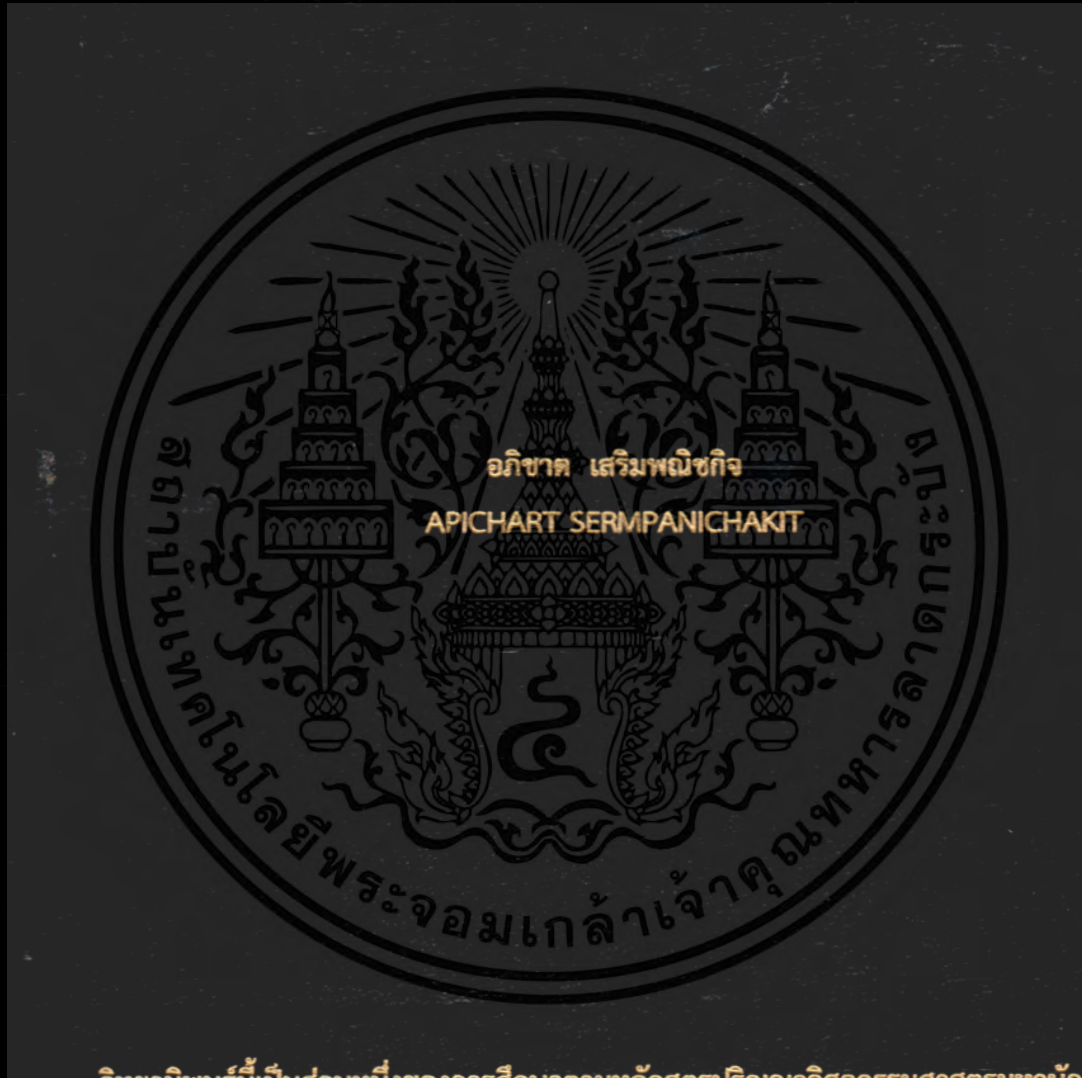


การปรับปรุงน้ำมันปาล์มใช้แล้วเพื่อใช้เป็นน้ำมันไฮดรอลิก

IMPROVEMENT OF USED PALM OLEIN FOR HYDRAULIC FLUID APPLICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-030-042

# การปรับปรุงน้ำมันปาล์มใช้แล้วเพื่อใช้เป็นน้ำมันไฮดรอลิก

## IMPROVEMENT OF USED PALM OLEIN FOR HYDRAULIC FLUID APPLICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-030-042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# IMPROVEMENT OF USED PALM OLEIN FOR HYDRAULIC FLUID APPLICATION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

KMITL-2018-EN-M-030-042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2018**



**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงน้ำมันปาล์มใช้แล้วเพื่อใช้เป็นน้ำมันไฮดรอลิก  
Thesis Title Improvement of Used Palm Olein for Hydraulic Fluid Application  
นักศึกษา นายอภิชาติ เสริมพณิชกิจ  
รหัสประจำตัว 56601144  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-030-042

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.พรชัย	นิเวศน์รังสรรค์	
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์	พิมสาร	
ผศ.ดร.อุนนต์	พิณโสภณ	
ผศ.ดร.เอกพจน์	ตันตกรวิวัฒน์	
รศ.ดร.จำลอง	ปราบแก้ว	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2561 เวลา 13.30-15.30 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 4 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมตัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุง น้ำมันปาล์มใช้แล้วเพื่อใช้เป็น น้ำมันไฮดรอลิก
นักศึกษา	นายอภิชาติ เสริมพณิชกิจ
รหัสประจำตัว	56601144
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว

### บทคัดย่อ

น้ำมันพืชใช้เป็นส่วนผสมในน้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันไฮดรอลิก เพราะมีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดี ไม่เป็นพิษและย่อยสลายเองได้ จึงสามารถทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมที่มีอย่างจำกัด แต่ยังไม่พบว่ามีหรือน้ำมันพืชใช้แล้วมาพัฒนาต่อยอดเป็นน้ำมันไฮดรอลิก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ใช้แล้วผ่านการใช้ทอดปาท่องโก๋ นำมาผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันและเติมสารเติมแต่ง แล้วจึงทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีและโทรโบลอจีด้วยโทรโบมิเตอร์ CSM แบบ Ball-on-Disk และเปรียบเทียบกับน้ำมันไฮดรอลิกมาตรฐาน ISO VG 46 และ VG 68 จากการทดสอบน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ใช้แล้วนี้มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.586% หลังจากผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันและเติมสารเติมแต่ง 5% โดยน้ำหนักของเอทิลีน-ไวนิล อะซิเตท โพลีเอไมด์ (EVA) ในเมทิลเอสเทอร์ จากผลการทดสอบน้ำมันผ่านกระบวนการดังกล่าวพบว่าความหนืดจลน์เพิ่มจาก 5.81 cSt เป็น 48.6 cSt ที่ 40°C ส่วนค่าความหนืดจลน์ที่ได้อยู่ในช่วงขอบเขตงานวิจัย ส่วนค่าดัชนีความหนืดและจุดวาบไฟอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.977-2551 แต่ผลจุดไหลเทและคุณสมบัติเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันยังไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.977-2551 สำหรับผลคุณสมบัติโทรโบลอจี สูตร BIOD+EVA5+AW ให้ผลดีที่สุดมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเฉลี่ยและปริมาตรการสึกหรอ 0.109 และ 0.0677 mm<sup>3</sup> ตามลำดับ เมื่อเทียบผลการหล่อลื่นและต้านทานการสึกหรอดีกว่าน้ำมันไฮดรอลิก ISO VG68 ซึ่งมีค่า 0.374 และ 0.155 mm<sup>3</sup> การประเมินต้นทุนในการปรับปรุงน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นชนิด BIOD+EVA5+AW มีค่าประมาณ 33.91 บาทต่อลิตร ขณะที่ราคาในตลาดของน้ำมันไฮดรอลิก ISO VG 46 และ ISO VG 68 ประมาณ 50-60 บาทต่อลิตร การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการพัฒนาน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ใช้แล้วด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันและเติมสารเติมแต่ง EVA 5% โดยน้ำหนักมีศักยภาพที่จะนำมาใช้แทนน้ำมันไฮดรอลิกตามมาตรฐาน ISO VG46 และ VG 68 ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis</b>	Improvement of Used Palm Olein for Hydraulic Fluid Application
<b>Student</b>	Mr. Apichart Sermpnichakit
<b>Student ID.</b>	56601144
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2018
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr.Chamlong Prabkeao

## ABSTRACT

The plant oil is an ingredient into lubrication and hydraulic fluid because of good lubricating properties, non-toxic and biodegradability to substitute for the petroleum-based oil that has limited resources; but, there was no any researches to study in using of the used vegetable oil developed to be a hydraulic fluid. Therefore, the aim of this work is to develop of used palm olein from frying the deep-fired dough stick, then through transesterification process and additive, the physico-chemical properties and tribology performances by CSM Tribometer Ball-on-Disk and comparing to hydraulic oil ISO VG 46 and VG 68 was investigated. For the result, free fatty acid of the used palm olein was 0.586% and then through transesterification process with 5% wt of ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA) as the additive into methyl ester. It has been found that the kinematic viscosity could increase from 5.81 to 48.6 cSt at 40°C. Viscosity index and flash point was a good result and met to Thai Industry Standard (TIS977-2551); while the pour point and oxidation stability did not meet the standard. For tribology result, BIOD+EVA5+AW is the best one, the coefficient of friction and wear volume are 0.109 and 0.0677 mm<sup>3</sup> respectively; and are better lubricity, more wear resistance than hydraulic oil ISO VG68 as 0.374 และ 0.155 mm<sup>3</sup> respectively. The cost estimation of BIOD+EVA5+AW is around 33.91 Baht per liter, while the market price of hydraulic oil ISO VG 46 and VG68 is around 50-60 Baht per liter. This study is indicated in the used palm olein through transesterification process with 5% wt EVA as a good potential and a substitute for hydraulic oil ISO VG 46 and VG 68.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว ที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษาแนะนำ การแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้พิจารณารายละเอียดงานวิจัยเล่มนี้ และได้ให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงส่วนต่างๆ ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือที่อนุเคราะห์การทดสอบสมบัติกายภาพของน้ำมัน

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. รัตน์พล มงคลรัตนาสีทธิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เอ็ม อีทีโออุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการเคมี

ขอขอบคุณ อาจารย์จีราภรณ์ ศรีประเสริฐ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แนะนำและให้ความรู้การทดสอบโทรโบลีย์ด้วยเครื่อง CSM Tribometer

สุดท้ายต้องขอขอบคุณภรรยาของข้าพเจ้า คุณภคมน ไพโรจน์วิริยะกุล ที่เป็นเสมือนคู่คิดและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

อภิชาติ เสริมพณิชกิจ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทน วน.....	1
1.1 ความสาคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.5 ผลที่ได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศ.....	14
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	17
3.1 โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันปาล์ม.....	17
3.2 น้ำมันปาล์มใช้แล้ว.....	18
3.3 การเสื่อมสภาพของน้ำมันวัตถุดิบ.....	19
3.3.1 การเกิดกรดไขมันอิสระ.....	19
3.3.2 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....	19
3.3.3 สะปอนนิฟิเคชัน.....	20
3.3.4 กลไกการเกิดการเสื่อมสภาพในน้ำมันดักซ์ปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....	20
3.4 ค่าความเป็นกรด.....	21
3.5 การผลิตเมทิลเอสเทอร์.....	22
3.6 ระบบไฮดรอลิก.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเพียงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6.1 ระบบไฮดรอสแตติกและไฮดรอดนามิก.....	23
3.6.2 กาลังของของไหล.....	24
3.6.3 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบไฮดรอลิก.....	24
3.7 น้ำมันไฮดรอลิก.....	26
3.7.1 หน้าที่ของน้ำมันไฮดรอลิก.....	27
3.7.2 คุณภาพที่ต้องการในน้ำมันไฮดรอลิก.....	27
3.7.3 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันไฮดรอลิก.....	28
3.7.4 คุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันไฮดรอลิก.....	33
3.8 โมดูลัสของแรงบีบอัด.....	33
3.9 ไทโรโบโลยี.....	34
3.9.1 ความเสียดทาน.....	35
3.9.2 การสึกหรอ.....	35
3.9.3 การหล่อลื่น.....	36
บทที่ 4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	38
4.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	38
4.2 วัสดุ.....	38
4.2.1 วัสดุดิบ.....	38
4.2.2 สารเคมี.....	40
4.3 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์.....	40
4.3.1 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน.....	40
4.3.2 เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี.....	41
4.3.3 เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติไทโรโบโลยี.....	43
4.3.4 เครื่องมือวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์.....	45
4.3.5 การคำนวณหาปริมาตรการสึกหรอบนบอล.....	46
4.4 วิธีการดำเนินงาน.....	46
4.4.1 ขั้นตอนการกรองสิ่งสกปรกและกำจัดคาบวมขึ้นในน้ำมันพืชใช้แล้ว.....	46
4.4.2 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน.....	46
4.4.3 ขั้นตอนการเติมสารเติมแต่ง เอพทีลีน-ไวนิล อะซิเตท โคโพลีเมอร์หรือ EVA.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.4 ขั้นตอนการตีพิมพ์ป้องกันลิขสิทธิ์ (AW) .....	47
4.4.5 น้ำมันไฮดรอลิกที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัย.....	49
4.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมี.....	50
4.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติโทรโพลยี.....	50
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	51
5.1 ผลการดัดไขมันอิสระ.....	51
5.2 ผลปริมาณ EVA ต่อความหนืดจลน์.....	51
5.3 ผลดัชนีความหนืด.....	54
5.4 ผลจุดวาบไฟ.....	54
5.5 ผลจุดไหลเท.....	55
5.6 ผลความเป็นกรด.....	56
5.7 ผลสมบัติเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....	57
5.8 ผลสมบัติโทรโพลยี.....	57
5.8.1 ผลสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน.....	57
5.8.2 ผลการสึกกร่อน.....	58
5.9 การประเมินต้นทุน.....	60
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	61
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	61
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	61
เอกสารอ้างอิง.....	63
ภาคผนวก ก. ผลทดสอบจากกรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ.....	68
ภาคผนวก ข. ผลทดสอบจากกรมวิทยาศาสตร์บริการ.....	71
ภาคผนวก ค. ผลทดสอบจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.....	75
ภาคผนวก ง. ผลทดสอบจากสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	81
ภาคผนวก จ. มาตรฐานสินค้า.....	86
ภาคผนวก ฉ. บทความที่ตีพิมพ์และเผยแพร่.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

ประวัติผู้เขียน.....	หน้า 111
----------------------	-------------



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และขอย้ำอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สูตรน้ำมันไฮดรอลิกจากงานวิจัย Mendoza และคณะ.....	6
2.2 ผลการย่อยสลายทางชีวภาพและพิษวิทยาจากงานวิจัย Mendoza และคณะ.....	7
4.1 องค์ประกอบและสารเติมแต่งใน DUPH.....	49
4.2 รายการและมาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมี รวมถึงห้องปฏิบัติการที่ทดสอบ.....	50
4.3 เงื่อนไขการทดสอบด้วยเครื่องไทรโบมิเตอร์ CSM แบบ Ball-on-Disk.....	50
5.1 ค่าความเป็นกรดและเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ (%FFA).....	51
5.2 แสดงผลความหนืดจลน์ 40°C และ 100°C ของ DUPH.....	53
5.3 ผลค่าความเป็นกรด.....	56
5.4 สมบัติเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....	57
5.5 คำนวณต้นทุนของ BIOD+EVA5+AW.....	60

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.1 ค่าความหนืดไดนามิกส์กับอุณหภูมิของ HOSO, CO และ HOSO/CO ผสมกับ 4% โดยน้ำหนักของ EVA จากงานวิจัย Quinchia และคณะ.....	5
2.2 กราฟ COF กับอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นจากงานวิจัย Golshokouh และคณะ.....	7
2.3 ผล COF กับเวลาของน้ำมันไฮดรอลิกในงานวิจัยของ Mendoza และคณะ.....	7
2.4 ลักษณะและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการสึกหรอแต่ละสูตรน้ำมันไฮดรอลิก จากงานวิจัย Mendoza และคณะ.....	8
2.5 เครื่องไทรโบมิเตอร์แบบ pin-on-disk จากงานวิจัย Syahrullail และคณะ.....	9
2.6 ลักษณะผิวที่สึกหรอหล่อลื่นโดย RBD และ HO ที่ความเร็ว 4 m/s ใช้เวลา 3600 วินาที จากงานวิจัย Syahrullail และคณะ.....	9
2.7 อุปกรณ์ ball-on-flat Reciprocatory จากงานวิจัย Alessandro และคณะ.....	10
2.8 กราฟแท่งแสดง COF ของน้ำมันทั้ง 3 ที่ความถี่ 10 กับ 20 Hz ด้วยน้ำหนักกดทับ a) 10 N และ b) 19 N จากงานวิจัย Alessandro และคณะ.....	11
2.9 กราฟแท่งแสดงปริมาตรการสึกหรอของน้ำมันทั้ง 3 ที่ความถี่ 10 กับ 20 Hz ด้วยน้ำหนักกดทับ a) 10 N และ b) 19 N จากงานวิจัย Alessandro และคณะ.....	11
2.10 กราฟแท่งความขรุขระพื้นผิวบนบอลหลังจากทดสอบไทรโบโลยี ที่ความถี่ 10 กับ 20 Hz ด้วยน้ำหนักกดทับ a) 10 N และ b) 19 N จากงานวิจัย Alessandro และคณะ.....	11
2.11 เครื่องวัดความเสียหายแบบ Ball-on-disk จากงานวิจัย Adhvaryu และคณะ.....	12
2.12 ค่า COF ของน้ำมันพืชและอนุพันธ์ของน้ำมันพืชที่ความเข้มข้น 0.07 M โดยใช้ความเร็ว สไลด์ 6.22 mm/s และน้ำหนักกดทับ 1778 N จากงานวิจัย Adhvaryu และคณะ.....	12
2.13 แนวทางการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน/ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน , estiolide formations และ epoxidation ของน้ำมันพืชจากงานวิจัย Josiah.....	13
2.14 โมดูลัสของแรงบีบอัดแบบไอเซนโทรปิกของเมทิลเอสเทอร์, เอทิลเอสเทอร์จากน้ำมัน ถั่วเหลืองและน้ำมันดีเซลเบอร์ 1 และเบอร์ 2 จากงานวิจัย Mustafa และคณะ.....	14
2.15 เครื่อง High Frequency Reciprocating Rig (HFRR) ของงานวิจัย Kiatkong และคณะ.....	14
2.16 อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์ปนเปื้อนบน Engine oil มีต่อขนาดสึกหรอบนชิ้นส่วนทดสอบของ งานวิจัย Kiatkong และคณะ.....	15
3.1 สูตรโครงสร้างไตรกลีเซอไรด์.....	17
3.2 ตัวอย่างกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส.....	18
3.4 ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน.....	20
3.5 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน.....	22
3.6 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	23
3.7 ส่วนประกอบของระบบไฮดรอลิก.....	25
3.8 ส่วนประกอบของระบบไฮดรอลิก (แบบเชิงสัญลักษณ์).....	26
3.9 ความหนืดสัมพันธ์กับการสูญเสียในระบบไฮดรอลิก.....	28
3.10 การพิจารณาค่าความหนืดสมบูรณ์.....	29
3.11 ความสัมพันธ์ความหนืดจลน์-อุณหภูมิกับเกรดน้ำมันไฮดรอลิก ISO.....	31
3.12 โมดูลัสของแรงบีบอัดของของไหล.....	34
3.13 แรงกระทำ เทียบกับเวลา.....	35
3.14 Stribeck diagram.....	37
4.1 การดำเนินการวิจัย.....	39
4.2 วัตถุประสงค์ในการทดลอง.....	40
4.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	41
4.4 อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการเคมี.....	42
4.5 อุปกรณ์วัดความหนืด.....	42
4.6 อุปกรณ์วัดจุดวาบไฟ.....	43
4.7 เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ.....	43
4.8 อุปกรณ์วัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....	44
4.9 ไทโรโบมิเตอร์ CSM แบบ Ball-on-Disk .....	44
4.10 ชิ้นส่วนทดสอบบอลและดิสก์.....	45
4.11 การสอบเทียบเครื่องไทโรโบมิเตอร์.....	45
4.12 ชุดกล้องจุลทรรศน์.....	45
4.13 ลักษณะการสึกหรอบนบอล.....	46
4.14 ขั้นตอนการสังเคราะห์ไบโอดีเซล (BIOD) หรือเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันพืชใช้แล้ว ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	48
4.15 น้ำมันไฮดรอลิกที่พัฒนาจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ใช้แล้วหรือ DUPH.....	49

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 กราฟความหนืดจลน์ ที่ 40°C กับปริมาณ EVA.....	52
5.2 กราฟความหนืดจลน์ ที่ 100°C กับปริมาณ EVA.....	53
5.3 แผนภูมิแท่งแสดงผลดัชนีความหนืด.....	54
5.4 แผนภูมิแท่งแสดงผลจุดวาวไฟ.....	55
5.5 แผนภูมิแท่งแสดงผลจุดไหลเท.....	56
5.6 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับเวลา.....	58
5.7 ภาพการสึกหรอของบอลจากกล่องจุลทรรศน์.....	59
5.8 แผนภูมิแท่งค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและปริมาตรการสึกหรอ.....	59
ก-1 ผลทดสอบจากกรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ.....	69
ข-1 ผลทดสอบจุดไหลเทของ WVO โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ.....	72
ข-2 ผลทดสอบจุดไหลเทของ BIOD+EVA5 โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ.....	73
ข-3 ผลทดสอบจุดไหลเทของ BIOD+EVA5+AW โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ.....	74
ค-1 ผลทดสอบจุดไหลเทของ BIOD โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.....	76
ค-2 ผลทดสอบค่าความเป็นกรด โดยศูนย์ทดสอบเครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.....	77
ค-3 ผลทดสอบเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยศูนย์ทดสอบเครื่องมือ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.....	78
ง-1 การสึกหรอและผลการวัดขนาดสึกหรอจากกล่องจุลทรรศน์ของชิ้นทดสอบบอลชิ้นที่ 1 โดยมี ISO VG68 เป็นสารหล่อลื่น.....	82
ง-2 การสึกหรอและผลการวัดขนาดสึกหรอจากกล่องจุลทรรศน์ของชิ้นทดสอบบอลชิ้นที่ 2 โดยมี ISO VG68 เป็นสารหล่อลื่น.....	82
ง-3 การสึกหรอและผลการวัดขนาดสึกหรอจากกล่องจุลทรรศน์ของชิ้นทดสอบบอลชิ้นที่ 1 โดยมี WVO เป็นสารหล่อลื่น.....	83
ง-4 การสึกหรอและผลการวัดขนาดสึกหรอจากกล่องจุลทรรศน์ของชิ้นทดสอบบอลชิ้นที่ 2 โดยมี WVO เป็นสารหล่อลื่น.....	83
ง-5 การสึกหรอและผลการวัดขนาดสึกหรอจากกล่องจุลทรรศน์ของชิ้นทดสอบบอลชิ้นที่ 1 โดยมี BIOD+EVA5 เป็นสารหล่อลื่น.....	84

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง-6 การศึกษาและผลการวัดขนาดสึกหรอจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นทดสอบบอลขึ้นที่ 2 โดยมี BIOD+EVA5 เป็นสารหล่อลื่น.....	84
ง-7 การศึกษาและผลการวัดขนาดสึกหรอจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นทดสอบบอลขึ้นที่ 1 โดยมี BIOD+EVA5+AW เป็นสารหล่อลื่น.....	85
ง-8 การศึกษาและผลการวัดขนาดสึกหรอจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นทดสอบบอลขึ้นที่ 2 โดยมี BIOD+EVA5+AW เป็นสารหล่อลื่น.....	85
จ-1 คุณภาพของสินค้า PTT Hydraulic ของ บริษัท ปตท. จำกัด(มหาชน).....	87
จ-2 คุณภาพสินค้าเอททีลีน-ไวนิล อะซิเตท โคโพลีเมอร์ หรือ EVA เกรด TV2160 ของ บริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด (มหาชน).....	88
จ-3 คุณภาพของสินค้า OMEGA 904.....	89



# คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

## สัญลักษณ์

$AN$	ค่าความเป็นกรด
$FFA\%$	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ (%)
$V$	ปริมาตรการสีกหรือ ( $mm^3$ )
$s$	เส้นผ่านศูนย์กลางที่จุดสีกหรือ (mm)
$h$	ความสูงของส่วนที่สีกหรือ (mm)
$r$	รัศมีบอล (mm)
$F$	แรงกระทำ (N)
$A$	พื้นที่หน้าตัดของแผ่นซึ่งกำลังเคลื่อนที่ ( $m^2$ )
$U$	ความเร็วของแผ่นที่เคลื่อนที่
$\frac{du}{dy}$	อัตราการเฉือนหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ( $s^{-1}$ )
$F_N$	แรงกดในแนวตั้ง (N)
$v_G$	ความเร็วในการลื่นไหล (m/s)
$T_B$	ช่วงเวลาในการรับภาระ (s)
$\mu$	สัมประสิทธิ์การเสียดทาน
$\mu_s$	สัมประสิทธิ์การเสียดทานสถิตย์
$\mu_k$	สัมประสิทธิ์การเสียดทานจลน์
$\tau$	ความเค้นที่เกิดจากการเคลื่อนที่ ( $N/m^2$ )
$\eta$	ความหนืดสัมบูรณ์ ( $N\cdot s/m^2$ )
$\nu$	ความหนืดจลน์ (cSt)
$\rho$	ความหนาแน่น ( $kg/m^3$ )
$\beta$	ค่าโมดูลัสของแรงบีบอัดแบบไอเซนโทรปิก ( $N/m^2$ )
$c$	ความเร็วเสียงในของตัวอย่าง (m/s)
$\frac{ZN}{P}$	ตัวแปรไร้มิติ Dimensionless duty parameter

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

สิ่งรอบตัวเราทุกวันนี้ไม่ว่าจะหันไปทางไหนมักพบผลิตภัณฑ์มาจากปิโตรเลียมกันอย่างแพร่หลาย เช่น พลาสติก น้ำมัน แก๊สหุงต้ม เป็นต้น หากยังใช้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ในปริมาณมากก็ย่อมจะนำไปสู่ภาวะขาดแคลนในที่สุดและยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่องตามมา น้ำมันปิโตรเลียมที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักสำหรับสารหล่อลื่นในอุตสาหกรรมและเป็นที่ยอมรับด้วยเพราะมันมีช่วงความหนืดที่หลากหลาย, สามารถเข้ากันได้กับชิ้นส่วนและเครื่องจักรในอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี แต่มีข้อเสียคือก่อให้เกิดสารพิษเสี่ยงอันตรายและย่อยสลายเองตามกระบวนการชีวภาพได้ยาก มีการประเมินกันว่าน้ำมันหล่อลื่นราว 12 ล้านตันถูกทิ้งและปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมทุกปี [1] จากวิกฤตพลังงานของโลกเกิดขึ้นหลายครั้งตั้งแต่ปี พ.ศ.2516 แต่ทุกครั้งที่เกิดวิกฤตพลังงานได้มีความตื่นตัวและมีความพยายามหาพลังงานหมุนเวียนมาใช้ทดแทนพลังงานจากฟอสซิล สำหรับประเทศไทยก็เช่นเดียวกันได้พยายามหาพลังงานทดแทนมาใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ที่สามารถหาได้ในท้องถิ่น เช่นน้ำมันพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล หลังจากวิกฤตพลังงานโลกครั้งแรกเป็นต้นมา พระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดช ทรงมีพระราชกรณียกิจด้านพลังงานทดแทนอย่างต่อเนื่อง กล่าวคือ ในปี พ.ศ. 2522 ทรงมีพระราชดำริให้โครงการสวนพระองค์ สวนจิตรลดา ทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโคนมได้ก๊าซหลายชนิดผสมกันและจุดติดไฟ ปี พ.ศ. 2528 พระองค์ได้พระราชทานเงินทุนวิจัย เพื่อศึกษาการผลิตแอลกอฮอล์จากอ้อย เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนเพราะในอนาคตอาจเกิดภาวะขาดแคลนและราคาอ้อยตกต่ำ ปี พ.ศ. 2539 ได้มีสถานีบริการแก๊สโซฮอลล์สวนจิตรลดา ปี พ.ศ. 2543 ทรงมีพระราชกระแสรับสั่งให้กองงานสวนพระองค์ดำเนินงานวิจัยใช้น้ำมันปาล์มเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ และโปรดเกล้าโปรดกระหม่อมให้ดำเนินการอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นในปัจจุบันมนุษย์จึงพยายามค้นหาและค้นคว้าเกี่ยวกับแหล่งพลังงานและวัตถุดิบทดแทนอื่น ๆ มาแทนที่หรือเพื่อลดการใช้ปิโตรเลียมให้น้อยลง ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาเริ่มมีความนิยมในสารหล่อลื่นที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น มีงานวิจัยและพัฒนาสินค้าใหม่ๆที่ยั่งยืนจากเคมีสีเขียว ยุโรปเป็นประเทศผู้นำเรื่องน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพมาหลายทศวรรษ โดยประมาณกันว่ามีมากถึง 18% ของน้ำมันหล่อลื่นทั้งหมด จากปัจจัยเชิงเศรษฐศาสตร์ไม่ว่าเป็นราคาน้ำมันแร่ที่สูงมากขึ้น ภาษีสินค้าน้ำมันหล่อลื่น ค่าใช้จ่ายอื่นเช่น การนำกลับมาใช้ใหม่ ค่าปรับจากการหกรั่วไหล รวมไปถึงคุณภาพสินค้า และประเด็นสำคัญคือกฎหมายสิ่งแวดล้อมผลักดันให้ใช้วัตถุดิบที่ย่อยสลายได้เชิงตามธรรมชาติและเป็นพิษให้น้อยที่สุด ในตลาดมีความต้องการน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพสูงมากทุกวันนี้ในยุโรปนำไปใช้ในงานหล่อลื่นในเหล็ก จาระบี น้ำมันรถแทรกเตอร์ และน้ำมันไฮดรอลิก อย่างไรก็ตามประสบความสำเร็จ ส่วนในอุตสาหกรรมรถยนต์เพื่อเอกรสารนี้เป็นเอกรสารที่สวนวโสภาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาทานาน โมอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหล่อลื่นก็มีข้อจำกัดในการใช้อยู่บ้าง อย่างไรก็ตามสินค้าเชิงชีวภาพได้รับการพิสูจน์ว่ามีประสิทธิภาพเชิงการหล่อลื่นสูงเมื่อนำไปในสูตรน้ำมันเครื่องยนต์เชื้อเพลิงประหยัดพลังงาน และของไหลสำหรับการส่งกำลัง ในตลาดยุโรปตะวันออกมีความต้องการสารหล่อลื่นถึง 1.6 พันล้านแกลลอน และประเมินกันว่ามีการใช้น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพถึง 127,000 ตันในปี 2006 โดยโตขึ้นถึง 3.7% ต่อปี ระหว่าง 2000 – 2006 แต่ราคาของน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพยังคงสูงมาก ๆ น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพสกัดจากพืชเป็นสารหล่อลื่นตามธรรมชาติได้ดี [2] ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต, ย่อยสลายเองได้ [3] และเป็นสารระเหยเป็นไอต่ำ [4] นอกจากนี้ น้ำมันรีไซเคิลและกลับมาใช้ใหม่ได้โดยอาศัยการตัดแปลงโครงสร้างทางเคมี [5-6] ยังพบอีกว่าสารหล่อลื่นธรรมชาติจากน้ำมันพืชจะสร้างผิวหรือฟิล์มปกป้องต่อการขัดถู [7] แต่ในช่วงอุณหภูมิที่จุดไหลเทของน้ำมันพืชมักเป็นปัญหา [3] ต้องแก้ไขโดยการเติมสารเติมแต่งหรือตัดแปลงโครงสร้างทางเคมี [8, B] พืชส่วนใหญ่ที่เป็นวัตถุดิบหลักในน้ำมันพืชและถูกนำมาใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นได้แก่ ปาล์ม [9-10], ทานตะวัน [7], ถั่วเหลือง [11], ละหุ่ง [1], สบู่ดำ [12], เมล็ดยางพารา [13] เป็นต้น. อย่างไรก็ตามผู้วิจัยยังไม่พบงานวิจัยที่น้ำมันพืชเก่าใช้แล้วมาศึกษาเป็นน้ำมันไฮดรอลิกหรือสารหล่อลื่นทั่วไป โดยน้ำมันไฮดรอลิกมีปริมาณการใช้มากที่สุดเป็นอันดับที่สองรองจากน้ำมันเครื่องยนต์ [14] เหตุที่สนใจในน้ำมันพืชเก่าใช้แล้วเนื่องจาก รศ.ดร.วิทยา กุลสมบูรณ์ [15] ผู้จัดการแผนงานคุ้มครองผู้บริโภคด้านสุขภาพ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ (สสส.) กล่าวว่า ในปี พ.ศ. 2555 ประเทศไทยมีปริมาณการบริโภคน้ำมันพืชประมาณ 8 แสนตันต่อปี โดยร้อยละ 50% เป็นการบริโภคในครัวเรือน อีกร้อยละ 50 ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร แต่น้ำมันพืชเก่าใช้แล้วกลับพบว่าถูกนำกลับมาเป็นพลังงานไปโอดีเซลเพียงร้อยละ 5 ซึ่งน่าเป็นห่วงว่าน้ำมันทอดซ้ำที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตอาหารนี้หายไปไหน มีการกำจัดอย่างไร ทั้งในสิ่งแวดล้อมหรือมีกระบวนการฟอกเพื่อกลับมาขายให้ผู้บริโภคใหม่ การใช้ไขมันพืชเก่ากลับมาประกอบอาหารซ้ำมีความเสี่ยงต่อการก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นแรงผลักดันให้ผู้วิจัยต้องการเพิ่มช่องทางเลือกการประยุกต์ใช้ประโยชน์น้ำมันพืชใช้แล้วโดยศึกษาสมบัติทางกายภาพ-เคมีและสมบัติโทรโพลีเพื่อพัฒนาน้ำมันพืชใช้แล้วให้เทียบเคียงกับคุณสมบัติ น้ำมันไฮดรอลิกที่จำหน่ายตามท้องตลาด และต่อยอดเป็นน้ำมันไฮดรอลิก ในงานวิจัยพัฒนาน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ใช้แล้วเพื่อต่อยอดเป็นน้ำมันไฮดรอลิกหรือ Developing of used palm olein build on hydraulic oil จะถูกเรียกสั้นๆ ว่า DUPH

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 พัฒนาน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ใช้แล้วเพื่อต่อยอดเป็นน้ำมันไฮดรอลิก (DUPH) ด้วยวิธีปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและสารเติมแต่ง

1.2.2 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมี และโทรโพลีของ DUPH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของ DUPH กับน้ำมันไฮดรอลิก ISO VG46 และ ISO VG68 เพราะน้ำมันไฮดรอลิก ISO VG 46 และ VG 68 เป็นเกรดที่ใช้มากที่สุดในระบบปั๊มเวน ปั๊มลูกสูบ และ ปั๊มเกียร์

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์หลังจากทอดปาห้องโกแล้ว โดยถูกทอดมาหลายครั้งและ กาลังจะถูกทิ้งโดยผู้วิจัย มาผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เพื่อเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์ แล้วเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสมกับน้ำมันไฮดรอลิกในท้องตลาด ในงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันไฮดรอลิก ISO VG46 และ VG68 แล้วทดสอบคุณสมบัติทาง กายภาพ-เคมี เช่น ความหนืดจลน์ที่ 40 °C และ 100°C ดัชนีความหนืด จุดวาบไฟ จุดไหลเท ค่า ความเป็นกรด และสมบัติเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันตามมาตรฐานนาชาติ นอกจากนี้ ยังทดสอบคุณสมบัติไทรโบโลยีด้วยเครื่อง CSM Tribometer แบบ Ball-on-Disk เพื่อพิจารณาค่า สัมประสิทธิ์ความเสียดทานและปริมาณการสึกหลอโดยมี DUPH เป็นสารหล่อลื่น

### 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งขั้นตอนในการศึกษาไว้ดังนี้

บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขั้นตอนการศึกษา กำหนดขอบเขตงานวิจัย และผลที่ได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในอดีตถึงปัจจุบัน เพื่อเป็นแนวทางในงานวิจัยนี้

บทที่ 3 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น ส่วนประกอบเชิงเคมีของน้ำมันพืช กลไกการเสื่อมสภาพ น้ำมันพืชใช้แล้ว ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ระบบไฮดรอลิก คุณสมบัติของน้ำมันไฮดรอลิก และไทรโบโลยี

บทที่ 4 วิธีการด าเนินงาน วัตถุประสงค์ สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้รวมทั้งวิธีการทดสอบ

บทที่ 5 วิเคราะห์ผลคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมี และไทรโบโลยีของ DUPH โดยเปรียบเทียบกับ น้ำมันไฮดรอลิก ISO VG46 และ VG68

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 1.5 ผลที่ได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 งานวิจัยครั้งนี้สามารถเป็นแนวทางพัฒนาน้ำมันไฮดรอลิกเชิงชีวภาพ

1.5.2 เป็นทางเลือกอีกทางในการใช้ประโยชน์จากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ใช้แล้วสำหรับ น้ำมันไฮดรอลิก

1.5.3 เป็นข้อมูลและต่อยอดพัฒนาน้ำมันหล่อลื่นชนิดอื่นๆ รวมทั้งผู้ที่สนใจหรือนักวิจัยอื่นๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

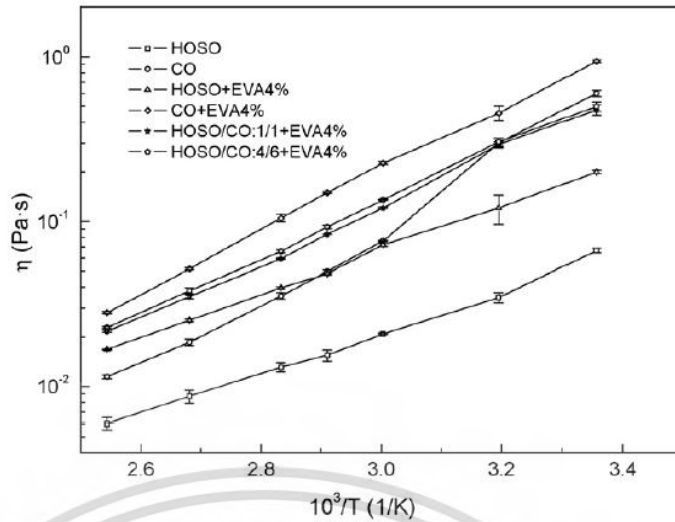
### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตและปัจจุบัน พบงานวิจัยที่ศึกษาคุณสมบัติกายภาพเคมี และโทรโบลีย์ของน้ำมันจากพืช และบางงานวิจัยได้พัฒนาจากน้ำมันหล่อลื่นธรรมชาติเหล่านี้ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันหล่อลื่นที่มาจากปิโตรเลียม เพื่อทดแทนการใช้ปิโตรเลียม ปกป้องรักษาสิ่งแวดล้อม ย่อยสลายเองทางชีวภาพ รวมไปถึงความแตกต่างของข้อกำหนดแต่ละประเทศเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม หัวใจหลักๆ ของการใช้สารหล่อลื่นคือ การลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างหน้าสัมผัสของชิ้นส่วนที่ใช้งานทางกล ซึ่งสารหล่อลื่นจะต้องสามารถคงทนในระหว่างการรับภาระนั้นๆ ของชิ้นส่วนอุปกรณ์ โดยสารหล่อลื่นจะต้องยังคงปริมาตรเดิม (Incompressible) และจะต้องไม่ถูกเฉือนตัวได้ง่ายเกินไป (Shear Resistant) นอกจากนี้การใช้สารหล่อลื่นยังหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่ต้องสัมผัสกับบรรยากาศหรืออากาศ ซึ่งคุณสมบัติในการต่อต้านการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Anti-Oxidation) เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเช่นเดียวกัน

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ

**Quinchia และคณะ [1]** ทดลองใช้เอทิลีน-ไวนิลอะซิเตท โคพอลิเมอร์ (EVA) เป็นตัวปรับความหนืดในน้ำมันถั่วเหลือง (SYO) น้ำมันดอกทานตะวัน (SO) และน้ำมันละหุ่ง (CO) ให้มีศักยภาพเป็นน้ำมันหล่อลื่น แมวน้ำมันพืชจะมีคุณสมบัติที่ดีและมีศักยภาพเป็นน้ำมันหล่อลื่น แต่มันมีข้อจำกัดในการนำไปใช้เรื่องความหนืดไม่หลากหลายและมีค่าต่ำเกินไป จากรูปที่ 2.1 พบว่าการเติม 4% wt ของ EVA ในน้ำมันพืช ให้ผลความหนืดไดนามิกส์เพิ่มขึ้นถึง 330-420% จากความหนืดน้ำมันพืชฐานเดิมของมัน ดังนั้น EVA จึงเป็นตัวปรับความหนืดที่ดีตัวหนึ่ง และยังสามารถนำ EVA มาใช้ในการออกแบบในสูตรสารหล่อลื่นตามธรรมชาติเพื่อใช้ในงานเฉพาะ

**Golshokouh และคณะ [9]** ศึกษาสมบัติทางกายภาพน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ (PFAD) เป็นแหล่งน้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันไฮดรอลิกทดแทน ทดสอบด้วยเครื่อง Four-ball tribometer ที่อุณหภูมิ 55, 75, 95, 105 และ 125 °C ความเร็วรอบที่ 120 rpm. น้ำหนักกดทับ 40 kg. ใช้เวลาทดสอบ 1 ชั่วโมง โดยเปรียบเทียบกับผลของน้ำมันเครื่อง (ENG) และน้ำมันไฮดรอลิก (HYD) ที่จำหน่ายในท้องตลาด ผลการทดลองพบว่า PFAD มีความสามารถต่อต้านความเสียดทานดีกว่า ENG และ HYD ทุกอุณหภูมิการทดลอง จากรูปที่ 2.2 และพบว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (COF) ของ ENG ค่อนข้างจะคงที่กว่าอันอื่นด้วยเหตุที่สารเติมแต่งใน ENG ไม่ว่าเป็นการป้องกันการสึกหรอและ



รูปที่ 2.1 ค่าความหนืดไดนามิกกับอุณหภูมิของ HOSO, CO และ HOSO/CO ผสมกับ 4% โดยน้ำหนักของ EVA จากงานวิจัย Quinchia และคณะ [1]

ลดความเสียดทานทำให้ค่า COF คงที่เมื่ออุณหภูมิจะเปลี่ยนไป ส่วน HYD แสดงสมบัติต้านการเสียดทานต่ำที่สุดในงานวิจัยนี้ยังพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิมีผลต่อความเสียดทานโดยตรงและสรุปออกเป็นสมการที่ 2.1 [9] แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง COF, แรงเฉือนเนื่องจากความเสียดทานและน้ำหนักกดทับ ส่วนผลการสึกหรอพบว่าที่อุณหภูมิ 55 °C แสดงผลค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอ (WSD) ของ ENG ต่ำที่สุด และ HYD มากที่สุด ลักษณะการสึกหรอทั้ง 3 ไม่รุนแรงคล้ายๆ กัน ขณะที่อุณหภูมิ 75 °C พบว่าลักษณะการสึกหรอของ ENG และ PFAD ไม่ค่อนข้างรุนแรงนักแต่ของ HYD มีลักษณะรุนแรง สำหรับที่อุณหภูมิ 95 °C พบว่าลักษณะการสึกหรอของ ENG ไม่ค่อยรุนแรง แต่พบที่สึกหรอรุนแรงของ PFAD ยังพบอีกว่าเกิดเป็นผิวหุลุมเล็กๆ โดยรอบของ HYD สำหรับที่อุณหภูมิ 105 °C พบว่าลักษณะการสึกหรอรุนแรงทั้ง 3 น้ำมัน และพบหุลุมผิวรอบวงกลมของ HYD จะมีขนาดใหญ่กว่า ENG และ PFAD และที่อุณหภูมิ 125 °C พบว่าลักษณะการสึกหรอรุนแรงทั้ง 3 น้ำมัน และพบหุลุมเล็กๆรอบวงกลมของ PFAD และ HYD

$$\mu = 0.22248 \times \frac{T}{W} \quad (2.1)$$

Mendoza และคณะ [7] พัฒนาสูตรน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันดอกทานตะวันที่มีกรดโอเลนิคสูงเป็นพื้นฐานตามตารางที่ 2.1 โดยเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ เพื่อให้ น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพเหล่านี้จะต้องมีสมรรถภาพเทียบเท่ากับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานน้ำมันแร่ในท้องตลาดโดยทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมี พฤติกรรมของน้ำมันหล่อลื่นที่อุณหภูมิ ค่าคุณสมบัติต่อต้านการเกิดออกซิเดชัน การเข้ากันได้กับระบบซีลในเครื่องจักร และคุณสมบัติต้านไทรโบโลยีด้วย Four ball tribometer และ Ball on disk tribometer จากนั้นนำไปใช้งานจริงกับระบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สูตรน้ำมันไฮดรอลิกจากงานวิจัย Mendoza และคณะ [7]

รหัส	น้ำมันพื้นฐาน	สารเติมแต่ง	หมายเหตุ
RAGH	น้ำมันจากแร่	ตามมาตรฐาน	อ้างอิง
HOSO	น้ำมันดอกทานตะวัน	ไม่มี	
BIOGIR-01	น้ำมันดอกทานตะวันมีกรดโอเลอิกสูง	ตามมาตรฐาน	สูตรพัฒนาขึ้น
BIOGIR-02	น้ำมันดอกทานตะวันมีกรดโอเลอิกสูง	RO-1 + AW-1	สูตรพัฒนาขึ้น
BIOGIR-03	น้ำมันดอกทานตะวันมีกรดโอเลอิกสูง	RO-2 + AW-1	สูตรพัฒนาขึ้น
BIOGIR-04	น้ำมันดอกทานตะวันมีกรดโอเลอิกสูง	Ester-1 + RO-2 + AW-2 + PPD	สูตรพัฒนาขึ้น
BIOGIR-05	น้ำมันดอกทานตะวันมีกรดโอเลอิกสูง	Ester -1 + RO-2 + AW-2 + PPD	สูตรพัฒนาขึ้น
BIOGIR-06	น้ำมันดอกทานตะวันมีกรดโอเลอิกสูง	Ester -1 + RO-2 + AW-2 + PPD	สูตรพัฒนาขึ้น

หมายเหตุ

RO = สารยับยั้งการเกิดสนิม-ออกซิเดชัน ในงานวิจัยมี 2 ชนิด คือ RO-1 และ RO-2

AW = สารต้านการสึกหรอ ในงานวิจัยมี 2 ชนิด คือ AW-1 และ AW-2

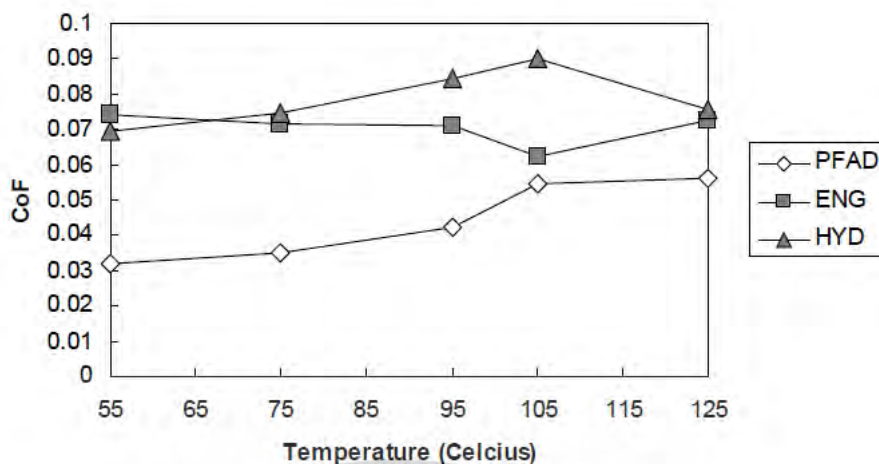
Ester = สารกลุ่มเอสเทอร์

PPD = สารเพิ่มคุณสมบัติจุดไหลเท

ไฮดรอลิกของรถแทรกเตอร์การเกษตร ในตารางที่ 2.2 ผลวิเคราะห์พบว่าน้ำมันหล่อลื่นที่พัฒนาขึ้นสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ตามมาตรฐาน Eco Label และไม่เป็นสารพิษต่อมนุษย์ ขณะที่น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานน้ำมันแร่ (RAGH) ให้ผลในทางกลับกันคือไม่สามารถย่อยสลายได้แต่ไม่เป็นพิษต่อมนุษย์เหมือนกัน ส่วนผลศึกษาคุณสมบัติโทรโบลีย์ ค่า COF น้ำมันหล่อลื่นที่พัฒนาขึ้นนี้มีแนวโน้มต่ำกว่า RAGH แต่ก็พบความไม่สม่ำเสมอของค่า COF ในน้ำมันหล่อลื่นที่พัฒนาต่างกับค่า COF ของ RAGH ที่สม่ำเสมอตามรูปที่ 2.3 ผลการสึกหรอในรูปที่ 2.4 พบว่าบางน้ำมันหล่อลื่นที่พัฒนาขึ้นมีค่าการสึกหรอสูงกว่าน้ำมันแร่ เช่น BIOGIR-01, BIOGIR-02 และ BIOGIR-03 แต่ก็มีสูตรน้ำมันหล่อลื่นที่เติมสารเติมแต่งที่เพียงพอและเหมาะสมสามารถลดการสึกหรอได้และเทียบเท่ากับของน้ำมันแร่ เช่น BIOGIR-04, BIOGIR-05 และ BIOGIR-06 นอกจากนี้ผลการเข้ากันได้กับวัสดุ ซีลยางก็เป็นที่น่าพอใจสำหรับ BIOGIR-06 โดยไม่พบปัญหาและจุดบกพร่อง

Syahrullail และคณะ [17] ศึกษาการหล่อลื่นของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (RBD) มาตรฐานประเทศมาเลเซีย MS 816:2007 เปรียบเทียบกับน้ำมันไฮดรอลิก (HO) ด้วยเครื่องโทรโบลีย์แบบ pin-on-disk ในรูปที่ 2.5 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G99 ที่ความเร็วสไลด์ 0.4 และ 4 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

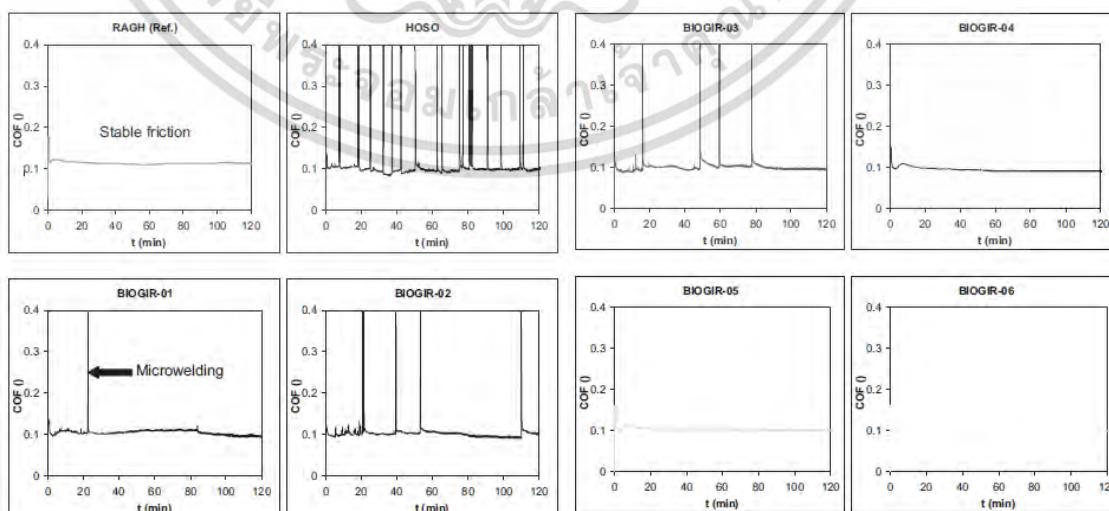


รูปที่ 2.2 กราฟ COF กับอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นจากงานวิจัย Golshokouh และคณะ [9]

ตารางที่ 2.2 ผลการย่อยสลายทางชีวภาพและพิษวิทยาจากงานวิจัย Mendoza และคณะ [7]

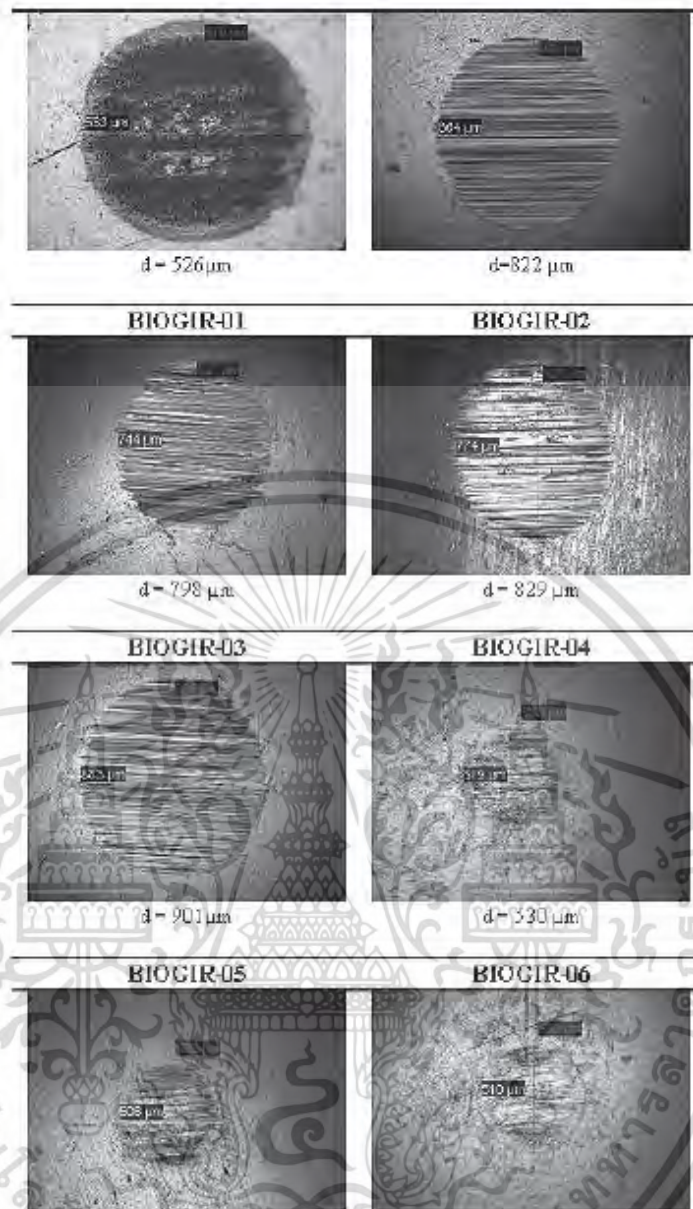
Substance	BIODEGRADABILITY		TOXICITY			
	OECD 301F		OECD 201		OECD 202	
	Biodegradability	Eco-label classification	aEC50 (mg/l)	Ecolabel Classification	aEC50 (mg/l)	Ecolabel Classification
RAGH	38±8	Non Biodegradable	>100	"Not harmful"	489	"Not harmful"
BIOGIR-01	85±5	Biodegradable	>100	"Not harmful"	>1000	"Not harmful"
BIOGIR-02	78±5	Biodegradable	>100	"Not harmful"	>1000	"Not harmful"
BIOGIR-03	73±1	Biodegradable	>100	"Not harmful"	>1000	"Not harmful"
BIOGIR-04	79±3	Biodegradable	>100	"Not harmful"	>1000	"Not harmful"
BIOGIR-05	68±3	Biodegradable	>100	"Not harmful"	>1000	"Not harmful"
BIOGIR-06	89±7	Biodegradable	>100	"Not harmful"	>1000	"Not harmful"

EC50: Effective Concentration.



รูปที่ 2.3 ผล COF กับเวลาของน้ำมันไฮดรอลิกในงานวิจัยของ Mendoza และคณะ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

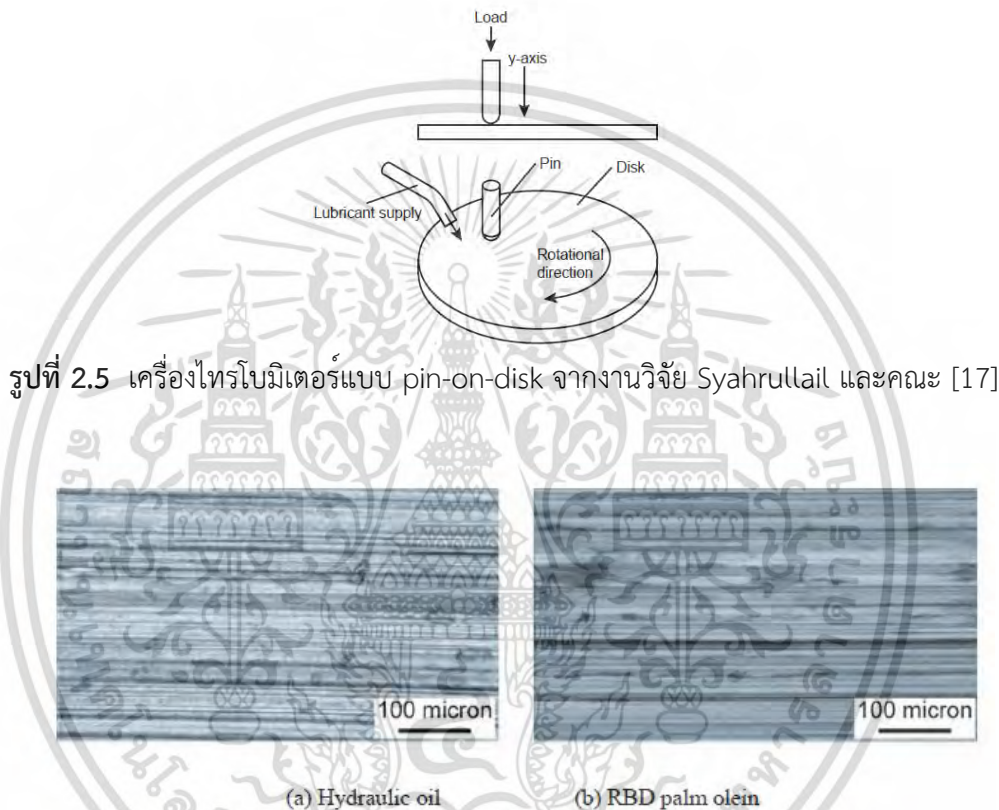


รูปที่ 2.4 ลักษณะและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการสึกหรอแต่ละสูตรน้ำมันไฮดรอลิกจากงานวิจัย Mendoza และคณะ [7]

น้ำหนักกดทับ 10 N เวลาทดสอบ 1 ชั่วโมง วัสดุพินและดิสก์ทำมาจากสแตนเลสเพื่อศึกษา COF และ อัตราสึกหรอของพิน ในหลักการของ pin-on-disk เป็นวิธีการทดสอบแบบเปรียบเทียบการสึกหรอ และวัดค่า COF ปริมาตรของการสึกหรอที่หายไปถูกนำไปคำนวณหาค่าอัตราการสึกหรอของวัสดุ ในรูปที่ 2.4 พินจะถูกยึดติดและเคลื่อนที่สไลด์ไปมาโดยปลายพินมีรูปร่างเป็นครึ่งทรงกลมมาสัมผัสกับ ระบายบนดิสก์ สารหล่อลื่น RBD จะถูกปั๊มเข้าเครื่องทดสอบอย่างต่อเนื่อง ผลค่า COF ของ RBD มีค่าต่ำกว่า HO ที่ความเร็วสไลด์ต่ำ (0.4 m/s) และทั้ง 2 มีค่า COF ใกล้เคียงกันที่ความเร็วสไลด์สูง (4 m/s) ขณะที่ RBD ให้ผลการหล่อลื่นที่ดีเพราะสายโซ่โมเลกุลของกรดไขมันในน้ำมันพืชแสดงศักยภาพของ สมบัติการหล่อลื่น โมเลกุลที่ใหญ่ของกรดไขมันไม่อิมพัทในน้ำมันพืชจะพัฒนาให้ฟิล์มหล่อลื่นที่หุ้มนั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้ไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แข็งแรงขึ้นด้วย และแสดงฟิล์มนี้เป็นชั้นปกป้องผิวเพื่อลดค่า COF สำหรับอัตราการศึกษาหรือสามารถคำนวณตามสมการที่ 2.2 ผลอัตราการศึกษาหรือของ RBD จะน้อยกว่า HO ที่ความเร็วต่ำ ขณะที่ทั้ง 2 ได้ค่าอัตราการศึกษาหรือเกือบจะเท่ากันที่ความเร็วสูง ส่วนในรูปที่ 2.6 แสดงภาพลักษณะพื้นผิวสึกหรอบนพิน พบว่าลักษณะความรุนแรงการสึกหรอของ RBD น้อยกว่าของ HO จากที่อธิบายเหตุผลข้างต้น

$$\text{Wear} = \text{Volumn loss} / (\text{Load} \times \text{Slide distance}) \quad (2.2)$$



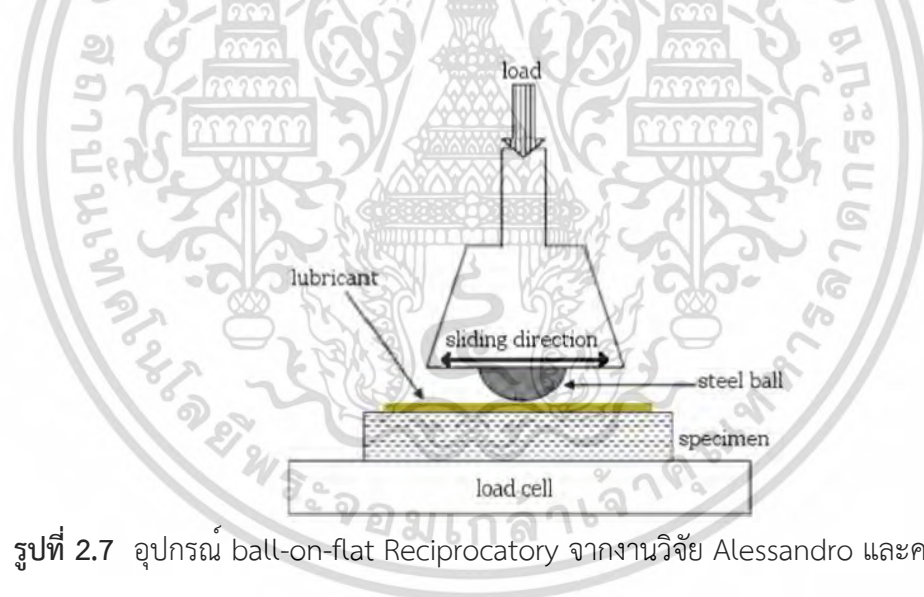
รูปที่ 2.5 เครื่องไทรโบมิเตอร์แบบ pin-on-disk จากงานวิจัย Syahrullail และคณะ [17]

รูปที่ 2.6 ลักษณะผิวที่สึกหรอหล่อลื่นโดย RBD และ HO ที่ความเร็ว 4 m/s ใช้เวลา 3600 วินาที จากงานวิจัย Syahrullail และคณะ [17]

Alessandro และคณะ [23] ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีและไทรโบโลยีของน้ำมันจากพืช 3 ชนิด คือ Rapeseed Methyl Esther (RME) ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันคาโนล่า (RME) ในเมทานอล อันที่สองน้ำมันเรฟชีดผ่านกระบวนการไฮโดรจิเนชัน (HVO) และน้ำมันสบู่ดำ (JCL) ทั้งหมดนำมาหล่อลื่นผิวเหล็กระหว่าง AISI E52100 (Ball) กับ เหล็ก X210Cr12 (Specimen) ด้วยเครื่อง ball-on-flat Reciprocatory friction Monitor แสดงในรูปที่ 2.7 โดยใช้น้ำหนักกดทับที่ 10 และ 19 N ความถี่สไลด์ของบอล 10 และ 20 Hz ใช้เวลาทดสอบ 30 นาที คณะวิจัยสรุปว่าผลคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของน้ำมันทั้งหมดนี้อยู่ในเกณฑ์การใช้งานน้ำมันหล่อลื่นในอุตสาหกรรม จากตามรูป 2.8 ผลค่า COF ลดลงเมื่อเพิ่มความถี่สไลด์ของบอล โดยที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

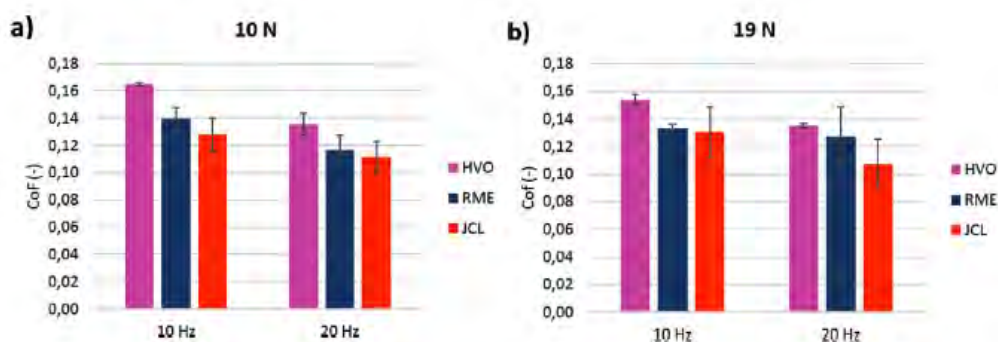
ค่า COF ของ JCL ต่ำที่สุด ขณะที่ผลจากน้ำหนักกดทับไม่แสดงแนวโน้มหรือมีผลต่อค่า COF อย่างเด่นชัด นักวิจัยให้เหตุผลว่ากรดไขมันใน JCL สร้างฟิล์มหล่อลื่นยึดติดบนผิวบอล เมื่อเกิดการสัมผัสกันมันจะช่วยลดการขัดถูระหว่างผิวสัมผัส สำหรับผลปริมาตรการสึกหรอบนบอลในรูปที่ 2.9 พบว่า HVO ให้มีค่าต่ำสุด แต่ความขรุขระมากที่สุด ในรูปที่ 2.10 นักวิจัยให้เหตุผลว่า JCL และ RMW มีค่า COF ที่น้อยกว่า HVO จึงให้ค่าความขรุขระพื้นผิวน้อยกว่าด้วยและกรดไขมันในน้ำมันพืชจะสร้างฟิล์มบนพื้นผิวโลหะและป้องกันความเสียหายบนพื้นผิว

**Shashidhara และคณะ [16]** : ศึกษาสมบัติกายภาพ-เคมีของน้ำมันพืชจากหยีนา (PRO) , สบูดำ (JRO) โดย PRO , JRO ถูกดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีด้วยกระบวนการอีพอกซิไดซ์จึงได้ อีพอกซิไดซ์ของน้ำมันหยีนา (EPRO) และ อีพอกซิไดซ์ของน้ำมันสบู่ดำ (EJRO) ตามลำดับ และผลจากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะได้เมทิลเอสเทอร์ของหยีนา (PME) และเมทิลเอสเทอร์ของสบู่ดำ (JME) หลังจากดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีแล้วพันธะคู่ C=C จุดที่ไม่อิ่มตัวจะถูกกำจัดออกไปจากโครงสร้างโมเลกุล ผลการทดลองพบว่าน้ำมันที่ถูกอีพอกซิไดซ์จะให้ความหนืดและดัชนีความหนืดเพิ่มขึ้นถึง 20% และ 30% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเดิมของมันเอง นอกจากนี้ยัง

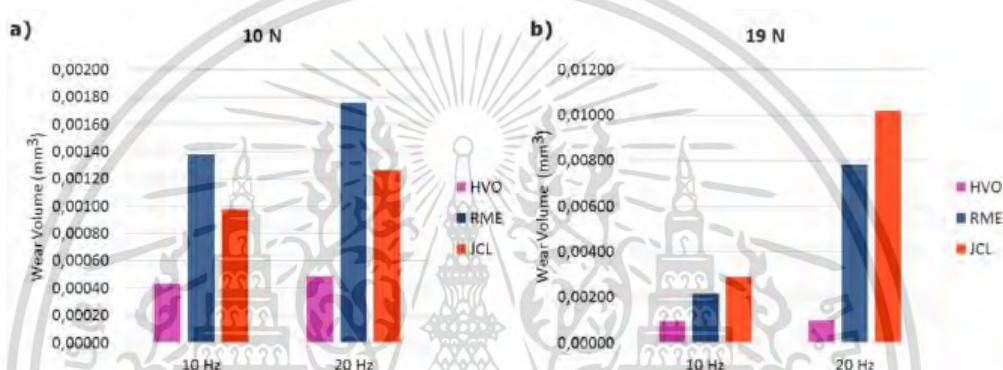


รูปที่ 2.7 อุปกรณ์ ball-on-flat Reciprocatory จากงานวิจัย Alessandro และคณะ [23]

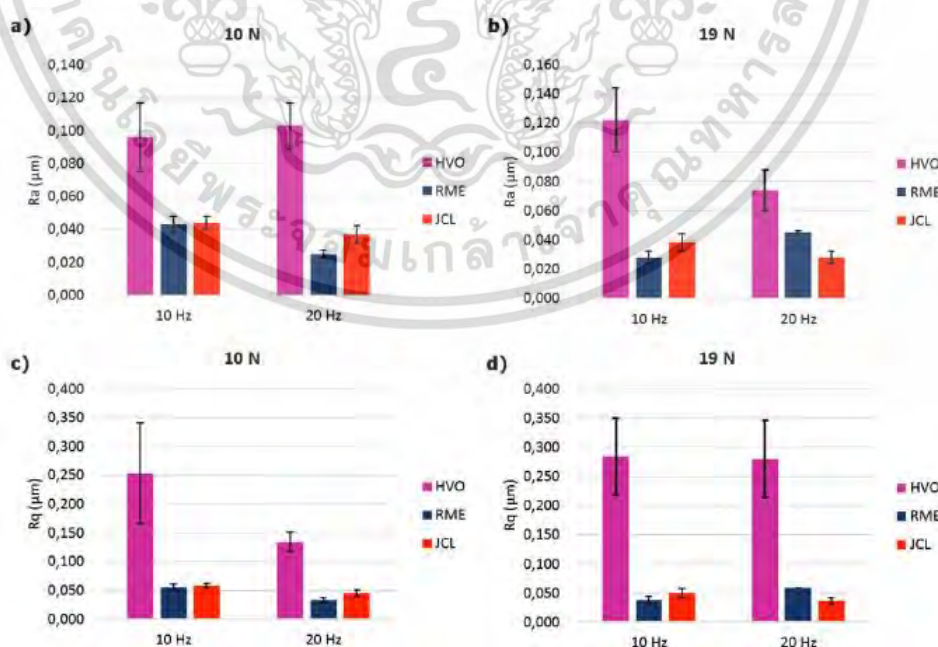
ปรับปรุงเล็กน้อยในค่าจุดไหลเท สำหรับคุณสมบัติโทรโบลีย์ คณะวิจัยใช้วัสดุเหล็กเกรด AISI 1040 ทดสอบด้วยเครื่อง Pin-on-disk tribometer ที่น้ำหนักกดทับ 70, 100, 150 และ 200 N โดยผลเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ พบว่าการลด COF และการสึกหรอแบบมีนัยสำคัญ PRO, JRO และ EJRO ให้ผลการต่อต้านการสึกหรอมากกว่าน้ำมันแร่ และยังพบว่าทั้ง PRO , JRO สร้างฟิล์มการหล่อลื่นดีกว่าน้ำมันแร่เสียอีก



รูปที่ 2.8 กราฟแท่งแสดง COF ของน้ำมันทั้ง 3 ที่ความถี่ 10 กับ 20 Hz ด้วยน้ำหนักกดทับ a) 10 N และ b) 19 N จากงานวิจัย Alessandro และคณะ [23]



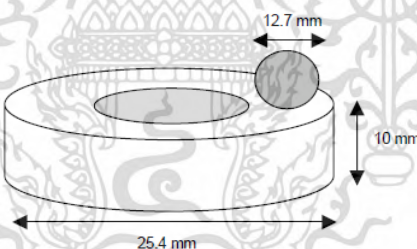
รูปที่ 2.9 กราฟแท่งแสดงปริมาณการสึกหรอของน้ำมันทั้ง 3 ที่ความถี่ 10 กับ 20 Hz ด้วยน้ำหนักกดทับ a) 10 N และ b) 19 N จากงานวิจัย Alessandro และคณะ [23]



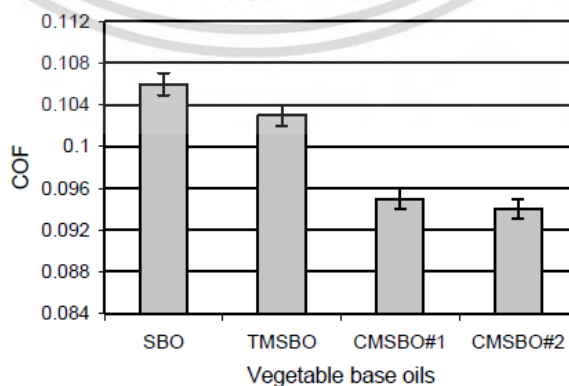
รูปที่ 2.10 กราฟแท่งแสดงความขรุขระพื้นผิวบนบอลหลังจากทดสอบไทรโบโลยี ที่ความถี่ 10 กับ 20 Hz ด้วยน้ำหนักกดทับ a) 10 N และ b) 19 N จากงานวิจัย Alessandro และคณะ [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Adhvaryu และคณะ** [24] พัฒนาและดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีของน้ำมันชีวภาพเพื่อการนำไปใช้ในอุตสาหกรรม แล้วศึกษาพฤติกรรมไทรโบเคมีคอลจากผลของโครงสร้างโมเลกุลที่หลากหลายเช่นผลจากความร้อนและผลจากการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมี คุณสมบัติหลักของน้ำมันจากเมล็ดพืชมีข้อจำกัดในคุณสมบัติออกซิเดชัน การไหลที่อุณหภูมิต่ำ และลักษณะความสัมพันธ์ของความหนืด-อุณหภูมิ อย่างไรก็ตามเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม การต่อต้านการสึกหรอและความเสียหายเป็นสิ่งสำคัญ ในการทดลองทำการอีพอกซิไดซ์น้ำมันถั่วเหลือง (SBO) เพื่อเตรียม CMSBO ขึ้นมา 2 ชนิด คือ CMSBO#1 และ CMSBO#2 ความแตกต่างทั้ง 2 อยู่ที่ระดับความมีขี้วในโครงสร้างโมเลกุลในส่วนของไตรกลีเซอไรด์และปริมาณการแทนที่ด้วยกรดไขมัน ส่วนการเตรียม TMSBO มาจากพื้นฐานของ ESBO ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 330°C ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายอาศัยหลักการ Ball-on-disk ที่อุณหภูมิห้องตามรูปที่ 2.11 และบันทึกค่าความกว้างการสึกหรอบนดิสก์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ จากรูปที่ 2.12 พบว่า SBO ให้ COF สูงที่สุดตามด้วย TMSBO และ CMSBO ตามลำดับ ให้เหตุผลว่าการเพิ่มการมีขี้วโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันหล่อลื่น จะสร้างแรงเชิงฟิสิกส์และเคมีหรือเป็นฟิล์มสร้างพันธะแบบเคมีกับพื้นผิววัสดุเหล็ก และผลของการเพิ่มการมีขี้วในหมู่ฟังก์ชันของโครงสร้างโมเลกุลน้ำมันมีผลเชิงบวกกับการปกป้องการสึกหรอบนผิววัสดุ ราวกับว่ามีแรงปฏิสัมพันธ์ขนาดใหญ่ระหว่างโซ่โมเลกุลเอสเทอร์ สิ่งนี้ผลจากการเพิ่มการมีขี้วด้วยการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีของน้ำมันถั่วเหลือง



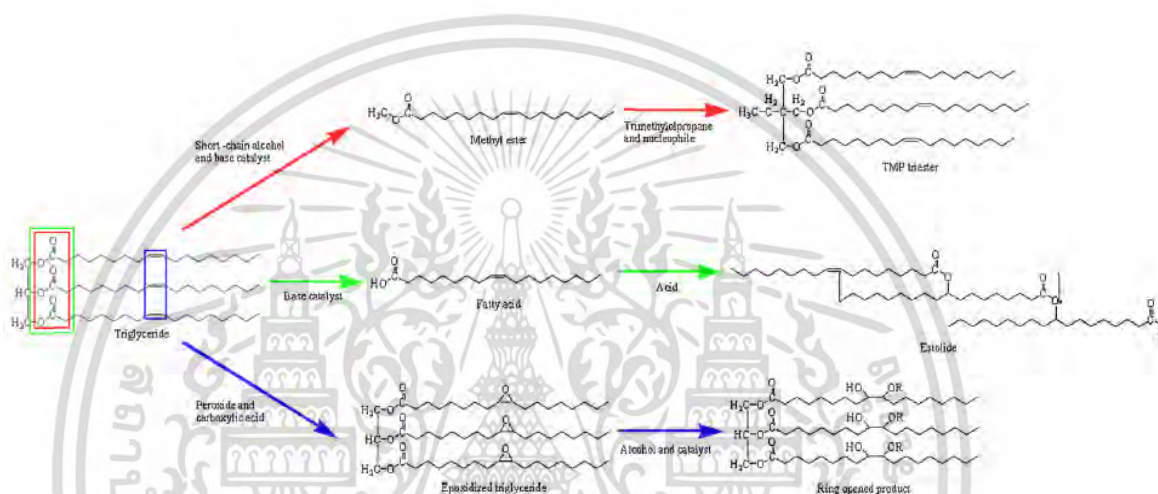
รูปที่ 2.11 เครื่องวัดความเสียหายแบบ Ball-on-disk จากงานวิจัย Adhvaryu และคณะ [24]



รูปที่ 2.12 ค่า COF ของน้ำมันพืชและอนุพันธ์ของน้ำมันพืชที่ความเข้มข้น 0.07 M โดยใช้ความเร็วสไลด์ 6.22 mm/s และน้ำหนักกดทับ 1778 N จากงานวิจัย Adhvaryu และคณะ [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Josiah [6] ทบทวนข้อดีของการสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันพืชด้วยการตัดแปลงโครงสร้างทางเคมีเช่นปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน/ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน , Estolide Formations และ epoxidation ของน้ำมันพืช สำหรับแนวทางการเกิดปฏิกิริยาแสดงในรูปที่ 2.13 โดยพบว่าปฏิกิริยาเหล่านี้เพิ่มคุณสมบัติกายภาพ-เคมีอย่างเด่นชัด ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน/ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน สามารถปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ (จุดไหลเท) และยังเพิ่มต่อเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ปฏิกิริยา Estolide Formation ให้ผลการปรับปรุงการหล่อลื่น, เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันและจุดไหลเท ปฏิกิริยา Epoxidation ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการหล่อลื่นและเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน



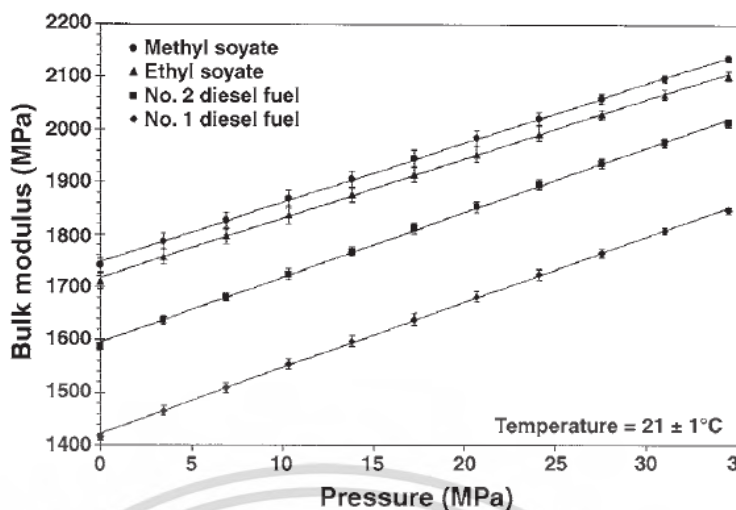
รูปที่ 2.13 แนวทางการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน/ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน, estolide formations และ epoxidation ของน้ำมันพืชจากงานวิจัย Josiah [6]

Mustafa และคณะ [40] ศึกษาผลการวัดความเร็วเสียงและโมดูลัสของแรงบีบอัดแบบไอเซนโทรปิกของเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันถั่วเหลืองโดยเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลเบอร์ 1 และ เบอร์ 2 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ  $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  และความดันบรรยากาศถึง 34.74 MPa โดยค่าโมดูลัสของแรงบีบอัดแบบไอเซนโทรปิกคำนวณได้จากความเร็วเสียงดังสมการที่ 2.3 ด้วยเทคนิคคลื่นเสียงอัลตราโซนิค ผลการทดลองในรูปที่ 2.14 สรุปว่าค่าค่าโมดูลัสของแรงบีบอัดแบบไอเซนโทรปิกของทั้งเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซลทั้งสองเบอร์

$$\beta = c^2 \times \rho \quad (2.3)$$

โดยที่  $\beta$  คือค่าโมดูลัสของแรงบีบอัดแบบไอเซนโทรปิก,  $c$  คือความเร็วเสียงในของตัวอย่าง และ  $\rho$  คือความหนาแน่นของตัวอย่าง

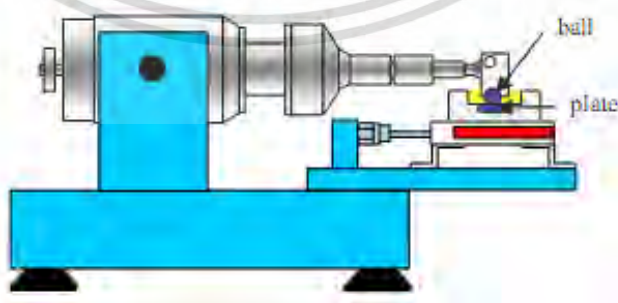
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 โมดูลัสของแรงบีบอัดแบบไอเซนโทรปิกของเมทิลเอสเทอร์, เอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันดีเซลเบอร์ 1 และ เบอร์ 2 จากงานวิจัย Mustafa และคณะ [40]

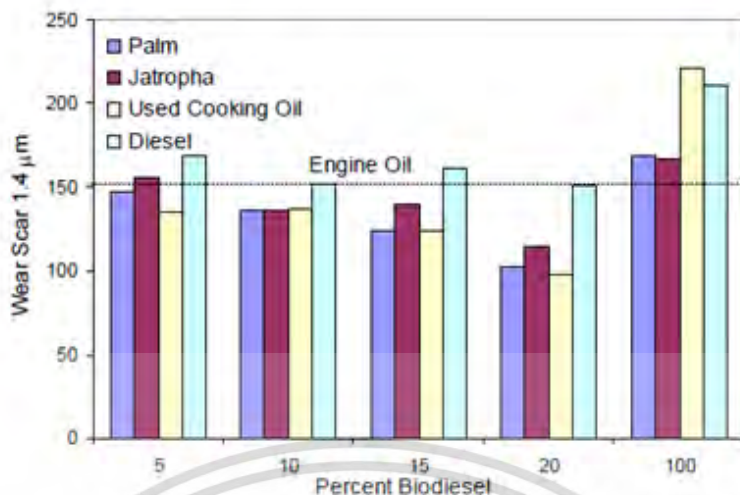
## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศ

Kiatkong และคณะ [25] ศึกษาคุณสมบัติกายภาพ-เคมีและต่อต้านการสึกหรอน้ำมันเครื่องยนต์ที่ปนเปื้อนด้วยไบโอดีเซล ในการศึกษาเลือกน้ำมันปาล์ม น้ำมันละหุ่ง และน้ำมันประกอบอาหารใช้แล้วเป็นพื้นฐานของไบโอดีเซลเทียบกับน้ำมันดีเซลในท้องตลาด ในการทดลองผสมน้ำมันเครื่องยนต์ในไบโอดีเซลเหล่านี้ในสัดส่วน 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก การประเมินต่อต้านการสึกหรอด้วยเครื่อง High Frequency Reciprocating Rig (HFRR) รูปที่ 2.15 เพื่อประเมินการหล่อลื่น และการทดสอบแบบ Ball-on-Flat เพื่อประเมินการสึกหรอในรูปขนาดรอยสึกหรอและน้ำหนักของชิ้นส่วนทดสอบที่หายไป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการปนเปื้อนไบโอดีเซลเป็นสาเหตุของความหนืดน้ำมันเครื่องลดลงอย่างมากหากเพื่อปริมาณการปนเปื้อนของไบโอดีเซลและดีเซล การปนเปื้อนนี้ส่งผลให้การหล่อลื่นดีขึ้นและทำให้เกิดการต่อต้านการสึกหรอแสดงในรูป 2.16



รูปที่ 2.15 เครื่อง High Frequency Reciprocating Rig (HFRR) งานวิจัย Kiatkong และคณะ [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์ป็นป้อนบน Engine oil มีต่อขนาดสึกหรอบนชิ้นส่วนทดสอบของงานวิจัย Kiatkong และคณะ [25]

นัยจันทร์ วรธนะภูติ [26] การสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นเตรียมได้จากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ น้ำมันมะพร้าวกับแอลกอฮอล์ซึ่ง ได้แก่ เฮกซานอล, ออกทานอล, 2-เอธิลเฮกซานอล, ไชโคลเฮกซานอล โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วนำมาผ่านกระบวนการไฮโดรจีเนชันปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์น้ำมันมะพร้าวกับไชโคลเฮกซานอล เตรียมที่อุณหภูมิ 90°C นาน 3 ชั่วโมง และสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไฮโดรจีเนชันประกอบด้วยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนักของน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 150°C ภายใต้ความดันเท่ากับ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง โดยใช้แพลตินัมร้อยละ 3 บนตัวรองรับอลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้มีแนวโน้ม ที่สามารถใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นได้ เนื่องจากมีค่าดัชนีความหนืดสูงจุดไหลเหตัว มีความเสถียรต่อความร้อนและการถูกออกซิไดซ์ดี

รงจุฑา สุวรรณประเสริฐ [27] วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสารหล่อลื่นสังเคราะห์ที่ได้จากน้ำมันถั่วเหลือง โดยการนำน้ำมันถั่วเหลือง ซึ่งมีโครงสร้างเป็นไตรกลีเซอไรด์ มาผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยการแปรผันชนิดของแอลกอฮอล์ที่เข้าทำปฏิกิริยาตั้งแต่ไอโซโพรพานอล, 1-บิวทานอล, 1-เฮกซานอล, 4-เมทิล-2-เพทานอล และ 2-เอทิล-1-เฮกซานอล ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 80°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยมีกรดซัลฟูริกเข้มข้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นจะนำสารหล่อลื่นสังเคราะห์ที่ได้มาผ่านกระบวนการไฮโดรจีเนชันภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 3 ชั่วโมงโดยใช้โลหะแพลตินัมร้อยละ 1 บนตัวรองรับอลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากขั้นตอนไฮโดรจีเนชันแล้วจะนำสารหล่อลื่นเอสเทอร์สังเคราะห์ที่ได้จากแอลกอฮอล์แต่ละตัวไปวัดคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี พบว่าสารหล่อลื่นเอสเทอร์สังเคราะห์ชนิด 2-เอทิล-1-เฮกซิล เอสเทอร์มีแนวโน้มที่จะนำมาใช้ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุตสาหกรรมมากที่สุดเพราะมีค่าความหนืด และดัชนีความหนืดสูง ค่าความเสถียรต่อความร้อนและการถูกออกซิไดซ์ได้ดี ส่วนค่าความเป็นกรด และความสามารถในการกัดกร่อนแผ่นทองแดงอยู่ในมาตรฐานที่ยอมรับได้ดังนั้น จึงสามารถนำเอสเทอร์สังเคราะห์ที่ได้มาใช้เป็นสารหล่อลื่นสังเคราะห์พื้นฐานเช่น น้ำมันไฮดรอลิกในอุตสาหกรรมได้ นอกจากนี้ยังพบว่า สารหล่อลื่นสังเคราะห์ที่ได้เหล่านี้จะให้ดัชนีความหนืดสูงมาก ดังนั้นจึงนำสารหล่อลื่นเอสเทอร์สังเคราะห์ที่ได้แต่ละชนิดไปผสมกับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน เพื่อศึกษาผลของดัชนีความหนืดที่เพิ่มขึ้น ผลที่ได้พบว่า เมื่อผสมสารหล่อลื่นเอสเทอร์สังเคราะห์นี้ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าดัชนีความหนืดสูงสุดที่ 128 โดยการผสมสารหล่อลื่นสังเคราะห์ชนิด 2-เอทิล-1-เฮกซิลเอสเทอร์

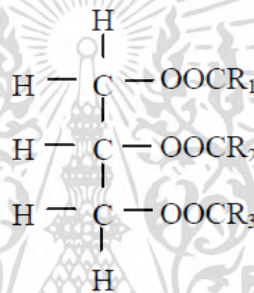
**ขนิษฐ พานชวงค์ [28]** เตรียมสารหล่อลื่นสังเคราะห์ประเภทไดเอสเทอร์โดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันของกรดไขมันได้แก่ กรดลอริก, กรดไมริสติก, กรดปาล์มมิติก และกรดสเตียริก กับ 1,2-อีเทนไดออล และ 1,2-โพรเพนไดออล โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไดเอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นของแข็งยกเว้นไดเอสเทอร์ที่ได้จากกรดลอริก กับ 1,2-โพรเพนไดออล ซึ่งไดเอสเทอร์ที่เป็นของแข็งจะมีลักษณะตามธรรมชาติเหมือนกับไข และมีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่ดีเช่น จุดวาบไฟ และความเสถียรต่อความร้อนและการถูกออกซิไดซ์ได้ดี ไดเอสเทอร์ประเภทนี้เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น ในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์, เครื่องสำอาง, ยา, และน้ำมันหล่อลื่น เป็นต้น โดยใช้เป็นตัวอิมัลซิไฟเออร์, ตัวลดฟอง และตัวลดแรงเสียดทาน

### บทที่ 3

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์มมีลักษณะโมเลกุลเหมือนน้ำมันพืช และไขมันสัตว์ชนิดอื่นๆ เช่นน้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง ไขมันหมู เป็นต้น สิ่งเหล่านี้เป็นสารอินทรีย์จำพวกหนึ่ง หรือที่เรียกว่าเอสเทอร์ (Ester) ประกอบด้วยโครงสร้างระหว่างโมเลกุลของกลีเซอรอล (Glycerol) หรือกลีเซอริน (Glycerin) กับกรดอินทรีย์หรือกรดไขมัน (Fatty acid) เชื่อมต่อกันหรือที่เรียกว่า ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ดังสูตรโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สูตรโครงสร้างไตรกลีเซอไรด์

จากรูปที่ 3.1 อักษร R หรือหมู่ R ในสูตรของโมเลกุลน้ำมันแทนไฮโดรคาร์บอนโซ่ยาว หมายความว่าโมเลกุล R ประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน (C) และ ไฮโดรเจน (H) ซึ่งจะต่อกันเป็น แกวโซ่ แต่ละโซ่มีจำนวน C อะตอมไม่เท่ากัน ดังนั้นอักษร  $R_1, R_2, R_3$  เพื่อเน้นว่า R ทั้งสามแตกต่างกันและจำนวน C อะตอมเป็นเลขคู่เสมอ ทั่วไปมีจำนวนคาร์บอน 11-19 ตัว นอกจากนี้โซ่คาร์บอน อาจเรียกว่ากรดไขมันอิ่มตัวหรือกรดไขมันไม่อิ่มตัวก็ได้ โซ่คาร์บอนอิ่มตัวประกอบไปด้วยพันธะ ระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนเป็นพันธะเดี่ยวทั้งหมด ส่วนโซ่คาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวประกอบด้วยพันธะ เดี่ยวและพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนอะตอมอยู่ 1 พันธะ หรือ 2 พันธะ หรือ 3 พันธะ ดังรูปที่ 3.2 กรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวของกรดอินทรีย์ในโมเลกุลน้ำมันมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของ น้ำมัน น้ำมันที่มีกรดไขมันอิ่มตัวมากจะมีจุดหลอมเหลวต่ำ ส่วนน้ำมันที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากจะมี จุดหลอมเหลวสูง ถ้าน้ำมันมีน้ำผสมอยู่จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับน้ำปฏิกิริยาดังกล่าว เรียกว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) จะได้กลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid, FFA) ปฏิกิริยาดังรูปที่ 3.3

ถ้าหากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมาก จะส่งผลส่งผลให้เพิ่มค่าความเป็นกรดไขมันอิสระของน้ำมัน เป็นการยากต่อกระบวนการทำทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยตรงเนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จะได้มาจากน้ำมันพืชหลายชนิดแต่ส่วนมากจะเป็นน้ำมันปาล์ม น้ำมันที่ได้มาจากร้านอาหารส่วนมากจะเป็นร้านที่ขายของประเภททอดซึ่งร้านอาหารเหล่านี้จะใช้น้ำมันปาล์มในการทำอาหารมากกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ เพราะน้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันราคาถูกกว่า

“น้ำมันทอดซ้ำ” เป็นอันตรายต่อสุขภาพหรือไม่? ควรใช้น้ำมันทอดซ้ำกี่ครั้ง? ใช้นานกี่วัน? และรู้ได้อย่างไรว่าน้ำมันที่ซื้อมานั้น มีความปลอดภัยสำหรับผู้บริโภค? ปัจจุบันปัญหาโรคความดันโลหิตสูง และโรคมะเร็งเป็นปัญหาสาธารณสุขที่สำคัญ และน้ำมันทอดซ้ำเสื่อมสภาพอาจเป็นหนึ่งในตัวการสำคัญของการเป็นโรคดังกล่าวอันเนื่องมาจากสารโพลาร์ สารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทอดอาหารต่างๆ อันตรายของน้ำมันที่เสื่อมคุณภาพเกิดจากโครงสร้างของน้ำมันถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย เช่น สารโพลาร์ ซึ่งเป็นสาเหตุก่อให้เกิดโรคความดันโลหิตสูง โรคหลอดเลือดหัวใจอุดตันและโรคหลอดเลือดสมองอุดตัน และสารโพลีไซคลิก อะโรมาติกไฮโดร-คาร์บอน ที่เป็นสารก่อมะเร็ง เป็นต้นด้วยเหตุนี้กระทรวงสาธารณสุขจึงออกประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 283) พ.ศ. 2547 เรื่องกำหนดปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันที่ใช้ทอดหรือประกอบอาหารเพื่อจำหน่าย โดยให้มีปริมาณสารโพลาร์ได้ไม่เกินร้อยละ 25 ของน้ำหนัก ผู้ประกอบการอาหารที่ใช้น้ำมันทอดอาหารที่มีค่าปริมาณสารโพลาร์เกินมาตรฐานที่กำหนด และจำหน่ายแก่ผู้บริโภค ถือเป็นกำรจำหน่ายอาหารผิดมาตรฐาน ฝ่าฝืนมาตรา ๒๕(๓) ของพระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ. 2522 ระวังโทษปรับไม่เกิน 50,000 บาท [29]

### 3.3 การเสื่อมสภาพของน้ำมันวัตถุดิบ [30]

พฤติกรรมการเสื่อมสภาพ (Degradation) ของน้ำมันวัตถุดิบและเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้อาจมีสาเหตุมาจากหลายประการด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นอากาศ ความชื้น หรือแม้แต่แสงแดด ซึ่งสามารถอธิบายได้จากปฏิกิริยาต่างๆ ดังนี้

#### 3.3.1 การเกิดกรดไขมันอิสระ

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส คือปฏิกิริยากำรแยกสายโซ่ของกรดไขมันออกจากกลีเซอรอลในโมเลกุลของกลีเซอไรด์ได้เป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยาออกไซด์-ออกซิเดชันต่อไป น้ำมันพืชและไขมันสัตว์โดยทั่วไปจะมีปริมาณของกรดไขมันอิสระ (FFA) หรือกรดคาร์บอกซิลิกอยู่ในปริมาณน้อย แต่สำหรับน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ใช้แล้วจะมีปริมาณของ FFA อยู่เป็นปริมาณมาก ซึ่ง FFA เหล่านี้เกิดขึ้นจากการที่น้ำมันโดนความร้อนในสภาวะที่มีน้ำ (เกิดการให้ไฮโดรเจนแก่น้ำมันขึ้น) ทำให้เกิด FFA ได้

#### 3.3.2 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

เกิดจากการทำปฏิกิริยาของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวในน้ำมันกับออกซิเจน แล้วแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระในรูปแบบต่างๆ กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมีหลากหลายรูปแบบด้วยกัน ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการปฏิบัติงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงกว้าง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ออโต้-ออกซิเดชัน คือปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดในสภาวะบรรยากาศทั่วไปโดยกรดไขมันทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรืออนุมูลอิสระอื่นๆ ได้เป็นสารประกอบพวกเปอร์ออกไซด์ และไฮโดรเปอร์ออกไซด์

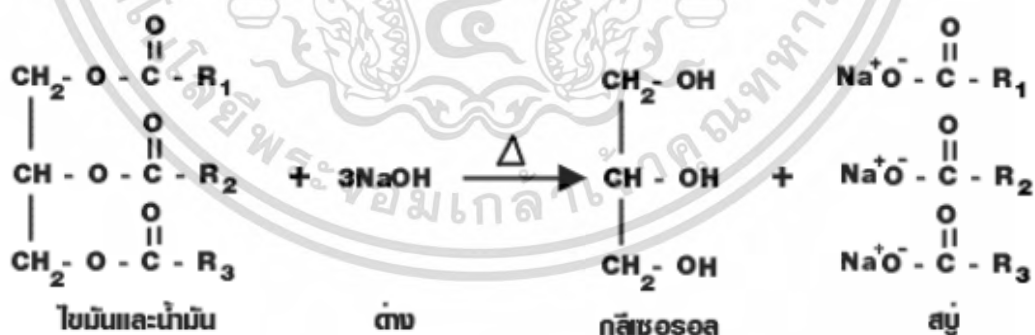
2. ออกซิเดชันเชิงแสง คือ เกิดโดยพันธะคู่ในกรดไขมันอิ่มตัวทำปฏิกิริยากับอะตอมของออกซิเจนที่ได้มาจากการปล่อยแสงผ่าน ปฏิกิริยาชนิดนี้เกิดได้เร็วกว่า Auto-oxidation ถึง 30,000 เท่า

3. Enzymatic-peroxidation ปฏิกิริยาชนิดนี้สามารถเกิดได้ด้วยเอนไซม์ชนิด lipoxigenase และ cyclooxygenase ซึ่งพบได้ในพืชทั่วไปในธรรมชาติ เข้าไปเร่งปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับกรดไขมันอิ่มตัวเชิงซ้อนทั้งหลาย

ปฏิกิริยากำรสลายตัวของน้ำมันหรือกรดไขมัน ด้วยการไฮโดรไลซิสหรือออกซิเดชัน นั้นเรียกอีกอย่างว่าการหืนจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกระบวนการดังกล่าวนี้เมื่อเกิดขึ้นแล้ว จะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วในน้ำมัน การป้องกันอาจทำได้โดยการเก็บน้ำมันเหล่านี้ไว้ในที่ที่ไม่สัมผัสกับออกซิเจนหรืออนุมูลอิสระอื่นๆ อุณหภูมิในการเก็บรักษาต่ำๆ และไม่มีแสงส่องผ่าน เนื่องจากทั้งแสงและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตีระหว่างน้ำมันกับออกซิเจน

### 3.3.3 สะปอนนิฟิเคชัน

จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ที่กล่าวถึงไว้ข้างต้น จะเห็นว่ามีการเกิดกรดไขมันอิสระเกิดขึ้น โดย FFA เหล่านี้จะเข้าไปขัดขวางกระบวนการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไบโอดีเซลก่อให้เกิดกระบวนการสะปอนนิฟิเคชันหรือกระบวนการเกิดสบู่ขึ้นแทน ดังตัวอย่างการเกิดสบู่ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน

### 3.3.4 กลไกการเกิดการเสื่อมสภาพในน้ำมันด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ขั้นตอนแรกในการเสื่อมสภาพของน้ำมันหรือเมทิลเอสเทอร์ในสภาวะที่มีออกซิเจน คือ การเกิดปฏิกิริยากำรเติมออกซิเจน (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) เข้าไปที่ตำแหน่งพันธะคู่ของสายโซ่กรดไขมัน ได้เป็นสารประกอบที่ไม่อยู่ตัว เช่นสารประกอบเปอร์ออกไซด์ และจะสามารถวัดปริมาณสารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นได้ อาจเรียกว่าการหาค่าเปอร์ออกไซด์เมื่อพิจารณาควบคู่ไป ในช่วงแรกๆ ที่เริ่มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดสารเปอร์ออกไซด์ขึ้นนี้ เราเรียกว่าเป็นขั้นเหนี่ยวนำ (Induction phase) ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดด้วยอัตราที่ค่อนข้างช้า และไม่มีควมสม่ำเสมอ ช่วงต่อมาคือช่วงการเกิดเปอร์ออกไซด์ในช่วงนี้จะมี การดูดซับออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบจำพวกเปอร์ออกไซด์ด้วยอัตราที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุด หลังจากจุดนี้ปฏิกิริยาจะเข้าสู่เฟสต่อไป ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการสลายตัวของ สารประกอบจำพวกเปอร์ออกไซด์ กลายเป็นสารประกอบจำพวกพอลิเมอร์หรือสารประกอบที่ระเหยได้และไม่ได้ ก่อให้เกิดสี และกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ ทั้งนี้จะเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันใดขึ้นอยู่กับตำแหน่งพันธะคู่เดิมของกรดไขมันไม่อิ่มตัวนั้นๆ ซึ่งหลังจากนี้ปฏิกิริยาจะเข้าสู่ขั้นตอนสุดท้ายของการเกิดออกซิเดชัน คือเกิดการเสื่อมสภาพหากการเสื่อมสภาพอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ จะสังเกตได้จากค่าความหนืดของน้ำมันที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ระยะเวลาของปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของน้ำมัน การเติมหรือไม่เติมสารต้านออกซิเดชันและสภาวะในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยานี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนที่ถูกดูดซับว่ามี มากน้อยเพียงใด

### 3.4 ค่าความเป็นกรด

เป็นค่าที่บ่งชี้ คุณภาพของน้ำมันและไขมัน โดยเป็นค่าที่บ่งชี้ว่าไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นส่วนประกอบหลักในไขมันและน้ำมัน ถูกย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยมีเอนไซม์ไลเปส และความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตผล คือกลีเซอรอล และกรดไขมันอิสระ ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งทำให้น้ำมันและไขมันมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น

ค่าความเป็นกรดของไขมันหรือน้ำมัน คือจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำปฏิกิริยาพอดีกับกรดไขมันอิสระซึ่งค่าที่ได้สามารถนำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระได้จกสมการ 3.1 [35]

$$AN = 1.99 \times FFA\% \quad (3.1)$$

โดยที่  $AN$  คือค่าความเป็นกรดตามมาตรฐาน ASTM D664 และ  $FFA\%$  คือเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ

ค่าความเป็นกรดเป็นค่าที่ใช้ตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันและไขมัน สำหรับทอด ระหว่างการทอด และคุณภาพของอาหารที่มีปริมาณไขมันสูง ได้แก่ อาหารทอด เช่น บะหมี่กึ่งสำเร็จรูประหว่างการเก็บรักษา หากค่าความเป็นกรดสูง แสดงว่าน้ำมันเสื่อมคุณภาพ มีจุดเกิดควันต่ำลง และเป็นสาเหตุเริ่มต้นของการเกิดกลิ่นหืนนอกจากนี้ยังมีโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ซึ่งทำให้เกิดการหืนอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ตัวอย่างเช่น ประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 57 (พ.ศ.2524) เรื่องน้ำมันมะพร้าว กำหนดให้น้ำมันมะพร้าวที่ผลิตด้วยวิธีธรรมชาติมีค่าของกรด ไม่เกิน 4.0 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อน้ำมัน 1 กรัม และน้ำมัน

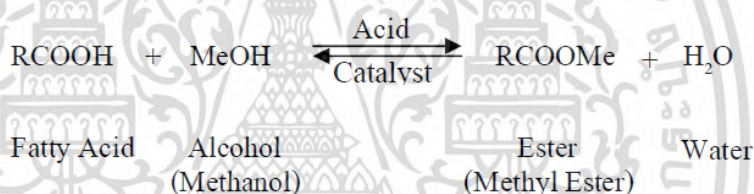
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มะพร้าวที่ผลิตโดยวิธีผ่านกรรมวิธี มีค่าของกรดไม่เกิน 0.6 มิลลิกรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อ น้ำมัน 1 กรัม

### 3.5 การผลิตเมทิลเอสเทอร์

เมทิลเอสเทอร์ คือผลผลิตที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับ แอลกอฮอล์ชนิดเมทานอล เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ให้มีลักษณะ โครงสร้างของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ คล้ายกับโครงสร้างของน้ำมันดีเซลที่ได้จากปิโตรเลียม

การผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทางเคมีแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เป็นการทำให้ปฏิกิริยาเคมีระหว่างกรด ไขมันกับแอลกอฮอล์ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อช่วยทำให้ปฏิกิริยาให้กลายเป็นเอสเทอร์ได้เร็วขึ้น โดย กระบวนการนี้เป็นการทำปฏิกิริยาของกรดไขมันหรือหมู่ R เป็นการทำปฏิกิริยาโดยตรง ผลผลิตที่ได้ คือเอสเทอร์กับน้ำโดยสมการทั่วไปเป็นดังรูปที่ 3.5

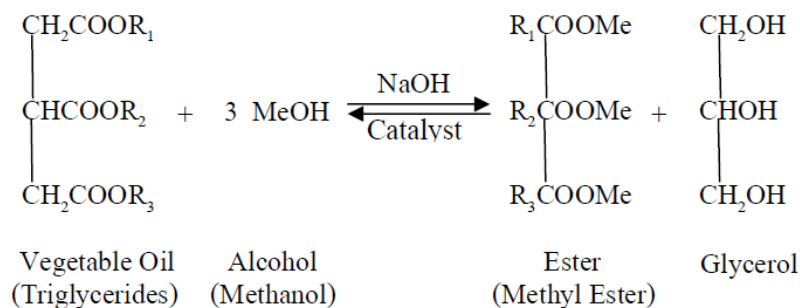


รูปที่ 3.5 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

โดยทั่วไปนิยมใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการผลิตแบบเอสเทอร์ฟิเคชัน กรดที่ใช้ ส่วนใหญ่เลือกใช้กรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเนื่องจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันใช้อุณหภูมิ ในการเกิดปฏิกิริยาไม่เกินอุณหภูมิจุดเดือดของเมทานอล ต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน เพื่อให้ ได้เมทิลเอสเทอร์ที่มีความบริสุทธิ์ตามมาตรฐานหรือเปอร์เซ็นต์การเกิดเมทิลเอสเทอร์ตามมาตรฐานที่ กำหนด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่สามารถย้อนกลับได้ ดังนั้นต้องมีการดึงน้ำออกเพื่อให้ ปฏิกิริยาดำเนินไปทางด้านขวามือเพื่อเพิ่มผลผลิตของเอสเทอร์

ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายหมู่เอสเทอร์ คือการทำปฏิกิริยาทางเคมี ระหว่างไตรเอสเตอร์ในน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์ เพื่อให้เกิดเป็นเอสเทอร์ตัวใหม่หรือที่ เรียกว่าการส่งผ่านเพื่อให้ทำปฏิกิริยา การนำเอาน้ำมันพืชหรือสัตว์ที่มีทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โดยใช้ กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ได้เอสเทอร์ โดยจะเรียกชนิดของไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ตาม ชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ทำปฏิกิริยา ไบโอดีเซลชนิดเอสเทอร์นี้มีคุณสมบัติคล้ายกับน้ำมันดีเซลมาก ผลผลิตของปฏิกิริยาที่กล่าวมาข้างต้นคือ เมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล ดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาสมดุล ถ้าต้องการให้ปฏิกิริยาดำเนินไปทางขวาทำได้โดยใช้แอลกอฮอล์ที่มากเกินไป ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาข้างต้นจะเป็นปฏิกิริยารวม ซึ่งจะประกอบด้วยกำนกลับต่อเนื่อง คือจากไตรกลีเซอไรด์ เป็นไดกลีเซอไรด์ และเป็นโมโนกลีเซอไรด์ จากดุลมวลสารข้างต้นต้องการ 3 โมลของเมทานอล ต่อ 1 โมลของไตรกลีเซอไรด์ จึงใช้เมทานอลมากเกินไป 100% ซึ่งจะให้อัตราการเปลี่ยนสูงและจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง โดยทั่วไปนิยมใช้ไฮดรอกไซด์ ส่วนอัตราการผลิตและการทำปฏิกิริยาขึ้นกับอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อให้เวลาเพียงพอ ปฏิกิริยาจะดำเนินไปสมบูรณ์ได้ ณ. อุณหภูมิห้อง โดยทั่วไปปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่อุณหภูมิจุดเดือดของเมทานอล

ตัวแปรสำคัญซึ่งมีผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันจากการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน และทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน มีดังนี้ อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา ความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้น ความชื้นและกรดไขมัน อัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์กับไตรกลีเซอไรด์ ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาและความรุนแรงในการผสม

### 3.6 ระบบไฮดรอลิก

#### 3.6.1 ระบบไฮดรอสแตติกและไฮดรอดนามิก

ระบบไฮดรอสแตติกใช้แรงดันของไหลในการส่งกำลัง ระบบไฮดรอสแตติกเกี่ยวข้องกับกลไกของของเหลวที่ยังคงสภาพและใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับสภาวะสมดุลในของไหล ระบบสร้างแรงดันสูงและผ่านสายส่งและตัวควบคุม แรงดันนี้จะขับเคลื่อนตัวกระตุ้น (แบบเชิงเส้นหรือเชิงหมุน) ปัมที่ใช้ในระบบไฮดรอสแตติกคือปัมแบบปริมาตรแทนที่เชิงบวก ตัวอย่างของไฮดรอสแตติกที่บริสุทธิ์คือการถ้ายอนกำลังในระบบไฮดรอลิก

ระบบไฮดรอดนามิกหรืออุทกพลศาสตร์ ใช้การเคลื่อนที่ของของเหลวเพื่อส่งกำลัง โดยถูกส่งผ่านด้วยพลังงานจลน์ของของไหล อุทกพลศาสตร์เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์ของการเคลื่อนย้ายของเหลวและใช้ทฤษฎีการไหล ปัมที่ใช้ในระบบอุทกพลศาสตร์เป็นปัมแบบปริมาตรแทนที่ไม่เชิงบวก ตัวอย่างของอุทกพลศาสตร์บริสุทธิ์คือการแปลงพลังงานการไหลในกังหันของโรงไฟฟ้าพลังน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา โดยผู้ดูแลเนื้อหาเว็บไซต์นี้ขอสงวนสิทธิ์ในการคัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.2 กำลังของของไหล

กำลังของของไหลมีความเก่าแก่เหมือนกับอารมณ์ของเราเอง น้ำใช้มานานหลายศตวรรษเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้ล้อเลื่อนน้ำและใช้ลมเพื่อหมุนกังหันลมและขับเคลื่อนเรือ ชาวจีนใช้ว่าลวไม้เพื่อควบคุมการไหลของน้ำผ่านท่อไม้ไผ่ใน 4000 ปีก่อนคริสตกาล ชาวอียิปต์โบราณได้สร้างเขื่อนก่อกออิฐขึ้นข้ามแม่น้ำไนล์ 14 ไมล์ไปทางใต้ถึงกรุงไคโรในปัจจุบัน เพื่อควบคุมการระบายน้ำด้วยคลอง ท่อกันอิฐ และท่อเซรามิก ในช่วงจักรวรรดิโรมันระบบน้ำที่ใช้ ท่อระบายน้ำอ่างเก็บน้ำและท่อก่อสร้างขึ้นเพื่อขนส่งน้ำไปยังเมืองต่างๆ อย่างไรก็ตามการใช้กำลังของของไหลในระยะเริ่มต้นนี้ต้องการเคลื่อนย้ายของเหลวในปริมาณมาก ขณะที่แรงดันที่ค่อนข้างต่ำจากธรรมชาติ เทคโนโลยีกำลังของของไหลเริ่มมีขึ้นในปี ค.ศ. 1650 โดยมีการค้นพบกฎปาสคาล กล่าวง่ายๆว่าความดันในของไหลจะถูกส่งไปอย่างไม่ลดละอย่างเท่าเทียมกันในทุกทิศทางในภาชนะที่ถูกกักไว้ ในปี ค.ศ. 1750 Bernoulli ได้พัฒนาหลักการอนุรักษ์พลังงานสำหรับของเหลวที่ไหลผ่านท่อ ทั้งกฎปาสคาลและ กฎ Bernoulli เป็นหัวใจสำคัญของการใช้กำลังของของไหลทั้งหมดและใช้เพื่อการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามมันก็ไม่ได้ใช้จนกว่าการปฏิวัติอุตสาหกรรมในปี ค.ศ. 1850 ในสหราชอาณาจักรเพื่อกลั่นเหล่านี้นำมาใช้ในอุตสาหกรรม

การใช้งานไฮดรอลิกขนาดใหญ่ครั้งแรกสำหรับงานที่กล่าวมานี้ถูกสร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1860 โดย Whitworth ในอีก 20 ปีข้างหน้ามีการพยายามลดการสูญเสียและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาของอุปกรณ์เป็นจำนวนมาก ในปี ค.ศ. 1872 Rigg ได้จดสิทธิบัตรเครื่องยนต์ไฮดรอลิกสามกระบอกสูบ ในปี ค.ศ. 1873 Brotherhood สามกระบอกสูบแบบจังหวะคงที่ที่ได้รับการจดสิทธิบัตรและใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับรถเครน เครื่องยก ฯลฯ ทั้งเครื่องยนต์ที่กล่าวมาข้างต้นถูกขับเคลื่อนโดยของไหล

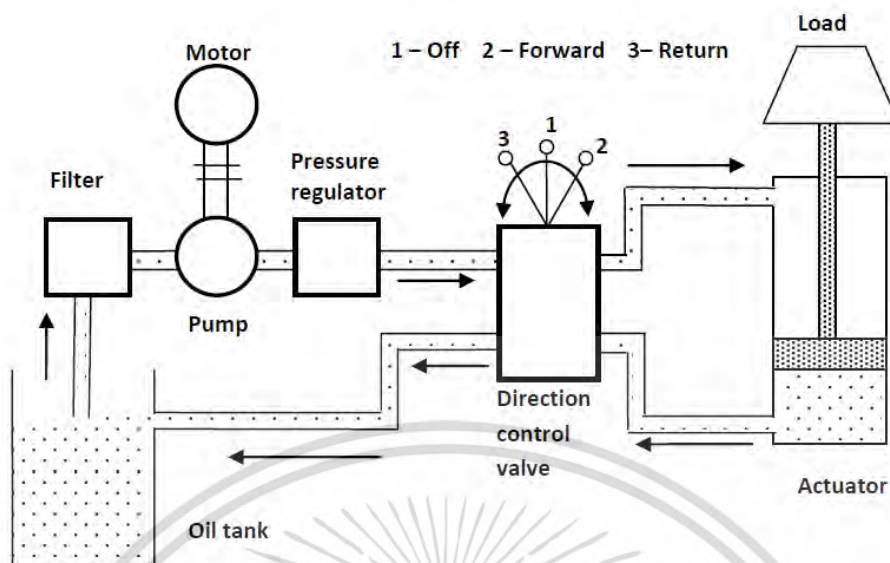
วันนี้กำลังของของไหลมีการใช้อย่างกว้างขวางในเกือบทุกสาขาของอุตสาหกรรม การใช้นวัตกรรมของเทคโนโลยีสมัยใหม่เช่นระบบไฟฟ้าชนิดวงรอบปิด ไมโครโพรเซสเซอร์และวัสดุที่ปรับปรุงใหม่สำหรับวัสดุก่อสร้าง จะยังคงพัฒนาประสิทธิภาพของกำลังของของไหลต่อไป ความต้องการทางทหารประยุกต์ใช้กำลังของของไหลและพัฒนาต่อไปได้ดี อุตสาหกรรมการบินและอวกาศเป็นแรงผลักดันให้เกิดความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีกำลังของของไหล

### 3.6.3 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบไฮดรอลิก

ระบบไฮดรอลิกเป็นชุดส่งกำลังที่ใช้ของเหลวที่มีแรงดันสูงเป็นของไหล สำหรับส่งพลังงานจากแหล่งกำเนิดพลังงานไปยังจุดที่ใช้พลังงานเพื่อให้ได้งานที่มีประโยชน์ ในรูปที่ 3.7 แสดงวงจรง่าย ๆ ของระบบไฮดรอลิกที่มีส่วนประกอบพื้นฐานหน้าที่ของส่วนประกอบที่แสดงในรูปที่ 3.7 มีดังนี้

1. ตัวกระตุ้นไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงพลังงานของของไหลให้เป็นพลังงานเชิงกลเพื่อให้เกิดงานที่เป็นประโยชน์ ตัวกระตุ้นอาจเป็นประเภทเชิงเส้น (เช่นกระบอกสูบไฮดรอลิก) หรือแบบโรตารี (เช่นมอเตอร์ไฮดรอลิก) เพื่อให้การเคลื่อนที่เชิงเส้นหรือการหมุนตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบของระบบไฮดรอลิก

2. ปั๊มไฮดรอลิกใช้เพื่อบังคับให้ของเหลวจากอ่างเก็บไปยังส่วนที่เหลือของวงจรไฮดรอลิกด้วยการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฮดรอลิก
3. วาล์วใช้ในการควบคุมทิศทางการไหลและความดันและอัตราการไหลของของไหลที่ไหลผ่านวงจร
4. ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟภายนอก (มอเตอร์) เพื่อขับเคลื่อนปั๊ม
5. อ่างเก็บใช้เพื่อเก็บน้ำมันไฮดรอลิก
6. ระบบท่อส่งเพื่อลำเลียงน้ำมันไฮดรอลิกจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง
7. ตัวกรองถูกนำมาใช้เพื่อขจัดอนุภาคแปลกปลอมเพื่อให้ระบบของเหลวสะอาดและมีประสิทธิภาพตลอดจนหลีกเลี่ยงความเสียหายต่อตัวทำงานและวาล์ว
8. ตัวควบคุมความดัน เพื่อรักษาระดับความดันที่ต้องการไว้ในน้ำมันไฮดรอลิก

ระบบท่อที่แสดงในรูปที่ 3.7 มีลักษณะระบบปิดด้วยของเหลวที่ถ่ายโอนจากถังเก็บเข้ากับด้านใดด้านหนึ่งของลูกสูบและกลับมาจากอีกด้านหนึ่งของลูกสูบไปยังถังเก็บ ของเหลวถูกดึงออกมาจากถังเก็บด้วยปั๊มที่สร้างการไหลของของไหลที่ระดับความดันที่ต้องการ ถ้าความดันของของไหลสูงกว่าระดับที่ต้องการของไหลที่เหลือจะกลับสู่ถังเก็บและยังคงอยู่ต่อไปจนกว่าความดันจะอยู่ในระดับที่ต้องการ การเคลื่อนของกระบอกสูบถูกควบคุมโดยการเปลี่ยนตำแหน่งสามครั้งเหมือนวาล์วควบคุม

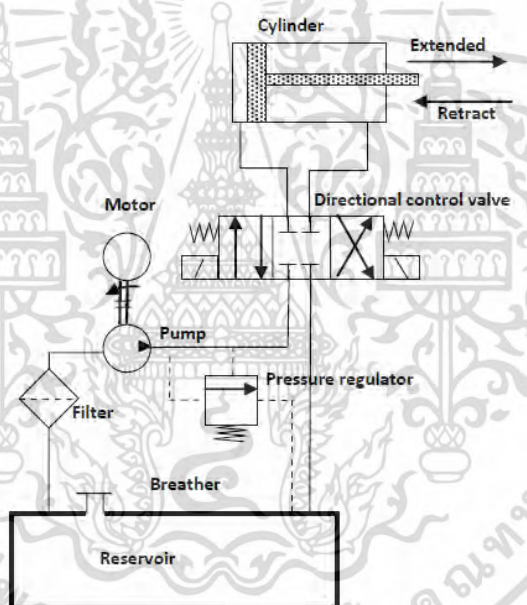
1. เมื่อเปลี่ยนลูกสูบวาล์วไปที่ตำแหน่งบน ท่อความดันจะเชื่อมต่อกับพอร์ต A และทำให้น้ำหนักขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เมื่อตำแหน่งของวาล์วเปลี่ยนไปที่ตำแหน่งที่ต่ำกว่า ท่อความดันจะเชื่อมต่อกับพอร์ต B และทำให้ไหลลดลง

3. เมื่อวาล์วอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลาง มันจะล๊อคของไหลเข้าไปในกระบอกสูบ และปลายสายของไหล (ทำให้ของไหลบีบเพื่อกลับไปที่ตั้งผ่านช่องปล่อยความดัน)

ในอุตสาหกรรม นักออกแบบเครื่องจักรสื่อถึงการออกแบบระบบไฮดรอลิกโดยใช้แผนภาพวงจรรูปที่ 3.8 แสดงส่วนประกอบของระบบไฮดรอลิกโดยใช้สัญลักษณ์ ของไหลซึ่งเป็นน้ำมันไฮดรอลิกจะถูกเก็บไว้ในอ่างเก็บ เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเปิด มันจะทำงานเป็นปั๊มแบบปริมาตรแทนที่เชิงบวกที่ดึงน้ำมันไฮดรอลิกผ่านตัวกรองและให้ความดันสูง น้ำมันที่มีแรงดันผ่านวาล์วควบคุมและทำงานบนตัวกระตุ้น น้ำมันจากปลายอีกข้างหนึ่งของตัวกระตุ้นจะกลับไปที่ตั้ง การเคลื่อนที่ของกระบอกสูบจะถูกควบคุมโดยใช้วาล์วควบคุมทิศทาง



รูปที่ 3.8 ส่วนประกอบของระบบไฮดรอลิก (แบบเชิงสัญลักษณ์)

### 3.7 น้ำมันไฮดรอลิก [31]

น้ำมันไฮดรอลิกเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งในระบบไฮดรอลิก เพราะถ้าปราศจากน้ำมันไฮดรอลิก ระบบก็ไม่สามารถทำงานได้ หรือถ้าเลือกใช้น้ำมันไฮดรอลิกผิดประเภท ไม่เหมาะสมกับเครื่องจักรตามที่บริษัทผู้ผลิตได้กำหนดไว้ เครื่องจักรก็จะทำงานได้ไม่เต็มที่หรืออาจจะขัดข้องไปทั้งระบบ เนื่องจากเครื่องจักรต่าง ๆ ที่ใช้ระบบไฮดรอลิกมีลักษณะของการใช้แรงไม่เหมือนกันและระยะเบียดของชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในเครื่องจักรไม่เท่ากันรวมทั้งอุณหภูมิในการทำงานของเครื่องจักรแต่ละชนิดด้วย ดังนั้นการเลือกใช้น้ำมันไฮดรอลิกแต่ละชนิดจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของงาน ตามที่บริษัทผู้ผลิตได้กำหนดไว้ ถึงแม้ว่าเราจะเลือกใช้น้ำมันไฮดรอลิกได้ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในทางปฏิบัติไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างถูกต้องแล้วก็ตาม ในขณะที่ใช้งานก็ยังคงดูแลบำรุงรักษาน้ำมันไฮดรอลิกให้อยู่ในสภาพดี คือสะอาด มีคุณสมบัติพอเหมาะและเปลี่ยนใหม่เมื่อถึงอายุการใช้งาน รวมทั้งควรตรวจสอบให้มือน้ำมันไฮดรอลิกอยู่ในระดับที่พอเพียงสำหรับการใช้งานในระบบอย่างสม่ำเสมอ

### 3.7.1 หน้าที่ของน้ำมันไฮดรอลิก

หน้าที่หลักของน้ำมันไฮดรอลิกมี 4 ประการ คือ

1. การส่งผ่านกำลังงาน น้ำมันไฮดรอลิกมีหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายทอดกำลังงานจากจุดหนึ่งในระบบเพื่อเปลี่ยนกำลังงานของไหลให้เป็นกำลังงานกล ซึ่งถ้าจะให้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพแล้ว น้ำมันไฮดรอลิกที่ไหลในท่อทางหรือไหลผ่านวาล์วควบคุมต่าง ๆ จะต้องไหลไปได้อย่างราบรื่น แต่ถ้าเกิดมีความต้านทานการไหลมาก ๆ ก็จะทำให้กำลังงานสูญเสียไปและน้ำมันไฮดรอลิกจะต้องไปยุบตัวตามความดันในขณะที่ทำงาน เช่น เมื่อปั๊มทำงานดูดอัดเพื่อส่งน้ำมันไปยังท่อทางวาล์วเลื่อนทำงาน และในขณะที่กระบอกสูบหรือมอเตอร์ไฮดรอลิก กำลังทำงานขับโหลด

2. การหล่อลื่น น้ำมันไฮดรอลิกจะทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นและลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ เช่น ชิ้นส่วนของปั๊ม มอเตอร์ไฮดรอลิก ลูกสูบ กระบอกสูบ แกนวาล์ว และส่วนประกอบต่าง ๆ ที่มีการเคลื่อนที่ โดยที่น้ำมันไฮดรอลิกจะมีสภาพเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ กั้นระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่เสียดสีกันทั้งในขณะที่ระบบทำงาน และหยุดนิ่ง ฟิล์มน้ำมันไฮดรอลิกจะช่วยในการหล่อลื่นเพื่อลดการเสียดสีของผิวสัมผัสระหว่างแกนวาล์วกับผนังภายในตัววาล์ว แผ่นฟิล์มดังกล่าวจะต้องมีความหนืดพอเหมาะที่จะแทรกซึมเข้าไปในรูเล็ก ๆ และรอยต่อของชิ้นส่วนภายในอุปกรณ์ และสามารถรับน้ำหนักของวัตถุที่กดทับหรือรับแรงกดอยู่ได้ ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้เรียกว่าความแข็งแรงของฟิล์ม (Film strength) นอกจากนี้ น้ำมันไฮดรอลิกยังควรมีคุณสมบัติในการลื่นไหลได้ดีด้วย กล่าวคือ ในขณะที่น้ำมันไฮดรอลิกเป็นฟิล์มยึดติดกับชิ้นส่วนใดก็สามารถจะลื่นไหลไปกับชิ้นส่วนนั้น ๆ และช่วยให้เคลื่อนไปได้อย่างคล่องตัวด้วย คุณสมบัติข้อนี้เรียกว่า ความลื่น (Lubricity)

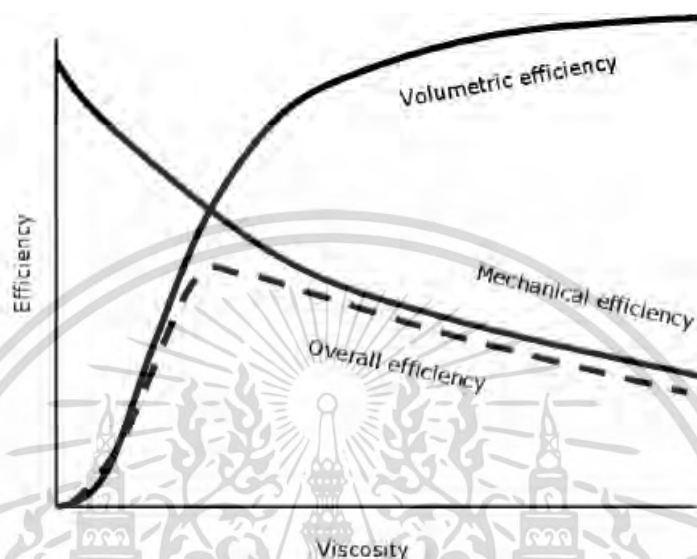
3. การซีลน้ำมันไฮดรอลิก จะทำหน้าที่เป็นซีลด้วยเพื่อให้มีการรั่วซึมเกิดขึ้น น้อยที่สุด ภายในชิ้นส่วนของอุปกรณ์ในระบบไฮดรอลิกเมื่อมีความกดดันเกิดขึ้น การซีลนี้ จะขึ้นอยู่กับความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิกแต่ละชนิด

4. การระบายความร้อนการไหลเวียนของน้ำมันไฮดรอลิกในระบบการทำงานจะช่วยถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ทั่วอุปกรณ์ต่าง ๆ อันเนื่องมาจากการสูญเสียกำลังงานในระบบความร้อนนี้ก็จะหายไปโดยน้ำมันและไหลลงสู่ถังพัก แล้วแผ่กระจายความร้อนผ่านผนังของถังพักได้

### 3.7.2 คุณภาพที่ต้องการในน้ำมันไฮดรอลิก

ของไหลทั้งหมดรวมทั้งน้ำมันและอากาศมีคุณสมบัติพื้นฐานและเป็นไปตามกฎกลศาสตร์ของไหลขั้นพื้นฐาน ความหนืดของของไหลคือความต้านทานของมัน ของไหลบางอย่างเช่นน้ำมีความเอกลक्षणนี้เป็นเอกลक्षणที่สวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนืดต่ำในขณะที่อื่น ๆ เช่นน้ำผึ้งเหนียวและมีความหนืดสูง ถ้าความหนืดต่ำเกินไปของไหลจะรั่วไหลผ่านซีลเป็นสาเหตุทำให้สูญเสียประสิทธิภาพเชิงปริมาตร ถ้าความหนืดสูงเกินไป ของไหลยากที่จะผลักดันผ่านท่อ, อุปกรณ์ และวาล์วทำให้สูญเสียประสิทธิภาพทางกล รูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นว่าของเหลวที่มีความหนืดปานกลางดีที่สุดสำหรับการประยุกต์ใช้ในไฮดรอลิก



รูปที่ 3.9 ความหนืดสัมพันธ์กับการสูญเสียในระบบไฮดรอลิก

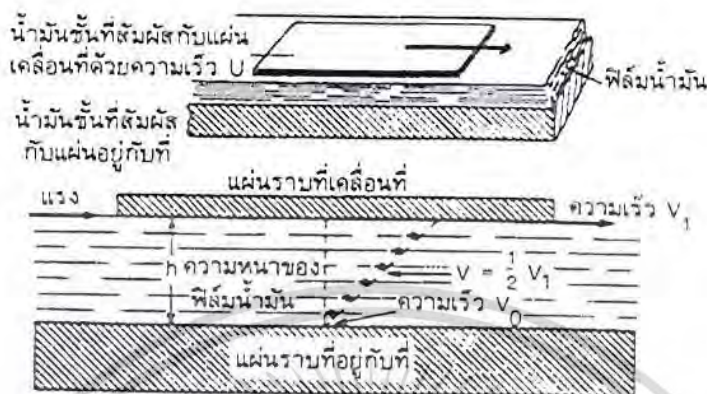
### 3.7.3 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันไฮดรอลิก

คุณสมบัติทางกายภาพเป็นสิ่งที่เราใช้ในการตรวจสอบว่า น้ำมันไฮดรอลิกมีประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานเพียงใดและจะมีอายุการใช้งานเท่าใด ดังนั้นในการเลือกชนิดของน้ำมันไฮดรอลิกจะนำมาใช้ เราจึงควรทราบถึงคุณสมบัติ ลักษณะ และข้อบ่งชี้ น้ำมันไฮดรอลิกชนิดนั้น ๆ คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันไฮดรอลิกที่จะกล่าวต่อไปนี้คือ ความหนืด ดัชนีความหนืด และจุดข้นแข็ง

1. ค่าความหนืดสมบูรณ์ หรือความหนืดไดนามิกทำได้จากการพิจารณาการไหลของของเหลวซึ่งมีค่าความหนืดผ่านแผ่นราบหรืออาจจะให้แผ่นราบเคลื่อนที่โดยของเหลวอยู่กับที่ ซึ่งจะได้ค่าเหมือนกันจากรูปที่ 3.10 เป็นการทดลองของนิวตันโดยเอาของเหลวที่มีความหนืดใส่ไว้ระหว่างแผ่นราบผิวเรียบ 2 แผ่น โดยแผ่นราบแผ่นหนึ่งถูกยึดติดอยู่กับที่ (Stationary plate) ส่วนแผ่นราบอีกแผ่นหนึ่งถูกดึงให้เคลื่อนที่ (Moving plate) ด้วยความเร็วอยู่ที่  $U$  โดยใช้แรง  $F$  กระทำ ระยะห่างของแผ่นราบทั้งสองเท่ากับ  $h$  เนื่องจากของเหลวจะเกาะติดอยู่กับผิวของของแข็งเสมอ ดังนั้นของเหลวชั้นที่อยู่ติดกับแผ่นบนก็จะเคลื่อนที่ตามด้วยความเร็ว  $U$  คือ  $v_1$  ดังรูปที่ 3.10 และของเหลวชั้นที่อยู่ติดกับแผ่นล่างจะมีความเร็วเป็นศูนย์ หรือ  $v_0$  ส่วนของเหลวชั้น อื่นๆ จะมีความเร็วอยู่ระหว่างสองค่านี้ และถ้าระยะห่าง  $h$  กับความเร็ว  $U$  มีค่าไม่มากเกินไป ความเร็วจะเปลี่ยนเป็นเส้นตรง จากการทดลองของนิวตันนี้พบว่า เมื่อออกแรงดึง  $F$  ให้แผ่นราบแผ่นบนเคลื่อนที่ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็ว  $U$  แรง  $F$  จะเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับพื้นที่ของแผ่นบน  $A$  และเป็นอัตราส่วนผกผันกับระยะห่างระหว่างแผ่นทั้งสอง  $h$  และเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับความเร็ว  $U$  ดังสมการ



รูปที่ 3.10 การพิจารณาค่าความหนืดสมบูรณ์

$$F \propto A \frac{U}{h} \quad (3.2)$$

$$F \propto A \frac{du}{dy} \quad (3.3)$$

$$F \propto \eta A \frac{du}{dy} \quad (3.4)$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{du}{dy} \quad (3.5)$$

$$\eta = \tau \frac{du}{dy} = \frac{F}{A} \frac{du}{dy} \quad (3.6)$$

$$\text{ความหนืดสมบูรณ์} = \frac{\text{ความเค้นเฉือน}}{\text{อัตราการเฉือน}} \quad (3.7)$$

สมการที่ 3.6 นี้ เรียกว่า Newton equation of viscosity

เมื่อ  $\eta$  = ค่าคงที่เรียกว่า ค่าความหนืดสมบูรณ์

$\tau$  = ความเค้นเฉือนที่เกิดจากการเคลื่อนที่

$F$  = แรงที่กระทำ

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของแผ่นซึ่งกำลังเคลื่อนที่

$\frac{du}{dy}$  = อัตราการเฉือนหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความหนืดจลน์ เมื่อนำเอาค่าความหนืดสมบูรณ์ของเหลวมาหารด้วยค่าความหนาแน่นของของเหลวนั้นในรูปสมการ 3.8 แล้วค่าที่ได้จะมีชื่อว่า ความหนืดคิเนมาติกหรือความหนืดจลน์นั่นเองโดยเขียนสัญลักษณ์ เป็น  $\nu$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3.8)$$

เมื่อ  $\nu$  = ความหนืดจลน์ หน่วยเป็นเซนติสโตก (cSt)

$\rho$  = ความหนาแน่นของของเหลวหน่วยเป็น  $\text{kg/m}^3$

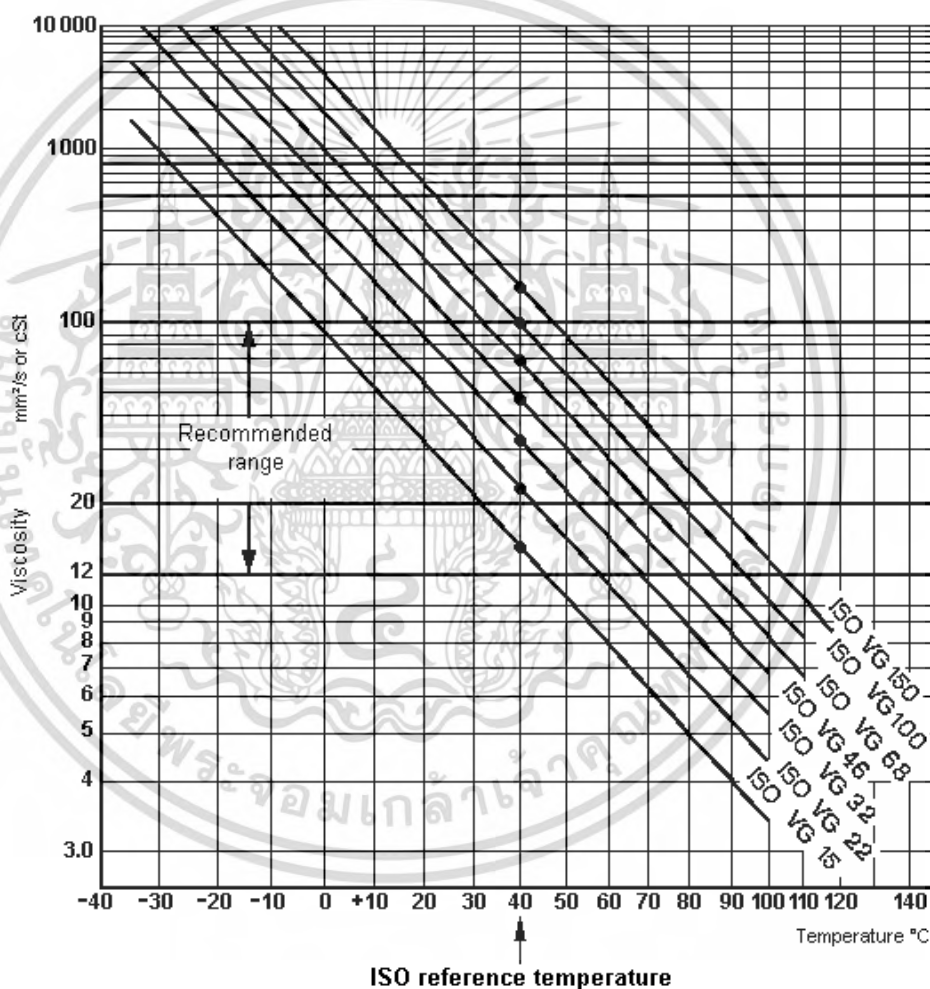
สำหรับความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิกเป็นคุณสมบัติที่สำคัญ ถ้ามีความหนืดไม่พอเหมาะอาจทำให้เกิดปั๊มทำงานผิดพลาด ตัวอย่างเช่น น้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะทำให้เกิดการรั่วภายในมากขึ้น ปริมาตรจ่ายของปั๊มก็จะลดลง ในขณะที่น้ำมันความหนืดสูงจะทำให้ปั๊มเกิดอาการวิเศษได้ ทั้งสองกรณีนี้ จลตประสิทธิภาพของปั๊มลงจึงควรเลือกความหนืดของน้ำมันที่เหมาะสมกับปั๊มไฮดรอลิกชนิดต่าง ๆ

ส่วนความหนืดที่พอเหมาะในระบบไฮดรอลิก การเลือกใช้น้ำมันไฮดรอลิกควรเลือกค่าความหนืดที่พอเหมาะ เพราะเมื่อระบบทำงาน อุณหภูมิของน้ำมันจะเท่ากับอุณหภูมิของอำภาครอบ ๆ ดังนั้นความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิกอาจจะสูงมาก ถ้าเครื่องจักรทำงานอยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ความหนืดก็จะลดลงและจะต้องใช้เครื่องช่วยลดอุณหภูมิด้วยดังรูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนืดจลน์ของน้ำมันไฮดรอลิกมาตรฐาน ISO ดังนั้นในกรณีที่ใช้น้ำมันไฮดรอลิกชนิดเดียวกันทั้งในฤดูร้อนและหนาว (สำหรับประเทศที่มีอุณหภูมิในฤดูร้อนและหนาวแตกต่างกันมาก) ความหนืดของน้ำมันก็จะลดลงมากถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น วิธีที่ดีก็คือควรจะใช้ใช้น้ำมันไฮดรอลิกที่มีความหนืดต่ำในฤดูหนาว และใช้ที่มีความหนืดสูงในฤดูร้อน อย่างไรก็ตามถ้าเครื่องจักรที่ใช้ติดตั้งอยู่แล้วภายในโรงงาน ปัญหาดังกล่าวอาจเกิดขึ้น น้อยมาก

โดยทั่วไปน้ำมันไฮดรอลิกจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อระบบทำงาน และถ้าเราเลือกใช้น้ำมันไฮดรอลิกชนิดที่เหมาะสมกับระบบแล้ว ถึงแม้ในขณะที่ทำงานอุณหภูมิในระบบจะสูงขึ้นก็จะไม่มีผล เพราะบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ระบบไฮดรอลิกได้ออกแบบทุกชิ้นส่วนให้สามารถปรับตัวเข้ากับความปลอดภัยบางอย่างในระบบ ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นปั๊ม วาล์วควบคุม หรือกระบอกสูบ ต่างก็จะปรับระบบการทำงานให้สอดคล้องกับสภาพอุณหภูมิของน้ำมันที่สูงขึ้นในขณะที่ทำงาน แต่ก็ได้หมายความว่าใช้น้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับเครื่องจักรได้เสมอ เนื่องจากความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิกจะเปลี่ยนแปลงเมื่อระบบทำงาน ดังนั้นจึงเกิดผลกระทบโดยทั่วไป กล่าวคือเมื่อความหนืดลดลงประสิทธิภาพของระบบก็จะลดลงด้วย ทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ เช่น เกิดการรั่วซึมในวาล์วและอุปกรณ์การทำงาน ซึ่งมีผลให้ความเที่ยงตรงในระบบและกำลังงานลดลงเกิดการรั่วซึมที่ประเก็นและซีลตรงรอยต่อระหว่างซี ส่วนได้ง่ายทำให้ซีลส่วนอุปกรณ์ที่เคลื่อนไหวในขณะที่ทำงานสึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเร็วขึ้น โดยเฉพาะว่าลวควบคุมและอุปกรณ์การทำงาน ทำให้น้ำมันมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการรั่วซึมในระบบ และอายุการใช้งานจะสั้นลงเมื่อระบบรับโหลดมาก ๆ อุปกรณ์ต่าง ๆ จะสึกหรอง่าย ประสิทธิภาพของปั๊มอาจลดลงและถ้าน้ำมันไฮดรอลิกมีความหนืดมากเกินไป ก็มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือแรงเสียดทานในการไหลจะสูงขึ้น ทำให้ความดันที่ระบบลดลงและต้องใช้กำลังงานมากขึ้น เกิดการขัดข้องในระบบ ทำให้การทำงานของระบบช้าและเสื่อมลง เกิดความผิดปกติมากขึ้นในระบบ โดยเฉพาะอยู่ในอุณหภูมิต่ำ ลดประสิทธิภาพของเครื่องจักรเนื่องจากการเกิดการสูญเสียกำลังมากขึ้น ปั๊มดูดน้ำมันได้ยากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของปั๊มลดลง ทำให้เกิดเสียงดังมากในขณะที่ระบบทำงานอำกาศจะไม่สามารถแยกตัวจากน้ำมันในถังพัก



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ความหนืดจลน์-อุณหภูมิกับเกรดน้ำมันไฮดรอลิก ISO

3. ดัชนีความหนืด (Viscosity index หรือ VI) จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมินั้นความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมัน และในขณะเดียวกันอุณหภูมิก็น่าจะเป็นสิ่งที่อิทธิพลต่อความหนืดมากที่สุดกล่าวคือเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้นความหนืดจะลดลง แต่ปริมาณการเปลี่ยนแปลงนี้ จะแตกต่างกันไปตามส่วนประกอบทางเคมีของน้ำมันแต่ละชนิดด้วย และเนื่องจากไม่ทราบกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนืดมีอิทธิพลต่อความเสียดทานของการไหลและความดันเป็นมาก ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของความหนืดเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการไหลของน้ำมันในท่อทางและการหล่อลื่นอุปกรณ์ ดังนั้นความหนืดเป็นส่วนหนึ่งที่จะแสดงลักษณะทางกายภาพของน้ำมัน โดยเราจะวัดได้จากการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของความหนืดของน้ำมันตัวอย่าง 2 ชนิดที่อุณหภูมิ 100 และ 210 องศาฟาเรนไฮต์ และเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป น้ำมันมีค่าดัชนีความหนืดสูงจะเปลี่ยนแปลงความหนืดน้อยกว่าน้ำมันที่มีค่าดัชนีความหนืดต่ำ กล่าวโดยสรุปก็คือถ้ากำหนดให้น้ำมันตัวอย่างชนิดหนึ่งมีดัชนีความหนืดเป็น 0 (ศูนย์) ความหนืดของน้ำมันชนิดนั้นก็จะเป็นเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ในขณะที่เดียวกัน ถ้ากำหนดให้น้ำมันชนิดหนึ่งมีดัชนีความหนืดเป็น 100 ความหนืดของน้ำมันชนิดนี้ ก็จะเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ดังนั้น น้ำมันต่างๆ ก็จะมีดัชนีความหนืดอยู่ระหว่าง 0-100 VI ในปัจจุบันมีวิธีการกลั่นน้ำมันที่ทันสมัยมากขึ้นจึงมีการเติมส่วนประกอบอื่น ๆ ทางเคมีลงในน้ำมัน ทำให้สามารถผลิตน้ำมันที่มีดัชนีความหนืดสูงกว่าหรือต่ำกว่า 100 VI หรือต่ำกว่า 0 VI ได้อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญที่สุดก็คือควรให้ความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิกมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป การหาค่าดัชนีความหนืดโดย ASTM D2270-4 น้ำมันในปัจจุบันมีค่าดัชนีความหนืดสูงกว่า 100 ซึ่งทำได้โดยเติมโพลีเมอร์หรือเรียกว่า VI improver ลงไปในฐานน้ำมัน โพลีเมอร์เหล่านี้มีโมเลกุลใหญ่มาประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 350 ถึง 1400 หรือมากกว่า โพลีเมอร์ซึ่งละลายอยู่ในน้ำมันมีคุณสมบัติสามารถเกาะตัวกันเป็นโมเลกุลใหญ่ขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลก็คือ น้ำมันผสมโพลีเมอร์เหล่านี้ จะมีอัตราการเปลี่ยนความหนืดน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน เพราะแรงเสียดทานของโพลีเมอร์โมเลกุลที่อุณหภูมิสูงมีผลทำให้ความหนืดของของผสมมากกว่าเดิม

4. จุดขุ่นแข็ง หรือจุดไหลเท (Pour point) เป็นคุณสมบัติทางกายภาพอีกประการหนึ่งของน้ำมันไฮดรอลิก หมายถึงจุดที่อุณหภูมิต่ำที่สุดที่น้ำมันจะไหลไปได้ จุดขุ่นแข็งของน้ำมันไฮดรอลิกควรมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่ระบบไฮดรอลิกทำงาน แต่จุดขุ่นแข็งนี้จะมีปัญหาหากเมื่อระบบไฮดรอลิกต้องทำงานในสภาพของอากาศเย็นมีอุณหภูมิต่ำกว่าปกติมาก สำหรับเกณฑ์โดยทั่ว ๆ ไปนั่นคือ จุดขุ่นแข็งควรอยู่ที่ 20 องศาฟาเรนไฮต์ก่อนจะถึงอุณหภูมิต่ำสุดที่ระบบทำงาน

5. จุดวาบไฟ (Flash Point) เป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่สารจะให้ไอระเหยออกมาได้มากพอสามารถลุกติดไฟได้เมื่อมีแหล่งกำเนิดไฟ และเมื่อไอระเหยของสารหมดไป ไฟก็จะดับ แต่หากอุณหภูมิของสารสูงขึ้นเกินกว่าจุดวาบไฟ ทำให้สารให้ไอระเหยออกมาได้อีก ก็จะเกิดการลุกติดไฟต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ที่อุณหภูมินี้ จะเรียกว่า จุดไหม้ไฟ (Fire point) มักจะสูงกว่าจุดวาบไฟประมาณ 10-20°C และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเลยจุดไหม้ไฟไปอีก ก็จะถึง จุดลุกติดไฟตัวเอง (Auto-ignition temperature) ซึ่งที่อุณหภูมินี้ สารนั้นจะสามารถลุกติดไฟได้เองโดยไม่ต้องมีแหล่งกำเนิดไฟ การทดสอบจุดวาบไฟสามารถทดสอบได้ 2 วิธี คือ Open Cup (OC) และ Closed Cup (CC) จุดวาบไฟที่ระบุใน NFPA 49 ทั้งหมดจะเป็นอุณหภูมิที่ทำจากวิธี Closed Cup ซึ่งเป็นตัวเลขสำหรับใช้อ้างอิงการเกิดจุดวาบไฟในถังปิด บริเวณที่อัปอากาศ แต่ถ้าเป็นการทดสอบแบบ Open Cup จะใช้ตัวเลขในการอ้างอิงกับสถานการณ์สารเคมีที่รั่วไหล หรือภาชนะบรรจุที่เปิดฝาไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7.4 คุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันไฮดรอลิก

คุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันไฮดรอลิกเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยในการตัดสินใจคุณภาพและอายุการใช้งาน คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดคือ ความต้านทานการเกิดสนิม (Oxidation resistance) เพราะของเหลวทั่วไปมักจะเกิดสนิมง่ายทำให้อายุการใช้งานสั้นลง การเกิดสนิมของน้ำมันไฮดรอลิกเป็นปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำมันกับอากาศ ซึ่งก่อให้เกิดสารใหม่ นอกเหนือไปจากส่วนประกอบอื่น ๆ ปะปนอยู่ในน้ำมัน ทำให้น้ำมันมีสีเข้มขึ้นและเหนียวขึ้น นอกจากนี้สารประกอบบางอย่างที่ละลายออกมาอาจมีคุณสมบัติเป็นกรด ซึ่งจะกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะภายในระบบ สำหรับสารประกอบประเภทที่ปะปนอยู่ในน้ำมันนั้น เมื่อได้รับความร้อนก็จับตัวกันเป็นก้อนอย่างเหนียว ซึ่งอนุภาคนี้จะลอยปะปนหมุนเวียนอยู่ในระบบด้วย นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่น ๆ ที่เกิดจากสนิมจับตัวกันกลายเป็นสภาพน้ำมันซีโล้ เมื่อปะปนกับผงโลหะก็จะทำให้เกิดปัญหาในระบบ เช่น ทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ติดขัดจากการอุดตัน

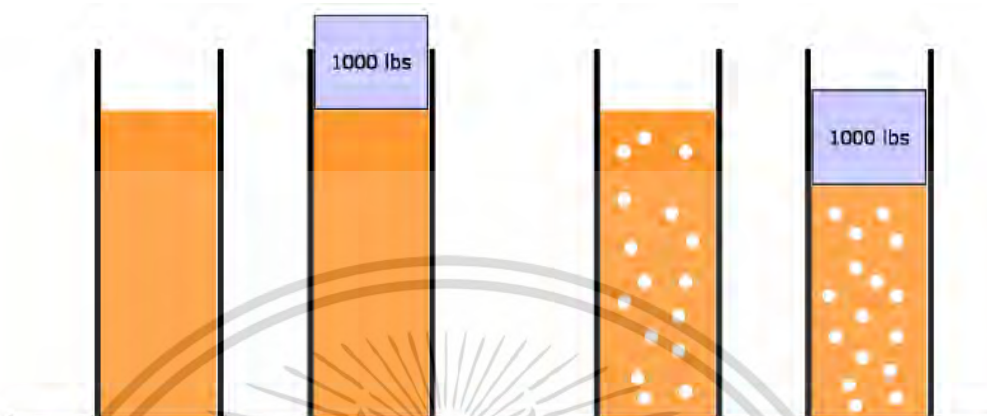
### 3.8 โมดูลัสของแรงบีบอัด

ในงานด้านวิศวกรรมจำนวนมาก ของไหลถูกสมมติว่าเป็นของไหลไม่สามารถอัดตัวได้ แม้ว่าวัสดุเกือบทั้งหมดจะสามารถบีบอัดได้ในระดับหนึ่ง ในบางงานไฮดรอลิก การอัดตัวของน้ำมันแค่เล็กน้อยกลายเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากแรงกดดันสูงถึง 5,000 psi โมดูลัสของแรงบีบอัดของของไหลเป็นสมบัติที่บ่งบอกถึงความเป็นสปริงของของไหลและถูกกำหนดให้เป็นความดันที่จำเป็นในการทำให้เกิดการลดลงของปริมาตร น้ำมันทั่วไปจะลดลงประมาณ 0.5% ปริมาตรสำหรับทุกๆ ความดันที่เพิ่มขึ้น 1000 psi เมื่อมีฟองอากาศอยู่ในน้ำมันไฮดรอลิก ค่าโมดูลัสของแรงบีบอัดจะลดลง และของไหลมีลักษณะคล้ายสปริง (รูปที่ 3.12) ของไหลในรูปด้านซ้ายเกือบเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ ยกเว้นของไหลที่มีอากาศแสดงในรูปด้านขวา อีกวิธีหนึ่งที่ของไหลสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติหากความดันตกต่ำกว่าความดันไอของของเหลวเป็นเหตุก่อให้เกิดฟองอากาศ เมื่อฟองอากาศยุบ คลื่นช็อกจะเกิดขึ้นได้กัดเซาะพื้นผิวบริเวณใกล้เคียง ความเสียหายของโพรงอากาศอาจเป็นปัญหาสำหรับใบพัดและปั๊มในระบบส่งกำลังมีอายุการใช้งานสั้น ค่าโมดูลัสแรงบีบอัด  $\beta$  แสดงในสมการ 3.9

$$\beta = \frac{\Delta P}{\Delta V/V} \quad (3.9)$$

โดยที่  $V$  คือปริมาตรของของเหลวเริ่มต้นและ  $\Delta V$  คือการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของของเหลวเมื่ออยู่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงความดัน  $\Delta P$  เนื่องจาก  $\Delta V/V$  ไม่มีหน่วย  $\beta$  มีหน่วยเป็นความดัน น้ำมันโมดูลัสแรงบีบอัด

$3.12 \times 10^5$  psi (2.15 GPa) ในขณะที่น้ำมันไฮดรอลิกมีค่าโมดูลัสแรงบีบอัดระหว่าง  $2 \times 10^5$  และ  $3 \times 10^5$  psi (น้ำมันSAE 30 อยู่ที่ประมาณ  $2.2 \times 10^5$  psi = 1.5 GPa), แต่ค่าโมดูลัสแรงบีบอัดจะลดลงหากเกิดฟองอากาศ



รูปที่ 3.12 โมดูลัสของแรงบีบอัดของของไหล

### 3.9 ไทโรโบลีย์ [32]

เป็นสาขาวิชาที่อาจจะใหม่สำหรับวิศวกรบำรุงรักษาในประเทศไทย หากแต่ความเป็นจริงแล้ว สาขาวิชาดังกล่าวนี้ได้มีการเรียนการสอนกันอย่างแพร่หลายในประเทศสหรัฐอเมริกา อังกฤษ เยอรมัน ญี่ปุ่นและเกาหลี ฯลฯ โดยที่คำว่า “Tribology” มีรากศัพท์มาจากอังกฤษกรีกที่แปลว่า “Rubbing” หรือ “Attrition” ซึ่งหมายถึงการขัดสีหรือการขัดถู เมื่อนำมาผนวกกับ “Logy” ก็จะเป็นชื่อของวิชาที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการที่ชิ้นส่วนอุปกรณ์ใด ๆ มีการขัดสี ขัดถู ถิ่นไกล กลิ้งตัว เคลื่อนที่ไปๆกลับๆ (เช่น ลูกสูบกับกระบอก) โดยหลักการแล้วเมื่อใดที่มีการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนใด ให้เกิดความเร็วสัมผัสกับอีกชิ้นส่วนหนึ่งจะเกิดการเสียดทานขึ้นไม่ว่าจะเป็นการเสียดทานจากการลื่นไกล (Sliding friction) หรือการเสียดทานจากการกลิ้ง (Rolling friction) ดังนั้น เพื่อลดการเสียดทานที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนใด ๆ ที่มนุษย์ไม่ต้องการให้เกิดแรงเสียดทาน จึงเป็นที่มาของการใช้สารหล่อลื่นเพื่อช่วยลดแรงเสียดทานที่บริเวณจุดสัมผัสนั้น ๆ ลง ซึ่งจะส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การเสียดทานต่ำลง ลดความร้อนที่เกิดขึ้นเพื่อลดพลังงานที่แพร่กระจายความร้อนออกไปโดยเปล่าประโยชน์ แต่แม้ว่าเราจะพัฒนาสารหล่อลื่นให้มีคุณภาพ หรือคุณสมบัติดีเพียงใดก็ตาม สุดท้ายตามกฎเกณฑ์ของธรรมชาติ สิ่งของต่าง ๆ ก็จะมีสึกหรอ (Wear) ไปในที่สุด ดังนั้น วิศวกรแล้วสาขาวิชาไทโรโบลีย์มีส่วนประกอบใหญ่ ๆ 3 องค์ประกอบที่เป็นแกนของสาขาวิชานี้ คือการศึกษาเรื่องการเสียดทาน (Friction) การศึกษาเรื่องสารหล่อลื่น/การหล่อลื่น (Lubrication) และการศึกษาเรื่องการสึกหรอ (Wear)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.9.1 ความเสียดทาน [32]

การเสียดทานและสัมประสิทธิ์การเสียดทานอาจแบ่งได้เป็น

1. สัมประสิทธิ์การเสียดทานสถิตย์ ( $\mu_s$ ) เป็นการเสียดทานที่เกิดขึ้นในขณะที่วัสดุอยู่นิ่งกับที่ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานแบบนี้ค่าเป็นอัตราส่วนของค่าแรงผลึกในแนวนอนหารด้วยแรงกด (หรือหน้าน้ำหนัก) ในแนวตั้งตามสมการ 3.10

$$\mu_s = \frac{F}{N} \quad (3.10)$$

2. สัมประสิทธิ์การเสียดทานจลน์ ( $\mu_k$ ) การเสียดทานหรือแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวชิ้นงาน 2 ชิ้น ในระหว่างการเคลื่อนที่ซึ่งทั่วไปค่า  $\mu_k < \mu_s$  เสนอโดยที่หากทำการวัดค่าของแรงกระทำต่อวัตถุอยู่นิ่งกับที่จนเริ่มเคลื่อนที่ และเรื่อยไปจนถึงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ใดๆ แล้วมักจะเป็นไปตามกราฟแสดงในรูปที่ 3.13 ทั้งนี้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้ และในรูปฟังก์ชันสมการ 3.11

$$\mu_G = f(F_N, F, v_G, T_B, O, v) \quad (3.11)$$

เมื่อ  $F_N$  คือแรงกดในแนวตั้ง,  $F$  คือพื้นที่สัมผัสผิว,  $v_G$  คือความเร็วในการลื่นไหล,  $T_B$  คือช่วงเวลาค่าในการรับภาระ,  $O$  คือปัจจัยของคุณภาพความหยาบผิว และ  $v$  คือความเร็ว



รูปที่ 3.13 แรงกระทำเทียบกับเวลา

### 3.9.2 การสึกหรอ [38]

การสึกหรอเป็นการสูญเสียผิวและเนื้อวัสดุที่เป็นผลมาจำกัวัตถุสองชิ้นที่ขูดถูกัน การสึกหรอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นได้เสมอแม้ว่าจะมีการหล่อลื่นในชิ้นส่วนเป็นอย่างดี เช่นในเครื่องยนต์ที่มีการทำงานไม่สมบูรณ์ หรือมีสิ่งสกปรกเข้าไปขีดข่วน การเดินเครื่องเปล่า การรับภาระมากเกินไปที่กำหนด และสภาพการทำงานอื่นๆที่ไม่คงที่ ล้วนแล้วแต่เป็นสาเหตุให้เกิดการสึกหรอได้ทั้งสิ้น กระบวนการสึกหรอสามารถจำแนกได้เป็น adhesive, abrasive, fatigue และ tribochemical reaction wears ตามมาตรฐาน DIN 50320.

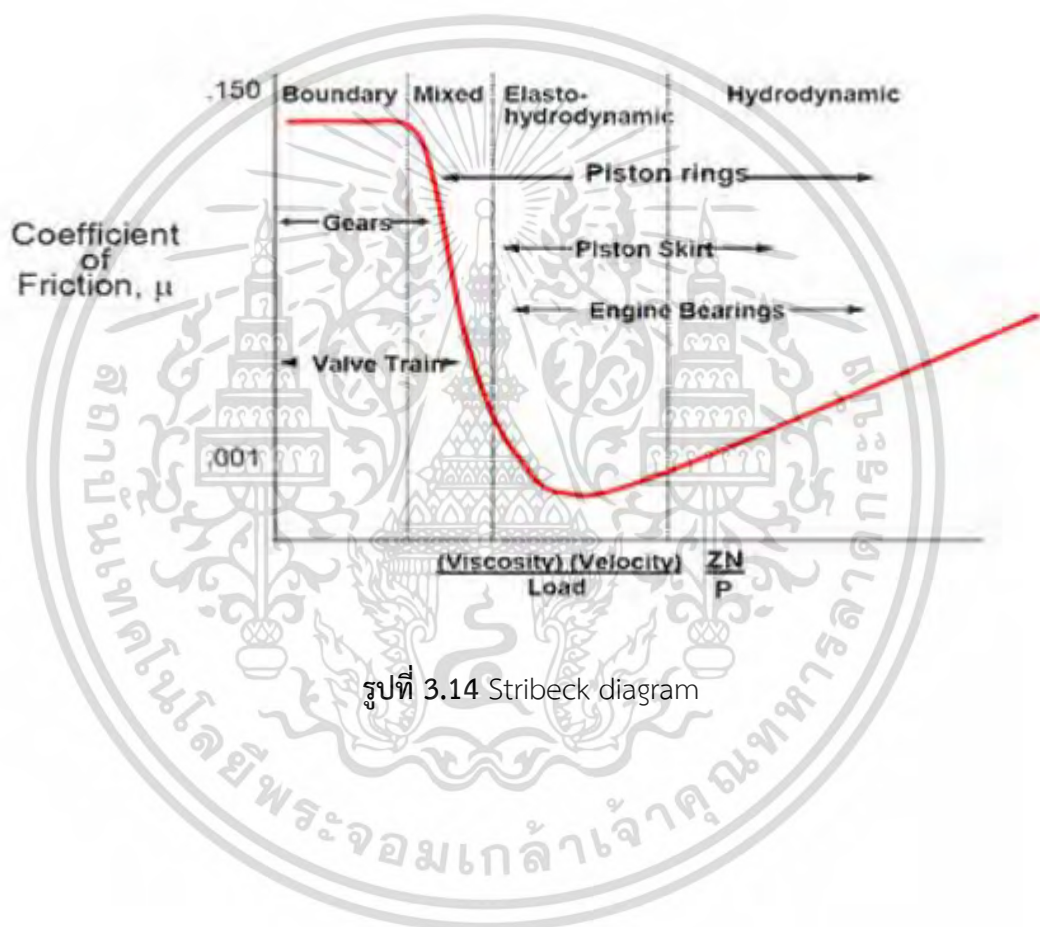
### 3.9.3 การหล่อลื่น [38]

การหล่อลื่นเป็นกระบวนการหรือเทคนิคที่ใช้ในการลดการสึกหรอของผิวสัมผัสสองผิวที่เคลื่อนที่สัมผัสกัน โดยการใช้สารหล่อลื่นบรรจุระหว่างผิวสัมผัสสองผิวนั้น เพื่อช่วยรับภาระระหว่างผิวทั้งคู่ สารหล่อลื่นที่อยู่ระหว่างกลางนั้นอาจเป็นของแข็ง ของแข็งกึ่งเหลว ของเหลว ก๊าซ ในกรณีทั่วไป ภาระที่กระทำจะถูกรองรับด้วยความดันที่สร้างขึ้นภายในของไหลเนื่องจากความต้านทานหนืดของความเสียดทานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของของไหลระหว่างคู่สัมผัส การหล่อลื่นที่เพียงพอทำให้การทำงานของอุปกรณ์เป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง เกิดการสึกหรอเพียงเล็กน้อย และปราศจากความเค้นที่มากเกินไป หรือการตายของแบร็งก์ หากปราศจากการหล่อลื่น โลหะหรือวัสดุที่ขัดกันจะทำให้ล้าอีก วัสดุหนึ่งเป็นให้เกิดความร้อนและความเสียหายตามมา เนื่องจากความเสียดทานที่เกิดขึ้นมีลักษณะแตกต่างกันออกไป โดยที่รูปแบบต่างๆ ที่หน้าสัมผัสของวัสดุที่มีการเสียดสีกันสามารถเกิดขึ้นได้หลายแบบ ดังนั้น จะมีสภาวะการหล่อลื่น (Regimes of lubrication) ที่แตกต่างกันไป เช่น Solid lubrication เป็นสภาวะการหล่อลื่นแบบนี้ เกิดเมื่อวัสดุ 2 ชิ้นที่ขัดสีกันโดยตรงไม่มีซี ของสารหล่อลื่นเลย จะมีความเสียดทานและอัตราสึกหรอสูง การหล่อลื่นแบบบาวนด์ลารี (Boundary Lubrication) ได้ของสารหล่อลื่น มีบริเวณพื้นที่ผิวที่ขัดสีกันซึ่งถูกปกคลุมไปด้วยชั้นโมเลกุลของสารหล่อลื่น แต่ยังคงมีความเสียดทานและอัตราสึกหรอสูงอยู่ พื้นที่ผิวทั้งคู่จะสัมผัสกันตามเส้นขอบของความขรุขระ และยอดของความขรุขระจะเกิดการแตกหัก ที่สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง ส่วนผลผลิตที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ของสารหล่อลื่นจะทำปฏิกิริยากับผิวสัมผัส ก่อให้เกิดชั้นผิวต้านทานสูง หรือฟิล์มบนผิวของแข็งเคลื่อนที่ซึ่งทนต่อภาระและการสึกหรอ การหล่อลื่นแบบบาวนด์ลารียังถูกนิยามว่าเป็นบริเวณที่ภาระถูกรองรับด้วยขอบเขตของฟิล์มแทนที่จะรองรับด้วยสารหล่อลื่น การหล่อลื่นแบบฟิล์มของไหล (Fluid lubrication) มีผิวของวัสดุที่มีการขัดสีกันจะถูกแยกออกจากกันโดยสิ้นเชิงด้วยชั้นฟิล์มของสารหล่อลื่น ชั้นฟิล์มของสารหล่อลื่นนี้จะอยู่ในรูปของการหล่อลื่นแบบไฮโดรสแตติก (Hydrostatic lubrication) และการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamic lubrication) ทั้ง 2 แบบนี้ จะไม่มีสัมผัสกันของโลหะ ทำให้มีแรงเสียดทานและการสึกหรอน้อย

รูปแบบการหล่อลื่นสามารถแสดงได้โดย Stribeck diagram ดังในรูปที่ 3.14 โดยมีการพล็อตระหว่างสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน กับตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า dimensionless duty parameter สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสามารถแสดงได้ในรูปสมการ 3.12 ค่าคงที่ของผิวสัมผัสโลหะต่อโลหะ ( $\alpha$ ) ค่าแปรผันอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ถ้า  $\alpha \rightarrow 1$  ทำให้  $\mu \rightarrow \mu_s$  และจะเรียกความเสียดทานนี้ว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติหน้าไปไซประโยชน์งานด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Boundary friction ใกล้เคียงกับ Solid friction พิล์มของสารหล่อลื่นจะลดลงเหลือหนึ่งหรือสองถึงสามชั้นโมเลกุลและไม่สามารถป้องกันหน้าสัมผัสโลหะต่อโลหะระหว่างพื้นผิวได้ ถ้า  $\alpha \rightarrow 0$  ทำให้  $\mu \rightarrow \mu_L$  และจะเรียกว่าความเสียดทานนี้ว่าการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์ พิล์มของสารหล่อลื่นจะมีความหนาเพียงพอที่จะแยกผิวสัมผัสของโลหะที่เคลื่อนที่ได้อย่างสมบูรณ์ ระหว่างการหล่อลื่นแบบนี้ จะมีเมฆของการหล่อลื่นอีกแบบหนึ่งคือการหล่อลื่นแบบผสม (Mixed lubrication) ที่เป็นช่วงเปลี่ยนจากการหล่อลื่นแบบบาวนด์รีไปสู่การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์

$$\mu = \alpha\mu_s + (1 - \alpha)\mu_L \quad (3.12)$$



รูปที่ 3.14 Stribeck diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### วิธีการดำเนินการวิจัย

วัตถุประสงค์ของวิจัยนี้คือพัฒนาน้ำมันไฮดรอลิกจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเป็นน้ำมันไฮดรอลิกโดยเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมี และไทรโบโลยีของน้ำมันไฮดรอลิก ISO VG46 และ ISO VG68 ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย วัสดุ และอุปกรณ์

#### 4.1 แผนการดำเนินการวิจัย

จากรูปที่ 4.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัยโดยรวม เริ่มจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ใช้แล้วหลังทอดปาท่องโก๋ แล้วตรวจสอบปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ใช้แล้ว หลังจากนั้นกรองสิ่งสกปรกด้วยไส้กรองรถบรรทุกแล้วต้มเพื่อกำจัดความชื้น ต่อจากนั้นนำมาผ่ากระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นเมทิลเอสเทอร์ เพื่อปรับปรุงความหนืดจลน์ จึงเติม 5 และ 8% โดยน้ำหนักของเอททิลีนไวนิลอะซิเตทโคพอลิเมอร์ (EVA) แล้วตรวจสอบคุณสมบัติความหนืดจลน์ที่ 40°C ตามวัตถุประสงค์งานวิจัยเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของน้ำมันไฮดรอลิก ISO VG46 และ ISO VG68 ซึ่งมีความหนืดจลน์ในช่วง 46 – 68 cSt ที่ 40°C ตามลำดับ แล้วตรวจสอบคุณสมบัติอื่นๆ เช่นความหนืดจลน์ที่ 100°C, จุดวาบไฟ, จุดไหลเท, ค่าความเป็นกรด, เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และคุณสมบัติไทรโบโลยีโดยเปรียบเทียบกับ ISO VG68

#### 4.2 วัสดุ

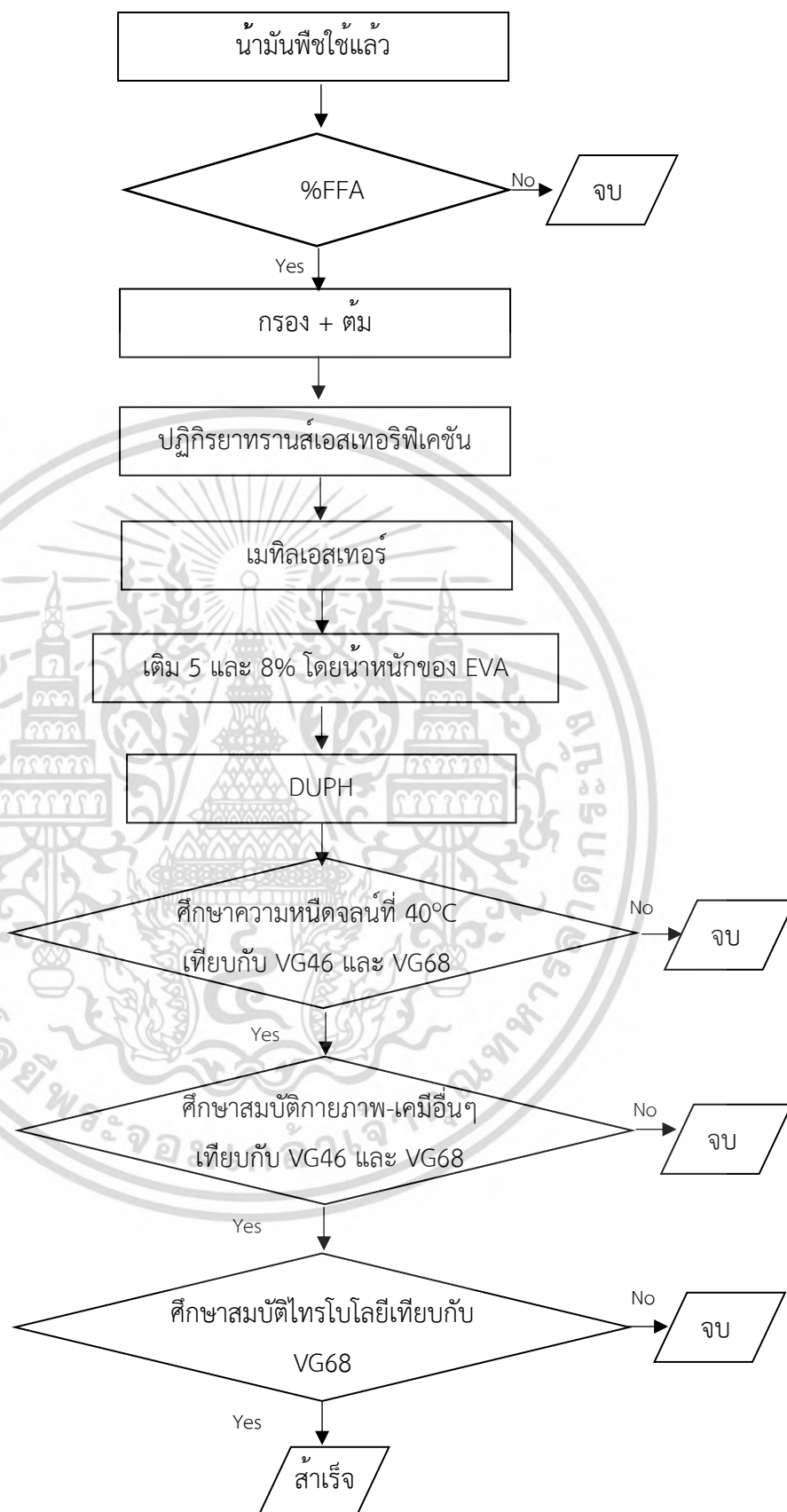
##### 4.2.1 วัตถุดิบ

1. น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ใช้แล้วในรูป 4.2 ก. ลักษณะสีน้ำตาลเข้มเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องและมีเศษตะกอนอาหารตกค้าง เป็นน้ำมันประกอบอาหารทอดปาท่องโก๋จากข้างทางบริเวณถนนอัสสัมชัญศรีราชาที่ทางร้านค้าใช้ทอดมาหลายๆครั้ง

2. น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์หรือ Refined Palm Oil (RPO) ยี่ห้อโอลีน แสดงในรูปที่ 4.2 ข. ถูกเก็บมาจากร้านทอดปาท่องโก๋ ข้างทางบริเวณถนนอัสสัมชัญศรีราชา

3. พีทีที ไฮดรอลิก 68 (ISO VG68) ชื่อทางการค้าของน้ำมันไฮดรอลิกมีความหนืดจลน์ประมาณ 68 cSt ที่ 40°C ผลิตโดยบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ตามรูปที่ 4.2 ค. เป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันไฮดรอลิกชนิดต้านทานการสึกหรอ ผลิตจากน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานชนิด Paraffinic จึงมีคุณภาพสูงและมีอายุการใช้งานยาวนาน เพิ่มคุณภาพด้วยสารป้องกันการสึกหรอ และสารป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีจะถูกอ้างอิงตามผู้ผลิตในภาคผนวก จ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 การดำเนินการวิธีวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 วัสดุดิบในการทดลอง

#### 4.2.2 สารเคมี

1. เมทานอล 70% ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) ในรูปที่ 4.3 ก. ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน จัดจำหน่ายโดยศึกษาภัณฑ์พาณิชย์
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซดาไฟ ( $\text{NaOH}$ ) ชนิดเม็ด ในรูปที่ 4.3 ข. ใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน จัดจำหน่ายโดยศึกษาภัณฑ์พาณิชย์
3. เอทิลีน-ไวนิล อะซิเตท โคลโพลีเมอร์ (EVA) ในรูปที่ 4.3 ค. โดยมีปริมาณไวนิล อะซิเตท 30.4 % ใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของ DUPH ผลิตโดยบริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด (มหาชน)
4. Omega904 ในรูปที่ 4.3 ง. เป็นหัวเขื่อน้ำมันสำหรับอุตสาหกรรมชนิดเข้มข้น สำหรับเกียร์และไฮดรอลิก ลดการสึกหรอ ลดการเสียดสี และใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ และยังขจัด การเขื่อน การเกิดผิวหยาบ การกระชาก ใช้งานง่าย ผสมกับน้ำมันไฮดรอลิก เกียร์ และหล่อลื่นโซ่ สลิง ที่ใช้งานหนัก จัดจำหน่ายโดยบริษัท กรีนบิช (ไทยแลนด์) จำกัด

### 4.3 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

#### 4.3.1 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

อุปกรณ์ในขั้นตอนนี้จะป็นอุปกรณ์ทางห้องปฏิบัติการทางเคมี เพื่อความปลอดภัยต้องสวมใส่ อุปกรณ์ป้องกันภัยส่วนบุคคล อาทิ ถุงมือยาง แวนนิรภัย เป็นต้น อุปกรณ์แสดงในรูปที่ 4.4 มีดังนี้ 1) ขวดรูปชมภู (Flask) ขนาด 500 ml. 2) ครอบอกตวง (Cylinder) ขนาด 100 ml. 3) ชุดตะเกียงแอลกอฮอล์พร้อมแมทิลแอกออล 4) ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 1000 ml. 5) แท่งแก้วคนสารเคมี 6) เทอร์โมมิเตอร์ช่วงอุณหภูมิ 0-200 °C 7) เครื่องกวนสารให้ความร้อนพร้อมแท่งแม่เหล็กกวน 8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

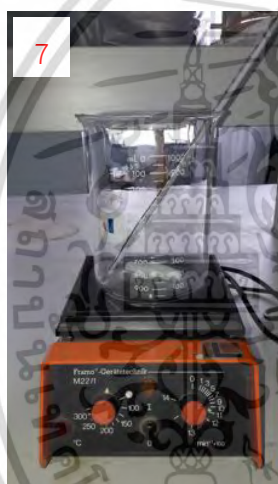
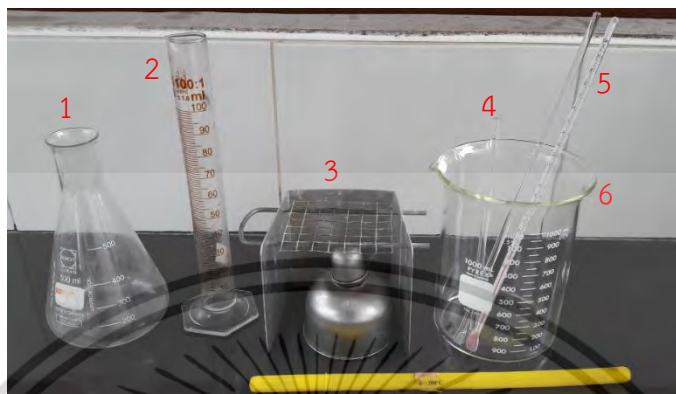
เครื่องซังดิจิตอล สำหรับซังสารเคมี 9) ไส้กรองน้ำมันเชื้อเพลิงรถบรรทุก และขวดน้ำดื่มพลาสติก ขนาด 1.5 L

#### 4.3.2 เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

การวิเคราะห์ความหนืดจลน์ที่อุณหภูมิ 40°C และ 100°C ดำเนินไปตามมาตรฐาน ASTM D-445 อุปกรณ์แสดงในรูปที่ 4.5 จุดวาบไฟดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-93 อุปกรณ์แสดงในรูปที่ 4.6 ทั้งคุณสมบัติความหนืดจลน์และจุดวาบไฟทดสอบโดยกรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ, การวิเคราะห์จุดไหลตามมาตรฐาน ASTM D5950-14 ทดสอบโดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ การวัดความเป็นกรดทำโดยการไตเตรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ตามมาตรฐาน ASTM D664 ด้วยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ ยี่ห้อ Metrohm ตามรูปที่ 4.7 และการวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°C ด้วยเครื่อง EC Meter ตามมาตรฐาน EN14112:2013 ด้วยเครื่อง EC Meter ตามรูปที่ 4.8 เครื่องผลิตขึ้นเองจากงานวิจัยของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เมื่อไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ทำให้คุณภาพของไบโอดีเซลเปลี่ยนแปลง ผลจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันก่อให้เกิดสารเคมีหลายกลุ่ม ซึ่งมีผลต่อระบบเครื่องยนต์ ดังนั้นกรมธุรกิจพลังงานกำหนดให้วัดค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องทดสอบเพื่อใช้เป็นตัวบ่งบอกถึงคุณภาพของไบโอดีเซล ทดสอบค่าเสถียรภาพต่อการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Fatty Acid Methyl Ester ณ อุณหภูมิ 110 °C อ้างอิงตาม BS EN 14112:2003 ทั้งการวัดความเป็นกรดและการวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้น ทดสอบโดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



รูปที่ 4.4 อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการเคมี



รูปที่ 4.5 อุปกรณ์วัดความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 อุปกรณ์วัดจุดวาบไฟ

#### 4.3.3 เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติโทรโบโลยี

เพื่อยืนยันประสิทธิภาพการหล่อลื่นและการสึกหรอของ DUPH ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องโทรโบโลมิเตอร์ซึ่งผลิตและพัฒนาโดย CSM Instrument รวมไปถึงซอฟต์แวร์ InstrumentX version 2.5A (Build478) แสดงในรูปที่ 4.9 ก. และ รูปที่ 4.9 ข. เป็นการจำลองการเคลื่อนที่สัมผัสด้วยวิธี Ball-on-Disk โดยหลักการทำงานตามรูปที่ 4.9 ค. โดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM G133-95 สำหรับวัสดุทดสอบทั้งดิสก์ (Disk) และบอล (Ball) ในรูปที่ 4.10 ทำจากวัสดุเหล็กหล่อเหนียว FCD 450 หรือ Ferrous Casting Ductile เพราะเหล็กหล่อเหนียวเป็นวัสดุหลักสำหรับชิ้นส่วนปั๊มไฮดรอลิก ชิ้นส่วนทั้ง 2 ถูกเตรียมด้วยเครื่อง CNC lathe เพื่อให้ได้ขนาดและรูปร่างที่แม่นยำ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นจาน 30 mm. หนา 5 mm. โดยแผ่นระนาบเรียบเสมอกัน สำหรับชิ้นส่วนบอล



รูปที่ 4.7 เครื่องโทรโบโลมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 อุปกรณ์วัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

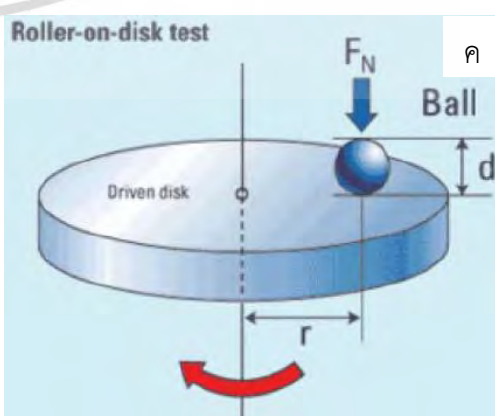
มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกหัวครึ่งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm. ความยาว 20 mm. และปาดเรียบบริเวณส่วนปลายของบอลเป็นตำแหน่งจับยึดกับเครื่องไทรโบมิเตอร์ ก่อนการทดสอบ ทุกครั้งต้องทำการสอบเทียบเครื่องมือด้วยชุดสอบเทียบมาตรฐาน โดยใช้โหลดน้ำหนัก 5 N แขนงผ่านรอกให้ได้ระดับพื้นและสมดุลตามรูป 4.11 โดยระบบจะดำเนินการสอบเทียบอัตโนมัติด้วยซอฟต์แวร์



ก



ข

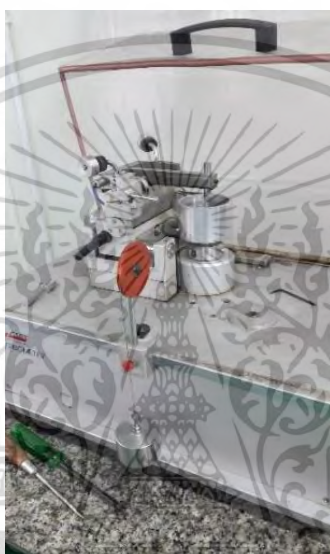


ค

รูปที่ 4.9 ไทรโบมิเตอร์ CSM แบบ Ball-on-Disk เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เอาต์เห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ชิ้นส่วนทดสอบบอกลและดิสก์



รูปที่ 4.11 การสอบเทียบเครื่องไทรโบมิเตอร์

#### 4.3.4 เครื่องมือวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์

ชุดอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์ OLYMPUS รุ่น BX60 ตามรูปที่ 4.12 เพื่อแสดงลักษณะและวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณที่สึกหรอบนชิ้นส่วนทดสอบบอกลโดยใช้เลนส์ที่มีกำลังขยาย 5X

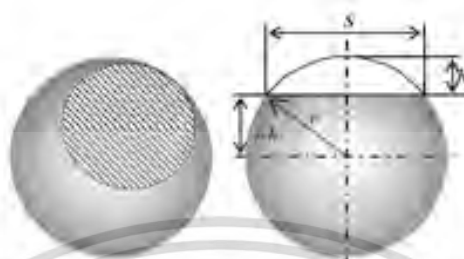


รูปที่ 4.12 ชุดกล้องจุลทรรศน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.5 การคำนวณหาปริมาตรการสีกหรือบนบอล

โดยทั่วไปลักษณะการสีกหรือบนบอลตามรูปที่ 4.13 หลังจากวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณที่สีกหรือ ( $s$ ) ของบอลด้วยกล้องจุลทรรศน์แล้วสามารถคำนวณหาปริมาตรที่หายไปเนื่องจากการสีกหรือตามสมการที่ 4.1 และ 4.2 (21) ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 ลักษณะการสีกหรือบนบอล

$$h = \frac{8r - \sqrt{64r^2 - 16s^2}}{8} \quad (4.1)$$

$$V = \pi h^2 \left[ r - \frac{h}{3} \right] \quad (4.2)$$

โดยที่  $V$  คือปริมาตรการสีกหรือ ( $\text{mm}^3$ ),  $s$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางที่จุดสีกหรือ ( $\text{mm}$ ),  $h$  คือความสูงของส่วนที่สีกหรือ ( $\text{mm}$ ) และ  $r$  คือรัศมีบอล ( $\text{mm}$ ).

## 4.4 วิธีการดำเนินการ

### 4.4.1 ขั้นตอนการกรองสิ่งสกปรกและกำจัดความชื้นในน้ำมันพืชใช้แล้ว

1. กรองน้ำมันพืชเก่าใช้แล้วด้วยไส้กรองน้ำมันเชื้อเพลิงรถบรรทุกตามรูปที่ 4.14 เพื่อกรองเอาเศษอาหารและกากต่างๆที่ปะปนมา เพื่อให้ปราศจากสารอินทรีย์ขณะทำปฏิกิริยา
2. นำมาผ่านความร้อนด้วยอุณหภูมิ  $110^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดความชื้นออกแล้วทิ้งให้เย็นจะได้ WVO

### 4.4.2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

1. ขั้นตอนแสดงในรูปที่ 4.14 เริ่มจากผสมเมทานอล 125 ml กับ 5 g โซเดียมไฮดรอกไซด์ในกระบอกตวง การผสมนี้จะเกิดความร้อนและไอสารเคมี ดังนั้นควรใช้ภาชนะทนความร้อน เช่น อุปกรณ์เครื่องแก้ว และที่ระบายอากาศได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่อยเทสารละลายลงใน 500 ml. ของ WVO พร้อมกับให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 60-70°C พร้อมคนให้ทั่วประมาณ 15-20 min. แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นตัวประมาณ 5 hr.

3. จะพบการแยกชั้นของน้ำมันกับกลีเซอรอลอย่างเห็นได้ชัดเจน ให้เทแยกส่วนเฉพาะน้ำมันด้านบนใส่ขวดพลาสติกใส (ขวดน้ำดื่มขนาด 1.5 L)

4. ขั้นตอนการล้างน้ำมัน เติมน้ำสะอาดลงในขวดบรรจุปริมาณให้มากกว่า 50% ของปริมาณน้ำมันเดิม จากนั้นเขย่าขวดเป็นเวลา 15 min. แล้วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 30 min. จะเห็นการแยกชั้น ให้เทแยกส่วนน้ำมันส่วนบนลงในขวดพลาสติกใสสะอาดอีกใบ

5. ล้างน้ำซ้ำตามข้อ 4 อีก 2 ครั้ง พบว่าน้ำมันที่ได้เริ่มใสขึ้น (รูปที่ 4.21) แล้วแยกส่วนเฉพาะน้ำมันด้านบนออกมา

6. ให้ความร้อนน้ำมันที่อุณหภูมิ 105-110°C ประมาณ 10-15 min. เพื่อนำพาความชื้นออกให้มากที่สุด และจะได้เป็นไบโอดีเซล (BIOD)

#### 4.4.3 ขั้นตอนการเติมสารเติมแต่งเอทิลีน-ไวนิล อะซิเตท โคลโพลีเมอร์ หรือEVA

1. ในสภาวะการทดลองเติม 5% และ 8% wt ของ EVA ใน BIOD และ WVO ที่บรรจุในบีกเกอร์

2. ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 °C พร้อมกวนสารด้วยเครื่องกวนสารให้ความร้อนเป็นเวลา 60 นาที จน EVA ละลายหมด

3. ตัวอย่างที่ได้คือ

- i. WVO+EVA5
- ii. WVO+EVA8
- iii. BIOD+EVA5
- iv. BIOD+EVA8

#### 4.4.4 ขั้นตอนการเติมสารป้องกันการสึกหรอ (AW)

1. เติม 0.5% โดยปริมาตรของ Omega904 ในน้ำมันในข้อ 4.3.3 แล้วคนผสมให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้อง

2. ตัวอย่างที่ได้คือ

- i. WVO+EVA5+AW
- ii. WVO+EVA8+AW
- iii. BIOD+EVA5+AW
- iv. BIOD+EVA8+AW



รูปที่ 4.14 ขั้นตอนการสังเคราะห์ไบโอดีเซล (BIOD) หรือเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน

#### 4.4.5 น้ำมันไฮดรอลิกที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัย

น้ำมันไฮดรอลิกที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยด้วยวิธีการดำเนินข้างต้นรวมเรียกว่า DUPH โดย แสดงในรูป 4.15 และสามารถจำแนกองค์ประกอบพื้นฐานและสารเติมแต่งตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบและสารเติมแต่งใน DUPH

DUPH	องค์ประกอบพื้นฐาน	สารเติมแต่ง
ISO VG46	ปิโตรเลียม	น้ำมันไฮดรอลิกในท้องตลาด
ISO VG68	ปิโตรเลียม	น้ำมันไฮดรอลิกในท้องตลาด
RPO	น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์	ไม่มี
WVO	น้ำมันพืชใช้แล้ว	ไม่มี
WVO+EVA5	น้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 5%
WVO+EVA8	น้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 8%
WVO+EVA5+AW	น้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 5%+AW
WVO+EVA8+AW	น้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 8%+AW
BIOD	น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว	ไม่มี
BIOD+EVA5	น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 5%
BIOD+EVA8	น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 8%
BIOD+EVA5+AW	น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 5%+AW
BIOD+EVA8+AW	น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 8%+AW



รูปที่ 4.15 น้ำมันไฮดรอลิกที่พัฒนาจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ใช้แล้วหรือ DUPH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมี

DUPH ถูกวิเคราะห์วิธีการทดสอบตามมาตรฐานนานาชาติ โดยห้องปฏิบัติการภายในประเทศ ที่น่าเชื่อถือดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 รายการและมาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมี รวมถึงห้องปฏิบัติการที่ทดสอบ

การวิเคราะห์	มาตรฐาน	ทดสอบโดย
ความหนืดจลน์ที่ 40 °C และ 100°C	ASTM D-445	กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ
ดัชนีความหนืด	ASTM D 2270-04	คำนวณตามมาตรฐาน
จุดวาบไฟ	ASTM D-93	กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ
จุดไหลเท	ASTM D 5950-14	กรมวิทยาศาสตร์บริการ
ค่าความเป็นกรด	ASTM D664	ศูนย์เครื่องมือฯ ม.สงขลลา
เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C	EN 14112	ศูนย์เครื่องมือฯ ม.สงขลลา

#### 4.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติไทรโบโลยี

ในการทดสอบใช้ทั้งดิสก์และบอลจำลองแทนวัสดุอุปกรณ์ปั๊มไฮดรอลิก การวิเคราะห์สำหรับงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นที่ปริมาณการสึกหรอของบอลและสัมประสิทธิ์การเสียดทานโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G133-95 รวมทั้งเปรียบเทียบพฤติกรรมการสึกหรอและการหล่อลื่นที่เกิดโดยมี DUPH และยังเปรียบเทียบกับน้ำมันไฮดรอลิกเชิงพาณิชย์ ISO VG68 เป็นสารหล่อลื่น หลังจากสอเทียบระบบแล้วติดตั้งชิ้นส่วนบอลและดิสก์บนเครื่องไทรโบมิเตอร์ CSM แบบ Ball-on-Disk แล้วใช้ชุดสมดุลงของระบบสภาวะการทดสอบตามตารางที่ 4.3 หลังจากทดสอบชิ้นส่วนบอลนำมาวิเคราะห์การสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 5 เท่า (5X) ในรูป 4.12 เพื่อแสดงลักษณะและวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอจากนั้นคำนวณหาปริมาตรการสึกหรอด้วยสมการ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขการทดสอบด้วยเครื่องไทรโบโลยี CSM แบบ Ball-on-Disk

น้ำหนักกดทับ	15 N
ความเร็วเชิงเส้น	10 cm.s <sup>-1</sup>
รัศมีการหมุนของบอล	7.53 mm
จำนวนรอบ	1,022 cycles
อุณหภูมิทดสอบ	อุณหภูมิห้อง (25 °C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดลองและวิจารณ์

ในงานวิจัยนี้น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ใช้แล้วมาเป็นน้ำมันไฮดรอลิกโดยผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันและสารเติมแต่งแล้วศึกษาสมบัติทางกายภาพ-เคมี และคุณสมบัติไทรโบโลยี ด้วยการทดสอบตามมาตรฐานนานาชาติและห้องปฏิบัติการที่น่าเชื่อถือ ผลการวิจัยแบ่งออกเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

#### 5.1 ผลกรดไขมันอิสระ

จากสมการที่ 2.1 คำนวณหา %FFA จากค่าความเป็นกรดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในตารางที่ 5.1 พบว่าในงานวิจัยนี้ น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ใช้แล้ว (WVO) จากการทอดปาท่องโก๋ พบมีค่าความเป็นกรด 1.167 mg. KOH / g. oil และปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.586 % สุภกรและคณะ [36] สรุปว่าน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง จะเป็นอุปสรรคในการเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน น้ำมันที่ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันไม่ควรมีความเป็นกรดสูงกว่า 2 mg KOH/g [37] ขณะที่น้ำมันพืชสดใหม่หรือห่อโอเลอินซึ่งทางร้านค้าขายปาท่องโก๋ใช้นั้นมีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.167 mg KOH/g และปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.368 % ทั้งนี้จากทฤษฎี น้ำมันพืชใช้แล้วจะประกอบด้วยกรดไขมันอิสระและน้ำมันในปริมาณที่สูงกว่า น้ำมันพืชสดใหม่ เพราะมันถูกย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) โดยมีเอนไซม์ไลเปส (lipase) และความชื้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์คือกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระ ซึ่งทำให้น้ำมันและไขมันมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น จากผลค่าความเป็นกรดน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ใช้แล้วในงานวิจัยนี้มีความเหมาะสมต่อกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

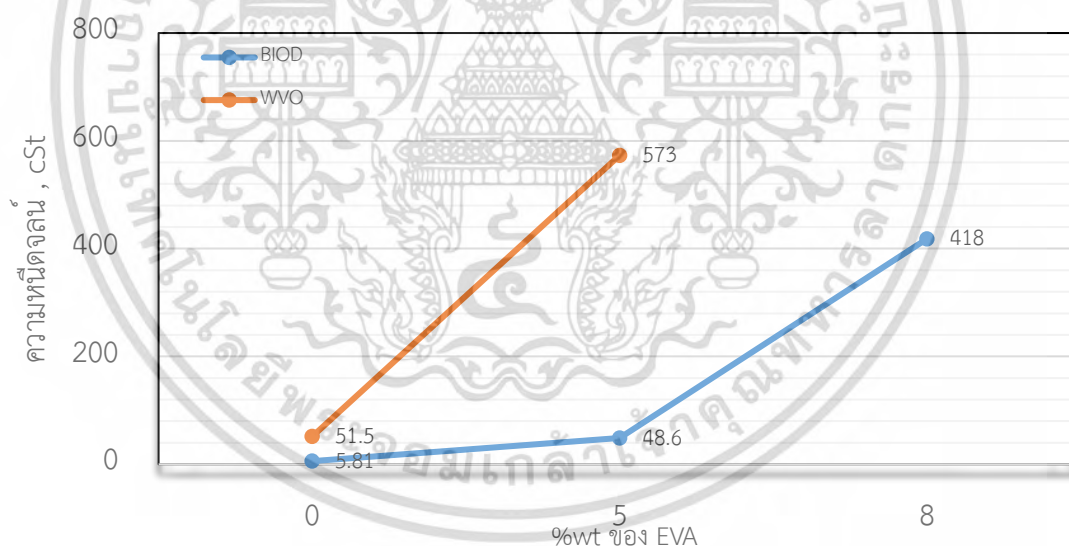
ตารางที่ 5.1 ค่าความเป็นกรดและเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ (%FFA)

รหัส	ค่าความเป็นกรด , mg. KOH / g. oil	% FFA
RPO	0.733	0.368
WVO	1.167	0.586

#### 5.2 ผลปริมาณ EVA ต่อความหนืดจลน์

เมื่อน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ใช้แล้วผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ได้เป็นไบโอดีเซล (BIOD) หรือเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันพืชเก่าใช้แล้ว จากรูปที่ 5.1 ผลความหนืดจลน์ของ BIOD มีค่า 5.81 cSt ที่ 40°C ความหนืดจลน์ระดับนี้ต่ำเกินไปสำหรับที่จะนำไปใช้งานไฮดรอลิกและไม่อยู่ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อน้ำมันถูกนำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

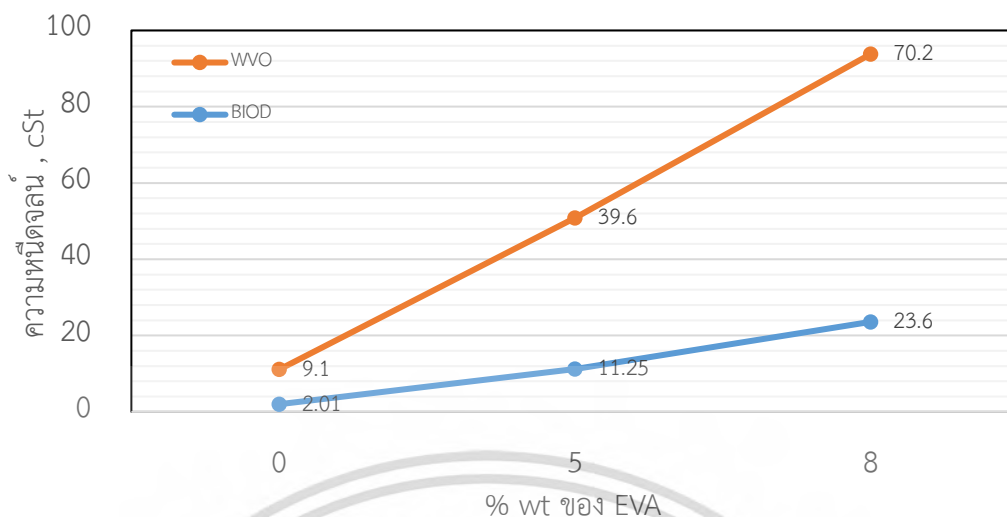
ขอบเขตงานวิจัยคือ 46-68 cSt ที่ 40°C จึงทำการปรับปรุงความหนืดจลน์ของ BIOD ด้วยการเติม EVA ที่ 5% wt เป็น BIOD+EVA5 ผลความหนืดจลน์เพิ่มขึ้นเป็น 48.6 cSt ที่ 40°C เพิ่มขึ้นประมาณ 736% ความหนืดจลน์ที่ได้นี้เป็นที่พอใจเพราะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนืดจลน์ของ ISO VG46 ที่ 40°C ในทานองเดียวกัน หากเติม EVA ที่ 8 %wt ใน BIOD ได้เป็น BIOD+EVA8 ผลความหนืดจลน์เพิ่มขึ้นเป็น 418 cSt ที่ 40°C เพิ่มขึ้นประมาณ 7,095% แต่ความหนืดจลน์ระดับนี้สูงกว่า ISO VG68 มากและสูงมากเกินไปไม่เหมาะกับระบบไฮดรอลิกเพราะท ให้มีปัญหาต่อการไหลอย่างไรก็ตามความหนืดจลน์ระดับนี้สามารถนำไปใช้เป็นของสารหล่อลื่นในชุดเกียร์อุตสาหกรรมและเรือเดินสมุทร [1] ดังนั้น EVA จึงเป็นสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงความหนืดจลน์ในไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันพืชใช้แล้ว สำหรับกรณีความหนืดจลน์ของน้ำมันพืชใช้แล้ว (WVO) มีค่า 51.5 cSt ที่ 40°C ซึ่งมีค่าความหนืดจลน์อยู่ในขอบเขตงานวิจัยโดยไม่ต้องเติม EVA และผลในทานองเดียวกัน หากเติม 5 %wt ของ EVA ในน้ำมันพืชใช้แล้วเป็น WVO+EVA5 ค่าความหนืดจลน์ ที่ 40°C มีค่าสูงขึ้นมาถึง 573 cSt ซึ่งสูงมาก ในขณะที่ผลความหนืดจลน์ของ WVO+EVA8 (8% wt ของ EVA) นั้นไม่สามารถวัดค่าได้เพราะเกินความสามารถของเครื่องมือวัด ในทานองเดียวกัน จากรูปที่ 5.2 ปริมาณ EVA ทำให้ค่าความหนืดจลน์ที่ 100°C สูงขึ้นทั้ง BIOD และ WVO เพิ่มขึ้นประมาณ 80 – 450 %



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความหนืดจลน์ ที่ 40°C กับปริมาณ EVA

ผลความหนืดจลน์ทั้งหมดของ DUPH แสดงในตารางที่ 5.2 หากพิจารณาจากค่าความหนืดจลน์ที่ 40°C และ 100°C สามารถคัดกรองน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐาน น้ำมันพืชใช้แล้วได้ดังนี้ BIOD+EVA5, BIOD+EVA5+AW และ WVO เพราะผลค่าความหนืดจลน์อยู่ในขอบเขตงานวิจัยโดยมีค่าความหนืดจลน์ใกล้เคียงกับ ISO VG46 และ ISO VG68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความหนืดจลน์ ที่ 100°C กับปริมาณ EVA

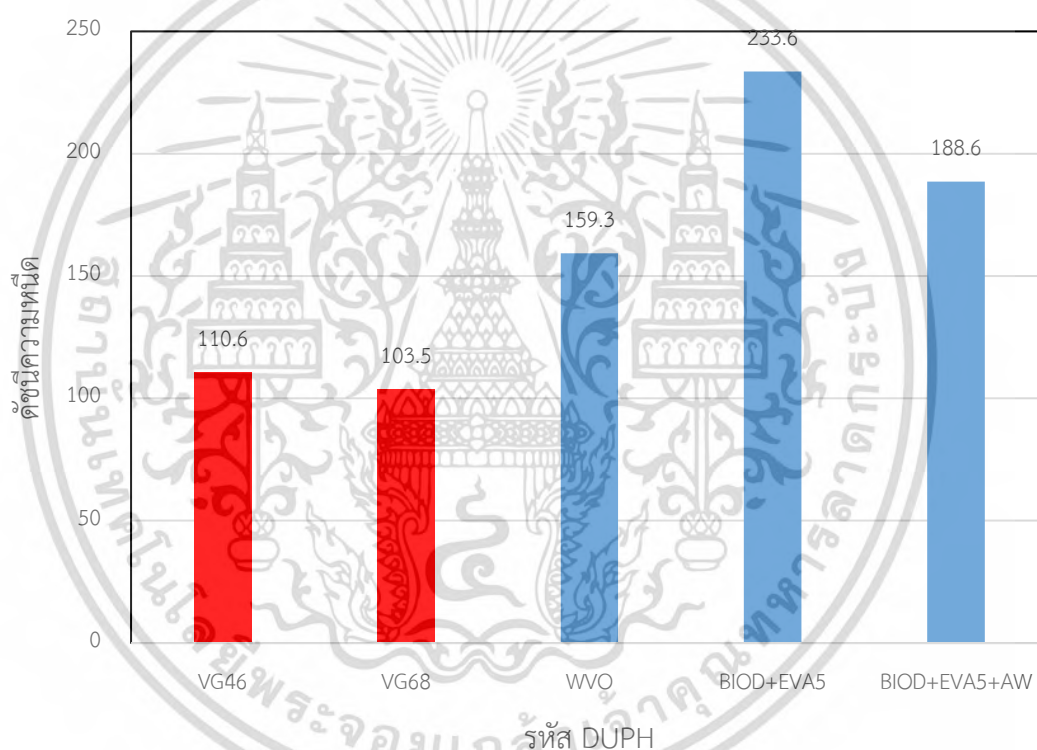
ตารางที่ 5.2 แสดงผลความหนืดจลน์ 40°C และ 100°C ของ DUPH

DUPH	ความหนืดจลน์ , cSt	
	40°C	100°C
ISO VG46	45.88	7.024
ISO VG68	68.98	8.9
WVO	51.5	9.1
WVO+EVA5	573	39.6
WVO+EVA8	NA	70.2
WVO+EVA5+AW	562	37.7
WVO+EVA8+AW	NA	72
BIOD	5.81	2.01
BIOD+EVA5	48.6	11.25
BIOD+EVA8	418	23.6
BIOD+EVA5+AW	57.1	11
BIOD+EVA8+AW	324	23.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ผลดัชนีความหนืด

ดัชนีความหนืด (VI) คือตัวเลขที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดจลน์ของน้ำมันหล่อลื่นกับอุณหภูมิโดยการเปรียบเทียบกับน้ำมันมาตรฐาน น้ำมันที่มีค่า VI สูงจะมีค่าความหนืดจลน์เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปน้อยกว่าน้ำมันที่มีค่า VI ต่ำ ดังนั้น VI ที่สูงจึงเป็นคุณสมบัติที่ดีของน้ำมันไฮดรอลิก พิจารณาเฉพาะตัวที่คัดกรองค่าความหนืดจลน์แล้ว ในรูปที่ 5.3 ค่า VI ของ BIOD+EVA5 , BIOD+EVA5+AW และ WVO มีค่า 233.6, 188.6 และ 159.3 ตามลำดับโดยทั้งหมดมีค่ามากกว่าทั้งค่า VI ของ ISO VG46 และ ISO VG68 ซึ่งมีค่า 110.6 และ 103.5 ตามลำดับโดยทั่วไปแล้วค่า VI ที่สูงเป็นผลดีต่อการนำไปใช้น้ำมันไฮดรอลิกและเป็นคุณสมบัติโดยธรรมชาติของน้ำมันพืชอยู่แล้ว [7].

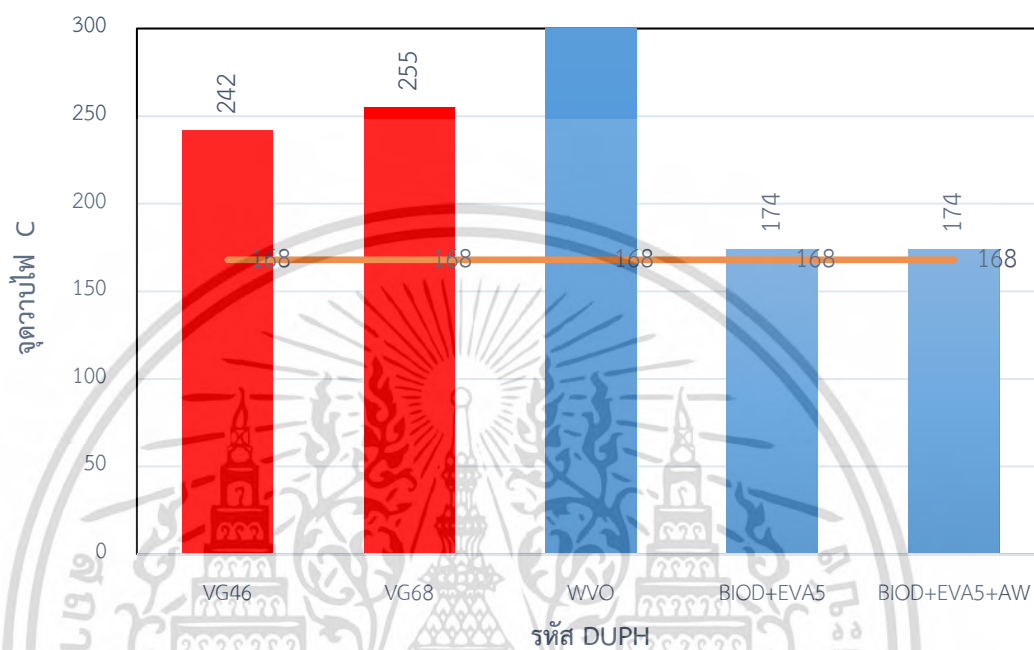


รูปที่ 5.3 แผนภูมิแท่งแสดงผลดัชนีความหนืด

### 5.4 ผลจุดวาบไฟ

สารนั้นๆจะสามารถลุกติดไฟได้เองโดยไม่ต้องมีแหล่งกำเนิดไฟ ดังนั้นอุณหภูมิในการปฏิบัติใช้งานควรต่ำกว่าจุดวาบไฟของน้ำมันไฮดรอลิกที่ถูกเลือกใช้ ในรูปที่ 5.4 จุดวาบไฟของ BIOD+EVA5 และ BIOD+EVA5+AW มีค่าเท่ากันคือ 174°C และต่ำกว่าจุดวาบไฟของ ISO VG46 และ ISO VG68 ซึ่งมีค่า 241 และ 251°C ตามลำดับ ขณะที่จุดวาบไฟของ WVO ไม่สามารถวัดค่าได้เพราะเกินความสามารถของเครื่องทดสอบ แม้ว่าผลทดสอบจุดวาบไฟของ BIOD+EVA5 และ BIOD+EVA5+AW เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะต่ำกว่า ISO VG46 และ ISO VG68 แต่จุดวาบไฟของทั้ง BIOD+EVA5 และ BIOD+EVA5+AW มีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.977-2551 น้ำมันไฮดรอลิก-พื้นฐานน้ำมันแร่ [22] กำหนดเกณฑ์จุดวาบไฟต่ำสุดของน้ำมันไฮดรอลิกไว้ที่ 168°C สำหรับทดสอบแบบถ้วยปิด เพนสกี-มาร์เทนส์ เช่นเดียวกับวิธีการทดสอบในงานวิจัยนี้

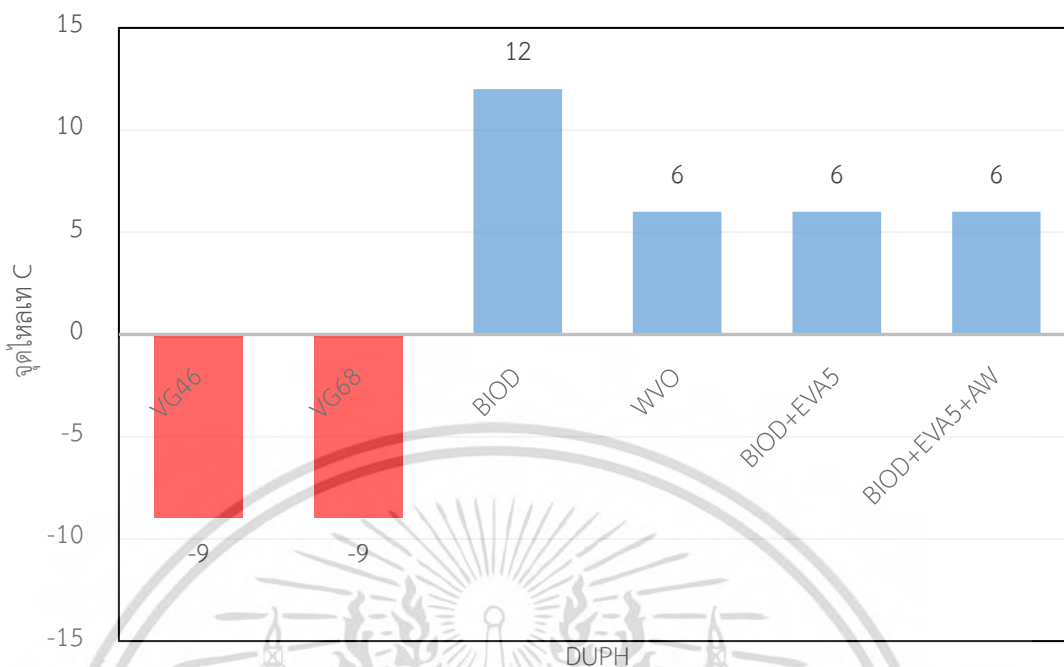


รูปที่ 5.4 แผนภูมิแท่งแสดงผลจุดวาบไฟ

## 5.5 ผลจุดไหลเท

เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันลดต่ำลง ความหนืดจะเพิ่มขึ้นหรือความต้านทานการไหลของมันจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดน้ำมันจะหยุดไหล อุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มหยุดไหลเรียกว่า “จุดไหลเท” โดยปกติคุณสมบัติการไหลและต้านทานต่อสภาพอากาศที่อุณหภูมิต่ำของน้ำมันหล่อลื่นจากนั้น มันพืชเป็นปัญหาหลัก [3] ในรูปที่ 5.5 พบว่าจุดไหลเทของ BIOD+EVA5, BIOD+EVA5+AW และ WVO มีค่า 6 °C ซึ่งสูงกว่าจุดไหลเทของ ISO VG46 และ ISO VG68 ที่มีค่า -9 °C และมีค่าสูงเกินเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.977-2551 น้ำมันไฮดรอลิก-พื้นฐานน้ำมันแร่ [22] กำหนดไม่เกิน -12 °C อีกด้วย ดังนั้นจุดไหลเทจะเป็นปัญหาหากนำไปใช้ในสภาวะอุณหภูมิต่ำกว่า 6°C แต่อย่างไรก็ตาม การปรับโครงสร้างทางเคมี [6] สามารถลดจุดไหลเทได้ จากงานวิจัย Li and Wang [33] น้ำมันพืชเก่าใช้แล้วมาดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีโดยผ่านกระบวนการ Epoxidized และผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน สามารถช่วยแก้ปัญหาและปรับปรุงคุณสมบัติการไหลที่อุณหภูมิต่ำได้ และพบข้อสังเกตว่า BIOD มีค่าจุดไหลเทที่ 12°C ขณะที่จุดไหลเทของ BIOD+EVA5 ลดลงมาถึง 6°C สารพอลิเมอร์เช่น EVA เป็นสารปรับปรุงจุดไหลเทเพื่อให้มีประสิทธิภาพการไหลที่ดีที่อุณหภูมิต่ำๆ[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 แผนภูมิแท่งแสดงผลจุดไหลเท

## 5.6 ผลความเป็นกรด

ตารางที่ 5.3 ผลค่าความเป็นกรด

DUPH	ค่าความเป็นกรด , mg. KOH / g. oil
WVO	1.167
BIOD+EVA5	3.761
BIOD+EVA5+AW	3.397
ISO VG68	1.295

ค่าความเป็นกรดเป็นเครื่องมือในการติดตามคุณภาพของสารหล่อลื่น เพื่อตรวจสอบการขาดหายไปของสารเติมแต่ง, ระดับของน้ำมันที่ถูกออกซิไดส์แล้วเปลี่ยนรูปเป็นกรด ยิ่งค่าความเป็นกรดสูง การหายไปของสารเติมแต่งและการถูกออกซิไดส์เป็นกรดมีแนวโน้มสูงตามไปด้วยและทำให้ประสิทธิภาพของน้ำมันไฮดรอลิกลดลง อย่างไรก็ตามค่าความเป็นกรดมักใช้ตรวจวัดคุณภาพของน้ำมันไฮดรอลิกเมื่อถูกใช้ไปตามระยะเวลา เพื่อดูแนวโน้มคุณภาพน้ำมันไฮดรอลิกตามระยะเวลาการใช้งานกับเครื่องจักรและอุปกรณ์ จากตารางที่ 5.3 น้ำมัน ISO VG68 ที่เป็นน้ำมันไฮดรอลิกเชิงพาณิชย์และยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ผ่านการใช้งาน มีค่าความเป็นกรดต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมัน BIOD+EVA5 และ BIOD+EVA5+AW ที่มีแนวโน้มความเป็นกรดสูงเนื่องจากถูกออกซิไดส์และผ่านปฏิกิริยาเคมี ขณะที่ WVO ยังมีค่าน้อยที่สุด แม้ว่า WVO ผ่านกระบวนการให้ความร้อนจากการทอดปาท่องโก๋มาแล้ว

## 5.7 ผลสมบัติเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ผู้วิจัยเลือก DUPH ที่ดีที่สุดในงานวิจัยรวมไปถึงผลจากไทรโบลอยที่จะกล่าวต่อไป นั่นคือ BIOD+EVA5+AW มาทดสอบสมบัติเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเปรียบเทียบกับ น้ำมันไฮดรอลิกเชิงพาณิชย์ ISO VG 68 ผลจากตารางที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่า BIOD+EVA5+AW มีเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพียง 0.74 ชั่วโมง และต่ำกว่าผลของน้ำมันไฮดรอลิก ISO VG68 ซึ่งค่ามากกว่า 24 ชั่วโมงเพราะว่าผู้ผลิตเติมสารป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำมันไฮดรอลิก ISO VG68 ไว้และตามธรรมชาติของไบโอดีเซลจากวัตถุดิบธรรมชาติมันง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและทำให้ประสิทธิภาพลดลง อย่างไรก็ตามการปรับปรุงเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสามารถทำได้ อย่างเช่นการเติมสารประเภท ฟีนอลิก สารผสมฟีนอล [34] ที่ 250 ppm. ไชปาล์มสเตียรินให้ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงถึง 41.06 ชั่วโมง ในขณะที่น้ำมันที่ไม่ได้เติมสารต้านออกซิเดชันนี้ มีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน 22.76 ชั่วโมง โดยน้ำมันปาล์มดิบ 20.76 ชั่วโมง น้ำมันปาล์มรีไฟน์ 20.63 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.4 สมบัติเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

DUPH	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน, ชั่วโมง
ISO VG68	>24
BIOD+EVA5+AW	0.74

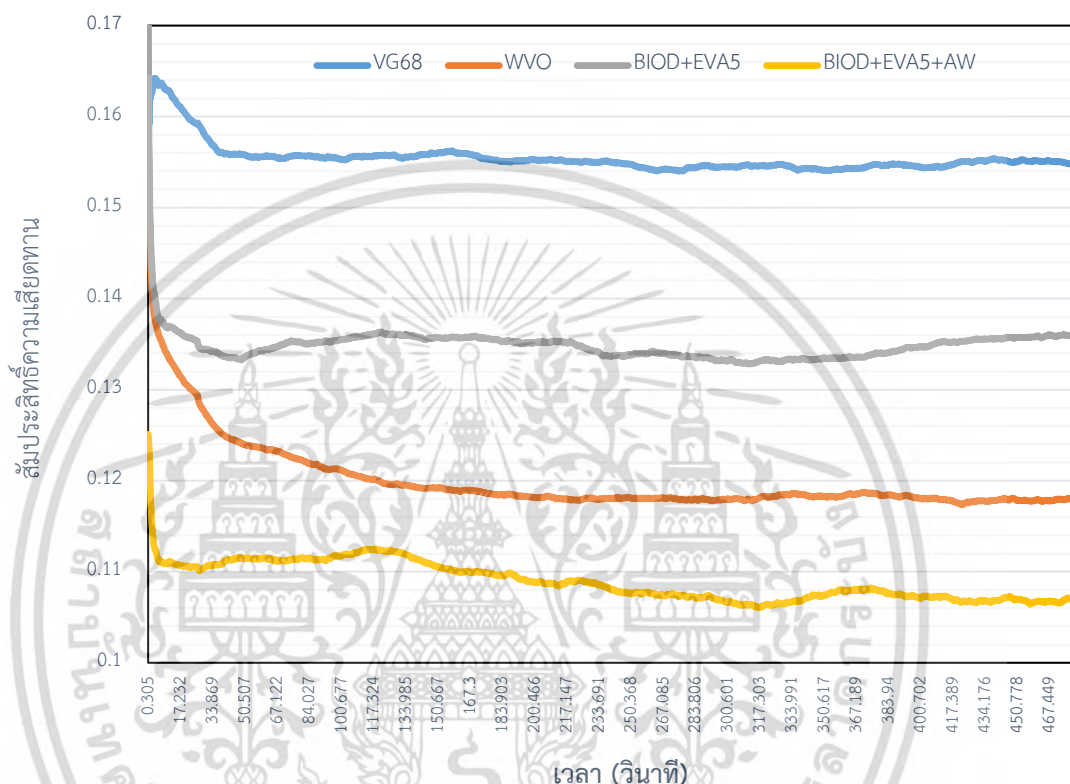
## 5.8 ผลสมบัติไทรโบลอย

### 5.8.1 ผลสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

DUPH ทั้ง 3 ที่ถูกคัดกรองจากสมบัติกายภาพและเคมีได้แก่ WVO, BIOD+EVA5 และ BIOD+EVA5+AW นามาศึกษาคุณสมบัติไทรโบลอยด้วยเครื่อง CSM แบบ Ball on Disk ที่เงื่อนไขการทดสอบเดียวกันทั้งหมดตามตารางที่ 4.3 สำหรับผลทดสอบจากรูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่า COF ที่เวลาใดๆ ระหว่างผิวสัมผัสสติกและบอล โดยมี DUPH เป็นสารหล่อลื่น ลักษณะกราฟ COF จะเข้าสู่สภาวะคงที่ ณ. เวลานั้น ค่า COF เฉลี่ยแสดงในภาพที่ 5.8 พบว่า DUPH ที่ถูกเลือกทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าเฉลี่ย COF ต่ำกว่า ISO VG68 และ BIOD+EVA5+AW มีค่าเฉลี่ย COF ต่ำที่สุดเพราะมีสารต่อต้านการสึกหรอ เห็นได้ว่า น้ำมันไฮดรอลิกที่ถูกเลือกเหล่านี้ให้คุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดีกว่า น้ำมันไฮดรอลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เชิงพาณิชย์ การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงพาณิชย์ ISO VG68. L.A. Quinchia และคณะอธิบายไว้ว่า EVA ในน้ำมันพืชช่วยลดความเสียหายของพื้นผิวสัมผัสและการสึกหรอด้วย และใน WVO มีน้ำมันพืชเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งเป็นสารหล่อลื่นที่ติดอยู่แล้วโดยมีสายโซ่โมเลกุลของกรดไขมันในน้ำมันพืชเป็นตัวช่วยสร้างชั้นฟิล์มระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง ทำให้น้ำมันไม่สัมผัสกันโดยตรง [23]

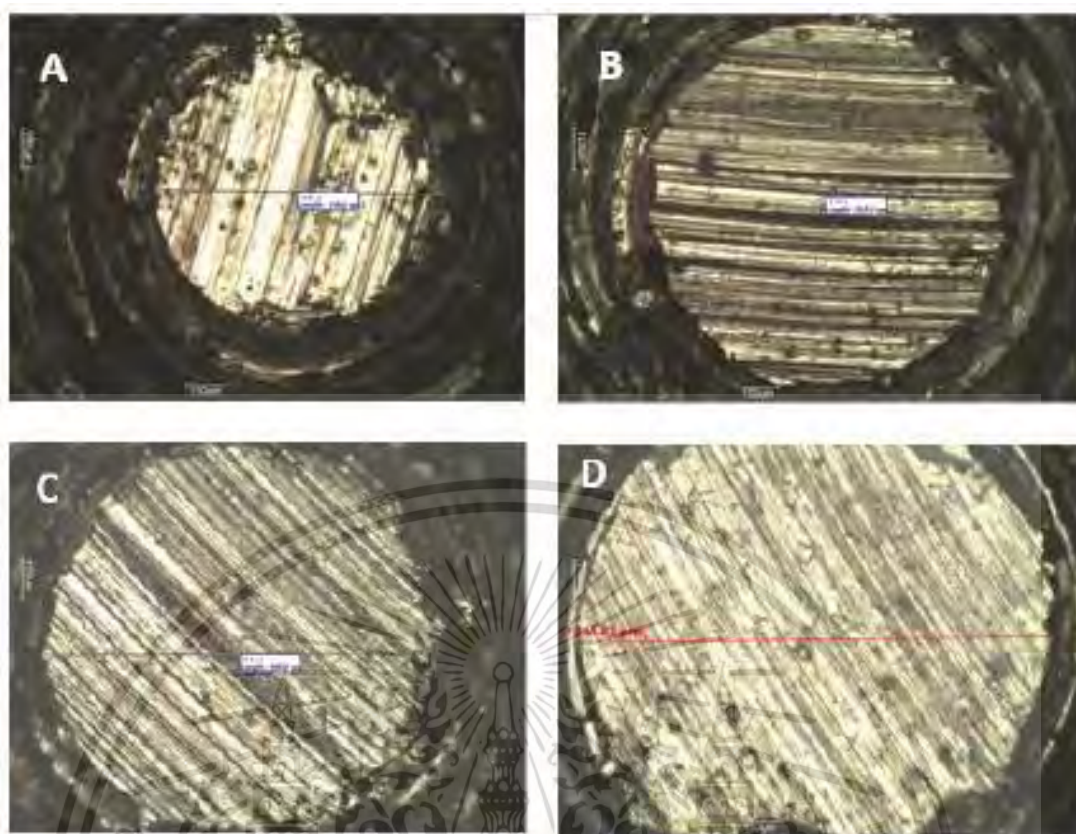


รูปที่ 5.6 กราฟแสดงผลสัมประสิทธิ์ความเสียหายกับเวลา

### 5.8.2 ผลการสึกหรอ

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ในรูปที่ 5.7 แสดงพื้นผิวหน้าตัดบริเวณที่สึกหรอและเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณสึกหรอของบอลแล้วมาคำนวณหาปริมาตรการสึกหรอ พบว่าปริมาตรสึกหรอทั้งสามตัวอย่างมีต่ำกว่า ISO VG68 อย่างเห็นได้ชัดและเป็นแนวโน้มเดียวกันกับค่า COF เฉลี่ยด้วยนั่นคือมีค่า COF เฉลี่ยต่ำกว่า ISO VG68 เช่นกัน เนื่องจากผลของ EVA ตามคำอธิบายข้างต้น และเป็นที่น่าสังเกตว่าผลการสึกหรอของ WVO (ปราศจาก EVA) ให้ผล COF และ ปริมาตรการสึกหรอที่ต่ำมาก เพราะว่า WVO มีน้ำมันพืชเป็นองค์ประกอบหลักโดยมีกรดไขมันเป็นส่วนประกอบซึ่งเป็นสารหล่อลื่นที่ติดอยู่แล้ว และงานวิจัย Syahrullail และคณะ [17] แสดงให้เห็นว่าน้ำมันปาล์มให้คุณสมบัติต่อการสึกหรอที่ดีกว่า น้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐาน น้ำมันแร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



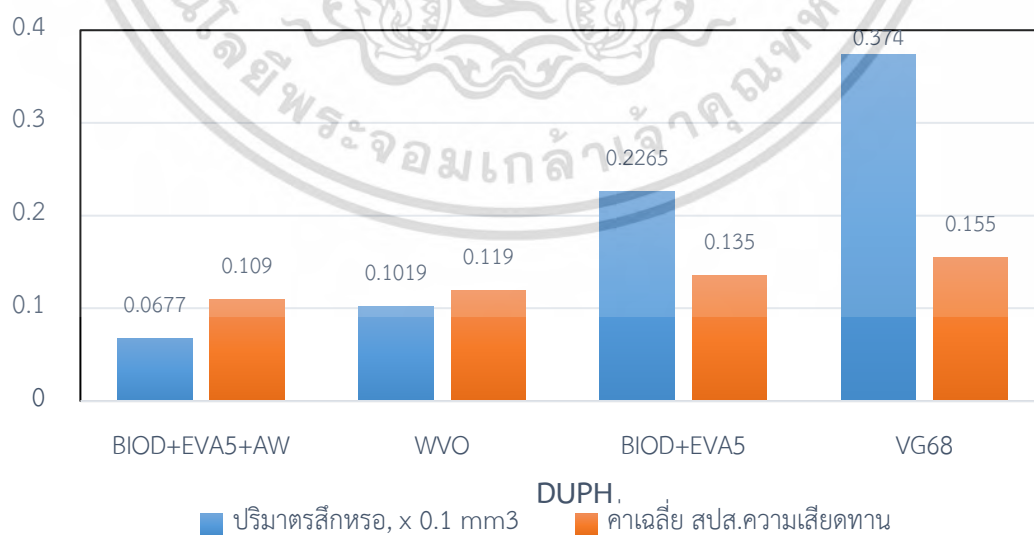
รูปที่ 5.7 ภาพการสีกหรือของบอลจากกล้องจุลทรรศน์

A) BIOD+EVA5+AW,

C) BIOD+EVA5

B) WVO

D) ISO VG68



รูปที่ 5.8 แผนภูมิแท่งค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความเสียหายและปริมาตรการสีกหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.9 การประเมินต้นทุน

เรือนขวัญ [39] ศึกษาต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วระดับชุมชนขนาดไม่เกิน 200 ลิตรต่อวัน ผลการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับต้นทุนในการผลิต ได้แก่ ค่าไฟฟ้า ค่าน้ำ ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง และค่าใช้จ่ายอื่นๆ เช่น ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษาเครื่องจักรและอุปกรณ์ ผลการคำนวณได้ต้นทุนไบโอดีเซลเฉลี่ย 22.05 บาทต่อลิตร โดยมี ก๊าซเฉลี่ย 5.95 บาทต่อลิตร ขณะที่ราคาขายของไบโอดีเซล (B100) อยู่ที่ประมาณ 23.64 บาทต่อลิตร (ธ.ค. 2560) ประกาศจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) จากผลการทดลอง BIOD+EVA5+AW ให้ผลคุณสมบัติที่ดีที่สุด โดยมีองค์ประกอบหลักคือไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว สารเติมแต่ง EVA และ OMEGA904 เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ เมื่อรวมกับต้นทุนจากสารเติมแต่งนี้สามารถคำนวณต้นทุนการผลิตได้ประมาณ 33.91 บาทต่อลิตร แสดงในตารางที่ 5.5 ในขณะที่ราคาน้ำมันไฮดรอลิก ISO VG46 และ VG68 มีราคาเฉลี่ยประมาณ 50-60 บาทต่อลิตร

ตารางที่ 5.5 คำนวณต้นทุนของ BIOD+EVA5+AW

รายการ	ปริมาณการใช้	ราคา	ต้นทุน บาท/ลิตร
ไบโอดีเซล	100%	22.05 บาท/ลิตร [39]	22.05
EVA	5% wt.	59 บาท/kg	2.61
OMAGE904	0.5% Vol.	1,850 บาท/ลิตร	9.25
ต้นทุน น้ำมันBIOD+EVA5+AW (บาท/ลิตร)			33.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการวิจัย

น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ใช้แล้ว (WVO) ในงานวิจัยนี้เก็บมาจากร้านค้าทอดปาท่องโก๋ ตรวจสอบปริมาณกรดไขมันอิสระได้เท่ากับ 0.568% ซึ่งอยู่ในค่าแนะนำในสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เริ่มจากนำ WVO ไปผ่านการกรองเศษอาหารสิ่งสกปรกและกำจัดความชื้นด้วยความร้อน จากนั้นผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันใช้เมทานอล และมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ (BIOD) ความหนืดจลน์ของ BIOD มีค่า 5.81 cSt ที่ 40 °C ซึ่งมีค่าต่ำกว่าขอบเขตงานวิจัย จึงเติม EVA ที่ 5% wt (BIOD+EVA5) ได้ค่าความหนืดจลน์ 48.6 cSt ที่ 40 °C ตามขอบเขตงานวิจัย นอกจากนี้ WVO และ BIOD+EVA5+AW มีค่าความหนืดจลน์ตามขอบเขตงานวิจัยคือ 51.5 และ 57.1 cSt ที่ 40 °C ตามลำดับ ดังนั้น WVO, BIOD+EVA5 และ BIOD+EVA5+AW จึงถูกนำไปศึกษาคุณสมบัติอื่นต่อไป ค่าดัชนีความหนืดทั้ง 3 ตัวอย่างนี้ มีค่าสูงกว่าดัชนีความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิกเชิงพาณิชย์ ISO VG46 และ ISO VG68 ส่วนจุดวาบไฟทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าต่ำกว่าน้ำมันไฮดรอลิก ISO VG46 และ ISO VG68 แต่จุดวาบไฟทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของน้ำมันไฮดรอลิก-พื้นฐานน้ำมันแร่ มอก.977-2551 สำหรับจุดไหลเททั้ง 3 ยังเป็นปัญหาเพราะมีค่าสูงกว่าน้ำมันไฮดรอลิก ISO VG68 และสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของน้ำมันไฮดรอลิก-พื้นฐานน้ำมันแร่ มอก.977-2551 ด้วย ผลคุณสมบัติไทรโบโลยีโดยเครื่องไทรโบมิเตอร์ CSM แบบ Ball-on-disk ของทั้ง 3 ตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าการหล่อลื่นและต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าน้ำมันไฮดรอลิก ISO VG68 เสียอีก โดยผลคุณสมบัติไทรโบโลยีของ BIOD+EVA5+AW ให้ผลดีที่สุด อย่างไรก็ตามสมบัติเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ BIOD+EVA5+AW มีค่าต่ำกว่าน้ำมันไฮดรอลิก ISO VG68 อยู่มากและอาจเป็นปัญหาต่อประสิทธิภาพของน้ำมันไฮดรอลิกในระยะยาว แต่สามารถถูกปรับปรุงได้โดยการเติมสารเติมแต่งเฉพาหรือดัดแปลงโครงสร้างทางเคมี จากการศึกษาวิเคราะห์ต้นทุนของ BIOD+EVA5+AW มีค่าประมาณ 33.92 บาทต่อลิตร ขณะที่น้ำมันไฮดรอลิก ISO VG46 และ ISO VG68 ในท้องตลาดมีราคาประมาณ 50-60 บาทต่อลิตร จากผลงานวิจัยชี้ให้เห็นว่าน้ำมันที่พัฒนาขึ้นจากน้ำมันพืชเก่าใช้แล้วนี้ มีศักยภาพที่พัฒนาเป็นน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานน้ำมันปิโตรเลียมได้

### 6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้เก็บตัวอย่างน้ำมันพืชใช้แล้วจากการทอดปาท่องโก๋ของพ่อค้าแม่ค้าในตลาดสด จึงไม่ทราบจำนวนการผ่านการทอดอาหารที่ครั้งและนานกี่ชั่วโมง ดังนั้นเพื่อเป็นตัวชี้วัดคุณภาพของน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยการตรวจสอบค่าความเป็นกรดและค่านวณไปเป็นเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอบนบอลด้วยกล้องจุลทรรศน์ เป็นการลากเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยสายดำแล้วประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งอาจคลาดเคลื่อน แต่หากใช้วิธีการชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาน้ำหนักที่หายไปเป็นวิธีการที่แม่นยำที่ดีกว่าและคลาดเคลื่อนน้อยกว่า

3. การปรับปรุงจุดไหลเทและสมบัติเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ BIOD+EVA5+AW ด้วยวิธีการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีหรือเติมสารเติมแต่ง เพื่อเพิ่มศักยภาพในการนำไปต่อยอดเป็นน้ำมันไฮดรอลิกได้ดีขึ้น หรือการนำไปผสมเป็นส่วนกับน้ำมันไฮดรอลิกทั่วไป อาจเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าวอีกทางหนึ่ง

4. การตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำมันไฮดรอลิกอื่นๆ อาทิ การป้องกันการเกิดฟอง, ความสามารถการป้องกันสนิม, การเข้ากันได้กับซีลยาง เป็นต้น

5. ผู้วิจัยไม่ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าโมดูลัสของแรงบีบอัด หรือ บัลก์ โมดูลัส (bulk modulus) ซึ่งมีความสำคัญต่อระบบไฮดรอลิกเนื่องจากค่าใช้จ่ายสูงมาก แต่อย่างไรก็ตามผู้วิจัยทบทวนวรรณกรรมในบทที่ 2 ของ Mustafa และคณะ [40] พบว่าค่าโมดูลัสของแรงบีบอัดของเมทิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองมีค่า 1,900 MPa ที่ 14 MPa ขณะที่น้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานน้ำมันปิโตรเลียมทั่วไปมีค่าประมาณ 1,500 MPa ที่ 14 MPa ดังนั้นแนวโน้มค่าโมดูลัสของแรงบีบอัดของไบโอดีเซลจะมีค่าสูงกว่าน้ำมันไฮดรอลิกทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] L.A.Quinchia, M.A.Delgado, C.Valencia, J.MFranco and C.Gallegos. (2010), “**Viscosity Modification of Different Vegetable Oils with EVA Copolymer for Lubricant Applications**”, Industrial Crops and Products, Vol 32, pp. 607–612.
- [2] Alejandrina Campanella, Eduardo Rustoy, Alicia Baldessari and Miguel A. Baltanás. (2010), “**Lubricants from Chemically Modified Vegetable Oil**” Bioresource Technology, Vol 101, pp. 245–254.
- [3] Sevim Z. Erhan and Svajus Asadauskas. (2000), “**Lubricant Basestocks from Vegetable Oils**” Industrial Crops and Products, Vol 11, pp. 277–282.
- [4] L.A.Quinchia, M.A. Delgado, T.Reddyhoff, C.Gallegos and H.A. Spikes. (2014), “**Tribological Studies of Potential Vegetable Oil-based Lubricants Containing Environmentally Friendly Viscosity Modifiers**” Tribology International, Vol 69, pp. 110-117.
- [5] Tirth M. Panchal, Ankit Patel, D.D. Chauhan, Merlin Thomas and Jigar V. Patel. (2017), “**A Methodological Review on Bio-lubricants from Vegetable Oil Based Resource.**” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 70, pp. 65–70.
- [6] Josiah McNutt and Quan (Sophia) He. (2016), “**Development of Biolubrations from Vegetable Oils Via Chemical Modification**” Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol 36, pp. 1-12.
- [7] G.Mendoza, A.Igartua, B.Fernandez, F.Urquiola, S.Vivanco and R.Arguizoniz. (2011), “**Vegetable Oils As Hydraulic Fluids for Agricultural Applications**” GRASAS Y ACEITES, Vol 61(1), pp. 29-38.
- [8] Piyush S. Lathi and Bo Mattiasson. (2007), “**Green Approach for The Preparation of Biodegradable Lubricant Base Stock from Epoxidized Vegetable Oil**” Applied Catalysis B: Environmental, Vol 69, pp. 207–212.
- [9] I.Golshokouh, J.Y.Wira, N.A.Farid and S.Syahrullail. (2013), “**Palm Fatty Acid Distillate As An Alternative Source for Hydraulic Oil**” Applied Mechanics and Materials, Vol 315, pp. 941-945.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] Yaogang Wang, Changhe Li, Yanbin Zhang, Benkai Li, Min Yang, Xianpeng Zhang, Shuming Huo, Guotao Liu and Mingge Zhai. (2017), “Comparative Evaluation of The Lubricating Properties of Vegetable-Oil-Based Nanofluids between Frictional Test And Grinding Experiment” Journal of Manufacturing Processes, Vol 26, pp. 94-104.
- [11] Lou A, and T.Honary. (1996), “An Investigation of The Use of Soybean Oil in Hydraulic Systems” Biosource Technology, Vol 56, pp. 41-47.
- [12] Ruggiero A, D’Amato R., Merola M., Valášek P. and Müller M. (2016), “On The Tribological Performance of Vegetable Lubricants: Experimental Investigation on Jatropha Curcas L. oil” Procedia Engineering, Vol 149, pp. 431 – 437.
- [13] K.Kamalakar, Amit Kumar Rajak, R.B.N Prasad, and M.S.L Karuna. (2013), “Rubber Seed Oil-Based Biolubricant Base Stocks: A Potential Source for Hydraulic Oils” Industrial Crops and Products, Vol 51, pp. 249–257.
- [14] ยุคคอน. “น้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic oil) เกิดฟองดำ US synthetic เหนือระดับ – Yukon” [online]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.yukonlubricants.com/productcategory/lubricants-for-industrial/hydraulic-oil/>. 2016
- [15] ไทยโพสต์. “เสนอออกกฎหมายควบคุมน้ำมันทอดซ้ำ” [online]. เข้าถึงได้จาก: <http://suchons.wordpress.com/2012/05/07/>. 2012
- [16] Y.M. Shashidhara and S.R. Jayaram. (2012), “Tribological Study on AISI 1040 with Raw and Modified Version of Pongam and Jatropha Vegetable Oil as Lubricants” Advances in Tribology, pp. 1-6.
- [17] S. Syahrullail, N. Nuraliza, M.I. Izhan, M.K. Abdul Hamid, D. Md Razak. (2013), “Wear Characteristic of Palm Olein as Lubricant in Different Rotating Speed” Procedia Engineering, Vol 68, pp. 158 – 165.
- [18] Sovereign Lubricants (UK) Ltd. “Omega 904 – Industrial Oil Concentrate” [Online] Available: <http://sovereign-omega.co.uk/omega-904-industrial-oil-concentrate/> 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [19] Theo Mang, Kirsten Bobzin, and Thorsten Bartels. **Industrial Tribology: Tribosystems Friction, Wear and Surface Engineering Lubrication**. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2011
- [20] วารุณี เปรมานนท์. (2547), “พฤติกรรมด้านไตรบอโลยีของผิวสัมผัสระหว่างเหล็กทำพิมพ์และเหล็กกล้าไร้สนิมโดยการจำลองการทำงานบนเครื่องแบบ Ball-on-disk” ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [21] ปกรณ์ ชุมรัมย์, วารุณี เปรมานนท์ และ คมกริช ละวรรณวงษ์. (2559), “การประยุกต์ใช้การปรับสภาพผิวเพื่อเพิ่มความต้านทานการสึกหรอในแม่พิมพ์ตัด” วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. Vol 12(1), pp. 13-27.
- [22] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2551), มอก.977-2551 **น้ำมันไฮดรอลิก – พื้นฐานน้ำมันแร่**, ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศและงานทั่วไป, เล่มที่ 125 ตอนพิเศษ 98ง.
- [23] Alessandro Ruggiero, Roberto D’ Amato, Massimiliano Merola, Petr Valašek, Miroslav Müller. (2017), “Tribological Characterization of Vegetal Lubricants: Comparative Experimental Investigation on Jatropha Curcas L. Oil Rapeseed Methyl Ester Oil, Hydrotreated Rapeseed oil” Tribology International, Vol 109, pp. 529-540.
- [24] A. Adhvaryu; S.Z. Erhan; J.M. Pere. (2004), “Tribological study of thermally and chemically modified vegetable oils for use as environmentally friendly lubricants” Wear, Vol 257, pp. 359-367.
- [25] Kiatkong Suwannakij; Teerapong Baitiang; Manida Tongroon; Sathaporn Chunchakityanon and Nuwong Chollacoop (2011), “Biodiesel Contamination in Engine Lube Oil” in The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering, Krabi.
- [26] นัยจันทร์ วรรณระภูติ (2539), “การสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นจากน้ำมันมะพร้าว” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สหสาขาวิชาปิโตรเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [27] ธงจุฑา สุวรรณประเสริฐ (2539), “การสังเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นจากน้ำมันถั่วเหลือง” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สหสาขาวิชาปิโตรเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [28] ขนิษฐ พานชูวงศ์ (2542), “การสังเคราะห์สารหล่อลื่นสังเคราะห์ประเภทไดเอสเทอร์จากกรดไขมัน” วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [29] คณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข “กำหนดปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันที่ใช้ทอดหรือประกอบอาหารเพื่อจำหน่าย และ วิธีการผลิตอาหารที่ใช้ไขมันทอดซ้ำ [Online]. เข้าถึงได้จาก:  
[http://food.fda.moph.go.th/law/data/announ\\_fda/1\\_No5\\_283\\_347.pdf](http://food.fda.moph.go.th/law/data/announ_fda/1_No5_283_347.pdf) 2556.
- [30] ศิริวรรณ ตันอายุวรรณ (2550), “การศึกษาการเสื่อมสภาพของน้ำมันพืชใช้แล้ว น้ำมันสบู่ดำ และผลที่มีต่อประสิทธิภาพในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [31] ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์ และ ปานเพชร ชินินทร (2555), ไฮดรอลิกอุตสาหกรรม กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น
- [32] สุรพล ราชภรณ์ (2549), วิศวกรรมหล่อลื่นเบื้องต้น. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น
- [33] Weimin Li and Xiaobo Wang (2015), “Bio Lubricants Derived from Waste Cooking Oil with Improved Oxidation Stability and Low-Temperature Properties” Journal of Oleo Science, Vol 64(4), pp. 367-375.
- [34] กานจนา พงษ์ตระกูล (2552), “ผลของสารต้านออกซิเจนต่อเสถียรภาพเชิงออกซิเดทีฟของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [35] Rick Da Tech. “Acid Number to FFA Conversions” [Online]. Available: <http://www.make-biodiesel.org/Biodiesel-Chemsitry/acid-number-to-ffa-conversions.html>. 2017.
- [36] สุภกร บุญยืน สมลักษณ์ เรื่องสุทธิณฤภาพ จิรดา สิงขรรัตน์ และนภัทร ทวีกาญจน์ (2553), “อิทธิพลของกรดไขมันอิสระต่อการผลิตไบโอดีเซล” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี Vol 18(2), pp. 37-41
- [37] เพียงพิศ กลิ่นหรั่ง และ ธงชัย กลิ่นหรั่ง. (2558), “การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันทอดใช้แล้วโดยกระบวนการสองขั้นตอน ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, Vol 20(1), pp. 95-105
- [38] สถาพร เชื้อเพ็ง (2559) “การหล่อลื่น” สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, pp. 70-74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [39] เรือนขวัญ อินทนนท์, สุภาพร ดอกไม้ทอง, จิตติคุณ วัฒนะ และ นลินี เหมาะะประสิทธิ์ (2010), “การศึกษาเชิงเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลชุมชนเพื่อการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน” Naresuan University Journal, Vol 18(2), pp. 73-81.
- [40] Mustafa E. Tat, Jon H. Van Gerpen, Seref Soylu, Mustafa Canakci, Abdul Monyem and Samuel Wormley (2010), “The speed of sound and isentropic bulk modulus of biodiesel at 21°C from atmospheric pressure to 35 MPa” Journal of the American Oil Chemists' Society, Vol77(3) pp. 285-289.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก  
ผลทดสอบจากกรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รูปที่ ก-1 ผลทดสอบจากกรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ



## กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ

รายงานผลการวิเคราะห์				
เลขรับตัวอย่าง	2099/59	หน่วยส่งตัวอย่าง	นายอภิชาติ เสริมพณิชกิจ (สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง)	
ประเภทตัวอย่าง	น้ำมันไบโอดีเซล	จำนวนตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	
วันรับตัวอย่าง	3 ต.ค.59	วันออกรายงาน	13 ต.ค.59	
ตัวอย่าง	1. BIOD + EVA8 2. BIOD + EVA8 + AW 3. BIOD + EVA5 +AW			
รายการวิเคราะห์ทดสอบ	Test method	ผลการวิเคราะห์ทดสอบ		
		BIOD + EVA8	BIOD + EVA8 + AW	BIOD + EVA5 +AW
1. Viscosity @ 40°c cSt	ASTM D 445	418	324	57.1
2. Viscosity @ 100°c cSt	ASTM D 445	23.6	23.6	11
3. Flash Point, °c	ASTM D 93	194	188	174
4. Specific gravity @ 15.6 °C	ASTM D-1298		0.8926	0.8866
หมายเหตุ	ตัวอย่างที่ 1 มีลักษณะขุ่นหนืด ไม่สามารถวัดค่า Specific gravity @ 15.6 °C ได้			
น.ท.หญิง สมทรง แพทย์ (สมทรง แพทย์) หัวหน้าแผนกเชื้อเพลิงและหล่อลื่น ฯ	น.อ.หญิง กิ่งแก้ว (พิทยวี ผาสุข) รองผู้อำนวยการกองวิเคราะห์และทดสอบ ฯ ทำการแทน ผู้อำนวยการกองวิเคราะห์และทดสอบ ฯ			
รายงานนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ เท่านั้น				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รูปที่ ก-1 (ต่อ) ผลทดสอบจากกรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ



## กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ

รายงานผลการวิเคราะห์						
เลขรับตัวอย่าง	2099/59	หน่วยส่งตัวอย่าง	นายอภิชาติ เสริมพณิชกิจ (สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง)			
ประเภทตัวอย่าง	น้ำมันไบโอดีเซล	จำนวนตัวอย่าง	5 ตัวอย่าง			
วันรับตัวอย่าง	3 ต.ค.59	วันออกรายงาน	13 ต.ค.59			
ตัวอย่าง 1. WVO 2. WVO+EV5A 3. WVO+EV5A+AW 4. WVO+EV8A 5. WVO+EV8A +AW						
รายการวิเคราะห์ทดสอบ	Test method	ผลการวิเคราะห์ทดสอบ				
		WVO	WVO + EV5A	WVO + EV5A+AW	WVO + EV8A	WVO + EV8A +AW
1. Viscosity @ 40°C cSt	ASTM D 445	51.5	573	562	-	-
2. Viscosity @ 100°C cSt	ASTM D 445	9.1	39.6	37.7	70.7	72
3. Flash Point, °C	ASTM D 93	-	-	-	-	-
4. Specific gravity @ 15.6 °C	ASTM D-1298	0.8449	0.9624	0.8786	-	-
หมายเหตุ	ตัวอย่างที่ 4 และ 5 มีลักษณะขุ่นหนืด ไม่สามารถวัดค่า Specific gravity @ 15.6 °C ได้ ตัวอย่างที่ 4 และ 5 มีลักษณะขุ่นหนืด ไม่สามารถวัดค่า Viscosity @ 40 °C ได้ ตัวอย่าง ที่ 1 2 3 4 และ 5 ไม่เกิดการ Flash ทั้งการทดลองแบบ Close cup and Open cup					
น.อ.หญิง สมทรง นพอัฐ (สมทรง นพอัฐ) หัวหน้าแผนกเชื้อเพลิงและหล่อลื่น ฯ	น.อ.หญิง พิทยวี มาสุข (พิทยวี มาสุข) รองผู้อำนวยการกองวิเคราะห์และทดสอบ ฯ ทำการแทน ผู้อำนวยการกองวิเคราะห์และทดสอบ ฯ					
รายงานนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ เท่านั้น						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รูปที่ ข-1 ผลทดสอบจุดไหลเทของ WVO โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ

แบบ วส.7



## TEST REPORT

Sample's name  
WVOMark / Brand  
-Laboratory No.  
L60/02051.1


## Test Result

Pour point, °C

6

Customer's name Mr. APIKHARI SERMPANICHAKI  
 Customer's address 120/320 Moo 10, Nonkham, Sriracha, Chonburi 20230  
 Sample's description Brown liquid  
 Test date 28 – 31 March 2017  
 Test method ASTM D 5950 14

Approved by  
  
 (Miss Kanda Komolwattanaichai)  
 Scientist, Senior Professional Level

Reported by  
  
 (Miss Jirat Laddawan)  
 Scientist

This report is only valid for the sample received. The above statement is not intended for advertising purposes and shall not be reproduced or shall not manifest partially without the written permission of the Department of Science Service.

Department of Science Service, Ministry of Science and Technology  
 Rama VI Road, Ratchathewi, Bangkok 10400, Thailand

Page 2/2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รูปที่ ข-2 ผลทดสอบจุดไหลเทของ BIOD+EVA5 โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ

แบบ วศ.7



## TEST REPORT

Sample's name  
BIOD+EVA5

Mark / Brand

Laboratory No.  
L60/02051.2

## Test Result

Pour point, °C

6

Customer's name Mr. APICHART SERMPANICHAKIT  
 Customer's address 120/320 Moo 10, Nongkham, Sriracha, Chonburi 20230  
 Sample's description Yellow liquid  
 Test date 28 – 31 March 2017  
 Test method ASTM D 5950-14

Approved by

*Kanda Kornwatt*  
 (Miss Kanda Kornwattanachai)  
 Scientist, Senior Professional Level

Reported by

*Jirat Laddawan*  
 (Miss Jirat Laddawan)  
 Scientist

This report is only valid for the sample received. The above statement is not intended for advertising purposes and shall not be reproduced or shall not manifest partially without the written permission of the Department of Science Service.

Department of Science Service, Ministry of Science and Technology  
 Rama VI Road, Ratchathewi, Bangkok 10400, Thailand

Page 2/2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รูปที่ ข-3 ผลทดสอบจุดไหลเทของ BIOD+EVA5+AW โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ

แบบ วศ.7



## TEST REPORT

Sample's name  
BIOD+EVA5+AW

Mark / Brand  
-

Laboratory No.  
L60/02051.3

## Test Result

Pour point, °C

6

Customer's name Mr. APICHART SERMPANICHAKIT  
 Customer's address 120/320 Moo 10, Nongkham, Sriracha, Chonburi 20230  
 Sample's description Yellow liquid  
 Test date 28 – 31 March 2017  
 Test method ASTM D 5950-14

Approved by

*Kanda Komotwattana*  
 (Miss Kanda Komotwattana)  
 Scientist, Senior Professional Level

Reported by

*Jirat Laddawan*  
 (Miss Jirat Laddawan)  
 Scientist

This report is only valid for the sample received. The above statement is not intended for advertising purposes and shall not be reproduced or shall not manifest partially without the written permission of the Department of Science Service.

Department of Science Service, Ministry of Science and Technology  
 Rama VI Road, Ratchathewi, Bangkok 10400, Thailand

Page 2/2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค  
ผลทดสอบจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค-1 ผลทดสอบจุดไหลเทของ BIOD โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

08-AUG-1994 23:48

CHEMICAL-ENGINEERING

074212896

P. 01



Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University  
Hat-Yai, Songkhla, Thailand 90112 Website: chem.eng.psu.ac.th  
Tel: 074-287055-6 Fax: 074-558833 E-mail: kunyanunt.c@psu.ac.th



### Test Report

Service No.8/2558

Pe2/2558

Date of sample receipt : 20 November 2014  
Customer name : Mr.Apichart Sermpanichakit  
Address : Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Sample name/type : Biodiesel

Sample name	Test list	Method	Standard	Result
1. BIODIESEL	Flash Point	ASTM-D93	120 °C Minimum	158 °C
	Pour Point	ASTM-D97	-	12 °C

Remark : The Department of Energy has not set the properties at low temperatures for biodiesel use in Thailand. But the pour point of Mallory conventional diesel, B5 diesel fuel and diesel oil slowly. Provided no more than 10,10 and 16 °C, respectively.

.....  
(Mr.Tanakorn Keatklunboot)

Scientist

.....  
(Asst.Prof.Dr.Sininart Chongkhong)

Deputy Head for Academic Services and Quality Assurance,  
Department of Chemical Engineering

Remark: This test report is valid only for tested sample.

This test report shall not be reproduced except in full, without written approval of the Department of Chemical Engineering.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค-2 ผลทดสอบค่าความเป็นกรด โดยศูนย์ทดสอบเครื่องมือวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



Scientific Equipment Center  
Prince of Songkla University

Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110  
Tel. 074-286904-7 Fax. 074-212813 E-mail: sec-all@group.psu.ac.th Website: http://www.sec.psu.ac.th

Vision: A growing government organization with a strong drive towards high performance and sustainability through services of advanced scientific research equipment

F-RES-003 Rev.11 08/05/60

TEST REPORT

<b>Report No.:</b>	R3303/60	<b>Page:</b>	1/1
<b>Test Request Form No.:</b>	4479/60 (Referred to F-ASO-038 No. 090/60, Date: August 6, 2017)	<b>Date Received:</b>	October 20, 2017
<b>Customer Name and Address:</b>	Mr. Apichart Sermpanichakit Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering King Mongkut's, Institute of Technology Ladkrabang No. 1, Soi Chalongsong 1, Chalongsong Road, Ladkrabang Sub-district, Ladkrabang district, Bangkok 10520		
<b>Analyst:</b>	Mrs. Wachiraporn Pisitara		
<b>Date Tested:</b>	October 20, 2017		
<b>Test method Used:</b>	In house method refer to ASTM D664		
<b>Test Equipment:</b>	Potentiometric Autotitrator, 794 Basic Titrino, Metrohm, Switzerland		
<b>Test Technique:</b>	Potentiometric Titration		
<b>Sample Condition:</b>	Liquid		
<b>Sample Description :</b>	Biodiesel, Hydraulic oil, Vegetable oil	<b>Quantity:</b>	5 Samples

Test Result(s):

No.	Sample name	Parameter	Unit	Results $\pm$ SD
1	RPO	Total Acid Number (TAN)	mgKOH/g	0.733 $\pm$ 0.043
2	WVO	Total Acid Number (TAN)	mgKOH/g	1.167 $\pm$ 0.101
3	PTT68	Total Acid Number (TAN)	mgKOH/g	1.295 $\pm$ 0.009
4	BIOD+EVA5	Total Acid Number (TAN)	mgKOH/g	3.761 $\pm$ 0.296
5	BIOD+EVA+AW	Total Acid Number (TAN)	mgKOH/g	3.397 $\pm$ 0.206

- Refer to: \\server2\rawdata\TITRATE\2560\4479-60

- SD = Standard Deviation

(Mrs. Roosanee Kulvijitra)

Head of Scientific Research Equipment Services

October 31, 2017

**Remark** This test report is valid only for the tested sample.

This test report shall not be reproduced except in full, without written approval of the Scientific Equipment Center.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค-3 ผลทดสอบเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยศูนย์ทดสอบเครื่องมือ  
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



**Scientific Equipment Center**  
**Prince of Songkla University**

Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110  
Tel. 074-286904-7 Fax. 074-212813 E-mail: sec-all@group.psu.ac.th Website: http://www.sec.psu.ac.th

Vision: A growing government organization with a strong drive towards high performance and sustainability through services of advanced scientific research equipment

F-RES-003 Rev.11 08/05/60

**TEST REPORT**

<b>Report No.:</b>	R3283/60	<b>Page:</b>	1/1
<b>Test Request Form No.:</b>	4338/60	<b>Date Received:</b>	October 11, 2017
<b>Customer Name and Address:</b>	Mr. Apichart Sermpnichakit Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang No. 1, Soi Chalongsong 1, Chalongsong Road, Ladkrabang Sub-district, Ladkrabang district, Bangkok 10520		
<b>Analyst:</b>	Ms. Kotchakorn Kummueang		
<b>Date Tested:</b>	October 18-20, 2017		
<b>Test method Used:</b>	In house method refer to WI-RES-EC Meter-001 and based on EN 14112:2003		
<b>Test Equipment:</b>	EC Meter, EC-450L, Istek inc., Korea		
<b>Test Technique:</b>	Oxidation Stability (Accelerated Oxidation Test)		
<b>Sample Condition:</b>	Contained in Plastic bottles		
<b>Sample Description :</b>	Biodiesel, Hydraulic oil	<b>Quantity:</b>	2 Samples

**Test Result(s):**

ที่	ชื่อตัวอย่าง	Oxidation stability (Hours)	Standard Criteria (Hours)
1.	PTT 68	> 24	≥ 10
2.	BIOD+EVA5+AW	0.74	≥ 10

\* The results were referred to folder: server2\rawdata\ EC\rawdata\2560\4338-60

(Mrs. Roosanee Kulvijitra)

**Head of Scientific Research Equipment Services**

October 20, 2017

**Remark** This test report is valid only for the tested sample.

This test report shall not be reproduced except in full, without written approval of the Scientific Equipment Center.

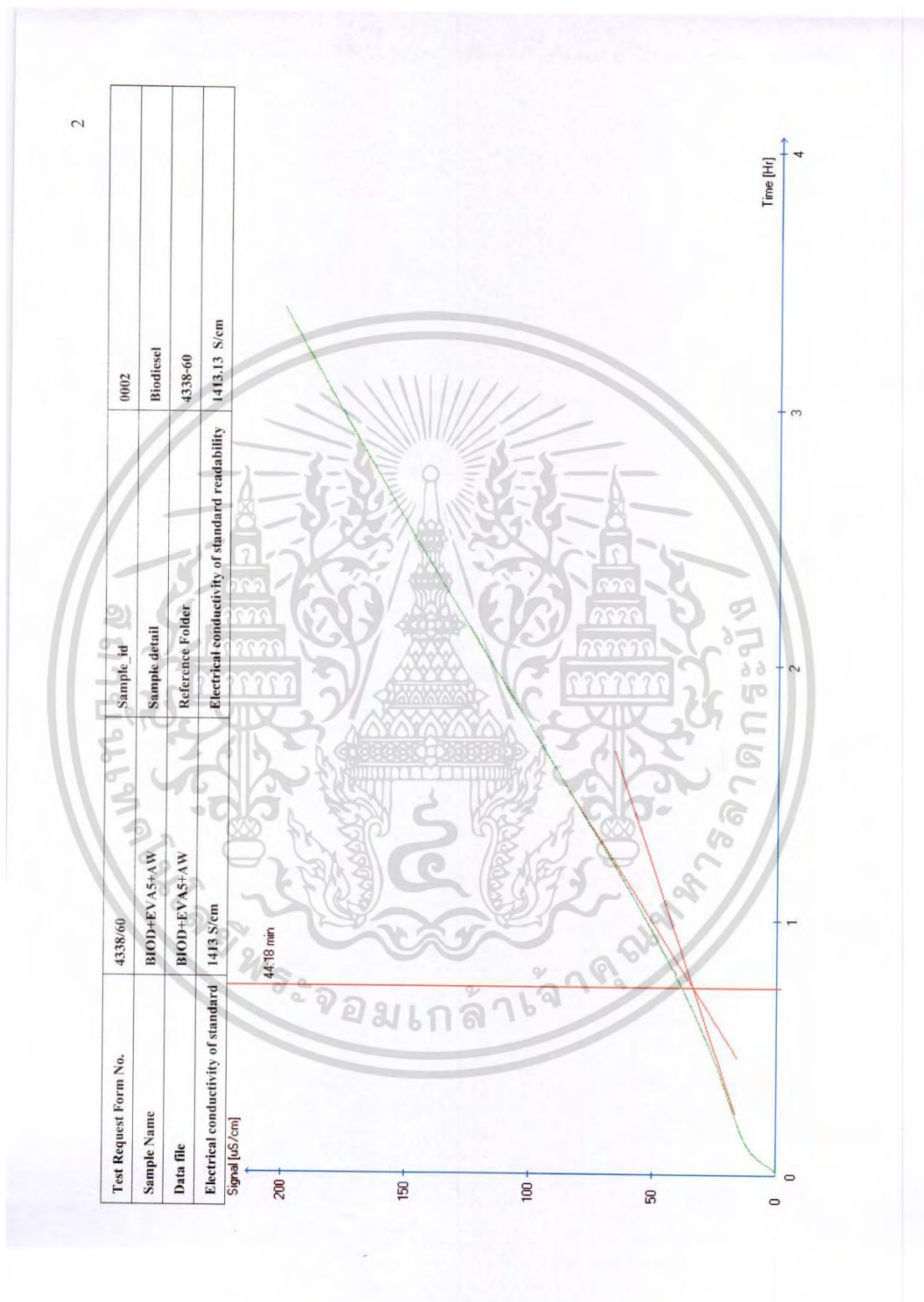
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค-3 (ต่อ) ผลเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยศูนย์ทดสอบเครื่องมือ  
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค-3 (ต่อ) ผลทดสอบเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยศูนย์ทดสอบเครื่องมือ  
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



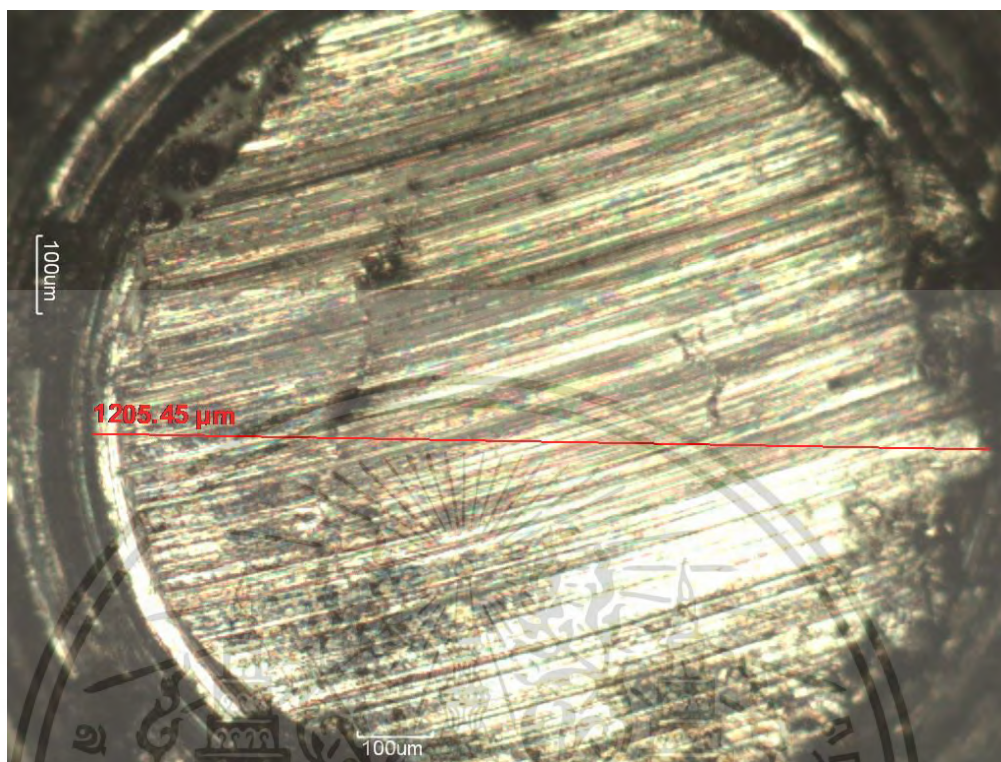
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



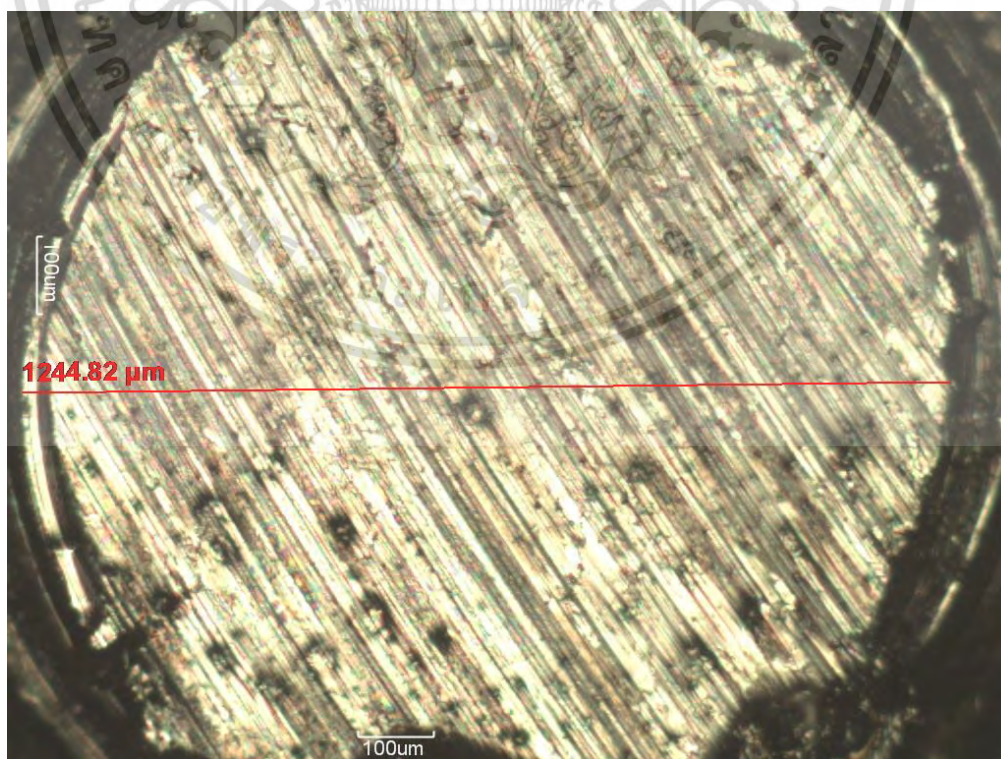
ภาคผนวก ง  
ผลทดสอบจากสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ง-1 การสีกรหและผลการวัดขนาดสีกรหจากกล้องจุลทรรศน์ของชั้นทดสอบบอลชั้นที่ 1 โดยมี ISO VG68 เป็นสารหล่อลื่น

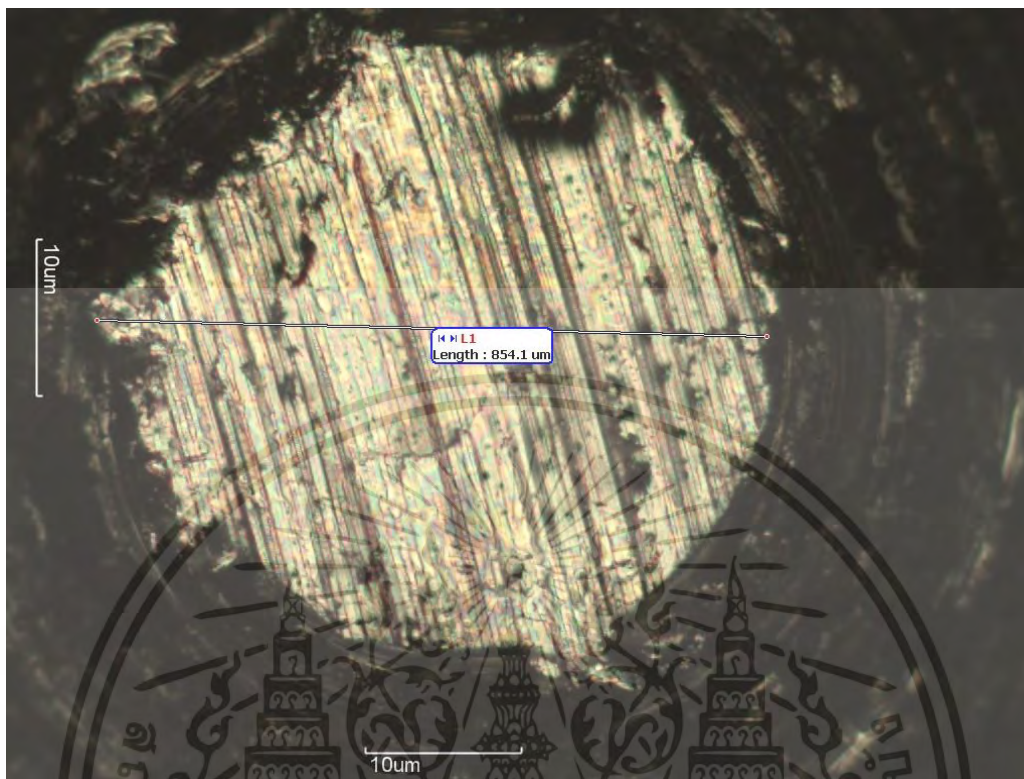


รูปที่ ง-2 การสีกรหและผลการวัดขนาดสีกรหจากกล้องจุลทรรศน์ของชั้นทดสอบบอลชั้นที่ 2 โดยมี ISO VG68 เป็นสารหล่อลื่น

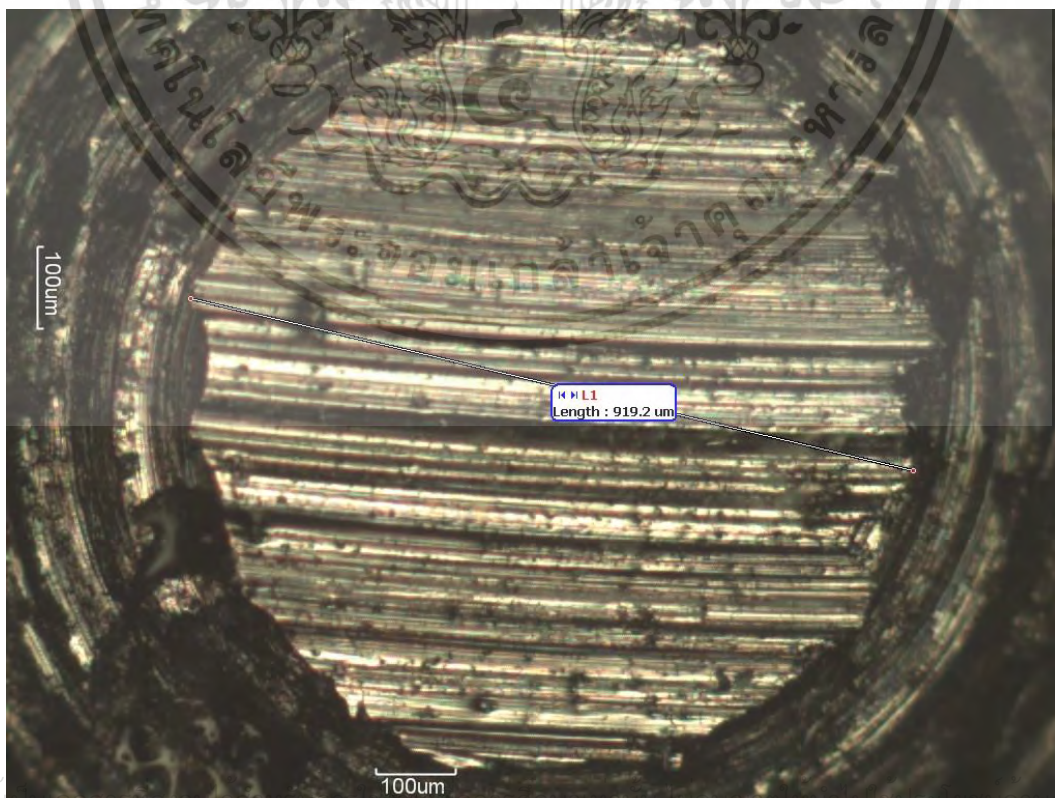


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ง-3 การสีกรหและผลการวัดขนาดสีกรหจากกล้องจุลทรรศน์ของชั้นทดสอบบอลขึ้นที่ 1 โดยมี WVO เป็นสารหล่อลื่น



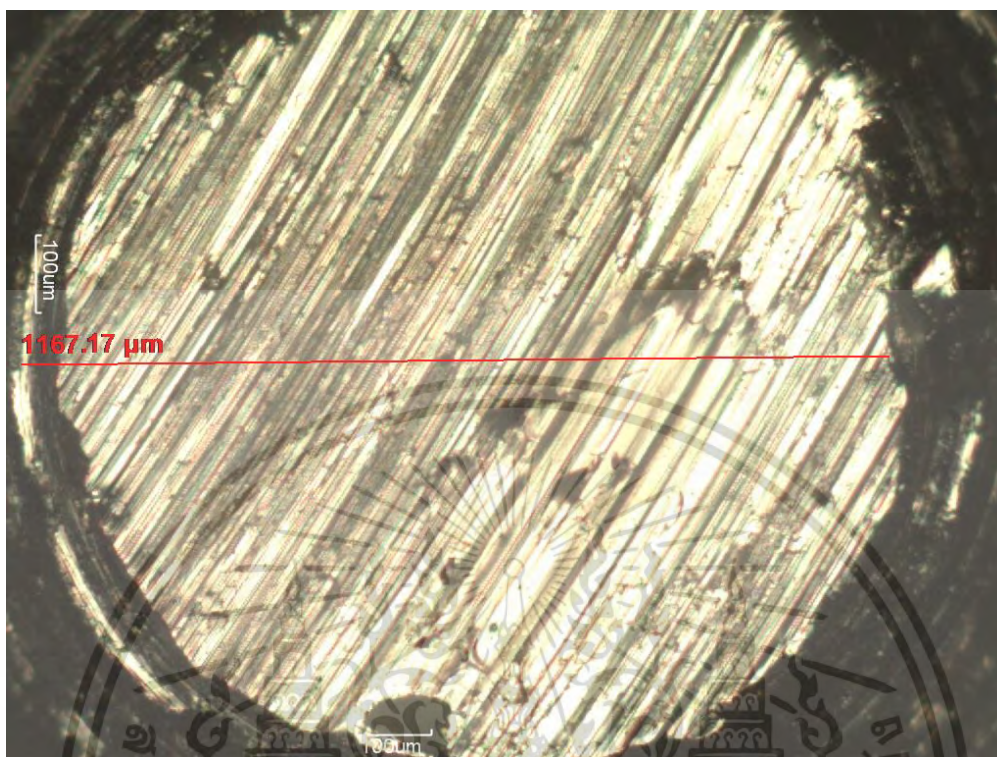
รูปที่ ง-4 การสีกรหและผลการวัดขนาดสีกรหจากกล้องจุลทรรศน์ของชั้นทดสอบบอลขึ้นที่ 2 โดยมี WVO เป็นสารหล่อลื่น



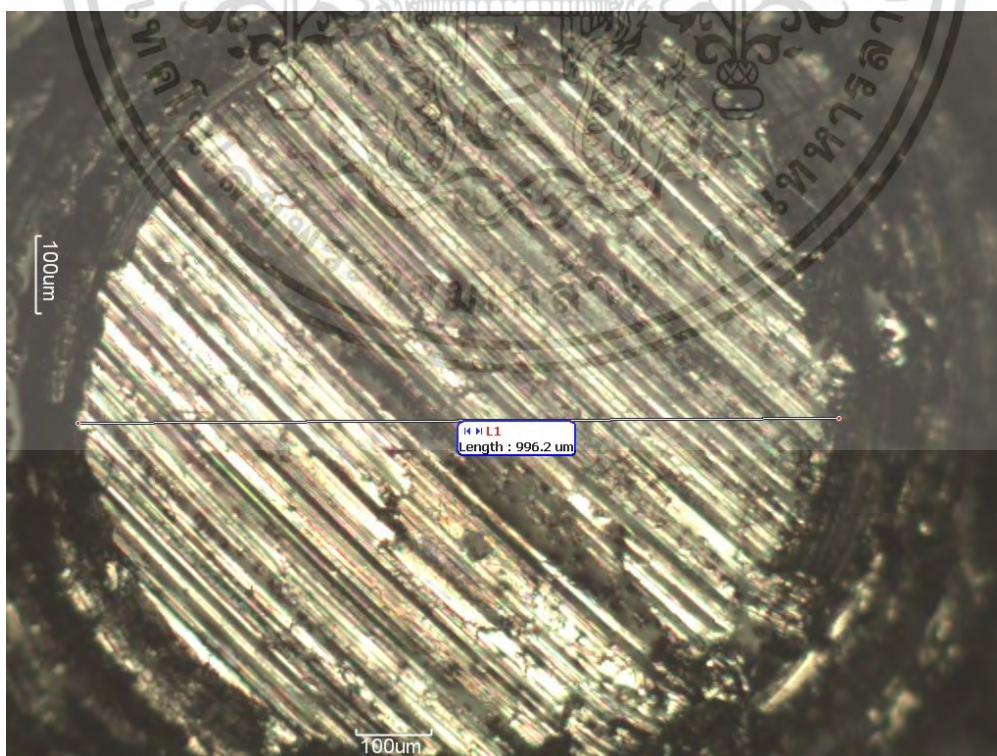
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ง-5 การสีกรหและผลการวัดขนาดสีกรหจากกล้องจุลทรรศน์ของชั้นทดสอบบอลขึ้นที่ 1 โดยมี BIOD+EVA5 เป็นสารหล่อลื่น

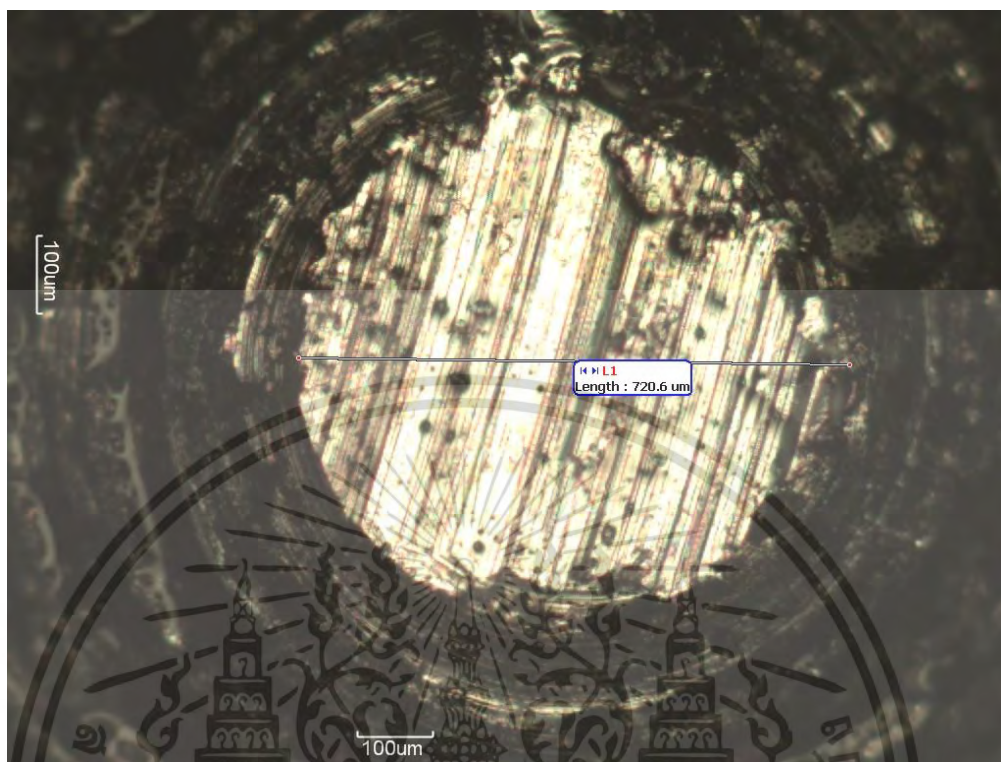


รูปที่ ง-6 การสีกรหและผลการวัดขนาดสีกรหจากกล้องจุลทรรศน์ของชั้นทดสอบบอลขึ้นที่ 2 โดยมี BIOD+EVA5 เป็นสารหล่อลื่น

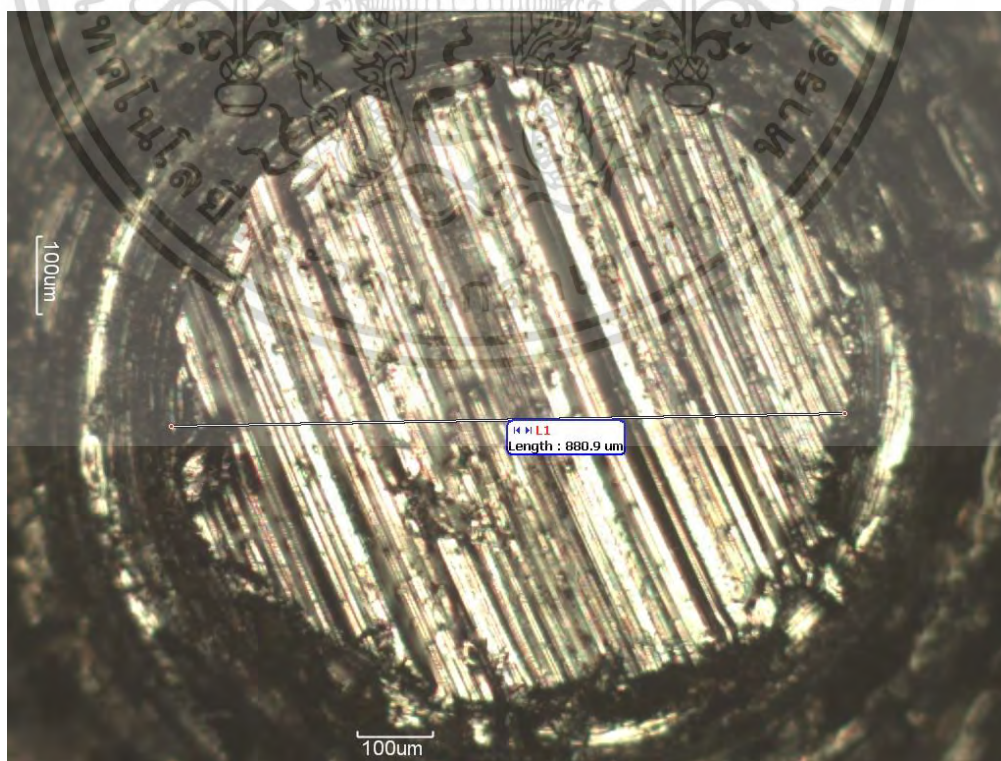


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ง-7 การสีทหรอและผลการวัดขนาดสีทหรอจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นทดสอบบอลขึ้นที่ 1 โดยมี BIOD+EVA5+AW เป็นสารหล่อลื่น



รูปที่ ง-8 การสีทหรอและผลการวัดขนาดสีทหรอจากกล้องจุลทรรศน์ของชิ้นทดสอบบอลขึ้นที่ 2 โดยมี BIOD+EVA5+AW เป็นสารหล่อลื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ

มาตรฐานสินค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รูปที่ จ-1 คุณภาพของสินค้า PTT Hydraulic ของ บริษัท ปตท. จำกัด(มหาชน)


**PTT HYDRAULIC**

PRODUCT DATA SHEET

**Industrial Hydraulic Oil**
**จุดเด่นของผลิตภัณฑ์**

- PTT HYDRAULIC 32, 37, 46, 68, 100: เป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันไฮดรอลิกชนิดต้านทานการสึกหรอ ผลิตจากน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานชนิด Paraffinic จึงมีคุณภาพสูงและมีอายุการใช้งานยาวนาน เพิ่มคุณภาพด้วยสารป้องกันการสึกหรอ และสารป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

**คุณสมบัติพิเศษ**

- ป้องกันอุปกรณ์จากการกัดกร่อนและการสึกหรอ ไม่ทำปฏิกิริยากับยาง และป้องกันไส้กรองอุดตัน
- ป้องกันการเกิดฟอง และปฏิกิริยาออกซิเดชัน สามารถทนความร้อน และอุณหภูมิได้สูง

**ลักษณะการใช้งาน**

- ใช้ได้กับระบบทั่วไป ทั้งระบบกำลังและระบบควบคุม
- ใช้ได้กับทั้งระบบที่ทำงานเบา และทำงานหนักที่ต้องการน้ำมันประเภทป้องกันการสึกหรอ
- เหมาะสำหรับระบบไฮดรอลิกในอุตสาหกรรม และระบบไฮดรอลิกในยานยนต์
- ใช้ได้กับอุปกรณ์อื่นๆ เช่น เครื่องอัดลมระบบเกียร์ที่ใช้น้ำมันประเภทป้องกันการสึกหรอ
- ไม่ควรใช้ผสมกับน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารละลาย เนื่องจากอาจเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดตะกอนได้

**มาตรฐานอ้างอิง**

- DIN 51524 Part 2
- US Steel 127, 136
- Denison HF-0, HF-1, HF-2
- SEB 181 222
- Eaton Vickers M-2950-S, I-286-S
- Cincinnati Milacron P-68, P-69, P-70
- ISO 11158 Category HM
- JCMAS HK P041
- Bosch Rexroth RD 90220-1
- GM LS-2

**คุณสมบัติจำเพาะ**

	32	37	46	68	100
- Viscosity @ 40 °C, cSt	31.57	36.85	45.88	68.98	97.55
- Viscosity @ 100 °C, cSt	5.59	6.17	7.024	8.90	11.1
- Viscosity Index	115.9	114.5	110.6	103.5	98
- Density @ 15°C, g/cm <sup>3</sup>	0.8720	0.8740	0.8769	0.8835	0.8884
- Flash Point (COC), °C	229	231	242	255	276
- Pour Point, °C	-12	-12	-9	-9	-6
- Copper Strip Corrosion	1b	1b	1b	1b	1b
- Foam Seq I, ml/ml	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
Seq II, ml/ml	10/0	10/0	0/0	0/0	0/0
Seq III, ml/ml	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0

รายละเอียดเพิ่มเติมติดต่อสอบถามได้ที่ ส่วนเทคนิคหล่อลื่น บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) โทร: 02-2397908 และ 02-2397986 โทรสาร 02-2397859 สายด่วนลูกค้า 02-2397878

Product no. IL-HY, Rev. 03-60

Page 1/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ จ-2 คุณภาพสินค้าเอททีลีน-ไวนิล อะซิเตท โคลิโพลีเมอร์ หรือ EVA เกรด TV2160 ของ บริษัท ทีพีโอ โพลีน จำกัด(มหาชน)

CoaLdpe

Page 1 of 1

**TPI POLYENE PUBLIC COMPANY LIMITED**

8th Floor, TPI TOWER, 26/56 Chan Tat Mai Road, Kwang Tungmahamek, Khet

Sathorn Bangkok 10120

Cable : "POLYTHENE" BANGKOK

www.tpipolene.co.th

Tel.: 022855090

Fax : 026787080

**CERTIFICATE OF LOT ANALYSIS**

WE HEREBY CERTIFY THAT THE UNDERMENTIONED GOODS HAVE BEEN DULY INSPECTED BY US AND THE RESULTS OF THE ROUTINE INSPECTION ARE AS FOLLOWS :

TYPE : EVA  
GRADE : TV2160  
LOT NO.: 16030371

ITEM	PROPERTIES	TEST METHOD	UNIT	RESULT
1.	MELT FLOW INDEX (190° C,LOAD 2.16 kg.)	ASTM D1238	g/10min	39
2.	DENSITY AT 23° C	ASTM D1505	g/cm <sup>3</sup>	0.951
3.	VA CONTENT	TPI POLYENE	%	30.4

CERTIFIED BY

(MR. THANACHAI CHAMNANKUL)  
SECTION MANAGER

The above test result are obtained from our quality test. This dose not relieve the purchasers from testing the product upon receipt and gives no assurance of suitability of the product for any particular purpose.

<http://192.168.21.55/coamkt/COAEva.aspx?LotNo=16030371>

29-Mar-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รูปที่ จ-3 คุณภาพของสินค้า OMEGA 904

# Omega 904

### DESCRIPTION:

Omega 904 is an industrial oil concentrate, scientifically designed to improve operating efficiency and reduce maintenance downtime.

### SPECIAL ADDITIVES:

Omega 904 contains special fortifying additives, including Extreme Pressure 'EP', anti-wear and anti-oxidation.

The EP and anti-wear additives allow safe and efficient operation under high-load conditions. As pressure on the moving parts increases, ordinary oils are squeezed out, and the resultant metal-to-metal contact causes localized welding. As the pressure continues, the welds shear and are evident as areas of severe wear. Omega 904 reacts with the surface of the metal and forms a chemical compound that provides lubrication, even under extreme pressure, and therefore pre-vents any damage to the metals.

When oxidation of a petroleum lubricant takes place, its viscosity is increased and Petroleum Oxyacids (acidic contaminants) are formed. Omega 904's anti-oxidation additives eliminate these undesirable effects and give the oil a greatly extended useful service life.

### REDUCED FRICTION:

Omega 904's high melting point enables it to maintain a protective, lubricating film between the surfaces in contact, and therefore, reduces 'drag' and high operating temperatures. It also eliminates shearing, galling, plucking and seizing of machine and equipment parts.

### VERSATILITY:

Omega 904 is so versatile that it can be used in all forms of gear boxes, transfers, transmissions Vee-drives. It can also be used for all automatic or semi-automatic lube systems and can be applied to all oil lubrication systems.

© Copyright. All rights reserved. (BSI 5750 or equivalent source)  
Magna Industrial reserves the right to modify or change this product for purposes of improving its performance characteristics.

OPIM 904-1	Version 1.0	Revision 1.1	Rev. Date: 13 January, 2003	Reference: LUN
------------	-------------	--------------	-----------------------------	----------------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### รูปที่ จ-3 (ต่อ) มาตรฐานคุณภาพของสินค้า OMEGA 904

#### APPLICATION:

Omega 904 can be applied to all lubrication systems: bath, wickfeed, dripfeed and closed or pressure-fed. It can be used in hydraulic systems, transmissions, V-drives, variators, reducers, transfers and all forms of gearboxes -excluding automatic transmissions.

Add 5% maximum by volume for hydraulic systems and up to 20% for gear systems.

#### TYPICAL DATA:

TEST	ASTM TEST METHOD	TEST METHOD
Viscosity @ 100°C, cSt	D-445	800-1200
Flash Point, °C (°F)	D-92	200(392)

© Copyright. All rights reserved. (BSI 5750 or equivalent source)  
Magna Industrial reserves the right to modify or change this product for purposes of improving its performance characteristics.

OPIM 904-2    Version 1.0    Revision 1.1    Rev. Date: 13 January, 2003    Reference: LUN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ฉ  
บทความที่ตีพิมพ์และเผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉ-1 การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 18 ปี 2560



The poster features a background of interlocking gears and a faint watermark of a Thai university seal. The main title 'TSAE 2017' is in large blue letters at the top. Below it, the Thai text describes the national and international conferences. The English text follows. The location and dates are listed in Thai. At the bottom, there are logos for the organizing institutions and participating countries, including Thailand, Nepal, and several Thai universities.

**TSAE  
2017**

การประชุมวิชาการ  
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย  
ระดับชาติ ครั้งที่ 18 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 10  
ประจำปี 2560  
The 18<sup>th</sup> TSAE National Conference and  
The 10<sup>th</sup> TSAE International Conference  
(TSAE 2017)

ณ อิมแพค เมืองทองธานี  
กรุงเทพมหานคร  
7-9 กันยายน 2560  
จัดโดย สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย  
ร่วมกับ กรมส่งเสริมการเกษตร

Logos include: TSAE, Thai Agricultural Engineering Association, and various Thai universities like Rajabhat, Sakon Nakhon, and others.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TEE002

## ศึกษาสมบัติกายภาพ-เคมีและไทรโบโลยีของน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานจากน้ำมันพืชเก่าใช้แล้ว

อภิชาติ เสริมพนิกกิจ<sup>1\*</sup>, จำลอง พรบแก้ว<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

ผู้เขียนติดต่อ: อภิชาติ เสริมพนิกกิจ E-mail: apipc@yahoo.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยมากมายให้เหตุผลสำคัญในการเลือกน้ำมันจากพืชเป็นส่วนประกอบสำคัญในน้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันไฮดรอลิกเพราะมีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดี ไม่เป็นพิษอันตรายและย่อยสลายเองตามกระบวนการทางชีวภาพโดยมาทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมที่มีอย่างจำกัดแต่ยังไม่พบว่ามีกรนำมาใช้น้ำมันพืชเก่าใช้แล้วมาศึกษา ฉะนั้นจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีและไทรโบโลยีด้วยเครื่อง CSM แบบ Ball on disk ในน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานจากน้ำมันพืชเก่าใช้แล้วซึ่งได้มาจากกรนำน้ำมันพืชทอดประกอบอาหารซ้ำๆ หลายครั้งในตลอดสดจากนั้นผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นไบโอดีเซลแต่ไม่มีข้อจำกัดในความหนืดรวมไปถึงการนำไปใช้เป็นสารหล่อลื่นชีวภาพในระบบไฮดรอลิก กรเติมสารเติมแต่งเอททีลีน-ไวนิล อะซิเตท โคลโพลีเมอร์ (EVA) พบว่าเติม 5% wt เอททีลีน-ไวนิล อะซิเตท โคลโพลีเมอร์ (EVA) ในไบโอดีเซลนี้เพิ่มความหนืดจาก 5.81 cSt เป็น 48.6 cSt ที่ 40°C เมื่อพิจารณาจากความหนืด สามารถคัดกรรน้ำมันไฮดรอลิกในกรวิจัยที่มีความหนืดใกล้เคียงน้ำมันไฮดรอลิกเชิงพาณิชย์เบอร์ 46 (PTT46) และ 68 (PTT68) ได้ 3 ตัวอย่างแล้วนำมาศึกษา ผลของจุดวาบไฟสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.แต่จุดไหลเทอาจเป็นปัญหา ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยและปริมาตรสึกกรรทั้ง 3 ตัวอย่างน้อยอยู่ในช่วง 0.10 - 0.14 และ 0.006 - 0.023 mm<sup>3</sup> ตามลำดับ และให้ผลการหล่อลื่นและด้านการสึกกรรที่ต่ำกว่า PTT68 ได้ค่า 0.155 และ 0.037 mm<sup>3</sup> ตามลำดับที่เงื่อนไขการทดสอบเดียวกัน ซึ่งเห็นว่น้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานน้ำมันเก่าใช้แล้วทั้ง 3 ตัวอย่างมีศักยภาพทดแทนน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานปิโตรเลียม

คำสำคัญ: น้ำมันพืชเก่าใช้แล้ว, น้ำมันไฮดรอลิก, ไทรโบโลยี

## Physico-Chemical and Tribological Studies of Hydraulic Fluid Based Wasted Vegetable Oil

Apichart Sermpnichakit<sup>1\*</sup>, Chamlong Prabkaew<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520.

Corresponding author: Apichart Sermpnichakit. E-mail: apipc@yahoo.com

### Abstract

The main reason of several researches shows the plant oil as main ingredient into lubrication and hydraulic fluid because of good lubricating properties, non toxic and biodegradability to substitute for the petroleum based oil that has limited resources; but, there was no any researches to study in using of the wasted vegetable oil. The aim of this paper was to investigate the physico chemical and tribological properties by CSM tribometer (Ball on disk) of hydraulic fluid based wasted vegetable oil. The wasted vegetable oil used for cooking many repeated time at the fresh market was studied and then it was made to be biodiesel by trans esterification process, but the limited range of biodiesel viscosity and this is constrains their use as suitable biolubricants in hydraulic system. Adding of 5% wt ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) into this biodiesel was studied. It has been found that the viscosity of the biodiesel could increase from 5.81 to 48.6 cSt at 40°C. When consider in the viscosity, there are 3 samples from all hydraulic oil in this research which are near to the local commercial hydraulics oil no.46 and 68, were studied. The flash point was also higher than Thai Industrial Standard; but, pour point might be a problem. The coefficient of friction and wear volume of all three samples stay in the ranges 0.10 - 0.14 and 0.006 - 0.023 mm<sup>3</sup> respectively; and better lubricity more wear resistance than PTT68 as 0.155 and 0.037 mm<sup>3</sup> respectively at the same testing conditions. This is indicated in the hydraulic fluid based wasted vegetable oil was a good potential to substitute for local commercial petroleum-based oil.

Keywords: Wasted vegetable oil, Hydraulic oil, Tribology.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## 1. บทนำ

สิ่งรอบตัวเรานี้ไม่ว่าจะหันไปทางไหนมักพบผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากโพลีเมอร์กันอย่างแพร่หลาย เช่น พลาสติก น้ำมัน แก๊สสูงดื่ม เป็นต้น หากยังใช้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ในปริมาณมากก็ย่อมจะนำไปสู่ภาวะขาดแคลนในที่สุดและยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่องตามมา ดังนั้นในปัจจุบันมนุษย์จึงพยายามค้นหาและค้นคว้าเกี่ยวกับแหล่งพลังงานและวัตถุดิบอื่น ๆ มาแทนที่หรือเพื่อลดการใช้โพลีเมอร์ให้น้อยลง ในทำนองเดียวกันโพลีเมอร์ก็ถูกใช้เป็นตัวดูดซับหลักสำหรับสารหล่อลื่นในอุตสาหกรรมและเป็นที่ยอมรับเสียด้วยเพราะมันมีช่วงความหนืดที่หลากหลาย, สามารถเข้ากันได้กับชิ้นส่วนและเครื่องจักรในอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี แต่มันก่อให้เกิดสารพิษเสียอันตรายและย่อยสลายเองตามกระบวนการชีวภาพได้ยาก มีการประเมินกันว่าน้ำมันหล่อลื่นราว 12 ล้านตันถูกทิ้งและปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมทุกปี (Quinchia et al., 2010) ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาเริ่มมีความนิยมในสารหล่อลื่นที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น มีงานวิจัยและพัฒนาสินค้าใหม่ๆ ที่ยั่งยืนจากเคมีสีเขียว (Green Chemistry) เช่น น้ำมันสกัดจากพืชเป็นสารหล่อลื่นตามธรรมชาติได้ดี (Alejandrina et al., 2010) ซึ่งไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต, ย่อยสลายเองตามกระบวนการทางชีวภาพ (Sevim and Svajus, 2010) และเป็นสารระเหยเป็นไอต่ำ (Quinchia et al., 2014) นอกจากนี้พวกมันสามารถนำมารีไซเคิลและกลับมาใช้ใหม่ได้โดยอาศัยการตัดแปลงโครงสร้างทางเคมี (Tirth et al., 2017; Josiah and Quan, 2016) ยิ่งไปกว่าสารหล่อลื่นธรรมชาติจากน้ำมันพืชจะสร้างผิวหรือฟิล์มปกป้องต่อการกัดกร่อน (Mendoza et al., 2011) แต่ในช่วงอุณหภูมิต่ำจุดไหลเทของน้ำมันพืชมักเป็นปัญหา (Sevim and Svajus et al., 2010) ต้องแก้ไขโดยการเติมสารเติมแต่งหรือตัดแปลงโครงสร้างทางเคมี (Piyush and Bo., 2007), พืชส่วนใหญ่ที่เป็นวัตถุดิบหลักในน้ำมันพืชและถูกนำมาใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นได้แก่ ปาล์ม (Golshokouh et al., 2013; Yaogang et al., 2017) ทานตะวัน (Mendoza et al., 2011), ถั่วเหลือง (Lou and Honary, 1996), ละหุ่ง (Quinchia et al., 2010), สับดำ (Ruggiero et al., 2016), เมล็ดยางพารา (Kamalakar et al., 2016) เป็นต้น

เป็นที่รู้กันดีว่าน้ำมันไฮดรอลิกมีหน้าที่หลักคือ เป็นตัวส่งผ่านกำลังหรือแรงดันจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งในระบบไฮดรอลิก นอกจากนี้ยังทำหน้าที่หล่อลื่นอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฮดรอลิก ลดแรงเสียดทาน ป้องกันการสึกหรอ รักษาความสะอาด และยังช่วยระบายความร้อนอีกด้วย จัดว่าเป็นกลุ่มสารหล่อลื่นที่มีความสำคัญและมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในโรงงานอุตสาหกรรมเกือบทุกประเภทรวมทั้งในงานก่อสร้าง โดยมีปริมาณการใช้มากที่สุดเป็นอันดับที่สองรองจากน้ำมันเครื่องยนต์ (ยุคอน, 2016) แต่อย่างไรก็ตามผู้วิจัยยังไม่พบงานวิจัยและค้นคว้าการนำน้ำมันพืชมาใช้แล้วมาศึกษาเป็นน้ำมันไฮดรอลิกหรือสารหล่อลื่นทั่วไป เหตุที่สนใจในน้ำมันพืชก็เพราะว่า รศ.ดร.วิทย์กุลสมบุรณ์ (ไทย์โพสดี, 2012) ผู้จัดการแผนงานคุ้มครองผู้บริโภคด้านสุขภาพ สำนักงานกองทุน

สนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ (สสส) กล่าวว่า ในปี 2012 ประเทศไทยมีปริมาณการบริโภคน้ำมันพืชประมาณ 8 แสนตันต่อปี โดยร้อยละ 50% เป็นการบริโภคในครัวเรือน อีกร้อยละ 50 ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร แต่น้ำมันเก่าใช้แล้วกลับพบว่ามีกากกลับมาเป็นพลังงานไบโอดีเซลเพียงร้อยละ 5 ซึ่งน่าเป็นห่วงว่าน้ำมันทอดซ้ำที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตอาหารนี้หายไปไหน มีการกำจัดอย่างไร ทั้งในสิ่งแวดล้อมหรือมีการบวนการฟอกเพื่อกลับมาขายให้ผู้บริโภคใหม่ การใช้น้ำมันพืชเก่ากลับมากประกอบอาหารซึ่งมีความเสี่ยงต่อการก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นแรงผลักดันให้ผู้วิจัยต้องการเพิ่มช่องทางการเลือกการประยุกต์ใช้ประโยชน์น้ำมันพืชเก่าใช้แล้วโดยศึกษาสมบัติทางกายภาพ เคมีและสมบัติเทโรโลยีเพื่อพัฒนาน้ำมันพืชเก่าใช้แล้วให้เทียบเคียงกับคุณสมบัติน้ำมันไฮดรอลิกที่จำหน่ายตามท้องตลาด

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 วัตถุดิบ

น้ำมันพืชเก่าใช้แล้ว (WVO) จากการทอดปาท่องโก๋หลายๆ ครั้งในตลาดสดก่อนที่มันจะถูกนำไปทิ้ง ผู้วิจัยจึงขอซื้อเพื่อนำมาวิจัย จากนั้นกำจัดเศษอาหารและสิ่งสกปรกโดยกรองด้วยไส้กรองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถบรรทุกแล้วต้มด้วยความร้อน 110°C เป็นเวลา 15 min. เพื่อกำจัดความชื้น, สำหรับโซเดียมไฮดรอกไซด์, เมทานอลถูกใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (ธาดาและคณะ, 2558), เพื่อผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชเก่าใช้แล้ว เทปทีลิน ไวนิล อะซิเตท โคลโพลีเมอร์ (EVA) ประกอบด้วย 30.4% wt ของไวโนลอะซิเตทถูกใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อปรับความหนืด (Quinchia et al., 2010) EVA ไม่เป็นสารพิษและเสถียรภายใต้แสงแดดหรือรังการย่อยสลายได้เองทางชีวภาพไม่ได้ (Syahrullaili et al., 2013) และ Omega904 (Sovereign Lubricants (UK) Ltd, 2016) ซึ่งประกอบด้วยสารต้านทานการสึกหรอ (AW), และป้องกันการเกิดการออกซิเดชันหรือต่อต้านการแปรสภาพของน้ำมันหล่อลื่นด้วย น้ำมันไฮดรอลิกในท้องตลาดมีวางจำหน่ายหลากหลายยี่ห้อ ในงานวิจัยนี้เลือก PTT Hydraulic 46 (PTT46) และ PTT Hydraulic 68 (PTT68) ผลิตโดยบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ กับน้ำมันไฮดรอลิกของงานวิจัยนี้ สำหรับผลการทดสอบคุณสมบัติกายภาพ-เคมีของทั้ง PTT46 และ PTT68 จะอ้างอิงจากผลทดสอบของผู้ผลิตโดยตรง

### 2.2 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไขมันหรือน้ำมัน (Triglyceride) กับแอลกอฮอล์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์และกลีเซอรอล โดยมีตัวเร่งในปฏิกิริยาทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้นในงานวิจัยนี้ใช้ตัวเร่งชนิดเบสคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ธาดาและคณะ, 2558) ได้เป็นไบโอดีเซล (BIOD) ตามขั้นตอนแผนภาพ (Figure 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.3 การเติมสารเติมแต่ง

เติม 5% wt ของ EVA ใน BIOD ที่อุณหภูมิ 120°C คนผสมให้เข้ากันนานเป็นเวลา 60 – 90 นาที จน EVA ละลายหมด สำหรับการสารต้านทานการสึกหรอ (AW), ให้ผสม 0.5% โดยปริมาตรของ Omega904 ในน้ำมันไฮดรอลิกแล้วคนผสมให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้อง สำหรับงานวิจัยนี้นอกจากเติม 5% wt ของ EVA ยังศึกษาที่ 8% wt ของ EVA ด้วย

ในงานวิจัยได้มีออกแบบการทดลองโดยเตรียมน้ำมันไฮดรอลิกที่พัฒนาขึ้นเองหลายตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์จุดที่เหมาะสมที่สุดและเพื่อความสะดวกในการอ้างอิงได้กำหนดรหัสน้ำมันไฮดรอลิกไว้ใน (Table 1)

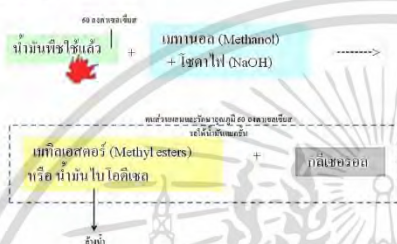


Figure 1 Esterification of wasted vegetable oil to form biodiesel.

Table 1 Codes of hydraulic oil and their composition.

รหัส	องค์ประกอบพื้นฐาน	สารเติมแต่ง
PTT46	ปิโตรเลียม	น้ำมันไฮดรอลิกในท้องตลาด
PTT68	ปิโตรเลียม	น้ำมันไฮดรอลิกในท้องตลาด
WVO	น้ำมันพืชใช้แล้ว	ไม่มี
WVO+EVA5	น้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 5%
WVO+EVA8	น้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 8%
WVO+EVA5+AW	น้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 5%+AW
WVO+EVA8+AW	น้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 8%+AW
BIOD	น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว	ไม่มี
BIOD+EVA5	น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 5%
BIOD+EVA8	น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 8%
BIOD+EVA5+AW	น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 5%+AW
BIOD+EVA8+AW	น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 8%+AW

ผลกระทบของแรงเสียดทานและความสึกหรอ ในรายงานงบประมาณของรัฐบาลสหรัฐอเมริกาปี 1997 พบว่าการประยุกต์ใช้ศาสตร์โทรโบลีย์สามารถประหยัดงบประมาณได้ถึง 16.25 พันล้านเหรียญสหรัฐ (Theo et al., 2011) ด้วยเหตุนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการสึกหรอจึงถูกศึกษาด้วยเครื่องโทรโบลีย์แบบ CSM แบบ Ball on Disk (Figure 2A) เป็นเครื่องมือวัดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีหลักการทางงาน (Figure 2C) (วารุณี, 2547) กำหนดแรงกด (*N*) คงที่บน Ball ส่วนที่แผ่นจานหมุนติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงบิด

2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติกายภาพ เคมี

ความหนืดของน้ำมันตัวอย่างที่อุณหภูมิ 40 °C และ 100°C ตามมาตรฐาน ASTM D-445 ถูกศึกษา โดยค่าความหนืดทั้ง 2 อุณหภูมิถูกนำมาคำนวณดัชนีความหนืด (VI) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความสามารถในการเปลี่ยนแปลงความหนืดตามสภาพอากาศและอุณหภูมิของไหล ในช่วงการปฏิบัติงานแสดงในสมการที่ (1) ตามมาตรฐาน ASTM D2270-04

$$VI = 100 \times \frac{L-U}{L-H} \tag{1}$$

โดยที่ *L, H* คือค่าจากตารางความหนืดที่ 100°C ใน ASTM D2270-04 และ *U* คือค่าความหนืดที่ 40°C

จุดควบไพบตามมาตรฐาน ASTM D-93 ถูกศึกษาเพื่อประเมินความเหมาะสมด้านความปลอดภัยสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง จุดไหลเตตามมาตรฐาน ASTM D5950-14 เพื่อประเมินการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกเมื่ออยู่ในสภาพอากาศหนาวเย็น

2.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติโทรโบลีย์

ความบกพร่องที่เกิดจากการออกแบบทางวิศวกรรม เครื่องกลทำให้สูญเสียงบประมาณมากกว่าที่ควร อันเนื่องมาจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หนา 5 mm. (Figure 2B) เส้นไขการทดสอบเครื่องไทรโบมิเตอร์ CSM ตาม (Table 2.) เพื่อจำลองสถานการณ์การสึกหลอ หลังจากนั้นนำ Ball ตรวจวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ OLYMPUS BX60 ด้วยเลนส์กำลังขยาย 5X0.15BD เพื่อวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณที่สึกหรอ (s) ของ Ball (Figure 3) สำหรับการคำนวณปริมาตรการสึกหรอบน Ball ตามสมการที่ (3) และ (4) (ปรกรณ์และคณะ, 2559) ตามลำดับ

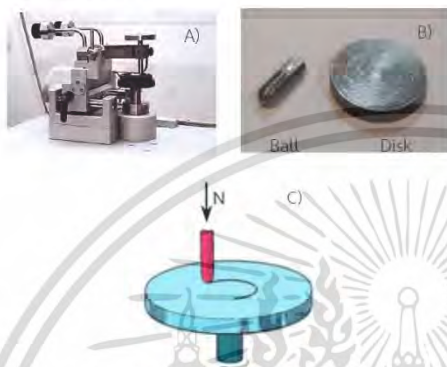


Figure 2 A) CSM Tribometer B) Ball and Disk Specimen C) The working of Ball-on-Disk.

$$\mu = \frac{F}{N} \tag{2}$$

$$h = \frac{8r - \sqrt{64r^2 - 16s^2}}{8} \tag{3}$$

$$V = \pi h^2 \left[ r - \frac{h}{3} \right] \tag{4}$$

โดยที่  $V$  คือปริมาตรการสึกหรอ (mm<sup>3</sup>),  $s$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางที่จุดสึกหลอ (mm),  $h$  คือความสูงของส่วนที่สึกหลอ (mm) และ  $r$  คือรัศมี Ball (mm).

Table 2 Testing condition of CSM Tribometer.

เงื่อนไขทดสอบ	Ball on Disk
น้ำหนักกดทับ	15 N
ความเร็วเชิงเส้น	10 cm s <sup>-1</sup>
รัศมีการหมุนของ Ball	7.53 mm
จำนวนรอบ	1,022 cycles
อุณหภูมิทดสอบ	อุณหภูมิห้อง (25 °C)

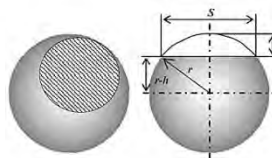


Figure 3 Wear characteristic on Ball.

3. ผลและวิจารณ์

3.1 ผลของคุณสมบัติกายภาพ-เคมี

(Table 3) แสดงผลทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ของน้ำมันไฮดรอลิกที่พัฒนาขึ้น ความหนืดของ BIOD มีค่า 5.81 cSt ที่ 40°C ความหนืดต่ำเกินไปสำหรับที่จะนำไปใช้งานไฮดรอลิก จึงต้องปรับปรุงความหนืดของ BIOD ด้วยการเติม EVA 5% wt ผลที่ได้ทำให้ BIOD+EVA5 มีความหนืดเพิ่มขึ้นเป็น 48.6 cSt ที่ 40°C ความหนืดที่ได้นี้เป็นที่พอใจเพราะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนืดของ PTT46 ที่ 40°C ดังนั้น EVA จึงเป็นสารเติมแต่งในการปรับปรุงความหนืดในน้ำมันพืช (Quinchia et al., 2010) ในทำนองเดียวกันหากเติม EVA 8% wt ใน BIOD ทำให้ BIOD+EVA8 มีความหนืดเพิ่มสูงขึ้นเป็น 418 cSt ที่ 40°C แต่ความหนืดที่สูงกว่า PTT68 มากและสูงมากเกินไปไม่เหมาะกับระบบไฮดรอลิกเพราะทำให้มีปัญหาต่อการไหลอย่างไรก็ตามความหนืดระดับนี้เป็นความหนืดของสารหล่อลื่นในชุดเกียร์อุตสาหกรรมและเรือเดินสมุทร ดังนั้นความสำคัญของตัวปรับความหนืดจึงเป็นที่ต้องการเพื่อนำไปใช้ในงานที่หลากหลายสำหรับน้ำมันหล่อลื่นจากน้ำมันพืช ในทำนองเดียวกันความหนืดของ BIOD+EVA5 ที่ 100°C มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันด้วยและสูงกว่า PTT68 เล็กน้อยเท่านั้น มีข้อสังเกตในผลการทดลองของผลความหนืด WVO (ไม่มี EVA) ที่ 40°C และ 100°C มีค่าใกล้เคียงกับความหนืด PTT46 และ PTT68 ด้วยดังนั้นหากพิจารณาจากค่าความหนืดสามารถคัดกรองน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานน้ำมันพืชแก้ไขแล้วได้ดังนี้ BIOD+EVA5, BIOD+EVA5+AW และ WVO เพราะค่าความหนืดใกล้เคียง PTT46 และ PTT68

ดัชนีความหนืด (VI) คือตัวเลขที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นกับอุณหภูมิโดยการเปรียบเทียบกับน้ำมันมาตรฐาน น้ำมันที่มีค่า VI สูงจะมีค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปน้อยกว่าน้ำมันที่มีค่า VI ต่ำ ดังนั้น VI ที่สูงจึงเป็นคุณสมบัติที่ดีของน้ำมันไฮดรอลิก

ค่า VI ของ BIOD+EVA5, BIOD+EVA5+AW และ WVO ทั้งหมดนี้มีค่ามากกว่าทั้ง PTT46 และ PTT68 โดยทั่วไปแล้วค่า VI ที่สูงเป็นคุณสมบัติโดยธรรมชาติของน้ำมันที่ข่อยแล้ว (Mendoza et al., 2011).

หากอุณหภูมิของสารหล่อลื่นสูงขึ้นเกินกว่าจุดวาบไฟทำให้สารให้ไอระเหยออกมาได้อีก ก็จะทำให้เกิดการลุกติดไฟต่อเนื่องไปเรื่อยๆที่อุณหภูมินี้จะเรียกว่า จุดไหมไฟ (Fire point) มักจะสูงกว่าจุดวาบไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ประมาณ 10-20°C และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเลยจุดใหม่ไฟไปอีกก็จะถึงจุดลุกติดไฟได้เอง (Auto-ignition temperature) ซึ่งที่อุณหภูมินี้สารนั้นจะสามารถติดไฟได้เองโดยไม่ต้องมีแหล่งกำเนิดไฟ ดังนั้นอุณหภูมิในการปฏิบัติใช้งานควรต่ำกว่าจุดวาบไฟของน้ำมันไฮดรอลิกที่ถูกเลือกใช้ ผลการทดลองพบว่าจุดวาบไฟ BIOD+EVA5 และ BIOD+EVA5+AW มีค่าเท่ากับคือ 174°C ต่ำกว่าจุดวาบไฟของ PTT46 และ PTT68 ซึ่งมีค่า 241 และ 251°C ตามลำดับ ขณะที่จุดวาบไฟของ WVO ไม่สามารถวัดค่าได้เพราะเกินความสามารถของ

เครื่องทดสอบ แม้ว่าผลทดสอบจุดวาบไฟของ BIOD+EVA5 และ BIOD+EVA5+AW จะต่ำกว่า PTT46 และ PTT68 แต่จุดวาบไฟของพวกมันก็มีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 977-2551 น้ำมันไฮดรอลิก พื้นฐานน้ำมันแร่ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2551) กำหนดเกณฑ์จุดวาบไฟต่ำสุดที่ 168°C สำหรับน้ำมันไฮดรอลิก VG68 อ้างอิงการทดสอบแบบ Pennsky-Martens Closed cup เช่นเดียวกับการทดสอบของงานวิจัยนี้

Table 3 Results of physical and chemical properties.

รหัส	ความหนืด @40°C, cSt	ความหนืด @100°C, cSt	ดัชนีความหนืด	จุดวาบไฟ °C	จุดไหลเท °C
PTT46	47.1 <sup>1</sup>	6.92 <sup>1</sup>	102 <sup>1</sup>	241 <sup>1,2</sup>	-9
PTT68	68.98 <sup>1</sup>	8.9 <sup>1</sup>	102 <sup>1</sup>	256 <sup>1,2</sup>	-9
WVO	51.5	9.1	159	NA <sup>4</sup>	6
WVO+EVA5	573	39.6	110	NA <sup>4</sup>	6
WVO+EVA8	NA <sup>4</sup>	70.2	NA	NA <sup>4</sup>	NA
WVO+EVA5+AW	562	37.7	105	NA <sup>4</sup>	6
WVO+EVA8+AW	NA <sup>4</sup>	72	NA	NA <sup>4</sup>	NA
BIOD	5.81	2.01	157	176 <sup>3</sup>	NA
BIOD+EVA5	48.6	11.25	233	174 <sup>3</sup>	NA
BIOD+EVA8	418	23.6	66	194 <sup>3</sup>	NA
BIOD+EVA5+AW	57.1	11	188	174 <sup>3</sup>	NA
BIOD+EVA8+AW	324	23.6	92	188 <sup>3</sup>	NA

Note: ผลการทดสอบจากผู้ผลิตโดยตรง, <sup>2</sup> ทดสอบแบบ Cleveland Open Cup Tester, <sup>3</sup> ทดสอบแบบ Pennsky-Martens Closed Cup Tester

<sup>4</sup> ไม่สามารถแสดงผลได้เพราะเกินความสามารถของเครื่องทดสอบ

เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันลดต่ำลงความหนืดหรือความต้านทานการไหลของน้ำมันจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนในที่สุดน้ำมันจะหยุดไหล อุณหภูมิที่ต่ำสุดที่น้ำมันเริ่มหยุดไหลเรียกว่า "จุดไหลเท" โดยปกติคุณสมบัติการไหลและต้านทานต่อสภาพอากาศที่อุณหภูมิต่ำของน้ำมันหล่อลื่นจากน้ำมันพืชเป็นปัญหาหลัก (Sevim and Svajus, 2010) จาก (Table 1) พบว่าจุดไหลเทของ BIOD+ EVA5, BIOD+EVA5+AW และ WVO มีค่าสูงกว่าจุดไหลเทของ PTT46 และ PTT68 และสูงเกินเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.977-2551 อีกด้วย การปรับโครงสร้างทางเคมี (Josiah and Quan, 2016) สามารถช่วยแก้ปัญหาและปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันพืชที่อุณหภูมิต่ำได้

### 3.2 ผลของคุณสมบัติไทรโบโลยี

น้ำมันไฮดรอลิกทั้ง 3 ที่ถูกคัดกรองจากผลของคุณสมบัติกายภาพและเคมีว่าคุณสมบัติเบื้องต้นใกล้เคียงกับ PTT46 และ PTT68 จึงนำมาศึกษาคุณสมบัติไทรโบโลยีด้วยเครื่อง CSM แบบ Ball on Disk ที่เงื่อนไขการทดสอบเดียวกันตาม (Table 2) สำหรับ (Figure 4) เป็นกราฟแสดงค่า COF ที่เวลาใดๆ ระหว่างผิวสัมผัส Disk และ Ball โดยมีน้ำมันไฮดรอลิกที่ศึกษาเป็นสารหล่อลื่น ลักษณะกราฟ COF จะเข้าสู่ภาวะคงที่ ณ เวลาหนึ่ง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยแสดงใน (Figure 5) พบว่าน้ำมันไฮดรอลิกที่ถูกเลือกทั้ง 3 ตัวอย่างมี

ค่าเฉลี่ย COF ต่ำกว่า PTT68 และ BIOD+EVA5+AW มีค่าเฉลี่ย COF ต่ำที่สุดเพราะมีสารต่อต้านการสึกหรอ เห็นได้ว่าน้ำมันไฮดรอลิกที่ถูกเลือกเหล่านี้ให้คุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดีกว่าน้ำมันไฮดรอลิกเชิงพาณิชย์อย่าง PTT68. L.A. Quinchia et al. (2014) อธิบายไว้ว่า EVA ในน้ำมันพืชช่วยลดความเสียดทานของพื้นผิวสัมผัสและการสึกหรอด้วย และใน WVO มีน้ำมันพืชเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นที่ได้อยู่แล้วโดยมีสายโซ่โมเลกุลของกรดไขมันในน้ำมันพืชเป็นตัวช่วยสร้างชั้นฟิล์มระหว่างผิวสัมผัสทั้ง 2 ทำให้มันไม่สัมผัสกันโดยตรง (Alessandro et al., 2017).

ผลจากกล้องจุลทรรศน์ (Figure 6) แสดงพื้นผิวหน้าตัดบริเวณที่สึกหรอและเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณสึกหรอของ Ball เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาณการสึกหรอแสดงใน (Figure 5) พบว่าปริมาณการสึกหรอของน้ำมันไฮดรอลิกทั้ง 3 ตัวอย่างมีต่ำกว่า PTT68 อย่างเห็นได้ชัดและเป็นแนวโน้มเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยด้วย เนื่องจากผลของ EVA ตามคำอธิบายข้างต้น และเป็นที่น่าสนใจกว่าผลของ WVO (ปราศจาก EVA) ก็น่าสนใจ เพราะ WVO มีน้ำมันพืชเป็นองค์ประกอบหลักโดยมีกรดไขมันเป็นส่วนประกอบซึ่งเป็นสารหล่อลื่นที่ได้อยู่แล้ว และงานวิจัย Syahrullail et al., (2013) แสดงให้เห็นว่าน้ำมันปาล์มให้คุณสมบัติต่อต้านการสึกหรอที่ดีกว่าน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานน้ำมันแร่

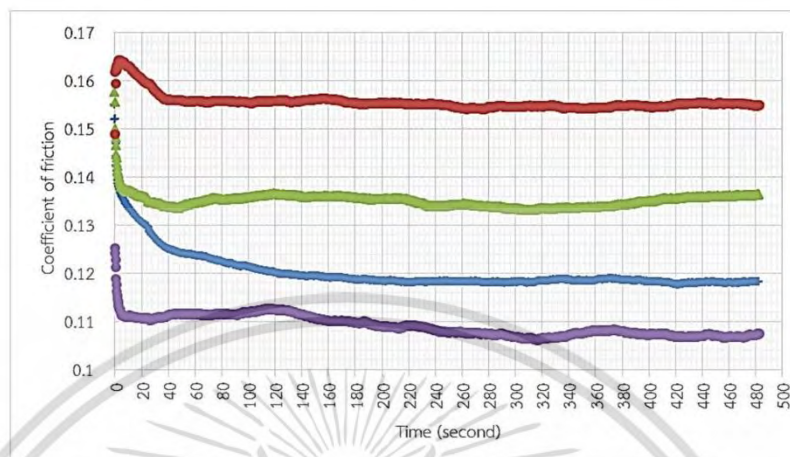


Figure 4 Coefficient of friction at distance of ball by CSM tribometer.

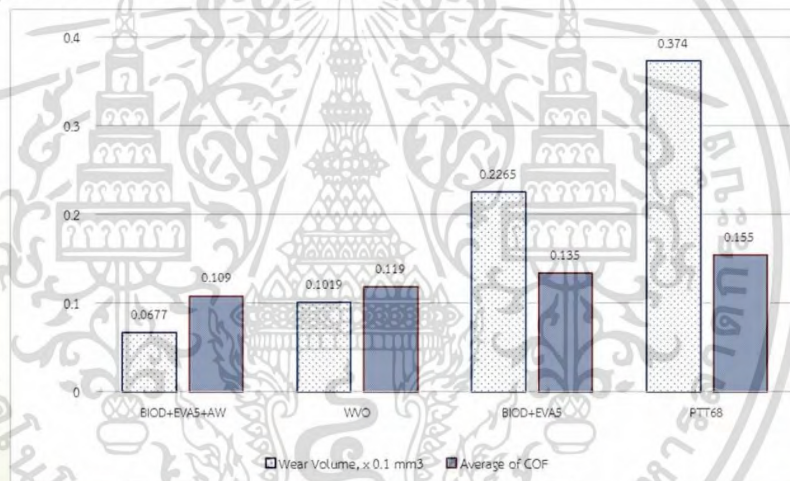


Figure 5 Comparison of average of COF and wear volume for hydraulic oils.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

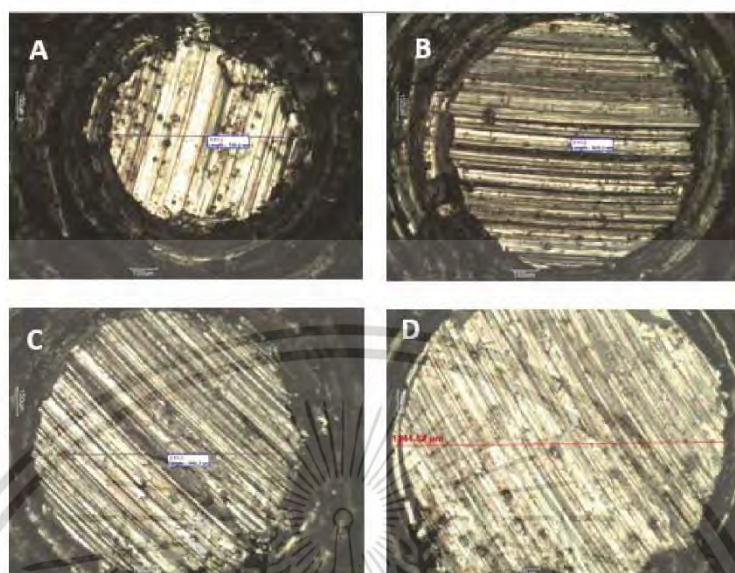


Figure 6 Wear characteristic on Ball by microscope A) BIOD+EVA5+AW, B) WVO, C) BIOD+EVA5 and D) PTT68.

#### 4. สรุปผลงานวิจัย

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และสมบัติโพรไฟล์ของน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานน้ำมันพืชเก่าใช้แล้วที่พัฒนาขึ้นทำให้เชื่อได้ว่ามีศักยภาพทดแทนน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานปิโตรเลียมได้ จากบทสรุปต่อไปนี้

- EVA เป็นตัวปรับความหนืดที่ดีโดยปรับความหนืดBIOD จาก 5.81 cSt เป็น 48.6 cSt (BIOD+EVA5) ที่ 40°C ทำให้ความหนืดมีค่าใกล้เคียงกับความหนืดของ PTT46 ที่ 40°C
- ดัชนีความหนืดน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานน้ำมันพืชเก่าใช้แล้วทั้ง 3 ตัวอย่าง ได้แก่ BIOD+EVA5+AW, BIOD+EVA5 และ WVO มีค่าสูงกว่า PTT46 และ PTT68 ซึ่งคุณสมบัติที่ดีของน้ำมันไฮดรอลิก
- จุดวาบไฟของน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานน้ำมันพืชเก่าใช้แล้วทั้ง 3 ตัวอย่าง สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.977-2551 ขณะที่จุดไหลสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานและอาจเป็นปัญหาเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ
- น้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานน้ำมันพืชเก่าใช้แล้วทั้ง 3 ตัวอย่าง แสดงคุณสมบัติการหล่อลื่นและต่อต้านการสึกหรอที่ดีกว่า PTT68

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างสูงแด่กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือที่อนุเคราะห์การทดสอบ, ผศ.ดร. รัตน์พล มงคลรัตนสิทธิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เอื้อเพื่ออุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการเคมี, อาจารย์จิราภรณ์ ศรีประเสริฐ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แนะนำและให้ความรู้การทดสอบโพรไฟล์ด้วยเครื่อง CSM.

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- ไทยโพสท์. 2012. เสนอออกกฎหมายควบคุมน้ำมันทอดซ้ำ, แหล่งข้อมูล: <http://suchons.wordpress.com/2012/05/07/> เข้าถึงเมื่อ 11 พฤษภาคม 2557.
- ธาดา ทรัพย์พิพัฒนา, ชนินทร ตริมีงมิตร และ ธนวรรณ พิณรัตน์. 2558. ปัจจัยสำคัญของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเพื่อการผลิตไบโอดีเซล, วิศวกรรมสารฉบับที่ 32(2), 1-5
- ปกรณ์ ชุมรม, วารุณี เปรมานนท์ และ คมกริช สวรรณวงษ์. 2559. การประยุกต์ใช้การปรับสภาพผิวเพื่อเพิ่มความต้านทานการสึกหรอในแม่พิมพ์ตัด, วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม 12 (1), 13-27.
- ยุคอน. 2016. น้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic oil) เกิดฟองดำ US synthetic เหนือระดับ - Yukon, แหล่งข้อมูล <http://www.yukonlubricants.com/product-category/lubricants-for-industrial/hydraulic-oil/> เข้าถึงเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2560.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- วารุณี เปรมาพันธ์. 2547. พฤติกรรมด้านไทรบอโลยีของผิวสัมผัสระหว่างเหล็กทำพื้มและเหล็กกล้าไร้สนิมโดยการจำลองการทำงานบนเครื่องแบบ Ball-on-disk. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18 ประจำปี 2547. ขอนแก่น, มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2551). มอก.977-2551 น้ำมันไฮดรอลิก – พื้นฐานน้ำมันแร่, ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศและงานทั่วไป, เล่มที่ 125 ตอนพิเศษ 98ง.
- Alejandrina Campanella, Eduardo Rustoy, Alicia Baldessari and Miguel A. Baltanás. 2010. Lubricants from chemically modified vegetable oils, *Bioresource Technology* 101, 245–254.
- Alessandro Ruggiero, Roberto D' Amato, Massimiliano Merola, Petr Valásek, Miroslav Müller. 2017. Tribological characterization of vegetal lubricats: Comparative experimental investigation on *Jatropha cuscas* L. oil, Rapeseed Methyl Ester oil, Hydrotreated Rapeseed oil, *Tribology International* 109, 529–540.
- G.Mendoza, A.Igartua, B.Fernandez, F.Urquiola, S.Vivanco and R.Arguizoz. 2011. Vegetable oils as hydraulic fluids for agricultural applications, *GRASAS Y ACEITES* 61(1), 29–38.
- I.Golshokouh, J.Y.Wira, N.A.Farid and S.Syahrullail. 2013. Palm fatty acid distillate as an alternative source for hydraulic oil, *Applied Mechanics and Materials* 315, 941–945.
- J.E. Martin-Alfonso and C.Valencia. 2015. Tribological, rheological, and microstructural characterization of oleogels based on EVA copolymer and vegetables oils for lubricant applications, *Tribology International* 90, 426–434.
- Josiah McNutt and Quan (Sophia) He. 2016. Development of biolubrications from vegetable oils via chemical modification, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 36, 1–12.
- K.Kamalakar, Amit Kumar Rajak, R.B.N Prasad, and M.S.L Karuna. 2013. Rubber seed oil-based biolubricant base stocks: A potential source for hydraulic oils, *Industrial Crops and Products* 51, 249–257.
- L.A.Quinchia, M.A.Delgado, C.Valencia, J.MFranco and C.Gallegos. 2010. Viscosity modification of different vegetable oils with EVA copolymer for lubricant applications, *Industrial Crops and Products* 32, 607–612.
- L.A.Quinchia, M.A.Delgado, T.Reddyhoff, C.Gallegos and H.A. Spikes. 2014. Tribological studies of potential vegetable oil-based lubricants containing environmentally friendly viscosity modifiers, *Tribology International* 69, 110–117.
- Lou A, and T.Honary. 1996. An investigation of the use of soybean oil in hydraulic systems, *Biosource Technology* 56, 41–47.
- Piyush S. Lathi and Bo Mattiasson. 2007. Green approach for the preparation of biodegradable lubricant base stock from epoxidized vegetable oil, *Applied Catalysis B: Environmental* 69, 207–212.
- Ruggiero A, D'Amato R., Merola M., Valásek P. and Müller M. 2016. On the tribological performance of vegetal lubricants: experimental investigation on *Jatropha Curcas* L. oil, *Procedia Engineering* 149, 431–437.
- Sevim Z. Erhan and Svajus Asadauskas. 2000. Lubricant basestocks from vegetable oils, *Industrial Crops and Products* 11, 277–282.
- Sovereign Lubricants (UK) Ltd. 2016. Omega 904 – Industrial Oil Concentrate. Available at: <http://sovereignomega.co.uk/omega-904-industrial-oil-concentrate/> Accessed on 28 March 2016.
- S. Syahrullail, N. Nuraliza, M.I. Izhah, M.K. Abdul Hamid, D. Md Razak. 2013. Wear Characteristic of Palm Olein as Lubricant in Different Rotating Speed, *Procedia Engineering* 68, 158–165.
- Theo Mang, Kirsten Bobzin, and Thorsten Bartels. 2011. *Industrial Tribology: Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication*, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Tirth M. Panchal, Ankit Patel, D.D. Chauhan, Merlin Thomas and Jigar V. Patel. 2017. A methodological review on bio lubricants from vegetable oil based resources, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70, 65–70.
- Yaogang Wang, Changhe Li, Yanbin Zhang, Benkai Li, Min Yang, Xianpeng Zhang, Shuming Huo, Guotao Liu and Mingge Zhai. 2017. Comparative evaluation of the lubricating properties of vegetable-oil-based nanofluids between frictional test and grinding experiment, *Journal of Manufacturing Processes* 26, 94–104.

## ฉ-2 วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ปีที่ 24 ฉบับที่ 1 (2561)

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ปีที่ 24 ฉบับที่ 1 (2561), 13-22



วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

บทความวิจัย

ปีที่ 24 ฉบับที่ 1 (2561) 13-22

ISSN 1685-408X

Available online at [www.tci-thaijo.org/index.php/TSAE](http://www.tci-thaijo.org/index.php/TSAE)

ศึกษาสมบัติกายภาพ-เคมีและไทรโบโลยีของน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานจากน้ำมันพืชเก่าใช้แล้ว

Physico-Chemical and Tribological Studies of Hydraulic Fluid Based Wasted Vegetable Oil

อภิชาติ เสร้มพนิชกิจ<sup>1\*</sup>, จำลอง พรอบแก้ว<sup>1</sup>Apichart Serpanichakit<sup>1\*</sup>, Chamlong Prabkaew<sup>1</sup><sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

\*Corresponding author: Tel: +66-8-49007979, E-mail: apipc@yahoo.com

## บทคัดย่อ

งานวิจัยมากมายให้เหตุผลสำคัญในการเลือกน้ำมันจากพืชเป็นส่วนประกอบสำคัญในน้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันไฮดรอลิกเพราะมีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดี ไม่เป็นพิษอันตรายและย่อยสลายเองตามกระบวนการทางชีวภาพโดยมาทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมที่มีอย่างจำกัดแต่ยังไม่พบว่ามีงานนำน้ำมันพืชเก่าใช้แล้วมาศึกษา ฉะนั้นจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีและไทรโบโลยีด้วยเครื่อง CSM แบบ Ball-on-disk ในน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานจากน้ำมันพืชเก่าใช้แล้วซึ่งได้มาจากการนำน้ำมันพืชทอดประกอบอาหารซ้ำ หลายครั้งในตลาดสดจากน้ำมันผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นไบโอดีเซลแต่มิมีข้อจำกัดในความหนืดรวมไม่ถึงการนำไปใช้เป็นสารหล่อลื่นชีวภาพในระบบไฮดรอลิก การเติม 5% wt ของสารเติมแต่งเอทิลีน-ไวนิล อะซิเตท โคลิเออร์ (EVA) ในไบโอดีเซลพบว่าความหนืดเพิ่มจาก 5.81 cSt เป็น 48.6 cSt ที่ 40°C เมื่อพิจารณาจากความหนืด สามารถคัดกรองน้ำมันไฮดรอลิกในงานวิจัยที่มีความหนืดใกล้เคียงน้ำมันไฮดรอลิกเชิงพาณิชย์เบอร์ 46 (PTT46) และ 68 (PTT68) ได้ 3 ตัวอย่างแล้ว นำมาศึกษา ผลของจุดวาบไฟสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของ มอก. แต่จุดไหลเหวี่ยงเป็นปัญหา ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยและปริมาตรสึกหรอทั้ง 3 ตัวอย่างอยู่ในช่วง 0.10 - 0.14 และ 0.006 - 0.023 mm<sup>3</sup> ตามลำดับ และให้ผลการหล่อลื่นและด้านการสึกหรอที่ดีกว่า PTT68 ได้ค่า 0.155 และ 0.037 mm<sup>3</sup> ตามลำดับที่เงื่อนไขการทดสอบเดียวกัน ซึ่งเห็นว่าน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานน้ำมันเก่าใช้แล้วทั้ง 3 ตัวอย่างมีศักยภาพทดแทนน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานปิโตรเลียม

คำสำคัญ: น้ำมันพืชเก่าใช้แล้ว, น้ำมันไฮดรอลิก, ไทรโบโลยี

## Abstract

The main reason of several researches shows the plant oil as main ingredient into lubrication and hydraulic fluid because of good lubricating properties, non-toxic and biodegradability to substitute for the petroleum-based oil that has limited resources; but, there was no any researches to study in using of the wasted vegetable oil. The aim of this paper was to investigate the physio-chemical and tribological properties by CSM tribometer (Ball-on-disk) of hydraulic fluid based wasted vegetable oil. The wasted vegetable oil used for cooking many repeated time at the fresh market was studied and then it was made to be biodiesel by trans esterification process, but the limited range of biodiesel viscosity and this is constrains their use as suitable biolubricants in hydraulic system. Adding of 5% wt ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA) into this biodiesel was studied. It has been found that the viscosity of the biodiesel could increase from 5.81 to 48.6 cSt at 40°C. When consider in the viscosity, there are 3 samples from all hydraulic oil in this research which are near to the local commercial hydraulics oil no.46 and 68, were studied. The flush point was also higher than Thai Industrial Standard; but, pour point might be a problem. The coefficient of friction and wear volume of all three samples stay in the ranges 0.10 - 0.14 and 0.006 - 0.023 mm<sup>3</sup> respectively; and better lubricity more wear resistance than PTT68 as 0.155 and 0.037 mm<sup>3</sup> respectively at the same testing conditions. This is indicated in the hydraulic fluid based wasted vegetable oil was a good potential to substitute for local commercial petroleum-based oil.

Keywords: Wasted vegetable oil, Hydraulic oil, Tribology

## 1 บทนำ

สิ่งรอบตัวเรากว้างขวางไม่ว่าจะหันไปทางไหนมักพบผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากปิโตรเลียมกันอย่างแพร่หลาย เช่น พลาสติก น้ำมัน แก๊สหุงต้ม เป็นต้น หากยังใช้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ในปริมาณมากก็ย่อมจะนำไปสู่ภาวะขาดแคลนในที่สุดและยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างต่อนื่องตามมา ดังนั้นในปัจจุบันมนุษย์จึงพยายามค้นหาและค้นคว้าเกี่ยวกับแหล่งพลังงานและวัสดุทดแทนอื่น ๆ มาแทนที่หรือเพื่อลดการใช้ปิโตรเลียมให้น้อยลง ในทำนองเดียวกันปิโตรเลียมก็ถูกใช้เป็นวัตถุดิบหลักสำหรับสารหล่อลื่นในอุตสาหกรรมและเป็นที่ยอมรับด้วยเพราะมันมีช่วงความหนืดที่หลากหลาย, สามารถเข้ากันได้กับชิ้นส่วนและเครื่องจักรในอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี แต่มันก่อให้เกิดสารพิษเสียอันตรายและย่อยสลายเองตามกระบวนการชีวภาพได้ยาก มีการประเมินกันว่าน้ำมันหล่อลื่นราว 12 ล้านตันถูกทิ้งและปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมทุกปี (Quinchia et al., 2010) ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาเริ่มมีความนิยมในสารหล่อลื่นที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น มีงานวิจัยและพัฒนาสินค้าใหม่ๆ ที่ยั่งยืน จากเคมีสีเขียว (Green Chemistry) เช่นน้ำมันสกัดจากพืชเป็นสารหล่อลื่นตามธรรมชาติได้ดี (Campanella et al., 2010) ซึ่งไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต, ย่อยสลายเองตามกระบวนการทางชีวภาพ (Erhan and Asadauskas, 2000) และเป็นสารระเหยเป็นไอต่ำ (Quinchia et al., 2014) นอกจากนี้พวกมันสามารถนำมารีไซเคิลและกลับมาใช้ใหม่ได้โดยอาศัยการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมี (Panchal et al., 2017; McNutt and He, 2016) ยังพบอีกว่าสารหล่อลื่นธรรมชาติจากน้ำมันพืชจะสร้างผิวหรือฟิล์มปกป้องต่อการขัดถู (Mendoza et al., 2011) แต่ในช่วงอุณหภูมิต่ำ จุดไหลเทของน้ำมันพืชมักเป็นปัญหา (Erhan and Asadauskas, 2000) ต้องแก้ไขโดยการเติมสารเติมแต่งหรือดัดแปลงโครงสร้างทางเคมี (Lathi and Mattiasson, 2007), พืชส่วนใหญ่ที่เป็นวัตถุดิบหลักในน้ำมันพืชและถูกนำมาใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นได้แก่ ปาล์ม (Golshokouh et al., 2013; Wang et al., 2017) ทานตะวัน (Mendoza et al., 2011), ถั่วเหลือง (Honary, 1996), ละหุ่ง (Quinchia et al., 2010), สบู่ดำ (Ruggiero et al., 2016), เมล็ดขางพารา (Kamalakar et al., 2013) เป็นต้น

เป็นที่รู้กันดีว่าน้ำมันไฮดรอลิกมีหน้าที่หลักคือ เป็นตัวส่งผ่านกำลังหรือแรงดันจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งในระบบไฮดรอลิก นอกจากนี้ยังทำหน้าที่หล่อลื่นอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฮดรอลิก ลดแรงเสียดทาน ป้องกันการสึกหรอ รักษาความสะอาด และยังช่วยระบายความร้อนอีกด้วย จัดว่าเป็นกลุ่มสารหล่อลื่นที่มีความสำคัญและมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในโรงงานอุตสาหกรรมเกือบทุกประเภทรวมทั้งในงานก่อสร้าง โดยมีปริมาณการเข้ามาที่สูงสุดเป็นอันดับที่สองรองจากน้ำมันเครื่องยนต์ (ยูคอน, 2559) แต่อย่างไรก็ตามผู้วิจัยยังไม่พบงานวิจัยและค้นคว้าการนำน้ำมันพืชมาใช้แล้วมาศึกษาเป็นน้ำมันไฮดรอลิกหรือสารหล่อลื่นทั่วไป เหตุที่สนใจในน้ำมันพืชมาใช้แล้ว

เพราะว่า รศ.ดร.วิทยา กุลสมบูรณ์ (ไทยโพสต์, 2555) ผู้จัดการแผนงานคุ้มครองผู้บริโภคด้านสุขภาพ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ (สสส.) กล่าวว่า พ.ศ. 2555 ประเทศไทยมีปริมาณการบริโภคน้ำมันพืชประมาณ 8 แสนตันต่อปี โดยร้อยละ 50% เป็นการบริโภคในครัวเรือน อีกร้อยละ 50% ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร แต่น้ำมันเก่าใช้แล้วกลับพบว่าถูกนำกลับมาเป็นพลังงานไบโอดีเซลเพียงร้อยละ 5 ซึ่งเป็นห่วงว่าน้ำมันทอดซ้ำที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตอาหารนี้หายไปไหน มีการกำจัดอย่างไร ทั้งในสิ่งแวดล้อมหรือมีกระบวนการฟอกเพื่อกลับมาขายให้ผู้บริโภคใหม่ การใช้ไขมันพืชเก่ากลับมาประกอบอาหารซ้ำมีความเสี่ยงต่อการก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นแรงผลักดันให้ผู้วิจัยต้องการเพิ่มช่องทางการประยุกต์ใช้ประโยชน์น้ำมันพืชเก่าใช้แล้วโดยศึกษาสมบัติทางกายภาพ-เคมีและสมบัติโทรโพลีเพื่อพัฒนาน้ำมันพืชเก่าใช้แล้วให้เทียบเคียงกับคุณสมบัติน้ำมันไฮดรอลิกที่จำหน่ายตามท้องตลาด.

## 2 อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 วัตถุดิบ

น้ำมันพืชเก่าใช้แล้ว (WVO) จากการทอดปาท่องโก๋หลายๆ ครั้งในตลาดสดก่อนที่มันจะถูกนำไปทิ้ง ผู้วิจัยจึงขอซื้อเพื่อมาวิจัย จากนั้นกำจัดเศษอาหารและสิ่งสกปรกโดยกรองด้วยไส้กรองน้ำมัน, เชื้อเพลิงของรถบรรทุกแล้วต้มด้วยความร้อน 110°C เป็นเวลา 15 min. เพื่อกำจัดความชื้น, สำหรับโซเดียมไฮดรอกไซด์, เมทานอลถูกใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (สาดาและคณะ, 2558) เพื่อผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชเก่าใช้แล้ว เอทิลีน-ไวนิล อะซิเตท โพลีเมอร์ (EVA) ประกอบด้วย 30.4% wt ของไวนิลอะซิเตทถูกใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อปรับความหนืด (Quinchia et al., 2010) EVA ไม่เป็นสารพิษและเสียอันตรายแต่คงคาทหวังการย่อยสลายได้เองทางชีวภาพไม่ได้ (Syahrullail et al., 2013) และ Omega904 (Sovereign, 2016) ซึ่งประกอบด้วยสารต้านทานการสึกหรอ (AW), สารต้านทานความดันที่ตีเยี่ยม และป้องกันการเกิดการออกซิเดชันหรือต่อต้านการแปรสภาพของน้ำมันหล่อลื่นด้วย สำหรับน้ำมันไฮดรอลิกในท้องตลาดมีวางจำหน่ายหลายยี่ห้อในงานวิจัยนี้เลือก PTT Hydraulic 46 (PTT46) และ PTT Hydraulic 68 (PTT68) ผลิตโดยบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) เพื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติต่างๆ กับน้ำมันไฮดรอลิกจากงานวิจัยนี้ สำหรับผลการทดสอบคุณสมบัติกายภาพ-เคมีของทั้ง PTT46 และ PTT68 จะอ้างอิงจากผลทดสอบของผู้ผลิตโดยตรง (บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน), 2557)

### 2.2 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไขมันหรือน้ำมัน (Triglyceride) กับแอลกอฮอล์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์และกลีเซอรอล โดยมีตัวเร่งในปฏิกิริยา

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ปีที่ 24 ฉบับที่ 1 (2561), 13-22

ทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้นในงานวิจัยนี้ใช้ตัวเร่งชนิดเบสคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ฮาตา และคณะ, 2558) มีขั้นตอนดังนี้

1) ผสมเมทานอล 125 ml. กับ 5 g ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เข้ากันจนละลายหมด ในการผสมนี้จะเกิดความร้อนและไอสารเคมี ดังนั้นควรใช้ภาชนะทนความร้อนเช่น อุปกรณ์เครื่องแก้วและที่ระบายอากาศได้ดี

2) ค่อยเทสารละลาย 2.2.1 ลงใน 500 ml. ของ WVO และโดยรักษาอุณหภูมิไว้ประมาณ 60-70°C พร้อมคนให้ทั่วประมาณ 15-20 min. แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นตัวประมาณ 5 hr.

3) พบการแยกชั้นของน้ำมันกับกลีเซอรอลอย่างเห็นได้ชัดเจน (Figure 1) ให้เทแยกส่วนเฉพาะน้ำมันด้านบนใส่ขวดพลาสติกเปล่า (ขวดน้ำดื่ม 1.5 L)

4) ขั้นตอนการล้างน้ำมัน เติมน้ำสะอาดลงในขวดบรรจุปริมาณให้มากกว่า 50% ของปริมาณน้ำมันเดิม จากนั้นแช่ยา 15 min. แล้วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 30 min. เมื่อแยกชั้น ให้เทแยกส่วนน้ำมันด้านบนลงในขวดพลาสติกอีกใบ



Figure 1 Isolation of oil (upper) and Glycerol (Lower).

5) ล้างน้ำซ้ำตามข้อ 4) นี้ซ้ำอีก 2 ครั้ง พบว่าน้ำมันที่ได้เริ่มใสขึ้น (Figure 2) แล้วแยกส่วนเฉพาะน้ำมันออกมา



Figure 2 Oil cleaning by water.

6) ต้มน้ำมันที่อุณหภูมิ 105-110°C ประมาณ 10-15 min. เพื่อกำจัดความชื้นจะได้เป็นไบโอดีเซล (BIOD)

### 2.3 การเติมสารเติมแต่ง

เติม 5% wt ของ EVA ใน BIOD ที่อุณหภูมิ 120°C คนผสมให้เข้ากันนานเป็นเวลา 60-90 นาที จน EVA ละลายหมด สำหรับการสารต้านทานการสึกหรอ (AW), ให้ผสม 0.5% โดยปริมาตรของ Omega904 ในน้ำมันไฮดรอลิกแล้วคนผสมให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้อง สำหรับงานวิจัยนี้นอกจากเติม 5% wt ของ EVA ยังศึกษาที่ 8% wt ของ EVA ด้วย

ในงานวิจัยได้มีออกแบบการทดลองโดยเตรียมน้ำมันโดยเตรียมน้ำมันไฮดรอลิกที่พัฒนาขึ้นเองหลายตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์จุดที่เหมาะสมที่สุดต่อไปและความสะดวกในการอ้างอิงได้กำหนดรหัสน้ำมันไฮดรอลิกไว้ (Table 1) และจะใช้ในการอ้างอิงต่อไป

### 2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติกายภาพ-เคมี

ความหนืดของน้ำมันตัวอย่างที่อุณหภูมิ 40°C และ 100°C ตามมาตรฐาน ASTM D-445 ถูกศึกษา โดยค่าความหนืดทั้ง 2 อุณหภูมิ ถูกนำมาคำนวณดัชนีความหนืด (VI) ซึ่งเป็นตัวชี้บอกความสามารถในการเปลี่ยนแปลงความหนืดตามสภาพอากาศและอุณหภูมิของไหลในช่วงการปฏิบัติงานแสดงในสมการที่ (1) ตามมาตรฐาน ASTM D2270-04

Table 1. Codes of hydraulic oil and their composition.

รหัส	องค์ประกอบพื้นฐาน	สารเติมแต่ง
PTT46	ปิโตรเลียม	น้ำมันไฮดรอลิกในท้องตลาด
PTT68	ปิโตรเลียม	น้ำมันไฮดรอลิกในท้องตลาด
WVO	น้ำมันพืชใช้แล้ว	ไม่มี
WVO+EVA5	น้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 5%
WVO+EVA8	น้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 8%
WVO+EVA5+AW	น้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 5%+AW
WVO+EVA8+AW	น้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 8%+AW
BIOD	น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว	ไม่มี
BIOD+EVA5	น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 5%
BIOD+EVA8	น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 8%
BIOD+EVA5+AW	น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 5%+AW
BIOD+EVA8+AW	น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว	EVA 8%+AW

$$VI = 100 \times \frac{L-U}{L-H} \quad (1)$$

โดยที่  $L, H$  คือค่าจากตารางความหนืดที่ 100°C ใน ASTM D2270-04 และ  $U$  คือค่าความหนืดที่ 40°C

จุดวาบไฟตามมาตรฐาน ASTM D-93 ถูกศึกษาเพื่อประเมินความเหมาะสมด้านความปลอดภัยสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง จุดไหลเทตามมาตรฐาน ASTM D5950-14 เพื่อประเมินการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกเมื่ออยู่ในสภาพอากาศหนาวเย็น

#### 2.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติไทรโบโลยี

ความบกพร่องที่เกิดจากการออกแบบทางวิศวกรรมเครื่องกลทำให้สูญเสียงบประมาณ มากกว่าที่ควร อันเนื่องมาจากผลกระทบของแรงเสียดทานและความสึกหรอ ในรายงานงบประมาณของรัฐบาลสหรัฐอเมริกาปี 1997 พบว่าการประยุกต์ใช้ศาสตร์ไทรโบโลยีสามารถประหยัดงบประมาณได้ถึง 16.25 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ (Mang et al., 2011) ด้วยเหตุนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการสึกหรอจึงถูกศึกษาด้วยเครื่องไทรโบมิเตอร์ CSM แบบ Ball on Disk (Figure 3A) เป็นเครื่องมือวัดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีหลักการทำงาน (Figure 3C) (วารณี, 2547) กำหนดแรงกด ( $N$ ) คงที่บน Ball ส่วนที่แผ่นจานหมุนติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงบิด แรงเสียดทาน ( $F$ ) คำนวณได้จากแรงบิดคูณรัศมีการหมุนของบอลบนแผ่นจาน ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ( $\mu$ ) จึงสามารถวัดได้โดยตรงจากสมการที่ (2) (วารณี, 2547) Ball ทำจากวัสดุเหล็กหล่อเหนียว (FCD450) ซึ่งเป็นวัสดุหลักของปั๊มไฮดรอลิก Ball มีลักษณะส่วนหัวเป็นครึ่งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm. ส่วนด้านปลายเป็นแท่งทรงกระบอกพร้อมปาดเรียบ (Figure 3B) เพื่อจับยึดให้มันคงกับเครื่อง CSM โดยขัดกับ Disk ทำจากวัสดุ FCD450 เช่นเดียวกัน โดยมีรูปร่างแผ่นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. และหนา 5

mm. (Figure 3B) เงื่อนไขการทดสอบเครื่องไทรโบมิเตอร์ CSM ตาม (Table 2.) เพื่อจำลองสถานการณ์การสึกหล่อ หลังจากนั้น นำ Ball ตรวจวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ OLYMPUS BX60 ด้วยเลนส์กำลังขยาย 5X0.15BD เพื่อวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณที่สึกหรอ ( $s$ ) ของ Ball (Figure 4) สำหรับการคำนวณปริมาตรการสึกหรอบน Ball ตามสมการที่ (3) และ (4) (ปกรณัม และคณะ, 2559) ตามลำดับ

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (2)$$

$$h = \frac{8r - \sqrt{64r^2 - 16s^2}}{8} \quad (3)$$

$$V = \pi h^2 \left[ r - \frac{h}{3} \right] \quad (4)$$

โดยที่  $V$  คือปริมาตรการสึกหรอ (mm<sup>3</sup>),  $S$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางที่จุดสึกหรอ (mm),  $h$  คือความสูงของส่วนที่สึกหรอ (mm) และ  $r$  คือรัศมี Ball (mm)



A)

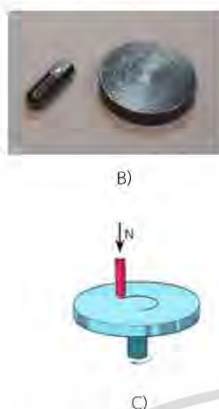


Figure 3 A) CSM Tribometer B) Ball and Disk Specimen  
C) Operation of Ball-on-Disk.

Table 2 Testing condition of CSM Tribometer

เงื่อนไขทดสอบ	Ball on Disk
น้ำหนักกดทับ	15 N
ความเร็วเชิงเส้น	10 cm s <sup>-1</sup>
รัศมีการหมุนของ Ball	7.53 mm
จำนวนรอบ	1,022 cycles
อุณหภูมิทดสอบ	อุณหภูมิห้อง (25 °C)



Figure 4 Wear characteristic on Ball

### 3 ผลและวิจารณ์

#### 3.1 ผลของคุณสมบัติกายภาพ-เคมี

(Table 3) แสดงผลทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันไฮดรอลิกที่พัฒนาขึ้น ความหนืดของ BIOD มีค่า 5.81 cSt ที่ 40°C ความหนืดนี้ต่ำเกินไปสำหรับที่จะนำไปใช้งานไฮดรอลิก จึงต้องปรับปรุงความหนืดของ BIOD ด้วยการเติม EVA 5% ผลที่ได้ทำให้ BIOD+EVA5 มีความหนืดเพิ่มขึ้นเป็น 48.6 cSt ที่ 40°C ความหนืดที่ได้นี้เป็นที่พอใจเพราะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนืดของ PTT46 ที่ 40°C ดังนั้น EVA จึงเป็นสารเติมแต่งในการปรับปรุงความหนืดในน้ำมันพืช (Quinchia et al., 2010) ในทำนองเดียวกันหากเติม EVA 8% wt ใน BIOD ทำให้ BIOD+EVA8 มีความหนืดเพิ่มสูงขึ้นเป็น 418 cSt ที่ 40°C แต่ความหนืดที่สูงกว่า PTT68 มากและสูงมากเกินไปไม่เหมาะสมกับระบบไฮดรอลิกเพราะทำให้มีปัญหาต่อการไหลอย่างไรก็ตามความหนืดระดับนี้เป็นความหนืดของสารหล่อลื่นในชุดเกียร์อุตสาหกรรมและเรือเดินสมุทร ดังนั้นความสำคัญของตัวปรับความหนืดจึงเป็นที่ต้องการเพื่อนำไปใช้ในงานที่หลากหลายสำหรับน้ำมันหล่อลื่นจากน้ำมันพืช ในทำนองเดียวกันความหนืดของ BIOD+EVA5 ที่ 100°C มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันด้วยและสูงกว่า PTT68 เล็กน้อยเท่านั้น มีข้อสังเกตในผลการทดลองของผลความหนืด WVO (ไม่มี EVA) ที่ 40°C และ 100°C มีค่าใกล้เคียงกับความหนืด PTT46 และ PTT68 ด้วยดังนั้นหากพิจารณาจากค่าความหนืดสามารถคัดกรองน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐาน น้ำมันพืช ใช้งานได้ ดังนี้ BIOD+EVA5 , BIOD+EVA5+AW และ WVO เพราะค่าความหนืดใกล้เคียง PTT46 และ PTT68

ดัชนีความหนืด (VI) คือตัวเลขที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นกับอุณหภูมิโดยการเปรียบเทียบกับน้ำมันมาตรฐาน น้ำมันที่มีค่า VI สูงจะมีค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปน้อยกว่าน้ำมันที่มีค่า VI ต่ำ ดังนั้น VI ที่สูงจึงเป็นคุณสมบัติที่ดีของน้ำมันไฮดรอลิกค่า VI ของ BIOD+EVA5 , BIOD+EVA5+AW และ WVO ทั้งหมดนี้มีค่ามากกว่าทั้ง PTT46 และ PTT68 โดยทั่วไปแล้วค่า VI ที่สูงเป็นคุณสมบัติโดยธรรมชาติของน้ำมันพืชอยู่แล้ว (Mendoza et al., 2011).

Table 3 Results of physical and chemical properties

รหัส	ความหนืด @40°C, cSt	ความหนืด @100°C, cSt	ดัชนีความ หนืด	จุดวาบไฟ °C	จุดไหลเท °C
PTT46	47.1 <sup>1</sup>	6.92 <sup>1</sup>	102 <sup>1</sup>	241 <sup>1,2</sup>	-9
PTT68	68.98 <sup>1</sup>	8.9 <sup>1</sup>	102 <sup>1</sup>	256 <sup>1,2</sup>	-9
WVO	51.5	9.1	159	NA <sup>4</sup>	6
WVO+EVA5	573	39.6	110	NA <sup>4</sup>	6
WVO+EVA8	NA <sup>4</sup>	70.2	NA	NA <sup>4</sup>	NA
WVO+EVA5+AW	562	37.7	105	NA <sup>4</sup>	6
WVO+EVA8+AW	NA <sup>4</sup>	72	NA	NA <sup>4</sup>	NA
BIOD	5.81	2.01	157	176 <sup>3</sup>	NA
BIOD+EVA5	48.6	11.25	233	174 <sup>3</sup>	NA
BIOD+EVA8	418	23.6	66	194 <sup>3</sup>	NA
BIOD+EVA5+AW	57.1	11	188	174 <sup>3</sup>	NA
BIOD+EVA8+AW	324	23.6	92	188 <sup>3</sup>	NA

Note: <sup>1</sup> ผลการทดสอบจากผู้ผลิตโดยตรง

<sup>2</sup> ทดสอบแบบ Cleveland Open Cup Tester

<sup>3</sup> ทดสอบแบบ Pensky-Martens Closed Cup Tester

<sup>4</sup> ไม่สามารถแสดงผลได้เพราะเกินความสามารถของเครื่องทดสอบ

หากอุณหภูมิของสารหล่อลื่นสูงขึ้นเกินกว่าจุดวาบไฟทำให้สารให้ไอระเหยออกมาได้อีก ก็จะเกิดการลุกติดไฟต่อเนื่องไปเรื่อยๆที่อุณหภูมินี้จะเรียกว่า จุดไหม้ไฟ (Fire point) มักจะสูงกว่าจุดวาบไฟประมาณ 10-20°C และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเลยจุดไหม้ไฟไปอีกก็จะถึงจุดลุกติดไฟได้เอง (Auto-ignition temperature) ซึ่งที่อุณหภูมินี้ สารนั้นจะสามารถลุกติดไฟได้เองโดยไม่ต้องมีแหล่งกำเนิดไฟ ดังนั้นอุณหภูมิในการปฏิบัติใช้งานควรต่ำกว่าจุดวาบไฟของน้ำมันไฮดรอลิกที่ถูกเลือกใช้ ผลการทดลองพบว่าจุดวาบไฟ BIOD+EVA5 และ BIOD+EVA5+AW มีค่าเท่ากันคือ 174°C ต่ำกว่าจุดวาบไฟของ PTT46 และ PTT68 ซึ่งมีค่า 241 และ 251°C ตามลำดับ ขณะที่จุดวาบไฟของ WVO ไม่สามารถวัดค่าได้เพราะเกินความสามารถของเครื่องทดสอบ แม้ว่าผลทดสอบจุดวาบไฟของ BIOD+EVA5 และ BIOD+EVA5+AW จะต่ำกว่า PTT46 และ PTT68 แต่จุดวาบไฟของพวกมันก็มีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.977-2551 น้ำมันไฮดรอลิก-พื้นฐานน้ำมันแร่ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2551) กำหนดเกณฑ์จุดวาบไฟต่ำสุดที่ 168°C สำหรับน้ำมันไฮดรอลิก VG68 อ้างถึงการทดสอบแบบ Pensky-Martens Closed cup เช่นเดียวกับ การทดสอบของงานวิจัยนี้

เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันลดต่ำลงความหนืดหรือความต้านทานการไหลของน้ำมันจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดน้ำมันจะหยุดไหล อุณหภูมิที่ต่ำสุดที่น้ำมันเริ่มหยุดไหลเรียกว่า "จุดไหลเท" โดยปกติคุณสมบัติการไหลและต้านทานต่อสภาพอากาศที่อุณหภูมิต่ำของน้ำมันหล่อลื่นจากน้ำมันพืชเป็นปัญหาหลัก (Erhan and

Asadauskas, 2000) จาก (Table 1) พบว่าจุดไหลเทของ BIOD+EVA5, BIOD+EVA5+AW และ WVO มีค่าสูงกว่าจุดไหลเทของ PTT46 และ PTT68 และสูงเกินเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.977-2551 อีกด้วย การปรับโครงสร้างทางเคมีสามารถช่วยแก้ปัญหาและปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันพืชที่อุณหภูมิต่ำได้ (McNutt and He, 2016)

### 3.2 ผลของคุณสมบัติไทรโบลอย์

น้ำมันไฮดรอลิกทั้ง 3 ที่ถูกคัดกรองจากผลของคุณสมบัติกายภาพและเคมีว่าคุณสมบัติเบื้องต้นใกล้เคียงกับ PTT46 และ PTT68 จึงนำมาศึกษาคุณสมบัติไทรโบลอย์ด้วยเครื่อง CSM แบบ Ball on Disk ที่เงื่อนไขการทดสอบเดียวกันตาม (Table 2) สำหรับ (Figure 5) เป็นกราฟแสดงค่า COF ที่เวลาใดๆ ระหว่างผิวสัมผัส Disk และ Ball โดยมีน้ำมันไฮดรอลิกที่ศึกษาเป็นสารหล่อลื่น ลักษณะกราฟ COF จะเข้าสู่สภาวะคงที่ ณ เวลานั้น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยแสดงใน (Figure 6) พบว่า น้ำมันไฮดรอลิกที่ถูกเลือกทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าเฉลี่ย COF ต่ำกว่า PTT68 และ BIOD+EVA5+AW มีค่าเฉลี่ย COF ต่ำที่สุดเพราะมีสารต่อต้านการสึกหรอ เห็นได้ว่าน้ำมันไฮดรอลิกที่ถูกเลือกเหล่านี้ให้คุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดีกว่าน้ำมันไฮดรอลิกเชิงพาณิชย์ (PTT68) Quinchia et al. (2014) อธิบายไว้ว่า EVA ในน้ำมันพืชช่วยลดความเสียดทานของพื้นผิวสัมผัสและการสึกหรอด้วย และใน WVO มีน้ำมันพืชเป็นองค์ประกอบหลัก Ruggiero et al. (2017) กล่าวว่าน้ำมันพืชเป็นสารหล่อลื่นที่ดีอยู่แล้วโดยมีสายโซ่โมเลกุลของกรดไขมันในน้ำมันพืชเป็นตัวช่วยสร้างชั้นฟิล์มระหว่างผิวสัมผัสทั้ง 2 ทำให้มันไม่สัมผัสกันโดยตรง

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ปีที่ 24 ฉบับที่ 1 (2561), 13-22

ผลจากกล้องจุลทรรศน์ (Figure 7) แสดงพื้นผิวหน้าตัด บริเวณที่สึกหรอและเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณสึกหรอของ Ball เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาตรการสึกหรอแสดงใน (Figure 6) พบว่าปริมาตรสึกหรอของน้ำมันไฮดรอลิกทั้ง 3 ตัวอย่างมีต่ำกว่า PTT68 อย่างเห็นได้ชัดและเป็นแนวโน้มเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยด้วย เนื่องจากผลของ EVA ตาม

คำอธิบายข้างต้น และเป็นที่น่าสนใจกว่าผลของ WVO (ปราศจาก EVA) ที่น่าสนใจ เพราะ WVO มีน้ำมันพืชเป็นองค์ประกอบหลักโดยมีกรดไขมันเป็นส่วนประกอบซึ่งเป็นสารหล่อลื่นที่ดีอยู่แล้ว และงานวิจัย Syahrullail et al., (2013) พบว่าน้ำมันปาล์มมีคุณสมบัติต่อต้านการสึกหรอดีกว่าน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานน้ำมันแร่

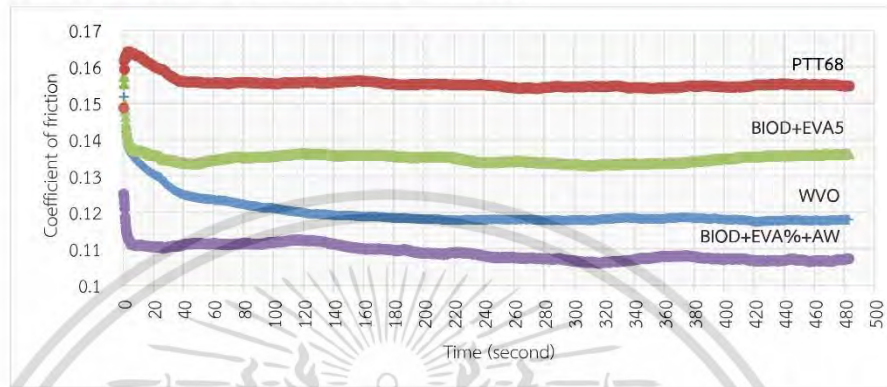


Figure 5 Coefficient of friction at distance of ball by CSM tribometer.

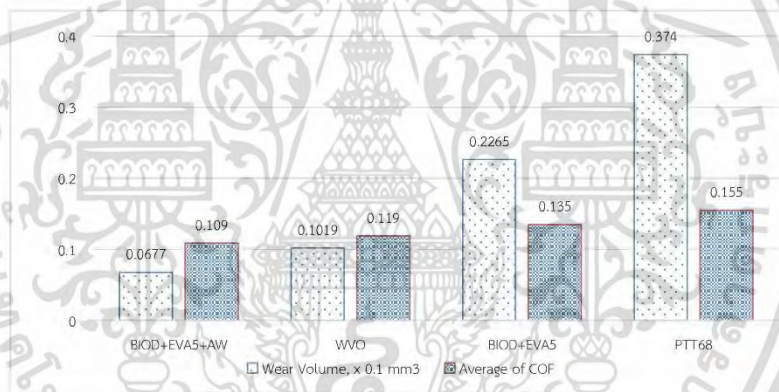


Figure 6 Comparison of average of COF and wear volume for hydraulic oils.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

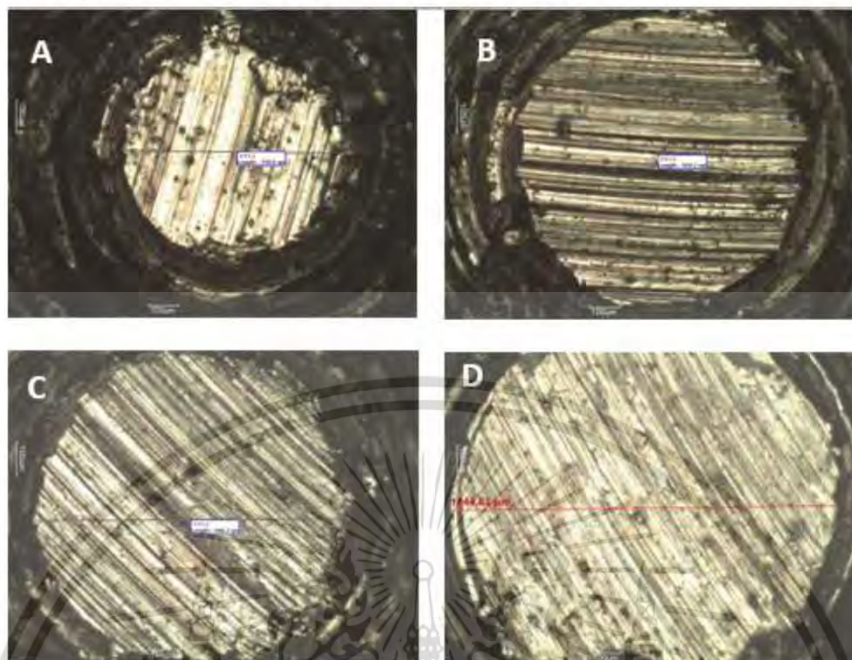


Figure 7 Wear characteristic on Ball by microscope A) BIOD+EVA5+AW, B) WVO, C) BIOD+EVA5 and D) PTT68.

#### 4 สรุปผลงานวิจัย

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพเคมี และสมบัติไทรโบโลยีของน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานน้ำมันพืชเก่าใช้แล้วที่พัฒนาขึ้นทำให้เชื่อได้ว่ามีศักยภาพทดแทนน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานปิโตรเลียมได้จากบทสรุปต่อไปนี้

- 1) EVA เป็นตัวปรับความหนืดที่ดีโดยปรับความหนืดBIOD จาก 5.81 cSt เป็น 48.6 cSt (BIOD+EVA5) ที่ 40°C ทำให้ความหนืดมีค่าใกล้เคียงกับความหนืดของ PTT46 ที่ 40°C
- 2) VI น้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานน้ำมันพืชเก่าใช้แล้วทั้ง 3 ตัวอย่าง ได้แก่ BIOD+EVA5+AW, BIOD+EVA5, และ WVO มีค่าสูงกว่า PTT46 และ PTT68 ซึ่งคุณสมบัติที่ดีของน้ำมันไฮดรอลิก
- 3) จุดวาบไฟของน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานน้ำมันพืชเก่าใช้แล้วทั้ง 3 ตัวอย่าง สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.977-2551 ขณะที่จุดไหลเทสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน และอาจเป็นปัญหาเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

- 4) น้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานน้ำมันพืชเก่าใช้แล้วทั้ง 3

ตัวอย่าง แสดงคุณสมบัติการหล่อลื่นและต่อต้านการสึกหรอที่ดีกว่า PTT68

#### 5 กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างสูงแก่กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือที่อนุเคราะห์ให้การทดสอบ, ผศ.ดร. รัตนพล มงคลรัตนาสีทธิ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการเคมี, อาจารย์จิราภรณ์ ศรีประเสริฐ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แนะนำและให้ความรู้การทดสอบไทรโบโลยีด้วยเครื่อง CSM.

#### 6 เอกสารอ้างอิง

ไทยโพสต์. 2555. เสนอออกกฎหมายควบคุมน้ำมันทอดซ้ำ, แหล่งข้อมูล: <http://suchons.wordpress.com/2012/05/07/>. เข้าถึงเมื่อ 11 พฤษภาคม 2557.  
ธาดา ทรัพย์พิพัฒนา, ชนินทร ตริ่มังมิตร, ธนวรรณ พินรัตน์. 2558. ปัจจัยสำคัญของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ซิเคชันเพื่อการผลิตไบโอดีเซล. วิศวกรรมลาดกระบัง 32(2), 1-6

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ปีที่ 24 ฉบับที่ 1 (2561), 13-22

- บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2557. PDS & MSDS. แหล่งข้อมูล: [http://pttlubricants.pttplc.com/assets/file\\_pds\\_msds/PTT%20HYDRAULIC\\_TH.pdf](http://pttlubricants.pttplc.com/assets/file_pds_msds/PTT%20HYDRAULIC_TH.pdf). เข้าถึงเมื่อ 11 สิงหาคม 2557.
- ปกรณ ชุมรม, วารุณี เปรमानนท์, คมกริช ละวรรณวงษ์. 2559. การประยุกต์ใช้การปรับสภาพผิวเพื่อเพิ่มความต้านทานการสึกหรอในแม่พิมพ์ดีด. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม 12(1), 13-27.
- ยุคอน. 2559. น้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic oil) เกิดฟองดำ US synthetic เหนือระดับ-Yukon. แหล่งข้อมูล: <http://www.yukonlubricants.com/product-category/lubricants-for-industrial/hydraulic-oil/>. เข้าถึงเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2560.
- วารุณี เปรमानนท์. 2547. ทดดิกรรมด้านไดรบอล์ของผิวสัมผัสระหว่างเหล็กทำพิมพ์และเหล็กกล้าโรสนิมโดยการจำลองการทำงานบนเครื่องแบบ Ball-on-disk. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18 ประจำปี 2547. ขอนแก่น: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 18-20 ตุลาคม 2547, เมือง, ขอนแก่น.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2551. มอก.977-2551 น้ำมันไฮดรอลิก – พื้นฐานน้ำมันแร่. ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศและงานทั่วไป. เล่มที่ 125 ตอนพิเศษ 98ง.
- Campanella, A., Rustoy, E., Baldessari, A., Baltanas, M.A. 2010. Lubricants from chemically modified vegetable oils. *Bioresource Technology* 101, 245–254.
- Erhan, S.Z., Asadauskas, S. 2000. Lubricant basestocks from vegetable oils. *Industrial Crops and Products* 11, 277–282.
- Golshokouh, I., Wira, J.Y., Farid, N.A., Syahrullail, S. 2013. Palm fatty acid distillate as an alternative source for hydraulic oil. *Applied Mechanics and Materials* 315, 941-945.
- Honary, L.A.T. 1996. An investigation of the use of soybean oil in hydraulic systems. *Biosource Technology* 56, 41-47.
- Kamalakar, K., Rajak, A.K., Prasad, R.B.N., Karuna, M.S.L. 2013. Rubber seed oil-based biolubricant base stocks: A potential source for hydraulic oils. *Industrial Crops and Products* 51, 249–257.
- Lathi, P.S., Mattiasson, B. 2007. Green approach for the preparation of biodegradable lubricant base stock from epoxidized vegetable oil. *Applied Catalysis B: Environmental* 69, 207–212.
- Mang, T., Bobzin, K., Bartels, T. 2011. *Industrial Tribology: Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Mendoza, G., Igartua, A., Fernandez-Diza, B., Urquiola, F., Vivanco, S., Arguisoniz, R. 2011. Vegetable oils as hydraulic fluids for agricultural applications. *GRASAS Y ACEITES* 61(1), 29-38.
- McNutt, J., He, Q. 2016. Development of biolubrications from vegetable oils via chemical modification. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 36, 1-12.
- Panchal, T.M., Patel A., Chauhan, D.D., Thomas, M., Patel, J.V. 2017. A methodological review on biolubricants from vegetable oil based resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70, 65–70.
- Quinchia, L.A., Delgado, M.A., Valencia, C., MFranco, J., Gallegos, C. 2010. Viscosity modification of different vegetable oils with EVA copolymer for lubricant applications. *Industrial Crops and Products* 32, 607–612.
- Quinchia, L.A., Delgado, M.A., Reddyhoff, T., Gallegos C., Spikes, H.A. 2014. Tribological studies of potential vegetable oil-based lubricants containing environmentally friendly viscosity modifiers. *Tribology International* 69, 110-117.
- Ruggiero, A., D'Amato, R., Merola, M., Valášek, P., Müller, M. 2017. Tribological characterization of vegetal lubricats: Comparative experimental investigation on *Jatropha curcas* L. oil, Rapeseed Methyl Ester oil, Hydrotreated Rapeseed oil. *Tribology International* 109, 529-540.
- Ruggiero, A., D'Amato, R., Merola, M., Valášek, P., Müller, M. 2016. On the tribological performance of vegetal lubricants: experimental investigation on *Jatropha Curcas* L. oil. *Procedia Engineering* 149, 431 – 437.
- Sovereign Lubricants. 2016. Omega 904 – Industrial Oil Concentrate, Available at: <http://sovereign-omega.co.uk/omega-904-industrial-oil-concentrate/> Accessed on 28 March 2016.
- Syahrullail, S., Nuraliza, N., Izhan, M.I., Abdul Hamid, M.K., Md-Razak, D. 2013. Wear Characteristic of Palm Olein as Lubricant in Different Rotating Speed. *Procedia Engineering* 68, 158 – 165.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thai Society of Agricultural Engineering Journal Vol. 24 No. 1 (2018), 13-22

Wang, Y., Li, C., Zhang, Y., Li, B., Yang, M., Zhang, X., Huo, S., Liu, G., Zhai, M., 2017. Comparative evaluation of the lubricating properties of vegetable-oil-based nanofluids between frictional test and grinding experiment. *Journal of Manufacturing Processes* 26, 94-104.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล นายอภิชาติ เสริมพณิชกิจ.
- วัน เดือน ปีเกิด 11 พฤษภาคม 2521 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร.
- ประวัติการศึกษา
- พ.ศ. 2542 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี.  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พ.ศ. 2548 วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์.  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ผลงานวิจัย
1. อภิชาติ เสริมพณิชกิจ และ จาลอง ปราบแก้ว. (2560) “ศึกษาสมบัติการภาพ-เคมี และไทรโบโลยีของน้ำมันไฮดรอลิกจากน้ำมันพืชเก่าใช้แล้ว” ในการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติครั้งที่ 18. กรุงเทพฯ, หน้า 229-236.
  2. อภิชาติ เสริมพณิชกิจ และ จาลอง ปราบแก้ว. (2561) “ศึกษาสมบัติการภาพ-เคมี และไทรโบโลยีของน้ำมันไฮดรอลิกจากน้ำมันพืชเก่าใช้แล้ว” วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, Vol 24 (1), หน้า 13-22.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้