

ผลกระทบของเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันละหุ่งในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด



นายอนุภาพ พุ่มพวง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2562

**EFFECT OF CASTOR OIL ETHYL ESTER ON
A COMPRESSION IGNITION ENGINE**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical and Process
System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2019**

ผลกระทบบของเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันละหุ่งในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิติพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ฉวีภา ทองรุ่ง

(อ. คร. มานิดา ทองรุ่ง)

ประธานกรรมการ

เฮอร์

(อ. คร. เอกรงค์ สุขจิต)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

พศ.

(ผศ. ดร. การุญ พิงสุวรรณรักษ์)

กรรมการ

สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์

(อ. ดร. สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์)

กรรมการ

กมลชนก จันทร์ภิรมณ์

(รศ. ร.อ. ดร. กมลชนก จันทร์ภิรมณ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล

พรศิริ

(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อนุภาพ พุ่มพวง : ผลกระทบของเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันละหุ่งในเครื่องยนต์จุดระเบิด
ด้วยการอัด (EFFECT OF CASTOR OIL ETHYL ESTER ON A COMPRESSION
IGNITION ENGINE) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.เอกรงค์ สุขจิต, 158 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ไขมันไบโอดีเซลจากละหุ่งเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด โดยมุ่งเน้นศึกษากระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification) ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันรวมมากที่สุด และศึกษาเชิงเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานทางเชื้อเพลิง สิ่งตกค้างที่หลงเหลืออยู่บนชิ้นงานทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมันเชื้อเพลิง คุณลักษณะการเผาไหม้ สมรรถนะของเครื่องยนต์ และมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

ผลการทดลองพบว่าปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันรวมที่ทราบชนิดมากที่สุดคือ 97.79% ซึ่งได้จากกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่มีอัตราส่วน โมลของน้ำมันละหุ่งต่อเอทานอลที่ 1 : 12 ความเข้มข้นของ KOH 1.5% อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 150 นาที

สำหรับคุณสมบัติพื้นฐานทางเชื้อเพลิงพบว่า ความหนืดจลนศาสตร์ จูควาไฟฟ้า และความถ่วงจำเพาะของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล ในทางตรงกันข้ามค่าดัชนีซีเทนและค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ในส่วนของความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมันเชื้อเพลิงพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยขีดขูดบนชิ้นงานทดสอบของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ด้วยค่าความหนืดที่สูงเป็นพิเศษจึงต้องผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งกับน้ำมันดีเซลและพบว่าการผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งในปริมาณ 8% โดยปริมาตร (COEE8) เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ค่าความหนืดของน้ำมันผสมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของน้ำมันดีเซล อีกทั้งเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยขีดขูดบนชิ้นงานทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมันเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อทดสอบด้วยน้ำมัน COOE8

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสิ่งตกค้างที่หลงเหลืออยู่บนชิ้นงานทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นพบว่าการตรวจพบหมู่เอสเทอร์, แอลเคน, แอลคีน และอะโรมาติก นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยขีดขูดมีขนาดเล็กลงมากขึ้นเมื่อมีการตรวจพบหมู่ O-H ของสิ่งตกค้างที่หลงเหลือบนชิ้นงานทดสอบเพิ่มมากขึ้น หมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบจากสิ่งตกค้างบนชิ้นงานทดสอบที่มีอิทธิพลที่สุดและมีแนวโน้มที่จะมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมันเชื้อเพลิงในสองอันดับแรกคือหมู่ O-H และ C-O ตามลำดับ

การทดสอบน้ำมันเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์พบว่าจุดเริ่มต้นของการเผาไหม้ (SOC) ของน้ำมัน COOE8 มีการเริ่มต้นของการเผาไหม้ก่อนน้ำมันดีเซล และอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดและความดันภายในกระบอกสูบสูงสุดของน้ำมัน COOE8 มีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซล เมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่อัตราส่วนการอัด 17 : 1 และ 18 : 1 จุดเริ่มต้นของการเผาไหม้เกิดได้เร็วขึ้น เมื่ออัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น อีกทั้งอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดและความดันภายในกระบอกสูบสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) ของน้ำมัน COOE8 มีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซล ค่า BSFC มีแนวโน้มลดลงเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ภาระงานและอัตราส่วนการอัดสูงขึ้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) จากการใช้ COOE8 มีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซล การเพิ่มขึ้นของภาระงานและอัตราส่วนการอัดมีแนวโน้มทำให้ค่า BTE มีค่าเพิ่มขึ้น ในส่วนมลพิษพบว่าไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ของ COOE8 มีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซล ในขณะที่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ได้เผาไหม้ (HC) และเขม่าควันของน้ำมัน COOE8 มีค่าน้อยกว่าน้ำมันดีเซล มลพิษไอเสียทุกชนิดที่ทำการตรวจวัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ภาระงานสูงขึ้น การเผาไหม้น้ำมัน COOE8 ให้ค่า HC และ CO ลดลง เมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่อัตราส่วนการอัดสูงขึ้น



ANUPAP PUMPUANG : EFFECT OF CASTOR OIL ETHYL ESTER ON
A COMPRESSION IGNITION ENGINE. THESIS ADVISOR :
EKARONG SUKJIT, Ph.D., 159 PP.

CASTOR OIL/ETHYL ESTER/FUEL LUBRICITY/FTIR

This research studied the use of castor oil biodiesel as fuel for compression ignition engines, which focused on the appropriate transesterification processes to meet the most amount of total fatty acid ethyl ester and comparatively studied on the basic fuel properties, deposit on the fuel lubricity test specimens, combustion characteristics, engine performances and emissions with respect to diesel fuel.

The experimental results showed that the maximum total fatty acid ethyl ester (FAEE) of 97.79% can be produced from transesterification process with 1:12 of oil to ethanol molar ratio, 1.5% of KOH concentration, 50 °C of reaction temperature and 150 minutes of reaction time.

For the fuel properties, it showed that the kinematic viscosity, flash point and specific gravity of castor oil biodiesel were higher than diesel fuel. On the other hand, its cetane index and heating value were lower than diesel fuel. In case of fuel lubricity, castor oil biodiesel showed smaller wear scar diameter than that of diesel fuel. With extremely high viscosity, castor oil biodiesel was blended with diesel fuel and the results showed that the presence of 8% castor oil biodiesel in diesel fuel (COEE8) was the optimum value to keep the viscosity under the diesel fuel standard, while the smallest wear scar diameter of the lubricity test was also found with COEE8.

According to ATR-FTIR analysis on the functional group of deposit on disc specimens of the lubricity test, it showed that ester, alkane, alkene and aromatic groups

were obtained. It was found that the wear scar diameter was smaller as the content of O-H group was higher. The most two effective functional groups which may have a prominent role for the enhancement of fuel lubricity were O-H group and C-O group, respectively.

For the engine test, it showed that the start of combustion (SOC) of COEE8 was earlier and the maximum rate of heat release and maximum in-cylinder pressure were higher with respect to diesel fuel, when the engine was operated at compression ratio of 17:1 and 18:1. The advance in SOC was obtained as the compression ratio was increased. In addition, the maximum rate of heat release and maximum in-cylinder pressure tended to increase with higher compression ratio. The brake specific fuel consumption (BSFC) of COEE8 was higher than that of diesel fuel. The BSFC tended to decrease as the engine load and compression ratio were increased. The brake thermal efficiency (BTE) of COEE8 was higher than that of diesel fuel. The BTE tended to increase as the engine load and compression ratio were increased. Nitrogen oxides (NO_x) and carbon monoxide (CO) of COEE8 were higher while unburned hydrocarbons (HC) and smoke were lower with respect to diesel fuel. All measured exhaust emissions tended to increase as the engine load was increased. The combustion of COEE8 produced lower HC and CO emissions when the engine was operated at higher compression ratio.

School of Mechanical Engineering

Academic year 2019

Student's Signature 

Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์เป็นอย่างดีได้ด้วยความกรุณาให้ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และมอบโอกาสต่าง ๆ ทั้งทางด้านวิชาการและด้านการจัดการในเรื่องอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ตลอดจน การเขียนบทความทางวิชาการ การตรวจสอบข้อมูลทางวิชาการจากท่านอาจารย์ ดร.เอกรงค์ สุขจิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ขอขอบพระคุณ ดร.มานิดา ทองธรม อติคณักวิจัยประจำศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุ แห่งชาติ (MTEC) อติคณักที่ปรึกษาร่วม ผู้ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการและสนับสนุนด้านเครื่องมือ ทดสอบด้วยเทคนิค High Frequency Reciprocating Rig (HFRR)

ขอขอบพระคุณ ว่าที่ร้อยตรีสมเกียรติ หมายถมกลาง, นายณัฐพล ที่รัก และนายนิติ กลิ่นแก้ว รุ่นพี่ระดับบัณฑิตศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ผู้ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการและให้ ความช่วยเหลือทั้งในด้านการทดสอบคุณสมบัติเชิงเปลืองและการทดสอบเครื่องยนต์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่อาคารเครื่องมือ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ด้วยแสงอินฟราเรด สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ผู้ช่วยให้การสนับสนุนในด้านเครื่องมือทดสอบและอุปกรณ์ใน งานวิจัย

ขอขอบคุณนางสาวดิศธร เศษวัชระ, นางสาวพรรณธร สมัยกลาง และนางสาวสมฤทัย แสนลือชา นักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย - มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี ผู้ให้ความช่วยเหลือทางด้านปฏิบัติการและทางด้านวิชาการ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูและคอยเป็น กำลังใจ ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

อานุกาพ พุ่มพวง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ท
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 น้ำมันละหุ่ง (Castor Oil).....	7
2.2 น้ำมันไบโอดีเซล (Biodiesel).....	9
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเอสเตอร์ของกรดไขมันที่ได้จากกระบวนการ ทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน (Ethanol).....	10
2.3.1 เอทานอล.....	10
2.3.2 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, KOH).....	12
2.3.3 เวลาในการทำปฏิกิริยา (Reaction Time).....	12
2.3.4 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (Reaction Temperature).....	13
2.4 เทคนิควิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC).....	13
2.5 คุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิง.....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.1	ความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic Viscosity).....	14
2.5.2	จุดวาบไฟ (Flash Point).....	15
2.5.3	ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity).....	15
2.5.4	อุณหภูมิการกลั่น (Distillation Temperature).....	15
2.5.5	ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Fuel Heating Value).....	15
2.5.6	ดัชนีซีเทน (Cetane Index).....	16
2.5.7	ความสามารถในการหล่อลื่น (Lubricity).....	16
2.6	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) แบบ Attenuated Total Reflectance (ATR).....	16
2.7	คุณลักษณะการเผาไหม้.....	18
2.7.1	อิทธิพลของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำต้อคุณลักษณะการเผาไหม้.....	18
2.7.2	อิทธิพลของภาระกรรมของเครื่องยนต์ต้อคุณลักษณะการเผาไหม้.....	19
2.7.3	อิทธิพลของอัตราส่วนการอัดต้อคุณลักษณะการเผาไหม้.....	19
2.8	สมรรถนะของเครื่องยนต์และมลพิษที่เครื่องยนต์ปลดปล่อย.....	20
2.8.1	อัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค.....	20
2.8.1.1	อิทธิพลของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำต้ออัตรา การบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิง.....	20
2.8.1.2	อิทธิพลของภาระงานของเครื่องยนต์ต้ออัตรา การบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิง.....	20
2.8.1.3	อิทธิพลของอัตราส่วนการอัดต้ออัตรา การบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิง.....	21
2.8.2	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค.....	21
2.8.2.1	อิทธิพลของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ ต้อประสิทธิภาพเชิงความร้อน.....	21
2.8.2.2	อิทธิพลของภาระงานของเครื่องยนต์ต้อ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน.....	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.8.2.3	อิทธิพลของภาระงานของอัตราส่วนการอัดต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน.....	22
2.8.3	ไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen Oxides, NO _x).....	22
2.8.4	ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon, HC).....	22
2.8.4.1	อิทธิพลของน้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่งต่อไฮโดรคาร์บอน.....	23
2.8.4.2	อิทธิพลของภาระกรรมของเครื่องยนต์ต่อไฮโดรคาร์บอน.....	23
2.8.4.3	อิทธิพลของอัตราส่วนการอัดต่อไฮโดรคาร์บอน.....	23
2.8.5	คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide, CO).....	24
2.8.5.1	อิทธิพลของน้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่งต่อคาร์บอนมอนอกไซด์.....	24
2.8.5.2	อิทธิพลของภาระกรรมของเครื่องยนต์ต่อคาร์บอนมอนอกไซด์.....	25
2.8.5.3	อิทธิพลของอัตราส่วนการอัดต่อคาร์บอนมอนอกไซด์.....	25
2.8.6	เขม่าควัน (Smoke).....	25
2.8.6.1	อิทธิพลของน้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่งต่อเขม่าควัน.....	25
2.8.6.2	อิทธิพลของภาระกรรมของเครื่องยนต์ต่อเขม่าควัน.....	26
2.8.6.3	อิทธิพลของอัตราส่วนการอัดต่อเขม่าควัน.....	26
3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	27
3.1	การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่ง.....	27
3.2	การวิเคราะห์เอสเทอร์ของกรดไขมันด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี.....	30
3.3	การสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิง.....	32
3.3.1	ความหนืดจลนศาสตร์ ณ อุณหภูมิ 40°C (Kinematic Viscosity at 40°C).....	33
3.3.2	จุดวาบไฟ (Flash Point).....	34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.3	ความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นของเชื้อเพลิง ณ อุณหภูมิ 15.6 °C (Specific Gravity and Density of Fuel at 15 °C).....	35
3.3.4	อุณหภูมิการกลั่น 50% (50% Distillation Temperature).....	36
3.3.5	ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Fuel Heating Value).....	37
3.3.6	ดัชนีซีเทน (Cetane Index).....	39
3.3.7	ความสามารถในการหล่อลื่น (Lubricity).....	40
3.4	การวิเคราะห์องค์ประกอบที่หลงเหลือบนชิ้นงานทดสอบความสามารถ ในการหล่อลื่นด้วยเทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรสโกปี (Fourier transform Infrared (FTIR) Spectroscopy) แบบ Attenuated Total Reflectance (ATR).....	44
3.5	การทดสอบเครื่องยนต์.....	45
3.5.1	การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์และคุณลักษณะ การเผาไหม้.....	46
3.5.2	อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก.....	48
3.5.3	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก.....	49
3.5.4	การตรวจวัดไนโตรเจนออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์.....	49
3.5.5	การตรวจวัดสารประกอบไฮโดรคาร์บอน.....	50
3.5.6	การตรวจวัดเขม่าควัน.....	50
4	การหาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ.....	55
4.1	ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันหุง.....	55
5	การทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง.....	66
5.1	การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิง.....	66
5.1.1	ความหนืดจลนศาสตร์ ณ อุณหภูมิ 40°C (Kinematic Viscosity at 40°C).....	66
5.1.2	จุดวาบไฟ (Flash Point).....	68

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.3	ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6°C (Specific Gravity at 15.6°C).....	70
5.1.4	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง ณ อุณหภูมิ 15.6°C (Density of Fuel at 15.6°C).....	71
5.1.5	อุณหภูมิการกลั่นร้อยละ 50 (50% Distillation Temperature).....	72
5.1.6	ดัชนีซีเทน (Cetane Index).....	72
5.1.7	ค่าความร้อน (Heating Value).....	74
5.1.8	ความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิง (Fuel Lubricity).....	75
5.2	การวิเคราะห์ห้องค้ำประกอบที่หลงเหลือบนชิ้นงานทดสอบ ความสามารถในการหล่อลื่นด้วยเทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy (FTIR)) แบบ Attenuated Total Reflectance (ATR).....	80
5.2.1	บริเวณที่เกิดการออกซิเดชัน (Oxidation Zone).....	80
5.2.1.1	น้ำมันดีเซล (Diesel Fuel).....	81
5.2.1.2	น้ำมันไบโอดีเซลจากกะทิง (Castor Oil Ester, COEE).....	84
5.2.1.3	น้ำมันเชื้อเพลิงผสม (COEE8).....	87
5.2.1.4	เปรียบเทียบ.....	89
5.2.2	บริเวณรอยขีดข่วน (Wear Track Zone).....	91
5.2.2.1	น้ำมันดีเซล (Diesel Fuel).....	91
5.2.2.2	น้ำมันไบโอดีเซลจากกะทิง (COEE).....	93
5.2.2.3	เชื้อเพลิงผสม (COEE8).....	95
5.2.2.4	เปรียบเทียบ.....	97
6	การทดสอบเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์.....	99
6.1	คุณลักษณะการเผาไหม้.....	99
6.2	สมรรถนะของเครื่องยนต์.....	106
6.2.1	อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค.....	106

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก.....	108
6.3 มลพิษไอเสีย.....	109
6.3.1 ไนโตรเจนออกไซด์.....	110
6.3.2 สารประกอบไฮโดรคาร์บอน.....	111
6.3.3 คาร์บอนมอนอกไซด์.....	113
6.3.4 เขม่าควัน.....	115
7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	117
7.1 การหาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ.....	117
7.2 การทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง.....	118
7.2.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิง.....	118
7.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบที่หลงเหลือบนชิ้นงานทดสอบ ความสามารถในการหล่อลื่นด้วยเทคนิคเทคนิค ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transform Infrared (FTIR) Spectroscopy) แบบ Attenuated Total Reflectance (ATR).....	119
7.3 การทดสอบเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์.....	122
7.3.1 คุณลักษณะการเผาไหม้.....	122
7.3.2 สมรรถนะของเครื่องยนต์.....	123
7.3.3 มลพิษจากเครื่องยนต์.....	123
7.4 ข้อเสนอแนะ.....	125
รายการอ้างอิง.....	127
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอสเตอร์ของกรดไขมัน.....	131
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิง.....	146
ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	149
ประวัติผู้เขียน.....	158

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	คุณสมบัติของน้ำมันดีเซล น้ำมันบิโอดีเซล และไดเอทิลอีเทอร์.....2
2.1	องค์ประกอบของกรดไขมันที่มีอยู่ในน้ำมันละหุ่ง..... 8
2.2	คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งชนิดเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ 10
2.3	คุณสมบัติของเอทานอลและเมทานอล 11
2.4	ลักษณะของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์..... 12
2.5	ลักษณะของผลจากเทคนิควิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี 14
2.6	ตัวอย่างชุดวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี 14
2.7	ลักษณะความถี่ในช่วง Fingerprint Region ของอะโรมาติกที่มีหมู่แทนที่ 1 ตำแหน่ง (ด้านบน) และ 2 ตำแหน่ง (ด้านล่าง) 17
3.1	สถานะในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งของแต่ละตัวอย่าง.....28
3.2	ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ทดสอบ 48
3.3	ข้อมูลจำเพาะของเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย TESTO-350..... 52
3.4	ข้อมูลจำเพาะของเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย HORIBA MEXA-584L 53
3.5	ข้อมูลจำเพาะของเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย TESTO-308..... 54
4.1	ชนิดของกรดไขมันและ Retention Time ที่ตรวจพบในกรดไขมันมาตรฐาน ชนิดเอทิลเอสเทอร์..... 56
4.2	ร้อยละของกรดไขมันที่ทราบชนิดแต่ละชนิดที่ได้จากน้ำมันไบโอดีเซล จากละหุ่ง 60
4.3	ความเข้มข้นของกรดไขมันที่มีอยู่ในกรดไขมันมาตรฐานชนิดเอทิลเอสเทอร์ และกรดริซิโนเลอิกมาตรฐานชนิดเมทิลเอสเทอร์ 61
4.4	ร้อยละของกรดไขมันรวมที่มีอยู่ในแต่ละตัวอย่าง 62
5.1	ขอบเขตและมาตรฐานที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงจากรมธุรกิจพลังงาน 66
5.2	พารามิเตอร์ของหลอดคาปิลลารี..... 67
5.3	ผลการทดสอบความหนืดจลนศาสตร์ของน้ำมันเชื้อเพลิง 6

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.4 ผลการทดสอบจุดวาบไฟของเชื้อเพลิง.....	68
5.5 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6°C ของเชื้อเพลิง.....	70
5.6 เลขลิปิดและมวลโมเลกุลของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ.....	70
5.7 จำนวนอะตอมของคาร์บอนและมวลโมเลกุลของแอลเคนชนิดต่าง ๆ.....	71
5.8 ผลการทำสอบอุณหภูมิการกลั่นร้อยละ 50.....	72
5.9 ค่าดัชนีซีเทนของกรดไขมันแต่ละชนิดและน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่ง.....	73
5.10 ผลการทดสอบค่าความร้อนของเชื้อเพลิง.....	74
5.11 ผลการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิง.....	78
5.12 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงในงานวิจัย.....	80
5.13 หมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบของแต่ละชนิดกราฟจากบริเวณออกซิเดชันของ น้ำมันดีเซล.....	84
5.14 หมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบของแต่ละชนิดกราฟจากบริเวณออกซิเดชันของ น้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่ง.....	86
5.15 หมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบของแต่ละชนิดกราฟจากบริเวณออกซิเดชันของ เชื้อเพลิงผสม.....	89
5.16 หมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบของแต่ละชนิดกราฟจากบริเวณออกกรอยคูบิคของ น้ำมันดีเซล.....	92
5.17 หมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบของแต่ละชนิดกราฟจากบริเวณออกกรอยคูบิคของ น้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่ง.....	94
5.18 หมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบของแต่ละชนิดกราฟจากบริเวณออกกรอยคูบิคของ เชื้อเพลิงผสม.....	96
6.1 องค์ประกอบทางเคมีของเอสเทอร์ของกรดไขมันจากน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่ง.....	113
ก.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีของเอสเทอร์ของกรดไขมัน มาตรฐาน.....	132
ก.2 พื้นที่ยอดกราฟและร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 1 ถึง 3.....	133

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.3 พื้นที่ยอดกราฟและร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 4 ถึง 6.....	134
ก.4 พื้นที่ยอดกราฟและร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 7 ถึง 9.....	135
ก.5 พื้นที่ยอดกราฟและร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 10 ถึง 12.....	136
ก.6 พื้นที่ยอดกราฟและร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 13 ถึง 15.....	137
ก.7 พื้นที่ยอดกราฟและร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 16 ถึง 18.....	138
ก.8 พื้นที่ยอดกราฟและร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 19 ถึง 21.....	139
ก.9 พื้นที่ยอดกราฟและร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 22 ถึง 24.....	140
ก.10 พื้นที่ยอดกราฟและร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 25 ถึง 26.....	141
ก.11 มวลโมเลกุลของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 1 ถึง 13	142
ก.12 มวลโมเลกุลของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 14 ถึง 26	143
ก.13 ผลการคำนวณร้อยละของกรดไขมันรวมในตัวอย่างที่ 1 ถึง 13	144
ก.14 ผลการคำนวณร้อยละของกรดไขมันรวมในตัวอย่างที่ 14 ถึง 26	145
ข.1 ผลการทดสอบความหนืดจลนศาสตร์.....	147
ข.2 ผลการทดสอบจุดวาบไฟ.....	147
ข.3 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะและความถ่วงเอพิโอ	147
ข.4 ผลการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่น	148

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะของต้นตะหุ้ง 7
2.2	ลักษณะของเมล็ดตะหุ้ง 8
2.3	สมการการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน 9
2.4	ลักษณะของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 13
2.5	ลักษณะของผลจากเทคนิควิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี 15
2.6	ตัวอย่างชุดวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี 16
2.7	ลักษณะความถี่ในช่วง Fingerprint Region ของอะโรมาติกที่มีหมู่แทนที่ 1 ตำแหน่ง และ 2 ตำแหน่ง 18
3.1	ลักษณะการบรรจุขวด Vial ลงในส่วนบรรจุตัวอย่าง 31
3.2	อ่างควบคุมอุณหภูมิ Tempering Bath for Viscosity Tubes - High Temperature 33
3.3	ลักษณะของหลอดคาปิลลารี 34
3.4	ลักษณะของเครื่องวัดจุดควบไฟ 35
3.5	ลักษณะของไฮโครมิเตอร์สำหรับวัดความถ่วงจำเพาะเชื้อเพลิง 36
3.6	ลักษณะของเครื่องวัดอุณหภูมิการกลั่น 37
3.7	ลักษณะของเครื่องวัดค่าความร้อนเชื้อเพลิง 38
3.8	ลักษณะของเครื่องทดสอบความสามารถในการหล่อลื่น HFRR 41
3.9	ลักษณะชุดทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นที่พร้อมทดสอบ 41
3.10	ลักษณะรอยขีดและความยาวแนวแกนตั้งและแกนนอน 42
3.11	เครื่องมือวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR 45
3.12	เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการที่สามารถปรับอัตราส่วนการอัดได้และ ไดนาโมมิเตอร์ 47
3.13	ส่วนควบคุมการกระกรรมและทดสอบอัตราการบริ โภคเชื้อเพลิงของชุดทดสอบ 47
3.14	ลักษณะการเชื่อมต่อเครื่องยนต์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ 48
3.15	เครื่องวิเคราะห์ไอเสีย TESTO 350 51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 เครื่องวิเคราะห์ไอเสีย HORIBA MEXA-584L	51
3.17 เครื่องวิเคราะห์เขม่าควัน TESTO 308.....	52
4.1 ผลการวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีของตัวอย่างในสารละลายไอโซออกเทน	55
4.2 ผลการวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีของกรดไขมันด้วยกรดไขมันมาตรฐาน ชนิดเอทิลเอสเทอร์	56
4.3 ผลการวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีของกรดไขมันชนิดอื่นมาตรฐาน	57
4.4 ผลการวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีของตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล จากแหล่งบริสุทธิ์	58
4.5 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์หากรดไขมันจากน้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่ง ที่ผลิตได้ในแต่ละสถานะ	59
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนมวลโมเลกุลน้ำมันละหุ่งต่อเอทานอล กับร้อยละกรดไขมันรวมที่ผลิตได้	63
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยา KOH กับร้อยละ กรดไขมันรวมที่ผลิตได้	64
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยากับร้อยละกรดไขมันรวม ที่ผลิตได้	64
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับร้อยละกรดไขมันรวม ที่ผลิตได้	65
5.1 ลักษณะรอยจุดที่เกิดขึ้นจากน้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่ง	75
5.2 ลักษณะรอยจุดที่เกิดขึ้นจากเชื้อเพลิงผสม COEE5	76
5.3 ลักษณะรอยจุดที่เกิดขึ้นจากเชื้อเพลิงผสม COEE8	76
5.4 ลักษณะรอยจุดที่เกิดขึ้นจากเชื้อเพลิงผสม COEE10	77
5.5 ลักษณะรอยจุดที่เกิดขึ้นจากเชื้อเพลิงผสม COEE15	77
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเชื้อเพลิงกับขนาดของรอยจุดเฉลี่ย	78
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเชื้อเพลิงกับสัมประสิทธิ์ความเสี่ยงความเสียหาย	79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่นกับร้อยละการส่งผ่านบริเวณ ออกซิเดชันของเชื้อเพลิง	81
5.9 บริเวณที่เกิดการออกซิเดชันจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่น ของน้ำมันดีเซล(ด้านบนรอยชุดซัด)	82
5.10 บริเวณที่เกิดการออกซิเดชันจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่น ของน้ำมันดีเซล(ด้านล่างรอยชุดซัด)	82
5.11 โครงสร้างของ Alkene แบบ Disubstituted (cis)	83
5.12 บริเวณที่เกิดการออกซิเดชันจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่น ของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหุ้ง (ด้านบนรอยชุดซัด)	84
5.13 บริเวณที่เกิดการออกซิเดชันจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่น ของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหุ้ง (ด้านบนรอยชุดซัด)	84
5.14 โครงสร้างอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่พบจากน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหุ้ง	85
5.15 บริเวณที่เกิดการออกซิเดชันจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่น ของเชื้อเพลิงผสม (COEE8) (ด้านบนรอยชุดซัด)	87
5.16 บริเวณที่เกิดการออกซิเดชันจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่น ของเชื้อเพลิงผสม (COEE8) (ด้านล่างรอยชุดซัด)	87
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่นกับร้อยละการส่งผ่านบริเวณรอยชุดซัด	91
5.18 บริเวณรอยชุดซัดจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมันดีเซล	91
5.19 บริเวณรอยชุดซัดจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่น ของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหุ้ง	93
5.20 บริเวณรอยชุดซัดจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่น ของเชื้อเพลิงผสม COEE8	95
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในกระบอกสูบกับมุมของเพลลาข้อเหวี่ยง และอัตราการปลดปล่อยความร้อนกับมุมของเพลลาข้อเหวี่ยง เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 16:1 และรับภาระกรรม 25%	99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระกรรมกับอัตราค่าบริการ โภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก	106
6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระกรรมกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก.....	108
6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระกรรมกับปริมาณไนโตรเจนออกไซด์.....	110
6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระกรรมกับปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอน.....	112
6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระกรรมกับปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์.....	113
6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระกรรมกับปริมาณเขม่าควัน.....	115



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

%Yield	=	ร้อยละของน้ำมัน ไบโอดีเซลที่ผลิตได้
ASTM	=	มาตรฐานการทดสอบของสมาคมการทดสอบและวัสดุประเทศสหรัฐอเมริกา
ATR	=	เทคนิควิเคราะห์ Attenuated Total Reflectance
BSFC	=	อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก
BTE	=	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก
CI	=	ดัชนีซีเทน
CN _{FAEE}	=	เลขซีเทนของแอลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมันชนิดนั้นๆ
CN _{Fuel}	=	เลขซีเทนรวมของเชื้อเพลิง
CO	=	คาร์บอนมอนอกไซด์
COEE	=	น้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่งชนิดเอทิลเอสเทอร์
FTIR	=	เทคนิควิเคราะห์ Fourier Transform Infrared Spectroscopy
GC	=	เทคนิควิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี
HC	=	ไฮโดรคาร์บอน
HFRR	=	เทคนิควิเคราะห์ High Frequency Reciprocating Rig
HHV	=	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง
KOH	=	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
m _{VO}	=	มวลของน้ำมันพืชตั้งต้น
m _f	=	อัตราการไหลของเชื้อเพลิง
MW _{FAEE}	=	มวลโมเลกุลของเอสเทอร์ของกรดไขมันในน้ำมันไบโอดีเซล
MWSD	=	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยจุดขีด
MW _{VO}	=	มวลโมเลกุลของน้ำมันพืชตั้งต้น
NC	=	จำนวนอะตอมของคาร์บอนในเอสเทอร์ของกรดไขมันชนิดนั้นๆ
ND	=	จำนวนพันธะคู่ของพันธะคาร์บอนในเอสเทอร์ของกรดไขมันชนิดนั้นๆ
NO _x	=	ไนโตรเจนออกไซด์
P	=	ความดันภายในกระบอกสูบ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

P_b	=	กำลังเบรคของเครื่องยนต์
Q	=	ความร้อนที่ปลดปล่อยออกมา
$RoHR$	=	อัตราการปลดปล่อยความร้อน
$S.G.$	=	ความถ่วงจำเพาะของเชื้อเพลิง ณ อุณหภูมิที่สนใจ
SOC	=	จุดเริ่มต้นการจุดระเบิด
T_b	=	แรงบิดเบรคของเครื่องยนต์
V	=	ปริมาตรภายในกระบอกสูบ
X_{FAEE}	=	ร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันชนิดนั้น ๆ
Y_{ACT}	=	ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้จริงซึ่งได้จากการชั่ง
Y_{TH}	=	ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้
ρ_{fuel}	=	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง ณ อุณหภูมิที่สนใจ
ρ_{water}	=	ความหนาแน่นของน้ำ ณ อุณหภูมิที่สนใจ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

ในปัจจุบันการศึกษาเกี่ยวกับเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในถูกให้ความสนใจมากขึ้นเพื่อลดปัญหาทางด้านมลพิษและเพิ่มสมรรถนะของเชื้อเพลิงและจะดีมากหากเชื้อเพลิงทางเลือกนั้น ๆ มาจากแหล่งทรัพยากรที่สามารถสร้างขึ้นเพื่อทดแทนได้หรือมีความสามารถในการหมุนเวียนเพื่อให้เกิดความยั่งยืนในการใช้เชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงทางเลือกต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้จำเป็นต้องมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน ซึ่งจะทำให้เชื้อเพลิงทางเลือกมีคุณสมบัติใกล้เคียงเชื้อเพลิงหลักเพื่อเป็นการช่วยป้องกันปัญหาที่จะเกิดกับระบบเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์

น้ำมันดีเซล (Diesel Fuel) เป็นเชื้อเพลิงหลักสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (Compression Ignition Engine) มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว (Schmidt and Gerpen, 2018) ซึ่งสามารถผลิตได้จากแหล่งปิโตรเลียมจึงทำให้มีข้อดีหลายอย่างเช่น มีค่าใช้จ่ายในการผลิตที่ต่ำกว่าและมีปริมาณพลังงานที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงทางเลือก สำหรับเชื้อเพลิงทางเลือกของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดนั้นมีหลายชนิด เช่น น้ำมันไบโอดีเซล (Biodiesel Fuel) และ ไดเอทิลอีเทอร์ (Diethyl Ether) แต่น้ำมันไบโอดีเซลกลับถูกให้ความสนใจมากกว่าเชื้อเพลิงทางเลือกชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงน้ำมันดีเซลมากกว่า คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทั้งสามชนิดแสดงดังตารางที่ 1.1 (Ibrahim, 2018) น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถผลิตได้จากไขมันพืชหรือสัตว์ โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน ซึ่งชนิดของเอสเทอร์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบตั้งต้นและแอลกอฮอล์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต สำหรับแหล่งวัตถุดิบของน้ำมันไบโอดีเซลส่วนใหญ่มาจากวัตถุดิบทางการเกษตรโดยตรง และอาจจะมีบางส่วนที่พยายามจะนำไขมันที่ได้จากน้ำมันที่ถูกทิ้งหลังจากการประกอบอาหารมาใช้ อย่างไรก็ตามการใช้ไขมันที่ได้จากพืชโดยตรงมีความนิยมมากกว่าเนื่องจากจะช่วยลดความผันผวน

ในการผลิตเชื้อเพลิงแต่ละครั้ง โดยข้อดีของการใช้น้ำมันไบโอดีเซลในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด คือ ช่วยลดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ได้และช่วยลดเขม่าควันที่เกิดจากการเผาไหม้ เนื่องจากเอสเทอร์ของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันไบโอดีเซล

มีปริมาณออกซิเจนมากกว่าส่งผลให้ได้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า สำหรับข้อเสียของน้ำมันไบโอดีเซล คือ มีปริมาณพลังงานที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลจึงทำให้เครื่องยนต์อาจให้กำลังที่ต่ำกว่าเมื่อใช้เชื้อเพลิงปริมาณที่เท่ากันหรือหากต้องการให้ได้กำลังเท่ากับที่ได้จากการใช้น้ำมันดีเซลจะทำให้เครื่องยนต์มีอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามน้ำมันไบโอดีเซลส่วนใหญ่ถูกระบุว่ามีความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล (Prasad et al., 2012; Lapuerta et al., 2016; Jianbo et al., 2005) จึงทำให้น้ำมันไบโอดีเซลถูกให้ความสนใจมากขึ้นหลังจากมีนโยบายปรับลดปริมาณกำมะถันในเชื้อเพลิง ซึ่งการปรับลดกำมะถันดังกล่าวส่งผลให้เชื้อเพลิงมีการหล่อลื่นที่แย่ลง เนื่องจากกระบวนการในการปรับลดกำมะถันได้นำพวกรังประกอบอื่น ๆ ที่มีส่วนช่วยในการหล่อลื่นออกไปด้วยเช่น ไนโตรเจนและออกซิเจนบางส่วน ในการศึกษาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์ในการนำของเสียจากสับปะรดมาใช้ประโยชน์ในการผลิตเป็นวัสดุดูดซับ โดยกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากของเสียสับปะรดด้วยกระบวนการกระตุ้น 3 วิธีการ ได้แก่ การกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, ทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ และกระบวนการกระตุ้นโดยสภาวะจำกัดออกซิเจน แล้วทำการประเมินความเป็นไปได้ ในการนำของเสียสับปะรดมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุดูดซับสีย้อม เพื่อบำบัดน้ำเสียสิ่งทิ้ง และทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ค่าความสามารถในการดูดซับ จลนพลศาสตร์ และการนำไปใช้กับน้ำเสียจริง เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของของเสียและลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเน่าเสียของของเสียสับปะรดได้ และเป็นประโยชน์ในการลดปริมาณของเสียและเป็นการทำของเสียไปใช้ประโยชน์ เพื่อเพิ่มมูลค่าของของเสียสับปะรด

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติของน้ำมันดีเซล น้ำมันไบโอดีเซล และไดเอทิลอีเทอร์

Properties	Fuel Type		
	Diesel	Biodiesel (from waste cooking oil)	Diethyl Ether
Lower Heating Value (MJ/kg)	44.8	40.5	33.9
Density @ 20 °C (kg/m ³)	815	855	714
Viscosity @ 40 °C (mPa-s)	2.95	4.57	0.22
Flash Point (°C)	70	126	-45
Cetane Number	52	52	125

กระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่นิยมใช้กันคือกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนองค์ประกอบของไขมันพืชหรือน้ำมันพืชตั้งต้นจากไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) เป็นแอลคิลเอสเทอร์ (Alkyl Ester) และกลีเซอรอล (Glycerol) ผ่านการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ สำหรับแอลคิลเอสเทอร์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับแอลกอฮอล์ที่ใช้เช่นหากใช้เมทิลแอลกอฮอล์หรือเมทานอล (Methyl Alcohol or Methanol) แอลคิลเอสเทอร์ที่ได้จะถูกเรียกว่า “เมทิลเอสเทอร์” หรือหากใช้เอทิลแอลกอฮอล์หรือเอทานอล (Ethyl Alcohol or Ethanol) แอลคิลเอสเทอร์ดังกล่าวจะถูกเรียกว่า “เอทิลเอสเทอร์แทน” กระบวนการดังกล่าวทำให้น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จะมีความหนืดที่ลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันพืชตั้งต้น นอกจากนี้ความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจะมีผลต่อปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้อีกด้วย ตัวอย่างปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาเช่นชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา, ชนิดของสารเร่งปฏิกิริยา, อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และเวลาในการทำปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามคุณสมบัติหลักของน้ำมันไบโอดีเซลจะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชตั้งต้นเป็นหลัก เนื่องจากน้ำมันพืชแต่ละชนิดจะมีกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบแตกต่างกันเช่นน้ำมันปาล์มจะมีองค์ประกอบหลักเป็น กรดปาล์มิติก (Palmitic Acid) และโอเลอิก (Oleic Acid) ในขณะที่น้ำมันละหุ่งจะมีองค์ประกอบหลักเป็นกรดริซิโนเลอิก (Ricinoleic Acid)

น้ำมันละหุ่งเป็นน้ำมันที่ได้จากเมล็ดละหุ่ง ซึ่งมีกรดริซิโนเลอิกเป็นองค์ประกอบหลัก โดยกรดไขมันชนิดดังกล่าวมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุลอยู่ 18 อะตอม และมีพันธะคู่ของคาร์บอนอยู่ 1 พันธะ นอกจากนี้จุดเด่นของกรดไขมันชนิดนี้คือมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl, -OH) เพิ่มเข้ามาหนึ่งตำแหน่งจึงคาดหวังว่าจะช่วยให้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมีความสมบูรณ์ขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นหมู่ไฮดรอกซิลยังช่วยให้ความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงดีขึ้นอีกด้วย (Prasad et al., 2012; Lapuerta et al., 2016; Hu et al., 2005) อย่างไรก็ตามข้อเสียของน้ำมันละหุ่งเมื่อเทียบกับน้ำมันพืชชนิดอื่น คือ ความหนืดที่มากกว่าอย่างมาก ถึงแม้จะถูกทำให้เป็นน้ำมันไบโอดีเซลจนมีความหนืดที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญก็อาจจะไม่เหมาะกับการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดเพราะอาจส่งผลเสียต่อระบบเชื้อเพลิง

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาสภาวะในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งเพื่อให้ได้ผลผลิตที่มากที่สุด โดยมีปัจจัยที่สนใจ 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนมวลโมเลกุลของน้ำมันละหุ่งต่อเอทานอล (Oil to Ethanol Molar Ratio), ความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH Concentration), อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (Reaction Temperature) และเวลาในการทำปฏิกิริยา (Reaction Time) โดยใช้วิธีเปรียบเทียบปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันรวมที่ผลิตได้ผ่าน

เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) และศึกษาเชิงเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำกับน้ำมันดีเซลทั่วไปเพื่อหาแนวทางในการใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดให้ได้มากที่สุด นอกจากนี้จะมุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางด้านความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงทั้งด้านขนาดของรอยขีดขีดที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นงานทดสอบด้วยเทคนิค High Frequency Reciprocating Rig (HFRR) และทางด้านหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบจากเทคนิค HFRR สุดท้ายจะศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์และมลพิษหลักที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำเป็นเชื้อเพลิงเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซลทั่วไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อหาสภาวะในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำที่ให้ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลมากที่สุดโดยวัดจากปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันรวมที่ผลิตได้

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำที่ได้จากการผลิตกับน้ำมันดีเซลทั่วไป

1.2.3 เพื่อตรวจหาหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิง

1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ได้จากการใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำกับน้ำมันดีเซลทั่วไปเป็นเชื้อเพลิง

1.2.5 เพื่อเปรียบเทียบมลพิษที่ถูกปล่อยจากเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำกับน้ำมันดีเซลทั่วไปเป็นเชื้อเพลิง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้ถูกแบ่งย่อยเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) การหาสภาวะในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำที่เหมาะสมซึ่งให้ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้มากที่สุด (2) การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิงและการตรวจหาหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิง และ (3) การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์และมลพิษจากไอเสียของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำกับน้ำมันดีเซล

การหาสภาวะในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำที่เหมาะสมซึ่งให้ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลมากที่สุดจะทำการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification) โดยใช้น้ำมันกะหล่ำ (Castor Oil) เป็นน้ำมันพืชตั้งต้นและใช้อทานอล (Ethanol)

เป็นแอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยา โดยมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นสารเร่งปฏิกิริยา สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตที่สนใจมี 4 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ (1) อัตราส่วนมวลโมเลกุลของน้ำมันละหุ่งต่อเอทานอล (Oil to Ethanol Molar Ratio) มี 3 ระดับ คือ 1 : 6, 1 : 9 และ 1 : 12 (2) ความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH Concentration) มี 3 ระดับ คือ 0.5%, 1.0% และ 1.5% w/w และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (Reaction Temperature) มี 3 ระดับ คือ 40 °C, 50 °C และ 60 °C และ (4) เวลาในการทำปฏิกิริยา (Reaction Time) มี 3 ระดับ คือ 90, 120 และ 150 นาที สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้จะใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี เพื่อหาชนิดและปริมาณของเอสเทอร์ของกรดไขมันที่มีอยู่ในน้ำมันไบโอดีเซลแต่ละตัวอย่าง

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิงและการตรวจหาหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงจะทำการทดสอบคุณสมบัติในส่วนของความหนืดจลนศาสตร์, จุดวาบไฟ, ความถ่วงจำเพาะ, อุณหภูมิการกลั่น, คัดนั้ซีเทน, ค่าความร้อนเชื้อเพลิง และความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิง ในการทดสอบคุณสมบัติดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM หรือ ISO โดยข้อมูลในส่วนนี้ถูกนำมาใช้อ้างอิงสำหรับการทดสอบเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์ในส่วนต่อไป หากน้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่งที่ผลิตได้มีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมการใช้งานเป็นเชื้อเพลิงหลักของเครื่องยนต์น้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่งจะถูกผสมกับน้ำมันดีเซลทั่วไปในอัตราส่วนที่มากที่สุดที่ทำให้คุณสมบัติของเชื้อเพลิงผสมไม่เกินขอบเขตที่กำหนด โดยมาตรฐานเชื้อเพลิงจากกรมธุรกิจพลังงานเป็นขอบเขตอ้างอิง ส่วนการตรวจหาหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงจะใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) แบบ Attenuated Total Reflectance (ATR) โดยจะวิเคราะห์เพื่อหาชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นเท่านั้น และจะทดสอบเฉพาะชิ้นงานจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซล, น้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่ง และเชื้อเพลิงผสม

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษจากไอเสียของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่งกับน้ำมันดีเซล จะทดสอบด้วยเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการอัดได้ โดยจะทดสอบด้วยอัตราส่วนการอัด 3 อัตราส่วน คือ 16 : 1, 17 : 1 และ 18 : 1 โดยทำการคงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ไว้ที่ 1,500 รอบต่อนาที และปรับเปลี่ยนภาระงาน 3 ระดับ คือ 50%, 75% และ 90% ของแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ สำหรับสมรรถนะที่สนใจ ได้แก่ อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake Specific Fuel Consumption, BSFC) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (Brake Thermal

Efficiency, BTE) ส่วนมลพิษที่ผู้วิจัยสนใจ ได้แก่ ไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen Oxides, NO_x), ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon, HC), คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide, CO) และเขม่าควัน (Smoke)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้สถานะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหุ้งโดยใช้เอทานอลเป็น แอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยาซึ่งให้ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลมากที่สุด

1.4.2 ได้ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบทางด้านคุณสมบัติของเชื้อเพลิงของน้ำมันไบโอดีเซล จากกะหุ้งกับน้ำมันดีเซลและเชื้อเพลิงผสม

1.4.3 ได้ข้อมูลเชิงคุณภาพของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหุ้งกับน้ำมันดีเซลและเชื้อเพลิงผสม

1.4.4 ได้ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบทางด้านสมรรถนะที่ได้จากเครื่องยนต์และมลพิษไอเสีย ที่เครื่องยนต์ปล่อยออกมาจากการใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหุ้งและน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำมันละหุ่ง (Castor Oil)

ละหุ่งมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า “*Ricinus Communis*” จัดอยู่ในวงศ์ยางพารา (Euphorbiaceae) มีลักษณะเป็นไม้พุ่มซึ่งอาจสูงได้ถึง 6 เมตร ใบมีลักษณะเป็นใบเดี่ยวเรียงสลับกัน ขอบใบหยักเป็นแฉกแบบนิ้วมือ 5-12 แฉก เนื้อใบค่อนข้างบาง สีเขียวหรือสีเขียวแกมแดงหรือสีแดงแกมส้ม ก้านใบยาว 10-30 เซนติเมตร ดอกออกเป็นช่อที่ยอดหรือตามปลายกิ่ง ช่อดอกตั้งตรง ดอกย่อยสีเขียวอมเหลืองหรือสีม่วงแดง แยกเพศแต่อยู่บนช่อเดียวกัน โดยดอกตัวผู้อยู่ส่วนบน ส่วนดอกตัวเมียอยู่ส่วนล่าง ผลรูปไข่มี 3 พู เมื่ออ่อนมีสีเขียวหรือสีเขียวแกมม่วง มีหนามอ่อน ๆ คลุม เมื่อแก่จะแห้งแตกได้ ภายในมีเมล็ด 1-3 เมล็ด ส่วนเมล็ดละหุ่งจะมีลักษณะเป็นรูปทรงรี เปลือกเมล็ดมีสีน้ำตาลแดงประขาวหรือเป็นจุดสีน้ำตาลปนเทาเป็นลายคล้ายกับตัวเห็บ สีจะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ เนื้อในเมล็ดมีสีขาว มีโปรตีนที่มีพิษ ภายในเนื้อเมล็ดจะมีน้ำมันอยู่โดยน้ำมันจากเมล็ดละหุ่งจะมีลักษณะเป็นของเหลวข้น เหนียวใส ไม่มีสี หรือมีสีเหลืองอ่อน ๆ น้ำมันมีกลิ่นเล็กน้อย มีรสฝื่อน มันเยียน และเผ็ดเล็กน้อย (สุภารัตน์ หอมหวล, 2554) ลักษณะของต้นและเมล็ดละหุ่งแสดงดังรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ลักษณะของต้นละหุ่ง

จากการที่เมล็ดละหุ่งมีโปรตีนที่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์และสัตว์จึงทำให้น้ำมันที่ได้จากการสกัดเมล็ดละหุ่งถูกจัดอยู่ในน้ำมันพืชที่ไม่สามารถรับประทานได้ (Non-Edible Vegetable Oil) ซึ่งเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่จัดอยู่ในเชื้อเพลิงไบโอดีเซลยุคที่สอง (Second Generation) ที่ส่งเสริมให้ใช้น้ำมันพืชที่ไม่สามารถรับประทานได้ในการผลิต สำหรับกรดไขมันที่มีอยู่ในน้ำมันละหุ่ง Jumat et al. (2010) ได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งจากประเทศต่าง ๆ ไว้ดังที่แสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2 ลักษณะของเมล็ดละหุ่ง

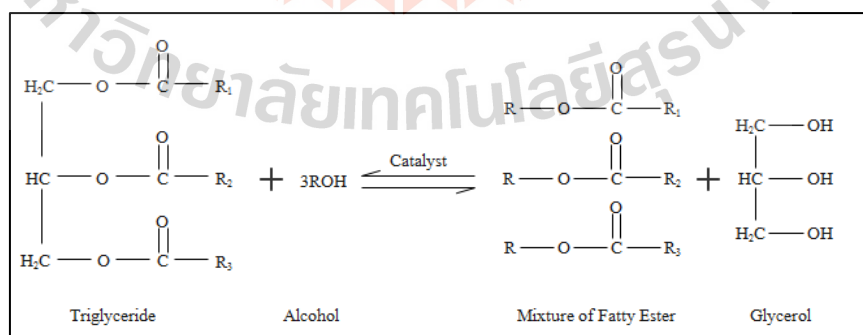
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของกรดไขมันที่มีอยู่ในน้ำมันละหุ่ง

Fatty Acid	Lipid Number	Percentage (%)		
		Malaysia	Brazil	India
Palmitic	C16:0	1.3	0.7	-
Stearic	C18:0	1.2	0.9	1.0
Oleic	C18:1	5.5	2.8	-
Linoleic	C18:2	7.3	4.4	4.3
Linolenic	C18:3	0.5	0.2	-
Ricinoleic	C18:1OH	84.2	90.2	94.0
Saturated Fatty Acid	-	2.5	1.6	1.0
Unsaturated Fatty Acid	-	97.5	97.6	98.3

2.2 น้ำมันไบโอดีเซล (Biodiesel)

ไบโอดีเซล คือ แอลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมันสายโซ่ยาว (Alkyl Ester of Long Chain Fatty Acid) (จิตรภรณ์ เลาหุบุญญาภูกุล, 2556) ซึ่งสามารถผลิตได้จากการนำไขมันพืชหรือสัตว์ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) มาผ่านกระบวนการทางเคมีเปลี่ยนเป็นน้ำมันไบโอดีเซล วัตถุประสงค์ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่นิยมใช้คือน้ำมันพืชเนื่องจากเป็นแหล่งวัตถุดิบที่มีปริมาณมากและสามารถสร้างขึ้นทดแทนได้อย่างรวดเร็ว สำหรับประเทศไทยนิยมใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากปาล์มเป็นวัตถุดิบเนื่องจากเป็นผลผลิตที่มีปริมาณมากและราคาถูก น้ำมันไบโอดีเซลมีคุณสมบัติที่ดีกว่าน้ำมันดีเซลหลายอย่างเช่นมีค่าซีเทนที่สูงกว่าซึ่งช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์กว่า, มีจุดวาบไฟที่สูงกว่าส่งผลให้การขนส่งมีความปลอดภัยมากขึ้น, มีปริมาณกำมะถันที่ต่ำกว่าจึงช่วยลดการเกิดมลพิษจากกำมะถันลง และมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นที่สูงกว่าจึงทำให้ชิ้นส่วนเคลื่อนที่ที่สัมผัสกับน้ำมันไบโอดีเซลมีอายุการใช้งานที่นานกว่า แต่คุณสมบัติด้านความหนืดที่สูงกว่าของน้ำมันไบโอดีเซลอาจส่งผลให้การฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้มีลักษณะที่เป็นละอองขนาดใหญ่ซึ่งเผาไหม้ได้ยากกว่า อย่างไรก็ตาม เอสเทอร์ของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันไบโอดีเซลมีปริมาณออกซิเจนที่มากกว่าน้ำมันดีเซลซึ่งช่วยให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์มากกว่าน้ำมันดีเซล

กระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่นิยมใช้กันคือปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืชไปเป็นแอลคิลเอสเทอร์และกลีเซอรินหรือกลีเซอรอล (Glycerin or Glycerol) โดยใช้แอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยาและใช้สารเร่งปฏิกิริยาช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้อย่างสมบูรณ์และลดการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับสมการสำหรับอธิบายการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สมการการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

สำหรับชนิดของหมู่แอลคิลของเอสเทอร์ของกรดไขมันจะขึ้นอยู่กับแอลกอฮอล์ที่ใช้ ตัวอย่างเช่นถ้าใช้เมทานอลเป็นแอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยาหมู่แอลคิลที่ได้จะเป็นเมทิล และหากใช้เอทานอลในการทำปฏิกิริยาหมู่แอลคิลที่ได้จะเป็นเอทิล โดยแอลคิลเอสเทอร์แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ตัวอย่างดังที่แสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งแสดงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งชนิดเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ (Yusoff et al., 2014)

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ได้จากกระบวนการทรานส์-เอสเตอริฟิเคชัน

2.3.1 เอทานอล (Ethanol)

แอลกอฮอล์ที่ใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันมีหลายชนิดแต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือเมทานอล (Methanol, CH_3OH) เนื่องจากเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวใส ระเหยง่าย มีความเป็นพิษต่อร่างกายสูง โดยเมทานอลสามารถซึมเข้าสู่ผิวหนังได้ทำให้เกิดการระคายเคือง หากสูดดมไอระเหยของเมทานอลจะทำให้ทางเดินหายใจอักเสบ หากเข้าตาจะทำให้เกิดการอักเสบของเยื่อตา จนถึงทำให้ตาบอด หากรับประทานเข้าไปจะเกิดการปวดท้อง คลื่นไส้ เวียนหัว อาเจียน กล้ามเนื้อกระตุก การหายใจติดขัด และการมองเห็นผิดปกติ จนถึงทำให้ตาบอด ส่วนเอทานอล (Ethanol, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) เป็นแอลกอฮอล์ที่ได้จากกระบวนการหมักวัตถุดิบทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ มีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี ระเหยได้ไวไฟสูง ละลายน้ำได้ เอทานอลถูกจัดเป็นแอลกอฮอล์ที่สามารถรับประทานได้ สำหรับความเป็นพิษต่อร่างกาย คือ โรคสุราเรื้อรังและตับอักเสบจากการรับประทานเครื่องดื่มที่มีเอทานอลเป็นระยะเวลานาน และเกิดการเมาสำหรับการรับประทานเอทานอลในปริมาณมากในครั้งเดียว (ศูนย์สื่อสารวิทยาศาสตร์ไทย, 2553) โดยคุณสมบัติของเอทานอลและเมทานอลแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งชนิดเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์

Fuel Properties	Alkyl Ester	
	Methyl	Ethyl
Cetane Number	43.9	43.8
Acid Value (mg KOH/g)	0.08	0.1
Cold Filter Plug ($^{\circ}\text{C}$)	0	0
Lubricity at 60°C (μm)	227	203
Oxidation Stability at 110°C (h)	15.7	19.4

จากการที่เอทานอลสามารถละลายน้ำได้จึงทำให้อิทธิพลของน้ำในอากาศสามารถเจือปนเข้าสู่เอทานอลได้ส่งผลให้ความบริสุทธิ์ลดลง และการทำให้เอทานอลมีความบริสุทธิ์มากขึ้น จำเป็นต้องใช้กระบวนการที่มีความซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายสูง เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูง จึงมีราคาแพง อีกทั้งการใช้งานแอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกหรือเชื้อเพลิงเสริมสำหรับเครื่องยนต์จำเป็นต้องใช้แอลกอฮอล์ที่มีความบริสุทธิ์สูง ลักษณะเช่นเดียวกับกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่ต้องการแอลกอฮอล์ที่มีความบริสุทธิ์สูงเพื่อให้ได้ปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันมาก (Atadashi, 2012) ด้วยเหตุผลดังกล่าวเมทานอลจึงเป็นที่นิยมในการใช้งานมากกว่า อย่างไรก็ตามด้วยคุณสมบัติการเป็นวัตถุดิบหมุนเวียน (Renewable Resource) จึงทำให้อเอทานอลมีความน่าสนใจมากขึ้นในฐานะแอลกอฮอล์ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของเอทานอลและเมทานอล

Properties	Ethanol	Methanol
Molecular Formula	C ₂ H ₅ OH	CH ₃ OH
Molecular Mass (g/mol)	46.07	32.04
Density at 20 °C (g/cm ³)	0.789	0.792
Vapor Pressure (kPa, 20 °C)	5.95	13.02
Melting Point (°C)	-155	-97.6
Boiling Point (°C)	78.4	64.7
Flash Point (°C)	13-14	11-12
Viscosity (Pa·s, 20 °C)	1.2 × 10 ⁻³	5.9 × 10 ⁻⁴
Kinematic Viscosity (m ² s ⁻¹ , 20 °C)	1.82 × 10 ⁻⁶	8.39 × 10 ⁻⁷

สำหรับอัตราส่วนมวล โมเลกุลของน้ำมันพืชต่อเอทานอลที่พอดีในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันคือ 1:3 เนื่องจากกระบวนการต้องการใช้แอลกอฮอล์ 3 โมล ในการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ 1 โมล เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน 3 โมล และกลีเซอรอล 1 โมล (Musa, 2016) อย่างไรก็ตามการที่ปฏิกิริยาจะเกิดได้อย่างสมบูรณ์เป็นเรื่องยากหากไม่มีการใช้สารเร่งปฏิกิริยาและควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสม ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการใช้อัตราส่วนโมลน้ำมันพืชต่อแอลกอฮอล์เกินค่าพอดีคือใช้แอลกอฮอล์มากกว่า 3 โมล ยิ่งไปกว่านั้นข้อดีของการใช้อัตราส่วนโมลน้ำมันพืชต่อแอลกอฮอล์สูงจะทำให้ได้ปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันมากตามไปด้วย (Anastopoulos et al., 2009)

2.3.2 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, KOH)

โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโพแทสเซียมมีสูตรโมเลกุลคือ KOH มีลักษณะเป็นของแข็ง ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีคุณสมบัติเป็นด่างและมีฤทธิ์กัดกร่อนรุนแรงต่อน้ำเยื่อ โดยมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 2.4 สำหรับกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ถูกใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยา โดยข้อดีของการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาคือให้ปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ได้จากกระบวนการสูงกว่าสารเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด (Atadashi, 2013)



รูปที่ 2.4 ลักษณะของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

สำหรับปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชตั้งต้น และชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เพราะหากใช้สารเร่งปฏิกิริยาน้อยเกินไปจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ไม่สมบูรณ์ ในทางตรงกันข้ามหากใช้มากเกินไปจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบเกินความจำเป็น (Anastopoulos et al., 2009)

2.3.3 เวลาในการทำปฏิกิริยา (Reaction Time)

เวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมัน จากกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน กล่าวคือหากใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้นจะทำให้ปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ได้มากตามไปด้วย แต่หากใช้เวลานานเกินไปจะทำให้เกิดความสิ้นเปลืองทั้งพลังงานและค่าใช้จ่ายในการผลิต โดยงานวิจัยของ Daniyan et al. (2015) ระบุว่าปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ได้จะมากที่สุดหากใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง และหลังจากนั้นปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ได้จะเริ่มลดลง

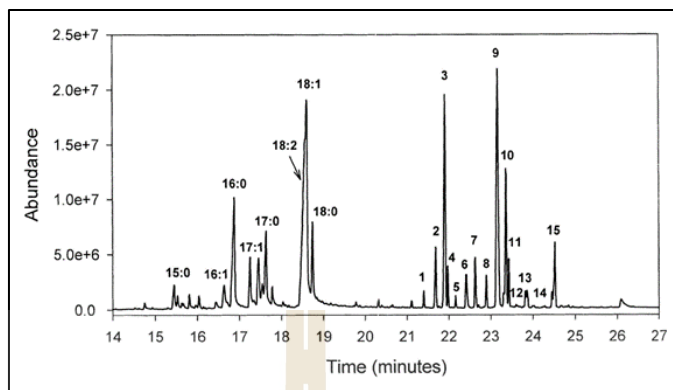
2.3.4 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (Reaction Temperature)

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ผลิตได้ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงโมเลกุลของสารตั้งต้นในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจะมีพลังงานจลน์สูง ส่งผลให้โมเลกุลดังกล่าวเกิดการพุ่งกระจายและเกิดการชนซึ่งทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูง โดย Uzun et al. (2012) ระบุว่าปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ผลิตได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยอุณหภูมิ 80 °C มีค่ามากกว่าอุณหภูมิ 35 °C และ Daniyan et al. (2015) ระบุว่าปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ผลิตได้ ณ สภาวะที่อุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้ปฏิกิริยาใช้เวลาน้อยกว่าในเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคืออุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

2.4 เทคนิควิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC)

แก๊สโครมาโทกราฟี (GC) เป็นเทคนิควิเคราะห์องค์ประกอบของสารผสม โดยการทำให้สารตัวอย่างระเหยกลายเป็นไอซึ่งไอระเหยดังกล่าวจะถูกฉีดเข้าสู่คอลัมน์ (Column) พร้อมกับแก๊สตัวพา (Carrier Gas) ที่เป็นแก๊สเฉื่อยเช่นไนโตรเจนและฮีเลียม โดยคอลัมน์จะมีลักษณะเป็นท่อแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-8 มิลลิเมตร ความยาวตั้งแต่ 2-20 เมตร ขดเป็นวงกลม หลังจากที่ถูกฉีดเข้าสู่คอลัมน์แล้วไอระเหยของตัวอย่างจะถูกพาให้ออกจากคอลัมน์โดยแก๊สตัวพา ในขั้นตอนนี้เฟสที่อยู่กับที่ (Stationary Phase) จะสร้างแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตเพื่อดึงดูดโมเลกุลของสารผสมแต่ละชนิด โดยสารที่มีสภาพขั้วต่างกันจะถูกดึงดูดด้วยแรงที่ต่างกัน ส่งผลให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ภายในคอลัมน์ต่างกันไปด้วย ที่ปลายสุดของคอลัมน์จะเป็นตำแหน่งของส่วนตรวจจับ (Detector) ที่มีหน้าที่ตรวจจับไอระเหยของสารแต่ละชนิด หลังจากที่ตรวจจับแล้วข้อมูลที่ได้จะส่งมาแสดงผลที่หน่วยแสดงผล ซึ่งแสดงผลในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง Retention Time กับปริมาณของสารที่ตรวจจับได้ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นยอดกราฟปลายแหลม (Peak) โดยมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.5 ส่วนลักษณะของตัวอย่างเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีแสดงดังรูปที่ 2.6

โดยทั่วไปตัวอย่างที่สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีจะต้องเป็นสารอินทรีย์ที่มีจุดเดือดต่ำเพราะหากจุดเดือดสูงจะทำให้ผลการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนได้ สำหรับการวิเคราะห์กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันพืชชนิดต่างๆจะใช้วิธีการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเพื่อลดจุดเดือดของตัวอย่างลง



รูปที่ 2.5 ลักษณะของผลจากเทคนิควิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างชุดวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี

2.5 คุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิง

2.5.1 ความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic Viscosity)

ความหนืดจลนศาสตร์ คือ ความเสียดทานภายในหรือความต้านทานการไหลของเชื้อเพลิงภายใต้แรงโน้มถ่วงหรือคืออัตราส่วนของความหนืดพลวัต (Dynamic Viscosity) ต่อความหนาแน่นของเชื้อเพลิง มีหน่วยเป็นเซนติสโตก (cSt) ในการทดสอบความหนืดจลนศาสตร์ จะดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D445 ซึ่งจะทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C ในอดีตความหนืดเคยถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิง โดยที่เชื้อเพลิงใดที่มีค่าความหนืดมากจะถือว่ามีความสามารถในการหล่อลื่นสูงตามไปด้วย ปัจจุบันความหนืดถูกใช้เพื่อคาดเดาลักษณะของ

ละอองเชื้อเพลิงที่ถูกป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ โดยที่เชื้อเพลิงใดที่มีค่าความหนืดสูงจะส่งผลละอองน้ำมันที่ถูกป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้มีขนาดใหญ่ซึ่งยากต่อการเผาไหม้

2.5.2 จุดวาบไฟ (Flash Point)

จุดวาบไฟคืออุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ไอระเหยของเชื้อเพลิงสามารถลุกติดไฟได้ แต่ไม่สูงเกินจนเกิดการลุกติดไฟอย่างต่อเนื่อง มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) ในการทดสอบจุดวาบไฟของเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดจะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D93 ประโยชน์ของจุดวาบไฟ คือ ใช้บ่งบอกถึงความไวไฟของเชื้อเพลิง โดยที่เชื้อเพลิงที่มีจุดวาบไฟต่ำจะถือว่ามีความไวไฟสูง ซึ่งใช้ในการประเมินและออกแบบสถานที่กักเก็บเชื้อเพลิงหรืออุปกรณ์เคลื่อนย้ายเชื้อเพลิง

2.5.3 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

ความถ่วงจำเพาะ คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของเชื้อเพลิงต่อความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิที่สนใจเดียวกัน เป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย ในการทดสอบความถ่วงจำเพาะจะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D1298 ซึ่งจะทดสอบที่อุณหภูมิ 15.6°C ความถ่วงจำเพาะถูกใช้เป็นปริมาณที่บอกความหนักเบาของเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังถูกใช้ในการคำนวณหาดัชนีซีเทนร่วมกับอุณหภูมิการกลั่นร้อยละ 50 อีกด้วย

2.5.4 อุณหภูมิการกลั่น (Distillation Temperature)

อุณหภูมิการกลั่นคืออุณหภูมิที่ไอระเหยของเชื้อเพลิงกลั่นตัวได้ปริมาณตามที่กำหนดจากการให้ความร้อนแก่เชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่องมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) ในการทดสอบจุดวาบไฟจะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D1298 ซึ่งจะใช้ทดสอบการกลั่นตัวที่ 90% ของปริมาตรเริ่มต้น อุณหภูมิการกลั่นถูกใช้การคำนวณหาค่าดัชนีซีเทนร่วมกับค่าความถ่วงจำเพาะ

2.5.5 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Heating Value)

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงคือพลังงานความร้อนที่เชื้อเพลิงสามารถปลดปล่อยออกมาได้ต่อหนึ่งหน่วยมวลจากการเผาไหม้ มีหน่วยเป็นจูลต่อกรัม (J/g) โดยทั่วไปเชื้อเพลิงมักมีพลังงานความร้อนสูงจึงมักบอกอยู่ในหน่วยกิโลจูลต่อกิโลกรัมหรือเมกะจูลต่อกิโลกรัม (kJ/kg , MJ/kg) ในการทดสอบค่าความร้อนเชื้อเพลิงจะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D240 ค่าความร้อนเชื้อเพลิงถูกใช้เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน และใช้เพื่อคาดเดาอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่มีการใช้เชื้อเพลิงนั้น ๆ โดยที่เชื้อเพลิงใดที่มีค่าพลังงานความร้อนต่ำจะถูกคาดเดาว่าเครื่องยนต์จะมีอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงสูง

2.5.6 ดัชนีซีเทน (Cetane Index)

ดัชนีซีเทนเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงความสามารถในการคลุกเคล้ากันของเชื้อเพลิงและอากาศซึ่งมีผลต่อการจุดระเบิดของเชื้อเพลิง เป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย ในการทดสอบจุดวาบไฟจะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D240 ดัชนีซีเทนถูกใช้เพื่อคาดเดาความช้าเร็วในการจุดระเบิดของเชื้อเพลิง โดยที่เชื้อเพลิงใดที่มีดัชนีซีเทนสูงจะบ่งบอกเชื้อเพลิงนั้นจุดระเบิดได้รวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ความช้าเร็วในการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงจำเป็นต้องสอดคล้องต่อการออกแบบของเครื่องยนต์ด้วยเพื่อให้การจุดระเบิดเกิดขึ้นในจังหวะที่เหมาะสม

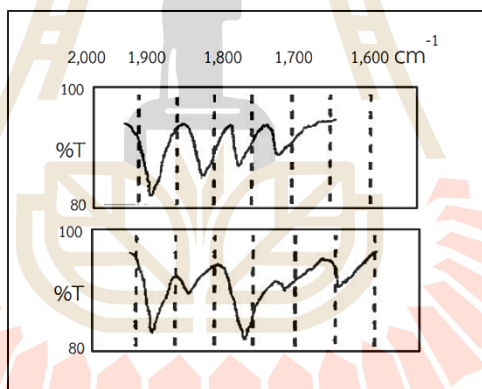
2.5.7 ความสามารถในการหล่อลื่น (Lubricity)

ความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงคือปริมาณที่บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานความเสียหายระหว่างพื้นผิวที่สัมผัสกับเชื้อเพลิง ซึ่งเกิดจากการเคลือบเป็นชั้นของเชื้อเพลิงที่พื้นผิว มักบอกในหน่วยไมโครเมตร (μm) ซึ่งเป็นความยาวของรอยขีดข่วนจากชิ้นงานทดสอบ ในการทดสอบจุดวาบไฟจะดำเนินการตามมาตรฐาน ISO12156-1 ความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงถูกใช้เพื่อคาดเดาความเสียหายของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ที่สัมผัสกับเชื้อเพลิง เช่น ปั๊มเชื้อเพลิงและกลไกของหัวฉีด

2.6 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) แบบ Attenuated Total Reflectance (ATR)

FTIR เป็นเทคนิคทางอินฟราเรดที่ใช้ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลของตัวอย่าง โดยนิยมใช้วิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ หลักการทำงานคือส่วนกำเนิดแสงปล่อยแสงที่อยู่ในช่วงอินฟราเรดไปยังตัวอย่าง ซึ่งพันธะเคมีในตัวอย่างจะดูดกลืนพลังงานจากแสงที่ความยาวคลื่นค่าหนึ่ง จากนั้นส่วนตรวจจับจะตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงดังกล่าวและส่งสัญญาณไปที่หน่วยประมวลผล เมื่อหน่วยประมวลผลได้รับสัญญาณมาแล้วจะทำการแปลงผลให้อยู่ในรูปสเปกตรัม (Spectrum) ซึ่งมีลักษณะที่แสดงดังรูปที่ 2.7 ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ที่ชื่อ Fourier Transform ส่วน ATR เป็นเทคนิคทางอินฟราเรดรูปแบบหนึ่งที่ทำางร่วมกับเทคนิค FTIR ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีความหนาไม่มากจนไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR แบบปกติได้ ในการทำงานของเทคนิค ATR จะใช้หลักการการสะท้อนของลำแสงอินฟราเรดส่งไปยังตัวอย่าง เมื่อลำแสงตกกระทบไปที่ตัวอย่าง โมเลกุลของหมู่ฟังก์ชันในตัวอย่างจะหักเหลำแสงและสะท้อนลำแสงไปที่ส่วนตรวจจับ หลังจากได้รับสัญญาณแสงมาส่วนตรวจจับจะแปลงข้อมูลและส่งไปประมวลผลด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ เช่นเดียวกับเทคนิค FTIR

ในการวิเคราะห์สเปกตรัมจะสนใจปริมาณ 3 อย่าง คือ (1) เลขคลื่นที่เกิดยอดกราฟ ซึ่งมักจะบอกอยู่ในหน่วย cm^{-1} , (2) ความเข้มของสัญญาณ และ (3) ลักษณะของสัญญาณสำหรับหมู่ฟังก์ชันที่มีสัญญาณในช่วง Fingerprint Region เช่น หมู่อะโรมาติก (Aromatic) ในการวิเคราะห์โดยทั่วไปจะใช้แสงอินฟราเรดในย่านกลางที่มีเลขคลื่น $4,000\text{-}200\text{ cm}^{-1}$ เลขคลื่นจะเป็นปริมาณที่สำคัญในการวิเคราะห์ข้อมูลเนื่องจากใช้ระบุว่ายอดกราฟที่เกิดขึ้นเป็นหมู่ฟังก์ชันชนิดใดและมีการสั่นของโมเลกุลแบบใดเช่นที่เลขคลื่นประมาณ $2,872\text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงแอลเคนหมู่เมทิล (Methyl, $-\text{CH}_3$) ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืดสมมาตร และที่เลขคลื่นประมาณ $2,853\text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงแอลเคนหมู่เมทิลลีน (Methyl, $-\text{CH}_2-$) ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืดสมมาตร ส่วนความเข้มของสัญญาณจะใช้ในการระบุหมู่ฟังก์ชันที่เกิดยอดกราฟที่เลขคลื่นใกล้เคียงกัน ในขณะที่ลักษณะของสัญญาณจะใช้ในการระบุหมู่ฟังก์ชันที่มีลักษณะเฉพาะเช่นหมู่อะโรมาติกที่มีหมู่แทนที่ 1 และ 2 ตำแหน่งจะมีลักษณะของยอดกราฟช่วง Fingerprint Region (เลขคลื่น $2,000\text{-}1,600\text{ cm}^{-1}$) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะความถี่ในช่วง Fingerprint Region ของอะโรมาติกที่มีหมู่แทนที่ 1 ตำแหน่ง (ด้านบน) และ 2 ตำแหน่ง (ด้านล่าง)

หมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงจะส่งผลต่อขนาดของรอยขีดแตกต่างกัน โดยที่หมู่ฟังก์ชันที่มีความสามารถในการหล่อลื่นเรียงจากดีสุดไปแย่สุดได้ดังนี้ $-\text{COOH} > -\text{OH} > -\text{COOCH}_3 \gg \text{C}=\text{O} > \text{C}-\text{O}-\text{C}$ และสำหรับเมทิลเอสเทอร์ ความสามารถในการหล่อลื่นจะขึ้นอยู่กับหมู่ $-\text{COOCH}_3$ เป็นหลัก ในขณะที่เอทิล-, โพรพิล- และ บิวทิล- เอสเทอร์ความสามารถในการหล่อลื่นจะขึ้นอยู่กับหมู่ $\text{C}=\text{O}$ เป็นหลักเนื่องจากการขาดแคลนหมู่ $-\text{COOCH}_3$ ในโมเลกุลของเชื้อเพลิง (Agarwal et al, 2013) ในขณะที่ Sukjit et al. (2017) ระบุว่า

หมู่ฟังก์ชันที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงสามารถเรียงจากดีสุดไปแย่สุดได้ ดังนี้ $\text{carboxyl} > \text{aldehyde} > \text{hydroxyl} > \text{ester} > \text{ether} > \text{ketone}$ นอกจากนี้ยังระบุอีกว่าการเพิ่มขึ้นของความยาวสายโซ่โมเลกุลของเอสเทอร์ของกรดไขมันจะช่วยให้ชั้นฟิล์มที่เคลือบบนผิววัสดุมีความหนามากขึ้น ส่งผลให้ขนาดของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลง

2.7 คุณลักษณะการเผาไหม้

ในการพิจารณาคุณลักษณะการเผาไหม้สามารถพิจารณาได้จากพารามิเตอร์ที่สำคัญสองอย่างได้แก่ความดันภายในกระบอกสูบ (In-Cylinder Pressure) และอัตราการปลดปล่อยความร้อน (Rate of Heat Release) โดยมีรายละเอียดดังนี้

ความดันภายในกระบอกสูบ (In-Cylinder Pressure) คือ ความดันที่เกิดขึ้นระหว่างวัฏจักรในการทำงานของเครื่องยนต์ ซึ่งประกอบด้วยจังหวะดูด (Intake Stroke), จังหวะอัด (Compression Stroke) จังหวะระเบิดหรือจังหวะขยาย (Combustion Stroke or Expansion Stroke) และจังหวะคาย (Exhaust Stroke) ความดันภายในกระบอกสูบเป็นพารามิเตอร์ที่มีประโยชน์ในการทำนายการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ โดยทั่วไปความดันภายในกระบอกสูบจะแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างมุมของเพลาค้อเหวี่ยง (Crank Angle) กับค่าความดันภายในกระบอกสูบที่เกิดขึ้น (In-Cylinder Pressure)

อัตราการปลดปล่อยความร้อน (Rate of Heat Release, RoHR) คือ อัตราที่เชื้อเพลิงสามารถปลดปล่อยพลังงานเคมีออกมาจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} \quad (2.1)$$

เมื่อ	Q	คือ ความร้อนที่ปลดปล่อยออกมา (J)
	k	คือ อัตราส่วนของค่าความร้อนจำเพาะ (c_p/c_v)
	θ	คือ มุมของเพลาค้อเหวี่ยง ($^{\circ}\text{CA}$)
	P	คือ ความดันภายในกระบอกสูบ (Bar)
	V	คือ ปริมาตรภายในกระบอกสูบ (m^3)

2.7.1 อิทธิพลของน้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่งต่อคุณลักษณะการเผาไหม้

งานวิจัยของ Das et al. (2018) ระบุว่าเชื้อเพลิงที่มีน้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่งผสมอยู่ 10% จะมีความล่าช้าในการจุดระเบิดที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลเมื่อเครื่องยนต์ไม่มีภาระงานหรือ

มีการะงานที่ต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากค่าดัชนีซีเทนที่สูงกว่าของเชื้อเพลิงผสมส่งผลให้เชื้อเพลิงคลุกเคล้ากับอากาศในห้องเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงได้ดีกว่า ส่วนที่ภาระงานสูงจุดเริ่มต้นของการเผาไหม้จะเกิดที่ตำแหน่งเพลาช้อเหวี่ยงเดียวกันจึงไม่พบแนวโน้มนดังกล่าว นอกจากนี้ยังพบว่าเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งจะมีอัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันภายในกระบอกสูบที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากเชื้อเพลิงผสมสามารถผสมกับอากาศได้ดีกว่าส่งผลให้การเผาไหม้เกิดได้อย่างสมบูรณ์และรุนแรงกว่า ส่วนงานวิจัยของ Sathiyagnanam (2011) ยังระบุไว้ด้วยว่าการเผาไหม้ช่วง Premixed Combustion จะขึ้นอยู่กับความหนืดและความสามารถในการระเหยตัวของเชื้อเพลิง โดยที่เชื้อเพลิงใดมีความหนืดที่มากจะทำให้เชื้อเพลิงชนิดนั้นมีความล่าช้าในการจุดระเบิดที่นานกว่า เนื่องจากเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดมีลักษณะเป็นละอองฝอยขนาดใหญ่ซึ่งมีพื้นที่โดยรวมของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดออกมาน้อย การทำปฏิกิริยาสันดาปของเชื้อเพลิงกับอากาศจึงเกิดได้ต่ำกว่า ส่วนเชื้อเพลิงที่มีความสามารถในการระเหยตัวต่ำจะส่งผลให้เชื้อเพลิงดังกล่าวเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอเพื่อทำปฏิกิริยาสันดาปกับอากาศได้ดี่า จึงทำให้ช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิดนานขึ้น นอกจากนี้ An et al. (2012) ยังระบุอีกด้วยว่าเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลจะมีระยะเวลาในการเผาไหม้ที่สั้นกว่าน้ำมันดีเซล

2.7.2 อิทธิพลของภาระงานของเครื่องยนต์ต่อคุณลักษณะการเผาไหม้

Hosamani & Katti (2018) ระบุว่าเมื่อภาระงานที่เครื่องยนต์ได้รับเพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันภายในกระบอกสูบที่มากที่สุดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อภาระงานเพิ่มขึ้นเครื่องยนต์จำเป็นต้องฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเพื่อคงความเร็วรอบในการทำงานไว้ตามที่กำหนด ปริมาณเชื้อเพลิงที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดการจุดระเบิดที่รุนแรงขึ้นซึ่งทำให้ความดันภายในกระบอกสูบสูงตามไปด้วย เช่นเดียวกับ An et al. (2012) ที่ระบุว่าเมื่อภาระงานที่เครื่องยนต์ได้รับเพิ่มขึ้นจะทำให้เครื่องยนต์จะต้องฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้มากขึ้นอีกทั้งยังทำให้อุณหภูมิภายในกระบอกสูบสูงขึ้นด้วย ด้วยเหตุผลดังกล่าวส่งผลให้การจุดระเบิดรุนแรงขึ้นซึ่งทำให้ความดันภายในกระบอกสูบสูงตามไปด้วย นอกจากนี้เมื่อเครื่องยนต์ฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเมื่อภาระงานเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดมากขึ้นไปด้วย เนื่องจากมีเชื้อเพลิงปริมาณที่มากกว่าในการเผาไหม้

2.7.3 อิทธิพลของอัตราส่วนการอัดต่อคุณลักษณะการเผาไหม้

Hosamani & Katti (2018) ระบุว่าเมื่ออัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันภายในกระบอกสูบสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากอุณหภูมิในกระบอกสูบที่สูงขึ้นจะทำให้เชื้อเพลิงมีการระเหยตัวได้มากขึ้นในเวลาเท่ากันซึ่งช่วยให้การเผาไหม้ในช่วง Premixed Combustion เกิดได้รุนแรงกว่า และอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนการอัดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นเพราะที่อัตราส่วนการอัดต่ำอุณหภูมิอากาศในห้องเผาไหม้จะต่ำกว่า

ทำให้เกิดการสะสมของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้มากกว่า เมื่อเชื้อเพลิงปริมาณดังกล่าว ได้รับความร้อนจนพร้อมเผาไหม้จะทำให้ได้การเผาไหม้ที่รุนแรงและปลดปล่อยความร้อนออกมาได้ สูงกว่าที่อัตราส่วนการอัดต่ำ

2.8 สมรรถนะของเครื่องยนต์และมลพิษที่เครื่องยนต์ปลดปล่อย

2.8.1 อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก

อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกคืออัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงต่อกำลังเบรกที่เครื่องยนต์สามารถสร้างได้หรือคือปริมาณเชื้อเพลิงที่เครื่องยนต์ใช้ในการสร้างกำลังออกมาหนึ่งหน่วย มักระบุในหน่วยกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (g/kW-h) อัตราส่วนการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกเป็นปริมาณที่บอกว่าเครื่องยนต์ดังกล่าวมีความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากน้อยเพียงใดในการทำงาน

2.8.1.1 อิทธิพลของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำต่ออัตราการบริโภคเชื้อเพลิง

Valente et al. (2010) ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมรรถนะของเครื่องยนต์และมลพิษที่เครื่องยนต์ปล่อยออกจากการใช้เชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ, ถั่วเหลือง และน้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียว กล่าวไว้ว่าอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกจากการใช้เชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลทั้งจากกะหล่ำและถั่วเหลืองจะมีค่ามากกว่าการใช้น้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียว เช่นเดียวกับ Bueno et al. (2017) ซึ่งได้ศึกษาเกี่ยวกับสมรรถนะและมลพิษจากเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำเป็นส่วนประกอบของเชื้อเพลิงได้กล่าวไว้ว่าอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์จากการใช้เชื้อเพลิงผสมมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียว และ Özcanli et al. (2015) ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมรรถนะและมลพิษจากเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำเป็นส่วนประกอบของเชื้อเพลิงได้กล่าวไว้ว่า อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์จากการใช้เชื้อเพลิงผสมทุกสัดส่วนจะมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียว โดยมีสาเหตุที่คล้ายคลึงกันคือค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันไบโอดีเซลทั้งสองชนิดต่ำกว่าน้ำมันดีเซลส่งผลให้เครื่องยนต์จำเป็นต้องฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้มากกว่าในการทำให้เครื่องยนต์ทำงานตามรอบและภาระงานที่กำหนด

2.8.1.2 อิทธิพลของภาระงานของเครื่องยนต์ต่ออัตราการบริโภคเชื้อเพลิง

งานวิจัยส่วนใหญ่ทั้งจาก Valente (2010), Bueno et al. (2017) และ Özcanli et al. (2015) ได้ระบุไว้ว่า การเพิ่มขึ้นของภาระงานจะส่งผลให้อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในปริมาณที่มากขึ้นและ

ถึงแม้ว่าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้จะสูงขึ้นแต่เวลาในการเผาไหม้ยังคงเท่าเดิม ส่งผลให้เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ได้ไม่หมดจึงได้กำลังออกมาต่ำลง ค่าอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคจึงเพิ่มขึ้น

2.8.1.3 อิทธิพลของอัตราส่วนการอัดต่ออัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิง

Muralidharan & Vasudevan. (2011) กล่าวว่าอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคของเครื่องยนต์จะลดลงหากเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดที่สูง เนื่องจากอุณหภูมิอากาศในห้องเผาไหม้ที่สูงจึงส่งผลให้เชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น จากการเผาไหม้ดังกล่าวส่งผลให้เชื้อเพลิงปลดปล่อยพลังงานออกมามากกว่าทำให้เครื่องยนต์ต้องการปริมาณเชื้อเพลิงน้อยลงในการสร้างกำลังออกมาเท่าเดิม เช่นเดียวกับ Venkateswara (2015) ซึ่งกล่าวว่าอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนการอัดสูงขึ้น เนื่องจากที่อัตราส่วนการอัดสูงอากาศมีอุณหภูมิที่สูงส่งผลให้เชื้อเพลิงเผาไหม้ได้ดีกว่าและปลดปล่อยพลังงานออกมามากกว่า ด้วยเหตุผลดังกล่าวเครื่องยนต์จึงต้องการปริมาณเชื้อเพลิงน้อยลงในการรักษาความเร็วรอบในการทำงานไว้เท่าเดิม

2.8.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค คือ อัตราส่วนของกำลังเบรคที่เครื่องยนต์แสดงออกมาต่อพลังงานที่เครื่องยนต์ใช้ หรือคือปริมาณที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนรูปพลังงานของเชื้อเพลิงจากกระบวนการเผาไหม้ โดยเครื่องยนต์ใดที่มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงจะบ่งบอกว่าเครื่องยนต์ดังกล่าวสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานเคมีจากเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานความร้อน หรือหากเปรียบเทียบชนิดของเชื้อเพลิงจะได้ว่าเชื้อเพลิงใดที่ทำให้เครื่องยนต์แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนออกมาสูงบ่งบอกว่าเชื้อเพลิงดังกล่าวสามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานความร้อนได้มากกว่าในข้อจำกัดในการทำงานของเครื่องยนต์เดียวกัน

2.8.2.1 อิทธิพลของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน

Vashist (2011) ได้ศึกษาเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะและมลพิษที่เกิดจากการใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำและสบู่ดำ กล่าวว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของเครื่องยนต์จากการใช้เชื้อเพลิงที่มีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซลที่ภาระงาน 20-100% ของแรงบิดสูงสุด หากเชื้อเพลิงมีน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำมากกว่า 10% โดยปริมาตร และที่ภาระงาน 20-40% ของแรงบิดสูงสุด หากเชื้อเพลิงมีน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำต่ำกว่า 10% เนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบอยู่มากซึ่งช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้นส่งผลให้ได้กำลังงานออกมามากกว่าเมื่อใช้เชื้อเพลิงในปริมาณที่เท่ากัน เช่นเดียวกับ Panwar et al. (2010) ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมรรถนะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดที่ใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ ซึ่งได้กล่าวว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคที่เครื่องยนต์แสดงออกมาจากการใช้เชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำมีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซลทุกภาระงานที่เครื่องยนต์ได้รับ

แต่แนวโน้มที่ชัดเจนของการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่เป็นผลมาจากอัตราส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ

2.8.2.2 อิทธิพลของภาระงานของเครื่องยนต์ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน

Devan & Mahalakshmi (2009) กล่าวว่าเมื่อเครื่องยนต์ได้รับภาระงานเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเชื้อเพลิงสามารถเปลี่ยนรูปแบบพลังงานจากเคมีไปเป็นความร้อนได้มากกว่า ส่วน Vashist (2011) กล่าวว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ที่ได้รับภาระงานเพิ่มขึ้นจะมีค่ามากขึ้น เนื่องจากเกิดการสูญเสียความร้อนน้อยกว่า

2.8.1.3 อิทธิพลของภาระงานของอัตราส่วนการอัดต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน

Kassaby & Nemit (2013) กล่าวว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดเพิ่มขึ้นมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิอากาศในห้องเผาไหม้สูงซึ่งความเหมาะสมแก่การเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลและเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลมากขึ้น เช่นเดียวกับ Venkateswara (2015) ที่กล่าวว่าเมื่ออัตราส่วนการอัดมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมากตามไปด้วย เนื่องจากเชื้อเพลิงสามารถผสมกับอากาศได้ดีกว่าและด้วยอุณหภูมิที่สูงส่งผลให้เชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ได้สมบูรณ์มากขึ้นจึงได้กำลังงานมากขึ้น

2.8.3 ไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen Oxides, NO_x)

Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park. (1999) กล่าวว่าไนโตรเจนออกไซด์ คือ มลพิษที่เกิดจากการรวมตัวกันของแก๊สที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของไนโตรเจนและออกซิเจนซึ่งมีหลายชนิด ได้แก่ ไนตริกออกไซด์, ไดไนโตรเจนไดออกไซด์, ไนตรัสออกไซด์, ไดไนโตรเจนไดออกไซด์, ไนโตรเจนไดออกไซด์, ไดไนโตรเจนเตตรอกไซด์ และไดไนโตรเจนเพนทอกไซด์ โดยมีไนตริกออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีปริมาณมากถึง 95% ของไนโตรเจนออกไซด์ทั้งหมด Varatharajana & Cheralathanb (2012) ได้แบ่งรูปแบบการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) การเกิดไนตริกออกไซด์จากอิทธิพลของความร้อน (Thermal NO), (2) การเกิดไนตริกออกไซด์แบบจับพลัน (Prompt NO), และ (3) การเกิดไนตรัสออกไซด์ (N₂O Pathway) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.8.4 ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon, HC)

Das et al. (2018) กล่าวว่าไฮโดรคาร์บอน คือ มลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของไอเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเผาไหม้ที่อากาศในห้องเผาไหม้ไม่เพียงพอ

2.8.4.1 อิทธิพลของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำต่อไฮโดรคาร์บอน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนหนึ่งได้กล่าวว่า การมีน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำเป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงจะช่วยให้ปริมาณของไฮโดรคาร์บอนจากไอเสียของเครื่องยนต์ลดลงได้ Sattanathan, (2013) กล่าวว่า การใช้เชื้อเพลิงที่มีน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำเป็นองค์ประกอบในอัตราส่วน 25%, 50% และ 75% หรือแม้แต่การใช้ น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำเพียงอย่างเดียวจะทำให้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่เครื่องยนต์ปล่อยออกมามีปริมาณน้อยกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซล เนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบซึ่งช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น นอกจากนี้ Ghenai (2011) ยังระบุว่า การลดลงของไฮโดรคาร์บอนจากการใช้เชื้อเพลิงที่มีน้ำมันไบโอดีเซลเป็นองค์ประกอบเกิดจากจำนวนอะตอมของคาร์บอนที่ลดลงเนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนที่เป็นสารตั้งต้นในการเกิดไฮโดรคาร์บอนน้อยกว่าน้ำมันดีเซลในปริมาณที่เท่ากัน ส่งผลให้ไฮโดรคาร์บอนก่อตัวได้น้อยกว่า

2.8.4.2 อิทธิพลของภาระงานของเครื่องยนต์ต่อไฮโดรคาร์บอน

Sattanathan, R. (2013) กล่าวว่า การเพิ่มขึ้นของภาระงานที่เครื่องยนต์ได้รับจะส่งผลให้ไฮโดรคาร์บอนที่เครื่องยนต์ปล่อยออกมามีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มภาระงานจะทำให้เครื่องยนต์ต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่มากขึ้นในการคงความเร็วรอบเครื่องยนต์ไว้เท่าเดิม การที่เครื่องยนต์มีความเร็วรอบเท่ากันหมายความว่าเชื้อเพลิงมีระยะเวลาในการเผาไหม้ที่เท่ากัน ส่งผลให้ที่ภาระงานสูงเชื้อเพลิงมีโอกาสเกิดการเผาไหม้ที่ไม่หมดทำให้ไฮโดรคาร์บอนมีปริมาณเพิ่มขึ้น ในขณะที่ Valente (2010) ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมรรถนะและมลพิษของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำและถั่วเหลืองเป็นเชื้อเพลิง สรุปไว้ว่าไฮโดรคาร์บอนจากเครื่องยนต์ดีเซลจะมีปริมาณลดลงตามภาระงานที่เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงภาระงานหนึ่งจากนั้นปริมาณไฮโดรคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เนื่องจากที่ภาระงานสูงเครื่องยนต์มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้ที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ยังได้สรุปไว้ดีกว่าสาเหตุของการเกิดไฮโดรคาร์บอนที่ภาระงานต่ำเกิดจากเครื่องยนต์ทำงานด้วยอัตราส่วนเชื้อเพลิงบางซึ่งส่งผลให้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเกิดขึ้นช้าและเปลวไฟของการเผาไหม้ดับลงก่อนที่เชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้จนหมด ส่วนสาเหตุของการเกิดไฮโดรคาร์บอนที่ภาระงานสูงเกิดจากเครื่องยนต์ทำงานด้วยอัตราส่วนเชื้อเพลิงที่หนาขึ้นเมื่อเทียบกับภาระงานต่ำส่งผลให้เปลวไฟจากการเผาไหม้ลามได้อย่างรวดเร็ว แต่ไอระเหยของเชื้อเพลิงจะส่งผลให้เปลวไฟดับลงก่อนที่เชื้อเพลิงจะเผาไหม้จนหมดทำให้เกิดไฮโดรคาร์บอน

2.8.4.3 อิทธิพลของอัตราส่วนการอัดต่อไฮโดรคาร์บอน

Muralidharan & Vasudevan (2011) กล่าวว่า ที่อัตราส่วนการอัดที่สูงขึ้นเชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วนน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว 40% จะปล่อยไฮโดรคาร์บอนออกมามากกว่าน้ำมันดีเซล ในขณะที่อัตราส่วน 20, 60 และ 80% จะปล่อยไฮโดรคาร์บอนออกมาน้อยกว่า

น้ำมันดีเซล สาเหตุคือความเกิดล่าช้าในการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงผสมส่งผลให้เชื้อเพลิงมีระยะเวลาในการเผาไหม้ที่น้อยลงอันก่อให้เกิดไฮโดรคาร์บอนในไอเสีย ส่วน Kassaby & Nemit (2013) ซึ่งได้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วในเชื้อเพลิงผสมและอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ต่อสมรรถนะและมลพิษที่เกิดขึ้น ได้กล่าวว่าเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดที่สูงขึ้นจะทำให้อากาศในห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งส่งผลให้เชื้อเพลิงมีการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์และปล่อยไฮโดรคาร์บอนออกมาน้อยลง

2.8.5 คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide, CO)

Bueno et al., (2017) กล่าวว่าไว้ว่าคาร์บอนมอนอกไซด์คือมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงซึ่งมีสาเหตุมาจากการขาดออกซิเจนในการเผาไหม้ สำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดที่ทำงานด้วยอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่บางจึงทำให้การเผาไหม้มีออกซิเจนสูงส่งผลให้คาร์บอนมอนอกไซด์ไม่ใช่มลพิษหลักที่เกิดจากเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด

2.8.5.1 อิทธิพลของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำต่อคาร์บอนมอนอกไซด์

Özcanli et al. (2015) ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมรรถนะของเครื่องยนต์และมลพิษที่เกิดขึ้นจากการใช้เชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำเทียบกับน้ำมันดีเซล กล่าวว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำในเชื้อเพลิงผสมส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงในทุกภาระงานที่เครื่องยนต์ได้รับ ซึ่งเป็นผลมาจากเอสเตอร์ของกรดไขมันในน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนในเชื้อเพลิง ส่งผลให้เชื้อเพลิงผสมเกิดการเผาไหม้ได้สมบูรณ์มากกว่าน้ำมันดีเซล ในขณะที่ Sattanathan (2013) ได้กล่าวว่า ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จากการใช้เชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำมากกว่าน้ำมันดีเซลในทุกอัตราส่วนผสม นอกจากนี้ Bueno et al. (2017) ได้กล่าวว่า คาร์บอนมอนอกไซด์จากการใช้เชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำมากกว่าน้ำมันดีเซลเมื่อเครื่องยนต์ได้รับภาระงานที่ต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติในด้านความหนืด (Viscosity), แรงตึงผิว (Surface Tension) และจุดเดือด (Boiling Point) ที่สูงของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำที่ทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่ำลง สำหรับน้ำมันไบโอดีเซลจากพืชชนิดอื่น Muralidharan & Vasudevan (2011) ได้กล่าวว่าคาร์บอนมอนอกไซด์จากเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลจะก่อให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์มากกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากความหนาแน่น (Density) ที่มากกว่าส่งผลให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในระยะเวลาที่เท่ากันมีปริมาณมากกว่าน้ำมันดีเซล ปริมาณเชื้อเพลิงที่มากกว่าส่งผลให้เชื้อเพลิงเกิดความสมบูรณ์ของการเผาไหม้ต่ำกว่า

2.8.5.2 อิทธิพลของภาระงานของเครื่องยนต์ต่อคาร์บอนมอนอกไซด์

Muralidharan & Vasudevan (2011) กล่าวว่าไว้ว่า ที่ภาระงานต่ำเครื่องยนต์ทำงานด้วยอัตราส่วนเชื้อเพลิงบางซึ่งมีปริมาณอากาศส่วนเกินมากเมื่อใช้น้ำมันดีเซล ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่าเป็นเชื้อเพลิงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นมีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอให้น้ำมันดีเซลเผาไหม้ได้สมบูรณ์กว่าการใช้เชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซล ส่วนที่ภาระงานต่ำเครื่องยนต์จะมีการฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่หนาขึ้นแต่มีปริมาณอากาศเท่าเดิมส่งผลให้การใช้เชื้อเพลิงผสมที่มีน้ำมันไบโอดีเซลซึ่งมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์กว่าน้ำมันดีเซล Devan (2009) ได้ศึกษาสมรรถนะและคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลจากยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิง กล่าวว่าเมื่อเครื่องยนต์ได้รับภาระงานต่ำและกลาง (25% และ 50% ของแรงบิดสูงสุด) ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จากการใช้เชื้อเพลิงผสมจะมีปริมาณน้อยกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากปริมาณออกซิเจนในเชื้อเพลิงผสมช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

2.8.5.3 อิทธิพลของอัตราส่วนการอัดต่อคาร์บอนมอนอกไซด์

Kassaby & Nemit (2013) ได้กล่าวว่าเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดที่สูงขึ้นจะทำให้อากาศในห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งส่งผลให้เชื้อเพลิงมีการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์และปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาน้อยลง

2.8.6 เขม่าควัน (Smoke)

Tan et al. (2012) กล่าวว่า เขม่าควันเป็นมลพิษที่เป็นผลมาจากการขาดเชื้อเพลิงในการเผาไหม้และอุณหภูมิในกระบอกสูบที่สูง โดยมีกระบวนการเกิดอยู่ 2 แบบ คือ Primary Soot Formation และ Soot Oxidation สำหรับกระบวนการ Primary Soot Formation เป็นการก่อตัวของเขม่าควันที่มีสถานะเป็นแก๊ส ซึ่งมีปัจจัยในการเกิดอยู่ 2 ปัจจัย คือ อัตราการชนกันระหว่างโมเลกุลสูงและปริมาณคาร์บอนในเชื้อเพลิงสูง ส่วน Soot Oxidation มีสาเหตุในการเกิดเหมือนกันกับ Primary Soot Formation แต่โมเลกุลของสารตั้งต้นจะประกอบไปด้วยออกซิเจนและคาร์บอน

2.8.6.1 อิทธิพลของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำต่อเขม่าควัน

Bueno et al. (2017) กล่าวว่า ปริมาณเขม่าควันที่เกิดขึ้นจากการใช้เชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำน้อยกว่าน้ำมันดีเซลเนื่องจากออกซิเจนที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำช่วยลดปริมาณสารอะโรมาติกซึ่งเป็นสาเหตุในการก่อตัวของควันดำ Sattanathan, R. (2013) กล่าวว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำในเชื้อเพลิงผสมส่งผลให้ปริมาณของเขม่าควันลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล เนื่องจากเชื้อเพลิงมีปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นและการลดลงของกำมะถันจากองค์ประกอบของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำที่มีออกซิเจนสูงและมีกำมะถันอยู่น้อย สำหรับน้ำมันไบโอดีเซล

ชนิดอื่น Devan (2009) กล่าวว่าเขม่าควันจากการใช้เชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซล จากยุคาลิปตัสมีปริมาณน้อยกว่าการใช้น้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียว เนื่องจากเขม่าควันเป็นมลพิษที่เกิดขึ้นได้ดีในช่วงการเผาไหม้แบบแพร่กระจาย การมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงของน้ำมันไบโอดีเซลจากยุคาลิปตัสจะช่วยให้การแพร่กระจายเกิดได้เร็วขึ้นส่งผลให้เขม่าควันเกิดได้น้อยลง

2.8.6.2 อิทธิพลของภาระงานของเครื่องยนต์ต่อเขม่าควัน

Bueno et al. (2017) กล่าวว่า เมื่อภาระงานที่เครื่องยนต์ได้รับมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณเขม่าควันมากขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากที่ภาระงานสูงเครื่องยนต์มีการฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มสารที่ก่อให้เกิดเขม่าควันอย่างอะโรมาติก นอกจากนี้การมีปริมาณออกซิเจนที่จำกัดซึ่งไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงให้สมบูรณ์ได้ทั้งหมดส่งผลให้เกิดเขม่าควันจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอีกด้วย เช่นเดียวกับ Sattanathan (2013) ซึ่งระบุว่าเขม่าควันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามภาระงานที่เพิ่มขึ้น และ Devan (2009) ที่กล่าวว่าเขม่าควันมีปริมาณมากขึ้นตามภาระงานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเครื่องยนต์มีการฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการก่อเขม่าควัน

2.8.6.3 อิทธิพลของอัตราส่วนการอัดต่อเขม่าควัน

Venkateswara (2015) ได้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ต่อสมรรถนะและมลพิษที่เกิดขึ้น โดยใช้เชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลจากสบู่ดำกับน้ำมันดีเซลเทียบกับน้ำมันดีเซล ได้ระบุว่าปริมาณเขม่าควันที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการอัด สาเหตุเนื่องจากที่อัตราส่วนการอัดสูงทำให้อากาศในห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงตามไปด้วยซึ่งเป็นสถานะที่ทำให้เชื้อเพลิงเกิดการออกซิเดชันได้ดีขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

หัวข้อนี้จะอธิบายวิธีการดำเนินการวิจัยซึ่งประกอบด้วยวิธีใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยจะแบ่งเป็น 5 ส่วนหลัก ได้แก่ การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ, การวิเคราะห์แอสเตอร์ของกรดไขมันในน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ, การทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงภายใต้มาตรฐาน ASTM และ ISO, การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันจากชิ้นงานทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิง และการทดสอบสมรรถนะและมลพิษจากเครื่องยนต์จากการใช้เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ

การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจะทำให้ไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันกะหล่ำดิบเปลี่ยนเป็นแอลคิลเอสเทอร์ โดยจากรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าหากต้องการทำให้ปฏิกิริยาดำเนินการอย่างสมบูรณ์จะต้องใช้แอลกอฮอล์อย่างน้อย 3 โมลต่อน้ำมันพืชตั้งต้น 1 โมล นอกจากนี้ กระบวนการดังกล่าวยังเป็นปฏิกิริยาที่สามารถย้อนกลับได้ซึ่งหากไม่มีสารเร่งปฏิกิริยาช่วยการทำให้ปฏิกิริยาดำเนินการไปทางขวาอย่างสมบูรณ์จึงเป็นเรื่องยาก

งานวิจัยนี้ให้ความสนใจกับปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณกรดไขมันที่ผลิตได้ 4 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ มีรายละเอียดดังนี้ (1) อัตราส่วนมวลโมลของน้ำมันกะหล่ำต่อเอทานอล (Oil to Ethanol Molar Ratio) มี 3 ระดับ คือ 1:6, 1:9 และ 1:12, ความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH Concentration) มี 3 ระดับ คือ 0.5%, 1.0% และ 1.5% w/w, อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (Reaction Temperature) มี 3 ระดับ คือ 40 °C, 50 °C และ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา (Reaction Time) มี 3 ระดับ คือ 90, 120 และ 150 นาที ซึ่งจำนวนตัวอย่างและสถานะต่าง ๆ ของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำที่ทำการผลิตแสดงดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 สภาวะในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำของตัวอย่าง

Sample	Oil to Ethanol Molar Ratio	KOH Concentration (%)	Reaction Temperature (°C)	Reaction Time (min.)
1	6	1.5	60	90
2	12	0.5	60	150
3	12	1.0	50	120
4	9	1.5	50	120
5	6	0.5	40	90
6	9	1.0	50	120
7	6	1.5	40	90
8	12	1.5	40	150
9	12	1.5	60	150
10	12	0.5	60	90
11	9	1.0	50	150
12	9	1.0	50	90
13	12	0.5	40	90
14	9	1.0	60	120
15	9	1.0	40	120
16	12	1.5	40	90
17	12	1.5	60	90
18	12	0.5	40	150
19	9	0.5	50	120
20	9	1.5	50	90
21	6	0.5	60	90
22	6	1.5	60	150
23	6	0.5	60	150
24	6	1.5	40	150
25	9	1.5	40	120
26	6	1.0	50	120

อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ

1. บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร	4	ใบ
2. เครื่องชั่งสาร 3 ตำแหน่ง	1	เครื่อง
3. เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน	2	เครื่อง
4. แท่งแม่เหล็ก	3	อัน
5. เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท	2	อัน
6. พลาสติกแรปหรือฟอยล์อะลูมิเนียม		
7. กรวยแยกสารขนาด 500 หรือ 1,000 มิลลิลิตร	1	อัน
8. ฐานตั้งกรวยแยกสาร	1	ชุด
9. ขวดบรรจุสารตัวอย่าง	26	ชุด

ขั้นตอนในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ชั่งน้ำมันกะหล่ำดิบ 100 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องชั่งสามตำแหน่ง
2. นำแท่งแม่เหล็ก (Magnetic Bar) ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำมันกะหล่ำอยู่ จากนั้นนำบีกเกอร์ดังกล่าวกวนและให้ความร้อนด้วยเครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hotplate Stirrer) ด้วยความเร็วการกวน 300 รอบต่อนาที และให้ความร้อนจนน้ำมันกะหล่ำดิบมีอุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ในแต่ละสภาวะโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทวัด
3. ชั่งเอทานอล (Ethanol) 29.715, 44.573 และ 59.431 กรัม สำหรับอัตราส่วนน้ำมันกะหล่ำต่อเอทานอล 1:6, 1:9 และ 1:12 ตามลำดับ ใส่บีกเกอร์ขนาด 250 กรัม และชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัม สำหรับความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 1.5% ตามลำดับ
4. นำโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ชั่งไว้ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีเอทานอลอยู่ จากนั้นนำแท่งแม่เหล็กใส่ลงในบีกเกอร์ดังกล่าวแล้วนำบีกเกอร์ดังกล่าวกวนและให้ความร้อนด้วยเครื่องกวนสารให้ความร้อนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที และอุณหภูมิเท่ากับข้อ 2 จนกว่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะละลายจนหมด
5. เมื่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ละลายหมดแล้วจึงนำสารละลายเอทานอลโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำมันกะหล่ำแล้วจับเวลาตามสภาวะของแต่ละตัวอย่าง ระหว่างนี้ทำการกวนต่อไปโดยพยายามรักษาอุณหภูมิไว้ที่ค่าที่กำหนดไว้และเพื่อป้องกันเอทานอลระเหยตัวออกจากระบบจึงทำการปิดฝาบีกเกอร์ด้วยพลาสติกแรป (Plastic Wrap) หรือฟอยล์อะลูมิเนียม (Aluminium Foil)

6. เมื่อครบกำหนดเวลาจึงนำสารละลายในบีกเกอร์เทลงในกรวยแยกสาร แล้วตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้กลีเซอรอลและเอสเทอร์ของกรดไขมันแยกตัวออกจากกัน โดยกลีเซอรอลจะแยกตัวอยู่ชั้นล่าง เนื่องจากมีความหนาแน่นที่มากกว่า

7. เมื่อครบ 24 ชั่วโมงตามที่กำหนดแล้วจึงเปิดวาล์วเพื่อให้กลีเซอรอลไหลออกมาจนหมดจึงปิดวาล์วเพื่อเตรียมล้างน้ำมันไบโอดีเซล

8. การล้างน้ำมันไบโอดีเซลทำโดยเติมน้ำสะอาด 200-500 มิลลิลิตร ลงในกรวยแยกสารและปิดฝา จากนั้นเขย่าเบา ๆ ประมาณ 10 วินาที เพื่อให้ น้ำและน้ำมันผสมกัน เมื่อเขย่าเสร็จจึงตั้งกรวยแยกสารเพื่อให้ น้ำและน้ำมันแยกตัวออกจากกัน โดยที่น้ำจะอยู่ชั้นล่างเนื่องจากมีความหนาแน่นมากกว่า ซึ่งขั้นตอนนี้ โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์ซึ่งอยู่ในน้ำมันไบโอดีเซลจะถูกชะล้างไปกับน้ำ เมื่อเห็นว่าน้ำและน้ำมันแยกชั้นกันแล้วจึงเปิดวาล์วเพื่อเทน้ำออก ในขั้นตอนนี้จะทำซ้ำจนกว่า น้ำที่แยกตัวออกมาจากน้ำมันจะใสเหมือนน้ำสะอาดที่เติมเข้าไป

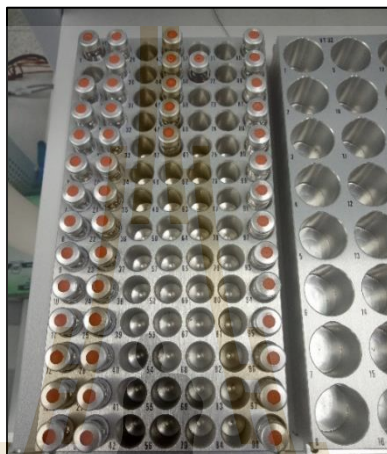
9. หลังจากล้างจนเสร็จจึงนำน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้มาต้มเพื่อระเหยน้ำออกจากน้ำมัน โดยนำน้ำมันที่ได้ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร และนำแท่งแม่เหล็กใส่ลงไป จากนั้นจึงกวนด้วยเครื่องกวนสารให้ความร้อนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที และให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส โดยกวนเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นจึงปล่อยให้ น้ำมันที่ได้เย็นตัวลง

10. หลังจากน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้เย็นตัวลงแล้วจึงบรรจุใส่ภาชนะที่ปิดมิดชิด เพื่อเตรียมทดสอบปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันต่อไป

3.2 การวิเคราะห์เอสเทอร์ของกรดไขมันด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี

การวิเคราะห์เอสเทอร์ของกรดไขมันจะใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีซึ่งเป็นเทคนิคการแยกที่นิยมใช้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยใช้หลักการการพาของแก๊สมีขึ้นขั้นตอนคร่าว ๆ คือ ฉีดสารตัวอย่างผ่านตำแหน่งฉีดสาร (Injector Port) ที่ให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการระเหยตัวของสารตัวอย่างชนิดต่าง ๆ, ไอระเหยของสารตัวอย่างจะถูกพาไปโดยแก๊สตัวพา (Carrier Gas) ผ่านคอลัมน์ (Column) ไปยังหน่วยตรวจจับ ระหว่างนี้องค์ประกอบของสารตัวอย่างจะถูกแยกออกจากกันเนื่องจากความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การกระจายตัวระหว่างเฟสคงที่และเฟสเคลื่อนที่ องค์ประกอบที่ถูกพามาโดยแก๊สตัวพาจะถูกตรวจจับโดยหน่วยตรวจจับ (Detector) และบันทึกผลออกมาในรูปแบบโครมาโทแกรม โดยเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ BRUKER 320 GC-MS, RESTEK Rtx®-5MS Column, สารมาตรฐาน FAEE เลขคาร์บอน C4-C24, Vial ขนาด 1 มิลลิลิตร, เครื่องดูด-จ่ายสาร (Auto Pipette), ฝาจุก Vial, เครื่องเขย่าสาร, เชื้อเพลิงทดสอบและไอโซออกเทน (Isooctane) โดยมีขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

1. เปิดวาล์วแก๊สนำพาซึ่งประกอบโดยคุณสารมาตรฐานด้วยฮีเลียม
2. เตรียมสารมาตรฐานโดยคุณสารมาตรฐานปริมาตร 100 μL ด้วยเครื่องดูด-จ่ายสารใส่ขวด Vial แล้วปิดฝาให้สนิทด้วยกิมปิดฝา Vial และเตรียมไอโซออกเทนโดยคุณไอโซออกเทนปริมาตร 1,000 μL แล้วจ่ายใส่ขวด Vial เปลา 2 ชุด แล้วปิดฝาให้สนิท



รูปที่ 3.1 ลักษณะการบรรจุขวด Vial ลงในส่วนบรรจุตัวอย่าง

3. เตรียมเชื้อเพลิงตัวอย่างโดยคุณเชื้อเพลิงปริมาตร 10 μL ด้วยเครื่องดูด-จ่ายสารใส่ขวด Vial จากนั้นคุณไอโซออกเทนปริมาตร 990 μL ใส่ขวด Vial เดียวกับเชื้อเพลิงตัวอย่างแล้วปิดฝาให้สนิทด้วยกิมปิดฝา Vial จากนั้นนำขวดดังกล่าวไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้สารละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกัน สาเหตุที่ใช้ไอโซออกเทนเป็นตัวทำละลายเชื้อเพลิงตัวอย่างคือเพื่อให้เชื้อเพลิงตัวอย่างระเหยตัวได้ง่ายขึ้นและทั่วถึงขึ้น
4. นำตัวอย่างทั้งหมดบรรจุลงในส่วนบรรจุตัวอย่าง โดยช่องแรกให้ใส่ Vial เปลา สำหรับฉีดสารทิ้ง ช่องที่สองและสามให้บรรจุ Vial ที่มีไอโซออกเทนเพื่อใช้ในการล้างหัวฉีด หลังจากฉีดตัวอย่างแต่ละตัวอย่าง ช่องถัดๆ ไปให้บรรจุตัวอย่างทั้งหมด ลักษณะดังรูปที่ 3.1
5. ตั้งค่าสภาวะในการทดสอบให้เหมาะสมกับชนิดของตัวอย่าง จากนั้นสร้างตารางการทดสอบและตั้งค่าการฉีดตัวอย่างให้เหมาะสมแล้วสั่งเริ่มการทดสอบ ระหว่างนี้เครื่องทดสอบจะให้ความร้อนแกจุดต่างๆจนถึงค่าที่กำหนดไว้จึงเริ่มทำการทดสอบ โดยใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 80 นาทีต่อหนึ่งตัวอย่าง

6. หลังจากที่เครื่องทำการทดสอบเสร็จผลที่ได้จะแสดงออกมาเป็น Retention Time และ Abundance โดยยอดกราฟที่ปรากฏ ณ Retention Time ต่าง ๆ จะบ่งบอกถึงเอสเทอร์ของกรดไขมันแต่ละชนิด

7. ทำการ Integrate พื้นที่ยอดกราฟ (Peak-Area) แต่ละยอดเพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมัน

หลังจากทราบชนิดและปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ได้ของน้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่งที่ผลิตในสภาวะต่าง ๆ แล้วจึงทำการคำนวณเพื่อหาผลผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน สมการที่ใช้ในการคำนวณคือ สมการที่ 3.2 และ 3.3 ดังนี้

$$Y_{TH} = \frac{3 \times m_{VO} \times MW_{FAEE}}{MW_{VO}} \quad (3.2)$$

เมื่อ	Y_{TH}	คือ ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ (g)
	m_{VO}	คือ มวลของน้ำมันพืชตั้งต้น (g)
	MW_{FAEE}	คือ มวลโมเลกุลของเอสเทอร์ของกรดไขมันในน้ำมันไบโอดีเซล (g/mol)
	MW_{VO}	คือ มวลโมเลกุลของน้ำมันพืชตั้งต้น (g/mol)

$$\% \text{Yield} = \frac{Y_{ACT}}{Y_{TH}} \quad (3.3)$$

เมื่อ	$\% \text{Yield}$	คือ ร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้
	Y_{ACT}	คือ ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้จริงซึ่งได้จากการชั่ง (g)

3.3 การสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิง

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิงจะดำเนินการตามมาตรฐาน American Society of Testing Material (ASTM) และมีบางคุณสมบัติที่ดำเนินการตามมาตรฐาน International Organization for Standardization (ISO) คุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิงที่ทำการทดสอบ ได้แก่ การทดสอบความหนืดจลน์ศาสตร์ ณ อุณหภูมิ 40 °C, จุดวาบไฟ, ความถ่วงจำเพาะ ที่ 15.6 °C, ความหนาแน่น ที่ 15.6 °C, ดัชนีซีเทน, ค่าความร้อนเชื้อเพลิง, อุณหภูมิการกลั่น 50% และความสามารถในการหล่อลื่น หลังจากทดสอบเสร็จค่าคุณสมบัติที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับ

มาตรฐานเชื้อเพลิงดีเซลจากกรมธุรกิจพลังงาน เพื่อเป็นการยืนยันว่าน้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่งสามารถนำไปทดสอบกับเครื่องยนต์ได้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

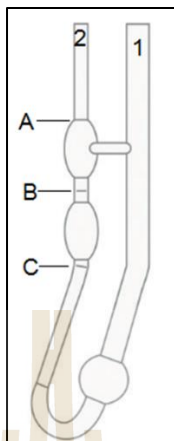
3.3.1 ความหนืดจลนศาสตร์ ณ อุณหภูมิ 40 °C (Kinematic Viscosity at 40 °C)

การทดสอบความหนืดจลนศาสตร์ ณ อุณหภูมิ 40 °C ของเชื้อเพลิงเป็นการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการต้านทานการไหลของเชื้อเพลิง ซึ่งดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D445 ค่าที่ได้ออกมาจะมีหน่วยเป็นเซนติสโตกเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 3.2 หลอดคาปิลลารี, ขायึดหลอดคาปิลลารี, หลอดหยดสารแบบจุกยาง, นาฬิกาจับเวลา และกระบอกตวง 100 มิลลิลิตร โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ตวงเชื้อเพลิงตัวอย่างที่ต้องการทดสอบปริมาตร 20 มิลลิลิตร ด้วยกระบอกตวง 100 มิลลิลิตร แล้วเติมลงในหลอดคาปิลลารีทางช่องที่ 1 ดังรูปที่ 3.3
2. นำหลอดคาปิลลารีประกอบเข้ากับขायึด แล้วนำหลอดแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิโดยตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 40 °C โดยแช่ไว้ 1 ชั่วโมง ก่อนเริ่มทำการทดสอบเพื่อให้เชื้อเพลิงทดสอบมีอุณหภูมิ 40 °C ตามที่กำหนด
3. ใช้หลอดหยดสารแบบจุกยางดูดเชื้อเพลิงทดสอบทางช่องที่ 2 จนเชื้อเพลิงขึ้นมาถึงตำแหน่ง A แล้วปล่อยให้เชื้อเพลิงทดสอบไหลลงมาถึงระดับ B จึงเริ่มจับเวลา หลังจากนั้นปล่อยให้เชื้อเพลิงทดสอบไหลลงมาถึงตำแหน่ง C จึงหยุดเวลาแล้วบันทึกผล โดยเวลาที่อ่านค่าได้ให้บันทึกในหน่วยวินาที
4. ทำการทดสอบตามขั้นตอนที่ 3 อย่างน้อย 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความหนืดจลนศาสตร์ด้วยค่าคงที่ของหลอดคาปิลลารีแต่ละหลอด ดังตารางที่ 5.2



รูปที่ 3.2 อ่างควบคุมอุณหภูมิ Tempering Bath for Viscosity tubes-High Temperature



รูปที่ 3.3 ลักษณะของหลอดคาปิตลารี

3.3.2 จุดวาบไฟ (Flash Point)

การทดสอบจุดวาบไฟเป็นการทดสอบเพื่อหาอุณหภูมิต่ำสุดที่ไอของเชื้อเพลิงสามารถถูกติดไฟได้ในระยะเวลาสั้น ๆ เมื่อถูกปล่อยด้วยเปลวไฟ ในการทดสอบจุดวาบไฟจะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D93 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบประกอบด้วย Pensky Marten Closed Cup Apparatus ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.4 เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทพิสัย 360 °C แก๊สหุงต้ม ขั้นตอนการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

1. เปิดวาล์วแก๊สหุงต้มแล้วจุดเปลวไฟเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวล่อให้เกิดการวาบไฟ จากนั้นปรับเปลวไฟให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2-4.8 เซนติเมตร
2. เติมเชื้อเพลิงทดสอบลงในถ้วยของชุดทดสอบจุดวาบไฟจนถึงขีดที่กำหนด ภายในถ้วยดังกล่าวแล้วจึงประกอบถ้วยเข้ากับชุดวัดจุดวาบไฟ
3. เปิดสวิทช์เครื่องทดสอบเพื่อให้ใบกวนกวนน้ำมันเพื่อให้รับความร้อนอย่างทั่วถึงจนเกิดเป็นไอระเหย โดยใช้ความเร็วประมาณ 100 รอบต่อนาที
4. ให้ความร้อนแก่เชื้อเพลิงทดสอบด้วยอัตราการใช้ความร้อน 5-6 °C หรือปรับสวิทช์ให้ความร้อนไปที่หมายเลข 3 สำหรับชุดทดสอบนี้
5. บิดแกนขับหัวเปลวไฟจนสุดเพื่อให้เปลวไฟไปล่อไอระเหยของเชื้อเพลิง จากนั้นสังเกตเปลวไฟที่ช่องส่องทันทีหากมีเปลวไฟเกิดขึ้นให้บันทึกค่าอุณหภูมินั้นๆ ไว้ แต่หากไม่มีเปลวไฟเกิดขึ้นจะให้ความร้อนต่อจนอุณหภูมิสูงขึ้น 2 °C แล้วทำการล่อไอระเหยของเชื้อเพลิงด้วยเปลวไฟอีกครั้ง
6. ทำการทดสอบขั้นตอนที่ 2-5 ซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.4 ลักษณะของเครื่องวัดจุดวาบไฟ

3.3.3. ความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นของเชื้อเพลิง ณ อุณหภูมิ 15.6 °C (Specific Gravity and Density of Fuel at 15 °C)

การทดสอบความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6 °C ของเชื้อเพลิงเป็นการทดสอบเพื่อระบุความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเทียบกับน้ำ ณ อุณหภูมิ 15.6 °C เพื่อเป็นการบอกความหนักเบาของเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิดังกล่าว โดยการทดสอบจะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D1298 อุปกรณ์หลักของการทดสอบ ได้แก่ ไฮโดรมิเตอร์สำหรับวัดเชื้อเพลิง (Fuel Hydrometer) ซึ่งมีช่วงการวัดอยู่ที่ 0.700 ถึง 1.000 และมีความละเอียดอยู่ที่ 0.005 ซึ่งมีลักษณะ ดังรูปที่ 3.5 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath), กระจกบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร และนาฬิกาจับเวลา โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

1. เปิดเครื่องอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิและตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 15.6 °C แล้วรอจนน้ำมีอุณหภูมิ 15.6 °C ตามที่กำหนด
2. เติมเชื้อเพลิงทดสอบลงในกระบอกตวง 100 มิลลิลิตร แล้วนำกระบอกตวงที่มีเชื้อเพลิงบรรจุอยู่แช่ในอ่างน้ำ
3. นำไฮโดรมิเตอร์จุ่มลงในเชื้อเพลิงแล้วปล่อยให้ไฮโดรมิเตอร์ลอย ระหว่างนี้ไฮโดรมิเตอร์ไม่ควรลอยไปติดขอบของกระบอกตวงเพราะจะทำให้ค่าที่แสดงผลผิดพลาดได้
4. ทำการทดสอบข้อที่ 3 ซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.5 ลักษณะของไฮโดรมิเตอร์สำหรับวัดความถ่วงจำเพาะเชื้อเพลิง

สำหรับความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 15.6 °C สามารถคำนวณได้จากความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6 °C ด้วยสมการที่ 3.4

$$\rho_{\text{fuel}} = S.G_{\text{fuel}} \times \rho_{\text{water}} \quad (3.4)$$

เมื่อ ρ_{fuel} คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง ณ อุณหภูมิที่สนใจ (kg/m^3)
 ρ_{water} คือ ความหนาแน่นของน้ำ ณ อุณหภูมิที่สนใจ (kg/m^3)
 $S.G_{\text{fuel}}$ คือ ความถ่วงจำเพาะของเชื้อเพลิง ณ อุณหภูมิที่สนใจ

3.3.4 อุณหภูมิการกลั่น 50% (50% Distillation Temperature)

การทดสอบอุณหภูมิการกลั่นของเชื้อเพลิง 50% เป็นการทดสอบเพื่อหาอุณหภูมิที่ไอระเหยของเชื้อเพลิงกลั่นตัวออกมาเป็นปริมาตร 50% ของเชื้อเพลิงทดสอบเริ่มต้น การทดสอบส่วนนี้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D86 ซึ่งอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบมี ได้แก่ ชุดทดสอบ Distillation at Atmospheric Pressure DU 4-Economy (manual) ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนให้ความร้อนและส่วนหล่อเย็น ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.6, ขวดกลั่นขนาด 100 มิลลิลิตร, ฟอยล์อะลูมิเนียม, กระจกบอควงขนาด 100 มิลลิลิตร 2 อัน, เทอร์โมมิเตอร์ช่วงการวัดสูงสุด 360 °C, นาฬิกาจับเวลา และจุกยาง สำหรับขั้นตอนการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

1. ตรวจสอบความสะอาดท่อหล่อเย็นด้วยการใช้ผ้าแห้งผุกดัดกับเส้นลวดเช็ดทำความสะอาด
2. ตวงเชื้อเพลิงทดสอบปริมาตร 100 มิลลิลิตรแล้วเทลงในขวดกลั่น
3. ประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ และปิดขวดกลั่น จากนั้นจึงทำการประขวดกลั่นเข้ากับอุปกรณ์หลัก โดยให้เทอร์โมมิเตอร์ติดที่ขวดกลั่นส่วนต่อทางเดินไอระเหยต่อเข้ากับส่วนหล่อเย็น
4. ตั้งอุณหภูมิที่เครื่องหล่อเย็น จากนั้นจึงเริ่มให้ความร้อนแก่เชื้อเพลิงทดสอบโดยช่วงเริ่มต้นให้ปรับอยู่ที่ระดับ 5 ถึง 6
5. เมื่อเชื้อเพลิงทดสอบเริ่มเดือดให้สังเกตและบันทึกอุณหภูมิที่ไอระเหยของเชื้อเพลิงทดสอบกลั่นออกมาเป็นหยดแรก
6. จับเวลาเพื่อควบคุมอัตราการกลั่นตัวของไอระเหยของเชื้อเพลิงทดสอบโดยควบคุมให้อัตราการกลั่นอยู่ในช่วง 4-5 มิลลิลิตรต่อนาที
7. บันทึกอุณหภูมิทุก ๆ 10 มิลลิลิตรที่ไอระเหยของเชื้อเพลิงกลั่นตัวได้จนถึงที่ปริมาตร 50 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.6 ลักษณะของเครื่องวัดอุณหภูมิการกลั่น

3.3.5 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Fuel Heating Value)

การทดสอบค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D240 เพื่อวิเคราะห์หาพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทดสอบหนึ่งหน่วยมวล

โดยมีอุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบดังนี้ ชุดทดสอบ Bomb Calorimeter รุ่น Bomb C5000 ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.7 ค่ายจุดระเบิด (Ignition Wire) 1 ชุดต่อหนึ่งตัวอย่าง คีมจับ 2 อัน หลอดหยดสาร ถังออกซิเจน เครื่องชั่งสาร 4 ตำแหน่ง ถ้วยใส่เชื้อเพลิงทดสอบ ส่วนขั้นตอนการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

1. เปิดการทำงานของเครื่องทดสอบและคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ข้อมูล และเปิดวาล์วแก๊สออกซิเจน
2. เปิดโปรแกรม CALWIN
3. เลือกมาตรฐานในการทดสอบเป็น ASTM D240
4. ชั่งเชื้อเพลิงทดสอบโดยการนำถ้วยใส่เชื้อเพลิงทดสอบวางบนเครื่องชั่งสาร 4 ตำแหน่ง จากนั้นกดปุ่ม TARE (เนื่องจากจะไม่สนใจน้ำหนักของเครื่องชั่งซึ่งเครื่องชั่งจะแสดงผลเป็น 0.0000 หลังจากกดปุ่ม) TARE แล้ว หลังจากนั้นจึงค่อยๆหยดเชื้อเพลิงทดสอบลงในถ้วยจนได้เชื้อเพลิงทดสอบที่มีน้ำหนักประมาณ 0.25 กรัม
5. ใช้คีมคีบค้ายจุดระเบิดออกมาจากภาชนะบรรจุแล้วมัดเข้ากับลวดโดยให้ปลายของค้ายุ่มลงในเชื้อเพลิงทดสอบ
6. ประกอบถ้วยบรรจุเชื้อเพลิงกับลวดที่มัดค้ายไว้แล้วประกอบกับลูก Bomb แล้วปิดให้สนิท
7. บรรจุลูก Bomb เข้ากับชุดเครื่องทดสอบในตำแหน่งที่ถูกต้อง หลังจากนั้นจึงสั่งเริ่มทดสอบผ่านโปรแกรม CALWIN โดยจะใช้เวลาประมาณ 15-22 นาทีต่อหนึ่งตัวอย่าง หลังจากทดสอบเสร็จแล้วผลที่ได้จะปรากฏในโปรแกรม CALWIN



รูปที่ 3.7 ลักษณะของเครื่องวัดค่าความร้อนเชื้อเพลิง

3.3.6 ดัชนีซีเทน (Cetane Index)

การหาค่าดัชนีซีเทนถูกใช้เพื่อทดแทนค่าเลขซีเทนเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการทดสอบที่ต่ำกว่า ค่าดัชนีซีเทนและเลขซีเทนเป็นปริมาณที่บอกรถึงความสามารถในการผสมกันของอากาศและเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยค่ายิ่งสูงความสามารถในการผสมจะยิ่งดีตามไปด้วย ในการทดสอบเพื่อหาค่าดัชนีซีเทนจะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D976 โดยที่การหาค่าดัชนีซีเทนสามารถคำนวณได้โดยใช้ค่าอุณหภูมิการกลั่น 50% และความถ่วง API จากการทดสอบก่อนหน้า โดยสมการสำหรับการคำนวณหาความถ่วง API แสดงดังสมการที่ 3.5

$$\text{ความถ่วงเอพีไอ} = (141.5/\text{ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิที่สนใจ}) - 131.5 \quad (3.5)$$

ส่วนสมการสำหรับคำนวณหาค่าดัชนีซีเทนของเชื้อเพลิงดีเซลจากแหล่งปิโตรเลียมแสดงดังสมการที่ 3.6

$$CI = -420.34 + 0.016G^2 + (0.192G)\log M + [(65.01)(\log M)^2] - 0.0001809M^2 \quad (3.6)$$

โดย CI คือ ดัชนีซีเทน
 G คือ ความถ่วงเอพีไอ (API Gravity)
 M คือ อุณหภูมิการกลั่น 50% ในหน่วยองศาฟาเรนไฮต์ (°F)
 สำหรับเลขซีเทนของเอสเตอร์ของกรดไขมันสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7

$$CN_{FAEE} = 58.1 + \left[2.8 \times \left(\frac{NC}{2} \right) \right] - (15.9 \times ND) \quad (7)$$

โดย CN_{FAEE} คือ เลขซีเทนของแอลคิลเอสเตอร์ของกรดไขมันชนิดนั้น ๆ
 NC คือ จำนวนอะตอมของคาร์บอนในเอสเตอร์ของกรดไขมันชนิดนั้น ๆ
 ND คือ จำนวนพันธะคู่ของพันธะคาร์บอนในเอสเตอร์ของกรดไขมันชนิดนั้น ๆ

ส่วนเลขซีเทนของเชื้อเพลิงที่ประกอบด้วยเอสเตอร์ของกรดไขมันหลายชนิดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.8

$$CN_{\text{fuel}} = \sum \left(\frac{X_{\text{FAAE}}}{100} \right) \times CN_{\text{FAAE}} \quad (3.8)$$

โดย CN_{fuel} คือ เลขซีเทนรวมของเชื้อเพลิง

X_{FAAE} คือ ร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันชนิดนั้น ๆ

3.3.7 ความสามารถในการหล่อลื่น (Lubricity)

ความสามารถในการหล่อลื่นเป็นคุณสมบัติที่บ่งบอกถึงความสามารถในการลดแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวจากการเคลือบของเชื้อเพลิง โดยการทดสอบจะดำเนินการตามมาตรฐาน ISO12156-1 ด้วยเครื่อง High Frequency Reciprocating Rig (HFRR) ซึ่งมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.8 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ ชุดเครื่องทดสอบ HFRR ซึ่งประกอบด้วยส่วนทดสอบและคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งงานทดสอบซึ่งประกอบด้วย แผ่นดิสก์ (Disc) และลูกบอล (Ball) มวลถ่วง 200 กรัม เครื่องดูด-จ่ายสารละลาย (Auto Pipette) อ่างสั่นคลื่นความถี่สูง (Sonicator Bath) คีมคีบ (Forceps) ทินเนอร์ อะซิโตน (Acetone) บีกเกอร์ ขนาด 100 มิลลิลิตร 3 ใบ 10 น้ำ Deionized Water (DI) สำหรับการจับย้ายชิ้นงานให้ใช้คีมคีบเท่านั้นและควรใส่ถุงมือยางเพื่อป้องกันความชื้นจากมือสัมผัสกับชิ้นงาน ขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. เททินเนอร์ลงในบีกเกอร์เปล่าแล้วนำชิ้นงานทดสอบแช่ลงในทินเนอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อชะล้างคราบน้ำมันและสิ่งสกปรกจากการผลิตชิ้นงานออก โดยใช้ชิ้นงานทดสอบ 1 ชุดต่อ 1 ตัวอย่าง
2. เทอะซิโตนใส่บีกเกอร์เปล่าแล้วนำชิ้นงานทดสอบ 1 ชุด จากขั้นตอนที่ 1 และอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานทดสอบของชุดทดสอบ HFRR ใส่ลงไปในบีกเกอร์ จากนั้นนำบีกเกอร์ลงแช่ในอ่างสั่นคลื่นความถี่สูงที่มีน้ำ DI บรรจุอยู่ แล้วทำการเปิดการทำงานของเครื่องไว้ที่ 5 นาที เพื่อชะล้างทินเนอร์ออก
3. ประกอบชิ้นงานทดสอบเข้ากับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานทดสอบ จากนั้นนำอุปกรณ์จับยึดที่มีชิ้นงานอยู่ประกอบเข้ากับส่วนทดสอบของเครื่อง HFRR



รูปที่ 3.8 ลักษณะของเครื่องทดสอบความสามารถในการหล่อลื่น HFRR



รูปที่ 3.9 ลักษณะชุดทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นที่พร้อมทดสอบ

4. ปรับเครื่องดูด-จ่ายสารละลายไว้ที่ 2 มิลลิลิตร แล้วดูดเชื้อเพลิงทดสอบขึ้นมา จากนั้นจ่ายเชื้อเพลิงทดสอบลงในอุปกรณ์จับยึดที่มีชิ้นงานอยู่ โดยให้เชื้อเพลิงทดสอบท่วมแผ่นดิสก์ ลักษณะดังที่แสดงตามรูปที่ 3.9
5. แขนงมวลถ่วงเข้ากับคานแขวนแล้วค่อย ๆ ปล่อยให้ลูกบอลและแผ่นดิสก์ สัมผัสกัน จากนั้นทำการเลียบหัวอ่านค่าของชุดทดสอบเข้ากับช่องเลียบ

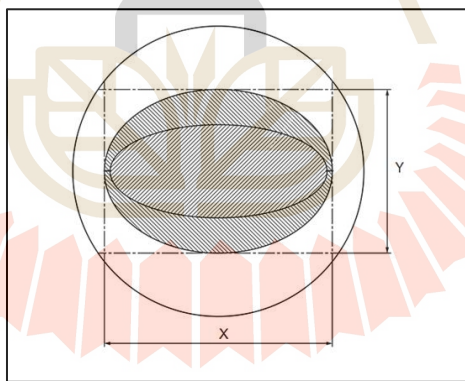
6. ตั้งค่ามาตรฐานทดสอบเป็น ISO12156-1 แล้วตั้งเริ่มการทดสอบซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 75 นาที

7. ปลดมวลถ่วงออกและแยกอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานทดสอบออกจากส่วนทดสอบ จากนั้นนำอุปกรณ์จับยึดที่มีชิ้นงานอยู่ใส่ลงในบีกเกอร์เปล่าที่บรรจุอะซิโตน แล้วนำบีกเกอร์ดังกล่าวแช่ลงในอ่างส่งคลื่นความถี่สูงแล้วเปิดการทำงานของเครื่องเป็นเวลา 5 นาที เพื่อชะล้างเชื้อเพลิงทดสอบออก

8. ปลดชิ้นงานทดสอบออกแล้วบรรจุใส่อุปกรณ์จัดเก็บเพื่อนำไปวิเคราะห์หาขนาดรอยขูดขีด

9. ทำการทดสอบกับเชื้อเพลิงชนิดต่อไปตามขั้นตอนที่ 2-8

หลังจากทดสอบด้วยเครื่อง HFRR จนชิ้นงานทดสอบมีรอยขูดขีดแล้วขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์ขนาดรอยขูดขีด เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดของรอยขูดขีดคือกล้องจุลทรรศน์โดยใช้กำลังขยาย 100 เท่า ส่วนลักษณะรอยขูดขีดที่จะทำการวัดแสดงดังรูปที่ 3.10 ซึ่งประกอบด้วยความยาวแนวแกนนอน (X) และความยาวแนวแกนตั้ง (Y) ส่วนขนาดของรอยขูดขีด (Mean Wear Scar Diameter, MWSD) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.9



รูปที่ 3.10 ลักษณะรอยขูดขีดและความยาวแนวแกนตั้งและแกนนอน

$$MWSD = \left(\frac{X+Y}{2} \right) \quad (3.9)$$

เมื่อ	MWSD	คือ ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยขูดขีด (μm)
	X	คือ ความยาวแนวแกนนอน (μm)
	Y	คือ ความยาวแนวแกนตั้ง (μm)

นอกจากนี้สภาพแวดล้อมในการทดสอบด้วยเครื่อง HFRR ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดอาจแตกต่างกันจึงจำเป็นที่จะทำการปรับค่าขนาดรอยขีดขูดที่ได้ด้วยการคำนวณเพื่อชดเชยความแตกต่างดังกล่าวซึ่งค่าขนาดของรอยขีดขูดที่ปรับค่าแล้ว (Corrected Mean Wear Scar Diameter, CMWSD) สามารถคำนวณได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{CMWSD} = \text{MWSD} + \text{HCF} \times (1.4 - \text{PV}_{\text{avg}}) \quad (3.10)$$

เมื่อ CMWSD คือ ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยขีดขูดปรับค่าแล้ว (μm)
 HCF คือ แฟคเตอร์ปรับค่า โดยมีค่า $60 \mu\text{m/kPa}$
 PV_{avg} คือ ความดันไอเฉลี่ย (kPa)

ความดันไอเฉลี่ย (PV_{avg}) สามารถคำนวณได้ดังสมการ 3.11

$$\text{PV}_{\text{avg}} = \frac{(\text{PV}_1 + \text{PV}_2)}{2} \quad (3.11)$$

เมื่อ PV_1 คือ ความดันไอเริ่มต้น (kPa)
 PV_2 คือ ความดันไอสุดท้าย (kPa)

ความดันไอเริ่มต้น (PV_1) และความดันไอสุดท้าย (PV_2) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.12 และสมการที่ 3.13

$$\text{PV}_1 = \frac{(\text{RH}_1 \times 10^v)}{750} \quad (3.12)$$

เมื่อ RH_1 คือ ความชื้นสัมพัทธ์เมื่อเริ่มต้นการทดสอบ (%)
 v คือ $8.017352 - 1705.984 / (231.864 + T_1)$
 T_1 คือ อุณหภูมิเมื่อเริ่มต้นการทดสอบ ($^{\circ}\text{C}$)

$$\text{PV}_2 = \frac{(\text{RH}_2 \times 10^v)}{750} \quad (3.13)$$

เมื่อ	RH_2	คือ ความชื้นสัมพัทธ์เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ (%)
	v	คือ $8.017352 - 1705.984/(231.864 + T_1)$
	T_2	คือ อุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ ($^{\circ}C$)

3.4 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบที่หลงเหลือบนชิ้นงานทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นด้วยเทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared (FTIR) Spectroscopy) แบบ Attenuated Total Reflectance (ATR)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR เป็นเทคนิคซึ่งใช้คุณสมบัติการดูดกลืนลำแสงของโมเลกุลของสารอินทรีย์ ซึ่งจะให้ผลออกมาในรูปแบบสเปกตรัม โดยมีหลักการทำงานคร่าว ๆ คือ แหล่งกำเนิดแสงส่งลำแสงไปที่ตัวอย่าง จากนั้นโมเลกุลในตัวอย่างจะดูดกลืนลำแสงบางส่วน ลำแสงที่เหลือจะผ่านไปยังส่วนตรวจจับเพื่อประมวลผล ส่วนตรวจจับรับสัญญาณแล้วแปลงผลด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ที่ชื่อ Fourier Transform แล้วแสดงผลที่หน่วยแสดงผล ส่วน ATR เป็นเทคนิคอินฟราเรดอีกรูปแบบหนึ่งสำหรับวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีความหนาจนลำแสงส่องไม่ทะลุ โดยใช้หลักการสะท้อนของแสง มีการทำงานคร่าว ๆ ดังนี้ แหล่งกำเนิดแสงส่งลำแสงไปที่ตัวอย่าง จากนั้นโมเลกุลในตัวอย่างจะดูดกลืนลำแสงแล้วสะท้อนลำแสงไปที่ส่วนตรวจจับ ขั้นตอนที่เหลือจะเหมือนกับเทคนิค FTIR ปกติ

ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันจากชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงมาจะใช้เทคนิค FTIR-ATR เนื่องจากชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นดิสก์ที่มีความหนาจึงไม่สามารถใช้เทคนิค FTIR ปกติได้ เครื่องมือวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR แสดงดังรูปที่ 3.11 โดยมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ดังนี้

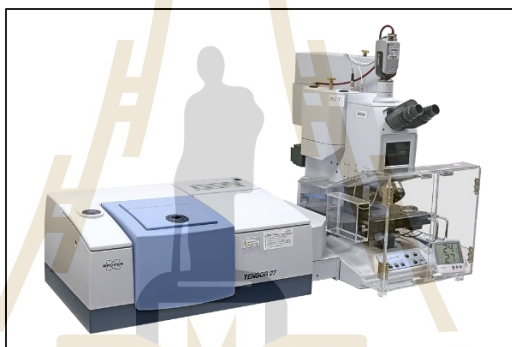
1. ทำความสะอาดหัว ATR ด้วยเอทานอล โดยเทเอทานอลใส่สำลีแล้วเช็ดทำความสะอาดเบา ๆ
2. นำชิ้นงานตัวอย่างวางบนฐานวางตัวอย่างจากนั้นปรับหัว ATR ไปยังตำแหน่งที่มีชิ้นงานอ้างอิงอยู่โดยใช้แกนหมุนปรับตำแหน่งแกน X และ Y จากนั้นใช้แกนหมุนปรับหัว ATR ในแนวแกน Z เพื่อเลื่อนหัว ATR ลงจนพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างที่แสดงบนหน้าจอแสดงผลมีความคมชัด เพื่อทดสอบการทำงานของอุปกรณ์
3. เลื่อนหัว ATR ไปยังชิ้นงานตัวอย่างแล้วปรับหัว ATR จนเห็นพื้นผิวของชิ้นงานชัดเจน
4. เลื่อนหัว ATR ไปยังตำแหน่งบริเวณการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Zone)

5. กำหนดพื้นที่ที่ต้องการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์สั่งการเลือกตำแหน่งมุมทั้งสี่มุมของพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ต้องการทดสอบหรือเลือกสองจุดซึ่งโปรแกรมจะสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยม โดยใช้เส้นตรงที่ลากเชื่อมจุดทั้งสองเป็นเส้นทแยงของรูปสี่เหลี่ยม ในขั้นตอนนี้จะต้องเลือกวิธีการสร้างพื้นที่วิเคราะห์แบบ 4 point และ 2 point ตามลักษณะการสร้างพื้นที่วิเคราะห์ที่กล่าวไปข้างต้น เมื่อเสร็จขั้นตอนนี้แล้วพื้นผิวของชิ้นงานที่มีเลือกวิเคราะห์จะแสดงที่หน้าจอ

6. กำหนดจุดด้วยวิเคราะห์โดยใช้คำสั่ง set point แล้วคลิกซ้ายเลือกตำแหน่ง

7. กดเริ่มการทดสอบ จากนั้นเครื่องมือจะทำการวิเคราะห์โดยอัตโนมัติ หลังจากเสร็จขั้นตอนนี้ข้อมูลที่ได้จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ผล

8. ทำขั้นตอนที่ 1-7 ใหม่โดยที่ขั้นตอนที่ 4 ให้เปลี่ยนตำแหน่งไปยังรอยขูดขีด (Wear Track)



รูปที่ 3.11 เครื่องมือวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR

3.5 การทดสอบเครื่องยนต์

สำหรับการทดสอบสมรรถนะและการตรวจวัดมลพิษจะใช้เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการอัดได้ โดยมีเชื้อเพลิงที่ทำการทดสอบสองชนิดคือน้ำมันดีเซลซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงอ้างอิงและเชื้อเพลิงผสม COEE8 ซึ่งใช้เป็นตัวแทนน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งที่ไม่สามารถทดสอบกับเครื่องยนต์ได้เนื่องจากความหนืดเกินมาตรฐาน ในส่วนของเครื่องยนต์จะถูกทดสอบด้วยความเร็วคงที่ที่ 1,500 รอบต่อนาที และเปลี่ยนแปลงภาระงานที่เครื่องยนต์ได้รับ 3 ระดับ ได้แก่ 25%, 50% และ 75% ของแรงบิดสูงสุดที่เครื่องยนต์สามารถทำได้ โดยจะทำการทดสอบทั้งหมด 3 อัตราส่วนการอัดได้แก่ 16:1, 17:1 และ 18:1 สำหรับสมรรถนะที่สนใจ คือ อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake Specific Fuel Consumption, BSFC) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนจำเพาะเบรก (Brake Thermal Efficiency, η_{TH}) ส่วนมลพิษที่สนใจ ได้แก่ ไนโตรเจนออกไซด์หรือออกไซด์ของไนโตรเจน (Nitrogen Oxides, NO_x), สารประกอบไฮโดรคาร์บอน

(Hydrocarbon, HC), คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide) และเขม่าควัน (Smoke) โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.5.1 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์และคุณลักษณะการเผาไหม้

เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดเป็นชุดทดสอบที่ประกอบด้วยเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยกันอัดที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการอัดได้โดยมีข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ดังแสดงในตารางที่ 3.2 , ไดนาโมมิเตอร์, ส่วนทดสอบอัตราการบริโภកเชื้อเพลิงและคอมพิวเตอร์สั่งการ ลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 3.12 และรูปที่ 3.13 และรูปแบบการเชื่อมต่อเครื่องยนต์และอุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 3.14 โดยมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

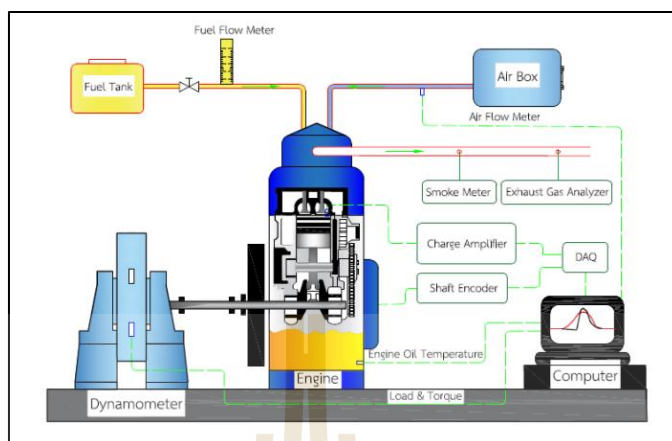
1. จ่ายไฟให้กับคอมพิวเตอร์สั่งการและส่วนควบคุมภาระงาน และจ่ายน้ำเพื่อใช้ในการหล่อเย็นและเบรกไดนาโมมิเตอร์
2. เติมเชื้อเพลิงเข้าสู่ถังบรรจุเชื้อเพลิงของชุดทดสอบ
3. เปิดลิ้นเร่งของชุดทดสอบจนสุดเพื่อจำลองการทำงานของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด และสตาร์ทเครื่องยนต์
4. ปรับความเร็วรอบไว้ที่ 1500 รอบต่อนาที แล้วอุ่นเครื่องโดยปล่อยให้เครื่องยนต์ทำงานโดยไม่มีภาระงานเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ระบบต่างๆอยู่ในสภาวะที่พร้อมทำงาน
5. สอบเทียบแรงบิดสูงสุดที่เครื่องยนต์สามารถทำได้ เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าภาระงานที่ต้องจ่ายให้เครื่องยนต์
6. ปรับภาระงานไปที่ค่าที่กำหนด 25% ของแรงบิดสูงสุดที่เครื่องยนต์สามารถสร้างได้จากข้อ 5 และปรับความเร็วรอบไว้ที่ 1,500 รอบต่อนาที ดังเดิมเนื่องจากความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะลดลงเมื่อมีการเพิ่มภาระงาน แล้วปล่อยให้เครื่องยนต์ทำงานที่ภาระงานดังกล่าวเป็นระยะเวลา 5 นาที
7. ทำการวัดสมรรถนะของเครื่องยนต์และคุณลักษณะการเผาไหม้ โดยสั่งการผ่านคอมพิวเตอร์สั่งการ ในขณะเดียวกันให้ทดสอบอัตราการบริโภกเชื้อเพลิงในส่วนทดสอบอัตราการบริโภกเชื้อเพลิงและวัดปริมาณมลพิษที่ปล่อยออกมาทางปลายของท่อไอเสียไปด้วย
8. ทำการทดสอบขั้นตอนที่ 6 และ 7 ซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย
9. ทำการทดสอบขั้นตอนที่ 6-8 ซ้ำโดยเปลี่ยนภาระงานเป็น 50% และ 75% ของแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์
10. ทำการทดสอบขั้นตอนที่ 6-9 ซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราส่วนการอัดเป็น 17:1 และ 18:1
11. คับเครื่องยนต์แล้วเปลี่ยนเชื้อเพลิงจากนั้นทำการทดสอบขั้นตอนที่ 4-10 ซ้ำอีกครั้ง



รูปที่ 3.12 เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการที่สามารถปรับอัตราส่วนการอัดได้และไดนาโมมิเตอร์



รูปที่ 3.13 ส่วนควบคุมภาระงานและทดสอบอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงของชุดทดสอบ



รูปที่ 3.14 ลักษณะการเชื่อมต่อเครื่องยนต์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ทดสอบ

Engine Specification	
Model	TV1
Manufacturer	Kirloskar Oil Engine
Engine Type	1 cylinder, 4 strokes, water cooled, direct injection
Bore	87.5 mm.
Stroke	110 mm.
Swept Volume	661 cc
Rated Power	3.5 KW at 1500rpm
Compression Ratio	12-18

สมรรถนะที่สนใจได้แก่อัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนจำเพาะเบรก (BTE) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.5.2 อัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake Specific Fuel Consumption, BSFC)

อัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกเป็นปริมาณที่บอกถึงปริมาณเชื้อเพลิงที่เครื่องยนต์ใช้เพื่อสร้างกำลังออกมาหนึ่งหน่วยในเวลาหนึ่งชั่วโมง สามารถคำนวณได้โดยใช้ตัวแปรที่ได้จากขั้นตอนการทดสอบเครื่องยนต์ มีสมการในการคำนวณดังสมการที่ 3.14

$$\text{BSFC} = \frac{m_f}{P_b} \quad (3.14)$$

เมื่อ m_f คือ อัตราการไหลของเชื้อเพลิงในหน่วยกรัมต่อวินาที (kg/h)
 P_b คือ กำลังเบรกของเครื่องยนต์ (Brake Power) ในหน่วยกิโลวัตต์ (kW)

ในสมการที่ 3.13 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงสามารถทดสอบได้จากชุดทดสอบ ส่วนกำลังเบรกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.15 ดังนี้

$$P_b = \frac{2 \times \pi \times N \times T_b}{1000} \quad (3.15)$$

เมื่อ N คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในหน่วยรอบต่อวินาที (rev/s)
 T_b คือ แรงบิดเบรกของเครื่องยนต์ (Brake Torque) ในหน่วยนิวตัน-เมตร (N-m)

3.5.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (Brake Thermal Efficiency, BTE)

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีจากกระบวนการสันดาปเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานทางความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.16

$$\text{BTE} = \frac{P_b}{(m_f \times \text{HHV})} \quad (3.16)$$

เมื่อ HHV คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงในหน่วยเมกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/kg)

3.5.4 การตรวจวัดไนโตรเจนออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ (Nitrogen Oxides and Carbon Monoxide)

สำหรับการตรวจวัดมลพิษในส่วนของไนโตรเจนออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ จะใช้เครื่องวิเคราะห์ไอเสีย TESTO-350 ซึ่งมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 3.15 และข้อมูลจำเพาะของเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย TESTO-350 แสดงในตารางที่ 3.3 โดยมีขั้นตอนการใช้ดังนี้

1. จ่ายไฟให้กับเครื่องวิเคราะห์ไอเสียแล้วเปิดการทำงานของออกซิเจนเซนเซอร์ทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้เครื่องทำการเตรียมความพร้อมให้กับส่วนต่าง ๆ
2. ตั้งค่าการวิเคราะห์สำหรับใช้ทดสอบไอเสียจากเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดโดยเลือกทดสอบที่ค่า λ มากกว่า 1
3. เมื่ออยู่ในขั้นตอนการทดสอบให้นำหัวดูดแก๊สไอเสียจ่อไปที่บริเวณปลายท่อไอเสียข้างไว้ประมาณ 1 นาที แล้วอ่านค่ามลพิษที่แสดงบนหน้าจอ
4. ทำการทดสอบขั้นตอนที่ 3 ซ้ำสามครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

3.5.5 การตรวจวัดสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon)

สำหรับการตรวจวัดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในไอเสียจะใช้เครื่องวิเคราะห์ไอเสีย HORIBA MEXA - 584L ซึ่งมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 3.16 และข้อมูลจำเพาะของเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย HORIBA MEXA - 584L แสดงในตารางที่ 3.5 โดยมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

1. จ่ายไฟให้กับเครื่องวิเคราะห์ไอเสียแล้วเปิดการทำงานของเครื่องทิ้งไว้เพื่อให้เครื่องทำการเตรียมความพร้อมให้กับส่วนต่าง ๆ เป็นเวลา 5 นาที
2. เมื่ออยู่ในขั้นตอนการทดสอบให้นำหัวดูดแก๊สไอเสียจ่อไปที่บริเวณปลายท่อไอเสียข้างไว้ประมาณ 1 นาที แล้วอ่านค่ามลพิษที่แสดงบนหน้าจอ
3. ทำการทดสอบขั้นตอนที่ 2 ซ้ำสามครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

3.5.6 การตรวจวัดเขม่าควัน (Smoke)

สำหรับการตรวจวัดเขม่าควันในไอเสียจะใช้เครื่องวิเคราะห์เขม่า TESTO 308 และข้อมูลจำเพาะของเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย TESTO-308 แสดงในตารางที่ 3.6 ซึ่งมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 3.17 โดยมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

1. ตรวจสอบปริมาณกระดาษกรองเขม่าให้อยู่ในปริมาณที่มากพอ
2. จ่ายไฟให้อุปกรณ์วิเคราะห์เขม่าควันแล้วเปิดเครื่อง
3. ทำการทดสอบหารอยรั่วของท่อทางเดินไอเสียโดยไปที่โหมคทดสอบรอยรั่วจากนั้นอุดรูของหัววัดไว้แล้วเริ่มทำการทดสอบ หากไม่มีรอยรั่วเกิดขึ้นเครื่องจะแสดงผลให้ทดสอบได้ทันที
4. เมื่ออยู่ในขั้นตอนการทดสอบให้นำหัวดูดแก๊สไอเสียจ่อไปที่บริเวณปลายท่อไอเสียแล้วกดปุ่มเริ่มทดสอบ หลังจากนั้นให้ค้างอยู่ที่ตำแหน่งดังกล่าวจนกว่าหน้าจอจะแสดงผลดัชนีเขม่าควันที่วัดได้ออกมา
5. ทำการทดสอบขั้นตอนที่ 4 ซ้ำอีก 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.15 เครื่องวิเคราะห์ไอเสีย TESTO 350



รูปที่ 3.16 เครื่องวิเคราะห์ไอเสีย HORIBA MEXA-584L



รูปที่ 3.17 เครื่องวิเคราะห์เขม่าควัน TESTO 308

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย TESTO-350

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

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย TESTO-350 (ต่อ)

Measurement Parameter	Measurement Range	Accuracy	Resolution
CO ₂ (IR)	0 – 50 vol.%	± 0.3 vol.% (0-39.9 vol. %) ± 0.5 vol.% ± 0.5 vol.% of reading (rest of range)	0.01 vol% (0-25 vol %) 0.1 vol% (>25 vol %)
HC	Natural gas: 100 – 40000 ppm Propane: 100 – 21000 ppm Butane: 100 – 18000 ppm	± 400 ppm (100-4000 ppm) ± 10% of reading (rest of range)	10 ppm

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย HORIBA MEXA-584L

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

ตารางที่ 3.6 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย TESTO-308

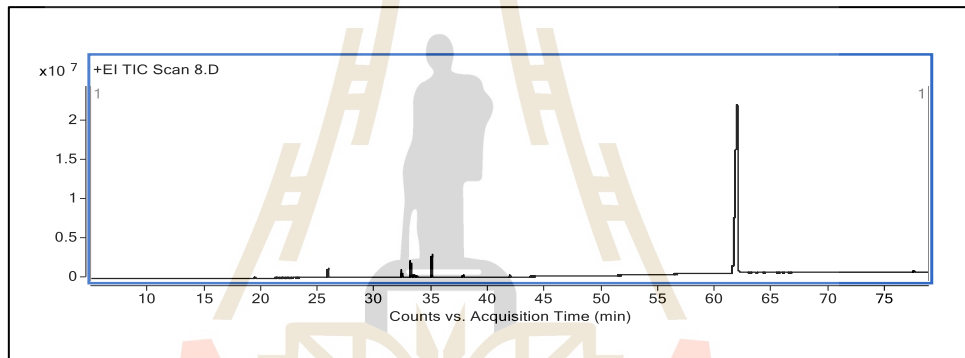
Technical Data	
Sensor Type	Photodiode
Measuring Range	0 to 6 RZ
Accuracy ± 1 digit	± 0.2 RZ
Resolution	0.1 RZ
General Technical Data	
Pump Capacity	1.63 ± 0.11
Reference Filter	At 990 mbar and + 20C Ambient Temperature
Display	Segment display with background Illumination
Norms and Tests	1.BImSchV, METAS, EU-Guideline 2004/108/EG
Operating Temperature	+5 to +45 °C
Storage Temperature	-20 to +50 °C
Protection Class	IP40
Interfaces	IR / IRDA
Gas Sampling	Stainless Steel Pipe ca. 220 mm, Rubber Hose 100 mm

บทที่ 4

การหาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากมะहु่ง

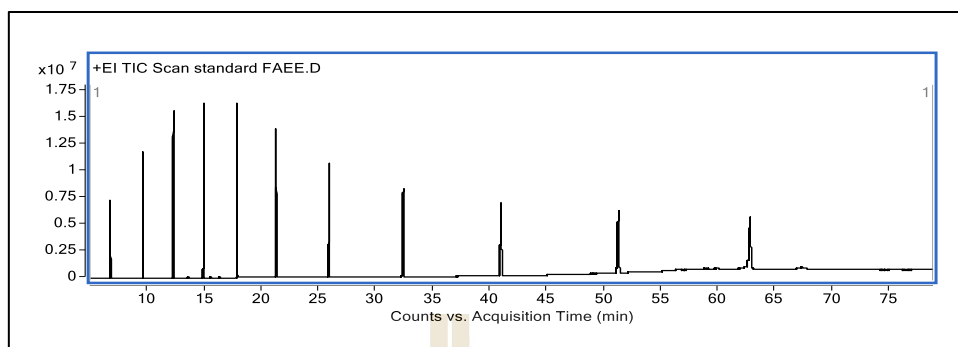
4.1 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะहु่ง

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะहु่ง (Castor oil ethyl ester, COEE) ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC) โดยทำการเจือจางน้ำมันตัวอย่างในไอโซออกเทน (Isooctane) 1,000 เท่า ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีของตัวอย่างในสารละลายไอโซออกเทน

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี โดยแกนนอนแสดงช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นตัวอย่างจนถึงเวลาออกกราฟสูงสุดปรากฏ (Retention time, T_R) ส่วนแกนตั้งแสดงปริมาณของแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ที่ถูกดูดกลืนโดยตัวตรวจจับ (Absorbance) พบว่าเครื่องวิเคราะห์สามารถตรวจจับองค์ประกอบของน้ำมันไบโอดีเซลจากมะहु่ง (COEE) ได้ 5 ชนิดตามจำนวนออกกราฟที่ปรากฏ โดยแต่ละชนิดจะมี T_R เท่ากับ 25.85, 32.32, 33.14, 34.87 และ 61.85 นาที ตามลำดับ โดยที่องค์ประกอบที่มีค่า T_R เท่ากับ 61.85 นาที มีออกกราฟสูงและพื้นที่ใต้กราฟกว้างอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อให้ทราบถึงชนิดและความเข้มข้นของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันไบโอดีเซลจากมะहु่งจึงทำการวิเคราะห์หา Retention time กรดไขมันด้วยกรดไขมันมาตรฐานชนิดเอทิลเอสเทอร์ (Fatty acid ethyl ester, FAEE) ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีของกรดไขมันด้วยกรดไขมันมาตรฐานชนิดเอทิลเอสเทอร์

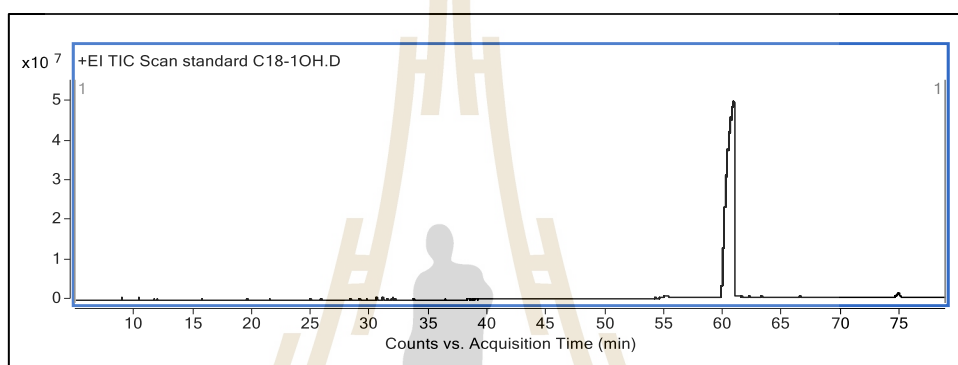
จากรูปที่ 4.2 พบว่า เครื่องวิเคราะห์สามารถตรวจจับกรดไขมันชนิดต่างได้ทั้งหมด 11 ชนิด โดยแต่ละชนิดมีชื่อเรียกและ Retention time ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ชนิดของกรดไขมันที่ตรวจพบในกรดไขมันมาตรฐานชนิดเอทิลเอสเทอร์

Number of Sample	Fatty Acid Name	Lipid Number	Retention Time (minutes)
1	Butyric Acid	C4:0	6.75
2	Caproic ACID	C6:0	9.59
3	Caprylic Acid	C8:0	12.26
4	Capric Acid	C10:0	14.90
5	Lauric Acid	C12:0	17.83
6	Myristic Acid	C14:0	21.25
7	Palmitic Acid	C16:0	25.89
8	Stearic Acid	C18:0	32.38
9	Arachidic Acid	C20:0	40.94
10	Behenic Acid	C22:0	51.21
11	Lignoceric Acid	C24:0	62.71

เมื่อเปรียบเทียบ Retention Time ขององค์ประกอบ 5 ชนิด ที่พบในน้ำมันไบโอดีเซลจาก ละหุ่งกับกรดไขมันมาตรฐานชนิดเอทิลเอสเทอร์พบว่า มีองค์ประกอบเพียง 2 ชนิดที่มี T_R ตรงกับ

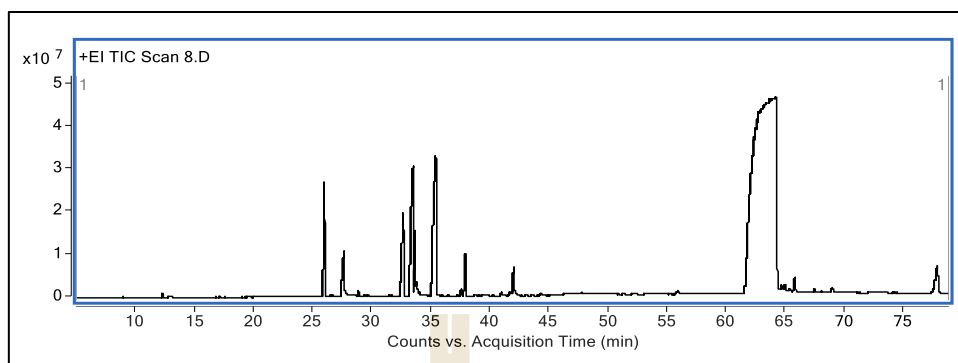
กรดไขมันมาตรฐานชนิดเอทิลเอสเทอร์ ได้แก่ องค์ประกอบที่ T_R เท่ากับ 25.85 และ 32.32 นาที ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวคือ Palmitic Acid และ Stearic Acid ส่วนองค์ประกอบที่ T_R เท่ากับ 33.14, 34.87 และ 61.85 นาที มี T_R ที่ไม่ตรงกับกรดไขมันมาตรฐานชนิดเอทิลเอสเทอร์จึงไม่สามารถทราบได้ว่าเป็นสารชนิดอะไร อย่างไรก็ตามข้อมูลจากหลายงานวิจัยทำให้ทราบว่าองค์ประกอบหลักของน้ำมันละหุ่งคือ กรดริซิโนเลอิก (Ricinoleic Acid) จึงทำการวิเคราะห์หา Retention Time ของกรดไขมันชนิดดังกล่าวด้วยกรดริซิโนเลอิกมาตรฐาน ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีของกรดริซิโนเลอิกมาตรฐาน

จากรูปที่ 4.3 พบว่า Retention Time ของกรดริซิโนเลอิกมีค่าเท่ากับ 60.83 นาที ซึ่งไม่ตรงกับองค์ประกอบในตัวอย่งน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งที่มี Retention Time เท่ากับ 61.85 นาที แต่เนื่องจากกรดริซิโนเลอิกมาตรฐานที่ใช้วิเคราะห์เป็นกรดประเภทเมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester) ซึ่งเป็นเอสเทอร์ชนิดหนึ่งคล้ายกับน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยที่เอสเทอร์ชนิดเมทิลเอสเทอร์จะมีจุดเดือดที่ต่ำกว่าเอทิลเอสเทอร์จึงมีความเป็นไปได้ว่า องค์ประกอบที่มี Retention Time เท่ากับ 61.85 นาที จะเป็นกรดริซิโนเลอิก

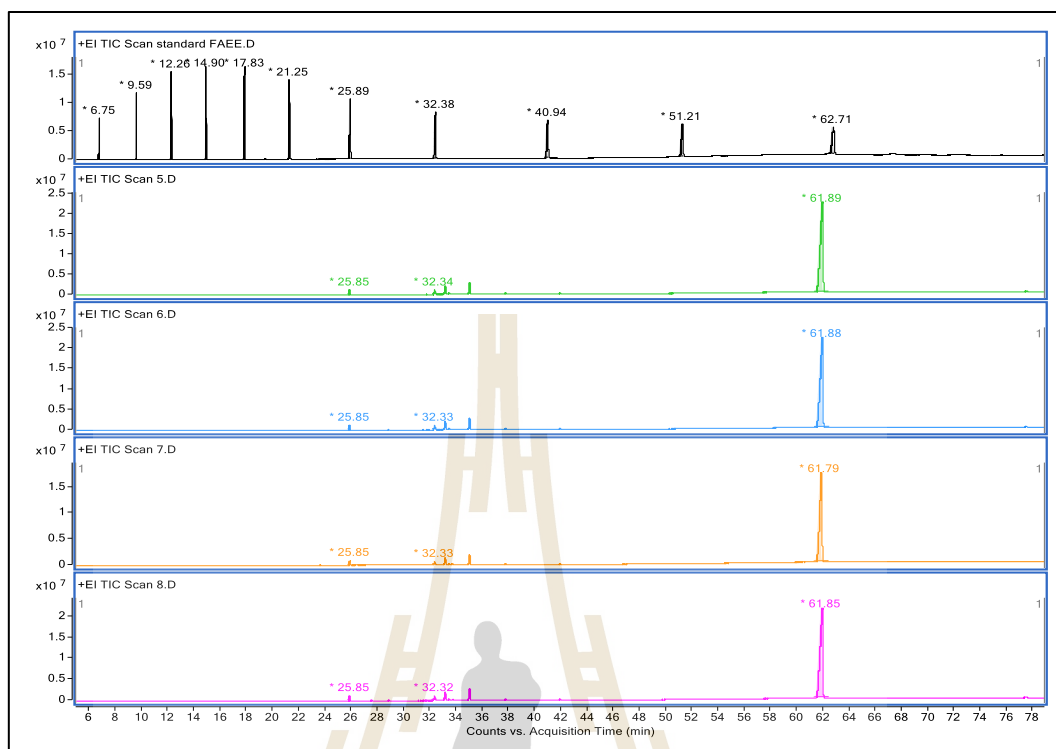
เนื่องจากผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งในรูปที่ 4.1 เกิดจากการเจือจางตัวอย่างในไอโซออกเทนจึงทำให้ยอดกราฟที่เกิดขึ้นมีพื้นที่เล็ก และอาจทำให้องค์ประกอบบางอย่างไม่แยกออกจากกันอย่างชัดเจน (องค์ประกอบที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกันอาจจะระเหยที่เวลาใกล้เคียงกันและเมื่อน้ำมันตัวอย่างมีความเข้มข้นน้อยจึงอาจทำให้ยอดกราฟขององค์ประกอบเหล่านั้นรวมกันเป็นยอดเดียว) จึงวิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งเพิ่มเติมโดยใช้ตัวอย่างเป็นน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งชนิดเอทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์ ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีของตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งบริสุทธิ์

จากรูปที่ 4.4 พบว่า มีองค์ประกอบเพิ่มเติมที่ถูกตรวจจับได้ที่ Retention Time เท่ากับ 27.46, 37.75 และ 42.57 นาที อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบ Retention Time ของตัวอย่างกับกรดไขมันชนิดเอทิลเอสเทอร์มาตรฐานกับกรดริซิโนเลอิกชนิดเมทิลเอสเทอร์มาตรฐานแล้วพบว่า ไม่มีองค์ประกอบใดที่มี Retention Time ตรงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่า กรดไขมันหลักที่ทราบชนิดหลักของน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งมี 3 ชนิด คือ Palmitic Acid (C16:0), Stearic Acid (C18:0) และ Ricinoleic Acid (C18:1OH)

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งด้วยสภาวะมากถึง 26 สภาวะ ซึ่งมีความจำเป็นที่ต้องหาสภาวะที่ให้ปริมาณกรดไขมันที่ทราบชนิดรวมมากที่สุดเพื่อใช้เป็นสภาวะอ้างอิงในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทั้งหมด จึงจำเป็นต้องนำตัวอย่างน้ำมันที่ผลิตได้จากแต่ละสภาวะมาวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟีเพื่อหาชนิดและปริมาณของกรดไขมันแต่ละชนิดและเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันรวมจากน้ำมันที่ผลิตจากแต่ละสภาวะ ตัวอย่างผลจากการวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีของแต่ละสภาวะแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์กรดไขมันจากน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำที่ผลิตได้ในแต่ละสภาวะ

จากรูปที่ 4.5 พบว่า ชนิดของกรดไขมันที่ทราบชนิดจากน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำที่ผลิตต่างสภาวะกันยังคงมีชนิดของกรดไขมันหลักอยู่ 3 ชนิด คือ Palmitic Acid (C16:0), Stearic Acid (C18:0) และ Ricinoleic Acid (C18:1OH) แต่จะมีความแตกต่างกันที่ปริมาณของกรดไขมันชนิดต่างๆและปริมาณกรดไขมันรวมที่ทราบชนิด จึงทำการเปรียบเทียบพื้นที่ยอดกราฟ (Peak Area) เพื่อคำนวณหาร้อยละของกรดไขมันแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3

จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 พบว่า ปริมาณของกรดไขมันหลักที่พบในน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ 3 ชนิด คือ Palmitic Acid (C16:0), Stearic Acid (C18:0) และ Ricinoleic Acid (C18:1OH) มีปริมาณเฉลี่ยจากทั้ง 26 ตัวอย่าง โดยคิดเป็นร้อยละเท่ากับ 0.714%, 0.779% และ 98.518% ตามลำดับ

เพื่อให้ทราบถึงสภาวะในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำที่ให้ปริมาณกรดไขมันรวมมากที่สุดจึงทำการเปรียบเทียบพื้นที่ยอดกราฟ (Peak Area) ของผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันทั้งหมดกับผลการวิเคราะห์กรดไขมันมาตรฐานชนิดเอทิลเอสเทอร์และกรดริซิโนเลอิกมาตรฐานชนิดเมทิลเอสเทอร์ เพื่อหาปริมาณของกรดไขมันรวมที่มีอยู่ในตัวอย่างนั้น ๆ โดยความเข้มข้นของ

กรดไขมันที่มีอยู่ในกรดไขมันมาตรฐานชนิดเอทิลเอสเทอร์และกรดริซิโนเลอิกมาตรฐานชนิดเมทิลเอสเทอร์แสดงดังตารางที่ 4.4 ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.2 ร้อยละของกรดไขมันที่ทราบชนิดแต่ละชนิดที่ได้จากน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหุ้ง

Number of Sample	Percentage of Fatty Acid (%)			
	Palmitic Acid	Stearic Acid	Ricinoleic Acid	Total
1	0.713	0.779	98.518	100
2	0.683	0.738	98.589	100
3	0.697	0.766	98.547	100
4	0.702	0.771	98.537	100
5	0.720	0.784	98.507	100
6	0.735	0.795	98.482	100
7	0.732	0.796	98.483	100
8	0.745	0.820	98.447	100
9	0.743	0.822	98.447	100
10	0.772	0.841	98.399	100
11	0.691	0.767	98.552	100
12	0.680	0.739	98.591	100
13	0.686	0.743	98.581	100
14	0.697	0.764	98.549	100
15	0.695	0.750	98.564	100
16	0.714	0.793	98.504	100
17	0.717	0.785	98.509	100
18	0.771	0.838	98.404	100
19	0.704	0.761	98.546	100
20	0.707	0.770	98.533	100

ตารางที่ 4.2 ร้อยละของกรดไขมันที่ทราบชนิดแต่ละชนิดที่ได้จากน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำง (ต่อ)

Number of Sample	Percentage of Fatty Acid (%)			
	Palmitic Acid	Stearic Acid	Ricinoleic Acid	Total
21	0.716	0.769	98.526	100
22	0.710	0.763	98.537	100
23	0.706	0.750	98.554	100
24	0.679	0.738	98.592	100
25	0.705	0.777	98.528	100
26	0.753	0.824	98.435	100
Average	0.714	0.779	98.518	

ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นของกรดไขมันที่มีอยู่ในกรดไขมันมาตรฐานชนิดเอทิลเอสเทอร์และกรดริซิโนเลอิกมาตรฐานชนิดเมทิลเอสเทอร์

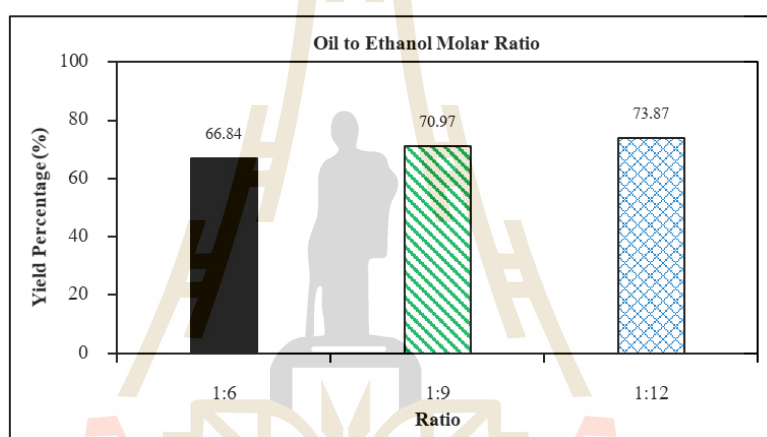
No.	Fatty Acid Name	Lipid Number	Concentration (µg/mL)
1	Butyric Acid	C4:0	1047.1
2	Caproic ACID	C6:0	1033.4
3	Caprylic Acid	C8:0	1031.9
4	Capric Acid	C10:0	1027.6
5	Lauric Acid	C12:0	1022.0
6	Myristic Acid	C14:0	1068.5
7	Palmitic Acid	C16:0	1036.6
8	Stearic Acid	C18:0	1062.1
9	Ricinoleic Acid	C18:1OH	100000.0
10	Arachidic Acid	C20:0	1051.3
11	Behenic Acid	C22:0	1055.9
12	Lignoceric Acid	C24:0	1059.0

ตารางที่ 4.4 ร้อยละของกรดไขมันรวมที่มีอยู่ในแต่ละตัวอย่าง

Number of Sample	Yield Percentage (%)
1	54.49
2	58.77
3	73.87
4	72.40
5	47.80
6	70.97
7	75.87
8	97.79
9	93.21
10	94.52
11	69.29
12	50.51
13	62.02
14	66.15
15	56.54
16	88.00
17	75.46
18	71.68
19	53.93
20	67.66
21	35.90
22	47.16
23	42.00
24	52.06
25	88.28
26	66.84

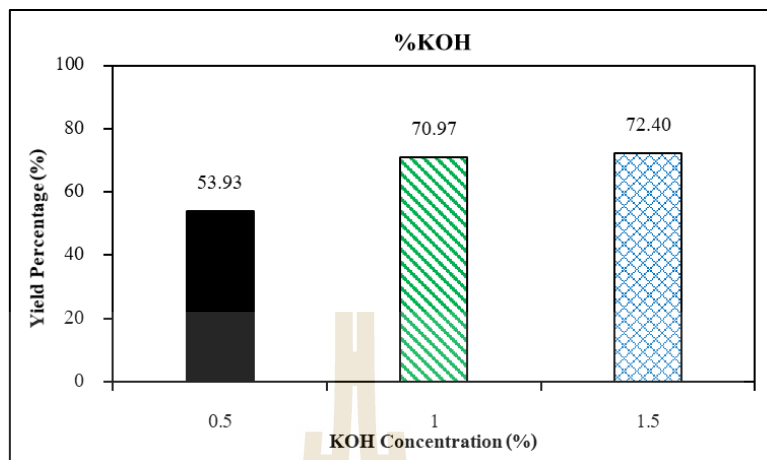
จากตารางที่ 4.4 พบว่า ตัวอย่างที่ 8 ให้ร้อยละของกรดไขมันรวมที่มากที่สุดโดยรายละเอียดสภาวะที่ใช้ในการผลิตมีดังนี้ อัตราส่วนมวลโมเลกุลของน้ำมันละหุ่งต่อเอทานอลเท่ากับ 1:12, ความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยา (KOH) เท่ากับ 1.5%, อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 50 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 150 นาที จึงเลือกใช้สภาวะนี้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทั้งหมด

นอกจากนี้เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งจึงทำการพล็อตข้อมูลเปรียบเทียบความร้อยละของกรดไขมันรวมของแต่ละตัวอย่างเมื่อปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงในขณะที่สามปัจจัยที่เหลือถูกควบคุม โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.6-4.9



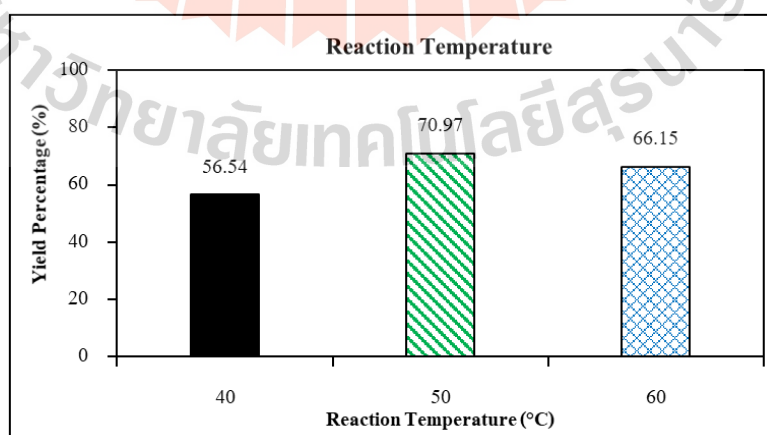
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนมวล โมเลกุลน้ำมันละหุ่งต่อเอทานอลกับร้อยละกรดไขมันรวมที่ผลิตได้

จากรูปที่ 4.6 พบว่า เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนมวลโมเลกุลน้ำมันละหุ่งต่อเอทานอลจะทำให้ร้อยละกรดไขมันรวมที่ทราบชนิดที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้น อัตราส่วนที่ให้ปริมาณกรดไขมันมากที่สุดคือ 1:12 รองลงมาเป็น 1:9 และ 1:6 ตามลำดับ โดยมีร้อยละของกรดไขมันรวมเท่ากับ 66.84%, 70.97% และ 73.87% ตามลำดับ สาเหตุเนื่องมาจากสภาวะการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งที่มีอัตราส่วนมวลโมเลกุลน้ำมันละหุ่งต่อเอทานอลสูงจะทำให้สารตั้งต้นมีเอทานอลมากเกินไปยิ่งขึ้นในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชันซึ่งช่วยลดโอกาสเกิดการขาดเอทานอลของปฏิกิริยา อีกทั้งการมีเอทานอลในปริมาณที่มากจะทำให้ลดการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับจึงทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันมีความสมบูรณ์กว่าสภาวะการผลิตที่อัตราส่วนมวลโมเลกุลน้ำมันละหุ่งต่อเอทานอลต่ำ



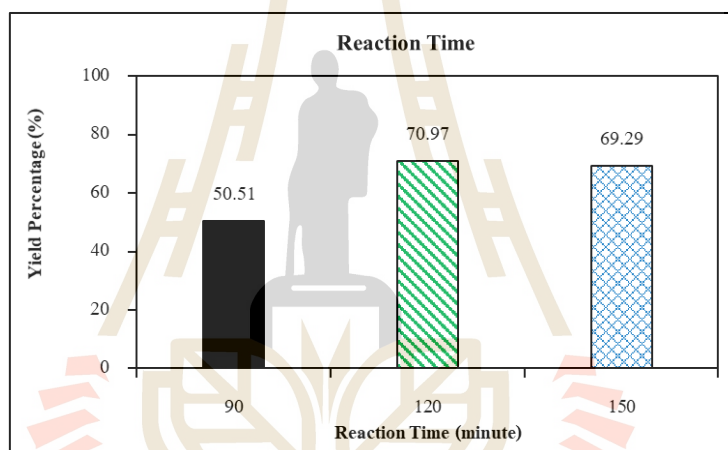
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยา KOH กับร้อยละกรดไขมันรวมที่ผลิตได้

จากรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยา KOH จะทำให้ร้อยละกรดไขมันรวมที่ทราบชนิดที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยา KOH ที่ให้ปริมาณกรดไขมันรวมมากที่สุดคือ 1.5% รองลงมาเป็น 1.0% และ 0.5% ตามลำดับ โดยมีร้อยละของกรดไขมันรวมเท่ากับ 53.93%, 70.97% และ 72.40% ตามลำดับ สาเหตุเนื่องมาจากสถานะการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่งที่มีความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยา KOH สูงจะทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์มากกว่า อีกทั้งยังช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับซึ่งจะทำให้ปริมาณกรดไขมันรวมที่ผลิตได้มีค่าลดลง



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยากับร้อยละกรดไขมันรวมที่ผลิตได้

จากรูปที่ 4.8 พบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาไม่ส่งผลอย่างชัดเจนกับปริมาณกรดไขมันรวมที่ผลิตได้ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ให้ปริมาณกรดไขมันรวมมากที่สุดคือ 50 °C รองลงมาเป็น 60 °C และ 40 °C ตามลำดับ โดยมีร้อยละของกรดไขมันรวมเท่ากับ 70.97%, 66.15% และ 56.54% ตามลำดับ สาเหตุอาจเกิดจากที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40 °C สารตั้งต้นมีพลังงานจลน์น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 50 °C และ 60 °C จึงทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีความไม่สมบูรณ์ ส่วนอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C อาจสูงเกินไปจนทำให้อัตราการระเหยตัวของเอทานอลมากเกินไปที่จะทำปฏิกิริยาได้ทันจึงทำให้เอทานอลระเหยตัวออกจากระบบ ในขณะที่ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 °C จะส่งผลให้สารตั้งต้นมีพลังงานเพิ่มขึ้นเพียงพอในการทำปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ แต่ไม่มากเกินไปจนทำให้เอทานอลระเหยตัวออกจากระบบ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับร้อยละกรดไขมันรวมที่ผลิตได้

จากรูปที่ 4.9 พบว่า การเพิ่มขึ้นของเวลาในการทำปฏิกิริยาไม่ส่งผลอย่างชัดเจนกับปริมาณกรดไขมันรวมที่ผลิตได้ เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ให้ปริมาณกรดไขมันรวมมากที่สุดคือ 120 นาที รองลงมาเป็น 150 นาที และ 90 นาที ตามลำดับ โดยมีร้อยละของกรดไขมันรวมเท่ากับ 70.97%, 69.29% และ 50.51% ตามลำดับ สาเหตุอาจเกิดจากที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันอาจยังไม่สมบูรณ์ ในขณะที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 150 นาที นานเกินไปจนทำให้เอทานอลตั้งต้นระเหยตัวออกจากระบบซึ่งส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับจึงทำให้ปริมาณกรดไขมันรวมจึงลดลง ในขณะที่ที่เวลา 120 นาที ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันมีเวลายาวเพียงพอในการทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์และยังไม่มากเกินไปจนทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ

บทที่ 5

การทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง

5.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิง

สำหรับคุณสมบัติพื้นฐานที่ทดสอบของเชื้อเพลิงถูกอ้างอิงตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานซึ่งใช้มาตรฐาน ASTM ในการทดสอบซึ่งแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 5.1 คุณสมบัติพื้นฐานที่ทดสอบได้มีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 ขอบเขตและมาตรฐานที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงจากกรมธุรกิจพลังงาน

คุณสมบัติของเชื้อเพลิง	หน่วย	ขอบเขต	มาตรฐานทดสอบ
ความหนืดจลนศาสตร์ ที่ 40 °C	cSt	ไม่เกิน 4.5	ASTM D445
จุดวาบไฟ	°C	ไม่ต่ำกว่า 52	ASTM D93
ความถ่วงจำเพาะ ที่ 15.6 °C	-	0.81 - 0.87	ASTM D1298
ความหนาแน่น ที่ 15.6 °C	kg/m ³	809 - 869	ASTM D1298
อุณหภูมิการกลั่น 50%	°C	-	ASTM D86
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง	(MJ/kg)	-	ASTM D240
ดัชนีซีเทน	-	ไม่ต่ำกว่า 50	ASTM D976
ความสามารถในการหล่อลื่น	µm	460	ISO 12156

5.1.1 ความหนืดจลนศาสตร์ ณ อุณหภูมิ 40 °C (Kinematic Viscosity at 40 °C)

ความหนืดจลนศาสตร์ของน้ำมันเชื้อเพลิงแสดงถึงความสามารถในการต้านการไหลภายใต้แรงโน้มถ่วงของน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งหาได้จากเวลาที่เชื้อเพลิงไหลผ่านระยะทางที่มีปริมาตรคงที่โดยแรงโน้มถ่วง มีหน่วยเป็นเซนติสโตกส์ (cSt) หรือมิลลิเมตรกำลังสองต่อวินาที (mm²/s) ในการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิงได้เลือกความหนืดจลนศาสตร์ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นคุณสมบัติแรกที่ทดสอบเนื่องจากมีความกังวลว่าน้ำมันละหุ่งมีความหนืดที่สูงมาก (มากกว่า 250 cSt) ซึ่งถึงแม้จะผ่านการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่ช่วยลดความหนืดลงแล้วน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งอาจยังคงมีความหนืดเกินกว่าขอบเขตของกรมธุรกิจพลังงาน และหากค่าความหนืดที่วัดได้มากกว่าขอบเขตของกรมธุรกิจพลังงานจริงจะมีความจำเป็นต้องปรับปรุง

คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำก่อนที่จะมีการทดสอบกับเครื่องยนต์ เพื่อลดโอกาสในการทำให้เครื่องยนต์เสียหาย ในการทดสอบเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจำเป็นต้องใช้หลอดคาปิลลารีที่สอดคล้องกับความหนืดของเชื้อเพลิงนั้น ๆ ด้วย โดยพารามิเตอร์ของหลอดคาปิลลารีแต่ละหลอดแสดงดังตารางที่ 5.2 ในการทดสอบความหนืดจลนศาสตร์ของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำครั้งแรกได้ใช้หลอดคาปิลลารีขนาด 300 ก่อนเพื่อประมาณความหนืดของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำพบว่าค่าความหนืดของน้ำมันมีค่าอยู่ในช่วง 19 ถึง 22 cSt ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงการทำงานที่แม่นยำของหลอดขนาด 150 จึงทำการทดสอบอีกครั้งโดยใช้หลอดขนาด 150 ผลที่ได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์ของหลอดคาปิลลารี

Size	Constant (cSt/s)	Total Uncertainty (%)		Kinematic Viscosity Range (cSt)
25	0.002	up to 3	±0.30	0.5 to 2
50	0.004			0.8 to 4
75	0.008			1.6 to 8
100	0.015	3 to 30	±0.35	3 to 15
150	0.035	30 to 100	±0.50	7 to 35
200	0.100			20 to 100
300	0.250			50 to 250

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบความหนืดจลนศาสตร์ของน้ำมันเชื้อเพลิง

Fuel Type	Average Time (s)	Capillary Size	Capillary Constant (cSt/s)	Viscosity (cSt)
COEE	576.84	150	0.035	20.189
DIESEL	278.99	100	0.015	4.185
COEE5	282.10			4.232
COEE8	293.78			4.407
COEE9	300.60			4.509
COEE10	304.30			4.565
COEE15	314.28			4.714
COEE20	339.92			5.099

จากตารางที่ 5.3 พบว่า ค่าความหนืดจลนศาสตร์ของน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่ง (COEE) มีค่า 20.189 cSt ซึ่งเกินกว่าขอบเขตของกรมธุรกิจพลังงานที่กำหนดไว้ต่ำกว่า 4.5 cSt จึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติของเชื้อเพลิง โดยใช้วิธีการผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งเข้ากับน้ำมันดีเซลทั่วไปซึ่งมีน้ำมันไบโอดีเซลจากปาล์มผสมอยู่แล้ว 7% ในสัดส่วนที่สามารถผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งได้มากที่สุดโดยที่ค่าความหนืดจลนศาสตร์ยังคงอยู่ในขอบเขตของกรมธุรกิจพลังงาน ซึ่งค่าความหนืดจลนศาสตร์ของน้ำมันดีเซลทั่วไปที่ใช้ผสมแสดงอยู่ในตารางที่ 5.3 จากนั้นจึงทำการผสมในอัตราส่วน 5%, 10%, 15% และ 20% v/v ของน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงผสม เมื่อวัดค่าความหนืดออกมาพบว่า ที่อัตราส่วน 5% v/v เป็นอัตราส่วนเดียวที่ให้ค่าความหนืดต่ำกว่าขอบเขตของกรมธุรกิจพลังงาน โดยมีความหนืดจลนศาสตร์เท่ากับ 4.232 cSt ในขณะที่อัตราส่วน 10%, 15% และ 20% v/v ให้ค่าความหนืดจลนศาสตร์เกินขอบเขตของกรมธุรกิจพลังงาน โดยมีค่าเท่ากับ 4.565, 4.714 และ 5.099 cSt เมื่อพิจารณาความหนืดของเชื้อเพลิงผสมที่อัตราส่วน 5% และ 10% v/v พบว่า ขอบเขตความหนืดของกรมธุรกิจพลังงานมีค่าอยู่ในช่วงนี้จึงมีความเป็นไปได้ที่อัตราส่วนซึ่งอยู่ระหว่าง 5% ถึง 10% จะยังคงให้ค่าความหนืดต่ำกว่าขอบเขตของกรมธุรกิจพลังงาน จึงทำการเพิ่มอัตราส่วนผสม 8% และ 9% v/v และทำการทดสอบค่าความหนืดจลนศาสตร์เพิ่มเติมผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.3 ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วน 8% v/v (COEE8) ที่ให้ค่าความหนืดจลนศาสตร์เท่ากับ 4.407 cSt เป็นอัตราส่วนที่มากที่สุดที่ให้ค่าความหนืดไม่เกินขอบเขตของกรมธุรกิจพลังงาน จึงเลือกใช้อัตราส่วนนี้เป็นตัวแทนของน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่ง (COEE) ในงานวิจัยนี้

5.1.2 จุดวาบไฟ (Flash Point)

จุดวาบไฟเป็นคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่บ่งชี้ถึงอุณหภูมิที่เชื้อเพลิงเกิดการลุกติดไฟเป็นครั้งแรกแต่ไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการลุกติดไฟอย่างต่อเนื่อง และสามารถสร้างส่วนที่ติดไฟได้ซึ่งสามารถลามไปได้ไกลจากจุดเริ่มต้น คุณสมบัติในส่วนนี้ของจุดวาบไฟนี้ทางกรมธุรกิจพลังงานกำหนดไว้ให้ไม่ต่ำกว่า 52 °C เพื่อให้การขนส่งน้ำมันไปยังสถานที่ต่างๆมีความปลอดภัยสำหรับผลของการทดสอบจุดวาบไฟของเชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบจุดวาบไฟของเชื้อเพลิง

Fuel Type	Flash Point (°C)
COEE	88
DIESEL	68
COEE8	77

จากตารางที่ 5.4 พบว่า น้ำมันดีเซลมีค่าจุดวาบไฟต่ำสุดโดยมีค่าเท่ากับ 68 °C ในขณะที่น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำมีจุดวาบไฟสูงกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 88 °C สาเหตุเนื่องมาจากโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันทั้งสองชนิดนั้นแตกต่างกัน โดยน้ำมันดีเซลเป็นน้ำมันที่ได้จากแหล่งปิโตรเลียมจะประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (Saturated Hydrocarbon) หรือ แอลเคน (Alkane) และสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbon) ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลแบบกิ่ง และมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จึงทำให้น้ำมันดีเซลจากแหล่งปิโตรเลียมมีจุดวาบไฟที่ต่ำ ในขณะที่น้ำมันไบโอดีเซลเป็นน้ำมันที่เกิดจากการรวมตัวกันของเอสเทอร์ของกรดไขมันเป็นโซ่ยาว (Long Chain Fatty Acid Alkyl Ester) และมีมวลโมเลกุลสูง จึงทำให้น้ำมันไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟที่สูงกว่า เมื่อนำน้ำมันทั้งสองชนิดมาผสมกันจึงทำให้จุดวาบไฟของเชื้อเพลิงผสมมีค่าอยู่ระหว่างจุดวาบไฟของน้ำมันตั้งต้นทั้งสอง สำหรับเชื้อเพลิงผสม COEE8 จะมีจุดวาบไฟเท่ากับ 77 °C ซึ่งอยู่ในขอบเขตของกรมธุรกิจพลังงานที่กำหนดไว้ให้สูงกว่า 52 °C

5.1.3 ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6 °C (Specific Gravity at 15.6 °C)

ความถ่วงจำเพาะของเชื้อเพลิงเป็นค่าที่บอกถึงอัตราส่วนของความหนาแน่นของเชื้อเพลิงต่อความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิเท่ากัน ความถ่วงจำเพาะของเชื้อเพลิงมีความสำคัญต่อการทำงานของระบบต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ เช่น ระบบป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้แบบคาร์บูเรเตอร์ที่มีการใช้ลูกลอย กรณีที่ความถ่วงจำเพาะของเชื้อเพลิงแตกต่างกันจะทำให้ระดับลูกลอยแตกต่างกันซึ่งส่งผลให้การป้อนน้ำมันเข้าสู่ห้องเผาไหม้แตกต่างกันตามไปด้วย ความถ่วงจำเพาะยังสามารถบอกได้ว่าเชื้อเพลิงชนิดใดมีความหนักเบามากกว่ากัน เมื่อพิจารณาปริมาตรที่เท่ากันเชื้อเพลิงที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าจะมีน้ำหนักที่มากกว่า อีกทั้งยังสามารถบอกได้ว่าเชื้อเพลิงชนิดใดใช้เวลาในการเผาไหม้มากกว่ากันเนื่องจากโดยทั่วไปเชื้อเพลิงที่มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าจะมีองค์ประกอบของสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลมากกว่าจึงใช้เวลาในการเผาไหม้ให้หมดมากกว่าเชื้อเพลิงที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ นอกจากนี้ความถ่วงจำเพาะยังมีความสำคัญต่อการคำนวณหาค่าดัชนีซีเทนที่บอกถึงความสามารถในการคลุกเคล้ากันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศอีกด้วย โดยผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเชื้อเพลิงแสดงดังตารางที่ 5.5

จากตารางที่ 5.5 พบว่า ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำมีค่าสูงที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 0.915 ซึ่งเกินกว่าขอบเขตของกรมธุรกิจพลังงานที่กำหนดให้มีค่าอยู่ในช่วง 0.810 ถึง 0.870 ในขณะที่น้ำมันดีเซลมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.830 ซึ่งอยู่ในช่วงที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด เมื่อนำเชื้อเพลิงทั้งสองมาผสมกันพบว่าค่าความถ่วงจำเพาะลดลงเหลือ 0.850 ซึ่งอยู่ในช่วงที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด สาเหตุที่น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำมีความถ่วงจำเพาะที่มากกว่าคือ องค์ประกอบของน้ำมันที่มีกรดไขมันอิ่มตัวเป็นองค์ประกอบหลักถึง

97% ซึ่งกรดไขมันชนิดนี้มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 298.46 g/mol ดังตารางที่ 5.6 ในขณะที่น้ำมันดีเซลมีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวหรือแอลเคนและสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน แต่จะมีปริมาณของสารประกอบแอลเคนมากกว่าอีกทั้งสารประกอบแอลเคนยังมีมวลโมเลกุลมากกว่าสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งหากพิจารณาให้น้ำมันดีเซลมีสารประกอบแอลเคนเพียงอย่างเดียวและเปรียบเทียบกับที่เลขอะตอมของคาร์บอน 18 เท่ากัน พบว่าน้ำมันดีเซลจะมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 254.49 g/mol ดังตารางที่ 5.7 ซึ่งต่ำกว่าน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำจึงเป็นเหตุผลให้ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำมีค่าสูงกว่า

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6 °C ของเชื้อเพลิง

Fuel Type	Specific Gravity	Density of Water at 15.6 °C (kg/m ³)	Density of Fuel at 15.6 °C (kg/m ³)
COEE	0.915	999.017	914.101
Diesel	0.830		829.184
COEE8	0.850		849.210

ตารางที่ 5.6 เลขลิปิดและมวลโมเลกุลของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ

No.	Fatty Acid		MW of Fatty Acid (g/mol)
	Fatty Acid Name	Lipid Number	
1	Butyric	C4:0	88.11
2	Caproic	C6:0	116.16
3	Caprylic	C8:0	144.21
4	Capric	C10:0	172.26
5	Lauric	C12:0	200.32
6	Myristic	C14:0	228.37
7	Palmitic	C16:0	256.40
8	Stearic	C18:0	284.48
9	Ricinoleic	C18:1OH	298.46
10	Arachidic	C20:0	312.53
11	Behenic	C22:0	340.58
12	Lignoceric	C24:0	368.63

ตารางที่ 5.7 จำนวนอะตอมของคาร์บอนและมวลโมเลกุลของแอลเคนชนิดต่าง ๆ

No.	Alkane		MW of Alkane (g/mol)
	Alkane Name	Number of Carbon	
1	Methane	1	16.04
2	Ethane	2	30.07
3	Propane	3	44.09
4	Butane	4	58.12
5	Pentane	5	72.15
6	Hexane	6	86.17
7	Heptane	7	100.20
8	Octane	8	114.23
9	Nonane	9	128.25
10	Decane	10	142.28
11	Undecane	11	156.31
12	Dodecane	12	170.33
13	Octadecane	18	254.49

5.1.4 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง ณ อุณหภูมิ 15.6 °C (Density of Fuel at 15.6°C)

ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง คือ ปริมาณที่บอกถึงมวลของเชื้อเพลิงที่มีอยู่ในหนึ่งหน่วยปริมาตรหรือคืออัตราส่วนระหว่างมวลของเชื้อเพลิงต่อปริมาตรของเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างมวลของเชื้อเพลิงต่อปริมาตรของเชื้อเพลิงโดยตรงหรือนำค่าความถ่วงจำเพาะของเชื้อเพลิงคูณกับความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมินั้น โดยความหนาแน่นมีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) ผลการคำนวณความหนาแน่นของเชื้อเพลิงแสดงดังตารางที่ 5.5

จากตารางที่ 5.5 พบว่า ความหนาแน่นของน้ำมันดีเซลมีค่าเท่ากับ 829.184 kg/m^3 ส่วนความหนาแน่นของน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งมีค่าเท่ากับ 914.101 kg/m^3 เมื่อนำเชื้อเพลิงทั้งสองมาผสมกันจะทำให้เชื้อเพลิงผสมมีความหนาแน่นเท่ากับ 849.210 kg/m^3 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงตั้งต้นทั้งสอง ส่วนเหตุผลเหมือนกับคุณสมบัติในส่วนของความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิ 15.6 °C

5.1.5 อุณหภูมิการกลั่นร้อยละ 50 (50% Distillation Temperature)

อุณหภูมิการกลั่นของเชื้อเพลิงเป็นคุณสมบัติที่บ่งบอกถึงอุณหภูมิที่ไอระเหยของเชื้อเพลิงกลั่นตัวได้ปริมาณตามที่กำหนดเช่นอุณหภูมิการกลั่นร้อยละ 50 คือ อุณหภูมิที่ไอระเหยของเชื้อเพลิงกลั่นตัวได้ปริมาณหรือมวลร้อยละ 50 ของปริมาณเริ่มต้น โดยทั่วไปหากพูดถึงอุณหภูมิการกลั่นมักจะกล่าวถึงอุณหภูมิการกลั่นร้อยละ 90 เพราะถือว่าที่ร้อยละ 90 นี้ส่วนของเชื้อเพลิงที่เป็นของเหลวได้ระเหยกลายเป็นไอและเผาไหม้ได้มากเพียงพอแล้วในการทำงานจริงโดยมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานกำหนดอุณหภูมิการกลั่นให้ต่ำกว่า 357 °C สาเหตุของการกำหนดอุณหภูมิการกลั่นคือเพื่อควบคุมปริมาณมลพิษที่เกิดจากเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงนั้น ๆ เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบเชื้อเพลิงจากแหล่งกำเนิดเดียวกันเชื้อเพลิงที่มีค่าอุณหภูมิการกลั่นที่สูงกว่าจะมีอุณหภูมิของเปลวไฟในการเผาไหม้สูงกว่าส่งผลให้เกิดมลพิษในส่วนของออกไซด์ของไนโตรเจนสูงกว่างานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อุณหภูมิการกลั่นร้อยละ 50 เนื่องจากเพียงพอต่อการคำนวณดัชนีซีเทนแล้ว โดยผลการทดสอบอุณหภูมิการกลั่นของเชื้อเพลิงต่าง ๆ ได้แสดงในตารางที่ 5.8

จากตารางที่ 5.8 พบว่า อุณหภูมิการกลั่นร้อยละ 50 ของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำมีค่าสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 382 °C ส่วนน้ำมันดีเซลมีค่าอุณหภูมิการกลั่นร้อยละ 50 ต่ำที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 296 °C ในขณะที่เชื้อเพลิงผสม COEE8 จะมีค่าอุณหภูมิการกลั่นร้อยละ 50 อยู่ระหว่างค่าของเชื้อเพลิงตั้งต้นทั้งสองโดยมีค่าเท่ากับ 326°C สาเหตุเนื่องจากองค์ประกอบของน้ำมันดีเซลที่มีสารประกอบแอลเคนและสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเป็นหลักซึ่งมีจุดเดือดที่ต่ำกว่าสารประกอบในกลุ่มเอสเทอร์ของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันไบโอดีเซล

ตารางที่ 5.8 ผลการทำสอบอุณหภูมิการกลั่นร้อยละ 50

Fuel Type	Distillation Temperature (°C)	API Gravity	Cetane Index
COEE	382	23.14	37.9
Diesel	298	39.39	60.2
COEE8	326	34.77	55.0

5.1.6 ดัชนีซีเทน (Cetane Index)

ดัชนีซีเทน คือ คุณสมบัติที่บ่งบอกถึงความเร็วในการเผาไหม้หรือความสามารถในการคลุกเคล้ากันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง โดยทั่วไปดัชนีซีเทนเป็นปริมาณที่ใช้แทนเลขซีเทนเนื่องจากมีค่าใช้ง่ายในการทดสอบต่ำกว่ามาก เนื่องจากการทดสอบเลขซีเทนจะใช้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้จริงโดยใช้เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดชนิดพิเศษที่เรียกว่า

“Cooperative Fuel Research (CFR) Engine” ภายใต้มาตรฐานทดสอบที่ยอมรับได้ทางสากล ในขณะที่ดัชนีซีเทนสามารถคำนวณได้เพียงแต่ทราบค่าความถ่วงเอพีไอ (API Gravity) และ อุณหภูมิการกลั่นของเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงที่มีค่าดัชนีซีเทนสูงจะสามารถคลุกเคล้ากับอากาศได้ดีกว่าส่งผลให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้รวดเร็วและทั่วถึงกว่า โดยผลการทดสอบค่าดัชนีซีเทนของเชื้อเพลิงแสดงดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ค่าดัชนีซีเทนของกรดไขมันแต่ละชนิดและน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่ง

No.	Fatty Acid			Cetane Index
	Fatty Acid Name	Number of Carbon	Number of Double Bond	
1	Butyric	4	0	52.5
2	Caproic	6	0	55.3
3	Caprylic	8	0	58.1
4	Capric	10	0	60.9
5	Lauric	12	0	63.7
6	Myristic	14	0	66.5
7	Palmitic	16	0	69.3
8	Stearic	18	0	72.1
9	Ricinoleic	18	1	56.2
10	Arachidic	20	0	74.9
11	Behenic	22	0	77.7
12	Lignoceric	24	0	80.5
COEE				56.4

จากตารางที่ 5.8 พบว่าดัชนีซีเทนของน้ำมันดีเซลจะมีค่าสูงกว่าดัชนีซีเทนของน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งโดยมีค่าเท่ากับ 60.2 ในขณะที่ค่าดัชนีซีเทนของน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งมีค่าเท่ากับ 37.9 ส่วนค่าดัชนีซีเทนของเชื้อเพลิงผสมมีค่าเท่ากับ 55.0 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างค่าดัชนีซีเทนของเชื้อเพลิงตั้งต้นทั้งสอง เมื่อเปรียบเทียบกับขอบเขตของกรมธุรกิจพลังงานที่กำหนดไว้ให้สูงกว่า 50 จะพบว่ามีเพียงน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งเท่านั้นที่ไม่เหมาะกับการใช้งานกับเครื่องยนต์ เนื่องจากอาจทำให้การเผาไหม้เกิดอย่างไม่สมบูรณ์ซึ่งจะนำมาสู่การปล่อยมลพิษที่มากเกินไป สาเหตุเนื่องจากการคำนวณค่าดัชนีซีเทนของเชื้อเพลิงทั้งสามใช้สมการที่ออกแบบ

มาสำหรับเชื้อเพลิงดีเซลจากปิโตรเลียม ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นสารประกอบแอลเคนและสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนต่างกับเชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่มีเอสเทอร์ของกรดไขมันเป็นองค์ประกอบหลัก แต่ถ้าใช้สมการที่ออกแบบมาเพื่อใช้กับเชื้อเพลิงไบโอดีเซลจะทำให้ดัชนีซีเทนของน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งเป็นดังที่แสดงในตารางที่ 5.9 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 56.2 ซึ่งสูงกว่ากรณีแรก

5.1.7 ค่าความร้อน (Heating Value)

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงคือปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงหนึ่งหน่วยมวล (สำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งและของเหลว) หรือหนึ่งหน่วยปริมาตร (สำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส) อย่างสมบูรณ์ การทดสอบค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะใช้เครื่องมือที่ชื่อว่า “Bomb Calorimeter” โดยทั่วไปค่าความร้อนเชื้อเพลิงจะบอกอยู่ในหน่วยกิโลจูลต่อกิโลกรัมหรือเมกะจูลต่อกิโลกรัม (KJ/Kg หรือ MJ/Kg) หรือบีทียู (BTU) หากเปรียบเทียบเชื้อเพลิงที่มีแหล่งกำเนิดเดียวกันเช่นเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลเหมือนกันจะพบว่าเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงกว่าจะใช้ปริมาณน้อยกว่าในการปลดปล่อยความร้อนที่เท่ากันเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำกว่า และถ้ากล่าวถึงเชื้อเพลิงที่ใช้ในยานพาหนะจะพบว่าเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงกว่าจะใช้ปริมาณเชื้อเพลิงน้อยกว่าในการเคลื่อนที่ที่ระยะทางเท่ากัน สำหรับผลการทดสอบค่าความร้อนเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงทั้งสามจะแสดงดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

Fuel Type	Heating Value (MJ/Kg)
COEE	37.65
Diesel	45.39
COEE8	45.17

จากตารางที่ 5.10 พบว่า ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซลมีค่าเท่ากับ 45.39 MJ/kg ส่วนน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 37.65 MJ/kg ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมมีค่าความร้อนอยู่ระหว่างค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทั้งสองโดยมีค่าเท่ากับ 45.17 MJ/kg สาเหตุที่ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซลสูงกว่าน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งคือความแตกต่างขององค์ประกอบของเชื้อเพลิง โดยทั่วไปเชื้อเพลิงทั้งจากแหล่งปิโตรเลียมและวัตถุดิบทางการเกษตรจะมีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอน (Carbon) และไฮโดรเจน (Hydrogen) แต่จะแตกต่างกันที่น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากแหล่งปิโตรเลียมจะไม่มีออกซิเจน

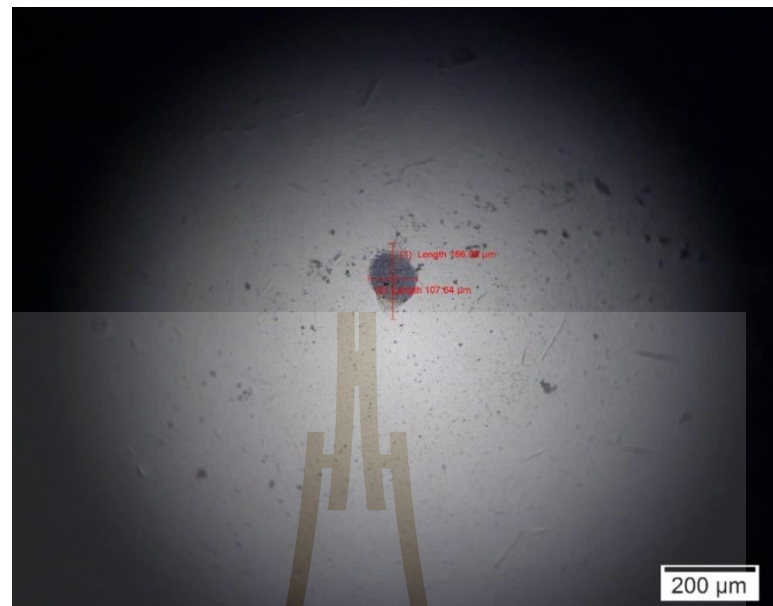
เป็นองค์ประกอบ ในขณะที่น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำที่ได้จากวัตถุดิบทางการเกษตรทำให้เชื้อเพลิงมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งออกซิเจนเป็นองค์ประกอบที่ไม่ก่อให้เกิดพลังงาน ความร้อนจากการเผาไหม้ เพียงแต่ช่วยให้การเผาไหม้มีความทั่วถึงมากขึ้นและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

5.1.8 ความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิง (Fuel Lubricity)

ความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงคือคุณสมบัติที่บอถึงความสามารถในการลดแรงเสียดทานหรือลดขนาดของรอยขีดขูดของพื้นผิวของชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ที่เชื้อเพลิงสัมผัสอยู่ โดยทั่วไปความสามารถในการหล่อลื่นสามารถทดสอบได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับลักษณะของภาระงาน (Load) ที่สนใจ เชื้อเพลิงที่มีความสามารถในการหล่อลื่นที่ดีจะให้ค่าแรงเสียดทานต่ำ, รอยขีดขูดมีขนาดเล็ก และมีชั้นการเคลือบพื้นผิวที่หนา เมื่อเปรียบเทียบเชื้อเพลิงสองชนิดที่มีความสามารถในการหล่อลื่นที่แตกต่างกัน เชื้อเพลิงที่มีความสามารถในการหล่อลื่นสูงกว่าจะทำให้ชิ้นส่วนต่างๆที่เชื้อเพลิงสัมผัสเช่นปั้มน้ำมันเชื้อเพลิงมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า สำหรับลักษณะรอยขีดขูดที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.5 ส่วนผลการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 5.11



รูปที่ 5.1 ลักษณะรอยขีดขูดที่เกิดขึ้นจากน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ



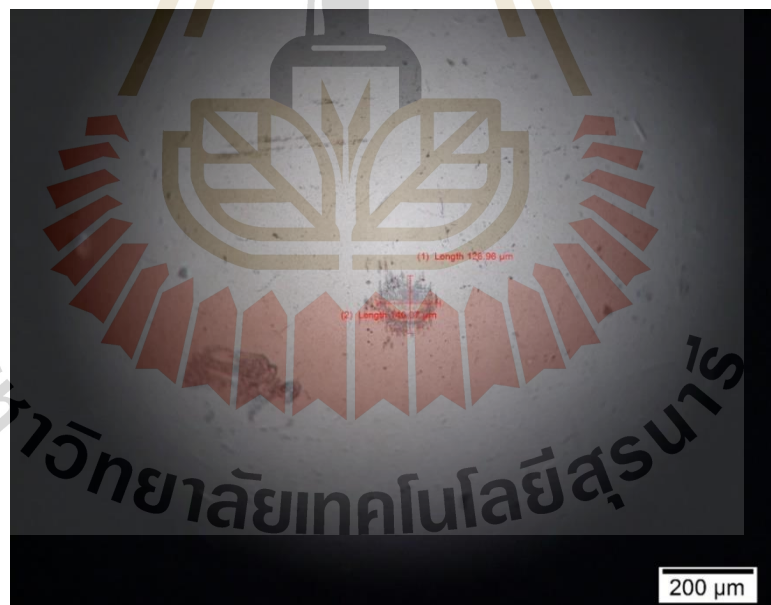
รูปที่ 5.2 ลักษณะรอยรูดขีดที่เกิดขึ้นจากเชื้อเพลิงผสม COEE5



รูปที่ 5.3 ลักษณะรอยรูดขีดที่เกิดขึ้นจากเชื้อเพลิงผสม COEE8



รูปที่ 5.4 ลักษณะรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นจากเชื้อเพลิงผสม COEE10

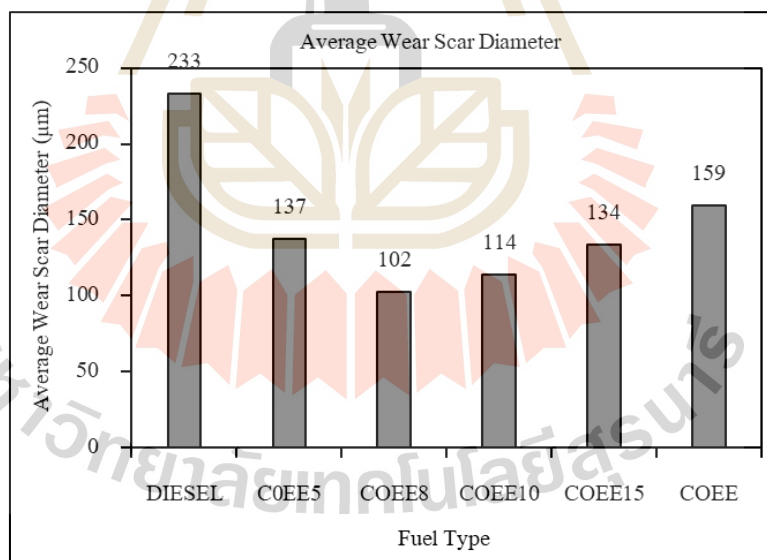


รูปที่ 5.5 ลักษณะรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นจากเชื้อเพลิงผสม COEE15

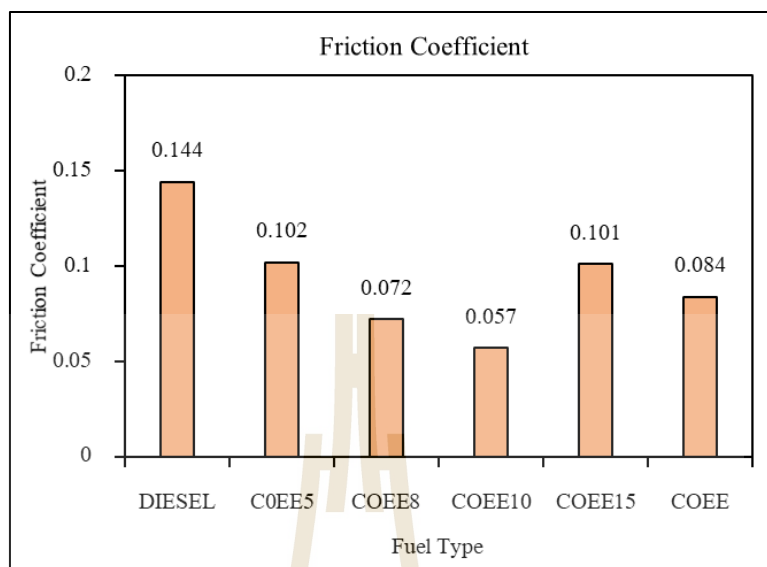
ตารางที่ 5.11 ผลการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิง

Fuel	Average Wear Scar Diameter (μm)	Friction Coefficient
DIESEL	233	0.144
COEE	159	0.084
COEE5	137	0.102
COEE8	102	0.072
COEE10	114	0.057
COEE15	134	0.101

เพื่อให้เห็นแนวโน้มอย่างชัดเจนจึงทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเชื้อเพลิงกับขนาดของรอยขีดข่วนเฉลี่ยและชนิดของเชื้อเพลิงกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างพื้นผิวดังที่แสดงในรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเชื้อเพลิงกับขนาดของรอยขีดข่วนเฉลี่ย



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเชื้อเพลิงกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

จากรูปที่ 5.6 พบว่า ขนาดของรอยขีดข่วนเฉลี่ยของน้ำมันดีเซลมีค่าสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ $233 \mu\text{m}$ และเมื่อเชื้อเพลิงที่มีน้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่งผสมอยู่จะมีแนวโน้มที่ลดลงของขนาดรอยขีดข่วนจนถึงอัตราส่วนที่มีน้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่งร้อยละ 8 โดยปริมาตร หลังจากนั้นขนาดของรอยขีดข่วนเฉลี่ยจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอีกครั้งแต่จะไม่เกินค่าขนาดรอยขีดข่วนจากน้ำมันดีเซล โดยเชื้อเพลิงผสม COEE5 และ COEE8 มีขนาดรอยขีดข่วนเฉลี่ยเท่ากับ 137 และ $102 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ส่วนเชื้อเพลิงผสม COEE10 และ COEE15 มีขนาดรอยขีดข่วนเฉลี่ยเท่ากับ 114 และ $134 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ในขณะที่น้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่งจะมีขนาดรอยขีดข่วนเฉลี่ยเท่ากับ $159 \mu\text{m}$ ซึ่งสูงกว่าเชื้อเพลิงผสมแต่จะต่ำกว่าน้ำมันดีเซล เมื่อพิจารณาแนวโน้มที่เกิดขึ้นจะพบว่าเชื้อเพลิงผสม COEE8 มีขนาดรอยขีดข่วนเฉลี่ยต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงทั้งหมดยังคงให้ขนาดรอยขีดข่วนที่ต่ำกว่า $460 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงาน และเมื่อพิจารณารูปที่ 5.7 พบว่า น้ำมันดีเซลจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.144 เมื่อเชื้อเพลิงมีน้ำมันไบโอดีเซลจะแหล่งผสมจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีแนวโน้มที่ลดลงจนถึงอัตราส่วนผสมที่มีน้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่งร้อยละ 10 โดยปริมาตร หลังจากนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเชื้อเพลิง COEE5 ถึง COEE15 มีค่าเท่ากับ 0.102 , 0.072 , 0.057 และ 0.101 ตามลำดับ ส่วนน้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่ง COEE จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.084 สาเหตุที่เชื้อเพลิงที่มีน้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่งผสมอยู่ให้ขนาดของรอยขีดข่วนที่เล็กกว่าเชื้อเพลิงที่ไม่มีเพราะเอสเทอร์ของ

กรดไขมันซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันไบโอดีเซลมีอะตอมของออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ การที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบส่งผลให้เอสเทอร์ของกรดไขมันสามารถกลายเป็นโมเลกุลที่มีขั้วได้ซึ่งสามารถยึดเกาะกับผิวโลหะได้ดีและสามารถสร้างชั้นฟิล์มของน้ำมันเชื้อเพลิงที่หนากว่า เชื้อเพลิงจากแหล่งปิโตรเลียมที่ไม่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ส่งผลให้ชิ้นงานทดสอบมีการสัมผัสกันน้อยกว่ารอยขีดข่วนจึงเล็กกว่า นอกจากนี้กรดรีซิโนเลอิกที่มีอยู่ในน้ำมันละหุ่งยังมี หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group) ซึ่งมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบจึงทำให้ออกซิเจนรวมของ น้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งมีมากขึ้นไปอีกรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดที่ลดลง ส่วนสาเหตุที่เชื้อเพลิงผสม COEE8 ให้ขนาดของรอยขีดข่วนที่เล็กที่สุดเป็นเพราะที่อัตราส่วนนี้ชั้นฟิล์มที่เกาะอยู่บนพื้นผิวชิ้นงานทดสอบมีค่าสูงสุดแล้ว การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งจึงไม่ช่วยให้รอยขีดข่วนมีขนาดลดลงไปมากกว่านี้

หลังจากทำการทดสอบคุณสมบัติดังที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดแล้วทำให้ได้ข้อมูล คุณสมบัติของเชื้อเพลิงดังที่แสดงดังตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงในงานวิจัย

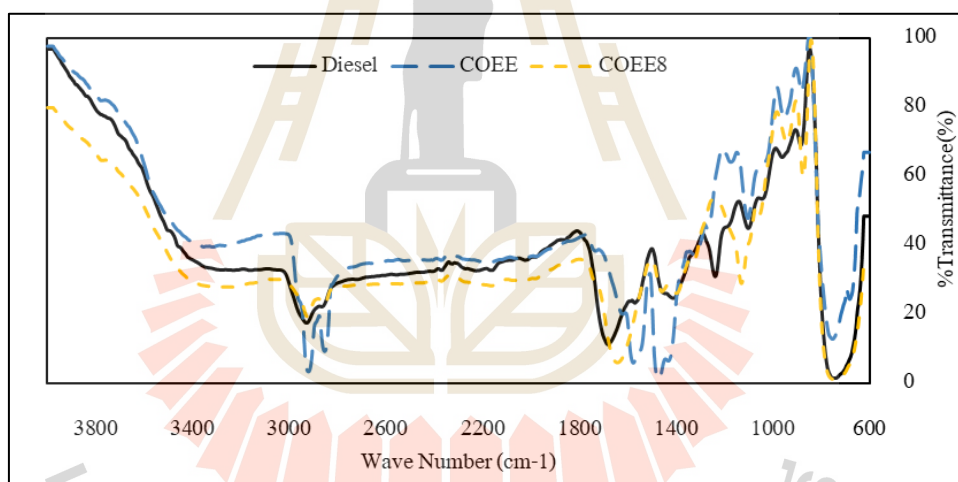
คุณสมบัติของเชื้อเพลิง	หน่วย	ขอบเขต	COEE	DIESEL	COEE8
ความหนืดจลนศาสตร์ ที่ 40 °C	cSt	ไม่เกิน 4.5	20.189	4.185	4.407
จุดวาบไฟ	°C	ไม่ต่ำกว่า 52	88	68	77
ความถ่วงจำเพาะ ที่ 15.6 °C	-	0.81-0.87	0.915	0.830	0.850
ความหนาแน่น ที่ 15.6 °C	kg/m ³	809-869	914.1	827.2	849.2
ดัชนีซีเทน	-	ไม่ต่ำกว่า 50	37.9	60.2	55.0
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง	(MJ/kg)	-	37.65	45.39	45.17
อุณหภูมิการกลั่น 50%	°C	-	382	298	326
ความสามารถในการหล่อลื่น	µm	460	159	233	102

5.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบที่หลงเหลือบนชิ้นงานทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นด้วยเทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) แบบ Attenuated Total Reflectance (ATR)

หัวข้อก่อนหน้าที่ได้กล่าวถึงการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงซึ่งประกอบไปด้วยน้ำมันดีเซล, น้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งและเชื้อเพลิงผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ

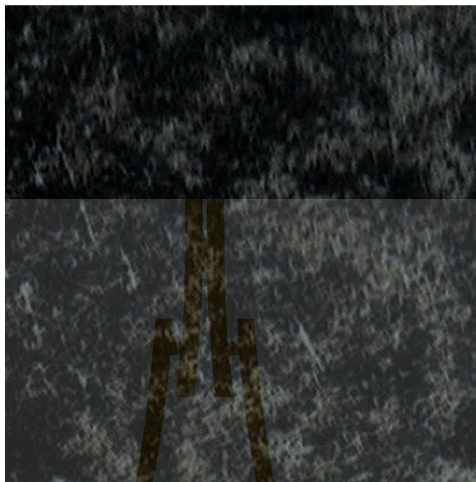
พบว่าเชื้อเพลิงที่มีน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำผสมอยู่จะมีความสามารถในการหล่อลื่นที่ดีกว่า เนื่องจากน้ำมันกะหล่ำมีกรดริซิโนเลอิก (Ricinoic Acid) เป็นองค์ประกอบ กรดชนิดนี้มีความพิเศษเฉพาะตัวคือมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group) เป็นองค์ประกอบในโมเลกุล ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลนี้จะช่วยเพิ่มความสามารถในการหล่อลื่นอันเป็นผลมาจากออกซิเจนที่เป็นองค์ประกอบของหมู่นี้สามารถเกิดขี้ได้ ทำให้น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำสามารถเคลือบอยู่บนชิ้นงานทดสอบได้มากกว่าซึ่งส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างผิวชิ้นงานทดสอบตำรอยขีดที่เพิ่มขึ้นจึงมีขนาดเล็ก การวิเคราะห์องค์ประกอบที่หลงเหลือบนชิ้นงานทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นด้วยเทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีแบบ Attenuated Total Reflectance (ATR) โดยบริเวณที่วิเคราะห์จะถูกแบ่งเป็นบริเวณที่เกิดการออกซิเดชัน (รอยรอยขีด) และบริเวณรอยขีด (Wear Track)

5.2.1 บริเวณที่เกิดการออกซิเดชัน (Oxidation Zone)



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่นกับร้อยละการส่งผ่านบริเวณออกซิเดชันของเชื้อเพลิง

5.2.1.1 น้ำมันดีเซล (Diesel Fuel)



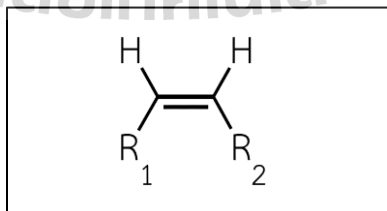
รูปที่ 5.9 บริเวณที่เกิดการออกซิเดชันจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมันดีเซล (ด้านบนรอยชุดซิค)



รูปที่ 5.10 บริเวณที่เกิดการออกซิเดชันจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมันดีเซล (ด้านล่างรอยชุดซิค)

ลักษณะบริเวณที่ทำการวิเคราะห์สารประกอบบริเวณที่เกิดการออกซิเดชันของน้ำมันดีเซลแสดงดังรูปที่ 5.9 และดังรูปที่ 5.10 โดยบริเวณที่มีสีดำคือบริเวณที่เกิดการออกซิเดชัน

ซึ่งจะพบว่าบริเวณที่เกิดการออกซิเดชันจากน้ำมันดีเซลมีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นจากรูปที่ 5.8 พบว่าช่วงเลขคลื่น $3,500 - 3,200 \text{ cm}^{-1}$ กราฟมีลักษณะกว้างและไม่แหลมซึ่งอาจเกิดจากพันธะ O-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืด (Stretching) โดยพันธะ O-H นี้เกิดได้จากหลายหมู่ฟังก์ชัน เช่น แอลกอฮอล์หรือฟีนอล (Alcohol or Phenol), เอสเตอร์ (Ester) และกรดคาร์บอกซิล (Carboxylic Acid) ซึ่งต้องพิจารณากราฟในช่วงเลขคลื่นอื่นเพื่อยืนยันหมู่ที่เกิดขึ้น, ช่วงเลขคลื่น $3,100 - 3,000 \text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืดที่เกิดได้จากหลายหมู่ฟังก์ชันเช่นแอลคีน (Alkene) และสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbon) ซึ่งต้องพิจารณากราฟในช่วงเลขคลื่น $1,000 - 650 \text{ cm}^{-1}$ และช่วง Fingerprint Region ที่เลขคลื่น $2,000 - 1,600 \text{ cm}^{-1}$ เพื่อยืนยันหมู่และรูปแบบที่เกิดขึ้น, ยอดกราฟที่เลขคลื่น $2,929$ และ $2,852 \text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืดไม่สมมาตร (Asymmetric) และสมมาตร (Symmetric) ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากหมู่แอลเคน (Alkane) โดยแอลเคนที่เกิดขึ้นเป็นแอลเคนหมู่เมทิลีน (Methylene, $-\text{CH}_2-$) ยอดกราฟที่เลขคลื่น $1,682 \text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C=C ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืด และยอดกราฟที่เลขคลื่น $1,000 - 650 \text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ =C-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบงอ (Bending) เมื่อพิจารณาร่วมกับยอดกราฟที่เลขคลื่น $3,100 - 3,000 \text{ cm}^{-1}$ ทำให้สามารถระบุได้ว่าหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นคือแอลคีนที่มีโครงสร้างแบบ Disubstituted (cis) ดังที่แสดงในรูปที่ 5.11, ยอดกราฟที่เลขคลื่น $1,460 \text{ cm}^{-1}$ และ $1,408 \text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบงอสมมาตร ซึ่งเกิดจากหมู่แอลเคนหมู่เมทิลีน ($-\text{CH}_2-$) และหมู่เมทิล ($-\text{CH}_3$) ตามลำดับ และยอดกราฟที่เลขคลื่น $1,240 \text{ cm}^{-1}$ และ $1,103 \text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C-O ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืด ซึ่งเกิดจากหมู่เอสเตอร์ เมื่อพิจารณาร่วมกับช่วงกราฟที่เลขคลื่น $3,500 - 3,200 \text{ cm}^{-1}$ ทำให้ระบุได้ว่าหมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้น ณ ช่วงดังกล่าวเกิดจากหมู่เอสเตอร์ โดยหมู่ฟังก์ชันทั้งหมดที่ตรวจพบแสดงดังตารางที่ 5.13



รูปที่ 5.11 โครงสร้างของ Alkene แบบ Disubstituted (cis)

ตารางที่ 5.13 หมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบของแต่ละยอดกราฟจากบริเวณออกซิเดชันของน้ำมันดีเซล

Wave Number (cm ⁻¹)	Vibration Type	Element	Functional Group
3,500 - 3,200	Stretching	O-H	Hydroxyl (From Ester)
3,100 - 3,000	Stretching	=C-H	Alkene
2,929	Stretching	C-H	Alkane (Methylene, -CH ₂ -)
2,852	Stretching	C-H	Alkane (Methylene, -CH ₂ -)
1,682	Stretching	C=C	Alkene
1,460	Bending	C-H	Alkane (Methylene, -CH ₂ -)
1,408	Bending	C-H	Alkane (Methyl, -CH ₃)
1,240	Stretching	C-O	Ester
1,103	Stretching	C-O	Ester
1,000 - 650	Bending	=C-H	Alkene

5.2.1.2 น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหุ้ง (Castor Oil Ethyl Ester, COEE)



รูปที่ 5.12 บริเวณที่เกิดการออกซิเดชันจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมันดีเซลไบโอดีเซลจากกะหุ้ง (ด้านบนรอยขีด)

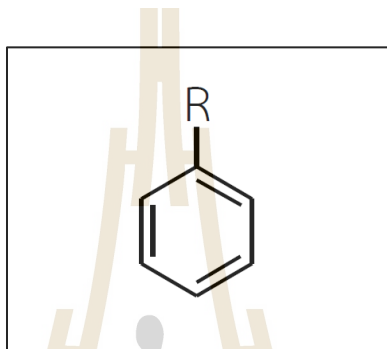


รูปที่ 5.13 บริเวณที่เกิดการออกซิเดชันจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหุ้ง (ด้านบนรอยขูดขีด)

ลักษณะบริเวณที่ทำการวิเคราะห์สารประกอบบริเวณที่เกิดการออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหุ้ง (COEE) แสดงดังรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 โดยพบว่า การเกิดการออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหุ้งสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนแต่จะมีความเบาบางกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล

จากรูปที่ 5.8 พบว่าช่วงเลขคลื่น $3,500 - 3,200 \text{ cm}^{-1}$ พบพันธะ O-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืด โดยกราฟมีลักษณะกว้างและไม่แหลมเช่นเดียวกับกรณีของน้ำมันดีเซล จึงจำเป็นต้องพิจารณากราฟในช่วงอื่นเพื่อยืนยันหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้น, ช่วง $3,100 - 3,000 \text{ cm}^{-1}$ พบว่ากราฟไม่ปรากฏยอดชัดเจนซึ่งอาจเกิดจากการรวมกันของยอดกราฟ โดยช่วงเลขคลื่นนี้บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ =C-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืดและเมื่อพิจารณาช่วงเลขคลื่น $1,000 - 650 \text{ cm}^{-1}$ และช่วง $2,000 - 1,600 \text{ cm}^{-1}$ (Fingerprint Region) พบว่าที่ช่วง $1,000 - 650 \text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกว่าพันธะ =C-H ที่เกิดขึ้นเกิดจากสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนถึงแม้ช่วง Fingerprint Region จะไม่มียอดกราฟปรากฏอย่างชัดเจนเนื่องจากอาจเกิดการทับกันของกราฟแต่ยังสามารถยืนยันหมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบได้จากช่วง $1,000 - 650 \text{ cm}^{-1}$ และพบว่าสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนมีโครงสร้างที่แสดงดังรูปที่ 5.14 , ยอดกราฟที่เลขคลื่น $2,918 \text{ cm}^{-1}$ และ $2,850 \text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืดไม่สมมาตรและสมมาตร ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากแอลเคนหมู่เมทิลีน (Methylene, $-\text{CH}_2-$), ยอดกราฟช่วง $1,575 \text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C=C ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืด ซึ่งเกิดจากจากสารประกอบ

อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน, ยอดกราฟที่เลขคลื่น $1,473\text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบงอ ซึ่งเกิดจากแอลเคนหมู่เมทิลีน ($-\text{CH}_2-$), และยอดกราฟที่เลขคลื่น $1,101\text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C-O ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืด ซึ่งเกิดจากหมู่เอสเตอร์ และเมื่อพิจารณาพร้อมกับช่วงเลขคลื่น $3,500 - 3,200\text{ cm}^{-1}$ พบว่าพันธะ O-H ที่เกิดขึ้นเกิดจากหมู่เอสเตอร์ โดยหมู่ฟังก์ชันทั้งหมดที่ตรวจพบแสดงดังตารางที่ 5.14

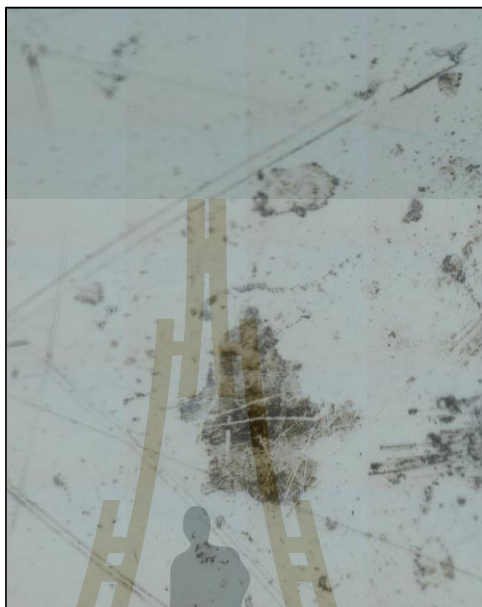


รูปที่ 5.14 โครงสร้างอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่พบจากน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่ง

ตารางที่ 5.14 หมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบของแต่ละยอดกราฟจากบริเวณออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่ง

Wave Number (cm^{-1})	Vibration Type	Element	Functional Group
3,500 - 3,200	Stretching	O-H	Hydroxyl (From Ester)
3,100 - 3,000	Stretching	=C-H	Aromatic Hydrocarbon
2,918	Stretching	C-H	Alkane (Methylene, $-\text{CH}_2-$)
2,850	Stretching	C-H	Alkane (Methylene, $-\text{CH}_2-$)
1,575	Stretching	C=C	Aromatic Hydrocarbon
1,473	Bending	C-H	Alkane (Methylene, $-\text{CH}_2-$)
1,101	Stretching	C-O	Ester
1,000 - 650	Bending	=C-H	Aromatic Hydrocarbon

5.2.1.3 น้ำมันเชื้อเพลิงผสม (COEE8)



รูปที่ 5.15 บริเวณที่เกิดการออกซิเดชันจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงผสม (COEE8) (ด้านบนรอยชุดฉีด)



รูปที่ 5.16 บริเวณที่เกิดการออกซิเดชันจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงผสม (COEE8) (ด้านล่างรอยชุดฉีด)

ลักษณะบริเวณที่ทำการวิเคราะห์สารประกอบบริเวณที่เกิดการออกซิเดชันของเชื้อเพลิงผสม (COEE8) แสดงดังรูปที่ 5.15 และรูปที่ 5.16 โดยพบว่าเกิดการเกิดการออกซิเดชันของเชื้อเพลิงผสม (COEE8) สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนแต่จะมีความเบาบางกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลและหนาแน่นกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่ง

จากรูปที่ 5.8 พบว่า ช่วงเลขคลื่น $3,500 - 3,200 \text{ cm}^{-1}$ กราฟมีลักษณะกว้างและไม่แหลมซึ่งอาจเกิดจากพันธะ O-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืด (Stretching) โดยพันธะ O-H นี้เกิดได้จากหลายหมู่ฟังก์ชัน เมื่อพิจารณาพร้อมกับยอดกราฟที่เลขคลื่น $1,103 \text{ cm}^{-1}$ พบว่าพันธะที่เกิดขึ้น ณ เลขคลื่นดังกล่าวเกิดจากหมู่ C-O ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืด ซึ่งเกิดจากหมู่เอสเทอร์ ทำให้ระบุได้ว่าพันธะ O-H ที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเลขคลื่น $3500 - 3200 \text{ cm}^{-1}$ เกิดจากหมู่เอสเทอร์, ช่วงเลขคลื่น $3,100 - 3,000 \text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืดที่เกิดได้จากหลายหมู่ฟังก์ชันเช่นแอลคีน และสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งต้องพิจารณารูปใน ช่วงเลขคลื่น $1000 - 650 \text{ cm}^{-1}$ และช่วง Fingerprint Region ที่เลขคลื่น $2,000 - 1,600 \text{ cm}^{-1}$ เพื่อยืนยันหมู่และรูปแบบที่เกิดขึ้น, ยอดกราฟที่เลขคลื่น $2,925$ และ $2,848 \text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืดไม่สมมาตร (Asymmetric) และสมมาตร (Symmetric) ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากหมู่แอลเคน (Alkane) โดยแอลเคนที่เกิดขึ้นเป็นแอลเคนหมู่เมทิลีน (Methylene, $-\text{CH}_2-$), ยอดกราฟที่เลขคลื่น $1,635 \text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C=C ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืด และยอดกราฟที่เลขคลื่น $1,000 - 650 \text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ =C-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบงอ (Bending) เมื่อพิจารณาร่วมกับยอดกราฟที่เลขคลื่น $3,100 - 3,000 \text{ cm}^{-1}$ ทำให้สามารถระบุได้ว่าหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นคือแอลคีนที่มีโครงสร้างแบบ Disubstituted (cis) ดังที่แสดงในรูปที่ 5.11 เช่นเดียวกับกรณีของน้ำมันดีเซล, ยอดกราฟที่เลขคลื่น $1,456$ และ $1,414 \text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบงอสมมาตร ซึ่งเกิดจากหมู่แอลเคนหมู่เมทิลีน ($-\text{CH}_2-$) และหมู่เมทิล ($-\text{CH}_3$) ตามลำดับ และยอดกราฟที่เลขคลื่น $1,103 \text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C-O ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืด ซึ่งเกิดจากหมู่เอสเทอร์ โดยหมู่ฟังก์ชันทั้งหมดที่ตรวจพบแสดงดังตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.15 หมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบของแต่ละยอดกราฟจากบริเวณออกซิเดชันของเชื้อเพลิงผสม

Wave Number	Vibration Type	Element	Functional Group
3,500 - 3,200	Stretching	O-H	Hydroxyl (From Ester)
3,100- 3,000	Stretching	=C-H	Alkene
2,925	Stretching	C-H	Alkane (Methylene, -CH ₂ -)
2,848	Stretching	C-H	Alkane (Methylene, -CH ₂ -)
1,635	Stretching	C=C	Alkene
1,456	Bending	C-H	Alkane (Methylene, -CH ₂ -)
1,414	Bending	C-H	Alkane (Methyl, -CH ₃)
1,103	Stretching	C-O	Ester
1,000 - 650	Bending	=C-H	Alkene

5.2.1.4 เปรียบเทียบ

จากงานวิจัยของ Agarwal et al. (2013) พบว่า ความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเช่นน้ำมันไบโอดีเซลจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความยาวของสายโซ่โมเลกุล และหมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบของเชื้อเพลิง สำหรับความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงตามหมู่ฟังก์ชันสามารถเรียงลำดับจากดีไปแย่ได้ดังนี้ $-\text{COOH} > -\text{OH} > -\text{COOCH}_3 >> \text{C}=\text{O} > \text{C}-\text{O}-\text{C}$ และสำหรับเมทิลเอสเทอร์ความสามารถในการหล่อลื่นจะขึ้นอยู่กับหมู่ $\text{C}=\text{O}$ เป็นหลักเนื่องจากขาดแคลนหมู่ $-\text{COOCH}_3$ ในโมเลกุลของเชื้อเพลิง สำหรับน้ำมันดีเซลความสามารถในการหล่อลื่นส่วนใหญ่จะมาจาก Polar Heteroatom ซึ่งคือสารประกอบที่มีวงแหวนที่ประกอบด้วยอะตอมต่างชนิดกันเช่นกำมะถัน, ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัสหรือออกซิเจนที่มีขั้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งออกซิเจนที่ช่วยให้เชื้อเพลิงมีการหล่อลื่นที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับธาตุอื่น ๆ

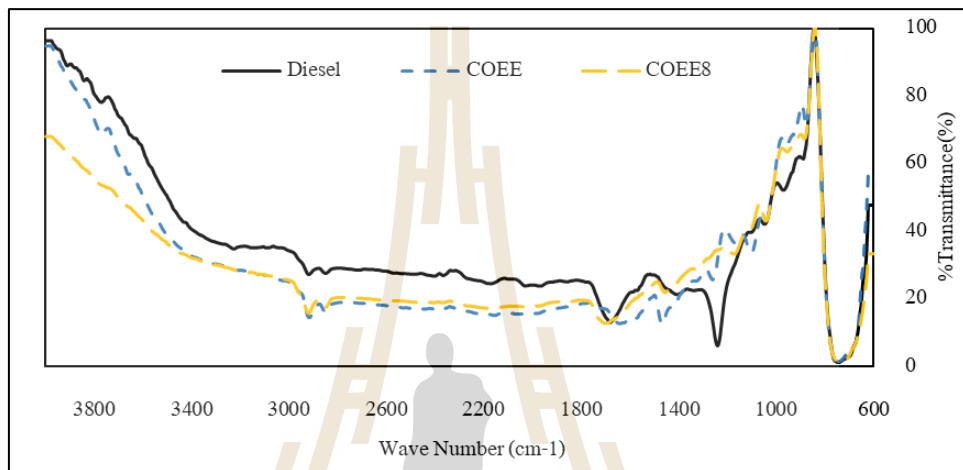
การตรวจพบพันธะ O-H จากเชื้อเพลิงทดสอบทั้งสามชนิดเกิดได้จากหมู่เอสเทอร์ที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงทั้งสามชนิดพันธะ C-H จากหมู่แอลเคนที่เลขคลื่นต่าง ๆ บ่งบอกถึงการตรวจพบสายโซ่คาร์บอนที่มีความยาวแตกต่างกันซึ่งเป็นไปได้ทั้งสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำมันดีเซลและเอสเทอร์ของกรดไขมันที่มีอยู่ในน้ำมันไบโอดีเซล พันธะ C=C จากหมู่แอลคีนบ่งบอกถึงการตรวจพบกรดไขมันหรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว

ส่วนพันธะ C=C จากหมู่อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนบ่งบอกถึงการตรวจพบโซ่แบบวงปิด และการตรวจพบพันธะ C-O เกิดจากการตรวจพบพันธะระหว่างหมู่เอสเทอร์กับกรดไขมันและกลีเซอรอล

สำหรับความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงที่เกิดจากเชื้อเพลิงทั้งสามชนิดเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันพบว่าไม่มียอดกราฟของพันธะ C=O ที่ควรจะเกิดช่วงเลขคลื่นประมาณ $1,750 - 1,680 \text{ cm}^{-1}$ จึงพิจารณาพันธะ C-O ซึ่งจะปรากฏช่วงเลขคลื่น $1,400 - 1,000 \text{ cm}^{-1}$ แทนพบว่าน้ำมันดีเซลมียอดกราฟที่เกิดจากพันธะ C-O อยู่สองยอดโดยยอดกราฟที่ปรากฏชัดเจนที่สุดอยู่ที่เลขคลื่น $1,240 \text{ cm}^{-1}$ ส่วนยอดกราฟที่มีขนาดเล็กกว่าเกิดที่เลขคลื่น $1,103 \text{ cm}^{-1}$ ในขณะที่น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำมียอดกราฟของพันธะ C-O ที่ชัดเจนที่สุดปรากฏที่เลขคลื่น $1,101 \text{ cm}^{-1}$ เช่นเดียวกับเชื้อเพลิงผสมที่มียอดกราฟจากพันธะ C-O ที่ปรากฏชัดเจนที่เลขคลื่น $1,103 \text{ cm}^{-1}$ สาเหตุอาจเป็นเพราะชนิดของเอสเทอร์ของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันดีเซลที่เป็น Palm Oil Methyl Ester (POME) ในขณะที่น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำเป็น Castor Oil Ethyl Ester (COEE) ส่วนเชื้อเพลิงผสมจะมีทั้ง POME และ COEE แต่กรณีของเชื้อเพลิงผสมอาจตรวจจับเอสเทอร์ของกรดไขมันจากกะหล่ำได้มากกว่ายอดกราฟจึงปรากฏดังที่แสดงในรูปที่ 42 และเมื่อพิจารณาพันธะ O-H พบว่าเชื้อเพลิงทั้งสามชนิดมีกราฟที่ปรากฏช่วงเดียวกันคือช่วง $3500-3200 \text{ cm}^{-1}$ โดยเชื้อเพลิงที่มีพื้นที่ใต้กราฟมากที่สุดคือเชื้อเพลิงผสม รองลงมาเป็นน้ำมันดีเซลและน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ เมื่อพิจารณาพันธะ C-H พบว่า ช่วงเลขคลื่น $3,000 - 2,800 \text{ cm}^{-1}$ ยอดกราฟของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำมีความสูงมากกว่าเชื้อเพลิงผสมและน้ำมันดีเซลอย่างเห็นได้ชัด เช่นเดียวกับช่วงเลขคลื่น $1,490 - 1,400 \text{ cm}^{-1}$ ที่น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำมีขนาดยอดกราฟที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลและเชื้อเพลิงผสมตามลำดับ และอีกส่วนหนึ่งที่แตกต่างกันคือหมู่ของพันธะ C=C ซึ่งน้ำมันดีเซลและเชื้อเพลิงผสมมีหมู่ที่เกิดขึ้นเป็นแอลคีน ในขณะที่น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำเป็นอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ส่วนสาเหตุที่เชื้อเพลิงผสมที่มีน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำไม่ปรากฏหมู่อะโรมาติกอย่างชัดเจนอาจเป็นเพราะปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำที่ผสมมีปริมาณไม่เพียงพอให้ยอดกราฟจากหมู่อะโรมาติกปรากฏได้อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาขนาดของรอยขีดขีด (Wear Scar Diameter) พบว่า เชื้อเพลิงผสมมีขนาดของรอยขีดขีดเล็กที่สุด รองลงมาเป็นน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำและน้ำมันดีเซลตามลำดับ เมื่อพิจารณาพร้อมกับหมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบพบว่าอาจเป็นเพราะเชื้อเพลิงผสมมีพันธะ C-O และ O-H ที่มีความสามารถในการหล่อลื่นสูงมากกว่าน้ำมันดีเซลและน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ และอีกส่วนหนึ่งอาจเป็นเพราะโมเลกุลที่มีลักษณะเป็นสายโซ่ที่ตรวจพบอาจมีความสามารถในการหล่อลื่นดีกว่าน้ำมันดีเซล ส่วนสาเหตุที่น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำมีความสามารถในการหล่อลื่นดีกว่าน้ำมันดีเซลอาจเป็นเพราะมีโมเลกุล

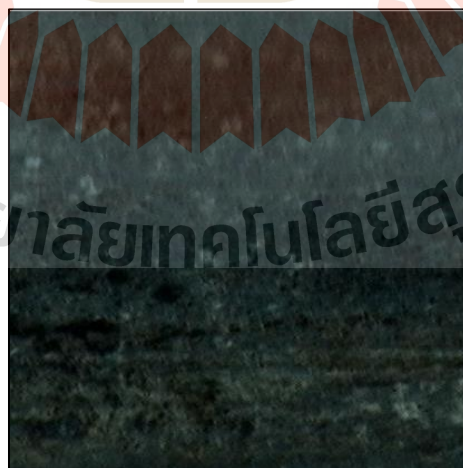
ที่มีลักษณะเป็นสายโซ่วงปิดอย่างอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งสายโซ่แบบวงปิดจะมีความสามารถในการหล่อลื่นดีกว่าสายโซ่แบบเปิด (Dodos, 2017) นอกจากนี้ชนิดของโมเลกุลที่เกิดจากพันธะ C-H ที่ตรวจพบอาจมีความสามารถในการหล่อลื่นมากกว่า

5.2.2 บริเวณรอยขีด (Wear Track Zone)



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่นกับร้อยละการส่งผ่านบริเวณรอยขีด

5.2.2.1 น้ำมันดีเซล (Diesel Fuel)



รูปที่ 5.18 บริเวณรอยขีดจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมันดีเซล

จากรูปที่ 5.18 พบว่า บริเวณรอยขีดขีดของตัวอย่างทดสอบที่เกิดจากน้ำมันดีเซลสามารถมองเห็นได้ชัดเจน

จากรูปที่ 5.17 พบว่า กราฟบริเวณช่วงเลขคลื่น $3,500 - 3,200 \text{ cm}^{-1}$ มีลักษณะกว้างและไม่แหลมซึ่งเกิดจากพันธะ O-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืด และเมื่อพิจารณากราฟช่วงเลขคลื่น $1,400 - 1,000 \text{ cm}^{-1}$ พบว่า มียอดกราฟปรากฏที่เลขคลื่น $1,242 \text{ cm}^{-1}$ ที่เกิดจากพันธะ C-O ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืดซึ่งเกิดจากหมู่เอสเตอร์ ทำให้ระบุได้ว่าพันธะ O-H ที่ปรากฏบริเวณดังกล่าว, ช่วงเลขคลื่น $3,100 - 3,000 \text{ cm}^{-1}$ พบว่า ไม่ปรากฏยอดกราฟอย่างชัดเจน แต่เมื่อพิจารณากราฟช่วงเลขคลื่น $1,700 - 1,500 \text{ cm}^{-1}$ พบว่า มียอดกราฟปรากฏที่เลขคลื่น $1,685 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งบ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C=C ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืดจากหมู่แอลคีน ทำให้ทราบว่า กราฟช่วง $3,100 - 3,000 \text{ cm}^{-1}$ ควรมียอดกราฟจากหมู่แอลคีนอยู่แต่อาจจะถูกบดบังจากสัญญาณรบกวน และเมื่อพิจารณากราฟช่วง $1,000 - 650 \text{ cm}^{-1}$ พบว่า มียอดกราฟปรากฏที่เลขคลื่น 761 cm^{-1} บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ =C-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบงอ ทำให้ระบุได้ว่าแอลคีนที่เกิดขึ้นมีรูปแบบแบบ Disubstituted (cis) ดังที่แสดงดังรูปที่ 5.11, ยอดกราฟที่เลขคลื่น $2,927$ และ $2,858 \text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืดซึ่งเกิดจากแอลเคนหมู่เมทิลีน ($-\text{CH}_2-$) โดยรายละเอียดของพันธะที่ตรวจพบถูกแสดงดังตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 หมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบของแต่ละยอดกราฟจากบริเวณอกรอยขีดขีดของน้ำมันดีเซล

Wave Number	Vibration Type	Element	Functional Group
3,500 - 3,200	Stretching	O-H	Hydroxyl (From Ester)
3,100 - 3,000	Stretching	=C-H	Alkene
2,927	Stretching	C-H	Alkane (Methylene, $-\text{CH}_2-$)
2,858	Stretching	C-H	Alkane (Methylene, $-\text{CH}_2-$)
1,685	Stretching	C=C	Alkene
1,242	Stretching	C-O	Ester
1,000 - 650	Bending	=C-H	Alkene

จากหมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบพบว่าพันธะ O-H ที่ตรวจพบช่วงเลขคลื่น $3,500 - 3,200 \text{ cm}^{-1}$ และพันธะ C-O ที่ตรวจพบที่เลขคลื่น $1,242 \text{ cm}^{-1}$ เกิดจากหมู่เอสเตอร์ โดยหมู่เอสเตอร์ที่ตรวจพบอาจเกิดจากการมีน้ำมันไบโอดีเซลจากปาล์มผสมอยู่ในน้ำมันดีเซล นอกจากนี้

หากตรวจพบหมู่เอสเทอร์ควรจะตรวจพบยอดกราฟของพันธะ C=O ที่เลขคลื่นประมาณ $1,735\text{ cm}^{-1}$ และ Overtone ที่ช่วงเลขคลื่น $3,650 - 3,320\text{ cm}^{-1}$ แต่เมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าไม่มียอดกราฟสองช่วงดังกล่าวปรากฏขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งอาจเกิดจากการซ้อนทับของกราฟหรือเกิดจากการบดบังจากสัญญาณรบกวน ส่วนพันธะ C-H ที่เกิดช่วงเลขคลื่นอื่นๆ ทั้งหมดอาจเกิดจากโมเลกุลของสายโซ่คาร์บอนที่มีความยาวของสายโซ่แตกต่างกัน โดยสายโซ่คาร์บอนอาจเป็นได้ทั้งสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันดีเซลหรืออาจเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันดีเซลด้วยเช่นกัน

5.2.2.2 น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหุ้ง (COEE)



รูปที่ 5.19 บริเวณรอยขีดจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหุ้ง

จากรูปที่ 5.19 จะเห็นได้ว่ารอยขีดจากตัวอย่างทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหุ้งมีลักษณะจางกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล แต่ยังคงสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน

จากรูปที่ 5.17 พบว่า กราฟบริเวณช่วงเลขคลื่น $3,500 - 3,200\text{ cm}^{-1}$ มีลักษณะกว้างและไม่แหลมซึ่งเกิดจากพันธะ O-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืด และเมื่อพิจารณาช่วงเลขคลื่น $1,400 - 1,000\text{ cm}^{-1}$ พบว่า มียอดกราฟปรากฏอยู่ 3 ยอดซึ่งเกิดจากพันธะ C-O ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืด โดยมียอดกราฟปรากฏที่เลขคลื่น $1,255, 1,172$ และ $1,099\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งยอดกราฟทั้งหมดเกิดจากหมู่เอสเทอร์ ทำให้ระบุได้ว่าพันธะ O-H ที่ตรวจพบเกิดจากหมู่เอสเทอร์,

ช่วงเลขคลื่น 3,100 - 3,000 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ควรตรวจพบพันธะ =C-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืดซึ่งเกิดจากหมู่แอลคีน พบว่าไม่ปรากฏยอดกราฟอย่างชัดเจน แต่เมื่อพิจารณากราฟช่วงเลขคลื่น 1,700 - 1,500 cm^{-1} พบว่า มียอดกราฟปรากฏที่เลขคลื่น 1,635 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากพันธะ C=C ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืด และช่วงเลขคลื่น 1,000 - 650 cm^{-1} พบว่ามียอดกราฟปรากฏที่เลขคลื่น 731 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากพันธะ =C-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบงอ จากข้อมูลทั้งหมดทำให้ทราบได้ว่าการตรวจพบหมู่แอลคีนโดยมีรูปแบบแบบ Disubstituted (cis) ที่มีลักษณะดังที่แสดงดังรูปที่ 5.11 และยอดกราฟที่เลขคลื่น 2,916 และ 2,850 cm^{-1} บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืด ส่วนยอดกราฟที่เลขคลื่น 1,473 cm^{-1} บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบงอ โดยพันธะ C-H ที่ตรวจพบเกิดจากหมู่แอลเคน (Methylene, $-\text{CH}_2-$) โดยพันธะและหมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบบริเวณรอยขีดจากน้ำมัน ไบโอดีเซลจากกะหล่ำแสดงดังตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.17 หมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบของแต่ละยอดกราฟจากบริเวณออกรอยขีดของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ

Wave Number	Vibration Type	Element	Functional Group
3,500 - 3,200	Stretching	O-H	Hydroxyl (From Ester)
3,100 - 3,000	Stretching	=C-H	Alkene
2,916	Stretching	C-H	Alkane (Methylene, $-\text{CH}_2-$)
2,850	Stretching	C-H	Alkane (Methylene, $-\text{CH}_2-$)
1,635	Stretching	C=C	Alkene
1,473	Bending	C-H	Alkane (Methylene, $-\text{CH}_2-$)
1,255	Stretching	C-O	Ester
1,172	Stretching	C-O	Ester
1,099	Stretching	C-O	Ester
1,000 - 650	Bending	=C-H	Alkene

จากหมู่ฟังก์ชันและพันธะที่ตรวจพบอาจเกิดเป็นเพราะน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำประกอบด้วยเอสเทอร์ของกรดไขมันเป็นส่วนใหญ่ ส่งผลให้ตรวจพบพันธะ O-H และพันธะ C-O ซึ่งเกิดจากหมู่เอสเทอร์ แต่ยอดกราฟที่ระบุถึงพันธะ C=O นั้น ไม่ได้ปรากฏอย่างชัดเจน โดยอาจถูกบดบังจากสัญญาณรบกวนหรือมีการซ้อนทับกับพันธะอื่น ๆ จนไม่สามารถแยกออกได้

พันธะ C-H ทั้งที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืดและแบบงอที่ตรวจพบที่เลขคลื่นต่างๆอาจเกิดจากโมเลกุลที่มีลักษณะเป็นสายโซ่ที่มีความยาวของสายโซ่ต่างกัน โดยสายโซ่ดังกล่าวอาจจะเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันเนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันไบโอดีเซล ส่วนพันธะ C=C ที่เกิดขึ้นเกิดจากการตรวจพบพันธะคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าจะเป็นกรณีซิโนเลอิกที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ

5.2.2.3 เชื้อเพลิงผสม (COEE8)



รูปที่ 5.20 บริเวณรอยขีดจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงผสม COEE8

จากรูปที่ 5.20 ซึ่งแสดงลักษณะของรอยขีดของชิ้นงานตัวอย่างจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงผสม จะเห็นได้ว่ารอยขีดที่เกิดขึ้นมีค่อนข้างจางแต่ยังคงมองเห็นได้ โดยมีลักษณะใกล้เคียงกับรอยขีดจากน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ

จากรูปที่ 5.17 พบว่า กราฟบริเวณช่วงเลขคลื่น $3,500 - 3,200 \text{ cm}^{-1}$ มีลักษณะกว้างและไม่แหลมซึ่งเกิดจากพันธะ O-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืด และเมื่อพิจารณาช่วงเลขคลื่น $1,400 - 1,000 \text{ cm}^{-1}$ พบว่ามียอดกราฟปรากฏอยู่ 2 ยอด ที่เลขคลื่น $1,169$ และ $1,036 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากพันธะ C-O ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืดซึ่งเกิดจากหมู่เอสเทอร์ ให้ระบุได้ว่าพันธะ O-H ที่ตรวจพบเกิดจากหมู่เอสเทอร์, ช่วงเลขคลื่น $3,100 - 3,000 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ควรตรวจพบพันธะ =C-H ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืดซึ่งเกิดจากหมู่แอลคีน พบว่าไม่ปรากฏยอดกราฟอย่างชัดเจน แต่เมื่อพิจารณากราฟช่วงเลขคลื่น $1,700 - 1,500 \text{ cm}^{-1}$ พบว่ามียอดกราฟปรากฏที่

เลขคลื่น $1,699\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากพันธะ $\text{C}=\text{C}$ ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืด และช่วงเลขคลื่น $1,000 - 650\text{ cm}^{-1}$ พบว่ามียอดกราฟปรากฏที่เลขคลื่น 754 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากพันธะ $=\text{C}-\text{H}$ ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบงอ จากข้อมูลทั้งหมดทำให้ทราบได้ว่าการตรวจพบหมู่แอลคีน โดยมีรูปแบบแบบ Disubstituted (cis) ที่มีลักษณะดังที่แสดงดังรูปที่ 5.11 เช่นเดียวกับกรณีน้ำมันดีเซลและน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ และยอดกราฟที่เลขคลื่น $2,922$ และ $2,846\text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ $\text{C}-\text{H}$ ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืด ส่วนยอดกราฟที่เลขคลื่น $1,452\text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ $\text{C}-\text{H}$ ที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบงอ โดยพันธะ $\text{C}-\text{H}$ ที่ตรวจพบเกิดจากหมู่แอลเคน (Methyl, $-\text{CH}_3$) โดยพันธะและหมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบบริเวณรอยขีดจากเชื้อเพลิงผสมแสดงดังตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 หมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบของแต่ละยอดกราฟจากบริเวณอกรอยขีดของเชื้อเพลิงผสม

Wave Number	Vibration Type	Element	Functional Group
3,500 - 3,200	Stretching	O-H	Hydroxyl (From Ester)
3,100 - 3,000	Stretching	$=\text{C}-\text{H}$	Alkene
2,922	Stretching	C-H	Alkane (Methylene, $-\text{CH}_2-$)
2,846	Stretching	C-H	Alkane (Methylene, $-\text{CH}_2-$)
1,699	Stretching	$\text{C}=\text{C}$	Alkene
1,452	Bending	C-H	Alkane (Methyl, $-\text{CH}_3$)
1,169	Stretching	C-O	Ester
1,036	Stretching	C-O	Ester
1,000 - 650	Bending	$=\text{C}-\text{H}$	Alkene

จากหมู่ฟังก์ชันและพันธะที่ตรวจพบอาจเกิดเป็นเพราะเชื้อเพลิงผสมประกอบด้วยเอสเทอร์ของกรดไขมันทั้งจากน้ำมันไบโอดีเซลจากปาล์มที่ผู้ผลิตผสมไว้ก่อนแล้ว และจากน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำที่ผสมในงานวิจัย ส่งผลให้ตรวจพบพันธะ O-H และพันธะ C-O ซึ่งเกิดจากหมู่เอสเทอร์ แต่ยอดกราฟที่ระบุถึงพันธะ $\text{C}=\text{O}$ นั้นไม่ได้ปรากฏอย่างชัดเจน โดยอาจถูกบดบังจากสัญญาณรบกวนหรือมีการซ้อนทับกับพันธะอื่น ๆ จนไม่สามารถแยกออกได้ พันธะ $\text{C}-\text{H}$ ทั้งที่มีการสั่นของโมเลกุลแบบยืดและแบบงอที่ตรวจพบที่เลขคลื่นต่าง ๆ อาจเกิดจากโมเลกุลที่มีลักษณะเป็นสายโซ่ที่มีความยาวของสายโซ่ต่างกัน โดยสายโซ่ดังกล่าวอาจจะเป็น

เอสเทอร์ของกรดไขมันเนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันไบโอดีเซล ส่วนพันธะ C=C ที่เกิดขึ้นเกิดจากการตรวจพบพันธะคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าจะเป็นกรดไขมันอีกที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ

5.2.2.4 เปรียบเทียบ

จากหมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบจากตัวอย่างทดสอบของเชื้อเพลิงทั้งสามชนิด พบว่า การตรวจพบพันธะ O-H จากเชื้อเพลิงทั้งสามชนิดเกิดได้จากหมู่เอสเทอร์ที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงทั้งสามชนิด โดยที่พันธะ O-H ของน้ำมันดีเซลเกิดจากเอสเทอร์ของกรดไขมันของน้ำมันไบโอดีเซลจากปาล์มที่เป็นองค์ประกอบ ส่วนน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำและเชื้อเพลิงผสม COEE8 เป็นผลมาจากเอสเทอร์ของกรดไขมันในน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ พันธะ C-H จากหมู่แอลเคนที่เลขคลื่นต่าง ๆ บ่งบอกถึงการตรวจพบสายโซ่คาร์บอนที่มีความยาวแตกต่างกัน ซึ่งเป็นไปได้ทั้งสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำมันดีเซลและเอสเทอร์ของกรดไขมันที่มีอยู่ในน้ำมันไบโอดีเซล พันธะ C=C จากหมู่แอลคีนบ่งบอกถึงการตรวจพบกรดไขมันหรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว ส่วนพันธะ C=C จากหมู่อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน บ่งบอกถึงการตรวจพบโซ่แบบวงปิด และการตรวจพบพันธะ C-O เกิดจากการตรวจพบพันธะระหว่างหมู่เอสเทอร์กับกรดไขมันและกลีเซอรอล

สำหรับความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงที่เกิดจากเชื้อเพลิงทั้งสามชนิดเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันพบว่าไม่มียอดกราฟของพันธะ C=O ที่ควรจะมีช่วงเลขคลื่นประมาณ 1,750 - 1,680 cm^{-1} โดยจากผลวิเคราะห์พบว่าน้ำมันดีเซลมียอดกราฟเกิดขึ้นที่เลขคลื่น 1,685 cm^{-1} และเชื้อเพลิงผสม COEE8 มียอดกราฟปรากฏขึ้นที่เลขคลื่น 1,699 cm^{-1} แต่ยอดกราฟดังกล่าวไม่ใช่ยอดกราฟจากพันธะ C=O เนื่องจากมีร้อยละการส่งผ่านต่ำกว่า จึงพิจารณาพันธะ C-O ซึ่งจะปรากฏช่วงเลขคลื่น 1,400 - 1,000 cm^{-1} แทนพบว่าน้ำมันดีเซลมียอดกราฟที่เกิดจากพันธะ C-O ปรากฏชัดเจนที่เลขคลื่น 1,242 cm^{-1} ในขณะที่น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำมียอดกราฟของพันธะ C-O ที่ชัดเจนที่สุดปรากฏที่เลขคลื่น 1,255 และ 1,172 cm^{-1} คล้ายกันกับเดียวกับเชื้อเพลิงผสมที่มียอดกราฟจากพันธะ C-O ที่ปรากฏที่เลขคลื่น 1,169 และ 1,036 cm^{-1} สาเหตุอาจเป็นเพราะชนิดของเอสเทอร์ของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันดีเซลที่เป็น Palm Oil Methyl Ester (POME) ในขณะที่น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำเป็น Castor Oil Ethyl Ester (COEE) ส่วนเชื้อเพลิงผสมจะมีทั้ง POME และ COEE แต่กรณีของเชื้อเพลิงผสมอาจตรวจจับเอสเทอร์ของกรดไขมันจากกะหล่ำได้มากกว่ายอดกราฟจึงปรากฏดังที่แสดงในรูปที่ 51 และเมื่อพิจารณาพันธะ O-H พบว่าเชื้อเพลิงทั้งสามชนิดมีกราฟที่ปรากฏช่วงเดียวกันคือช่วง 3,500 - 3,200 cm^{-1} โดยเชื้อเพลิงที่มีพื้นที่ใต้กราฟมากที่สุดคือเชื้อเพลิงผสม รองลงมาเป็นน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ

และน้ำมันดีเซล สาเหตุอาจเกิดจากเชื้อเพลิงผสมและน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งมีเอสเทอร์ของ กรดริซิโนเลอิกซึ่งเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในขณะที่น้ำมันดีเซลไม่มี เอสเทอร์ของกรดไขมันชนิดดังกล่าว จึงส่งผลให้ปริมาณของพันธะ O-H มีลักษณะดังกล่าว เมื่อพิจารณาพันธะ C-H พบว่าช่วงเลขคลื่น $3,000 - 2,800 \text{ cm}^{-1}$ ยอดกราฟของน้ำมันไบโอดีเซลจาก ละหุ่งและเชื้อเพลิงผสมมีความสูงมากกว่าน้ำมันดีเซลอย่างเห็นได้ชัด เช่นเดียวกับช่วงเลขคลื่น $1,490 - 1,400 \text{ cm}^{-1}$ ที่น้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งมีขนาดยอดกราฟที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลและเชื้อเพลิง ผสมตามลำดับ ส่วนหมู่ของพันธะ C=C ของเชื้อเพลิงทั้งสามชนิดที่ตรวจพบเป็นแอลคีน จากพันธะทั้งหมดที่ตรวจพบและขนาดของรอยขีดขีดของตัวอย่างจากการทำสอบความสามารถใน การหล่อลื่นของเชื้อเพลิงที่ให้ผลว่าเชื้อเพลิงผสมมีขนาดของรอยขีดขีดที่เล็กกว่าน้ำมันไบโอดีเซล จากละหุ่งและน้ำมันดีเซล อาจเป็นผลมาจากปริมาณของพันธะ O-H ที่เกิดขึ้นบนรอยขีดขีด เนื่องจากเชื้อเพลิงทั้งสามชนิดมีเอสเทอร์ของกรดไขมันเป็นองค์ประกอบซึ่งหมู่ดังกล่าวจะมีพันธะ O-H เป็นองค์ประกอบ หมู่ O-H ดังกล่าวเป็นหมู่ที่ช่วยเสริมความสามารถในการหล่อลื่นของ เชื้อเพลิงดีเป็นอันดับที่สอง แต่น้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งล้วนและที่อยู่ในเชื้อเพลิงผสมจะมี กรดริซิโนเลอิกที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบส่งผลให้พันธะ O-H จากเชื้อเพลิงสองชนิด ดังกล่าวมีปริมาณมากกว่าน้ำมันดีเซลจึงส่งผลให้ขนาดของรอยขีดขีดจากเชื้อเพลิงผสมมีขนาดเล็ก กว่าเชื้อเพลิงอีกสองชนิดที่เหลือ

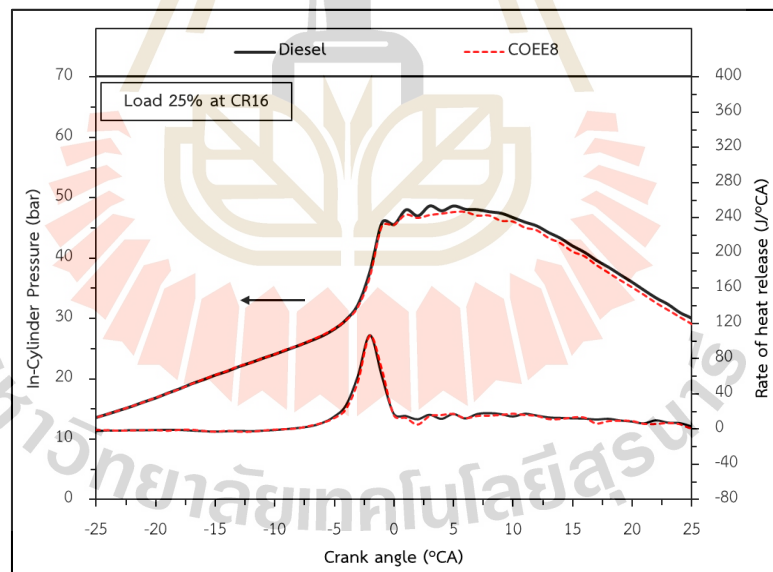


บทที่ 6

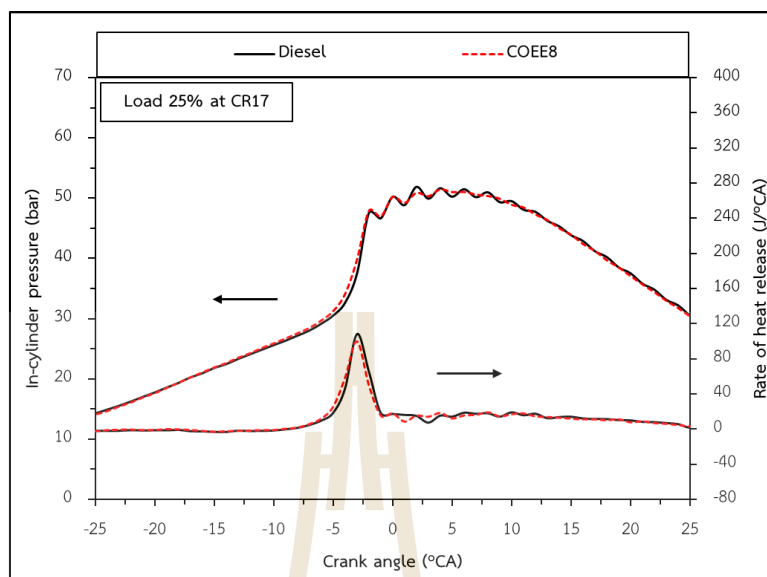
การทดสอบเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์

6.1 คุณลักษณะการเผาไหม้

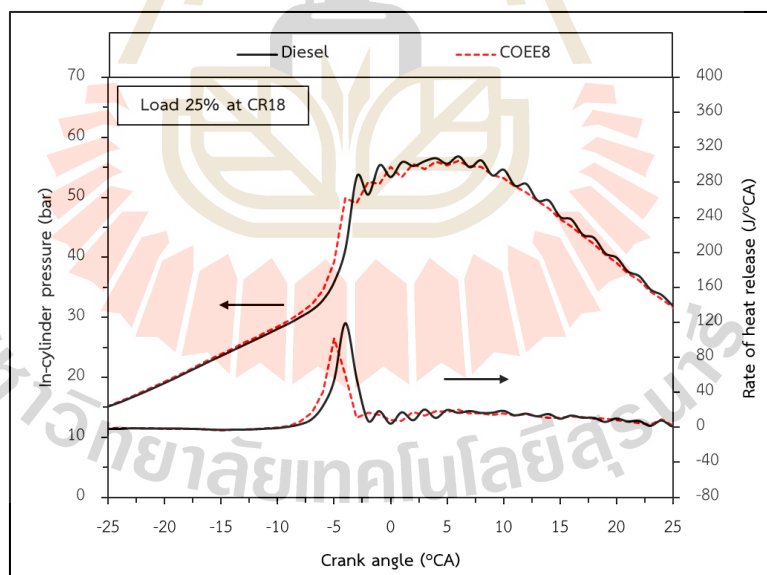
คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งที่ 8% โดยปริมาตร (COEE8) นั้นประกอบด้วย การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ คือ 16:1, 17:1 และ 18:1 ตามลำดับ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระงานที่ 25%, 50% และ 75% ของแรงบิดสูงสุด พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ทั้งนี้จะทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับน้ำมันดีเซล ซึ่งแสดงรายละเอียดดังนี้



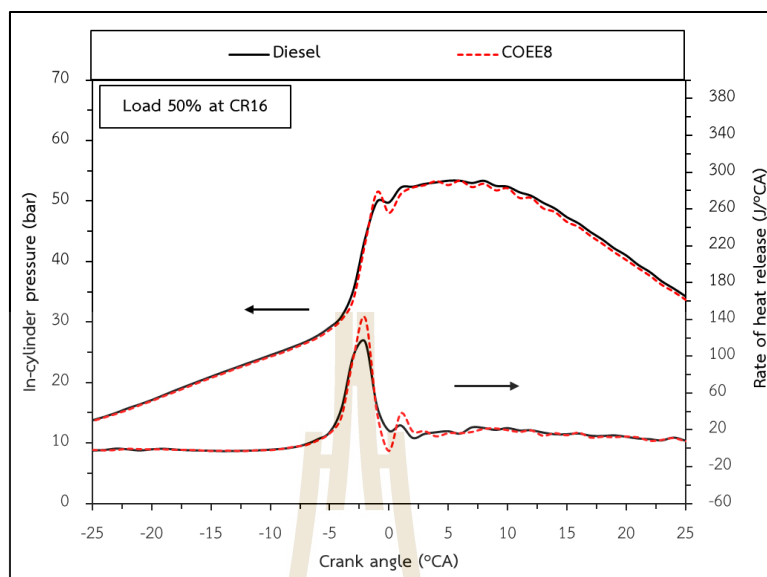
รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนกับมุมของเพลลาเหวี่ยง เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 16:1 และรับภาระงาน 25%



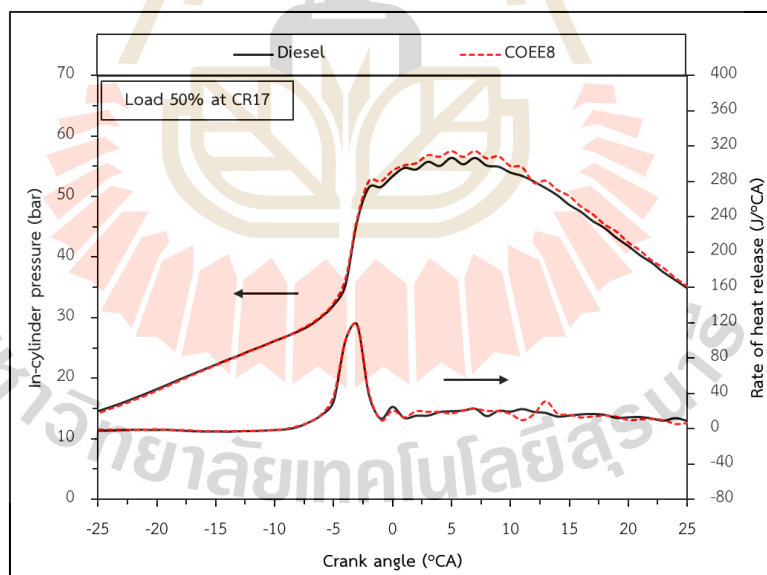
รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนกับมุมของเพลลาเหวี่ยง เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 17:1 และรับภาระงาน 25%



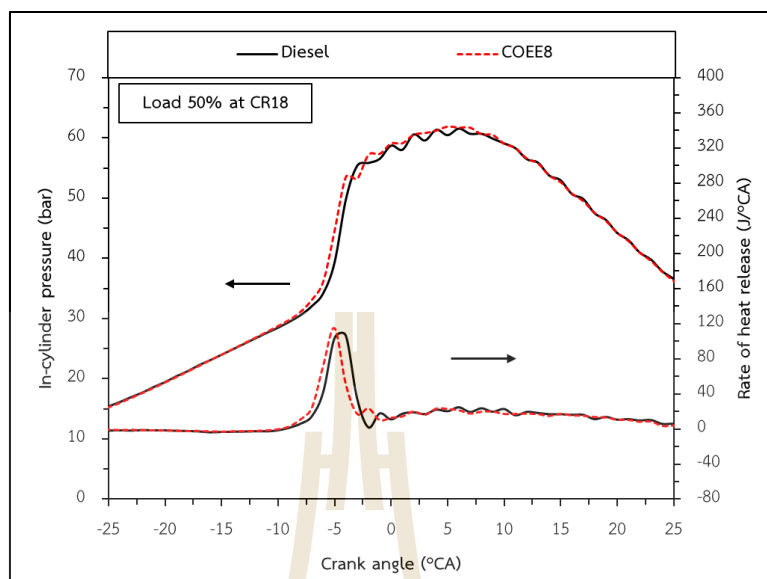
รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนกับมุมของเพลลาเหวี่ยง เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1 และรับภาระงาน 25%



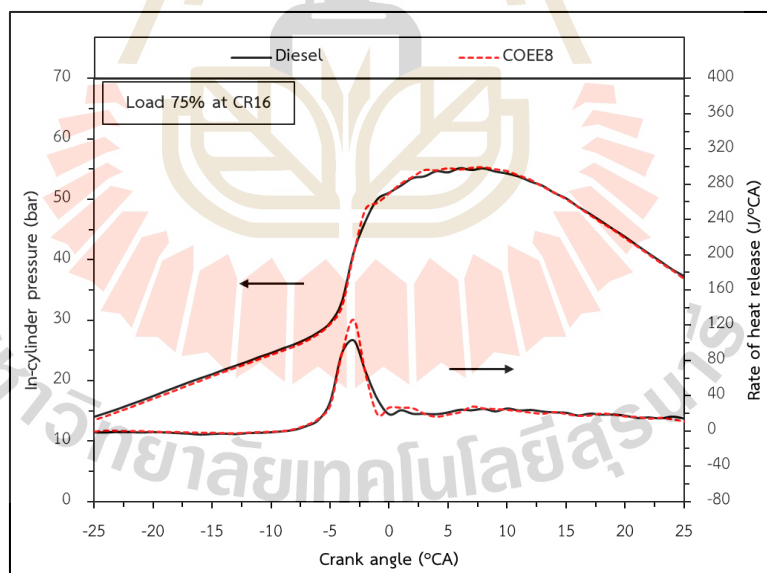
รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนกับมุมของเพลลาเหวี่ยง เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 16:1 และรับภาระงาน 50%



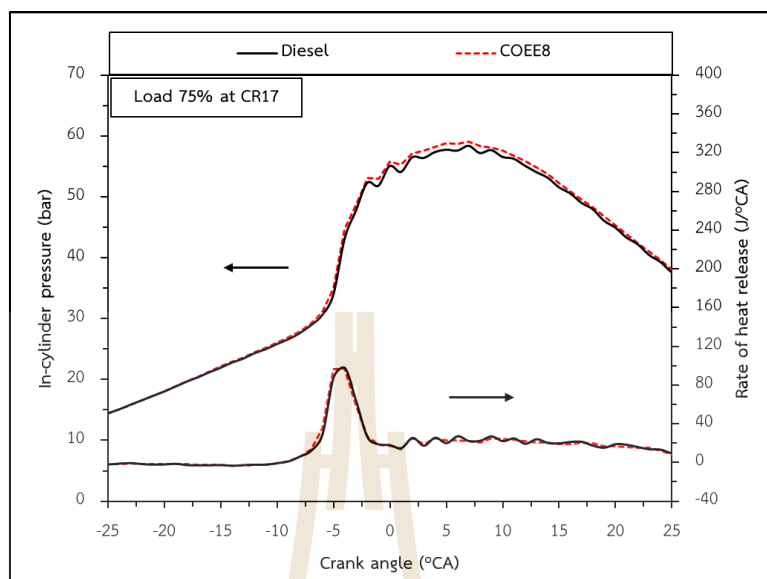
รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนกับมุมของเพลลาเหวี่ยง เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 17:1 และรับภาระงาน 50%



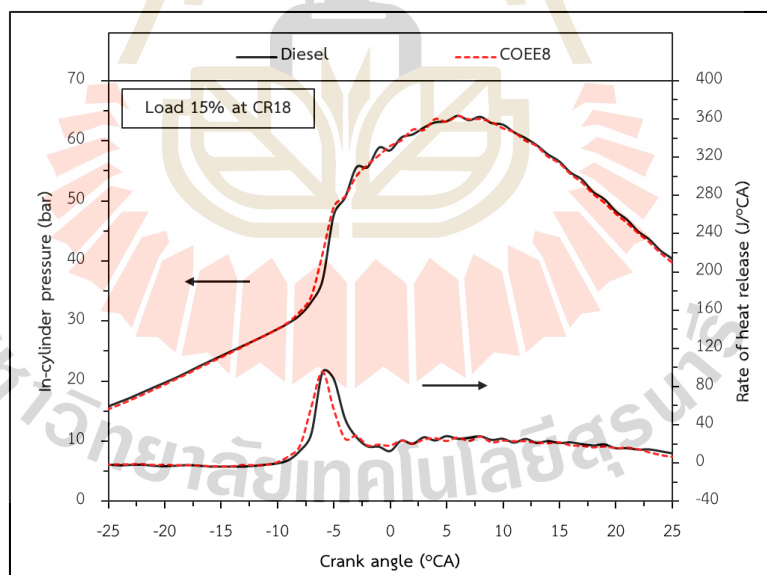
รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนกับมุมของเพลลาเหวี่ยง เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1 และรับภาระงาน 50%



รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในกระบอกสูบ และอัตราการปลดปล่อยความร้อนกับมุมของเพลลาเหวี่ยง เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 16:1 และรับภาระงาน 75%



รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนกับมุมของเพลลาเหวี่ยง เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 17:1 และรับภาระงาน 75%



รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนกับมุมของเพลลาเหวี่ยง เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1 และรับภาระงาน 50%

จากรูปที่ 6.1 ถึง 6.9 พบว่า ช่วง Premixed Combustion เมื่อเครื่องยนต์ได้รับภาระงาน 25% ของแรงบิดสูงสุด มีจุดเริ่มต้นของการจุดระเบิด (Start of Combustion, SOC) เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1 เกิดขึ้นก่อน โดยน้ำมันดีเซลมีจุด SOC เกิดขึ้นที่มุมของเพลาช้อเหวียง -10.0°CA รองลงมาเป็นอัตราส่วนการอัด 17:1 และ 16:1 โดยเกิดขึ้นที่มุมของเพลาช้อเหวียง -9.1 และ -8.2°CA ตามลำดับ ส่วนเชื้อเพลิงผสม COEE8 มี SOC เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1 เกิดขึ้นที่มุมของเพลาช้อเหวียง -10.0°CA รองลงมาเป็นอัตราส่วนการอัด 17:1 และ 16:1 โดยเกิดขึ้นที่มุมของเพลาช้อเหวียง -9.1 และ -8.1°CA ตามลำดับ ซึ่งเกิดที่ตำแหน่งเดียวกับน้ำมันดีเซลเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1 และเกิดก่อนน้ำมันดีเซล -0.1°CA เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 16:1 และ 17:1 ซึ่งหมายความว่าที่อัตราส่วนการอัด 18:1 เครื่องยนต์มีความล่าช้าในการจุดระเบิดสั้นที่สุด รองลงมาเป็นอัตราส่วนการอัด 17:1 และ 16:1 ตามลำดับ

เมื่อเครื่องยนต์ได้รับภาระงาน 50% จุด SOC ของน้ำมันดีเซลจะเกิดขึ้นก่อนเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1 รองลงมาเป็นอัตราส่วนการอัด 17:1 และ 16:1 ตามลำดับ โดยเกิดขึ้นที่มุมของเพลาช้อเหวียง -10.00 , -8.5 และ -7.5°CA เช่นเดียวกับเชื้อเพลิงผสม โดยเชื้อเพลิงผสมมีจุด SOC เกิดขึ้นที่มุมของเพลาช้อเหวียง -11.5 , -8.7 และ -7.6°CA เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1, 17:1 และ 16:1 ตามลำดับ ซึ่งเชื้อเพลิงผสมมีจุดเริ่มต้นของการเผาไหม้เกิดก่อนน้ำมันดีเซล -0.1 , -0.2 และ -1.5°CA ที่อัตราส่วนการอัด 16:1, 17:1 และ 18:1 ตามลำดับ และเมื่อเครื่องยนต์ได้รับภาระงาน 75% จุด SOC ของน้ำมันดีเซลจะเกิดขึ้นก่อนเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1 รองลงมาเป็นอัตราส่วนการอัด 17:1 และ 16:1 ตามลำดับ โดยเกิดขึ้นที่มุมของเพลาช้อเหวียง -11.00 , -10.6 และ -7.5°CA เช่นเดียวกับเชื้อเพลิงผสม โดยเชื้อเพลิงผสมมีจุด SOC เกิดขึ้นที่มุมของเพลาช้อเหวียง -12.0 , -10.8 และ -7.6°CA เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1, 17:1 และ 16:1 ตามลำดับ ซึ่งเชื้อเพลิงผสมมีจุดเริ่มต้นของการเผาไหม้เกิดก่อนน้ำมันดีเซล -0.1 , -0.2 และ -1.0°CA ที่อัตราส่วนการอัด 16:1, 17:1 และ 18:1 ตามลำดับ เมื่อเครื่องยนต์ได้รับภาระงาน 25% อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดของน้ำมันดีเซลมีค่ามากที่สุดเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1 รองลงมาเป็นอัตราส่วนการอัด 17:1 และ 16:1 โดยมีค่า 120.00 , 109.33 และ $107.27 \text{ J}^{\circ}\text{CA}$ ตามลำดับ ส่วนเชื้อเพลิงผสมจะมีอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดมีค่ามากที่สุดเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1 รองลงมาเป็นอัตราส่วนการอัด 16:1 และ 17:1 โดยมีค่า 110.65 , 105.45 และ $101.33 \text{ J}^{\circ}\text{CA}$ ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 1.82 , 8.00 และ $9.35 \text{ J}^{\circ}\text{CA}$ เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 16:1, 17:1 และ 18:1 ตามลำดับ เมื่อเครื่องยนต์ได้รับภาระงาน 50% อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดของน้ำมันดีเซลมีค่ามากที่สุดเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 17:1 รองลงมาเป็นอัตราส่วนการอัด 18:1 และ 16:1 โดยมีค่า 120.00 , 112.50 และ $108.42 \text{ J}^{\circ}\text{CA}$

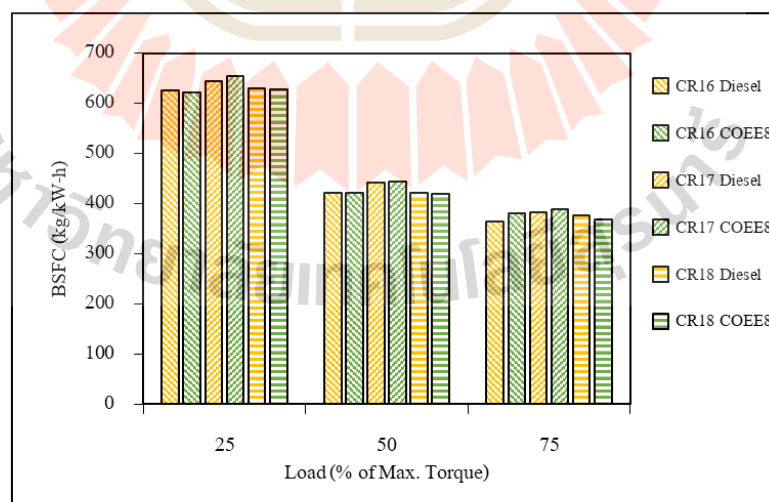
ตามลำดับ ส่วนเชื้อเพลิงผสมจะมีอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดมีค่ามากที่สุดเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1 รองลงมาเป็นอัตราส่วนการอัด 16:1 และ 17:1 เช่นเดียวกัน โดยมีค่า 122.14 , 116.25 และ 100.00 J/°CA ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 8.42, 2.14 และ 3.75 J/°CA เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 16:1, 17:1 และ 18:1 ตามลำดับ

เมื่อเครื่องยนต์ได้รับภาระงาน 75% อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดของน้ำมันดีเซลมีค่ามากที่สุดเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 17:1 รองลงมาเป็นอัตราส่วนการอัด 16:1 และ 18:1 โดยมีค่า 105.67, 104.73 และ 100.71 J/°CA ตามลำดับ ส่วนเชื้อเพลิงผสมจะมีอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดมีค่ามากที่สุดเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 16:1 รองลงมาเป็นอัตราส่วนการอัด 17:1 และ 18:1 โดยมีค่า 124.36 , 106.74 และ 102.51 J/°CA ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 19.63, 1.07 และ 1.80 J/°CA เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 16:1, 17:1 และ 18:1 ตามลำดับ ส่วนความดันภายในกระบอกสูบสูงสุดเมื่อเครื่องยนต์ได้รับภาระงาน 25% จากการใช้ น้ำมันดีเซลและเชื้อเพลิงผสมมีค่ามากที่สุดเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1 รองลงมาเป็น 17:1 และ 16:1 สำหรับน้ำมันดีเซลค่าความดันภายในกระบอกสูบมีค่า 56.42, 51.94 และ 48.76 Bar โดยเกิดขึ้นที่มุมของเพลาคอเหวี่ยง 6.9, 2.0 และ 5.0 °CA และสำหรับเชื้อเพลิงผสมความดันภายในกระบอกสูบมีค่า 55.52, 51.55 และ 48.00 Bar เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1, 17:1 และ 16:1 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 0.76, 0.39 และ 0.90 Bar เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 16:1, 17:1 และ 18:1 ตามลำดับ เมื่อเครื่องยนต์ได้รับภาระงาน 50% ความดันภายในกระบอกสูบสูงสุดจากการใช้น้ำมันดีเซลและเชื้อเพลิงผสมมีค่ามากที่สุดเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1 รองลงมาเป็น 17:1 และ 16:1 สำหรับน้ำมันดีเซลความดันภายในกระบอกสูบสูงสุดมีค่า 61.36, 55.56 และ 51.63 Bar และสำหรับเชื้อเพลิงผสมความดันภายในกระบอกสูบสูงสุดมีค่า 61.82, 57.78 และ 51.16 Bar เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1, 17:1 และ 16:1 ตามลำดับ โดยมีค่าความดันภายในกระบอกสูบสูงสุดจากเชื้อเพลิงผสมมีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซล 2.22 และ 0.45 Bar เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 17:1 และ 18:1 แต่มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 0.47 Bar เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 16:1 และเมื่อเครื่องยนต์ได้รับภาระงาน 75% การใช้น้ำมันดีเซลและเชื้อเพลิงผสมจะมีความดันภายในกระบอกสูบสูงสุดเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1, 17:1 และ 16:1 มีค่า 64.01, 58.20 และ 55.42 Bar สำหรับน้ำมันดีเซล และมีค่า 64.08, 59.10 และ 55.51 Bar สำหรับเชื้อเพลิงผสม โดยการใช้เชื้อเพลิงผสมจะเกิดความดันภายในกระบอกสูบสูงสุดมากกว่าน้ำมันดีเซล 0.09, 0.90 และ 0.07 Bar เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1, 17:1 และ 16:1 ตามลำดับ สาเหตุเป็นเพราะที่อัตราส่วนการอัด 16:1 เชื้อเพลิงผสมมีความสามารถในการอัดตัวที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลจึงถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ก่อน ส่งผลให้เกิดการเริ่มต้นในการเผาไหม้ก่อนน้ำมันดีเซล ในขณะเดียวกัน

เชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ก่อนของเชื้อเพลิงผสมจะมีปริมาณที่น้อยกว่าน้ำมันดีเซลส่งผลให้อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล แต่จุดที่มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นก่อนน้ำมันดีเซล แต่เมื่ออัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์มีค่า 17:1 และ 18:1 อากาศภายในห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงสมบูรณ์และรุนแรงขึ้น นอกจากนี้เชื้อเพลิงผสมยังมีออกซิเจนในเชื้อเพลิงมากกว่าน้ำมันดีเซลซึ่งมีส่วนช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้นอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดจากการใช้เชื้อเพลิงผสมที่อัตราส่วนการอัด 17:1 และ 18:1 จึงสูงกว่าน้ำมันดีเซล เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการอัดพบว่าอัตราส่วนการอัดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เชื้อเพลิงเริ่มเผาไหม้ได้เร็วขึ้นและมีอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดเพิ่มขึ้น อีกทั้งความดันภายในกระบอกสูบยังสูงขึ้นอีกด้วย สาเหตุเป็นเพราะอุณหภูมิในห้องเผาไหม้มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเหมาะสมกับการเผาไหม้มากกว่า จึงทำให้การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นมีความรุนแรงและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างภาระงานพบว่าไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนของอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุด, จุดเริ่มต้นของการเผาไหม้ และความดันภายในกระบอกสูบ สาเหตุอาจเป็นเพราะความแตกต่างของสถานะที่เหมาะสมในการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดที่แตกต่างกัน

6.2 สมรรถนะของเครื่องยนต์

6.2.1 อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก

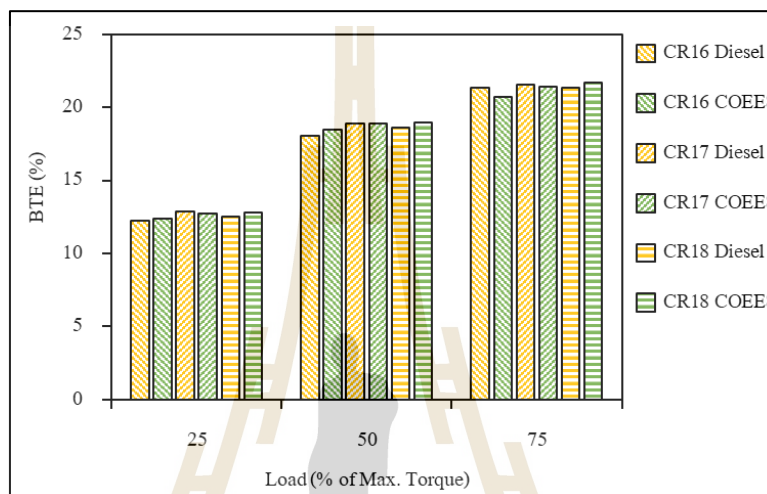


รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระงานกับอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก

จากรูปที่ 6.10 พบว่า อัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์จากการใช้เชื้อเพลิงผสมมีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 16:1 และ 17:1 ในขณะที่อัตราส่วนการอัด 18:1 เชื้อเพลิงผสมมีแนวโน้มที่จะมีค่าอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกต่ำกว่าน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตามความแตกต่างของอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกจากเชื้อเพลิงทั้งสองไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเครื่องยนต์ได้รับภาระงานเพิ่มขึ้นอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกมีแนวโน้มที่จะลดลง และเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดที่เพิ่มขึ้นอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกมีแนวโน้มที่จะลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่แสดงออกมาเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 16:1 มีค่า 626, 421 และ 365 kg/kW-h ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ จากการใช้น้ำมันดีเซล ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมจะได้ค่าอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกเท่ากับ 621, 421 และ 381 kg/kW-h ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าน้ำมันดีเซล 0.84 และ 0.12% ที่ภาระงาน 25% และ 50% และมากกว่าน้ำมันดีเซล 4.32% ที่ภาระงาน 75% อัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 17:1 มีค่า 644, 441 และ 383 kg/kW-h ที่ภาระงาน 25, 50 และ 75% ตามลำดับ จากการใช้น้ำมันดีเซล ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมจะได้ค่าอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกเท่ากับ 655, 443 และ 389 kg/kW-h ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าน้ำมันดีเซล 1.63%, 0.48% และ 1.65% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ และอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 18:1 มีค่า 629, 422 และ 377 kg/kW-h ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ จากการใช้น้ำมันดีเซล ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมจะได้ค่าอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกเท่ากับ 628, 420 และ 368 kg/kW-h ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าน้ำมันดีเซล 0.17%, 0.50% และ 2.23% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ สาเหตุของการเพิ่มขึ้นของอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกเมื่อเครื่องยนต์ใช้เชื้อเพลิงผสมเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 16:1 และ 17:1 เป็นเพราะเชื้อเพลิงผสมมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลอยู่ 0.22 MJ/kg ส่งผลให้เครื่องยนต์จำเป็นต้องฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในปริมาณที่มากกว่าเพื่อคงความเร็วรอบเครื่องยนต์ไว้ที่ 1,500 รอบต่อนาที ตามที่กำหนด และสาเหตุที่เครื่องยนต์มีอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่ลดลงตามภาระงานที่เพิ่มขึ้นเป็นเพราะอุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงขึ้นส่งผลให้เชื้อเพลิงทั้งสองสามารถเผาไหม้ได้สมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งทำให้เครื่องยนต์ใช้เชื้อเพลิงน้อยลงเพื่อให้ได้กำลังงานที่เท่ากันเมื่อเปรียบเทียบกับภาระงานต่ำ ส่วนสาเหตุที่อัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนการอัดของเชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้นเป็นเพราะอุณหภูมิอากาศในห้องเผาไหม้ที่อัตราส่วนการอัดสูงมีค่าสูงกว่า

อัตราส่วนการอัดต่ำ ส่งผลให้เชื้อเพลิงเผาไหม้ได้สมบูรณ์และปลดปล่อยพลังงานออกมามากขึ้น เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงภาระงาน อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของภาระงานส่งผลต่ออัตราการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคมากกว่าอัตราส่วนการอัด

6.2.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค



รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระงานกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค

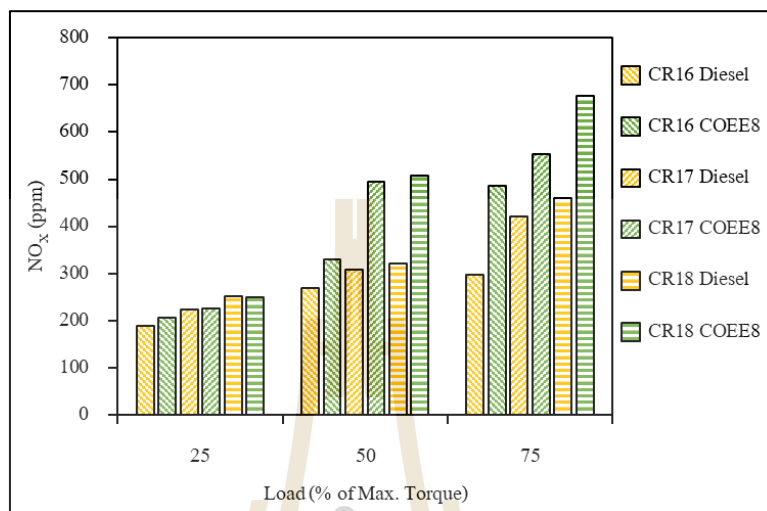
จากรูปที่ 6.11 พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคที่เครื่องยนต์แสดงออกมาจากการใช้เชื้อเพลิงผสมมีแนวโน้มที่จะมากกว่าน้ำมันดีเซล ยกเว้นที่อัตราส่วนการอัด 16:1 และ 17:1 เมื่อเครื่องยนต์ได้รับภาระงาน 75% เมื่อพิจารณาอิทธิพลของภาระงานพบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามภาระงานที่เพิ่มขึ้น ส่วนอิทธิพลของอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ไม่มีแนวโน้มอย่างชัดเจนต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่เครื่องยนต์แสดงออกมา โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคที่แสดงออกมาเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 16:1 มีค่า 12.27%, 18.07% และ 21.32% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ จากการใช้น้ำมันดีเซล ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมจะได้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคเท่ากับ 12.36%, 18.48% และ 20.73% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าน้ำมันดีเซล 0.74% และ 2.26% ที่ภาระงาน 25% และ 50% ส่วนที่ภาระงาน 75% เชื้อเพลิงผสมมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 2.77% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 17:1 มีค่า 12.84%, 18.91% และ 21.59% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ จากการใช้น้ำมันดีเซล ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมจะได้ค่าอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะ

เบรกเท่ากับ 12.75%, 18.89% และ 21.45% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่า น้ำมันดีเซล 0.71% และ 0.12% ที่ภาระงาน 25% และ 75% ในขณะที่ที่ภาระงาน 50% เชื้อเพลิงผสม มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกมากกว่าน้ำมันดีเซล 0.63% และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 18:1 มีค่า 12.52%, 18.64% และ 21.36 % ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ จากการใช้ น้ำมันดีเซล ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมจะได้ประสิทธิภาพ เชิงความร้อนเบรกเท่ากับ 12.77%, 18.95% และ 21.70% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าน้ำมันดีเซล 2.00%, 1.71% และ 1.60% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ สาเหตุที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกจากเชื้อเพลิงผสมน้อยกว่าน้ำมันดีเซลที่ภาระงาน 75% เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 16:1 และ 17:1 อาจเป็นเพราะที่ภาระงานดังกล่าว เครื่องยนต์มีการฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเพื่อคงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ไว้ ตามค่าที่กำหนด การฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในปริมาณมากอาจทำให้เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ไม่ หมดเนื่องจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงผสมที่ความหนืดสูงกว่าส่งผลให้ไม่ได้รับพลังงานทั้งหมด จากเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไป ส่วนสาเหตุที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามภาระ งานที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นเพราะที่ภาระงานสูงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้จะสูงตามไปด้วยซึ่งเหมาะแก่การ เผาไหม้ของเชื้อเพลิง ส่งผลให้เชื้อเครื่องยนต์ได้รับพลังงานจากเชื้อเพลิงมากกว่าที่ภาระงานต่ำจึง ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกที่ได้รับมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราส่วนการอัด เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิอากาศในห้องเผาไหม้สูงขึ้น ส่งผลให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้นเชื้อเพลิงจึงปลดปล่อยพลังงานออกมามาก

6.3 มลพิษไอเสีย

สำหรับมลพิษที่เกิดขึ้นจากไอเสียของเครื่องยนต์ที่มีการใช้เชื้อเพลิงทั้งสามชนิดประกอบ ไปด้วยไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen Oxide, NO_x), สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon), คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) และเขม่าควัน (Smoke) โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.3.1 ไนโตรเจนออกไซด์

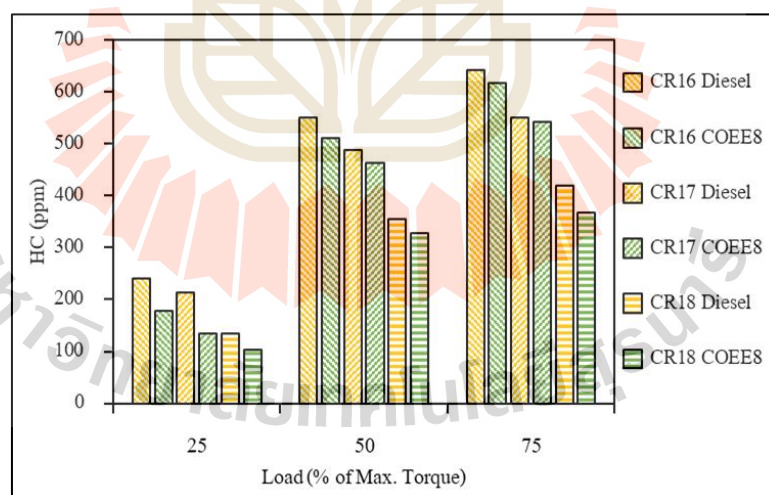


รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระงานกับปริมาณไนโตรเจนออกไซด์

จากรูปที่ 6.12 พบว่า ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์จากไอเสียของเครื่องยนต์จากการใช้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามภาระงานที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงพบว่าเชื้อเพลิงผสมจะปล่อยปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ออกมามากกว่าน้ำมันดีเซลทุกภาระงาน โดยที่ภาระงานต่ำปริมาณไนโตรเจนออกไซด์จากเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการอัดพบว่าเมื่ออัตราส่วนการอัดมีค่าเพิ่มขึ้นปริมาณไนโตรเจนออกไซด์มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น โดยปริมาณไนโตรเจนออกไซด์เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 16:1 ปล่อยออกมามีค่า 190, 270 และ 298 ppm ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ออกมา 206, 330 และ 485 ppm ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าน้ำมันดีเซล 8.64%, 22.61% และ 62.57% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 17:1 ปล่อยออกมามีค่า 223, 309 และ 421 ppm ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ออกมา 226, 495 และ 553 ppm ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าน้ำมันดีเซล 1.48%, 60.00% และ 31.37% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ และเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 18:1 ปล่อยออกมามีค่า 251, 321 และ 459 ppm ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ออกมา 249, 508 และ 676 ppm ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่า

น้ำมันดีเซล 0.80%, 58.35% และ 47.27% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ สาเหตุที่ไนโตรเจนออกไซด์จากการใช้เชื้อเพลิงผสมมีปริมาณมากกว่าน้ำมันดีเซลอาจเกิดจากน้ำมันไบโอดีเซลจากแหล่งที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงมีความหนืดสูงและอาจจะมีความสามารถในการอัดตัวต่ำ ส่งผลให้เครื่องยนต์มีการฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ก่อน (Advance Injection) ทำให้เชื้อเพลิงมีเวลาในการเผาไหม้ที่มากกว่าและปล่อยความร้อนออกมามากกว่า นอกจากนี้เชื้อเพลิงผสมยังมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบจึงช่วยให้เชื้อเพลิงมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้นและปล่อยความร้อนออกมามากกว่าน้ำมันดีเซล จากการเผาไหม้ที่ปล่อยความร้อนออกมามากกว่าส่งผลให้ห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงกว่าซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการก่อตัวของไนโตรเจนออกไซด์ สำหรับสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนออกไซด์จากการเพิ่มขึ้นของภาระงานเป็นเพราะเมื่อเครื่องยนต์รับภาระงานสูงจะส่งผลให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงตามไปด้วย เนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้มาก สภาวะที่อุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงดังกล่าวส่งผลให้ไนโตรเจนออกไซด์ก่อตัวได้ดีขึ้น เช่นเดียวกับแนวโน้มของปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการอัด เนื่องจากที่อัตราส่วนการอัดสูงส่งผลให้อากาศในห้องเผาไหม้สูงตามไปด้วย ซึ่งเอื้ออำนวยต่อการก่อตัวของไนโตรเจนออกไซด์

6.3.2 สารประกอบไฮโดรคาร์บอน



รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระงานกับปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

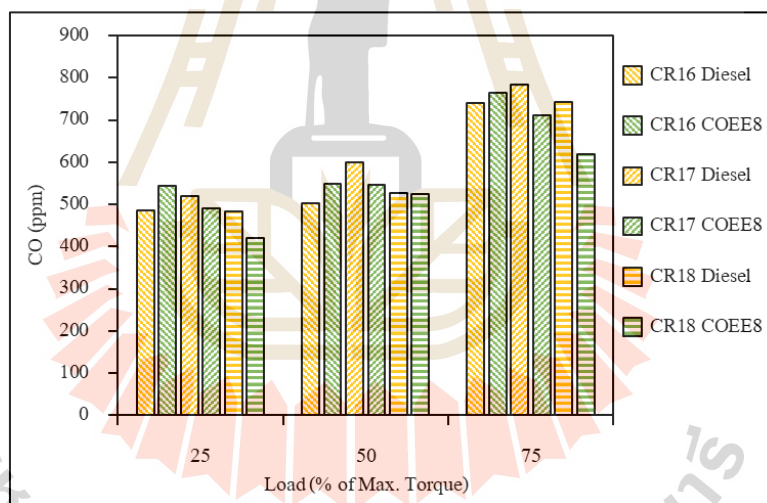
จากรูปที่ 6.13 พบว่า ปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากไอเสียของเครื่องยนต์จากการใช้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามภาระงานที่เพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงพบว่าน้ำมันดีเซลจะปล่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนออกมา มากกว่าเชื้อเพลิงผสมทุกภาระงาน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนการอัดพบว่า เครื่องยนต์มีแนวโน้มที่จะปล่อยไฮโดรคาร์บอนออกมาลดลงในทุกภาระงานจากเชื้อเพลิงทั้งสอง ชนิด โดยปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ปล่อยออกเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 16:1 มีค่า 240, 550 และ 641 ppm ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมปล่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนออกมา 179, 511 และ 617 ppm ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าน้ำมันดีเซล 25.56%, 7.15% และ 3.80% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ เมื่ออัตราส่วนการอัดเท่ากับ 17:1 มีค่า 214, 489 และ 511 ppm ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมปล่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนออกมา 134, 464 และ 542 ppm ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75%ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าน้ำมันดีเซล 37.14, 5.13 และ 1.48% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ และเมื่อมีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 18:1 มีค่า 135, 354 และ 420 ppm ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมปล่อย สารประกอบไฮโดรคาร์บอนออกมา 103, 277 และ 367 ppm ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าน้ำมันดีเซล 23.68, 7.63 และ 12.71% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงสาเหตุที่ไฮโดรคาร์บอนจากน้ำมันดีเซลมีค่ามากกว่า อาจเกิดจากเชื้อเพลิงผสมมีการผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งถึง 8% v/v ซึ่งในปริมาณ 8% ที่เท่ากันนี้ น้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งมีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนต่ำกว่าน้ำมันดีเซล หากพิจารณาจากตารางที่ 6.1 พบว่า น้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งมีปริมาณออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ อยู่ถึง 12.13% นั่นหมายความว่าเชื้อเพลิงผสมจะมีการรับบนและไฮโดรเจนน้อยกว่าน้ำมันดีเซล อยู่ 12.13% ส่งผลให้ไฮโดรคาร์บอนมีปริมาณลดลง ส่วนสาเหตุที่ทำให้ไฮโดรคาร์บอนขณะ ที่เครื่องยนต์รับภาระงานมากกว่ามีค่าสูง เมื่อเทียบกับภาระงานต่ำเกิดจากเครื่องยนต์มีการฉีด เชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเพื่อให้เครื่องยนต์คงความเร็วรอบไว้ที่ 1,500 รอบต่อนาทีตามที่ กำหนดไว้ ซึ่งการฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้นอาจจะส่งผลให้เชื้อเพลิงมีเวลาไม่เพียงพอ ในการเผาไหม้จนหมดจึงทำให้เหลือไฮโดรคาร์บอนตกค้างในไอเสียจากเครื่องยนต์ ส่วนสาเหตุ ที่ไฮโดรคาร์บอนมีปริมาณลดลง เมื่ออัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์มีค่าเพิ่มขึ้นอาจเกิดจาก ที่อัตราส่วนการอัดที่สูงอากาศในห้องเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูงตามไปด้วยซึ่งส่งผลให้เชื้อเพลิง มีการเผาไหม้ที่หมดจดขึ้น ปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจึงมีปริมาณลดลง

ตารางที่ 6.1 องค์ประกอบทางเคมีของเอสเทอร์ของกรดไขมันจากน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่ง

FAEE Name	Chemical Formula	MW of Carbon (g/mol)	MW of Hydrogen (g/mol)	MW of Oxygen (g/mol)
Ethyl Palmitate	$C_{18}H_{36}O_2$	216.19	36.28	32.00
Ethyl Stearate	$C_{20}H_{40}O_2$	240.21	40.31	32.00
Ethyl Ricinoleate	$C_{20}H_{38}O_3$	240.21	38.30	48.00
SUM. (g/mol)		696.62	114.89	111.99
Total (g/mol)		923.51		
Percentage (%)		75.43	12.44	12.13

6.3.3 คาร์บอนมอนอกไซด์

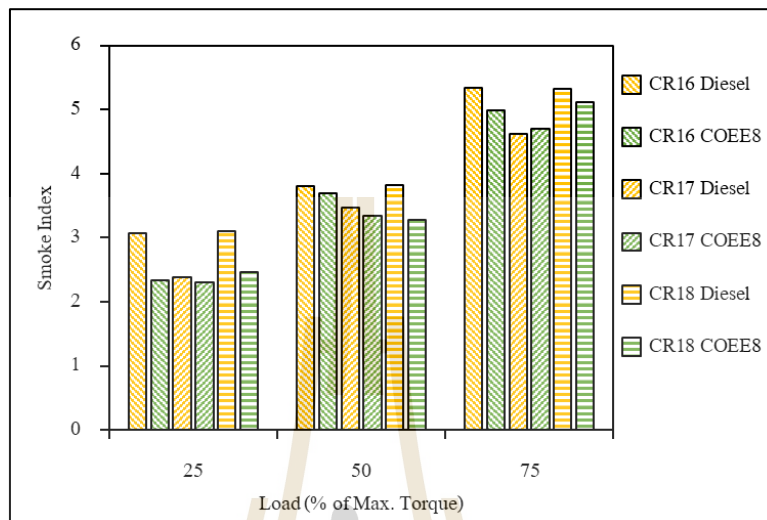


รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระงานกับปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์

จากรูปที่ 6.14 พบว่า ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จากไอเสียของเครื่องยนต์ มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเครื่องยนต์รับภาระงานสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงพบว่า น้ำมันดีเซลจะปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาน้อยกว่าเชื้อเพลิงผสมทุกภาระงาน เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 16:1 ส่วนที่อัตราส่วนการอัดเท่ากับ 17:1 และ 18:1 เชื้อเพลิงผสมมีแนวโน้มที่จะปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลทุกภาระงาน

โดยปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปล่อยออกมาเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 16:1 มีค่า 486, 503 และ 739 ppm ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 90% ตามลำดับ ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมา 543, 550 และ 765 ppm ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าน้ำมันดีเซล 11.85%, 9.35% และ 3.51% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ เมื่ออัตราส่วนการอัดเท่ากับ 17:1 คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปล่อยออกมามีค่า 520, 559 และ 784 ppm ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมา 490, 546 และ 711 ppm ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าน้ำมันดีเซล 5.71%, 8.95% และ 9.37% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ และเมื่ออัตราส่วนการอัดเท่ากับ 16:1 คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปล่อยออกมามีค่า 484, 527 และ 742 ppm ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมา 421, 524 และ 619 ppm ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าน้ำมันดีเซล 13.08%, 0.47% และ 16.52% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ สาเหตุที่เชื้อเพลิงผสมปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาน้อยกว่าน้ำมันดีเซลเป็นเพราะเชื้อเพลิงผสมมีปริมาณออกซิเจนมากกว่าน้ำมันดีเซลซึ่งช่วยลดโอกาสเกิดการขาดออกซิเจนในการเผาไหม้ ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น เมื่อเครื่องยนต์รับภาระงานมากขึ้นเครื่องยนต์จำเป็นต้องฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้มากขึ้นเพื่อคงความเร็วรอบไว้ตามที่กำหนด จึงเป็นการเพิ่มสารตั้งต้นในการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ และเมื่ออัตราส่วนการอัดเพิ่มขึ้นเชื้อเพลิงผสมสามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงขึ้น อีกทั้งปริมาณออกซิเจนที่มากกว่าซึ่งช่วยลดการเผาไหม้ที่อากาศขาดทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์ปลดปล่อยออกมาน้อยกว่า ในขณะที่น้ำมันดีเซลจะปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมามากที่อัตราส่วนการอัด 16:1 จากนั้นจะเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนการอัด 17:1 และลดลงอีกครั้งที่อัตราส่วนการอัด 18:1 สาเหตุเป็นเพราะที่อัตราส่วนการอัด 16:1 อุณหภูมิอากาศในห้องเผาไหม้ต่ำซึ่งไม่เหมาะแก่การเผาไหม้จึงทำให้เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ได้น้อยกว่าส่งผลให้เกิดมลพิษไฮโดรคาร์บอนแทนที่จะเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อัตราส่วนการอัด 17:1 เชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ได้มากขึ้นจึงทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์เกิดได้มากกว่า และที่อัตราส่วนการอัด 18:1 อุณหภูมิอากาศในห้องเผาไหม้สูงขึ้น ซึ่งช่วยให้การเผาไหม้เกิดได้อย่างสมบูรณ์มากกว่า คาร์บอนมอนอกไซด์จึงลดลงอีกครั้ง

6.3.4 เขม่าควัน



รูปที่ 6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระงานกับปริมาณเขม่าควัน

จากรูปที่ 6.15 พบว่า ปริมาณเขม่าควันจากเครื่องยนต์มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามภาระงานที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบชนิดของเชื้อเพลิงพบว่าเชื้อเพลิงผสมมีแนวโน้มที่จะปล่อยเขม่าควันออกมาน้อยกว่าน้ำมันดีเซล ยกเว้นที่ภาระงาน 75% เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 17:1 และเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการอัดพบว่าไม่มีแนวโน้มของการปลดปล่อยเขม่าควันที่ชัดเจน เนื่องจากที่อัตราส่วนการอัด 16:1 เครื่องยนต์มีการปล่อยเขม่าควันมากกว่าอัตราส่วนการอัด 17:1 และปริมาณเขม่าควันที่ปล่อยออกมาจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1 โดยปริมาณเขม่าควันที่ปล่อยออกมาเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 16:1 มีค่า 3.1, 3.8 และ 5.3 ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมปล่อยเขม่าควันออกมา 2.3, 3.7 และ 5.0 ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าน้ำมันดีเซล 24.07%, 2.99% และ 6.70% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ เมื่ออัตราส่วนการอัดเท่ากับ 17:1 เขม่าควันที่ปล่อยออกมามีค่า 2.4, 3.5 และ 4.6 ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมปล่อยเขม่าควันออกมา 2.3, 3.3 และ 4.7 ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าน้ำมันดีเซล 3.39%, 3.72% และ 1.75% ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ และเมื่ออัตราส่วนการอัดเท่ากับ 18:1 เขม่าควันที่ปล่อยออกมามีค่า 3.1, 3.8 และ 5.3 ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมปล่อยเขม่าควันออกมา 2.5, 3.3 และ 5.1 ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าน้ำมันดีเซล 20.63%, 14.19% และ 3.70% ที่ภาระงาน

25%, 50% และ 75% ตามลำดับ สาเหตุที่ปริมาณเขม่าควันจากการใช้เชื้อเพลิงผสมน้อยกว่า น้ำมันดีเซลอาจเกิดเชื้อเพลิงผสมมีปริมาณคาร์บอนในเชื้อเพลิงน้อยกว่าน้ำมันดีเซลซึ่งคาร์บอนเป็นสาเหตุของการก่อตัวของเขม่าควัน นอกจากนี้ออกซิเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงผสมอาจช่วยให้เชื้อเพลิงเผาไหม้ได้สมบูรณ์ขึ้นปริมาณเขม่าควันที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล เมื่อเครื่องยนต์ได้รับการบำรุงรักษาดีขึ้นเครื่องยนต์จำเป็นต้องฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น เพื่อคงความเร็วรอบในการทำงานไว้ที่ค่าที่กำหนด ซึ่งส่งผลให้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้มีปริมาณมากขึ้นและอาจมีเชื้อเพลิงบางส่วนที่ก่อตัวเป็นเขม่าควัน



บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

สำหรับบทนี้จะเป็นการสรุปข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการวิจัยทั้ง 3 ส่วน ได้แก่ การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ การทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง และการทดสอบเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์ โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

7.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) พบว่า น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำที่ผลิตได้ประกอบไปด้วยเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ทราบชนิด 3 ชนิด คือ (1) เอทิลเอสเทอร์ของกรดปาล์มิติก (Palmitic acid ethyl ester, C16:0) (2) เอทิลเอสเทอร์ของกรดสเตียริก (Stearic Acid Ethyl Ester, C18:0) และ (3) เอทิลเอสเทอร์ของกรดริซิโนเลอิก (Ricinoleic Acid Ethyl Ester, C18:1OH) โดยมีสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตซึ่งเป็นสภาวะที่ให้ปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันรวมมากที่สุดคืออัตราส่วนมวลโมเลกุลน้ำมันกะหล่ำต่อเอทานอล 1:12, ความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยา KOH 1.5% ของมวลน้ำมันกะหล่ำ, อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 150 นาที โดยมีปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ทราบชนิดรวม 97.79% แบ่งออกเป็นเอทิลเอสเทอร์ของกรดปาล์มิติก 0.745%, เอทิลเอสเทอร์ของกรดสเตียริก 0.820% และเอทิลเอสเทอร์ของกรดริซิโนเลอิก 98.447%

สำหรับอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของเอสเทอร์ของกรดไขมันจากการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันกะหล่ำพบว่าปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนมวลโมเลกุลน้ำมันกะหล่ำต่อเอทานอลเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันมีปริมาณเอทานอลมากเกินไปที่ความต้องการเอทานอลเพียง 3 โมลต่อน้ำมันกะหล่ำ 1 โมล ส่งผลให้ลดโอกาสเกิดการขาดเอทานอลของปฏิกิริยาลงและทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนอิทธิพลของความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยา KOH พบว่าปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยา KOH ที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากสภาวะการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำที่มีความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยา KOH สูงจะช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับที่จะทำให้ปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันรวมลดลง และยังทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์มากกว่า ในขณะที่อิทธิพลของเวลาและอุณหภูมิใน

การทำปฏิกิริยาไม่มีแนวโน้มที่จัดต่อปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ได้ โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 50 °C จะได้เอสเทอร์ของกรดไขมันรวมมากที่สุด ซึ่งอาจเกิดจากที่อุณหภูมิดังกล่าวโมเลกุลของสารตั้งต้นมีพลังงานเพิ่มขึ้นจึงเกิดการชนและทำปฏิกิริยาได้ดีที่สุด และอุณหภูมิดังกล่าวอาจจะไม่สูงเกินไปซึ่งทำให้เอทานอลระเหยตัวออกจากระบบได้น้อยลง และที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที จะได้ปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมันมากที่สุด สาเหตุอาจเป็นเพราะระยะเวลาดังกล่าวอาจจะเพียงพอให้ปฏิกิริยาเกิดได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งไม่ยาวนานเกินไปจนเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ

7.2 การทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง

7.2.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิง

คุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิงที่ได้ทำการทดสอบประกอบด้วยความหนืด จลนศาสตร์, จุดวาบไฟ, ความถ่วงจำเพาะ, อุณหภูมิการกลั่น, ค่าความร้อนเชื้อเพลิง, ดัชนีซีเทน และความสามารถในการหล่อลื่น โดยมีรายละเอียดดังนี้

ความหนืดจลนศาสตร์ถูกวัดที่อุณหภูมิ 40 °C ของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำง มีค่าสูงเกินมาตรฐานจากรมธุรกิจพลังงานค่อนข้างมาก โดยขอบเขตจากมาตรฐานระบุไว้ที่ 4.5 cSt ในขณะที่น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำงมีค่าความหนืดเท่ากับ 20.189 cSt ซึ่งไม่เหมาะกับการทดสอบกับเครื่องยนต์จึงทำการผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำงกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนน้ำมันไบโอดีเซล 8% โดยปริมาตร จึงได้เชื้อเพลิงผสม COEE8 ซึ่งเป็นตัวแทนของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำง โดยเชื้อเพลิงผสม COEE8 มีค่าความหนืดจลนศาสตร์มากกว่าน้ำมันดีเซลอยู่เล็กน้อย โดยความหนืดจลนศาสตร์ของน้ำมันดีเซลมีค่า 4.185 cSt ส่วนเชื้อเพลิงผสมมีค่าความหนืด 4.407 cSt

จุดวาบไฟของเชื้อเพลิงผสมมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล โดยมีค่า 77 °C ในขณะที่น้ำมันดีเซลมีจุดวาบไฟเท่ากับ 68 °C สาเหตุเกิดจากน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำงที่ถูกผสมอยู่ในเชื้อเพลิงผสมมีจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล โดยมีค่า 88 °C ส่งผลให้ค่าจุดวาบไฟของเชื้อเพลิงผสมอยู่ระหว่างค่าของเชื้อเพลิงทั้งสองชนิด

ความถ่วงจำเพาะพบว่าเชื้อเพลิงผสมมีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำมันดีเซล โดยมีค่าเท่ากับ 0.850 ในขณะที่น้ำมันดีเซลมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.830 สาเหตุเกิดจากความถ่วงจำเพาะของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำงที่ถูกผสมอยู่ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.915 ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของเชื้อเพลิงผสมมีค่าอยู่ระหว่างเชื้อเพลิงหลักทั้งสองชนิด

อุณหภูมิการกลั่นถูกวัดที่ 50% ของปริมาตรเริ่มต้น ซึ่งพบว่าเชื้อเพลิงผสมมีค่าอุณหภูมิการกลั่นสูงกว่าน้ำมันดีเซล โดยมีค่า 326 °C ในขณะที่น้ำมันดีเซลมีค่า 298 °C สาเหตุ

อาจเกิดจากองค์ประกอบหลักของน้ำมันดีเซลที่มีสารประกอบแอลเคนและสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเป็นหลักซึ่งมีจุดเดือดที่ต่ำกว่าสารประกอบในกลุ่มเอสเทอร์ของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันไบโอดีเซล

ดัชนีซีเทนของเชื้อเพลิงผสมมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล โดยมีค่าเท่ากับ 55.0 ส่วนน้ำมันดีเซลมีค่า 60.2 สาเหตุเกิดจากความแตกต่างของคุณสมบัติในส่วนความถ่วงจำเพาะและอุณหภูมิการกลั่นของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่ใช้ในการคำนวณค่าดัชนีซีเทน นอกจากนี้สมการที่ใช้ในการคำนวณถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับน้ำมันดีเซลจึงเป็นไปได้ที่สมการดังกล่าวอาจไม่เหมาะสมกับการนำมาคำนวณเชื้อเพลิงผสม ส่วนน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งมีค่าดัชนีซีเทนเท่ากับ 37.9 แต่เมื่อใช้สมการที่ถูกออกแบบมาสำหรับเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบหลักเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันจะทำให้ค่าดัชนีซีเทนของน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งมีค่า 56.4

ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงผสมมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซลเล็กน้อย โดยค่าความร้อนเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงผสมมีค่า 45.17 MJ/kg ในขณะที่น้ำมันดีเซลมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 45.39 MJ/kg สาเหตุเกิดจากน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งที่ถูกผสมอยู่มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล โดยมีค่า 37.65 MJ/kg ส่งผลให้เชื้อเพลิงที่ผสมจากเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดมีค่าความร้อนอยู่ระหว่างเชื้อเพลิงตั้งต้นทั้งสองชนิด

ความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงผสมดีกว่าน้ำมันดีเซลอย่างเห็นได้ชัด โดยขนาดของรอยขูดขีดที่เกิดจากเชื้อเพลิงผสมมีขนาด 102 μm ในขณะที่น้ำมันดีเซลจะให้ขนาดของรอยขูดขีด 233 μm ส่วนน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งมีขนาดรอยขูดขีด 159 μm สาเหตุที่เชื้อเพลิงผสมมีขนาดรอยขูดขีดที่เล็กกว่าน้ำมันดีเซลเป็นเพราะองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ประกอบด้วยเอสเทอร์ของกรดไขมันเป็นหลัก อีกทั้งน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งที่ถูกผสมอยู่ยังมีออกซิเจนเพิ่มเติมจากกรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งมีส่วนช่วยในการหล่อลื่นเป็นอย่างมาก โดยจะกล่าวอย่างละเอียดในส่วนต่อไป

7.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบที่หลงเหลือบนชิ้นงานทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นด้วยเทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบ Attenuated Total Reflectance (ATR)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบที่หลงเหลือบนชิ้นงานทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นด้วยเทคนิค ATR-FTIR พบว่าหมู่พันธะที่เกิดขึ้นขึ้นงานจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมันดีเซลบริเวณการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Zone) ได้แก่พันธะ O-H แบบยึดจากหมู่เอสเทอร์ในช่วงเลขคลื่น 3,500-3,200 cm^{-1} เนื่องจากน้ำมันดีเซลมีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลจากปาล์มที่มีเอสเทอร์ของกรดไขมันเป็นองค์ประกอบหลัก,

พันธะ =C-H แบบยืดจากหมู่แอลคีนที่ช่วงเลขคลื่น 3,100-3,000 cm^{-1} เนื่องจากองค์ประกอบหลักของน้ำมันดีเซลที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก, พันธะ C-H แบบยืดที่เลขคลื่น 2,929 และ 2,852 cm^{-1} , แบบงอที่เลขคลื่น 1,460 และ 1,408 cm^{-1} และพันธะ =C-H แบบงอที่ช่วงเลขคลื่น 1,000-650 cm^{-1} การตรวจพบพันธะดังกล่าวที่หลายเลขคลื่นบ่งบอกถึงการตรวจพบพันธะ C-H ที่มีความยาวของโมเลกุลแตกต่างกัน เนื่องจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันดีเซลมีหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีความยาวของสายโซ่ที่แตกต่างกัน, พันธะ C=C แบบยืดที่เลขคลื่น 1,682 cm^{-1} บ่งบอกถึงการตรวจพบหมู่แอลคีนและเมื่อพิจารณาลักษณะของยอดกราฟช่วงเลขคลื่น 1,000-650 cm^{-1} พบว่า หมู่แอลคีนที่ตรวจพบมีรูปแบบแบบ Disubstituted (cis) และพันธะ C-O แบบยืดที่เลขคลื่น 1,240 cm^{-1} และ 1,103 cm^{-1} เนื่องจากหมู่จากเอสเทอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันไบโอดีเซลจากปาล์มที่ผสมอยู่ในน้ำมันดีเซล ส่วนน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำพบว่าที่เลขคลื่น 3,500-3,200 cm^{-1} ตรวจพบพันธะ O-H แบบยืด ซึ่งเกิดจากหมู่เอสเทอร์, พันธะ =C-H แบบยืดที่ช่วงเลขคลื่น 3,100-3,000 cm^{-1} , แบบงอที่ช่วงเลขคลื่น 1,000-650 cm^{-1} และพันธะ C=C ที่เลขคลื่น 1,575 cm^{-1} บ่งบอกถึงการตรวจพบหมู่อะโรมาติกที่หมู่แทนที่ 1 หมู่, พันธะ C-H แบบยืดที่เลขคลื่น 2,918 และ 2,850 cm^{-1} และแบบงอที่เลขคลื่น 1,473 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากพันธะระหว่างคาร์บอนและไฮโดรคาร์บอนในโมเลกุลของเอสเทอร์ของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ ส่วนการตรวจพบพันธะดังกล่าวหลายเลขคลื่นเป็นเพราะความยาวของสายโซ่โมเลกุลที่แตกต่างกันของเอสเทอร์ของกรดไขมันแต่ละชนิด และพันธะ C-O แบบยืดที่เลขคลื่น 1,101 cm^{-1} บ่งบอกถึงการตรวจพบหมู่เอสเทอร์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ ในขณะที่เชื้อเพลิงผสมตรวจพบพันธะ O-H แบบยืดที่ช่วงเลขคลื่น 3,500-3,200 cm^{-1} บ่งบอกถึงการตรวจพบหมู่เอสเทอร์, พันธะ =C-H แบบยืดที่ช่วงเลขคลื่น 3,100-3,000 cm^{-1} และแบบงอที่ช่วงเลขคลื่น 1,000-650 cm^{-1} และพันธะ C=C แบบยืดที่เลขคลื่น 1,635 cm^{-1} บ่งบอกถึงการตรวจพบหมู่แอลคีนแบบ Disubstituted (cis), พันธะ C-H แบบยืดที่เลขคลื่น 2,925 และ 2,848 cm^{-1} และแบบงอที่เลขคลื่น 1,456 และ 1,414 cm^{-1} บ่งบอกถึงการตรวจพบหมู่แอลเคน ส่วนการตรวจพบพันธะดังกล่าวหลายเลขคลื่นเป็นเพราะองค์ประกอบของเชื้อเพลิงผสมที่ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวและเอสเทอร์ของกรดไขมันหลายชนิดซึ่งมีความยาวของสายโซ่โมเลกุล แตกต่างกัน และพันธะ C-O แบบยืดที่เลขคลื่น 1,103 cm^{-1} บ่งบอกถึงการตรวจพบหมู่เอสเทอร์ ซึ่งอาจเกิดจากเอสเทอร์ของกรดไขมันจากน้ำมันไบโอดีเซลจากปาล์มหรือน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำ

ส่วนบริเวณรอยขีดขีดพบว่าชิ้นงานทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมันดีเซลตรวจพบพันธะ O-H แบบยึดที่ช่วงเลขคลื่น $3,500-3,200\text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบหมู่เอสเทอร์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันไบโอดีเซลจากปาล์มที่ถูกผสมอยู่ในน้ำมันดีเซล, พันธะ $=\text{C}-\text{H}$ แบบยึดที่ช่วงเลขคลื่น $3,100-3,000\text{ cm}^{-1}$ และแบบงอที่ช่วงเลขคลื่น $1,000-650\text{ cm}^{-1}$ และพันธะ $\text{C}=\text{C}$ แบบยึดที่เลขคลื่น $1,685\text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบหมู่แอลคีนที่มีรูปแบบ Disubstituted (cis) ซึ่งอาจจะเกิดจากองค์ประกอบของน้ำมันดีเซล, พันธะ C-H แบบยึดที่เลขคลื่น $2,927\text{ cm}^{-1}$ และ $2,858\text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบหมู่แอลเคนซึ่งเกิดจากองค์ประกอบของน้ำมันดีเซลและน้ำมันไบโอดีเซลจากปาล์มที่ถูกผสมอยู่ ส่วนสาเหตุที่ตรวจพบพันธะดังกล่าวหลายเลขคลื่นเป็นเพราะความแตกต่างของความยาวของสายโซ่โมเลกุลขององค์ประกอบแต่ละชนิด โดยเป็นไปได้ทั้งสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว, อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และเอสเทอร์ของกรดไขมัน และพันธะ C-O ที่เลขคลื่น $1,242\text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบหมู่เอสเทอร์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันไบโอดีเซลจากปาล์มที่ถูกผสมอยู่ ส่วนชิ้นงานจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำงตรวจพบพันธะ O-H แบบยึดที่ช่วงเลขคลื่น $3,500-3,200\text{ cm}^{-1}$ และพันธะ C-O แบบยึดที่เลขคลื่น $1,255, 1,172$ และ $1,099\text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบหมู่เอสเทอร์ซึ่งเกิดจากเอสเทอร์ของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำง, พันธะ $=\text{C}-\text{H}$ แบบยึดที่ช่วงเลขคลื่น $3,100-3,000\text{ cm}^{-1}$ และแบบงอที่ช่วงเลขคลื่น $1,000-650\text{ cm}^{-1}$ และพันธะ $\text{C}=\text{C}$ ที่เลขคลื่น $1,635\text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบหมู่แอลคีนที่มีรูปแบบ Disubstituted (cis), พันธะ C-H แบบยึดที่เลขคลื่น $2,916$ และ $2,850\text{ cm}^{-1}$ และแบบงอ $1,473\text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบหมู่แอลคีนซึ่งเกิดโมเลกุลของเอสเทอร์ของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำง การตรวจพบพันธะดังกล่าวหลายเลขคลื่นเป็นเพราะความแตกต่างของความยาวของสายโซ่โมเลกุลของเอสเทอร์ของกรดไขมันแต่ละชนิด ในขณะที่ชิ้นงานจากการทดสอบของเชื้อเพลิงผสมตรวจพบพันธะ O-H แบบยึดที่ช่วงเลขคลื่น $3,500-3,200\text{ cm}^{-1}$ และพันธะ C-O แบบยึดที่เลขคลื่น $1,169$ และ $1,036\text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบหมู่เอสเทอร์ซึ่งเกิดจากเอสเทอร์ของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันไบโอดีเซลทั้งจากปาล์มและกะหล่ำง, พันธะ $=\text{C}-\text{H}$ แบบยึดที่ช่วงเลขคลื่น $3,100-3,000\text{ cm}^{-1}$ และแบบงอที่ช่วงเลขคลื่น $1,000-650\text{ cm}^{-1}$ และพันธะ $\text{C}=\text{C}$ แบบยึดที่เลขคลื่น $1,699\text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบแอลคีนที่มีรูปแบบแบบ Disubstituted (cis), พันธะ C-H แบบยึดที่เลขคลื่น $2,922$ และ $2,846\text{ cm}^{-1}$ และแบบงอที่เลขคลื่น $1,452\text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงการตรวจพบหมู่แอลเคนที่มีความยาวสายโซ่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดได้จากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทั้งอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวในน้ำมันดีเซลและเอสเทอร์ของกรดไขมันในน้ำมันไบโอดีเซลจากปาล์มและกะหล่ำง

จากพันธะและหมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบจากเชื้อเพลิงทั้งสามชนิดพบว่าหมู่ฟังก์ชันที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการหล่อลื่นมากที่สุดคือพันธะ O-H ของหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของหมู่เอสเทอร์ รองลงมาเป็นหมู่ C=O ซึ่งหมู่ฟังก์ชันทั้งสองสามารถตรวจพบได้จากชิ้นงานจากเชื้อเพลิงทั้งสามชนิด อย่างไรก็ตามปริมาณของหมู่ O-H ที่ตรวจพบจากเชื้อเพลิงผสมมีค่ามากกว่าเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดที่เหลือในบริเวณที่เกิดการออกซิเดชันและใกล้เคียงกับน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำสำหรับบริเวณรอยขีดขูด ส่วนพันธะ C=O ของเชื้อเพลิงผสมที่บริเวณที่เกิดการออกซิเดชันจะมีปริมาณใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลแต่จะแตกต่างกันที่เลขคลื่นที่เกิดยอดกราฟ ในขณะที่น้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำมีปริมาณพันธะดังกล่าวต่ำที่สุด และบริเวณรอยขีดขูดพบว่า น้ำมันดีเซลมีปริมาณพันธะ C=O มากที่สุด รองลงมาเป็นน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำและเชื้อเพลิงผสม ตามลำดับ อย่างไรก็ตามความสามารถในการหล่อลื่นของพันธะ O-H ถือว่าดีกว่าพันธะ C=O ก่อนข้างมากจึงทำให้เชื้อเพลิงผสมที่ตรวจพบปริมาณของพันธะ O-H มากที่สุดจึงมีขนาดของรอยขีดขูดของชิ้นงานจากการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นเล็กที่สุด รองลงมาเป็นน้ำมันไบโอดีเซลจากกะหล่ำและน้ำมันดีเซล ตามลำดับ

7.3 การทดสอบเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์

7.3.1 คุณลักษณะการเผาไหม้

คุณลักษณะในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จากการใช้เชื้อเพลิงทั้งสามชนิดพบว่าเชื้อเพลิงผสมจะมีจุดเริ่มต้นในการเผาไหม้เกิดขึ้นก่อนน้ำมันดีเซลเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 17:1 และ 18:1 ยกเว้นที่อัตราส่วนการอัด 17:1 เมื่อเครื่องยนต์ได้รับภาระงาน 25% แต่จุดเริ่มต้นในการเผาไหม้จะเกิดหลังน้ำมันดีเซลเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 16:1 อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดและความดันภายในกระบอกสูบสูงสุดจากการใช้เชื้อเพลิงผสมมีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซลเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 17:1 และ 18:1 ยกเว้นที่อัตราส่วนการอัด 17:1 เมื่อเครื่องยนต์ได้รับภาระงาน 25% แต่เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 16:1 อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดและความดันภายในกระบอกสูบสูงสุดจากการใช้เชื้อเพลิงผสมจะมีค่าน้อยกว่าน้ำมันดีเซล สาเหตุเป็นเพราะเชื้อเพลิงผสมมีความสามารถในการอัดตัวที่ต่ำจึงถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ก่อนน้ำมันดีเซล อีกทั้งยังมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบซึ่งช่วยให้เชื้อเพลิงกับอากาศสามารถคลุกเคล้ากันได้เร็วขึ้นจึงเกิดการเผาไหม้ก่อนน้ำมันดีเซลและมีความรุนแรงในการจุดระเบิดที่สูงกว่า แต่ที่อัตราส่วนการอัด 16:1 อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ยังไม่สูงพอที่จะทำให้เชื้อเพลิงผสมถูกเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อเปรียบที่อัตราส่วนการอัดพบว่าจุดเริ่มของการจุดระเบิดจะเกิดเร็วขึ้นเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดเพิ่มขึ้น อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุด

และความดันภายในกระบอกสูบสูงสุดมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการอัดที่สูงขึ้น สาเหตุเป็นเพราะที่อัตราส่วนการอัดสูงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้จะสูงกว่า ซึ่งเหมาะสมกับการเผาไหม้มากกว่า จึงทำให้การเผาไหม้มีความรุนแรงมากกว่า ส่วนภาระงานที่เครื่องยนต์ได้รับไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนต่อจุดเริ่มต้นของการเผาไหม้, อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดและความดันภายในกระบอกสูบสูงสุด สาเหตุอาจเป็นเพราะความแตกต่างของสภาวะที่เหมาะสมในการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดที่แตกต่างกัน

7.3.2 สมรรถนะของเครื่องยนต์

สมรรถนะของเครื่องยนต์จากการทดสอบด้วยเชื้อเพลิงผสมและน้ำมันดีเซลพบว่า อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคจากการใช้เชื้อเพลิงผสมมีแนวโน้มที่จะมากกว่าน้ำมันดีเซลในทุกภาระงานและทุกอัตราส่วนการอัดเนื่องจากเชื้อเพลิงผสมมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำกว่า น้ำมันดีเซลส่งผลให้เครื่องยนต์จำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงในปริมาณที่มากกว่าในการคงความเร็วรอบไว้ที่ 1,500 รอบต่อนาที ตามที่กำหนด เมื่อภาระงานของเครื่องยนต์มีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคมีแนวโน้มที่จะลดลง เนื่องจากอุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงขึ้นส่งผลให้เชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ได้สมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งทำให้เครื่องยนต์ใช้เชื้อเพลิงน้อยลง เพื่อให้ได้กำลังงานที่เท่ากันเมื่อเปรียบเทียบกับภาระงานสูงกับภาระงานต่ำ เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการอัด ซึ่งพบว่าอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคมีแนวโน้มที่จะลดลงเนื่องจากอุณหภูมิในห้องเผาไหม้มีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนการอัดเพิ่มขึ้นส่งผลให้เชื้อเพลิงเผาไหม้สมบูรณ์และปลดปล่อยพลังงานออกมามากยิ่งขึ้น

ในส่วนของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคพบว่าเชื้อเพลิงผสมมีแนวโน้มที่จะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคมากกว่าน้ำมันดีเซล ยกเว้นที่ภาระงาน 75% เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 16:1 และ 17:1 เนื่องจากเชื้อเพลิงผสมมีปริมาณออกซิเจนในองค์ประกอบมากกว่าซึ่งช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้นส่งผลให้ได้กำลังงานจากเชื้อเพลิงออกมามากกว่าในปริมาณเชื้อเพลิงที่เท่ากัน เมื่อเครื่องยนต์มีภาระงานเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่สูงขึ้นของห้องเผาไหม้ส่งผลให้เชื้อเพลิงเผาไหม้ได้สมบูรณ์มากกว่า เมื่ออัตราส่วนการอัดมีค่าสูงขึ้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคจากการใช้เชื้อเพลิงผสมมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่น้ำมันดีเซลจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำที่สุดที่อัตราส่วนการอัด 16:1 และสูงสุดที่อัตราส่วนการอัด 17:1 แต่เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัด 18:1 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะลดลงอีกครั้ง เนื่องจากที่อัตราส่วนการอัดที่สูงขึ้นอุณหภูมิในห้องเผาไหม้จะสูงตามไปด้วยซึ่งเหมาะแก่การเผาไหม้ที่มากกว่า

7.3.3 มลพิษจากเครื่องยนต์

ไนโตรเจนออกไซด์จากการใช้เชื้อเพลิงผสมมีแวนโน้มที่จะมากกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งที่ผสมอยู่ในเชื้อเพลิงผสมมีความหนืดสูง และเป็นไปได้ที่จะมีความสามารถในการอัดตัวที่ต่ำ ส่งผลให้เชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ก่อน (Advance Injection) ซึ่งทำให้เชื้อเพลิงมีเวลาในการเผาไหม้ที่นานกว่าจึงปลดปล่อยความร้อนออกมามากกว่าทำให้ไนโตรเจนออกไซด์จึงก่อตัวได้ดีกว่า เมื่อเครื่องยนต์มีภาระงานเพิ่มมากขึ้น ปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์มีแวนโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเครื่องยนต์จำเป็นต้องฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเพื่อคงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ไว้ตามที่กำหนด การเพิ่มขึ้นของปริมาณเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ทำให้การเผาไหม้รุนแรงขึ้นซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงขึ้น ไนโตรเจนออกไซด์จึงก่อตัวได้ดีกว่าที่สภาวะดังกล่าว ส่วนการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการอัดทำให้ปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์มีแวนโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิอากาศในห้องเผาไหม้ที่สูงส่งผลให้เชื้อเพลิงเผาไหม้ได้ดีกว่าและปลดปล่อยความร้อนออกมามากกว่า การปลดปล่อยความร้อนดังกล่าวส่งผลให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงขึ้นการก่อตัวของไนโตรเจนออกไซด์จึงสูงขึ้นตามไปด้วย

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากการใช้เชื้อเพลิงผสมมีแวนโน้มที่จะลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล สาเหตุเป็นเพราะน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งในเชื้อเพลิงผสมมีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนน้อยกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งส่งผลให้สารตั้งต้นในการก่อตัวของไฮโดรคาร์บอนลดลง นอกจากนี้เชื้อเพลิงผสมมีปริมาณออกซิเจนมากกว่าน้ำมันดีเซลจึงทำให้การเผาไหม้เกิดได้อย่างทั่วถึงมากกว่า มลพิษในส่วนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งเกิดจากเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้จึงน้อยกว่า เมื่อภาระงานของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นปริมาณไฮโดรคาร์บอนมีแวนโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้มากขึ้นเพิ่มคงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ไว้ตามที่กำหนด ปริมาณเชื้อเพลิงที่มากขึ้นส่งผลให้อากาศที่เชื้อเพลิงจะไม่ถูกเผาไหม้มากขึ้นไปด้วย และเมื่อเครื่องยนต์มีอัตราส่วนการอัดเพิ่มขึ้นปริมาณไฮโดรคาร์บอนมีแวนโน้มที่จะลดลง เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศในห้องเผาไหม้สูงขึ้นจึงทำให้การเผาไหม้เกิดได้อย่างทั่วถึงมากกว่า

คาร์บอนมอนอกไซด์จากการใช้เชื้อเพลิงผสมที่อัตราส่วนการอัด 16:1 มีปริมาณมากกว่าน้ำมันดีเซล ในขณะที่อัตราส่วนการอัด 17:1 และ 18:1 มีปริมาณน้อยกว่าน้ำมันดีเซล สาเหตุเกิดจากเชื้อเพลิงผสมมีปริมาณออกซิเจนมากน้ำมันดีเซลซึ่งช่วยลดโอกาสในการเกิดการเผาไหม้ที่ออกซิเจนขาดที่จะช่วยให้การก่อตัวของคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มมากขึ้น เมื่อเครื่องยนต์ได้รับการงานสูงขึ้นปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มีแวนโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเครื่องยนต์ต้องฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นจึงทำให้มีสารตั้งต้นในการก่อตัวของคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราส่วนการอัดเพิ่มขึ้นเชื้อเพลิงผสมสามารถเผาไหม้ได้

อย่างสมบูรณ์มากขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงขึ้น อีกทั้งปริมาณออกซิเจนที่มากกว่า ซึ่งช่วยลดการเผาไหม้ที่อากาศขาดทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์ปลดปล่อยออกมาน้อยกว่า ในขณะที่น้ำมันดีเซลจะปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมามากที่อัตราส่วนการอัด 16:1 จากนั้นจะเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนการอัด 17:1 และลดลงอีกครั้งที่อัตราส่วนการอัด 18:1 สาเหตุเป็นเพราะที่อัตราส่วนการอัด 16:1 อุณหภูมิอากาศในห้องเผาไหม้ต่ำ ซึ่งไม่เหมาะแก่การเผาไหม้จึงทำให้เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ได้น้อยกว่าส่งผลให้เกิดมลพิษไฮโดรคาร์บอนแทนที่จะเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อัตราส่วนการอัด 17:1 เชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ได้มากขึ้นจึงทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์เกิดได้มากกว่า และที่อัตราส่วนการอัด 18:1 อุณหภูมิอากาศในห้องเผาไหม้สูงขึ้น ซึ่งช่วยให้การเผาไหม้เกิดได้อย่างสมบูรณ์มากกว่า คาร์บอนมอนอกไซด์จึงลดลงอีกครั้ง

เขม่าควันจากการใช้เชื้อเพลิงผสมมีแวนโน้มที่จะน้อยกว่าน้ำมันดีเซล สาเหตุที่ปริมาณเขม่าควันจากการใช้เชื้อเพลิงผสมน้อยกว่าน้ำมันดีเซล อาจจากเกิดเชื้อเพลิงผสมมีปริมาณคาร์บอนในเชื้อเพลิงน้อยกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งคาร์บอนเป็นสาเหตุของการก่อตัวของเขม่าควัน นอกจากนี้ออกซิเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงผสมอาจช่วยให้เชื้อเพลิงเผาไหม้ได้สมบูรณ์ขึ้นปริมาณเขม่าควันที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล เมื่อเครื่องยนต์ได้รับการบำรุงรักษาดีขึ้นเครื่องยนต์จำเป็นต้องฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเพื่อคงความเร็วรอบในการทำงานไว้ที่ค่าที่กำหนด ซึ่งส่งผลให้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้มีปริมาณมากขึ้นและอาจมีเชื้อเพลิงบางส่วนที่ก่อตัวเป็นเขม่าควัน

7.4 ข้อเสนอแนะ

ในขั้นตอนการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งได้ในความสนใจในปัจจัย 4 ชนิด คือ อัตราส่วนมวลโมเลกุลของน้ำมันละหุ่งต่อเอทานอล, ความเข้มข้นของ KOH อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยแต่ละปัจจัยถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่ระดับต่าง ๆ ของแต่ละปัจจัยอาจจะไม่ครอบคลุมสภาวะที่เหมาะสมที่สุด หากมีการเพิ่มระดับหรือเปลี่ยนแปลงค่าต่ำสุดและสูงสุดของแต่ละระดับอาจจะได้สภาวะที่เหมาะสมมากกว่านี้ สำหรับการทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงจะทดสอบคุณสมบัติที่จำเป็นในการยืนยันผลเพื่อใช้เชื้อเพลิงในการทดสอบกับเครื่องยนต์ ในขณะที่มีอีกหลายคุณสมบัติที่สามารถช่วยให้การวิเคราะห์ผลมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น เช่น ค่า Bulk Modulus ที่คำนวณได้จากค่าความเร็วของเสียงในเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถใช้ในการยืนยันความสามารถในการอัดตัวของเชื้อเพลิงก่อนถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้ นอกจากนี้การหาวิธีในการใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากละหุ่งในอัตราส่วนที่มากที่สุดมีความน่าสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากเชื้อเพลิงดังกล่าวมี

ความโดดเด่นในการผลผลิตที่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์ และมีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างมาก



รายการอ้างอิง

- Kevin Schmidt and Jon Van Gerpen. (2018). The Effect of Biodiesel Fuel Composition on Diesel Combustion and Emissions. **International Spring Fuels & Lubricants Meeting**.
- Amr, Ibrahim. 2018. An experimental study on using diethyl ether in a diesel engine operated with diesel-biodiesel fuel blend. **Engineering Science and Technology**, vol. 21, pp. 1024-1033.
- Lalit, P., L. M., Das, & S. N., Naik. (2012). Effect of Castor Oil, Methyl and Ethyl Esters as Lubricity Enhancer for Low Lubricity Diesel Fuel (LLDF). **Energy Fuels**, Vol. 26, pp. 5207-5315.
- Lapuerta, M., Sánchez-Valdepeñas, J., Bolonio, D., & Sukjit, E. (2016). Effect of fatty acid composition of methyl and ethyl esters on the lubricity at different humidities. **Fuel**, Vol. 184, pp. 202-210.
- Jianbo, H., Zexue, D., Changxiu, L., & Enze, M. (2005). Study on the lubrication properties of biodiesel as fuel lubricity enhancers. **Fuel**, Vol. 84, pp. 1601-1606.
- สุดารัตน์ หอมหวล. (2554). ละหุ่ง [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.thaicrudedrug.com>
- Jumat, S., Dina, N., Nazrizawati, A.T., Mohd Firduas, M.Y., & Noraisha, A. (2010). Fatty Acid Composition and Physicochemical Properties of Malaysian Castor Bean *Ricinus Communis* L. Seed Oil. **Sains Malaysiana**, Vol. 39, pp. 761-764.
- จิตรารักษ์ เลาหบุญญานุกูล. (2556). เอสเทอร์ฟิเคชันและทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์ เมมเบรนไลโตซาน. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Mohamad, Y., Xuebing, X., & Zheng, G. (2014). Comparison of Fatty Acid Methyl and Ethyl Esters as Biodiesel Base Stock: a Review on Processing and Production Requirements. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, vol. 91, pp. 525-531
- Atadashi, I.M., Aroua, M.K., Abdul Aziz, A.R., & Sulaiman., N.M.N. (2012). The effects of water on biodiesel production and refining technologies: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 16, pp. 3456-3470.
- Idris, M. (2016). The effects of alcohol to oil molar ratios and the type of alcohol on biodiesel production using Transesterification process. **Egyptian Journal of Petroleum**, vol. 25, pp. 21-31.

- George, A., Ypatia Z., Stamoulis, S. & Stamatis K. (2009). Transesterification of Vegetable Oils with Ethanol and Characterization of the Key Fuel Properties of Ethyl Esters. **Energies**, vol. 2, pp. 362-376.
- Atadashi, I. M., Aroua, M. K., Aziz, A. A., & Sulaiman, N. M. N. (2013). The effects of catalysts in biodiesel production: A review. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 19(1), 14-26.
- Daniyan, I.A., Adeodu, A.O., Dada, O.M., & Adewumi, D.F. (2015). Effects of Reaction Time on Biodiesel Yield. **Journal of Bioprocessing and Chemical Engineering**, vol. 3, pp. 434-436.
- Basak, U., Murat, K., Nurgül, Ö., Ays,e, & E. P., Ersan, Pütün. (2012). Biodiesel production from waste frying oils: Optimization of reaction parameters and determination of fuel properties. **Energy**, vol. 44, pp347-351.
- Shilpi, A., Vijay, C., & Ajay, B. (2013). Tribological behavior of diesel fuels and the effect of anti-wear additives. **Energy**, vol. 44, pp. 347-351.
- Sukjit, E., Poapongsakorn, P., Dearn, K.D., Lapuerta, M. & Sánchez-Valdepeñas, J. (2017). Investigation of the lubrication properties and tribological mechanisms of oxygenated compounds. **Wear**, vol. 376-377, pp. 836-842.
- Osmano, V., Márcio, S., Vanya, P., Carlos, B., & José, S. (2010). Fuel consumption and emissions from a diesel power generator fuelled with castor oil and soybean biodiesel. **Fuel**, Vol. 89, pp. 3637-3642.
- Andre, B., Mariana Paul, P., Joao, P., Francisco, L., & Celio, J. (2017). Performance and Emissions Characteristics of Castor Oil Biodiesel Fuel Blends. **Applied Thermal Engineering**, vol. 125, pp. 559-566.
- Özcanli M., Serin H., Saribiyik O. Y., Aydin K., & Serin, S. (2015). Performance and Emission Studies of Castor Bean (*Ricinus Communis*) Oil Biodiesel and Its Blends with Diesel Fuel. **Energy Sources, Part A**, Vol. 34, pp. 1808-1814.
- Muralidharan, K., Vasudevan D. (2011). Performance, emission and combustion characteristics of a variable compression ratio engine using methyl esters of waste cooking oil and diesel blends. **Applied Energy**, Vol. 88, pp. 3959-3968.
- Venkateswara, P. (2015). Compression ratio effect on Diesel Engine working with Biodiesel (JOME)-Diesel blend as fuel. **Research Journal of Chemical Sciences**, vol. 5, pp. 48-51.

- Vashist, D. (2011). A comparative study of castor and Jatropha oil sources and its methyl ester test on the diesel engine. **International Journal of Engineering Science and Technology**, vol. 3, pp. 4765-4733.
- 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**, vol. 30, pp. 245-249.
- Devan, P.K., Mahalakshmi, N.V. (2009). A study of the performance, emission and combustion characteristics of a compression ignition engine using methyl ester of paradise oil-eucalyptus oil blends. **Applied Energy**, vol. 86, pp. 675-680.
- Kassaby, M.E., Nemit, M.A. (2013). Studying the effect of compression ratio on an engine fueled with waste oil produced biodiesel/diesel fuel. **Alexandria Engineering Journal**, vol. 52, pp. 1-11.
- Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park. (1999). **Technical Bulletin Nitrogen Oxides (NO_x), Why and How They Are Controlled**. United States Environmental Protection Agency.
- Varatharajana, K., Cheralathanb, M. (2012). Influence of fuel properties and composition on NO_x emissions from biodiesel powered diesel engines: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 16, pp. 3702-3710.
- Fenimore, C.P. (1971). Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. **Symposium (International) on Combustion**, vol. 13, pp. 373-380.
- Zareh, P. Zare, A.A., Ghobadian B. (2017). Comparative assessment of performance and emission characteristics of castor, coconut and waste cooking-based biodiesel as fuel in a diesel engine. **Energy**, vol. 139, pp. 883-894.
- Sayin, C., Gumus, M. (2011). Impact of compression ratio and injection parameters on the performance and emissions of a DI diesel engine fueled with biodiesel-blended diesel fuel. **Applied Thermal Engineering**, vol. 31, pp. 3182-3188.
- Sathiyagnanam, A.P. (2011). Experimental Studies on the Combustion Characteristics and Performance of a Direct Injection Engine Fueled with Biodiesel/Diesel Blends with SCR. **Proceedings of the World Congress on Engineering**, vol. 3, July 6 - 8, 2011, London, U.K.

- An, H., Yang, W.M., Chou, S.K. & Chua, K.J. (2012). Combustion and emissions characteristics of diesel engine fueled by biodiesel at partial load conditions. **Applied Energy**, vol. 99, pp. 363-371.
- Hosamani, B.R. & Katti, V.V. (2018). Experimental analysis of combustion characteristics of CI DI VCR engine using mixture of two biodiesel blend with diesel. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, vol. 21, pp. 769-777.
- 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**. vol. 119, pp. 174-184.
- Mana, X.J., Cheung, C.S., Ning, Z., Wei, L., & Huang, Z.H. (2016). Influence of engine load and speed on regulated and unregulated emissions of a diesel engine fueled with diesel fuel blended with waste cooking oil biodiesel. **Fuel**, vol. 180, pp. 41-49.
- Sattanathan, R. (2013). Production of Biodiesel from Castor Oil with its Performance and Emission Test. **International Journal of Science and Research (IJSR)**, Vol. 4, pp. 273-279.
- Ghenai, C. (2011). Combustion and Emissions Characteristics of Biodiesel Fuels [Online]. Available: <https://www.intechopen.com>.
- Tan, P.Q., Hu, Z.Y., Lou, D.M., & Li, Z.J. (2012). Exhaust emissions from a light-duty diesel engine with Jatropha biodiesel fuel. **Energy**, vol. 39, pp. 356-362.
- Dodos, G.S., Vassileiou, F., & Karonis, D. (2017). Lubricity of Diesel Fuel Hydrocarbons and Surrogate Fuels. **International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting**



ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอสเทอร์ของกรดไขมัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีของเอสเทอร์ของกรดไขมันมาตรฐาน

No.	Fatty Acid Name	Lipid Number	Concentration ($\mu\text{g/mL}$)	Retention Time (minutes)	Peak Area
1	Butyric Acid	C4:0	1047.1	6.75	13.83×10^6
2	Caproic Acid	C6:0	1033.4	9.59	21.30×10^6
3	Caprylic Acid	C8:0	1031.9	12.26	27.84×10^6
4	Capric Acid	C10:0	1027.6	14.9	32.98×10^6
5	Lauric Acid	C12:0	1022	17.83	36.92×10^6
6	Myristic Acid	C14:0	1068.5	21.25	40.14×10^6
7	Palmitic Acid	C16:0	1036.6	25.89	43.50×10^6
8	Stearic Acid	C18:0	1062.1	32.38	46.01×10^6
9	Ricinoleic Acid	C18:1OH	100000	60.83	2.141×10^9
10	Arachidic Acid	C20:0	1051.3	40.94	47.83×10^6
11	Behenic Acid	C22:0	1055.9	51.21	50.00×10^6
12	Lignoceric Acid	C24:0	1059	62.71	51.18×10^6



ตารางที่ ก.2 พื้นที่ยอดกราฟและร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 1 ถึง 3

Fatty Acid Name	Peak Area of Sample			Percentage (%)		
	1	2	3	1	2	3
Butyric Acid	0	0	0	0	0	0
Caproic Acid	0	0	0	0	0	0
Caprylic Acid	0	0	0	0	0	0
Capric Acid	0	0	0	0	0	0
Lauric Acid	0	0	0	0	0	0
Myristic Acid	0	0	0	0	0	0
Palmitic Acid	3514604	3424235	4546195	1.36	1.30	1.33
Stearic Acid	4022196	3875965	5234074	1.55	1.47	1.53
Ricinoleic Acid	251364146	255867079	332631226	97.09	97.23	97.14
Arachidic Acid	0	0	0	0	0	0
Behenic Acid	0	0	0	0	0	0
Lignoceric Acid	0	0	0	0	0	0



ตารางที่ ก.3 พื้นที่ยอดกราฟและร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 4 ถึง 6

Fatty Acid Name	Peak Area of Sample			Percentage (%)		
	4	5	6	4	5	6
Butyric Acid	0	0	0	0	0	0
Caproic Acid	0	0	0	0	0	0
Caprylic Acid	0	0	0	0	0	0
Capric Acid	0	0	0	0	0	0
Lauric Acid	0	0	0	0	0	0
Myristic Acid	0	0	0	0	0	0
Palmitic Acid	4398152	2995971	4579201	1.34	1.37	1.40
Stearic Acid	5061494	3422204	5191314	1.54	1.56	1.58
Ricinoleic Acid	319553308	212345513	317935176	97.12	97.07	97.02
Arachidic Acid	0	0	0	0	0	0
Behenic Acid	0	0	0	0	0	0
Lignoceric Acid	0	0	0	0	0	0



ตารางที่ ก.4 พื้นที่ยอดกราฟและร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 7 ถึง 9

Fatty Acid Name	Peak Area of Sample			Percentage (%)		
	7	8	9	7	8	9
Butyric Acid	0	0	0	0	0	0
Caproic Acid	0	0	0	0	0	0
Caprylic Acid	0	0	0	0	0	0
Capric Acid	0	0	0	0	0	0
Lauric Acid	0	0	0	0	0	0
Myristic Acid	0	0	0	0	0	0
Palmitic Acid	4751936	6556523	6408600	1.39	1.42	1.41
Stearic Acid	5410694	7564595	7433995	1.59	1.63	1.64
Ricinoleic Acid	330927307	448919334	439992365	97.02	96.95	96.95
Arachidic Acid	0	0	0	0	0	0
Behenic Acid	0	0	0	0	0	0
Lignoceric Acid	0	0	0	0	0	0



ตารางที่ ก.5 พื้นที่ยอดกราฟและร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 10 ถึง 12

Fatty Acid Name	Peak Area of Sample			Percentage (%)		
	10	11	12	10	11	12
Butyric Acid	0	0	0	0	0	0
Caproic Acid	0	0	0	0	0	0
Caprylic Acid	0	0	0	0	0	0
Capric Acid	0	0	0	0	0	0
Lauric Acid	0	0	0	0	0	0
Myristic Acid	0	0	0	0	0	0
Palmitic Acid	6225905	4131192	3038320	1.46	1.32	1.30
Stearic Acid	7117556	4806665	3458483	1.68	1.53	1.47
Ricinoleic Acid	411371081	305175255	228011563	96.86	97.16	97.23
Arachidic Acid	0	0	0	0	0	0
Behenic Acid	0	0	0	0	0	0
Lignoceric Acid	0	0	0	0	0	0



ตารางที่ ก.6 พื้นที่ยอดกราฟและร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 13 ถึง 15

Fatty Acid Name	Peak Area of Sample			Percentage (%)		
	13	14	15	13	14	15
Butyric Acid	0	0	0	0	0	0
Caproic Acid	0	0	0	0	0	0
Caprylic Acid	0	0	0	0	0	0
Capric Acid	0	0	0	0	0	0
Lauric Acid	0	0	0	0	0	0
Myristic Acid	0	0	0	0	0	0
Palmitic Acid	3825385	3962406	3486431	1.31	1.33	1.32
Stearic Acid	4340328	4550191	3940645	1.48	1.52	1.50
Ricinoleic Acid	284488041	290064534	255788563	97.21	97.15	97.18
Arachidic Acid	0	0	0	0	0	0
Behenic Acid	0	0	0	0	0	0
Lignoceric Acid	0	0	0	0	0	0



ตารางที่ ก.7 พื้นที่ยอดกราฟและร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 16 ถึง 18

Fatty Acid Name	Peak Area of Sample			Percentage (%)		
	16	17	18	16	17	18
Butyric Acid	0	0	0	0	0	0
Caproic Acid	0	0	0	0	0	0
Caprylic Acid	0	0	0	0	0	0
Capric Acid	0	0	0	0	0	0
Lauric Acid	0	0	0	0	0	0
Myristic Acid	0	0	0	0	0	0
Palmitic Acid	5269847	4588516	4623618	1.36	1.36	1.46
Stearic Acid	6136702	5261023	5277099	1.58	1.57	1.67
Ricinoleic Acid	376645864	326377682	306092891	97.06	97.07	96.87
Arachidic Acid	0	0	0	0	0	0
Behenic Acid	0	0	0	0	0	0
Lignoceric Acid	0	0	0	0	0	0



ตารางที่ ก.8 พื้นที่ยอดกราฟและร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 19 ถึง 21

Fatty Acid Name	Peak Area of Sample			Percentage (%)		
	19	20	21	19	20	21
Butyric Acid	0	0	0	0	0	0
Caproic Acid	0	0	0	0	0	0
Caprylic Acid	0	0	0	0	0	0
Capric Acid	0	0	0	0	0	0
Lauric Acid	0	0	0	0	0	0
Myristic Acid	0	0	0	0	0	0
Palmitic Acid	3454852	4239164	2374993	1.34	1.35	1.36
Stearic Acid	3910896	4834903	2671340	1.52	1.54	1.53
Ricinoleic Acid	250376292	305646323	169217584	97.14	97.12	97.10
Arachidic Acid	0	0	0	0	0	0
Behenic Acid	0	0	0	0	0	0
Lignoceric Acid	0	0	0	0	0	0



ตารางที่ ก.9 พื้นที่ยอดกราฟและร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 22 ถึง 24

Fatty Acid Name	Peak Area of Sample			Percentage (%)		
	22	23	24	22	23	24
Butyric Acid	0	0	0	0	0	0
Caproic Acid	0	0	0	0	0	0
Caprylic Acid	0	0	0	0	0	0
Capric Acid	0	0	0	0	0	0
Lauric Acid	0	0	0	0	0	0
Myristic Acid	0	0	0	0	0	0
Palmitic Acid	3052530	2668171	3212916	1.35	1.34	1.29
Stearic Acid	3435902	2969013	3655991	1.52	1.50	1.48
Ricinoleic Acid	219258288	192744988	241330400	97.13	97.16	97.23
Arachidic Acid	0	0	0	0	0	0
Behenic Acid	0	0	0	0	0	0
Lignoceric Acid	0	0	0	0	0	0



ตารางที่ ก.10 พื้นที่ยอดกราฟและร้อยละของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 25 และ 26

Fatty Acid Name	Peak Area of Sample		Percentage (%)	
	25	26	25	26
Butyric Acid	0	0	0	0
Caproic Acid	0	0	0	0
Caprylic Acid	0	0	0	0
Capric Acid	0	0	0	0
Lauric Acid	0	0	0	0
Myristic Acid	0	0	0	0
Palmitic Acid	5118192	4317147	1.34	1.43
Stearic Acid	5916367	4950736	1.55	1.64
Ricinoleic Acid	370475745	292315753	97.11	96.93
Arachidic Acid	0	0	0	0
Behenic Acid	0	0	0	0
Lignoceric Acid	0	0	0	0



ตารางที่ ก.11 มวลโมเลกุลของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 1 ถึง 13

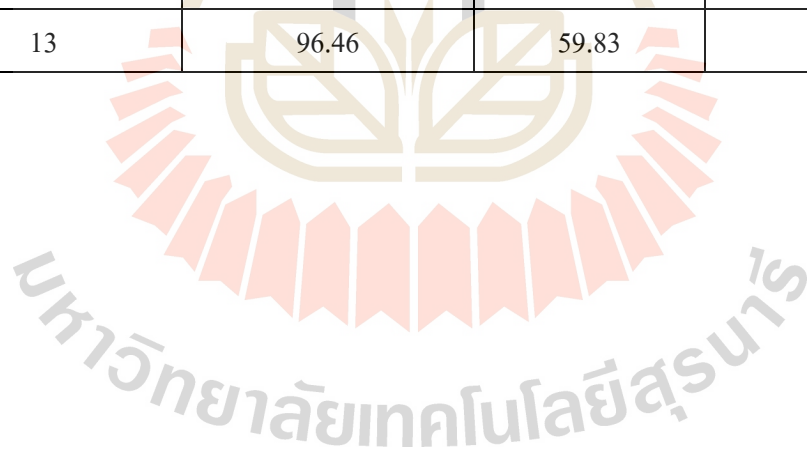
Number of Sample	Molecular Weight of Fatty Acid (g/mol)			
	Palmitic Acid	Stearic Acid	Ricinoleic Acid	Total
1	1.802	2.216	294.039	298.057
2	1.726	2.099	294.250	298.075
3	1.762	2.180	294.124	298.065
4	1.774	2.194	294.095	298.062
5	1.818	2.232	294.004	298.053
6	1.855	2.260	293.930	298.046
7	1.850	2.263	293.933	298.046
8	1.881	2.332	293.826	298.038
9	1.875	2.338	293.825	298.038
10	1.948	2.393	293.683	298.024
11	1.745	2.182	294.141	298.068
12	1.718	2.102	294.256	298.076
13	1.734	2.114	294.225	298.073

ตารางที่ ก.12 มวลโมเลกุลของเอสเทอร์ของกรดไขมันของตัวอย่างที่ 14 ถึง 26

Number of Sample	Molecular Weight of Fatty Acid (g/mol)			
	Palmitic Acid	Stearic Acid	Ricinoleic Acid	Total
14	1.761	2.173	294.132	298.065
15	1.757	2.134	294.176	298.068
16	1.803	2.256	293.996	298.054
17	1.811	2.232	294.011	298.054
18	1.944	2.385	293.696	298.025
19	1.778	2.164	294.121	298.063
20	1.787	2.191	294.082	298.060
21	1.809	2.186	294.062	298.057
22	1.794	2.170	294.095	298.060
23	1.784	2.134	294.145	298.063
24	1.717	2.099	294.260	298.076
25	1.780	2.212	294.068	298.060
26	1.901	2.343	293.789	298.034

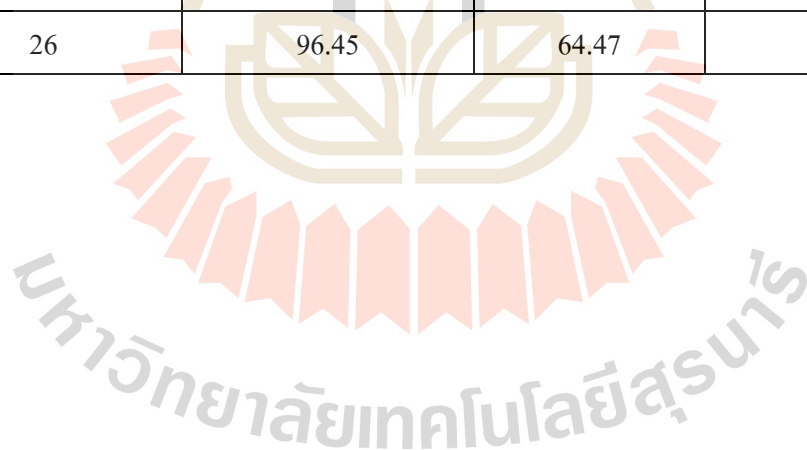
ตารางที่ ก.13 ผลการคำนวณร้อยละของกรดไขมันรวมในตัวอย่างที่ 1 ถึง 13

Number of Sample	Theoretical Yield (g)	Actual Yield (g)	Yield Percentage (%)
1	96.46	52.56	54.49
2	96.46	56.69	58.77
3	96.46	71.26	73.87
4	96.46	69.83	72.40
5	96.46	46.11	47.80
6	96.45	68.46	70.97
7	96.45	73.18	75.87
8	96.45	94.32	97.79
9	96.45	89.90	93.21
10	96.45	91.17	94.52
11	96.46	66.84	69.29
12	96.46	48.72	50.51
13	96.46	59.83	62.02



ตารางที่ ก.14 ผลการคำนวณร้อยละของกรดไขมันรวมในตัวอย่างที่ 14 ถึง 26

Number of Sample	Theoretical Yield (g)	Actual Yield (g)	Yield Percentage (%)
14	96.46	63.81	66.15
15	96.46	54.54	56.54
16	96.46	84.88	88.00
17	96.46	72.79	75.46
18	96.45	69.13	71.68
19	96.46	52.02	53.93
20	96.46	65.26	67.66
21	96.46	34.63	35.90
22	96.46	45.49	47.16
23	96.46	40.51	42.00
24	96.46	50.22	52.06
25	96.46	85.16	88.28
26	96.45	64.47	66.84





ภาคผนวก ข

ผลการสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบความหนืดจลนศาสตร์

Fuel Type	Time (s)			Average Time (s)	Viscosity (cSt)
	1	2	3		
COEE	576.71	576.78	577.02	576.84	20.1893
DIESEL	279.56	278.09	279.32	278.99	4.185
COEE5	282.02	282.31	281.98	282.10	4.232
COEE8	293.87	293.65	293.81	293.78	4.407
COEE10	303.19	305.25	304.47	304.30	4.565
COEE15	313.07	315.32	314.44	314.28	4.714
COEE20	339.25	340.48	340.02	339.92	5.099

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบจุดวาบไฟ

Fuel Type	Flash Point (°C)			
	1	2	3	Average
COEE	87	88	88	88
DIESEL	68	68	69	68
COEE5	74	73	74	74
COEE8	75	78	78	77
COEE10	78	79	77	78
COEE15	80	82	79	80

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะและความถ่วงเอพีไอ

Fuel Type	Specific Gravity				API Gravity
	1	2	3	Average	
COEE	0.915	0.915	0.915	0.915	23.14
DIESEL	0.830	0.83	0.83	0.830	38.98
COEE8	0.85	0.85	0.85	0.850	34.97

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบความสามารถในการหล่อลื่น

Fuel	Wear Scar Diameter			Friction Coefficient
	X	Y	AVG.	
DIESEL	-		233.08	0.144
COEE	213.9	104.88	159.39	0.084
DIESEL+5%COEE	166.98	107.64	137.31	0.102
DIESEL+8%COEE	126.27	78.69	102.48	0.072
DIESEL+10%COEE	151.11	76.59	113.85	0.057
DIESEL+15%COEE	140.07	126.96	133.52	0.101



ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Pumpuang, A., Maithomklang, S., Sukjit, E., Dejvajara, D. et al., "Utilization of Castor Oil-Based Ethyl Ester Biodiesel in a Diesel Engine," SAE Technical Paper 2019-32-0606, 2020.



JSAE 20199606

Utilization of Castor oil-based Ethyl Ester Biodiesel in a Diesel Engine

Anupap PumPuang, Somkiat Maithomklang, Ekarong Sukjit

School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology

Disatorn Dejvajara, Phannathon Samaiklang, Somluethai Sanluecha

Ratchasima Wittayalai School, SCiUS-Suranaree University of Technology

Copyright © 2019 SAE Japan and Copyright © 2019 SAE International

ABSTRACT

Nowadays, world energy consumption from fossil fuels contributes to pollutions and environmental deterioration. Thus, renewable, environmental friendly, alternative fuels such as biodiesel has received more attention. The most commonly used method for preparing biodiesel is transesterification reaction of vegetable oils and alcohol. However, there are some controversies of economics, feedstock supply and availability about using edible oil for biodiesel production. In this study, we aim to prepare biodiesel through the transesterification of castor oil and ethanol. Castor oil is non-edible oil crop with high proportion of hydroxylated fatty acid, ricinoleic acid (C18:1 OH). Excellent lubrication properties and hydroxyl group present in molecule are attractive factors of castor oil as alternative feedstock of biodiesel. It is expected that the presence of oxygen belonging to hydroxyl group can enhance the combustion efficiency. The optimization of parameters related to the yield of transesterification, such as the concentration of catalyst, ethanol to oil molar ratio, reaction temperature and reaction time was investigated. The results indicated that the optimum condition for castor oil ethyl ester (COEE) production was 1:12 oil to ethanol molar ratio, 1.5% of catalyst concentration, 50°C reaction temperature and 120 minutes reaction time.

To avoid extremely high viscosity of castor oil which can affect the fuel injection system, COEE was blended with commercial diesel fuel at different concentrations ranged from 5%-15% volume and key properties of fuel blends, mainly focused on fuel lubricity and viscosity were evaluated. The presence of 8% COEE in diesel fuel was concluded as the optimum concentration because the smallest wear scar diameter was obtained after the lubricity test and its viscosity was within acceptable limits prescribed by the standard specification of diesel fuel. Consequently, the blend of 8% COEE and diesel fuel was used in the engine test to investigate the engine performance and engine-out emissions. The test was carried out in a single cylinder diesel engine fitted with an eddy current dynamometer. Constant engine speed of 1500 rpm and variable engine loads of 50%, 75% and 90% of maximum torque were selected as test conditions. The results showed

that the addition of 8% COEE to diesel fuel increased brake thermal efficiency at middle to high engine operating loads. The reduction in carbonaceous gas emissions including carbon monoxide (CO) and unburnt hydrocarbon (HC) was obtained by the addition of COEE. Moreover, smoke emissions generated by the combustion of COEE blend was lower than that of diesel fuel. From the results as mentioned, castor oil ethyl ester has been shown a feasible alternative for biodiesel. This is due to the most relevant benefits of engine performance and engine-out emissions.

INTRODUCTION

The demand of petroleum fuels is increasing worldwide whereas these fuels are limited and continuously depleting. Moreover, the use of petroleum fuels has caused many environmental problems by high emissions of harmful gases. One of most promising alternatives to replace petroleum fuels, especially in diesel engines is renewable fuels such as biodiesel. The raw material for biodiesel production is vegetable oil such as corn oil, palm oil, soybean oil and sunflower. These vegetable oils are called as feedstock for first generation biodiesel. Usually, biodiesel contains virtually no sulphur content and produces cleaner combustion compared to diesel fuel, leading to better exhaust emissions and more friendly to environment. However, there are some controversies of economics, feedstock supply and availability about using edible oil for biodiesel production. Castor oil, a non-edible oil crop as second generation biodiesel, is very attractive to be feedstocks for biodiesel production. Castor oil contains high proportion of ricinoleic acid (C18:1OH) which is one kind of fatty acid that possesses more oxygen content than other vegetable oils [1-5]. The presence of oxygen in fuel molecule is expected to improve the combustion efficiency and engine-out emissions. Moreover, hydroxyl group belonging to ricinoleic acid can enhance soot oxidation which directly relates to the reduction in particulate matter smoke emissions. Another attractive property of ricinoleic acid is excellent lubricating properties compared to other fatty acids [6]. However, extremely high viscosity of castor oil will be significant problem to limit the use of castor oil as biodiesel source. Therefore, the use of castor oil and its biodiesel as blend component in diesel fuel is a feasible way

SETC2019

to apply castor oil as renewable and alternative fuels in a diesel engine. Previous studies have been reported that the use of biodiesel derived from castor oil as blend component can improve fuel properties (i.e. fuel lubricity), combustion characteristics and engine-out emissions [7-8].

Most commonly used method for biodiesel preparation is transesterification which is the reaction between triglyceride from oils and fats with alcohol, methanol is the most common alcohol used. The esters or biodiesel is main product, meanwhile glycerol is byproduct. Methanol is the production of petrochemical product and toxic alcohol while ethanol is a natural byproduct of plant fermentation and non-poisonous. In this work, ethanol was used in the transesterification instead of methanol to avoid the use of petroleum product. Potassium hydroxide was selected as chemical reaction catalyst. Four parameters related to the yield of transesterification consists of oil to ethanol molar ratio, catalyst concentration, reaction temperature and reaction time were investigated. Thereafter, the effect of addition of ethyl ester biodiesel derived from castor oil (COEE) to diesel fuel on fuel properties, mainly focused on

fuel lubricity and viscosity, engine performance and exhaust gas emissions were analyzed.

METHODOLOGY

Test Fuel

In this study, diesel fuel and castor oil ethyl ester (COEE) were used as primary fuel. Diesel fuel was commercial diesel fuel with the presence of 7% palm biodiesel which is the mandatory blend rate prescribed by the domestic regulation under the Alternative Energy Development Plan (AEDP 2015), Ministry of Energy, Thailand. COEE was prepared from castor oil and ethanol by using potassium hydroxide (KOH) as catalyst through transesterification process. In such biodiesel production, effect of oil to ethanol molar ratio (1:6, 1:9 and 1:12), catalyst concentration (0.5%, 1.0% and 1.5% by weight), reaction temperature (40°C, 50°C and 60°C) and reaction time (90 min., 120 min. and 150 min) on the yield of transesterification was studied.

Table 1. Selected conditions for biodiesel preparation and their yield percentage

NO. Sample	A	B	C	D	Y_{th} (g)	Y_{act} (g)	%Y (%)
1	1:6	1.5	60	90	96.458	52.56	54.49
2	1:12	0.5	60	150	96.464	56.69	58.77
3	1:12	1.0	50	120	96.461	71.26	73.87
4	1:9	1.5	50	120	96.460	69.83	72.40
5	1:6	0.5	40	90	96.457	46.11	47.80
6	1:9	1.0	50	120	96.455	68.46	70.97
7	1:6	1.5	40	90	96.455	73.18	75.87
8	1:12	1.5	40	150	96.452	94.32	97.79
9	1:12	1.5	60	150	96.452	89.90	93.21
10	1:12	0.5	60	90	96.448	91.17	94.52
11	1:9	1.0	50	150	96.462	66.84	69.29
12	1:9	1.0	50	150	96.464	48.72	50.51
13	1:12	0.5	40	90	96.463	59.83	62.02
14	1:9	1.0	60	120	96.461	63.81	66.15
15	1:9	1.0	40	120	96.462	54.54	56.54
16	1:12	1.5	40	90	96.457	84.88	88.00
17	1:12	1.5	60	90	96.457	72.79	75.46
18	1:12	0.5	40	150	96.448	69.13	71.68
19	1:9	0.5	50	120	96.460	52.02	53.93
20	1:9	1.0	50	90	96.459	65.26	67.66
21	1:6	0.5	60	90	96.458	34.63	35.90
22	1:6	1.5	60	150	96.459	45.49	47.16
23	1:6	0.5	60	150	96.460	40.51	42.00
24	1:6	1.5	40	150	96.464	50.22	52.06
25	1:9	1.5	40	120	96.459	85.16	88.28
26	1:6	1.0	50	120	96.451	64.47	66.84

A = Oil to ethanol molar ratio, B = Catalyst concentration (%w/w), C = Reaction temperature (°C), D = Reaction time (minute)

SETC2019

The biodiesel yield percentage is the factor that indicates the amount of actual biodiesel yield (Y_{act}) compared with the theoretical biodiesel yield (Y_{th}) and biodiesel yield percentage (%Y) can be calculated from the following equations.

$$Y_{th} = \frac{N \times MW_{COEE} \times m_{CCO}}{MW_{CCO}} \quad (1)$$

$$\%Y = \frac{Y_{act}}{Y_{th}} \quad (2)$$

when,

- Y_{th} = theoretical yield of biodiesel (g)
- N = mole number of biodiesel per mole number of crude vegetable oil
- m_{CCO} = crude castor oil mass (g)
- MW_{COEE} = molecular weight of castor oil ethyl ester (g/mol)
- MW_{CCO} = molecular weight of crude castor oil (g/mol)

Selected conditions for biodiesel preparation by variation of such four parameters were shown in Table 1. It can be seen that maximum yield percentage was obtained with conditions of 1:12 oil to ethanol molar ratio, 1.50% KOH, reaction temperature of 40 °C and reaction time of 150 minutes. The experimental results on biodiesel yield percentage can be concluded to introduce the relationship between yield percentage and tested parameters (Figure 1-4). An increase in oil:ethanol molar ratio and catalyst concentration tended to increase yield percentage while there was no clear trend of yield percentage with varying reaction temperature and temperature time.

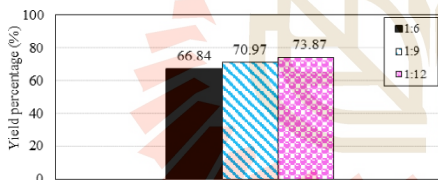


Figure 1. The relationship between yield percentage and oil to ethanol molar ratio.

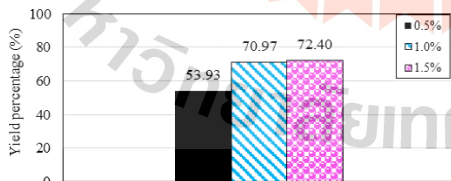


Figure 2. The relationship between yield percentage and catalyst concentration.

SETC2019

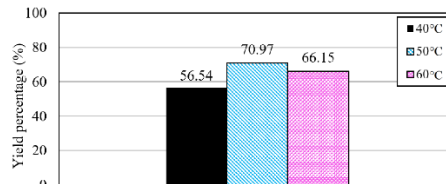


Figure 3. The relationship between yield percentage and reaction temperature.

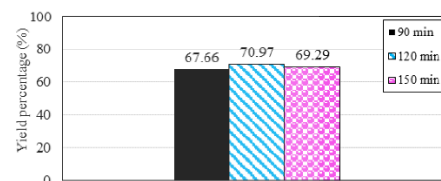


Figure 4. The relationship between yield percentage and reaction time.

With extremely high viscosity of ricinoleic acid as main component of castor oil, viscosity of ethyl ester biodiesel derived from castor oil was over limitation of biodiesel specification. So, the proportion of COEE as blend component in diesel fuel was maximized. The variation of COEE concentrations ranged from 5%-15% volume were blended with diesel fuel. Two key properties of fuel blends, consisting of fuel lubricity and kinematic viscosity, were determined according to American Society for Testing and Materials (ASTM) and the results were compared to the limitation prescribed by the diesel fuel specification to avoid any engine modification when COEE blend was used in the engine test. The effect of COEE concentration present in diesel fuel on lubricity and viscosity was demonstrated in Figure 5. The results shows that the smallest wear scar diameter generated by the lubricity test was obtained by the addition of 8% COEE to diesel fuel (C8) while its viscosity was within acceptable limits prescribed by specification of standard diesel fuel. Consequently, the 8% COEE blended with diesel fuel was selected for the engine test to evaluate the effect of COEE present in diesel fuel on engine performance and engine-out emissions. The basic physical and chemical properties of diesel fuel and 8% COEE were measured according to ASTM standards and were shown in Table 2.

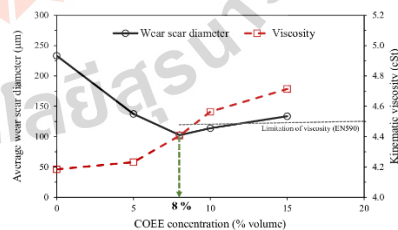


Figure 5. Lubricity and viscosity of COEE blends.

Table 2. Basic physical and chemical properties of test fuels

Fuel Properties	Method	Diesel	8%COEE
Kinematic viscosity @40 °C (cSt)	ASTM D445	4.185	4.407
Density @15.6 °C (kg/m ³)	ASTM D1298	829	839
Specific gravity @15.6 °C	ASTM D1298	0.830	0.840
Distillation 90% Recovered (°C)	ASTM D86	348	328
Cetane Index	ASTM D976	59.18	53.47
Flash point (°C)	ASTM D93	68	81
Gross Calorific Value (MJ/kg)	ASTM D240	45.39	45.17

Engine Test

A single cylinder direct injection diesel engine with naturally aspirated and water-cooled system was used for the engine test to evaluate engine performance and engine-out emissions of the optimum fuel blend (8% COEE) selected by the consideration of fuel lubricity and viscosity of fuel blends. The engine was operated with diesel fuel and the results were used as reference value so that the results obtained by the engine fueled with the optimum COEE blend were compared. The engine specification is shown in Table 3. The experimental installation is drawn schematically in Figure 6. A eddy current dynamometer equipped with a load cell was used to load the engine. The engine was tested at constant speed of 1500 rpm with varying three engine operating loads (50%, 75% and 90% of maximum engine torque) which represents the range of the engine operating condition from middle to high levels. Engine-out emissions were measured by standard exhaust gas analyzers: Testo 350 for CO and NO_x, Horiba Mexa-584L for HC and Testo 308 for smoke emissions. In each condition tested, the engine was stabilized by the observation of exhaust temperatures and exhaust emissions.

Table 3. Test Engine specification.

Engine	Specification
Model	Kirloskar TV1
Engine type	1 cylinder, 4 strokes, Water cooled, Direct injection
Bore	87.5 mm
Stroke	110 mm
Swept volume	661 cc
Rate output	3.5 kW at 1500 rpm
Compression ratio	12:1-18:1
Fuel timing for standard engine	23° BTDC
Injection pressure	210 bar
Dynamometer	Eddy current

SETC2019

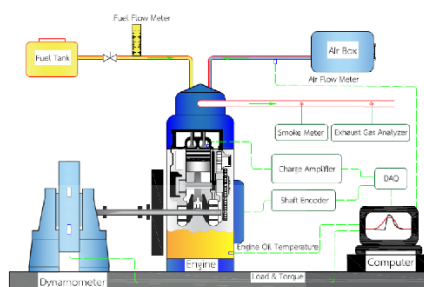


Figure 6. Schematic diagram of the experimental engine installation.

RESULTS AND DISCUSSION

Engine Performance

The results showed that the addition of 8% COEE to diesel fuel increased brake specific fuel consumption at middle engine load without significant penalty in brake thermal efficiency. The lower bsfc was found by the use of COEE blend at higher engine operating loads, resulting in the higher thermal efficiency compared to diesel fuel (Figure 7).

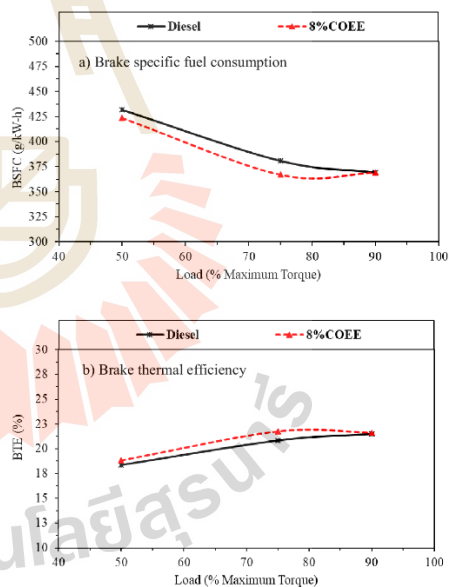


Figure 7. Engine performance: a) Brake specific fuel consumption b) Brake thermal efficiency.

Combustion Characteristics

In-Cylinder pressure and heat release rate of the combustion of 8% COEE compared to diesel fuel is shown in Figure 8. It seems that the presence of 8% COEE does not significantly affect the combustion characteristics of blended fuels with respect to that of diesel fuel. Small difference in start of combustion with retard for COEE blend was found at middle engine load while similar start of combustion for both test fuels was obtained at higher engine loads. Obviously, the combustion of 8% COEE generated higher in-cylinder pressure than diesel fuel combustion at all engine loads tested. The addition of COEE to diesel fuel increased the oxygen content which tended to increase combustion temperature, resulting in the increase in in-cylinder pressure.

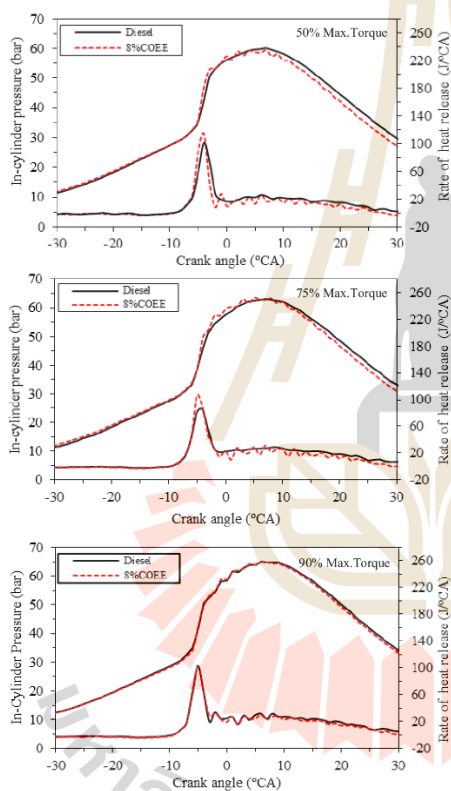


Figure 8. In-cylinder pressure and heat release rate.

Emissions

The variation of unburnt hydrocarbon (HC) emissions with engine loads and test fuels is shown in Figure 9. It can be seen from Fig. 9 that HC emissions of 8% COEE were decreased by 12.50 to 20.00%, compared with diesel fuel. The presence of oxygen in COEE blend resulting in more complete combustion can be used to justify the reduction in HC emissions when the addition of COEE biodiesel to diesel fuel was applied. Although, high viscosity of COEE biodiesel with high surface tension can affect the poor atomization resulting in the high THC emissions, the effect of oxygen content seems to overcome high viscosity of the blend. As a consequence, the lower THC emissions can be obtained from the combustion of the diesel fuel blended with COEE biodiesel.

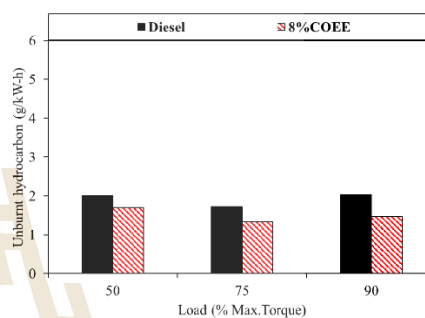


Figure 9. Variation of unburnt hydrocarbon emissions.

Figure 10. shows the variation of carbon monoxide (CO) emissions with engine loads and test fuels. Similar trend to HC emissions, the combustion of 8% COEE generated lower CO emissions that that of diesel fuel. CO emissions were decreased by 8.57 to 52.50%, compared with diesel fuel. This is likely to be a consequence of oxygen content present in COEE blend which improve complete combustion.

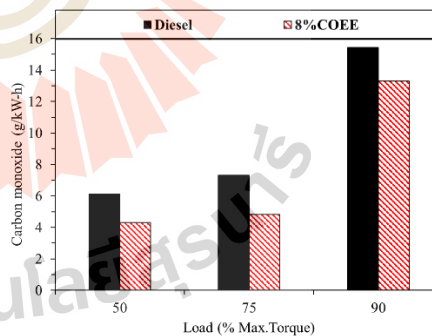


Figure 10. Variation of carbon monoxide emissions.

Smoke is the parameter that used to predict the trend of particulate matter (PM) emissions. The variation of the smoke emissions with engine loads and test fuels was shown in Fig.11. It can be seen that small improvement of smoke emissions was obtained by the combustion of 8% COEE compared with diesel fuel. The reduction in smoke emissions with the use of COEE blend is likely to be a consequence of the presence of oxygen in fuel molecules of COEE. It is notable that more biodiesel addition to commercial diesel fuel (B7) does not meet the significant improvement in smoke emissions for the engine and operating loads used in this study.

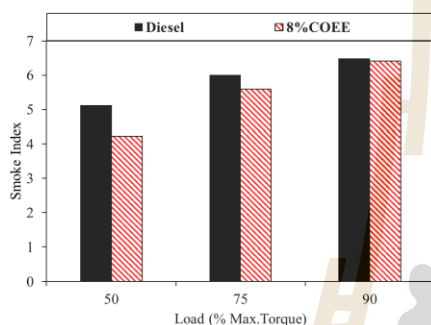


Figure 11. Variation of smoke emissions.

NOx emission is the main emission of compression ignition engine or diesel engine because diesel engine operated at high combustion temperature which is more favourable the NOx formation. The variation of the NOx emission with engine loads and test fuels was shown in Figure 12. It can be seen that NOx emissions of 8% COEE were decreased by 25.93 to 46.56%, compared with diesel fuel. Commonly, The oxygen present in fuel molecules of biodiesel can improve the combustion process resulting in the increase in the combustion temperature and the retard in start of combustion due to low cetane number can promote the high peak of premixed combustion, which tend to increase NOx emissions. However, the decrease in NOx emissions was found with the use of COEE blend in this study. The reason which may be used to explain such NOx reduction is higher viscosity of COEE blend than diesel fuel. Higher viscosity of fuel molecule can cause the difficulty of fuel atomization which may reduce the charge temperature and is effective to NOx alleviation [10].

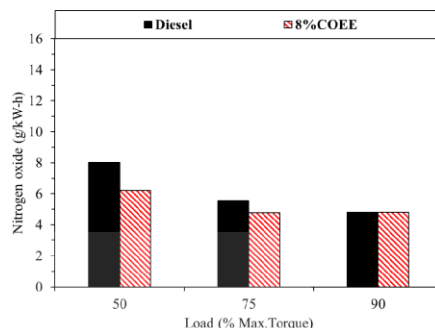


Figure 12. Variation of oxides of nitrogen emissions.

CONCLUSIONS

The incorporation of castor oil based ethyl ester biodiesel as blend components to reduce the use of diesel fuel in a compression ignition engine was investigated in this study and the following conclusions can be drawn.

- The optimum transesterification conditions with consideration of the reaction yield was 1:12 oil to ethanol molar ratio, 1.50% KOH, reaction temperature of 40 °C and reaction time of 150 minutes.
- The presence of 8% COEE in diesel fuel showed the best lubricity with smallest wear scar diameter and its viscosity was under the limitation of diesel fuel specification prescribed by the European standard.
- The addition COEE to diesel fuel tended to reduce fuel consumption, resulting in the increase in thermal efficiency.
- Carbonaceous gas emissions and smoke emissions were reduced by the addition of COEE, mainly due to the presence of oxygen in COEE.
- The reduction in NOx emissions was obtained with the combustion of COEE blend, supposedly due to higher viscosity of COEE blend resulting in lower charge temperature.
- Castor oil ethyl ester has been shown a feasible alternative for biodiesel due to the most relevant benefits of engine performance and engine-out emissions.

REFERENCES

1. D.P. Geller DP, J.W. Goodrum. Effects of specific fatty acid methyl esters on diesel fuel lubricity. *Fuel*. 2004;83:2351-2356.
2. R.Sattanathan. Production of Biodiesel from Castor Oil with its Performance and Emission Test. *International Journal of Science and Research*. 2013;4:2319-7064.

3. Abdelrahman B. Fadhil, Emaad T.B. Al-Tikrity, Mohammed A. Albadree. Biodiesel production from mixed non-edible oils, castor seed oil and waste fish oil. *Fuel*. 2017;210:721-728.
4. Laureano Canoira, Juan Garcia Galean, Ramon Alcantara, Magin Lapuerta, Reyes Garcia-Contreras. Fatty acid methyl esters (FAMES) from castor oil: Production process assessment and synergistic effects in its properties. *Renewable Energy*. 2010;35:208-217.
5. S.T. Keera, S.M.El Sabagh, A.R. Taman. Castor oil biodiesel production and optimization. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2018;27:979-984.
6. E. Sukjit, J.M. Herreros, J. Piaszyk, K.D. Dearn, A. Tsolakis. Finding synergies in fuels properties for the design of renewable fuels – hydroxylated biodiesel effects on butanol-diesel blends, *Environmental Science & Technology*. 2013, 47:3535-3542.
7. E. Sukjit, J.M. Herreros, K.D. Dearn, A. Tsolakis. Improving ethanol-diesel blend through the use of hydroxylated biodiesel. *SAE Technical*. 2014 (2014-01-2776).
8. E. Sukjit, P. Liplap, S. Maithomklang, W. Arjharn. Experimental Investigation on a DI Diesel Engine Using Waste Plastic Oil Blended with Oxygenated Fuels, *SAE Technical Paper*, 2017, 2017-24-0116.
9. A.V. Bueno, M.P.B. Pereira, J.V. de Oliveira Pontes, F.M.T. de Luna, C.L. Cavalcante, Performance and emissions characteristics of castor oil biodiesel fuel blends, *Apply Thermal Energy*, vol. 125, pp. 559-566, 2017.

CONTACT INFORMATION

Dr. Ekarong. Sukjit
 School of Mechanical Engineering
 Suranaree University of Technology
 Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
 Email: ekarong@sut.ac.th

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank you to the National Science and Technology Development Agency (NSTDA) according to the Thailand Graduate Institute of Science and Technology (TGIST) scholarship for financial support of Mr. Anupap PumPuang. National Metal and Materials Technology Center is acknowledged for the lubricity equipment.

ประวัติผู้เขียน

นายอนุภาพ พุ่มพวง เกิดเมื่อวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2539 ที่อำเภอเมืองจังหวัดพิจิตร สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนพิจิตรพิทยาคม อำเภอเมือง จังหวัดพิจิตร ในปีการศึกษา 2556 ในระหว่างศึกษาอยู่ระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 และ 5 ได้มีโอกาสเข้าร่วมอบรมโครงการส่งเสริมโอลิมปิกวิชาการและพัฒนามาตรฐานวิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ (สอวน.) ค่าฯ 1 และ 2 ณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก จากนั้นได้เข้าศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปีการศึกษา 2557 โดยได้รับทุนการศึกษาในโครงการโอลิมปิกวิชาการจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีเมื่อปีการศึกษา 2560 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2560 โดยได้รับทุนการศึกษาจากโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) โดยระหว่างการศึกษาได้รับโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนรายวิชาเขียนแบบทางกล และปฏิบัติการทางพลศาสตร์และระบบควบคุมในยานยนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี