ผลกระทบของขนาดและปริมาณคาร์บอนแบล็คที่ปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 5W30 ต่อลักษณะการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล

EFFECT OF SIZE AND AMOUNT OF CARBON BLACK CONTAMINATION IN LUBE OIL GRADE SAE 5W30 ON WEAR CHARACTERISTICS USING FOUR-BALL TESTER

ภัทระ ฉ่ำมะนา

PATTARA CHAMMANA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-030-072

ผลกระทบของขนาดและปริมาณคาร์บอนแบล็คที่ปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 5W30 ต่อลักษณะการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล

EFFECT OF SIZE AND AMOUNT OF CARBON BLACK CONTAMINATION IN LUBE OIL GRADE SAE 5W30 ON WEAR CHARACTERISTICS USING FOUR-BALL TESTER

ภัทระ ฉ่ำมะนา
PATTARA CHAMMANA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561
KMITL-2018-EN-M-030-072

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบของขนาดและปริมาณคาร์บอนแบล็คที่ปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 5W30 ต่อลักษณะการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล

EFFECT OF SIZE AND AMOUNT OF CARBON BLACK CONTAMINATION IN LUBE OIL GRADE SAE 5W30 ON WEAR CHARACTERISTICS USING FOUR-BALL TESTER

ภัทระ ฉ่ำมะนา
PATTARA CHAMMANA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561
KMITL-2018-EN-M-030-072

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF SIZE AND AMOUNT OF CARBON BLACK CONTAMINATION IN LUBE OIL GRADE SAE 5W30 ON WEAR CHARACTERISTICS USING FOUR-BALL TESTER

PATTARA CHAMMANA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018
KMITL-2018-EN-M-030-072

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2018
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของขนาดและปริมาณคาร์บอนแบล็คที่ปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 5W30 ต่อลักษณะการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล
Thesis Title Effect of Size and Amount of Carbon Black Contamination in Lube Oil Grade SAE 5W30 on Wear Characteristics using Four-ball Tester
นักศึกษา นายภัทระ ฉ่ำมะนา
รหัสประจำตัว 56601164
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ.ดร.ปรีชา การินทร์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-030-072

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

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 16 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 09.00-11.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-303 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 16 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของขนาดและปริมาณคาร์บอนแบล็คที่ปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 5W30 ต่อลักษณะการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล
นักศึกษา	นายภัทระ ฉ่ำมะนา
รหัสประจำตัว	56601164
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)	ผศ.ดร.ปรีชา การินทร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบขนาดอนุภาคเขม่าต่อลักษณะการสึกหรอของโลหะด้วยเครื่องมือโฟร์บอล (Four-Ball Wear Tester) เป็นการทดสอบเพื่อวัดคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอ โดยที่การปนเปื้อนของเขม่า (Soot) จะถูกจำลองโดยใช้คาร์บอนแบล็ค (Carbon Black) ที่มีขนาดอนุภาคเดี่ยว (Primary Particle Size) และปริมาณการปนเปื้อนที่แตกต่างกัน โครงสร้างของอนุภาคเขม่าถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) และเครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (LDS) ค่าการสึกหรอ (WSD) และค่าความหยาบ (Roughness) ถูกตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) กล้องจุลทรรศน์ 3 มิติ (3D OM) และภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM Image) ผลการทดสอบโฟร์บอลพบว่า กรณีปนเปื้อนเขม่าที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันที่ 1% wt. ในน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 5W30 โดยใช้คาร์บอนแบล็ค N220, N330, N550 และ N660 พบว่าขนาดของแผลสึกหรอมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ไม่ปนเปื้อนคาร์บอนแบล็คอยู่ที่ร้อยละ 26, 38, 41 และ 39 ตามลำดับ แต่ค่าความหยาบพื้นผิวมีค่าลดลงร้อยละ 22, 35, 21 และ 30 ตามลำดับ ขนาดของแผลสึกหรอของตัวอย่างที่ปนเปื้อนที่ปริมาณ 0.5% wt. มีค่าลดลงร้อยละ 8.70 ส่วนตัวอย่างที่ปนเปื้อนที่ปริมาณ 1 และ 2% wt. มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 38 และ 44 ตามลำดับ แต่ค่าความหยาบพื้นผิวมีค่าลดลงร้อยละ 89, 35 และ 29 ตามลำดับ โดยทั้งสองกรณีพบว่าเมื่อมีการปนเปื้อนคาร์บอนแบล็คจะส่งผลให้เกิดกลไกการสึกหรอแบบยึดติดเป็นหลัก เนื่องจากกลุ่มของอนุภาคคาร์บอนแบล็คมีขนาดใหญ่กว่าความหนาชั้นฟิล์มน้ำมัน ทำให้ปิดกั้นน้ำมันหล่อลื่นไม่ให้เข้าไปในช่องว่างระหว่างผิวโลหะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Effect of Size and Amount of Carbon Black Contamination in Lube Oil Grade SAE 5W30 on Wear Characteristics Using Four-ball Tester
Student	Mr.Pattara Chammana
Student ID.	56601164
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Chinda Charoenphonphanich
Thesis Co-Advisor	Asst.Prof.Dr.Preecha Karin

ABSTRACT

This research investigated the soot particle size contamination effect on metal wear characteristics using Four-Ball tester to measure the anti-wear. Soot particle contamination in engine oil grade SAE 5W30 was simulated using carbon black (CB). There were commercial carbon blacks which difference primary particle size and quantity. Micro and Nanostructure of soot particles were studied by Scanning Electron Microscope (SEM), Transmission Electron Microscope (TEM) and Laser Diffraction Spectroscope (LDS). Wear and Roughness was measured by Optical Microscope (OM), 3D rendering optical technique and SEM image. The results showed that the WSD from Four-ball wear test in case 1 the 1% by weight of CB N220, N330, N550 and N660 contamination showed 26, 38, 41 and 39% higher average WSD compare to the pure engine oil respectively, but the surface roughness was 22, 35, 21 and 30% lower respectively. In case 2 the 0.5, 1 and 2% by weight of CB N330 contamination showed 8.70% lower but 38 and 44% higher average WSD compare to the pure engine oil respectively, but the surface roughness was 89, 35 and 29% lower respectively. Both case 1 and case 2 when added CB in engine oil, soot particle was much larger than the oil film thickness. So, it might block the lubrication inlet to the contact, therefore resulting in Adhesive wear which causes the larger wear scar diameter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์ และ ผศ.ดร.ปรีชา การินทร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ FOCUSLAB Ltd. ห้องแลบปฏิบัติการวิเคราะห์สำหรับความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น

สุดท้ายต้องขอขอบคุณ คุณอริศรา สินอุดม ที่เป็นที่ปรึกษาในการจัดทำรูปเล่มและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดาผู้ล่วงลับ มารดา และพี่ชาย ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์อันล้ำค่าให้แก่ข้าพเจ้า

ภัทระ ฉ่ำมะนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญตาราง VI
สารบัญรูป VII
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย 1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ 2
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ 2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 3
2.1 การหล่อลื่น การสึกหรอ การเสียดทาน 3
2.2 การวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว 11
2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว 14
2.4 การวิเคราะห์รูปร่าง ขนาด พื้นผิว และชนิดของธาตุ 17
2.5 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง 18
2.6 การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ 19
2.7 การทดสอบวัดคุณสมบัติต้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล 19
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 20
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย 27
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการวิจัย 27
3.1.1 น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 5W30 27
3.1.2 คาร์บอนแบล็ค 27
3.1.3 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) 28
3.1.4 เครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง 28
3.1.5 เครื่องทดสอบต้านทานการสึกหรอชนิดโฟร์บอล (Four-Ball Wear Tester)..... 29
3.1.6 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) 29
3.1.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด (SEM) 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย........ 30
3.2.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคคาร์บอนแบล็ค........ 30
3.2.2 ผลกระทบของการปนเปื้อนเขม่าต่อการสึกหรอของโลหะ........ 31
บทที่ 4 การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง........ 34
4.1 การกระจายตัวของอนุภาคเดี่ยวของคาร์บอนแบล็ค........ 34
4.2 การกระจายตัวของอนุภาคเขม่าในน้ำมันหล่อลื่น........ 36
4.3 ผลกระทบของอนุภาคเขม่าต่อการสึกหรอของโลหะด้วยเครื่องทดสอบโฟร์บอล........ 39
4.4 การกระจายตัวขนาดอนุภาคเขม่าหลังการทดสอบโฟร์บอล........ 43
4.5 การวิเคราะห์ภาพถ่ายรอยการสึกหรอของพื้นผิวลูกบอลเหล็ก โดยกล้องจุลทรรศน์ แบบส่องกราด (SEM) และเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (EDX)........ 46
4.5.1 การวิเคราะห์ภาพถ่ายรอยการสึกหรอของพื้นผิวลูกบอลเหล็กโดยกล้อง จุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)........ 46
4.5.2 การวิเคราะห์ภาพถ่ายรอยการสึกหรอของพื้นผิวลูกบอลเหล็กโดยเครื่อง วิเคราะห์ธาตุ (EDX)........ 59
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ........ 68
5.1 สรุปผลการวิจัย........ 68
5.2 ข้อเสนอแนะ........ 69
เอกสารอ้างอิง........ 70
ภาคผนวก........ 74
ภาคผนวก ก ข้อมูลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง........ 75
ภาคผนวก ข ข้อมูลวิเคราะห์การทดสอบคุณสมบัติต้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล........ 126
ภาคผนวก ค บทความที่ได้รับการตีพิมพ์........ 131

ประวัติผู้เขียน........ 149

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงแหล่งที่มาของธาตุในการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว... 12
3.1 เงื่อนไขการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-4172.. 29
3.2 น้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ขนาดแตกต่างกัน... 31
3.3 น้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณแตกต่างกัน... 31
4.1 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 5W30.. 34
4.2 ข้อมูลเชิงสถิติของคาร์บอนแบล็ค... 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ค่าความหนืดและช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน.. 3
2.2 กลไกการสึกหรอแบบยึดติด.. 4
2.3 กลไกการสึกหรอแบบขูดขีด.. 5
2.4 กลไกการสึกหรอแบบล้าตัว... 5
2.5 กลไกการสึกหรอแบบกัดกร่อน.. 6
2.6 พฤติกรรมการสึกหรอ.. 6
2.7 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี่.. 7
2.8 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์.. 7
2.9 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิค.. 8
2.10 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิค.. 8
2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าขอบเขตการหล่อลื่น ความหนาของแผ่นฟิล์ม และการสึกหรอ......... 9
2.12 แรงเสียดทานแบบไถล.. 10
2.13 แรงเสียดทานแบบกลิ้ง... 11
2.14 ค่าความหนืดตามมาตรฐานต่างๆ.. 13
2.15 หลักการทำงานของ RDE... 15
2.16 หลักการทำงานของ RFS.. 15
2.17 เครื่องวัดค่าความหนืด (Viscometer)... 16
2.18 เครื่องวัดค่าความเป็นด่าง (Potentiometric).. 16
2.19 เครื่องวัดจุดวาบไฟ (Small Scale Closed Cup Tester).. 17
2.20 หลักทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง... 17
2.21 หลักทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.. 18
2.22 หลักทำงานของการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง.. 18
2.23 หลักทำงานของการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์.. 19
2.24 หลักทำงานของโฟร์บอล.. 19
2.25 ระดับการปนเปื้อนของแต่ละขนาดอนุภาค... 21
2.26 ความแตกต่างทางรูปร่างลักษณะของเขม่าจากเครื่องยนต์ดีเซลและคาร์บอนแบล็ค................. 22
2.27 การกระจายตัวของอนุภาคปฐมภูมิของเขม่าจากเครื่องยนต์ดีเซลและคาร์บอนแบล็ค.............. 23
2.28 คุณสมบัติการกระตัวของน้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดที่ปนเปื้อนคาร์บอนแบล็ค 1% wt. 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.29 ขนาดของแผลที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็กของน้ำมันหล่อลื่น Lubricant A และ Lubricant B และที่ปนเปื้อนคาร์บอนแบล็ค 1% wt. 24

2.30 ขนาดของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กของการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของไบโอดีเซลที่แตกต่างกัน.. 25

2.31 แรงเสียดทานต้านการหมุนของการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของไบโอดีเซลที่แตกต่างกัน.. 25

3.1 คาร์บอนแบล็ค.. 27

3.2 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM).. 28

3.3 เครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค (LDS).. 28

3.4 เครื่องทดสอบต้านการสึกหรอชนิดโฟร์บอล (Four-ball Tester).. 29

3.5 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.. 30

3.6 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด.. 30

3.7 การวัดขนาดอนุภาคเดี่ยวคาร์บอนแบล็ค.. 31

3.8 เครื่องวัด WSD และวิเคราะห์พื้นผิวรอยสึกหรอบนลูกบอลเหล็ก.. 32

4.1 ภาพถ่ายอนุภาคคาร์บอนแบล็คโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM).. 35

4.2 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของคาร์บอนแบล็ค.. 36

4.3 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คก่อนการทดสอบโฟร์บอล กรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คขนาดอนุภาคแตกต่างกัน.. 37

4.4 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คสะสมก่อนการทดสอบโฟร์บอล กรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คขนาดอนุภาคแตกต่างกัน.. 37

4.5 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คก่อนการทดสอบโฟร์บอล กรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณอนุภาคแตกต่างกัน.. 38

4.6 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คสะสมก่อนการทดสอบโฟร์บอล กรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณอนุภาคแตกต่างกัน.. 38

4.7 เส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวของลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า, น้ำมันหล่อลื่นผสมเขม่า 1%wt จาก (b) CB N220, (c) CB N330, (d) CB N550, (e) CB N660, (f) น้ำมันหล่อลื่นผสมเขม่า 0.5% wt. และ (g) น้ำมันหล่อลื่นผสมเขม่า 2% wt. 41

4.8 เส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวของลูกบอลเหล็กลูกล่าง กรณีปนเปื้อนขนาดอนุภาคเขม่าแตกต่างกัน.. 41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.9 เส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวของลูกบอลเหล็กลูกล่าง กรณีปนเปื้อนปริมาณเขม่าแตกต่างกัน.......... 42

4.10 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (a) และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสะสม (b) หลังการทดสอบโฟร์บอล กรณีน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนขนาดอนุภาคเขม่าแตกต่างกัน.......... 43

4.11 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (a) และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสะสม (b) หลังการทดสอบโฟร์บอล กรณีน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนปริมาณเขม่าแตกต่างกัน.......... 45

4.12 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า และน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าที่ 1%wt ของ (b) CB N220, (c) CB N330, (d) CB N550, (e) CB N660, (f) CB N330-0.5% และ (g) CB N330-2.......... 48

4.13 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า และน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าที่ 1%wt ของ (b) CB N220, (c) CB N330, (d) CB N550, (e) CB N660, (f) CB N330-0.5% และ (g) CB N330-2%.......... 49

4.14 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า และน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าที่ 1%wt ของ (b) CB N220, (c) CB N330, (d) CB N550, (e) CB N660, (f) CB N330-0.5% และ (g) CB N330-2%.......... 50

4.15 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า และน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าที่ 1%wt ของ (b) CB N220, (c) CB N330, (d) CB N550, (e) CB N660, (f) CB N330-0.5% และ (g) CB N330-2%.......... 51

4.16 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า และน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าที่ 1%wt ของ (b) CB N220, (c) CB N330, (d) CB N550, (e) CB N660, (f) CB N330-0.5% และ (g) CB N330-2%.......... 52

4.17 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า และน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าที่ 1%wt ของ (b) CB N220, (c) CB N330, (d) CB N550, (e) CB N660, (f) CB N330-0.5% และ (g) CB N330-2%.......... 53

4.18 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า และน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าที่ 1%wt ของ (b) CB N220, (c) CB N330, (d) CB N550, (e) CB N660, (f) CB N330-0.5% และ (g) CB N330-2%.......... 54

4.19 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า และน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าที่ 1%wt ของ (b) CB N220, (c) CB N330, (d) CB N550, (e) CB N660, (f) CB N330-0.5% และ (g) CB N330-2%.......... 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.20 การวิเคราะห์ปริมาณกลไกการสึกหรอของ (a) ลูกบอลเหล็กด้านล่างกรณีปนเปื้อนขนาดอนุภาคเขม่าแตกต่างกัน (b) ลูกบอลเหล็กด้านล่างกรณีปนเปื้อนปริมาณเขม่าแตกต่างกัน...... 56
4.21 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,000X ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า...... 57
4.22 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,000X ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N220...... 57
4.23 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,000X ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330...... 57
4.24 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,000X ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N550...... 58
4.25 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,000X ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N660...... 58
4.26 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,000X ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 0.5% wt. 58
4.27 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,000X ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 0.5% wt. 59
4.28 ภาพถ่าย SEM และ EDX ที่กำลังขยาย 500X ของรอยการสึกหรอ (Wear Scar) บนลูกบอลเหล็ก จากน้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า...... 60
4.29 ภาพถ่าย SEM และ EDX ที่กำลังขยาย 500X ของรอยการสึกหรอ (Wear Scar) บนลูกบอลเหล็ก จากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N220...... 61
4.30 ภาพถ่าย SEM และ EDX ที่กำลังขยาย 500X ของรอยการสึกหรอ (Wear Scar) บนลูกบอลเหล็ก จากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330...... 62
4.31 ภาพถ่าย SEM และ EDX ที่กำลังขยาย 500X ของรอยการสึกหรอ (Wear Scar) บนลูกบอลเหล็ก จากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N550...... 63
4.32 ภาพถ่าย SEM และ EDX ที่กำลังขยาย 500X ของรอยการสึกหรอ (Wear Scar) บนลูกบอลเหล็ก จากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N660...... 64
4.33 ภาพถ่าย SEM และ EDX ที่กำลังขยาย 500X ของรอยการสึกหรอ (Wear Scar) บนลูกบอลเหล็ก จากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 0.5% wt. 65
4.34 ภาพถ่าย SEM และ EDX ที่กำลังขยาย 500X ของรอยการสึกหรอ (Wear Scar) บนลูกบอลเหล็ก จากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 2% wt. 65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.35 การวิเคราะห์สัดส่วนของธาตุ โดย EDX ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กหลังการทดสอบโฟร์บอลจากน้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า น้ำมันหล่อลื่นผสมเขม่า 1% ของ CB N220, CB N330, CB N550, CB N660 น้ำมันหล่อลื่นผสมเขม่า 0.5% CB N330 และน้ำมันหล่อลื่นผสมเขม่า 2% CB N330 66

4.36 ภาพถ่าย Spectrum จาก SEM และ EDX ของ (a) พื้นผิวลูกบอลเหล็ก (b) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า น้ำมันหล่อลื่นผสมเขม่า 1% wt. ของ (c) CB N220, (d) CB N330, (e) CB N550, (f) CB N660 น้ำมันหล่อลื่นผสมเขม่า 0.5% wt. ของ CB N330 (g) น้ำมันหล่อลื่นผสมเขม่า 2% wt. ของ CB N330 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน แรงเสียดทานส่วนใหญ่เกิดที่ส่วนประกอบของลูกสูบ คิดเป็น 40-60% ของแรงเสียดทานภายในเครื่องยนต์ [1]

สาเหตุหลักความเสียหายของเครื่องยนต์เนื่องจากคุณภาพของเชื้อเพลิงและน้ำมันหล่อลื่น มีดังนี้

- การทับถมตะกอนตามส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์
- การปนเปื้อน เช่น ฝุ่น อนุภาคสึกหรอ สารหล่อเย็น และน้ำ
- ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Oxidation) ของน้ำมันเชื้อเพลิงและน้ำมันหล่อลื่น
- ความหนาของน้ำมันหล่อลื่นเนื่องจากปฏิกิริยาเทอร์โม-ออกซิเดชั่นและเขม่า
- การใช้น้ำมันหล่อลื่นมากเนื่องจากการระเหยของน้ำมันหล่อลื่นและการสึกหรอในระดับที่สูง
- แหวนลูกสูบเกิดคราบเหนียวอันเนื่องจากการสะสมคราบเศษต่างๆ บริเวณลูกสูบ

จะเห็นได้ว่า หนึ่งในสาเหตุหลักของความเสียหายของเครื่องยนต์คือความหนาของน้ำมันหล่อลื่นเนื่องจากเขม่า ซึ่งเขม่าเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ประกอบด้วย คาร์บอน (Carbon) ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) และขี้เถ้า (Metallic Ash) โดยที่ขนาดเขม่าอนุภาคเดี่ยว (Primary Soot Particles) และขนาดเขม่าอนุภาคกลุ่มก้อน (Agglomerated) ถูกวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) มีขนาด 20-80 nm และ 100-300 nm ตามลำดับ [2]

ลักษณะสำคัญของกลไกการสึกหรอเนื่องจากการปนเปื้อนเขม่าในน้ำมันหล่อลื่น คือ กลไกการสึกหรอแบบขูดขีด (Abrasive Wear) เกิดจากการขูดขีดโดยเขม่าซึ่งมีความแข็งสูงกว่าลูกบอลเหล็ก และการขัดขวางการหล่อลื่นของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวโลหะ (Oil Starvation) เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคกลุ่มก้อนเขม่ามีขนาดมากกว่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น ทำให้ขัดขวางน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัสของโลหะ [3]

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคเขม่าต่อลักษณะการสึกหรอของโลหะด้วยเครื่องมือโฟร์บอล (Four-Ball Wear Tester) เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอน (Electron Microscopy)

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคเขม่าในน้ำมันหล่อลื่น

2. ศึกษาคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอของน้ำมันหล่อลื่นที่มีการปนเปื้อนเขม่าจำลองการปนเปื้อนด้วยคาร์บอนแบล็ค โดยการทดสอบโฟร์บอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. วิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคเขม่าในน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 5W30

2. วิเคราะห์คุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอของน้ำมันหล่อลื่นที่มีการปนเปื้อนเขม่าจำลองการปนเปื้อนด้วยคาร์บอนแบล็ค (N220, N330, N550 และ N660) ที่ 1% wt และจำลองการปนเปื้อนด้วยคาร์บอนแบล็ค N330 ที่ 0.5 และ 2% wt ตามลำดับ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับกลไกการสึกหรอ การหล่อลื่น ศาสตร์ของไทรโบโลยี

2. ศึกษาข้อมูลเครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุ ที่ใช้ในการทดสอบวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นและเขม่า

3. วางแผน กำหนดตัวแปรและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นและเขม่า

4. วิเคราะห์และสรุปผลจากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบโฟร์บอล

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้ทราบถึงขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคเขม่าในน้ำมันหล่อลื่น

2. ได้ทราบถึงคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอจากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอบนลูกบอลเหล็ก และค่าความหยาบของพื้นผิวของตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนเขม่า เพื่อที่จะสามารถช่วยลดการสึกหรอได้

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา จุดมุ่งหมาย ขอบเขตของงาน ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่ได้รับ ของงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง พื้นฐานของไทรโบโลยี การปนเปื้อนของเชื้อเพลิงและเขม่าต่อการสึกหรอของโลหะ

บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอน วิธีการดำเนินงานวิจัย และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเขม่าในน้ำมันหล่อลื่น และผลกระทบของการปนเปื้อนเขม่าต่อลักษณะการสึกหรอของโลหะด้วยเครื่องทดสอบโฟร์บอล กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) และเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (LDS)

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การหล่อลื่น การสึกหรอ การเสียดทาน

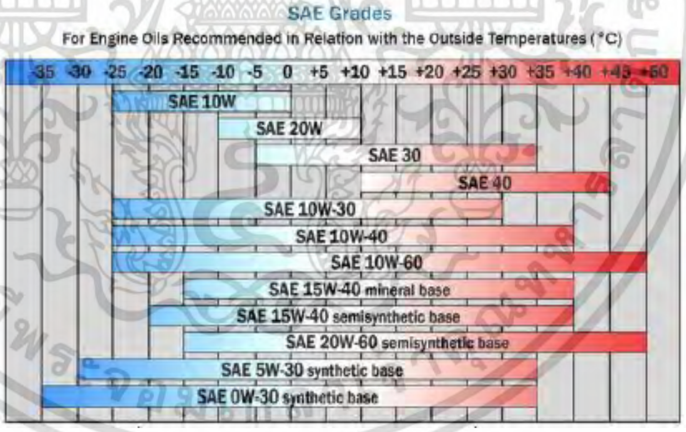
2.1.1 มาตรฐานน้ำมันหล่อลื่น

2.1.1.1 การแบ่งประเภทของความหนืด

สมาคมวิศวกรรมยานยนต์ (Society of Automotive Engineer: SAE) ของสหรัฐอเมริกากำหนดมาตรฐานความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) น้ำมันเกรดเดียว (Mono grade) หรือ น้ำมันเครื่องที่มีความหนืดค่าเดียว เช่น SAE10 SAE20 SAE30 เมื่อวัดความหนืดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส น้ำมันเครื่องจะมีความหนืดเบอร์ 10 20 และ 30 ตามลำดับ

2) น้ำมันเกรดรวม (Multigrade) หรือ น้ำมันเครื่องที่มีความหนืดสองค่า เช่น 0W20 5W40 10W30 15W40 และ 20W60 โดยตัวอักษร “W” แสดงค่าความต้านทานการเป็นไขของน้ำมันหล่อลื่น ตัวเลขชุดหน้าตัวอักษรแสดงค่าความต้านทานการเป็นไขของน้ำมันหล่อลื่นที่อุณหภูมิต่ำกว่า -30 องศาเซลเซียส และ -30 -20 -10 และ 0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สำหรับตัวเลขชุดหลังแสดงเบอร์ของน้ำมันเครื่อง ซึ่งวัดความหนืดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.1 ค่าความหนืดและช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน [4]

2.1.1.2 การแบ่งประเภทของคุณภาพ

สถาบันปิโตรเลียมแห่งสหรัฐอเมริกา (The American Petroleum Institute: API) กำหนดมาตรฐานคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่น โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1) เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิง ใช้สัญลักษณ์ "S" จาก Service qualifying for gasoline enginesนำหน้า และตามด้วยอักษรภาษาอังกฤษโดยเริ่มต้นจาก A ยิ่งตัวอักษรลำดับที่ไกลมากขึ้น คุณภาพของน้ำมันก็จะสูงขึ้นตาม เช่น SA SB SC SD SE SF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ใช้สัญลักษณ์ "C" จาก Commercial qualifying diesel engines นำหน้า และตามด้วยอักษรภาษาอังกฤษโดยเริ่มต้นจาก A ยิ่งตัวอักษรลำดับที่ไกลมากขึ้น คุณภาพของน้ำมันก็จะสูงขึ้นตาม ซึ่งหากมีเลข 4 ต่อท้ายด้วย จะหมายถึงการใช้กับเครื่องยนต์แบบ 4 จังหวะ เช่น CA CB CC CD CE CF-4

2.1.2 กลไกลการสึกหรอ [5-6]

แบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด คือ

2.1.2.1 กลไกการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear)

เกิดขึ้นจากการที่ชิ้นงานซึ่งมีหน้าสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานมีการเคลื่อนที่แนบติดกันทำให้ผิวหน้าชิ้นงานบางส่วนฉีกขาดออกไปและเกิดการเยิ้มติดลงบนผิวหน้าผิวชิ้นงานอีกชิ้นที่สัมผัสกัน ถ้ามองพื้นผิวหน้าชิ้นงานในระดับจุลภาคพื้นผิวจะมีความหยาบลักษณะคล้ายยอดแหลมของภูเขาสลับไปมา เรียกว่า “Asperities” โดยส่วนนี้จะเป็นพื้นผิวที่รับภาระจริงของชิ้นงาน ซึ่งกลไกการสึกหรอแบบยึดติดส่วนมากจะพบตอนเริ่มหรือเลิกใช้งานเครื่องยนต์ รวมถึงช่วงที่มีความเร็วรอบต่ำ

รูปที่ 2.2 กลไกการสึกหรอแบบยึดติด [7]

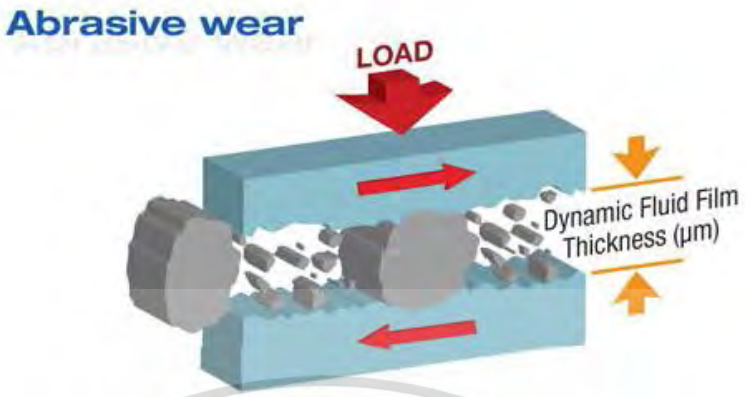
2.1.2.2 กลไกการสึกหรอแบบขูดขีด (Abrasive Wear)

เกิดจากสิ่งที่มีความแข็งสูงขูดขีดเนื้อวัสดุออกไป โดยลักษณะของเศษเนื้อวัสดุที่ถูกขูดขีดมีลักษณะเป็นเส้น ม้วนตัวเป็นวงกลม ซึ่งกลไกการสึกหรอแบบขูดขีดแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) การขูดขีดแบบสองเนื้อ (Two Body Abrasion) เกิดขึ้นจากการที่ชิ้นงาน 2 ชิ้น ขัดถูกัน โดยชิ้นงานที่มีความแข็งมากกว่าจะเป็นตัวขูดขีดผิวของชิ้นงานที่มีความแข็งน้อยกว่า

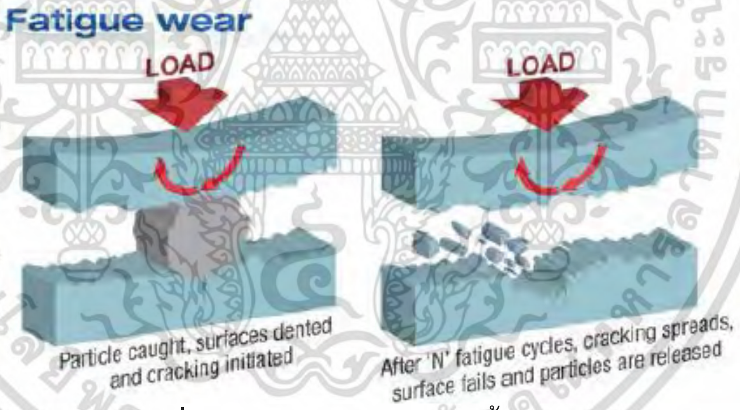
2) การขูดขีดแบบสามเนื้อ (Three Body Abrasion) เกิดขึ้นจากการที่ชิ้นส่วน 3 ชิ้น เกิดการขัดถูกันของคู่ชิ้นงานและมีการปนเปื้อนสิ่งสกปรกที่มีความแข็งสูง อาทิ เม็ดทราย ซึ่งเมื่อเข้าไปอยู่ข้างในระหว่างคู่ชิ้นงานจะทำเกิดการขูดขีดผิวชิ้นงานทั้งคู่และทำให้เกิดการสึกหรอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กลไกการสึกหรอแบบขูดขีด [8]

2.1.2.3 กลไกการสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue Wear) เกิดขึ้นจากการที่ชิ้นงานรับภาระการกด (Compressive Stress) สลับกับการดึง (Tensile Stress) ซ้ำกันไปมา ส่งผลให้ผิวชิ้นงานเกิดการหลุดร่อน ทำให้เกิดหลุมลึกบนผิวชิ้นงานหรือมีสิ่งสกปรกที่มีความแข็งปนเปื้อนเข้าไป ซึ่งจะทำให้เกิดรอยกด (Dents) บนผิวชิ้นงาน และเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้เกิดรอยแตก (Crack) และหลุดออกมา จนเกิดเป็นหลุมบนผิวชิ้นงาน

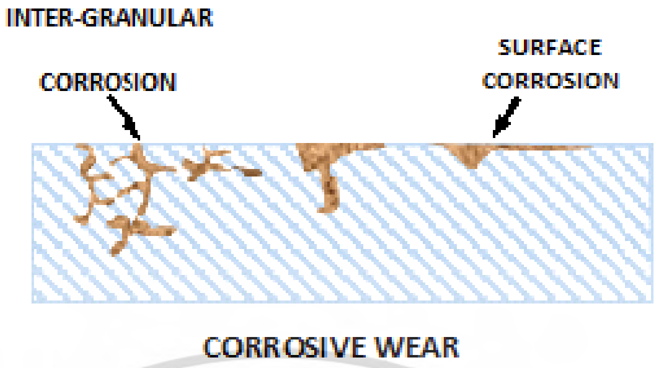


รูปที่ 2.4 กลไกการสึกหรอแบบล้าตัว [9]

2.1.2.4 กลไกการสึกหรอแบบปฏิกิริยาไทรโบเคมี (Tribo-Chemical Wear)

เกิดขึ้นจากการที่ชิ้นงานขัดถูกันทำให้เกิดเศษโลหะและเกิดผลพวงจากปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดสนิม ซึ่งองค์ประกอบที่เป็นปัจจัยเร่งให้เกิด ปฏิกิริยากับออกซิเจนเร็วขึ้น คือ ความร้อน ความชื้น และเศษโลหะ โดยเศษโลหะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นได้ จากการเข้าไปเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสออกซิเจนให้มากขึ้น ซึ่งองค์ประกอบทั้งหมดเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วจะก่อให้เกิดสนิม อาจเรียกกลไกการสึกหรอดังกล่าวว่ากลไกการสึกหรอแบบกัดกร่อน (Corrosive Wear) ก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 กลไกการสึกหรอแบบกัดกร่อน[10]

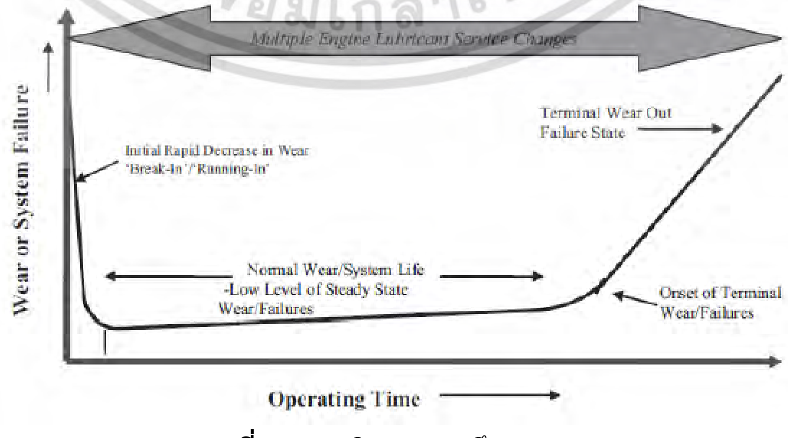
2.1.3 พฤติกรรมการสึกหรอ [11]

แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

1) การสึกหรอช่วงเริ่มต้น (Running-In หรือ Break-In) พบว่าอัตราการสึกหรอช่วงเริ่มต้นค่อนข้างสูง โดยส่วนมากการสึกหรอช่วงเริ่มต้นจะพบในเครื่องยนต์ใหม่ เนื่องจากมีความหยาบของผิวสูงทำให้เกิดการขัดถูกันของยอดแหลมของผิว ความหยาบที่รับภาระจริงจึงมากขึ้น ทำให้มีเศษโลหะสึกหรอออกมาค่อนข้างมากในระยะแรก ซึ่งเมื่อมีการใช้งานเครื่องยนต์นานไปอัตราการสึกหรอก็จะเข้าสู่ภาวะปกติ

2) การสึกหรอช่วงปกติ (Normal Wear) พบต่อเนื่องจากระยะการสึกหรอช่วงเริ่มต้นโดยการสึกหรอช่วงปกติจะมีทั้งแบบรุนแรงและไม่รุนแรงขึ้นอยู่กับการบำรุงรักษาตามคู่มือการใช้งานและการควบคุมสิ่งสกปรกปนเปื้อน ซึ่งหากมีการบำรุงรักษาที่ดี เครื่องยนต์ก็จะมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น

3) ช่วงการสึกหรอ (Wear Out) พบว่าอัตราการสึกหรอช่วงนี้จะเพิ่มขึ้นจนถึงระดับอันตรายเมื่อมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์เกิดการล้าตัว ต้องซ่อมบำรุงหรือเปลี่ยนใหม่เพื่อป้องกันเครื่องยนต์พัง



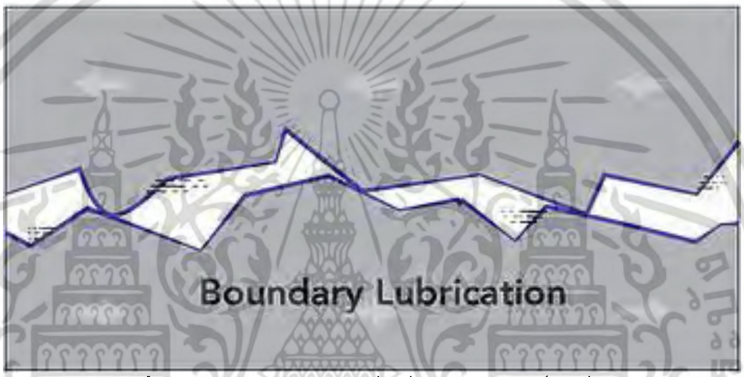
รูปที่ 2.6 พฤติกรรมการสึกหรอ[11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ขอบเขตการหล่อลื่น [5-6]

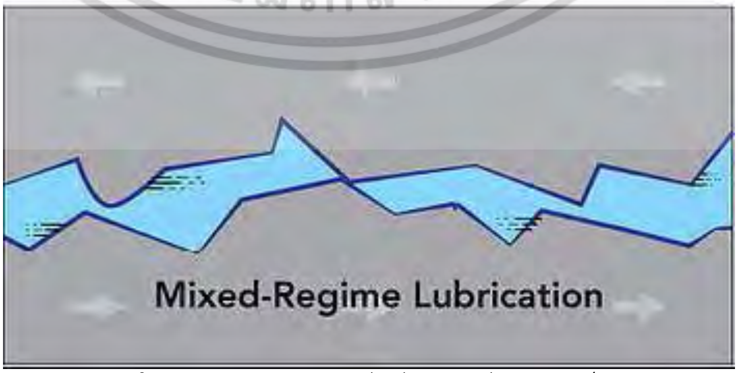
แบ่งออกเป็น 3 ขอบเขตหลัก ดังนี้

1) ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี่ (Boundary Lubrication) เป็นขอบเขตแรกที่เกิดจากการขัดถูกันระหว่างผิวหน้าชิ้นงานโดยตรงและไม่มีสารหล่อลื่นเข้ามาช่วยในการหล่อลื่น หรือเรียกว่าสภาวะไร้สารหล่อลื่น ทำให้มีเศษชิ้นงานหลุดออกมาจำนวนมาก โดยเศษชิ้นงานที่หลุดออกมาจะปกคลุมพื้นที่โดยรอบหน้าผิวชิ้นงานที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีหรือการดูดกลืนอะตอม ซึ่งจะทำให้ลักษณะผิวของชิ้นงานประกอบไปด้วยสองชั้น ชั้นแรกซึ่งอยู่ด้านล่างเป็นชั้นของเนื้อชิ้นงาน และชั้นที่สองซึ่งอยู่ด้านบนสุดของชิ้นงานเป็นเศษเนื้อชิ้นงานที่เกิดจากการขัดถูและมีค่าความต้านทานการเฉือนตัวที่ต่ำกว่าชั้นของเนื้อชิ้นงาน เมื่อเกิดการขัดถูของชิ้นงานเกิดขึ้นชั้นนี้จะหลุดออกมาก่อน เป็นการช่วยในการหล่อลื่นระหว่างผิวหน้าชิ้นงาน



รูปที่ 2.7 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี่ [12]

2) ขอบเขตการหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์ (Mixed Film Lubrication) เป็นขอบเขตที่ผสมระหว่างการเคลื่อนที่ขัดถูของผิวชิ้นงานโดยตรงและการเคลื่อนที่ขัดถูของผิวชิ้นงานโดยมีแผ่นฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นแยกชิ้นงานออกจากกันหรือการเกิดสัมประสิทธิ์การเสียดทานในระหว่างผิวชิ้นงานและสัมประสิทธิ์การเสียดทานในชั้นสารหล่อลื่นสลับกันไป ทำให้เครื่องจักรกลสูญเสียกำลังทำงาน แต่สัมประสิทธิ์การเสียดทานในภาพรวมของขอบเขตการหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์จะต่ำกว่าขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี่

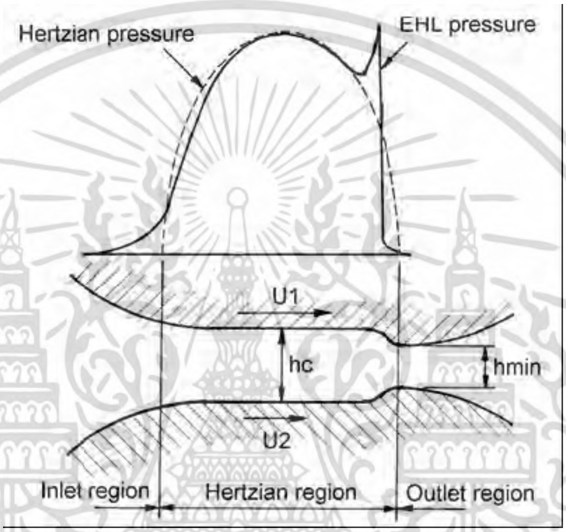


รูปที่ 2.8 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

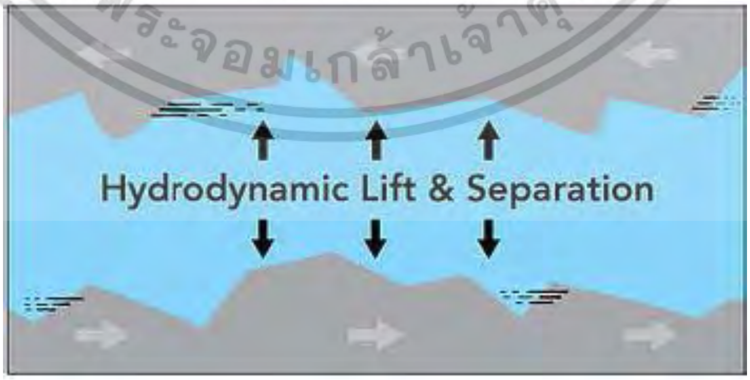
3) ขอบเขตการหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ (Full-film Lubrication) เป็นขอบเขตที่มีการหล่อลื่นแบบเต็มฟิล์ม กล่าวคือแผ่นฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นสามารถแยกชั้นของชิ้นงานได้ ทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานไม่สัมผัสกัน ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การเสียดทานที่เกิดขึ้นมีเฉพาะในชั้นสารหล่อลื่นเท่านั้น โดยสามารถแบ่งออกเป็นรูปแบบย่อยได้ดังนี้

- ขอบเขตการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิค (Elastohydrodynamic Lubrication) มีลักษณะของการถ่ายทอดแรงเป็นจุดสัมผัสหรือเส้นสัมผัส น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านเข้าไปจะได้รับภาระการกดของชิ้นงานสูงถึง 10,000 บาร์ ตัวอย่างของชิ้นส่วนที่มีผิวคู่สัมผัสที่มีแรงกดสูง เช่น ลูกเบี้ยว ตลับลูกปืน ฟันเฟือง



รูปที่ 2.9 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิค [14]

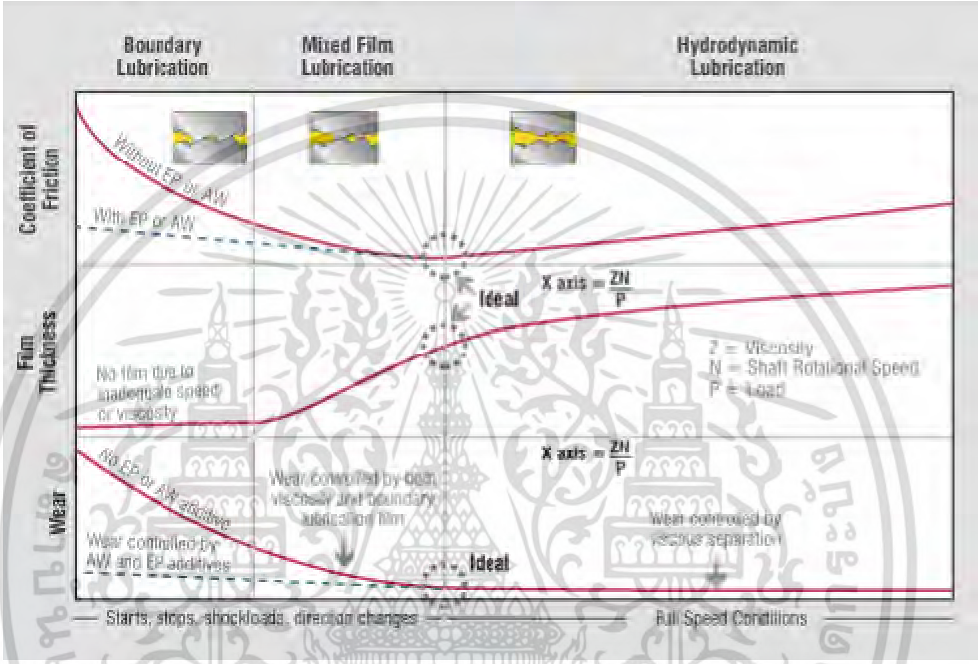
- ขอบเขตการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิค (Hydrodynamic Lubrication) เกิดจากการไหลของน้ำมันหล่อลื่นเข้าสู่ช่องแคบด้วยความเร็วสูง ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นสามารถไหลเข้าได้มากกว่าไหลออก ส่งผลให้เกิดแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นขึ้นภายในช่องแคบดังกล่าว



รูปที่ 2.10 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิค [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความรู้และเข้าใจในเรื่องขอบเขตการหล่อลื่นแบบต่างๆ มีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากจะทำให้ทราบถึงการเลือกใช้สารหล่อลื่นที่เหมาะสมกับการใช้งานของเครื่องจักรในสถานการณ์ต่างๆ เช่น ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี่มีค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานระหว่างผิวหน้าชิ้นงานที่สูง ฟิล์มน้ำมันบางมากหรือความหยาบของหน้าผิวสัมผัสชองชิ้นงานมีค่ามากกว่าความหนาของแผ่นฟิล์มน้ำมัน ส่งผลให้มีเศษชิ้นงานที่สึกหรอออกมาจำนวนมาก ทำให้ต้องเลือกใช้ผลิตภัณฑ์น้ำมันหล่อลื่นชนิดที่มีสารปรุงแต่งต่อต้านการสึกหรอและรับแรงกดสูง



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขอบเขตการหล่อลื่น ความหนาของแผ่นฟิล์ม และการสึกหรอ [16]

2.1.5 การเสียดทาน [5-6]

2.1.5.1 ความเสียดทานแบบไถล (Sliding Friction)

แรงเสียดทานขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวที่มีการสัมผัสกันจริง ถ้าต้องการให้เกิดการเคลื่อนที่ แรงที่ใช้จะต้องมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวและพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปของผิวที่อ่อนกว่า ซึ่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

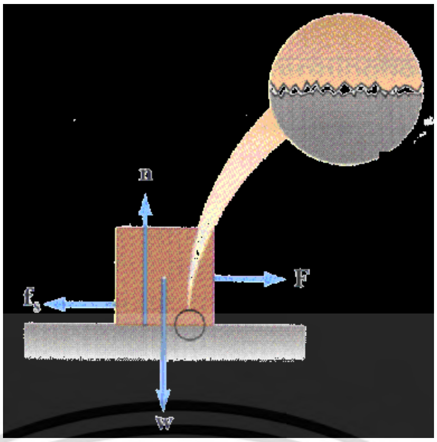
$$F = F_a + F_d \quad (2.1)$$

โดย F = แรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (N)

F_a = แรงยึดเหนี่ยว (N)

F_d = แรงในการเปลี่ยนรูปวัสดุ (N)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แรงเสียดทานแบบไถล [17]

2.1.5.2 ความเสียดทานแบบกลิ้ง (Rolling Friction)

หมายถึงการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างสองผิว โดยที่การเคลื่อนที่แบบกลิ้งจะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าการเคลื่อนที่แบบไถลเนื่องจากใช้พลังในการเคลื่อนที่ต่ำกว่า การเคลื่อนที่แบบกลิ้งเกิดขึ้นในกรณีที่คู่สัมผัสมีรูปร่างกลมหรือเกือบกลม ความแตกต่างของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งกับการเคลื่อนที่แบบไถล คือ ทิศทางการเข้าหา (Approach) และการเคลื่อนจาก (Separation) ของบริเวณสัมผัส ซึ่งจะเกิดในทิศตั้งฉากกับผิว จะไม่เกิดในทิศขนานกับผิวเหมือนการไถล โดยสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแบบกลิ้ง มีค่าดังต่อไปนี้

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

โดย M_R = โมเมนต์ของการต้านทานการเคลื่อนที่ (N.m.)

F_R = แรงต้านทานการเคลื่อนที่ (N)

F_N = แรงกดในแนวตั้งฉากบนพื้นราบ (N)

u_R = สัมประสิทธิ์การเสียดทานในการกลิ้ง (มีหน่วยมิติของค่าความยาว)

r = รัศมีของเม็ดทรงกลม (m)

โดยทั่วไป ขณะที่เกิดการกลิ้งก็จะมีการเคลื่อนที่แบบรวมด้วย การกลิ้งและการไถลลักษณะนี้เป็นการเคลื่อนที่ผสมกัน ซึ่งสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแบบกลิ้งมีค่าดังต่อไปนี้

$$u_R = \frac{V_S}{V_R} \times u_K \quad (2.3)$$

โดย V_S = ความเร็วของการไถล (m/s)

V_R = ความเร็วของการกลิ้ง (s−1)

u_K = สัมประสิทธิ์การเสียดทานในการลื่นไถล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.13 แรงเสียดทานแบบกลิ้ง [18]

2.1.6 ระดับการทดสอบระบบทางวิศวกรรม [19]

การทดสอบระบบ เครื่องยนต์ หรือเครื่องจักรกล ทางวิศวกรรม มีดังต่อไปนี้

1) การทดสอบภาคสนาม (Field Test)

2) การทดสอบบนแท่นทดสอบ (Bench Test)

3) การทดสอบบนระบบย่อย (Subsystem Test)

4) การทดสอบในระดับชิ้นส่วนย่อย (Component Test)

5) การทดสอบในระดับชิ้นส่วนย่อยอย่างง่าย (Simplified Component Test)

6) การทดสอบในระดับการจำลองด้านไทรโบโลยี (Model Test or Tribo Test)

2.2 การวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว [20]

การวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้วเป็นการดำเนินการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงไปของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (New Oil) เพื่อนำมาวิเคราะห์ ประเมิน และใช้ประโยชน์ในการควบคุมคุณภาพหรือประเมินสมรรถนะของน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งการตรวจวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นสามารถแบ่งออกเป็น 3 แนวทางหลักดังนี้

2.2.1 เศษโลหะสึกหรอ (Wear Condition)

เป็นการตรวจวิเคราะห์ปริมาณธาตุของเศษโลหะสึกหรอที่ออกมาปะปนในน้ำมันหล่อลื่นซึ่งเกิดจากกลไกการสึกหรอในรูปแบบต่างๆ ที่เกิดจากการขัดถูกันของชิ้นงาน สารเคมีปรุงแต่ง และสิ่งสกปรกปนเปื้อน โดยตัวอย่างของธาตุที่ตรวจพบ เช่น เหล็ก ตะกั่ว ดีบุก ทำให้สามารถทราบแหล่งที่มาของธาตุนั้นๆ โดยวิเคราะห์ด้วยสเปคโตมิเตอร์ (Elemental Spectroscopy) ชนิด AES (Atomic Emission Spectroscopy) ตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) D6595

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงแหล่งที่มาของธาตุในการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว [21,22]

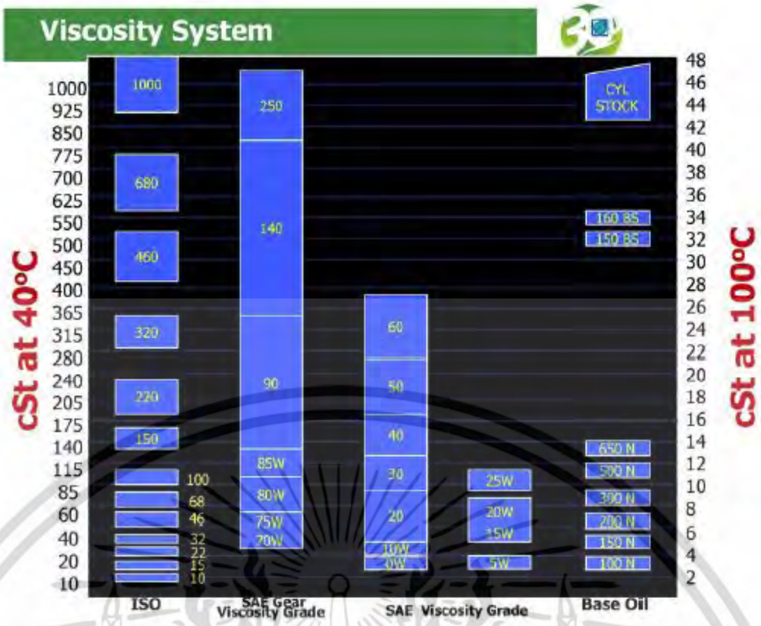
วัสดุ	แหล่งที่มา
เหล็ก	เสื้อสูบ , แหวนลูกสูบ , เพลารางวิ่งรองลื่น , เม็ดลูกกลิ้ง
โครเมียม	เสื้อสูบ , แหวนลูกสูบ , ปลอกสลักข้อต่อก้านสูบ
ตะกั่ว	วัสดุรองลื่น , โลหะบัดกรี , น้ำมันเชื้อเพลิง
ทองแดง	ลิ้นไอดีลิ้นไอเสีย , ปลอกนำเลื่อนลิ้นไอดีลิ้นไอเสีย
ดีบุก	ก้านสูบ , ปลอกก้านสูบลูกสูบ , แหวนและสลัก
อลูมิเนียม	ลูกสูบ , แบริ่งเพลาข้อเหวี่ยง , รังของรองเลื่อนแบบกลิ้ง
นิเกิล	ผิวรองลื่นแบบกาบ , ใบพัดเทอร์ไบน์
เงิน	ผิวรองลื่น , การบัดกรีเงิน , รองลื่นเพลาข้อเหวี่ยง
โมลิบดินัม	สารปรุงแต่งน้ำมันหล่อลื่น , แหวนลูกสูบ
ไททาเนียม	ใบพัดเทอร์ไบน์ , ชิ้นส่วนเครื่องบินเจ็ต
ซิลิกอน	เม็ดทราย , ฝุ่นผง , สารปรุงแต่งต่อต้านฟอง
โบรอน	ฝุ่นผง , ซีล , น้ำหล่อเย็น
แมกนีเซียม	สารปรุงแต่งน้ำมันหล่อลื่น , ชิ้นส่วนเครื่องกลอากาศยาน
แคลเซียม	รองลื่น , สารปรุงแต่งน้ำมันหล่อลื่น
แบเรียม	สารปรุงแต่งน้ำมันหล่อลื่น
ฟอสฟอรัส	สารปรุงแต่งน้ำมันหล่อลื่น , น้ำหล่อเย็น
สังกะสี	สารปรุงแต่งน้ำมันหล่อลื่น , รองลื่นแบบกาบ , ซีลยาง

2.2.2 การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น (Oil Condition)

การตรวจวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นเป็นการดำเนินการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับน้ำมันใหม่ โดยมีการตรวจวัดตามคุณสมบัติต่อไปนี้

- ความหนืด (Viscosity) หรือค่าความต้านทานการไหล มีหน่วยเป็น cSt (centiStoke) ซึ่งความข้นและความใสของน้ำมันหล่อลื่นโดยวัด ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง (มาตรฐาน ISO และ SAE วัดที่ 40 และ 100 องศาเซลเซียสตามลำดับ) หากน้ำมันหล่อลื่นใส (ค่า viscosity น้อย) แสดงว่าไหลง่าย มีชั้นฟิล์มของน้ำมันบาง ในทางตรงกันข้ามหากน้ำมันหล่อลื่นข้น (ค่า viscosity มาก) แสดงว่าจะไหลยาก มีชั้นฟิล์มของน้ำมันหนา โดยปกติทั่วไปการทดสอบที่พบบ่อยคือ มาตรฐาน ASTM D445

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ค่าความหนืดตามมาตรฐานต่างๆ [23]

- ออกซิเดชั่น (Oxidation) คือการตรวจวัดการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นที่มีอายุการใช้งานยาวนาน มีหน่วยวัดเป็น Abs (absorbance) ใช้เครื่องมือ FTIR (Fourier-Transform Infrared Spectroscopy) ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM E2412M ความยาวคลื่นของค่าออกซิเดชั่น คือ 1798 to 1670 cm−1

- ไนเตรชั่น (Nitration) คือการตรวจวัดการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นอันมีสาเหตุมาจากการสันดาปภายในเครื่องยนต์ระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ เกิดการรั่วเล็ดรอดตลอดผ่านแหวนลูกสูบทำให้ค่าไนเตรชั่นสูงขึ้น มีหน่วยวัดเป็น Abs ใช้เครื่องมือ FTIR ความยาวคลื่นของค่าไนเตรชั่นตามมาตรฐาน ASTM E2412M คือ 1650 to 1600 cm−1

- ค่าความเป็นด่าง (Total Base Number: TBN) คือการตรวจวัดค่าความเป็นด่างที่เหลืออยู่ในน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งเมื่อค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้นค่าความเป็นด่างก็จะลดลง โดยในขณะที่เครื่องยนต์เกิดการเผาไหม้จะมีค่าความเป็นกรดจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นอย่างรุนแรงและการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ คือ ASTM D4739

- จุดวาบไฟ (Flash Point) คือการตรวจวัดการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงในน้ำมันหล่อลื่นซึ่งจะส่งผลให้ค่าความหนืดลดลง เสี่ยงต่อการติดไฟเร็วกว่าปกติ โดยมีมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ คือ ASTM D3828

- ดัชนีความหนืด (Viscosity Index) หรือค่าความต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เป็นตัวเลขที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิ โดยน้ำมันหล่อลื่นจะมีค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงต่ำเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่ามีค่าดัชนีความหนืดสูง ในทางกลับกันหากน้ำมันหล่อลื่นมีค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงสูงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จะแสดงว่ามีค่าดัชนีความหนืดต่ำ โดยมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ คือ ASTM D2270

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การปนเปื้อน (Contamination)

การปนเปื้อนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งต่อการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นและการสึกหรอของเครื่องยนต์ โดยการปนเปื้อนสามารถเกิดได้จากแหล่งที่มาทั้งภายในและภายนอกเครื่องยนต์ ดังต่อไปนี้

- น้ำ (Water) น้ำหรือความชื้นส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นและการสึกหรอของเครื่องยนต์เป็นอย่างมาก เนื่องจากเมื่อมีน้ำเข้าไปปนเปื้อนกับน้ำมันหล่อลื่นในเครื่องยนต์จะทำให้แผ่นฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นด้อยประสิทธิภาพลง ส่งผลให้ผิวของชิ้นงานมีโอกาสเกิดการสึกหรอแบบยึดติด ขูดขีด และล้าตัว ได้ รวมถึงยังส่งผลให้เกิดสนิมเหล็กและความเป็นกรดสูงได้ด้วย โดยมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ คือ ASTM E2412M

- น้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel) น้ำมันเชื้อเพลิงสามารถเข้าไปปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นผ่านแหวนลูกสูบขณะเกิดกระบวนการเผาไหม้ ส่งผลให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นลดต่ำลง ทำให้การปกป้องชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์ลดต่ำลงตามไปด้วย ซึ่งจะก่อให้เกิดการสึกหรอมากขึ้น โดยมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ คือ ASTM E2412M

- เขม่า (Soot) เขม่าเกิดจากกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ เมื่ออายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นมากขึ้น เขม่าก็จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยเขม่าจะทำให้น้ำมันหล่อลื่นหนืดขึ้น ส่งผลให้เครื่องยนต์ร้อนขึ้น เนื่องจากไม่สามารถเข้าไปหล่อลื่นชิ้นส่วนที่เกิดความร้อนได้ทันตามการไหลที่ช้าลง และเกิดการสึกหรอมากขึ้นเพราะเขม่าจับตัวกันเป็นก้อนทำให้เกิดการขูดขีดเพิ่มขึ้น โดยมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ คือ ASTM E2412M

- อนุภาคสิ่งสกปรกและฝุ่นละออง (Silicon) เป็นสาเหตุที่มักทำให้ชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์สึกหรอ ซึ่งระดับความรุนแรงจะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และความแข็ง ของอนุภาคสิ่งสกปรกและฝุ่นละอองนั้นๆ เนื่องจากเมื่อปนเปื้อนเข้าไปในเครื่องยนต์ระหว่างหน้าผิวสัมผัสที่กำลังมีการเคลื่อนที่อนุภาคเหล่านี้จะก่อให้เกิดการขีดข่วนของหน้าผิวชิ้นงาน และการเคลื่อนที่แบบกลิ้งตัวของอนุภาคสิ่งสกปรกและฝุ่นละอองอาจทำให้ผิวชิ้นงานเกิดการล้าตัว โดยมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ คือ ASTM E2412M

2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้ว [20]

2.3.1 การตรวจวิเคราะห์ธาตุด้วยสเปคโตรมิเตอร์ (Elemental Spectroscopy)

การตรวจวิเคราะห์ธาตุด้วยสเปคโตรมิเตอร์อาศัยหลักการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกับน้ำมันหล่อลื่นตัวอย่าง ทำให้อะตอมของธาตุในน้ำมันหล่อลื่นระเหยตัว โดยพลังงานจะถูกปลดปล่อยออกมาในลักษณะของแสง ซึ่งธาตุแต่ละชนิดจะมีแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน สเปคโตรมิเตอร์สามารถใช้ตรวจวัดชนิดของธาตุได้ตามความยาวคลื่น โดยความเข้มของแสงจะบ่งบอกถึงปริมาณของธาตุแต่ละชนิด เช่น ตะกั่ว เหล็ก ดีบุก มีหน่วยเป็นส่วนในล้านส่วนน้ำมันหล่อลื่น (past per million: ppm) ซึ่งธาตุที่วิเคราะห์ได้สามารถแบ่งตามการเกิดได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ธาตุโลหะจากการสึกหรอ ธาตุโลหะจากสิ่งสกปรก และธาตุโลหะจากสารปรุงแต่ง โดยมีเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

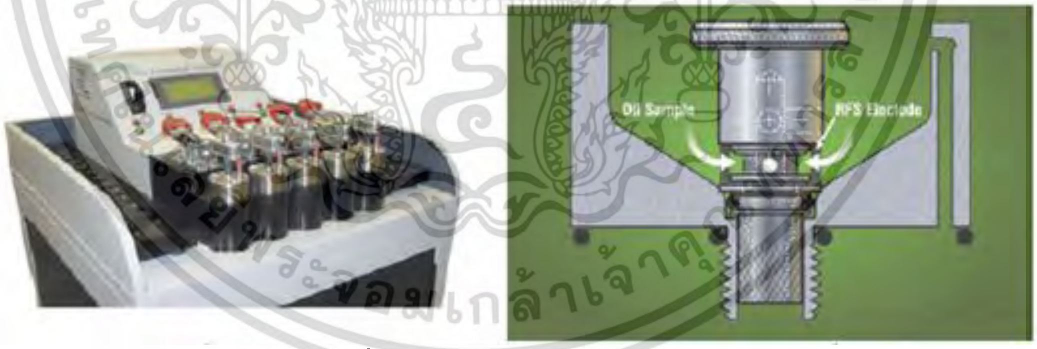
- Rotating Disk Electrode: RDE สามารถตรวจวัดขนาดได้น้อยกว่า 8 ไมโครเมตร โดยตัวอย่างของน้ำมันหล่อลื่นจะถูกอาร์คของขั้วอิเล็กโตรดที่อุณหภูมิสูง โดยใช้จานหมุนที่ทำจากวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนซึ่งจะจุ่มอยู่ในภาชนะบรรจุน้ำมัน ซึ่งจานหมุนดังกล่าวจะชักนำเอาตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นขึ้น เมื่อเกิดการอาร์คอะตอมของธาตุจะได้รับพลังงานความร้อนอย่างรุนแรงจนทำให้อิเล็กตรอนชั้นนอกสุดหลุดออกจากวงโคจร และมีการรังสีที่ความยาวคลื่นเฉพาะของธาตุนั้นๆ

รูปที่ 2.15 หลักการท างานของ RDE

- Rotrode Filter Spectroscopy: RFS สามารถตรวจวัดขนาดได้ใหญ่กว่า RDE ตั้งแต่ 5-100 ไมโครเมตร โดยตัวอย่างของน้ำมันหล่อลื่นจะถูกอาร์คของขั้วอิเล็กโตรดที่อุณหภูมิสูง โดยใช้จานหมุนที่ทำจากวัสดุคาร์บอนที่มีด้านขอบของจานเป็นไส้กรองซึ่งจะทำการกรองก่อนแล้วจึงค่อยทำการอาร์คลักษณะเช่นเดียวกับ RDE



รูปที่ 2.16 หลักการท างานของ RFS

2.3.2 การตรวจวิเคราะห์ความหนืด (Elemental Spectroscopy)

- เครื่องวัดค่าความหนืด (Viscometer) ความหนืดคือค่าความต้านทานการไหลภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก หรือ คุณสมบัติของสารหล่อลื่นซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของแรงกระทำ เครื่องวัดค่าความหนืดมีลักษณะเป็นหลอดแก้วยาวคงที่เพื่อให้เกิดการไหลแบบราบเรียบ ในการวัดจะต้องมีการควบคุมความดันและอุณหภูมิให้คงที่ โดยค่าเวลา (วินาที) ที่วัดได้ตั้งแต่เริ่มการไหลจุดแรกจนถึงจุดสุดท้าย เมื่อนำไปคูณกับค่าคงที่ของหลอดทดสอบผลที่ได้จะมีหน่วยเป็นเซนติสโตรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.17 เครื่องวัดค่าความหนืด (Viscometer) [24]

2.3.3 การตรวจวิเคราะห์ความเป็นด่าง

- เครื่องวัดค่าความเป็นด่าง (Potentiometric) ใช้วัดค่าความเป็นด่างที่เหลืออยู่ในน้ำมันหล่อลื่น โดยใช้หลักการตรวจสอบจุดสะเทินด้วยการวัดทางไฟฟ้า มีหน่วยเป็นด่าง คือ mgKOH/g เหมือนกับค่า TAN ซึ่งค่า KOH ที่ใช้ในการหาจุดสะเทินของ TBN คือการนำ KOH ไปทำการไทเทรชั่นกับ HCl เพื่อหาจุดสะเทิน

รูปที่ 2.18 เครื่องวัดค่าความเป็นด่าง (Potentionmetric) [25]

2.3.4 การตรวจวิเคราะห์จุดวาบไฟ

- เครื่องวัดจุดวาบไฟ (Small Scale Closed Cup Tester) ใช้หลักการให้ความร้อนกับน้ำมันตัวอย่างจนทำให้เกิดไอน้ำมันหล่อลื่นผสมกับบรรยากาศภายในถ้วย และจะเกิดการลุกวาบของไฟเมื่อนำไฟเข้าไปใกล้ เป็นการทดสอบการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงในน้ำมันหล่อลื่นซึ่งจะทำให้ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นลดลง ส่งผลให้มีการปกป้องชิ้นงานน้อยลง ก่อให้เกิดการสึกหรอมากขึ้นและเสี่ยงต่อการติดไฟได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.19 เครื่องวัดจุดวาบไฟ (Small Scale Closed Cup Tester) [26]

2.4 การวิเคราะห์ รูปร่าง ขนาด พื้นผิว และชนิดของธาตุ

2.4.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope: OM)

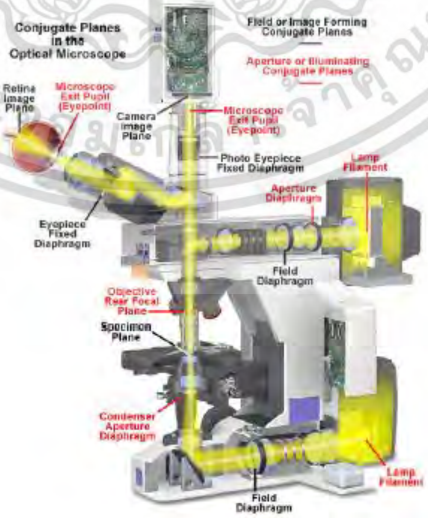
OM เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ขนาด รูปร่าง และผิว ของชิ้นงาน โดยสามารถขยายภาพของวัตถุได้ในระดับ 10-1,000 เท่า โดยกล้องรุ่น Huvitz HRM-300 สามารถถ่ายภาพได้ทั้ง 2 มิติ (กว้างและยาว) และ 3 มิติ (กว้าง ยาว และลึก) ใช้หลักการวัดระดับความเข้มของแสงที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งเลนส์ของกล้องรุ่นดังกล่าวสามารถจดจำระดับความเข้มของแสงของแต่ละกำลังขยายได้ ทำให้สามารถสร้างภาพ 3 มิติ ได้และสามารถใช้ดูภาพตัดขวางของภาพนั้นได้ ทำให้สามารถทราบถึงค่าความหยาบโดยเฉลี่ย และนำมาคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$R = \frac{h_1 + h_2 + \cdots + h_n}{n} \quad (2.4)$$

โดย R = ค่าเฉลี่ยความหยาบผิวทางเลขคณิต (Mean Roughness Value)

h_n = ผลต่างของค่าความสูงระหว่างจุดสูงกับจุดต่ำ

n = จำนวนที่ทำการวัด



รูปที่ 2.20 หลักท างานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

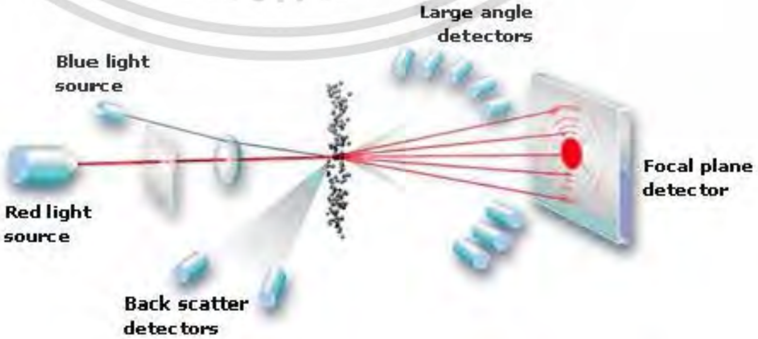
2.4.2 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

การวิเคราะห์ด้วย SEM ใช้หลักการกราดยิงลำอิเล็กตรอนบนผิวตัวอย่าง ซึ่งบริเวณที่ถูกลำอิเล็กตรอนจะเกิดสัญญาณ โดยสัญญาณดังกล่าวจะถูกแปลงเป็นภาพบนจอรับภาพ มีกำลังขยายภาพสูงถึง 500,000 เท่า และมีความละเอียดต่ำกว่า 1 นาโนเมตร นอกจากนี้ SEM ยังมีเครื่องรับสัญญาณชนิด energy-dispersive x-ray spectroscopy (EDX or EDS) หรือเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน ซึ่งใช้หลักการวัดค่าพลังงานรังสีเอกซ์จากการคายพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกสุดในรูปของรังสีเอกซ์ โดยธาตุแต่ละชนิดมีค่ารังสีเอกซ์เฉพาะตัวทำให้สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในแต่ละชิ้นงานได้

รูปที่ 2.21 หลักท างานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [28]

2.5 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Particle Size Analysis by Laser Diffraction Technique)

เป็นการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคที่มีอยู่ในตัวอย่างทดสอบ ซึ่งจะถูกคำนวณออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคนั้น โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของแสงที่มีแหล่งกำเนิดจากเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 400-700 นาโนเมตร ขนาดของอนุภาคจะแปรผกผันกับมุมการเลี้ยวเบนของแสง กล่าวคืออนุภาคขนาดใหญ่จะมีมุมการเลี้ยวเบนของแสงแคบและอนุภาคขนาดเล็กจะมีมุมการเลี้ยวเบนของแสงกว้าง

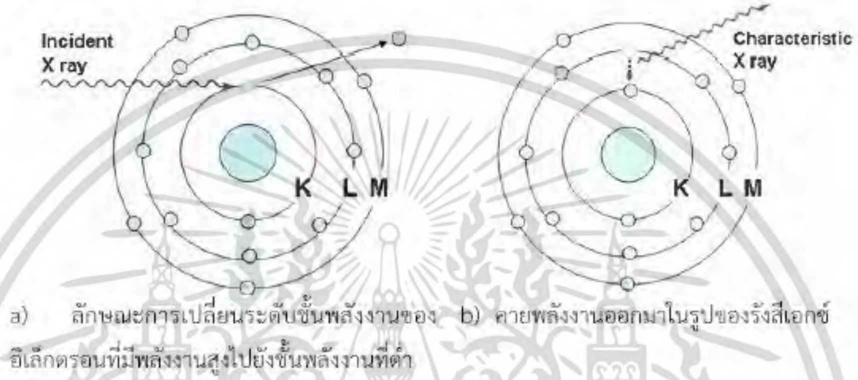


รูปที่ 2.22 หลักท างานของการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X ray Fluorescence Spectroscopy)

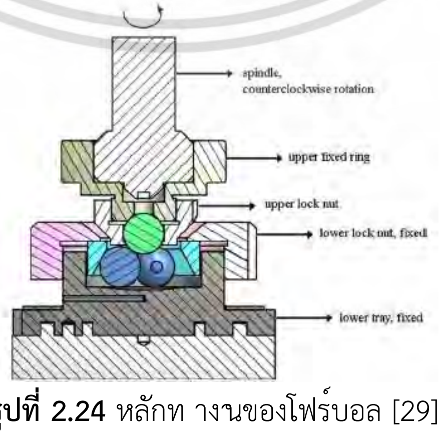
เป็นการวิเคราะห์โดยใช้หลักการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็คตรอนที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นพลังงานที่ต่ำกว่าจากการพุ่งชนสารตัวอย่างด้วยรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray photon) จากหลอดรังสีเอ็กซ์ โดยอิเล็คตรอนจะปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิ (Secondary X-ray photon) ที่มีพลังงานจำเพาะของแต่ละธาตุในการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน ทำให้สามารถทราบชนิดของธาตุ และยังสามารถทราบปริมาณธาตุได้จากการวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่มีการคายออกมา



รูปที่ 2.23 หลักท างานของการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์

2.7 การทดสอบวัดคุณสมบัติต้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล (Four ball test)

การทดสอบโฟร์บอลแบบวัดคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอของน้ำมันหล่อลื่น โดยนำลูกบอลเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร เกรด 25 EP (Extra Polish) ค่าความหยาบของผิวลูกบอลเหล็ก = 0.05 um และค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ (HRC) อยู่ในช่วง 64-66 ทั้งสามลูกแช่ลงไปในน้ำมันหล่อลื่นจนท่วม จับยึดแน่นไม่ให้เคลื่อนที่ เมื่อกดลูกบอลเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. อีกลูกลงบนช่องว่างระหว่างลูกบอลทั้งสามลูกดังกล่าว จนเกิดจุดผิวสัมผัสกับลูกบอลเหล็กทั้งสามลูกด้วยแรง 394 นิวตัน พร้อมทั้งหมุนด้วยความเร็ว 1,200 รอบ/นาที เป็นเวลา 60 นาที แล้วเปรียบเทียบคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอโดยวิเคราะห์จากเส้นผ่านศูนย์กลางของแผลการสึกหรอ (Scar) ที่เกิดจากการเสียดสีของลูกบอลบนผิวลูกบอลเหล็กทั้งสามลูกด้านล่าง



รูปที่ 2.24 หลักท างานของโฟร์บอล [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

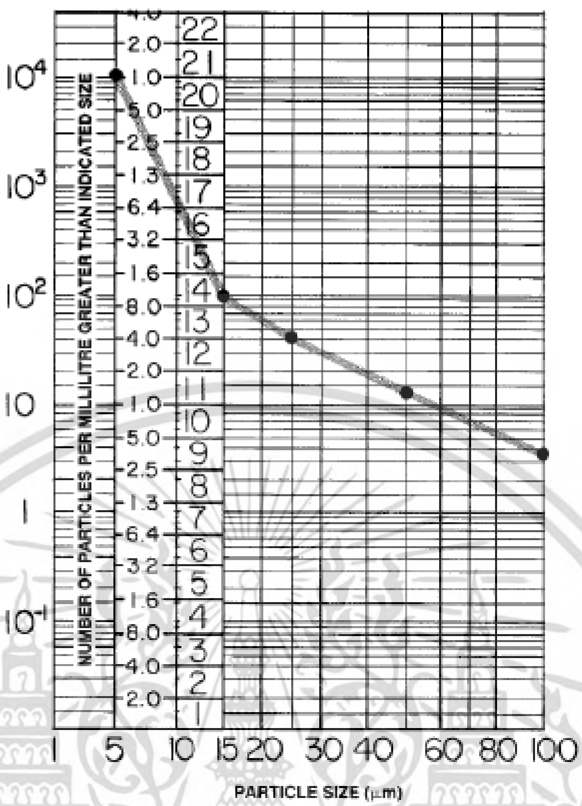
Hakan Kaleli et al. [30] ศึกษาการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นและช่วงเวลาการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น โดยแบ่งสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นเป็นสองประเภท สาเหตุแรกเกิดจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีในทางที่แย่ลงซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดออกซิเดชั่นที่สูงขึ้น สาเหตุที่สองเกิดจากการปนเปื้อนฝุ่นละออง น้ำมันเชื้อเพลิง และโบลว์บายก๊าซที่เพิ่มมากขึ้น ผลการศึกษากรณีรถยนต์เฟียต (Fiat) ขนาดเครื่องยนต์ 1.6 L น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ 20W50 ใช้การขับขี่ในเมืองของประเทศตุรกี โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นทุก 2,000 กิโลเมตร จนถึงระยะ 15,000 กิโลเมตร แล้วคาดการณ์ระยะเวลาการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสมโดยประเมินจากการเสื่อมสภาพทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่น เช่น ความหนืด จุดวาบไฟ ค่าความเป็นด่าง เศษโลหะเหล็กที่สึกหรอ ซึ่งพบว่าระยะการเปลี่ยนถ่ายที่เหมาะสม คือ 9000 กิโลเมตร

Karl Kollmann et al. [31] ศึกษาการยืดระยะเวลาการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น ใช้ระบบการบำรุงรักษารถยนต์ Active Service System (ASSYST) เป็นอุปกรณ์ในการนำข้อมูลที่ได้จากรถ เช่น อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น อุณหภูมิน้ำมันหล่อเย็น ค่าการนำไฟฟ้า ความเร็วของเครื่องยนต์ รอบและโหลดของเครื่องยนต์ รวมถึงระดับน้ำมันหล่อลื่น มาคำนวณหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งจากการศึกษากรณีเครื่องยนต์เบนซิน 70 คัน ที่มีเครื่องยนต์ ลักษณะการขับขี่ และความจุของเครื่องยนต์ ที่ต่างกัน พบว่าระยะทางการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสมโดยเฉลี่ย คือ 21,000 กิโลเมตร และยังพบว่าเครื่องยนต์ที่มีความจุของเครื่องยนต์ที่สูงกว่าจะมีผลกระทบต่อน้ำมันหล่อลื่นน้อยกว่า โดยจากการทดสอบกับรถทดสอบวิ่งจริงที่อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นต่ำและสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าความหนืด การปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง และโลหะ เพิ่มขึ้น ในส่วนของค่าความเป็นด่างในน้ำมันหล่อลื่นพบว่าลดลงทั้งสองกรณี ซึ่งระยะเวลาการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสมของกรณีน้ำมันหล่อลื่นอุณหภูมิต่ำ คือ 6,554 กิโลเมตร และกรณีน้ำมันหล่อลื่นอุณหภูมิสูง คือ 20,000 กิโลเมตร

Marián KUČERA et al. [32] ใช้เครื่องมือ FTIR ตรวจวัดอนุภาคเศษโลหะสึกหรอในน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้วของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการเกษตรที่ระยะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่น 1,000 2,000 และ 3,000 ชั่วโมง ดูการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีเติมแต่งระหว่างการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่น โดยภาพถ่ายเฟอร์โรกราฟฟี่สามารถนำมา ใช้วิเคราะห์รูปร่าง สี และพื้นผิวของเศษโลหะ ที่สึกหรอได้ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าสารเคมีเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้วมีปริมาณลดลง และตรวจพบเศษโลหะสึกหรอแบบยึดติด ขูดขีด และล้าตัว

James A.Addison and William M. Needelmal. [19] ศึกษาการปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์สึกหรอ เนื่องจากการปนเปื้อนเป็นปัจจัยเร่งให้น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพเร็วขึ้น และหากมีการปนเปื้อนของอนุภาคขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนามากกว่าชั้นของแผ่นฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นก็จะทำให้เกิดการขูดขีดบนแผ่นชิ้นงานที่เคลื่อนที่และส่งผลให้เกิดการสึกหรอ โดยพบว่าขนาดอนุภาคที่เป็นอันตรายต่อเครื่องยนต์ส่วนใหญ่เล็กกว่า 20 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 ระดับการปนเปื้อนของแต่ละขนาดอนุภาค

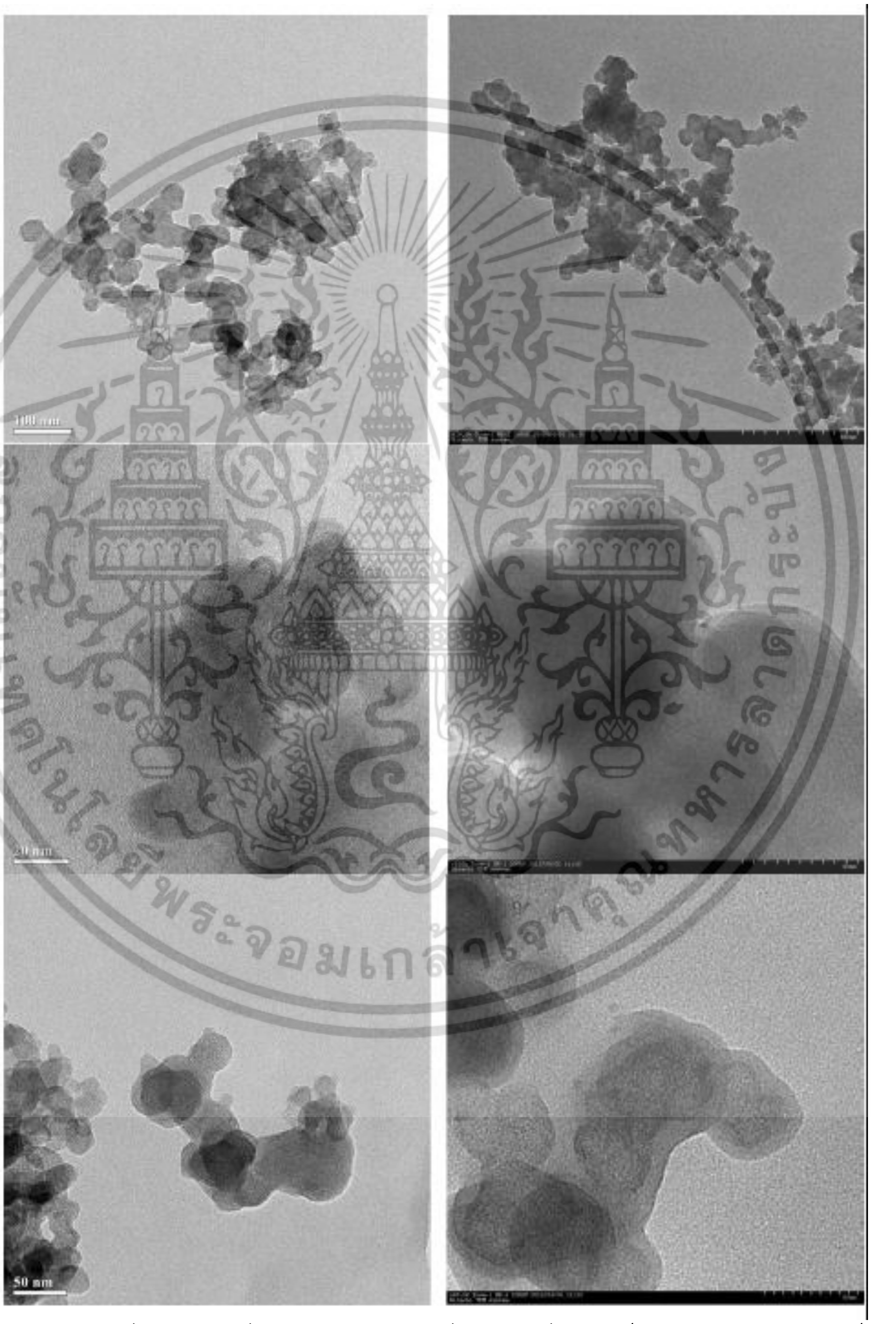
D A Green and R Lewis. [33] ได้รวบรวมงานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของการปนเปื้อนเขม่าในน้ำมัน หล่อลื่น และพบว่าจากงานวิจัยของ *Sato, H et al.* ซึ่งใช้เครื่องมือทดสอบโฟร์บอลค้นพบว่าเมื่อเขม่าเกาะตัวเป็นก้อนเขม่าขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นจะทำให้ขาดการหล่อลื่นในจุดที่มีขนาดของเขม่ามากกว่าความหนาของแผ่น ฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น

A.D.H Clague et al. [34] พบว่าอนุภาคของคาร์บอนแบล็ค (Carbon Black) มีลักษณะคล้ายกับเขม่า (Soot) ในน้ำมันหล่อลื่น โดยเขม่ามีขนาดโดยเฉลี่ยที่ 30-50 นาโนเมตร (ใช้เทคนิค SEM และ TEM ในการวิเคราะห์) เมื่อเทียบกับคาร์บอนแบล็คแล้วมีขนาดแตกต่างกันน้อยมาก แต่หากตรวจวัดขณะที่มีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน คาร์บอนแบล็คจะมีขนาดใหญ่กว่าเขม่าเล็กน้อย

CHOKUN S. [35] ศึกษาผลกระทบของการปนเปื้อนเขม่าต่อการสึกหรอและคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น โดยใช้เครื่องมือทดสอบโฟร์บอล พบว่าขนาดของอนุภาคที่เกาะรวมกันเป็นกลุ่มก้อนของทั้งเขม่าและคาร์บอนแบล็คจากภาพถ่ายTEM มีขนาดตั้งแต่ 200-500 nm (แสดงดังรูปที่ 2.26) เมื่อตรวจสอบขนาดอนุภาคปฐมภูมิของเขม่าจากเครื่องยนต์ดีเซลและคาร์บอนแบล็ค (แสดงดังรูปที่ 2.27) พบว่าอนุภาคปฐมภูมิของเขม่าจากเครื่องยนต์ดีเซลมีขนาดตั้งแต่ 8-62 nm โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30 nm สำหรับอนุภาคปฐมภูมิของคาร์บอนแบล็คมีขนาดตั้งแต่30-87 nm โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 58 nm และยังพบว่าเมื่อปนเปื้อนคาร์บอนแบล็คปริมาณ 1 %wt. ในน้ำมันหล่อลื่น Lubricant A และ Lubricant B เพื่อศึกษาคุณสมบัติการกระกระจายตัวในน้ำมันหล่อลื่นด้วยการทดสอบโฟร์บอล อนุภาคที่

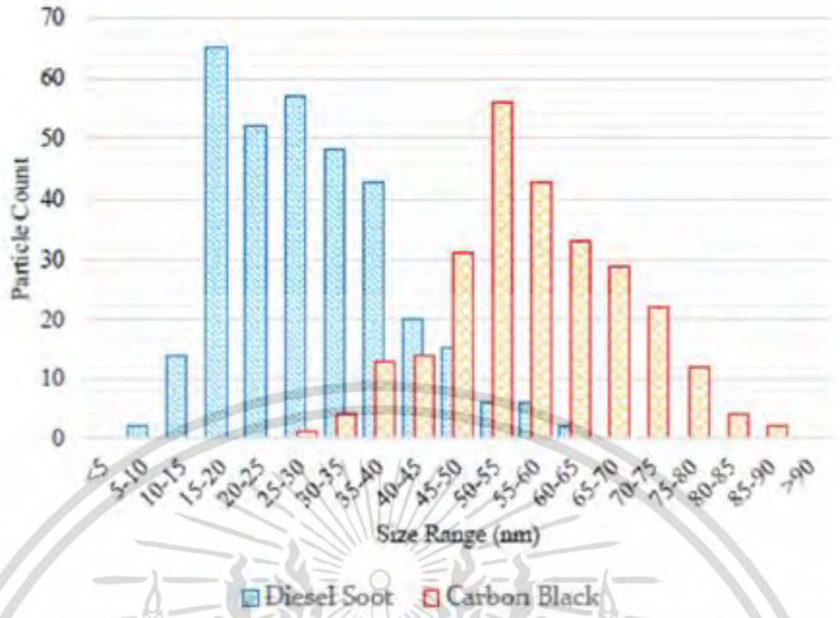
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีขนาดมากกว่า 300 nm อาจไม่สามารถก่อให้เกิดการสึกหรอระหว่างผิวชิ้นงานได้เพราะมีขนาดมากกว่าความหนาของแผ่นฟิล์ม โดยอนุภาคของคาร์บอนแบล็คในน้ำมันหล่อลื่น Lubricant A ที่สามารถเข้าไปก่อให้เกิดการสึกหรอระหว่างชิ้นงานได้มีปริมาณ 9% ส่วนอนุภาคของคาร์บอนแบล็คในน้ำมันหล่อลื่น Lubricant B ที่สามารถเข้าไปก่อให้เกิดการสึกหรอระหว่างชิ้นงานได้มีปริมาณ 25% (แสดงดังรูปที่ 2.28) และขนาดของแผลที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็กของน้ำมันหล่อลื่น Lubricant A และ Lubricant B มีค่าเพิ่มขึ้น 44 um และ 66 um ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ new oil (แสดงดังรูปที่ 2.29)

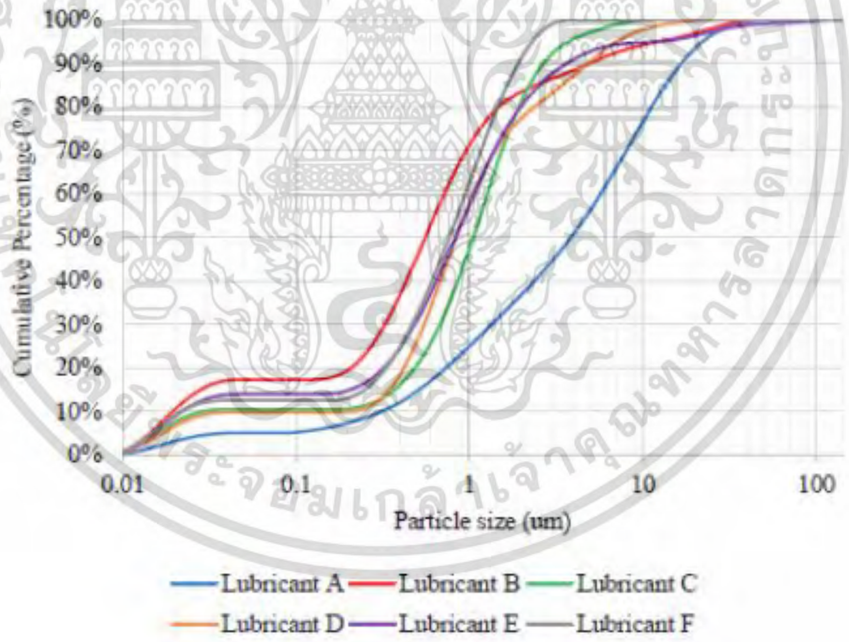


รูปที่ 2.26 ความแตกต่างทางรูปร่างลักษณะของเขม่าจากเครื่องยนต์ดีเซล (ขวา) และคาร์บอนแบล็ค (ซ้าย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

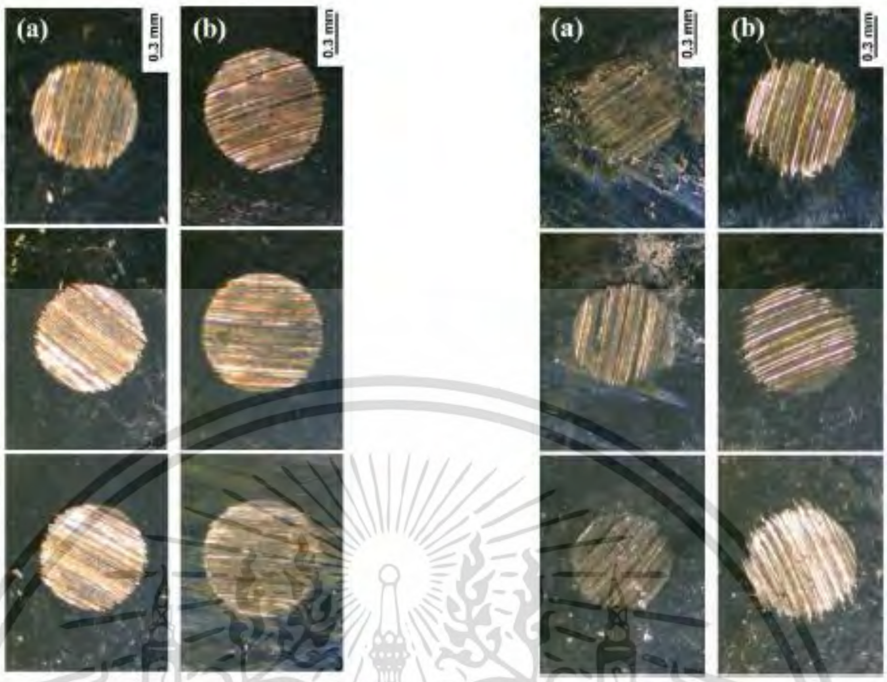


รูปที่ 2.27 การกระจายตัวของอนุภาคปฐมภูมิของเขม่าจากเครื่องยนต์ดีเซลและคาร์บอนแบล็ค



รูปที่ 2.28 คุณสมบัติการกระตัวของน้ ามันหล่อลื่นแต่ละชนิดที่ปนเปื้อนคาร์บอนแบล็ค 1 % wt.

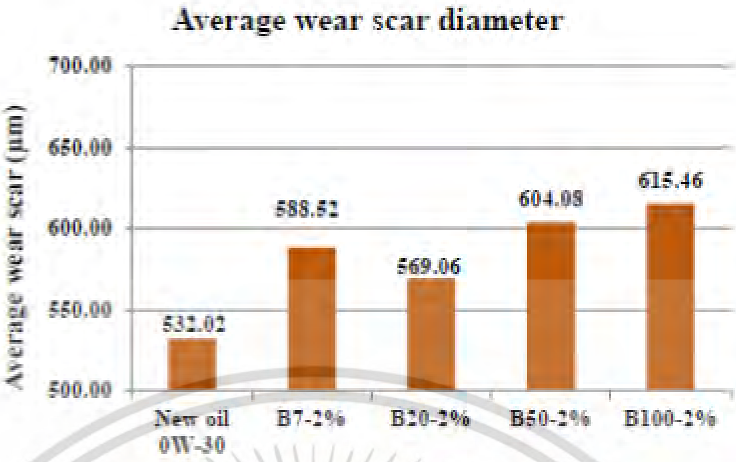
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



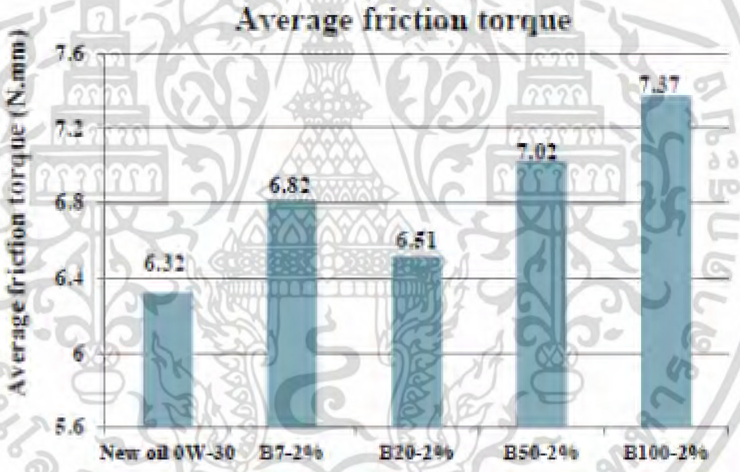
รูปที่ 2.29 ขนาดของแผลที่สึกหรอบนลูกบอลเหล็กของน้ำมันหล่อลื่น Lubricant A และ Lubricant B และที่ปนเปื้อนคาร์บอนแบล็ค 1% wt.

PHIRANAT K. [36] ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วของเครื่องยนต์ดีเซล พบว่าค่าเฉลี่ยการปนเปื้อนเขม่าในน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วของรถยนต์ที่มีขนาดเครื่องยนต์ 1,500 ซีซี จำนวน 10 คัน เก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นจากรถที่ใช้งานจริงที่ระยะเปลี่ยนถ่ายน้ำมัน หล่อลื่น 10,000 กิโลเมตร อยู่ที่ 0.69% wt. และในการทดสอบโฟร์บอลที่มีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของไบโอดีเซลแตกต่างกัน พบว่าขนาดของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กและแรงเสียดทานต้านการหมุนของ B100-2% มีค่ามากที่สุด ในขณะที่ new oil SAE 0W30 ที่ไม่มีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงมีค่าน้อยที่สุด และในส่วนของการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง B20-2% มีขนาดของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กและแรงเสียดทานต้านการหมุนน้อยกว่า B7-2%, B50-2% และ B100-2% เนื่องจากมีค่าความหนืดมากกว่า B7-2% และมีเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนน้อยกว่า B50-2% และ B100-2% (แสดงดังรูปที่ 2.30 และ 2.31)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 ขนาดของแผลสึกหรอบนลูกบอลเหล็กของการปนเปื้อนน้ ามันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของไบโอดีเซลที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.31 แรงเสียดทานต้านการหมุนของการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของไบโอดีเซลที่แตกต่างกัน

Simon C. Tung and Hong Gao. [37] ใช้เครื่องมือทดสอบไทรโบมิเตอร์ชนิดเคลื่อนที่ไปกลับเพื่อทดสอบค่าแรงเสียดทานและการสึกหรอของแหวนลูกสูบกับกระบอกสูบในการวิเคราะห์ผลกระทบจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของเอทานอลและแก๊สโซลีนในอัตราส่วน 85%:15% หรือที่เรียกว่า E85 พบว่าน้ำมันเชื้อเพลิง E85 จะทำให้ชั้นฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นที่ปกป้องชิ้นงานอยู่บางลง ส่งผลให้เกิดความเสียดทานระหว่างชิ้นงานและมีการสึกหรอเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ด้วยเงื่อนไขการทดสอบเดียวกัน ยกเว้นในส่วนของความเป็นกรดที่ต่างกันคือ pH4 และ pH6 พบว่าน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ที่มีความเป็นกรดมากจะก่อให้เกิดความเสียดทานระหว่างชิ้นงานและการสึกหรอมากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิง E85 ที่มีความเป็นกรดน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Henara L. Costa, Tung and Hugh A. Spikes. [38] ศึกษาผลกระทบของเอธานอลต่อการก่อตัวของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารเคมีเติมแต่ง ZDDP ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่น โดยใช้เทคนิคการทดสอบ MTM-SLIM (Sliding/Rolling Contact is Generated Between a Steel Ball and Steel Disk Using a Mini Traction Machine) ตรวจสอบการปนเปื้อนเอธานอล 5%wt ของเอธานอลไม่มีน้ำ (anhydrous) และเอธานอลที่มีน้ำเจือปน (hydrated) 6.2-7.4 %wt ในน้ำมันหล่อลื่น ตามมาตรฐาน API SL และน้ำมันพื้นฐานที่มีการผสมสารเคมีเติมแต่ง ZDDP พบว่าเมื่อมีการปนเปื้อนเอธานอลในน้ำมันหล่อลื่นทั้งคู่ความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเอธานอลที่มีน้ำเจือปนมีความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นต่ำกว่าเอธานอลไม่มีน้ำ และเมื่อทดสอบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่มีการปนเปื้อนเอธานอลแล้วทำการปนเปื้อนเอธานอลที่มีน้ำเจือปน พบว่าความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นลดลงจากเดิม ทำให้พื้นผิวที่ขัดถูเกิดความเสียหาย

E. LAINE et al. [39] ศึกษาผลกระทบของสารเคมีเติมแต่งลดแรงเสียดทาน MoDTC (Molybdenum Bis-Diethylhexyl Dithiocarbamate) พบว่าตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base oil) ชนิดน้ำมันแร่ที่มีการผสมสารปรุงแต่งต่อต้านการสึกหรอ (ZDDP) และ MoDTC มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและการสึกหรอน้อยกว่าตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base oil) ชนิดน้ำมันแร่ที่มีการผสมสารปรุงแต่งต่อต้านการสึกหรอ (ZDDP) เพียงอย่างเดียว เนื่องจากกลไกที่เกี่ยวข้องกับโมลิบดินัมไดซัลไฟด์ (MoS2) ที่เข้าไปปกคลุมในพื้นที่ที่มีการขัดถูของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 5W30

น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 5W30 ใช้ได้ทั้งเครื่องยนต์ดีเซลและแก๊สโซลีน จะถูกทำการวิเคราะห์ค่าความหนืด ออกซิเดชั่น ไนเตรชั่น และค่าความเป็นด่าง ด้วยวิธีตามมาตรฐาน ASTM สารเติมแต่งน้ำมันเชื้อเพลิงจะถูกวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุ ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X ray Fluorescence Spectroscopy) โดยมีมาตรฐานสำหรับการทดสอบน้ำมันหล่อลื่น (New Engine Oil) ดังนี้

- Kinematic Viscosity @ 40°C (ASTMD-445)
- Kinematic Viscosity @ 100°C (ASTMD-445)
- Oxidation (ASTM E-2412 M)
- Total base number (ASTM D-4739)

3.1.2 คาร์บอนแบล็ค [39]

คาร์บอนแบล็ค คือ เขม่าสังเคราะห์ ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพและขนาดอนุภาคคล้ายกับเขม่าเครื่องยนต์ ในงานวิจัยนี้ได้นำคาร์บอนแบล็คมาจำลองแทนที่เขม่า เพื่อที่จะศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคเขม่าต่อการสึกหรอของโลหะ โดยใช้คาร์บอนแบล็ค (Commercial Carbon Black) ที่มีขนาดอนุภาคเดี่ยว (Primary Particle Sizes) แตกต่างกัน คือ คาร์บอนแบล็ค เบอร์ N220, N330, N550 และ N660

รูปที่ 3.1 คาร์บอนแบล็ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

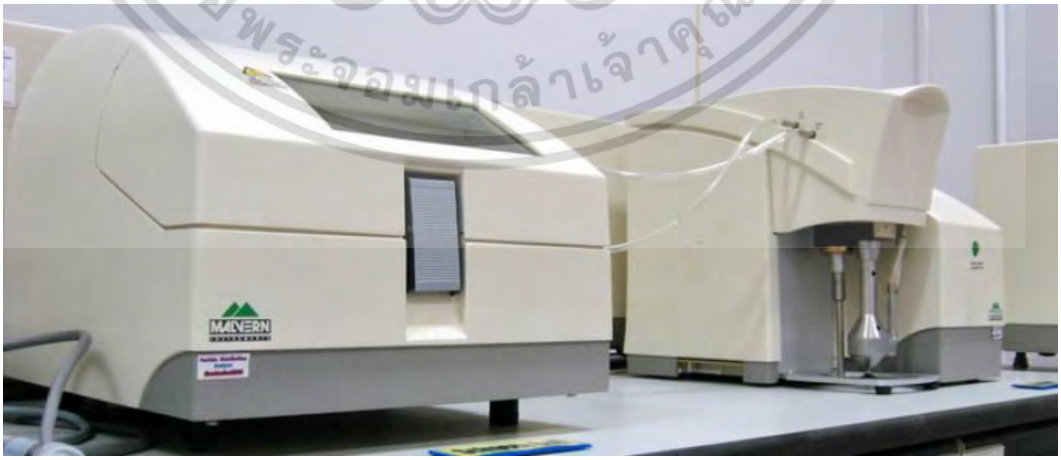
3.1.3 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM)

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านใช้ในการศึกษาลักษณะทางสัญฐานวิทยาและโครงสร้างในระดับนาโนของอนุภาคคาร์บอนแบล็ค จุดประสงค์เพื่อหาขนาดอนุภาคเดี่ยวเฉลี่ยและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM)

3.1.4 เครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Laser Diffraction Spectroscopy)

เครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสงสามารถใช้วิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคในของเหลว ในงานวิจัยนี้ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็คที่มีชนิดแตกต่างกัน ทั้งก่อนและหลังการทดสอบการวัดคุณสมบัติต้านการสึกหรอ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค (LDS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 เครื่องทดสอบวัดคุณสมบัติต้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล (Four-Ball Wear Tester)

เครื่องทดสอบโฟร์บอลแบบวัดคุณสมบัติการป้องกันการสึกหรอของน้ำมันหล่อลื่น โดยนำลูกบอลเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร เกรด 25 EP ค่าความแข็งแบบร็อคเวลส์ (HRC) อยู่ระหว่าง 64 ถึง 66 และค่าความหยาบของผิวลูกบอลเหล็ก มีค่า 0.005 ไมครอน ทั้งสามลูกถูกแช่อยู่ในน้ำมันหล่อลื่นจนท่วมและยึดแน่นไม่เคลื่อนที่ กดลูกบอลเหล็กลูกที่สี่ลงบนช่องว่างระหว่างลูกบอลทั้งสามด้วยแรง 394 นิวตัน พร้อมทั้งหมุนด้วยความเร็ว 1,200 รอบ/นาที เป็นเวลา 60 นาที การเปรียบเทียบคุณสมบัติต้านการสึกหรอ ซึ่งจะเปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยที่เกิดจากการเสียดสีของลูกบอล

รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบต้านการสึกหรอชนิดโฟร์บอล (Four-Ball Tester)

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-4172 [40]

เงื่อนไขการทดสอบ		วัสดุลูกบอลเหล็ก	
ความเร็วรอบการหมุนลูกบอล	1,200 rpm	เกรดวัสดุลูกบอลเหล็ก	25 EP
ภาระแรงกด	392 N	ความหยาบพื้นผิว	0.005 microns
ช่วงเวลาทดสอบ	60 min	ความแข็ง (Rock well)	64-66 (HRC)
อุณหภูมิ	75°C		

3.1.6 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) ใช้ในการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยสึกหรอ (WSD) ของลูกบอลเหล็กจำนวน 3 ลูก ด้านล่าง หลังจากการทดสอบวัดคุณสมบัติต้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล เพื่อเปรียบรอยการสึกหรอในแต่ละตัวอย่าง และสามารถวัดความหยาบพื้นผิว (Roughness Surface) โดยใช้ภาพถ่ายพื้นผิว 3D การทดสอบนี้จะช่วยทำความเข้าใจกลไกการสึกหรอของโลหะมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

3.1.7 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) และเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (EDX) ใช้วิเคราะห์รอยสึกหรอและองค์ประกอบธาตุบนพื้นผิวโลหะ

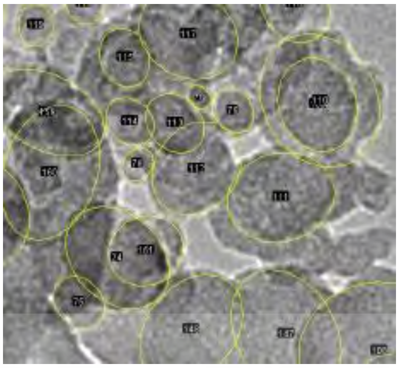
รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคคาร์บอนแบล็ค

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและโครงสร้างในระดับนาโนเมตรของคาร์บอนแบล็คชนิดแตกต่างกัน มีจุดประสงค์เพื่อหาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคเดี่ยวคาร์บอนแบล็คเฉลี่ย โดยคาร์บอนแบล็คที่ถูกใช้ทดสอบมี 4 ชนิด คือ N220, N330, N550 และ N660 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การวัดขนาดอนุภาคเดี่ยวคาร์บอนแบล็ค

3.2.2 ผลกระทบของการปนเปื้อนเขม่าต่อการสึกหรอของโลหะ

คุณสมบัติต้านการสึกหรอของน้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนเขม่าจำลองโดยใช้คาร์บอนแบล็คถูกวิเคราะห์โดยเครื่องทดสอบวัดคุณสมบัติต้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล (Four-Ball Wear Tester)วิธีการและเงื่อนไขการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-4172 จุดประสงค์การทดสอบนี้เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดและปริมาณอนุภาคเขม่าต่อการสึกหรอของโลหะ แบ่งเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็ค (CB) แตกต่างกันที่ปริมาณ 1% wt ผสมกับน้ำมันหล่อลื่นโดยใช้คาร์บอนแบล็ค N220, N330, N550 และ N660 ดังแสดงในตารางที่ 3.2

กรณีที่ 2 ปริมาณอนุภาคคาร์บอนแบล็ค (CB) ที่แตกต่างกันผสมกับน้ำมันหล่อลื่นที่ 0.5, 1 และ 2% wt โดยใช้คาร์บอนแบล็ค N330 ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 น้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ขนาดแตกต่างกัน

ตัวอย่าง	คาร์บอนแบล็ค	% น้ำมันหล่อลื่น (wt)	% คาร์บอนแบล็ค (wt)
NE	-	100%	-
EC2	N220	99%	1%
EC3	N330	99%	1%
EC5	N550	99%	1%
EC6	N660	99%	1%

ตารางที่ 3.3 น้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณแตกต่างกัน

ตัวอย่าง	คาร์บอนแบล็ค	% น้ำมันหล่อลื่น (wt)	% คาร์บอนแบล็ค (wt)
NE	-	100%	-
EC3-0.5%	N330	99.5%	0.5%
EC3	N330	99%	1%
EC3-2%	N330	98%	2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากการทดสอบวัดคุณสมบัติต้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล ลูกบอลเหล็กและน้ำมัน หล่อลื่นจะถูกทดสอบเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้น ตามนี้

1) วิเคราะห์พื้นผิวรอยสึกหรอของลูกบอลเหล็ก

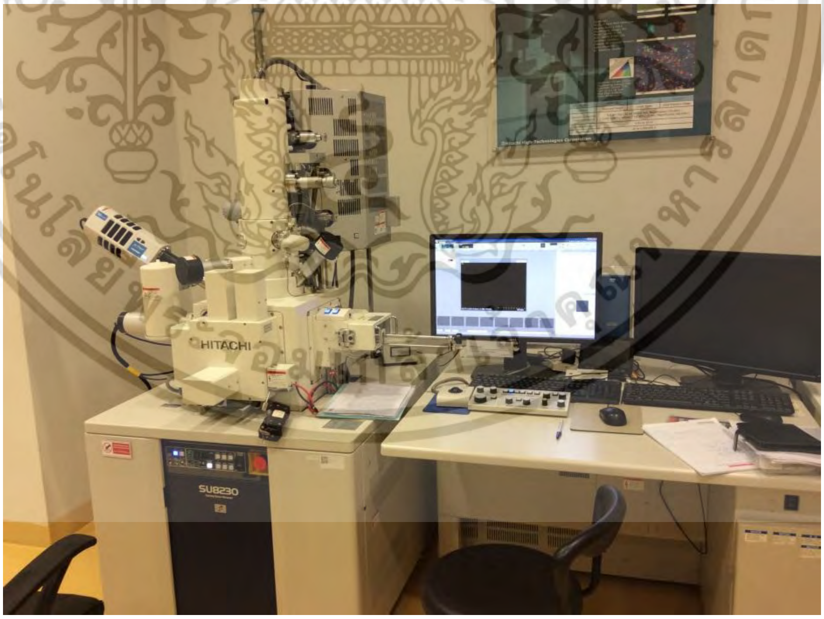
1.1) การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอ (WSD) โดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM)

1.1.1) เส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอของลูกบอลเหล็กทั้ง 3 ลูกด้านล่าง และ 1 ลูกด้านบน จะถูกวัดขนาดโดย OM ดังแสดงในรูปที่ 3.7 หลังจากนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอเฉลี่ย (Average Wear Scar Diameter) ของลูกบอลทั้ง 3 ลูกด้านล่าง จะถูกนำไปเปรียบเทียบผลกระทบของการปนเปื้อนเขม่าต่อการสึกหรอของโลหะ

1.1.2) ความหยาบพื้นผิว (Roughness Surface) ของลูกบอลเหล็กทั้ง 3 ลูกด้านล่าง และ 1 ลูกด้านบน จะถูกวัดโดยภาพถ่ายพื้นผิว 3D จาก OM ดังแสดงในรูปที่ 3.5 หลังจากนั้น ความหยาบพื้นผิวเฉลี่ย (Average Roughness Surface) ของลูกบอลเหล็กทั้ง 3 ลูกด้านล่าง จะถูกนำไปเปรียบเทียบผลกระทบของการปนเปื้อนเขม่าต่อการสึกหรอของโลหะ

1.2) การวิเคราะห์พื้นผิวรอยสึกหรอโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด (SEM)

พื้นผิวรอยสึกหรอของลูกบอลเหล็กทั้ง 4 ลูก ในแต่ละตัวอย่าง จะถูกวิเคราะห์โดย SEM ซึ่งสามารถทำให้ศึกษารายละเอียดของพื้นผิวรอยสึกหรอ พร้อมทั้งช่วยให้วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุบนพื้นผิวโลหะได้



รูปที่ 3.8 เครื่องวัด WSD และวิเคราะห์พื้นผิวรอยสึกหรอบนลูกบอลเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การกระจายตัวขนาดอนุภาคโดยเครื่องวัดขนาด และการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Laser Diffraction Spectroscopy)

การกระจายตัวขนาดอนุภาคทั้งก่อนและหลังการทดสอบวัดคุณสมบัติต้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล (Four-Ball Wear Tester) จะถูกวัดโดยเครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (LDS) การกระจายตัวขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็ค (CB) ทั้ง 2 กรณี ตามตารางที่ 3.2 และ 3.3 จะถูกผสมกับน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 5W30 ซึ่งการกระจายตัวขนาดอนุภาคก่อนการทดสอบด้วยเครื่องมือโฟร์บอล แสดงได้ ดังนี้

- New SAE 5W30 Engine Oil
- New SAE 5W30 Engine Oil + 1% wt CB 220
- New SAE 5W30 Engine Oil + 1% wt CB 330
- New SAE 5W30 Engine Oil + 1% wt CB 550
- New SAE 5W30 Engine Oil + 1% wt CB 660
- New SAE 5W30 Engine Oil + 0.5% wt CB 330
- New SAE 5W30 Engine Oil + 2% wt CB 330

อย่างไรก็ตาม หลังการทดสอบด้วยเครื่องมือโฟร์บอลองค์ประกอบของอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงไป แสดงได้ ดังนี้

- New SAE 5W30 Engine Oil + Wear Metal
- New SAE 5W30 Engine Oil + 1% wt CB 220 + Wear Metal
- New SAE 5W30 Engine Oil + 1% wt CB 330 + Wear Metal
- New SAE 5W30 Engine Oil + 1% wt CB 550 + Wear Metal
- New SAE 5W30 Engine Oil + 1% wt CB 660 + Wear Metal
- New SAE 5W30 Engine Oil + 0.5% wt CB 330 + Wear Metal
- New SAE 5W30 Engine Oil + 2% wt CB 330 + Wear Metal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 5W30 เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการวิจัยนี้ ซึ่งคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นถูกทดสอบวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี เช่น ความหนืด (Viscosity) ออกซิเดชั่น ไนเทรชั่น และค่าความเป็นด่าง (TBN) ในส่วนของสารเคมีเติมแต่ง (Oil Additives) ในน้ำมันหล่อลื่นจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (XRF) คุณสมบัติน้ำมันหล่อลื่นและสารเคมีเติมแต่ง แสดงในตารางที่ 4.1

ตาราง 4.1 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 5W30

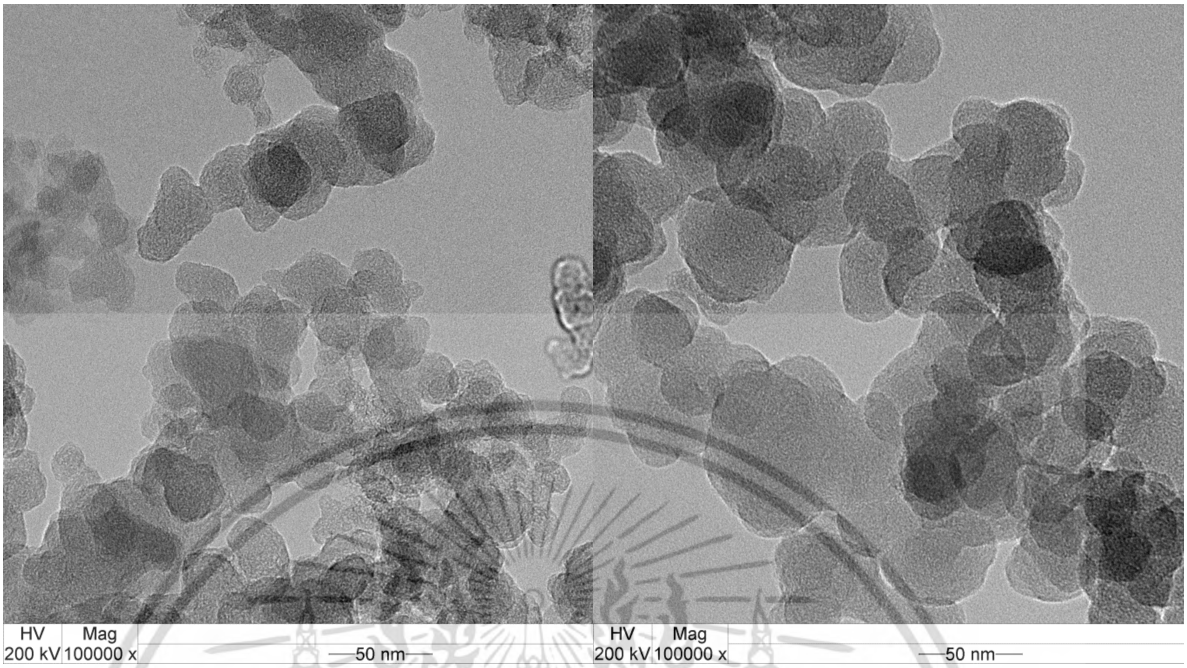
Oil Conditions			Oil Additives		
Kinematic Viscosity @ 40°C	cSt	66.9	S	%	0.157
Kinematic Viscosity @ 100°C	cSt	11.2	Ca	%	0.102
Oxidation	Abs	7.7	Zn	ppm	763
Nitration	Abs	5.8	P	ppm	658
TBN	mg KOH/g	10.2	Mg	ppm	607
			Mo	ppm	96.9

4.1 การกระจายตัวของอนุภาคเดี่ยวของคาร์บอนแบล็ค

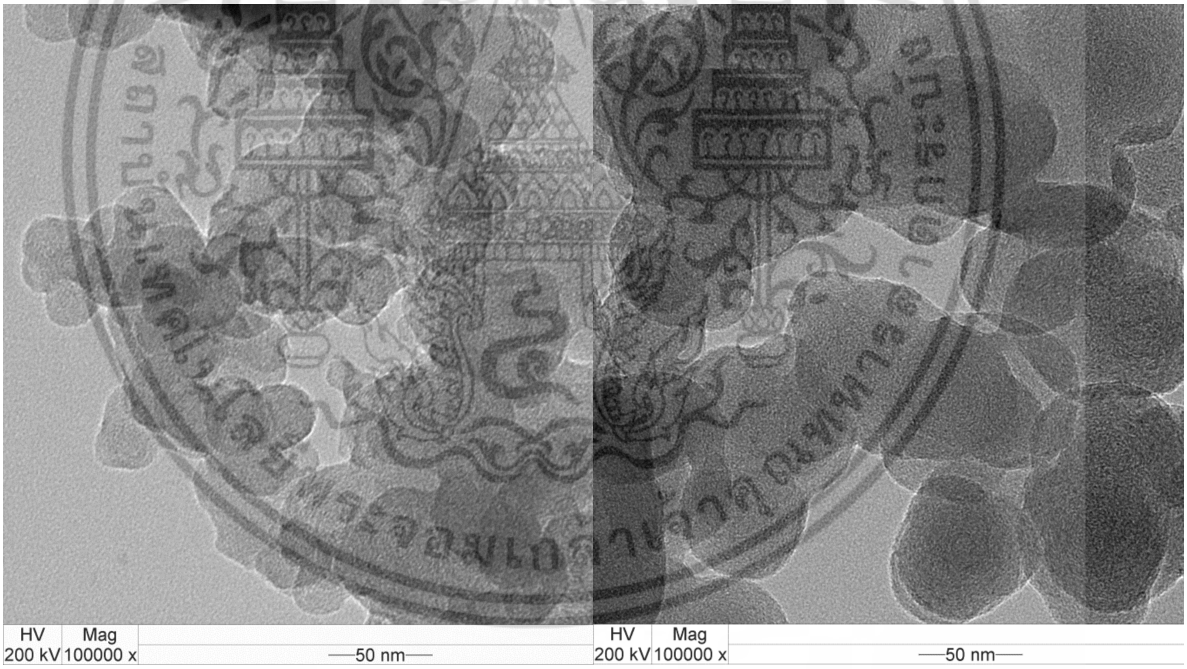
ตามรูปที่ 4.1 ได้แสดงภาพถ่ายรูปร่างลักษณะของคาร์บอนแบล็ค (a) N220, (b) N330, (c) N550 และ (d) N660 ในการทดลองนี้ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) วัดขนาดของคาร์บอนแบล็ค โดยไม่สามารถที่จะวัดขนาดอนุภาคเดี่ยว (Primary Particle Size) ของคาร์บอนแบล็คได้โดยตรง เนื่องจากอนุภาคคาร์บอนแบล็คมีการรวมกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) ดังนั้น จึงต้องใช้โปรแกรมวัดขนาดอนุภาค (Image J) เข้ามาช่วย เพื่อหาขนาดอนุภาคเดี่ยวของคาร์บอนแบล็ค โดยที่รูปร่างของคาร์บอนแบล็คมีลักษณะคล้ายวงกลม

สุดท้ายนี้ ได้หาขนาดของอนุภาคคาร์บอนแบล็คแต่ละตัวอย่างไม่ต่ำกว่าอย่างละ 200 รูป ตามรูปที่ 4.2 แสดงถึงการกระจายตัวขนาดอนุภาคเดี่ยวในระดับนาโนเมตรของตัวอย่างคาร์บอนแบล็ค ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 5-115 นาโนเมตร โดยขนาดของอนุภาคมีมากในช่วง 20-65 นาโนเมตร โดยข้อมูลสถิติในตารางที่ 4.2 แสดงถึงขนาดอนุภาคเดี่ยวเฉลี่ยของคาร์บอนแบล็คเบอร์ N660 มีขนาดใหญ่ที่สุด และคาร์บอนแบล็คเบอร์ N220 มีขนาดเล็กที่สุด ซึ่งขนาดอนุภาคเดี่ยวของคาร์บอนแบล็คเบอร์ N220, N330, N550 และ N660 คือ 23.6, 30.4, 44.6 และ 54 นาโนเมตร ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



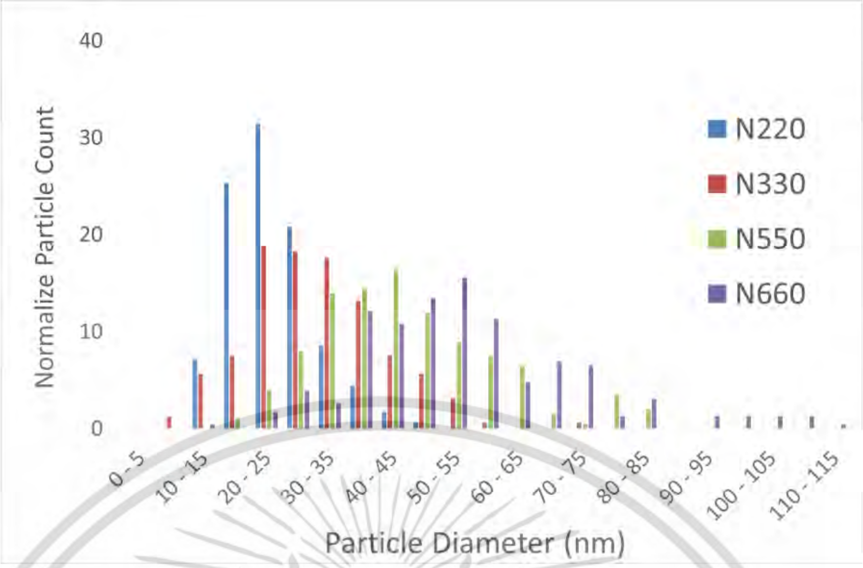
(a) คาร์บอนแบล็ค N220 (b) คาร์บอนแบล็ค N330



(c) คาร์บอนแบล็ค N550 (d) คาร์บอนแบล็ค N660

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายอนุภาคคาร์บอนแบล็คโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของคาร์บอนแบล็ค

ตาราง 4.2 ข้อมูลเชิงสถิติของคาร์บอนแบล็ค

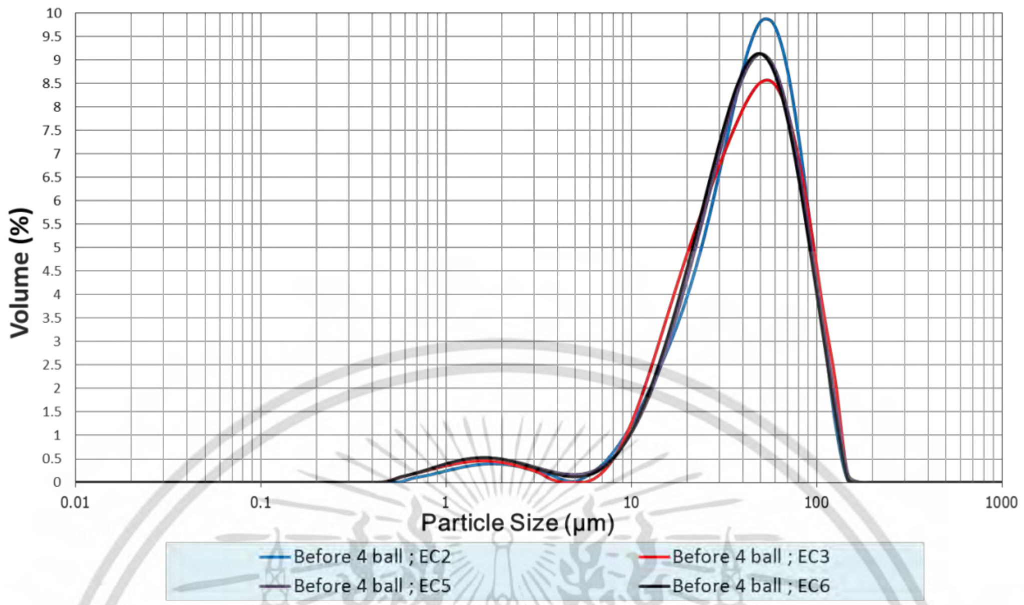
Statistical Data	Carbon Black			
	N220	N330	N550	N660
Particle Count	293	159	202	232
Maximum (nm)	49	74.4	83.4	120.2
Minimum (nm)	11.3	9.4	15.9	14.9
Average (nm)	23.6	30.4	44.6	54
SD	6.8	10.9	14.1	17.8

4.2 การกระจายตัวของอนุภาคเขม่าในน้ำมันหล่อลื่น

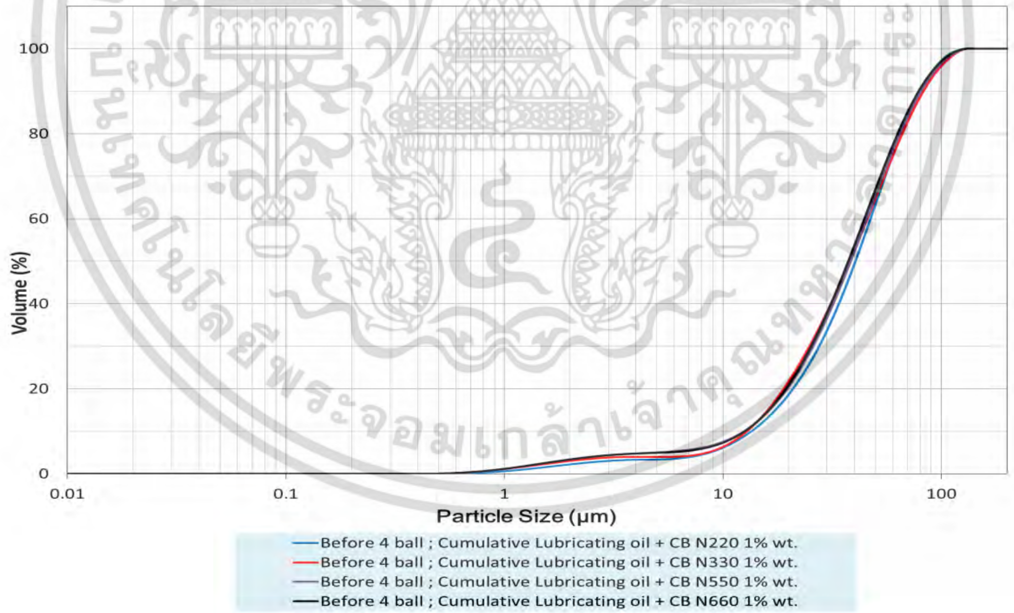
รูปที่ 4.3 แสดงถึงการกระจายตัวขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็คในกรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คขนาดอนุภาคแตกต่างกันก่อนการทดสอบโฟร์บอล ซึ่งมีอนุภาคคาร์บอนแบล็ค N220, N330, N550 และ N660 ตามลำดับ ซึ่งการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกันมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยพบอนุภาคที่เล็กที่สุดจนถึงขนาดใหญ่ที่สุดในช่วง 0.5-170 um ซึ่งแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกมีขนาดตั้งแต่ 0.5-5 um กลุ่มที่สองมีขนาดตั้งแต่ 5-170 um

รูปที่ 4.4 แสดงถึงการกระจายตัวอนุภาคคาร์บอนแบล็คสะสม ในกรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกันก่อนการทดสอบโฟร์บอล ซึ่งมีอนุภาคคาร์บอนแบล็ค N220, N330, N550 และ N660 ตามลำดับ ซึ่งการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คสะสมที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกันมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยในช่วงขนาดอนุภาค 0.5-5 um มีอนุภาคสะสมประมาณ 3% โดยปริมาตร และช่วงขนาดอนุภาค 5-170 um มีอนุภาคสะสมอยู่ประมาณ 97% โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



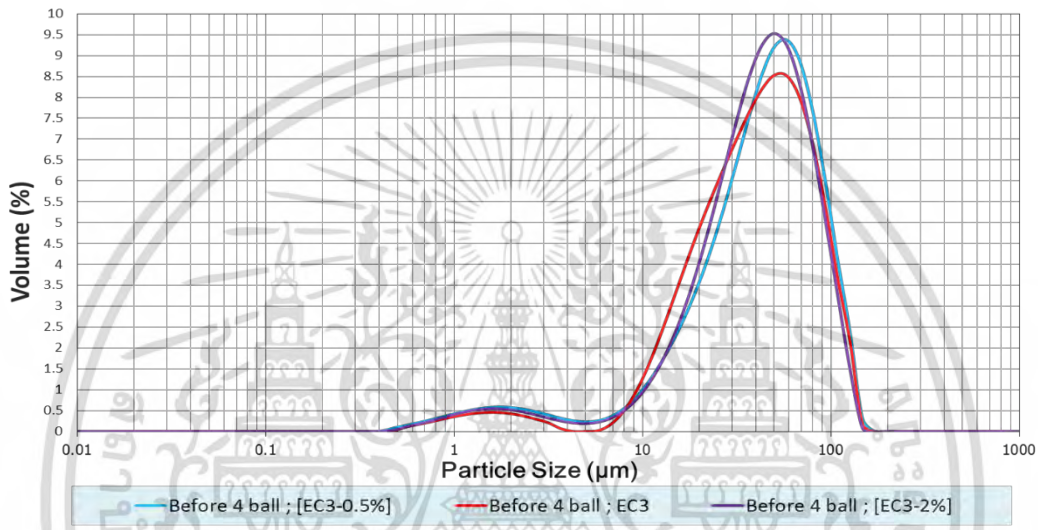
รูปที่ 4.3 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คก่อนการทดสอบโฟร์บอล กรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คขนาดอนุภาคแตกต่างกัน



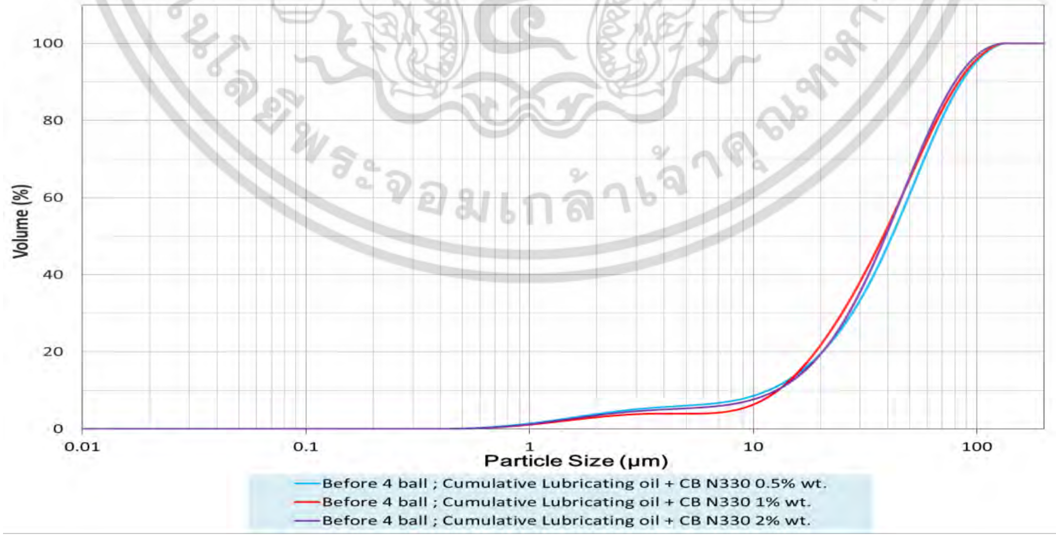
รูปที่ 4.4 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คสะสมก่อนการทดสอบโฟร์บอล กรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คขนาดอนุภาคแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 แสดงถึงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็คในกรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณอนุภาคแตกต่างกันก่อนการทดสอบโฟร์บอล ซึ่งมีอนุภาคคาร์บอนแบล็ค N330 ที่ปริมาณ 0.5, 1 และ 2% ตามลำดับ ผสมกับน้ำมันหล่อลื่น การกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณอนุภาคแตกต่างกันมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยพบอนุภาคที่เล็กที่สุดจนถึงใหญ่ที่สุดในช่วง 0.5-170 um ซึ่งแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกมีขนาดตั้งแต่ 0.5-5 um และกลุ่มที่สองมีขนาดตั้งแต่ 5-170 um



รูปที่ 4.5 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คก่อนการทดสอบโฟร์บอล กรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณอนุภาคแตกต่างกัน



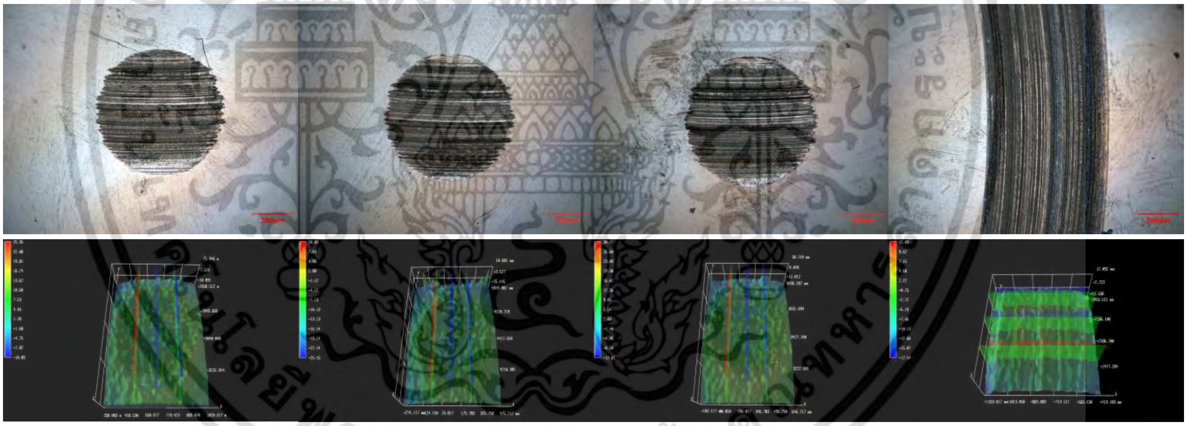
รูปที่ 4.6 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คสะสมก่อนการทดสอบโฟร์บอล กรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณอนุภาคแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

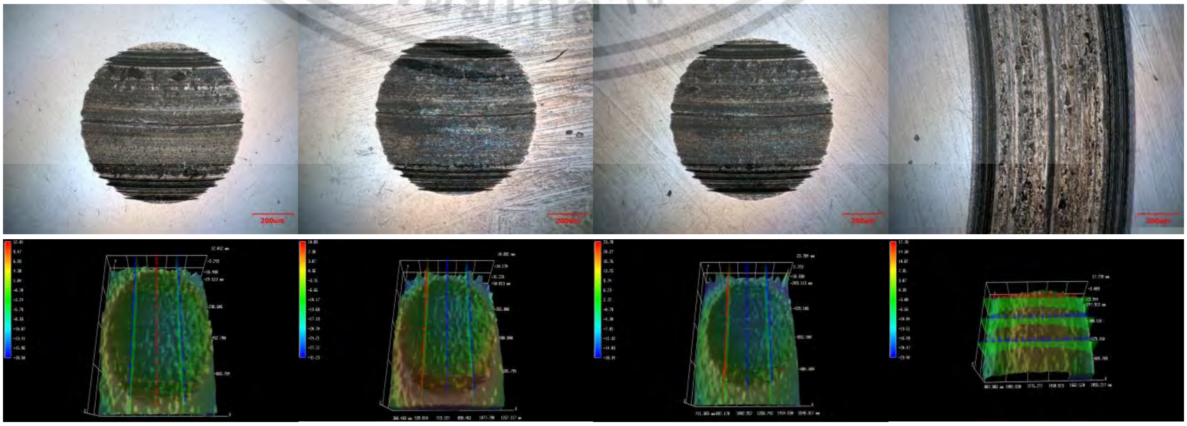
รูปที่ 4.6 แสดงถึงการกระจายตัวอนุภาคคาร์บอนแบล็คสะสม การกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คสะสมในกรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณอนุภาคแตกต่างกันมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยในช่วงขนาดอนุภาค 0.5-5 um มีอนุภาคสะสมอยู่ประมาณ 0.5% โดยปริมาตร และช่วงขนาดอนุภาค 5-170 um มีอนุภาคสะสมอยู่ประมาณ 95% โดยปริมาตร

4.3 ผลกระทบของอนุภาคเขม่าต่อการสึกหรอของโลหะด้วยเครื่องทดสอบโฟร์บอล

ในการที่จะศึกษาผลกระทบของอนุภาคเขม่าต่อการสึกหรอของโลหะ ได้ใช้คาร์บอนแบล็คเป็นตัวแทนของเขม่า ซึ่งคาร์บอนแบล็คที่เบอร์แตกต่างกันจะมีขนาดอนุภาคเดี่ยว (Primary Particle Size) แตกต่างกัน ในการทดสอบ สามารถแบ่งเป็นสองกรณี ในกรณีแรกก็คือขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็ค (CB) แตกต่างกันที่ปริมาณ 1%wt ผสมกับน้ำมันหล่อลื่น โดยใช้คาร์บอนแบล็ค N220, N330, N550 และ N660 ในกรณีที่สอง ปริมาณอนุภาคคาร์บอนแบล็ค (CB) ที่แตกต่างกันผสมกับน้ำมันหล่อลื่นที่ 0.5, 1 และ 2% wt โดยใช้คาร์บอนแบล็ค N330 หลังการทดสอบโฟร์บอล ลูกบอลเหล็ก 3 ลูกด้านล่างจะถูกวัดเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอ (WSD) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) พร้อมทั้งจะถูกวัดความหยาบพื้นผิว (Roughness) ด้วยภาพถ่ายพื้นผิว 3D จาก OM แล้วนำไปเปรียบเทียบการสึกหรอของโลหะ แสดงดังรูปที่ 4.7

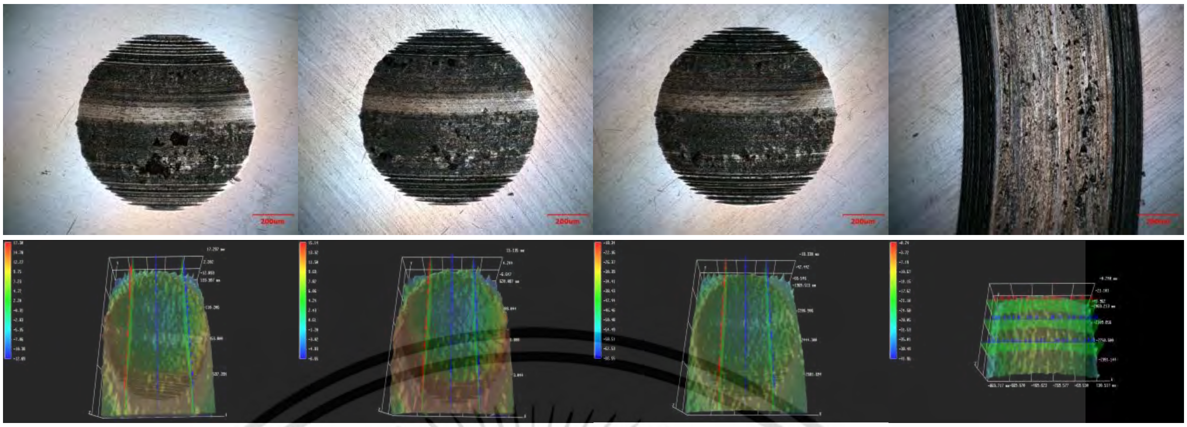


(a)

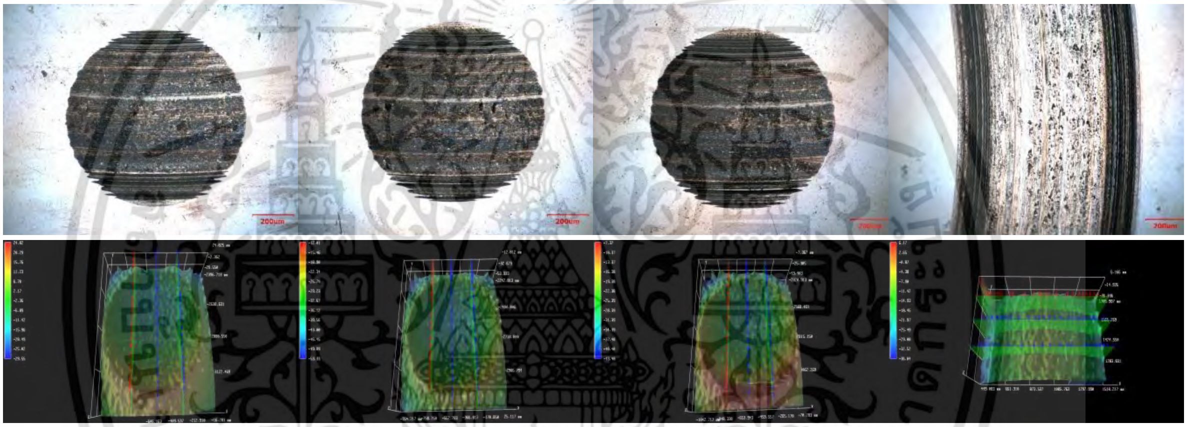


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

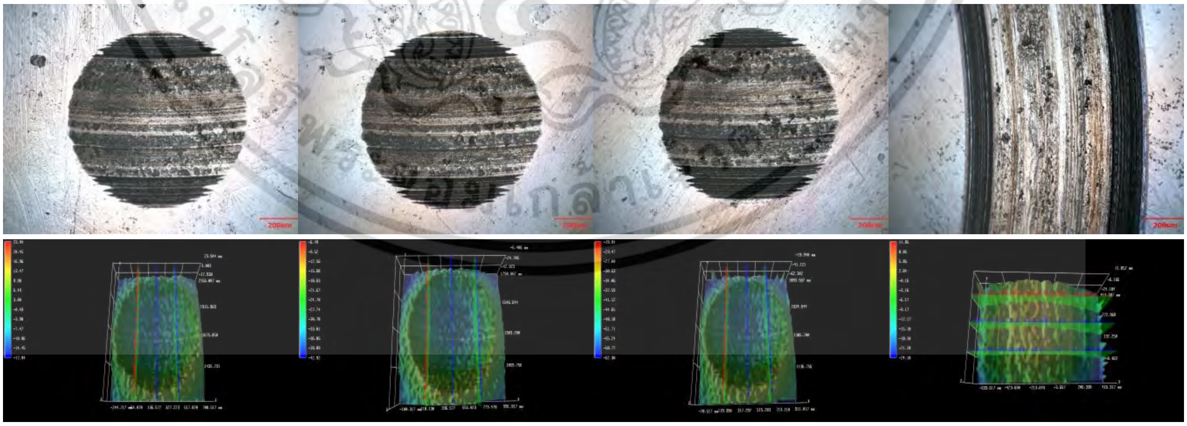
(b)



(c)

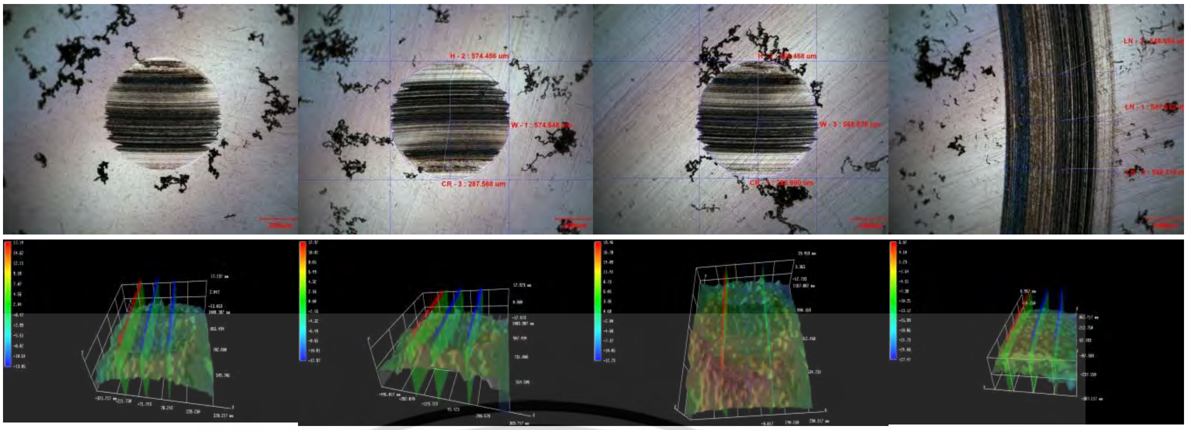


(d)

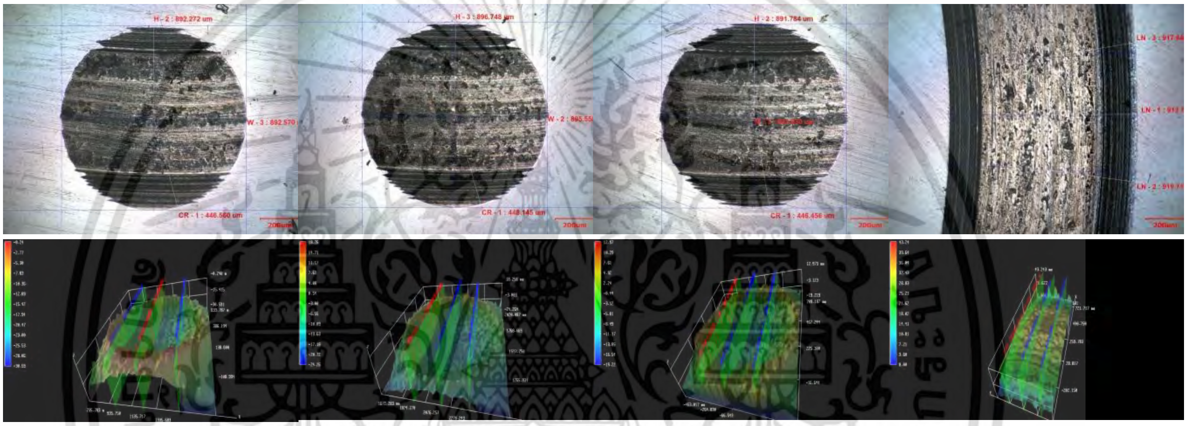


(e)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



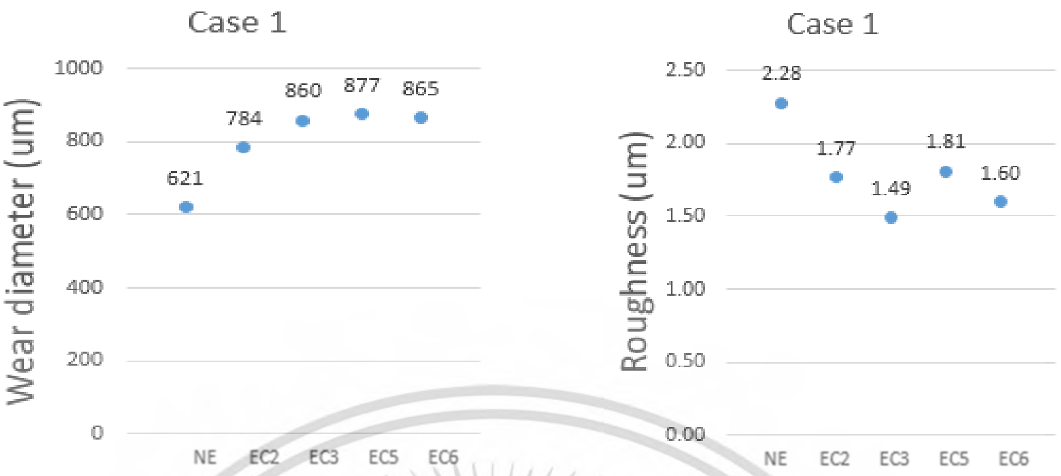
(f)



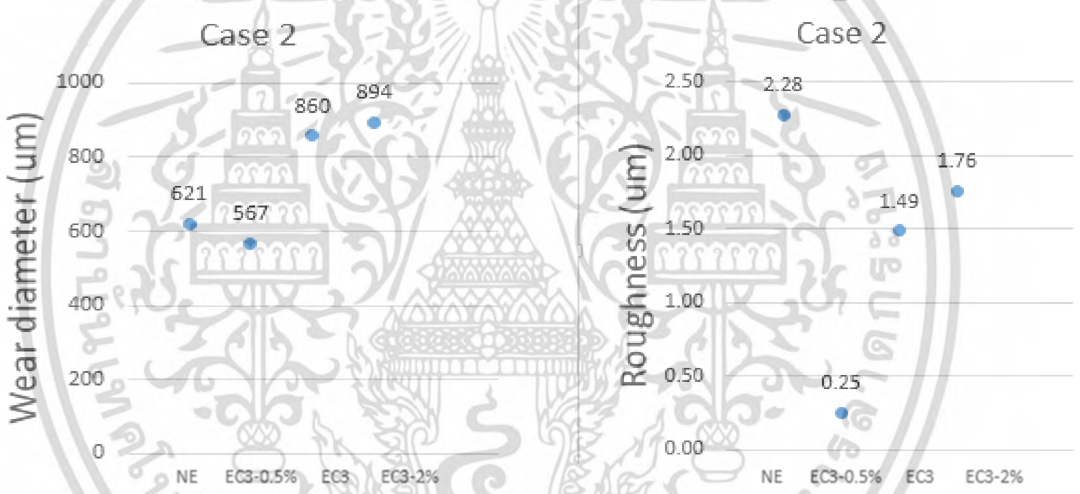
(g)

รูปที่ 4.7 เส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวของลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า, น้ำมันหล่อลื่นผสมเขม่า 1%wt จาก (b) CB N220, (c) CB N330, (d) CB N550, (e) CB N660, (f) น้ำมันหล่อลื่นผสมเขม่า 0.5% wt และ (g) น้ำมันหล่อลื่นผสมเขม่า 2% wt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 เส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวของลูกบอลเหล็กลูกล่าง กรณีปนเปื้อนขนาดอนุภาคเขม่าแตกต่างกัน



รูปที่ 4.9 เส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวของลูกบอลเหล็กลูกล่าง กรณีปนเปื้อนปริมาณเขม่าแตกต่างกัน

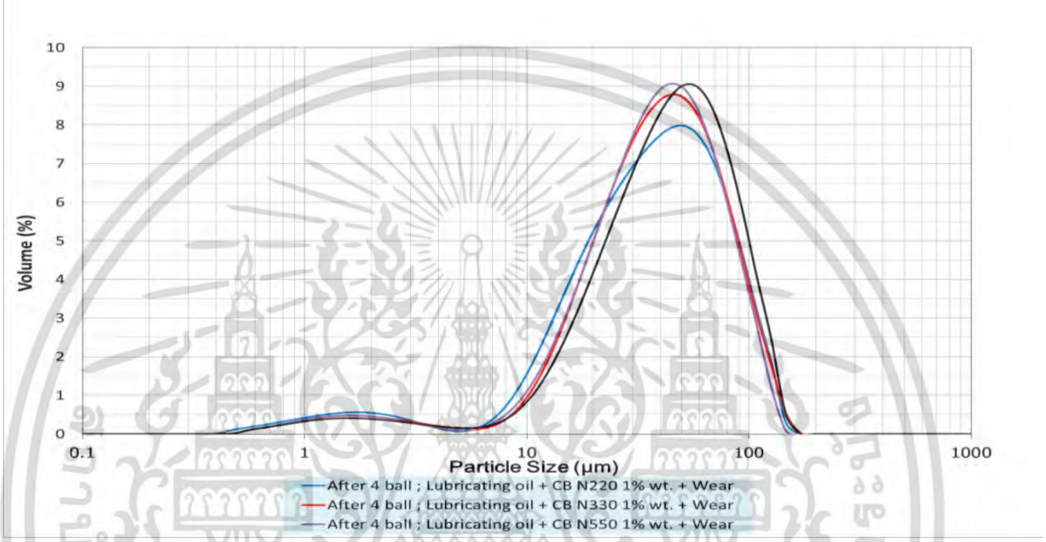
รูปที่ 4.8 แสดงถึงเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอเฉลี่ย (Average WSD) มากกว่าน้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมคาร์บอนแบล็ค 36.3% แต่ความหยาบพื้นผิวเฉลี่ย (Average Roughness) ลดลง 26.75% รูปที่ 4.9 สำหรับกรณีผสมคาร์บอนแบล็คในน้ำมันหล่อลื่นที่ปริมาณแตกต่างกัน คือ 0.5, 1 และ 2% wt โดยใช้คาร์บอนแบล็ค N330 พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอเฉลี่ย (Average WSD) มากกว่าน้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมคาร์บอนแบล็ค 24.5% โดยน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ค (NE), ผสมคาร์บอนแบล็ค N330 0.5% (EC3-0.5%), ผสมคาร์บอนแบล็ค N330 1% (EC3-1%) และผสมคาร์บอนแบล็ค N330 2% (EC3-2%) มีเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอ (WSD) 621, 567, 860 และ 894 um ตามลำดับ สังเกตได้ว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมคาร์บอนแบล็ค N330 ปริมาณ 0.5% wt มี WSD น้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ค (NE) 54 um คิดเป็น 8.69% ที่ลดลง แต่ความหยาบพื้นผิวเฉลี่ย (Average

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

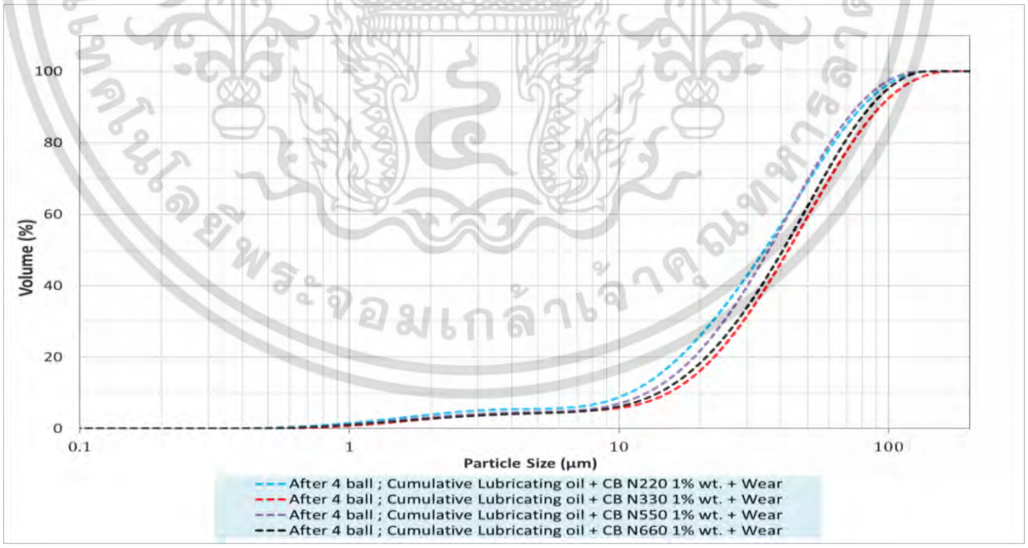
Roughness) ลดลง 49.12% มีความหยาบพื้นผิว (Roughness) 2.28, 0.25, 1.49 และ 1.76 um ตามลำดับ สิ่งที่น่าสนใจคือตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมคาร์บอนแบล็ค N330 ปริมาณ 0.5% (EC3-0.5%) มีผลความหยาบพื้นผิวที่น้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ค (NE) อยู่ถึง 2.03 um คิดเป็น 89% ที่ลดลง

4.4 การกระจายตัวของอนุภาคเขม่าหลังการทดสอบโฟร์บอล

หลังจากทดสอบคุณสมบัติการต้านการสึกหรอของน้ำมันหล่อลื่นแล้ว พบว่า



(a)



(b)

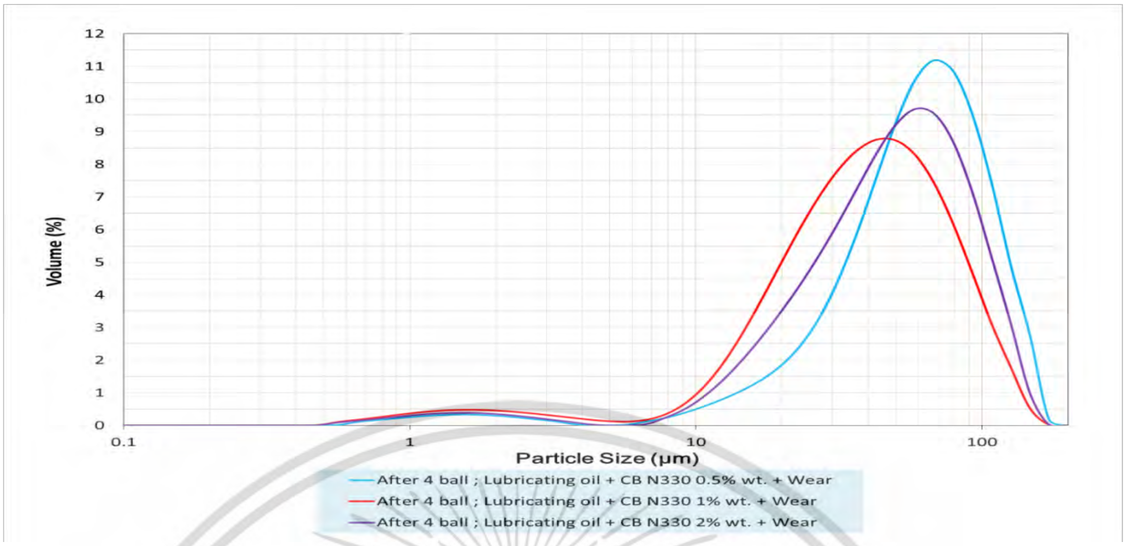
รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (a) และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสะสม (b) หลังการทดสอบโฟร์บอล กรณีน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนขนาดอนุภาคเขม่าแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

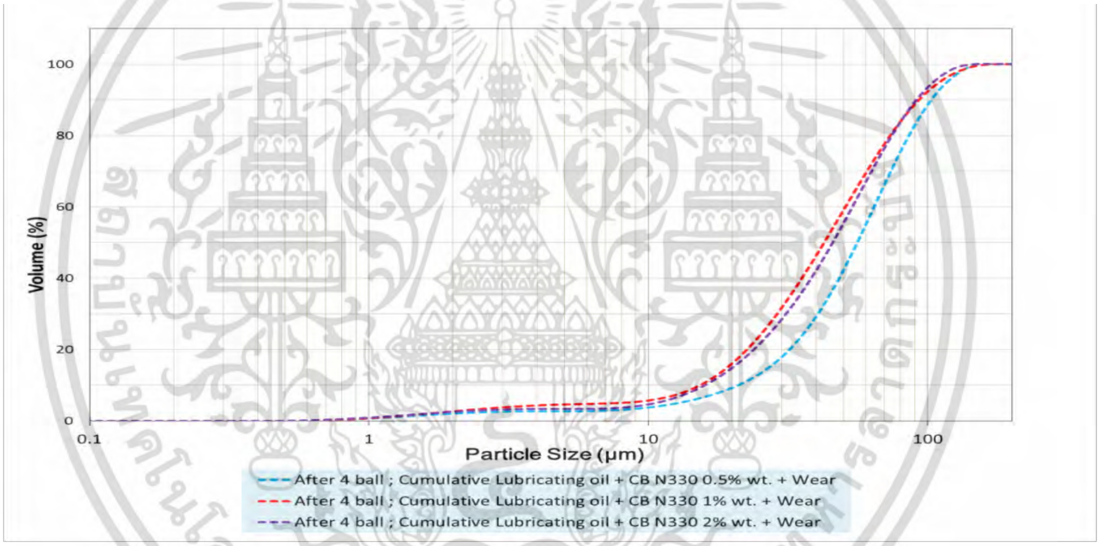
รูปที่ 4.10 (a) แสดงถึงการกระจายตัวขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็คในกรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คขนาดอนุภาคแตกต่างกันหลังการทดสอบโฟร์บอล ซึ่งมีอนุภาคคาร์บอนแบล็ค N220, N330, N550 และ N660 ตามลำดับ ซึ่งการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกันมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยพบอนุภาคที่เล็กที่สุดจนถึงขนาดใหญ่ที่สุดในช่วง 0.5-170 um ซึ่งแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกมีขนาดตั้งแต่ 0.5-5 um กลุ่มที่สองมีขนาดตั้งแต่ 5-170 um

รูปที่ 4.10 (b) แสดงถึงการกระจายตัวอนุภาคคาร์บอนแบล็คสะสม ในกรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกันหลังการทดสอบโฟร์บอล ซึ่งมีอนุภาคคาร์บอนแบล็ค N220, N330, N550 และ N660 ตามลำดับ ซึ่งการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คสะสมที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกันมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยในช่วงขนาดอนุภาค 0.5-5 um มีอนุภาคสะสมประมาณ 3% โดยปริมาตร และช่วงขนาดอนุภาค 5-170 um มีอนุภาคสะสมอยู่ประมาณ 97% โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (a) และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสะสม (b) หลังการทดสอบโฟร์บอล กรณีน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนปริมาณเขม่าแตกต่างกัน

รูปที่ 4.11 (a) แสดงถึงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็คในกรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณอนุภาคแตกต่างกันหลังการทดสอบโฟร์บอล ซึ่งมีอนุภาคคาร์บอนแบล็ค N330 ที่ปริมาณ 0.5, 1 และ 2% ตามลำดับ ผสมกับน้ำมันหล่อลื่น การกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณอนุภาคแตกต่างกันมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยพบอนุภาคที่เล็กที่สุดจนถึงใหญ่ที่สุดในช่วง 0.5-170 um ซึ่งแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกมีขนาดตั้งแต่ 0.5-5 um และกลุ่มที่สองมีขนาดตั้งแต่ 5-170 um

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.11 (b) แสดงถึงการกระจายตัวอนุภาคคาร์บอนแบล็คสะสม การกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คสะสมในกรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณอนุภาคแตกต่างกันมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยในช่วงขนาดอนุภาค 0.5-5 um มีอนุภาคสะสมอยู่ประมาณ 0.5% โดยปริมาตร และช่วงขนาดอนุภาค 5-170 um มีอนุภาคสะสมอยู่ประมาณ 95% โดยปริมาตร

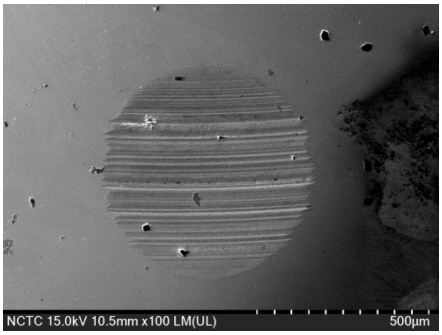
4.5 การวิเคราะห์ภาพถ่ายรอยการสึกหรอของลูกบอลเหล็ก โดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) และเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (EDX)

4.5.1 การวิเคราะห์ภาพถ่ายรอยการสึกหรอโดย SEM

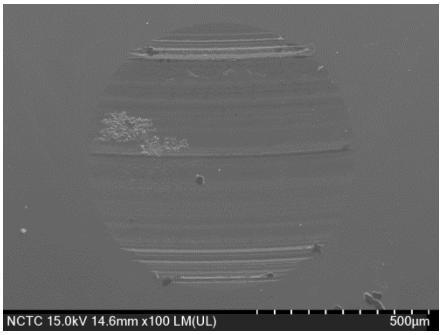
จากรูปที่ 4.14 และ 4.18 แสดงถึงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบรอยสึกหรอของลูกบอลโลหะหลังการทดสอบโฟร์บอลจากตัวอย่าง (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่าและน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณ 1% wt. ของ (b) N220, (c) N330, (d) N550, (e) N660, 0.5% wt. ของ (f) N330 และ 2% wt. ของ (f) N330

รูปที่ 4.15 และ 4.19 แสดงถึงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่ารายสึกหรอลูกบอลเหล็กจากตัวอย่าง (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า พบรอยสึกหรอเป็นร่องขนานไปตามทิศทางการเคลื่อนที่ของลูกบอลเหล็ก ซึ่งเป็นลักษณะการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) บางพื้นที่พบรอยการสึกหรอเป็นแบบผิวหน้าชิ้นงานฉีกขาดออกไป ซึ่งเป็นลักษณะการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) และบางพื้นที่พบรอยการสึกหรอแบบหลุม (Crack) บนผิวชิ้นงานซึ่งเป็นลักษณะการสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue Wear) ซึ่งเกิดจากชิ้นงานรับแรงกดสลับกับแรงดึงซ้ำไปมา (b-e) และ g แสดงถึงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) จากตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็ค 1% wt. ของ N220, N330, N550 และ N660 มีลักษณะการสึกหรอเป็นไปในรูปแบบเดียวกัน คือ มีลักษณะการสึกหรอแบบขูดขีดของผิวสัมผัสตามทิศทางการเคลื่อนที่ของลูกบอลเหล็ก จากรูปคือด้านบนและด้านล่างของรอยการสึกหรอ (พื้นที่วงกลม) รูปที่ 4.14 และ 4.18 (b-e) และ g ลักษณะการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) ส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณตรงกลางของผิวสัมผัสตามแนวทิศทางการเลื่อนที่ของลูกบอลเหล็ก จากรูปคือบริเวณตรงกลางของรอยการสึกหรอของพื้นที่รอยวงกลม ซึ่งเป็นผลมาจากการที่น้ำมันหล่อลื่นไม่สามารถที่จะเข้ามาหล่อลื่นในบริเวณนี้ได้มากนัก เพราะกลุ่มอนุภาคคาร์บอนแบล็คไปปิดกั้นไม่ให้น้ำมันหล่อลื่นเข้าไปในระหว่างผิวสัมผัส (Contact Zone) ของโลหะได้ ส่วนลักษณะการสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue Wear) จะพบได้น้อยกว่าลักษณะการสึกหรอแบบขูดขีดและแบบยึดติด (f) แสดงถึงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) จากตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็ค 0.5% wt. ของ N330 พบว่ามีการสึกหรอที่น้อยที่สุดอย่างเห็นได้ชัด โดยมีลักษณะการสึกหรอแบบขูดขีดเป็นส่วนใหญ่ที่บริเวณตรงกลางของผิวสัมผัสตามทอศทางการเคลื่อนที่ของลูกบอลเหล็ก จะสังเกตได้ว่าตัวอย่างนี้ น้ำมันหล่อลื่นสามารถเข้าไปหล่อลื่นในบริเวณระหว่างผิวสัมผัสของโลหะได้มากกว่าตัวอย่าง (b-e) และ g จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสึกหรอได้น้อยที่สุด

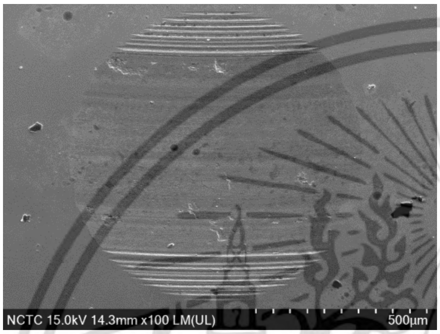
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



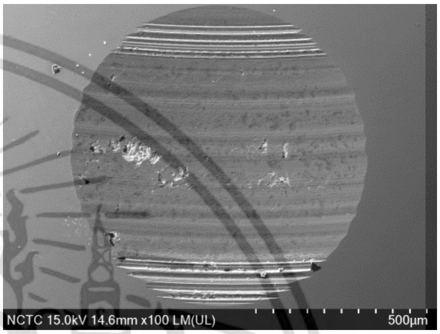
(a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมอนุภาคเขม่า



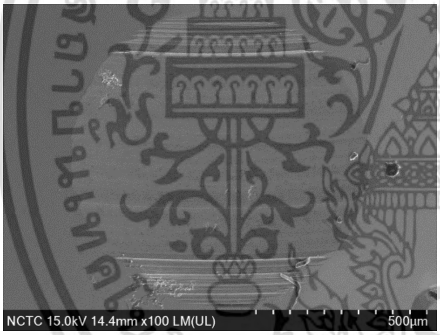
(b) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N220



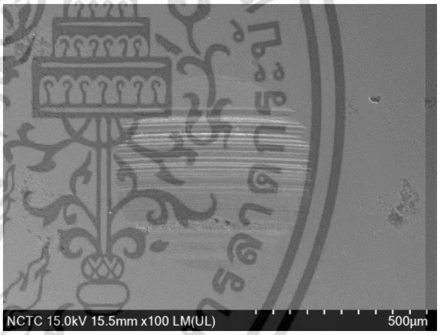
(c) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330



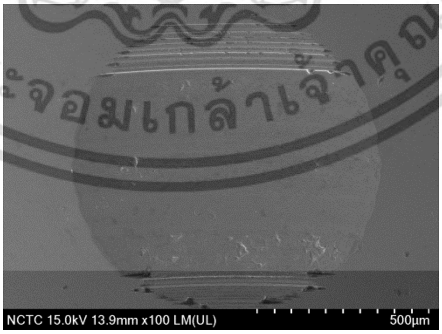
(d) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N550



(e) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N660



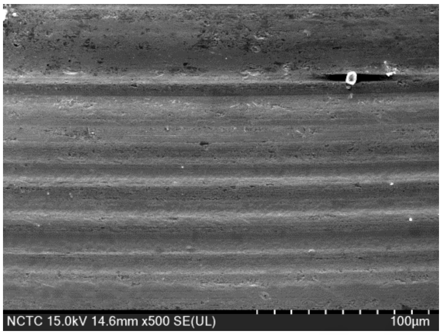
(f) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 0.5%wt



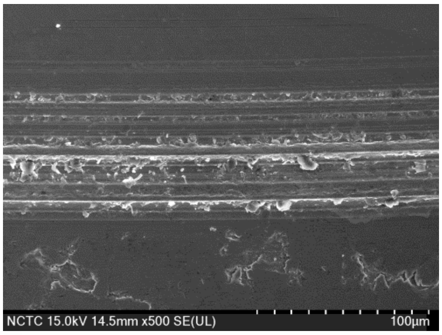
(g) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 2%wt

รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า และน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าที่ 1%wt ของ (b) CB N220, (c) CB N330, (d) CB N550, (e) CB N660, (f) CB N330-0.5% และ (g) CB N330-2%

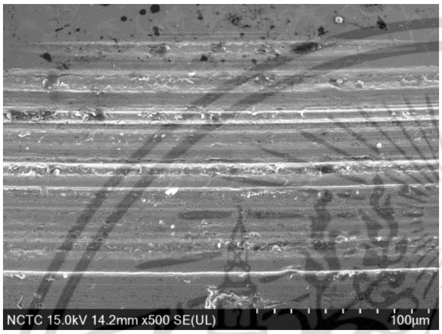
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



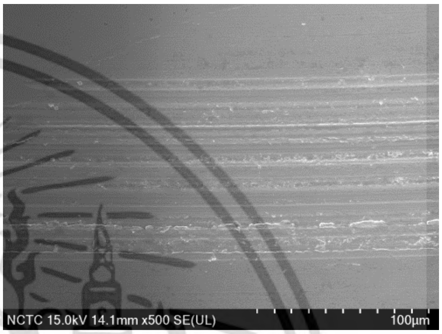
(a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมอนุภาคเขม่า



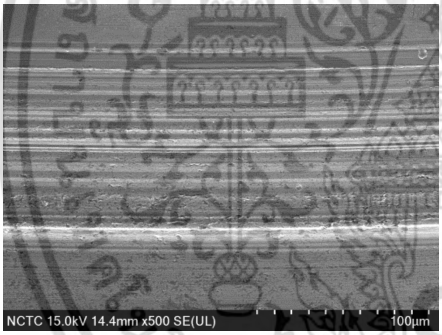
(b) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N220



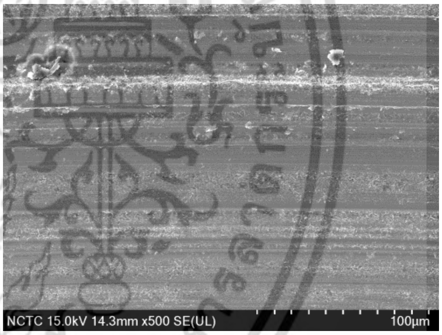
(c) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330



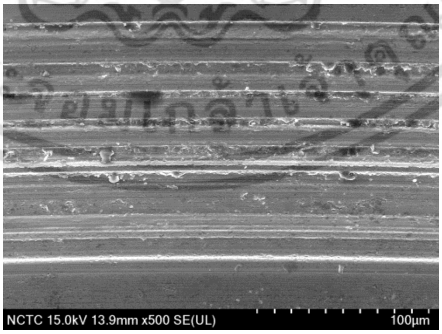
(d) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N550



(e) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N660



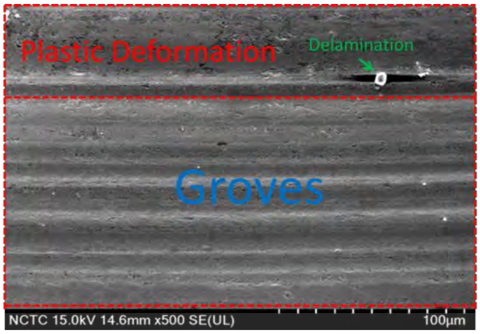
(f) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 0.5%wt



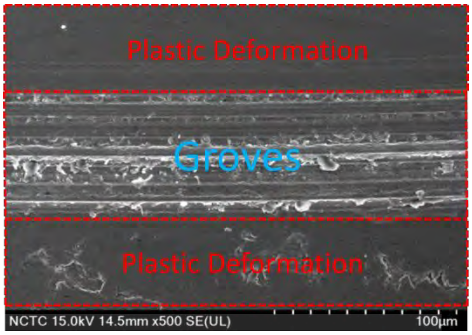
(g) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 2%wt

รูปที่ 4.13 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า และน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าที่ 1%wt ของ (b) CB N220, (c) CB N330, (d) CB N550, (e) CB N660, (f) CB N330-0.5% และ (g) CB N330-2%

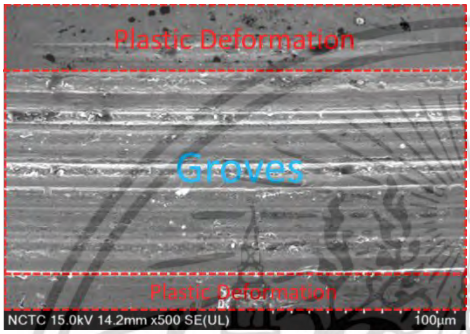
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



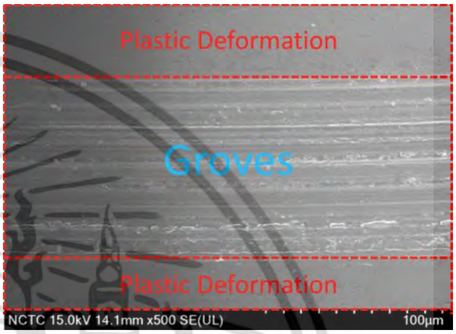
(a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมอนุภาคเขม่า



(b) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N220

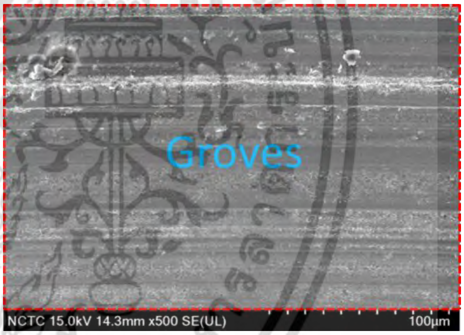


(c) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330

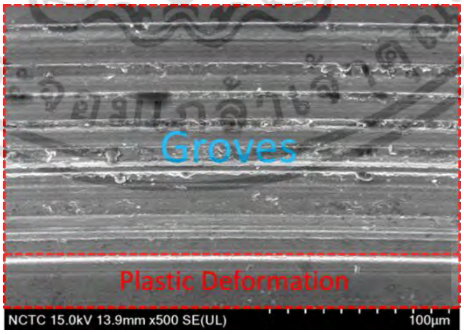


(d) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N550

(e) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N660



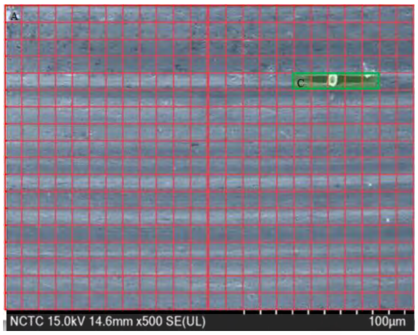
(f) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 0.5%wt



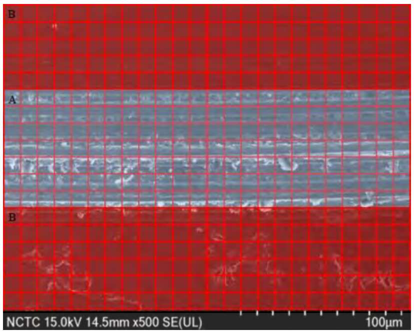
(g) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 2%wt

รูปที่ 4.14 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า และน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าที่ 1%wt ของ (b) CB N220, (c) CB N330, (d) CB N550, (e) CB N660, (f) CB N330-0.5% และ (g) CB N330-2%

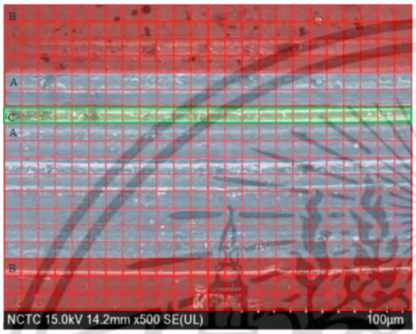
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



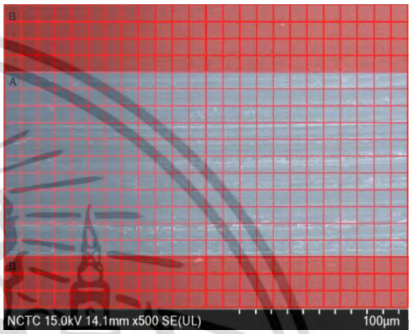
(a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมอนุภาคเขม่า



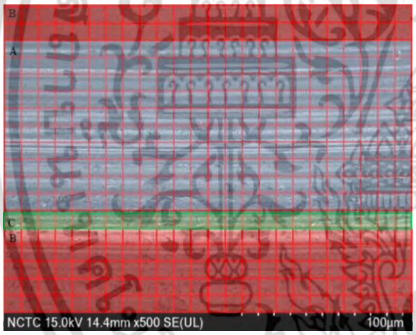
(b) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N220



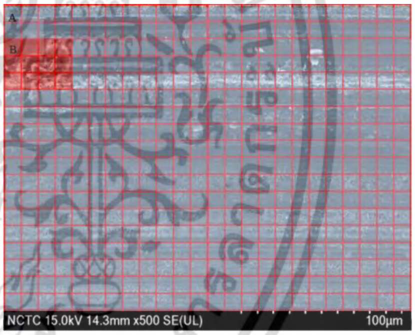
(c) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330



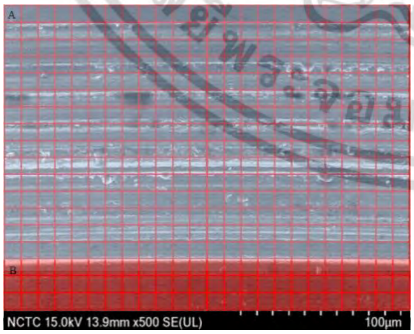
(d) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N550



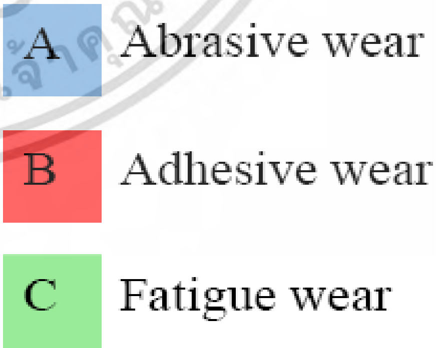
(e) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N660



(f) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 0.5%wt

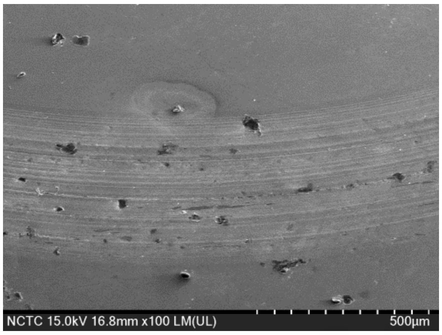


(g) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 2%wt

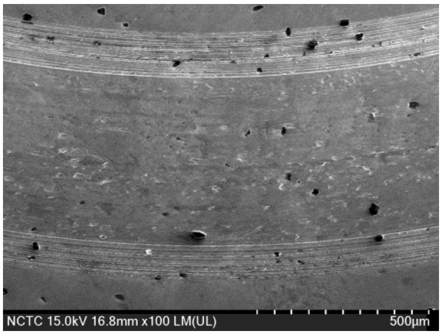


รูปที่ 4.15 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า และน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าที่ 1%wt ของ (b) CB N220, (c) CB N330, (d) CB N550, (e) CB N660, (f) CB N330-0.5% และ (g) CB N330-2%

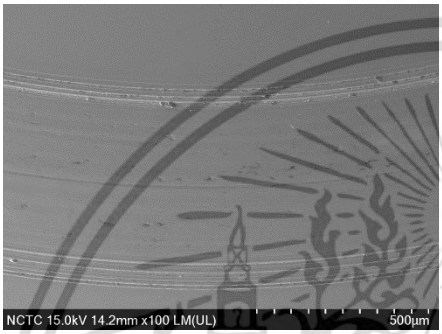
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



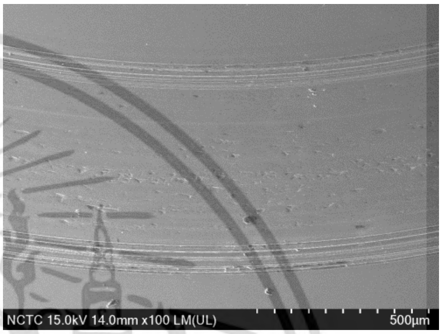
(a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมอนุภาคเขม่า



(b) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N220

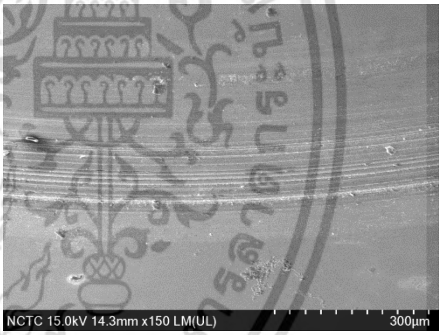


(c) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330

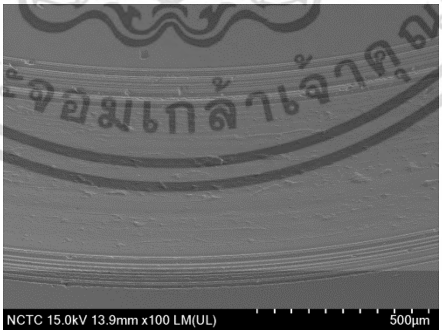


(d) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N550

(e) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N660



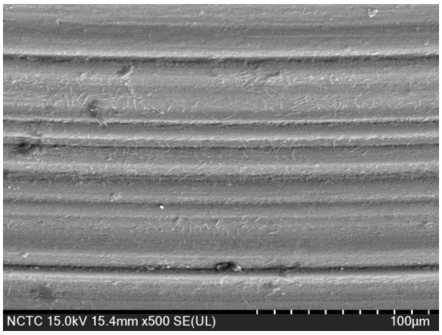
(f) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 0.5%wt



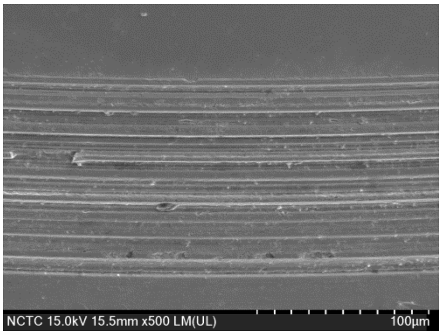
(g) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 2%wt

รูปที่ 4.16 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า และน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าที่ 1%wt ของ (b) CB N220, (c) CB N330, (d) CB N550, (e) CB N660, (f) CB N330-0.5% และ (g) CB N330-2%

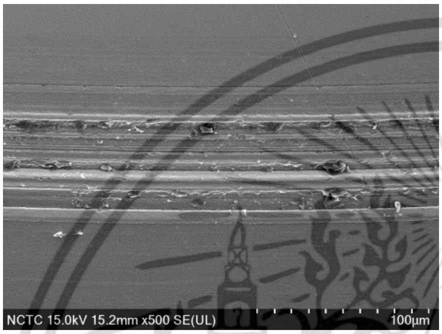
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



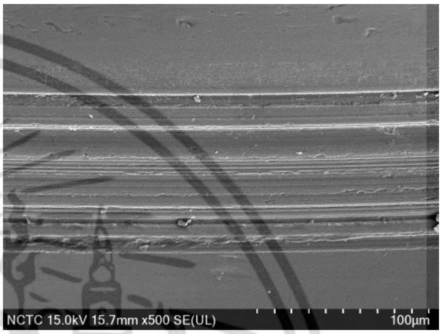
(a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมอนุภาคเขม่า



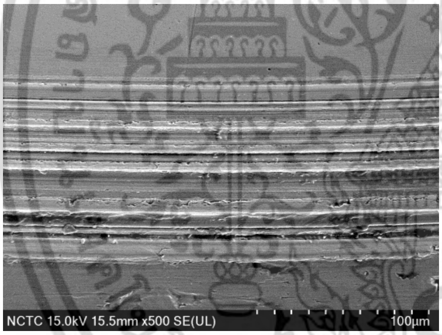
(b) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N220



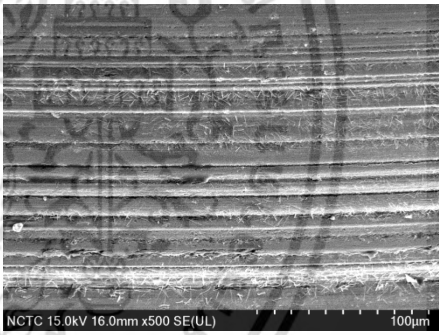
(c) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330



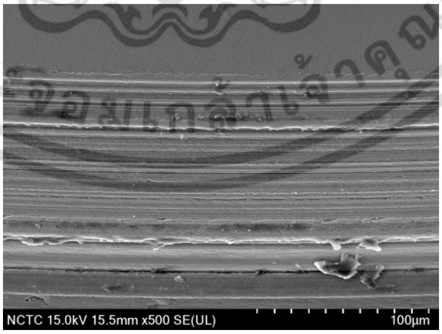
(d) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N550



(e) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N660



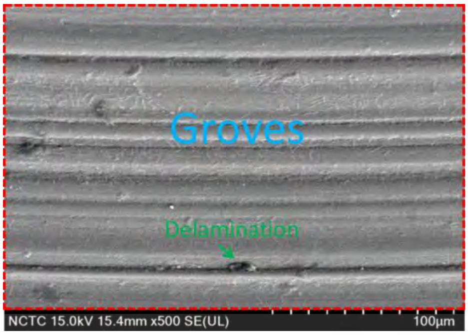
(f) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 0.5%wt



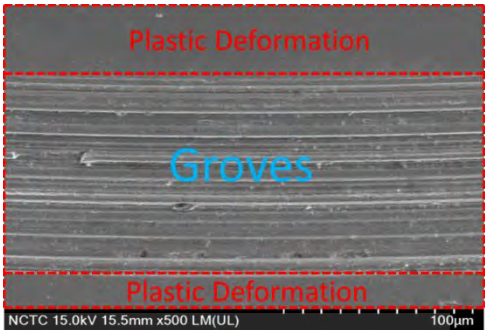
(g) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 2%wt

รูปที่ 4.17 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า และน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าที่ 1%wt ของ (b) CB N220, (c) CB N330, (d) CB N550, (e) CB N660, (f) CB N330-0.5% และ (g) CB N330-2%

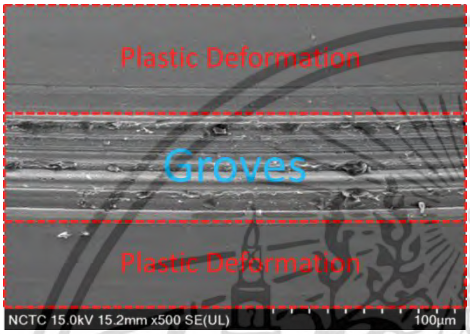
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมอนุภาคเขม่า

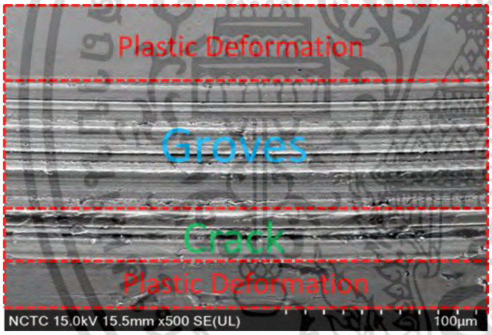


(b) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N220



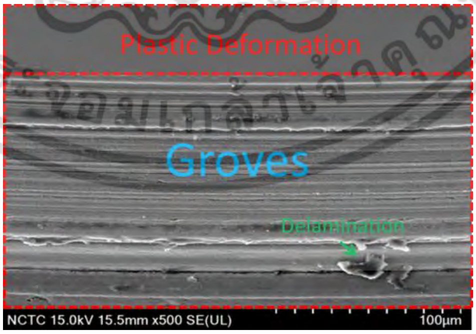
(c) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330

(d) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N550



(e) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N660

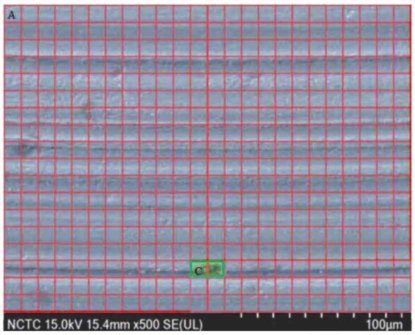
(f) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 0.5%wt



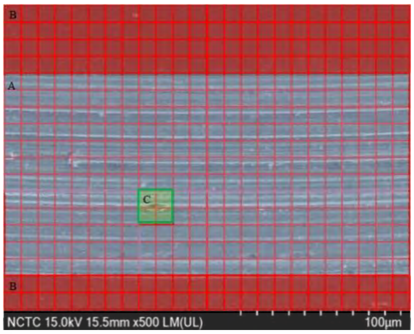
(g) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 2%wt

รูปที่ 4.18 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า และน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าที่ 1%wt ของ (b) CB N220, (c) CB N330, (d) CB N550, (e) CB N660, (f) CB N330-0.5% และ (g) CB N330-2%

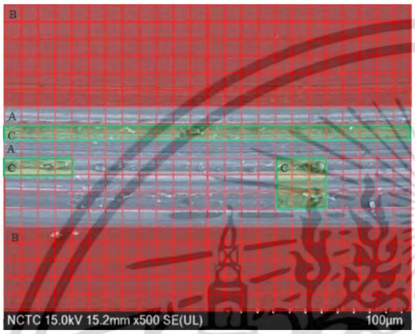
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



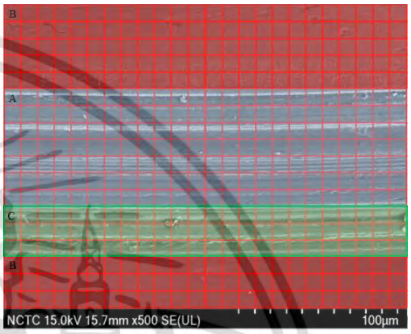
(a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมอนุภาคเขม่า



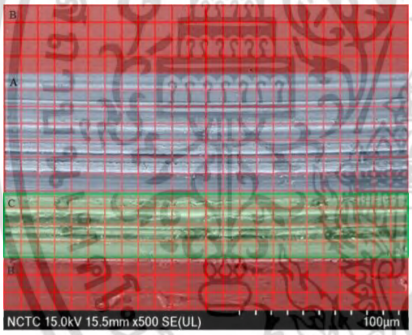
(b) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N220



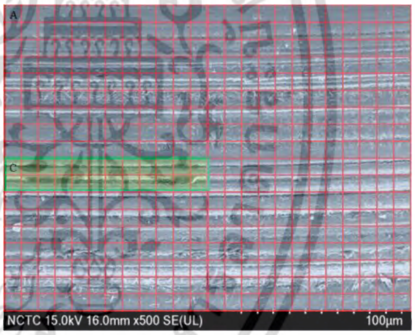
(c) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330



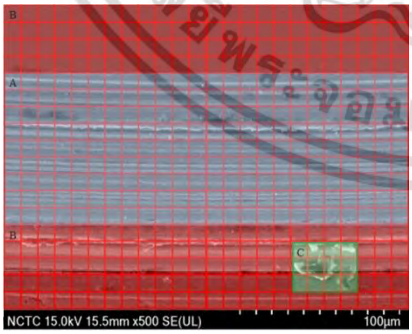
(d) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N550

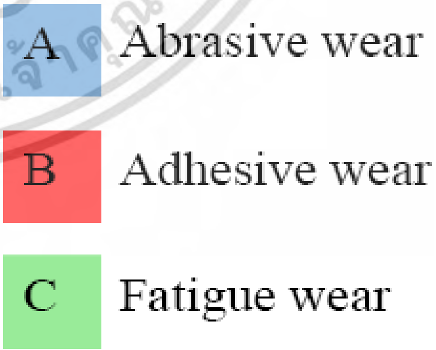


(e) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N660



(f) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 0.5%wt

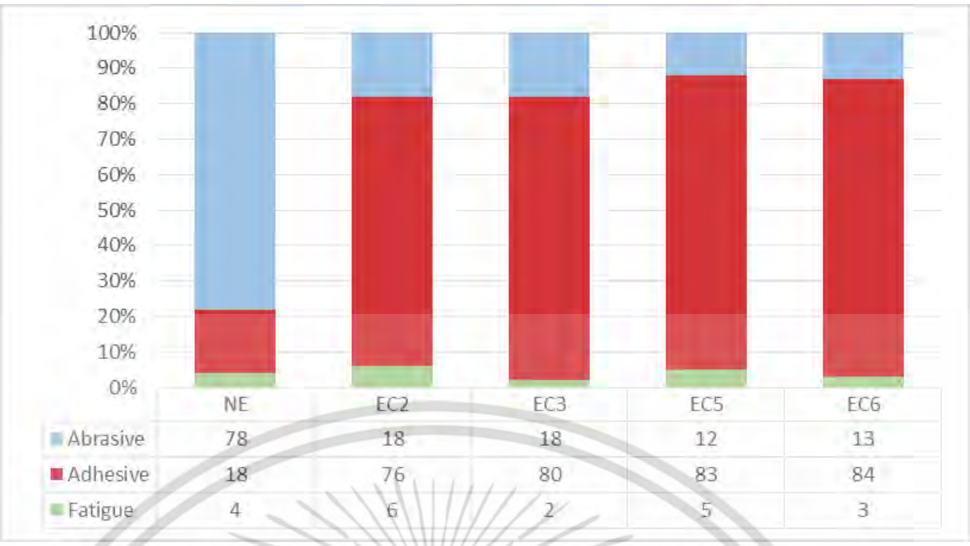




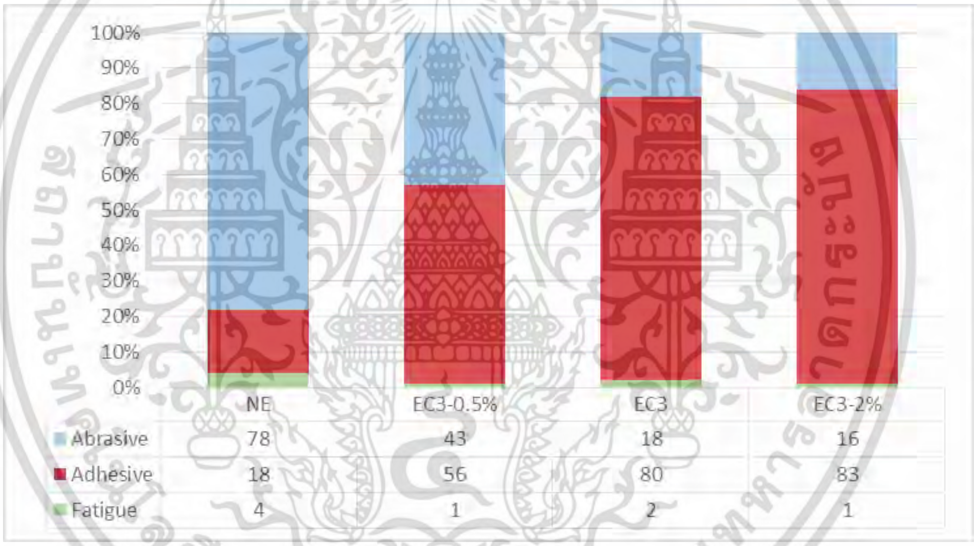
(g) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 2%wt

รูปที่ 4.19 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า และน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าที่ 1%wt ของ (b) CB N220, (c) CB N330, (d) CB N550, (e) CB N660, (f) CB N330-0.5% และ (g) CB N330-2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) กลไกการสึกหรอเฉลี่ยของลูกบอลเหล็กด้านล่างกรณีปนเปื้อนขนาดอนุภาคเขม่าแตกต่างกัน

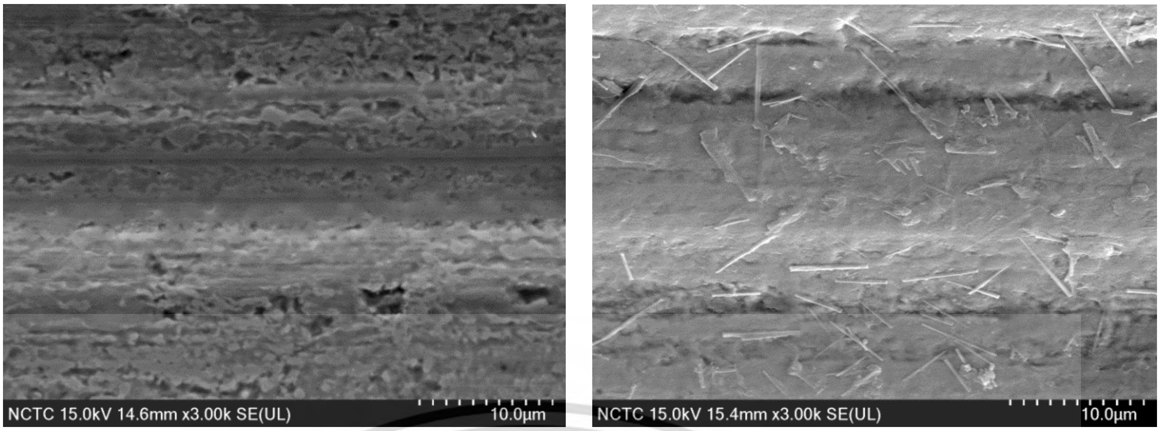


(b) กลไกการสึกหรอเฉลี่ยของลูกบอลเหล็กด้านล่างกรณีปนเปื้อนปริมาณเขม่าแตกต่างกัน

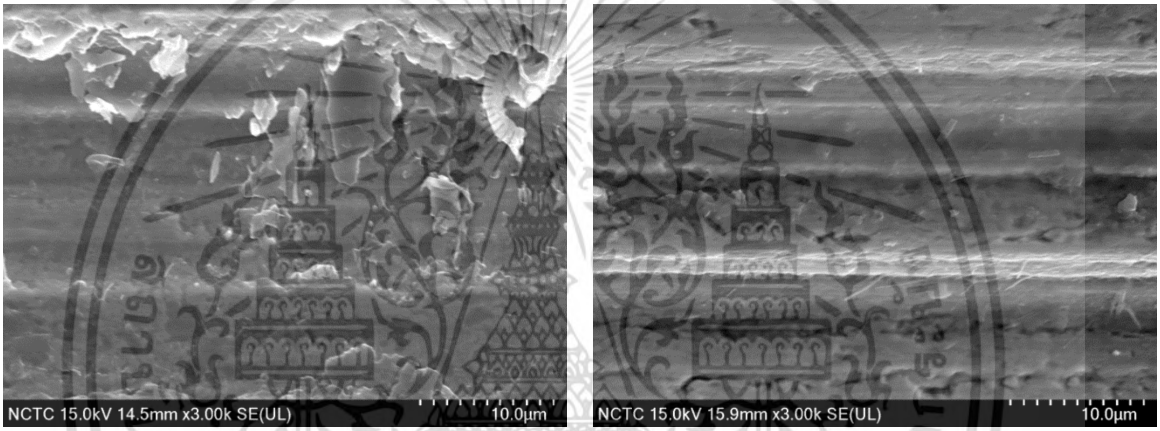
รูปที่ 4.20 การวิเคราะห์ปริมาณกลไกการสึกหรอของ (a) กลไกการสึกหรอเฉลี่ยของลูกบอลเหล็กด้านล่างกรณีปนเปื้อนขนาดอนุภาคเขม่าแตกต่างกัน (b) กลไกการสึกหรอเฉลี่ยของลูกบอลเหล็กด้านล่างกรณีปนเปื้อนปริมาณเขม่าแตกต่างกัน

รูปที่ 4.20 แสดงถึงการวิเคราะห์กลไกการสึกหรอเชิงปริมาณ (a) กรณีปนเปื้อนขนาดอนุภาคเขม่าแตกต่างกัน ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่ปนเปื้อนคาร์บอนแบล็คจะมีลักษณะกลไกการสึกหรอแบบขูดขีด ในขณะที่ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนคาร์บอนแบล็คจะมีลักษณะกลไกการสึกหรอแบบยึดติด โดยขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็คที่ใหญ่ขึ้นจะมีแนวโน้มของลักษณะกลไกการสึกหรอแบบยึดติดมากขึ้น (b) กรณีปนเปื้อนปริมาณเขม่าแตกต่างกัน ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดลักษณะกลไกการสึกหรอแบบยึดติดมากขึ้น

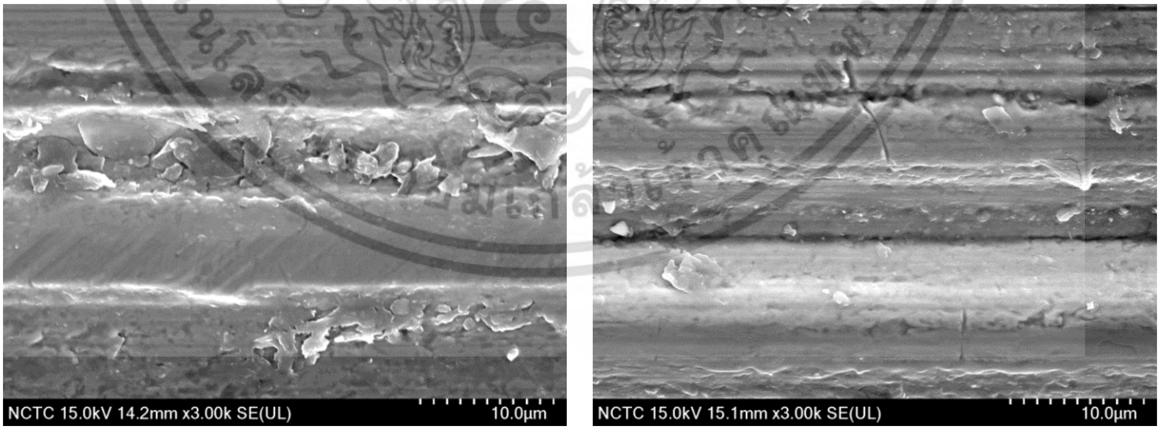
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,000X ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า

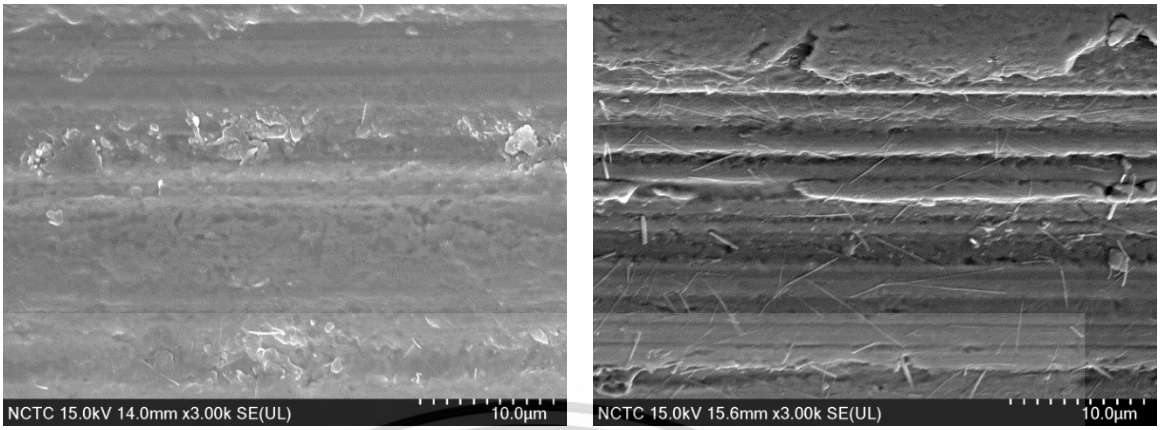


รูปที่ 4.22 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,000X ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N220

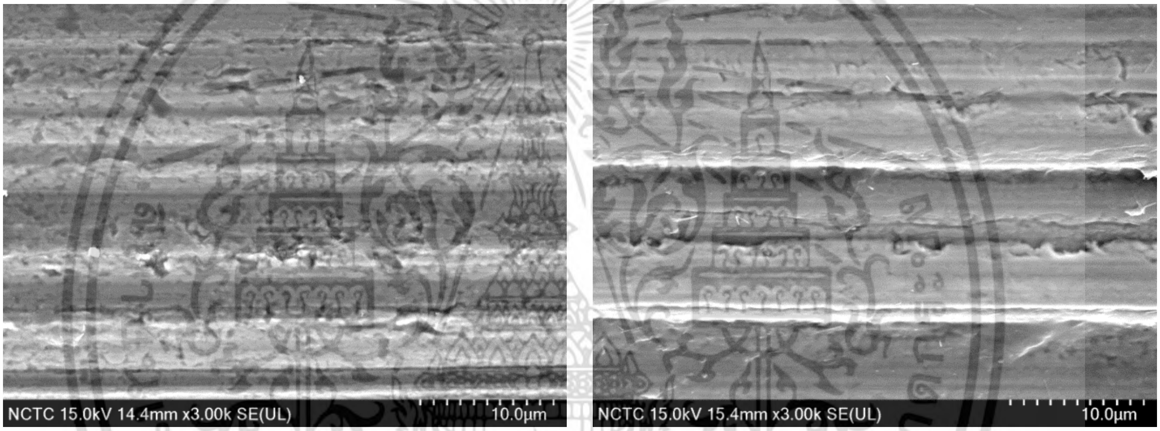


รูปที่ 4.23 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,000X ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330

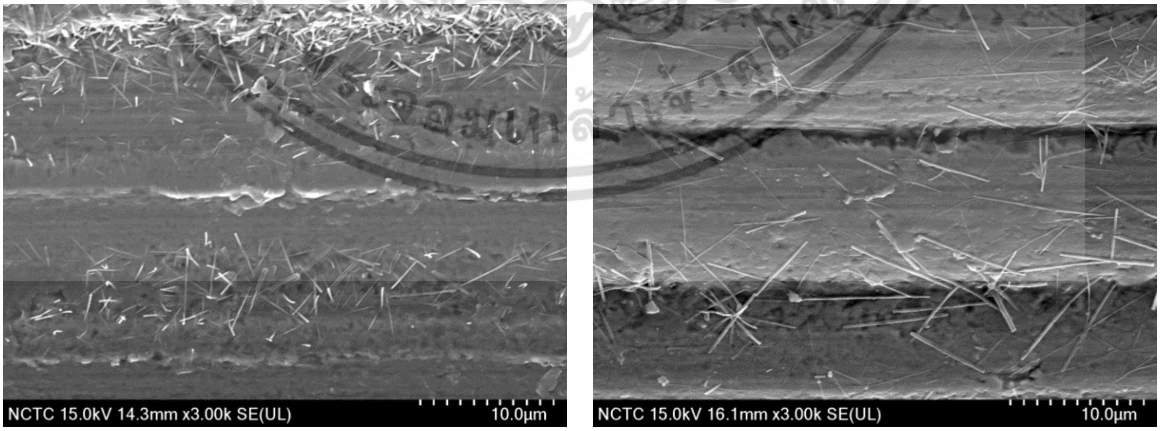
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,000X ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N550

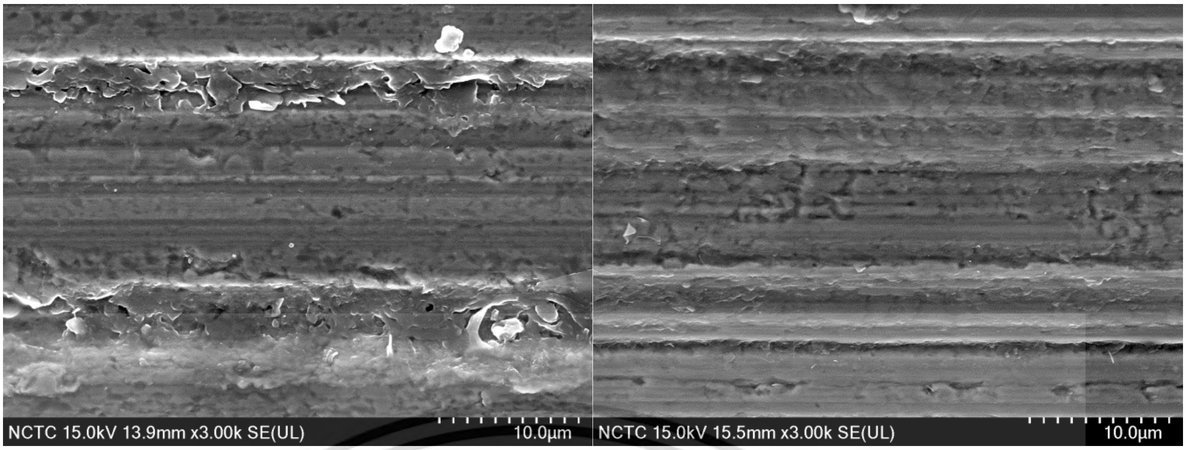


รูปที่ 4.25 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,000X ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N660



รูปที่ 4.26 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,000X ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 0.5% wt.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

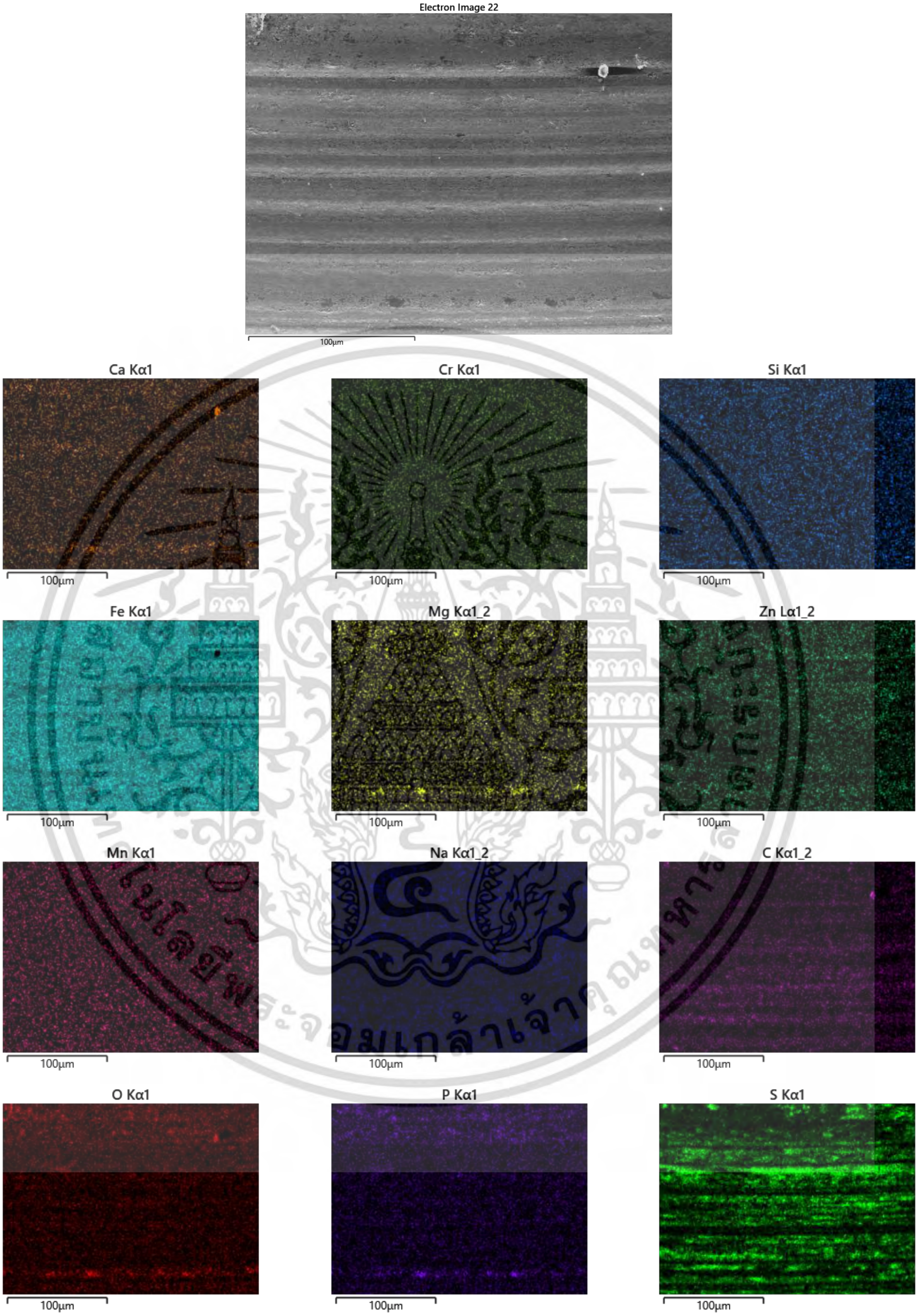


รูปที่ 4.27 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,000X ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 2% wt.

4.5.2 การวิเคราะห์ภาพถ่ายรอยการสึกหรอของพื้นผิวลูกบอลเหล็ก โดยเครื่องวิเคราะห์ธาต (EDX)

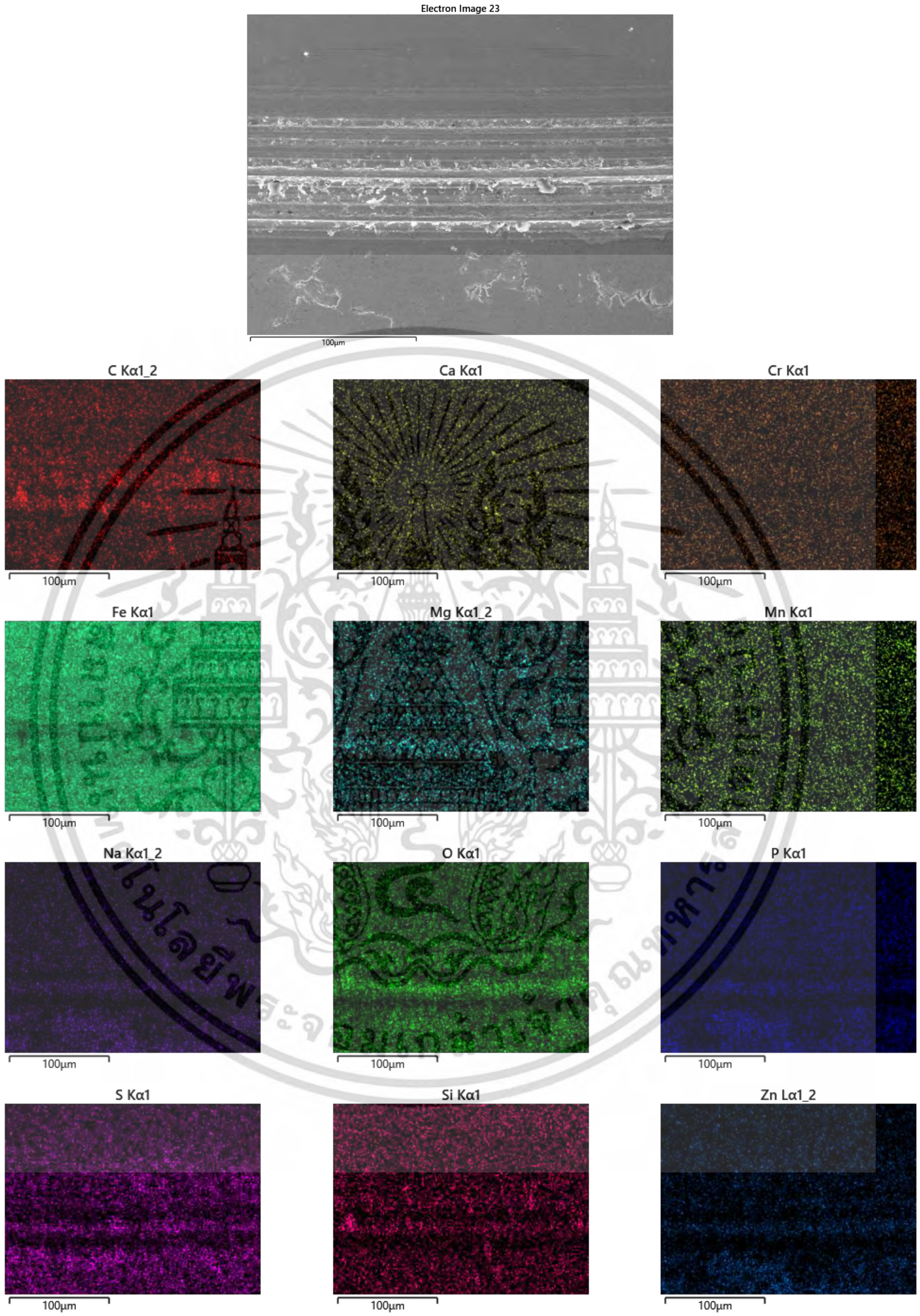
ลักษณะการสึกหรอบริเวณลูกบอลเหล็กที่เกิดจากน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คถูกวิเคราะห์โดย SEM/EDX แสดงดังรูปที่ 4.30-4.36 โดยภาพถ่ายกำลังขยาย 500 เท่า รูปที่ 4.37 แสดงถึงภาพการสึกหรอจาก SEM และ Spectrum จากเครื่องวิเคราะห์ธาตุ EDX ของแต่ละตัวอย่างการทดสอบ ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุแสดงในรูปแบบกราฟแท่งดังรูปที่ 4.38 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของพื้นผิวลูกบอลเหล็กที่ปราศจากเขม่าจะประกอบด้วยเหล็ก (Iron) และคาร์บอน (C) เมื่อมีการเติมคาร์บอนแบล็ก (CBs) เข้าไปในตัวอย่างการทดสอบ จะตรวจพบปริมาณธาตุคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวลูกบอลเหล็ก ซึ่งเกิดจากการสะสมคาร์บอนแบล็คบนพื้นผิวลูกบอลเหล็ก อย่างไรก็ตาม ยังตรวจพบธาตุอื่น เช่น สังกะสี (Zn) ฟอสฟอรัส (P) ซัลเฟอร์ (S) ซึ่งอาจมาจากสารเคมีเติมแต่ง (Additive) ในน้ำมันหล่อลื่นที่นำมาทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



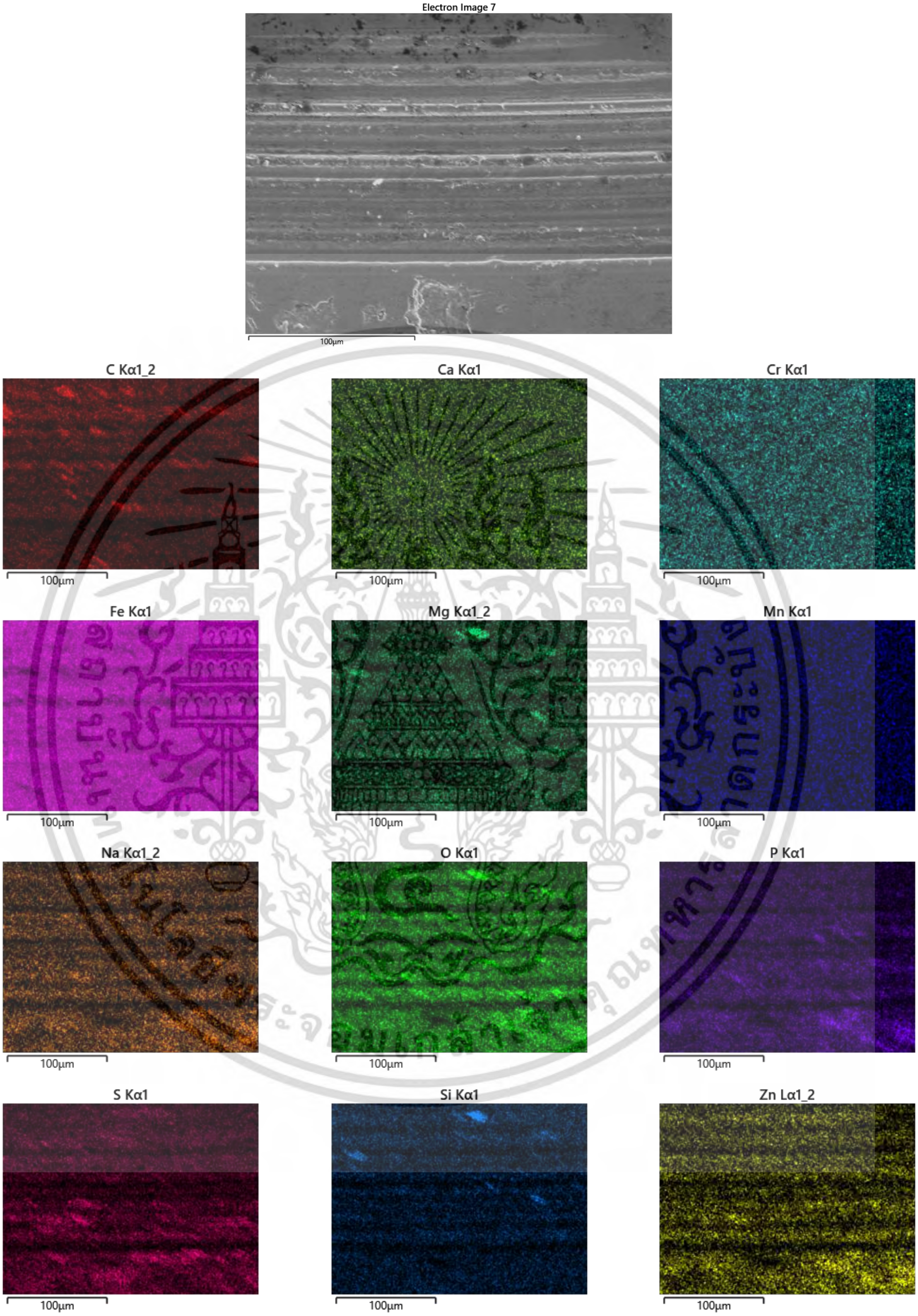
รูปที่ 4.28 ภาพถ่าย SEM และ EDX ที่กำลังขยาย 500X ของรอยการสึกหรอ (Wear Scar) บนลูกบอลเหล็ก จากน้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



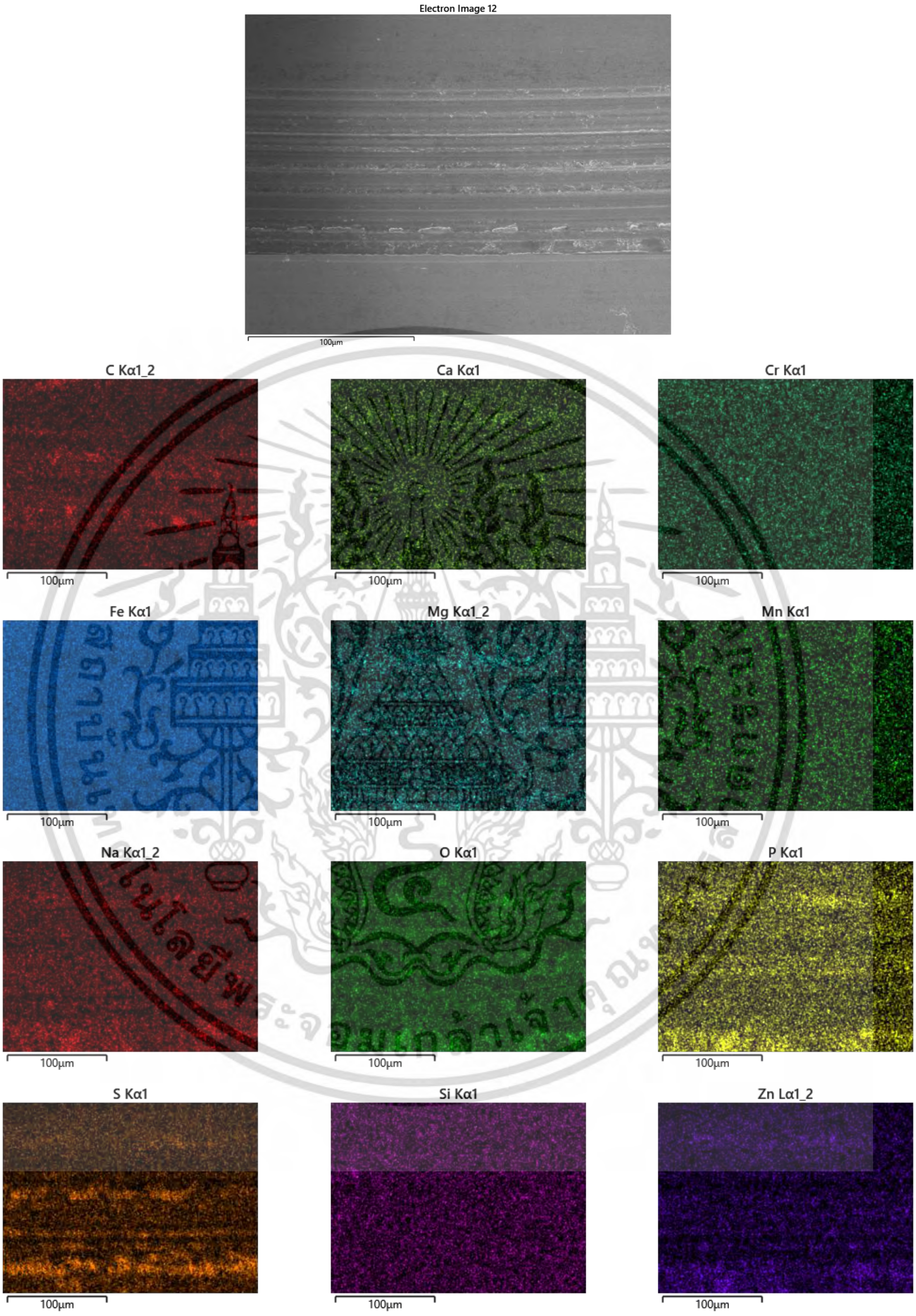
รูปที่ 4.29 ภาพถ่าย SEM และ EDX ที่กำลังขยาย 500X ของรอยการสึกหรอ (Wear Scar) บนลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



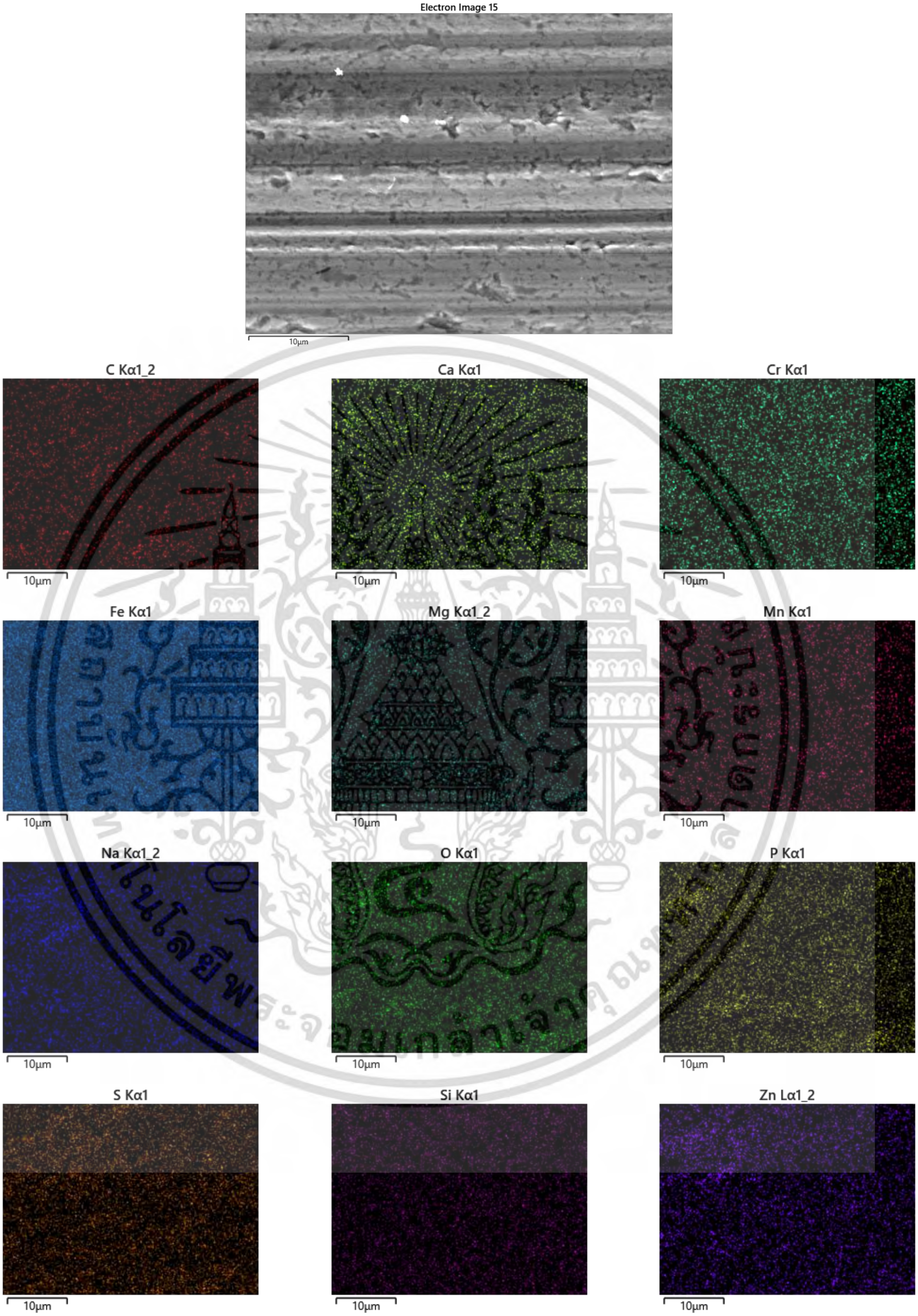
รูปที่ 4.30 ภาพถ่าย SEM และ EDX ที่กำลังขยาย 500X ของรอยการสึกหรอ (Wear Scar) บนลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



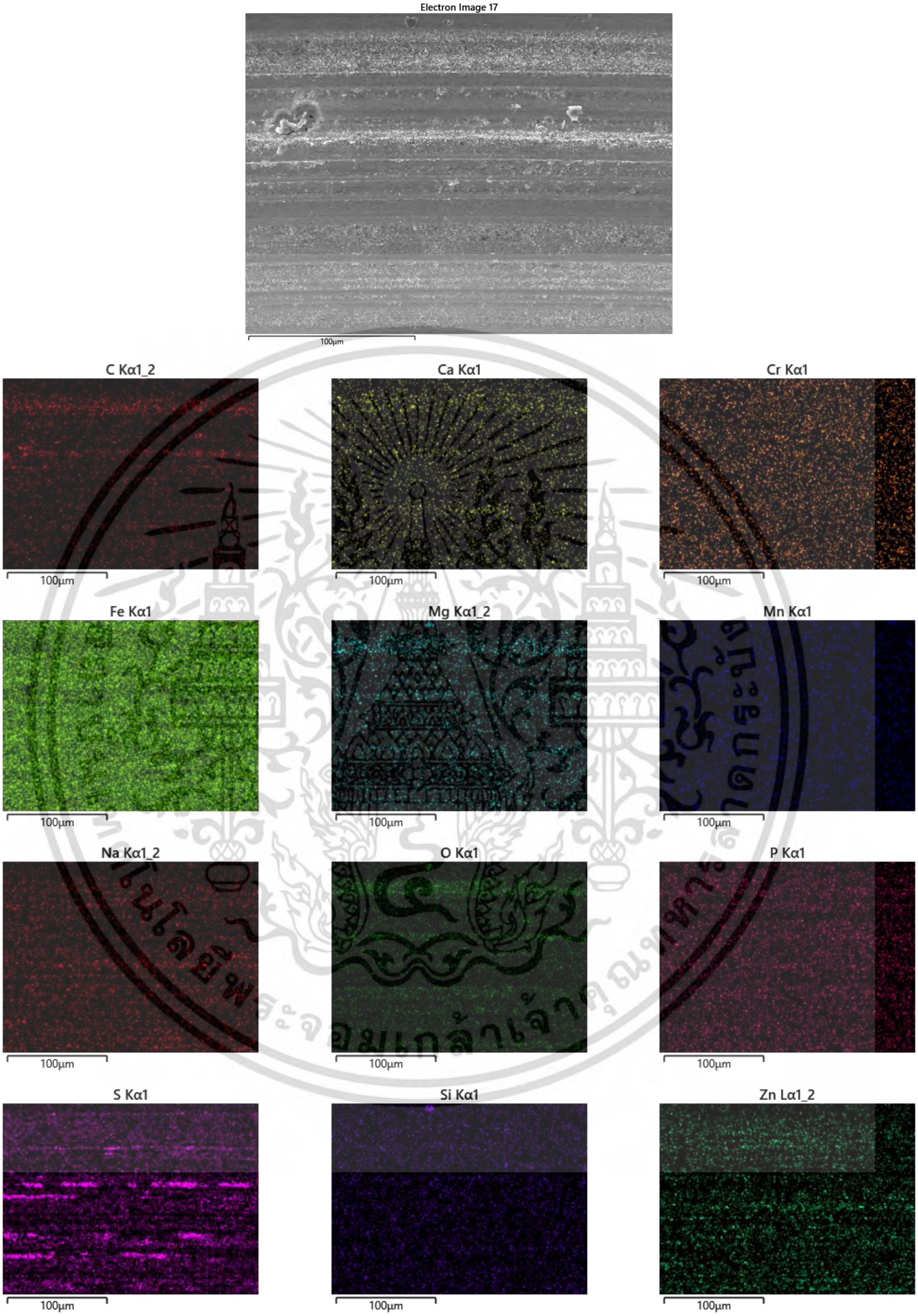
รูปที่ 4.31 ภาพถ่าย SEM และ EDX ที่กำลังขยาย 500X ของรอยการสึกหรอ (Wear Scar) บนลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



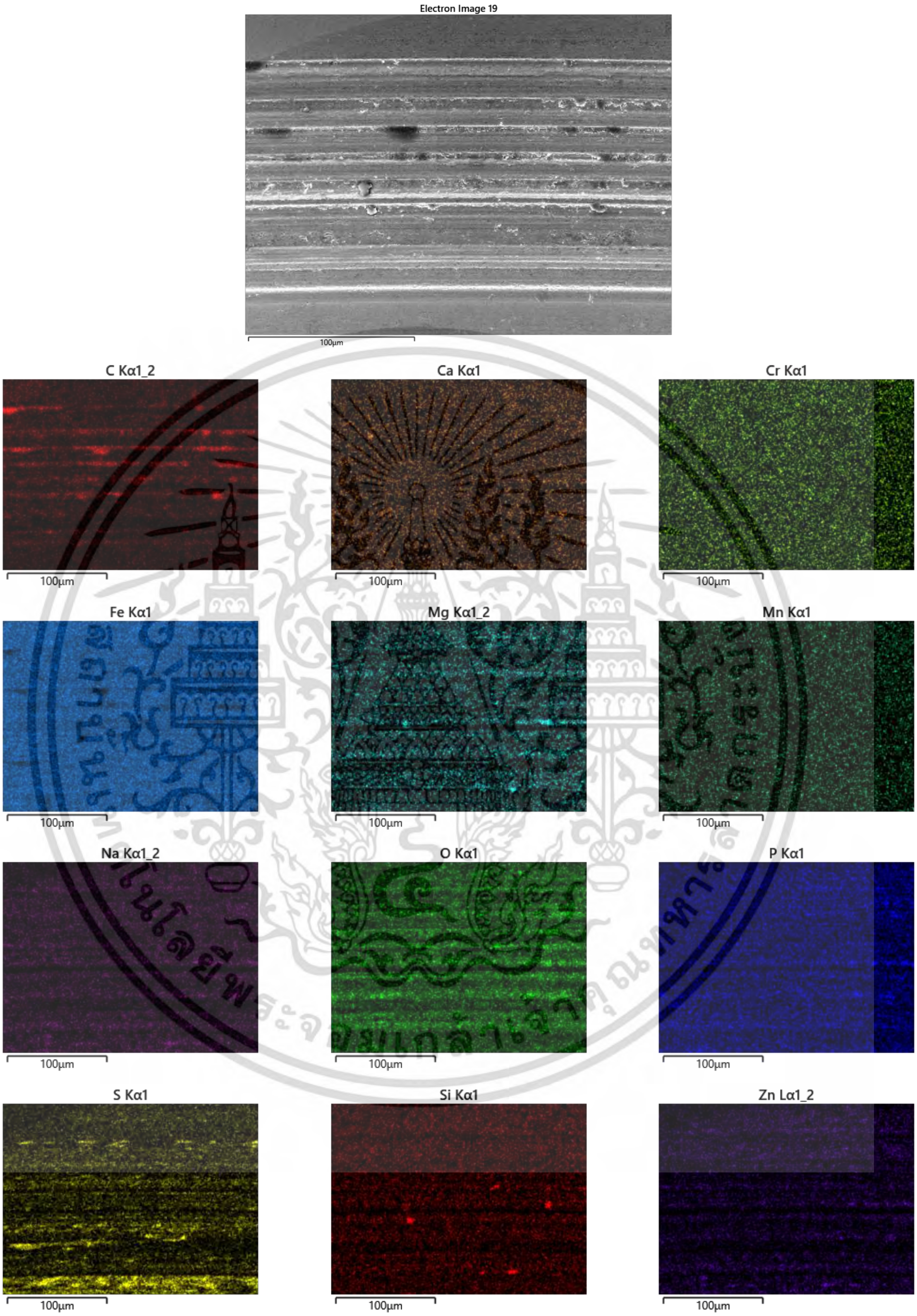
รูปที่ 4.32 ภาพถ่าย SEM และ EDX ที่กำลังขยาย 500X ของรอยการสึกหรอ (Wear Scar) บนลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N660

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



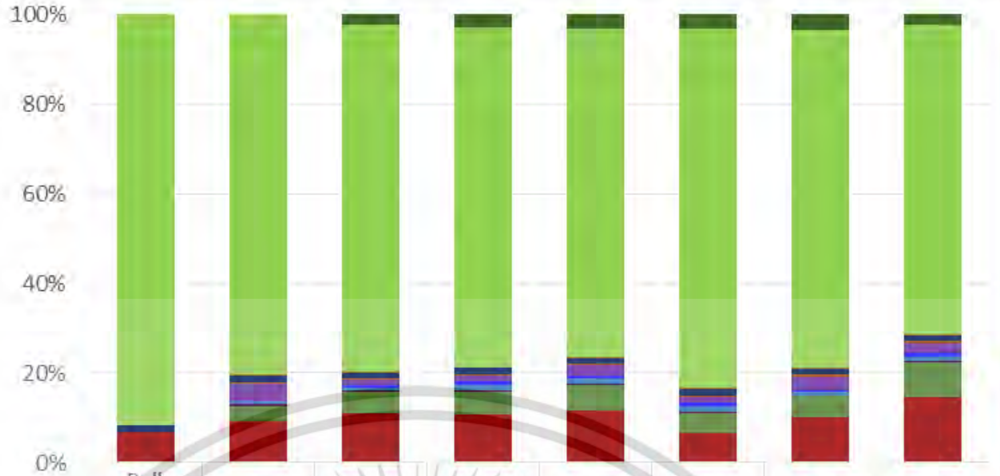
รูปที่ 4.33 ภาพถ่าย SEM และ EDX ที่กำลังขยาย 500X ของรอยการสึกหรอ (Wear Scar) บนลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 0.5% wt.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 ภาพถ่าย SEM และ EDX ที่กำลังขยาย 500X ของรอยการสึกหรอ (Wear Scar) บนลูกบอลเหล็กจากน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 2% wt.

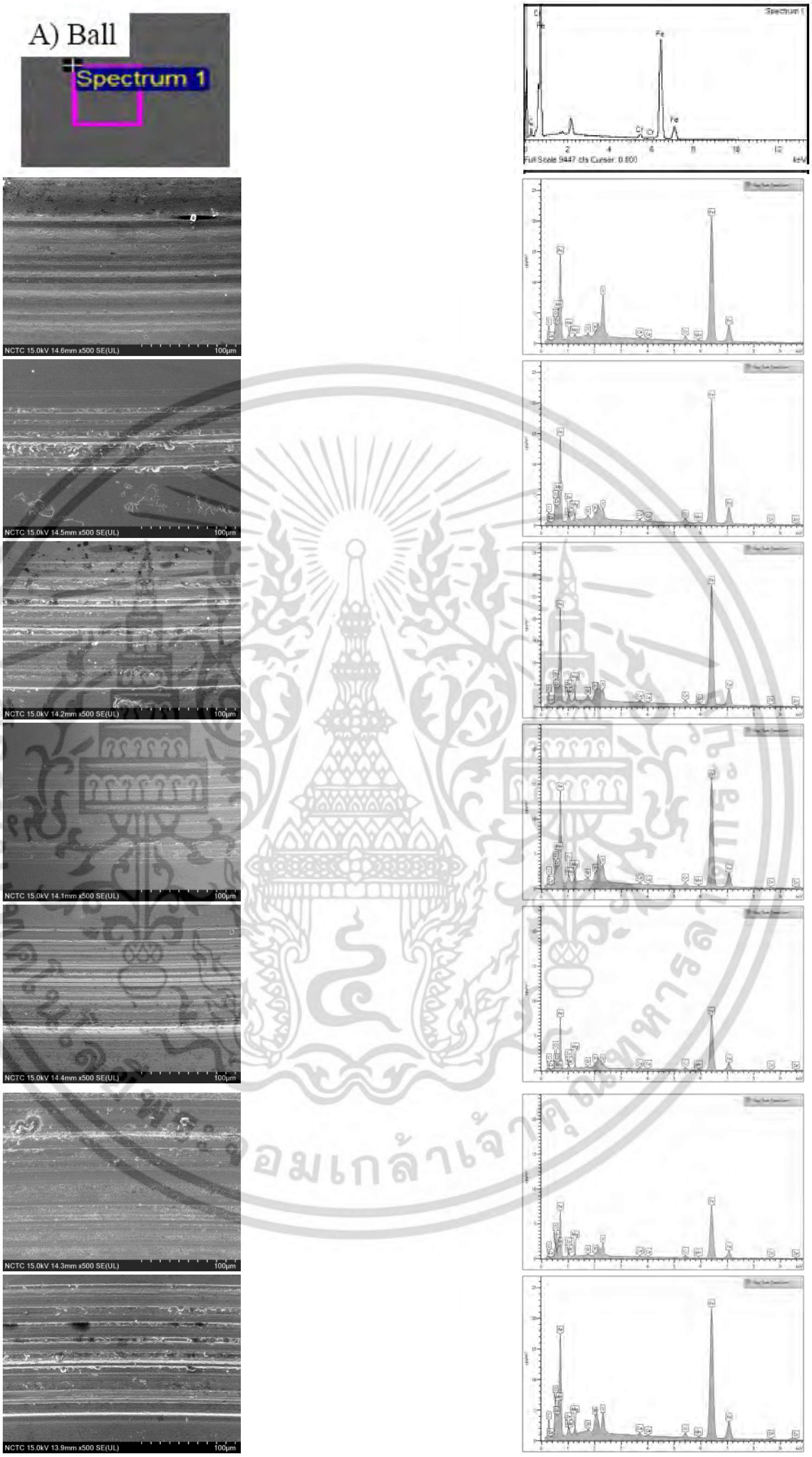
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



	Ball surface	NE	EC2	EC3	EC5	EC6	EC3-0.5%	EC3-2%
Zn	0	0	2.28	2.91	3.32	3.15	3.44	2.45
Fe	91.81	80.39	77.4	76.04	73.17	80.21	75.43	69.01
Mn	0	0.33	0.32	0	0.28	0.27	0.24	0.32
Cr	1.41	1.3	1.21	1.26	1.26	1.37	1.26	1.15
Ca	0	0.28	0.27	0.34	0.34	0.37	0.46	0.37
S	0	4.05	1.17	1.27	2.1	1.13	3.02	2.15
P	0	0	0.57	0.98	0.87	1.02	0.34	1.1
Si	0	0.21	0.34	0.39	0.3	0.22	0.24	0.27
Mg	0	0.41	0.4	0.59	0.67	0.83	0.7	0.62
Na	0	0.64	0.21	0.32	0.33	0.42	0	0.29
O	0	3.03	4.88	5.13	5.82	4.43	4.65	7.64
C	6.79	9.36	10.94	10.77	11.55	6.59	10.24	14.62

รูปที่ 4.35 การวิเคราะห์สัดส่วนของธาตุ โดย EDX ของพื้นผิวลูกบอลเหล็กหลังการทดสอบโฟร์บอล จากน้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า น้ำมันหล่อลื่นผสมเขม่า 1% ของ CB N220, CB N330, CB N550, CB N660 น้ำมันหล่อลื่นผสมเขม่า 0.5% CB N330 และน้ำมันหล่อลื่นผสมเขม่า 2% CB N330

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 ภาพถ่าย Spectrum จาก SEM และ EDX ของ (a) พื้นผิวลูกบอลเหล็ก (b) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า น้ำมันหล่อลื่นผสมเขม่า 1% wt ของ (c) CB N220, (d) CB N330, (e) CB N550, (f) CB N660 น้ำมันหล่อลื่นผสมเขม่า 0.5% wt ของ CB N330 (g) น้ำมันหล่อลื่นผสมเขม่า 2% wt ของ CB N330

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การทดสอบหาขนาดอนุภาคเดี่ยวของคาร์บอนแบล็ค N220, N330, N550 และ N660 โดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน มีค่า 24, 30, 45, 55 นาโนเมตรตามลำดับ

ผลการทดสอบคุณสมบัติต้านการสึกหรอของลูกบอลเหล็กด้วยเครื่องมือโฟร์บอล ในกรณีผสมคาร์บอนแบล็คขนาดอนุภาคแตกต่างกันที่ปริมาณ 1 % wt ในน้ำมันหล่อลื่น โดยใช้คาร์บอนแบล็ค N220, N330, N550 และ N660 พบว่าขนาดของแผลที่สึกหรอมีค่ามากกว่ากรณีไม่ผสมคาร์บอนแบล็คอยู่ที่ร้อยละ 26, 38, 41, และ 39 ตามลำดับ โดยอนุภาคคาร์บอนแบล็คที่ใหญ่ขึ้นมีแนวโน้มที่จะทำให้การสึกหรอมากขึ้น ซึ่งเป็นกลไกการสึกหรอแบบยึดติดเป็นส่วนใหญ่ คือร้อยละ 76, 80, 83 และ 84 ตามลำดับ เนื่องจากขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็คที่ใหญ่ขึ้นจะไปปิดกั้นไม่ให้น้ำมันหล่อลื่นเข้าไปในช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสของโลหะได้ แต่ความหยาบพื้นผิว (Roughness) มีค่าน้อยกว่าอยู่ที่ร้อยละ 22, 35, 21, และ 30 ตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคคาร์บอนแบล็คบางส่วนสามารถเข้าไปในช่องว่างระหว่างผิวโลหะได้พร้อมทั้งช่วยลดแรงเสียดทานในการกลิ้งระหว่างผิวสัมผัสชิ้นงาน และผิวของลูกบอลเหล็กถูกขัดถูโดยอนุภาคคาร์บอนแบล็ค

ผลการทดสอบคุณสมบัติต้านการสึกหรอของลูกบอลเหล็กด้วยเครื่องมือโฟร์บอล ในกรณีผสมคาร์บอนแบล็คปริมาณอนุภาคแตกต่างกันที่ปริมาณ 0.5, 1 และ 2 % wt. ในน้ำมันหล่อลื่น โดยใช้คาร์บอนแบล็ค N330 พบว่าขนาดของแผลที่สึกหรอกรณีผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณ 0.5 % wt. มีค่าน้อยกว่ากรณีไม่ผสมคาร์บอนแบล็คอยู่ที่ร้อยละ 8.70 ส่วนกรณีผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณ 1 และ 2 % wt. มีค่ามากกว่าอยู่ที่ร้อยละ 38 และ 44 ตามลำดับ โดยกรณีผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณ 0.5 % wt. ขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็คสามารถเข้าไปช่วยในการกลิ้งระหว่างผิวชิ้นงาน ในขณะที่กรณีผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณ 1 และ 2 % wt. อนุภาคมีการเกาะกลุ่มกันมากพอที่จะไปปิดกั้นไม่ให้น้ำมันหล่อลื่นไหลเข้าไปในช่องว่างผิวโลหะได้ ในส่วนของค่าความหยาบพื้นผิวจะมีค่าลดลงอยู่ที่ร้อยละ 89, 35, และ 29 ตามลำดับ เพราะว่ากรณีผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณ 0.5 % wt. ขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็คสามารถเข้าไปในช่องว่างระหว่างผิวโลหะได้มากกว่ากรณีผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณ 1 และ 2 % wt. เนื่องจากว่าที่ปริมาณ 1 และ 2 % wt. อนุภาคมีการเกาะกลุ่มกันมากขึ้นจนทำให้ไปปิดกั้นน้ำมันหล่อลื่น และ คาร์บอนแบล็คไม่ให้ไหลเข้าไปในช่องว่างระหว่างผิวโลหะได้ และเป็นสาเหตุให้เกิดกลไกการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การทดสอบโฟร์บอลควรเพิ่มการปนเปื้อนอนุภาคชนิดอื่นๆ นอกเหนือจากคาร์บอนแบล็ค เช่น เชื้อเพลิง ฝุ่นละออง น้ำ เพื่อให้ตัวแปรการปนเปื้อนคล้ายสถานการณ์ใช้งานจริงมากที่สุด

5.2.2 การทดสอบการปนเปื้อนคาร์บอนแบล็คควรเน้นการปนเปื้อนในช่วง 0-0.5% และ 0.5-1% เนื่องจากเป็นช่วงที่ให้การสึกหรอและความหยาบพื้นผิวของโลหะน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] M. Guatam, K. Chitoor, M. Durbha, and J.C. Summers: Effect of Diesel Soot Contaminated Oil on Engine Wear Investigation of Novel Oil.

[2] D. A. Green and R. Lewis, "The effects of soot-contaminated engine oil on wear and," IMechE, vol. 222, 2008.

[3] WARAWUT A. 2017. “IMPACT OF BIODIESEL CONTAMINATION AND SOOT ON ENGINE WEAR USING FOUR-BALL, LASER PARTICLE DISTRIBUTION” 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.

[4] Machinerylubrication. “SAE grades” [Online]. Available : http://www.machinery lubrication.com/Read/30197/choose-engine-oil (2559)

[5] สุรพล ราษฎรนุย. 2549. วิศวกรรมการหลอลื่นเบื้องต้น. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.

[6] ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ และคณะ. 2547. การสึกหรอในอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ: สมาคมสงเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

[7] Pall Corporation. “Adhesive Wear” [Online]. Available : http://ru.pall.com/main/ industrial-manufacturing/why-is-filtration-important-3779.page (2559)

[8] Pall Corporation. “Abrasive Wear” [Online]. Available : http://ru.pall.com/main/ industrial-manufacturing/why-is-filtration-important-3779.page (2559)

[9] Pall Corporation. “Fatigue Wear” [Online]. Available : http://ru.pall.com/main/ industrial-manufacturing/why-is-filtration-important-3779.page (2559)

[10] JGS-Nitriding, LLC. “Corrosive Wear” [Online]. Available : http://www.jgs-nitriding. com/ index.php (2559)

[11] Simon C. Tung and George E. Totten. 2012. Automotive Lubricants and Testing. U.S.A : ASTM Stock Number: MNL50.

[12] Cherry Balmz. “Boundary Lubrication” [Online]. Available : http://www.cherrybalmz .com/?_escaped_fragment_=lubricant-formulation--regimes/cloh (2559)

[13] Cherry Balmz. “Mixed Regime Lubrication” [Online]. Available : http://www.cherry balmz.com/?_escaped_fragment_=lubricant-formulation--regimes/cloh (2559)

[14] Robert Errichello. “Elastohydrodynamic Lubrication (EHL): A Review” [Online]. Avai lable : http://www.geartechnology.com/articles/0715/Elastohydrodynamic_ Lubrication _%28EHL%29:_A_Review (2559)

[15] Cherry Balmz. “Hydrodynamic Lubrication” [Online]. Available :http://www.cherry balmz.com/?_escaped_fragment_=lubricant-formulation--regimes/cloh (2559)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[16] Drew Troyer. “The Stribeck Equation and Curve” [Online]. Available : http://www.machinerylubrication.com/Read/27725/a-balanced-approach-to-lubrication-effectiveness-(2559)

[17] Doug Davis. “Sliding Friction” [Online].Available:http://www.ux1.eiu.edu/~cfadd/1150/04Nwtn/frict.html (2559)

[18] Ron Kurtus. “Role of Friction in Starting Rolling Motion” [Online]. Available : http://www.school-for-champions.com/science/friction_rolling_start.htm#.Vynk3xWLlhE (2559)

[19] James A. Addison and William M. Needelman. “Diesel engine lubricant contamination and Wear” Pall Corporation, ENGWEAR O2885M.

[20] Focuslab (2016). Oil Analysis-level 2.

[21] 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.

[22] พีระวัตร นันวงค. 2549. “การวิเคราะหรูปรางลักษณะอนุภาคการสึกหรอดวยการใชเทคนิคการวิเคราะหภาพถายทางคอมพิวเตอรเพื่อชวยในการติดตามสภาพเครื่องจักร” วิทยานิพนธวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกลาพระนครเหนือ.

[23] SW OCEAN WORLD CO.,LTD. “Viscosity System” [Online]. Available : http://www.swoceanworld.com/ (2559)

[24] 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)

[25] Xebex International, Ltd. “karl fischer moisture titrator” [Online]. Available : http://www.xebex.jp/Prod/cn12/mks-520.html (2559)

[26] 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)

[27] Thomas J. Fellers and Michael W. Davidson. “Conjugate Planes in Optical Microscopy”[Online]. Available : http://www.microscopyu.com/articles/formulas/formulasconjugate.html (2559)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[28] Girish Chandra. “SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM)” [Online]. Available : http://www.iaszoology.com/sem/ (2559)

[29] 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 Available : http://tribology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid =1469084 (2559)

[30] Hakan Kaleli et al. “Oil ageing – drain period in a petrol engine” Industrial Lubrication and Tribology, ISSN 0036-8792, 1997. pp.120-126.

[31] 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.

[32] Marián KUČERA et al. “INSPECTION OF WEAR PARTICLES CONTAMINATING USED ENGINE OILS” ACTA FACULTATIS TECHNICAE, XIX, 2014. pp. 39–47.

[33] 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.

[34] 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.

[35] 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.

[36] 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.

[37] Simon C. Tung and Hong Gao. “Tribological characteristics and surface interaction between piston ring” ELSEVIER, Wear 255, 2003. pp.1276–1285.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[38] 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.

[39] E. LAINE et al. “The Effect of a Friction Modifier Additive on Micropitting” Tribology Transactions, ISSN 1040-2004, 2009. pp. 526-533.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค
ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC0576/60

รายงานผลการวิเคราะห์

วันที่รายงาน	:	9 ธันวาคม 2559
ตัวอย่างจาก	:	คุณภัทระ ฉ่ำมะนา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
ทดสอบโดย	:	ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์เชิงฟิสิกส์ หน่วยวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
วันที่รับตัวอย่าง	:	29 พฤศจิกายน 2559
วันที่วิเคราะห์	:	2 ธันวาคม 2559
ตัวอย่างที่วิเคราะห์	:	ตัวอย่างคาร์บอนในน้ำมันเครื่อง จำนวน 10 ตัวอย่าง
การบ่งชี้ตัวอย่าง	:	1.) ตัวอย่างที่ 2 6.) ตัวอย่างที่ 7 2.) ตัวอย่างที่ 3 7.) Case II 3.) ตัวอย่างที่ 4 8.) Case III 4.) ตัวอย่างที่ 5 9.) Case 4 5.) ตัวอย่างที่ 6 10.) Case 5
เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์	:	Mastersizer 2000, Malvern Instruments Limited.
เทคนิคในการวิเคราะห์	:	Laser Diffraction Technique.
สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์	:	Red light source : He-Ne laser source, λ : 633 nm. Blue light source : Solid state light source Beam length : 2.35 mm. Particle size range analysis : 0.02-2,000 μm. Dispersion unit : Hydro 2000S (A) Dispersing medium : De-ionized water. Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement. ค่าดัชนีหักเหของตัวอย่าง : 2.4200 จำนวนครั้งในการทดลอง 3 ครั้ง Laser power : 82.2

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120 โทรศัพท์ 0 2564 6500 โทรสาร 0 2564 6501-5
National Metal and Materials Technology Center
National Science and Technology Development Agency
114 Thailand Science Park, Phahonyothin Road, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120 Thailand.
Tel. +66 2564 6500 Fax. +66 2564 6501-5 http://www.mtec.or.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมตัวอย่าง	:	1.) เตรียมเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์แบบเปียกโดยใช้สารละลายช่วยกระจายตัว (0.1% v/v Igepal CA-630) เป็นตัวกลาง จากนั้นปรับความเร็วรอบ Stirrer ของ Hydro 2000S (A) ไป ที่ 2,000 rpm 2.) ใส่ตัวอย่างประมาณ 1 มิลลิลิตร ในตัวกลางปริมาตร 40 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ คนตัวอย่างให้เกิดการกระจายตัว 3.) หลังจากนั้นเทตัวอย่างลงไปใน Chamber ของ Hydro 2000S (A) จากนั้นทำการวัดตัวอย่างด้วยเครื่อง Mastersizer 2000. 4.) ทำการวัดตัวอย่างซ้ำ 3 ครั้ง
ความหมายทางเทคนิค	:	**ค่า Obscuration** คือ ค่าที่อนุภาคมาปิดบัง (บดบัง) ลำแสงเลเซอร์ที่ยิงออกมา (เปอร์เซ็นต์) ซึ่งช่วงที่ใช้ในการพิจารณาแบ่งได้ดังนี้ 1. การวัดตัวอย่างแบบ Dry analysis ค่า Obscuration ที่ใช้อยู่ระหว่าง 0.1-5% 2. การวัดตัวอย่างแบบ Wet analysis ค่า Obscuration ที่ใช้อยู่ระหว่าง 10-30% **ค่า Residual** คือ ค่าความผิดพลาดในการวิเคราะห์อันอาจจะเกิดจากผลทางอิเล็กทรอนิกส์ในขณะที่อนุภาคไหลเข้าสู่เซลล์ขณะที่ทำการตรวจวัดซึ่งค่านี้ ไม่ควรจะเกิน 5% **ค่า D [4, 3]** คือ ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคในเชิงปริมาตร **ค่า D [3, 2]** คือ ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคในเชิงพื้นที่ผิว **ค่า D (v, 0.1)** คือ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่พบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้เป็นไมครอน **ค่า D (v, 0.5)** คือ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่พบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาด ที่วิเคราะห์ได้เป็นไมครอน **ค่า D (v, 0.9)** คือ 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่พบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาด ที่วิเคราะห์ได้เป็น ไมครอน **ค่า Span** คือ ค่าความกว้างในการกระจายตัวของอนุภาคที่ไม่ขึ้นกับค่ามัธยฐาน (D (v, 0.5)) **ค่า Uniformity** คือ ค่าการวัดความเบี่ยงเบนสมบูรณ์จากค่ามัธยฐาน (D (v, 0.5))

a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า **Specific Surface Area** คือ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะซึ่งคำนวณจากค่าความหนาแน่นของอนุภาคที่วิเคราะห์ และค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคในเชิงพื้นที่ผิว

ผลการวิเคราะห์ :

ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Mastersizer 2000 แสดงดังตารางที่ 1 – 10 และเอกสารแนบที่ 1 – 30

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างที่ 2

จำนวนครั้งในการวิเคราะห์	จำนวนการวิเคราะห์ซ้ำ	D [4,3] ไมครอน	D (v,0.1) ไมครอน	D (v,0.5) ไมครอน	D (v,0.9) ไมครอน	Span
1	1	52.48	15.97	48.27	95.85	1.66
	2	52.00	15.89	47.90	94.76	1.65
	3	51.82	15.87	47.75	94.39	1.64
2	1	51.47	15.82	47.44	93.66	1.64
	2	51.05	15.76	47.08	92.82	1.64
	3	50.69	15.70	46.79	92.06	1.63
3	1	50.56	15.72	46.66	91.79	1.63
	2	50.24	15.66	46.37	91.18	1.63
	3	50.10	15.65	46.23	90.93	1.63
ค่าเฉลี่ย		51.16	15.78	47.17	93.05	1.64
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.83	0.11	0.71	1.71	0.01
% ค่าความผิดพลาด		1.63	0.71	1.51	1.84	0.56

MTEC a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างที่ 3

จำนวนครั้งในการวิเคราะห์	จำนวนการวิเคราะห์ซ้ำ	D [4,3] ไมครอน	D (v,0.1) ไมครอน	D (v,0.5) ไมครอน	D (v,0.9) ไมครอน	Span
1	1	90.48	33.28	87.09	151.68	1.36
	2	88.96	32.41	85.75	149.28	1.36
	3	87.45	31.76	84.46	146.65	1.36
2	1	86.74	31.53	83.65	145.58	1.36
	2	85.98	31.30	82.95	144.08	1.36
	3	85.44	31.01	82.36	143.37	1.36
3	1	84.48	30.54	81.43	141.73	1.37
	2	83.92	29.97	80.92	140.86	1.37
	3	83.09	29.53	80.33	139.27	1.37
ค่าเฉลี่ย		86.28	31.26	83.22	144.72	1.36
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		2.40	1.17	2.26	4.02	0.00
% ค่าความผิดพลาด		2.78	3.74	2.71	2.78	0.24

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างที่ 4

จำนวนครั้งในการวิเคราะห์	จำนวนการวิเคราะห์ซ้ำ	D [4,3] ไมครอน	D (v,0.1) ไมครอน	D (v,0.5) ไมครอน	D (v,0.9) ไมครอน	Span
1	1	45.15	12.95	40.24	85.61	1.81
	2	44.29	12.80	39.60	83.79	1.79
	3	43.65	12.66	39.16	82.31	1.78
2	1	43.30	12.59	38.80	81.62	1.78
	2	42.82	12.49	38.39	80.61	1.77
	3	42.26	12.40	38.00	79.25	1.76
3	1	41.87	12.33	37.69	78.38	1.75
	2	41.47	12.27	37.38	77.49	1.75
	3	41.14	12.20	37.15	76.73	1.74
ค่าเฉลี่ย		42.88	12.52	38.49	80.64	1.77
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.34	0.25	1.05	2.97	0.02
% ค่าความผิดพลาด		3.12	2.00	2.73	3.68	1.28

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างที่ 5

จำนวนครั้งในการวิเคราะห์	จำนวนการวิเคราะห์ซ้ำ	D [4,3] ไมครอน	D (v,0.1) ไมครอน	D (v,0.5) ไมครอน	D (v,0.9) ไมครอน	Span
1	1	44.00	12.97	39.27	83.26	1.79
	2	43.56	12.89	38.92	82.25	1.78
	3	43.07	12.78	38.43	81.31	1.78
2	1	42.32	12.69	37.90	79.46	1.76
	2	41.80	12.59	37.41	78.47	1.76
	3	41.28	12.50	37.06	77.21	1.75
3	1	40.77	12.41	36.64	76.17	1.74
	2	40.41	12.34	36.36	75.37	1.73
	3	40.03	12.27	36.05	74.60	1.73
ค่าเฉลี่ย		41.91	12.60	37.56	78.68	1.76
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.42	0.25	1.14	3.11	0.02
% ค่าความผิดพลาด		3.38	1.96	3.04	3.95	1.30

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างที่ 6

จำนวนครั้งในการวิเคราะห์	จำนวนการวิเคราะห์ซ้ำ	D [4,3] ไมครอน	D (v,0.1) ไมครอน	D (v,0.5) ไมครอน	D (v,0.9) ไมครอน	Span
1	1	47.71	12.75	43.63	89.29	1.76
	2	47.01	12.50	43.12	87.85	1.75
	3	46.28	12.05	42.49	86.68	1.76
2	1	45.74	11.81	42.02	85.72	1.76
	2	45.17	11.60	41.52	84.59	1.76
	3	44.80	11.39	41.14	84.01	1.77
3	1	44.62	11.24	40.93	83.72	1.77
	2	44.30	11.02	40.66	83.14	1.77
	3	43.87	10.82	40.25	82.37	1.78
ค่าเฉลี่ย		45.50	11.68	41.75	85.26	1.76
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.29	0.66	1.15	2.30	0.01
% ค่าความผิดพลาด		2.84	5.61	2.75	2.70	0.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างที่ 7

จำนวนครั้งในการวิเคราะห์	จำนวนการวิเคราะห์ซ้ำ	D [4,3] ไมครอน	D (v,0.1) ไมครอน	D (v,0.5) ไมครอน	D (v,0.9) ไมครอน	Span
1	1	45.27	13.33	41.04	84.41	1.73
	2	44.56	13.15	40.42	82.93	1.73
	3	44.16	13.04	40.03	82.17	1.73
2	1	43.51	12.88	39.51	80.73	1.72
	2	42.87	12.73	38.99	79.40	1.71
	3	42.30	12.55	38.52	78.24	1.71
3	1	41.91	12.43	38.23	77.39	1.70
	2	41.38	12.11	37.82	76.46	1.70
	3	40.89	11.96	37.40	75.49	1.70
ค่าเฉลี่ย		42.98	12.69	39.10	79.69	1.71
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.50	0.47	1.24	3.07	0.01
% ค่าความผิดพลาด		3.49	3.68	3.16	3.86	0.76

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่าง Case II

จำนวนครั้งในการวิเคราะห์	จำนวนการวิเคราะห์ซ้ำ	D [4,3] ไมครอน	D (v,0.1) ไมครอน	D (v,0.5) ไมครอน	D (v,0.9) ไมครอน	Span
1	1	42.27	11.31	36.07	83.83	2.01
	2	41.81	11.23	35.71	82.70	2.00
	3	41.16	11.12	35.36	81.26	1.98
2	1	40.66	11.04	35.03	80.07	1.97
	2	40.14	10.94	34.54	79.03	1.97
	3	40.12	10.92	34.51	78.97	1.97
3	1	39.88	10.84	34.20	78.51	1.98
	2	39.42	10.76	33.96	77.43	1.96
	3	39.05	10.65	33.68	76.65	1.96
ค่าเฉลี่ย		40.50	10.98	34.78	79.83	1.98
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.08	0.22	0.81	2.38	0.02
% ค่าความผิดพลาด		2.66	1.96	2.34	2.98	0.86

MTEC a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่าง Case III

จำนวนครั้งในการวิเคราะห์	จำนวนการวิเคราะห์ซ้ำ	D [4,3] ไมครอน	D (v,0.1) ไมครอน	D (v,0.5) ไมครอน	D (v,0.9) ไมครอน	Span
1	1	43.73	13.46	38.20	83.56	1.84
	2	43.18	13.34	37.53	82.54	1.84
	3	43.40	13.34	37.58	82.93	1.85
2	1	41.98	13.16	36.70	79.74	1.81
	2	41.98	13.12	36.44	79.79	1.83
	3	41.70	13.08	36.23	79.16	1.82
3	1	40.79	12.99	35.74	77.15	1.80
	2	40.83	12.95	35.59	77.14	1.80
	3	40.18	12.88	35.25	75.81	1.79
ค่าเฉลี่ย		41.97	13.15	36.58	79.76	1.82
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.25	0.20	1.01	2.78	0.02
% ค่าความผิดพลาด		2.98	1.50	2.75	3.49	1.24

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่าง Case 4

จำนวนครั้งในการวิเคราะห์	จำนวนการวิเคราะห์ซ้ำ	D [4,3] ไมครอน	D (v,0.1) ไมครอน	D (v,0.5) ไมครอน	D (v,0.9) ไมครอน	Span
1	1	42.43	12.64	37.15	81.32	1.85
	2	42.04	12.70	36.90	80.29	1.83
	3	41.34	12.69	36.43	78.42	1.80
2	1	40.84	12.72	36.13	77.02	1.78
	2	40.47	12.74	35.86	76.09	1.77
	3	40.13	12.79	35.70	75.08	1.75
3	1	39.71	12.79	35.38	74.11	1.73
	2	39.56	12.84	35.30	73.67	1.72
	3	38.97	12.82	34.98	72.14	1.70
ค่าเฉลี่ย		40.61	12.75	35.98	76.46	1.77
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.16	0.07	0.74	3.09	0.05
% ค่าความผิดพลาด		2.87	0.52	2.05	4.04	2.90

MTEC a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่าง Case 5

จำนวนครั้งในการวิเคราะห์	จำนวนการวิเคราะห์ซ้ำ	D [4,3] ไมครอน	D (v,0.1) ไมครอน	D (v,0.5) ไมครอน	D (v,0.9) ไมครอน	Span
1	1	46.93	14.22	41.66	88.65	1.79
	2	46.58	14.18	41.47	87.74	1.77
	3	46.21	14.14	41.19	86.91	1.77
2	1	45.98	14.12	41.01	86.39	1.76
	2	45.39	14.05	40.59	85.08	1.75
	3	45.10	14.05	40.45	84.32	1.74
3	1	44.81	13.99	40.16	83.82	1.74
	2	44.52	13.95	39.93	83.10	1.73
	3	44.42	13.95	39.84	82.87	1.73
ค่าเฉลี่ย		45.55	14.07	40.70	85.43	1.75
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.91	0.10	0.66	2.08	0.02
% ค่าความผิดพลาด		2.01	0.70	1.63	2.44	1.16

หมายเหตุ : 1. ความหนาแน่นและพื้นที่ผิวจำเพาะที่แสดงไว้ในเอกสารแนบเป็นค่าที่ตั้งไว้ในเครื่อง ไม่เกี่ยวข้องกับสมบัติของสารตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

2. อนุภาคที่วิเคราะห์ได้นั้นเป็นอนุภาคที่เกิดการกระจายตัวของตัวอย่างเท่านั้น

การแปลผล/ความคิดเห็น : ไม่มี

เอกสารแนบ :

เอกสารแนบหน้าที่	รายละเอียด
1 – 3	ผลการวิเคราะห์ขนาดและกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่างที่ 2
4 – 6	ผลการวิเคราะห์ขนาดและกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่างที่ 3
7 – 9	ผลการวิเคราะห์ขนาดและกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่างที่ 4
10 – 12	ผลการวิเคราะห์ขนาดและกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่างที่ 5
13 – 15	ผลการวิเคราะห์ขนาดและกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่างที่ 6
16 – 18	ผลการวิเคราะห์ขนาดและกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่างที่ 7
19 – 21	ผลการวิเคราะห์ขนาดและกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่าง Case II
22 – 24	ผลการวิเคราะห์ขนาดและกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่าง Case III
25 – 27	ผลการวิเคราะห์ขนาดและกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่าง Case 4
28 – 30	ผลการวิเคราะห์ขนาดและกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่าง Case 5

MTEC a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบโดย :

(นายอรินทรเชษฐ์ ศิรินันทวิทยา)

(นายสามารถ นุชสาย)

ตรวจสอบโดย :

(นางปิยวรรณ ปนิทานเต)

หมายเหตุ

1. ศูนย์ฯ ไม่อนุญาตให้มีการแก้ไข เพิ่มเติม หรือเปลี่ยนแปลงรายงาน หรือส่วนหนึ่งส่วนใดของรายงาน เว้นแต่จะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร จากศูนย์ฯ
2. ทางศูนย์ฯ ไม่สามารถรับผิดชอบต่อความเสียหายใด ๆ ที่จะเกิดขึ้น ไม่ว่าโดยทางตรงหรือทางอ้อม ในกรณีที่นำข้อมูล ผลการวิเคราะห์ ข้อสรุปหรือคำแนะนำฉบับนี้ไปใช้ในการออกแบบ การผลิต หรือเพื่อจุดประสงค์ใดก็ตาม
3. ผลการทดลองเป็นจริงเฉพาะตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น

MTEC
a member of NSTDA

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 1

Sample Details

Sample ID : Sample No.2_1

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1 % v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 1 ธันวาคม 2559 9:56:58

Analysed : 1 ธันวาคม 2559 9:56:59

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 20.71 **Residual (%) :** 0.379

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0544 %Vol **Specific Surface Area :** 0.319 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 15.89 um **D (0.5) :** 47.9 um **D (0.9) :** 94.76 um

D [4,3] : 52 um **D [3,2] :** 18.83 um **Span :** 1.647 **Uniformity :** 0.509

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

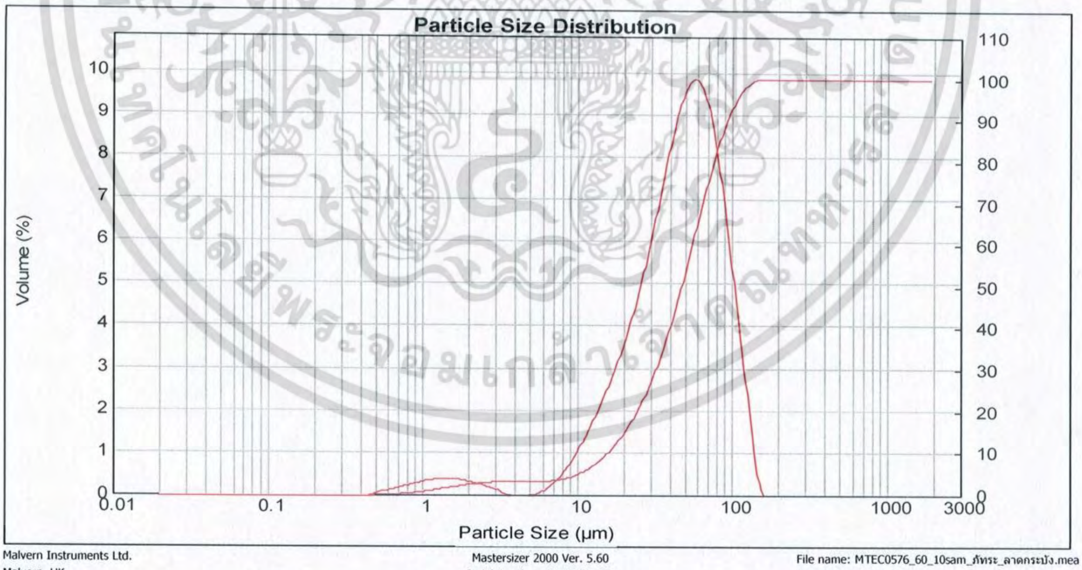
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.01
0.502	0.09
0.586	0.14
0.683	0.20
0.796	0.27
0.928	0.33
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.37
1.262	0.39
1.471	0.39
1.715	0.36
2.000	0.31
2.332	0.23
2.719	0.16
3.170	0.05
3.696	0.00
4.309	0.00
5.024	0.02
5.857	0.14
6.829	0.33
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.62
9.283	0.99
10.823	1.44
12.619	1.95
14.713	2.51
17.154	3.14
20.000	3.87
23.318	4.73
27.187	5.75
31.698	6.90
36.957	8.09
43.089	9.13
50.238	9.77
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	9.79
68.291	9.04
79.621	7.59
92.832	5.63
108.234	3.59
126.191	1.57
147.128	0.08
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 122
2/12/2559 11:14:59

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 2

Sample Details

Sample ID : Sample No.2_2

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1 % v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 1 ธันวาคม 2559 9:57:45

Analysed : 1 ธันวาคม 2559 9:57:46

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 21.02 **Residual (%) :** 0.426

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0547 %Vol **Specific Surface Area :** 0.322 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 15.76 um **D (0.5) :** 47.08 um **D (0.9) :** 92.82 um

D [4,3] : 51.05 um **D [3,2] :** 18.63 um **Span :** 1.637 **Uniformity :** 0.507

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

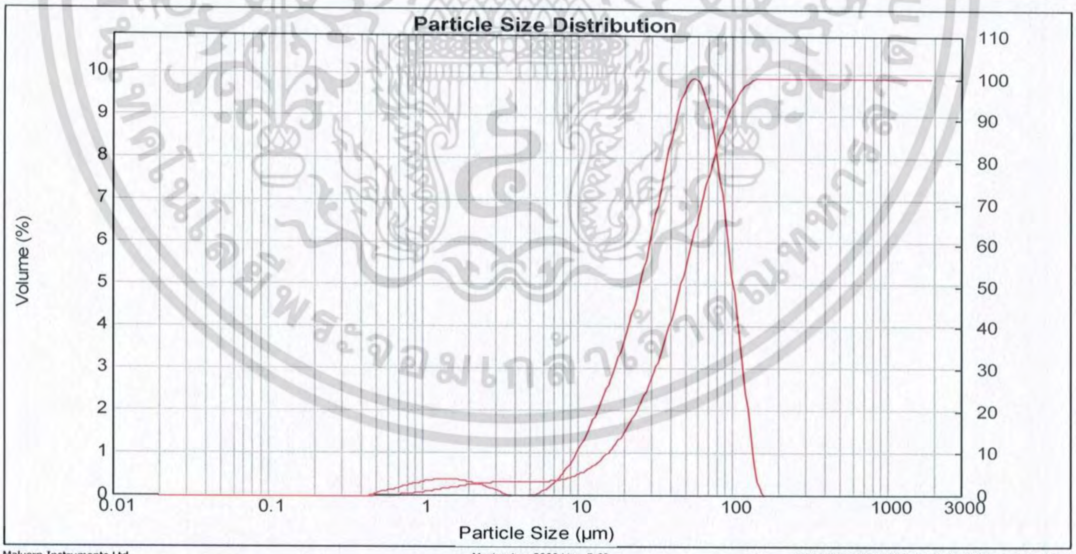
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.01
0.502	0.09
0.586	0.14
0.683	0.21
0.796	0.27
0.928	0.33
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.37
1.262	0.40
1.471	0.39
1.715	0.36
2.000	0.31
2.332	0.23
2.719	0.16
3.170	0.05
3.696	0.00
4.309	0.00
5.024	0.02
5.857	0.15
6.829	0.34
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.63
9.283	1.01
10.823	1.47
12.619	1.99
14.713	2.56
17.154	3.21
20.000	3.96
23.318	4.85
27.187	5.90
31.698	7.07
36.957	8.26
43.089	9.27
50.238	9.85
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	9.78
68.291	8.95
79.621	7.41
92.832	5.40
108.234	3.34
126.191	1.21
147.128	0.04
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 125
2/12/2559 11:14:59

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 3

Sample Details

Sample ID : Sample No.2_3

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1 % v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 1 ธันวาคม 2559 9:58:31

Analysed : 1 ธันวาคม 2559 9:58:33

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 21.29 **Residual (%) :** 0.386

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0550 %Vol **Specific Surface Area :** 0.325 m^2/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 15.66 um **D (0.5) :** 46.37 um **D (0.9) :** 91.18 um

D [4,3] : 50.24 um **D [3,2] :** 18.47 um **Span :** 1.629 **Uniformity :** 0.505

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

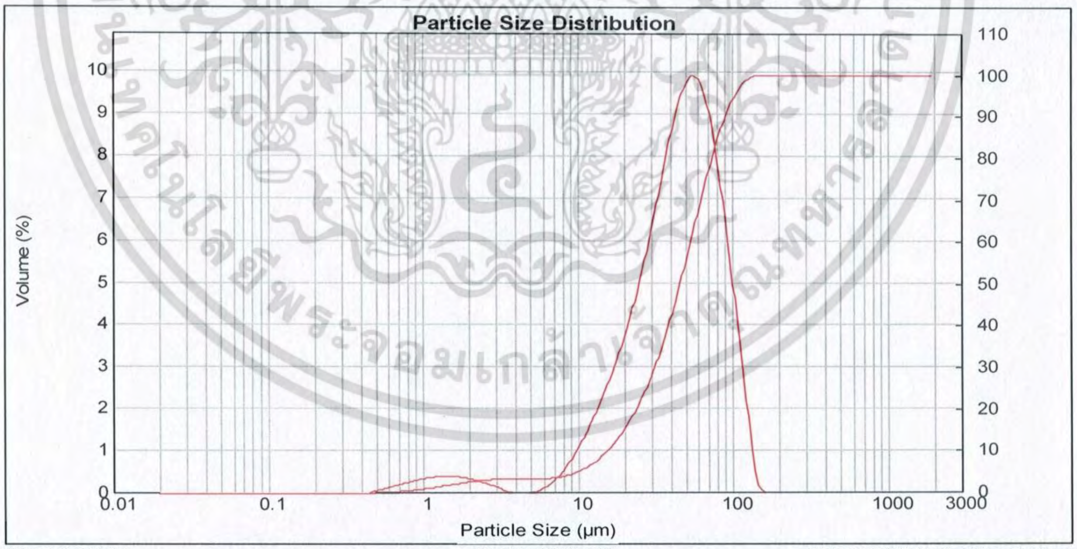
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.01
0.502	0.09
0.586	0.14
0.683	0.21
0.796	0.27
0.928	0.33
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.37
1.262	0.40
1.471	0.39
1.715	0.36
2.000	0.31
2.332	0.23
2.719	0.16
3.170	0.05
3.696	0.00
4.309	0.00
5.024	0.02
5.857	0.15
6.829	0.35
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.64
9.283	1.02
10.823	1.49
12.619	2.02
14.713	2.61
17.154	3.28
20.000	4.05
23.318	4.97
27.187	6.04
31.698	7.23
36.957	8.42
43.089	9.39
50.238	9.92
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	9.76
68.291	8.84
79.621	7.23
92.832	5.19
108.234	3.13
126.191	0.93
147.128	0.02
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 128
2/12/2559 11:14:59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

<u>เอกสารแนบที่ 4</u>

Sample Details

Sample ID : Sample No.3_1

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1 % v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 1 ธันวาคม 2559 12:43:33

Analysed : 1 ธันวาคม 2559 12:43:35

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 29.50 **Residual (%) :** 0.721

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.1437 %Vol **Specific Surface Area :** 0.183 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 32.41 um **D (0.5) :** 85.75 um **D (0.9) :** 149.28 um

D [4,3] : 88.96 um **D [3,2] :** 32.84 um **Span :** 1.363 **Uniformity :** 0.413

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

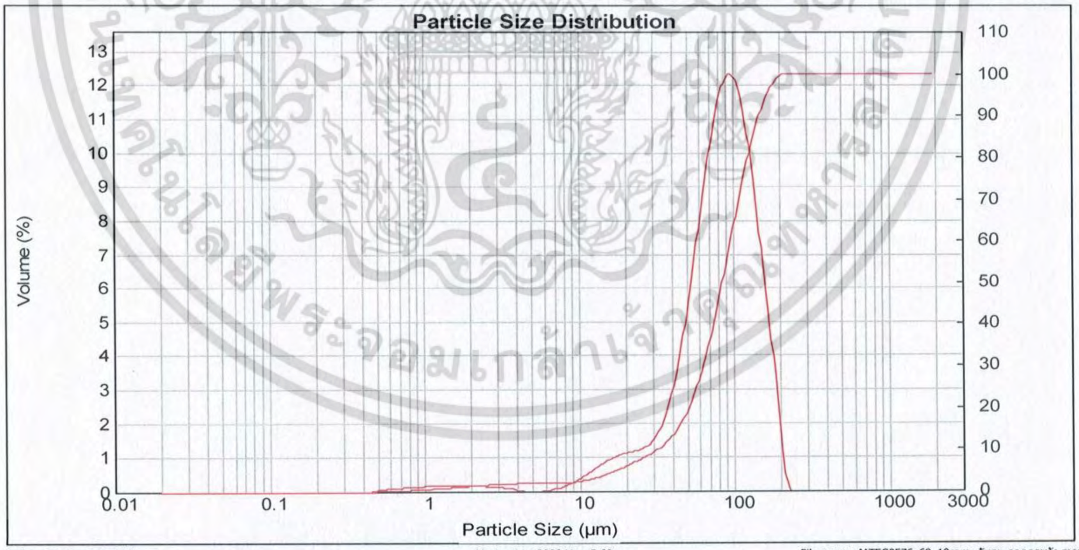
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.01
0.502	0.07
0.586	0.09
0.683	0.12
0.796	0.14
0.928	0.16
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.17
1.262	0.18
1.471	0.18
1.715	0.18
2.000	0.17
2.332	0.15
2.719	0.13
3.170	0.11
3.696	0.04
4.309	0.00
5.024	0.00
5.857	0.02
6.829	0.10
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.20
9.283	0.36
10.823	0.56
12.619	0.76
14.713	0.95
17.154	1.07
20.000	1.15
23.318	1.24
27.187	1.44
31.698	1.93
36.957	2.86
43.089	4.33
50.238	6.30
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	8.53
68.291	10.61
79.621	12.02
92.832	12.33
108.234	11.35
126.191	9.25
147.128	6.47
171.539	3.68
200.000	0.59
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 131
2/12/2559 11:14:59

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 5

Sample Details

Sample ID : Sample No.3_2

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1 % v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 1 ธันวาคม 2559 12:44:20

Analysed : 1 ธันวาคม 2559 12:44:21

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 30.57 **Residual (%) :** 0.808

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.1428 %Vol **Specific Surface Area :** 0.192 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 31.3 um **D (0.5) :** 82.95 um **D (0.9) :** 144.08 um

D [4,3] : 85.98 um **D [3,2] :** 31.29 um **Span :** 1.360 **Uniformity :** 0.413

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

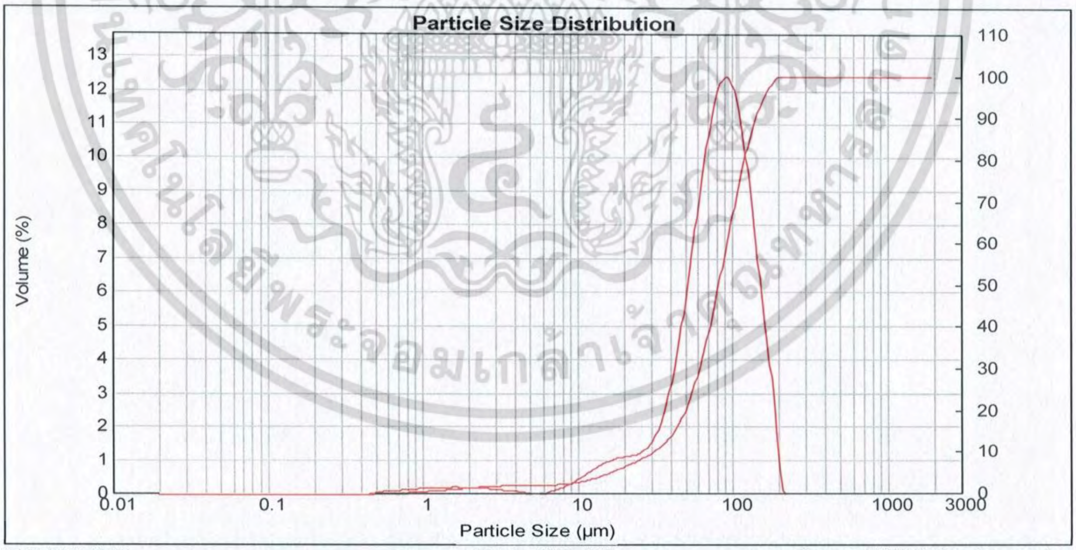
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.01
0.502	0.07
0.586	0.09
0.683	0.12
0.796	0.14
0.928	0.17
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.18
1.262	0.19
1.471	0.20
1.715	0.19
2.000	0.19
2.332	0.17
2.719	0.15
3.170	0.12
3.696	0.09
4.309	0.03
5.024	0.00
5.857	0.03
6.829	0.13
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.24
9.283	0.41
10.823	0.61
12.619	0.81
14.713	0.97
17.154	1.07
20.000	1.12
23.318	1.21
27.187	1.44
31.698	2.01
36.957	3.06
43.089	4.68
50.238	6.78
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	9.06
68.291	11.07
79.621	12.29
92.832	12.30
108.234	10.99
126.191	8.64
147.128	5.68
171.539	3.13
200.000	0.17
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 134
2/12/2559 11:15:00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

<u>เอกสารแนบที่ 6</u>

Sample Details

Sample ID : Sample No.3_3

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_...

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1 % v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 1 ธันวาคม 2559 12:45:06

Analysed : 1 ธันวาคม 2559 12:45:08

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 31.29 **Residual (%) :** 0.778

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.1409 %Vol **Specific Surface Area :** 0.2 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 29.97 um **D (0.5) :** 80.92 um **D (0.9) :** 140.86 um

D [4,3] : 83.92 um **D [3,2] :** 30.05 um **Span :** 1.370 **Uniformity :** 0.415

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

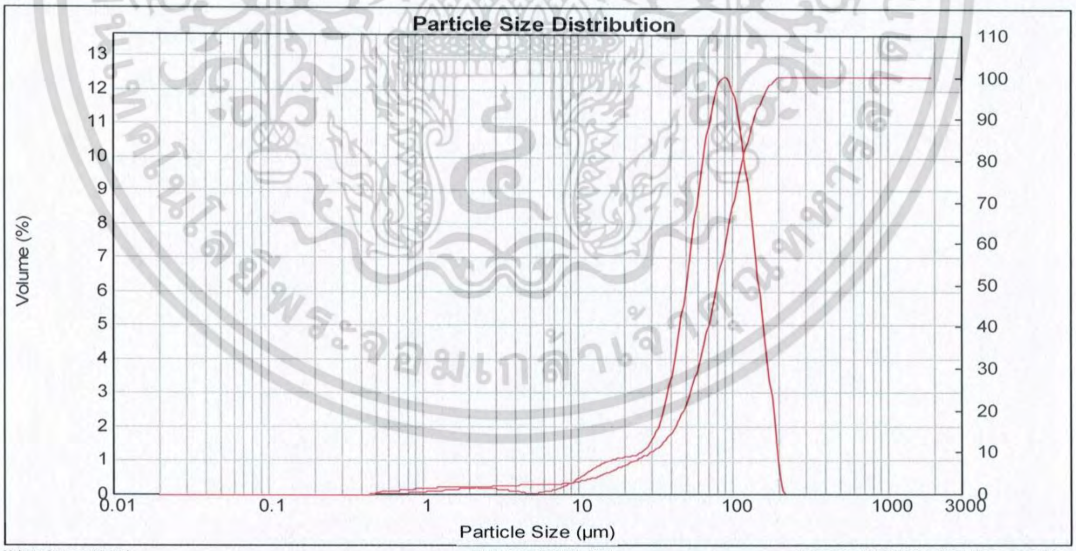
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.01
0.502	0.08
0.586	0.10
0.683	0.12
0.796	0.15
0.928	0.17
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.19
1.262	0.20
1.471	0.21
1.715	0.21
2.000	0.20
2.332	0.18
2.719	0.16
3.170	0.13
3.696	0.10
4.309	0.04
5.024	0.02
5.857	0.09
6.829	0.15
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.27
9.283	0.45
10.823	0.65
12.619	0.84
14.713	0.99
17.154	1.08
20.000	1.12
23.318	1.21
27.187	1.48
31.698	2.11
36.957	3.25
43.089	4.96
50.238	7.11
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	9.40
68.291	11.31
79.621	12.35
92.832	12.15
108.234	10.64
126.191	8.15
147.128	5.19
171.539	2.65
200.000	0.14
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 137
2/12/2559 11:15:00

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 7

Sample Details

Sample ID : Sample No.4_1

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1 % v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 1 ธันวาคม 2559 13:14:01

Analysed : 1 ธันวาคม 2559 13:14:02

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 22.55 **Residual (%) :** 0.262

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

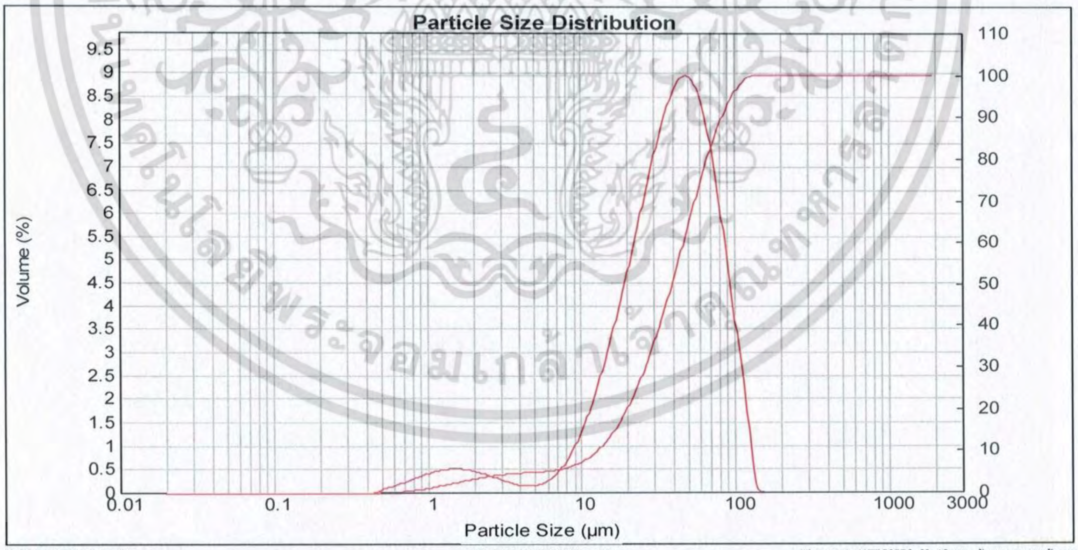
Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0479 %Vol **Specific Surface Area :** 0.396 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 12.8 um **D (0.5) :** 39.6 um **D (0.9) :** 83.79 um

D [4,3] : 44.29 um **D [3,2] :** 15.15 um **Span :** 1.793 **Uniformity :** 0.556

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.147	0.00	1.082	0.47	7.962	0.82	58.573	8.23	430.887	0.00
0.023	0.00	0.172	0.00	1.262	0.51	9.283	1.27	68.291	7.10	502.377	0.00
0.027	0.00	0.200	0.00	1.471	0.52	10.823	1.84	79.621	5.59	585.729	0.00
0.032	0.00	0.233	0.00	1.715	0.49	12.619	2.54	92.832	3.87	682.910	0.00
0.037	0.00	0.272	0.00	2.000	0.44	14.713	3.33	108.234	2.29	796.214	0.00
0.043	0.00	0.317	0.00	2.332	0.37	17.154	4.21	126.191	0.29	928.318	0.00
0.050	0.00	0.370	0.00	2.719	0.30	20.000	5.15	147.128	0.00	1082.339	0.00
0.059	0.00	0.431	0.01	3.170	0.22	23.318	6.12	171.539	0.00	1261.915	0.00
0.068	0.00	0.502	0.10	3.696	0.17	27.187	7.08	200.000	0.00	1471.285	0.00
0.080	0.00	0.586	0.17	4.309	0.15	31.698	7.95	233.183	0.00	1715.392	0.00
0.093	0.00	0.683	0.25	5.024	0.18	36.957	8.62	271.871	0.00	2000.000	
0.108	0.00	0.796	0.33	5.857	0.29	43.089	8.96	316.979	0.00		
0.126	0.00	0.928	0.41	6.829	0.50	50.238	8.86	369.570	0.00		
0.147		1.082		7.962		58.573		430.887			



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 140
2/12/2559 11:15:00

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 8

Sample Details

Sample ID : Sample No.4_2

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1 % v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 1 ธันวาคม 2559 13:14:48

Analysed : 1 ธันวาคม 2559 13:14:49

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A)
Beam Length (mm) : 2.35
Obscuration (%) : 23.19
Residual (%) : 0.272

Particle RI : 2.420
Absorption : 1
Dispersant Name : Water
Dispersant RI : 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume
Concentration : 0.0482 %Vol
Specific Surface Area : 0.406 m²/g

Mean Diameters :
D (0.1) : 12.49 um
D (0.5) : 38.39 um
D (0.9) : 80.61 um

D [4,3] : 42.82 um
D [3,2] : 14.76 um
Span : 1.774
Uniformity : 0.55

Size (μm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

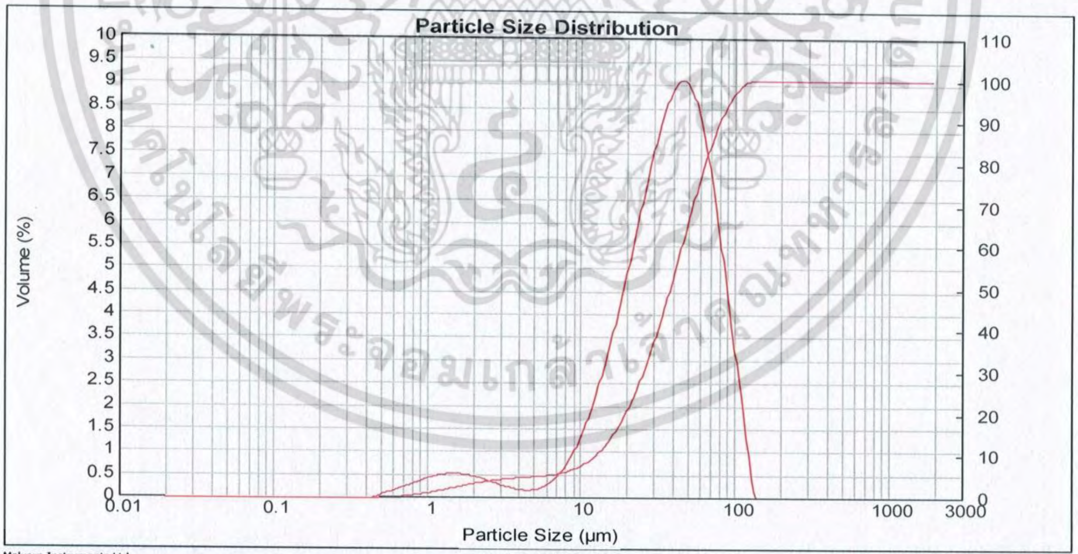
Size (μm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.02
0.502	0.10
0.586	0.18
0.683	0.26
0.796	0.34
0.928	0.42
1.082	

Size (μm)	Volume In %
1.082	0.48
1.262	0.52
1.471	0.53
1.715	0.50
2.000	0.45
2.332	0.38
2.719	0.31
3.170	0.24
3.696	0.19
4.309	0.17
5.024	0.21
5.857	0.32
6.829	0.52
7.962	

Size (μm)	Volume In %
7.962	0.85
9.283	1.29
10.823	1.87
12.619	2.58
14.713	3.41
17.154	4.33
20.000	5.34
23.318	6.38
27.187	7.39
31.698	8.27
36.957	8.90
43.089	9.13
50.238	8.86
58.573	

Size (μm)	Volume In %
58.573	8.05
68.291	6.75
79.621	5.12
92.832	3.41
108.234	1.82
126.191	0.12
147.128	0.00
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (μm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 143
2/12/2559 11:15:00

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC a member of NSTDA

Result : Analysis Report

<u>เอกสารแนบที่ 9</u>

Sample Details

Sample ID : Sample No.4_3

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1 % v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 1 ธันวาคม 2559 13:15:34

Analysed : 1 ธันวาคม 2559 13:15:36

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 23.71 **Residual (%) :** 0.289

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0485 %Vol **Specific Surface Area :** 0.415 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 12.27 um **D (0.5) :** 37.38 um **D (0.9) :** 77.49 um

D [4,3] : 41.47 um **D [3,2] :** 14.47 um **Span :** 1.745 **Uniformity :** 0.54

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

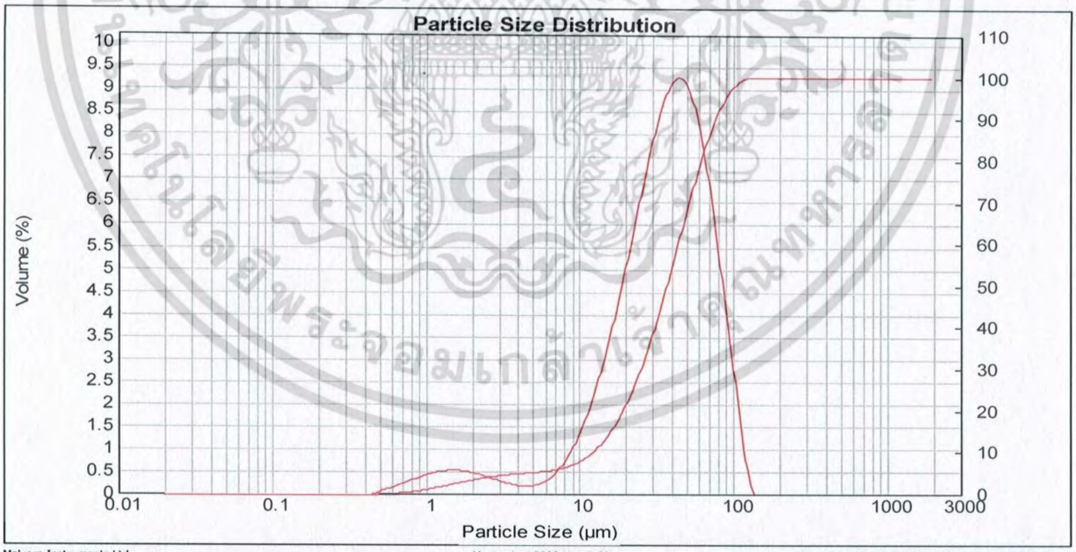
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.02
0.502	0.11
0.586	0.18
0.683	0.26
0.796	0.35
0.928	0.43
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.49
1.262	0.53
1.471	0.53
1.715	0.51
2.000	0.46
2.332	0.39
2.719	0.32
3.170	0.25
3.696	0.20
4.309	0.19
5.024	0.23
5.857	0.34
6.829	0.54
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.86
9.283	1.31
10.823	1.90
12.619	2.63
14.713	3.48
17.154	4.46
20.000	5.52
23.318	6.62
27.187	7.67
31.698	8.57
36.957	9.15
43.089	9.29
50.238	8.88
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	7.90
68.291	6.45
79.621	4.73
92.832	2.98
108.234	1.21
126.191	0.06
147.128	0.00
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 146
2/12/2559 11:15:00

MTEC a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารแนบที่ 10

Result : Analysis Report

Sample Details

Sample ID : Sample No.5_1

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1 % v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 1 ธันวาคม 2559 13:58:49

Analysed : 1 ธันวาคม 2559 13:58:51

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 23.04 **Residual (%) :** 0.305

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0490 %Vol **Specific Surface Area :** 0.397 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 12.89 um **D (0.5) :** 38.92 um **D (0.9) :** 82.25 um

D [4,3] : 43.56 um **D [3,2] :** 15.11 um **Span :** 1.782 **Uniformity :** 0.554

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

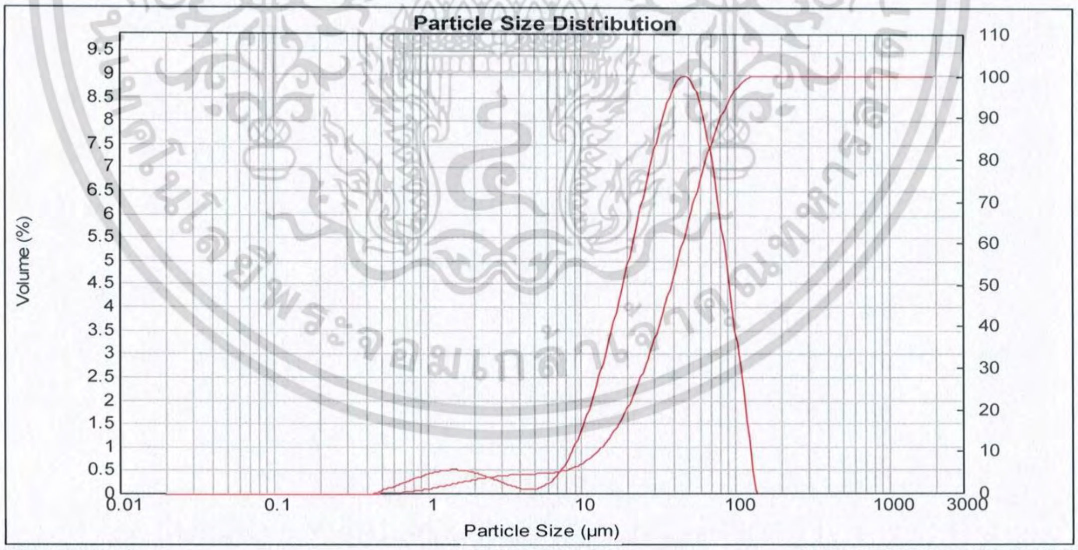
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.02
0.502	0.11
0.586	0.18
0.683	0.25
0.796	0.34
0.928	0.41
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.47
1.262	0.51
1.471	0.51
1.715	0.48
2.000	0.43
2.332	0.35
2.719	0.27
3.170	0.18
3.696	0.12
4.309	0.09
5.024	0.13
5.857	0.25
6.829	0.48
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.83
9.283	1.32
10.823	1.94
12.619	2.67
14.713	3.49
17.154	4.38
20.000	5.32
23.318	6.29
27.187	7.23
31.698	8.07
36.957	8.70
43.089	9.00
50.238	8.83
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	8.13
68.291	6.94
79.621	5.39
92.832	3.65
108.234	2.09
126.191	0.15
147.128	0.00
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 149
2/12/2559 11:15:01

a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 11

Sample Details

Sample ID : Sample No.5_2

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1 % v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 1 ธันวาคม 2559 13:59:36

Analysed : 1 ธันวาคม 2559 13:59:38

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 23.75 **Residual (%) :** 0.314

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0491 %Vol **Specific Surface Area :** 0.41 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 12.59 um **D (0.5) :** 37.41 um **D (0.9) :** 78.47 um

D [4,3] : 41.8 um **D [3,2] :** 14.64 um **Span :** 1.761 **Uniformity :** 0.547

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

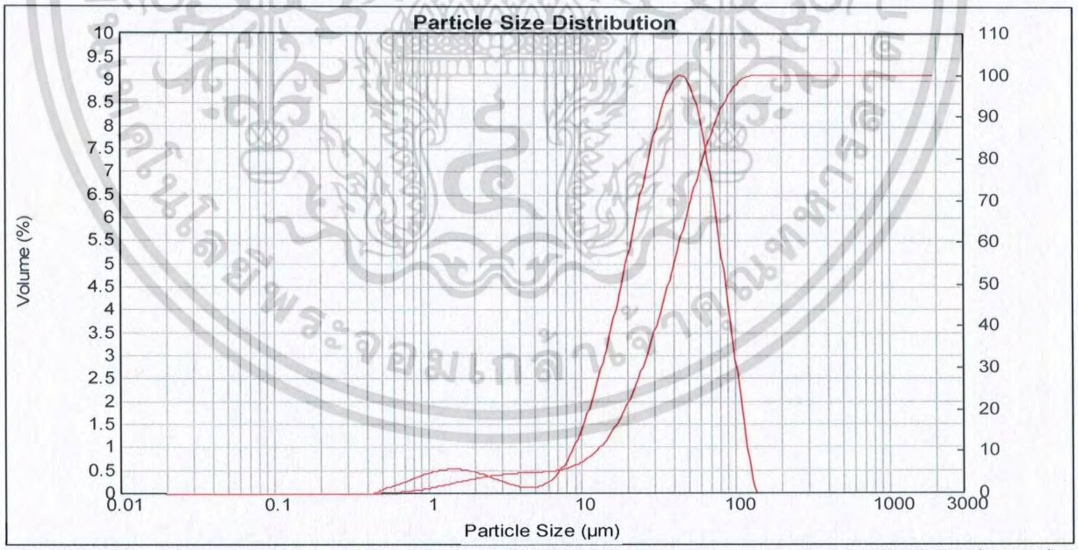
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.02
0.502	0.11
0.586	0.18
0.683	0.26
0.796	0.35
0.928	0.43
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.49
1.262	0.52
1.471	0.53
1.715	0.50
2.000	0.44
2.332	0.37
2.719	0.28
3.170	0.20
3.696	0.14
4.309	0.12
5.024	0.15
5.857	0.27
6.829	0.50
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.85
9.283	1.35
10.823	1.98
12.619	2.74
14.713	3.62
17.154	4.58
20.000	5.60
23.318	6.64
27.187	7.63
31.698	8.46
36.957	9.00
43.089	9.14
50.238	8.76
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	7.85
68.291	6.48
79.621	4.82
92.832	3.11
108.234	1.44
126.191	0.08
147.128	0.00
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 152
2/12/2559 11:15:01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 12

Sample Details

Sample ID : Sample No.5_3

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1 % v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 1 ธันวาคม 2559 14:00:23

Analysed : 1 ธันวาคม 2559 14:00:24

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 24.45 **Residual (%) :** 0.293

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0496 %Vol **Specific Surface Area :** 0.42 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 12.34 um **D (0.5) :** 36.36 um **D (0.9) :** 75.37 um

D [4,3] : 40.41 um **D [3,2] :** 14.29 um **Span :** 1.733 **Uniformity :** 0.536

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

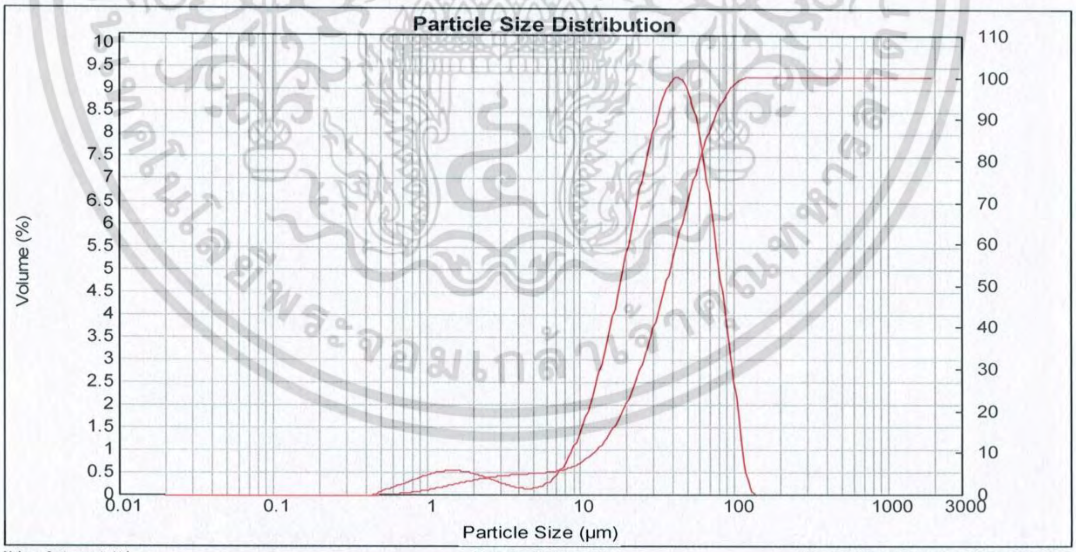
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.02
0.502	0.11
0.586	0.19
0.683	0.27
0.796	0.36
0.928	0.44
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.50
1.262	0.53
1.471	0.54
1.715	0.51
2.000	0.45
2.332	0.38
2.719	0.30
3.170	0.22
3.696	0.16
4.309	0.14
5.024	0.17
5.857	0.29
6.829	0.51
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.86
9.283	1.36
10.823	2.01
12.619	2.80
14.713	3.71
17.154	4.73
20.000	5.81
23.318	6.91
27.187	7.92
31.698	8.74
36.957	9.23
43.089	9.26
50.238	8.73
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	7.67
68.291	6.17
79.621	4.43
92.832	2.69
108.234	0.85
126.191	0.02
147.128	0.00
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 155
2/12/2559 11:15:01

MTEC a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 13

Sample Details

Sample ID : Sample No.6_1

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1 % v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 1 ธันวาคม 2559 15:18:59

Analysed : 1 ธันวาคม 2559 15:19:01

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 25.08 **Residual (%) :** 0.339

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0530 %Vol **Specific Surface Area :** 0.403 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 12.5 um **D (0.5) :** 43.12 um **D (0.9) :** 87.85 um

D [4,3] : 47.01 um **D [3,2] :** 14.89 um **Span :** 1.747 **Uniformity :** 0.539

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

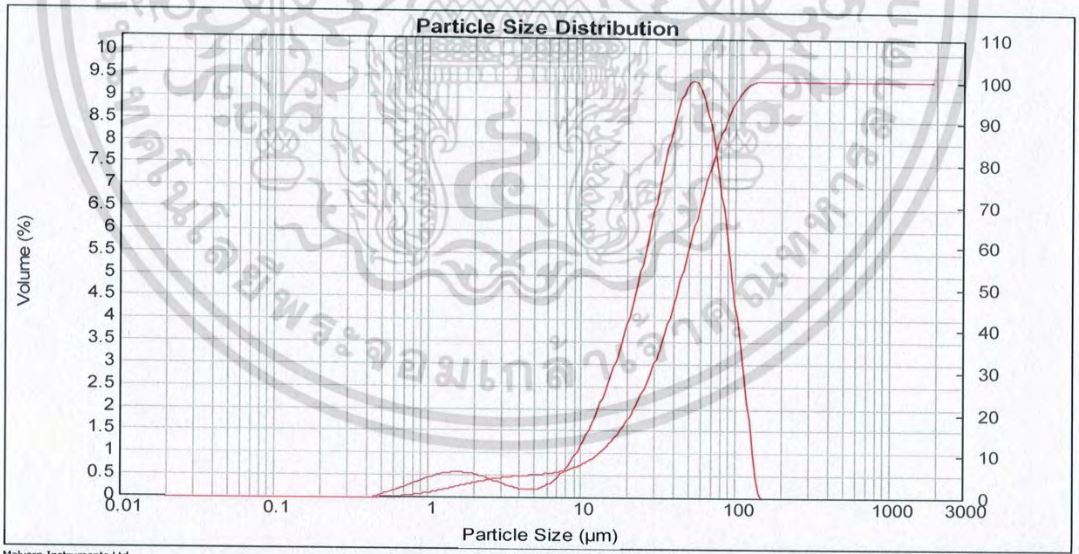
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.01
0.502	0.10
0.586	0.17
0.683	0.25
0.796	0.35
0.928	0.44
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.51
1.262	0.56
1.471	0.57
1.715	0.55
2.000	0.51
2.332	0.44
2.719	0.35
3.170	0.27
3.696	0.21
4.309	0.18
5.024	0.21
5.857	0.32
6.829	0.51
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.79
9.283	1.17
10.823	1.63
12.619	2.17
14.713	2.78
17.154	3.47
20.000	4.27
23.318	5.20
27.187	6.24
31.698	7.34
36.957	8.36
43.089	9.13
50.238	9.42
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	9.08
68.291	8.06
79.621	6.48
92.832	4.58
108.234	2.69
126.191	0.61
147.128	0.00
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 158
2/12/2559 11:15:01

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 14

Sample Details

Sample ID : Sample No.6_2

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1 % v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 1 ธันวาคม 2559 15:19:46

Analysed : 1 ธันวาคม 2559 15:19:47

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 26.12 **Residual (%) :** 0.355

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0493 %Vol **Specific Surface Area :** 0.448 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 11.6 um **D (0.5) :** 41.52 um **D (0.9) :** 84.59 um

D [4,3] : 45.17 um **D [3,2] :** 13.39 um **Span :** 1.758 **Uniformity :** 0.539

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	0.00

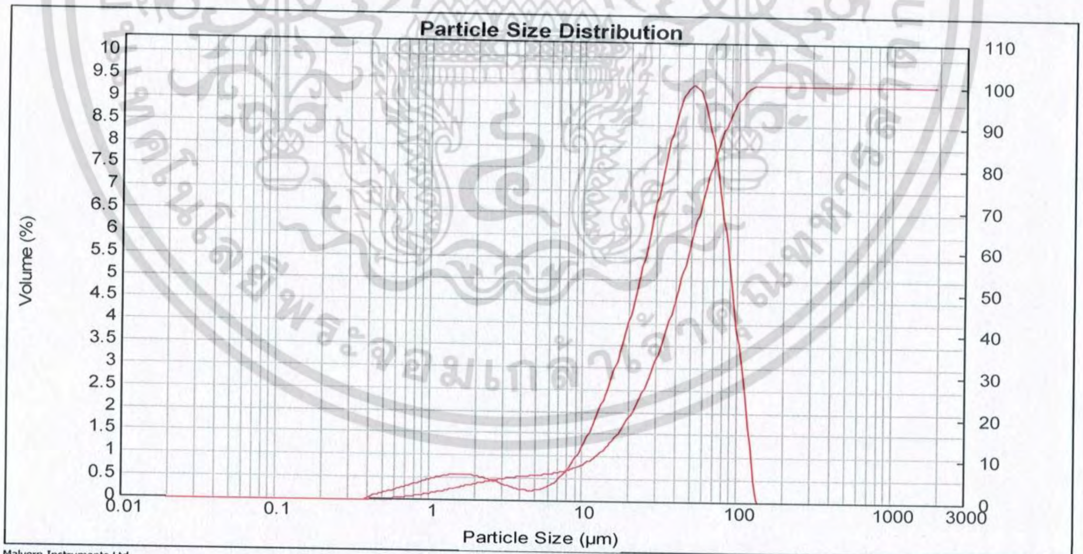
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.01
0.431	0.11
0.502	0.17
0.586	0.23
0.683	0.31
0.796	0.38
0.928	0.45
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.52
1.262	0.56
1.471	0.58
1.715	0.58
2.000	0.54
2.332	0.48
2.719	0.40
3.170	0.32
3.696	0.26
4.309	0.23
5.024	0.26
5.857	0.36
6.829	0.54
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.82
9.283	1.20
10.823	1.66
12.619	2.21
14.713	2.85
17.154	3.58
20.000	4.43
23.318	5.41
27.187	6.50
31.698	7.61
36.957	8.59
43.089	9.26
50.238	9.40
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	8.88
68.291	7.71
79.621	6.03
92.832	4.09
108.234	2.31
126.191	0.17
147.128	0.00
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 161
2/12/2559 11:15:02

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

<u>เอกสารแนบที่ 15</u>

Sample Details

Sample ID : Sample No.6_3

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1 % v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 1 ธันวาคม 2559 15:20:32

Analysed : 1 ธันวาคม 2559 15:20:34

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A)
Beam Length (mm) : 2.35
Obscuration (%) : 27.11
Residual (%) : 0.375

Particle RI : 2.420
Absorption : 1
Dispersant Name : Water
Dispersant RI : 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume
Concentration : 0.0500 %Vol
Specific Surface Area : 0.461 m^2/g

Mean Diameters :
D (0.1) : 11.02 um
D (0.5) : 40.66 um
D (0.9) : 83.14 um

D [4,3] : 44.3 um
D [3,2] : 13.01 um
Span : 1.774
Uniformity : 0.544

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

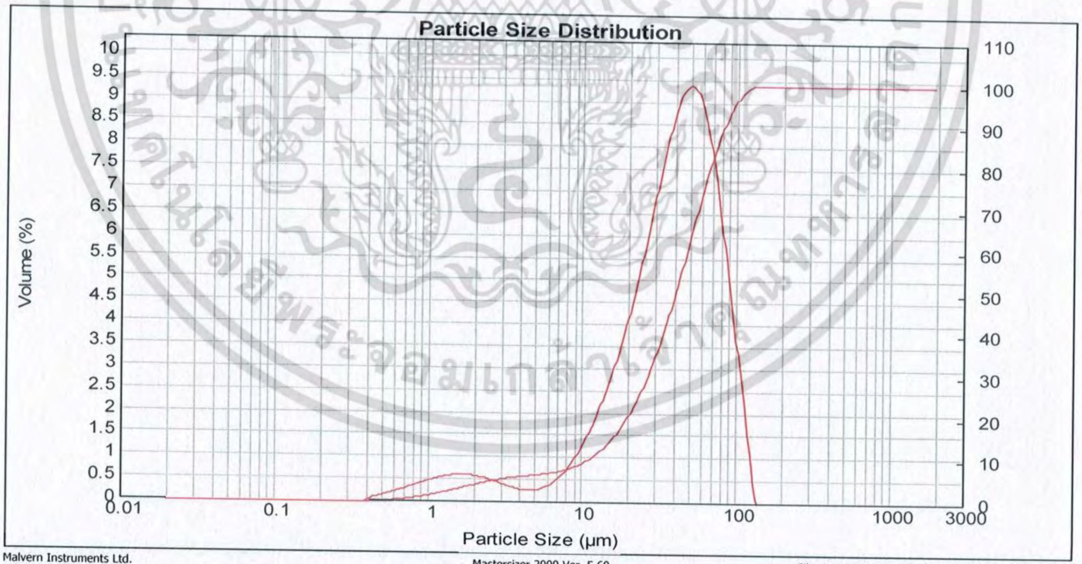
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.01
0.431	0.11
0.502	0.17
0.586	0.24
0.683	0.31
0.796	0.39
0.928	0.47
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.53
1.262	0.58
1.471	0.61
1.715	0.60
2.000	0.57
2.332	0.51
2.719	0.44
3.170	0.36
3.696	0.30
4.309	0.27
5.024	0.30
5.857	0.40
6.829	0.58
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.86
9.283	1.22
10.823	1.69
12.619	2.24
14.713	2.88
17.154	3.63
20.000	4.51
23.318	5.52
27.187	6.63
31.698	7.75
36.957	8.70
43.089	9.30
50.238	9.35
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	8.72
68.291	7.45
79.621	5.70
92.832	3.82
108.234	2.13
126.191	0.15
147.128	0.00
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 164
2/12/2559 11:15:02

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 16

Sample Details

Sample ID : Sample No.7_1

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1 % v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 1 ธันวาคม 2559 17:48:04

Analysed : 1 ธันวาคม 2559 17:48:06

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 24.44 **Residual (%) :** 0.250

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0525 %Vol **Specific Surface Area :** 0.396 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 13.15 um **D (0.5) :** 40.42 um **D (0.9) :** 82.93 um

D [4,3] : 44.56 um **D [3,2] :** 15.15 um **Span :** 1.727 **Uniformity :** 0.533

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

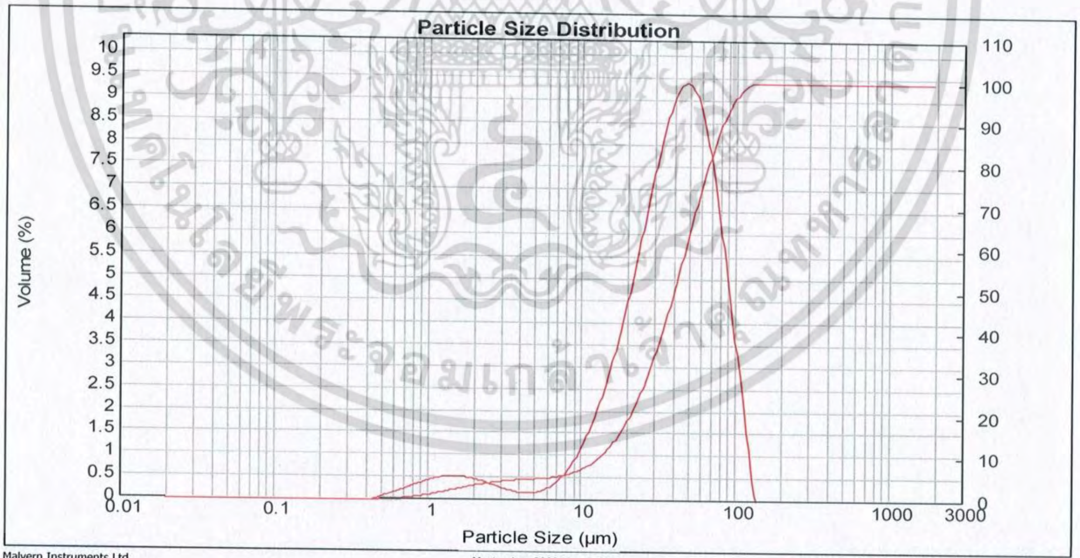
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.01
0.502	0.10
0.586	0.17
0.683	0.25
0.796	0.34
0.928	0.42
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.49
1.262	0.53
1.471	0.53
1.715	0.50
2.000	0.45
2.332	0.38
2.719	0.30
3.170	0.22
3.696	0.17
4.309	0.16
5.024	0.19
5.857	0.29
6.829	0.47
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.74
9.283	1.13
10.823	1.63
12.619	2.25
14.713	3.01
17.154	3.90
20.000	4.91
23.318	6.01
27.187	7.13
31.698	8.17
36.957	8.98
43.089	9.39
50.238	9.28
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	8.56
68.291	7.29
79.621	5.63
92.832	3.79
108.234	2.10
126.191	0.15
147.128	0.00
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 167
2/12/2559 11:15:02

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

<u>เอกสารแนบที่ 17</u>

Sample Details

Sample ID : Sample No.7_2

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1 % v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 1 ธันวาคม 2559 17:48:51

Analysed : 1 ธันวาคม 2559 17:48:52

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 25.53 **Residual (%) :** 0.280

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0534 %Vol **Specific Surface Area :** 0.41 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 12.73 um **D (0.5) :** 38.99 um **D (0.9) :** 79.4 um

D [4,3] : 42.87 um **D [3,2] :** 14.65 um **Span :** 1.710 **Uniformity :** 0.529

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

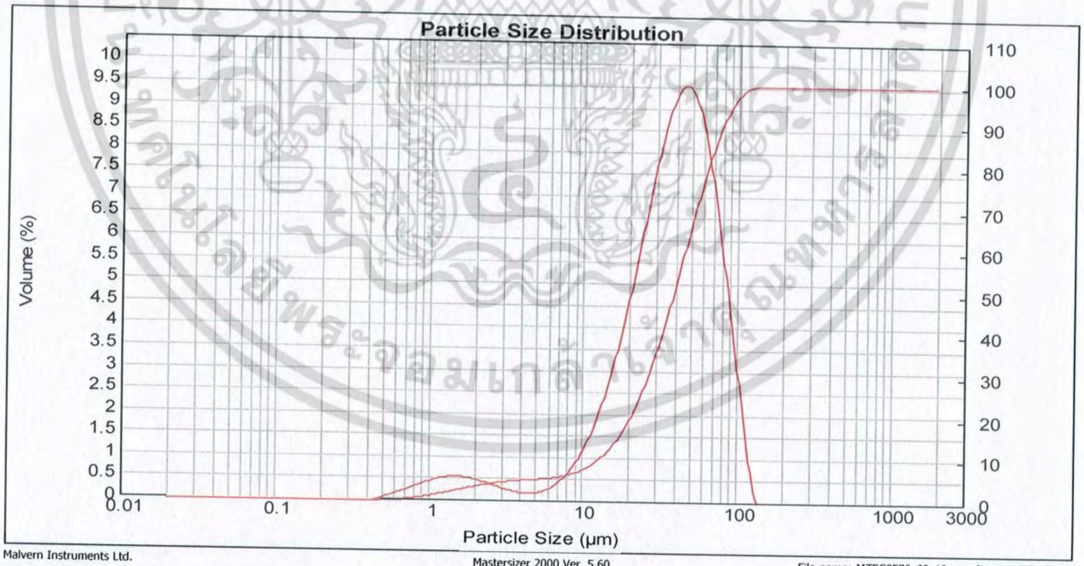
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.01
0.502	0.10
0.586	0.18
0.683	0.26
0.796	0.35
0.928	0.44
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.50
1.262	0.54
1.471	0.55
1.715	0.52
2.000	0.47
2.332	0.40
2.719	0.32
3.170	0.25
3.696	0.20
4.309	0.19
5.024	0.22
5.857	0.32
6.829	0.49
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.76
9.283	1.14
10.823	1.65
12.619	2.29
14.713	3.09
17.154	4.04
20.000	5.14
23.318	6.32
27.187	7.51
31.698	8.55
36.957	9.29
43.089	9.57
50.238	9.25
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	8.31
68.291	6.86
79.621	5.09
92.832	3.26
108.234	1.46
126.191	0.08
147.128	0.00
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 170
2/12/2559 11:15:02

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 18

Sample Details

Sample ID : Sample No.7_3

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1 % v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 1 ธันวาคม 2559 17:49:37

Analysed : 1 ธันวาคม 2559 17:49:39

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A)
Beam Length (mm) : 2.35
Obscuration (%) : 26.29
Residual (%) : 0.317

Particle RI : 2.420
Absorption : 1
Dispersant Name : Water
Dispersant RI : 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume
Concentration : 0.0497 %Vol
Specific Surface Area : 0.449 m²/g

Mean Diameters :
D (0.1) : 12.11 um
D (0.5) : 37.81 um
D (0.9) : 76.46 um

D [4,3] : 41.38 um
D [3,2] : 13.35 um
Span : 1.702
Uniformity : 0.525

Size (µm)	Volume In %
0.020	
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	0.00

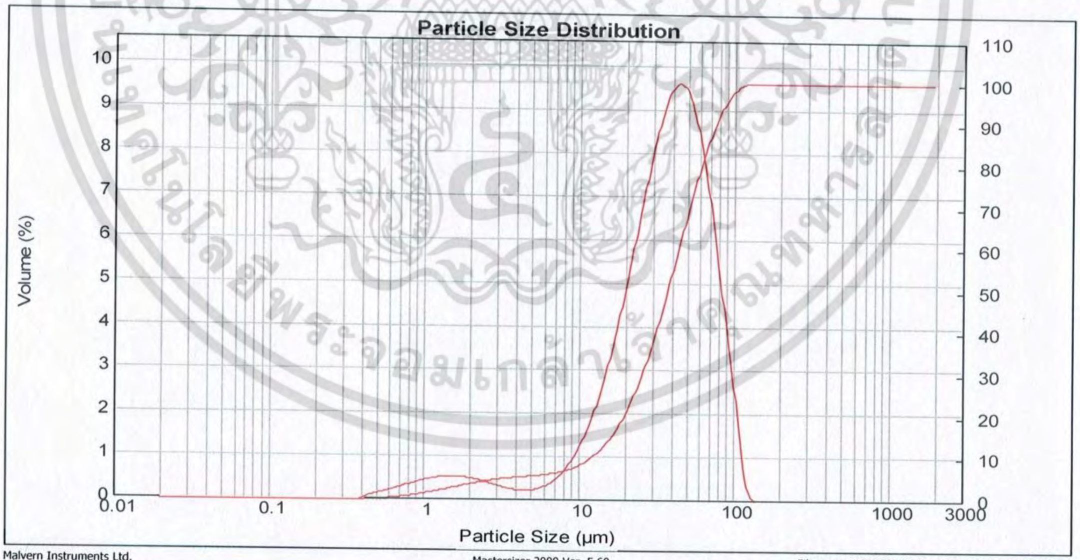
Size (µm)	Volume In %
0.147	
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.01
0.502	0.11
0.586	0.17
0.683	0.24
0.796	0.31
0.928	0.38
1.082	0.45

Size (µm)	Volume In %
1.082	
1.262	0.50
1.471	0.54
1.715	0.55
2.000	0.53
2.332	0.49
2.719	0.42
3.170	0.35
3.696	0.28
4.309	0.24
5.024	0.22
5.857	0.25
6.829	0.35
7.962	0.51

Size (µm)	Volume In %
7.962	
9.283	0.78
10.823	1.16
12.619	1.68
14.713	2.34
17.154	3.18
20.000	4.17
23.318	5.32
27.187	6.55
31.698	7.76
36.957	8.79
43.089	9.47
50.238	9.64
58.573	9.18

Size (µm)	Volume In %
58.573	
68.291	8.11
79.621	6.53
92.832	4.69
108.234	2.85
126.191	0.88
147.128	0.02
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	0.00

Size (µm)	Volume In %
430.887	
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	0.00



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 173
2/12/2559 11:15:02

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 19

Sample Details

Sample ID : Case II_1

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1% v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 2 ธันวาคม 2559 14:18:08

Analysed : 2 ธันวาคม 2559 14:18:10

System Details

Accessory Name :	Hydro 2000S (A)	**Beam Length (mm) :**	2.35	**Obscuration (%) :**	22.64	**Residual (%) :**	0.307
Particle RI :	2.420	**Absorption :**	1	**Dispersant Name :**	Water	**Dispersant RI :**	1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume

Concentration : 0.0424 %Vol

Specific Surface Area : 0.446 m^2/g

Mean Diameters :

D [4,3] : 41.81 um

D (0.1) : 11.23 um

D (0.5) : 35.71 um

D (0.9) : 82.7 um

D [3,2] : 13.44 um

Span : 2.001

Uniformity : 0.625

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

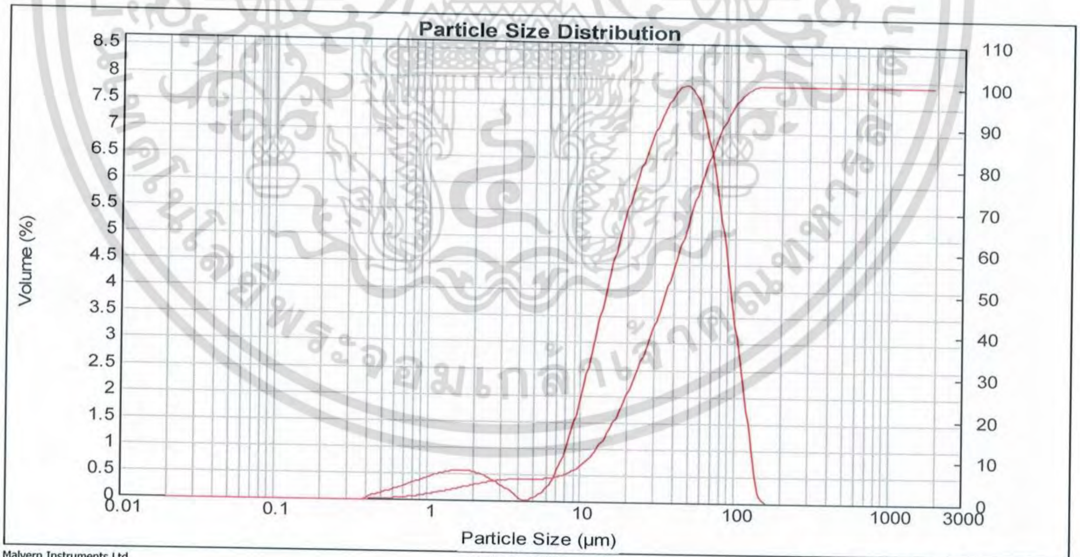
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.01
0.431	0.09
0.502	0.15
0.586	0.21
0.683	0.27
0.796	0.35
0.928	0.42
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.48
1.262	0.54
1.471	0.56
1.715	0.56
2.000	0.52
2.332	0.44
2.719	0.33
3.170	0.22
3.696	0.07
4.309	0.02
5.024	0.12
5.857	0.31
6.829	0.67
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	1.20
9.283	1.89
10.823	2.70
12.619	3.55
14.713	4.38
17.154	5.14
20.000	5.81
23.318	6.40
27.187	6.91
31.698	7.37
36.957	7.72
43.089	7.89
50.238	7.77
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	7.25
68.291	6.31
79.621	5.02
92.832	3.53
108.234	2.13
126.191	0.67
147.128	0.02
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 256
8/12/2559 14:24:50

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 20

Sample Details

Sample ID : Case II_2

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1% v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 2 ธันวาคม 2559 14:18:55

Analysed : 2 ธันวาคม 2559 14:18:57

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) | **Beam Length (mm) :** 2.35 | **Obscuration (%) :** 23.28 | **Residual (%) :** 0.297

Particle RI : 2.420 | **Absorption :** 1 | **Dispersant Name :** Water | **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume | **Concentration :** 0.0410 %Vol | **Specific Surface Area :** 0.473 m²/g

Mean Diameters :

D [4,3] : 40.14 um | **D (0.1) :** 10.94 um | **D (0.5) :** 34.54 um | **D (0.9) :** 79.03 um

D [3,2] : 12.68 um | **Span :** 1.971 | **Uniformity :** 0.615

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

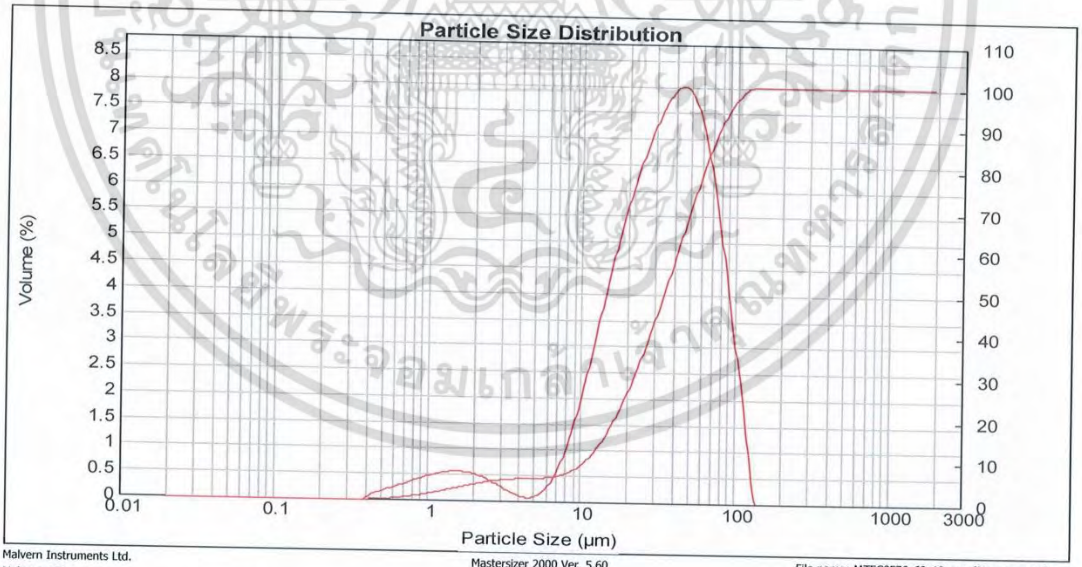
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.02
0.431	0.13
0.502	0.19
0.586	0.25
0.683	0.32
0.796	0.39
0.928	0.46
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.51
1.262	0.55
1.471	0.56
1.715	0.55
2.000	0.50
2.332	0.42
2.719	0.31
3.170	0.20
3.696	0.11
4.309	0.07
5.024	0.13
5.857	0.32
6.829	0.69
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	1.23
9.283	1.93
10.823	2.76
12.619	3.63
14.713	4.49
17.154	5.29
20.000	6.00
23.318	6.62
27.187	7.16
31.698	7.61
36.957	7.93
43.089	8.01
50.238	7.77
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	7.11
68.291	6.04
79.621	4.67
92.832	3.16
108.234	1.78
126.191	0.13
147.128	0.00
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 259
8/12/2559 14:24:50

MTEC a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 21

Sample Details

Sample ID : Case II_3

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1% v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 2 ธันวาคม 2559 14:19:42

Analysed : 2 ธันวาคม 2559 14:19:43

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A)
Beam Length (mm) : 2.35
Obscuration (%) : 23.92
Residual (%) : 0.299

Particle RI : 2.420
Absorption : 1
Dispersant Name : Water
Dispersant RI : 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume
Concentration : 0.0416 %Vol
Specific Surface Area : 0.481 m²/g

Mean Diameters :
D (0.1) : 10.76 um
D (0.5) : 33.96 um
D (0.9) : 77.43 um

D [4,3] : 39.42 um
D [3,2] : 12.47 um
Span : 1.963
Uniformity : 0.613

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

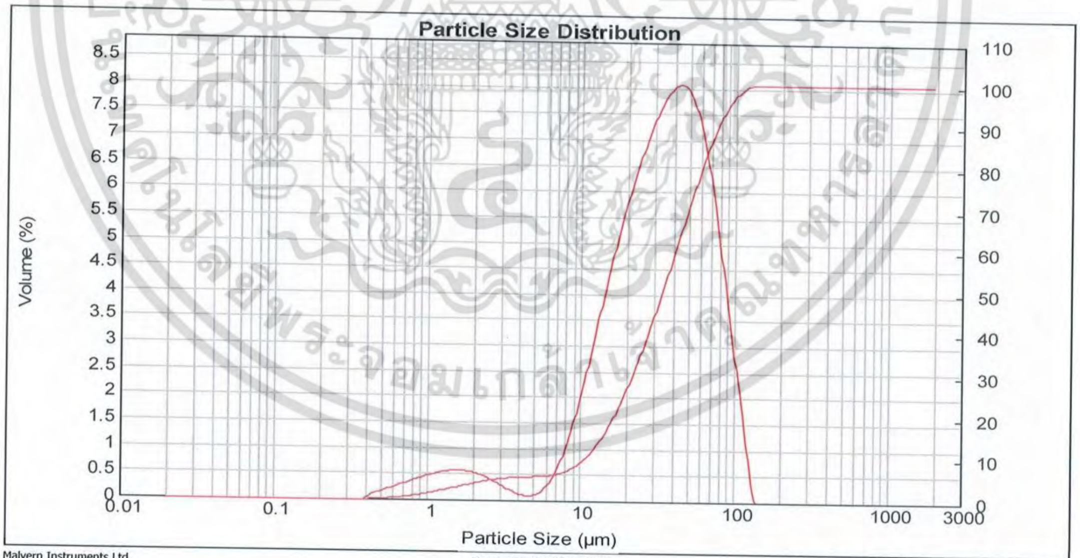
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.02
0.431	0.13
0.502	0.19
0.586	0.26
0.683	0.33
0.796	0.40
0.928	0.46
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.52
1.262	0.56
1.471	0.57
1.715	0.56
2.000	0.51
2.332	0.43
2.719	0.33
3.170	0.22
3.696	0.13
4.309	0.09
5.024	0.15
5.857	0.34
6.829	0.70
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	1.25
9.283	1.96
10.823	2.79
12.619	3.68
14.713	4.56
17.154	5.37
20.000	6.09
23.318	6.73
27.187	7.27
31.698	7.72
36.957	8.01
43.089	8.05
50.238	7.74
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	7.00
68.291	5.87
79.621	4.44
92.832	2.94
108.234	1.54
126.191	0.10
147.128	0.00
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 262
8/12/2559 14:24:50

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 22

Sample Details

Sample ID : Case III_1

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1% v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 2 ธันวาคม 2559 15:04:56

Analysed : 2 ธันวาคม 2559 15:04:58

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 22.40 **Residual (%) :** 0.226

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0484 %Vol **Specific Surface Area :** 0.39 m^2/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 13.34 um **D (0.5) :** 37.53 um **D (0.9) :** 82.54 um

D [4,3] : 43.18 um **D [3,2] :** 15.37 um **Span :** 1.844 **Uniformity :** 0.575

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

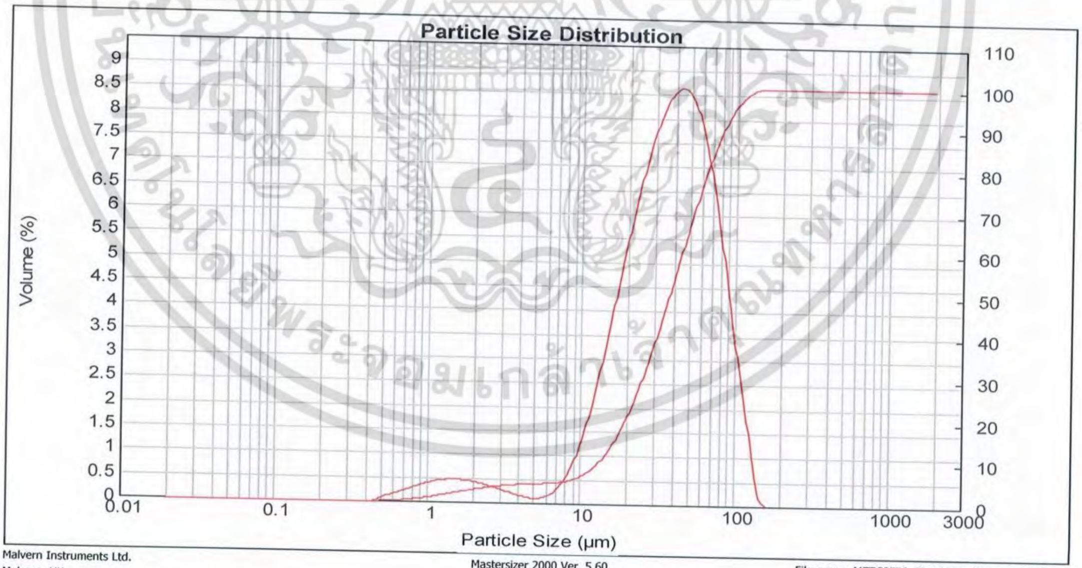
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.02
0.502	0.11
0.586	0.17
0.683	0.24
0.796	0.32
0.928	0.39
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.44
1.262	0.47
1.471	0.47
1.715	0.45
2.000	0.41
2.332	0.36
2.719	0.29
3.170	0.23
3.696	0.16
4.309	0.11
5.024	0.10
5.857	0.17
6.829	0.35
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.69
9.283	1.21
10.823	1.93
12.619	2.82
14.713	3.83
17.154	4.88
20.000	5.90
23.318	6.82
27.187	7.61
31.698	8.21
36.957	8.57
43.089	8.63
50.238	8.31
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	7.58
68.291	6.44
79.621	5.02
92.832	3.48
108.234	2.10
126.191	0.69
147.128	0.02
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 265
8/12/2559 14:24:51

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 23

Sample Details

Sample ID : Case III_2

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1% v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 2 ธันวาคม 2559 15:05:43

Analysed : 2 ธันวาคม 2559 15:05:44

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 23.12 **Residual (%) :** 0.237

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0490 %Vol **Specific Surface Area :** 0.399 m^2/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 13.12 um **D (0.5) :** 36.44 um **D (0.9) :** 79.78 um

D [4,3] : 41.98 um **D [3,2] :** 15.03 um **Span :** 1.829 **Uniformity :** 0.571

Size (µm)	Volume In %
0.020	
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	0.00

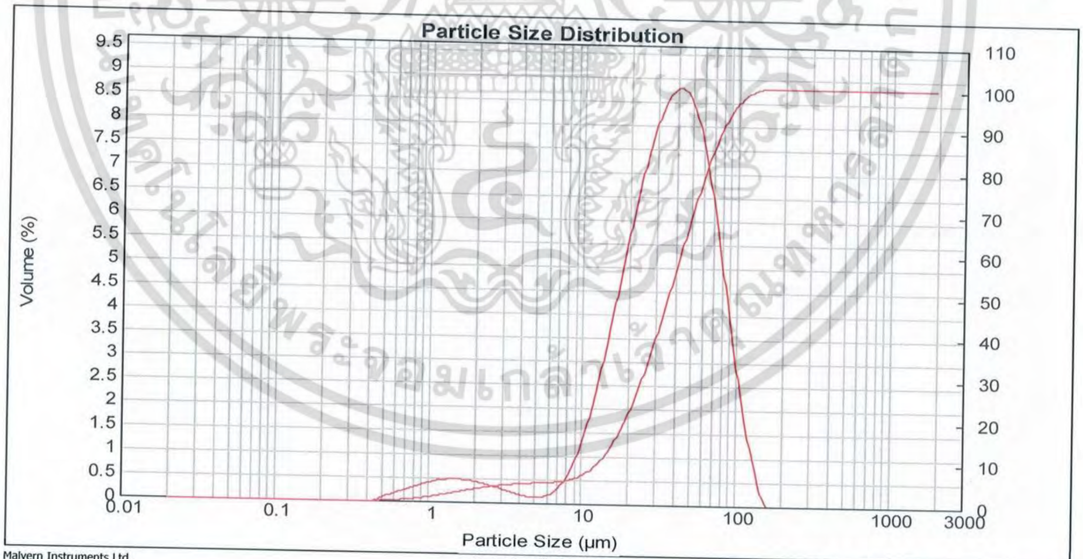
Size (µm)	Volume In %
0.147	
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.00
0.502	0.02
0.586	0.11
0.683	0.18
0.796	0.25
0.928	0.33
1.082	0.40

Size (µm)	Volume In %
1.082	
1.262	0.45
1.471	0.48
1.715	0.48
2.000	0.46
2.332	0.42
2.719	0.37
3.170	0.30
3.696	0.24
4.309	0.17
5.024	0.13
5.857	0.12
6.829	0.18
7.962	0.36

Size (µm)	Volume In %
7.962	
9.283	0.71
10.823	1.24
12.619	1.98
14.713	2.89
17.154	3.94
20.000	5.04
23.318	6.11
27.187	7.08
31.698	7.89
36.957	8.48
43.089	8.77
50.238	8.72
58.573	8.24

Size (µm)	Volume In %
58.573	
68.291	7.34
79.621	6.06
92.832	4.56
108.234	3.04
126.191	1.69
147.128	0.74
171.539	0.04
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	0.00

Size (µm)	Volume In %
430.887	
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	0.00



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 268
8/12/2559 14:24:51

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 24

Sample Details

Sample ID : Case III_3

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1% v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 2 ธันวาคม 2559 15:06:30

Analysed : 2 ธันวาคม 2559 15:06:31

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 23.76 **Residual (%) :** 0.252

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0497 %Vol **Specific Surface Area :** 0.406 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 12.95 um **D (0.5) :** 35.59 um **D (0.9) :** 77.14 um

D [4,3] : 40.83 um **D [3,2] :** 14.76 um **Span :** 1.803 **Uniformity :** 0.564

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

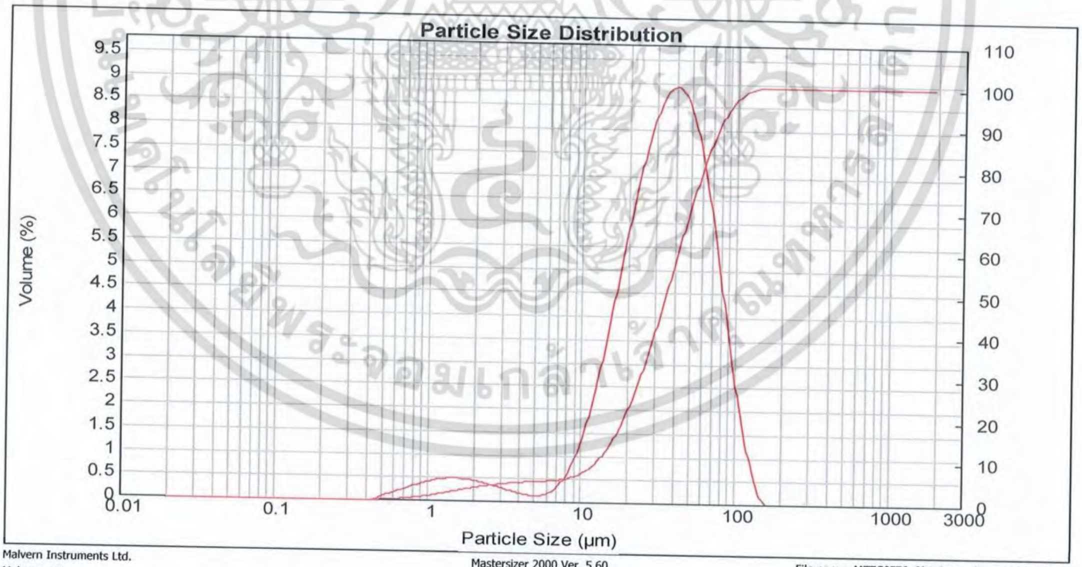
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.02
0.502	0.12
0.586	0.18
0.683	0.26
0.796	0.33
0.928	0.40
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.45
1.262	0.48
1.471	0.48
1.715	0.46
2.000	0.42
2.332	0.37
2.719	0.31
3.170	0.25
3.696	0.19
4.309	0.14
5.024	0.13
5.857	0.20
6.829	0.38
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.72
9.283	1.26
10.823	2.01
12.619	2.95
14.713	4.03
17.154	5.18
20.000	6.30
23.318	7.31
27.187	8.13
31.698	8.70
36.957	8.94
43.089	8.79
50.238	8.20
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	7.18
68.291	5.80
79.621	4.24
92.832	2.72
108.234	1.42
126.191	0.52
147.128	0.02
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 271
8/12/2559 14:24:51

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 25

Sample Details

Sample ID : Case 4_1

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1% v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 8 ธันวาคม 2559 11:38:35

Analysed : 8 ธันวาคม 2559 11:38:36

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 21.48 **Residual (%) :** 0.199

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0452 %Vol **Specific Surface Area :** 0.398 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 12.7 um **D (0.5) :** 36.9 um **D (0.9) :** 80.29 um

D [4,3] : 42.04 um **D [3,2] :** 15.07 um **Span :** 1.832 **Uniformity :** 0.567

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

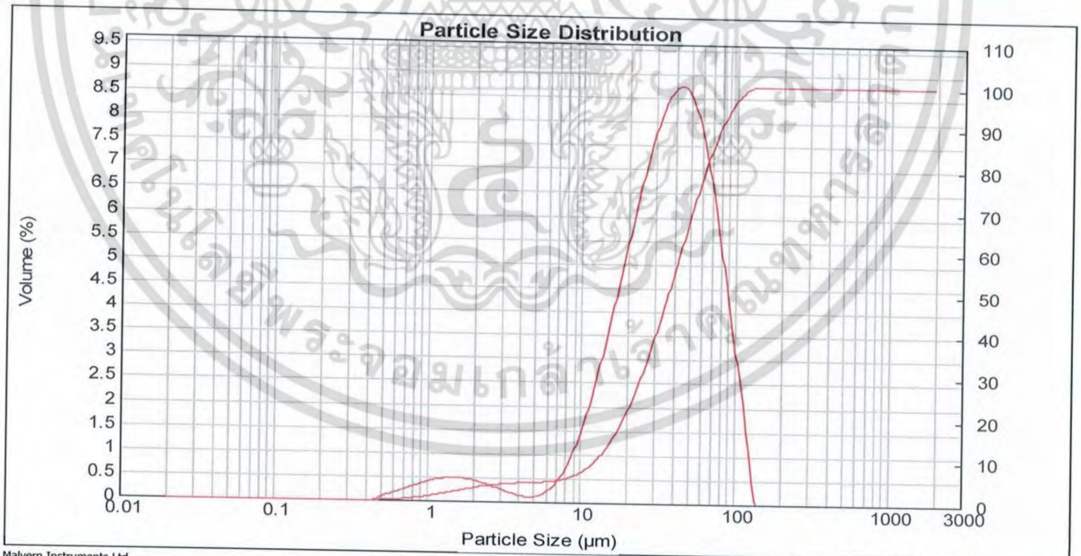
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.02
0.502	0.11
0.586	0.17
0.683	0.25
0.796	0.32
0.928	0.40
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.45
1.262	0.48
1.471	0.49
1.715	0.46
2.000	0.41
2.332	0.35
2.719	0.27
3.170	0.20
3.696	0.13
4.309	0.10
5.024	0.13
5.857	0.25
6.829	0.49
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.87
9.283	1.42
10.823	2.12
12.619	2.95
14.713	3.88
17.154	4.85
20.000	5.84
23.318	6.78
27.187	7.61
31.698	8.28
36.957	8.68
43.089	8.72
50.238	8.35
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	7.53
68.291	6.33
79.621	4.88
92.832	3.33
108.234	1.95
126.191	0.14
147.128	0.00
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 274
8/12/2559 14:24:51

MTEC a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 26

Sample Details

Sample ID : Case 4_2

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1% v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 8 ธันวาคม 2559 11:39:21

Analysed : 8 ธันวาคม 2559 11:39:23

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 21.81 **Residual (%) :** 0.215

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0454 %Vol **Specific Surface Area :** 0.403 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 12.74 um **D (0.5) :** 35.86 um **D (0.9) :** 76.09 um

D [4,3] : 40.47 um **D [3,2] :** 14.88 um **Span :** 1.767 **Uniformity :** 0.547

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

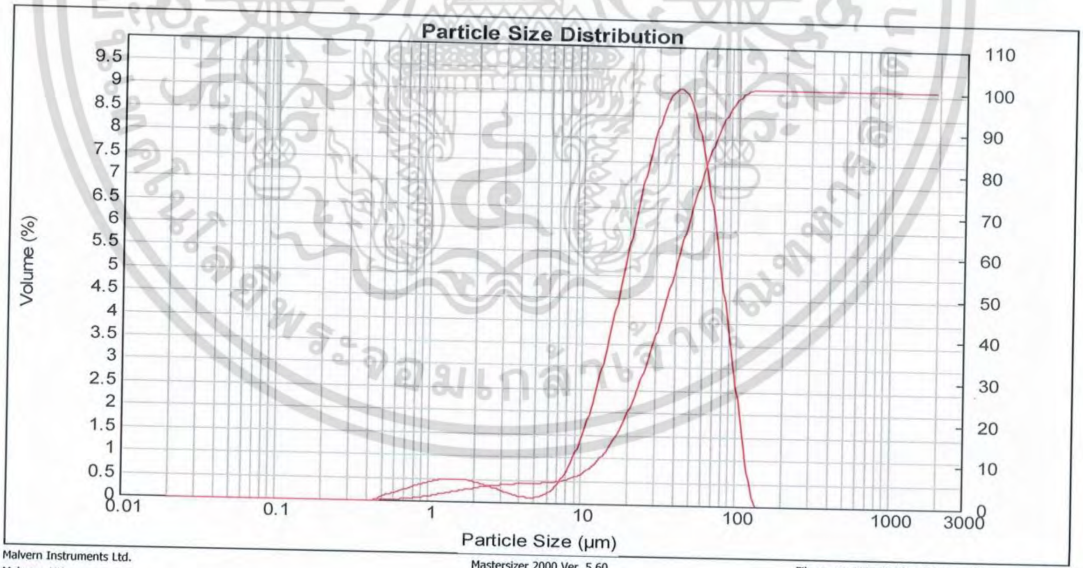
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.02
0.502	0.11
0.586	0.18
0.683	0.25
0.796	0.33
0.928	0.40
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.45
1.262	0.48
1.471	0.48
1.715	0.46
2.000	0.41
2.332	0.35
2.719	0.27
3.170	0.20
3.696	0.14
4.309	0.11
5.024	0.13
5.857	0.25
6.829	0.47
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.85
9.283	1.39
10.823	2.10
12.619	2.96
14.713	3.95
17.154	5.01
20.000	6.09
23.318	7.13
27.187	8.04
31.698	8.73
36.957	9.08
43.089	8.99
50.238	8.42
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	7.38
68.291	5.98
79.621	4.39
92.832	2.78
108.234	1.16
126.191	0.06
147.128	0.00
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 277
8/12/2559 14:24:51

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 27

Sample Details

Sample ID : Case 4_3

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1% v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 8 ธันวาคม 2559 11:40:08

Analysed : 8 ธันวาคม 2559 11:40:09

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A)
Beam Length (mm) : 2.35
Obscuration (%) : 22.18
Residual (%) : 0.205

Particle RI : 2.420
Absorption : 1
Dispersant Name : Water
Dispersant RI : 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume
Concentration : 0.0461 %Vol
Specific Surface Area : 0.405 m²/g

Mean Diameters :
D (0.1) : 12.84 um
D (0.5) : 35.29 um
D (0.9) : 73.67 um

D [4,3] : 39.56 um
D [3,2] : 14.82 um
Span : 1.723
Uniformity : 0.534

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

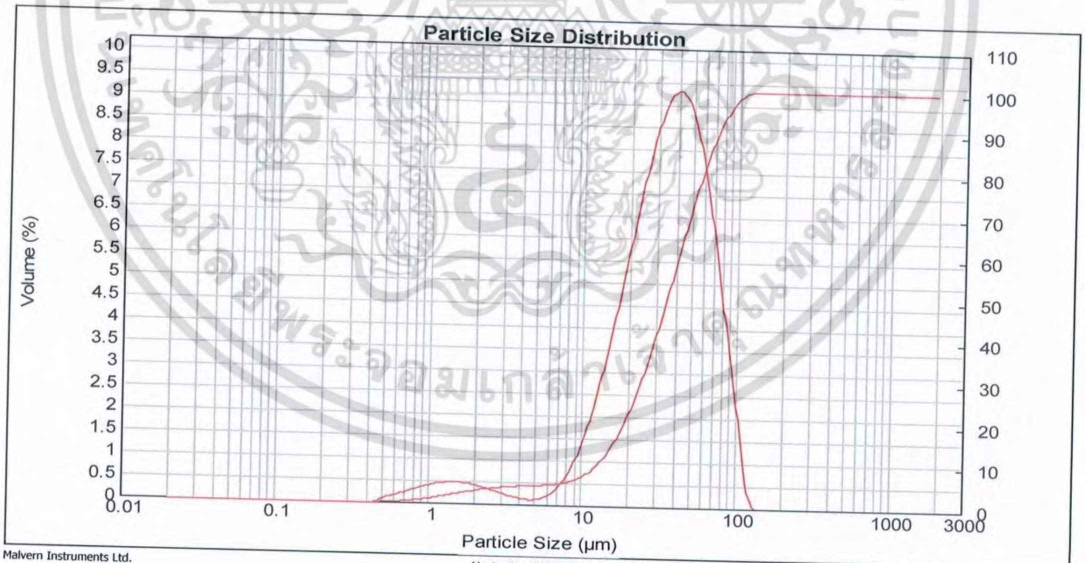
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.02
0.502	0.12
0.586	0.18
0.683	0.26
0.796	0.33
0.928	0.40
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.45
1.262	0.48
1.471	0.48
1.715	0.45
2.000	0.40
2.332	0.34
2.719	0.27
3.170	0.20
3.696	0.14
4.309	0.12
5.024	0.14
5.857	0.24
6.829	0.46
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.82
9.283	1.36
10.823	2.07
12.619	2.95
14.713	3.98
17.154	5.10
20.000	6.26
23.318	7.38
27.187	8.34
31.698	9.03
36.957	9.34
43.089	9.15
50.238	8.44
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	7.27
68.291	5.75
79.621	4.10
92.832	2.47
108.234	0.72
126.191	0.01
147.128	0.00
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 280
8/12/2559 14:24:52

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 28

Sample Details

Sample ID : Case 5_1

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1% v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 8 ธันวาคม 2559 12:09:23

Analysed : 8 ธันวาคม 2559 12:09:24

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 22.24 **Residual (%) :** 0.288

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0521 %Vol **Specific Surface Area :** 0.36 m^2/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 14.18 um **D (0.5) :** 41.47 um **D (0.9) :** 87.74 um

D [4,3] : 46.58 um **D [3,2] :** 16.65 um **Span :** 1.774 **Uniformity :** 0.551

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

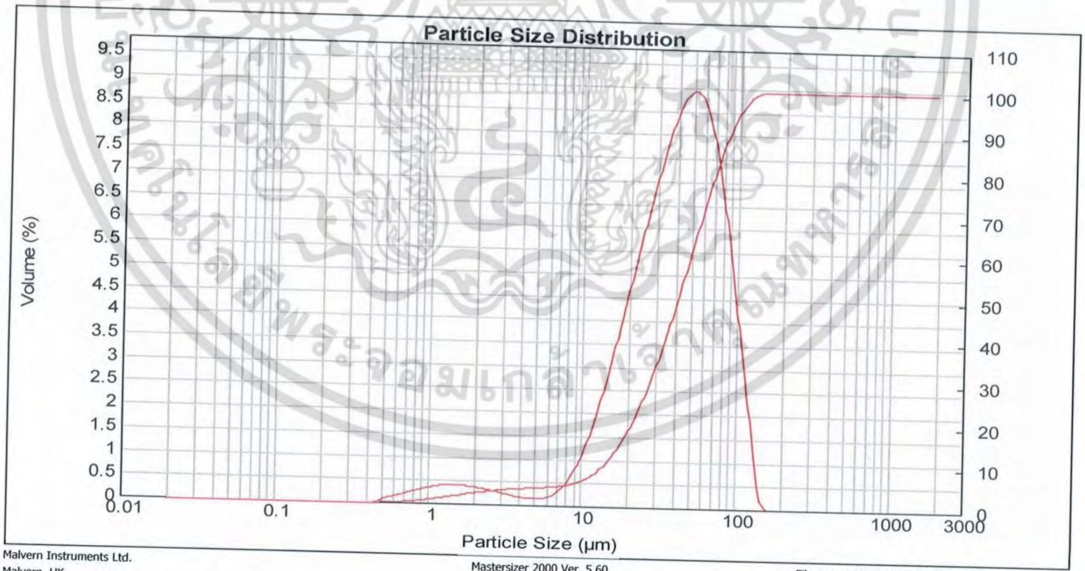
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.02
0.502	0.10
0.586	0.16
0.683	0.22
0.796	0.29
0.928	0.35
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.39
1.262	0.41
1.471	0.41
1.715	0.39
2.000	0.36
2.332	0.32
2.719	0.27
3.170	0.22
3.696	0.18
4.309	0.15
5.024	0.15
5.857	0.21
6.829	0.35
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.63
9.283	1.05
10.823	1.64
12.619	2.37
14.713	3.22
17.154	4.14
20.000	5.08
23.318	6.01
27.187	6.91
31.698	7.74
36.957	8.42
43.089	8.86
50.238	8.92
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	8.49
68.291	7.53
79.621	6.10
92.832	4.39
108.234	2.67
126.191	0.86
147.128	0.02
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 283
8/12/2559 14:24:52

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 29

Sample Details

Sample ID : Case 5_2

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1% v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 8 ธันวาคม 2559 12:10:09

Analysed : 8 ธันวาคม 2559 12:10:11

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A)

Particle RI : 2.420

Beam Length (mm) : 2.35

Absorption : 1

Obscuration (%) : 22.59

Dispersant Name : Water

Residual (%) : 0.301

Dispersant RI : 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume

Mean Diameters :

D [4,3] : 45.39 um

Concentration : 0.0523 %Vol

D (0.1) : 14.05 um

D [3,2] : 16.44 um

Specific Surface Area : 0.365 m^2/g

D (0.5) : 40.59 um

Span : 1.750

D (0.9) : 85.08 um

Uniformity : 0.544

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

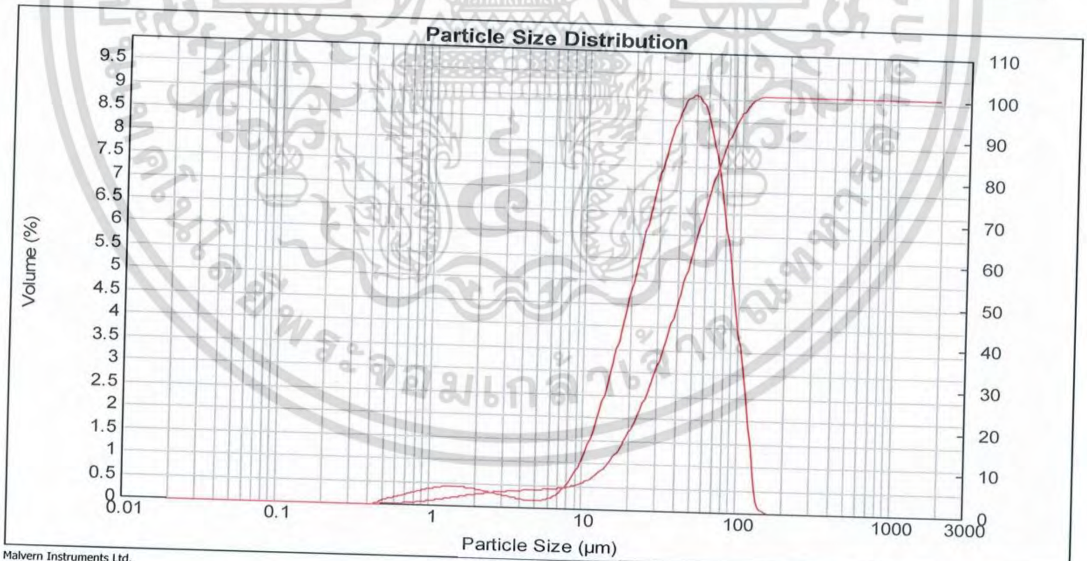
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.02
0.502	0.11
0.586	0.17
0.683	0.23
0.796	0.29
0.928	0.35
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.39
1.262	0.41
1.471	0.41
1.715	0.39
2.000	0.36
2.332	0.32
2.719	0.27
3.170	0.23
3.696	0.19
4.309	0.16
5.024	0.16
5.857	0.22
6.829	0.37
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.64
9.283	1.07
10.823	1.66
12.619	2.40
14.713	3.26
17.154	4.21
20.000	5.20
23.318	6.18
27.187	7.13
31.698	7.98
36.957	8.66
43.089	9.04
50.238	9.00
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	8.45
68.291	7.35
79.621	5.83
92.832	4.07
108.234	2.44
126.191	0.38
147.128	0.01
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 286
8/12/2559 14:24:52

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 30

Sample Details

Sample ID : Case 5_3

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1% v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 8 ธันวาคม 2559 12:10:56

Analysed : 8 ธันวาคม 2559 12:10:57

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 22.93 **Residual (%) :** 0.289

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0527 %Vol **Specific Surface Area :** 0.368 m^2/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 13.95 um **D (0.5) :** 39.93 um **D (0.9) :** 83.1 um

D [4,3] : 44.52 um **D [3,2] :** 16.28 um **Span :** 1.732 **Uniformity :** 0.538

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

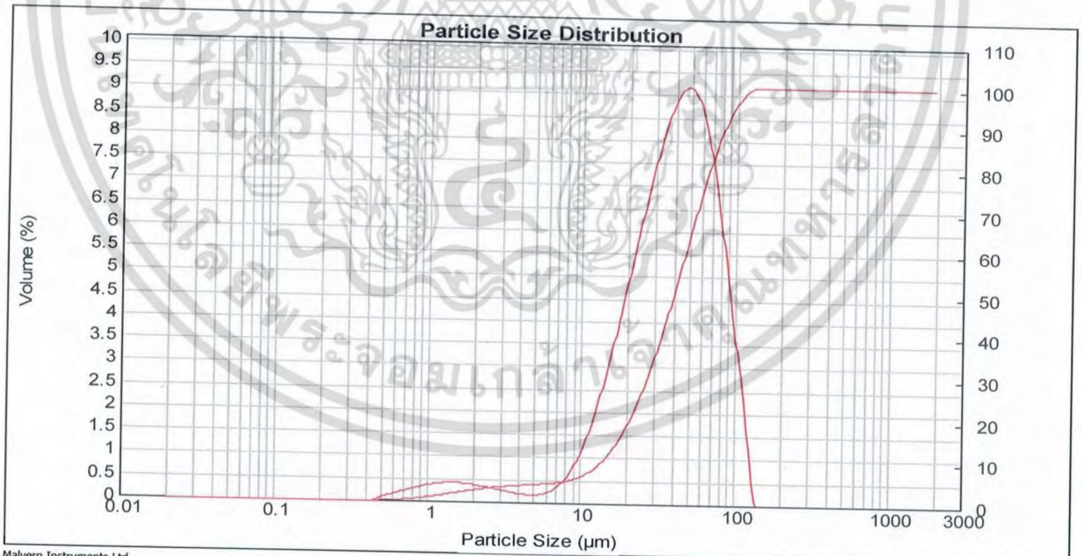
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.02
0.502	0.11
0.586	0.17
0.683	0.23
0.796	0.30
0.928	0.35
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.39
1.262	0.41
1.471	0.41
1.715	0.39
2.000	0.36
2.332	0.32
2.719	0.27
3.170	0.23
3.696	0.19
4.309	0.17
5.024	0.17
5.857	0.23
6.829	0.38
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.66
9.283	1.08
10.823	1.67
12.619	2.42
14.713	3.30
17.154	4.28
20.000	5.30
23.318	6.33
27.187	7.31
31.698	8.17
36.957	8.84
43.089	9.17
50.238	9.05
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	8.39
68.291	7.20
79.621	5.61
92.832	3.80
108.234	2.17
126.191	0.16
147.128	0.00
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0576_60_10sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 289
8/12/2559 14:24:52

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

MTEC0948/60

รายงานผลการวิเคราะห์

วันที่รายงาน	:	31 มกราคม 2560
ตัวอย่างจาก	:	คุณภัทระ ฉ่ำมะนา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
ทดสอบโดย	:	ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์เชิงฟิสิกส์ หน่วยวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
วันที่รับตัวอย่าง	:	17 มกราคม 2560
วันที่วิเคราะห์	:	26 มกราคม 2560
ตัวอย่างที่วิเคราะห์	:	ตัวอย่างคาร์บอนในน้ำมันเครื่อง จำนวน 2 ตัวอย่าง
การบ่งชี้ตัวอย่าง	:	1.) Case 6 2.) Case 7
เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์	:	Mastersizer 2000, Malvern Instruments Limited.
เทคนิคในการวิเคราะห์	:	Laser Diffraction Technique.
สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์	:	Red light source : He-Ne laser source, λ : 633 nm. Blue light source : Solid state light source Beam length : 2.35 mm. Particle size range analysis : 0.02-2,000 µm. Dispersion unit : Hydro 2000S (A) Dispersing medium : De-ionized water. Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement. ค่าดัชนีหักเหของตัวอย่าง : 2.4200 จำนวนครั้งในการทดลอง 3 ครั้ง Laser power : 82.5

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง
จังหวัดปทุมธานี 12120 โทรศัพท์ 0 2564 6500 โทรสาร 0 2564 6501-5
National Metal and Materials Technology Center
National Science and Technology Development Agency
114 Thailand Science Park, Phahonyothin Road, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120 Thailand.
Tel. +66 2564 6500 Fax. +66 2564 6501-5 http://www.mtec.or.th
MTEC a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมตัวอย่าง	:	1.) เตรียมเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์แบบเปียกโดยใช้สารละลายช่วยกระจายตัว (0.1% v/v Igepal CA-630) เป็นตัวกลาง จากนั้นปรับความเร็วรอบ Stirrer ของ Hydro 2000S (A) ไป ที่ 2,000 rpm 2.) ใส่ตัวอย่างประมาณ 1 มิลลิลิตร ในตัวกลางปริมาตร 40 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ คนตัวอย่างให้เกิดการกระจายตัว 3.) หลังจากนั้นเทตัวอย่างลงไปใน Chamber ของ Hydro 2000S (A) จากนั้นทำการวัดตัวอย่างด้วยเครื่อง Mastersizer 2000. 4.) ทำการวัดตัวอย่างซ้ำ 3 ครั้ง
ความหมายทางเทคนิค	:	**ค่า Obscuration** คือ ค่าที่อนุภาคมาปิดบัง (บดบัง) ลำแสงเลเซอร์ที่ยิงออกมา (เปอร์เซ็นต์) ซึ่งช่วงที่ใช้ในการพิจารณาแบ่งได้ดังนี้ 1. การวัดตัวอย่างแบบ Dry analysis ค่า Obscuration ที่ใช้อยู่ระหว่าง 0.1-5% 2. การวัดตัวอย่างแบบ Wet analysis ค่า Obscuration ที่ใช้อยู่ระหว่าง 10-30% **ค่า Residual** คือ ค่าความผิดพลาดในการวิเคราะห์อันอาจจะเกิดจากผลทางอิเล็กทรอนิกส์ในขณะที่อนุภาคไหลเข้าสู่เซลล์ขณะที่ทำการตรวจวัดซึ่งค่านี้ ไม่ควรจะเกิน 5% **ค่า D [4, 3]** คือ ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคในเชิงปริมาตร **ค่า D [3, 2]** คือ ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคในเชิงพื้นที่ผิว **ค่า D (v, 0.1)** คือ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่พบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้เป็นไมครอน **ค่า D (v, 0.5)** คือ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่พบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาด ที่วิเคราะห์ได้เป็นไมครอน **ค่า D (v, 0.9)** คือ 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่พบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาด ที่วิเคราะห์ได้เป็นไมครอน **ค่า Span** คือ ค่าความกว้างในการกระจายตัวของอนุภาคที่ไม่ขึ้นกับค่ามัธยฐาน (D (v, 0.5)) **ค่า Uniformity** คือ ค่าการวัดความเบี่ยงเบนสมบูรณ์จากค่ามัธยฐาน (D (v, 0.5))

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า **Specific Surface Area** คือ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะซึ่งคำนวณจากค่าความหนาแน่นของอนุภาคที่วิเคราะห์ และค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคในเชิงพื้นที่ผิว

ผลการวิเคราะห์ :

ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Mastersizer 2000 แสดงดังตารางที่ 1 – 2 และเอกสารแนบที่ 1 – 6

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่าง Case 6

จำนวนครั้งในการวิเคราะห์	จำนวนการวิเคราะห์ซ้ำ	D [4,3] ไมครอน	D (v,0.1) ไมครอน	D (v,0.5) ไมครอน	D (v,0.9) ไมครอน	Span
1	1	60.54	21.36	57.25	105.08	1.46
	2	60.22	21.23	56.93	104.51	1.46
	3	59.80	21.16	56.42	103.83	1.47
2	1	59.58	21.06	56.24	103.37	1.46
	2	59.33	20.99	55.97	102.99	1.47
	3	58.85	20.85	55.53	102.02	1.46
3	1	58.76	20.79	55.42	101.95	1.46
	2	58.51	20.74	55.17	101.49	1.46
	3	58.28	20.70	54.97	100.97	1.46
ค่าเฉลี่ย		59.32	20.99	55.99	102.91	1.46
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.78	0.23	0.79	1.41	0.00
% ค่าความผิดพลาด		1.32	1.10	1.41	1.37	0.00

MTEC a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่าง Case 7

จำนวนครั้งในการวิเคราะห์	จำนวนการวิเคราะห์ซ้ำ	D [4,3] ไมครอน	D (v,0.1) ไมครอน	D (v,0.5) ไมครอน	D (v,0.9) ไมครอน	Span
1	1	50.99	16.09	46.63	93.27	1.66
	2	50.56	16.03	46.23	92.41	1.65
	3	50.43	16.01	46.17	92.05	1.65
2	1	50.21	15.99	45.96	91.66	1.65
	2	49.87	15.94	45.68	90.96	1.64
	3	49.66	15.90	45.48	90.58	1.64
3	1	49.49	15.87	45.34	90.25	1.64
	2	49.44	15.86	45.30	90.11	1.64
	3	49.01	15.81	44.92	89.27	1.64
ค่าเฉลี่ย		49.96	15.94	45.74	91.17	1.64
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.63	0.09	0.54	1.27	0.01
% ค่าความผิดพลาด		1.26	0.58	1.19	1.39	0.38

หมายเหตุ : 1. ความหนาแน่นและพื้นที่ผิวจำเพาะที่แสดงไว้ในเอกสารแนบเป็นค่าที่ตั้งไว้ในเครื่อง ไม่เกี่ยวข้องกับสมบัติของสารตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

2. อนุภาคที่วิเคราะห์ได้นั้นเป็นอนุภาคที่เกิดการกระจายตัวของตัวอย่างเท่านั้น

การแปลผล/ความคิดเห็น : ไม่มี

เอกสารแนบ :

เอกสารแนบหน้าที่	รายละเอียด
1 – 3	ผลการวิเคราะห์ขนาดและกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่าง Case 6
4 – 6	ผลการวิเคราะห์ขนาดและกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่าง Case 7

MTEC a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบโดย :

(นายอรินทรเชษฐ์ ศิรินันทวิทยา) (นายสามารถ นุชสาย)

ตรวจสอบโดย :

(นางปิยวรรณ ปนิทานเต)

หมายเหตุ

1. ศูนย์ฯ ไม่อนุญาตให้มีการแก้ไข เพิ่มเติม หรือเปลี่ยนแปลงรายงาน หรือส่วนหนึ่งส่วนใดของรายงาน เว้นแต่จะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร จากศูนย์ฯ
2. ทางศูนย์ฯ ไม่สามารถรับผิดชอบต่อความเสียหายใด ๆ ที่จะเกิดขึ้น ไม่ว่าโดยทางตรงหรือทางอ้อม ในกรณีที่นำข้อมูล ผลการวิเคราะห์ ข้อสรุปหรือคำแนะนำฉบับนี้ไปใช้ในการออกแบบ การผลิต หรือเพื่อจุดประสงค์ใดก็ตาม
3. ผลการทดลองเป็นจริงเฉพาะตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น

MTEC a member of NSTDA

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 1

Sample Details

Sample ID : Case 6_1

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0948_60_2sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1% v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 26 มกราคม 2560 15:13:26

Analysed : 26 มกราคม 2560 15:13:28

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 22.00 **Residual (%) :** 0.505

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0727 %Vol **Specific Surface Area :** 0.258 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 21.23 um **D (0.5) :** 56.93 um **D (0.9) :** 104.51 um

D [4,3] : 60.22 um **D [3,2] :** 23.3 um **Span :** 1.463 **Uniformity :** 0.446

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

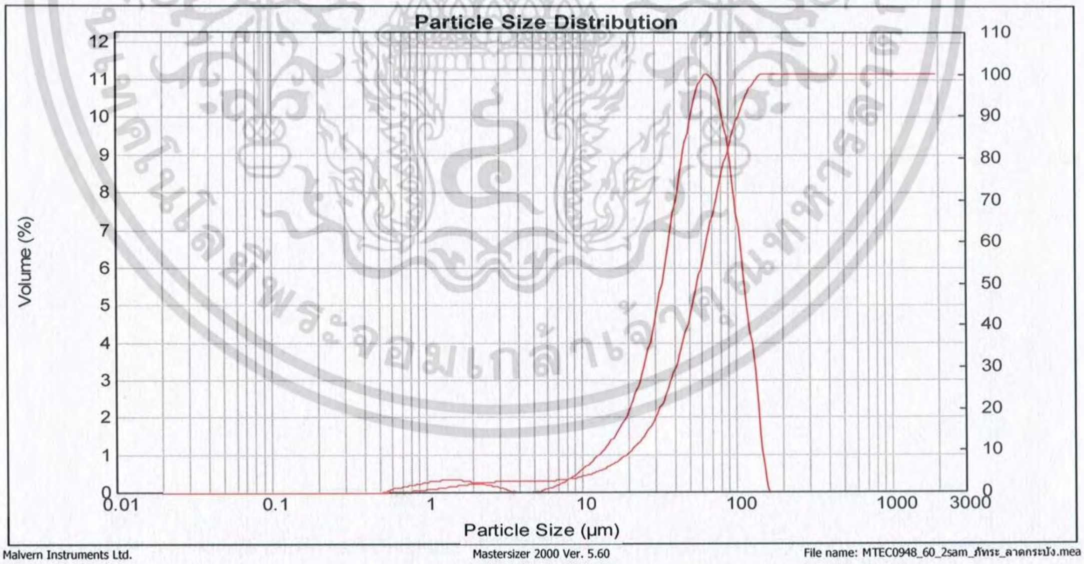
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.00
0.502	0.02
0.586	0.11
0.683	0.16
0.796	0.22
0.928	0.27
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.31
1.262	0.33
1.471	0.32
1.715	0.30
2.000	0.26
2.332	0.20
2.719	0.14
3.170	0.05
3.696	0.00
4.309	0.00
5.024	0.03
5.857	0.12
6.829	0.23
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.39
9.283	0.58
10.823	0.81
12.619	1.08
14.713	1.40
17.154	1.82
20.000	2.41
23.318	3.24
27.187	4.38
31.698	5.81
36.957	7.46
43.089	9.11
50.238	10.45
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	11.15
68.291	10.93
79.621	9.73
92.832	7.73
108.234	5.26
126.191	2.99
147.128	0.20
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0948_60_2sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 42
27/1/2560 11:05:42

MTEC a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 2

Sample Details

Sample ID : Case 6_2

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0948_60_2sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1% v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 26 มกราคม 2560 15:14:13

Analysed : 26 มกราคม 2560 15:14:14

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 22.39 **Residual (%) :** 0.551

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0733 %Vol **Specific Surface Area :** 0.26 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 20.99 um **D (0.5) :** 55.96 um **D (0.9) :** 102.99 um

D [4,3] : 59.33 um **D [3,2] :** 23.03 um **Span :** 1.465 **Uniformity :** 0.449

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

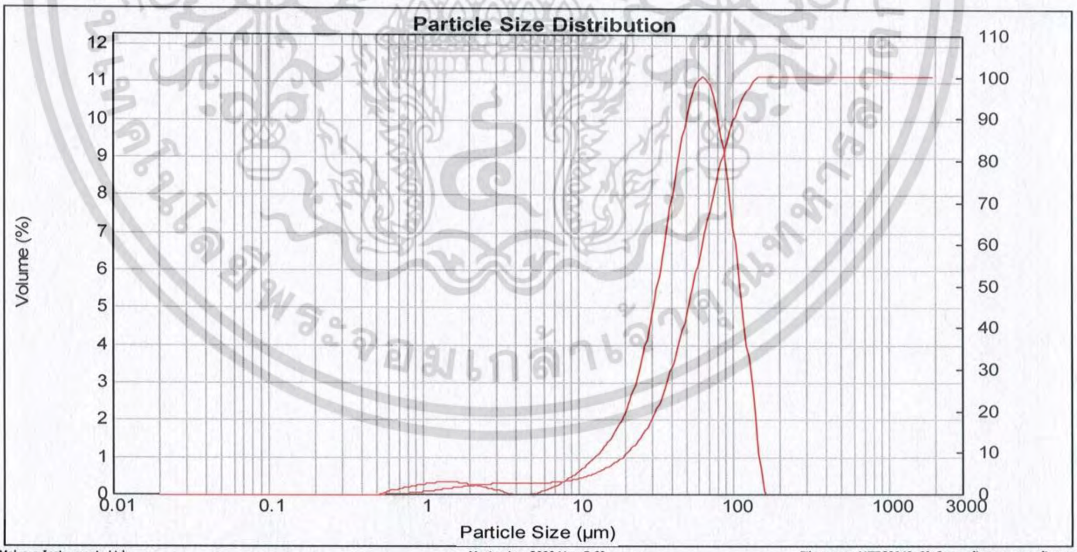
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.00
0.502	0.02
0.586	0.11
0.683	0.17
0.796	0.22
0.928	0.27
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.31
1.262	0.33
1.471	0.33
1.715	0.30
2.000	0.25
2.332	0.19
2.719	0.14
3.170	0.05
3.696	0.00
4.309	0.00
5.024	0.03
5.857	0.13
6.829	0.24
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.40
9.283	0.60
10.823	0.83
12.619	1.09
14.713	1.42
17.154	1.86
20.000	2.47
23.318	3.34
27.187	4.52
31.698	6.01
36.957	7.68
43.089	9.32
50.238	10.60
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	11.18
68.291	10.82
79.621	9.48
92.832	7.40
108.234	4.89
126.191	2.79
147.128	0.19
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0948_60_2sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 45
27/1/2560 11:05:43

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 3

Sample Details

Sample ID : Case 6_3

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0948_60_2sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1% v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 26 มกราคม 2560 15:15:00

Analysed : 26 มกราคม 2560 15:15:01

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) | **Beam Length (mm) :** 2.35 | **Obscuration (%) :** 22.63 | **Residual (%) :** 0.584

Particle RI : 2.420 | **Absorption :** 1 | **Dispersant Name :** Water | **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume | **Concentration :** 0.0734 %Vol | **Specific Surface Area :** 0.263 m²/g

Mean Diameters : | **D (0.1) :** 20.74 um | **D (0.5) :** 55.17 um | **D (0.9) :** 101.49 um

D [4,3] : 58.51 um | **D [3,2] :** 22.81 um | **Span :** 1.464 | **Uniformity :** 0.45

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

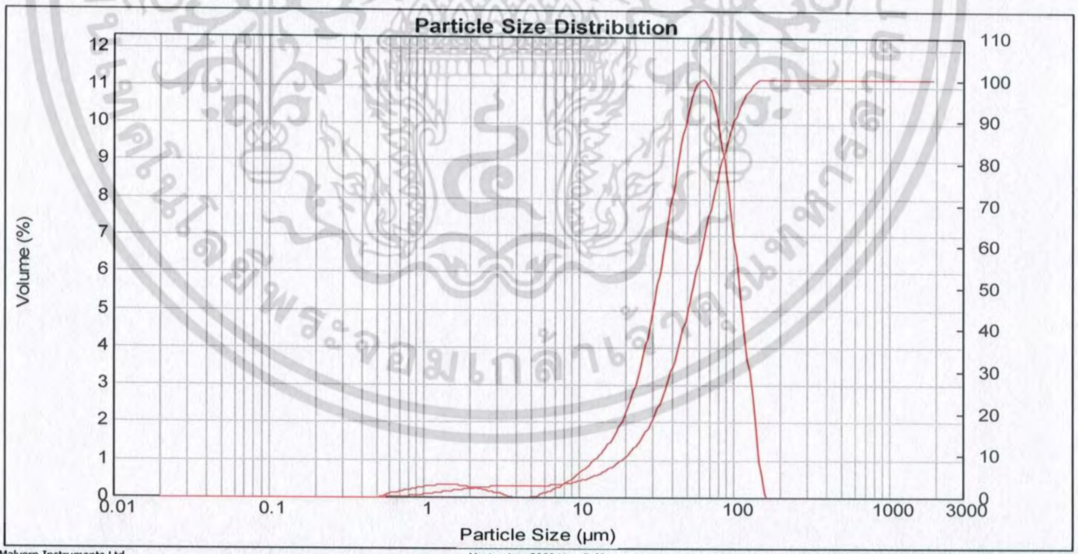
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.00
0.502	0.02
0.586	0.11
0.683	0.17
0.796	0.22
0.928	0.28
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.31
1.262	0.33
1.471	0.33
1.715	0.30
2.000	0.25
2.332	0.19
2.719	0.14
3.170	0.05
3.696	0.00
4.309	0.00
5.024	0.03
5.857	0.14
6.829	0.26
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.42
9.283	0.62
10.823	0.85
12.619	1.11
14.713	1.45
17.154	1.89
20.000	2.52
23.318	3.42
27.187	4.64
31.698	6.16
36.957	7.86
43.089	9.48
50.238	10.72
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	11.21
68.291	10.75
79.621	9.30
92.832	7.15
108.234	4.62
126.191	2.52
147.128	0.17
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0948_60_2sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 48
27/1/2560 11:05:43

MTEC a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 4

Sample Details

Sample ID : Case 7_1

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0948_60_2sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1% v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 26 มกราคม 2560 15:45:22

Analysed : 26 มกราคม 2560 15:45:24

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 22.23 **Residual (%) :** 0.447

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0581 %Vol **Specific Surface Area :** 0.323 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 16.03 um **D (0.5) :** 46.23 um **D (0.9) :** 92.41 um

D [4,3] : 50.56 um **D [3,2] :** 18.58 um **Span :** 1.652 **Uniformity :** 0.515

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

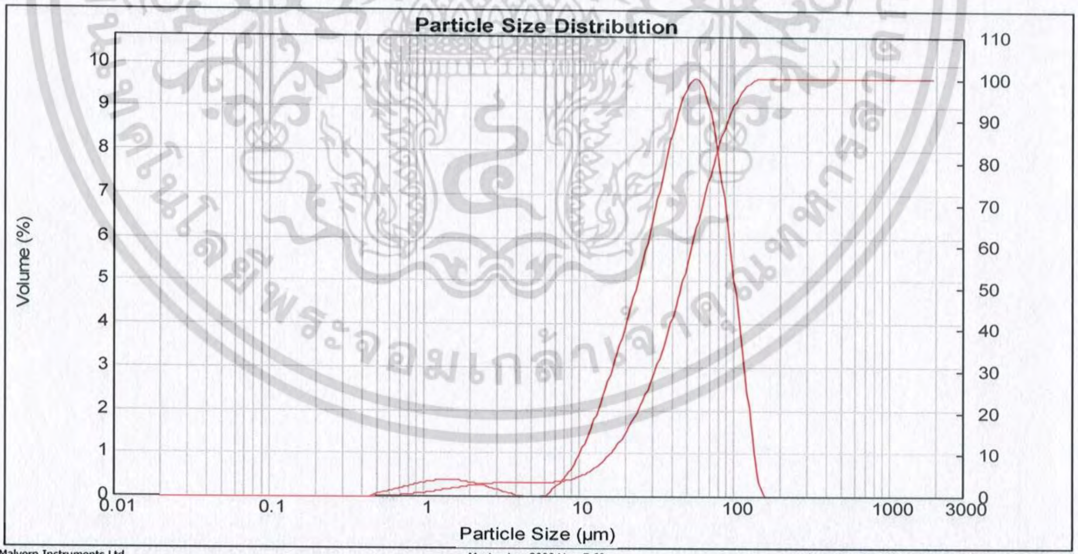
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.01
0.502	0.09
0.586	0.15
0.683	0.21
0.796	0.27
0.928	0.33
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.37
1.262	0.39
1.471	0.38
1.715	0.35
2.000	0.31
2.332	0.24
2.719	0.17
3.170	0.10
3.696	0.03
4.309	0.00
5.024	0.00
5.857	0.05
6.829	0.25
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.52
9.283	0.91
10.823	1.42
12.619	2.03
14.713	2.72
17.154	3.47
20.000	4.29
23.318	5.18
27.187	6.17
31.698	7.22
36.957	8.27
43.089	9.15
50.238	9.65
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	9.55
68.291	8.72
79.621	7.23
92.832	5.28
108.234	3.27
126.191	1.22
147.128	0.05
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0948_60_2sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 51
27/1/2560 11:05:43

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 5

Sample Details

Sample ID : Case 7_2

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0948_60_2sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1% v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 26 มกราคม 2560 15:46:09

Analysed : 26 มกราคม 2560 15:46:10

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A)
Beam Length (mm) : 2.35
Obscuration (%) : 22.57
Residual (%) : 0.437

Particle RI : 2.420
Absorption : 1
Dispersant Name : Water
Dispersant RI : 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume
Concentration : 0.0588 %Vol
Specific Surface Area : 0.325 m²/g

Mean Diameters :
D (0.1) : 15.94 um
D (0.5) : 45.67 um
D (0.9) : 90.96 um

D [4,3] : 49.87 um
D [3,2] : 18.47 um
Span : 1.643
Uniformity : 0.512

Size (μm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

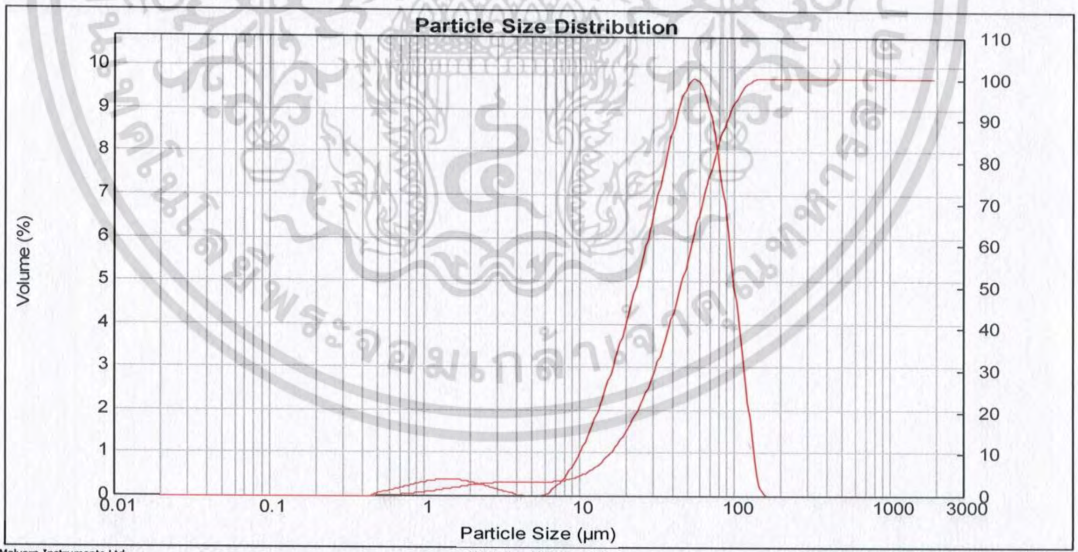
Size (μm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.01
0.502	0.09
0.586	0.15
0.683	0.21
0.796	0.27
0.928	0.33
1.082	

Size (μm)	Volume In %
1.082	0.37
1.262	0.39
1.471	0.38
1.715	0.35
2.000	0.30
2.332	0.24
2.719	0.17
3.170	0.10
3.696	0.03
4.309	0.00
5.024	0.00
5.857	0.05
6.829	0.26
7.962	

Size (μm)	Volume In %
7.962	0.53
9.283	0.93
10.823	1.44
12.619	2.05
14.713	2.75
17.154	3.52
20.000	4.35
23.318	5.27
27.187	6.28
31.698	7.35
36.957	8.40
43.089	9.26
50.238	9.72
58.573	

Size (μm)	Volume In %
58.573	9.55
68.291	8.65
79.621	7.09
92.832	5.10
108.234	3.09
126.191	0.95
147.128	0.02
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (μm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0948_60_2sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 54
27/1/2560 11:05:43

MTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MTEC a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 6

Sample Details

Sample ID : Case 7_3

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_60\MTEC0948_60_2sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water.
Additive : 0.1% v/v Igepal CA-630.
Treatment : Stirring at 2000 rpm during measurement.

Measured : 26 มกราคม 2560 15:46:55

Analysed : 26 มกราคม 2560 15:46:57

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 22.85 **Residual (%) :** 0.462

Particle RI : 2.420 **Absorption :** 1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0594 %Vol **Specific Surface Area :** 0.326 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 15.86 um **D (0.5) :** 45.29 um **D (0.9) :** 90.11 um

D [4,3] : 49.44 um **D [3,2] :** 18.42 um **Span :** 1.639 **Uniformity :** 0.511

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

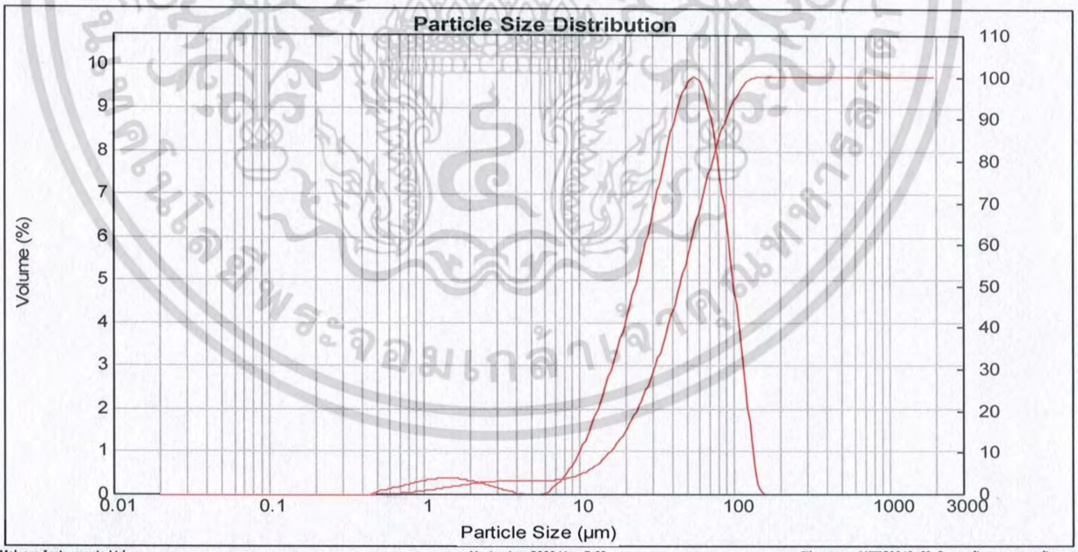
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.01
0.502	0.10
0.586	0.15
0.683	0.21
0.796	0.27
0.928	0.32
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.36
1.262	0.38
1.471	0.38
1.715	0.35
2.000	0.30
2.332	0.24
2.719	0.17
3.170	0.10
3.696	0.03
4.309	0.00
5.024	0.00
5.857	0.06
6.829	0.27
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.54
9.283	0.94
10.823	1.46
12.619	2.08
14.713	2.79
17.154	3.56
20.000	4.41
23.318	5.33
27.187	6.35
31.698	7.42
36.957	8.46
43.089	9.31
50.238	9.73
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	9.53
68.291	8.59
79.621	7.00
92.832	5.00
108.234	2.98
126.191	0.81
147.128	0.01
171.539	0.00
200.000	0.00
233.183	0.00
271.871	0.00
316.979	0.00
369.570	0.00
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	0.00
502.377	0.00
585.729	0.00
682.910	0.00
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MAL1021434

File name: MTEC0948_60_2sam_ภัทระ_ลาดกระบัง.mea
Record Number: 57
27/1/2560 11:05:43

MTEC a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ข้อมูลวิเคราะห์การทดสอบคุณสมบัติต้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

InS Thai Ltd.
Thai-French Innovation Center (8th Floor),
King Mongkut's University of Technology North Bangkok,
1518 Pibulsongkram Rd., Wangsawang, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand.
Tel: +66 (0)2 585 9946, +66 (0)2 585 9964, +66 (0)2 585 9982 – Fax: +66 (0)2 585 9951
www.ins-thai.com

ANALYSIS REPORT:
King Mongkut's Institute of technology ladkrabang
Four ball – Wear resistance according to ASTM D4172

Sample description	Lubricants
Customer Sample Reference	See table 1
Internal Sample Reference	See table 1
Date of Receipt	17/11/2016
Date of Analysis	17/11/2016-16/12/2016
Analysis Report Reference	R1611203KMI

TESTS & SAMPLES

TEST	STANDARD	CONDITIONS	CUSTOMER SAMPLE REF.	INTERNAL SAMPLE REF.
4-ball test method	ASTM D4172	– Rotational speed: 1200 ± 10 rpm – Load: 392 ±2N (40 ± 2kgf) – Duration per load: 60 ± 1 min – Temperature: 75°C ± 2°C	See Table 1	See Table 1

Table 1: List of samples reference

Customer Reference	InS Thai Reference
case1	S1611203KMI-01.1
case2	S1611203KMI-01.2
case3	S1611203KMI-01.3
case4	S1611203KMI-01.4
case5	S1611203KMI-01.5
case6	S1611203KMI-01.6
case7	S1611203KMI-01.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

InS Thai Ltd.
Thai-French Innovation Center (8th Floor),
King Mongkut's University of Technology North Bangkok,
1518 Pibulsongkram Rd., Wangsawang, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand.
Tel: +66 (0)2 585 9946, +66 (0)2 585 9964, +66 (0)2 585 9982 – Fax: +66 (0)2 585 9951
www.ins-thai.com

SAMPLE PREPARATION & TESTING

According to the four balls testing standard (ASTM D4172), the samples are tested at 75°C. The normal load applied is 392 N. Running time is 60 minutes.

Figure 1: Four balls testing machine and direction of applied load

After the test, the wear scar diameter is measured under microscope at 100× and 200× magnification. The wear scar diameter of the three lower balls is measured and the average value is reported. The friction torque during the test is also noted every 5 minute and reported.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

InS Thai Ltd.
Thai-French Innovation Center (8^{th} Floor),
King Mongkut's University of Technology North Bangkok,
1518 Pibulsongkram Rd., Wangsawang, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand.
Tel: +66 (0)2 585 9946, +66 (0)2 585 9964, +66 (0)2 585 9982 – Fax: +66 (0)2 585 9951
www.ins-thai.com

RESULTS

Table 2 presents the wear scars diameter measured on the lower three balls. Figure 3 shows the optical microscopy images of wear scars found on three lower balls after 60 min running time. The variation of wear scar diameter is small indicating a good sample installation. Figure 2 shows the comparison of wear scar between different samples.

Table 2: Wear scars diameter measured by microscope

Case	Ball 1		Ball 2		Ball 3		Average (µm)	Ball 4			Average (µm)
	d_1 (µm)	d_2 (µm)	d_1 (µm)	d_2 (µm)	d_1 (µm)	d_2 (µm)		d_1 (µm)	d_2 (µm)	d_3 (µm)	
1	620.71	620.98	613.25	613.46	631.16	629.87	621.57	591.10	594.07	593.56	592.91
2	789.32	791.07	777.38	777.64	783.39	783.61	783.74	792.57	793.25	791.69	792.50
3	856.46	858.24	856.46	856.75	865.41	865.70	859.84	868.69	869.57	868.85	869.04
4	871.38	868.69	881.83	880.63	884.81	885.11	878.74	892.59	893.54	898.32	894.82
5	868.40	898.69	872.88	868.69	854.97	856.75	870.06	889.60	891.74	892.00	891.11
6	556.91	557.14	574.65	574.46	568.49	568.68	566.72	547.83	545.32	548.59	547.25
7	892.27	892.57	895.56	896.75	891.78	893.23	893.69	913.12	910.72	917.94	913.93

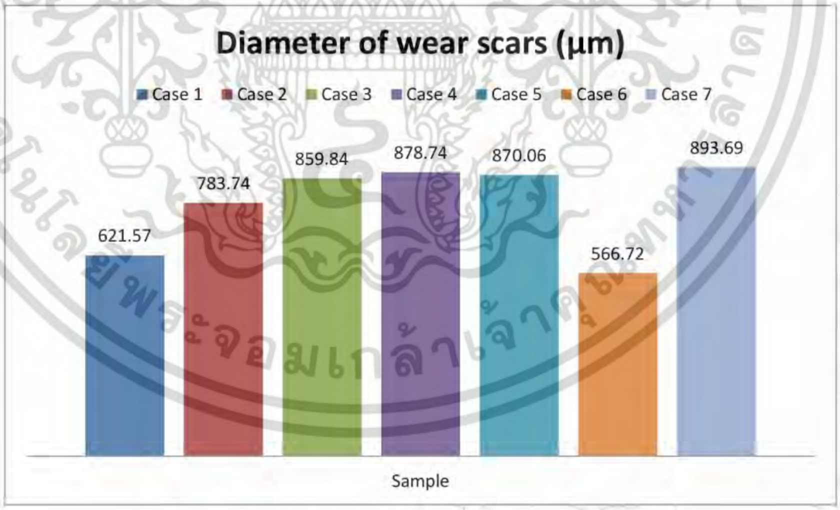


Figure 2: Comparison of average wear scar after testing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

InS Thai Ltd.
Thai-French Innovation Center (8th Floor),
King Mongkut's University of Technology North Bangkok,
1518 Pibulsongkram Rd., Wangsawang, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand.
Tel: +66 (0)2 585 9946, +66 (0)2 585 9964, +66 (0)2 585 9982 – Fax: +66 (0)2 585 9951
www.ins-thai.com

Table 3: Mass loss measured by high precision of balance (4 digit)

Case	Ball 1			Ball 2			Ball 3			Ball 4		
	Before	After	loss	Before	After	loss	Before	After	loss	Before	After	loss
1	8.3554	8.3551	0.0003	8.355	8.3548	0.0002	8.3537	8.3535	0.0002	8.3549	8.3541	0.0008
2	8.3529	8.3528	0.0001	8.3512	8.3511	0.0001	8.3529	8.3528	0.0001	8.3528	8.3526	0.0002
3	8.3554	8.3552	0.0002	8.3504	8.3502	0.0002	8.3526	8.3524	0.0002	8.3522	8.3519	0.0003
4	8.3521	8.3519	0.0002	8.352	8.352	>0.0001	8.3545	8.3544	0.0001	8.3549	8.3547	0.0002
5	8.3557	8.3553	0.0004	8.356	8.356	>0.0001	8.3531	8.353	0.0001	8.3552	8.3548	0.0004
6	8.3507	8.3504	0.0003	8.3532	8.353	0.0002	8.3532	8.353	0.0002	8.3531	8.3525	0.0006
7	8.3528	8.3523	0.0005	8.3526	8.3525	0.0001	8.3536	8.3535	0.0001	8.3542	8.354	0.0002

General conclusion:

- The case 6 sample show the lowest of scar diameter.
- The mass loss of all samples is about less than 0.0001 to 0.0008 g.

Prepared by:
Mr.Panumas Songvut
R&D Scientist
Panumas Songvut
2016-12-16

Approved by:
Mr.Vttaya Prommin
R&D Scientist Materials Science
Vittaya Prommin
2016-12-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AMM - 045

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32
3 – 6 กรกฎาคม 2561 จังหวัดมุกดาหาร

การศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคเขม่าต่อการสึกหรอของโลหะโดยวิธีโฟร์บอลไทรโบโลยี
Impact of Soot Particle Size on Metal Wear Using Four-Ball Tribology

ภัทระ ฉ่ำมะนา*, จินดา เจริญพรพาณิชย์ , ปรีชา การินทร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง
เขตลาดกระบัง, 10520
*pattara_ra@hotmail.com, 0878914019, 02-3543126

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบขนาดของอนุภาคเขม่าที่แตกต่างกันต่อกลไกการสึกหรอของโลหะโดยใช้วิธีโฟร์บอลไทรโบโลยี (Four-ball Tribology) ในการทดสอบโดยน้ำมันหล่อลื่นจะถูกปนเปื้อนด้วยเขม่าซึ่งจำลองโดยคาร์บอนแบล็คที่มีขนาดอนุภาคเดี่ยวแตกต่างกันการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) และโครงสร้างในระดับนาโน (Nano Structure) ของอนุภาคเขม่านั้นได้ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด scanning electron microscopy (SEM), กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านtransmission electron microscopy (TEM) และเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง Laser Diffraction Spectroscopy (LDS) เป็นเครื่องมือในการทดสอบ การวัดขนาดความสึกหรอและความหยาบในระดับไมครอนของโลหะใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง (Optical Microscope) และกล้องจุลทรรศน์ 3 มิติ (3D Optical Microscope) และรูปภาพ SEM

จากผลการทดสอบพบว่าค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอ (WSD) ของโลหะเฉลี่ยเมื่อทดสอบโดยใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE5W30ที่มีการปนเปื้อนด้วยคาร์บอนแบล็ค 1% โดยน้ำหนักจะมีค่ามากกว่าที่ไม่มีการปนเปื้อนด้วยคาร์บอนแบล็ค 36.3% แต่ค่าความหยาบจะมีค่าน้อยกว่า 26.75% ขนาดอนุภาคเขม่าสามารถที่จะเพิ่มอัตราการสึกหรอของโลหะได้เนื่องจากมีขนาดมากกว่าชั้นความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นและมีค่าความแข็ง (hardness) มากกว่าลูกบอลเหล็ก

Abstract

In this research has studied the morphology of different soot particle sizes to investigate the effects of soot nanoparticles on metal wear using Four ball Wear Tester. Soot particles contamination in engine oil was simulated using carbon black (CB). There were commercial carbonblack which difference primary particle size.Micro – nanostructure of soot particles were studied by scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM) and laser diffraction spectroscopy (LDS). Wear and roughness measurement was investigated by high resolution optical microscopy (OM), 3D rendering optical technique and SEM image processing method.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Base on four ball wear test, the 1% by weight of CB contamination show 36.3% higher average WSD compare to the pure SAE5W30 engine oil, but the surface roughness was 26.75% lower. Soot particle could be increase the rate of wear because it was large in comparison with the oil film and its hardness was higher than of steel ball.

Keywords: Soot, Wear, Nanoparticles, Four-Ball Wear tester, Electron Microscopy, Laser Diffraction Spectroscopy

1. บทนำ

ในปัจจุบันรถโดยสารส่วนบุคคลได้เข้ามามีบทบาทในประเทศไทยเป็นอย่างมากมากเนื่องจากมีความสะดวกสบายในการที่จะเดินทางไปยังที่ต่าง ๆ ตามที่ต้องการ แต่อย่างไรก็ตามเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในก็ยังเป็นเครื่องจักรที่กำเนิดไอเสียอยู่ดีและเขม่าก็เป็นองค์ประกอบหนึ่งในนั้น

หนึ่งในสาเหตุหลักของความเสียหายของเครื่องยนต์เนื่องจากคุณภาพของเชื้อเพลิงและน้ำมัน คือ ความหนาของน้ำมันหล่อลื่นเนื่องจากปฏิกิริยาเทอร์โม-ออกซิเดชั่น (Thermo-Oxidation) และเขม่า (Soot). Guatum. [1].

1.1 การเกิดเขม่า (Soot Generation)

เขม่า (Soot) คืออนุภาคที่ประกอบด้วยคาร์บอนขนาดเล็กมากๆ โดยเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ซึ่งประกอบไปด้วย คาร์บอน (Carbon), ขี้เถ้า (Ash), ไฮโดคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด (Unburned hydrocarbon) โดยที่ไฮโดคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด (Unburnedhydrocarbon) คือ อะเซติลีน (Acetylene) และโพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons) ที่มีสภาพเป็นกรด และสารระเหยในระดับที่สูง จากการวัดปริมาณองค์ประกอบของธาตุพบว่ามีคาร์บอน (Carbon) 90%, ออกซิเจน (Oxigen) 4%, ไฮโดรเจน (Hydrogen) 3% รวมทั้งส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ซัลเฟอร์ (Sulphur) และเศษโลหะ Clague et al. [2].

Rocca et al. [3] ได้ทำการศึกษาลักษณะของเขม่าในน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์แก๊สโซลีนแบบฉีดตรง (GDI) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) พบว่าขนาดของอนุภาคเดี่ยวเฉลี่ย (Average Primary Particles Size) มีรูปร่างเป็นทรงกลม (Spherical) มีค่า 36 นาโนเมตร และอนุภาคกลุ่มก้อนเฉลี่ย (Average Agglomerates Particles Size) มีค่าความกว้าง 59 นาโนเมตร และความยาว 153 นาโนเมตร ตามลำดับ

1.2 ผลกระทบของเขม่าต่อคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

Truhan et al. [4]. ได้ทำการค้นคว้าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเนื่องจากเขม่า ผลลัพธ์ คือค่าความหนืดที่ 40 และ 100°C มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นเขม่ามากขึ้น

1.3 กลไกการสึกหรอ (Wear Mechanism)

โดยทั่วไปนิยมแบ่งกลไกการสึกหรอออกเป็นตามประเภทกลไกการสึกหรอ 4 ประเภทดังต่อไปนี้

- การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) เกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ไถลที่รอยต่อระหว่างหน้าสัมผัส และเกิดแรงดึงส่วนที่ติดแน่นและอ่อนแอกว่าแยกจากกันเกิดฟิล์มถ่ายโอน (Transfer Film) ไปสู่อีกพื้นผิวหนึ่ง

การสึกหรอแบบนี้เป็นพื้นฐานของความเสียโลหะทุกชนิดที่มีการไถล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กลไกการสึกหรอแบบขูดขีด (Abrasion) การขูดขีดเกิดจากการที่เนื้อวัสดุหลุดหายไปจากการถูกขีดข่วน หรือถูกขูดเป็นร่องลึก หรือเกิดจากการที่มีผงฝุ่นสิ่งสกปรกที่มีความแข็งมากๆ แทรกอยู่ระหว่างผิวคู่สัมผัส

- การล้าตัว (Material Fatique) เป็นการสึกหรอที่เกิดจากการล้าตัวของเนื้อวัสดุ ซึ่งจะทำให้เห็นว่าผิววัสดุมีหลุม มีรอยแตกหรือรอยแยก

- ปฏิกิริยาไทรโบเคมีคอล Tribichemical Reactions) ผลพวงของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างผิววัสดุคู่สัมผัสกับสารหล่อลื่นในระหว่างผิวคู่สัมผัสภายใต้การเคลื่อนที่ที่มีความเค้นกด ทำให้เกิดการสึกหรอ อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวจะเรียกสิ่งเหล่านี้ว่า การสึกหรอแบบกัดกร่อน (Corrosive Wear) [5]

1.4 Tribology

Tribology เป็นศาสตร์และเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับพื้นผิวที่มีปฏิสัมพันธ์กันในระหว่างการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ โดยรวมถึงการศึกษาและการใช้งานของหลักการแรงเสียดทาน การหล่อลื่น และการสึกหรอ ด้วยการใช้กราฟ Stribeck (Stribeck Curve) ทำให้สามารถคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงจากการหล่อลื่นแบบโดยรอบ (Boundary Lubrication) ไปเป็นการหล่อลื่นแบบผสม (mixed lubrication) และจากการหล่อลื่นแบบผสม (Mixed Lubrication) ไปเป็นการหล่อลื่นแบบElasto-hydrodynamic (Elasto-hydrodynamic Lubrication) ได้ ซึ่งก็ทำให้สามารถคาดการณ์รูปแบบการหล่อลื่นที่หน้าสัมผัสใดหน้าสัมผัสหนึ่งได้

การทดสอบโดยวิธีโฟร์บอล (Four-ball Test) เปนการทดสอบเพื่อวัดคุณสมบัติการปองกันการสึกหรอ (Anti Wear) ของน้ำมันหลอลื่น (Lubricating oil) และสารหลอลื่นจำพวกจาระบี(Grease) พื้นผิวการสัมผัสถูกจำลองโดยการนำลูกบอลเหล็กจำนวน 4 ลูก เสนผานศูนยกลาง 12.7 มิลิเมตรแชลงในสารหลอลื่นโดยใหลูกบอลลูกหนึ่งออกแรงกดลงบนลูกบอลอีกสามลูกซึ่งถูกยึดใหอยูกับที่ ตัวแปรตางๆ เชน ความเร็วรอบของลูกบอลที่ใชกด, แรงกด รวมถึงอุณหภูมิที่ใชทดสอบถูกกำหนดตามมาตรฐาน ASTM การวัดคุณสมบัติการปองกันการสึกหรอทำโดยการวัดเสนผานศูนย์กลางของรอยที่เกิดจากการเสียดสี[6]

2. ขั้นตอนการทดลอง

2.1 การศึกษาลักษณะทางสัญฐานวิทยาของอนุภาคคาร์บอนแบล็ค

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและโครงสร้างในระดับนาโนเมตรของคาร์บอนแบล็คชนิดแตกต่างกัน มีจุดประสงค์เพื่อหาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคเดี่ยวคาร์บอนแบล็คเฉลี่ย โดยคาร์บอนแบล็คที่ถูกใช้ทดสอบมี 4 ชนิด คือ N220, N330, N550 และ N660 ตามลำดับ

รูปที่ 1 รูปด้านบนคือคาร์บอนแบล็คจำนวน 4 เบอร์ N220, N330, N550 และ N660 รูปด้านล่างคือ เขม่าจากเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ผลกระทบของการปนเปื้อนเขม่าต่อการสึกหรอของโลหะ

คุณสมบัติต้านการสึกหรอของน้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนเขม่าจำลองโดยใช้คาร์บอนแบล็คถูกวิเคราะห์โดยเครื่องทดสอบวัดคุณสมบัติต้านการสึกหรอด้วยเครื่องมือโฟร์บอล (Four-Ball Wear Tester)วิธีการและเงื่อนไขการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-4172 จุดประสงค์การทดสอบนี้เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดและปริมาณอนุภาคเขม่าต่อการสึกหรอของโลหะ แบ่งเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็ค (CB) แตกต่างกันที่ปริมาณ 1% wt ผสมกับน้ำมันหล่อลื่นโดยใช้คาร์บอนแบล็ค N220, N330, N550 และ N660 ดังแสดงในตารางที่ 1

กรณีที่ 2 ปริมาณอนุภาคคาร์บอนแบล็ค (CB) ที่แตกต่างกันผสมกับน้ำมันหล่อลื่นที่ 0.5, 1 และ 2% wt โดยใช้คาร์บอนแบล็ค N330 ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 น้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ขนาดแตกต่างกัน

ตัวอย่าง	คาร์บอนแบล็ค	% น้ำมันหล่อลื่น (wt)	% คาร์บอนแบล็ค (wt)
NE	-	100%	-
EC2	N220	99%	1%
EC3	N330	99%	1%
EC5	N550	99%	1%
EC6	N660	99%	1%

ตารางที่ 2 น้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณแตกต่างกัน

ตัวอย่าง	คาร์บอนแบล็ค	% น้ำมันหล่อลื่น (wt)	% คาร์บอนแบล็ค (wt)
NE	-	100%	-
EC3-0.5%	N330	99.5%	0.5%
EC3	N330	99%	1%
EC3-2%	N330	98%	2%

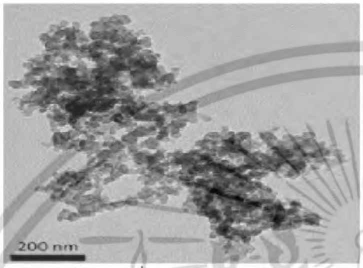
3. ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

3.1 การกระจายตัวของอนุภาคเดี่ยวของคาร์บอนแบล็ค P.Karin et al [7]. ได้ทำการค้นคว้าและวัดขนาดของเขม่าเครื่องยนต์และพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ยของเขม่ามีค่า 30 นาโนเมตร ในการทดลองนี้ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) วัดขนาดของคาร์บอนแบล็ค ตามรูปที่ 2 โดยไม่สามารถที่จะวัดขนาดอนุภาคเดี่ยว (Primary Particle Size) ของคาร์บอนแบล็คได้โดยตรง เนื่องจากอนุภาคคาร์บอนแบล็คมีการรวมกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) ดังนั้น จึงต้องใช้โปรแกรมวัดขนาดอนุภาค (Image J) เข้ามาช่วย เพื่อหาขนาดอนุภาคเดี่ยวของคาร์บอนแบล็ค โดยที่รูปร่างของคาร์บอนแบล็คมีลักษณะคล้ายวงกลม

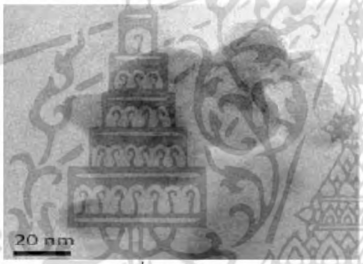
สุดท้ายนี้ ได้หาขนาดของอนุภาคคาร์บอนแบล็คแต่ละตัวอย่างไม่ต่ำกว่าอย่างละ 200 รูป แสดงถึงการกระจายตัวขนาดอนุภาคเดี่ยวในระดับนาโนเมตรของตัวอย่างคาร์บอนแบล็ค ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 5-115 นาโนเมตร โดยขนาดของอนุภาคมีมากในช่วง 20-65 นาโนเมตร โดยข้อมูลสถิติในตารางที่ 3 แสดงถึงขนาดอนุภาคเดี่ยวเฉลี่ยของคาร์บอนแบล็คเบอร์ N660 มีขนาดใหญ่ที่สุด และคาร์บอนแบล็คเบอร์ N220 มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

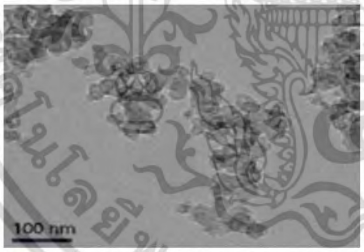
ขนาดเล็กที่สุด ซึ่งขนาดอนุภาคเดี่ยวของคาร์บอนแบล็คเบอร์ N220, N330, N550 และ N660 คือ 23.6, 30.4, 44.6 และ 54 นาโนเมตร ตามลำดับ



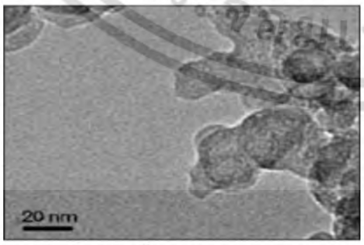
(a) เขม่าจากเครื่องยนต์ P.Karin et al [7].



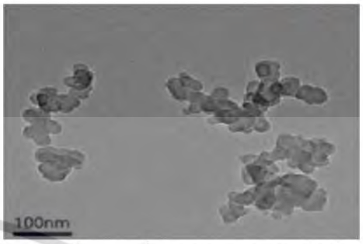
(b) เขม่าจากเครื่องยนต์ P.Karin et al [7].



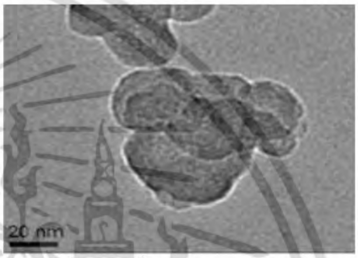
(c) คาร์บอนแบล็ค (carbon black N220)



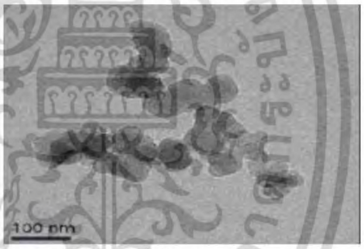
(d) คาร์บอนแบล็ค (carbon black N220)



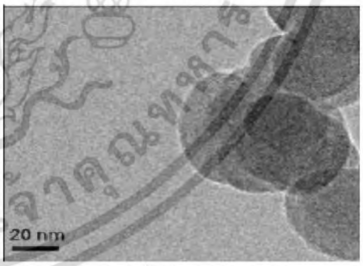
(e) คาร์บอนแบล็ค (carbon black N330)



(f) คาร์บอนแบล็ค (carbon black N330)

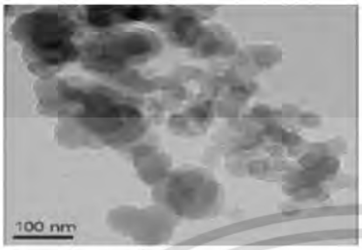


(g) คาร์บอนแบล็ค (carbon black N550)



(h) คาร์บอนแบล็ค (carbon black N550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(i) คาร์บอนแบล็ค (carbon black N660)

(j) คาร์บอนแบล็ค (carbon black N660)

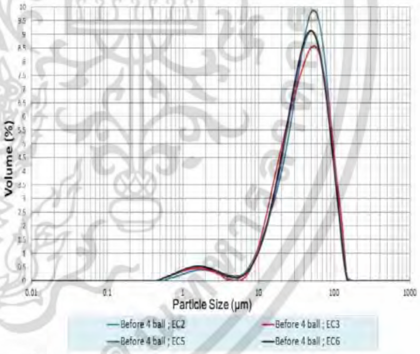
รูปที่ 2 รูปจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) ของ (a-b) เขม่าจากเครื่องยนต์ และ (c-j) คาร์บอนแบล็ค

ตารางที่ 3 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยของอนุภาคเดี่ยวของเขม่าและคาร์บอนแบล็ค

Statistical Data	Carbon Black			
	N220	N330	N550	N660
Particle Count	293	159	202	232
Maximum (nm)	49	74.4	83.4	120.2
Minimum (nm)	11.3	9.4	15.9	14.9
Average (nm)	23.6	30.4	44.6	54
SD	6.8	10.9	14.1	17.8

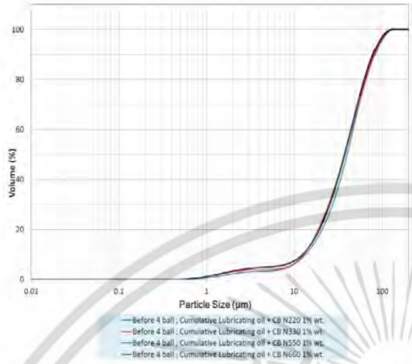
3.2 การกระจายตัวของอนุภาคเขม่าในน้ำมันหล่อลื่น

รูปที่ 3 แสดงถึงการกระจายตัวขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็คในกรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คขนาดอนุภาคแตกต่างกันก่อนการทดสอบโฟร์บอล ซึ่งมีอนุภาคคาร์บอนแบล็ค N220, N330, N550 และ N660 ตามลำดับ ซึ่งการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกันมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยพบอนุภาคที่เล็กที่สุดจนถึงขนาดใหญ่ที่สุดในช่วง 0.5-170 um ซึ่งแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกมีขนาดตั้งแต่ 0.5-5 um กลุ่มที่สองมีขนาดตั้งแต่ 5-170 um รูปที่ 4 แสดงถึงการกระจายตัวอนุภาคคาร์บอนแบล็คสะสม ในกรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกันก่อนการทดสอบโฟร์บอล ซึ่งมีอนุภาคคาร์บอนแบล็ค N220,N330,N550และ N660 ตามลำดับ ซึ่งการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คสะสมที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกันมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยในช่วงขนาดอนุภาค 0.5-5 um มีอนุภาคสะสมประมาณ 3% โดยปริมาตร และช่วงขนาดอนุภาค 5-170 um มีอนุภาคสะสมอยู่ประมาณ 97% โดยปริมาตร



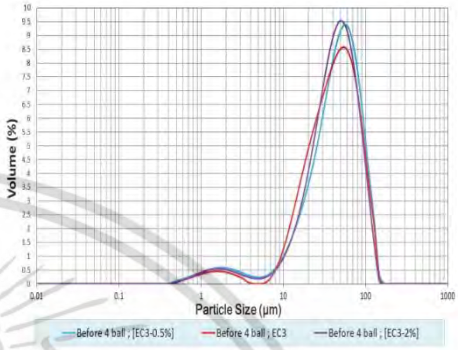
รูปที่ 3 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คก่อนการทดสอบโฟร์บอลกรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คขนาดอนุภาคแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

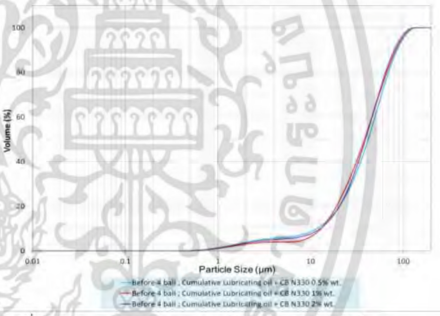


รูปที่ 4 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คสะสมก่อนการทดสอบโฟร์บอลกรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คขนาดอนุภาคแตกต่างกัน

รูปที่ 5 แสดงถึงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็คในกรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณอนุภาคแตกต่างกันก่อนการทดสอบโฟร์บอล ซึ่งมีอนุภาคคาร์บอนแบล็ค N330 ที่ปริมาณ 0.5, 1 และ 2% ตามลำดับ ผสมกับน้ำมันหล่อลื่น การกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณอนุภาคแตกต่างกันมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยพบอนุภาคที่เล็กที่สุดจนถึงใหญ่ที่สุดในช่วง 0.5-170 um ซึ่งแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกมีขนาดตั้งแต่ 0.5-5 um และกลุ่มที่สองมีขนาดตั้งแต่ 5-170 um รูปที่ 6 แสดงถึงการกระจายตัวอนุภาคคาร์บอนแบล็คสะสม การกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คสะสมในกรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณอนุภาคแตกต่างกันมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยในช่วงขนาดอนุภาค 0.5-5 um มีอนุภาคสะสมอยู่ประมาณ 0.5% โดยปริมาตร และช่วงขนาดอนุภาค 5-170 um มีอนุภาคสะสมอยู่ประมาณ 95% โดยปริมาตร



รูปที่ 5 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คก่อนการทดสอบโฟร์บอลกรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณอนุภาคแตกต่างกัน



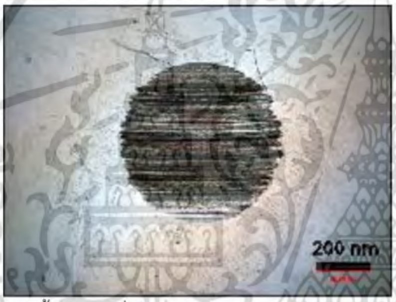
รูปที่ 6 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็คสะสมก่อนการทดสอบโฟร์บอลกรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณอนุภาคแตกต่างกัน

3.3 ผลกระทบของอนุภาคเขม่าต่อการสึกหรอของโลหะด้วยเครื่องทดสอบโฟร์บอล

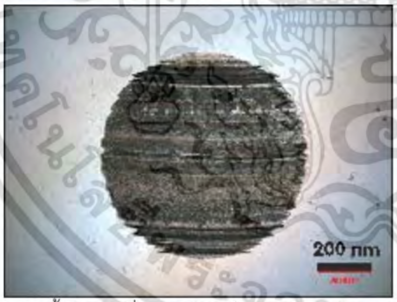
ในการที่จะศึกษาผลกระทบของอนุภาคเขม่าต่อการสึกหรอของโลหะ ได้ใช้คาร์บอนแบล็คเป็นตัวแทนของเขม่า ซึ่งคาร์บอนแบล็คที่เบอร์แตกต่างกันจะมีขนาดอนุภาคเดี่ยว (Primary Particle Size) แตกต่างกัน ในการทดสอบ สามารถแบ่งเป็นสองกรณี ในกรณีแรกก็คือ ขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็ค (CB) แตกต่างกันที่ปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

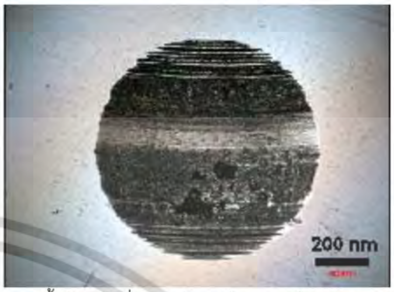
1%wt ผสมกับน้ำมันหล่อลื่น โดยใช้คาร์บอนแบล็ค N220, N330, N550 และ N660 ในกรณีที่สอง ปริมาณอนุภาคคาร์บอนแบล็ค (CB) ที่แตกต่างกันผสมกับน้ำมันหล่อลื่นที่ 0.5, 1 และ 2% wt โดยใช้คาร์บอนแบล็ค N330 หลังการทดสอบโฟร์บอล ลูกบอลเหล็ก 3 ลูกด้านล่างจะถูกวัดเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอ (WSD) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) พร้อมทั้งจะถูกวัดความหยาบพื้นผิว (Roughness) ด้วยภาพถ่ายพื้นผิว 3D จาก OM แล้วนำไปเปรียบเทียบการสึกหรอของโลหะ แสดงดังรูปที่ 7



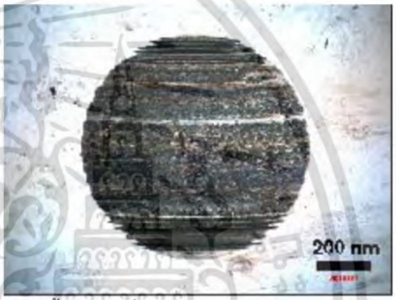
a) น้ำมันหล่อลื่น



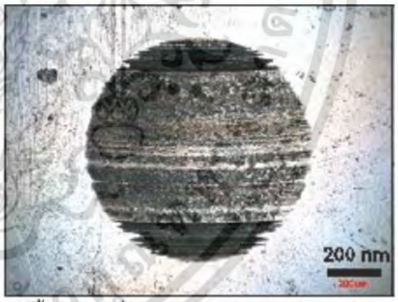
(b) น้ำมันหล่อลื่นผสมกับคาร์บอนแบล็ค N220 1% โดยน้ำหนัก



(c) น้ำมันหล่อลื่นผสมกับคาร์บอนแบล็ค N330 1% โดยน้ำหนัก

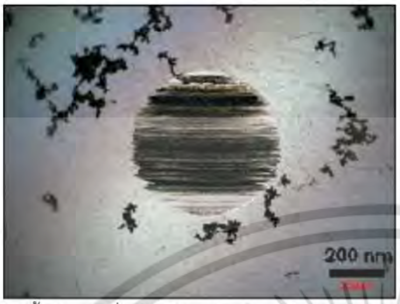


(d) น้ำมันหล่อลื่นผสมกับคาร์บอนแบล็ค N550 1% โดยน้ำหนัก

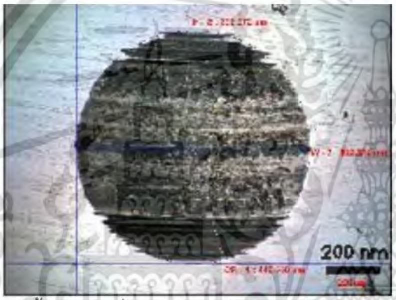


(e) น้ำมันหล่อลื่นผสมกับคาร์บอนแบล็ค N660 1% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

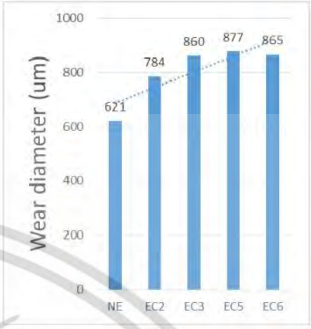


(f) น้ำมันหล่อลื่นผสมกับคาร์บอนแบล็ค N330 0.5% โดยน้ำหนัก

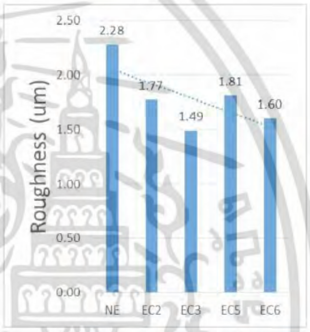


(g) น้ำมันหล่อลื่นผสมกับคาร์บอนแบล็ค N330 2% โดยน้ำหนัก

รูปที่ 7 รอยการสึกหรอบนลูกบอลโลหะของ (a) น้ำมันหล่อลื่น (b) น้ำมันหล่อลื่นผสมกับคาร์บอนแบล็ค N220 ที่ 1% โดยน้ำหนัก (c) น้ำมันหล่อลื่นผสมกับคาร์บอนแบล็ค N330 ที่ 1% โดยน้ำหนัก (d) น้ำมันหล่อลื่นผสมกับคาร์บอนแบล็ค N550 ที่ 1% โดยน้ำหนัก และ (e) น้ำมันหล่อลื่นผสมกับคาร์บอนแบล็ค N660 ที่ 1% โดยน้ำหนัก

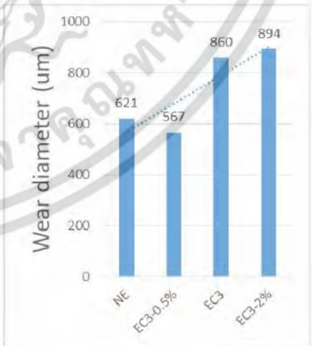


(a)



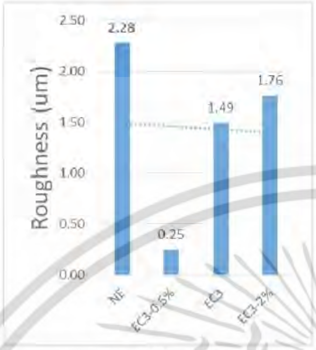
(b)

รูปที่ 8 เส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอ (a) และความหยาบพื้นผิว (b) ของลูกบอลเหล็กลูกล่าง กรณีปนเปื้อนขนาดอนุภาคเขม่าแตกต่างกัน



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

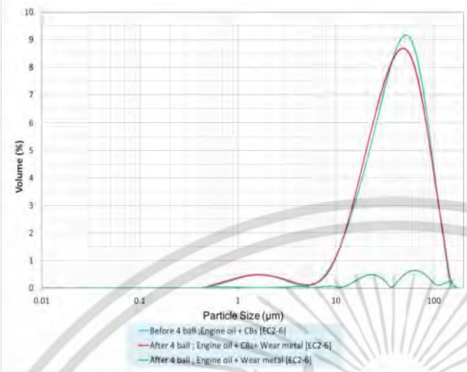
รูปที่ 9 เส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอ (a) และความหยาบพื้นผิว (b) ของลูกบอลเหล็กลูกล่าง กรณีปนเปื้อนปริมาณเขม่าแตกต่างกัน

รูปที่ 8 แสดงถึงเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอเฉลี่ย (Average WSD) มากกว่าน้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมคาร์บอนแบล็ค 36.3% แต่ความหยาบพื้นผิวเฉลี่ย (Average Roughness) ลดลง 26.75% รูปที่ 9 สำหรับกรณีผสมคาร์บอนแบล็คในน้ำมันหล่อลื่นที่ปริมาณแตกต่างกัน คือ 0.5, 1 และ 2% wt โดยใช้คาร์บอนแบล็ค N330 พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอเฉลี่ย (Average WSD) มากกว่าน้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมคาร์บอนแบล็ค 24.5% โดยน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ค (NE), ผสมคาร์บอนแบล็ค N330 0.5% (EC3-0.5%), ผสมคาร์บอนแบล็ค N330 1% (EC3-1%) และผสมคาร์บอนแบล็ค N330 2% (EC3-2%) มีเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอ (WSD) 621, 567, 860 และ 894 um ตามลำดับ สังเกตได้ว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมคาร์บอนแบล็ค N330 ปริมาณ 0.5% wt มี WSD น้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ค (NE) 54 um คิดเป็น 8.69% ที่ลดลง แต่ความหยาบพื้นผิวเฉลี่ย (Average Roughness) ลดลง 49.12% มีความหยาบพื้นผิว (Roughness) 2.28, 0.25, 1.49 และ 1.76 um ตามลำดับ สิ่งที่น่าสนใจคือตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมคาร์บอนแบล็ค N330 ปริมาณ 0.5% (EC3-0.5%) มีผลความหยาบพื้นผิวที่น้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ค (NE) อยู่ถึง 2.03 um คิดเป็น 89% ที่ลดลง

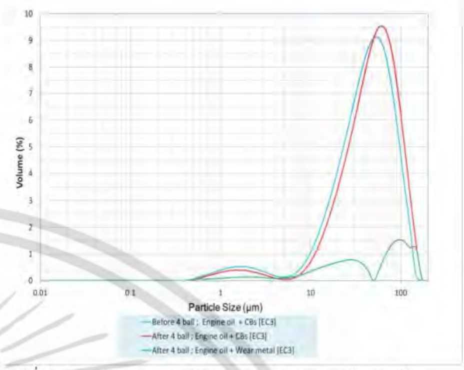
3.4 การกระจายตัวของอนุภาคเขม่าหลังการทดสอบโฟร์บอล

หลังจากทดสอบคุณสมบัติการต้านการสึกหรอของน้ำมันหล่อลื่นแล้ว พบว่าจากรูปที่ 4.10 แสดงถึงการเปรียบเทียบการกระจายตัวขนาดอนุภาคระหว่างก่อนและหลังการทดสอบโฟร์บอลในกรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คขนาดอนุภาคแตกต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่าการกระจายตัวขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็คเฉลี่ยก่อนการทดสอบโฟร์บอลจากตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็ค CB N220, N330, N550 และ N660 แสดงด้วยเส้นกราฟสีฟ้า ส่วนการกระจายตัวขนาดอนุภาคโลหะสึกหรอที่ปราศจากคาร์บอนแบล็คแสดงด้วยเส้นกราฟสีเขียว การกระจายตัวขนาดอนุภาคโลหะสึกหรอซึ่งมีคาร์บอนแบล็คปนเปื้อนเฉลี่ยหลังการทดสอบโฟร์บอลแสดงด้วยเส้นกราฟสีแดง ผลการทดสอบพบว่าการกระจายตัวขนาดอนุภาคเฉลี่ยก่อนและหลังการทดสอบโฟร์บอลพบอนุภาคในช่วง 0.5-170 um (เส้นกราฟสีฟ้าและสีแดง) ส่วนการกระจายตัวขนาดอนุภาคโลหะหลังการทดสอบโฟร์บอลพบขนาดอนุภาคโลหะในช่วง 3-36 um และ 36-170 um จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า ไม่น่าจะมีขนาดอนุภาคโลหะสึกหรอเล็กกว่า 3 um แสดงว่าขนาดอนุภาคที่อยู่ในช่วง 0.5-3 um ควรจะเป็นขนาดอนุภาคของคาร์บอนแบล็ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคโลหะสึกหรอในน้ำมันหล่อลื่นกรณีปนเปื้อนขนาดอนุภาคเขม่าแตกต่างกัน



รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคโลหะสึกหรอในน้ำมันหล่อลื่นกรณีปนเปื้อนปริมาณเขม่าแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.11 แสดงถึงการเปรียบเทียบการกระจายตัวขนาดอนุภาคระหว่างก่อนและหลังการทดสอบโฟร์บอลในกรณีน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณอนุภาคแตกต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่าการกระจายตัวขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็คเฉลี่ยก่อนการทดสอบโฟร์บอลจากตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็ค CB N330 ที่ปริมาณ 0.5, 1 และ 2% wt แสดงด้วยเส้นกราฟสีฟ้า ส่วนการกระจายตัวขนาดอนุภาคโลหะสึกหรอที่ปราศจากคาร์บอนแบล็คแสดงด้วยเส้นกราฟสีเขียว การกระจายตัวขนาดอนุภาคโลหะสึกหรอซึ่งมีคาร์บอนแบล็ค ปนเปื้อนเฉลี่ยหลังการทดสอบโฟร์บอลแสดงด้วยเส้นกราฟสีแดง ผลการทดสอบพบว่าการกระจายตัวขนาดอนุภาคเฉลี่ยก่อนและหลังการทดสอบโฟร์บอล พบอนุภาคในช่วง 0.5-170 um (เส้นกราฟสีฟ้าและสีแดง) ส่วนการกระจายตัวขนาดอนุภาคโลหะหลังการทดสอบโฟร์บอลพบขนาดอนุภาคโลหะในช่วง 0.5-50 um และ 50-170 um

3.5 การวิเคราะห์ภาพถ่ายรอยการสึกหรอของลูกบอลเหล็ก โดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

จากรูปที่ 4.12 แสดงถึงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบรอยสึกหรอของลูกบอลโลหะหลังการทดสอบโฟร์บอลกรณีน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนขนาดอนุภาคเขม่าแตกต่างกันจากตัวอย่าง (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่าและน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็คที่ปริมาณ 1% wt. ของ (b) N220, (c) N330, (d) N550, (e) N660

จากรูปที่ 4.13 แสดงถึงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบรอยสึกหรอของลูกบอลโลหะหลังการทดสอบโฟร์บอลกรณีน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนปริมาณเขม่าแตกต่างกันจากตัวอย่าง (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่าและน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็ค (b) N330 ที่ 0.5% wt. (c) N330 ที่ 1% wt. (d) N330 ที่ 2% wt.

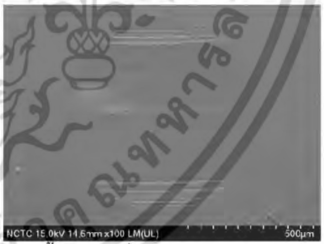
รูปที่ 4.14 แสดงถึงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่ากรณีน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนขนาดอนุภาคเขม่าแตกต่างกัน พบว่ารอยสึกหรอลูกบอลเหล็กจากตัวอย่าง (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า พบรอยสึกหรอเป็นร่องขนานไปตามทิศทางการเคลื่อนที่ของลูกบอลเหล็ก ซึ่งเป็นลักษณะการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) บางพื้นที่พบรอยการสึกหรอเป็นแบบผิวหน้าชิ้นงานฉีกขาดออกไป ซึ่งเป็นลักษณะการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) และบางพื้นที่พบรอยการสึกหรอแบบหลุม (Crack) บนผิวชิ้นงาน ซึ่งเป็นลักษณะการสึกหรอแบบล้าตัว (Fatique Wear) ซึ่งเกิดจากชิ้นงานรับแรงกดสลับกับแรงดึงซ้ำไปมา (b-e) แสดงถึงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) จากตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็ค 1% wt. ของ N220, N330, N550 และ N660 มีลักษณะการสึกหรอเป็นไปในรูปแบบเดียวกัน คือ มีลักษณะการสึกหรอแบบขูดขีดบริเวณด้านข้างของผิวสัมผัสตามทิศทางการเคลื่อนที่ของลูกบอลเหล็ก จากรูปคือด้านบนและด้านล่างของรอยการสึกหรอ (พื้นที่วงกลม) ลักษณะการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) ส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณตรงกลางของผิวสัมผัสตามแนวทิศทางการเลื่อนที่ของลูกบอลเหล็ก จากรูปคือบริเวณตรงกลางของรอยการสึกหรอ (พื้นที่รอยวงกลม) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่น้ำมันหล่อลื่นไม่สามารถที่จะเข้ามาหล่อลื่นในบริเวณนี้ได้มากนัก เพราะกลุ่มอนุภาคคาร์บอนแบล็คไปปิดกั้นไม่ให้น้ำมันหล่อลื่นเข้าไปในระหว่างผิวสัมผัส (Contact Zone) ของโลหะได้ ส่วนลักษณะการสึกหรอแบบล้าตัว (Fatique Wear) จะพบได้น้อยกว่าลักษณะการสึกหรอแบบขูดขีดและแบบยึดติด

รูปที่ 4.15 แสดงถึงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่ากรณีน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนปริมาณเขม่าแตกต่างกันพบว่ารอยสึกหรอลูกบอลเหล็ก (f) ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นผสมคาร์บอนแบล็ค 0.5% wt. ของ N330 พบว่ามีการสึกหรอที่น้อยที่สุดอย่างเห็นได้ชัด โดยมีลักษณะการสึกหรอแบบขูดขีดเป็นส่วนใหญ่ที่บริเวณตรงกลางของผิวสัมผัสตามทอศทางการเคลื่อนที่ของลูกบอลเหล็ก จะสังเกตได้ว่าตัวอย่างนี้ น้ำมันหล่อลื่นสามารถเข้าไปหล่อลื่นในบริเวณระหว่างผิวสัมผัสของโลหะได้มากกว่าตัวอย่าง c และ d จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสึกหรอได้น้อยกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง a คือ ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า พบว่ามีรอยการสึกหรอน้อยกว่าโดยเป็นลักษณะการสึกหรอแบบขูดขีดเช่นกัน อาจเนื่องจากเขม่าเข้าไปช่วยการกลิ้งระหว่างผิวสัมผัสของโลหะทำให้แรงเสียดทานน้อยกว่าจึงส่งผลให้การสึกหรอน้อยลงไปด้วย

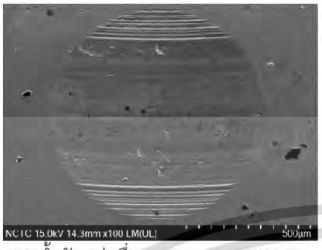
(a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมอนุภาคเขม่า



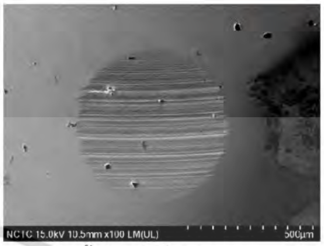
(b) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N220

จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

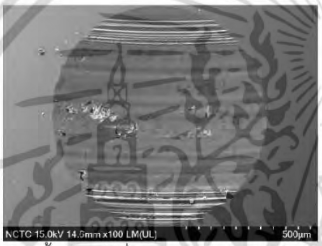
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



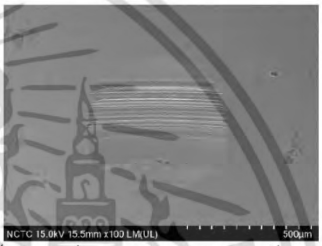
(c) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330



(a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมอนุภาคเขม่า



(d) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N550



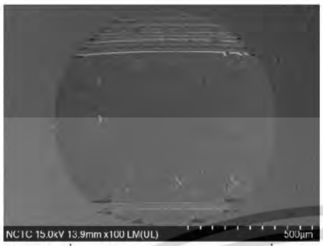
(b) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 0.5% wt.

(e) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N660

(c) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 1% wt.

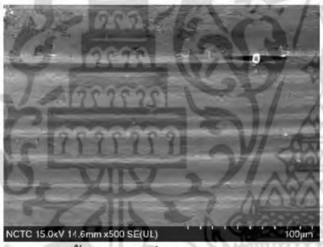
รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 100 เท่าของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่าและน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าที่ 1%wt ของ (b) CB N220, (c) CBN330, (d) CB N550, (e) CB N660

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

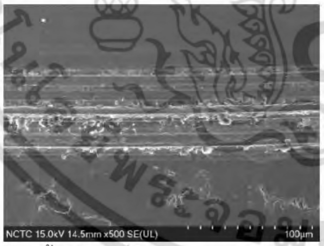


(d) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 2% wt.

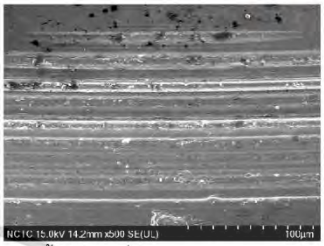
รูปที่ 4.13 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 100 เท่าของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่าและน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าของ
(b) CB N330-0.5%, (c) CB N330-1% และ
(d) CB N330-2%



(a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมอนุภาคเขม่า

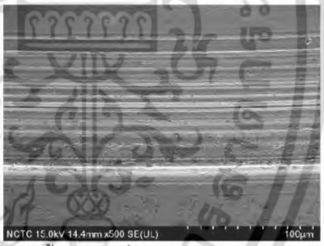


(b) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N220



(c) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330

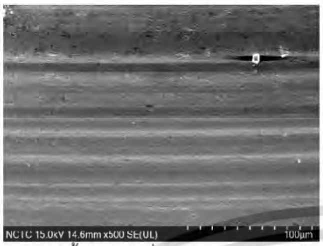
(d) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N550



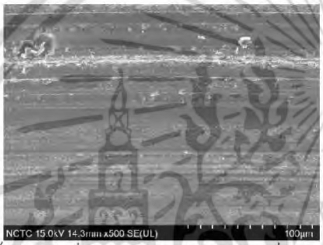
(e) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N660

รูปที่ 4.14 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่าของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่าและน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าที่ 1%wt ของ (b) CB N220, (c) CBN330, (d) CB N550, (e) CB N660

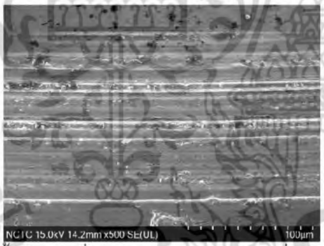
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



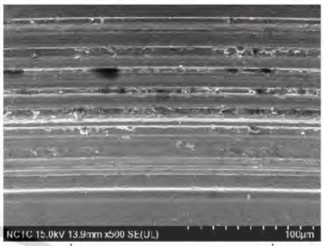
(a)น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมอนุภาคเขม่า



(b) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 0.5% wt.



(c) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 1% wt.



(d) น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาค CB N330 ที่ 2% wt.

รูปที่ 4.15 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่าของพื้นผิวลูกบอลเหล็กจาก (a) น้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมเขม่า และน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคเขม่าของ (b) CB N330-0.5%, (c) CB N330-1% และ (d) CB N330-2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สรุป

จากผลการทดสอบการสึกหรอของลูกบอลเหล็กในกรณีผสมคาร์บอนแบล็คที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกันในน้ำมันหล่อลื่นที่ปริมาณ 1%wt โดยใช้คาร์บอนแบล็ค N220, N330, N550 และ N660 พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอเฉลี่ย (Average WSD) มากกว่าน้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมคาร์บอนแบล็ค 36.3% แต่ความหยาบพื้นผิวเฉลี่ย (Average Roughness) ลดลง 26.75% สำหรับกรณีผสมคาร์บอนแบล็คในน้ำมันหล่อลื่นที่ปริมาณแตกต่างกัน คือ 0.5, 1 และ 2% wt โดยใช้คาร์บอนแบล็ค N330 พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอเฉลี่ย (Average WSD) มากกว่าน้ำมันหล่อลื่นไม่ผสมคาร์บอนแบล็ค 24.5% โดยน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ค (NE), ผสมคาร์บอนแบล็ค N330 0.5% (EC3-0.5%), ผสมคาร์บอนแบล็ค N330 1% (EC3-1%) และผสมคาร์บอนแบล็ค N330 2% (EC3-2%) มีเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอ (WSD) 621, 567, 860 และ 894 um ตามลำดับ สังเกตได้ว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมคาร์บอนแบล็ค N330 ปริมาณ 0.5% wt มี WSD น้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ค (NE) 54 um คิดเป็น 8.69% ที่ลดลง แต่ความหยาบพื้นผิวเฉลี่ย (Average Roughness) ลดลง 49.12% มีความหยาบพื้นผิว (Roughness) 2.28, 0.25, 1.49 และ 1.76 um ตามลำดับ สิ่งที่น่าสนใจคือตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมคาร์บอนแบล็ค N330 ปริมาณ 0.5% (EC3-0.5%) มีผลความหยาบพื้นผิวที่น้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ค (NE) อยู่ถึง 2.03 um คิดเป็น 89% ที่ลดลง อนุภาคเขม่าสามารถเพิ่มอัตราการสึกหรอ (Wear Rate) ของโลหะได้ เพราะมีขนาดที่มากกว่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำมัน (Oil Film Thickness) และมีความแข็ง (Hardness) มากกว่า

เอกสารอ้างอิง

[1] M. Guatam, K. Chitoor, M. Durbha, and J.C. Summers: Effect of Diesel Soot Contaminated Oil on Engine Wear Investigation of Novel Oil.

[2] AD H. Clague, J.B. Donnet, T.K. Wang, and J.C.M. Peng: A Comparison of Diesel Engine Soot with Carbon Black: Carbon, 30, p.1553-1565 (1999).

[3] A L. Rocca, G.D. Liberto, P.J. Shayler, and M.w. Fay: The Nanostructure of soot-in-oil Particles and Agglomerates from an Automotive Diesel Engine: Tribology International, 61, p.80-87 (2013).

[4] J.J. Truhan, J. Qu, and P.J. Blau: The Effect of Lubricating oil Condition on the Friction and Wear of Piston Ring and Cylinder Liner Materials in a Reciprocating Bench Test: Wear, 259, p.1048-1055 (2005).

[5] สุรพล ราษฎร์นุ้ย. วิศวกรรมการหล่อลื่นเบื้องต้น, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น

[6]http://www.insthai.com/thai/Brochure_InSThai_Thai

[7] P. Karin C. Supanamo K. Hanamura: IMPACT OF SOOT ON METAL WEAR CHARACTERISTICS USING LASER DIFFRACTION SPECTROSCOPY: Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering ,Vol. 4, No. 2, 126-134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายภัทระ ฉ่ำมะนา
วัน เดือน ปีเกิด 19 ตุลาคม 2526 ที่เพชรบุรี
ที่อยู่ 142/1 หมู่ 7 ถนนเพชรเกษม ตำบลท่ายาง อำเภอท่ายาง
จังหวัดเพชรบุรี 76130 โทร.087-8914019
ประวัติการศึกษา 2549 วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) การตรวจสอบและรับรองการจัดการพลังงานในโรงงานและอาคาร
2.) การจดทะเบียนเครื่องจักรตามพระราชบัญญัติจดทะเบียนเครื่องจักร
พ.ศ. 2514 และพระราชบัญญัติจดทะเบียนเครื่องจักร (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2530
3.) การประเมินราคาเครื่องจักร

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย
พ.ศ. 2550-2551 ตำแหน่งวิศวกรแผนกวิศวกรรมฝ่ายผลิต บริษัท มูราโมโต้ อิเล็คตรอน (ไทยแลนด์) จำกัด (สาขาบางพลี)
- ออกแบบ Jig and Fixture
- กำหนดหัวข้อการตรวจเช็ค (Check Sheet) Jig and Fixture
- ตรวจสอบและอำนวยการใช้เครื่องจักรประเภทเครื่อง Shearing
พ.ศ. 2552-2555 ตำแหน่งวิศวกรแผนกช่างกลโรงงานบริษัท ไอ.เอส.เอ แวลู จำกัด (สาขาบางบอน)
- อำนวยการใช้เครื่องจักรประเภทเครื่องลำเลียง
- ซ่อม/Overhaul เครื่องจักร
- ตรวจสอบและอำนวยการใช้ปั้นจั่นและอุปกรณ์ยก
- ดำเนินงานโครงการในเชิงวิศวกรรมของบริษัท
ปัจจุบัน วิศวกรปฏิบัติการ สำนักงานทะเบียนเครื่องจักรกลาง กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
- ตรวจสอบและพิจารณาคำขอจดทะเบียนกรรมสิทธิ์เครื่องจักร
- ตรวจสอบติดตามผลเกี่ยวกับเครื่องจักรที่จดทะเบียนแล้วให้เป็นไปตามกฎหมาย
- ประเมิณราคาเครื่องจักร
- แนะนำให้คำปรึกษาการบำรุงรักษาเครื่องจักร
- จัดทำฐานข้อมูลเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้