# การศึกษาการใช้น้ำมันขยะเป็นเชื้อเพลิงผสมกับไบโอดีเซล
# สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว

นางสาวชลิตา แก้วบุตรดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการพลังงาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2563

# A STUDY OF WASTE PLASTIC OIL AS A FUEL BLENDED WITH BIODIESEL ON A SINGLE CYLINDER DIESEL ENGINE

**Chalita Kaewbuddee**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Doctor of Engineering in Energy Management Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2020**

**การศึกษาการใช้น้ำมันขยะเป็นเชื้อเพลิงผสมกับไบโอดีเซล**
**สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กัมปนาท เทียนน้อย)
ประธานกรรมการ

(อ. ดร.เอกรงค์ สุขจิต)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)
กรรมการ

(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)
กรรมการ

(อ. ดร.ธีทัต ดลวิชัย)
กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ชลิตา แก้วบุตรดี : การศึกษาการใช้น้ำมันขยะเป็นเชื้อเพลิงผสมกับไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว (A STUDY OF WASTE PLASTIC OIL AS A FUEL BLENDED WITH BIODIESEL ON A SINGLE CYLINDER DIESEL ENGINE) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.เอกรงค์ สุขจิต, 145 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการใช้น้ำมันขยะจากพลาสติกและน้ำมันไบโอดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว ซึ่งมุ่งเน้นการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานของน้ำมันเชื้อเพลิง สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย โดยการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแต่ยังไม่ได้ผ่านการกลั่นลำดับส่วนผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งและน้ำมันปาล์มที่อัตราส่วนผสมที่ 5%, 10% และ 15% โดยปริมาตร ในส่วนแรกได้ทำการทดสอบการหล่อลื่นและความหนืดของเชื้อเพลิง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการผสมน้ำมันไบโอดีเซล 10% โดยปริมาตร ในน้ำมันขยะพลาสติกเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผลที่เล็กที่สุดและความหนืดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามข้อกำหนดมาตรฐานน้ำมันดีเซล จากนั้นทำการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ 4 จังหวะ ไม่มีการปรับแต่งเครื่องยนต์ ใช้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์คงที่ 1,500 รอบต่อนาที ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงานของเครื่องยนต์ 25%, 50% และ 75% ของแรงบิดสูงสุด ตามลำดับ ผลจากการตรวจวัดคุณสมบัติพื้นฐานของน้ำมันเชื้อเพลิงผสมพบว่า ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล และจุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ในขณะที่ค่าความร้อนเชื้อเพลิง ความหนืด และค่าดัชนีซีเทนมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ผลจากการทดสอบสมรรถนะกับเครื่องยนต์พบว่า ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) ของ WPOP10 (น้ำมันจากขยะพลาสติก 90% และน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม 10%) และ WPOC10 (น้ำมันจากขยะพลาสติก 90% และน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่ง 10%) มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลทุกภาระงาน ในแง่ของการปล่อยมลพิษไอเสียพบว่า การผสมน้ำมันไบโอดีเซลลงในน้ำมันจากขยะพลาสติกมีแนวโน้มทำให้ลดการปล่อยไฮโดรคาร์บอนและไนโตรเจนออกไซด์ ส่วนข้อเสียของการผสมไบโอดีเซลลงในน้ำมันจากขยะพลาสติกคือ การเพิ่มคาร์บอนมอนอกไซด์และควันดำ หากเปรียบเทียบน้ำมันไบโอดีเซลทั้งสองชนิดที่ใช้ในการศึกษาพบว่า การผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งกับน้ำมันจากขยะพลาสติกทำให้การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์และควันดำต่ำกว่า ขณะที่การปล่อยไฮโดรคาร์บอนและไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ภาระงานสูง นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบราคาของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้พบว่า ราคาน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มอยู่ที่ 11.33 บาทต่อลิตร ส่วนราคาน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมน้ำมันไบโอดีเซลจาก

น้ำมันละหุ่งเท่ากับ 23.77 บาทต่อลิตร ซึ่งราคาน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ผสมด้วยน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มมีราคาถูกกว่าน้ำมันดีเซลที่ลิตรละ 14.36 บาท เมื่อราคาน้ำมันดีเซลในปัจจุบันอยู่ที่ 25.69 บาทต่อลิตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชา <u>วิศวกรรมการจัดการพลังงาน</u> ลายมือชื่อนักศึกษา______________

ปีการศึกษา 2563 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา______________

CHALITA KAEWBUDDEE : A STUDY OF WASTE PLASTIC OIL AS A FUEL BLENDED WITH BIODIESEL ON A SINGLE CYLINDER DIESEL ENGINE. THESIS ADVISOR : EKARONG SUKJIT, Ph.D., 145 PP.

WASTE PLASTIC OIL/BIODIESEL/DIESEL ENGINE

This research studies the use of waste plastic oil and biodiesel as an alternative fuel for a single cylinder diesel engine, which focuses on the comparison of the basic physical and chemical properties of fuels, engine performances, combustion characteristics, and exhaust emissions by using waste plastic oil that has been processed into energy by a pyrolysis process which has not passed the distillation process yet. The test fuels were prepared by blending waste plastic oil (WPO) with biodiesel derived from castor oil and palm oil at different mixing ratios of 5%, 10% and 15% by volume. The preliminary study will focus on lubrication and viscosity of fuels, which indicated that 10% biodiesel in waste plastic oil was the optimum ratio because the smallest wear scar diameter was obtained and the viscosity was under the acceptable criteria according to diesel standard specification. Engine tests were carried out on a single cylinder four-stroke diesel engine without any engine modification. The tests were performed at constant engine speed of 1,500 rpm under different engine operating loads of 25%, 50% and 75% of the maximum engine torque. The results of basic fuel properties were found that the fuel blends showed higher density and specific gravity and lower flash point than those of diesel fuel. While heating value, viscosity and cetane index of fuel blends were similar with respect to diesel fuel. The experimental results of the tested performance on the engine showed that the brake specific fuel consumption (BSFC) and brake thermal efficiency (BTE) of WPOP10 (10% palm oil biodiesel blended with 90% waste plastic oil) and WPOC10 (10% castor oil biodiesel

blended with 90% waste plastic oil) were close to diesel fuel at all engine loads. The addition of biodiesel to waste plastic oil tended to reduce the levels of hydrocarbon and nitrogen oxides emissions. One drawback of adding biodiesel to waste plastic oil was the increase in carbon monoxide and smoke. Comparing among 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 nitrogen oxides emissions when the engine was operated at high load. In addition, the price of fuel used for waste plastic oil blended with palm oil biodiesel is 11.33 baht per liter and waste plastic oil blended with castor oil biodiesel is 23.77 baht per liter. The price of waste plastic oil blended with palm oil biodiesel is cheaper than diesel fuel at 14.36 baht per liter when the current diesel fuel price is 25.69 baht per liter.

School of Energy Management Engineering　　Student's Signature ____ชลิตา____

Academic year 2020　　Advisor's Signature ____________

# กิตติกรรมประกาศ


วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.เอกรงค์ สุขจิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาดูแลเอาใจใส่และให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาอันเป็นประโยชน์ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กัมปนาท เทียนน้อย อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ ดร.ธีทัต ดลวิชัย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรษา ลิบลับ ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นและสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี, ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี

นอกจากนี้ ขอขอบคุณผู้ที่ให้ความช่วยเหลือทุกท่านในอีกหลายด้าน ซึ่งมิได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และขอขอบคุณทุกคนในครอบครัวที่สนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิจัยจนสำเร็จ

ชลิตา แก้วบุตรดี


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญ

**หน้า**


บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ค
กิตติกรรมประกาศ ..... จ
สารบัญ ..... ฉ
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฎ

**บทที่**

**1 บทนำ** ..... 1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย ..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย ..... 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย ..... 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ..... 3
1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย ..... 4

**2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง** ..... 5
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องยนต์ดีเซล ..... 5
2.1.1 กล่าวนำ ..... 5
2.1.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่องยนต์ดีเซล ..... 6
2.1.2.1 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ ..... 6
2.2 เครื่องทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ ..... 9
2.3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะของเครื่องยนต์ ..... 9
2.3.1 แรงบิด ..... 9
2.3.2 กำลังเบรก ..... 10
2.3.3 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ ..... 10
2.3.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ..... 11
2.3.5 ความดันในกระบอกสูบ ..... 11



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า


2.3.6 อัตราการปลดปล่อยความร้อน ..... 11

2.4 มลพิษไอเสียที่เกิดจากเครื่องยนต์ ..... 13

2.4.1 ไนโตรเจนออกไซด์ ($NO_X$) ..... 13

2.4.2 คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ..... 14

2.4.3 ไฮโดรคาร์บอน (HC) ..... 14

2.4.4 ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Particulate Matter หรือ PM) ..... 15

2.5 น้ำมันจากขยะพลาสติก ..... 15

2.5.1 ขยะมูลฝอย ..... 15

2.5.2 วัตถุดิบสำหรับผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกในกระบวนการไพโรไลซิส ..... 18

2.5.3 เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากขยะพลาสติก ..... 20

2.5.3.1 เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงขยะ RDF ..... 20

2.5.3.2 เทคโนโลยีทางความร้อน ..... 22

2.5.3.3 เทคโนโลยีทางชีวภาพ (Biological) ..... 25

2.5.4 กระบวนการไพโรไลซิส ..... 27

2.5.5 การนำไปใช้งานเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล ..... 29

2.6 น้ำมันไบโอดีเซล ..... 36

2.6.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับน้ำมันไบโอดีเซล ..... 36

2.6.2 วัตถุดิบในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ..... 37

2.6.3 การใช้งานของน้ำมันไบโอดีเซล ..... 40

2.6.4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ..... 42

2.6.5 การนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์ ..... 43

**3 วิธีดำเนินการวิจัย** ..... 48

3.1 กรอบการดำเนินการวิจัย ..... 48

3.2 การเตรียมน้ำมันเชื้อเพลิงเสีย ..... 50

3.2.1 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่ง ..... 50


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า


3.2.2 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม ........ 51

3.2.3 การกลั่นน้ำมันจากขยะพลาสติก ........ 52

3.3 การตรวจวัดคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง ........ 52

3.3.1 ความถ่วงจำเพาะความถ่วงเอพีไอ และความหนาแน่น ........ 52

3.3.2 ความหนืดจลนศาสตร์ ........ 53

3.3.3 การกลั่น ........ 55

3.3.4 จุดวาบไฟ ........ 56

3.3.5 ดัชนีซีเทน ........ 57

3.3.6 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง ........ 57

3.3.7 คุณสมบัติการหล่อลื่น ........ 58

3.4 การติดตั้งเครื่องยนต์ ........ 60

3.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ ........ 60

3.5 วิธีการทดสอบเครื่องยนต์ ........ 64

**4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง** ........ 66

4.1 บทนำ ........ 66

4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง ........ 67

4.2.1 อุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันจากขยะพลาสติก ........ 67

4.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง ........ 68

**5 การทดสอบสมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล** ........ 76

5.1 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ ........ 76

5.1.1 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก ........ 76

5.1.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก ........ 77

5.2 คุณลักษณะการเผาไหม้ ........ 78

5.3 การปลดปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ ........ 80

# สารบัญ (ต่อ)

**หน้า**


5.3.1 คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ...... 80

5.3.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน ($NO_X$) ...... 81

5.3.3 ไฮโดรคาร์บอน (HC) ...... 82

5.3.4 ควันดำ (Smoke) ...... 83

5.4 สรุปผลการวิจัย ...... 84

**6 ผลการประเมินต้นทุนการผลิต** ...... 86

6.1 นโยบายภาครัฐ ...... 86

6.1.1 แผนพัฒนาปาล์มน้ำมันของไทย ...... 87

6.1.2 มาตรการเชิงนโยบายของรัฐ ...... 87

6.2 การปลูกพืชพลังงาน ...... 88

6.2.1 การปลูกละหุ่งของไทย ...... 88

6.2.2 การปลูกปาล์มน้ำมันของไทย ...... 90

6.3 ศักยภาพน้ำมันจากขยะพลาสติก ...... 92

6.4 ศักยภาพน้ำมันไบโอดีเซล ...... 92

6.5 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิง ...... 94

6.5.1 ต้นทุนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ...... 94

6.5.2 ต้นทุนการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงผสมจากน้ำมันขยะพลาสติก และน้ำมันไบโอดีเซล ...... 99

6.6 การประเมินน้ำมันเชื้อเพลิงที่ระดับภาระงานต่างๆ ...... 100

6.7 การส่งเสริมและการพัฒนา ...... 104

รายการอ้างอิง ...... 105

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง ...... 116

ภาคผนวก ข. รูปภาพแสดงลักษณะและผลการตรวจวัดขนาดรอยขีดข่วน ...... 121

ภาคผนวก ค. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา ...... 123

ประวัติผู้เขียน ...... 145


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญตาราง

**ตารางที่** **หน้า**


2.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของพลาสติกประเภทต่าง ๆ ..... 19
2.2 ประเภทของขยะเชื้อเพลิง RDF ..... 26
2.3 คุณภาพของเชื้อเพลิงเหลวจากการใช้วัตถุดิบที่เป็นพลาสติกชนิดต่าง ๆ ..... 30
2.4 แหล่งวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซล ..... 38
2.5 คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตจากวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ ..... 44
3.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์อัตราส่วนกำลังอัดแปรผัน ..... 61
3.2 ข้อมูลจำเพาะของไดนาโมมิเตอร์ชนิดกระแสเหนี่ยวนำ ..... 62
3.3 ข้อมูลจำเพาะเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Testo 350 ..... 63
3.4 ข้อมูลจำเพาะเครื่องมือวัดดัชนีเขม่าควัน Testo 308 ..... 64
4.1 ปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ ในน้ำมันปาล์มและน้ำมันละหุ่ง ..... 70
4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันจากขยะพลาสติกและน้ำมันดีเซลด้วย GC-MS ..... 71
4.3 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ ..... 71
6.1 สายพันธุ์ของละหุ่ง ..... 88
6.2 การใช้ประโยชน์ปาล์มน้ำมันศักยภาพการผลิตน้ำมันของพืชน้ำมันชนิดต่าง ๆ ..... 91
6.3 เปรียบเทียบปริมาณการผลิตน้ำมันละหุ่งและน้ำมันปาล์มในประเทศไทย ..... 91
6.4 กำลังการผลิตและปริมาณการใช้ไบโอดีเซลภาคเชื้อเพลิงของประเทศ ..... 94
6.5 สรุปราคาน้ำมันเชื้อเพลิงเมื่อคำนวณตามโครงสร้างและเปรียบเทียบแนวทางส่งเสริมน้ำมันขยะพลาสติกผสมไบโอดีเซลปาล์ม (ใช้ข้อมูลราคาวันที่ 18 ตุลาคม 2562) ..... 96
6.6 เปรียบเทียบราคาน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกกับน้ำมันดีเซล ..... 99
ก.1 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล ..... 117
ก.2 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน ..... 119
ข.1 ลักษณะและผลการตรวจวัดขนาดรอยขีดข่วน ..... 122
ข.2 ผลการตรวจวัดขนาดรอยขีดข่วนบนลูกบอลที่ใช้ทดสอบ ..... 122

# สารบัญรูป


รูปที่ หน้า

2.1 กลไกของเครื่องยนต์แบบลูกสูบ ....................6
2.2 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ ....................7
2.3 อัตราการปลดปล่อยความร้อนในเครื่องยนต์แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง ....................12
2.4 กระบวนการไพโรไลซิส ....................28
2.5 ปริมาณสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ....................28
2.6 เมล็ดและต้นละหุ่ง....................39
2.7 ใบและผลละหุ่ง....................40
2.8 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ....................42
3.1 กรอบการดำเนินการวิจัย ....................49
3.2 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ความหนืด....................54
3.3 หลอดแก้วรูเล็กใช้จับเวลาการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง ....................54
3.4 อุปกรณ์สำหรับทดสอบอุณหภูมิการกลั่นน้ำมันเชื้อเพลิง ....................55
3.5 อุปกรณ์ทดสอบจุดวาบไฟ....................56
3.6 เครื่องมือบอมบ์แคลอริมิเตอร์ ....................58
3.7 เครื่อง High frequency reciprocating rig (HFRR) ....................59
3.8 การวัดขนาดของความยาวรอยถลอกบนลูกบอลทดสอบ....................60
3.9 เครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ในการทดสอบ ....................60
3.10 ไดนาโมมิเตอร์ชนิดกระแสเหนี่ยวนำ....................61
3.11 เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Testo 350 ....................62
3.12 เครื่องมือวัดดัชนีเขม่าควัน Testo 308 ....................64
4.1 อุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล....................68
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหล่อลื่นและความหนืดของการผสมน้ำมันไบโอดีเซล ....................69
4.3 โครมาโทรแกรมของน้ำมันจากขยะพลาสติกและน้ำมันดีเซล ....................70

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**

4.4 ความหนืดจลนศาสตร์ของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ ....72
4.5 ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ ....72
4.6 ความหนาแน่นของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ....73
4.7 จุดวาบไฟของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ....73
4.8 ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ....74
4.9 ดัชนีซีเทนของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ ....74
5.1 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่ภาระงานต่าง ๆ....76
5.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกที่ภาระงานต่าง ๆ....77
5.3 คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ภาระงาน 25% ของแรงบิดสูงสุด....78
5.4 คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ภาระงาน 50% ของแรงบิดสูงสุด....79
5.5 คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ภาระงาน 75% ของแรงบิดสูงสุด....79
5.6 คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ภาระงานต่าง ๆ ....80
5.7 ออกไซด์ของไนโตรเจนที่ภาระงานต่าง ๆ....81
5.8 ไฮโดรคาร์บอนที่ภาระงานต่าง ๆ....82
5.9 ควันดำที่ภาระงานต่าง ๆ....83
6.1 การผลิตไบโอดีเซลของประเทศไทย....86
6.2 ผลผลิตปาล์มดิบในประเทศ ....93
6.3 ราคาผลผลิตปาล์มดิบในประเทศ....93
6.4 ราคาขายปลีกน้ำมันดีเซลของไทย....97
6.5 เปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ ของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ ที่ภาระงาน 25%....101
6.6 เปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ ของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ ที่ภาระงาน 50%....102
6.7 เปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ ของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ ที่ภาระงาน 75%....103

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บทที่ 1
# บทนำ

งานวิจัยเรื่องนี้ศึกษาการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส และไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันละหุ่งโดยใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น เพื่อใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล โดยบทนำในวิทยานิพนธ์เล่มนี้กล่าวถึง ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และสถานที่ดำเนินการวิจัย

## 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

น้ำมันเชื้อเพลิงมีความสำคัญอย่างมากต่อภาคอุตสาหกรรม การขนส่งและการเกษตร ในปัจจุบันสภาวะราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความผันผวนจึงส่งกระทบผลต่อต้นทุนการผลิต และการพัฒนาประเทศในด้านต่าง ๆ ดังนั้นรัฐบาลจึงได้ส่งเสริมให้มีการนำพลังงานทดแทนมาใช้ เป็นทางเลือกจูงใจให้ประชาชนหันมาใช้เชื้อเพลิงเพื่อนำมาทดแทนน้ำมันดีเซลมากขึ้น และเพื่อตอบสนองต่อปริมาณความต้องการของการใช้น้ำมันที่เพิ่มมากขึ้นจากอดีต ปัจจุบันงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์จึงมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นและเป็นที่น่าสนใจ เนื่องมากจากปัญหาด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อม และเศรษฐกิจ ทำให้มีความจำเป็นต้องสนับสนุนให้มีการศึกษาถึงชนิดของพลังงานเชื้อเพลิงทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ทดแทน เพื่อเพิ่มทางเลือกหรือลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงหลักได้ โดยเฉพาะการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันสบู่ดำ น้ำมันละหุ่ง และน้ำมันพืชใช้งานแล้ว เป็นต้น เป็นการนำผลผลิตทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ ช่วยเหลือเกษตรกรให้มีรายได้และสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานเพิ่มมากขึ้น

นอกจากนี้ประเทศไทยประสบปัญหาปริมาณขยะมูลฝอยที่มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นจำนวนมาก จำเป็นต้องดำเนินการแก้ไขปัญหาขยะพลาสติก จากข้อมูลสถานการณ์ปัญหาขยะในประเทศไทย พบว่า ปีพ.ศ. 2560 มีปริมาณขยะประมาณ 27.37 ล้านตัน มีอัตราการเกิดขยะมูลฝอย 1.13 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2561) ปริมาณขยะมูลฝอยได้ถูกนำไปกำจัดอย่างถูกต้องประมาณ 11.69 ล้านตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 43 ของปริมาณขยะมูลฝอยทั้งหมด และขยะมูลฝอยถูกนำกลับไปใช้ประโยชน์ประมาณ 8.51 ล้านตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 31 ของปริมาณมูลฝอยที่เกิดขึ้นทั้งหมด สำหรับขยะมูลฝอยอีกประมาณ 7.71 ล้านตัน หรือร้อยละ 26 ของปริมาณ

ขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะถูกนำไปจัดการอย่างไม่ถูกต้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์กำลังมีจำนวนเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องมาจากราคาน้ำมันเชื้อเพลิงในตลาดโลกที่ปรับตัวเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งประเทศไทยเป็นประเทศต้องนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ได้ทำการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์ มลพิษไอเสียทางอากาศจากการใช้สัดส่วนของน้ำมันดีเซลต่อไบโอดีเซลที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน อย่างไรก็ตามการนำน้ำมันไบโอดีเซลผสมกับน้ำมันจากขยะพลาสติกในอัตราส่วนการผสมที่ต่างกันนั้นยังไม่มีการศึกษามากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการนำไบโอดีเซลละหุ่งและไบโอดีเซลปาล์มเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่สามารถนำมาทดแทนหรือผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิงหลักคือน้ำมันจากขยะพลาสติกได้เช่นเดียวกันกับไบโอดีเซลชนิดอื่นในเครื่องยนต์การเกษตร เพราะเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ คุณสมบัติค่อนข้างใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังสามารถจัดหาและผลิตได้ง่าย โดยวิธีการทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นจากพืชชนิดต่าง ๆ ที่มีในประเทศไทย เช่น ละหุ่งและปาล์ม ซึ่งคาดว่าสามารถนำมาผสมกับน้ำมันจากขยะพลาสติกเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ และยังเป็นการส่งเสริมให้มีการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากพืชมาใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลทางการเกษตรด้วยการนำไบโอดีเซลผสมกับน้ำมันจากขยะพลาสติกที่สัดส่วนต่าง ๆ

สำหรับงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ การวิเคราะห์การปล่อยมลพิษไอเสีย และคุณสมบัติการหล่อลื่นของเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว และคุณสมบัติพื้นฐานเมื่อใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยไม่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งและน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่อัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการนำน้ำมันไบโอดีเซลมาผสมกับน้ำมันจากขยะพลาสติกให้สามารถใช้งานได้จริงเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซลที่ใช้ในเครื่องยนต์โดยไม่มีการปรับแต่งเครื่องยนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานของน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของน้ำมันจากขยะพลาสติกกับน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่ง และน้ำมันจากขยะพลาสติกกับน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่อัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมไปทดสอบกับเครื่องยนต์ โดยที่เครื่องยนต์สามารถเดินเครื่องเรียบปกติ

1.2.2 เพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นส่วนผสมในเชื้อเพลิงน้ำมันจากขยะพลาสติก เพื่อเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ทางการเกษตร

1.2.3 เพื่อทดสอบการปลดปล่อยมลพิษไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในการวิจัยเป็นการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงและนำน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างไปทดสอบกับเครื่องยนต์ที่ติดตั้งบนไดนาโมมิเตอร์ เพื่อหาสมรรถนะของเครื่องยนต์และมลพิษไอเสีย ดังนั้นจึงจำกัดขอบเขตของการวิจัยไว้ดังนี้

1.3.1 ใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส โดยเป็นน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ยังไม่ผ่านกระบวนการกลั่นลำดับส่วน จากโรงงานแปรรูปขยะเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล)

1.3.2 ใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นจากน้ำมันละหุ่งและน้ำมันปาล์ม โดยใช้โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3.3 ใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างน้ำมันไบโอดีเซลกับน้ำมันจากขยะพลาสติกในอัตราส่วน 5%, 10% และ 15% โดยปริมาตร เพื่อหาความเหมาะสมของอัตราส่วนน้ำมันไบโอดีเซลกับน้ำมันจากขยะพลาสติกสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง

1.3.4 ใช้น้ำมันดีเซลที่ได้รับความเห็นชอบในการจัดจำหน่ายจากกรมธุรกิจพลังงาน

1.3.5 ทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยไม่มีการปรับแต่งเครื่องยนต์แบบจุดระเบิดด้วยการอัด

1.3.6 ทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ไดนาโมมิเตอร์ชนิดใช้กระแสเหนี่ยวนำสร้างโหลดให้กับเครื่องยนต์

1.3.7 ทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 1,500 รอบต่อนาที โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงภาระงาน

1.3.8 ตรวจวัดคุณสมบัติพื้นฐานภายใต้มาตรฐานการทดสอบของสมาคมการทดสอบและวัสดุประเทศสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials: ASTM)

1.3.9 ทดสอบคุณสมบัติการหล่อลื่นของเชื้อเพลิง ภายใต้มาตรฐานการทดสอบขององค์การมาตรฐานสากล (International Standardization Organization : ISO)

1.3.10 ศึกษาและตรวจวัดการปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย ได้แก่ ออกไซด์ของไนโตรเจน ($NO_X$), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไฮโดรคาร์บอน (HC) และควันดำ (Smoke)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลจากการศึกษาและวิจัยจะช่วยให้ทราบถึงคุณลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์และผลกระทบที่เกิดขึ้น รวมถึงข้อดีและข้อเสียจากการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลที่อัตราส่วนต่าง ๆ สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว เพื่อเป็น

แนวทางในการพิจารณาถึงความเหมาะสมในการนำน้ำมันขยะพลาสติกไพโรไลซิสผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลไปใช้เป็นพลังงานทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว

## 1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

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

1.5.2 อาคารปฏิบัติการพื้นฐานด้านวิศวกรรมศาสตร์ (F11) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5.3 ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บทที่ 2
# ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องยนต์ดีเซล ประเภทของเครื่องทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องน้ำมันไพโรไลซิสเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล และการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

## 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องยนต์ดีเซล

### 2.1.1 กล่าวนำ

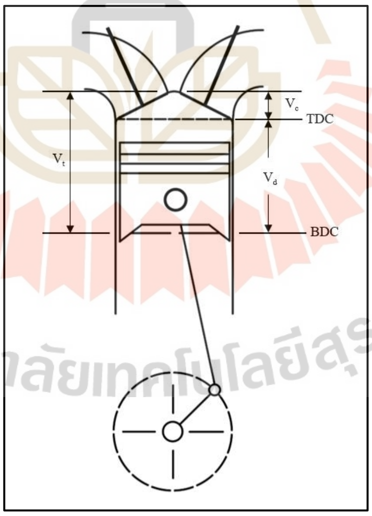
เครื่องยนต์ หมายถึง เครื่องจักรที่สามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีที่ได้จากเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานความร้อน โดยการเผาไหม้ของอากาศกับเชื้อเพลิงแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานกล โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของการหมุนของเพลาส่งกำลังเครื่องยนต์ความร้อนหรือเครื่องยนต์เผาไหม้นี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1) เครื่องยนต์สันดาปภายนอก (External Combustion Engine) เป็นเครื่องยนต์ที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายนอกตัวเครื่องยนต์ โดยนำเอาผลจากการเผาไหม้ของอากาศกับเชื้อเพลิงให้ถ่ายเทความร้อนไปยังของไหลชนิดที่สอง ซึ่งให้เป็นสารทำงานสำหรับผลิตกำลัง ดังนั้น สารทำงานและสารที่เกิดการเผาไหม้จึงเป็นของไหลคนละชนิดและถูกแยกออกจากกัน โดยผนังนำความร้อนสารที่เกิดการเผาไหม้จึงไม่สัมผัสกับชิ้นส่วนที่เกิดการเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์ โดยเครื่องยนต์สันดาปภายนอกนี้ ได้แก่ เครื่องจักรไอน้ำ กังหันน้ำ และเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

2) เครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine) เป็นเครื่องยนต์ความร้อน ซึ่งแปลงพลังงานเคมีในเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานกล โดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของการหมุนของเพลาส่งกำลัง เพลาข้อเหวี่ยงจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับเกียร์หรือระบบส่งกำลัง เพื่อส่งผ่านพลังงานกลในรูปของการหมุนไปใช้งานตามความประสงค์ขั้นสุดท้าย ส่วนใหญ่แล้วเครื่องยนต์สันดาปภายในจะเป็นเครื่องยนต์ลูกสูบที่สลับทิศ ซึ่งเคลื่อนที่สลับทิศไปมาอยู่ภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ โดยเครื่องยนต์สันดาปภายในนี้ ได้แก่ เครื่องยนต์ลูกสูบ เครื่องยนต์โรทารี กังหันแก๊สและเครื่องยนต์จรวด (John B. Heywood, 1998) ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเครื่องยนต์ลูกสูบ (เครื่องยนต์ดีเซล)

**2.1.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่องยนต์ดีเซล**

เครื่องยนต์ดีเซลหรือเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดล้วนทำงานด้วยวัฏจักรอย่างใดอย่างหนึ่งคือ วัฏจักร 4 จังหวะ หรือวัฏจักร 2 จังหวะ ยกเว้นเฉพาะบางแบบที่มีการออกแบบเป็นพิเศษเฉพาะตัวเท่านั้น โดยขณะที่เครื่องยนต์แบบลูกสูบทำงานนั้นลูกสูบจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในกระบอกสูบ และถ่ายทอดกำลังผ่านก้านสูบไปยังเพลาข้อเหวี่ยง ซึ่งการเคลื่อนที่กลับไปกลับมานี้จะถูกเปลี่ยนไปเป็นการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยง เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งบนสุดหรือตำแหน่งศูนย์ตายบน (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, $r_c$)” ส่วนระยะระหว่างตำแหน่งศูนย์ตายบนและศูนย์ตายล่างคือ ระยะชักหรือช่วงชัก (Stroke) ของลูกสูบ แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 2.1 (John B. Heywood, 1998)

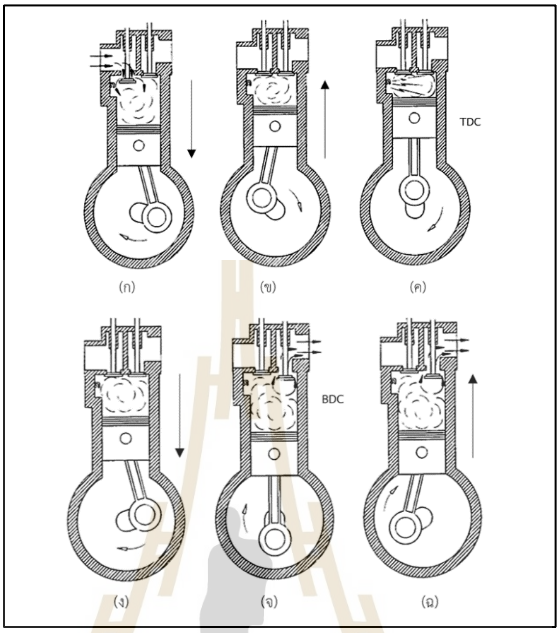



รูปที่ 2.1 กลไกของเครื่องยนต์แบบลูกสูบ (John B. Heywood, 1998)

2.1.2.1 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ

วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ ในแต่ละกระบอกสูบของเครื่องยนต์จะต้องใช้จังหวะการเคลื่อนที่ของลูกสูบ 4 จังหวะ หรือเพลาข้อเหวี่ยงหมุน 2 รอบ

ซึ่งได้จังหวะกำลัง 1 จังหวะนั้นสมบูรณ์ หรือให้ครบ 1 วัฏจักรการทำงาน สามารถอธิบายได้โดยสังเขปดังนี้




รูปที่ 2.2 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ (Willard W. Pullkrabek., 2003)

1) จังหวะแรก : จังหวะดูด (Intake Stroke)

จังหวะดูดลูกสูบเคลื่อนที่จากศูนย์ตายบน (TDC) ไปยังศูนย์ตายล่าง (BDC) ขณะที่ลิ้นไอดีเปิดและลิ้นไอเสียปิด เป็นการขยายปริมาตรห้องเผาไหม้และทำให้เกิดความดันต่ำกว่าบรรยากาศ อากาศภายนอกจึงถูกดันไหลเข้าสู่กระบอกสูบ จนกระทั่งลูกสูบเคลื่อนที่ถึงศูนย์ตายล่าง (BDC) ดังรูปที่ 2.2 (ก)

2) จังหวะที่สอง : จังหวะอัด (Compression Stroke)

จังหวะอัดลิ้นไอดีจะเปิดเมื่อเคลื่อนที่ถึงศูนย์ตายล่าง (BDC) ลูกสูบเคลื่อนที่ไปยังศูนย์ตายบน (TDC) ในขณะที่ลิ้นไอดีและลิ้นไอเสียปิดสนิท ไอดีจะถูกลดปริมาตรทั้งความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากลิ้นไอดีไม่สามารถปิดได้ทันที เพราะฉะนั้นการอัดไอดีจะเริ่มเมื่อลิ้นไอดีปิดสนิทหลังศูนย์ตายล่าง (BDC) โดยอากาศภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลจะถูกอัดให้เหลือปริมาตรประมาณ 1:17-1:23 ซึ่งในช่วงสุดท้ายของจังหวะอัดเชื้อเพลิงจะถูกฉีดเป็นละอองฝอยเข้าสู่ห้องเผาไหม้และผสมกับอากาศร้อน ทำให้เชื้อเพลิงเกิดการระเหยตัวอย่างรวดเร็วและลุกไหม้ เป็นการเริ่มต้นของกระบวนการเผาไหม้ ดังรูปที่ 2.2 (ข)

3) การเผาไหม้ (Combustion)

การเผาไหม้ของส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นก่อนลูกสูบเคลื่อนที่ถึงศูนย์ตายบน (bTDC) การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างเต็มที่ที่ศูนย์ตายบน (TDC) ซึ่งเป็นการเผาไหม้ที่ความดันคงที่ (Constant Pressure) จนสิ้นสุดการฉีดเชื้อเพลิง และลูกสูบเคลื่อนที่ลงสู่ศูนย์ตายล่าง (TDC) ดังรูปที่ 2.2 (ค) การเผาไหม้ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบแก๊สให้กลายเป็นไอเสีย และเพิ่มอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ให้สูงมากขึ้นส่งผลให้ความดันของแก๊สในห้องเผาไหม้สูงตามไปด้วย

4) จังหวะที่สาม : จังหวะกำลังหรือจังหวะขยายตัว (Power Stroke)

จังหวะกำลังหรือจังหวะขยายนี้เป็นช่วงที่ลิ้นไอดีและลิ้นไอเสียปิดสนิทและจากกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ทำให้เกิดความดันสูงในห้องเผาไหม้ดันลูกสูบให้เคลื่อนที่ลงจากตำแหน่งศูนย์ตายบน (TDC) ไปยังศูนย์ตายล่าง (BDC) ซึ่งเป็นจังหวะที่เครื่องยนต์ให้กำลังและงานการขยายตัวของของห้องเผาไหม้ส่งผลให้ความดันและอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ลดลง ดังรูปที่ 2.2 (ง)

5) การระบายไอเสีย (Exhaust Blowdown)

ช่วงท้ายของจังหวะกำลังโดยลิ้นไอเสียจะเปิดเพื่อระบายไอเสีย ความดันและอุณหภูมิในกระบอกสูบยังมีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับบรรยากาศภายนอกกระบอกสูบ ด้วยเหตุนี้ไอเสียส่วนใหญ่ที่อยู่ในกระบอกสูบจะคายออกจากกระบอกสูบตั้งแต่ลูกสูบยังเคลื่อนที่ลงมาไม่ถึงศูนย์ตายล่าง (BDC) ดังรูปที่ 2.2 (จ) ซึ่งเป็นไอเสียที่มีเอนทัลปี (Enthalpy) สูง ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรลดลง ทั้งนี้การเปิดลิ้นไอเสียก่อนถึงศูนย์ตายล่างแม้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน แต่ด้วยความจำเป็นเนื่องจากการระบายไอเสียที่ต้องใช้เวลา

6) จังหวะที่สี่ : จังหวะคายไอเสีย (Exhaust Stroke)

จังหวะคายไอเสียเป็นช่วงที่ลูกสูบเคลื่อนที่ถึงศูนย์ตายล่าง (BDC) ในกระบอกสูบยังเต็มไปด้วยไอเสียความดันต่ำที่ใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศ เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นจากศูนย์ตายล่าง (BDC) ในขณะที่ลิ้นไอดีปิดและลิ้นไอเสียเปิดอยู่ ไอเสียจะถูกไล่ออกจากกระบอกสูบจนเหลือตกค้างเพียงปริมาตรอัด (Clearance Volume) ดังรูปที่ 2.2 (ฉ) เมื่อลูกสูบถึงศูนย์ตายบน (TDC) ก่อนลูกสูบจะถึงศูนย์ตายบนลิ้นไอดีจะเริ่มเปิด และเปิดสุดที่หลังศูนย์ตายบน (aTDC) เป็นการเริ่มต้นจังหวะแรกของวัฏจักรต่อไป ส่วนลิ้นไอเสียจะเริ่มปิดก่อนศูนย์ตายบนและปิดสนิทหลังศูนย์ตายบนเล็กน้อย ช่วงก่อนและหลังศูนย์ตายบนเล็กน้อยในช่วงจังหวะสุดท้ายของจังหวะคายไอเสีย และช่วงเริ่มต้นของจังหวะดูดจึงเป็นช่วงที่ลิ้นไอดีและไอเสียเปิดอยู่ด้วยกัน ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า “มุมลิ้นซ้อนเหลี่ยม (Valve Overlap)” (John B. Heywood, 1998)

## 2.2 เครื่องทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) เป็นเครื่องมือสำหรับทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ โดยการวัดค่าแรงบิดของเครื่องยนต์เพื่อหากำลังเบรก ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นชนิดหลัก ๆ ได้แก่

1) ไดนาโมมิเตอร์แบบโพรนีเบรก (Prony Brake) เป็นเครื่องมือวัดแรงบิดของเครื่องยนต์ที่ประกอบด้วยชุดเบรกที่มีคานยาวไปกดบนเครื่องวัดแรง โดยชุดเบรกซึ่งรัดอยู่รอบพูลเลย์สามารถปรับเพิ่มหรือลดความฝืดได้

2) ไดนาโมมิเตอร์แบบเชือกรัด (Rope Brake) เป็นเครื่องมือวัดแรงบิดของเครื่องยนต์ เหมาะสำหรับทดสอบเครื่องยนต์ที่มีความเร็วรอบต่ำ ซึ่งใช้เชือกหรือสายพานพันรอบพูลเลย์ โดยปลายข้างหนึ่งยึดติดกับเครื่องชั่งสปริงส่วนปลายอีกด้านหนึ่งแขวนตุ้มน้ำหนัก มีหลักการวัดแรงในแนวสัมผัสที่พูลเลย์โดยอาศัยความฝืดระหว่างขอบของพูลเลย์กับเชือกสายพาน เพื่อนำมาคำนวณหาแรงบิดและกำลังเบรก

3) ไฮดรอลิกไดนาโมมิเตอร์ (Hydraulic Dynamometer) เป็นเครื่องมือวัดแรงบิดของเครื่องยนต์ที่ใช้ของเหลวเป็นตัวสร้างความฝืดมีหลักการคล้ายกับทอร์คคอนเวอร์เตอร์ของเกียร์อัตโนมัติโดยมีโรเตอร์ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องยนต์ หมุนเพื่อให้ของเหลวไหลวนไปผลักดันสเตเตอร์ซึ่งยึดติดอยู่กับตัวเรือนทำให้เกิดแรงกระทำ เพื่อหาค่าแรงบิดและกำลังเบรก

4) ไดนาโมมิเตอร์แบบไฟฟ้า (Electrical Dynamometer) มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้ามาติดตั้งกับเพลาของเครื่องยนต์ โดยเครื่องยนต์จะทำหน้าที่หมุนอาร์เมเจอร์และส่งกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ขดลวดสนามแม่เหล็กที่ยึดติดอยู่กับตัวเรือนของอาร์เมเจอร์เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กต้านการหมุนของอาร์เมเจอร์ ผลของแรงปฏิกิริยาระหว่างขดลวดสนามแม่เหล็กกับอาร์เมเจอร์ที่หมุนไปนี้จะบิดให้ตัวเรือนของเจนเนอเรเตอร์หมุนตามไปด้วยก็สามารถวัดแรงบิดได้เช่นเดียวกับไฮดรอลิกไดนาโมมิเตอร์ (ชัยยง ศิริพรมงคลชัย, 2558)

## 2.3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์ดีเซลถือเป็นกลจักรความร้อนชนิดหนึ่งที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงเป็นพลังงานทางกล ซึ่งให้กำลังออกมาในรูปของแรงบิด เพื่อนำไปใช้ในการขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่อพ่วงต่าง ๆ พารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงสมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์ที่ควรทราบและทำความเข้าใจนั้นมีหลายปัจจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.3.1 แรงบิด

แรงบิด (Torque) คือ โมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นจากเพลาข้อเหวี่ยง โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “ไดนาโมมิเตอร์” เพื่อวัดค่าแรงบิดของเครื่องยนต์ กระทำโดยการเร่งเครื่องยนต์พร้อมกับ

ชุดต้านทานการหมุนให้ต้านการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ และวัดขนาดของแรงที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวัดแรง (Load Cell) สมการที่ใช้คำนวณแสดงดังสมการที่ 2.1

$$T = Fr \tag{2.1}$$

โดย T คือ แรงบิด (N-m)

F คือ แรง (N)

r คือ ระยะจากจุดกึ่งกลางของแกนหมุนถึงแนวแรง (m)

**2.3.2 กำลังเบรก**

กำลังเบรก (Brake Power) คือ กำลังของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นจากการวัดแรงบิดที่เพลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ โดยการวัดกำลังเบรกจะใช้ไดนาโมมิเตอร์ต่อเข้ากับเครื่องยนต์เพื่อวัดแรงบิดของเครื่องยนต์ ซึ่งสามารถคำนวณกำลังเบรกได้จากสมการที่ 2.2

$$P_b = \frac{2\pi NT}{(60)(1000)} \tag{2.2}$$

โดยที่ $P_b$ คือ กำลังเบรก (kW)

T คือ แรงบิด (N-m)

N คือ รอบการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยง (RPM)

**2.3.3 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ**

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption: SFC) คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยมวลต่อกำลังหนึ่งหน่วยที่ผลิตได้จากเครื่องยนต์ภายในระยะเวลาหนึ่งหน่วย (ชัยยง ศิริพรมงคลชัย, 2558) โดยการทดสอบเครื่องยนต์ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะถูกวัดเป็นอัตราการไหลของมวล สำหรับใช้เปรียบเทียบความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่มีขนาดแตกต่างกันในรูปแบบของความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake Specific Fuel Consumption: BSFC) ซึ่งเป็นอัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิงต่อหน่วยกำลังเบรกที่ผลิตออกมาสามารถคำนวนได้จากสมการที่ 2.3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \tag{2.3}$$

โดยที่ BSFC คือ ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (g/kW-hr)
$\dot{m}_f$ คือ อัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิง (kg/s)

**2.3.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน**

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency : $\eta_{th}$) คือ ความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานกล (ชัยยง ศิริพรมงคลชัย, 2558) หรือ อัตราส่วนของงานที่ส่งออกต่อพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับเครื่องยนต์ (N.K. Giri, 2011) ซึ่งเป็นส่วนที่มีสำคัญอีกอย่างหนึ่งสำหรับการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดหรือเครื่องยนต์ดีเซล ทั้งนี้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสามารถหาได้หลายกรณี บางครั้งหาได้จากกำลังบ่งชี้เรียกว่า "ประสิทธิภาพเชิงความร้อนบ่งชี้ (Indicated Thermal Efficiency : $\eta_i$)" หรือหาได้จากกำลังเบรกเรียกว่า "ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (Brake Thermal Efficiency : $\eta_b$) ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$\eta_b = \frac{P_b}{\dot{m}_f Q_{HV}} \tag{2.4}$$

โดยที่ $\eta_b$ คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก
$Q_{HV}$ คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (kJ/kg)

**2.3.5 ความดันในกระบอกสูบ**

ความดันในกระบอกสูบ (In-Cylinder Pressure) คือ ความดันที่เกิดขึ้นภายในกระบอกสูบเทียบกับมุมองศาเพลาข้อเหวี่ยงต่าง ๆ ในช่วงจังหวะการอัดและจังหวะการคายของวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ และเป็นวิธีที่เหมาะสำหรับการวัดอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนของพลังงานเคมีในน้ำมันเชื้อเพลิง โดยสามารถวัดได้ด้วยการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ความดัน เพื่อวัดความดันที่บริเวณห้องเผาไหม้

**2.3.6 อัตราการปลดปล่อยความร้อน**

อัตราการปลดปล่อยความร้อน (Rate of Heat Release : ROHR) เป็นหลักการสำคัญที่นำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์การเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ ซึ่งอัตราการปลดปล่อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ความร้อนคือ อัตราที่พลังงานเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ของความดันในกระบอกสูบ และปริมาตรที่มุมองศาเพลาข้อเหวี่ยงต่าง ๆ ด้วยกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ภายใต้สมมติฐานกระบวนการโพลิโทรปิค (Polytropic) ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ 2.5

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma - 1} V \frac{dP}{d\theta} \tag{2.5}$$

โดยที่ $Q$ คือ อัตราการปลดปล่อยความร้อน

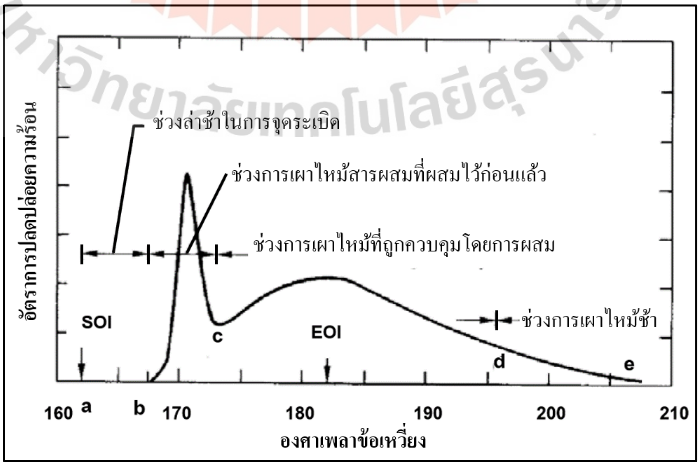
$\gamma$ คือ อัตราส่วนของค่าความร้อนจำเพาะ ($c_p/c_v$)

$\theta$ คือ องศาเพลาข้อเหวี่ยง (°CA)

$P$ คือ ความดันในห้องเผาไหม้ (Bar)

$V$ คือ ปริมาตรในห้องเผาไหม้ ($m^3$)

อัตราการปลดปล่อยความร้อนนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 4 ช่วง คือ ช่วงล่าช้าการจุดระเบิด, ช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ผสมไว้ก่อนแล้ว, ช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ควบคุมโดยการผสม และช่วงการเผาไหม้ช้า ซึ่งในแต่ละช่วงถูกควบคุมโดยกระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.3 แสดงแผนภูมิอัตราการปลดปล่อยความร้อนในเครื่องยนต์แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง โดยสามารถอธิบายพอสังเขปได้ดังนี้




รูปที่ 2.3 อัตราการปลดปล่อยความร้อนในเครื่องยนต์แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง

(John B. Heywood, 1998)

1) ช่วงล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay Period, a-b) เป็นช่วงระหว่างการเริ่มต้นของการฉีดเชื้อเพลิง (Start of Injection, SOI) เข้าสู่ห้องเผาไหม้และการเริ่มต้นการเผาไหม้

2) ช่วงการเผาไหม้ของสารผสม (Premixed Combustion Phase, b-c) ในช่วงนี้เป็นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ผสมกับอากาศในช่วงล่าช้าในการจุดระเบิด โดยการเผาไหม้ก็จะเผาไหม้เกือบพร้อมกัน ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็วและเป็นผลให้มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนในช่วงนี้สูง

3) ช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-Controlled Combustion Phase, c-d) เป็นการเผาไหม้หลังจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ถูกผสมกับอากาศในช่วงล่าช้าในการจุดระเบิดได้ถูกเผาไหม้จนหมด ในช่วงนี้จะถูกควบคุมโดยปริมาณเชื้อเพลิงที่พร้อมเผาไหม้ อัตราการปลดปล่อยความร้อนช่วงนี้จะต่ำกว่าในช่วงการเผาไหม้ของสารผสม แล้วจะลดลงเมื่อการเผาไหม้ดำเนินต่อไป

4) ช่วงการเผาไหม้ช้า (Late Combustion Phase, d-e) เป็นช่วงที่การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ยังคงหลงเหลืออยู่ภายในห้องเผาไหม้เล็กน้อย และเป็นการเผาไหม้ของเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ของส่วนผสมหนาที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนที่ต่ำในจังหวะที่มีการขยายตัวภายในกระบอกสูบ (John B. Heywood, 1998)

## 2.4 มลพิษไอเสียที่เกิดจากเครื่องยนต์

ไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงกับอากาศของเครื่องยนต์ดีเซล ประกอบไปด้วยก๊าซที่เป็นมลพิษอยู่หลายชนิด ได้แก่ ไนโตรเจนออกไซด์ ($NO_X$) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอน (HC) ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Particulate Matter) ความเข้มข้นของก๊าซที่เป็นมลพิษในไอเสียของเครื่องยนต์มักจะถูกวัดเป็นส่วนในล้านส่วน (Part per million, ppm) หรือร้อยละโดยปริมาตร

### 2.4.1 ไนโตรเจนออกไซด์ ($NO_X$)

กลุ่มของออกไซด์ไนโตรเจน ประกอบด้วยไนตริกออกไซด์ (NO) ไนโตรเจนไดออกไซด์ ($NO_2$) ไนตรัสออกไซด์ ($N_2O$) ไนโตรเจนไตรออกไซด์ ($N_2O_3$) ไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์ ($N_2O_4$) และไดไนโตรเจนเพนตอกไซด์ ($N_2O_5$) ก๊าซจำพวกนี้เกิดเองตามธรรมชาติมีสาเหตุหลักมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปก๊าซที่ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศสำคัญคือ ก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ($NO_2$) ซึ่งก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ เกิดจากการรวมตัวกันของก๊าซไนตริกออกไซด์ทำปฏิกิริยากับโอโซนในบรรยากาศ โดยทั่วไปไนโตรเจนไดออกไซด์ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายของมนุษย์ แต่เมื่อรวมตัวกับน้ำในอากาศจะกลายเป็นกรดไนตริก ($HNO_3$) ซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อนสามารถกัดกร่อนโลหะได้

กลไลที่ทำให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลไก ดังนี้

1. การเกิด Prompt $NO_X$ เกิดจากโมเลกุลของไนโตรเจนในอากาศทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอนเมื่อมีการเผาไหม้ โดยจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเผาไหม้ที่ส่วนผสมเชื้อเพลิงที่หนา

2. การเกิด Fuel $NO_X$ เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของไนโตรเจน เช่น แอมโมเนีย ($NH_3$) เป็นต้น แต่ในการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากเชื้อเพลิงจะมีปริมาณที่น้อยมาก

3. การเกิด Thermal $NO_X$ เกิดจากไนโตรเจนในอากาศเมื่ออยู่ในที่อุณหภูมิสูงอย่างห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ บางส่วนของไนโตรเจนอะตอมคู่ ($N_2$) จะแตกตัวเป็นไนโตรเจนอะตอมเดี่ยว (N) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ง่ายกว่า ดังนั้น เมื่อเกิดอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้มีการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ที่สูงขึ้น

**2.4.2 คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)**

ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) โดยปกติเป็นก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบรูณ์ของสารประกอบคาร์บอนหรือสารประกอบคาร์บอนต่าง ๆ เป็นมลพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย โดยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์จะรวมตัวจับกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงได้มากกว่าออกซิเจน ทำให้เม็ดเลือดแดงไม่สามารถรับ ออกซิเจนไปเลี้ยงส่วนต่างๆของร่างกาย เมื่อร่างกายได้รับก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์จะมีอาการเวียนศีรษะ อึดอัด คลื่นไส้อาเจียน หากได้รับในปริมาณมากอาจช็อกหมดสติหรืออันตรายถึงชีวิตได้

**2.4.3 ไฮโดรคาร์บอน (HC)**

ไฮโดรคาร์บอนเป็นสารที่มีธาตุไฮโดรเจนและธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนในอากาศมีหลายประเภทเข้าสู่บรรยากาศเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์หรือการระเหย สารเหล่านี้ส่วนใหญ่มีความเข้มข้นต่ำและไม่มีพิษภัย แต่เมื่อไฮโดรคาร์บอนไปทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนออกไซด์ โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดหมอกควันและไฮโดรคาร์บอนยังเป็นสารที่มีส่วนในก่อมะเร็งด้วย สาเหตุการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของไฮโดรคาร์บอนมาจากหลายแหล่ง ดังนี้

1) ภายในห้องเผาไหม้ที่มีซอกหรือช่องแคบ ๆ ที่เชื้อเพลิงหรือไอดีสามารถเข้าไปอยู่ตามซอกต่าง ๆ เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นในจังหวะการอัด ความดันในกระบอกสูบจะดันให้เชื้อเพลิงเข้าไปติดตามซอกหรือช่องต่าง ๆ เมื่อเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงในส่วนนี้จะไม่เกิดการเผาไหม้หรือเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

2) บริเวณผนังกระบอกสูบเมื่อเปลวไฟลามไปถึงผนังสูบกระบอกสูบ ซึ่งบริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิต่ำเนื่องจากอยู่ใกล้ระบบระบายความร้อนจึงส่งผลให้เปลวไฟดับ ซึ่งทำให้เชื้อเพลิงบางส่วนไม่ถูกเผาไหม้

3) ไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นจากสารหล่อลื่นสามารถดูดซับและปล่อยไฮโดรคาร์บอนได้ เป็นผลให้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนนั้นไม่สามารถเผาไหม้ได้

### 2.4.4 ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Particulate Matter หรือ PM)

ฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เรามักจะเรียกว่า “เขม่าควันดำ (Smoke)” คือ มลพิษทางอากาศที่อยู่ในรูปของอนุภาคของแข็งหรือของเหลวแขวนลอยกระจายอยู่ในอากาศ ซึ่งมีสาเหตุเกิดจากกิจกรรมเผาไหม้ของมนุษย์ อุตสาหกรรมและอื่น ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ โดยหนึ่งในปัจจัยเหล่านั้นคือ มลพิษไอเสียจากเครื่องยนต์ ซึ่งสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าในรูปของควันดำที่ออกมาจากท่อไอเสีย เมื่อสูดดมเข้าสู่ร่างกายจะทำให้เกิดโรคในระบบทางเดินหายใจ อาจก่อให้เกิดโรคเรื้อรังซึ่งสามารถผ่านเข้าสู่กระแสเลือดและแทรกซึมไปสู่อวัยวะส่วนต่าง ๆ ได้ ปัจจุบันปัญหามลพิษบนท้องถนนถูกมองว่าเป็นหนึ่งในปัญหาหลักในการปล่อยมลพิษทางอากาศ ทำให้ภาครัฐให้ความสำคัญถึงปัญหาดังกล่าวและได้มีการปรับมาตรฐานมลพิษจากเครื่องยนต์ให้เข้มงวดมากขึ้น

## 2.5 น้ำมันจากขยะพลาสติก

### 2.5.1 ขยะมูลฝอย

ขยะมูลฝอยเป็นสิ่งที่เหลือใช้จากการดำเนินกิจกรรมของมนุษย์ในชีวิตประจำวัน และปัญหาขยะ โดยเฉพาะขยะพลาสติกกำลังเป็นวิกฤตของสถานการณ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พลาสติกเป็นสิ่งที่มนุษย์ผลิตขึ้นโดยนำวัตถุดิบจากธรรมชาติที่สำคัญมาใช้สำหรับการผลิต คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน แร่ธาตุต่าง ๆ และเส้นใย พลาสติกมีหลากหลายชนิดแตกต่างกันไปตามสิ่งที่นำมาใช้ผลิตและกรรมวิธีการผลิต เพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่จะทำจากพลาสติกแต่ละชนิด

พลาสติกที่พบเห็นและใช้งานในชีวิตประจำวันมีอยู่มากมายหลายชนิด หากแบ่งจำแนกทั่วไปเป็นชนิดตามสากล ได้แก่ โพลิเอทีลีนเทเรฟทาเลต (PET) โพลิเอทีลีน (PE) โพลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และโพลิสไตรีน (PS) ซึ่งพลาสติกเหล่านี้ถูกนำไปใช้งานมีบทบาทต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์เรามาก ทั้งของเล่น อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าเครื่องประดับ ผลิตภัณฑ์ยานยนต์ ก่อสร้าง เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีของสินค้าพลาสติก คือ มีความเหนียว แข็ง ยืดหยุ่น ทนความร้อนได้ไม่มากนัก ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้าน้ำหนักเบาทำให้

สะดวกในการใช้งาน การเติบโตของธุรกิจบรรจุภัณฑ์ โดยเฉพาะในกลุ่มที่เป็นบรรจุภัณฑ์พลาสติกสำหรับอาหารและเครื่องดื่ม อาทิเช่น ถุงพลาสติก แผ่นฟิล์มพลาสติก กระสอบพลาสติก จากสถานการณ์ดังกล่าวจึงก่อให้เกิดปริมาณขยะพลาสติกขึ้นเป็นจำนวนมหาศาล ซึ่งขยะพลาสติกเหล่านี้เป็นขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ และขยะพลาสติกเหล่านี้ต้องใช้เวลาหลายร้อยปีในการย่อยสลาย ดังนั้นวิธีการจัดการขยะพลาสติกส่วนใหญ่จึงเป็นการฝังกลบในหลุมฝังกลบหรือเผาทำลายในเตาเผาขยะ หากกำจัดด้วยวิธีฝังกลบจะใช้พื้นที่มากกว่าขยะปกติหลายเท่า หรือหากเผาทำลายจะก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกสาเหตุของภาวะโลกร้อน อีกทั้งยังทิ้งสารตกค้างปนเปื้อนในดินและน้ำได้อีกด้วย ซึ่งเป็นวิธีจัดการที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก

สำหรับขยะพลาสติกมีจำนวนมากถึงประมาณ 20-30% โดยปริมาตร และ 10-12% โดยน้ำหนักของขยะมูลฝอยชุมชน และเป็นที่รู้กันว่าพบมากเป็นอันดับสามของปริมาณขยะมูลฝอยชุมชน รองลงมาจาก เศษอาหารและกระดาษ (Singh et al., 2016) ขณะที่เมื่อปี พ.ศ. 2555 พบว่าพลาสติกถูกผลิตขึ้นจำนวน 280 ล้านตันทั่วโลก และมากกว่าครึ่งหนึ่งของพลาสติกที่เหลือจากการฝังกลบหรือรีไซเคิลราว 150 ล้านตัน น่าจะถูกทิ้งลงดินและทะเล (Rochman et al., 2013) และเพื่อจัดการกับปัญหาเหล่านี้คณะกรรมาธิการยุโรป (EU) ได้นำเสนอยุทธศาสตร์การจัดการกับพลาสติกเพื่อลดใช้พลาสติกในภาคอุตสาหกรรม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนวิธีการผลิต การใช้และการกำจัดพลาสติก โดยได้ตั้งเป้าหมายในส่งเสริมการรีไซเคิลพลาสติกโดยกำหนดให้ได้ร้อยละ 65 ของในเขตเทศบาลเมืองและร้อยละ 75 ของขยะบรรจุภัณฑ์ ในปี ค.ศ.2030 (Fivga et al., 2018)

ในประเทศไทยปัญหาขยะในปัจจุบันเป็นปัญหาใหญ่ จากพฤติกรรมการบริโภคผลิตภัณฑ์พลาสติกในชีวิตประจำวันนี้ทำให้สถานการณ์ขยะพลาสติกในประเทศไทยอยู่ในขั้นวิกฤต โดยในปัจจุบันจากการประเมินปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นของประเทศไทย พบว่าในปี พ.ศ.2560 มีปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดขยะมูลฝอยต่าง ๆ ประมาณ 27.37 ล้านตัน และพบว่าข้อมูลปริมาณขยะพลาสติกคิดเป็น 12% ของปริมาณขยะทั้งหมด หรือประมาณ 2 ล้านตันต่อปี แต่การนำขยะพลาสติกกลับไปใช้ประโยชน์น้อยมากเฉลี่ยประมาณปีละ 0.5 ล้านตันส่วนที่เหลือ 1.5 ล้านตัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) ขยะพลาสติกบางชนิดนำมาคัดแยกเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ แต่ยังมีปริมาณไม่มากมักเมื่อเทียบกับปริมาณของขยะที่เกิดขึ้น

ปัจจุบันปริมาณขยะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทุกวันตามจำนวนประชากร แต่ขยะที่จัดเก็บรวบรวมได้และนำไปกำจัดอย่างถูกวิธีมีน้อย การจัดการขยะเป็นปัญหาสำคัญของประเทศที่จำเป็นต้องได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วน เนื่องจากขยะที่เหลือจึงตกค้างสะสมเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนที่อยู่โดยรอบ ปัญหาขยะมูลฝอยมีผลกระทบอย่างมากต่อคุณภาพชีวิต

สุขภาพและสิ่งแวดล้อมของมนุษย์ ดังนั้นเราจึงต้องหาวิธีจัดการมาใช้อย่างที่มีประสิทธิภาพและให้เกิดประโยชน์กลับคืนมา นอกจากนี้ขยะยังเป็นทรัพยากรที่มีคุณค่าในตัวเองเนื่องจากสามารถนำวนกลับมาผลิตเป็นพลังงานใหม่ได้ การนำขยะมูลฝอยที่มีอยู่มาผลิตเป็นพลังงานทดแทนเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ได้และเป็นการใช้ประโยชน์จากขยะเพื่อจัดการแก้ไขปัญหาขยะได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถช่วยลดปริมาณขยะลงและได้พลังงาน ซึ่งนอกจากจะได้พลังงานทดแทนกลับมาใช้แล้วยังส่งผลดีต่อช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมในการลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ช่วยลดปัญหาสภาวะโลกร้อนได้ นอกจากนี้ทุกคนควรช่วยกันแก้ปัญหาร่วมกันตั้งแต่ต้นเหตุถึงปลายทางด้วยการสร้างแนวคิดลดขยะตั้งแต่ต้นทาง คัดแยกขยะ นำขยะกลับมาใช้ซ้ำ หมุนเวียนขยะกลับมาใช้ใหม่ และกำจัดขยะอย่างถูกต้องปลอดภัย

ถึงอย่างไรก็ตามพลาสติกที่ถูกทิ้งเป็นขยะส่วนหนึ่งถูกนำกลับมาใช้อีก โดยนำขยะพลาสติกมารีไซเคิลแปรรูปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้น้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก ด้วยเหตุว่าขยะพลาสติกมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอย่างหนึ่งเช่นเดียวกับน้ำมัน สำหรับเทคโนโลยีที่ใช้ในการจัดการขยะเพื่อเปลี่ยนสภาพเป็นพลังงานทดแทนมีอยู่หลายวิธีทั้งใช้กระบวนการทางความร้อน กระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางชีวเคมี ได้แก่ การเผาขยะในระบบเตาเผา (Incineration) เทคโนโลยีการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง เทคโนโลยีไพโรไรซิส เทคโนโลยีเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel, RDF) ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีมีข้อดีและข้อเสียที่ต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เพราะขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นในแต่ละพื้นที่นั้นไม่เหมือนกัน มีความแตกต่างของสภาพคุณสมบัติและลักษณะ ดังนั้นเทคโนโลยีในการผลิตพลังงานจากขยะจึงมีอยู่หลากหลายวิธี การนำเทคโนโลยีมาใช้จะต้องคำนึงถึงวิถีความเป็นอยู่ของสังคม ความหลากหลายของประเภทขยะที่เกิดขึ้น สภาพคุณสมบัติ ลักษณะของขยะ สถานที่ที่ใช้จัดการขยะ สภาพภูมิประเทศและผลกระทบด้านต่าง ๆ ซึ่งการจัดการขยะพลาสติกและการพัฒนาการใช้ขยะพลาสติกมารีไซเคิลเพื่อจัดการขยะในหลากหลายวิธีจึงเป็นสิ่งช่วยในการจัดการปัญหาขยะนี้ได้ ซึ่งตั้งแต่ราคาพลังงานได้ปรับตัวสูงขึ้นมาโดยตลอด ทำให้มีนโยบายการส่งเสริมและสนับสนุนการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกซึ่งได้รับความสนใจกันอย่างกว้างขวางทั้งในระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้การนำพลังงานจากขยะพลาสติกขึ้นมาใช้อีกโดยวิธีไพโรไลซิสให้กลายเป็นน้ำมันจากขยะพลาสติก (Waste plastic oil, WPO) และนำมารีไซเคิลเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล วิธีนี้เป็นทางออกที่ยั่งยืนสำหรับการจัดการขยะพลาสติกคือ ช่วยลดช่องว่างระหว่างการผลิตพลาสติกและการเกิดขยะพลาสติกที่ขยายวงกว้างขึ้นทั่วโลก ซึ่งวัฏจักรของขยะเหล่านี้ยังคงวนเวียนในชีวิตประจำวันของมนุษย์และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นการแปรรูปเปลี่ยนของเสียจากขยะพลาสติกให้เป็นน้ำมัน เพื่อให้การจัดการขยะที่ขาดประสิทธิภาพได้อย่างเหมาะสม เพื่อผลิตน้ำมันใช้เอง ซึ่งระบบไพโรไลซิสมีใช้ในหลายประเทศ เช่น แคนาดา เนเธอร์แลนด์ สาธารณรัฐประชาชนจีน สหรัฐอเมริกา เกาหลี ฮ่องกง มาเลเซีย เป็นต้น การใช้พลาสติกทั่วโลกมีปริมาณสูงถึง 322 ล้านตัน ในปี พ.ศ.2558 คิดเป็นเพิ่มขึ้น 4% จากปี พ.ศ.2557 บ่งบอกถึงปริมาณการสะสมของขยะพลาสติกที่จะเพิ่มขึ้นด้วยในแต่ละปี ในประเทศที่พัฒนาแล้วอย่างเช่น อเมริกา มีขยะพลาสติกเพิ่มขึ้น 13% จากปี พ.ศ.2554 ถึง ปี พ.ศ.2557 ประเทศอังกฤษ เพิ่มขึ้น 60% จาก พ.ศ.2548 ถึง ปี พ.ศ.2558 และประเทศกำลังพัฒนาอย่างมาเลเซีย เพิ่มขึ้น 18 เปอร์เซนต์ในระยะเวลา 5 ปี ปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นว่าแต่ละประเทศมีแนวโน้มของการผลิตขยะพลาสติกในปริมาณที่แตกต่างกัน ชี้ให้เห็นว่าการผลิตเชื้อเพลิงเหลวด้วยไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกจะแตกต่างกันในเชิงปริมาณและคุณภาพ (Sharuddin et al, 2017) การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกเข้ามามีบทบาทมากขึ้นและเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญและได้มีการศึกษาเรื่องนี้เพิ่มมากขึ้น

ในขณะเดียวกันกระบวนการไพโรไลซิสไม่ได้รับรองว่าเป็นวิธีการที่สามารถขจัดปัญหาได้สะอาดหมดจดสำหรับขยะมูลฝอยชุมชน เนื่องจากยังมีการปล่อยก๊าซพวกไฮโดรเจนคลอไรด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แอมโมเนีย และผลิตภัณฑ์อาจทำให้เกิดปัญหาสิ่งสกปรกปนเปื้อน ดังนั้นจะต้องติดอุปกรณ์ควบคุมการปล่อยมลพิษกับชุดอุปกรณ์ไพโรไรซิสด้วยเสมอ และวัดการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซ ของเหลว และของแข็ง เพื่อให้ไพโรไลซิสขยะมูลฝอยชุมชนเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น (Chen et al., 2014) การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันไพโรไลซิสควรศึกษาไปถึงวิธีการบำบัดขั้นหลัง (Post-treatment) ได้แก่ การกรองสารเคมี การบำบัดทางเคมี หรือด้วยการผสมกับดีเซลและเชื้อเพลิงชนิดอื่น การกลั่นและการกลั่นเพื่อกำจัดไฮโดรคาร์บอนหนักและสิ่งเจือปนอื่น ๆ (Miandad et al., 2017) แต่ด้วยในปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีมาใช้ในการกำจัดที่ดีขึ้น ไม่กระทบต่อสิ่งแวดล้อมและยังก่อให้เกิดประโยชน์เพิ่มขึ้น โดยนำมาแปรรูปทำเป็นพลังงานในรูปของน้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซ ซึ่งนอกจากเป็นการช่วยลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังเป็นอีกทางเลือกของการผลิตพลังงานหมุนเวียน

**2.5.2 วัตถุดิบสำหรับผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกในกระบวนการไพโรไลซิส**

การเตรียมวัตถุดิบในการผลิตเป็นตัวแปรหลักต่อผลผลิตได้จากกระบวนการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ในขยะพลาสติกพบว่า มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเช่นเดียวกับน้ำมันเชื้อเพลิง เพียงแต่มีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า ขณะที่น้ำมันดีเซลมีคาร์บอน 12-20 อะตอม น้ำมันเบนซิน 6-12 อะตอม ซึ่งขยะพลาสติกจะมีโซ่ที่ยาวมาก มีจำนวนคาร์บอนหลายอะตอม ขึ้นกับชนิดของโพลิเมอร์แบบนั้น ๆ การจะเปลี่ยนขยะพลาสติกให้เป็นน้ำมันจะ

ต้องตัดโซ่พันธะให้สั้นลง นอกจากนั้นการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นน้ำมันจากการนำมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสมีความเป็นไปได้สูงที่จะได้เป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากน้ำมันที่ผลิตได้มีค่าความร้อนสูงเทียบได้กับน้ำมันเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ (Sharuddin et al., 2016) ขยะพลาสติกทั่วไปมีหลายประเภทที่สามารถนำมาผลิตเป็นน้ำมันได้ แต่อาจให้ผลผลิตและปริมาณที่แตกต่างกัน

โดยพื้นฐานแล้วพลาสติกชนิดต่าง ๆ จะมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ซึ่งจะวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติทางเคมีของสารประกอบของพลาสติก โดยจะประกอบด้วย ปริมาณความชื้น (Moisture Content), ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon), ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) และปริมาณเถ้า (Ash content) ปริมาณสารระเหยและปริมาณเถ้าเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ของน้ำมันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิส อธิบายคือถ้ามีปริมาณสารระเหยสูงจะให้การเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันเหลวดี ในทางตรงกันปริมาณเถ้าสูงขึ้นจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันเหลวลดลง ทำให้เป็นการเพิ่มผลผลิตที่เป็นก๊าซและของแข็งมากขึ้น (Sharuddin et al., 2016) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของพลาสติกประเภทต่าง ๆ (Sharuddin et al., 2016)

| ประเภทของพลาสติก | ปริมาณความชื้น (%wt) | ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%wt) | ปริมาณสารระเหย (%wt) | ปริมาณเถ้า (%wt) |
|---|---|---|---|---|
| โพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต | 0.61 | 16.17 | 86.83 | 0.00 |
| โพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง | 0.00 | 0.03 | 98.57 | 1.40 |
| โพลิไวนิลคลอไรด์ | 0.74 | 5.19 | 94.82 | 0.00 |
| โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ | 0.30 | 0.00 | 99.70 | 0.00 |
| โพลิโพรไพลีน | 0.18 | 0.16 | 97.85 | 1.99 |
| โพลิสไตรีน | 0.30 | 0.20 | 99.50 | 0.00 |
| โพลิเอทีลีน | 0.10 | 0.04 | 98.87 | 0.99 |

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการคัดแยกด้วยเทคโนโลยีการบาบัดขยะมูลฝอยทางกลและชีวภาพ (Mechanical and Biological treatment, MBT) ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นวิธีการหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับใช้จัดการขยะ คือ ดำเนินการปรับสภาพของขยะโดยวิธีการหมัก (ทางชีวภาพ) ก่อนทำการคัดแยก (ทางกล) โดยใช้หลักการหมัก

ในสภาวะใช้อากาศ ทำให้ใช้ระยะเวลาในการหมักสั้นไม่ถึง 30 วัน โดยไม่ส่งกลิ่นเหม็นเน่าเหมือนการเทกองทิ้งไว้ เนื่องจากใช้เทคโนโลยีการกลับกองขยะด้วยสกรูในแนวตั้ง (Vertical agitators) ซึ่งจะทำให้ขยะที่อยู่ด้านล่างมีโอกาสสัมผัสกับอากาศมากขึ้น ทำให้สามารถช่วยป้องกันการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของขยะด้านล่างได้ และยังเป็นการประหยัดพื้นที่ในการจัดการ พร้อมกันนี้กระบวนการบำบัดด้วยวิธีนี้ยังให้ผลพลอยได้คือขยะมีคุณสมบัติเหมาะสมในการนำเศษเหลือพวกอินทรียวัตถุมาทำเป็นสารปรับปรุงดิน (Soil amendment) และเชื้อเพลิงขยะ (Refuse derived fuel: RDF) ทำให้เป็นการสร้างมูลค่าให้ขยะเพิ่มขึ้น

**2.5.3 เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากขยะพลาสติก**

ปริมาณขยะที่เพิ่มสูงขึ้นในปัจจุบันส่งผลให้เกิดความยุ่งยากในการจัดการ เนื่องจากมีขยะมีอยู่หลายประเภทปะปนกัน มีข้อแตกต่างทั้งปริมาณและองค์ประกอบ จะเห็นได้ว่าในอดีตจะมีวิธีการกำจัดขยะมูลฝอยส่วนใหญ่ด้วยวิธีการฝังกลบ การเผา การกองทิ้งเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดงบประมาณ แต่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยมากขึ้นในอนาคต จนกระทั่งในปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดเพื่อใช้ประโยชน์จากขยะให้เกิดประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนมาเป็นพลังงานและลดปัญหาขยะลงได้ การแปรรูปพลังงานที่มีอยู่ในขยะมูลฝอยจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดและนำพลังงานที่อยู่ในขยะมูลฝอยกลับมาใช้ โดยทั่วไปเทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากขยะในปัจจุบันแบ่งได้เป็น 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel, RDF) กระบวนการทางความร้อน และกระบวนการทางชีวภาพ (Biological Process) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.5.3.1 เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงขยะ RDF แยกเป็นขั้นตอนต่าง ๆ (ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล, 2561) ดังนี้

1) การคัดแยกด้วยแรงงานคน

ขยะประเภท เครื่องใช้ภายในบ้าน เฟอร์นิเจอร์ และขยะอันตรายบางชนิดที่ผสมกันมาสามารถทำได้เบื้องต้นโดยอาศัยแรงงานคนก่อนที่จะส่งต่อให้เครื่องจักร ทำให้สามารถแยกขยะที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น กระดาษ แก้ว/พลาสติก ภาชนะ กระป๋องอลูมิเนียม เป็นต้น

2) การลดขนาด (Size Reduction)

การลดขนาด (Size Reduction) ในการจัดการขยะแข็ง มีความหมายคล้ายกับ Shredding และ Grinding แต่คำว่า Shredding โดยทั่วไปจะหมายถึงการลดขนาดของขยะผสม ในขณะที่ Grinding จะหมายถึงการลดขนาดของวัสดุประเภทแก้ว การลดขนาดเป็นกระบวนการที่สำคัญอันหนึ่งในกระบวนการทางกลเนื่องจากมันจะทำให้ขยะมีขนาดสม่ำเสมอ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในบางครั้งอาจต้องมีการลดขนาดถึง 2-3 ครั้ง เพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการสำหรับทำ RDF เครื่อง Shredder สามารถแบ่งออกเป็นหลายชนิดดังนี้

- Hammer mills มีอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ แบบแนวนอนและแบบแนวตั้ง เครื่อง Hammer mills แบบแนวนอนเป็นที่นิยมสำหรับขยะผสม โดยที่ส่วนประกอบหลักจะประกอบไปด้วย ตัวหมุน (Rotor) ตัวใบมีด (Hammer) ตะแกรง (Grate) กรอบหุ้ม (Frame) และล้อช่วยแรง (Fly Wheel) หลักการทำงานก็คือ ใบมีดจะตีขยะจนกระทั่งได้ขนาดเล็กกว่าตะแกรง
- Shear Shredder เครื่องลดขนาดชนิดนี้จะมีแรงบิดสูงและรอบต่ำ เครื่องจะประกอบไปด้วยเพลาที่ติดใบมีดวางในแนวนอน 2 เพลา ซึ่งหมุนในทิศทางตรงกันข้าม เนื่องจากเครื่องมีแรงบิดที่สูงและมีการกระทำเป็นแรงเฉือน เครื่องจักรชนิดนี้จึงนิยมใช้ในการลดขนาดของวัสดุที่เฉือนยาก เช่น ยางรถยนต์ อลูมิเนียม และ พลาสติก

3) การร่อน (Screening)

วัตถุประสงค์ของการร่อนก็เพื่อที่จะทำการคัดแยกขนาด การร่อนนี้จะแบ่งวัตถุดิบออกเป็นอย่างน้อย 2 ส่วน คือส่วนที่อยู่บนตะแกรงและส่วนที่ผ่านตะแกรง การร่อนสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทดังนี้

- Trommel Screen เครื่องร่อนแบบนี้จะมีลักษณะเป็น โรตารี่และมีตะแกรงล้อมรอบ ตัวตะแกรงอาจจะเป็นลวดถักหรือแผ่นเจาะรู เครื่องนี้อาจจะใช้สำหรับผสมขยะชุมชนก่อนที่จะส่งต่อไปเครื่องลดขนาด หรือที่เรียกว่า Pre-trammeling เป็นเครื่องที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการทำงานสูง
- Disc Screen เครื่องร่อนแบบนี้เหมาะสำหรับใช้แยกส่วนที่เป็นอนินทรีย์ออกจาก RDF จากกระดาษหรือจากของเสียที่เป็นไม้ เครื่องแบบนี้จะประกอบด้วยเพลาที่ติดแผ่น Disc หลาย ๆ แผ่นซึ่งมีช่องว่างเท่ากัน เพลานี้จะวางตัวในแนวนอน ขยะที่มีขนาดเล็กกว่าช่องว่างนี้จะหล่นลงสู่ด้านล่าง เพลาทุกอันจะหมุนในแนวเดียวกันทำให้วัตถุดิบเคลื่อนที่จากด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่ง

4) การคัดแยกโดยใช้อากาศ (Air Separation)

การคัดแยกโดยใช้อากาศจะอาศัยคุณลักษณะด้านอากาศพลศาสตร์ของของเสีย โดยที่คุณลักษณะเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับ ขนาด รูปร่าง และ ความหนาแน่น กระบวนการแยกจะจะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนที่ของอากาศ ขยะที่ผ่านการย่อย และ แรงโน้มถ่วง ส่วนของขยะที่ลอยอยู่ในอากาศจะเรียกว่า ส่วนเบา (Light Fraction) ขณะที่ขยะที่ตกลงสู่ด้านล่างเรียกว่า ส่วนหนัก (Heavy Fraction) ในการคัดแยกของขยะชุมชน วัสดุที่เป็นกระดาษและพลาสติกจะเป็นส่วนที่เบา ส่วนโลหะและแก้วจะเป็นส่วนที่หนัก เครื่องคัดแยก

5) การแยกโดยใช้แม่เหล็ก (Magnetic Separation)

เครื่องแยกโดยใช้แม่เหล็กจะแยกวัสดุที่เป็นเหล็กออกจากขยะชุมชน โดยลักษณะของเครื่องจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ ได้แก่ Magnetic Head Pulley, Drum และ Magnetic Belt ในเรื่องของความสามารถในการคัดแยก เหล็กที่สามารถคัดแยกได้ต่อน้ำหนักทั้งหมดของโลหะในขยะชุมชนจะอยู่ที่ประมาณ 80% สำหรับการคัดแยกหนึ่งครั้ง ถ้าต้องการจะแยกให้ได้มากขึ้นจะต้องผ่านเครื่องคัดแยกอีก เปอร์เซ็นต์การแยกสามารถเพิ่มขึ้นถึง 85-90% เมื่อใช้เครื่องคัดแยกนี้หลังเครื่องคัดแยกโดยใช้อากาศ ที่เป็นเช่นนี้เพราะเศษกระดาษและเศษพลาสติกที่เป็นตัวขัดขวางการคัดแยกถูกกำจัดออกไปแล้ว

6) การอบแห้งและทำให้แน่น

การอบและการทำให้แน่นนี้จะใช้เพื่อวัตถุประสงค์จำเพาะ เช่น การผลิต RDF และเป็นการลดปริมาตรก่อนที่จะนำไปกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ วัตถุประสงค์ของการอบแห้งก็เพื่อที่จะปรับปรุงคุณภาพของ RDF การทำให้แน่นจะกระทำเมื่อต้องการผลิต Densified-RDF ซึ่งสามารถทำได้โดย การอัดแท่ง (Briquetting) การอัดเม็ด (Pelletizing) และการทำให้อยู่ในรูปลูกเต๋า (Cube Formation)

2.5.3.2 เทคโนโลยีทางความร้อน

เทคโนโลยีทางความร้อน อาทิเช่น เทคโนโลยีเตาเผา (Incineration) เทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากขยะ (Gasification) เทคโนโลยีการเปลี่ยนขยะให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว (Pyrolysis oil) เทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากขยะเตาปฏิกรณ์พลาสมา (Plasma gasification)

1) เทคโนโลยีเตาเผา

การเผาขยะเป็นการเป็นการใช้อุณหภูมิสูงโดยการนำความร้อนจากภายนอกเข้ามาให้กับขยะมูลฝอยทำให้เกิดการแตกสลายด้วยความร้อน (Thermal cracking) ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง (Endothermic process) แล้วเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อเปลี่ยนรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ด้วยปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermal process) ทำให้สามารถนำความร้อนที่ได้ไปใช้ผลิตเป็นพลังงาน

การเผาขยะในเตาที่ได้มีการออกแบบเฉพาะเพื่อให้เข้ากับลักษณะสมบัติของขยะที่มีความชื้นสูง มีส่วนประกอบและคุณสมบัติที่หลากหลายทางเคมี การมีค่าความร้อนที่แปรผัน การเผาขยะมูลฝอยด้วยความร้อนอุณหภูมิสูงจะต้องมีการควบคุมการเผาไหม้ที่ดีเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดมลพิษต่าง ๆ เช่น เขม่าควัน กลิ่น ก๊าซพิษ เป็นต้น เข้าสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งก๊าซที่เกิดขึ้นจะได้รับการกำจัดเขม่าและอนุภาคก่อนที่จะส่งออกสู่บรรยากาศตามที่กฎหมายควบคุม

ขี้เถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้จะถูกนำไปฝังกลบหรือใช้เป็นวัสดุปูพื้นสาหรับการสร้างถนน นอกจากนั้นหากมีปริมาณขยะมากจะสามารถที่จะนำพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาขยะมาใช้ในการทำน้ำร้อน ผลิตไอน้ำ ผลิตกระแสไฟฟ้า แต่การใช้เตาเผากำจัดขยะมูลฝอยนั้นใช้เงินลงทุนสูง เพราะการออกแบบต้องคำนึงถึงการเผาสารอันตรายที่อาจหลุดลอดจากการคัดแยกเข้าไป เช่น แบตเตอรี่ ถ่านไฟฉาย ทำให้ต้องมีการติดตั้งระบบบำบัดก๊าซทิ้งที่มีประสิทธิภาพสูงเป็นกรณีพิเศษ รวมถึงขี้เถ้าที่ต้องนำไปฝังกลบอย่างถูกหลักวิชาการเทคโนโลยีเตาเผานี้เป็นที่นิยมในญี่ปุ่นและทวีปยุโรป ส่วนประเทศไทยมีการใช้เตาเผาขยะมูลฝอยผลิตไฟฟ้าอยู่ที่จังหวัดภูเก็ต สามารถลดปริมาณสารอันตรายได้และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงหลากหลาย มีกากเหลือจากการเผาไหม้น้อย ซึ่งเตาเผาขยะมูลฝอยแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ เตาเผาแบบตะกรับเคลื่อนที่ (Moving grate) เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln) และเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed) เทคโนโลยีนี้เตาเผาแบบตะกรับที่เคลื่อนที่ได้รับความนิยมมาก มีสมรรถนะที่ยอมรับได้และสามารถรองรับการเผาขยะมูลฝอยที่มีองค์ประกอบและค่าความร้อนที่หลากหลายได้ ส่วนระบบที่ได้รับความนิยมรองลงมาคือระบบเตาเผาแบบหมุน

2) เทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากขยะ

กระบวนแก๊สซิฟิเคชั่น (Gasification) หรือการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเชื้อเพลิง (เชื้อเพลิงแก๊ส) คือ กระบวนการแปรสภาพเชื้อเพลิงแข็งที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส เช่น คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน ($H_2$) มีเทน ($CH_4$) และคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงนี้จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น องค์ประกอบของขยะมูลฝอยและการทำงานของระบบ ซึ่งกระบวนนี้เป็นกระบวนเปลี่ยนรูปทางด้านเคมีความร้อน (Thermochemical conversion process) เป็นการสลายองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงพอให้วัตถุดิบสลายตัวเป็นวัฏภาคก๊าซทั้งหมด อุณหภูมิสูงกว่า 700 °C ผ่านตัวกลางของกระบวนการ เช่น ภายใต้บรรยากาศที่มีสภาวะอากาศหรือออกซิเจนที่มีจำกัดหรือไอน้ำที่ความดัน 1 บรรยากาศขึ้นไป แก๊สที่เกิดขึ้นสามารถนำไปให้ความร้อนโดยตรงหรือนำแก๊สที่ผลิตได้ไปใช้จะต้องทำให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมกด้วยการกรองเอาสารเจือปนออกก่อนนำไปใช้ เช่น นำไปให้ความร้อนแก่หม้อน้ำในเครื่องยนต์ นำไปผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อน ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายด้วยที่ระบบการทำงานไม่ซับซ้อน และสามารถนำวัสดุทั้งขยะและผลผลิตทางการเกษตรมาใช้ได้ ซึ่งกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นจะแตกต่างจากกระบวนการเผาไหม้คือเป็นการเผาอย่างไม่สมบูรณ์ เป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานเคมีภายในของคาร์บอนไปเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ แต่การเผาไหม้เป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นอย่างสมบูรณ์เกิดขึ้นในหนึ่งกระบวนการเท่านั้น ดังนั้น กระบวนการเผาแบบนี้จึงมีสภาวะอยู่ระหว่างกระบวน

การเผาแบบ Combustion และกระบวนการเผาแบบ Pyrolysis นอกจากนี้ข้อดีของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น คือ เทคโนโลยีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็ว ใช้พื้นที่น้อย สามารถกักเก็บเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นไว้ได้ และสามารถพัฒนาเป็นระบบผลิตพลังงานรวมซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายโอนพลังงาน

3) เทคโนโลยีไพโรไลซิส

พลาสติกมีสารประกอบคล้ายกับปิโตรเลียมหรือน้ำมันเบนซินและดีเซล เพราะฉะนั้นกระบวนการไพโรไลซิสจึงช่วยแปรรูปขยะพลาสติกให้กลับมาเป็นน้ำมันใหม่ได้ การใช้เทคโนโลยีไพโรไลซิส (Pyrolysis) เพื่อเปลี่ยนขยะให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว (Pyrolysis oil) คือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 400 - 800 °C ในสภาวะไร้อออกซิเจนหรือมีออกซิเจนในปริมาณที่น้อยมาก เพื่อสลายโมเลกุลให้มีขนาดเล็กลง ความร้อนในกระบวนการไพโรไลซิสเป็นความร้อนทางอ้อมที่ให้แก่เครื่องปฏิกรณ์แล้วถ่ายเทไปให้กับวัตถุดิบข้างในจนกลายเป็นผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 วัฏภาคในรูปของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยก๊าซที่ได้ประกอบด้วยก๊าซมีเทนจนถึงก๊าซโพรเพน ซึ่งเป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าได้ ส่วนของเหลวที่ได้เป็นน้ำมันที่มีคุณลักษณะทั่วไปเทียบกับน้ำมันดิบ นอกจากนี้ยังได้ของแข็งจากกระบวนการคือ ถ่าน (Char) เป็นผงคาร์บอนโมเลกุลขนาดเล็ก โดยอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดัน อัตราเร็วในการให้ความร้อนและองค์ประกอบของวัตถุดิบเริ่มต้น ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วยการสลายตัวของสารที่ระเหยง่ายออกจากวัตถุดิบ ขั้นต่อมาคือ การแตกตัวของวัตถุดิบเอง โดยที่องค์ประกอบที่สามารถแตกตัวได้ที่สภาวะที่ใช้ก็จะแตกตัวออกมาเป็นโมเลกุลที่เล็กลงเรื่อย ๆ ตามเวลาหรืออุณหภูมิที่กำหนด จนเกิดการแตกตัวอย่างสมบูรณ์ของวัตถุดิบ โดยอุณหภูมิในแต่ละขั้นตอนแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ แต่การให้ความร้อนและเวลาที่มากไปสารที่ได้จากการแตกตัวของวัตถุดิบจะกลับมารวมตัวกันเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ดังนั้น สภาวะที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสจะต้องขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาใช้ (ศิริรัตน์ จิตการค้า, 2551)

สำหรับการแปรรูปขยะเป็นน้ำมันของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีอาศัยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) ที่ทำให้ขยะพลาสติกสลายตัวด้วยความร้อนในสภาวะปราศจากออกซิเจน สามารถผลิตน้ำมันได้ประมาณ 4,000 ลิตรต่อวัน จากวัตถุดิบขยะพลาสติกประมาณ 5,000 กิโลกรัม

4) เทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากขยะเตาปฏิกรณ์พลาสมา

พลาสมาเชิงความร้อน (Thermal plasma) คือ ส่วนผสมของไอออน อิเล็กตรอนและอนุภาคที่เป็นกลาง เกิดจากการแตกตัวของประจุของแก๊ส เนื่องจากอาร์คทางไฟฟ้า

อย่างต่อเนื่องระหว่างขั้วบวกและขั้วลบของหัวพลาสมา หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่ง คือ โมเลกุลของแก๊สถูกทำให้ชนกับประจุอิเล็กตรอนและทำให้เกิดอนุภาคที่มีประจุ เมื่ออนุภาคมีประจุเพียงพอแล้ว (ทั้งขั้วบวกและลบ) แก๊สก็จะเริ่มนำไฟฟ้าได้เอง การชนกันของอนุภาคที่มีประจุจะปลดปล่อยความร้อนและเกิดเป็นลำแสงอาร์ค หรือเรียกว่า “พลาสมา” พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาในรูปพลาสมาจะมีอุณหภูมิสูงมากกว่า 5,000 °C ความร้อนอุณหภูมิสูงนี้เองที่นำมาใช้ในการทำให้ขยะมูลฝอยสิ้นซากไป เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวให้ความร้อนสูงมากจึงมักใช้กับเครื่องกำเนิดแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier) เพื่อทำให้องค์ประกอบของสารอินทรีย์ในขยะมูลฝอยเปลี่ยนรูปกลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิง นอกจากนี้การประยุกต์ใช้ Plasma arc gasification สำหรับการจัดการกากของเสีย การควบคุมปริมาณออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์จำเป็นต้องควบคุมอย่างระมัดระวัง เช่นเดียวกับระบบ Gasification เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Combustion) และทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์แตกตัวออกมาเป็นโครงสร้างพื้นฐานอย่างง่ายของแก๊ส เช่น CO $H_2$ และ $CO_2$ (ทิพย์สุภินทร์ หินซุย, 2556)

2.5.3.3 เทคโนโลยีทางชีวภาพ (Biological)

เทคโนโลยีการจัดการขยะมูลฝอย เพื่อผลิตพลังงานด้วยกระบวนการทางชีวภาพเป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในขยะมูลฝอยด้วย จุลินทรีย์และทำให้ได้เชื้อเพลิงขยะ สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตพลังงานต่อไปได้ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) เทคโนโลยีการย่อยสลายขยะแบบใช้อากาศ ในการบำบัดขยะมูลฝอยชุมชนด้วย เทคโนโลยีการย่อยสลายขยะแบบใช้ออกซิเจนมีเหตุผลหลักเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ซึ่ง เป็นส่วนประกอบของขยะ

2) เทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Digestion) การใช้เทคโนโลยีหมักแบบไม่ใช้อากาศในการบำบัดขยะมูลฝอยชุมชนเป็นเรื่องใหม่ แม้ในประเทศพัฒนาแล้ว ก็เป็นเรื่อง ที่ทำกันมาไม่นานนัก สำหรับประเทศไทยส่วนใหญ่จะมีการคัดแยกขยะชุมชนเบื้องต้น เพื่อนำวัสดุที่ขายได้ เช่น ขวดพลาสติก แก้ว ทาให้ขยะที่ส่งไปเก็บที่กองขยะต่าง ๆ มี สัดส่วนของสารอินทรีย์อยู่มาก จนสามารถเกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศได้

การผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกเริ่มต้นจากรับขยะมาจากรถขนส่งทำการคัดแยกขยะออกจากถุงบรรจุ และแยกขยะที่สามารถรีไซเคิลได้โดยใช้แรงงานคนบนสายพานคัดแยก (Hand sort conveyer) คัดแยกขยะจำพวกขวดแก้ว กระป๋องอลูมิเนียม เศษเหล็ก และพลาสติกออกก่อน ขณะที่ขยะผ่านกระบวนการคัดแยกแล้วจะนำไปย่อยหยาบก่อนโดยใช้เครื่องฉีก (Shredder) เพื่อลดขนาดให้เหมาะต่อการจัดการ ขยะที่ถูกฉีกนั้นจะถูกลำเลียงต่อไปที่เครื่องอัดแบบ

ไฮโดรลิคเพื่อบีบน้ำออกจากขยะหลังจากนั้นขยะจะถูกลำเลียงไปสู่โรงบำบัดทางกลและทางชีวภาพ (Mechanical and Biological Treatment, MBT) ซึ่งออกแบบให้เป็นระบบกวนผสมเพื่อเติมอากาศ ประสิทธิภาพการย่อยสลายสูง และมีเสถียรภาพปราศจากกลิ่น เพื่อปรับสภาพขยะให้เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง กระบวนการนี้จะใช้เวลาประมาณ 1 เดือน จากนั้นขยะชุมชนที่ผ่านกระบวนการ MBT จะถูกส่งเข้าไป คัดแยกโดยใช้เครื่องคัดแยกแบบตะแกรงหมุน (Trommel Separator) เพื่อเอาเศษวัสดุอินทรีย์ที่เป็นปุ๋ยออก ขยะที่ได้จะถูกนำไปลดขนาดอีกครั้งโดยใช้เครื่อง Hammer Mill โดยก่อนที่ขยะจากโรงบำบัดจะเข้าสู่เครื่องนี้จะต้องมีการคัดแยกเศษเหล็กออกก่อนเพื่อ ป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับใบมีดของเครื่องย่อย ขยะที่ผ่านกระบวนการนี้จะถูกนำ ไปผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5) เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไป

ขยะเชื้อเพลิง RDF แบ่งออกได้เป็น 7 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งแบ่งตามลักษณะของขยะเชื้อเพลิงและกระบวนการใช้ในการจัดการขยะ

ตารางที่ 2.2 ประเภทของขยะเชื้อเพลิง RDF (วสันต์ ปินะเต, 2559)

| ชนิด | กระบวนการจัดการ |
|---|---|
| RDF 1 : MSW | คัดแยกส่วนที่เผาไหม้ได้ออกด้วยมือรวมทั้งขยะที่มีขนาดใหญ่ |
| RDF 2 : Coarse RDF | มีการบดหรือตัดขยะมูลฝอยอย่างหยาบ ๆ |
| RDF 3 : Fluff RDF | คัดแยกส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ออก เช่น โลหะ แก้ว และอื่น ๆ มีการบดหรือตัดจนทำให้ร้อยละ 95 ของขยะมูลฝอยที่คัดแยกแล้วมีขนาดเล็กกว่า 2 นิ้ว |
| RDF 4 : Dust RDF | นำขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้มาทาให้อยู่ในรูปของผงฝุ่น |
| RDF 5 : Densified RDF | นำขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้มาผ่านกระบวนการอัดแท่งโดยให้มีความหนาแน่นมากกว่า 600 kg/$m^3$ |
| RDF 6 : RDF Slurry | นำขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้มาผ่านกระบวนการให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงเหลว และ Slurry |
| RDF 7 : RDF Syngas | นำขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้มาผ่านกระบวนการ Gasification เพื่อผลิต Syngas ที่ใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงได้ |

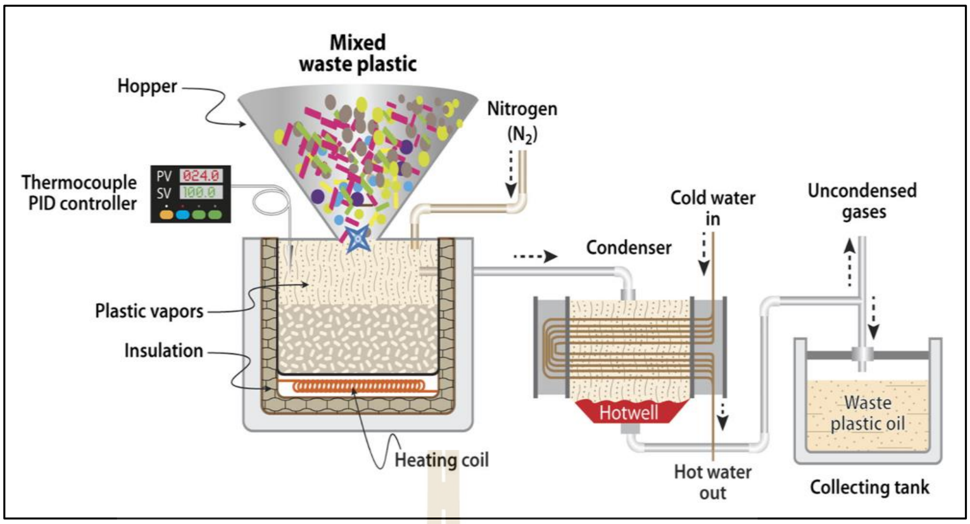
ในส่วนของตัวโรงงานแปรรูปขยะเป็นน้ำมันมีกระบวนการดังนี้ คือ วัตถุดิบพลาสติกที่ผ่านการเตรียมจะถูกลำเลียงเข้าสู่เครื่องป้อนแบบเกลียว (Screw feeder) ที่อัตราประมาณ 250 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยที่ตัวสกรูนี้จะมีการให้ความร้อน (Preheating) เพื่อทำให้

พลาสติกหลอมเหลวและพร้อมที่จะระเหยออกเป็นไอเมื่อได้รับความร้อนที่สูงขึ้น หลังจากนั้นพลาสติกเหลวจะไหลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์แบบ ถังกวนสมบูรณ์ (Continuous stirred tank reactor) ที่มีตัวกวน (Stirrer) ทำงานอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยตัวเตาจะมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 350 - 400 °C เมื่อพลาสติกเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของไอจะไหลขึ้นไปสู่หอกลั่น (Fractional distillation tower) ที่อุณหภูมิประมาณ 340 °C และที่หอกลั่นนี้จะทำหน้าที่แยกไอน้ำมันโมเลกุลหนักและเบาออกจากกัน หลังจากนั้นไอน้ำมันจะเข้าสู่เครื่องควบแน่น (Condenser) แล้วไหลลงสู่ถังแยกน้ำออกจากน้ำมัน (Oil/Water separator) ที่ถังนี้น้ำจะตกอยู่ด้านล่างส่วนน้ำมันจะลอยอยู่ด้านบนของถัง เมื่อน้ำมันที่ได้มีปริมาณค่าหนึ่งก็จะไหลข้ามไปสู่ถังพัก (Storage tank) ส่วนแก๊สที่เหลือที่ยังไม่ควบแน่นก็จะไหลไปสู่เครื่องควบแน่นอีกตัวที่ติดตั้งอยู่เหนือถังพักน้ำมันซึ่งทำหน้าที่ควบแน่นไอน้ำมันที่เหลือและลดอุณหภูมิของแก๊ส แก๊สที่เหลือนี้เป็นแก๊สธรรมชาติ (Natural Gas) และจะถูกนำกลับมาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนแก่เตาปฏิกรณ์ต่อไป น้ำมันที่ได้จะเป็นน้ำมันผสม โดยมีองค์ประกอบหลักคือ น้ำมันดีเซล (50 - 60%) เนปทา (15 - 20%) น้ำมันเตา (5 - 10%) ส่วนที่ไม่ระเหยในเตาปฏิกรณ์จะได้ออกมาเป็นกากคาร์บอน (10 - 25%) ซึ่งสามารถนำไปใช้ทดแทนถ่านหินในงานอุตสาหกรรมได้ (ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล, 2560)

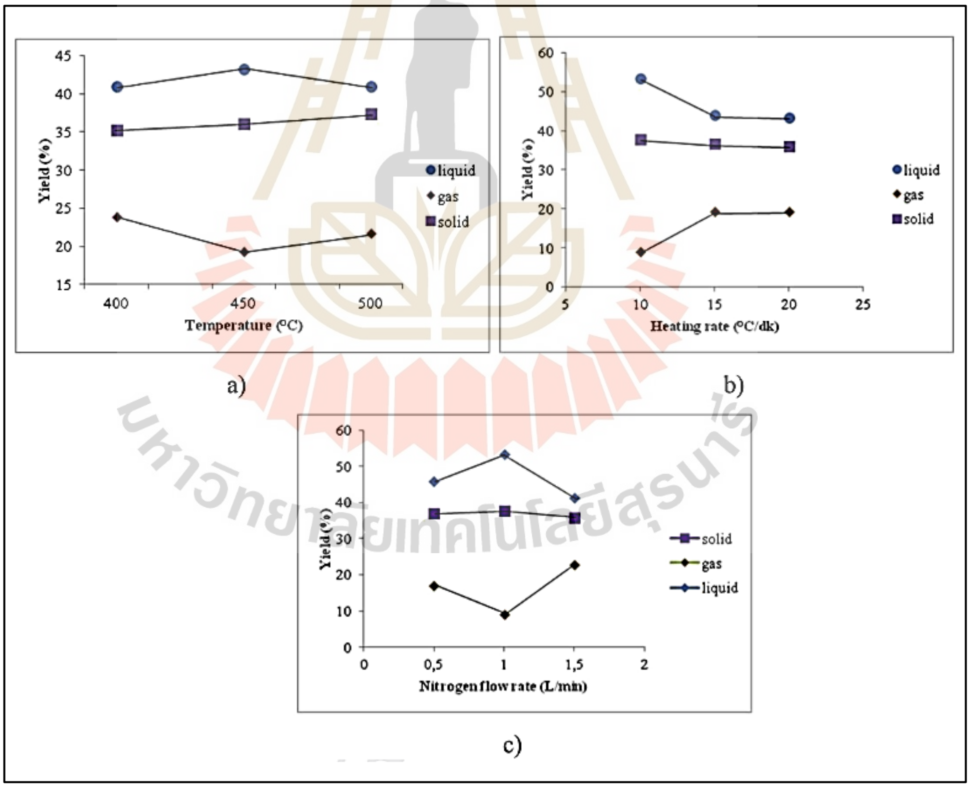
**2.5.4 กระบวนการไพโรไลซิส**

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการแตกตัวของพอลิเมอร์หรือการสลายตัวของสารประกอบด้วยกระบวนการทางความร้อนภายใต้สภาวะปราศจากอากาศหรือมีอากาศอยู่น้อยมาก โดยกระบวนการผลิตเริ่มจากการที่ขยะพลาสติกจะถูกอัดและส่งไปยังเตาหลอมพร้อมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนแก่พลาสติกในอ่างโลหะหลอมเหลว ความร้อนที่ใช้มีขนาดปานกลางที่อุณหภูมิ 400 - 800 °C ซึ่งถูกให้ความร้อนโดยแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และพลาสติกหลอมเหลวจะเกิดการแตกตัวให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สหรือไอออกมาที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา (350 - 450 °C) หลังจากพลาสติกสลายตัวเป็นแก๊สแล้วก็จะถูกกักเก็บจากส่วนบนของเตาไปสู่หน่วยให้ความเย็น เพื่อควบแน่นไอกลายเป็นน้ำมันเหลวที่มีขนาดโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนมากกว่า 5 อะตอม ส่วนแก๊สที่ไม่ควบแน่นจะถูกส่งกลับไปเผาไหม้ให้ความร้อนกับเตาหลอมต่อไป สิ่งปนเปื้อนที่ตกค้างที่ไม่หลอมเหลวหรือหลอมเหลวไม่หมดจะถูกกำจัดออก

ปริมาณของสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสนั้นจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการ อาทิเช่น อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิของปฏิกิริยา อัตราการป้อนไนโตรเจน เป็นต้น ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของกระบวนการไพโรไลซิสที่มีผลต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น




รูปที่ 2.4 กระบวนการไพโรไลซิส (Damodharan, D. et al., 2017)




รูปที่ 2.5 ปริมาณสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ (Uyumaz et al., 2019)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### 2.5.5 การนำไปใช้งานเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล

1) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันจากขยะพลาสติก

น้ำมันจากขยะพลาสติกที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส เมื่อทำการศึกษาถึงองค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับแยกวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณสารในสภาวะแก๊ส โดยใช้ตัวตรวจวัดเป็นแบบเครื่องวิเคราะห์มวลสารพบว่า น้ำมันจากขยะพลาสติกจะมีองค์ประกอบสารประกอบอินทรีย์อยู่ในช่วง C5 - C30 (Mani et al., 2011; Damodharan et al., 2017) อย่างไรก็ตามปริมาณของสารประกอบนั้นจะขึ้นอยู่กับประเภทของวัตถุดิบ

ทั้งนี้เมื่อศึกษาถึงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันจากขยะพลาสติกจากวัตถุดิบที่แตกต่างกันพบว่า คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันจากขยะพลาสติกต่างชนิดกันจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เนื่องจากโครงสร้างพื้นฐานทางเคมีของวัตถุดิบและเงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งผลในด้านคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเหลวจากการใช้วัตถุดิบที่เป็นพลาสติกชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.3 โดยเมื่อพิจารณาถึงค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกชนิดต่าง ๆ พบว่า มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงประมาณ 21.10 - 43.00 MJ/kg โดยขยะพลาสติกประเภท PVC และ PET มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดอื่น ๆ เนื่องจาก PET มีกรดเบนโซอิก ซึ่งกรดเบนโซอิกประกอบไปด้วยวงแหวนอะโลเมติกที่เป็นสาเหตุให้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงมีค่าต่ำสำหรับ PET และมีสารประกอบคลอไรด์ใน PVC เป็นเหตุทำให้คุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงแย่ลง (Anuar Sharuddin, Abnisa, Wan Daud, & Aroua, 2016) นอกจากนี้ความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นคุณสมบัติที่บ่งชี้ให้เห็นถึงคุณลักษณะการกระจายตัวเป็นละอองฝอยของน้ำมันเชื้อเพลิง โดยทั่วไปน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความหนืดสูงนั้นไม่เหมาะสำหรับการนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากค่าความหนืดมีผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ลดลง (Erdoğan, 2020) โดยของน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกชนิดต่าง ๆ มีค่าอยู่ในช่วง 1.4 - 5.56 sCt และคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงอื่น ๆ ของน้ำมันจากขยะพลาสติกชนิดต่าง ๆ ที่สำคัญสำหรับการใช้งานน้ำมันเชื้อเพลิงและการกักเก็บสำรองน้ำมันเชื้อเพลิง อาทิเช่น จุดไหลเท ซึ่งเป็นจุดที่อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันเริ่มไม่ไหล เมื่ออากาศเย็นทำให้อุณหภูมิต่ำส่งผลให้น้ำมันก่อตัวเป็นเกล็ดขี้ผึ้งติดที่กรองน้ำมัน ทำให้เกิดการอุดตันทางเดินและขัดขวางการไหลของน้ำมันที่จะไหลไปยังปั๊มเชื้อเพลิงและหัวฉีด (มีค่าอยู่ในช่วง -67 ถึง -5 °C) และจุดวาบไฟเป็นจุดที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุดที่ไอระเหยสามารถติดไฟได้ด้วยตัวเอง ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้มีความสำคัญในด้านการเก็บสำรองน้ำมันเชื้อเพลิงและป้องกันการเกิดอัคคีภัย (มีค่าอยู่ในช่วง 26 ถึง 48 °C) เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 คุณภาพของเชื้อเพลิงเหลวจากการใช้วัตถุดิบที่เป็นพลาสติกชนิดต่าง ๆ (Sharuddin et al., 2016; Czajczyńska, 2017)

| คุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง | ประเภทของขยะพลาสติก | | | | | | น้ำมันเชื้อเพลิง |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | PET | HDPE | PVC | LDPE | PP | PS | Diesel |
| ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (MJ/kg) | 28.2 | 40.50 | 21.10 | 39.50 | 40.80 | 43.00 | 43.0 |
| ความถ่วงเอพีไอที่ 60 ºF | - | 27.48 | 38.98 | 47.75 | 33.03 | - | - |
| ความหนืดจนลศาสตร์ (sCt) | - | 5.08 | 6.36 | 5.56 | 4.09 | 1.4 | 1.9-4.1 |
| ความหนาแน่น ที่ 15 ºC (g/cm$^3$) | 0.90 | 0.89 | 0.84 | 0.78 | 0.86 | 0.85 | 0.87 |
| ปริมาณเถ้า (%wt) | - | 0.00 | - | 0.02 | 0.00 | 0.006 | - |
| เลขออคเทน MON (min) | - | 85.30 | - | - | 87.60 | - | - |
| เลขออคเทน RON (min) | - | 95.30 | - | - | 97.80 | 90-98 | - |
| จุดไหลเท (°C) | - | -5 | - | - | -9 | -67 | 6 |
| จุดวาบไฟ (°C) | - | 48 | 40 | 41 | 30 | 26.1 | 52 |
| ดัชนีดีเซล | - | 31.05 | - | - | 34.35 | - | 40 |

2) สมรรถนะของเครื่องยนต์และคุณลักษณะการเผาไหม้

ในการนำน้ำมันจากขยะพลาสติกมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลส่งผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสมรรถนะและคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ โดยทำการติดตั้งเครื่องยนต์เข้ากับอุปกรณ์ตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้น เช่น อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพเชิงความร้อน อัตราการปลดปล่อยความร้อน ความดันที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากการใช้น้ำมันดีเซล (Somkiat et al., 2017) และน้ำมันจากขยะพลาสติกมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล สาเหตุจากน้ำมันจากขยะพลาสติกมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงและมีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่ำ การที่น้ำมันจากขยะพลาสติกมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากน้ำมันจากขยะพลาสติกมีค่าความหนืดที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลและมีความหนาแน่นเทียบเท่ากับน้ำมันดีเซล (Kumar et al., 2016) ในทางกลับกันกับพบว่า น้ำมันจากขยะพลาสติกที่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากความหนาแน่นและค่าความหนืดที่มากกว่าของน้ำมันจากขยะพลาสติกเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล

(V. K. Kaimal et al., 2016; Kalargaris et al., 2017) อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของน้ำมันขยะผสมน้ำมันดีเซลมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล ส่วนหนึ่งมาจากค่าความร้อนที่ลดลงของน้ำมันจากขยะพลาสติก อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำมันจากขยะพลาสติกที่สูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดลง ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ลดลงนั้นแสดงให้เห็นว่าเครื่องยนต์ทำงานได้มีประสิทธิภาพน้อยลงเมื่อใช้น้ำมันจากขยะพลาสติก (Kalargaris et al., 2017) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ลดลงเพราะความหนาแน่นและความหนืดของน้ำมันขยะที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล อันเนื่องจากมากการที่มีองค์ประกอบของสารอะโรมาติกจำนวนมากอยู่ในน้ำมันจากขยะพลาสติกเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่หนัก ($C_{12}$ ถึง $C_{30}$) ที่เกิดจากพันธะอะโรมาติก ซึ่งต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการทำลายหรือแตกสลายพันธะอะโรมาติก ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ลดลง (Kaimal et al., 2015; Kaimal et al., 2016; Kalargaris et al., 2017) เหตุผลอื่นคือค่าความร้อนของน้ำมันพลาสติกที่สูงกว่าทำให้ปล่อยความร้อนออกมาสูงระหว่างการเผาไหม้ทำให้เกิดการสูญเสียทางความร้อนที่สูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ลดลง (Mani et al., 2009) อีกสาเหตุหนึ่งก็คืออุณหภูมิการเผาไหม้ของน้ำมันจากขยะพลาสติกที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการสูญเสียการถ่ายเทความร้อนสูง (Kalargaris et al., 2017) ในทำนองเดียวกันการใช้น้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านและไม่ผ่านการกลั่นเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลพบว่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเชื้อเพลิงผสมมีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซลทุกภาระงานและประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล (Khatha, W. et al, 2020) นอกจากนี้ V. K. Kaimal and P. Vijayabalan (2016) ได้วิจัยและทดสอบสมรรถนะและมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล โดยใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่าง ๆ คือ 25% (PO25), 50% (PO50) และ 75% (PO75) ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล แต่การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงผสม PO25 ส่งผลทำให้สมรรถนะของเครื่องยนต์มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ซึ่งสอดคล้องกับ Pappula, Periyasamy PhD, Krishnan, and Geetha (2018) ที่ได้ศึกษาและวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์และคุณลักษณะการเผาไหม้โดยผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วน 25% (WPO25), 50% (WPO50) และ 75% (WPO75) ตามลำดับ ผลการทดสอบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ WPO25 มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่ WPO50 และ WPO75 มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลและความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของ WPO25 มีค่าต่ำกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงผสมอื่น ๆ

นอกจากนี้มีการศึกษาถึงคุณลักษณะของการเผาไหม้ต่าง ๆ คือ ความดันในกระบอกสูบ อัตราการปลดปล่อยความร้อน การเผาไหม้ล่าช้า พบว่า ความดันในกระบอกสูบ อัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันในกระบอกสูบที่ค่าสูงสุดของน้ำมันจากขยะผสม

น้ำมันดีเซลจะสูงกว่าน้ำมันดีเซล การที่ความดันในกระบอกสูบเพิ่มขึ้นจากการผสมน้ำมันขยะเพิ่มเข้าไปในน้ำมันดีเซลอาจเกิดจากความหนืดที่เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นสูงขึ้นและค่าซีเทนส่งผลต่อความดันในกระบอกสูบให้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย (Venkatesan et al., 2018) และอัตราการปล่อยความร้อนที่สูงขึ้นมาจากการปริมาณน้ำมันจากขยะพลาสติกที่เพิ่มขึ้นในน้ำมันดีเซลทำให้ค่าความหนืดสูงขึ้นทำให้ช่วงระยะเวลาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศยาวนานขึ้นหรือเกิดความล่าช้าในการจุดระเบิดที่ยาวนานกว่าน้ำมันดีเซล (Kaimal and Vijayabalan, 2015; Senthilkumar et al., 2016; Venkatesan et al., 2018) ตลอดจนในน้ำมันผสมมีค่าความร้อนและปริมาณออกซิเจนเพิ่มมากขึ้นทำให้การปลดปล่อยความร้อนมากขึ้นในทุก ๆ ภาระงาน ในกรณีเดียวกันพบว่า ความดันในกระบอกสูบที่ค่าสูงสุดของน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล มีสาเหตุเพราะเมื่อปริมาณของน้ำมันพลาสติกเพิ่มขึ้นทำให้ความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นละอองได้ไม่ดีรวมทั้งใช้เวลานานอันจะส่งผลต่อระยะเวลาในการการเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความดันในกระบอกสูบสูงสุดเพิ่มขึ้น (Venkatesan et al., 2018) อันเนื่องมาจากการระเหยของน้ำมันจากขยะพลาสติกในกระบอกสูบเกิดการดูดซับความร้อนจากห้องเผาไหม้ (Senthilkumar et al., 2016) และเมื่อพิจารณาจากงานวิจัยที่ผ่านมาโดยแยกเป็นกลุ่มวิจัยนั้นสามารถสรุปโดยสังเขปได้ดังนี้

Kaimal and Vijayabalan (2015) ได้ศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล ภายใต้สภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบคงที่ โดยใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ซึ่งน้ำมันจากขยะพลาสติกได้จากขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นในชุมชนที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส โดยทำการทดสอบน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 25%, 50% และ 75% โดยปริมาตรเทียบกับน้ำมันดีเซลภายใต้การเปลี่ยนภาระงาน จากผลการทดสอบพบว่า น้ำมันจากขยะพลาสติกผสมทุกอัตราส่วนและน้ำมันจากขยะพลาสติกมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนของต่ำกว่าน้ำมันดีเซลในทุกภาระงาน และหากพิจารณาคุณลักษณะการเผาไหม้ที่ภาระงานสูงสุดความดันในกระบอกสูบสูงสุด อัตราการปลดปล่อยความร้อน ระยะเวลาการเผาไหม้ และความล่าช้าในการเผาไหม้ของน้ำมันจากขยะพลาสติกและน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล ความดันในกระบอกสูบสูงสุดเพิ่มขึ้นประมาณ 6% แต่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล โดยผลการทดสอบจะสังเกตเห็นได้ว่าคุณลักษณะการเผาไหม้ได้รับผลกระทบอย่างมากมาจากคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น ความหนืด ความหนาแน่น และค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ

Kaimal and Vijayabalan (2016) ได้วิจัยและทดสอบสมรรถนะและมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ โดยใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสมน้ำมันดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ได้แก่ 25% (PO25), 50% (PO50) และ 75% (PO75) โดยปริมาตร จากผลการทดสอบพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล แต่อย่างไรก็ตาม การใช้เชื้อเพลิงผสม PO25 กลับมีสมรรถนะของเครื่องยนต์ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

Kalargaris et al. (2017) ได้ศึกษาและวิเคราะห์ สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติกประเภทต่าง ๆ ซึ่งทำการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ 4 จังหวะ และเป็นเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงตรงเข้าห้องเผาไหม้ ซึ่งการทดสอบใช้น้ำมันไพโรไลซิสที่ผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ คือ 25%, 50%, 75% และ 90% โดยปริมาตร ที่สภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ ณ ความเร็วรอบคงที่ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนโหลดที่ 25%, 50%, 75% และ 100% ของภาระงานสูงสุดที่ความเร็วรอบของการทดสอบ ตามลำดับ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าที่ภาระงานสูงสมรรถนะของเครื่องยนต์ใกล้เคียงกันกับการใช้น้ำมันดีเซล และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของน้ำมันไพโรไลซิสมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซลเล็กน้อย

สมเกียรติ หมายถมกลาง และคณะ (2017) ศึกษาการใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด โดยการใช้น้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการแปรรูปเป็นพลังงานด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่ยังไม่ผ่านขั้นตอนการกลั่นลำดับส่วนผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 25 (WPO25), 50 (WPO50), และ 75 (WPO75) โดยปริมาตร ทำการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ 4 จังหวะ ชนิดฉีดเชื้อเพลิงตรงเข้าห้องเผาไหม้ ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 2,500 รอบต่อนาที ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระกรรม 30, 50, 70, 90 และ 110 นิวตันเมตร ตามลำดับ ผลจากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของน้ำมันขยะพลาสติกพบว่า ค่าดัชนีซีเทนมีค่าสูงกว่า ค่าความหนืด ความหนาแน่น และจุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่า ในขณะที่ค่าความร้อนเชื้อเพลิงมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ผลจากการทดสอบน้ำมันขยะพลาสติกกับเครื่องยนต์พบว่า ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (bsfc) มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซลทุกภาระกรรม และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bridjesh, P., & N.K, G. (2020) ได้ศึกษาและวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์, คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย จากการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกในเครื่องยนต์ดีเซล ผลการทดสอบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ WPO25 มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่ WPO50 และ WPO75 มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของ WPO25 มีค่าต่ำกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงผสมอื่น ๆ ทั้งนี้

คุณลักษณะการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงผสมมีพฤติกรรมที่คล้ายกันในช่วงการผสมควบคุม (Mixing control phase) และน้ำมันจากขยะพลาสติกมีความดันสูงสุดและอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดสูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงผสม

Verma et al. (2018) ศึกษาถึงผลของการใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกใสที่เป็นบรรจุภัณฑ์ในเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ภาระงานต่างกัน ในสภาวะที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ โดยผสมของน้ำมันจากขยะพลาสติกกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการผสม 10%, 20%, 30% และ 40% โดยปริมาตร ผลจากการทดลองบ่งชี้ให้เห็นว่า น้ำมันพลาสติกสามารถใช้ผสมกับน้ำมันดีเซลได้ถึง 40% โดยไม่มีความแตกแตกอย่างมีนัยสำคัญในด้านกำลังของเครื่องยนต์ รวมถึงการใช้น้ำมันพลาสติกขยะนั้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน และการลดอัตราการใช้เชื้อเพลิงหรืออัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะลง

สมเกียรติ หมายถมกลาง และคณะ (2018) ศึกษาการใช้เชื้อเพลิงทดแทนจากกระบวนการอิมัลชั่นของน้ำมันขยะพลาสติกและเอทานอลความบริสุทธิ์ต่ำเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล โดยการใช้น้ำมันขยะพลาสติกที่ผ่านการแปรรูปเป็นพลังงานด้วยกระบวนการไพโรไลซิสผสมกับเอทานอลความบริสุทธิ์ต่ำที่ 10% โดยปริมาตร และใช้ดีไฮดอลกับออคทานอลเป็นตัวประสานที่ 10% โดยปริมาตร (อัตราส่วนดีไฮดอลต่อออคทานอลคือ 1:10) ทำการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ 4 จังหวะ ระบายความร้อนด้วยอากาศ ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 2,700 รอบต่อนาที ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงานพบว่า ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) ของ WPOE10 มีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซลทุกภาระงาน และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล และ Pal et al. (2019) ได้ศึกษาผลกระทบของระยะเวลาการฉีดเชื้อเพลิงที่ 10 ° bTDC และ 8 ° bTDC ต่อสมรรถนะและมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนต่าง ๆ ได้แก่ 10%, 20% และ 30% โดยปริมาตร ซึ่งผลจากการทดสอบชี้ให้เห็นว่า การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงผสมที่ 30% นั้นส่งผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์ทำให้เครื่องยนต์เดินไม่ราบเรียบ และการฉีดเชื้อเพลิงล่าช้าเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ต่ำลง

3) มลพิษไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยการอัดอากาศ ซึ่งมีหลักการทำงานคือ การอัดอากาศให้มีความดันสูงขึ้น และส่งผลให้เกิดความร้อนในห้องเผาไหม้จนเชื้อเพลิงสามารถติดไฟได้ ซึ่งผลจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จะปล่อยมลพิษไอเสียออกมา อาทิเช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน ไนโตรเจนออกไซด์ และควันดำ เป็นต้น โดยคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนไม่สมบูรณ์ใน

ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ นอกจากนี้มีผลการวิจัยที่ผ่านมานั้นแสดงให้เห็นว่า น้ำมันจากขยะพลาสติกมีปริมาณการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ของสูงกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล และจากการใช้อัตราน้ำมันเชื้อเพลิงที่มากขึ้นทำให้มีไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้นในสภาวะภาระงานที่สูงขึ้น ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์คาร์บอนไดออกไซด์น้ำมันจากขยะพลาสติกมีปริมาณสูงกว่าน้ำมันดีเซล

นอกจากนี้ปัจจัยที่จะทำให้เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ ปริมาณออกซิเจน และช่วงเวลาของการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ ซึ่งพบว่า ออกไซด์ของไนโตรเจนมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อใช้น้ำมันจากขยะพลาสติก โดยสาเหตุที่ออกไซด์ของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นนั้น เนื่องจากอัตราการปลดปล่อยความร้อนและอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงขึ้น (Mani et al., 2009; Mani et al., 2010) และไฮโดรคาร์บอน เกิดขึ้นจากการที่เชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งไฮโดรคาร์บอนนั้น หมายถึง สารประกอบอินทรีย์ในสถานะแก๊สและฝุ่นละอองที่เป็นไฮโดรคาร์บอนในรูปของแข็ง จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การปล่อยไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันจากขยะพลาสติกนั้นสูงกว่าน้ำมันดีเซลเล็กน้อย (Mani et al., 2009) ซึ่งเนื่องมาจากอัตราการระเหยสูงขึ้นและการมีของออกซิเจนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลที่ภาระงานสูง ทั้งนี้ยังมีผลงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติก โดยจะกล่าวถึงดังนี้

V. K. Kaimal and P. Vijayabalan (2016) ได้วิจัยและทดสอบสมรรถนะและมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ โดยใช้น้ำมันขยะพลาสติกผสมน้ำมันดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ได้แก่ 25% (PO25), 50% (PO50) และ 75% (PO75) โดยปริมาตร จากผลการวิจัยพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตามการใช้เชื้อเพลิงผสม PO25 กลับมีสมรรถนะของเครื่องยนต์ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงมลพิษไอเสียการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง PO25 ช่วยลดมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันจากขยะพลาสติก โดยการปลดปล่อยเขม่าควันดำและ $NO_X$ ลดลง 22% และ 17.8% ตามลำดับ

Kaimal and Vijayabalan (2016) ได้ศึกษาและประเมินถึงศักยภาพการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสสำหรับเป็นเชื้อเพลิงทางเลือก พบว่าน้ำมันพลาสติกผสมที่มีสัดส่วนของน้ำมันจากขยะพลาสติกต่อน้ำมันดีเซล 25% โดยปริมาตรมีปริมาณควันดำลดลง 22% และมีปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนลดลง 17.8% เปรียบเทียบกับน้ำมันพลาสติกบริสุทธิ์ เหตุที่ควันดำลดลงเนื่องจากความหนืดต่ำจะส่งผลให้คุณลักษณะการสเปรย์ดีขึ้นและการก่อตัวของสารผสมทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งคือควันดำและออกไซด์ของไนโตรเจนจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อน้ำมันพลาสติกเพิ่มขึ้นหากเปรียบเทียบกับ

น้ำมดีเซลบริสุทธิ์ และการเพิ่มขึ้นออกไซด์ของไนโตรเจนสำหรับน้ำมันขยะบริสุทธิ์เนื่องจากความดันในกระบอกสูบและการความล่าช้าในการจุดระเบิดสูง ซึ่งเป็นการเพิ่มการปลดปล่อยความร้อนเมื่อเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิงที่ทดสอบตัวอื่น ๆ

Kalargaris, Tian, and Gu (2017) ได้ศึกษาผลกระทบการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกประเภทโพลิโพพิลีน (PP) โดยน้ำมันจากขยะพลาสติกนั้นใช้อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่ต่างกันคือ 700 ° C (WP700) และ 900 ° C (WP900) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า น้ำมันจากขยะพลาสติกทั้ง WP700 และ WP900 สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ได้ โดยไม่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตามผลกระทบต่อสมรรถนะและมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์นั้นพบว่า ส่งผลให้สมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ต่ำน้ำมันดีเซล รวมถึงเครื่องยนต์ปลดปล่อยมลพิษไอเสีย $NO_X$, HC, และ CO ที่สูงกว่า ยกเว้น $CO_2$ ที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล เมื่อพิจารณาระหว่างน้ำมันเชื้อเพลิงทั้งสองนั้นพบว่า WP900 ส่งผลที่ดีกว่าในด้านสมรรถนะและการปลดปล่อยมลพิษไอเสีย

Uyumaz et al. (2019) ได้ศึกษาการใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากยางรถยนต์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ 4 จังหวะ ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2,200 รอบต่อนาที ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงภาระงานที่ 3.57, 7.5, 11.25 และ 15 นิวตันเมตร ผลจากการวิจัยพบว่า น้ำมันไพโรไลซิสจากยางรถยนต์มีผลกระทบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ สมรรถนะ และมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์เป็นอย่างมาก โดยการเพิ่มปริมาณน้ำมันไพโรไลซิสจากยางรถยนต์ในน้ำมันดีเซลที่ 10% ส่งผลให้ความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล

## 2.6 น้ำมันไบโอดีเซล

### 2.6.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับน้ำมันไบโอดีเซล

น้ำมันไบโอดีเซล (Biodiesel) หมายถึง น้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากน้ำมันพืชหรือสัตว์ เช่น ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว น้ำมันมะพร้าว น้ำมันหมู น้ำมันสบู่ดำ เป็นต้น ซึ่งการนำน้ำมันจากพืชหรือสัตว์เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทไตรกลีเซอไรด์มาผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า “ทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification)” เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างไขมันให้เป็นเอสเตอร์ โดยทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์และมีด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งชื่อเรียกของไบโอดีเซลจะเรียกตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยา น้ำมันไบโอดีเซลมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้ โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับเครื่องยนต์

ในประเทศไทยมีการเพาะปลูกพืชน้ำมันหลายชนิด เช่น ปาล์ม มะพร้าว ถั่วลิสง ถั่วเหลือง ทานตะวัน งา สบู่ดำและละหุ่ง น้ำมันปาล์มและผลิตภัณฑ์จากน้ำมันปาล์มถือเป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล เนื่องจากให้ผลผลิตพื้นที่สูงและมีต้นทุนการผลิตต่ำทำให้ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันทั่วประเทศมากถึง 5 ล้านไร่ในปี พ.ศ. 2561

อย่างไรก็ตาม ความสนใจในการนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกได้กลับมาเป็นที่น่าสนใจอีกครั้ง เนื่องจากพลังงานฟอสซิลที่กำลังจะหมดไปน้ำมันไบโอดีเซลมีข้อดีและประโยชน์มากมายหลายด้าน ได้แก่ ด้านสิ่งแวดล้อม สุขภาพ การผลิต ความมั่นคง และสมรรถนะของเครื่องยนต์ ซึ่งไบโอดีเซลมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่กลั่นจากปิโตรเลียม สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลในรูปของไบโอดีเซลเกือบทั้งหมดหรือนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลได้โดยไม่ต้องมีการดัดแปลงเครื่องยนต์ (รุ่งทิพย์ ชัยเดช, 2557)

**2.6.2 วัตถุดิบในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล**

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลสามารถแบ่งออกเป็น 4 หมวดหมู่ คือ น้ำมันพืช (รับประทานได้และรับประทานไม่ได้) ไขมันสัตว์ น้ำมันใช้แล้วที่นำกลับมาใช้ใหม่ และสาหร่าย (Ghazali et al., 2015) แสดงดังตัวตารางที่ 2.4 ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้น้ำมันพืชในการผลิตไบโอดีเซล แต่หากนำพืชพลังงานที่เป็นอาหารของมนุษย์มาใช้ผลิตไบโอดีเซลเป็นจำนวนมากก็อาจส่งผลกระทบต่อปัญหาความขาดแคลนวัตถุดิบที่จะนำมาผลิตหรือราคาที่สูงขึ้นในอนาคตได้ ปัจจุบันจึงมีการศึกษาหาวัตถุดิบพืชพลังงานชนิดอื่น ๆ เช่น น้ำมันสบู่ดำ ซึ่งสามารถนำผลิตไบโอดีเซลและไม่เป็นพืชอาหารของมนุษย์เพื่อเป็นการลดความไม่สมดุลระหว่างพืชอาหารและพืชพลังงานอีกทางหนึ่ง นอกจากจะเป็นทางเลือกด้านพลังงานแล้ว ยังเป็นทางเลือกให้กับเกษตรกรได้นำมาปลูกเพื่อเป็นอาชีพเสริมได้

การใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมร่วมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่าง ๆ หรือใช้แทนน้ำมันดีเซลจะช่วยเรื่องคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันดีเซลให้ดีขึ้นได้ และสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ เนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลมีส่วนประกอบที่ออกซิเจนผสมอยู่จึงทำให้การผสมระหว่างน้ำมันกับอากาศมีการกระจายตัวที่ดี ซึ่งทำให้สามารถใช้น้ำมันไบโอดีเซลไปใช้งานได้โดยไม่ต้องดัดแปลงหรือดัดแปลงเครื่องยนต์เพียงเล็กน้อย ทั้งนี้การนำไปใช้งานจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติอื่น ๆ ของน้ำมันเชื้อเพลิงตามอัตราส่วนการผสมของน้ำมันไบโอดีเซลเพื่อให้น้ำมันใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่ใช้งานได้กับเครื่องยนต์

การศึกษาและวิจัยการใช้น้ำมันพืชที่ผ่านมาพบว่า ปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจความเหมาะสมของวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลนั้นคือ ผลผลิตน้ำมันที่ได้จากพืช ซึ่งมักจะใช้พืชน้ำมันที่มีผลผลิตน้ำมันสูงในอุตสาหกรรมไบโอดีเซล เนื่องจากสามารถลดต้นทุนการผลิตได้

และผลผลิตน้ำมันที่สูงจะทำให้ต้นทุนต่ำลง ในบรรดาน้ำมันที่ไม่สามารถบริโภคได้พบว่า สบู่ดำมีผลผลิตสูงที่สุด รองลงมาคือ หยีน้ำและละหุ่ง สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่ง เนื่องจากละหุ่งเป็นพืชที่ไม่สามารถนำมารับประทานได้ และมีความสามารถเป็นเชื้อเพลิงได้อย่างดี ซึ่งข้อมูลรายละเอียดของละหุ่งโดยสรุปมีดังนี้

ตารางที่ 2.4 แหล่งวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซล (Mishra et al., 2017)

| **Group** | | | |
|---|---|---|---|
| **Edible Oils** | **Non-edible Oils** | **Animal fats** | **Other sources** |
| - Soybeans | - Jatropha curcas | - Pork lard | - Bacteria |
| - Rapeseed | - Mahua | - Beef tallow | - Algae |
| - Safflower | - Pongamia | - Poultry fat | - Microalgae |
| - Rice bran oil | - Camelina | - Fish oil | - Tarpenes |
| - Barley | - Cotton seed | - Chicken fat | - Poplar |
| - Wheat | - Karanja or honge | | - Switchgrass |
| - Corn | - Cumaru | | - Miscanthus |
| - Coconut | - Abutilon muticum | | - Fungi |
| - Canola | - Cynara cardunculus | | - Latexes |
| - Peanut | - Neem | | |
| - Palm / Palm kernel | - Jojoba | | |
| - Sunflower | - Passion seed | | |
| | - Moringa | | |
| | - Tobacco seed | | |
| | - Rubber seed tree | | |
| | - Salmon oil | | |
| | - Tal | | |
| | - Coffee ground | | |
| | - Nagchampa | | |
| | - Pachira glabra | | |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 2.6 เมล็ดและต้นละหุ่ง

ละหุ่งมีเขตการกระจายพันธุ์อย่างแพร่หลายทั้งในประเทศเขตร้อน เอเชีย ยุโรป และแอฟริกามาเป็นเวลานาน มีถิ่นกำเนิดในแอฟริกาตะวันออก ซึ่งละหุ่งจัดเป็นพืชเศรษฐกิจของไทยสมัยก่อน ปลูกได้ดีเกือบทุกภาคของประเทศของไทย แหล่งปลูกละหุ่งที่สำคัญอยู่ในภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลาง แหล่งปลูกที่สำคัญ ได้แก่ กาญจนบุรี ลำปาง น่าน ลพบุรี สระบุรี เป็นต้น แต่ในปัจจุบันผลผลิตละหุ่งลดลงอย่างมากทำให้ไม่เพียงพอต่อความต้องการทั้งใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น จนต้องมีการนำเข้าเมล็ดและน้ำมันละหุ่งมาใช้จากต่างประเทศ ซึ่งสาเหตุของพื้นที่ปลูกและผลผลิตมีแนวโน้มลดลงทุกปีเนื่องจากผลผลิตในท้องถิ่นอยู่ในระดับต่ำ แมลงศัตรูพืชระบาด ไม่นิยมปลูกเป็นแปลงใหญ่ มักจะปลูกตามริมรั้ว หัวไร่ปลายนา จึงทำให้เกษตรการขาดการเอาใจใส่ในการดูแลรักษาและเก็บเกี่ยวที่ดี รวมถึงไม่มีเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาใช้พัฒนการผลิต จึงไม่เป็นที่นิยม ทำให้เกษตรกรหันไปปลูกพืชชนิดอื่นแทน ตลาดผู้ผลิตละหุ่งรายใหญ่ ได้แก่ บราซิล อินเดีย จีน รัสเซีย และสหรัฐอเมริกา

ลักษณะทั่วไปของละหุ่ง ละหุ่งมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า Ricinus communis เป็นพืชในวงศ์ยางพารา (Euphorbiaceae) มีถิ่นกำเนิดในบริเวณแอฟริกาตะวันออกและเมดิเตอร์เรเนียน จัดเป็นไม้พุ่มหรือยืนต้นขนาดเล็ก มีความสูงของต้นได้ถึง 6 เมตร มีใบเป็นใบเดี่ยวออกเรียงสลับกัน ลักษณะมีแฉกปลายแหลมประมาณ 6 - 10 แฉก ใบกว้างประมาณ 15 เซนติเมตร และยาวประมาณ 60 เซนติเมตร มีเส้นแขนงของใบ ขอบใบหยัก ก้านใบหรือช่อดอกยาวประมาณ 20 - 30 เซนติเมตร ส่วนดอกละหุ่งเป็นช่อบริเวณปลายยอด โดยต้นละหุ่งจะเริ่มออกดอกเมื่อมีอายุประมาณ 40 - 60 วัน ในดอกละหุ่งจะมีทั้งตัวผู้และตัวเมียอยู่ในช่อเดียวกัน ซึ่งใช้การผสมเกสรด้วยแมลงเป็นหลัก กลีบเลี้ยงมี 3 - 5 แฉก ช่อดอกมีลักษณะเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยดอกออกเป็นกระจุกรวมกันแน่น

ผลหรือลูกละหุ่งมีลักษณะเป็นทรงรียาวประมาณ 1.5 เซนติเมตร สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ภายในประมาณ 150 วัน ผลของละหุ่งมีพู 3 พู แต่ละพูจะมีหนึ่งเมล็ด ลักษณะผลเป็นรูปไข่ ผิวมีขนคล้ายหนาม หากผลแก่หนามจะแข็งขึ้น ลักษณะของเมล็ดเป็นรูปทรงรี เปลือกเมล็ดมีสีน้ำตาลแดงประขาวหรือน้ำตาลปนเทาเป็นลายคล้ายกับตัวเห็บ เนื้อในเมล็ดมีสีขาว มีโปรตีนที่มีพิษ ภายในเนื้อเมล็ดจะมีน้ำมันอยู่ภายใน โดยน้ำมันที่ได้จากเมล็ดละหุ่งจะมีลักษณะเป็นของเหลวใสหรือมีสีเหลืองอ่อน ๆ เหนียวข้น มีกลิ่นเล็กน้อย

รูปที่ 2.7 ใบและผลละหุ่ง

การเจริญเติบโตของต้นละหุ่ง เมื่อต้นละหุ่งเติบโตมีใบหรือข้อประมาณ 6 - 12 ใบ จะมีช่อดอกเกิดขึ้นที่ยอด ในขณะที่ช่อแรกกำลังออกดอกติดฝักจะมีกิ่งชุดแรกแตกออกจากลำต้นใต้ช่อดอกแรกอีกสองถึงสามกิ่ง เมื่อกิ่งชุดแรกมีช่อดอกเกิดขึ้นที่ยอดกิ่งชุดที่สองก็จะแตกออกจากกิ่งชุดแรก และมีกิ่งชุดที่สามแตกออกจากชุดที่สองและกิ่งชุดต่อ ๆ ไปเกิดขึ้นตามลำดับ ทำให้ลำต้นมีการเจริญเติบโตอย่างสืบเนื่องไปตามลำดับ

ประโยชน์ของละหุ่ง น้ำมันเมล็ดละหุ่งมีกรดไขมัน Ricinoleic มีคุณสมบัติเฉพาะตัว และมีคุณสมบัติที่ดีคือ ไม่แห้งงาย มีความหนืด และเหนียวกว่าน้ำมันชนิดอื่น จึงนิยมนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น น้ำมันหล่อลื่น จาระบี สีทาบ้าน น้ำยารักษาหนัง หมึกพิมพ์ ขี้ผึ้งเทียม พลาสติก หนังเทียม ฉนวนไฟฟ้า เส้นใยเทียม ส่วนน้ำมันละหุ่งที่ผ่านกรรมวิธีทำให้บริสุทธิ์แล้วสามารถนำมาผลิตใช้เป็นยารักษาโรค เครื่องสำอาง นอกจากนี้ลำต้นของละหุ่งสามารถนำมาใช้ในการทำเยื่อกระดาษได้

**2.6.3 การใช้งานของน้ำมันไบโอดีเซล**

การนำน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการนำน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ชนิดต่าง ๆ มาใช้งานเพื่อเป็นแหล่งพลังงานสามารถทำได้หลายวิธีมีกระบวนการหลัก 5 วิธีคือ การเจือจางหรือ

ผสมตามอัตราส่วนกระบวนการผลิตแบบไมโครอิมัลชัน การแตกตัวด้วยความร้อน และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

1) การใช้น้ำมันไบโอดีเซลโดยตรงกับเครื่องยนต์ดีเซล (Direct Use)

การใช้น้ำมันไบโอดีเซลโดยตรงในเครื่องยนต์แทนน้ำมันดีเซล โดยไม่เติมน้ำมันดีเซลหรือน้ำมันชนิดอื่นผสมไป งานวิจัยส่วนมากจะใช้น้ำมันพืชมากกว่าน้ำมันสัตว์ เนื่องจากน้ำมันพืชที่สกัดได้มีคุณสมบัติที่ดีและเหมาะสมกว่าน้ำมันสัตว์ อีกทั้งน้ำมันที่ได้จากสัตว์มีจุดหลอมเหลวที่สูงทำให้เกิดการจับตัวเป็นไขได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องได้ ซึ่งเป็นปัญหาต่อการใช้น้ำมันชนิดนี้ ส่วนน้ำมันพืชดีกว่าคือ เกิดการจับตัวเป็นไขที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า บางครั้งพบว่ามีการอุ่นน้ำมันโดยอาศัยความร้อนช่วยในการหลอมเหลวไขและลดค่าความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรง เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาในการป้อนน้ำมันเข้าห้องเผาไหม้และปัญหาการเผาไหม้ของของเชื้อเพลิง แต่การทำดังกล่าวทำให้เกิดความยุ่งยากในการใช้งานได้

2) การเจือจาง (Dilution) หรือการผสม (Blending)

การเจือจางหรือการผสมกับน้ำมัน เป็นการนำน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ที่สกัดได้มาผสมกับน้ำมันดีเซลด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อลดความหนืดของน้ำมันลง และได้น้ำมันผสมที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากขึ้น โดยอัตราส่วนการผสมที่ใช้นั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิใช้งานของแต่ละพื้นที่ ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันวิธีนี้มีหลายสาเหตุ คือ มีองค์ประกอบที่เป็นกรด เกิดการสะสมของคาร์บอน เกิดยางเหนียวเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างการเก็บรักษาและการใช้งาน ส่งผลต่อการอุดตันหรือทำให้หัวฉีดน้ำมันฉีดน้ำมันเป็นละอองฝอยได้ไม่ดี

3) ไมโครอิมัลชั่น (Microemulsion)

วิธีการทำไมโครอิมัลชันเป็นกระบวนการผสมระหว่างน้ำมันพืชกับตัวละลายแอลกอฮอล์ โดยทั่วไปของเหลวไมโครอิมัลชันคือของเหลวผสมที่มีการแพร่กระจายตัวในลักษณะของคอลลอยด์ จากการผสมของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนมากมีขนาดอนุภาค 1 ถึง 150 นาโนเมตร ตัวทำละลายที่ใช้เป็นแอลกอฮอล์ลชนิดต่าง ๆ เช่น เมทานอล เอทานอล และบิวทานอล เป็นวิธีการที่ใช้ลดค่าความหนืดเพื่อให้ได้น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ส่วนใหญ่ปัญหาที่พบเกิดจากของการสะสมตัวของคาร์บอนเป็นตะกอนและยางเหนียวบริเวณหัวฉีด วาล์ว และของเครื่องยนต์ซึ่งเป็นข้อเสียของน้ำมันที่ผลิตโดยวิธีนี้ (Agarwal, 2007)

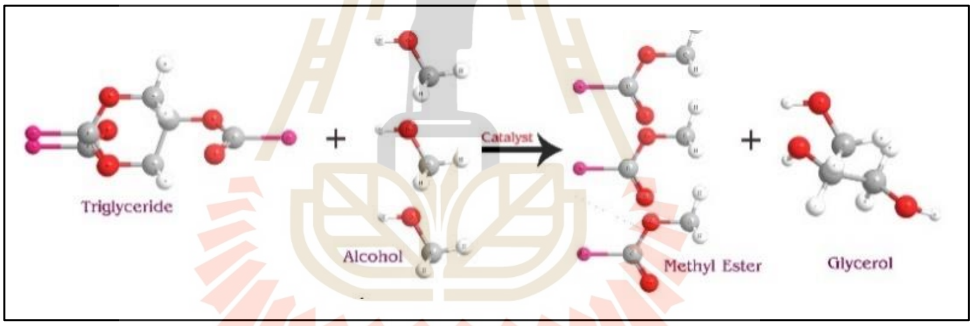
4) การแตกตัวด้วยความร้อนหรือไพโรไลซิส (Thermal Cracking or Pyrolysis)

การแตกตัวด้วยความร้อนหรือไพโรไลซิส เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารตั้งต้นหนึ่งชนิดไปเป็นผลิตภัณฑ์อีกชนิดหนึ่งหรือหลายชนิด โดยใช้ความร้อนกระตุ้นให้เกิดหรือใช้พลังงานความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการจะต้องทำภายใต้

สภาวะจำกัดออกซิเจนหรือปริมาณอากาศ เพื่อไม่ให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง วัตถุดิบส่วนใหญ่ที่นิยมนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาคือน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ กรดไขมันอินทรีย์และเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการประมาณ 450 - 600 องศาเซลเซียส กระบวนการนี้อาจจะเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นหลายชนิดและยากที่จะกำหนดหรือควบคุมให้ได้ผลิตตามต้องการ เนื่องจากมีความหลากหลายของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบ

5) ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น (Transesterification reaction)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น เป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์ โดยการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นสารประกอบเอสเตอร์และกลีเซอรอล เป็นการย้ายหมู่แอลคิลของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ ปฏิกิริยาทราน-เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์สามารถผันกลับได้และเกิดขึ้นค่อนข้างช้าจึงต้องตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นและได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น




รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (ที่มา : www.energyfantasia.com)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### 2.6.4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น

การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นเพื่อผลิตไบโอดีเซลเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมที่สุดในปัจจุบัน ซึ่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นนั้นเป็นชื่อเรียกโดยทั่วไปของปฏิกิริยาอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่สามารถใช้ลดค่าความหนืดของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทไตรกลีเซอไรด์ และปรับปรุงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงให้มีลักษณะคล้ายกับน้ำมันดีเซล สามารถทำได้โดยการนำไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ทั้งที่ใช้แล้วและยังไม่ได้ใช้ไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นกับสารประเภทแอลกอฮอล์โซ่สั้น เช่น เมทานอล หรือเอทานอล ทั้งนี้เมทานอลจะเป็นที่นิยมมากที่สุดเนื่องจากมีราคาถูกเมื่อเทียบกับ

แอลกอฮอล์ชนิดอื่น อีกทั้งยังมีข้อดีในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี คือ เป็นโมเลกุลขนาดเล็กมีขั้ว คุณสมบัติดังกล่าวสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอลได้อย่างรวดเร็วและสามารถละลายตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี การเรียกชื่อของไบโอดีเซลขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ยกตัวอย่างเช่น เอทิลเอสเตอร์ เป็นเอสเตอร์ที่ได้จากการที่ใช้เอทานอลเป็นสารในการทำปฏิกิริยา หรือเมทิลเอสเตอร์ เป็นเอสเตอร์ที่ได้จากการใช้เมทานอลเป็นสารในการทำปฏิกิริยา สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสามารถใช้ได้หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี กรด ด่าง หรือตัวเร่งชีวภาพ อาทิเช่น กรดซัลฟูริก ($H_2SO_4$) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือลิเพส เป็นต้น

ทั้งนี้วัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นไบโอดีเซล และเงื่อนไขของกระบวนการผลิตไม่ว่าจะเป็นสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลระหว่างน้ำมันกับแอลกอฮอล์ (สารตั้งต้น) อุณหภูมิและระยะเวลาในระหว่างการทำปฏิกิริยา ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อผลผลิตที่ได้ สำหรับสัดส่วนในการทำปฏิกิริยาของน้ำมันกับแอลกอฮอล์แล้วพบว่า ใช้อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 3 : 1 เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ แต่ในทางปฏิบัติต้องใช้อัตราส่วนที่มากกว่านั้น เนื่องจากต้องการให้ผลผลิตสูงและใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาสั้นลง

### 2.6.5 การนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์

1) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันไบโอดีเซล

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไบโอดีเซลเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ และคุณลักษณะของการเกิดมลพิษ โดยปกติแล้วคุณสมบัติหลัก ๆ ของไบโอดีเซลที่ทำการพิจารณา ได้แก่ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง เลขซีเทน ความหนืด ความหนาแน่น จุดไหลเท จุดวาบไฟ เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ปริมาณกรดไขมันและองค์ประกอบทางเคมีของไบโอดีเซลว่าเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของไบโอดีเซล ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ จากตารางพบว่าคุณสมบัติของไบโอดีเซลจะใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

นอกจากนี้ คุณสมบัติการหล่อลื่นของไบโอดีเซลนั้นมีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นสามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งาน โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้ไบโอดีเซลช่วยส่งเสริมคุณสมบัติการหล่อลื่น รวมถึงช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของกำลังให้ดีขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติการหล่อลื่นจะช่วยลดการสูญเสียจากแรงเสียดทานแต่ทั้งนี้ก็สามารถทำให้เกิดคราบเขม่าที่หัวฉีดเชื้อเพลิงได้เช่นกันขึ้นอยู่กับความสามารถในการย่อยสลาย ปริมาณกลีเซอรอล และคุณสมบัติการไหล (Mishra, V. K., & Goswami, R., 2017)

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตจากวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ (Thapa et al., 2018; Karmakar et al, 2010)

| น้ำมันวัตถุดิบ | คุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (MJ/kg) | เลขซีเทน | ความหนืด ($mm^2/s$) | ความหนาแน่น ($kg/m^3$) | จุดไหลเท (°C) | จุดวาบไฟ (°C) |
| ปาล์ม | - | 52 | 4.9 | 879 | 14 | 181 |
| ถั่วเหลือง | 39.6 | 37.9 | 28.87 | 913.8 | - | 254 |
| ถั่วลิสง | 39.8 | 41.8 | 39.6 | 905.6 | - | 271 |
| สบู่ดำ | 38.5-42 | 46-55 | 3.7-5.8 | 864-880 | 5 | 162 |
| ละหุ่ง | 37.4 | 45.3 | 251.2 | 955 | - | - |

2) สมรรถนะของเครื่องยนต์และคุณลักษณะการเผาไหม้

การทกสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลนั้นประกอบไปด้วยการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น กำลัง ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ และประสิทธิภาพเชิงความร้อน เป็นต้น จากผลการวิจัยที่ผ่านมาจากการศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์ โดยใช้ไบโอดีเซลจากแหล่งวัตถุดิบต่าง ๆ ผสมกับน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง Murillo et al. (2007) พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนผสมของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วส่งผลให้กำลังที่ได้จากเครื่องยนต์มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกับน้ำมันดีเซล และ Kalam et al. (2011) ได้รายงานผลการผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม และ ไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวกับน้ำมันดีเซลที่ 5% โดยปริมาตร ส่งผลให้กำลังเบรกของเครื่องยนต์ลดลง 1.2% และ 0.7% ตามลำดับ เนื่องจากคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำกว่าน้ำมันดีเซล และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Altaie et al. (2015) ที่พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มทำให้แรงบิดเบรกมีค่าลดลง โดยการลดลงของกำลังเบรกคาดน่าจะมาจากผลของค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ต่ำของไบโอดีเซล และอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกนั้นจะมีค่ามากขึ้นตามสัดส่วนของไบโอดีเซลมีเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของไบโอดีเซลพบว่า ไบโอดีเซลมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งมีสาเหตุจากคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่มีค่าความร้อนต่ำกว่าน้ำมันดีเซลรวมถึงความหนาแน่นและความหนืดมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ส่งผลให้การกระจายตัวเป็นละอองฝอยได้ไม่ดี (Nantha Gopal et al., 2014)

เมื่อพิจารณาถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญของเชื้อเพลิง โดยสามารถอธิบายได้จากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความดันในกระบอกสูบ ความล่าช้าการจุดระเบิด ช่วงเวลาการเผาไหม้ การปลดปล่อยความร้อน และอัตราการปลดปล่อยความร้อน เป็นต้น (Hasan et al., 2017) จากการศึกษาของไบโอดีเซลในด้านคุณลักษณะการเผาไหม้พบว่า ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและไบโอดีเซลจากคาโนลามีความดันในกระบอกสูบสูงสุดมากกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากไบโอดีเซลมีความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก จุดเดือด จำนวนซีเทน ปริมาณออกซิเจนที่สูง และเวลาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้าที่มากกว่าน้ำมันดีเซล (Ozsezen et al., 2009) แต่ถึงอย่างไรก็ตาม งานวิจัยบางส่วนได้พบว่า ความดันในกระบอกสูบสูงสุดและอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดของไบโอดีเซลมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากมีคุณลักษณะการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ไม่ดี ซึ่งเป็นผลจากค่าความหนืดที่สูง การระเหยกลายเป็นไอที่ไม่ดี และค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ส่งผลให้อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดมีค่าลดลง (Kegl et al., 2006 ; Sayin et al., 2009)

3) มลพิษไอเสียของเครื่องยนต์

การใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ส่งผลให้เกิดมลพิษไอเสียขึ้นสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลประกอบด้วยมลพิษต่าง ๆ ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์ ออกไซด์ของไนโตรเจน และฝุ่นละออง นอกจากนี้พบว่า ควันที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์นั้นมีปริมาณไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีส่วนประกอบของออกซิเจนเป็นตัวช่วยในการเผาไหม้ ทำให้มีแนวโน้มของปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนในไอเสียสูงกว่าน้ำมันดีเซล ทั้งนี้ฝุ่นละอองจากการใช้ไบโอดีเซลยังสามารถลดฝุ่นละอองลงอีกด้วย

จากงานวิจัยที่ผ่านมา โดยใช้ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและไบโอดีเซลจากคาโนลาที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลพบว่า ปริมาณการปล่อยมลพิษไอเสียไฮโดรคาร์บอนลดลง 14.29% และ 72.86% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล (Ozezen et al, 2009) โดยเป็นผลมาจากองค์ประกอบทางเคมีของไบโอดีเซล เช่น ปริมาณออกซิเจนที่มากกว่าน้ำมันดีเซลทำให้ไบโอดีเซลมีปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่ต่ำ (Hasan and Rahman, 2017) คล้ายกันกับคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยมีงานวิจัยได้กล่าวว่า คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซล เช่น ปริมาณออกซิเจนและจำนวนซีเทนมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล เป็นปัจจัยที่ทำให้ปริมาณการปล่อยมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล และยังพบว่าอัตราส่วนผสมของไบโอดีเซลและรูปแบบของเครื่องยนต์มีผลกระทบต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องยนต์ดีเซล โดยอัตราส่วนผสมของไบโอดีเซลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้คาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง (Durbin et al., 2008) และเมื่อกล่าวถึง

ฝุ่นละอองพบว่า การใช้ไบโอดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลจะช่วยลดฝุ่นละอองเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล Rakopoulos et al. (2006) ได้ศึกษาคุณลักษณะมลพิษของไบโอดีเซลบริสุทธิ์และไบโอดีเซลผสมน้ำมันดีเซลพบว่า ไบโอดีเซลมีฝุ่นละอองปริมาณที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลและมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น

การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนพบว่า เมื่ออัตราส่วนผสมของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น (Chauhan et al., 2012) และ Gokalp et al. (2011) พบว่า ปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนสูงขึ้น 4.5%, 10% และ 15.5% สำหรับไบโอดีเซล B20, B50 และไบโอดีเซลบริสุทธิ์ ตามลำดับ ซึ่งภาระงานความเร็วของเครื่องยนต์ ปริมาณออกซิเจนและจำนวนซีเทนที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล รวมถึงการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้าและการเผาไหม้เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่ก่อเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนสำหรับไบโอดีเซล (Hasan and Rahman, 2017) โดยจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา เช่น

Yarrapathruni et al. (2009) ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของน้ำมันไบโอดีเซลจากสบู่ดำผสมกับน้ำมันดีเซล โดยทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลลูกสูบเดียวที่มีระบบการระบายความร้อนด้วยน้ำ จากการทดสอบพบว่า น้ำมันไบโอดีเซลที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลสบู่ดำ 25% โดยปริมาตร ส่งผลให้สมรรถนะของเครื่องยนต์มีลักษณะใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ส่วนน้ำมันไบโอดีเซลสบู่ดำบริสุทธิ์ทำให้ประสิทธิ์ภาพเชิงความร้อนเบรกต่ำกว่า ทั้งนี้การปล่อยมลพิษไอเสียทั้งคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และควันดำมีปริมาณลดลง

Hirkude et al. (2012) ได้ศึกษาและวิเคราะห์มลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันใช้แล้ว ซึ่งจากการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลพบว่า สมรรถนะของเครื่องยนต์จากการใช้ไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วที่ส่วนผสมต่าง ๆ มีความใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลและในด้านมลพิษไอเสียปริมาณการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงประมาณ 21% - 45% ฝุ่นละอองลดลงประมาณ 23% - 47% และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลดลงประมาณ 50% - 100% สำหรับไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

Shahabuddin et al. (2012) ได้ศึกษาการใช้น้ำมันปาล์มเมทิลเอสเทอร์ผสมกับน้ำมันดีเซลและผสมสารเติมแต่ง โดยใช้อัตราส่วนผสมดังนี้ คือ 20% ของปาล์มเมทิลเอสเทอร์ (B20) 20% ปาล์มเมทิลเอสเทอร์ผสมกับสารเติมแต่งที่ 1 เปอร์เซนต์ (B20+1%) 20% ปาล์มเมทิลเอสเทอร์ผสมกับสารเติมแต่ง 2% (B20+2%) และปาล์มเมทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์ (B100) จากผลการทดสอบพบว่า การผสมสารเติมแต่งด้วยอัตราส่วนผสม 20% ปาล์มเมทิลเอสเทอร์กับสารเติมแต่งที่ 1% ทำให้สมรรถนะเครื่องยนต์ดีที่สุด มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลง ปริมาณการเกิด

ออกไซด์ของไนโตรเจน ไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล

Anbarasu et al. (2014) ทำการทดสอบบนเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว 4 จังหวะ โดยใช้ไบโอดีเซลจากคาโนลาผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนผสม 20%, 40%, 60% และ 100% ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1,500 รอบต่อนาที เพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์และมลพิษไอเสีย ผลการทดสอบพบว่า ไฮโดรคาร์บอนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการผสมไบโอดีเซล ควันดำของน้ำมันที่มีไบโอดีเซลผสมจะมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล และออกไซด์ของไนโตรเจนมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล

Senthil et al. (2015) ได้ศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์และมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ 4 จังหวะ ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที โดยใช้ไบโอดีเซลจากลูกพลัมเหลือง จากการทดสอบพบว่า ไบโอดีเซลและไบโอดีเซลผสมมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกต่ำกว่าน้ำมันดีเซลเล็กน้อยในทุกภาระงาน อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของน้ำมันดีเซลมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับไบโอดีเซลผสมตัวอื่น ๆ ที่ใช้ในการทอสอบ นอกจากนี้คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอนของไบโอดีเซลผสมมีต่ำกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล ส่วนออกไซด์ของไนโตรเจนมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บทที่ 3
# วิธีการดำเนินการวิจัย

## 3.1 กรอบการดำเนินการวิจัย

การใช้น้ำมันขยะพลาสติกเพื่อเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในเครื่องยนต์ยังมีข้อด้อยอยู่ด้านการปล่อยมลพิษไอเสีย ผู้วิจัยต้องการศึกษาการใช้น้ำมันขยะพลาสติกถูกแปรรูปเป็นพลังงานผ่านกระบวนไพโรไลซิสที่ยังไม่ผ่านกระบวนการการกลั่นลำดับส่วนมาใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกและทำให้เกิดความเชื่อมั่นในการนำไปใช้งาน ผู้วิจัยจึงเกิดความสนใจในการศึกษา ค้นคว้า และวิจัยเกี่ยวกับน้ำมันขยะพลาสติกในด้านต่าง ๆ ได้แก่ คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมี สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ การปล่อยมลพิษไอเสีย และคุณสมบัติการหล่อลื่นจากการใช้น้ำมันขยะพลาสติก นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังมีความสนใจในการนำน้ำมันขยะพลาสติกผสมกับไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่ง เพื่อให้เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและปรับปรุงข้อด้อยของน้ำมันขยะพลาสติก ซึ่งน้ำมันละหุ่งซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบที่ไม่สามารถรับประทานได้และเป็นพืชที่เหมาะสมในการเพาะปลูกในประเทศไทยหากได้รับการสนับสนุน การนำน้ำมันละหุ่งมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันขยะพลาสติกจะเป็นการลดความไม่สมดุลระหว่างพืชอาหารและพืชพลังงาน อีกทั้งเป็นแนวทางส่งเสริมการใช้พลังงานจากวัสดุธรรมชาติและขยะเหลือทิ้งอีกทางหนึ่ง โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ดังรูปที่ 3.1

ในขั้นตอนแรกของการดำเนินการวิจัยนั้นเป็นการติดตั้งเครื่องยนต์ที่จะทำการทดสอบกับไดนาโมมิเตอร์ และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ อีกส่วนหนึ่งของการดำเนินการวิจัยคือ การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น และเตรียมน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบโดยผสมน้ำมันขยะพลาสติกด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่ง หลังจากนั้นเป็นการนำน้ำมันเชื้อเพลิงไปทำการทดสอบด้านต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติพื้นฐานทางเคมี สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และการปล่อยมลพิษไอเสีย

รูปที่ 3.1 กรอบการดำเนินการวิจัย

## 3.2 การเตรียมน้ำมันเชื้อเพลิง

### 3.2.1 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่ง

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น โดยใช้โพแตสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้เมทานอลเป็นเป็นสารตั้งต้น ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนการผลิตดังนี้

1) การเตรียมวัตถุดิบ

การเตรียมวัตถุดิบจากน้ำมันละหุ่งสำหรับการนำมาผลิตไบโอดีเซลนั้น จะทำการตวงน้ำมันละหุ่งปริมาณ 500 กรัม แล้วนำน้ำมันละหุ่งมากรองเพื่อเอาตะกอนและกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก

2) การเตรียมสารละลายแอลกอฮอล์

ทำการตวงเมทานอลที่ใช้สำหรับเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปริมาณ 155 กรัม และชั่งโพแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.5 กรัม แล้วเทใส่ในเมทานอลที่ตวงไว้ กวนโดยใช้แท่งแม่เหล็กด้วยเครื่องกวนสารจนกว่าโพแตสเซียมไฮดรอกไซด์จะละลายจนหมด

3) การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น

นำน้ำมันละหุ่งที่เตรียมไว้ไปอุ่นที่อุณหภูมิประมาณ 50 °C หากมีน้ำปนมาต้องต้มไล่น้ำออกให้หมดก่อนที่จะทำปฏิกิริยา จากนั้นเทเมทานอลที่ละลายโพแตสเซียมไฮดรอกไซด์ไว้แล้วลงในน้ำมันละหุ่ง แล้วปรับให้อุณหภูมิของปฏิกิริยาอยู่ที่ 50 °C โดยใช้เวลาประมาณ 120 นาที

4) การแยกกลีเซอลีน

หลังจากทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นเสร็จ นำน้ำมันเทใส่ในภาชนะขวดรูปชมพู่แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกชั้นระหว่างเมทิลเอสเตอร์หรือไบโอดีเซลกับกลีเซอรอล เพื่อให้แน่ใจว่าเกิดการแยกชั้นอย่างสมบูรณ์ผู้วิจัยตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 8 - 12 ชั่วโมง

5) การล้างสิ่งปนเปื้อนออก

ขั้นตอนการล้างสิ่งปนเปื้อนออกจะเป็นการนำไบโอดีเซลล้างด้วยน้ำ เพื่อขจัดเมทานอล สารเร่งปฏิกิริยา และกลีเซอบางส่วนที่ยังหลงเหลืออยู่ออกไป โดยการเติมน้ำเท่ากับ 1/4 ของไบโอดีเซลทำการล้างจนน้ำที่ใช้ในการล้างไบโอดีเซลที่ออกมามีสีใส

6) การขจัดน้ำออกขั้นสุดท้าย

เมื่อล้างสิ่งปนเปื้อนออกหมดแล้ว ขั้นตอนสุดท้ายคือ การขจัดน้ำที่หลงเหลือในไบโอดีเซลออก ซึ่งกระทำโดยการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 20 นาที

**3.2.2 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม**

สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มจะใช้วิธีการเดียวกันกับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งคือ ผลิตโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น ใช้โพแตสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้เมทานอลเป็นเป็นสารตั้งต้น ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนการผลิตดังนี้

1) การเตรียมวัตถุดิบก่อนการทำปฏิกิริยา

การเตรียมวัตถุดิบจากน้ำมันปาล์มสำหรับการนำมาผลิตไบโอดีเซลนั้นจะทำการตวงน้ำมันละหุ่งปริมาณ 400 กรัม แล้วนำน้ำมันปาล์มมากรองเพื่อเอาตะกอนและกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก

2) การเตรียมสารละลายแอลกอฮอล์

ทำการตวงเมทานอลที่ใช้สำหรับเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปริมาณ 180 กรัม และชั่งโพแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 2% ของน้ำมันปาล์มดิบซึ่งคิดเป็น 8 กรัม แล้วเทใส่ในเมทานอลที่ตวงไว้ กวนโดยใช้แท่งแม่เหล็กด้วยเครื่องกวนสารจนกว่าโพแตสเซียมไฮดรอกไซด์จะละลายจนหมด

3) การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น

นำน้ำมันปาล์มที่เตรียมไว้ไปอุ่นที่อุณหภูมิประมาณ 60 °C หากมีน้ำปนมาต้องต้มไล่น้ำออกให้หมด จากนั้นเทเมทานอลที่ละลายโพแตสเซียมไฮดรอกไซด์ไว้แล้วลงในน้ำมันปาล์มแล้วปรับให้อุณหภูมิของปฏิกิริยาอยู่ที่ 60 °C โดยใช้เวลาประมาณ 30 นาที

4) การแยกกลีเซอลีน

หลังจากทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นเสร็จ นำน้ำมันเทใส่ในภาชนะขวดรูปชมพู่แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกชั้นระหว่างเมทิลเอสเตอร์หรือไบโอดีเซลกับกลีเซอรอล ในที่นี้ผู้วิจัยตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่ากลีเซอรอลจะอยู่ชั้นด้านล่างและชั้นด้านบนจะเป็นไบโอดีเซล

5) การล้างสิ่งปนเปื้อนออก

ขั้นตอนถัดมาจะเป็นการนำไบโอดีเซลล้างด้วยน้ำ เพื่อขจัดเมทานอล สารเร่งปฏิกิริยาและกลีเซอบางส่วนที่ยังหลงเหลืออยู่ออกไป

6) การขจัดน้ำออกขั้นสุดท้าย

เมื่อล้างสิ่งปนเปื้อนออกหมดแล้ว ขั้นตอนสุดท้ายคือ การขจัดน้ำที่หลงเหลือในน้ำมันไบโอดีเซลออก ซึ่งกระทำโดยการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 20 นาที

### 3.2.3 การกลั่นน้ำมันจากขยะพลาสติก

ชุดกลั่นน้ำมันเป็นอุปกรณที่ใช้สำหรับแยกเอาน้ำมันจากขยะพลาสติกที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับน้ำมันดีเซลออกมาจากน้ำมัน เพื่อใช้ในการทดสอบเป็นอุปกรณเครื่องแก้วสำหรับการกลั่นใช้คนโทก้นกลมสองคอเป็นภาชนะสำหรับให้ความร้อน มีเครื่องมือวัดอุณหภูมิใช้การหล่อเย็นด้วยน้ำ โดยมีขั้นตอนการกลั่นดังนี้

1) นำน้ำมันดิบ (น้ำมันจากขยะพลาสติก) ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเทใส่หลอดแก้วตวงที่ปริมาตร 250 มิลลิลิตร เทใส่ภาชนะให้ความร้อน 3 ครั้ง จะได้นำมันดิบ 750 มิลลิลิตร เป็นปริมาตรของสารตั้งต้นที่ใช้ในการกลั่นแต่ละครั้ง

2) เตรียมขาตั้งและชุดหลอดแก้วที่ใช้สำหรับการกลั่นมาประกอบกันให้อยู่ในลักษณะพร้อมใช้งาน

3) นำเทอร์โมมิเตอร์สอดเข้าที่ช่องของภาชนะสำหรับให้ความร้อนผลิตภัณฑ์และหลอดแก้ว 3 ทางเพื่อวัดอุณหภูมิสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยตำแหน่งปลายของเทอร์โมมิเตอร์อยู่ที่จุดกึ่งกลางของสารตั้งต้น และช่วงกลางของช่องหลอดแก้ว 3 ทางที่เป็นทางผ่านของผลิตภัณฑ์

4) เตรียมอุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนและต่อสายยางสองเส้นคือ สายจ่ายและถ่ายน้ำเข้ากับหลอดกลั่น เพื่อให้มีน้ำหล่อเลี้ยงภายในหลอดกลั่นตลอดเวลาทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความร้อนสามารถกลั่นตัวได้

5) ให้ความร้อนโดยควบคุมอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอและวางภาชนะให้อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางภาชนะให้ความร้อน

6) เพิ่มความร้อนอย่างต่อเนื่องโดยผลิตภัณฑ์ที่เราต้องการนำไปใช้ในการทดสอบจะเริ่มออกมาตั้งแต่อุณหภูมิ 170 - 250 องศาเซลเซียส และวัดปริมาณน้ำมันที่ได้จากการกลั่น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## 3.3 การตรวจวัดคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง

การทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะ ความถ่วงเอพีไอ ความหนาแน่น ความหนืดจลนศาสตร์ การกลั่น จุดวาบไฟ ดัชนีซีเทน ค่าความร้อนเชื้อเพลิง การประเมินคุณสมบัติการหล่อลื่น ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการทดสอบดังนี้

### 3.3.1 ความถ่วงจำเพาะความถ่วงเอพีไอ และความหนาแน่น

การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, SG) ของน้ำมันเชื้อเพลิงภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D1298 และการคำนวณค่าความถ่วงเอพีไอ (API Gravity) โดยใช้

เครื่องมือ Density API & Specific gravity - Tempering bath เพื่อทำการระบุความหนักเบาของน้ำมันทดสอบที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส (60 $^{\circ}$F)

1) เปิดเครื่องมือทดสอบ (อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ) และตั้งค่าอุณหภูมิอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 15 องศาเซลเซียส

2) กรองน้ำมันเชื้อเพลิงก่อนการนำไปทดสอบเพื่อแยกสิ่งสกปรกหรือเศษตะกอนต่าง ๆ ออกจากน้ำมันทดสอบ

3) เทน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบลงในกระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร และนำกระบอกตวงแช่ลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิทดสอบ 15 องศาเซลเซียส

4) จุ่มไฮโดรมิเตอร์ลงไปในกระบอกตวงแล้วปล่อยให้ลอย เมื่อไฮโดรมิเตอร์นิ่งแล้วทำการอ่านค่าและบันทึกค่าที่อ่านได้

5) ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ตามข้อที่ 4 สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบแต่ละชนิด แล้วหาค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัด

จากค่าที่อ่านได้จากไฮโดรมิเตอร์สามารถนำมาคำนวณเป็นมาตราความถ่วงเอพีไอ (API Gravity) โดยเทียบเท่าความถ่วงจำเพาะคำนวณหาค่าได้ดังสมการที่ 3.1

$$\text{ความถ่วงเอพีไอ} = \frac{141.5}{\text{ความถ่วงจำเพาะ}\,15.6/15.6\ ^{\circ}\mathrm{C}} - 131.5 \qquad (3.1)$$

ทั้งนี้จากค่าความถ่วงจำเพาะสามารถใช้ในการคำนวณค่าความหนาแน่นของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบได้โดยใช้สมการที่ 3.2

$$\text{ความหนาแน่น} = SG \times 999.016 \qquad (3.2)$$

### 3.3.2 ความหนืดจลนศาสตร์

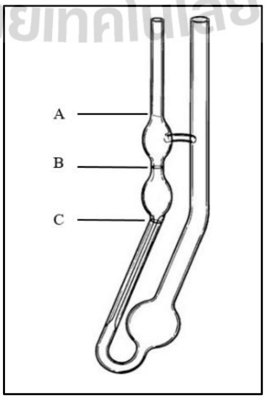
การทดสอบความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic viscosity) ของน้ำมันเชื้อเพลิงภายใต้มาตรฐานทดสอบ ASTM D445 โดยใช้เครื่องมือวัด Viscosity - Kinematic capillary tempering bath high temperature ซึ่งประกอบด้วยหลอดแก้วรูเล็กสำหรับวิเคราะห์ความหนืด ขายึดหลอดแก้วรูเล็ก (Capillary tube) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิสำหรับวิเคราะห์ความหนืดและนาฬิกาจับเวลา ซึ่งมีวิธีการทดสอบและการคำนวณดังต่อไปนี้

1) ตวงน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบที่ต้องการทดสอบปริมาณ 20 มิลลิลิตร ลงในกระบอกตวง แล้วเทน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบลงในหลอดแก้วรูเล็ก

2) จากนั้นนำหลอดแก้วรูเล็กประกอบกับขายึด และแช่ลงในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิสำหรับวิเคราะห์ความหนืดที่ตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 40 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ความหนืด

3) แช่น้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบมีอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แล้วใช้หลอดตวงสารด้วยหลอดปิเปตดูดน้ำมันทดสอบให้สูงถึงระดับ A และเริ่มจับเวลาเมื่อของเหลวไหลลงมาที่ระดับ B และหยุดจับเวลาเมื่อของเหลวไหลลงมาที่ระดับ C บันทึกเวลาที่จับได้เป็นวินาที ดังรูปที่ 3.3




รูปที่ 3.3 หลอดแก้วรูเล็กใช้จับเวลาการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4) นำเวลาที่ได้จากการทดสอบคำนวนค่ากับพารามิเตอร์ตามขนาดของหลอดแก้วรูเล็กสำหรับวิเคราะห์ความหนืด

### 3.3.3 การกลั่น

การทดสอบอุณหภูมิการกลั่น (Distillation) ของน้ำมันเชื้อเพลิงภายใต้มาตรฐานทดสอบ ASTM D86 ประกอบด้วยชุดวัดค่าอุณหภูมิการกลั่น ขวดการกลั่น กระบอกตวง นาฬิกาจับเวลา เทอร์โมมิเตอร์ และจุกยางซิลิโคน ซึ่งวิธีการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ตวงน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบด้วยกระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร และเทน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบลงในขวดการกลั่น

2) ประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ และปิดฝาขวดการกลั่น แล้วทำการประกอบอุปกรณ์

รูปที่ 3.4 อุปกรณ์สำหรับทดสอบอุณหภูมิการกลั่นน้ำมันเชื้อเพลิง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3) ให้ความร้อนด้วยเครื่องให้ความร้อน (Heater) เมื่อน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบในขวดกลั่นเริ่มเดือดให้ทำการสังเกตและบันทึกอุณหภูมิที่น้ำมันเชื้อเพลิงกลั่นตัวออกมาหยดแรก โดยบันทึกอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ที่ติดอยู่กับขวดการกลั่น

4) เริ่มจับเวลาและควบคุมการให้ความร้อนกับขวดกลั่น เพื่อกำหนดอัตราการกลั่นอยู่ในช่วง 4 - 5 มิลลิลิตรต่อนาที

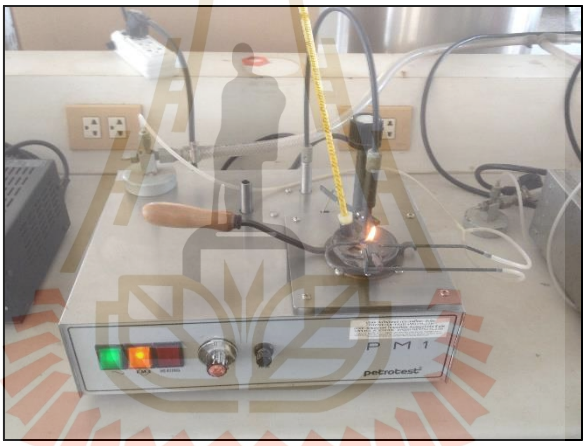
5) บันทึกอุณหภูมิการกลั่นทุก ๆ 10 มิลลิลิตรของน้ำมันเชื้อเพลิงที่กลั่นออกมาจนมีปริมาตร 50 มิลลิลิตร หรือร้อยละ 50 โดยปริมาตร

### 3.3.4 จุดวาบไฟ

การทดสอบจุดวาบไฟ (Flash point) ทำการทดสอบภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D93 เป็นการวัดจุดวาบไฟในภาชนะปิด เครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบประกอบด้วย เครื่องมือทดสอบจุดวาบไฟแบบ Pensky – Marten close cup apparatus ถ้วยใส่ตัวอย่างน้ำมันทดสอบ เทอร์โมมิเตอร์ และแก๊สหุงต้ม โดยตรวจวัดน้ำมันทดสอบที่มีอุณหภูมิจุดวาบไฟอยู่ในช่วง 40 ถึง 360 องศาเซลเซียส ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการทดสอบและการตรวจวัด ดังต่อไปนี้

1) เปิดแก๊สทิ้งไว้ก่อนทำการทดสอบเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้แก๊สเกิดการไหลไปที่หัวติดไฟ

2) ทำการจุดเปลวไฟ ซึ่งเป็นตัวล่อให้เกิดการวาบไฟของน้ำมัน โดยปรับวาล์วแก๊สให้เปลวไฟมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.2 - 4.8 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.5




รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ทดสอบจุดวาบไฟ

3) เทน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบลงในถ้วยให้มีปริมาตรเท่ากับขีดที่ปรากฏอยู่ในถ้วย

4) นำถ้วย Pensky - Marten ประกอบเข้ากับเครื่องทดสอบจุดวาบไฟ แล้วเปิดสวิตซ์เครื่องทดสอบ

5) เปิดสวิตซ์ใบพัดกวนน้ำมันเชื้อเพลิงที่ทดสอบ เพื่อต้องการทำให้เกิดไอระเหยของน้ำมันที่ทำบริเวณเหนือผิวของน้ำมัน โดยใช้ความเร็วรอบการหมุนใบพัดกวนอยู่ที่ประมาณ 90 - 120 รอบต่อนาที

6) เริ่มให้ความร้อนแก่น้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ เพื่อทำให้เกิดไอของน้ำมันทดสอบมากขึ้น ทำการปรับระดับอัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 5 - 6 องศาเซลเซียสต่อนาที

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7) เริ่มการทดสอบหาจุดวาบไฟของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ โดยบิดแกนหมุนทดสอบจนสุดแล้วปล่อยหัวเปลวไฟให้เข้าไปล่อให้เกิดการวาบไฟ และเมื่อปล่อยหัวของเปลวไฟจะกลับคืนสู่ตำแหน่งเดิม ในขณะที่บิดแกนทดสอบให้สังเกตดูเปลวไฟที่ช่องว่างที่เปิดออกเมื่อบิดแกนทดสอบ

8) เมื่อเกิดจุดวาบไฟจะสังเกตเห็นเปลวไฟวาบขึ้นบริเวณผิวหน้าของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบประมาณ 2 - 3 วินาที อุณหภูมิที่เกิดเปลวไฟนี้คืออุณหภูมิจุดวาบไฟของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ทดสอบ

9) ทำการทดสอบตามข้อปฏิบัติ 3 ถึง 8 ซ้ำ 3 ครั้ง โดยใช้น้ำมันทดสอบชนิดเดียวกันแล้วหาค่าผลเฉลี่ยจากค่าที่ได้จากการตรวจวัด

### 3.3.5 ดัชนีซีเทน

การทดสอบหาค่าดัชนีซีเทน (Calculated cetane index, CCI) ของน้ำมันเชื้อเพลิงภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D976 โดยดัชนีซีเทนได้มาจากความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการกลั่นที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร หรือจุดกึ่งกลางของการเดือดและความหนาแน่นหรือความถ่วงเอพีไอที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าดัชนีซีเทนสามารถหาได้จากโนโมกราฟหรือคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$CCI = -420.34 + 0.016G^2 + 0.192G \log M + 65.01(\log M)^2 - 0.0001809M^2 \quad (3.3)$$

โดย CCI คือ ดัชชีซีเทน (Calculated cetane index)

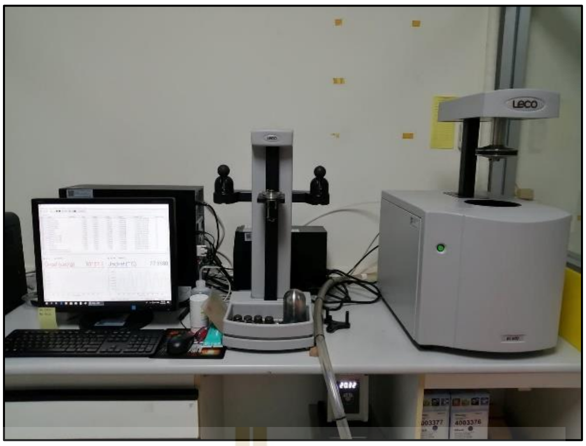
G คือ ความถ่วงเอพีไอ (API gravity)

M คือ อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของการเดือดที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร (°F)

### 3.3.6 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง

การทดสอบค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Heating value) ทำการทดสอบภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D240 โดยใช้เครื่องมือบอมบ์แคลอลิมิเตอร์ (Bomb calorimeter) ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการทดสอบดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.6 เครื่องมือบอมบ์แคลอลิมิเตอร์

1) เปิดระบบการทำงานของอุปกรณ์เครื่องวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อน วาล์วออกซิเจน เปิดโปรแกรม CALWIN ในคอมพิวเตอร์ ตามลำดับ

2) ทำการตั้งค่าโปรแกรมให้เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D240 ที่ใช้ในการอ้างอิงสำหรับการทดสอบ

3) ทำการชั่งน้ำหนักของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ ด้วยการตวงน้ำมันโดยใช้หลอดหยดสารหยดลงในภาชนะสำหรับใส่สาร และชั่งบนเครื่องชั่งดิจิตอลให้ได้น้ำหนัก 0.25 กรัม

4) ใช้คีมดึงด้ายออกมา 1 เส้น มัดเส้นด้ายให้ติดกับลวด แล้วนำถ้วยใส่น้ำมันทดสอบ วางบนแกนอลูมิเนียมของชุดทดสอบ จากนั้นนำปลายของเส้นด้ายที่พันไว้จุ่มลงในถ้วยจุดระเบิด

5) ประกอบลูกบอมบ์ โดยการนำสิ่งที่เตรียมไว้บรรจุลงในกระบอกสูบอลูมิเนียม จากนั้นกดลงให้สนิทแล้วหมุนเกลียวอลูเนียม เมื่อประกอบลูกบอมบ์เข้าไปติดตั้งในเครื่องวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อน

6) จากนั้นทำการสั่งการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนบนโปรแกรม CALWIN เครื่องวิเคราะห์จะเริ่มทำงานและใช้เวลาในการวัดค่าประมาณ 20 นาที เครื่องวิเคราะห์จะอ่านค่าพลังงานความร้อนออกมาได้

### 3.3.7 คุณสมบัติการหล่อลื่น

การทดสอบคุณสมบัติการหล่อลื่น (Lubricity) ของน้ำมันเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ISO 12156-1 โดยใช้เครื่อง High frequency reciprocating rig (HFRR) ดังรูปที่ 3.7 ประกอบกับชิ้นงานทดสอบ 2 ชิ้น ที่มีลักษณะเป็นลูกบอลและแผ่นดิสก์ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

รูปที่ 3.7 เครื่อง High frequency reciprocating rig (HFRR)

ในระหว่างการทดสอบลูกบอลจะเคลื่อนที่แบบกลับไปมาบนดิสก์ที่ถูกยึดไว้ในภาชนะที่มีน้ำมันที่ต้องการทดสอบ ในการทดสอบจะใช้เวลา 75 นาที ระยะการเคลื่อนที่ของลูกบอลมีระยะ 1 มิลลิเมตร ด้วยความถี่ 50 เฮิรตซ์ และภาระกรรมที่ชิ้นทดสอบได้รับคือ 200 กรัม ปริมาตรน้ำมันที่ใช้ทดสอบคือ 2 มิลลิลิตร และอุณหภูมิขณะทดสอบถูกควบคุมไว้ที่ 60 องศาเซลเซียส

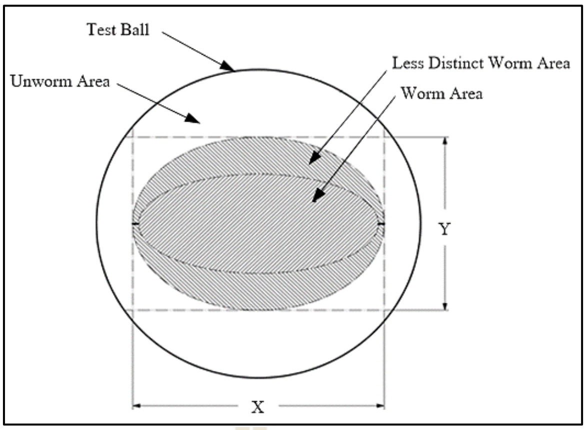
หลังการทดสอบรอยถลอกบนลูกบอลจะถูกวัดขนาดของความยาวในแนวการเคลื่อนที่ของลูกบอล (แนวแกน X) และแนวที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลูกบอล (แนวแกน Y) ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า ดังรูปที่ 3.8 และรายงานเป็นค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยถลอก (Mean wear scar diameter, MWSD) บนลูกบอลของตัวอย่าง ดังสมการที่ 3.4

$$\text{MSWD} = \frac{x+y}{2} \qquad (3.4)$$

โดย $x$ คือ ขนาดรอยถลอกในแนวตั้งฉากกับทิศทางการสั่น ($\mu$m)

$y$ คือ ขนาดรอยถลอกในแนวขนานกับทิศทางการสั่น ($\mu$m)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี




รูปที่ 3.8 การวัดขนาดของความยาวรอยถลอกบนลูกบอลทดสอบ

## 3.4 การติดตั้งเครื่องยนต์

### 3.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

1) เครื่องยนต์ดีเซล

การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลจะทำกับเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ 1 สูบ ขนาดความจุของเครื่องยนต์ 661.5 ซีซี ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ สามารถปรับอัตราส่วนกำลังอัดได้ โดยเครื่องยนต์จะติดตั้งเข้ากับไดนาโมมิเตอร์ชนิดกระแสเหนี่ยวนำและทำการติดตั้งอุปกรณ์การวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ แรงบิด ความเร็วรอบ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง โดยแสดงลักษณะของเครื่องยนต์ภายนอก ดังรูปที่ 3.9 และรายละเอียดของเครื่องยนต์ ดังตารางที่ 3.1

รูปที่ 3.9 เครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์อัตราส่วนกำลังอัดแปรผัน

| Engine | Specification |
|---|---|
| Engine Model | 240PE |
| Engine type | 4-Stroke, 1-cylinder, Water Cooled, Direct injection |
| Bore x Stroke | 87.5x110 mm |
| Total piston displacement | 661.5 cc |
| Compression ratio | 12:1-18:1 |
| Rated Power | 3.5 kW @1500 rpm |
| Fuel injection timing (BTDC) | 23 degree |

2) ไดนาโมมิเตอร์

ไดนาโมมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองภาระของเครื่องยนต์อาศัยหลักการของการดูดกลืนพลังงานจากเครื่องยนต์ ไดนาโมมิเตอร์ที่ใช้เป็นแบบกระแสเหนี่ยวนำ (Eddy current brake) รูปที่ 3.10 แสดงไดนาโมมิเตอร์ชนิดกระแสเหนี่ยวนำ โดยข้อมูลรายละเอียดมีดังตารางที่ 3.2

รูปที่ 3.10 ไดนาโมมิเตอร์ชนิดกระแสเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลจำเพาะของไดนาโมมิเตอร์ชนิดกระแสเหนี่ยวนำ

| **Model** | **AG10** |
|---|---|
| **Make** | SAJ Test Plant Pvt. Ltd. |
| **Hot coil voltage max.** | 60 VDC |
| **Continuous current amps** | 5.0 A |
| **Speed max** | 10,000 rpm |

3) เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย

การวิเคราะห์ก๊าซไอเสียใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ทั้งหมด 2 เครื่อง ได้แก่ เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Testo 350 และเครื่องมือวัดดัชนีเขม่าควัน Testo 308 โดยรายละเอียดเครื่องมือวัดและข้อมูลทางเทคนิคจะแสดงดังต่อไปนี้

รูปที่ 3.11 เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Testo 350

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลจำเพาะเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Testo 350

| **Measurement Parameter** | **Measurement Rang** | **Accuracy** | **Resolution** |
|---|---|---|---|
| $O_2$ | 0-25 vol% | ± 2 vol% | 0.01 vol% |
| CO, $H_2$-comp. | 0-10,000 ppm | ± 10 ppm (0-199ppm)<br>± 5 ppm of reading 200-2000ppm<br>± 10 ppm of reading (rest of range) | 1 ppm |
| $CO_{low}$, $H_2$-comp. | 0-500 ppm | ± 2 ppm (0-39.9 ppm)<br>± 5 ppm of reading (rest of range) | 0.1 ppm |
| NO | 0-4000 ppm | ± 5 ppm (0-99 ppm)<br>± 5 ppm of reading 100-1,999 ppm<br>± 10 ppm of reading (rest of range) | 1 ppm |
| $NO_{low}$ | 0-300 ppm | ± 2 ppm (0-39 ppm)<br>± 5 ppm of reading (rest of range) | |
| $NO_2$ | 0-500 ppm | ± 5 ppm (0-99 ppm)<br>± 5 ppm of reading (rest of range) | 0.1 ppm |
| $CO_2$ (IR) | 0-50 vol% | ± 0.3 vol% (0-39 vol%)<br>± 0.5 vol% of reading (rest of range) | 0.01 vol% |
| HC | Natural gas: 100-40,000 ppm<br>Propane: 100-21,000 ppm<br>Butane: 100-18,000 ppm | ± 400 ppm (100-4000 ppm)<br>± 5 % of reading (rest of range) | 10 ppm |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.12 เครื่องมือวัดดัชนีเขม่าควัน Testo 308

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลจำเพาะเครื่องมือวัดดัชนีเขม่าควัน Testo 308

| **Technical Data** | |
|---|---|
| Measuring Range | 0 to 6 RZ |
| Accuracy ± 1 digit | ± 0.2 RZ |
| Resolution | 0.1 RZ |
| **General Technical Data** | |
| Pump capacity | 1.63 ± 0.1 L |
| Reference filter | At 990 mbar and +20 °C Ambient Temperature |
| Display | Segment display with background Illumination |
| Norms and tests | 1.BlmSchV, METAS, EU-Guideline 2004/108/EG |
| Operating Temperature | +5 to +45 °C |
| Storage Temperature | -20 to +50 °C |

## 3.5 วิธีการทดสอบเครื่องยนต์

1) ทำการติดเครื่องยนต์แล้วปล่อยให้เครื่องยนต์เดินเบา (ประมาณ 1,000 รอบต่อนาที)

2) เริ่มทำการทดสอบด้วยการปรับการจ่ายภาระงานให้กับเครื่องยนต์ที่ 25 เปอร์เซ็นของโหลดสูงสุด (ภาระงาน 3.75 กิโลกรัม) และความเร็วรอบของเครื่องยนต์ให้อยู่ที่ 1,500 รอบต่อนาที

3) ทำการเก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ความดันในกระบอกสูบ อัตราการปลดปล่อยความร้อน และวัดอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยการจับเวลาอัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง โดยใช้ปริมาตรในการวัดที่ 100 มิลลิลิตร

4) ทำการตรวจวัดมลพิษไอเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย ณ บริเวณปลายท่อไอเสียของเครื่องยนต์ ด้วยการวัดซ้ำจำนวน 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยจากผลที่ได้ในการตรวจวัด

5) ทำการทดสอบตามขั้นตอนการปฏิบัติข้อที่ 3 ถึง 5 โดยการเปลี่ยนแปลงภาระกรรมที่ทดสอบเป็น 50 (ภาระงาน 7.5 กิโลกรัม) และ 75 เปอร์เซนต์ (ภาระงาน 11.25 กิโลกรัม) ตามลำดับ และ ทำการทดสอบเช่นเดียวกันนี้กับน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบชนิดอื่น ๆ ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบเดียวกัน

# บทที่ 4
# ผลการทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง

## 4.1 บทนำ

น้ำมันเชื้อเพลิงจากวัตถุดิบตั้งต้นที่ผลิตจากวัตถุดิบต่าง ๆ นอกจากจะมีความแตกต่างด้านชนิด ปริมาณ และองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันแล้ว คุณสมบัติบางประการที่สามารถทดสอบหาคุณลักษณะเฉพาะของน้ำมันเชื้อเพลิงได้ เพื่อเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานภายใต้มาตราฐานการทดสอบสากล ซึ่งมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ ได้แก่

1. ความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic Viscosity) ของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ โดยทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D445 Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids the Calculation of Dynamic Viscosity
2. ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (Density and Specific Gravity) ของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ โดยทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D1298 Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method
3. จุดวาบไฟ (Flash point) ของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ โดยทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D93-15 Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester
4. อุณหภูมิการกลั่น (Distillation) ของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ โดยทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D86-16a Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products and Liquid Fuels at Atmospheric Pressure
5. ดัชนีซีเทน (Cetane Index) ของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบทดสอบ โดยภายใต้มาตรฐาน ASTM D976 Standard Test Method for Calculated Cetane Index of Distillate Fuels
6. ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Gross Calorific Value) ของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ โดยทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D240 Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter

7. การหล่อลื่น (Lubricity) ของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ โดยทดสอบภายใต้มาตรฐาน International Standard ISO 12156-1 Assessment of lubricity using the high-frequency reciprocating rig (HFRR)

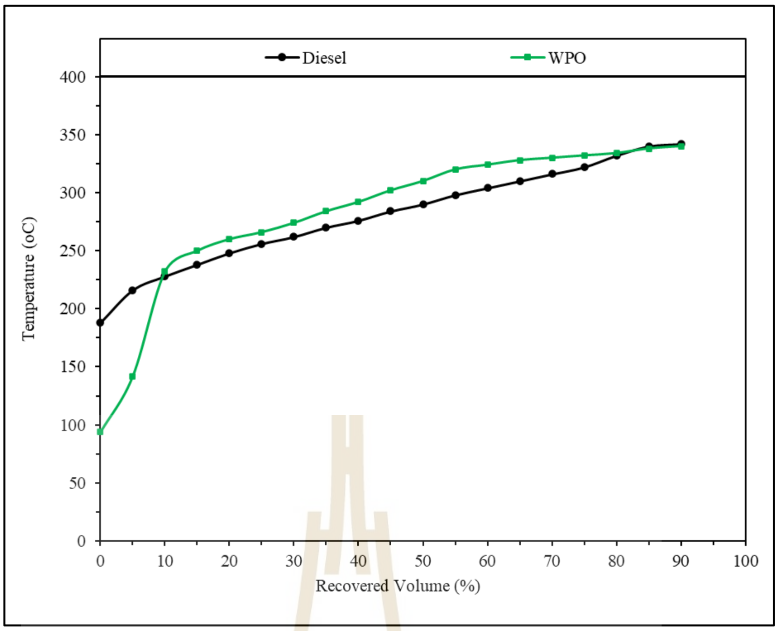
นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์อุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันจากขยะพลาสติก โดยเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล รวมถึงวิเคราะห์หาปริมาณและชนิดของเอสเตอร์ของกรดไขมันของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งและน้ำมันปาล์มโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทรกราฟี (Gas Chromatography, GC) ซึ่งเป็นเทคนิคการแยกที่นิยมใช้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

## 4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง

### 4.2.1 อุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันจากขยะพลาสติก

การกลั่น คือ การแยกของเหลวที่มีสารองค์ประกอบตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการระเหยกลายเป็นไอได้ไม่เท่ากัน ณ อุณหภูมิและความดันเดียวกัน เมื่อให้ความร้อนจนของเหลวกลายเป็นไอบางส่วน แล้วนำไอนั้นไปควบแน่นกลับให้เป็นของเหลวจะได้ของเหลวหลังควบแน่นที่มีส่วนผสมแตกต่างจากของเหลวก่อนการกลั่น ดังนั้นการกลั่นจึงทำให้ของเหลวมีความบริสุทธิ์ขึ้นหรือใช้แยกของเหลวผสมออกเป็นองค์ประกอบต่าง ๆ ซึ่งช่วงอุณหภูมิการกลั่นของเชื้อเพลิงนั้นมีผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ รวมถึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการติดเครื่องยนต์และอุ่นเครื่องยนต์ (Demirbus, 2008) โดยอุณหภูมิการกลั่นในช่วง Light volitile fraction จะช่วยบ่งชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการติดเครื่องยนต์ได้ง่าย แต่ถ้ามีค่าที่ต่ำจนเกินไปอาจจะส่งผลให้เครื่องยนต์เกิดการน๊อคได้ และช่วงอุณหภูมิการกลั่นที่ช่วง Heavy volitile fraction จะส่งผลให้เครื่องยนต์ติดยากและถ้ามีค่าสูงเกินค่าที่กำหนดจะทำให้คราบเขม่าในเครื่องยนต์ได้

ทั้งนี้ เส้นโค้งการกลั่น (Distillation curve) ของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ช่วงปริมาตรการกลั่นต่าง ๆ สามารถแสดงถึงคุณลักษณะการระเหยกลายเป็นไอของของเหลวหรือน้ำมันเชื้อเพลิงได้ โดยจากรูปที่ 4.1 แสดงถึงอุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันจากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ช่วงการกลั่นที่ 10% ถึง 90% ของการกลั่นตัว ของน้ำมันจากขยะพลาสติกมีลักษณะอุณหภูมิการกลั่นสูงกว่าน้ำมันดีเซลคิดเป็นค่าโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 11.76 $^{\circ}$C และมีช่วงอุณหภูมิการกลั่นอยู่ที่ 232 - 340 $^{\circ}$C จากผลดังกล่าวนี้ถือว่าอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานตามข้อกำหนดน้ำมันดีเซลของกรมธุรกิจพลังงาน แต่อย่างไรก็ตามที่ช่วงเริ่มกลั่นจนถึง 10% ของการกลั่นตัว พบว่า น้ำมันจากขยะพลาสติกจะมีอุณหภูมิการกลั่นที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล โดยมีค่าอุณหภูมิการกลั่นเริ่มต้นอยู่ที่ 94 $^{\circ}$C



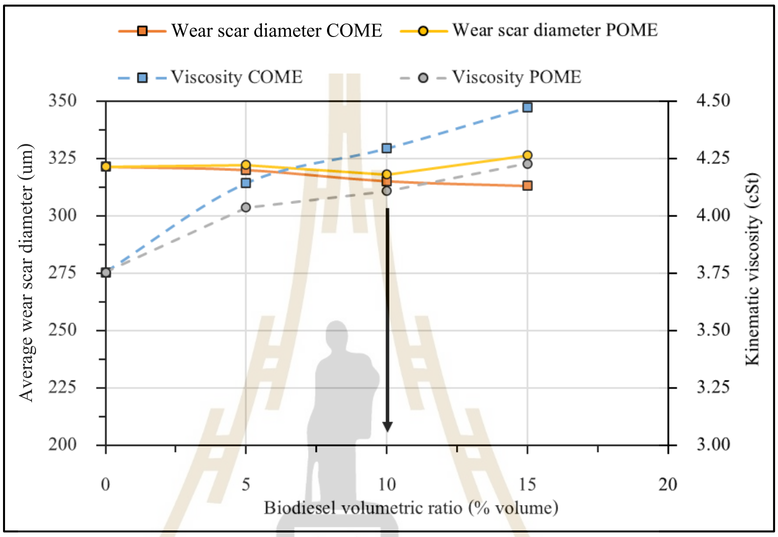

รูปที่ 4.1 อุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

**4.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง**

การปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันจากขยะพลาสติก โดยการผสมน้ำมันจากขยะพลาสติกกับน้ำมันไบโอดีเซล เพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนในน้ำมันจากขยะพลาสติกสำหรับช่วยให้การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีขึ้น อีกทั้งช่วยปรับปรุงค่าความหนืดและการหล่อลื่นของน้ำมันจากขยะพลาสติก การนำน้ำมันไบโอดีเซลละหุ่งและน้ำมันไบโอดีเซลปาล์มผสมกับน้ำมันจากขยะพลาสติก ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่ 5%, 10% และ 15% โดยปริมาตร ตามลำดับ โดยทำการตรวจวัดศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงผสม ซึ่งจะเน้นให้ความสำคัญที่คุณสมบัติการหล่อลื่นและความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิง

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การผสมน้ำมันไบโอดีเซลที่ 10% โดยปริมาตรในน้ำมันจากขยะพลาสติกเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยแผลหลังการทดสอบการหล่อลื่นที่เล็กที่สุด และค่าความหนืดนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งกำหนดโดยข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับเชื้อเพลิงดีเซลดังแสดงในรูปที่ 4.2 การทดสอบการหล่อลื่นได้ทำการทดสอบด้วยอุปกรณ์ความถี่สูงลูกสูบแท่นขุดเจาะ (High Frequency Reciprocating Rig; HFRR) และดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน EN ISO 12156 จากการทดลองเบื้องต้นพบว่า การผสมน้ำมันไบโอดีเซลที่ 10% โดยปริมาตรนั้นเพียงพอที่จะรักษาการหล่อลื่นของน้ำมันเชื้อเพลิงผสมได้ และไม่มีนัยสำคัญสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติการหล่อลื่นเมื่ออัตราส่วนผสมของไบโอดีเซล

ในน้ำมันจากขยะพลาสติกเกินกว่าที่อัตราส่วนนี้ ดังนั้นการผสมทั้งน้ำมันไบโอดีเซลละหุ่ง 10% โดยปริมาตร หรือน้ำมันไบโอดีเซลปาล์ม 10% โดยปริมาตร กับน้ำมันจากยะพลาสติกที่ 90% โดยปริมาตร จึงเป็นอัตราส่วนผสมที่เลือกใช้สำหรับการทดสอบต่อไปในเครื่องยนต์ เพื่อศึกษาผลกระทบเกี่ยวกับสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และการปลดปล่อยมลพิษไอเสียของการเติมน้ำมันไบโอดีเซลในน้ำมันจากขยะพลาสติก




รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหล่อลื่นและความหนืดของการผสมน้ำมันไบโอดีเซล

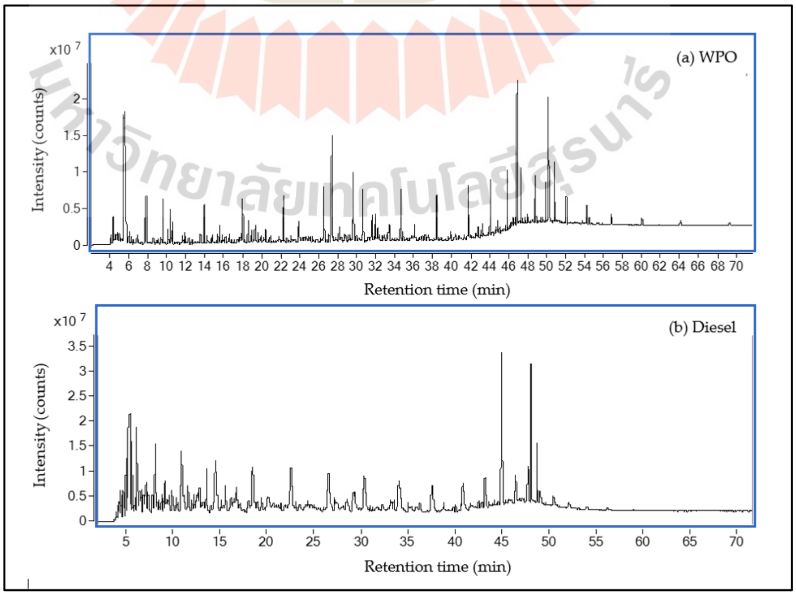
เมื่อทำการศึกษาและทดสอบเพื่อหาปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ ในน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันละหุ่ง สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งยืนยันว่ากรดไขมันที่มีอยู่มากที่สุดในน้ำมันละหุ่งคือ กรดริโนซิลิก (Ricinoleic acid) ซึ่งมีอยู่ประมาณ 85% โดยน้ำหนักของปริมาณกรดไขมันทั้งหมด ในขณะที่องค์ประกอบหลักของน้ำมันปาล์มเป็นกรดปาลมิติก (Palmitic acid) ประมาณ 46% และกรดโอเลอิก (Oleic acid) 37% ของน้ำหนักกรดปาลมิติกเป็นกรดไขมันที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในผัก สัตว์ และเป็นองค์ประกอบหลักของไขมันนมมนุษย์ นอกจากนี้กรดโอเลอิคยังเป็นองค์ประกอบสำคัญของน้ำมันและไขมันหลายชนิด

น้ำมันจากขยะพลาสติกที่ใช้ในการศึกษานี้สกัดจากขยะพลาสติกผสม ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยเครื่อง GC-MS โดยใช้แก๊สโครมาโตกราฟรุ่น Agilent 7890A ควบคู่ไปกับแมสสเปกโตรมิเตอร์รุ่น Agilent 7000B ผลการวิเคราะห์ GC-MS ของน้ำมันจากขยะพลาสติกและน้ำมันดีเซลแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งบอกถึงสารที่

เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญที่มีอยู่ในน้ำมันจากขยะพลาสติกและปริมาณของสารแต่ละชนิดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์พื้นที่ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ ในน้ำมันปาล์มและน้ำมันละหุ่ง

| **กรดไขมัน** | | **เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก** | |
|---|---|---|---|
| | | **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 |




รูปที่ 4.3 โครมาโทรแกรมของน้ำมันจากขยะพลาสติกและน้ำมันดีเซล

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันจากขยะพลาสติกและน้ำมันดีเซลด้วย GC-MS

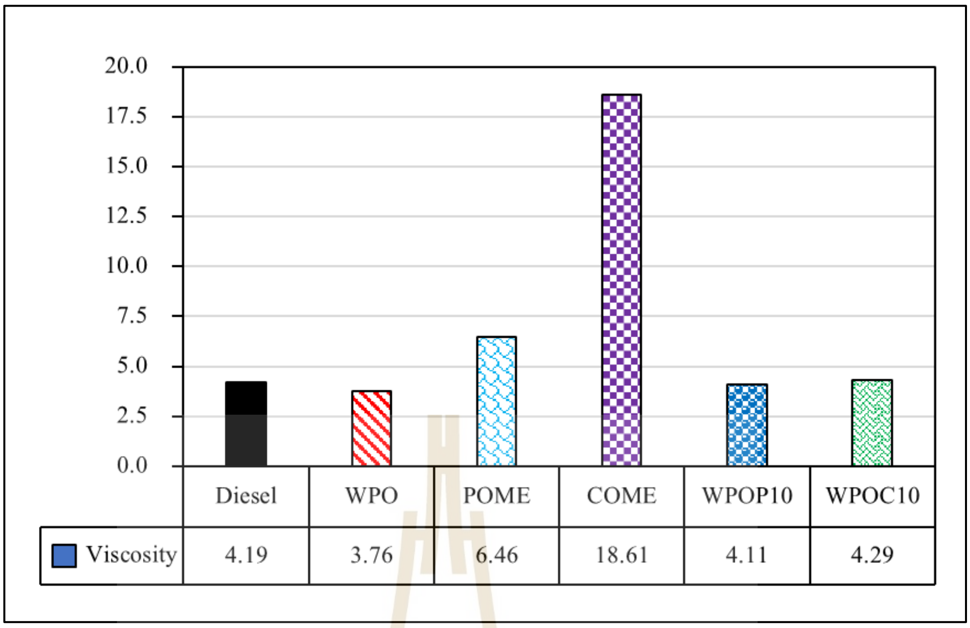
| ปริมาณคาร์บอน | เปอร์เซนต์พื้นที่ | |
|---|---|---|
| | WPO | Diesel |
| $C_4$–$C_{11}$ | 12.85 | 17.56 |
| $C_{12}$–$C_{20}$ | 74.39 | 73.28 |
| $>C_{20}$ | 12.76 | 9.16 |

น้ำมันจากขยะพลาสติกประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนที่แตกต่างกัน ซึ่งหากแยกตามความหนักเบาตั้งแต่อะตอมคาร์บอนต่ำสุด ($C_4$) จนถึงอะตอมคาร์บอนสูงสุด ($> C_{20}$) สามารถแบ่งออกได้เป็นสามกลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 ($C_4$ - $C_{11}$) เป็นตัวแทนของส่วนที่เบาหรือน้ำมันเบนซินและน้ำมันเบนซินทั่วไปประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนระหว่างอะตอมคาร์บอน 5 - 9 กลุ่มที่ 2 ($C_{12}$ - $C_{20}$) เป็นตัวแทนของส่วนที่หนักปานกลางหรือน้ำมันดีเซล โดยมีสัดส่วนอะตอมคาร์บอน $C_{16}$-$C_{20}$ (Wathakit, K. al et, 2019) ตารางที่ 4.2 แสดงผลของการเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันเชื้อเพลิงพบว่า มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันระหว่างน้ำมันจากขยะพลาสติกและน้ำมันดีเซล เนื่องจากน้ำมันจากขยะพลาสติกและน้ำมันดีเซลมีสัดส่วนอะตอมคาร์บอนมากที่สุดในช่วง $C_{12}$-$C_{20}$ ที่ 74.39% และ 73.28% ตามลำดับ

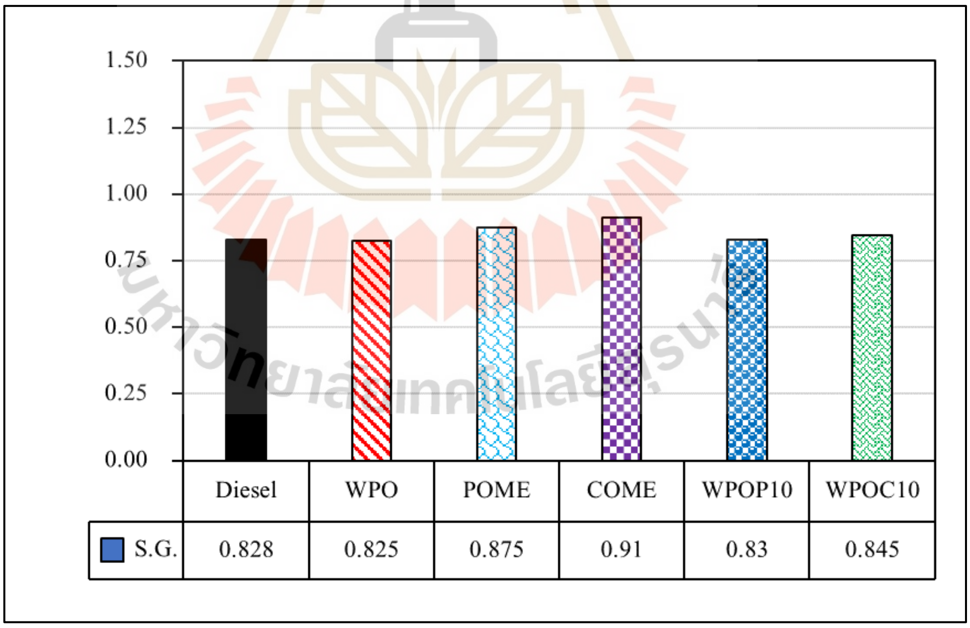
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ

| คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง | Diesel | WPO | POME | COME | WPOP10 | WPOC10 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ความหนืดจลนศาสตร์ ณ อุณหภูมิ 40 °C (cSt) | 4.19 | 3.76 | 6.46 | 18.61 | 4.11 | 4.29 |
| ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6 °C | 0.828 | 0.825 | 0.875 | 0.910 | 0.830 | 0.845 |
| ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15.6 ºC (kg/m$^3$) | 827 | 824 | 874 | 909 | 829 | 844 |
| จุดวาบไฟ (°C) | 68 | 41 | 96 | 108 | 45 | 48 |
| ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (MJ/kg) | 42.45 | 40.58 | 36.79 | 37.95 | 39.18 | 39.64 |
| ดัชนีซีเทน | 60.2 | 60 | 48.7 | 39.4 | 59.6 | 54.5 |

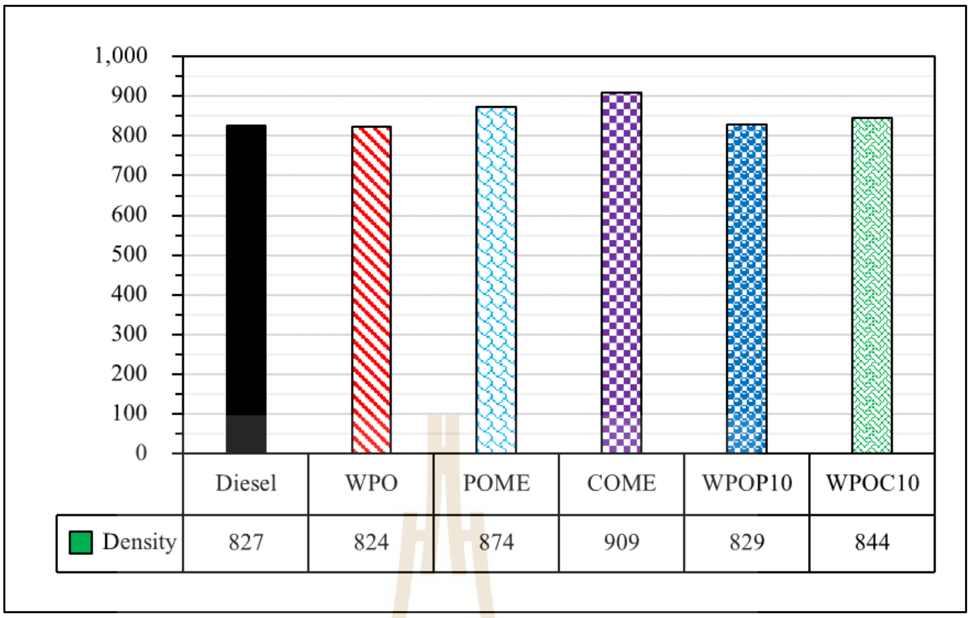
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



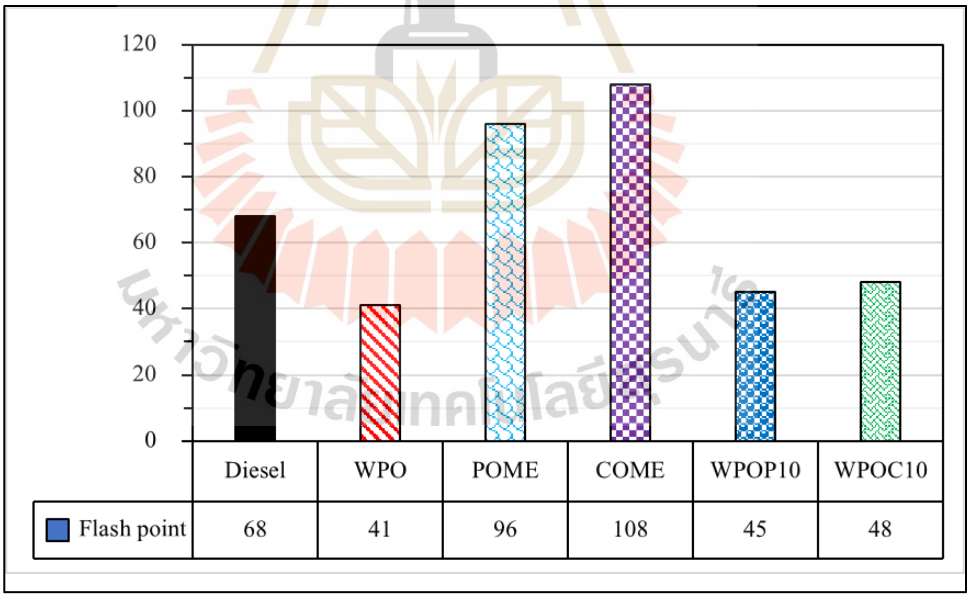

รูปที่ 4.4 ความหนืดจลนศาสตร์ของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ



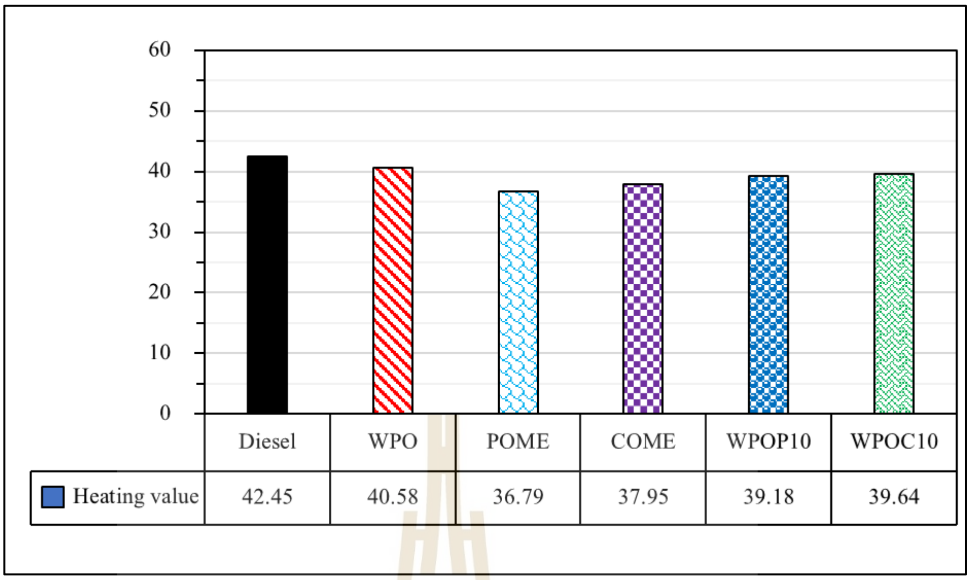

รูปที่ 4.5 ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ



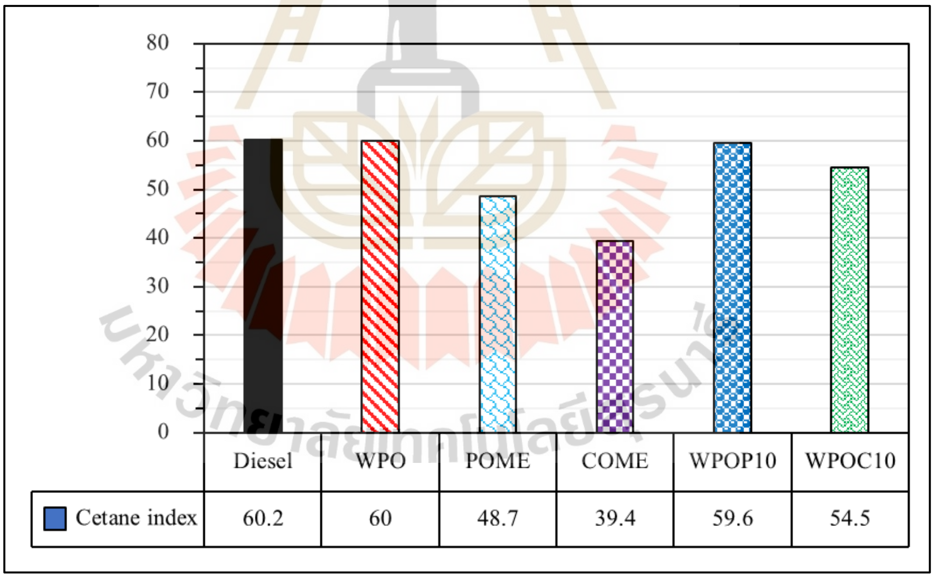

รูปที่ 4.6 ความหนาแน่นของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ




รูปที่ 4.7 จุดวาบไฟของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ




รูปที่ 4.8 ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ




รูปที่ 4.9 ดัชนีซีเทนของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ

การตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบภายใต้ข้อกำหนดมาตรฐานที่ผ่านการรับรองของสมาคมการทดสอบและวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials, ASTM) ซึ่งทำการทดสอบกับน้ำมันตัวอย่างทั้ง

6 ชนิด ได้แก่ น้ำมันดีเซล (Diesel) น้ำมันจากขยะพลาสติก (WPO) น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่ง (COME) น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม (POME) น้ำมันจากขยะพลาสติกผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งที่ 10% โดยปริมาตร (WPOC10) และน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่ 10% โดยปริมาตร (WPOP10) จากผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 -4.9 พบว่า น้ำมันจากขยะพลาสติกมีค่าความหนืดจลนศาสตร์ ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น จุดวาบไฟ และค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ทั้งนี้ค่าดัชนีซีเทนของน้ำมันจากขยะพลาสติกและน้ำมันดีเซลมีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งและน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มพบว่า น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งมีค่าความหนืดจลนศาสตร์ ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น จุดวาบไฟ และค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงกว่าน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม ยกเว้นค่าดัชนีซีเทนที่มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม นอกจากนี้การผสมไบโอดีเซลในน้ำมันจากขยะพลาสติกยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันจากขยะพลาสติกให้ดีขึ้น เช่น จุดวาบไฟ เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีความสำคัญต่อสมรรถนะและการปลดปล่อยมลพิษไอเสียจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการหล่อลื่นและความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิงพบว่า การผสมน้ำมันไบโอดีเซลที่ 10% โดยปริมาตร เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงน้ำมันจากขยะพลาสติก และเมื่อนำน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งและน้ำมันปาล์มพบว่า ช่วยปรับปรุงคุณภาพทางเชื้อเพลิงของน้ำมันจากขยะพลาสติกให้ดีขึ้น และความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะของน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมไบโอดีเซลสูงกว่าน้ำมันดีเซลและจุดวาบไฟต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ในขณะที่ค่าความร้อนเชื้อเพลิง ความหนืด และดัชนีซีเทนมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

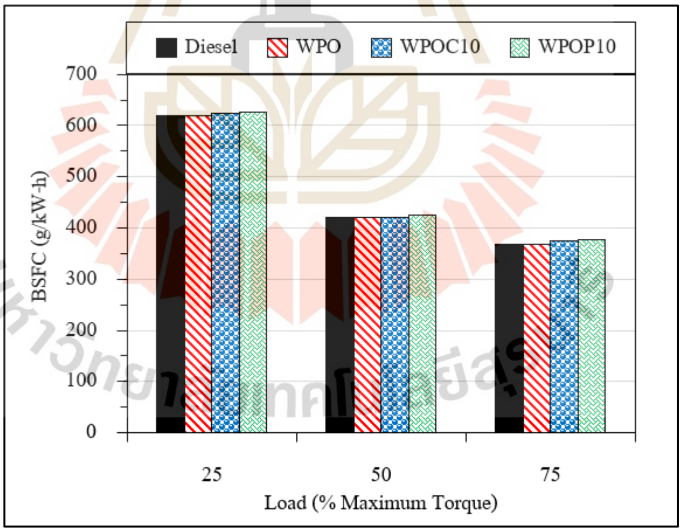
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บทที่ 5
# การทดสอบสมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย ของเครื่องยนต์ดีเซล

## 5.1 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์โดยการใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งที่ 10% โดยปริมาตร (WPOC10) และน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมน้ำมันปาล์มที่ 10% โดยปริมาตร (WPOP10) เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลคือ ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) โดยวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังนี้

### 5.1.1 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก



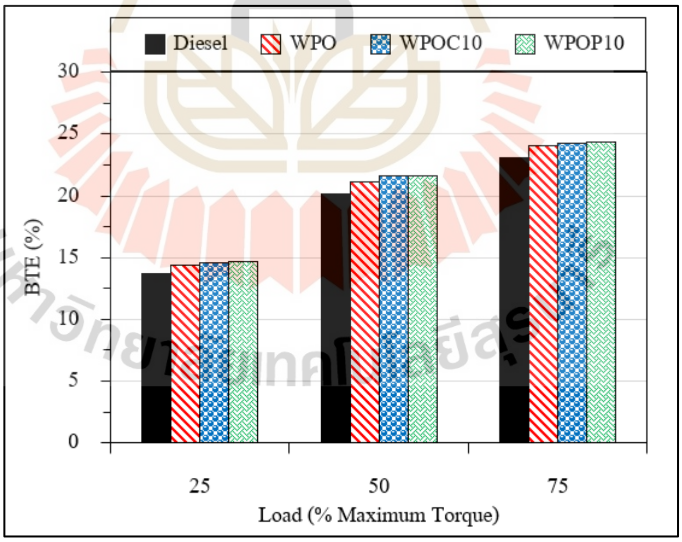

รูปที่ 5.1 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่ภาระงานต่าง ๆ

สำหรับการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกผสมไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงได้ผลการทดสอบความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค (BSFC) ของเครื่องยนต์ดังรูปที่ 5.1 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกถูกวัดเป็นอัตราการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิง

โดยมวลต่อกำลังเบรกหนึ่งหน่วยที่ผลิตออกมาได้จากเครื่องยนต์ภายในระยะเวลาหนึ่งหน่วย จากรูปแสดงให้เห็นว่า BSFC ของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบทั้ง 4 ชนิด ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงภาระงานเครื่องยนต์พบว่า BSFC จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มภาระงานให้กับเครื่องยนต์ โดยการเพิ่มขึ้นของภาระงานของเครื่องยนต์ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกและอุณหภูมิของไอเสียเพิ่มขึ้นขณะเดียวกันก็จะลดความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกได้ในเวลาเดียวกัน (Shirneshan et al., 2013; Kumar et al., 2013)

เมื่อพิจารณา BSFC ของน้ำมันจากขยะพลาสติกเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลพบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ภาระงานที่ทำการทดสอบ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาน้ำมันเชื้อเพลิงผสมทั้ง 2 ชนิด พบว่า BSFC มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกภาระงานเนื่องจากน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่ง (WPOC10) และน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมน้ำมันปาล์ม (WPOP10) มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลและน้ำมันจากขยะพลาสติก (Shirneshan et al., 2013; Tarabet et al., 2011; Adaileh et al., 2012; Yusop et al., 2018) ดังนั้นจำเป็นต้องใช้ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่มากขึ้น เพื่อให้ได้กำลังของเครื่องยนต์ที่ภาระงานเดียวกัน

### 5.1.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก



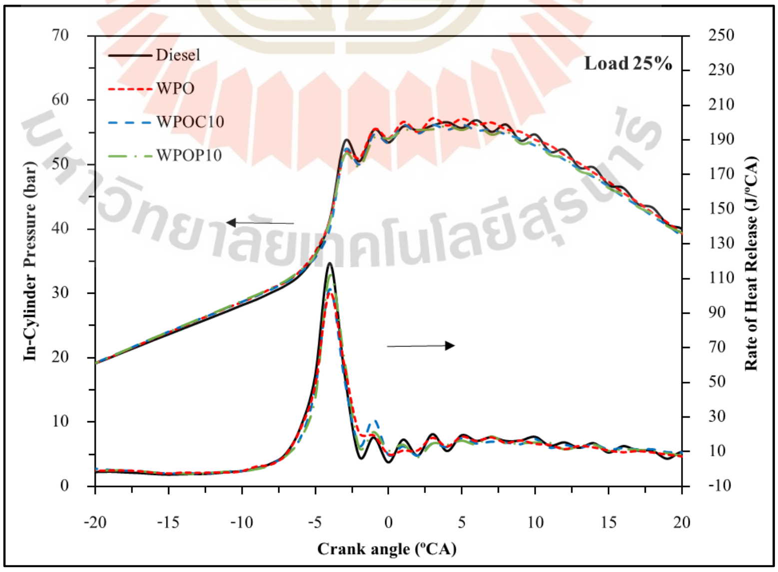

รูปที่ 5.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกที่ภาระงานต่าง ๆ

จากรูปที่ 5.2 แสดงค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) ของเครื่องยนต์ที่ภาระงานต่าง ๆ ซึ่งเป็นค่าที่บอกให้ทราบถึงความสามารถในการทำงานของเครื่องยนต์นั้นว่าสามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนที่ได้รับจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงได้ดีเพียงใด จากผล

การทดสอบจะเห็นได้ว่า BTE ของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบทั้ง 4 ชนิด มีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มภาระงานให้กับเครื่องยนต์ และยังพบว่าน้ำมันจากขยะพลาสติกมีค่า BTE ที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลในทุกภาระงานที่ทำการทดสอบ (Sharma et al., 2015; Semakula et al., 2019) ทั้งนี้เมื่อพิจารณา BTE ของน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมน้ำมันไบโอดีเซล การผสมน้ำมันไบโอดีเซลมีแนวโน้มที่จะปรับปรุงการเผาไหม้ของน้ำมันจากขยะพลาสติก ที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจน เนื่องจากน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมน้ำมันไบโอดีเซลทั้ง 2 ชนิด มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของกรดไขมัน (ดังตารางที่ 4.1) ทำให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพมากขึ้น (Yusop et al., 2018; Arato et al., 2015; Pumpuang et al., 2019; Kaimal et al., 2016; Mrityunjaya et al., 2011; Das et al., 2018) นอกจากนี้คุณสมบัติการหล่อลื่นที่เหมาะสมของไบโอดีเซลนั้นมีบทบาทในการลดแรงเสียดทานจนถึงระดับที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกเพิ่มขึ้นจากน้ำมันจากขยะพลาสติก (Ramadhas et al., 2005; Sukjit et al., 2014)

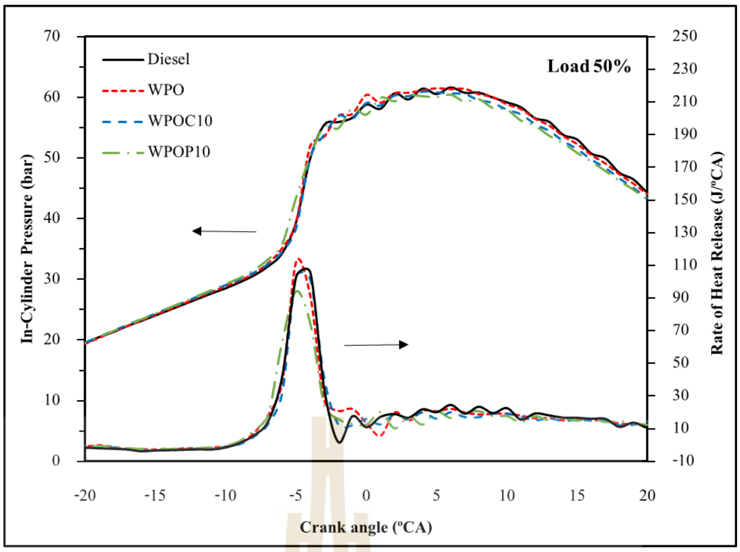
## 5.2 คุณลักษณะการเผาไหม้

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้โดยการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบทั้ง 4 ชนิด ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ความดันในกระบอกสูบ และอัตราการปลดปล่อยความร้อน โดยสามารถวิเคราะห์ผลการทดสอบได้ดังนี้

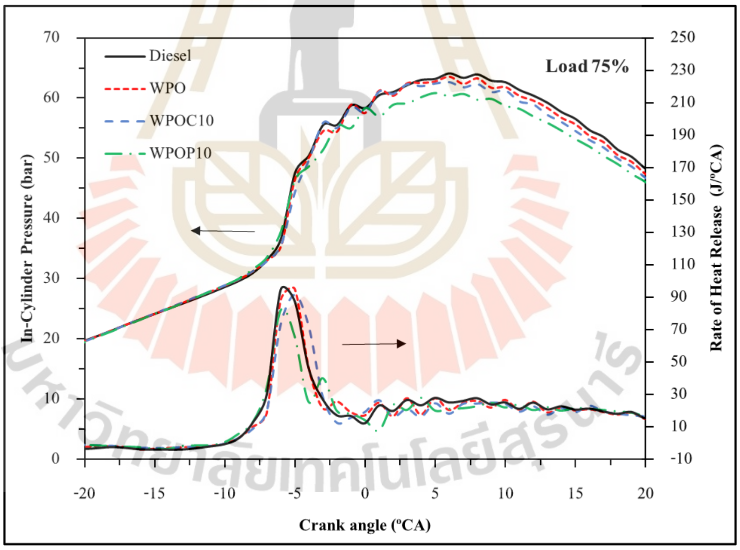



รูปที่ 5.3 คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ภาระงาน 25% ของแรงบิดสูงสุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี




รูปที่ 5.4 คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ภาระงาน 50% ของแรงบิดสูงสุด




รูปที่ 5.5 คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ภาระงาน 75% ของแรงบิดสูงสุด

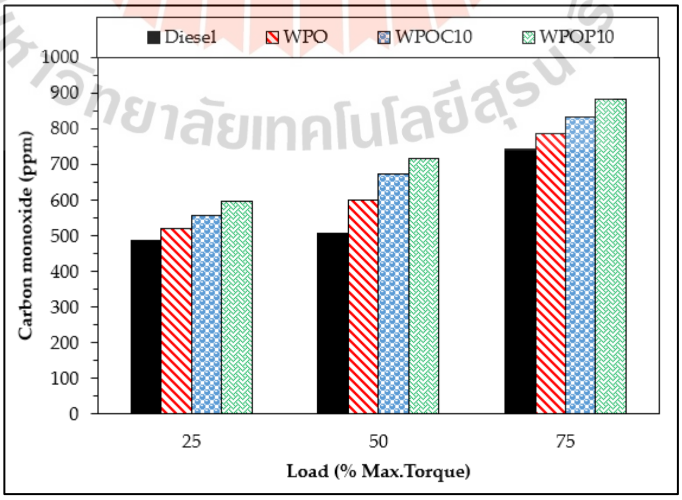
คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบที่ภาระงานต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.3 – 5.5 พบว่า การเผาไหม้ของน้ำมันจากขยะพลาสติกคล้ายกับน้ำมันดีเซลสำหรับการทดสอบทุก ๆ ภาระงานของเครื่องยนต์ และการผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งในน้ำมันจากขยะพลาสติกทำให้เกิดความล่าช้าในการเริ่มต้นของการเผาไหม้มากกว่าการผสม

น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม สาเหตุที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้จากค่าดัชนีซีเทนของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งที่มีค่าต่ำกว่าน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม นอกจากนี้ความหนืดที่สูงขึ้นของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงความล่าช้าในกระบวนการเผาไหม้ เนื่องจากทำให้ยากต่อการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงให้เป็นละอองฝอยและคุณภาพของการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงไม่ดี (Sukjit et al., 2014; Panwar et al., 2010) เมื่อพิจารณาถึงอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดพบว่า มีพีคสูงขึ้นสำหรับน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งเมื่อเทียบกับน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม การสะสมของปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงในระยะเวลาช่วงล่าช้าในการจุดระเบิดที่ยาวกว่าส่งผลให้พีคของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ผสมกันก่อนแล้วสูงขึ้น ซึ่งถูกนำมาใช้ในการประเมินพีคของอัตราการปล่อยความร้อนที่สูงขึ้นจากการเผาไหม้ของน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันจากขยะพลาสติกผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม (Sukjit et al., 2017)

## 5.3 การปลดปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์

การตรวจวัดมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียสำหรับการตรวจวัดปริมาณการปลดปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ ซึ่งประกอบไปด้วย ออกไซด์ของไนโตรเจน ($NO_X$) ไฮโดรคาร์บอน (HC) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และควันดำ (Smoke) โดยสามารถอธิบายและวิเคราะห์ผลการตรวจวัดได้ดังนี้

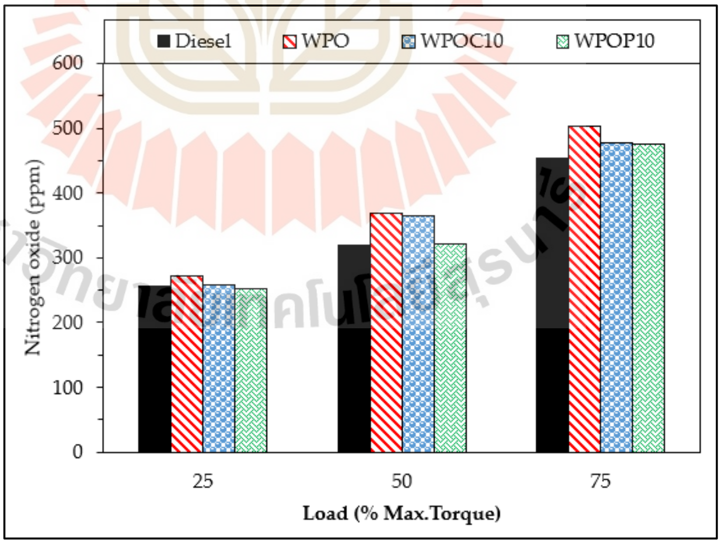
### 5.3.1 คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)




รูปที่ 5.6 คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ภาระงานต่าง ๆ

จากรูปที่ 5.6 แสดงปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) โดยการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนที่ไม่เพียงพอและขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง โดยทั่วไปแล้วเครื่องยนต์จะทำงานที่ส่วนผสมบาง ดังนั้น ปริมาณ CO ควรจะมีปริมาณที่น้อย (Mani et al., 2009) โดยพบว่าการผสมของน้ำมันจากขยะพลาสติกกับน้ำมันไบโอดีเซลทำให้เกิดผลเสียในการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เนื่องจากความหนืดที่สูงขึ้นและค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ต่ำลง ส่งผลให้อุณหภูมิการเผาไหม้ลดลง เนื่องจากการกระจายตัวเป็นละอองฝอยของน้ำมันเชื้อเพลิงได้ไม่ดีทำให้การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันไบโอดีเซลทั้งสองชนิดพบว่าการผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งในน้ำมันจากขยะพลาสติกทำให้การปล่อย CO ต่ำกว่าน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม แม้ว่าน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งจะมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันไบโอดีเซลน้ำมันปาล์ม แต่อย่างไรก็ตามจากองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งที่มีออกซิเจนช่วยปรับปรุงคุณภาพของการเผาไหม้และสามารถชดเชยด้วยผลของความหนืดที่สูงขึ้น ซึ่งเมื่อผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งในน้ำมันจากขยะพลาสติกจะทำให้การปล่อย CO ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการเติมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม

### 5.3.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน ($NO_X$)

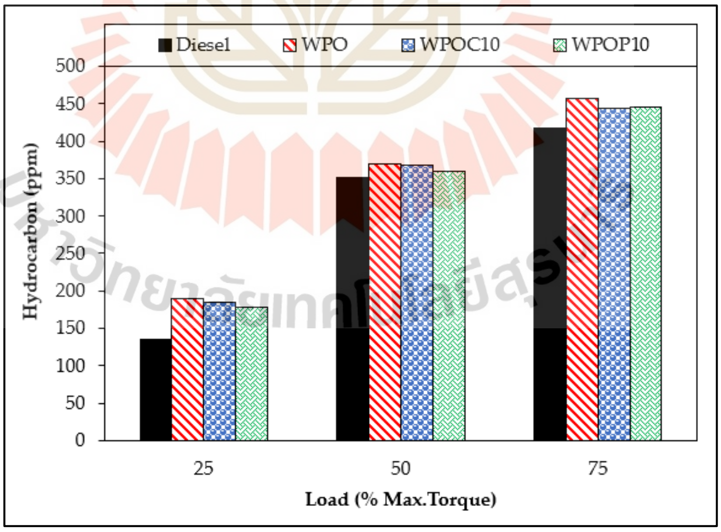



รูปที่ 5.7 ออกไซด์ของไนโตรเจนที่ภาระงานต่าง ๆ

จากรูปที่ 5.7 แสดงปริมาณการปลดปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจน ($NO_X$) ที่ภาระงานต่าง ๆ ซึ่ง $NO_X$ เป็นมลพิษไอเสียที่เกิดจากการรวมตัวของไนตริกออกไซด์ (NO) และ

ไนโตรเจนไดออกไซด์ ($NO_2$) ที่เกิดขึ้นจากการออกซิเดชั่นของไนโตรเจนในอากาศระหว่างการเผาไหม้ของอากาศและน้ำมันเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ (Kumar et al., 2013) โดยจะเห็นได้ว่าปริมาณการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้นตามภาระงานของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้นและระดับการปลดปล่อย $NO_X$ ของน้ำมันจากขยะพลาสติกสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล เมื่อเปรียบเทียบน้ำมันจากขยะพลาสติกและน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซล พบว่า มีการปลดปล่อย $NO_X$ ที่ต่ำกว่าเมื่อผสมน้ำมันไบโอดีเซล การลดลงของพีคการปลดปล่อยความร้อนในช่วงของการเผาไหม้ที่ผสมกันก่อนแล้วนั้น เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของน้ำมันจากขยะพลาสติกน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งมีแนวโน้มที่ลดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเผาไหม้และไม่ก่อให้เกิด $NO_X$ ผลของการผสมน้ำมันไบโอดีเซลนั้นคล้ายคลึงกับการใช้น้ำมันดีเซลและทำให้ $NO_X$ ลดลง ซึ่งพบในการศึกษาของ Pumpuang et al., 2019 ได้ใช้น้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลละหุ่งเอทิลเอสเตอร์ เมื่อพิจารณาการผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งและน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม พบว่าน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งมีการปล่อย $NO_X$ สูงกว่าน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม และความล่าช้าในการจุดระเบิดนานขึ้นเนื่องจากค่าซีเทนที่ต่ำ โดยเกิดจากการผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งทำให้เกิดอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงขึ้น

### 5.3.3 ไฮโดรคาร์บอน (HC)

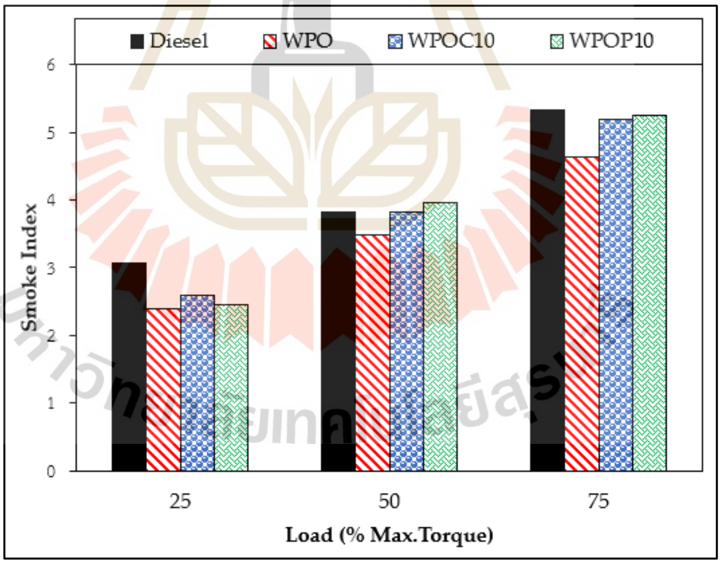



รูปที่ 5.8 ไฮโดรคาร์บอนที่ภาระงานต่าง ๆ

จากรูปที่ 5.8 แสดงการปริมาณการปลดปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) ที่ภาระงานต่าง ๆ ซึ่ง HC เป็นองค์ประกอบของน้ำมันเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ โดยสังเกตเห็นได้ว่า

การปล่อย HC ของน้ำมันจากขยะพลาสติกสูงกว่าน้ำมันดีเซลในทุกภาระงาน อย่างไรก็ตามการผสมน้ำมันไบโอดีเซลช่วยลดการปลดปล่อย HC (Niculescu et al., 2019) โดยน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งจะมีปริมาณออกซิเจนสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม ซึ่งด้วยปัจจัยดังกล่าวนี้คาดว่าจะส่งเสริมการปล่อย HC ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม แต่ในทางตรงกันข้ามผลของความหนืดสูงของน้ำมันละหุ่งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มปริมาณการปล่อย HC และสามารถขัดขวางการลดการปล่อย HC ที่เป็นประโยชน์เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่สูงขึ้น (Sukjit et al., 2018) ผลกระทบเหล่านี้เห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ภาระงานต่ำ ซึ่งอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ไม่สูงพอที่จะระเหยเชื้อเพลิงทั้งหมดที่ฉีดเข้าไป ดังนั้นน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ผสมน้ำมันไบโอดีเซลละหุ่งจึงให้ไฮโดรคาร์บอนสูงเมื่อเทียบกับน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและเมื่อเพิ่มภาระงานของเครื่องยนต์จะส่งผลให้ปริมาณการปล่อย HC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

**5.3.4 ควันดำ (Smoke)**




รูปที่ 5.9 ควันดำที่ภาระงานต่าง ๆ

จากรูปที่ 5.9 แสดงให้เห็นถึงการปล่อยควันดำ (Smoke) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบพบว่า การเผาไหม้ของน้ำมันจากขยะพลาสติกมีผลอย่างชัดเจนปล่อยควันดำต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลในทุกภาระงาน สาเหตุมาจากน้ำมันจากขยะพลาสติก

มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของเขม่าคาร์บอน (Mani et al., 2009) นอกจากนี้การผสมน้ำมันไบโอดีเซลในน้ำมันจากขยะพลาสติกมีแนวโน้มที่ส่งผลให้เกิดการปล่อยควันดำเพิ่มขึ้น โดยเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่สภาวะงานสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งและน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มพบว่าน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งปล่อยควันดำต่ำกว่าน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม ปัจจัยหลักสองประการที่มีผลกระทบต่อการปล่อยฝุ่นละอองซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับการปล่อยควันดำ อย่างแรกคือ ความหนืดที่สูงขึ้นของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งทำให้การฉีดเชื้อเพลิงเป็นละอองฝอยได้ยาก ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการปล่อยควันดำนั้นสูงขึ้น ประการที่สองคือ ปริมาณออกซิเจนในน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งและกลุ่มไฮดรอกซิลที่เป็นของกรดริซิโนเลอิก เนื่องจากเป็นกรดไขมันปฐมภูมิของน้ำมันละหุ่งสามารถเพิ่มคุณภาพของการเผาไหม้ทำให้เกิดการปล่อยควันดำน้อยลง (Sukjit et al., 2013)

## 5.4 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้น้ำมันไบโอดีเซลในน้ำมันจากขยะพลาสติกที่มีต่อเครื่องยนต์ทั้งสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และการปล่อยมลพิษไอเสีย ซึ่งใช้น้ำมันจากขยะพลาสติกที่ใช้นั้นเป็นน้ำมันที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการกลั่น ส่วนน้ำมันไบโอดีเซลทั้งสองประเภทที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมกับน้ำมันจากขยะพลาสติกคือ น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งและน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม ซึ่งผลการทดสอบที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อผสมน้ำมันไบโอดีเซลในน้ำมันจากขยะพลาสติก

2) การผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มทำให้เกิดความล่าช้าในการเริ่มต้นของการเผาไหม้ส่งผลให้อัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดมีค่ามากขึ้น

3) การผสมน้ำมันไบโอดีเซลทำให้การปลดปล่อยมลพิษไฮโดรคาร์บอนและไนโตรเจนออกไซด์นั้นลดลง ในขณะที่ปริมาณการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์และควันดำนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น

5) เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบของน้ำมันไบโอดีเซลทั้งสองชนิดพบว่าการผสมน้ำมันละหุ่งในน้ำมันจากขยะพลาสติกจะทำให้การปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์และควันดำลดลง ในทางตรงกันข้ามกับการปลดปล่อยไฮโดรคาร์บอนและไนโตรเจนออกไซด์จะให้ค่าสูงขึ้นเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ภาระงานสูง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

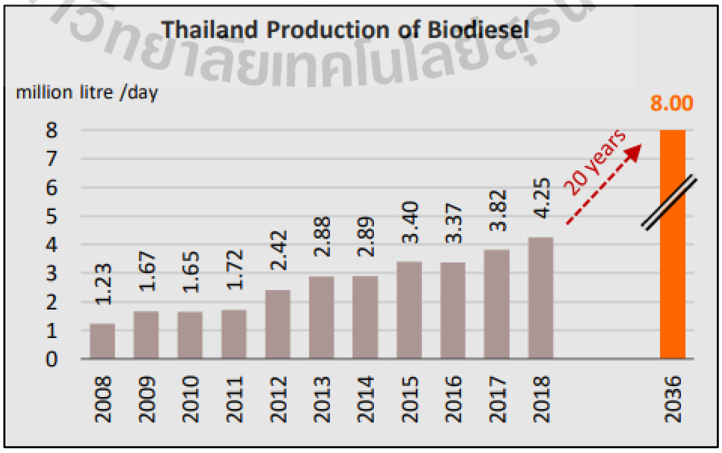
6) สำหรับทิศทางการวิจัยในอนาคตควรศึกษาถึงการดัดแปลงเครื่องยนต์ด้านต่าง ๆ เช่น รูปทรงของลูกสูบ และความดันในการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น ตัวแปรเหล่านี้สามารถนำมาพิจารณาเพื่อใช้พัฒนางานต่อไปอีกได้ เป็นการหาทางลดปริมาณการปล่อยมลพิษไอเสียที่ใช้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นส่วนผสมในน้ำมันจากขยะพลาสติก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บทที่ 6
# ผลการประเมินต้นทุนการผลิต

## 6.1 นโยบายภาครัฐ

จากสถานการณ์การขาดแคลนพลังงานในปัจจุบันส่งผลให้พลังงานทดแทนมีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนและผลักดันให้ภาครัฐและเอกชน ตระหนักถึงสถานการณ์โลกที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น การพัฒนาพลังงานทดแทนจึงเป็นส่วนหนึ่งสำหรับการกำหนดนโยบายพลังงานที่จำเป็นต้องบูรณาการร่วมกับแผนพลังงานอื่น ๆ เพื่อให้การสอดคล้องกับการจัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561- 2580 (Alternative Energy Development Plan: AEDP2018) ปีพ.ศ. 2562 ซึ่งกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงานปรับปรุงแผนพัฒนาฯ ใหม่โดยมุ่งเน้นการลดการใช้ไบโอดีเซล เพื่อให้สอดรับกับแผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าระยะยาวปี 2561 - 2580 (PDP) โดยมุ่งเน้นการเพิ่มอัตราส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนเกือบทุกประเภท โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ ชีวมวล และขยะ ในขณะที่ปรับลดการใช้พลังงานทดแทนประเภทเชื้อเพลิงชีวภาพโดยเน้นเอทานอล และไบโอดีเซล ซึ่งผลมาจากภาคขนส่งในปัจจุบันเน้นระบบรถไฟฟ้าสูงขึ้น จากแผนดังกล่าวจะสามารถลดการผลิตไบโอดีเซลจาก 14 ล้านลิตรต่อวันเป็น 8 ล้านลิตรต่อวันในปี พ.ศ. 2580 (ชัยวัช โชวเจริญสุข, 2563)




รูปที่ 6.1 การผลิตไบโอดีเซลของประเทศไทย (ชัยวัช โชวเจริญสุข, 2563)

**6.1.1 แผนพัฒนาปาล์มน้ำมันของไทย**

แผนปฏิรูปปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์มทั้งระบบปี พ.ศ. 2560 - 2579 โดยสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (สศก.) และกระทรวงเกษตรและสหกรณ์การเกษตร มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1) เพิ่มอัตราผลผลิตจากปาล์มน้ำมัน ต่อไร่ไม่ต่ำกว่า 10% โดยการขยายพื้นที่พร้อมทั้งปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตและการแปรรูปเพื่อให้ได้อัตราน้ำมัน 22 - 23% โดยให้สอดคล้องกับความเพียงพอและความต้องการบริโภคในอนาคต

2) เพิ่มอุปสงค์ในประเทศ ซึ่งมุ่งเน้นการใช้น้ำมันปาล์มในอัตราที่สูงขึ้นสำหรับการบริโภคโดยเฉลี่ย 3% ต่อปี และส่งเสริมผลักดันการใช้น้ำมันปาล์มเป็นพลังงานทดแทน โดยรักษาระดับการส่งออกน้ำมันปาล์มที่ 3 - 7 แสนตันต่อปี

**6.1.2 มาตรการเชิงนโยบายของรัฐ**

มาตรการเชิงนโยบายของรัฐที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์ม ปี พ.ศ. 2561 - 2562

1) การปรับสมดุลน้ำมันปาล์มภายในประเทศ โดยการส่งเสริมให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตรับซื้อ น้ำมันปาล์มดิบสำหรับใช้ผลิตไฟฟ้าในช่วงที่อุปทานส่วนเกินของปาล์มน้ำมันสูง

2) มาตรฐานโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม กำหนดอัตราการสกัดน้ำมันขั้นต่ำที่โรงสกัดน้ำมันปาล์มต้องผลิต โดยกำหนดจากกระทรวงอุตสาหกรรมซึ่งประกาศในราชกิจจานุเบกษาเมื่อ 23 เมษายน พ.ศ. 2562 บังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 22 มิถุนายน พ.ศ. 2562

3) ส่งเสริมการใช้น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว โดยกำหนดมาตรฐานการใช้น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว B7, B10 และ B20 และคุณลักษณะรถที่เหมาะสมกับการใช้น้ำมันแต่ละประเภท ซึ่งกำหนดโดยกรมธุรกิจพลังงาน ซึ่งมีมติจากคณะรัฐมนตรีให้เร่งรัดการใช้น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว B10 เป็นเกรดมาตรฐานตั้งแต่ 1 มกราคม พ.ศ. 2563

4) โครงการประกันรายได้แก่เกษตรกรสวนปาล์มน้ำมัน 27 สิงหาคม พ.ศ. 2562 มติจากคณะรัฐมนตรีอนุมัติจ่ายส่วนต่างระหว่างราคาประกันและราคาอ้างอิงของ ปาล์มน้ำมันให้แก่เกษตรกรไม่เกิน 25 ไร่/ครัวเรือน (กรณีราคาตลาดต่ำกว่า) โดยราคาประกันอยู่ที่ 4 บาท/กิโลกรัม สำหรับเปอร์เซ็นต์น้ำมันที่ 18%

จากแผนนโยบาย/มาตรการของรัฐผู้วิจัยมีความเห็นว่าต้องเพิ่มมาตรการที่ส่งเสริมและสนับสนุนเฉพาะกลุ่ม เพื่อให้เกิดการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือก (น้ำมันขยะพลาสติก 90% + น้ำมันไบโอดีเซล10%) เพิ่มขึ้น โดยจัดมาตรการฝึกอบรมให้ความรู้เรื่องคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกทดแทนการใช้น้ำมันดีเซล และข้อดีของเชื้อเพลิงทางเลือก อีกทั้งยังต้อง

สนับสนุนโรงงานผลิตเชื้อเพลิงทางเลือกให้สามารถมีปริมาณการผลิตที่เพียงพอต่อความต้องการ และควบคุมคุณภาพให้สามารถผ่านคุณสมบัติตามที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด

## 6.2 การปลูกพืชพลังงาน

### 6.2.1 การปลูกละหุ่งของไทย

ละหุ่งเป็นพืชน้ำมันที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่ง ซึ่งน้ำมันละหุ่งมีคุณสมบัติพิเศษที่ดีกว่าน้ำมันชนิดอื่น คือ มีความเหนียว หนืด ไม่แห้งง่าย โดยแหล่งเพาะปลูกที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกละหุ่งคือ พื้นที่ราบ พื้นที่ราบเชิงเขา หรือที่ดอนที่มีการระบายน้ำที่ดี เพราะละหุ่งไม่ทนต่อน้ำขังเป็นเวลานาน ข้อดีของละหุ่งในการเพาะปลูกคือสารมารถเพาะปลูกได้ดีในพื้นที่ดินเกือบทุกประเภท ยกเว้นดินเค็ม เป็นพืชที่ทนแล้ง ไม่ชอบร่มเงา ระยะที่ละหุ่งต้องการน้ำคือช่วงแรกของการเพาะปลูก

ละหุ่งสามารถเพาะปลูกได้ในพื้นที่เกือบทั้งประเทศของไทย โดยมีแหล่งเพาะปลูกที่สำคัญอยู่ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลางและภาคเหนือ จังหวัดที่เพาะปลูกละหุ่งที่สำคัญได่แก่ กาญจนบุรี นครราชสีมา ลำปาง น่าน พะเยา สระบุรี ลพบุรี เป็นต้น

1. สายพันธุ์ที่นิยมเพาะปลูก

สายพันธุ์ที่เหมาะสมในการเพาะปลูก คือ พันธุ์ TCO 205 เพราะให้ผลผลิตต่อไร่และปริมาณน้ำมันสูงมีอายุการเก็บเกี่ยวสั้นกว่าสาพันธุ์อื่น ส่วนพันธุ์ลูกผสมอุบล 90 เป็นพันธุ์แนะนำที่ได้รับการรับรอง วันที่ 25 ตุลาคม 2533 โดยกรมวิชาการเกษตร

ตารางที่ 6.1 สายพันธุ์ของละหุ่ง

| ชนิด | ชื่อสายพันธุ์ | ผลผลิต (กก./ไร่) | อายุการเก็บเกี่ยว (วัน) | ปริมาณน้ำมัน |
|---|---|---|---|---|
| พันธุ์อายุสั้น | H22 | 200- 300 | 150-160 | 50-52% |
| | อุบล 90 | 199 | 120 | |
| | TCO 205 | 200-300 | 100-120 | |
| พันธุ์อายุยาว | TCO 101 | 150-200 | > 150 | 46-48% |

ที่มา : สำนักส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตร และเรวัต เลิศฤทัยโยธิน, 2541

2. ระยะเวลาในการเพาะปลูก

การเพาะปลูกละหุ่งในเวลาที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลผลิตต่อไร่ดีและปราศจากศัตรูพืชที่จะทำลายพื้นที่เพาะปลูกเสียหาย การเพาะปลูกละหุ่งในช่วงเวลาที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะของสานพันธุ์ที่ใช้เพาะปลูก ซึ่งละหุ่งมีฤดูกาลเพาะปลูกที่เหมาะสม 2 ช่วง คือ

(1) สายพันธุ์อายุสั้น เป็นพันุธ์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ หรือนำมาปรับปรุงสายพันธุ์และคัดเลือกพันธุ์ในประเทศ มีอายุเก็บเกี่ยวประมาณ 120-150 วัน ช่วงที่ควรเพาะปลูกละหุ่งคือช่วงปลายเดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคม ถ้าอยู่ในพื้นที่ที่มีการชลประทานที่ดีสามารถเพาะปลูกได้ในช่วงเดือนธันวาคมถึงมกราคม ต้นหลังปลูกจะมีความสูงประมาณ 1-2 เมตร ให้ผลผลิตต่อไรสูง ผลฝักไม่แตกเมื่อผลแก่หรือแตกเพียงเล็กน้อย

(2) สายพันธุ์อายุยาว มีอายุเก็บเกี่ยว 150 วันขึ้นไป ช่วงที่ควรเพาะปลูกละหุ่งคือช่วงเดือนเมษายนถึงมิถุนายน หากอยู่ในพื้นที่ที่มีฝนตกหนักหรือช่วงปลายฤดูฝนในพื้นที่ภาคเหนือและกลาง จะทำให้เกิดปัญหาโรคช่อดอกละหุ่งเน่าเสียได้ จึงควรเลื่อนเวลาสำหรับการเพาะปลูกเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดจากฝนตกหนักในช่วงของการเก็บเกี่ยวมาเป็นในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคม ซึ่งทำให้ละหุ่งออกดอกในช่วงเดือนธันวาคมถึงมกราคมของปีถัดไป ซึ่งเป็นช่วงหมดฝนจะทำให้ละหุ่งสามารถผสมพันธุ์ได้ติดดีขึ้น ลำต้นมีลักษณะสูงใหญ่แตกกิ่งก้าน ฝักแตกง่าย สามารถไว้ตอเพื่อเก็บเกี่ยวได้นานถึง 3 ปี

3. สถานการณ์การเพาะปลูกละหุ่งในปัจจุบัน

ละหุ่งเป็นพืชไรน้ำมันที่ไม่สามารถใช้บริโภคได้โดยตรงแต่ที่มีประโยชน์มากมายในเชิงอุตสาหกรรม มีการนำละหุ่งไปใช้เป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ใช้ในการผลิตพลาสติก ขี้ผึ้ง จาระบี สี ยาถ่าย หมึกพิมพ์ ใยสังเคราะห์ ผงซักฟอก เครื่องสำอาง ไนลอน น้ำมันละหุ่งใช้เป็นสารปะกอบในยาได้หลังจากผ่านกรรมวิธีทำลายสารพิษ ใช้กากละหุ่งมาเลี้ยงสัตว์ได้ ซึ่งน้ำมันละหุ่งที่สกัดได้มีอยู่ไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ของภาคอุตสาหกรรมในประเทศ ทำให้ต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศปีละหลายล้านบาทและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี แหล่งตลาดละหุ่งที่สำคัญ ได้แก่ ญี่ปุ่น ออสเตรเลีย สหรัฐอเมริกา อินเดีย จีน มาเลเซีย บราซิล และเกาหลี

ปัจจุบันการเพาะปลูกละหุ่งมีแนวโน้มลดน้อยลงทุกปี เนื่องจากปัญหาในการเพาะปลูกที่สำคัญคือ เรื่องพันธุ์ที่เกษตรกรปลูก ผลผลิตยังอยู่ในระดับต่ำและปัญหาแมลงศัตรูพืชระบาดรุนแรง เกษตรกรไม่นิยมปลูกเป็นแปลงใหญ่โดยมากจะปลูกตามริมรั้ว หัวไร่ปลายนา จึงทำให้ขาดการดูแลรักษาที่ดีส่งผลให้ผลผลิตที่ออกมายังน้อยอยู่ ดังนั้นการเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของละหุ่งให้เหมาะสมจึงเป็นทางแก้ปัญหาที่สามารถดำเนินการได้โดยใช้การจัดการ

กระบวนการผลิตทางธรรมชาติที่เหมาะสมและยั่งยืน ทำให้มีความปลอดภัยต่อเกษตรกรและสิ่งแวดล้อม เพื่อให้ได้รับผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่าที่จะนำไปปฏิบัติ

แนวทางการพัฒนาการเพาะปลูก คือ จัดการอบรมให้ความรู้เรื่องการผลิต การเลือกใช้พันธุ์ที่เหมาะสมในการเพาะปลูก เช่น พันธุ์ TCO 205 การดูแลรักษา การป้องกันโรคที่สำคัญในการเพาะปลูก ส่งเสริมให้มีการสร้างเครือข่ายในการเพาะปลูกทั้งการผลิตและการตลาด ส่งเสริมการใช้เครื่องจักรแทนการใช้แรงงานคนในการเก็บเกี่ยวผลผลิต รวมทั้งสร้างเครือข่ายกับเอกชนให้สามารถเพาะปลูกในลักษณะแบบครบวงจร โดยมีการรับประกันราคาผลผลิตเพื่อสร้างความมั่นใจกับเกษตรกรในการเพาะปลูก

**6.2.2 การปลูกปาล์มน้ำมันของไทย**

ในปัจจุบันปาล์มน้ำมันคือพืชที่มีศักยภาพสูงสุดสำหรับการผลิตน้ำมันต่อพื้นที่ คุณสมบัติสามารถเจริญเติบโตได้แม้เกิดแม้จะเกิดภัยภัยธรรมชาติหากเทียบกับพืชอายุสั้น ซึ่งการปลูกหนึ่งครั้งมีอายุการเก็บเกี่ยวผลผลิตนานถึง 20 ปี พื้นที่ปลูกที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง ละติจูดที่ 20 องศาเหนือ-ใต้ พื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันส่วนใหญ่คือประเทศในแถบเอเชีย ตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ อินโดนีเซีย มาเลเซีย และ ไทย ซึ่งน้ำมันปาล์มมีส่วนแบ่งตลาดน้ำมันพืช และสัตว์ร้อยละ 48 ของตลาดน้ำมันโลก

ภาคใต้ปลูกปาล์มน้ำมัน 14 จังหวัด พื้นที่ที่ให้ผลมากที่สุด คือ จังหวัดสุราษฎร์ธานี ซึ่งมีพื้นที่ 950,542 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 29 ของพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันในภาคใต้ อัตราการปลูกปลูกสูงสุดในอำเภอพระแสง อำเภอท่าชนะ อำเภอพุนพิน อำเภอชัยบุรี และอำเภอกาญจนดิษฐ์ รองลงมาได้แก่ จังหวัดกระบี่และจังหวัดชุมพร พื้นที่ให้ผล 930,272 และ 726,960 ไร่ ตามลำดับคิดเป็นร้อยละ 28 และ 22 ของพื้นที่ปลูก ในจังหวัดกระบี่พื้นที่ที่ ปลูกปาล์มน้ำมันสูงสุด ได้แก่ เขตอำเภอเขาพนม อำเภออ่าวลึก อำเภอปลายพระยา และอำเภอคลองท่อม และในจังหวัดชุมพร ปลูกในเขตอำเภอท่าแซะ อำเภอปะทิว และอำเภอละแม (กรมวิชาการเกษตร, 2563)

การผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยนิยมใช้น้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันสบู่ดำ น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันเรพซีด น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันละหุ่ง เป็นต้น โดยอ้างอิงจากตารางที่ 6.2 แสดงให้เห็นว่า ไบโอดีเซลมีอัตราการผลิตสูงสุดมาจากปาล์ม เพราะให้ปริมาณน้ำมันต่อไร่สูง สำหรับละหุ่งก็สามารถผลิตและแปรรูปเป็นน้ำมันไบโอดีเซลได้ แต่ไม่เป็นที่นิยมเพราะส่วนใหญ่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมยาเป็นหลัก

ตารางที่ 6.2 ศักยภาพการผลิตน้ำมันของพืชน้ำมันชนิดต่าง ๆ

| ชนิดของพืช | ปริมาณการผลิตน้ำมัน (กก./ไร่) |
|---|---|
| ปาล์มน้ำมัน (น้ำมันปาล์มดิบ) | 512 |
| ปาล์มน้ำมัน (น้ำมันเมล็ดใน) | 73 |
| เรพสีด (Rape seed) | 89 |
| ทานตะวัน | 81 |
| มะพร้าว | 54 |
| ถั่วเหลือง | 52 |
| ถั่วลิสง | 51 |

ที่มา : โอลีน, 2558

ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบปริมาณการผลิตน้ำมันละหุ่งและน้ำมันปาล์มในประเทศไทย

| การผลิตน้ำมัน | ละหุ่ง | ปาล์ม |
|---|---|---|
| พื้นที่เก็บเกี่ยว | 47,619 ไร่ | 4.77 ล้านไร่ |
| ผลผลิต | 6,000 ตัน | 13.51 ล้านตัน |
| ผลผลิตต่อไร่ | 126 กก. | 2.83 ตัน |
| ผลผลิตน้ำมัน | 56.7 กก.ต่อไร่ | 772.38 กก.ต่อไร่ |

ที่มา : สำนักส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร, 2562; วรรัตน์ เกียรติธนาวิทย์, 2525

จากตารางที่ 6.3 หากเปรียบเทียบปริมาณการผลิตน้ำมันละหุ่งและน้ำมันปาล์มในประเทศไทย จะเห็นได้ว่า เกษตรกรนิยมปลูกปาล์มน้ำมันซึ่งตรงกับพื้นที่ส่วนใหญ่ของภาคใต้ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะปลูกปาล์มเนื่องจากมีการกระจายของน้ำฝนอย่างสม่ำเสมอ และปาล์มยังเป็นพืชที่มีศักยภาพในการให้น้ำมันสูงเมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่น ๆ โดยปาล์มจะให้น้ำมันปริมาณมากประมาณ 772.38 กิโลกรัมต่อไร่ ในขณะพื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตของละหุ่งมีแนวโน้มลดลงทุกปีเนื่องจากปัญหาเรื่องพันธุ์ที่เกษตรกรปลูก ผลผลิตยังอยู่ในระดับต่ำและปัญหาแมลงศัตรูพืชระบาดรุนแรง เกษตรกรไม่นิยมปลูกเป็นแปลงใหญ่โดยมากจะปลูกตามริมรั้ว หัวไร่ปลายนา จึงทำให้ขาดการดูแลรักษาที่ดี

## 6.3 ศักยภาพน้ำมันจากขยะพลาสติก

ในปี พ.ศ. 2560 กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พบว่า มีปริมาณขยะถึง 27 ล้านตัน แบ่งเป็นขยะพลาสติกถึง 2 ล้านตัน อัตราการใช้ถุงพลาสติกประมาณ 4.5 หมื่นล้านใบต่อปี หากเปรียบเทียบอัตราการใช้ถุงพลาสติกทั่วโลกมีการใช้ถุงพลาสติกสูงถึง 5 แสนล้านใบต่อปี โดยสถิติอัตราครึ่งหนึ่งเป็นลักษณะของพลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง (กรุงเทพธุรกิจ, 2562)

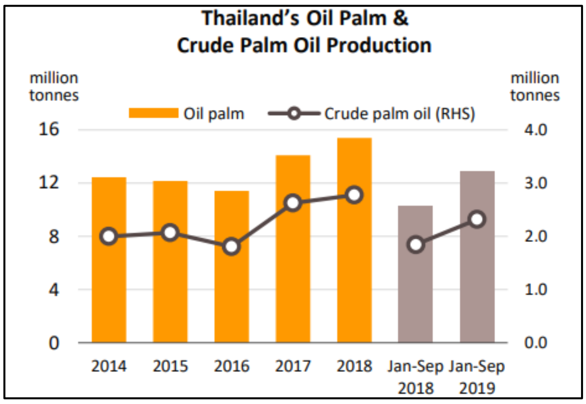
ปัจจุบันนายกรัฐมนตรี เล็งเห็นความสำคัญในเรื่องของอัตราการใช้พลาสติกที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถหลีกเลี่ยงสารพิษจากขยะพลาสติกได้ สร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมนำเสนอว่า ในช่วง 10 ปี ที่ผ่านมา ประเทศไทยใช้พลาสติกภายในประเทศประมาณปีละ 2 ล้านตัน ใช้ประโยชน์เพียงประมาณปีละ 0.5 ล้านตัน อีก 1.5 ล้านตัน เป็นลักษณะเศษขยะถุงพลาสติกปนเปื้อน เพราะฉะนั้น หน่วยงานที่เกี่ยวข้องจำเป็นต้องหาแนวทางสำหรับลดปริมาณขยะพลาสติกในปัจจุบัน ซึ่งกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จึงเสนอร่างแผนการจัดการขยะพลาสติก พ.ศ. 2561 - 2573 โดยกรมควบคุมมลพิษจัดทำร่างแผนปฏิบัติการด้านการจัดการขยะพลาสติกให้สอดคล้องกับ ยุทธศาสตร์ชาติตามมติคณะรัฐมนตรี โดยสาระสำคัญคือการบูรณาการ ระหว่างภาครัฐและภาคเอกชน เพื่อเป็นกรอบนโยบายการบริหารจัดการขยะพลาสติกในภาพรวมของประเทศ

## 6.4 ศักยภาพน้ำมันไบโอดีเซล

ปี พ.ศ. 2554 ประเทศไทยมีการใช้ไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากกระทรวงพลังงานเพิ่มสัดส่วนผสมไบโอดีเซลในเนื้อน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนร้อยละ 3 - 5

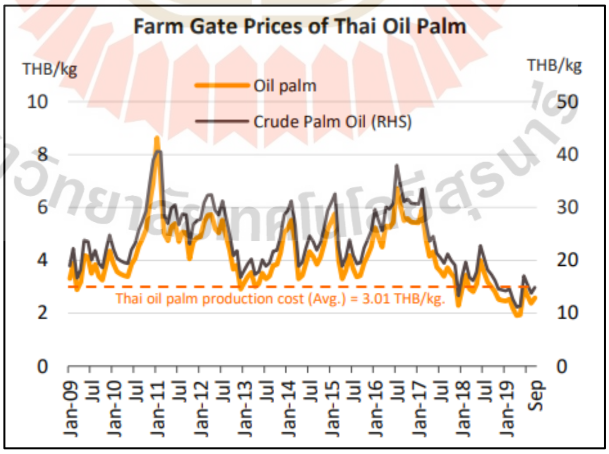
ปี พ.ศ. 2557 เพิ่มส่วนผสมไบโอดีเซลเป็นร้อยละ 7 เนื่องจากปริมาณน้ำมันปาล์มดิบมีความผันผวนทางฤดูกาล ส่งผลให้ในบางช่วงเวลามีความจำเป็นต้องลดสัดส่วนการผสมไบโอดีเซลลง เพื่อให้สมดุลกับวัตถุดิบในประเทศ สำหรับประเทศไทยมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลเพิ่ม 10 แห่ง มีกำลังการผลิตรวม 4.96 ล้านลิตรต่อวัน ซึ่งไบโอดีเซลสามารถทดแทนน้ำมันดีเซลรวม 1,054.92 ล้านลิตร หรือเทียบเท่า 2.89 ล้านลิตรต่อวัน

ปี พ.ศ. 2557 - 2559 ภัยแล้งส่งผลกระทบต่อผลผลิตของปาล์มสดในประเทศซึ่งลดระดับต่ำสุดในรอบ 8 ปี คิดเป็น 11.4 ล้านตันในปี พ.ศ. 2559 ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และส่งผลให้ราคาเฉลี่ยของน้ำมันปาล์มดิบปี พ.ศ. 2559 ราคาสูงสุดในรอบ 5 ปี 32.0 บาท/ กิโลกรัม สูงขึ้น 16.9% จาก 27.3 บาท/กิโลกรัม ปี พ.ศ. 2558 ดังแสดงในรูปที่ 6.3




รูปที่ 6.2 ผลผลิตปาล์มดิบในประเทศ (ชัยวัช โชวเจริญสุข, 2563; Office Agricultural Economics, 2019)

ปี พ.ศ. 2560 - 2561 ผลผลิตน้ำมันปาล์มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากปริมาณน้ำฝน ดังนั้นส่งผลให้ราคาน้ำมันปาล์มตกต่ำ ประกอบกับพื้นที่ปลูกเพิ่มใหม่ในช่วงปี พ.ศ. 2551 - 2555 ตามนโยบายส่งเสริมของภาครัฐ ผลผลิตปาล์มสดเพิ่มขึ้นมามากกว่า 15 ล้านตันต่อปี ในปี พ.ศ. 2560 ผลผลิตต่อไร่ 2,918 กิโลกรัม และเพิ่มในปี พ.ศ. 2561 เป็น 3,024 กิโลกรัม เฉลี่ย 2,872 กิโลกรัม ในปี พ.ศ. 2557 - 2559 ดังนั้นจึงส่งผลให้ราคาผลปาล์มสดลดลงอย่างมาก ในเดือนธันวาคมปี พ.ศ. 2560 แตะระดับต่ำสุดที่ 2.3 บาท




รูปที่ 6.3 ราคาผลผลิตปาล์มดิบในประเทศ (ชัยวัช โชวเจริญสุข, 2563; Office Agricultural Economics, 2019)

ช่วงปี พ.ศ. 2563 - 2565 อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มภาพรวมมีอัตราลดลงซึ่งผลเกิดจากการขยายพื้นที่ปลูกต่อเนื่องมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2552 และมีอัตราการกักเก็บน้ำมันปาล์มในระดับสูง

มากไปกว่านั้นปัจจัยหลักอย่างต้นทุนการผลิตมีอัตราที่สูง กว่าประเทศคู่แข่ง และการรณรงค์การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและมุ่งเน้นความสำคัญด้านสุขภาพ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงการใช้รถยนต์ดีเซลเป็นรถยนต์ไฟฟ้าซึ่งเป็นแนวโน้มที่สำคัญในอนาคต อย่างไรก็ตาม ภาครัฐส่งเสริมให้มีการใช้น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว B10 เป็นน้ำมันดีเซลเกรดมาตรฐานและการออกพระราชบัญญัติปาล์มน้ำมันจะมีส่วนช่วยบรรเทาผลกระทบได้ในระดับหนึ่ง

ตารางที่ 6.4 กำลังการผลิตและปริมาณการใช้ไบโอดีเซลภาคเชื้อเพลิงของประเทศ (ล้านลิตรต่อวัน)

| **ไบโอดีเซลภาคเชื้อเพลิง (ล้านลิตร/วัน)** | **2562** | **2563** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **ม.ค.** | **ก.พ.** | **มี.ค.** | **เม.ย.** |
| ปริมาณการผลิต | 5.05 | 5.21 | 5.52 | 4.83 | 4.55 |
| ปริมาณการใช้ | 4.90 | 5.35 | 5.43 | 5.32 | 4.74 |

ที่มา: กองนโยบายปิโตรเลียม สนพ.

ปัจจุบันพบว่า เชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีอัตราความต้องการการใช้ใกล้เคียงกับสัดส่วนการผลิต ซึ่งปัจจัยหลักก็คือต้นทุนที่สูงขึ้น ส่งผลให้การควบคุมต้นทุนได้ในอนาคตเป็นไปได้ยาก ดังนั้นผู้บริโภคจึงมีความเสี่ยงในเรื่องของต้นทุนเชื้อเพลิงที่มีความผันผวนตามสถานการณ์เศรษฐกิจ เช่นนั้นแล้ว ทางเลือกที่จะนำเชื้อเพลิงทางเลือกมา (น้ำมันขยะพลาสติก 90% + น้ำมันไบโอดีเซล 10%) ใช้ทดแทนคือทางเลือกที่หนึ่งที่เป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภค

## 6.5 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิง

### 6.5.1 ต้นทุนการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิง

โรงงานแปรรูปน้ำมันจากขยะของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสใช้ปริมาณขยะพลาสติกวันละ 5 ตัน ในการผลิตน้ำมันขยะพลาสติกประมาณ 4,000 ลิตรต่อวัน โดยได้ขยะพลาสติกจากระบบ MBT และโรงงานผลิตเชื้อเพลิงขยะพลาสติกของมหาวิทยาลัยฯ มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิต

กระบวนการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกจะทำให้ได้น้ำมันประเภทต่าง ๆ ซึ่งมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ น้ำมันดีเซล แนฟทา และน้ำมันเตา มีปริมาณโดยประมาณในปี 2562 เท่ากับ 60.76%, 35.72% และ 3.51% ตามลำดับ ทั้งนี้สามารถจำหน่ายเป็นน้ำมันประเภทต่าง ๆ คือ น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา และแนฟทา ซึ่งคิดเป็นราคาเฉลี่ยอยู่ที่ 11.60 บาทต่อลิตร และหากหักค่า

กลั่นน้ำมันออกไปลิตรละ 1.45 บาท จะทำให้ได้ราคาเท่ากับลิตรละ 10.15 บาท (ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2557) โดยราคาของน้ำมันขยะพลาสติกที่กลั่นแล้วสามารถแตกแยกโครงสร้างราคาได้ดังนี้ ราคาค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงถึง 45.49% คิดเป็น 5.28 บาทต่อลิตร รองลงมาคือ ค่าวัตถุดิบ 33.76% คิดเป็น 3.91 บาทต่อลิตร ส่วนหนึ่งมาจากค่าแรงงานและสวัสดิการ 15.76% คิดเป็น 1.83 บาทต่อลิตร ส่วนค่าใช้จ่ายในการขายและบริหารมีสัดส่วนอยู่ที่ 4.99% คิดเป็น 0.58 บาทต่อลิตร

หากพิจารณาถึงปริมาณน้ำมันขยะพลาสติกที่มีอยู่ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นที่ตั้ง พบว่าสามารถผลิตน้ำมันขยะได้มากที่สุดและคิดปริมาณน้ำมันขยะปีละ 1,387,584 ลิตร ณ โรงงานแปรรูปน้ำมันจากขยะของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จะต้องการใช้ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลปาล์มไปผสมเพื่อเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือก 10% คิดเป็นน้ำมันไบโอดีเซลปาล์มจำนวน 138,758 ลิตร ลิตรละ 22.00 บาท คิดเป็นเงิน 3,052,676 บาท น้ำมันขยะพลาสติกลิตรละ 10.15 บาท คิดเป็นเงิน 14,083,978 บาท ซึ่งจะทำให้ได้น้ำมันเชื้อเพลิงผสมระหว่างน้ำมันขยะพลาสติก 90% และน้ำมันไบโอดีเซลอีก 10% รวมเป็นปริมาณของน้ำมันผสมทั้งหมด 1,526,342 ลิตร ทำให้ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงผสมที่ได้ มีราคาอยู่ที่ลิตรละ 11.33 บาทโดยคำนวณแบบถ่วงน้ำหนักด้วยสัดส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิง แสดงดังตารางที่ 6.5

เมื่อพิจารณาถึงความเพียงพอของปริมาณปาล์มน้ำมันที่เพาะปลูกในพื้นที่ปาล์มน้ำมันจะให้น้ำมันประมาณ 772 กิโลกรัมต่อไร่ ดังตารางที่ 6.3 ซึ่งปริมาณของพื้นที่เก็บเกี่ยวปาล์มน้ำมันในเขตพื้นที่จังหวัดนครราชสีมามีตัวเลขพื้นที่เก็บเกี่ยวอยู่ที่ 5,340 ไร่ในปี พ.ศ. 2562 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562) ซึ่งเพียงพอต่อปริมาณความต้องการของน้ำมันไบโอดีเซลต่อปีจำนวน 138,758 ลิตร คิดเป็นพื้นที่เพาะปลูก 206 ไร่ ทำให้พื้นที่เพาะปลูกที่มีอยู่ในเขตจังหวัดนครราชสีมามีพื้นที่มากพอที่จะใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลปาล์มเพื่อเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับใช้ผสมกับน้ำมันขยะพลาสติกที่ผลิตได้ของมหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.5 สรุปราคาน้ำมันเชื้อเพลิงเมื่อคำนวณตามโครงสร้าง (ใช้ข้อมูลราคาวันที่ 18 ตุลาคม 2562) และเปรียบเทียบแนวทางส่งเสริมน้ำมันขยะพลาสติกผสมไบโอดีเซลปาล์ม (ศูนย์ข่าวพลังงาน, 2562; สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2562; ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2557; Gonsalves, J. B., 2006 ; คำนวณโดยผู้วิจัย)

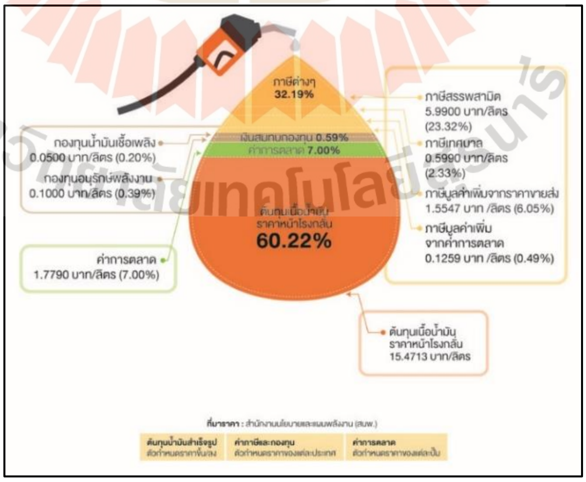
| | | ราคาต้นทุนเนื้อน้ำมัน | | | ค่าใช้จ่ายในการขาย บริหาร และค่าการตลาด | เครดิตไกลคอล | ค่าภาษีต่าง ๆ | ค่าเงินสมทบกองทุน | รวมราคาขาย |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | วัตถุดิบ | ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ค่าแรงงานและสวัสดิการ | | | | | |
| น้ำมันดีเซล | บาท/ลิตร | 15.47 | | | 1.80 | | 8.27 | 0.15 | 25.69 |
| | % | 60.22 | | | 7.00 | | 32.19 | 0.59 | 100.00 |
| น้ำมันขยะพลาสติก | บาท/ลิตร | 3.91 | 3.83 | 1.83 | 0.58 | | | | 10.15 |
| | % | 38.58 | 37.70 | 18.01 | 5.71 | | | | 100.00 |
| น้ำมันขยะพลาสติก 90% | บาท/ลิตร | 3.52 | 3.44 | 1.64 | 0.52 | | | | 9.13 |
| | % | 38.58 | 37.70 | 18.01 | 5.71 | | | | 100.00 |
| ไบโอดีเซล | $/ลิตร | 0.64 | 0.08 | 0.03 | 0.01 | 0.03 | | | 0.73 |
| | บาท/ลิตร | 19.27 | 2.41 | 0.77 | 0.44 | 0.89 | | | 22.00 |
| | % | 87.61 | 10.97 | 3.48 | 2.00 | 4.06 | | | 100.00 |
| ไบโอดีเซล 10% | $/ลิตร | 0.06 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | 0.07 |
| | บาท/ลิตร | 1.93 | 0.24 | 0.08 | 0.04 | 0.09 | | | 2.20 |
| | % | 87.61 | 10.97 | 3.48 | 2.00 | 4.06 | | | 100.00 |
| น้ำมันขยะพลาสติก 90%+ ไบโอดีเซล 10% | บาท/ลิตร | 5.45 | 3.68 | 1.72 | 0.57 | 0.09 | | | 11.33 |
| | % | 48.10 | 32.51 | 15.19 | 4.99 | 0.79 | | | 100.00 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

*โครงสร้างราคาน้ำมันเชื้อเพลิง*

ประเทศไทยเป็นผู้นำเข้าพลังงานจำนวนมากเนื่องจากความต้องการมีมากและมีน้ำมันไม่เพียงพอจึงทำให้ต้องนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศเป็นจำนวนมาก ดังนั้นรัฐบาลจึงมีนโยบายส่งเสริมการประหยัดพลังงาน ด้วยการเก็บภาษีเพื่อสนับสนุนให้ประชาชนใช้พลังงานอย่างประหยัดและนำเงินภาษีที่ได้นี้ไปใช้เป็นงบประมาณในการพัฒนาประเทศ นอกจากนี้ต้องเก็บเงินเข้ากองทุนน้ำมันเชื้อเพลิง เพื่อบรรเทาผลกระทบจากราคาน้ำมันในช่วงที่มีความผันผวนและรวบรวมเงินเข้ากองทุนอนุรักษ์พลังงานเพื่อส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน

หากเปรียบเทียบกับประเทศข้างเคียงที่มีรายได้จากการส่งออกน้ำมันเป็นจำนวนมาก อย่างเช่นประเทศมาเลเซีย รัฐบาลมาเลเซียไม่เรียกเก็บภาษีและเงินสมทบกองทุนจากน้ำมันเพราะสามารถนำรายได้จากการผลิตและส่งออกน้ำมันไปใช้เป็นงบประมาณในการพัฒนาประเทศ โดยไม่พึ่งพาเงินภาษีน้ำมัน ทั้งนี้มีการอุดหนุนราคาขายปลีกน้ำมันให้ต่ำกว่าที่เป็นจริง ฉะนั้นโครงสร้างราคาขายปลีกน้ำมันของมาเลเซียประกอบด้วยเพียง 2 ส่วนคือต้นทุนราคาน้ำมันหน้าโรงกลั่นอ้างอิงตามราคาตลาดกลางของสิงคโปร์ และค่าการตลาด นอกจากนี้เหตุที่ราคาต้นทุนเนื้อน้ำมันของไทยสูงกว่ามาเลเซีย เนื่องมาจากไทยมีค่าขนส่งสูงกว่ามาเลเซียเพราะระยะทางที่ไกลกว่าจากสิงคโปร์ถึงไทยนั้นไกลกว่าจากสิงคโปร์ถึงมาเลเซียจึงส่งผลให้ราคาต้นทุนน้ำมันสูงกว่า ทั้งนี้คุณภาพน้ำมันของไทยใช้มาตรฐานยูโร 4 ขึ้นไปซึ่งสูงกว่ามาเลเซียซึ่งใช้มาตรฐานยูโร 2 จนถึงยูโร 5 ทำให้ไทยมีต้นทุนการผลิตมากกว่า แต่ปล่อยมลพิษน้อยกว่า




รูปที่ 6.4 ราคาขายปลีกน้ำมันดีเซลของไทย (ศูนย์ข่าวพลังงาน, 2562 และสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน, 2562)

โครงสร้างราคาขายปลีกของน้ำมันดีเซล พบว่า โครงสร้างราคาขายปลีกที่แตกต่างกันตามนโยบายพลังงานของแต่ละประเทศ ซึ่งโครงสร้างราคาขายปลีกของไทยประกอบด้วย 4 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ 1) ต้นทุนราคาน้ำมันสำเร็จรูป ราคาหน้าโรงกลั่น อ้างอิงราคาตลาดกลางของสิงคโปร์ 2) ภาษี 3) เงินสมทบกองทุนต่าง ๆ 4) ค่าการตลาด

ซึ่งจากรูปที่ 6.4 ตัวอย่างราคาขายปลีกน้ำมันดีเซล เมื่อวันที่ 18 ตุลาคม 2562 พบว่า มีราคา 25.69 บาทต่อลิตร เป็นราคาต้นทุนเนื้อน้ำมันสูงถึง 60.22% คิดเป็น 15.47 บาทต่อลิตร รองลงมาคือเป็นค่าภาษีต่างๆสูงถึง 32.19% แยกออกเป็นภาษีสรรพสามิต 23.32% คิดเป็น 5.99 บาทต่อลิตร ภาษีเทศบาล 2.33% คิดเป็น 0.60 บาทต่อลิตร ภาษีมูลค่าเพิ่มจากราคาขายส่งอีก 6.05% คิดเป็น 1.55 บาทต่อลิตร และส่วนหนึ่งมาจากภาษีมูลค่าเพิ่มจากการตลาด 0.49% คิดเป็น 0.13 บาทต่อลิตร ส่วนค่าการตลาดมีสัดส่วนอยู่ที่ 7% คิดเป็น 1.80 บาทต่อลิตร นอกจากนั้นเป็นค่าเงินสมทบกองทุน 0.59% แยกเป็นเงินกองทุนน้ำมันเชื้อเพลิง 0.2% คิดเป็น 0.05 บาทต่อลิตรและกองทุนอนุรักษ์พลังงาน 0.39% คิดเป็น 0.10 บาทต่อลิตร (ศูนย์ข่าวพลังงาน, 2562; สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2562)

น้ำมันไบโอดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกที่น่าสนใจ มีคุณสมบัติที่สามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถหาวัตถุดิบในการผลิตได้ในท้องถิ่น แต่ทุกวันนี้วัตถุดิบน้ำมันพืชที่ใช้ในการผลิตนั้นมีราคาสูงส่งผลกระทบให้ราคาน้ำมันไบโอดีเซลสูงขึ้นไปด้วย

ในขณะเดียวกันไบโอดีเซลมีต้นทุนที่ใช้ในการผลิตแยกออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้ ราคาวัตถุดิบ คือน้ำมันปาล์ม เมทานอล ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งราคาไบโอดีเซลปาล์มมีสัดส่วนของราคาวัตถุดิบสูงถึง 87.61 % รองลงมาคือ ค่าใช้จ่ายในการผลิต 5.14% แยกออกเป็น ค่าไฟฟ้า 0.40% ไอน้ำ 1.80% น้ำหล่อเย็น 0.06% น้ำมันเตา 1.62% ค่าบำรุงรักษา 0.90% ค่าประกัน 0.36% และส่วนหนึ่งมาจากค่าแรงงานและสวัสดิการ 3.48% ส่วนค่าใช้จ่ายการขายและการบริหารมีสัดส่วนอยู่ที่ 2.00% นอกจากนั้นแล้วมีค่าเครดิตไกลคอลที่จะได้รับการอุดหนุนราคาเพิ่มมาอีกทำให้ราคาขายลดลง 4.06% (Gonsalves, 2006 ; คำนวณโดยผู้วิจัย)

การให้เครดิตภาษีสำหรับน้ำมันไบโอดีเซลที่จะชดเชยต้นทุนไบโอดีเซลนั้นเป็นการส่งเสริมประชาชนให้หันมาใช้พลังงานทางเลือกมากขึ้นและเป็นส่วนสำคัญในการช่วยชาติลดการพึ่งการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ ด้วยเหตุที่การผลิตไบโอดีเซลมีค่ารับประกันเครดิตภาษีต่อปริมาณน้ำมันที่ผลิต จึงเป็นการช่วยให้เกษตรกรไทยได้มีรายได้เพิ่มขึ้น เสริมสร้างความเข้มแข็งของภาคการเกษตรให้สามารถพึ่งพาตนเองได้อย่างยั่งยืนต่อไปในอนาคต

ในขณะเดียวกันน้ำมันขยะพลาสติกที่ใช้พบว่ามีราคาอยู่ที่ 10.15 บาทต่อลิตร เป็นราคาค่าวัตถุดิบสูงถึง 38.58% คิดเป็น 3.91 บาทต่อลิตร รองลงมาคือเป็นค่าใช้จ่ายในการผลิต 37.70% คิดเป็น 3.83 บาทต่อลิตร และส่วนหนึ่งมาจากค่าแรงงานและสวัสดิการ 18.01% คิดเป็น 1.83 บาทต่อลิตร ส่วนค่าใช้จ่ายในการขายและบริหารมีสัดส่วนอยู่ที่ 5.71% คิดเป็น 0.58 บาทต่อลิตร (ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2557)

**6.5.2 ต้นทุนการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงผสมจากน้ำมันขยะพลาสติกและน้ำมันไบโอดีเซล**

เนื่องจากสถานการณ์ราคาน้ำมันที่เพิ่มสูงขึ้นและมีความผันผวนอย่างมาก ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนภาคเกษตรกรรม ดังนั้นการเลือกใช้เชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทำการเกษตรได้ โดยจากการวิจัยพบว่า การใช้น้ำมันขยะพลาสติก 90% ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซล 10% มีต้นทุนเชื้อเพลิงที่น้อยกว่าน้ำมันดีเซล โดยมีการเปรียบเทียบ ดังนี้

ตารางที่ 6.6 เปรียบเทียบราคาน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกกับน้ำมันดีเซล

| ราคาเชื้อเพลิง | เชื้อเพลิงทางเลือก | | | | | น้ำมันดีเซล |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | น้ำมันขยะพลาสติก 90% (10.15 บาท/ลิตร) | น้ำมันไบโอดีเซลปาล์ม 10% (22.00 บาท/ลิตร) | น้ำมันไบโอดีเซลละหุ่ง10% (146.36 บาท/ลิตร) | น้ำมันขยะพลาสติกผสมน้ำมันไบโอดีเซลปาล์ม | น้ำมันขยะพลาสติกผสมน้ำมันไบโอดีเซลละหุ่ง | |
| บาทต่อลิตร | 9.13 | 2.20 | 14.64 | 11.33 | 23.77 | 25.69 |

หมายเหตุ: ราคาน้ำมัน ณ วันที่ 18 ตุลาคม พ.ศ. 2562

เมื่อเปรียบเทียบน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือก (น้ำมันขยะพลาสติก 90% + น้ำมันไบโอดีเซล 10%) กับน้ำมันดีเซล พบว่า สัดส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกมีราคาเชื้อเพลิงเท่ากับ 11.33 บาทต่อลิตร และเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลมีราคาเชื้อเพลิงเท่ากับ 25.69 บาทต่อลิตร โดยมีราคาส่วนต่างถึง 14.36 บาทต่อลิตร ดังนั้นผู้วิจัยคิดว่าทางเลือกนี้อาจเป็นทางเลือกที่สามารถลดต้นทุนของผู้บริโภคได้ เมื่อเทียบกับปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในปัจจุบัน ก็จะสามารถทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายอย่างเห็นได้ชัด

## 6.6 การประเมินน้ำมันเชื้อเพลิงที่ระดับภาระงานต่างๆ

การดูผลการประเมินและเปรียบเทียบในทุกมิติได้ถูกนำเสนอด้วยแผนภูมิเรดาร์ ซึ่งนำเสนอข้อมูลเป็นกราฟรูปหลายเหลี่ยมที่แสดงการเปรียบเทียบระดับของแต่ละส่วน โดยการกำหนดตำแหน่งของแต่ละแกนของกราฟ ซึ่งกำหนดค่าบนแกนนี้อาจใช้เปรียบเทียบแต่ละมิติในแต่ละภาระโหลด หน้าที่ของแผนภูมิเรดาร์ คือใช้นำเสนอเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ในแต่ละด้านของข้อมูลที่ต้องการจะแสดง นำปัจจัยต่างๆที่ต้องการของน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละตัวมาพิจารณาเพื่อเทียบกันได้

กราฟนี้จะแสดงผลการประเมินตาม Radar Chart หรือที่เรียกว่าแผนภูมิเรดาร์หรือกราฟใยแมงมุม แสดงถึงความแตกต่างของปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการพิจารณาสมรรถนะ การปล่อยมลพิษและของราคาของการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงประเภทต่าง ๆ จากข้อมูลที่แสดงใช้แกนแผนภูมิเรดาห์ในการวิเคราะห์ทั้งหมด 7 ด้าน เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลด้านต่าง ๆ พร้อมกันโดยการนำค่าคะแนนของแต่ละปัจจัยในแต่ละด้านมาทำแผนภูมิเรดาร์ เพื่อเป็นการนำข้อมูลมาสรุปภาพรวมแสดงการเปรียบเทียบ

*การแปลความของแผนภูมิเรดาร์*

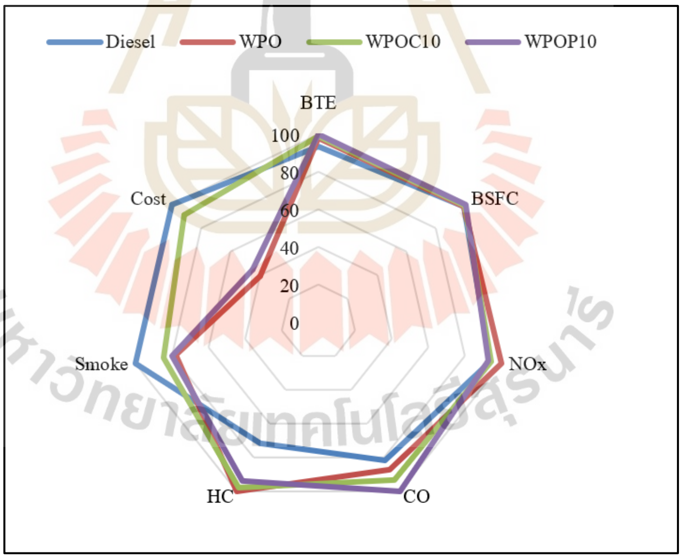
1. กราฟแสดงแผนภูมิเรดาร์ 7 เหลี่ยม แสดงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบบนเครื่องยนต์ทั้ง 7 ด้าน ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงผลของการวิเคราะห์ถึงผลในภาพรวมทั้งหมดของน้ำมันเชื้อเพลิง
2. ค่าระดับคะแนนในสเกลแต่ละแกน มีค่าตั้งแต่ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับเป็นระดับคะแนนในแต่ละด้านของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ
3. กราฟเส้นแสดงการวิเคราห์ถึงภาพรวมของการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง โดยการนำค่าคะแนนมาจากการทดสอบเครื่องยนต์
4. การแปลความหมายของแผนภูมิเรดาร์ ในแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อสมรรถนะและการปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ หากมีค่าต่ำจะทำให้สมรรถนะและการปล่อยมลพิษที่ดี ซึ่งมีอยู่หลายค่าปัจจัยที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ นั่นก็คือมิติดังต่อไปนี้ ได้แก่ BSFC (การสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก), Cost (ราคา), $NO_X$ (ไนโตรเจนออกไซด์), CO (คาร์บอนมอนนอกไซด์), HC (ไฮโดรคาร์บอน), Smoke (ควันดำ) ยกเว้นปัจจัยด้าน BTE (ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก) เป็นค่าที่บอกว่าความร้อนจากน้ำมันเชื้อเพลิงถูกเปลี่ยนเป็นกำลังเชิงกลได้ดีเพียงใด ซึ่งหากมีค่าต่ำหมายถึงทำได้ไม่ดี

ในงานวิจัยนี้ได้นำแผนภูมิเรดาร์มาใช้ในการแสดงผล ปัจจัยที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาผลการทดสอบของน้ำมันเชื้อเพลิงบนเครื่องยนต์ตามที่ได้นิยามไว้ในหัวข้อที่ 2.3 และ 2.4 โดยแบ่งปัจจัยออกเป็น 7 ปัจจัยหลัก ดังนี้

โดยในแต่ละแกนจำนำระดับของปัจจัยต่างๆที่วิเคราะห์ไว้ขั้นต้นมากำหนดค่าลงบนแกน ซึ่งแต่ละแกนมีระดับของปัจจัย

5. ผลการวิเคราะห์แผนภูมิเรดาร์ จากภาพรวมของการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ที่วิเคราะห์จากข้อมูลที่ทำการทดสอบบนเครื่องยนต์ สามารถแสดงผลเป็นแต่ละเส้นในแผนภูมิเรดาร์ในการพิจารณาประเด็นทั้ง 7 ด้าน สำหรับภาระกรรมต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบผลแสดงดังนี้

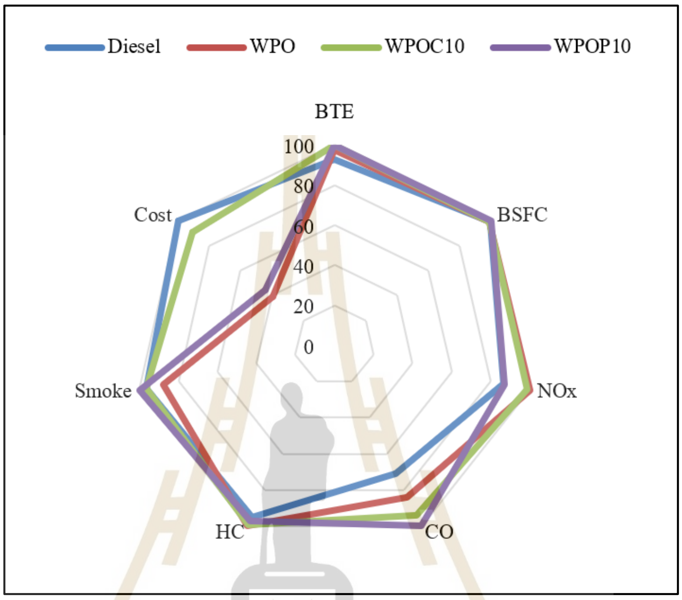
ผลการวิจัยได้สร้างตัวชี้วัดผลการทดสอบและนำเสนอเกี่ยวกับผลการพิจารณาจากปัจจัยที่ใช้เป็นตัวแปรในการวัดประสิทธิภาพเครื่องยนต์มาวิเคราะห์เพื่อนำเสนอในรูปแบบของแผนภูมิเรดาร์ (Radar Chart) แสดงระดับคะแนนเของแต่ละปัจจัยจากการประเมิน เพื่อให้ทราบถึงผลทดสอบบนเครื่องยนต์และนำไปใช้ในการพัฒนาปรับปรุงการทดสอบต่อไป




รูปที่ 6.5 เปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ ของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ที่ภาระงาน 25%

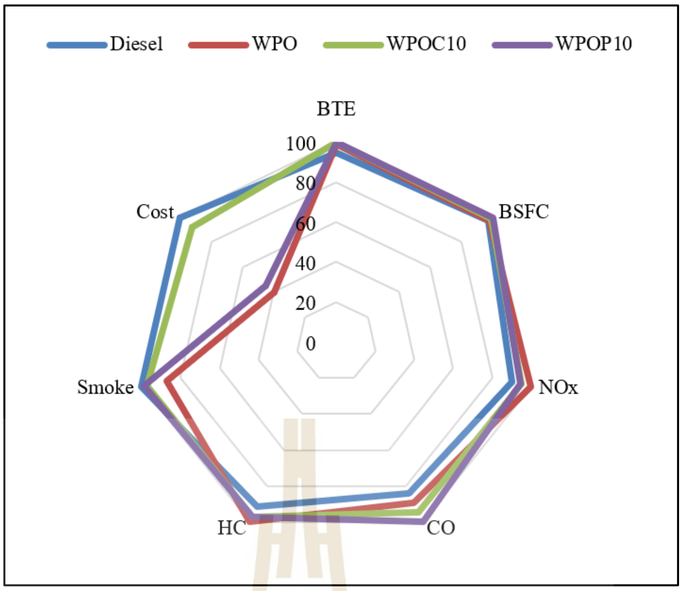
จากรูปที่ 6.5 แสดงผลการประเมินมิติต่างๆที่ได้จากการทดสอบของเครื่องยนต์ที่ภาระงาน 25% ในรูปแบบแผนภูมิเรดาร์ บ่งบอกว่าที่ภาระงาน 25% น้ำมันขยะพลาสติกผสมไบโอดีเซลปาล์มมีระดับที่ดีในปัจจัยด้านต่าง ๆ ได้แก่ ด้านราคาพบว่ามีราคาถูกกว่าน้ำมันดีเซลเป็น

อย่างมาก ด้าน BTE (ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก) ด้านการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ และการปลดปล่อยควันดำ ส่วนมิติด้านที่มีผลการประเมินไม่ดีหรือด้อยกว่ามิติด้านอื่น ๆ คือ มิติด้านการปลดปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้ผลไม่ได้เท่าที่ควร จึงควรต้องมีการปรับปรุงด้านนี้ เพื่อให้ดีขึ้นหากนำไปใช้




รูปที่ 6.6 เปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ ของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ที่ภาระงาน 50%

ขณะที่ผลลัพธ์จากภาระงาน 50% ได้ถูกแสดงในรูปแบบของแผนภูมิเรดาร์และวิเคราะห์ผลได้ ดังนี้ ซึ่งจากรูปที่ 6.6 ได้แสดงผลการเปรียบเทียบการประเมินตัวชี้วัดการทดสอบในแต่ละมิติ พบว่า น้ำมันดีเซลมีระดับดีในมิติด้านต่างๆได้แก่ มิติด้านการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอน ส่วนน้ำมันขยะพลาสติกมีมิติปัจจัยที่ดีในด้านต่าง ๆ ได้แก่ มิติด้านการปลดปล่อยควันดำ, มิติด้านการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) และมิติด้านราคาที่ถูกกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น ในขณะเดียวกันน้ำมันขยะพลาสติกผสมไบโอดีเซลปาล์มมีค่าการประมินมิติด้าน BTE (ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก) ดีที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น




รูปที่ 6.7 เปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ ของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ที่ภาระงาน 75%

จากรูปที่ 6.7 บ่งบอกว่าที่ภาระงาน 75% น้ำมันชนิดน้ำมันขยะพลาสติกผสมไบโอดีเซลปาล์มมีระดับมิติด้านประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) ดีที่สุด และพบว่าน้ำมันขยะพลาสติกมีมิติด้านการปลดปล่อยควันดำและราคาที่ดีกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น ส่วนมิติด้านการปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์นั้นน้ำมันขยะพลาสติกมีผลที่ดีกว่าน้ำมันชนิดอื่น แต่ยังไม่ดีเท่าน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ดีมิติในด้านต่าง ๆ ส่วนใหญ่พบว่า น้ำมันดีเซลมีระดับประเมินที่ดีกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่นในหลายด้าน ได้แก่ มิติด้านการปลดปล่อยมลพิษไอเสีย คือ ไนโตรเจนออกไซด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนนอกไซด์ นอกจากนั้นน้ำมันดีเซลยังมีข้อดีในด้านการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) อีกด้วย

หากมองในภาพรวมจาก Radar chart แสดงให้เห็นว่า มิติด้าน BTE และ BSFC ของน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละชนิดไม่ต่างกันมาก ส่วนในด้านอื่น ๆ เห็นได้ชัดว่าน้ำมันขยะพลาสติกและน้ำมันขยะพลาสติกที่ผสมด้วยไบโอดีเซลปาล์มมีจุดเด่นทางด้านราคา ส่วนมิติทางด้านการปล่อยมลพิษไอเสียนั้นพบว่า ที่ทุกภาระงานการปล่อยควันดำของน้ำมันขยะพลาสติกนั้นดีกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น น้ำมันดีเซลให้การปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้ดีสุด รองลงมาคือน้ำมันขยะพลาสติก น้ำมันขยะพลาสติกผสมไบโอดีเซลละหุ่งและน้ำมันขยะพลาสติกที่ผสมไบโอดีเซลปาล์ม ตามลำดับ ส่วนน้ำมันดีเซลและน้ำมันขยะพลาสติกผสมไบโอดีเซลปาล์มมีการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ที่ดีกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น อย่างไรก็ดีพบว่าการปล่อยไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละชนิดไม่แตกต่างกันมาก

## 6.7 การส่งเสริมและการพัฒนา

จากสถานการณ์ปัจจุบันผู้วิจัยเล็งเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงและผันผวนของราคาน้ำมันตามเศรษฐกิจโลก เพราะฉะนั้นการผลักดันและส่งเสริมพัฒนาการใช้เชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงแต่ราคาที่ถูกนั้นจึงเป็นทางเลือกที่ดีในปัจจุบัน ซึ่งน้ำมันขยะพลาสติกผสมน้ำมันไบโอดีเซลเป็นทางเลือกของผู้บริโภคที่จะช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายในครัวเรือนได้ ดังนั้นถ้าทั้งภาครัฐ ภาคเอกชนหรือผู้ที่มีส่วนได้ส่วนเสียร่วมมือกันและช่วยส่งเสริมพลังงานเชื้อเพลิงทางเลือกนี้จะทำให้สถานการณ์ด้านพลังงานมีความมั่นคง เกษตรกรมีรายได้เพิ่มมากขึ้นทำให้สามารถเลี้ยงตนและครอบครัวได้ ซึ่งภาครัฐจะได้รับประโยชน์คือสามารถประหยัดงบประมาณสำหรับการอุดหนุนเยียวยาภาคเกษตรกรรมของประเทศ โดยสามารถใช้มาตรการการส่งเสริม ได้แก่ ให้มีการนำน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกมาใช้เฉพาะกลุ่ม ได้แก่ ภาคเกษตรกรรม เป็นต้น สนับสนุนผู้ผลิตสำหรับการปรับปรุงคุณลักษณะของน้ำมันให้ผ่านมาตรฐาน ส่งเสริมและสนับสนุนน้ำมันขยะในชุมชน และสนับสนุนด้านการเกษตรโดยการปลูกพืชพลังงานเป็นอีกมาตรการหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเพื่อให้มีวัตถุดิบสำหรับผลิตเชื้อเพลิงทดแทน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# รายการอ้างอิง


กรมควบคุมมลพิษ. (2560). **ร่างแผนจัดการขยะพลาสติกอย่างบูรณาการ (พ.ศ.2560 - 2564)**. [ออนไลน์]. (สืบค้นเมื่อเมษายน 2562), http:/www.pcd.go.th.

กรมควบคุมมลพิษ. (2561). **รายงานสถานการณ์สถานที่กำจัดขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทยปี พ.ศ. 2561.**

กรมควบคุมมลพิษ. (2561). **รายงานสถานการณ์ขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทยปี พ.ศ. 2560**.

กรมควบคุมมลพิษ. (2560). **(ร่าง)** แผนจัดการขยะพลาสติกอย่างบูรณาการ **(พ.ศ. 2560-2564)**. สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2563, จาก http://infofile.pcd.go.th.

กรมธุรกิจพลังงาน. (2556). **ประกาศกรมธุรกิจพลังงานเรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล**. กระทรวงพลังงาน.

กรมธุรกิจพลังงาน. (2556). **ประกาศกรมธุรกิจพลังงานเรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน**. กระทรวงพลังงาน.

กรมวิชาการเกษตร. (2563). สืบค้น 6 เมษายน 2563, จาก http://www.doa.go.th.

ชัยยง ศิริพรมงคลชัย (2558). **เครื่องยนต์สันดาปภายใน** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

ชัยวัช โชวเจริญสุข.(2563). **อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม.** แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2563-65. มกราคม 2563.

ทิพย์สุภินทร์ หินซุย. (2556). การศึกษาการกำจัดขยะชุมชนเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่น. **ปริญญานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา

บัญชา คั้งตระกูล (2552). **อุณหพลศาสตร์ของเครื่องยนต์สันดาปภายใน**. กรุงเทพฯ: จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์.

วสันต์ ปินะเต และดวงกมล ดังโพนทอง (2559). การผลิตเชื้อเพลิง RDF-5 จากขยะชุมชน : กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม. **วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยราชภัฏลาปาง**, 1(9), 72-86.

รุ่งทิพย์ ชัยเดช (2557). การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันทอดใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมเมทอกไซด์. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต** มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เรวัต เลิศฤทัยโยธิน. (2541). **ละหุ่ง**, พฤกษศาสตร์พืชเศรษฐกิจ.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2562). **โครงสร้างราคาน้ำมัน**. [ออนไลน์]. (สืบค้นเมื่อกันยายน 2563), http://www.eppo.go.th.

สำนักส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร. **สถานการณ์สินค้าเกษตร สสจ**. [ออนไลน์]. (สืบค้นเมื่อสิงหาคม 2562), http://www.agriman.doae.go.th.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2562). **ผลผลิตปาล์มน้ำมันแยกตามจังหวัด ปี 2562**. [ออนไลน์]. (สืบค้นเมื่อกันยายน 2563), http://www.oae.go.th.

โอลีน. (2558). **ความสำคัญและศักยภาพของปาล์มน้ำมัน (ในการให้น้ำมัน)**. สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2563, จาก http://www.oleen.co.th/th/knowledge/interesting

สมเกียรติ หมายถมกลาง. (2017). การใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด. **ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13**. เชียงใหม่. 1226-1233.

สมเกียรติ หมายถมกลาง. (2018). สมรรถนะเครื่องยนต์และมลพิษของเชื้อเพลิงทดแทนจากกระบวนการอิมัลชั่นของน้ำมันขยะพลาสติกและเอทานอลความบริสุทธิ์ต่ำ. **ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14**. ระยอง. 762-769.

ศิริรัตน์ จิตการค้า (2551). **จากขยะสู่น้ำมัน : เทคโนโลยีผลิตพลังงานทางเลือกที่ดูแลสิ่งแวดล้อม** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. (2557). **โครงการการศึกษาต้นแบบการบริหารจัดการเชื้อเพลิงขยะพลาสติกสำหรับใช้ในการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกแบบครบวงจร**. รายงานการวิจัย. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน

ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. (2560). **ต้นแบบโรงงานแปรรูปขยะเป็นน้ำมันของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**. [ออนไลน์]. (สืบค้นเมื่อกุมภาพันธ์ 2562), http://biomass.sut.ac.th

ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. (2561). การผลิตเชื้อเพลิงขยะ. **กระบวนการผลิต RDF**. [ออนไลน์]. (สืบค้นเมื่อกุมภาพันธ์ 2562), www.biomass.sut.ac.th.

ศูนย์ข่าวพลังงาน. (2562). ENC DATA: **ทำไมราคาน้ำมันไทยไม่เท่ากับมาเลเซีย**. [ออนไลน์]. (สืบค้นเมื่อกันยายน 2563), https://www.energynewscenter.com.

วรรัตน์ เกียรติธนาวิทย์. (2525). ปัญหาในการผลิตและจำหน่ายเมล็ดละหุ่งในประเทศไทย. **ปริญญาบัญชีมหาบัณฑิต**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Adaileh, W.M., & Alqdah, K.S. (2012). Performance of diesel engine fuelled by a biodiesel extracted from a waste cocking oil. **Energy Procedia**, 18, 1317-1334.

Agarwal, A.K. (2007). Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, 33, 233-271.

Altaie, M. A. H., Janius, R. B., Rashid, U., Taufiq-Yap, Y. H., Yunus, R., Zakaria, R., & Adam, N. M. (2015). Performance and exhaust emission characteristics of direct-injection diesel engine fueled with enriched biodiesel. **Energy Conversion and Management**, 106, 365-372.

Anbarasu, A., & Karthikeyan, A. (2014). Performance and Emission Characteristics of Direct Injection Diesel Engine Running on Canola Oil / Diesel Fuel Blend. **American Journal of Engineering Research**, 3(8), 202-207.

Ambat, I., Srivastava, V., & Sillanpää, M. (2018). Recent advancement in biodiesel production methodologies using various feedstock: **A review Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 90, 356-369.

Anbarasu, A., & Karthikeyan, A. (2014). Performance and emission characteristics of direct injection diesel engine running on canola oil/diesel fuel blend. **American Journal of Engineering Research (AJER)**, 3(8), 202-207.

Arato, K., & Takashima, T. (2015). A study on reduction of heat loss by optimizing combustion chamber shape. **SAE International Journal of Engines**, 8, 596-608.

Ashraful, A.M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Fattah, I. M. R., Shahir, S. I. S.A., & Mobarak, H.M. (2014). Production and comparison of fuel properties, engine performance, and emission characteristics of biodiesel from various non-edible vegetable oils: A review. **Energy Conversion and Management**, 80, 202–228.

Demirbas, A. (2008). **Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines**: Springer.

Bahar, D., Kirti, G., Mounika, R. and Rajesham, S. (2018). Study of performance and emission characteristics of a compression ignition engine using tamarind biodiesel. **International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration**, 5(43), 134-139.

Baskar, G., & Aiswarya, R. (2016). Trends in catalytic production of biodiesel from various feedstocks. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 57, 496-504.

Bridjesh, P., & N.K, G. (2020). Effect of Diethyl Carbonate as Additive to Waste Plastic Oil on Performance and Emission of a Diesel Engine. **Oriental Journal of Chemistry**, 36, 189-194.

Chauhan, B. S., Kumar, N., & Cho, H. M. (2012). A study on the performance and emission of a diesel engine fueled with Jatropha biodiesel oil and its blends. **Energy**, 37(1), 616-622.

Chen, D., Yin, L., Wang, H., & He, P. (2014). Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. **Waste Management**, 34, 2466-2486.

Czajczyńska, D., Anguilano, L., Ghazal, H., Krzyżyńska, R., Reynolds, A. J., Spencer, N., & Jouhara, H. (2017). Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. **Thermal Science and Engineering Progress**, 3, 171-197.

Das, M., Sarkar, M., Datta, A., & Santra, A. K. (2018). An experimental study on the combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel-castor oil biodiesel blends. **Renewable Energy**, 119, 174-184.

Damodharan, D., Sathiyagnanam, A. P., Rana, D., Kumar, B. R., & 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. (2016). Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 72, 97-102.

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.

Durbin, T. D. (2008). Evaluation of the proposed new European methodology for determination of particle number emissions and its potential in California for in-use screening. **California Environmental Protection Agency, Air Resources Board, Research Division**.

Fakhrhoseini, S.M., & Dastanian, M. (2013). Predicting pyrolysis products of PE, PP, and PET using NRTL activity coefficient model. **Hindawi Publishing Corporation Journal of Chemistry**, 1-5.

Fivga, A., & Dimitriou, I. (2018). Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment. **Energy**, 149, 865-874.

Gnanasekaran, S., Saravanan, N., & Ilangkumaran, M. (2016). Influence of injection timing on performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine running on fish oil biodiesel. **Energy**, 116, 1218-1229.

Ghazali, W. N. M. W., Mamat, R., Masjuki, H. H., & Najafi, G. (2015). Effects of biodiesel from different feedstocks on engine performance and emissions: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 51, 585-602.

Gokalp, B., Buyukkaya, E., & Soyhan, H. S. (2011). Performance and emissions of a diesel tractor engine fueled with marine diesel and soybean methyl ester. **Biomass and Bioenergy**, 35(8), 3575-3583.

Gonsalves, J. B. (2006). **An Assessment of the Biofuels Industry in Thailand**.

Gopal, K. N., Pal, A., Sharma, S., Samanchi, C., Sathyanarayanan, K., & Elango, T. (2014). Investigation of emissions and combustion characteristics of a CI engine fueled with waste cooking oil methyl ester and diesel blends. **Alexandria Engineering Journal**, 53, 281-287.

Hasan, M. M., & Rahman, M. M. (2017). Performance and emission characteristics of biodiesel-diesel blend and environmental and economic impacts of biodiesel production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 74, 938-948.

Hirkude, J. B., & Padalkar, A. S. (2012). Performance and emission analysis of a compression ignition: engine operated on waste fried oil methyl esters. **Applied Energy**, 90(1), 68-72.

Hürdoğan, E., Ozalp, C., Kara, O., & Ozcanli, M. (2017). Experimental investigation on performance and emission characteristics of waste tire pyrolysis oil-diesel blends in a diesel engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, 36, 23373-23378.

John B. Heywood. (1998). **Internal Combustion Engine Fundamentals**. Singapore: McGraw- Hill.

Kaimal, V. K., & Vijayabalan, P. (2015). A detailed study of combustion characteristics of a DI diesel engine using waste plastic oil and its blends. **Energy Conversion and Management**, 105, 951-956.

Kaimal, V. K., & Vijayabalan, P. (2016). A study on synthesis of energy fuel from waste plastic and assessment of its potential as an alternative fuel for diesel engines. **Waste Management**, 51, 91-96.

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.

Kalargaris, I., Tian, G., & Gu, S. (2017). The utilization of oils produced from plastic waste at different pyrolysis temperatures in a DI diesel engine. **Energy**, 131, 179-185.

Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Jayed, M. H., & Liaquat, A. M. (2011). Emission and performance characteristics of an indirect ignition diesel engine fuelled with waste cooking oil. **Energy**, 36(1), 397-402.

Karmakar, A., Karmakar, S., Mukherjee, S. (2010). Properties of various plants and animals' feedstocks for biodiesel production. **Bioresource Technology**, 101, 7201-7210.

Khatha, W., Ekarong, S., Somkiat, M., & Jiraphon, S. (2020). Fuel Properties, Performance and Emission of Alternative Fuel from Pyrolysis of Waste Plastics. **Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**.

Kegl, B. (2006). Experimental Investigation of Optimal Timing of the Diesel Engine Injection Pump Using Biodiesel Fuel. **Energy & Fuels**, 20(4), 1460-1470.

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.

Kumar, R., Mishra, M. K., Singh, S. K., & Kumar, A. (2016). Experimental evaluation of waste plastic oil and its blends on a single cylinder diesel engine. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 30(10), 4781-4789.

Mahmudul, H. M., Hagos, F. Y., Mamat, R., Adam, A. A., Ishak, W. F. W., & Alenezi, R. (2017). Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 72, 497-509.

Mani, M., Subash, C., & Nagarajan, G. (2009). Performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine using waste plastic oil. **Applied Thermal Engineering**, 29, 2738-2744.

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, 1826-1832.

Mani, M., Nagarajan, G., & Sampath, S. (2011). Characterisation and effect of using waste plastic oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. **Energy**, 36, 212-219.

Murugan, S., Ramaswamy, M. C., & Nagarajan, G. (2008). The use of tyre pyrolysis oil in diesel engines. **Waste Management**, 28, 2743-2749.

Marcilla, A., Beltrán, M. I., & Navarro, R. (2009). Thermal and catalytic pyrolysis of polyethylene over HZSM5 and HUSY zeolites in a batch reactor under dynamic conditions. **Applied Catalysis B: Environmental**, 86, 78-86.

Mishra, V. K., & Goswami, R. (2017). A review of production, properties and advantages of biodiesel. **Biofuels**, 9(2), 273-289.

Miandad, R., Barakat, M. A., Aburiazaiza, 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.

Miranda, R., Jin, Y., Roy, C., Vasile, C. (1999). Vacuum pyrolysis of PVC kinetic study. **Polymer Degradation and Stability**, 64, 127-144.

Miskolczi, N., Bartha, L., Deák, G., Jóver, B., & Kalló D. (2004). Thermal and thermo-catalytic degradation of high-density polyethylene waste. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 72, 235-242.

Mrityunjaya, S. K. M., Ramesha, D. K., Premkumara, G., & Ranaprapareddy, N. (2011). Performance and emission characteristics of a compression ignition engine using blends of bio-oil as a fuel. **Journal of Middle European Construction and Design of Cars**, 9, 40-44.

Murillo, S., Míguez, J. L., Porteiro, J., Granada, E., & Morán, J. C. (2007). Performance and exhaust emissions in the use of biodiesel in outboard diesel engines. **Fuel**, 86, 1765-1771.

Nantha Gopal, K., Pal, A., Sharma, S., Samanchi, C., Sathyanarayanan, K., & Elango, T. (2014). Investigation of emissions and combustion characteristics of a CI engine fueled with waste cooking oil methyl ester and diesel blends. **Alexandria Engineering Journal**, 53(2), 281-287.

Niculescu, R., Clenci, A., & Iorga-Siman, V. (2019). Review on the Use of Diesel–Biodiesel–Alcohol Blends in Compression Ignition Engines. **Energies**, 12, 1194.

N.K. Giri. (2011). **Automobile Machanics** 8 ed. New Delhi: Khanna.

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, 293-303.

Ozsezen, A. N., Canakci, M., Turkcan, A., & Sayin, C. (2009). Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters. **Fuel**, 88(4), 629-636.

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.

Panwar, N. L., Shrirame, H. Y., Rathore, N. S., Jindal, S., & Kurchania, A. K. (2010). Performance evaluation of a diesel engine fueled with methyl ester of castor seed oil. **Applied Thermal Engineering**, 30, 245-249.

Pratoomyod, J., & Laohalidanond, K. (2013). Performance and Emission Evaluation of Blends of Diesel fuel with Waste Plastic Oil in a Diesel Engine. **International Journal of Engineering Science and Innovative Technology**, 2(2), 57-63.

Pumpuang, A., Maithomklang, S., Sukjit, E., Dejvajara, D., Samaiklang, P., & Sanluecha, S. (2019). Utilization of Castor oil-based Ethyl Ester Biodiesel in a Diesel Engine; No. 2019-32-0606; **SAE Technical Paper;SAE International; United States**.

Rakopoulos, C. D., Antonopoulos, K. A., Rakopoulos, D. C., Hountalas, D. T., & Giakoumis, E. G. (2006). Comparative performance and emissions study of a direct injection Diesel engine using blends of Diesel fuel with vegetable oils or bio-diesels of various origins. **Energy Conversion and Management**, 47(18), 3272-3287.

Ramadhas, A. S., Muraleedharan, C., & Jayaraj, S. (2005). Performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with methyl esters of rubber seed oil. **Renewable Energy**, 30, 1789-1800.

Rochman, C. M., Browne, M. A., Halpern, B. S., Hentschel, B. T., Hoh, E., Karapanagioti, H. K., Rios-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Mendoza, L. M., Takada, H., Teh, S., & Thompson, R. C. (2013). Policy: Classify plastic waste as hazardous. **Nature**, 494(7436), 169-170.

Sayin, C., & Canakci, M. (2009). Effects of injection timing on the engine performance and exhaust emissions of a dual-fuel diesel engine. **Energy Conversion and Management**, 50(1), 203-213.

Senthil, R., Sivakumar, E., & Silambarasan, R. (2015). Effect of di ethyl ether on the performance and emission characteristics of a diesel engine using biodiesel–eucalyptus oil blends. **RSC Advances**, 5(67), 54019-54027.

Shahabuddin, M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Mofijur, M., Hazrat, M. A., & Liaquat, A. M. (2012). Effect of Additive on Performance of C.I. Engine Fuelled with Bio Diesel. **Energy Procedia**, 14, 1624-1629.

Shirneshan, A., Almassi, M., Ghobadian, B., Borghei, A.M., & Najafi, G. (2013). Brake specific fuel consumption of diesel engine by using biodiesel from waste cooking oil. **World Sci. J**, 1, 45-52.

Singh, R. K., & Ruj, B. (2016). Time and temperature depended fuel gas generation from pyrolysis of real-world municipal plastic waste. **Fuel**, 174, 164-171.

Sukjit, E., Maithomklang, S., Trirak, N., & Klinkaew, N. (2018). Emission benefits from the use of castor oil in a compression ignition engine fuelled with diesel-ethanol blends. **International Journal of Electrical Energy**, 6, 57-63.

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, 3535-3542.

Sukjit, E., Herreros, J. M., Dearn, K., & Tsolakis, A. (2014). Improving Ethanol-Diesel Blend Through the Use of Hydroxylated Biodiesel. **SAE Technical Paper Series**.

Tarabet, L., Loubar, K., Lounici, M.S., Hanchi, S., & Tazerout, M. (2011). Experimental evaluation of performance and emissions of DI diesel engine fueled with eucalyptus biodiesel. **In Proceedings of the Internal Combustion Engines: Performance, Fuel Economy and Emissions**, London, United Kingdom, 29-30 November 2011; pp. 167-176.

Sánchez, N., Sánchez, R., Encinar, J. M., González, J. F., & Martínez, G. (2015). Complete analysis of castor oil methanolysis to obtain biodiesel. **Fuel**, 147, 95-99.

Shahabuddin, M., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Mofijur, M., & Hazrat, M.A. (2012). Effect of Additive on Performance of C.I. Engine Fuelled with Bio Diesel. **Energy Procedia**, 14, 1624-1629.

Sharuddin, S. D. A., Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., & Aroua, M. K. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. **Energy Conversion and Management**, 115, 308-326.

Sharuddin, S. D. A., Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., & 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.

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, 289-297.

Semakula, M., & Inambao, F. (2019). The Effect of Fuel Additives on Pyrorated Biodiesel Blends on the Performance of a Diesel Power Generator. **Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal**, 4(5), 88-96.

Senthil, R., Silambarasan, R., Thankachan, B., Pranesh, G. (2015). Performance and emission characteristics single cylinder engine using biodiesel. **Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences**, 55-57.

Senthilkumar, P., & Sankaranarayanan, G. (2016). Effect of Jatropha methyl ester on waste plastic oil fueled DI diesel engine. **Journal of the Energy Institute**, 89, 504-512.

Sreenivasulu1, P., & Kiran, A. V. N. S. (2017). Performance and emission characteristics of single cylinder diesel engine with safflower biodiesel blends. **International Journal of Computational Engineering Research**, 7(12), 13-19.

Thapa, S., Indrawan, N., & Bhoi, P. R. (2018). An overview on fuel properties and prospects of Jatropha biodiesel as fuel for engines. **Environmental Technology & Innovation**, 9, 210-219.

Uyumaz, A., Aydoğan, B., Solmaz, H., Yılmaz, E., YeŞim Hopa, D., Aksoy Bahtli, T., . . . Aksoy, F. (2019). Production of waste tyre oil and experimental investigation on combustion, engine performance and exhaust emissions. **Journal of the Energy Institute**, 92(5).

Venkatesan, H., Sivamani, S., Bhutoria, K., & Vora, H. H. (2018). Experimental study on combustion and performance characteristics in a DI CI engine fuelled with blends of waste plastic oil. **Alexandria Engineering Journal**, 57, 2257-2263.

Verma, A., Raghuvansi, A., Quraishi, M.A., Tirkey, J. V., & Verma, C. (2018). Engine Fuel Production from Waste plastic Pyrolysis (WPO) and Performance Evaluation in a CI engine with Diesel Blend. **Journal of Materials and Environmental Sciences**, 9(6), 1712-1721.

Willard W. Pullkrabek. (2003). **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**. New Jersey: Pearson Education Inc.

Yarrapathruni, R. H. V., Voleti, S. R., Pereddy, R. N., & Alluru, R. S. V. (2009). Jatropha oil methylester and its blends used as an alternative fuel in diesel engine. **Thermal Science**, 13(3), 207-217.

Yusop, A.F., Mamat, R., Yusaf, T., Najafi, G., Yasin, M.H.M. & Khathri, A. (2018). Analysis of particulate matter (PM) emissions in diesel engines using palm oil biodiesel blended with diesel fuel. **Energies**, 11, 1039.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# ภาคผนวก ก

# ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล (กรมธุรกิจพลังงาน, 2556)

| รายการ | ข้อกำหนด | อัตรา สูง-ต่ำ | น้ำมันดีเซล | | วิธีทดสอบ[1] |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | หมุนเร็ว | หมุนช้า | |
| 1 | ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6/15.6 ºC | ไม่ต่ำกว่า<br>และ<br>ไม่สูงกว่า | 0.810<br><br>0.870 | -<br><br>0.920 | ASTM D1298 |
| 2 | เลขซีเทน<br>หรือ<br>ดัชนีซีเทน | ไม่ต่ำกว่า<br><br>ไม่ต่ำกว่า | 50<br><br>50 | 45<br><br>45 | ASTM D613<br><br>ASTM D976 |
| 3 | จุดไหลเท (องศาเซลเซียส) | ไม่สูงกว่า | 10 | 16 | ASTM D97 |
| 4 | กำมะถัน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) | ไม่สูงกว่า | 0.005 | 1.5 | ASTM D2622 |
| 5 | ความหนืด (เซนติสโตกส์)<br>ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส<br><br><br><br>หรือ<br>ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส | <br><br>ไม่ต่ำกว่า<br>และ<br>ไม่สูงกว่า<br><br>ไม่สูงกว่า | <br><br>1.8<br><br>4.1<br><br>- | <br><br>-<br><br>8.0<br><br>6.0 | ASTM D445 |
| 6 | การกัดกร่อนแผ่นทองแดง | ไม่สูงกว่า | หมายเลข 1 | - | ASTM D130 |
| 7 | เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (กรัม/ลูกบาศก์เมตร) | ไม่สูงกว่า | 25 | - | ASTM D2274 |
| 8 | กากถ่าน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) | ไม่สูงกว่า | 0.05 | - | ASTM D189 |
| 9 | น้ำและตะกอน (ร้อยละ โดยปริมาตร) | ไม่สูงกว่า | 0.05 | 0.3 | ASTM D2709 |
| 10 | เถ้า (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) | ไม่สูงกว่า | 0.01 | 0.02 | ASTM D482 |
| 11 | จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส) | ไม่ต่ำกว่า | 52 | 52 | ASTM D 93 |

ตารางที่ ก.1 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล (กรมธุรกิจพลังงาน, 2556) (ต่อ)

| **รายการ** | **ข้อกำหนด** | **อัตรา สูง-ต่ำ** | **น้ำมันดีเซล** | | **วิธีทดสอบ**[1] |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | **หมุนเร็ว** | **หมุนช้า** | |
| 12 | การกลั่น (องศาเซลเซียส) อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตรในอัตราร้อยละ 90 | ไม่สูงกว่า | 357 | - | ASTM D86 |
| 13 | โพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | ไม่สูงกว่า | 11 | - | ASTM D2425 |
| 14 | สี<br>ชนิดของสี<br><br>ความเข้มของสี | <br>ไม่ต่ำกว่า<br>และ<br>ไม่สูงกว่า | เหลือง<br>-<br><br>4.0 | น้ำตาล<br>4.5<br><br>7.5 | ASTM D1500 |
| 15 | ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน (ร้อยละโดยปริมาตร) | ไม่ต่ำกว่า<br>และ<br>ไม่สูงกว่า | 3.5<br><br>7 | -<br><br>- | EN 14078 |
| 16 | คุณสมบัติการหล่อลื่น รอยขีดข่วน (ไมโครเมตร) | ไม่สูงกว่า | 460 | - | CEC F-06-96 |
| 17 | สารเติมแต่ง (ถ้ามี) | ให้เป็นไปตามความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน | | | |

หมายเหตุ [1] วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นเทียบได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.2 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน (กรมธุรกิจพลังงาน, 2556)

| รายการ | ข้อกำหนด | อัตราสูง-ต่ำ | | วิธีทดสอบ[1] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | เมทิลเอสเตอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | ไม่ต่ำกว่า | 96.5 | EN 14103 |
| 2 | ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) | ไม่ต่ำกว่า<br>และ<br>ไม่สูงกว่า | 860<br><br>900 | ASTM D1298 |
| 3 | ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C (เซนติสโตกส์) | ไม่ต่ำกว่า<br>และ<br>ไม่สูงกว่า | 3.5<br><br>5.0 | ASTM D445 |
| 4 | จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส) | ไม่ต่ำกว่า | 120 | ASTM D93 |
| 5 | กำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | ไม่สูงกว่า | 0.0010 | ASTM D2622 |
| 6 | กากถ่าน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) จากร้อยละ 10 ของส่วนที่เหลือจากการกลั่น | ไม่สูงกว่า | 0.30 | ASTM D 4560 |
| 7 | จำนวนซีเทน | ไม่ต่ำกว่า | 51 | ASTM D613 |
| 8 | เถ้าซัลเฟต (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | ไม่สูงกว่า | 0.02 | ASTM D874 |
| 9 | น้ำ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม) | ไม่สูงกว่า | 500 | EN ISO 12937 |
| 10 | สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (มิลลิกรัม/กิโลกรัม) | ไม่สูงกว่า | 24 | EN 12662 |
| 11 | การกัดกร่อนแผ่นทองแดง | ไม่สูงกว่า | หมายเลข 1 | ASTM D130 |
| 12 | เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (ชั่วโมง) | ไม่ต่ำกว่า | 10 | EN 15751 |
| 13 | ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม) | ไม่สูงกว่า | 0.50 | ASTM D664 |
| 14 | ค่าไอโอดีน (กรัมไอโอดีน/100 กรัม) | ไม่สูงกว่า | 120 | EN 14111 |
| 15 | กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเตอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | ไม่สูงกว่า | 12.0 | EN 14103 |
| 16 | เมทานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | ไม่สูงกว่า | 0.20 | EN 14110 |
| 17 | โมโนกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | ไม่สูงกว่า | 0.70 | EN 14105 |
| 18 | ไดกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | ไม่สูงกว่า | 0.20 | EN 14105 |

ตารางที่ ก.2 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน (กรมธุรกิจพลังงาน, 2556) (ต่อ)

| รายการ | ข้อกำหนด | อัตราสูง-ต่ำ | | วิธีทดสอบ[1] |
|---|---|---|---|---|
| 19 | ไตรกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | ไม่สูงกว่า | 0.20 | EN 14105 |
| 20 | กลีเซอรีนอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | ไม่สูงกว่า | 0.02 | EN 14105 |
| 21 | กลีเซอรีนทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | ไม่สูงกว่า | 0.25 | EN 14105 |
| 22 | โลหะกลุ่ม 1 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)<br>โลหะกลุ่ม 2 (โซเดียมและโปแตสเซียม) (มิลลิกรัม/กิโลกรัม) | ไม่สูงกว่า<br><br>ไม่สูงกว่า | 5.0<br><br>5.0 | EN 14538<br><br>EN 14538 |
| 23 | ฟอสฟอรัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | ไม่สูงกว่า | 0.0010 | EN 14107 |
| 24 | จุดขุ่น (องศาเซลเซียส)<br>(Cloud Point : CP, $^{o}C$) | รายงาน[2] | | |
| 25 | จุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ (องศาเซลเซียส)<br>(Cold Flow Plugging Point : CP, $^{o}C$) | รายงาน[2] | | |
| 26 | สารเติมแต่ง (ถ้ามี)<br>(Additive, If Any) | ให้เป็นไปตามความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน | | |

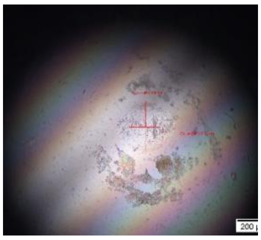
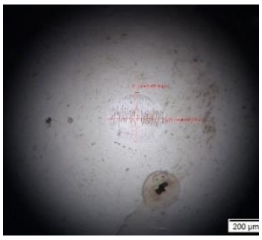
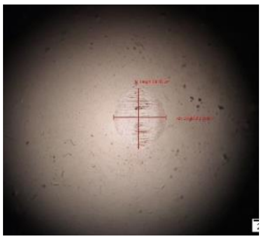
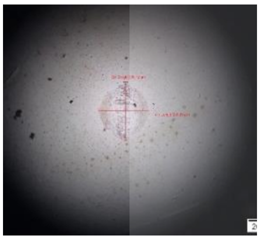
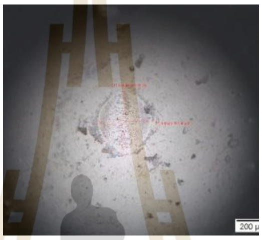
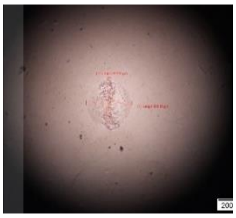
หมายเหตุ [1] วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นเทียบได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

[2] ให้ผู้ค้าน้ำมันรายงานอธิบดีเป็นรายไตรมาส ภายในวันที่ 15 ของเดือนถัดไปจากเดือนสุดท้ายของไตรมาสนั้น

# ภาคผนวก ข

## รูปภาพแสดงลักษณะและผลการตรวจวัดขนาดรอยขีดข่วน

ตารางที่ ข.1 ลักษณะและผลการตรวจวัดขนาดรอยขีดข่วน

| **รูปภาพแสดงลักษณะและผลการตรวจวัดขนาดรอยขีดข่วน** | | |
|---|---|---|
| WPO | WPOC5 | WPOC10 |
|  |  |  |
| WPOC15 | WPOP5 | WPOP10 |
|  |  |  |
| WPOP15 | | |
| | | |

ตารางที่ ข.2 ผลการตรวจวัดขนาดรอยขีดข่วนบนลูกบอลที่ใช้ทดสอบ

| **น้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ** | **ขนาดรอยขีดข่วนแนวแกนตั้งฉาก (μm)** | **ขนาดรอยขีดข่วนแนวแกนขนาน** | **ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยขีดข่วน** |
|---|---|---|---|
| WPO | 345.01 | 298.08 | 321.55 |
| WPOC5 | 342.24 | 298.08 | 320.16 |
| WPOC10 | 338.10 | 292.56 | 315.33 |
| WPOC15 | 336.72 | 289.80 | 313.26 |
| WPOP5 | 351.90 | 292.56 | 322.23 |
| WPOP10 | 343.62 | 292.56 | 318.09 |
| WPOP15 | 345.00 | 307.74 | 326.37 |

# ภาคผนวก ค

## บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Kaewbuddee, C., Sukjit, E., Srisertpol, J., Maithomklang, S., Wathakit, K., Klinkaew, N., Arjharn, W. (2020). Evaluation of Waste Plastic Oil-Biodiesel Blends as Alternative Fuels for Diesel Engines. Energies, 13(11), 2823.

Kaewbuddee, C., Wathakit, K., & Srisertpol, J. (2018). The effect of n-butanol to waste plastic oil fuel blends utilization on engine emissions of a single cylinder diesel engine.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

*Proceedings of IEEE International Conference on Applied System Innovation 2018*
*IEEE ICASI 2018- Meen, Prior & Lam (Eds)*

# The effect of n-butanol to waste plastic oil fuel blends utilization on engine emissions of a Single cylinder diesel engine

Chalita Kaewbuddee, Khatha Wathakit, Jiraphon Srisertpol

Suranaree University of Technology
111 University Avenue, Suranaree Sub-District, Muang District
Nakhon Ratchasima, Thailand
chalita.k@srru.ac.th, vkata@sut.ac.th, jiraphon@sut.ac.th

**Abstract**

This research study measured the engine performance and emissions using fuel blends by pyrolysis of waste plastic oil compared with waste plastic oil mixed with n-butanol. Nitrogen oxide emission is the most harmful emission from the conventional diesel engines. This aims to investigate the effect of n-butanol blended to waste plastic oil on engine emission from a Single-Cylinder Diesel Engine. The 4 sample test fuels are prepared in the ratios of waste plastic oil to n-butanol 60/40, 70/30, 80/20 and 100% waste plastic oil (Bu40, Bu30, Bu20, WPO) and then tested in the engine. Tests were carried out in a single cylinder, unmodified, and difference engine speed (2500-3000 rpm) by using 4 test fuels. The test results demonstrated that the fuel consumption of waste plastic oil blends were higher than waste plastic oil. Amount of nitrogen oxides emissions decreased but CO emission was higher with the rising the content of n-butanol in the fuel blends.

**Key words:** Waste plastic oil, Emission, n-Butanol, Diesel engine

## Introduction

The use of alternative fuels is becoming even more important role and it is an alternative to research more, today. Furthermore, possibilities of developing a variety of plastic recycling application and waste plastic management problem are big issue in present in Thailand. In 2010, municipal plastic waste in Thailand was $2.57\text{x}10^6$ tonnes which accounts for almost 1/4 of the total solid waste [1]. To find the type of fuel that will be used to replace or mix to reduce the amount of primary fuel used. Many concerns have researched by using alcohol to replace or mix with the main fuel. Butanol is a promising candidate fuel for utilization in compressed ignition engines and it shows superior properties over ethanol and methanol, for example, high Cetane number and heating value, low latent heat, and good miscible with diesel [2]. For this research, it is a test to examine the influence of fuel blends on engine performance and exhausted gas emissions on a single-cylinder, brand KAWAMA model 500D. Normal butanol mixed to waste plastic oil in different ratios by volume were used to find the optimal of the mixture for future use. Finally, for a guide of further study.

## Methods

In this research, it tests some physical properties of fuel and its mixture on diesel engine which mounted on a gas exhaust detector. The detector was used to find Nitrogen oxides ($NO_x$) and Carbon monoxide (CO). The fuel consumption of the engine was examined by adjusting speed of the diesel engine. Therefore, the scope of this research is limited as described here:

1. Utilization of fuel mixtures between n-butanol and waste plastic oil at various ratio are 0, 20, 30, and 40 percent of n-butanol by volume mixed with waste plastic oil to determine the suitability of the n-butanol and waste plastic oil used as fuel.
2. Tested with a single-cylinder diesel engine, KAWAMA model 500D without any modification of engine. And installed a gas detector in laboratory to compare the amount of exhaust gas at different ratios of fuel blends.

### *A. Materials used*

Laboratory supplied the n-butanol with a 99.9%purity certified was obtained from Sigma Aldrich. The waste plastic oil which employed in this study, was obtained from the pyrolysis of waste plastic. Pyrolysis process that causes the plastics to decompose by heat in an oxygen-free state. The master plant of processing waste to oil is located at Suranaree University of Technology.

TABLE 1 CHARACTERISTICS OF TEST FUELS

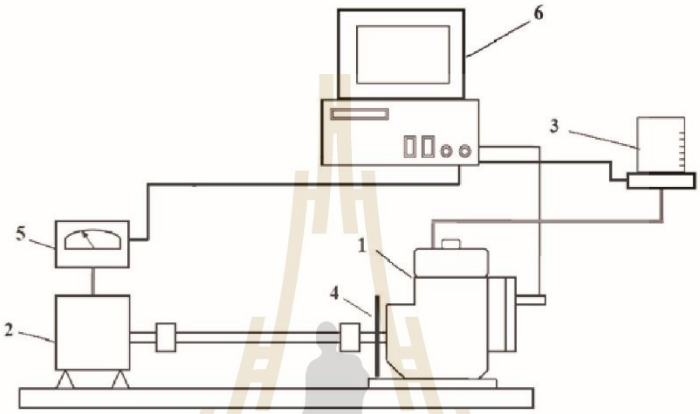
| Properties | Waste Plastic Oil | n-Butanol [3] |
|---|---|---|
| Color | Black | Colorless |
| Density (kg/m$^3$) | 799.21 | 810 |
| Calorific Value (MJ/kg) | 44.98 (Gross) | 33.1 (Lower) |
| Kinematic Viscosity, cSt @ 40 °C | 3.065 | 2.22 |
| Cetane index | 68.98 | 17 |
| Flash Point (°C) | 36 | 35 |



*ISBN 978-1-5386-4342-6*

*Proceedings of IEEE International Conference on Applied System Innovation 2018*
*IEEE ICASI 2018- Meen, Prior & Lam (Eds)*

Fig. 1 Apparatus setup of the test engine used in testing




1: Tested Engine 2: Dynamometer 3: Weighing Scale
4: Encoder Wheel 5: Load cell 6: Control Unit
Fig. 2 A schematic of the apparatus setup

TABLE 2 TEST ENGINE DETAILS

| | |
|---|---|
| Engine Model | KAWAMA 500D |
| Type Engine | four stroke single cylinder air-cooled |
| Bore x Stroke (mm) | 68 x 54 |
| Displacement (cc) | 196 |
| Compression ratio | 22 : 1 |
| Rated Speed (rpm) | 3000 |
| Max. Power (kW) | 2.42 kw |
| Rate Output power (kW) | 2.2 kw |
| Start system | Recoil starter |
| Lubrication Oil | 10W30 |

***B. The experimental testing***

The experimental design was performed to compare the test results of experiment obtained from the use of pure waste plastic oil and blended mixture between waste plastic oil and n-butanol at the various mixture ratios. Equipment and measuring instruments used in laboratory room were as follows: a single cylinder diesel engine, KAWAMA model 500D, with gas detector. The engine is air cooled. The engine is mounted on fixed bed floor in laboratory room and load applied on the engine. The picture of apparatus setup is illustrated in Fig.1&2

***B.1 Testing by adjusting engine speed***

Before testing engine emission with different fuels, it was always clean the combustion chamber. Then it was tested using only waste plastic oil as a fuel, compared to the blends with n-butanol. In tests with each fuel blends, the engine speed will be adjusted as follow each value will adjust the throttle. Fuel consumption rate and amount of emissions gas were recorded at each engine speed. The fuel consumption of an engine is determined in the change of fuel weight between before and after the consumption test divided by the testing time.

***B.2 Emission Testing***

In each test engine, It adjusts the engine speed was varied by gradually adjusting the throttle and measuring the actual speed through the Encoder Wheel. To measure the tested value of exhaust gas emission of 100% waste plastic oil and its mixture ratios. Exhaust gas detector, testo 350-XL model, was employed to determine the emission gases, carbon monoxide and nitrogen oxide, from the engine.

*ISBN 978-1-5386-4342-6*

**Results**

***A. Mass fuel consumption***

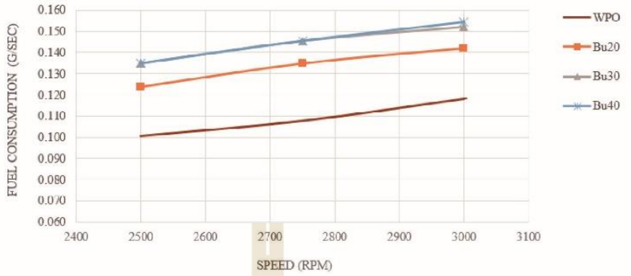



Fig. 3 Variation of engine speed for test fuel blends.

Fig. 3 provides information about the fuel consumption rate with the speed. The direct injection diesel engine was fed with waste plastic oil, Bu20, Bu30, Bu40 and ran at varied engine speed at free load. The test results showed the fuel consumption of waste plastic oil blends were higher than pure waste plastic oil. It is found that the consumption rate is similar for all fuels. The pure waste plastic oil 100% at 2,500, 2,750, 3,000 rpm. The fuel consumption rate were 0.101, 0.108, 1.118 grams per second, respectively. The waste plastic oil was added at a ratio of 20% at the same speed. The fuel consumption rate were 0.124, 0.135, 0.142 grams per second, respectively. Waste plastic oil was increased the mixing ratio to 30% at the same speed, The fuel consumption rate were 0.135, 0.146, 0.152 grams per second, respectively. The mixture ratio was increase to 40% at the same speed, The fuel consumption rate were 0.135, 0.146, 0.154 grams per second, respectively. It was seen that low range of the engine is a similar rate of consumption. As the engine rises, the tendency of the fuel consumption rate varies with the speed of the engine. Fuel blends are slightly higher than the pure waste plastic oil at higher speed. Nevertheless, it was said that the fuel blends of n-butanol/diesel is not significantly difference of the fuel consumption due to the heating value of butanol fuel is similar to diesel. As a result, the fuel consumption rate in the combustion is similar [4]. The disadvantage of alcohol fuels is that it posed the higher consumption of fuel, compared to the sole diesel fuel [5,6].

***B. Emission***

Fig. 4 Carbon monoxide gas content at difference speed

From Fig. 4, the CO concentration of n-butanol fuel blends and pure waste plastic oil fuel only at difference speed. The result shown that CO gas content is higher when the n-butanol fuel ratio was increased and higher than pure waste plastic oil. Because of carbon in the n-butanol component can not react with oxygen during combustion completely. Therefore, the remaining carbon will come out in the form of higher carbon monoxide gas. The use of n-butanol lead to increased CO emission because the high oxygen content in butanol promoted an oxidation and promptly converted the fuel into carbon monoxide [7]. The rapidly increase of CO emission at higher engine speed due to higher fuel consumption rate. The results showed that blended fuels affect to higher value of CO than waste plastic

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



*ISBN 978-1-5386-4342-6*

oil.

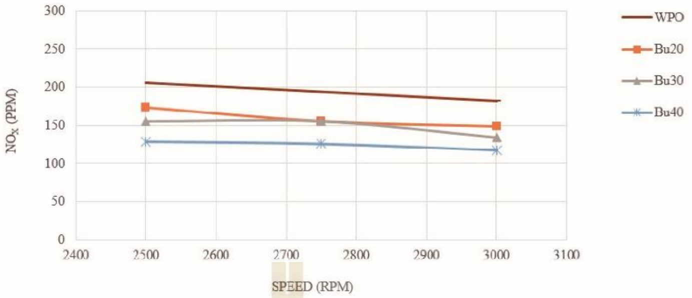



Fig. 5 Nitrogen oxide gas content at difference speed

Nitrogen oxides ($NO_x$) is the toxic compositions in the exhaust gases from diesel engine. From Fig. 5, emissions $NO_x$ from the direct injection diesel engine are compared, For all tested fuel, pure waste plastic oil, Bu20, Bu30 and Bu40, It was found that the $NO_x$ emission was not significant changed when increasing the engine speed. And when the fuel mixture ratio of n-Butanol increased, the amount of nitrogen oxide gas generated was lower than that of pure waste plastic oil. As could be seen in the plot, the $NO_x$ emissions slightly decrease while the content of n-Butanol in the blend increases. Similar results is also observed in the previous reports dealing with mixtures of butanol–biodiesel. It may be ascribed to rise in the overall content of oxygen in the blends as diminishing its cetane number. The lower cetane number in the blends of n-butanol/diesel induces the delay of ignition longer, and consequently results in the higher combustion temperature [8,9]. Similarly, addition of ethanol to diesel decreased the emission of $NO_x$ as previously reported [10].

## Conclusion

The investigation was experimentally carried out in order to evaluate and compare the utilization of the waste plastic oil to n-butanol at blending ratios of 60/40, 70/30, 80/20 and 100% by volume with the Single cylinder diesel engine running at difference engine speeds. In each test, emissions of exhaust gases such as $NO_x$ and CO were analyzed. The carbon monoxide emission increased with the ratio of the butanol-waste plastic oil blends, with this increase being higher the percentage of butanol in the blend. The nitrogen oxides emission diminished with the ratio of the butanol-waste plastic oil blends. Concerning the fuel consumption for n-butanol addition to fuel blends, increasing the content of n-butanol in the fuel blends found slightly higher consumption of fuel.

## Acknowledgments

The authors would like to thankfully acknowledge the laboratory facilities from Suranaree University of Technology (SUT).

## References

[1] R. Kamala, Evaluation of plastic waste management in Thailand using material flow analysis. Master's Thesis, Environmental Engineering and Management, Asian Institute of Technology, 2013.

[2] Y. Nadir, V. M. Francisco, B. Kyle, D. M. Stephen, C. Antonio. "Effect of biodiesel-butanol fuel blends on emissions and performance characteristics of a diesel engine". Fuel 135, 2014, pp. 46-50.

[3] I. Erol, "Experimental study of 2-ethylhexyl nitrate effects on engine performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with n-butanol or 1-pentanol diesel-sunflower oil blends". Energy Conversion and Management 118, 2016, pp 320-330.

[4] L. Paiboon, S. Aanothai, A. Pichai. *The 21th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand.* "The performance study of a diesel engine using buthanol base diesohol fuel". Thailand, pp. 1288-1294, 2007

[5] S. Cenk and C. Mustafa, "Effects of injection timing on the engine performance and exhaust emissions of a dual-fuel diesel engine". Energy Conversion and Management 50, 2009, pp. 203–213.

[6] C. Byungchul, K. K. Young, J. Gilsung, L. Chunhwan, J. Xiaolong, C. Inchul. *The 6th International Conference on Applied Energy.* "Effect of diesel fuel blend with biobutanol on the emission of turbocharged CRDI diesel engine". Energy Procedia 61, 2014, pp. 2145–2148.

[7] L. Sheng-Lun, L. Wen-Jhy, L. F. Chia-fon, W. Yo-ping. "Reduction in emissions of nitrogen oxides, particulate matter, and polycyclic aromatic hydrocarbon by adding water-containing butanol into a diesel-fueled engine generator". Fuel 93, 2012, pp. 364-372.

[8] D. Og˘uzhan. "The influence of n-butanol/diesel fuel blends utilization on a small diesel engine performance and emissions". Fuel 90, 2011, pp. 2467-2472.

[9] A. Ertan, "Evaluation of ethanol and isopropanol as additives with diesel fuel in a CRDI diesel engine". Fuel 205, 2017, pp. 161–172.

[10] D. Ambarish, M. K. Bijan, "Impact of alcohol addition to diesel on the performance combustion and emissions of a compression ignition engine". Applied Thermal Engineering 98, 2016, pp. 670–682.



*ISBN 978-1-5386-4342-6*

View publication stats

energies

MDPI

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 Arjharn**

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

check for updates

**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 ($NO_X$), 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.

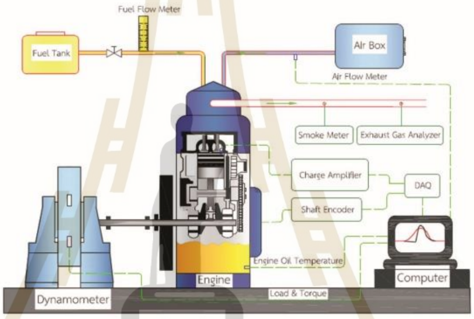



**Figure 2.** A schematic diagram of the experimental installation.

**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 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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 ($NO_X$), 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, $NO_X$, 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.

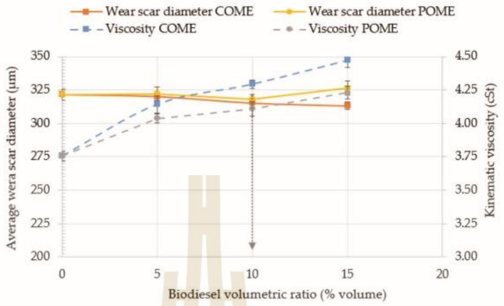



**Figure 3.** Lubricity and viscosity of biodiesel blending.

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.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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

| Properties | Test Method | Diesel | WPO | POME | COME | WPOP10 | 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$^3$) | 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.

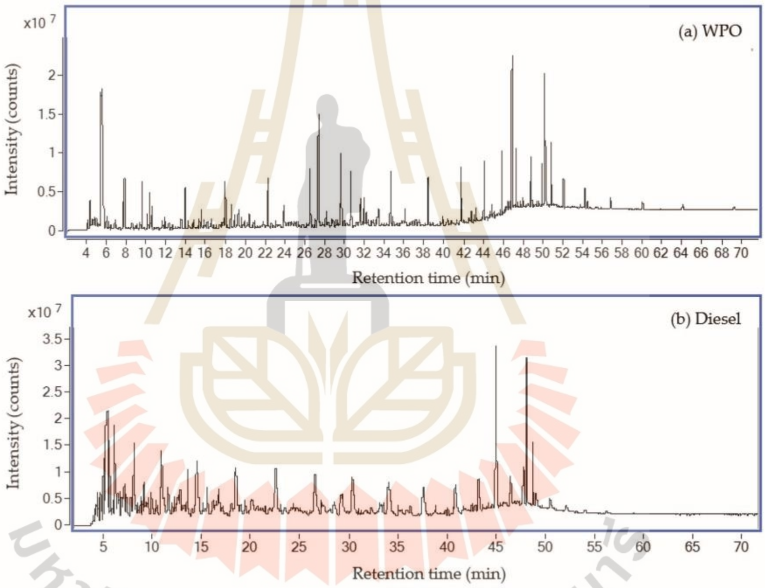



**Figure 4.** Total ion current chromatogram for: (**a**) Waste plastic oil and (**b**) diesel.

**Table 4.** Components identified from waste plastic oil and diesel by GC–MS analysis.

| Carbon Content | % Area | |
|---|---|---|
| | **WPO** | **Diesel** |
| $C_4$–$C_{11}$ | 12.85 | 17.56 |
| $C_{12}$–$C_{20}$ | 74.39 | 73.28 |
| $>C_{20}$ | 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.

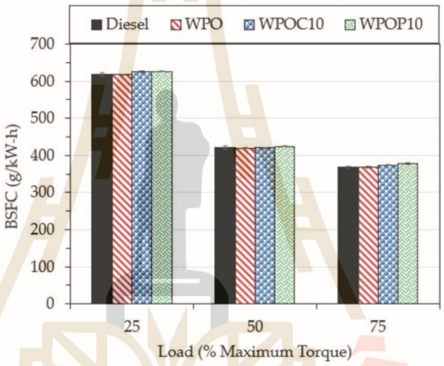



**Figure 5.** Variation of brake specific fuel consumption.

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].

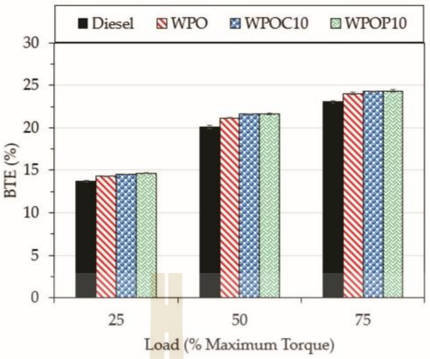
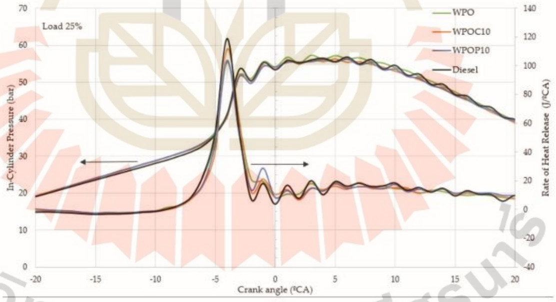



**Figure 6.** Variation of the brake thermal efficiency.

### 3.3. *Combustion Characteristics*

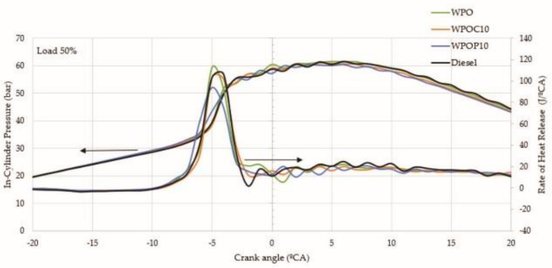
The combustion characteristics were examined as in-cylinder pressure and the rate of heat release based on the basic principles of the first law of thermodynamics, as shown in Figure 7. It was found that the combustion of waste plastic oil was similar to diesel fuel for all tested engine loads. The addition 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].



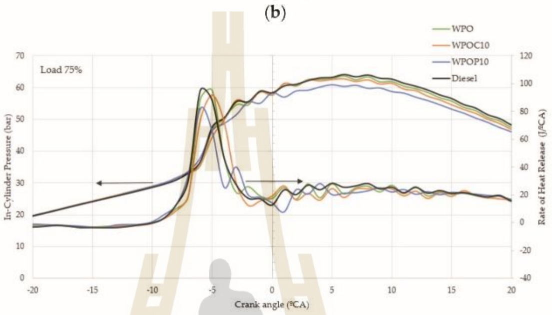

(a)

**Figure 7.** *Cont.*

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี




(**b**)




(**c**)

**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 NOx 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 NOx formation. The results of biodiesel addition were similar to diesel fuel blends and resulted in $NO_X$ 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 NOx 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 NOx emissions observed with the combustion of waste plastic oil blended with castor oil biodiesel.

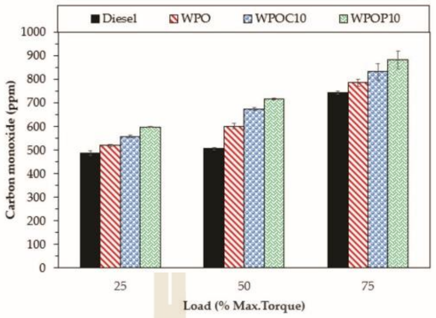



**Figure 8.** Carbon monoxide emissions.

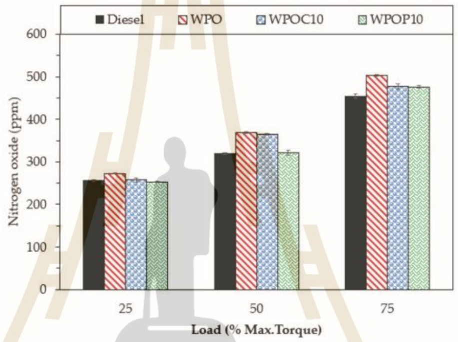



**Figure 9.** Nitrogen oxide emissions.

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.

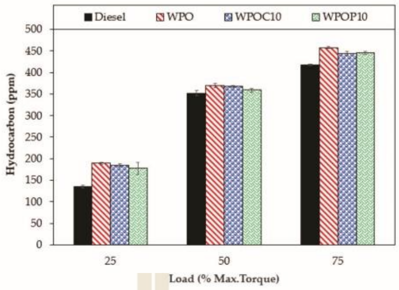



**Figure 10.** Hydrocarbon emissions.

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.

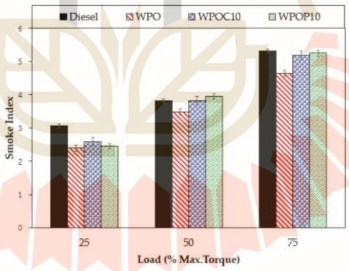



**Figure 11.** Smoke emissions.

## 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.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- 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 |
| $NO_X$ | 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/informationservices/ct-menu-item-56?orders[publishUp]=publishUp&issearch=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.; Inseemeesak, 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 fueled 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.; Alqdah, K.S. Performance of diesel engine fuelled by a biodiesel extracted from a waste cocking 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.; Muraleedharan, 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.; 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; 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/).

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# ประวัติผู้เขียน

นางสาวชลิตา แก้วบุตรดี เกิดเมื่อวันที่ 11 กันยายน พ.ศ. 2526 ณ จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสิรินธร อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์ ในปีการศึกษา 2544 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2548 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2551 เมื่อเข้าศึกษาในระดับปริญญาโท โดยศึกษาและวิจัยในหัวข้อ "การเลือกรีดิวซ์ไนโตรเจนออกไซด์ด้วยแอมโมเนียบนตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5$-$WO_3$/$TiO_2$" ในปี พ.ศ. 2559 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะศึกษาระดับปริญญาเอกได้ศึกษาและวิจัยในหัวข้อ "การศึกษาการใช้น้ำมันขยะเป็นเชื้อเพลิงผสมกับไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว" มีผลงานตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ "Energies" ในบทความเรื่อง "Evaluation of Waste Plastic Oil-Biodiesel Blends as Alternative Fuels for Diesel Engines"

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี