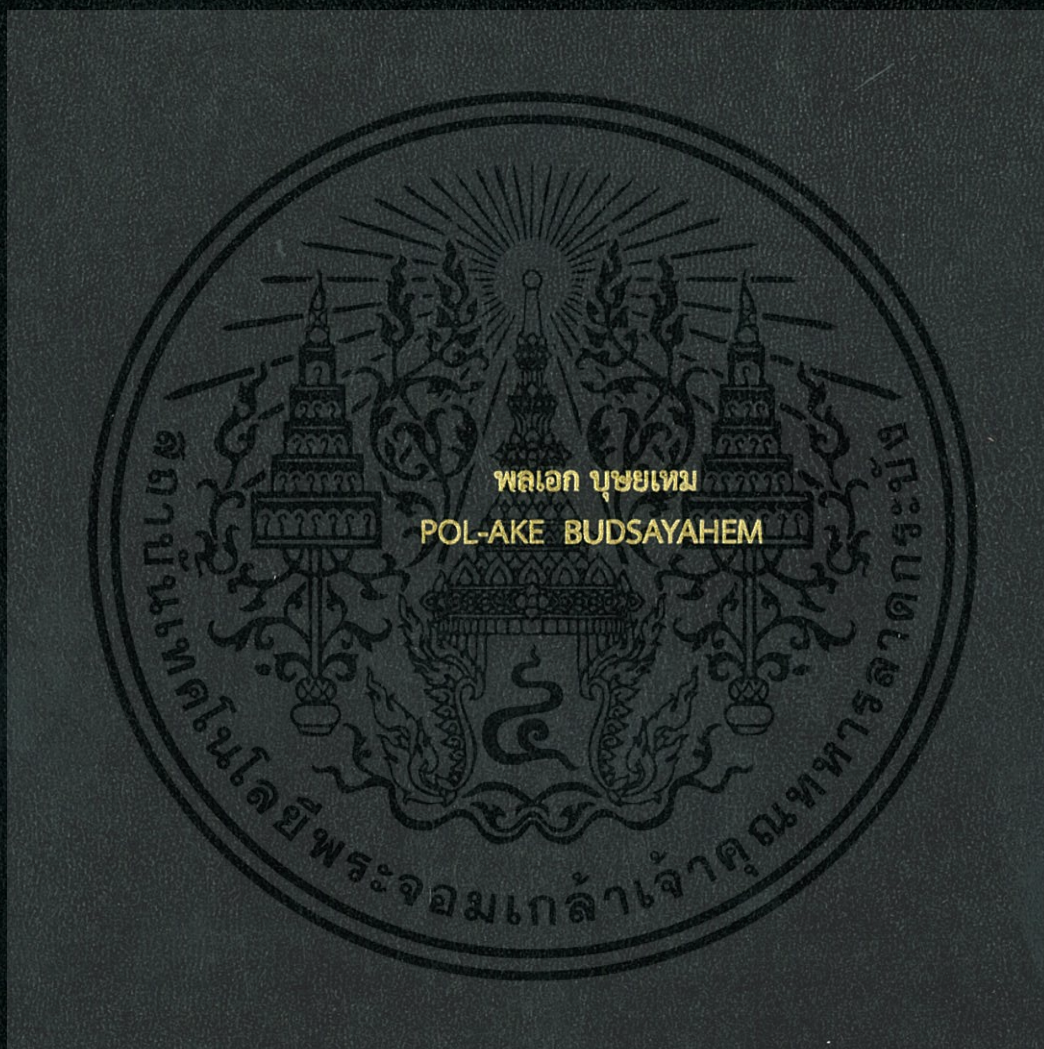


การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นและลักษณะการสึกหรอจากเชื้อเพลิง
แก๊สโซฮอล์

DETERIORATION OF ENGINE OIL AND WEAR CHARACTERISTICS
WITH GASOHOL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-030-016

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นและลักษณะการสึกหรอจากเชื้อเพลิง
แก๊สโซฮอล์

DETERIORATION OF ENGINE OIL AND WEAR CHARACTERISTICS
WITH GASOHOL



T148791



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 148791
พิมพ์เดือนปี 23 111 2560

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-030-016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DETERIORATION OF ENGINE OIL AND WEAR CHARACTERISTICS
WITH GASOHOL



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
2017

KMITL-2017-EN-M-030-016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

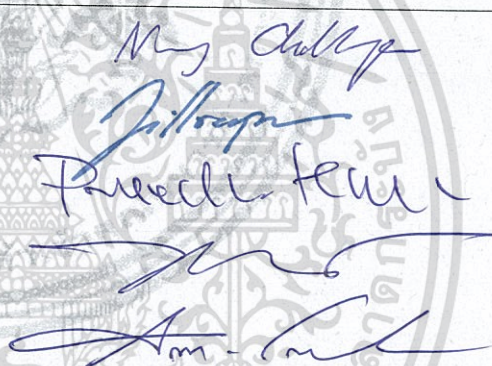
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นและลักษณะการสึกหรอจากเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์
Thesis Title Deterioration of Engine Oil and Wear Characteristics with Gasohol
นักศึกษา นายพลเอก บุษยhem
รหัสประจำตัว 57601174
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) ผศ.ดร.ปรีชา การินทร์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-030-016

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.นงศ์	ชลคุป	
ดร.จิตราภรณ์	วงศางาม	
ผศ.ดร.ปรีชา	การินทร์	
รศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	
ผศ.ดร.จินดา	เจริญพรพาณิชย์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงแหล่งที่มาในการนำไปใช้
วันที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นและลักษณะการสึกหรอจากเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์
นักศึกษา	นายพลเอก บุษยhem
รหัสประจำตัว	57601174
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)	ผศ.ดร.ปรีชา การินทร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว เพื่อวิเคราะห์สภาพการสึกหรอของเครื่องยนต์ การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นและสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่น โดยรูปร่างของเศษโลหะในน้ำมันหล่อลื่นวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายของชิ้นเศษโลหะ (Ferroggraphy) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รวมถึงศึกษาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆในภาพรวมจากน้ำมันหล่อลื่นและไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Particle Size Analysis by Laser Diffraction Technique) ในการทดสอบแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ชนิด คือ การทดสอบแบบที่หนึ่งเป็นการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นจากการใช้งานจริงที่มาจากรถทดสอบและศูนย์บริการรถยนต์ โดยตัวอย่างจากรถทดสอบถูกเก็บจากเครื่องยนต์ i-VTEC 2 คัน ซึ่งใช้น้ำมันหล่อลื่นมีมาตรฐาน API SN ชนิดความหนืด SAE 0W20 และกำหนดการเติมน้ำมันเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์ E20 และ E85 โดยเก็บตัวอย่างทุกๆ ระยะทาง 1,000 กิโลเมตร จนถึง 10,000 กิโลเมตร ในปริมาณครั้งละ 80-100 มิลลิลิตร รวมถึงการทดสอบตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่มาจากศูนย์บริการรถยนต์ถูกเก็บที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์สองรุ่นคือ รุ่นที่ 1 (i-VTEC) ใช้น้ำมันหล่อลื่นมีมาตรฐาน API SN ชนิดความหนืด SAE 0W20 และรุ่นที่ 2 (VVT-i) ใช้น้ำมันหล่อลื่นมีมาตรฐาน API SM ชั้นความหนืด SAE 5W40 ในปริมาณ 80-100 มล. ต่อคัน

การทดสอบแบบที่สองคือ การทดสอบด้านไทรโบโลยี (tribology) โดยการวิเคราะห์ด้วย เครื่องมือโฟร์บอล (four ball test) ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อวัดคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอ (anti-wear) ด้วยการปนเปื้อนของเขม่า (soot) จำลองโดยใช้คาร์บอนแบล็ค (carbon black) และ น้ำมันเชื้อเพลิง (fuel)

ผลการทดลองพบว่าปริมาณของโลหะที่สึกหรอมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาการใช้งานของ น้ำมันหล่อลื่น เศษโลหะที่สึกหรอส่วนใหญ่เป็นเศษโลหะสึกหรอแบบปกติจากการขัดถูและจากการล้า ตัว ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆในภาพรวมจากน้ำมันหล่อลื่นและไส้กรอง น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วมีขนาดตั้งแต่เล็กสุดถึงใหญ่สุดโดยเฉลี่ยตั้งแต่ 0.23 – 147.12 μm , 0.23 - 200 μm ตามลำดับ ในคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้วพบว่า ค่าความหนืด (viscosity) ค่าความเป็นด่าง (TBN) ของ น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว มีค่าลดลง และ ค่าออกซิเดชัน (oxidation) ค่าไนเตรชัน (nitration) มีค่า เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (new oil) นอกจากนี้ในการทดสอบโฟร์บอล โดยการผสมของคาร์บอนแบล็คและน้ำมันเชื้อเพลิงในน้ำมันหล่อลื่น เพื่อวิเคราะห์การสึกหรอของ พื้นผิวลูกบอลเหล็ก พบว่าการสึกหรอของพื้นผิวลูกบอลเหล็กในน้ำมันหล่อลื่นไม่มีการปนเปื้อนน้ำมัน เชื้อเพลิงและปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงของ E0 1 %Wt , E10 1 %Wt , E20 1%Wt ,E85 1%Wt, E85 1 %Wt + carbon black 1 %Wt มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผลที่สึกหรอบนผิวลูก บอลเหล็กมีขนาดเท่ากับ 364 μm , 368 μm , 369 μm , 370 μm , 513 μm , 506 μm ตามลำดับ และพบว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารเคมีเติมแต่งโมลิบดีนัมมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผลที่สึกหรอ บนผิวลูกบอลเหล็กน้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่มีสารเคมีเติมแต่งโมลิบดีนัม

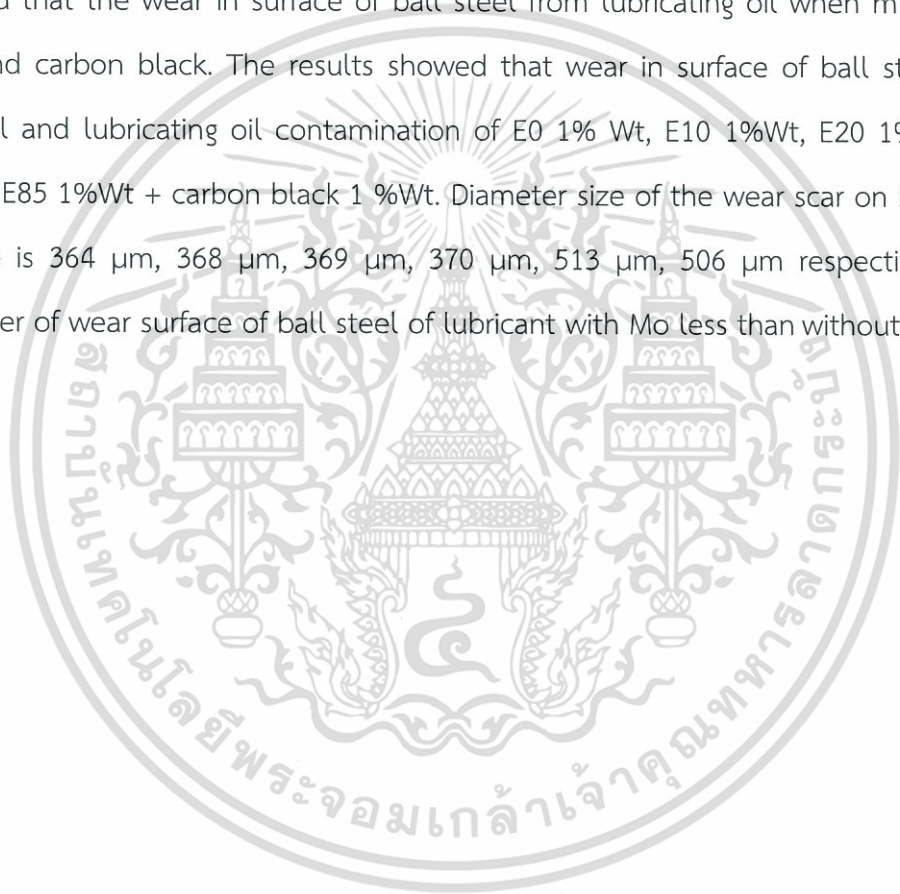
Thesis	DETERIORATION OF ENGINE OIL AND WEAR CHARACTERISTICS WITH GASOHOL
Student	Mr. Pol-ake Budsayahem
Student ID.	57601174
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Chinda Chareonphonphanich
Thesis Co-Advisor	Asst. Prof. Dr. Preechar Karin

ABSTRACT

This research investigated the physical and chemical properties of used lubricating oil in order to analyze the wear of engines, deterioration and contamination in the lubricating oil. The character of metals from wear debris is investigated by ferrography and scanning electron microscope. The particle size distribution is analyzed by laser diffraction technique. This experimental can categorized by two methods as first, the samples of used lubricating oil gathered from passenger vehicle which owned by their customers. Samples of used lubricating oils were collected from the test vehicle. They are same engine i-VTEC which is in the class of API SN with viscosity of SAE 0W20 and using E20 and E85. The samples of lubricating oil used whereas distance range 1,000 km. to 10,000 km. by collected 80-100 ml. of each sample. Second, samples were collected same as previous from service center but conducted on oil drained period from two engine types; engine A type was i-VTEC which filled with API SN grade and viscosity of SAE 0W20 together with engine B type was VVT-I which filled with API SM grade and viscosity of SAE 5W40.

Next method were investigated from the tribology behavior by four ball test, to measure the anti-wear when blended with fuel and carbon black.

The results showed that the quantities of metals wear were increased when the lubricating oil age is extended. The metals wear mostly were normal rubbing and fatigue wear. The average particle size distribution of the used lubricating oil and filter was found since 0.23 to 147.12 μm and 0.23 to 200 μm respectively. The physical and chemical properties of used lubricating oil showed that the viscosity and total base numbers (TBN) were decreased. However, nitration and oxidation were increased when compare with the new oil. In addition, the four ball test showed that the wear in surface of ball steel from lubricating oil when mixing with fuel and carbon black. The results showed that wear in surface of ball steel from new oil and lubricating oil contamination of E0 1% Wt, E10 1%Wt, E20 1%Wt, E85 1%Wt, E85 1%Wt + carbon black 1 %Wt. Diameter size of the wear scar on ball steel surface is 364 μm , 368 μm , 369 μm , 370 μm , 513 μm , 506 μm respectively. The diameter of wear surface of ball steel of lubricant with Mo less than without one.



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) และ ทุนสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (EPPO) สำหรับเงินทุนในการทำงานวิจัย เพื่อนำมาใช้จ่าย ค่าวัสดุและอุปกรณ์ ค่าตัวอย่าง ทดสอบของงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา การินทร์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำช่วยเหลือในเรื่องต่างๆตลอดจนข้อชี้แนะแนวทางการทำวิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และอาจารย์ประจำภาควิชากรรมเครื่องกลทุกท่านที่ ให้คำแนะนำและความรู้

ขอขอบคุณ FOCUSLAB Ltd. ห้องแล็บปฏิบัติการวิเคราะห์สำหรับความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นและชุดอุปกรณ์ในการจัดเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นรวมถึงความรู้ในการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่น และขอขอบคุณเจ้าของรถหมายเลขทะเบียน 3กต 5607 กท, 4กข 148 กท, โซว์รูมรถยนต์ ที่อนุญาตให้ทำการเก็บผลตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้อง รวมถึงเพื่อนทุกคน ที่คอยให้กำลังใจและคอยส่งเสริมผลักดันในเรื่องต่างๆ ทำให้ผู้เขียนทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้เขียนขอมอบให้กับ บิดา มารดา ญาติ พี่น้องอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ตลอดจนอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า และขอให้ทุกๆท่านจงมีแต่ความสุขความเจริญตลอดไป

พลเอก บุชยhem

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การหล่อลื่น การสึกหรอ การเสียดทาน.....	6
2.2 การวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว.....	21
2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว.....	26
2.4 ใส่กรองน้ำมันหล่อลื่น.....	31
2.5 การวิเคราะห์ รูปร่าง ขนาด พื้นผิว และชนิดของธาตุ.....	32
2.6 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง.....	36
2.7 การวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	37
2.8 การทดสอบวัดคุณสมบัติด้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล.....	37
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	48
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการวิจัย.....	48
3.1.1 วัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบภาคสนามกับรถยนต์ที่ใช้งานจริง.....	48
3.1.2 วัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบในระดับการจำลองด้านโทรโบโลยี.....	52
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VI อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1 ขั้นตอนการดำเนินงานในการทดสอบภาคสนามกับรถยนต์ที่ใช้งานจริง.....	54
3.2.2 ขั้นตอนการดำเนินงานในการทดสอบในระดับการจำลองด้านโทรโบโลยีโดย เครื่องทดสอบวัดคุณสมบัติด้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล.....	65
บทที่ 4 การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	71
4.1 การทดสอบภาคสนามกับรถยนต์ที่ใช้งานจริง.....	71
4.1.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่น.....	71
4.1.2 เพอร์โรกราฟฟี.....	92
4.1.3 การวิเคราะห์ภาพถ่ายของชิ้นเศษโลหะสึกหรอโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	96
4.1.4 การวิเคราะห์ภาพถ่ายของชิ้นเศษโลหะสึกหรอโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดพร้อมเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (SEM and EDX).....	99
4.1.5 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบน ของแสง.....	102
4.2 การทดสอบในระดับการจำลองด้านโทรโบโลยีโดยเครื่องทดสอบวัดคุณสมบัติด้านการ สึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล.....	105
4.2.1 ผลกระทบจากการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงในน้ำมันหล่อลื่น.....	105
4.2.2 ผลกระทบจากการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์E85 และเขม่าที่มีสาร จำลองการปนเปื้อนด้วยคาร์บอนแบล็ค.....	110
4.2.3 ผลกระทบจากการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์E85 ในน้ำมันหล่อลื่น ที่มีสารเคมีเติมแต่งลดแรงเสียดทานของโมลิบดีนัม.....	116
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	123
5.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นจากการทดสอบภาค สนามกับรถยนต์ที่ใช้งานจริง.....	123
5.2 การทดสอบในระดับการจำลองด้านโทรโบโลยีโดยเครื่องทดสอบวัดคุณสมบัติด้านการ สึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล.....	124
5.3 ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยต่อ.....	125
เอกสารอ้างอิง.....	126
ภาคผนวก.....	132

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดสอบทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่น.....	133
ภาคผนวก ข ข้อมูลลักษณะการสึกหรอและอนุภาคต่างๆในน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากภาพถ่ายเพอร์โรกราฟฟี.....	140
ภาคผนวก ค ข้อมูลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง.....	177
ภาคผนวก ง ข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติด้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล.....	204
ภาคผนวก จ ข้อมูลการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	207
ภาคผนวก บ บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	210
ประวัติผู้เขียน.....	230

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงแหล่งที่มาของธาตุในการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว.....22
2.2	การวิเคราะห์ค่าหมายเลขคลื่นของ FTIR.....29
2.3	ลักษณะของเศษโลหะที่สึกหรอและอนุภาคต่างๆที่ไม่ใช่โลหะ.....33
3.1	ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ i-VTEC.....50
3.2	ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ VVT-i.....51
3.3	การทดสอบทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นตามมาตรฐานการทดสอบ.....51
3.4	คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง.....52
3.5	เงื่อนไขการทดสอบคุณสมบัติด้านการสึกหรอนิตโรบอล.....53
3.6	ข้อมูลการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นของรถทดสอบ T1.....55
3.7	ข้อมูลการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นของรถทดสอบ T2.....56
3.8	ข้อมูลการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นจากรถที่ใช้งานจริงที่มาจากศูนย์บริการรถยนต์.....60
3.9	ระดับขอบเขตการเตือนภัยของน้ำมันหล่อลื่นเบอร์ SN 0W20.....62
3.10	ระดับขอบเขตการเตือนภัยของน้ำมันหล่อลื่นเบอร์ SM 5W40.....63
3.11	ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง.....65
3.12	ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงและคาร์บอนแบล็ค.....65
3.13	ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงในน้ำมันหล่อลื่นที่มีและไม่มีสารเคมีเติม แต่งลดแรงเสียดทานของโมลิบดีนัม.....66
3.14	ข้อมูลค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นที่มีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงและคาร์บอน แบล็ค.....69
ก.1	ข้อมูลการทดสอบทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T1 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SN 0W20.....134
ก.2	ข้อมูลการทดสอบทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T1 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SN 0W20.....135
ก.3	ข้อมูลการทดสอบทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T2 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SN 0W20.....136
ก.4	ข้อมูลการทดสอบทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T2 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SN 0W20.....137
ก.5	ข้อมูลการทดสอบทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากศูนย์บริการ รถยนต์ของเครื่องยนต์ชนิด i-VTEC ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ SN 0W20.....138

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.6 ข้อมูลการทดสอบทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากศูนย์บริการรถยนต์ของเครื่องยนต์ชนิด VVT-i ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ SM 5W40.....	139
ข.1 ข้อมูลลักษณะการสึกหรอและอนุภาคต่างๆในน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T1 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20.....	141
ข.2 ข้อมูลลักษณะการสึกหรอและอนุภาคต่างๆในน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T1 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85.....	144
ข.3 ข้อมูลลักษณะการสึกหรอและอนุภาคต่างๆในน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T2 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20.....	147
ข.4 ข้อมูลลักษณะการสึกหรอและอนุภาคต่างๆในน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T2 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85.....	150
ข.5 ข้อมูลลักษณะการสึกหรอและอนุภาคต่างๆในน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เก็บตัวอย่างจากศูนย์บริการรถยนต์ของเครื่องยนต์ชนิด i-VTEC.....	153
ข.6 ข้อมูลลักษณะการสึกหรอและอนุภาคต่างๆในน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เก็บตัวอย่างจากศูนย์บริการรถยนต์ของเครื่องยนต์ชนิด VVT-i.....	156
ข.7 ภาพถ่ายเพอร์โรกราฟฟิของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T1 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20.....	159
ข.8 ภาพถ่ายเพอร์โรกราฟฟิของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T1 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85.....	162
ข.9 ภาพถ่ายเพอร์โรกราฟฟิของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T2 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20.....	165
ข.10 ภาพถ่ายเพอร์โรกราฟฟิของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T2 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85.....	168
ข.11 ภาพถ่ายเพอร์โรกราฟฟิของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากศูนย์บริการรถยนต์ของเครื่องยนต์ชนิด i-VTEC.....	171
ข.12 ภาพถ่ายเพอร์โรกราฟฟิของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากศูนย์บริการรถยนต์ของเครื่องยนต์ชนิด VVT-i.....	174
ค.1 ขนาดและการกระจายตัวของคาร์บอนแบล็คโดยเฉลี่ย.....	178
ค.2 ขนาดและการกระจายตัวของคาร์บอนแบล็คในน้ำมันหล่อลื่น (New oil) โดยเฉลี่ย.....	180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และขอร้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.3 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากทดสอบT1 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20.....	182
ค.4 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากทดสอบT1 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85.....	184
ค.5 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากทดสอบT2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20.....	186
ค.6 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากทดสอบT2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85.....	188
ค.7 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากทดสอบT1 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20.....	190
ค.8 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากทดสอบT1 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85.....	192
ค.9 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากทดสอบT2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20.....	194
ค.10 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากทดสอบT2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85.....	196
ค.11 ขนาดและการกระจายตัวของเศษโลหะสึกหรอของลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบกับไฟร์บอลของตัวอย่าง new oil (SN 0W20) + E20.....	198
ค.12 ขนาดและการกระจายตัวของเศษโลหะสึกหรอของลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบกับไฟร์บอลของตัวอย่าง new oil (SN 0W20) + E85.....	200
ค.13 ขนาดและการกระจายตัวของเศษโลหะสึกหรอของลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบกับไฟร์บอลของตัวอย่าง new oil (SN 5W40) + E85.....	202
ง.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผลที่สึกหรอบนผิวลูกบอล (Scar) และค่าความหยาบ (Roughness).....	205
ง.2 ค่าแรงเสียดทานด้านการหมุนลูกบอลเหล็กของตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ.....	206

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่น.....	6
2.2 ตัวอย่างน้ำมันพืชและสัตว์.....	6
2.3 โครงสร้างการจับตัวของไฮโดรคาร์บอน.....	7
2.4 โครงสร้างโมเลกุลของโพลีแอลฟาโอเลฟิน (PAO : Polyalphaolefin).....	8
2.5 ค่าความหนืดและช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน.....	11
2.6 กลไกการสึกหรอแบบยึดติด.....	12
2.7 กลไกการสึกหรอแบบขูดขีด.....	13
2.8 กลไกการสึกหรอแบบล้าตัว.....	13
2.9 กลไกการสึกหรอแบบกัดกร่อน.....	14
2.10 พฤติกรรมการสึกหรอ.....	15
2.11 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี.....	16
2.12 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์.....	16
2.13 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก.....	17
2.14 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก.....	18
2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขอบเขตการหล่อลื่น ความหนาของแผ่นฟิล์มและการสึกหรอ.....	18
2.16 แรงเสียดทานแบบไกล.....	19
2.17 แรงเสียดทานแบบกลิ้ง.....	20
2.18 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องยนต์.....	23
2.19 ค่าความหนืดตามมาตรฐานต่างๆ.....	24
2.20 หลักการทำงานของ RDE.....	27
2.21 หลักการทำงานของ RFS.....	27
2.22 เครื่องวัดค่าความหนืด (Viscometer).....	28
2.23 หลักการทำงานของ FTIR.....	29
2.24 เครื่องวัดค่าความเป็นต่าง (Potentionmetric).....	30
2.25 เครื่องวัดจุดวาวไฟ (Small Scale Closed Cup Tester).....	30
2.26 อัตราส่วนเบต้าของกรองที่ขนาดอนุภาคขนาดมากกว่า 3 ไมครอน.....	31
2.27 หลักทำงานการวิเคราะห์อนุภาคเศษโลหะด้วยเพอร์โรกราฟฟี.....	32
2.28 หลักทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29	หลักทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....36
2.30	หลักทำงานของการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการ เลี้ยวเบนของแสง.....36
2.31	หลักทำงานของการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ ฟลูออเรสเซนซ์.....37
2.32	หลักทำงานของโฟร์บอล.....38
2.33	ตัวอย่างของเศษโลหะสึกหรอ.....39
2.34	ระดับการปนเปื้อนของแต่ละขนาดอนุภาค.....40
2.35	ความแตกต่างทางรูปร่างลักษณะของเขม่าจากเครื่องยนต์ดีเซล (ขาว) และคาร์บอน แบล็ค (ซ้าย).....42
2.36	การกระจายตัวของอนุภาคปฐมภูมิของเขม่าจากเครื่องยนต์ดีเซลและคาร์บอนแบล็ค.....43
2.37	คุณสมบัติการกระจายตัวของน้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดที่ปนเปื้อนคาร์บอนแบล็ค 1 %Wt.....43
2.38	ขนาดของแผ่นที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็กของน้ำมันหล่อลื่น Lubricant A และ Lubricant B และที่ปนเปื้อนคาร์บอนแบล็ค 1 %Wt.....44
2.39	ขนาดของแผ่นสึกหรอบนลูกบอลเหล็กของการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของ ไบโอดีเซลที่แตกต่างกัน.....45
2.40	แรงเสียดทานด้านการหมุนของการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของไบโอดีเซลที่ แตกต่างกัน.....45
2.41	การทดสอบคุณสมบัติการสึกหรอใช้ทดสอบแบบโฟร์บอล.....47
3.1	ชุดปั๊มดูดสุญญากาศ.....48
3.2	ชุดทดสอบเฟอร์โรกราฟฟี.....49
3.3	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....49
3.4	SEM และ EDX.....49
3.5	เครื่องวัดการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง.....50
3.6	กราฟแสดงการกลั่นตัวของน้ำมันเชื้อเพลิง.....51
3.7	คาร์บอนแบล็ค.....53
3.8	เครื่องทดสอบด้านการสึกหรอชนิดโฟร์บอล (Four Ball Test).....54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9	รถทดสอบที่ทำการเก็บตัวอย่างและขั้นตอนการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น.....57
3.10	ไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่เตรียมสำหรับการวิเคราะห์กับเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ.....59
3.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลระยะทางของรถยนต์ (Trip length หน่วย km.) และอายุของน้ำมันหล่อลื่น (Oil change interval หน่วย km.) ของรถยนต์จากโชว์รูม A (i-VTEC) 10 คัน และโชว์รูม B (VVT-i) 10 คัน.....60
3.12	แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานในการทดสอบภาคสนามกับรถยนต์ที่ใช้งานจริง.....64
3.13	ลักษณะของแผ่นที่สึกหรอบนผิวลูกบอลเหล็ก.....66
3.14	การวิเคราะห์พื้นผิวการสึกหรอของลูกบอลเหล็กด้วยภาพถ่าย SEM.....67
3.15	เครื่องวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....68
3.16	แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานในการทดสอบในระดับการจำลองด้านไทรโบโลยีโดยเครื่องทดสอบวัดคุณสมบัติด้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล (Four ball test).....70
4.1	ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ a) 40 °c และ b) 100 °c ของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ที่ระยะทุกๆ 1,000 km.....72
4.2	ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ a) 40 °c และ b) 100 °c จากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น.....74
4.3	ค่าออกซิเดชันของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ที่ระยะทุกๆ 1,000 km.....76
4.4	ค่าออกซิเดชันจากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น.....76
4.5	ค่าไนเตรชันของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ที่ระยะทุกๆ 1,000 km.....77
4.6	ค่าไนเตรชันจากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น.....78
4.7	ค่าความเป็นต่างในน้ำมันหล่อลื่นของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ระยะทุกๆ 1,000 km.....79
4.8	ค่าความเป็นต่างในน้ำมันหล่อลื่นจากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น.....79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 จุดวาบไฟน้ำมันหล่อลื่นของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ที่ระยะทุกๆ 1,000 km.....	81
4.10 จุดวาบไฟน้ำมันหล่อลื่นจากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น.....	81
4.11 ค่าดัชนีความหนืดของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ที่ระยะทุกๆ 1,000 km.....	82
4.12 ค่าดัชนีความหนืดจากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น.....	83
4.13 ค่าความปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ที่ระยะทุกๆ 1,000 km.....	84
4.14 ค่าความปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงจากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น.....	84
4.15 ค่าความปนเปื้อนเขม่าของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ที่ระยะทุกๆ 1,000 km.....	86
4.16 ค่าความปนเปื้อนเขม่าจากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น.....	86
4.17 ค่าความปนเปื้อนน้ำของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ที่ระยะทุกๆ 1,000 km.....	87
4.18 ค่าความปนเปื้อนน้ำจากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น.....	88
4.19 ค่าความปนเปื้อนซิลิกอนของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ที่ระยะทุกๆ 1,000 km.....	89
4.20 ค่าความปนเปื้อนซิลิกอนค่าความปนเปื้อนน้ำจากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น.....	89
4.21 ปริมาณของเศษโลหะสึกหรอแต่ละชนิด.....	91
4.22 ปริมาณของเศษโลหะสึกหรอแต่ละชนิดโดยเฉลี่ยทั้งหมด.....	91
4.23 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และการปนเปื้อนที่เปลี่ยนแปลงไปของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว.....	92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ของลักษณะการสึกหรอประเภทต่างๆ.....92
4.25	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ของลักษณะการสึกหรอประเภทต่างๆและขนาดโดยเฉลี่ยทั้งหมด.....95
4.26	แสดงตัวอย่างภาพถ่ายของ ferrogram และ filtergram ที่กำลังขยาย 500X.....95
4.27	ภาพถ่ายของชั้นเศษโลหะสึกหรอจากไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากรถทดสอบที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 ที่กำลังขยาย 500X.....97
4.28	ภาพถ่ายของชั้นเศษโลหะสึกหรอจากไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากรถทดสอบที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ที่กำลังขยาย 500X.....98
4.29	ไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานรูป (a) ที่กำลังขยาย 50X และรูป (b) ที่กำลังขยาย 200X.....99
4.30	ภาพถ่ายของชั้นเศษโลหะสึกหรอโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อมเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (SEM and EDX).....100
4.31	อนุภาคองค์ประกอบของธาตุแต่ละชนิดในแต่ละภาพ.....102
4.32	ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากเครื่องยนต์ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85.....102
4.33	ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคขนาดต่างๆจากตัวอย่างไส้กรองที่ผ่านการใช้งานแล้วของรถยนต์ทดสอบ T1,T2 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85.....103
4.34	ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคขนาดต่างๆจากตัวอย่างไส้กรองและน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วของรถทดสอบ T1,T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 E85.....104
4.35	ขนาดของผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กของการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอธานอลที่แตกต่างกัน.....106
4.36	แรงเสียดทานด้านการหมุนของการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอธานอลที่แตกต่างกัน.....106
4.37	แสดงค่าความหนืด (cSt) ที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง 1 %Wt วัดที่ 40, 100°C และความหนืดที่ 75°C จากการคำนวณ.....106
4.38	รูปแบบการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงในน้ำมันหล่อลื่น.....107
4.39	เส้นโค้งสไตรเบ็ค (Stribeck Curve).....107

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.40	ลักษณะของแผ่นสึกหรอบนลูกบอลเหล็ก a) ภาพถ่ายพื้นผิว 3D b) ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 200X c) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 500X.....108
4.41	ค่าความหยาบโดยเฉลี่ยของการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอธานอลที่แตกต่างกัน.....109
4.42	ขนาดและการกระจายตัวของเศษโลหะสึกหรอของลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบกับโพรบอลของตัวอย่าง new oil+E20 และ new oil+E85.....110
4.43	ขนาดของแผ่นสึกหรอบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง new oil + E85-1% + C เทียบกับ new oil + E85-1%.....111
4.44	แรงเสียดทานด้านการหมุนของตัวอย่าง new oil + E85-1% + C เทียบกับ new oil + E85-1%.....111
4.45	รูปแบบการกลิ้งระหว่างผิวชิ้นงาน.....112
4.46	ขนาดและการกระจายตัวของคาร์บอนแบล็คโดยเฉลี่ย.....113
4.47	ขนาดและการกระจายตัวของคาร์บอนแบล็คในน้ำมันหล่อลื่นที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ.....113
4.48	ลักษณะของแผ่นสึกหรอบนลูกบอลเหล็กตัวอย่าง New oil+E85-1%+C-1% a) ภาพถ่ายพื้นผิว 3D b) ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 200X c) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 500X.....114
4.49	ค่าความหยาบของแผ่นสึกหรอบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง new oil + E85-1% + C เทียบกับ new oil + E85-1%.....115
4.50	ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 1,500X ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบโพรบอลและลักษณะของพื้นผิวลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง a) 0W20 + E85-1% และ b) 0W20 + E85-1% + C-1%.....115
4.51	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแผ่นสึกหรอบนลูกบอลเหล็ก (Wear Scar) กับความหนืด (Viscosity) ที่ 100 °C.....117
4.52	ธาตุของสารเคมีเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่น.....118
4.53	ขนาดของแผ่นสึกหรอบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85-1% เทียบกับ Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85-1%.....118
4.54	รูปแบบกลไกการทำงานสารปรุงแต่งลดแรงเสียดทานโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (MoS ₂).....118

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.55 ลักษณะของแผ่นสีกหอบนลูกบอลเหล็กตัวอย่าง Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85-1% a)ภาพถ่ายพื้นผิว 3D b) ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่ กำลังขยาย 100X c) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 500X.....	119
4.56 ค่าความหยาบของแผ่นสีกหอบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85-1% เทียบกับ Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85-1%.....	120
4.57 ขนาดและการกระจายตัวของเศษโลหะสีกหอบนลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบ โฟร์บอลของตัวอย่าง Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85 และ Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85.....	121
4.58 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 1,500X ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบ โฟร์บอลและลักษณะของพื้นผิวลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง a) Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85 และ b) Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85.....	121

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันโลกให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก เพราะในปัจจุบันนี้มีรถยนต์พาหนะตามท้องถนนเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ฉะนั้นถ้าทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการช่วยลดปัญหาดังกล่าว เพราะในเครื่องยนต์แก๊สโซลีนพลังงานที่ได้จากการกระบวนการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์คิดเป็น 100% สูญเสียพลังงานไปกับก๊าซเสีย (Exhaust) 33% ถ่ายเทความร้อน (Cooling) 29% พลังงานกล (Mechanical power) 38% พลังงานกลที่ได้ที่ได้นั้นสูญเสียไปกับการเสียดทานในส่วนต่างๆถึง 33% เฉพาะภายในเครื่องยนต์มีการเสียดทานถึง 11.5% แต่โดยทั่วไปในการเสียดทานภายในเครื่องยนต์ส่วนใหญ่เป็นการเสียดทานจากส่วนประกอบของลูกสูบคิดเป็น 40-60% ของการเสียดทานภายในเครื่องยนต์ [1] ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่น (Lubricant) จึงเป็นตัวแปรที่สำคัญที่จะช่วยลดการเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์และปกป้องการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่เคลื่อนที่สัมผัสกันซึ่งส่งผลให้เกิดแรงเสียดทาน ให้เครื่องยนต์ทำงานได้เต็มประสิทธิภาพซึ่งสอดคล้องศาสตร์ที่เรียกกันว่า “โทรโบโลยี” (Tribology) ที่ศึกษาเกี่ยวกับการเสียดทาน การสึกหรอ และการหล่อลื่น

การหล่อลื่นของสารหล่อลื่นมีขอบเขตของการหล่อลื่นแบ่งออกเป็น 3 ขอบเขตการหล่อลื่น ชนิดที่หนึ่งขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวนด์คาร์รี (boundary) ขอบเขตแบบนี้ชิ้นงานจะถูกปกคลุมด้วยชั้นผิวหน้าของชิ้นส่วนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีหรือดูดกลืนอะตอม (Absorbed) ชิ้นส่วนเหล่านี้จะถูกฉีกตัวออกไปก่อนถึงเนื้อชิ้นงานเพราะมีค่าความต้านทานความเค้นเฉือนที่ต่ำ ชิ้นส่วนเหล่านี้ช่วยให้ปกป้องชิ้นงานจากการสึกหรอได้ ชนิดที่สองแบบกึ่งสมบูรณ์ (Mixed) ลักษณะแบบนี้จะเกิดการสลับเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างสัมประสิทธิ์การเสียดทานในชิ้นงานคู่สัมผัสกับสัมประสิทธิ์การเสียดทานในชั้นของสารหล่อลื่น ชนิดที่สามขอบเขตการหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ (full-film) ลักษณะแบบนี้ น้ำมันหล่อลื่นจะแยกชั้นของชิ้นงานออกจากกันอย่างชัดเจนมีทั้งการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก (elastrohydrodynamic) และการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก (hydrodynamic) [2-3] พบว่าช่วงที่เริ่มสตาร์ทและดับเครื่องยนต์และปัจจัยของอุณหภูมิที่สูงมีผลทำให้ฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นบางลงจนอาจนำไปสู่การขาดการหล่อลื่นมักพบในขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวนด์คาร์รี [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะกลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์มีกลไกแบบยึดติด (adhesive wear) เกิดจากพื้นระ asperities ฉีกขาดออกไปในขณะชิ้นงานเคลื่อนที่ กลไกแบบขูดขีด (abrasive wear) เกิดจากเนื้อชิ้นงานถูกรูสสารที่มีความแข็งสูง ขูดขีดชิ้นงาน กลไกการสึกหรอแบบล้าตัว (fatigue wear) เกิดจากชิ้นงานมีการรับภาระเป็นวงรอบ (cycles) และเกิดรอยแตกและกลไกแบบกัดกร่อน (corrosive wear) เกิดจากชิ้นงานที่มีการขัดสีและเกิดผลพวงจากปฏิกิริยาเคมี [2-3] ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยเฟอโรโรกราฟที่ทำให้ทราบถึงลักษณะกลไกการสึกหรอจากเศษโลหะที่สึกหรอที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันหล่อลื่น [5-6] หรือควบคู่กับการวิเคราะห์ได้โดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงสามารถขยายภาพของวัตถุในระดับ 10 – 1,000 เท่า และการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) มีกำลังขยายภาพสูงถึง 500,000 เท่า ซึ่งถ้ามีเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDX or EDS) ที่ติดตั้งร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าชิ้นเศษโลหะที่สึกหรอมือประกอบของธาตุอะไรบ้างส่งผลให้การวิเคราะห์ลักษณะกลไกการสึกหรอของชิ้นเศษโลหะที่สึกหรอมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

การวิเคราะห์น้ำมันที่ใช้งานแล้วมี 3 ส่วนหลักในการวิเคราะห์ ส่วนที่หนึ่งการวิเคราะห์ถึงชนิดธาตุของการสึกหรอ (wear condition) เพื่อวิเคราะห์หาแหล่งที่มา ปริมาณของเศษโลหะสึกหรอว่ามี การสึกหรอในปริมาณที่ปกติหรือผิดปกติและรูปร่างหน้าตาของเศษโลหะสึกหรอ ส่วนที่สองการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของน้ำมันหล่อลื่น (oil condition) ในรูปของคุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันหล่อลื่นเช่น ค่าความหนืด ค่าออกซิเดชัน ค่าไนโตรเจน ค่าความเป็นด่างในน้ำมันหล่อ ส่วนที่สามการปนเปื้อน (contamination) ซึ่งสามารถปนเปื้อนได้ทั้งทางภายในและภายนอกเครื่องยนต์ ตัวอย่างการปนเปื้อนเช่น น้ำมันเชื้อเพลิง เขม่า ผุ่นละออง น้ำ เป็นสาเหตุหนึ่งที่สำคัญที่ส่งผลต่อการสึกหรอภายในเครื่องยนต์และการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น [7] ซึ่งในปัจจุบันเครื่องยนต์ต้องรับภาระโหลดต่างๆมากขึ้นเช่น ความเครียด สภาวะด้านอุณหภูมิ การปนเปื้อนสิ่งสกปรกในเครื่องยนต์ทำให้น้ำมันหล่อลื่นต้องมีคุณสมบัติพิเศษต่างๆหรือมีการเติมสารเคมีปรุงแต่งลงในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน เช่น สารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารป้องกันการสึกหรอ สารรับแรงกดสูง สารชะล้างกระจายสิ่งสกปรก แตกต่างกันตามสูตรของแต่ละผู้ผลิตที่ผลิตออกมา ดังนั้นการศึกษาและวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือการทดสอบและการตีความหมายของการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านและไม่ผ่านการใช้งาน รวมไปถึงไส้กรองน้ำมันหล่อ (filter) จึงมีความจำเป็นอย่างมากเพราะจะทำให้ทราบถึงปัญหาและแหล่งที่มาของปัญหาของทั้งระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษากลไกการเสื่อมสภาพทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน
2. ศึกษาสาเหตุและแหล่งที่มาของเศษโลหะสึกหรือจากการวิเคราะห์ลักษณะกลไกการสึกหรือ รูปร่าง ขนาดและชนิดธาตุของเศษโลหะที่สึกหรือที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันหล่อลื่น
3. ศึกษาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆในภาพรวมจากน้ำมันหล่อลื่นและไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้ว
4. ศึกษาคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรือของน้ำมันหล่อลื่นที่มีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงและเขม่าที่มีการจำลองการปนเปื้อนด้วยคาร์บอนแบล็คโดยการทดสอบโฟร์บอล
5. ศึกษาคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรือของน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารเคมีเติมแต่งลดแรงเสียดทานโดยการทดสอบโฟร์บอล

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. วิเคราะห์กลไกการสึกหรือจากเศษโลหะสึกหรือและการเสื่อมสภาพทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานจากการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นจากรถทดสอบทุกๆระยะทาง 1,000 km. จนถึงระยะการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นหรือเฉลี่ยที่ระยะทาง 10,000 km. และกำหนดชนิดการเติมน้ำมันเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์ E20 และ E85
2. วิเคราะห์กลไกการสึกหรือจากเศษโลหะสึกหรือและการเสื่อมสภาพทางกายภาพและเคมีโดยภาพรวมของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานซึ่งส่งผลต่อการสึกหรือของเครื่องยนต์ จากการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นจากศูนย์บริการรถยนต์ที่ระยะการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น
3. วิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆในภาพรวมจากน้ำมันหล่อลื่นและไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้ว
4. วิเคราะห์คุณสมบัติการป้องกันการสึกหรือของน้ำมันหล่อลื่นที่มีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงและเขม่าที่มีการจำลองการปนเปื้อนด้วยคาร์บอนแบล็คโดยการทดสอบโฟร์บอลของตัวอย่าง New oil, New oil + E0-1 %Wt, New oil + E10-1 %Wt, New oil + E20-1 %Wt, New oil + E85 1 %Wt, New oil + E85 1 %Wt + Carbon Black 1 %Wt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. วิเคราะห์คุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอของน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารเคมีเติมแต่งลดแรงเสียดทานของโมลิบดีนัมโดยการทดสอบโพร์บอล

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการเสียดทาน การสึกหรอ และการหล่อลื่น หรือศาสตร์ของโทรโบโลยี ขอบเขตการหล่อลื่นของน้ำมันหล่อลื่น กลไกการสึกหรอ การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นทางกายภาพและเคมี
2. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องมือ อุปกรณ์และวัสดุ ที่ใช้ในการทดสอบและการวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นและไส้กรองน้ำมันหล่อลื่น
3. วางแผนและกำหนดตัวแปรที่จะทดสอบและเครื่องมือที่จะใช้ในการทดสอบและการวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นและไส้กรองน้ำมันหล่อลื่น
4. วิเคราะห์และสรุปผลจากการทดสอบภาคสนามกับรถยนต์ที่ใช้งานจริงและการทดสอบในระดับการจำลองด้านโทรโบโลยีโดยเครื่องทดสอบวัดคุณสมบัติด้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโพร์บอล

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้ทราบถึงกลไกการเสื่อมสภาพทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน
2. ได้ทราบถึงกลไกการสึกหรอ รูปร่าง ขนาดและชนิดธาตุของเศษโลหะที่สึกหรอที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นและทำให้สามารถวิเคราะห์ทราบถึงสาเหตุและแหล่งที่มาของการสึกหรอ
3. ได้ทราบถึงขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆในภาพรวมจากน้ำมันหล่อลื่นและไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้ว
4. ได้ทราบถึงคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอจากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผลที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็ก (scar) ค่าความหยาบของพื้นผิว, ค่า Friction torque ของตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่มีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงและเขม่าที่มีการจำลองการปนเปื้อนด้วยคาร์บอนแบล็คและน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารเคมีเติมแต่งลดแรงเสียดทานของโมลิบดีนัมที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ได้ทราบถึงลักษณะกลไกการสึกหรอของแผลที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็กซึ่งเกิดจากการเสียดสีกันของลูกบอลเหล็กและมีการหล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่นที่มีการปนเปื้อนปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงและเขม่าที่มีการจำลองการปนเปื้อนด้วยคาร์บอนแบล็คและน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารเคมีเติมแต่งลดแรงเสียดทานของโมลิบดีนัม

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 5 บท โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา จุดมุ่งหมายขอบเขตงาน ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ ของงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เช่น การหล่อลื่น, การสึกหรอ, การเสียดทาน การวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว ไล้กรองน้ำมันหล่อลื่น การวิเคราะห์รูปร่าง, ขนาด, พื้นผิวและชนิดของธาตุ การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง การทดสอบวัดคุณสมบัติด้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยของการดำเนินงานในการทดสอบภาคสนามกับรถยนต์ที่ใช้งานจริงและการดำเนินงานในการทดสอบในระดับการจำลองด้านโทรโบลีย์โดยเครื่องทดสอบวัดคุณสมบัติด้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของการดำเนินงานในการทดสอบภาคสนามกับรถยนต์ที่ใช้งานจริงและการดำเนินงานในการทดสอบในระดับการจำลองด้านโทรโบลีย์โดยเครื่องทดสอบวัดคุณสมบัติด้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะของการทดสอบและการตรวจวิเคราะห์ทั้งหมด

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การหล่อลื่น การสึกหรอ การเสียดทาน

2.1.1 น้ำมันหล่อลื่น (Lubricant)

น้ำมันหล่อลื่นเป็นน้ำมันที่ได้จากการผสมระหว่างน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base oil) กับ สารปรุงแต่ง (Additive) รวมกันเป็นน้ำมันหล่อลื่น น้ำมันหล่อลื่นมีหน้าที่ช่วยลดแรงเสียดทานของ ชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์ที่มีการเคลื่อนที่สัมผัสกันทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้เต็มประสิทธิภาพและลด การสึกหรอของชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่น

2.1.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base oil)

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานแบ่งออกได้ 3 ประเภท ดังต่อไปนี้

1) น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ (Vegetable or Animal Oils) : เป็นน้ำมันที่สกัดได้ตามธรรมชาติแต่คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันขณะใช้งานต่ำจึงต้องผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติก่อนนำไปใช้งาน ส่งผลให้ราคาของน้ำมันแพงขึ้น น้ำมันพืชตัวอย่างเช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันงา น้ำมันละหุ่งและน้ำมันสัตว์ ตัวอย่างเช่น น้ำมันหมู น้ำมันปลา น้ำมันไก่



a) น้ำมันพืช [8]



b) น้ำมันสัตว์ [9]

รูปที่ 2.2 ตัวอย่างน้ำมันพืชและสัตว์

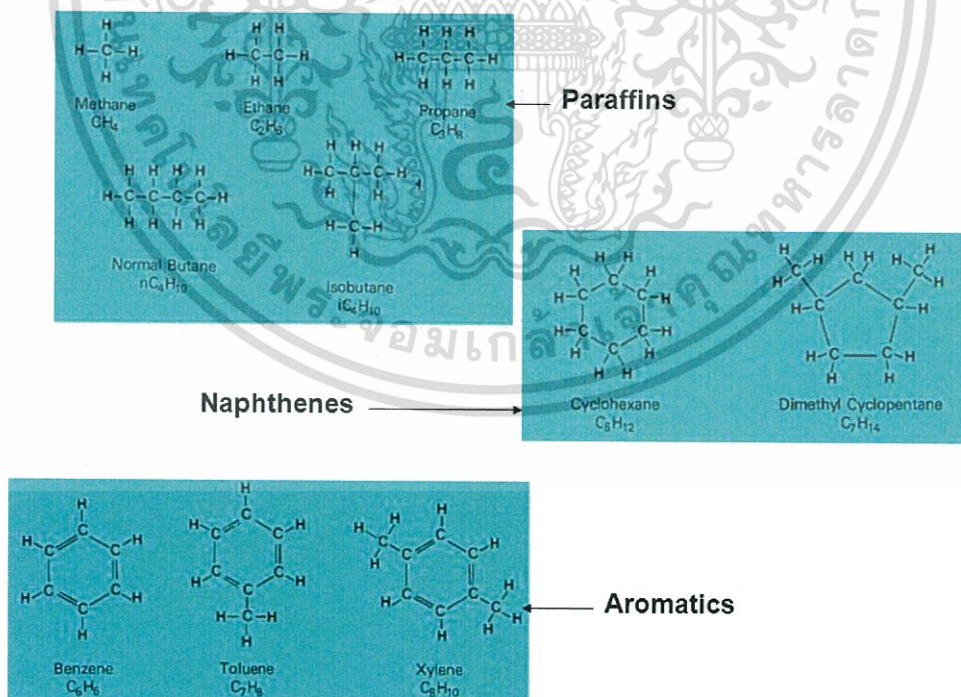
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) น้ำมันแร่ (Mineral Oils) : เป็นน้ำมันที่ได้มาจากการกลั่นน้ำมันดิบเป็นน้ำมันที่มีคุณภาพดีราคาไม่แพงแต่ก็ต้องผ่านกระบวนการกำจัดสารที่ไม่ต้องการออกเพื่อให้ได้คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ดี น้ำมันแร่ประกอบไปด้วยโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนหลากหลายชนิดสามารถแบ่งจำแนกตามโครงสร้างการจับตัวของไฮโดรคาร์บอนเป็น 3 กลุ่มคือ

- พาราฟิน (Paraffins) มีโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอนแบบอิ่มตัว (Saturated) มีคุณสมบัติในการต่อต้านการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดหรือ “ดัชนีความหนืด” เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปค่อนข้างดี (HVI : High Viscosity Index)

- แนฟทีน (Naphthenes) มีโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอนแบบอิ่มตัว (Saturated) มีคุณสมบัติในการต่อต้านการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดหรือ “ดัชนีความหนืด” เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปปานกลาง (MVI : Medium Viscosity Index)

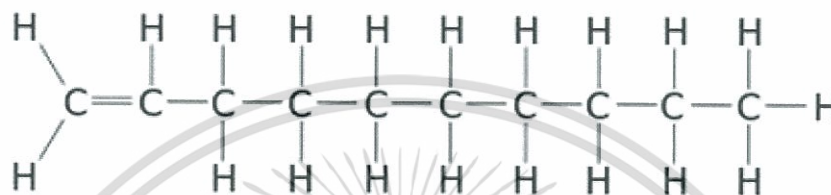
- อะโรแมติก (Aromatics) มีโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอนแบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated) มีคุณสมบัติในการต่อต้านการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดหรือ “ดัชนีความหนืด” เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปค่อนข้างไม่ดี



รูปที่ 2.3 โครงสร้างการจับตัวของไฮโดรคาร์บอน [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) น้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Oils) : สังเคราะห์ขึ้นจากขบวนการทางเคมีโดยส่วนใหญ่ใช้น้ำมันปิโตรเลียมเป็นตัวเริ่มต้น เป็นน้ำมันที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษโดยเฉพาะเช่น ดัชนีความหนืดสูงมาก การระเหยต่ำต่อต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ป้องกันการติดไฟ ทั้งหมดคือการเพิ่มขีดความสามารถของน้ำมันให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ตัวอย่างน้ำมันสังเคราะห์เช่น โพลีแอลฟาโอเลฟิน (PAO : Polyalphaolefin)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของโพลีแอลฟาโอเลฟิน (PAO : Polyalphaolefin) [11]

2.1.2 สารเพิ่มคุณภาพ (Additive) [7]

การเติมสารปรุงแต่ง (Additive) ลงในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานรวมเป็นน้ำมันหล่อลื่นนั้น มีผลทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีประสิทธิภาพมากขึ้นเพราะมันจะไปลดข้อด้อยของน้ำมันพื้นฐานซึ่งน้ำมันพื้นฐานเพียงอย่างเดียวไม่สามารถที่จะทนต่อภาระการใช้งาน อุณหภูมิที่สูงได้ ตัวอย่างของสารปรุงแต่งที่สำคัญและพบได้บ่อยๆ คือ

- สารยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Anti-Oxidation/Oxidation Inhibitor) : สารหล่อลื่นที่ทำให้ปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงภายในเครื่องยนต์เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยากมาก ผลของการเกิดปฏิกิริยานี้ส่งผลให้เกิดสารองค์ประกอบของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อนุมูลอิสระ คีโตน อัลดีด์ และกรดอินทรีย์ สิ่งเหล่านี้คืออัตราการเกิดออกซิเดชันซึ่งมันจะมีค่ามากขึ้น เมื่อมีปัจจัยด้านปริมาณของฟองอากาศ อุณหภูมิ น้ำ ผงเศษโลหะที่เป็นคาตาไลสต์ ที่สูง ผลของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันหล่อลื่นคือ ความหนืดเพิ่มสูงขึ้น ความเป็นกรดเพิ่มสูงขึ้น สีเข้มขึ้น มีคราบวานิช คราบยางเหนียวจับเกาะที่ผิวชิ้นงานและมีตะกอนนอนก้นที่อ่าง สารปรุงแต่งยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ใส่เข้าไปจะทำหน้าที่ช่วยสลายองค์ประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและยืดอายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่น ตัวอย่างสารปรุงแต่งป้องกันการเกิดออกซิเดชันเช่น ฮินเดอร์ฟีโนล (Hinder phenols) ซิงค์ไดธิโอฟอสเฟส (Zinc dithiophosphates) อะโรมาติกเอมีน (Aromatic amines) อัลคิลซัลไฟด์ (Alkyl sulfides)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สารยับยั้งสนิม (Rust Inhibitors) : สนิมเป็นผลมาจากการปนเปื้อนน้ำและมีผลต่อเนื่องเป็นการกัดกร่อนชิ้นส่วนที่ทำมาจากเหล็กและเหล็กกล้า ซึ่งน้ำก็ยิ่งส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของสารหล่อลื่นและอายุการใช้งานที่สั้นลง สารปรุงแต่งป้องกันการเกิดสนิมที่ใส่เข้าไปจะทำหน้าที่ป้องกันและขับไล่ความชื้นออกจากผิวโลหะ เพราะลักษณะของโมเลกุลของสารปรุงแต่งมีสภาพเป็นขั้วโดยที่ขั้วด้านหัวของสารเคมีปรุงแต่งจะจับเกาะผิวโลหะและส่วนหางจะเป็นส่วนที่ผลักรน้ำและความชื้นออกจากผิวโลหะ ตัวอย่างสารปรุงแต่งป้องกันการเกิดสนิมเช่น ซัลโฟเนต (Sulfonates) ฟอสเฟต (Phosphates) กรดอินทรีย์ (Organic acids) ซัคซินิไมด์ (Succinimides) เอสเตอร์ (Ester) และเอมีน (Amines)

- สารกระจายเขม่าและสารชะล้างทำความสะอาด (Dispersants and detergents) : สารกระจายเขม่าเป็นโมเลกุลที่มีขั้วมันจะทำให้เขม่าไม่เกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและกระจายเขม่าเป็นก้อนเล็กๆและแขวนลอยอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นโดยสารกระจายเขม่าจะเข้าไปล้อมกรอบเขม่าเพื่อป้องกันการรวมตัวกันของก้อนเขม่าแล้วไปเกาะติดบนผิวโลหะ สารชะล้างทำความสะอาดมันจะช่วยทำความสะอาดและปกป้องการจับตัวของสสารต่างๆบนผิวโลหะที่มีอุณหภูมิสูงๆ ตัวอย่างสารปรุงแต่งกระจายเขม่าและสารชะล้างทำความสะอาดเช่น ซัคซินิไมด์ (Succinimides) แคลเซียมและแบเรียมซัลโฟเนต (Calcium and barium sulfonates) ฟีนีต (Phenates) สารชะล้างแบบโพลีเมอร์ (Polymeric detergents) และสารประกอบเอมีน (Amine compounds)

- สารปรุงแต่งต่อต้านการสึกหรอและสารปรุงแต่งรับแรงกดสูง (Anti-wear and Extreme pressure additives) : เป็นสารปรุงแต่งต่อต้านการสึกหรอของเครื่องยนต์ภายใต้สภาวะการหล่อลื่นขอบเขตแบบบาวน์ดารีและลดค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานลงโดยสารเคมีปรุงแต่งจะสร้างฟิล์มลักษณะคล้ายเนื้อสปูมีความลื่นในตัวฟิล์ม ความแตกต่างระหว่างสารปรุงแต่งต่อต้านการสึกหรอ (AW : Anti-wear) และสารปรุงแต่งรับแรงกดสูง (EP : Extreme pressure) คือความหนาของฟิล์มที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของผิวโลหะซึ่งสารปรุงแต่งรับแรงกดสูงจะมากกว่าสารปรุงแต่งต่อต้านการสึกหรอ ตัวอย่างสารปรุงแต่งต่อต้านการสึกหรอและสารปรุงแต่งรับแรงกดสูงเช่น ซิงค์ไดอิโอฟอสเฟตหรือซิงค์ไดอัลคิลไดอิโอฟอสเฟต (ZDDP) ไตรครีซิลฟอสเฟต (Tri-cresyl phosphate) ซัลเฟอร์ฟอสฟอรัส (Sulfur-phosphorous)

- สารปรุงแต่งลดแรงเสียดทาน (Friction modifiers additives) : เป็นสารปรุงแต่งที่เป็นของแข็งมีสามารถรับแรงกดในแนวตั้งและมีความสามารถในการเลื่อนหลุดง่ายในโครงสร้างชั้นผิวเมื่อมีแรงกระทำในแนวราบหรือแรงเฉือนได้ดี สารหล่อลื่นแข็งที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

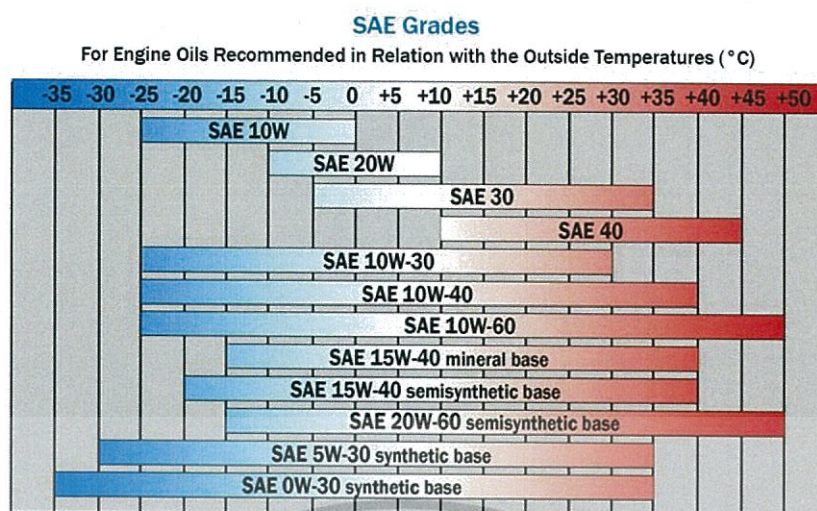
(MoS₂) ซึ่งการก่อดัวได้รับการส่งเสริมจากการปรากฏตัวของสารปรุงแต่งต่อต้านการสึกหรอซิงค์ ไดอัลคิลไดริโอฟอสเฟต (ZDDP) ที่ให้อะตอมของซัลเฟอร์ โครงสร้างที่เรียงเป็นชั้นของโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์จะเข้าไปปกคลุมปลายยอดแหลมของความหยาบของพื้นผิวเมื่อมีแรงกระทำในแนวราบ โครงสร้างชั้นผิวของโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์เป็นแบบโครงสร้างร่างตาข่ายรูปหกเหลี่ยมชั้นพันธะระหว่างก็ โครงผลึกกับอะตอมของซัลเฟอร์จะยึดเกาะกันอ่อนแอกว่าพันธะระหว่างอะตอมโมลิบดีนัม และซัลเฟอร์ในโครงสร้างทำให้เลื่อนหลุดง่ายส่งผลให้ค่าแรงเสียดทานและการสึกหรอของชิ้นงาน ลดลง

2.1.3 มาตรฐานน้ำมันหล่อลื่น

2.1.3.1 การแบ่งประเภทของความหนืด

มาตรฐานของสมาคมวิศวกรยานยนต์ (SAE : Society of Automotive Engineer) ของสหรัฐอเมริกากำหนดความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเป็น 2 ประเภท คือ

- 1) น้ำมันเกรดเดี่ยว (Monograde) : น้ำมันเครื่องที่มีความหนืดค่าเดียวตัวอย่าง เช่น SAE10 SAE20 และ SAE30 วัดความหนืดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส น้ำมันเครื่องจะมีความหนืดเบอร์ 10 20 และ 30 ตามลำดับ
- 2) น้ำมันเกรดรวม (Multigrade) : น้ำมันเครื่องที่มีความหนืดสองค่าตัวอย่างเช่น OW20 5W40 10W30 15W40 และ 20W60 ตัวอักษร “W” คือค่าความต้านทานการเป็นไขของ น้ำมันหล่อลื่น ค่าตัวเลขชุดหน้าตัวอักษรคือค่าความต้านทานการเป็นไขของน้ำมันหล่อลื่นที่อุณหภูมิ ต่ำกว่า -30 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ -30 -20 -10 0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และค่าตัวเลข ชุดหลังคือเบอร์ของน้ำมันเครื่อง ซึ่งวัดความหนืดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.5 ค่าความหนืดและช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน [12]

2.1.3.2 การแบ่งประเภทของคุณภาพ

มาตรฐานของสถาบันปิโตรเลียมแห่งสหรัฐอเมริกา (API : The American Petroleum Institute) กำหนดคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นเป็น 2 กลุ่ม คือ

1) เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิงใช้สัญลักษณ์ "S" (Service qualifying for gasoline engines) นำหน้าและจะตามด้วยอักษรภาษาอังกฤษเริ่มต้นจาก A ยิ่งตัวอักษรที่ไกลมากขึ้น คุณภาพของน้ำมันก็จะสูงขึ้นไปด้วย ตัวอย่างเช่น SA SB SC SD SE SF

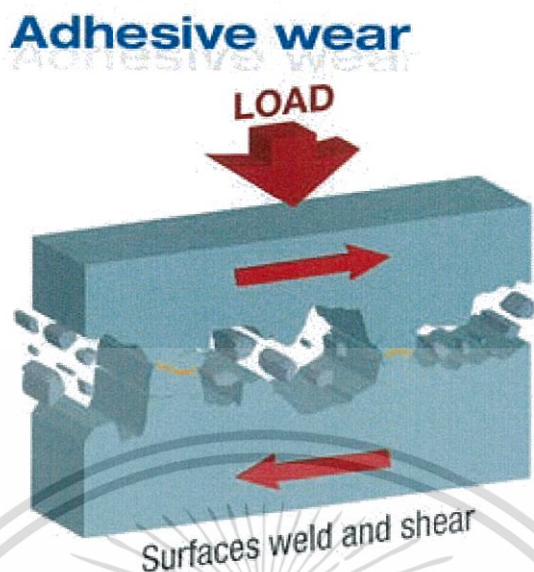
2) เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ใช้สัญลักษณ์ "C" (Commercial qualifying diesel engines) นำหน้าและจะตามด้วยอักษรภาษาอังกฤษเริ่มต้นจาก A ยิ่งตัวอักษรที่ไกลมากขึ้น คุณภาพของน้ำมันก็จะสูงขึ้นไปด้วยและบางครั้งก็มีเลข 4 ต่อท้ายเพิ่มเติมซึ่งเลข 4 หมายถึงใช้กับเครื่องยนต์แบบ 4 จังหวะ ตัวอย่างเช่น CA CB CC CD CE CF-4

2.1.4 กลไกการสึกหรอ[2-3]

กลไกการสึกหรอแบ่งออกได้ 4 กลไก คือ

2.1.4.1 กลไกการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear)

กลไกการสึกหรอแบบยึดติดเกิดขึ้นจากชิ้นงานที่มีหน้าสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานมีการเคลื่อนที่แนบติดกันทำให้ผิวหน้าชิ้นงานบางส่วนเกิดการฉีกขาดออกไปและเกิดการยึดติดบนผิวหน้าผิวชิ้นงานอีกชิ้นที่สัมผัสกัน ถ้ามองพื้นผิวหน้าชิ้นงานในระดับจุลภาคพื้นผิวจะมีความหยาบลักษณะคล้ายๆยอดแหลมของภูเขาสลับไปมาเรียกว่า "Asperities" ซึ่งส่วนนี้จะเป็นพื้นผิวที่รับภาระจริงของชิ้นงาน กลไกการสึกหรอแบบยึดติดส่วนมากพบได้บ่อยตอนเริ่มและตอนเลิกใช้งานเครื่องยนต์หรือช่วงที่มีความเร็วรอบต่ำ



รูปที่ 2.6 กลไกการสึกหรอแบบยึดติด [13]

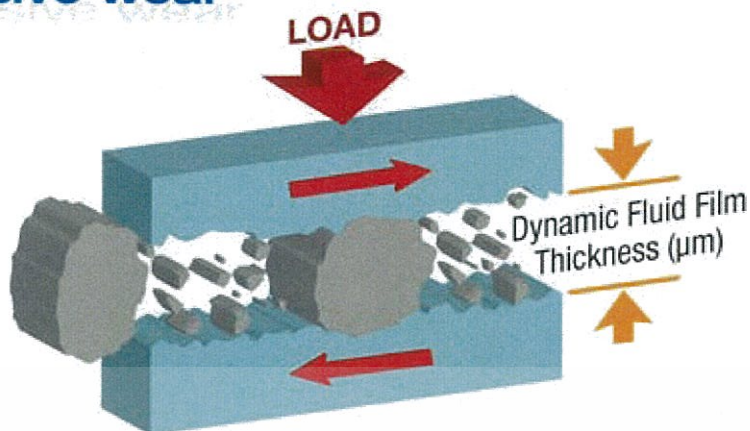
2.1.4.2 กลไกการสึกหรอแบบขูดขีด (Abrasive Wear)

กลไกการสึกหรอแบบขูดขีดเกิดจากสิ่งที่มีความแข็งสูงขูดขีดเนื้อวัสดุออกไป ลักษณะของเศษเนื้อวัสดุที่ถูกขูดขีดออกไปมีลักษณะเป็นเส้นๆ ม้วนตัวเป็นวงกลม กลไกการสึกหรอแบบขูดขีดสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) การขูดขีดแบบสองเนื้อ (Two Body Abrasion) : เป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นมีชิ้นงาน 2 ชิ้น เกิดการขัดถูกันซึ่งชิ้นงานที่มีความแข็งมากกว่าก็จะเป็นตัวขูดขีดผิวชิ้นงานของตัวที่มีความแข็งน้อยกว่า

2) การขูดขีดแบบสามเนื้อ (Three Body Abrasion) : เป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นมีชิ้นส่วน 3 ชิ้น เกิดจากการขัดถูกันของคู่ชิ้นงานและมีการปนเปื้อนสิ่งสกปรกที่มีความแข็งสูง เช่น ฝุ่นละออง เม็ดทราย เมื่อมันเข้าไปอยู่ข้างในระหว่างคู่ชิ้นงานมันจะทำให้เกิดการขูดขีดผิวชิ้นงานทั้งคู่ทำให้เกิดการสึกหรอ

Abrasive wear

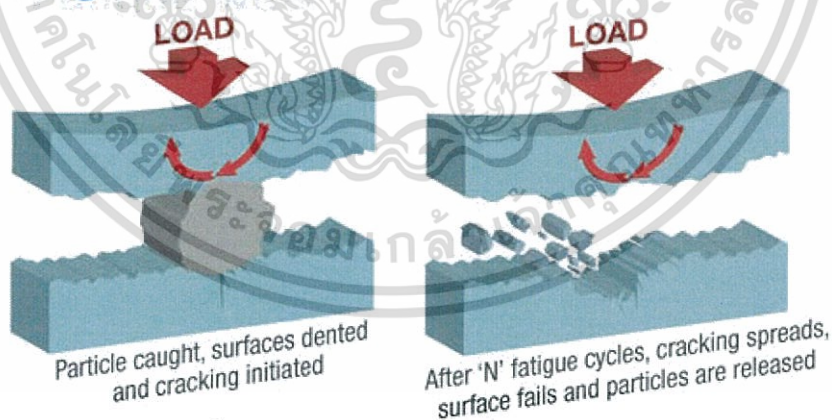


รูปที่ 2.7 กลไกการสึกหรอแบบขูดขีด [14]

2.1.4.3 กลไกการสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue Wear)

เกิดจากชิ้นงานรับภาระการกด (Compressive stress) สลับกับการดึง (Tensile stress) ซ้ำกันไปมา ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการหลุดร่อนออกไปของผิวชิ้นงานทำให้เกิดหลุมลึกบนผิวชิ้นงาน หรือมีสิ่งสกปรกที่มีความแข็งปนเปื้อนเข้าไปมันจะทำให้เกิดรอยกด (Dents) บนผิวชิ้นงาน เมื่อเวลานานไปจะเกิดรอยแตก (Crack) และหลุดออกมาเกิดเป็นหลุมบนผิวชิ้นงาน

Fatigue wear



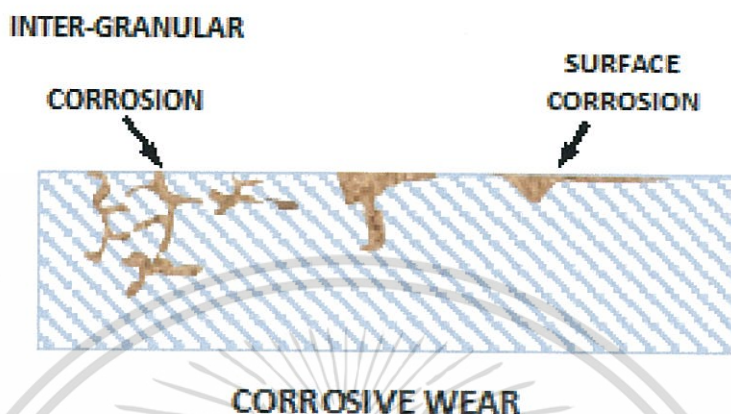
รูปที่ 2.8 กลไกการสึกหรอแบบล้าตัว [15]

2.1.4.4 กลไกการสึกหรอแบบปฏิกิริยาไทรโบเคมี (Tribo-Chemical Wear)

เกิดจากชิ้นงานมีการขัดถูกันทำให้เกิดเศษโลหะออกมาและเกิดผลพวงจากปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดสนิม องค์ประกอบที่เป็นตัวเร่งทำให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนเร็วขึ้นคือ

ความร้อน ความชื้น และเศษโลหะ ซึ่งเศษโลหะเป็นตัวเร่งทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นนั้นเนื่องจากมันจะ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ของเอกสารนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสออกซิเจนมากขึ้น องค์ประกอบทั้งหมดเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วจะส่งผลให้เกิดเป็นสนิม หรือเรียกกลไกการสึกหรอแบบว่า กลไกการสึกหรอแบบกัดกร่อน (Corrosive Wear)



รูปที่ 2.9 กลไกการสึกหรอแบบกัดกร่อน[16]

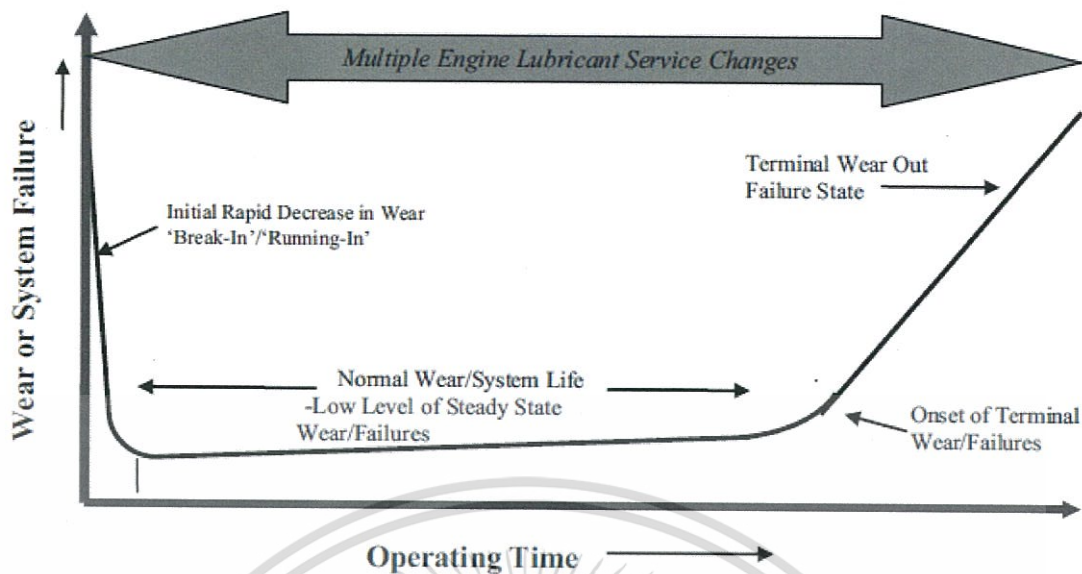
2.1.5 พฤติกรรมการสึกหรอ [1]

พฤติกรรมการสึกหรอแบ่งออกได้ 3 ช่วง คือ

1) การสึกหรอช่วงเริ่มต้น (Runing-In หรือ Break-In) : อัตราการสึกหรอช่วงเริ่มต้นค่อนข้างสูง ส่วนใหญ่การสึกหรอช่วงเริ่มต้นพบได้บ่อยในเครื่องยนต์ใหม่เนื่องจากเครื่องยนต์มีความหยาบของผิวสูงการขัดถูกันของยอดแหลมของผิวความหยาบที่รับภาระจริงจึงมากไปด้วยทำให้เศษโลหะสึกหรอออกมามากในช่วงระยะแรกหลังจากเวลาการใช้งานเครื่องยนต์ผ่านไปอัตราการสึกหรอก็จะเข้าสู่ภาวะปกติ

2) การสึกหรอช่วงปกติ (Normal Wear) : อัตราการสึกหรอช่วงนี้จะต่อเนื่องจากระยะการสึกหรอช่วงเริ่มต้น การสึกหรอช่วงปกติจะมีการสึกหรอทั้งแบบรุนแรงและไม่รุนแรงขึ้นอยู่กับบำรุงรักษาที่ดีตามคู่มือการใช้งานและการควบคุมสิ่งสกปรกปนเปื้อน ถ้าทำการบำรุงรักษาดีเครื่องยนต์ก็จะมีอายุการใช้งานเพิ่มมากขึ้น

3) ช่วงการสึกหรอ (Wear Out) : อัตราการสึกหรอช่วงนี้จะเพิ่มขึ้นจนถึงระดับอันตรายเนื่องจากอายุการใช้งานเป็นระยะที่ยาวนาน ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์เกิดการล้าตัว ต้องทำการซ่อมบำรุงหรือทำการเปลี่ยนชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ใหม่เพื่อป้องกันก่อนที่เครื่องยนต์จะพัง

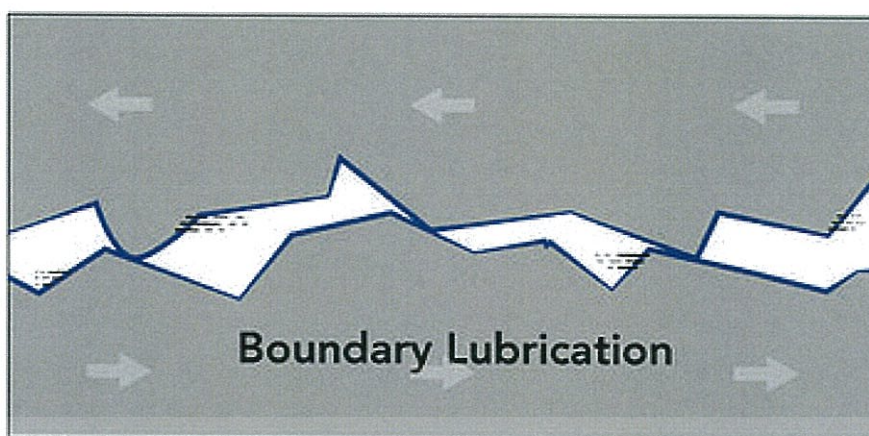


รูปที่ 2.10 พฤติกรรมการสึกหรอ[1]

2.1.6 ขอบเขตการหล่อลื่น[2-3]

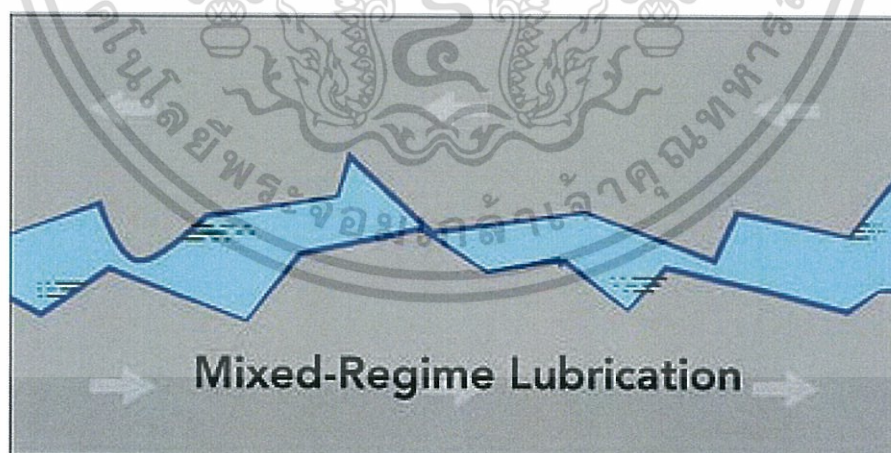
ขอบเขตการหล่อลื่นหลักๆแบ่งออกได้ 3 ขอบเขต ดังนี้

- 1) ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวนด์รี (Boundary Lubrication) : เป็นขอบเขตแรกที่เกิดต่อการขัดถูกันระหว่างผิวหน้าชิ้นงานกันโดยตรงโดยไม่มีสารหล่อลื่นเข้ามาช่วยในการหล่อลื่น หรือสถานะไร้สารหล่อลื่นทำให้เศษชิ้นงานที่หลุดออกมามีปริมาณมาก เศษชิ้นงานที่หลุดออกมาจะปกคลุมพื้นที่โดยรอบหน้าผิวชิ้นงานที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีหรือการดูดกลืนอะตอมซึ่งทำให้ชิ้นงานมีลักษณะของผิวประกอบไปด้วยสองชั้น ชั้นแรกเป็นชั้นของเนื้อชิ้นงานจะอยู่ด้านล่างและชั้นที่สองเป็นเศษของชิ้นงานซึ่งอยู่ชั้นบนสุดของชิ้นงานมีลักษณะเป็นเศษเนื้อชิ้นงานที่เกิดจากการขัดถูของชิ้นงานปกคลุมและมีค่าความต้านทานการเฉือนตัวที่ต่ำกว่าชั้นเนื้อชิ้นงาน เมื่อเกิดการขัดถูของชิ้นงานเกิดขึ้นชั้นนี้จะหลุดออกมาก่อนซึ่งมันจะช่วยในการหล่อลื่นระหว่างผิวหน้าชิ้นงาน



รูปที่ 2.11 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี [17]

2) ขอบเขตการหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์ (Mixed Film Lubrication) : เป็นขอบเขตการหล่อลื่นที่ผสมระหว่างการเคลื่อนที่ขีดยูของผิวชิ้นงานโดยตรงและการเคลื่อนที่ขีดยูของผิวชิ้นงานโดยมีแผ่นฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นแยกชิ้นงานออกจากกันหรือการเกิดสัมประสิทธิ์การเสียดทานในระหว่างผิวชิ้นงานและสัมประสิทธิ์การเสียดทานในชั้นสารหล่อลื่นสลับกันไป ทำให้เครื่องจักรกลสูญเสียกำลังทำงานไปแต่สัมประสิทธิ์การเสียดทานในภาพรวมของขอบเขตการหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์ต่ำกว่าขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี

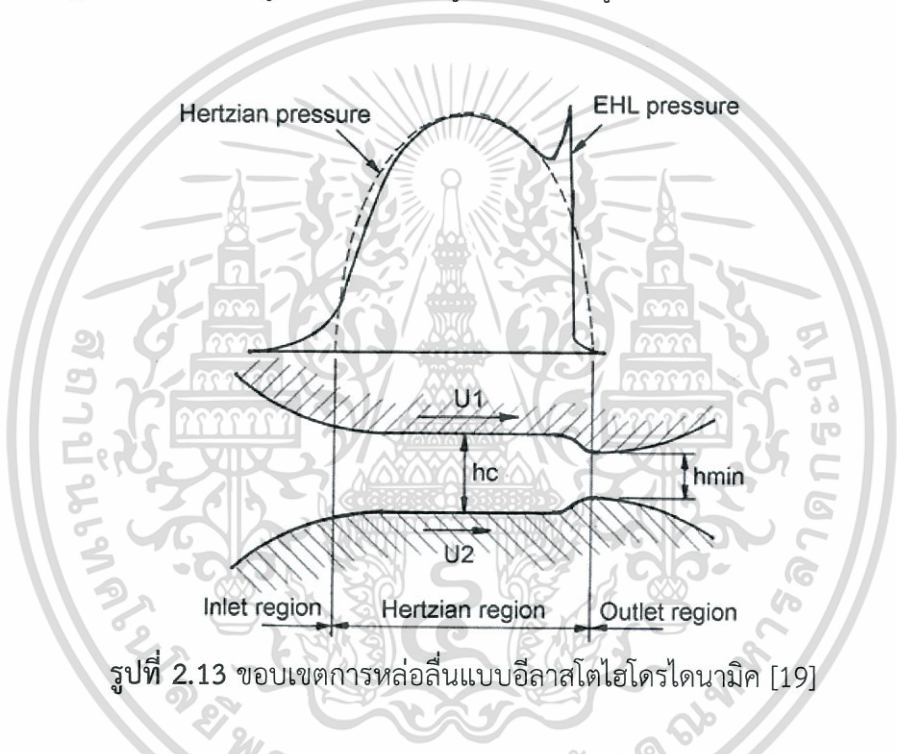


รูปที่ 2.12 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์ [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

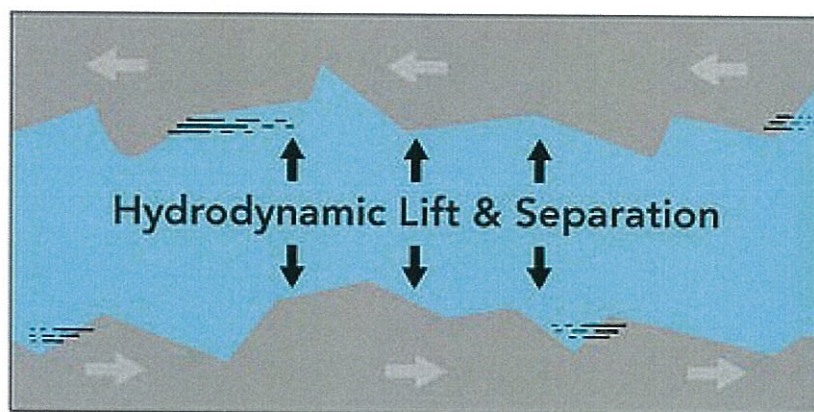
3) ขอบเขตการหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ (Full-film Lubrication) : เป็นขอบเขตที่มีการหล่อลื่นแบบเต็มฟิล์มหรือแผ่นฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นสามารถแยกชั้นของชิ้นงานทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานไม่สัมผัสกัน สัมประสิทธิ์การเสียดทานที่เกิดขึ้นนั้นมีเฉพาะสัมประสิทธิ์การเสียดทานในชั้นสารหล่อลื่นเท่านั้น สามารถแบ่งย่อยได้ดังนี้

- ขอบเขตการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก (Elastohydrodynamic Lubrication) : เป็นขอบเขตที่มีลักษณะของการถ่ายเทแรงเป็นจุดสัมผัสหรือเส้นสัมผัส น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านเข้าไปในพื้นที่นั้นจะได้รับการกดของชิ้นงานสูงถึง 10,000 บาร์ ตัวอย่างของลักษณะที่มีผิวคู่สัมผัสที่มีแรงกดสูงเช่น ฟันเฟือง ลูกเบี้ยว ตลับลูกปืน



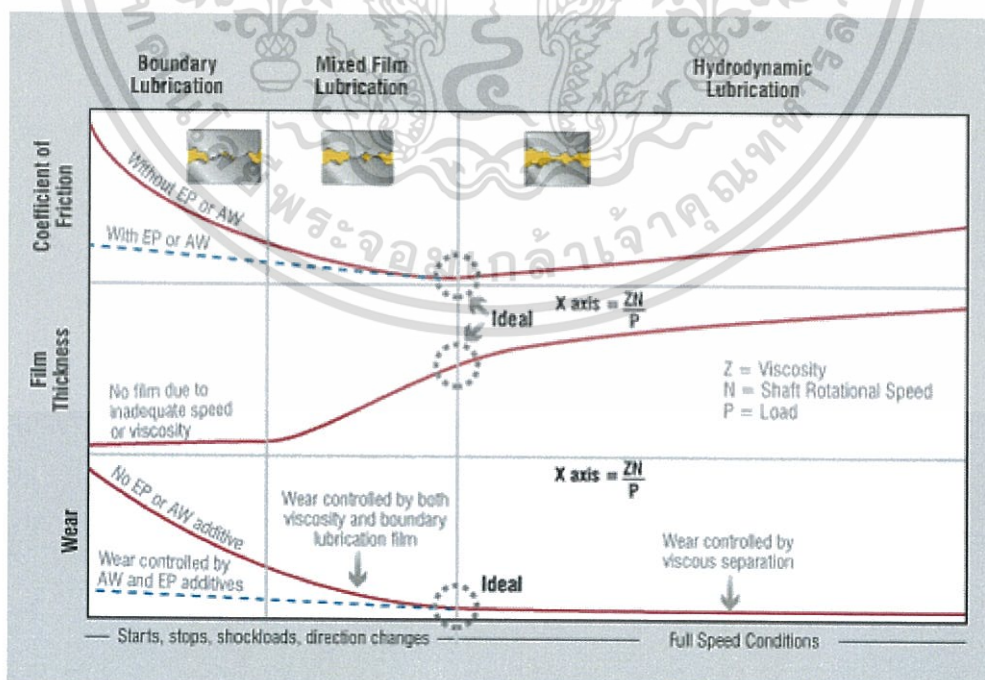
รูปที่ 2.13 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก [19]

- ขอบเขตการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic Lubrication) : เป็นขอบเขตที่เกิดจากการไหลของน้ำมันหล่อลื่นเข้าสู่ช่องแคบๆ ด้วยความเร็วสูงซึ่งช่องทางเข้าน้ำมันหล่อลื่นสามารถไหลเข้าได้มากกว่าไหลออก ส่งผลให้เกิดแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นขึ้นภายในช่องแคบที่น้ำมันหล่อลื่นไหลเข้าไป



รูปที่ 2.14 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก [20]

ความรู้และความเข้าใจเรื่องขอบเขตการหล่อลื่นในแบบต่าง ๆ นั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมากเพราะจะทำให้ทราบถึงการเลือกใช้สารหล่อลื่นที่เหมาะสมกับสภาวะการใช้งานของเครื่องจักรในสถานการณ์การใช้งานนั้นๆ เช่น ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารีมีค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานระหว่างผิวหน้าชิ้นงานที่สูง ฟิล์มน้ำมันบางมากหรือความหยาบของหน้าผิวสัมผัสของชิ้นงานมีค่ามากกว่าความหนาของแผ่นฟิลมน้ำมัน ส่งผลให้เศษชิ้นงานที่สึกหรอออกมาปริมาณสูง ซึ่งส่งผลให้ต้องทำการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์น้ำมันหล่อลื่นที่มีสารปรุงแต่งต่อต้านการสึกหรอและสารปรุงแต่งรับแรงกดสูง



รูปที่ 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขอบเขตการหล่อลื่น ความหนาของแผ่นฟิล์ม และการสึกหรอ

[21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.7 การเสียดทาน [2-3]

2.1.7.1 ความเสียดทานแบบไถล (Sliding Friction)

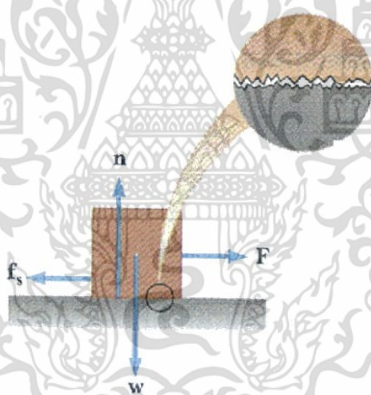
พื้นผิวชิ้นงานโดยทั่วไปถ้ามองดูด้วยตาเปล่าอาจจะคิดว่าเป็นพื้นผิวที่เรียบแต่ถ้ามองในระดับจุลภาพแล้วจะมีความเป็นคลื่นขรุขระอยู่ แรงเสียดทานจึงขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่มีผิวสัมผัสกันจริงถ้าต้องการให้เกิดการเคลื่อนที่ แรงที่ใช้ต้องมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวและพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปของผิวที่อ่อนกว่าดังสมการต่อไปนี้

$$F = F_a + F_d \quad (2.1)$$

โดยที่ F = แรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมผัส (N)

F_a = แรงยึดเหนี่ยว (N)

F_d = แรงในการเปลี่ยนรูปวัสดุ (N)



รูปที่ 2.16 แรงเสียดทานแบบไถล[22]

2.1.7.2 ความเสียดทานแบบกลิ้ง (Rolling Friction)

การเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างสองผิว การเคลื่อนที่แบบกลิ้งจะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าการเคลื่อนที่แบบไถลเพราะใช้พลังในการเคลื่อนที่ที่ต่ำกว่า การเคลื่อนที่แบบกลิ้งเกิดขึ้นในกรณีที่คู่สัมผัสมีลักษณะรูปร่างกลมหรือเกือบกลม ความแตกต่างของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งกับการเคลื่อนที่แบบไถลตรงที่ทิศทางการเข้าหา (Approach) และการเคลื่อนที่จาก (Separation) ของบริเวณสัมผัสซึ่งจะเกิดในทิศตั้งฉากกับผิว ไม่ได้เกิดในทิศขนานกับผิวเหมือนการไถล โดยสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแบบกลิ้งมีค่าดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{M_R}{F_N} = \frac{F_R}{F_N} \times r = \mu_R \quad (2.2)$$

โดยที่ M_R = โมเมนต์ของการต้านทานการเคลื่อนที่ (N.m)

F_R = แรงต้านทานการเคลื่อนที่ (N)

F_N = แรงกดในแนวตั้งฉากบนพื้นราบ (N)

μ_R = สัมประสิทธิ์การเสียดทานในการกลิ้ง (มีหน่วยมิติของค่าความยาว)

r = รัศมีของเม็ดทรงกลม (m)

โดยทั่วไปขณะที่เกิดการกลิ้งก็จะมีเคลื่อนที่แบบรวมด้วยคือ การกลิ้งและการไถลลักษณะแบบนี้เป็นการเคลื่อนที่ผสมกัน โดยสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแบบกลิ้งมีค่าดังต่อไปนี้

$$\mu_R = \frac{V_S}{V_R} \times \mu_K \quad (2.3)$$

โดยที่ V_S = ความเร็วของการไถล (m/s)

V_R = ความเร็วของการกลิ้ง (s^{-1})

μ_K = สัมประสิทธิ์การเสียดทานในการสั่นไถล



รูปที่ 2.17 แรงเสียดทานแบบกลิ้ง [23]

2.1.8 ระดับการทดสอบระบบทางวิศวกรรม [4]

ลักษณะการทดสอบระบบหรือเครื่องยนต์ เครื่องจักรกล ทางวิศวกรรมมีระดับการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) การทดสอบภาคสนาม (Field Test)
- 2) การทดสอบบนแท่นทดสอบ (Bench Test)
- 3) การทดสอบบนระบบย่อย (Subsystem Test)
- 4) การทดสอบในระดับชิ้นส่วนย่อย (Component Test)
- 5) การทดสอบในระดับชิ้นส่วนย่อยอย่างง่าย (Simplified Component Test)
- 6) การทดสอบในระดับการจำลองด้านโทรโบโลยี (Model Test or Tribotest)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว [7]

การวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้วเป็นการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงไปของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (New Oil) เพื่อนำมาวิเคราะห์ ประเมิน หรือใช้ประโยชน์ในแง่ของการควบคุมคุณภาพ ประเมินสมรรถนะของน้ำมันหล่อลื่น ในการตรวจวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นถูกพิจารณาออกเป็น 3 แนวทางหลักๆดังนี้

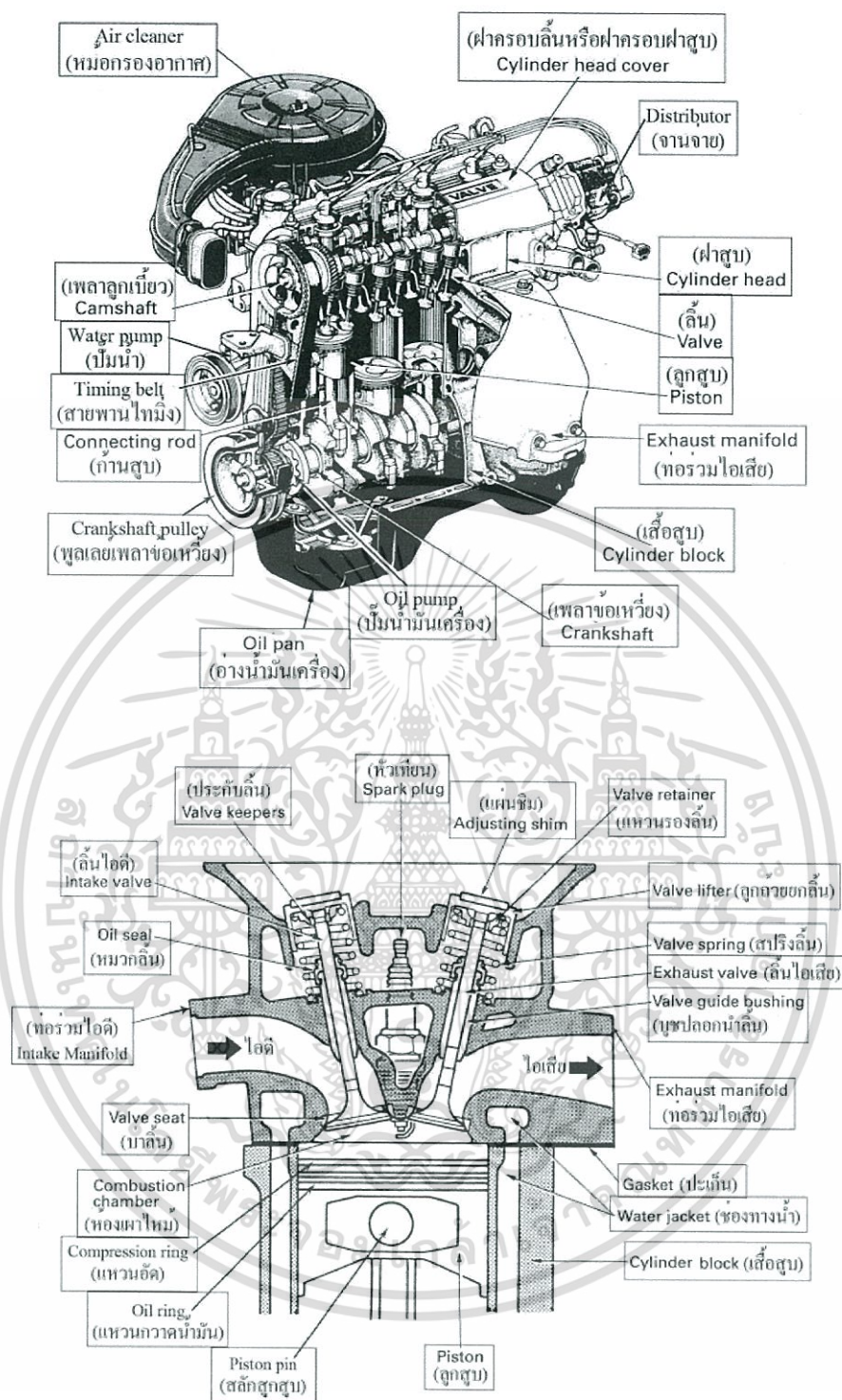
2.2.1 เศษโลหะสึกหรอ (Wear Condition)

เป็นการตรวจวิเคราะห์ถึงปริมาณธาตุของเศษโลหะสึกหรอที่สึกหรอออกมาปะปนในน้ำมันหล่อลื่นซึ่งเกิดจากกลไกการสึกหรอในรูปแบบต่างๆที่มาจากการขัดถูกันของชิ้นงาน สารเคมีปรุงแต่งและจากสิ่งสกปรกปนเปื้อน ตัวอย่างของธาตุที่ตรวจพบ เช่น เหล็ก ตะกั่ว ดีบุก ฯลฯ ซึ่งส่งผลให้ทราบถึงแหล่งที่มาของธาตุนั้นๆในการตรวจวิเคราะห์ถึงปริมาณธาตุของเศษโลหะสึกหรอ วิเคราะห์ด้วยสเปกโตรมิเตอร์ (Elemental Spectroscopy) ชนิด AES (Atomic Emission Spectroscopy) ตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) D6595

ตารางที่ 2.1 แสดงแหล่งที่มาของธาตุในการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว [5,24]

วัสดุ	แหล่งที่มา
เหล็ก	เสื่อสูบ , แหวนลูกสูบ , เพลาารางวิ่งรองลิ้น , เม็ดลูกกลิ้ง
โครเมียม	เสื่อสูบ , แหวนลูกสูบ , ปลอกสลักข้อต่อก้านสูบ
ตะกั่ว	วัสดุรองลิ้น , โลหะบัดกรี , น้ำมันเชื้อเพลิง
ทองแดง	ลิ้นไอดีลิ้นไอเสีย , ปลอกนำเลื่อนลิ้นไอดีลิ้นไอเสีย
ดีบุก	ก้านสูบ , ปลอกก้านสูบลูกสูบ , แหวนและสลัก
อลูมิเนียม	ลูกสูบ , แบริงเพลลาข้อเหวี่ยง , รั้งของรองเลื่อนแบบกลิ้ง
นิกเกิล	ผิวรองลิ้นแบบกาบ , ไบพัตเทอร์ไบน์
เงิน	ผิวรองลิ้น , การบัดกรีเงิน , รองลิ้นเพลลาข้อเหวี่ยง
โมลบดีนัม	สารปรุงแตงน้ำมันหล่อลื่น , แหวนลูกสูบ
ไททานเนียม	ไบพัตเทอร์ไบน์ , ชิ้นส่วนเครื่องบินเจ็ต
ซิลิกอน	เม็ดทราย , ฝุ่นผง , สารปรุงแตงต่อต้านฟอง
โบรอน	ฝุ่นผง , ซีล , น้ำหล่อเย็น
แมกนีเซียม	สารปรุงแตงน้ำมันหล่อลื่น , ชิ้นส่วนเครื่องกลอากาศยาน
แคลเซียม	รองลิ้น , สารปรุงแตงน้ำมันหล่อลื่น
แบเรียม	สารปรุงแตงน้ำมันหล่อลื่น
ฟอสฟอรัส	สารปรุงแตงน้ำมันหล่อลื่น , น้ำหล่อเย็น
สังกะสี	สารปรุงแตงน้ำมันหล่อลื่น , รองลิ้นแบบกาบ , ซีลยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



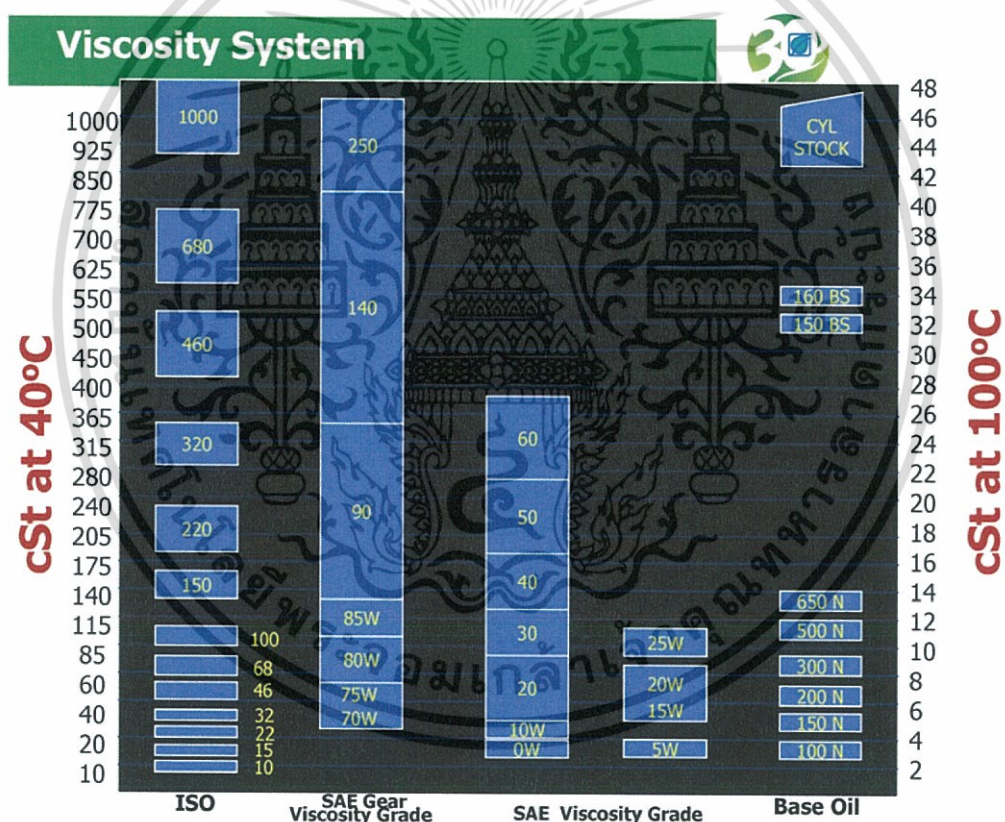
รูปที่ 2.18 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องยนต์ [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น (Oil Condition)

เป็นการตรวจวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับน้ำมันใหม่มีการตรวจวัดตามคุณสมบัติต่อไปนี้

- ความหนืด (Viscosity) : ค่าความต้านทานการไหลมีหน่วยเป็น cSt (centiStoke) ซึ่งความข้นและความใสของน้ำมันหล่อลื่นโดยวัดที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งซึ่งในมาตรฐาน ISO และ SAE วัดที่ 40 และ 100 องศาเซลเซียสตามลำดับ ถ้าน้ำมันหล่อลื่นใส (ค่า viscosity น้อย) แสดงว่าไหลง่ายชั้นฟิล์มของน้ำมันก็จะบาง ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมันหล่อลื่นข้น (ค่า viscosity มาก) จะไหลยากชั้นฟิล์มของน้ำมันก็จะหนา โดยปกติทั่วไปการทดสอบที่พบบ่อยคือ มาตรฐาน ASTM D445



รูปที่ 2.19 ค่าความหนืดตามมาตรฐานต่างๆ [26]

- ออกซิเดชัน (Oxidation) : เป็นการตรวจวัดการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นเนื่องจากอายุการใช้งานที่นานและน้ำมันหล่อลื่นต้องรับแรงกด อุณหภูมิที่สูง ทำให้ค่าออกซิเดชันเพิ่มขึ้น มีหน่วยวัดออกมาเป็น Abs (absorbance) ใช้เครื่องมือ FTIR (Fourier-Transform Infrared) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Spectroscopy) ความยาวคลื่นของค่าออกซิเดชันคือ 1798 to 1670 cm^{-1} ตามมาตรฐาน ASTM E2412M

- ไนเตรชัน (Nitration) : เป็นการตรวจวัดการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นเนื่องจากการสันดาปภายในเครื่องยนต์ระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ผลผลิตเกิดการรั่วเล็ดรอตลอดผ่านทางแหวนลูกสูบ ทำให้ค่าไนเตรชันเพิ่มสูงขึ้น มีหน่วยวัดออกมาเป็น Abs ใช้เครื่องมือ FTIR ความยาวคลื่นของค่าไนเตรชันคือ 1650 to 1600 cm^{-1} ตามมาตรฐาน ASTM E2412M

- ค่าความเป็นด่าง (TBN : Total Base Number) : เป็นการตรวจวัดค่าความเป็นด่างที่เหลืออยู่ในน้ำมันหล่อลื่น เมื่อใดค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้นค่าความเป็นด่างก็จะลดลงเพราะในขณะการเกิดการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จะมีค่าความเป็นกรดเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรุนแรงและการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ ASTM D4739

- จุดวาบไฟ (Flash Point) : เป็นการตรวจวัดการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงในน้ำมันหล่อลื่น ส่งผลให้ค่าความหนืดลดลงและเสี่ยงต่อการติดไฟได้เร็วกว่าปกติ มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ ASTM D3828

- ดัชนีความหนืด (Viscosity Index) : ค่าความต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งเป็นตัวเลขที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิหรือน้ำมันหล่อลื่นมีค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงต่ำเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นแสดงว่าค่าดัชนีความหนืดสูงในทางตรงกันข้าม ถ้า น้ำมันหล่อลื่นมีค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงสูงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นแสดงว่าค่าดัชนีความหนืดต่ำ มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ ASTM D2270

2.2.3 การปนเปื้อน (Contamination)

การปนเปื้อนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งต่อการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นและการสึกหรอของเครื่องยนต์ซึ่งการปนเปื้อนมีการปนเปื้อนได้จากแหล่งที่มาจากทั้งภายนอกและภายในเครื่องยนต์ มีดังต่อไปนี้

- น้ำ (Water) : น้ำหรือความชื้นเป็นสิ่งที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นเป็นอย่างมากและการสึกหรอของเครื่องยนต์เป็นอย่างมากเพราะเมื่อน้ำปนเปื้อนเข้าไปในเครื่องยนต์กับน้ำมันหล่อลื่นจะทำให้แผ่นฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นด้อยประสิทธิภาพส่งผลให้ผิวของชิ้นงานมีโอกาสเกิดการสึกหรอแบบยึดติด ขูดขีด และล้าตัว นอกจากนั้นยังส่งผลให้เกิดสนิมเหล็กและค่าความเป็นกรดที่สูงขึ้นเนื่องจากมีน้ำปนเปื้อนเปื้อน มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ ASTM E2412M

- น้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel) : น้ำมันเชื้อเพลิงปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นโดยการผ่านแหวน ลูกสูบขณะเกิดกระบวนการเผาไหม้ส่งผลให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นลดต่ำลง การปกป้องชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ก็จะลดต่ำลงไปด้วยทำให้การสึกหรอเพิ่มมากขึ้น มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ ASTM E2412M

- เขม่า (Soot) : เขม่าเป็นผลผลิตมาจากกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เมื่ออายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นมากขึ้นเขม่าก็จะมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นตาม ซึ่งเขม่าจะส่งผลเสียให้น้ำมันหล่อลื่นหนืดขึ้นและส่งผลทำให้เครื่องยนต์ร้อนขึ้นเพราะไม่สามารถเข้าไปหล่อลื่นชิ้นส่วนที่เกิดความร้อนได้ทันเนื่องจากไหลช้าขึ้นและเกิดการสึกหรอมากขึ้นเนื่องจากเขม่าจับตัวกันเป็นก้อนส่งผลให้เกิดกลไกการขูดขีดมากขึ้น มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ ASTM E2412M

- อนุภาคสิ่งสกปรกและฝุ่นละออง (Silicon) : มักเป็นองค์ประกอบที่ทำให้ชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องยนต์สึกหรอ ระดับความรุนแรงขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง ความแข็ง เนื่องจากเมื่ออนุภาคสิ่งสกปรกและฝุ่นละอองเข้าไปในเครื่องยนต์ระหว่างหน้าผิวสัมผัสที่กำลังมีการเคลื่อนที่อนุภาคเหล่านี้จะส่งผลให้เกิดการขีดข่วนของหน้าผิวชิ้นงานหรือภายใต้การเคลื่อนที่แบบกึ่งตัวอนุภาคสิ่งสกปรกและฝุ่นละอองจะส่งผลให้ผิวชิ้นงานเกิดการล้าตัว มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ ASTM E2412M

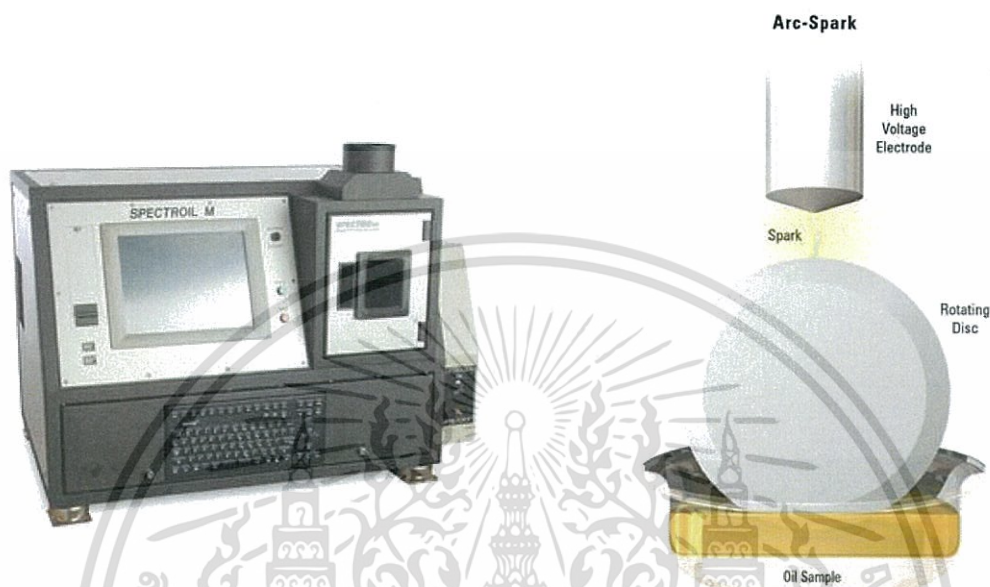
2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว [7]

2.3.1 การตรวจวิเคราะห์ธาตุด้วยสเปกโตรมิเตอร์ (Elemental Spectroscopy)

การตรวจวิเคราะห์ธาตุด้วยสเปกโตรมิเตอร์ใช้หลักการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกับน้ำมันหล่อลื่นตัวอย่างทำให้อะตอมของธาตุต่างๆในน้ำมันหล่อลื่นระเหยตัวและพลังงานจะถูกปลดปล่อยออกมาในลักษณะของแสง ซึ่งธาตุแต่ละธาตุจะมีแสงที่มีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันสเปกโตรมิเตอร์จะสามารถตรวจวัดชนิดของธาตุได้ตามความยาวคลื่นเฉพาะของแต่ละธาตุและความเข้มของแสงจะบ่งบอกถึงปริมาณของธาตุแต่ละธาตุ เช่น เหล็ก ตะกั่ว ดีบุก ฯลฯ หน่วยของค่าวัดจะเป็นส่วนในล้านส่วนน้ำมันหล่อลื่น (ppm : part per million) ธาตุโลหะที่วิเคราะห์ได้อาจจำแนกตามการเกิดได้ 3 กลุ่ม ตามแหล่งที่มาคือ ธาตุโลหะจากการสึกหรอ ธาตุโลหะจากสิ่งสกปรก และธาตุโลหะจากสารปรุงแต่ง ในการตรวจวิเคราะห์ธาตุใช้เครื่องมือ ดังต่อไปนี้

- RDE (Rotating Disk Electrode) : ตัวอย่างของน้ำมันหล่อลื่นจะถูกอาร์คของขั้วอิเล็กโทรดที่อุณหภูมิสูง โดยใช้จานหมุนที่ทำจากวัสดุคาร์บอนซึ่งจะจมอยู่ในสถานะบรรจุน้ำมัน ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานนี้จะชักนำเอาตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นขึ้น เมื่อเกิดการอาร์คอะตอมของธาตุที่ได้รับพลังงานความร้อนอย่างรุนแรงทำให้อิเล็กตรอนนอกสุดหลุดออกจากวงโคจรและมีการรังสีที่ความยาวคลื่นเฉพาะของธาตุนั้นๆ การตรวจวิเคราะห์ธาตุด้วยRDE สามารถตรวจวัดขนาดได้น้อยกว่า 8 ไมโครเมตร



a) เครื่อง RDE [27]

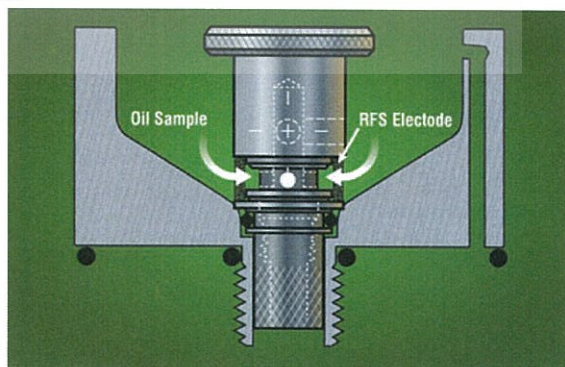
b) ลักษณะภายในของเครื่อง RDE [28]

รูปที่ 2.20 หลักการทำงานของ RDE

- RFS (Rotrode Filter Spectroscopy) : ตัวอย่างของน้ำมันหล่อลื่นจะถูกอาร์คของขั้วอิเล็กโทรดที่อุณหภูมิสูง โดยใช้จานหมุนที่ทำจากวัสดุคาร์บอนแต่ด้านขอบของจานมีลักษณะพิเศษเป็นไส้กรองซึ่งจะทำการกรองก่อนแล้วจึงค่อยไปทำการอาร์คลักษณะเหมือนกับRDE แต่การตรวจวิเคราะห์ธาตุด้วยRFS สามารถตรวจวัดขนาดได้ใหญ่กว่าRDE ตั้งแต่ 5-100 ไมโครเมตร



a) เครื่อง RFS [29]



b) ลักษณะภายในของเครื่อง RFS [30]

รูปที่ 2.21 หลักการทำงานของ RFS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การตรวจวิเคราะห์ความหนืด (Elemental Spectroscopy)

- เครื่องวัดค่าความหนืด (Viscometer) : ความหนืดคือค่าความต้านทานการไหลภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลกหรือคุณสมบัติของสารหล่อลื่นซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของแรงกระทำ เครื่องวัดความหนืดมีลักษณะเป็นหลอดแก้วยาวคงที่เพราะต้องทำให้เกิดการไหลแบบราบเรียบ โดยที่มีการควบคุมความดันและอุณหภูมิคงที่ ค่าเวลา (วินาที) ที่วัดได้ตั้งแต่เริ่มการไหลจุดแรกถึงจุดสุดท้าย เมื่อนำค่าเวลาที่ได้ออกมาคูณกับค่าคงที่ของหลอดทดสอบผลที่ได้จะมีหน่วยเป็นเซนติสโตกรก



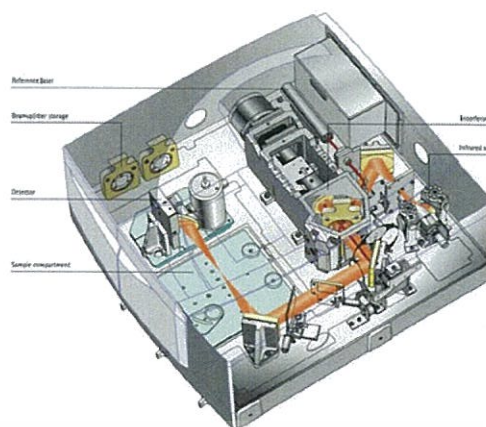
รูปที่ 2.22 เครื่องวัดค่าความหนืด (Viscometer) [31]

2.3.3 การวิเคราะห์คลื่นรังสีได้แดง

- FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer) : เป็นเครื่องมือที่สามารถจำแนกประเภทของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส เช่น เหม่า น้ำ ไกลคอล น้ำมันเชื้อเพลิง สารปรุงแต่งต่อต้านการสึกหรอ โซลเว้นท์ สารปรุงแต่ง สสารที่เกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปฏิกิริยาไนเตรชัน โดยFTIR จะมีการส่งผ่านคลื่นรังสีได้แดงผ่านไปยังฟิล์มของน้ำมันตัวอย่างซึ่งประเภทของสารต่างๆจะมีการดูดกลืนพลังงานของคลื่นรังสีได้แดงที่แตกต่างกันหรือความถี่ของคลื่นที่ต่างกันส่งผลให้ทราบถึงประเภทของสารและปริมาณของสารต่างๆ ได้โดยการเปรียบเทียบน้ำมันหล่อลื่นใหม่



a) เครื่อง FTIR [32]



b) ลักษณะภายในของเครื่อง FTIR [33]

รูปที่ 2.23 หลักการทำงานของ FTIR

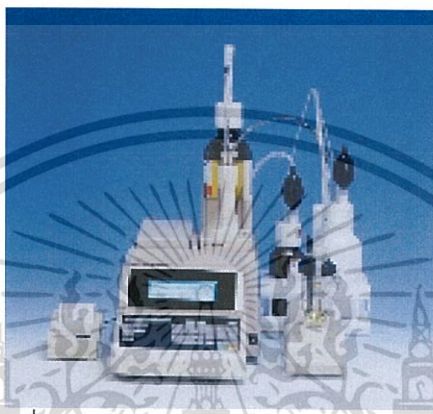
ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ค่าหมายเลขคลื่นของ FTIR [7,24]

พารามิเตอร์	ความยาวคลื่น (Wave number , cm^{-1})
ออกซิเดชัน	น้ำมันแร่ - 1750 เอสเทอร์ (อินทรีย์) - 3540 ฟอสเฟสเอสเทอร์ - 815
ซัลเฟชัน	1150
ไนเตรชัน	1630
เขม่า	2000
น้ำ	น้ำมันแร่ - 3400 เอสเทอร์ (อินทรีย์) - 3625
ไกลคอล	880 , 3400 , 1040 และ 1080
น้ำมันเชื้อเพลิง	ดีเซล - 800 เบนซิน - 750 น้ำมันเครื่องบิน - 795 ถึง 815
สารยับยั้งออกซิเดชัน - ฟีนอล	3650
สารต่อต้านการสึกหรอ -ต่อต้านออกซิเดชัน : ZDDP (Zinc Dialkyl Dithio Phosphate)	980

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 การตรวจวิเคราะห์ความเป็นต่าง

- เครื่องวัดค่าความเป็นต่าง (Potentionmetric) : เป็นเครื่องมือที่วัดค่าความเป็นต่างที่เหลืออยู่ในน้ำมันหล่อโดยใช้หลักการตรวจสอบจุดสะเทินด้วยการวัดทางไฟฟ้า หน่วยของการตรวจวัดความเป็นต่างคือ mgKOH/g ซึ่งมีหน่วยเหมือนกับค่า TAN ซึ่งค่า KOH ที่ใช้ในการหาจุดสะเทินของ TBN นั้นคือการนำ KOH ไปทำการไทเทรชันกับ HCl เพื่อหาจุดสะเทิน



รูปที่ 2.24 เครื่องวัดค่าความเป็นต่าง (Potentionmetric) [34]

2.3.5 การตรวจวิเคราะห์จุดวาวไฟ

- เครื่องวัดจุดวาวไฟ (Small Scale Closed Cup Tester) : เป็นเครื่องมือที่มีหลักการให้ความร้อนกับน้ำมันตัวอย่างจนทำให้เกิดไอน้ำมันหล่อลื่นผสมกับบรรยากาศภายในถ้วยแล้วจะเกิดการลุกวาวของไฟเมื่อเอาไฟเข้าไปใกล้ การทดสอบนี้ทำให้ทราบถึงการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงในน้ำมันหล่อลื่นส่งผลให้ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นลดลง การปกป้องชิ้นงานน้อยลงทำให้การสึกหรอมากขึ้นและเสี่ยงต่อการติดไฟ



รูปที่ 2.25 เครื่องวัดจุดวาวไฟ (Small Scale Closed Cup Tester) [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นใจในประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ใ้กรองน้ำมันหล่อลื่น [7]

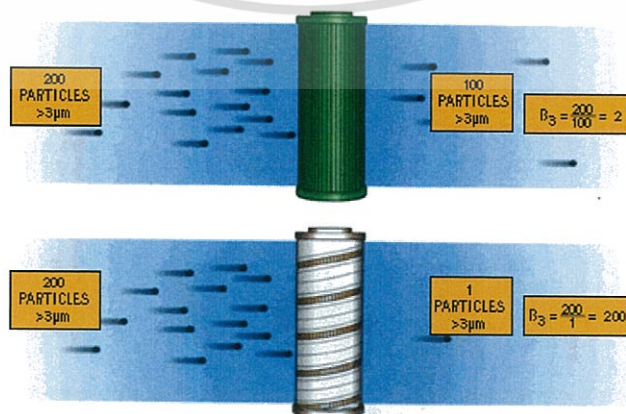
ใ้กรองน้ำมันหล่อลื่นมีหน้าที่ขจัดสิ่งสกปรกปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งถ้าสิ่งสกปรกปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นในปริมาณมากก็จะส่งผลให้เครื่องยนต์เกิดกลไกการสึกหรอมากขึ้น การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อเร็วขึ้น ใ้กรองที่มักนำมาใช้ในการกรองอนุภาคต่างๆ เช่น ใ้กรองที่ทำจากเยื่อเซลลูโลส (Cellulose fiber media filter) ใ้กรองที่ทำมาจากไมโครไฟเบอร์กลาส (Micro-fiberglass media filters) ซึ่งใ้กรองแบบไมโครไฟเบอร์กลาสจะมีประสิทธิภาพที่สูงมากกว่าใ้กรองที่ทำจากเยื่อเซลลูโลส ซึ่งการวัดประสิทธิภาพของใ้กรองนั้นจะมีประสิทธิภาพดีหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการดักจับยิ่งดักจับได้มากยิ่งดีและความดันตกคร่อมใ้กรองยิ่งน้อยยิ่งดี ความสามารถในการดักจับของใ้กรองหรือเบต้า (β_x) ตามสมการด้านล่าง

$$\beta_x = \frac{\text{Up Stream}}{\text{Down Stream}} \quad (2.4)$$

โดยที่ β_x = อัตราส่วนเบต้าของกรองที่ขนาดอนุภาค X ไมครอน
 Up Stream = จำนวนอนุภาคก่อนเข้ากรอง
 Down Stream = จำนวนอนุภาคหลังออกจากกรอง

แล้วสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพในการดักจับของกรอง (% Capture Efficiency) ได้ตามสมการด้านล่างนี้

$$\% \text{ Capture Efficiency} = \left(\frac{\beta_x - 1}{\beta_x} \right) \times 100 \quad (2.5)$$



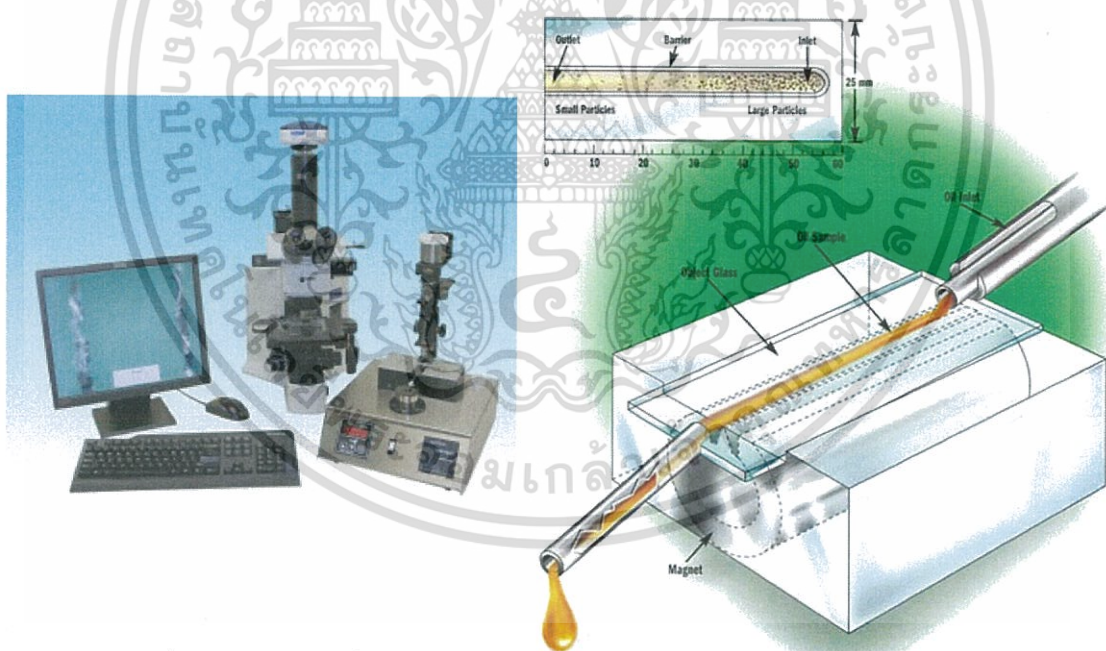
รูปที่ 2.26 อัตราส่วนเบต้าของกรองที่ขนาดอนุภาคขนาดมากกว่า 3 ไมครอน [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การวิเคราะห์ รูปร่าง ขนาด พื้นผิว และชนิดของธาตุ

2.5.1 การวิเคราะห์ด้วยเฟอร์โรกราฟี (Ferrogaphy)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์อนุภาคเศษโลหะสึกหรอที่มีประสิทธิภาพสูงทำให้ทราบถึงขนาด รูปร่าง ผิวและปริมาณของเศษโลหะ หลักการทำงานของเฟอร์โรกราฟีนั้นน้ำมันหล่อลื่นตัวอย่างจะถูกบังคับให้ไหลผ่านแผ่นสไลด์ซึ่งข้างล่างของแผ่นสไลด์จะมีแม่เหล็กประสิทธิภาพสูงอยู่ มีหน้าที่ดูดเศษโลหะสึกหรอที่เคลื่อนตัวผ่านสไลด์ให้ติดอยู่ด้านบนสไลด์ส่งผลให้เศษโลหะสึกหรอที่มีขนาดใหญ่จะติดอยู่ด้านบนสไลด์ส่วนอนุภาคเศษโลหะสึกหรอขนาดเล็กติดอยู่ด้านล่างสไลด์ เมื่อนำแผ่นสไลด์มาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยายต่างๆจะทำให้ทราบถึง ขนาด รูปร่าง สี และชนิดของกลไกการสึกหรอในรูปแบบต่างๆ ซึ่งเฟอร์โรแกรม (Ferrogram) สามารถตรวจวัดขนาดของอนุภาคเศษโลหะได้โดยประมาณตั้งแต่ 8 - 1,000 ไมโครเมตร ส่วนฟิลเตอร์แกรม (Filtergram) สามารถตรวจวัดขนาดของอนุภาคเศษโลหะได้โดยประมาณตั้งแต่ 2 - 1,000 ไมโครเมตร

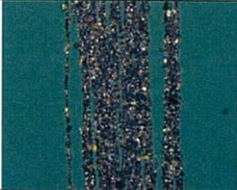
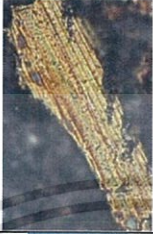
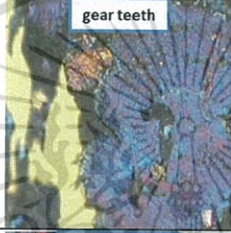
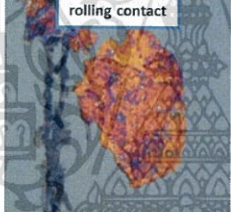
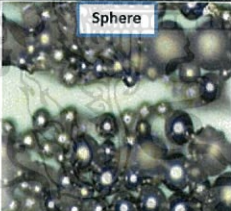

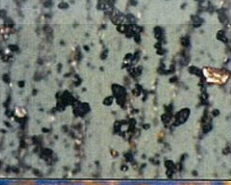
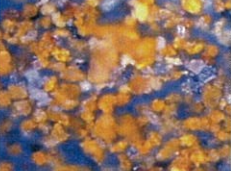


a) เครื่องเฟอร์โรกราฟี [37]

b) หลักการทำงานของเครื่องเฟอร์โรกราฟี [38]

รูปที่ 2.27 หลักทำงานการวิเคราะห์อนุภาคเศษโลหะด้วยเฟอร์โรกราฟี

ตารางที่ 2.3 ลักษณะของเศษโลหะที่สึกหรอและอนุภาคต่างๆที่ไม่ใช่โลหะ [7,39]

ชนิด	รูปร่างลักษณะ	อธิบาย
Normal Rubbing Wear		เกิดขึ้นได้จากผลการถูไถอย่างสภาพปกติขนาดน้อยกว่า 15 μm
Sliding Wear		เกิดจากการสั่นไถอย่างรุนแรง จะเกิดขึ้นภายใต้ สภาวะที่ภาระสูง และ/หรือ ความเร็วสูงเกินไป เป็นการสึกหรอที่ผิดปกติ
Fatigue Wear		เศษโลหะสึกหรอแบบล้าตัวและขูดขีดของผิวสัมผัสเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ขบกันของฟันเฟือง
		เศษโลหะสึกหรอแบบล้าตัวของผิวสัมผัสเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของเม็ดลูกกลิ้ง
		เศษโลหะสึกหรอแบบล้าตัวของเม็ดลูกกลิ้ง เกิดจากการล้าตัวของเม็ดลูกกลิ้ง อาจควบคุมมากับการปนเปื้อนสิ่งสกปรก ซึ่งเป็นตัวเร่งให้เกิดการล้าตัวที่มากขึ้น
Cutting Wear		เกิดขึ้นเนื่องจากมีอนุภาคสิ่งสกปรกที่มีลักษณะขูดขีดปนเปื้อนในระบบหล่อลื่น
Black Oxides		เกิดขึ้นโดยผลของ ความร้อนจัด และ / หรือ ภาระสูงและ/ หรือ การขาดน้ำมันอย่างรุนแรง
Red Oxides		เกิดขึ้นโดยความชื้นหรือน้ำปนเปื้อนในระบบหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

ชนิด	รูปร่างลักษณะ	อธิบาย
Corrosive Wear		เกิดขึ้นโดยจากน้ำมันหล่อลื่นมีสภาพที่เป็นกรดโจมตีผิวสัมผัสที่สึกหรอ
Dirt and Dust		อนุภาคสิ่งสกปรก เช่น ฝุ่นละออง อนุภาคเม็ดทราย เกิดโดยการเสียดลัดเข้ามาในระบบหล่อลื่น

2.5.2 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM : Optical Microscope)

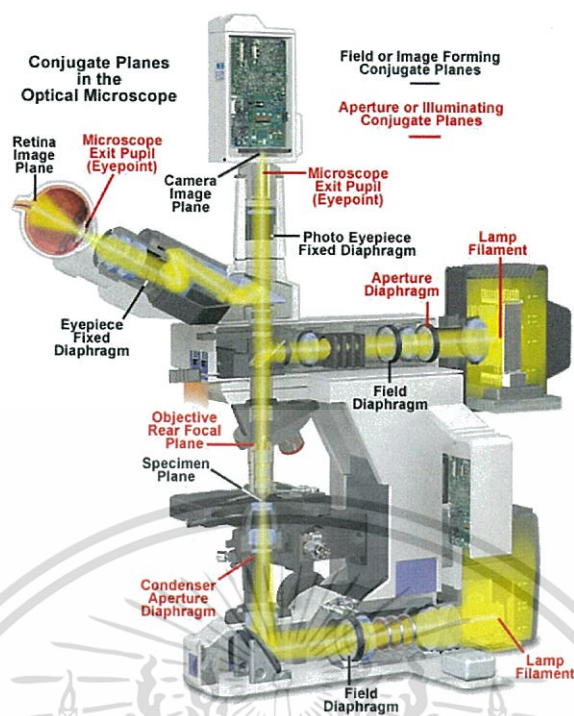
เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ขนาด รูปร่าง ผิว ของชิ้นงาน กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงสามารถขยายภาพของวัตถุในระดับ 10 - 1,000 เท่า กล้องรุ่น Huvitz HRM-300 สามารถถ่ายภาพได้ทั้ง 2 มิติ(ด้านกว้างและยาว) และ 3 มิติ(ด้านกว้าง ยาว และลึก)โดยใช้หลักการวัดระดับความเข้มของแสงที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งเลนส์ของกล้องรุ่นนี้สามารถจดจำระดับความเข้มของแสงของแต่ละกำลังขยายได้ ทำให้กล้องรุ่นนี้สามารถสร้างภาพ 3 มิติ ออกมาได้และสามารถดูภาพตัดขวางของภาพนั้นส่งผลให้สามารถทราบถึงค่าความหยาบโดยเฉลี่ยได้ โดยคำนวณจากสมการด้านล่าง ดังนี้

$$R = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{n} \quad (2.6)$$

โดยที่ R = ค่าเฉลี่ยความหยาบผิวทางเลขคณิต
(Mean Roughness Value)

h_n = ผลต่างของค่าความสูงระหว่างจุดสูงกับจุดต่ำ

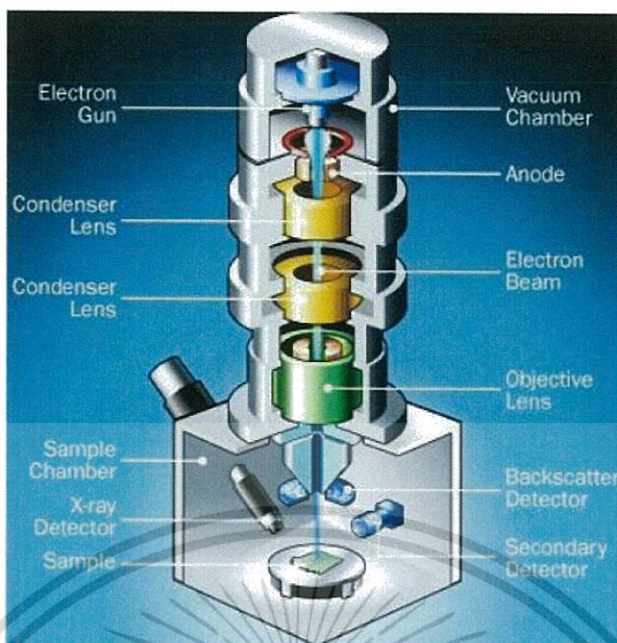
n = จำนวนที่ทำการวัด



รูปที่ 2.28 หลักทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [40]

2.5.3 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM : Scanning Electron Microscope)

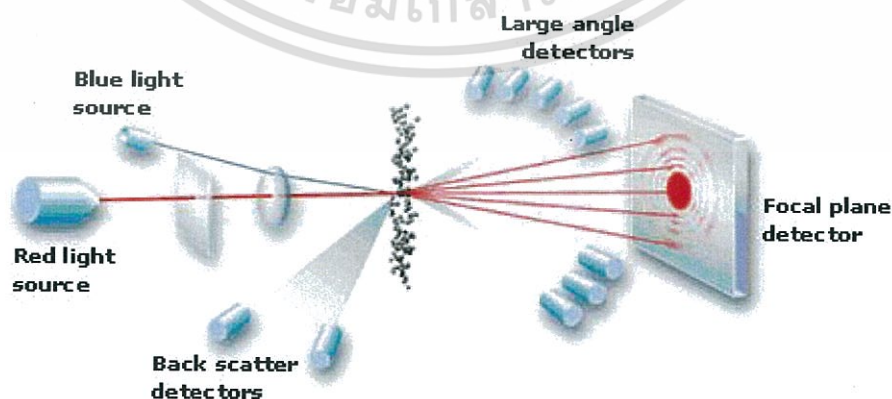
การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ใช้หลักการกราดยิงลำอิเล็กตรอนบนผิวตัวอย่าง บริเวณที่ถูกลำอิเล็กตรอนนี้จะเกิดสัญญาณ ซึ่งสัญญาณจะถูกแปลงเป็นภาพบนจอรับภาพ มีกำลังขยายภาพสูงถึง 500,000 เท่า โดยมีความละเอียดต่ำกว่า 1 นาโนเมตร และ SEM ยังมีเครื่องรับสัญญาณชนิด energy-dispersive x-ray spectroscopy (EDX or EDS) หรือเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน ใช้หลักการวัดค่าพลังงานรังสีเอกซ์จากการคายพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกสุดในรูปของรังสีเอกซ์ซึ่งธาตุแต่ละธาตุจะมีค่ารังสีเอกซ์เฉพาะตัวของมันทำให้วิเคราะห์ได้ว่าชิ้นงานมีองค์ประกอบของธาตุอะไรบ้าง



รูปที่ 2.29 หลักทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [41]

2.6 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Particle Size Analysis by Laser Diffraction Technique)

เป็นการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคที่มีอยู่ในตัวอย่างทดสอบซึ่งจะถูกคำนวณออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคนั้นๆ โดยใช้หลักการการเลี้ยวเบนของแสงซึ่งแหล่งกำเนิดแสงจากเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร ขนาดของอนุภาคจะแปรผกผันกับมุมการเลี้ยวเบนของแสงคือ อนุภาคขนาดใหญ่มีมุมการเลี้ยวเบนของแสงแคบและอนุภาคขนาดเล็กมีมุมการเลี้ยวเบนของแสงใหญ่

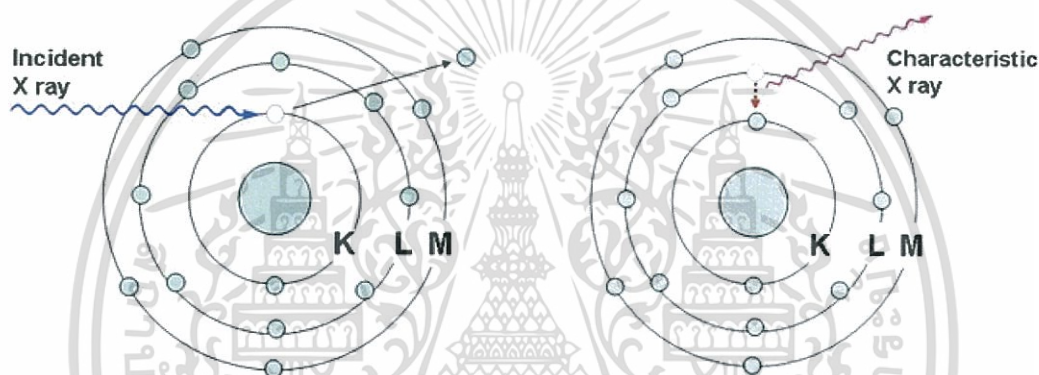


รูปที่ 2.30 หลักทำงานของการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง [42]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X ray Fluorescence Spectroscopy)

การวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ โดยใช้หลักการการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นพลังงานที่ต่ำกว่าจากการฟุ้งชนสารตัวอย่างด้วยรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray photon) จากหลอดรังสีเอ็กซ์ ซึ่งในการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิ (Secondary X-ray photon) ที่มีพลังงานจำเพาะของแต่ละธาตุซึ่งจะทำให้สามารถหาชนิดของธาตุได้และการหาปริมาณธาตุสามารถทำได้โดยจากการวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่คายออกมา



a) ลักษณะการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นพลังงานที่ต่ำ

b) คายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์

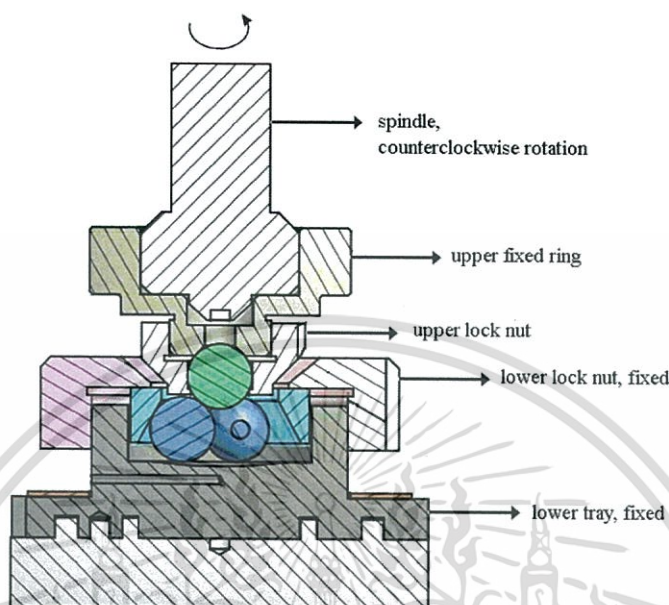
รูปที่ 2.31 หลักทำงานของการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ [43]

2.8 การทดสอบวัดคุณสมบัติต้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล (Four ball test)

การทดสอบโฟร์บอลแบบวัดคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอของน้ำมันหล่อลื่นโดยนำลูกบอลเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. เกรด 25 EP (Extra Polish) ค่าความหยาบของผิวลูกบอลเหล็กมีค่า $0.05 \mu\text{m}$ และมีค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ (HRC) อยู่ในช่วงระหว่าง 64 ถึง 66 ทั้งสามลูกแช่ลงไปในน้ำมันหล่อลื่นจนท่วมจับยึดแน่นไม่มีการเคลื่อนที่ กดลูกบอลเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. อีกลูกลงบนช่องว่างระหว่างลูกบอลสามลูกจะเกิดจุดผิวสัมผัสทั้งสามลูกด้วยแรง 394 นิวตัน กดด้วยความเร็ว 1,200 รอบ/นาที เป็นเวลา 60 นาที เปรียบเทียบคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์จากเส้นผ่านศูนย์กลางของแผลการสึกหรอ(Scar) บนผิวลูกบอลเหล็กทั้งสามลูกด้านล่างที่เกิดจากการเสียดสีของลูกบอล



รูปที่ 2.32 หลักทำงานของโพรบอล [44]

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

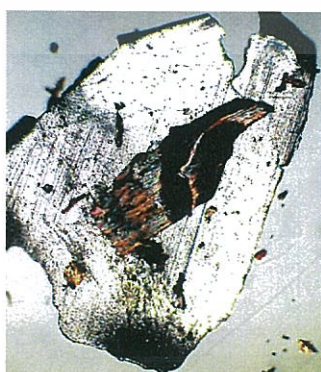
Hakan Kaleli et al. [45] ทำการศึกษาในเรื่องการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นและช่วงเวลาการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น สาเหตุการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นแบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก สาเหตุที่หนึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีในทางที่แย่งซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดออกซิเดชันที่เพิ่มสูงขึ้น สาเหตุที่สองมาจากการปนเปื้อนฝุ่นละออง น้ำมันเชื้อเพลิงและโบลบายก๊าซที่เพิ่มมากขึ้น ผลการศึกษาจากรถยนต์เฟียต (Fiat) ขนาดเครื่องยนต์ 1.6 ลิ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 20W50 เป็นการขับในเมืองที่ประเทศตุรกีทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นทุกๆ 2,000 km จนถึงระยะ 15,000 km ทำการคาดการณ์ระยะเวลาการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสมโดยประเมินจากการเสื่อมสภาพทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นเช่น ความหนืด จุดวาบไฟ ค่าความเป็นด่าง เซซิโลหะเหล็กที่สึกหรอ ซึ่งจะใช้ข้อมูลที่จุดเดือนภัยสูงสุดพบว่าระยะการเปลี่ยนถ่ายเหมาะสมอยู่ที่ 9000 km

Karl Kollmann et al. [46] ทำการศึกษาในเรื่องการยืดระยะเวลาการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นซึ่งใช้แนวทางแบบระบบการบำรุงรักษารถยนต์ชื่อว่า Active Service System (ASSYST) เป็นอุปกรณ์ที่จะนำข้อมูลที่ได้จากรถเช่น อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น อุณหภูมิน้ำมันหล่อเย็น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับน้ำมันหล่อลื่น ค่าการนำไฟฟ้า รอบและโพลดของเครื่องยนต์ ความเร็วของเครื่องยนต์ เพื่อนำมาคำนวณหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น ผลการศึกษาจากเครื่องยนต์เบนซิน 70 คัน ที่มีเครื่องยนต์ ลักษณะการขับขี่และความจุของเครื่องยนต์ที่ต่างกันพบว่าระยะทางการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 21,000 km และเครื่องยนต์ที่มีความจุของเครื่องยนต์ที่สูงกว่าจะมีผลกระทบต่อน้ำมันหล่อลื่นที่น้อยกว่า และการทดสอบกับรถทดสอบวิ่งจริงที่อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นต่ำและสูงกว่า 60 องศาเซลเซียสพบว่ามีค่าความหนืด การปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงและโลหะเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นด่างในน้ำมันหล่อลื่นลดลงทั้งกรณีอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นต่ำและสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส ซึ่งระยะเวลาการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นของกรณีน้ำมันหล่อลื่นอุณหภูมิต่ำอยู่ที่ 6,554 km และกรณีน้ำมันหล่อลื่นอุณหภูมิต่ำอยู่ที่ 20,000 km

Hakan Kaleli et al. [47] ทำการทดสอบเครื่องยนต์แก๊สโซลีนชนิด 4 กระบอกสูบ 1300 ซีซี บนแท่นทดสอบใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 15W50 ทำการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เปลี่ยนไปของน้ำมันหล่อลื่นและอนุภาคเศษโลหะสึกหรอมิตัวแปรพิจารณา คือ ปริมาณเศษโลหะสึกหรอเหล็ก ความหนืดและจุดวาบไฟ ตัวอย่างของน้ำมันหล่อลื่นถูกเก็บทุกๆ 2,000 km. จำนวน 150 ml. ต่อครั้ง และนำผลวิเคราะห์ต่างๆมาวิเคราะห์คาดการณ์ช่วงระยะเวลาการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสมพบว่าปริมาณเศษโลหะสึกหรอเหล็ก ความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นและจุดวาบไฟลดลงส่วนช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นอยู่ที่ระยะ 11,000 km.

Al-Osaimy et al. [5] ได้ทำการตรวจวัดอนุภาคเศษโลหะสึกหรอในน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้วและใส่กรองน้ำมันหล่อลื่นโดยเครื่องมือพีโรกราฟฟี เป็นการตรวจวัดที่ช่วยบ่งบอกถึงลักษณะของกลไกการสึกหรอ ขนาด รูปร่าง ของเศษโลหะสึกหรอควบคู่กับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อระบุลักษณะของการสึกหรอและการวิเคราะห์ชนิดของเศษโลหะสึกหรอซึ่งสีผิวของเศษโลหะสึกหรอชนิดต่างๆจะมีสีที่ต่างกันเมื่อได้รับความร้อน

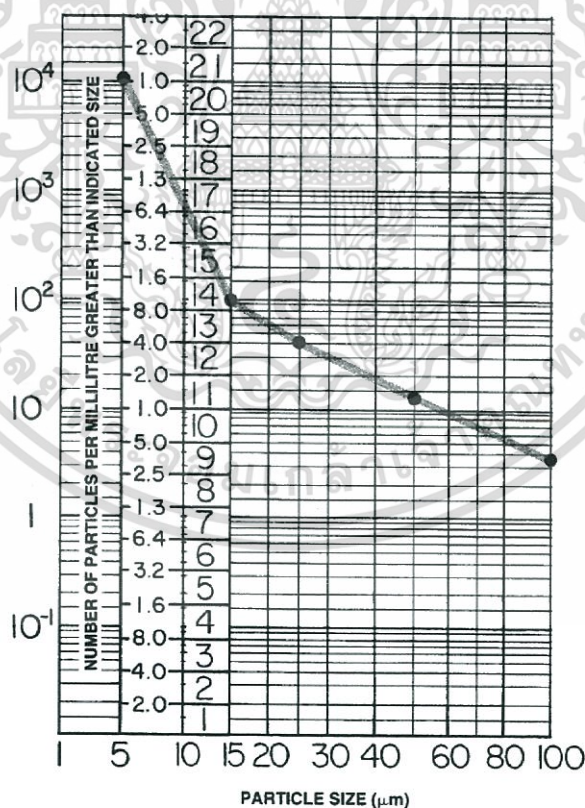


รูปที่ 2.33 ตัวอย่างของเศษโลหะสึกหรอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Marián KUČERA et al. [48] ได้ทำการตรวจวัดอนุภาคเศษโลหะสึกหรอในน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้วของเครื่องยนต์ทางการเกษตรที่ระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่น 1,000, 2,000, 3,000 ชม. โดยใช้เครื่องมือ FTIR ดูการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีเติมแต่งจากผลกระทบบระหว่างการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่น ภาพถ่ายเพอร์โรกราฟฟิววิเคราะห์ รูปร่าง สี พื้นผิวของเศษโลหะที่สึกหรอและเครื่องตรวจวัดจำนวนและรูปร่างของอนุภาคเพื่อวิเคราะห์ชนิดและจำนวนของอนุภาคนั้นๆ พบว่าสารเคมีเติมแต่งจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้วมีปริมาณลดลงและตรวจพบเศษโลหะสึกหรอแบบยึดติด ขูดขีดและล้าตัว

James A. Addison and William M. Needelman. [4] ศึกษาการปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ดีเซล เป็นปัญหาหลักที่ส่งผลให้ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์สึกหรอ การปนเปื้อนเป็นตัวการเร่งให้น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพเร็วขึ้นและถ้ามีการปนเปื้อนของอนุภาคขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นจะมีมากกว่าชั้นของแผ่นฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นก็จะส่งผลให้เกิดการขูดขีดบนแผ่นชิ้นงานที่เคลื่อนที่และทำให้เกิดการสึกหรอ ขนาดอนุภาคที่เป็นอันตรายต่อเครื่องยนต์ส่วนมากมีขนาดเล็กกว่า 20 ไมโครเมตร



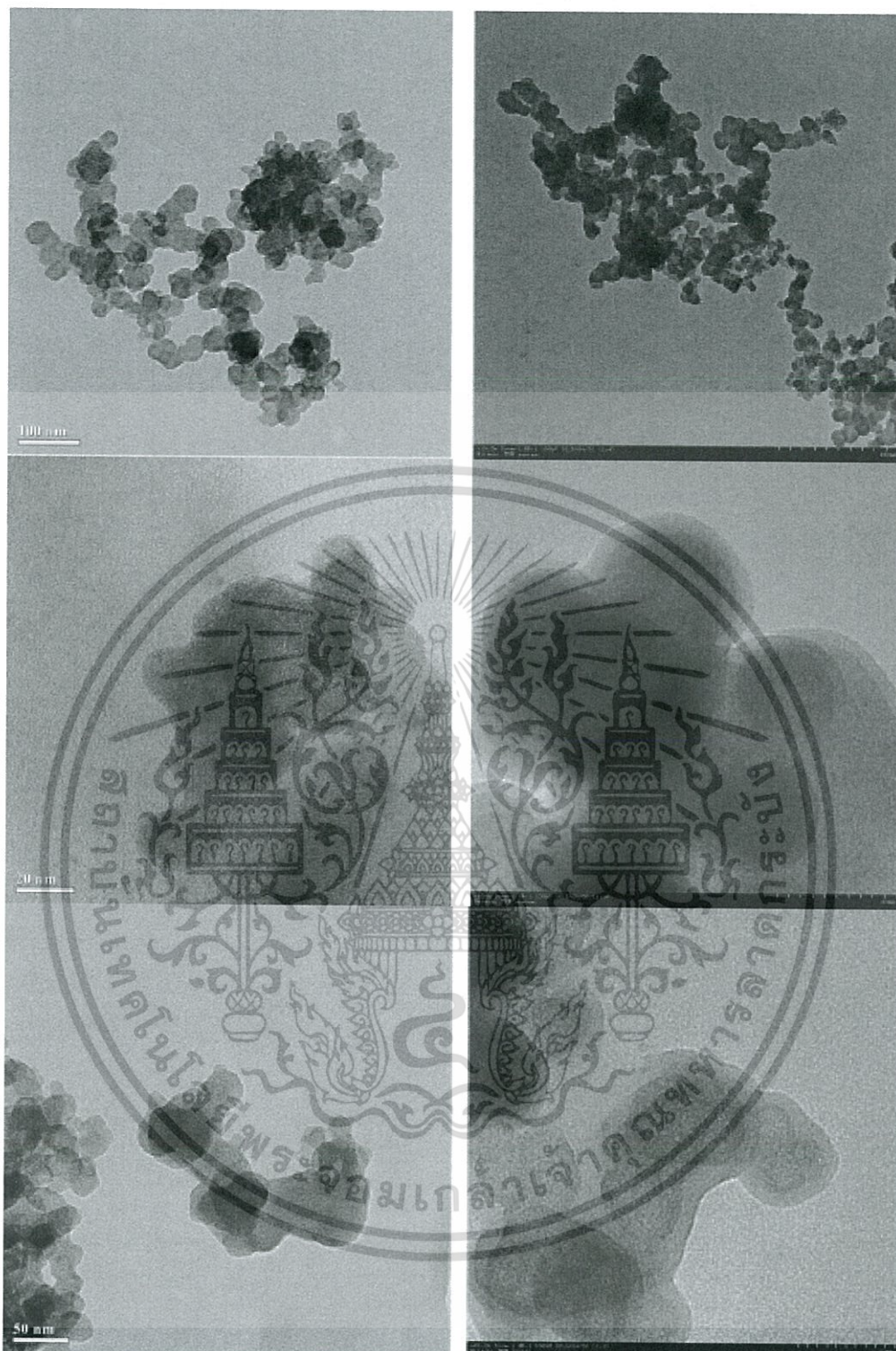
รูปที่ 2.34 ระดับการปนเปื้อนของแต่ละขนาดอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D A Green and R Lewis. [49] ได้ทำการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบจากการปนเปื้อนเขม่าในน้ำมันหล่อลื่นพบว่าจากงานวิจัยของ *Sato, H et al.* ใช้เครื่องมือทดสอบโฟร์บอล การปนเปื้อนของเขม่า เมื่อเขม่ามีการเกาะตัวเป็นก้อนเขม่าขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นจะส่งผลให้เกิดโอกาสขาดการหล่อลื่นในจุดที่มีขนาดของเขม่ามากกว่าความหนาของแผ่นฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น

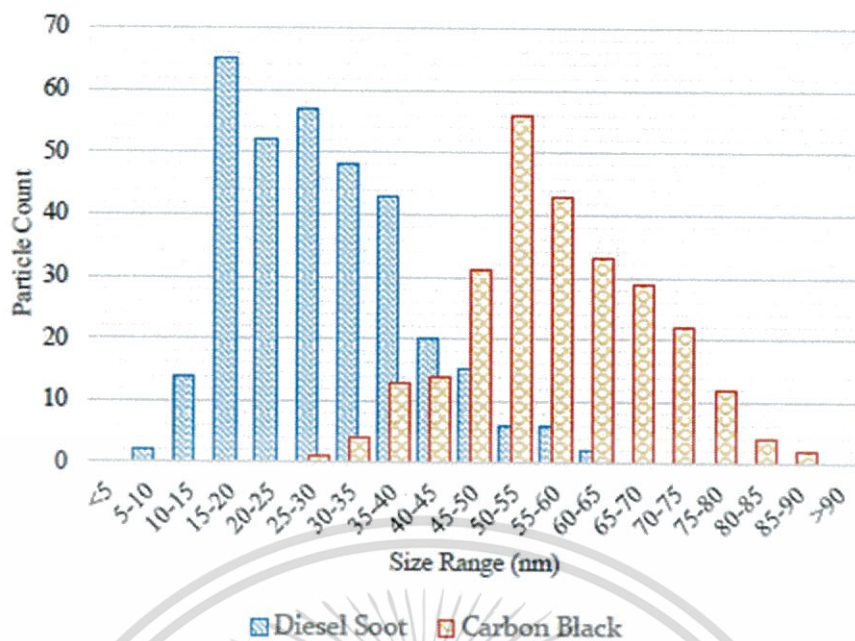
A.D.H Clague et al. [50] ตรวจสอบได้ว่าอนุภาคของคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) มีลักษณะคล้ายกับเขม่า (Soot) ในน้ำมันหล่อลื่น เขม่ามีขนาดโดยเฉลี่ย 30-50 นาโนเมตรโดยใช้เทคนิค SEM และ TEM ในการวิเคราะห์ เมื่อเทียบกันระหว่างเขม่าและคาร์บอนแบล็คแล้วมีขนาดที่แตกต่างกันน้อยมาก แต่ถ้าตรวจวัดตอนขณะที่มีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน คาร์บอนแบล็คมีขนาดใหญ่กว่าเขม่าเล็กน้อย

CHOKUN S. [51] ได้ศึกษาผลกระทบของการปนเปื้อนเขม่าที่ส่งผลต่อการสึกหรอและคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นโดยใช้เครื่องมือทดสอบโฟร์บอล พบว่าขนาดของอนุภาคที่เกาะรวมกันเป็นกลุ่มก้อนของทั้งเขม่าและคาร์บอนแบล็คจากภาพถ่ายTEM มีขนาดตั้งแต่ 200 nm ถึง 500 nm แสดงดังรูปที่ 2.35 และเมื่อทำการตรวจสอบขนาดของอนุภาคปฐมภูมิของเขม่าจากเครื่องยนต์ดีเซลและคาร์บอนแบล็ค แสดงดังรูปที่ 2.36 พบว่าอนุภาคปฐมภูมิของเขม่าจากเครื่องยนต์ดีเซลมีขนาดตั้งแต่ 8-62 nm โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 30 nm ส่วนอนุภาคปฐมภูมิของคาร์บอนแบล็คมีขนาดตั้งแต่ 30-87 nm โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 58 nm และพบว่าเมื่อทำการปนเปื้อนคาร์บอนแบล็คปริมาณ 1 %Wt ในน้ำมันหล่อลื่น Lubricant A และ Lubricant B เพื่อดูคุณสมบัติการกระจายตัวในน้ำมันหล่อลื่นจากการทดสอบโฟร์บอลขนาดอนุภาคที่มากกว่า 300 nm อาจไม่สามารถเข้ามาทำการสึกหรอระหว่างผิวชิ้นงานได้เนื่องจากมีขนาดมากกว่าความหนาของแผ่นฟิล์มที่มีความหนาโดยประมาณ 300 nm ซึ่งขนาดของอนุภาคของคาร์บอนแบล็คในน้ำมันหล่อลื่น Lubricant A ที่เข้าไปทำให้เกิดการสึกหรอระหว่างชิ้นงานได้มีปริมาณ 9% ส่วน Lubricant B มีปริมาณ 25% แสดงดังรูปที่ 2.37 และขนาดของแผ่นที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็กของน้ำมันหล่อลื่น Lubricant A และ Lubricant B มีค่าเพิ่มขึ้น 44 μm และ 66 μm ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ new oil แสดงดังรูปที่ 2.38

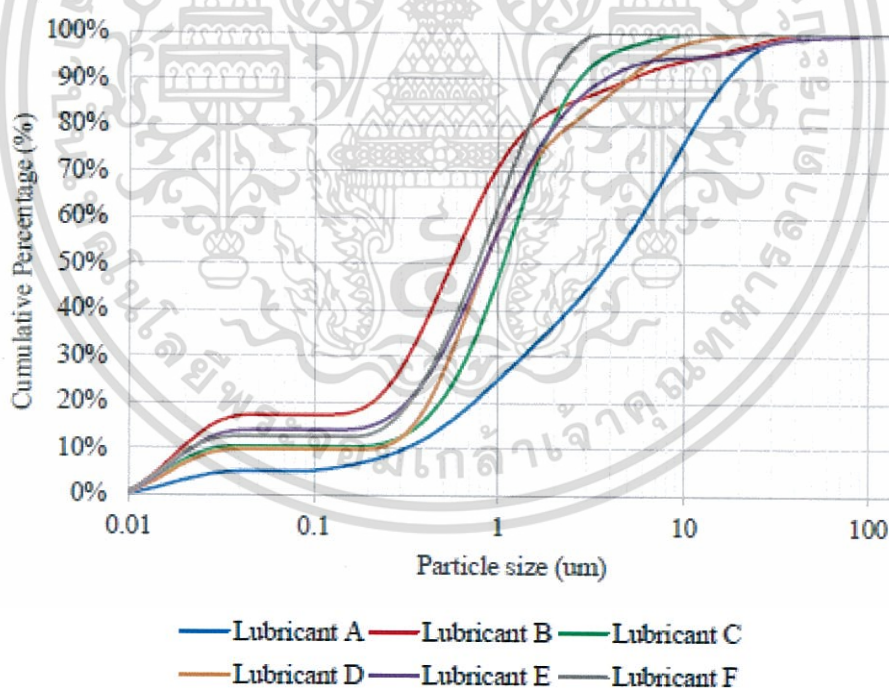


รูปที่ 2.35 ความแตกต่างทางรูปร่างลักษณะของเขม่าจากเครื่องยนต์ดีเซล (ขวา) และคาร์บอนแบล็ค (ซ้าย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

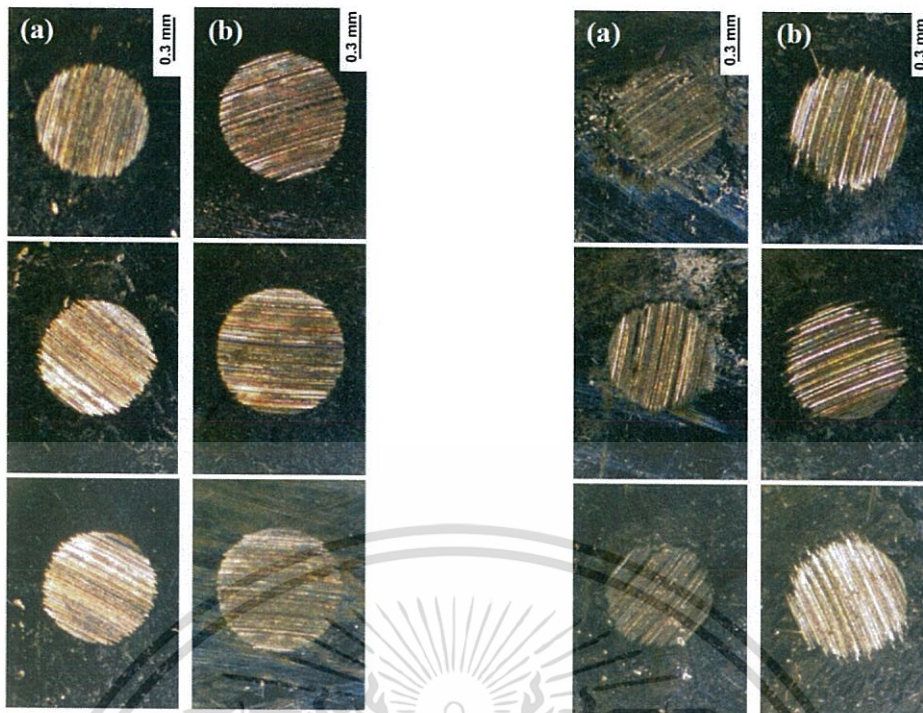


รูปที่ 2.36 การกระจายตัวของอนุภาคปฐมภูมิของเขม่าจากเครื่องยนต์ดีเซลและคาร์บอนแบล็ค



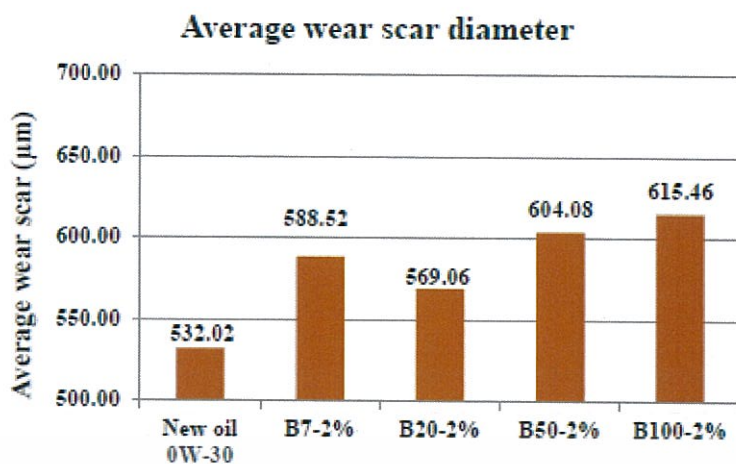
รูปที่ 2.37 คุณสมบัติการกระจายตัวของน้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดที่ปนเป็นคาร์บอนแบล็ค 1 %Wt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

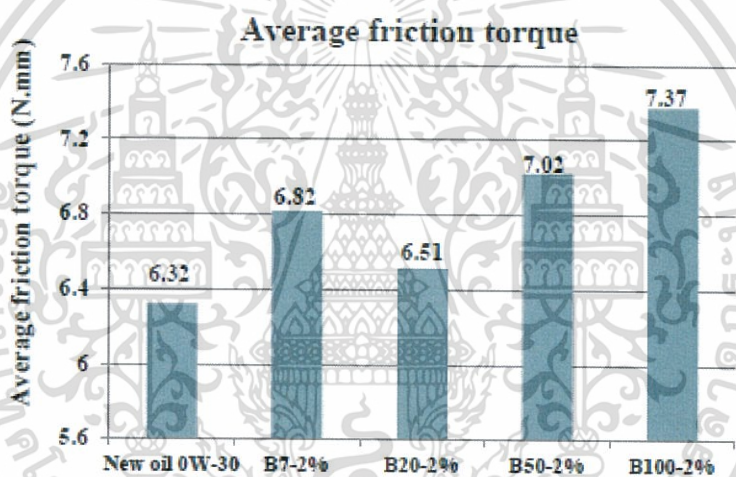


a) Lubricant A b) Lubricant A + C-1% a) Lubricant B b) Lubricant B + C-1%
รูปที่ 2.38 ขนาดของแผลที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็กของน้ำมันหล่อลื่น Lubricant A และ Lubricant B และที่ปนเป็นคาร์บอนแบล็ค 1 %Wt

PHIRANAT K. [52] ได้ทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วของเครื่องยนต์ดีเซล พบว่าค่าการปนเปื้อนเขม่าในน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วของรถยนต์ 10 คัน ขนาดเครื่องยนต์ 1,500 ซีซี ที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นจากรถที่ใช้งานจริงที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นโดยประมาณ 10,000 km มีค่าเฉลี่ย 0.69 %Wt และในการทดสอบโฟร์บอลที่มีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของไบโอดีเซลที่แตกต่างกัน ขนาดของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กและแรงเสียดทานด้านการหมุนของ B100-2% มีค่ามากที่สุดและ new oil SAE 0W30 ที่ไม่มีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงมีค่าน้อยที่สุดและในการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง B20-2% มีขนาดของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กและแรงเสียดทานด้านการหมุนน้อยกว่า B7-2%, B50-2% และ B100-2% เพราะว่ามีค่าความหนืดมากกว่า B7-2% ในทางตรงกันข้ามก็มีเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนน้อยกว่า B50 -2% และ B100-2% แสดงดังรูปที่ 2.36 และ 2.37



รูปที่ 2.39 ขนาดของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กของการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของไบโอดีเซลที่ต่างกัน



รูปที่ 2.40 แรงเสียดทานด้านการหมุนของการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของไบโอดีเซลที่ต่างกัน

Simon C. Tung and Hong Gao. [53] ใช้เครื่องมือทดสอบไทรโบมิเตอร์ชนิดแบบเคลื่อนที่ไปกลับเพื่อทดสอบค่าแรงเสียดทานและการสึกหรอของแหวนลูกสูบกับกระบอกสูบเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วนผสมของเอทานอล 85% และแก๊สโซลีน 15% หรือเรียกว่า E85 ผลปรากฏว่าน้ำมันเชื้อเพลิง E85 จะทำลายชั้นฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นที่ปกป้องชิ้นงานอยู่ให้บางลงส่งผลให้เกิดความเสียหายระหว่างชิ้นงานและการสึกหรอเพิ่มมากขึ้นและที่การปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง E85 และเงื่อนไขการทดสอบเดียวกันแต่มีความเป็นกรดที่ความแตกต่างกันคือ pH4

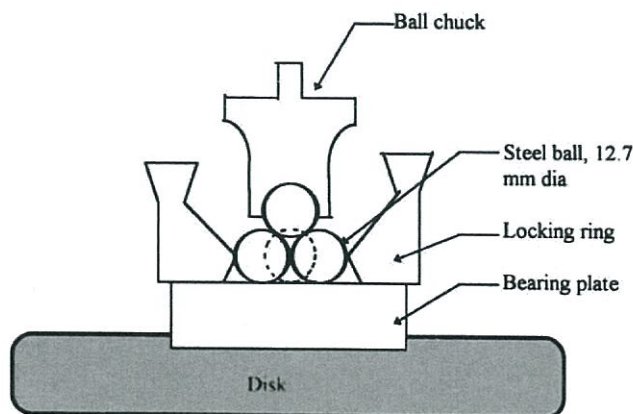
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ pH6 พบว่าน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ที่มีความเป็นกรดมากจะทำให้เกิดความเสียหายระหว่างชิ้นงานและการสึกหรอมากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ที่มีความเป็นกรดน้อย

Henara L. Costa, Tung and Hugh A. Spikes. [54] ทำการศึกษาผลกระทบของเอธานอลที่มีผลต่อการก่อตัวของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารเคมีเติมแต่ง ZDDP ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่น ใช้เทคนิคการทดสอบ MTM-SLIM (sliding/rolling contact is generated between a steel ball and steel disk using a minitraction machine) ตรวจสอบการปนเปื้อนเอธานอล 5%wt ของเอธานอลไม่มีน้ำ (anhydrous) และเอธานอลที่มีน้ำเจือปน 6.2-7.4 %wt (hydrated) ในน้ำมันหล่อลื่นตามมาตรฐาน API SL และน้ำมันพื้นฐานที่มีการผสมสารเคมีเติมแต่ง ZDDP พบว่าความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการปนเปื้อนเอธานอลในน้ำมันหล่อลื่นทั้งคู่ เอธานอลที่มีน้ำเจือปนมีความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นต่ำกว่าเอธานอลไม่มีน้ำและเมื่อทดสอบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่มีการปนเปื้อนเอธานอลแล้วทำการปนเปื้อนเอธานอลที่มีน้ำเจือปนพบความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นลดลงจากเดิมและทำให้พื้นผิวที่ขูดถูเกิดความเสียหาย

Charlotte Besser et al. [55] ทำการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของน้ำมันหล่อลื่นจากการจำลองการเสื่อมสภาพในแล็บที่เร่งขึ้นมาเพื่อศึกษาผลกระทบของเอธานอลที่เป็นส่วนประกอบในน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งในการจำลองการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 15W-40, 5W-40, 5W-30 ทำการผสมกับเอธานอล อะซีทัลดีไฮด์ กรดแอซิติค ทั้งหมดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์ พบว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมกับเอธานอลและอะซีทัลดีไฮด์ส่งผลกระทบต่อน้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพเพียงเล็กน้อยแต่ที่ผสมกับกรดแอซิติคจะส่งผลกระทบต่อเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นมากส่งผลให้เกิดการก่อตัวของตะกอนในน้ำมันหล่อลื่น

H.H.Masjuki, M.A. Maleque. [56] ศึกษาคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอของน้ำมันปาล์มเมทิลเอสเทอร์ (palm oil methyl ester:POME) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการผสมกับน้ำมันหล่อลื่นเบอร์ SAE10 และ SAE30 โดยผสมน้ำมันปาล์มที่สัดส่วน 3% 5% 7% และ 10% ลักษณะของ POME ทำหน้าที่คล้ายสารเคมีเติมแต่งผลปรากฏว่า POME ที่ผสมในสัดส่วน 5% มีค่าการสึกหรอและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานน้อยสุดและพบว่าค่าจุดการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น (FTP : Flash temperature parameter) มีค่ามากที่สุด เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติการสึกหรอใช้ทดสอบแบบโพร์บอล



รูปที่ 2.41 การทดสอบคุณสมบัติการสึกหรอใช้ทดสอบแบบโพรบอล

N.W.M. Zulkifli et al. [57] ทำการศึกษาลักษณะการป้องกันการสึกหรอของน้ำมันปาล์มไตรเมทิลลอลโพรเพนเอสเทอร์ (trimethylolpropane: TMP) ซึ่งผสม TMP 1%, 3%, 5%, 7%, 10%, 100% ในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานโดยใช้เครื่องมือทดสอบโพรบอลพบว่า TMP 3% ผสมกับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีขนาดของแผลที่สึกหรอและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้ลดลงมากที่สุด

Zhenglin Tang, Shaohui Li. [58] โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (MoS_2) ซึ่งการก่อตัวได้รับการส่งเสริมจากการปรากฏตัวของสารปรุงแต่งต่อต้านการสึกหรอซิงค์ไดอัลคิลไดริโอฟอสเฟต (ZDDP) ที่ให้อะตอมของซัลเฟอร์ โครงสร้างชั้นผิวของโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์เป็นแบบโครงสร้างตาข่ายรูปหกเหลี่ยมมีความสามารถในการเลื่อนหลุดง่ายในโครงสร้างชั้นผิวเมื่อมีแรงกระทำในแนวราบหรือแรงเฉือนได้ดี

E. LAINE et al. [59] เป็นการศึกษาผลกระทบของสารเคมีเติมแต่งลดแรงเสียดทาน MoDTC (Molybdenum bis-diethylhexyl dithiocarbamate) พบว่าตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base oil) ชนิดน้ำมันแร่ที่มีการผสมสารปรุงแต่งต่อต้านการสึกหรอ (ZDDP) และ MoDTC มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและการสึกหรอน้อยกว่าตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base oil) ชนิดน้ำมันแร่ที่มีการผสมสารปรุงแต่งต่อต้านการสึกหรอ (ZDDP) เพียงอย่างเดียว เนื่องจากกลไกที่เกี่ยวข้องกับโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (MoS_2) ที่เข้าไปปกคลุมในพื้นที่ที่มีการขัดถูของชิ้นงาน

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยของการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น ใ้กรอง น้ำมันหล่อลื่นที่จะนำมาตรวจสอบวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น การปนเปื้อนและการสึกหรอของเครื่องยนต์เพื่อให้ทราบถึงกลไกการสึกหรอ ขนาด รูปร่างของอนุภาคเศษโลหะสึกหรอ และการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์พร้อมกับทดสอบคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอของน้ำมันหล่อลื่นโดยโฟร์บอล ในงานวิจัยนี้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

- 1) การทดสอบภาคสนามกับรถยนต์ที่ใช้งานจริง (Field Test)
- 2) การทดสอบในระดับการจำลองด้านไทรโบโลยี (Model Test or Tribotest)

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบภาคสนามกับรถยนต์ที่ใช้งานจริง

- 1) น้ำมันหล่อลื่นมีมาตรฐาน API SN ชั้นความหนืด SAE 0W20 ใช้กับรถที่มาจากศูนย์บริการรถยนต์A (ไอวีรูม A) รถทดสอบ T1 (ทะเบียนรถ 4กข148) รถทดสอบ T2 (ทะเบียนรถ 3กศ5607) ทั้งหมดเป็นเครื่องยนต์รุ่น i-VTEC และ น้ำมันหล่อลื่นมีมาตรฐาน API SM ชั้นความหนืด SAE 5W40 ใช้กับรถที่มาจากศูนย์บริการรถยนต์B (ไอวีรูม B) เป็นเครื่องยนต์รุ่น VVT-i
- 2) ชุดปั๊มดูดสุญญากาศ (ปั๊มดูดสุญญากาศ, ขวด , ท่อ , ถุงพลาสติกชนิดซิปปิด) ใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้ว แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดปั๊มดูดสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ชุดทดสอบเฟอร์โรกราฟี (Ferrogaphy) แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดทดสอบเฟอร์โรกราฟี [37]

4) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM : Optical Microscope) แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

5) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM : Scanning Electron Microscope) พร้อมกับเครื่องรับสัญญาณชนิด energy-dispersive x-ray spectroscopy (EDX or EDS) หรือเครื่องวิเคราะห์ธาตุ แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 SEM และ EDX [60]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) เครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Particle Size Analysis by Laser Diffraction Technique) แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง

7) รถยนต์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น รุ่น i-VTEC และ VVT-i มีข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ แสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ i-VTEC

รุ่น/แบบ	4 สูบ แถวเรียง SOHC 16 วาล์ว i-VTEC
ปริมาตรกระบอกสูบ (ซีซี)	1,497
เส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ x ช่วงชัก (มม.)	73.0 x 89.4
อัตราส่วนกำลังอัด	10.3 : 1
กำลังสูงสุด กิโลวัตต์ (พีเอส) / รอบต่อนาที	86 (117 PS) / 6,000
แรงบิดสูงสุด นิวตัน-เมตร (กก.-เมตร) / รอบ	146 (14.9 กก.-เมตร) / 4,700
ระบบจ่ายน้ำมัน	หัวฉีดมัลติพอยท์ PGM-FI
ระบบเกียร์	อัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ VVT-i

รุ่น/แบบ	4 สูบ แถวเรียง DOHC 16 วาล์ว VVT-i
ปริมาตรกระบอกสูบ (ซีซี)	1,497
เส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ x ช่วงชัก (มม.)	75.0 x 84.7
อัตราส่วนกำลังอัด	10.5 : 1
กำลังสูงสุด กิโลวัตต์ (พีเอส) / รอบต่อนาที	80 (109 PS) / 6,000
แรงบิดสูงสุด นิวตัน-เมตร (กก.-เมตร) / รอบ	141 (14.4 กก.-เมตร) / 4,200
ระบบจ่ายน้ำมัน	หัวฉีดอิเล็กทรอนิกส์ EFI
ระบบเกียร์	อัตโนมัติ

9) เครื่องมือทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นตามมาตรฐานการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การทดสอบทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นตามมาตรฐานการทดสอบ

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี		มาตรฐานการทดสอบ	หน่วย
Wear condition	เหล็ก	D6595	PPM
	โครเมียม		
	ตะกั่ว		
	ทองแดง		
	ดีบุก		
	อะลูมิเนียม		
Oil condition	ความหนืด (ที่100°C)	D445	cSt
	ออกซิเดชัน	E2412M	Abs
	ไนเตรชัน	E-2412M	Abs
	ค่าความเป็นด่าง	D-4739	mgKOH/g
	จุดวาบไฟ	D-3828	°C
	ดัชนีความหนืด	D-2270	
Contamination	น้ำ	E2412M	% Wt
	น้ำมันเชื้อเพลิง	D-3828	°C
	เขม่า	E2412M	% Wt
	ซิลิกอน	D-6595	ppm

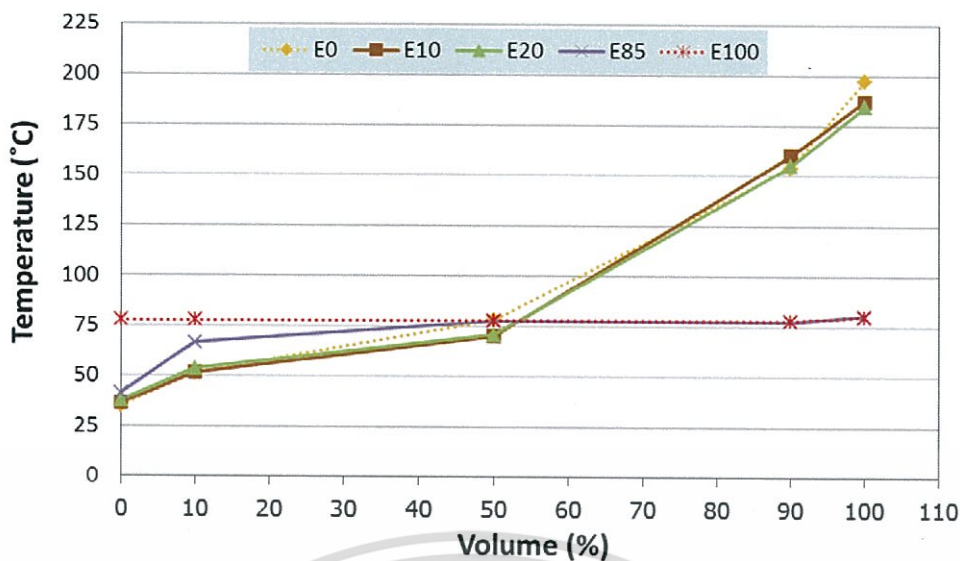
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 วัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบในระดับการจำลองด้านไทรโบโลยี (Model Test or Tribotest)

- 1) น้ำมันหล่อลื่นมีมาตรฐาน API SN ชั้นความหนืด SAE 0W20 และ 5W40 ทั้งคู่เป็นน้ำมันหล่อลื่นยี่ห้อเดียวกัน
- 2) น้ำมันเชื้อเพลิง E0, E10, E20, E85 เป็นน้ำมันที่ขายตามท้องตลาดโดยทั่วไปตามสถานีขายน้ำมันซึ่งจะใช้ในการจำลองการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงในน้ำมันหล่อลื่นมีคุณสมบัติบางประการ แสดงดังตารางที่ 3.4 และคุณสมบัติการกลั่นตัวของน้ำมันเชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง

คุณสมบัติ	E0	E10	E20	E85	E100
1.สูตรโมเลกุล	C_8H_{16}	$CH_{2.043}O_{0.015}$	$CH_{1.63}O_{0.065}$	$CH_{2.822}O_{0.425}$	C_2H_5OH
2.น้ำหนักโมเลกุล [g/mol]	100-105	99.47	88.12	50.60	100-105
3.คาร์บอน [mass%]	85-88	86.70	79.85	55.36	46.70
4.ไฮโดรเจน [mass%]	12-15	13.20	12.88	12.89	52.20
5.ออกซิเจน [mass%]	0	1.94	7.54	31.75	13.10
6.ความหนาแน่น, [kg/l], ที่ 15°C	0.72-0.77	0.76	0.76	0.78	34.70
7.ความหนืด [mm ² /s]	0.5-0.6				1.2-1.5
8.การทดสอบการกลั่น อุณหภูมิของจุดเดือด เริ่มต้น [°C]					
10%	78.2	70.2	70.8	77.5	77.8
50%	154.0	160.2	155.0	77.8	77.9
90%	197.3	187.2	184.6	80.5	78.0
100%	51.5	51.6	53.5	66.6	80.0



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงการกลั่นตัวของน้ำมันเชื้อเพลิง

3) คาร์บอนแบล็ค (Carbon Black) ใช้เบอร์ N330 ซึ่งจะใช้ในการจำลองการปนเปื้อนเขม่าโดยคาร์บอนแบล็คในน้ำมันหล่อลื่น แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 คาร์บอนแบล็ค [61]

3) เครื่องทดสอบคุณสมบัติด้านการสึกหรอชนิดโฟร์บอล (Four Ball Test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4172-94 มีเงื่อนไขการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 3.5 และแสดงดังรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.5 เงื่อนไขการทดสอบคุณสมบัติป้องกันการสึกหรอชนิดโฟร์บอล

อุณหภูมิ	75±2 °C [167±4 °F]
ความเร็วในการหมุนของลูกบอล	1,200±60 rpm
ช่วงเวลาทดสอบ	60±1 min
ภาระแรงกด	392±2 N [40±0.2 kgf]



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบด้านการสึกหรอชนิดโฟร์บอล (Four Ball Test)

- 5) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) พร้อมฟังก์ชันถ่ายภาพ 3 มิติ
- 6) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 ขั้นตอนการดำเนินงานในการทดสอบภาคสนามกับรถยนต์ที่ใช้งานจริง แบ่งออกตามแหล่งที่เก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นได้ 2 แบบ

3.2.1.1 เก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นจากรถทดสอบ

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นจากรถทดสอบ 2 คัน ทั้งคู่เป็นเครื่องยนต์รุ่น i-VTEC ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 และกำหนดให้ทั้งคู่เติมน้ำมันเชื้อเพลิงตามที่กำหนดให้เท่านั้น ซึ่งรถทดสอบ T1 (ทะเบียนรถ 4กท148) รอบแรกเติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85 รอบสองเติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และรถทดสอบ T2 (ทะเบียนรถ 3กศ5607) รอบแรกเติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 รอบสองเติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ในแต่ละรอบก่อนเริ่มทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นได้ทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนไส้กรองอากาศและไส้กรองน้ำมันเครื่องทุกครั้ง ในการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น จะทำการเก็บตัวอย่างเมื่อทำการดับเครื่องยนต์ไปแล้ว 7-10 นาที แล้วใช้ชุดปั๊มสุญญากาศดูดน้ำมันหล่อลื่นที่ช่องวัดระดับน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่เก็บตัวอย่างปริมาณ 80-100 ml ต่อระยะทาง 1000 km แสดงดังรูป 3.9 หลังจากทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นเสร็จทำการบันทึกข้อมูลระยะทางของรถยนต์ (Trip length หน่วย km) และอายุของน้ำมันหล่อลื่น (Oil interval หน่วย km) ในหนึ่งรอบของการทดสอบทำการกำหนดชนิดการเติมน้ำมันเชื้อเพลิงและทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นทั้งหมด 10 ครั้ง หรือระยะอายุของน้ำมันหล่อลื่นโดยเฉลี่ย 10,000 km ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์ต่างๆทั้งน้ำมันหล่อลื่นตัวอย่างที่ผ่านการใช้งานแล้ว ตามอายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นและไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ระยะเปลี่ยนถ่ายเนื่องจากมีเศษ โลหะสึกหรือส่วนหนึ่งถูกกรองไว้ที่ไส้กรองน้ำมันน้ำมันหล่อลื่นซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์เศษโลหะ สึกหรือได้ครอบคลุมทั้งระบบ ทั้งหมดจะถูกวิเคราะห์โดยแบ่งตามชนิดที่เก็บตัวอย่างมามีดังต่อไปนี้

1) น้ำมันหล่อลื่นตัวอย่าง

1.1) การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่น : การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วเปรียบเทียบกับน้ำมันที่ยังไม่ได้ใช้งาน (New oil) โดยที่ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์รุ่น i-VTEC ใช้ น้ำมันหล่อลื่น เบอร์ 0W20 รถทดสอบ T1 และ T2 ข้อมูลที่ได้จะทราบถึงเปลี่ยนแปลงของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการ ใช้งานที่อายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นช่วงต่างๆว่าอยู่ในระดับขอบเขตค่าเตือนภัยหรือขีดจำกัด ที่ปกติหรือไม่ซึ่งระดับขอบเขตค่าเตือนภัยมาจากค่าข้อมูลทางสถิติที่ทางแลปวิเคราะห์ได้จากการเก็บ รวบรวมการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์กลุ่มนั้นแล้วนำมาประมวลผลเป็นข้อมูลชุด นั้น ข้อมูลการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นของรถทดสอบ T1 และ T2 แสดงดังตารางที่ 3.6 และ 3.7

ตารางที่ 3.6 ข้อมูลการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นของรถทดสอบ T1

รอบแรกเติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85			รอบสองเติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20		
ครั้งที่	อายุรถ (km)	อายุ น้ำมันหล่อลื่น (km)	ครั้งที่	อายุรถ (km)	อายุ น้ำมันหล่อลื่น (km)
1	10979	1116	1	29250	1006
2	12005	2141	2	30243	1999
3	13064	3200	3	31249	3005
4	14261	4397	4	31813	3569
5	15253	5389	5	33233	4989
6	16337	6473	6	34280	6036
7	17496	7632	7	35315	7071
8	18914	9050	8	36533	8289
9	19460	9596	9	37729	9485
10	20330	10466	10	38671	10427

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

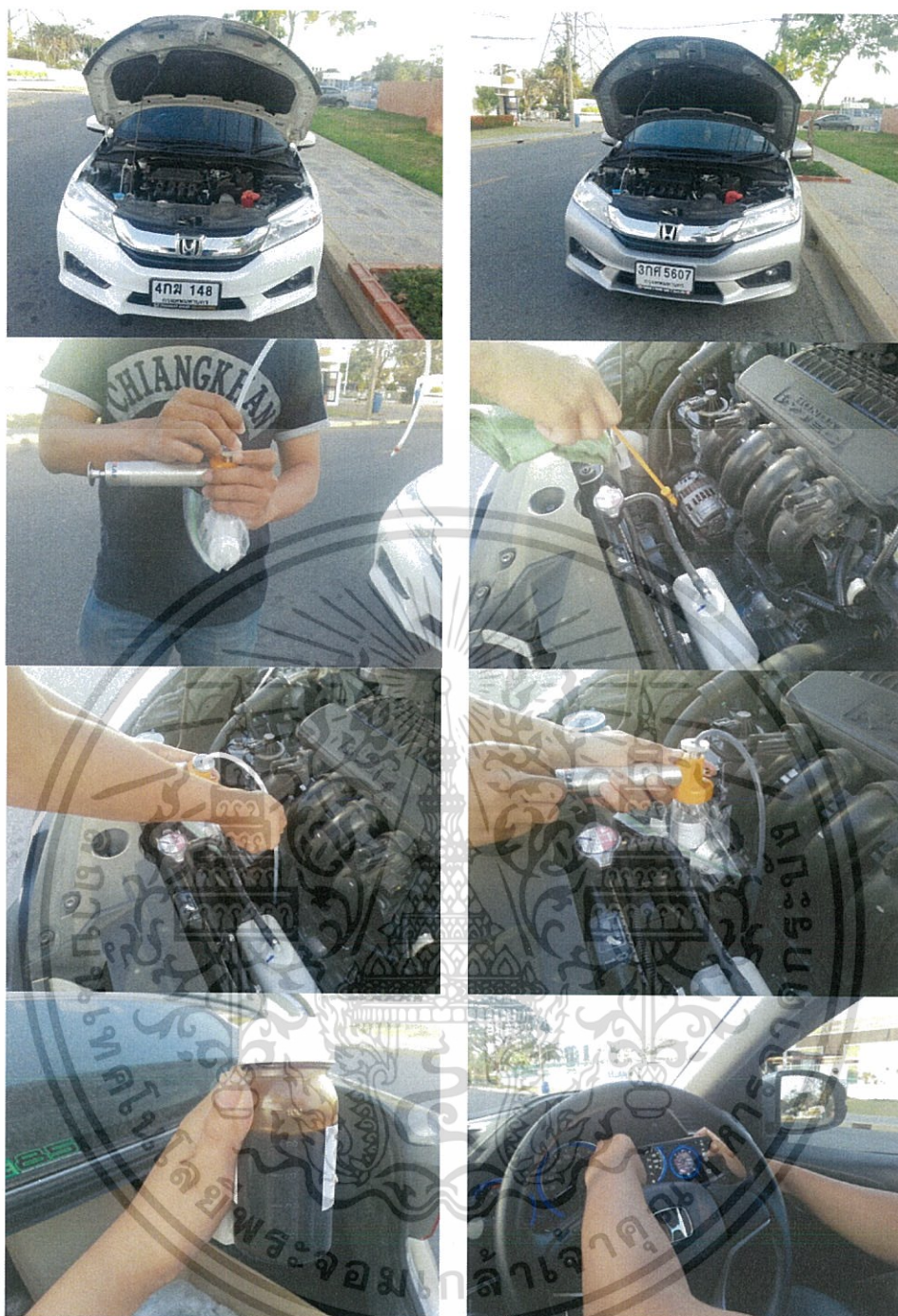
ตารางที่ 3.7 ข้อมูลการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นของรถทดสอบ T2

รอบแรกเติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20			รอบสองเติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85		
ครั้งที่	อายุรถ (km)	อายุ น้ำมันหล่อลื่น (km)	ครั้งที่	อายุรถ (km)	อายุ น้ำมันหล่อลื่น (km)
1	22878	1016	1	32951	1077
2	24012	2150	2	34018	2144
3	25047	3185	3	34961	3087
4	26039	4177	4	35946	4072
5	27037	5175	5	36991	5117
6	28061	6199	6	37975	6101
7	29041	7179	7	38980	7106
8	30021	8159	8	39972	8098
9	31004	9142	9	40958	9084
10	31871	10009	10	42057	10183

1.2) เฟอร์โรกราฟฟี (Ferrography) : เป็นการวิเคราะห์ภาพถ่ายของชิ้นเศษโลหะสึกหรอและสิ่งสกปรกปนเปื้อนทำการวิเคราะห์จากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้วทั้งรถทดสอบ T1 และ T2

1.3) การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Particle Size Analysis by Laser Diffraction Technique) : วิเคราะห์ขนาดของอนุภาคที่มีอยู่ในตัวอย่างทดสอบซึ่งจะถูกคำนวณออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคนั้นๆตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20
- น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85



รูปที่ 3.9 รถทดสอบที่ทำการเก็บตัวอย่างและขั้นตอนการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น

2) ใส่กรองน้ำมันหล่อลื่น

2.1) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM : Optical Microscope) : เป็นการวิเคราะห์ภาพถ่ายของชิ้นเศษโลหะสึกหรอและสิ่งสกปรกปนเปื้อนซึ่งชิ้นส่วนที่นำมาถ่ายภาพจะถูกล้างด้วยสารละลายโทลูอินก่อนเพื่อขจัดคราบน้ำมันที่เกาะแน่นออก แสดงดังรูป 3.10 ทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ด้วยกำลังขยายต่างๆจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้วเพื่อวิเคราะห์ขนาด รูปร่าง พื้นผิว และ ชนิดของกลไกการสึกหรอของเศษโลหะการสึกหรอ ตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- ใส่กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากเครื่องยนต์ที่เติมน้ำมัน
เชื้อเพลิง E20

- ใส่กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากเครื่องยนต์ที่เติมน้ำมัน
เชื้อเพลิง E85

- ใส่กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งาน

2.2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อมเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (SEM and EDX) : เป็นการวิเคราะห์ภาพถ่ายของชิ้นเศษโลหะสึกหรอและสิ่งสกปรกปนเปื้อนทำการวิเคราะห์จากใส่กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว แสดงดังรูป 3.10-e ซึ่งมีกำลังขยายมากกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงหรือกำลังขยายมากกว่า 1,000 เท่า พร้อมทำการวิเคราะห์ชนิดธาตุของเศษโลหะสึกหรอนั้น ตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

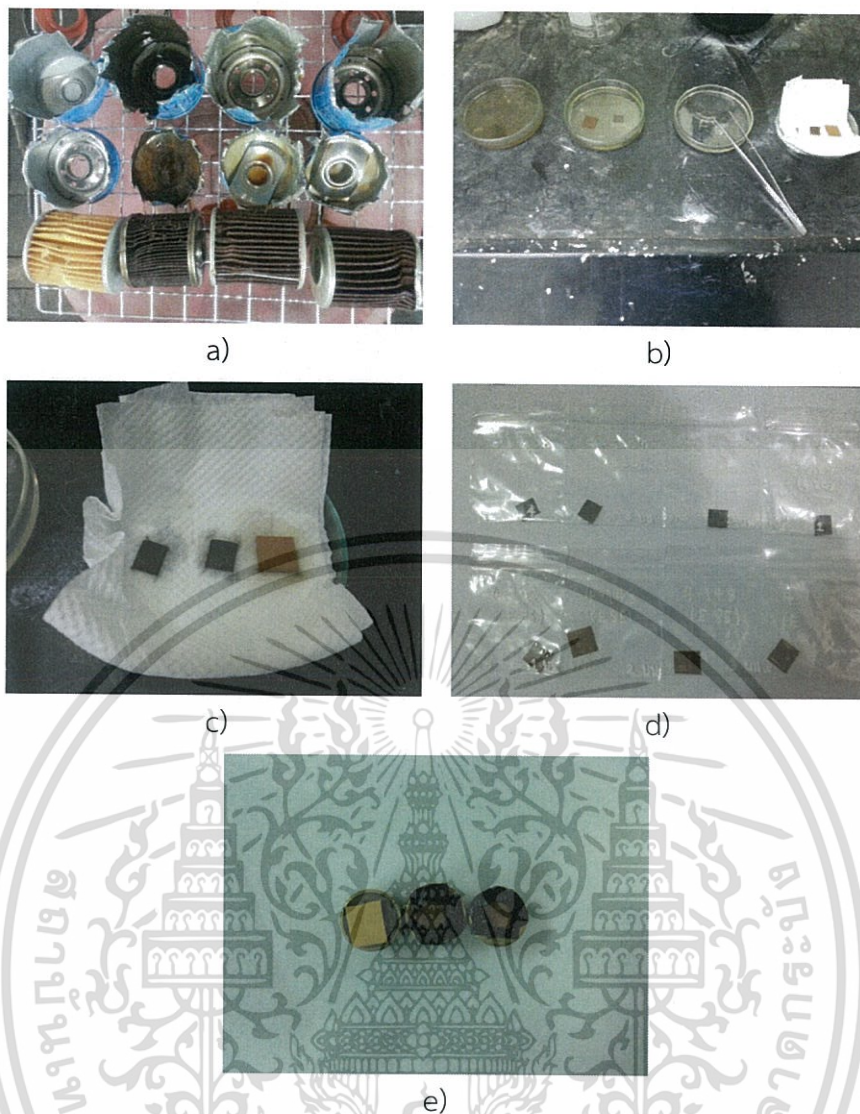
- ใส่กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากเครื่องยนต์ที่เติมน้ำมัน
เชื้อเพลิง E20

- ใส่กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากเครื่องยนต์ที่เติมน้ำมัน
เชื้อเพลิง E85

2.3) การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Particle Size Analysis by Laser Diffraction Technique) : วิเคราะห์ขนาดของอนุภาคที่มีอยู่ในตัวอย่างทดสอบซึ่งจะถูกคำนวณออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคนั้นๆ ในการเลือกตัวอย่างจะทำการเลือกที่ตำแหน่งของแผ่นพับในใส่กรองที่ตำแหน่งเดียวกันของทุกตัวอย่าง แสดงดังรูป 3.10-a เป็นลักษณะของใส่กรองที่ผ่านการใช้งานแล้วตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- ใส่กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากเครื่องยนต์ที่เติมน้ำมัน
เชื้อเพลิง E20

- ใส่กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากเครื่องยนต์ที่เติมน้ำมัน
เชื้อเพลิง E85



รูปที่ 3.10 ใส่กรองน้ำมันหล่อลื่นที่เตรียมสำหรับการวิเคราะห์กับเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

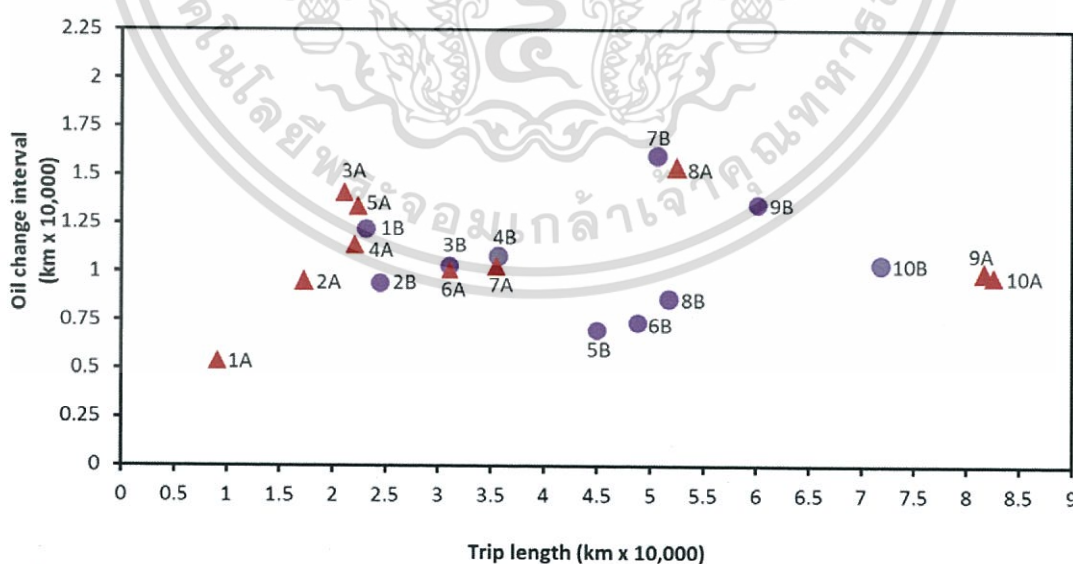
3.2.1.2 เก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นจากโชว์รูมรถยนต์

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นจากรถที่ถึงช่วงระยะเวลาการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นที่ระยะทางโดยเฉลี่ย 10,000 กิโลเมตร รถยนต์ที่ทำการเก็บตัวอย่างมีทั้งหมด 20 คัน จากโชว์รูม A (i-VTEC) 10 คัน และโชว์รูม B (VVT-i) 10 คัน การเก็บตัวอย่างเริ่มเมื่อรถเข้ามาจอดที่ส่วนบริการตรวจเช็คสภาพและเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น ก่อนทำการเก็บตัวอย่างด้วยปั๊มดูดสุญญากาศนั้นจะต้องให้รถยนต์ดับเครื่องยนต์เป็นเวลาอย่างน้อย 7-10 นาที เพื่อรอให้น้ำมันหล่อลื่นที่ไปทำหน้าที่หล่อลื่นส่วนต่างๆและชะล้างสิ่งสกปรกของเครื่องยนต์ไหลลงมาที่อ่างน้ำมันเครื่องจึงค่อยทำการเก็บตัวอย่างปริมาณ 80-100 ml หลังจากทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นเสร็จทำการบันทึกข้อมูล

ระยะทางของรถยนต์ (Trip length หน่วย km) และอายุของน้ำมันหล่อลื่น (Oil change interval หน่วย km) แสดงดังตารางที่ 3.8 และ แสดงดังรูปที่ 3.11

ตารางที่ 3.8 ข้อมูลการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นจากรถที่ใช้งานจริงที่มาจากศูนย์บริการรถยนต์

โชว์รูม A			โชว์รูม B		
คันที่	อายุรถ (km)	อายุ น้ำมันหล่อลื่น (km)	คันที่	อายุรถ (km)	อายุ น้ำมันหล่อลื่น (km)
1A	9132	5483	1B	23219	12274
2A	17341	9576	2B	24514	9442
3A	21140	14110	3B	31150	10367
4A	22190	11484	4B	35777	10884
5A	22420	13404	5B	45058	7065
6A	31150	10174	6B	48869	7418
7A	35545	10314	7B	50631	16012
8A	52546	15436	8B	51768	8677
9A	81793	10057	9B	60121	13535
10A	82680	9886	10B	71885	10412



รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลระยะทางของรถยนต์ (Trip length หน่วย km) และ อายุของน้ำมันหล่อลื่น (Oil change interval หน่วย km) ของรถยนต์จากโชว์รูม A (i-VTEC) 10 คัน และโชว์รูม B (VVT-i) 10 คัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.11 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลระยะทางของรถยนต์และอายุของน้ำมันหล่อลื่นของรถยนต์ไอซ์รูม A และ B สามารถแบ่งข้อมูลออกได้เป็น 4 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 มีระยะทางของรถยนต์อยู่ที่ 0 - 45,000 km และอายุของน้ำมันหล่อลื่นอยู่ที่ 0 - 10,000 km ข้อมูลกลุ่มนี้บ่งบอกว่ารถยนต์กลุ่มนี้มีระยะทางของรถยนต์ที่น้อยและมีระยะการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่เกินค่ากำหนดที่ผู้ผลิตเครื่องยนต์กำหนดมา กลุ่มที่ 2 มีระยะทางของรถยนต์อยู่ที่ 0 - 45,000 km และอายุของน้ำมันหล่อลื่นมากกว่า 10,000 km ข้อมูลกลุ่มนี้บ่งบอกว่ารถยนต์กลุ่มนี้มีระยะทางของรถยนต์ที่น้อยและมีระยะการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นที่เกินค่ากำหนดที่ผู้ผลิตเครื่องยนต์กำหนดมา กลุ่มที่ 3 มีระยะทางของรถยนต์มากกว่า 45,000 km และอายุของน้ำมันหล่อลื่นอยู่ที่ 0 - 10,000 km ข้อมูลกลุ่มนี้บ่งบอกว่ารถยนต์กลุ่มนี้มีระยะทางของรถยนต์ที่มากและมีระยะการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่เกินค่ากำหนดที่ผู้ผลิตเครื่องยนต์กำหนดมา กลุ่มที่ 4 มีระยะทางของรถยนต์มากกว่า 45,000 km และอายุของน้ำมันหล่อลื่นมากกว่า 10,000 km ข้อมูลกลุ่มนี้บ่งบอกว่ารถยนต์กลุ่มนี้มีระยะทางของรถยนต์ที่มากและมีระยะการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นที่เกินค่ากำหนดที่ผู้ผลิตเครื่องยนต์กำหนดมา

น้ำมันหล่อลื่นตัวอย่างที่จะถูกทำการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1) การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่น : การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วเปรียบเทียบกับน้ำมันที่ยังไม่ได้ใช้งาน (New oil) โดยที่ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นของรถยนต์จากไอซ์รูม A (i-VTEC) 10 คัน ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 และรถยนต์จากไอซ์รูม B (VVT-i) 10 คัน ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 5W40 ทุกคันไม่ได้กำหนดชนิดของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเติม เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นแล้วจะส่งผลให้ทราบถึงข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วว่าอยู่ในในระดับขอบเขตค่าเตือนภัยหรือขีดจำกัดที่ปกติหรือไม่ซึ่งระดับขอบเขตค่าเตือนภัยมาจากค่าข้อมูลทางสถิติที่ทางแลปวิเคราะห์ได้จากการเก็บรวบรวมการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์กลุ่มนั้นแล้วนำมาประมวลผลเป็นข้อมูลชุดนั้นแสดงดังตารางที่ 3.9 และ 3.10 ผลที่ได้นำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงไปของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยภาพรวม

2) เฟอร์โรกราฟฟี (Ferrography) : เป็นการวิเคราะห์ภาพถ่ายของชิ้นเศษโลหะสึกหรอและสิ่งสกปรกปนเปื้อนทำการวิเคราะห์จากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้วทั้ง 20 คัน เพื่อให้ทราบถึงกลไกการสึกหรอ ขนาดและปริมาณของอนุภาคโลหะสึกหรอ

ตารางที่ 3.9 ระดับขอบเขตการเตือนภัยของน้ำมันหล่อลื่นเบอร์ SN 0W20

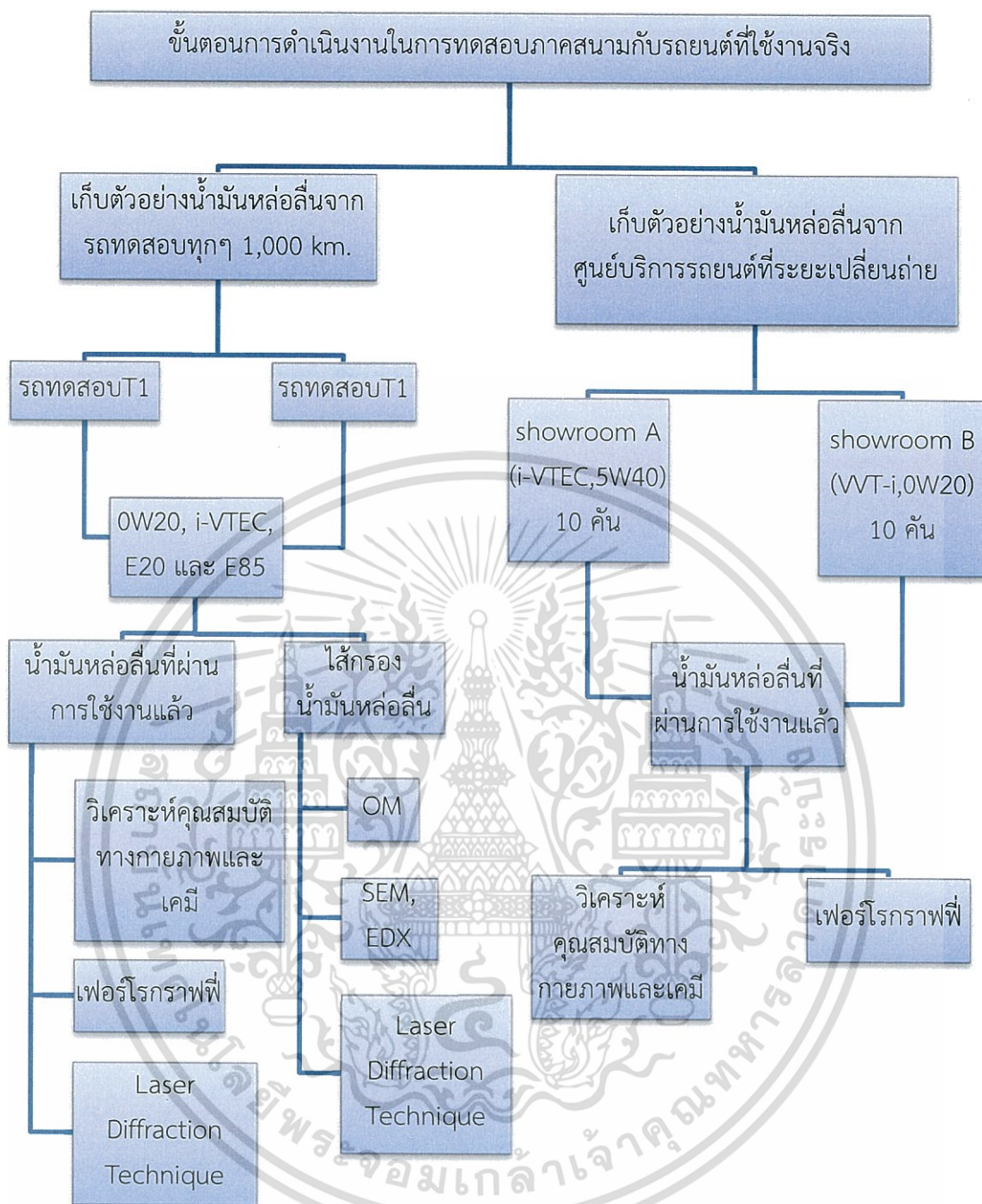
คุณสมบัติทาง กายภาพและเคมี		ขอบเขตค่าเตือนภัย					หน่วย
		New oil	Lower- Warning	Lower- Caution	Upper- Caution	Upper- Warning	
Wear condition	เหล็ก	0			≥100	≥200	ppm
	โครเมียม	0			≥40	≥60	
	ตะกั่ว	0			≥40	≥60	
	ทองแดง	0			≥40	≥60	
	ดีบุก	0			≥40	≥60	
	อะลูมิเนียม	0			≥40	≥60	
Oil condition	ความหนืด(40°C)	45.5	≤40.95	≤43.23	≥50.05	≥54.60	cSt
	ความหนืด(100°C)	8.7	≤7.8	≤8.24	≥9.1	≥9.54	cSt
	ออกซิเดชัน	6.6			≥13.2	≥16.5	Abs
	ไนเตรชัน	3.6			≥7.2	≥9	Abs
	ค่าความเป็น ด่าง	6.6	≤1.7	≤3.3			mgK OH/g
	จุดวาบไฟ	212	159	192			°C
	ดัชนีความหนืด	173					
Contamination	น้ำ	0.044			≥0.15	≥0.2	%Wt
	น้ำมันเชื้อเพลิง	0			≥3	≥5	%Wt
	เขม่า	0			≥2	≥3	%Wt
	ซิลิกอน	5			≥10	≥30	ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.10 ระดับขอบเขตการเตือนภัยของน้ำมันหล่อลื่นเบอร์ SM 5W40

คุณสมบัติทาง กายภาพและเคมี		ขอบเขตค่าเตือนภัย					หน่วย
		New oil	Lower- Warning	Lower- Caution	Upper- Caution	Upper- Warning	
Wear condition	เหล็ก	0			≥100	≥200	ppm
	โครเมียม	0			≥40	≥60	
	ตะกั่ว	0			≥40	≥60	
	ทองแดง	0			≥40	≥60	
	ดีบุก	0			≥40	≥60	
	อะลูมิเนียม	0			≥40	≥60	
Oil condition	ความหนืด(40°C)	81.5	≤73.35	≤77.43	≥89.65	≥97.80	cSt
	ความหนืด(100°C)	13.6	≤12.25	≤12.93	≥14.29	≥14.97	cSt
	ออกซิเดชัน	7.5			≥15	≥18.75	Abs
	ไนเตรชัน	3.0			≥6	≥7.5	Abs
	ค่าความเป็น ด่าง	6.5	≤1.6	≤3.2			mgK OH/g
	จุดวาบไฟ	216	162	196			°C
	ดัชนีความหนืด	171					
Contamination	น้ำ	0.042			≥0.15	≥0.2	%Wt
	น้ำมันเชื้อเพลิง	0			≥3	≥5	%Wt
	เขม่า	0			≥2	≥3	%Wt
	ซิลิกอน	5			≥20	≥40	ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานในการทดสอบภาคสนามกับรถยนต์ที่ใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ขั้นตอนการดำเนินงานในการทดสอบในระดับการจำลองด้านไทรโบโลยีโดยเครื่องทดสอบวัดคุณสมบัติด้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล (Four ball test)

การทดสอบคุณสมบัติด้านการสึกหรอของน้ำมันหล่อลื่นด้วยเครื่องมือโฟร์บอลเปรียบเทียบกับคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอโดยวิเคราะห์จากเส้นผ่านศูนย์กลางของแผลการสึกหรอ (scar) บนผิวลูกบอลเหล็กทั้งสามลูกด้านล่างที่เกิดจากการเสียดสีของลูกบอล เงื่อนไขการทดสอบของเครื่องทดสอบโฟร์บอลเป็นไปตามตารางที่ 3.5 ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อหลักมีดังต่อไปนี้

- ผลกระทบจากการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงในน้ำมันหล่อลื่น ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบโฟร์บอล แสดงดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง

ชนิดของน้ำมันหล่อลื่น	เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันหล่อลื่น	ชนิดของน้ำมันเชื้อเพลิง	เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันเชื้อเพลิง
SAE SN OW-20	100%	-	-
SAE SN OW-20	99%	E0	1%
SAE SN OW-20	99%	E10	1%
SAE SN OW-20	99%	E20	1%
SAE SN OW-20	99%	E85	1%

- ผลกระทบจากการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์ E85 และเขม่าที่มีการจำลองการปนเปื้อนด้วยคาร์บอนแบล็ค (N330) ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบโฟร์บอล แสดงดังตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงและคาร์บอนแบล็ค

ชนิดของน้ำมันหล่อลื่น	เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันหล่อลื่น	ชนิดของน้ำมันเชื้อเพลิง	เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันเชื้อเพลิง	เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนแบล็ค
SAE SN OW-20	98%	E85	1%	1%

● ผลกระทบจากการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์ E85 ในน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารเคมีเติมแต่งลดแรงเสียดทานของโมลิบดีนัม ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบโพรบอลทั้งคู่เป็นน้ำมันหล่อลื่นยี่ห้อเดียวกันน้ำมันหล่อลื่นมีมาตรฐาน API SN ชั้นความหนืด SAE 0W20 และ 5W40 แสดงดังตารางที่ 3.13 จากผลการทดสอบ XRF น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 พบสารเคมีเติมแต่งลดแรงเสียดทานของโมลิบดีนัมในน้ำมันหล่อลื่น (Lubricant-Mo) และน้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 5W40 ไม่พบมีสารเคมีเติมแต่งลดแรงเสียดทานของโมลิบดีนัมในน้ำมันหล่อลื่น (Lubricant-Mo free)

ตารางที่ 3.13 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงในน้ำมันหล่อลื่นที่มีและไม่มีสารเคมีเติมแต่งลดแรงเสียดทานของโมลิบดีนัม

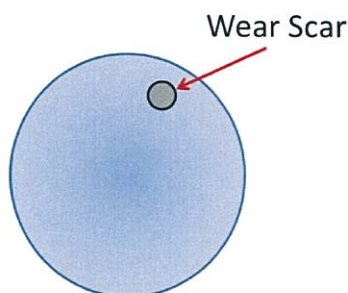
ชนิดของน้ำมันหล่อลื่น	เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันหล่อลื่น	ชนิดของน้ำมันเชื้อเพลิง	เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันเชื้อเพลิง
Lubricant-Mo	99%	E85	1%
Lubricant-Mo free	99%	E85	1%

ในการทดสอบคุณสมบัติด้านการสึกหรอของน้ำมันหล่อลื่นด้วยเครื่องมือโพรบอลมีเครื่องมือวิเคราะห์ร่วมในการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1) การวิเคราะห์การสึกหรอของผิวลูกบอล

1.1) การวิเคราะห์การสึกหรอของผิวลูกบอลด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

1.1.1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผลที่สึกหรอบนผิวลูกบอล (Scar) : ทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผลที่สึกหรอบนผิวลูกบอลเหล็ก แสดงดังรูปที่ 3.13 โดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงซึ่งมีฟังก์ชันการวัดขนาด การวัดขนาดทำการวัดเฉพาะแผลการสึกหรอบนผิวของลูกบอล 3 ลูก ที่อยู่ด้านล่างแต่ละลูกวัดขนาด 3 ครั้ง

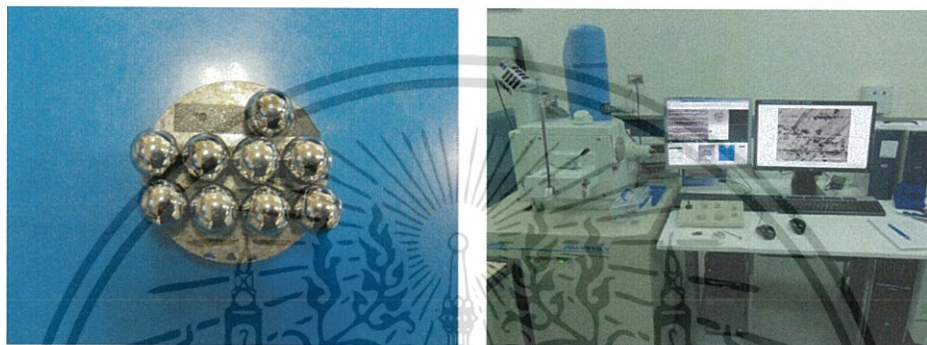


รูปที่ 3.13 ลักษณะของแผลที่สึกหรอบนผิวลูกบอลเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.2) ความหยาบของพื้นผิว (Roughness) : ทำการวิเคราะห์ค่าความหยาบของแผ่นที่สึกหรอบนผิวลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบโพรบโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่มีฟังก์ชัน 3 มิติ ซึ่งสามารถหาค่าความหยาบโดยเฉลี่ยจากสมการที่ 2.6

1.2) การวิเคราะห์การสึกหรอของผิวลูกบอลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด : เป็นการวิเคราะห์พื้นผิวการสึกหรอของลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบโพรบเป็นการวิเคราะห์กลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนผลการสึกหรอที่เงื่อนไขต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การวิเคราะห์พื้นผิวการสึกหรอของลูกบอลเหล็กด้วยภาพถ่าย SEM

2) แรงเสียดทานด้านการหมุน (Friction torque) : เป็นการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่มีการปนเปื้อนตามเงื่อนไขต่างๆ ที่มีผลต่อแรงเสียดทานด้านการหมุนของลูกบอลเหล็ก

3) การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (ความหนืด) ของน้ำมันหล่อลื่น : การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานหรือยังไม่ได้ทดสอบกับโพรบและมีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงและคาร์บอนแบล็คแล้วเปรียบเทียบกับน้ำมันที่ยังไม่ได้ใช้งาน(New oil) แสดงดังตารางที่ 3.14 ของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีดังต่อไปนี้

- New oil(SN 0W20) หรือ Lubricant-Mo
- New oil(SN 0W20) + E0 1%Wt
- New oil(SN 0W20) + E10 1%Wt
- New oil(SN 0W20) + E20 1%Wt
- New oil(SN 0W20) + E85 1%Wt หรือ Lubricant-Mo + E85 1%Wt
- New oil(SN 5W40) หรือ Lubricant-Mo free
- New oil(SN 5W40) + E85 1%Wt หรือ Lubricant-Mo free + E85 1%Wt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้ว : เป็นการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของเศษโลหะสึกหรอของลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบกับโฟร์บอล ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีดังต่อไปนี้

- New oil (SN 0W20) + E20 1%Wt
- New oil (SN 0W20) + E85 1%Wt
- Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85 1%Wt

5) การวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ของน้ำมันหล่อลื่น : เป็นวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุของสารเคมีเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่นเครื่อง XRF แสดงดังรูปที่ 3.15 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีดังต่อไปนี้

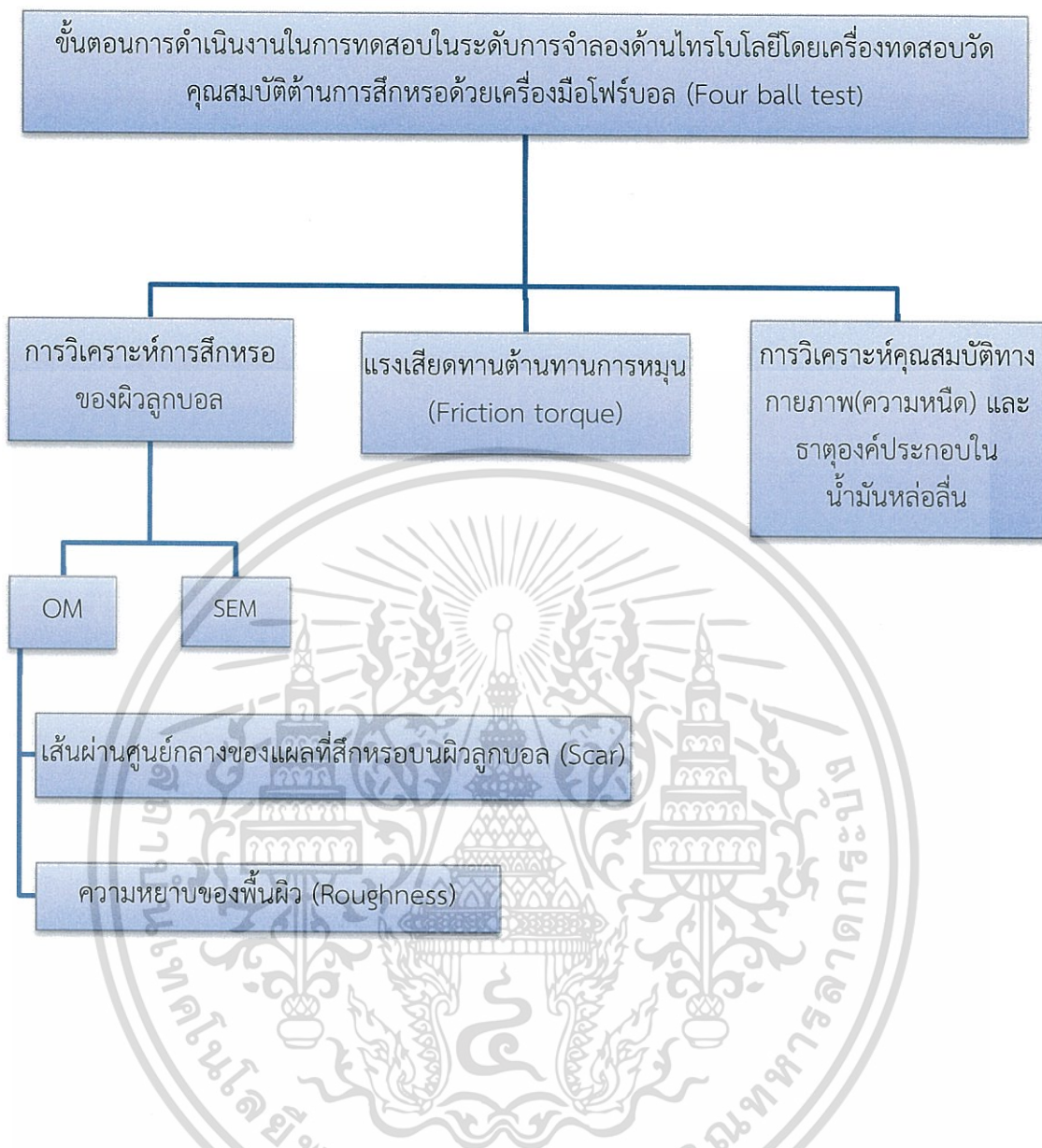
- New oil API SN SAE0W20 (Lubricant-Mo)
- New oil API SN SAE5W40 (Lubricant-Mo free)



รูปที่ 3.15 เครื่องวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

ตารางที่ 3.14 ข้อมูลค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นที่มีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงและคาร์บอนแบล็ค

ชนิดของน้ำมันหล่อลื่น	เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันหล่อลื่น	ชนิดของน้ำมันเชื้อเพลิง	เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันเชื้อเพลิง	เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนแบล็ค	ความหนืด ที่ 40°C (cSt)	ความหนืด ที่ 100°C (cSt)	ดัชนีความหนืด
SN 0W20	100%	-	-	-	45.7	8.7	174
SN 0W20	99%	E0	1%	-	42.8	8.4	176
SN 0W20	99%	E10	1%	-	42.5	8.3	176
SN 0W20	99%	E20	1%	-	42.5	8.3	176
SN 0W20	99%	E85	1%	-	41.9	8.3	177
SN 0W20	98%	E85	1%	1%	43.6	8.4	172
SN 5W40	100%	-	-	-	91.0	14.9	172
SN 5W40	99%	E85	1%	-	84.0	14.7	183



รูปที่ 3.16 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานในการทดสอบในระดับการจำลองด้านโทรโบลยีโดยเครื่องทดสอบวัดคุณสมบัติด้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล (Four ball test)

การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงผลที่ได้จากการทดสอบของชุดเครื่องมือทดสอบต่างๆจากการทดสอบทั้งการทดสอบภาคสนามกับรถยนต์ที่ใช้งานจริงและการทดสอบในระดับการจำลองด้านไทรโบโลยีโดยเครื่องทดสอบวัดคุณสมบัติด้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโพรบออลตามเงื่อนไขการทดสอบต่างๆและทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง

4.1 การทดสอบภาคสนามกับรถยนต์ที่ใช้งานจริง

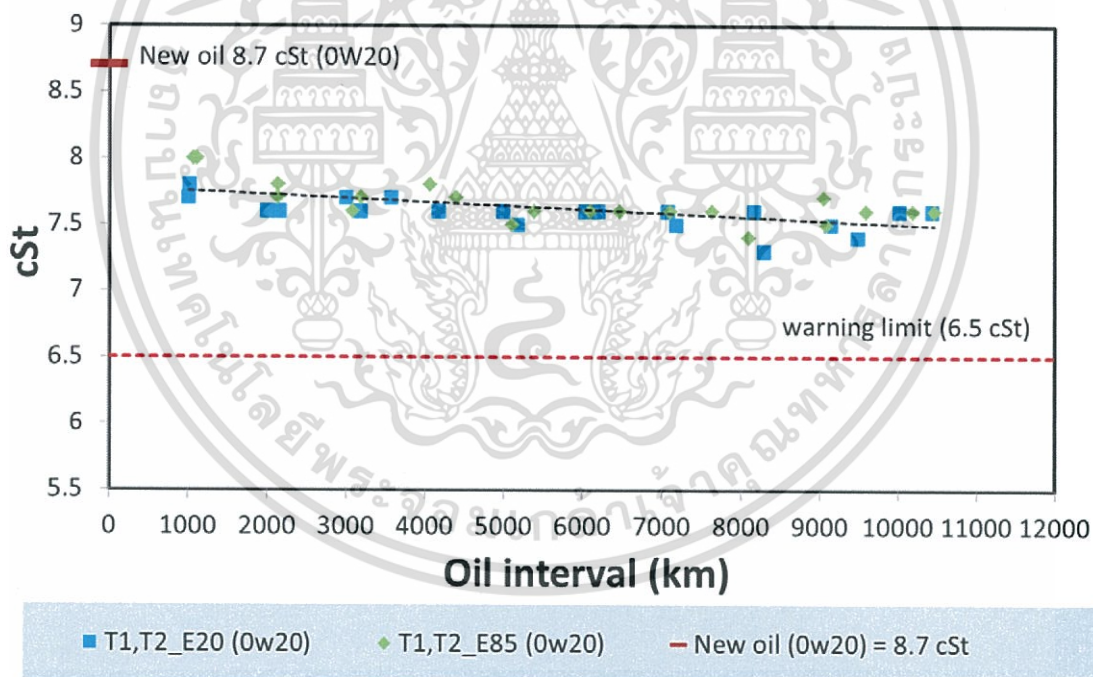
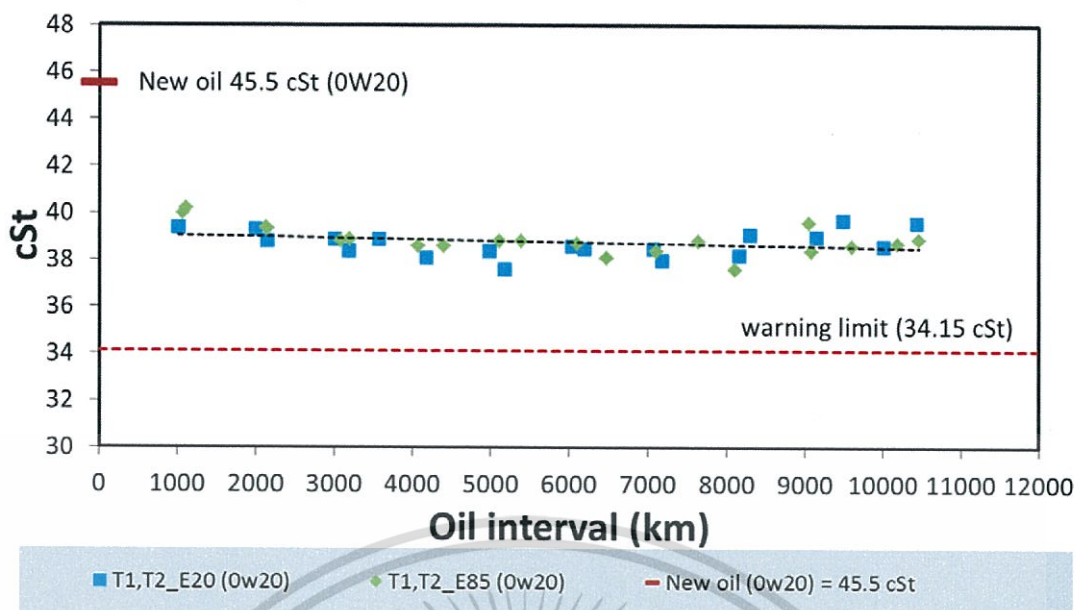
4.1.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่น

การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อหลักดังนี้

1) การวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น (Fluid properties analysis)

- ความหนืด

จากรูปที่ 4.1(a), (b) แสดงค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40 °c และ 100 °c ของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 มีค่าเตือนภัยความหนืดที่อุณหภูมิ 40 °c ระดับระมัดระวังขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 50.05 cSt ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 56.88 cSt ค่าเตือนภัยระดับระมัดระวังขอบเขตล่างอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 43.23 cSt ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตล่างอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 34.13.95 cSt และค่าเตือนภัยความหนืดที่อุณหภูมิ 100 °c ระดับระมัดระวังขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 9.1 cSt ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 10.88 cSt ค่าเตือนภัยระดับระมัดระวังขอบเขตล่างอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 8.24 cSt ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตล่างอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 6.53 cSt ซึ่งค่าความหนืดมีค่าเตือนภัยในระดับมากที่สุดอยู่ที่ $\pm 25\%$ จาก new oil และยังคงอยู่ในชั้นความหนืดเดิม ตามมาตรฐาน SAE J300 ได้จำแนกชั้นความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น [62] เมื่อนำมาวิเคราะห์กับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วเป็นการบอกถึงว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วนั้นยังอยู่ในชั้นความหนืดเดิมหรือไม่ การวัดค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40 °c เป็นการตรวจสอบช่วงที่เริ่มใช้งานของเครื่องยนต์หรือช่วงสตาร์ทเครื่องยนต์ซึ่งถ้าพบว่าค่าความหนืดมากกว่าการสตาร์ทเครื่องยนต์ก็จะยากและการวัดค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 100 °c เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญาตเห็นใบเซปวีระโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ a) 40 °c และ b) 100 °c ของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ที่ระยะทุกๆ 1,000 km

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นการตรวจสอบช่วงที่เครื่องยนต์ทำงานซึ่งถ้าพบว่าความหนืดน้อยลงอย่างมากการสึกหรอของเครื่องยนต์ก็จะมากขึ้น จากการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานตามระยะทุกๆ 1,000 km พบว่าค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40 °c และ 100 °c ทั้งช่วงที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 มีแนวโน้มลดลงตามระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น การลดลงของค่าความหนืดเกิดจากการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงจากการรั่วไหลหรือลอดผ่านช่องว่างระหว่างแหวนลูกสูบและผนังกระบอกสูบเข้าไปผสมกับน้ำมันหล่อลื่นซึ่งน้ำมันเชื้อเพลิงมาในรูปของก๊าซโบลบายเป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ผลกระทบที่เกิดขึ้นส่งผลให้น้ำมันหล่อลื่นมีค่าความหนืดลดลงทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์สูญเสียพลังงานจากการเสียดทานมากขึ้นและเกิดการสึกหรอเพิ่มมากขึ้น

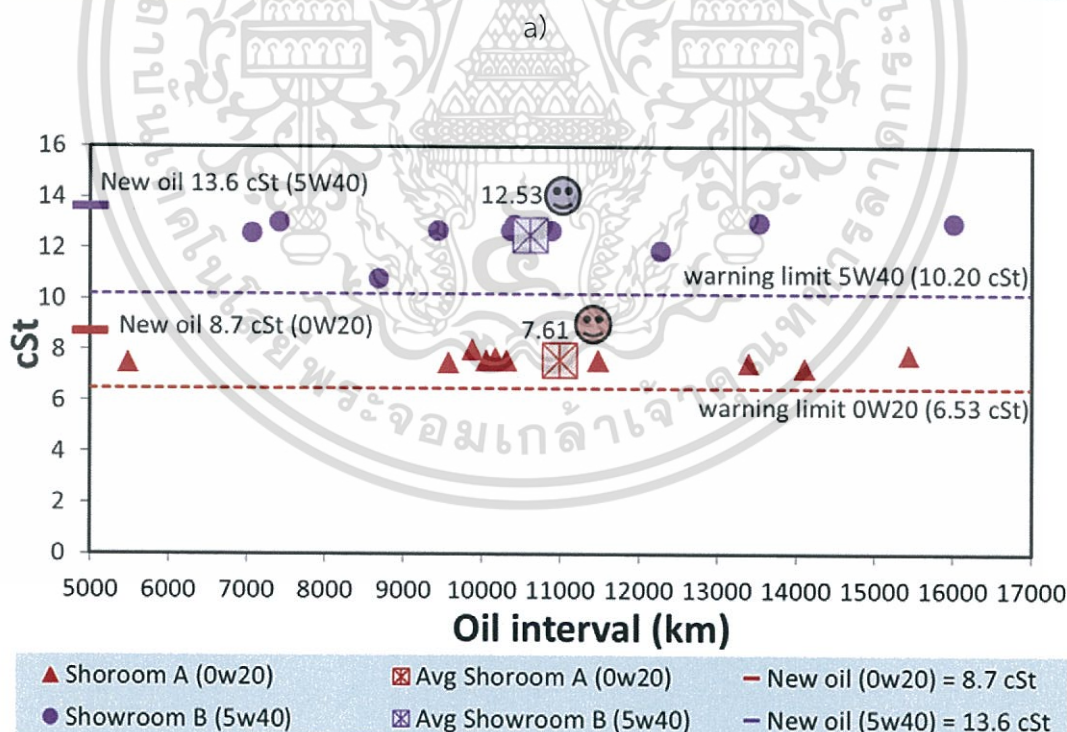
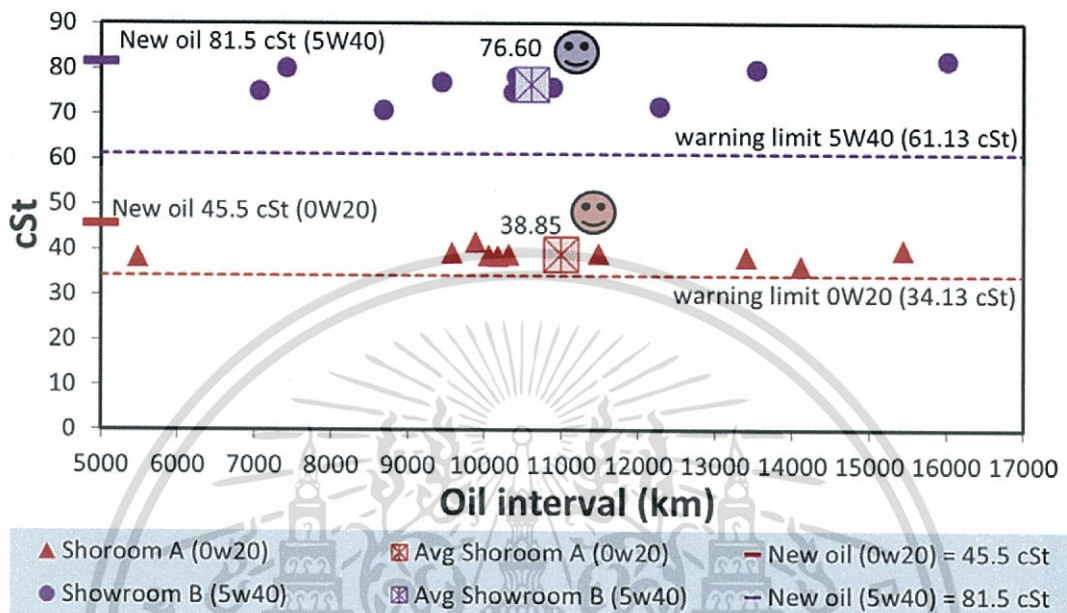
จากรูปที่ 4.2(a), (b) แสดงค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40 °c และ 100 °c ของรถยนต์โซว์รูม A (i-VTEC) เก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ระยะเปลี่ยนถ่ายจำนวน 10 คัน ซึ่งไม่ได้ทำการกำหนดชนิดการเติมน้ำมันเชื้อเพลิง เครื่องยนต์ชนิดนี้รองรับการเติมน้ำมันเชื้อเพลิง E0, E10, E20 และ E85 ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 และรถยนต์โซว์รูม B (VVT-i) เก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ระยะเปลี่ยนถ่ายจำนวน 10 คัน ซึ่งไม่ได้ทำการกำหนดชนิดการเติมน้ำมันเชื้อเพลิง เครื่องยนต์ชนิดนี้รองรับการเติมน้ำมันเชื้อเพลิง E0, E10 และ E20 ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 5W40 มีค่าเตือนภัยความหนืดที่อุณหภูมิ 40 °c ระดับระมัดระวังขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 89.65 cSt ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 101.88 cSt ค่าเตือนภัยระดับระมัดระวังขอบเขตล่างอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 77.43 cSt ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตล่างอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 61.13 cSt และค่าเตือนภัยความหนืดที่อุณหภูมิ 100 °c ระดับระมัดระวังขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 14.29 cSt ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 17 cSt ค่าเตือนภัยระดับระมัดระวังขอบเขตล่างอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 12.93 cSt ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตล่างอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10.20 cSt เมื่อพิจารณาที่รุ่นเครื่องยนต์และน้ำมันหล่อลื่นชนิดเดียวกันพบว่า น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วของรถยนต์โซว์รูม A มีค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40 °c และ 100 °c โดยเฉลี่ย 38.85 cSt, 7.61 cSt ซึ่งมีค่าต่ำลงเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ 6.65 cSt, 1.09 cSt หรือคิดเป็น 58.49%, 50.23% ตามลำดับและรถยนต์โซว์รูม B มีค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40 °c และ 100 °c โดยเฉลี่ย 76.60 cSt, 12.53 cSt ซึ่งมีค่าต่ำลงเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ 4.9 cSt, 1.07 cSt หรือคิดเป็น 24.05%, 31.47% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นของรถยนต์โดยทั่วไปจะมีค่าความหนืดโดยเฉลี่ยต่ำลงซึ่งเกิด

จากการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงตามระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้นและในกราฟที่แสดงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามผู้ใดเห็นว่าเป็นลิขสิทธิ์ของเอกสารนี้ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีต่างๆของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วสัญลักษณ์

😊 บอกถึงค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลนั้นมีค่าเฉลี่ยไม่เกินค่าเตือนภัยสูงสุดที่กำหนดและสัญลักษณ์

☹ บอกถึงค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลนั้นมีค่าเฉลี่ยเกินค่าเตือนภัยสูงสุดที่กำหนด



b)

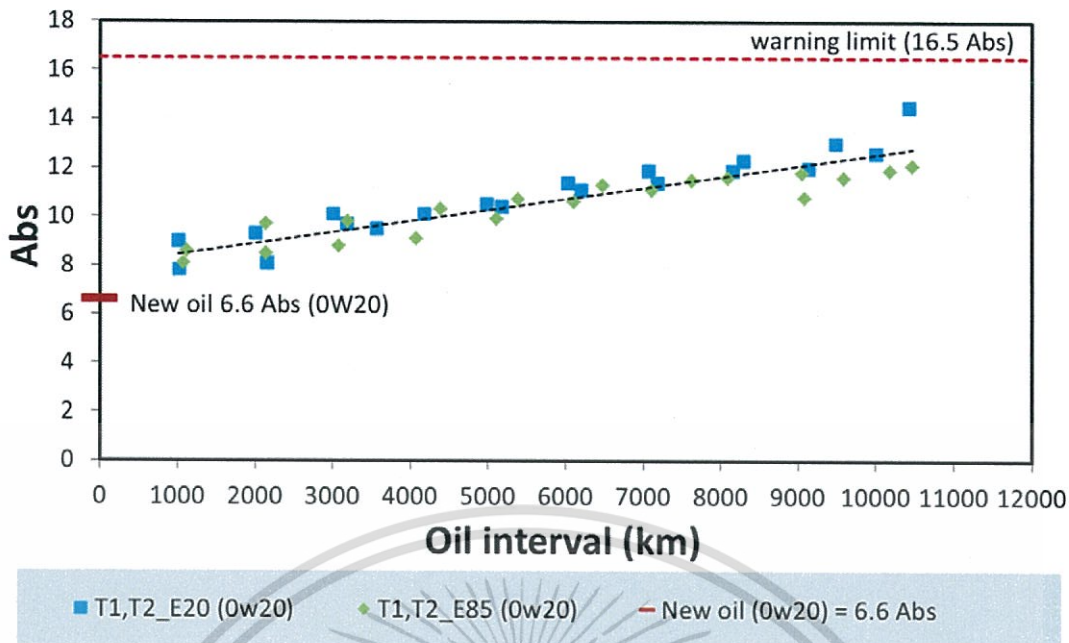
รูปที่ 4.2 ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ a) 40 °C และ b) 100 °C จากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

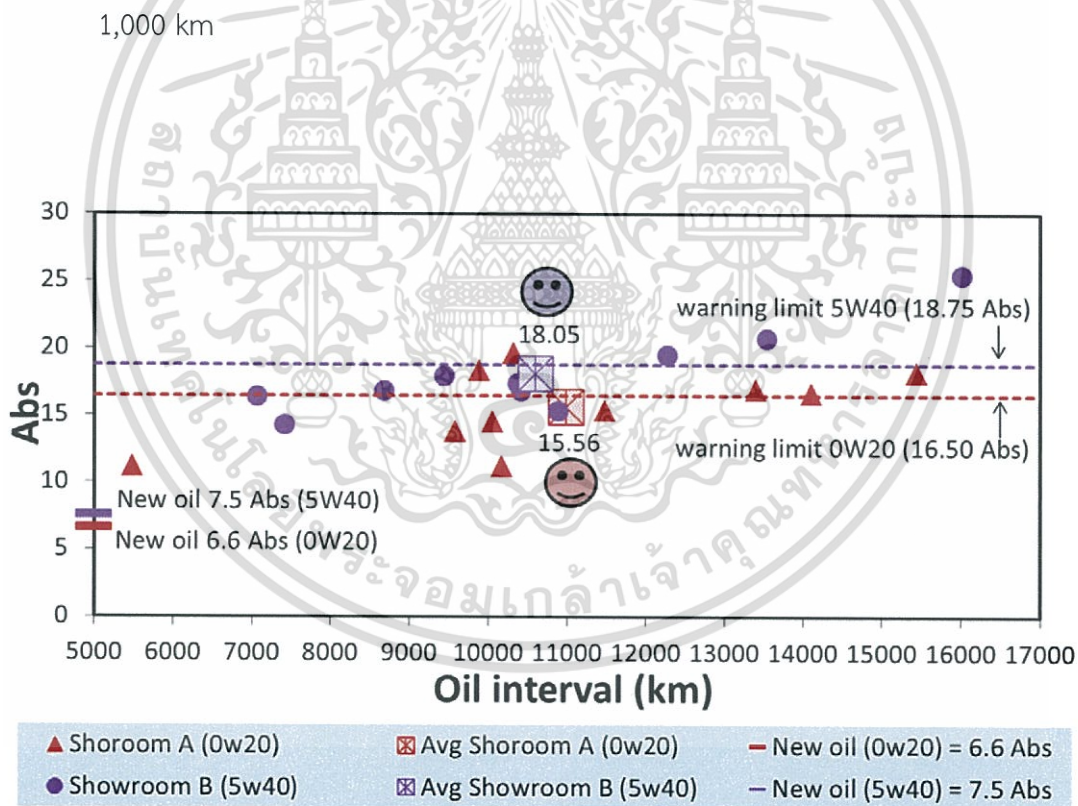
- ค่าออกซิเดชัน

จากรูปที่ 4.3 แสดงค่าออกซิเดชันของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 มีค่าเตือนภัยระดับประมัตระวังขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 13.2 Abs ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 16.5 Abs จากการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานตามระยะทุกๆ 1,000 km พบว่าค่าออกซิเดชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าออกซิเดชันเกิดจากการปนเปื้อนความชื้นหรือน้ำและออกซิเจนในอากาศถ้ามีการปนเปื้อนพวกเศษโลหะสึกหรอจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มมากขึ้นเพราะเศษโลหะสึกหรอจะเป็นตัวกระตุ้น (Catalyst) จับออกซิเจนให้ไปหาพันธะได้เร็วขึ้น การทำงานของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิที่สูงก็เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้นเพราะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทุก 10°C จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็น 2 เท่า การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพเร็วขึ้น ความหนืดเพิ่มสูงขึ้น ความเป็นกรดในน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มสูงขึ้น น้ำมันหล่อลื่นมีกลิ่นเหม็นและสีเข้มขึ้น

จากรูปที่ 4.4 แสดงค่าออกซิเดชันจากรถยนต์ไอซ์รูม A และไอซ์รูม B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น รถยนต์ไอซ์รูม A ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 เช่นเดียวกับรถทดสอบ T1 และ T2 และรถยนต์ไอซ์รูม B ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 5W40 มีค่าเตือนภัยระดับประมัตระวังขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 15 Abs ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 18.75 Abs เมื่อพิจารณาที่รุ่นเครื่องยนต์และน้ำมันหล่อลื่นชนิดเดียวกันพบว่ารถยนต์จากไอซ์รูม A ที่ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 ที่ผ่านการใช้งานแล้วมีค่าออกซิเดชันโดยเฉลี่ย 15.56 Abs ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ 8.96 Abs หรือคิดเป็น 81.41% และรถยนต์จากไอซ์รูม B ที่ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 5W40 ที่ผ่านการใช้งานแล้วมีค่าออกซิเดชันโดยเฉลี่ย 18.05 Abs ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ 10.55 Abs หรือคิดเป็น 94.19% แสดงให้เห็นว่าการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นของรถยนต์โดยทั่วไปจะมีค่าออกซิเดชันโดยเฉลี่ยสูงขึ้นตามระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น



รูปที่ 4.3 ค่าออกซิเดชันของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ที่ระยะทุกๆ



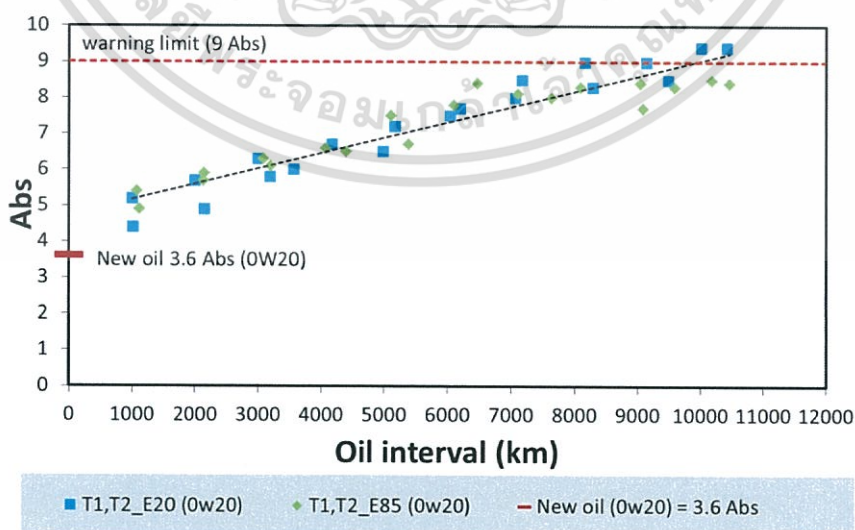
รูปที่ 4.4 ค่าออกซิเดชันจากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่าไนเตรชั่น

จากรูปที่ 4.5 แสดงค่าไนเตรชั่นของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 มีค่าเตือนภัยระดับระมัดระวังขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 7.2 Abs ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 9 Abs จากการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานตามระยะทุกๆ 1,000 km พบว่าค่าไนเตรชั่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าไนเตรชั่นเกิดจากการรั่วของโบลบายก๊าซ (Blow-by gas) ผ่านช่องทางระหว่างแหวนลูกสูบกับผนังกระบอกสูบไปสู่ห้องอ่างน้ำมันหล่อลื่นส่งผลให้น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพเร็วขึ้น ความเป็นกรดในน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มสูงขึ้น

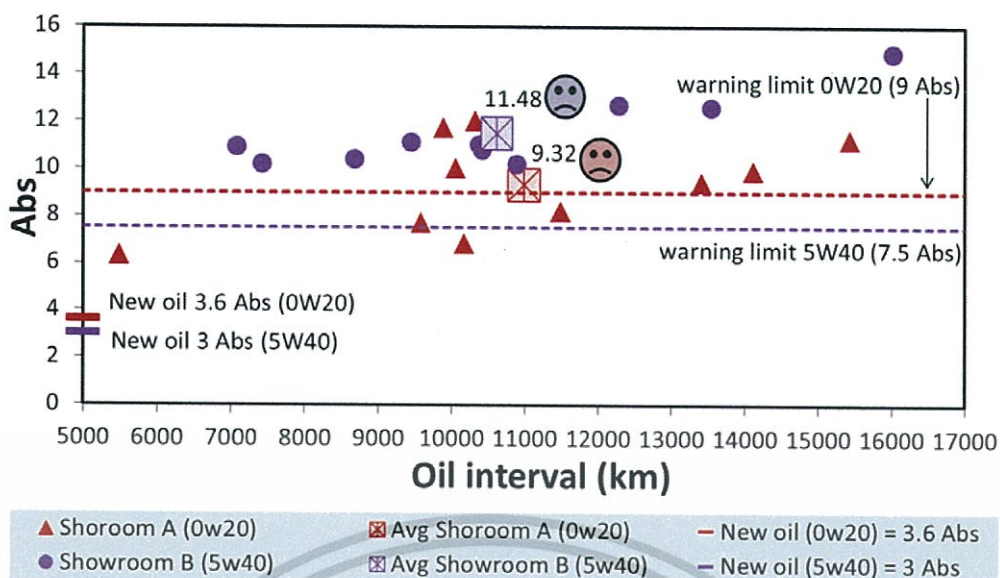
จากรูปที่ 4.6 แสดงค่าไนเตรชั่นจากรถยนต์ไฮว A และ ไฮวรัม B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น รถยนต์จากไฮวรัม A ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 เช่นเดียวกับรถทดสอบ T1 และ T2 และรถยนต์จากไฮวรัม B ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 5W40 มีค่าเตือนภัยระดับระมัดระวังขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 6 Abs ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 7.5 Abs เมื่อพิจารณาที่รุ่นเครื่องยนต์และน้ำมันหล่อลื่นชนิดเดียวกันพบว่ารถยนต์จากไฮวรัม A มีค่าไนเตรชั่นโดยเฉลี่ย 9.32 Abs ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ 5.72 Abs หรือคิดเป็น 105.93% และรถยนต์จากไฮวรัม B มีค่าไนเตรชั่นโดยเฉลี่ย 11.48 Abs ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ 8.48 Abs หรือคิดเป็น 188.44% แสดงให้เห็นว่าการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นของรถยนต์โดยทั่วไปจะมีค่าไนเตรชั่นโดยเฉลี่ยสูงขึ้นตามระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น



รูปที่ 4.5 ค่าไนเตรชั่นของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ที่ระยะทุกๆ

1,000 km

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ค่าไนเตรชั่นจากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น

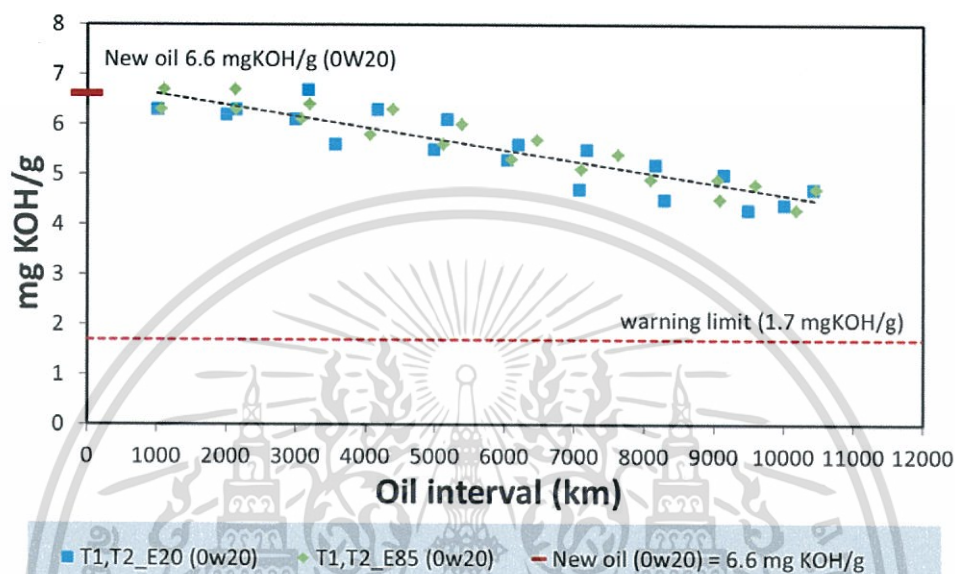
- ค่าความเป็นด่าง

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าความเป็นด่างของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 มีค่าเตือนภัยระดับระมัดระวังขอบเขตล่างอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3.3 mgKOH/g ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตล่างอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.7 mgKOH/g จากการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานตามระยะทุกๆ 1,000 km พบว่าค่าความเป็นด่างมีแนวโน้มลดลงตามระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น การลดลงของค่าความเป็นด่างในน้ำมันหล่อลื่นเกิดจากระยะเวลาในการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นมากเกินไปและเกิดจากกรดที่เพิ่มมากขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ไม่สมบูรณ์หรือเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรุนแรงส่งผลให้น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพเนื่องจากสารเคมีปรุงแต่งในน้ำมันหล่อเป็นสารเคมีที่เป็นด่างจะเข้าไปสะเทินกับกรดที่เกิดขึ้นและเมื่อปริมาณค่าความเป็นด่างหมดไป น้ำมันหล่อลื่นก็จะมีสภาพเป็นกรดที่สูงทำให้เกิดการกัดกร่อน

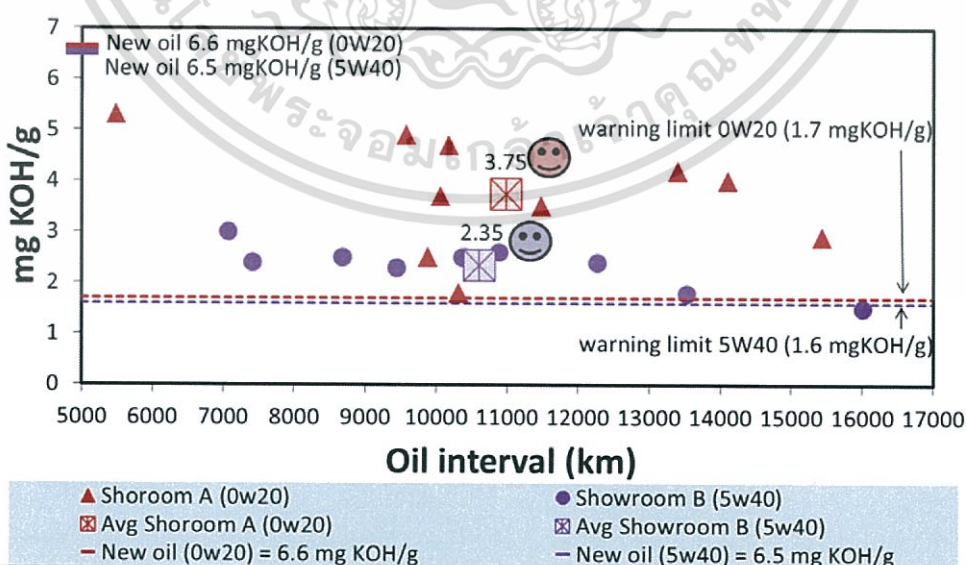
จากรูปที่ 4.8 แสดงค่าความเป็นด่างจากรถยนต์โชว์รูม A และ โชว์รูม B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น รถยนต์จากโชว์รูม A ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 เช่นเดียวกับกับรถทดสอบ T1 และ T2 และรถยนต์จากโชว์รูม B ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 5W40 มีค่าเตือนภัยระดับระมัดระวังขอบเขตล่างอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3.2 mgKOH/g ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตล่างอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.6 mgKOH/g เมื่อพิจารณาที่รุ่นเครื่องยนต์และน้ำมันหล่อลื่น

ชนิดเดียวกันพบว่ารถยนต์จากโชว์รูม A มีค่าความเป็นด่างเฉลี่ย 3.75 mgKOH/g ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้จัดทำไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ 2.85 mgKOH/g หรือคิดเป็น 81.41% และรถยนต์จากโชว์รูม B มีค่าความเป็นด่างโดยเฉลี่ย 2.35 mgKOH/g ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ 4.15 mgKOH/g หรือคิดเป็น 84.69% แสดงให้เห็นว่าการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นของรถยนต์โดยทั่วไปจะมีค่าความเป็นด่างโดยเฉลี่ยลดลงตามระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น



รูปที่ 4.7 ค่าความเป็นด่างในน้ำมันหล่อลื่นของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ที่ระยะทุกๆ 1,000 km



รูปที่ 4.8 ค่าความเป็นด่างในน้ำมันหล่อลื่นจากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะ

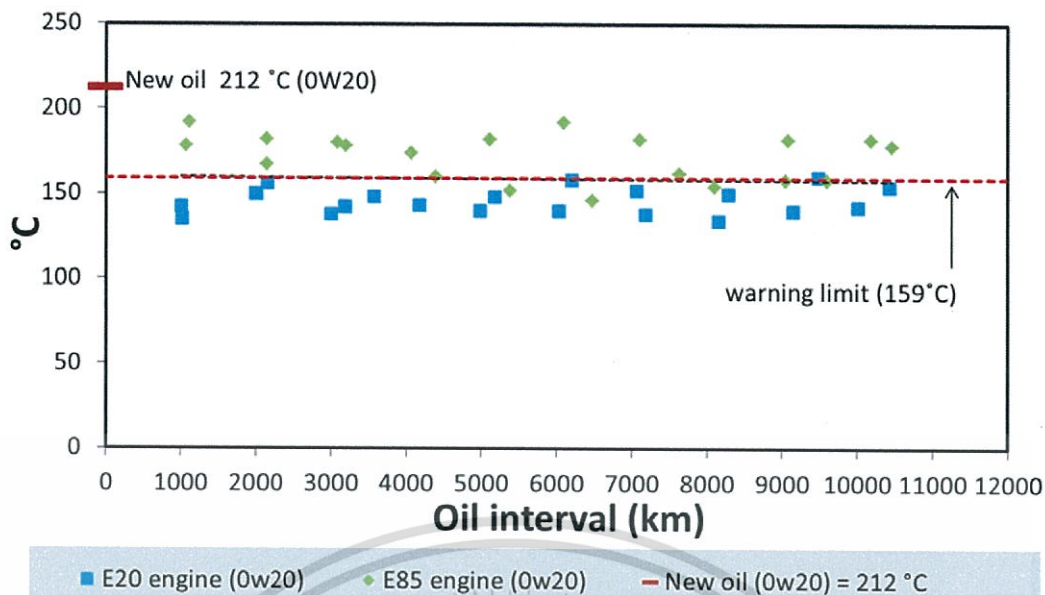
เปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

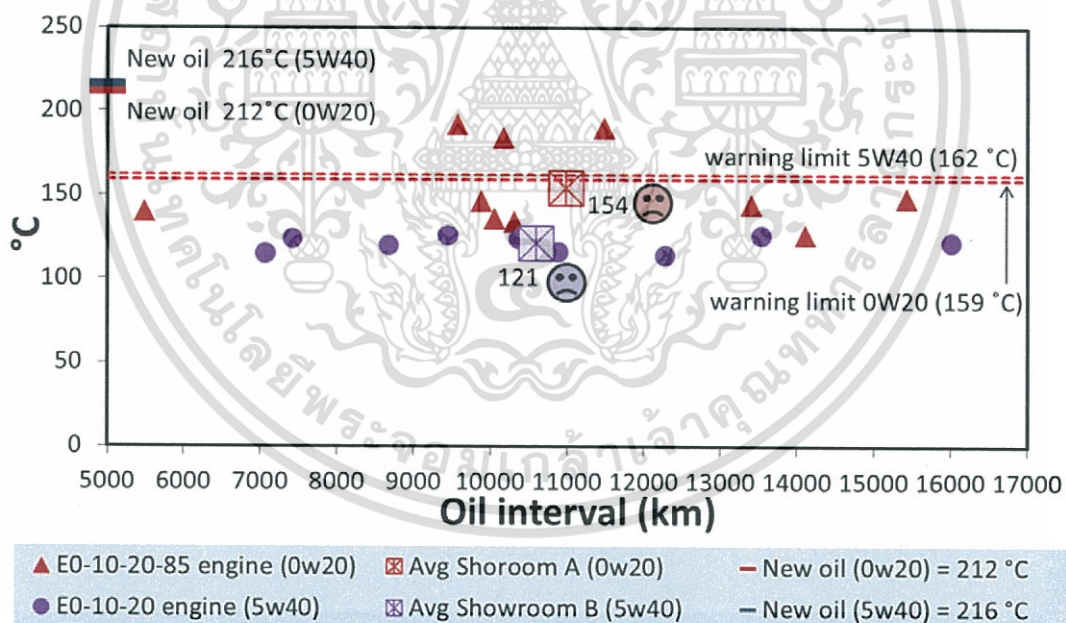
- จุดวาบไฟ

จากรูปที่ 4.9 แสดงค่าจุดวาบไฟน้ำมันหล่อลื่นของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 มีค่าเตือนภัยระดับระมัดระวังขอบเขตล่างอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ $192\text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตล่างอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ $159\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานตามระยะทุกๆ 1,000 km พบว่าค่าจุดวาบไฟน้ำมันหล่อลื่นมีแนวโน้มลดลงตามระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น การลดลงของค่าจุดวาบไฟน้ำมันหล่อลื่นเกิดจากการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงส่งผลให้น้ำมันหล่อลื่นมีความหนืดลดลงทำให้ฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นบางลงและการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงในน้ำมันหล่อลื่นในปริมาณที่สูงจะมีความเสี่ยงที่จะเกิดการลุดติดไฟได้ง่ายขึ้น

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่าจุดวาบไฟน้ำมันหล่อลื่นจากรถยนต์ไฮเวีย A และ ไฮเวีย B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น รถยนต์จากไฮเวีย A ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 เช่นเดียวกับรถทดสอบ T1 และ T2 และรถยนต์จากไฮเวีย B ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 5W40 มีค่าเตือนภัยระดับระมัดระวังขอบเขตล่างอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ $196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตล่างอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ $162\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อพิจารณาที่รุ่นเครื่องยนต์และน้ำมันหล่อลื่นชนิดเดียวกันพบว่ารถยนต์จากไฮเวีย A มีค่าจุดวาบไฟน้ำมันหล่อลื่นเฉลี่ย $154\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ $58\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือคิดเป็น 109.43% และรถยนต์จากไฮเวีย B มีค่าจุดวาบไฟน้ำมันหล่อลื่นโดยเฉลี่ย $121\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ $91\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือคิดเป็น 109.43% แสดงให้เห็นว่าการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นของรถยนต์โดยทั่วไปจะมีค่าจุดวาบไฟน้ำมันหล่อลื่นโดยเฉลี่ยลดลงตามระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น



รูปที่ 4.9 จุดวาบไฟน้ำมันหล่อลื่นของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ที่ระยะทุกๆ 1,000 km



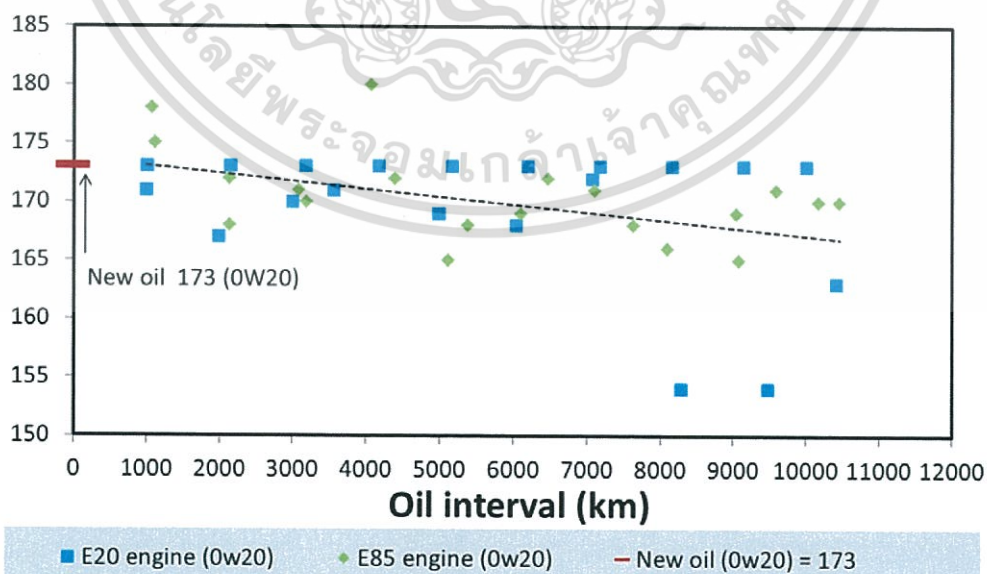
รูปที่ 4.10 จุดวาบไฟน้ำมันหล่อลื่นจากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ดัชนีความหนืด

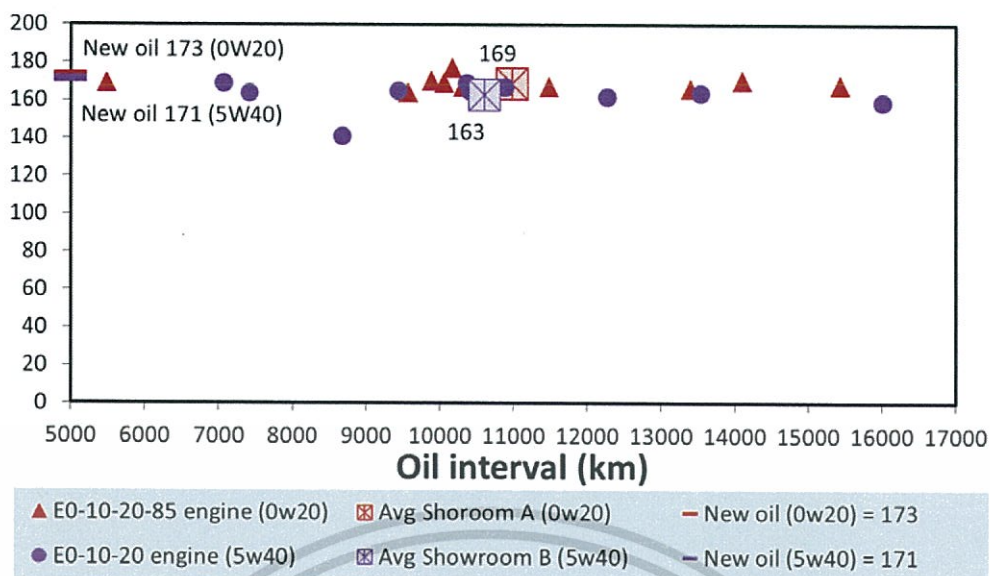
จากรูปที่ 4.11 แสดงค่าดัชนีความหนืดของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 ค่าดัชนีความหนืดไม่ได้มีการกำหนดหรือค่าเตือนภัยที่บอกถึงการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น จากการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานตามระยะทุกๆ 1,000 km พบว่าค่าดัชนีความหนืดมีแนวโน้มลดลงตามระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น การลดลงของค่าดัชนีความหนืดเกิดจากสารเคมีเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่นที่เป็นโพลีเมอร์ที่มีพันธะเชื่อมต่อกันยาวโดนแรงเฉือนจากชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ทำให้โพลีเมอร์ที่มีพันธะเชื่อมต่อกันยาวแตกหรือเสียรูปไปบางส่วนส่งผลให้ค่าดัชนีความหนืดลดลงหรืออาจกล่าวได้ว่าที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะมีค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงต่ำลงเร็วขึ้น

จากรูปที่ 4.12 แสดงค่าดัชนีความหนืดจากรถยนต์ไฮบริด A และ ไฮบริด B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น รถยนต์จากกลุ่ม A ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 เช่นเดียวกับรถทดสอบ T1 และ T2 และรถยนต์จากไฮบริด B ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 5W40 เมื่อพิจารณาที่รุ่นเครื่องยนต์และน้ำมันหล่อลื่นชนิดเดียวกันพบว่ารถยนต์จากไฮบริด A มีค่าดัชนีความหนืดโดยเฉลี่ย 169 ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ 4 และรถยนต์จากไฮบริด B มีค่าดัชนีความหนืดโดยเฉลี่ย 163 ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ 8 แสดงให้เห็นว่า การใช้งานน้ำมันหล่อลื่นของรถยนต์โดยทั่วไปจะมีค่าดัชนีความหนืดโดยเฉลี่ยลดลงตามระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น



รูปที่ 4.11 ค่าดัชนีความหนืดของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ที่ระยะทุกๆ 1,000 km

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงไว้ในเว็บไซต์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ค่าดัชนีความหนืดจากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น

2) การวิเคราะห์สิ่งสกปรกปนเปื้อน (Contamination analysis)

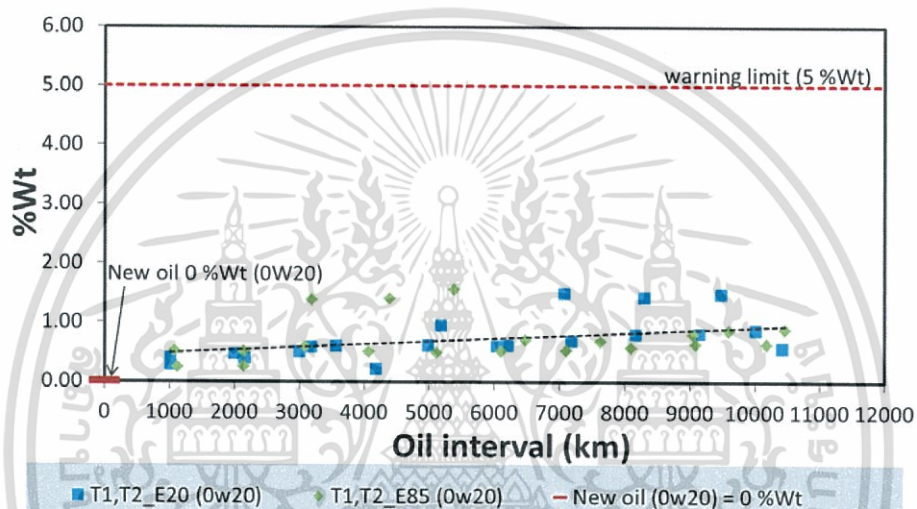
• ค่าความปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง

จากรูปที่ 4.13 แสดงค่าความปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 มีค่าเตือนภัยระดับระมัดระวังขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 3 %Wt ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 5 %Wt จากการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานตามระยะทุกๆ 1,000 km พบว่าค่าความปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะการใช้งาน น้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าความปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงเกิดจากการรั่วเล็ดรอดผ่านช่องว่างระหว่างแหวนลูกสูบและผนังกระบอกสูบเข้าไปผสมกับน้ำมันหล่อลื่นซึ่งน้ำมันเชื้อเพลิงมาในรูปของก๊าซโบลบายเป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ผลกระทบที่เกิดขึ้นน้ำมันหล่อลื่นมีค่าความหนืดลดลงและทำให้สารเคมีปรุงแต่งถูกเจือจางส่งผลให้ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์เกิดการสึกหรอเพิ่มมากขึ้น การควบคุมการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงถ้ามีการปนเปื้อนในปริมาณที่สูงควรทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น

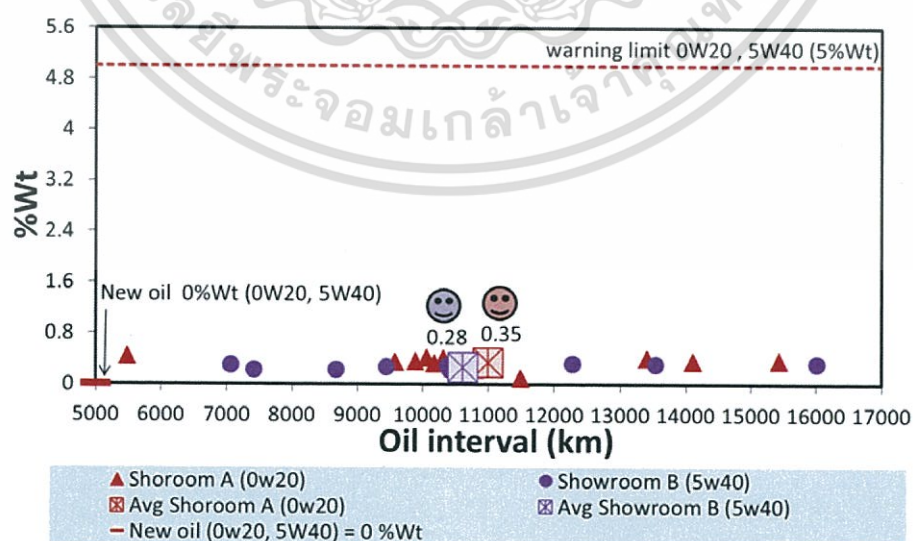
จากรูปที่ 4.14 แสดงค่าความปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงจากรถยนต์โชว์รูม A และ โชว์รูม B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น รถยนต์จากโชว์รูม A ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 เช่นเดียวกับรถทดสอบ T1 และ T2 และรถยนต์จากโชว์รูม B ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 5W40 มีค่าเตือนภัยระดับ

ระมัดระวังขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 3 %Wt ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตบน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูเห็นใบใช้ประโยชน์ท่านการค่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 5 %Wt เมื่อพิจารณาที่รุ่นเครื่องยนต์และน้ำมันหล่อลื่นชนิดเดียวกันพบว่ารถยนต์จากโชว์รูม A มีค่าความปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงโดยเฉลี่ย 0.35 %Wt เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ 0.35 %Wt หรือคิดเป็น 7% และรถยนต์จากโชว์รูม B มีค่าความปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงโดยเฉลี่ย 0.28 %Wt ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ 0.28 %Wt หรือคิดเป็น 5.6% แสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำมันหล่อลื่นของรถยนต์โดยทั่วไปจะมีค่าความปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงโดยเฉลี่ยสูงขึ้นตามระยะเวลาใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น



รูปที่ 4.13 ค่าความปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ที่ระยะทุกๆ 1,000 km



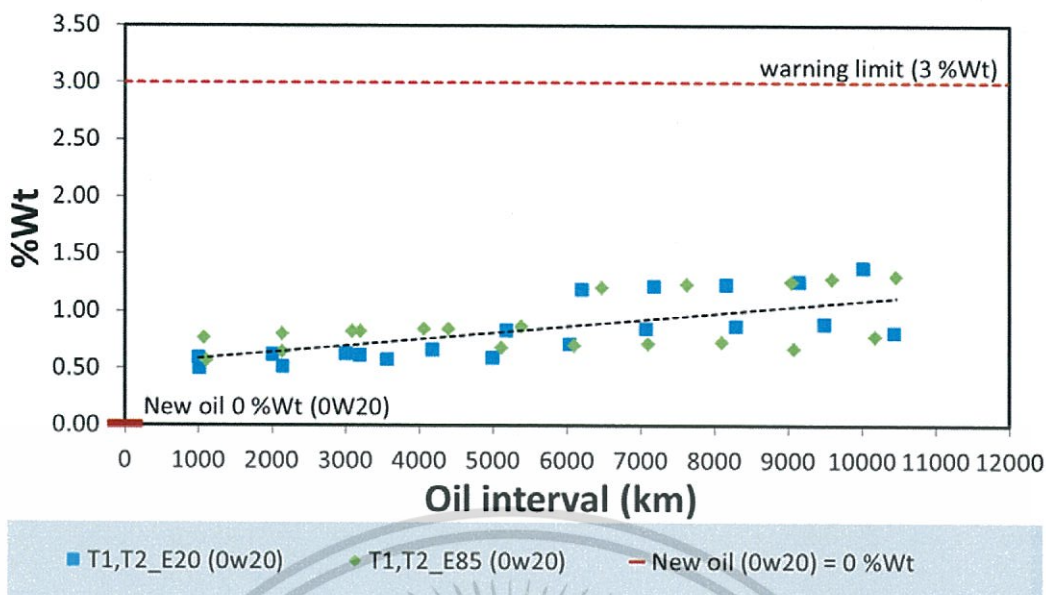
รูปที่ 4.14 ค่าความปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงจากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

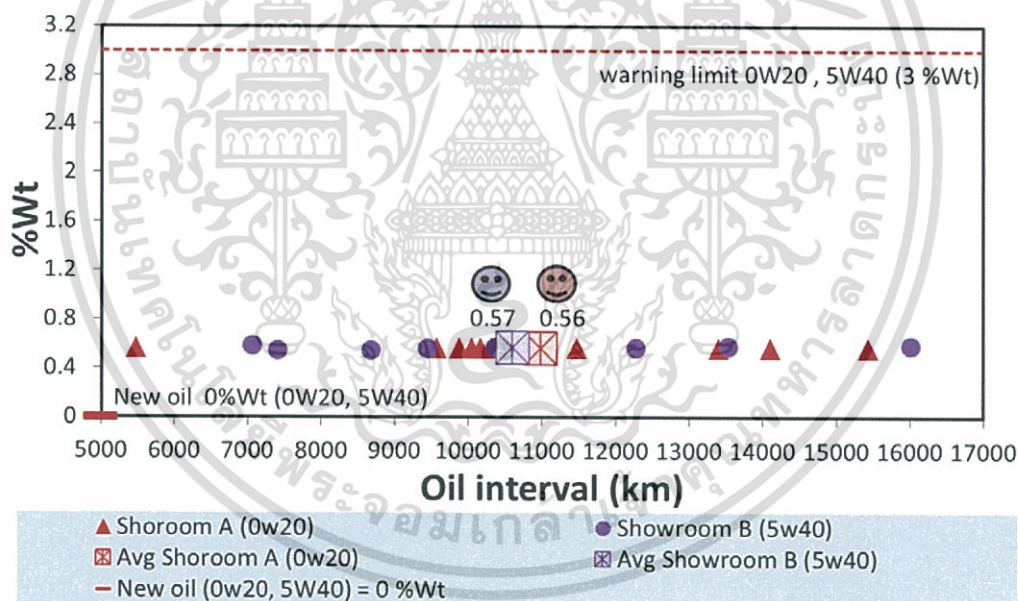
- ค่าความปนเปื้อนเขม่า

จากรูปที่ 4.15 แสดงค่าความปนเปื้อนเขม่าของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 มีค่าเตือนภัยระดับระมัดระวังขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 2 %Wt ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 3 %Wt จากการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานตามระยะทุกๆ 1,000 km พบว่าค่าความปนเปื้อนเขม่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าความปนเปื้อนเขม่าเกิดจากการรั่วเล็ดรอดผ่านช่องว่างระหว่างแหวนลูกสูบและผนังกระบอกสูบเข้าไปผสมกับน้ำมันหล่อลื่นซึ่งมาในรูปของก๊าซโบลบายเป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เครื่องยนต์ทำงานที่ภาระสูงเกินไป และระยะการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นที่นานก็จะมีปริมาณการสะสมของเขม่ามากขึ้น ผลกระทบที่เกิดขึ้นน้ำมันหล่อลื่นจะมีค่าความหนืดสูงขึ้น การเสื่อมสภาพของสารเคมีปรุงแต่งในการกระจายเขม่าลดต่ำลงเนื่องจากมีปริมาณการปนเปื้อนของเขม่ามากขึ้นเป็นผลให้เกิดการสึกหรอที่มากขึ้น

จากรูปที่ 4.16 แสดงค่าความปนเปื้อนเขม่าจากรถยนต์ไฮบริด A และ ไฮบริด B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น รถยนต์จากไฮบริด A ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 เช่นเดียวกับรถทดสอบ T1 และ T2 และรถยนต์จากไฮบริด B ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 5W40 มีค่าเตือนภัยระดับระมัดระวังขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 2 %Wt ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 3 %Wt เมื่อพิจารณาที่รุ่นเครื่องยนต์และน้ำมันหล่อลื่นชนิดเดียวกันพบว่ารถยนต์จากไฮบริด A มีค่าความปนเปื้อนเขม่าโดยเฉลี่ย 0.56 %Wt ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ 0.56 %Wt หรือคิดเป็น 18.67% และรถยนต์จากไฮบริด B มีค่าความปนเปื้อนเขม่าโดยเฉลี่ย 0.57 %Wt ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ 0.57 %Wt หรือคิดเป็น 19% แสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำมันหล่อลื่นของรถยนต์โดยทั่วไปจะมีค่าความปนเปื้อนเขม่าโดยเฉลี่ยสูงขึ้นตามระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น



รูปที่ 4.15 ค่าความปนเปื้อนเขม่าของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ที่ระยะทุกๆ 1,000 km



รูปที่ 4.16 ค่าความปนเปื้อนเขม่าจากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น

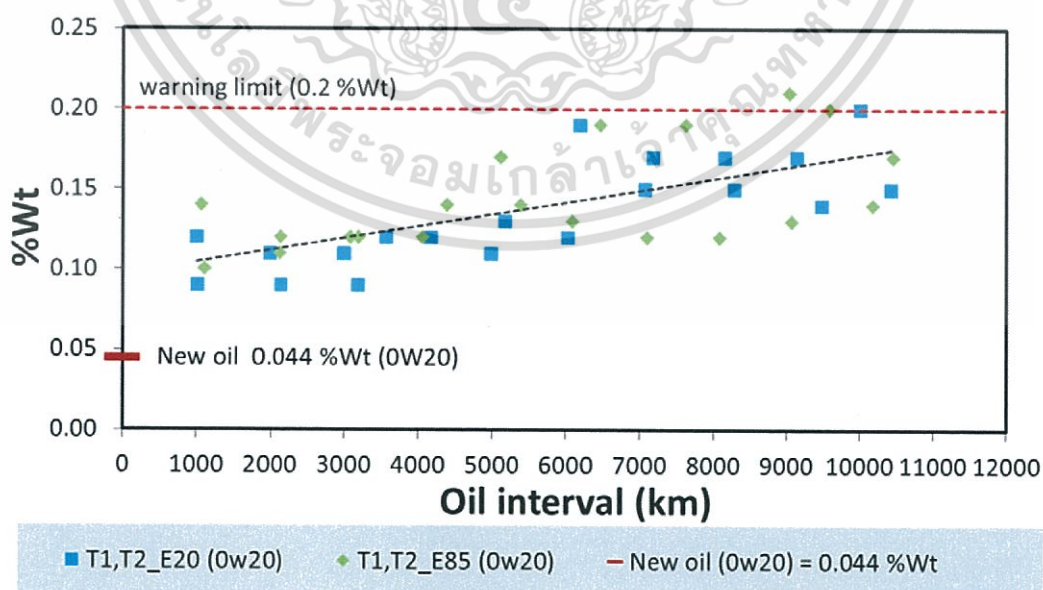
- ค่าความปนเปื้อนน้ำ

จากรูปที่ 4.17 แสดงค่าความปนเปื้อนน้ำของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 มีค่าเตือนภัยระดับระมัดระวังขอบเขตบนอยู่ใน

ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 0.15 %Wt ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเท่ากับ 0.2 %Wt จากการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานตามระยะทุกๆ 1,000 km พบว่าค่าความปนเปื้อนน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าความปนเปื้อนน้ำเกิดจากการปนเปื้อนมาจากบรรยากาศสิ่งแวดล้อมที่เข้ามาทางช่องไอซีของเครื่องยนต์หรือมีการรั่วไหลของระบบน้ำหล่อเย็นในเครื่องยนต์ส่งผลให้น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพและส่งผลต่อค่าการเกิดออกซิเดชันและค่าความหนืดเพิ่มสูงขึ้น การปนเปื้อนน้ำยังส่งผลให้เกิดการตกตะกอนนอนกันและก่อให้เกิดสนิมเหล็ก

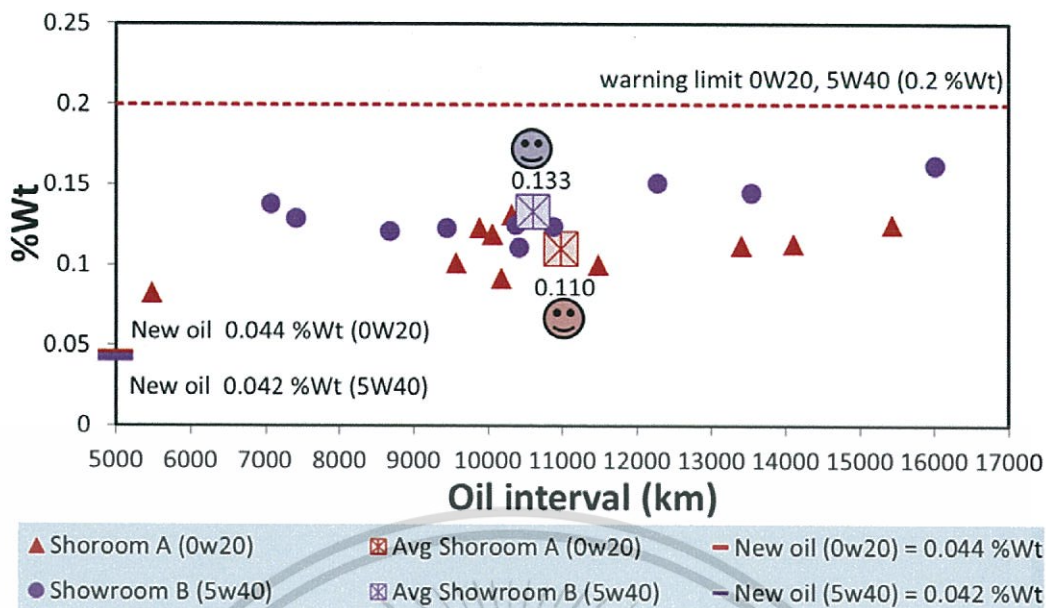
จากรูปที่ 4.18 แสดงค่าความปนเปื้อนน้ำจากรถยนต์โชว์รูม A และ โชว์รูม B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น รถยนต์จากโชว์รูม A ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 เช่นเดียวกับรถทดสอบ T1 และ T2 และรถยนต์จากโชว์รูม B ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 5W40 มีค่าเตือนภัยระดับระมัดระวังขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 0.15 %Wt ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 %Wt เมื่อพิจารณาที่รุ่นเครื่องยนต์และน้ำมันหล่อลื่นชนิดเดียวกันพบว่ารถยนต์จากรถยนต์ A มีค่าความปนเปื้อนน้ำโดยเฉลี่ย 0.110 %Wt ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ 0.066 %Wt หรือคิดเป็น 42.31% และรถยนต์จาก showroom B มีค่าความปนเปื้อนน้ำโดยเฉลี่ย 0.133 %Wt ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ 0.091 %Wt หรือคิดเป็น 57.59% แสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำมันหล่อลื่นของรถยนต์โดยทั่วไปจะมีค่าความปนเปื้อนน้ำโดยเฉลี่ยสูงขึ้นตามระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น



รูปที่ 4.17 ค่าความปนเปื้อนน้ำของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ที่

ระยะทุกๆ 1,000 km

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



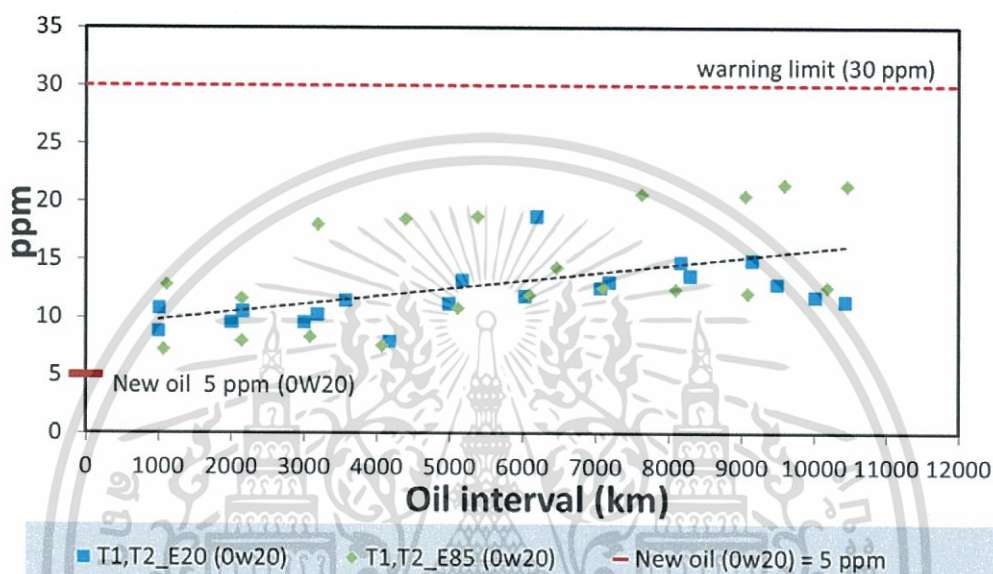
รูปที่ 4.18 ค่าความปนเปื้อนน้ำจากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น

- ค่าความปนเปื้อนซิลิกอน

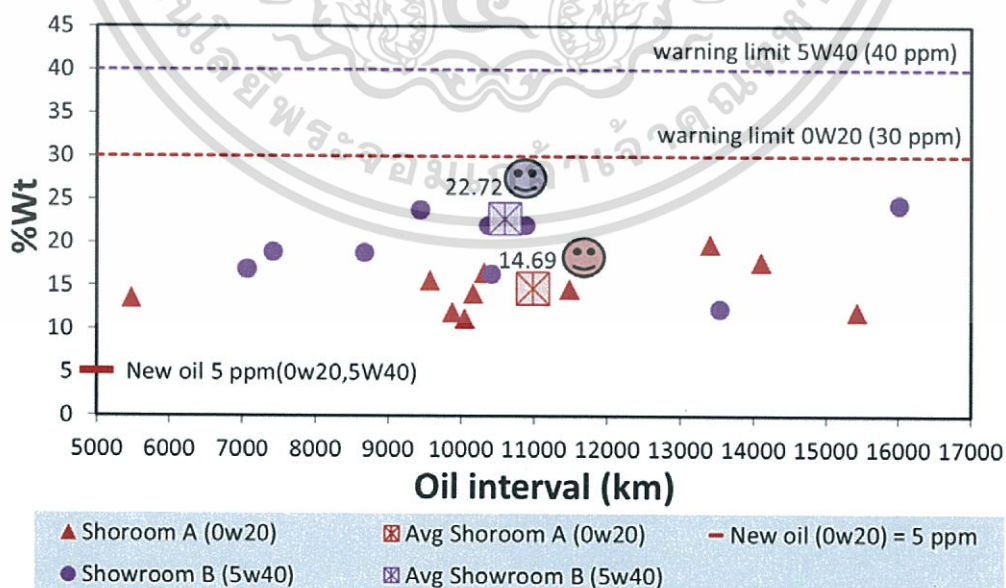
จากรูปที่ 4.19 แสดงค่าความปนเปื้อนซิลิกอนของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 มีค่าเตือนภัยระดับมัธยขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 10 ppm ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 30 ppm จากการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานตามระยะทุกๆ 1,000 km พบว่าค่าความปนเปื้อนซิลิกอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าความปนเปื้อนซิลิกอนหรือฝุ่นละอองมาจากบรรยากาศภายนอกเข้าไปช่องอากาศไอดีของเครื่องยนต์หรืออาจมาจากน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานซึ่งอาจมีการปนเปื้อนจากกระบวนการจัดเก็บหรือขนถ่ายจากผู้ผลิต ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสิ่งปนเปื้อนเข้ามาซึ่งเป็นอนุภาคที่มีความแข็งเมื่อเข้ามาในเครื่องยนต์จะทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์เกิดการสึกหรอแบบการขูดขีดมากขึ้น

จากรูปที่ 4.20 แสดงค่าความปนเปื้อนซิลิกอนจากรถยนต์โชว์รูม A และโชว์รูม B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น รถยนต์จากโชว์รูม A ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 เช่นเดียวกับรถทดสอบ T1 และ T2 และรถยนต์จากโชว์รูม B ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 5W40 มีค่าเตือนภัยระดับมัธยขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 20 ppm ค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 40 ppm เมื่อพิจารณาที่รุ่นเครื่องยนต์และน้ำมันหล่อลื่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดเดียวกันพบว่าโชว์รูม A มีค่าความปนเปื้อนซิลิกอนโดยเฉลี่ย 14.69 ppm ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ 9.69 ppm หรือคิดเป็น 38.76% และโชว์รูม B มีค่าความปนเปื้อนซิลิกอนโดยเฉลี่ย 22.27 ppm ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานเท่ากับ 17.72 ppm หรือคิดเป็น 50.63% แสดงให้เห็นว่าการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นของรถยนต์โดยทั่วไปจะมีค่าความปนเปื้อนซิลิกอนโดยเฉลี่ยสูงขึ้นตามระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่มากขึ้น



รูปที่ 4.19 ค่าความปนเปื้อนซิลิกอนของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 E85 ที่ระยะทุกๆ 1,000 km



รูปที่ 4.20 ค่าความปนเปื้อนซิลิกอนค่าความปนเปื้อนน้ำจากรถยนต์ showroom A และ showroom B ที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

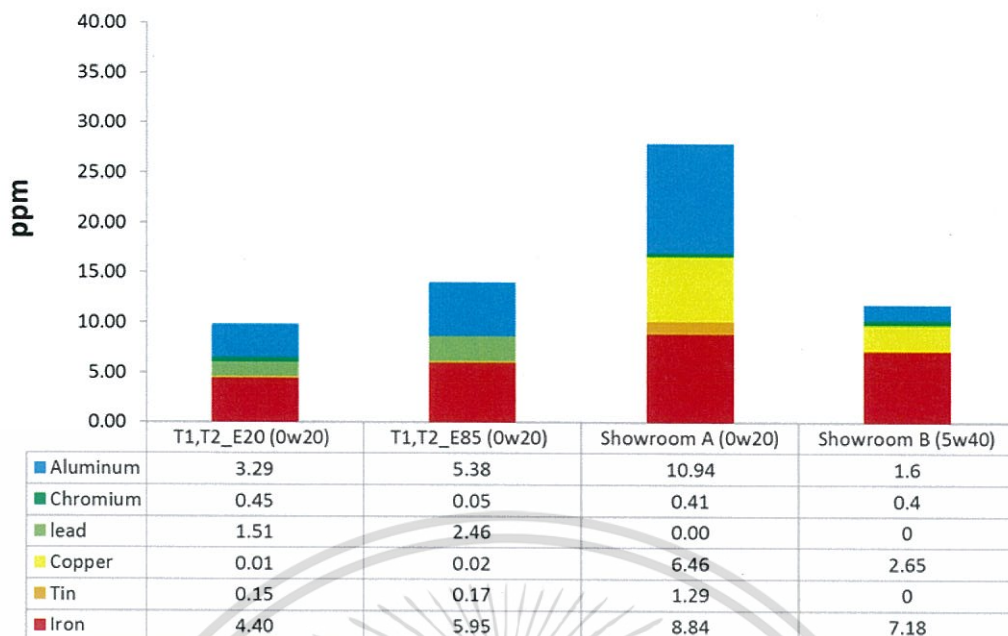
3) การวิเคราะห์เศษโลหะสึกหรอจากการสึกหรอ (Wear debris analysis)

จากรูปที่ 4.21 แสดงปริมาณของเศษโลหะสึกหรอแต่ละชนิดของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 และจากรถยนต์โซว์รุ่ม A และ โซว์รุ่ม B ผลของเศษโลหะสึกหรอแต่ละชนิดสามารถบอกถึงแหล่งที่มาของการเกิดการสึกหรอของเครื่องยนต์โดยทั่วไปได้ดังนี้

- อลูมิเนียม (Aluminum) : สึกหรอมาจาก ลูกสูบ , แบริ่งเพลลาข้อเหวี่ยง , รั้งของรองเลื่อนแบบกลิ้ง
- โครเมียม (Chromium) : สึกหรอมาจาก เสื้อสูบ , แหวนลูกสูบ , ปลอกสลักข้อต่อก้านสูบ
- ทองแดง (Copper) : สึกหรอมาจาก ลินไอดีลีนไอเสีย
- ดีบุก (Tin) : สึกหรอมาจาก ก้านสูบ , ปลอกก้านสูบลูกสูบ
- เหล็ก (Iron) : สึกหรอมาจาก เสื้อสูบ , แหวนลูกสูบ , ลูกสูบ, เพลารางวิ่งรองลื่น , เม็ดลูกกลิ้ง

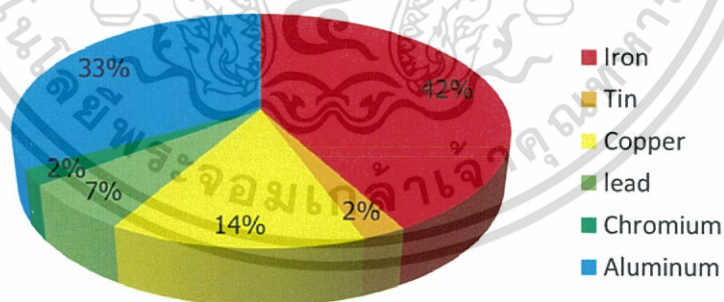
ค่าขอบเขตการเตือนภัยของปริมาณเศษโลหะการสึกหรอของอลูมิเนียม โครเมียม ทองแดง ดีบุก มีค่าเตือนภัยระดับระมัดระวังขอบเขตบน (Upper-Caution) อยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 40 ppm และค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตบน (Upper-Warning) อยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 60 ppm ค่าขอบเขตการเตือนภัยของปริมาณเศษโลหะการสึกหรอของเหล็กมีค่าเตือนภัยระดับระมัดระวังขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 100 ppm และค่าเตือนภัยระดับต้องตรวจสอบขอบเขตบนอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 200 ppm การตรวจพบเศษโลหะสึกหรอของธาตุต่างๆที่เพิ่มมากขึ้นแสดงให้เห็นถึงอัตราการสึกหรอที่ผิดปกติที่กำลังเกิดขึ้น

การสูญเสียพลังงานจากกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการเปลี่ยนเป็นการเคลื่อนที่ของกลไกต่างๆในเครื่องยนต์สูญเสียไปกับการเสียดทานกันของชิ้นงานที่มีการเคลื่อนสัมผัสกันเช่น รางวาล์ว (Valve train) ส่วนประกอบต่างๆของลูกสูบ (piston assembly) พบว่าสูญเสียพลังไปกับการเสียดทานกับส่วนประกอบต่างๆของลูกสูบถึง 40-60% [1] ส่วนใหญ่เศษโลหะสึกหรอเหล็กสึกหรอมาจากส่วนประกอบต่างๆของลูกสูบ ทำให้ปริมาณเศษโลหะการสึกหรอของเหล็กมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการตรวจวิเคราะห์การสึกหรอของเครื่องยนต์



รูปที่ 4.21 ปริมาณของเศษโลหะสีหรือแต่ละชนิด

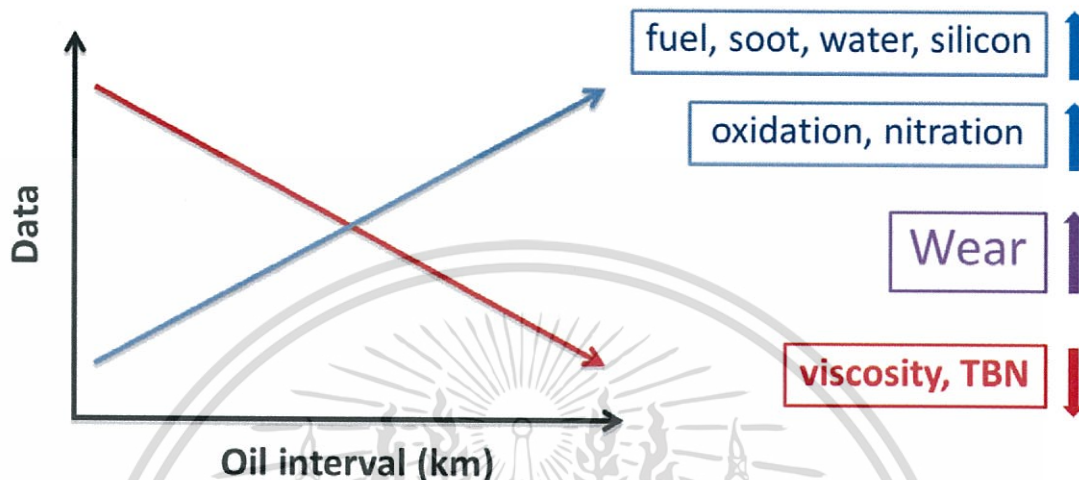
จากรูปที่ 4.22 แสดงปริมาณของเศษโลหะสีหรือแต่ละชนิดโดยเฉลี่ยทั้งหมดรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 และจากรถยนต์โชว์รูม A และ โชว์รูม B พบการสีหรือเรียงลำดับจากมากที่สุดถึงน้อยสุดคือ เหล็ก (Iron) 42%, อลูมิเนียม (Aluminum) 33%, ทองแดง (Copper) 14%, ตะกั่ว (Lead) 7%, ดีบุก (Tin) 2%, โครเมียม (Chromium) 2%



รูปที่ 4.22 ปริมาณของเศษโลหะสีหรือแต่ละชนิดโดยเฉลี่ยทั้งหมด

จากรูปที่ 4.23 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และการปนเปื้อนที่เปลี่ยนแปลงไปของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว พบว่าที่ระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่เพิ่มสูงขึ้นค่าการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิง เขม่า น้ำ ฟูละออง ในน้ำมันหล่อลื่นมีปริมาณค่าที่เพิ่มสูงขึ้นและค่าออกซิเดชันไนโตรเจน สูงขึ้น ส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพหรือความหนืดลดลงซึ่งได้รับอิทธิพลหลักจากการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

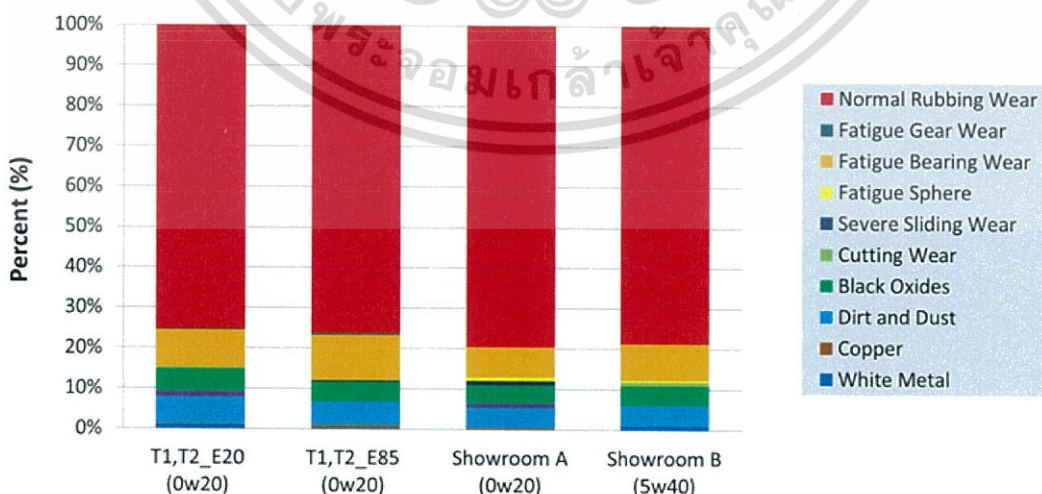
ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงในน้ำมันหล่อลื่นและคุณสมบัติทางเคมีหรือค่าความเป็นด่างที่เหลืออยู่ของน้ำมันหล่อลื่นลดลงซึ่งได้รับอิทธิพลหลักจากการทำปฏิกิริยาของก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจนส่งผลให้มีค่าความเป็นกรดที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุให้ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์สึกหรอมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และการปนเปื้อนที่เปลี่ยนแปลงไปของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว

4.1.2 เฟอร์โรกราฟฟี (Ferrogaphy)

จากรูปที่ 4.24 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์ของลักษณะการสึกหรอประเภทต่างๆของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และE85 และจากรถยนต์โชว์รูม A และ โชว์รูม B



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ของลักษณะการสึกหรอประเภทต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.25 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์ของลักษณะการสึกหรอประเภทต่างๆและขนาดของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 และจากรถยนต์ไอซ์รูม A และ ไอซ์รูม B โดยเฉลี่ยทั้งหมดจากภาพถ่ายเพอร์โรกราฟฟีหรือภาพชิ้นส่วนโลหะสึกหรอของเครื่องยนต์ ข้อมูลลักษณะการสึกหรอและขนาดของอนุภาคโลหะสึกหรอของเครื่องยนต์มีดังต่อไปนี้

- Normal rubbing wear หรือ เศษโลหะสึกหรอแบบปกติจากการขัดถู เกิดจากชิ้นส่วนของเครื่องยนต์มีการถูไถกันอย่างปกติ เศษโลหะสึกหรอมีขนาดโดยเฉลี่ย 2-3 μm เป็นสัดส่วน 77.41% ของลักษณะการสึกหรอของอนุภาคโลหะสึกหรอของเครื่องยนต์ทั้งหมด

- Fatigue gear wear หรือ เศษโลหะสึกหรอแบบลำตัวและขูดขีดของผิวสัมผัสจากการเคลื่อนที่ขบกันของฟันเฟือง เกิดจากการเคลื่อนที่ขบกันของฟันเฟืองของผิวหน้าสัมผัสซ้ำๆเป็นเวลานาน เศษโลหะสึกหรอมีขนาดโดยเฉลี่ย 5-20 μm เป็นสัดส่วน 0.19% ของลักษณะการสึกหรอของอนุภาคโลหะสึกหรอของเครื่องยนต์ทั้งหมด

- Fatigue bearing wear หรือ เศษโลหะสึกหรอแบบลำตัวของผิวสัมผัสจากการเคลื่อนที่ของเม็ดลูกกลิ้ง เกิดจากเม็ดลูกกลิ้งมีการเคลื่อนที่แบบกลิ้งและไถลกับผิวสัมผัสซ้ำๆเป็นเวลานาน เศษโลหะสึกหรอมีขนาดโดยเฉลี่ย 5-50 μm เป็นสัดส่วน 9.27% ของลักษณะการสึกหรอของอนุภาคโลหะสึกหรอของเครื่องยนต์ทั้งหมด

- Fatigue sphere หรือ เศษโลหะสึกหรอแบบลำตัวของเม็ดลูกกลิ้ง เกิดจากการลำตัวของเม็ดลูกกลิ้งอาจควบคุมมากับการปนเปื้อนสิ่งสกปรกซึ่งจะเป็นตัวเร่งให้เกิดการลำตัวที่มากขึ้น เศษโลหะสึกหรอมีขนาดโดยเฉลี่ย 5-10 μm เป็นสัดส่วน 0.36% ของลักษณะการสึกหรอของอนุภาคโลหะสึกหรอของเครื่องยนต์ทั้งหมด

- Severe sliding wear หรือ เศษโลหะสึกหรอแบบการลื่นไถลอย่างรุนแรง เกิดจากชิ้นส่วนของเครื่องยนต์มีการเคลื่อนที่สัมผัสกันด้วยความเร็วและอยู่ในสภาวะที่รับแรงกดที่สูงและอาจควบคุมคู่กับการขาดสารเคมีปรุงแต่งจำพวกปรับแรงกดสูงและป้องกันการสึกหรอ เศษโลหะสึกหรอมีขนาดโดยเฉลี่ย 60-80 μm เป็นสัดส่วน 0.31% ของลักษณะการสึกหรอของอนุภาคโลหะสึกหรอของเครื่องยนต์ทั้งหมด

- Cutting wear หรือ เศษโลหะสึกหรอแบบขูดขีด เกิดจากชิ้นส่วนของเครื่องยนต์มีการเคลื่อนที่สัมผัสกันชิ้นส่วนที่มีความแข็งมากกว่าจะขูดขีดชิ้นส่วนที่อ่อนกว่าหรืออาจเกิดจากการปนเปื้อนสิ่งสกปรกในน้ำมันหล่อลื่นซึ่งสิ่งสกปรกที่มีความแข็งสูงจะทำการขูดขีดชิ้นส่วนขณะเคลื่อนที่

เศษโลหะสึกหรอมีขนาดโดยเฉลี่ย 20-60 μm เป็นสัดส่วน 0.35% ของลักษณะการสึกหรอของอนุภาคโลหะสึกหรอของเครื่องยนต์ทั้งหมด

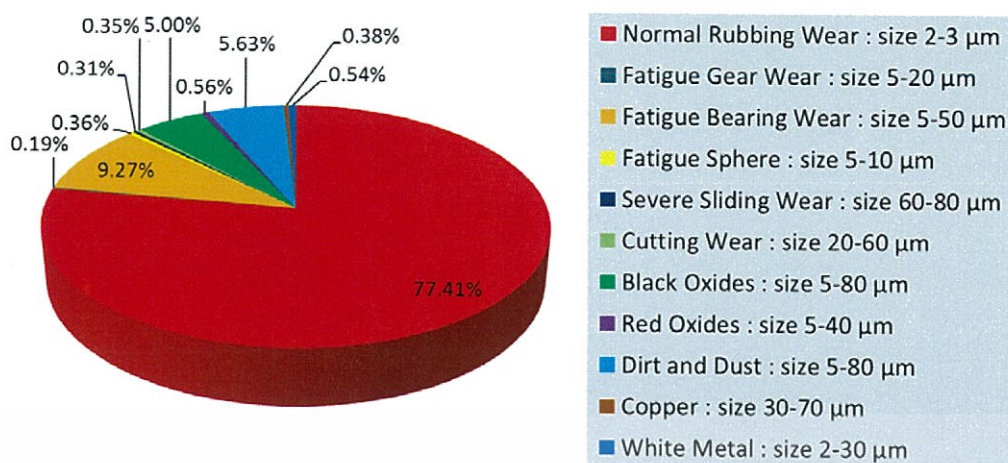
- Black oxides หรือ เศษโลหะสึกหรอแบบออกไซด์สีดำ เกิดจากชิ้นส่วนของเครื่องยนต์มีการเคลื่อนที่สัมผัสกันรับภาระแรงกดสูงและขาดการหล่อลื่นส่งผลให้เกิดความร้อน เศษโลหะสึกหรอมีขนาดโดยเฉลี่ย 5-80 μm เป็นสัดส่วน 5% ของลักษณะการสึกหรอของอนุภาคโลหะสึกหรอของเครื่องยนต์ทั้งหมด

- Red oxides หรือ เศษโลหะสึกหรอประเภทสนิม เกิดจากมีการปนเปื้อนความชื้นหรือน้ำในน้ำมันหล่อลื่นอาจควบคุมคู่กับการขาดสารเคมีปรุงแต่งจำพวกสารป้องกันสนิม เศษโลหะสึกหรอมีขนาดโดยเฉลี่ย 5-40 μm เป็นสัดส่วน 0.56% ของลักษณะการสึกหรอของอนุภาคโลหะสึกหรอของเครื่องยนต์ทั้งหมด

- Dirt and dust หรือ อนุภาคสิ่งสกปรก เกิดจากมีการปนเปื้อนจำพวกฝุ่นละออง เม็ดทรายในน้ำมันหล่อลื่นซึ่งจะส่งผลต่อการสึกหรอแบบขูดขีดของชิ้นส่วนของเครื่องยนต์เนื่องจากเป็นอนุภาคที่แข็ง อนุภาคสิ่งสกปรกมีขนาดโดยเฉลี่ย 5-80 μm เป็นสัดส่วน 5.63% ของลักษณะการสึกหรอของอนุภาคโลหะสึกหรอของเครื่องยนต์ทั้งหมด

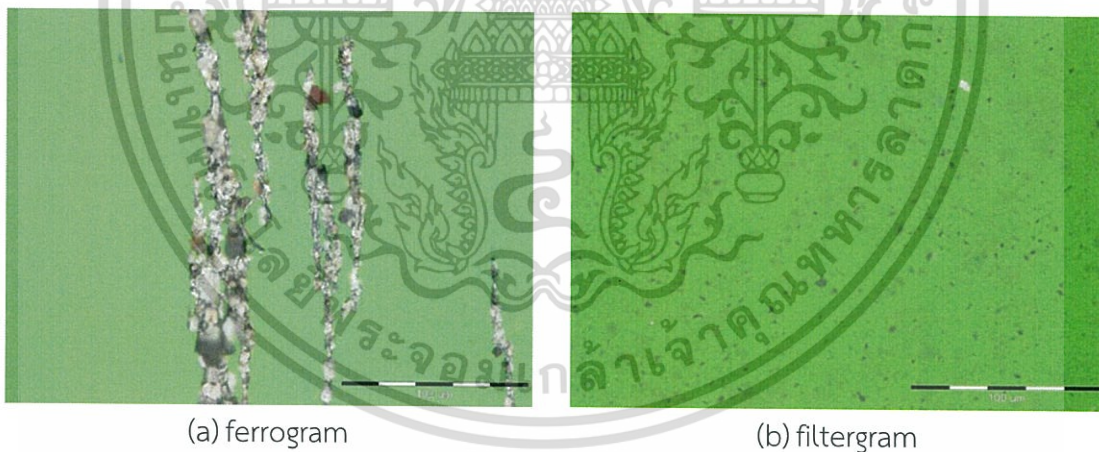
- Copper หรือ เศษโลหะสึกหรอประเภททองแดงเป็นอนุภาคเศษโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous wear particles) หรือเป็นโลหะที่มีธาตุอื่น ที่ไม่ใช่เหล็กเป็นโลหะพื้นฐาน (base metal) เกิดจากการสึกหรอของชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ที่มีองค์ประกอบของทองแดงเช่น ลินไอดีลีนไอเสีย ปลอกนำเลื่อนลีนไอดีลีนไอเสีย เศษโลหะสึกหรอมีขนาดโดยเฉลี่ย 30-70 μm เป็นสัดส่วน 0.38% ของลักษณะการสึกหรอของอนุภาคโลหะสึกหรอของเครื่องยนต์ทั้งหมด

- White metal หรือ เศษโลหะสึกหรอประเภทเหล็กหล่อขาวอนุภาคเศษโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เกิดจากการสึกหรอของชิ้นผิวของแบริ่ง เศษโลหะสึกหรอมีขนาดโดยเฉลี่ย 2-30 μm เป็นสัดส่วน 0.54% ของลักษณะการสึกหรอของอนุภาคโลหะสึกหรอของเครื่องยนต์ทั้งหมด



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ของลักษณะการสึกหรอประเภทต่างๆและขนาดโดยเฉลี่ยทั้งหมด

จากรูปที่ 4.26 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายของ ferrogram และ filtergram ที่กำลังขยาย 500X จากน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้ว ภาพถ่ายของ ferrogram จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะของเศษโลหะที่สึกหรอลักษณะต่างๆ ส่วนภาพถ่าย filtergram จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะของอนุภาคต่างๆที่ไม่ใช่โลหะหรือไม่ถูกดูดติดกับแม่เหล็กเช่น เชม่า



รูปที่ 4.26 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายของ ferrogram และ filtergram ที่กำลังขยาย 500X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การวิเคราะห์ภาพถ่ายของชิ้นเศษโลหะสึกหรอโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

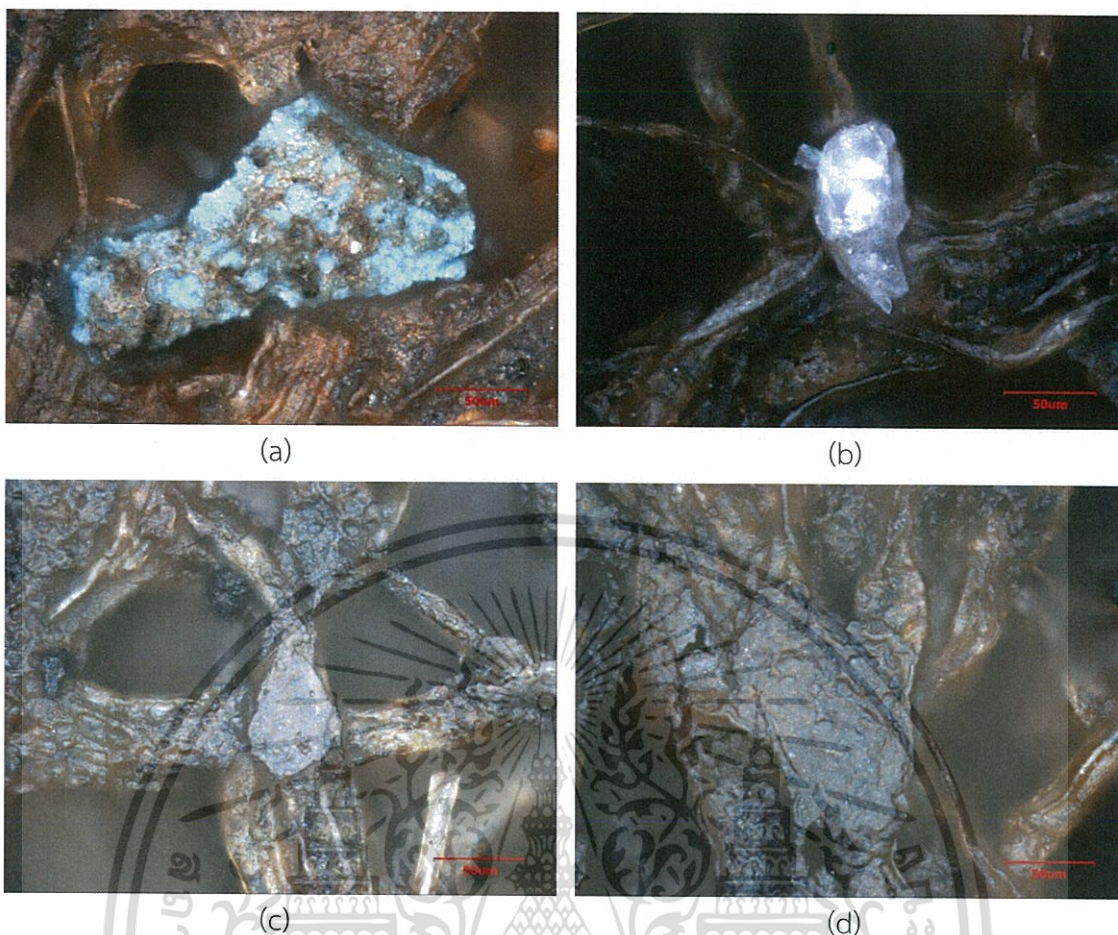
- 1) ใส่กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากรถทดสอบที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20

จากรูปที่ 4.27(a) ลักษณะของเศษโลหะสึกหรอแบบก้อนจากกลไกการล้าตัว (Fatigue spalls and chunks) มีขนาดโดยประมาณ 150 μm ผิวหน้าของเศษโลหะสึกหรอเป็นก้อนและผิวไม่เรียบซึ่งเกิดจากผิวหน้าของชิ้นงานเกิดการรับภาระเป็นวงรอบและมีคราบสีน้ำตาลปกคลุมซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นและได้รับความร้อนและมีเม็ดสีขาวบนผิวเศษโลหะสึกหรอซึ่งอาจเป็นจำพวกฝุ่นละออง ฝุ่นทราย อนุภาคสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนมาจากสิ่งแวดล้อม

จากรูปที่ 4.27(b) ลักษณะของเศษโลหะสึกหรอแบบก้อนจากกลไกการล้าตัว (Fatigue spalls and chunks) มีขนาดโดยประมาณ 100 μm ผิวหน้าของเศษโลหะสึกหรอมีร่องรอยขูดข่วนที่ผิว ซึ่งลักษณะของเศษโลหะสึกหรอเกิดจากผิวหน้ารับภาระเป็นวงรอบซึ่งมีผลทำให้เกิดรอยแตกหรือหลุมขนาดใหญ่บนผิวชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.27(c) ลักษณะของเศษโลหะสึกหรอแบบเป็นแผ่นแบน (Laminar particles) มีขนาดโดยประมาณ 80 μm ผิวหน้าของเศษโลหะสึกหรอเป็นแผ่นแบนเรียบขนาดใหญ่มีผิวขรุขระโดยทั่วพื้นผิวซึ่งเกิดจากการบีบอัดตัวของเฟืองทำให้เศษโลหะเป็นแผ่นแบนและผิวหน้ามีสีน้ำตาลซึ่งเกิดมาจากการเสื่อมคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นและได้รับความร้อนสูง

จากรูปที่ 4.27(d) ลักษณะของเศษโลหะสึกหรอแบบเป็นแผ่นแบน (Laminar particles) มีขนาดโดยประมาณ 150 μm ผิวหน้าของเศษโลหะสึกหรอเป็นแผ่นแบนขนาดใหญ่ซึ่งเกิดจากการบีบอัดขกันของเฟืองและผิวของเศษโลหะมีคราบสีน้ำตาลปกคลุมโดยทั่วซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นเกิดเป็นโคลนตมและวานิช (sludge and varnish) ซึ่งเป็นสิ่งสกปรกที่เป็นของนิ่ม



รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายของชิ้นเซาะโลหะสึกหรือจากไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากรถทดสอบที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 ที่กำลังขยาย 500X

2) ไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากรถทดสอบที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85

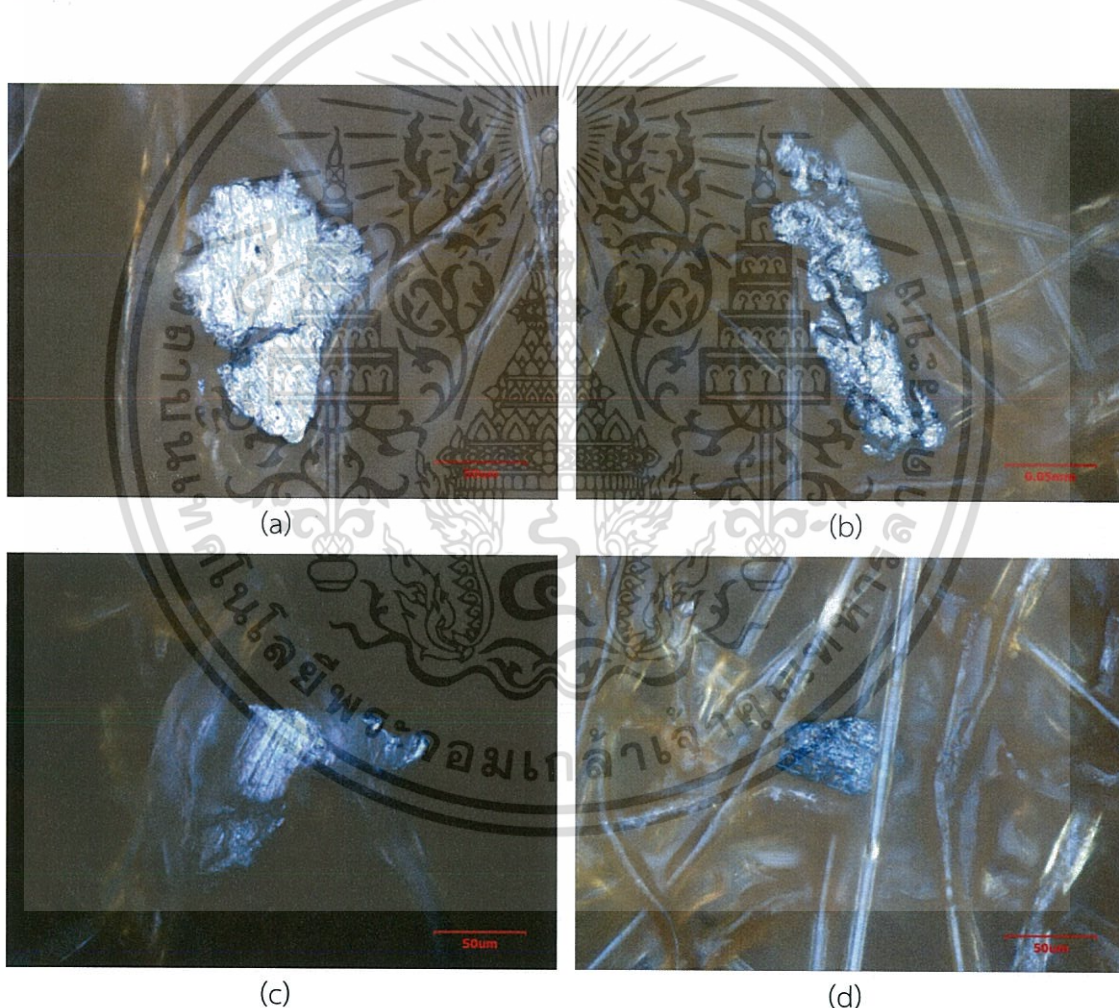
จากรูปที่ 4.28(a) ลักษณะของเซาะโลหะสึกหรือแบบสไลด์ (sliding wear) มีขนาดโดยประมาณ 150 μm ผิวหน้าของเซาะโลหะที่สึกหรือมีเส้นตรงลากผ่านผิวหน้าโดยทั่วผิวของเซาะโลหะสึกหรือ ซึ่งเกิดจากสภาพของผิวชิ้นงานสไลด์อย่างรุนแรงภายใต้สภาวะที่ภาระสูงและความเร็วสูง

จากรูปที่ 4.28(b) ลักษณะของเซาะโลหะสึกหรือแบบแผ่นขนาดใหญ่จากกลไกการล้าตัว (Fatigue spalls and chunks) มีขนาดโดยประมาณ 135 μm ผิวหน้าของเซาะโลหะที่สึกหรือมีลักษณะเป็นหลุมขนาดใหญ่ ผิวหน้าไม่เรียบมีความสูงต่ำผสมกันขรุขระและหยาบ ซึ่งเกิดจากผิวหน้าของชิ้นงานมีการสัมผัสกันและมีการเคลื่อนที่แบบกึ่งหรือไกลซ้ำๆ ต่อเนื่องเป็นเวลานาน ทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานเกิดการรับภาระเป็นวงรอบ (cyclic load) ทำให้เกิดการรอยแตกและหลุมขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.28(c) ลักษณะของเศษโลหะสึกหรอแบบลื่นไถล (sliding wear) มีขนาดโดยประมาณ $170\ \mu\text{m}$ ผิวหน้าของเศษโลหะที่สึกหรอมีลักษณะของเส้นตรงลากผ่านผิวหน้า โดยตัวซึ่งเกิดจากสภาพของชิ้นงานเลื่อนไถลอย่างรุนแรงภายใต้สภาวะภาระสูง ความเร็วสูง เศษโลหะมีสีน้ำเงินบางส่วนซึ่งบอกถึงอุณหภูมิที่เศษโลหะได้รับมา

จากรูปที่ 4.28(d) ลักษณะของเศษโลหะสึกหรอของเหล็กกล้าผสมสูงและต่ำ (hardened and low alloy steel particle) มีขนาดโดยประมาณ $100\ \mu\text{m}$ ผิวหน้าของเศษโลหะ การสึกหรอมีลักษณะของสีที่ปรากฏให้เห็นในชิ้นงานเช่น สีน้ำเงิน สีม่วง ซึ่งเหล็กกล้าผสมสูงจะออกสีม่วง ส่วนเหล็กกล้าผสมต่ำจะออกสีน้ำเงิน และเศษโลหะที่สึกหรอมีร่องรอยของร่องเส้นตรงบนผิวเศษโลหะ ชิ้นเศษโลหะเกิดจากการสึกหรอไม่ปกติของเฟือง



รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายของชิ้นเศษโลหะสึกหรอจากไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากรถทดสอบที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ที่กำลังขยาย 500X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ใ้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งาน

จากรูปที่ 4.29 ลักษณะของใ้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานที่ทำมาจากเยื่อเซลลูโลส (Cellulose fiber media filter) เป็นใ้กรองประเภทใช้แล้วทิ้ง ซึ่งจากการตรวจวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Particle Size Analysis by Laser Diffraction Technique) โดยเฉลี่ยของใ้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วมันสามารถดักจับได้ตั้งแต่มากกว่าหรือเท่ากับ $0.23 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.29 ใ้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานรูป (a) ที่กำลังขยาย 50X และรูป (b) ที่กำลังขยาย 200X

4.1.4 การวิเคราะห์ภาพถ่ายของชิ้นโลหะสึกหรอโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อมเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (SEM and EDX)

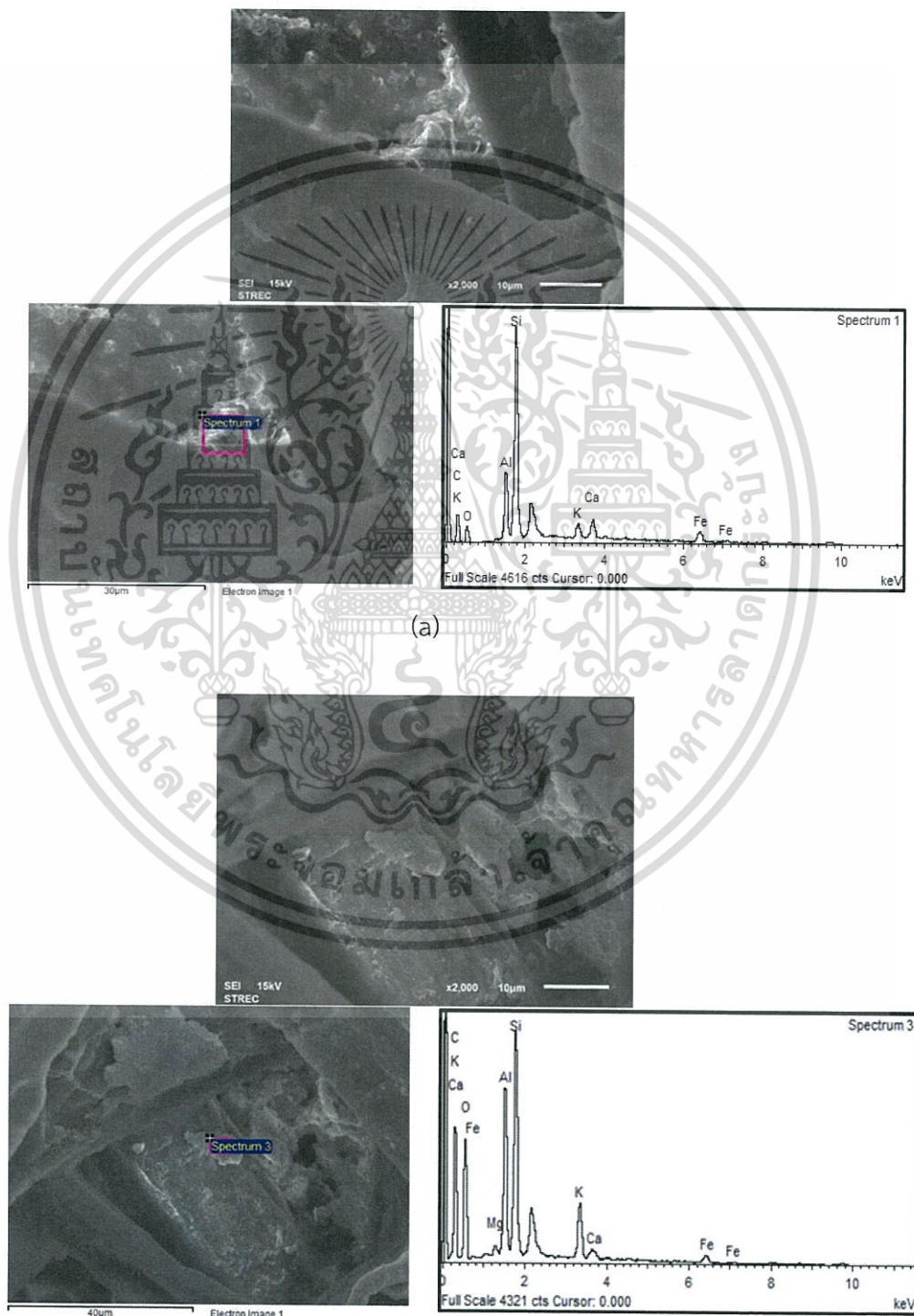
จากรูปที่ 4.30(a) อนุภาคมีลักษณะเป็นก้อนมีขนาดโดยประมาณ $10 \mu\text{m}$ ประกอบด้วยธาตุ C 35.70%, Si 27.32%, Fe 10.81%, O 9.91%, Al 7.51%, Ca 5.15%, K 3.59%

จากรูปที่ 4.30(b) อนุภาคมีลักษณะเป็นแผ่นแบนมีขนาดโดยประมาณ $14 \mu\text{m}$ ประกอบด้วยธาตุ C 43.27%, O 26.93%, Si 11.90%, Al 7.71%, K 5.81%, Fe 3.20%, Ca 0.78%, Mg 0.78%

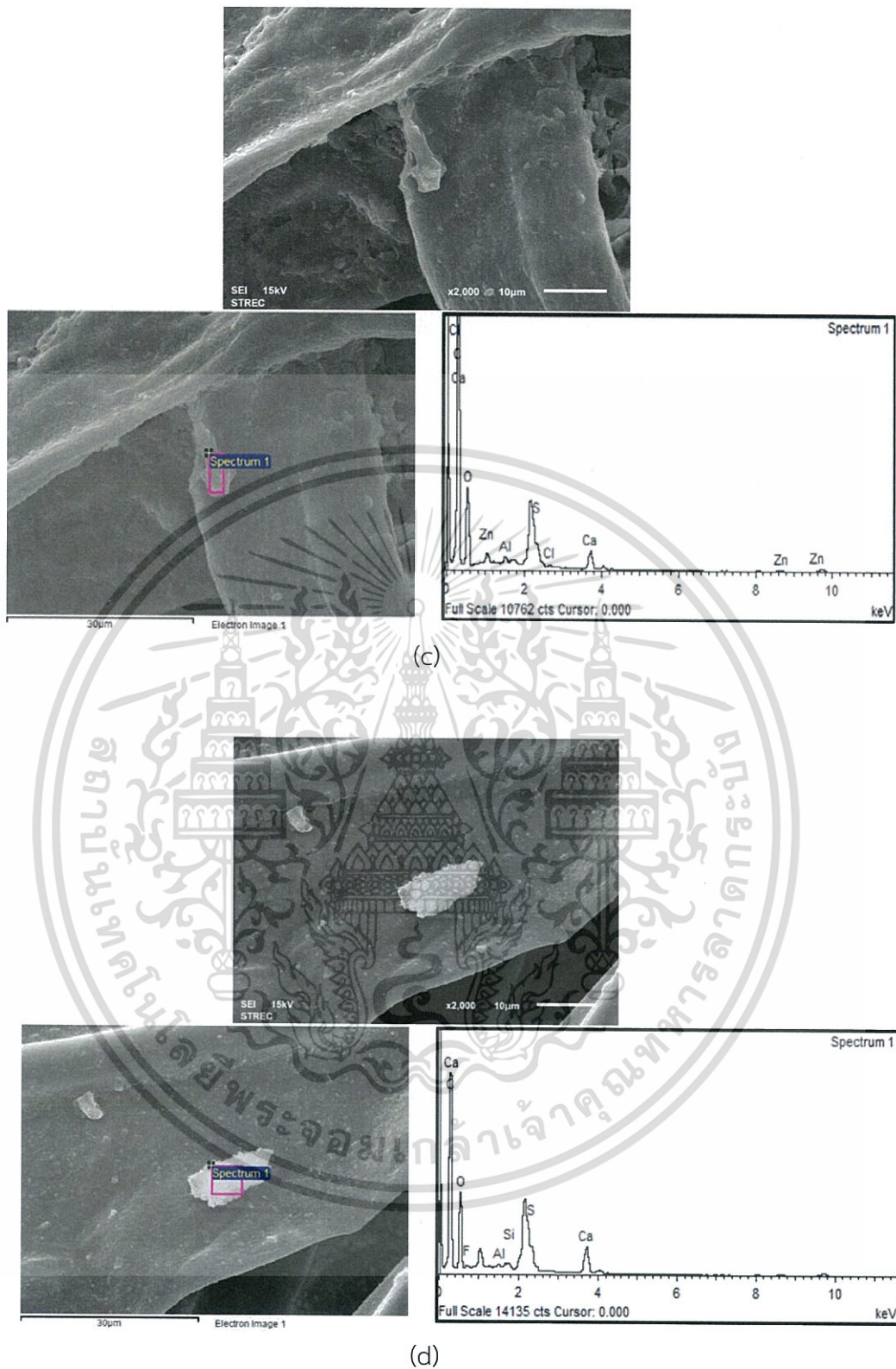
จากรูปที่ 4.30(c) อนุภาคมีลักษณะเป็นแผ่นแบนมีขนาดโดยประมาณ $15 \mu\text{m}$ ประกอบด้วยธาตุ C 62.45%, O 31.30%, Ca 3.43%, Zn 1.66%, Al 0.54%, Cl 0.34%, S 0.29%

จากรูปที่ 4.30(d) อนุภาคมีลักษณะเป็นแผ่นแบนมีขนาดโดยประมาณ 16 μm ประกอบด้วยธาตุ C 53.03%, O 37.66%, Ca 6.26%, F 1.84%, S 0.57%, Al 0.34%, Si 0.30%

จากรูปที่ 4.31 กราฟนี้แสดงให้เห็นถึงอนุภาคองค์ประกอบของธาตุแต่ละชนิดของแต่ละภาพพบว่ารูปที่ 4.30-a, b, c และ d มีเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบของธาตุต่างๆโดยเฉลี่ยทั้งหมดเรียงจากมากไปน้อยได้แก่ C , O ,Si , Al, Ca และ Fe ตามลำดับ

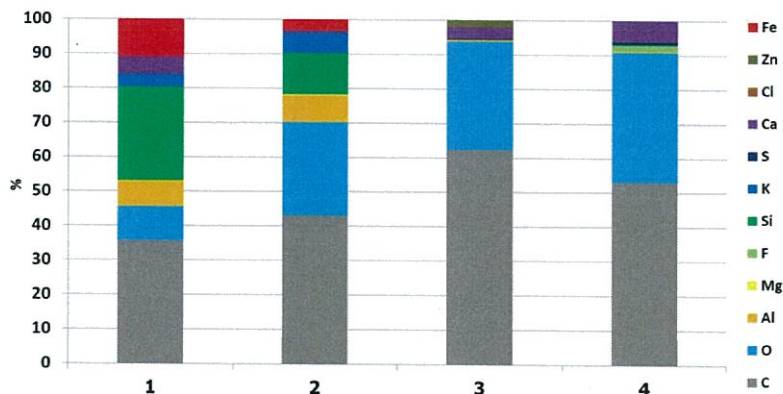


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายของชั้นเคลือบสังกะสีหรือโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อมเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (SEM and EDX)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



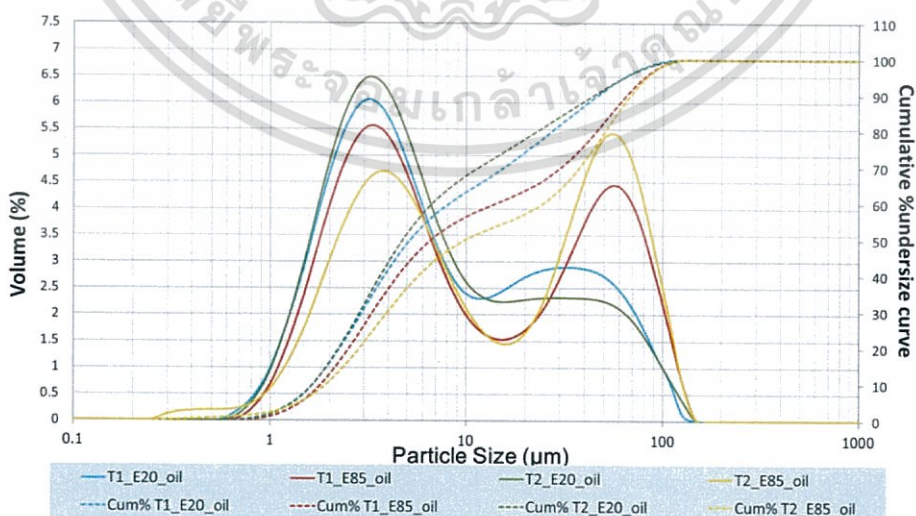
รูปที่ 4.31 อนุภาคองค์ประกอบของธาตุแต่ละชนิดในแต่ละภาพ

4.1.5 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง

ตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- 1) น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วจากการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นครั้งที่ 10 ของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85

จากรูปที่ 4.32 แสดงขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคขนาดต่างๆจากน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วของรถยนต์ทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 พบว่าอนุภาคที่ตรวจพบขนาดที่เล็กที่สุดจนถึงขนาดใหญ่สุดอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.2 μm ถึง 145 μm และในน้ำมันหล่อลื่นเจอกลุ่มใหญ่สองกลุ่ม กลุ่มแรกมีขนาดตั้งแต่ 0.2 μm -15 μm ขนาดที่พบมากที่สุดโดยเฉลี่ยมีขนาด 3.28 μm กลุ่มสองมีขนาดตั้งแต่ 15 μm - 145 μm ขนาดที่พบมากที่สุดโดยเฉลี่ยมีขนาด 43.51 μm

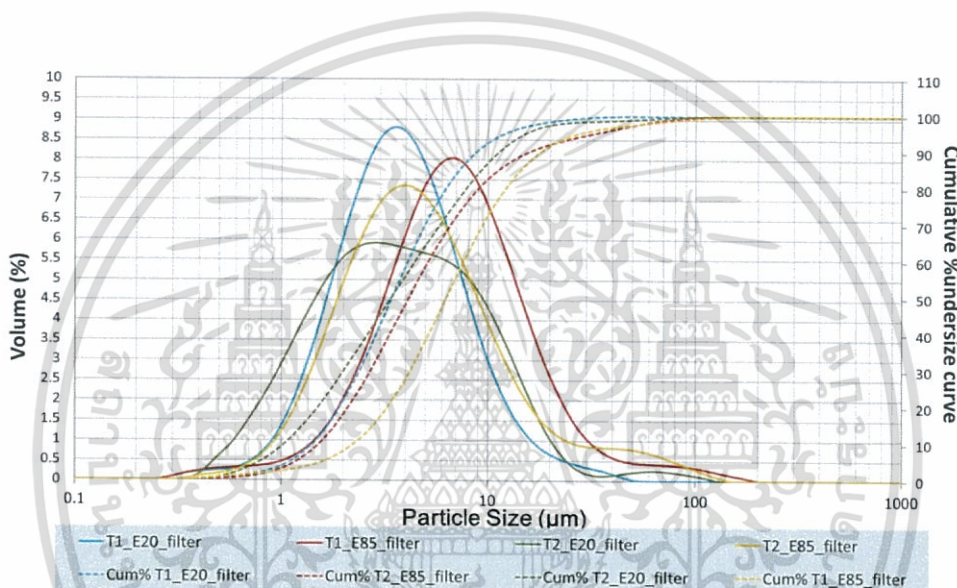


รูปที่ 4.32 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งาน

แล้วจากเครื่องยนต์ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ใส้กรองน้ำมันหล่อลื่นของรถยนต์ทดสอบ T1,T2 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 จากรูปที่ 4.33 แสดงขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของใส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วของรถยนต์ทดสอบ T1 และ T2 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 พบว่าอนุภาคที่ตรวจพบขนาดเล็กที่สุดจนถึงขนาดใหญ่สุดอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.2 μm ถึง 200 μm ขนาดโดยเฉลี่ยทั้งหมดที่พบมากที่สุดมีขนาด 7.5 μm ซึ่งในความเป็นจริงแล้วในใส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วควรพบเศษโลหะที่มีขนาดใหญ่มากกว่านี้แต่อาจจะหลุดระหว่างการเตรียมชิ้นงานเนื่องจากเศษโลหะที่มีขนาดใหญ่มีน้ำหนักมากและตำแหน่งที่เลือกตัดชิ้นงานไปตรวจสอบ



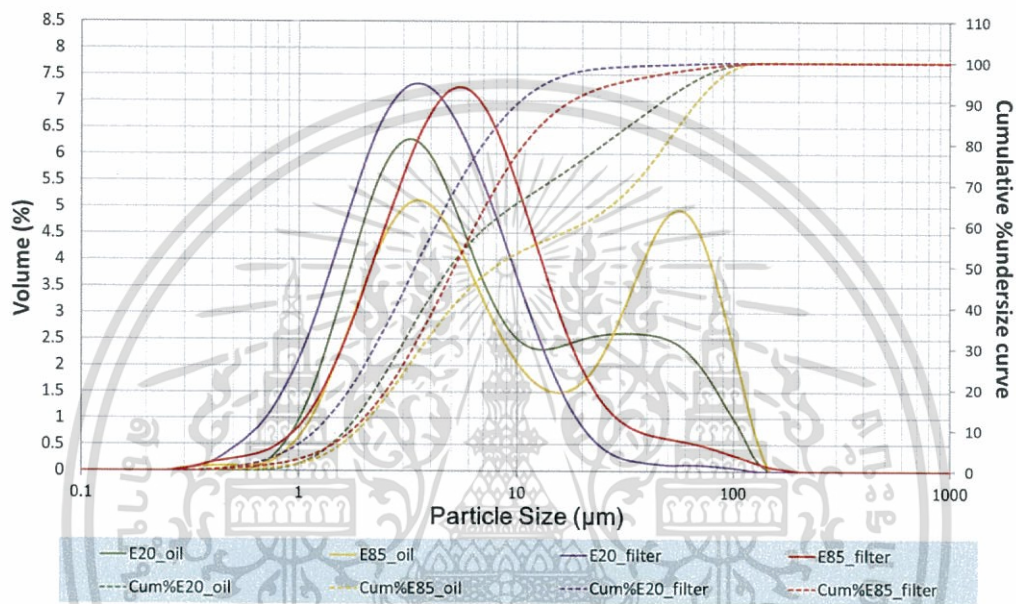
รูปที่ 4.33 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคขนาดต่างๆจากตัวอย่างใส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วของรถยนต์ทดสอบ T1,T2 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85

3) น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานและใส้กรองน้ำมันหล่อลื่นโดยเฉลี่ยทั้งหมด

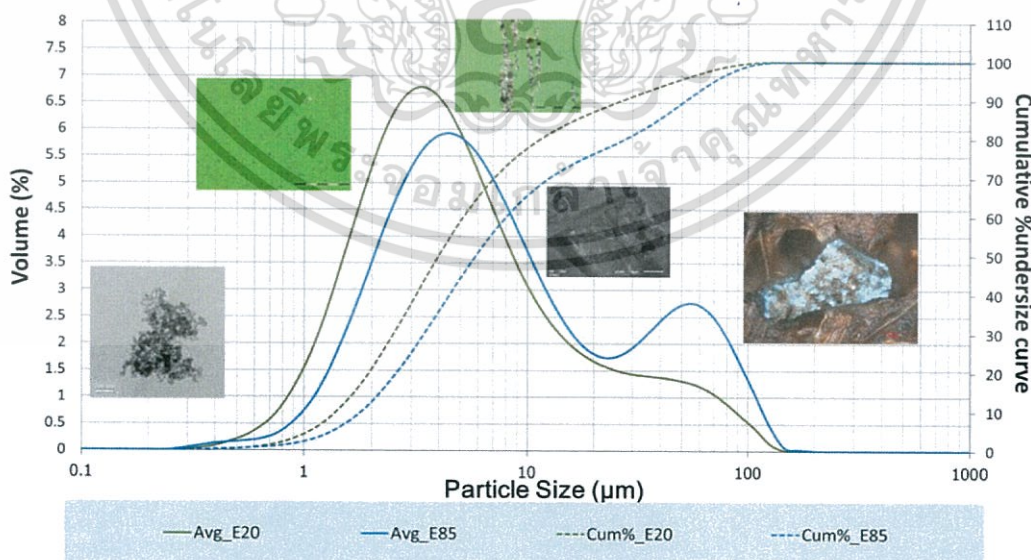
จากรูปที่ 4.34 แสดงขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคขนาดต่างๆจากตัวอย่างใส้กรองและน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 พบว่าอนุภาคที่ตรวจพบขนาดเล็กที่สุดถึงขนาดใหญ่สุดโดยเฉลี่ยมีขนาดตั้งแต่ 0.2 μm ถึง 200 μm และพบว่าในน้ำมันหล่อลื่นและใส้กรองของรถทดสอบที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85 มีสัดส่วนของอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิง E20 ดังรูป a. เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิง E20 มีค่าพลังงานความร้อนมากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ที่พลังงานความร้อนเท่ากันน้ำมันเชื้อเพลิง E85 จึงต้องใช้ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่มากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิง E20 จึงทำให้มีโอกาสเล็ดรอดผ่านทางช่องว่างระหว่างแหวนลูกสูบกับผนังกระบอกสูบไปปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นได้มากกว่าส่งผลให้ความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของน้ำมันหล่อลื่นลดลง การสึกหรอเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการรวมกราฟระหว่างขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยทั้งหมดของน้ำมันหล่อลื่นและไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วดังรูป b. สังเกตได้ว่าเป็นลักษณะของกราฟพระฆังคว่ำสองกราฟซ้อนทับกันอยู่อาจบ่งบอกได้ว่าเป็นอนุภาคของเศษโลหะที่สึกหรอทั้งสองฟีกและขนาดของอนุภาคที่ลดลงไปทางซ้ายมือของกราฟคาดว่าอาจจะเป็นกลุ่มก้อนของเขม่าและขนาดของอนุภาคที่อาจส่งผลต่อการสึกหรอมีขนาดโดยประมาณตั้งแต่ 0.2-10 μm เนื่องจากสามารถเล็ดรอดผ่านไส้กรองออกมาได้



a)



b)

รูปที่ 4.34 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคขนาดต่างๆจากตัวอย่างไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นและ

น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วของรถทดสอบ T1,T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 E85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบในระดับการจำลองด้านไทรโบโลยีโดยเครื่องทดสอบวัดคุณสมบัติด้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล (Four ball test)

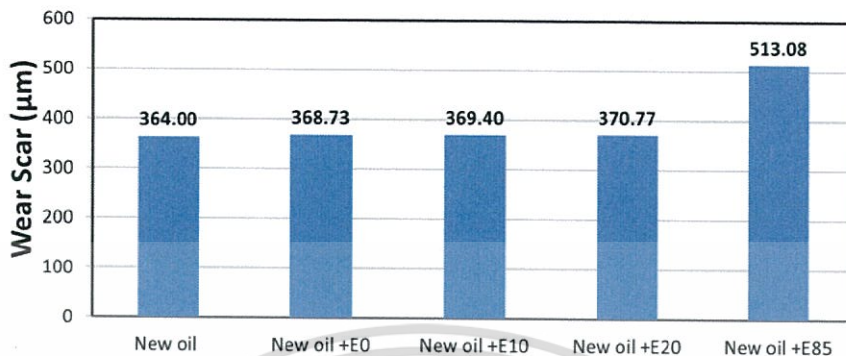
4.2.1 ผลกระทบจากการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงในน้ำมันหล่อลื่น

จากรูปที่ 4.35 แสดงขนาดของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง new oil, new oil+E0-1%, new oil+E10-1%, new oil+E20-1%, new oil+E85-1% มีขนาดเท่ากับ 364 μm , 368.73 μm , 369.40 μm , 370.77 μm , 513.08 μm ตามลำดับ และทำการทดสอบอีกครั้งเพื่อเช็คความความแม่นยำของเครื่องทดสอบพบว่าขนาดของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง new oil, new oil+E0-1%, new oil+E10-1%, new oil+E20-1%, new oil+E85-1% มีขนาดเท่ากับ 367.86 μm , 370.65 μm , 369.48 μm , 368.97 μm , 514.98 μm ตามลำดับซึ่งมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 μm พบว่าขนาดของแผลที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็กมีขนาดมากขึ้นเมื่อมีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงใน new oil และเมื่อมีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอทานอลมากขึ้นในน้ำมันหล่อลื่นก็จะส่งผลต่อขนาดของแผลที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็กมากขึ้นเนื่องจากการระเหยของเอทานอลระเหยได้น้อยกว่าแก๊สโซลีนทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอทานอลมากจะส่งผลต่อค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นต่ำลงมากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอทานอลน้อย

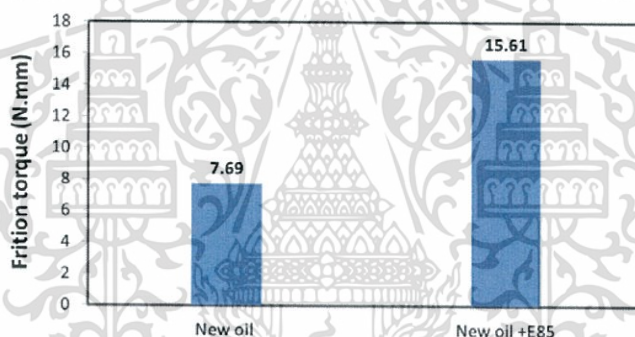
จากรูปที่ 4.36 แสดงค่าแรงเสียดทานด้านการหมุนลูกบอลเหล็ก (friction torque) ของตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นต่างๆที่ใช้ในการทดสอบเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ new oil+E85-1%, new oil มีค่าเท่ากับ 15.16 N.mm, 7.69 N.mm ตามลำดับพบว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงจะมีค่า friction torque ที่สูงกว่ากรณีอื่นเนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นตัวทำความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นลดลง ความหนาของแผ่นฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นลดลงจึงทำให้ผิวของลูกบอลเหล็กมีโอกาสสัมผัสกันโดยตรงจึงทำให้ค่า friction torque สูง ในการวัดค่าแรงเสียดทานด้านการหมุนลูกบอลเหล็ก (friction torque) สามารถทำการวัดได้เพียง 2 ตัวอย่าง เนื่องจากเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดค่าแรงเสียดทานด้านการหมุนชำรุด ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อทดสอบวัดคุณสมบัติด้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล เนื่องจากเป็นเครื่องที่แยกกันคนละส่วนการทดสอบ

จากรูปที่ 4.37 แสดงให้เห็นค่าความหนืดจากน้ำมันหล่อลื่น (New oil) ที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ 1%Wt จากการวัดที่อุณหภูมิ 40, 100°C ตามมาตรฐาน (ASTM D445) และค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 75°C ได้จากการคำนวณระหว่างค่าความหนืดวัดที่ 40, 100°C ซึ่งในการทดสอบโฟร์บอลทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 75°C พบว่าค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อน

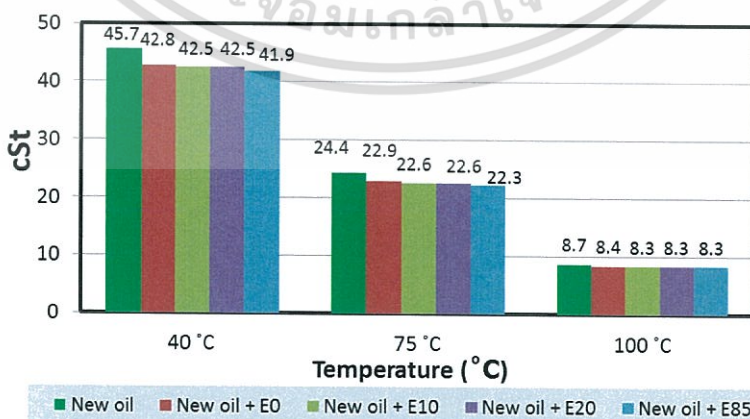
น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอทานอลสูงมีแนวโน้มที่จะส่งผลต่อค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นให้ต่ำลงมากที่สุด



รูปที่ 4.35 ขนาดของแผลสึกหรือบนลูกบอลเหล็กของการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอทานอลที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.36 แรงเสียดทานด้านการหมุนของการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอทานอลที่แตกต่างกัน

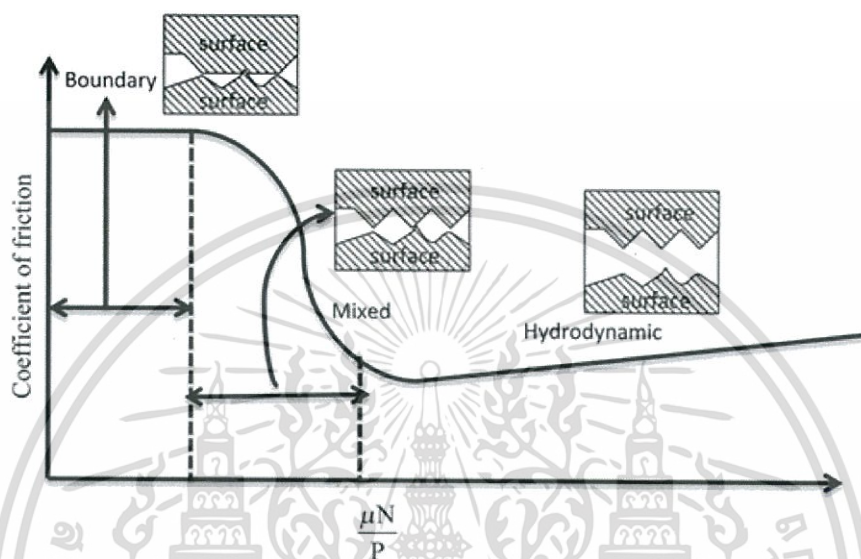


รูปที่ 4.37 แสดงค่าความหนืด (cSt) ที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง 1 %Wt วัดที่ 40, 100°C และความหนืดที่ 75°C จากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

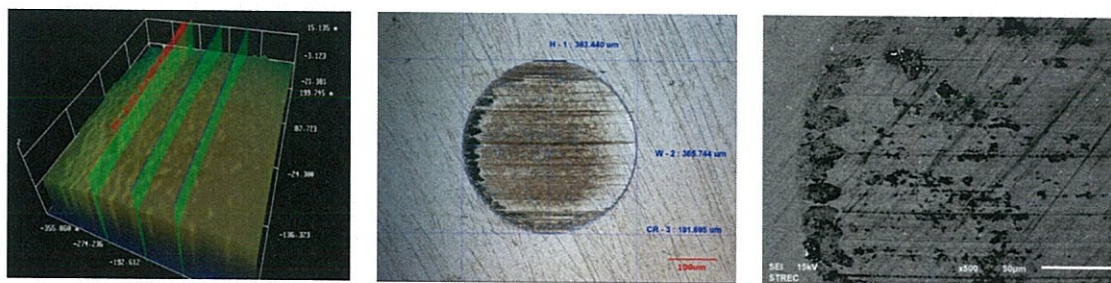


รูปที่ 4.38 รูปแบบการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงในน้ำมันหล่อลื่น

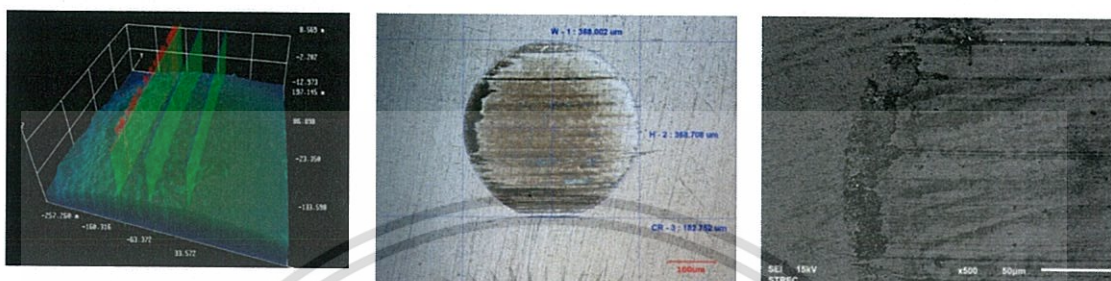


รูปที่ 4.39 เส้นโค้งสไตรเบ็ค (Stribeck Curve) [57]

จากรูปที่ 4.38 แสดงรูปแบบการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอทานอลที่แตกต่างกันในน้ำมันหล่อลื่นที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของแผ่นฟิล์มน้ำมัน การปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอทานอลที่มากขึ้นในน้ำมันหล่อลื่นจะส่งผลต่อขนาดของแผ่นที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็กมากขึ้นเนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอทานอลมากส่งผลต่อค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นให้ต่ำกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอทานอลน้อยเนื่องจากการระเหยของเอทานอลระเหยได้น้อยกว่าแก๊สโซลีนที่อุณหภูมิทดสอบส่งผลให้ฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นบางลงทำให้ผิวของชิ้นงานมีโอกาสเสียดสีกันมากขึ้นทำให้เกิดการสึกหรอมากขึ้น ตามเส้นโค้งสไตรเบ็ค (Stribeck Curve) แสดงดังรูปที่ 4.39 เมื่อทำการทดสอบวัดคุณสมบัติด้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอลซึ่งมีค่าความเร็วรอบ (N) และภาระ (P) ที่ใส่เข้าไปเท่ากันจะเห็นได้ว่าถ้าความหนืด (μ) ของน้ำมันหล่อลื่นที่ลดลง ชิ้นงานก็จะเกิดการเสียดสีกันมากขึ้นหรือมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากขึ้นเนื่องจากความหนาของแผ่นฟิล์มบางลงทำให้ชิ้นงานมีการสัมผัสกันมากขึ้นและทำให้เกิดการสึกหรอมากขึ้น



New oil



New oil+E0-1%



New oil+E10-1%



New oil+E20-1%



New oil+E85-1%

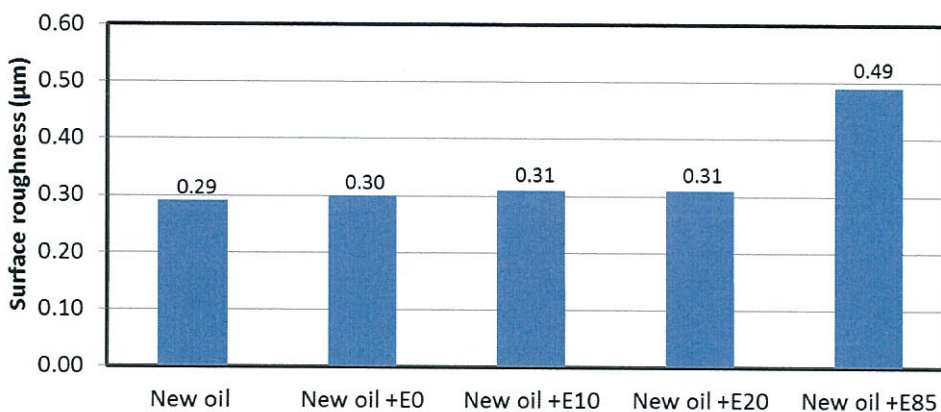
a)

b)

c)

รูปที่ 4.40 ลักษณะของแผ่นสึกหรอบนลูกบอลเหล็ก a) ภาพถ่ายพื้นผิว 3D b) ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 200X c) ภาพถ่ายSEM ที่กำลังขยาย 500X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



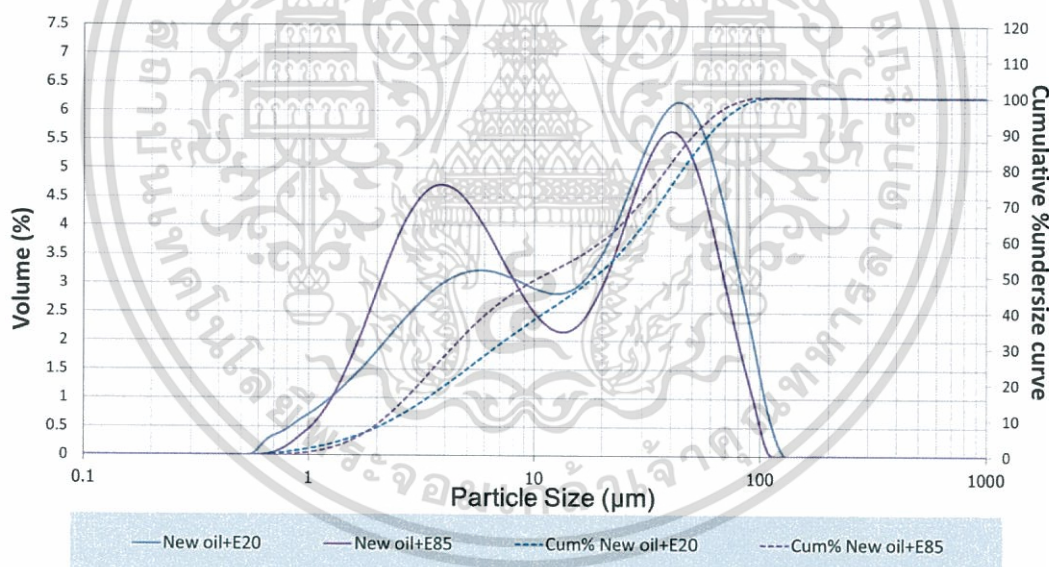
รูปที่ 4.41 ค่าความหยาบโดยเฉลี่ยของการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอทานอลที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.40 แสดงลักษณะของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กในแต่ละตัวอย่างจะประกอบด้วยรูป 3 มิติ ภาพแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และภาพแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในการทดสอบโพรบบอลเป็นเคลื่อนที่เสียดสีกันแบบสั่นไถลและทำให้เกิดการสึกหรอแบบยึดติดพบได้ในตัวอย่าง new oil+E85-1% เกิดขึ้นจากชิ้นงานที่มีหน้าสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานมีการเคลื่อนที่แนบติดกันทำให้ผิวหน้าชิ้นงานบางส่วนเกิดการฉีกขาดออกไปและเกิดการยึดติดบนผิวหน้าผิวชิ้นงานอีกชั้นที่สัมผัสกัน การสึกหรอแบบขูดขีดพบได้ในทุกๆตัวอย่างเกิดจากสิ่งที่มีความแข็งสูงขูดขีดเนื้อวัสดุออกไปลักษณะของผิวชิ้นงานจะมีเหมือนกับเส้นตรงยาวลากผ่านและการสึกหรอแบบล้าตัวพบได้ในทุกๆตัวอย่างเกิดจากชิ้นงานรับภาระการกด (Compressive stress) สลับกับการดึง (Tensile stress) ซ้ำกันไปมา ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการหลุดร่อนออกไปของผิวชิ้นงานทำให้เกิดหลุมลึกบนผิวชิ้นงาน หรือมีสิ่งสกปรกที่มีความแข็งปนเปื้อนเข้าไปมันจะทำให้เกิดรอยกด (Dents) บนผิวชิ้นงานเมื่อเวลานานไปจะเกิดรอยแตก (Crack) และหลุดออกมาเกิดเป็นหลุมบนผิวชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.41 แสดงค่าความหยาบโดยเฉลี่ยของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง new oil, new oil+E0-1%, new oil+E10-1%, new oil+E20-1%, new oil+E85-1% มีค่าเท่ากับ 0.29 µm, 0.30 µm, 0.31 µm, 0.31 µm, 0.49 µm ตามลำดับซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปตามขนาดของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กและพหุคูณกับความหนืด พบว่าเมื่อน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงจะมีค่าความหนืดน้อยลงหรือฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นบางลงจะส่งผลให้ขนาดของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กมีขนาดใหญ่ขึ้นและความหยาบก็มากขึ้นด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.42 แสดงขนาดและการกระจายตัวของเศษโลหะสีทหรอของลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบกับโพรบอลลของตัวอย่าง new oil+E20 และ new oil+E85 พบว่าอนุภาคที่ตรวจพบขนาดที่เล็กที่สุดจนถึงขนาดใหญ่สุดอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.5 μm ถึง 125 μm และในน้ำมันหล่อลื่นเจอกกลุ่มใหญ่สองกลุ่ม กลุ่มแรกมีขนาดตั้งแต่ 0.5-15 μm กลุ่มสองมีขนาดตั้งแต่ 15- 125 μm และพบว่าตัวอย่าง new oil+E85 มีเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเศษโลหะสีทหรอของลูกบอลเหล็กขนาดเล็กและใหญ่ 55% และ 45% ตามลำดับ ตัวอย่าง new oil+E20 มีเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเศษโลหะสีทหรอของลูกบอลเหล็กขนาดเล็กและใหญ่ 45% และ 55% ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างทั้งคู่ส่วนใหญ่เป็นลักษณะการสีทหรอบแบบขูดขีด แสดงดังรูปที่ 4.40 ที่ปริมาณสะสม 20% ของ new oil+E85 และ new oil+E20 มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0-3 μm และ 0-4 μm ตามลำดับ ที่ปริมาณสะสม 50% ของ new oil+E85 และ new oil+E20 มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0-10 μm และ 0-20 μm ตามลำดับ ที่ปริมาณสะสม 80% ของ new oil+E85 และ new oil+E20 มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0-37 μm และ 0-43 μm ตามลำดับ



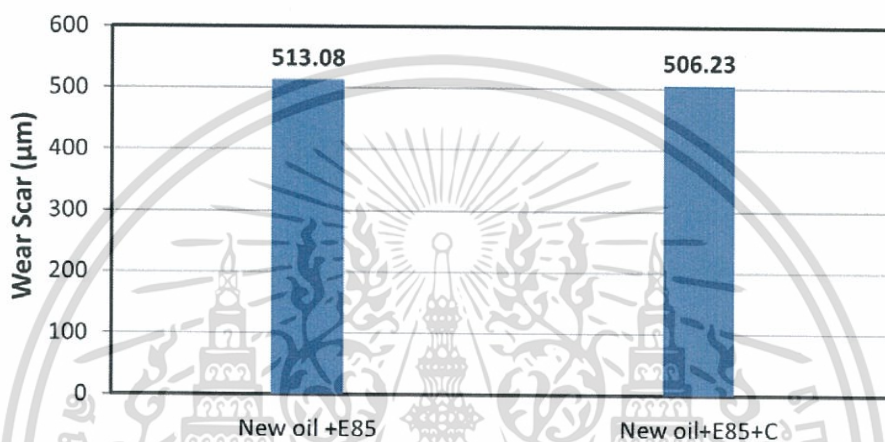
รูปที่ 4.42 ขนาดและการกระจายตัวของเศษโลหะสีทหรอของลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบกับโพรบอลลของตัวอย่าง new oil+E20 และ new oil+E85

4.2.2 ผลกระทบจากการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์ E85 และเขม่าที่มีการจำลองการปนเปื้อนด้วยคาร์บอนแบล็ค

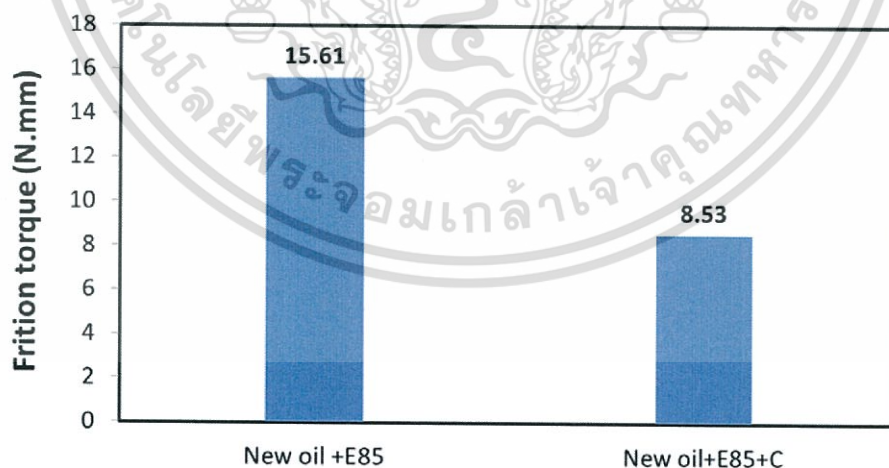
จากรูปที่ 4.43 แสดงขนาดของผลสีทหรอบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง new oil + E85-1% และ new oil + E85-1% + C-1% มีขนาดเท่ากับ 513.08 μm และ 506.23 μm ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าขนาดของแผลที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง new oil + E85-1% + C-1% มีขนาดน้อยกว่าตัวอย่าง new oil + E85-1% เท่ากับ $7.57 \mu\text{m}$

จากรูปที่ 4.44 แสดงแรงเสียดทานด้านการหมุนของตัวอย่าง new oil + E85-1% และ new oil + E85-1% + C-1% มีค่าเท่ากับ 15.61 N.mm และ 8.53 N.mm ตามลำดับ พบว่าเมื่อมีการปนเปื้อนคาร์บอนแบล็คส่งผลทำให้แรงเสียดทานด้านการหมุนลดลงเนื่องจากคาร์บอนแบล็คเข้าไปช่วยในการกลี้งระหว่างผิวชิ้นงานซึ่งมีลักษณะการทำหน้าที่คล้ายสารหล่อลื่นแข็ง แสดงดังรูปที่ 4.45

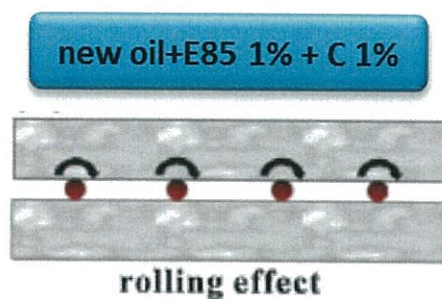


รูปที่ 4.43 ขนาดของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง new oil + E85-1% + C-1% เทียบกับ new oil + E85-1%



รูปที่ 4.44 แรงเสียดทานด้านการหมุนของตัวอย่าง new oil + E85-1% + C-1% เทียบกับ new oil + E85-1%

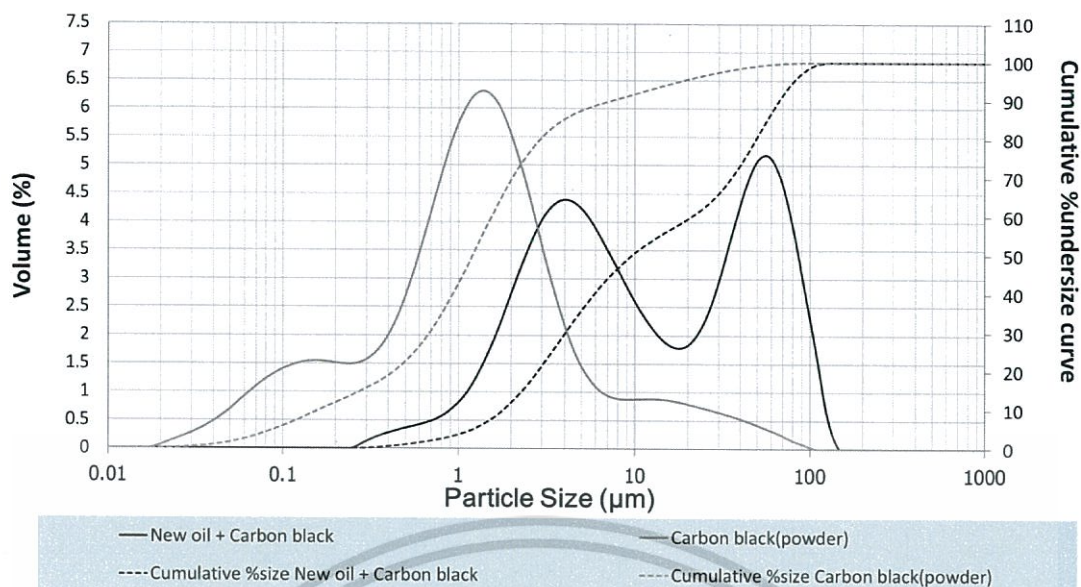
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



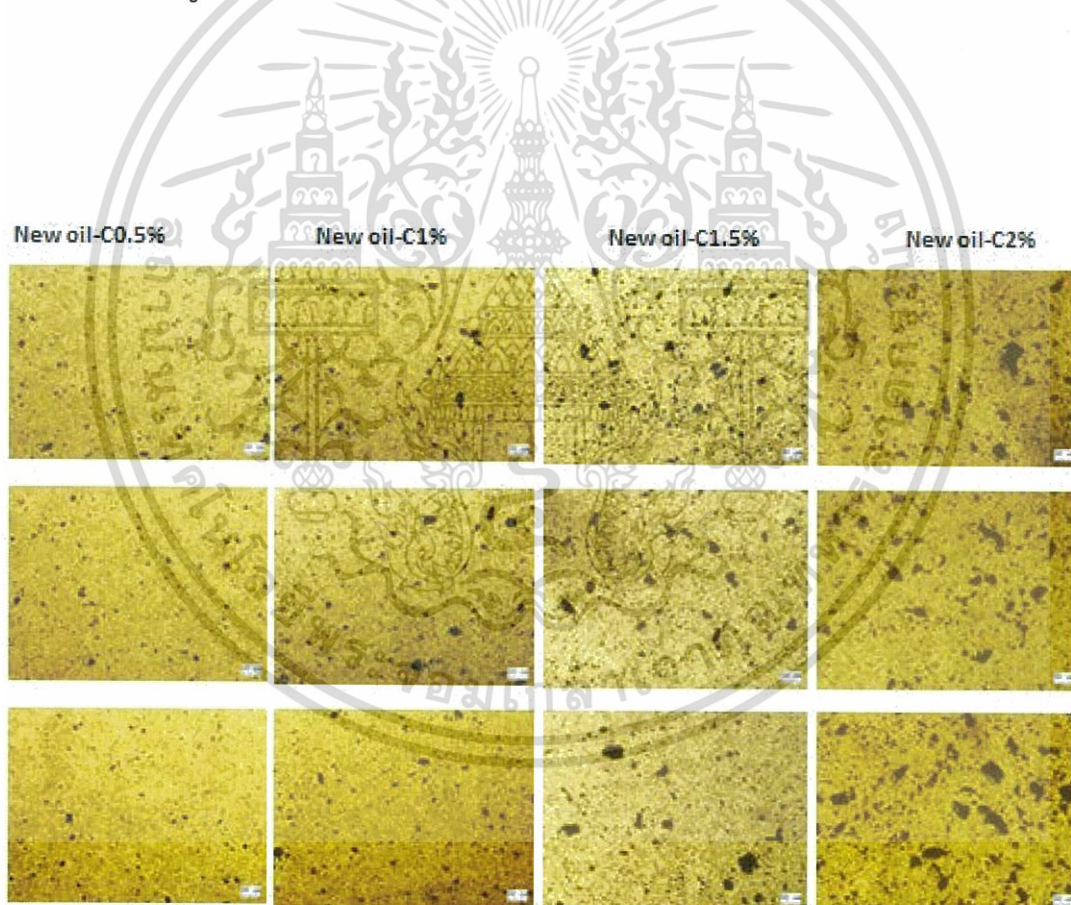
รูปที่ 4.45 รูปแบบการกลิ้งระหว่างผิวชิ้นงาน [58]

จากรูปที่ 4.46 แสดงขนาดและการกระจายตัวของคาร์บอนแบล็คปริมาณ 1 %Wt ที่ผสมในน้ำมันหล่อลื่นแสดงให้เห็นในกราฟเส้นสีดำ พบว่าอนุภาคที่ตรวจพบขนาดที่เล็กที่สุดจนถึงขนาดใหญ่ที่สุดมีขนาดตั้งแต่ 0.2 μm ถึง 145 μm และเปอร์เซ็นต์สะสมที่ตรวจพบอนุภาคที่ 10%, 50%, 90% โดยปริมาตรที่พบอนุภาคมีขนาดตั้งแต่ 0-1.83 μm , 0-9.63 μm , 0-66.24 μm ตามลำดับ กราฟเส้นสีเทาเป็นอนุภาคการกระจายตัวของคาร์บอนแบล็คปริมาณ 1 %Wt ที่มีการเติมสารเคมีปรุงแต่งกระจายอนุภาค (Igepal CA630) ซึ่งเป็นตัวช่วยให้อนุภาคไม่เกาะตัวรวมกันซึ่งในกรณีที่ผสมคาร์บอนแบล็คในน้ำมันหล่อลื่นก็ทำการเติมสารเคมีปรุงแต่งกระจายอนุภาคเช่นกัน พบว่าอนุภาคที่ตรวจพบขนาดที่เล็กที่สุดจนถึงขนาดใหญ่ที่สุดมีขนาดตั้งแต่ 0.03 μm ถึง 108 μm และเปอร์เซ็นต์สะสมที่ตรวจพบอนุภาคที่ 10%, 50%, 90% โดยปริมาตรที่พบอนุภาคมีขนาดตั้งแต่ 0-0.18 μm , 0-1.22 μm , 0-7.26 μm ตามลำดับ สังเกตได้ว่าคาร์บอนแบล็คที่ผสมกับน้ำมันหล่อลื่นมีขนาดการเกาะกลุ่มเป็นก้อนที่ใหญ่ขึ้น

จากรูปที่ 4.47 แสดงให้เห็นถึงขนาดและการกระจายตัวของคาร์บอนแบล็คในน้ำมันหล่อลื่นที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆซึ่งในการจำลองการปนเปื้อนเขม่าด้วยคาร์บอนแบล็คพบว่าที่ปริมาณการปนเปื้อนคาร์บอนแบล็คมากขึ้นความหนาแน่นต่อพื้นที่ของคาร์บอนแบล็คในน้ำมันหล่อลื่นก็จะมากขึ้นด้วยและพบขนาดของคาร์บอนแบล็คที่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้น ในการจำลองการปนเปื้อนเขม่าด้วยคาร์บอนแบล็คทำการผสมที่ 1 %Wt ซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกับการปนเปื้อนของเขม่าในรถยนต์ที่ใช้งานจริง

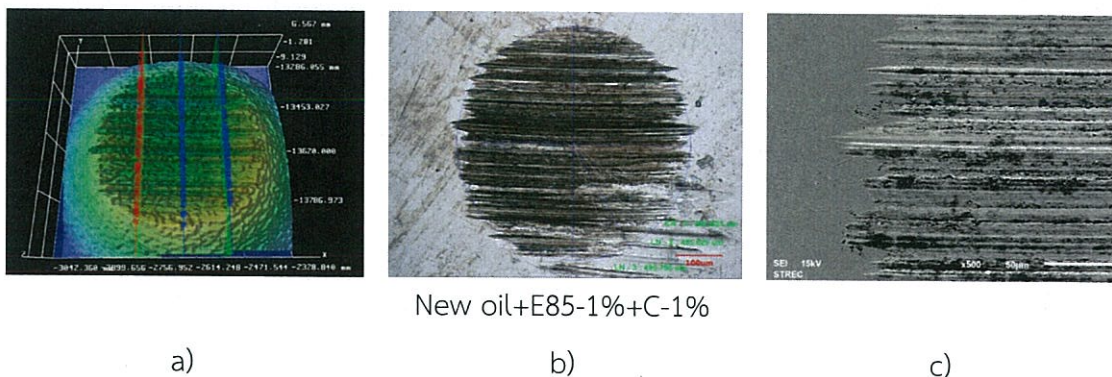


รูปที่ 4.46 ขนาดและการกระจายตัวของคาร์บอนแบล็คโดยเฉลี่ย



รูปที่ 4.47 ขนาดและการกระจายตัวของคาร์บอนแบล็คในน้ำมันหล่อลื่นที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



New oil+E85-1%+C-1%

a)

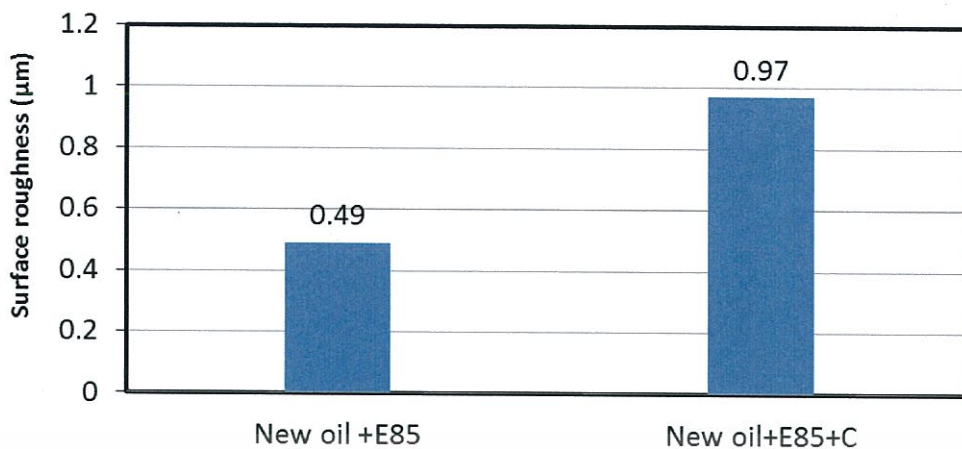
b)

c)

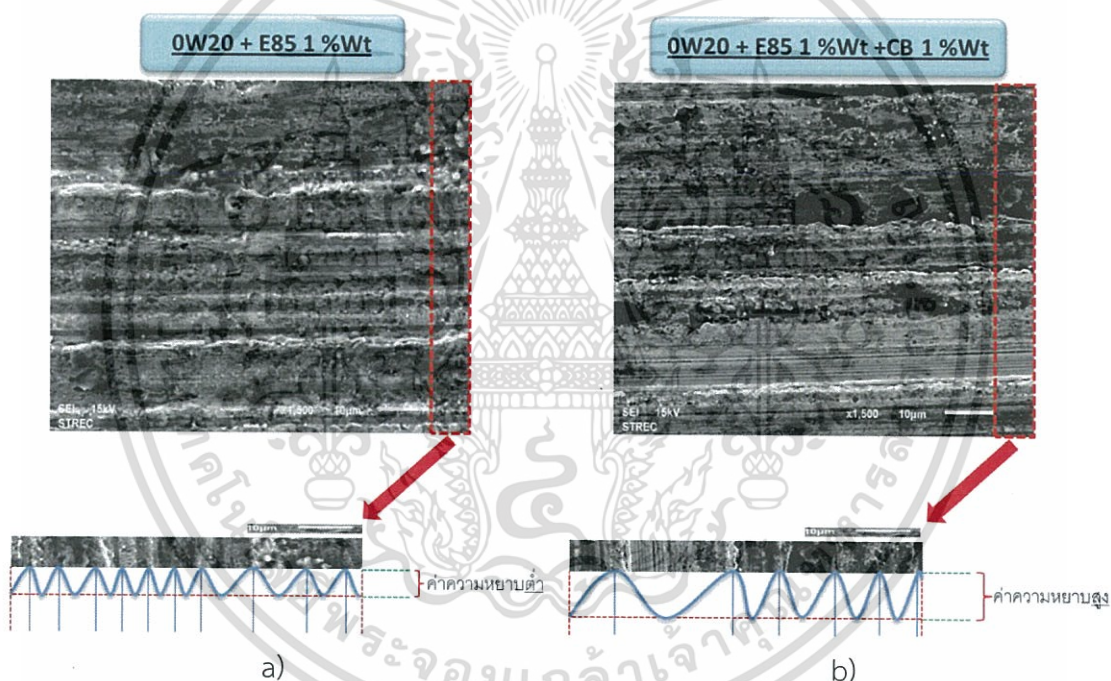
รูปที่ 4.48 ลักษณะของแผลสีกหรือบนลูกบอลเหล็กตัวอย่าง New oil+E85-1%+C-1% a) ภาพถ่ายพื้นผิว 3D b) ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 200X c) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 500X

จากรูปที่ 4.48 แสดงลักษณะของแผลสีกหรือบนลูกบอลเหล็กตัวอย่าง New oil+E85-1%+C-1% จะประกอบด้วยรูป 3มิติ ภาพแผลสีกหรือบนลูกบอลเหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และภาพแผลสีกหรือบนลูกบอลเหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะเห็นว่าลูกบอลเหล็กมีการสึกหรอทั้งแบบยึดติด ขูดขีดและการล่าตัว

จากรูปที่ 4.49 แสดงค่าความหยาบของแผลสีกหรือบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง new oil + E85-1% และ new oil + E85-1% + C-1% มีค่าเท่ากับ $0.49 \mu\text{m}$ และ $0.97 \mu\text{m}$ ตามลำดับ พบว่าค่าความหยาบของแผลสีกหรือบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง new oil + E85-1% + C-1% มีค่ามากกว่าตัวอย่าง new oil + E85-1% เท่ากับ $0.48 \mu\text{m}$ เนื่องจากคาร์บอนแบล็คมีการเกาะตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ที่มีความสูงมากกว่าความหนาของแผ่นฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมันอาจจะเข้าไปปิดกั้นการเข้าไปทำงานของน้ำมันหล่อลื่นส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีโอกาสสัมผัสกันมากยิ่งขึ้นและคาร์บอนแบล็คที่สามารถเข้าไปอยู่ระหว่างผิวชิ้นงานได้อาจมีขนาดโดยประมาณน้อยกว่า $1 \mu\text{m}$ พิจารณาจากค่าความหยาบของพื้นผิวที่เกิดขึ้นซึ่งคาร์บอนแบล็คอาจแทรกตัวเข้าไปในร่องความหยาบขณะที่ลูกบอลเคลื่อนที่หมุน ขนาดของคาร์บอนแบล็คที่อาจแทรกตัวเข้าไปในร่องความหยาบอยู่ในช่วง $0-1 \mu\text{m}$ เป็นปริมาณสะสม 4% คาร์บอนแบล็คที่สามารถเข้าไปอยู่ระหว่างผิวชิ้นงานได้สามารถช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างผิวเมื่อเทียบกับตัวอย่าง new oil + E85-1% แต่คาร์บอนแบล็คก็ทำให้เกิดการสึกหรอแบบขูดขีดระหว่างผิวชิ้นงานสูง



รูปที่ 4.49 ค่าความหยาบของแผ่นสีกหรอบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง new oil + E85-1% + C-1% เทียบกับ new oil + E85-1%



รูปที่ 4.50 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 1,500X ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบโพรบและลักษณะของพื้นผิวลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง a) OW20 + E85-1% และ b) OW20 + E85-1% + C-1%

จากรูปที่ 4.50 แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบโพรบของตัวอย่าง OW20 + E85-1% และ OW20 + E85-1% + C-1% มีลักษณะของพื้นผิวเป็นร่องขูดขีดเป็นแนวยาวพบว่ารูปแบบของร่องขูดขีดของตัวอย่าง OW20 + E85-1% มีจำนวนของร่องลึกที่มากกว่าตัวอย่าง OW20 + E85-1% + C-1% เมื่อเทียบที่ระยะความยาวที่เท่ากันแต่ระยะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

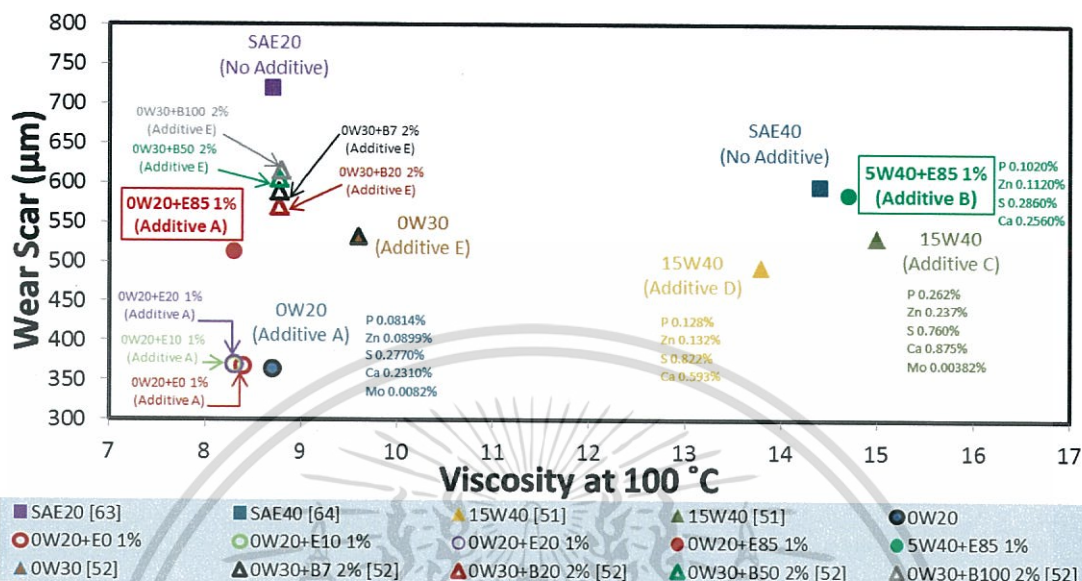
ระหว่างยอดถึงยอดของทั้งสองตัวอย่างพบว่าตัวอย่าง 0W20 + E85-1% + C-1% มีร่องขีดขนาด เล็กที่มากกว่าและพบว่าค่าความหยาบของพื้นผิวของตัวอย่าง 0W20 + E85-1% + C-1% มีค่า มากกว่าตัวอย่าง 0W20 + E85-1% แสดงว่าความสูงของยอดเขาแปลที่สึกหรอของตัวอย่าง 0W20 + E85-1% + C-1% มียอดเขาที่สูงมากกว่าตัวอย่าง 0W20 + E85-1%

4.2.3 ผลกระทบจากการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์ E85 ในน้ำมันหล่อลื่นที่มี สารเคมีเติมแต่งลดแรงเสียดทานของโมลิบดีนัม

จากรูปที่ 4.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็ก (Wear Scar) กับ ความหนืด (Viscosity) ที่ 100 °C จากงานวิจัยที่ผ่านมาในกรณีที่ไม่มีสารเคมีเติม แต่งในน้ำมันหล่อลื่นพบว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดมากจะมีขนาดของ Wear Scar น้อยกว่า น้ำมันหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดต่ำตามกรณีน้ำมันหล่อลื่นเบอร์ SAE20 (No Additive) กับ SAE40 (No Additive) และน้ำมันหล่อลื่นในช่วงความหนืดใกล้เคียงกันพบว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารเคมีเติม แต่งมีขนาดของ Wear Scar น้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่มีสารเคมีเติมแต่งตามกรณีน้ำมันหล่อลื่น เบอร์ 0W20 (Additive A) และ 0W30 (Additive E) เทียบกับ SAE20 (No Additive) และตาม กรณีน้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 15W40 (Additive C) และ 15W40 (Additive D) เทียบกับ SAE40 (No Additive) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ในน้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 (Additive A) และ 5W40 (Additive B) พบว่าน้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 + E85-1% มีค่า ความหนืดที่ต่ำกว่าน้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 5W40 + E85-1% แต่มีค่า Wear Scar ที่ต่ำกว่าน้ำมันหล่อลื่น เบอร์ 5W40 + E85-1% ซึ่งโดยปกติในกรณีที่น้ำมันหล่อลื่นที่ไม่มีสารเคมีเติมแต่ง น้ำมันหล่อลื่นที่มี ความหนืดต่ำกว่าจะมีขนาดของ Wear Scar มากกว่าซึ่งอาจเป็นผลมาจากสารเคมีเติมแต่งที่มีอยู่ใน น้ำมันหล่อลื่นแตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาที่ความหนืดเดียวกันแต่สารเคมีเติมแต่งที่มีอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นต่างชนิดกัน พบว่าถ้าน้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 (Additive A) + E85 ถ้าเป็น additive B ขนาด Wear Scar ที่ เกิดขึ้นควรอยู่ในช่วงโดยประมาณ 650 μm – 710 μm มาจากการพิจารณาขนาดของ Wear Scar ที่เกิดขึ้นของน้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 5W40 (Additive B) + E85 เปรียบเทียบกับน้ำมันหล่อลื่น SAE40 (No Additive) และพบว่าถ้าน้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 5W40 (Additive B) + E85 ถ้าเป็น additive A ขนาด Wear Scar ที่เกิดขึ้นควรอยู่ในช่วงโดยประมาณ 340 μm – 390 μm มาจากการพิจารณา ขนาดของ Wear Scar ที่เกิดขึ้นของน้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 0W20 (Additive A) + E85 เปรียบเทียบกับ น้ำมันหล่อลื่น SAE20 (No Additive) แต่เมื่อพิจารณาที่ความหนืดเดียวกันพบว่า Additive A ที่มีอยู่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

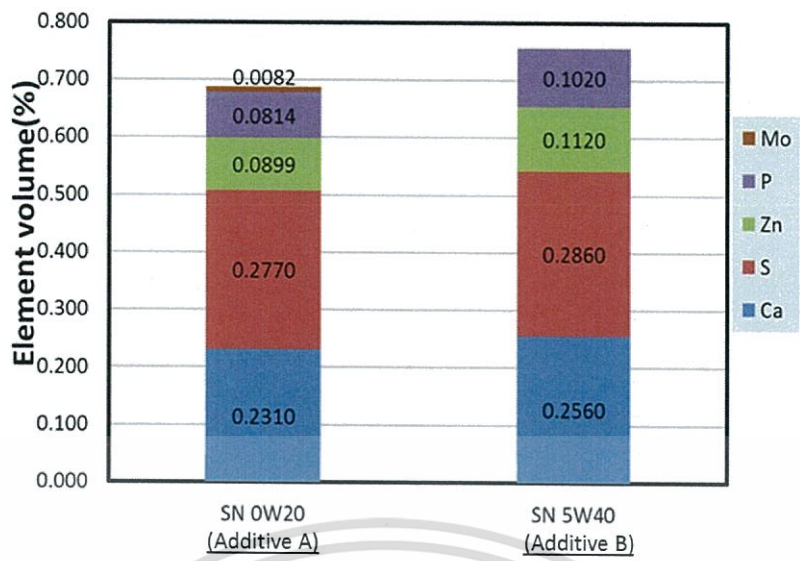
ในน้ำมันหล่อลื่นตามกรณี 0W20 + E85 และ 5W40 + E85 มีคุณสมบัติป้องกันการสึกหรอได้ดีกว่า Additive B เนื่องจากขนาด Wear Scar เล็กกว่า



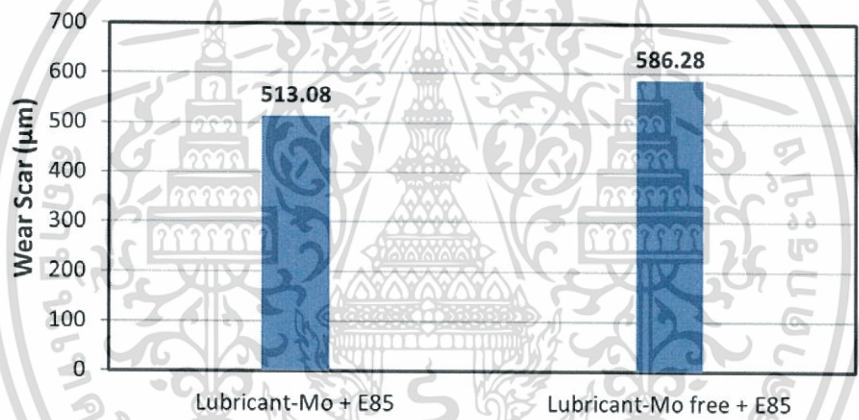
รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็ก (Wear Scar) กับ ความหนืด (Viscosity) ที่ 100 °C

จากรูปที่ 4.52 แสดงธาตุของสารเคมีเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่นที่ตรวจสอบด้วย XRF พบว่าในน้ำมันหล่อลื่นชนิด SN 0W20 (Additive A) มีสารประกอบของธาตุโมลิบดีนัม (Mo) ปริมาณ 0.0082% เป็นสารปรุงแต่งลดแรงเสียดทานซึ่งเป็นของแข็งที่สามารถรับแรงกดในแนวตั้งและการเลื่อนหลุดง่ายในโครงสร้างชั้นผิวที่ตีส่งผลให้ค่าแรงเสียดทานและการสึกหรอของชิ้นงานลดลง ส่วนธาตุของสารเคมีเติมแต่ง กำมะถัน (S) สังกะสี (Zn) ฟอสฟอรัส (P) และแคลเซียม (Ca) ถูกตรวจพบทั้งในน้ำมันหล่อลื่นชนิด SN 0W20 (Additive A) และ SN 5W40 (Additive B) ซึ่งธาตุของสารเคมีเติมแต่ง กำมะถัน(S) สังกะสี(Zn) ฟอสฟอรัส (P) เป็นธาตุองค์ประกอบในสารเคมีเติมแต่งซิงค์ไดอิลิโอฟอสเฟตหรือซิงค์ไดอัลคิลไดอิลิโอฟอสเฟต (ZDDP) มีคุณสมบัติเป็นสารต่อต้านการสึกหรอ รับแรงกดสูง และยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนธาตุของสารเคมีเติมแต่งแคลเซียม (Ca) มีคุณสมบัติเป็นสารกระจายเขม่าและสารชะล้างทำความสะอาด

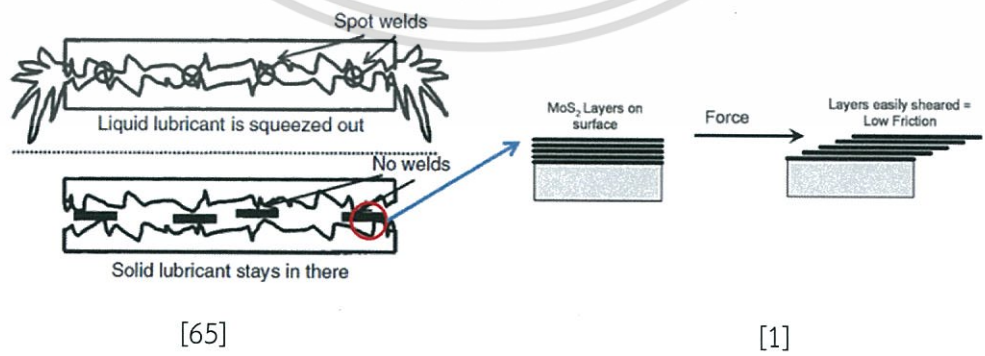
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.52 ธาตุของสารเคมีเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่น



รูปที่ 4.53 ขนาดของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85-1% เทียบกับ Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85-1%

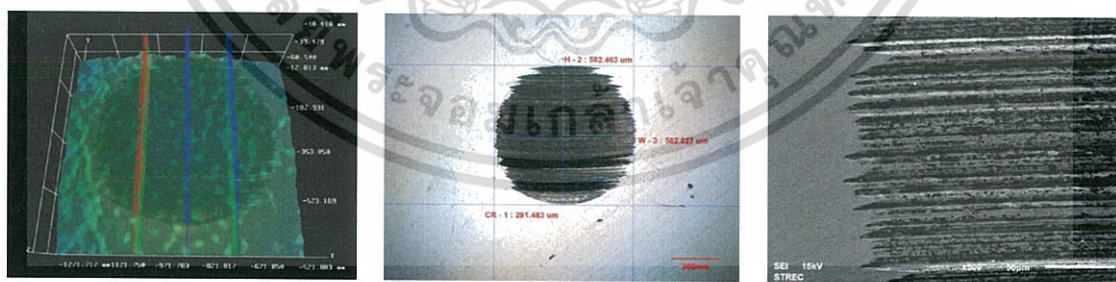


รูปที่ 4.54 รูปแบบกลไกการทำงานของสารเคมีปรุงแต่งลดแรงเสียดทานโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (MoS₂)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.53 แสดงขนาดของแผ่นสึกหรอบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85-1% และ Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85-1% มีขนาดเท่ากับ 513.08 μm และ 586.28 μm ตามลำดับ พบว่าขนาดของแผ่นที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85-1% มีขนาดใหญ่กว่าตัวอย่าง Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85-1% เท่ากับ 73.2 μm อาจเกิดจาก Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85-1% ไม่มีสารปรุงแต่งลดแรงเสียดทานโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (MoS_2) ซึ่งการก่อตัวได้รับการส่งเสริมจากการปรากฏตัวของสารปรุงแต่งต่อต้านการสึกหรอซิงค์ไดอัลคิลไดริโอฟอสเฟต (ZDDP) ที่ให้อะตอมของซัลเฟอร์กลไกการทำงานของโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ แสดงดังรูปที่ 4.54 รูปซ้ายมือแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ที่เข้าไปปกคลุมปลายยอดแหลมของความหยาบของพื้นผิวช่วยทำให้น้ำมันหล่อลื่นไม่ถูกบีบอัดออกไปอย่างรวดเร็วจนเกินไปจากกระทำของปลายยอดแหลมของความหยาบของพื้นผิวทำให้ฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นสามารถก่อตัวได้ทันทีซึ่งจะทำให้ลดโอกาสการสัมผัสกันโดยตรงของชิ้นงานทำให้การสึกหรอน้อยลงและช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างปลายยอดแหลมของความหยาบของพื้นผิวชิ้นงานเนื่องจากโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์มีความสามารถในการเลื่อนหลุดง่ายในโครงสร้างชิ้นผิวเมื่อมีแรงกระทำในแนวราบหรือแรงเฉือนได้ดี แสดงดังรูปที่ 4.54 ด้านขวามือ

จากรูปที่ 4.55 แสดงลักษณะของแผ่นสึกหรอบนลูกบอลเหล็กตัวอย่าง Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85-1% จะประกอบด้วยรูป 3มิติ ภาพแผ่นสึกหรอบนลูกบอลเหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และภาพแผ่นสึกหรอบนลูกบอลเหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะเห็นได้ว่าลูกบอลเหล็กมีการสึกหรอทั้งแบบยึดติด ขูดขีดและการล้าตัว



Lubricant-Mo free (SN 5W40) +E85-1%

a)

b)

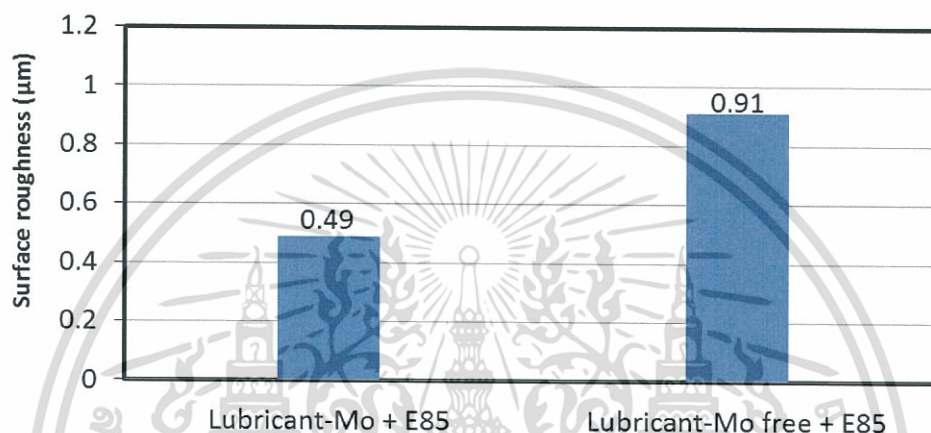
c)

รูปที่ 4.55 ลักษณะของแผ่นสึกหรอบนลูกบอลเหล็กตัวอย่าง Lubricant-Mo free (SN 5W40)

+ E85-1% a) ภาพถ่ายพื้นผิว 3D b) ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 100X c) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 500X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.56 แสดงค่าความหยาบของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85-1% และ Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85-1% มีค่าเท่ากับ $0.49 \mu\text{m}$ และ $0.91 \mu\text{m}$ ตามลำดับ พบว่าค่าความหยาบโดยของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85-1% มีค่าน้อยกว่าตัวอย่าง Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85-1% เท่ากับ $0.42 \mu\text{m}$ เนื่องจากมีสารปรุงแต่งลดแรงเสียดทานของโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ที่มีคุณสมบัติช่วยลดค่าแรงเสียดทานและการสึกหรอของชิ้นงาน

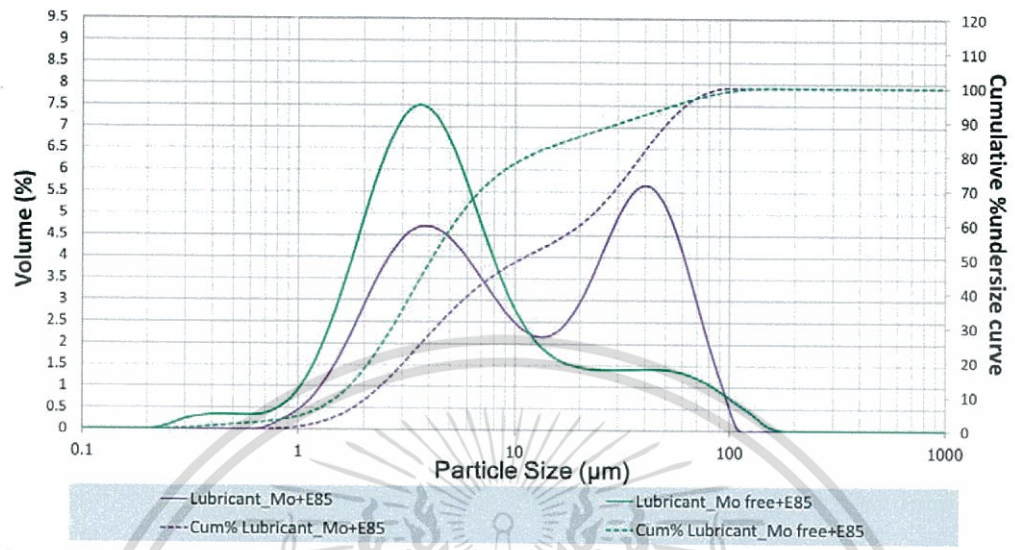


รูปที่ 4.56 ค่าความหยาบของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85-1% เทียบกับ Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85-1%

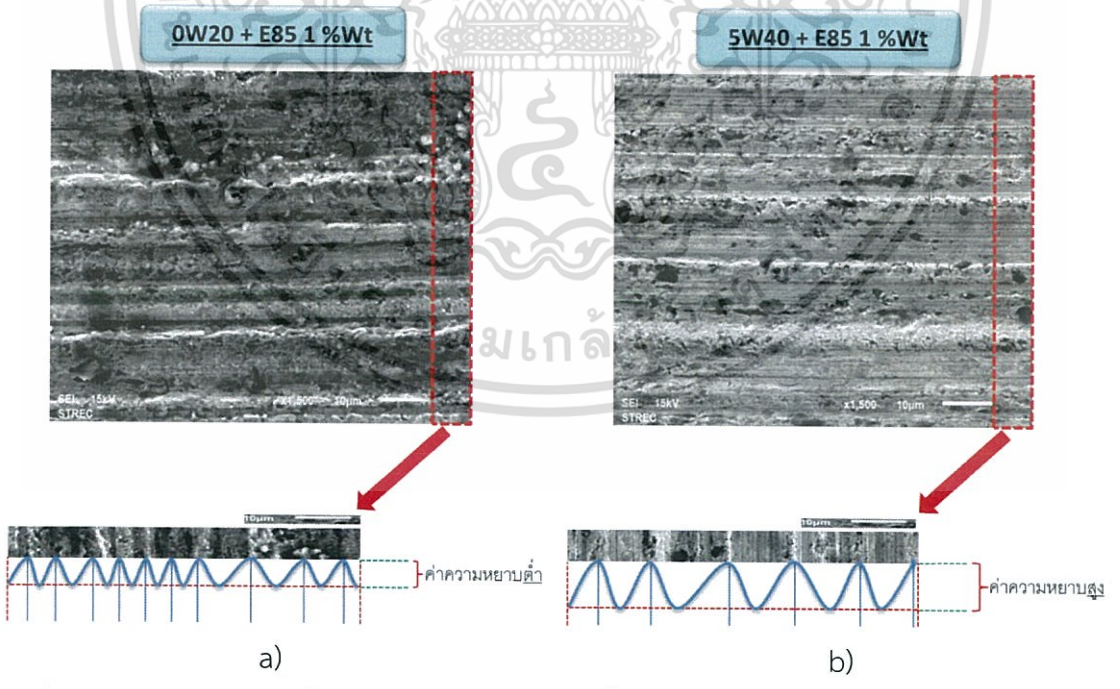
จากรูปที่ 4.57 แสดงขนาดและการกระจายตัวของเศษโลหะสึกหรอของลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบโฟร์บอลของตัวอย่าง Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85 และ Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85 พบว่าอนุภาคที่ตรวจพบขนาดเล็กที่สุดจนถึงขนาดใหญ่สุดอยู่ในช่วงตั้งแต่ $0.2 \mu\text{m}$ ถึง $170 \mu\text{m}$ และในน้ำมันหล่อลื่นเจอกกลุ่มใหญ่สองกลุ่ม กลุ่มแรกมีขนาดตั้งแต่ $0.2-15 \mu\text{m}$ กลุ่มสองมีขนาดตั้งแต่ $15-170 \mu\text{m}$ และพบว่าตัวอย่าง Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85 มีเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเศษโลหะสึกหรอของลูกบอลเหล็กขนาดเล็กและใหญ่ 55% และ 45% ตามลำดับ ตัวอย่าง Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85 มีเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเศษโลหะสึกหรอของลูกบอลเหล็กขนาดเล็กและใหญ่ 85% และ 15% ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างทั้งคู่ส่วนใหญ่เป็นลักษณะการสึกหรอแบบขูดขีด แสดงดังรูปที่ 4.40 และ 4.55 ที่ปริมาณสะสม 20% ของ Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85 และ Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85 มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง $0-3 \mu\text{m}$ และ $0-2 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ที่ปริมาณสะสม 50% ของ Lubricant-Mo (SN 0W20)

+ E85 และ Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85 มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง $0-10 \mu\text{m}$ และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0-4 μm ตามลำดับ ที่ปริมาณสะสม 80% ของ Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85 และ Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85 มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0-37 μm และ 0-12 μm ตามลำดับ



รูปที่ 4.57 ขนาดและการกระจายตัวของเศษโลหะสึกหรอของลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบ โพรบของตัวอย่าง Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85 และ Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85



รูปที่ 4.58 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 1,500X ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบโพรบและลักษณะของพื้นผิวลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง a) Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85 และ b) Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.58 แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบ โพรบของตัวอย่าง Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85 และ Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85 มีลักษณะของพื้นผิวเป็นร่องขูดขีดเป็นแนวยาวพบว่ารูปแบบของร่องขูดขีดของตัวอย่าง Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85 มีจำนวนของร่องลึกที่มากกว่าตัวอย่าง Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85 เมื่อเทียบที่ระยะความยาวที่เท่ากันแต่ระยะระหว่างยอดถึงยอดของทั้งสองตัวอย่าง พบว่าตัวอย่าง Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85 มีร่องขูดขีดขนาดเล็กที่มากกว่าและพบว่าค่าความหยาบของพื้นผิวของตัวอย่าง Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85 มีค่ามากกว่าตัวอย่าง Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85 แสดงว่าความสูงของยอดเขาแปลที่สึกหรอของตัวอย่าง Lubricant-Mo free (SN 5W40) + E85 มียอดเขาที่สูงกว่าตัวอย่าง Lubricant-Mo (SN 0W20) + E85



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นจากการทดสอบภาคสนามกับรถยนต์ที่ใช้งานจริง

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นพบว่าปริมาณเศษโลหะสึกหรอทั้งหมดโดยเฉลี่ยของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 และรถยนต์จากโชว์รูม A และโชว์รูม B มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่เพิ่มมากขึ้นและปริมาณของเศษโลหะสึกหรอที่พบไม่มีปริมาณเศษโลหะใดเกินขอบเขตค่าเตือนภัยที่แนะนำไว้ ปริมาณเศษโลหะที่พบมากที่สุดคือ เหล็ก 42% ซึ่งน่าจะมีแหล่งที่มาจากการสึกหรอส่วนของเสื่อสูบ แหวนลูกสูบ และลูกสูบ ปริมาณเศษโลหะที่พบรองลงมาคือ อลูมิเนียม 33% ซึ่งน่าจะมีแหล่งที่มาจากการสึกหรอส่วนของลูกสูบและแบริ่งเพลลาข้อเหวี่ยง เมื่อระยะเวลาการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่เพิ่มสูงขึ้นค่าการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพ (ความหนืด) ลดลงและฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นที่ปกป้องชิ้นงานบางลงทำให้เกิดการสึกหรอมากขึ้น

ภาพถ่ายอนุภาคจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 และรถยนต์จากโชว์รูม A และโชว์รูม B โดยเฉลี่ยทั้งหมดพบว่าเป็นเศษโลหะสึกหรอแบบปกติจากการขัดถูมีขนาดโดยเฉลี่ย 2-3 μm เป็นสัดส่วน 77.41%, เศษโลหะสึกหรอแบบล้าตัวและขูดขีดของผิวสัมผัสจากการเคลื่อนที่ขบกันของพื้นเพื่อมีขนาดโดยเฉลี่ย 5-20 μm เป็นสัดส่วน 0.19%, เศษโลหะสึกหรอแบบล้าตัวของผิวสัมผัสจากการเคลื่อนที่ของเม็ดลูกกลิ้งมีขนาดโดยเฉลี่ย 5-50 μm เป็นสัดส่วน 9.27%, เศษโลหะสึกหรอแบบล้าตัวของเม็ดลูกกลิ้งมีขนาดโดยเฉลี่ย 5-10 μm เป็นสัดส่วน 0.36%, เศษโลหะสึกหรอแบบการลื่นไถลอย่างรุนแรงมีขนาดโดยเฉลี่ย 60-80 μm เป็นสัดส่วน 0.31%, เศษโลหะสึกหรอแบบขูดขีดมีขนาดโดยเฉลี่ย 20-60 μm เป็นสัดส่วน 0.35%, เศษโลหะสึกหรอแบบออกไซด์สีดำมีขนาดโดยเฉลี่ย 5-80 μm เป็นสัดส่วน 0.56%, เศษโลหะสึกหรอประเภทสนิมมีขนาดโดยเฉลี่ย 5-40 μm เป็นสัดส่วน 0.56%, อนุภาคสิ่งสกปรกมีขนาดโดยเฉลี่ย 5-80 μm เป็นสัดส่วน 5.63%, เศษโลหะสึกหรอประเภททองแดงเป็นอนุภาคเศษโลหะนอกกลุ่มเหล็กมีขนาดโดยเฉลี่ย 30-70 μm เป็นสัดส่วน 0.38%, เศษโลหะสึกหรอประเภทเหล็กหล่อขาวอนุภาคเศษโลหะนอกกลุ่มเหล็กมีขนาดโดยเฉลี่ย 2-30 μm เป็นสัดส่วน 0.54% โดยภาพรวมจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายอนุภาคจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้วพบเศษโลหะสึกหรอมีขนาด

ตั้งแต่ 2-80 μm นอกจากนั้นยังพบอนุภาคเขม่าซึ่งมีขนาดน้อยกว่า 2 μm เห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคจากการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสงของน้ำมันหล่อลื่นและไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วของรถทดสอบ T1 และ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 ตรวจพบมีขนาดตั้งแต่ 0.2-200 μm แบ่งออกได้ 2 กลุ่ม กลุ่มแรกมีขนาดตั้งแต่ 0.2-20 μm กลุ่มสองมีขนาดตั้งแต่ 20-200 μm และพบว่าในน้ำมันหล่อลื่นและไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วของรถทดสอบที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85 มีสัดส่วนของก้อนขนาดใหญ่มากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และขนาดของอนุภาคที่อาจส่งผลต่อการสึกหรอมีขนาดโดยประมาณตั้งแต่ 0.2-10 μm เนื่องจากสามารถเล็ดรอดผ่านไส้กรองออกมาได้

5.2 การทดสอบในระดับการจำลองด้านไทรโบโลยีโดยเครื่องทดสอบวัดคุณสมบัติด้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล

การทดสอบในระดับการจำลองด้านไทรโบโลยีโดยเครื่องทดสอบโฟร์บอลพบว่าขนาดของแผลที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็กและแรงเสียดทานด้านการหมุนมีค่ามากขึ้นเมื่อมีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงใน new oil เนื่องจากค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นลดลงทำให้ฟิล์มน้ำมันให้บางลงส่งผลให้เกิดแผลที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็กมีขนาดที่ใหญ่มากขึ้น

น้ำมันหล่อลื่นที่มีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอทานอลมากขึ้นจะส่งผลต่อขนาดของแผลที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็กมากขึ้นเพราะน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอทานอลมากจะส่งผลต่อค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นให้ต่ำลงมากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอทานอลน้อย เนื่องจากในการทดสอบโฟร์บอลทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 75°C ทำให้เอทานอลระเหยได้น้อยกว่าแก๊สโซลีนส่งผลให้น้ำมันหล่อลื่นที่มีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอทานอลมากจะมีปริมาณการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่เหลืออยู่ในน้ำมันหล่อลื่นมากกว่าการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอทานอลน้อยและส่งผลให้ความหนืดต่ำลงและความหนาของแผ่นฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นก็จะบางลงมากกว่าการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของเอทานอลน้อยทำให้แผลที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็กมีขนาดมากขึ้น ตามกรณีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงในน้ำมันหล่อลื่นที่มีขนาดของแผลที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็กที่มีขนาดเรียงจากมากไปน้อยของตัวอย่าง New oil + E85-1%, New oil + E20-1%, New oil + E10-1%, New oil + E0-1% ตามลำดับ

แรงเสียดทานด้านการหมุนของตัวอย่าง New oil + E85-1% + C-1% มีค่าน้อยกว่าตัวอย่าง New oil + E85-1% อยู่ที่ 0.48 N.mm หรือคิดเป็น 54.65% เนื่องจากคาร์บอนแบล็คเข้าไปช่วยในการกลิ้งระหว่างผิวชิ้นงานแต่พบว่าค่าความหยาบของตัวอย่าง New oil + E85-1% + C-1% มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าตัวอย่าง New oil + E85-1% อยู่ที่ 0.48 μm หรือคิดเป็น 97.96% และขนาดของผลที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็กของตัวอย่าง New oil + E85-1% + C-1% มีค่าน้อยกว่าตัวอย่าง New oil + E85-1% อยู่ที่ 6.85 μm หรือคิดเป็น 1.34%

5.3 ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยต่อ

จากการวิจัยโดยภาพรวมทั้งหมดที่ทำการเก็บตัวอย่างจากรถที่ใช้งานจริงและจากการจำลองด้านโทรโบโลยีทำให้เห็นแนวทางในการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมสำหรับผู้สนใจ ดังนี้

5.4.1 การเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญเป็นอย่างมากควรมีการควบคุมการเก็บตัวอย่างที่มีหลักการเก็บตัวอย่างที่ถูกต้องทุกครั้งและมีการจัดเก็บข้อมูลตัวอย่างที่ดี

5.4.2 การดำเนินงานในการทดสอบภาคสนามกับรถยนต์ทดสอบที่ใช้งานจริงที่มีการกำหนดชนิดการเติมน้ำมันเชื้อเพลิงควรเพิ่มเติมการทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆให้ครอบคลุมทุกชนิด

5.4.3 การดำเนินงานในการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคจากการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสงของไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วในการเลือกตัวอย่างควรกำหนดตำแหน่งที่จะทำการตัดตัวอย่างไปวิเคราะห์และควรทดสอบหลายๆตำแหน่งเพื่อหาค่าเฉลี่ยโดยภาพรวมและเพื่อความแม่นยำของข้อมูล

5.4.4 การดำเนินงานในการทดสอบในระดับการจำลองด้านโทรโบโลยีโดยไฟร์บอลควรมีการทดสอบซ้ำของแต่ละตัวอย่างเพื่อความแม่นยำของข้อมูล

5.4.5 การดำเนินงานในการทดสอบในระดับการจำลองด้านโทรโบโลยีโดยไฟร์บอลควรเพิ่มการปนเปื้อนชนิดอื่นนอกเหนือจากน้ำมันเชื้อเพลิงและคาร์บอนแบล็ค เช่น น้ำ ฝุ่นละออง เหม่า เพื่อความเสมือนจริงของตัวแปรการปนเปื้อนจากการทดสอบภาคสนามกับรถยนต์ที่ใช้งานจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Simon C. Tung and George E. Totten. 2012. Automotive Lubricants and Testing. U.S.A : ASTM Stock Number: MNL50.
- [2] สุรพล ราชภูริบุญ. 2549. วิศวกรรมกลหล่อลื่นเบื้องต้น. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- [3] ปณิตดา นิรนาทล้ำพงศ์ และคณะ. 2547. การสึกหรอในอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น).
- [4] James A. Addison and William M. Needelman. “Diesel engine lubricant contamination and wear” **Pall Corporation**, ENGWEAR O2885M.
- [5] Al-Osaimy A. S., Elhabib O. A. and Ali W. Y. “Inspecting Metallic Wear Particles Contaminating Lubricating Automotive Engine Oils” **INTERNATIONAL JOURNAL OF CONTROL, AUTOMATION AND SYSTEMS**, VOL.2, NO.3, October 2013. pp.15–22.
- [6] Om Prakash Sondhiya, Amit Kumar Gupta. “Wear debris analysis of automotive engine lubricating oil using by ferrography” *International journal of engineering and innovative technology (IJEIT)*. Volume 2, issue 5. November 2012.
- [7] Focuslab (2016). Oil Analysis-level 2.
- [8] MTHAI. “**Vegetable Oils**” [Online]. Available : <http://www.raytek.com/Raytek/enr/IREducation/EmissivityNonMetals.htm>. (2559)
- [9] Maerakluke. “**Animal Oils**” [Online]. Available : <http://www.maerakluke.com/น้ำมันปลาและน้ำมันตับปลา-ต่างกันอย่างไร/> (2559)
- [10] Ronald Dean. “**Paraffins Naphthenes Aromatics**” [Online]. Available : <http://slideplayer.com/slide/4419420/> (2559)
- [11] AMSOIL. “**PAO : Polyalphaolefin**” [Online]. Available : <http://www.selectsynthetics.com/base-oil-groups.html> (2559)
- [12] Machinerylubrication. “**SAE grades**” [Online]. Available : <http://www.machinerylubrication.com/Read/30197/choose-engine-oil> (2559)
- [13] Pall Corporation. “**Adhesive Wear**” [Online]. Available : <http://ru.pall.com/main/industrial-manufacturing/why-is-filtration-important-3779.page> (2559)
- [14] Pall Corporation. “**Abrasive Wear**” [Online]. Available : <http://ru.pall.com/main/industrial-manufacturing/why-is-filtration-important-3779.page> (2559)
- [15] Pall Corporation. “**Fatigue Wear**” [Online]. Available : <http://ru.pall.com/main/industrial-manufacturing/why-is-filtration-important-3779.page> (2559)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [16] JGS-Nitriding, LLC. “Corrosive Wear” [Online]. Available : <http://www.jgs-nitriding.com/index.php> (2559)
- [17] Cherry Balmz. “Boundary Lubrication” [Online]. Available : http://www.cherrybalmz.com/?_escaped_fragment_=lubricant-formulation--regimes/cloh (2559)
- [18] Cherry Balmz. “Mixed Regime Lubrication” [Online]. Available : http://www.cherrybalmz.com/?_escaped_fragment_=lubricant-formulation--regimes/cloh (2559)
- [19] Robert Errichello. “Elastohydrodynamic Lubrication (EHL): A Review” [Online]. Available : http://www.geartechnology.com/articles/0715/Elastohydrodynamic_Lubrication_%28EHL%29:_A_Review (2559)
- [20] Cherry Balmz. “Hydrodynamic Lubrication” [Online]. Available : http://www.cherrybalmz.com/?_escaped_fragment_=lubricant-formulation--regimes/cloh (2559)
- [21] Drew Troyer. “The Stribeck Equation and Curve” [Online]. Available : <http://www.machinerylubrication.com/Read/27725/a-balanced-approach-to-lubrication-effectiveness-> (2559)
- [22] Doug Davis. “Sliding Friction” [Online]. Available : <http://www.ux1.eiu.edu/~cfadd/1150/04Nwtn/frict.html> (2559)
- [23] Ron Kurtus. “Role of Friction in Starting Rolling Motion” [Online]. Available : http://www.school-for-champions.com/science/friction_rolling_start.htm#.Vynk3xWLLhE (2559)
- [24] พีระวัตร นันวงค์. 2549. “การวิเคราะห์รูปร่างลักษณะอนุภาคการสึกหรอด้วยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการติดตามสภาพเครื่องจักร” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [25] Vallop Magmee. “ชิ้นส่วนเครื่องยนต์” [Online]. Available : http://vallop-automechanics.blogspot.com/2012/05/blog-post_30.html (2559)
- [26] SW OCEAN WORLD CO.,LTD. “Viscosity System” [Online]. Available : <http://www.swoceanworld.com/> (2559)
- [27] Spectro Scientific. “Spectroil M - Spectroil M/C-W” [Online]. Available <http://www.spectrosci.com/product/spectroil-mc-w/> (2559)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [28] Noria Corporation. “Anatomy of an Atomic Emission Spectrometer” [Online]. Available : <http://www.machinerylubrication.com/Read/287/elemental-analysis> (2559)
- [29] Robert J. Yurko, Malte Lukas, Daniel Anderson . “New Rotrode Filter Spectroscopy Method” [Online]. Available : <http://www.machinerylubrication.com/Read/918/rotrode-filter-spectroscopy> (2559)
- [30] Robert J. Yurko, Malte Lukas, Daniel Anderson . “New Rotrode Filter Spectroscopy Method” [Online]. Available : <http://www.machinerylubrication.com/Read/918/rotrode-filter-spectroscopy> (2559)
- [31] Koehler Instrument Company, Inc. “KV3000 and KV4000 Constant Temperature Kinematic Viscosity Baths with Integrated Digital Timing & Data Acquisition Software” [Online]. Available : <http://www.koehlerinstrument.com/viscosity-index.html> (2559)
- [32] Shimadzu Corporation. “FTIR Validation” [Online]. Available : <http://www.shimadzu.com/an/ftir/support/tips/letter4/validation.html> (2559)
- [33] Applidyne Engineering Design Solutions. “FTIR Spectrometer Vibration Investigation” [Online]. Available : <https://www.applidyne.com.au/index.php?select=196> (2559)
- [34] Xebex International, Ltd. “karl fischer moisture titrator” [Online]. Available : <http://www.xebex.jp/Prod/cn12/mks-520.html> (2559)
- [35] Stanhope–Seta Limited. “Setaflash Series 3 Closed Cup Flash Point Tester” [Online]. Available : <http://www.stanhope-seta.co.uk/1495/setaflash-series-3-closed-cup-flash-point-tester> (2559)
- [36] Pall Corporation. “How to determine if a filter is designed for highly efficient removal” [Online]. Available : <http://www.pall.com/main/aerospace-defense-marine/what-to-look-for-in-a-filter-17932.page> (2559)
- [37] Crea Laboratory Technologies Pty Ltd. “SpectroT2FM Q500 Analytical Ferrography Laboratory Application” [Online]. Available : <http://www.crealt.co.nz/oilanalysis/onsite/q5200/pulp-and-paper/spectrot2fm-q500-analytical-ferrography-laboratory/> (2559)
- [38] Surapol Raadnui. “Analytical Ferrography Analysis” [Online]. Available : <http://www.machinerylubrication.com/Read/672/grease-analysis-bearings> (2559)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [39] Trico Corporation. “TYPICAL FERROGRAPHIC WEAR PARTICLES”[Online]. Available : <https://www.tricocorp.com> (2559)
- [40] Thomas J. Fellers and Michael W. Davidson. “Conjugate Planes in Optical Microscopy”[Online]. Available : <http://www.microscopyu.com/articles/formulas/formulasconjugate.html> (2559)
- [41] Girish Chandra. “SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM)” [Online]. Available : <http://www.iaszoology.com/sem/> (2559)
- [42] Particle Analytical. “Laser diffraction theory” [Online]. Available : <http://particle.dk/methods-analytical-laboratory/particle-size-by-laser-diffraction/laser-diffraction-theory/> (2559)
- [43] Nuclear Society of Thailand Articles. “X ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)” [Online]. Available : <http://www.nst.or.th/article/article494/article49418.htm> (2559)
- [44] The American Society of Mechanical Engineers. “Fractal Theory Applied to Evaluate the Tribological Performances of Two Greases Demonstrated in Four-Ball Tests” [Online]. Available : <http://tribology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1469084> (2559)
- [45] Hakan Kaleli et al. “Oil ageing – drain period in a petrol engine” **Industrial Lubrication and Tribology**, ISSN 0036-8792, 1997. pp.120-126.
- [46] Karl Kollmann et al. “Extended Oil Drain Intervals - Conservation of Resources or Reduction of Engine Life (Part II)” **Society of Automotive Engineers**, ISSN 0148-7191, 1998. pp.1-21.
- [47] Hakan Kaleli et al. “Used Oil Analysis and Study of Oil Drain Period in Gasoline Engine” **Society of Automotive Engineers**, ISSN 0148-7191, 1998. pp.1-12.
- [48] Marián KUČERA et al. “INSPECTION OF WEAR PARTICLES CONTAMINATING USED ENGINE OILS” **ACTA FACULTATIS TECHNICAЕ**, XIX, 2014. pp. 39–47.
- [49] D A Green and R Lewis. “The effects of soot-contaminated engine oil on wear and friction: a review” **IMechE**, Vol. 222, Part D: J. Automobile Engineering. pp.1669–1689.
- [50] A.D.H. Clague, J.B. Donnet, T.K. Wang and J.C.M. Peng. “A comparison of diesel engine soot with carbon black” **PERGAMON**, Carbon 37, 1999. pp.1553–1565.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [51] CHOKUN S. 2015. "IMPACT OF SOOT CONTAMINATION ON METAL WEAR AND OIL PROPERTIES USING FOUR-BALL TRIBOLOGY TEST" A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN AUTOMOTIVE ENGINEERING, INTERNATIONAL COLLEGE, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG.
- [52] PHIRANAT K. 2015. "AN INVESTIGATION ON PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES IN USED LUBRICATING OIL OF DIESEL ENGINE" A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN AUTOMOTIVE ENGINEERING, INTERNATIONAL COLLEGE, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG.
- [53] Simon C. Tung and Hong Gao. "Tribological characteristics and surface interaction between piston ring" *ELSEVIER, Wear* 255, 2003. pp.1276-1285.
- [54] Henara L. Costa, Tung and Hugh A. Spikes. "Impact of ethanol on the formation of antiwear tribofilms from engine lubricants" *Tribology International*, ISSN 0301-679X, 2016. pp.364-376.
- [55] Charlotte Besser et al. "Investigation of long-term engine oil performance using lab-based artificial ageing illustrated by the impact of ethanol as fuel component" *Tribology International*, ISSN 0301-679X, 2016. pp.174-182.
- [56] H.H. Masjuki and M.A. Maleque. "Investigation of the anti-wear characteristics of palm oil methyl ester using a four-ball tribometer test" *ELSEVIER, Wear* 206, 1997. pp.179-186.
- [57] N.W.M. Zulkifli et al. "Wear prevention characteristics of a palm oil-based TMP (trimethylolpropane) ester as an engine lubricant" *Energy*, ISSN 0360-5442, 2013. pp.167-173.
- [58] Zhenglin Tang, Shaohui Li. "A review of recent developments of friction modifiers for liquid lubricants (2007-present)" *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, ISSN 1359-0286, 2014. pp. 119-139.
- [59] E. LAINE et al. "The Effect of a Friction Modifier Additive on Micropitting" *Tribology Transactions*, ISSN 1040-2004, 2009. pp. 526-533.


เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [60] Lesson Plans. “Scanning Electron Microscope (SEM)” [Online]. Available : <https://ez002.k12.sd.us/Chapters/Chapter%20One%20Science.htm>. (2559)
- [61] NANOSAFETY DATABASE. “Carbon Black” [Online]. Available : http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/ceri/nanodatabase/info_index.php?cat_id=13. (2559)
- [62] Infineum. “CRANKCASE LUBRICANT SPECIFICATIONS” **API Engine Oil Classifications**, 2015. pp. 1-10.
- [63] Designation: D 4172 – 94 (Reapproved 1999), “Standard Test Method for Wear Preventive Characteristics of Lubricating Fluid (Four-Ball Method)” **ASTM INTERNATIONAL**. pp. 1-5.
- [64] S.R.Nimbalka and S.N.Mandlik. “Tribological behavior of Carbon Coated Nickel Nanoparticle, Silicon Oxide and their Combinations with Lubricating Oil” **IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development**, ISSN (online): 2321-0613, Vol. 3, Issue 08, 2015.
- [65] Leslie R. Rudnick. 2009. **Lubricant Additives Chemistry and Applications** Second Edition. U.S.A : International Standard Book Number-13: 978-1-4200-5964-9.
- [66] สถาพร เชื้อเพ็ง. “ความเข้ากันได้ของวัสดุชิ้นส่วนยานยนต์กับเชื้อเพลิงผสมเอทานอล-แก๊สโซลีน (อี 85)” **วิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา**, ฉบับที่ 70 ปีที่ 22 พฤศจิกายน 2552 - มกราคม 2553, หน้า 33-44.
- [67] Syed Q. A. Rizvi. 2009. **A Comprehensive Review of Lubricant Chemistry, Technology, Selection, and Design**. U.S.A : ASTM Stock Number: MNL50.
- [68] R. A. Kishore Nadkarni. 2009. **Guide to ASTM test methods for the analysis of petroleum products and lubricants**. U.S.A : ASTM Stock No. MNL44-2nd.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดสอบทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการทดสอบทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T1 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SN OW20

4-148 (E20)		หน่วย	New oil	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อายุรถ		(km)		29250	30243	31249	31813	33233	34280	35315	36533	37729	38671
อายุของน้ำมันหล่อลื่น		(km)		1006	1999	3005	3569	4989	6036	7071	8289	9485	10427
Wear condition	เหล็ก	ppm	-	2	2.5	2.6	4	4.2	4.2	4.9	5.5	5.6	5
	โครเมียม	ppm	-	0	0.2	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
	ตะกั่ว	ppm	-	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	ทองแดง	ppm	-	0.6	0.7	0.8	1.1	1.2	1.1	1.2	1.4	1.4	1.4
	ดีบุก	ppm	-	0	0.3	0	1.8	1.2	0.7	1.7	1.5	1.6	0.1
	อะลูมิเนียม	ppm	-	2.9	3.1	2.8	3.6	3.4	2.5	2.7	2.6	2.7	2.7
Oil condition	ความหนืด ที่ 100°C	cSt	8.7	7.7	7.6	7.7	7.7	7.6	7.6	7.6	7.3	7.4	7.6
	ออกซิเดชัน	Abs	6.6	9	9.3	10.1	9.5	10.5	11.4	11.9	12.3	13	14.5
	ไนเตรชัน	Abs	3.6	5.2	5.7	6.3	6	6.5	7.5	8	8.3	8.5	9.4
	ค่าความเป็นด่าง	mgKOH/g	6.6	6.3	6.2	6.1	5.6	5.5	5.3	4.7	4.5	4.3	4.7
	จุดวาบไฟ	°C	212	142	150	138	148	140	140	152	150	160	154
	ดัชนีความหนืด		173	171	167	170	171	169	168	172	154	154	163
Contamination	น้ำ	% Wt	0.044	0.118	0.101	0.104	0.106	0.1	0.105	0.134	0.128	0.113	0.12
	น้ำมันเชื้อเพลิง	°C	0	0.39	0.45	0.47	0.55	0.55	0.53	1.38	1.28	1.31	0.39
	เขม่า	% Wt	0	0.59	0.59	0.59	0.52	0.52	0.62	0.75	0.75	0.75	0.65
	ซิลิกอน	ppm	5	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการทดสอบทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T1 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SN 0W20

4-148 (E85)		หน่วย	New oil	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อายุรถ		(km)		10979	12005	13064	14261	15253	16337	17496	18914	19460	20330
อายุของน้ำมันหล่อลื่น		(km)		1116	2141	3200	4397	5389	6473	7632	9050	9596	10466
Wear condition	เหล็ก	ppm	-	4.8	3.9	7	8.2	8.1	5.4	10	10.2	10.1	10.7
	โครเมียม	ppm	-	0.2	0.3	0.1	0.2	0.1	0	0.2	0.4	0.4	0.5
	ตะกั่ว	ppm	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	ทองแดง	ppm	-	2	2.7	2.5	2.9	2.9	1.9	4.3	4.7	4.8	5.1
	ดีบุก	ppm	-	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	อะลูมิเนียม	ppm	-	6.2	6.4	8.3	8.7	8.1	2.8	7.7	8.5	8.4	8.6
Oil condition	ความหนืด ที่ 100°C	cSt	8.7	8	7.8	7.7	7.7	7.6	7.6	7.6	7.7	7.6	7.6
	ออกซิเดชัน	Abs	6.6	8.6	9.7	9.8	10.3	10.7	11.3	11.5	11.8	11.6	12.1
	ไนเตรชัน	Abs	3.6	4.9	5.7	6.1	6.5	6.7	8.4	8	8.4	8.3	8.4
	ค่าความเป็นด่าง	mgKOH/g	6.6	6.7	6.7	6.4	6.3	6	5.7	5.4	4.9	4.8	4.7
	จุดวาบไฟ	°C	212	192	167	178	160	152	146	162	158	158	192
	ดัชนีความหนืด		173	175	172	170	172	168	172	168	169	171	170
Contamination	น้ำ	% Wt	0.044	0.104	0.105	0.114	0.124	0.123	0.168	0.164	0.186	0.17	0.139
	น้ำมันเชื้อเพลิง	°C	0	0.24	0.24	1.33	1.32	1.45	0.57	0.54	0.64	0.68	0.69
	เขม่า	% Wt	0	0.56	0.61	0.77	0.77	0.77	1.09	1.09	1.08	1.08	1.08
	ซิลิกอน	ppm	5	12.8	11	17	17	16.8	12.1	18	17.4	17.9	17.4

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลการทดสอบทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T2 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SN 0W20

3-5607 (E20)		หน่วย	New oil	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อายุรถ		(km)		22878	24012	25047	26039	27037	28061	29041	30021	31004	31871
อายุของน้ำมันหล่อลื่น		(km)		1016	2150	3185	4177	5175	6199	7179	8159	9142	10009
Wear condition	เหล็ก	ppm	-	2.3	2.4	2.6	2.2	4.8	9.3	5.4	6	6.8	5.7
	โครเมียม	ppm	-	0.3	0.2	0.4	0.2	0	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2
	ตะกั่ว	ppm	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	ทองแดง	ppm	-	1	1.1	1.3	1.3	1.1	3.9	2	2.4	2.7	2.5
	ดีบุก	ppm	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	อะลูมิเนียม	ppm	-	4.3	3.8	3.7	2.6	3.6	6.9	2.9	3.3	3	2.7
Oil condition	ความหนืด ที่ 100°C	cSt	8.7	7.8	7.6	7.6	7.6	7.5	7.6	7.5	7.6	7.5	7.6
	ออกซิเดชัน	Abs	6.6	7.8	8.1	9.7	10.1	10.4	11.1	11.4	11.9	12	12.6
	ไนเตรชัน	Abs	3.6	4.4	4.9	5.8	6.7	7.2	7.7	8.5	9	9	9.4
	ค่าความเป็นด่าง	mgKOH/g	6.6	6.3	6.3	6.7	6.3	6.1	5.6	5.5	5.2	5	4.4
	จุดวาบไฟ	°C	212	135	156	142	143	148	158	138	134	140	142
	ดัชนีความหนืด		173	172	170	170	171	172	171	170	172	164	172
Contamination	น้ำ	% Wt	0.044	0.093	0.081	0.085	0.109	0.117	0.174	0.154	0.15	0.141	0.168
	น้ำมันเชื้อเพลิง	°C	0	0.29	0.38	0.56	0.18	0.89	0.54	0.6	0.7	0.69	0.73
	เขม่า	% Wt	0	0.5	0.49	0.57	0.61	0.76	1.09	1.09	1.08	1.08	1.17
	ซิลิกอน	ppm	5	10.8	10	9.5	7	12	17.1	11.1	12.5	12.4	9

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลการทดสอบทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T2 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SN 0W20

3-5607 (E85)		หน่วย	New oil	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อายุรถ		(km)		32951	34018	34961	35946	36991	37975	38980	39972	40958	42057
อายุของน้ำมันหล่อลื่น		(km)		1077	2144	3087	4072	5117	6101	7106	8098	9084	10183
Wear condition	เหล็ก	ppm	-	2.8	3.1	3.1	3.3	3.7	4	4.5	4.6	5.6	5.8
	โครเมียม	ppm	-	0	0	0.2	0.1	0	0	0.3	0.1	0.2	0.1
	ตะกั่ว	ppm	-	0	0	0	0	0.3	0	0.1	0	0	0
	ทองแดง	ppm	-	0.7	0.9	1.1	1.2	1.5	1.7	1.9	2	2.2	2.2
	ดีบุก	ppm	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	อะลูมิเนียม	ppm	-	2.7	2.8	2.8	3	3.5	3.3	3.6	3.8	4.4	4
Oil condition	ความหนืด ที่ 100°C	cSt	8.7	8	7.7	7.6	7.8	7.5	7.6	7.6	7.4	7.5	7.6
	ออกซิเดชัน	Abs	6.6	8.1	8.5	8.8	9.1	9.9	10.6	11.1	11.6	10.8	11.9
	ไนเตรชัน	Abs	3.6	5.4	5.9	6.3	6.6	7.5	7.8	8.1	8.3	7.7	8.5
	ค่าความเป็นด่าง	mgKOH/g	6.6	6.3	6.3	6.1	5.8	5.6	5.3	5.1	4.9	4.5	4.3
	จุดวาบไฟ	°C	212	178	182	180	174	182	192	182	154	182	182
	ดัชนีความหนืด		173	178	168	171	180	165	169	171	166	165	170
Contamination	น้ำ	% Wt	0.044	0.139	0.114	0.109	0.104	0.152	0.112	0.101	0.093	0.105	0.112
	น้ำมันเชื้อเพลิง	°C	0	0.51	0.48	0.55	0.45	0.43	0.44	0.45	0.48	0.53	0.52
	เขม่า	% Wt	0	0.76	0.76	0.76	0.76	0.59	0.59	0.59	0.59	0.52	0.62
	ซิลิกอน	ppm	5	7.2	7.6	7.7	6.8	9.8	10.7	11	10.6	10	10.3

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลการทดสอบทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากศูนย์บริการรถยนต์ของเครื่องยนต์ชนิด i-VTEC ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ SN OW20

Show room A (i-VTEC)		หน่วย	New oil	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	9A	10A
อายุรถ		(km)		9132	17341	21140	22190	22420	31150	35545	52546	81793	82680
อายุของน้ำมันหล่อลื่น		(km)		5483	9576	14110	11484	13404	10174	10314	15436	10057	9886
Wear condition	เหล็ก	ppm	-	7	8	10.3	11.6	11.1	10.5	9.6	8.9	5.9	5.5
	โครเมียม	ppm	-	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
	ตะกั่ว	ppm	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	ทองแดง	ppm	-	8.8	7.8	5.3	20	5.2	10.2	2.2	2.5	1.3	1.3
	ดีบุก	ppm	-	0	1.6	1.2	2.4	1.4	1.7	1.9	2.2	0.3	0.2
	อะลูมิเนียม	ppm	-	7.9	12.1	15.8	12.3	10.4	12.6	10.8	12.5	9.7	5.3
Oil condition	ความหนืด ที่ 100°C	cSt	8.7	7.5	7.5	7.3	7.6	7.5	7.7	7.6	7.8	7.6	8
	ออกซิเดชัน	Abs	6.6	11.2	13.8	16.6	15.3	16.9	11.2	19.6	18.2	14.5	18.3
	ไนเตรชัน	Abs	3.6	6.3	7.7	9.9	8.2	9.4	6.8	12	11.2	10	11.7
	ค่าความเป็นด่าง	mgKOH/g	6.6	5.3	4.9	4	3.5	4.2	4.7	1.8	2.9	3.7	2.5
	จุดวาบไฟ	°C	212	140	192	126	190	144	184	134	148	136	146
	ดัชนีความหนืด		173	169	164	170	167	166	177	167	168	169	170
Contamination	น้ำ	% Wt	0.044	0.082	0.101	0.113	0.1	0.112	0.091	0.131	0.125	0.119	0.123
	น้ำมันเชื้อเพลิง	°C	0	0.44	0.35	0.36	0.1	0.4	0.33	0.4	0.37	0.41	0.36
	เขม่า	% Wt	0	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
	ซิลิกอน	ppm	5	13.5	15.6	17.7	14.6	19.8	14.1	16.5	12	11.2	11.9

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลการทดสอบทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากศูนย์บริการรถยนต์ของเครื่องยนต์ชนิด VVT-i ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ SM 5W40

Show room B (VVT-i)		หน่วย	New oil	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B	9B	10B
อายุรถ		(km)		23219	24514	31150	35777	45058	48869	50631	51768	60121	71885
อายุของน้ำมันหล่อลื่น		(km)		12274	9442	10367	10884	7065	7418	16012	8677	13535	10412
Wear condition	เหล็ก	ppm	-	9.3	9.3	13.8	3.9	3.3	4.6	10.5	6.8	6.8	3.5
	โครเมียม	ppm	-	0.5	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.3	0.4	0.4
	ตะกั่ว	ppm	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	ทองแดง	ppm	-	14	2.1	2	1.5	1.7	0.8	1.8	0.8	0.6	1.2
	ดีบุก	ppm	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	อะลูมิเนียม	ppm	-	3.2	1.7	1.4	1.3	1.4	1.1	1.8	1.5	1.5	1.1
Oil condition	ความหนืด ที่ 100°C	cSt	13.6	11.9	12.7	12.7	12.7	12.6	13	13	10.8	13	12.9
	ออกซิเดชัน	Abs	7.5	19.5	17.9	17.4	15.3	16.4	14.3	25.4	16.8	20.7	16.8
	ไนเตรชัน	Abs	3.0	12.7	11.1	11	10.2	10.9	10.2	14.9	10.4	12.6	10.8
	ค่าความเป็นด่าง	mgKOH/g	6.5	2.4	2.3	2.5	2.6	3	2.4	1.5	2.5	1.8	2.5
	จุดวาบไฟ	°C	216	114	126	124	116	115	124	122	120	126	124
	ดัชนีความหนืด		171	162	165	169	167	169	164	159	141	164	165
Contamination	น้ำ	% Wt	0.042	0.151	0.123	0.125	0.124	0.138	0.129	0.162	0.121	0.145	0.111
	น้ำมันเชื้อเพลิง	°C	0	0.33	0.27	0.29	0.23	0.3	0.23	0.33	0.23	0.31	0.23
	เขม่า	% Wt	0	0.57	0.56	0.57	0.56	0.59	0.55	0.59	0.55	0.58	0.56
	ซิลิกอน	ppm	5	51.6	23.8	22	22	16.9	18.9	24.4	18.8	12.4	16.4



ภาคผนวก ข

ข้อมูลลักษณะการสึกหรอและอนุภาคต่างๆในน้ำมันหล่อลื่นที่
ผ่านการใช้งานแล้วจากภาพถ่ายเฟอร์โรกราฟฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลลักษณะการสึกหรอและอนุภาคต่างๆในน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T1 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20

4-148 (E20)	หน่วย	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อายุรถ	(km)	29250	30243	31249	31813	33233	34280	35315	36533	37729	38671
อายุของน้ำมันหล่อลื่น	(km)	1006	1999	3005	3569	4989	6036	7071	8289	9485	10427
Normal Rubbing Wear	Size (μm)	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3
	Particle Type	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	%Rating	75	75	70	80	75	75	75	75	75	85
Fatigue Gear Wear	Size (μm)										5-20
	Particle Type										1
	%Rating										5
Fatigue Bearing Wear	Size (μm)	5-20	5-40	5-20	5-20	5-30	5-40	5-15	5-30	5-30	
	Particle Type	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	%Rating	10	15	10	10	10	5	10	15	10	
Fatigue Sphere	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Severe Sliding Wear	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

4-148 (E20)	หน่วย	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อายุรถ	(km)	29250	30243	31249	31813	33233	34280	35315	36533	37729	38671
อายุของน้ำมันหล่อลื่น	(km)	1006	1999	3005	3569	4989	6036	7071	8289	9485	10427
Cutting Wear	Size (μm)					60					
	Particle Type					1					
	%Rating					5					
Black Oxides	Size (μm)	5-20	5-40	5-20	5-20	5-20	5-20	5-10	5-10	5-20	5-15
	Particle Type	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	%Rating	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Red Oxides	Size (μm)			5-15				5-40			
	Particle Type			1				1			
	%Rating			5				5			
Corrosive Wear	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Dirt and Dust	Size (μm)	10-80	10-60	10-60	10-40	10-60	10-60	10-40	5-40	10-80	10-40
	Particle Type	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	%Rating	10	5	10	5	5	10	5	5	10	5

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

4-148 (E20)	หน่วย	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อายุรถ	(km)	29250	30243	31249	31813	33233	34280	35315	36533	37729	38671
อายุของน้ำมันหล่อลื่น	(km)	1006	1999	3005	3569	4989	6036	7071	8289	9485	10427
Copper	Size (µm)						60-70				
	Particle Type						2				
	%Rating						5				
White Metal	Size (µm)										
	Particle Type										
	%Rating										

เมื่อ Particle Type 1 คือ อนุภาคเศษโลหะในกลุ่มเหล็ก
 2 คือ อนุภาคเศษโลหะนอกกลุ่มเหล็ก
 3 คือ อนุภาคสิ่งสกปรกปนเปื้อน
 %Rating คือ เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่ปกคลุมอยู่

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลลักษณะการสึกหรอและอนุภาคต่างๆในน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T1 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85

4-148 (E20)	หน่วย	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อายุรถ	(km)	10979	12005	13064	14261	15253	16337	17496	18914	19460	20330
อายุของน้ำมันหล่อลื่น	(km)	1116	2141	3200	4397	5389	6473	7632	9050	9596	10466
Normal Rubbing Wear	Size (μm)	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3
	Particle Type	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	%Rating	85	75	80	80	75	75	70	75	80	80
Fatigue Gear Wear	Size (μm)		5-20								
	Particle Type		1								
	%Rating		10								
Fatigue Bearing Wear	Size (μm)	5-10		5-30	5-20	5-20	5-20	5-20	5-15	5-20	5-15
	Particle Type	1		1	1	1	1	1	1	1	1
	%Rating	5		10	10	15	10	20	15	10	10
Fatigue Sphere	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Severe Sliding Wear	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

4-148 (E20)	หน่วย	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อายุรถ	(km)	10979	12005	13064	14261	15253	16337	17496	18914	19460	20330
อายุของน้ำมันหล่อลื่น	(km)	1116	2141	3200	4397	5389	6473	7632	9050	9596	10466
Cutting Wear	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Black Oxides	Size (μm)	5-15	5-40	5-15	5-10	5-10	5-15	5-10	5	5-15	5-10
	Particle Type	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	%Rating	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Red Oxides	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Corrosive Wear	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Dirt and Dust	Size (μm)	5-40	10-40	10-40	10-40	10-40	5-40	10-50	5	10-40	10-40
	Particle Type	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	%Rating	5	5	5	5	5	10	5	5	5	5

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

4-148 (E20)	หน่วย	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อายุรถ	(km)	10979	12005	13064	14261	15253	16337	17496	18914	19460	20330
อายุของน้ำมันหล่อลื่น	(km)	1116	2141	3200	4397	5389	6473	7632	9050	9596	10466
Copper	Size (µm)										
	Particle Type										
	%Rating										
White Metal	Size (µm)		5-10								
	Particle Type		2								
	%Rating		5								

เมื่อ Particle Type 1 คือ อนุภาคเศษโลหะในกลุ่มเหล็ก
 2 คือ อนุภาคเศษโลหะนอกกลุ่มเหล็ก
 3 คือ อนุภาคสิ่งสกปรกปนเปื้อน
 %Rating คือ เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่ปกคลุมอยู่

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลลักษณะการสึกหรอและอนุภาคต่างๆในน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T2 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20

3-5607 (E20)	หน่วย	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อายุรถ	(km)	22878	24012	25047	26039	27037	28061	29041	30021	31004	31871
อายุของน้ำมันหล่อลื่น	(km)	1016	2150	3185	4177	5175	6199	7179	8159	9142	10009
Normal Rubbing Wear	Size (μm)	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3
	Particle Type	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	%Rating	80	75	85	75	80	65	70	80	80	55
Fatigue Gear Wear	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Fatigue Bearing Wear	Size (μm)	5-15	5-50	5-10	5-15	5-10	5-30	5-50	5-10	5-20	5-20
	Particle Type	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	%Rating	5	10	5	10	5	10	10	10	10	15
Fatigue Sphere	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Severe Sliding Wear	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										

ตารางที่ ข.3 (ต่อ)

3-5607 (E20)	หน่วย	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อายุรถ	(km)	22878	24012	25047	26039	27037	28061	29041	30021	31004	31871
อายุของน้ำมันหล่อลื่น	(km)	1016	2150	3185	4177	5175	6199	7179	8159	9142	10009
Cutting Wear	Size (μm)										40
	Particle Type										1
	%Rating										5
Black Oxides	Size (μm)	5-10	5-15	5-10	5-10	5-10	5-80	5-30	5-10	5-10	5-20
	Particle Type	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	%Rating	5	5	5	5	5	15	5	5	5	5
Red Oxides	Size (μm)						5-20	5-15			5-15
	Particle Type						1	1			1
	%Rating						5	5			5
Corrosive Wear	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Dirt and Dust	Size (μm)	5-40	10-40	10-40	10-40	5-40	10-40	5-60	10-40	10-40	>20
	Particle Type	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	%Rating	5	5	5	5	10	5	10	5	5	10

ตารางที่ ข.3 (ต่อ)

3-5607 (E20)	หน่วย	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อายุรถ	(km)	22878	24012	25047	26039	27037	28061	29041	30021	31004	31871
อายุของน้ำมันหล่อลื่น	(km)	1016	2150	3185	4177	5175	6199	7179	8159	9142	10009
Copper	Size (µm)										
	Particle Type										
	%Rating										
White Metal	Size (µm)	5-15	5-10		5-10						5-10
	Particle Type	2	2		2						2
	%Rating	5	5		5						5

เมื่อ Particle Type 1 คือ อนุภาคเศษโลหะในกลุ่มเหล็ก
 2 คือ อนุภาคเศษโลหะนอกกลุ่มเหล็ก
 3 คือ อนุภาคสิ่งสกปรกปนเปื้อน
 %Rating คือ เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่ปกคลุมอยู่

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลลักษณะการสึกหรอและอนุภาคต่างๆในน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เก็บตัวอย่างจากรถทดสอบ T2 เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85

3-5607 (E85)	หน่วย	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อายุรถ	(km)	32951	34018	34961	35946	36991	37975	38980	39972	40958	42057
อายุของน้ำมันหล่อลื่น	(km)	1077	2144	3087	4072	5117	6101	7106	8098	9084	10183
Normal Rubbing Wear	Size (μm)	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3
	Particle Type	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	%Rating	70	70	80	70	75	75	80	70	80	80
Fatigue Gear Wear	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Fatigue Bearing Wear	Size (μm)	5-20	5-40	5-30	5-20	5-15	5-20	5-20	5-30	5-20	5-20
	Particle Type	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	%Rating	15	15	10	10	15	10	10	15	10	10
Fatigue Sphere	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Severe Sliding Wear	Size (μm)				60						
	Particle Type				1						
	%Rating				5						

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

3-5607 (E85)	หน่วย	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อายุรถ	(km)	32951	34018	34961	35946	36991	37975	38980	39972	40958	42057
อายุของน้ำมันหล่อลื่น	(km)	1077	2144	3087	4072	5117	6101	7106	8098	9084	10183
Cutting Wear	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Black Oxides	Size (μm)	5-20	5-40	5-15	5-15	5-10	5-20	5-10	5-10	5-20	
	Particle Type	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	%Rating	5	10	5	5	5	5	5	5	5	
Red Oxides	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Corrosive Wear	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Dirt and Dust	Size (μm)	10-60	10-60	10-40	10-40		10-60	10-80	10-80	5-40	5-50
	Particle Type	3	3	3	3		3	3	3	3	3
	%Rating	5	5	5	5	5	10	5	5	5	10

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

3-5607 (E85)	หน่วย	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อายุรถ	(km)	32951	34018	34961	35946	36991	37975	38980	39972	40958	42057
อายุของน้ำมันหล่อลื่น	(km)	1077	2144	3087	4072	5117	6101	7106	8098	9084	10183
Copper	Size (µm)										
	Particle Type										
	%Rating										
White Metal	Size (µm)	5-10			5-10				10-30		
	Particle Type	2			2				2		
	%Rating	5			5				5		

เมื่อ Particle Type 1 คือ อนุภาคเศษโลหะในกลุ่มเหล็ก
 2 คือ อนุภาคเศษโลหะนอกกลุ่มเหล็ก
 3 คือ อนุภาคสิ่งสกปรกปนเปื้อน
 %Rating คือ เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่ปกคลุมอยู่

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลลักษณะการสึกหรอและอนุภาคต่างๆในน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เก็บตัวอย่างจากศูนย์บริการรถยนต์ของเครื่องยนต์ชนิด i-VTEC

Show room A (i-VTEC)	หน่วย	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	9A	10A
อายุรถ	(km)	9132	17341	21140	22190	22420	31150	35545	52546	81793	82680
อายุของน้ำมันหล่อลื่น	(km)	5483	9576	14110	11484	13404	10174	10314	15436	10057	9886
Normal Rubbing Wear	Size (μm)	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3
	Particle Type	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	%Rating	80	80	85	80	70	80	65	85	80	75
Fatigue Gear Wear	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Fatigue Bearing Wear	Size (μm)	5-40	5-50	5-10	5-40	5-40	5-20	5-50	5-40	10-40	10-50
	Particle Type	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	%Rating	10	10	5	10	10	10	15	5	10	10
Fatigue Sphere	Size (μm)					5-10					
	Particle Type					1					
	%Rating					5					
Severe Sliding Wear	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

Show room A (i-VTEC)	หน่วย	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	9A	10A
อายุรถ	(km)	9132	17341	21140	22190	22420	31150	35545	52546	81793	82680
อายุของน้ำมันหล่อลื่น	(km)	5483	9576	14110	11484	13404	10174	10314	15436	10057	9886
Cutting Wear	Size (μm)							>20			50-60
	Particle Type							1			1
	%Rating							5			5
Black Oxides	Size (μm)	5-30	5-15	5-10	5-20	5-20	5-30	5-40	5-15	5-15	5-40
	Particle Type	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	%Rating	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Red Oxides	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Corrosive Wear	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Dirt and Dust	Size (μm)	20-80	10-40	10-40	10-40	10-40	10-60	10-60	5-40	10-50	10-40
	Particle Type	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	%Rating	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

Show room A (i-VTEC)	หน่วย	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	9A	10A
อายุรถ	(km)	9132	17341	21140	22190	22420	31150	35545	52546	81793	82680
อายุของน้ำมันหล่อลื่น	(km)	5483	9576	14110	11484	13404	10174	10314	15436	10057	9886
Copper	Size (µm)										
	Particle Type										
	%Rating										
White Metal	Size (µm)					5-10		5-20			
	Particle Type					2		2			
	%Rating					5		5			

- เมื่อ Particle Type 1 คือ อนุภาคเศษโลหะในกลุ่มเหล็ก
 2 คือ อนุภาคเศษโลหะนอกกลุ่มเหล็ก
 3 คือ อนุภาคสิ่งสกปรกปนเปื้อน
 %Rating คือ เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่ปกคลุมอยู่

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลลักษณะการสึกหรอและอนุภาคต่างๆในน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เก็บตัวอย่างจากศูนย์บริการรถยนต์ของเครื่องยนต์ชนิด VVT-i

Show room B (VVT-i)	หน่วย	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B	9B	10B
อายุรถ	(km)	23219	24514	31150	35777	45058	48869	50631	51768	60121	71885
อายุของน้ำมันหล่อลื่น	(km)	12274	9442	10367	10884	7065	7418	16012	8677	13535	10412
Normal Rubbing Wear	Size (μm)	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3
	Particle Type	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	%Rating	80	80	75	90	75	85	80	70	80	80
Fatigue Gear Wear	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Fatigue Bearing Wear	Size (μm)	5-50	5-20	5-30	5-15	5-20		5-20	5-20	5-40	5-15
	Particle Type	1	1	1	1	1		1	1	1	1
	%Rating	10	10	10	5	5		10	10	10	5
Fatigue Sphere	Size (μm)						5-10		5-10		
	Particle Type						1		1		
	%Rating						5		5		
Severe Sliding Wear	Size (μm)					60-80					
	Particle Type					1					
	%Rating					10					

ตารางที่ ข.6 (ต่อ)

Show room B (VVT-i)	หน่วย	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B	9B	10B
อายุรถ	(km)	23219	24514	31150	35777	45058	48869	50631	51768	60121	71885
อายุของน้ำมันหล่อลื่น	(km)	12274	9442	10367	10884	7065	7418	16012	8677	13535	10412
Cutting Wear	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Black Oxides	Size (μm)	5-30	5-15	5-10		5-20	5-40	5-10	5-20	5-20	5-10
	Particle Type	1	1	1		1	1	1	1	1	1
	%Rating	5	5	5		5	5	5	5	5	5
Red Oxides	Size (μm)			5-15							5-40
	Particle Type			1							1
	%Rating			5							5
Corrosive Wear	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										
Dirt and Dust	Size (μm)	10-40	10-40	10-40	10-40	10-40	10-40	10-60	>20	10-50	10-40
	Particle Type	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	%Rating	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

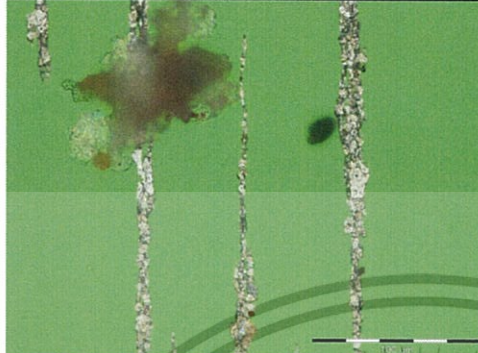


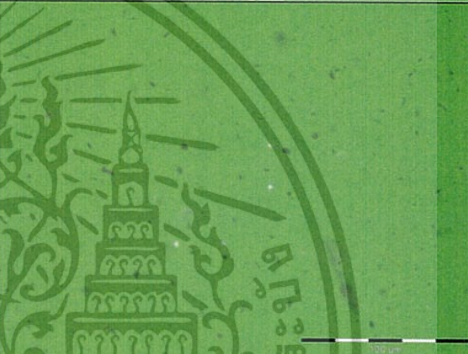

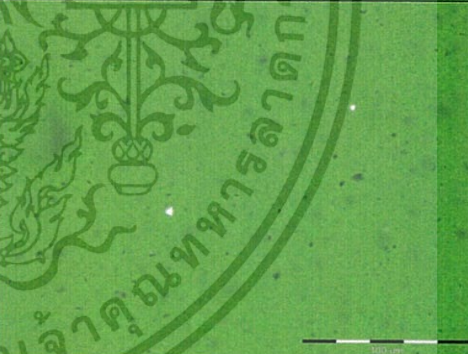

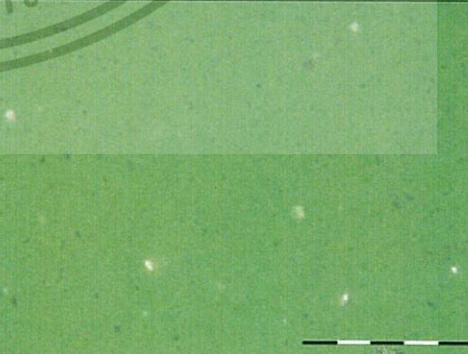
ตารางที่ ข.6 (ต่อ)

Show room B (VVT-i)	หน่วย	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B	9B	10B
อายุรถ	(km)	23219	24514	31150	35777	45058	48869	50631	51768	60121	71885
อายุของน้ำมันหล่อลื่น	(km)	12274	9442	10367	10884	7065	7418	16012	8677	13535	10412
Copper	Size (μm)								30		
	Particle Type								2		
	%Rating								5		
White Metal	Size (μm)										
	Particle Type										
	%Rating										

- เมื่อ Particle Type 1 คือ อนุภาคเศษโลหะในกลุ่มเหล็ก
 2 คือ อนุภาคเศษโลหะนอกกลุ่มเหล็ก
 3 คือ อนุภาคสิ่งสกปรกปนเปื้อน
 %Rating คือ เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่ปกคลุมอยู่

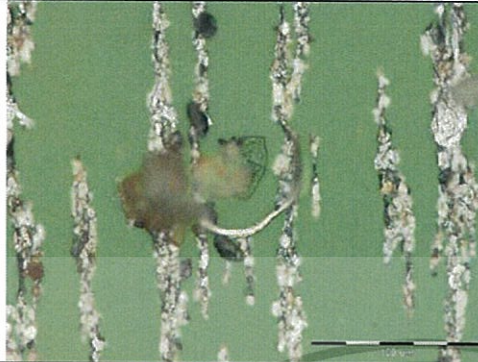
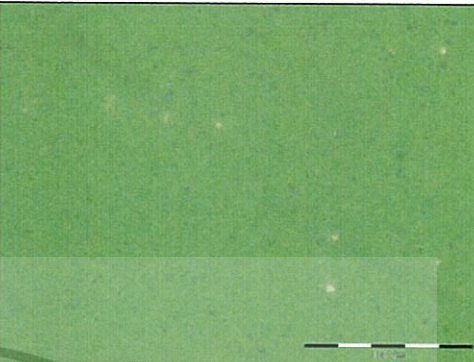

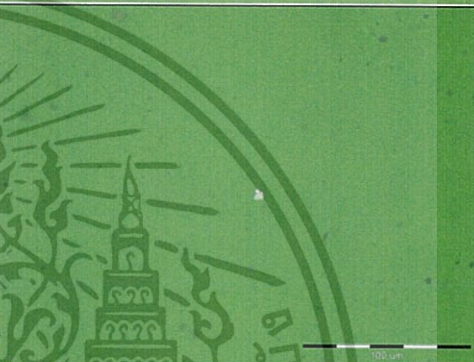

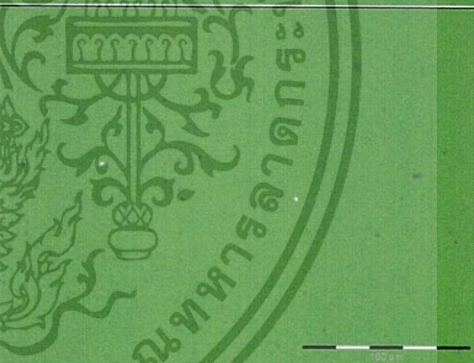
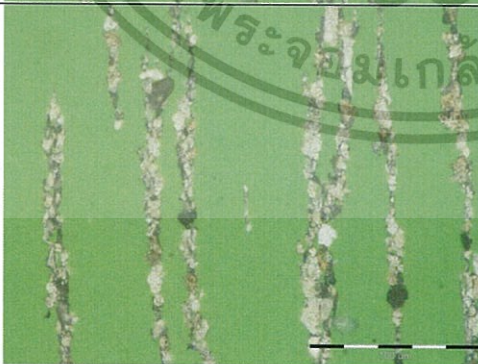
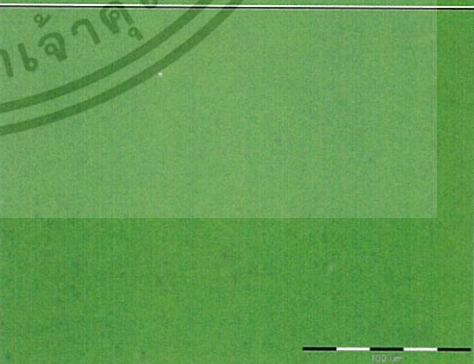
ตารางที่ ข.7 ภาพถ่ายเฟอร์โรกราฟฟีของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากจากรถทดสอบ T1

เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20

4-148 (E20)	Image of Wear & Contaminants (Ferrogram) Magnification 500X	Image of Wear & Contaminants (Filtergram) Magnification 500X
1		
2		
3		
4		

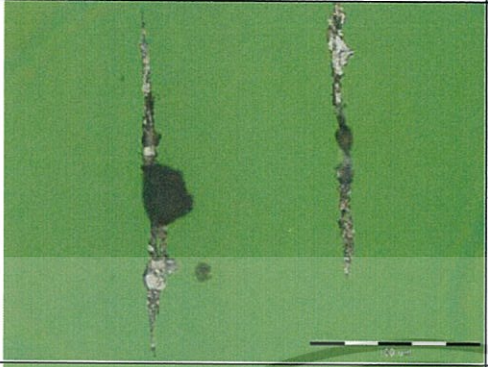
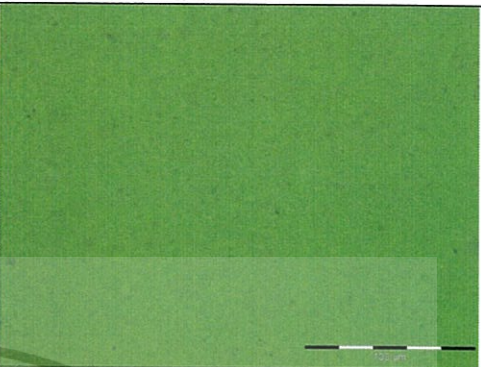
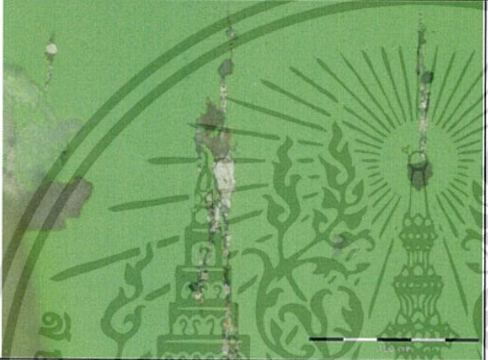
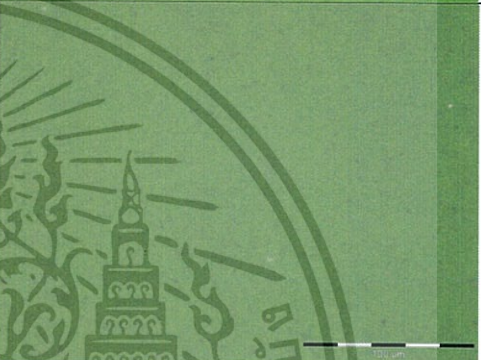
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 (ต่อ)

4-148 (E20)	Image of Wear & Contaminants (Ferrogram) Magnification 500X	Image of Wear & Contaminants (Filtergram) Magnification 500X
5		
6		
7		
8		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

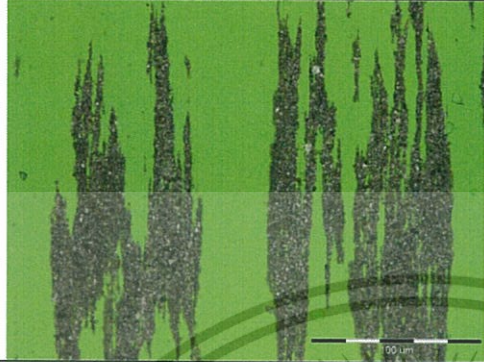
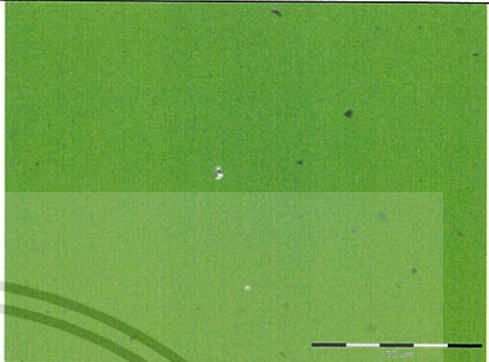

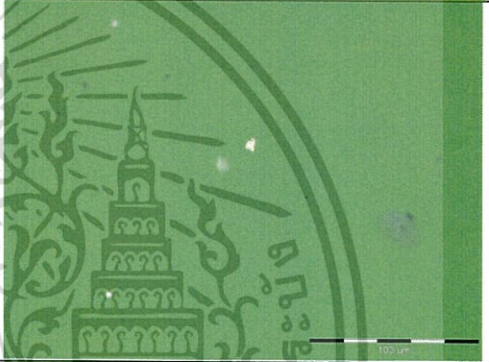

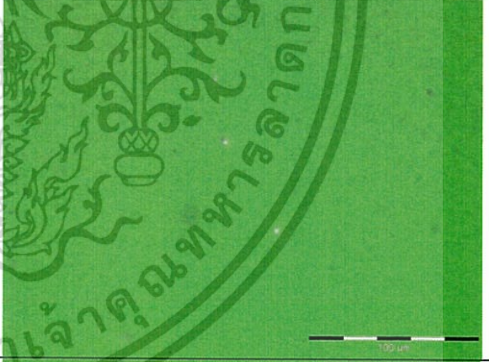
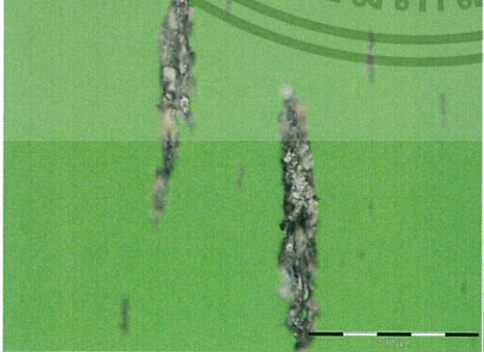
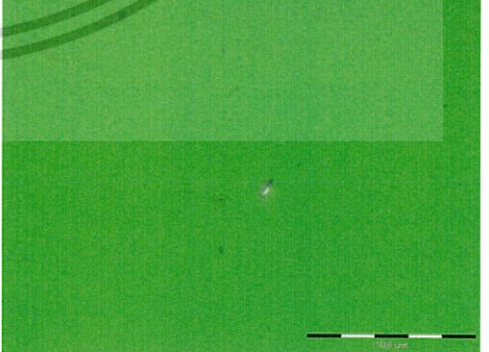
ตารางที่ ข.7 (ต่อ)

4-148 (E20)	Image of Wear & Contaminants (Ferrogram) Magnification 500X	Image of Wear & Contaminants (Filtergram) Magnification 500X
9		
10		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

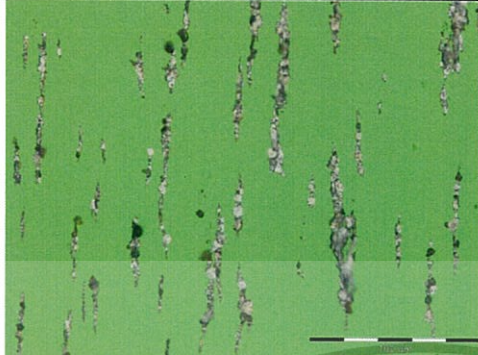
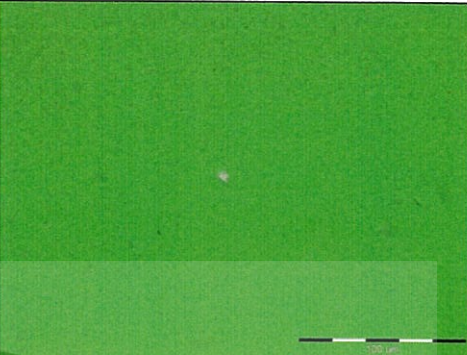
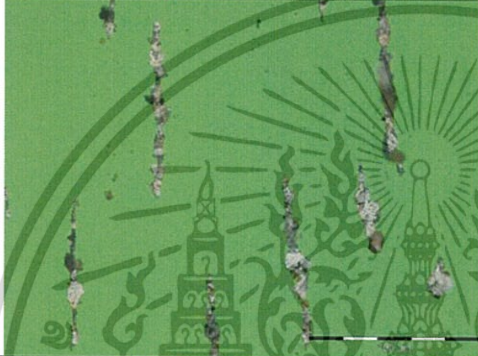
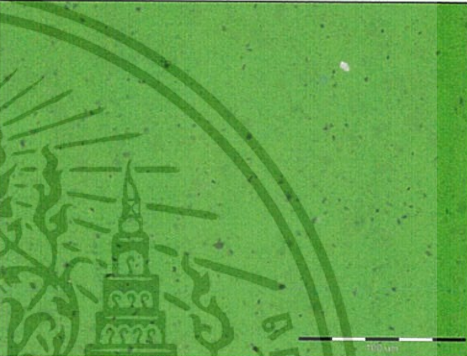

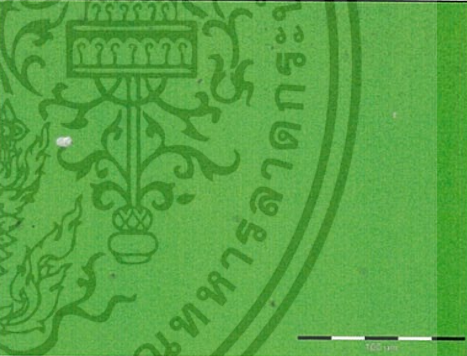
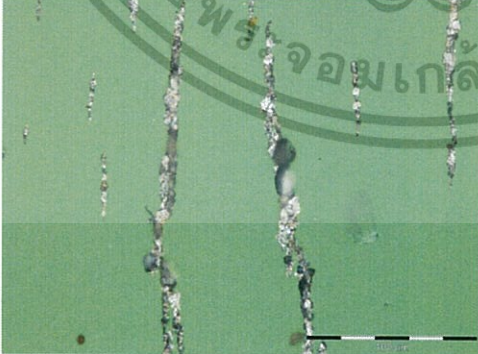
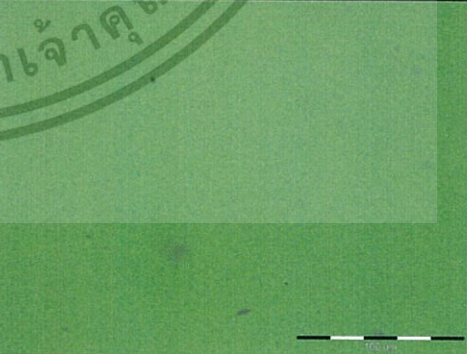
ตารางที่ ข.8 ภาพถ่ายเฟอร์โรกราฟฟีของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากจากรถทดสอบ T1

เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85

4-148 (E85)	Image of Wear & Contaminants (Ferrogram) Magnification 500X	Image of Wear & Contaminants (Filtergram) Magnification 500X
1		
2		
3		
4		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

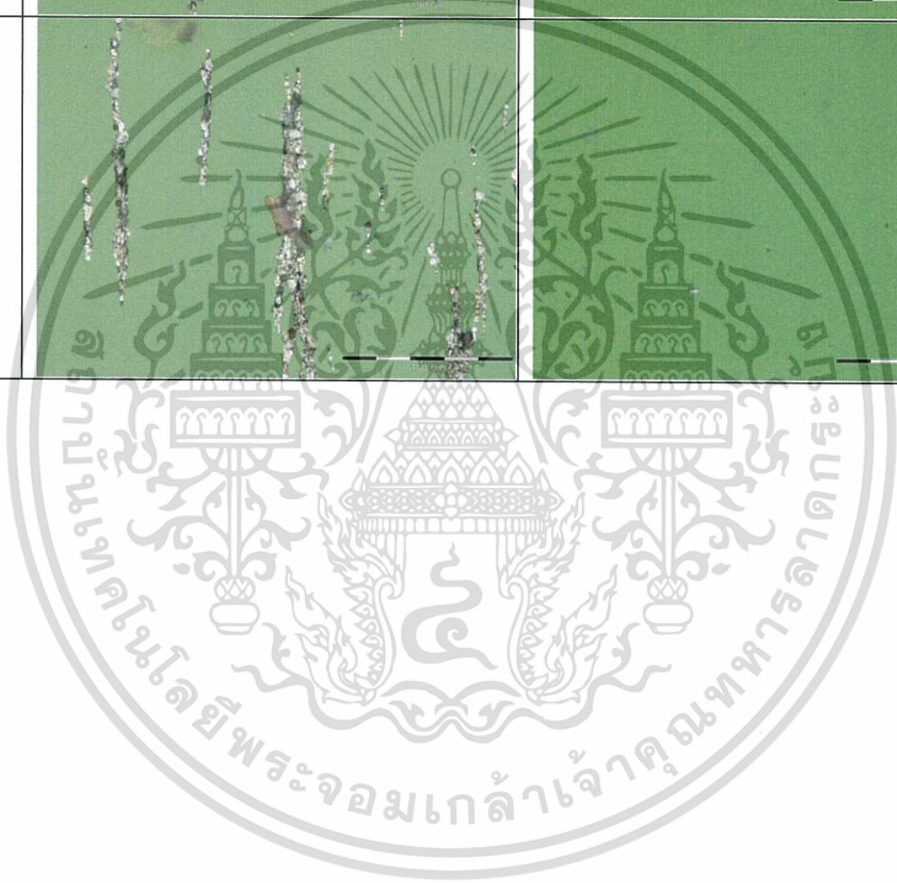
ตารางที่ ข.8 (ต่อ)

3-5607 (E85)	Image of Wear & Contaminants (Ferrogram) Magnification 500X	Image of Wear & Contaminants (Filtergram) Magnification 500X
5		
6		
7		
8		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 (ต่อ)

4-148 (E85)	Image of Wear & Contaminants (Ferrogram) Magnification 500X	Image of Wear & Contaminants (Filtergram) Magnification 500X
9		
10		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

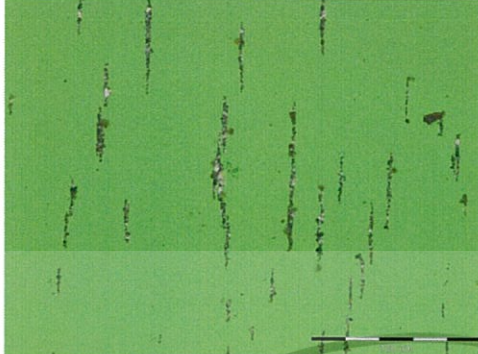
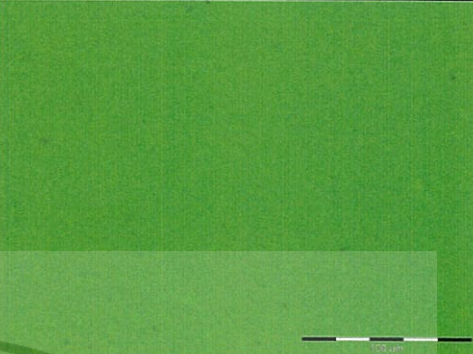

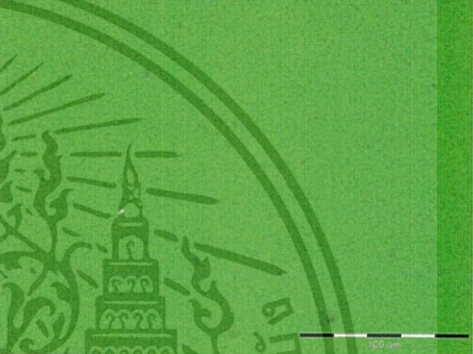

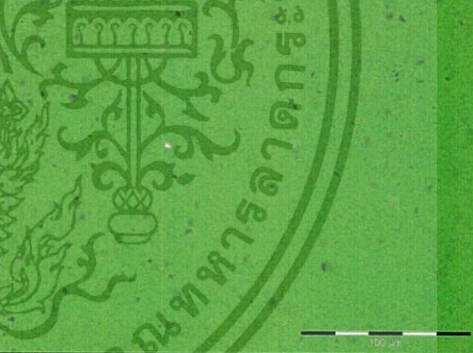
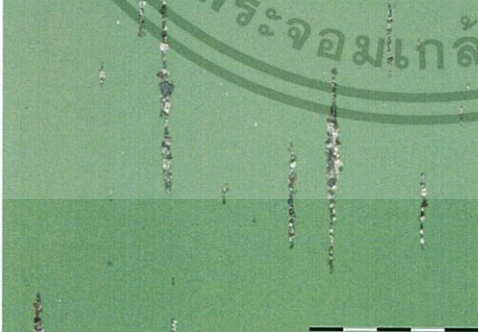

ตารางที่ ข.9 ภาพถ่ายเฟอร์โรกราฟฟีของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากจากรถทดสอบ T2

เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20

3-5607 (E20)	Image of Wear & Contaminants (Ferrogram) Magnification 500X	Image of Wear & Contaminants (Filtergram) Magnification 500X
1		
2		
3		
4		

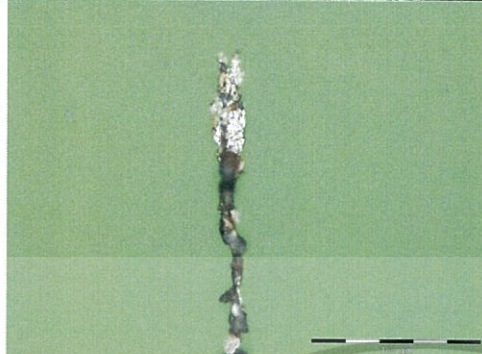
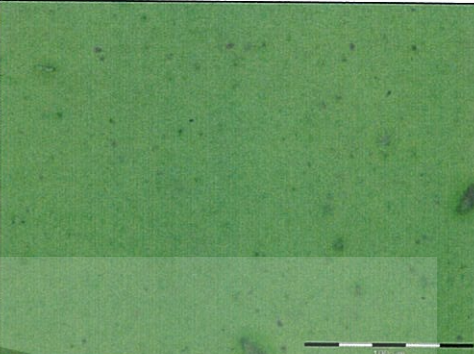


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 (ต่อ)

3-5607 (E20)	Image of Wear & Contaminants (Ferrogram) Magnification 500X	Image of Wear & Contaminants (Filtergram) Magnification 500X
5		
6		
7		
8		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 (ต่อ)

3-5607 (E20)	Image of Wear & Contaminants (Ferrogram) Magnification 500X	Image of Wear & Contaminants (Filtergram) Magnification 500X
9		
10		

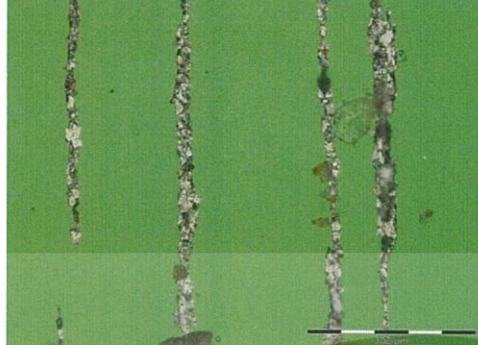
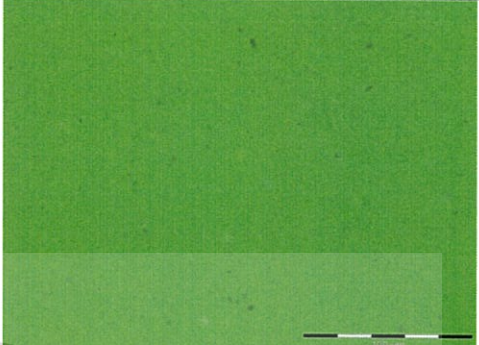






เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 ภาพถ่ายเฟอร์โรกราฟฟีของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากจากรถทดสอบ T2
เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85

3-5607 (E85)	Image of Wear & Contaminants (Ferrogram) Magnification 500X	Image of Wear & Contaminants (Filtergram) Magnification 500X
1		
2		
3		
4		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 (ต่อ)

3-5607 (E85)	Image of Wear & Contaminants (Ferrogram) Magnification 500X	Image of Wear & Contaminants (Filtergram) Magnification 500X
5		
6		
7		
8		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 (ต่อ)

3-5607 (E85)	Image of Wear & Contaminants (Ferrogram) Magnification 500X	Image of Wear & Contaminants (Filtergram) Magnification 500X
9		
10		

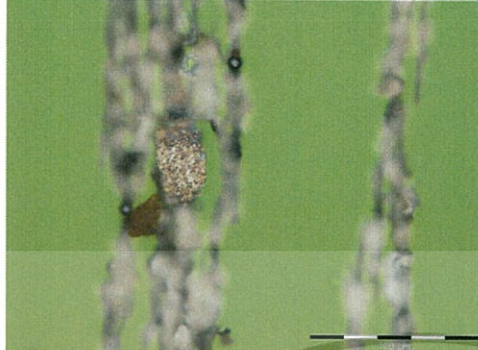
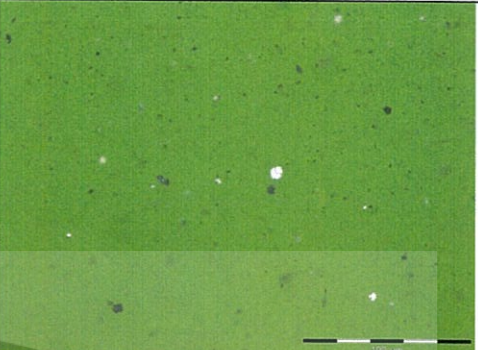



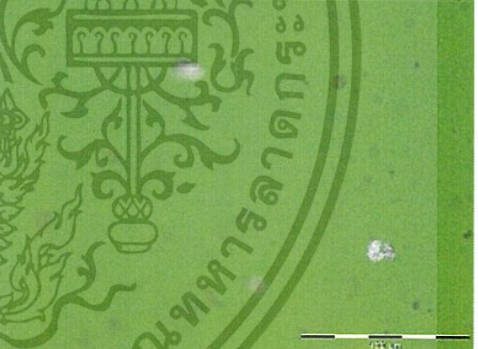
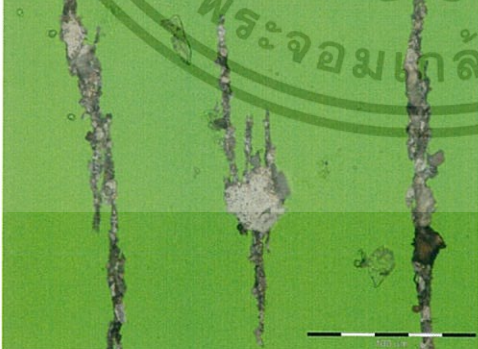
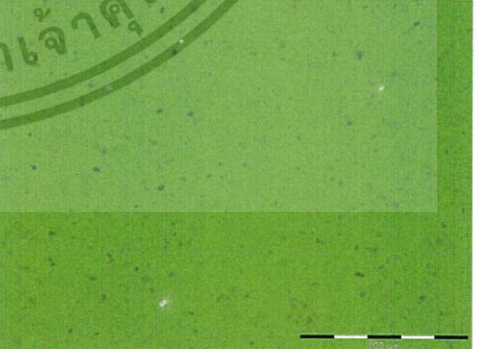
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 ภาพถ่ายเฟอโรกราฟฟีของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากศูนย์บริการรถยนต์ของ
 เครื่องยนต์ชนิด i-VTEC

Type A (i-VTEC)	Image of Wear & Contaminants (Ferrogram) Magnification 500X	Image of Wear & Contaminants (Filtergram) Magnification 500X
1A		
2A		
3A		
4A		

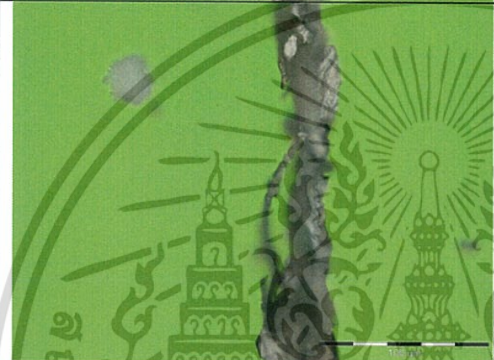
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 (ต่อ)

Type A (i-VTEC)	Image of Wear & Contaminants (Ferrogram) Magnification 500X	Image of Wear & Contaminants (Filtergram) Magnification 500X
5A		
6A		
7A		
8A		

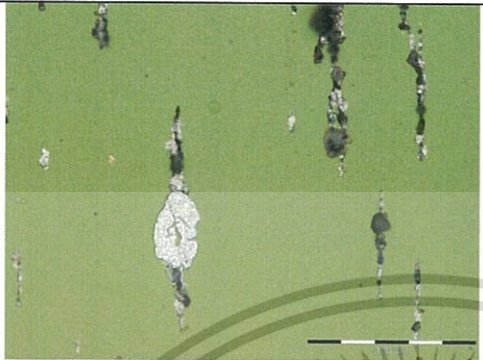
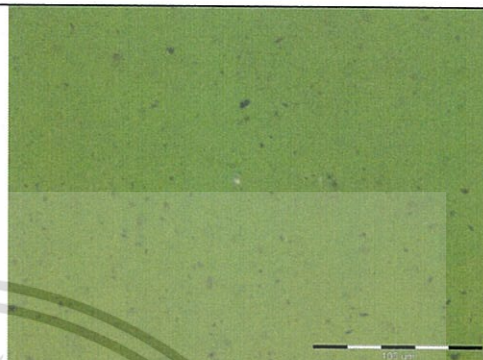




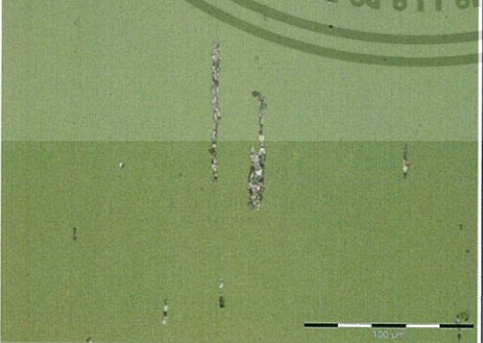
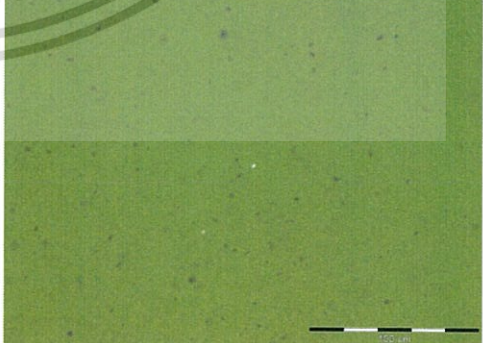
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 (ต่อ)

Type A (i-VTEC)	Image of Wear & Contaminants (Ferrogram) Magnification 500X	Image of Wear & Contaminants (Filtergram) Magnification 500X
9A		
10A		

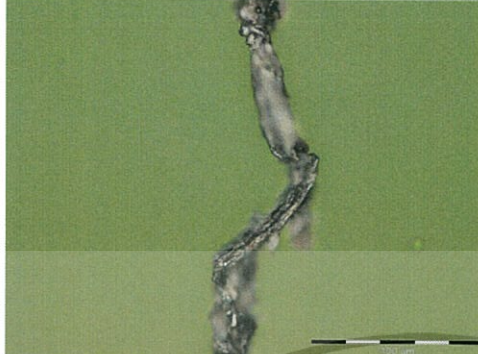
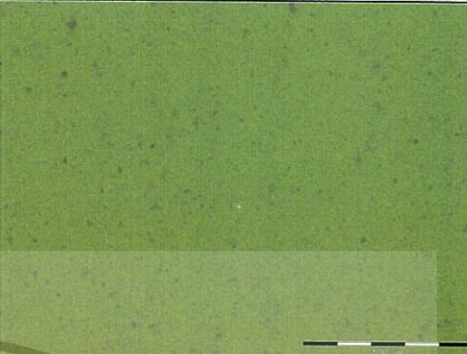

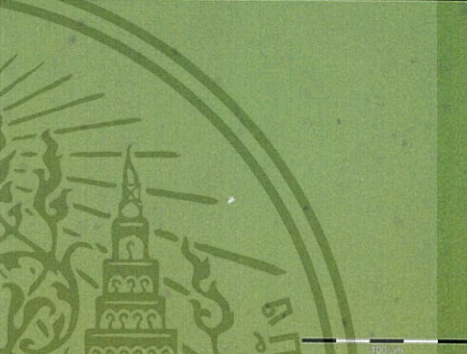

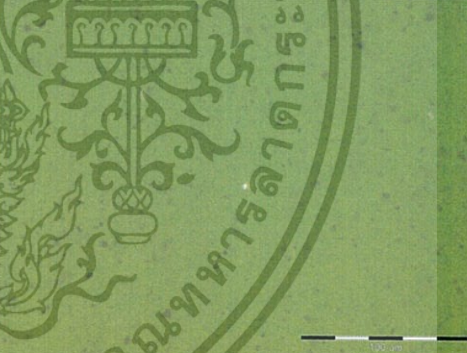

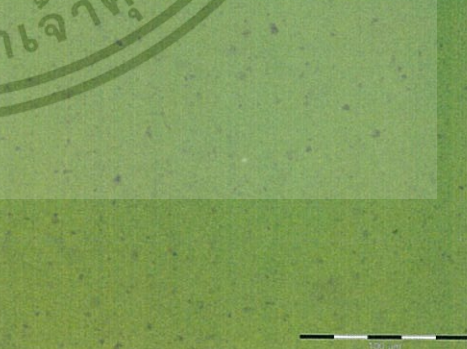
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 ภาพถ่ายเฟอโรกราฟฟีของน้ำมันหล่อลื่นที่เก็บตัวอย่างจากศูนย์บริการรถยนต์ของ
เครื่องยนต์ชนิด VVT-i

Type B (VVT-i)	Image of Wear & Contaminants (Ferrogram) Magnification 500X	Image of Wear & Contaminants (Filtergram) Magnification 500X
1B		
2B		
3B		
4A		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 (ต่อ)

Type B (VVT-i)	Image of Wear & Contaminants (Ferrogram) Magnification 500X	Image of Wear & Contaminants (Filtergram) Magnification 500X
5B		
6B		
7B		
8B		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 (ต่อ)

Type B (VVT-i)	Image of Wear & Contaminants (Ferrogram) Magnification 500X	Image of Wear & Contaminants (Filtergram) Magnification 500X
9B		
10B		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค

ข้อมูลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วย
เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ขนาดและการกระจายตัวของคาร์บอนแบล็คโดยเฉลี่ย

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	Carbon black-Average Volume (%)	Cum% C-Average
0.02-0.023318	0.003318	0	0
0.023318-0.027187	0.007187	0	0
0.027187-0.031698	0.011698	0	0
0.031698-0.036957	0.016957	0	0
0.036957-0.043089	0.023089	0.138346	0.138346
0.043089-0.050238	0.030238	0.280683	0.419029
0.050238-0.058573	0.038573	0.451652	0.870681
0.058573-0.068291	0.048291	0.661499	1.532179
0.068291-0.079621	0.059621	0.914012	2.446191
0.079621-0.092832	0.072832	1.138804	3.584995
0.092832-0.108234	0.088234	1.316385	4.90138
0.108234-0.126191	0.106191	1.445847	6.347227
0.126191-0.147128	0.127128	1.524213	7.87144
0.147128-0.171539	0.151539	1.55104	9.422479
0.171539-0.2	0.18	1.535557	10.958036
0.2-0.233183	0.213183	1.503822	12.461858
0.233183-0.271871	0.251871	1.497449	13.959307
0.271871-0.316979	0.296979	1.563964	15.523271
0.316979-0.36957	0.34957	1.747196	17.270467
0.36957-0.430887	0.410887	2.078154	19.348622
0.430887-0.502377	0.482377	2.566355	21.914977
0.502377-0.585729	0.565729	3.194921	25.109898
0.585729-0.68291	0.66291	3.919339	29.029237
0.68291-0.796214	0.776214	4.670931	33.700168
0.796214-0.928318	0.908318	5.364969	39.065137
0.928318-1.082339	1.062339	5.913321	44.978458
1.082339-1.261915	1.241915	6.240028	51.218486
1.261915-1.471285	1.451285	6.296296	57.514782
1.471285-1.715392	1.695392	6.070611	63.585393
1.715392-2	1.98	5.592031	69.177424
2-2.331829	2.311829	4.919612	74.097037
2.331829-2.718713	2.698713	4.131668	78.228704
2.718713-3.169786	3.149786	3.31593	81.544634

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 (ต่อ)

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	Carbon black-Average Volume (%)	Cum% C-Average
3.169786-3.6957	3.6757	2.558037	84.102671
3.6957-4.308869	4.288869	1.925056	86.027727
4.308869-5.023773	5.003773	1.452016	87.479743
5.023773-5.857289	5.837289	1.139746	88.619489
5.857289-6.829098	6.809098	0.964311	89.5838
6.829098-7.962143	7.942143	0.889291	90.473091
7.962143-9.283178	9.263178	0.874012	91.347103
9.283178-10.823391	10.803391	0.881504	92.228607
10.823391-12.619147	12.599147	0.885371	93.113977
12.619147-14.712845	14.692845	0.872054	93.986031
14.712845-17.153918	17.133918	0.839474	94.825505
17.153918-20	19.98	0.793183	95.618688
20-23.318288	23.298288	0.740717	96.359405
23.318288-27.187128	27.167128	0.686607	97.046012
27.187128-31.697864	31.677864	0.630283	97.676294
31.697864-36.956996	36.936996	0.568338	98.244632
36.956996-43.088694	43.068694	0.498691	98.743324
43.088694-50.237729	50.217729	0.422747	99.16607
50.237729-58.572891	58.552891	0.339042	99.505113
58.572891-68.290977	68.270977	0.254196	99.759309
68.290977-79.621434	79.601434	0.154147	99.913455
79.621434-92.831777	92.811777	0.080019	99.993474
92.831777-108.233905	108.213905	0.006526	100
108.233905-126.191469	126.171469	0	100
126.191469-147.128451	147.108451	0	100
147.128451-171.53918	171.51918	0	100
171.53918-200	199.98	0	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ขนาดและการกระจายตัวของคาร์บอนแบล็คในน้ำมันหล่อลื่น(New oil) โดยเฉลี่ย

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	New oil+C -Average Volume (%)	Cum%
0.02-0.023318	0.003318	0	0
0.023318-0.027187	0.007187	0	0
0.027187-0.031698	0.011698	0	0
0.031698-0.036957	0.016957	0	0
0.036957-0.043089	0.023089	0	0
0.043089-0.050238	0.030238	0	0
0.050238-0.058573	0.038573	0	0
0.058573-0.068291	0.048291	0	0
0.068291-0.079621	0.059621	0	0
0.079621-0.092832	0.072832	0	0
0.092832-0.108234	0.088234	0	0
0.108234-0.126191	0.106191	0	0
0.126191-0.147128	0.127128	0	0
0.147128-0.171539	0.151539	0	0
0.171539-0.2	0.18	0	0
0.2-0.233183	0.213183	0	0
0.233183-0.271871	0.251871	0.013006	0.013006
0.271871-0.316979	0.296979	0.123823	0.136829
0.316979-0.36957	0.34957	0.221779	0.358608
0.36957-0.430887	0.410887	0.293283	0.651892
0.430887-0.502377	0.482377	0.355552	1.007443
0.502377-0.585729	0.565729	0.407729	1.415172
0.585729-0.68291	0.66291	0.466501	1.881673
0.68291-0.796214	0.776214	0.552462	2.434135
0.796214-0.928318	0.908318	0.690948	3.125083
0.928318-1.082339	1.062339	0.906751	4.031834
1.082339-1.261915	1.241915	1.21858	5.250414
1.261915-1.471285	1.451285	1.63301	6.883424
1.471285-1.715392	1.695392	2.137318	9.020742
1.715392-2	1.98	2.696881	11.717623
2-2.331829	2.311829	3.259514	14.977137
2.331829-2.718713	2.698713	3.761814	18.738951
2.718713-3.169786	3.149786	4.142412	22.881363

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 (ต่อ)

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	New oil+C -Average Volume (%)	Cum%
3.169786-3.6957	3.6757	3.19414	67.277834
3.6957-4.308869	4.288869	3.93962	71.217453
4.308869-5.023773	5.003773	4.629207	75.846661
5.023773-5.857289	5.837289	5.087139	80.9338
5.857289-6.829098	6.809098	5.159708	86.093508
6.829098-7.962143	7.942143	4.769024	90.862532
7.962143-9.283178	9.263178	3.958122	94.820654
9.283178-10.823391	10.803391	2.864082	97.684736
10.823391-12.619147	12.599147	1.743214	99.42795
12.619147-14.712845	14.692845	0.557685	99.985636
14.712845-17.153918	17.133918	0.014364	100
17.153918-20	19.98	0	100
20-23.318288	23.298288	0	100
23.318288-27.187128	27.167128	0	100
27.187128-31.697864	31.677864	0	100
31.697864-36.956996	36.936996	0	100
36.956996-43.088694	43.068694	0	100
43.088694-50.237729	50.217729	0	100
50.237729-58.572891	58.552891	0	100
58.572891-68.290977	68.270977	0	100
68.290977-79.621434	79.601434	0	100
79.621434-92.831777	92.811777	0	100
92.831777-108.233905	108.213905	0	100
108.233905-126.191469	126.171469	0	100
126.191469-147.128451	147.108451	0	100
147.128451-171.53918	171.51918	0	100
171.53918-200	199.98	0	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งาน
แล้วจากรถทดสอบT1 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	T1_E20_oil Volume (%)	Cum%
0.02-0.023318	0.003318	0	0
0.023318-0.027187	0.007187	0	0
0.027187-0.031698	0.011698	0	0
0.031698-0.036957	0.016957	0	0
0.036957-0.043089	0.023089	0	0
0.043089-0.050238	0.030238	0	0
0.050238-0.058573	0.038573	0	0
0.058573-0.068291	0.048291	0	0
0.068291-0.079621	0.059621	0	0
0.079621-0.092832	0.072832	0	0
0.092832-0.108234	0.088234	0	0
0.108234-0.126191	0.106191	0	0
0.126191-0.147128	0.127128	0	0
0.147128-0.171539	0.151539	0	0
0.171539-0.2	0.18	0	0
0.2-0.233183	0.213183	0	0
0.233183-0.271871	0.251871	0	0
0.271871-0.316979	0.296979	0	0
0.316979-0.36957	0.34957	0	0
0.36957-0.430887	0.410887	0	0
0.430887-0.502377	0.482377	0	0
0.502377-0.585729	0.565729	0.020634333	0.020634333
0.585729-0.68291	0.66291	0.146056667	0.166691
0.68291-0.796214	0.776214	0.348069	0.51476
0.796214-0.928318	0.908318	0.689168333	1.203928667
0.928318-1.082339	1.062339	1.217501	2.421429667
1.082339-1.261915	1.241915	1.925095	4.346524667
1.261915-1.471285	1.451285	2.781465333	7.127989333
1.471285-1.715392	1.695392	3.711978333	10.839968
1.715392-2	1.98	4.611058333	15.45102667
2-2.331829	2.311829	5.363623667	20.81465
2.331829-2.718713	2.698713	5.867517	26.682167

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 (ต่อ)

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	T1_E20_oil Volume (%)	Cum%
2.718713-3.169786	3.149786	2.898800333	82.98935367
3.169786-3.6957	3.6757	2.888265	85.87761833
3.6957-4.308869	4.288869	2.839472333	88.71709067
4.308869-5.023773	5.003773	2.727218	91.44430867
5.023773-5.857289	5.837289	2.516858333	93.96116667
5.857289-6.829098	6.809098	2.184405333	96.145572
6.829098-7.962143	7.942143	1.744617667	97.89018967
7.962143-9.283178	9.263178	1.224668333	99.114858
9.283178-10.823391	10.803391	0.754848	99.86970567
10.823391-12.619147	12.599147	0.123005333	99.992711
12.619147-14.712845	14.692845	0.007289	100
14.712845-17.153918	17.133918	0	100
17.153918-20	19.98	0	100
20-23.318288	23.298288	0	100
23.318288-27.187128	27.167128	0	100
27.187128-31.697864	31.677864	0	100
31.697864-36.956996	36.936996	0	100
36.956996-43.088694	43.068694	0	100
43.088694-50.237729	50.217729	0	100
50.237729-58.572891	58.552891	0	100
58.572891-68.290977	68.270977	0	100
68.290977-79.621434	79.601434	0	100
79.621434-92.831777	92.811777	0	100
92.831777-108.233905	108.213905	0	100
108.233905-126.191469	126.171469	0	100
126.191469-147.128451	147.108451	0	100
147.128451-171.53918	171.51918	0	100
171.53918-200	199.98	0	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งาน
แล้วจากทดสอบT1 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	T1_E85_oil Volume (%)	Cum%
0.02-0.023318	0.003318	0	0
0.023318-0.027187	0.007187	0	0
0.027187-0.031698	0.011698	0	0
0.031698-0.036957	0.016957	0	0
0.036957-0.043089	0.023089	0	0
0.043089-0.050238	0.030238	0	0
0.050238-0.058573	0.038573	0	0
0.058573-0.068291	0.048291	0	0
0.068291-0.079621	0.059621	0	0
0.079621-0.092832	0.072832	0	0
0.092832-0.108234	0.088234	0	0
0.108234-0.126191	0.106191	0	0
0.126191-0.147128	0.127128	0	0
0.147128-0.171539	0.151539	0	0
0.171539-0.2	0.18	0	0
0.2-0.233183	0.213183	0	0
0.233183-0.271871	0.251871	0	0
0.271871-0.316979	0.296979	0	0
0.316979-0.36957	0.34957	0	0
0.36957-0.430887	0.410887	0	0
0.430887-0.502377	0.482377	0	0
0.502377-0.585729	0.565729	0	0
0.585729-0.68291	0.66291	0.022400333	0.022400333
0.68291-0.796214	0.776214	0.161425333	0.183825667
0.796214-0.928318	0.908318	0.446989333	0.630815
0.928318-1.082339	1.062339	0.876867667	1.507682333
1.082339-1.261915	1.241915	1.498424667	3.006107333
1.261915-1.471285	1.451285	2.271321333	5.277428667
1.471285-1.715392	1.695392	3.137136333	8.414564667
1.715392-2	1.98	3.999566667	12.41413167
2-2.331829	2.311829	4.751208333	17.16534
2.331829-2.718713	2.698713	5.291516333	22.45685633

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 (ต่อ)

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	T1_E85_oil Volume (%)	Cum%
2.718713-3.169786	3.149786	2.876142	70.962079
3.169786-3.6957	3.6757	3.444562	74.406641
3.6957-4.308869	4.288869	3.977671	78.384312
4.308869-5.023773	5.003773	4.350356667	82.734669
5.023773-5.857289	5.837289	4.439509667	87.174178
5.857289-6.829098	6.809098	4.166930667	91.34110867
6.829098-7.962143	7.942143	3.541089	94.88219767
7.962143-9.283178	9.263178	2.657654667	97.53985233
9.283178-10.823391	10.803391	1.695672	99.235524
10.823391-12.619147	12.599147	0.726374	99.961898
12.619147-14.712845	14.692845	0.038102	100
14.712845-17.153918	17.133918	0	100
17.153918-20	19.98	0	100
20-23.318288	23.298288	0	100
23.318288-27.187128	27.167128	0	100
27.187128-31.697864	31.677864	0	100
31.697864-36.956996	36.936996	0	100
36.956996-43.088694	43.068694	0	100
43.088694-50.237729	50.217729	0	100
50.237729-58.572891	58.552891	0	100
58.572891-68.290977	68.270977	0	100
68.290977-79.621434	79.601434	0	100
79.621434-92.831777	92.811777	0	100
92.831777-108.233905	108.213905	0	100
108.233905-126.191469	126.171469	0	100
126.191469-147.128451	147.108451	0	100
147.128451-171.53918	171.51918	0	100
171.53918-200	199.98	0	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งาน
แล้วจากทดสอบ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	T2_E20_oil Volume (%)	Cum%
0.02-0.023318	0.003318	0	0
0.023318-0.027187	0.007187	0	0
0.027187-0.031698	0.011698	0	0
0.031698-0.036957	0.016957	0	0
0.036957-0.043089	0.023089	0	0
0.043089-0.050238	0.030238	0	0
0.050238-0.058573	0.038573	0	0
0.058573-0.068291	0.048291	0	0
0.068291-0.079621	0.059621	0	0
0.079621-0.092832	0.072832	0	0
0.092832-0.108234	0.088234	0	0
0.108234-0.126191	0.106191	0	0
0.126191-0.147128	0.127128	0	0
0.147128-0.171539	0.151539	0	0
0.171539-0.2	0.18	0	0
0.2-0.233183	0.213183	0	0
0.233183-0.271871	0.251871	0	0
0.271871-0.316979	0.296979	0	0
0.316979-0.36957	0.34957	0	0
0.36957-0.430887	0.410887	0	0
0.430887-0.502377	0.482377	0	0
0.502377-0.585729	0.565729	0.007686667	0.007686667
0.585729-0.68291	0.66291	0.073876333	0.081563
0.68291-0.796214	0.776214	0.280966667	0.362529667
0.796214-0.928318	0.908318	0.636780333	0.999309667
0.928318-1.082339	1.062339	1.182835	2.182145
1.082339-1.261915	1.241915	1.932764333	4.114909
1.261915-1.471285	1.451285	2.847274667	6.962183667
1.471285-1.715392	1.695392	3.849648	10.81183167
1.715392-2	1.98	4.826908667	15.63874067
2-2.331829	2.311829	5.656775667	21.295516
2.331829-2.718713	2.698713	6.230918	27.526434

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 (ต่อ)

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	T2_E20_oil Volume (%)	Cum%
2.718713-3.169786	3.149786	2.320082667	85.02444167
3.169786-3.6957	3.6757	2.314856667	87.33929867
3.6957-4.308869	4.288869	2.300353	89.639651
4.308869-5.023773	5.003773	2.255346	91.894997
5.023773-5.857289	5.837289	2.144339667	94.039337
5.857289-6.829098	6.809098	1.934313	95.97365
6.829098-7.962143	7.942143	1.616080333	97.58973067
7.962143-9.283178	9.263178	1.215529333	98.80525967
9.283178-10.823391	10.803391	0.791189667	99.59644933
10.823391-12.619147	12.599147	0.380392667	99.97684233
12.619147-14.712845	14.692845	0.023157667	100
14.712845-17.153918	17.133918	0	100
17.153918-20	19.98	0	100
20-23.318288	23.298288	0	100
23.318288-27.187128	27.167128	0	100
27.187128-31.697864	31.677864	0	100
31.697864-36.956996	36.936996	0	100
36.956996-43.088694	43.068694	0	100
43.088694-50.237729	50.217729	0	100
50.237729-58.572891	58.552891	0	100
58.572891-68.290977	68.270977	0	100
68.290977-79.621434	79.601434	0	100
79.621434-92.831777	92.811777	0	100
92.831777-108.233905	108.213905	0	100
108.233905-126.191469	126.171469	0	100
126.191469-147.128451	147.108451	0	100
147.128451-171.53918	171.51918	0	100
171.53918-200	199.98	0	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งาน
แล้วจากทดสอบT2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	T2_E85_oil Volume (%)	Cum%
0.02-0.023318	0.003318	0	0
0.023318-0.027187	0.007187	0	0
0.027187-0.031698	0.011698	0	0
0.031698-0.036957	0.016957	0	0
0.036957-0.043089	0.023089	0	0
0.043089-0.050238	0.030238	0	0
0.050238-0.058573	0.038573	0	0
0.058573-0.068291	0.048291	0	0
0.068291-0.079621	0.059621	0	0
0.079621-0.092832	0.072832	0	0
0.092832-0.108234	0.088234	0	0
0.108234-0.126191	0.106191	0	0
0.126191-0.147128	0.127128	0	0
0.147128-0.171539	0.151539	0	0
0.171539-0.2	0.18	0	0
0.2-0.233183	0.213183	0	0
0.233183-0.271871	0.251871	0.012483	0.012483
0.271871-0.316979	0.296979	0.114562	0.127045
0.316979-0.36957	0.34957	0.168395	0.29544
0.36957-0.430887	0.410887	0.191306	0.486746
0.430887-0.502377	0.482377	0.197581	0.684327
0.502377-0.585729	0.565729	0.198135	0.882462
0.585729-0.68291	0.66291	0.219011	1.101472
0.68291-0.796214	0.776214	0.291571	1.393043
0.796214-0.928318	0.908318	0.449901	1.842944
0.928318-1.082339	1.062339	0.723575	2.56652
1.082339-1.261915	1.241915	1.129718	3.696238
1.261915-1.471285	1.451285	1.665697	5.361935
1.471285-1.715392	1.695392	2.301866	7.6638
1.715392-2	1.98	2.982149	10.64595
2-2.331829	2.311829	3.63393	14.27988
2.331829-2.718713	2.698713	4.178946	18.458825

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 (ต่อ)

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	T2_E85_oil Volume (%)	Cum%
2.718713-3.169786	3.149786	3.383024	65.324586
3.169786-3.6957	3.6757	4.182009	69.506595
3.6957-4.308869	4.288869	4.889499	74.396094
4.308869-5.023773	5.003773	5.341332	79.737427
5.023773-5.857289	5.837289	5.396788	85.134214
5.857289-6.829098	6.809098	4.987756	90.12197
6.829098-7.962143	7.942143	4.159962	94.281932
7.962143-9.283178	9.263178	3.053595	97.335527
9.283178-10.823391	10.803391	1.90601	99.241537
10.823391-12.619147	12.599147	0.727383	99.96892
12.619147-14.712845	14.692845	0.03108	100
14.712845-17.153918	17.133918	0	100
17.153918-20	19.98	0	100
20-23.318288	23.298288	0	100
23.318288-27.187128	27.167128	0	100
27.187128-31.697864	31.677864	0	100
31.697864-36.956996	36.936996	0	100
36.956996-43.088694	43.068694	0	100
43.088694-50.237729	50.217729	0	100
50.237729-58.572891	58.552891	0	100
58.572891-68.290977	68.270977	0	100
68.290977-79.621434	79.601434	0	100
79.621434-92.831777	92.811777	0	100
92.831777-108.233905	108.213905	0	100
108.233905-126.191469	126.171469	0	100
126.191469-147.128451	147.108451	0	100
147.128451-171.53918	171.51918	0	100
171.53918-200	199.98	0	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.7 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่าน
การใช้งานแล้วจากทดสอบT1 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	T1_E20_filter Volume (%)	Cum%
0.02-0.023318	0.003318	0	0
0.023318-0.027187	0.007187	0	0
0.027187-0.031698	0.011698	0	0
0.031698-0.036957	0.016957	0	0
0.036957-0.043089	0.023089	0	0
0.043089-0.050238	0.030238	0	0
0.050238-0.058573	0.038573	0	0
0.058573-0.068291	0.048291	0	0
0.068291-0.079621	0.059621	0	0
0.079621-0.092832	0.072832	0	0
0.092832-0.108234	0.088234	0	0
0.108234-0.126191	0.106191	0	0
0.126191-0.147128	0.127128	0	0
0.147128-0.171539	0.151539	0	0
0.171539-0.2	0.18	0	0
0.2-0.233183	0.213183	0	0
0.233183-0.271871	0.251871	0.008543667	0.008543667
0.271871-0.316979	0.296979	0.083958	0.092501333
0.316979-0.36957	0.34957	0.167553333	0.260054667
0.36957-0.430887	0.410887	0.207379667	0.467434333
0.430887-0.502377	0.482377	0.238786333	0.706220333
0.502377-0.585729	0.565729	0.284119333	0.990339667
0.585729-0.68291	0.66291	0.391089333	1.381429
0.68291-0.796214	0.776214	0.614123667	1.995552667
0.796214-0.928318	0.908318	1.009310333	3.004863
0.928318-1.082339	1.062339	1.62113	4.625992333
1.082339-1.261915	1.241915	2.468498	7.094490333
1.261915-1.471285	1.451285	3.532836	10.62732633
1.471285-1.715392	1.695392	4.746826	15.374152
1.715392-2	1.98	5.998927667	21.37308
2-2.331829	2.311829	7.154021333	28.52710133
2.331829-2.718713	2.698713	8.073793	36.600894

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.7 (ต่อ)

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	T2_E20_filter Volume (%)	Cum%
2.718713-3.169786	3.149786	0.309767333	99.625092
3.169786-3.6957	3.6757	0.229306333	99.854398
3.6957-4.308869	4.288869	0.121366	99.975764
4.308869-5.023773	5.003773	0.024236	100
5.023773-5.857289	5.837289	0	100
5.857289-6.829098	6.809098	0	100
6.829098-7.962143	7.942143	0	100
7.962143-9.283178	9.263178	0	100
9.283178-10.823391	10.803391	0	100
10.823391-12.619147	12.599147	0	100
12.619147-14.712845	14.692845	0	100
14.712845-17.153918	17.133918	0	100
17.153918-20	19.98	0	100
20-23.318288	23.298288	0	100
23.318288-27.187128	27.167128	0	100
27.187128-31.697864	31.677864	0	100
31.697864-36.956996	36.936996	0	100
36.956996-43.088694	43.068694	0	100
43.088694-50.237729	50.217729	0	100
50.237729-58.572891	58.552891	0	100
58.572891-68.290977	68.270977	0	100
68.290977-79.621434	79.601434	0	100
79.621434-92.831777	92.811777	0	100
92.831777-108.233905	108.213905	0	100
108.233905-126.191469	126.171469	0	100
126.191469-147.128451	147.108451	0	100
147.128451-171.53918	171.51918	0	100
171.53918-200	199.98	0	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.8 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่าน
การใช้งานแล้วจากทดสอบT1 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	T1_E85_filter Volume (%)	Cum%
0.02-0.023318	0.003318	0	0
0.023318-0.027187	0.007187	0	0
0.027187-0.031698	0.011698	0	0
0.031698-0.036957	0.016957	0	0
0.036957-0.043089	0.023089	0	0
0.043089-0.050238	0.030238	0	0
0.050238-0.058573	0.038573	0	0
0.058573-0.068291	0.048291	0	0
0.068291-0.079621	0.059621	0	0
0.079621-0.092832	0.072832	0	0
0.092832-0.108234	0.088234	0	0
0.108234-0.126191	0.106191	0	0
0.126191-0.147128	0.127128	0	0
0.147128-0.171539	0.151539	0	0
0.171539-0.2	0.18	0	0
0.2-0.233183	0.213183	0	0
0.233183-0.271871	0.251871	0.007986333	0.007986333
0.271871-0.316979	0.296979	0.080031667	0.088018333
0.316979-0.36957	0.34957	0.174427667	0.262445667
0.36957-0.430887	0.410887	0.236991	0.499436667
0.430887-0.502377	0.482377	0.285483333	0.784919667
0.502377-0.585729	0.565729	0.314097667	1.099017333
0.585729-0.68291	0.66291	0.334148	1.433165333
0.68291-0.796214	0.776214	0.360532333	1.793697667
0.796214-0.928318	0.908318	0.414620333	2.208318
0.928318-1.082339	1.062339	0.521612333	2.72993
1.082339-1.261915	1.241915	0.708595	3.438525
1.261915-1.471285	1.451285	1.002434	4.440959
1.471285-1.715392	1.695392	1.426475667	5.867434667
1.715392-2	1.98	1.997583333	7.865018333
2-2.331829	2.311829	2.724164	10.58918233
2.331829-2.718713	2.698713	3.597839667	14.187022

ตารางที่ ค.8 (ต่อ)

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	T1_E85_filter Volume (%)	Cum%
2.718713-3.169786	3.149786	0.935528333	95.983218
3.169786-3.6957	3.6757	0.676927333	96.66014533
3.6957-4.308869	4.288869	0.527554	97.187699
4.308869-5.023773	5.003773	0.454994	97.642693
5.023773-5.857289	5.837289	0.426012333	98.06870567
5.857289-6.829098	6.809098	0.411450667	98.48015667
6.829098-7.962143	7.942143	0.391067667	98.871224
7.962143-9.283178	9.263178	0.354024	99.225248
9.283178-10.823391	10.803391	0.297357333	99.522605
10.823391-12.619147	12.599147	0.226206333	99.748811
12.619147-14.712845	14.692845	0.151233	99.900044
14.712845-17.153918	17.133918	0.088836333	99.98888033
17.153918-20	19.98	0.011119667	100
20-23.318288	23.298288	0	100
23.318288-27.187128	27.167128	0	100
27.187128-31.697864	31.677864	0	100
31.697864-36.956996	36.936996	0	100
36.956996-43.088694	43.068694	0	100
43.088694-50.237729	50.217729	0	100
50.237729-58.572891	58.552891	0	100
58.572891-68.290977	68.270977	0	100
68.290977-79.621434	79.601434	0	100
79.621434-92.831777	92.811777	0	100
92.831777-108.233905	108.213905	0	100
108.233905-126.191469	126.171469	0	100
126.191469-147.128451	147.108451	0	100
147.128451-171.53918	171.51918	0	100
171.53918-200	199.98	0	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.9 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่าน
การใช้งานแล้วจากทดสอบ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	T2_E20_filter Volume (%)	Cum%
0.02-0.023318	0.003318	0	0
0.023318-0.027187	0.007187	0	0
0.027187-0.031698	0.011698	0	0
0.031698-0.036957	0.016957	0	0
0.036957-0.043089	0.023089	0	0
0.043089-0.050238	0.030238	0	0
0.050238-0.058573	0.038573	0	0
0.058573-0.068291	0.048291	0	0
0.068291-0.079621	0.059621	0	0
0.079621-0.092832	0.072832	0	0
0.092832-0.108234	0.088234	0	0
0.108234-0.126191	0.106191	0	0
0.126191-0.147128	0.127128	0	0
0.147128-0.171539	0.151539	0	0
0.171539-0.2	0.18	0	0
0.2-0.233183	0.213183	0	0
0.233183-0.271871	0.251871	0	0
0.271871-0.316979	0.296979	0	0
0.316979-0.36957	0.34957	0.020061667	0.020061667
0.36957-0.430887	0.410887	0.187891333	0.207953
0.430887-0.502377	0.482377	0.532772667	0.740725333
0.502377-0.585729	0.565729	0.895251333	1.635977
0.585729-0.68291	0.66291	1.353866667	2.989843667
0.68291-0.796214	0.776214	1.886583667	4.876427333
0.796214-0.928318	0.908318	2.497511	7.373938667
0.928318-1.082339	1.062339	3.167558667	10.54149733
1.082339-1.261915	1.241915	3.862445333	14.40394267
1.261915-1.471285	1.451285	4.530509667	18.934452
1.471285-1.715392	1.695392	5.109335	24.043787
1.715392-2	1.98	5.544174	29.587961
2-2.331829	2.311829	5.808732333	35.39669333
2.331829-2.718713	2.698713	5.914254667	41.31094767

ตารางที่ ค.9 (ต่อ)

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	T2_E20_filter Volume (%)	Cum%
2.718713-3.169786	3.149786	0.148009667	98.51214667
3.169786-3.6957	3.6757	0.127368667	98.63951533
3.6957-4.308869	4.288869	0.165401	98.80491667
4.308869-5.023773	5.003773	0.215940333	99.02085633
5.023773-5.857289	5.837289	0.247053667	99.26791
5.857289-6.829098	6.809098	0.244652	99.512562
6.829098-7.962143	7.942143	0.210107667	99.72266967
7.962143-9.283178	9.263178	0.159743667	99.882413
9.283178-10.823391	10.803391	0.101122333	99.98353567
10.823391-12.619147	12.599147	0.016464333	100
12.619147-14.712845	14.692845	0	100
14.712845-17.153918	17.133918	0	100
17.153918-20	19.98	0	100
20-23.318288	23.298288	0	100
23.318288-27.187128	27.167128	0	100
27.187128-31.697864	31.677864	0	100
31.697864-36.956996	36.936996	0	100
36.956996-43.088694	43.068694	0	100
43.088694-50.237729	50.217729	0	100
50.237729-58.572891	58.552891	0	100
58.572891-68.290977	68.270977	0	100
68.290977-79.621434	79.601434	0	100
79.621434-92.831777	92.811777	0	100
92.831777-108.233905	108.213905	0	100
108.233905-126.191469	126.171469	0	100
126.191469-147.128451	147.108451	0	100
147.128451-171.53918	171.51918	0	100
171.53918-200	199.98	0	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.10 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆโดยเฉลี่ยของไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่าน
การใช้งานแล้วจากทดสอบ T2 ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	T2_E85_filter Volume (%)	Cum%
0.02-0.023318	0.003318	0	0
0.023318-0.027187	0.007187	0	0
0.027187-0.031698	0.011698	0	0
0.031698-0.036957	0.016957	0	0
0.036957-0.043089	0.023089	0	0
0.043089-0.050238	0.030238	0	0
0.050238-0.058573	0.038573	0	0
0.058573-0.068291	0.048291	0	0
0.068291-0.079621	0.059621	0	0
0.079621-0.092832	0.072832	0	0
0.092832-0.108234	0.088234	0	0
0.108234-0.126191	0.106191	0	0
0.126191-0.147128	0.127128	0	0
0.147128-0.171539	0.151539	0	0
0.171539-0.2	0.18	0	0
0.2-0.233183	0.213183	0	0
0.233183-0.271871	0.251871	0	0
0.271871-0.316979	0.296979	0.002581667	0.002581667
0.316979-0.36957	0.34957	0.036780333	0.039362
0.36957-0.430887	0.410887	0.117231333	0.156593
0.430887-0.502377	0.482377	0.16027	0.316862667
0.502377-0.585729	0.565729	0.225519333	0.542382
0.585729-0.68291	0.66291	0.348728667	0.891110667
0.68291-0.796214	0.776214	0.568498667	1.459609333
0.796214-0.928318	0.908318	0.924105	2.383714333
0.928318-1.082339	1.062339	1.444016333	3.827730667
1.082339-1.261915	1.241915	2.136530667	5.964261667
1.261915-1.471285	1.451285	2.982303	8.946564333
1.471285-1.715392	1.695392	3.928341333	12.87490567
1.715392-2	1.98	4.894648	17.76955367
2-2.331829	2.311829	5.791741	23.56129467
2.331829-2.718713	2.698713	6.534641	30.09593567

ตารางที่ ค.10 (ต่อ)

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	T2_E85_filter Volume (%)	Cum%
2.718713-3.169786	3.149786	0.845718667	95.08536833
3.169786-3.6957	3.6757	0.827133	95.912501
3.6957-4.308869	4.288869	0.813032667	96.72553433
4.308869-5.023773	5.003773	0.778575667	97.50411
5.023773-5.857289	5.837289	0.710604	98.21471367
5.857289-6.829098	6.809098	0.608013333	98.82272667
6.829098-7.962143	7.942143	0.481585	99.30431167
7.962143-9.283178	9.263178	0.345121	99.64943333
9.283178-10.823391	10.803391	0.225384	99.874817
10.823391-12.619147	12.599147	0.109539333	99.984356
12.619147-14.712845	14.692845	0.015644	100
14.712845-17.153918	17.133918	0	100
17.153918-20	19.98	0	100
20-23.318288	23.298288	0	100
23.318288-27.187128	27.167128	0	100
27.187128-31.697864	31.677864	0	100
31.697864-36.956996	36.936996	0	100
36.956996-43.088694	43.068694	0	100
43.088694-50.237729	50.217729	0	100
50.237729-58.572891	58.552891	0	100
58.572891-68.290977	68.270977	0	100
68.290977-79.621434	79.601434	0	100
79.621434-92.831777	92.811777	0	100
92.831777-108.233905	108.213905	0	100
108.233905-126.191469	126.171469	0	100
126.191469-147.128451	147.108451	0	100
147.128451-171.53918	171.51918	0	100
171.53918-200	199.98	0	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.11 ขนาดและการกระจายตัวของเศษโลหะสีกรหของลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบ
กับไฟร์บอลของตัวอย่าง new oil(SN 0W20) + E20

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	new oil(0W20)_E20 Volume (%)	Cum%
0.02-0.023318	0.003318	0	0
0.023318-0.027187	0.007187	0	0
0.027187-0.031698	0.011698	0	0
0.031698-0.036957	0.016957	0	0
0.036957-0.043089	0.023089	0	0
0.043089-0.050238	0.030238	0	0
0.050238-0.058573	0.038573	0	0
0.058573-0.068291	0.048291	0	0
0.068291-0.079621	0.059621	0	0
0.079621-0.092832	0.072832	0	0
0.092832-0.108234	0.088234	0	0
0.108234-0.126191	0.106191	0	0
0.126191-0.147128	0.127128	0	0
0.147128-0.171539	0.151539	0	0
0.171539-0.2	0.18	0	0
0.2-0.233183	0.213183	0	0
0.233183-0.271871	0.251871	0	0
0.271871-0.316979	0.296979	0	0
0.316979-0.36957	0.34957	0	0
0.36957-0.430887	0.410887	0	0
0.430887-0.502377	0.482377	0	0
0.502377-0.585729	0.565729	0.023737333	0.023737333
0.585729-0.68291	0.66291	0.288581667	0.312319
0.68291-0.796214	0.776214	0.4277	0.740019
0.796214-0.928318	0.908318	0.605055	1.345074
0.928318-1.082339	1.062339	0.784427667	2.129502
1.082339-1.261915	1.241915	0.989939667	3.119442
1.261915-1.471285	1.451285	1.227697667	4.347139333
1.471285-1.715392	1.695392	1.500424	5.847563333
1.715392-2	1.98	1.799280667	7.646844333
2-2.331829	2.311829	2.108724	9.755568
2.331829-2.718713	2.698713	2.410635667	12.16620367

ตารางที่ ค.11 (ต่อ)

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	new oil(OW20)_E20 Volume (%)	Cum%
2.718713-3.169786	3.149786	2.687237667	14.85344133
3.169786-3.6957	3.6757	2.920607	17.77404833
3.6957-4.308869	4.288869	3.094853333	20.86890167
4.308869-5.023773	5.003773	3.19877	24.06767167
5.023773-5.857289	5.837289	3.227912667	27.295584
5.857289-6.829098	6.809098	3.187377333	30.48296167
6.829098-7.962143	7.942143	3.093292667	33.57625367
7.962143-9.283178	9.263178	2.973365333	36.54961867
9.283178-10.823391	10.803391	2.867043333	39.41666233
10.823391-12.619147	12.599147	2.822349667	42.23901167
12.619147-14.712845	14.692845	2.889900333	45.12891267
14.712845-17.153918	17.133918	3.113162333	48.24207467
17.153918-20	19.98	3.514758	51.756833
20-23.318288	23.298288	4.081348667	55.83818167
23.318288-27.187128	27.167128	4.752154	60.590335
27.187128-31.697864	31.677864	5.418391667	66.00872667
31.697864-36.956996	36.936996	5.938143	71.94687
36.956996-43.088694	43.068694	6.167079333	78.11394933
43.088694-50.237729	50.217729	5.998820667	84.11276967
50.237729-58.572891	58.552891	5.398705	89.51147433
58.572891-68.290977	68.270977	4.430792333	93.94226767
68.290977-79.621434	79.601434	3.237571	97.179838
79.621434-92.831777	92.811777	2.021553	99.20139067
92.831777-108.233905	108.213905	0.765089667	99.96648033
108.233905-126.191469	126.171469	0.033519667	100
126.191469-147.128451	147.108451	0	100
147.128451-171.53918	171.51918	0	100
171.53918-200	199.98	0	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.12 ขนาดและการกระจายตัวของเศษโลหะสึกหรอของลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบ
กับไฟร์บอลของตัวอย่าง new oil(SN 0W20) + E85

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	new oil(0W20)_E85 Volume (%)	Cum%
0.02-0.023318	0.003318	0	0
0.023318-0.027187	0.007187	0	0
0.027187-0.031698	0.011698	0	0
0.031698-0.036957	0.016957	0	0
0.036957-0.043089	0.023089	0	0
0.043089-0.050238	0.030238	0	0
0.050238-0.058573	0.038573	0	0
0.058573-0.068291	0.048291	0	0
0.068291-0.079621	0.059621	0	0
0.079621-0.092832	0.072832	0	0
0.092832-0.108234	0.088234	0	0
0.108234-0.126191	0.106191	0	0
0.126191-0.147128	0.127128	0	0
0.147128-0.171539	0.151539	0	0
0.171539-0.2	0.18	0	0
0.2-0.233183	0.213183	0	0
0.233183-0.271871	0.251871	0	0
0.271871-0.316979	0.296979	0	0
0.316979-0.36957	0.34957	0	0
0.36957-0.430887	0.410887	0	0
0.430887-0.502377	0.482377	0	0
0.502377-0.585729	0.565729	0	0
0.585729-0.68291	0.66291	0.019445	0.019445
0.68291-0.796214	0.776214	0.133639	0.153083667
0.796214-0.928318	0.908318	0.320842	0.473926
0.928318-1.082339	1.062339	0.569874	1.0438
1.082339-1.261915	1.241915	0.946089333	1.989889
1.261915-1.471285	1.451285	1.459948333	3.449837667
1.471285-1.715392	1.695392	2.105549667	5.555387
1.715392-2	1.98	2.825349	8.380736
2-2.331829	2.311829	3.527860333	11.90859633
2.331829-2.718713	2.698713	4.116439667	16.02503567

ตารางที่ ค.12 (ต่อ)

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	new oil(0W20)_E85 Volume (%)	Cum%
2.718713-3.169786	3.149786	4.520095	20.54513067
3.169786-3.6957	3.6757	4.702793333	25.24792367
3.6957-4.308869	4.288869	4.663663667	29.91158733
4.308869-5.023773	5.003773	4.431167333	34.34275467
5.023773-5.857289	5.837289	4.053603333	38.396358
5.857289-6.829098	6.809098	3.591584333	41.98794267
6.829098-7.962143	7.942143	3.110177667	45.09812033
7.962143-9.283178	9.263178	2.673176333	47.77129667
9.283178-10.823391	10.803391	2.341541333	50.11283867
10.823391-12.619147	12.599147	2.1681	52.28093867
12.619147-14.712845	14.692845	2.196072667	54.47701133
14.712845-17.153918	17.133918	2.455368333	56.93237967
17.153918-20	19.98	2.950455333	59.882835
20-23.318288	23.298288	3.640118	63.52295367
23.318288-27.187128	27.167128	4.420710667	67.943664
27.187128-31.697864	31.677864	5.130343	73.07400667
31.697864-36.956996	36.936996	5.581423	78.65543
36.956996-43.088694	43.068694	5.616739667	84.27216967
43.088694-50.237729	50.217729	5.170090667	89.44226033
50.237729-58.572891	58.552891	4.296325667	93.73858567
58.572891-68.290977	68.270977	3.170351	96.90893667
68.290977-79.621434	79.601434	2.006358	98.915295
79.621434-92.831777	92.811777	1.009685	99.92498033
92.831777-108.233905	108.213905	0.075019667	100
108.233905-126.191469	126.171469	0	100
126.191469-147.128451	147.108451	0	100
147.128451-171.53918	171.51918	0	100
171.53918-200	199.98	0	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.13 ขนาดและการกระจายตัวของเศษโลหะสึกหรอของลูกบอลเหล็กหลังจากการทดสอบ
กับโพรบของตัวอย่าง new oil(SN 5W40) + E85

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	new oil(5W40)_E85 Volume (%)	Cum%
0.02-0.023318	0.003318	0	0
0.023318-0.027187	0.007187	0	0
0.027187-0.031698	0.011698	0	0
0.031698-0.036957	0.016957	0	0
0.036957-0.043089	0.023089	0	0
0.043089-0.050238	0.030238	0	0
0.050238-0.058573	0.038573	0	0
0.058573-0.068291	0.048291	0	0
0.068291-0.079621	0.059621	0	0
0.079621-0.092832	0.072832	0	0
0.092832-0.108234	0.088234	0	0
0.108234-0.126191	0.106191	0	0
0.126191-0.147128	0.127128	0	0
0.147128-0.171539	0.151539	0	0
0.171539-0.2	0.18	0	0
0.2-0.233183	0.213183	0.008955667	0.008955667
0.233183-0.271871	0.251871	0.100411	0.109367
0.271871-0.316979	0.296979	0.234108333	0.343475
0.316979-0.36957	0.34957	0.307264667	0.65074
0.36957-0.430887	0.410887	0.345605667	0.996345667
0.430887-0.502377	0.482377	0.345330333	1.341675333
0.502377-0.585729	0.565729	0.334753667	1.676428667
0.585729-0.68291	0.66291	0.353682667	2.030111333
0.68291-0.796214	0.776214	0.454965333	2.485076667
0.796214-0.928318	0.908318	0.695599	3.180675333
0.928318-1.082339	1.062339	1.126220667	4.306896
1.082339-1.261915	1.241915	1.777464	6.084360667
1.261915-1.471285	1.451285	2.647335333	8.731696333
1.471285-1.715392	1.695392	3.687993333	12.41968933
1.715392-2	1.98	4.805007333	17.224697
2-2.331829	2.311829	5.872518	23.097215
2.331829-2.718713	2.698713	6.751809667	29.84902433

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.13 (ต่อ)

Particle size (μm)	จุดกึ่งกลาง (μm)	new oil(5W40)_E85 Volume (%)	Cum%
2.718713-3.169786	3.149786	7.320711667	37.169736
3.169786-3.6957	3.6757	7.500587667	44.67032367
3.6957-4.308869	4.288869	7.274836333	51.94516033
4.308869-5.023773	5.003773	6.693030667	58.638191
5.023773-5.857289	5.837289	5.859298333	64.49748967
5.857289-6.829098	6.809098	4.907512	69.40500167
6.829098-7.962143	7.942143	3.969605667	73.374607
7.962143-9.283178	9.263178	3.146816333	76.52142367
9.283178-10.823391	10.803391	2.498416333	79.01984
10.823391-12.619147	12.599147	2.035939333	81.05577933
12.619147-14.712845	14.692845	1.735036	82.79081533
14.712845-17.153918	17.133918	1.554933	84.34574833
17.153918-20	19.98	1.456297	85.80204533
20-23.318288	23.298288	1.410248333	87.21229367
23.318288-27.187128	27.167128	1.397749333	88.61004267
27.187128-31.697864	31.677864	1.405037	90.01508
31.697864-36.956996	36.936996	1.418839333	91.433919
36.956996-43.088694	43.068694	1.424831667	92.85875067
43.088694-50.237729	50.217729	1.408023	94.26677367
50.237729-58.572891	58.552891	1.352121667	95.61889567
58.572891-68.290977	68.270977	1.244196	96.86309167
68.290977-79.621434	79.601434	1.080025667	97.94311767
79.621434-92.831777	92.811777	0.870183333	98.8133
92.831777-108.233905	108.213905	0.630028667	99.44332933
108.233905-126.191469	126.171469	0.407117	99.85044633
126.191469-147.128451	147.108451	0.134435333	99.98488167
147.128451-171.53918	171.51918	0.015118333	100
171.53918-200	199.98	0	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง
ข้อมูลการทดสอบวัดคุณสมบัติด้านการสีกหรือด้วยเครื่องมือ
โพรบอลล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผลที่สึกหรอบนผิวลูกบอล (Scar) และค่าความหยาบ (Roughness)

Sample	Scar (μm)	New oil	New oil+E0	New oil+E10	New oil+E20	New oil+E85	New oil+E85+C	Lubricant-Mo free+E85
Ball 1	D1	363.40	368.00	365.74	370.97	516.19	495.65	582.46
	D2	365.74	368.71	365.70	370.26	515.50	495.63	582.23
	D3	363.39	365.50	364.14	368.27	514.89	496.79	582.93
Ball 2	D1	365.24	375.08	373.98	374.73	515.44	518.03	587.89
	D2	364.38	372.52	378.54	373.27	515.50	518.30	588.08
	D3	365.32	372.33	373.66	373.88	514.04	518.57	588.52
Ball 3	D1	362.69	365.70	368.71	368.71	509.42	504.55	588.45
	D2	363.49	365.74	367.25	368.75	508.73	504.54	587.89
	D3	362.32	365.03	366.90	368.06	508.04	504.04	588.08
Average wear scar (μm)		364.00	368.73	369.40	370.77	513.08	506.23	586.28
Roughness (μm)		0.29	0.30	0.31	0.31	0.49	0.97	0.91

ตารางที่ ง.2 ค่าแรงเสียดทานด้านการหมุนลูกบอลเหล็กของตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ

Friction torque (N.mm)			
Time (sec)	New oil	New oil+E85	New oil+E85+C
0	0	0	0
300	0.2	0.2	0.3
600	0.4	1.2	0.6
900	1.6	14.2	1.4
1200	7.5	14.5	8.3
1500	7.7	15.4	8.6
1800	7.6	15.1	8.2
2100	8.3	15.6	8.4
2400	7.7	15.4	8.7
2700	7.9	15.6	8.2
3000	7.6	15.9	8.6
3300	7.4	15.8	8.4
3600	7.3	16.1	9.1
Average wear scar (μm)	5.48	11.92	6.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

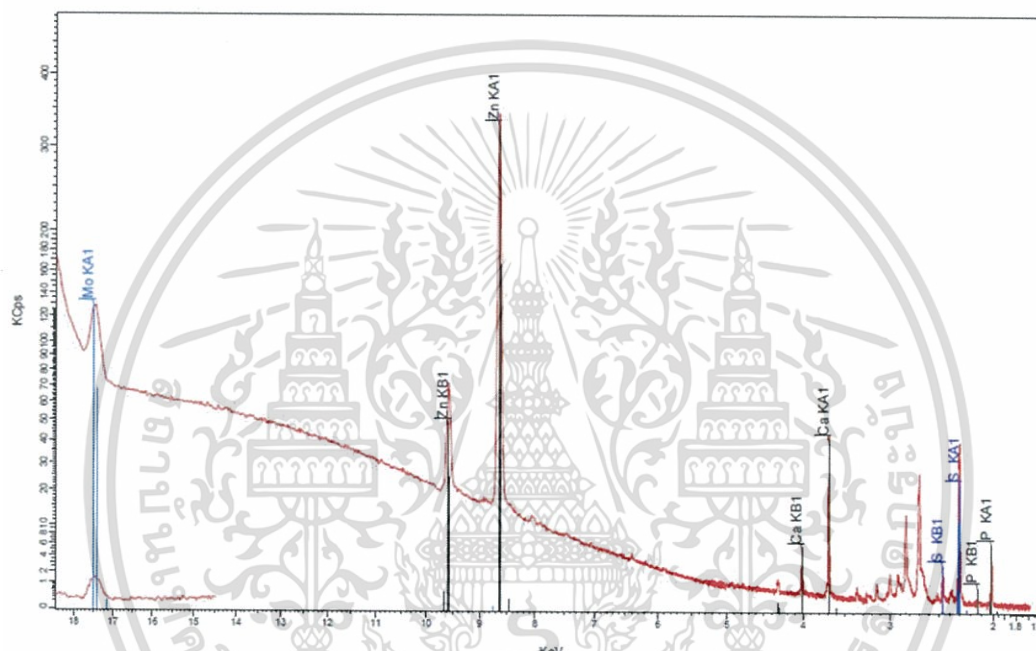


ภาคผนวก จ
ข้อมูลการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุด้วยเทคนิค
เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Additives elements in SN 0W20

Instrument Type	X-ray Fluorescence Spectrometer
Model	Bruker Model S8 Tiger
Measurement Method	Best Detection-He34mm
Calculation Method	Theoretical Formulas, "Fundamental Parameter Calculations"



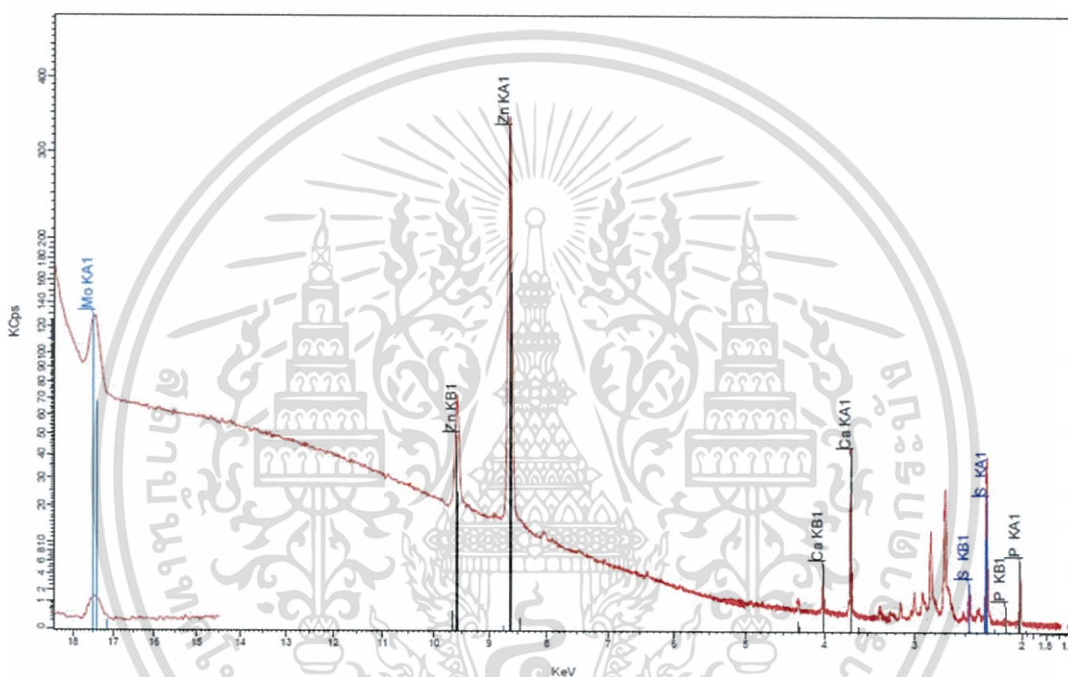
Result: SN 0W20

Element	Volume
CALCIUM Ca	0.231%
SULPHUR S	0.277%
ZINC Zn	0.0899%
PHOSPHORUS P	0.0814%
MOLYBDENUM Mo	0.0082%
Summary	0.69%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Additives elements in SN 5W40

Instrument Type	X-ray Fluorescence Spectrometer
Model	Bruker Model S8 Tiger
Measurement Method	Best Detection-He34mm
Calculation Method	Theoretical Formulas, "Fundamental Parameter Calculations"



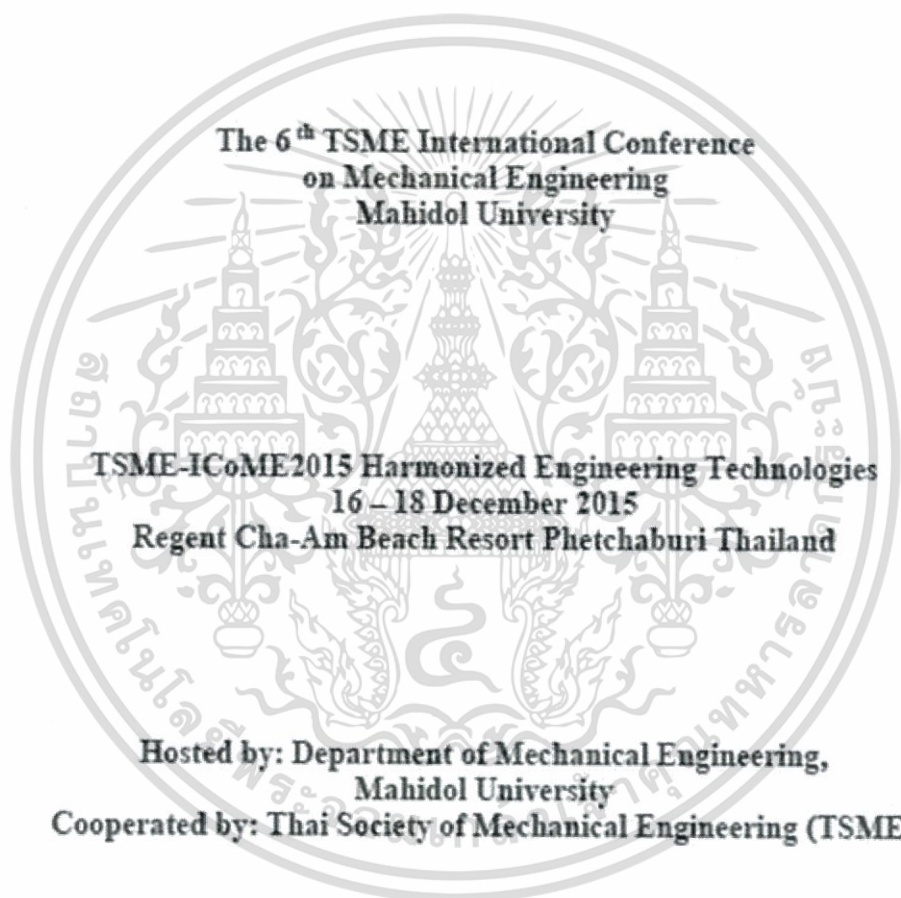
Result: SN 5W40

Element	Volume
CALCIUM Ca	0.256%
SULPHUR S	0.286%
ZINC Zn	0.112%
PHOSPHORUS P	0.102%
Summary	0.76%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AEC024

Characterization of Commercial Gasoline Passenger Car's Used Lubricating Oils and Metal Wears

Pol-ake Budsavahem¹, Chinda Chareonphonphanich¹, Pongsak Kummul¹ and Preechar Karin²

¹ Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok Thailand 10520

² International College, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok Thailand 10520

*Corresponding Author: pol.ake.kmitl@gmail.com, 088-0805535

Abstract

The main focusing point of this research is physical and chemical characterization of gasoline engine wear particles and used lubricating oil. Particle shape of the wear elements and the condition of used lubricating oil would be measured to see the wear behavior of engine components and the degradation of the engine lubricating oil using the existing advanced technology. The samples of used lubricating oils were collected from the conventional passenger cars which are general use by customers in dealer's showroom service area. The samples are collected when the distance of approximately 10,000 km. Two types of 1497 cc displacement volume gasoline engines are used in this research. Engine A and B is operated with the standard conventional lubricants number SAE5W40 and SAE0W20 respectively. The impact of different trip length and oil change interval on engine wear behaviors would be investigated and discussed with the degradation behavior of used lubricating oils.

Keywords: Engine, Lubricating Oil, Wear.

1. INTRODUCTION

Engines currently are designed to be a downsizing technology. As a result, higher load of engine are one of key factors which related to advance lubricating oil development. The lubricating oil developments are mainly focusing on anti-oxidizing, anti-wear, anti-rust, anti-foam and viscosity index additives. Conventional direct injection spark igniting engine wears are mainly consisting of adhesive wear, abrasive wear and fatigue wear. The adhesive wear is a mechanism wear caused by parts bonded together and are torn off. Abrasive wear is wear caused by parts that were cut off from the beginning as the movement part. Fatigue wear caused by wear and fatigue casting are the burdens pressed together and tribochemical reaction. The wear particle size and shape of each wear will be different according to the level of damage. Metal wear element is varying based on various engine components and the source of wear. The wear will be greater when the condition of lubricants deteriorate. Wear rate is increased when the fraction of impurities occurs and contaminants are added. Oil condition indicates deterioration of lubricating oil from the engines internal combustion process. The combustion process also causes nitration to occur when the air-fuel combustion process slips past the piston ring seal, which produces nitrous acid and nitric acid. These acids cause corrosion, rust, sediment, making the TBN decrease and affect the viscosity increase. However, the contamination of fuel also makes viscosity decrease. Contamination is a major cause of oil deteriorates. Water, soot, fuel, silicon, chemical additives will also affect the wear rate increases [1-14].

2. METHODOLOGY

Wear Condition

The quantity of wear will be measured in units of parts per million (ppm) using RDE spectrometer (rotating disk electrode atomic emission spectrometer: measure particle size up to 8 microns) and RFS spectrometer (rotrode filter spectroscopy atomic emission spectrometer: measure particle size from 5 to 100 microns). The tests standard is ASTM D6595. Ferrography is a device to check the amount of particular metal wear. Ferrogram can measure particle size from 8 to 1000 microns. Filtergram can measure particle size from 3 to 1000 microns [15-19].

Table 1 Wear metal detection limits due to instruments (www.focuslab.co.th)

Test Methods	Wear Particles Size (Micron)
AAS/AES-ICP	< 3 micron
AES-RDE	< 8 micron
AES-RFS	~ 5-100 micron
Ferrogram	~ 8-1000 micron
Filtergram	~ 3-1000 micron

AAS:	Atomic Absorption Spectrometer
AES-ICP:	Atomic Emission Spectrometer-Inductively Couple Plasma
AES-RDE:	Atomic Emission Spectrometer-Rotating Disk Electrode
AES-RFS:	Atomic Emission Spectrometer-Rotrode Filter Spectroscopy
RDE spectrometer:	Rotating Disk Electrode - Atomic Emission Spectrometer
RFS spectrometer:	Rotrode Filter Spectroscopy-Atomic Emission

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AEC024

Oil condition

A measurement of the condition of the used lubricant is to see the degradation of oil physical and chemical properties.

Viscosity is the resistance to flow of internal. The viscosity is measured at 100 degrees Celsius using the common standard of ASTM D445. Warning level of viscosity is <12.25 cSt and <7.82 cSt for oil type A and B respectively.

Oxidation is a measure of deterioration of oil using FTIR (Fourier-transform infrared spectroscopy). Warning level of oxidation is >18.75 Abs and >15.3 Abs for oil type A and B respectively.

Nitration is also a measure of deterioration of oil using FTIR (Fourier-transform infrared spectroscopy). Warning level of nitration is >7.5 Abs and >8.5 Abs for oil type A and B respectively.

TBN total base number is a measure of the remaining bases in the lubricant by titration standard number ASTM D4739. Warning level of TBN is <1.6 mgKOH/g and <1.7 mgKOH/g for oil type A and B respectively.

Flash Point is the lowest temperature that causes the oil to mix with water vapor which will ignite into a flash of fire. Normally the test standard is number ASTM D3828.

Contamination

Dirt contamination is another factor that affects the lubricant deteriorates and also engine wear.

Water contamination is measured in units of percent by weight using FTIR (fourier-transform infrared spectroscopy). Warning level of water contamination is >0.2 % Wt for both oil type A and B.

Soot contamination is also measured in units of percent by weight using FTIR (fourier-transform infrared spectroscopy). Warning level of water contamination is >0.3 % Wt for both oil type A and B.

Silicon contamination is measured in units of ppm using RDE spectrometer and RFS spectrometers. Warning level of water contamination is >40 ppm and 30 ppm for oil type A and B, respectively.

3. EXPERIMENTAL

The used lubricating oils were collected from the conventional 22 passenger cars which are general use by customers in dealer's showroom service area. The samples are collected when the distance of approximately 10,000 km as shown in Table 3. Two types of 1497 cc displacement volume gasoline engines are used in this research as shown in Table 2. Engine A and B is operated with the standard

conventional lubricants number SAE5W40 and SAE0W20 respectively.

Sampling starts when the vehicle is parked at the inspection services. Before sampling by vacuum pump, the engine is turning off for at least 7-10 minutes. After sampling process is finished, customer data, trip length and oil change interval were recorded. The collected samples were sent to FOCUS laboratory for investigate the properties of lubricants with various tools.

Table 2 Specifications of engines

Data of engine	Type A	Type B
Engine type	4-cylinder, DOHC	4-cylinder, SOHC
Displacement (cc)	1497	1497
Bore x Stroke (mm)	75 x 84.7	73 x 89.4
Compression Ratio	10.5:1	10.3:1
Max. output (kW)	80/6000rpm	86/6000rpm
Max. torque (Nm)	141/4200rpm	146/4700rpm
Transmission	Automatic	Automatic
Engine oil	SAE 5W40	SAE 0W20

Table 3 Data trip length and oil change interval

Type A	Trip length (km)	Oil change interval (km)	Type B	Trip length (km)	Oil change interval (km)
Type 1A	23219	12274	Type 1B	9132	5483
Type 2A	24514	9442	Type 2B	17341	9576
Type 3A	31150	10367	Type 3B	21140	14110
Type 4A	35777	10884	Type 4B	22190	11484
Type 5A	45058	7065	Type 5B	22420	13404
Type 6A	48869	7418	Type 6B	31150	10174
Type 7A	50631	16012	Type 7B	35545	10314
Type 8A	51768	8677	Type 8B	52546	15436
Type 9A	60121	13535	Type 9B	62826	21084
Type 10A	71885	10412	Type 10B	81793	10057
			Type 11B	82680	9886

Table 4 Caution and warning level of wear particles

Metal	Fine wear (<8µm)		Coarse (~5-150 µm)	
	U-Caution	U-Warning	U-Caution	U-Warning
Iron	>100	>200	>100	>200
Chromium	>40	>60	>40	>60
Lead	>40	>60	>40	>60
Copper	>40	>60	>40	>60
Tin	>40	>60	>40	>60
Aluminum	>40	>60	>40	>60

U: Upper, L: Lower

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AEC024

4. RESULTS

Figure 1 shows that iron had the most wear, which is an indication that the wear and tear of the parts that are made from iron and steel such as cylinder walls, piston, valve train, bearings and shafts. Iron wear quantity, trip length and oil change interval of each car is plotted in Fig 2. Iron wear samples in trip length of the vehicle 20,000-35,000 km is higher than the others is because the engine is under run-in condition. The surface of new engine parts might be rougher than that of after run-in condition which has trip length over 40,000 km.

Table 5 shows the result of Ferrography which can detect fatigue wear in the size of 5-30 microns. Amount of ferrous wear debris particles are approximately 85-90%. Ferrography shows the amount and shape and also indicate the type of metal wear, where most of the wear and tear caused is by normal rubbing wear and followed by the fatigue bearing wear.

Figure 3, 4, 5, 6 and 7 show viscosity, oxidation, nitration, TBN and flash point of each used lubricating oil sample, respectively. Figure 8, 9 and 10 show water, soot and silicon of each used lubricating oil sample, respectively. The used lubricating oil conditions and contaminations result of each samples are acceptable level.

Table 5 Shape of engine wear and oil contaminations

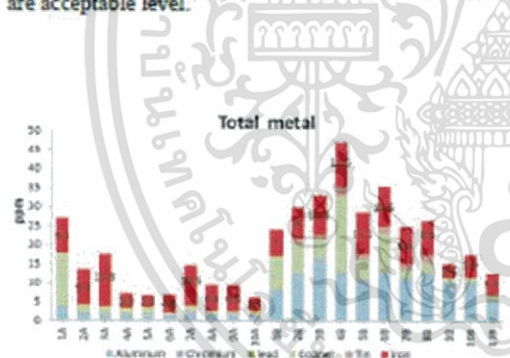
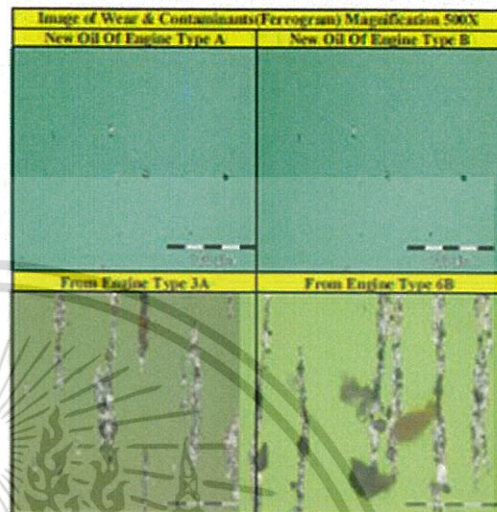


Fig.1 Total metal wear of each used oil sample

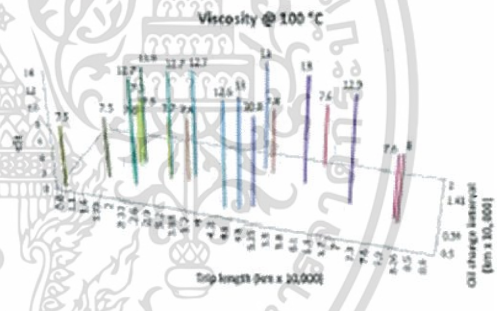


Fig.3 Viscosity of each used oil sample

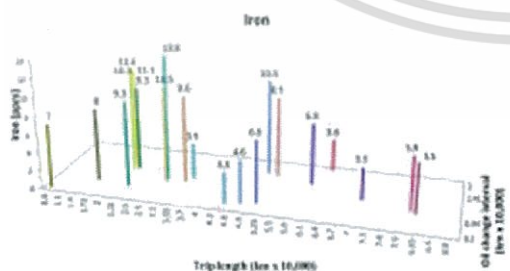


Fig. 2 Iron wears of each used oil sample

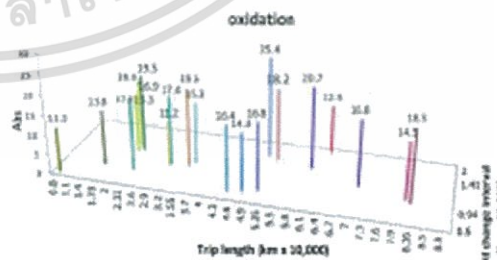


Fig.4 Oxidation of each used oil sample

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AEC024

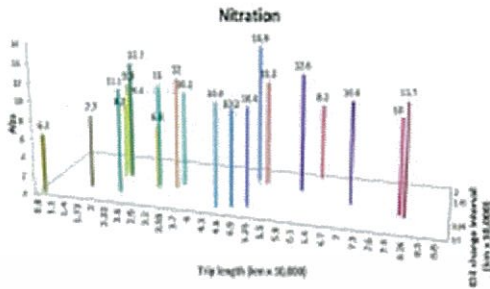


Fig.5 Nitration of each used oil sample

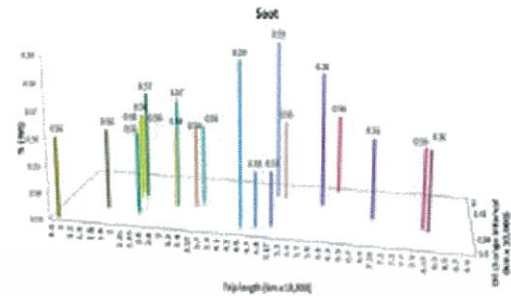


Fig.9 Soot contamination of each used oil sample

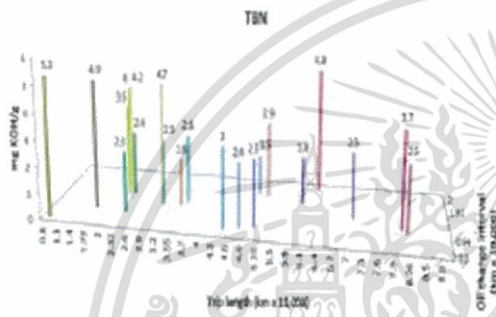


Fig.6 TBN of each used oil sample

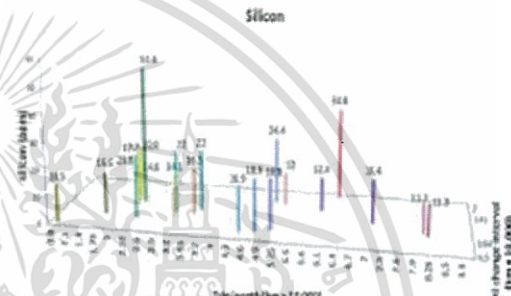


Fig.10 Silicon contamination of each used oil sample

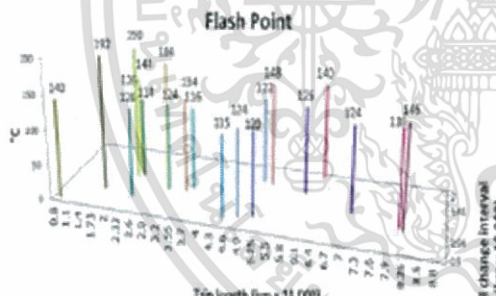


Fig.7 Flash point of each used oil sample

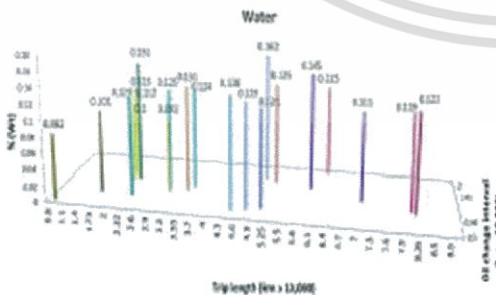


Fig.8 Water contamination of each used oil sample

5. CONCLUSION

Amount of metal wear is high in the condition of engine run-in due to surface of new engine parts might be rougher than that of normal condition. After the run-in condition, the normal wear amount is dependent on the oil change interval.

Quantitative analysis and shape of the wear particles are mostly in the wear of normal rubbing wear and followed by the fatigue bearing wear.

Viscosity and TBN decrease when the oil change interval is increased because oxidation and nitration of oil are increased by leakage of gases inside the combustion chamber. Soot is also increase when the oil change interval is increased.

Wear, oil condition and contamination of all samples are acceptable level and some cases show the relationship of wear and oil conditions or contaminations.

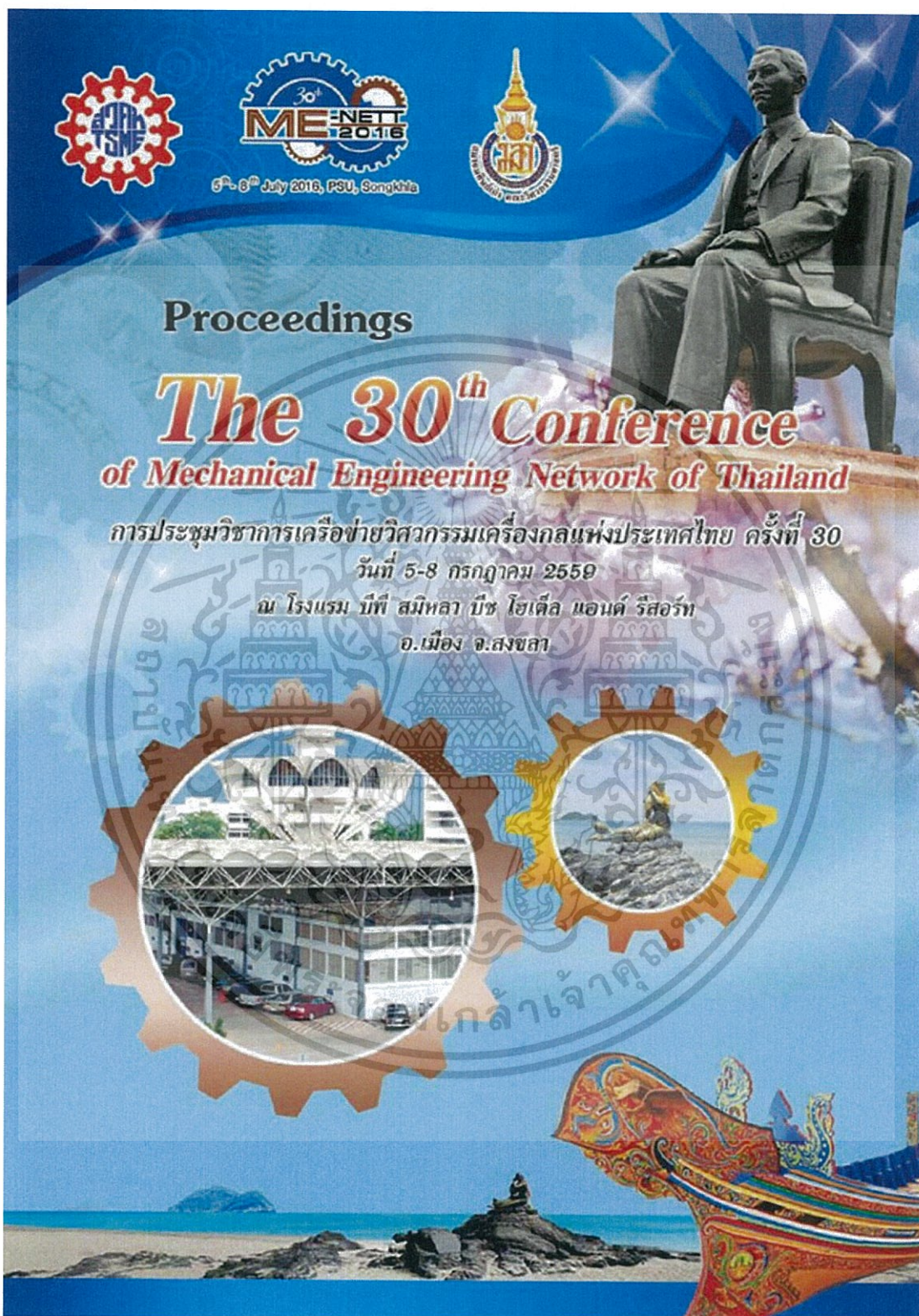
6. ACKNOWLEDGEMENT

The authors gratefully acknowledge FOCUSLAB Ltd. laboratories for oils analysis support.

AEC024

8. REFERENCES

- [1] Designation: D6595 - 00 (Reapproved 2011), Test Method for Determination of Wear Metals and Contaminants in Used Lubricating Oils or Used Hydraulic Fluids by Rotating Disc Electrode Atomic Emission Spectrometry, ASTM INTERNATIONAL
- [2] Designation: 71 Section 1/97, Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids, ASTM INTERNATIONAL
- [3] Designation: D6514 - 03 (Reapproved 2014), Standard Test Method for High Temperature Universal Oxidation Test for Turbine Oils, ASTM INTERNATIONAL
- [4] Designation: D4739 - 11, Standard Test Method for Base Number Determination by Potentiometric Hydrochloric Acid Titration, ASTM INTERNATIONAL
- [5] Designation: D3828 - 12a, Standard Test Methods for Flash Point by Small Scale Closed Cup Tester, ASTM INTERNATIONAL
- [6] Designation: D7844 - 12, Standard Test Method for Condition Monitoring of Soot in In-Service Lubricants by Trend Analysis using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry, ASTM INTERNATIONAL
- [7] H. KALELI, E. YILDIRIM. Determination of Oil Drain Period in Naval Ship Diesel Engine. *Tribology in Industry*, Volume 30, No. 3&4, 2008, pp. 21-30
- [8] Paul Michael, Andrew Bergesen, Brian Blazel, Aaron Kimball, and Thomas S. Wanke. Atomic Force Microscopy of Geroler Motor Wear Debris Ferrograms. *Journal of ASTM International*, Vol. 6, No. 1, paper ID JAI101628
- [9] Al-Osaimy A. S., Elhabib O. A. and Ali W.Y. Inspecting Metallic Wear Particles Contaminating Lubricating Automotive Engine Oils. VOL.2 NO.3. October 2013. ISSN 2165-8277
- [10] Marián KUČERA - Michaela HNILICOVÁ - Zdeněk ALEŠ. INSPECTION OF WEAR PARTICLES CONTAMINATING USED ENGINE OILS. *ACTA FACULTATIS TECHNICAЕ*, XIX, 2014 (2): 39-47
- [11] James A. Addison, William M. Needelman. DIESEL ENGINE LUBRICANT CONTAMINATION AND WEAR. Pall Corporation 30 Sea Cliff Avenue Glen Cove, NY 11542
- [12] Syed Q. A. Rizvi, Ph.D. A Comprehensive Review of Lubricant Chemistry Technology Selection and Design. "ASTM stock number: MNL59". ISBN 978-0-8031-7000-1. Printed in the U.S.A.
- [13] Simon C. Tung and George E. Totten, Editors. *Automotive Lubricants and Testing*. ASTM Stock Number: MNL62. U.S.A.
- [14] George E. Totten, Editor. Section Editors, Steven R. Westbrook, Rajesh J. Shah. *Fuels and lubricants handbook: Technology, Properties, Performance and Testing*
- [15] R. A. Kishore Nadkarni. *Guide to ASTM Test Methods for the Analysis of Petroleum Products and Lubricants 2nd Edition*. ASTM Stock No. MNL44-2nd. U.S.A.
- [16] Salvatore J. Rand, Editor. *Significance of Tests for Petroleum Products 8th Edition*. ASTM Stock Number MNL1-8TH. U.S.A.
- [17] R. A. Kishore Nadkarni. *Spectroscopic Analysis of Petroleum Products and Lubricants*. ASTM Stock Number: MONO9. U.S.A.
- [18] Thanant Sirisithichote. *Wear debris analysis-focus lab*. www.focuslab.co.th
- [19] Om Prakash Sondhiya, Amit Kumar Gupta. *Wear Debris Analysis of Automotive Engine Lubricating Oil Using By Ferrography*. Volume 2, Issue 5, November 2012, ISSN: 2277-3754
- [20] D A Green and R Lewis. The effects of soot-contaminated engine oil on wear and friction a review. DOI:10.1243/09544070JAUTO468. *Proc. IMechE Vol. 222 Part D: J. Automobile Engineering*.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ลักษณะการสึกหรอของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์ E20 E85 และน้ำมันหล่อลื่นที่ ใช้งานแล้ว

Characterization of E20 E85 Engine Wear and Lubricating Used Oil

พลเอก บุญนิยม^{1*}, จินดา เจริญพรพณิชย์¹ และ ปรีชา การินทร์²

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

² วิทยาลัยนานาชาติ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

*ติดต่อ: อีเมล polake.jmitt@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 088-0805535

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว เพื่อวิเคราะห์สภาพการสึกหรอของเครื่องยนต์, การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นและสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่น โดยรูปร่างของเศษโลหะในน้ำมันหล่อลื่นวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายของชั้นเศษโลหะ(Ferrogaphy) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) ซึ่งในการทดสอบจะใช้เครื่องยนต์ 4 กระบอกสูบ 16 วาล์ว I-VTEC ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์ E20 และ E85 จะใช้น้ำมันหล่อลื่นมาตรฐาน 0W20 โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ชนิด คือ การทดสอบแบบที่หนึ่งเป็นการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นจากรถที่ใช้งานจริง ทุก ๆ ระยะทาง 1,000 กม. ถึง 10,000 กม. ในปริมาณ 80-100 มล. และการทดสอบแบบที่สองคือ การทดสอบด้านไทรโบโลยีโดยการใช้เครื่องมือไทรโบส ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อวัดคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอด้วยการปนเปื้อนของเขม่า(soot) จำลองโดยใช้คาร์บอนแบล็ค(carbon black) และน้ำมันเชื้อเพลิง(fuel)

ผลการทดลองพบว่าปริมาณของโลหะที่สึกหรอมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่น แต่ในทางตรงกันข้ามค่าความหนืด(viscosity) และค่าความเป็นด่างของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว(TBN) จะมีค่าลดลง นอกจากนี้ในการทดสอบไทรโบส โดยภาพรวมของคาร์บอนแบล็คและน้ำมันเชื้อเพลิงในน้ำมันหล่อลื่น เพื่อวิเคราะห์การสึกหรอของพื้นผิวลูกบอลเหล็ก พบว่าการสึกหรอของพื้นผิวลูกบอลเหล็กในน้ำมันหล่อลื่นที่มีการปนเปื้อนของคาร์บอนแบล็คและน้ำมันเชื้อเพลิง มีค่าการสึกหรอมากกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่มีการปนเปื้อน(new oil)

คำหลัก: น้ำมันหล่อลื่น, การสึกหรอ, เครื่องยนต์, ไทรโบโลยี, การทดสอบไทรโบส

Abstract

This research is studied to analyze the physical and chemical properties of the lubricant used to analyze the wear of engine, deterioration of the lubricant oil and contamination in the lubricating oil. The shapes of metals wear debris is investigated by ferrogaphy and scanning on electron microscope. The engine is a 4-cylinder 16 valve I-VTEC used E20 and E85 fuel which has the viscosity grade SAE 0W20 used to testing and divided into two types; the first type is the samples of lubricating oil used from the vehicle actually at distance range of 1,000 to 10,000 km with quantity oil 80-100 ml.



The second type is the tribology behavior which is studied by four ball test. It is used to measure the anti wear when mixing the fuel and carbon black to analyze wear surface of the steel ball.

The results showed that the quantities of metals wear has increased with in the intervals of the lubricating oil. In contrast, the viscosity value and total base number (TBN) are decreased. In addition, the four ball test showed that the wear in the surface of the steel ball in lubricating oil when mixing with fuel and carbon black wears more than the new oil.

Keywords: lubricant, wear, engine, tribology, four ball test

1. บทนำ

ในเครื่องยนต์แก๊สโซลีนพลังงานที่ได้จากการ กระบวนการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์คิดเป็น 100% สูญเสียพลังงานไปกับก๊าซเสีย(Exhaust) 33% ถ่ายเท ความร้อน(Cooling) 29% พลังงานกล(Mechanical power) 38% พลังงานกลที่ได้ที่ได้นั้นสูญเสียไปกับการ เสียคานในส่วนต่างๆถึง 33% เฉพาะภายในเครื่องยนต์ มีการเสียดทานถึง 11.5% แต่โดยทั่วไปในการเสียดทาน ภายในเครื่องยนต์ส่วนใหญ่เป็นการเสียดทานจาก ส่วนประกอบของลูกสูบคิดเป็น 40-60% ของการเสียด ทานภายในเครื่องยนต์ [7]

ขอบเขตของครีทรลลอสันนั้นแบ่งออกเป็น 3 ขอบเขตการลลอสัน ชนิดที่หนึ่งขอบเขตการลลอสันแบบ บาวนารี(boundary) ขอบเขตแบบนี้ชิ้นงานจะถูกปกคลุมด้วยชั้นผิวหน้าของชิ้นส่วนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี หรือดูดกลืนอะตอม(Absorbed) ชิ้นส่วนเหล่านี้จะถูก ฉีดตัวออกไปก่อนถึงเนื้อชิ้นงานเพราะมีค่าความ ต้านทานความเค้นเฉือนที่ต่ำ ชิ้นส่วนเหล่านี้ช่วยให้ ปกป้องชิ้นงานจากการสึกหรอได้ ชนิดที่สองแบบกึ่ง สมบูรณ์(Mixed) ลักษณะแบบนี้จะเกิดการสลับ เปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างสัมประสิทธิ์การเสียดทานใน ชิ้นงานคู่สัมผัสกับสัมประสิทธิ์การเสียดทานในชั้นของสาร ลลอสัน ชนิดที่สามขอบเขตการลลอสันแบบสมบูรณ์ (full-film) ลักษณะแบบนี้มีน้ำมันลลอสันจะแยกชั้นของ ชิ้นงานออกจากกันอย่างชัดเจนมีทั้งการลลอสันแบบ อีลาสโตไฮโดรไดนามิก(elastrohydrodynamic) และ การลลอสันแบบไฮโดรไดนามิก(hydrodynamic) [6-7]

พบว่าช่วงที่เริ่มสตาร์ทและดับเครื่องยนต์และปัจจัยของ อุณหภูมิที่สูงมีผลทำให้ฟิล์มน้ำมันลลอสันบางลงจนอาจ นำไปสู่การขาดการลลอสันมีพบในขอบเขตการลลอสัน แบบบาวนารี [2]

กลไกการสึกหรอภายในเครื่องยนต์มีกลไกแบบยึดติด (adhesive wear) เกิดจากพื้นผิว asperities อีกขาด ออกไปในขณะชิ้นงานเคลื่อนที่ กลไกแบบ(abrasive wear) เกิดจากเนื้อชิ้นงานถูกลูสสารที่มีความแข็งสูง ถูจุด ชัดชิ้นงาน กลไกการสึกหรอแบบล้าตัว(fatigue wear) เกิดจากชิ้นงานมีการรับภาระเป็นวงรอบ(cycles) และ เกิดรอยแตกและกลไกแบบกัดกร่อน(corrosive wear) เกิดจากชิ้นงานที่มีการขีดและเกิดผลพวงจากปฏิกิริยา เคมี[9-10] ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยเฟอโรกราฟที่หา ให้ทราบถึงลักษณะกลไกการสึกหรอจากเศษโลหะที่สึก หรือที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันลลอสัน [8-9]

การวิเคราะห์น้ำมันที่ใช้แล้วมี 3 ส่วนหลักในการ วิเคราะห์ ส่วนที่หนึ่งการวิเคราะห์ถึงชนิดธาตุของการสึก หรอ(wear condition) เพื่อวิเคราะห์หาแหล่งที่มา ปริมาณของเศษโลหะสึกหรอว่ามี การสึกหรอในปริมาณที่ ปกติหรือผิดปกติและรูปร่างหน้าตาของเศษโลหะสึกหรอ ส่วนที่สองการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพของ น้ำมันลลอสัน(oil condition) ในรูปของคุณสมบัติที่ สำคัญของน้ำมันลลอสันเช่น ค่าความหนืด ค่าออกซิเดชัน ค่าไนเตรชัน ค่าความเป็นด่างในน้ำมันลลอสัน ส่วนที่สาม การปนเปื้อน(contamination) สามารถปนเปื้อนได้ทั้ง ทางภายในและภายนอกเครื่องยนต์ ตัวอย่างการปนเปื้อน เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง เหม่า ผุ่นละออง น้ำ เป็นสาเหตุหนึ่ง



ที่สำคัญที่ส่งผลต่อการสึกหรอภายในเครื่องยนต์และการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น [2] [4-5]

ดังนั้นการศึกษาและวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือการทดสอบและการตีความหมายของการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านและไม่ผ่านการใช้งานจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพราะจะทำให้ทราบถึงปัญหาและแหล่งที่มาของปัญหา

2. วิธีศู อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 ข้อมูลเครื่องยนต์ น้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันเชื้อเพลิง

งานวิจัยนี้ทำการเก็บข้อมูลจากรถยนต์ 1 คัน ก่อนทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นได้ทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น เปลี่ยนไส้กรองอากาศและไส้กรองน้ำมันหล่อลื่น กำหนดให้รถคันนี้รอบแรกเติมน้ำมันเชื้อเพลิงเฉพาะ E20 จนถึงระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นโดยเฉลี่ย 10,000 กม. และทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น เปลี่ยนไส้กรองอากาศและไส้กรองน้ำมันเครื่อง รอบสองเปลี่ยนน้ำมันเชื้อเพลิงจาก E20 เป็น E85 ในการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นจะทำการเก็บตัวอย่างเมื่อทำการเดินเครื่องยนต์ไปแล้ว 10 นาที ใช้ปืนสุญญากาศดูดเข้ากับสายดูดน้ำมัน เสียบสายดูดน้ำมันหล่อลื่นเข้าทางช่องวัดระดับน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ เก็บตัวอย่างปริมาณ 80-100 มล. ต่อระยะทาง 1,000 กม. รายละเอียดเครื่องยนต์ น้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันเชื้อเพลิง แสดงข้อมูลตามตารางที่ 1 ด้านล่าง

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลเครื่องยนต์ น้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ

Engine type	4-cylinder, 16-valve, SOHC HVTEC
Displacement (CC)	1497
Bore x Stroke	73 mm x 89.4 mm
Compression Ratio	10.3:1
Transmission	Automatic
Engine oil	SAE 0W20
Fuel	E20,E85

2.2 การวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่น

การวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้วทำการวิเคราะห์ดูจากการเปลี่ยนแปลงไปของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้วเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งาน(new oil) การวิเคราะห์น้ำมันที่ใช้งานแล้วมี 3 ส่วนหลักในการวิเคราะห์ ส่วนที่หนึ่งการวิเคราะห์ถึงชนิดธาตุของการสึกหรอ ส่วนที่สองการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น ส่วนที่สามการปนเปื้อน แสดงรายละเอียดตามตารางที่ 2 ด้านล่าง

ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีและมาตรฐานในการตรวจสอบ

Physical/Chemical properties	Testing standard	Unit	
Wear condition	Iron	ASTM D6595	PPM
	Chromium		
	Lead		
	Copper		
	Tin		
	Aluminum		
Oil condition	Shape	Ferrogaphy	
	Viscosity	ASTM D445	cSt
Contamination	TBN	ASTM D-4739	mg/KOH/g
	Fuel	E2412M	% Wt
	Soot	E2412M	% Wt

*TBN - ค่าความเป็นด่างของน้ำมันหล่อลื่น(Total Base Number)

2.3 คุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอ

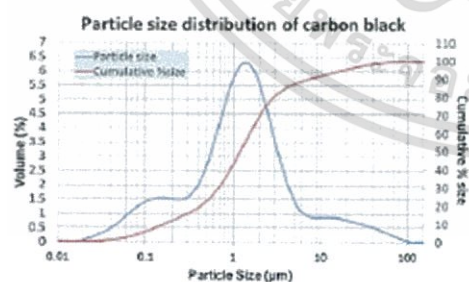
การทดสอบด้วยไฟร์บอลเป็นการทดสอบเพื่อวัดคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอ(anti wear) และภาวะสูงสุดที่รับได้(extreme pressure) ของน้ำมันหล่อลื่น ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบแบบวัดคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอของน้ำมันหล่อลื่นโดยนำลูกบอลเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. สามลูกแช่ลงไปในน้ำมันหล่อลื่นจนท่วมจับยึดแน่นไม่มีการเคลื่อนที่ กดลูกบอลเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. อีกลูกลงบนช่องว่างระหว่างลูกบอลสามลูกจะเกิดจุดผิวสัมผัสทั้งสามลูกด้วยแรง 394 นิวตัน กดด้วยความเร็ว 1,200 รอบ/นาที เป็นเวลา 60 นาที



เปรียบเทียบคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอโดยวิเคราะห์จากเส้นผ่านศูนย์กลางของแผลการสึกหรอ (scar) บนผิวลูกบอลเหล็กทั้งสามลูกด้านล่างที่เกิดจากการเสียดสีของลูกบอล ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีด้วยกัน 4 ตัวอย่าง ตัวอย่างที่หนึ่งเป็นตัวอย่างของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งาน ตัวอย่างที่สอง น้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง E20 1 %Wt. ตัวอย่างที่สามน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง E85 1 %Wt. ตัวอย่างที่สี่ น้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งานปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง E85 1 %Wt. และคาร์บอนแบล็ค 1 %Wt.

2.4 เหม่า

เหม่าเกิดมาจากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะส่งผลทำให้มีปริมาณเหม่าสูงผิดปกติ เหม่าเข้ามาปนเปื้อนในอ่างน้ำมันหล่อลื่นได้โดยวิธีไหลขยับซึ่งจะส่งผลให้น้ำมันเสื่อมคุณภาพอย่างรวดเร็วทำให้เกิดคราบสกปรกตกตะกอนในระบบ เกิดการอุดตันในไส้กรองและการสึกหรอของชิ้นส่วนต่างๆในเครื่องยนต์ ในเหม่าประกอบไปด้วย คาร์บอน 90 % ออกซิเจน 4 % ไฮโดรเจน 3 % และธาตุอื่นๆ 3 % ในงานวิจัยนี้จะจำลองการปนเปื้อนเหม่าโดยใช้คาร์บอนแบล็ค เนื่องจากอนุภาคของคาร์บอนแบล็คมีขนาดและรูปร่างที่มีความคล้ายคลึงกับอนุภาคของเหม่า[1] คาร์บอนแบล็คมีขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 กราฟแสดงขนาด(µm) และการกระจายตัวของอนุภาคของคาร์บอนแบล็ค(volume%)

“รูปที่ 1” กราฟแสดงขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของคาร์บอนแบล็คด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนแสงในแนวแกนนอนคือ ขนาดของคาร์บอนแบล็ค แนวแกนตั้งด้านซ้ายคือ ปริมาณของขนาดที่ตรวจพบ แนวแกนตั้งด้านขวา คือ ความถี่สะสมของขนาด ขนาดของคาร์บอนแบล็คมีขนาดโดยประมาณตั้งแต่ 0.03-108 ไมโครเมตร สารปรุงแต่งขยาในน้ำมันหล่อลื่นจะเสื่อมสภาพเร็วขึ้นถ้ามีการปนเปื้อนเหม่าที่จับตัวเป็นก้อนขนาดมากกว่า 1 ไมโครเมตร[1-2] และจะส่งผลกระทบต่อสึกหรอมากขึ้น จะเห็นได้ว่าขนาดของคาร์บอนแบล็คมีขนาดมากกว่า 1 ไมโครเมตร โดยประมาณมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์

2.5 รูปร่างของเศษโลหะและพื้นผิว

การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายของชิ้นเศษโลหะ (Fetography) เป็นการตรวจเช็คน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยใช้หลักการผ่านตัวอย่างน้ำมันไปบนแผ่นสไลด์ที่มีแม่เหล็กแรงสูงวางอยู่ ซึ่งแม่เหล็กจะดูดเหล็กตามขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็ก ชิ้นเศษโลหะขนาดใหญ่จะอยู่บริเวณด้านบนของสไลด์ ชิ้นเศษโลหะขนาดเล็กจะอยู่ในบริเวณด้านล่างของสไลด์ การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายของชิ้นเศษโลหะทำให้ทราบถึงลักษณะอนุภาคเศษโลหะสึกหรอ กลไกรูปแบบการสึกหรอ และวิเคราะห์แยกแยะชนิดของสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อน การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) ใช้หลักการกราดยิงลำอิเล็กตรอนบนผิวตัวอย่าง บริเวณที่ถูกลำอิเล็กตรอนนี้จะเกิดสัญญาณ ซึ่งสัญญาณจะถูกแปลงเป็นภาพบนจอรับภาพ ในงานวิจัยนี้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดวิเคราะห์ภาพถ่ายเศษโลหะในไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นและแผลการสึกหรอ(Scar) บนผิวลูกบอลเหล็ก

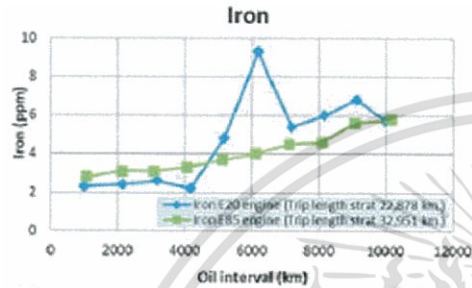
3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่น

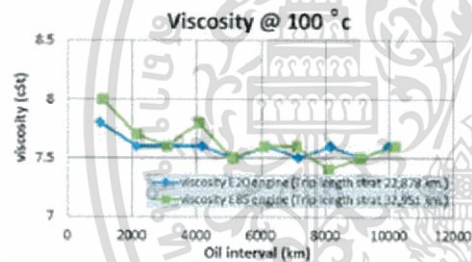
น้ำมันหล่อลื่นหลังจากใช้งานแล้วมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบ



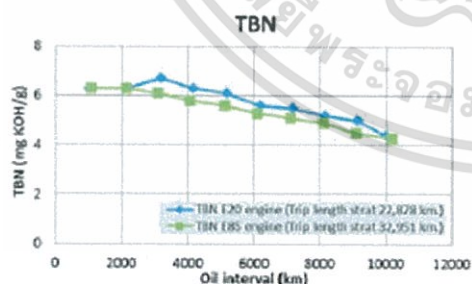
น้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ได้ใช้งาน เครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบเติม
น้ำมันเชื้อเพลิง E20 ในรอบแรกและเปลี่ยนมาเติมน้ำมัน
เชื้อเพลิง E85 ในรอบที่สอง น้ำมันหล่อลื่นทั้งคู่มิมีการ
เปลี่ยนแปลงทางคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีตามอายุ
การใช้งานน้ำมันหล่อลื่นตามรูปที่ 2-6



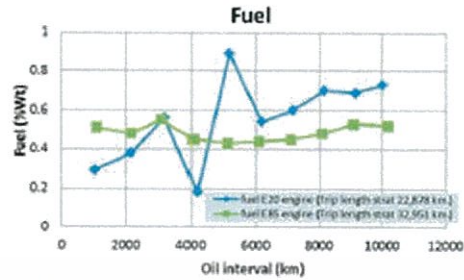
รูปที่ 2 กราฟแสดงปริมาณของเหล็ก(ppm) ในน้ำมัน
หล่อลื่นและอายุของน้ำมันหล่อลื่น(km)



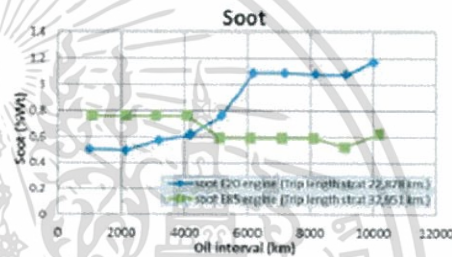
รูปที่ 3 กราฟแสดงความหนืด(cSt) ในน้ำมันหล่อลื่น
และอายุของน้ำมันหล่อลื่น(km)



รูปที่ 4 กราฟแสดงค่าความเป็นด่าง(mgKOH/g) ในน้ำมัน
หล่อลื่นและอายุของน้ำมันหล่อลื่น(km)



รูปที่ 5 กราฟแสดงค่าการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิง
(%wt) ในน้ำมันหล่อลื่นและอายุของน้ำมัน
หล่อลื่น(km)



รูปที่ 6 กราฟแสดงค่าการปนเปื้อนของเขม่า(%wt) ใน
น้ำมันหล่อลื่นและอายุของน้ำมันหล่อลื่น(km)

“รูปที่ 2” กราฟแสดงปริมาณของเหล็ก(ppm) หรือ
ส่วนในล้านส่วนในน้ำมันหล่อลื่นและอายุน้ำมันหล่อลื่น
(km) การตรวจวิเคราะห์ธาตุด้วยสเปกโตรมิเตอร์สามารถ
ตรวจวัดธาตุต่างๆได้ตามความยาวคลื่น เช่น เหล็ก
โครเมียม ตะกั่ว ฯลฯ แต่โดยทั่วไปในการเสียดทาน
ภายในเครื่องยนต์ส่วนใหญ่เป็นการเสียดทานจาก
ส่วนประกอบของลูกสูบ เช่น แหวนลูกสูบสัมผัสกับผนัง
กระบอกสูบซึ่งจะมีการสึกหรอมากตอนช่วงจังหวะจุด
ระเบิดของเครื่องยนต์เพราะว่าเป็นช่วงที่ฟิล์มน้ำมันบาง
สุด ซึ่งชิ้นส่วนของแหวนลูกสูบ กระบอกสูบ ลูกสูบ มีธาตุ
องค์ประกอบหลักเป็นเหล็ก ในกราฟจะเห็นได้ว่าช่วงอายุ
น้ำมันหล่อลื่น 1,000-4,000 กม. เครื่องยนต์ที่เติมน้ำมัน
เชื้อเพลิง E85 มีปริมาณการสึกหรอของเหล็กมากกว่า
ตอนที่เครื่องยนต์ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 เนื่องจาก
น้ำมันเชื้อเพลิงมีสัดส่วนผสมเอทานอลที่มากกว่าจะ



ทำลายชั้นฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นมากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนผสมเอธานอลที่น้อยเพราะเอธานอลเป็นตัวทำละลายที่ดีและในการเผาไหม้เอธานอลก่อให้เกิดกรดอะซิติกมีผลให้เกิดการกัดกร่อน[10] แต่หลังจากช่วงอายุน้ำมัน 4,000 กม. เครื่องยนต์ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 มีปริมาณการสึกหรอของเหล็กมากกว่าเครื่องยนต์ตอนที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85 เนื่องจากมีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงและเขม่ามากกว่าเพราะน้ำมันเชื้อเพลิงจะไปทำลายชั้นฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นและเขม่าจะไปปิดกั้นการเข้าทำหน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่นทำให้ชิ้นงานสัมผัสกันโดยตรงและเขม่ายังเข้าไปอุดตันชิ้นงานอีกด้วย

“รูปที่ 3” กราฟแสดงความหนืดมีหน่วยเป็นเซนติโลก (cSt) และอายุของน้ำมันหล่อลื่น(km) ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งในการวิเคราะห์เพราะอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยก็มีผลต่อฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น ในกราฟจะเห็นได้ว่ามีความหนืดลดลงทั้งคู่ตามอายุน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจมาจากการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง

“รูปที่ 4” กราฟแสดงค่าความเป็นด่าง(mgKOH/g) หรือค่าเป็นด่างทั้งหมดในน้ำมันหล่อลื่นและอายุของน้ำมันหล่อลื่น(km) ในกราฟจะเห็นได้ว่าค่าความเป็นด่างในเครื่องยนต์ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85 มีค่าเป็นด่างต่ำกว่าตอนที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนผสมเอธานอลมากกว่า ซึ่งเมื่อเกิดกระบวนการเผาไหม้จะก่อให้เกิดกรดแล้วรั่วเล็ดรอดผ่านทางแหวนลูกสูบไปสู่อ่างน้ำมันหล่อลื่น กรดเหล่านี้ส่งผลทำให้เกิดการกัดกร่อน เกิดสนิม เกิดตะกอน ทำให้ค่าความเป็นด่างลดลง

“รูปที่ 5” กราฟแสดงค่าการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิง(%Wt) ในน้ำมันหล่อลื่นและอายุของน้ำมันหล่อลื่น(km) ในกราฟจะเห็นได้ว่าเครื่องยนต์ตอนที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 มีการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นทั้งคู่ตามอายุน้ำมันหล่อลื่นที่เพิ่มขึ้น แต่เครื่องยนต์ตอนที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 หลังจากช่วงอายุน้ำมัน 4,000 กม. มีอัตราการปนเปื้อน

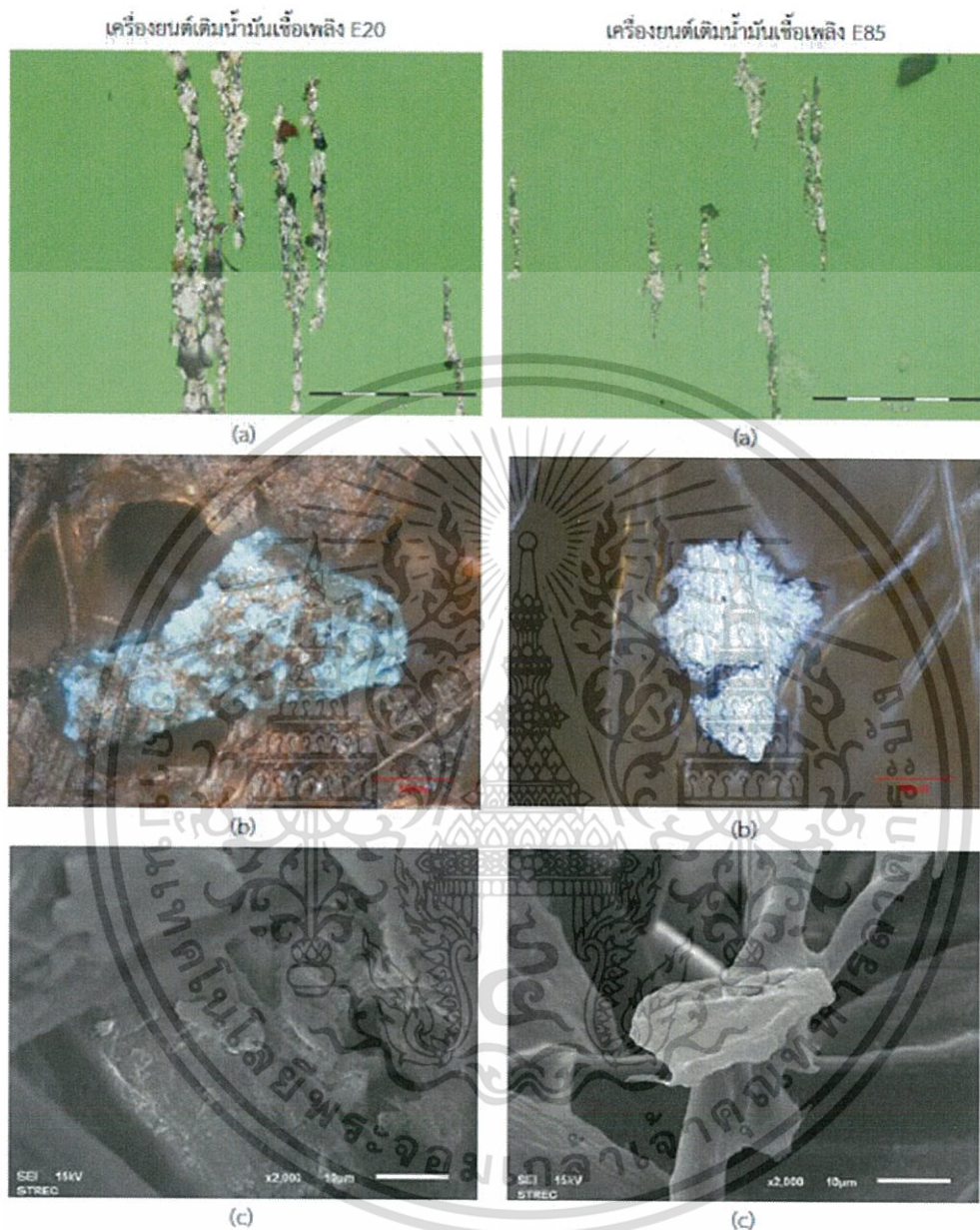
น้ำมันเชื้อเพลิงที่สูงมากกว่าตอนที่เครื่องยนต์ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85 การปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงส่งผลต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นลดลง

“รูปที่ 6” กราฟแสดงค่าการปนเปื้อนของเขม่า(% Wt) ในน้ำมันหล่อลื่นและอายุของน้ำมันหล่อลื่น(km) ในกราฟจะเห็นได้ว่าเครื่องยนต์ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 มีอัตราการมีการปนเปื้อนเขม่าสูงมากกว่าตอนที่เครื่องยนต์ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85 เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนผสมเอธานอลที่น้อยกว่าจะปล่อยก๊าซไอเสียออกมามากกว่า ซึ่งทำให้โอกาสการปนเปื้อนของเขม่ามีมากขึ้นอีกด้วย

3.2 ภาพถ่ายของชิ้นเสขโลหะ

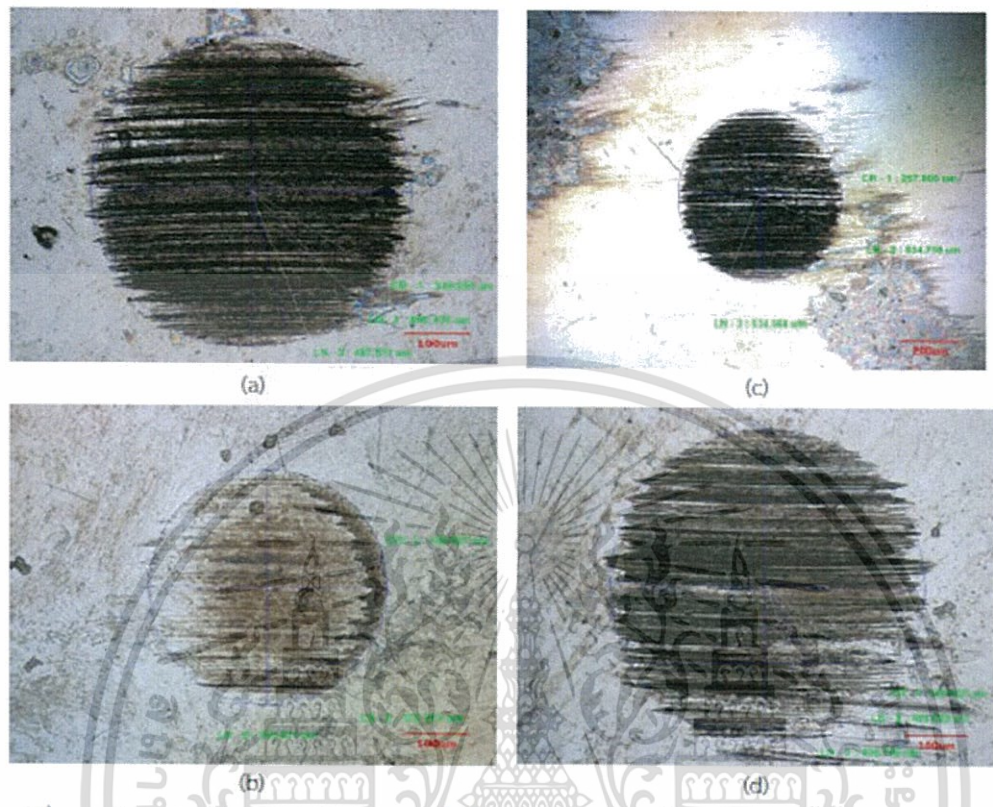
เครื่องยนต์ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 จะถูกวิเคราะห์ถึงลักษณะ รูปร่าง และขนาดของเสขโลหะการสึกหรอจากน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยใช้ภาพถ่ายเพื่อวิเคราะห์และได้กรองที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดในการวิเคราะห์ตามรูปที่ 7

“รูปที่ 7” ภาพถ่ายเสขโลหะสึกหรอที่ระยะ 10,000 กม. ของเครื่องยนต์เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 ภาพ a) ภาพถ่ายเพื่อวิเคราะห์ชิ้นเสขโลหะการสึกหรอแบบขีดแบบปกติขนาด 2-3 ไมโครเมตร โดยเฉลี่ย 55% การสึกหรอแบบล้าตัวของแข็งขนาด 5-20 ไมโครเมตร โดยเฉลี่ย 15% และมีการสึกหรอแบบติดเลื่อนขนาด 40 ไมโครเมตร โดยเฉลี่ย 5% ภาพ b) ภาพถ่ายได้กรองน้ำมันเครื่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ลักษณะของเสขโลหะการสึกหรอแบบล้นหรือแผ่นขนาดใหญ่จากกลไกการล้าตัวมีขนาดโดยประมาณ 230 ไมโครเมตร ผิวหน้าไม่เรียบซึ่งเกิดจากการรับภาระเป็นวงรอบและมีคราบสีน้ำตาลปกคลุมเกิดจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นและได้รับความร้อน ตรงคราบสีน้ำตาลมีเม็ดกลมสีขาวติดอยู่อาจจะเป็นฝุ่นละออง อนุภาคสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนมาจากสิ่งแวดล้อมภาพ c) ภาพถ่ายได้กรองน้ำมันเครื่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

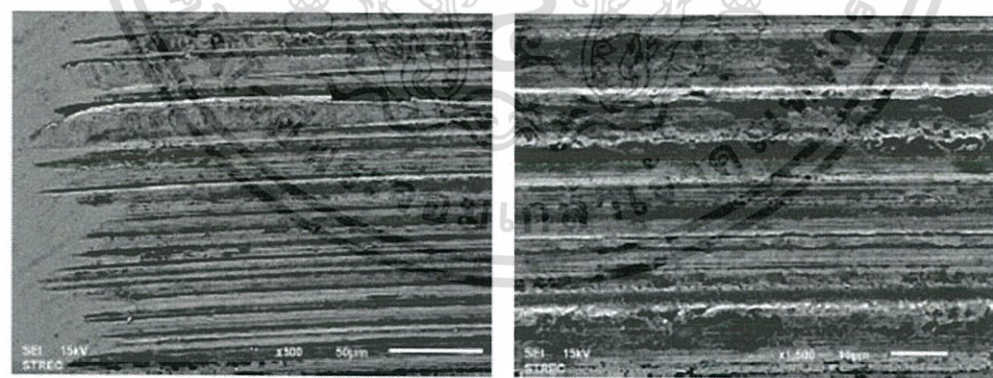


รูปที่ 7 ภาพถ่ายเศษโลหะสีกรอที่ระยะ 10,000 กม.ของเครื่องยนต์เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 E85 a) ภาพถ่ายเพอร์ริกราฟฟิที่กำลังขยาย 500X b) ภาพถ่ายได้กรองน้ำมันเครื่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 500X c) ภาพถ่ายได้กรองน้ำมันเครื่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 2,000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

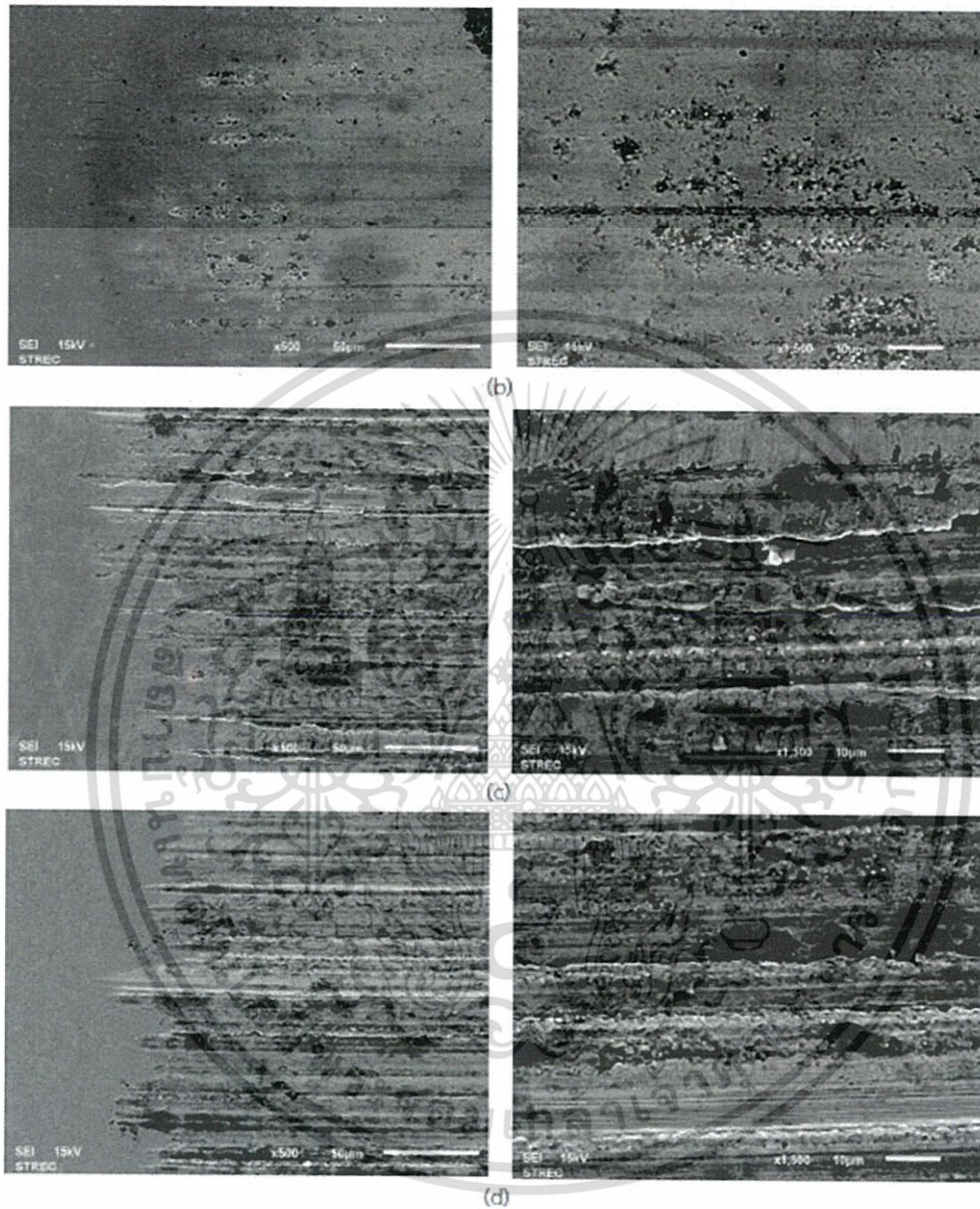


รูปที่ 8 ภาพถ่ายแผลการสึกหรอ (scar) บนลูกบอลเหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบไขว้แสง a) new oil ที่กำลังขยาย 200X
b) New oil+E20 ที่กำลังขยาย 200X c) New oil+E85 ที่ กำลังขยาย 100X d) New oil+E85+คาร์บอนแบล็ค
ที่ กำลังขยาย 200X



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 ภาพถ่ายแผลการสึกหรอ (scar) บนลูกบอลเหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500X 1,500X ตามลำดับ a) New oil b) New oil+E20 c) New oil+E85 d) New oil+E85+คาร์บอนแบล็ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ลักษณะของเศษโลหะการสึกหรอแบบก้อนหรือแผ่นขนาดใหญ่จากกลไกการล้าตัวมีขนาดโดยประมาณ 15 ไมโครเมตร เกิดจากการรับภาระเป็นวงรอบและมีคราบเขม่าที่ติดตามแกนโยได้กรองโดยหัว

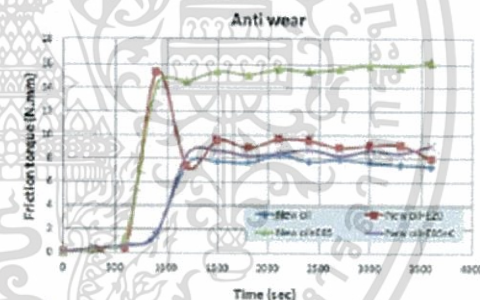
ภาพถ่ายเศษโลหะสึกหรอที่ระยะ 10,000 กม.ของเครื่องยนต์เดิมน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ภาพ a) ภาพถ่ายเพอร์โรกราฟที่มีเศษโลหะการสึกหรอแบบขี้ดแบบปกติขนาด 2-3 ไมโครเมตร โดยเฉลี่ย 80% การสึกหรอแบบล้าตัวของแบร็งขนาด 5-20 ไมโครเมตร โดยเฉลี่ย 10% ภาพ b) ภาพถ่ายไส้กรองน้ำมันเครื่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ลักษณะของเศษโลหะการสึกหรอแบบเส้นใยมีขนาดโดยประมาณ 150 ไมโครเมตร ลักษณะของผิวหน้ามีลักษณะของเส้นตรงลากผ่านผิวหน้าโดยทั่วซึ่งเกิดจากสภาพของผิวชิ้นงานเส้นใยอย่างรุนแรงภายใต้ภาระสูงและความเร็วสูง ภาพ c) ภาพถ่ายไส้กรองน้ำมันเครื่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ลักษณะของเศษโลหะการสึกหรอจากกลไกการล้าตัวมีขนาดโดยประมาณ 29 ไมโครเมตร

3.3 การทดสอบด้วยไฟรบอล

การทดสอบด้วยไฟรบอลเป็นการทดสอบเพื่อวัดคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอของน้ำมันหล่อลื่นวิเคราะห์จากเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการสึกหรอ การเสียดสีของลูกบอลและวิเคราะห์ร่วมกับภาพถ่ายของผลการสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดตามรูปที่ 8-11

“รูปที่ 8-9” ภาพถ่ายผลการสึกหรอ(Scar) บนลูกบอลเหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่มีฟังก์ชันวัดเส้นผ่านศูนย์กลางพร้อมกับความหนาของผลการสึกหรอและกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดตามลำดับ ภาพ a) new oil มีเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการสึกหรอบนลูกบอลเหล็กทั้งสามลูกเฉลี่ย 494 ไมโครเมตร ความหนาของผิวเฉลี่ย 0.760 ไมโครเมตร และมวลที่หายไปของลูกบอลเหล็กเฉลี่ยทั้งสามลูกที่ซึ่งก่อนและหลังทดสอบมีค่า 0.3 มิลลิกรัม ภาพ b) ปนเบือน้ำมัน

เชื้อเพลิง E20 ใน new oil มีเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการสึกหรอเฉลี่ย 366 ไมโครเมตร ความหนาของผิวเฉลี่ย 0.440 ไมโครเมตร และมวลที่หายไปเฉลี่ยมีค่า 0.4 มิลลิกรัม ภาพ c) ปนเบือน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ใน new oil มีเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการสึกหรอเฉลี่ย 529 ไมโครเมตร ความหนาของผิวเฉลี่ย 0.800 ไมโครเมตร และมวลที่หายไปเฉลี่ยมีค่า 0.8 มิลลิกรัม ภาพ d) ปนเบือน้ำมันเชื้อเพลิง E85 และคาร์บอนแบล็คใน new oil มีเส้นผ่านศูนย์กลางของผลการสึกหรอเฉลี่ย 506 ไมโครเมตร ความหนาของผิวเฉลี่ย 0.970 ไมโครเมตร และมวลที่หายไปเฉลี่ยมีค่า 0.5 มิลลิกรัม จะเห็นได้ว่าลูกบอลเหล็กมีการสึกหรอทั้งแบบยึดติด ขูดขีด และการล้าตัว การสึกหรอแบบล้าตัวเห็นได้อย่างชัดเจนในผลการทดสอบที่มีการปนเบือน้ำมันเชื้อเพลิง E20 ใน new oil มีลักษณะเป็นหลุม เพราะบริเวณนี้มีการรับภาระเป็นวงรอบ

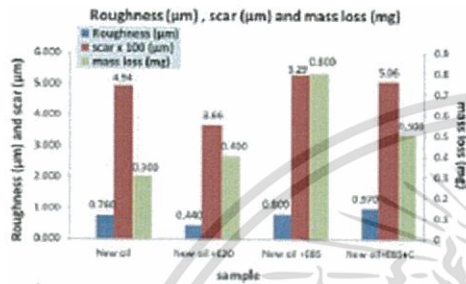


รูปที่ 10 กราฟแสดงค่า friction torque(N.mm) และเวลาที่ทำการทดสอบ(วินาที)

“รูปที่ 10” กราฟแสดงค่า friction torque (N.mm) และเวลาที่ทำการทดสอบ(วินาที) ในกราฟจะเห็นได้ว่า new oil มีค่า friction torque เฉลี่ย 5.48 N.mm การปนเบือน้ำมันเชื้อเพลิง E20 ใน new oil มีค่า friction torque เฉลี่ย 7.35 N.mm การปนเบือน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ใน new oil มีค่า friction torque เฉลี่ย 11.92 N.mm และการปนเบือน้ำมันเชื้อเพลิง E85และคาร์บอนแบล็ค ใน new oil มีค่า friction



torque เฉลี่ย 6.06 N.mm การปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ใน new oil มีค่า friction torque ที่สูงกว่า E20 ถึง 4.57 N.mm และสูงกว่าที่มีคาร์บอนแบ็คปนเปื้อน 5.86 N.mm ค่า friction torque ของ new oil มีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 11 กราฟแสดงค่าของเส้นผ่าศูนย์กลางแผลสึกหรอ (µm) ความหยาบของแผลการสึกหรอ (µm) มวลที่หายไป (mg) ของแต่ละตัวอย่างการทดสอบ

“รูปที่ 11” กราฟแสดงค่าของเส้นผ่าศูนย์กลางแผลสึกหรอ (ไมโครเมตร) ความหยาบของแผลการสึกหรอ (ไมโครเมตร) มวลที่หายไป (มิลลิกรัม) ของแต่ละตัวอย่างการทดสอบ ในกราฟเห็นได้ว่าการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิง E85 มีการสึกหรอมากกว่า E20 เนื่องเส้นผ่านศูนย์กลางแผลสึกหรอของบอลเหล็กของตัวอย่าง E85 มีขนาดใหญ่กว่า E20 163 ไมครอน ซึ่งค่า friction torque ของ E85 มากกว่า E20 เพราะน้ำมันหล่อลื่นที่ทำหน้าที่ในการปกป้องผิวสัมผัสกันของชิ้นงานมีความเสื่อมสภาพไปจึงทำให้ผิวชิ้นงานสัมผัสกันโดยตรง ทำให้เกิดการสึกหรอและความหยาบของผิวลูกบอลเหล็กที่สึกหรอของ E85 มีค่าความหยาบเกือบ 2 เท่าของผิวลูกบอลเหล็กที่สึกหรอของ E20

การจำลองการปนเปื้อนเขม่าโดยใช้คาร์บอนแบล็คที่ปนเปื้อนด้วยกับน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ใน new oil มีผลทำให้ค่าความหยาบของแผลการสึกหรอบนผิวลูกบอลเหล็กมีค่าความหยาบสูงมากกว่าตัวอย่างที่ปนเปื้อน

เฉพาะน้ำมันเชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียวอาจจะเป็นเพราะคาร์บอนแบล็คมีการเกาะตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ที่มีความสูงมากกว่าความหนาของฟิล์มน้ำมันทำให้เกิดการสึกหรอแบบขูดขีดได้และมันอาจจะเข้าไปปิดกั้นการเข้าไปทำงานของน้ำมันหล่อลื่นส่งผลให้ผิวชิ้นงานสัมผัสกันมากยิ่งขึ้น เส้นผ่านศูนย์กลางของแผลการสึกหรอของการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ด้วยกับคาร์บอนแบล็คและปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง E85 เพียงอย่างเดียวมีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน

4. สรุป

- ปริมาณของเศษโลหะเหล็กที่มีปริมาณมากขึ้นตามอายุของน้ำมันหล่อลื่นที่เพิ่มสูงขึ้นและปริมาณของเศษโลหะเหล็กมีความสัมพันธ์แปรตามกับการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงและเขม่า ยิ่งปนเปื้อนมากปริมาณของเศษโลหะเหล็กก็เพิ่มมากขึ้นด้วย
- เครื่องยนต์ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85 มีปริมาณการปนเปื้อนเขม่าน้อยกว่าตอนที่เครื่องยนต์ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20 แต่ค่าความเป็นด่างในน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E85 มีค่าต่ำกว่าเครื่องยนต์ตอนที่เติมน้ำมันเชื้อเพลิง E20
- เศษโลหะสึกหรอที่ตรวจพบโดยภาพถ่ายเฟอโรกราฟที่ส่วนใหญ่พบการสึกหรอแบบขีดถูแบบปกติมีขนาดโดยเฉลี่ย 2-3 ไมครอน
- การทดสอบไพรบอลล ตัวอย่างที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ใน new oil มีเส้นผ่านศูนย์กลางแผลการสึกหรอและค่า friction torque มากกว่าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง E20
- การทดสอบไพรบอลล ตัวอย่างที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ด้วยกับคาร์บอนแบล็ค ใน new oil มีความหยาบของผิวแผลการสึกหรอมากกว่าตัวอย่างที่มีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85 แต่ค่า friction torque น้อยกว่าตัวอย่างที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง E20 และ E85



5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่งขอขอบคุณ FOCUSLAB Ltd. ท้องแลปปฏิบัติการวิเคราะห์สำหรับความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันและชุดอุปกรณ์ในการจัดเก็บตัวอย่าง, เจ้าของรถที่อนุญาตให้ทำการเก็บผลตัวอย่าง, ทุนสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว) และ ทุนสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน(EPPO) สำหรับเงินทุนในการทำงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D A Green and R Lewis. The effects of soot-contaminated engine oil on wear and friction a review. DOI:10.1243/09544070_JAUTO468. Proc. IMechE Vol. 222 Part D: J. Automobile Engineering.
- [2] James A. Addison, William M. Needelman. DIESEL ENGINE LUBRICANT CONTAMINATION AND WEAR. Pall Corporation 30 Sea Cliff Avenue Glen Cove, NY 11542.
- [3] Charlotte Besser, Investigation of long-term engine oil performance using lab-based artificial ageing illustrated by the impact of ethanol as fuel component. Tribology International, Volume 30, 46 (2012), pp174-182.
- [4] H. KALELI, E. YILDIRIM .Determination of Oil Drain Period in Naval Ship Diesel Engine. Tribology in industry, Volume 30, No. 3&4, 2008, pp. 21-30.
- [5] Hakan Kaleli, Used Oil Analysis and Study of Oil Drain Period in Gasoline Engine. ISSN 0148-7191 Copyright 1998 Society of Automotive Engineers, Inc.
- [6] Syed Q. A. Rizvi, Ph.D. A Comprehensive Review of Lubricant Chemistry Technology Selection and Design. "ASTM stock number: MNL59". ISBN 978-0-8031-7000-1. Printed in the U.S.A.
- [7] Simon C. Tung and George E. Totten, Editors. Automotive Lubricants and Testing. ASTM Stock Number: MNL62. U.S.A
- [8] Al-Osaimy A.S., Elhabib O.A. and Ali W.Y. Inspecting metallic wear particles lubricating automotive engine oils contaminating. International journal of control, automation and systems. Vol.2, no.3. October 2013.
- [9] Om Prakash Sondhiya, Amit Kumar Gupta. Wear debris analysis of automotive engine lubricating oil using by ferrography. International journal of engineering and innovative technology (IJETT). Volume 2, issue 5. November 2012
- [10] สถาพร เชื้อเพ็ง. ความเข้ากันได้ของวัสดุชิ้นส่วนยานยนต์กับเชื้อเพลิงผสมเอธานอล-แก๊สโซลีน (อี85), ฉบับที่ 70 ปีที่ 22 พฤศจิกายน 2552 - มกราคม 2553, หน้า 33-44
- [11] สุรพล ราชภรณ์น้อย(2549).วิศวกรรมการหล่อลื่นเบื้องต้น, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น,2549.
- [12] ปณิตดา นีรมานถ้ำพงศ์ และคณะ(2547). การศึกษาหล่อลื่นอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น),2547
- [13] Focuslab (2016). Oil Analysis-level 2.
- [14] Thanant Sirisithichote. Wear debris.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อนามสกุล นายพลเอก บุชัยเหม
วัน เดือน ปีเกิด 20 กันยายน 2533 ที่อุบลราชธานี
ที่อยู่ 600/7 ถ.สรรพสิทธิ์ ต.ในเมือง อ.เมือง
 จ.อุบลราชธานี 34000
 โทร. 088-0805535
ประวัติการศึกษา 2555 วิทยาศาสตร์บัณฑิต
 สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยี
 พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 2551 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเบ็ญจะ
 มฆมาราช จังหวัดอุบลราชธานี

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

- พ.ศ.2558 นำเสนอบทความวิจัยในงาน The 6th TSME International Conference on Mechanical Engineering (6th TSME-ICoME), เรื่อง Characterization of Commercial Gasoline Passenger Car's Used Lubricating Oils and Metal Wears
- พ.ศ.2559 นำเสนอบทความวิจัยในงานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30 (MENETT 30), เรื่อง ลักษณะการสึกหรอของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์ E20 E85 และน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้