

การศึกษาการสึกหรอของเฟืองตรงที่หล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคนาโน

EFFECT OF NANOPARTICLE ADDITIVES ON
WEAR CHARACTERISTIC OF SPUR GEAR SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF NANOPARTICLE ADDITIVES ON
WEAR CHARACTERISTIC OF SPUR GEAR SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการสึกหรอของเฟืองตรงที่หล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคนาโน
EFFECT OF NANOPARTICLE ADDITIVES ON WEAR CHARACTERISTIC OF SPUR GEAR
SYSTEM

ผู้จัดทำ

- | | | |
|--------------------------|--------------|----------|
| 1. นาย ชานนท์ เจริญพานิช | รหัสประจำตัว | 53010358 |
| 2. นาย พงศ์โสภา สิทธิชัย | รหัสประจำตัว | 53011037 |
| 3. นาย ยุทธนา ขวัญใจ | รหัสประจำตัว | 53011319 |



(Handwritten signature)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการสึกหรอของเฟืองตรงที่หล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคนาโน

ชานนท์	เจริญพานิช	53010358
พงศัโสภา	สิทธิชัย	53011037
ยุทธนา	ขวัญใจ	53011319
รศ.ดร มงคล มงคลวงศ์โรจน์	อาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา 2556		

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อธิบายลักษณะการสึกหรอของเฟืองตรง ที่มีการหล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคนาโน จากแรงเสียดทานและการหล่อลื่นมีผลต่อลักษณะการสึกหรอของระบบต้นกำลังในเทคโนโลยีใหม่ จึงได้ทำการออกแบบและสร้างชุดทดลอง เพื่อทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด และการเติมอนุภาคนาโนที่ผสมในน้ำมันแร่เพื่อพัฒนาลักษณะการหล่อลื่นในสภาวะที่มีภาระโหลดสูง ทำการเปรียบเทียบผลระหว่างลักษณะการสึกหรอของระบบเกียร์ที่มีการเติมสารนาโนกับลักษณะการสึกหรอของระบบเกียร์ที่ไม่มีการเติมสารนาโน



EFFECT OF NANOPARTICLE ADDITIVES ON WEAR CHARACTERISTIC OF SPUR GEAR

Chanon Charoenpanich 53010358

Pongsopa Sittichai 53011037

Yutthana Khwanjai 53011319

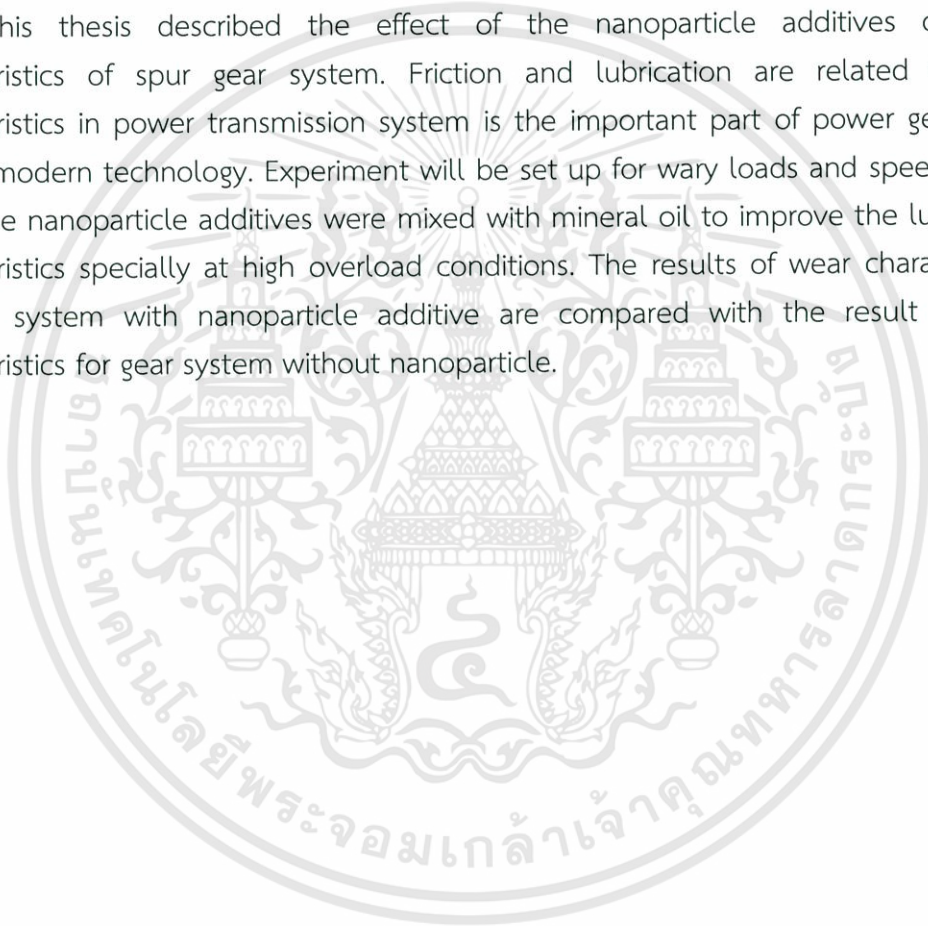
Assoc.Prof.Dr.Mongkol Mongkolwongrojn

Advisor

Year 2556

ABSTRACT

This thesis described the effect of the nanoparticle additives on wear characteristics of spur gear system. Friction and lubrication are related to wear characteristics in power transmission system is the important part of power generation units in modern technology. Experiment will be set up for vary loads and speed. In this study, the nanoparticle additives were mixed with mineral oil to improve the lubrication characteristics specially at high overload conditions. The results of wear characteristics for gear system with nanoparticle additive are compared with the result of wear characteristics for gear system without nanoparticle.



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาบุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จก็คือ รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสาทวิชาความรู้ทั้งมวลตลอดการศึกษาที่ผ่านมา และรศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำเทคนิคในด้านเครื่องมือช่างและการสร้างชุดทดลองนี้ขึ้น

ขอขอบคุณบริษัท เอเชีย เอ็นจิเนียริง (ประเทศไทย) จำกัด ที่เอื้อเฟื้อให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ และขอบคุณพี่พัทธ์ที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆในการทำโครงการนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ชานนท์
พงศ์โสภ
ยุทธนา

เจริญพานิช
สิทธิชัย
ขวัญใจ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	1
1.5 ขอบเขตการวิจัย	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับเฟืองตรง.....	6
3.1 โมเดลการสัทหรือของเฟืองตรง.....	8
3.2 ความเสียหายของเฟืองตรง.....	8
บทที่ 4 สารหล่อลื่น.....	12
4.1 การหล่อลื่นชิ้นงาน.....	12
4.2 ชนิดของสารหล่อลื่น.....	13
4.2.1 สารหล่อลื่นสถานะของเหลว.....	14
4.2.2 สารหล่อลื่นสถานะกึ่งของแข็ง.....	17
4.2.3 สารหล่อลื่นสถานะของแข็ง.....	17
4.3 น้ำมันหล่อลื่น.....	20
4.3.1 น้ำมันแร่.....	20
4.3.2 น้ำมันสังเคราะห์.....	21
4.4 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น.....	22
4.4.1 ความหนืด (Viscosity).....	22
4.4.2 ดัชนีความหนืด (Viscosity index).....	22
4.4.3 กากคาร์บอน (carbon residue).....	23
4.4.4 สี (Color)	23
4.4.5 ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (Density and gravity)	24
4.4.6 จุดวาบไฟและจุดติดไฟ (Flash and fire point)	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.7 จุดไหลเท (Pour point)	24
4.4.8 ตัวเลขความเป็นกลาง (Neutralization number)	24
4.5 สารเพิ่มคุณภาพ.....	25
4.5.1 สารลดจุดไหลเท (Pour point depressants)	25
4.5.2 สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (Viscosity index improvers)	25
4.5.3 สารป้องกันการเกิดฟอง (Defoamants)	26
4.5.4 สารป้องกันการออกซิเดชัน (Oxidation inhibitors)	26
4.5.5 สารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion inhibitors)	26
4.5.6 สารป้องกันสนิม (Rust inhibitors)	26
4.5.7 สารชะล้างและกระจายสิ่งสกปรก (Detergents and dispersants)	26
4.5.8 สารป้องกันการสึกหรอ (Antiwear additives)	27
บทที่ 5 การออกแบบและสร้างชุดทดลอง.....	28
5.1 การศึกษาลักษณะการทำงานของเครื่อง.....	28
5.2 การคำนวณและออกแบบทางกล.....	29
5.2.1 เฟือง.....	29
5.2.2 มอเตอร์.....	30
5.2.3 เพลา.....	31
5.3 ชุดทดลองและส่วนประกอบ.....	33
บทที่ 6 การทดลอง.....	35
6.1 วิธีการทดลอง.....	35
6.2 ผลการทดลอง.....	41
6.2.1 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง.....	41
6.2.2 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง.....	46
6.2.3 ระยะเวลาสึกหรอ.....	51
6.2.4 ลักษณะการสึกหรอ.....	56
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	60
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	60
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	60
เอกสารอ้างอิง.....	61
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลองน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป.....	62
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลองอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป.....	65
ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการทดลองระยะเวลาการสึกหรอที่เปลี่ยนแปลงไป.....	68

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติของเฟืองตรง.....	7
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยเฉลี่ย.....	13
4.2 ผลของส่วนผสมของน้ำมันปิโตรเลียมต่อคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น.....	14
4.3 ชนิดของน้ำมันหล่อลื่นแบ่งตามเบอร์ SAE.....	15
4.4 แสดงตัวอย่างการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารเติมแต่ง.....	16
4.5 สารเติมแต่งที่นิยมใช้.....	16
5.1 ข้อมูลลักษณะต่างๆของเฟืองตรงที่ทดสอบ.....	28
6.1 กรณีที่ทำการศึกษา.....	35

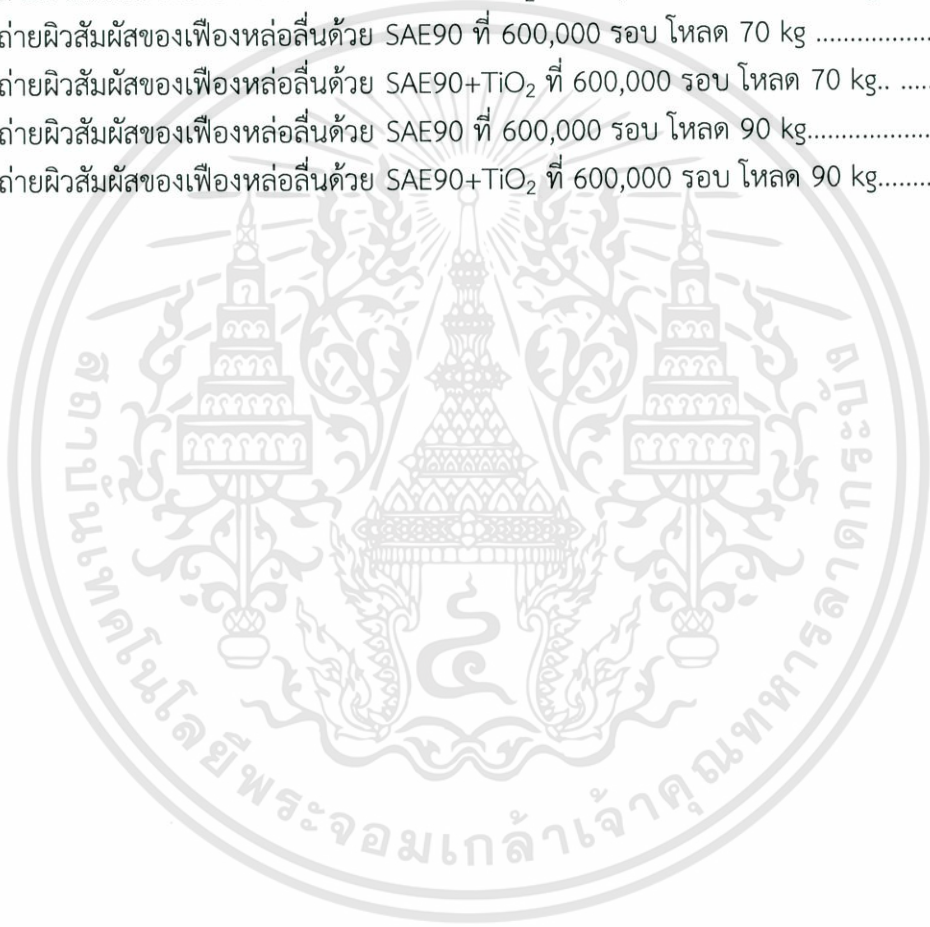


สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 ลักษณะรูปร่างอินโวลูตของเฟืองตรง.....	6
3.2 ลักษณะการขบกันของเฟืองตรง.....	7
3.3 ความเสียหายเนื่องจากความล้าของเฟืองตรง.....	9
3.4 ความเสียหายแบบ pitting ที่บริเวณ Flank ของเฟืองตรง.....	9
3.5 ความเสียหายแบบ spalling ที่บริเวณ Flank ของเฟืองตรง.....	10
3.6 ความเสียหายจากการสึกหรอของเฟืองตรง.....	10
3.7 ความเสียหายแบบ scuffing ของเฟืองตรง.....	11
4.1 รายละเอียดความหนืดตามมาตรฐานต่างๆ.....	23
5.1 ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบ Gear test rig.....	28
5.2 ภาพถ่ายเฟืองตรงที่ทำการทดสอบ.....	29
5.3 การออกแบบเครื่องทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	33
5.4 เครื่องทดสอบ Gear test rig	33
5.5 เครื่องทดสอบ Gear test rig (ด้านข้าง)	34
5.6 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องทดสอบ	34
6.1 ผงอนุภาคนาโน Titanium Dioxide.....	35
6.2 น้ำมันหล่อลื่นที่ทดสอบ (ก) น้ำมันหล่อลื่น SAE 90 ผสม TiO ₂ 0%wt ทดสอบ (ข) น้ำมันหล่อลื่น SAE 90 ผสม TiO ₂ 0.5%wt.....	36
6.3 การติดตั้งเฟืองและประกอบชุดทดลอง.....	36
6.4 การประกอบชุดทดลองและติดตั้งอ่างน้ำมัน.....	37
6.5 การเติมน้ำมันหล่อลื่นที่ทดลองลงไปอ่างน้ำมัน.....	37
6.6 การขบกันของเฟืองในอ่างน้ำมัน.....	38
6.7 การติดตั้งโหลดโดยการใส่ตุ้มน้ำหนัก.....	38
6.8 เครื่องชุดทดสอบที่ติดตั้งถูกต้อง.....	39
6.9 เครื่องชั่งดิจิทัลอลความละเอียด 0.01 กรัม.....	39
6.10 การตรวจระยะสึกหรอด้วยไดอัลเกจ.....	40
6.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบ หล่อลื่น SAE90 ที่โหลด 50 kg.	41
6.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบ หล่อลื่น SAE90+TiO ₂ ที่โหลด 50kg.....	41
6.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบ หล่อลื่น SAE90 ที่โหลด 70 kg	42
6.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบ หล่อลื่น SAE90+TiO ₂ ที่โหลด 70 kg	42

6.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบ หล่อลื่น SAE90 ที่ไหลต 90 kg.....	43
6.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบ หล่อลื่น SAE90+TiO ₂ ที่ไหลต 90 kg.....	43
6.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบของสารหล่อลื่น ที่ไหลต 50 kg.....	44
6.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบของสารหล่อลื่น ที่ไหลต 70 kg.....	44
6.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบของสารหล่อลื่น ที่ไหลต 90 kg.....	45
6.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบ 45	
6.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ ของ SAE90 ที่ไหลต 50 kg.....	46
6.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ ของ SAE90+TiO ₂ ที่ไหลต 50 kg.....	46
6.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ ของ SAE90 ที่ไหลต 70 kg.....	47
6.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ ของ SAE90+TiO ₂ ที่ไหลต 70 kg.....	47
6.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ ของ SAE90 ที่ไหลต 90 kg.....	48
6.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ ของ SAE90+TiO ₂ ที่ไหลต 90 kg.....	48
6.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ ที่ไหลต 50 kg.....	49
6.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ ที่ไหลต 70 kg.....	49
6.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ . ที่ไหลต 90 kg.....	50
6.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ.....	50
6.31 กราฟแสดงระยะสึกหรอกับตำแหน่งบนผิวหน้าเฟือง ที่หล่อลื่นด้วย SAE90 ที่ไหลต 50 kg.....	51
6.32 กราฟแสดงระยะสึกหรอกับตำแหน่งบนผิวหน้าเฟือง ที่หล่อลื่นด้วย SAE90+TiO ₂ ที่ไหลต 50 kg.....	51
6.33 กราฟแสดงระยะสึกหรอกับตำแหน่งบนผิวหน้าเฟือง ที่หล่อลื่นด้วย SAE90 ที่ไหลต 70 kg.....	52
6.34 กราฟแสดงระยะสึกหรอกับตำแหน่งบนผิวหน้าเฟือง ที่หล่อลื่นด้วย SAE90+TiO ₂ ที่ไหลต 70 kg.....	52

6.35 กราฟแสดงระยะสีทหรือกับตำแหน่งบนผิวหน้าเฟือง ที่หล่อลื่นด้วย SAE90 ที่โหลด 90 kg.....	53
6.36 กราฟแสดงระยะสีทหรือกับตำแหน่งบนผิวหน้าเฟือง ที่หล่อลื่นด้วย SAE90+TiO ₂ ที่โหลด 90 kg.....	53
6.37 กราฟแสดงระยะสีทหรือกับตำแหน่งบนผิวหน้าเฟือง ที่โหลด 50 kg.....	54
6.38 กราฟแสดงระยะสีทหรือกับตำแหน่งบนผิวหน้าเฟือง ที่โหลด 70 kg.....	54
6.39 กราฟแสดงระยะสีทหรือกับตำแหน่งบนผิวหน้าเฟือง ที่โหลด 90 kg.....	55
6.40 ภาพถ่ายผิวสัมผัสของเฟืองที่ 0 รอบ.....	56
6.41 ภาพถ่ายผิวสัมผัสของเฟืองหล่อลื่นด้วย SAE90 ที่ 600,000 รอบ โหลด 50 kg.....	56
6.42 ภาพถ่ายผิวสัมผัสของเฟืองหล่อลื่นด้วย SAE90+TiO ₂ ที่ 600,000 รอบ โหลด 50 kg	57
6.43 ภาพถ่ายผิวสัมผัสของเฟืองหล่อลื่นด้วย SAE90 ที่ 600,000 รอบ โหลด 70 kg	57
6.44 ภาพถ่ายผิวสัมผัสของเฟืองหล่อลื่นด้วย SAE90+TiO ₂ ที่ 600,000 รอบ โหลด 70 kg..	58
6.45 ภาพถ่ายผิวสัมผัสของเฟืองหล่อลื่นด้วย SAE90 ที่ 600,000 รอบ โหลด 90 kg.....	58
6.46 ภาพถ่ายผิวสัมผัสของเฟืองหล่อลื่นด้วย SAE90+TiO ₂ ที่ 600,000 รอบ โหลด 90 kg.....	59



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เฟืองตรงเป็นชิ้นอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายโอนพลังงานผ่านผิวสัมผัสของฟันเฟือง การทำงานภายใต้ภาระโหลดที่สูงส่งผลให้เกิดความเสียหายกับเฟืองตรงเป็นอย่างมาก การหล่อลื่นจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีส่วนช่วยในการลดการสึกหรอ สารหล่อลื่นเป็นปัจจัยหลักที่ช่วยลดแรงเสียดทานและลดการสึกหรอ ดังนั้นการดูแลเรื่องการหล่อลื่นและบำรุงรักษาอย่างถูกวิธี สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับผิวสัมผัสของฟันเฟือง ยืดอายุการใช้งานและลดค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์ของเครื่องจักรที่เสียหายหรือการซ่อมบำรุง

ในปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีได้มีการพัฒนาไปอย่างมาก อนุภาคนาโนหลายชนิดถูกนำมาผสมกับน้ำมันหล่อลื่นเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องจักร เนื่องจากอนุภาคนาโนมีคุณสมบัติช่วยในการลดแรงเสียดทานและลดการสึกหรอ

ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการสร้างชุดทดลองเพื่อที่จะศึกษาการสึกหรอของเฟืองตรงที่หล่อลื่นโดยใช้น้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคนาโน เพื่อช่วยการเพิ่มประสิทธิภาพของการหล่อลื่นชิ้นส่วนของเฟืองตรงให้ดีขึ้นภายใต้ภาระโหลดที่กระทำสูง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งศึกษาการสึกหรอของเฟืองตรงที่หล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคนาโน

1.2.1 เพื่อทำการออกแบบและสร้างชุดทดลองขึ้นเพื่อหาความสามารถทางด้านแรงเสียดทานและลดการสึกหรอสารหล่อลื่น

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของของสารหล่อลื่นที่ผสมสารเพิ่มคุณภาพต่อการสึกหรอ

1.2.3 เพื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะการสึกหรอของเฟืองตรงที่หล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่นผสมอนุภาคนาโนกับลักษณะการสึกหรอของเฟืองตรงที่หล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่นปราศจากอนุภาคนาโน

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การเติมอนุภาคนาโนลงไปในน้ำมันหล่อลื่นช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างฟิล์มน้ำมันกับพื้นผิวของวัสดุที่พอที่ฟิล์มน้ำมันนี้จะติดกับพื้นผิว ทำให้ความเหนียวภายในของฟิล์มน้ำมันมีขนาดใหญ่พอที่ฟิล์มน้ำมันจะไม่แยกออก อนุภาคนาโนมีขนาดเล็กมากสามารถเข้าถึงพื้นที่สัมผัสแรงเสียดทานได้งานจึงทำให้โครงสร้างราบเรียบช่วยให้การหล่อลื่นดีขึ้นและมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดี จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหล่อลื่นของเฟืองตรงดีขึ้นและ ช่วยให้การเคลื่อนแบบสไลด์ที่ดีขึ้น ลดแรงเสียดทานลดการเกิดความเสียหายบนพื้นผิวหรือลดการสึกหรอ ภายใต้ภาระโหลดที่สูง

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

เฟืองเป็นส่วนที่ในการส่งผ่านกำลังและเคลื่อนที่แบบหมุน เพื่อให้การส่งผ่านความเร็วรอบระหว่างตัวขับและตัวตามเป็นไปอย่างราบเรียบไม่เกิดการกระแทกหรือการเสียดกัน กำลังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานที่ส่งผ่านระหว่างเฟืองแต่ละคู่และความเร็วรอบยังมีความสัมพันธ์กับจำนวนฟันอีกด้วย และเมื่อเฟืองคบกัันจะมีจุดที่เฟืองทั้งคู่สัมผัสกันตลอดเวลาซึ่งเรียกว่า "จุดพิช" (Pitch point)

โมเดลการสึกหรอของเฟืองตรง American Society of Testing and Materials (ASTM) ได้ให้นิยามคำว่า "Wear" หรือการสึกหรอคือการสูญเสียเนื้อวัสดุที่ผิว (Loss of surface material) จากคำนิยามนี้จะเห็นได้ว่ากระบวนการที่ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุที่ผิวนั้นเกิดขึ้นได้จากหลายกระบวนการซึ่งแต่ละกระบวนการก็มีองค์ประกอบและปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การสึกหรอสามารถแบ่งออกได้ 3 กลุ่มคือ 1) ปัจจัยด้านการใช้งาน (Operation parameter) อันได้แก่ ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว ลักษณะการสัมผัส แรงกระทำ ความเร็วในการถูหรือกลิ้ง สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 2) ปัจจัยด้านวัสดุ อันได้แก่ ความแข็ง ความเหนียว ความต้านทานแรงดึง ความสามารถในการชุบแข็ง มอดูลัสของความยืดหยุ่น โครงสร้าง ชนิดและความหนาของสารหล่อลื่น คุณสมบัติด้านความร้อน และ 3) ปัจจัยแวดล้อม อันได้แก่ ชนิดและปริมาณสารหล่อลื่น ชนิดและปริมาณเศษสิ่งสกปรก (Dirt and Debris) ความแข็งแรงของโครงสร้างที่รองรับ อุณหภูมิ ความต่อเนื่องของการสัมผัส ระยะพิชัดผิวหรือความตรง ศูนย์ ความเหมาะสมของคู่วัสดุที่สัมผัสกัน Archard ได้แบ่งประเภทการสึกหรอของโลหะในสภาวะไม่มีการหล่อลื่นออกเป็น 2 ประเภทคือ 1) การสึกหรอแบบไม่รุนแรง (Mild wear) เมื่อผิวสัมผัสขัดสีกันและมีอัตราการสึกหรอต่ำ 2) การสึกหรอแบบรุนแรง (Severe wear) เมื่อผิวสัมผัสเกิดความเสียหายและอัตราการสึกหรอเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในการคำนวณปริมาตรของผิววัสดุที่หายไปเนื่องจากการสึกหรอของผิวที่มีความแข็ง Hv ภายใต้แรงกระทำ F และระยะทางการเคลื่อนที่ S

สารหล่อลื่นที่ใช้ในระบบการหล่อลื่นจะทำหน้าที่หลักใหญ่ๆ สองประการคือ ทำหน้าที่ลดหรือควบคุมแรงเสียดทาน ประการที่สอง ช่วยลดการสึกหรอที่ผิวชิ้นงานระหว่างชิ้นงานที่มีการหมุนหรือการเคลื่อนที่ ในการออกแบบระบบการหล่อลื่นและการเลือกสารหล่อลื่น จะต้องพิจารณาถึง 1. ระยะห่างระหว่างผิวชิ้นงาน 2. แรงกระทำบนผิวชิ้นงาน 3. คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของผิวชิ้นงาน ดังนั้นแพคเตอร์ทั้งสามตัวนี้จะเป็นการกำหนดชนิดของการหล่อลื่นซึ่งการหล่อลื่นโดยทั่วไปจะแบ่งเป็นสองชนิดคือ 1. การหล่อลื่นที่มีฟิล์มของไหลหนาหรือการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์เป็นชนิดของการหล่อลื่นที่ผิวชิ้นงานมีสารหล่อลื่นหนา ดังนั้นสมรรถนะของการหล่อลื่นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่นเป็นหลัก 2. การหล่อลื่นแบบเบาดารี เป็นชนิดของการหล่อลื่นที่ผิวชิ้นงานมีสารหล่อลื่นคั่นอยู่เพียงหนึ่งถึงสองโมเลกุลเท่านั้น ดังนั้นสมรรถนะของการหล่อลื่นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่นและคุณสมบัติของผิวชิ้นงาน

สารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน โดยทั่วไปเป็นสารประกอบทางเคมี ซึ่งใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายตัว สารเพิ่มคุณภาพแต่ละตัวมีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเฉพาะอย่างโดยพอที่จะแบ่งตามผลที่มีต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานออกได้เป็น 3 พวก คือ

1. สารเพิ่มคุณภาพที่ให้คุณสมบัติใหม่ที่เป็นประโยชน์ต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน
2. สารเพิ่มคุณภาพที่ปรับปรุงคุณสมบัติที่มีอยู่แล้วให้ดีขึ้น
3. สารเพิ่มคุณภาพที่ทำหน้าที่ในการลดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการซึ่งขึ้นในช่วงการทำงาน

การที่จะเติมสารเพิ่มคุณภาพตัวใดและจำนวนเท่าใดลงไป ในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการนำไปใช้งาน โดยจะต้องคำนึงถึงผลข้างเคียงที่เกิดขึ้นด้วย เนื่องจากสารเพิ่มคุณภาพบางตัวแม้ว่าจะทำให้คุณสมบัติประการใดประการหนึ่งดีขึ้นแต่ก็อาจจะทำให้คุณสมบัติประการอื่นเสื่อมลงไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าใส่เข้าไปมากเกินไปหรือถ้าสารเพิ่มคุณภาพนั้นไปทำปฏิกิริยากับสารเพิ่มคุณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละตัวจึงต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ น้ำมันหล่อลื่นทำงานได้อย่างดีที่สุดและจะต้องมีการทดสอบให้แน่ใจว่าไม่มีผลข้างเคียงที่ไม่ต้องการเกิดขึ้น ซึ่งในกรณีต่างๆไปจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเติมสารเพิ่มคุณภาพเข้าไปอีก น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่อเติมสารเพิ่มคุณภาพเข้าไปแล้วก็จะเรียกว่า น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป ซึ่งบริษัทผู้ผลิตแต่ละรายมักจะตั้งชื่อเฉพาะของแต่ละผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมา

คุณสมบัติของอนุภาคนาโนในการหล่อลื่น คือ

1.4.1 ทำให้ระดับของการยึดเกาะระหว่างฟิล์มน้ำมันกับพื้นผิวของวัสดุที่พอลิฟิล์มน้ำมันนี้จะติดกับพื้นผิว [1]

1.4.2 ทำให้ความเหนียวภายในของฟิล์มน้ำมันมีขนาดใหญ่พอที่ฟิล์มน้ำมันจะไม่แยกออก [1]

1.4.3 อนุภาคนาโนมีขนาดเล็กมากสามารถเข้าถึงพื้นที่สัมผัสแรงเสียดทานได้งานจึงทำให้โครงสร้างราบเรียบช่วยให้การหล่อลื่นดีขึ้น [1]

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงคุณลักษณะการสึกหรอของเฟืองตรงที่มีการหล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมอนุภาคนาโนและทำการศึกษาเปรียบเทียบกับ การสึกหรอของเฟืองตรงที่มีการหล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่นที่ปราศจากอนุภาคนาโน สารหล่อลื่นที่นำมาทดลองจะใช้น้ำมันเกียร์ (SAE 90) และน้ำมันเกียร์ (SAE 90) ที่ผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) 0.5% ของน้ำหนักทั้งหมด เฟืองตรงที่ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาการสึกหรอจะใช้เฟืองสำเร็จรูปที่มีโปรไฟล์เป็นแบบอินโวลูต มีมุมความดัน (Pressure angle) เท่ากับ 20 องศาและโมดูล (Module) เท่ากับ 4 จำนวนฟันของเฟืองเท่ากับ 15 ฟันและความกว้างของฟันเท่ากับ 1 นิ้ว อัตราทด (Gear ratio) 1:1 ทำการศึกษาผลกระทบของโหลด 3 ค่าคือ 50 , 70 , 90 กิโลกรัม ความเร็วรอบที่ใช้ในการศึกษาคือ 142 รอบต่อนาที จำนวนรอบที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมดคือ 600,000 รอบ

โดยทำการบันทึกค่าผลที่ได้การทดลอง 3 ค่าคือ

- 1.วิธีการตรวจสอบวัดการสึกหรอใช้ชั่งน้ำหนักที่สูญหายไป (weight loss) โดยใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.01 กรัม
- 2.การวัดอุณหภูมิของสารหล่อลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปที่จำนวนรอบการทดลองต่างๆ
- 3.ภาพตรวจสอบระยะการสึกหรอโดยใช้ไดอัลเกจ
- 4.การตรวจสอบลักษณะการสึกหรอด้วยภาพถ่าย

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ในการศึกษานี้ทำการทดสอบการสึกหรอของเฟืองตรงโดยการทดสอบเฟืองเป็นคู่ๆบนเครื่องทดสอบการสึกหรอที่ออกแบบและจัดทำขึ้น ในการทดสอบนี้มีได้ทำการควบคุมความเร็วรอบคงที่วิธีการทดลอง

- 1.ทำการประกอบติดตั้งชุดทดลองและต้องทำการตั้งศูนย์ให้หน้าเฟืองขบกันพอดีก่อนการทดลองทุกครั้งที่มีการติดตั้งเฟือง จากนั้นประกอบชุดทดลองและเติมน้ำมันหล่อลื่นที่จะทดลองลงในอ่างน้ำมัน ทำการตรวจสอบการรั่วซึมของอ่างน้ำมันและติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆให้เรียบร้อย
- 2.เปิดสวิตช์เพื่อให้ชุดทดลองทำงาน
- 3.ทำการติดตั้งโหลดที่ให้กับชุดเฟืองโดยการเพิ่มตุ้มน้ำหนักลงบนปลายด้านหนึ่งของชุดเบรคสายพานแบน (Band brake) และทำการตรวจค่าที่อ่านได้จากตาชั่งสปริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4.เมื่อทำการทดลองเมื่อครบจำนวน 200,000 รอบ ทำการวัดอุณหภูมิของน้ำมัน
- 5.ปิดสวิตช์เพื่อหยุดชุดทดลอง
- 6.นำน้ำมันออก ถอดโพลต์และชุดทดลอง จากนั้นนำเฟืองที่ทดสอบออกจากอ่างน้ำมันและทำความสะอาดเฟือง
- 7.จากนั้นนำมาซึ่งหาน้ำหนักที่สูญหายไป วัดความสึกหรอเฉลี่ยและทำการเก็บบันทึกข้อมูล
- 8.ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 จนครบจำนวนทั้งหมด 600,000 รอบ และทำการเก็บบันทึกข้อมูล
- 9.ทำการเปลี่ยนแปลงแรงบิดโพลต์ที่กระทำและทำตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 7
- 10.ทำการเติมสารอนุภาคนาโน(TiO_2)0.5%ลงในน้ำมันหล่อลื่นทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 7 และทำการเก็บบันทึกข้อมูล
- 11.นำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์และทำการเปรียบเทียบลักษณะการสึกหรอของเฟือง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเกี่ยวกับเรื่องเฟืองซึ่งเป็นแขนงหนึ่งของกลศาสตร์ของแข็งที่มีผู้ทำการศึกษาและวิจัยด้านนี้อยู่ไม่น้อย ปัญหาด้าน Contact การศึกษาการเกิดความเสียหายแบบต่างๆและการสึกหรอนั้นเป็นปัญหาที่สามารถทำการแก้ไขได้โดยการใช้สารหล่อลื่นที่ดีสามารถช่วยลดการสึกหรอและความเสียหายได้ ในส่วนหนึ่ง จึงสนใจลักษณะการสึกหรอของเฟืองซึ่งมีการใช้สารหล่อลื่นชนิดต่างๆ การศึกษาและพัฒนาสารหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น เป็นต้น ในการศึกษาการพัฒนาสารหล่อลื่นสำหรับเฟืองนั้นมีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากการทำงานของเฟืองในระบบส่งกำลังส่งถ่ายบนผิวหน้าของเฟืองด้วยภาระโหลดสูงจึงทำให้เกิดการสึกหรอและเสียหายที่บริเวณ Contact surface อย่างมากและเป็นส่วนที่สัมผัสกันของเฟือง ซึ่งทำให้สามารถแบ่งลักษณะของการสัมผัสที่มีความเสียหายออกเป็น 2 แบบคือ การสัมผัสแบบ Stick เมื่อไม่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวสัมผัส นั่นคือ แรงในแนวเส้นสัมผัสน้อยกว่าแรงเสียดทานและการสัมผัสแบบ Slip เมื่อมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวสัมผัส นั่นคือ แรงในแนวเส้นสัมผัสเท่ากับแรงเสียดทานและมีทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ [1] อาจกล่าวได้ว่าการศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับปัญหาด้าน Contact นี้มีรากฐานมาจากผลงานของ Hertz ซึ่งได้เสนอสมการสำหรับการสัมผัสแบบไร้แรงเสียดทานของผิวสัมผัสที่มีโรไฟล์แบบวงรี (Ellipsoidal profile) ในปี คศ.1882 จนกระทั่งปัจจุบันสมการดังกล่าวก็ยังคงถูกใช้ในการออกแบบเกี่ยวกับ (Elastic contact)

การศึกษาเกี่ยวกับความเสียหายของเฟืองได้แก่ การศึกษาการเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าของผิวเฟือง การเสียหายเนื่องจากความล้าที่โคนฟัน การสึกหรอของเฟือง เป็นต้น ความเสียหายของผิวเฟืองยังไม่มีบทนิยามที่แน่ชัด B.R.Hohn และ K. Michaelis ทำการศึกษาเชิงทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิน้ำมันที่มีต่อการเสียหายของเฟือง โดยพิจารณาถึงความเสียหายด้าน การสึกหรอ การเกิด Scuffing และการเกิด Pitting [2]

การศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาสารหล่อลื่นได้มีการศึกษาหลายรูปแบบส่วนจะทดสอบแบบ Pin on disk, Disk on disk, Ring on ring, ซึ่งสารที่นิยมทำการศึกษาและวิจัย ได้แก่ TiO_2 CuO ZnO และ ZrO_2 เป็นต้น ซึ่งเป็นสารที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก A H Battez. R Gonzalez. J L Viesca. J E.Fernandez. J M D Fernandez. A Machado. R Chou. J Riba ได้ทำการศึกษาและทดสอบการสึกหรอแบบ Block on ring และพบว่าที่อัตราส่วนผสม 0.5%wt ของ ZnO ZrO_2 จะสามารถให้ลักษณะการสึกหรอที่ลดลงและมีความเสถียร แต่สำหรับ CuO จะให้ลักษณะการสึกหรอที่ลดลงและมีความเสถียรที่อัตราส่วนผสม 2.0%wt [6] S Ingole. A Charanpahari. A Kakade. S S Umare. D V Bhatt ได้ทำการศึกษาการสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่นโดยการทดสอบบนเครื่อง Pin on Disk โดยพบว่าสารหล่อลื่นที่ผสม TiO_2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ต่ำกว่า P25 และมีความเสถียรของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน [5] จากการศึกษาซึ่งเป็นสามารถทดสอบได้ตามหลักการและทฤษฎีแต่ยังสามารถอธิบายลักษณะการสึกของเฟืองตรงที่ใช้งานได้ จากการศึกษาของ H Chang. Z Y Li. M J Kao. K D Huang. H M Wu ทำการศึกษาคุณสมบัติของสารหล่อลื่นที่ผสมอนุภาคนาโน TiO_2 โดยศึกษา ลักษณะการสึกหรอของลูกสูบและกระบอกสูบที่มีการพ่นสารหล่อลื่นที่ผสมอนุภาคนาโน TiO_2 พบว่าอนุภาคนาโนสามารถช่วยลดอัตราการสึกหรอของผิวสัมผัสและช่วยลดความเสียหายที่เกิดจากความล้าของผิวหน้าผิวสัมผัสได้ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับเฟืองตรง

เฟืองเป็นชิ้นส่วนที่ใช้ในการส่งผ่านกำลังและการเคลื่อนที่แบบหมุน โดยติดอยู่กับเพลาส่งกำลัง โดยมีระยะห่างระหว่างเฟืองแต่ละตัวที่ค่อนข้างแน่นอน เฟืองมีลักษณะเป็นซี่ๆ ที่เรียกว่าฟันเฟือง (Teeth) ซึ่งมีรูปทรงที่มีลักษณะโค้งหรือโปรไฟล์แบบ อินโวลูต (Involute) เพื่อให้การส่งผ่านความเร็วรอบระหว่างตัวขับและตัวตามเป็นไปอย่างราบเรียบไม่เกิดการกระแทกหรือรบกวนระหว่างฟันแต่ละซี่ขณะขบกัน กำลังงานที่ส่งผ่านระหว่างเฟืองแต่ละคู่และความเร็วรอบยังมีความสัมพันธ์กับจำนวนฟันอีกด้วย เฟืองที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวางคือเฟืองตรงที่มีฟันแบบอินโวลูตความลึกเต็ม ลักษณะรูปร่างของเฟืองแบบนี้เป็นดังรูปที่ 3.1



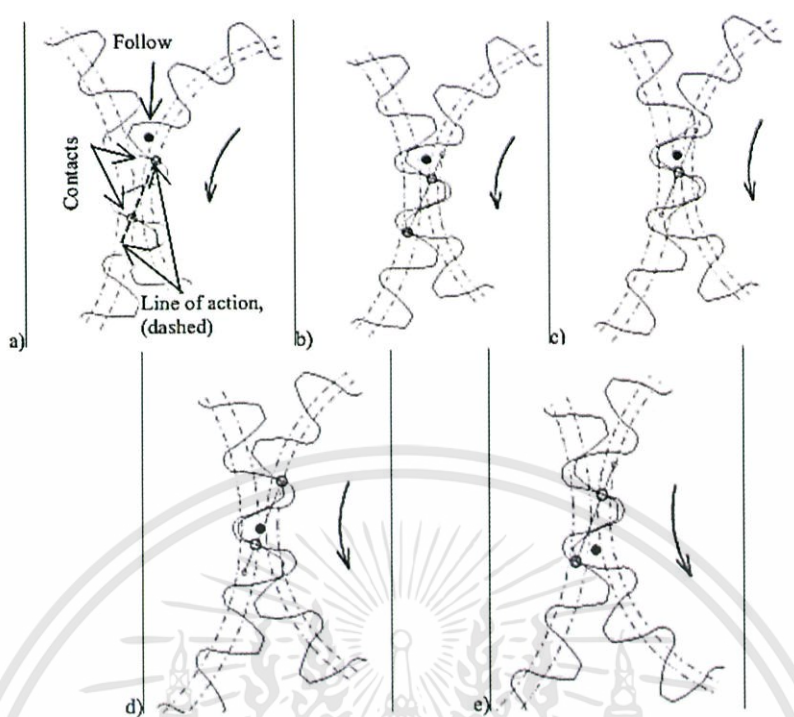
รูปที่ 3.1 ลักษณะรูปร่างอินโวลูตของเฟืองตรง

และเมื่อเฟืองตรงขบกันจะมีจุดที่เฟืองทั้งคู่สัมผัสกันตลอดเวลาซึ่งเรียกว่า “จุดพิช” (Pitch point) ลักษณะการขบกันของเฟืองเป็นดังรูปที่ 3.2 การระบุขนาดของเฟืองโดยทั่วไปสามารถทำได้ 3 แบบคือ 1) ใช้ค่าโมดูล (Module : m) ซึ่งเป็นแบบเมตริก 2) ใช้ค่า Diametral pitch : P และ 3) ใช้ค่า Circular pitch : p โดยแต่ละค่ามีความหมายและความสัมพันธ์กันดังนี้

$$m = d/N \tag{3.1}$$

$$P = N/d \tag{3.2}$$

$$p = \pi d/N = \pi m = \pi/P \tag{3.3}$$



รูปที่ 3.2 ลักษณะการขบกันของเฟืองตรง

และเนื่องจากในสมการ (3.1) นั้น d มีหน่วยเป็นนิ้ว ดังนั้นเมื่อทำเป็นหน่วยมิลลิเมตรจะได้ว่า

$$m = 25.4/P$$

(3.4)

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเฟืองตรง

Tooth proportions	Coarse Pitch (1-19.99 P) AGMA 201.02 August 1974 20 or 25 Full Depth	Fine Pitch (20-200 P) AGMA 207.06 November 1977 20 Full Depth
Addendum (a)	1.000 / P	1.000 / P
Dedendum (b)	1.250 / P	1.200 / P + 0.002 (min)
Clearance (c)	0.250 / P	0.200 / P + 0.002 (min)
Working depth (hk)	2.000 / P	2.000 / P
Whole depth (ht)	2.250 / P	2.200 / P + 0.002 (min)
Fillet radius of basic rack (rf)	0.300 / P	-
Tooth thickness (t)	1.5708 / P	1.5708 / P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 โมเดลการสึกหรอของเฟืองตรง

American Society of Testing and Materials (ASTM) ได้ให้นิยามคำว่า “Wear” หรือการสึกหรอคือการสูญเสียเนื้อวัสดุที่ผิว (Loss of surface material) จากคำนิยามนี้จะเห็นได้ว่ากระบวนการที่ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุที่ผิวนั้นเกิดขึ้นได้จากหลายกระบวนการซึ่งแต่ละกระบวนการก็มีองค์ประกอบและปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การสึกหรอสามารถแบ่งออกได้ 3 กลุ่มคือ 1) ปัจจัยด้านการใช้งาน (Operation parameter) อันได้แก่ ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว ลักษณะการสัมผัส แรงกระทำ ความเร็วในการถูหรือลื่น สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 2) ปัจจัยด้านวัสดุ อันได้แก่ ความแข็ง ความเหนียว ความต้านทานแรงดึง ความสามารถในการชุบแข็ง โมดูลัสของ ความยืดหยุ่น โครงสร้าง ชนิดและความหนาของสารหล่อลื่น คุณสมบัติด้านความร้อน และ 3) ปัจจัยแวดล้อม อันได้แก่ ชนิดและปริมาณสารหล่อลื่น ชนิดและปริมาณเศษสิ่งสกปรก (Dirt and Debris) ความแข็งเกร็งของโครง สร้างที่รองรับ อุณหภูมิ ความต่อเนื่องของการสัมผัส ระยะพิกัดเพื่อหรือความตรงศูนย์ ความเหมาะสมของคู่วัสดุที่สัมผัสกัน Archard ได้แบ่งประเภทการสึกหรอของโลหะในสภาวะไม่มีการหล่อลื่น ออกเป็น 2 ประเภทคือ 1) การสึกหรอแบบไม่รุนแรง (Mild wear) เมื่อผิวสัมผัสขัดสีกันและมีอัตราการสึกหรอต่ำ 2) การสึกหรอแบบรุนแรง (Severe wear) เมื่อผิวสัมผัสเกิดความเสียหายและอัตราการสึกหรอเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในการคำนวณปริมาตรของผิววัสดุที่หายไปเนื่องจากการสึกหรอของผิวที่มีความแข็ง H_v ภายใต้แรงกระทำ F และระยะทางการเคลื่อนที่ S

$$V = \frac{KFS}{3H_v} \quad (3.5)$$

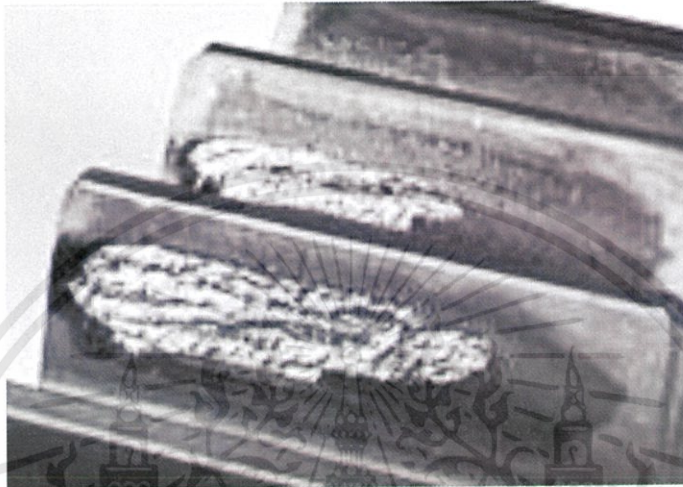
โดยที่ K คือค่าคงที่
จากสมการแรงตามแนวตั้งฉาก (Normal force)

$$W_n = \frac{W_t}{\cos\phi} \quad (3.6)$$

3.2 ความเสียหายของเฟืองตรง

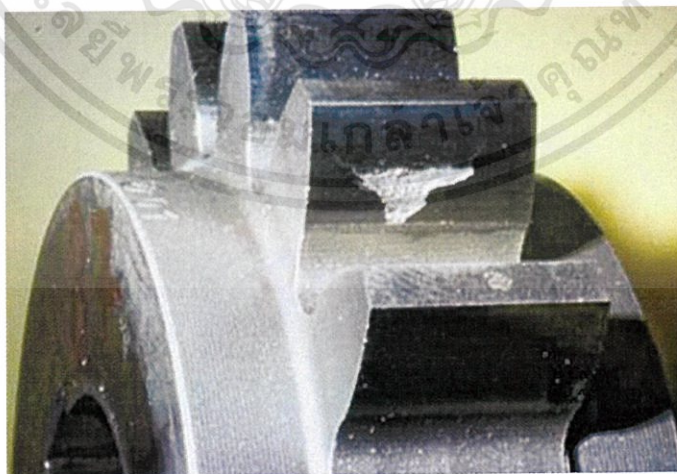
โดยทั่วไปแล้วความเสียหายที่เกิดกับเฟืองมักเกิดขึ้นที่บริเวณ 2 บริเวณ คือ 1) บริเวณโคนฟัน 2) บริเวณ Flank ความเสียหายที่เกิดบริเวณโคนฟันมักเป็นความเสียหายที่ไม่สามารถใช้งานเฟืองต่อไปได้อีก ได้แก่ 1.1) การแตกเนื่องจากการรับโหลดเกิน (Overload breakage) ซึ่งผิวแตก (Fractured surface) จะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุ กล่าวคือถ้าเป็นการแตกแบบเปราะ (Brittle fracture) ผิวแตกจะมีลักษณะค่อนข้างราบและหยาบ แต่หากเป็นการแตกแบบเหนียว (Ductile fracture) ผิวแตกจะมีลักษณะตะปุ่มตะป่ำเป็นซี่ๆ สาเหตุของการแตกแบบรับโหลดเกินคือความเค้นที่โคนฟันเกินค่าความแข็งแรงวัสดุ ซึ่งอาจเกิดได้เมื่อมีแรงบิดกระทำอย่างฉับพลันตอนเริ่มหมุนหรือหยุดหมุน หรือมีสิ่งแปลกปลอมเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างฟันเป็นต้น การป้องกันความเสียหายลักษณะนี้ได้แก่การใช้ Safety clutch หรือ ตัวจำกัดแรงบิดเป็นต้น 1.2) การแตกเนื่องจากความล้า (Fatigue breakage) ดังรูปที่ 3.5 ผิวแตกจะมีลักษณะเนียนละเอียดและมักจะพบเห็น “เส้นเนินทราย” (Beach mark) รอบๆจุดเริ่มต้นของ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแตกและอาจมีคราบสีน้ำตาลเนื่องจากการสึกกร่อน (Corrosion) ร่วมอยู่ด้วยก็ได้ สาเหตุสำคัญของความเสียหายลักษณะนี้คือ วัสดุที่ใช้ไม่เหมาะสม ขนาดฟันเฟืองไม่เหมาะสมกับการรับแรง ความไม่สม่ำเสมอของการสัมผัสระหว่างที่ขบกัน เช่นการสัมผัสไม่เต็มหน้าฟัน หรืออาจเกิดจากการชุบผิวแข็งที่ไม่ได้คุณภาพ โดยทั่วไปแล้วพบว่าถ้าหากเฟืองสามารถใช้งานได้ถึง 10^7 ครั้งของการหมุน ความเสียหายแบบนี้มักจะไม่มีเกิดขึ้น ส่วนความเสียหายที่เกิดบริเวณ Flank นั้นมักทำให้เกิดเสียงดัง การหมุนไม่ราบเรียบเกิดความร้อนสูง และนำไปสู่ความเสียหายของเฟืองอันในที่สุด



รูปที่ 3.3 ความเสียหายเนื่องจากความล่าของเฟืองตรง

ความเสียหายที่เกิดบริเวณ Flank ได้แก่ 2.1) การเกิดหลุม (Pitting) เป็นการหลุดร่อนของวัสดุที่ผิวบริเวณ Flank โดยมีลักษณะเป็นรูๆตรงบริเวณใกล้กับเส้นพิซดังรูปที่ 3.6 แต่ในบางครั้งพบว่าการสึกหรอของเฟืองที่มีความสม่ำเสมอบริเวณ Flank ก็อาจทำให้ Pitting ที่เกิดขึ้นในระยะเริ่มต้นหายไปได้เช่นกัน Pitting ทำให้ความหนาของเฟืองลดลงและอาจนำไปสู่ความเสียหายแบบความล่าได้ สาเหตุสำคัญของความเสียหายลักษณะนี้คือ ความเค้นกดที่ผิวฟันสูงกว่า Hertzian stress

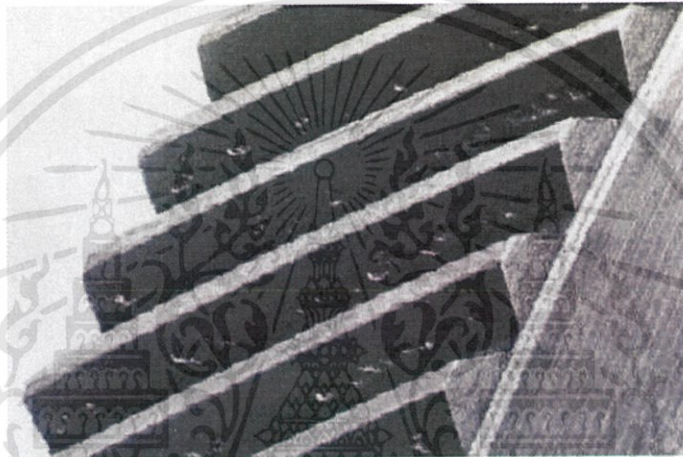


รูปที่ 3.4 ความเสียหายแบบ pitting ที่บริเวณ Flank ของเฟืองตรง

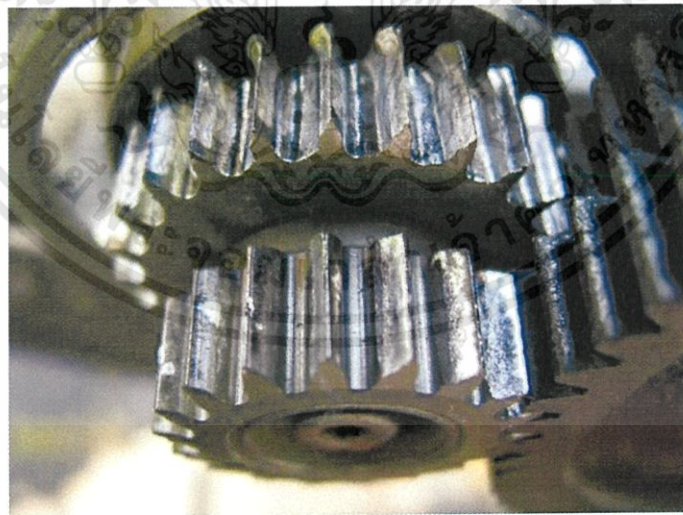
ตามสมการที่(3.22) ซึ่งมักเกิดกับเฟืองที่ไม่ได้ผ่านการชุบผิวแข็ง ความไม่สม่ำเสมอของแรงบิด ความไม่สม่ำเสมอของการสัมผัส ก็มีสาเหตุทำให้เกิดความเสียหายแบบนี้ได้เช่นกัน โดยทั่วไปแล้วพบว่าถ้าหากเฟือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถใช้งานได้ถึง 3×10^8 ครั้งของการหมุนความเสียหายแบบนี้มักจะไม่มีเกิดขึ้น การเกิด Pitting อาจสังเกตได้จากอาการเบื้องต้นคือการสั่นสะเทือนของเฟืองขณะใช้งาน การป้องกันความเสียหายลักษณะนี้ได้แก่การระมัดระวังในการ Machining การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม การตรวจสอบลักษณะการสัมผัสของคู่เฟืองก่อนการนำไปใช้งาน การให้สารหล่อลื่นที่มีสาร MoS_2 เป็นต้น 2.2) การเกิด (Spalling) ดังรูปที่ 3.4 เป็นความเสียหายที่มักเกิดกับเฟืองที่ผ่านการชุบผิวแข็งแบบ Case hardening และ Induction hardening โดยจะเกิดการหลุดเป็นสะเก็ดที่บริเวณ Flank สาเหตุของความเสียหายแบบนี้มักมาจากความบกพร่องของเนื้อวัสดุ (Material defect) ความบกพร่องของการ Machining การชุบผิวแข็งที่ไม่ได้คุณภาพ หรืออาจเกิดจากแรงเสียดทานสูงเนื่องจากใช้สารหล่อลื่นที่มีความหนืดต่ำก็ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า 100°C การป้องกันความเสียหายลักษณะนี้เช่นเดียวกับการป้องกันการเกิด Pitting 2.3)



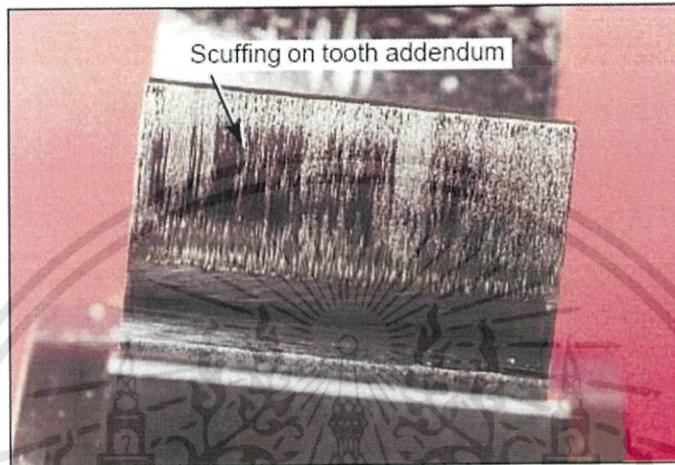
รูปที่ 3.5 ความเสียหายแบบ spalling ที่บริเวณ Flank ของเฟืองตรง



รูปที่ 3.6 ความเสียหายจากการสึกหรอของเฟืองตรง

การสึกหรอ ดังรูปที่ 3.6 เฟืองมีการสึกหรอในสภาพปกติระหว่างการใช้งานโดยสังเกตได้จากร่องรอยการ Machining จะหายไป แต่การสึกหรอแบบทำลายก็อาจเกิดขึ้นได้หากขาดสารหล่อลื่นหรือชนิดสารหล่อลื่นไม่เหมาะสม หรือความเร็วเชิงเส้นของการหมุนต่ำ เช่นต่ำกว่า 0.5 เมตรต่อนาที 2.4) การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิด Scuffing หรือ “Seizing”, “Scoring”, “Galling” ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งจะเกิดรอยยุบเป็นเส้นขึ้นก่อนแล้วติดตามด้วยการเกิดรอยคล้ายรอยข่วนโดยมีความลึกอยู่ในระหว่าง 3 ถึง 5 ไมครอน มักจะเกิดในบริเวณที่มีการเคลื่อนที่แบบถูมากที่สุดได้แก่ยอดฟันและโคนฟัน 2.5) การเกิด Plastic flow หรือ Plastic deformation ซึ่งจะเกิดขึ้นเนื่องจากมีสิ่งแปลกปลอมเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างฟัน ทำให้เกิดการเสียรูปที่อาจมีลักษณะแบนราบหรือเป็นคลื่นๆที่ Face ของเฟือง 2.6) การเกิด Surface crack หรือการเกิดรอยแตกเนื่องจาก



รูปที่ 3.7 ความเสียหายแบบ scuffing ของเฟืองตรง

การอบชุบทางความร้อนสูง (Quenching crack) จะเกิดรอยแตกเป็นแนวยาวบนผิวเนื่องจากความบกพร่องของความแข็ง มักจะเกิดกับวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนสูง เหล็กชุบผิวแข็งที่มีปริมาณอัลลอยด์สูง

บทที่ 4

สารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ใช้ในระบบการหล่อลื่นจะทำหน้าที่หลักใหญ่ๆ สองประการคือ ทำหน้าที่ลดหรือควบคุมแรงเสียดทาน ประการที่สอง ช่วยลดการสึกหรอที่ผิวชิ้นงานระหว่างชิ้นงานที่มีการหมุนหรือการเคลื่อนที่ ในการออกแบบระบบการหล่อลื่นและการเลือกสารหล่อลื่น จะต้องพิจารณาถึง

1. ระยะห่างระหว่างผิวชิ้นงาน
2. แรงกระทำบนผิวชิ้นงาน
3. คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของผิวชิ้นงาน

แฟกเตอร์ทั้งสามตัวนี้จะเป็นการกำหนดชนิดของการหล่อลื่นซึ่งการหล่อลื่นโดยทั่วไปจะแบ่งเป็นสองชนิดคือ

1. การหล่อลื่นที่มีฟิล์มของไหลหนาหรือการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์เป็นชนิดของการหล่อลื่นที่ผิวชิ้นงานมีสารหล่อลื่นหนา ดังนั้นสมรรถนะของการหล่อลื่นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่นเป็นหลัก
2. การหล่อลื่นแบบเบาดารี เป็นชนิดของการหล่อลื่นที่ผิวชิ้นงานมีสารหล่อลื่นคั่นอยู่เพียงหนึ่งถึงสองโมเลกุลเท่านั้น ดังนั้นสมรรถนะของการหล่อลื่นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่นและคุณสมบัติของผิวชิ้นงาน

4.1 การหล่อลื่นชิ้นงาน

การหล่อลื่นชิ้นงาน คือการแยกชิ้นงานออกจากกันด้วยฟิล์มสารหล่อลื่น ขณะผิวชิ้นงานสองชิ้นเคลื่อนไถลต่อกันด้วยความเร็วสัมพัทธ์ ฟิล์มสารหล่อลื่นจะถูกเขี่ยโดยผิวของชิ้นงานทั้งสองไม่เกิดความเสียหาย แต่ถ้าไม่มีฟิล์มหรือมีฟิล์มเฉพาะบางพื้นที่ผิว ผิวชิ้นงานจะเกิดการแตะสัมผัสกัน ทำให้ผิวของชิ้นงานเคลื่อนไถลกันระหว่างผิวโลหะทำให้เนื้อโลหะหลุดออกมา เกิดการสึกหรอของชิ้นงาน ดังนั้นการหล่อลื่นชิ้นงานสามารถลดการสึกหรอลงได้ทำให้เครื่องจักรมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น และทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ซึ่งจะทำให้เครื่องจักรมีขนาดเล็กลง เกิดการประหยัดและลดมลพิษ การหล่อลื่นจำเป็นต้องให้เกิดฟิล์มสารหล่อลื่นที่มีความหนาเพียงพอเพื่อไม่ให้เกิดการแตะกันของผิวโลหะขณะที่มีการเคลื่อนไถล การหล่อลื่นแบบนี้พบในการหล่อลื่นเพลากลม แผ่นรองลื่นรับแรงดูล เรียกรการหล่อลื่นแบบนี้ว่าการหล่อลื่นด้วยฟิล์มของไหล หรือการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก สารหล่อลื่นที่นิยมใช้มักจะเป็นน้ำมันหล่อลื่นแร่ น้ำ อากาศ หรือน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ ฯลฯ

จากเหตุผลที่ว่าอุตสาหกรรมได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เครื่องจักรเครื่องมือสมัยใหม่ได้ถูกพัฒนาให้ชิ้นงานมีความเที่ยงตรงสูง ความเร็วรอบสูง ทำให้การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกได้ถูกนำไปใช้ในการหล่อลื่นเรื่องจักรต่างๆ เช่น กังหันไอน้ำ กังหันแก๊ส เครื่องอัดอากาศเครื่องยนต์ และเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น การหล่อลื่นแบบแห้งและการหล่อลื่นแบบเบาดารี ซึ่งสารหล่อลื่นเป็นไขอาจเป็นจาระบีหรือไขมัน มักจะใช้ในงานที่มีความเร็วรอบต่ำ หรืองานที่ผิวชิ้นงานเคลื่อนไถลบนผิวชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งที่มีความเร็วสัมพัทธ์ต่ำ ซึ่งผิวที่เคลื่อนที่ไถลกันของผิวชิ้นงานอาจมีการหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ หรืออาจไม่มีสารหล่อลื่นเป็นผิวแห้งก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิชาการวิทยาศาสตร์การหล่อลื่น ได้เริ่มมีการศึกษาตั้งแต่ประมาณปี ค.ศ. 1785 นายคูลอมบ์ (Coulomb) ได้อธิบายปรากฏการณ์การเกิดความฝืดและยังได้อธิบายความแตกต่างของความฝืดสถิตและความฝืดจลน์ (Static friction and kinetic friction) ต่อมาในปี ค.ศ. 1866 นายเรโนลด์ (Reynold) ได้เขียนทฤษฎีการหล่อลื่นด้วยฟิล์มของไหลเป็นครั้งแรก ทำให้วิชาการทางด้านการหล่อลื่นได้ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว จนปัจจุบันวิชาการหล่อลื่นได้เป็นวิชาการที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่

4.2 ชนิดของสารหล่อลื่น

พฤติกรรมของการเคลื่อนไถลของผิวชิ้นงานจะขึ้นกับฟิล์มสารหล่อลื่นที่คั่นอยู่ระหว่างผิวของชิ้นงานทั้งสอง และสภาวะการทำงาน จากรูป 2-1 สำหรับกาบรองลื่นเพลากลมได้แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน f และค่าโดยที่ μ คือค่าความหนืดของสาร N คือความเร็วรอบของเพล และ P คือภาระที่กาบรองลื่นรับต่อพื้นที่ภาพฉาย เรียกว่าภาระจำเพาะ จากกราฟพบว่าที่ค่า $\mu N/P$ สูงๆ กาบรองลื่นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $\mu N/P$ และให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำซึ่งเป็นการหล่อลื่นแบบฟิล์มหนาหรือการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก เมื่อลดค่า $\mu N/P$ ลงจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะลดลงด้วยจนมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งเป็นการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง ในการหล่อลื่นแบบนี้ ถ้าลดค่า $\mu N/P$ ให้มีค่าต่ำลงไปอีกจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว การหล่อลื่นแบบนี้เรียกว่าการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง และถ้าลดค่า $\mu N/P$ ให้ต่ำลงไปอีก จากรูปพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และยังพบว่าฟิล์มสารหล่อลื่นบางส่วนจะถูกทำลายไป ซึ่งเรียกรการหล่อลื่นแบบนี้ว่า การหล่อลื่นแบบเบตารี ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยเฉลี่ยของการหล่อลื่นแบบต่างๆ ได้แสดงในตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยเฉลี่ย

ชนิดของสารหล่อลื่น	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	การสึกหรอ
ไม่มีการหล่อลื่น	1.0-2.0	การสึกหรอสูงมาก
การหล่อลื่นแบบเบตารี	0.05-0.15	การสึกหรอเล็กน้อย
การหล่อลื่นแบบฟิล์มหนา	0.001	ไม่มีการสึกหรอ

การหล่อลื่นแบบฟิล์มหนา เป็นการหล่อลื่นที่มีสารหล่อลื่นคั่นระหว่างผิวชิ้นงานหนาขณะที่ชิ้นงานเคลื่อนไถลกัน ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ ของสารหล่อลื่นเพียงอย่างเดียวไม่ขึ้นกับคุณสมบัติของผิวโลหะชิ้นงาน และไม่เกิดการสึกหรอ ดังนั้นจึงเป็นชนิดการหล่อลื่นที่ต้องการของผู้ออกแบบเครื่องจักรโดยทั่วไป

การหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง เป็นการหล่อลื่นที่มีสารหล่อลื่นเป็นฟิล์มบางๆคั่นระหว่างผิวของชิ้นงาน ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของผิวชิ้นงานและขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่น จากรูป 2-1 จะเห็นว่าการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางเมื่อค่า $\mu N/P$ มีค่าต่ำลงฟิล์มสารหล่อลื่นจะบางลงจนกระทั่งยอดขรุขระของผิวชิ้นงานแตะสัมผัสกัน แล้วค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะขึ้นอยู่กับความขรุขระของผิวชิ้นงาน คุณสมบัติโลหะชิ้นงาน และคุณสมบัติของสารหล่อลื่นที่ใช้ด้วย ในการหล่อลื่นแบบเบตารีจะพบว่าฟิล์มสารหล่อลื่นบางมาก ฟิล์มหนาตั้งแต่ 10-4 เซนติเมตร ถึงความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเท่ากับความหนาความหนาของโมเลกุลของสารหล่อลื่นเท่านั้น ถ้าชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานที่ความเร็วต่ำเกิดภาระเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้ฟิล์มสารหล่อลื่นบางกว่าความสูงของยอดขรุขระที่ผิวชิ้นงาน และถ้าผิวขรุขระนี้มีสารหล่อลื่นจับเป็นชั้นโมเลกุล สารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติที่ดีคือโมเลกุลของสารหล่อลื่นที่สามารถจับตัวเป็นลูกโซ่ยาวได้แก่ ไชครดน้ำมัน เมื่อใช้กับชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้า การหล่อลื่นแบบนี้จะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.1 เท่านั้น

สารหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมาย ซึ่งถ้าแบ่งตามสถานะจะแบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ ก๊าซของเหลว สารกึ่งแข็ง (Semi-solid) และของแข็ง ในจำนวนของสารหล่อลื่นทั้งหมดที่ใช้กัน สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กันมากที่สุด และรองลงมาคือ สารกึ่งแข็งซึ่งได้แก่ จาระบี เป็นต้น สารหล่อลื่นที่จะกล่าวต่อไป คือ สารหล่อลื่นสถานะของเหลว สารหล่อลื่นสถานะกึ่งของแข็ง สารหล่อลื่นสถานะของแข็ง

4.2.1 สารหล่อลื่นสถานะของเหลว

น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่นสถานะของเหลวที่ได้จากปิโตรเลียมและถ่านหิน โดยส่วนใหญ่ น้ำมันหล่อลื่นจะได้น้ำมันปิโตรเลียม ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะน้ำมันหล่อลื่นที่เป็นน้ำมันปิโตรเลียมเท่านั้น น้ำมันปิโตรเลียมเท่านั้น น้ำมันปิโตรเลียมดิบส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมของคาร์บอนอยู่ประมาณ 83-87% มีไฮโดรเจนประมาณ 11-14% และมีส่วนผสมอื่นๆ ได้แก่ กำมะถัน ออกซิเจน และไฮโดรเจน จะเห็นได้ว่าปิโตรเลียมดิบส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนและไฮโดรเจนการจับตัวของคาร์บอนและไฮโดรเจนจะสามารถจับตัวได้หลายๆแบบ ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติของน้ำมันแตกต่างกันไป สามารถแบ่งออกเป็น พาราฟิน (Paraffins) โอลีฟิน (Olefins) อะโรมาติก (Aromatics) แนฟทีน (Naphthen) และเอสพาเทิน (Asphaltens) ผู้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นปิโตรเลียมสามารถเลือกชนิดหรือแหล่งน้ำมันปิโตรเลียมดิบและกำหนดอัตราส่วนของน้ำมันดิบจากแหล่งน้ำมันดิบต่างๆ ในโลกปริมาณ 0-40% เพื่อให้ได้ น้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ น้ำมันปิโตรเลียมสามารถใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นได้เป็นอย่างดี เนื่องจากทำให้ผิวชิ้นงานที่มีน้ำมันหล่อลื่นเปียกเป็นชั้นน้ำมันขณะที่ชิ้นงานมีการเคลื่อนไถลถูกกัน น้ำมันปิโตรเลียมเป็นน้ำมันที่มีพิสัยความหนืดสูงสามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมได้ง่าย และน้ำมันปิโตรเลียมมีความหนืดเพิ่มขึ้นมากกว่าของไหลอื่นเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น ส่วนผสมชนิดของน้ำมันปิโตรเลียม เช่น ส่วนผสมของพาราฟิน อะโรมาติก และแนฟทีน จะส่งผลต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์อย่างมากตาม ตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลของส่วนผสมของน้ำมันปิโตรเลียมต่อคุณสมบัติของของน้ำมันหล่อลื่น

คุณสมบัติ	พาราฟิน	อะโรมาติก	แนฟทีน
ความหนาแน่น	ต่ำ	สูง	สูง
จุดวาบไฟ	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน	ต่ำ	สูง	ต่ำ
ดัชนีความหนืด	สูง	ต่ำ	ต่ำ

ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น คือ อัตราส่วนของค่าความเค้นเฉือนต่อความเครียดเฉือนของชั้นของน้ำมันหล่อลื่น โดยสมมติว่าน้ำมันหล่อลื่นเป็นของไหลนิวโตเนียน (Newtonian Fluid) ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นตัวกำหนดความสูญเสียพลังงานเนื่องจากความฝืด ประสิทธิภาพทางกลความร้อนที่เกิดขึ้น การไหลของน้ำมัน ภาระที่สามารถรับได้ และความสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักร เช่น การร่องลื่น หรือ เฟือง เป็นต้น

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ของน้ำมันหล่อลื่น จะทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าต่ำลงซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในทางปฏิบัติ สำหรับเครื่องยนต์ SAE ได้กำหนดน้ำมันหล่อลื่นตามค่าความหนืดที่อุณหภูมิที่กำหนดให้ ตามตาราง 4.3

ตารางที่ 4.3 ชนิดของน้ำมันหล่อลื่นแบ่งตามเบอร์ SAE

ดัชนีความหนืด (SAE)	ความหนืด ($\mu m^2/s$)			
	-17.8°C		99°C	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
5W	-	869	-	-
10W	1303	2606	-	-
20W	2066	10423	5.73	9.62
30W	-	-	9.62	12.93
40W	-	-	12.93	16.77
50W	-	-	16.77	22.68
75W	-	3257	-	-
80W	3257	21716	-	-
90W	-	-	14024	25.0
140W	-	-	25.0	42.7
250W	-	-	42.7	-

เนื่องจากอุณหภูมิทำให้ค่าความหนืดของน้ำมันเปลี่ยนไป กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าความหนืดจะลดลง การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืดได้แสดงด้วยดัชนีความหนืด (Viscosity Index) หรือ VI ค่า VI สูงแสดงว่าค่าความหนืดมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิน้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีค่า VI ต่ำ

เนื่องจากแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นจะทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนไปซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะมีผลต่อสมรรถนะของกาบรองลื่น เช่น ทำให้ภาวะที่สามารถรับได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ทำให้แรงเสียดทานและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งตรงข้ามกับการเพิ่มของอุณหภูมิ จะทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีค่าความหนืดลดลง ในทางปฏิบัติเมื่อเพิ่มแรงดันของน้ำมันหล่อลื่น 38 เท่าของความดันบรรยากาศ จะมีผลต่อค่าความหนืดเท่ากับลดอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นลง 1 °C

คุณสมบัติอื่นที่ควรพิจารณา ได้แก่ ความหนาแน่น ความดันไอ ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ ความสามารถในการดูดซับแก๊ส ความร้อนจำเพาะ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน จุดเยือกแข็ง เป็นต้น การใช้น้ำมันปิโตรเลียมเป็นน้ำมันหล่อลื่นมีข้อได้เปรียบที่สำคัญ คือ น้ำมันปิโตรเลียมมีส่วนผสมที่แตกต่างกันซึ่งจะทำให้สมบัติที่ต่างกัน ดังนั้นสามารถผสมหรือทำน้ำมันหล่อลื่นปิโตรเลียมให้มีคุณสมบัติตามความต้องการได้ไม่ยาก อย่างไรก็ตามน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของสารเติมแต่ง (Additive) เพื่อให้ให้น้ำมันที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับงานที่สุด รวมทั้งต้นทุนที่เหมาะสมด้วย เช่น น้ำมันหล่อลื่นของเครื่องทำความเย็น จะต้องไม่มีความหนืดไม่เป็นไขที่อุณหภูมิต่ำ น้ำมันหล่อลื่นกังหันจะต้องสามารถต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันเพื่อจะได้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงตัวอย่างการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารเติมแต่ง

ชนิดของน้ำมันที่การใช้งาน	ชนิดน้ำมันปิโตรเลียม	คุณสมบัติของสารเติมแต่ง
น้ำมันเครื่อง	พาราฟิน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน สามารถละลายสิ่งสกปรก เพิ่มดัชนีความหนืด ต้านทานการสึกหรอ ต้านทานการเกิดฟอง ต้านทานต่อการเกิดสนิม
น้ำมันหล่อลื่นกังหัน	พาราฟิน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานต่อการเกิดสนิม ต้านทานการสึกหรอ ต้านทานการเกิดฟอง
น้ำมันไฮดรอลิก	แน็พธีน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานการกัดกร่อน
น้ำมันหล่อลื่นเครื่องทำความเย็น	พาราฟิน แน็พธีน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานต่อการเกิดสนิม
น้ำมันเกียร์	พาราฟิน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ป้องกันการเกิดสนิม ต้านทานต่อการเกิดสนิม ต้านทานการเกิดฟอง เพิ่มความสามารถในการรับแรง

ตารางที่ 4.5 สารเติมแต่งที่นิยมใช้

คุณสมบัติของสารเติมแต่ง	สารเติมแต่งที่ใช้
สารเพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน	Phenolic amines, hindered phenols
สารเพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อน	Zinc dithiophosphates, sulfurized olefins
สารเพิ่มความในการละลายสิ่งสกปรก	Tricresyl phosphate, lead naphthenate
สารเพิ่มความต้านทานการเกิดสนิม	Calcium and barium sulfonates, phosphonates, Phenates, salicylates, polyimides, polyesters
สารเพิ่มคุณสมบัติดัชนีความหนืด	Polyisobutylenes, polyacrylates
สารเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มน้ำมัน	Chlorine-phosphorus, sulfur-containing oils and waxes, lead soaps
สารป้องกันการเกิดฟอง	Silicones, organic copolymers

4.2.2 สารหล่อลื่นสถานะกึ่งของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาระบีเป็นส่วนหล่อลื่นที่เป็นส่วนผสมของน้ำมันแร่กับสารเติมให้ข้น เช่น โลหะลิเทียมเหมือนสบู่ผสม หรืออาจจะเป็นน้ำมันสังเคราะห์ได้แก่ ซิลิคอน (Silicone) หรือ เอสเตอร์ (Esters) ผสมกับสารเติมข้น อาจจะเป็นดิน (Bentones) ซิลิกา คาร์บอนเบลค และ เทปลอน เป็นต้น

จาระบีเป็นของไหล Non-Newtonian คือ ให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือนไม่เชิงเส้น จาระบีได้ถูกนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นซึ่งมีทั้งข้อดีและข้อเสีย กล่าวคือ การใช้จาระบีเป็นสารหล่อลื่นมีข้อดี คือ สามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นที่มีความเร็วต่ำ ข้อเสีย คือ สามารถระบายความร้อนได้ต่ำ ไม่สามารถไหลพาเศษโลหะที่เกิดจากการสึกหรอออกจากคานรองลื่นได้หรือแผ่นรองลื่น จาระบีไม่เหมาะที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่นที่ความเร็วสูงๆ อย่างไรก็ตาม จาระบีสามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นตลับลูกปืนได้ ที่ความเร็วสูงถึง 100,000 รอบต่อนาที เป็นเวลานานถึง 100 ชั่วโมง

จาระบีมีส่วนผสมของลิเทียม (Lithium-base grease) เป็นจาระบีที่เป็นส่วนผสมของลิเทียม (Lithium soap) ซึ่งเป็นกรด 12-ไฮดรอกซิล (12-hydroxy acid) หรือไกลเซอร์ไรต์ (Glyceride) รวมกับกรดไขมัน (Fatty acid) จาระบีชนิดนี้จะให้ความเสถียรของแรงเฉือนดีมาก สามารถจับผิวชิ้นงานได้ดี สามารถใช้กับสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงได้ดี เป็นจาระบีที่นิยมใช้มากที่สุดในยานยนต์และอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่

จาระบีที่มีส่วนผสมของแคลเซียม (Calcium-base grease) มีลักษณะคล้ายเนย มีอุณหภูมิที่ทำให้จาระบีชนิดนี้เริ่มหยดตัวได้ (Dropping point) ที่ $66-104^{\circ}\text{C}$ ใช้เป็นสารหล่อลื่นเครื่องจักรที่มีความเร็วต่ำ มีการกัดกร่อนสูง เนื่องจากจาระบีชนิดนี้มีคุณสมบัติสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี

จาระบีที่มีส่วนผสมของโซเดียม (Sodium-base grease) เป็นจาระบีที่มีอุณหภูมิเริ่มหยดตัว (Dropping point) ที่ $121-232^{\circ}\text{C}$ โครงสร้างมีความเสถียรสูง มีความสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ไม่ดี แต่สามารถใช้กับงานที่มีความเร็วสูงได้เป็นอย่างดี

จาระบีที่มีส่วนผสมของแบเรียม (Barium-base grease) เป็นจาระบีที่มีอุณหภูมิเริ่มหยดตัวได้ (Dropping point) สูงมากจึงเหมาะสำหรับใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงๆ

จาระบีที่มีส่วนผสมของตะกั่ว (Lead-base grease) เป็นจาระบีที่ให้ความสามารถในการรับแรงอัดหรือแรงดันได้สูงจึงเหมาะสำหรับใช้ในการหล่อลื่นเฟือง จาระบีชนิดนี้มักจะมีส่วนผสมของ กำมะถัน (Sulfur) คลอไรด์ (Chloride) และฟอสฟอรัส (Phosphorus) เพื่อให้มีคุณสมบัติสามารถต้านทานต่อการออกซิเดชัน

จาระบีที่มีส่วนผสมของเบนโทน (Bentone-base grease) เป็นจาระบีที่มีคุณสมบัติสามารถต้านทานต่อน้ำ สามารถจับตัวกับผิวโลหะได้ดี ไม่มีอุณหภูมิเริ่มหยดตัวจึงเหมาะสมที่จะใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงมากๆได้

จาระบีสังเคราะห์ (Synthetic grease) เป็นจาระบีที่ได้จากการนำเอาของไหลสังเคราะห์ เช่น ซิลิคอน (Silicone) ไปผสมกับสารทำให้ข้น อนินทรีย์ ทำให้มีคุณสมบัติสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี ส่วนใหญ่จะใช้ในการหล่อลื่นเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรในเครื่องบิน

4.2.3 สารหล่อลื่นสถานะของแข็ง

สารหล่อลื่นสถานะของแข็งมักจะใช้กับงานอุตสาหกรรมที่สารหล่อลื่นสถานะของเหลวไม่สามารถใช้งานได้ เช่น งานอุตสาหกรรมที่มีอุณหภูมิสูงมากเกินไป หรือในงานที่เกิดความเค้นสูงที่ผิวชิ้นงานซึ่งสารหล่อลื่นสถานะของแข็งสามารถรับความเค้นได้มากกว่าสารหล่อลื่นสถานะของเหลว สารหล่อลื่นของแข็งยังมีข้อดีในการใช้งานเหนือกว่าสารหล่อลื่นสถานะของเหลว คือ ไม่จำเป็นต้องมีภาชนะบรรจุสารหล่อลื่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และไม่ต้องมีซีล (Seal) ที่ใช้ในการป้องกันการรั่วไหลของน้ำมันหล่อลื่น และยังสามารถป้องกันสิ่งสกปรกหรือสิ่งแปลกปลอมเข้าไปในระบบหล่อลื่น

สารหล่อลื่นสถานะของแข็งจำพวกผงยังใช้ผสมลงในน้ำมันหล่อลื่นจาระบีและแก๊สเพื่อช่วยในการหล่อลื่น สารหล่อลื่นสถานะของแข็งยังนิยมทำเป็นฟิล์มหรือชั้นของสารหล่อลื่นของแข็ง สมรรถนะของการหล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นของแข็งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผิวชิ้นงานและชนิดของสารหล่อลื่นของแข็ง จะเห็นว่าสารหล่อลื่นสถานะของแข็งไม่สามารถใช้ในงานทั่วไป แต่จะใช้เป็นสารหล่อลื่นกับงานประเภทที่มีสภาวะอุณหภูมิสูงมาก ๆ สภาวะต่ำมาก ๆ สภาวะสูญญากาศภายในสภาวะสูงมาก ๆ ในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีรุนแรงและในอุปกรณ์นิวเคลียร์

1. สารหล่อลื่นของแข็งชนิดผง (Particular)

สารหล่อลื่นมีลักษณะเป็นผงทำมาจากวัสดุอินทรีย์อาจจะใช้สารหล่อลื่นคั่นระหว่างชิ้นงานที่ต้องการหล่อลื่น หรืออาจจะใช้ผงสารหล่อลื่นผสมลงในสารหล่อลื่นสถานะของเหลว เช่น น้ำมันหล่อลื่นหรือจาระบี ผงสารหล่อลื่นอาจจะเป็น แกรไฟต์ โมลิตินัมไดซัลไฟด์ (Molybdenum disulfide) แทลค (Talc) ไมก้า (Mica) เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) เทฟลอน (Teflon) และเกลืออนินทรีย์อื่นๆ สารหล่อลื่นที่ได้กล่าวมานี้จะมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นที่ดี คือ มีโครงสร้างเป็นชั้น แลกทิส (Lattice)

สารหล่อลื่นของแข็งที่นิยมใช้กันมาก คือ แกรไฟต์และโมลิตินัมไดซัลไฟด์ มักจะทำเป็นผงใช้ผสมลงในสารหล่อลื่นอื่น เช่น น้ำหรือน้ำมันหล่อลื่น เป็นต้น บางครั้งอาจจะเติมเทฟลอนหรือผงตะกั่วเนื่องจากเทฟลอนและผงตะกั่วจะช่วยป้องกันหรือชะลอการจับตัวของชิ้นงาน เมื่อฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นถูกทำลายเนื่องจากรับภาระสูงเกินไปทำให้ผิวชิ้นงานร้อนจัดจะเกิดการจับติดกันของผิวชิ้นงาน

ปริมาณของสารหล่อลื่นของแข็งที่ใช้เติมลงในจาระบี หรือน้ำมันหล่อลื่นจะมีค่าประมาณตั้งแต่ 0.5-60% ตามปกติสำหรับงานทั่วไปจะใช้แกรไฟต์และโมลิตินัมไดซัลไฟด์ เป็นผงสารหล่อลื่นใช้เติมลงในจาระบีหรือน้ำมันหล่อลื่นประมาณ 5%

2. แกรไฟต์

แกรไฟต์สามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นได้อย่างดีเนื่องจากมีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้ คือ เป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือไม่เกิดออกซิเดชัน มีโครงสร้างเป็นแผ่นหรือชั้นจึงทำให้มีค่าความเค้นเฉือนต่ำหรือให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำเนื่องจากอะตอมที่จับตัวกันอย่างไม่ถูกตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อนทำให้เกิดแรงพันธะ แรงดึงดูดระหว่างอะตอมต่ำเกินไปจึงทำให้แกรไฟต์มีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงแตกหักง่าย มีทฤษฎีหนึ่งอธิบายว่าแก๊ส หรือ ไออนที่ถูกแกรไฟต์ดูดสะสมจะทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของชั้นแกรไฟต์สูงขึ้นเป็นผลทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ ทำให้มีคุณสมบัติที่ดีในการหล่อลื่น สารหล่อลื่นสถานะของแข็งได้แก่ แกรไฟต์ โมลิตินัมไดซัลไฟด์ โบรอนไนไตรด์ (Boron nitride) และ แทลค (Talc) จะมีโครงสร้างเป็นผลึกจับตัวกันทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ

ถึงแม้ว่าแกรไฟต์จะไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่สภาวะอุณหภูมิต่ำเหมือนโลหะ แต่แกรไฟต์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ที่อุณหภูมิสูง แกรไฟต์บริสุทธิ์จะสูญเสียน้ำหนักของมัน 1% ของน้ำหนักทั้งหมดในเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 520-560 °C ในอากาศ หรือแกรไฟต์มีอัตราการเกิดออกซิเดชัน เท่ากับ 30 กรัมต่อตารางเมตรในหนึ่งชั่วโมง สารที่ผสมอยู่ในแกรไฟต์มีผลต่อการเกิดออกซิเดชันของแกรไฟต์ เช่น เมื่อแกรไฟต์มีส่วนผสมของแบเรียม (Barium) เพียง 1% จะทำให้แกรไฟต์มีอัตราการเกิดออกซิเดชันเป็น 2000 กรัมต่อตารางเมตรในหนึ่งชั่วโมง และถ้าแกรไฟต์มีส่วนผสมของสังกะสีโบเรต (Zinc borate) เพียง 2% ก็สามารถช่วยลดอัตราการเกิดออกซิเดชันลงเหลือเพียง 7.4 กรัมต่อตารางเมตรในหนึ่งชั่วโมง โมลิตินัมซัลไฟด์และแกรไฟต์ฟลูออไรด์ (Graphite fluoride) จะเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกรไฟต์และโมลิตินัมซัลไฟด์จะมีปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีกับเหล็กและอลูมิเนียม ทำให้เกิดการกัดกร่อน ความชื้นจะไม่ทำให้การกัดกร่อนเปลี่ยนไปได้ สำหรับอลูมิเนียมสามารถป้องกันการกัดกร่อนด้วยการทำให้ผิวอลูมิเนียมมีสภาพเป็นขี้บวก

โมลิตินัมไดซัลไฟด์ MoS_2 มีโครงสร้างเป็นผลึกเหมือนโครงสร้างของแกรไฟต์มีคุณสมบัติสามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นได้ดี มีอุณหภูมิระเหิดที่ 450°C และทำปฏิกิริยากับอากาศที่อุณหภูมิ 400°C แสดงว่าโมลิตินัมไดซัลไฟด์ MoS_2 ไม่เหมาะที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นโมลิตินัมไดซัลไฟด์สามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นได้ดีในแก๊สไนโตรเจนแห้งและไม่เหมาะในการใช้เป็นสารหล่อลื่นในแก๊สออกซิเจน ไม่ควรใช้โมลิตินัมไดซัลไฟด์เป็นสารหล่อลื่นในบริเวณที่มีอากาศชื้น ยังพบว่าโมลิตินัมไดซัลไฟด์ทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าในการหล่อลื่นแบบเบาดารี ทำให้เกิด FeS

เมื่อใช้โมลิตินัมไดซัลไฟด์ผสมในน้ำมันจะต้องผสมอย่างน้อย 10% จึงจะทำให้มีผลของ MoS_2 ในน้ำมันหล่อลื่น

3. วัสดุประกอบ (Composites)

เนื่องจากสารหล่อลื่นสถานะของแข็งจะต้องจับตัวกับโลหะในระบบการหล่อลื่นวิธีการให้สารหล่อลื่นเกาะจับตัวกับโลหะ สามารถทำได้หลายวิธี วิธีที่นิยมมากที่สุด คือ บอนฟิล์ม (Bonded Films)

บอนฟิล์มจะประกอบด้วยชั้นของสารหล่อลื่นของแข็งจับยึดกับผิวโลหะที่ต้องการ การหล่อลื่นด้วยน้ำยาประสาน ได้แก่ เรซิน ซิลลิเกต (Silicate) หรือ เซรามิก (Ceramic) แล้วอบให้ความร้อนหรือทิ้งให้แห้งในบรรยากาศ สารหล่อลื่นที่นิยมใช้มากที่สุดได้แก่ MoS_2 แกรไฟต์ เทปลอน และ WS_2 บางครั้งส่วนผสมของสารหล่อลื่นผสมกันตามอัตราส่วนเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานเฉพาะ

เรซินบอนฟิล์ม (Resin-bonded films) จะใช้กับผิวโลหะที่สะอาด บางครั้งจะทำให้เกิดการซึมลึกของผิวโลหะประมาณ 5.1-20.3 ไมโครเมตร ด้วยวิธีการฉีดยาหรือจุ่ม

ตัวประสานสำหรับให้สารหล่อลื่นแห้งจับตัวที่อุณหภูมิบรรยากาศ คือ เทอร์โมพลาสติก เรซิน (Thermoplastic resin) เช่น พวกลเซลลูโลซิก (Cellulosics) และอะคริลิก (Acrylics) จะได้ฟิล์มของสารหล่อลื่นที่ค่อนข้างแข็งประสานกับผิวโลหะ

สารหล่อลื่นของแข็งที่ได้จาก เรซินบอน (Resin Bonded) ที่ต้องใช้ความร้อนในการอบให้แห้งและแข็งเป็นที่นิยมมากที่สุด ตามปกติประกอบด้วยส่วนผสมของ MoS_2 90% และแกรไฟต์ 10% ในเรซินเทอร์โมเซตติง (Thermosetting resin) ได้แก่ อัลคอดี (Alkyds) ฟีนอลิก (Phenolics) อีพ็อกซี (Epoxyes) และซิลิคอน (Silicone) บางครั้งจะมีส่วนผสมของเงินและตะกั่ว การอบจะต้องใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ $150-200^\circ\text{C}$ การอบแข็งด้วยความร้อนจะให้ผลดีกว่าอบแห้งที่อุณหภูมิบรรยากาศ จะใช้ในงานที่มีภาระสูงและทำให้อายุการใช้งานยาวนานขึ้น

4. โลหะอ่อนนุ่ม

ได้มีการใช้โลหะอ่อนนุ่มทำเป็นฟิล์มโลหะเช่น ดีบุก อินเดียม ตะกั่ว และเงิน เป็นต้น ทำเป็นฟิล์มในกาบรองลื่น แต่ปัจจุบันและอนาคตเชื่อแน่ว่า ดีบุก ทองแดง และตะกั่ว จะถูกนำไปเคลือบหรือชุบบนผิวโลหะเพื่อใช้เป็นสารหล่อลื่น ตามปกติจะชุบเคลือบฟิล์มโลหะอ่อนเพียงบางๆ เท่านั้นบนผิวโลหะแข็ง การใช้งานของกาบรองลื่นแบบนี้จะใช้กับงานที่มีอุณหภูมิสูงมากๆ หรือในสภาวะสิ่งแวดล้อมที่รุนแรง เช่น ใช้ในการรีดเหล็กที่อุณหภูมิสูงมากๆ ฟิล์มของ ทองคำ เงิน และโลหะมีค่าอื่นได้ถูกใช้เป็นสารหล่อลื่นในยานอวกาศ เครื่องบินไอพ่นเครื่องบินที่ทำงานที่ความเร็วรอบสูง และภาระสูงได้มีการรายงานว่าชุบทองคำบนผิวเหล็กกล้า และสแตนเลสทำให้การสึกหรอลดลง แต่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงขึ้น การชุบ

โลหะเงิน ทองแดง และทองคำ จะมีผลน้อยกว่าในการลดการสึกหรอของผิวโลหะ และการชุบโลหะนิกเกิล (Nickel) จะไม่มีผลต่อการสึกหรอของผิวโลหะเลย

กาบรองลื่นที่เคลือบด้วยโลหะอินเดียม (Indium-coated bearings) จะใช้ในเครื่องบิน เครื่องยนต์ดีเซล เครื่องยนต์แก๊สโซลีน เพราะว่ากาบรองลื่นที่เคลือบด้วยโลหะอินเดียมกัลดะกั่วนผิวเพลอาเหล็กกล้า โลหะอินเดียมจะเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแก่กาบรองลื่น และยังช่วยให้สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และช่วยให้มีคุณสมบัติต่างๆ ที่อุณหภูมิสูงดีขึ้น การรองลื่นที่ใช้งานหนักๆ บางครั้งจะเคลือบด้วยเงิน

โลหะอ่อนนุ่มจะมีค่าความเค้นเฉือนต่ำ เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำและกาบรองลื่นสามารถรับภาระได้สูง จำเป็นต้องเคลือบโลหะนุ่มเป็นฟิล์มบางๆ ความหนาของฟิล์มโลหะนุ่มจะอยู่ระหว่าง 10^{-4} - 10^{-5} เซนติเมตร

4.3 น้ำมันหล่อลื่น

การที่สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวนิยมใช้กันแพร่หลายมากนั้น เพราะสามารถแยกผิววัตถุทั้งสองได้อย่างสมบูรณ์และสามารถรับแรงที่กระทำได้มาก ของเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นมีน้ำ สารละลายกับน้ำ (Aqueous solution) น้ำมันแร่ (Mineral oil) น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ และน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic oil) ในบรรดาสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวนี้จะมีการใช้งานค่อนข้างจำกัด เช่น ใช้ในการหล่อลื่นแบริ่งไม้หรือแบริ่งของกังหันวิดน้ำหรือเครื่องสูบน้ำบางประเภท ส่วนสารละลายกับน้ำจะใช้เฉพาะในการหล่อลื่นชิ้นงานของเครื่องกลึง เครื่องเจียรไนและเครื่องไสเป็นหลัก สำหรับสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวที่ใช้กันมากก็คือ น้ำมันหล่อลื่นซึ่งจะมีอยู่สองชนิด คือ น้ำมันแร่ และน้ำมันสังเคราะห์ ส่วนน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากมีราคาแพง

4.3.1 น้ำมันแร่

น้ำมันแร่เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ (Crude oil) น้ำมันหล่อลื่นได้มาจากส่วนที่หนักของน้ำมันดิบที่เหลือจากการกลั่นเอาส่วนที่เบา ได้แก่ ก๊าซน้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด และน้ำมันดีเซล ออกไปโดยหอกลั่น บรรยากาศ (Atmospheric tower) กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นจากน้ำมันดิบเริ่มต้นจากการนำเอา ส่วนที่เหลือจากหอกลั่นบรรยากาศเข้าไปกลั่นอีกครั้งหนึ่งในหอกลั่นสุญญากาศ (Vacuum tower) เพื่อแยกส่วนที่เหลือจากหอกลั่นบรรยากาศออกเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีจุดเดือด (Boiling point) เหมือนกัน โดยความดันในหอกลั่นสุญญากาศจะมีค่าต่ำกว่าหนึ่งส่วนสิบของความดันบรรยากาศ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการแยกสลาย (Cracking) ที่อุณหภูมิ คุณสมบัติที่สำคัญที่ถูกควบคุมโดยการกลั่นสุญญากาศก็คือความหนืด (Viscosity) จุดวาบไฟ (Flash point) และกากคาร์บอน (Carbon residue) ซึ่งก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดต่างๆ กันออกมา หลังจากที้ออกจากหอกลั่นสุญญากาศแล้วก็นำไปผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อแยกส่วนที่ไม่ต้องการออกให้เหลือผลิตภัณฑ์หรือน้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติต้องการ ตัวอย่างของกระบวนการเหล่านี้ได้แก่ กระบวนการแยกยางมะตอยออกโดยใช้โพรเพนเป็นสารละลาย (Propane deasphalting) การแยกเอาสารประกอบพวกอะโรมาติก (Aromatic compounds) ออกจากพวกที่ไม่ใช่อะโรมาติก (Nonaromatic compounds) ซึ่งเป็นการเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น ได้แก่ การเพิ่มเสถียรภาพในด้านความร้อนและการรวมตัวกับออกซิเจนและเพิ่มดัชนีความหนืด (Viscosity index) กระบวนการอันต่อไปนี้ก็คืกระบวนการการแยกเอาไขออก (Dewaxing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อลดจุดไหลเทให้ต่ำลงให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนกระบวนการสุดท้ายก็คือ การเติมไฮโดรเจน (Hydro-finishing) เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างของโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดสีและสารที่ไม่เสถียรทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีสีจางลงและช่วยเพิ่มคุณสมบัติบางประการ

น้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากการผลิตตามกระบวนการผลิตดังกล่าวข้างต้นเรียกว่า น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Lube base stock) ซึ่งโดยทั่วไปยังไม่สามารถนำไปใช้ในการหล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องจักรได้ ทั้งนี้เนื่องจากยังมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเสียก่อน วิธีที่นิยมใช้กันก็คือการใส่สารเพิ่มคุณภาพ (Additives) เข้าไป

4.3.2 น้ำมันสังเคราะห์

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่ที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบนั้น แม้ว่าจะผ่านกระบวนการมากมายที่ใช้กำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป แต่น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้ออกมานั้นยังคงเป็นของผสมของสารประกอบหลายตัว ซึ่งไม่มีทางที่จะเลือกเอาเฉพาะสารที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดได้ หรือถ้ามีก็จะได้ผลผลิตต่ำทำให้การผลิตไม่คุ้มค่า ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่จึงมีคุณสมบัติเฉลี่ยของผสมซึ่งประกอบด้วยสารประกอบที่เหมาะสมมากที่สุดและน้อยที่สุด เป็นผลให้น้ำมันแร่มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงได้มีการพัฒนาน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันสังเคราะห์ขึ้นมา น้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันพื้นฐานที่ได้จากกระบวนการทางเคมี ซึ่งเป็นการรวมตัวของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำให้ได้น้ำมันที่มีความหนืดเพียงพอที่จะเป็นสารหล่อลื่นโดยสารประกอบเริ่มต้นที่ใช้ในการผลิตน้ำมันสังเคราะห์มักจะได้ออกมาจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและเนื่องจากน้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันที่ทำขึ้นจากกระบวนการทางเคมี จึงสามารถควบคุมให้มีโครงสร้างและโมเลกุลตามที่ต้องการและมีคุณสมบัติที่คาดหวังไว้ได้ข้อได้เปรียบที่สำคัญของน้ำมันสังเคราะห์เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือสามารถนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าน้ำมันแร่ คือ ใช้ได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าและสูงกว่าของน้ำมันแร่ นอกจากนี้ น้ำมันสังเคราะห์บางประเภทยังให้คุณสมบัติเฉพาะ เช่น ผสมเข้ากันกับน้ำได้และไม่ติดไฟ เป็นต้น

1. ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์ (Synthesized hydrocarbon)

เป็นสารไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์ที่ผลิตจากวัตถุดิบ ที่ได้มาจากน้ำมันดิบที่ใช้กันมากมีอยู่สามชนิดคือ โอลิฟินโอลิเมอร์ (Olefin oligomers) อัลคิลเอเตดอะโรมาติก (Alkylated aromatics) และโพลิบิวทีนส์ (Polybutenes) ข้อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ มีความมั่นคง มีอุณหภูมิ อายุการใช้งานยาวมีดัชนีความหนืดสูง มีการไหลที่อุณหภูมิต่ำไม่มีไข และมีการระเหยต่ำ

2. เอสเทอร์อินทรีย์ (Organic esters)

เป็นสารหล่อลื่นที่ได้มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่นใช้เป็นสารหล่อลื่นของเครื่องยนต์ของอากาศยานและใช้ในระบบไฮดรอลิก เป็นต้น เอสเทอร์อินทรีย์ที่ใช้กันอยู่ สองชนิด ชนิดแรกคือ ไดเบสิกเอซิดเอสเทอร์ (Dibasic acid) กับโมนไฮดริคแอลกอฮอล์ (Monohydric alcohol) อีกชนิดหนึ่งก็คือ โพลีโอลเอสเทอร์ (Polyol ester) ซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง โพลีไฮดรอลกอฮอล์ (Polyhydric alcohol) กับโมนเบสิกเอซิด (Monobasic acid) ข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ มีความคงที่อุณหภูมิสูง มีการไหลที่อุณหภูมิต่ำและมีอายุการใช้งานยาว

3. โพลีไกลคอลล์ (Polyglycols)

เป็นสารหล่อลื่นที่มีจุดเดือดสูงและจุดไหลเทต่ำเหมาะสำหรับสภาพการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น ใช้เป็นน้ำมันเบรคและน้ำมันไฮดรอลิกที่ติดไฟได้

4. ฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate esters)

เป็นสารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติทนไฟจึงใช้เป็นน้ำมันไฮดรอลิกสำหรับอากาศยานและน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟ

5. น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์อื่นๆ

ได้แก่ ซิลิโคน ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นที่มีดัชนีความหนืดสูงมาก (300 หรือ มากกว่า) และมีจุดไหลเทต่ำจึงเหมาะสำหรับการใช้งานในช่วงอุณหภูมิกว้างและใช้เป็นน้ำมันไฮดรอลิกในกรณีพิเศษ เช่น ใช้เป็นสปริงของเหลวและซิลิเคตเอสเทอร์ (Silicate ester) เป็นสารหล่อลื่นที่มีดัชนีความหนืดสูงและจุดไหลเทต่ำเช่นกัน

แม้ว่าน้ำมันสังเคราะห์จะมีความสมบูรณ์โดยทั่วไปดีกว่าน้ำมันแร่ก็ตาม แต่สำหรับการนำไปใช้งานบางประเภทน้ำมันสังเคราะห์ก็อาจจะยังไม่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมทุกด้าน จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันสังเคราะห์โดยการใส่สารเพิ่มคุณภาพเข้าไปเช่นเดียวกับการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันแร่

4.4 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

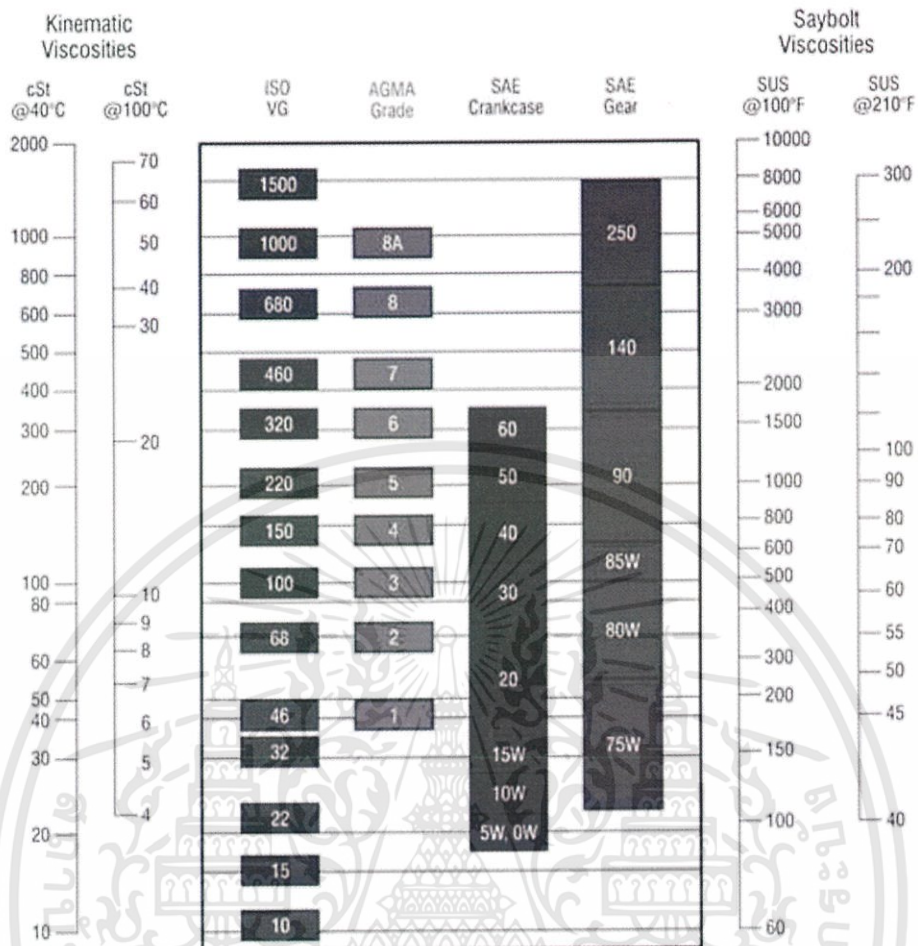
น้ำมันหล่อลื่นประเภทน้ำมันแร่นั้นมีหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นในการเลือกใช้ จึงจำเป็นที่จะต้องรู้ถึงคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น และในการผลิตก็จะต้องมีการควบคุมคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นให้ได้ตามต้องการ สำหรับคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่สำคัญทางด้านฟิสิกส์และเคมี มีดังต่อไปนี้

4.4.1 ความหนืด (Viscosity)

เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัสและมีผลต่อการเกิดความร้อนขึ้นระหว่างผิวสัมผัสที่มีการหล่อลื่นด้วยน้ำมัน ความหนืดหมายถึง ความข้นหรือความใสของน้ำมันเป็นคุณสมบัติของของไหลซึ่งวัดในรูปของความต้านทานในการไหล

4.4.2 ดัชนีความหนืด (Viscosity index)

น้ำมันหล่อลื่นต่างชนิดกันจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืด อันเนื่องมาจากอุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดดัชนีความหนืดขึ้นมา เพื่อใช้แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ โดยใช้การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นที่จะหาดัชนีความหนืดกับน้ำมันหล่อลื่นที่เลือกสองชนิด เช่น น้ำมันหล่อลื่น Gulf Coast ซึ่งมีความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิมาก ให้มีดัชนีความหนืดเท่ากับ และน้ำมันหล่อลื่น Pennsylvanian ซึ่งความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิน้อยให้มีดัชนีความหนืดเท่ากับ 100



รูปที่ 4.1 รายละเอียดความหนืดตามมาตรฐานต่างๆ

4.4.3 กากคาร์บอน (Carbon residue)

สิ่งที่ตกค้างอยู่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายหลังจากเผาไหม้น้ำมันหล่อลื่นในสภาวะที่กำหนดปริมาณกากคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นจะไม่ค่อยมีความสำคัญสำหรับการใช้งาน เนื่องจากจะไม่มี การเผาไหม้โดยตรงของน้ำมันหล่อลื่นในการใช้งาน แต่ปริมาณกากคาร์บอนจะมีความสำคัญสำหรับ เชื้อเพลิงเพราะจะมีการเผาไหม้โดยตรง ดังนั้นการหาปริมาณกากคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นทั่วไปจึงเป็น การหาสำหรับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเพื่อดูว่าขบวนการผลิตเป็นไปตามกำหนดหรือไม่

4.4.4 สี (Color)

สีน้ำมันที่เห็นเมื่อมีแสงผ่านนั้นจะมีสีต่างๆกัน ตั้งแต่ใสมากจนถึงดำ ซึ่งอาจมีสีเหลือง แดง และ น้ำตาล เป็นต้น ความแตกต่างกันของสีน้ำมันหล่อลื่นเป็นผลมาจากชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาผลิตเป็น น้ำมันหล่อลื่นแตกต่างกัน วิธีการกลั่นและผลิตและชนิดของสารเพิ่มคุณภาพ ดังนั้นสีของน้ำมันหล่อลื่น สำเร็จรูปจึงไม่มีความสำคัญนักในด้านการใช้งาน ยกเว้นกรณีที่เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในอุตสาหกรรม อาหารและยา

4.4.5 ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (Density and gravity)

ความหนาแน่น หมายถึง มวลสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิมาตรฐานที่กำหนด ส่วนความถ่วงจำเพาะ (ความหนาแน่นสัมพัทธ์) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของน้ำมันและความหนาแน่นของน้ำมันที่อุณหภูมิเดียวกัน ในสหรัฐอเมริกานิยมกำหนดค่าความถ่วงจำเพาะในรูปของหน่วยองศา API (American Petroleum Institute) ซึ่งหาได้จากสมการ

องศา API = $141.5 / (Sp\ gr\ 60/60^\circ F) - 131.5$ = ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันที่ 60°F

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าเมื่อค่าองศา API เพิ่มขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะจะลดลง ค่าความถ่วงจำเพาะนี้จะเป็นตัวช่วยในการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้แล้ว ซึ่งถ้ามีค่าความถ่วงจำเพาะลดลง (ค่าองศา API เพิ่มขึ้น) ก็อาจแสดงว่ามีน้ำมันเชื้อเพลิงเข้ามาผสมกับน้ำมันหล่อลื่น และถ้ามีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นก็อาจแสดงว่ามีสิ่งแปลกปลอม เช่น เหมะหรือสารที่เกิดจากการรวมตัวกับออกซิเจนผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่น

4.4.6 จุดวาบไฟและจุดติดไฟ (Flash and fire point)

จุดวาบไฟ หมายถึง อุณหภูมิที่น้ำมันระเหยกลายเป็นไอเพียงพอที่ผิวสามารถลุกไหม้ได้เมื่อโดนเปลวไฟแต่อุณหภูมิที่การระเหยกลายเป็นไอจะไม่เพียงพอที่จะทำให้การลุกไหม้คงอยู่ต่อไป เปลวไฟจึงดับเองทันที แต่หากมีการให้ความร้อนแก่น้ำมันต่อไปอีกอุณหภูมิจะสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่การระเหยกลายเป็นไอเพียงพอที่จะทำให้เกิดการลุกไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง อุณหภูมินี้เรียกว่า จุดติดไฟ จุดวาบไฟของน้ำมันหล่อลื่นใหม่จะแปรผันกับความหนืด โคน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดสูงก็จะมีจุดวาบไฟสูงด้วย นอกจากนี้ชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานก็มีผลต่อจุดวาบไฟด้วย

จุดวาบไฟและจุดติดไฟของน้ำมันจะใช้ในการควบคุมการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและจะใช้ในการพิจารณาในด้านความปลอดภัยในการทำงาน

4.4.7 จุดไหลเท (Pour point)

หมายถึง อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันหล่อลื่นจะเริ่มไหลภายใต้สภาวะที่กำหนด ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นทั่วไปจะมีไขส่วนหนึ่งละลายอยู่ด้วย เมื่อน้ำมันเย็นไขจะตกผลึกและเกาะกันเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง โดยกักเอาน้ำมันเอาไว้และเมื่อผลึกของไขเกิดขึ้นมากพอ น้ำมันก็จะไม่สามารถไหลได้ต่อไป

ความสำคัญของจุดไหลเทจะขึ้นอยู่กับสภาวะของการทำงาน ตัวอย่าง ในประเทศที่หนาวจะต้องเลือกใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำ เพื่อให้ น้ำมันสามารถไหลได้ถึงแม้ว่าอุณหภูมิของอากาศโดยรอบจะต่ำ ในทางตรงกันข้ามน้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำก็ไม่มีผลสำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูงตลอดเวลา

4.4.8 ตัวเลขความเป็นกลาง (Neutralization number)

น้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะมีสภาพความเป็นกรดอยู่เล็กน้อย ซึ่งสภาพความเป็นกรดนี้จะวัดเป็นปริมาณของเบสมาตรฐานที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำมันมีสภาพเป็นกลาง

สภาพความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจน (Oxidation) ซึ่งทำให้เกิดกรดอินทรีย์ขึ้น

4.5 สารเพิ่มคุณภาพ

สารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน โดยทั่วไปเป็นสารประกอบทางเคมี ซึ่งใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายตัว สารเพิ่มคุณภาพแต่ละตัวมีวัตถุประสงค์ในหารปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเฉพาะอย่างโดยพอที่จะแบ่งตามผลที่มีต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานออกได้เป็น 3 พวก คือ

1. สารเพิ่มคุณภาพที่ให้คุณสมบัติใหม่ที่เป็ประโยชน์ต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน
2. สารเพิ่มคุณภาพที่ปรับปรุงคุณสมบัติที่มีอยู่แล้วให้ดีขึ้น
3. สารเพิ่มคุณภาพที่ทำหน้าที่ในการลดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการซึ่งขึ้นในช่วงการทำงาน

การที่จะเติมสารเพิ่มคุณภาพตัวใดและจำนวนเท่าใดลงไปนน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการนำไปใช้งาน โดยจะต้องคำนึงถึงผลข้างเคียงที่เกิดขึ้นด้วย เนื่องจากสารเพิ่มคุณภาพบางตัวแม้ว่าจะทำให้คุณสมบัติประการใดประการหนึ่งดีขึ้นแต่ก็อาจจะทำให้คุณสมบัติประการอื่นเสื่อมลงไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าใส่เข้าไปมากเกินไปหรือถ้าสารเพิ่มคุณภาพนั้นไปทำปฏิกิริยากับสารเพิ่มคุณภาพแต่ละตัวจึงต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ น้ำมันหล่อลื่นทำงานได้อย่างดีที่สุดและจะต้องมีการทดสอบให้แน่ใจว่าไม่มีผลข้างเคียงที่ไม่ต้องการเกิดขึ้น ซึ่งในกรณีต่างๆไปจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเติมสารเพิ่มคุณภาพเข้าไปอีก น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่อเติมสารเพิ่มคุณภาพเข้าไปแล้วก็จะเรียกว่า น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป ซึ่งบริษัทผู้ผลิตแต่ละรายมักจะตั้งชื่อเฉพาะของแต่ละผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมา สำหรับสารเพิ่มคุณภาพที่นิยมใช้กันมีดังต่อไปนี้

4.5.1 สารลดจุดไหลเท (Pour point depressants)

เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการยับยั้งการเกิดผลึกไขที่ป้องกันไม่ให้น้ำมันไหลที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นสารนี้จึงช่วยให้จุดไหลเทของน้ำมันหล่อลื่นต่ำลง ทำให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำๆได้ สารที่ใช้ลดจุดไหลเทจะเป็นพวกโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งที่ใช้กันมีอยู่ 2 ชนิด คือ อัลคิลอะโรมาติก (Alkyl aromatic polymer) ทำหน้าที่ในการดูกลืนผลึกของไขเมื่อเกิดขึ้น เพื่อป้องกันไม่ให้ผลึกเติบโต สำหรับอุณหภูมิของจุดไหลเทของน้ำมันเมื่อเติมสารนี้เข้าไปแล้วโดยทั่วไปจะลดลงประมาณ 11-17 องศาเซลเซียส

4.5.2 สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (Viscosity index improvers)

เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยไม่ให้ความหนืดของน้ำมันเปลี่ยนแปลงมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืดจะเป็นพวกโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีโครงสร้างเป็นลูกโซ่ยาว (Long chain) วึ่งทำหน้าที่ในการเพิ่มความหนืดสัมพัทธ์ของน้ำมันหล่อลื่นที่อุณหภูมิสูงมากกว่าการเพิ่มความหนืดสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่ำซึ่งจะเป็นผลมาจากการที่โพลีเมอร์ดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลจะยืดออกและมีปฏิกิริยากันระหว่างโมเลกุล ทำให้เกิดความหนืดเพิ่มขึ้น สำหรับสารที่นิยมใช้เป็นสารเพิ่มดัชนีมีหลายตัว เช่น เมทาคริลโพลีเมอร์ (Methacrylate polymers) โอลีฟินโพลีเมอร์ (Olefin polymers) และอะครีเลตโพลีเมอร์ (Acrylate polymers) เป็นต้น

4.5.3 สารป้องกันการเกิดฟอง (Defoamants)

ใช้ป้องกันการเกิดฟองอากาศที่ผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่นเมื่อถูกหมุนเวียนใช้ในระบบ สารนี้จะทำหน้าที่โดยโมเลกุลของสารจะเข้าไปติดกับฟองอากาศทำให้ฟองอากาศเล็กๆรวมตัวกันเป็นฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้นลอยขึ้นผิวและแตกในที่สุด สำหรับสารที่นิยมใช้เป็นสารป้องกัน การเกิดฟอง คือ ซิลิโคนโพลิเมอร์ (Silicone polymers) และพวกโพลิเมอร์อินทรีย์ (Organic polymers)

4.5.4 สารป้องกันการออกซิเดชัน (Oxidation inhibitors)

เมื่อน้ำมันหล่อลื่นร้อนและสัมผัสกับอากาศก็จะเกิด ปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันหล่อลื่นกับออกซิเจนในอากาศที่เรียกว่าออกซิเดชันขึ้น ผลของการเกิดออกซิเดชันจะทำให้ความหนืดและความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดวาร์นิชและตะกอน สารป้องกันการออกซิเดชันก็คือ สังกะสีไดไทโอฟอสเฟต (Zinc dithiophosphate)

4.5.5 สารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion inhibitors)

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในระบบหล่อลื่นโดยน้ำมันหล่อลื่นนั้นมีหลายชนิดแต่ชนิดที่สำคัญที่สุดมี 2 ชนิด คือ การกัดกร่อนจากกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในตัวเอง และการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากสารปนเปื้อนที่ถูกนำและพาไปโดยน้ำมัน สำหรับสารป้องกันการกัดกร่อนที่ใช้กันทั่วไปเป็นสารตัวเดียวกับสารป้องกันการออกซิเดชันซึ่งก็คือ สังกะสีไดไทโอฟอสเฟต แต่สารที่มีซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสก็ถูกนำมาใช้ด้วย

4.5.6 สารป้องกันสนิม (Rust inhibitors)

ใช้เพื่อป้องกันสนิมที่อาจจะเกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นส่วนโลหะที่มีการหล่อลื่นด้วยน้ำมัน สารที่ใช้โดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบที่มีการยึดติดกับผิวของโลหะได้ดี โดยสารป้องกันสนิมจะทำปฏิกิริยากับผิวโลหะเกิดเป็นฟิล์มเกาะติดกับผิวเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำเข้าถึงผิวโลหะ สารที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ อะไมนซัคซิเนต (Amine succinates) และอัลคาไลเอิร์ทซัลโฟเนต (Alkaline earth sulfonates)

4.5.7 สารชะล้างและกระจายสิ่งสกปรก (Detergents and dispersants)

ใช้เพื่อชะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวของชิ้นส่วนและกระจายมิให้รวมตัวกันเป็นโคลนหรือตะกอน ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน ได้แก่ เครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซล โคลนหรือตะกอนที่เกิดขึ้นจะอุดช่องทางน้ำมันหล่อลื่นและจะไปรวมกันอยู่ด้านหลังของแหวนสูบ ซึ่งอาจทำให้แหวนติดตายได้ สารชะล้างจะทำหน้าที่ในการป้องกันไม่ให้เกิดโคลนหรือตะกอน สารที่เป็นตัวชะล้างที่ใช้กันในปัจจุบันได้แก่ สบู่อินทรีย์ (Organic soaps) และแบเรียม (Barium) แมกนีเซียมซัลโฟเนต (Magnesium sulfonates) เป็นต้น ส่วนสารกระจายสิ่งสกปรกจะทำหน้าที่ในการกระจายหรือทำให้สารที่รวมตัวกันเป็นโคลนแขวนลอยอยู่ในน้ำมัน สารที่เป็นตัวกระจายที่ใช้กัน ได้แก่ โพลีเมอริกซัคซินิไมด์ (Polymeric succinimides) และเบนซิลไมด์ (Benzylamides) เป็นต้น

4.5.8 สารป้องกันการสึกหรอ (Antiwear additives)

เป็นสารที่ช่วยลดความเสียหายและการสึกหรอ ภายใต้สภาวะการหล่อลื่นแบบเบอร์ดาร์ (Boundary lubrication) ซึ่งก็คือในสภาวะที่ฟิล์มของน้ำมันที่จะแยกผิวสัมผัสได้อย่างสมบูรณ์ไม่สามารถคงอยู่ได้ สารป้องกันการสึกหรอที่ใช้กันแบ่งออกเป็นสองประเภทตามความต้องการของการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทแรกเป็นสารที่ใช้ลดความเสียดทานและการสึกหรอสำหรับสภาวะการทำงานเบา สารนี้บางครั้งเรียกว่าสารเพิ่มคุณภาพสำหรับการหล่อลื่นแบบเบอร์ดารี (Boundary lubrication additives) ได้แก่ กรดไขมัน (Fatty acid) และน้ำมันไขมัน (Fatty oil) ประเภทที่สองเป็นสารที่ใช้ลดความเสียดทานและการสึกหรอภายใต้ สภาวะความดันสูงมาก เรียกว่า Extreme pressure additives (EP) ซึ่งจะทำหน้าที่โดยทำปฏิกิริยาทางเคมีกับผิวโลหะ โดยจะเกิดเป็นฟิล์มเคลือบที่ผิวโลหะป้องกันการสัมผัสโดยตรงของผิวโลหะ สาร EP โดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบของซัลเฟอร์คลอรีนหรือฟอสฟอรัสตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัวรวมกัน



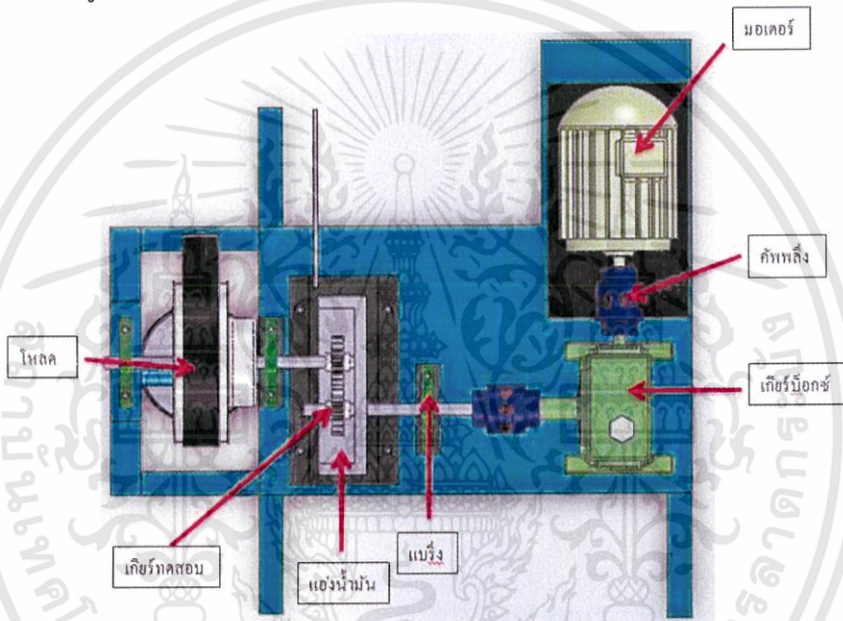
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การออกแบบและสร้างชุดทดลอง

5.1 การศึกษาลักษณะการทำงานของเครื่อง

เครื่องทดสอบการสึกหรอของเฟือง (Gear test rig) ใช้ทดสอบหาคุณสมบัติของสารหล่อลื่นในสถานะต่างๆ เพื่อหาผลที่เกิดขึ้นขณะที่ผิวของชิ้นงานสองชิ้นเคลื่อนที่เสียดกันไป ซึ่งชิ้นงานสองชิ้นที่ใช้ คือ เฟืองตรง ข้อมูลเฟืองตรงที่ใช้ดังตารางที่ 5-1 โดยเฟืองตรงทั้ง 2 ชิ้นจะทำการส่งถ่ายกำลังกันในอ่างน้ำมันที่สามารถใส่น้ำมันที่ต้องการทดสอบได้ และลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบเป็นแบบ Close mechanic power loop โดยทำการส่งกำลังจากเพลานึงไปยังอีกเพลานึงซึ่งเป็นลักษณะโดยทั่วไปของการส่งถ่ายกำลัง ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบ Gear test rig

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลลักษณะต่างๆของเฟืองตรงที่ทดสอบ

ข้อมูล	เฟืองขับ	เฟืองตาม
รัศมีพิซ (มิลลิเมตร)	60	
โมดูล	4	
ความกว้างของฟัน (มิลลิเมตร)	25.4	
มุมกด	20°	
ความแข็ง (Hv)	170	
อัตราทด	1:1	
ส่วนประกอบทางเคมี (%wt)	C 3.4, P 0.1, Mn 0.4, Ni1.0, Mg 0.06	
Yield strength (MPa)	365.42	
Tensile strength (MPa)	930.79	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 ภาพถ่ายเฟืองตรงที่ทำการทดสอบ

การออกแบบชุดทดลอนนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงเฟืองที่ใช้ในการทดสอบเป็นอันดับแรกเนื่องจากในการวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับการศึกษาลักษณะการสึกของเฟืองตรงและทำการเลือกใช้เฟืองตรงที่มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆ ที่มีลักษณะของเฟืองดังนี้

5.2 การคำนวณและออกแบบทางกล

5.2.1 เฟือง

จากข้อมูลเฟืองเบื้องต้นสามารถนำค่าลักษณะของเฟืองเพื่อคำนวณหาแรงสูงสุดที่เฟืองสามารถรับได้สามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

ค่าความเค้นสถิตยใช้งาน (σ) มีค่าเท่ากับ 53 ksi หรือ 365.422 N/mm^2

ϕ คือ ค่าตัวประกอบรูปแบบของลูอิส มีค่าเท่ากับ 0.289

K_f คือ ค่าตัวประกอบความความเค้นหนาแน่นจริง

สามารถหาค่า F_b ได้จากสมการที่ 5.1

$$F_b = \frac{\sigma_b \phi m}{k_f}$$

(5.1)

$$F_b = \frac{365.42 \times 25.4 \times 0.289 \times 4}{1.5}$$

$$F_b = 7,153.072$$

พบว่าจากการคำนวณเฟืองตรงที่ใช้ในการทดสอบสามารถรับแรงได้สูงสุด 7,153.072 นิวตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 มอเตอร์

ตัวต้นกำลังหรือมอเตอร์นั้นเป็นหัวใจในการให้กำลังแก่ชุดทดลองในการทดลองนี้เราจะทำการทดสอบลักษณะการสีกหรือของเฟืองตรงที่สภาวะโหลดสูงตั้งนั้นเมื่อเราทำการหาขนาดมอเตอร์ที่สามารถให้กำลังใกล้เคียงกับโหลดสูงสุดของเฟือง

โดยที่ m คือ ค่าโมดูลของเฟือง มีค่าเท่ากับ 4

โดยที่ n_p คือ จำนวนฟันของเฟือง มีค่าเท่ากับ 15

โดยที่ N คือ ความเร็วรอบที่ใช้ในการทดสอบ

สามารถหาค่า v คือ ความเร็วของเฟืองที่เคลื่อนที่ ได้จากสามการที่ 5.2

$$V = \pi m n_p N$$

(5.2)

$$V = \pi \times 4 \times 15 \times \frac{142}{60}$$

$$V = 0.446 \text{ m/s}$$

สามารถหาค่า F_t คือ แรงในแนวตั้งฉากที่กระทำของมอเตอร์ ได้จากสามการที่ 5.3

$$F_t = \frac{\omega_p}{v}$$

(5.3)

$$F_t = \frac{3 \times 746}{0.446}$$

$$F_t = 5,017.937 \text{ N}$$

สามารถหาค่า k_v คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ ได้จากสามการที่ 5.4

$$k_v = \frac{3+v}{3}$$

(5.4)

$$k_v = \frac{3 + 0.446}{3}$$

$$k_v = 1.1486$$

สามารถหาค่า F_d คือ แรงสูงสุดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ ได้จากสามการที่ 5.5

$$F_d = k_v F_t$$

(5.5)

$$F_d = 1.1486 \times 5,017.937$$

$$F_d = 5,763.602 \text{ N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 เพลลา

การคำนวณหาขนาดของเพลลาเมื่อเฟืองมีขนาด $m=4$ มีจำนวนฟัน 15 ฟัน

ดังนั้น
$$m = \frac{d}{N} \quad (5.6)$$

$$d = mN = 15 \times 4 = 60 \text{ mm.}$$

สามารถหาทอร์คจากสมการ

$$P = 2\pi TN \quad (5.7)$$

$$3 \text{ hp} \times 746 \frac{\text{watt}}{\text{hp}} = 2\pi T \times 142 \text{ rpm} \times \frac{1}{60} \text{ s}$$

$$T = 150.5 \text{ Nm}$$

แรงที่เฟืองกระทำต้งฉากกับหน้าเฟืองหาได้จาก

$$T = Fr$$

$$150.5 = F \left(\frac{60 \times 10^{-3}}{2} \right)$$

$$Fn = 5016.6 \text{ N}$$

ดังนั้นแรงในแนวรัศมีและแนวสัมผัส

$$Fr = 5016.6 \sin 20^\circ = 1715.778 \text{ N}$$

$$Fb = 5016.6 \cos 20^\circ = 4714.062 \text{ N}$$

จากสมการ

$$\frac{J}{C} = \frac{\tau}{\tau_{allow}}$$

โดยที่

$$J = \frac{\pi}{2} c^4$$

และ

$$\tau_{allow} = 0.6\tau_y$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหา C ดังนี้

$$\frac{\frac{\pi}{2}c^4}{C} = \frac{150.5}{0.6\tau_y}$$

จากตาราง AISI : 304 L property $\tau_y = 210 \text{ MPa}$

$$\frac{\frac{\pi}{2}c^4}{C} = \frac{150.5}{0.6 \times 210}$$

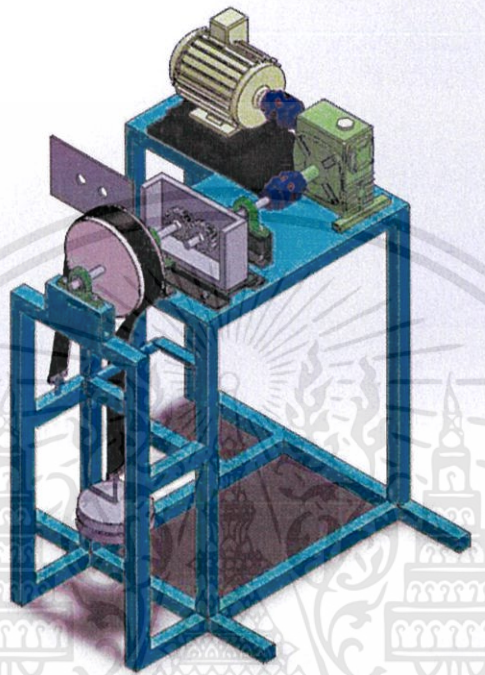
จากสูตรคำนวณได้เส้นผ่านศูนย์กลาง = 1.826 เซนติเมตร ดังนั้นจึงเลือกใช้เพลขนาด 2 เซนติเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ชุดทดลองและส่วนประกอบ

เมื่อทำการคำนวณทางกลศาสตร์แล้วทำการสร้างชุดทดลองโดยใช้อุปกรณ์ต่างๆตามความเหมาะสมและจะต้องมีการวางแผนในการทำงานเพื่อให้งานออกมาถูกต้องและสามารถใช้งานได้จริง ในการสร้างชุดทดลองนั้นพบปัญหาหลายด้านทั้งชิ้นส่วนที่ออกแบบมาไม่สามารถใช้งานได้และไม่สามารถทำชิ้นงานได้เนื่องจากด้วยปัจจัยอื่น หลังจากสามารถแก้ไขปัญหาที่พบจนได้เครื่องทดสอบ Gear test rig ที่สามารถใช้งานได้

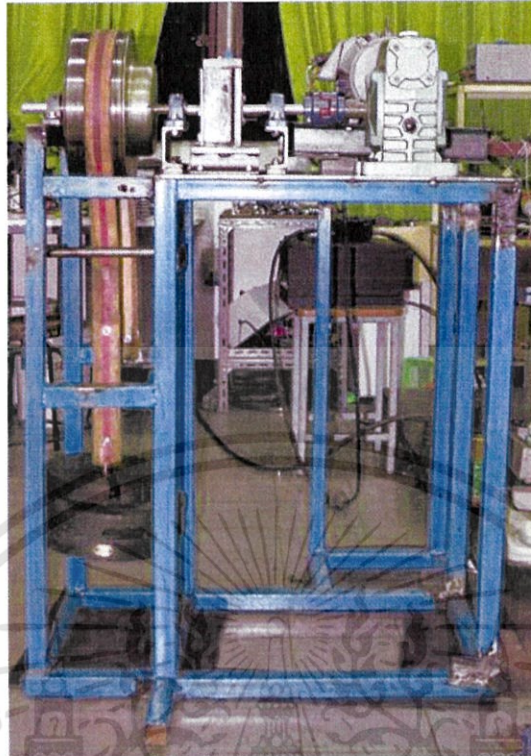


รูปที่ 5.3 การออกแบบเครื่องทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

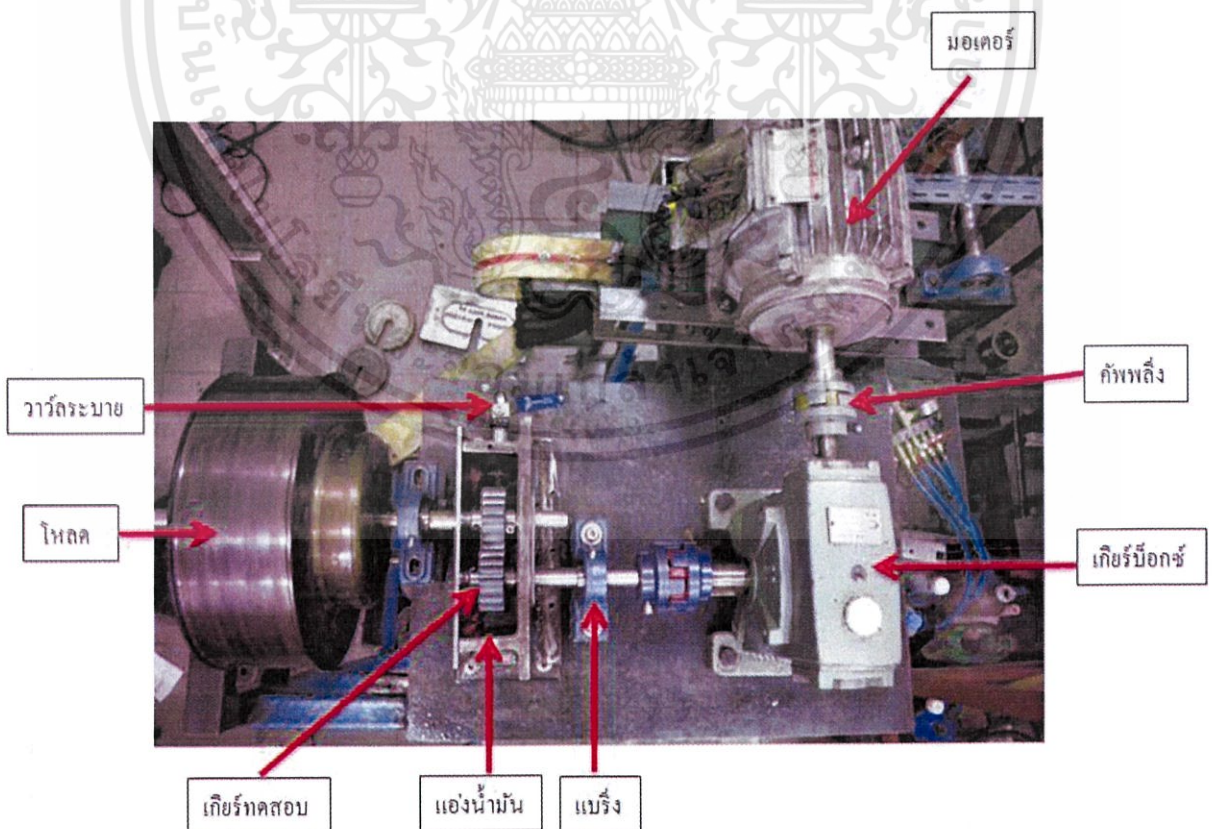


รูปที่ 5.4 เครื่องทดสอบ Gear test rig

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 เครื่องทดสอบ Gear test rig (ด้านข้าง)



รูปที่ 5.6 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การทดลอง

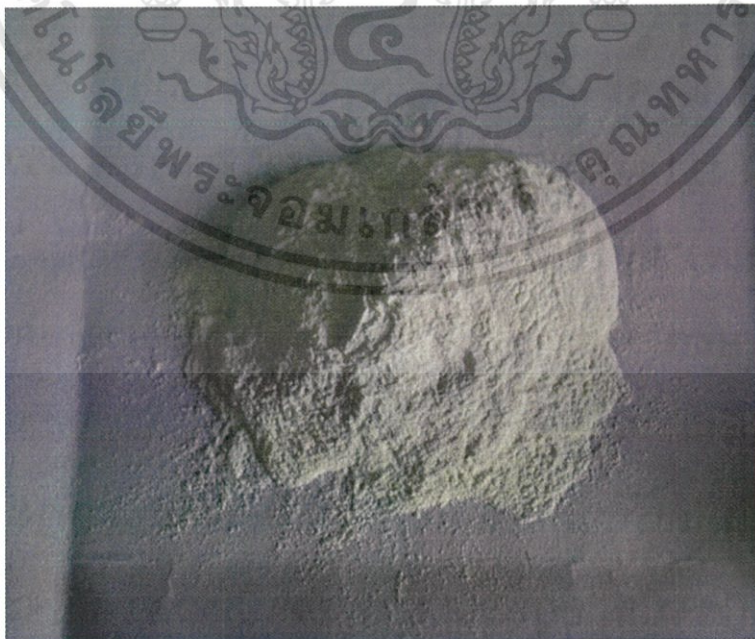
ในการทดลองนี้จะทำการทดลองหาลักษณะการสึกหรอของเฟืองตรงกับความสัมพันธ์ของโหลด 50, 70, 90 กิโลกรัม โดยทำการควบคุมความเร็วรอบที่ 142 รอบต่อนาที ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง คือ 25 องศาเซลเซียส และทำการเปรียบเทียบลักษณะการสึกหรอระหว่างสารหล่อลื่นที่มีการเติมอนุภาคนาโนกับสารหล่อลื่นที่ปราศจากการเติมอนุภาคนาโน ได้เป็นดังตารางที่ 6-1

ตารางที่ 6.1 กรณีที่ทำการศึกษา

กรณีที่	สารหล่อลื่น	สารเพิ่มคุณภาพ	โหลดทดสอบ
1.	SAE 90	Titanium Dioxide 0%wt	50
2.	SAE 90	Titanium Dioxide 0.5%wt	70
3.	SAE 90	Titanium Dioxide 0%wt	90
4.	SAE 90	Titanium Dioxide 0.5%wt	50
5.	SAE 90	Titanium Dioxide 0%wt	70
6.	SAE 90	Titanium Dioxide 0.5%wt	90

6.1 วิธีการทดลอง

6.1.1 ทำการผสมสารหล่อลื่นได้แก่ น้ำมันหล่อลื่น SAE 90 ผสม Titanium Dioxide 0%wt และน้ำมันหล่อลื่น SAE 90 ผสม Titanium Dioxide 0.5%wt โดยใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 90 น้ำหนัก 400กรัม ผสมกับ Titanium Dioxide 2 กรัม ดังรูปที่ 6-2

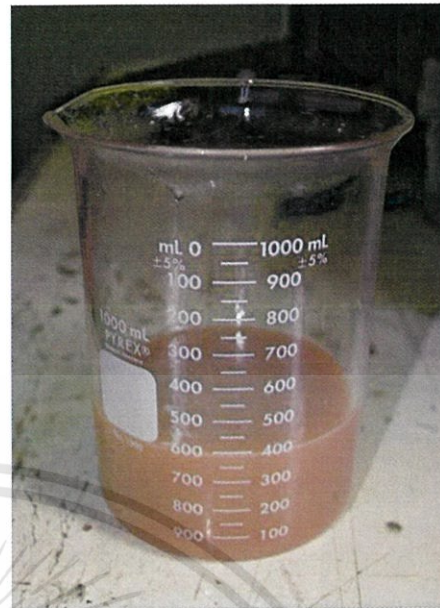


รูปที่ 6.1 ผงอนุภาคนาโน Titanium Dioxide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



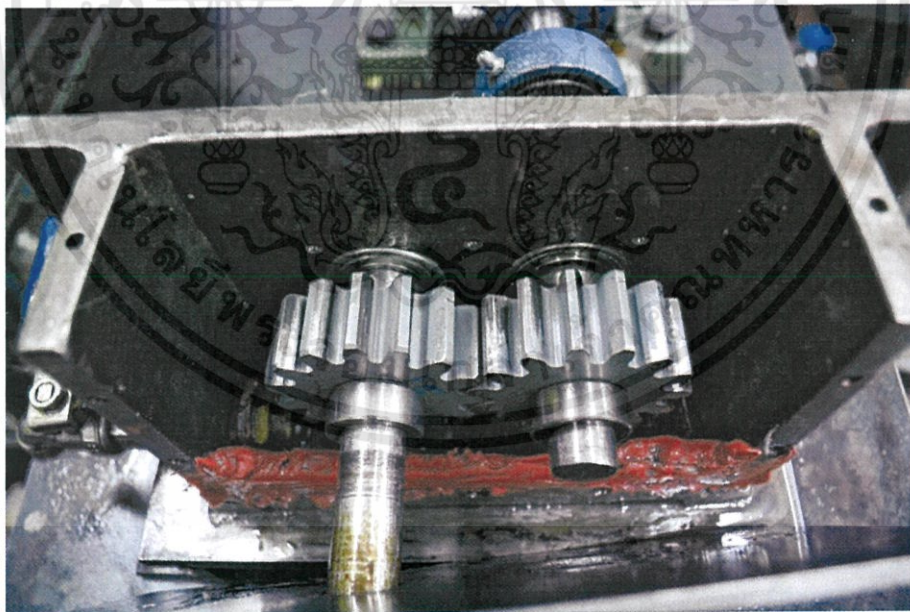
(ก)



(ข)

รูปที่ 6.2 น้ำมันหล่อลื่นที่ทดสอบ (ก) น้ำมันหล่อลื่น SAE 90 ผสม TiO_2 0%wt ทดสอบ (ข) น้ำมันหล่อลื่น SAE 90 ผสม TiO_2 0.5%wt

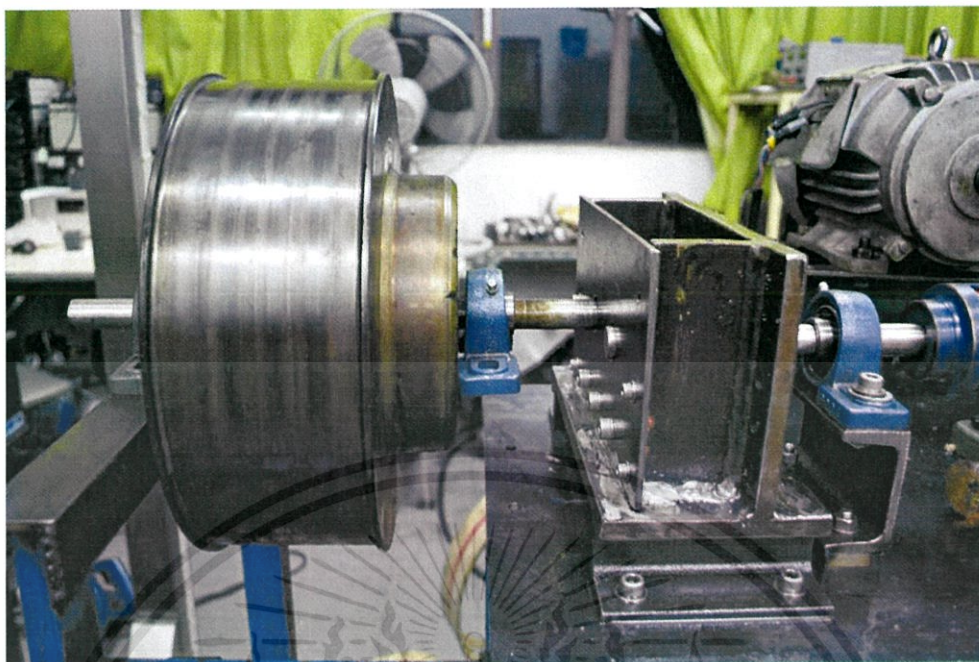
6.1.2 ทำการติดตั้งเฟืองและประกอบชุดทดลองเข้ากับชุดทดลอง ดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.3 การติดตั้งเฟืองและประกอบชุดทดลอง

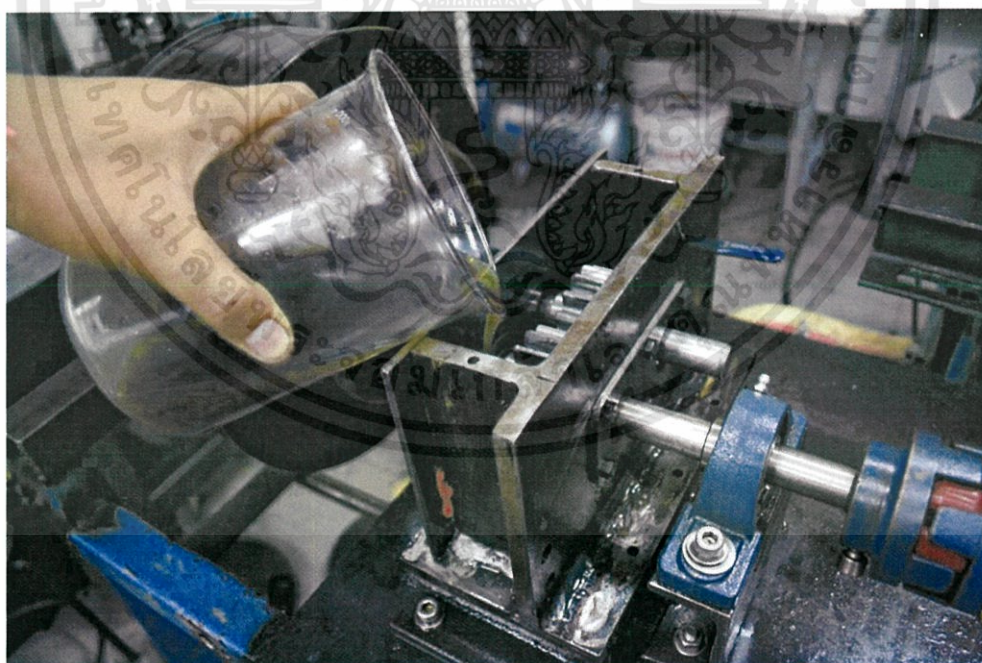
6.1.3 จากนั้นประกอบชุดทดลองและติดตั้งอ่างน้ำมัน ดังรูปที่ 6.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 การประกอบชุดลองและติดตั้งอ่างน้ำมัน

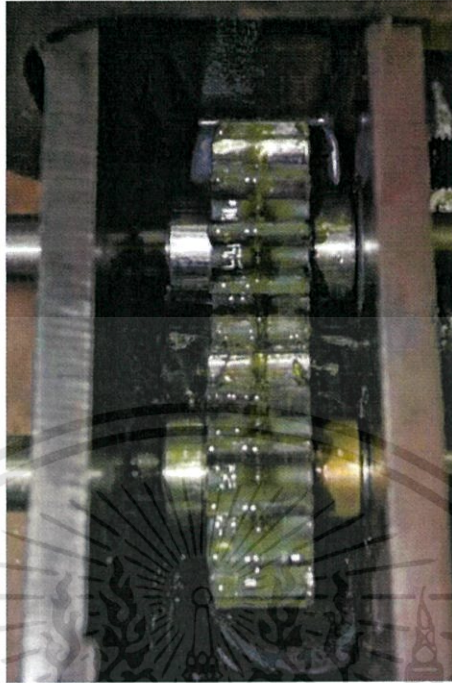
- 6.1.4 เติมน้ำมันหล่อลื่นที่จะทดลองลงในอ่างน้ำมันและทำการตรวจสอบการรั่วซึมของอ่างน้ำมัน และติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆให้เรียบร้อย ดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 การเติมน้ำมันหล่อลื่นที่ทดลองลงในอ่างน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.5 ทำการเปิดสวิตช์เพื่อให้ชุดทดลองทำงาน เพื่องจะทำงานภายในอ่างน้ำมัน ดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 การขบกันของเฟืองในอ่างน้ำมัน

6.1.6 ทำการติดตั้งโหลดที่ให้กับชุดเฟืองโดยการเพิ่มตุ้มน้ำหนักลงบนปลายด้านหนึ่งของชุดเบรคสายพานแบน(Band brake) ดังรูปที่ 6.7



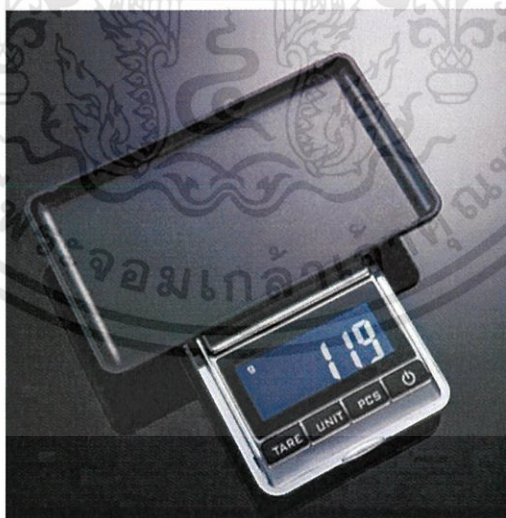
รูปที่ 6.7 การติดตั้งโหลดโดยการใส่ตุ้มน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.8 เครื่องชุดสอบที่ติดตั้งถูกต้อง

- 6.1.7 เมื่อทำการทดลองเมื่อครบจำนวน 200,000 รอบ ทำการเก็บบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ
- 6.1.8 ปิดสวิตช์เพื่อหยุดชุดทดลอง
- 6.1.9 นำน้ำมันออก ถอดโหลตและชุดทดลอง จากนั้นนำเฟืองที่ทดสอบออกจากอ่างน้ำมันและทำความสะอาดเฟือง
- 6.1.10 จากนั้นชั่งน้ำหนักที่สูญหายไปด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.01 กรัมดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.01 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.10 วัดความสึกหรอด้วยไดอัลเกจและทำการเก็บบันทึกข้อมูล ดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 การตรวจระยะสึกหรอด้วยไดอัลเกจ

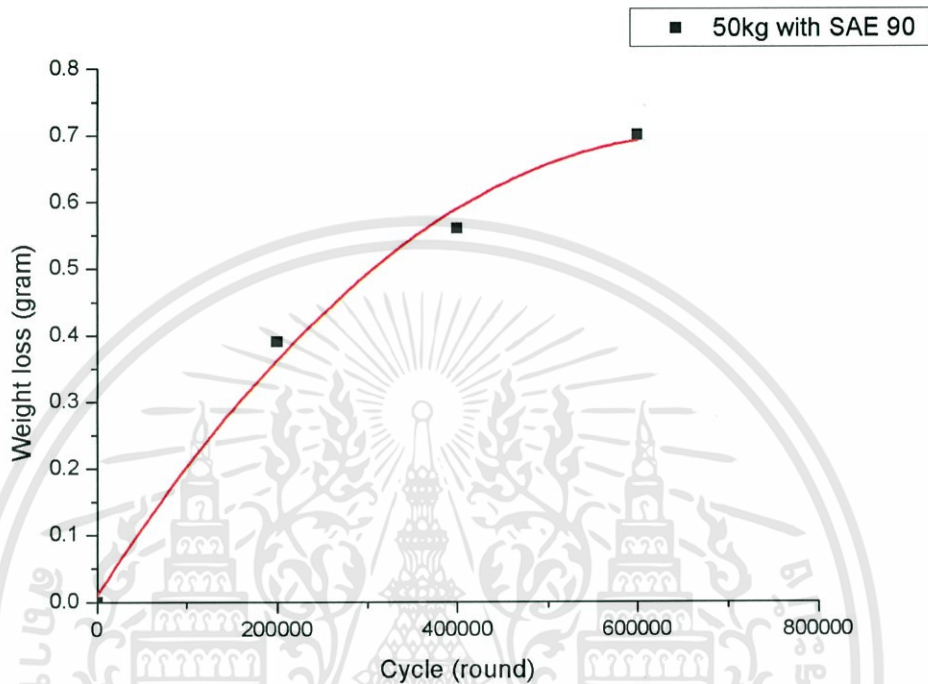
6.1.11 ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 12 จนครบจำนวนทั้งหมด 600,000 รอบ และทำการเก็บบันทึกข้อมูล

6.1.12 ทำการเก็บบันทึกข้อมูลต่างๆและวิเคราะห์ผล

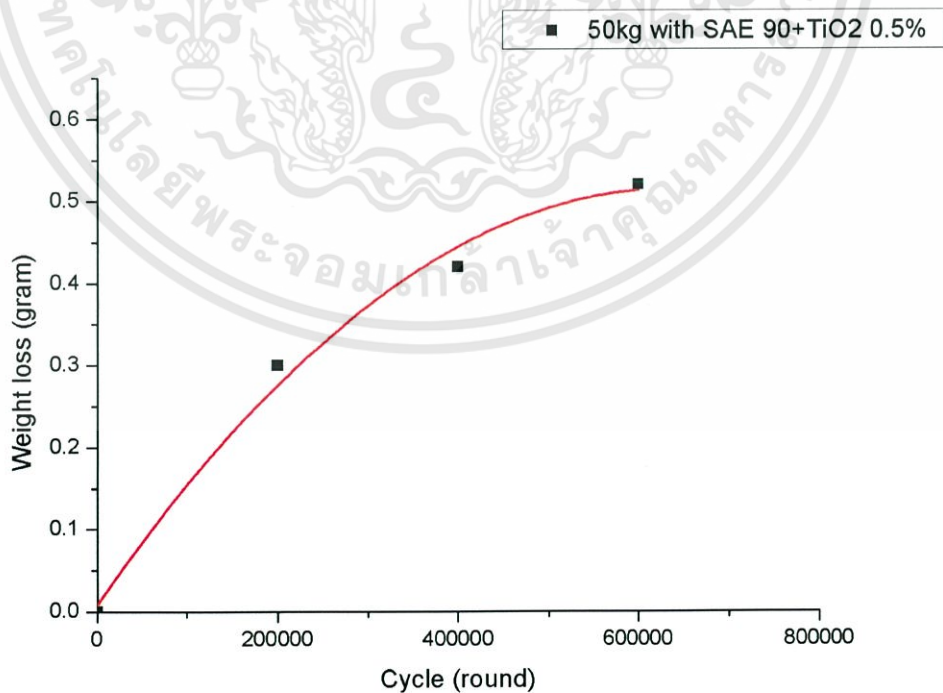
6.2 ผลการทดลอง

6.2.1 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง

การตรวจสอบการสึกหรอด้วยการหาค่าน้ำหนักที่สูญหายไปเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบการสึกหรอของเฟืองตรง เนื่องด้วยรูปร่างของเฟืองตรงนั้นยากต่อการตรวจด้วยวิธีอื่นและเป็นไปตาม ASTM D 4998

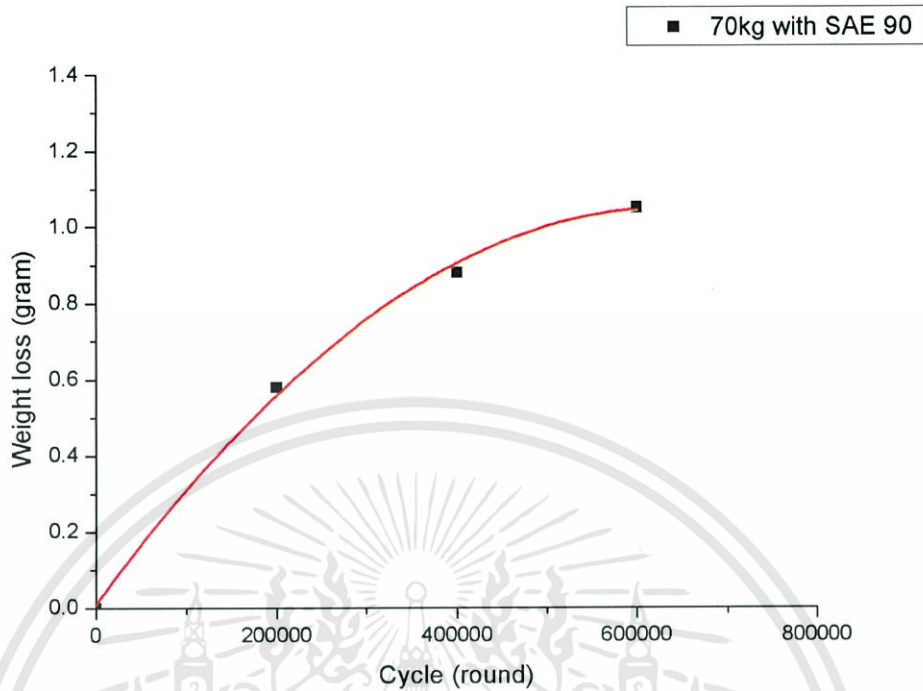


รูปที่ 6.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบ หล่อสี SAE90 ที่โหลด 50 kg

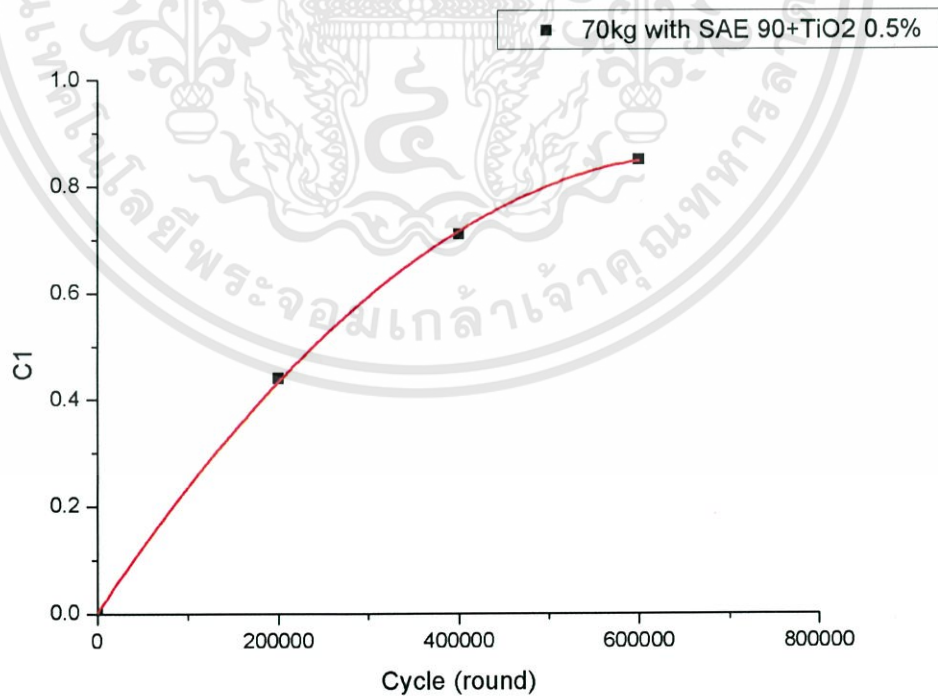


รูปที่ 6.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบ หล่อสี SAE90+TiO₂ ที่โหลด 50 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

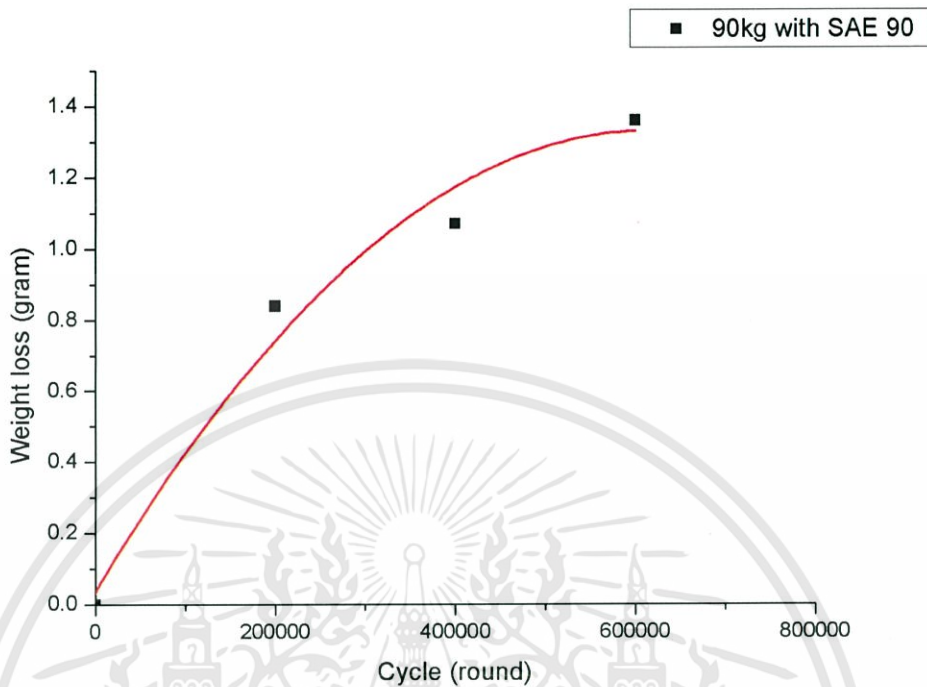


รูปที่ 6.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบ หล่อสีน SAE90 ที่โหลด 70 kg

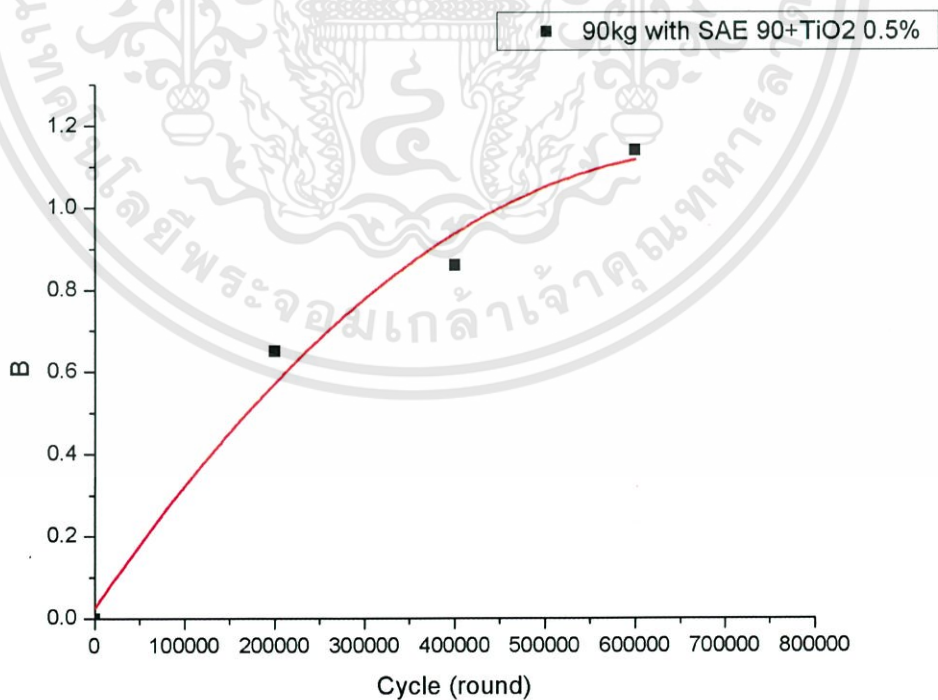


รูปที่ 6.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบ หล่อสีน SAE90+TiO₂ ที่โหลด 70 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

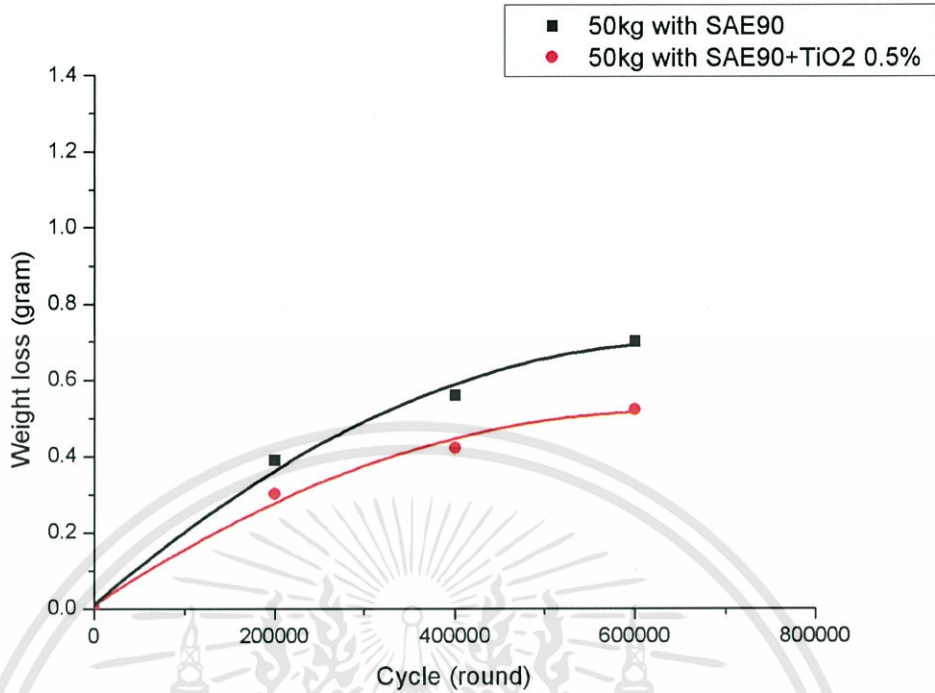


รูปที่ 6.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบ หล่อลื่น SAE90 ที่โหลด 90 kg

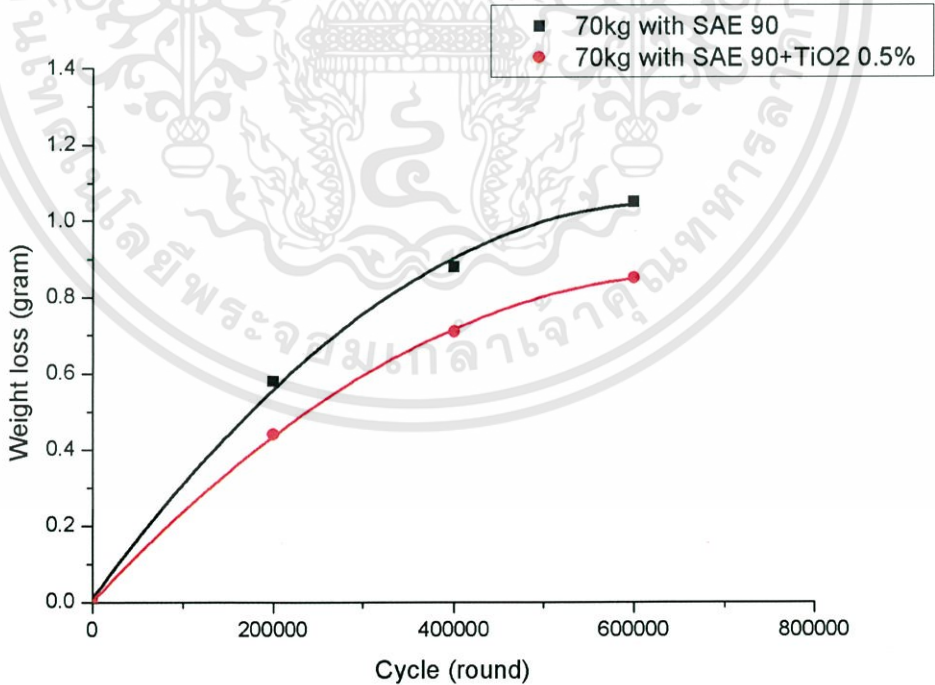


รูปที่ 6.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบ หล่อลื่น SAE90+TiO₂ ที่โหลด 90 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

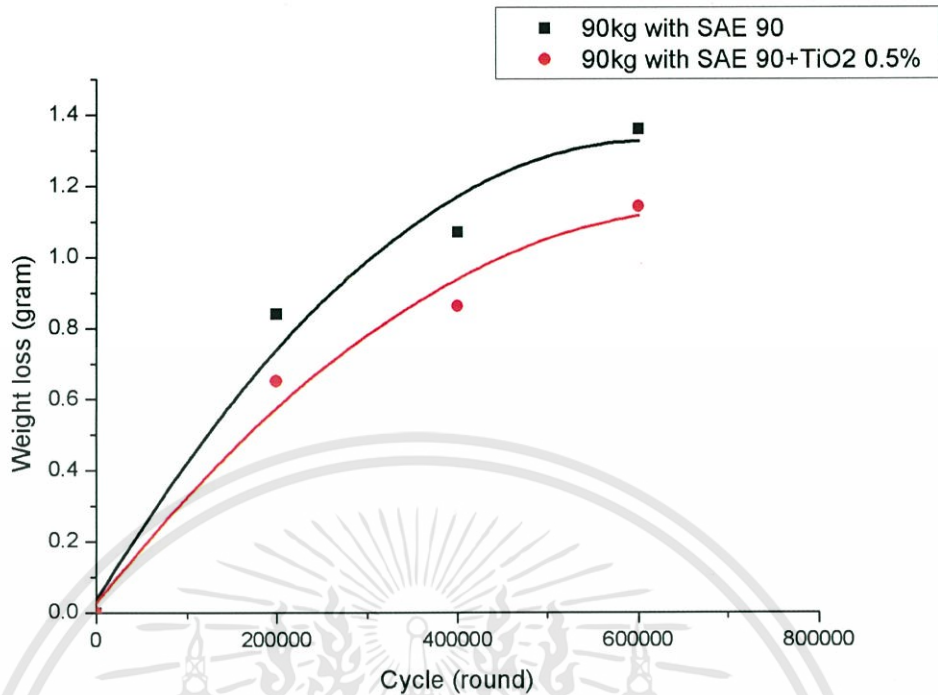


รูปที่ 6.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบของสารหล่อลื่นที่โหลด 50 kg

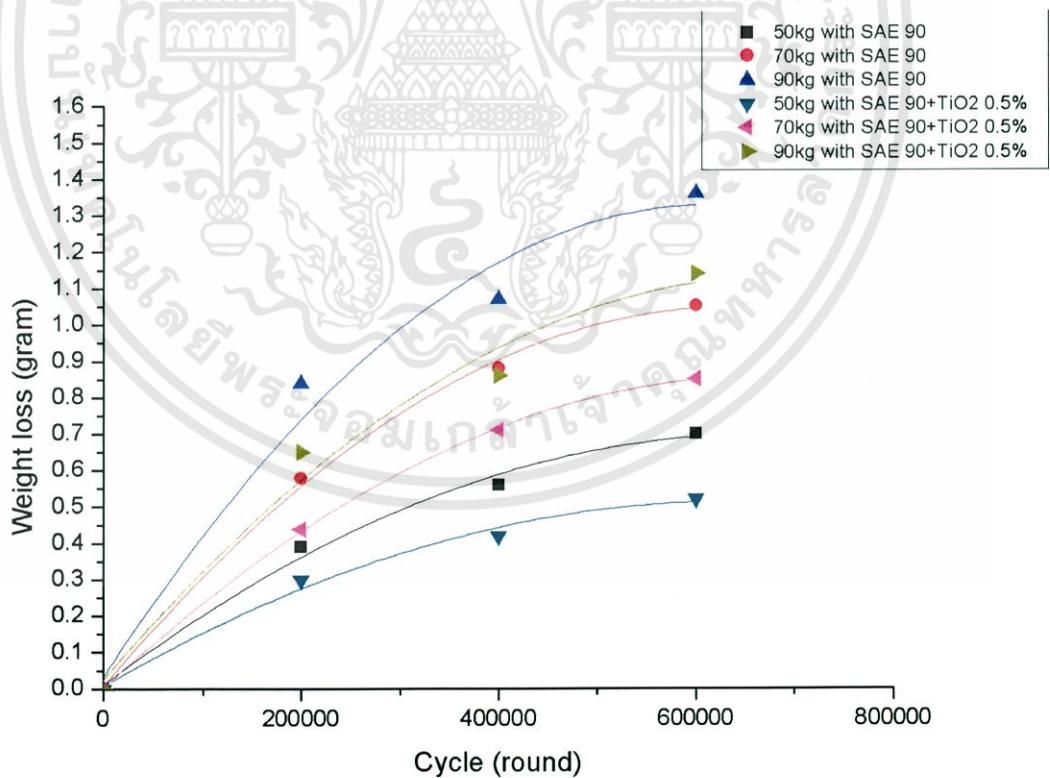


รูปที่ 6.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบของสารหล่อลื่นที่โหลด 70 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบของสารหล่อลื่นที่ไหล 90 kg

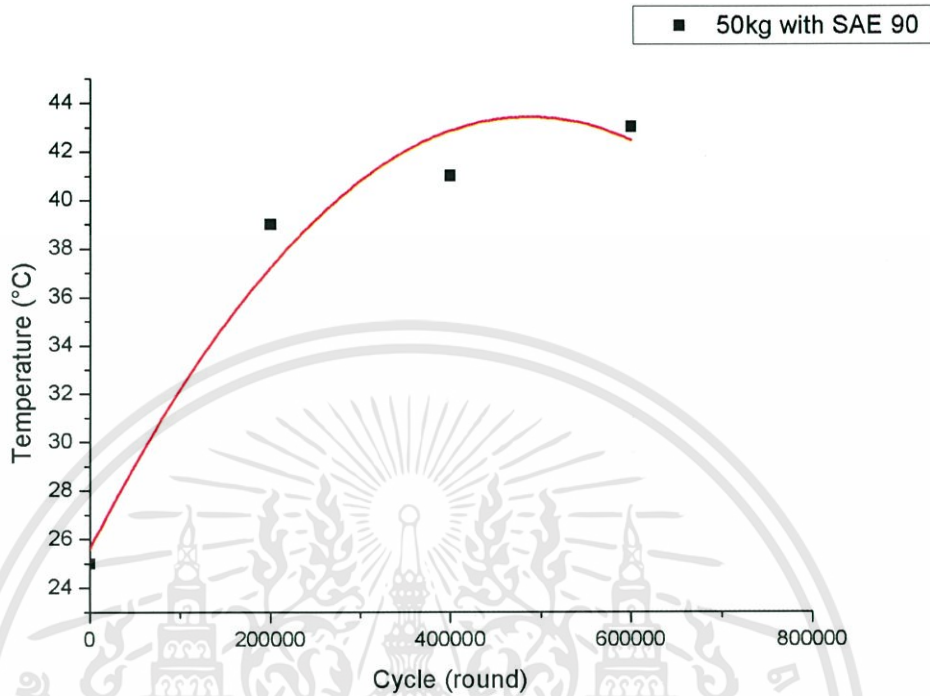


รูปที่ 6.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฟืองที่สูญหายกับรอบ

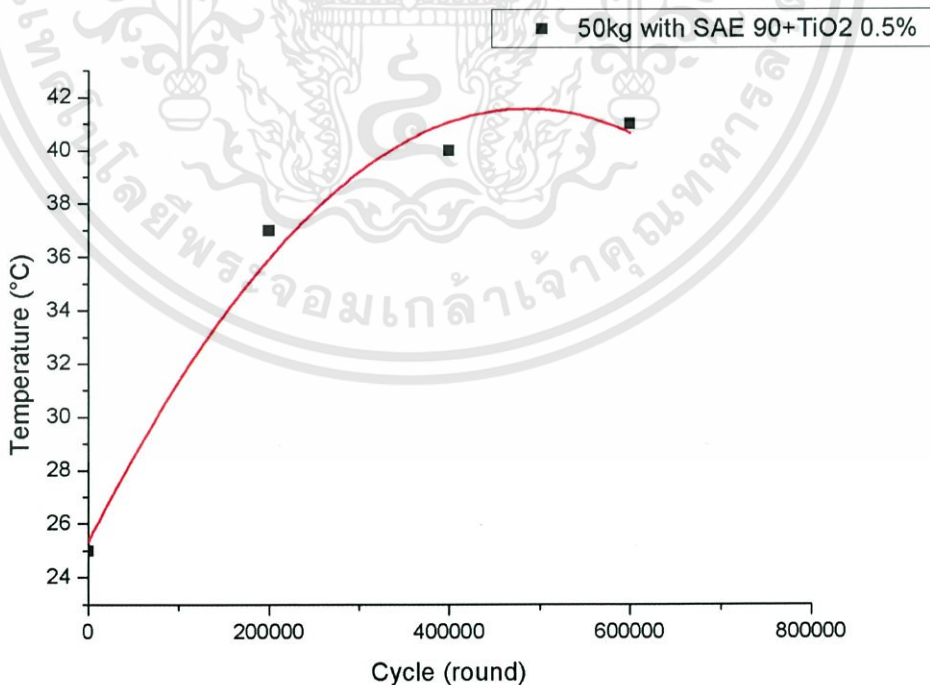
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.2 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

การตรวจสอบอุณหภูมิทำให้สามารถอธิบายผลของคุณสมบัติน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไปได้เนื่องจากอุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อค่าความหนืดของน้ำมันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดน้ำมันจะมีค่าลดลง

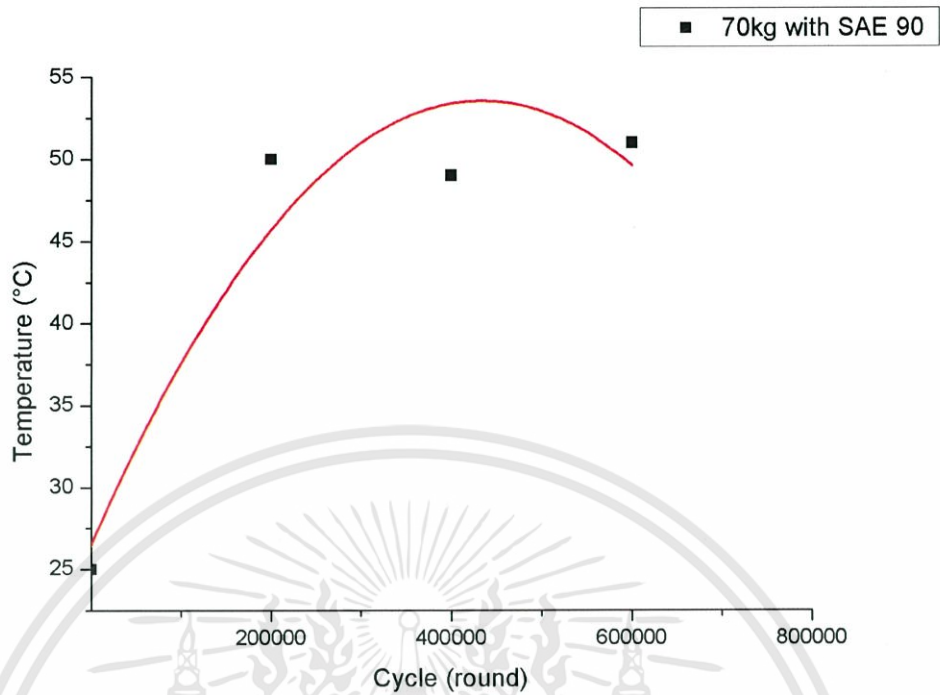


รูปที่ 6.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ ของ SAE90 ที่โหลด 50 kg

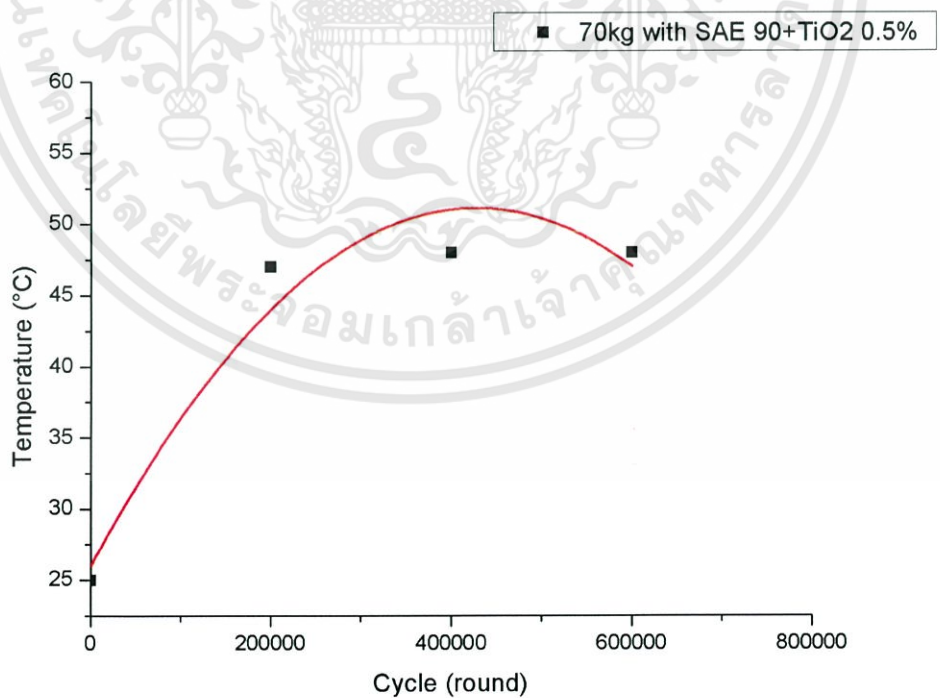


รูปที่ 6.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ ของ SAE90+TiO₂ ที่โหลด 50 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

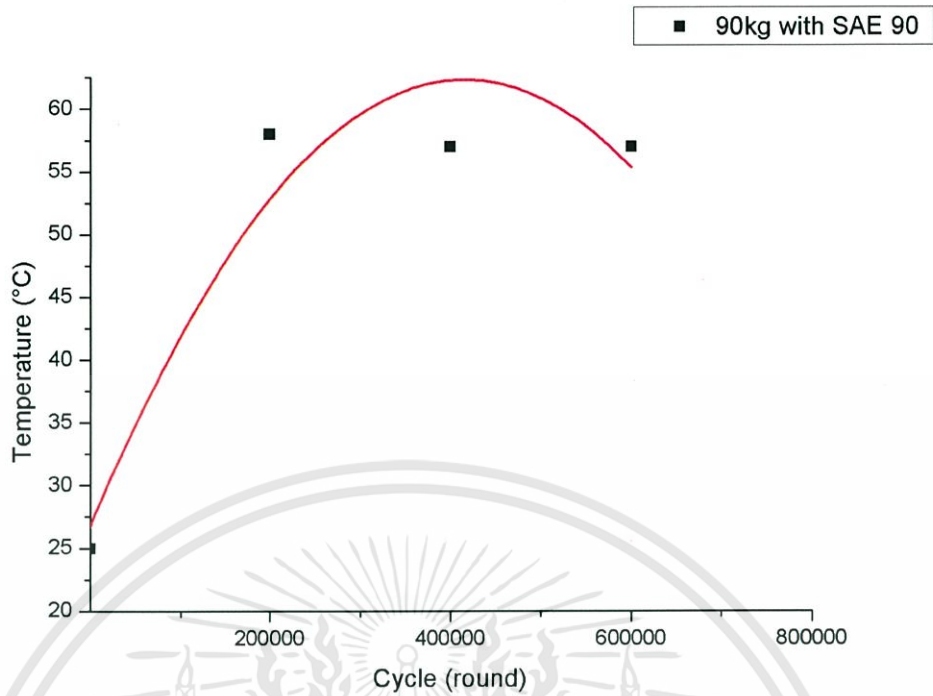


รูปที่ 6.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ ของ SAE90 ที่โหลด 70 kg

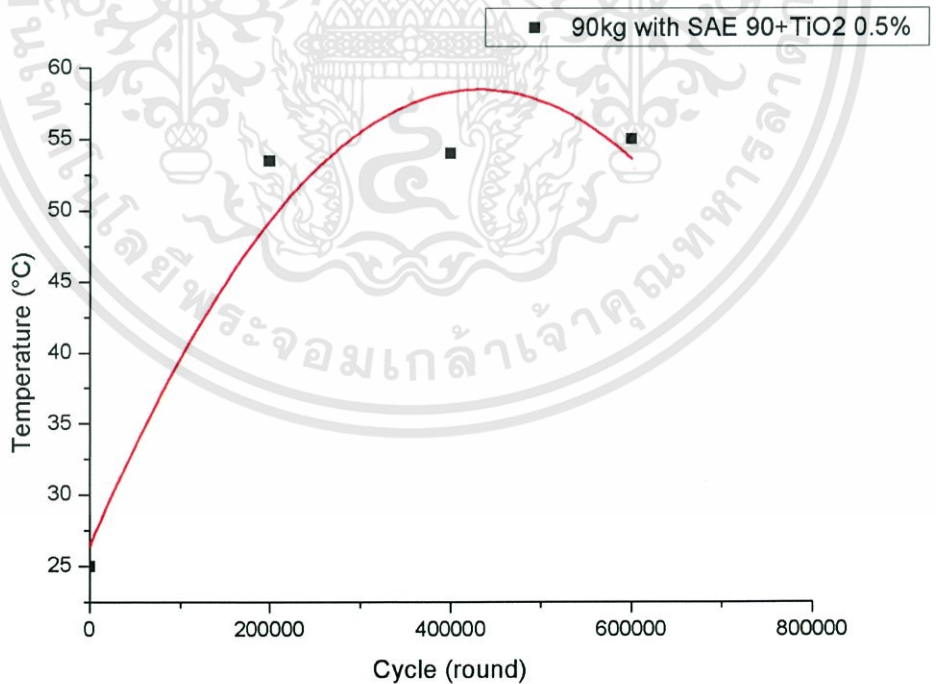


รูปที่ 6.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ ของ SAE90+TiO₂ ที่โหลด 70 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

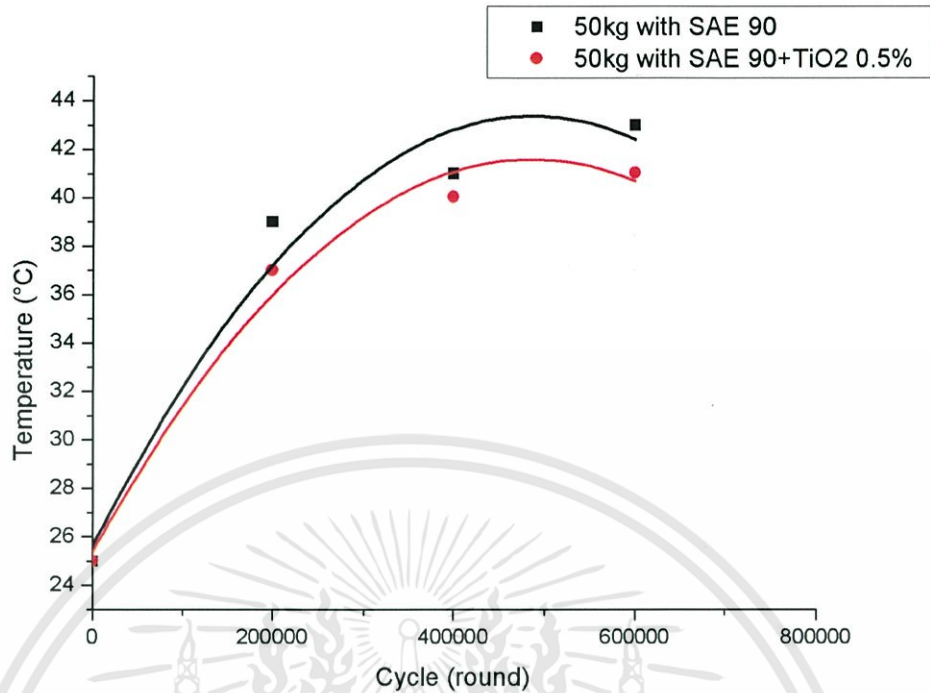


รูปที่ 6.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ ของ SAE90 ที่โหลด 90 kg

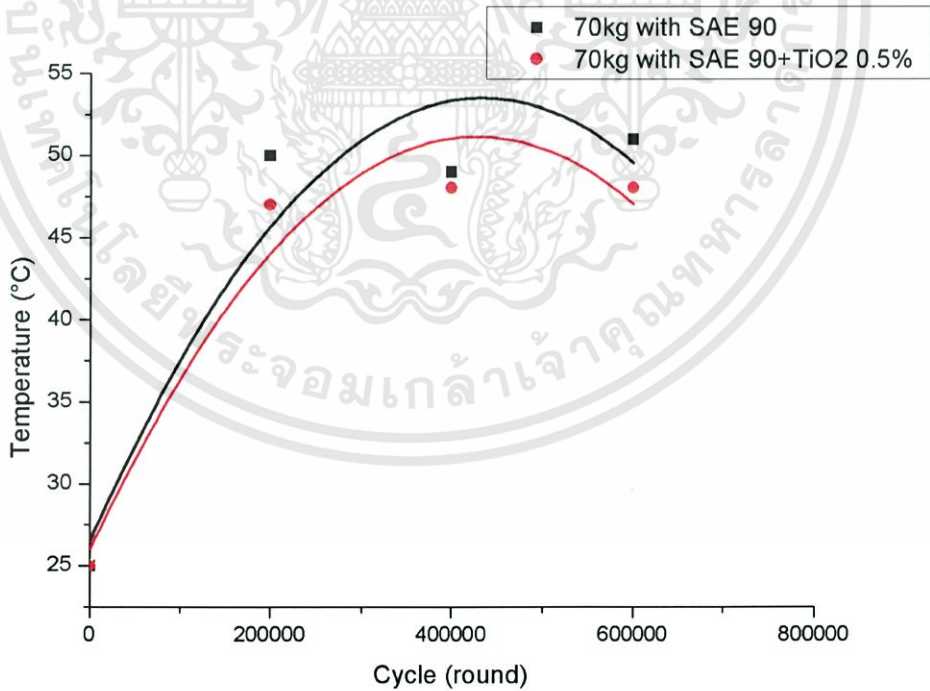


รูปที่ 6.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ ของ SAE90+TiO₂ ที่โหลด 90 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

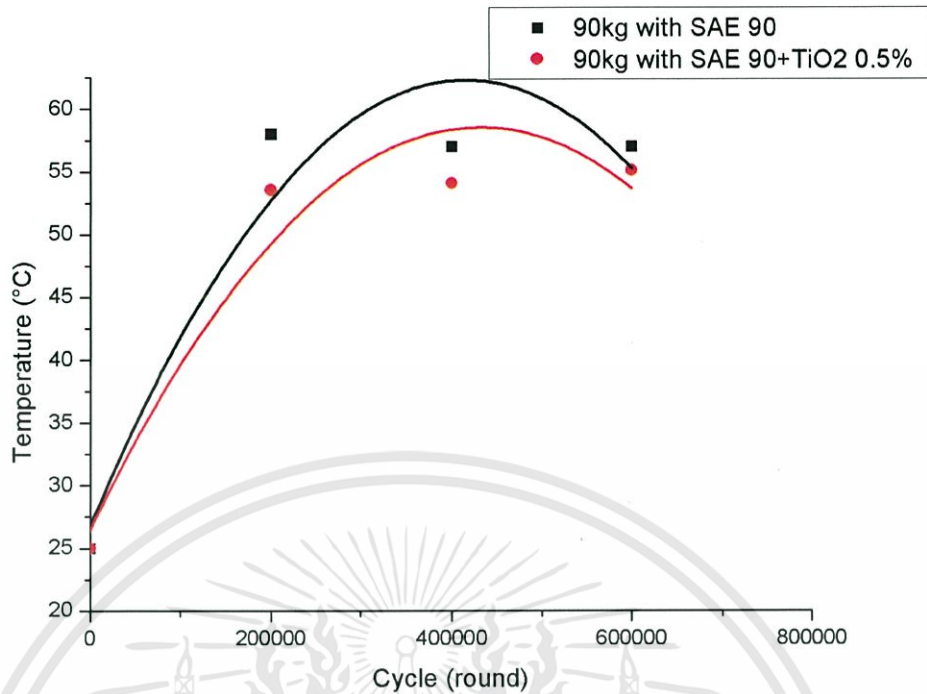


รูปที่ 6.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ ที่โหลด 50 kg

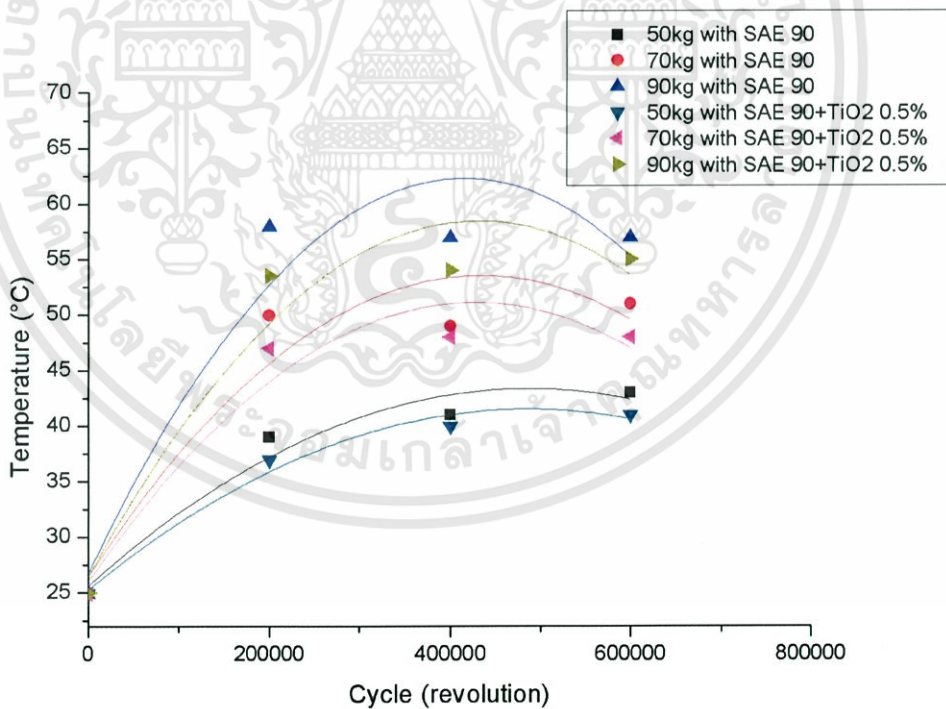


รูปที่ 6.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ ที่โหลด 70 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ ที่โหลด 90 kg

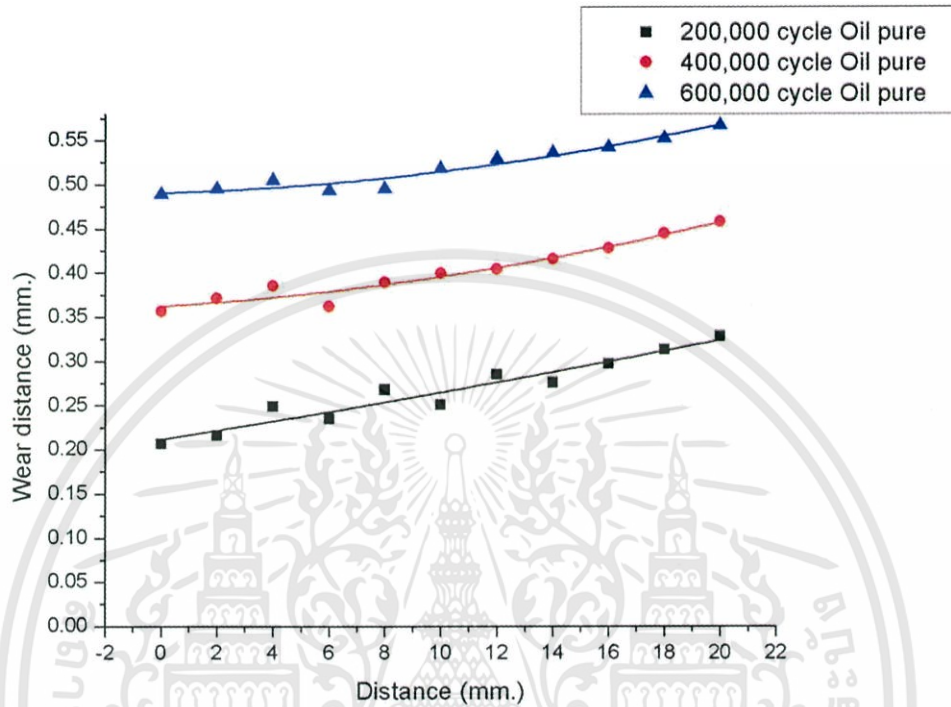


รูปที่ 6.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับรอบ

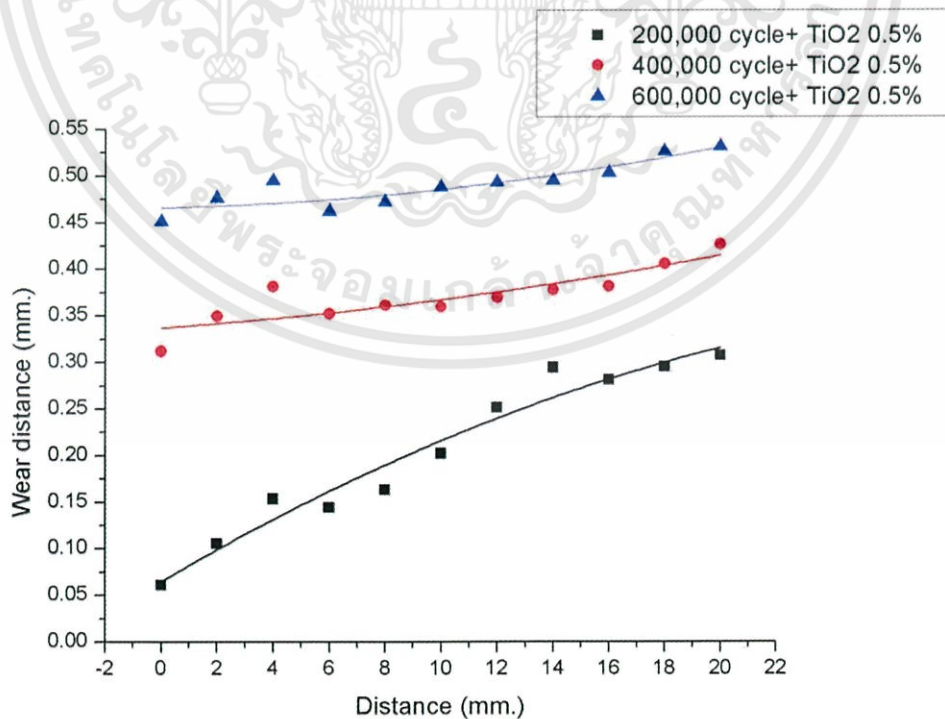
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3 ระยะสึกหรอ

การวัดระยะการสึกหรอนั้นเป็นการตรวจเพื่อให้สามารถอธิบายลักษณะการสึกหรอของเฟืองตรงโดยทำการตรวจสอบระยะสึกหรอที่บริเวณจุดพิชของเฟืองเนื่องจากเป็นจุดที่มีการสัมผัสกันของผิวมากที่สุดอีกทั้งยังเกิดการเคลื่อนที่ทั้งแบบ Rolling และ Sliding

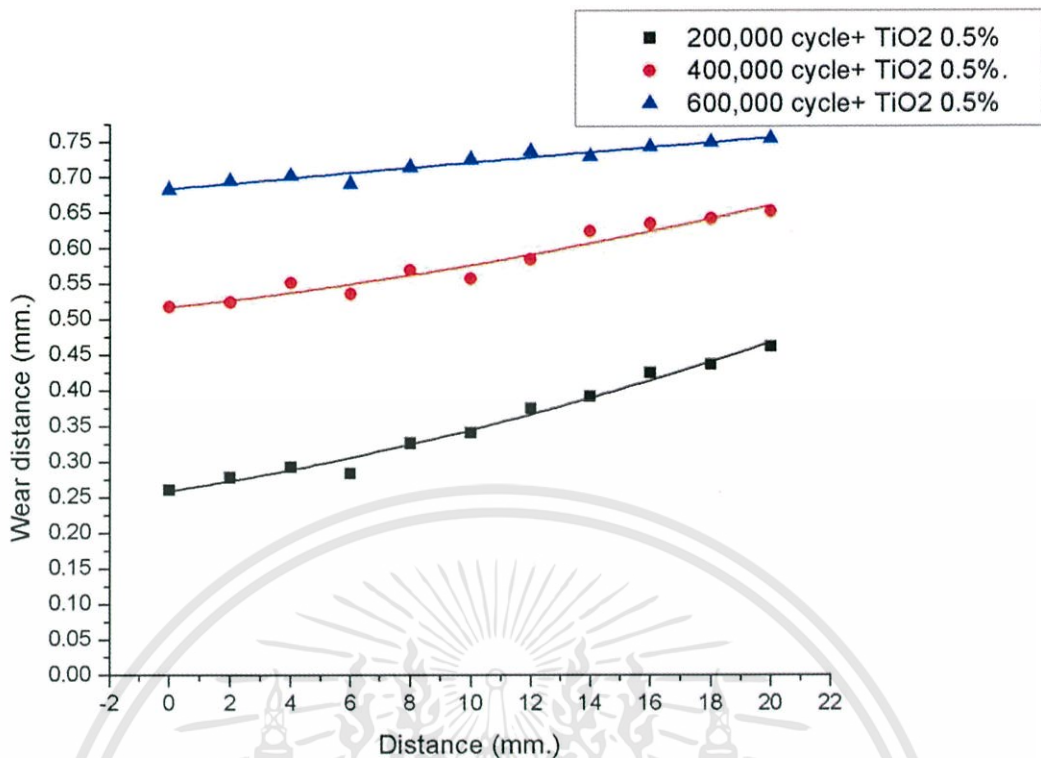


รูปที่ 6.31 กราฟแสดงระยะสึกหรอกับตำแหน่งบนผิวหน้าเฟือง ที่หล่อลื่นด้วย SAE90 ที่โหลด 50 kg

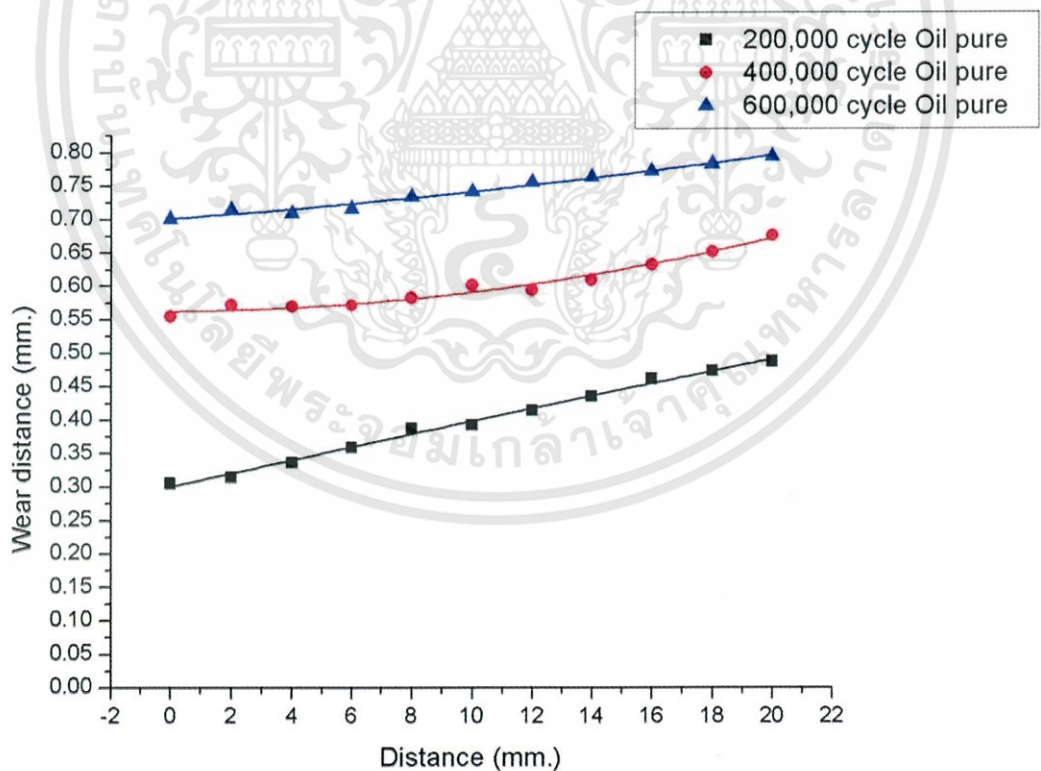


รูปที่ 6.32 กราฟแสดงระยะสึกหรอกับตำแหน่งบนผิวหน้าเฟือง ที่หล่อลื่นด้วย SAE90+TiO₂ ที่โหลด 50 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

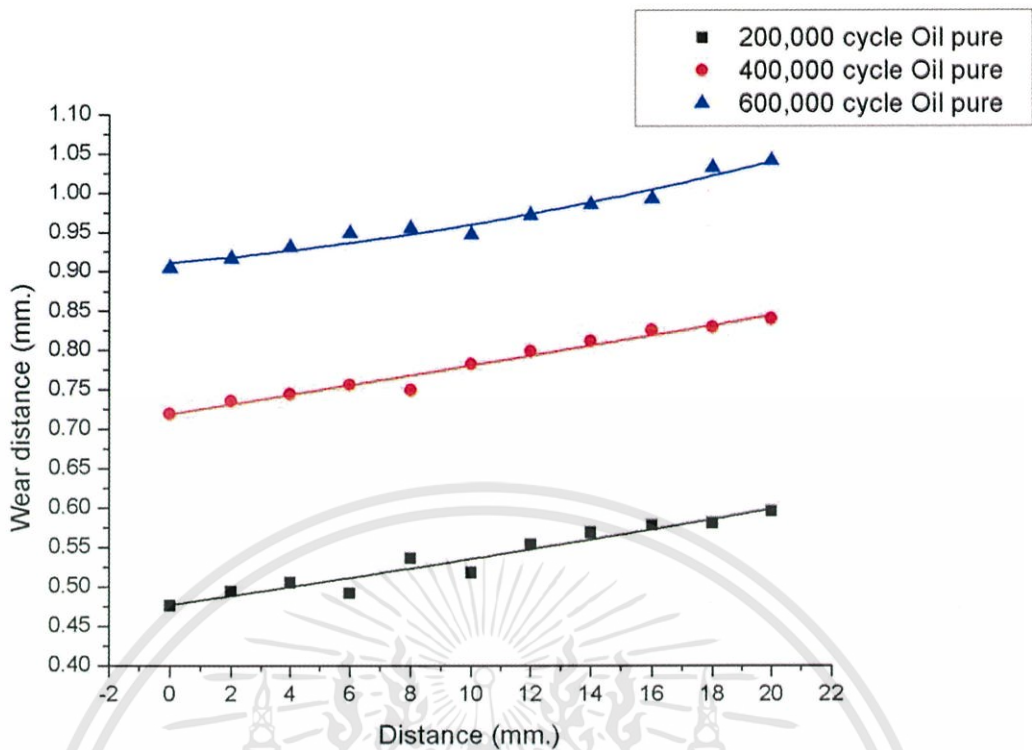


รูปที่ 6.33 กราฟแสดงระยะสึกหรอกับตำแหน่งบนผิวหน้าเฟือง ที่หล่อลื่นด้วย SAE90 ที่โหลด 70 kg

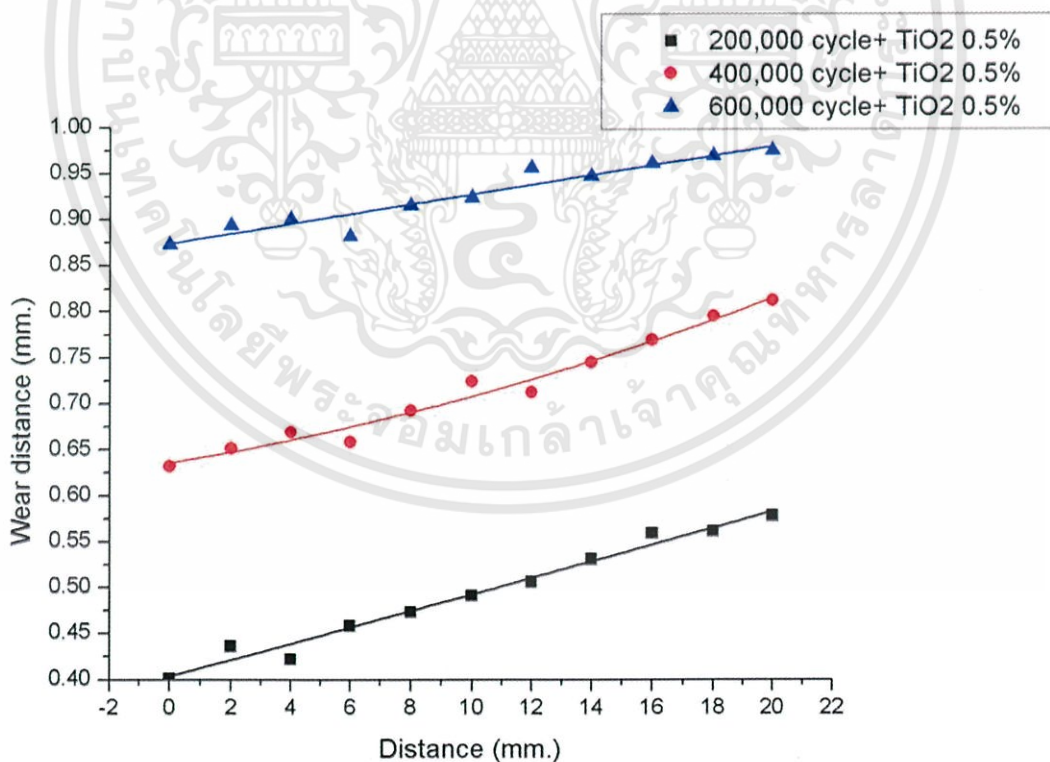


รูปที่ 6.34 กราฟแสดงระยะสึกหรอกับตำแหน่งบนผิวหน้าเฟือง ที่หล่อลื่นด้วย SAE90+TiO₂ ที่โหลด 70 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

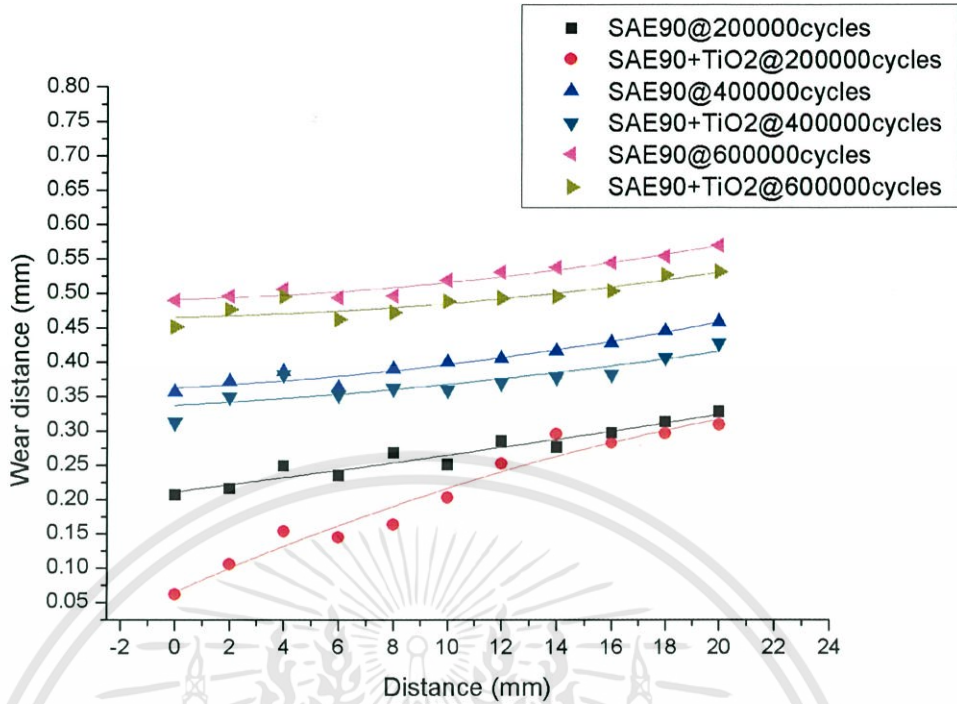


รูปที่ 6.35 กราฟแสดงระยะสึกหรอกับตำแหน่งบนผิวหน้าเฟือง ที่หล่อลื่นด้วย SAE90 ที่โหลด 90 kg

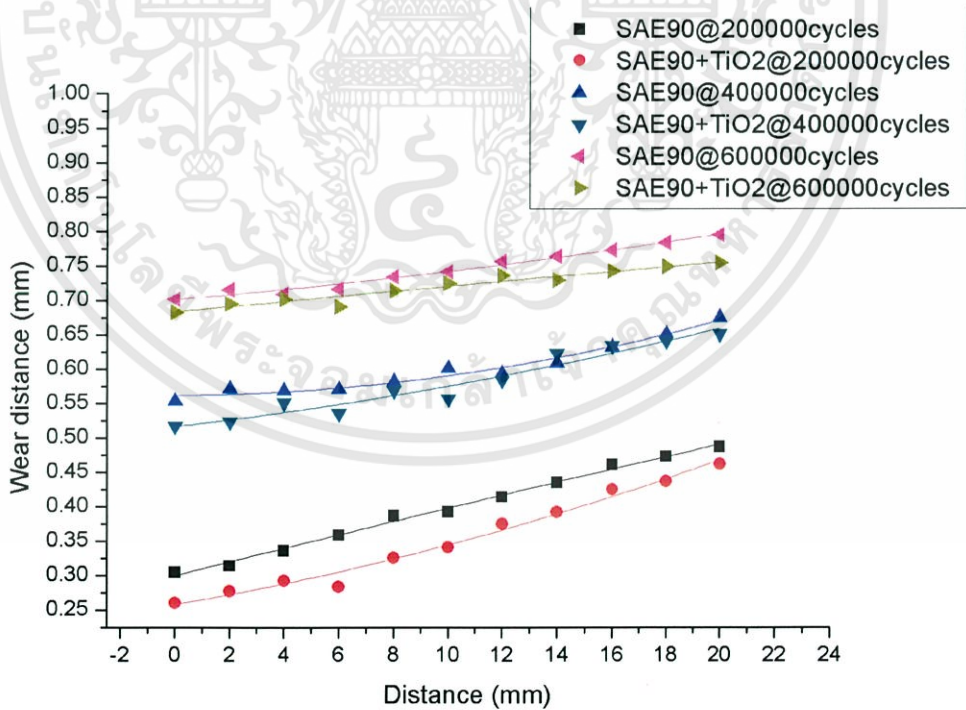


รูปที่ 6.36 กราฟแสดงระยะสึกหรอกับตำแหน่งบนผิวหน้าเฟือง ที่หล่อลื่นด้วย SAE90+TiO₂ ที่โหลด 90 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

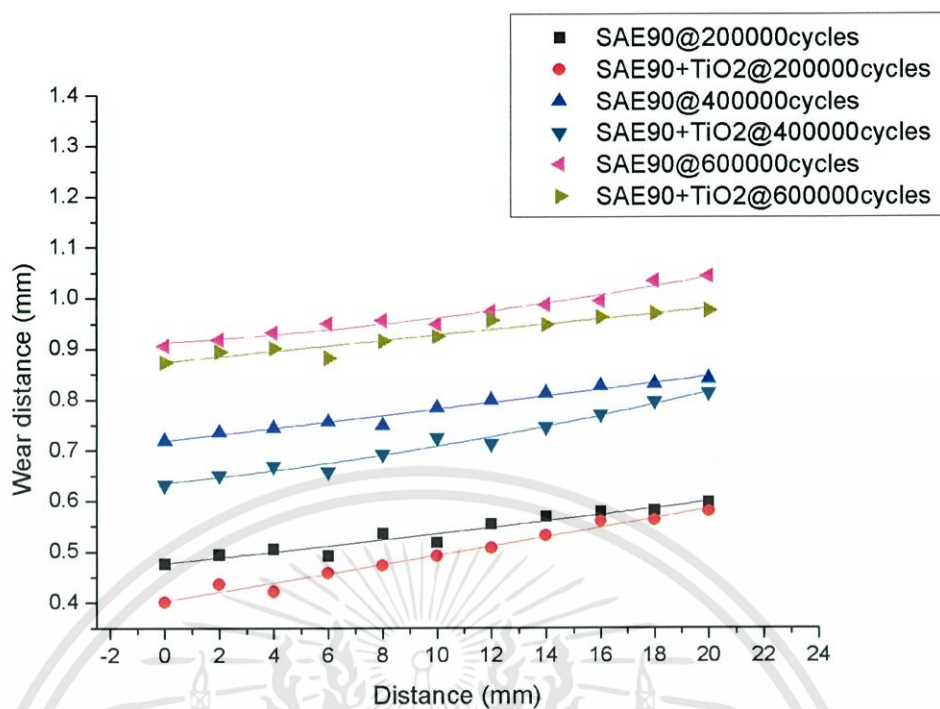


รูปที่ 6.37 กราฟแสดงระยะสึกหรอกับตำแหน่งบนผิวหน้าเฟือง ที่โหลด 50 kg



รูปที่ 6.38 กราฟแสดงระยะสึกหรอกับตำแหน่งบนผิวหน้าเฟือง ที่โหลด 70 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

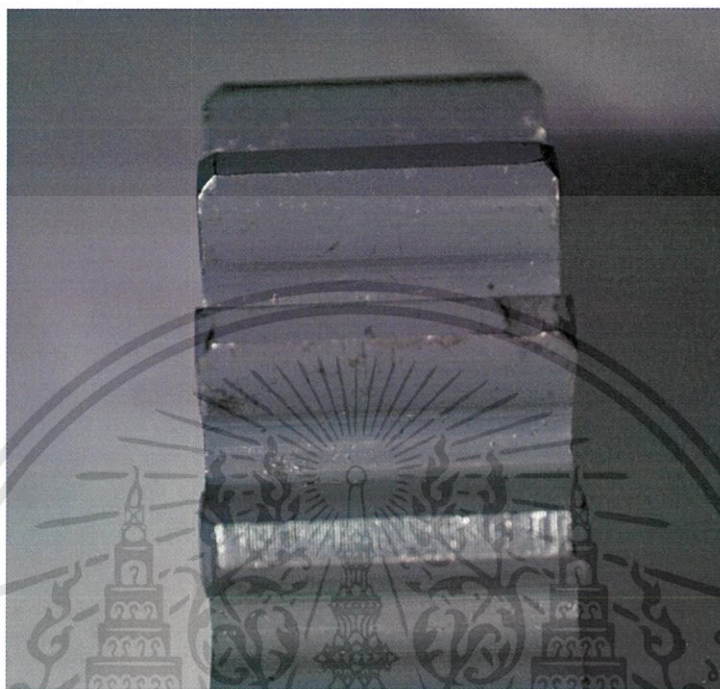


รูปที่ 6.39 กราฟแสดงระยะสึกหรอกับตำแหน่งบนผิวหน้าเฟือง ที่โหลด 90 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.4 ลักษณะการสึกหรอ

การศึกษาการสึกหรอนั้นส่วนที่สึกหรอมากที่สุด คือ ผิวสัมผัสหน้าฟันเฟืองเพื่อที่จะสามารถทำการตรวจสอบลักษณะการสึกหรอได้โดยตรงนั้นคือภาพถ่ายพื้นผิวของเฟืองตรงที่ได้รับ ความเสียหาย เนื่องจากการส่งถ่ายกำลังที่สูง

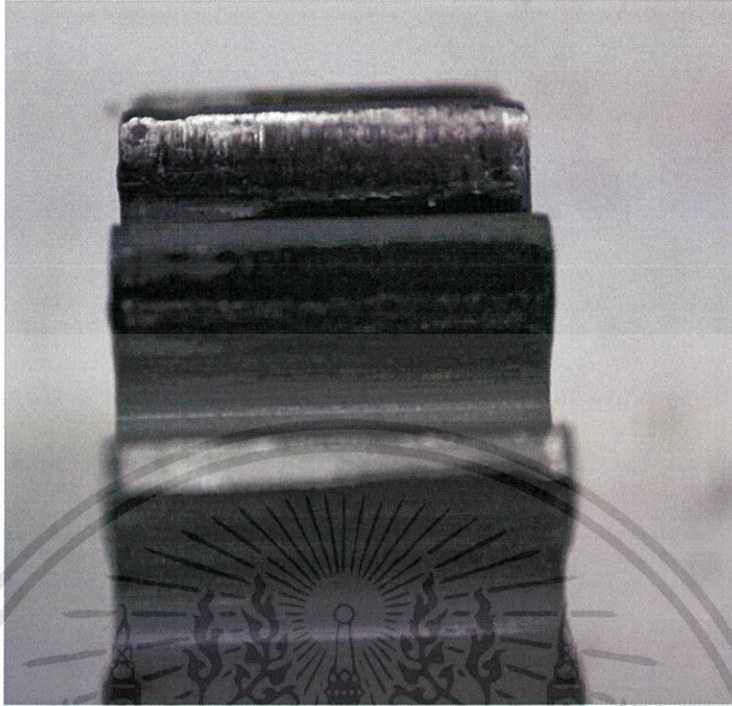


รูปที่ 6.40 ภาพถ่ายผิวสัมผัสของเฟืองที่ 0 รอบ



รูปที่ 6.41 ภาพถ่ายผิวสัมผัสของเฟืองหล่อสแตนด้วย SAE90 ที่ 600,000 รอบ โหลด 50 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

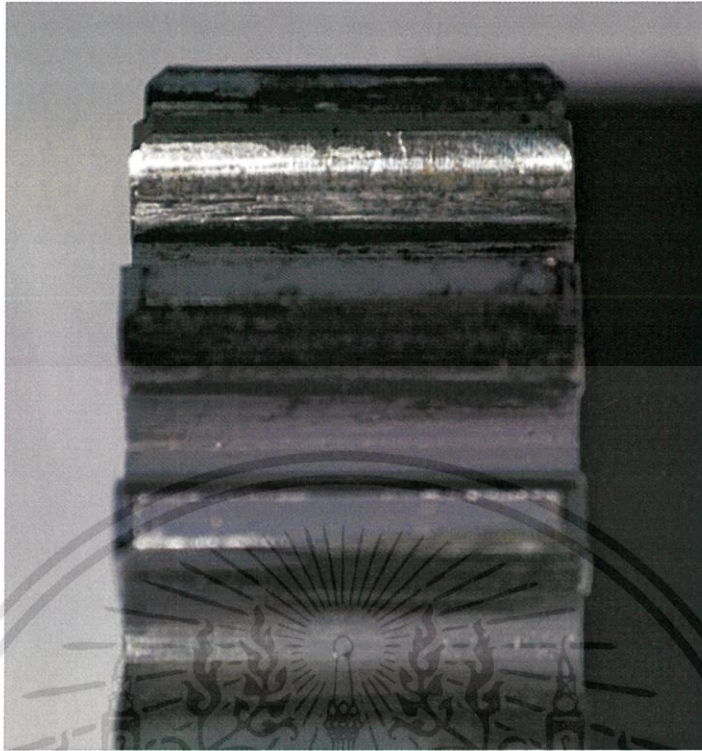


รูปที่ 6.42 ภาพถ่ายผิวสัมผัสของเฟืองหล่อขึ้นด้วย SAE90+TiO₂ ที่ 600,000 รอบ โหลด 50 kg



รูปที่ 6.43 ภาพถ่ายผิวสัมผัสของเฟืองหล่อขึ้นด้วย SAE90 ที่ 600,000 รอบ โหลด 70 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

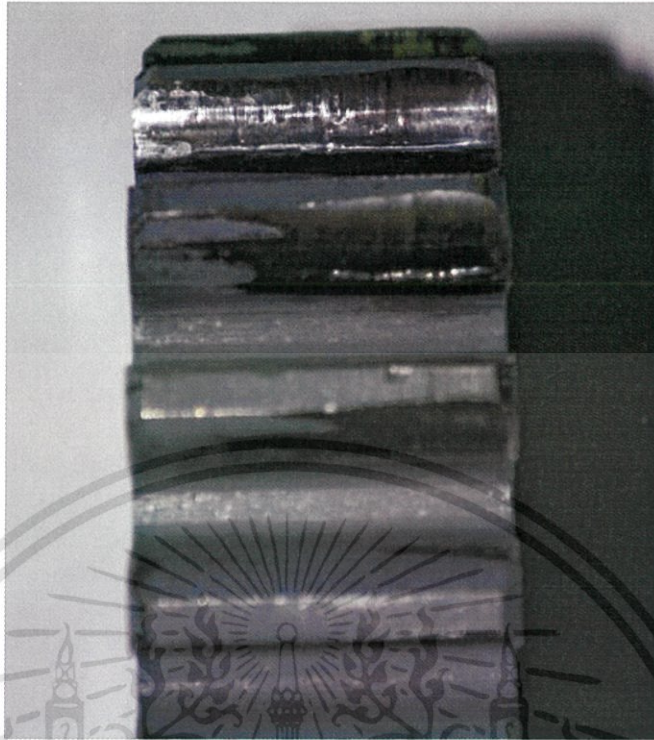


รูปที่ 6.44 ภาพถ่ายผิวสัมผัสของเฟืองหล่อด้วย SAE90+TiO₂ ที่ 600,000 รอบ โหลด 70 kg



รูปที่ 6.45 ภาพถ่ายผิวสัมผัสของเฟืองหล่อด้วย SAE90 ที่ 600,000 รอบ โหลด 90 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.46 ภาพถ่ายผิวสัมผัสของเฟืองหล่อสั่นด้วย SAE90+TiO₂ ที่ 600,000 รอบ โหลด 90 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาลักษณะการสึกหรอของเฟืองตรงที่มีการหล่อลื่นด้วยอนุภาคนาโนจากผลการทดลองสามารถสรุปว่าการเติมอนุภาคนาโน TiO_2 นั้นสามารถช่วยลดการสึกหรอของเฟืองตรงได้เป็น ที่ 600,000 รอบ โหลด 50 กิโลกรัมสามารถช่วยลดการสึกหรอเป็น 25.71% ที่ 600,000 รอบ โหลด 70 กิโลกรัมสามารถช่วยลดการสึกหรอเป็น 19.04% และที่ 600,000 รอบโหลด 90 กิโลกรัมสามารถช่วยลดการสึกหรอเป็น 16.17% จะพบว่าเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นความสามารถในการช่วยลดการสึกหรอของอนุภาคนาโนก็จะลดลง ในด้านอุณหภูมิอนุภาคนาโนสามารถช่วยลดอุณหภูมิของสารหล่อลื่นได้เนื่องจากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิของการค่อนข้างคงที่และมีความเสถียร ในการวัดความสึกหรอด้วยไดอัลเกจสามารถสนับสนุนว่าความสึกหรอโดยการชั่งน้ำหนักที่หาย ในการตรวจสอบลักษณะการสึกหรอของผิวหน้าเฟืองตรงที่สัมผัสกันพบว่าเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดความล้าที่ผิวมากขึ้นและทำให้เกิดการแตกหักหลุดร่อนและทำให้เกิดหลุดขึ้นของผิวหน้าฟันเฟืองแต่ในทางกลับกันเมื่อมีการเติมอนุภาคนาโนในสารหล่อลื่นจะพบว่าที่โหลด 50 และ 70 กิโลกรัม นั้นไม่พบหลุดเกิดขึ้น และจะพบหลุดขนาดเล็กที่โหลด 90 กิโลกรัม ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการเติมอนุภาคนาโนในสารหล่อลื่นสามารถช่วยลดการสึกหรอของเฟืองตรงได้

7.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองนั้นยังมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการศึกษาศึกษาการสึกหรออีกหลายประการ ดังนั้นการตรวจสอบจึงจำเป็นต้องการการวิเคราะห์ในรูปแบบอื่นๆ เช่น การตรวจสอบค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอนุภาคนาโน และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่น เพื่อจะได้ทราบถึงผลของอนุภาคนาโนว่าสามารถมีลักษณะที่ช่วยลดการสึกหรอในด้านใด รวมถึงการวัดระยะการสึกหรอที่ตำแหน่งต่างๆนั้นทำได้ยากเนื่องจากขาดแคลนเครื่องมือในการวัด

ในการออกแบบและสร้างเครื่องทดลองนั้นในการออกแบบนั้นสามารถทำได้โดยไม่พบอุปสรรคเนื่องจากมีตัวอย่างการออกแบบเครื่องทดสอบแต่ในการสร้างชุดทดลองจริงนั้นพบปัญหาในด้านเครื่องมือช่าง เนื่องด้วยชิ้นงานบางชิ้นจำเป็นต้องใช้เครื่องมือโดยเฉพาะทางเช่น การกลึง การทำร่องลิ้ม การกัด บางครั้งไม่สามารถทำได้เนื่องจากไม่มีเครื่องมือจึงจำเป็นต้องจ้างโรงกลึงทำและจำเป็นต้องทำหลายชิ้นทำให้เสียค่าใช้จ่ายในส่วนนี้จำนวนมาก

เอกสารอ้างอิง

- [1] Th Mang . W Dresel . **Lubricants and Lubrication** . WILLEY-VCS Verlag HmbH & Co. KGaA . Weinhem . ISBN: 978-3-527-31497-3.
- [2] B.-R.Hohn . K Michaelis. **Influence of oil temperature on gear failures**. Tribology International ,37 (2004) 103-109
- [3] H Chang. Z Y Li. M J Kao. K D Huang. H M Wu. **Tribology property of TiO₂ nanolubricant on piston and cylinder surfaces**. Journal of alloys and compounds. 495 (2010) 481-484
- [4] Y Y Wu. W C Tsui. T C Liu. **Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additive**. Wear. 262 (2007) 819-825
- [5] S Ingole. A Charanpahari. A Kakade. S S Umare. D V Bhatt. **Tribolglcal behavior of nano TiO₂ as additive in base oil**. Wear. 301 (2013) 776-785
- [6] A H Battez. R Gonzalez. J L Viesca. J E.Fernandez. J M D Fernandez. A Machado. R Chou. J Riba. **CuO ZrO₂ and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants**. Wear. 265 (2008) 422-428
- [7] Robert L Norton. **Machine Design an integrated approach**. Third Edition. Person Education International. Inc.2006



ภาคผนวก ก
ข้อมูลผลการทดลองน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลน้ำหนักของเฟืองทดสอบในน้ำมันหล่อลื่นที่ปราศจากอนุภาคนาโนที่โหลด 50 kg

จำนวนทดลอง (รอบ)	น้ำหนักของเฟือง (กรัม)	น้ำหนักสูญหาย (กรัม)
0	466.54	0.00
200,000	466.15	0.39
400,000	466.09	0.56
600,000	465.84	0.70

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลน้ำหนักของเฟืองทดสอบในน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมอนุภาคนาโนที่โหลด 50 kg

จำนวนทดลอง (รอบ)	น้ำหนักของเฟือง (กรัม)	น้ำหนักสูญหาย (กรัม)
0	462.43	0.00
200,000	462.13	0.30
400,000	462.02	0.42
600,000	461.61	0.52

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลน้ำหนักของเฟืองทดสอบในน้ำมันหล่อลื่นที่ปราศจากอนุภาคนาโนที่โหลด 70 kg

จำนวนทดลอง (รอบ)	น้ำหนักของเฟือง (กรัม)	น้ำหนักสูญหาย (กรัม)
0	462.01	0.00
200,000	461.47	0.58
400,000	461.21	0.88
600,000	460.88	1.05

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลน้ำหนักของเฟืองทดสอบในน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมอนุภาคนาโนที่โหลด 70 kg

จำนวนทดลอง (รอบ)	น้ำหนักของเฟือง (กรัม)	น้ำหนักสูญหาย (กรัม)
0	463.22	0.00
200,000	462.88	0.44
400,000	462.59	0.71
600,000	462.37	0.85

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลน้ำหนักของเฟืองทดสอบในน้ำมันหล่อลื่นที่ปราศจากอนุภาคนาโนที่โหลด 90 kg

จำนวนทดลอง (รอบ)	น้ำหนักของเฟือง (กรัม)	น้ำหนักสูญหาย (กรัม)
0	464.14	0.00
200,000	463.42	0.84
400,000	463.29	1.07
600,000	462.78	1.36

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลน้ำหนักของเฟืองทดสอบในน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมอนุภาคนาโนที่โหลด 90 kg

จำนวนทดลอง (รอบ)	น้ำหนักของเฟือง (กรัม)	น้ำหนักสูญหาย (กรัม)
0	465.16	0.00
200,000	464.61	0.65
400,000	464.3	0.86
600,000	464.02	1.14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่ปราศจากอนุภาคนาโนที่ไหลต 50 kg

จำนวนรอบทดลอง (รอบ)	อุณหภูมิน้ำมัน (องศาเซลเซียส)
0	25
200,000	40
400,000	41
600,000	43

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมอนุภาคนาโนที่ไหลต 50 kg

จำนวนรอบทดลอง (รอบ)	อุณหภูมิน้ำมัน (องศาเซลเซียส)
0	25
200,000	37
400,000	40
600,000	41

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่ปราศจากอนุภาคนาโนที่ไหลต 70 kg

จำนวนรอบทดลอง (รอบ)	อุณหภูมิน้ำมัน (องศาเซลเซียส)
0	25
200,000	50
400,000	49
600,000	51

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมอนุภาคนาโนที่โหลด 70 kg

จำนวนรอบทดลอง (รอบ)	อุณหภูมิน้ำมัน (องศาเซลเซียส)
0	25
200,000	47
400,000	48
600,000	48

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่ปราศจากอนุภาคนาโนที่โหลด 90 kg

จำนวนรอบทดลอง (รอบ)	อุณหภูมิน้ำมัน (องศาเซลเซียส)
0	25
200,000	58
400,000	57
600,000	57

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมอนุภาคนาโนที่โหลด 90 kg

จำนวนรอบทดลอง (รอบ)	อุณหภูมิน้ำมัน (องศาเซลเซียส)
0	25
200,000	53.5
400,000	54
600,000	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กเหนียวที่ผสมสารเติมแต่ง (พื้นที่1) ที่ภาระโหลด 50 กิโลกรัม

ตำแหน่ง Pitch point (มิลลิเมตร)	ความลึกของการสึกหรอ (มิลลิเมตร) ที่จำนวนรอบ			
	0	200,000	400,000	600,000
0	0	0.061	0.312	0.451
2	0	0.105	0.349	0.476
4	0	0.153	0.381	0.495
6	0	0.144	0.352	0.462
8	0	0.163	0.361	0.472
10	0	0.202	0.359	0.488
12	0	0.251	0.369	0.493
14	0	0.294	0.377	0.495
16	0	0.281	0.381	0.503
18	0	0.295	0.405	0.526
20	0	0.307	0.426	0.531

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กเหนียวที่ผสมสารเติมแต่ง (พื้นที่2) ที่ภาระโหลด 50 กิโลกรัม

ตำแหน่ง Pitch point (มิลลิเมตร)	ความลึกของการสึกหรอ (มิลลิเมตร) ที่จำนวนรอบ			
	0	200,000	400,000	600,000
0	0	0.06	0.309	0.448
2	0	0.082	0.316	0.454
4	0	0.104	0.352	0.467
6	0	0.149	0.327	0.476
8	0	0.183	0.388	0.491
10	0	0.195	0.365	0.482
12	0	0.205	0.392	0.496
14	0	0.263	0.375	0.481
16	0	0.281	0.398	0.502
18	0	0.295	0.414	0.519
20	0	0.301	0.421	0.528

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กเหนียวที่ผสมสารเติมแต่ง (พื้นที่3) ที่ภาระโหลด 50 กิโลกรัม

ตำแหน่ง Pitch point (มิลลิเมตร)	ความลึกของการสึกหรอ (มิลลิเมตร) ที่จำนวนรอบ			
	0	200,000	400,000	600,000
0	0	0.062	0.306	0.445
2	0	0.103	0.327	0.462
4	0	0.116	0.353	0.477
6	0	0.164	0.348	0.486
8	0	0.208	0.381	0.499
10	0	0.229	0.362	0.449
12	0	0.245	0.375	0.452
14	0	0.285	0.388	0.492
16	0	0.264	0.405	0.501
18	0	0.297	0.419	0.519
20	0	0.305	0.425	0.527

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กเหนียวที่ผสมสารเติมแต่ง (พื้นที่1) ที่ภาระโหลด 70 กิโลกรัม

ตำแหน่ง Pitch point (มิลลิเมตร)	ความลึกของการสึกหรอ (มิลลิเมตร) ที่จำนวนรอบ			
	0	200,000	400,000	600,000
0	0	0.261	0.518	0.683
2	0	0.278	0.524	0.695
4	0	0.293	0.551	0.702
6	0	0.284	0.536	0.691
8	0	0.326	0.569	0.714
10	0	0.341	0.557	0.725
12	0	0.375	0.584	0.736
14	0	0.392	0.623	0.729
16	0	0.425	0.634	0.742
18	0	0.437	0.641	0.749
20	0	0.462	0.651	0.754

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กเหนียวที่ผสมสารเติมแต่ง (พื้นที่2) ที่ภาระโหลด 70 กิโลกรัม

ตำแหน่ง Pitch point (มิลลิเมตร)	ความลึกของการสึกหรอ (มิลลิเมตร) ที่จำนวนรอบ			
	0	200,000	400,000	600,000
0	0	0.266	0.525	0.681
2	0	0.271	0.536	0.693
4	0	0.295	0.561	0.704
6	0	0.299	0.544	0.691
8	0	0.285	0.572	0.711
10	0	0.325	0.593	0.742
12	0	0.341	0.621	0.731
14	0	0.365	0.603	0.729
16	0	0.415	0.625	0.711
18	0	0.433	0.639	0.735
20	0	0.451	0.648	0.749

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กเหนียวที่ผสมสารเติมแต่ง (พื้นที่3) ที่ภาระโหลด 70 กิโลกรัม

ตำแหน่ง Pitch point (มิลลิเมตร)	ความลึกของการสึกหรอ (มิลลิเมตร) ที่จำนวนรอบ			
	0	200,000	400,000	600,000
0	0	0.273	0.519	0.686
2	0	0.265	0.541	0.714
4	0	0.284	0.527	0.702
6	0	0.297	0.533	0.693
8	0	0.313	0.574	0.726
10	0	0.342	0.582	0.738
12	0	0.367	0.596	0.744
14	0	0.362	0.609	0.721
16	0	0.432	0.615	0.735
18	0	0.441	0.633	0.739
20	0	0.459	0.645	0.745

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กเหนียวที่ผสมสารเติมแต่ง (พื้นที่1) ที่ภาระโหลด 90 กิโลกรัม

ตำแหน่ง Pitch point (มิลลิเมตร)	ความลึกของการสึกหรอ (มิลลิเมตร) ที่จำนวนรอบ			
	0	200,000	400,000	600,000
0	0	0.401	0.632	0.873
2	0	0.436	0.651	0.894
4	0	0.422	0.669	0.901
6	0	0.458	0.658	0.882
8	0	0.473	0.692	0.915
10	0	0.491	0.724	0.924
12	0	0.506	0.712	0.956
14	0	0.531	0.745	0.947
16	0	0.559	0.769	0.961
18	0	0.561	0.795	0.969
20	0	0.578	0.812	0.975

ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กเหนียวที่ผสมสารเติมแต่ง (พื้นที่2) ที่ภาระโหลด 90 กิโลกรัม

ตำแหน่ง Pitch point (มิลลิเมตร)	ความลึกของการสึกหรอ (มิลลิเมตร) ที่จำนวนรอบ			
	0	200,000	400,000	600,000
0	0	0.395	0.63	0.871
2	0	0.398	0.651	0.887
4	0	0.428	0.695	0.895
6	0	0.439	0.714	0.931
8	0	0.441	0.785	0.955
10	0	0.467	0.764	0.932
12	0	0.478	0.756	0.945
14	0	0.481	0.733	0.956
16	0	0.496	0.791	0.97
18	0	0.551	0.801	0.969
20	0	0.576	0.808	0.972

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กเหนียวที่ผสมสารเติมแต่ง (พื้นที่3) ที่ภาระโหลด 90 กิโลกรัม

ตำแหน่ง Pitch point (มิลลิเมตร)	ความลึกของการสึกหรอ (มิลลิเมตร) ที่จำนวนรอบ			
	0	200,000	400,000	600,000
0	0	0.4	0.628	0.868
2	0	0.438	0.635	0.893
4	0	0.481	0.672	0.876
6	0	0.456	0.666	0.899
8	0	0.462	0.642	0.901
10	0	0.485	0.639	0.947
12	0	0.492	0.741	0.931
14	0	0.506	0.789	0.939
16	0	0.536	0.766	0.944
18	0	0.561	0.791	0.959
20	0	0.575	0.805	0.968

ตารางที่ ค.10 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กเหนียว (พื้นที่1) ที่ภาระโหลด 50 กิโลกรัม

ตำแหน่ง Pitch point (มิลลิเมตร)	ความลึกของการสึกหรอ (มิลลิเมตร) ที่จำนวนรอบ			
	0	200,000	400,000	600,000
0	0	0.207	0.356	0.489
2	0	0.216	0.371	0.495
4	0	0.249	0.385	0.505
6	0	0.235	0.362	0.493
8	0	0.268	0.389	0.495
10	0	0.251	0.399	0.518
12	0	0.285	0.404	0.529
14	0	0.276	0.415	0.536
16	0	0.297	0.427	0.542
18	0	0.313	0.444	0.552
20	0	0.328	0.457	0.567

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.11 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กเหนียว (ฟันที่2) ที่ภาระโหลด 50 กิโลกรัม

ตำแหน่ง Pitch point (มิลลิเมตร)	ความลึกของการสึกหรอ (มิลลิเมตร) ที่จำนวนรอบ			
	0	200,000	400,000	600,000
0	0	0.204	0.351	0.481
2	0	0.243	0.365	0.496
4	0	0.213	0.383	0.506
6	0	0.238	0.397	0.518
8	0	0.254	0.391	0.532
10	0	0.278	0.382	0.502
12	0	0.298	0.451	0.498
14	0	0.257	0.402	0.514
16	0	0.291	0.425	0.538
18	0	0.312	0.447	0.551
20	0	0.325	0.455	0.561

ตารางที่ ค.12 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กเหนียว (ฟันที่3) ที่ภาระโหลด 50 กิโลกรัม

ตำแหน่ง Pitch point (มิลลิเมตร)	ความลึกของการสึกหรอ (มิลลิเมตร) ที่จำนวนรอบ			
	0	200,000	400,000	600,000
0	0	0.202	0.349	0.483
2	0	0.251	0.372	0.496
4	0	0.248	0.386	0.545
6	0	0.235	0.399	0.538
8	0	0.281	0.416	0.514
10	0	0.275	0.405	0.501
12	0	0.286	0.428	0.532
14	0	0.251	0.433	0.529
16	0	0.299	0.444	0.538
18	0	0.307	0.439	0.543
20	0	0.321	0.451	0.558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.13 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กเหนียว (ฟันที่1) ที่ภาระโหลด 70 กิโลกรัม

ตำแหน่ง Pitch point (มิลลิเมตร)	ความลึกของการสึกหรอ (มิลลิเมตร) ที่จำนวนรอบ			
	0	200,000	400,000	600,000
0	0	0.305	0.554	0.701
2	0	0.314	0.572	0.715
4	0	0.336	0.569	0.709
6	0	0.359	0.571	0.716
8	0	0.387	0.582	0.734
10	0	0.392	0.601	0.741
12	0	0.414	0.594	0.756
14	0	0.435	0.609	0.763
16	0	0.461	0.632	0.772
18	0	0.473	0.651	0.783
20	0	0.487	0.675	0.794

ตารางที่ ค.14 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กเหนียว (ฟันที่2) ที่ภาระโหลด 70 กิโลกรัม

ตำแหน่ง Pitch point (มิลลิเมตร)	ความลึกของการสึกหรอ (มิลลิเมตร) ที่จำนวนรอบ			
	0	200,000	400,000	600,000
0	0	0.31	0.551	0.696
2	0	0.339	0.573	0.704
4	0	0.325	0.585	0.712
6	0	0.385	0.596	0.735
8	0	0.364	0.609	0.723
10	0	0.391	0.615	0.742
12	0	0.409	0.624	0.732
14	0	0.418	0.633	0.744
16	0	0.462	0.615	0.756
18	0	0.471	0.648	0.771
20	0	0.477	0.651	0.785

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.15 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กเหนียว (ฟันที่3) ที่ภาระโหลด 70 กิโลกรัม

ตำแหน่ง Pitch point (มิลลิเมตร)	ความลึกของการสึกหรอ (มิลลิเมตร) ที่จำนวนรอบ			
	0	200,000	400,000	600,000
0	0	0.308	0.56	0.685
2	0	0.314	0.553	0.728
4	0	0.351	0.574	0.714
6	0	0.324	0.583	0.703
8	0	0.339	0.594	0.749
10	0	0.382	0.624	0.725
12	0	0.391	0.601	0.744
14	0	0.411	0.617	0.756
16	0	0.451	0.63	0.768
18	0	0.466	0.653	0.775
20	0	0.482	0.665	0.789

ตารางที่ ค.16 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กเหนียว (ฟันที่1) ที่ภาระโหลด 90 กิโลกรัม

ตำแหน่ง Pitch point (มิลลิเมตร)	ความลึกของการสึกหรอ (มิลลิเมตร) ที่จำนวนรอบ			
	0	200,000	400,000	600,000
0	0	0.476	0.719	0.905
2	0	0.494	0.735	0.917
4	0	0.505	0.744	0.931
6	0	0.492	0.756	0.949
8	0	0.536	0.749	0.955
10	0	0.518	0.782	0.947
12	0	0.554	0.798	0.972
14	0	0.569	0.811	0.985
16	0	0.578	0.825	0.992
18	0	0.581	0.829	1.032
20	0	0.596	0.839	1.041

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.17 ผลการทดสอบการสีกหรือของเฟืองเหล็กเหนียว (ฟันที่2) ที่ภาระโหลด 90 กิโลกรัม

ตำแหน่ง Pitch point (มิลลิเมตร)	ความลึกของการสีกหรือ (มิลลิเมตร) ที่จำนวนรอบ			
	0	200,000	400,000	600,000
0	0	0.471	0.714	0.903
2	0	0.489	0.733	0.924
4	0	0.499	0.765	0.952
6	0	0.539	0.748	0.981
8	0	0.575	0.752	0.977
10	0	0.541	0.784	0.946
12	0	0.569	0.793	0.953
14	0	0.582	0.829	0.989
16	0	0.574	0.815	0.994
18	0	0.586	0.821	1.025
20	0	0.592	0.833	1.036

ตารางที่ ค.18 ผลการทดสอบการสีกหรือของเฟืองเหล็กเหนียว (ฟันที่3) ที่ภาระโหลด 90 กิโลกรัม

ตำแหน่ง Pitch point (มิลลิเมตร)	ความลึกของการสีกหรือ (มิลลิเมตร) ที่จำนวนรอบ			
	0	200,000	400,000	600,000
0	0	0.475	0.718	0.901
2	0	0.487	0.724	0.903
4	0	0.498	0.753	0.952
6	0	0.516	0.768	0.942
8	0	0.504	0.792	0.937
10	0	0.499	0.785	0.975
12	0	0.515	0.796	0.964
14	0	0.562	0.804	0.977
16	0	0.534	0.815	0.985
18	0	0.548	0.825	0.992
20	0	0.587	0.836	1.034

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้