of 12:1, 1.5% KOH with varying reaction time of 60, 90, and 120 min, respectively. The amounts of palm oil and palm kernel oil, methanol, and KOH used in the reactions were calculated, based on their molar ratio. After finishing the reaction process, the mixture was left in a separating funnel to separate glycerol layer after 24 hours. Biodiesel were washed by using water for remove residual within biodiesel. Finally, biodiesel was dried at 120 °C to remove excess alcohol and water. Biodiesel production from palm oil and palm kernel oil are called palm oil methyl ester (POME) and palm kernel oil methyl ester (PKOME), respectively.

#### 2.1.2. Quantity of the produced biodiesel

In order to characterize the quantity of the produced biodiesel several techniques were utilized. The mass of biodiesel product was first measured and the mass yield percentage was estimated using the following Eq. (1).

$$\text{Yield (\%)} = \frac{\text{mass of biodiesel obtained (g)}}{\text{mass of oil used (g)}} \times 100 \quad (1)$$

For palm oil, the experimental test results showed that the highest biodiesel production yield of 82.61% were found from mechanical-stirred method and reaction time of 60 minutes for palm oil as shown in Table 1 and Figure 2 (a). It seems slightly higher than that from ultrasonic method which is of 81.83%. However, the ultrasonic method at 120 min gave higher yield than that from mechanical-stirred method. For the palm kernel oil in Figure 2 (b), it was found that the highest yield of 92.59% for using ultrasonic method at 90

minutes. For the overall trend of both oils, at some specific conditions, the ultrasonic method gave the higher yield than that of the mechanical-stirred method. The viscosity (Figure 2 (a) and (b)) of produced biodiesel from both oils are similar implying that the similar fuel properties of derived products. The result of ultrasonic method does agree with other works that reported the conversion efficiency of triglycerides to fatty acid methyl ester (FAME) is higher ultrasonic method than mechanical stirring method [16]. Due to the process involves transfer of energy in the reaction mixture using ultrasonic waves which tend to create cavitation bubbles in the mixture and provide intense mixing [17]. There are some works found that the production yield of biodiesel also depends on the ultrasonic frequency [18-19].

Table 1. Percentage of biodiesel yield and kinematic viscosity obtained using difference conditions.

Type of feedstock	Reaction method	Reaction time (min)	Yield (%)	Kinematic viscosity (cSt)
Palm oil	Mechanical-stirred	60	82.61	4.78
	Mechanical-stirred	90	77.97	5.32
	Mechanical-stirred	120	64.12	5.23
	Ultrasonic	60	81.83	5.27
	Ultrasonic	90	77.13	5.37
	Ultrasonic	120	76.92	5.46
Palm kernel oil	Mechanical-stirred	60	82.25	3.41
	Mechanical-stirred	90	59.37	3.44
	Mechanical-stirred	120	54.94	3.47
	Ultrasonic	60	78.58	3.42
	Ultrasonic	90	92.59	3.39
	Ultrasonic	120	86.89	3.39

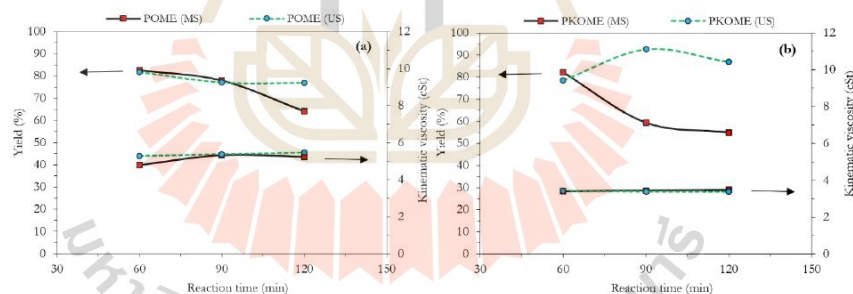


Fig. 2. Percentage of biodiesel yield and kinematic viscosity obtained using difference conditions.

## 2.2. Test Fuels

The physical and chemical properties of biodiesel from palm oil and palm kernel oil were then examined according to the ASTM standard. The American standard ASTM D6751 identifies that the fuel properties of the biodiesel should carry out before being used as fuel with diesel fuel. Table 2 shows the fuel properties characteristics of POME and PKOME compared with diesel fuel (7% biodiesel containing diesel) such as kinematic viscosity, specific gravity, API gravity, density, flash point, gross calorific value, distillation temperature and cetane index were compared with diesel fuel. Kinematic viscosity, specific gravity and

density of POME and PKOME were higher than diesel fuel and may result in fluidity-atomization of fuel injected in the combustion chamber [20]. In the same way, flash point was higher than diesel fuel, so POME and PKOME are safer than diesel fuel. On the other hand, owing to lower calorific values of POME and PKOME than that of diesel fuel cause diesel engine consumes more fuel than diesel fuel to enlarge the same power output. POME and PKOME have lower cetane index than diesel fuel. This results in cause ignition characteristics of fuel and lower combustion efficiency [21]. However, physicochemical properties of POME and PKOME were evaluated and found within acceptable limits of ASTM D6751 standards.

Table 2. Comparison of physicochemical properties of POME, PKOME and diesel fuel.

Fuel properties	Test Method	Test fuels		
		Diesel	POME	PKOME
Kinematic viscosity at 40 °C (cSt)	ASTM D445	3.39	4.78	3.39
Gross calorific value (MJ/kg)	ASTM D240	45.00	39.98	38.51
Flash point (°C)	ASTM D93	78	180	128
Specific gravity at 15 °C	ASTM D1298	0.830	0.870	0.860
API gravity at 15 °C	ASTM D1298	38.98	31.14	33.03
Density at 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM D1298	829	869	859
Cetane index	ASTM D976	59.45	50.08	47.69
Distillation temperature	ASTM D86			
10% Recovered (°C)		168	340	269
50% Recovered (°C)		242	357	286
90% Recovered (°C)		308	372	328
Color	RAL Standard	Yellow	Traffic yellow	Pure white

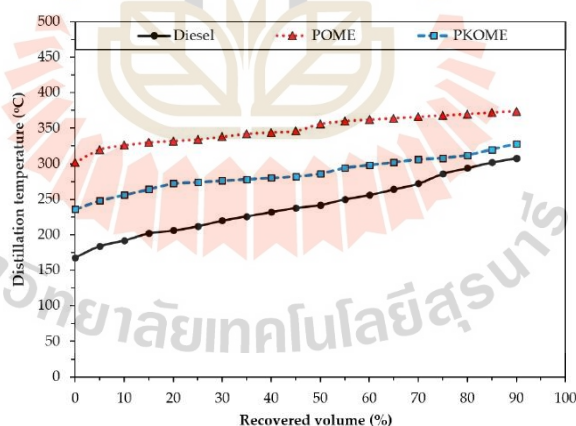


Fig 3. Distillation curve characteristics of POME, PKOME and diesel fuel.

The distillation curve of fuels is a critically important indicator of the volatility behavior. Moreover, the distillation curve can be estimate engine starting ability, drivability and vapor lock [22]. The volatile light fractions in fuels help the engine to start and warm while heavy fractions contribute to deposit formation and hard starting. In general, the distillation curve is presented as the distillation temperature against the recovered volume as shown in Fig.3. The results showed that the distillation curve of diesel fuel is wider in its range of temperature than in POME and PKOME. As can be seen, POME and PKOME have higher distillation temperature than the diesel fuel. In addition, distillation curve of POME and PKOME were almost flat at higher temperatures in the range of 356-374 °C and 286-328 °C, respectively.

The distillation temperature at 10% of the recovered volume characterizes the cold start ability of engine. The 50% of the recovered volume has an influence on engine warm-up time and on its operating stability. The parameter 90% of the recovered is related to the combustion characteristics of fuel, influencing the complete combustion, the fuel consumption, the engine wear, and deposits inside the engine [23]. In this study the results showed that the distillation temperature at 10%, 50% and 90% of the recovered volume of the POME and PKOME are higher than the distillation temperature of diesel fuel for all percentage of recovered volume. The distillation temperature at 10% of the recovered volume of POME and PKOME are higher than that of diesel fuel, which makes more difficult the cold start of the engine. When comparing between POME and PKOME, POME has higher distillation temperature compared to PKOME as shown in Tables 2. This behavior could be related with the chemical compounds of test fuels. The diesel fuel is a mixture of paraffins, olefins, naphthene and aromatics. Meanwhile POME and PKOME are primarily composed of lauric acid, myristic acid, palmitic acid, oleic acid, stearic acid and linoleic acid. Besides, the common boiling temperatures of the majority of methyl esters or ethyl esters [24-25].

### 2.3. Experimental setup and procedure

The engine tests were conducted on 1-cylinder, 4-strokes, naturally aspirated, water-cooled compression ignition engines coupled with water-cooled eddy current dynamometer which can be operated at a maximum rate power of 3.5 kW at 1,500 rpm. The specifications of the engine are given in Table 3 and the schematic diagram of the engine setup is shown in Fig. 4. The engine was operated at 1,500 rpm with various engine load of 25%, 50%, and 75% of the maximum engine torque for all test fuels in order to investigate the effects of biodiesel from palm oil and palm kernel oil on engine performance, combustion characteristics and exhaust gas emission of diesel engine. The fuel mass consumption was measured using a glass burette and stopwatch to determine the volume of spent fuel with the testing time. EngineSoft software was used to analyze the combustion characteristics. Testo 308 smoke tester was used to measure smoke emission and Testo 350 flue gas analyzer was applied to measure nitrogen oxides, carbon monoxide and hydrocarbon. The technical specifications of exhaust gas analyzer are listed in Table 4. All resulting data were read after the conditions of engine steadied. Measurement of each test was repeated three times to ensure validity of the results.

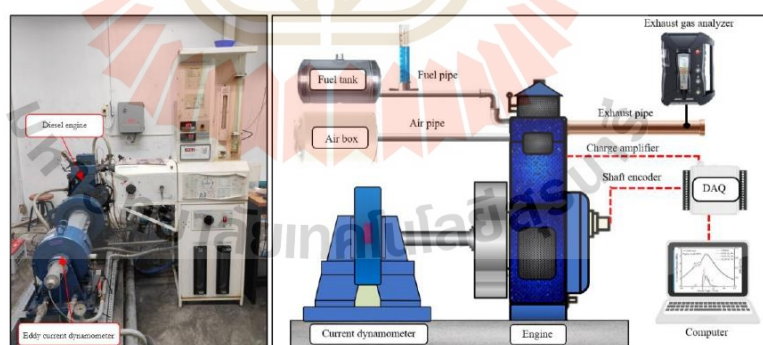


Fig. 4. Schematic diagram of the experimental engine setup.

Table 3. Technical specifications of diesel engine.

Engine parameter	Technical specifications
Model	Kirloskar TV1
Engine type	1 cylinder, 4 strokes, water cooled, DI diesel engine
Bore x Stroke	87.5 mm x 110 mm
Connecting rod	234 mm
Displacement volume	661 cc
Injection timing	23 °bTDC
Rate output at 1,500 rpm	3.5 kW
Maximum torque at 1,500 rpm	28 Nm
Compression ratio	18 : 1

Table 4. Exhaust gas analyzer specification.

Parameter	Measuring techniques	Measuring range	Resolution	Accuracy
<b>Testo 350</b>		(ppm)	(ppm)	(ppm)
NO	Chemiluminescence	0-4,000	1	$\pm 5 < 100$
NO <sub>2</sub>	Chemiluminescence	0-500	0.1	$\pm 5 < 100$
CO	Nondispersive Infrared	0-10,000	1	$\pm 10 < 200$
HC	Flame Ionization Detector	0-40,000	10	$\pm 400$
<b>Testo 308</b>				
Smoke index	Paper filter	0-6	0.1	$\pm 0.2$

### 3. Results and discussion

In this section are exhibited and discussed the experimental results obtained from the engine by using POME and PKOME with respect to diesel fuel operation. The investigation is focused on engine performance, combustion characteristics and exhaust emission variation with different engine load for POME and PKOME used in experiments are discussed in detail below.

#### 3.1. Engine performance characteristics

The variation of brake specific fuel consumption (BSFC) with engine load for POME, PKOME and diesel fuel is shown in Fig. 5. The BSFC is engine parameters to evaluate performance of diesel engine with various fuels and it can be calculated, by dividing the brake power with the fuel mass flow rate [26]. The experimental results showed that BSFC is found decreasing with an increase in engine load for all teste fuels. The reduction of BSFC can also be linked to increase of thermal efficiency that also increases with load increase. BSFC for POME and PKOM are higher than diesel fuel owing to the lower gross calorific values of POME and PKOM compared to diesel fuel [27]. This reason led to higher amount of fuel to be injected into the combustion chamber to maintain the constant power output. On the other hand, BSFC of PKOME was also found to be higher than POME. This result can maybe indicate that the reason above.

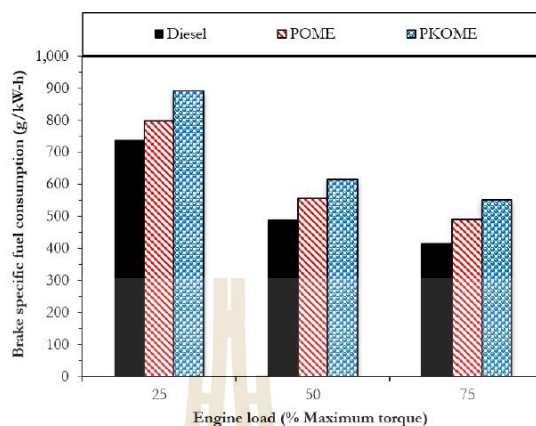


Fig. 5. Brake specific fuel consumption variation with engine loads.

The variation of brake thermal efficiency (BTE) with engine load for POME, PKOME and diesel fuel is shown in Fig. 6. BTE signifies the conversion efficiency from chemical energy of fuel is converted to mechanical power [25]. The experimental results showed that BTE increased with increasing engine load for all test fuels. The behavior of this result was due to the increase amount of the injected fuel, which resulting in the increase of combustion efficiency. The significance factors that affect BTE are the spray characteristics and atomization of the fuels in the combustion chamber. It was found that the higher density and kinematic viscosity led to poor volatilization and atomization process of the fuel particles in the combustion chamber which caused uniformity of combustion [28-29]. Therefore, the higher density and kinematic viscosity of POME and PKOME led to decrease the BTE of POME and PKOME when compared to diesel fuel for all engine load. Meanwhile, BTE of PKOME was obtained to be higher than POME for all engine load. Because of the higher length of carbon chain and kinematic viscosity for POME provided significant reduction in thermal efficiency [30]

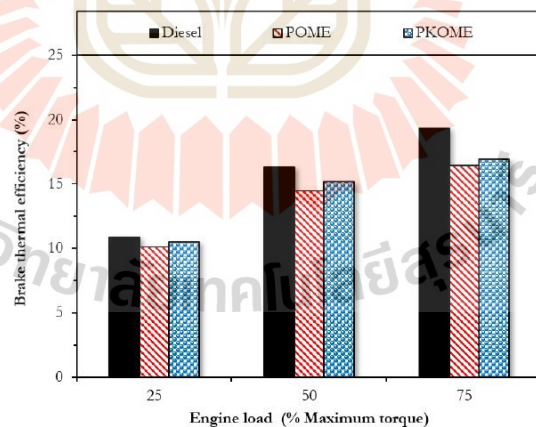


Fig. 6. Brake thermal efficiency variation with engine loads.

### 3.2. Combustion characteristics

Combustion characteristics of test fuels can be described by means of in-cylinder pressure (ICP) and rate of heat release biodiesel (RoHR). ICP is significant parameter unusually measured by pressure transducer that indicates the combustion characteristics of test fuels in combustion chamber and RoHR of test fuels was calculated from the in-cylinder pressure and combustion chamber volume at each crank angle by the following Eq. (2) which was derived from basic principles of first law of thermodynamics and the assumption of polytropic process [31-32].

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{d\theta} \quad (2)$$

Where  $dQ/d\theta$  is the rate of heat release,  $p$  is the in-cylinder pressure,  $V$  is the volume of combustion chamber,  $\theta$  is the crank angle and  $\gamma$  represents the constant specific heat ratio ( $\gamma=1.35$ ).

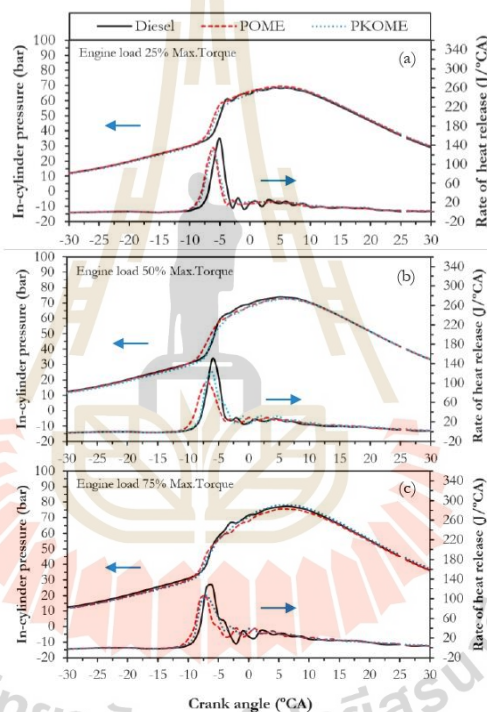


Fig. 7. The variations of in-cylinder pressure and rate of heat release against crank angle at various engine load.

The ICP and RoHR against crank angle diagram for POME and PKOME with respect to the diesel fuel at different engine load are presented in Fig. 7(a)-(c). ICP depends on the burned fuel fraction during the premixed burning phase. In testing with the diesel engine, the ICP increased with increase of engine load for all test fuels.

Furthermore, the RoHR is helpful to get some information about the combustion characteristics of the engine. As the results of the RoHR, it can be noted that the maximum RoHR for the test fuels tended to



decreases with increased engine load. Due to the low engine the engine has a longer ignition delay compared to the high engine load. Causing the amount of oil waiting to be ignited a lot, led to the maximum RoHR during the premixed combustion occurring at low engine load. On the other hand, at high engine load can be observed that the low peak of RoHR is due to insufficient oil ignition condition at high engine load causing residual oil to be ignited during mixing-controlled combustion phase and late combustion phase. The results evaluated that the higher density and lower heating value of POME and PKOME resulted lower RoHR compared to diesel fuel [31]. However, RoHR does not depend on only this factor, it also depends on oxygen content and latent heat of vaporization, which affects the release of premixed combustion heat. POME and PKOME have less calorific value compared to diesel fuel, thus RoHR for POME and PKOME was lower than that of diesel fuel operation [33].

The use of POME and PKOME resulted in shorter ignition delay when compared with diesel fuel for all engine load. This may be because chemical characteristics of POME and PKOME having higher oxygen content has decreased ignition delay [34]. In addition, the higher bulk modulus and carbon chain length of POME together with its higher viscosity may slightly advance the start of combustion and shorter the ignition delay compared to PKOME [30].

### 3.3. Emissions characteristics

The variation of nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ) emissions with engine load for POME, PKOME and diesel fuel is shown in Fig. 8.  $\text{NO}_x$  emissions is one of the major pollutants emitted by a compression ignition engine and it is mainly comprised of two compounds, namely nitric oxide (NO) and nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ) [35].

As the engine load increases, the fuel-air ratio increases resulting in an increase in the cylinder combustion temperature and adiabatic flame temperature. Hence  $\text{NO}_x$  formation, which is sensitive to temperature increase. The  $\text{NO}_x$  emission for POME and PKOME were lower than those for diesel fuel although higher oxygen content of biodiesel helps to improve the combustion efficiency. However, the higher viscosity of fuel can be attributed to larger droplet size injection and higher amount of biodiesel injected resulting an absorb temperature in the combustion chamber that enhances increased  $\text{NO}_x$  emissions. Therefore, decreasing of the combustion temperature in order to inhibit thermal  $\text{NO}_x$  emissions, that could reduce  $\text{NO}_x$  emissions from combustion process of test fuels [36]. As comparing between POME and PKOME, higher  $\text{NO}_x$  emissions were found by the combustion of PKOME. Due to  $\text{NO}_x$  emissions increased as the carbon chain length decreased and as the unsaturation increased that indicated the oxygen content contained in PKOME is higher than POME, resulting in an increase in the combustion temperature (see in Fig. 7) [37].

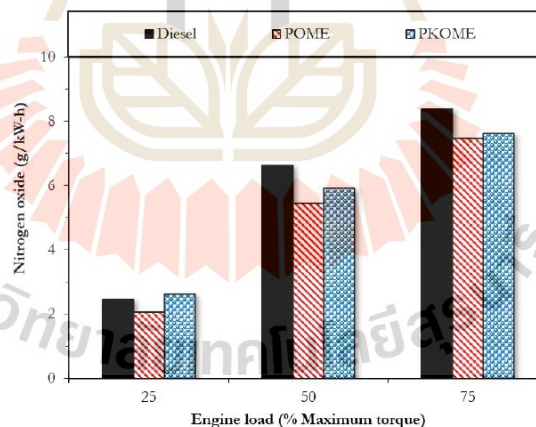


Fig. 8. Nitrogen oxides variation with engine loads.

The variation of carbon monoxide (CO) emissions with engine load for POME, PKOME and diesel fuel is shown in Fig. 9. CO originate in the incomplete combustion of fuels during the combustion process in combustion chamber, which occurs when enough oxygen is not available [36]. Usually, CO emissions are affected by fuel characteristics, engine design and engine operating conditions. The experiment showed that the amount of CO emissions increased with increasing engine load for all test fuels, and the CO emissions amount of POME and PKOME were higher compared to diesel fuel at low and middle engine load. This result was mainly related to the high viscosity of biodiesel affected poor atomization, resulting in incomplete combustion and more CO emissions [38]. For this reason was analyzed corresponds to the fuel properties of test fuels (see in Table 2). However, at high engine loads, there was not significant difference in the amount of CO between diesel fuel and biodiesel. it corresponds to the fuel combustion result in Fig. 7 that because the temperature within the combustion chamber is more influential for the combustion of biodiesel resulting in the closer CO emissions compared to diesel fuel. When comparing between POME and PKOME, it was found that no significant difference in amount of CO emissions.

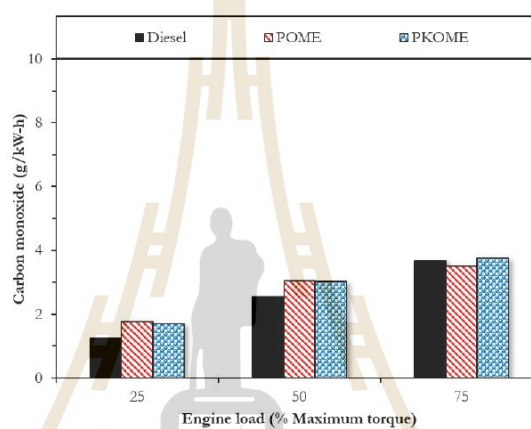


Fig. 9. Carbon monoxide variation with engine loads.

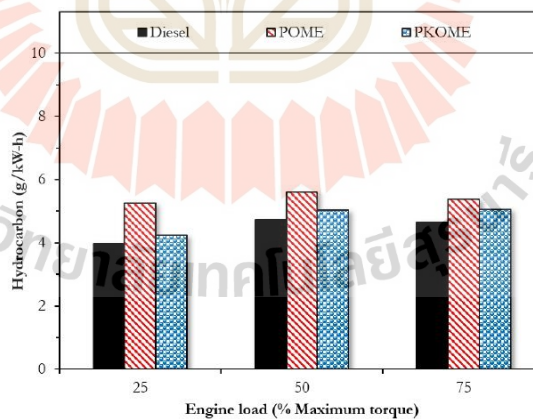


Fig. 10. Unburned hydrocarbon variation with engine loads.

The variation of unburned hydrocarbon (HC) emissions with engine load for POME, PKOME and diesel fuel is shown in Fig. 10. The HC emissions were increased as the engine load is increased for all test fuels. Due to decreasing A/F ratio with the increase of engine load, which initiate more fuel to be deposited on the walls and produces higher concentrations in the spray core. The HC emissions formed in this cause increase [39-40]. The HC emissions of POME and PKOME were higher compared to diesel fuel due to higher bulk modulus, kinematic viscosity and lower gross calorific value for biodiesel fuel. When comparing between the HC emissions of POME and PKOME at the same engine load, it can be seen that HC emissions for POME were higher than those of PKOME. Because of high viscosity of POME provide poor atomization in the engine, which causes a drop in the engine performance along with increase of HC emissions [41].

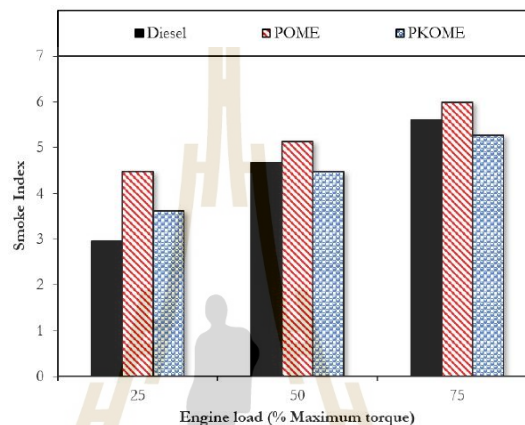


Fig. 11. Smoke index variation with engine loads.

The variation of smoke index with engine load for POME, PKOME and diesel fuel. From the Fig. 11, the results showed that smoke index increased with increase in engine loading for all test fuels. This was due to the increase in fuel consumption which led to rich mixtures of the air-fuel during combustion. In fact, the higher oxygen content in POME and PKOME, which may lead to lean combustion in the combustion chamber and effectively improve the combustion efficiency [42]. On the other hand, the fuels properties with higher density and kinematic viscosity of POME and PKOME will greatly affect the atomization and process of volatilization attributing in greater smoke, especially at low engine load. Therefore, the smoke index of POME and PKOME was higher compared to diesel fuel at low engine load. While the engine load is higher, the temperature inside the combustion chamber is high enough to evaporate the biodiesel better. As a result, the difference in the smoke index between diesel and biodiesel tends to decrease. However, the lowest smoke index of PKOME was found during the test at middle and high engine load operating. Due to its closer kinematic viscosity and higher oxygen content when compared with diesel fuel and lower carbon content in the fuel as compared to POME which led to better combustion [43]. This effect was more severe at middle and high engine load condition where the temperature in combustion chamber was high.

#### 4. Conclusions

The purpose of this research is to determine the effect of different stirred methods on quality of produced biodiesel. As comparison between mechanical-stirred (MS) and ultrasonic (US) methods for biodiesel production from palm oil (POME) and palm kernel oil (PKOME). The following conclusions can be drawn.

- The maximum biodiesel production yield of 82.61% and lowest kinematic viscosity of 4.78 cSt were found in the batch of palm oil using MS with reaction time of 60 minutes.
- The palm kernel oil gave the highest biodiesel yield of 92.59% and lowest kinematic viscosity 3.39 cSt using US with reaction time of 90 minutes.

Moreover, this study aims to investigate the effects of POME and PKOME on engine performances, combustion characteristics and exhaust emissions in a diesel engine. The findings from the engine test can be summarized as followed.

- The use of POME and PKOME tended to increase BSFC, resulting in the decrease in BTE with respect to diesel fuel.
- The effect of POME and PKOME on combustion characteristics was found that POME and PKOME led to increase in-cylinder pressure as engine load increased. Furthermore, the use of POME and PKOME results in the advance in start of combustion with respect to diesel fuel, resulting in lower rate of heat release.
- The results of exhaust emissions showed that the combustion of POME and PKOME increased CO, HC and smoke emissions while decreased NO<sub>x</sub> emissions in comparison with diesel fuel.
- Lower HC and smoke emissions was obtained by the use of PKOME than POME, while there was no penalty in CO emissions. However, the combustion of PKOME tended to increase NO<sub>x</sub> with respect to POME.
- The clear benefits of PKOME to reduce NO<sub>x</sub> and smoke emissions was found when the engine was operated at high load.
- The use of biodiesel from palm oil and palm kernel oil can be a potential oil for diesel fuel. However, further research work may need to be studied to investigate the optimum properties for the engine under additional testing conditions.

#### References

- [1] P. Yuthana. (2020). *Eppo: Energy use to grow (Low oil prices propel consumption in 2020)*. Available online: <https://www.bangkokpost.com> [Accessed: 9 January 2021].
- [2] G. Knothe, J. Krahl, & J. Van Gerpen, "Biodiesel Production," In *The Biodiesel Handbook*, 2<sup>nd</sup> ed., AOCS Press, 2010, ch.4, pp. 31-96.
- [3] Tarbuka, P., Onocha, O., & Ohimor, O., "Production of biodiesel from palm kernel oil (PKO) using sodium-ethoxide: The effect of time," *International Journal of Research in Engineering and Innovation*, vol. 1, pp. 1-4, 2017.
- [4] Abed, K. A., Gad, M. S., El Morsi, A. K., Sayed, M. M., & Elyazeed, S. A., "Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions," *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 28(2), pp. 183-188, 2019.
- [5] Office of Agricultural Economics, Ministry of Agriculture and Cooperatives (2020). *Agricultural Economic Information: Palm oil production*. Available online: <https://www.oae.go.th> [Accessed: 10 January 2021].
- [6] Demirbaş, A., "Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines," in *Springer*, London, England, 2008.
- [7] Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Dehghani, M., Panahi, H. K. S., Mollahosseini, A., Hosseini, M., & Soufiyan, M. M., "Reactor technologies for biodiesel production and processing: A review," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 74, pp. 239-303, 2019.
- [8] Kiss, A. A., "Process intensification technologies for biodiesel production: reactive separation processes," *Springer Science & Business Media*, 2014.
- [9] Zahan, K. A., & Kano, M., "Technological Progress in Biodiesel Production: An Overview on Different Types of Reactors," *Energy Procedia*, vol. 156, pp. 452-457, 2019.
- [10] Sáez-Bastante, J., Pinzi, S., Arzamendi, G., De Castro, M. L., Priego-Capote, F., & Dorado, M., "Influence of vegetable oil fatty acid composition on ultrasound-assisted synthesis of biodiesel," *Fuel*, vol. 125, pp. 183-191, 2014.
- [11] Manickam, S., Arigela, V. N. D., & Gogate, P. R., "Intensification of synthesis of biodiesel from palm oil using multiple frequency ultrasonic flow cell," *Fuel Processing Technology*, vol. 128, pp. 388-393, 2014.
- [12] Shinde, K., & Kaliaguine, S., "A Comparative Study of Ultrasound Biodiesel Production Using Different Homogeneous Catalysts," *Chem Engineering*, vol. 3(18), 2019.
- [13] Ashokkumar, M., "The characterization of acoustic cavitation bubbles – An overview," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 18(4), pp. 864-872, 2011.
- [14] Chuah, L. F., Klemesš, J. J., Yusup, S., Bokhari, A., & Akbar, M. M., "A review of cleaner intensification technologies in biodiesel production," *Journal of Cleaner Production*, vol. 146, pp. 181-193, 2017.
- [15] Manickam, S., Arigela, V. N. D., & Gogate, P. R., "Intensification of synthesis of biodiesel from palm oil using multiple frequency ultrasonic flow cell," *Fuel Processing Technology*, vol. 128, pp. 388-393, 2014.

- [16] Shinde, K., & Kaliaguine, S., "A comparative study of ultrasound biodiesel production using different homogeneous catalysts," *ChemEngineering*, vol. 3(1), pp. 18, 2019.
- [17] Topare, N. S., Patil, K. D., Naik, P., Sonawane, A., & Joshi, P., "Application of Ultrasound for Synthesis of Biodiesel," *Int ETCE*, vol. 2, pp. 1-8, 2015.
- [18] Laosuttiwong, T., Ngaosuwan, K., Kiatkittipong, W., Wongsawaeng, D., Kim-Lohsoontorn, P., & Assabumrungrat, S., "Performance comparison of different cavitation reactors for biodiesel production via transesterification of palm oil," *Journal of Cleaner Production*, vol. 205, pp. 1094-1101, 2018.
- [19] Martinez-Guerra, E., & Gude, V. G., "Determining optimum pulse mode for ultrasound enhanced biodiesel production," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 35, pp. 14-19, 2016.
- [20] Pandu, R., & Farizal, F., "Plastic Waste Pyrolysis Optimization to Produce Fuel Grade Using Factorial Design," *E3S Web of Conferences*, vol. 125, pp. 13005, 2019.
- [21] Bhatia, S. C., "Biodiesel," in *Advanced Renewable Energy Systems*, Woodhead Publishing India, 2014, ch.22, pp. 573-626.
- [22] Bruno, T. J., "Improvements in the Measurement of Distillation Curves. 1. A Composition-Explicit Approach," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 45(12), pp. 4371-4380, 2006.
- [23] Stan, C., Andreescu, C., Dobre, A., & Iozsa, D., "Experimental Study on the Distillation Capacity of Alcohol-Gasoline Blends," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 252, 012069, 2017.
- [24] Atzemi, M., Lois, E., & Kosyologou, I., "Effects of biodiesel and Hydrotreated Vegetable Oil on the performance and exhaust emissions of a stationary diesel engine," *IOSR Journal of Applied Chemistry*, vol. 12, pp. 44-54, 2019.
- [25] Ramírez-Verduzco, L. F., & Hernández-Sánchez, M. J., "Blends of Green Diesel (Synthesized from Palm Oil) and Petroleum Diesel: a Study on the Density and Viscosity," *BioEnergy Research*, 2020.
- [26] Yusop, A. F., Mamat, R., Yusaf, T., Najafi, G., Yasin, M. H. M., & Khathri, A. M., "Analysis of Particulate Matter (PM) Emissions in Diesel Engines Using Palm Oil Biodiesel Blended with Diesel Fuel," *Energies*, vol. 11(5), pp. 1039, 2018.
- [27] Mohiddin, M. N., Ahmed, A., Reddy, A. N. R., & Hamdan, S., "A Study on Chicken Fat as an Alternative Feedstock: Biodiesel Production, Fuel Characterisation, and Diesel Engine Performance Analysis," *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, vol. 15, pp. 5535-5546, 2018.
- [28] Dhamodaran, G., Krishnan, R., Pochareddy, Y., Pyarelal, H., Sivasubramanian, H., & Ganeshram, A., "A comparative study of combustion, emission, and performance characteristics of rice-bran-, neem-, and cottonseed-oil biodiesels with varying degree of unsaturation," *Fuel*, vol. 187, pp. 296-305, 2017.
- [29] Chandran, M., Tamilkolundu, S., & Murugesan, C., "Characterization studies: waste plastic oil and its blends," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 42(3), pp. 281-291, 2020.
- [30] Lapuerta, M., Amas, O., & Rodríguez-Fernández, J., "Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions," *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(2), 198-223, 2008.
- [31] Sakthivel, G., Nagarajan, G., Ilangkumaran, M., & Gaikwad, A. B., "Comparative analysis of performance, emission and combustion parameters of diesel engine fuelled with ethyl ester of fish oil and its diesel blends," *Fuel*, vol. 132, pp. 116-124, 2014.
- [32] Hey, John B. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill: New York; 1988. pp. 508.
- [33] Santhoshkumar, A., Thangarasu, V., & Anand, R. (2019). *Chapter 12 - Performance, combustion, and emission characteristics of DI diesel engine using mahua biodiesel*. In A. K. Azad & M. Rasul (Eds.), *Advanced Biofuels*: Woodhead Publishing: pp. 291-327.
- [34] Pumpuang, A., Maithomklang, S., Sukjit, E., et al., "Utilization of castor oil-based ethyl ester biodiesel in a diesel engine," *SAE Technical paper*, 2020, No. 2019-32-0606.
- [35] Kattimani, S. S., Topannavar, S. N., Shivashimpi, M. M., & Dodamani, B. M., "Experimental investigation to optimize fuel injection strategies and compression ratio on single cylinder DI diesel engine operated with FOME biodiesel," *Energy*, vol. 200, 117336, 2020.
- [36] Majewski, A., & Khair, M., "Diesel Emissions and Their Control," SAE International, Warrendale, 2006, ch.7, pp. 121-145.
- [37] Silitonga, A. S., Masjuki, H. H., Mahlia, T. M. I., Ong, H. C., Chong, W. T., & Boosroh, M. H., "Overview properties of biodiesel diesel blends from edible and non-edible feedstock," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, pp. 346-360, 2013.
- [38] Ganjehkaviri, A., Mohd Jaafar, M. N., Hosseini, S. E., & Musthafa, A. B., "Performance Evaluation of Palm Oil-Based Biodiesel Combustion in an Oil Burner," *Energies*, vol. 9(2), pp. 97, 2016.

- [39] Wu, G., Ge, J. C., & Choi, N. J., "A Comprehensive Review of the Application Characteristics of Biodiesel Blends in Diesel Engines," *Applied Sciences*, vol. 10(22), 8015, 2020.
- [40] Maithomklang, S., Sukjit, E., & Srisertpol, J., "Experimental investigation of ethanol blended with waste plastic oil as an alternative biofuel in a diesel engine," *Energy Sources, Part A: Recovery, Suranaree J. Sci. Technol.*, vol. 27(7), pp. 010022(1-7), 2020.
- [41] Wirawan, R. P., & Farizal, "Plastic Waste Pyrolysis Optimization to Produce Fuel Grade Using Factorial Design," *E3S Web of Conferences*, vol. 125, 13005, 2019.
- [42] Patil, A., & Taji, D. S., "Effect of Oxygenated Fuel Additive on Diesel Engine Performance and Emission: A Review," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 2278-1684, 2013.
- [43] Abed, K. A., Gad, M. S., El Morsi, A. K., Sayed, M. M., & Elyazeed, S. A., "Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions," *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 28(2), pp. 183-188, 2019.



Article

## Evaluation of Waste Plastic Oil-Biodiesel Blends as Alternative Fuels for Diesel Engines

Chalita Kaewbuddee, Ekarong Sukjit \*, Jiraphon Srisertpol, Somkiat Maithomklang, Khatha Wathakit, Niti Klinkaew, Pansa Liplap and Weerachai Arjharh

Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Suranaree Sub-District, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand; annen\_ch@hotmail.com (C.K.); jiraphon@sut.ac.th (J.S.); somkiat\_mai@outlook.co.th (S.M.); vkata@sut.ac.th (K.W.); niti\_nick@hotmail.com (N.K.); pansa@sut.ac.th (P.L.); arjharh@g.sut.ac.th (W.A.)

\* Correspondence: ekarong@sut.ac.th

Received: 27 April 2020; Accepted: 29 May 2020; Published: 2 June 2020



**Abstract:** This study examined the use of waste plastic oil (WPO) combined with biodiesel as an alternative fuel for diesel engines, also commonly known as compression ignition engines, and focused on comparison of the basic physical and chemical properties of fuels, engine performance, combustion characteristics, and exhaust emissions. A preliminary study was conducted to determine the suitable ratio for the fuel blends in consideration of fuel lubricity and viscosity, and these results indicated that 10% biodiesel—derived from either palm oil or castor oil—in waste plastic oil was optimal. In addition, characterization of the basic properties of these fuel blends revealed that they had higher density and specific gravity and a lower flash point than diesel fuel, while the fuel heating value, viscosity, and cetane index were similar. The fuel blends, comprised of waste plastic oil with either 10% palm oil biodiesel (WPOP10) or 10% castor oil biodiesel (WPOC10), were selected for further investigation in engine tests in which diesel fuel and waste plastic oil were also included as baseline fuels. The experimental results of the performance of the engine showed that the combustion of WPO was similar to diesel fuel for all the tested engine loads and the addition of castor oil as compared to palm oil biodiesel caused a delay in the start of the combustion. Both biodiesel blends slightly improved brake thermal efficiency and smoke emissions with respect to diesel fuel. The addition of biodiesel to WPO tended to reduce the levels of hydrocarbon- and oxide-containing nitrogen emissions. One drawback of adding biodiesel to WPO was increased carbon monoxide and smoke. Comparing the two biodiesels used in the study, the presence of castor oil in waste plastic oil showed lower carbon monoxide and smoke emissions without penalty in terms of increased levels of hydrocarbon- and oxide-containing nitrogen emissions when the engine was operated at high load.

**Keywords:** waste plastic oil; biodiesel; castor oil; emission; diesel engine

### 1. Introduction

The demand for and consumption of energy is expected to increase, especially for fossil fuels. In Thailand, fossil fuels, also known as conventional energy, are widely used in various forms of transportation and industrial plants because of their convenience and ability to provide a high heating value. Fossil fuels are a nonrenewable resource which continues to be used by humans, with demand steadily increasing. Thus, these fossil fuels will soon be entirely consumed. For this reason, many countries are beginning to rely more on alternative energy or renewable energy sources.

Thailand still lacks any significant alternative sources of energy. Moreover, it produces insufficient energy to meet the demand, resulting in the import of over 49% of its consumed energy in 2017 [1]. The value of crude oil and imported petroleum products in Thailand increased by 39.8% and 23.0%, in

2016 and 2017, respectively, due to the higher oil demand. Thailand has mainly imported crude oil from Middle Eastern countries. In Thailand, the share of energy from renewable sources is expected to increase steadily. To increase this share and reduce primary energy consumption, waste plastic oil has been proposed as a new option for use in transportation. While there is less demand for transportation energy, this initiative represents a move toward the direction of diversification of fuels through energy conversion technologies. It also focuses on using oil from plastic waste in diesel engines. Plastic waste is a petroleum waste that comes from both household and industrial sectors, leading to a large amount of plastic waste. These wastes require hundreds of years for decomposition and are a burden to manage. Most plastic is recycled using mechanical recycling, while only 2% of chemicals are recycled [2]. Generally, the waste management process that is currently popular is the landfill method, which normally requires a lot of landfill space and has an impact on the environment, resulting in soil pollution.

Plastic waste is composed of hydrocarbons, which are the main component of conventional fuels. This raises the possibility of recycling these plastic wastes through their conversion into fuel. Products can also be obtained from the production process, in addition to being used as an energy source similar to conventional fuels. It is also able to provide environmental benefits in terms of waste management for maximum benefits and reduction in the amount of plastic waste, reduced plastic waste disposal, and also minimizing the problem of finding places for garbage landfills. The use of plastic waste as a renewable energy feedstock also helps in mitigating the energy crisis.

Several studies have investigated the use of waste plastic oil in diesel engines as an alternative fuel. Waste plastic pyrolysis oil has properties that are similar to diesel fuel, including the heating value, density, and cetane index, and can be used as a substitute for diesel fuel [3]. The literature also shows that diesel engines use waste plastic oil to provide stability in performance and a similar efficiency [4]. The different types of plastics are also basically impacted by their different compositions. Recent studies have shown that the oil product of HDPE (high-density polyethylene), mixed with LDPE (low-density polyethylene), has a higher heating value than LDPE, PP (polypropylene), and HDPE alone. It was revealed that LDPE produces the highest yields [5]. Waste plastic oil has also been studied with regard to engine power, and it was found that there was no significant difference from diesel fuel [6]. The thermal efficiency of waste plastic oil was higher when compared to diesel fuel [7,8]. However, one study examined the exhaust emissions of a four-cylinder, direct-injection diesel engine running on diesel blended with different ratios of waste plastic oil and found that the amount of nitrogen oxides increased because of the longer ignition delay [9] and that there was greater hydrocarbon emission in comparison to diesel fuel [10].

In addition, it is expected that biodiesel will be used as a renewable energy source in the energy transportation sector. A great deal of research supports the use of biodiesel as a suitable alternative in replacing diesel fuel. The presence of oxygen in fuel molecules is expected to result in cleaner biodiesel combustion, leading to improvements when considering emission. However, there are only a few reports on the use of biodiesel mixed with waste plastic oil. For example, Ramesha et al. [11] reported that B20 algae biodiesel blended with waste plastic oil can be a suitable fuel for diesel engines. The waste plastic oil-biodiesel blend showed an increase of 16% in brake thermal efficiency with respect to diesel engines. Additionally, the carbonaceous gas emissions, including hydrocarbons and carbon monoxide, were decreased, but nitrogen oxides slightly increased, as compared to diesel fuel. In the study by Senthilkumar et al. [12], waste plastic oil was mixed with *Jatropha* biodiesel for diesel engines. The brake thermal efficiency and brake specific fuel consumption of the waste plastic oil-biodiesel blend were higher than the waste plastic oil. The hydrocarbon and carbon monoxide emissions decreased when waste plastic oil was blended with *Jatropha* biodiesel.

In the present work, waste plastic oil-biodiesel blends were used as an alternative fuel in a diesel engine without any engine modifications. The selected biodiesels were produced from castor oil and palm oil through a transesterification process and were then blended with waste plastic oil. Palm is an important economic crop and main feedstock for biodiesel production in Thailand. To avoid the use



of edible feedstock, castor oil was considered because of its benefits of high oxygen content in fuel molecules and excellent fuel lubricity. These properties are attributed to the presence of ricinoleic acid, which is the main component of castor oil [13]. The oxygen in the fuel molecules contributes to better combustion processes in terms of emissions. In this study, we evaluated the effect of biodiesel addition to waste plastic oil in terms of basic physical and chemical fuel properties of the resulting fuel mixture, mainly focusing on fuel lubricity and viscosity, engine performance, combustion characteristics, and exhaust gas emissions of a single-cylinder diesel engine. In the section of combustion characteristics, basic parameters comprised of in-cylinder pressure and crank angle were recorded during the engine test. After that, heat release rate of test fuels was calculated on the basic principles of the first law of thermodynamics, which the specific heat ratio was calculated based on the in-cylinder pressure and combustion chamber volume through the assumption of polytropic process.

## 2. Materials and Methods

As part of this research, some physical and chemical properties of test fuels were determined. Experimental tests were carried out on a single-cylinder diesel engine (model Kirloskar TV1 with product code 240PE). The engine was connected to an eddy current dynamometer to simulate the load and was tested at a constant speed of 1500 rpm under variable load conditions, i.e., low, medium, and high load conditions (25%, 50%, and 75% of the maximum torque). The gas detector was used to determine the levels of carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), hydrocarbon (HC), and smoke. The fuel consumption of the engine was tested by adjusting the load of the diesel engine. Therefore, the scope of this research project was limited to the following:

- To find a suitable ratio of the fuel blend by mainly considering fuel lubricity and viscosity; the fuel blends were prepared at various ratios, i.e., 0%, 5%, 10%, and 15% (by volume) of the biodiesel to the waste plastic oil.
- To test the suitable fuel blends with a single-cylinder diesel engine without any engine modifications. The objective of this test was to evaluate engine performance, combustion characteristics, and exhaust emissions.

### 2.1. Materials

In this experimental investigation, waste plastic oil (WPO) was used as the main fuel, whereas the other fuels included castor oil methyl ester (COME) and palm oil methyl ester (POME) as components for blending with WPO. The diesel fuel was commercial diesel fuel (B7) containing 7% biodiesel, according to the department of energy business in Thailand. The waste plastic oil used in this research project was produced from waste plastic by the pyrolysis method. The pyrolysis process is a chemical process of heating that decomposes plastics in the absence of oxygen. The master plant that processes waste plastic to oil is located at Suranaree University of Technology.

#### 2.1.1. Waste Plastic Oil

The raw materials used in this study were from plastic waste, such as plastic waste bags collected from waste in Suranaree Subdistrict, Nakhon Ratchasima, Thailand. The composition of these plastics includes polyethylene (PE) and polystyrene (PS) and about 70% was contaminated organic matter. The waste plastics obtained from mechanical biological treatment (MBT) were processed into raw materials using an agglomerator, which processed the plastic into small pieces that could be continuously fed into the oil processing plant. The waste plastic oil was recycled using pyrolysis and did not undergo distillation.

The pyrolysis process involves the breakdown of large molecules into smaller molecules by chemically decomposing organic matter through heating in an oxygen-free environment. Waste plastic is processed to maintain a temperature of 300–350 °C inside the reactor, where the waste plastic is then vaporized and the outlet gas condensed through the condenser unit at this high temperature. The

obtained liquid was taken as fuel, and this process happened constantly in converting the waste plastic back into usable oil. All gases from this process were treated before being released into the atmosphere. The exhaust gas was treated through scrubbers and chemical treatment for neutralization. From the pyrolysis process, the following output products were collected: Waste plastic oil (70%), gas (10%), and solid (20%), with values based on the weight of the input. The plastics yielded approximately 600 L per ton.

#### 2.1.2. Production of Castor Oil Biodiesel and Palm Oil Biodiesel

The experimental work was carried out in a laboratory at Suranaree University of Technology. Castor oil was used in the transesterification process to convert castor oil into castor oil methyl ester. Methanol and potassium hydroxide (KOH) catalyst were used for the reaction. The reaction was carried out using methanol and castor oil in a 9:1 molar ratio with 0.5% KOH (by weight of oil). The KOH was first dissolved in methanol and was then mixed with the castor oil. This mixture was heated and stirred using an electric heater and a magnetic stirrer. The reaction was carried out at a constant temperature of 50 °C for about 120 min. Then, the mixture was poured into a separating funnel to separate the methyl ester of castor oil and glycerol. The layers were separated and were allowed to settle for a minimum period of 8 h, with glycerol at the bottom layer and the ester at the top layer. The castor oil methyl ester was then washed with water to remove any traces of methanol or potassium hydroxide that was not reacted. The castor oil methyl ester was heated to 120 °C for moisture removal.

However, palm oil was also used with methanol and potassium hydroxide (KOH) in the reaction. The reaction was carried out by taking methanol and palm oil in a 12:1 molar ratio and 2% KOH (according to the weight of the oil). KOH was dissolved in methanol and this mixture was then mixed with palm oil. This mixture was heated and stirred using an electric heater and a magnetic stirrer. The reaction was carried out at a constant temperature of 60 °C for about 30 min. Then, the mixture was poured into a separating funnel to separate the methyl ester of the palm oil and glycerol. The layers were separated and allowed to settle for 24 h, with glycerol at the bottom layer and the ester at the top layer. The palm oil methyl ester was then washed with water to remove any traces of methanol or potassium hydroxide that was not reacted. The palm oil methyl ester was heated to 120 °C for moisture removal.

#### 2.2. Gas Chromatography Analysis

The column for GC-MS analysis was a DB-wax capillary column (60 m length × 0.25 mm inner diameter, 0.25 µm film thickness). Helium was used as a carrier gas with a constant flow rate of 1.0 mL/min. The oven temperature was programmed to operate from 70 °C to 250 °C, with the initial temperature of 70 °C that was held for 3 min, followed by a rate of heating of 3 °C/min to a temperature of 180 °C and then a rate of 10 °C/min to a final temperature at 250 °C, which was held for 25 min. The inlet was held at 250 °C with a split ratio of 20:1. The injection volume was 1 µL per sample. The mass spectrometer was scanned from mass to charge ratio ( $m/z$ ) of 35 to 550 with the source at 250 °C.

#### 2.3. Experimental Setup

An experimental investigation was tested to evaluate and compare the results obtained for the use of different types of test fuels. This study aimed to investigate the effect of waste plastic oil blended with biodiesel on engine performance and the emission of a single-cylinder diesel engine. WPOC10 and WPOP10 were selected for experimental comparison based on initial experiment data regarding the lubrication and viscosity of the blended fuels, whereby 10% biodiesel and 90% waste plastic oil was determined to be the optimal ratio for further testing in the engine. The total number of samples was four test fuels (using either WPOC10, WPOP10, WPO, diesel), which were prepared for testing with the equipment and measuring tools used in the laboratory as follows: A four-stroke, single-cylinder diesel engine (Kirloskar TV1) with a water cooler system, direct injection, and a rated output power of 3.5 kW at 1500 rpm, unmodified and under different loading conditions. The engine was mounted

on a fixed bed floor in the laboratory room and the load was applied on the engine. A picture of the experimental setup is shown in Figures 1 and 2, and the engine specifications are given in Table 1.



Figure 1. Experimental setup for engine testing.

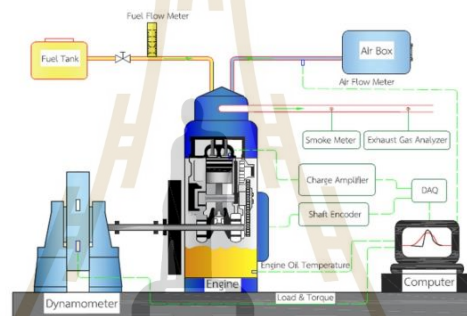


Figure 2. A schematic diagram of the experimental installation.

Table 1. Test engine specifications.

Engine	Specification
Model	Kirloskar TV1
Engine type	Single cylinder, 4 stroke, Water cooler, Direct injection
Bore	87.5 mm
Stroke	110 mm
Connecting rod length	234 mm
Swept volume	661 cc
Rate output	3.5 kW at 1500 rpm
Compression ratio	12–18
Dynamometer	Eddy current, Water cooler

The observation results during testing in the engine were used to evaluate the use of different fuel blends in comparison to the commercial diesel fuel and waste plastic oil as a reference. Three repetitions were carried out in each test to obtain the average values for analysis. The used confidence intervals corresponded to a 95% confidence level with respect to statistical significance of the result trends.

### 2.3.1. Testing by Adjusting Engine Load

Engine tests were done by loading the engine to a level that simulated the workload condition of the engine. Three engine loading conditions (25%, 50%, and 75% of the maximum engine torque) were chosen for engine experiments, and the engine loads were adjusted by the eddy current dynamometer, which acted as a brake and an enabling measurement of the engine's torque. The knob on the dynamometer loading unit was rotated to gradually adjust the engine load to ensure that the load on the load indicator gradually changed for each load value before the test. The experiment was performed using various blends at different loads, from low to high loads, at a constant speed. Furthermore, before testing the engine output with different fuels, the engine was always cleaned prior to installing the fresh oil to ensure the new oils were tested according to the intended compositions.

The fuel consumption was measured using a burette and stopwatch to determine the change in the fuel volume divided by the testing time. The burette with a unit of volume in mL was used to determine the volume of spent fuel. The tests were performed by counting the time needed using a stopwatch to determine the length of time before the fuel ran out. This required a fixed test fuel volume in a burette of 10 mL, and this measurement was repeated three times. The determination of each output value, such as the brake-specific fuel consumption, thermal efficiency, combustion, and amount of gas emission, was based on recordings at each engine load change using the four tested fuels.

### 2.3.2. Emission Testing

In each engine test, the engine load was gradually adjusted using the knob, and the actual engine speed was measured through encoder wheel monitoring, to measure the tested value of the exhaust gas emission of fuel blends.

The data corresponding to the parameters of engine combustion characteristics were collected through the signals from an in-cylinder pressure sensor and shaft encoder, both of which were analyzed using IC Engine Soft of Apex Innovations' software. The amount of nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ), hydrocarbon (HC), carbon monoxide (CO), and smoke in emissions was measured by the engine exhaust emission analyzer using a Testo 350 Gas analyzer for CO,  $\text{NO}_x$ , and HC, and a Testo 308 for smoke by installing the equipment for the experiment, as shown in Figure 2.

The Testo 350 and Testo 308 exhaust gas analyzers were used to measure the exhaust gas. The exhaust emission probe was placed in the tailpipe of the engine and the exhaust gas emissions were measured. The test engine was run to idle for approximately 10 min in order to ensure the stability of the engine before measuring the exhaust gas emissions. The Testo 350 was analyzed by using a nondispersive infrared and electronic chemical method. Furthermore, the Testo 308 was analyzed using the principles of absorption photometry.

## 3. Results and Discussions

### 3.1. Test Fuels

In order to improve the properties of waste plastic oil by combination with biodiesel, such as through increasing the oxygen content in the waste plastic oil for better combustion and to improve the viscosity and lubricity of the waste plastic oil, COME and POME were blended with waste plastic oil at different volumetric ratios, ranging from 0% to 15%, and the basic physical and chemical properties of the blended fuels were investigated, which mainly focused on fuel lubrication and viscosity. It can be concluded that the presence of 10% biodiesel in waste plastic oil is the optimal ratio because the smallest scar diameter was obtained after lubrication testing and the viscosity was within the acceptable criteria prescribed by the standard specification for diesel fuel, as shown in Figure 3. The lubricity testing was evaluated by a high-frequency reciprocating rig (HFRR) and was conducted according to EN ISO 12156 [14]. From the preliminary experiment, 10% biodiesel was enough to maintain the lubrication of the blended fuel and there was no significant improvement in the lubrication of the blend when exceeding this percentage of biodiesel in waste plastic oil. Therefore, a combination of either 10% castor

oil biodiesel or 10% palm oil biodiesel with 90% waste plastic oil (WPOC10 and WPOP10, respectively) was selected for further investigation in the engine test to study the effect of biodiesel addition to waste plastic oil on engine performance, combustion characteristics, and exhaust emissions.

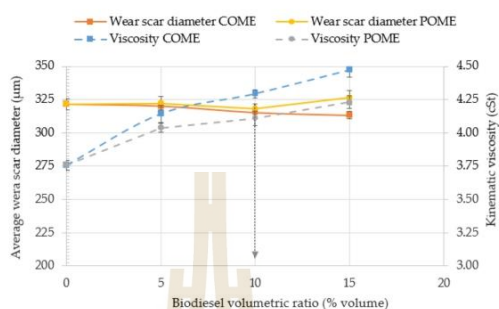


Figure 3. Lubricity and viscosity of biodiesel blending.

The fatty acid profile of castor oil and palm oil are summarized in Table 2, which confirms that the most abundant fatty acid in castor oil is ricinoleic acid, comprising about 85% by weight of the total fatty acid content, while the major constituents of palm oil are palmitic and oleic acid, at about 46% and 37% of the weight. Palmitic acid is a fatty acid that naturally occurs in vegetable and animals, and it is the main component of human milk fat. Furthermore, oleic acid is also the major component of many oils and fats.

Table 2. Fatty acid composition of palm oil and castor oil.

Fatty Acid		% wt.	
		POME	COME
Lauric	C12:0	0.92	0.02
Myristic	C14:0	1.28	0.06
Palmitic	C16:0	46.29	1.63
Stearic	C18:0	4.63	1.66
Oleic	C18:1	37.07	3.85
Ricinoleic	C18:1 OH	-	85.6
Linoleic	C18:2	8.67	6.04
Linolenic	C18:3	0.03	0.43
Arachidic	C20:0	0.36	0.08
Other		0.75	0.63

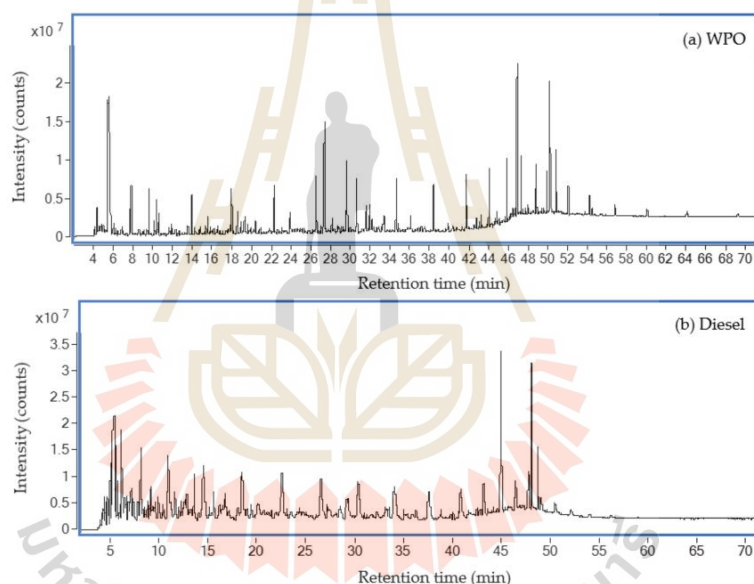
The physicochemical properties of fuels were carried out, based on the ASTM standards, and the properties of the test fuels are given in Table 3.

**Table 3.** Properties of the test fuels.

Properties	Test Method	Diesel	WPO	POME	COME	WPO10	WPOC10
Kinematic viscosity at 40 °C (cSt)	ASTM D445	4.19	3.76	6.46	18.61	4.11	4.29
Specific gravity at 15.6 °C	ASTM D1298	0.828	0.825	0.875	0.910	0.830	0.845
Density at 15.6 °C (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM D1298	827	824	874	909	829	844
Flash point (°C)	ASTM D93	68	41	96	108	45	48
Gross calorific value (MJ/kg)	ASTM D240	42.45	40.58	36.79	37.95	39.18	39.64
Cetane index	ASTM D976	60.2	60.0	48.7	39.4	59.6	54.5

#### Characterization of Waste Plastic Oil

The waste plastic oil or pyrolysis oil used in this study was extracted from mixed plastic wastes. The chemical compounds contained in the waste plastic oil were analyzed by gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS), using a gas chromatograph Agilent 7890A coupled to a mass spectrometer Agilent 7000B. The results of the GC–MS analysis of waste plastic oil and diesel are presented in Figure 4, and it is an important chemical compound contained in plastic oil and the percentage of the area is shown in Table 4.

**Figure 4.** Total ion current chromatogram for: (a) Waste plastic oil and (b) diesel.**Table 4.** Components identified from waste plastic oil and diesel by GC–MS analysis.

Carbon Content	% Area	
	WPO	Diesel
C <sub>4</sub> –C <sub>11</sub>	12.85	17.56
C <sub>12</sub> –C <sub>20</sub>	74.39	73.28
>C <sub>20</sub>	12.76	9.16

The waste plastic oil consisted of different hydrocarbons contents, which separate according to the light and heavy fractions, from the lowest carbon atom ( $C_4$ ) to the highest carbon atoms ( $>C_{20}$ ) and can be divided into three groups. The  $C_4$ – $C_{11}$  group represented the light fraction or gasoline, and typical gasoline consists of hydrocarbons between five and nine carbon atoms. The  $C_{12}$ – $C_{20}$  group represented the middle fraction or diesel. Diesel has a high percentage of carbon atoms of  $C_{16}$ – $C_{20}$  [15]. Table 4 presents the results of the comparison between fuels, and a similar trend was observed between waste plastic oil and diesel. The waste plastic oil and diesel produced the highest  $C_{12}$ – $C_{20}$  fraction.

### 3.2. Engine Performance

Figure 5 illustrates the results of the brake specific fuel consumption (BSFC) of the engine for four kinds of test fuels according to three engine-operating loads. The results showed that the BSFC increased at the low loading (25% of the maximum torque) rather than at medium and high loading, respectively (50% and 75% of the maximum torque). The results also showed that the increment in the engine load seems to result in less specific fuel consumption for all the fuels [16,17]. The increase in engine loading resulted in an increase of fuel flow rate, brake thermal efficiency, and exhaust gas temperature while also decreasing the brake specific fuel consumption at the same time.

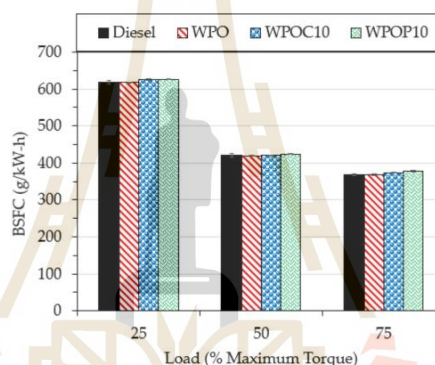


Figure 5. Variation of brake specific fuel consumption.

The brake specific fuel consumption was slightly increased for biodiesel-waste plastic oil. In general, brake specific fuel consumption was found to increase when the biodiesel quantity of the blends was increased, which was due to its lower heating value [16,18–20].

Figure 6 shows the variation of brake thermal efficiency (BTE) and engine load. Higher BTE was obtained with the use of waste plastic oil and its blends. The addition of biodiesel tended to improve the combustion of waste plastic oil. This may be attributed to the increase in oxygen content, due to oxygen in the fuel molecule of the fatty acid in biodiesel, resulting in more effective combustion [20–25]. In addition, the proper lubricating properties of biodiesel may play a role in reducing the friction to the level that the brake efficiency was enhanced from pure waste plastic oil [26,27].

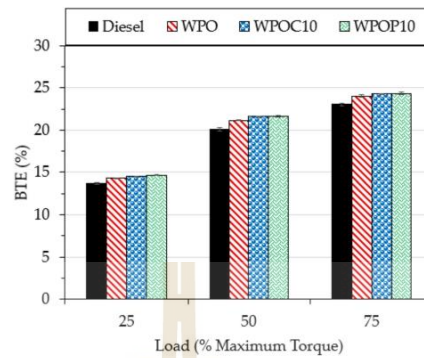


Figure 6. Variation of the brake thermal efficiency.

### 3.3. Combustion Characteristics

The combustion characteristics were examined as in-cylinder pressure and the rate of heat release based on the basic principles of the first law of thermodynamics, as shown in Figure 7. It was found that the combustion of waste plastic oil was similar to diesel fuel for all tested engine loads. The addition of castor oil biodiesel to waste plastic oil caused a delay in the start of the combustion rather than the addition of palm oil biodiesel. This was explained by the lower cetane number in castor oil. Additionally, the higher viscosity of castor oil biodiesel can be used to justify the delay in the combustion process due to the difficulty of fuel injection and the quality of fuel spray [27,28]. When considering peak of heat release rate, it was found that a higher peak was obtained for fuel blends with castor oil as biodiesel compared to palm oil. The accumulation of fuel volume during the longer ignition delay, which impacted the higher peak of premixed combustion, was used to justify the higher peak of the heat release rate obtained by the combustion of WPOC10 with respect to WPOP10 [29,30].

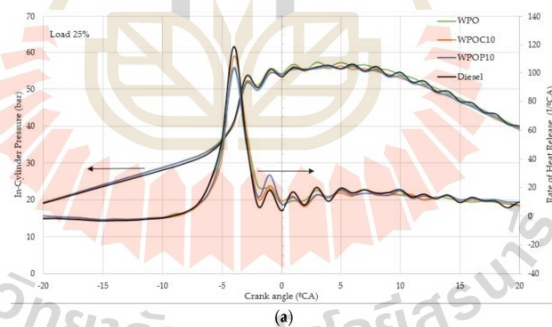
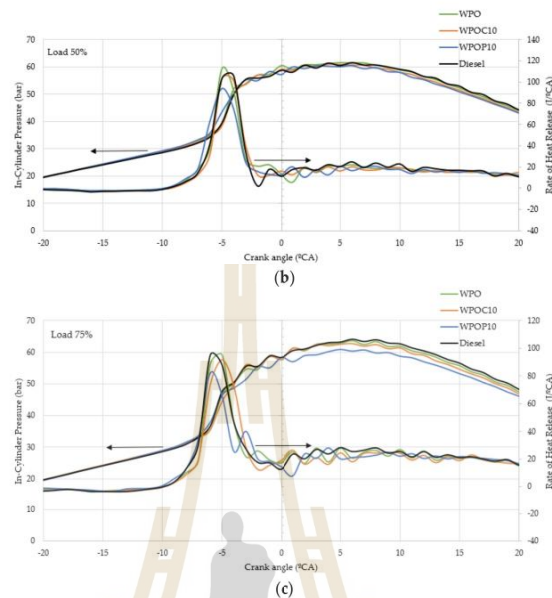


Figure 7. Cont.





**Figure 7.** In-cylinder pressure and rate of heat release at different levels of maximum torque: (a) 25%; (b) 50%; (c) 75%.

#### 3.4. Emissions

From Figure 8, the blends of the biodiesel-waste plastic oil showed a disadvantage in carbon monoxide emissions because of the higher viscosity and lower calorific value. Therefore, the combustion temperature was lowered due to ineffective atomization of the fuel blends, leading to an increase in carbon monoxide emissions. Comparing the two biodiesels used in this study, the presence of castor oil in fuel blends showed lower CO emissions. Although, castor oil possesses higher viscosity than palm oil, which can generate poor fuel atomization that results in more incomplete combustion. The higher oxygen content of castor oil may improve the quality of the combustion and can be compensated for by the effect of higher viscosity, leading to lower CO emissions by the addition of castor oil biodiesel to waste plastic oil as compared to the addition of palm oil biodiesel.

From Figure 9, it can be seen that the amount of nitrogen oxide emissions increased with increasing engine load, and the nitrogen oxide emission levels of plastic waste oil were higher compared to diesel fuel. Comparing waste plastic oil and its blends, lower NO<sub>x</sub> emissions were found when biodiesel was added. The reduction in the peak of the heat release in the premixed combustion phase was caused by the combustion of biodiesel blends, which tended to attenuate the increase in combustion temperature and did not favor NO<sub>x</sub> formation. The results of biodiesel addition were similar to diesel fuel blends and resulted in NO<sub>x</sub> reduction, which was also observed in another study by Pumpuang et al. [22] using blends of diesel with castor oil ethyl ester biodiesel. Considering the addition of castor oil and palm oil biodiesel, the castor oil biodiesel blends showed higher NO<sub>x</sub> emissions than those of palm oil biodiesel. The longer ignition delay due to the lower cetane value, caused by the addition of castor oil biodiesel, led to a higher combustion temperature, and this can explain the higher NO<sub>x</sub> emissions observed with the combustion of waste plastic oil blended with castor oil biodiesel.

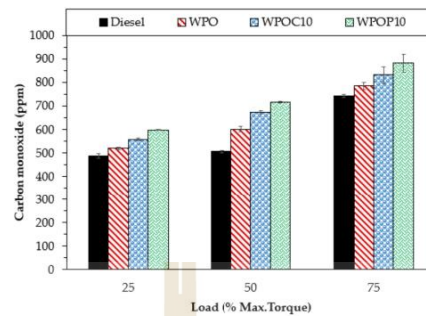


Figure 8. Carbon monoxide emissions.

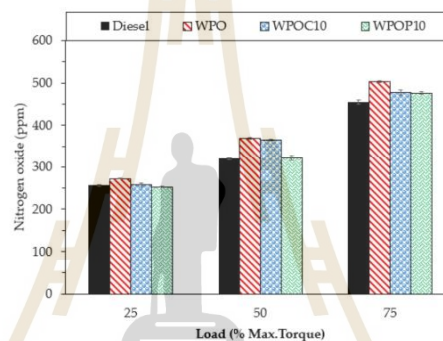


Figure 9. Nitrogen oxide emissions.

The variation of hydrocarbons with engine loads is shown in Figure 10. Higher levels of hydrocarbon emissions were found with the combustion of waste plastic oil with respect to diesel fuel. However, the addition of biodiesels may have contributed to reducing hydrocarbon emissions [31]. In the case of palm oil biodiesel, the shorter ignition delay due to the lower cetane index, in comparison to castor oil biodiesel, can improve (reduce) hydrocarbon emissions by allowing more time for the combustion process, resulting in lower levels of hydrocarbon emission. However, the blend with castor oil biodiesel, containing a higher oxygen content for the same volumetric percentage when comparing the two biodiesels, was blended with the waste plastic oil. This is expected to promote lower levels of hydrocarbon emission compared to the blend of palm oil biodiesel. The effect of the extremely high viscosity of castor oil, however, tended to increase the emission of hydrocarbons and could counteract the beneficial reductions in hydrocarbon emission due to the higher oxygen content [32]. These effects were more obviously seen at low engine operating loads where the temperature in the combustion chamber was not high enough to vaporize all the injected fuels. Consequently, WPOC10 produced higher hydrocarbons with respect to WPOP10.

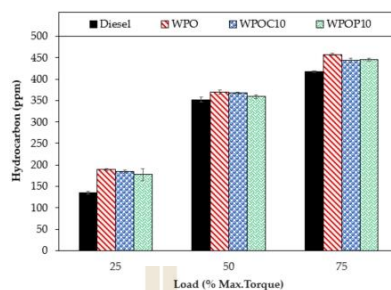


Figure 10. Hydrocarbon emissions.

Figure 11 shows the smoke emissions obtained by the combustion of the tested fuels. The combustion of the waste plastic oil was evidently associated with less smoke emission than diesel fuel. The addition of biodiesels to waste plastic oil tended to result in increased smoke emissions of these fuel blends. This increase in smoke emissions was apparent when the engine was operated at higher load conditions. Comparing castor oil and palm oil biodiesel, it was found that lower smoke emissions were obtained with the use of castor oil biodiesel. The two main factors had opposing effects on particulate matter emission, which was directly related to the smoke emissions. First, the higher viscosity of castor oil biodiesel caused more difficulty in fuel injection. The ineffective fuel atomization resulted in more incomplete combustion, which was related to a higher amount of unburnt fuel, resulting in higher smoke emissions. Second, the higher oxygen content present in the castor oil biodiesel and hydroxyl group belonged to ricinoleic acid as the primary fatty acid of castor oil can contribute to the enhancement of combustion quality, leading to less smoke emission [33]. It was notable that the effect of higher oxygen content may be more likely to reduce smoke emissions in this study as a result of lower smoke emissions associated with the combustion of WPOC10 compared to WPOP10.

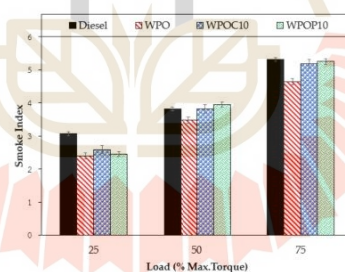


Figure 11. Smoke emissions.

#### 4. Conclusions

The effects of biodiesel addition on fuel properties, combustion characteristics, engine performance, and exhaust emissions of crude waste plastic oil were studied. Two types of biodiesel, palm oil biodiesel and castor oil biodiesel, were selected as components for blending with waste plastic oil. The findings can be summarized as follows:

- Considering fuel lubricity and viscosity, the presence of 10% (v/v) biodiesel was the optimal ratio for improving the waste plastic oil.

- The brake thermal efficiency of the engine was slightly improved with the addition of biodiesel to waste plastic oil.
- The addition of castor oil as compared to palm oil biodiesel caused a delay in the start of the combustion, resulting in a higher peak of heat release rate.
- The reduction in the level of hydrocarbon- and oxide-containing nitrogen emissions was found with the addition of biodiesel, while carbon monoxide and the smoke emissions were increased.
- Comparing the two tested biodiesels, the presence of castor oil in waste plastic oil showed lower carbon monoxide and smoke emissions without any penalty regarding the levels of hydrocarbon- and oxide-containing nitrogen emissions when the engine was operated at a high load.
- Future studies on engine modification, such as to the piston, injection timing, and injection pressure, can be considered for further improvements through the reduction of exhaust emissions by the use of biodiesel as a blend component in waste plastic oil.

**Author Contributions:** Conceptualization, E.S.; investigation, C.K., S.M., and N.K.; writing—Original draft preparation, C.K.; writing—Review and editing, C.K. and E.S.; supervision, J.S. and W.A.; resources, K.W. and P.L. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflicts of interest.

#### Nomenclature

BSFC	brake-specific fuel consumption
BTE	brake thermal efficiency
CO	carbon monoxide
COME	castor oil methyl ester
HC	hydrocarbon
HDPE	high-density polyethylene
HFRR	high-frequency reciprocating rig
KOH	potassium hydroxide
LDPE	low-density polyethylene
MBT	mechanical biological treatment
NO <sub>x</sub>	nitrogen oxides
PE	polyethylene
POME	palm oil methyl ester
PP	polypropylene
PS	polystyrene
WPO	waste plastic oil
WPOC10	fuel blend of 10% castor oil biodiesel and 90% waste plastic oil
WPOP10	fuel blend of 10% palm oil biodiesel and 90% waste plastic oil
GC-MS	gas chromatography–mass spectrometry

#### References

1. Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy, Thailand. Energy Statistics of Thailand. Available online: [http://www.eppo.go.th/index.php/th/information/services/ct-menu-item-56?orders\[publishUp\]=publishUp&eisearch=1](http://www.eppo.go.th/index.php/th/information/services/ct-menu-item-56?orders[publishUp]=publishUp&eisearch=1) (accessed on 28 July 2019).
2. Gabbar, H.A.; Aboughaly, M.; Stoute, C.A. DC thermal plasma design and utilization for the low density polyethylene to diesel oil pyrolysis reaction. *Energies* **2017**, *10*, 784. [CrossRef]
3. 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.* **2016**, *131*, 117–126. [CrossRef]
4. 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]

5. Areeprasert, C.; Asingsamanunt, J.; Srisawat, S.; Kaharn, J.; Insemeesak, B.; Phasee, P.; Khaobang, C.; Siwakosit, W.; Chiemchaisri, C. Municipal plastic waste composition study at transfer station of Bangkok and possibility of its energy recovery by pyrolysis. *Energy Procedia* **2017**, *107*, 222–226. [CrossRef]
6. Baskaran, R.; Sathish Kumar, P. Evaluation on performance of CI engine with waste plastic oil-diesel blends as alternative fuel. *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* **2015**, *3*, 642–646.
7. 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* **2018**, *8*, 38–47. [CrossRef]
8. Sachuthananthan, B.; Reddy, D.R.; Mahesh, C. Production of diesel like fuel from municipal solid waste plastics for using in CI Engine to study the combustion, performance and emission characteristics. *Int. J. Pure Appl. Math.* **2018**, *119*, 85–98.
9. 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]
10. 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]
11. Ramesha, D.K.; Kumara, G.P.; Lalsaheb; Mohammed, A.V.T.; Mohammad, H.A.; Kasma, M.A. An experimental study on usage of plastic oil and B20 algae biodiesel blend as substitute fuel to diesel engine. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2015**, *23*, 9432–9439. [CrossRef]
12. Senthilkumar, P.; Sankaranarayanan, G. Effect of Jatropha methyl ester on waste plastic oil fueled DI diesel engine. *J. Energy Inst.* **2016**, *89*, 504–512. [CrossRef]
13. Keera, S.T.; El Sabagh, S.M.; Taman, A.R. Castor oil biodiesel production and optimization. *Egypt. J. Pet.* **2018**, *27*, 979–984. [CrossRef]
14. ISO12156-1: Diesel Fuel—Assessment of Lubricity Using the High Frequency Reciprocating Rig. 2016. Available online: <https://www.iso.org/standard/65227.html> (accessed on 1 June 2020).
15. Wathakit, K.; Sukjit, E.; Maithomklang, S.; Srisertpol, J. Fuel properties, performance and emission of alternative fuel from pyrolysis of waste plastics. In Proceedings of the 2019 the 6th International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering, Wuhan, China, 9–11 November 2019; IOP Publishing Ltd.: Bristol, UK, 2020.
16. Shirneshan, A.; Almassi, M.; Ghobadian, B.; Borghei, A.M.; Najafi, G. Brake specific fuel consumption of diesel engine by using biodiesel from waste cooking oil. *World Sci. J.* **2013**, *1*, 45–52.
17. Kumar, S.; Prakash, R.; Murugan, S.; Singh, R.K. Performance and emission analysis of blends of waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste HDPE with diesel in a CI engine. *Energy Convers. Manag.* **2013**, *74*, 323–331. [CrossRef]
18. Tarabet, L.; Loubar, K.; Lounici, M.S.; Hanchi, S.; Tazerout, M. Experimental evaluation of performance and emissions of DI diesel engine fuelled with eucalyptus biodiesel. In Proceedings of the Internal Combustion Engines: Performance, Fuel Economy and Emissions, London, UK, 29–30 November 2011; pp. 167–176.
19. Adaileh, W.M.; Alqadah, K.S. Performance of diesel engine fuelled by a biodiesel extracted from a waste cooking oil. *Energy Procedia* **2012**, *18*, 1317–1334. [CrossRef]
20. Yusop, A.F.; Mamat, R.; Yusaf, T.; Najafi, G.; Yasin, M.H.M.; Khathri, A. Analysis of particulate matter (PM) emissions in diesel engines using palm oil biodiesel blended with diesel fuel. *Energies* **2018**, *11*, 1039. [CrossRef]
21. Arato, K.; Takashima, T. A study on reduction of heat loss by optimizing combustion chamber shape. *SAE Int. J. Engines* **2015**, *8*, 596–608. [CrossRef]
22. Pumpuang, A.; Maithomklang, S.; Sukjit, E.; Dejvajara, D.; Samaiklang, P.; Sanluecha, S. Utilization of Castor Oil-Based Ethyl Ester Biodiesel in a Diesel Engine; No. 2019-32-0606; SAE Technical Paper: 2019; SAE International: Pennsylvania, PA, USA, 2019.
23. Kaimal, V.K.; Vijayabalan, P. A study on synthesis of energy fuel from waste plastic and assessment of its potential as an alternative fuel for diesel engines. *Waste Manag.* **2016**, *51*, 91–96. [CrossRef]
24. Mrityunjaya, S.K.M.; Ramesha, D.K.; Premkumara, G.; Ranaprapareddy, N. Performance and emission characteristics of a compression ignition engine using blends of bio-oil as a fuel. *J. Middle Eur. Constr. Des. Cars* **2011**, *9*, 40–44. [CrossRef]
25. Das, M.; Sarkar, M.; Datta, A.; Santra, A.K. An experimental study on the combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel-castor oil biodiesel blends. *Renew. Energy* **2018**, *119*, 174–184. [CrossRef]

26. Ramadhas, A.S.; Muraliedharan, C.; Jayaraj, S. Performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with methyl esters of rubber seed oil. *Renew. Energy* **2005**, *30*, 1789–1800. [CrossRef]
27. Sukjit, E.; Herreros, J.M.; Dearn, K.; Tsolakis, A. *Improving Ethanol-Diesel Blend through the Use of Hydroxylated Biodiesel*; No. 2014-01-2776; SAE Technical Paper: 2014; SAE International: Pennsylvania, PA, USA, 2014.
28. Panwar, N.L.; Shrirame, H.Y.; Rathore, N.S.; Jindal, S.; Kurchania, A.K. Performance evaluation of a diesel engine fueled with methyl ester of castor seed oil. *Appl. Therm. Eng.* **2010**, *30*, 245–249. [CrossRef]
29. Sukjit, E.; Liplap, P.; Maithomklang, S.; Arjham, W. *Experimental Investigation on a DI Diesel Engine Using Waste Plastic Oil Blended with Oxygenated Fuels*; No. 2017-24-0116; SAE Technical Paper: 2017; SAE International: Pennsylvania, PA, USA, 2017.
30. Azad, A.K.; Rasul, M.G.; Khan, M.M.K.; Sharma, S.C.; Bhuiya, M.M.K. Recent development of biodiesel combustion strategies and modelling for compression ignition engines. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *56*, 1068–1086. [CrossRef]
31. Niculescu, R.; Clenci, A.; Iorga-Siman, V. Review on the use of diesel-biodiesel-alcohol blends in compression ignition engines. *Energies* **2019**, *12*, 1194. [CrossRef]
32. Sukjit, E.; Maithomklang, S.; Trirak, N.; Klinkaew, N. Emission benefits from the use of castor oil in a compression ignition engine fuelled with diesel-ethanol blends. *Int. J. Electr. Energy* **2018**, *6*, 57–63. [CrossRef]
33. Sukjit, E.; Herreros, J.M.; Piaszyk, J.; Dearn, K.D.; Tsolakis, A. Finding synergies in fuels properties for the design of renewable fuels-hydroxylated biodiesel effects on butanol-diesel blends. *Environ. Sci. Technol.* **2013**, *47*, 3535–3542. [CrossRef]



© 2020 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 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 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.

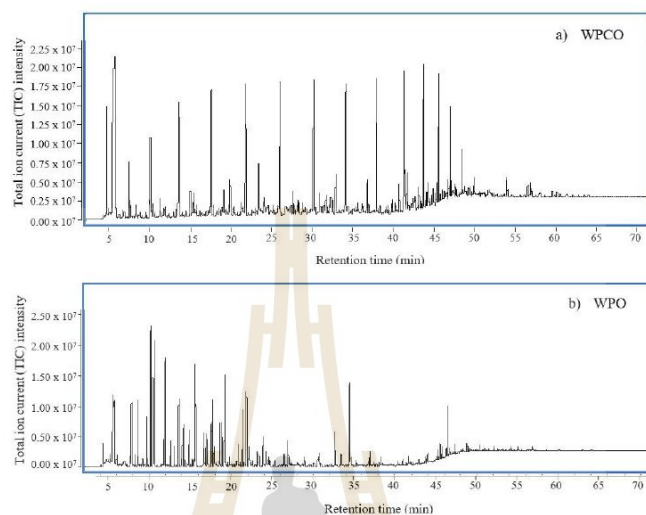
Engine	Specifications
Model	Kirloskar TV1
Engine type	1 cylinder, 4 strokes, Water cooled, Direct injection
Bore x Stroke	87.5 x 110 mm
Swept volume	661 cc
Rate output	3.5 kW at 1500 rpm
Compression ratio	12:1-18:1
Dynamometer	Eddy current

## 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 <sup>3</sup> )	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.

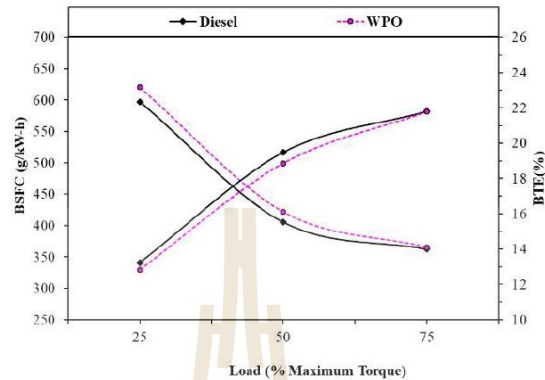


Figure 2. Variation of BSFC and BTE with load

#### 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.

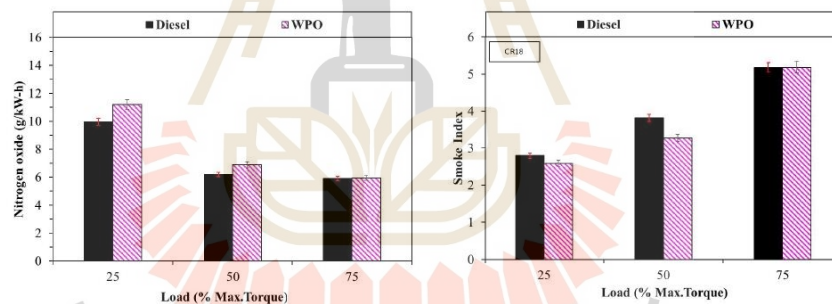


Figure 3. Variation of nitrogen oxide and smoke index with load.

Oxides of nitrogen present in emissions is the combination of nitric oxide (NO) and nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>). 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.

## ระบบควบคุมแบบป้อนกลับสำหรับการทดสอบสมรรถนะ เครื่องยนต์แบบระยะยาว

เทคโนโลยีด้วยระบบอัตโนมัติ

### นักวิจัย

รศ.ดร.จิรพล ศรีเสริฐผล

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### สถานภาพสิทธิบัตร

คำขอสิทธิบัตร เลขที่คำขอ 2001002302 ยื่นคำขอวันที่ 15 เมษายน 2563

### ที่มา ข้อมูลเบื้องต้น ความสำคัญของปัญหา

เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในภาคการเกษตร โดยเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กเหล่านี้มีชั่วโมงการใช้งานที่สูงและต้องทำงานอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ดังนั้นผู้ผลิตจะต้องมีการทดสอบสมรรถนะและความทนทานของเครื่องยนต์ แต่ส่วนมากเป็นการทดสอบระยะสั้นซึ่งไม่เหมาะกับการทดสอบในปัจจุบันที่ต้องการทดสอบแบบหลายชั่วโมง

### สรุปและจุดเด่นเทคโนโลยี

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับอัตโนมัติมีตัวควบคุมแบบ PID โดยการควบคุมปริมาณน้ำมอเตอร์สามเฟสที่ขับเคลื่อนน้ำเพื่อให้เกิดภาระโหลดเพื่อเบรกเครื่องยนต์ให้ได้แรงม้าสูงสุด ซึ่งสามารถควบคุมรูปแบบภาระโหลดที่ให้แก่เครื่องยนต์ได้

### ความร่วมมือที่เสาะหา

เสาะหาผู้รับอนุญาตใช้สิทธิ

### สถานภาพของผลงานวิจัย

ต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการได้ถูกทดสอบในสภาวะจำลอง

### เงื่อนไข

เทคโนโลยีต้องราคา

### สนใจสอบถามข้อมูล

บุปผาชาติ กันสา

สำนักงานจัดการทรัพย์สินทางปัญญา เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โทรศัพท์ : 04 422 4825, 09 5814 5910

Email : buppha\_chat@g.sut.ac.th



## ประวัติผู้เขียน

ว่าที่ร้อยตรีสมเกียรติ หมายถมกลาง เกิดเมื่อวันที่ 26 ตุลาคม พ.ศ. 2534 ณ อำเภอบัวใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2552 สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนบัวใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีหลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปีการศึกษา 2556 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและผู้ช่วยวิจัย ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลเป็นระยะเวลา 1 ปี ซึ่งเป็นสายงานทางวิชาการที่เกี่ยวข้องด้านการเรียนและการสอน ทำให้เกิดแรงจูงใจในการศึกษาต่อในระดับปริญญาโทด้านพลังงานทางเลือก ผู้วิจัยจึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ในหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยในระหว่างการศึกษาได้ทำวิจัยเกี่ยวกับพลังงานเชื้อเพลิงไบโอดีเซล ไบโอดีเซล และน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก โดยสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ในหัวข้อ “การใช้ไขมันขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด” และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2558

เมื่อปีการศึกษา 2556 หลังจากสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาโท ผู้วิจัยได้เข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและผู้ช่วยวิจัย ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นระยะเวลา 1 ปี

เมื่อปี พ.ศ. 2561 ได้รับทุนการศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่ให้ทุนร่วมกับบริษัท พลวัชรเครื่องยนต์ จำกัด ในโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรม (พวอ.) เพื่อศึกษาต่อในระดับปริญญาเอกในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยในระหว่างการศึกษาผู้วิจัยได้วิจัยและร่วมวิจัยกับคณาจารย์จนมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 7 เรื่อง และจดสิทธิบัตรจำนวน 1 เรื่อง ดังแสดงในภาคผนวก ค ทั้งนี้ ในระหว่างการศึกษาผู้วิจัยได้มีโอกาสเป็นผู้สอนในรายวิชาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ และสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งประกอบด้วยวิชาต่าง ๆ ดังนี้

1. กลุ่มรายวิชาเขียนแบบ ได้แก่ การเขียนแบบวิศวกรรม 1 การเขียนแบบวิศวกรรม 2 เขียนแบบทางกล และการเขียนแบบไฟฟ้า
2. กลุ่มรายวิชาปฏิบัติการ ได้แก่ ปฏิบัติการทางพลศาสตร์และระบบควบคุมในยานยนต์ ปฏิบัติการระบบในยานยนต์