

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางเชื้อเพลิงและกระบวนการหล่อลื่นของ
น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์



นางสาวสรลพร ศรีประทุม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2566

A STUDY OF EFFECT OF PARAMETERS ON FUEL PROPERTIES AND
LUBRICATION OF BIO-HYDROGENATED DIESEL



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2023

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางเชื้อเพลิงและกระบวนการหล่อลื่นของ
น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.เล็ก วันทา)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.อรรถพล มณีแดง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.เอกรังค์ สุขจิต)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



(อ. ดร.สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์)

กรรมการ



(รศ. ดร.สุวิมล วงศ์สกุลเกสัช)

กรรมการ



(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สรลพร ศรีประทุม: การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชื้อเพลิงและกระบวนการหล่อลื่น
ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ (A STUDY OF EFFECT OF PARAMETERS ON FUEL
PROPERTIES AND LUBRICATION OF BIO-HYDROGENATED DIESEL)

อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล มณีแดง , 145 หน้า.

คำสำคัญ : น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ การหล่อลื่น ไทโรโบโลยี

มลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก 2.5 ไมครอน ก่อให้เกิดความ
เสี่ยงอย่างมากต่อสุขภาพของมนุษย์ เช่น ปัญหาระบบทางเดินหายใจ และมีส่วนทำให้เกิดภาวะ
โลกร้อนผ่านการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ปัญหาเหล่านี้มีต้นกำเนิดหลักมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงใน
ภาคอุตสาหกรรม อุตสาหกรรมการขนส่งยังทำให้สถานการณ์แยลง เนื่องจากมีการใช้เชื้อเพลิงมากขึ้น
และขนาดของยานพาหนะใหญ่ขึ้น การสึกหรอของหัวฉีดน้ำมันนำไปสู่การจ่ายน้ำมันที่มากเกินไป
ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และการก่อตัวของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ยิ่งไปกว่านั้น
ราคาน้ำมันที่สูงขึ้นทำให้เชื้อเพลิงชีวภาพมีความสำคัญมากขึ้นในฐานะทางเลือกแทนน้ำมันปิโตรเลียม
ส่งผลให้การใช้ไบโอดีเซล เช่น B7, B10 และ B20 ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นไบโอดีเซลสามารถผลิตได้
จากวัตถุดิบชีวมวลประเภทต่างๆ รวมถึงปาล์มและเมล็ดละหุ่ง ผ่านกระบวนการ
ทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเชื้อเพลิงชีวภาพอีกประเภทหนึ่งคือ น้ำมันดีเซล
ชีวภาพสังเคราะห์ หรือ Bio-Hydrogenated Diesel แม้ว่าจะได้มาจากชีวมวลเช่นเดียวกับไบโอดีเซล
แต่ได้ผ่านกระบวนการไฮโดรจิเนชัน ทำให้มีองค์ประกอบโมเลกุลที่คล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซล
ปิโตรเลียมมาก จึงสามารถใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลได้ ด้วยเหตุนี้ ไบโอดีเซลเจเนเตดดีเซลจึงมีสมบัติ
เทียบเคียงกับน้ำมันดีเซลปิโตรเลียม อย่างไรก็ตาม ไบโอดีเซลเจเนเตดดีเซลยังต้องได้รับการปรับปรุง
สมบัติเพิ่มเติม โดยเฉพาะในด้านคุณสมบัติการหล่อลื่นและความถ่วงจำเพาะ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
และทำให้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่ยั่งยืน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อ
กระบวนการหล่อลื่นและตรวจสอบสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ สร้างแผนที่การสึกหรอ
(Wear map) เพื่อจำลองสภาพการเกิดรอยสึกหรอให้ครอบคลุมระบบการทำงานของหัวฉีดน้ำมันใน
สภาวะต่าง ๆ ตลอดไปถึงการศึกษาลักษณะการหล่อลื่นแบบฟิล์มที่เกิดขึ้น โดยนำน้ำมันดีเซลชีวภาพ
สังเคราะห์ทดสอบสมบัติการหล่อลื่นด้วยเครื่อง High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR) ตาม
มาตรฐาน ISO 12156-1: 2018 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นบนรอยสึกหรอด้วยเครื่องฟลูอริเออร์
ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรไมโครสโคปและตรวจสอบลักษณะพื้นผิวบนรอยสึกหรอที่เกิดขึ้น
ด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากผลการทดสอบการเพิ่มร้อยละ 3 – 90 ของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ทำให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยสึกหรอลดลงอยู่ในช่วง 177.5 – 375.0 μm ค่าเฉลี่ยอัตราร้อยละของฟิล์มอยู่ระหว่าง 72 - 97 และ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอยู่ระหว่าง 0.125 – 0.178 เนื่องจากการสร้างชั้นฟิล์มที่มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นจากการมีโมเลกุลของออกซิเจนที่พบในหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์และการที่โมเลกุลมีขั้วสามารถดูดซับบนพื้นผิวโลหะ ซึ่งสัดส่วนที่เหมาะสมในการผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ คือ ในปริมาณร้อยละ 10 โดยปริมาตร เป็นสัดส่วนเริ่มต้นที่มีค่าสมบัติการหล่อลื่นและสมบัติอื่น ๆ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของน้ำมันดีเซล

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการหล่อลื่นของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์และที่มีการผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ผลการทดสอบปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการหล่อลื่นมากที่สุดเมื่อมีการผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันตามค่าขนาดของผล Cohen's d คือ โหลด อุณหภูมิ ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ และ เวลาที่ใช้ในการทดสอบ ตามลำดับ โดยที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดและเวลาที่ใช้ในการทดสอบน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์และที่เพิ่มร้อยละ 10 และ 20 ของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน จะทำให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยสึกหรอมีขนาดเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 609.0 – 898.4 176.0 – 315.5 และ 180.0 – 367.0 μm ตามลำดับ เนื่องจากโหลดและเวลาที่ใช้ในการทดลองที่เพิ่มขึ้นทำให้บอลและแผ่นดิสก์มีแรงกดมากขึ้นเพิ่มพื้นที่ของผิวสัมผัสในระยะเวลาที่นานขึ้น สำหรับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อผสมร้อยละ 10 โดยปริมาตรของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ที่โหลด 200 g และ 1000 g ทำให้ขนาดค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยสึกหรอมีขนาดอยู่ที่ 162.0 – 328.5 μm และ 245.0 – 380.5 μm ตามลำดับ เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณของออกซิเจนสูงขึ้นชั้นขอบเขตการหล่อลื่นที่แย่ง การเกิดปฏิกิริยาไทรโบฟิล์มบนพื้นผิวโลหะและอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิง

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา *ศิริพร*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *ath*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม *10/2566*

SARUNPORN SRIPRATHUM: A STUDY OF EFFECT OF PARAMETERS ON FUEL
PROPERTIES AND LUBRICATION OF BIO-HYDROGENATED DIESEL

THESIS ADVISOR: ASST. PROF.ATTHAPHON MANEEDAENG, Ph.D. , 145 PP.

Keyword : Bio-Hydrogenated diesel, Lubrication, Tribology

Air pollution, particularly from particulate matter as small as 2.5 μm , poses significant risks to human health, causing respiratory issues and contributing to global warming through greenhouse gas emissions. These problems primarily originate from fuel combustion in industrial sectors. The transportation industry exacerbates the situation by consuming more fuel and increasing vehicle sizes. Fuel injector wear leads to excessive fuel delivery, resulting in incomplete combustion and the formation of carbon monoxide gas. Moreover, rising fuel prices have heightened the importance of biofuels as alternatives to petroleum-based fuels. Consequently, the use of biodiesel, such as B7, B10, and B20, has gained prominence. Biodiesel can be derived from various biomass feedstocks, including palm and castor beans, through the process of transesterification. Another biofuel, Bio-Hydrogenated Diesel, has also been developed. Although derived from biomass like biodiesel, it undergoes hydrogenation, making it highly similar to petroleum diesel in terms of molecular composition, enabling its use in diesel engines. As a result, Bio-Hydrogenated Diesel exhibits comparable properties to its petroleum counterpart. However, further improvements are necessary for Bio-Hydrogenated Diesel, particularly in terms of lubrication properties and specific gravity, to optimize its performance and ensure its viability as a sustainable alternative fuel. Therefore, this research aims to study the factors affecting the lubrication process and examine the properties of Bio-Hydrogenated Diesel. It's creating a wear map to simulate the wear conditions of the oil injector under different conditions. Additionally, the study aims to investigate the characteristics of film lubrication that occurs. This will be done by testing the lubricating properties of Bio-Hydrogenated Diesel oil using a High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR) according to ISO 12156-1: 2018. Furthermore, the research will analyze the functional groups

formed on wear from disk using a Fourier Transform Infrared Spectromicroscope and examine the surface texture of the wear created with a scanning electron microscope.

The results show that adding 3 - 90 % of Fatty acid methyl ester to Bio-hydrogenated diesel caused the average wear scar diameter to decrease within the range of 177.5 – 375.0 μm. The average rate of % film ranged between 72 - 97 %, and the friction of coefficient ranged between 0.125 - 0.178. This is because the presence of oxygen molecules found in the carboxylic functional groups of biodiesel creates a more stable film layer. Additionally, polar molecules can adsorb on metal surfaces. The appropriate proportion for mixing fatty acid methyl ester in Bio-hydrogenated diesel is 10 % by volume, which meets the criteria for lubricity and other properties within the standards for diesel.

The research also studied the factors affecting the lubrication process of Bio-Hydrogenated Diesel mixed with 10 and 20% fatty acid methyl ester by volume. The results showed that the most effect size, Cohen’s d values influencing lubrication were load, temperature, % relative humidity and time respectively. When the load and time were altered with Bio-Hydrogenated Diesel and with the addition of 10 and 20 percent of fatty acid methyl ester, it led to an increase in the average wear scar diameter within the ranges of 609.0 - 898.4 μm, 176.0 - 315.5 μm, and 180.0 – 367.0 μm, respectively. The wear scar diameter increases when the load and time increases. This is because the pressure on the ball and disc increases, which makes the contact surface area larger. For the % relative humidity and temperature of Bio-Hydrogenated, when mixed with 10% by volume of fatty acid methyl ester at load 200 g and 1000 g, the average wear scar diameter ranged between 162.0 - 328.5 μm and 245.0 - 380.5 μm, respectively. This can be attributed to increased relative humidity leading to a higher amount of oxygen and a worsened lubrication boundary layer. Also, higher temperatures cause more fuel to evaporate.

School of Chemical Engineering
 Academic year 2023

Student’s Signature.....
 Advisor’s Signature
 Co-Advisor’s Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล มณีแดง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรงค์ สุขจิต อาจารย์ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ได้กรุณาแนะนำ ช่วยเหลือ ทางด้านวิชาการและการดำเนินการวิจัย ตลอดจนคำแนะนำในการเขียน การตรวจทาน แก้ไข วิทยานิพนธ์และสนับสนุนค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในการวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก วันทา ประธานกรรมการ อาจารย์ ดร.สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล วงศ์สกุลเกษัช คณะกรรมการ ที่ได้ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางเพิ่มเติมในการดำเนินงานวิจัยและให้ความช่วยเหลือตลอดการศึกษาทั้ง ด้านวิชาการทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้อบรมให้คำปรึกษาแนะแนวทางในด้านวิชาการตลอดจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณคุณศรัณย์ ดอกไม้กุล เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่อำนวยความสะดวกในการจัดหาเครื่องมืออุปกรณ์และให้คำแนะนำตลอดการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณคุณอัมพร ลาดหนองขุ่นที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ประสานงานและให้คำปรึกษา ทางด้านเอกสารตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนทางด้านทุนการศึกษาและเปิดโอกาส ในการเข้าศึกษาและดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณย่า บิดา มารดา และครอบครัวที่ให้โอกาสทางการศึกษา คอยให้กำลังใจและสนับสนุนค่าใช้จ่ายตลอดการศึกษาจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีรวมทั้งขอบคุณเพื่อนพี่น้องทุกท่านที่คอยสนับสนุนและให้คำปรึกษา จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

สร้อยพร ศรีประทุม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ (Bio-Hydrogenated Diesel, BHD).....	4
2.1.1 กระบวนการผลิต	4
2.1.2 เทคโนโลยีในการผลิต	6
2.1.3 สมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์	8
2.2 น้ำมันไบโอดีเซล (Biodiesel).....	9
2.2.1 กระบวนการผลิต	9
2.3 สมบัติเบื้องต้นของไบโอดีเซล	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.1 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ณ อุณหภูมิ 15 °C.....	12
2.3.2 ความหนืด (Kinematic viscosity) ณ อุณหภูมิ 40 °C.....	12
2.3.3 ค่าซีเทน (Cetane number).....	13
2.3.4 จุดไหลเท (Pour point).....	13
2.3.5 เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Stability)	13
2.3.6 จุดวาบไฟ (Flash point).....	13
2.3.7 สมบัติการหล่อลื่น รอยสึกหรอ (Lubricity, Wear Scar).....	13
2.4 ทฤษฎีไทรโบโลยี.....	13
2.4.1 การเสียดทาน (Friction)	14
2.4.2 การสึกหรอ (Wear).....	15
2.4.3 การหล่อลื่น (Lubrication).....	17
2.4.4 Stribeck Diagram.....	19
2.5 การหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง (Thin film lubrication)	20
2.5.1 การปรับปรุงการเสียดทาน (Friction modifiers).....	21
2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)	23
2.6.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way analysis of variance)..	23
2.6.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางเดียว (Two-way analysis of variance).....	23
2.6.3 การเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple comparisons).....	23
2.7 ขนาดอิทธิพล (Effect size)	25
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
3 วิธีดำเนินการวิจัย	31
3.1 สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	31
3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้.....	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 สารเคมีที่ใช้	31
3.2 การเตรียมตัวอย่างน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์	32
3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง	32
3.4 กระบวนการวิเคราะห์สมบัติการหล่อลื่นตาม ISO 12156-1: 2018	36
3.5 กระบวนการวิเคราะห์สมบัติการหล่อลื่นเมื่อโหลดและเวลาเปลี่ยนแปลง	38
3.6 กระบวนการวิเคราะห์สมบัติการหล่อลื่นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง	39
3.7 กระบวนการวิเคราะห์ผลการทดลอง	40
4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	42
4.1 การศึกษาสารประกอบทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง	43
4.2 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิง	46
4.2.1 ความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic viscosity)	46
4.2.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	47
4.2.3 ความหนาแน่น (Density)	48
4.2.4 ดัชนีซีเทน (Cetane index)	49
4.2.5 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Higher heating value)	50
4.2.6 อุณหภูมิการกลั่น (Distillation temperature)	51
4.2.7 จุดวาบไฟ (Flash point)	53
4.3 การศึกษาสมบัติการหล่อลื่นและสมบัติของไทรโบโลยี	54
4.3.1 ผลการทดสอบโดยเครื่อง High Frequency Reciprocating Rig (HFRR)	54
4.3.2 ผลการวิเคราะห์โดยเครื่องเครื่องฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรไมโครสโคป	59
4.3.3 ผลการวิเคราะห์โดยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	62
4.3.4 ผลการวิเคราะห์โดยเครื่องกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคปแบบเลเซอร์สามมิติ ...	64

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4	การวิเคราะห์ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อโทรโบลีย์.....	67
4.4.1	ผลการวิเคราะห์แผนภูมิค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอจากปัจจัยของโหลด และ เวลา.....	67
4.4.2	ผลการวิเคราะห์แผนภูมิค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอจากปัจจัยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์	75
4.4.3	ผลการวิเคราะห์โดยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจากปัจจัยสิ่งแวดล้อม	82
4.4.4	ผลการวิเคราะห์โดยเครื่องกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคปแบบเลเซอร์สามมิติจากปัจจัยสิ่งแวดล้อม.....	86
5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	90
5.1	ผลการศึกษาคำประกอบทางเคมี	90
5.2	ผลการศึกษาสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิง	90
5.3	ผลการศึกษาสมบัติการหล่อลื่นและโทรโบลีย์.....	91
5.4	ผลการศึกษาปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อโทรโบลีย์.....	91
5.5	ข้อจำกัดของงานวิจัย	92
5.6	ข้อเสนอแนะ	92
	รายการอ้างอิง	94
	ภาคผนวก ก ผลการตรวจวิเคราะห์สมบัติพื้นฐาน	102
	ภาคผนวก ข ผลการตรวจสมบัติการหล่อลื่น	110
	ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางและ Cohen's d.....	124
	ภาคผนวก ง บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	133
	ประวัติผู้เขียน	145

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 น้ำมันและตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์.....	5
2.2 สมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์และไบโอดีเซลเทียบกับน้ำมันดีเซล	8
2.3 น้ำมันและตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไบโอดีเซล	11
2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง	24
3.1 ค่ามาตรฐานสำหรับการทดสอบสมบัติการหล่อลื่นตามมาตรฐาน ISO 12156-1: 2018.....	37
3.2 เกลลี่ที่ใช้ควบคุมความชื้นที่อุณหภูมิห้องทดลอง	39
4.1 ผลวิเคราะห์สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรีของ น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์	44
4.2 ผลวิเคราะห์สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรีของ น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	45
4.3 ภาพถ่ายรอยสีหรือด้วยกล้องจุลทรรศน์ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อมีร้อยละของ น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น	57
4.4 ผลวิเคราะห์ธาตุโดยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยเทคนิค EDS.....	63
4.5 ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสีหรือในช่วงโพลด 200 – 1000 g และ เวลา 75 – 150 นาที 70	
4.6 ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยสีหรือในช่วงอุณหภูมิ 60 – 150 °C และ ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 10 – 90	78
4.7 ผลการทดสอบโดยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อเปลี่ยนปัจจัยโพลด และ เวลา	84
4.8 ผลการทดสอบโดยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อเปลี่ยนปัจจัย ความชื้นสัมพัทธ์ และ อุณหภูมิ.....	85
4.9 ผลวิเคราะห์ธาตุโดยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยเทคนิค EDS เมื่อ เปลี่ยนปัจจัยสิ่งแวดลอม.....	86
4.10 ผลการทดสอบขนาดความลึกและภาพถ่ายสามมิติของแผ่นดิสก์ โดยกล้องจุลทรรศน์ไมโคร สโคปแบบเลเซอร์สามมิติเมื่อเปลี่ยนปัจจัยโพลด และ เวลา	88

4.11 ผลการทดสอบขนาดความลึกและภาพถ่ายสามมิติของแผ่นดิสก์ โดยกล้องจุลทรรศน์ไมโคร
 สโคปแบบเลเซอร์สามมิติเมื่อเปลี่ยนปัจจัยความชื้น และ อุณหภูมิ 89



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ปฏิกริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation).....	4
2.2 เทคโนโลยีในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพสังเคราะห์	7
2.3 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification)	9
2.4 ทฤษฎีไทรโบโลยี.....	14
2.5 การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesion wear).....	15
2.6 การสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive wear).....	16
2.7 การสึกหรอแบบการล้า (Fatigue wear).....	16
2.8 การสึกหรอแบบไทรโบเคมีคอลหรือการกัดกร่อน (Tribochemical reaction wear/Corrosive wear).....	17
2.9 Stribeck Diagram	19
2.10 แบบจำลองการหล่อลื่นของฮาร์ดี้	21
2.11 การปรับปรุงการเสียดทานอินทรีย์.....	22
3.1 เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบหลอดแก้วรูเล็ก	33
3.2 ไฮโดรมิเตอร์สำหรับการวัดความถ่วงเอพียู	34
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์อุณหภูมิการกลั่น.....	34
3.4 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์.....	35
3.5 เครื่องมือวิเคราะห์จุดวาบไฟ.....	36
3.6 เงื่อนไขของอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องทดสอบ.....	37
3.7 เครื่อง High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR).....	38
3.8 เครื่องฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรไมโครสโคป (FTIR Micro-Spectrometer) ...	40
3.9 เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)...	41
3.10 เครื่องกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคปแบบเลเซอร์สามมิติ (3D Laser Scanning Microscope). 41	
4.1 ความหนืดจลนศาสตร์ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อมีร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซล ประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น	47

4.2 ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อมีร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น	48
4.3 ความหนาแน่นของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อมีร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น.....	49
4.4 ดัชนีซีเทนของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อมีร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น.....	50
4.5 ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อมีร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น	51
4.6 อุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล.....	53
4.7 จุดวาบไฟของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อมีร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น.....	54
4.8 ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อมีร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น.....	56
4.9 ร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อมีร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น	59
4.10 ร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น	59
4.11 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันด้วยเทคนิค FT-IR.....	61
4.12 ภาพถ่ายของแผ่นดิสก์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น.....	63
4.13 ขนาดความลึกของแผ่นดิสก์โดยกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคปแบบเลเซอร์สามมิติที่ร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น	65
4.14 ภาพถ่ายสามมิติของแผ่นดิสก์โดยกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคปแบบเลเซอร์สามมิติที่ร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น	66
4.15 แผนที่ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอ ในช่วงโหลด 200 – 1000 g และ เวลา 75 – 150 นาที ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์บริสุทธิ์ และ ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร	71
4.16 แผนที่ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอ ในช่วงโหลด 200 – 1000 g และ เวลา 75 – 150 นาที ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์	71

- 4.17 แผนทีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอ ในช่วงโหลด 200 – 1000 g และ เวลา 75 – 150 นาที ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันร้อยละ 10 โดยปริมาตร..... 72
- 4.18 แผนทีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอ ในช่วงโหลด 200 – 1000 g และ เวลา 75 – 150 นาที ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันร้อยละ 20 โดยปริมาตร..... 72
- 4.19 แผนทีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ในช่วงโหลด 200 – 1000 g และ เวลา 75 – 150 นาที ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์บริสุทธิ์ และ ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร 74
- 4.20 แผนทีอัตราร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่น ในช่วงโหลด 200 – 1000 g และ เวลา 75 – 150 นาที ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์บริสุทธิ์ และ ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร..... 74
- 4.21 แผนทีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอ ในช่วงอุณหภูมิ 60 – 150 °C และ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 - 90 โดยปริมาตร ซึ่งใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ทีโหลด 200 g และ 1000 g..... 79
- 4.22 แผนทีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอ ในช่วงอุณหภูมิ 60 – 150 °C และ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 - 90 โดยปริมาตร ซึ่งใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ทีโหลด 200 g..... 79
- 4.23 แผนทีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอ ในช่วงอุณหภูมิ 60 – 150 °C และ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 - 90 โดยปริมาตร ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ทีโหลด 1000 g..... 80
- 4.24 แผนทีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ในช่วงอุณหภูมิ 60 – 150 °C และ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 - 90 โดยปริมาตร ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ทีโหลด 200 g และ 1000 g 81

- 4.25 แผนที่แสดงอัตราร้อยละของฟิล์มการหล่อขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 60 – 150 °C และ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 - 90 โดยปริมาตร ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่ไหลด 200 g และ 1000 g.. 81



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัญหามลพิษทางอากาศที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน จากการสูดดมฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 μm หรือ PM 2.5 และมลพิษอื่น ๆ เข้าสู่ร่างกาย ผ่านระบบทางเดินหายใจ ส่งผลให้เกิดโรคทางระบบหายใจ อาทิเช่น โรคหอบหืด และโรคภูมิแพ้ ปัญหามลพิษทางอากาศนี้ส่วนหนึ่งเกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงฟอสซิลในเครื่องยนต์ดีเซล การคมนาคม การสีกรของหัวฉีดน้ำมัน ทำให้จ่ายน้ำมันมากเกินไปเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ สร้างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และ การขยายตัวของเขตอุตสาหกรรมที่มีเครื่องจักร ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สเรือนกระจก ที่ส่งผลต่อปัญหาภาวะโลกร้อนเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมไปทั่วโลก นอกจากนี้ ปัญหาราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่เพิ่มสูงขึ้น เกิดจากหลายปัจจัย เช่น การนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิง (น้ำมันดิบ) ในปี 2565 ประเทศไทยมีการนำเข้าเพิ่มขึ้น คิดเป็น ร้อยละ 5.8 เป็นมูลค่า 1,257,475 ล้านบาท/ปี (กรมธุรกิจพลังงาน, 2563) รวมไปถึงความผันผวนของราคาน้ำมันที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนในการขนส่ง ดังนั้นการแก้ไขปัญหาดังกล่าวเป็นเรื่องที่สำคัญ จำเป็น และเร่งด่วน เพื่อที่จะเป็นส่วนหนึ่งในการช่วยลดปริมาณของแก๊สเรือนกระจก และลดการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม แนวทางการแก้ไขอย่างหนึ่ง คือ การใช้พลังงานทางเลือก พลังงานสะอาด หรือ พลังงานทดแทนที่จะสามารถลดปริมาณควันเขม่าและแก๊สเรือนกระจก หลายประเทศเริ่มที่จะมีการปรับตัวหันมาใช้พลังงานทางเลือกกันมากขึ้นและออกนโยบายการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ เพื่อแก้ปัญหาภาวะโลกร้อน

น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ (Bio-Hydrogenated Diesel, BHD) คือ พลังงานทางเลือกที่น่าสนใจ จัดเป็น second generation biodiesel ที่ผลิตจากพืชหรือไขมันจากสัตว์ที่ไม่สามารถนำมารับประทานได้ (Caprotti et al., 2011) ผ่านกระบวนการการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) โดยใช้ การเร่งปฏิกิริยา ทำให้มีโครงสร้างทางโมเลกุลที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาว $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ และ $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$ แต่มีข้อดีที่แตกต่างไปจากน้ำมันดีเซลปิโตรเลียม คือ ตัวเลขซีเทนที่สูง ปริมาณซัลเฟอร์ต่ำ (Phichitsurathaworn et al., 2021) และ ยังเป็นพลังงานสะอาดที่ลด

การปล่อย ไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ได้ถึงร้อยละ 9 ลดการปล่อยฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 μm ถึง ร้อยละ 31 (Hartikka, Kuronen, & Kiiski, 2012) แต่ยังมีสมบัติบางประการที่ยังต้องปรับปรุงนั้น คือ สมบัติของการหล่อลื่นของน้ำมันที่มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม ที่ถูกควบคุมตามกรมพลังงานให้มีค่าไม่เกิน 460 μm (กรมธุรกิจพลังงาน, 2563) การหล่อลื่นที่ไม่ดี อาจจะผลต่อการสึกหรอของเครื่องยนต์ได้ ซึ่งในการปรับปรุงสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันสามารถทำได้หลายวิธี ตัวอย่างเช่น ใช้น้ำมันดีเซลที่มีกำมะถันต่ำผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้มาจากเรพซิด เพื่อปรับปรุงสมบัติความหล่อลื่นของ Swedish diesel fuel MK1 (Sukjit & Dearn, 2011) ศึกษาผลกระทบของคุณลักษณะความหล่อลื่นบนไทรโบโลยีของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้มาจากน้ำมันจากขยะพลาสติกและน้ำมันพืชใช้แล้ว (Awang et al., 2022) การผสมน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพสังเคราะห์กับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสมรรถนะของรถยนต์ และ ลดการปล่อยไอเสีย ซึ่งสาเหตุที่ยังใช้น้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมเนื่องจากสมบัติบางประการของ น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพสังเคราะห์ที่ยังเป็นข้อจำกัด และ ต้องทำการปรับปรุง เช่น สมบัติการไหลที่อุณหภูมิต่ำ และ สมบัติการหล่อลื่น (M. Lapuerta, Villajos, Agudelo, & Boehman, 2011) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน และการปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ โดยการใช้ น้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ในสัดส่วนต่าง ๆ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ปรับปรุงสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพสังเคราะห์ โดยตรงยังมีการศึกษาจำนวนไม่มาก

ในงานวิจัยนี้จะทำการปรับปรุงและตรวจสอบสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์โดยใช้สารเติมแต่ง คือ น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Methyl Ester) เป็น น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพรุ่นแรก ซึ่งเป็นน้ำมันจากน้ำมันพืชไขมันสัตว์นำมาผ่านกระบวนการปฏิกิริยาแบบทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายผสมกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม ในปัจจุบันที่รู้จักกันในนามของ B7 และ B10 โดย น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันสามารถช่วยเพิ่มสมบัติการหล่อลื่นให้กับน้ำมันดีเซลลดแรงเสียดทานและการสึกหรอ (Zengshe Liu, Li, Knothe, Sharma, & Jiang, 2019) เพื่อที่จะปรับปรุงให้น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีสมบัติของการหล่อลื่นที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังทำการศึกษาทฤษฎีไทรโบโลยีของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ผลิต เพื่อให้ได้น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ลดลง และ ยืดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์ดีเซลให้เพิ่มขึ้นลดปัญหาการสึกหรอของหัวฉีดน้ำมันซึ่งจะทดสอบประสิทธิภาพการหล่อลื่นของน้ำมันผ่านเครื่อง High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR) ตามมาตรฐาน ISO 12156-1: 2018

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อปรับปรุงสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงให้ดียิ่งขึ้นโดยการผสมน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์กับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน และ ตรวจสอบสมบัติของน้ำมันที่มีส่วนผสมของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์กับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

1.2.2 ศึกษาปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อไทรโบโลยีของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ที่ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน เช่น โหลด เวลา ความชื้นสัมพัทธ์ และ อุณหภูมิ

1.2.3 เพื่อศึกษาการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ที่ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ทดสอบสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ด้วยเครื่อง High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR) ตามมาตรฐาน ISO 12156-1: 2018

1.3.2 ใช้มาตรฐานการทดสอบของสมาคมการทดสอบและวัสดุประเทศสหรัฐอเมริกา (ASTM) ในการทดสอบสมบัติอื่น ๆ ของน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพสังเคราะห์

1.3.3. น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ ผลิตจากน้ำมันปาล์ม (Bio Hydrogenated Diesel, BHD) จาก บริษัท วีระสุวรรณ จำกัด

1.3.4. น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ผลิตจากน้ำมันปาล์ม (Fatty Acid Methyl Ester, FAME) จาก บริษัท ไบโอดีเซลเนอรัจี้ จำกัด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1. เพื่อได้น้ำมันที่มีส่วนผสมของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์กับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่มีสมบัติที่ดีขึ้นและใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมาตรฐานสามารถนำไปใช้กับรถเครื่องยนต์ดีเซล

1.4.2. เพื่อพฤติกรรมทางไทรโบโลยีของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ที่ผลิต

1.4.3. เพื่อปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อรอยสึกหรอที่เกิดขึ้น

1.4.4. ผลการวิจัยจะเป็นแนวทางในการพัฒนาเชื้อเพลิงทางเลือกที่ช่วยลดปัญหามลพิษทางอากาศและภาวะโลกร้อน

1.4.5. เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องยนต์ดีเซลในอนาคตที่อาจมีสภาวะการทำงานที่ความดัน และ อุณหภูมิที่สูงขึ้น

บทที่ 2

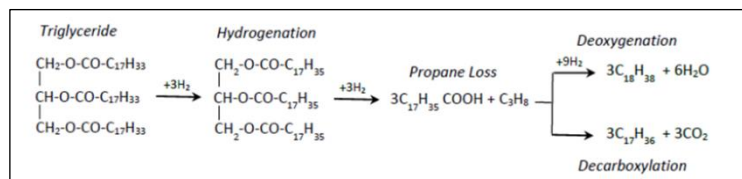
ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ (Bio-Hydrogenated Diesel, BHD)

น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เป็นผลผลิตมาจากน้ำมันพืช ไขมันจากสัตว์ และน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วซึ่งมีโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ โดยโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์มีองค์ประกอบ คือ กลีเซอรอล 1 โมเลกุลและกรดไขมันอีก 3 โมเลกุล ดังรูปที่ 2.1 หมู่คาร์บอกซิลจะเชื่อมต่อกันระหว่าง กลีเซอรอลและกรดไขมันที่เป็นสายโซ่ของคาร์บอน ซึ่งจะมีความยาวของสายโซ่ที่แตกต่างกันเป็น ปัจจัยหลักในการกำหนดสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อผ่านกระบวนการผลิต น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมและถูกจัดให้เป็น เชื้อเพลิงชีวภาพรุ่นที่ 2 (Second Generation Biodiesel) (Lambert, 2012)

2.1.1 กระบวนการผลิต

ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) เป็นปฏิกิริยาที่เติมไฮโดรเจนให้กับโมเลกุล ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวเพื่อทำปฏิกิริยากลายเป็นกรดไขมันที่อิ่มตัวซึ่งจะต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) และทำที่อุณหภูมิและความดันสูง เพื่อเปลี่ยนโมเลกุลให้เป็นพาราฟิน (n-alkane) ซึ่งจะมี จำนวนของคาร์บอนอะตอมใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม จากนั้นจะกำจัดออกซิเจนออก จาก ไตรกลีเซอไรด์ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน (Hydrodeoxygenation) นอกจากนี้จะเกิด เกิดปฏิกิริยาย่อย คือ ดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) และดีคาร์บอนิเลชัน (Decarbonylation) ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการ คือ น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ (Bio-Hydrogenated Diesel, BHD) หรือ น้ำมันพืชเติมไฮโดรเจน (Hydrogenated Vegetable Oil, HVO) (Dujanutat, Srihanun, Muanruksa, Winterburn, & Kaewkannetra, 2023) (Omojola, Kallon, & Pelemo, 2022)



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) (Shah, 2021)

ตารางที่ 2.1 น้ำมันและตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์

น้ำมัน	ตัวเร่งปฏิกิริยา	จำนวนตัวเร่งปฏิกิริยา (g)	สภาวะสำหรับทำปฏิกิริยา	ผลได้ BHD (%)	อ้างอิง
น้ำมันสบู่ดำ	Ni-HPW/Al ₂ O ₃	10	360 °C, 3.3 MPa, LHSV 1h ⁻¹ , H ₂ /oil 600 Nm ³ /m ³	99.85	C. Liu, Liu, Zhou, Tian, และ Rong (2013)
น้ำมันสบู่ดำ	Ni-Mo/SiO ₂ -Al ₂ O ₃	1	350 °C, 4 MPa, LHSV 7.6h ⁻¹ , H ₂ /oil 800 Nm ³ /m ³	83.5	Y. Liu, Sotelo-Boyás, Murata, Minowa, และ Sakanishi (2011)
น้ำมันคาโนลา	Ni-Mo/SiO ₂ -Al ₂ O ₃	1	350 °C, 4 MPa, LHSV 7.6 h ⁻¹ , H ₂ /oil 800 Nm ³ /m ³	81.4	Y. Liu et al. (2011)
น้ำมันปาล์ม	Ni-Mo/SiO ₂ -Al ₂ O ₃	1	350 °C, 4 MPa, LHSV 7.6 h ⁻¹ , H ₂ /oil 800 Nm ³ /m ³	82.1	Y. Liu et al. (2011)
น้ำมันปาล์ม	NiMoS ₂ /γ-Al ₂ O ₃	8.5	300 °C, 30 - 50 bar, LHSV 1 - 2 h ⁻¹ , H ₂ /oil 750 - 1000Nm ³ /m ³	90	Srifa et al. (2014)
ไขมันไก่	Ni/ γ-Al ₂ O ₃	8.5	330 °C, 50 bar, LHSV 2 h ⁻¹ , H ₂ /oil 1000 Ncm ³ /cm ³ ,	84	Kaewmeesri, Srifa, Itthibenchapong, และ Faungnawakij (2015)

2.1.1.1 ข้อดีของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์

- 1) สามารถผลิตจากชีวมวลและน้ำมันที่ใช้แล้วที่ไม่สามารถนำไปผลิตน้ำมันไบโอดีเซล
- 2) ลดการปล่อยมลพิษทางอากาศและแก๊สเรือนกระจก เช่น คาร์บอนมอนนอกไซด์และควีน
- 3) ค่าซีเทนที่สูง
- 4) ไม่มีซัลเฟอร์และไม่มีออกซิเจนเหลือจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์
- 5) ค่าความร้อนที่สูง
- 6) สามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องดัดแปลง
- 7) มีข้อจำกัดในการใช้งานน้อยกว่าไบโอดีเซล เช่น การใช้งานในอุณหภูมิต่ำ
- 8) เสถียรภาพที่สูงรักษาสภาพได้ดีกว่าไบโอดีเซล

2.1.1.2 ข้อเสียของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์

- 1) การหล่อลื่นที่ไม่ดีอาจส่งผลการสึกหรอให้แก่เครื่องยนต์ในระยะยาว
- 2) การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ (NOx) และฝุ่นขนาดเล็ก
- 3) ปัจจุบันมีราคาสูงกว่าน้ำมันดีเซล

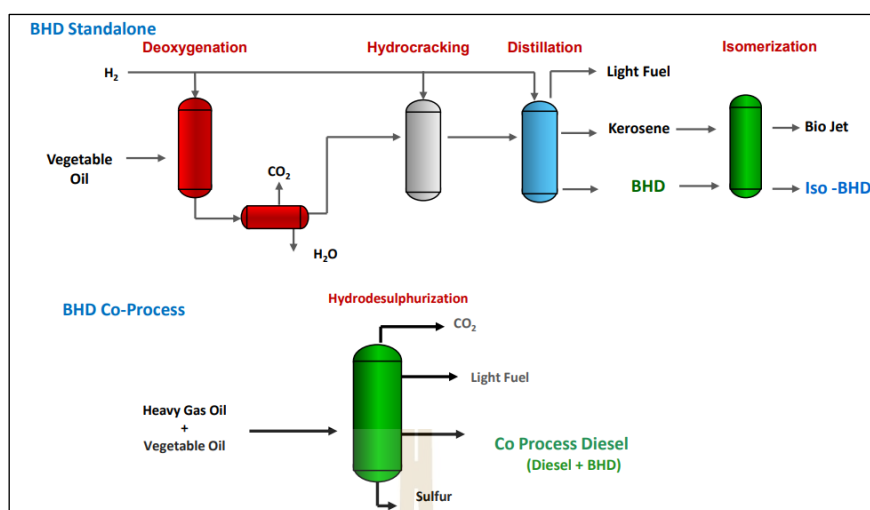
2.1.2 เทคโนโลยีในการผลิต

2.1.2.1 กระบวนการร่วม (Co-processing)

กระบวนการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์สามารถทำร่วมกับเทคโนโลยีการกลั่นที่มีอยู่เดิมในกระบวนการของการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำมัน (Hydrodesulphurization unit) ซึ่งจะใช้สารเร่งปฏิกิริยาและไฮโดรเจนที่อุณหภูมิและความดันสูง เช่นเดียวกันจึงสามารถที่จะนำมาปรับเป็นกระบวนการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ได้เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง

2.1.2.2 กระบวนการอิสระ (Stand-alone)

กระบวนการที่สร้างขึ้นใหม่ทำให้สามารถปรับให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตหรือปรับปรุงจากโรงกลั่นเดิมที่มีการใช้ไฮโดรเจนและการรีไซเคิลเพื่อให้ประสิทธิภาพสูงสุดแต่การสร้างกระบวนการผลิตขึ้นมาใหม่นี้ตามมาด้วยการใช้ต้นทุนในการลงทุนที่สูง



รูปที่ 2.2 เทคโนโลยีในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพสังเคราะห์ (ศิลปคัมภีรภาพ, 2556)

2.1.3 สมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์

ตารางที่ 2.2 สมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์และไบโอดีเซลเทียบกับน้ำมันดีเซล

คุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง	Diesel	BHD	FAME	วิธีทดสอบ
ความหนืดจลนศาสตร์ ณ อุณหภูมิ 40 °C (cSt)	3.12	2.58	5.16	ASTM D445
ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15 °C	0.830	0.770	0.850	ASTM D1298
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C (kg/m ³)	829	769	874	ASTM D1250
ดัชนีซีเทน	59	78	48	ASTM D976
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (MJ/kg)	43.48	47.02	39.62	ASTM D240
ค่ารอยสีกรอ (µm)	220	570	180	ISO 12156-1: 2018
อุณหภูมิการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ที่ ร้อยละ 10 โดยปริมาตร (°C)	222	220	336	ASTM D86
อุณหภูมิการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ที่ ร้อยละ 50 โดยปริมาตร (°C)	280	258	356	ASTM D86
อุณหภูมิการกลั่นของส่วนที่กลั่นได้ที่ ร้อยละ 90 โดยปริมาตร (°C)	334	274	374	ASTM D86
จุดวาบไฟ (°C)	65*	87	169	ASTM D93

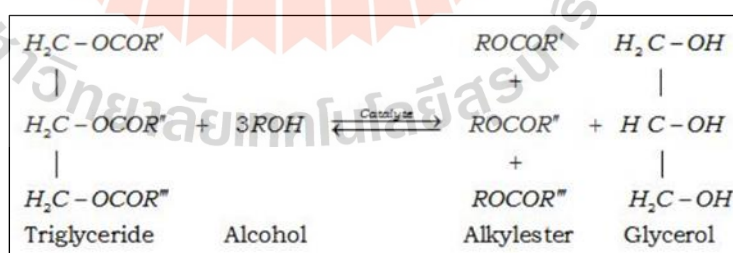
*(Hossain, Chowdhury, Islam, & Alamin, 2012)

2.2 น้ำมันไบโอดีเซล (Biodiesel)

ไบโอดีเซลหรือน้ำมันดีเซลชีวภาพซึ่งผลิตจากวัสดุทางชีวภาพน้ำมันจากพืช อาทิเช่น น้ำมันปาล์ม สาหร่ายและสบู่ดำ ไขมันจากสัตว์และน้ำมันทำอาหารที่ผ่านการใช้งานแล้วไบโอดีเซลเป็นพลังงานเชื้อเพลิงหมุนเวียนหรือพลังงานทดแทนให้กับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมที่มีอยู่อย่างจำกัด ไบโอดีเซลมีองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ที่ผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ซึ่งจะเติมแอลกอฮอล์เช่นเมทานอลหรือเอทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย อีกทั้งยังได้ผลพลอยได้คือกลีเซอรอล ปัจจุบันไบโอดีเซลถูกนำมาใช้ผสมกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม ซึ่งสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลร้อยละการผสมจะอยู่ที่ร้อยละ 5 - 20 ตัวอย่างเช่น B7 B10 และ B20 ซึ่งเป็นการปรับตัวจากการที่เชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีลดลงและปัญหาของภาวะโลกร้อนที่เพิ่มขึ้น ไบโอดีเซลจัดให้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพรุ่นที่ 1 (First Generation Biodiesel)

2.2.1 กระบวนการผลิต

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) เป็นปฏิกิริยาที่ไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์เช่นเอทานอลหรือเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อที่จะเปลี่ยนหมู่อัลคิล (Alkyl) ในไตรกลีเซอไรด์ให้อยู่ในรูปของโมโนอัลคิลเอสเทอร์ (Mono-alkyl ester) ซึ่งจะเป็นสารที่ขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้กระบวนการผลิตได้เป็นเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Methyl Ester, FAME) หรือ เอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Ethyl Ester, FAEE) และในกระบวนการผลิตนี้จะได้กลีเซอรอล (Glycerol) เป็นผลพลอยได้ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification)

2.2.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม

2.2.1.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ

การเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalysts) ตัวอย่างเช่น

1) ด่าง (Basic) เป็นรูปแบบที่ นิยมนำมาใช้มากที่สุด ตัวอย่างเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เป็นต้น

2) กรด (Acidic) ตัวอย่างเช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นต้น

การเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalysts) ตัวอย่างเช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และ โพแทสเซียมไนเตรตบนอลูมินา ($\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$)

2.2.1.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพ

1) เอนไซม์ (Enzyme) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพมีการนำมาศึกษาได้ไม่นาน สามารถทำให้บริสุทธิ์ได้ง่ายและมีการเกิดสบู่ (Soap Formation) ที่น้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยารูปแบบอื่นแต่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานและมีต้นทุนที่สูง ตัวอย่างเช่น ลิเปส (Lipases)

ตารางที่ 2.3 น้ำมันและตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

น้ำมัน	ตัวเร่งปฏิกิริยา	จำนวนตัวเร่งปฏิกิริยา (g)	สถานะสำหรับทำปฏิกิริยา	ผลได้ FAME (%)	อ้างอิง
น้ำมันสบู่ดำ	H ₂ SO ₄	15	99.8	60 °C, 24 h	Shuit, Lee, Kamaruddin, และ Yusup (2010)
น้ำมันสบู่ดำ	NaOH	1	98	60 °C, 1.5 h	Chitra, Venkatachalam, และ Sampathrajan (2005)
น้ำมันปาล์ม	CaO	7	87.5	65 °C, 3 h	Chen et al. (2016)
น้ำมันถั่วเหลือง	CaO	8	95	65 °C, 1.5 h	X. Liu, He, Wang, Zhu, และ Piao (2008)
น้ำมันถั่วเหลือง	KOH	1	93.2	60 °C, 1 h	Moradi, Dehghani, Khosravian, และ Arjmandzadeh (2013)
น้ำมันพืชใช้แล้ว	KOH	1.25	88.3	65 °C, 2 h	Hoque, Singh, และ Chuan (2011)
ไขมันไก่	KOH	1.25	89	65 °C, 2 h	Hoque et al. (2011)
น้ำมันเรปซีด	KOH	1	95 - 96	65 °C, 2 h	Rashid และ Anwar (2008)
น้ำมันทานตะวัน	KOH	0.28	96	70 °C	Antolin et al. (2002)

2.2.1.2 ข้อดีของน้ำมันไบโอดีเซลเมื่อนำมาใช้แทนน้ำมันดีเซล

- 1) ช่วยเพิ่มการหล่อลื่นให้เครื่องยนต์เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลสามารถยืดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์
- 2) สามารถนำมาผสมกับน้ำมันดีเซลและใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องดัดแปลง
- 3) ลดการปล่อยมลพิษทางอากาศและแก๊สเรือนกระจก เช่น คาร์บอนมอนนอกไซด์และควีน
- 4) ไม่มีการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂)
- 5) มีค่าจุดวาบไฟที่สูง
- 6) สร้างรายได้ให้แก่เกษตรกรในการใช้พืชมาเป็นวัตถุดิบ

2.2.1.3 ข้อเสียของน้ำมันไบโอดีเซล

- 1) การปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) สูงกว่าน้ำมันดีเซลเล็กน้อย
- 2) มีเสถียรภาพน้อยกว่าน้ำมันดีเซล ไม่แนะนำให้เก็บน้ำมันไบโอดีเซลในระยะยาว (มากกว่า 6 เดือน)

2.3 สมบัติเบื้องต้นของไบโอดีเซล

2.3.1 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ณ อุณหภูมิ 15 °C

อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของน้ำมันดีเซลคือความหนาแน่นของน้ำค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานเชื้อเพลิง หากความหนาแน่นมีค่าที่มากจะให้พลังงานความร้อนที่มากขึ้นตามไปด้วย โดยน้ำมันไบโอดีเซลที่มีแอลกอฮอล์ตกค้างจะส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นที่น้อยลงตามมาตรฐานน้ำมันดีเซลจะมีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 0.81 - 0.87 มีวิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1298

2.3.2 ความหนืด (Kinematic viscosity) ณ อุณหภูมิ 40 °C

ความสามารถในการต้านทานการไหลของไหลที่มีต่ออากาศหรือท่อหากมีความหนืดที่สูงเกินไปจะส่งผลต่อการฉีดเป็นฝอยของหัวฉีดในห้องเผาไหม้ ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์แต่หากมีความหนืดที่ต่ำก็จะส่งผลต่อการเกิดการสึกหรอของเครื่องยนต์ได้ตามมาตรฐานน้ำมันดีเซลจะมีค่าความหนืด 1.8 - 4.1 cSt สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วและไม่เกิน 8.0 สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนช้ามีวิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D445

2.3.3 ค่าซีเทน (Cetane number)

ค่าแสดงประสิทธิภาพในการเผาไหม้ (ระยะเวลาระหว่างการฉีดของน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้) จำนวนค่าซีเทนสูงแสดงถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีของเชื้อเพลิงตามมาตรฐานน้ำมันดีเซลจะมีค่าซีเทนไม่ต่ำกว่า 45 และ 50 สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนช้าและหมุนเร็วตามลำดับซึ่งมีวิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D976

2.3.4 จุดไหลเท (Pour point)

จุดที่อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันจะยังสามารถไหลได้หากใช้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่กำหนดจะส่งผลน้ำมันเกิดอุดตันทางเดินน้ำมันตามมาตรฐานน้ำมันดีเซลจะมีจุดไหลเทไม่สูงกว่า 16 และ 10 สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนช้าและหมุนเร็วตามลำดับซึ่งมีวิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D97

2.3.5 เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Stability)

ความคงตัวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความเสถียรของน้ำมันต่อการถูกออกซิไดซ์ภายใต้สภาวะที่เร่งให้มีการออกซิไดซ์เกิดขึ้นตามมาตรฐานน้ำมันดีเซลจะมีค่าไม่สูงกว่า 25 g/cm^3 สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วซึ่งมีวิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2274

2.3.6 จุดวาบไฟ (Flash point)

ค่าอุณหภูมิต่ำสุดเมื่อเปลวไฟผ่านเหนือโอของน้ำมันแล้วทำให้น้ำมันติดไฟตามมาตรฐานน้ำมันดีเซลจะมีจุดวาบไฟไม่ต่ำกว่า $52 \text{ }^{\circ}\text{C}$ มีวิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D93

2.3.7 สมบัติการหล่อลื่น รอยสึกหรอ (Lubricity, Wear Scar)

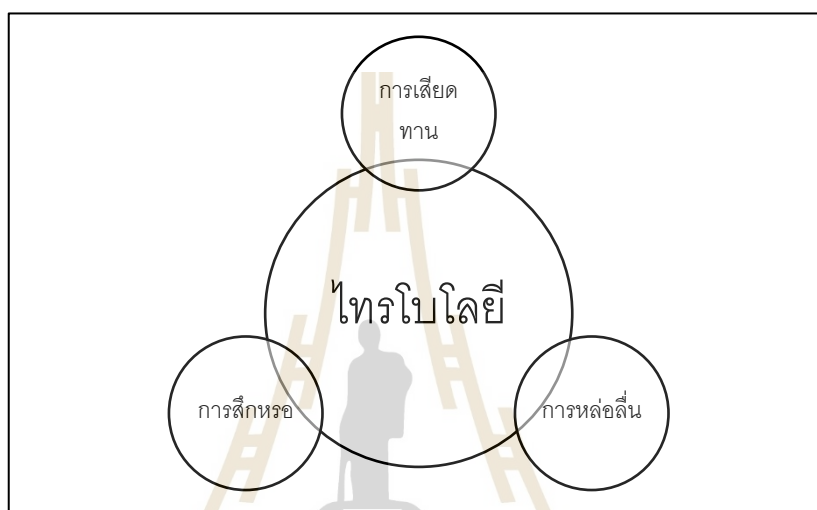
สมบัติการหล่อลื่นจะสามารถต้านทานการสึกหรอจากแรงกดและการขัดสี ซึ่งการสึกหรอจะแสดงในรูปร่องรอยการสึกหรอหรือเนื้อของชิ้นส่วนเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรที่สึกหรอตามมาตรฐานน้ำมันดีเซลจะรอยสึกหรอไม่เกิน $460 \text{ } \mu\text{m}$ มีวิธีทดสอบตามมาตรฐาน ISO 12156-1: 2018

2.4 ทฤษฎีไทรโบโลยี

ไทรโบโลยี (Tribology) เป็นการศึกษาพฤติกรรมระหว่างการสัมผัสกันของพื้นผิววัสดุสองชนิดที่เกิดการเคลื่อนที่และเกิดความสัมพันธ์ระหว่างการเสียดทาน (Friction) การสึกหรอ (Wear) และการหล่อลื่น (Lubricant) “Tribology” ถูกพูดขึ้นครั้งแรกโดยนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ David Tabor ซึ่งเป็นคำที่มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก tribo แปลว่า ขัดถู และ logia แปลว่า การศึกษาของ

ไทรโบโลยีมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมที่หลากหลายเช่นอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะ การปรับปรุงชิ้นส่วน เครื่องมือ และอุปกรณ์ในอุตสาหกรรม ตลอดจนการคาดการณ์อายุการใช้งานของ

ชิ้นส่วนยานยนต์ซึ่งมีมูลค่าในการเปลี่ยนหรือซ่อมบำรุงค่อนข้างสูงหรือการเสียดทานจะเพิ่มการสึกหรอของเครื่องมือและกำลังที่เครื่องมือต้องใช้ในการทำงานซึ่งเป็นสาเหตุของการเพิ่มต้นทุนในการเปลี่ยนเครื่องมือและการใช้แรงที่เพิ่มขึ้นดังนั้น การควบคุมปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสียดทานหรือการสึกหรอของการเคลื่อนที่วัสดุที่มีพื้นผิวสัมผัสกันจะสามารถช่วยลดความเสียหายจากไทรโบโลยีที่เกิดขึ้นและลดต้นทุนลงได้



รูปที่ 2.4 ทฤษฎีไทรโบโลยี

2.4.1 การเสียดทาน (Friction)

การเสียดทาน คือ การต้านทานของแรงต่อการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างสองพื้นผิวสัมผัสโดยแรงเสียดทานจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของแรงที่ทำให้วัสดุนั้นเคลื่อนที่ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่อาจเกิดจากการลื่นไถล (Sliding) หรือการกลิ้ง (Rolling) ของสองพื้นผิวโดยทั้งสองพื้นผิวนั้นอาจสัมผัสกันโดยตรงหรือมีของเหลว ฟิล์มอยู่ระหว่างพื้นผิวที่กำลังมีการเคลื่อนที่ นอกจากนี้ยังมีบางการเคลื่อนที่ที่เกิดทั้งการลื่นไถลและการกลิ้งไปพร้อมกัน ซึ่งการวัดการเสียดทานของพื้นผิววัดได้จากการการาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction coefficient, μ)

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (2.1)$$

เมื่อ

F คือ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้น

N คือ แรงที่กระทำในแนวตั้งฉาก

รูปแบบของแรงเสียดทาน

1) แรงเสียดทานที่เกิดจากความเสียดทานภายนอก (External friction) ซึ่งจะเกิดแรงเสียดทานในรูปแบบสถิตย์ศาสตร์ (Static friction) และแบบจลน์ศาสตร์ (Dynamic friction) ระหว่างผิวสัมผัส

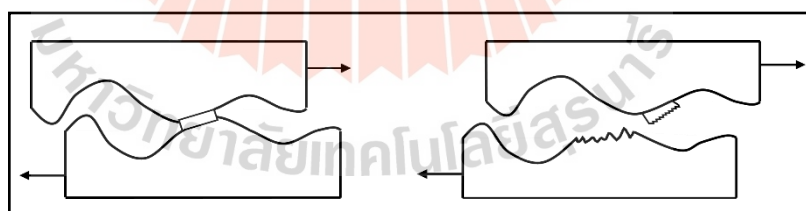
2) แรงเสียดทานที่เกิดจากความเสียดทานภายใน (Internal friction) ซึ่งจะเกิดแรงเสียดทานของโมเลกุลของสารหล่อลื่น

2.4.2 การสึกหรอ (Wear)

การสึกหรอเป็นการสูญเสียเนื้อและผิวสัมผัสของวัสดุซึ่งเป็นผลมาจากการที่วัสดุทั้งสองเกิดการเคลื่อนที่ ขัดถู การสึกหรอสามารถเกิดขึ้นได้ถึงแม้จะมีการหล่อลื่นอย่างดีแล้วก็ตาม

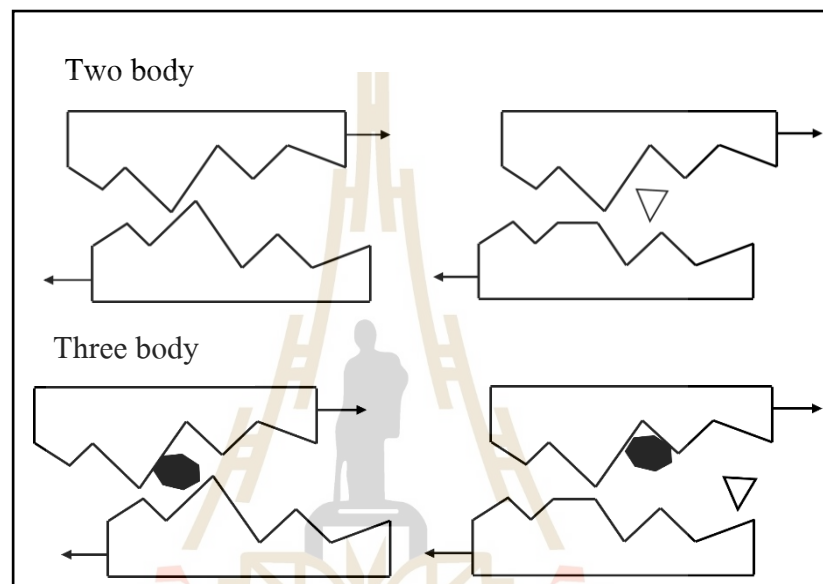
กระบวนการสึกหรอสามารถจำแนกได้ 4 ประเภท

2.4.2.1 การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesion wear) เป็นการสึกหรอที่เกิดจากการเคลื่อนที่ในแนวไถล (Sliding contact) และเกิดการรูดกันจนเกิดความเค้นสัมผัส (Contact stress) ที่สูงจนเกิดจุด Yield stress ของวัสดุทำให้เกิดการก่อตัวของจุดเชื่อมต่อ (Spot joint) ระหว่างวัสดุ 2 ชิ้น หรือเรียกว่าเกิดการเชื่อม (Cold welding) แรงกระทำของโมเลกุลและอะตอมระหว่างคู่สัมผัสที่เกิดการขัดถูจะสามารถแยกหรือฉีกขาดของวัสดุออกจากชิ้นงานที่เกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งจะส่งผลให้มีอนุภาคของวัสดุสึกหรอออกมาโดยมีสาเหตุจากการมีสารหล่อลื่นที่มีความหนืดน้อยเกินไป ใช้ความเร็วต่ำเกินไปและการมีโหลด ที่มากเกินไป เป็นต้น



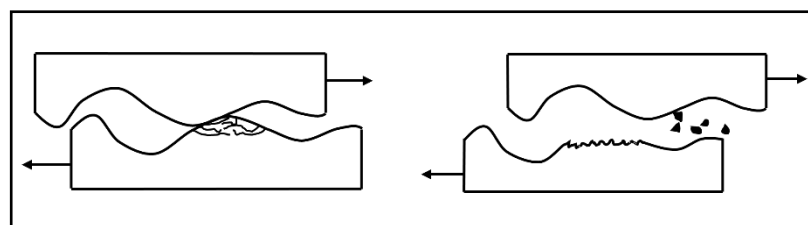
รูปที่ 2.5 การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesion wear)

2.4.2.2 การสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive wear) เป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นเมื่อมีวัตถุหรืออนุภาคที่มีความแข็งมากกว่า (Abrasive particle) สิ่งสกปรกที่อยู่ในน้ำมันหล่อลื่น เช่น ฝุ่นผงทรายหรือเศษโลหะ มีการเคลื่อนที่ผ่านระหว่างวัสดุ 2 ชิ้นจนเนื้อวัสดุถูกฉีกออกไปจากการขีดขูดโดยวัตถุหรืออนุภาคที่มีความแข็งสูง ซึ่งการกำจัดอนุภาคหรือสิ่งสกปรกสามารถทำได้โดยการกรองหรือการเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นตามระยะเวลาที่กำหนด



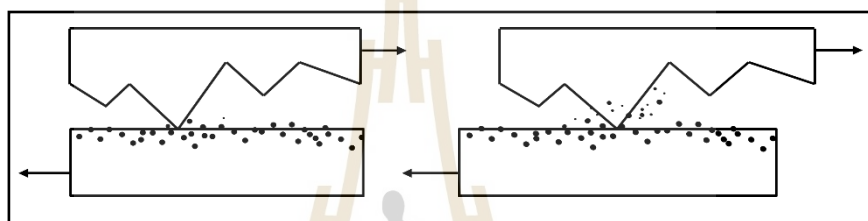
รูปที่ 2.6 การสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive wear)

2.4.2.3 การสึกหรอแบบการล้า (Fatigue wear) เป็นการสึกหรอที่เกิดจากการที่วัสดุ 2 ชิ้น เกิดการสัมผัสกันด้วยจำนวนครั้งมาก ๆ เป็นวัฏจักรจนเกิดการสึกหรอขึ้นวัสดุภายใต้ความล้าทำให้ผิววัสดุมีหลุมหรือมีรอยแยก แตกร้าว (Crack) ที่ผิวของวัสดุ



รูปที่ 2.7 การสึกหรอแบบการล้า (Fatigue wear)

2.4.2.4 การสึกหรอแบบไทรโบเคมีคอลหรือการกัดกร่อน (Tribochemical reaction wear/Corrosive wear) เป็นการสึกหรอที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างผิววัสดุคู่สัมผัสกับสารหล่อลื่น ในระหว่างผิวคู่สัมผัสภายใต้ความเค้นจากการเคลื่อนที่ ชั้นฟิล์มสารหล่อลื่นทำให้เกิดการสึกหรอมากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการเปิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารกัดกร่อน (Corrosive agent) และวัสดุที่ถูกกัดกร่อน (Bulk material) ซึ่งบริเวณที่โดนกัดกร่อนจะเปลี่ยนเนื้อวัสดุให้กลายเป็นชั้นฟิล์มหนาและหลังจากการถูสัมผัสจะทำให้ฟิล์มตรงนั้นหายไปซ้ำไปเรื่อย ๆ เนื้อวัสดุก็จะหายไปเรื่อย ๆ เช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.8 การสึกหรอแบบไทรโบเคมีคอลหรือการกัดกร่อน (Tribochemical reaction wear/Corrosive wear)

2.4.3 การหล่อลื่น (Lubrication)

การหล่อลื่นเป็นกระบวนการหรือเทคนิคที่ใช้ในการลดการสึกหรอของผิวสัมผัสสองผิวที่เคลื่อนที่สัมผัสกันโดยใช้สารหล่อลื่นบรรจุระหว่างผิวสัมผัสสองผิวเพื่อช่วยรับภาระระหว่างผิวทั้งคู่ ซึ่งสารหล่อลื่นอาจอยู่ในรูปแบบก๊าซเช่น อากาศ รูปแบบของเหลวเช่น น้ำมันหล่อลื่น รูปแบบของแข็งเช่น กราไฟต์ และรูปแบบกึ่งของแข็งของเหลว เช่น จารบี

ในกรณีทั่วไปภาระที่กระทำจะถูกรองรับด้วยความดันที่สร้างขึ้นภายในของไหล เนื่องจากความต้านทานความหนืดและแรงเสียดทานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของของไหลระหว่างคู่ผิวสัมผัส การหล่อลื่นที่เพียงพอทำให้การทำงานของอุปกรณ์เป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง เกิดการสึกหรอเพียงเล็กน้อย และปราศจากความเค้นที่มากเกินไป หากปราศจากการหล่อลื่น โลหะหรือวัสดุที่ขัดถูกันจะทำลายอีกวัตถุหนึ่งจนเกิดความร้อนและความเสียหายตามมา

รูปแบบของการหล่อลื่น

ความเสียดทานที่เกิดขึ้นมีรูปแบบที่แตกต่างกันตามผิวหน้าสัมผัสของวัสดุที่เกิดการเสียดสี ซึ่งแบ่งได้ตามสภาวะการหล่อลื่น (Regimes of lubrication)

2.4.3.1 สภาวะไร้การหล่อลื่น (Solid lubrication) เป็นสภาวะการหล่อลื่นที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุ 2 ชิ้น สัมผัสกันโดยตรงไม่มีชั้นของสารหล่อลื่นทำให้เกิดการเสียหาย หรือการสึกหรออย่างรุนแรง

2.4.3.2 สภาวะการหล่อลื่นแบบบาว์นดารี (Boundary lubrication) เป็นสภาวะการหล่อลื่นที่มีชั้นโมเลกุลของสารหล่อลื่นเป็นฟิล์มบางที่บริเวณพื้นผิวที่ขัดสีกันทำให้ยังคงมีการเสียดทานและการสึกหรอในชั้นผิวหน้าของวัสดุตามเส้นขอบและยังส่งผลให้เกิดเป็นร่องหลุมบนผิวเมื่อชั้นฟิล์มของสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นไปอุดตันตามร่องหลุมทำให้สามารถรับโหลด (Load) ได้สูงมากขึ้น แต่ถ้ามีแรงกระทำที่มากเกินไปร่วมกับความหนืดมีค่าที่ลดลง ก็จะส่งผลให้ผิวของวัสดุ 2 ชิ้นถูกบีบเข้าหากันอย่างรวดเร็วและทำให้ต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนเพิ่มมากขึ้น สภาวะการหล่อลื่นแบบบาว์นดารีถูกนิยามด้วยว่าเป็นบริเวณที่ภาระรองรับด้วยขอบเขตของพื้นผิวแทนที่จะรองรับด้วยสารหล่อลื่น

2.4.3.3 สภาวะการหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ (Fluid lubrication) เป็นสภาวะการหล่อลื่นแบบฟิล์มของไหล (Fluid film lubrication) ซึ่งจะมีผิวของวัสดุ 2 ชิ้นถูกแยกออกจากกันโดยสมบูรณ์ด้วยชั้นฟิล์มของสารหล่อลื่น ชั้นฟิล์มของสารหล่อลื่นจะอยู่ในรูปของ (Hydrodynamic lubrication) และ (Hydrostatic lubrication) ซึ่งทั้ง 2 แบบนี้จะไม่มีการสัมผัสกันของโลหะ ทำให้มีแรงเสียดทานและการสึกหรอน้อย

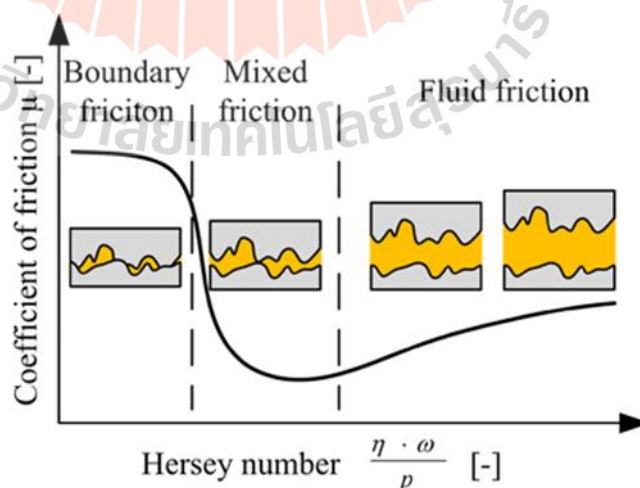
1) การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic lubrication) เกิดเมื่อสารหล่อลื่นทำให้เกิดฟิล์มน้ำมันหนาพอซึ่งเกิดจากกำลังหรือแรงดันของของไหลเองทำให้พื้นผิวของวัสดุ 2 ชิ้นที่มีการเคลื่อนที่แยกออกจากกันโดยสมบูรณ์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างสองพื้นผิว ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น โหลด และช่องว่างภายใน (Clearance) ระหว่างผิวสัมผัส

2) การหล่อลื่นแบบไฮโดรสแตติก (Hydrostatic lubrication) เป็นรูปแบบหนึ่งของการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกที่ผิวสัมผัสของวัสดุ 2 ชิ้นแยกออกจากกันด้วยฟิล์มน้ำมันแต่แตกต่างที่ชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นเกิดจากกำลังหรือแรงดันที่มาจากปั๊มอัดน้ำมัน การหล่อลื่นแบบนี้จะขึ้นกับแรงดันของน้ำมันที่ส่งมาจากปั๊มและช่องว่างภายในระหว่างผิวสัมผัส

2.4.3.4 สถานะการหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์ (Mixed lubrication) หรือสถานะการหล่อลื่นแบบผสม เกิดขึ้นเมื่อมีสถานะการหล่อลื่นแบบบาวนด์ (Boundary lubrication) ผสมกับสถานะการหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ (Fluid lubrication) เกิดขึ้นเมื่อสารหล่อลื่นมีช่วงเวลาที่เหมาะสมในการสร้างชั้นผิวที่มีความแข็งแรงต่อการเสียดตัวต่ำมาก ซึ่งจะเป็นผลดีต่อค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานและการสึกหรอเป็นสถานะที่มีภาวะกระทำอย่างมากวัดให้เกิดความเครียดออสติกบนพื้นผิวเกิดเป็นบริเวณที่รับภาระเป็นช่องเกือบขนานให้สารหล่อลื่นไหลเข้าไปได้ การเคลื่อนที่ของผิวสัมผัสสร้างความดันที่เกิดจากการไหล เกิดเป็นแรงหนีพื้นผิวสัมผัส ในบางบริเวณที่มีความดันสูง ความหนืดของสารหล่อลื่นอาจเพิ่มขึ้นอย่างมาก เรียกว่า การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก (Elastohydrodynamic lubrication) ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุทั้งสองหรือเส้นขอบสามารถเกิดขึ้นได้นอกจากนี้สถานะที่เกิดขึ้นนี้จะมีการสลับเปลี่ยนสถานะระหว่างสัมประสิทธิ์การเสียดทานของการขัดสีของวัสดุ 2 ขึ้นกับสัมประสิทธิ์การเสียดทานในชั้นของสารหล่อลื่น

2.4.4 Stribeck Diagram

Stribeck Diagram จะแสดงตัวอย่างรูปแบบการหล่อลื่น (Regimes of lubrication) ของเจอร์นัลแบร์ริง ซึ่งเป็นการพล็อตระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction, μ) คือ แรงในแนวสัมผัสต่อแรงในแนวตั้งฉาก กับตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless duty parameter, ZN/P) เมื่อ Z คือ ความหนืด (Viscosity), N คือ ความเร็ว (Speed) และ P คือ โหลด (Load) เส้นโค้งของ Stribeck หรือเส้นโค้งของ Stribeck-Hersey ซึ่งถูกตั้งตาม Richard Stribeck และ Mayo D. Hersey ถูกใช้ในการจำแนกสมบัติของความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสสองผิว



รูปที่ 2.9 Stribeck Diagram (Bergmann & Grün, 2016)

2.5 การหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง (Thin film lubrication)

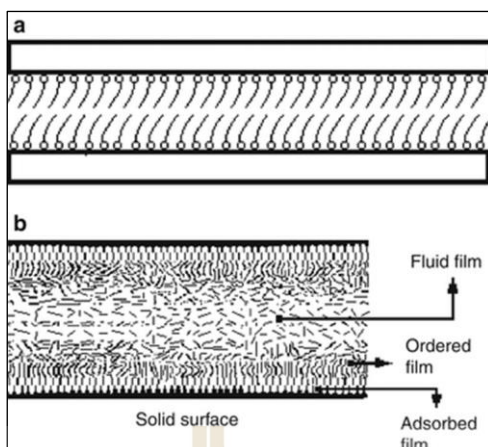
การหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง คือ การหล่อลื่นที่เกิดฟิล์มบางขนาดนาโนเมตรเป็นต้นไป เกิดจากปฏิกิริยาไทรโบเคมีระหว่างพื้นผิวโลหะ และ น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่ก่อตัวเป็นชั้นฟิล์ม ซึ่งสามารถเกิดขึ้นใน สภาวะการหล่อลื่นที่แตกต่างกัน โดยที่องค์ประกอบของของเหลวจะมีลักษณะเป็นฟิล์มแบ่งเป็น Fluid film คือ ฟิล์มที่แสดงถึงความหนาของฟิล์มที่เกิดขึ้น มีองค์ประกอบของน้ำมันเชื้อเพลิงพื้นฐานเป็นหลัก Ordered film คือ ฟิล์มที่อยู่ระหว่าง Fluid film และ adsorbed film เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไทรโบโลยี :ซึ่งความหนาจะสัมพันธ์กับความหนืด ขนาด และช่วงของโมเลกุลมีองค์ประกอบของน้ำมันที่นำมาผสมลักษณะของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน รวมไปถึงส่วนประกอบอื่น ๆ และ Adsorbed film คือ ฟิล์มที่อยู่ติดกับพื้นผิวโลหะ มีองค์ประกอบของกรดไขมันที่อิ่มตัว และ สารประกอบเชิงซ้อนซึ่งมีปฏิกิริยากับพื้นผิว (Ge, Halman, Li, & Luo, 2019) แสดงตามรูปแบบการจำลองของฮาร์ดี้ (Hardy model) รูปที่ 2.10 ซึ่งองค์ประกอบมีการจัดรูปแบบตามขอบเขตการหล่อลื่นและสมบัติที่เกิดขึ้นของขอบเขตนั้น ๆ โมเลกุลของเหลวจะถูกดูดซับไว้กับพื้นผิวของวัตถุตามคู่ของไทรโบ และ ถูกสร้างขึ้นเป็นชั้น ทำให้ความหนาของชั้นฟิล์ม ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความเร็ว ความหนืด และความดันของของเหลวเป็นต้น ซึ่งตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อ การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางมากที่สุด คือ ความเร็วในการเคลื่อนตัวของพื้นผิวเนื่องจากเกี่ยวข้องกับปฏิสัมพันธ์ระดับโมเลกุลการมีช่วงของโมเลกุลและตัวของพื้นผิววัตถุ

การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการหล่อลื่น

1) สภาวะการหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ (Full film) คือ มีองค์ประกอบของ Fluid film เป็นองค์ประกอบหลักทำให้ชั้นของฟิล์มมีความหนาจึงทำให้สมบัติจะเป็นไปตามรูปแบบของ Fluid film

2) สภาวะการหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์ (Mixed lubrication) หรือ Thin film lubrication มีองค์ประกอบของ Ordered film เป็นองค์ประกอบหลักต่อความหนาของฟิล์มทั้งหมด

3) สภาวะการหล่อลื่นแบบบาวนด์ารี (Boundary lubrication) เกิดจากการสลายตัวไปของ Ordered film และมี Adsorbed film เป็นองค์ประกอบหลักแทน



รูปที่ 2.10 แบบจำลองการหล่อลื่นของฮาร์ดดี (Luo, 2013)

การประยุกต์ใช้ของการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง สามารถลดแรงเสียดทาน และการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนในยานยนต์ที่มีการเคลื่อนไหว เพิ่มประสิทธิภาพ และ ยืดอายุการใช้งาน (Patel & Deheri, 2016) นอกจากนี้ยังสามารถช่วยควบคุมการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นส่วนยานยนต์ ลดความเสี่ยงของการทำงานที่อุณหภูมิสูงเกินไป

2.5.1 การปรับปรุงการเสียดทาน (Friction modifiers)

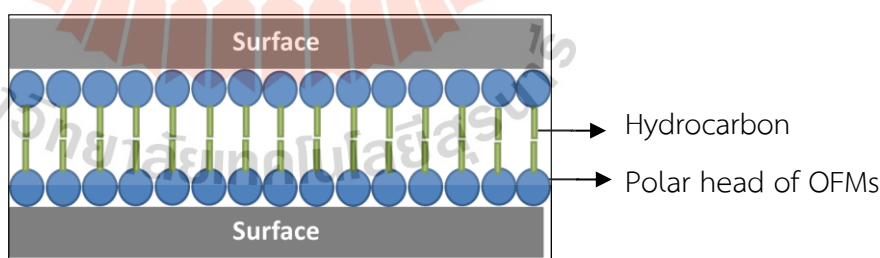
มีการใช้ครั้งแรกตั้งแต่ในช่วงปี 1915 และเพิ่มขึ้นในช่วงปลายทศวรรษ 1970 เพื่อจุดประสงค์ทำให้การเคลื่อนไหวในชิ้นส่วนที่ยังขึ้นป้องกันการสึกหรอบนพื้นผิวของโลหะป้องกันการสัมผัสกันโดยตรงกับพื้นผิวของแข็งจึงสามารถช่วยลดแรงเสียดทานหรือเพิ่มความหล่อลื่นและการสึกหรอ รวมไปถึงการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับน้ำมันเชื้อเพลิงและการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง

การปรับปรุงการเสียดทาน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท

2.5.1.1 อนุภาคนาโน (Nanoparticles) ซึ่งเป็นสารประกอบคาร์บอน โลหะ โลหะ ออกไซด์ โลหะคาร์บอเนต และอื่น ๆ ในขนาดช่วง 2 - 120 นาโนเมตรเพื่อลดแรงเสียดทานและ การสึกหรอที่เกิดขึ้นอยู่กับความเป็นผลึก ขนาด รูปร่างและความเข้มข้น การลดแรงเสียดทานจะเป็นผล จากการเกิดการขัดเงา การกลิ้ง และการสร้างเป็นฟิล์มเพื่อป้องกัน

2.5.1.2 ออร์กาโนโมลิบดีนัม (Organomolybdenum, MoFMs) สารประกอบหลัก ประกอบด้วย ซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสเป็นผลึกขนาดนาโนสัมผัสกับแอสเพอริตี้หากพื้นผิวของวัตถุมีความขรุขระเคลือบที่เข้าหากันเช่นโมลิบดีนัม ไทโทโอคาร์บาเมต (MoDTC) และ MOS_2 ซึ่งสารประกอบโมลิบดีนัมอินทรีย์สามารถทำงานร่วมกับสังกะสีไดอัลคิลไฮโอฟอสเฟต (ZDDP) ได้อย่างดีจึงถูกนำมาใช้น้ำมันเครื่องอย่างยาวนานก่อนที่จะมีการศึกษาเรื่องผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อมจึงค่อย ๆ ถูกลดปริมาณในการใช้งานไป

2.5.1.3 การปรับปรุงการเสียดทานอินทรีย์ (Organic friction modifiers, OFMs) ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ซึ่งจะอยู่ในหมู่ของ เอสเทอร์ แอลกอฮอล์ เอมีน เอไมด์ กรดคาร์บอกซิลิก เป็นต้น โครงสร้างโมเลกุลเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาวและมีหัวที่หัวสามารถดูดซับได้บนพื้นผิวด้วยแรงดึงดูดระหว่างขั้วและหางของไฮโดรคาร์บอนละลายเข้ากับ น้ำมันซึ่งสามารถละลายในน้ำได้อยู่ในแนวตั้งฉากเดียวกันกับพื้นผิวของโลหะด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ เกิดเป็นชั้นฟิล์มที่หนา ดังรูปที่ 2.11 เพื่อลดแรงเสียดทานและการสึกหรอที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.11 การปรับปรุงการเสียดทานอินทรีย์

2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อทดสอบความแตกต่างของประชากรตั้งแต่ 3 ประชากรขึ้นไป ความแตกต่างในด้านค่าเฉลี่ยของแต่ละประชากรโดยจะมีการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของระหว่างประชากรและภายในประชากรเดียวกัน ซึ่งความแปรปรวนทั้งหมดคือ ผลรวมของความแปรปรวนระหว่างประชากรรวมกับความแปรปรวนภายในประชากรเดียวกัน โดยจะแสดงผลผ่านค่าระดับนัยสำคัญ (P - value) และกำหนดระดับนัยสำคัญ (α) ให้หากมีค่าที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 คือ ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีสมมติฐานตามแสดงต่อไปนี้

สมมติฐานในการวิเคราะห์

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

ซึ่งมีหลักการคำนวณที่สำคัญตามตารางที่ 2.4 เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนที่เกิดขึ้น เช่น กลุ่ม A หากค่าสถิติทดสอบ (F) มากกว่าค่าวิกฤต ($f_{1-\alpha, a-1, ab(n-1)}$) จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 นอกจากนี้สามารถหาค่าระดับนัยสำคัญ ตามสมการที่ 2.2

$$P\text{-value} = P(F_{a-1, ab(n-1)}) \quad (2.2)$$

2.6.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way analysis of variance)

เป็นการประเมินความแตกต่างของประชากรโดยที่ประชากรมีความแตกต่างกันเพียงลักษณะเดียวหรือในการทำการทดลองมีเพียงปัจจัยที่แตกต่างเพียงปัจจัยเดียวซึ่งจะทดสอบระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละประชากรโดยที่ปัจจัยนั้น ๆ อาจจะมีค่าได้หลายระดับ (Treatment)

2.6.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางเดียว (Two-way analysis of variance)

เป็นการประเมินความแตกต่างของประชากรโดยที่ประชากรมีความแตกต่างกันสองลักษณะหรือในการทดลองมีปัจจัยที่แตกต่างกันสองปัจจัย

2.6.3 การเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple comparisons)

เป็นการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยคู่ที่มีค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนที่ไม่เท่ากัน เช่น

1) Fisher's Least Significant Difference (LSD) จะเปรียบเทียบผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากรแต่ละคู่ โดยเป็นการสุ่ม ใช้กับกลุ่มประชากรที่มีขนาดเท่ากัน

2) Tukey's Multiple Comparison test จะเปรียบเทียบด้วยวิธีใกล้เคียงกับ LSD แต่จะสามารถใช้กับกลุ่มประชากรที่มีขนาดเท่ากันหรือไม่เท่ากัน

ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง

แหล่งความแปรปรวน	ผลรวมกำลังสอง (SS)	องศาอิสระ (df)	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (MS)	ค่าตัวสถิติ (F)
กลุ่ม A	$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i\dots}^2}{bn} - \frac{y_{\dots}^2}{abn}$	a-1	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F = \frac{MS_A}{MS_E}$
กลุ่ม B	$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{j\dots}^2}{an} - \frac{y_{\dots}^2}{abn}$	b-1	$MS_b = \frac{SS_b}{b-1}$	$F = \frac{MS_B}{MS_E}$
ความคลาดเคลื่อน	$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B$	ab(n-1)	$MS_E = \frac{SS_E}{(a-1)(b-1)}$	
ผลรวม	$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abn}$	abn-1		

เมื่อ

y_{ij} คือ ค่าสังเกตแถว i คอลัมน์ที่ j

y_i , y_j คือ ผลรวมค่าสังเกตแถวที่ i และ คอลัมน์ที่ j

y_{\dots} คือ ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด

a คือ จำนวนแถว

b คือ จำนวนคอลัมน์

n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

2.7 ขนาดอิทธิพล (Effect size)

ขนาดอิทธิพลเป็นการวัดขนาดของข้อมูลทางสถิติที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้นต่อตัวแปรตาม โดยระบุเป็นปริมาณของขนาดที่แตกต่างกันระหว่างกลุ่ม ซึ่งสามารถคำนวณได้หลายวิธีแบ่งจำแนกได้ 3 เกณฑ์ (สุกมลสันต์, 2553)

1. ช่วงความเชื่อมั่น (Confidence interval)

2. หน่วยมาตรฐานของความแตกต่าง (Standardizes units of difference) สามารถหาได้จากหาได้จากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มทดลองหารด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากความแปรปรวนร่วม ค่าที่คำนวณได้จะเป็นตัวแปรไร้หน่วย ซึ่งมีนักสถิติได้คิดค้นไว้ อาทิเช่น สูตรจาก Cohen (Cohen's d) Glass (Glass's Δ) และ Hedges (Hedges's g) ตัวอย่างสูตรคำนวณจาก Cohen's d ตามสมการที่ 2.3

$$d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S.D._{pooled}} \quad (2.3)$$

$$S.D._{pooled} = \sqrt{\frac{(n_1-1)S.D_1^2 + (n_2-1)S.D_2^2}{(n_1+n_2-2)}} \quad (2.4)$$

เมื่อ

\bar{x}_1 \bar{x}_2 คือ ค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่ 1 และ กลุ่มที่ 2

$S.D_1$ และ $S.D_2$ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มที่ 1 และ กลุ่มที่ 2

3. สถิติการมีส่วนร่วมของความแปรปรวน (Variance accounted for statistics) คือ การใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน เช่น ANOVA โดยจะคำนวณหา Eta squared (η^2) หรือ Omega squared (ω^2)

การแปรความของขนาดอิทธิพล (Cohen, 1988)

$d \leq 0.20$ คือ มีผลขนาดน้อยมาก

$d = 0.5$ คือ มีผลขนาดปานกลาง

$d \geq 0.80$ คือ มีผลขนาดใหญ่มาก

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lacey (1993) พัฒนาแผนภาพของการสึกหรอ (Wear mapping) ที่เกิดจากเชื้อเพลิงเจ็ทเอ-1 ที่มีการหล่อลื่นที่ต่ำซึ่งส่งผลต่อความทนทานของอุปกรณ์หัวฉีดด้วยเครื่อง Cameron-Plint โดยทดสอบที่ความชื้นสัมพัทธ์และโหลดที่แตกต่างกันในสภาวะอากาศ แก๊สไนโตรเจนและรูปแบบของน้ำมันที่ใส่สารยับยั้งการกัดกร่อนในสภาวะอากาศ เพื่อสามารถศึกษาการเป็นฟังก์ชันไปอย่างพร้อมกันและมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น พบว่า เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นทำให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเพิ่มขึ้นจาก 0.32 - 0.48 โหลดที่เพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกันการใส่สารยับยั้งการกัดกร่อนไม่ทำให้ขนาดของรอยสึกหรอลดลง

Hu, Du, Li, และ Min (2005) ศึกษาคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันไบโอดีเซล (ไม่บริสุทธิ์และบริสุทธิ์) โดยเครื่อง High Frequency Reciprocating Rig (HFRR) และโครงสร้างระดับโมเลกุลของน้ำมันที่ส่งผลกระทบต่อการใช้ไบโอดีเซลในการเพิ่มการหล่อลื่นให้กับน้ำมันดีเซลได้ทำให้มีการสึกหรอลดลงจาก 735 เป็น 351 - 429 μm น้ำมันไบโอดีเซลแบบไม่บริสุทธิ์ให้การหล่อลื่นได้ดีกว่าบริสุทธิ์ ซึ่งเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและโมโนกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักในการเพิ่มการหล่อลื่น กรดไขมันอิสระและไดกลีเซอไรด์ส่งผลต่อการหล่อลื่นเพียงเล็กน้อยและไตรกลีเซอไรด์ไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้ไบโอดีเซล

Peng (2015) ทำการศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิและสัดส่วนร้อยละของความเข้มข้นน้ำมันไบโอดีเซลที่ใช้เป็นสารเติมแต่งผสมกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมที่ร้อยละ 2 5 10 20 50 และ 100 (B2, B5, B10, B20, B50 และ B100) ที่มีต่อไทรโบโลยีโดยใช้วิธี Ball-on-ring เพื่อวิเคราะห์รอยสึกหรอและการสึกหรอที่เกิดขึ้นซึ่งจะทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 30 60 90 และ 120 °C โดยมีโหลด 5 นิวตันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และความเร็ว 500 รอบต่อนาที จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มน้ำมันไบโอดีเซลลงไปเพียงเล็กน้อยก็ส่งผลให้น้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมมีขนาดรอยสึกหรอ (Wear Scar Diameter, WSD) ที่ลดลงและการเสียดทานอยู่ในสภาวะการหล่อลื่นแบบบาวนด์ดารี นอกจากนี้ยังพบว่าการเสียดทานและรอยสึกหรอจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

Ruggiero, D'Amato, Merola, Valašek, และ Müller (2017) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีทางกายภาพ และ ไทรโบโลยีของน้ำมันที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันจากเรพซิด น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ และน้ำมันสบู่ดำ โดยใช้ Ball-on-flat ที่ความถี่ 10 และ 20 Hz โหลด 10 และ 19 นิวตัน เวลา 30 นาที ผลการทดสอบพบว่าพฤติกรรมทางไทรโบของน้ำมันสามารถแบ่งขอบเขตการหล่อลื่นได้ 3 ขอบเขตตาม Stribeck curves

กรดไขมันสามารถช่วยให้การหล่อลื่นดีขึ้นเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงที่สุดรองลง คือ น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันจากเรพซีดและน้ำมันสบู่ดำตามลำดับและน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีปริมาณของรอยที่น้อยที่สุด เนื่องจากการมีปริมาณของกรดสเตียริก (Stearic acid) และกรดปาล์มติก (Palmitic acid) ที่ต่ำ

Sukjit, Poapongsakorn, Dearn, Lapuerta, และ Sánchez-Valdepeñas (2017) ศึกษาคุณสมบัติการหล่อลื่น ไทโรโบโลยี และ ผลกระทบจากหมู่ฟังก์ชัน ความชื้น และสายโซ่คาร์บอนต่อการหล่อลื่นของสารอินทรีย์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบโดย High Frequency Reciprocating Rig (HFRR) พบว่า คาร์บอกซิล แอลดีไฮด์ ไฮดรอกซิล เอสเทอร์ และคีโตน ทำให้การหล่อลื่นดีขึ้นตามลำดับ ความชื้นที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้การหล่อลื่นของสารอินทรีย์ที่มีออกซิเจนแย่งขนาดของรอยสึกหรือเพิ่มขึ้นจากการดูดซับของออกซิเจนเกิดการกัดกร่อนเป็นผิวของโลหะที่สังเกตจากภาพถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และจำนวนของสายโซ่คาร์บอนที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การหล่อลื่นดีขึ้นตามความหนาของชั้นฟิล์มที่เพิ่มขึ้น

Lin และ Hsu (2017) ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพทางทฤษฎีไทรโบโลยีของน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการเติมไฮโดรเจน (Hydrotreated Vegetable Oil, HVO) ผสมกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมที่ปริมาณร้อยละ 0 2.5 10 20 40 60 80 และ 100 ซึ่งไทรโบโลยีถูกประเมินด้วย Reciprocating Cylinder-On-Flat (Cameron-Plint TE77) เพื่อทดสอบรอยสึกหรือที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 25 °C และ 80 °C พบว่าเมื่อมีปริมาณของ HVO มากกว่าร้อยละ 20 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่อุณหภูมิ 25 °C จะมีค่าที่ลดลง และที่ร้อยละ 100 HVO จะทำให้อายุการใช้งานหรือมีความสึกมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 80 °C มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากตัวอย่างที่ได้ทำการทดสอบน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 25 °C แต่รอยสึกหรือที่เกิดขึ้นมีความสึกเพิ่มขึ้นและจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการผสม HVO ในน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม ที่ร้อยละ 10 ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าที่ลดลงเมื่อความเข้มข้นของ HVO มีค่ามากขึ้น

Dearn et al. (2018) ทดสอบคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันเบนซินที่ผสม 2-เมทิลฟูรัน (MF) และ 2,5-ไดเมทิลฟูรัน (DMF) ร้อยละ 2 4 6 8 10 20 และ 50 โดยปริมาตรด้วยเครื่อง High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR) มาตรฐาน ASTM D6079 พบว่าการหล่อลื่นของ

น้ำมันเบนซินดีเซลซึ่งการผสม MF และ DMF เพียงร้อยละ 2 ทำให้ขนาดรอยสึกหรอลดลงร้อยละ 46 และ 47 ตามลำดับ เมื่อร้อยละของ MF และ DMF เพิ่มขึ้นก็จะทำให้รอยสึกหรอนั้นลดลงเนื่องจากการมีหมู่เมทิลทำให้ส่วนหัวมีความแข็งแรงและสามารถสร้างชั้นฟิล์มเพื่อป้องกันพื้นผิวของโลหะได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งร้อยละ 10 ของ MF และร้อยละ 20 ของ DMF ถือเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากร้อยละที่เพิ่มขึ้นไปส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของไทรโบโลยีไม่มากนัก

Sukjit et al. (2019) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางไทรโบโลยีของน้ำมันไบโอดีเซลที่มาจากปาล์ม (FAME) ผ่านกระบวนการไฮโดรจีเนชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัวของเมทิลเอสเทอร์ (H-FAME) ซึ่งจะมีความเสถียรต่อการเกิดออกซิเดชันมากกว่าไบโอดีเซลเนื่องจากมี โครงสร้าง กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีตำแหน่งพันธะคู่ตั้งแต่ 2 ตำแหน่ง (Polyunsaturated molecules) ที่ลดลง และ ไอโซเมอร์ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวของเมทิลเอสเทอร์การศึกษาพฤติกรรมทางไทรโบโลยีผ่านการวัดสมบัติความหล่อลื่นของน้ำมันแต่ละประเภทที่ความชื้นแตกต่างกันโดยเครื่อง High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR) ตามมาตรฐาน ISO 12156-1: 2016 จากนั้นรอยสึกหรอและการปนเปื้อนที่เกิดขึ้นบน Specimens จะถูกนำไปวิเคราะห์ผ่านเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) ด้วย Energy-dispersive X-ray spectrometry (EDS) ซึ่งจะพบว่า H-FAME เป็นการเพิ่มความคงตัวของฟิล์มหล่อลื่นทำให้ความเสียหายที่เกิดจากการสึกหรอลดลงและ H-FAME มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น

Rodriguez, Ramos, Sánchez-Valdepeñas, และ Serrano (2019) ศึกษาความหล่อลื่นของน้ำมันพาราฟินิก (Paraffinic fuels) เมื่อใช้สารเติมแต่งเป็นเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งความหล่อลื่นจะช่วยการป้องกันการสึกหรอที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนโลหะภายในระบบหัวฉีดของการเผาไหม้เครื่องยนต์น้ำมันพาราฟินิกสามารถใช้กับเครื่องยนต์แต่อย่างไรก็ตามน้ำมันเชื้อเพลิงพาราฟินิกบริสุทธิ์สมบัติการหล่อลื่นที่ต่ำ โดยจะผสมเอสเทอร์ในปริมาณร้อยละ 1 และ 2 กับน้ำมันพาราฟินิกและทดสอบความหล่อลื่นโดยเครื่อง High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่ามีค่าความหล่อลื่นที่ค่อนข้างต่ำจากผลของการวัดค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยสึกหรอ (Wear Scar Diameter) ที่เกิดขึ้น และ หากค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยสึกหรอมีค่าเพิ่มมากขึ้นก็บ่งบอกถึงความหล่อลื่นของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ลดลงหากการเติมเอสเทอร์เพียงร้อยละ 1 จะส่งผลให้ความหล่อลื่นดียิ่งขึ้นและมีค่าที่เป็นไปตามมาตรฐานของน้ำมันเชื้อเพลิง

Kuszewski, Jakubowski, Jaworski, Lubas, และ Balawender (2021) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติไทรโบโลยีเบื้องต้นของ 1-butanol-diesel fuel (1-BDFs) โดยใช้เครื่อง

High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR) เนื่องจาก 1-บิวทานอล ไม่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงเดียวกับเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยมีแวนโน้มที่มีการจุดระเบิดตัวเองของน้ำมันที่ต่ำและความหล่อลื่นไม่สูงมากดังนั้นจึงให้ความสนใจกับ 1-บิวทานอล เมื่อพิจารณาความทนทานของระบบหัวฉีดเชื้อเพลิงจึงจำเป็นต้องทดสอบความหล่อลื่นของน้ำมันเชื้อเพลิงเมื่อมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในขณะที่มีเงื่อนไขในการทดสอบเพื่อประเมินความหล่อลื่นของน้ำมันดีเซลมาตรฐานและ 1-บิวทานอล ที่อุณหภูมิ 30 60 90 และ 120 °C และทดสอบ 1-บิวทานอล ที่มีสัดส่วนร้อยละโดยปริมาตรของ 1-บิวทานอล อยู่ที่ร้อยละ 5 15 และ 25 โดยเครื่อง High Frequency Reciprocating Rig (HFRR) ซึ่งวิธีการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 12156-1 จากนั้นทำการถ่ายภาพรอยสึกหรอบน Ball ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยสึกหรอ (Wear Scar Diameter, WSD) จะเป็นเกณฑ์พื้นฐานในการประเมินสมบัติของความหล่อลื่นจากผลการทดลองพบว่าสัดส่วนร้อยละของ 1-บิวทานอลที่ผสมเพิ่มขึ้นจะทำให้มีความหล่อลื่นที่ดีขึ้นที่อุณหภูมิสูงและสมบัติของความหล่อลื่นที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัดมากที่สุด คือ จากน้ำมันดีเซลบริสุทธิ์และ 1-บิวทานอลที่มีสัดส่วนร้อยละ 5 โดยปริมาตรของ 1-บิวทานอล

Doustdar et al. (2021) ศึกษาการประเมินประสิทธิภาพโครงสร้างโมเลกุลของเชื้อเพลิงพลังงานทางเลือกต่อสมบัติทางไทรโบโลยีโดยการนำเชื้อเพลิงทางเลือกที่ได้จากชีวมวลที่ให้ออกซิเจนที่หลากหลายเช่น บิวทานอล เพนทานอล ไฮโคลเพนทานอล ไฮโคลเพนทาโนน และน้ำมันเบนซิน ผสมกับน้ำมันดีเซลบริสุทธิ์ ผ่านการทดสอบความหล่อลื่นด้วยเครื่อง High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR) ซึ่งจากการทดลองพบว่า ไฮโคลเพนทานอล และไฮโคลเพนทาโนน ที่ผสมกับน้ำมันดีเซลจะให้ค่ารอยสึกหรอน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ รอยสึกหรอจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมเชื้อเพลิงทางเลือกร้อยละ 20 ขึ้นไป เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลบริสุทธิ์ซึ่งการลดลงของรอยสึกหรอเกิดจากการมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล คาร์บอนิลในแอลกอฮอล์และคีโตนตามลำดับ ซึ่งทำให้น้ำมันดีเซลที่มีการผสมเชื้อเพลิงทางเลือกเป็นโมเลกุลที่มีขั้วมากขึ้น และ ช่วยสร้างชั้นฟิล์มความหล่อลื่นเพื่อป้องกันการสึกหรอที่เกิดจากการเคลื่อนที่พื้นผิว ดังนั้น จากการทดลองพบว่า ไฮโคลเพนทานอล และไฮโคลเพนทาโนน เหมาะสมที่จะนำไปใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเชื้อเพลิงในอนาคต

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามนำเสนอข้างต้นพบว่า มีการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่หลากหลาย เช่น 1-บิวทานอล 2-เมทิลฟูรัน (MF) 2,5-ไดเมทิลฟูรัน (DMF) และ น้ำมันไบโอดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมเพื่อเพิ่มสมบัติการหล่อลื่น ลดการสึกหรอให้กับน้ำมันเชื้อเพลิง รวมไปถึงการทดสอบ

สมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และ ไทโรโบลยีของน้ำมันเชื้อเพลิง ทดสอบผลกระทบจากอุณหภูมิ ความชื้น และโหลด เพื่อสร้างแผนภาพการสึกหรอ (Wear map) อย่างไรก็ตามยังขาดการศึกษาการวิเคราะห์ที่ครอบคลุมการทดสอบสมบัติทางเคมี ทางกาย ไทโรโบลยี และ ผลกระทบจากปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่สามารถส่งผลกระทบต่อน้ำมันเชื้อเพลิง

ผู้วิจัยจึงเห็นถึงความสำคัญในการทดสอบน้ำมันเชื้อเพลิง งานวิจัยนี้นำน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ในระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน เพื่อเพิ่มสมบัติการหล่อลื่นให้กับน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ ทำการทดสอบสมบัติทางเคมี และ ไทโรโบลยี รวมไปถึงการทดสอบผลกระทบจากปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่อาจเปลี่ยนแปลง เช่น โหลด เวลา อุณหภูมิ และ ความชื้น เพื่อสร้างเป็นแผนภาพการสึกหรอ



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้

- 3.1.1.1 ขวดวัดปริมาตร
- 3.1.1.2 ขวดDuran
- 3.1.1.3 ปีเปตต์
- 3.1.1.4 ปีกเกอร์
- 3.1.1.5 เครื่องชั่งสี่ตำแหน่ง
- 3.1.1.6 เครื่องล้างอัลตราโซนิก
- 3.1.1.7 เครื่อง High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR) PCS Instruments
- 3.1.1.8 เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)
- 3.1.1.9 เครื่องกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคปแบบเลเซอร์สามมิติ (3D Laser Scanning Microscope)
- 3.1.1.10 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรไมโครสโคป (FTIR Micro-Spectrometer)

3.1.2 สารเคมีที่ใช้

- 3.1.2.1 น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ (Bio Hydrogenated Diesel, BHD) ผลิตจากน้ำมันปาล์ม จากบริษัท วีระสุวรรณ จำกัด
- 3.1.2.2 น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ผลิตจากน้ำมันปาล์ม (Fatty Acid-Methyl Ester, FAME) จากบริษัท ไบโอดีเซลเนอจี จำกัด
- 3.1.2.3 อะซิโตน (Acetone) เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทกรดคาร์บอกซิลิกมีสูตรเคมี คือ CH_3COCH_3 ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 (เกรด AR) จาก RCI Labscan
- 3.1.2.4 น้ำ DI (Deionized water) คือ น้ำที่ผ่านกระบวนการกำจัดสารละลายหรือไอออนออกไปเป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก

3.1.2.5 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 (เกรด AR) จาก RCI Labscan

3.1.2.6 โพแทสเซียมแอสเตท (Potassium acetate, $C_2H_3KO_2$) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 (เกรด AR) จาก LOBA CHEMIE

3.1.2.7 แมกนีเซียมคลอไรด์ (Magnesium chloride, $MgCl_2$) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 (เกรด AR) จาก LOBA CHEMIE

3.1.2.8 โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate, K_2CO_3) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 (เกรด AR) จาก QReC

3.1.2.9 โซเดียมโบรไมด์ (Sodium bromide, NaBr) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 (เกรด AR) จาก QReC

3.1.2.10 โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 (เกรด AR) จาก RCI Labscan

3.1.2.11 โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride, KCl) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 (เกรด AR) จาก QReC

3.1.2.12 แบเรียมคลอไรด์ (Barium chloride, $BaCl_2$) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 (เกรด AR) จาก LOBA CHEMIE

3.2 การเตรียมตัวอย่างน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างของน้ำมันที่ใช้ในการวิเคราะห์นำน้ำดีเซลชีวภาพสังเคราะห์กับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในปริมาณร้อยละ 0 - 100 ในขวดวัดปริมาตร 250 ml

3.2.2 ใช้ปิเปตต์กับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทกรดไขมันของเมทิลเอสเทอร์ตามสัดส่วนร้อยละที่กำหนด

3.2.3 เทน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 ml

3.2.4 ปิดขวดวัดปริมาตรและทำการเขย่าและสังเกตให้น้ำมันผสมกัน

3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง

3.3.1 การวิเคราะห์ความหนืดจลนศาสตร์ตามมาตรฐาน ASTM D445 นำน้ำมันเชื้อเพลิงใส่ลงในหลอดแก้วรูเล็ก (Cannon – Fenske) ที่แช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิคงที่ $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นดูดตัวอย่างเชื้อเพลิงให้สูงที่ระดับเริ่มต้นและเมื่อน้ำมันเชื้อเพลิงไหลถึงจุดที่กำหนดเริ่มทำการจับเวลาและหยุดเวลาเมื่อถึงจุดสุดท้าย ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง นำเวลามาหาค่าเฉลี่ย และคำนวณค่าความหนืดจลนศาสตร์ ตามสมการที่ 3.1

$$v = Cxt [1-B \times T_T - T_F] \quad (3.1)$$

เมื่อ

- v** คือ ความหนืดจลนศาสตร์ (cSt)
- C** คือ ค่าคงที่ของหลอดแก้วรูเล็ก (cSt/วินาที)
- t** คือ เวลาที่ได้จากการทดสอบ (วินาที)
- B** คือ ค่าคงที่สำหรับการปรับค่า (1/°C)
- T_T** คือ อุณหภูมิที่ทดสอบ (°C)
- T_F** คือ อุณหภูมิน้ำมันเชื้อเพลิงก่อนทดสอบ (°C)



รูปที่ 3.1 เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบหลอดแก้วรูเล็ก

3.3.2 การวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะ ความถ่วงเอพิโอ และความหนาแน่น ตามมาตรฐาน ASTM D1298 นำน้ำมันเชื้อเพลิงใส่ลงในกระบอกตวงขนาด 100 ml แช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิคงที่ 15 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไฮโดรมิเตอร์ ดังรูปที่ 3.2 จุ่มลงในกระบอกตวงและปล่อยให้ลอยอ่านค่าและบันทึกผลเมื่อไฮโดรมิเตอร์นิ่ง ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งค่าที่ออกมาจะเป็นค่าความถ่วงเอพิโอ ซึ่งเป็นค่าที่ผกผันกับความถ่วงจำเพาะของน้ำมันเชื้อเพลิง ตามสมการที่ 3.2 นอกจากนี้ยังสามารถนำค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันเชื้อเพลิงไปคำนวณค่า

ความหนาแน่น โดยนำค่าความหนาแน่นของน้ำ ณ อุณหภูมิ 15 °C ซึ่งมีค่า 999.016 kg/m³ (มาตรฐาน ASTM D1250)

$$\text{ความถ่วงเอพิไอ} = (141.5/\text{ความถ่วงจำเพาะที่ } 15 \text{ }^{\circ}\text{C}) - 131.5 \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.2 ไฮโดรมิเตอร์สำหรับการวัดความถ่วงเอพิไอ

3.3.3 การวิเคราะห์อุณหภูมิการกลั่นโดยปริมาตรตามมาตรฐาน ASTM D86 นำน้ำมันเชื้อเพลิงใส่ลงในขวดกลั่น (Distillation flask) 100 ml จากนั้นนำไปติดตั้งกับชุดวิเคราะห์อุณหภูมิการกลั่นและติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์เพื่ออ่านค่าอุณหภูมิ ให้ความร้อนแก่น้ำมันเชื้อเพลิงพร้อมจับเวลา โดยควบคุมอัตราการกลั่นในช่วง 4 – 5 ml/min อ่านค่าและบันทึกผลของอุณหภูมิเมื่อตัวอย่างน้ำมันถูกกลั่นออกมาเป็นหยดแรกและจะบันทึกผลของอุณหภูมิทุก ๆ 5 ml ของปริมาณน้ำมันที่กลั่นได้



รูปที่ 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์อุณหภูมิการกลั่น

3.3.4 การวิเคราะห์ค่าดัชนีซีเทนตามมาตรฐาน ASTM D976 ใช้ค่าความถ่วงเอพีไอและค่าอุณหภูมิการกลั่นที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตรของส่วนที่กลั่นได้มาคำนวณ ตามสมการที่ 3.3

$$CI = 45.2 + 0.0892T_{10N} + [0.131 + 0.901B]T_{50N} + [0.0523 - 0.420B]T_{90N} + 0.00049[T_{10N}^2 - T_{90N}^2] + 107B + 60B^2 \quad (3.3)$$

เมื่อ

CI	คือ ดัชนีซีเทน
D	คือ ความหนาแน่นที่ 15 °C (g/ml)
B	คือ $[\exp(-0.0035(D-850))]$ หรือ $\exp(-3.5(D-0.85))-1$
T ₁₀	คือ อุณหภูมิการกลั่นที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตร (°C)
T _{10N}	คือ T ₁₀ - 215 (°C)
T ₅₀	คือ อุณหภูมิการกลั่นที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร (°C)
T _{50N}	คือ T ₅₀ - 260 (°C)
T ₉₀	คือ อุณหภูมิการกลั่นที่ร้อยละ 90 โดยปริมาตร (°C)
T _{90N}	คือ T ₉₀ - 310 (°C)

3.3.5 การวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM D240 นำน้ำมันเชื้อเพลิงใส่ลงในถ้วยจุดระเบิดและชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 4 ตำแหน่ง ให้น้ำหนักอยู่ในช่วง 0.5 ± 0.02 g ติดตั้งถ้วยจุดระเบิดบนแกนอลูมิเนียมมัดเส้นด้ายติดกับหลอดให้ปลายเส้นด้ายจุ่มอยู่ในถ้วยจุดระเบิดจากนั้นประกอบเข้ากับลูกบอมบ์อัดอากาศเข้าไปติดตั้งภายในเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ ดังรูปที่ 3.4 และเริ่มทำการวิเคราะห์



รูปที่ 3.4 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์

3.3.6 การวิเคราะห์จุดวาบไฟตามมาตรฐาน ASTM D93 นำน้ำมันเชื้อเพลิงใส่ลงในถ้วยใส่ตัวอย่างให้ถึงเส้นที่กำหนดไว้ (ประมาณ 70 ml) จากนั้นนำไปติดตั้งกับชุดวิเคราะห์จุดวาบไฟและติดตั้งเทอร์มิสเตอร์จากนั้นให้ความร้อนกับน้ำมันเชื้อเพลิงที่ค่าคงที่ ปลดปล่อยเปลวไฟเพื่อไปก่อให้เกิดการวาบไฟขึ้นสังเกตเมื่อเกิดการวาบไฟบริเวณผิวหน้าของน้ำมันเชื้อเพลิงทำการอ่านค่าและบันทึกผลอุณหภูมิ



รูปที่ 3.5 เครื่องมือวิเคราะห์จุดวาบไฟ

3.4 กระบวนการวิเคราะห์สมบัติการหล่อลื่นตาม ISO 12156-1: 2018

3.4.1 ติดตั้งลูกบอลเข้ากับ Upper holder แขนที่ยึดลูกบอลและใส่ดิสก์ลงใน Lower holder กับที่ใส่ตัวอย่างน้ำมัน

3.4.2 ใส่ตัวอย่างน้ำมันที่ต้องการนำมาวิเคราะห์โดยปิเปตต์ 2 ml ลงในที่ใส่ตัวอย่างน้ำมัน จากนั้นนำไปติดตั้งภายในเครื่อง HFRR

3.4.3 แขนตุ้มห้อยถ่วงน้ำหนักตามโหลดที่ต้องใช้ในการทดลองตั้งแต่ 200 g

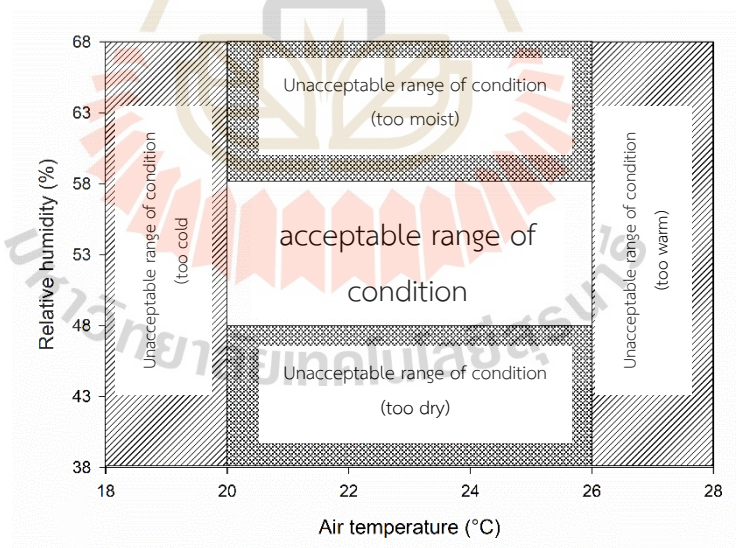
3.4.4 เตรียมสารละลายโซเดียมโบรไมด์ปริมาตร 500 ml ภายในภาชนะภายในเครื่อง HFRR

3.4.5 ตั้งค่าโปรแกรม HFRR เพื่อกำหนดเวลา, อุณหภูมิ, ความถี่, ระยะเวลาพัก และ โหลด โดยตามมาตรฐาน ISO 12156-1: 2018 กำหนดเวลา 75 นาที, อุณหภูมิ 60 °C, ความถี่ 50 Hz, ระยะเวลาพัก 1000 μ m และโหลด 200 g

3.4.6 เมื่ออุณหภูมิภายในตัวเครื่อง 20 - 26 °C และค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในตัวเครื่องร้อยละ 48 - 58 จึงสามารถกดเริ่มการทดลองได้ เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการวัดรอยสึกหรอตามมาตรฐานของ ISO 12156-1: 2018

ตารางที่ 3.1 ค่ามาตรฐานสำหรับการทดสอบสมบัติการหล่อลื่นตามมาตรฐาน
ISO 12156-1: 2018

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง (ml)	2 ± 0.2
ระยะชัก (mm)	1 ± 0.02
ความถี่ (Hz)	50 ± 1
อุณหภูมิและความชื้นในห้องทดสอบ	รูปที่ 3.6
อุณหภูมิน้ำมันเชื้อเพลิง (°C)	60 ± 2
โหลดทดสอบ (g)	200 ± 1
ระยะเวลาในการทดสอบ (นาที)	75 ± 0.1



รูปที่ 3.6 เงื่อนไขของอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องทดสอบ



รูปที่ 3.7 เครื่อง High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR)

3.5 กระบวนการวิเคราะห์สมบัติการหล่อลื่นเมื่อโหลดและเวลาเปลี่ยนแปลง

3.5.1 ติดตั้งลูกบอลเข้ากับ Upper holder แกนที่ยึดลูกบอลและใส่ดิสก์ลงใน Lower holder กับที่ใส่ตัวอย่างน้ำมัน

3.5.2 ใส่น้ำมันตัวอย่างที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0 10 และ 20 นำมาปิเปตต์ 2 ml ลงในที่ใส่ตัวอย่างน้ำมันจากนั้นนำไปติดตั้งภายในเครื่อง HFRR

3.5.3 แขนตุ้มห้อยถ่วงน้ำหนักตามโหลดที่ต้องใช้ในการทดลองตั้งแต่ 200 400 600 800 และ 1000 g

3.5.4 เตรียมสารละลายโซเดียมโบรไมด์ปริมาตร 500 ml ภายในสภาพขณะภายในเครื่อง HFRR

3.5.5 ตั้งค่าโปรแกรม HFRR เพื่อกำหนดเวลา, อุณหภูมิ, ความถี่, ระยะชัก และ โหลด กำหนดเวลา 75 นาที, อุณหภูมิ 60 °C, ความถี่ 50 Hz, ระยะชัก 1000 μm

3.5.6 เมื่ออุณหภูมิภายในตัวเครื่อง 20 - 26 °C และค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในตัวเครื่องร้อยละ 48 - 58 จึงสามารถดริมการทดลองได้ เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการวัดรอยสึกหรอตามมาตรฐานของ ISO 12156-1: 2018

3.6 กระบวนการวิเคราะห์สมบัติการหล่อลื่นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

3.6.1 ติดตั้งลูกบอลเข้ากับ Upper holder แกนที่ยึดลูกบอลและใส่แผ่นดิสก์ลงใน Lower holder กับที่ใส่ตัวอย่างน้ำมัน

3.6.2 ใส่น้ำมันตัวอย่างที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 นำมาปิเปตต์ 2 ml ลงในที่ใส่ตัวอย่างน้ำมันจากนั้นนำไปติดตั้งภายในเครื่อง HFRR

3.6.3 แขนตุ้มห้อยถ่วงน้ำหนักตามโหลดที่ต้องใช้ในการทดลองตั้งแต่ 200 และ 1000 g

3.6.3 เตรียมสารละลายเกลือแสดงดังตารางที่ 3.2 ปริมาตร 500 ml ภายในภาตภาชนะภายในเครื่อง HFRR

3.6.4 ตั้งค่าโปรแกรม HFRR เพื่อกำหนดเวลา, อุณหภูมิ, ความถี่, ระยะเวลาชัก และ โหลด กำหนดเวลา 75 นาที, อุณหภูมิ 60 90 120 และ 150 °C, ความถี่ 50 Hz, ระยะเวลาชัก 1000 μ m

3.6.5 เมื่ออุณหภูมิภายในตัวเครื่อง เท่ากับอุณหภูมิที่กำหนดไว้ และความชื้นสัมพัทธ์ภายในตัวเครื่องมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละที่กำหนดตามตารางที่ 3.2 จึงสามารถกดเริ่มการทดลองได้

ตารางที่ 3.2 เกลือที่ใช้ควบคุมความชื้นที่อุณหภูมิห้องทดลอง

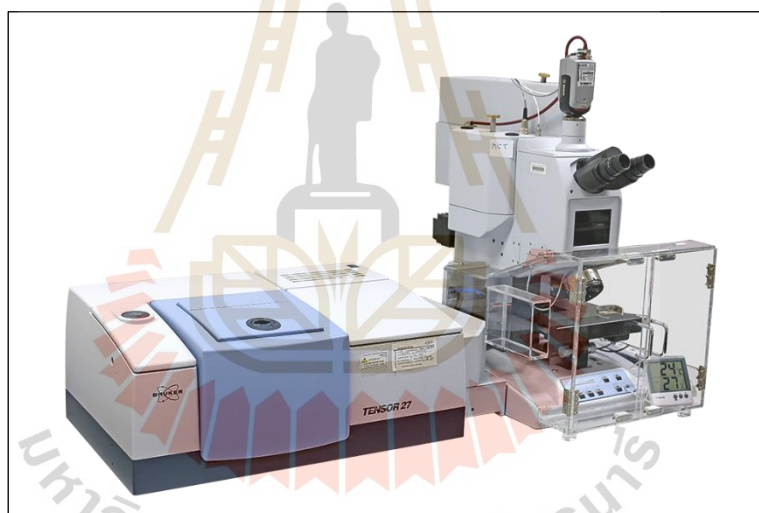
เกลือ	ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ (%)
โซเดียมไฮดรอกไซด์	9.65 – 14.00
โพแทสเซียมอะซิเตท	23.05 – 26.20
แมกนีเซียมคลอไรด์	32.85 – 36.00
โพแทสเซียมคาร์บอเนต	44.00 – 48.95
โซเดียมโบรไมด์	51.20 – 57.15
โซเดียมคลอไรด์	66.15 – 71.30
โพแทสเซียมคลอไรด์	79.20 – 81.95
แบเรียมคลอไรด์	86.75 – 90.10

3.7 กระบวนการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.7.1 เมื่อการทดลองเสร็จสิ้นนำ Ball มาใส่ในเครื่องทำล้างความสะอาดด้วยอัลตราโซนิก (Sonicator) โดยมีสารทำละลายเป็นกรดแอสติคหลังจากนั้นนำไปถ่ายภาพรอยสึกหรอที่เกิดขึ้นโดยกล้องไมโครสโคป

3.7.2 นำดิสก์และที่ใส่ตัวอย่างนำไปทำความสะอาดด้วยแรงสั่นโดยมีสารทำละลายเป็นกรดแอสติครอให้แห้งและนำไปเก็บภายในตู้ดูดความชื้น

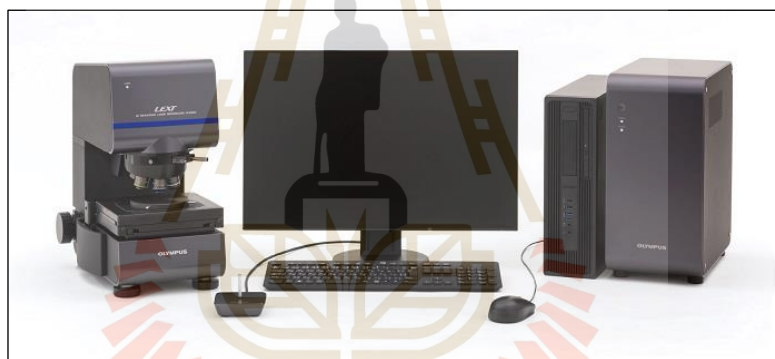
3.7.3 นำดิสก์ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟลูอริเยร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรไมโครสโคป ดังรูปที่ 3.8 เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้น ถ่ายภาพของพื้นผิวรอยที่เกิดขึ้นบนดิสก์ด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูปที่ 3.9 และการวัดขนาดความลึกและปริมาตรของรอยสึกหรอที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคปแบบเลเซอร์สามมิติ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.8 เครื่องฟลูอริเยร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรไมโครสโคป (FTIR Micro-Spectrometer)



รูปที่ 3.9 เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)



รูปที่ 3.10 เครื่องกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคปแบบเลเซอร์สามมิติ (3D Laser Scanning Microscope)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

บทนี้จะเป็นการวิเคราะห์และอภิปรายผลการศึกษาของการปรับปรุงและตรวจสอบสมบัติ และ ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อไทรโบโลยีของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ (BHD) กับ น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAME) โดยใช้เครื่อง High Frequency Reciprocating Rig (HFRR) ในการทดสอบสมบัติการหล่อลื่นตามมาตรฐาน ISO 1256-1: 2018 และ ที่สภาวะของสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน คือ โหลด เวลา อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยการปรับปรุง และตรวจสอบสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ซึ่งเป็นน้ำมันดีเซลที่มีโครงสร้างโมเลกุล ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมทำให้มีสมบัติคล้ายคลึงกัน และสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ ดีเซลได้โดยไม่ต้องผ่านการปรับปรุงแต่ยังมีสมบัติความหล่อลื่นที่ให้ผลการทดสอบต่ำกว่ามาตรฐานที่ ใช้ในกระทรวงพลังงานประเทศไทยกับน้ำมันดีเซลส่งผลให้เกิดการสึกหรอกับเครื่องยนต์ทำให้ จำเป็นต้องมานำปรับปรุงโดยใช้น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่มีสมบัติการ หล่อลื่นที่โดดเด่นใช้เป็นสารเติมแต่งอย่างแพร่หลาย โดยทำการศึกษาที่ร้อยละ 3 – 90 ของน้ำมัน ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันทั้งหมด 3 ซ้ำ เพื่อจะได้สัดส่วนที่เหมาะสมในการผสม น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ จากนั้น ทดสอบสมบัติพื้นฐานอื่น ๆ ของน้ำมันเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (SEM) และ วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดย (FTIR) นอกจากนี้ก็นำน้ำมันดีเซลชีวภาพ สังเคราะห์ที่มีสัดส่วนที่เหมาะสมของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์มาทดสอบในสภาวะของ สิ่งแวดล้อมรูปแบบที่ 1 คือ โหลด 200 400 600 และ 1000 g เวลาตั้งแต่ 75 100 125 และ 150 นาที ที่ความถี่ 50 Hz ระยะชัก 1000 μm อุณหภูมิของเชื้อเพลิง 60 °C และภายในตัวเครื่องทดลองมี ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 52 – 56 และอุณหภูมิ 20 – 26 °C และทดสอบในสภาวะของสิ่งแวดล้อม รูปแบบที่ 2 คือ ภายในตัวเครื่องทดลองมีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 – 90 และอุณหภูมิของเชื้อเพลิง 60 90 120 และ 150 °C ที่ ความถี่ 50 Hz ระยะชัก 1000 μm โหลด 200 g เวลา 75 นาที เพื่อ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติการหล่อลื่นและชั้นฟิล์มบาง ที่อาจเกิดขึ้นเมื่อสภาวะของการใช้งาน น้ำมันเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันออกไปตามสภาวะต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อไทรโบโลยี

4.1 การศึกษาสารประกอบทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง

สารประกอบทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงผ่านการทดสอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS) จะแสดงผลในรูปของสัญญาณที่พบในเวลาหนึ่ง “พื้นที่ใต้กราฟ (Peak)” ทำให้พื้นที่ใต้กราฟ คือ ความเข้มข้นของสารประกอบที่พบในน้ำมันเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับสารประกอบมาตรฐานแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีองค์ประกอบของ $C_8 - C_{20}$ โดยที่จะพบส่วนใหญ่ คือ $C_{18:0}$ และ $C_{16:0}$ ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง หรือ พาราฟิน คิดเป็นร้อยละ 40.70 และ 25.01 ตามลำดับ โดยมีองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ทำให้มีสมบัติพื้นฐานเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตามการมีสมบัติการหล่อลื่นไม่ดี เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนในกระบวนการไฮโดรจิเนชันร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวหรือมีพันธะคู่เกิดปฏิกิริยา decarbonylation และ decarboxylation กลายเป็นสายโซ่ตรง ไม่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกที่เป็นองค์ประกอบที่ทำให้มีสมบัติการหล่อลื่นที่ดี และมีองค์ประกอบของพาราฟินที่มีกิ่งของกลุ่มเมทิล เนื่องจากในขั้นตอนการทำปฏิกิริยาอาจจะไม่ได้สมบูรณ์ (M. Lapuerta et al., 2011) ตามตารางที่ 4.2 สำหรับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พบว่ามีองค์ประกอบของ $C_{16:0}$ หรือ Palmitic acid methyl ester (Mancini et al., 2015) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่พบส่วนใหญ่แสดงให้เห็นว่าน้ำมันที่นำมาทดสอบนี้มาจากกระบวนการสังเคราะห์จากน้ำมันปาล์ม (Na-Ranong & Kitchaiya, 2014) น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันมีองค์ประกอบส่วนใหญ่ คือ $C_{16:0}$ $C_{18:1}$ และ $C_{18:2}$ ใน ร้อยละ 41.61 39.45 และ 11.0 ตามลำดับ โดยมีค่าร้อยละใกล้เคียงกับ Sukjit et al. (2019) ซึ่งใช้น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันจากปาล์มมีองค์ประกอบ คือ $C_{16:0}$ $C_{18:1}$ และ $C_{18:2}$ ในร้อยละ 46.29 37.07 และ 8.67 ตามลำดับ โดยองค์ประกอบที่กล่าวข้างต้นเป็นองค์ประกอบของกรดไขมันที่สำคัญที่พบในน้ำมันไบโอดีเซล และจะสังเกตว่ามีสารประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัว หรือ การมีพันธะคู่ในน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน จึงสามารถสร้างชั้นฟิล์มบาง และดูดซับบนพื้นผิวของโลหะ เพื่อช่วยเพิ่มสมบัติการหล่อลื่น และลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานให้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้สารประกอบของน้ำมันมีองค์ประกอบของออกซิเจนซึ่งจะช่วยให้เกิดกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ในเครื่องยนต์ และลดการปล่อยมลพิษทางอากาศ

ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรีของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์

เวลาการน่วง (นาที)	ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรอย่างง่าย	สูตรโมเลกุล	พื้นที่ใต้กราฟ
				ร้อยละใน BHD
4.41	Octane	C8:0	C ₈ H ₁₈	0.42
6.05	Nonane	C9:0	C ₉ H ₂₀	1.08
7.88	Decane	C10:0	C ₁₀ H ₂₂	4.69
10.61	Undecanoic	C11:0	C ₁₁ H ₂₄	8.16
13.23	Dodecane	C12:0	C ₁₂ H ₂₆	0.25
14.01	Tridecane	C13:0	C ₁₃ H ₂₈	5.95
17.99	Tetradecane	C14:0	C ₁₄ H ₃₀	12.71
18.59	2-methyl tetradecane	C15:0	C ₁₅ H ₃₂	0.28
19.00	Pentadecane	C15:0	C ₁₅ H ₃₂	0.18
21.07	Hexadecane	C16:0	C ₁₆ H ₃₄	0.11
22.14	Heptadecane	C17:0	C ₁₇ H ₃₆	25.01
23.86	2-methyl heptadecane	C18:0	C ₁₆ H ₃₄	0.27
26.27	Octadecane	C18:0	C ₁₈ H ₃₈	40.70
28.02	Nonadecane	C19:0	C ₁₉ H ₄₀	0.10
28.96	Eicosane ₂₀	C20:0	C ₂₀ H ₄₂	0.11
				100.0

ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรีของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

เวลาการน่วง (นาที)	ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรอย่าง ง่าย	สูตร โมเลกุล	พื้นที่ใต้
				กราฟ ร้อยละใน FAME
20.75	Lauric acid methyl ester	C12:0	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	0.25
23.24	Myristic acid methyl ester	C14:0	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	0.97
24.86	Pentadecanoic acid methyl ester	C15:0	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	0.06
27.01	Palmitic acid methyl ester	C16:0	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	41.61
29.38	Palmitoleic acid methyl ester	C16:1	C ₁₆ H ₃₀ O ₂	0.14
32.74	Stearic acid methyl ester	C18:0	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	5.66
35.37	Oleic acid methyl ester	C18:1	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	39.45
39.582	Linoleic acid methyl ester	C18:2	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	11.07
44.2	Eicosenoic acid methyl ester	C20:1	C ₂₀ H ₃₈ O ₂	0.71
46.52	Heneicosanoic acid methyl ester	C21:0	C ₂₁ H ₄₂ O ₂	0.09
				100.0

4.2 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิง

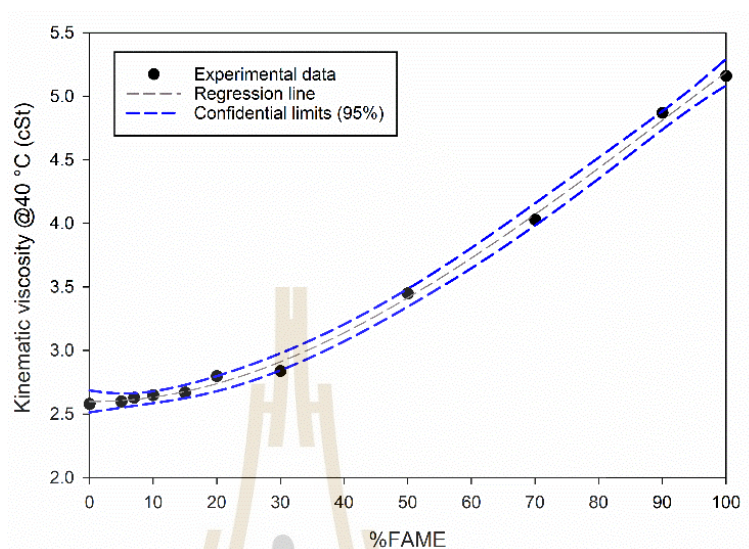
สมบัติพื้นฐานทางกายภาพ และเคมีของเชื้อเพลิงแสดงดังตารางที่ 2.2 จะพบว่าเมื่อร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นทำให้ความหนืดจลนศาสตร์ ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น อุณหภูมิการกลั่น และจุดวาบไฟ มีค่าที่สูงขึ้น เนื่องจากเป็นสมบัติที่น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์โดยพื้นฐานมีค่าที่สูงจึงทำให้เมื่อเพิ่มเข้าไปจึงมีค่าที่สูงขึ้นแต่เมื่อเป็นสมบัติค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะมีค่าที่ลดลง

4.2.1 ความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic viscosity)

ความหนืดมีบทบาทสำคัญเนื่องจากการวัดการต้านทานการไหล ความหนืดจลนศาสตร์ที่สูงเกินไปก็จะส่งผลกระทบต่อระบบการฉีดของหัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ และเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และความหนืดสูงทำให้มีการหล่อลื่นจะมีค่าที่สูงเกิดจากการไหลของของเหลวระหว่างวัตถุสองชิ้นได้ง่ายกว่ามีชั้นฟิล์มบางเพิ่มขึ้นจึงลดแรงเสียดทานและรอยสึกหรอได้

จากรูปที่ 4.1 พบว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีค่าความหนืด คือ 2.58 cSt และเมื่อมีร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 5 – 100 โดยปริมาตรจะมีค่าความหนืดอยู่ที่ 2.6 – 5.16 cSt ตามลำดับ ซึ่งความหนืดมีเกณฑ์ที่กรมธุรกิจพลังงานของประเทศไทยได้กำหนดไว้ คือ มีค่าไม่ต่ำกว่า 1.8 cSt และไม่สูงกว่า 4.1 cSt ของน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม (กรมธุรกิจพลังงาน, 2563) โดยความหนืดที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของการผสมน้ำมันไบโอดีเซล เกิดขึ้นตามทฤษฎีไฮโดรไดนามิกของการหล่อลื่น (Hydrodynamic lubrication) กล่าวคือเมื่อความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดแรงเฉือน (Shear force) ระหว่างชั้นของน้ำมันมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงต้านทานการไหล (Flow resistance) ระหว่างผิวสัมผัส ซึ่งสามารถช่วยรองรับน้ำหนักบรรทุก ลดการสัมผัสโดยตรงของผิววัสดุ ทำให้ลดแรงเสียดทานและการสึกหรอลง ดังนั้นการเพิ่มความหนืดของน้ำมันด้วยการผสมน้ำมันไบโอดีเซล จึงเป็นแนวทางที่มีประสิทธิผลในการปรับปรุงสมบัติการหล่อลื่น อย่างไรก็ตาม ความหนืดที่สูงเกินไปอาจส่งผลเสียต่อการฉีดและการไหลเวียนของน้ำมันเชื้อเพลิงได้ ทำให้ต้องพิจารณาถึงสัดส่วนที่เหมาะสม และเพื่อไม่ให้ความหนืดมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานกำหนด การผสมร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่เหมาะสม คือ ตั้งแต่ 5 – 70 โดยปริมาตรจะมีค่าความหนืดอยู่ในช่วง 2.6 – 4.03 cSt น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันสามารถช่วยเพิ่มความหนืดให้กับน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ เนื่องจากการมีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาวของกรดไขมันในน้ำมันไบโอดีเซลและมี

องค์ประกอบของหมู่ไฮดรอกซิลในกลุ่มของกรดคาร์บอกซิลิก จึงทำให้การเพิ่มน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันมีความหนืดที่เพิ่มขึ้น (Knothe & Steidley, 2005)



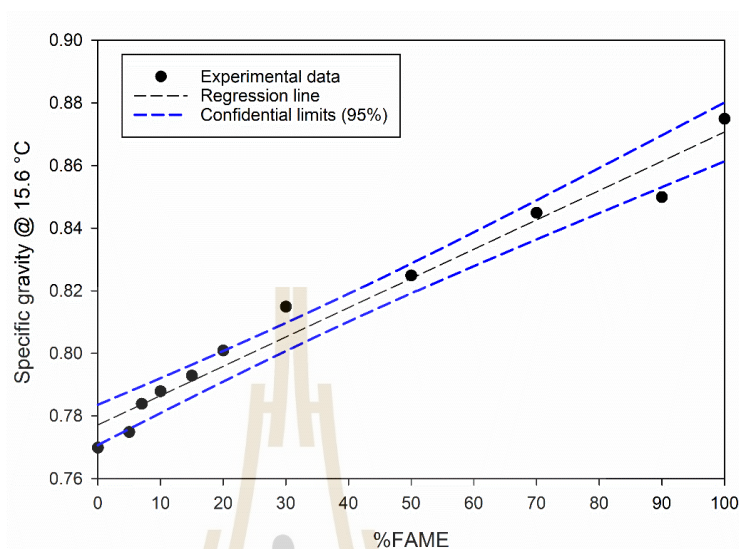
รูปที่ 4.1 ความหนืดจลนศาสตร์ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อมีร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น

4.2.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

ความถ่วงจำเพาะ คือ ค่าอัตราส่วนความหนาแน่นของเชื้อเพลิงต่อความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน ความถ่วงจำเพาะเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของน้ำมันเชื้อเพลิงเนื่องจากมีผลต่อการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สามารถบอกความหนักเบาของน้ำมันเชื้อเพลิง นอกจากนี้ค่าความถ่วงจำเพาะยังขึ้นกับอุณหภูมิถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความถ่วงจำเพาะมีค่าที่ลดลง (Tat & Van Gerpen, 2000) และเป็นสมบัติที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับเลขซีเทนและค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

จากรูปที่ 4.2 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีค่า คือ 0.770 และเมื่อเพิ่มน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ร้อยละ 5 – 100 โดยปริมาตร ทำให้มีค่าความถ่วงจำเพาะ คือ 0.775 – 0.875 อยู่ในช่วงมาตรฐานของน้ำมันดีเซลที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนดไว้ คือ 0.81 – 0.87 (กรมธุรกิจพลังงาน, 2563) Dunn (2011) ใช้ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันถั่วเหลือง และ น้ำมันคร้วผสมกับน้ำมันดีเซลกัมมะถันต่ำพิเศษ (ULSD) พบว่าเมื่อร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิ 15.6 °C มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นสมการเส้นตรงมีค่าอยู่ในช่วง 0.847 – 0.855 ซึ่งให้ผลการทดลองได้สอดคล้อง โดยค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าที่สูงขึ้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่นประเภทของวัตถุดิบที่นำมาสังเคราะห์น้ำมัน

เชื้อเพลิงและการเป็นกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะที่สูงขึ้น

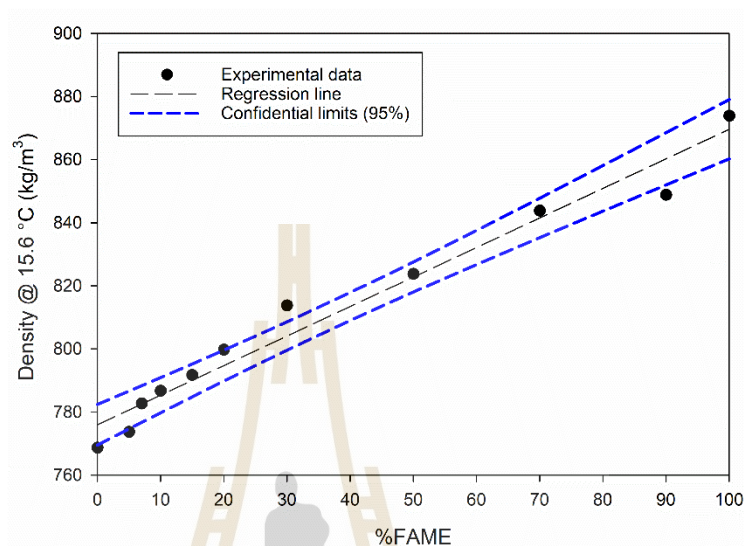


รูปที่ 4.2 ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อมีร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น

4.2.3 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่น คือ สมบัติที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ และการเกิดการเผาไหม้ในการฉีดเชื้อเพลิง เนื่องจากตามนิยามของความหนาแน่น คือ ส่วนของมวลเชื้อเพลิงต่อปริมาตรของเชื้อเพลิงทำให้เมื่อมีการฉีดเชื้อเพลิงไปในห้องเผาไหม้จะมีการถูกควบคุมปริมาตรจึงส่งผลโดยตรงต่อกำลังของเครื่องยนต์ดีเซล โดยที่หากค่าความหนาแน่นต่ำอาจส่งผลให้ภายในห้องเผาไหม้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เกิดการปล่อยมลพิษที่สูงขึ้น ทำให้มีการกำหนดให้มีค่าควบคุมอยู่ในช่วง 810 - 870 kg/m³ ที่อุณหภูมิ 15 °C (กรมธุรกิจพลังงาน, 2563) จากรูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์จากการทดสอบพบว่าเมื่อน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น จะทำให้น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีโมเลกุลของอะโรมาติกที่มีความหนาแน่นมากกว่าโมเลกุลของแอลเคนที่พบในน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์โดยในการทดลองน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีค่าความหนาแน่น คือ 769 kg/m³ และเมื่อเพิ่มร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ 5 - 100 โดยปริมาตรจะมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเป็น 774 - 874 kg/m³ ซึ่งมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับการทดสอบของ Fathurrahman et al. (2023) ความหนาแน่นของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์และน้ำมันไบโอดีเซลจากปาล์มมีค่าอยู่ที่ 783

kg/m^3 และ 873 kg/m^3 ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าน้ำมันไบโอดีเซลจะให้ค่าความหนาแน่นที่มากกว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ ดังนั้นการเพิ่มร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลจึงทำให้ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามแสดงดังรูปที่ 4.3



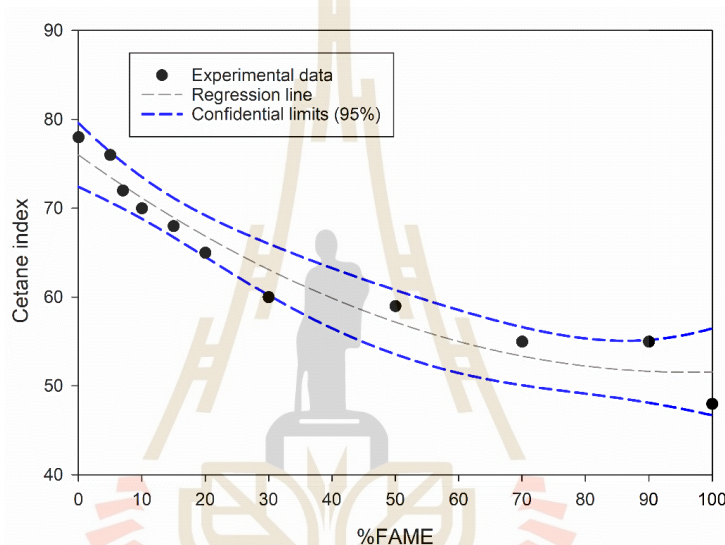
รูปที่ 4.3 ความหนาแน่นของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อมีร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภท เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น

4.2.4 ดัชนีซีเทน (Cetane index)

ดัชนีซีเทนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.3) การที่มีค่าดัชนีซีเทนที่สูงบ่งบอกถึงการมีระบบการเผาไหม้ที่ดีของเครื่องยนต์ดีเซล และสามารถบ่งชี้ว่าน้ำมันเชื้อเพลิงจุดติดไฟได้ง่ายแค่ไหน เนื่องจากสามารถอธิบายการทำงานระหว่างอากาศและน้ำมันเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ การคำนวณค่าดัชนีซีเทนสามารถวัดจากปริมาณการจุดระเบิดในระดับโครงสร้างโมเลกุลซึ่งน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรงหรือพาราฟิน จึงทำให้มีค่าดัชนีซีเทนที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันจากไบโอดีเซล

จากรูปที่ 4.4 พบว่าดัชนีซีเทนของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์คือ 78 ซึ่งมีค่าที่มากกว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม ทำให้อาจจำเป็นต้องปรับบางพารามิเตอร์ของเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อให้ได้ใช้ศักยภาพของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์อย่างเต็มที่ (Sonthalia & Kumar, 2021) และเมื่อมีการผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ร้อยละ 5 – 90 โดยปริมาตร ทำให้ดัชนีซีเทนมีค่าดัชนีซีเทนที่ลดลงตั้งแต่ 76 – 55 ตามลำดับ และอยู่ในช่วงที่กรมธุรกิจพลังงานของประเทศไทยกำหนดไว้ คือ มีค่าไม่ต่ำกว่า 50 (กรมธุรกิจพลังงาน, 2563) เนื่องจากดัชนีซีเทนของ

น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันคือ 48 ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับดัชนีซีเทนของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวันคือ 54 (Aburudyna, Karonis, Zannikos, & Lois, 2015) แต่ยังมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ จึงทำให้ควรมีการผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันอย่างเหมาะสมหรือในปริมาณที่ไม่สูงเกินไป เนื่องจากการมีค่าดัชนีซีเทนที่สูงสามารถทำให้เกิดการจุดระเบิดได้รวดเร็ว และเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ เพิ่มประสิทธิภาพของการเผาไหม้ อีกทั้งยังลดการเกิดปัญหาทางมลพิษและเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ (Chukwuezie, Nwakuba, Asoegwu, & Nwaigwe, 2017)

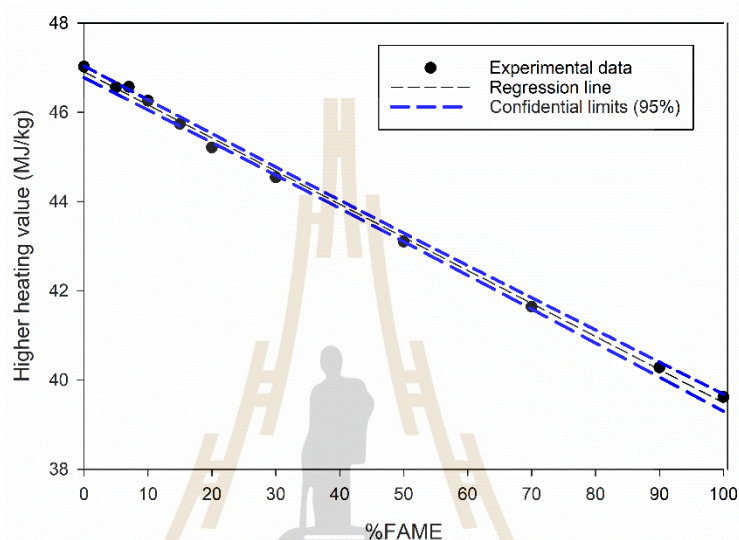


รูปที่ 4.4 ดัชนีซีเทนของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อมีร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น

4.2.5 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Higher heating value)

ค่าความร้อนเชื้อเพลิง คือ สมบัติค่าความร้อนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากการเกิดการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงรวมถึงค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ เมื่อน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสารประกอบของไฮโดรคาร์บอนมากจะส่งผลให้มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงยังขึ้นอยู่กับความยาวของโซ่โมเลกุลและการมีองค์ประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัวในน้ำมันเชื้อเพลิงจากรูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิงพบว่าเมื่อร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น 5 – 90 โดยปริมาตรในน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์จะให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ลดลงจากเดิม 47.02 MJ/kg เป็น 46.56 – 40.28 MJ/kg Sivaramakrishnan และ Ravikumar (2011) พบว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงของน้ำมันไบโอดีเซลจะมีค่าอยู่ในช่วง 40.84 – 41.98 MJ/kg มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมเพียงเล็กน้อย

49.65 MJ/kg ซึ่งเกิดจากโมเลกุลของออกซิเจนที่พบในน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ทำให้อัตราส่วนของคาร์บอนและไฮโดรเจน เมื่อผสมกับน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ลดลง ทำให้มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ลดลง ถึงแม้ว่าน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน จะส่งผลให้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงมีค่าที่ลดลง แต่ปริมาณพลังงานยังคงมีอยู่ จึงจำเป็นต้องผสมในร้อยละที่ทำให้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงอยู่ในเกณฑ์เหมาะสม



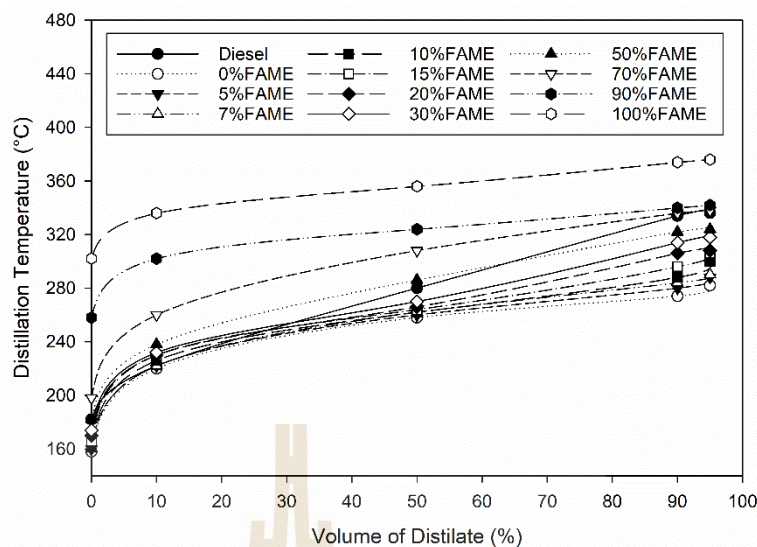
รูปที่ 4.5 ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อมีร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น

4.2.6 อุณหภูมิการกลั่น (Distillation temperature)

อุณหภูมิการกลั่น คือ สมบัติที่อธิบายการระเหยตัวของน้ำมันเชื้อเพลิงจากการเกิดจุดเดือด และลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์ โดยที่ค่าอุณหภูมิการกลั่นสังเกตได้จากร้อยละของปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่กลั่นได้ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งอุณหภูมิของการกลั่นมีค่าสูง เนื่องจากองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักเบาของน้ำมันเชื้อเพลิง จะถูกทำให้เดือดและระเหยได้ง่ายที่อุณหภูมิในช่วงเริ่มต้นมีค่าดัชนีซีเทนที่สูง หลังจากนั้นองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักจะเริ่มเดือดที่จุดเดือดสูงขึ้นและระเหยได้ยากกว่า จากนั้นจะเกิดการเดือดจนกลายเป็นไอและควบแน่นโดยสังเกตได้จากน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนตามตารางที่ 4.2 ซึ่งมี Oleic acid methyl ester C18:2 ในร้อยละ 39.45 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักมากที่สุด จึงทำให้มีค่าอุณหภูมิการกลั่นที่สูงที่สุด และจะค่อย ๆ ลดลง เมื่อร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ลดลง นอกจากนี้ค่าของอุณหภูมิการกลั่นในแต่ละส่วนจะสามารถประเมินการทำงานของเครื่องยนต์ได้เบื้องต้น อาทิเช่น

อุณหภูมิการกลั่นในร้อยละ 10 โดยปริมาตร คือส่วนที่ระเหยได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากเป็นส่วนองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เบา ทำให้สามารถประเมินการจุดติดของเครื่องยนต์ กล่าวคือ หากน้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถระเหยได้ช้า ทำให้เครื่องยนต์ติดได้ช้ากว่าน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีการระเหยได้เร็ว ค่าอุณหภูมิการกลั่นในร้อยละ 50 โดยปริมาตร คือช่วงที่การระเหยของน้ำมันได้เพิ่มขึ้น เมื่อมีอุณหภูมิเครื่องยนต์สูงขึ้น และค่าอุณหภูมิการกลั่นในร้อยละ 90 โดยปริมาตร คือค่าอุณหภูมิสุดท้ายที่กำหนดไว้ เพื่อความปลอดภัยของเครื่องยนต์ป้องกันไม่ให้น้ำมันเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงเกิน อาจเกิดการไหลย้อนกลับเข้าไปในอ่างน้ำมัน

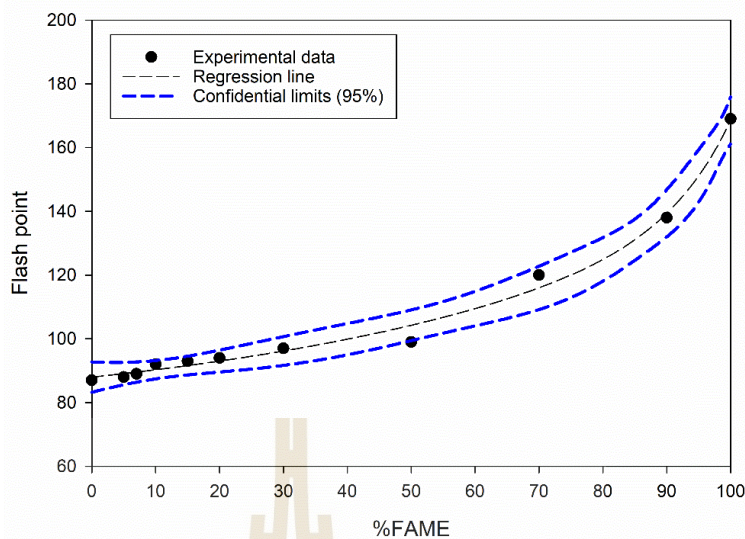
จากรูปที่ 4.6 พบว่าค่าอุณหภูมิการกลั่นในร้อยละ 10 และ 50 โดยปริมาตร เมื่อผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ในช่วงร้อยละ 0 – 50 โดยปริมาตร ทำให้การระเหยของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม แต่เมื่อมีการผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในร้อยละ 70 – 100 โดยปริมาตร จะมีค่าอุณหภูมิการกลั่นที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการมีองค์ประกอบที่ระเหยได้ยากของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน และมีจุดเดือดที่ต่ำ ซึ่งค่าอุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและน้ำมันดีเซลมีค่าอุณหภูมิการกลั่นในร้อยละ 90 โดยปริมาตรอยู่ที่ 274 °C 374 °C และ 334 °C ตามลำดับ โดยมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกระทรวงพลังงานกำหนดให้ค่าอุณหภูมิการกลั่นน้ำมันดีเซลในร้อยละ 90 โดยปริมาตร ให้ไม่สูงกว่า 357 °C (กรมธุรกิจพลังงาน, 2563) เช่นเดียวกับรายงานการทดลองก่อนหน้าที่ทำการศึกษาโดยการผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวันในน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม พบว่าที่อุณหภูมิการกลั่นในร้อยละ 10 และ 50 โดยปริมาตร จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มสูงขึ้น แต่ที่อุณหภูมิการกลั่นในร้อยละ 90 โดยปริมาตรจะให้ผลที่ใกล้เคียงกัน (Aburudyna et al., 2015) นอกจากนี้ค่าอุณหภูมิการกลั่นในร้อยละ 10 50 และ 90 สามารถนำไปใช้คำนวณข้อมูลของค่าดัชนีซีเทนตามสมการที่ (3.3)



รูปที่ 4.6 อุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

4.2.7 จุดวาบไฟ (Flash point)

จุดวาบไฟ คืออุณหภูมิของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้รับความร้อนจนเกิดการระเหยกลายเป็นไอ และเมื่อถูกเปลวไฟในอากาศจะเกิดไฟลุกวาบขึ้น ถึงแม้จุดวาบไฟจะไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์แต่มีความสำคัญในด้านความปลอดภัยของการเก็บรักษาและการขนส่งน้ำมันเพื่อป้องกันการเกิดอัคคีภัยซึ่งกรมธุรกิจพลังงานได้กำหนดมาตรฐานของจุดวาบไฟต้องไม่ต่ำกว่า 52 °C (กรมธุรกิจพลังงาน, 2563) จากรูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การทดลองพบว่าจุดวาบไฟของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ คือ 87 °C และเมื่อร้อยละ 5 – 90 ของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้นโดยปริมาตร ทำให้จุดวาบไฟมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 88 - 138 °C ซึ่งผลของจุดวาบไฟของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันอยู่ที่ 169 °C โดยให้ผลที่สอดคล้องกับรายงานผลของ Sivaramakrishnan และ Ravikumar (2011) ซึ่งพบว่าจุดวาบไฟของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชจะมีค่าอยู่ในช่วง 142 – 190 °C เนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ได้จากการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลด้วย กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ไตรกรีเซอไรด์ของน้ำมันปาล์ม ทำให้มีองค์ประกอบของออกซิเจนในน้ำมันมากกว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรจีเนชัน ทำให้ความสามารถระเหยเป็นไอ และเกิดการจุดวาบไฟได้ง่ายกว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ ซึ่งสมบัติของจุดวาบไฟไม่ได้มีผลโดยตรงต่อการเผาไหม้ของระบบในเครื่องยนต์ แต่เป็นเพียงการควบคุมให้เกิดความปลอดภัยในการเก็บรักษาและขนย้ายตามเกณฑ์ของกรมธุรกิจพลังงาน



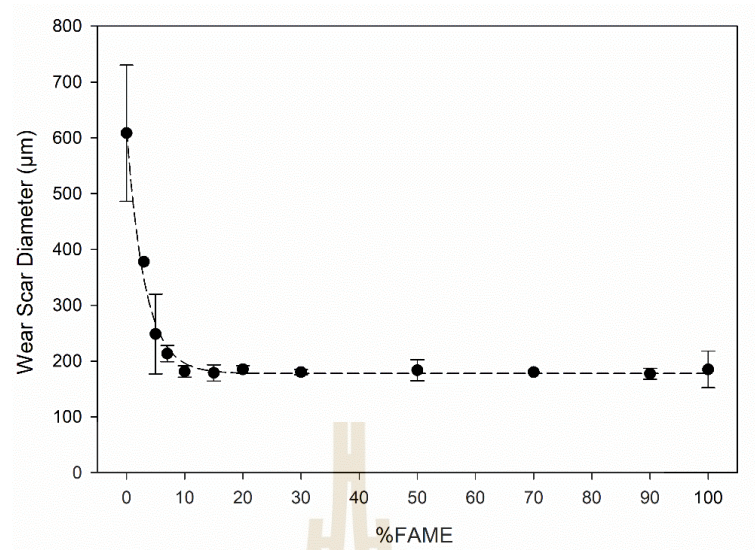
รูปที่ 4.7 จุดวาบไฟของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อมีร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น

4.3 การศึกษาสมบัติการหล่อลื่นและสมบัติของไทรโบโลยี

4.3.1 ผลการทดสอบโดยเครื่อง High Frequency Reciprocating Rig (HFRR)

สมบัติการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงสามารถทดสอบได้โดยเครื่อง High Frequency Reciprocating Rig โดยมีชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบ คือ ลูกบอลและแผ่นดิสก์ หลักการทำงานคือ ลูกบอลจะเคลื่อนที่ในรูปแบบกลับไปกลับมาบนแผ่นดิสก์ซึ่งแผ่นดิสก์ถูกยึดติดลงใน lower holder พร้อมกับตัวอย่างน้ำมัน ตามเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งจะแสดงผลด้วยค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยสึกหรือจากค่าเฉลี่ยของแนวแกน X และ Y ที่เกิดขึ้นบนลูกบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm กล่าวคือ เมื่อรอยสึกหรือมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางสูงขึ้นบ่งบอกถึงน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดนั้นมีสมบัติการหล่อลื่นที่ไม่ดี นอกจากนี้ยังแสดงผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่น ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบซึ่งวัดโดย Electrical contact potential (ECR) เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.8 การเพิ่มขึ้นของร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันทำให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยสึกหรือมีค่าที่ลดลง โดยน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยสึกหรือ 609.0 μm และเมื่อเพิ่มร้อยละ 5 โดยปริมาตรของน้ำมัน ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันทำให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยสึกหรือลดลงไปที่ 249.0 μm จากนั้นมีแนวโน้มเริ่มคงที่ ที่ร้อยละ 10 - 100 ของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ซึ่งมีค่าขนาดรอยสึกหรือในช่วง 178.0 - 185.0 μm

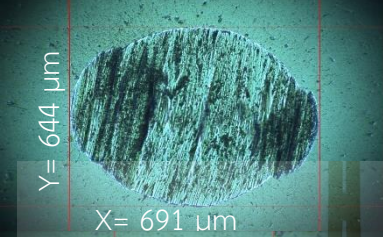
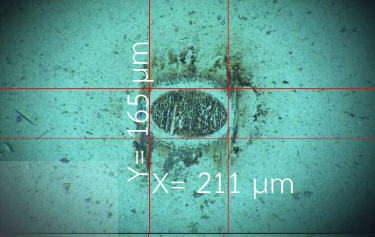

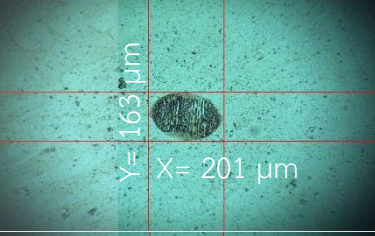
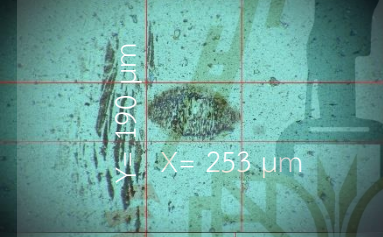
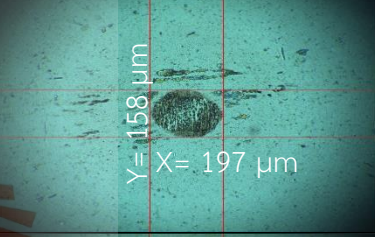
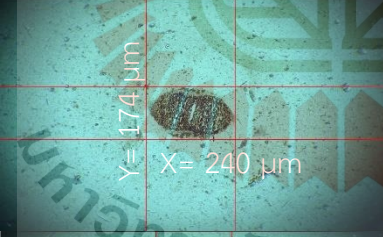
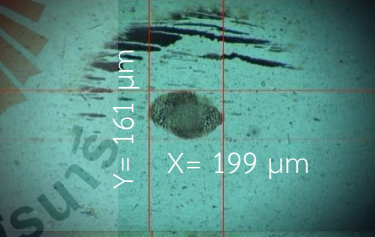
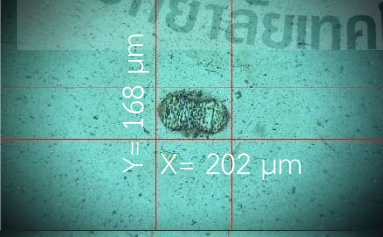
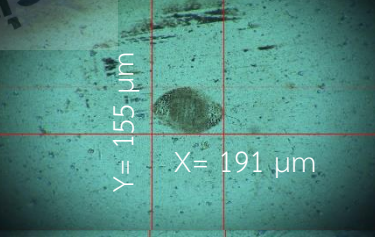
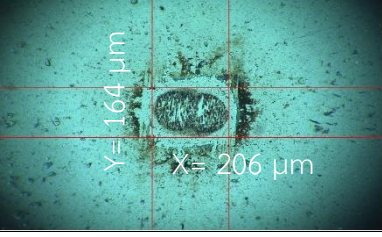
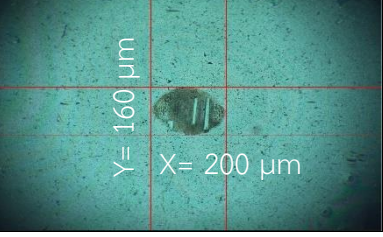
เช่นเดียวกับ Fathurrahman et al. (2023) พบว่า ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรอของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ลดลงจาก เนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายโซ่ตรงหรืออะลิฟาติก และเป็นกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว รวมไปถึงการมีสารประกอบออกซิเจนทำให้มีการหล่อลื่นที่ดีขึ้น นอกจากนี้โมเลกุลที่มีขั้วซึ่งจะพบในคาร์บอกซิลิกสามารถทำให้เกิดการดูดซับของส่วนขั้วของโมเลกุลเข้ากับพื้นผิวของโลหะ (Doustdar et al., 2021) กลายเป็นชั้นของฟิล์มบางซึ่งปลายของสายไฮโดรคาร์บอนหรือส่วนหางจะเรียงตัวห่างจากพื้นผิวของโลหะ ช่วยลดการสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะโดยตรง (Zuowen Liu, Li, Shen, & Wang, 2019) ทำให้เกิดการหล่อลื่นที่ดีขึ้นจากการสร้างชั้นไทรโบฟิล์มและมีขอบเขตการหล่อลื่นอยู่ในขอบเขตแบบบาวนด์ารี อย่างไรก็ตามฟิล์มที่ถูกสร้างขึ้นสามารถลดค่าพลังงานความร้อนจากการเกิดการเคลื่อนที่ของผิวสัมผัสมีการหล่อลื่นที่ดีขึ้น ซึ่งความเสถียรของฟิล์มที่สร้างขึ้นนี้ยังขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยที่เกิดขึ้น เช่น โทลด์ อุณหภูมิหรือองค์ประกอบของโมเลกุล (Fazal, Haseeb, & Masjuki, 2013) ดังนั้นเมื่อผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน จึงมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยสึกหรอที่ลดลง เป็นไปตามทฤษฎีไทรโบโลยี เมื่อการหล่อลื่นที่ดีขึ้นมีการเสียดทาน และการสึกหรอจะลดลง ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรสามารถยืดระยะเวลาในการใช้งานได้ (Ruggiero et al., 2017) ถึงแม้ว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์จะมีสมบัติการหล่อลื่นที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนเข้าไปยังพันธะคู่ของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว แต่มีสมบัติอื่น ๆ ซึ่งเป็นข้อดี เช่น มีค่าดัชนีซีเทนที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม จึงเป็นพลังงานทางเลือกที่สามารถนำมาทดแทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมที่เริ่มมีอย่างจำกัด นอกจากนี้ก็ช่วยลดการปล่อยมลภาวะทางอากาศ NO_x และ PM ที่จะส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน (Aatola, Larimi, Sarjovaara, & Mikkonen, 2009) โดยตารางที่ 4.3 จะแสดงภาพถ่ายของรอยสึกหรอบนลูกบอลของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อมีร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น โดยสังเกตว่ารอยมีขนาดที่ลดลงและพื้นผิวมีความเรียบมากขึ้น



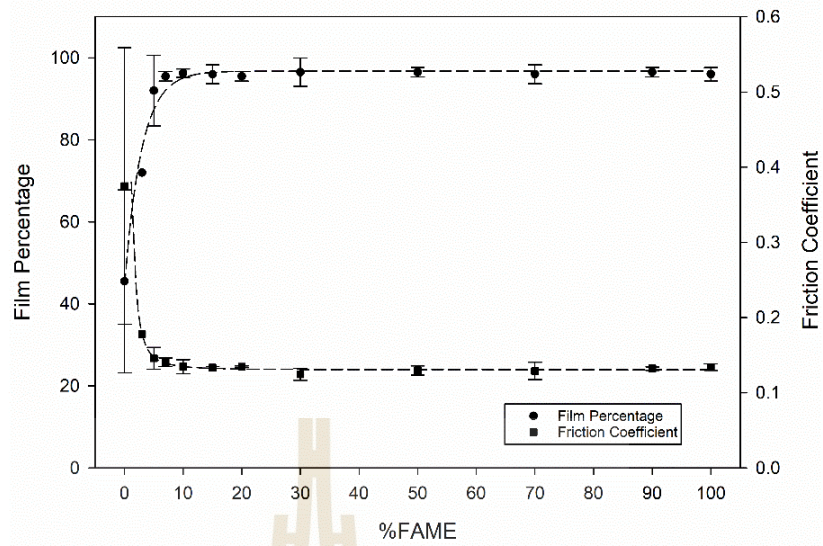
รูปที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อมี ร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น



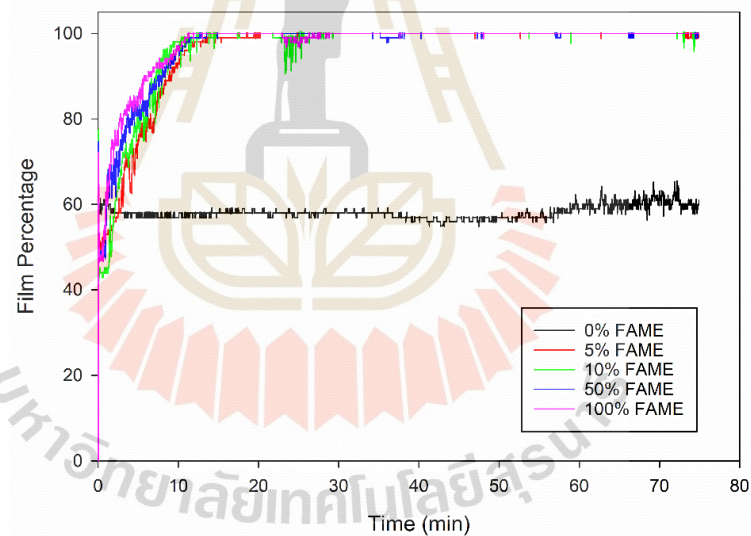
ตารางที่ 4.3 ภาพถ่ายรอยสึกหรือด้วยกล้องจุลทรรศน์ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อมี ร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น

%FAME	Wear Scar Diameter (μm)	%FAME	Wear Scar Diameter (μm)
0	 Y= 644 μm X= 691 μm	20	 Y= 165 μm X= 211 μm
3	 Y= 332 μm X= 424 μm	30	 Y= 163 μm X= 201 μm
5	 Y= 190 μm X= 253 μm	50	 Y= 158 μm X= 197 μm
7	 Y= 174 μm X= 240 μm	70	 Y= 161 μm X= 199 μm
10	 Y= 168 μm X= 202 μm	90	 Y= 155 μm X= 191 μm
15	 Y= 164 μm X= 206 μm	100	 Y= 160 μm X= 200 μm

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างแรงเสียดทานกับแรงกระทำในแนวตั้งฉาก เป็นตัวแปรไร้หน่วย สามารถบอกถึงแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิว จากรูปที่ 4.9 พบว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคือ 0.452 เกิดจากแรงของไหลที่กระทำในแนวตั้งฉาก และความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีค่าสูง เนื่องจากไม่มีองค์ประกอบของกรดไขมัน (Ruggiero et al., 2017) ทำให้เมื่อมีการผสมร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ตั้งแต่ 3 – 90 โดยปริมาตร ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าที่ลดลงอยู่ในช่วง 0.121 – 0.178 ซึ่งถูกจัดอยู่ในขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวดารี (Boundary lubrication) โดยที่ จะต้องมียุคในช่วง 0.001 – 0.200 (Yashvir Singh, Singla, Singh, & Upadhyay, 2018) นอกจากนี้การที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลงจะสอดคล้องกับร้อยละของฟิล์มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลที่มีหัวที่พบในกรดไขมันเกิดการดูดซับกับพื้นผิวโลหะสร้างเป็นชั้นฟิล์มและส่วนปลายของไฮโดรคาร์บอนจัดเรียงตัวเพื่อให้มีระยะห่างระหว่างพื้นผิวโลหะทั้งสองชั้น เนื่องจากฟิล์มที่เกิดขึ้นจะเกิดบริเวณระหว่างของพื้นผิวโลหะ ทำให้พื้นผิวมีความราบเรียบมากขึ้นเมื่อเกิดการขัดถูซ้ำ ๆ บนพื้นผิวโลหะ โดยการผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่เพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ 3 – 100 โดยปริมาตร ทำให้ร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นที่สร้างขึ้นมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 96 - 98 จากเดิมที่น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีค่าร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นอยู่ที่ 58 ทำให้น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีการหล่อลื่นที่ดีมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรอที่สูง จากรูปที่ 4.10 แสดงร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งถูกวัดสัญญาณโดยอาศัยความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโลหะ โดยที่วัดได้จาก Electrical contact potential (ECR) (Hong, Singh, & Sarathy, 2021) ในช่วงเริ่มต้นเป็นช่วงเริ่มเกิดการก่อตัวของฟิล์มบางซึ่งจะใช้เวลา 10 – 15 นาที จึงยังมีการสัมผัสระหว่างผิวโลหะ หลังจากนั้นจะค่อย ๆ เกิดการก่อตัวของฟิล์มบาง ตามปฏิกิริยาทางโทรโเคมีที่สูงขึ้นและคงที่ตั้งแต่ร้อยละ 95 ขึ้นไป ทำให้การสัมผัสระหว่างผิวโลหะเกิดขึ้นลดลง และจากรูปจะพบว่าการเพิ่มน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันจะทำให้การก่อตัวของฟิล์มบางมีความเสถียรได้เร็ว จนอยู่ในสภาวะเริ่มคงที่ และมีประสิทธิภาพมากกว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ เนื่องจากมีลักษณะของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวและมีหัวทำให้เกิดการดูดซับบนผิวของโลหะได้ดีก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มเพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการก่อตัวของฟิล์มบางได้เร็วและเข้าสู่ความเสถียรได้ดี



รูปที่ 4.9 ร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์
เมื่อมีร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น



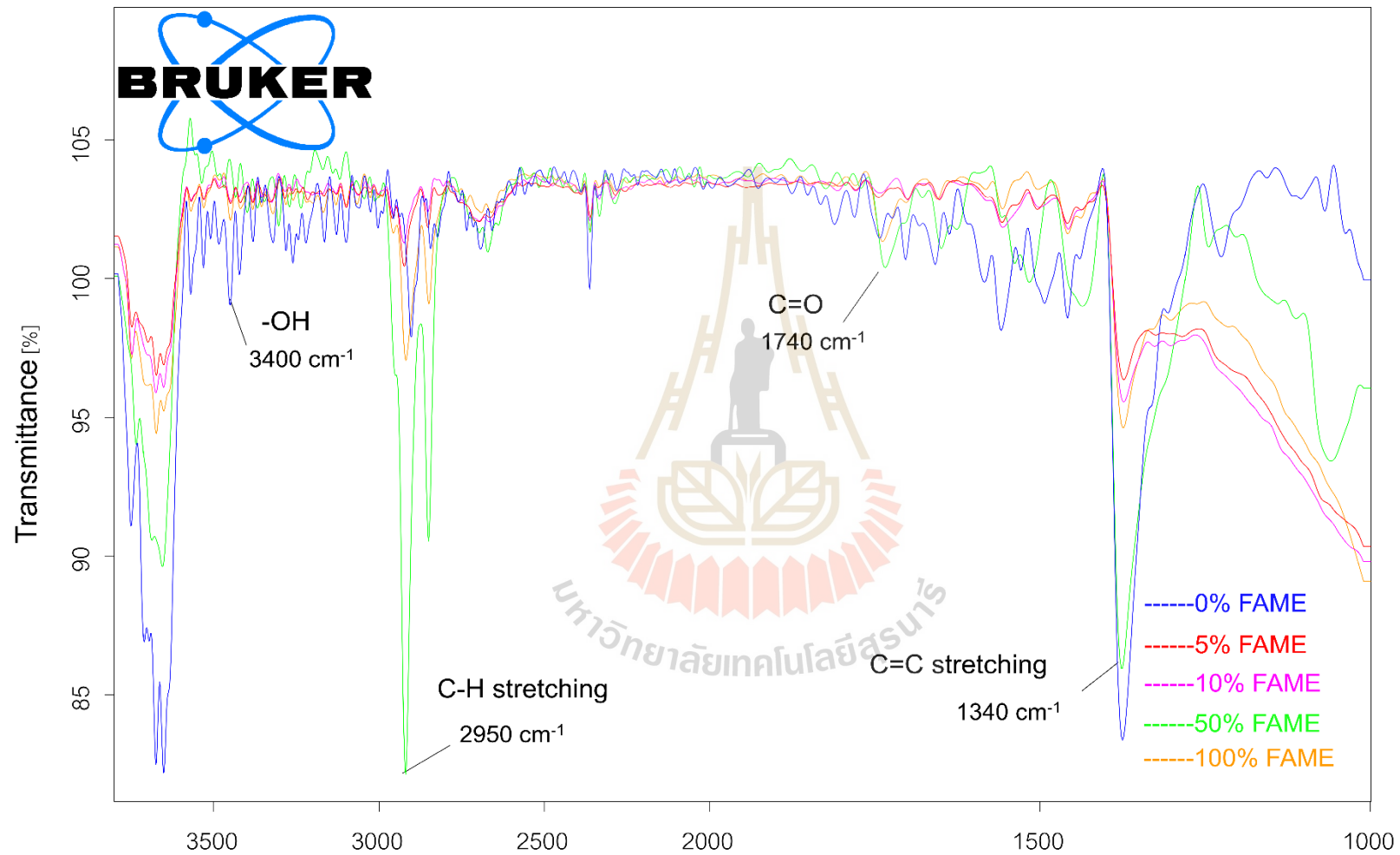
รูปที่ 4.10 ร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

4.3.2 ผลการวิเคราะห์โดยเครื่องเครื่องฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรไมโคร สโคป

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยเครื่องฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรไมโครสโคปโดยใช้การวัดคลื่นแสงที่ส่องผ่านพื้นผิวตัวอย่างที่จะมีเลขคลื่นแตกต่างกันและสามารถระบุหมู่ฟังก์ชันโครงสร้างโมเลกุลตามรูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบน

พื้นผิวรอยสักหรือของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ที่ผสมน้ำมันไบโอดีเซลดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์จะปรากฏพื้นที่ได้กราฟที่เลขคลื่น 3400 cm^{-1} แสดงถึงตำแหน่งของหมู่ -OH กรดคาร์บอกซิลิกที่พบส่วนใหญ่มีในน้ำมันไบโอดีเซลดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์พื้นที่ได้กราฟที่เลขคลื่น 2950 cm^{-1} C-H stretching เป็นกลุ่มเมทิลซึ่งเป็นแอลเคนพบทั้งในน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์และน้ำมันไบโอดีเซลดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์พื้นที่ได้กราฟที่เลขคลื่น 1740 cm^{-1} คือ C=O เอสเทอร์ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ที่เข้มข้นเพิ่มขึ้นทำให้มีสมบัติการหล่อลื่นที่ดีจากการเป็นโมเลกุลที่มีขั้วเพื่อสร้างชั้นฟิล์มช่วยลดแรงเสียดทานให้มีการหล่อลื่นที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบพื้นที่ได้กราฟที่เลขคลื่น 1340 cm^{-1} C=C stretching กลุ่มของแอลคีนซึ่งเป็นกรดไม่อิ่มตัวส่วนใหญ่จะพบในน้ำมันไบโอดีเซลดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ โดยแสดงผลที่สอดคล้องกับ Oyerinde และ Bello (2016) ได้ใช้เครื่องฟลูออริสเปกโตรเมทรีอินฟราเรดสเปกโตรไมโครสโคปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันจากน้ำมันถั่วลิสงพบว่าในน้ำมันไบโอดีเซลจะพบหมู่ฟังก์ชันของ C=O $\text{-(CH}_2\text{)}_n$ C-O C=C และ C-H นอกจากนี้ยังพบว่า C=O มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสมน้ำมันไบโอดีเซลสูงขึ้นเนื่องจากการส่องผ่านของแสงที่ลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันไบโอดีเซลผสมสูงขึ้น





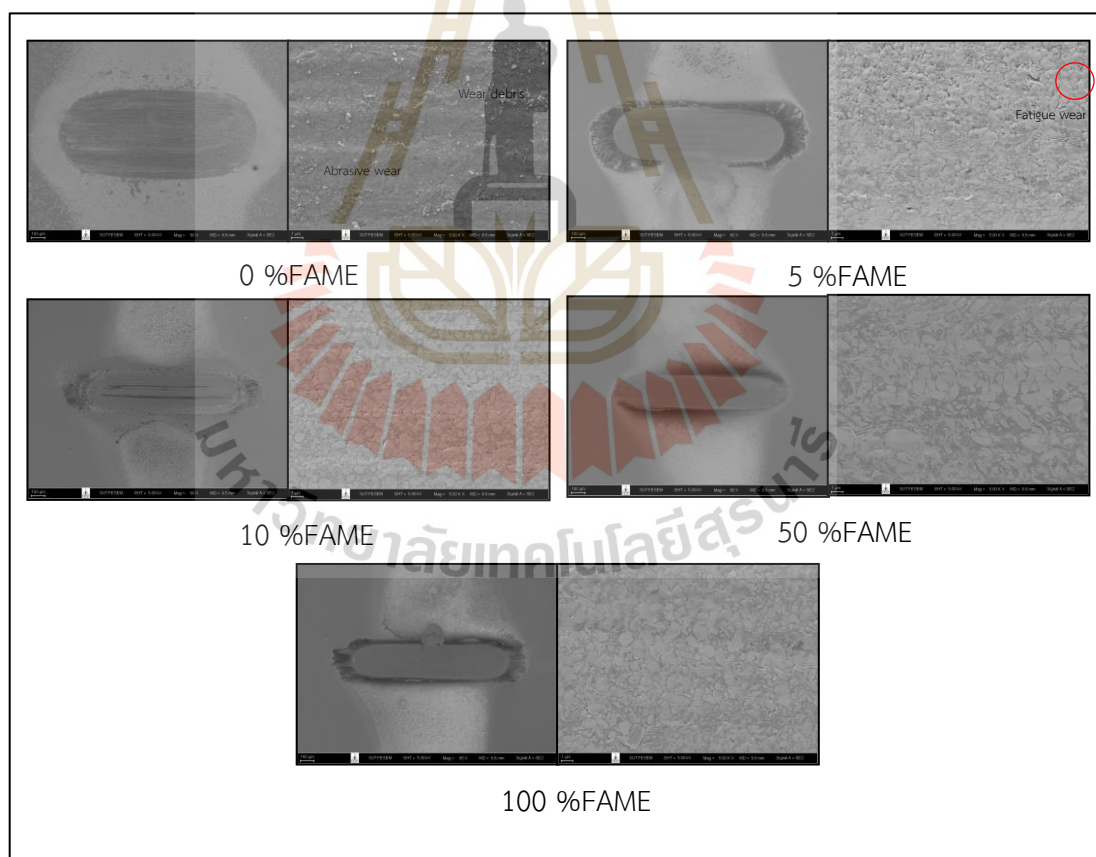
รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันด้วยเทคนิค FT-IR

4.3.3 ผลการวิเคราะห์โดยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์ลักษณะของรอยการสึกหรอบนแผ่นดิสก์และองค์ประกอบทางเคมีโดยการใช้ สเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานบนพื้นผิวของดิสก์ จากรูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่ายของแผ่นดิสก์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 60 เท่า และ 5000 เท่า จะสังเกตเห็นว่าการเพิ่มร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ทำให้พื้นผิวของการสึกหรอเกิดขึ้นลดลง โดยจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์จะเกิดรอยสึกหรอขนาดใหญ่พบเศษผิวการสึกหรอของพื้นผิวโลหะหลุดจากพื้นผิว และ เกิดเป็นร่องบนพื้นผิวจากการสึกหรอแบบขัดสีและการสึกหรอแบบล้า แต่เมื่อผสมร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้นทำให้พื้นผิวของแผ่นดิสก์มีลักษณะที่ราบเรียบมากขึ้น ซึ่งน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้นทำให้มีรอยการสึกหรอน้อยลงพื้นผิวมีความราบเรียบมากขึ้น เนื่องมาจากการมีชั้นของโมเลกุลที่ทำการดูดซับบนผิวโลหะและการก่อตัวของชั้นฟิล์มจากสารประกอบออกซิเจน เช่น หมูฟังก์ชันคาร์บอกซิลที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไทรโบระหว่างพื้นผิวของโลหะ นอกจากนี้มีการพบคราบสีดำโดยรอบพื้นผิวของการสึกหรอ ซึ่งเป็นคราบของคาร์บอนจากบนพื้นผิวของแผ่นดิสก์ที่เกิดหลังจากการขัดถูซ้ำ ๆ กับลูกบอลโดยเครื่อง HFRR และรวมไปถึงคาร์บอนที่เกิดหลังจากผ่านกระบวนการให้ความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงจากการทดลอง (Sukjit et al., 2019) การวิเคราะห์ธาตุที่อยู่บนแผ่นดิสก์จากการตรวจจับโดย EDS ตามตารางที่ 4.4 ส่วนใหญ่จะเป็นเหล็ก (Fe) ซิลิคอน (Si) และโครเมียม (Cr) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของแผ่นดิสก์ที่ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม รวมไปถึงการมีออกซิเจน ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น Fe_3O_4 และ Fe_2O_3 ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำทดลองจากการขัดถูซ้ำ ๆ ของลูกบอลและแผ่นดิสก์ (Xu, Wang, Hu, Li, & Zhu, 2010) การสึกหรอแบบกัดกร่อนที่เกิดจากการออกไซด์ นอกจากนี้คาร์บอนที่หลงเหลือขององค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นในการทดสอบ ซึ่งจะพบคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่บนพื้นผิวของดิสก์ (Sukjit, Dearn, & Tsolakis, 2012b) การพบองค์ประกอบของคาร์บอนและพื้นผิวที่ถูกกัดกร่อนตามบริเวณโดยรอบของรอยสึกหรอที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว แสดงให้เห็นถึงการเกิดดูดซับของโมเลกุลของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน เพื่อทำหน้าที่ช่วยเพิ่มสมบัติการหล่อลื่น โดยการสร้างขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวดารี (Doustdar et al., 2021)

ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์ธาตุโดยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยเทคนิค EDS

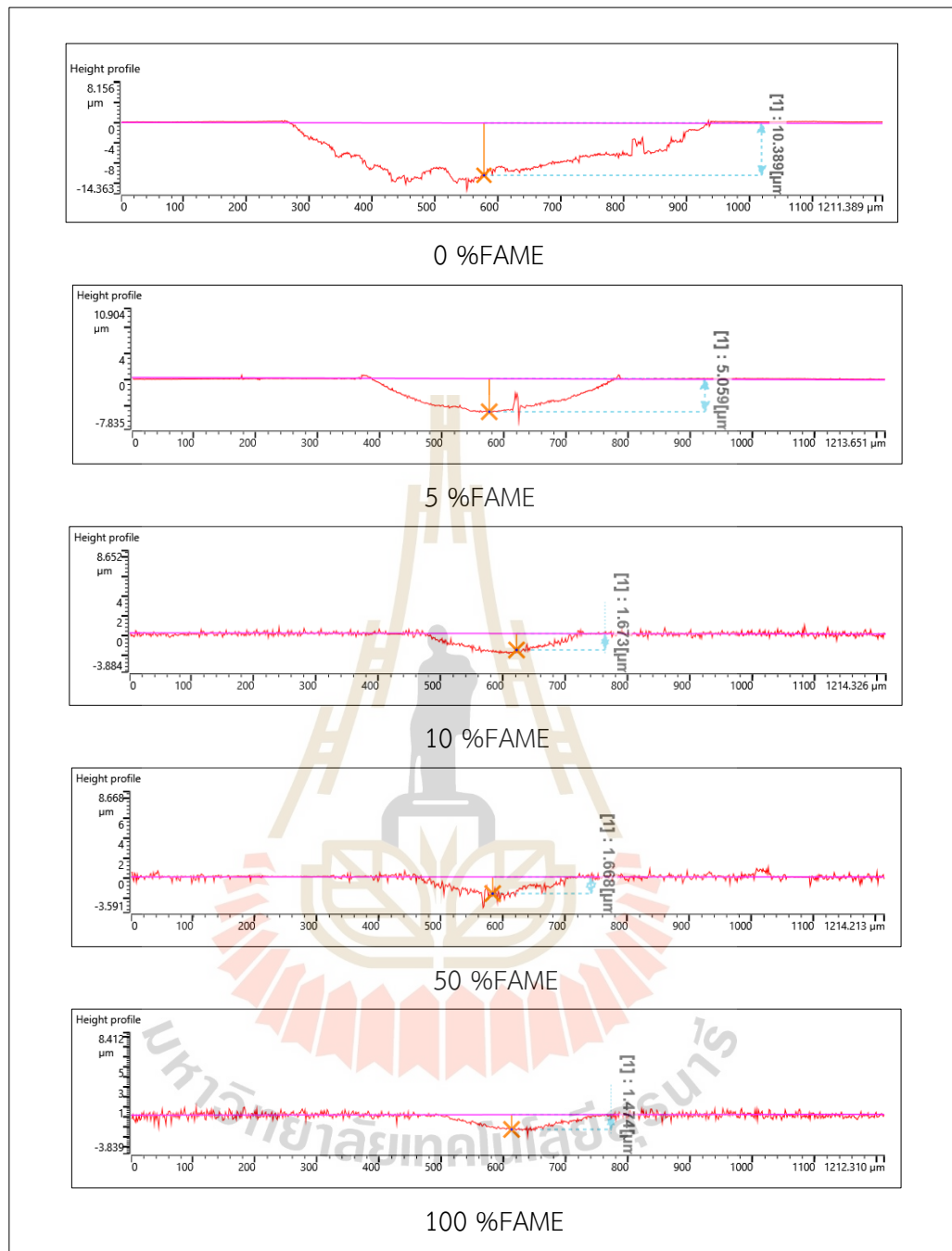
%FAME	ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุ				
	คาร์บอน (C)	ออกซิเจน (O)	ซิลิคอน (Si)	โครเมียม (Cr)	เหล็ก (Fe)
0	5.85	6.27	0.27	1.73	85.88
5	5.93	1.55	0.26	3.45	88.87
10	5.15	1.15	0.28	3.8	89.62
50	4.66	1.25	0.31	3.83	89.95
100	5.55	1.44	0.27	3.39	89.36



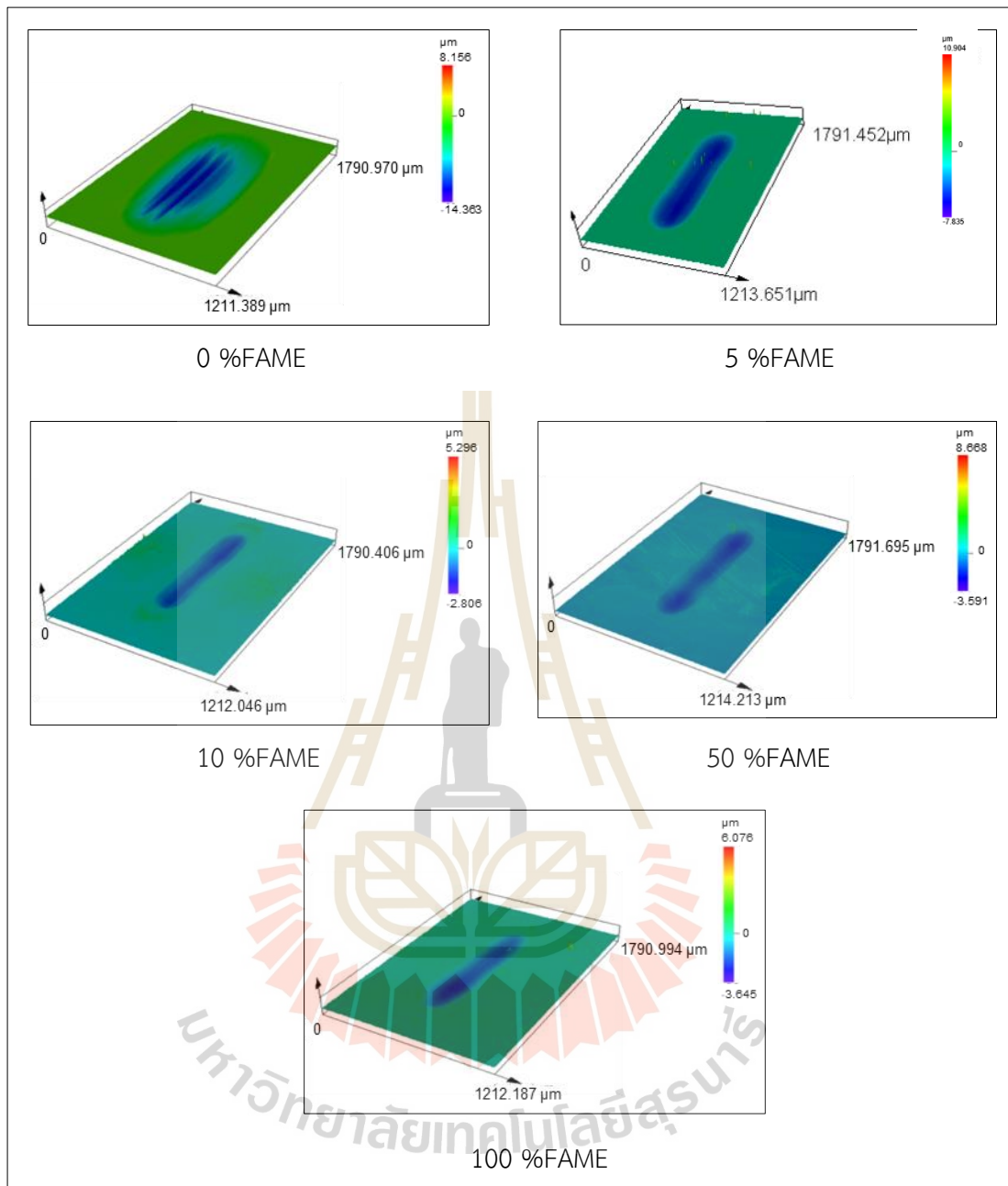
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายของแผ่นดิสก์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น

4.3.4 ผลการวิเคราะห์โดยเครื่องกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคปแบบเลเซอร์สามมิติ

การวิเคราะห์รอยการสึกหรอจากความลึกที่เกิดขึ้นบนดิสก์ในแนวตั้งฉากกับทิศทางของลูกบอล ผ่านการใช้ลำแสงเลเซอร์บนพื้นผิว ซึ่งใช้จุดพื้นผิวเรียบด้านบนของดิสก์เป็นจุดอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบว่าระดับความลึกที่จะเกิดขึ้นกับบริเวณจุดที่ลึกที่สุดของการเกิดรอยสึกหรอและจากรูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงโปรไฟล์ความลึกจากรอยการสึกหรอและภาพสามมิติของรอยการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของดิสก์ ซึ่งจะพบว่าให้ผลของข้อมูลสอดคล้องกับค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรอที่เกิดขึ้นบนลูกบอล ตารางที่ 4.3 กล่าวคือ เมื่อมีการผสมร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้นจะมีความลึกที่วัดจากพื้นผิวของดิสก์ลงไปได้ลดลง โดยจากการทดสอบพบว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพชีวภาพสังเคราะห์วัดค่าความลึกได้ คือ $10.389 \mu\text{m}$ และเมื่อเพิ่มร้อยละ 5 10 50 และ 100 โดยปริมาตรของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์จะทำให้ค่าความลึกลดลงเป็น 5.059 1.683 1.661 และ $1.474 \mu\text{m}$ ตามลำดับ และจากภาพสามมิติก็แสดงให้เห็นถึงขนาดของรอยสึกหรอที่ลดลงตามร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการทดลองนี้สามารถยืนยันถึงความสามารถในการลดรอยการสึกหรอจากการเพิ่มสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันให้กับน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ เนื่องจากการมีองค์ประกอบของหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนและเป็นกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวสามารถดูดซับกับพื้นผิวของโลหะเพื่อสร้างชั้นฟิล์มบางได้โดยการศึกษาที่สอดคล้องกับ Sukjit, Dearn, และ Tsolakis (2012a) ที่ได้ทำการทดลองศึกษาเปรียบเทียบสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพและแสดงผลของข้อมูลเป็นการวัดค่าความลึกและภาพสามมิติ พบว่า การใช้น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ได้จากน้ำมันเรพซิดสามารถเพิ่มสมบัติการหล่อลื่นให้กับน้ำมันเชื้อเพลิงในสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตร



รูปที่ 4.13 ขนาดความลึกของแผ่นดิสก์โดยกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคปแบบเลเซอร์สามมิติที่ร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายสามมิติของแผ่นดิสก์โดยกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคปแบบเลเซอร์สามมิติที่ร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น

4.4 การวิเคราะห์ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อโทรโปโลยี

การวิเคราะห์แผนที่ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นกับน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ที่ถูกนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับค่าที่ทดสอบตามมาตรฐานกำหนดและทำให้เข้าใจถึงผลกระทบจากปัจจัยที่อาจเกิดขึ้นทางโทรโปโลยีของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ ดังนั้นการทดสอบโดยมีปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น โหลด เวลาที่ใช้ในการทดสอบ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ จึงมีความจำเป็นต่อการทำความเข้าใจทางโทรโปโลยีการสึกหรอที่เกิดขึ้นและขอบเขตความสามารถของสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ รวมไปถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบขนาดอิทธิพลของปัจจัยสิ่งแวดล้อม จากค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอ

4.4.1 ผลการวิเคราะห์แผนภูมิค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอจากปัจจัยของโหลด และ เวลา

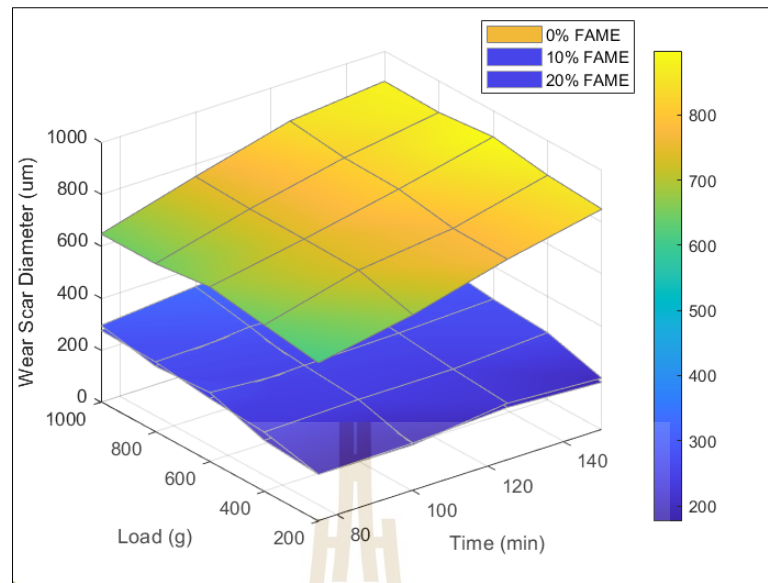
การทดสอบสมบัติการหล่อลื่นจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยจากโหลดและเวลาที่ใช้ในการทดสอบสำหรับโหลดที่ใช้ในการทดสอบคือ 200 400 600 800 และ 1000 g เพื่อจำลองการรองรับแรงดันที่จะเกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ดีเซล บั๊มเชื้อเพลิง และหัวฉีด ซึ่งหากน้ำมันเชื้อเพลิงมีการหล่อลื่นที่ไม่เพียงพอ จะส่งผลให้เกิดการสึกหรอที่รุนแรงได้ (Hansen, Lee, Westbrook, & Wilson, 2018) สำหรับเวลาที่ใช้ในการทดสอบคือ 75 100 125 และ 150 นาที เพื่อแสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์บริสุทธิ์ผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร เมื่อมีพารามิเตอร์ความถี่ 50 Hz ระยะชัก 1 mm อุณหภูมิ 60 °C และ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 52 - 56 แสดงค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอตามตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.15 แสดงแผนที่ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยโหลด 200 - 1000 g และเวลาในการทดสอบ 75 - 150 นาที ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์บริสุทธิ์ และเมื่อผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร พบว่าขอบเขตการทดสอบสมบัติการหล่อลื่นนี้มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์บริสุทธิ์ให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอมากที่สุดอยู่ในช่วง 609.0 - 898.4 μm แสดงให้เห็นว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีการหล่อลื่นที่ไม่ดี เนื่องจากมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอที่สูง และจำเป็นที่จะนำมาปรับปรุงการหล่อลื่น ซึ่งน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์บริสุทธิ์ผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ทำให้

ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 176.5 – 315.5 μm และ 180.0 – 357.5 μm ตามลำดับ ดังนั้นการผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันสามารถเพิ่มสมบัติการหล่อลื่นให้กับน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ที่สอดคล้องกับการทดลองก่อนหน้า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาตามปัจจัยของโหลดและเวลาดังรูปที่ 4.16 4.17 และ 4.18 แสดงที่สภาวะวิกฤตหรือเมื่อมีการใช้โหลด 1000 g และ เวลาในการทดสอบ 150 นาทีจะทำให้เกิดค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอสูงสุด คือ 883.0 305.0 และ 335.2 μm ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกหรอที่รุนแรงกับเครื่องยนต์ เนื่องจากมีโหลดหรือแรงกดสัมผัสกระทำในแนวตั้งฉากบนพื้นผิวโลหะมากขึ้น ทำให้มีพื้นที่สัมผัสเพิ่มมากขึ้นและใช้เวลาในการทดสอบนานมากขึ้น จึงทำให้เกิดค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะตามมาตรฐาน คือ โหลด 200 g เวลาในการทดสอบ 75 นาที มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอลดลงคือ 609.0 180.0 และ 180.0 μm ตามลำดับ หรือลดลงคิดเป็นร้อยละ 31.05 41.00 และ 46.31 ตามลำดับ สังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอมีค่าที่ลดลง ดังนั้นการทดสอบที่สภาวะที่นอกเหนือจากค่ามาตรฐานจะสามารถทำให้เข้าใจขอบเขตความสามารถของน้ำมันเชื้อเพลิงและผลกระทบต่อไทรโบโลยีที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดสภาวะที่รุนแรง นอกจากนี้จากรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อโหลดคงที่และเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการทดสอบส่งผลให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอเพิ่มขึ้นในร้อยละที่มากที่สุด คือ 13.78 แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการทดสอบคงที่และเปลี่ยนแปลงโหลดค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอเพิ่มขึ้นในร้อยละที่มากที่สุด คือ 7.83 จากที่กล่าวข้างต้น คือ เวลาที่ใช้ในการทดสอบมีผลต่อค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอได้มากกว่าโหลด เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ด้วย ANOVA พบว่า ปัจจัยจากโหลดมีค่า ระดับนัยสำคัญ คือ 0.0005 และเวลาในการทดสอบมีค่าระดับนัยสำคัญ คือ 0.0000 ปัจจัยจากโหลดจึงไม่มีนัยสำคัญ แต่เวลาในการทดสอบมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอ เนื่องจากมีค่าระดับนัยสำคัญ ≤ 0.05 และเมื่อวัดขนาดอิทธิพลจากการคำนวณ Cohen's d แบบเฉลี่ย พบว่าปัจจัยจากโหลดมีค่า $d = 0.140$ และปัจจัยจากเวลาในการทดสอบมีค่า $d = 2.760$ ให้ผลที่สอดคล้องกับระดับนัยสำคัญ น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีสมบัติการหล่อลื่นที่ไม่ดี ทำให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอมีค่าสูงเกินค่าที่มาตรฐานกำหนด ดังนั้นเมื่อให้โหลดที่เพิ่มขึ้นจึงไม่ได้ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเพิ่มมากขึ้น จากค่าของ Cohen's d ก็แสดงให้เห็นมีผลต่อค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอน้อยมาก และปัจจัยของเวลาที่ใช้ในการทดสอบนี้มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอ รวมไปถึงมีค่าของ Cohen's d พบว่า ปัจจัยจากเวลาในการทดสอบส่งผลให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น เมื่อสังเกตรูปที่ 4.17 และ 4.18 แผนที

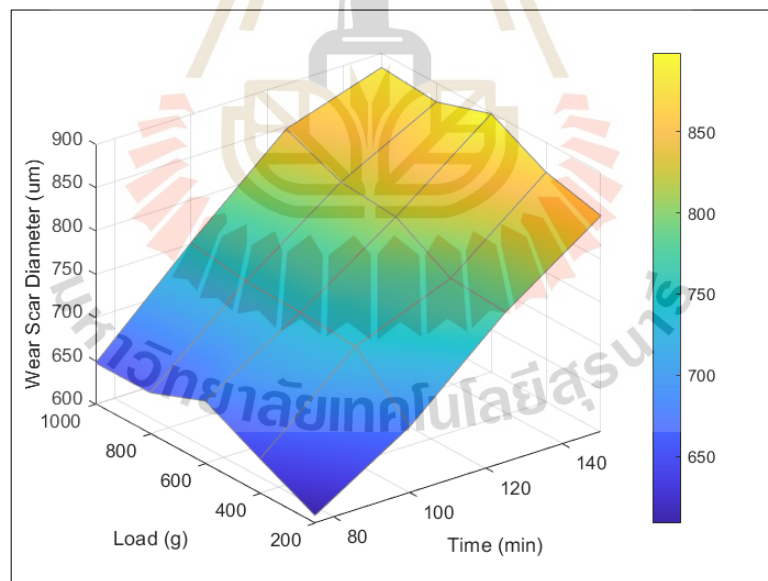
ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอ ที่โหลดคงที่และเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการทดสอบทำให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอเพิ่มขึ้นในร้อยละที่มากที่สุด คือ 20.00 และ 11.20 ตามลำดับ แต่เมื่อเวลาที่ใช้ในการทดสอบคงที่และเปลี่ยนแปลงโหลดค่าเฉลี่ย เส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอเพิ่มขึ้นในร้อยละที่มากที่สุดคือ 25.74 และ 25.94 ตามลำดับ ให้ผลที่สอดคล้องกับค่าระดับนัยสำคัญ ปัจจัยจากโหลดมีค่าระดับนัยสำคัญ คือ 0.000 ทั้งในร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร และเวลาในการทดสอบมีค่าระดับนัยสำคัญ คือ 0.0013 และ 0.1985 ตามลำดับ และเมื่อวัดขนาดอิทธิพลจากการคำนวณ Cohen's d แบบเฉลี่ย พบว่า ปัจจัยจากโหลดมีค่า $d = 1.731$ และ 2.118 ตามลำดับ ปัจจัยจากเวลาในการทดสอบมีค่า $d = 0.135$ และ 0.163 ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากผลของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์บริสุทธิ์ เมื่อมีการผสมน้ำมัน ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ทำให้ปัจจัยจากโหลดและเวลาส่งผลต่อค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอมากที่สุด คือ ปัจจัยจากโหลด มีนัยสำคัญตามระดับนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงและมีค่าของ Cohen's d ที่สูงส่งผลต่อค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอมาก แต่ปัจจัยจากเวลาในการทดสอบไม่มีนัยสำคัญและค่าของ Cohen's d ก็มีผลต่อค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย แต่การเปลี่ยนแปลงโหลดที่สูงขึ้นจะส่งผลต่อรูปแบบของรอยการสึกหรอแบบยึดติดที่เพิ่มขึ้น ในทางตรงข้ามเมื่อเวลาที่ใช้ในการทดสอบนานขึ้น รอยการสึกหรอแบบยึดติดจะลดลง (Hornby, Cuckston, Caprotti, & More, 2013) นอกจากนี้ยังพบว่า การผสมน้ำมัน ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันร้อยละ 10 โดยปริมาตร ให้ผลที่แตกต่างจากการผสมร้อยละ 20 โดยปริมาตรเพียงเล็กน้อยดังนั้นผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันร้อยละ 10 โดยปริมาตรเพียงพอต่อการช่วยเพิ่มสมบัติการหล่อลื่นให้กับน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรอในช่วงโหลด 200 – 1000 g และ เวลา 75 – 150 นาที

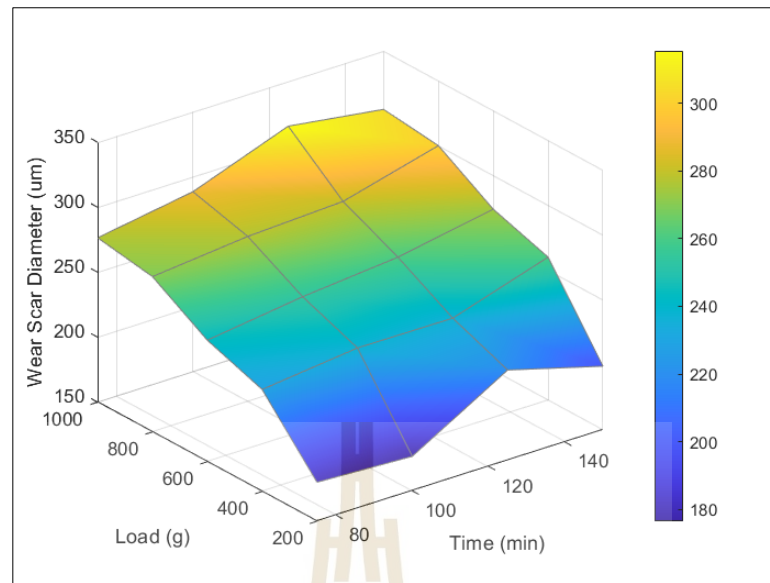
%FAME	โหลด (g)	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรอ (μm)			
		75 นาที	100 นาที	125 นาที	150 นาที
0	200 g	609.0	677.0	773.5	849.4
	400 g	640.5	734.5	778.0	865.3
	600 g	672.5	739.5	814.5	898.4
	800 g	647.5	741.0	820.4	877.7
	1000 g	647.5	751.0	847.3	883.2
10	200 g	180.0	176.5	219.5	199.0
	400 g	228.5	237.0	236.5	260.0
	600 g	243.5	253.5	260.5	274.0
	800 g	269.5	277.0	280.5	300.0
	1000 g	276.5	288.5	315.5	305.0
20	200 g	180.0	184.0	203.5	183.0
	400 g	196.5	204.5	228.5	211.5
	600 g	266.0	240.5	244.5	243.5
	800 g	253.0	253.0	275.0	312.7
	1000 g	295.5	295.5	357.5	335.2



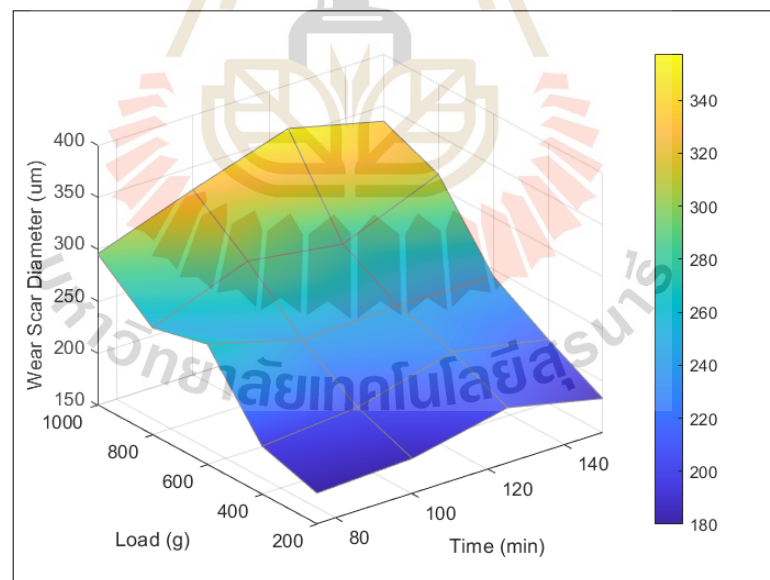
รูปที่ 4.15 แผนที่ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอ ในช่วงโหลด 200 – 1000 g และ เวลา 75 – 150 นาที ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์บริสุทธิ์ และ ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร



รูปที่ 4.16 แผนที่ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอ ในช่วงโหลด 200 – 1000 g และ เวลา 75 – 150 นาที ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์

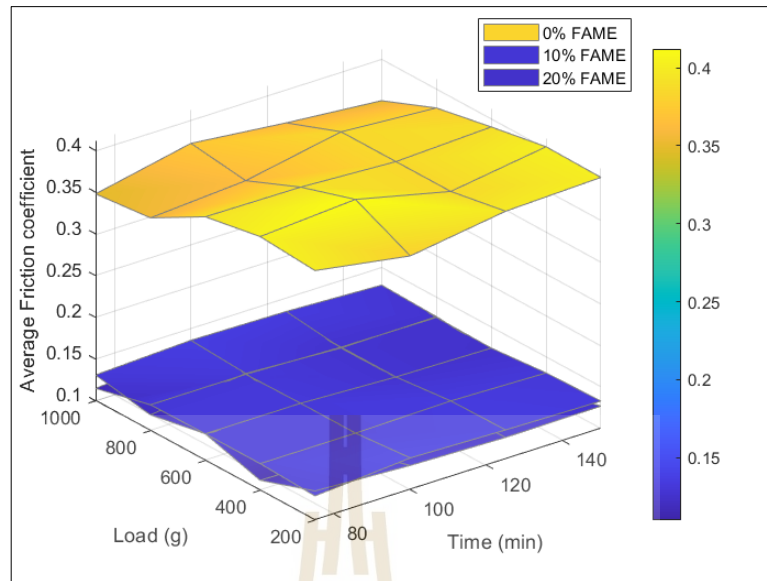


รูปที่ 4.17 แผนที่ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอ ในช่วงโหลด 200 – 1000 g และ เวลา 75 – 150 นาที ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภท เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันร้อยละ 10 โดยปริมาตร

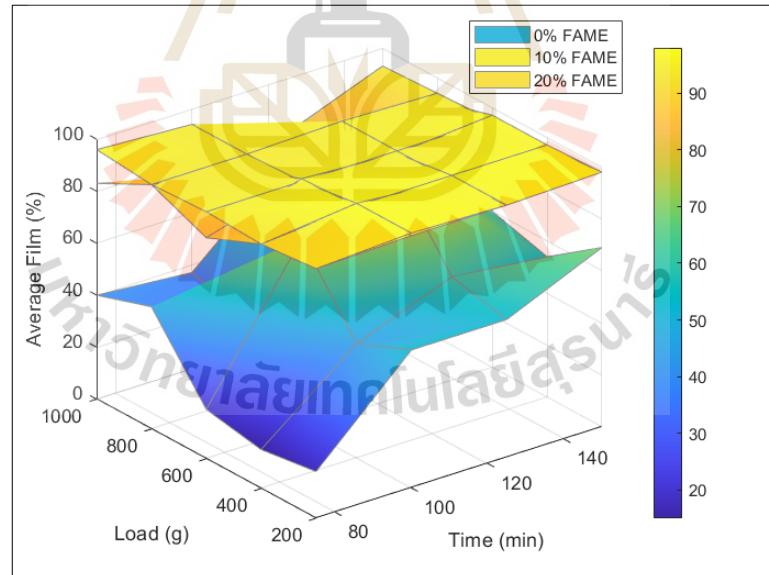


รูปที่ 4.18 แผนที่ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอ ในช่วงโหลด 200 – 1000 g และ เวลา 75 – 150 นาที ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภท เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันร้อยละ 20 โดยปริมาตร

นอกจากการแสดงผลค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอยังมีผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และ ร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นซึ่งแสดงตามรูปที่ 4.19 และ 4.20 พบว่า น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ห้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอยู่ในช่วง 0.348 – 0.412 และมีร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นอยู่ในช่วง 15 - 87 ซึ่งจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สูงกว่าและร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลงอยู่ในช่วง 0.115 – 0.138 และ 0.110 – 0.136 ตามลำดับ และมีร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นสูงขึ้นอยู่ในช่วง 79 – 98 และ 69 - 98 ตามลำดับ ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ที่ผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน มีค่าอยู่ในขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวนด์รารี โดยสาเหตุหลักที่ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลง และ ร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นสูงขึ้น เนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันมีสมบัติการหล่อลื่นที่ดีกว่า (Xu et al., 2010) สำหรับผลจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยจากโหลดและเวลาเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีแนวโน้มที่ลดลงเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อมีการทดสอบสมบัติการหล่อลื่นของไบโอดีเซลจากสบู่ดำที่ผสมน้ำมันหล่อลื่น (SAE 20W40) เปลี่ยนแปลงโหลด 50 100 และ 160 นิวตัน พบว่าเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีแนวโน้มค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีแรงกดทับจากโหลดที่เพิ่มขึ้น ทำให้พื้นผิวของวัตถุมีช่องว่างที่ลดลง สัมพันธ์กับร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นลดลงจึงเกิดแรงเสียดทานที่สูงขึ้น (Yashvir Singh, Singla, Kumar, & Kumar, 2016)



รูปที่ 4.19 แผนทีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ในช่วงโหลด 200 – 1000 g และ เวลา 75 – 150 นาที ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์บริสุทธิ์ และ ผสมกับ น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร



รูปที่ 4.20 แผนทีอัตราร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่น ในช่วงโหลด 200 – 1000 g และ เวลา 75 – 150 นาที ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์บริสุทธิ์ และ ผสมกับ น้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร

4.4.2 ผลการวิเคราะห์แผนภูมิค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอจากปัจจัย อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

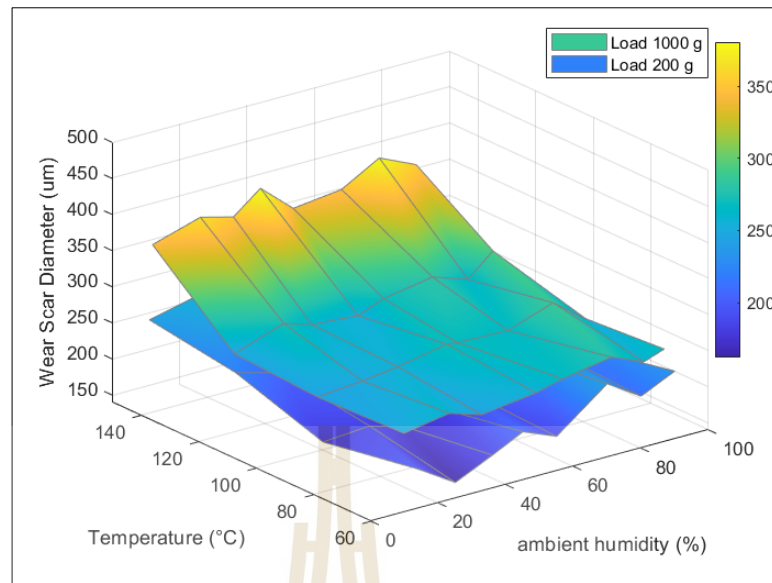
การทดสอบสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันเชื้อเพลิง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยของ อุณหภูมิ และ ความชื้นสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่อง HFRR สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบคือ 60 90 120 และ 150 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สามารถใช้ทดสอบ โดยเครื่อง HFRR เนื่องจากการทำงาน ของเครื่องยนต์ และ หัวฉีด อาจจะทำงาในสภาวะที่รุนแรงมากยิ่งขึ้น มีความร้อนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะ ส่งผลกระทบต่อระบบไทรโบโลยี ทำให้มีความจำเป็นที่ทดสอบในสภาวะที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 °C ที่ เป็นอุณหภูมิตามระบบมาตรฐาน อุณหภูมิของน้ำมันเชื้อเพลิงที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้การจัดเรียงโมเลกุล ของน้ำมันไปโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเปลี่ยนจากเดิมในรูปแบบฮาร์ดี้ (Hardy) เกิดการสูญเสียชั้นฟิล์ม เนื่องจากการเสื่อมสลายของโมเลกุลทำให้เมื่อเกิดการขัดถูจึงรอยการสึกหรอ บนผิวของโลหะสูงขึ้น (Buyanovskii, 2010) นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ความหนืดของ น้ำมันลดลง การดูดซับของสารหล่อลื่นที่พื้นผิวลดลง ยังเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารเติมแต่งในน้ำมัน เชื้อเพลิงกับพื้นผิวโลหะได้ง่ายขึ้น เช่น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบไขมันไม่อิ่มตัว บนพื้นผิว ทำให้เกิดการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear) จากอนุภาคของสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้น หรือปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมีระหว่างกรดไขมันกับโลหะ ทำให้เกิดการสึกหรอแบบกัดกร่อน (Corrosive wear) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีเกี่ยวกับกลไกทางไทรโบเคมี (Tribocchemical mechanism) ที่ ปฏิกิริยาเคมีเร่งให้เกิดการสึกหรอระหว่างพื้นผิวที่เสียดสีกันในสภาวะหล่อลื่น ดังนั้นการเลือกใช้ สารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ รวมถึงการควบคุมอุณหภูมิของน้ำมัน จึงเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาเพื่อลด ปฏิกิริยาที่ไม่พึงประสงค์เหล่านี้ สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ในการทดสอบคือร้อยละ 10 – 90 ควบคุมโดยสารละลายเกลืออิ่มตัว 8 ชนิด ซึ่งเป็นการจำลองระดับความชื้นในอากาศที่แตกต่างกัน และอาจส่งผลกระทบต่อเกิดกับระยะเวลาในการเก็บรักษาน้ำมันเชื้อเพลิง รวมไปถึงการใช้งานน้ำมัน เชื้อเพลิงในสภาวะที่มีไอน้ำที่กักเก็บไว้ในอากาศ โดยสภาวะที่ใช้ในการทดสอบตามระบบมาตรฐาน จะต้องมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วงร้อยละ 52 – 56 เนื่องจากต้องควบคุมตัวแปรภายนอกที่อาจ เกิดขึ้น และ ให้เป็นค่ามาตรฐานสามารถนำไปเปรียบเทียบ การทดลองครั้งนี้ใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพ สังเคราะห์ผสมน้ำมันไปโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในร้อยละ 10 โดยปริมาตร โดย มีไหลที่แตกต่างกัน คือ 200 g และ 1000 g เมื่อมีพารามิเตอร์ความถี่ 50 Hz ระยะชัก 1 mm และ เวลาในการทดสอบ 75 นาที ผลของการทดลองจะถูกแสดงเป็นค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอ ตามตารางที่ 4.6 และ ในรูปแบบของแผนที่ เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และ ความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยการสึกหรอหรือสมบัติการหล่อลื่นที่เกิดขึ้น

รูปที่ 4.21 พบว่า ที่ไหลด 1000 g มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรืออยู่ในช่วง 245.0 – 380.5 μm ซึ่งมีความมากกว่าที่ไหลด 200 g มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรืออยู่ในช่วง 162.0 – 328.5 μm เนื่องจากปัจจัยจากไหลดที่แตกต่างกันไหลด 1000 g ทำให้มีพื้นผิวสัมผัสที่จะทำให้เกิดรอยการสึกหรือได้มากกว่าและการสร้างชั้นฟิล์มบางได้ต่ำกว่า จึงทำให้มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรือสูงกว่า จากรูปที่ 4.22 เมื่อพิจารณาที่ไหลด 200 g จะสังเกตว่ามีสภาวะที่วิกฤตคืออุณหภูมิ 150 $^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงร้อยละ 80 - 90 ให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรือที่สูงที่สุดคือ 328.5 μm เพิ่มขึ้นจากสภาวะมาตรฐาน คือ อุณหภูมิ 60 $^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงร้อยละ 52 - 56 ที่มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรือ คือ 188.0 μm คิดเป็นเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 42.8 โดยค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรือมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและมีค่าน้อยที่สุดในช่วงอุณหภูมิ 60 - 90 $^{\circ}\text{C}$ อย่างไรก็ตามสำหรับทุกสภาวะของร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรือเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยสอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ ANOVA จากปัจจัยอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรือ มีระดับนัยสำคัญ คือ 0.0000 และปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์มีระดับนัยสำคัญคือ 0.0013 โดยที่ระดับนัยสำคัญ ≤ 0.05 ทำให้ทั้งปัจจัยจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์นั้นมีนัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรือ แต่เมื่อวัดขนาดอิทธิพลจากการคำนวณ Cohen's d แบบเฉลี่ย พบว่าปัจจัยจากอุณหภูมิมีค่า $d = 1.032$ และปัจจัยจากความชื้นสัมพัทธ์มีค่า $d = 0.580$ ดังนั้นสำหรับการทดลองที่ไหลด 200 g การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรือเพิ่มขึ้นได้มากกว่าความชื้นสัมพัทธ์ เนื่องจากมีค่าของ Cohen's d ที่สูงกว่า นอกจากนี้จากรูปที่ 4.23 สำหรับที่ไหลด 1000 g ที่สภาวะวิกฤตมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางคือ 355.0 μm เพิ่มจากสภาวะมาตรฐานคือ 265.5 μm คิดเป็นร้อยละ 25.2 โดยที่สภาวะวิกฤตมีค่าค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรือที่ใกล้เคียงกันกับค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรือที่อุณหภูมิ 150 $^{\circ}\text{C}$ ที่เปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ตั้งแต่ร้อยละ 10 - 90 อยู่ในช่วง 340.5 - 380.5 μm และ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์คงที่ เช่น ที่ร้อยละ 52 - 56 เปลี่ยนอุณหภูมิ 60 - 150 $^{\circ}\text{C}$ มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรืออยู่ในช่วง 265.5 - 340.5 μm เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรือน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สอดคล้องกับค่าของ P-value จากอุณหภูมิ คือ 0.0000 และ ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์คือ 2.2013 สำหรับการทดลองที่ 1000 g มีเพียงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีนัยสำคัญส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรือ และ เมื่อวัดขนาดอิทธิพลจากการคำนวณ Cohen's d แบบเฉลี่ย พบว่า ปัจจัยจากอุณหภูมิมีค่า $d = 2.201$ และปัจจัยจากความชื้นสัมพัทธ์มีค่า $d = 0.162$ ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบระดับนัยสำคัญที่พบว่าค่า

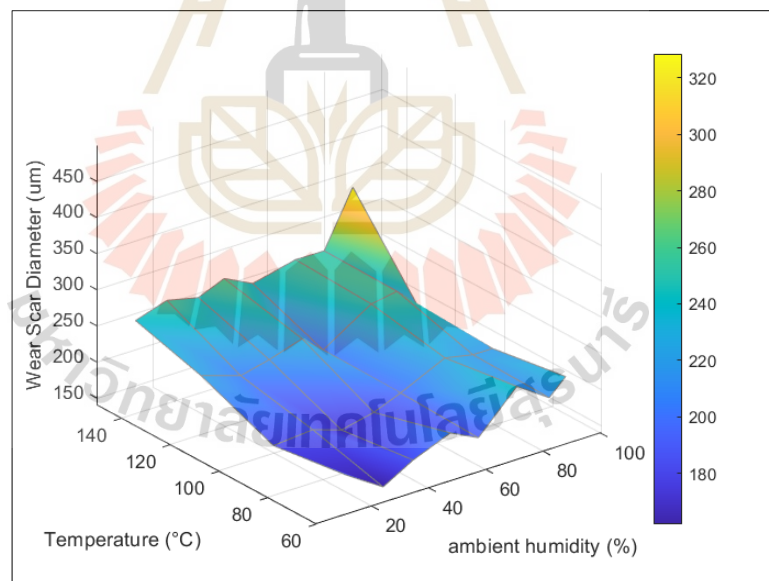
ของ Cohen's d จากอุณหภูมิจะทำให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรือเพิ่มขึ้น อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรือสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ส่วนที่มีหัวของ โมเลกุลน้ำมันเกิดการดูดซับบนพื้นผิวโลหะได้น้อยลง ชั้นฟิล์มที่สร้างยังไม่สมบูรณ์หรือเสื่อมสภาพจะลง (Wadumesthrige, Ara, Salley, & Ng, 2009) รวมไปถึงเกิดการระเหยและความหนืดของน้ำมัน เชื้อเพลิงลดลง นอกจากนี้มีการทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อสมบัติทางโทรโพลีของ น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นการวิเคราะห์ถึงความทนทานของหัวฉีดเชื้อเพลิง (Kuszewski et al., 2021) ดังนั้นผลจากอุณหภูมิที่ส่งผลต่อสมบัติการหล่อลื่นนี้ยังขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันไบโอดีเซลหรือสารเติมแต่งแต่ละชนิด สำหรับปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติการหล่อลื่น ของน้ำมันเชื้อเพลิงสอดคล้องกับ Shaver, Giannini, Lacey, และ Erwin (1998) ได้ทำศึกษา ผลกระทบจากน้ำทะเลต่อสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันอากาศยาน น้ำมันดีเซล ที่ใช้กับเครื่องยนต์ของ เรือ ซึ่งมีความชื้นที่แตกต่างกันออกไป พบว่าความชื้นไม่มีผลกระทบหรือมีเพียงเล็กน้อยต่อค่าเฉลี่ย เส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรือ แต่อีกมุมหนึ่งมีการศึกษาที่พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ส่งผลต่อการมี ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ โดยที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงจะส่งผลดีต่อ พารามิเตอร์ที่จำเป็นในการทำงานของเครื่องยนต์ (Haller, Jankowski, Kolanek, Magdziak-Toktowicz, & Wróbel, 2015) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาความชื้นสัมพัทธ์และความสามารถในการ ดูดความชื้นของน้ำมันน้ำมันเชื้อเพลิง โดยน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันมี ความสามารถในการดูดความชื้นมากที่สุด รองลงมา คือ น้ำมันเชื้อเพลิงพาราฟินิกและน้ำมันดีเซล จากปิโตรเลียม ตามลำดับ เนื่องจากการมีหมู่คาร์บอกซิลิก ซึ่งเป็นกลุ่มโมเลกุลที่มีหัวสามารถดูด ความชื้นได้ดีมากกว่ากลุ่มของสารประกอบ อะโรมาติกที่พบในน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม ทำให้ มีสมบัติไม่ชอบน้ำจึงดูดความชื้นได้น้อยกว่ากลุ่มแอลเคนในน้ำมันพาราฟินิก ซึ่งการมีองค์ประกอบ ของน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงส่งผลมีการหล่อลื่นที่ลดลง (Magin Lapuerta, Sánchez-Valdepeñas, & Sukjit, 2014) ดังนั้นร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุให้มืองค์ประกอบของน้ำในน้ำมัน เชื้อเพลิงทำให้ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวนด์รีเปลี่ยนแปลงไปและอาจเกิดการสึกหรือเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยสึกหรอในช่วงอุณหภูมิ 60 – 150 °C และ
ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 – 90

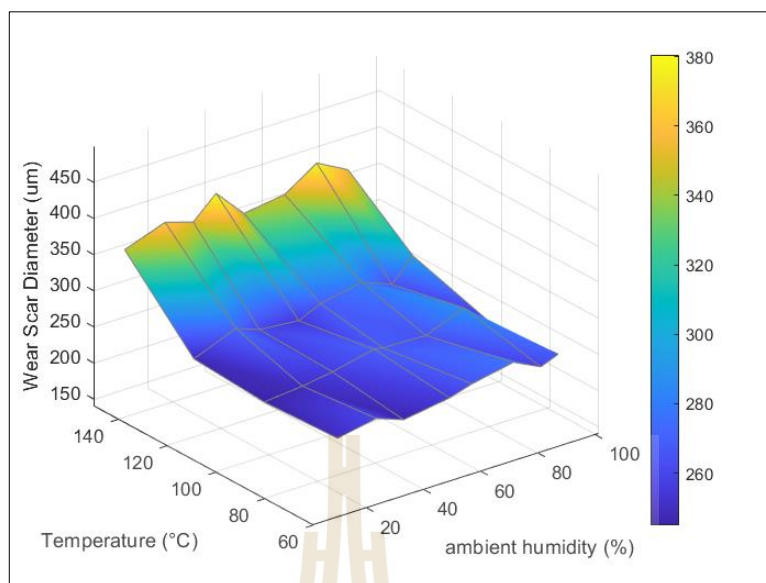
โหลต (g)	%ความชื้นสัมพัทธ์	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรอ (μm)			
		60 °C	90 °C	120 °C	150 °C
200	11.88	194.5	180.5	222.0	240.0
	24.73	162.0	185.0	204.5	254.0
	35.10	186.0	172.0	214.0	244.0
	46.30	207.0	182.0	228.5	259.0
	55.44	188.0	197.0	203.5	239.5
	70.64	242.0	226.0	246.0	253.5
	80.68	212.0	218.0	252.0	253.0
	88.04	234.0	218.0	226.0	328.5
1000	10.51	249.5	246.0	248.5	343.0
	24.46	260.0	250.0	272.0	363.0
	34.00	246.0	256.5	260.0	351.0
	47.08	256.0	269.5	255.0	380.5
	54.14	265.5	267.5	269.0	340.5
	68.70	277.0	265.5	280.5	348.5
	79.88	258.5	287.0	264.0	378.0
	88.39	268.5	252.5	294.0	355.0



รูปที่ 4.21 แผนที่ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอ ในช่วงอุณหภูมิ 60 – 150 °C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 - 90 โดยปริมาตร ซึ่งใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่โหลด 200 g และ 1000 g



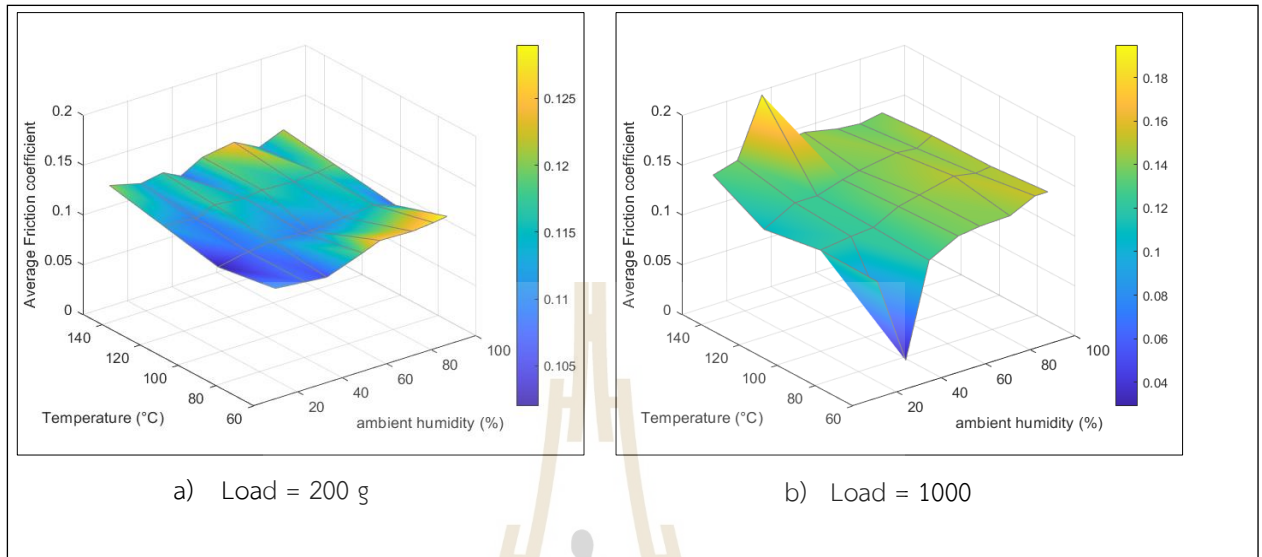
รูปที่ 4.22 แผนที่ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอ ในช่วงอุณหภูมิ 60 – 150 °C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 - 90 โดยปริมาตร ซึ่งใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่โหลด 200 g



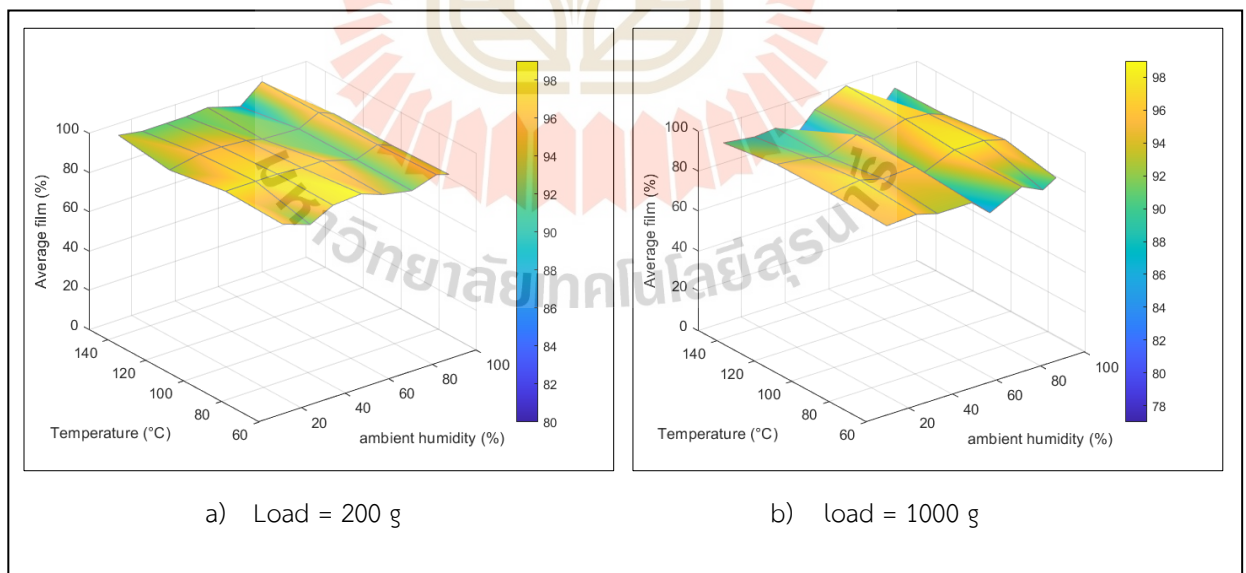
รูปที่ 4.23 แผนที่ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอ ในช่วงอุณหภูมิ 60 – 150 °C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 - 90 โดยปริมาตร ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่โหลด 1000 g

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และ ร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นแสดงตามรูปที่ 4.24 และ 4.25 ที่ โหลด 200 g และ 1000 g ตามลำดับ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอยู่ในช่วง 0.108 – 0.195 และ 0.102 – 0.129 และมีร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นอยู่ในช่วง 80 – 99 และ 77 – 99 ตามลำดับ การทดสอบที่โหลดต่างกันจะพบว่าที่โหลด 1000 g มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และ ร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นต่ำกว่า ที่โหลด 200 g เนื่องจากมีแรงกดในแนวตั้งฉากจากโหลดเพิ่มขึ้นทำให้พื้นผิวของโลหะที่กดทับสูงขึ้นสอดคล้องกับผลของค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยการสึกหรอที่กล่าวไปก่อนหน้านี้ สำหรับปัจจัยจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์จะสังเกตว่าที่ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ 10 – 50 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ที่ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ 60 – 90 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานส่วนใหญ่จะมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นจะเห็นได้ชัดที่โหลด 200 g เนื่องจากการสร้างชั้นฟิล์มของออกไซด์ที่ทำให้ชั้นฟิล์มเปลี่ยนแปลงไปจากการมีความชื้นสัมพัทธ์ (Kuszewski et al., 2021) ซึ่งชั้นฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้ความสามารถในการหล่อลื่นลดลง และมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรอที่ลดลง รวมไปถึงเมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองและสารละลายเกลือทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มสูงขึ้น สำหรับร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นจะมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากเป็นการ

วัดโดยใช้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าจึงอาจเกิดความคลาดเคลื่อน จึงไม่เห็นความแตกต่างกันอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.24 แผนที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ในช่วงอุณหภูมิ 60 – 150 °C และ ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 10 - 90 โดยปริมาตร ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซล ประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่โหลด 200 g และ 1000 g



รูปที่ 4.25 แผนที่แสดงอัตราร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่น ในช่วงอุณหภูมิ 60 – 150 °C และ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 - 90 โดยปริมาตร ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่โหลด 200 g และ 1000 g

4.4.3 ผลการวิเคราะห์โดยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจากปัจจัย สิ่งแวดล้อม

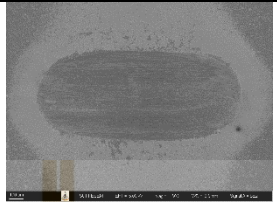
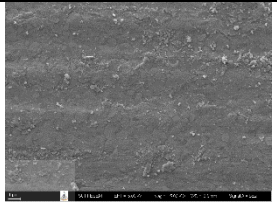
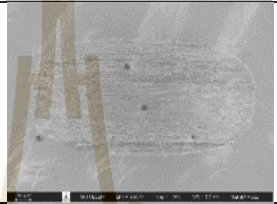
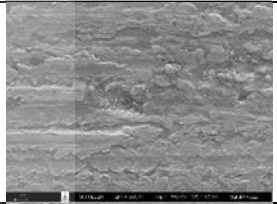

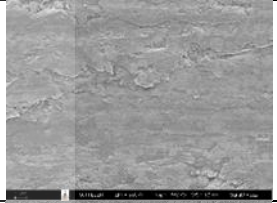
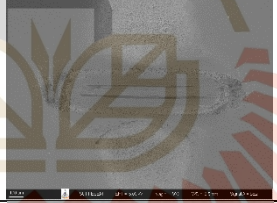
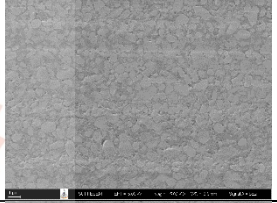
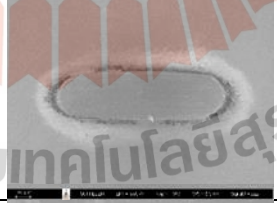

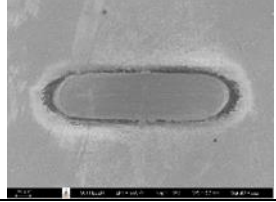
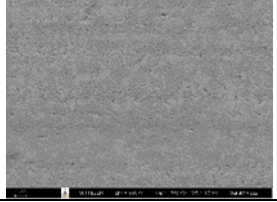
การวิเคราะห์ลักษณะของรอยการสึกหรอบนแผ่นดิสก์ ขนาด 60 เท่า และ 5000 เท่า เมื่อเปลี่ยนปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม จากตารางที่ 4.7 ปัจจัยจากโหลดและเวลา สังกะตมน้ำมันดีเซล ชีวภาพสังเคราะห์ เมื่อเปรียบเทียบกับ 0%FAME ที่ โหลด 200 g และ เวลา 75 นาที ซึ่งเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 12156-1: 2018 พบว่าปัจจัยจากเวลาส่งผลกระทบกับรอยที่เกิดขึ้นมากกว่าปัจจัยจากโหลด อย่างไรก็ตามรอยที่เกิดจากการใช้เวลาทดสอบนานกว่าจะส่งผลให้รอยมีขนาดใหญ่และเกิดความเสียหายบนพื้นผิวที่มากกว่า เมื่อพิจารณาที่กำลังขยายสูงกลไกการสึกหรอจะเกิดขึ้นแตกต่างกัน ซึ่งเกิดการสึกหรอในรูปแบบขีดสีเป็นร่องขนาดเล็กตามแนวยาว การสึกหรอแบบกัดกร่อน และการสึกหรอแบบการล่า ที่พื้นผิวของแผ่นดิสก์เกิดรอยขนาดใหญ่ จากการถูกขีดสีเป็นเวลานาน จนเกิดสะเก็ดจากการสึกหรอขึ้นเกิดเป็นรอยแตกขนาดเล็กในแนวตั้งฉากกับแรง (พัชรวิชัย, 2561) ให้ผลสอดคล้องกับค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรอ นอกจากนี้เมื่อผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภท เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ได้ทำการเปรียบเทียบกับ 10% FAME ซึ่งเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน โหลด 200 g พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องกัน คือ ปัจจัยจากโหลดส่งผลกระทบกับลักษณะการสึกหรอ เมื่อสังเกตรอยสึกหรอที่โหลด 200 g มีพื้นผิวการสึกหรอขนาดเล็กกว่า และ เมื่อพิจารณาที่กำลังขยายสูงขึ้นจะเกิดการสึกหรอแบบขีดสี แต่จะเกิดน้อยกว่า โหลด 1000 g โดยการสึกหรอแบบขีดสีจะมีขนาดเล็กเป็นร่องแนวยาว (Doustdar et al., 2021) รวมไปถึงการสึกหรอแบบการล่า เนื่องจากการถูกแรงกดที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการสึกหรอที่รุนแรงกระทำเป็นวัฏจักรซ้ำ ๆ เกิดการแพร่กระจายของรอยแตกและการหลุดออกของวัสดุ อย่างไรก็ตามการผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันร้อยละ 10 – 20 โดยปริมาตร ยังส่งผลให้เกิดคราบสีดำบริเวณโดยรอบของรอยสึกหรอ ซึ่งเป็นคาร์บอนที่ผ่านการให้ความร้อนจากการทดลอง (Hornby et al., 2013) เมื่อพิจารณาที่กำลังขยายสูงพบว่าพื้นผิวสึกหรอที่เรียบขึ้น ความเสียหายบนพื้นผิวไม่รุนแรง เนื่องจากการก่อตัวของฟิล์มหล่อลื่น สารประกอบที่มีช่วยลดการสัมผัสระหว่างพื้นผิว รวมไปถึงการสึกหรอแบบขีดสีและการสึกหรอแบบล่า

จากตารางที่ 4.8 ปัจจัย อุณหภูมิ และ ความชื้นสัมพัทธ์ พบว่าเมื่อพิจารณาที่กำลังขยายสูง โหลด 1000 g จะเกิดการสึกหรอแบบขีดสีที่รุนแรงกว่า จากโหลด 200 g เนื่องจากการสึกหรอแบบขีดสีเป็นร่องแนวยาวอย่างเห็นได้ชัด รวมไปถึงการสึกหรอแบบกัดกร่อนและการสึกหรอแบบล่าเมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.7 10% FAME โหลด 200 g ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 53

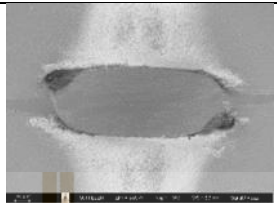
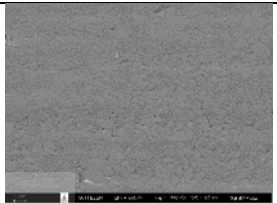
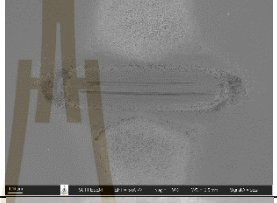
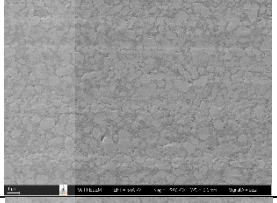
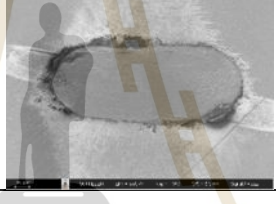
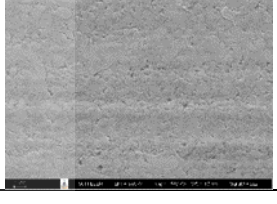
และ อุณหภูมิเชื้อเพลิง 60 °C โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 และ อุณหภูมิเชื้อเพลิง 150 °C พบว่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น ทำให้รอยสึกหรอขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นได้จาก ทั้ง 2 ปัจจัย เนื่องจากความชื้นทำให้การหล่อลื่นแยลง (Sukjit et al., 2017) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับ 10% FAME ซึ่งมีอุณหภูมิเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน คือ 60 °C และ 150 °C พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นรอยสึกหรอบนดิสก์มีขนาดใหญ่กว่า และ พบคราบของคาร์บอนบนพื้นผิวมากกว่า เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการสลายตัวของฟิล์มบางที่สร้างขึ้นเพื่อลดการสึกหรอ จึงทำให้เกิดรอยที่ขนาดใหญ่ ดังนั้นทำให้ผลที่สอดคล้องกับค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางเช่นเดียวกัน คือ อุณหภูมิของเชื้อเพลิงส่งผลต่อรอยการสึกหรอได้มากกว่าความชื้นสัมพัทธ์

สำหรับการวิเคราะห์ธาตุที่อยู่บนแผ่นดิสก์จากการตรวจจับโดย EDS ตามตารางที่ 4.9 แสดงถึงธาตุที่มีอยู่บนพื้นผิวของชิ้นงาน ได้แก่ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิคอน (Si) โครเมียม (Cr) และเหล็ก (Fe) การพบเหล็กบนชิ้นงานเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของแผ่นดิสก์ที่ใช้ในการทดสอบ รวมไปถึงการพบโครเมียมและซิลิคอนที่สอดคล้องกับตารางที่ 4.7 และ 4.8 ที่เกิดการสึกหรอแบบขัดสีบนแผ่นดิสก์มีลักษณะเป็นร่องขนานหรือส่วนเนื้อของพื้นผิวเสียรูป และ คาร์บอน ซึ่งคาร์บอนจะถูกพบมากที่สุดเมื่อทำการทดสอบในปัจจัยอุณหภูมิสูงคือ 150 °C เกิดจากคราบคาร์บอนที่ผ่านการดูดซับบนพื้นผิวพบส่วนใหญ่บริเวณโดยรอบของรอยสึกหรอและการเปลี่ยนรูปของพื้นผิว (Xu et al., 2010) นอกจากนี้การพบออกซิเจนบนพื้นผิวของรอยเกิดจากการสึกหรอแบบกัดกร่อน ซึ่งเป็นการสึกหรอที่เกี่ยวข้องจากการก่อตัวของชั้นฟิล์มบางที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนเกิดออกไซด์จากปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับสิ่งแวดล้อม โดยที่พบเพิ่มขึ้นเมื่อปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิสูงขึ้น

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบโดยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อเปลี่ยนปัจจัย โหลด และ เวลา

% FAME	โหลด (g)	เวลา (นาที)	SEM Image	
			60 X	5000 X
0	200	75		
0	200	150		
0	1000	75		
10	200	75		
10	1000	75		
20	1000	75		

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบโดยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อเปลี่ยนปัจจัย
ความชื้นสัมพัทธ์ และ อุณหภูมิ

โหลต (g)	% ความชื้น สัมพัทธ์	อุณหภูมิ (°C)	SEM Image	
			60 X	5000 X
200	85	150		
200	53	60		
1000	53	150		



ตารางที่ 4.9 ผลวิเคราะห์ธาตุโดยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยเทคนิค EDS เมื่อเปลี่ยนปัจจัยสิ่งแวดล้อม

% FAME/ โพลิต (g)	ปัจจัยที่ 1	ปัจจัยที่ 2	ร้อยละโดยน้ำหนักธาตุ (%)				
			คาร์บอน (C)	ออกซิเจน (O)	ซิลิคอน (Si)	โครเมียม (Cr)	เหล็ก (Fe)
0	load: 200 g	Time: 75 min	5.85	6.27	0.27	1.73	85.88
0	load: 200 g	Time: 150 min	4.71	5.87	0.27	3.25	85.89
0	load: 1000 g	Time: 75 min	4.08	5.09	0.28	2.78	87.76
10	load: 200 g	Time: 75 min	5.15	1.15	0.28	3.80	89.62
10	load: 1000 g	Time: 75 min	4.66	1.71	0.24	3.83	89.59
20	load: 1000 g	Time: 75 min	5.71	2.05	0.25	4.34	87.64
200 g	%RH: 88%	Temp: 150 °C	8.29	3.37	0.23	3.94	84.17
1000 g	%RH: 53%	Temp: 150 °C	9.04	3.98	0.21	4.13	82.63

4.4.4 ผลการวิเคราะห์โดยเครื่องกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคปแบบเลเซอร์สามมิติจาก ปัจจัยสิ่งแวดล้อม

การวิเคราะห์รอยการสึกหรอจากความลึกและภาพสามมิติ เมื่อเปลี่ยนปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม จากตารางที่ 4.10 โปรไฟล์ความลึกและภาพสามมิติของรอยการสึกหรอจากปัจจัยโพลิตและเวลา เปรียบเทียบความลึกของรอยการสึกหรอของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ที่โพลิต 200 g และเวลา 75 นาที จะพบว่ามีค่าความลึก 10.389 μm เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้นเป็น 150 นาที ทำให้มีค่าความลึกมากที่สุดอยู่ที่ 16.766 μm ตามด้วยผลจากการเพิ่มขึ้นของโพลิต 1000 g มีความลึก 14.709 μm และจากภาพสามมิติแสดงให้เห็นถึงลักษณะการสึกหรอที่เกิดขึ้นบน

พื้นผิว สอดคล้องกับการวิเคราะห์ก่อนหน้า เนื่องจากชั้นของฟิล์มบางที่ไม่เสถียรการเพิ่มเวลาในการทดสอบที่นานขึ้นจึงทำให้รอยความลึกสูงขึ้นมากกว่า การเพิ่มโพลดที่เกิดแรงกดทับในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว อย่างไรก็ตามการผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ จะทำให้ความลึกของรอยการสึกหรอลดลง เนื่องจากมีฟิล์มบางที่สูงขึ้นและเสถียร ทำให้การผสมที่ร้อยละ 20 มีรอยความลึก 2.606 μm นอกจากนี้เมื่อสังเกตรูปที่ 4.13 (10%FAME) โพลด 200 g มีรอยความลึก 1.673 μm และเมื่อเพิ่มโพลด 1000 g ที่เวลาเท่ากัน มีความลึก 3.445 μm ทำให้ปัจจัยของโพลดส่งผลกระทบต่อรอยความลึก สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ที่กล่าวไปข้างต้น

จากตารางที่ 4.11 โพรไฟล์ความลึกและภาพสามมิติของรอยการสึกหรอจากปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับรอยความลึกจากรูปที่ 4.13 (10%FAME) พบว่า การเพิ่มปัจจัยจากอุณหภูมิ 150 °C และโพลด 1000 g ทำให้เกิดความลึก 9.212 μm นอกจากนี้การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ และ อุณหภูมิ มีความลึก 5.737 μm ดังนั้นจึงสังเกตได้ว่า ผลจากการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความลึกเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโมเลกุลที่สร้างฟิล์มบางที่ดูดซับบนดิสก์มีความเสถียรลดลง รวมไปถึงเกิดการระเหยของเชื้อเพลิง (Karner & Eisenmenger-Sittner, 2010) อย่างไรก็ตามการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จะพบว่ก้ทำให้ความลึกเพิ่มขึ้น เพียงแต่ทำให้เกิดความลึกที่น้อยกว่า เนื่องจากความชื้นที่เพิ่มขึ้นทำให้โมเลกุลที่มีขั้วดูดซับที่ไม่ดี มีสมบัติการหล่อลื่นที่ลดลง (Magín Lapuerta, Sánchez-Valdepeñas, Bolonio, & Sukjit, 2016)

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบขนาดความลึกและภาพถ่ายสามมิติของแผ่นดิสก์ โดยกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคปแบบเลเซอร์สามมิติเมื่อเปลี่ยนปัจจัยโหลด และเวลา

%FAME	โหลด (g)	เวลา (นาที)	โปรไฟล์ความลึก	ภาพถ่ายสามมิติ
0	200	75		
0	200	150		
0	1000	75		
10	1000	75		
20	1000	75		

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบขนาดความลึกและภาพถ่ายสามมิติของแผ่นดิสก์ โดยกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคปแบบเลเซอร์สามมิติเมื่อเปลี่ยนปัจจัยความชื้น และ อุณหภูมิ

โหลต (g)	%ความชื้นสัมพัทธ์	อุณหภูมิ (°C)	โปรไฟล์ความลึก	ภาพถ่ายสามมิติ
200	85	150		
1000	53	150		



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์และน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกับองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมคือ องค์ประกอบทางเคมีของไฮโดรคาร์บอน $C_{13} - C_{18}$ หรือพาราฟินซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนสายยาว นอกจากนี้ยังพบองค์ประกอบของ Palmitic acid methyl ester ในน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่จะพบในน้ำมันปาล์ม ซึ่งเป็นน้ำมันที่ผ่านทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และองค์ประกอบของสารประกอบไขมันที่ไม่อิ่มตัวในน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดสมบัติการหล่อลื่นที่ดีกว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม เนื่องจากมีแนวโน้มในการยึดเกาะและสร้างฟิล์มป้องกันการสึกหรอบนผิวโลหะได้ดีกว่าสารประกอบพาราฟินในน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อถัดไป

5.2 ผลการศึกษสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิง

การศึกษสมบัติพื้นฐานของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ พบว่า ความถ่วงจำเพาะมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่มาตราฐานกำหนด ตรงข้ามกับความหนืดจลนศาสตร์ ดัชนีซีเทน อุณหภูมิการกลั่นและจุดวาบไฟ ที่มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่มาตราฐานกำหนด ถึงแม้ว่าความหนืดจลนศาสตร์ ความถ่วงจำเพาะ อุณหภูมิการกลั่น และความหนาแน่น ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์จะมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล แต่เมื่อนำมาผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในร้อยละ 5 – 90 โดยปริมาตร ซึ่งมีค่าของสมบัติดังกล่าวสูงกว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ ทำให้สมบัติของเชื้อเพลิงที่กล่าวข้างต้นมีค่าที่สูงขึ้นเป็นการใช้จุดเด่นของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพื่อปรับปรุงให้น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีสมบัติพื้นฐานอยู่เกณฑ์ตามมาตรฐานของน้ำมันดีเซล นอกจากนี้จากผลการทดสอบพบว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าพลังงานที่สูงสังเกตจากการมีค่าความร้อนของเชื้อเพลิง จุดวาบไฟ รวมไปถึงดัชนีซีเทนทำให้เป็นเชื้อเพลิงที่

เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน อย่างไรก็ตาม พบว่าการผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ที่สัดส่วนร้อยละ 20 – 30 โดยปริมาตร จะช่วยปรับปรุงให้สมบัติความหนืด ความหนาแน่น และอุณหภูมิการกลั่น อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานเทียบเท่ากับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม โดยยังคงรักษาข้อดีด้านดัชนีซีเทน และ ค่าความร้อนของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ไว้ได้

5.3 ผลการศึกษาสมบัติการหล่อลื่นและไทรโบโลยี

การศึกษาสมบัติการหล่อลื่นและไทรโบโลยีของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์และเมื่อผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พบว่า น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีสมบัติการหล่อลื่นที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ซึ่งพิจารณาจากการมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรอที่มีค่าสูงเกินเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด รวมไปถึงมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สูงและมีค่าร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นที่ต่ำ ส่งผลให้อาจเกิดการสึกหรอเพิ่มมากขึ้น การผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ร้อยละ 3 – 90 โดยปริมาตร ทำให้น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์มีสมบัติการหล่อลื่นที่ดีขึ้น โดยที่ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรอและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลง ร้อยละของฟิล์มการหล่อลื่นเพิ่มสูงขึ้น เมื่อน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น เนื่องจากการมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก การมีกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวและการมีขี้ของโมเลกุล ทำให้เกิดการดูดซับบนผิวของโลหะช่วยเพิ่มสมบัติการหล่อลื่นให้กับเชื้อเพลิง ซึ่งการผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน มีค่านัยสำคัญต่อการลดขนาดของค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรอ ผลที่ได้สอดคล้องกับการวัดขนาดรอยสึกของรอยบนแผ่นดิสก์ที่จะมีค่าลดลงเมื่อผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดของการผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ควรพิจารณาถึงสมดุลระหว่างสมบัติการหล่อลื่นที่ดีขึ้นกับผลกระทบต่อสมบัติอื่น ๆ เช่น ความหนืดที่อาจเพิ่มสูงเกินไป จากการศึกษาในครั้งนี้ พบว่าที่สัดส่วนร้อยละ 10 – 20 โดยปริมาตร จะทำให้สมบัติการหล่อลื่นดีขึ้น โดยมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติอื่น ๆ ไม่มากนัก จึงอาจเป็นช่วงที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

5.4 ผลการศึกษาปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อไทรโบโลยี

การศึกษาปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อไทรโบโลยี โดยทำการศึกษาจากปัจจัยของโหลดเวลา อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ พบว่า น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์เมื่อเปลี่ยนแปลงโหลดและเวลา ปัจจัยจากเวลาจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรอมากกว่า

ปัจจัยจากโพลด ซึ่งสอดคล้องกับการตรวจสอบจากระดับนัยสำคัญและ Cohen's d ในทางตรงกันข้ามเมื่อผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ปัจจัยจากโพลดจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรมมากกว่าปัจจัยจากเวลาเมื่อตรวจสอบจากระดับนัยสำคัญและ Cohen's d สำหรับปัจจัยจากอุณหภูมิ และ ความชื้นสัมพัทธ์ จะทดสอบโดยใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงโพลด คือ 200 g และ 1000 g พบว่าที่โพลด 200 g สำหรับปัจจัยจากอุณหภูมิ และ ความชื้นสัมพัทธ์มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรม แต่เมื่อตรวจสอบ Cohen's d ปัจจัยจากอุณหภูมิจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงมากกว่าปัจจัยจากความชื้นสัมพัทธ์ โดยที่โพลด 1000 g ปัจจัยจากอุณหภูมิจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรมมากกว่าปัจจัยจากความชื้นสัมพัทธ์ เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงต่อน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองเกิดการระเหยของน้ำมัน และโครงสร้างของชั้นฟิล์มเปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตามผลของภาพถ่ายของดิสก์ ขนาดความลึก และภาพสามมิติ ให้ผลในทางที่สอดคล้องกันกับที่กล่าวข้างต้น ซึ่งลักษณะการสึกหรมส่วนใหญ่เมื่อมีโพลดที่สูงจะเกิดการสึกหรมในรูปแบบขีดสี นอกจากนี้จากการศึกษาภาพรวมของปัจจัยต่าง ๆ พบว่าปัจจัยด้านอุณหภูมิมีผลต่อการสึกหรมมากที่สุด โดยเฉพาะอุณหภูมิที่สูงเกิน 100 °C และเมื่อใช้ร่วมกับโพลดที่สูงขึ้น จะทำให้เกิดการสึกหรมในระดับรุนแรง เนื่องจากส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพ และระเหยของฟิล์มน้ำมันได้ง่าย ดังนั้นในสภาวะการใช้งานที่มีอุณหภูมิสูง ควรเลือกใช้สัดส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลให้เหมาะสม และหลีกเลี่ยงการใช้โพลดเกินพิกัดเป็นเวลานาน

5.5 ข้อจำกัดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น การทดสอบยังจำกัดเฉพาะน้ำมันจากวัตถุดิบบางชนิด และสัดส่วนการผสมที่เลือกศึกษา รวมถึงยังไม่ได้ทดสอบผลระยะยาวในเครื่องยนต์จริง ซึ่งอาจต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อยืนยันผลในทางปฏิบัติต่อไป นอกจากนี้ผลที่ได้ อาจเป็นเฉพาะเจาะจงกับชนิดของคู่ทดสอบแบบจำลองที่ใช้ในงานนี้ ซึ่งอาจมีปัจจัยด้านวัสดุและพื้นผิวที่แตกต่างจากคู่สัมผัสในชิ้นส่วนของเครื่องยนต์จริง

5.6 ข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงแนวทางในการปรับปรุงสมบัติพื้นฐานและสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ให้ดีขึ้นสำหรับการใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล โดยการเติมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของ

ชิ้นส่วนเครื่องยนต์และเพิ่มสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงทางเลือกได้ นอกจากนี้ยังสามารถช่วยลดมลภาวะทางอากาศ สำหรับงานวิจัยในอนาคต ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในประเด็นดังนี้

- 1) การทดสอบกับวัสดุคู่สัมผัสชนิดอื่น ๆ ที่ใช้จริงในเครื่องยนต์
- 2) การศึกษาผลของสารเติมแต่งชนิดอื่น เช่น สารต้านออกซิเดชันต่อการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น
- 3) การศึกษาความเสถียรของน้ำมันผสมระหว่างการรักษาในระยะยาว เพื่อให้สามารถกำหนดอายุการใช้งานและสภาวะที่เหมาะสมได้แม่นยำยิ่งขึ้น
- 4) การศึกษาปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อไทรโบโลยีระหว่าง อุณหภูมิ และ โหลด



รายการอ้างอิง

- Aatola, H., Larmi, M., Sarjovaara, T., & Mikkonen, S. (2009). Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel Trade-off between NO_x, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine. *SAE International Journal of Engines*, 1(1), 1251-1262. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/26308354>
- Aburudyna, A., Karonis, D., Zannikos, F., & Lois, E. (2015). Impact of Biodiesel Addition on Distillation Characteristics and Cetane Index of Diesel Fuels. *Journal of Energy Engineering*, 141(2), C4014011. doi:10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000244
- Antolín, G., Tinaut, F. V., Briceño, Y., Castaño, V., Pérez, C., & Ramírez, A. I. (2002). Optimisation of biodiesel production by sunflower oil transesterification. *Bioresource Technology*, 83(2), 111-114. doi:[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00200-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00200-0)
- Awang, M. S. N., Zulkifli, N. W. M., Abbas, M. M., Zulkifli, S. A., Kalam, M. A., Yusoff, M. N. A. M., . . . Ahmad, M. H. (2022). Effect of diesel-palm biodiesel fuel with plastic pyrolysis oil and waste cooking biodiesel on tribological characteristics of lubricating oil. *Alexandria Engineering Journal*, 61(9), 7221-7231. doi:10.1016/j.aej.2021.12.062
- Bergmann, P., & Grün, F. (2016). *Modeling Wear of Journal Bearings*.
- Buyanovskii, A. A. (2010). Boundary lubrication by an adsorption layer. *Journal of Friction and Wear*, 31(1), 33-47. doi:10.3103/s1068366610010046
- Caprotti, R., Tang, T., Ishibe, N., In-ochanon, R., Tipdecho, C., & Silapakampeerapap, S. (2011). Performance of diesel containing Bio Hydrogenated Component. *SAE Technical Paper*, 2011-2001-1953.
- Chen, G.-Y., Shan, R., Yan, B.-B., Shi, J.-F., Li, S.-Y., & Liu, C.-Y. (2016). Remarkably enhancing the biodiesel yield from palm oil upon abalone shell-derived CaO catalysts treated by ethanol. *Fuel Processing Technology*, 143, 110-117. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.11.017>

- Chitra, P., Venkatachalam, P., & Sampathrajan, A. (2005). Optimisation of experimental conditions for biodiesel production from alkali-catalysed transesterification of *Jatropha curcus* oil. *Energy for Sustainable Development*, 9(3), 13-18. doi:[https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60518-9](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60518-9)
- Chukwuezie, O., Nwakuba, N., Asoegwu, S., & Nwaigwe, K. (2017). Cetane number effect on engine performance and gas emission: a review. *Am J Eng Res*, 6, 56-67.
- Dearn, K. D., Moorcroft, H., Sukjit, E., Poapongsakorn, P., Hu, E. Z., Xu, Y. F., & Hu, X. G. (2018). The tribology of fructose derived biofuels for DISI gasoline engines. *Fuel*, 224, 226-234. doi:10.1016/j.fuel.2018.03.082
- Doustdar, O., Zeraati-Rezaei, S., Herreros, J. M., Tsolakis, A., Dearn, K. D., & Wyszynski, M. L. (2021). Tribological Performance of Biomass-Derived Bio-Alcohol and Bio-Ketone Fuels. *Energies*, 14(17), 5331. doi:10.3390/en14175331
- Dujanutat, P., Srihanun, N., Muanruksa, P., Winterburn, J., & Kaewkannetra, P. (2023). Transesterification and Hydrotreating Reactions of Rice Bran Oil for Bio-Hydrogenated Diesel Production. *Energies*, 16(3). doi:10.3390/en16031347
- Dunn, R. (2011). Specific Gravity and API Gravity of Biodiesel and Ultra-Low-Sulfur Diesel (ULSD) Blends. *Transactions of the ASABE*, 54. doi:10.13031/2013.36461
- Fathurrahman, N. A., Auzani, A. S., Zaelani, R., Anggarani, R., Aisyah, L., Maymuchar, M., & Wibowo, C. S. (2023). Lubricity Properties of Palm Oil Biodiesel Blends with Petroleum Diesel and Hydrogenated Vegetable Oil. *Lubricants*, 11(4). doi:<https://doi.org/10.3390/lubricants11040176>
- Fazal, M. A., Haseeb, A. S. M. A., & Masjuki, H. H. (2013). Investigation of friction and wear characteristics of palm biodiesel. *Energy Conversion and Management*, 67, 251-256. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.12.002>
- Ge, X., Halmans, T., Li, J., & Luo, J. (2019). Molecular behaviors in thin film lubrication— Part three: Superlubricity attained by polar and nonpolar molecules. *Friction*, 7(6), 625-636. doi:10.1007/s40544-018-0254-2
- Haller, P., Jankowski, A., Kolanek, C., Magdziak-Tokłowicz, M., & Wróbel, R. (2015). Impact analysis of air humidity on operating parameters of diesel engine. *Journal of KONES*, 22(3), 37-42.

- Hansen, G. A. T., Lee, P. M., Westbrook, S. R., & Wilson, G. R., III. (2018). Determining the Sensitivity of Fuel Lubricity Additive Concentration on HFRR Test Parameters. *Materials Performance and Characterization*, 7(3), 374-391. doi:10.1520/MPC20170070
- Hartikka, T., Kuronen, M., & Kiiski, U. (2012). Technical Performance of HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) in Diesel Engines. *SAE Technical Paper 9*. doi:10.4271/2012-01-1585
- Hong, F. T., Singh, E., & Sarathy, S. M. (2021). On the origins of lubricity and surface cleanliness in ethanol-diesel fuel blends. *Fuel*, 302, 121135. doi:10.1016/j.fuel.2021.121135
- Hoque, M. E., Singh, A., & Chuan, Y. L. (2011). Biodiesel from low cost feedstocks: The effects of process parameters on the biodiesel yield. *Biomass and Bioenergy*, 35(4), 1582-1587. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.024>
- Hornby, B., Cuckston, G., Caprotti, R., & More, I. (2013). Pushing the Boundaries of the HFRR: Impact of Increased Test Severity on Wear. *SAE Technical Paper 13*.
- Hossain, M. A., Chowdhury, S., Islam, M., & Alamin, H. M. (2012). ANALYSIS OF EXHAUST GAS EMISSIONS IN A DIESEL ENGINE OPERATING WITH DIESEL AND BIODIESEL BLENDS.
- Hu, J., Du, Z., Li, C., & Min, E. (2005). Study on the lubrication properties of biodiesel as fuel lubricity enhancers. *Fuel*, 84, 1601-1606. doi:10.1016/j.fuel.2005.02.009
- Kaewmeesri, R., Srifa, A., Itthibenchapong, V., & Faungnawakij, K. (2015). Deoxygenation of Waste Chicken Fats to Green Diesel over Ni/Al₂O₃: Effect of Water and Free Fatty Acid Content. *Energy & Fuels*, 29, 833-840. doi:10.1021/ef5023362
- Karner, D., & Eisenmenger-Sittner, C. (2010). Tribological characterisation and surface analysis of diesel lubricated sliding contacts.
- Knothe, G., & Steidley, K. R. (2005). Kinematic viscosity of biodiesel fuel components and related compounds. Influence of compound structure and comparison to petrodiesel fuel components. *Fuel*, 84(9), 1059-1065. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.01.016>
- Kuszewski, H., Jakubowski, M., Jaworski, A., Lubas, J., & Balawender, K. (2021). Effect of temperature on tribological properties of 1-butanol–diesel fuel blends –

- Preliminary experimental study using the HFRR method. *Fuel*, 296, 120700. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120700>
- Lacey, P. I. (1993). Wear with low-lubricity fuels I. Development of a wear mapping technique. *Wear*, 160(2), 325-332. doi:[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(93\)90437-O](https://doi.org/10.1016/0043-1648(93)90437-O)
- Lambert, N. (2012). *Study of Hydrogenation Derived Renewable Diesel as a Renewable Fuel Option in North America*. สืบค้นจาก Resources naturelles Canada:
- Lapuerta, M., Sánchez-Valdepeñas, J., Bolonio, D., & Sukjit, E. (2016). Effect of fatty acid composition of methyl and ethyl esters on the lubricity at different humidities. *Fuel*, 184, 202-210. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.019>
- Lapuerta, M., Sánchez-Valdepeñas, J., & Sukjit, E. (2014). Effect of ambient humidity and hygroscopy on the lubricity of diesel fuels. *Wear*, 309(1), 200-207. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.017>
- Lapuerta, M., Villajos, M., Agudelo, J. R., & Boehman, A. L. (2011). Key properties and blending strategies of hydrotreated vegetable oil as biofuel for diesel engines. *Fuel Processing Technology*, 92(12), 2406-2411. doi:10.1016/j.fuproc.2011.09.003
- Lin, Y.-C., & Hsu, C.-C. (2017). *Tribological performance evaluation of Hydrotreated Vegetable Oil blended with fossil diesel*.
- Liu, C., Liu, J., Zhou, G., Tian, W., & Rong, L. (2013). A cleaner process for hydrocracking of jatropha oil into green diesel. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44(2), 221-227. doi:10.1016/j.jtice.2012.10.006
- Liu, X., He, H., Wang, Y., Zhu, S., & Piao, X. (2008). Transesterification of soybean oil to biodiesel using CaO as a solid base catalyst. *Fuel*, 87(2), 216-221. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.04.013>
- Liu, Y., Sotelo-Boyás, R., Murata, K., Minowa, T., & Sakanishi, K. (2011). Hydrotreatment of Vegetable Oils to Produce Bio-Hydrogenated Diesel and Liquefied Petroleum Gas Fuel over Catalysts Containing Sulfided Ni–Mo and Solid Acids. *Energy & Fuels*, 25(10), 4675-4685. doi:10.1021/ef200889e

- Liu, Z., Li, F., Shen, J., & Wang, h. (2019). Effect of oxidation of Jatropha curcas-derived biodiesel on its lubricating properties. *Energy for Sustainable Development*, 52, 33-39. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.06.003>
- Liu, Z., Li, J., Knothe, G., Sharma, B. K., & Jiang, J. (2019). Improvement of Diesel Lubricity by Chemically Modified Tung-Oil-Based Fatty Acid Esters as Additives. *Energy & Fuels*, 33(6), 5110-5115. doi:10.1021/acs.energyfuels.9b00854
- Luo, J. (2013). Thin Film Lubrication. In Q. J. Wang & Y.-W. Chung (Eds.), *Encyclopedia of Tribology* (pp. 3663-3667). Boston, MA: Springer US.
- Mancini, A., Imperlini, E., Nigro, E., Montagnese, C., Daniele, A., Orrù, S., & Buono, P. (2015). Biological and Nutritional Properties of Palm Oil and Palmitic Acid: Effects on Health. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 20, 17339-17361. doi:10.3390/molecules200917339
- Moradi, G. R., Dehghani, S., Khosravian, F., & Arjmandzadeh, A. (2013). The optimized operational conditions for biodiesel production from soybean oil and application of artificial neural networks for estimation of the biodiesel yield. *Renewable Energy*, 50, 915-920. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.070>
- Na-Ranong, D., & Kitchaiya, P. (2014). Precipitation above cloud point in palm oil based biodiesel during production and storage. *Fuel*, 122, 287-293. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.003>
- Omojola, A., Kallon, D., & Pelemo, J. (2022). Performance and Emission Characteristics of Hydrogenation Derived Renewable Diesel as Diesel Engine Fuel. In.
- Oyerinde, A., & Bello, E. (2016). Use of Fourier Transformation Infrared (FTIR) Spectroscopy for Analysis of Functional Groups in Peanut Oil Biodiesel and Its Blends. *British Journal of Applied Science & Technology*, 13(3), 1-14. doi:10.9734/bjast/2016/22178
- Patel, J., & Deheri, G. M. (2016). A study of thin film lubrication at nanoscale for a ferrofluid based infinitely long rough porous slider bearing. *Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*, 14, 89-99. doi:10.22190/FUME1601089P

- Peng, D.-X. (2015). Effects of concentration and temperature on tribological properties of biodiesel. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(11), 1687814015611025. doi:10.1177/1687814015611025
- Phichitsurathaworn, N., Simasatitkul, L., Amornraksa, S., Anantpinijwatna, A., Charoensuppanimit, P., & Assabumrungrat, S. (2021). Techno-economic analysis of co-production of bio-hydrogenated diesel from palm oil and methanol. *Energy Conversion and Management*, 244, 114464. doi:10.1016/j.enconman.2021.114464
- Rashid, U., & Anwar, F. (2008). Production of biodiesel through optimized alkaline-catalyzed transesterification of rapeseed oil. *Fuel*, 87(3), 265-273. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.003>
- Rodriguez, J., Ramos, A., Sánchez-Valdepeñas, J., & Serrano, J. (2019). Lubricity of paraffinic fuels additivated with conventional and non-conventional methyl esters. *Advances in Mechanical Engineering*, 11, 168781401987707. doi:10.1177/1687814019877077
- Ruggiero, A., D'Amato, R., Merola, M., Valašek, P., & Müller, M. (2017). Tribological characterization of vegetal lubricants: Comparative experimental investigation on *Jatropha curcas* L. oil, Rapeseed Methyl Ester oil, Hydrotreated Rapeseed oil. *Tribology International*, 109, 529-540. doi:10.1016/j.triboint.2017.01.030
- Shah, R. (2021). Lubricity Challenges of Renewable Diesel Fuels.
- Shaver, B. D., Giannini, R. M., Lacey, P. I., & Erwin, J. (1998). Effects of Water on Distillate Fuel Lubricity. *SAE Transactions*, 107, 1480-1495. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/44746554>
- Shuit, S. H., Lee, K. T., Kamaruddin, A. H., & Yusup, S. (2010). Reactive extraction and in situ esterification of *Jatropha curcas* L. seeds for the production of biodiesel. *Fuel*, 89(2), 527-530. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.07.011>
- Singh, Y., Singla, A., Kumar, A., & Kumar, D. (2016). Friction and wear characteristics of jatropha oil-based biodiesel blended lubricant at different loads. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38, 2749-2755. doi:10.1080/15567036.2015.1107924

- Singh, Y., Singla, A., Singh, A. K., & Upadhyay, A. K. (2018). Tribological characterization of Pongamia pinnata oil blended bio-lubricant. *Biofuels*, 9(4), 523-530.
- Sivaramakrishnan, K., & Ravikumar, P. (2011). Determination of higher heating value of biodiesels. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 3.
- Sonthalia, A., & Kumar, N. (2021). Comparison of fuel characteristics of hydrotreated waste cooking oil with its biodiesel and fossil diesel. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(10), 11824-11834. doi:10.1007/s11356-019-07110-w
- Srifa, A., Faungnawakij, K., Itthibenchapong, V., Viriya-empikul, N., Charinpanitkul, T., & Assabumrungrat, S. (2014). Production of bio-hydrogenated diesel by catalytic hydrotreating of palm oil over NiMoS₂/V-Al₂O₃ catalyst. *Bioresource Technology*, 158, 81-90. doi:10.1016/j.biortech.2014.01.100
- Sukjit, E., & Dearn, K. D. (2011). Enhancing the lubricity of an environmentally friendly Swedish diesel fuel MK1. *Wear*, 271(9), 1772-1777. doi:10.1016/j.wear.2010.12.088
- Sukjit, E., Dearn, K. D., & Tsolakis, A. (2012a). Interrogating the Surface The Effect of Blended Diesel Fuels on Lubricity. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 5(1), 154-162. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/26272871>
- Sukjit, E., Dearn, K. D., & Tsolakis, A. (2012b). Interrogating the Surface: The Effect of Blended Diesel Fuels on Lubricity. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 5, 154-162.
- Sukjit, E., Poapongsakorn, P., Dearn, K. D., Lapuerta, M., & Sánchez-Valdepeñas, J. (2017). Investigation of the lubrication properties and tribological mechanisms of oxygenated compounds. *Wear*, 376-377, 836-842. doi:10.1016/j.wear.2017.02.007
- Sukjit, E., Tongroon, M., Chollacoop, N., Yoshimura, Y., Poapongsakorn, P., Lapuerta, M., & Dearn, K. D. (2019). Improvement of the tribological behaviour of palm biodiesel via partial hydrogenation of unsaturated fatty acid methyl esters. *Wear*, 426-427, 813-818. doi:10.1016/j.wear.2018.12.017

- Tat, M. E., & Van Gerpen, J. H. (2000). The specific gravity of biodiesel and its blends with diesel fuel. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77(2), 115-119. doi:10.1007/s11746-000-0019-3
- Wadumesthrige, K., Ara, M., Salley, S. O., & Ng, K. Y. S. (2009). Investigation of Lubricity Characteristics of Biodiesel in Petroleum and Synthetic Fuel. *Energy & Fuels*, 23(4), 2229-2234. doi:10.1021/ef800887y
- Xu, Y., Wang, Q., Hu, X., Li, C., & Zhu, X. (2010). Characterization of the lubricity of bio-oil/diesel fuel blends by high frequency reciprocating test rig. *Energy*, 35(1), 283-287. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.09.020>
- กรมธุรกิจพลังงาน. (2563). กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล.
- พัชรวิชัย, ฐ. (2561). รายงานการวิจัยความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ผลิตด้วยกระบวนการโลหะวิทยาโลหะผง. สืบค้นจาก <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/8492>
- ศิลปินภัทรภาพ, ส. (Producer). (2556). Bio Hydrogenated Diesel.
- สุกมลสันต์, ส. (2553). ความมีนัยสำคัญทางปฏิบัติในการวิจัย. วารสารภาษาอริทัศน์(25).



ภาคผนวก ก

ผลการตรวจวิเคราะห์สมบัติพื้นฐาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ความหนืดจลนศาสตร์ของน้ำมันเชื้อเพลิง

ตัวอย่าง	ความหนืดจลนศาสตร์ ณ อุณหภูมิ 40°C (cSt) - ASTM D445			
	I	II	III	เฉลี่ย
Diesel	3.12	3.11	3.12	3.12
0%FAME	2.58	2.58	2.58	2.58
5%FAME	2.60	2.60	2.60	2.60
7%FAME	2.63	2.64	2.63	2.63
10%FAME	2.65	2.65	2.64	2.65
15%FAME	2.67	2.67	2.67	2.67
20%FAME	2.80	2.80	2.80	2.80
30%FAME	2.84	2.84	2.84	2.84
50%FAME	3.45	3.44	3.45	3.45
70%FAME	4.03	4.03	4.02	4.03
90%FAME	4.87	4.87	4.87	4.87
100%FAME	5.16	5.16	5.16	5.16

ตารางที่ ก.2 ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันเชื้อเพลิง

ตัวอย่าง	ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15°C - ASTM D1298			
	I	II	III	เฉลี่ย
Diesel	0.830	0.830	0.830	0.830
0%FAME	0.770	0.770	0.770	0.770
5%FAME	0.775	0.775	0.775	0.775
7%FAME	0.784	0.784	0.784	0.784
10%FAME	0.788	0.788	0.788	0.788
15%FAME	0.793	0.793	0.793	0.793
20%FAME	0.801	0.801	0.801	0.801
30%FAME	0.815	0.815	0.815	0.815
50%FAME	0.825	0.825	0.825	0.825
70%FAME	0.845	0.845	0.845	0.845
90%FAME	0.850	0.850	0.850	0.850
100%FAME	0.875	0.875	0.875	0.875



ตารางที่ ก.3 ความหนาแน่นของน้ำมันเชื้อเพลิง

ตัวอย่าง	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C (kg/m ³) - ASTM D1298			
	I	II	III	เฉลี่ย
Diesel	829	829	829	829
0%FAME	769	769	769	769
5%FAME	774	774	774	774
7%FAME	783	783	783	783
10%FAME	787	787	787	787
15%FAME	792	792	792	792
20%FAME	800	800	800	800
30%FAME	814	814	814	814
50%FAME	824	824	824	824
70%FAME	844	844	844	844
90%FAME	849	849	849	849
100%FAME	874	874	874	874

ตารางที่ ก.4 ดัชนีซีเทนของน้ำมันเชื้อเพลิง

ตัวอย่าง	ดัชนีซีเทน - ASTM D976			
	T ₁₀ (°C)	T ₅₀ (°C)	T ₉₀ (°C)	ดัชนีซีเทน
Diesel	222	280	334	56
0%FAME	220	258	274	78
5%FAME	222	260	280	76
7%FAME	222	262	284	72
10%FAME	226	262	288	70
15%FAME	230	264	296	68
20%FAME	230	266	306	65
30%FAME	232	270	314	60
50%FAME	238	286	322	59
70%FAME	260	308	336	55
90%FAME	302	324	340	55
100%FAME	336	356	374	48

ตารางที่ ก.5 ค่าความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิง

ตัวอย่าง	ค่าความร้อนเชื้อเพลิง – ASTM D240
Diesel	
0%FAME	47.02
5%FAME	46.56
7%FAME	46.57
10%FAME	46.26
15%FAME	45.74
20%FAME	45.21
30%FAME	44.54
50%FAME	43.1
70%FAME	41.64
90%FAME	40.28
100%FAME	39.62

ตารางที่ ก.6 อุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันเชื้อเพลิง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการกลั่น (°C) - ASTM D86				
	จุดเดือด เริ่มต้น	10% ของ ส่วนที่กลั่นได้	50% ของ ส่วนที่กลั่นได้	90% ของ ส่วนที่กลั่นได้	จุดเดือด สุดท้าย
Diesel	182	222	280	334	336
0%FAME	158	220	258	274	282
5%FAME	160	222	260	280	288
7%FAME	160	222	262	284	290
10%FAME	162	226	262	288	300
15%FAME	166	230	264	296	306
20%FAME	170	230	266	306	308
30%FAME	174	232	270	314	318
50%FAME	182	238	286	322	324
70%FAME	198	260	308	336	338
90%FAME	258	302	324	340	342
100%FAME	302	336	356	374	376

ตารางที่ ก.7 จุดวาบไฟของน้ำมันเชื้อเพลิง

ตัวอย่าง	จุดวาบไฟ - ASTM D93
Diesel	71
0%FAME	87
5%FAME	88
7%FAME	89
10%FAME	92
15%FAME	93
20%FAME	94
30%FAME	97
50%FAME	99
70%FAME	120
90%FAME	138
100%FAME	169



ภาคผนวก ข

ผลการตรวจสอบัติการหล่อขึ้น

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 การทดลองที่ 1 ทดสอบสมบัติการหล่อลื่นเมื่อผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

ตัวอย่าง	%BHD	%FAME	อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	%ฟิล์ม	X (µm)	Y (µm)	WSD (µm)
E1.X.01	100	0	59.9	0.302	58	610	530	570
E1.X.02	95	5	59.9	0.143	96	260	200	230
E1.X.03	93	7	59.9	0.143	96	230	210	220
E1.X.04	90	10	59.9	0.129	96	210	150	180
E1.X.05	85	15	59.9	0.133	97	190	160	170
E1.X.06	80	20	59.9	0.135	96	190	170	180
E1.X.07	70	30	59.9	0.128	98	200	150	180
E1.X.08	50	50	59.9	0.128	97	210	150	180
E1.X.09	30	70	59.9	0.134	97	200	160	180
E1.X.10	10	90	59.9	0.133	97	200	160	180
E1.X.11	0	100	59.9	0.131	97	210	140	180

ตารางที่ ข.2 การทดลองที่ 2 ทดสอบสมบัติการหล่อลื่นเมื่อผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

ตัวอย่าง	%BHD	%FAME	อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	%ฟิล์ม	X (μm)	Y (μm)	WSD (μm)
E7.X.01	100	0	59.9	0.452	33	690	640	665
E7.X.01-1	100	0	59.9	0.422	8	670	590	630
E7.X.02	97	3	59.9	0.178	72	420	330	375
E7.X.03	95	5	59.9	0.139	92	250	190	220
E7.X.04	93	7	59.9	0.138	95	240	170	205
E7.X.05	90	10	59.9	0.133	96	200	170	185
E7.X.06	85	15	59.9	0.134	95	210	160	185
E7.X.07	80	20	59.9	0.134	95	210	170	190
E7.X.08	70	30	59.9	0.121	95	200	160	180
E7.X.09	50	50	59.9	0.126	96	200	160	180
E7.X.10	30	70	59.9	0.124	95	199	161	180
E7.X.11	10	90	59.9	0.131	96	190	160	175

ตารางที่ ข.3 การทดลองที่ 3 ทดสอบสมบัติการหล่อลื่นเมื่อผสมน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

ตัวอย่าง	%BHD	%FAME	อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	%ฟิล์ม	X (µm)	Y (µm)	WSD (µm)
E8.0.01	100	0	59.9	0.289	40	590	500	545
E8.5.02	95	5	59.9	0.156	86	320	280	300
E8.10.03	90	10	59.9	0.138	97	200	150	180
E8.50.04	50	50	59.9	0.133	96	190	160	175
E8.100.05	0	100	59.9	0.135	96	190	150	170
E8.0.06	100	0	59.9	0.457	51	690	620	655
E8.5.07	95	5	59.9	0.145	94	260	230	245
E8.10.08	90	10	59.9	0.139	96	220	150	185
E8.50.09	50	50	59.9	0.131	97	210	190	200
E8.100.10	0	100	59.9	0.136	96	240	180	210

ตารางที่ ข.4 การทดสอบสมบัติการหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนปัจจัยโหลด และ เวลา ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมน้ำมันไบโอดีเซล ร้อยละ 10 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์ แรงเสียดทาน	%ฟิล์ม	X (µm)	Y (µm)	WSD (µm)	เริ่มต้น		สิ้นสุด	
							อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ โดยรอบ (%)	อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ โดยรอบ (%)
E2.L200.T75	59.9	0.129	96	210	150	180	25	53.6	25.1	53.6
E2.L400.T75	59.9	0.132	94	255	202	229				
E2.L600.T75	59.9	0.132	95	275	212	244	25.3	24.2	55	55.9
E2.L800.T75	59.9	0.131	94	307	232	270	24.9	23.6	56	57.4
E2.L1000.T75	59.9	0.115	96	324	229	277				
E2.L200.T100	59.9	0.138	98	214	139	176	22.8	54.6	22.8	54.7
E2.L400.T100	59.9	0.132	98	264	210	237	25.8	52.3	24.1	56.6
E2.L600.T100	59.9	0.132	95	286	221	254	24.7	52.9	23.4	56
E2.L800.T100	59.9	0.131	94	310	244	277	23.1	50.8	22.9	54.4
E2.L1000.T100	59.9	0.124	94	318	259	288	22.6	51.3	22.6	53.9
E2.L200.T125	59.9	0.135	97	250	189	220	25.8	51.2	24.9	55
E2.L400.T125	59.9	0.134	95	266	211	236	25.5	53.5	24.8	54.6

ตารางที่ ข.4 การทดสอบสมบัติการหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนปัจจัยโหลด และ เวลา ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมน้ำมันไบโอดีเซล ร้อยละ 10 โดยปริมาตร
(ต่อ)

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์ แรงเสียดทาน	%ฟิล์ม	X (µm)	Y (µm)	WSD (µm)	เริ่มต้น		สิ้นสุด	
							อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	ความขึ้น สัมพัทธ์ โดยรอบ (%)	อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	ความขึ้น สัมพัทธ์ โดยรอบ (%)
E2.L600.T125	59.9	0.127	95	298	223	260.5	22.3	50.2	22.4	53.6
E2.L800.T125	59.9	0.127	95	315	246	280.5	22.9	52.3	22.8	54.1
E2.L1000.T125	60	0.125	79	335	296	315.5	26	26.6	50.9	53.2
E2.L200.T150	59.9	0.133	98	223	175	199	26	51	24	55.5
E2.L400.T150	59.9	0.131	96	285	235	260	23.9	49.8	23.2	54.1
E2.L600.T150	59.9	0.125	95	302	246	274	23	49	22.9	53.7
E2.L800.T150	59.9	0.126	94	328	272	300	25.4	52.3	23.3	55.4
E2.L1000.T150	59.9	0.122	93	333	277	305	25.6	26.4	55.2	56.3

ตารางที่ ข.5 การทดสอบสมบัติการหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนปัจจัยโหลด และ เวลา ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมน้ำมันไบโอดีเซล ร้อยละ 20 โดยปริมาตร

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์แรง เสียดทาน	%ฟิล์ม	X (µm)	Y (µm)	WSD (µm)	เริ่มต้น		สิ้นสุด	
							อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	ความขึ้น สัมพัทธ์ โดยรอบ (%)	อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	ความขึ้น สัมพัทธ์ โดยรอบ (%)
E3.L200.T75	59.9	0.135	96	190	170	180	24.6	56.8	24.7	53.9
E3.L400.T75	59.9	0.112	94	218	176	197	22.4	53.2	22.7	54.7
E3.L600.T75	59.9	0.132	85	293	239	266	22.3	52.6	22.7	53.8
E3.L800.T75	59.9	0.119	94	291	215	253	22.5	50.7	22.8	53.3
E3.L1000.T75	59.9	0.131	83	335	256	295.5	22.5	49.1	22.8	52.9
E3.L200.T100	59.9	0.129	97	207	161	184	23.6	52.5	23.9	53.6
E3.L400.T100	59.9	0.11	97	241	168	204.5	23.8	51	23.3	55.3
E3.L600.T100	59.9	0.12	96	272	209	240.5	22.8	52.2	23.2	53.5
E3.L800.T100	59.9	0.132	88	309	267	288	24.7	50.1	24.3	54.1
E3.L1000.T100	59.9	0.136	73	370	286	328	24.9	54.8	24.2	55.6
E3.L200.T125	59.9	0.126	97	200	187	203.5	24.9	52	24.1	55.2
E3.L400.T125	59.9	0.124	97	245	212	228.5	23.5	50.9	23.6	53.6

ตารางที่ ข.5 การทดสอบสมบัติการหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนปัจจัยโหลด และ เวลา ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมน้ำมันไบโอดีเซล ร้อยละ 20 โดยปริมาตร

(ต่อ)

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์แรง เสียดทาน	%ฟิล์ม	X (µm)	Y (µm)	WSD (µm)	เริ่มต้น		สิ้นสุด	
							อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ โดยรอบ (%)	อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ โดยรอบ (%)
E3.L600.T125	59.9	0.125	94	284	205	244.5	23	53.7	23.3	53.9
E3.L800.T125	59.9	0.126	94	300	250	275	24.8	57.7	25	54.3
E3.L1000.T125	59.9	0.134	69	387	328	358	23.7	55.7	24	53.9
E3.L200.T150	59.9	0.127	98	213	153	183	22.8	50.5	22.8	54.6
E3.L400.T150	59.9	0.11	97	238	185	211.5	23.2	50.1	23.2	54.5
E3.L600.T150	59.9	0.121	97	264	223	243.5	22.7	53.9	23	53.9

ตารางที่ ข.6 การทดสอบสมบัติการหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนปัจจัยโหลด และ เวลา ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์แรง เสียดทาน	%ฟิล์ม	X (µm)	Y (µm)	WSD (µm)	เริ่มต้น		สิ้นสุด	
							อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	ความขึ้น สัมพัทธ์ โดยรอบ (%)	อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	ความขึ้น สัมพัทธ์ โดยรอบ (%)
E4.L200.T75	59.9	0.399	18	657.0	561.0	609.0	23.3	55.4	23.5	55
E4.L400.T75	59.9	0.404	15	686.0	595.0	640.0	23.3	55.3	23.4	55.2
E4.L600.T75	59.9	0.392	19	711.0	634.0	672.0	23.2	53.4	23.6	53.6
E4.L800.T75	59.9	0.355	47	676.0	619.0	647.5	23.1	49.8	23.5	52.8
E4.L1000.T75	59.9	0.348	40	678.0	617.0	647.5	23.1	51.7	23.4	53.2
E4.L200.T100	59.9	0.38	53	717.0	637.0	677.0	23.3	55.3	23.5	54.5
E4.L400.T100	59.9	0.412	44	779.0	690.0	734.5	23.1	54.3	23.6	53.5
E4.L600.T100	59.9	0.391	73	781.0	698.0	739.5	23.1	54.3	23.4	53.6
E4.L800.T100	59.9	0.363	30	770.0	712.0	741.0	23.5	54.2	23.6	54.8
E4.L1000.T100	59.9	0.372	37	783.0	719.0	751.0	23.2	51.7	23.7	53.5
E4.L200.T125	59.9	0.397	53	818.0	729.0	773.5	23.2	49.3	23.5	53.3
E4.L400.T125	59.9	0.385	58	820.0	736.0	778.0	23.9	54	23.9	54.4

ตารางที่ ข.6 การทดสอบสมบัติการหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนปัจจัยโหลด และ เวลา ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์แรง เสียดทาน	%ฟิล์ม	X (µm)	Y (µm)	WSD (µm)	เริ่มต้น		สิ้นสุด	
							อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ โดยรอบ (%)	อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ โดยรอบ (%)
E4.L600.T125	60	0.383	87	790.1	873.5	831.8	23.5	52.8	23.9	53.3
E4.L800.T125	59.9	0.385	62	796.3	844.6	820.4	24.3	53.6	24.3	54.3
E4.L1000.T125	59.9	0.36	69	817.0	877.7	847.3	24	49.5	23.7	53.7
E4.L200.T150	59.9	0.401	69	812.8	886.0	849.4	23.5	53.2	23.9	54
E4.L400.T150	59.9	0.402	54	823.9	906.7	865.3	23.3	50.2	23.7	53.3
E4.L600.T150	59.9	0.39	60	858.4	938.4	898.4	23.2	54.2	23.5	53.4

ตารางที่ ข.7 การทดสอบสมบัติการหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์ และ อุณหภูมิ ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมน้ำมันไบโอดีเซล ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่ไหลด 1000 g

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์แรง เสียดทาน	%ฟิล์ม	X (µm)	Y (µm)	WSD (µm)	เริ่มต้น		สิ้นสุด	
							อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ โดยรอบ (%)	อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ โดยรอบ (%)
E5.NaOH.T60	59.9	0.111	95	289	210	249.5	27.2	10.1	27.6	9.4
E5.NaOH.T90	89.9	0.102	96	285	207	246	28	9.7	28.3	9.6
E5.NaOH.T120	119.9	0.112	95	284	213	248.5	27.9	11.4	28.7	9.9
E5.NaOH.T150	150	0.122	88	394	286	340				
E5.NaOH.T150-1	150	0.121	90	387	299	343	26	12		
E5.C2H3KO2.T60	59.9	0.108	96	302	218	260	28.3	24	28.2	22.6
E5.C2H3KO2.T90	89.9	0.108	98	294	206	250	27.7	23.8	28.4	22.3
E5.C2H3KO2.T120	119.9	0.109	93	318	226	272	25.3	26.7	26.8	23.9
E5.C2H3KO2.T150-1	150	0.113	88	412	314	363	27.4	26.2		
E5.MgCl2.T60	59.9	0.106	93	285	207	246	24.8	32.8	25.7	32.9
E5.MgCl2.T90	89.9	0.111	95	312	201	256.5	25,6	33.9	26.7	33.2

ตารางที่ ข.7 การทดสอบสมบัติการหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์ และ อุณหภูมิ ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมน้ำมันไบโอดีเซล ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่ไหลด 1000 g (ต่อ)

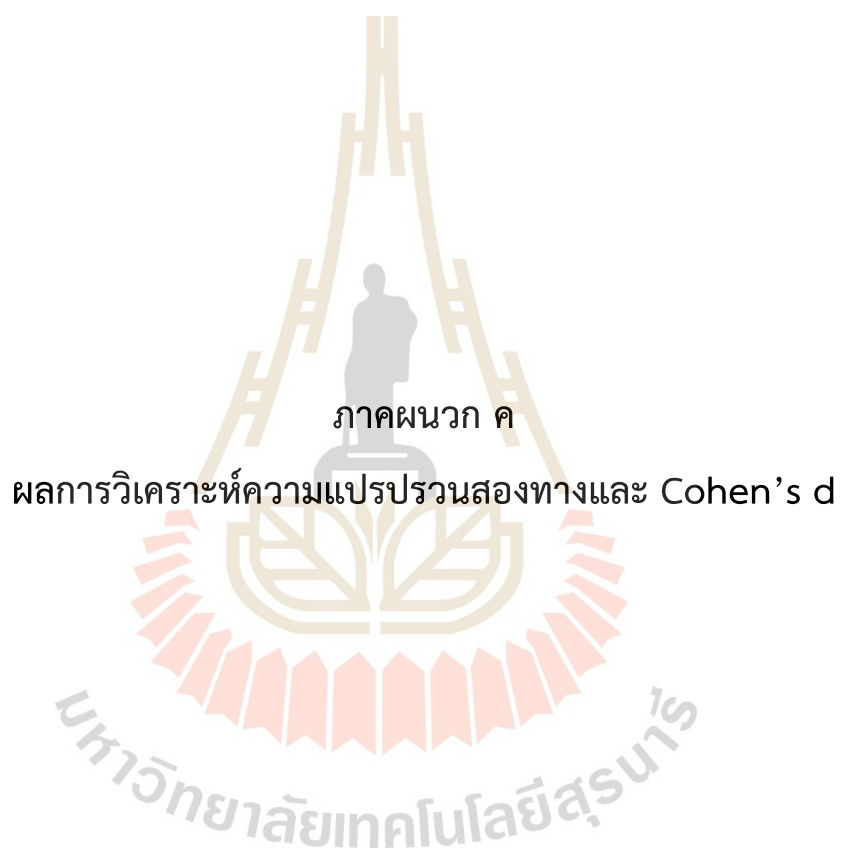
ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์แรง เสียดทาน	%ฟิล์ม	X (µm)	Y (µm)	WSD (µm)	เริ่มต้น		สิ้นสุด	
							อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ โดยรอบ (%)	อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ โดยรอบ (%)
E5.MgCl2.T120	119.9	0.117	91	308	212	260	26.4	33.9	27.7	33.3
E5.MgCl2.T150	150	0.117	89	409	293	351	28	36		
E5.K2CO3.T60	59.9	0.119	93	288	224	256	26.8	48.9	27.2	49
E5.K2CO3.T90	89.9	0.109	96	320	219	269.5	27.6	48.6	28.1	47.5
E5.K2CO3.T120	119.9	0.114	97	312	198	255	27.6	47.1	28.5	47.5
E5.K2CO3.T150	150	0.108	81	437	324	380.5	27	44		

ตารางที่ ข.8 การทดสอบสมบัติการหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์ และ อุณหภูมิ ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมน้ำมันไบโอดีเซล ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่ไหลด 200 g

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์แรง เสียดทาน	%ฟิล์ม	X (µm)	Y (µm)	WSD (µm)	เริ่มต้น		สิ้นสุด	
							อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ โดยรอบ (%)	อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ โดยรอบ (%)
E6.NaOH.T60	59.9	0.117	97	224	165	194.5	28.8	11.1	28	11.1
E6.NaOH.T90	89.9	0.118	98	211	150	180.5	27	11.2	27.9	10.9
E6.NaOH.T120	119.9	0.108	93	239	205	222	27.5	11.3	28.7	11.4
E6.NaOH.T150-1	150	0.13	94	278	202	240	27.4	14		
E6.C2H3KO2.T60	59.9	0.029	92	177	148	162	26.5	23.8	26.8	23.9
E6.C2H3KO2.T90	89.9	0.122	98	208	162	185	26	24.9	26.9	24.8
E6.C2H3KO2.T120	119.9	0.125	96	222	187	204.5	25.9	25.3	27.3	25.1
E6.C2H3KO2.T150	150	0.137	92	288	220	254	27.9	25		
E6.MgCl2.T60	59.9	0.122	98	209	163	186	26.1	34.4	26.4	34.3
E6.MgCl2.T90	89.9	0.124	98	200	145	172	25.7	35.1	26.7	34.6
E6.MgCl2.T120	119.9	0.125	96	232	195	214	25.9	35.4	27.3	35

ตารางที่ ข.8 การทดสอบสมบัติการหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์ และ อุณหภูมิ ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมน้ำมันไบโอดีเซล ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่ไหลต 200 g (ต่อ)

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	%ฟิล์ม	X (µm)	Y (µm)	WSD (µm)	เริ่มต้น		สิ้นสุด	
							อุณหภูมิโดยรอบ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์โดยรอบ (%)	อุณหภูมิโดยรอบ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์โดยรอบ (%)
E6.MgCl2.T150	150	0.195	92	273	215	244	28.3	36		
E6.K2CO3.T60	59.9	0.137	99	240	174	207	28.3	47.1	29.2	47.7
E6.K2CO3.T90	89.9	0.137	97	217	148	182	27.2	45.7	29	46.6
E6.K2CO3.T120	119.9	0.133	95	255	202	228.5	27.7	46.2	29.1	47.1
E6.K2CO3.T150	150	0.141	92	295	223	259	27.6	45		



ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางและ Cohen's d

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค 1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางเมื่อเปลี่ยนปัจจัยโหลด และ เวลา ของน้ำมันดีเซล
ชีวภาพสังเคราะห์ผสมน้ำมันไปโอดีเซล ร้อยละ 10 โดยปริมาตร

แหล่งความแปรปรวน	องศาอิสระ (df)	ผลรวมกำลังสอง (SS)	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (MS)	ค่าตัวสถิติ (F)	ระดับนัยสำคัญ (P-value)
โหลด (g)	4	25572	6393.02	75	0
เวลา (นาท)	3	2604	868.02	10.18	0.0013
ความคลาดเคลื่อน	12	1023	85.24		
ผลรวม	19	29199			

ตารางที่ ค 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางเมื่อเปลี่ยนปัจจัยโหลด และ เวลา ของน้ำมันดีเซล
ชีวภาพสังเคราะห์ผสมน้ำมันไปโอดีเซล ร้อยละ 20 โดยปริมาตร

แหล่งความแปรปรวน	องศาอิสระ (df)	ผลรวมกำลังสอง (SS)	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (MS)	ค่าตัวสถิติ (F)	ระดับนัยสำคัญ (P-value)
โหลด (g)	4	50990	12747.5	43.09	0
เวลา (นาท)	3	1609	536.2	1.81	0.1985
ความคลาดเคลื่อน	12	3550	295.8		
ผลรวม	19	56149			

ตารางที่ ค 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางเมื่อเปลี่ยนปัจจัยโพลด และ เวลา ของน้ำมันดีเซล
ชีวภาพสังเคราะห์

แหล่งความแปรปรวน	องศาอิสระ (df)	ผลรวมกำลังสอง (SS)	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (MS)	ค่าตัวสถิติ (F)	ระดับนัยสำคัญ (P-value)
โพลด (g)	4	8513	2128.3	11.45	0.0005
เวลา (นาท)	3	149505	49835.1	268.14	0
ความคลาดเคลื่อน	12	2230	185.9		
ผลรวม	19	160249			

ตารางที่ ค 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางเมื่อเปลี่ยนปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์ และ อุณหภูมิ
ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมน้ำมันไปโอดีเซล ร้อยละ 10 โดยปริมาตร
ที่โพลด 1000 g

แหล่งความแปรปรวน	องศาอิสระ (df)	ผลรวมกำลังสอง (SS)	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (MS)	ค่าตัวสถิติ (F)	ระดับนัยสำคัญ (P-value)
ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ (%)	7	1958	279.7	1.88	0.1238
อุณหภูมิ (°C)	3	53520	17840	120.05	0
ความคลาดเคลื่อน	21	3121	148.6		
ผลรวม	31	58599			

ตารางที่ ค 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางเมื่อเปลี่ยนปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์ และ อุณหภูมิ
ของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมน้ำมันไบโอดีเซล ร้อยละ 10 โดยปริมาตร
ที่โหลด 200 g

แหล่งความแปรปรวน	องศาอิสระ (df)	ผลรวมกำลังสอง (SS)	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (MS)	ค่าตัวสถิติ (F)	ระดับนัยสำคัญ (P-value)
ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ (%)	7	10192	1456	5.34	0.0013
อุณหภูมิ (°C)	3	18643	6214.2	22.8	0
ความคลาดเคลื่อน	21	5725	272.6		
ผลรวม	31	34559			

ตารางที่ ค 6 การคำนวณค่า Cohen's d เมื่อเปลี่ยนปัจจัยโหลดของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมน้ำมันไบโอดีเซล ร้อยละ 10 โดยปริมาตร

โหลด (g)	ค่าเฉลี่ย (mean)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานรวม (S.D. pooled)	Cohen's d
200	193.80	20.20	17.17	2.720
400	240.50	13.48	13.03	1.353
600	258.13	12.57	12.58	1.889
800	281.88	12.58	15.06	0.964
1000	296.39	17.18		
ผลรวม				6.925
ค่าเฉลี่ย				1.731

ตารางที่ ค 7 การคำนวณค่า Cohen's d เมื่อเปลี่ยนปัจจัยเวลาของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์
ผสมน้ำมันไบโอดีเซล ร้อยละ 10 โดยปริมาตร

เวลา (นาทีก)	ค่าเฉลี่ย (mean)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน รวม (S.D. pooled)	Cohen's d
75	240.00	38.70	41.49	0.154
100	246.40	44.10	40.98	0.393
125	262.50	37.60	40.18	0.127
150	267.60	42.60		
ผลรวม				0.674
ค่าเฉลี่ย				0.135

ตารางที่ ค 8 การคำนวณค่า Cohen's d เมื่อเปลี่ยนปัจจัยโหลดของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์
ผสมน้ำมันไบโอดีเซล ร้อยละ 20 โดยปริมาตร

โหลด (g)	ค่าเฉลี่ย (mean)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน รวม (S.D. pooled)	Cohen's d
200	187.63	10.72	12.17	1.870
400	210.38	13.46	12.62	3.032
600	248.63	11.71	19.52	1.720
800	282.20	25.00	25.40	1.850
1000	329.20	25.80		
ผลรวม				8.472
ค่าเฉลี่ย				2.118

ตารางที่ ค 9 การคำนวณค่า Cohen's d เมื่อเปลี่ยนปัจจัยเวลาของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์
ผสมน้ำมันไบโอดีเซล ร้อยละ 20 โดยปริมาตร

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ย (mean)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน รวม (S.D. pooled)	Cohen's d
75	238.30	48.40	54.07	0.198
100	249.00	59.20	59.45	0.217
125	261.90	59.70	62.46	0.075
150	257.20	65.10		
ผลรวม				0.490
ค่าเฉลี่ย				0.163

ตารางที่ ค 10 การคำนวณค่า Cohen's d เมื่อเปลี่ยนปัจจัยโหลดของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์

โหลด (g)	ค่าเฉลี่ย (mean)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน รวม (S.D. pooled)	Cohen's d
200	727.20	105.80	99.93	0.273
400	754.50	93.70	96.80	0.319
600	785.40	99.80	99.90	0.137
800	771.70	100.00	102.94	0.103
1000	782.30	105.80		
ผลรวม				0.833
ค่าเฉลี่ย				0.208

ตารางที่ ค 11 การคำนวณค่า Cohen's d เมื่อเปลี่ยนปัจจัยเวลาของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์

เวลา (นาทื)	ค่าเฉลี่ย (mean)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน รวม (S.D. pooled)	Cohen's d
75	643.20	22.60	26.28	3.250
100	728.60	29.50	31.25	2.612
125	810.20	32.90	26.70	2.420
150	874.80	18.52		
ผลรวม				8.281
ค่าเฉลี่ย				2.760

ตารางที่ ค 12 การคำนวณค่า Cohen's d เมื่อเปลี่ยนปัจจัยอุณหภูมิ ของน้ำมันดีเซลชีวภาพ
สังเคราะห์ผสมน้ำมันไปโอดีเซล ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่ไหลด 1000 g

อุณหภูมิ (°C)	ค่าเฉลี่ย (mean)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน รวม (S.D. pooled)	Cohen's d
60	260.13	10.11	11.93	0.131
90	261.69	13.50	14.02	0.441
120	267.88	14.53	14.85	6.032
150	357.44	15.16		
ผลรวม				6.604
ค่าเฉลี่ย				2.201

ตารางที่ ค 13 การคำนวณค่า Cohen's d เมื่อเปลี่ยนปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์ ของน้ำมันดีเซลชีวภาพ
สังเคราะห์ผสมน้ำมันไปโอดีเซล ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่ไหลด 1000 g

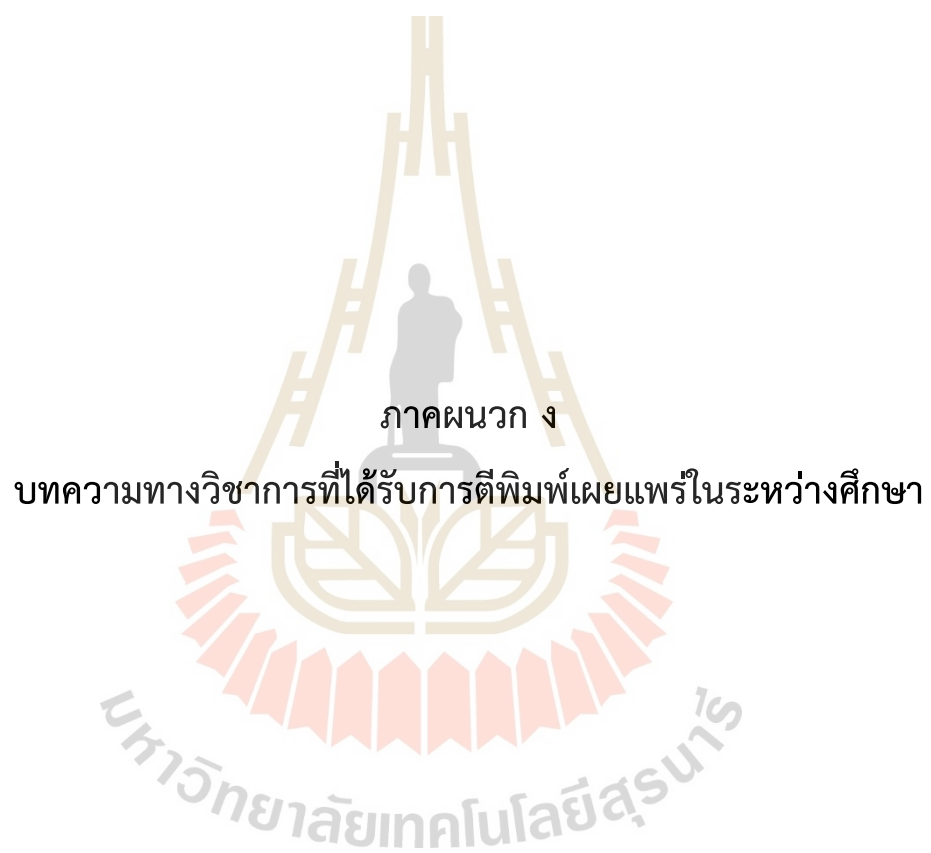
%RH	ค่าเฉลี่ย (mean)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน รวม (S.D. pooled)	Cohen's d
10.51	271.50	47.70	49.90	0.297
24.46	286.30	52.00	50.43	0.157
34.00	278.40	48.80	54.96	0.217
47.08	290.30	60.50	50.00	0.094
54.14	285.60	36.60	37.10	0.197
68.70	292.90	37.60	47.40	0.084
79.88	296.90	55.50	50.52	0.087
88.39	292.50	45.00		
ผลรวม				1.132
ค่าเฉลี่ย				0.162

ตารางที่ ค 14 การคำนวณค่า Cohen's d เมื่อเปลี่ยนปัจจัยอุณหภูมิ ของน้ำมันดีเซลชีวภาพ
สังเคราะห์ผสมน้ำมันไปโอดีเซล ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่ไหลด 200 g

อุณหภูมิ (°C)	ค่าเฉลี่ย (mean)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน รวม (S.D. pooled)	Cohen's d
60	203.19	26.31	23.65	0.249
90	197.31	20.66	19.24	1.417
120	224.56	17.70	24.02	1.429
150	258.90	29.00		
ผลรวม				3.095
ค่าเฉลี่ย				1.032

ตารางที่ ค 15 การคำนวณค่า Cohen's d เมื่อเปลี่ยนปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์ ของน้ำมันดีเซลชีวภาพ
สังเคราะห์ผสมน้ำมันไปโอดีเซล ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่ไหลต 200 g

%RH	ค่าเฉลี่ย (mean)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน รวม (S.D. pooled)	Cohen's d
11.88	209.30	26.80	33.52	0.236
24.73	201.40	39.10	35.68	0.073
35.10	204.00	31.90	32.30	0.467
46.30	219.10	32.70	28.11	0.430
55.40	207.00	22.60	17.97	1.941
70.64	241.88	11.61	17.46	0.463
80.68	233.80	21.80	39.67	0.449
88.04	251.60	51.70		
ผลรวม				4.059
ค่าเฉลี่ย				0.580



ภาคผนวก ง

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ภาคผนวก ง

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Sriprathum, S., Maneedaeng, A., Klinkaew, N., & Sukjit, E. (2023). Comprehensive analysis of properties of green diesel enhanced by fatty acid methyl esters. *RSC advances*, 13(45), 31460-31469. doi:10.1039/D3RA06492A



PAPER

Cite this: *RSC Adv.*, 2023, 13, 31460

Comprehensive analysis of properties of green diesel enhanced by fatty acid methyl esters†

Sarunporn Sriprathum,^a Atthaphon Maneedaeng,^{*a} Niti Klinkaew^b and Ekarong Sukjit^c

This study systematically investigates the lubricating properties of bio-hydrogenated diesel (BHD), a synthetic diesel produced through biomass hydrogenation of vegetable oil. Despite having similar chemical properties to petroleum diesel, BHD has poor lubricating properties due to the removal of sulfur and oxygenated compounds during the hydrogenation process, which could damage the engine. To address this issue, fatty acid methyl esters (FAME) was added as an additive to BHD to enhance its fuel and lubricating properties. FAME is a polar molecule with good lubricating properties that adsorb on the surface to protect against wear. The study found that adding as little as 5% FAME significantly improved the lubricating properties of BHD. The wear scar diameter (WSD) decreased from 609 μm to 249 μm , and the average film was 94% with an average coefficient of friction of 0.138 by only 5% FAME addition investigated by High Frequency Reciprocating Rig with ISO 12156-1: 2018. This shows that blending FAME with BHD could reduce engine wear and improve its lubricating properties. Disc samples were analyzed using a Scanning Electron Microscope (SEM), OLS5100 3D laser microscopy, and Fourier Transform Infrared Microscopy (FTIR) to examine the worn surface both physically and chemically. An increase in the percentage of FAME addition to BHD resulted in a smoother worn surface, exhibiting reduced delamination and debris compared to pure BHD. This effect was attributed to the protective film formed by FAME. The study highlights the potential of FAME as an additive to enhance the lubricating properties of BHD and reduce engine wear.

Received 23rd September 2023
Accepted 23rd October 2023

DOI: 10.1039/d3ra06492a

rsc.li/rsc-advances

1. Introduction

Air pollution presents a pressing challenge that jeopardizes human health and environmental well-being. Particulate matter with a diameter less than 2.5 microns (PM_{2.5}) poses a grave threat as it can infiltrate the respiratory system, causing respiratory ailments, allergies, and even lung cancer.¹ A significant contributor to air pollution is the incomplete combustion of fossil fuels, leading to the emission of carbon monoxide due to engine and fuel injector wear.² Additionally, industrial activities exacerbate the issue by releasing pollutants into the atmosphere. The ramifications of air pollution extend beyond human health, with far-reaching impacts on global warming stemming from greenhouse gas emissions. Consequently, urgent action is imperative to combat air pollution.

Transitioning to renewable and alternative energy sources is a pivotal step in reducing emissions.

Bio-hydrogenated diesel (BHD) emerges as a promising synthetic green diesel, offering an environmentally friendly alternative energy solution.³ Derived from vegetable oils and fats through hydrogenation, BHD undergoes a catalytic transformation that yields a molecular structure akin to conventional diesel fuel, encompassing long-chain hydrocarbons (C₁₄H₃₀–C₁₆H₃₄). The advantages of BHD are manifold, including a higher cetane number, lower sulfur content, and cleaner energy profile, resulting in a potential reduction of up to 9% in nitrogen oxide (NO_x) emissions and 32% in particulate matter (PM) emissions.^{4,5} Notwithstanding its merits, BHD exhibits room for enhancement in specific aspects, particularly its lubrication properties. The lubrication properties of BHD do not meet the standards set by national and international regulations, as indicated by a limited wear scar diameter of 460 μm . Inadequate lubrication can have detrimental effects on engine wear. Recent advancements demonstrate the efficacy of blending ultra-low sulfur diesel with fatty acid methyl esters (FAME) derived from rapeseed to enhance the lubrication of Swedish diesel fuel MK1.⁶ A similar approach involving BHD blending has the potential to enhance vehicle performance and curtail emissions; however, this blending is constrained by

^aSchool of Chemical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand. E-mail: atthaphon@sut.ac.th

^bInstitute of Research and Development, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand

^cSchool of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand

† Electronic supplementary information (ESI) available. See DOI: <https://doi.org/10.1039/d3ra06492a>

certain properties that necessitate refinement, including cold flow properties and lubricity.⁷ While tribological theories have explored the lubricity attributes of fuels derived from plastic pyrolysis oil and waste cooking biodiesel when blended with diesel-palm biodiesel,⁸ limited research has specifically targeted the augmentation of BHD's lubricating attributes.^{7,9-12}

Hence, the drive for improvement in the bio-hydrogenated diesel (BHD) blend's lubricating properties and overall fuel characteristics remains pivotal. Moreover, tribological investigations into synthetic fuels hold promise for mitigating environmental concerns, extending the lifespan of diesel engines, and curbing the aging and wear of fuel injectors. This study is dedicated to advancing the fuel and lubricating attributes of this eco-friendly liquid fuel by harnessing the potential of fatty acid methyl esters (FAME) as an additive. FAME, a biodiesel synthesized *via* sustainable technologies, is derived from the transesterification process. Widely employed in conjunction with commercial diesel fuel, known as B7 and B10,¹³ FAME augmentation has demonstrated the capability to enhance diesel fuel's lubricating characteristics, leading to reduced friction and wear scars. The polar head and extended fatty acid chain structure of FAME molecules confer favorable mixed and boundary lubrication properties, even at low concentrations.^{10,14} This research seeks to methodically investigate the fuel characteristics and lubrication efficacy of synthetic fuel blended with FAME. The focal point of this study is to address the necessity for enhancing the fuel and lubricating properties of eco-friendly liquid fuel, fostering improved performance and diminished environmental impact.

The primary novelty of this study lies in the systematic exploration of the lubricating and fuel properties of synthetic fuel blends containing FAME. Unlike previous studies, which have mainly focused on broad property trends and general lubricity improvements, the research aims to delineate the intricate relationship between FAME content and lubrication efficiency within the context of BHD blends. By investigating a full range of FAME concentrations and their impact on fuel and lubrication properties, the intention is to unveil the optimal conditions that yield enhanced lubrication while addressing potential challenges such as viscosity and cetane index properties. Furthermore, this analysis expands beyond common properties by scrutinizing lesser-studied aspects, such as specific gravity. This comprehensive approach enriches understanding of the intricate interplay between FAME concentration, fuel characteristics, and lubrication performance.

2. Materials and methods

2.1 Chemicals

The commercial specification of bio-hydrogenated diesel derived hydrogenation of palm oil (BHD) was obtained from Verasuwan Co., Ltd, Thailand. The industrial-grade biodiesel, composed of Fatty Acid Methyl Esters (FAME) obtained from transesterification of palm oil and a mixture of partially recycled cooking oils, was procured from Biosynergy Co., Ltd, Thailand. Both biofuels were characterized by Gas Chromatography (GC) Technique to examine the variation of hydrocarbon molecules.

Table 1 Hydrocarbon compound in bio-hydrogenated diesel (BHD) and fatty acid composition in fatty acid methyl esters (FAME) based on the qualitative GC/MS full scan

Compounds	Peak area	
	% in BHD	% in FAME
C8:0	0.42	0.0
C10:0	1.08	0.0
C11:0	4.69	0.0
C12:0	8.16	0.25
C13:0	5.95	0.0
C14:0	12.71	0.97
C15:0	25.01	0.06
C16:0	40.70	41.61
C16:1	0.0	0.14
C18:0	0.0	5.66
C18:1	0.0	39.45
C18:2	0.0	11.07
C20:1	0.0	0.71
C21:0	0.0	0.09
Aromatics	1.3	0.0
	100.0	100.0

The qualitative analysis of hydrocarbon compounds was tabulated in Table 1 in accordance with the GC/MS full scan shown in ESI† section. They have been utilized for a large-scale industry and transportation. Acetone (AR grade) with purity of 99.5% was purchased from RCI Labscan. Sodium Bromide (Analytical grade) with purity of 99.5% was purchased from QREc.

2.2 Fuel properties

The investigation firstly focused on examining the fuel properties of green diesel blended with varying concentrations of FAME between 0–100% by volume using standard procedures. The kinematic viscosity analysis was carried out using ASTM D445 at 40 °C in a glass capillary and temperature control water bath. Similarly, the specific gravity was analysed using ASTM D1298 at 15.6 °C in a density API and specific gravity with temperature-controlled water bath, while the calculated cetane index was estimated using the Nomograph method with ASTM D976. The fuel properties assessed in this study underwent triple measurements, aligning with ASTM standards that adhere to the regulations established by the Department of Energy Business, Ministry of Energy, Thailand *i.e.*, the limitation of chemical and physical properties of diesel fuel specified accordingly with the nation regulation as revised in June 2020.

2.3 Lubrication properties

The lubrication properties of synthetic diesel fuel were examined using High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR), PCS Instruments. Friction coefficient, film percentage, and wear scar diameter were obtained for further investigation of lubrication mechanism. In the HFRR cabinet, an upper specimen holder with a ball and weight loading, and a lower specimen holder with a disc, fuel sample, and temperature probe were installed. The ball and disc are made from stainless steel 6 mm

in diameter for a ball and 3 mm thick, 10 mm in diameter for a disc. BHD was blended by FAME ranged between 0–100% by volume with testing conditions in accordance with ISO 12156-1: 2018. The standard testing condition was a fluid volume of 2 ml, fuel temperature at 60 °C, frequency of 50 Hz, stroke length of 1 mm, test mass of 200 g, and test duration of 75 min. The temperature and humidity in the cabinet were controlled according to laboratory ambient using sodium bromide saturated solution in accordance with the testing standard¹⁵ which is a temperature of 20–26 °C and relative humidity of 48–58%. Upon conducting the test, the ball was subjected to a cleaning process in accordance with the standard procedure. Subsequently, a measurement of the wear scar on the surface of the ball was taken along the *X* and *Y* dimensions utilizing a metallographic microscope that had a magnification of 100×.

The disc was also taken to measure the wear area, depth, and volume by LEXT OLS 5100 (Olympus, Tokyo, Japan) and surface roughness around the worn zone. The worn surface on disc was further examined by scanning electron microscopy (SEM) AURIGA (Carl-Zeiss, Jena, Germany), JSM-7800F (JEOL Ltd, Tokyo, Japan) to illustrate the abrasive mechanism. The deposit formation around the worn surface was chemically examined using FTIR microscope with an MCT detector. The disc specimen was cooled with liquid nitrogen over the measurement range from 4000 to 400 cm^{-1} with an IR microscope (Hyperion 3000, Bruker). The microscope was connected to a software-controlled microscope stage and placed in a specially designed box that was purged by dry air. The measurements were performed in the mapping mode, using an aperture size of $8 \times 3 \mu\text{m}$ with a spectral resolution of 4 cm^{-1} , with 64 scans co-added.

3. Results and discussion

The percentage of area under chromatogram peaks of hydrocarbon profiles in BHD and fatty acid compositions in FAME is presented in Table 1, indicating that hexadecane (C16), pentadecane (C15), and tetradecane (C14) are the predominant paraffin constituents of BHD in consecutive order. BHD, akin to conventional diesel derived from petroleum, is composed of lengthy hydrocarbon chains. Upon examination of BHD's hydrocarbon compound, it is observed that saturated hydrocarbon molecules demonstrate a propensity for efficient combustion. Alkanes tend to produce fewer emissions of particulate matter and sulfur oxides than petroleum diesel, which can help improve air quality and reduce the environmental impact of combustion.¹⁶ Nevertheless, their lubricating properties exhibit suboptimal performance due to the hydrogenation of double bonds within unsaturated triglyceride molecules during catalytic reactions. Additionally, thermochemical conversion processes lead to the reduction of long-chain hydrocarbons such as decarbonylation and decarboxylation, resulting in the formation of shorter-chain hydrocarbons, ultimately contributing to the production of alkanes.¹⁷ However, FAME does not solely comprise palmitic acid (C18:0), but additionally exhibits substantial levels of oleic acid (C18:1) and linoleic acid (C18:2). The occurrence of unsaturated

hydrocarbons is indicative of their pronounced influence on the reduction of friction and lubrication improvement in a range of biofuel blends.^{11,18–20}

The study shows the enhancement of fuel properties such as the kinematic viscosity, specific gravity, and cetane index of BHD fuel by incorporating FAME in varying proportions, ranging from 0% to 100% as tabulated in Table 2 and shown in Fig. 1–3. Based on the test results shown in Fig. 1, the viscosity characteristics of BHD fuel improved significantly as the proportion of biodiesel increased from 0% to 70%. The kinematic viscosity values remained within the acceptable range specified by the Department of Energy Business, Ministry of Energy, Thailand, which mandates a maximum viscosity limit of 4.1 cSt for diesel fuel. It is noteworthy that the study demonstrated the efficacy of adding FAME in enhancing the viscosity properties of BHD fuel, while conforming to the regulatory standards. The viscosity of FAME can impact the performance of diesel engines when used as BHD. Higher viscosity can lead to increased fuel consumption, engine deposits, and emissions, as well as reduced fuel atomization and spray penetration. Studies have shown that the viscosity of FAME can be influenced by various factors, including the type of

Table 2 Fuel properties of bio-hydrogenated diesel (BHD) blended with fatty acid methyl esters (FAME)

% FAME	Kinematic viscosity at 40 °C (cSt)	Specific gravity at 15.6 °C	Cetane index
0	2.58	0.770	78
5	2.60	0.775	76
7	2.63	0.784	72
10	2.65	0.788	70
15	2.67	0.793	68
20	2.80	0.801	65
30	2.84	0.815	60
50	3.45	0.825	59
70	4.03	0.845	55
90	4.87	0.850	55
100	5.16	0.875	48

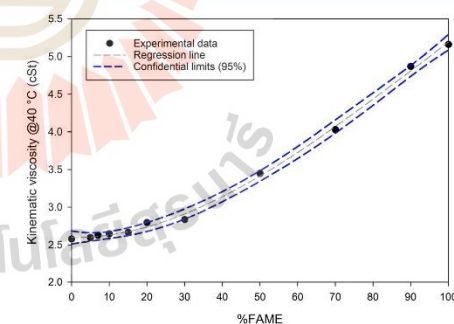


Fig. 1 Variation of kinematic viscosity at 40 °C of the blended fuels of FAME in BHD.

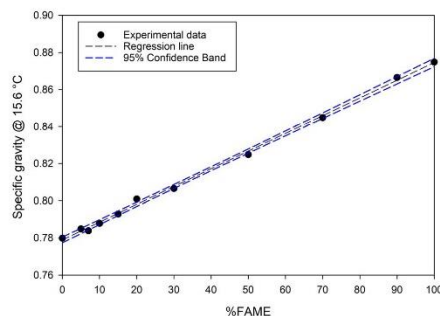


Fig. 2 Variation of specific gravity at 15.6 °C of BHD with different concentration of FAME addition.

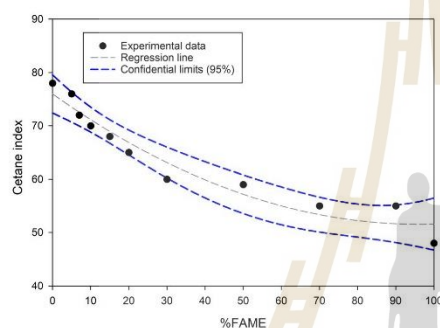


Fig. 3 Variation of calculated cetane index of the blended fuels of FAME in BHD.

feedstock, the degree of unsaturation, and the level of impurities.²¹ In 2018, Chen *et al.* investigated the effect of FAME viscosity on the fuel spray and combustion characteristics of a common rail diesel engine. Their results showed that higher FAME viscosity can lead to reduced fuel atomization and spray penetration, as well as increased combustion duration and particulate emissions.²²

There is a relationship between the viscosity and lubrication properties, viscosity plays a crucial role in lubrication, as it is a measure of a fluid's resistance to flow. In general, fluids with lower viscosity tend to have better lubrication properties as they can easily flow between two surfaces, reducing friction and wear.²³ FAME, which is fatty acid methyl esters, has a higher viscosity than BHD, which can impact its lubricating properties.^{12,24} However, the presence of polar compounds in FAME, such as carboxylic group of fatty acids, can enhance its lubricating properties, even with the higher viscosity. BHD, on the other hand, has poor lubricating properties due to the removal of sulfur and oxygenated compounds during the hydrogenation

process. Incorporating FAME into BHD can enhance the fuel's lubricating properties by creating a protective film layer that diminishes wear and friction. This film layer is discussed in detail in the subsequent section. FAME's innate lubricating properties can contribute to this effect, resulting in improved lubrication characteristics for the blended biofuel.

Consider Fig. 2, which depicts the investigation of alterations in specific gravity attributes upon the addition of biodiesel, ranging from 0% to 100%, to BHD fuel. The experimental results indicate that up to a 90% addition of FAME, the specific gravity attributes remain within the prescribed limit. The standard for specific gravity of diesel fuel, as determined by the Department of Energy Business, Ministry of Energy, Thailand, dictates that it should be in a range of 0.81–0.87 for 30–90% FAME. The specific gravity of FAME blended with BHD can impact the fuel properties and performance of the fuel. It is generally recognized that the specific gravity of FAME is slightly higher than that of petroleum diesel. As a result, this disparity can impact engine power output and fuel consumption. However, blending FAME with BHD can increase the specific gravity of the blended biofuel as shown in Fig. 2, and could improve its performance. Specific gravity is a measure of the density of a substance relative to the density of water at a specific temperature. The specific gravity of FAME can vary depending on the type of feedstock used and the degree of unsaturation. When blended with BHD, the specific gravity of the blended fuel can be increased to meet the desired fuel properties and engine performance requirements.

Several studies have explored the impact of specific gravity on the emission and performance of biodiesel blends. Elevating the specific gravity of FAME blends can lead to better engine performance and reduced emissions, particularly under higher engine loads.²⁵ Additionally, alternative research suggests that optimizing the manufacturing process or integrating additives can enhance the specific gravity and overall performance of FAME blends.^{26,27}

Refer to Fig. 3, which presents the investigation of changes in calculated cetane index characteristics upon the incorporation of FAME in varying proportions, ranging from 0% to 100%, into BHD fuel. The findings indicate that up to a 90% addition of FAME, the cetane index attributes remain within the stipulated range. As per the standard value in Thailand, the cetane index of diesel fuel should surpass 50. The cetane number of the resulting blend is lower than that of BHD alone. This is because the lower cetane number of FAME has a diluting effect on the overall blend. The degree of reduction in cetane index depends on the proportion of FAME in the blend and the cetane number of the specific FAME used. When blending BHD with FAME, it's common to see a reduction in cetane index. Cetane index is a measure of the combustion quality of diesel fuels, and higher cetane index values generally indicate better combustion characteristics. The reduction in cetane index is due to the lower cetane number of FAME compared to BHD. Cetane number is a related but slightly different measure than cetane index, with higher values indicating better combustion quality. BHD typically has a higher cetane number than FAME due to its molecular structure and production process.

According to a study by Cendeia *et al.* in 2009, the blending of FAME with diesel fuel can result in a decrease in the cetane number of the blend, which in turn affects engine performance and emissions.²⁸ Similarly, Kim *et al.* in 2014 studied the effects of blending different biodiesel feedstocks on the properties of diesel-biodiesel blends and their effects on engine performance, combustion, and emissions. In contrast to the findings of this study, it has been determined that the incorporation of FAME into conventional diesel fuel can lead to a gradual elevation in the cetane number, thereby exerting a beneficial influence on both engine performance and emissions.²⁹ In practical terms, an increase in cetane index can result in decreased emissions, increased engine performance, and lower levels of engine deposits. To mitigate these effects, it's important to carefully consider the blend ratio and the specific FAME used in the blend. Additionally, engine calibration adjustments may be necessary to optimize combustion performance.

The calculated cetane index of BHD is a measure of its ignition quality and is based on the fuel's chemical composition, specifically the amount and type of hydrocarbons present. BHD is typically produced from feedstocks with a higher degree of saturation, such as vegetable oils or animal fats, which results in a fuel with a higher cetane number compared to standard diesel derived from petroleum.^{30,31} A higher cetane number indicates that the fuel will ignite more readily and burn more completely in the combustion chamber, resulting in improved engine performance and reduced emissions. Additionally, the hydrogenation process used to produce BHD can also increase the cetane number by saturating unsaturated hydrocarbons, resulting in a fuel with a more uniform and predictable combustion behavior.³² Fig. 4 and 5 exhibits an investigation of the lubricating properties of BHD with different FAME concentration addition between 0 to 100% using HFRR with ISO 12156-1: 2018. The evaluation was obtained through the wear scar diameter (WSD), which was measured in micrometers by using a microscope on the ball, the friction coefficient (CoF), and the film percentage. Each sample was subjected to triple measurement. However, if the difference in

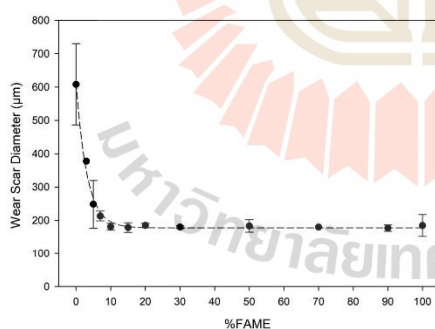


Fig. 4 Variation of wear scar diameter (WSD) of the blended fuels of FAME in BHD.

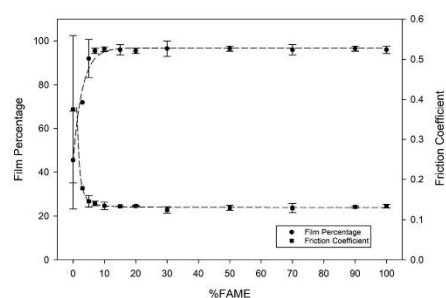


Fig. 5 Variation of percentage of film and friction coefficient of BHD with different concentration of FAME addition.

the values of WSD exceeded ± 20 μm , a fourth test was performed to verify the repeatability of the results. The mean values of WSD were then calculated and plotted in Fig. 4. Experimentally, it was observed that there is a positive correlation between the concentration of FAME and the lubricity, as indicated by the reduction in friction and wear. This phenomenon can be attributed to the presence of aliphatic fatty acids in FAME, particularly oleic and linoleic acids, which possess the ability to enhance lubrication properties. These acids promote the development of lubrication films, which regulate the friction and wear between contacting surfaces. The adsorption of oxygen-containing compounds and a mixture of several fatty acids in methyl esters on the rubbing surface further contributes to the reduction in friction and improvement in the film stability and thickness of the boundary lubrication regime.

Despite the numerous benefits of utilizing BHD over traditional diesel, such as higher cetane number, reduced sulfur content, and decreased NO_x and PM emissions,³³ inadequate lubrication can result in adverse effects on engine wear. Experimentally, the wear scar diameter (WSD) of pure BHD was approximately 609 μm . However, when blended with 5% FAME, the WSD reduced to 249 μm and continued to gradually decrease until reaching stability at a 10% FAME addition, with a WSD of 178–185 μm . The study reveals that an increase in FAME concentration leads to an increase in the proportion of the tribofilm covering the surface under frictional conditions. The application of protective films on the surface results in a reduction of thermal energy in reciprocating contact, ultimately enhancing lubricity.^{34–36} It is plausible that the carboxylic acid moiety serves as the fundamental building block for the formation of lubricity-enhancing films. In addition, the presence of trace components in the FAME, such as free fatty acids, monoglycerides, and diglycerides, may also contribute to improving the lubricity of blended fuels.³⁷

According to Fig. 5, a decrease in CoF was observed with an increase in FAME concentration. The average range of CoF was found to be between 0.121–0.178, which suggests the presence of a boundary lubrication mechanism.^{8,38} In contrast, the CoF of pure BHD was found to be 0.452. The film percentage, which

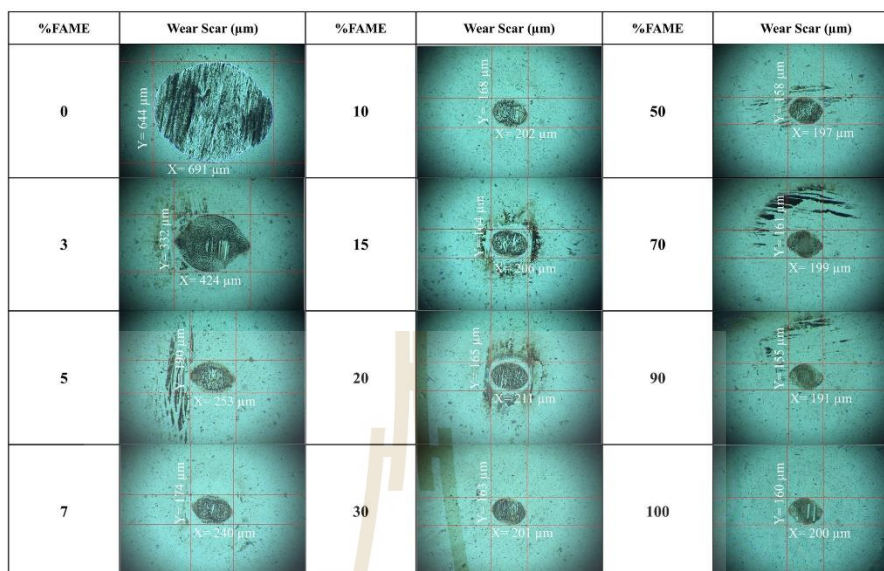


Fig. 6 Microscopy images of wear scar on the ball of the blended fuels of FAME in BHD.

indicates the formation of a protective layer on the metal surface to prevent wear, was observed to be between 96–98% for the range of FAME concentrations studied. Careful consideration is necessary when quantifying the film percentage utilizing electrical contact potential (ECR) due to the potential for misleading outcomes caused by dust or wear on the disc's surface. It is crucial to acknowledge these factors and take appropriate measures to ensure the accuracy of the ECR measurement.^{39,40} Microscopic analysis of wear scars on ball bearings for blended biofuels, as shown in Fig. 6, indicates that the inclusion of 3–5% FAME in BHD blend results in a significant reduction in wear scar diameter as compared to that observed with pure BHD. Further, it is observed that the wear scar diameter remains stable at concentrations of 10% FAME and above.

These results highlight the potential of biofuel blends in mitigating the adverse effects of wear and tear in machinery and equipment. It is imperative to conduct further research in this area to fully understand the mechanism behind this observation and optimize the use of biofuels in industrial applications. When analysing the stability of thin film creation in lubrication processes, several illustrative systems are depicted in Fig. 7. These systems display a notable increase in the speed of thin film formation, reaching over 95% formation in 10–15 minutes. This can be attributed to the chemical properties of unsaturated fatty acids present in FAME, which adhere to the surface of stainless-steel specimens and create a layer that resembles

a film under the area of friction. It is worth noting that the concentration of FAME has a significant impact on the process of film formation, with higher concentrations resulting in a faster and more effective stabilization of the film. Therefore, an increase in the percentage of FAME addition leads to an accelerated process of film formation and improved film stability. The analysis of the worn surface of engine components is a crucial tool for understanding the mechanisms of wear and degradation in diesel engines. According to Swain *et al.* in 2021,

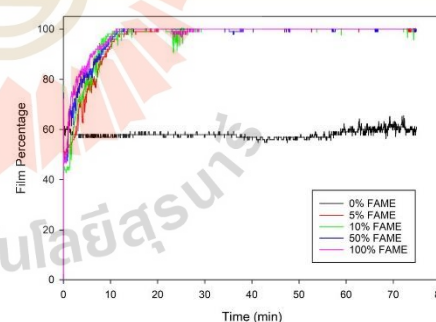


Fig. 7 Evolution of film formation under the lubrication process of BHD with different concentration of FAME addition.

the surface morphology and topography of worn surfaces can identify the types of wear that have occurred, such as abrasive wear, adhesive wear, or fatigue wear.⁴¹

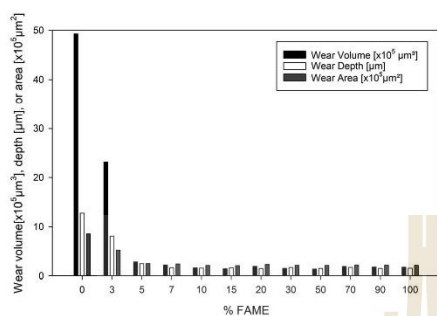


Fig. 8 Variation of wear volume, wear depth, and wear area with of the blended fuels of FAME in BHD.

Additionally, analysing the chemical composition of the worn surface can provide insight into the mechanisms of deposit formation and corrosion that can lead to engine damage.⁴² In the context of FAME blending with BHD in diesel engines, examining the worn surface of engine components with different percentages of FAME can provide valuable information on the impact of FAME blending on engine wear and degradation. By comparing the surface morphology and chemical composition of the worn surfaces, we can identify any differences in wear patterns or deposit formation that may be attributed to the use of FAME blends. This information can be useful in developing strategies to minimize engine wear and improve engine performance and longevity.⁴⁰

Fig. 8 portrays wear volume, wear area, and wear depths on worn surfaces, whereby wear depth measurements were acquired by identifying the minimum position on the wear scar. The outcomes indicated a reduction in wear depth proportional to the increase in FAME concentration. The reduction was marginal until a stable level was achieved at 10% FAME. The outcomes align with the findings in Fig. 4, which indicate a positive correlation between wear scar diameter and FAME

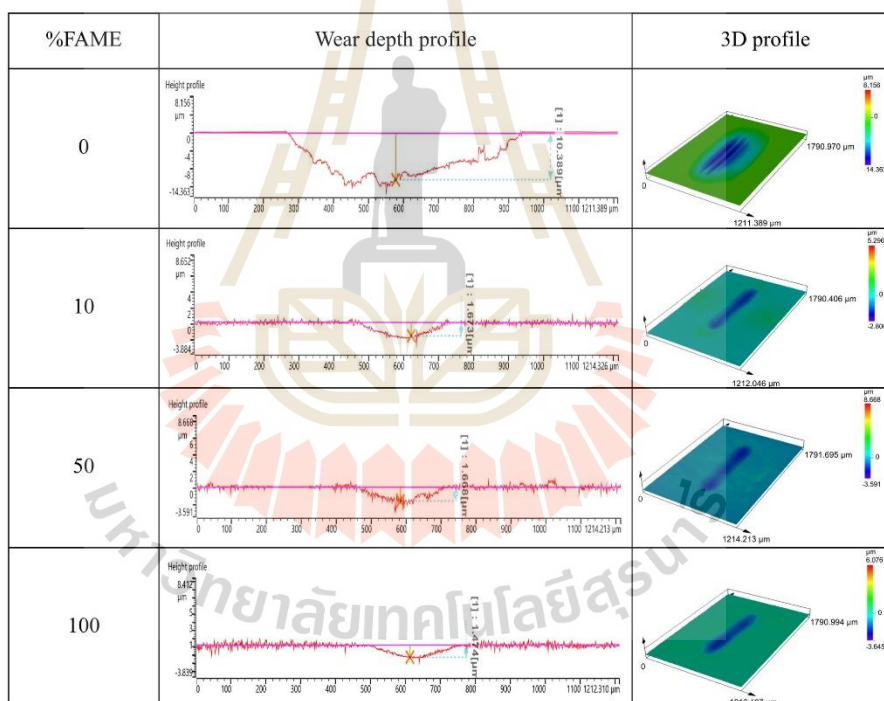


Fig. 9 Selected depiction of depth and 3D profiles of worn surface on the disc for the blended fuels of FAME in BHD.

concentration. Thus, the incorporation of FAME into BHD's composition contributes to the enhancement of its lubricating property. Fig. 9 presents comprehensive data on the wear depth and 3D profiles of the worn surface on the disc, obtained using the LEXT OLS 5100 imaging system. Specifically, the wear depth values for a concentration of 0% FAME, 10% FAME, 50% FAME, and 100% FAME were measured at 10.389 μm , 1.683 μm , 1.661 μm , and 1.474 μm respectively, under conditions of reciprocated rubbing of the ball against the disc. Notably, the 3D profile analysis of the worn surface also revealed a decrease in the depth of wear scars with an increase in FAME concentration. This phenomenon can be attributed to the significant protection provided by the tribofilm, assisted by the presence of unsaturated molecules in FAME, on the stainless-steel contact surface. The experimental findings in this study are consistent with the outcomes of Ruggiero *et al.*, who carried out a comprehensive investigation on the tribological properties of fatty acid methyl esters (FAME).¹¹ Sulek *et al.* reported data on surface roughness, depth of wear and 2D profiles of the worn surface, as well as the impact of FAME concentration on the wear depth.⁴³ Their study showed that the unsaturated molecules in FAME produce a tribofilm that offers considerable protection on the contact surface of stainless steel, leading to

a reduction in friction and wear. Fig. 10 presents the scanning electron microscopy (SEM) images of the worn surface on the disc. SEM images indicate the presence of abrasive wear, which is a common phenomenon during the HFRR test, resulting from the intermingling of hard particles between the ball and the disc, as well as debris formation.³³ The SEM images portray the full worn surface at 60 \times and 5000 \times magnification. The addition of FAME leads to an improvement in lubricating properties, thus decreasing the area of worn surface in comparison to the worn surface of the disc under 0% FAME (pure BHD).

Significantly, an increase in the percentage of FAME resulted in the appearance of black residues around the worn surface of the disc. Further, an energy-dispersive spectrometer (EDS) analysis reveals the formation of waxy carbon on the disc, which could be attributed to heat generation during the test.^{44,45} In the worn surface of the disc under 0% FAME, wear debris was clearly discovered. An increase in the percentage of FAME added to bio-hydrogenated diesel has been found to result in a worn surface that appears smoother and shows reduced delamination and debris when compared to the worn surface of pure BHD. However, with the increase in the FAME concentration, the worn surface's smoothness significantly improves. The FT-IR spectra depicted in Fig. 11 shows the results of examining the chemical compounds present on and around the worn surface of a blended fuels with varying concentrations of FAME in BHD. The spectra show several peaks representing various chemical bonds and functional groups. The broad peak at around 3400 cm^{-1} corresponds to the stretching vibrations of the O-H bonds present in the carboxylic acids in the FAME. The peak at around 2950 cm^{-1} is attributed to the C-H stretching vibrations of the methyl and methylene groups in both the FAME and the BHD.

This suggests a decrease in the amount of alkyl groups in the sample, possibly due to the presence of FAME. This observation is consistent with the findings of previous studies, which have also reported a decrease in the intensity of this peak with an increase in the percentage of FAME in biodiesel blends.^{46,47} The peak at around 1740 cm^{-1} is associated with the stretching

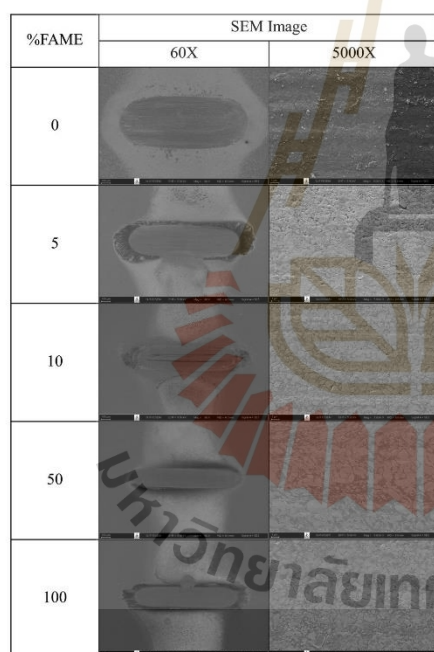


Fig. 10 Images of worn surface on the disc taken by scanning electron microscopy.

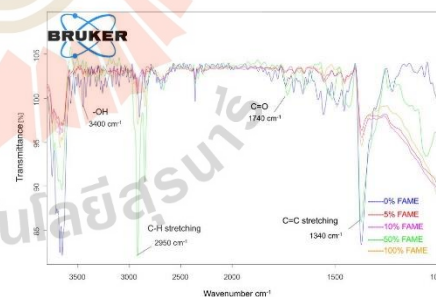


Fig. 11 FT-IR spectra across the worn surface on the disc for the blended fuels of FAME in BHD.

vibrations of the C=O bond in the ester groups present in the FAME.

The intensity of the peak at around 1740 cm^{-1} increases with increasing FAME concentration, indicating a higher concentration of ester groups in the sample. This increase in ester concentration may enhance the lubricating properties of the blend due to the polar nature of the ester groups. This is consistent with the presence of more ester groups in the sample, as FAME is a type of esters. Previous studies have also reported a similar trend in the FT-IR spectra of biodiesel blends, which is in agreement with this observation.^{46,47} Additionally, the appearance of peaks at around 1600 cm^{-1} and 1340 cm^{-1} , which are attributed to the C=C stretching vibrations and the bending vibrations of the CH_2 groups, respectively, suggests the presence of unsaturated fatty acids in the FAME. The formation of deposit compounds from FAME blending with BHD during the lubrication process in diesel engines is a common issue that can negatively impact engine performance and longevity. Hydrocarbon deposits can accumulate on the worn surfaces of engine components, which can interfere with proper lubrication and increase friction between moving parts. This can lead to increased wear and tear on the engine, reducing its efficiency and potentially causing damage over time. Several studies have investigated the impact of FAME blending with BHD on deposit formation in diesel engines. One study found that the use of biodiesel blends containing FAME resulted in higher deposit formation on the engine components compared to pure diesel fuel.⁴⁸ Another study showed that the presence of FAME in the fuel resulted in increased deposit formation on the piston crown and cylinder head of the engine.⁴⁹ To minimize the formation of deposits in diesel engines, several strategies have been proposed. One approach is to use high-quality fuel and lubricants that are specifically designed to reduce deposit formation. Another approach is to implement regular maintenance and cleaning of the engine components to prevent the build-up of deposit compounds. Additionally, some studies have suggested the use of fuel additives, such as detergents and dispersants, to reduce the formation of deposits in the engine.⁵⁰

4. Conclusions

In conclusion, this study demonstrates that the addition of fatty acid methyl esters (FAME) to bio-hydrogenated diesel (BHD) can improve its fuel properties. BHD mainly consists of paraffin hydrocarbons, while FAME contains unsaturated hydrocarbons that enhance lubrication and reduce friction. Mixing FAME into BHD can improve lubricating properties and specific gravity but reduces cetane index because of the diluting effect. FAME concentration positively correlates with lubricity and reduces friction and wear, with aliphatic fatty acids and trace components such as monoglycerides and diglycerides contributing to film formation and enhanced lubricity. Biofuel blends can mitigate adverse wear effects in machinery, with unsaturated fatty acids in FAME accelerating the formation of thin films in lubrication processes.

Analysing worn surfaces with different FAME percentages can inform strategies for minimizing engine wear and

improving performance, with FAME incorporation into BHD enhancing its lubricating properties and leading to reduced wear depth and smoother worn surfaces. The study identifies the presence of abrasive wear and black residues, with carbon formation and wear debris reduced at higher FAME concentrations. However, increasing FAME concentration leads to higher deposit formation on worn surfaces. Further research is needed to optimize the use of blended biofuels in industrial applications. The forthcoming research endeavors will aim to establish a correlation between the black residue that forms on a worn surface as a result of oxidation reactions, and the deposition of material within engine components.

Author contributions

The study was conceptualized by AM and ES, who were instrumental in securing the necessary financial resources to undertake the research. Additionally, they contributed to the editorial process to enhance the manuscript's quality. SS conducted tribology experiments using advanced equipment and provided insightful commentary on the initial manuscript draft, enriching the quality of the final product. NK contributed to the testing of fuel properties and offered valuable insights and commentary on the relevant sections of the manuscript.

Conflicts of interest

There are no conflicts to declare.

Acknowledgements

This work was financially supported by Office of National Higher Education Science Research and Innovation Policy Council, and Thailand Science Research and Innovation (TSRI), through Program Management Unit for Competitiveness (PMU-C), PTT Exploration and Production Public Co., Ltd., Cherdchai Corporation Co., Ltd., Polawat Engine Co., Ltd., and Verasuwan Co., Ltd., grant no. C04F660060. This work was also supported by (i) Suranaree University of Technology (SUT), (ii) Thailand Science Research and Innovation (TSRI), and (iii) National Science, Research and Innovation Fund (NSRF) through Fundamental Fund, grant no. 160346. The co-author, SS, also wishes to express gratitude to Suranaree University of Technology for generously providing a grant in support of her pursuit of a Master's degree.

References

- 1 E. Long and C. Carlsten, *Part. Fibre Toxicol.*, 2022, **19**, 11.
- 2 H. Masjuki, A. M. Zaki and S. M. Sapuan, *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 1993, **70**, 1021–1025.
- 3 R. Caprotti, T. Tang, N. Ishibe, R. In-ochanon, C. Tipdecho and S. Silapakampeerapap, *SAE [Tech. Pap.]*, 2011, 2011-01-1953.
- 4 T. Hartikka, M. Kuronen and U. Kiiski, *SAE [Tech. Pap.]*, 2012, **9**, 2012-01-1585.

- 5 H. Aatola, M. Larmi, T. Sarjovaara and S. Mikkonen, *SAE Int. J. Engines*, 2009, **1**, 1251–1262.
- 6 E. Sukjit and K. D. Dearn, *Wear*, 2011, **271**, 1772–1777.
- 7 M. Lapuerta, M. Villajos, J. R. Agudelo and A. L. Boehman, *Fuel Process. Technol.*, 2011, **92**, 2406–2411.
- 8 M. S. N. Awang, N. W. M. Zulkifli, M. M. Abbas, S. A. Zulkifli, M. A. Kalam, M. N. A. M. Yusoff, W. M. A. W. Daud and M. H. Ahmad, *Alexandria Eng. J.*, 2022, **61**, 7221–7231.
- 9 M. Happonen, J. Heikkilä, P. Aakko-Saksa, T. Murtonen, K. Lehto, A. Rostedi, T. Sarjovaara, M. Larmi, J. Keskinen and A. Virtanen, *Fuel*, 2013, **103**, 380–386.
- 10 M. A. Hazrat, M. G. Rasul and M. M. K. Khan, *Energy Procedia*, 2015, **75**, 111–117.
- 11 A. Ruggiero, R. D'Amato, M. Merola, P. Valašek and M. Müller, *Tribol. Int.*, 2017, **109**, 529–540.
- 12 N. A. Fathurrahman, A. S. Auzani, R. Zaclani, R. Anggarani, L. Aisyah, Maymuchar and C. S. Wibowo, *Lubricants*, 2023, **11**, 176.
- 13 S. Nupung, P. Oosterveer and A. P. J. Mol, *Energy Sci. Eng.*, 2018, **6**, 643–657.
- 14 Z. Liu, F. Li, J. Shen and h. Wang, *Energy Sustainable Dev.*, 2019, **52**, 33–39.
- 15 EN ISO 12156-1, *Diesel fuel: assessment of lubricity using the high frequency reciprocating rig (HFRR)-Part 1: test method*, Belgium, European Committee for Standardization, Brussels, 2018.
- 16 J. M. Bergthorson and M. J. Thomson, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2015, **42**, 1393–1417.
- 17 N. Hongloi, P. Prapainainar and C. Prapainainar, *Mol. Catal.*, 2021, **523**, 111696.
- 18 N. A. Zainal, N. W. M. Zulkifli, M. Gulzar and H. H. Masjuki, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2018, **82**, 80–102.
- 19 N. A. Masripan, M. A. Salim, G. Omar, M. R. Mansor, A. M. Saad, N. A. Hamid, M. I. Syaki and F. Dai, *Int. J. Nanoelectron. Mater.*, 2020, **13**, 161–176.
- 20 R. Gusain, A. Khan and O. P. Khatri, *J. Mol. Liq.*, 2020, **301**, 112322.
- 21 A. Q. Mairizal, S. Awad, C. R. Priadi, D. M. Hartono, S. S. Moersidik, M. Tazerout and Y. Yves, *Renewable Energy*, 2020, **145**, 375–381.
- 22 P.-C. Chen, W.-C. Wang, W. L. Roberts and T. Fang, *Fuel*, 2013, **103**, 850–861.
- 23 J. Milano, A. H. Shamsuddin, A. S. Silitonga, A. H. Sebayang, M. A. Siregar, H. H. Masjuki, M. A. Pulungan, S. R. Chia and M. F. M. A. Zamri, *Energy Rep.*, 2022, **8**, 1578–1590.
- 24 M. Tongroon, A. Suebwong, M. Kananont, J. Aunchaisri and N. Chollacoop, *Renewable Energy*, 2017, **113**, 660–668.
- 25 N. Usta, E. Öztürk, Ö. Can, E. S. Çonkur, S. Nas, A. H. Çon, A. Ç. Can and M. Topcu, *Energy Convers. Manage.*, 2005, **46**, 741–755.
- 26 R. O. Dunn, *Trans. ASABE*, 2011, **54**, 571–579.
- 27 H. Fang, S. Whitacre, E. Yamaguchi and M. Boons, *SAE [Tech. Pap.]*, 2007, 2017–01–4141.
- 28 R. A. Candeia, M. C. D. Silva, J. R. Carvalho Filho, M. G. A. Brasilino, T. C. Bicudo, I. M. G. Santos and A. G. Souza, *Fuel*, 2009, **88**, 738–743.
- 29 D. Kim, S. Kim, S. Oh and S.-Y. No, *Fuel*, 2014, **125**, 36–43.
- 30 S. Jaroonsitsathian, C. Tipdecho, P. Sukajit, N. Namthirach and S. Suppatvech, *SAE [Tech. Pap.]*, 2013, **1**, 2013–01–0070.
- 31 S. Loganathan, in *Innovations in Fuel Economy and Sustainable Road Transport*, 2011, pp. 97–107.
- 32 E. Sukjit, M. Tongroon, N. Chollacoop, Y. Yoshimura, P. Poapongsakorn, M. Lapuerta and K. D. Dearn, *Wear*, 2019, **426–427**, 813–818.
- 33 K. Sugiyama, I. Goto, K. Kitano, K. Mogi and M. Honkanen, *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, 2012, **5**, 205–217.
- 34 M. A. Fazal, A. S. M. A. Haseeb and H. H. Masjuki, *Energy Convers. Manage.*, 2013, **67**, 251–256.
- 35 H. H. Masjuki and M. A. Maleque, *Wear*, 1996, **198**, 293–299.
- 36 U. S. Choi, B. G. Ahn, O. K. Kwon and Y. J. Chun, *Tribol. Int.*, 1997, **30**, 677–683.
- 37 K. Wadumesthrige, M. Ara, S. O. Salley and K. Y. Simon Ng, *Energy Fuels*, 2009, **23**, 2229–2234.
- 38 Y. Singh, A. Singla, A. K. Singh and A. K. Upadhyay, *Biofuels*, 2018, **9**, 523–530.
- 39 S. M. Campen, *Imperial College London for the degree of Doctor of Philosophy*, 2012.
- 40 F. T. Hong, E. Singh and S. M. Sarathy, *Fuel*, 2021, **302**, 121135.
- 41 B. Swain, S. K. Bhuyan, R. Behera, S. S. Mohapatra and A. Behera, in *Tribology in Materials and Manufacturing - Wear, Friction and Lubrication 2021*.
- 42 A. M. Liaquat, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, M. A. Fazal, A. F. Khan, H. Fayaz and M. Varman, *Applied Energy*, 2013, **111**, 882–893.
- 43 M. W. Sulek, A. Kulczycki and A. Malysa, *Wear*, 2010, **268**, 104–108.
- 44 E. Sukjit, K. Dearn and A. Tsolakis, *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, 2012, **5**, 154–162.
- 45 E. Sukjit, J. M. Herreros, K. D. Dearn, R. Garcia-Contreras and A. Tsolakis, *Energy*, 2012, **42**.
- 46 A. Oyerinde and E. Bello, *Br. J. Appl. Sci. Technol.*, 2016, **13**, 1–14.
- 47 H. Feld and N. Oberender, *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, 2016, **9**, 717–724.
- 48 M. Alves-Fortunato, E. Ayoub, K. Bacha, A. Mouret and C. Dalmazzone, *Fuel*, 2020, **268**, 117074.
- 49 A. T. Hoang and A. T. Le, *Energy Sources, Part A*, 2018, **41**, 584–599.
- 50 G. Żak, L. Ziemiański, Z. Stepień and M. Wojtasik, *Fuel*, 2014, **122**, 12–20.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวสรลพร ศรีประทุม เกิดเมื่อวันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2541 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนบุญเหลือวิทยานุสรณ์ จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2560 ได้เข้าศึกษาปริญญาตรีในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำเร็จการศึกษาระดับบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) ในปีการศึกษา 2564 โดยทำโครงการวิศวกรรมเคมีเรื่องการศึกษากระบวนการผลิตและคุณลักษณะของน้ำมันชีวภาพจากต้นปาล์มและต้นกระถินจากกระบวนการไพโรไลซิส และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2564 โดยทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการหล่อลื่นของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ อาทิเช่นปัจจัยจากความเข้มข้น โหลด เวลา ความชื้น และ อุณหภูมิ รวมไปถึงทดสอบสมบัติพื้นฐานของน้ำมันเชื้อเพลิง และ สารประกอบทางเคมี นอกจากนี้ในระหว่างการศึกษาได้รับผิดชอบในการเป็นผู้ช่วยสอนในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ทำให้ได้ทบทวนความรู้ ฝึกทักษะการบริหารเวลาและการแก้ไขปัญหา และได้รับโอกาสในการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติในงาน 3rd Korea-Tribology International Symposium (K-TRIB 2023) ระหว่างวันที่ 2 – 5 เมษายน พ.ศ. 2563 ณ เมืองปูซาน สาธารณรัฐเกาหลีใต้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี