

การศีกษาเชิงการทคองด้านไทรโบลลยลต่อระบบส่งถ่ายถ่าลล้ง
Experimental study on the tribology for transmission systems



นาย สุบัน ภูมิ
นาย สุพจน์ เฉลิมศิริกุล
นาย อมรเทพ อรรถอาภา

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 61850
วัน,เดือน,ปี..... 21 ก.ค. 2549

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศีกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเชิงการทดลองด้านไทรโบโลยีต่อระบบส่งถ่ายกำลัง
Experimental study on the tribology for transmission systems



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงการทดลองด้าน ไตรโบ โลยีต่อระบบส่งถ่ายกำลัง

Experimental study on the tribology for transmission systems

ผู้จัดทำ

1. นาย สุบัน ภูมิ รหัสประจำตัว 44010873

2. นาย สุพจน์ เฉลิมศิริกุล รหัสประจำตัว 44010874

3. นาย อมรเทพ อรรถอาภา รหัสประจำตัว 44010887



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์)



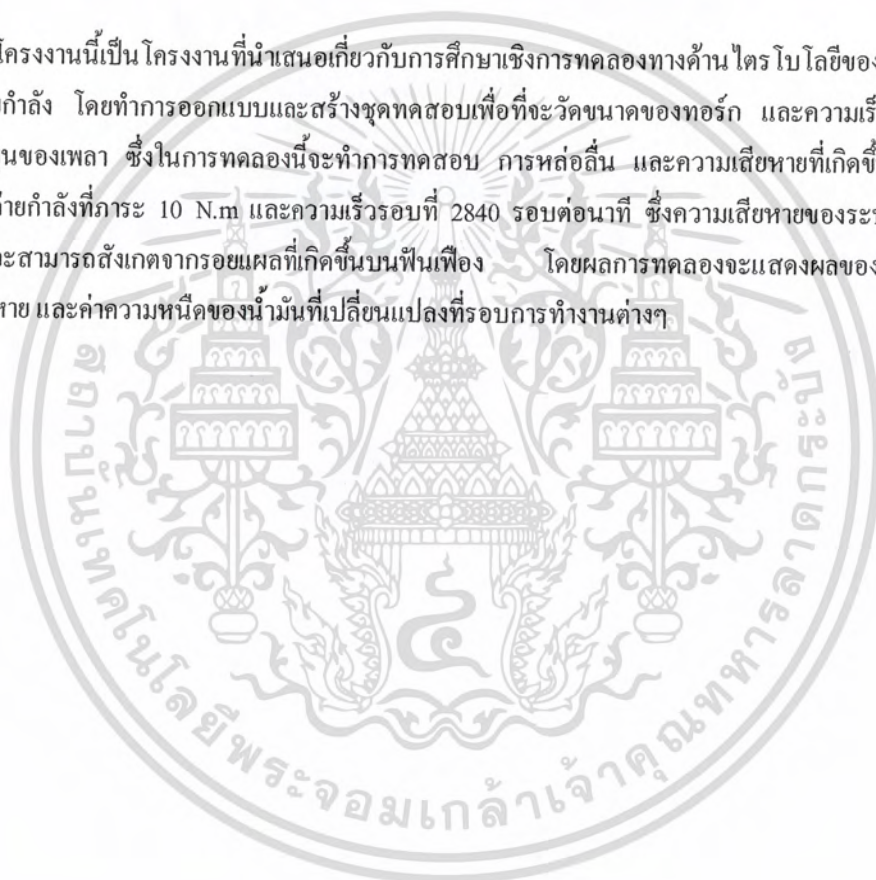
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเชิงการทดลองด้านไทรโบโลยีต่อระบบส่งถ่ายกำลัง

นาย สุบัน ภูมิ 44010873
นาย สุพจน์ เจริญศิริกุล 44010874
นาย อมรเทพ อรรถอาภา 44010887
รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นโครงการที่นำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาเชิงการทดลองทางด้านไทรโบโลยีของระบบส่งถ่ายกำลัง โดยทำการออกแบบและสร้างชุดทดสอบเพื่อที่จะวัดขนาดของทอร์ค และความเร็วรอบในการหมุนของเพลา ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการทดสอบ การหล่อลื่น และความเสียหายที่เกิดขึ้นของระบบส่งถ่ายกำลังที่ภาระ 10 N.m และความเร็วรอบที่ 2840 รอบต่อนาที ซึ่งความเสียหายของระบบส่งถ่ายกำลังจะสามารถสังเกตจากรอยแผลที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเพียง โดยผลการทดลองจะแสดงผลของอัตราความเสียหาย และค่าความหนืดของน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงที่รอบการทำงานต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXPERIMENTAL STUDY ON THE TRIBOLOGY FOR TRANSMISSION SYSTEMS

Subun Poomee

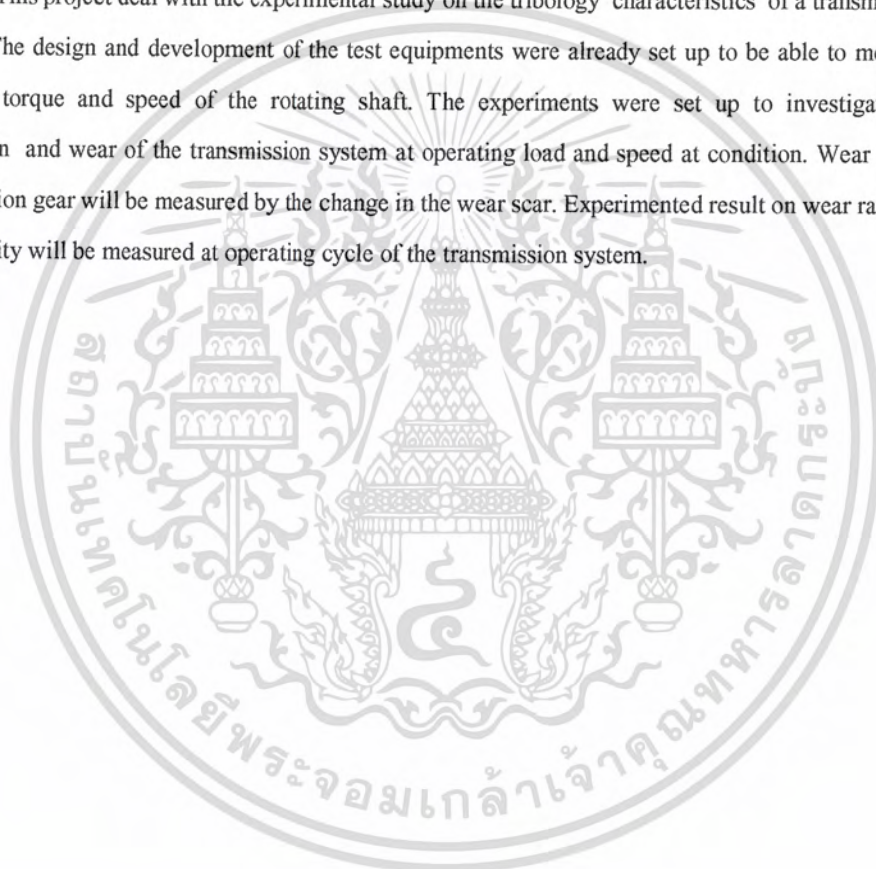
Suphot ChalermSirikul

Amornthep Atta-artpa

Assoc. Prof.Dr. Mongkol Mongkolwongroj Advisor

Abstract

This project deal with the experimental study on the tribology characteristics of a transmission system. The design and development of the test equipments were already set up to be able to measure the load torque and speed of the rotating shaft. The experiments were set up to investigate the lubrication and wear of the transmission system at operating load and speed at condition. Wear of the transmission gear will be measured by the change in the wear scar. Experimented result on wear rate and oil viscosity will be measured at operating cycle of the transmission system.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะได้รับการสนับสนุนจากสถาบันยานยนต์ซึ่งได้
กรุณาให้วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการทดลองครั้งนี้ และต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.
มงคล มงคลวงษ์โรจน์ ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในทุกๆ ด้าน

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ให้ความรู้และคอยดูแลเอาใจใส่
ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมที่กรุณาให้ใช้อุปกรณ์สำหรับการทดลอง
ขอขอบคุณ พี่ สมนึก ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ได้ช่วยเหลือกันทำงานให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นาย สุบัน ภูมิ

นาย สุพจน์ เฉลิมศิริกุล

นาย อมรเทพ อรรถอาภา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ไตรโบโลยี (Tribology)	3
2.1 ไตรโบโลยี กับวิวัฒนาการของมนุษย์	3
2.2 ไตรโบโลยี คืออะไร	3
2.3 คุณสมบัติของวัสดุกับพฤติกรรมการสึกหรอ	6
2.3.1 การสึกหรอของเนื้อโลหะบนเนื้อโลหะ	8
2.3.2 การสึกหรอจากการขัดถู (Abrasive Wear)	11
2.3.3 การสึกหรอแบบไถลในสภาวะแห้ง (Dry Sliding Wear)	12
2.4 แรงเสียดทาน	14
2.4.1 ความเสียดทานแบบไถล (Sliding Friction)	15
2.4.2 ความเสียดทานแบบกลิ้ง (Rolling Friction)	18
2.4.3 การวัดค่าความเสียดทาน	19
บทที่ 3 การสึกหรอของโลหะ	21
3.1 การสึกหรอระหว่างโลหะหรือการสึกหรอแบบไถลในสภาวะที่มีการหล่อลื่น	25
3.1.1 หน้าที่ของสารหล่อลื่น	25
3.1.2 การเกิด Transfer Layer และ Third Body Film	26
3.2 การสึกหรอแบบไถลในสภาวะที่ไม่มีการหล่อลื่น	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 การสึกหรอแบบขัดถู	28
3.3.1 ชนิดของการสึกหรอแบบขัดถู	28
3.3.2 ลักษณะความเป็น Abrasive ของอนุภาค	32
3.3.3 ผลของขนาด ความเร็วและทิศทางของแรงกระทำ	34
3.4 การสึกหรอและความล้าที่เกิดจากการถูครูด	36
3.4.1 การสึกหรอแบบถูครูด	37
บทที่ 4 น้ำมันหล่อลื่น	40
4.1 น้ำมันแร่	40
4.2 น้ำมันสังเคราะห์	41
4.3 สารเพิ่มคุณภาพ	42
4.4 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น	44
4.5 รีโอยี (Rheology)	50
4.5.1 ความหมายของรีโอยี	50
4.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความข้นเหนียว อัตราความเครียดเฉือน และความหนืด	50
4.5.3 เครื่องมือวัดทางรีโอยี	52
บทที่ 5 เพื่อง	53
5.1 ชนิดของเพื่อง	53
5.2 คำจำกัดความของเกียร์	54
5.3 คุณสมบัติแบบ Involute	56
5.4 กฎการขับเพื่องและการทำงานของฟันเพื่อง	57
5.5 ระยะการขับและอัตราการขับ	59
5.6 การขัดกัน	60
5.7 วิธีการตัดเพื่อง	61
บทที่ 6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	62
6.1 เพื่อง	62
6.2 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ	63
6.3 เครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.4 มอเตอร์	64
6.5 Strain Gage	65
6.6 น้ำมัน	65
6.7 แปรรงถ่าน	66
6.8 อุปกรณ์ลดความเร็วรอบ	66
6.9 อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของน้ำมัน	66
บทที่ 7 วิธีการทดลองและผลการทดลอง	67
7.1 วิธีทำการทดลอง	67
7.2 ขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการวัด	68
7.3 ขั้นตอนการทดลองทางรีโวลยี (Rheology Lab Test)	71
7.4 ผลการทดลอง	72
7.4.1 กราฟแสดงพฤติกรรมการไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 และกราฟแสดงพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่สภาวะต่างๆ	73
7.4.2 รอยแผลที่เกิดขึ้นที่ผิวฟันเฟืองที่สภาวะต่างๆ	85
บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	89
8.1 บทสรุป	89
8.2 ข้อเสนอแนะ	89
ภาคผนวก	90
ภาคผนวก ก. กราฟแสดง Calibration curve ของ Torque Full Torsion Bridge	91
ภาคผนวก ข. ตารางแสดงผลการทดลองทาง รีโวลยี (Rheology Lab Test) ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90	92
ภาคผนวก ค. การคำนวณค่าต่างๆ ตามทฤษฎี	101
เอกสารอ้างอิง	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
2.1 คำศัพท์ประสิทธิ์ของความเสี่ยงทานและอัตราการศึกษาของคู่สัมพันธ์บางประเภท	6
3.1 หมวดและชนิดของการศึกษาหรือในโลหะ	22
3.2 กลไกการเกิดของการศึกษาหรือชนิดต่างๆ	24
3.3 การแบ่งประเภทของการศึกษาหรือแบบจำลองโดยใช้กลไกและสถานการณ์เป็นเกณฑ์	31
3.4 การแบ่งประเภทของการศึกษาหรือแบบจำลองโดยใช้ระดับความรุนแรงของการศึกษาหรือเป็นเกณฑ์	31
3.5 ค่าความแข็งของแร่ และวัสดุต่างๆ	33
5.1 แสดงขนาดเพื่อมาตรฐาน	55
5.2 มาตรฐาน SI ของพื้นที่	58
5.3 มาตรฐานอังกฤษพื้นที่	59
6.1 แสดงข้อมูลของพื้นที่ที่ใช้สำหรับการทดลอง	63
7.1 แสดงเงื่อนไขสำหรับการทดสอบ	68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้าที่
2.1 ลำดับขั้นตอนของการออกแบบชิ้นส่วนทางวิศวกรรมตามแนวความคิดแบบ“ผิวมีดีใจนะ”	4
2.2 Tribology ในรูปของระบบทางวิศวกรรมศาสตร์(Engineering System)	5
2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness) ณ บริเวณผิวสัมผัสกับดัชนี ความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasion index) ของโลหะผสมที่มีอนุภาคของคาร์ไบด์ แบบต่อเนื่อง (M_3C) และแบบไม่ต่อเนื่อง (M_7C_3) ผสมอยู่ในโครงสร้าง	7
2.4 แสดงพื้นผิวของวัสดุที่มองเห็นด้วยตาเปล่าว่าเรียบ แต่จะมีความขรุขระในระดับจุลภาคเสมอเมื่อมาสัมผัสกันจึงเกิดเป็น “จุดสัมผัส” (ในวงกลม) ขึ้น ณ ยอดสูงบนผิวนั้น เมื่อมีพันธะแบบ แนบติดเกิดขึ้น การเคลื่อนที่ระหว่างผิวหน้าจะทำให้เกิดการแตกหักของยอดสูงได้	8
2.5 ผลกระทบจากลักษณะโครงสร้างของคู่ผิวสัมผัสกับการสึกหรอ	9
2.6 แสดงปฏิกิริยาระหว่างผิวสัมผัสเมื่อไม่มีพันธะโลหะแบบแนบติด ผิวที่มีความอ่อนนุ่มของวัสดุมากกว่าจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ซึ่งจะนำไปสู่การหลุดล่อนของเศษเกล็ดเล็กๆในที่สุด	10
2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของโลหะบริสุทธิ์ที่เสียดสีบนโลหะชนิดเดียวกันภายใต้สภาวะที่ปราศจากสารหล่อลื่น กับ ความแข็งวิกเกอร์ส	12
2.8 กราฟเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอระหว่าง (A) เหล็กกล้า และ (B) เหล็กหล่อเทาที่นำเสียดสีกับอัลลอยของ Al-Si ที่แรงกดต่างๆ	13
2.9 โครงสร้างของระบบการสึกหรอแสดงถึงปัจจัย Input และ Output ต่อระบบ	14
2.10 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์แบบการไถลและการกรัด	14
2.11 แสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	15
2.12 แสดงพื้นที่สัมผัสจริงของผิวสัมผัสทั่วไป	16
2.13 แสดงการวัดค่าความเสียดทานโดยการดึงวัตถุผ่านรอก	19
2.14 แสดงการวัดค่าความเสียดทานโดยการใช้พื้นเอียง	19
2.15 หลักการทำงานของ Pin on disk	20
3.1 แสดงสภาวะการหล่อลื่นแบบ Hydrodynamic	25
3.2 แสดงการเกิด Transfer layer ระหว่างผิววัสดุในกรณีที่ผิวเชื่อมติดกันได้ง่าย	26
3.3 แสดงการเกิด Transfer layer ระหว่างผิววัสดุในกรณีที่ผิวเชื่อมติดกันได้ยาก	26
3.4 แสดงการสร้างชั้น Third body film จาก Transfer layer	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
3.5 (ก)การสึกหรอชนิดสองเนื้อ [2 Body wear] และ (ข) การสึกหรอชนิดสามเนื้อ [3 Body wear]	30
3.6 การสึกหรอของ(ก)วัสดุเหนียว (ข)วัสดุเปราะ ที่มีมุมปะต่างๆ	35
3.7 แสดงการเกิดรอยขีดข่วนขนาดเล็กบริเวณผิวสัมผัสในกลไกการสึกหรอแบบถูครูด	37
3.8 แสดงรอยแตกจากการสัมผัสระหว่างยอดสูงของผิวคู่สัมผัส	38
3.9 แสดงรอยแตกจากความเค้นวงรอบเนื่องจากแรงเสียดทานบริเวณผิวสัมผัส	39
4.1 กลั่นน้ำมันดิบ	40
4.2 ขบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น	41
4.3 หลักการของความหนืด	45
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นบางชนิด	46
4.5 ผลของความดันต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40	47
4.6 การหาค่าดัชนีความหนืด	48
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราความเครียดเฉือน	51
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสัมบูรณ์กับอัตราความเครียดเฉือน	52
4.9 เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน	52
5.1 แสดงส่วนต่างๆของเฟือง	53
5.2 แสดงลักษณะเฟืองแบบ Involute curve	56
5.3 แสดงส่วนทั้งหมดของเฟือง	57
5.4 แสดงลักษณะการขบของเฟือง	58
5.5 แสดงระยะการขบของฟันเฟือง	59
5.6 การขบของเฟืองไม่ขัดกัน	60
5.7 แสดงการตัดเฟืองแบบเรีคคัตเตอร์	61
6.1 แสดงเฟืองที่ใช้สำหรับการทดลอง	62
6.2 แสดงไดอะแกรมชุดเฟืองของระบบส่งถ่ายกำลังที่ใช้สำหรับการทดลอง	62
6.3 แสดงอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Themocouple)	64
6.4 แสดงเครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า	64
6.5 แสดงมอเตอร์ที่ใช้ส่งกำลัง	65
6.6 แสดง Strain gage	65
6.7 แสดงน้ำมันที่ใช้ทดสอบ	65
6.8 แสดงแปรงถ่าน	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
6.9 แสดง Worm Gear Reducer	66
6.10 แสดงอุปกรณ์ Rheology lab test	66
7.1 แสดงการติด Strain Gage ของ Torque Full Torsion Bridge	68
7.2 แสดงวงจร Wheatstone Bridge Circuit	69
7.3 แสดงผังไดอะแกรมของการติดตั้งชุดสอบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดทอร์ก	69
7.4 แสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์วัดทอร์ก (Pony Brake)	70
7.5 แสดงการติด Strain Gage	70
7.6 แสดงอุปกรณ์การสอบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ	71
7.7 แสดงผังไดอะแกรมของอุปกรณ์ Rheology lab test	72
7.8 แสดงอุปกรณ์ Rheology lab test	72
7.9 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ขณะเดินเครื่องใช้งานอย่างต่อเนื่อง	73
7.10 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่สภาวะยังไม่ได้ใช้งาน เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำมันระหว่างอุณหภูมิห้อง = 30 °C และที่อุณหภูมิใช้งาน = 75°C	73
7.11 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่สภาวะยังไม่ได้ใช้งาน เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำมันระหว่างอุณหภูมิห้อง = 30 °C และที่อุณหภูมิใช้งาน = 75°C	74
7.12 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 1.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C	74
7.13 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 1.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C	75
7.14 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งาน เท่ากับ 1.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิการใช้งาน = 75 °C	75
7.15 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 1.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิใช้งาน = 75 °C	76
7.16 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งาน เท่ากับ 3 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C	76
7.17 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 3 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
7.18 แสดงผลพฤติกรรมการไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 3 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิการใช้งาน = 75 °C	77
7.19 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 3 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิใช้งาน = 75 °C	78
7.20 แสดงผลพฤติกรรมการไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 4.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C	78
7.21 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 4.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C	79
7.22 แสดงผลพฤติกรรมการไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 4.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิการใช้งาน = 75 °C	79
7.23 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 4.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิใช้งาน = 75 °C	80
7.24 แสดงผลพฤติกรรมการไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 6 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C	80
7.25 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 6 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C	81
7.26 แสดงผลพฤติกรรมการไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 6 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิการใช้งาน = 75 °C	81
7.27 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 6 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิการใช้งาน = 75 °C	82
7.28 แสดงผลพฤติกรรมการไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 7.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C	82
7.29 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 7.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C	83
7.30 แสดงผลพฤติกรรมการไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 7.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิการใช้งาน = 75 °C	83
7.31 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 7.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิใช้งาน = 75 °C	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
7.32 แสดงรอยแผลที่เกิดขึ้นที่ผิวฟันเฟืองด้านซ้ายของ Bevel Pinion ของชุดทดสอบที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุง	85
7.33 แสดงรอยแผลที่เกิดขึ้นที่ผิวฟันเฟืองด้านซ้ายของ Bevel Pinion ของชุดทดสอบที่ได้ทำการปรับปรุงแล้ว	85
7.34 แสดงรอยแผลที่เกิดขึ้นที่ผิวฟันเฟืองด้านขวาของ Bevel Pinion ของชุดทดสอบที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุง	86
7.35 แสดงรอยแผลที่เกิดขึ้นที่ผิวฟันเฟืองด้านขวาของ Bevel Pinion ของชุดทดสอบที่ได้ทำการปรับปรุงแล้ว	86
7.36 แสดงรอยแผลที่เกิดขึ้นที่ผิวฟันเฟืองด้านซ้ายของ Bevel Gear ของชุดทดสอบที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุง	87
7.37 แสดงรอยแผลที่เกิดขึ้นที่ผิวฟันเฟืองด้านซ้ายของ Bevel Gear ของชุดทดสอบที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุง	87
7.38 แสดงรอยแผลที่เกิดขึ้นที่ผิวฟันเฟืองด้านขวาของ Bevel Gear ของชุดทดสอบที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุง	88
7.39 แสดงรอยแผลที่เกิดขึ้นที่ผิวฟันเฟืองด้านขวาของ Bevel Gear ของชุดทดสอบที่ได้ทำการปรับปรุงแล้ว	88

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

การศึกษารอที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรม ประกอบกับการขาดความรู้ทางด้านโทรโบลยี ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ร้ายแรงและมีราคาแพงตามมาในปี ค.ศ.1966 ได้มีการศึกษาเพื่อประมาณมูลค่าของความเสียหายที่เกิดจากความผิดพลาดทางโทรโบลยี (เรียกรายงานนี้ว่า Jost report) โดยก่อนที่รายงานฉบับนี้ จะถูกนำออกเผยแพร่ วิศวกรและนักออกแบบมักจะเพิกเฉยกับปัญหาการศึกษารอซึ่งคงจะเนื่องมาจาก ลักษณะความหลากหลายของปัญหา ในรายงานได้กล่าวไว้อย่างชัดเจนว่าการหลีกเลี่ยงปัญหาของการศึกษารอทำให้เกิดการสูญเสียเงินตราจำนวนมากอย่างไม่จำเป็น ซึ่งผลกระทบจากความเสียหายและการศึกษารอที่เกิดขึ้นตามมา จากการศึกษาในสหราชอาณาจักรอังกฤษแสดงให้เห็นว่า การแก้ปัญหาการศึกษารอที่ถูกต้องในอุตสาหกรรม สามารถลดค่าใช้จ่ายได้ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ของมูลค่ามวลรวมประชาชาติ(GDP)ของประเทศนั้นๆ

ดังนั้นการศึกษา โทรโบลยีจึงมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมและต่อเศรษฐกิจของประเทศชาติเป็นอย่างมากทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ความรู้ความเข้าใจที่ถูกต้องจะนำไปสู่ชิ้นงาน เครื่องมือ และอุปกรณ์ในอุตสาหกรรมที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น อายุการใช้งานที่นานขึ้น การปิดซ่อมบำรุงที่น้อยลง และที่สำคัญ ต้นทุนและค่าใช้จ่ายที่ลดลง

ในปริญญานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาทดลองพฤติกรรมการหล่อลื่นของน้ำมัน SAE 90 และการศึกษารอของระบบส่งกำลังของเพื่องท้ายรถกอล์ฟ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.เพื่อศึกษาพฤติกรรมการศึกษารอของระบบส่งกำลังที่สภาวะต่างๆ
- 2.ศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นและคุณสมบัติของสารหล่อลื่นที่สภาวะการทำงานต่างๆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในการทดสอบจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 3 แรงม้า1420 รอบต่อนาที โดยใช้พูลีย์ (Pulley) ช่วยในการเพิ่มรอบเป็น 2840 รอบต่อนาทีเพื่อใช้สำหรับการขับเคลื่อนเพลาขับส่งกำลังไปยังเพื่องสำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจะกล่าวถึงในบทที่ 8

สำหรับเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ มีดังนี้

- 1.ติดตั้งและปรับแต่งอุปกรณ์ให้ได้ความถูกต้องและเที่ยงตรง
- 2.ประกอบชุดเพื่องท้ายของรถกอล์ฟและประกอบรวมเข้ากับแท่นชุดทดลอง
- 3.เปิดสวิตซ์เดินเครื่องมอเตอร์โดยขับเคลื่อนรอบของมอเตอร์ที่ 1420 รอบ/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกจะเป็นการทดสอบหาค่าคุณสมบัติของ น้ำมันหล่อลื่นและอุณหภูมิในห้องเกียร์ของน้ำมันที่ใช้ก่อนการทดลอง โดยใช้ชุดอุปกรณ์การทดสอบ น้ำมันหล่อลื่นแบบแกนหมุน และเทอร์โมคัปเปิ้ลเพื่อวัดอุณหภูมิ โดยน้ำมันหล่อลื่นที่นำมาทดสอบคือน้ำมัน SAE-90

การทดสอบในส่วนที่ 2 จะเป็นการเปรียบเทียบความรอยแผลที่เกิดขึ้นบนพื้นเฟือง , ความหนืดของ น้ำมันหล่อลื่นที่เปลี่ยนแปลงไป ,อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงภายในห้องเฟือง โดยจะทำการวัดทุกๆ 1.5 ล้านรอบ ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นเฟืองจะสามารถสังเกตได้จากลักษณะรอยแผลที่เกิดขึ้นบนเฟือง และเปรียบเทียบน้ำหนักของเฟืองก่อนและหลังการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.เรียนรู้พฤติกรรมการทำงานของระบบส่งถ่ายกำลัง
- 2.เรียนรู้ลักษณะการหล่อลื่นของสารหล่อลื่นและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของสารหล่อลื่น
- 3.ในด้านอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบส่งถ่ายกำลัง งานวิจัยนี้ต้องการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานและปีอายุการใช้งานของระบบส่งถ่ายกำลัง

1.5 วิธีการดำเนินงาน

1. ทำการศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่จะนำมาทดลอง
2. ทำการศึกษาลักษณะการทำงานของเฟืองและคุณสมบัติต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
3. ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ
4. ทำการบันทึกค่าที่ได้จากการทดสอบ และนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟ
5. วิเคราะห์ค่าที่ได้จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับทฤษฎี และสรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

Tribology

2.1 ไตรโบโลยีกับวิวัฒนาการของมนุษย์

ไตรโบโลยี : ศาสตร์แห่งการเสียดหรือแปลเป็นทางการว่า “วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของการสัมผัสกันระหว่าง 2 พื้นผิวที่มีปฏิกิริยาต่อกัน และมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน” นั้น ได้มีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์เรามาเป็นเวลานานหลายพันปี ตั้งแต่สมัยที่มนุษย์ในยุคโบราณมีการเตรียมอาวุธที่ใช้ในการล่าสัตว์โดยการลับหินให้ใ้รูปร่างที่เหมาะสม เช่น ปลายแหลมคมสำหรับทำปลายหอก หรือลับหินให้มีแนวสันเป็นเส้นตรงสำหรับทำหัวขวาน เป็นต้น

ยกตัวอย่างเช่น วงล้อ ซึ่งขึ้นชื่อว่าเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ยิ่งใหญ่ชิ้นแรกของมนุษยชาติโดยวงล้อที่คาดว่าเก่าแก่ที่สุดนั้นขุดพบบริเวณแม่น้ำเมโสโปเตเมีย เมื่อประมาณ 3,000 -3,500 ปี ก่อนคริสตกาล โดยการออกแบบวงล้อในลักษณะที่ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างตัวรถลากและพื้นดิน เมื่อมนุษย์ได้เรียนรู้เกี่ยวกับ ไตรโบโลยี มากขึ้น จึงได้มาพัฒนาสิ่งประดิษฐ์นี้ต่อมาเรื่อยๆมีการนำสารหล่อลื่นประเภทจารบีมาใช้ ณ จุดที่คู่มือสวมเข้ากับเพลลาเพื่อผ่อนกำลังที่ต้องใช้ลากลง จนมาถึงปัจจุบัน ในรถที่เราใช้กัน เช่น จักรยานและรถยนต์ ที่มีการสวมวัสดุยางเข้ากับภายนอกของวงล้อเพื่อให้เกิดแรงเสียดทานในปริมาณที่เหมาะสมจนกระทั่งเกิดการยึดเกาะที่ระหว่างตัวรถกับถนน เพื่อป้องกันการลื่นไถล

นอกจากวงล้อแล้ว ความรู้ด้าน Tribology ก็ยังสามารถนำมาออกแบบชิ้นส่วนอื่นๆอีก เช่น เบรกและคลัตช์ หรือสิ่งใกล้ตัว เช่น พื้นรองเท้าที่ทำจากยาง โดยใช้ความเสียดทานสูงระหว่างพื้นผิววัสดุ 2 ประเภทให้เป็นประโยชน์ การลัดมือหรือการใช้ดินสอดเขียนลงบนกระดาษก็เป็นการเสียดแบบตั้งใจ โดยองใจทำให้เกิดแรงกระทำระหว่าง 2 ผิววัสดุ เพื่อให้ส่วนที่ต้องการ เช่น เนื้อดินสอดสีคำเสียดออกไปติดอยู่บนกระดาษ

สิ่งที่กล่าวถึงไปแล้วนั้น คือ การนำประโยชน์จากประสบการณ์และความรู้ทางด้านความเสียดทาน การเสียดและการหล่อลื่น ซึ่งทั้ง 3 องค์ประกอบนั้น ต่างมีความสัมพันธ์ต่อกันและกันนักวิทยาศาสตร์จึงได้รวบรวมเข้าไว้ด้วยกันเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งเรียกว่า “ไตรโบโลยี”

2.2 ไตรโบโลยีคืออะไร

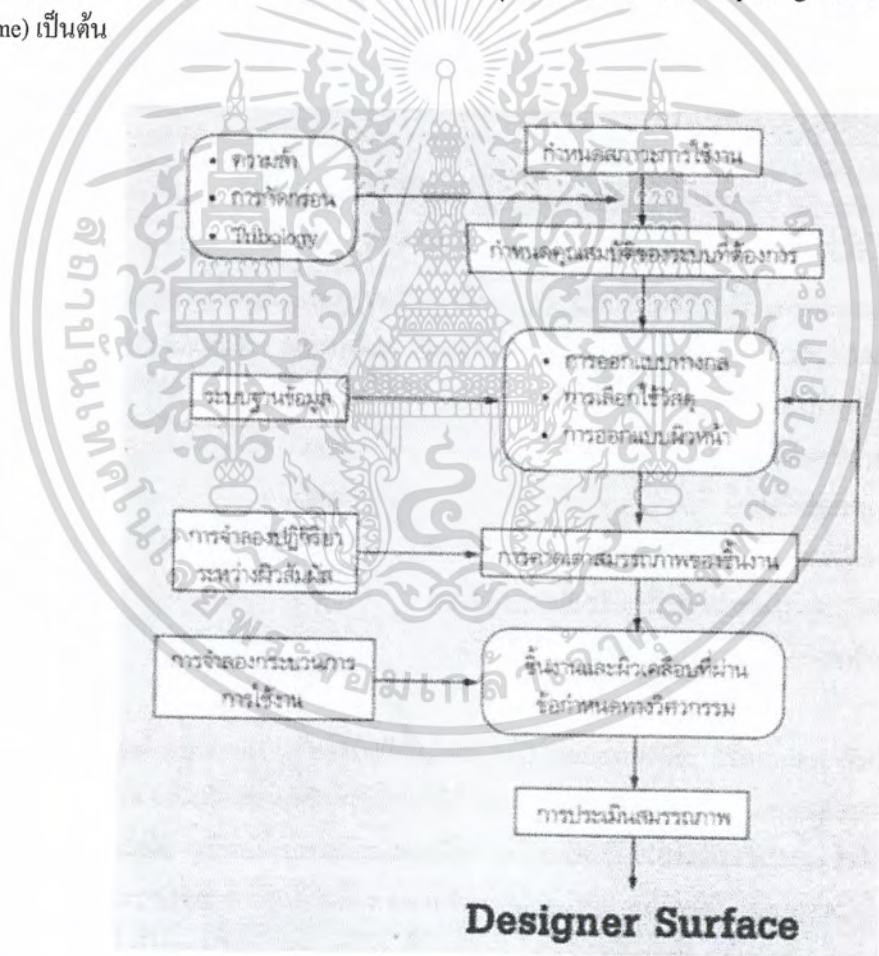
ไตรโบโลยี (Tribology) คือ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของการสัมผัสกันระหว่าง 2 ผิวที่มีปฏิกิริยาต่อกัน และมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ต่อกัน ซึ่งได้รวมไปถึงศาสตร์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องด้วย Tribology ถือกำเนิดขึ้นมาจากห้องทดลอง Cavendish ที่งานวิจัยส่วนหนึ่ง คือ การศึกษาเกี่ยวกับความเสียดทานและการหล่อลื่นระหว่างของแข็ง และจากงานสัมมนาในงานเหล็กและเหล็กกล้าในปี ค.ศ.1964 ที่ได้จัดตั้งวิทยาศาสตร์สาขา Tribology ขึ้นมา ซึ่งประกอบด้วย

- วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีด้านวัสดุ 40%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วิศวกรรมเครื่องกล 30%
- ความรู้เรื่องการหล่อลื่น 20%
- การควบคุมและดูแลการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การวิเคราะห์หาสาเหตุ และการเก็บรวบรวมข้อมูล 10%

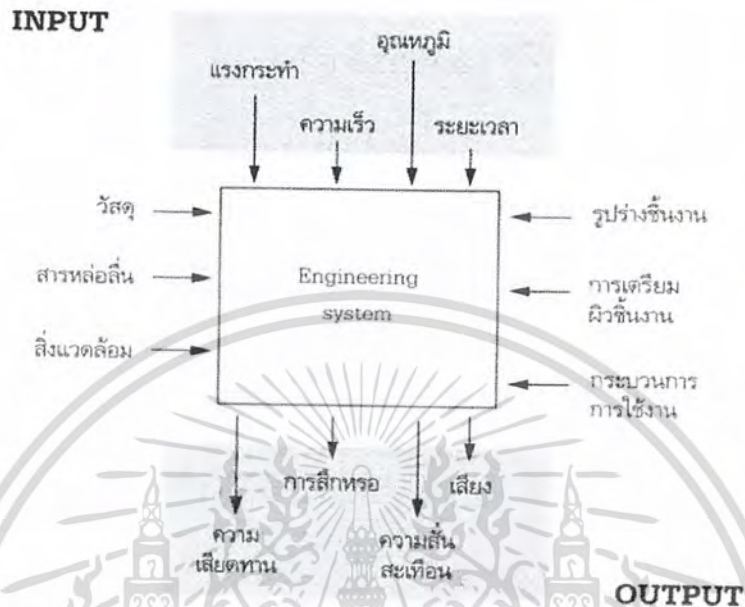
ต่อมาในปี ค.ศ.1987 ได้มีวิทยาศาสตร์อีกสาขาหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับ Tribology โดยตรง คือ วิศวกรรมพื้นผิว (Surface Engineering) ซึ่ง Prof.T.Bell ได้กล่าวไว้ว่า “วิศวกรรมพื้นผิว คือ การออกแบบและปรับปรุงชั้นผิวเคลือบและผิวชิ้นส่วนรองรับ ไปพร้อมกัน เหมือนหนึ่งเป็นระบบเดียวกัน เพื่อให้สมรรถภาพของชิ้นส่วนนั้นสูงขึ้นได้ในราคาถูก ซึ่งจะไม่สามารถทำได้โดยถ้าขาดชั้นผิวเคลือบที่เหมาะสมเพียงอย่างเดียว ” ในปัจจุบันเราจะพบว่าเทคโนโลยีด้านพื้นผิวหลายประเภทที่พัฒนาขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการต้านทานการสึกหรอ เช่น การทำคาร์บูไรเซชัน (Carburisation) การเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพ (Physical vapour deposition) และการชุบผิวด้วยไฟฟ้า (Electroplating เช่น การทำ Hard chrome) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ลำดับขั้นตอนของการออกแบบชิ้นส่วนทางวิศวกรรมตามแนวความคิดแบบ“ผิวมีดีไซน์”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งแต่นั้นมา Tribology ก็ได้มีบทบาทสำคัญในการเติบโตอย่างรวดเร็วของวิศวกรรมพื้นผิว จนเกิดเป็นแนวความคิดแบบ “ผิวมีดีไซน์”(Designer surface) ขึ้น ซึ่งมีขั้นตอนการออกแบบชิ้นส่วนทางวิศวกรรมดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.2 Tribology ในรูปของระบบทางวิศวกรรมศาสตร์ (Engineering System)

การเสียดสีและความสามารถในการต้านทานการสึกหรอนั้น ไม่ใช่คุณสมบัติที่เกิดขึ้นจากตัววัสดุ (Intrinsic property) เพียงอย่างเดียว ไม่ใช่เพียงเพราะวัสดุแข็ง เช่น ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) แล้วจะต้องมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอสูง แต่การเสียดสีและความสามารถในการต้านทานการสึกหรอเป็นลักษณะเฉพาะของ “ระบบ” หนึ่งๆ ซึ่งจะมีผลกระทบต่ออัตราการสึกหรอของวัสดุนั้น ระบบดังกล่าวและปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 การแก้ไขปัญหาการสึกหรอโดยการปรับเปลี่ยนระบบและปัจจัยดังกล่าวเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง แทนการพัฒนาวัสดุหรือผิวเคลือบให้มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ปัญหาการสึกหรอในเครื่องยนต์หนึ่งๆอาจจะแก้ไขได้ด้วยการปรับเปลี่ยนสภาวะการทำงาน เช่น ความเร็วรอบของและแรงกระทำ (Loads) ให้อยู่ในระดับที่เกิดการสึกหรอแต่เพียงเล็กน้อย แล้วจึงเปลี่ยนวัสดุของผิวสัมผัส ปรับปรุงระบบการกรองอากาศและละอองน้ำมัน และ/หรือตกแต่งผิวชิ้นงานขั้นสุดท้ายเพื่อให้ได้ความเรียบผิวที่ต้องการ นอกจากนี้ ในการออกแบบเครื่องจักรกลบางประเภท เช่น เครื่องยนต์ของรถยนต์ จุดประสงค์ของการใช้ Tribology ในรูปของระบบทางวิศวกรรมนั้น ไม่เพียงเพื่อลดการเสียดสีและการสึกหรอแต่รวมไปถึงการลดแรงสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 คุณสมบัติของวัสดุกับพฤติกรรมการสึกหรอ

ความเสียหายจากการสึกหรอสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบริเวณผิวหน้าภายนอกและผิวหน้าภายใน ซึ่งมักจะมีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาระหว่างสสาร 2 ตัว ที่มาสัมผัสกัน กล่าวคือ

- ผิวแข็งเคลื่อนที่บนผิวแข็ง
- อนุภาคแข็งขนาดเล็ก ซึ่งถูกพัดมาในของเหลวหรือก๊าซ มาปะทะลงบนผิวแข็ง
- การไหลของของแข็งหรือก๊าซบนของแข็ง

ในแต่ละกรณีข้างต้น ความเสียหายจากการสึกหรอจะเป็นมาจากปฏิกิริยาทางกล ทางเคมี และทางความร้อน โดยปฏิกิริยาเหล่านี้มักจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ดังนั้น ลักษณะและขอบเขตของความเสียหายที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ดังต่อไปนี้

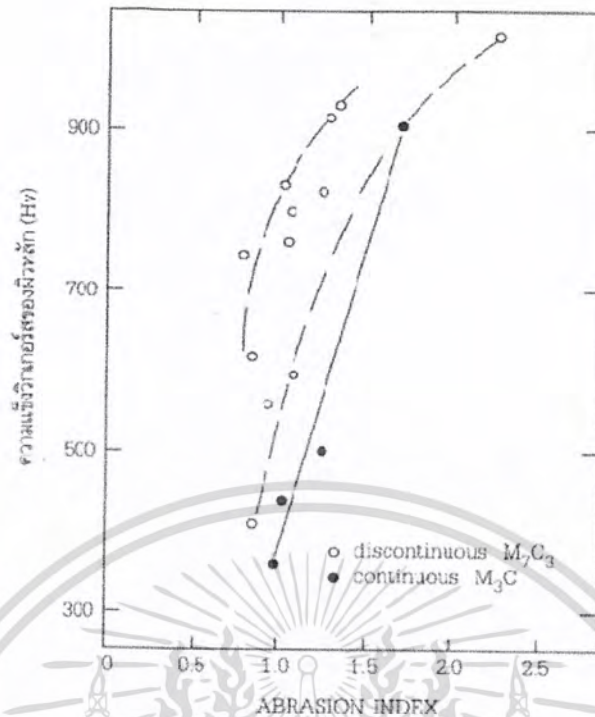
- โครงสร้างจุลภาคของผิวสัมผัสทั้ง 2 หน้า และ โครงสร้างของเนื้อชิ้นงาน
- ประเภทของวัสดุที่สัมผัสกัน และอัตราการผลิตระหว่างผิว
- การเคลื่อนที่สัมผัสของผิวหน้า
- แรงกระทำ ณ บริเวณจุดสัมผัส

ปัจจัยเหล่านี้ได้ครอบคลุมถึงคุณสมบัติของวัสดุหลายอย่างรวมกัน รวมทั้งคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ตัว คือ ความเสียดทาน และความแข็ง แต่ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียดทานกับการสึกหรอ หรือความแข็งกับการสึกหรอนั้นเป็นกลไกที่ซับซ้อนมาก โดยทั่วไปค่าความเสียหายที่ต่ำมักจะส่งผลให้อัตราการสึกหรอมีค่าต่ำด้วย

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานและอัตราการสึกหรอของคู่สัมผัสบางประเภท

คู่สัมผัส	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน, μ	อัตราการสึกหรอ ($\text{cm}^3/\text{cm} \times 10^{-12}$)
เหล็กกล้าคาร์บอน 0.2 % บนผิวชนิดเดียวกัน	0.62	157,000
Cu-37%Zn – 3%Pb อัลลอยด์ บนเหล็กกล้า	0.60	24,000
อัลลอยด์ Stellite บนเหล็กกล้าคาร์บอน	0.60	320
เหล็กกล้าไร้สนิม บนเหล็กกล้าคาร์บอน	0.53	270
ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) บนผิวชนิดเดียวกัน	0.35	2
โลหะผิวสะอาดในสุญญากาศ บนผิวชนิดเดียวกัน	1-5 หรือสูงกว่า	--
โลหะในบรรยากาศออกซิเจน บนผิวชนิดเดียวกัน	0.4-1.0	--

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness) ณ บริเวณผิวสัมผัสกับดัชนีความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasion index) ของโลหะผสมที่มีอนุภาคของคาร์ไบด์แบบต่อเนื่อง (M_3C_2) และแบบไม่ต่อเนื่อง (M_3C_2) ผสมอยู่ในโครงสร้าง

ในหลายกรณี การเปลี่ยนแปลงค่าความเสียดทานเพียงเล็กน้อยกลับมีผลให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นได้อย่างมหาศาล ส่วนคุณสมบัติความแข็งที่สูงก็จะทำให้วัสดุมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอที่ดี แต่ในบางกรณี โครงสร้างที่แข็งกลับสึกไปอย่างรวดเร็วเนื่องมาจากการแตกและหลุดออกของเนื้อที่แข็งเปราะ นอกจากนี้ ประสบการณ์ยังได้สอนเรามากกว่าการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ ความเร็วของการเคลื่อนที่ และ/หรือสภาวะแวดล้อมเพียงเล็กน้อยก็สามารถมีผลกระทบอย่างรุนแรงต่อกลไกและอัตราการสึกหรอได้

ลักษณะที่คุณสมบัติของวัสดุจะส่งผลกระทบต่อปฏิริยาระหว่าง 2 ผิวหน้าขณะที่เกิดการสึกหรอจะต่างกันไปในแต่ละกรณี ขึ้นอยู่กับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น โดยจะแบ่งออกง่ายๆ ได้เป็น 3 กรณีด้วยกันได้แก่

1. การสึกหรอของเนื้อโลหะบนเนื้อโลหะ (Metal-to-metal wear หรือ Adhesive wear)
2. การสึกหรอจากการขัดถู (Abrasive wear)
3. การสึกหรอแบบไถลในสภาวะแห้ง (Dry sliding wear)

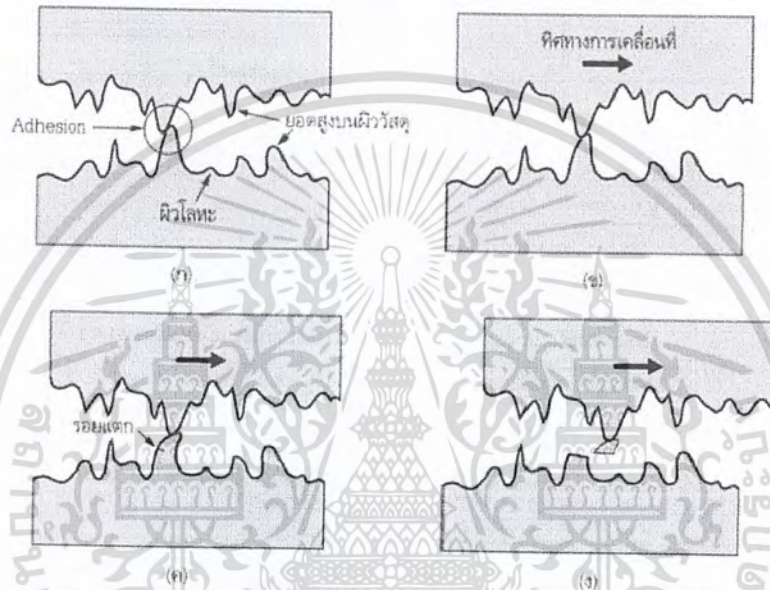
ซึ่งรายละเอียดได้นำมาอธิบายไว้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 การสึกหรอของเนื้อโลหะบนเนื้อโลหะ

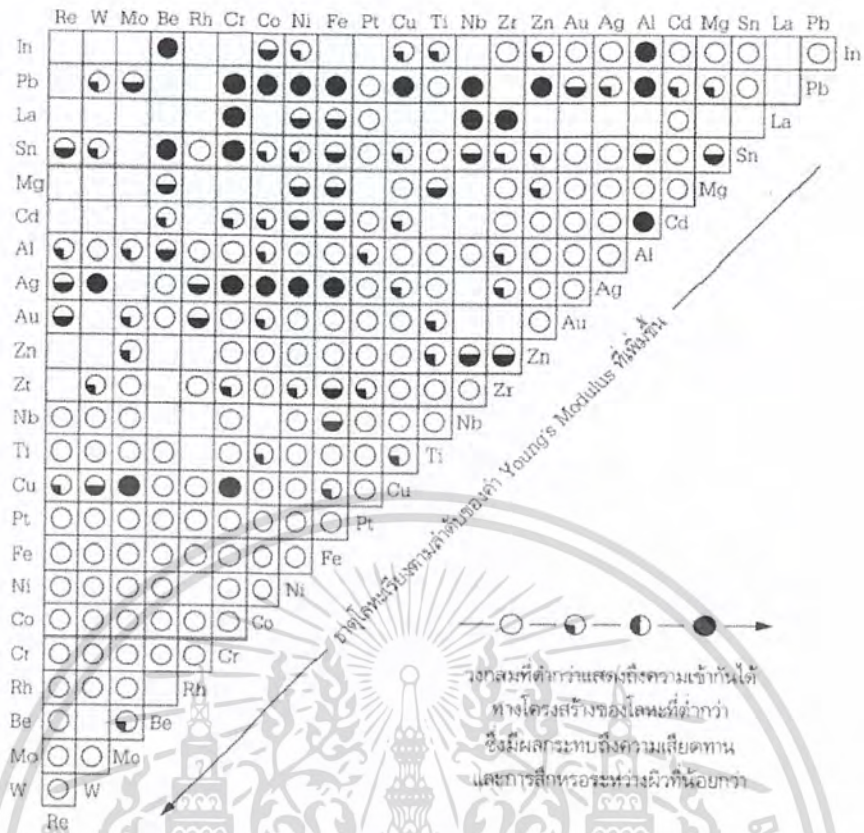
1. ลักษณะของคู่ผิวสัมผัส

เมื่อผิวหน้าของโลหะ 2 ผิวหน้าเคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกันภายใต้แรงกด พันธะทางโลหะจะสามารถเกิดขึ้นได้ ณ บริเวณจุดสัมผัส พันธะที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ยอดสูง (Asperity) ของวัสดุมาแตะกันนี้ เรียกว่าเป็นพันธะแบบแนบติด หรือ “Adhesion” ในขณะสัมผัสระหว่างกัน พันธะแบบแนบติดจะสามารถขยับและหลุดแตกออกจากกันได้ ในขณะที่เดียวกัน ยอดสูงเหล่านี้ก็อาจเกิดการแตกหักออกจากกันได้เช่นกัน ถ้าหากความแข็งแรงของพันธะโลหะนี้มีค่าสูงกว่าความแข็งแรงของยอดสูงของผิวหน้าหนึ่ง ยอดสูงนั้นก็แตกและผิวหน้านั้นจะสูญเสียเนื้อวัสดุไปให้กับคู่สัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงพื้นผิวของวัสดุที่มองเห็นด้วยตาเปล่าว่าเรียบ แต่จะมีความขรุขระในระดับจุลภาคเสมอ เมื่อมาสัมผัสกันจึงเกิดเป็น “จุดสัมผัส” (ในวงกลม) ขึ้น ณ ยอดสูงบนผิวนั้น เมื่อมีพันธะแบบแนบติดเกิดขึ้น การเคลื่อนที่ระหว่างผิวหน้าจะทำให้เกิดการแตกหักของยอดสูงได้

ในช่วงที่เกิดการสึกหรอการสร้างพันธะแบบแนบติดและการแตกหักของผิววัสดุที่กล่าวมา ก็จะเกิดขึ้นพร้อมๆ กันอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุจากผิวหนึ่งไปยังอีกผิวหนึ่งตลอดเวลา ซึ่งมักจะเกิดขึ้นทั้ง 2 ทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าวัสดุทั้ง 2 มีโครงสร้างลักษณะคล้ายกัน หรือมีความเข้ากันได้ทางโครงสร้าง (Structural compatibility) ที่ดี เนื่องจากค่าความเสียดทานระหว่างวัสดุจะขึ้นอยู่กับความเข้ากันได้นี้ ยกตัวอย่างเช่น โลหะโครเมียมกับทองแดงมีความเข้ากันได้ทางโครงสร้างต่ำ ดังนั้น ความเสียดทานและการสึกหรอที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 ผิวนั้นจึงมีค่าที่ต่ำด้วย (ดูรูปที่ 2.4 ประกอบ)



รูปที่ 2.5 ผลกระทบจากลักษณะ โครงสร้างของคู่วัสดุผสมกับการสึกหรอ

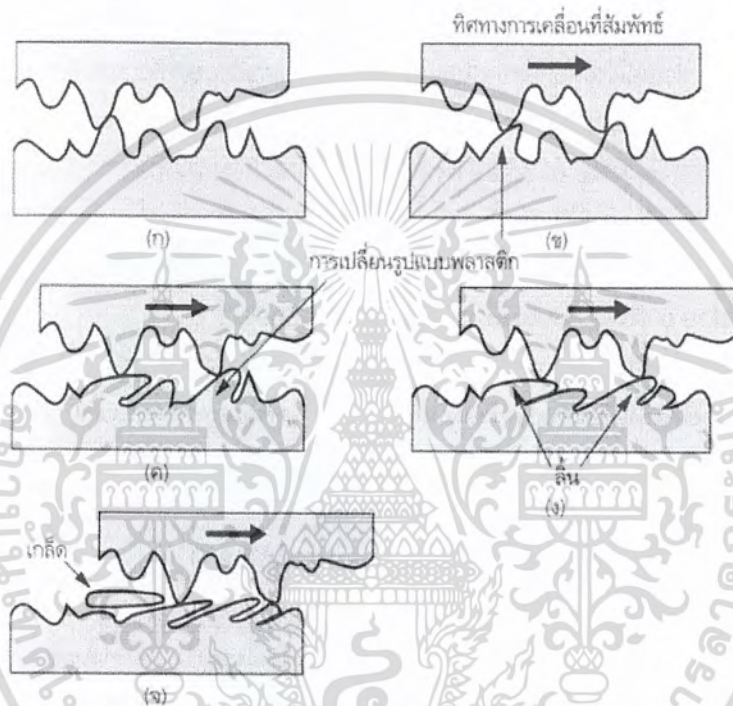
ถ้าหากว่าวัสดุ A มีความแข็งแรงทางกลมากกว่าวัสดุ B โดยรวม วัสดุ B จะสูญเสียเนื้อให้กับวัสดุ A ในขณะที่วัสดุแตกออก ผิวหน้าใหม่ที่เปิดขึ้นบริเวณรอยแตกจะเกิดการออกซิเดชัน* ซึ่งปฏิกิริยาจะถูกเร่งด้วยความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีทำให้เกิดออกไซด์บนผิววัสดุ เมื่อการสึกหรอดำเนินต่อไปและเกิดการแตกหักของยอดสูงอย่างต่อเนื่อง เศษของวัสดุที่แตกออกก็จะมาทับถมบนผิวหน้า สร้างเป็นชั้นขึ้นมา ซึ่งชั้นนั้นก็จะมีออกไซด์ของโลหะปะปนอยู่ด้วย (ออกไซด์ที่ฝังตัวอยู่จะทำให้เนื้อวัสดุบริเวณนั้นแตกง่าย) บางครั้ง ชั้นของเศษที่ทับถมก็จะหลุดล่อนออกมา ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุจากทั้ง 2 วัสดุผสม ดังนั้นพฤติกรรมของการสึกหรอจึงขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุโลหะทั้ง 2 ที่เข้ามาสัมผัสกัน โดยพันธะแบบแนบติดจะเกิดขึ้นได้ง่ายหากผิวสัมผัสมีความสะอาด ปราศจากออกไซด์บนผิวหน้า (และมีออกไซด์ที่เกิดขึ้นใหม่) และคู่วัสดุผสมมีความคล้ายคลึงกันหรือเข้ากันได้ทางเคมีและทางโครงสร้างของวัสดุ

วิธีการป้องกันความเสียหายจากการสึกหรอวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงมาก คือ การใช้สารหล่อลื่นของเหลวหรือของแข็งกึ่งของเหลว เช่น น้ำมันหล่อลื่นหรือจาระบี โดยให้สารหล่อลื่นนี้กระจายตัวเป็นฟิล์มปกคลุมผิวชิ้นงานเอาไว้ หน้าที่หลักของสารหล่อลื่น เช่น ที่ใช้ในระบบเกียร์หรือลูกปืนต่างๆ คือ เพื่อแยกผิวสัมผัสทั้ง 2 ให้อยู่ห่างกัน เพื่อจะป้องกันการเกิดพันธะแนบติดและลดการไถครูดจากยอดสูง นอกจากนี้สารหล่อลื่นยังสามารถช่วยการหล่อเย็นของผิววัสดุเพื่อลดอุณหภูมิ จุดสัมผัสได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก(Plastic Deformation) และการต้านทานความล้า (Fatigue)

ถ้าหากว่าพันธะแบบแนบติดที่กล่าวไว้ข้างต้น ไม่ได้เกิดขึ้น วัสดุที่มีความอ่อนนุ่มอาจเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกในบริเวณยอดสูงที่สัมผัสกับอีกผิวหน้าหนึ่งเมื่อ โคนแรงกระทำในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ได้ เมื่อถูกดันไปในทิศทางหนึ่ง ยอดสูงเหล่านี้จะถูกบีบให้แบนออกเป็นแผ่นและขีดยาวออกไปในทิศทางนั้น เป็นลักษณะคล้ายเส้น แรงกระทำซ้ำๆ ในลักษณะนี้จะทำให้ “ลื่น” แดกและหลุดออกเป็นเศษเกล็ดเล็กๆที่เกิดจากการสึกหรอ (เรียกว่า Wear debris) การสึกหรอในลักษณะนี้เรียกว่า “การหลุดล่อน” (Delamination)



รูปที่ 2.6 แสดงปฏิกิริยาระหว่างผิวสัมผัสเมื่อไม่มีพันธะโลหะแบบแนบติด ผิวที่มีความอ่อนนุ่มของวัสดุมากกว่าจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ซึ่งจะนำไปสู่การหลุดล่อนของเศษเกล็ดเล็กๆในที่สุด

นอกจากนี้ ความล้าที่เกิดขึ้นจากแรงกดและจากการไถครูดของยอดสูงและอนุภาคแข็งอิสระที่ติดอยู่ระหว่างผิว (เช่น เศษเกล็ดจากการสึกหรอและเศษออกไซด์) จะทำให้รอยแตกเกิดขึ้นภายในผิววัสดุ ซึ่งจะช่วยให้เกิดการสึกหรอต่อไป

ดังนั้น ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอจึงขึ้นอยู่กับ ความแข็ง ความแข็งแรง ณ จุดคราก(Yield strength) และความสามารถล้า

3. ความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อน

ก่อนหน้าที่ผิวของวัสดุจะเข้ามาสัมผัสกันก็มักจะมีชั้นฟิล์มบางๆของออกไซด์ปกคลุมผิวอยู่แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งฟิล์มออกไซด์ที่อยู่ในลักษณะนี้มักจะทำให้การสึกหรอที่กำลังจะเกิดทวีความรุนแรงมากขึ้น แต่ถ้าหากว่าฟิล์มออกไซด์มีความหนาและมีแรงยึดเกาะสูงพอ จะทำให้พันธะที่เกิดขึ้นบริเวณยอดสูงถูกจำกัดเนื่องจากโลหะกับออกไซด์ซึ่งเป็นเซรามิกมีความเข้ากันได้ทางโครงสร้างต่ำ ดังนั้น อัตราการสึกหรอก็จะลดลงด้วยตามที่กล่าวไว้ในข้างต้น อย่างไรก็ตาม ถ้าหากว่าฟิล์มออกไซด์นี้เกิดแตกขึ้นมา เช่น ในกรณีที่แรงกดจากภายนอกเพิ่มสูงขึ้น เนื้อโลหะของยอดสูงที่เปลือยออกก็สามารถสัมผัสและเกิดพันธะแบบแนบติดขึ้นได้ นอกจากนี้ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีในกรณีที่เป็นการเสียดสีแบบแห้ง กล่าวคือ ไม่มีการใช้สารหล่อลื่น หรือมีการหล่อลื่นไม่เพียงพอ จะเป็นปัจจัยสำคัญตัวหนึ่งที่ทำให้เกิดการสร้างฟิล์มออกไซด์บางๆ ขึ้นอีกผิว ซึ่งจะแตกออกเมื่อถูกเสียดสี ส่วนหนึ่งของออกไซด์จะไปปะปนอยู่ในชั้นของเศษสึกหรอที่ทับถมกันดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นและอีกส่วนหนึ่งจะแตกออกเป็นอิสระออกจากผิว จากพันธะที่เกิดขึ้นประกอบกับเศษออกไซด์ที่แตกออกทำให้อัตราการสึกหรอที่เพิ่มมากขึ้น และอาจเกิดการบิดเบี้ยวเสียรูปของชิ้นงานนั้นอีกด้วย ส่วนในกรณีที่ผิววัสดุมีการสัมผัสกับสารเคมีหรือมีการใช้สารหล่อลื่น สิ่งเจือปนในน้ำมันหล่อลื่นยังอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนบนผิววัสดุได้อีกด้วย ยกตัวอย่างในเครื่องยนต์ของรถยนต์ เป็นต้น

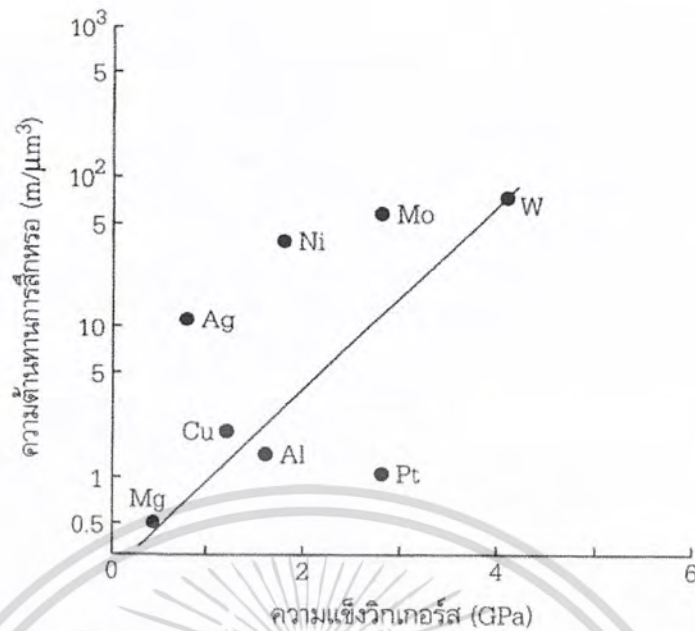
ดังนั้น ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอโดยรวมของวัสดุหนึ่งๆจึงขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของผิวหน้าของวัสดุนั้น ที่สามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนได้

2.3.2 การสึกหรอจากการขัดถู (Abrasive Wear)

วัสดุที่สามารถต้านทานการสึกหรอจากการขัดถูได้ดีมักจะมีโครงสร้างจุลภาคแบบแบ่งเป็น 2 เฟส ซึ่งประกอบด้วย (1) เนื้อหลัก หรือ Matrix (เฟสที่มีความต่อเนื่อง เป็นตัวกลาง/ตัวประสานในวัสดุ) ที่มีความเหนียว (Toughness) และ (2) อนุภาคแข็งขนาดเล็ก เช่น สารประกอบคาร์ไบด์ หรือยูเทคติกคาร์ไบด์ กระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อหลัก ขณะที่เกิดการขัดถูวัสดุนี้ก็จะสึกหรอออกไปด้วยสาเหตุต่างๆ เหล่านี้ ได้แก่

- การสึกหรอของเนื้อหลักจากวัสดุที่มาขัดสีที่ไม่แข็งแรง และการสึกหรอของเนื้อหลักและอนุภาคแข็งจากวัสดุที่มาขัดสีที่มีความแข็งแรงสูง
- การสึกหรอ และ/หรือ การกัดกร่อนเฉพาะที่บริเวณเนื้อหลักเท่านั้น (Selective removal)
- การสึกหรอโดยการเปลี่ยนรูปของเนื้อหลัก
- การแตกและหลุดของอนุภาคแข็งภายในเนื้อหลักเนื่องจาก
 - แรงกระทำภายนอก (เช่นแรงกดแบบ Indentation)
 - การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก หรือการสึกหรอของเนื้อหลักรอบๆอนุภาคนั้น
 - การแตกของรอยต่อระหว่างอนุภาคแข็งและเนื้อหลัก
- การแตกจากความล้าเนื่องมาจากการกระทำซ้ำๆ ของแรงกดและการไถครูด

ในสภาวะการใช้งานส่วนมากการสึกหรอแบบขัดถูมักจะมีแรงกระทำที่ชิ้นงานอยู่ด้วย ในการเลือกใช้วัสดุสำหรับผลิตชิ้นงานหนึ่งๆ จึงต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติหลายประการรวมถึงความแข็งแรงเพื่อป้องกันการสึกหรอและการยุบตัว และความเหนียวเพื่อป้องกันการแตกหักของชิ้นงาน



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของโลหะบริสุทธิ์ที่เสียคิบนโลหะชนิดเดียวกันภายใต้สภาวะที่ปราศจากสารหล่อลื่น กับ ความแข็งวิกเกอร์ส

คุณสมบัติด้านความแข็ง มักจะถูกนำมาเป็นแนวทางในการเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 แต่ค่าความแข็งรวมของเนื้อวัสดุเพียงอย่างเดียวไม่สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับความต้านทานการสึกหรอได้ดีเท่าไรนัก สังเกตได้จากการกระจายตัวของข้อมูลในกราฟ ดังนั้น เพื่อให้ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ 2 ตัวนี้มีความหมายมากที่สุด เราควรจะพิจารณาตั้งแต่ ค่าความแข็งแรกเริ่มของวัสดุ ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นจากความเครียดเมื่อผ่านการใช้งาน (Work hardening) และความลึกของความแข็งดังกล่าว ความแข็งของเฟสต่างๆ ในเนื้อวัสดุ การกระจายตัวของเฟสนั้นๆ และผลกระทบของอุณหภูมิขณะ ใช้งานที่มีต่อความแข็ง

ดังนั้น สำหรับการสึกหรอแบบขัดถู เราจะต้องคำนึงถึงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่ควบคุมความแข็ง รวมถึงความแข็งที่เพิ่มขึ้นโดยความเครียด ความเหนียว และที่สำคัญพฤติกรรมการกัดกร่อนเนื่องจากการนำชิ้นงานไปใช้งานมักจะต้องมีของเหลวหรือก๊าซที่มีฤทธิ์กัดกร่อนเข้ามาเกี่ยวข้อง

2.3.3 การสึกหรอแบบไถลในสภาวะแห้ง (Dry Sliding Wear)

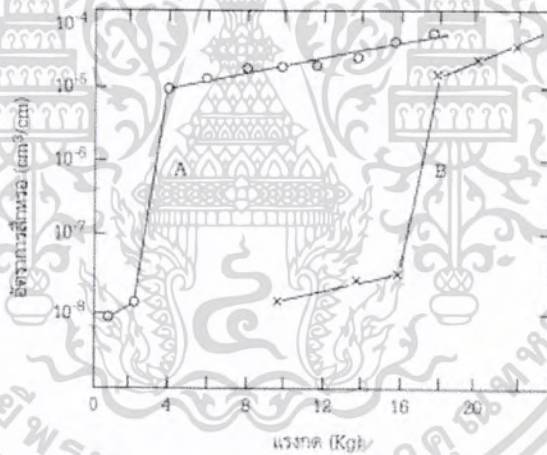
การสึกหรอแบบไถลในสภาวะแห้งหรือสภาวะที่ปราศจากสารหล่อลื่น อย่างเช่นที่เกิดขึ้นในระบบคลัตช์หรือระบบเบรกในรถยนต์ เกิดขึ้นจากการที่ผิวคู่สัมผัสของวัสดุทั้ง 2 จะต้องดูดซับพลังงาน โดยการถ่ายเทความร้อนออกไป เพื่อชะลอและหยุดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่าง 2 ผิวหน้า หรือเพื่อเริ่มการเคลื่อนที่โดยป้องกันไม่ให้เกิดการสันสะเทือน ดังนั้น คุณสมบัติทางด้านวัสดุที่สำคัญสำหรับคลัตช์และงานเบรกจึงมีดังต่อไปนี้

- ความสามารถในการนำความร้อนที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

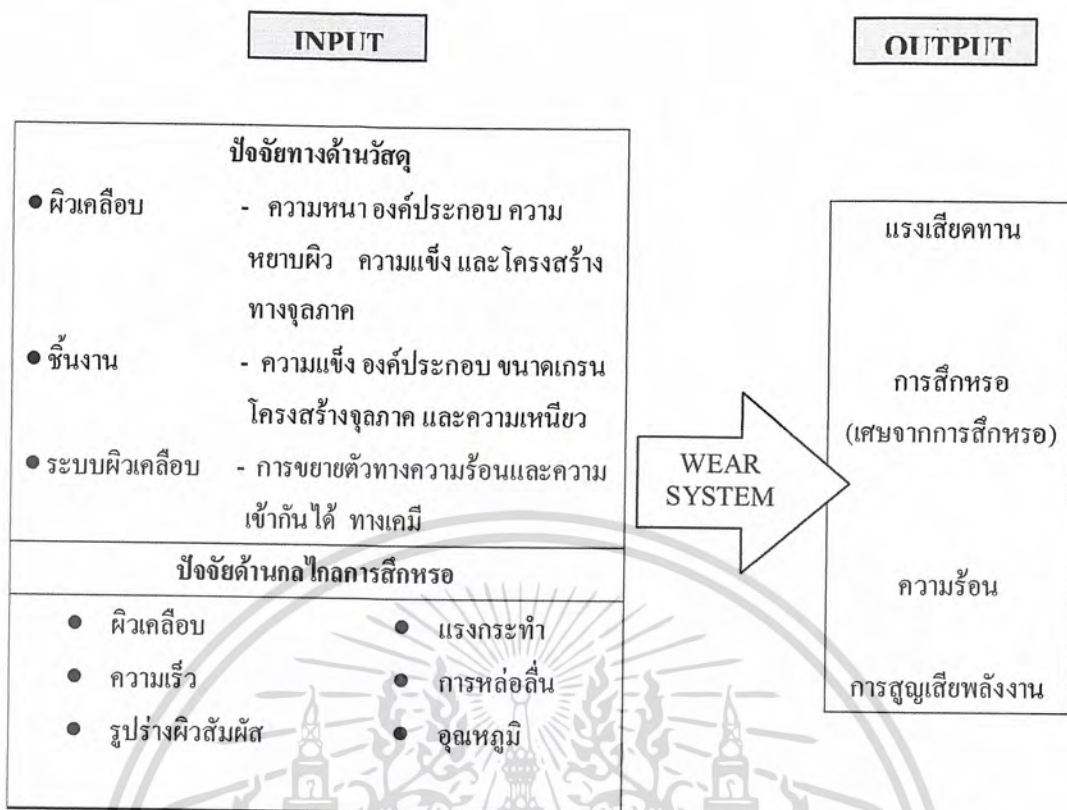
- คุณสมบัติด้านการเสียดสีที่ดี
- ความแข็งแรงที่เพียงพอ
- ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Elastic modulus)* ที่ต่ำเพื่อลดการสะสมของความเค้น ซึ่งเกิดจากการขยายตัวเฉพาะพื้นที่เนื่องมาจากความร้อน
- เสถียรภาพทางโครงสร้างจุลภาคที่ดีในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน เพื่อลดการขยายตัวและหดตัวของผิววัสดุ
- ความสามารถในการต้านทานการเกิดพันธะแบบแนบติด

เหล็กหล่อเทา (Grey iron หรือ Flanke graphite cast iron) เป็นวัสดุตัวหนึ่งที่มีคุณสมบัติครบตามที่ต้องการมากที่สุด และเหล็กหล่อเทายังมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบไถลในสถานะที่มีสารหล่อลื่นที่ดีอีกด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากการดูดซับน้ำมัน ไว้ในผิววัสดุที่สูญเสียกราไฟต์ไปบางส่วนเนื่องจากการสึกหรอ นอกจากนี้ กราไฟต์ที่ผิวของเหล็กหล่อเทายังช่วยลดการพันธะแบบ Adhesion ระหว่างผิวสัมผัสได้อีกด้วย ความสามารถในการป้องกันการสึกหรอของเหล็กหล่อเทาได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 ตัวอย่างของเหล็กหล่อเทานี้ได้ชี้ให้เห็นว่า การควบคุมโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ คือ กุญแจไปสู่คุณสมบัติทางด้านวัสดุที่ต้องการในการป้องกันการสึกหรอ



รูปที่ 2.8 กราฟเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอระหว่าง (A) เหล็กกล้าและ (B) เหล็กหล่อเทาที่มาเสียดสีกับอัลลอยของ Al-Si ที่แรงกดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของระบบการสึกหรอแสดงถึงปัจจัย Input และ Output ต่อระบบ

ในการรับมือกับปัญหาการสึกหรอที่เกิดขึ้น ผิวสัมผัสของชิ้นงานหนึ่งๆมักจะผ่านขั้นตอนการทำวิศวกรรมพื้นผิว (Surface engineering) อาทิเช่น การเคลือบผิว หรือการชุบผิวแข็ง และอื่นๆ ในสถานการณ์เหล่านี้ พฤติกรรมของการสึกหรอก็จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติที่ผิวของวัสดุด้วย กล่าวคือ โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบและของชิ้นงานรองรับ และลักษณะของรอยต่อระหว่างวัสดุทั้ง 2 แต่สุดท้ายเราจะต้องระลึกไว้เสมอว่าคุณสมบัติของวัสดุเป็นเพียงปัจจัยหนึ่งในหลายๆปัจจัยที่สำคัญของระบบการสึกหรอ ซึ่งเราจะต้องนำมาพิจารณาควบคู่กันไป

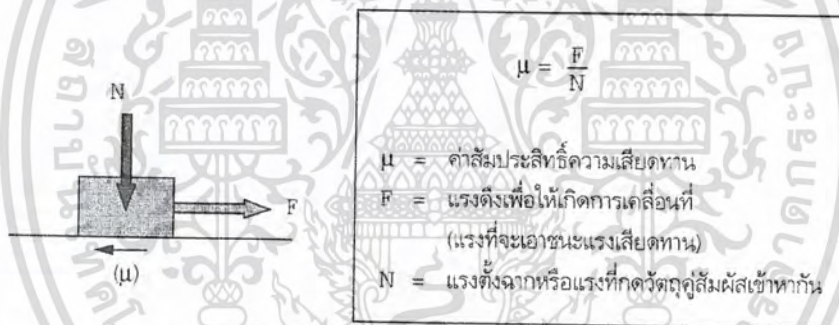
2.4 แรงเสียดทาน



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่สัมผัสแบบการไถลและการกลิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเสียดทานเป็นแรงต้านทานการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิว 2 ผิว ลักษณะของการเคลื่อนที่ อาจจะเป็นการเลื่อนไถล (Sliding) หรือการกลิ้ง (Rolling) ของผิวหนึ่งไปบนอีกผิวหนึ่งซึ่งอาจจะสัมผัสกันโดยตรงหรือมีของเหลว หรือมีฟิล์มคั่นอยู่ระหว่างผิวที่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ปัญหาสำคัญของความเสียดทาน คือ การที่มีความเสียดทานระหว่างผิววัสดุจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานระบบเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานหรือต้องใส่พลังงานให้แก่ระบบมากขึ้นเพื่อให้ระบบทำงานได้ พลังงานที่สูญเสียไปนี้เมื่อนำมารวมกันจะพบว่ามียูลค่ามหาศาลทีเดียว การศึกษาโดยมุ่งเน้นที่การลดแรงเสียดทานจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากในวิทยาการสมัยใหม่ทั้งในการพัฒนาวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ และการออกแบบระบบให้เกิดความเสียดทานขึ้นน้อยที่สุด เป็นต้น แต่ในบางกรณีความเสียดทานก็เป็นที่ต้องการ เช่น การเดิน การขับของรถยนต์ การหีบจับสิ่งของ ถ้าไม่มีแรงเสียดทานระหว่างผิว กิจกรรมต่างๆ เหล่านี้ก็จะเกิดขึ้นไม่ได้ ดังนั้น การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความเสียดทานจึงประกอบด้วยการศึกษาเพื่อลดความเสียดทานให้ต่ำที่สุดในกรณีที่ไม่ต้องการและการศึกษาเพื่อรักษาค่าความเสียดทานให้เพียงพอกับความต้องการในการทำงานบางอย่าง นอกจากนี้ยังมีบางกรณีที่ต้องการศึกษาเพื่อรักษาค่าความเสียดทานในช่วงเวลาแคบๆ ให้สามารถควบคุมได้ เช่น ในระบบเบรกของรถยนต์ ซึ่งการทำงานของเบรกไม่ต้องการหยุดในทันที ต้องมีช่วงเวลาที่เหมาะสมในการหยุดของรถไม่ให้ช้าหรือเร็วจนเกินไปเพื่อความนุ่มนวลในการขับขี่ เป็นต้น



รูปที่ 2.11 แสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ขนาดหรือระดับของค่าความเสียดทาน โดยทั่วไปเราใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ) เป็นตัววัด โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสามารถหาได้ตามรูปที่ 2.11

2.4.1 ความเสียดทานแบบไถล (Sliding Friction)

ผู้ที่ได้รับการยกย่องว่าเป็นบุคคลแรกที่ค้นพบเรื่องความเสียดทาน คือ Leonardo da Vinci หลังจากนั้น Amontons ได้ทำการสังเกตและตั้งกฎพื้นฐานของความเสียดทานไว้ 2 ข้อ ซึ่งได้รับการกล่าวถึงและมีการนำไปอ้างอิงเป็นที่แพร่หลาย ต่อมากฎข้อที่ 3 ก็ได้ตั้งขึ้นตามมาจาก การสังเกตของ Coulomb ซึ่งมีเนื้อหา ดังนี้ คือ

กฎข้อที่ 1 แรงเสียดทานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงตั้งฉาก ($F = \mu N$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

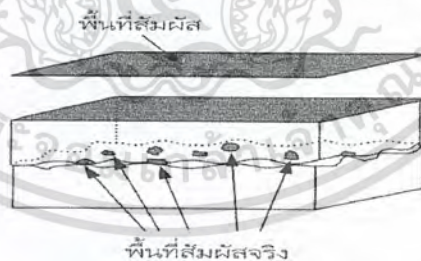
กฎข้อที่ 2 ความเสียดทานไม่ขึ้นอยู่กับพื้นที่สัมผัส

กฎข้อที่ 3 แรงเสียดทานไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์

กฎข้อที่ 1 และข้อที่ 2 โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับ มีเพียงบางกรณีที่ไม่เป็นไปตามกฎ เช่น ในกรณีวัสดุที่แข็งมากๆ เช่น เพชร หรือ กรณีที่วัสดุอ่อนมาก เช่น PTFE (Teflon) พบว่าอาจจะเกิดความสัมพันธ์แบบยกกำลัง ($F = CN^n$) ได้ นอกจากนี้ในกรณีที่วัสดุอ่อนนุ่มแต่มีฟิล์มแข็งเคลือบอยู่ ในสภาวะการทำงานที่มีค่าความเค้นค่าฟิล์มแข็งที่เคลือบอยู่จะมีผลกับค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น จึงเป็นการวัดความเสียดทานระหว่างฟิล์มเคลือบกับวัตถุที่มากระทำ แต่เมื่อความเค้นที่มากระทำเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ฟิล์มเคลือบแตกเนื้อของวัสดุภายในจะเป็นตัวที่มีอิทธิพลต่อค่าความเสียดทานทำให้ค่าความเสียดทานเปลี่ยนไปความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานและแรงกดจึงไม่เป็นไปตามกฎข้อที่ 1 ส่วนกรณีโต้แย้งของกฎข้อที่ 2 คือ กรณีที่ผิวงานเรียบมากและสะอาดมากจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสูง จึงทำให้แรงเสียดทานไม่ขึ้นกับค่าความเค้นที่มากระทำแต่จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่สัมผัส ในส่วนของกฎข้อที่ 3 มีการโต้แย้งกันมากจากที่ทราบทั่วไปว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตย์ (Static friction coefficient : μ_s) มีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ (Kinetic friction coefficient : μ_k) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตย์จะมีค่าแปรตามช่วงเวลาในการสัมผัสของผิว 2 ผิว ถ้าสัมผัสกันเป็นช่วงเวลาสั้นๆ μ_s จะมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับค่า μ_k และเมื่อผิว 2 ผิวสัมผัสกันเป็นระยะเวลาานก่อนที่จะเกิดการเคลื่อนที่ μ_s จะสูงขึ้น ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก (Plastic flow) และการคืบของวัสดุ ในส่วนของ μ_k มีการทดลองมากมายที่ยืนยันว่า μ_k จะแปรตามความเร็วของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ซึ่งก็จะไม่เป็นไปตามกฎข้อที่ 3

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่ากฎทั้ง 3 ข้อที่ตั้งขึ้นมานั้นเป็นเพียงแนวทางในการศึกษาความเสียดทานเท่านั้น ในทางปฏิบัติเราจะต้องนำปัจจัยอื่นๆมาร่วมพิจารณาในการวิเคราะห์หาค่าความเสียดทานด้วย

1. กลไกพื้นฐานของการเกิดความเสียดทานแบบไฮโดร



รูปที่ 2.12 แสดงพื้นที่สัมผัสจริงของผิวสัมผัสทั่วไป

เป็นที่ทราบกันดีว่าพื้นผิวทางวิศวกรรมไม่มีพื้นผิวใดที่เรียบจริง ถึงแม้จะเป็นจะมองเห็นว่าเรียบด้วยตาเปล่าแต่เมื่อมองกล้องที่กำลังขยายสูงๆ จะพบว่ามีลักษณะที่เป็นคลื่นขรุขระอยู่ แบบจำลองของความเสียดทานจึงขึ้นอยู่กับพื้นผิวที่สัมผัสกันจริง (Real area of contact) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 Bowden และ Tabor สร้างสมมุติฐานว่า บริเวณที่สัมผัสกันของผิววัสดุจะเกิดความเค้นสูงสุดที่จุดสัมผัสระหว่าง 2

ผิว เนื่องจากเป็นบริเวณเล็ก ๆ จึงเกิดเป็นการเชื่อมติดกัน และถูกฉีกให้แยกออกจากกันเมื่อเกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์

ภายหลังพบว่า ความเค้นสูงสุดที่จุดสัมผัสไม่ได้เกิดการเชื่อมติดกัน แต่จะมีแรงยึดเหนี่ยวอยู่ค่าหนึ่ง ถ้าต้องการให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ แรงที่ใช้จะต้องมากกว่าที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวได้ นอกจากนี้เมื่อเกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ส่วนที่อยู่ยอดสูงของผิวที่แข็งแกร่งกว่าของคู่สัมผัสจะบุกลงบนผิวที่อ่อนกว่าเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องจึงต้องการแรงหรือพลังงานอีกส่วนหนึ่งการเปลี่ยนรูปของผิวที่อ่อนกว่า ดังนั้น แรงเสียดทานซึ่งเท่ากับแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (F) จึงต้องเอาชนะแรงยึดเหนี่ยว (F_a) และแรงในการเปลี่ยนรูปวัสดุ (F_d)

$$F = F_a + F_d$$

2. แรงยึดเหนี่ยว (Adhesion Force : F_a)

พื้นผิวเล็กๆ บริเวณที่สัมผัสกันจริงจะเกิดการยึดเหนี่ยวซึ่งอาจเกิดได้ทั้งจากปฏิกิริยาทางกายภาพหรือทางเคมี แรงยึดเหนี่ยวเกิดได้ง่ายบนผิวที่เรียบ สะอาด ปราศจากสิ่งสกปรก ในการที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ได้นั้นจะต้องมีแรงกระทำที่เพียงพอในการฉีกเพื่อทำลายแรงยึดเหนี่ยวนี้ บริเวณที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุดก็จะฉีกขาด ซึ่งอาจจะเป็นที่ผิวสัมผัส หรือเนื้อของวัสดุตัวใดตัวหนึ่งในกรณีที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสแข็งแรงกว่าเนื้อในของวัสดุตัวนั้น

จากทฤษฎีของ Bowden และ Tabor

<p>ในกรณีที่ไม่มีสารหล่อลื่นคั่นระหว่างผิว (Dry friction) จะพบว่า</p> $F_a = A_r + \tau_a$	<p>ในกรณีที่มีสารหล่อลื่นคั่นระหว่างผิว (Partial liquid) จะพบว่า</p> $F_a = A_r [\alpha \tau_a + (1-\alpha) \tau_l]$
--	--

- โดยที่ A_r คือ พื้นที่สัมผัสจริงของผิว
- τ_a คือ ค่าความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวระหว่างผิว
- α คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวสัมผัสจริงต่อพื้นที่สัมผัสทั้งหมด
- τ_l คือ ค่าความแข็งแรงเฉือนของของเหลวที่คั่นอยู่

ความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกล ทางกายภาพ และทางเคมีของพื้นผิวทั้งคู่ โดยทั่วไปความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวจะต่ำถ้ามีพื้นที่ที่สัมผัสจริงต่ำ เช่น ในกรณีที่มีฟิล์มบางกั้นหรือมีการใช้สารหล่อลื่นเพื่อลดบริเวณการสัมผัสจริงของผิวคู่สัมผัส แต่ถ้าผิวสัมผัสกันในสุญญากาศ ไม่

มีอนุภาคอื่น ๆ มากขึ้นระหว่างกลาง จะทำให้ค่าความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวสูง นั่นหมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานก็จะสูงด้วย

3. แรงในการเปลี่ยนรูป (Deformation)

เนื่องจากบริเวณที่สัมผัสจริงของผิวคู่สัมผัสมักจะเป็นบริเวณเล็กๆของยอดสูง (Asperity) ขณะที่มีการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่าง 2 ผิวจึงมักจะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (คือ การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก) ของผิวคู่สัมผัส ส่วนที่เป็นยอดสูงของผิวที่แข็งกว่าจะซูดไปบนผิวที่อ่อนกว่า ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร เกิดการแตกหัก หรือการฉีกขาดของวัสดุที่อ่อนนุ่มกว่า ดังนั้น เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่สัมผัสอย่างต่อเนื่อง แรงในการเคลื่อนที่จึงจะต้องมากเพียงพอในการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่อ่อนกว่า นอกเหนือจากนั้นผิววัสดุบางส่วนที่ถูกซูดจนเกิดการแตกหัก เมื่อหลุดออกจากผิวชิ้นงานก็จะกลายเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่มีความแข็งแรงสูงเนื่องจากกลไกการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของวัสดุที่ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากความเครียด (Work hardening) อนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้มีอิทธิพลในการเพิ่มแรงที่ต้องใช้ในการเคลื่อนที่เพราะจะสามารถซูดไปบนผิวของชิ้นงานเหมือนกับส่วนที่เป็นยอดสูงของผิวแข็ง ถ้าหากต้องการลดแรงเสียดทานที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปวัสดุใน ส่วนนี้ เราสามารถทำได้โดยปรับสภาพผิวคู่สัมผัสให้มีความเรียบสูง ก็จะช่วยลดปริมาณของยอดสูงและลดการเปลี่ยนรูปของวัสดุให้น้อยลงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผิวที่มีความแข็งแรงสูงควรจะต้องทำให้เรียบมากขึ้น

2.4.2 ความเสียดทานแบบกลิ้ง (Rolling Friction)

ในการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างสองพื้นผิว ลักษณะการเคลื่อนที่แบบกลิ้งจะเกิดได้ง่ายกว่ากล่าวคือระบบคู่สัมผัสจะต้องการพลังงานในการเคลื่อนที่ต่ำกว่าลักษณะการเคลื่อนที่แบบไถล แต่การเคลื่อนที่แบบกลิ้งมักจะเกิดขึ้นเฉพาะในกรณีที่วัตถุคู่สัมผัสหนึ่งมีลักษณะกลมหรือเกือบกลมเท่านั้น ในกลไกของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งพลังงานในการเคลื่อนที่สัมผัสของระบบจะต้องเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวและแรงในการเปลี่ยนรูปได้ ซึ่งก็เหมือนกับการเคลื่อนที่แบบไถล แต่มีความแตกต่างที่ทิศทางในกาเข้าหา (Approach) และการเคลื่อนที่จาก (Separation) ของบริเวณสัมผัสซึ่งจะเกิดในทิศทางตั้งฉากกับผิว ไม่ได้เกิดในทิศทางขนานกับผิวเหมือนการไถล โดยปกติในขณะที่เกิดการกลิ้งก็จะมีเคลื่อนที่รูปแบบอื่นอยู่ด้วยคือ การไถลและการหมุน ถึงแม้ว่าการไถลหรือการหมุนจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยในการเคลื่อนที่รูปแบบที่แบบกลิ้ง แต่ก็เป็นตัวสร้างความต้านทานเคลื่อนที่ทั้งหมด ตามสมการของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบกลิ้ง (μ_R) ดังต่อไปนี้

$$\mu_R = \frac{V_S}{V_R} \mu_K$$

โดยที่ V_S = เป็นค่าความเร็วของการไถล
 V_R = เป็นความเร็วของการกลิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\mu_k =$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ในสภาวะการเคลื่อนที่แบบ

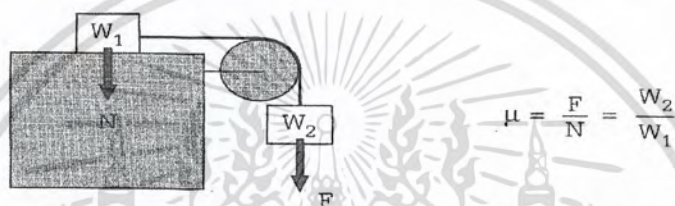
ไถล

กฎการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

1. แรงเสียดทานจะแปรผกผันกับค่ารัศมีความโค้งของผิวที่กลิ้ง
2. ผิวที่เรียบจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่าผิวหยาบ
3. ความเสียดทานสถิตย์ (Static friction) จะมีค่าสูงกว่าความเสียดทานจลน์ (Kinetic friction)

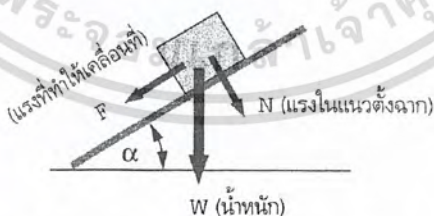
2.4.3 การวัดค่าความเสียดทาน

การวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเกี่ยวข้องกับการวัดแรง 2 ส่วน คือ F แรงที่ทำให้เริ่มหรือรักษาสภาวะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ และ N แรงตั้งฉากหรือแรงที่ทำให้ผิว 2 ผิวยึดติดกัน ดังแสดงในรูป 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงการวัดค่าความเสียดทาน โดยการดึงวัตถุผ่านรอก

การวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอย่างง่ายทำได้ตามรูปที่ 2.13 โดยใช้แรงจากตุ้มน้ำหนัก W_2 ดึงตุ้มน้ำหนัก W_1 ผ่านรอก เพิ่มแรง F จนกระทั่งตุ้มน้ำหนัก W_1 เกิดการเคลื่อนที่ ค่าที่ได้จากการคำนวณจะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตย์ ($\mu_s = F_s/N$) ถ้าต้องการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ก็สามารถทำการทดสอบได้โดยใช้มือดึงเชือกแล้วปล่อย ถ้าตุ้มน้ำหนักหยุดการเคลื่อนที่ ก็เพิ่มแรง F ขึ้นแล้วลองดึงใหม่ จนกระทั่งถึง F ที่ตุ้มน้ำหนักสามารถเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องหลังจากปล่อยมือจากการดึงแล้ว ($\mu_k = F_k/N$) อีกวิธีหนึ่งที่เป็นกรวัดค่าความเสียดทานอย่างง่าย คือ การใช้พื้นเอียง ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงการวัดค่าความเสียดทาน โดยการใช้พื้นเอียง

จากรูปที่ 2.14 จะพบว่า

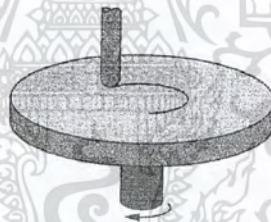
$$\mu = \frac{F}{N}$$

และ

$$\mu = \frac{W \sin \alpha}{W \cos \alpha} = \tan \alpha$$

การทดสอบจะทำโดยการเพิ่มมุมเอียงของพื้น (α) จนกระทั่งวัตถุเริ่มเคลื่อนไถลลงตามพื้นเอียง ค่า $\tan \alpha$ ที่คำนวณได้จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตย์ ถ้าต้องการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ ใช้มือผลักให้เกิดการเคลื่อนที่ก่อน แล้วดูว่ามุมที่เอียงไว้ตั้งแต่เริ่มต้นเพียงพอที่จะให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องหรือไม่ ถ้าวัตถุหยุดเคลื่อนที่ ก็เพิ่มมุมเอียงของพื้นขึ้นแล้วลองผลักวัตถุอีกครั้ง ทำซ้ำไปจนกระทั่งถึงจุดที่วัตถุเกิดการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องได้ ก็จะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ได้

นอกเหนือวิธีการคำนวณจากการทดลองอย่างง่ายนี้แล้ว ก็ยังมีเครื่องมือเฉพาะสำหรับวัดค่าความเสียดทานอยู่อีกหลายชนิด ตั้งแต่การใช้ Spring scale ไปจนถึงหัวรับสัญญาณทางไฟฟ้าในการวัดค่าแรง ซึ่งโดยทั่วๆ ไปจะอาศัยหลักการวัดจากการเปลี่ยนแปลงของวัตถุในช่วงการเปลี่ยนรูปอย่างไม่ถาวรเมื่อมีแรงมากระทำที่วัตถุนั้น โดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ เช่น Strain gauge, Piezoelectric หรือ Acoustic emission เครื่องมือวัดความเสียดทานแต่ละอย่างจะแตกต่างกันที่ลักษณะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรง



รูปที่ 2.15 หลักการทำงานของ Pin on disk

ตัวอย่างเครื่องมือวัดความเสียดทานที่ใช้กันค่อนข้างแพร่หลายคือ Pin-on-disk ในอุปกรณ์ชุดนี้ ชิ้นส่วนที่เป็นหมุด (Pin) ซึ่งเป็นวัสดุที่นำมาทดสอบ จะยึดไว้โดยคานที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรง และจะเคลื่อนที่สัมพัทธ์บนจาน (Disk) งานทดสอบนี้จะหมุนโดยมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เครื่องทดสอบแบบ Pin-on-disk เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ง่าย และสามารถให้ผลของความเสียดทานที่รวดเร็วได้ จึงเป็นหนึ่งในเครื่องมือทดสอบที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การสึกหรอของโลหะ

การสึกหรอเป็นผลของผิววัสดุจากการถูกแรงกระทำขณะที่ผิวเคลื่อนที่สัมผัสกับอีกผิวหนึ่ง การสึกหรอเกิดได้หลายรูปแบบ เช่น การสึกหรอจากการไถลระหว่างผิว (Sliding wear) การขัดถูของอนุภาคกับผิว (Abrasion) การชนของอนุภาคขนาดเล็ก หรือของเหลวกับผิว (Erosion) เป็นต้น ลักษณะหรือกลไกการเกิดการสึกหรอของวัสดุแต่ละชนิดก็แตกต่างกันไป การสึกหรอจะช้าหรือเร็วขึ้นกับหลายองค์ประกอบ เช่น โครงสร้างจุลภาคของผิว ชนิดของวัสดุ ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุ ลักษณะของแรงกระทำ หรือการโหลด (Nature of loading) ปฏิริยาเคมี และอุณหภูมิ เป็นต้น การสึกหรอที่พบโดยทั่วไปมักมีความซับซ้อนมีหลายกลไกเกิดพร้อมๆกัน บางทีก็ไม่สามารถระบุการสึกหรอที่เกิดขึ้นได้แน่นอนว่าเป็นชนิดใด

ลักษณะการสึกหรอของชิ้นส่วนโลหะที่มักจะพบในอุตสาหกรรมทั่วไป สามารถจำแนกอย่างคร่าวๆได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. การสึกหรอระหว่างโลหะหรือการสึกหรอแบบไถลในกรณีที่มีสารหล่อลื่น
2. การสึกหรอแบบไถลในกรณีที่ไม่มีสารหล่อลื่น
3. การสึกหรอแบบขัดถูซึ่งเป็นการสึกหรอจากผิวหรืออนุภาคแข็งที่มากกระทำ
4. การสึกหรอที่เกิดจากความล้าและการสึกหรอแบบล้า (Fatigue และ Fretting wear)

ในตารางที่ 3.1 และ ตารางที่ 3.2 เป็นการรวบรวมรูปแบบการสึกหรอและกลไกทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับวัสดุประเภทโลหะ โดยใช้หลักการในการแบ่งแยกประเภทของการสึกหรอตามปัจจัยหลักบางประการดังต่อไปนี้

1. สภาพการสึกหรอ หมายถึง ข้อมูลที่อธิบายถึงสถานการณ์ของการทำงานที่ทำให้เกิดการสึกหรอ เช่น ลักษณะและรูปร่างของผิวสัมผัส ปริมาณความเค้นที่เกิดขึ้น ความเร็วรอบหรือความเร็วสัมผัส ณ จุดสัมผัส ฯลฯ

2. กลไกการสึกหรอ หมายถึง กลไกที่เกิดขึ้นในระดับจุลภาค ณ จุดสัมผัสทำให้เกิดการสึกหรอ ซึ่งรวมถึง ลักษณะการยึดติดกันของอะตอม การเสีรูปร่างแบบพลาสติก และการหลุดออกของเนื้อโลหะ กลายเป็นเศษของการสึกหรอ เป็นต้น

3. หลักฐานและข้อมูลทางเทคนิค หมายถึง ข้อมูลที่สามารถติดตามวัดผลและแสดงออกมาอย่างชัดเจนได้ เช่น อัตราการสึกหรอ การเปลี่ยนแปลงของอัตราการสึกหรอ ลักษณะสำคัญของผิวที่สึกหรอ และเศษการสึกหรอ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ตารางดังกล่าวก็มีขีดจำกัดในการประเมินถึงประเภทของการสึกหรอที่เกิดขึ้น เนื่องจากไม่สามารถนำตัวแปรที่มีทั้งหมดมาร่วมพิจารณาได้ จึงนำเฉพาะตัวแปรที่สำคัญบางส่วนมาเป็น

ตารางที่ 3.1 หมวดและชนิดของการสึกหรอในโลหะ

หมวดการสึกหรอ	ชนิดการสึกหรอ	ลักษณะการเกิด	ลักษณะที่ปรากฏ
A. การสึกหรอระหว่างโลหะ (Metal to Metal Wear)	1. การสึกหรอแบบไถลชั้นรุนแรง (Severe metal to metal sliding wear)	การไถลของโลหะบนโลหะ	อัตราการสึกหรอสูง เศษที่หลุดจากผิวยังคงสภาพเป็นโลหะเหมือนเดิม
	2. การสึกหรอแบบไถลเพียงเล็กน้อย (Mild metal to metal sliding wear)	การไถลของโลหะบนโลหะ	อัตราการสึกหรอต่ำและ เศษสึกหรอที่หลุดออกจากผิวถูกออกซิไดซ์
	3. การสึกหรอแบบถูครูด (Fretting wear)	การสั่นสะเทือนที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะ	เป็นแอ่งของเศษออกไซด์
	4. การสึกหรอจากการชนของอิเล็กตรอน (Electric discharge erosion)	การอาร์กหรือเกิดสะเก็ดไฟระหว่างผิวโลหะ	ผิวเป็นรูและมีร่องรอยการหลอม
	5. การสึกหรอระหว่างโลหะที่อุณหภูมิสูง (High temperature metal to metal wear)	โลหะร้อนกลิ้ง ไถลบนโลหะร้อน	ผิวอ่อนตัว มีเศษออกไซด์หลุดออกมา
	6. การสึกหรอจากความล้าที่เกิดจากการกลิ้ง (Rolling contact fatigue wear)	การสัมผัสระหว่างผิวโลหะจากการกลิ้ง	ผิวเป็นรู (Pitting) หลังเกิดการเคลื่อนที่ไประยะหนึ่ง
	7. การสึกหรอจากความล้าที่เกิดจากการชน (Solid body impact fatigue wear)	การชนซ้ำๆ	ผิวหลุดร่อนหลังจากชนไปได้ระยะหนึ่ง
B. การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear)	8. การสึกหรอแบบขัดถูร่วมกับการกระแทก/ การปะทะของอนุภาคแข็ง (Impact abrasion)	การชนซ้ำๆพร้อมกับขูด	(ยังไม่มีกรณีศึกษาชัดเจน)
	9. การสึกหรอจากการชนด้วยแรงมาก (Gouging abrasion)	การชนด้วยอนุภาคขนาดใหญ่และเกิดความเค้นที่ผิวสูง	ผิวเป็นร่องลึก เกิดการเสีรูปร่าง
	10. การสึกหรอแบบขัดถูชนิดความเค้นสูง (Grinding abrasion)	การชนที่มีความเค้นมากพอที่จะทำให้อนุภาคแตก	อัตราการสึกหรอสูง รอยขีดข่วนสามารถมองเห็นได้
	11. การสึกหรอแบบขัดถูชนิดความเค้นต่ำ (Low stress abrasion)	การชนที่ความเค้นไม่มากพอที่จะทำให้อนุภาคแตก	อัตราการสึกหรอต่ำ และรอยขีดข่วนเล็กๆ
	12. การสึกหรอร่วมกับการกัดกร่อน (Corrosion -abrasion)	การกัดกร่อนเกิดพร้อมกับการสึกหรอแบบขัดถู	ลักษณะปรากฏหลากหลาย การกัดกร่อนเกิดเร็วขึ้น

ตารางที่ 3.1 หมวดและชนิดของการสึกหรอในโลหะ(ต่อ)

C.การสึกหรอจากการชนของของไหล (Fluid Erosion)

13.การสึกกร่อนจากการชนของอนุภาค (Solid particle erosion)	การชนของอนุภาคขนาดเล็กในของไหลที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง	ลักษณะร่องรอยการสึกกร่อนที่ปรากฏบนผิวจะสัมพันธ์กับรูปแบบของการไหล
14.การสึกกร่อนจากการชนของของเหลว (Liquid flow erosion)	การชนด้วยลำของของเหลว หรือสเลอรี (Slurry)	อัตราการสึกกร่อนต่ำ ลักษณะที่ปรากฏบนผิวจะสัมพันธ์กับการไหล
15.การสึกกร่อนจากการชนของหยดของเหลว (Liquid droplet erosion)	การชนด้วยหยดของเหลว หรือการพ่นของเหลว	อัตราการสึกกร่อนไม่สูงมาก และผิวเป็นหลุม
16.การสึกกร่อนจากการแตกของฟองอากาศ (Cavitation erosion)	การเกิดและแตกของฟองอากาศในลำของเหลว	อัตราการสึกกร่อนสูง ผิวเป็นหลุม
17.การสึกกร่อนร่วมกับการกัดกร่อน (Erosion-corrosion)	ของเหลวที่มีสมบัติกัดกร่อน เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง	การสึกกร่อนและการกัดกร่อนเกิดเร็วขึ้น
18.การสึกกร่อนที่อุณหภูมิสูง (High temperature erosion)	อากาศร้อนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง	การเกิดออกซิเดชันเร็วขึ้น

ตารางที่ 3.2 กลไกการเกิดของการสึกหรอชนิดต่างๆ

กลไกการสึกหรอ		ชนิดการสึกหรอ																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
a	การแนบติด (Adhesion)	/		/		/		/											
b	การแตกแยกชั้น (Delamination)	/	/	/		/					/								
c	การเกิดออกซิเดชันอย่างรวดเร็ว (Accelerated oxidation)		/	/	/	/												/	/
d	ความล้าจากแรงกดซ้ำๆ ที่ผิว (Herzian contact fatigue)						/	/	/										
e	การเกิดลิ่มไฮดรอลิก (Hydraulic wedging)*					/	/	/								/	/	/	
f	การไถในระดับจุลภาค (Microploughing)	/	/	/		/		/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
g	การตัดเฉือนในระดับจุลภาค (Microcutting)							/	/	/	/	/	/					/	/
h	การแตกขนานกับผิว (Tangential stress microfracture)			/				/	/	/	/	/	/					/	
i	การแตกร่อนเป็นแผ่นเกล็ดขนาดเล็ที่ผิว (Platelet formation)												/	/	/	/	/	/	
j	การแตกจากการกดซ้ำๆ ที่ผิว (Dynamic stress wave microfracture)							/	/				/	/	/	/	/	/	
k	การหลอม (Melting)	/		/	/								/						
l	การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Accelerated Corrosion)											/						/	

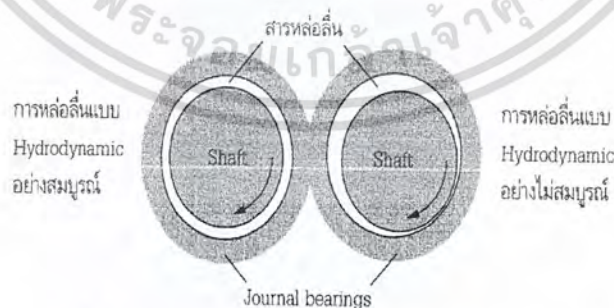
* การแตกที่เกิดจากการที่มีของเหลวเข้าไปติดในซอกรอยแตกเล็กๆ ที่ผิวเมื่อถูกกดของเหลวซึ่งไม่สามารถไหลออกได้ก็ดันกลับให้รอยแตกเปิด้าออก

ตัวหลักในการพิจารณา ดังนั้นถึงแม้ว่า ตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 จะแสดงถึงประเภทของการสึกหรอที่จัดหมวดหมู่มาอย่างรอบคอบแล้ว แต่ในการนำไปใช้งานผู้ใช้ควรจะขีดตารางเหล่านี้เป็นข้อมูลพื้นฐานเท่านั้น และจะต้องพิจารณาตัวแปรร่วมอื่นๆที่มีให้มากที่สุดก่อนที่จะระบุประเภทของการสึกหรอ แต่ถึงอย่างนั้นก็ตาม เราก็จะยังพบว่าทฤษฎีด้านกลไกการสึกหรอไม่ว่าจะเป็นของ โลหะ เซรามิก หรือ โพลีเมอร์ ก็ยังมีการปรับเปลี่ยนอยู่เสมอ มีการเสนอทฤษฎีขึ้นมาใหม่ตลอดเวลา ดังนั้น การอ้างอิงถึงประเภทการสึกหรอตามกลไกหรือตามทฤษฎีที่มีอยู่ในปัจจุบันก็อาจสร้างความเข้าใจผิดได้ ในการเก็บข้อมูลผู้ปฏิบัติควร จะเลือกเก็บข้อมูลด้าน “สภาวะการสึกหรอ”และด้าน “หลักฐานและข้อมูลทางเทคนิค” ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการนำมาใช้อ้างอิงในอนาคตมากกว่า แทนที่จะระบุประเภทและกลไกของการสึกหรอไว้เพียงอย่างเดียว

3.1 การสึกหรอระหว่างโลหะหรือการสึกหรอแบบไฮโดรไดนามิกในสภาวะที่มีการหล่อลื่นหน้าที่ยังสารหล่อลื่น

3.1.1 หน้าที่ยังสารหล่อลื่น

เมื่อการสึกหรอ คือ ความเสียหายที่เกิดจากการขัดถูหรือการไถลระหว่างผิวสัมผัส หากเราสามารถแยกผิวสัมผัสนั้นออกจากกันได้ ปริมาณการสึกหรอที่เกิดขึ้นก็จะลดลง หรือแม้กระทั่งไม่เกิดการสึกหรอขึ้นเลยก็ตาม การใช้สารหล่อลื่นที่เหมาะสมเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดการสัมผัสโดยตรงระหว่างผิว ตัวอย่าง เช่น ในระบบของแกนเพลา (Shaft) และรองเพลา (Journal bearing) ที่ใช้การหล่อลื่นแบบ Hydrodynamic ในสภาวะที่มีการหล่อลื่นอย่างสมบูรณ์เพลาที่หมุนอยู่จะไม่สัมผัสโคนรองเพลาเลย จึงไม่เกิดการสึกหรอ แต่เมื่อสภาวะการหล่อลื่นนั้นไม่สมบูรณ์ก็จะเกิดผิวสัมผัสขึ้นระหว่างเพลาและรองเพลา ซึ่งจะมีการสึกหรอเกิดขึ้นตามมา นอกจากนี้ถ้าระบบทำงานไปได้ระยะหนึ่งแล้วมีสิ่งแปลกปลอมหลุดเข้ามาเจือปนอยู่ในสารหล่อลื่น ซึ่งสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้อาจมาจากเศษของการสึกหรอจากชิ้นส่วนต่างๆ ภายในเครื่องยนต์ หรืออาจเป็นฝุ่นละอองที่หลุดผ่านซีล (Seal) เข้ามาในระบบ เมื่ออนุภาคสิ่งแปลกปลอมเข้าไปสัมผัสผิวโลหะ การสึกหรอก็เกิดได้ง่ายขึ้นอีก การกำจัดหรือลดปริมาณสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้สามารถทำได้โดยใช้ตัวกรองน้ำมัน การเปลี่ยนน้ำมันอย่างสม่ำเสมอ และการบำรุงรักษาซีลอย่างถูกวิธี



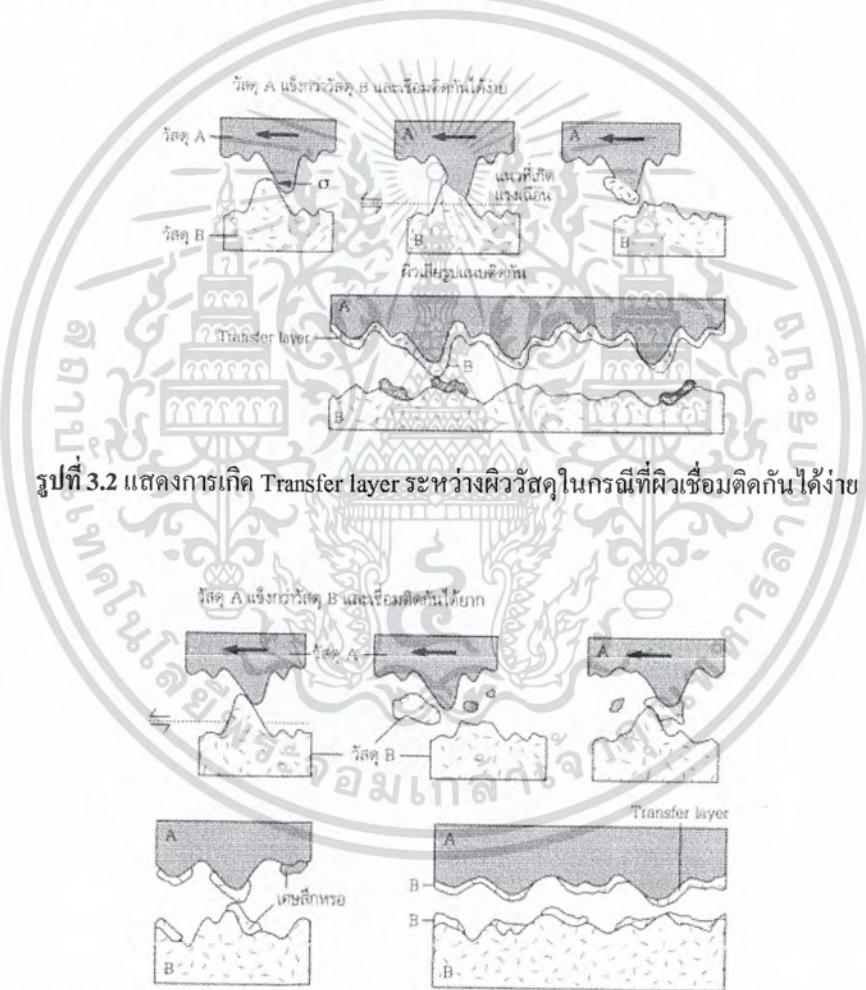
รูปที่ 3.1 แสดงสภาวะการหล่อลื่นแบบ Hydrodynamic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสึกหรอแบบไถลมักจะถูกเรียกว่าเป็นการสึกหรอแบบแนบติด (Adhesive wear) หรือการสึกหรอ ระหว่างโลหะ (Metal to metal wear) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 คำว่า “การสึกหรอระหว่างโลหะ” เป็นชื่อกลางที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางเพราะได้รวมเอาการสึกหรอที่สำคัญเข้าไว้ด้วยกัน รวมทั้งการสึกหรอจากการไถล การสึกหรอเนื่องจากความล้า (Rolling contact fatigue) และการสึกหรอแบบถูครูด (Fretting wear) เป็นต้น

ถึงแม้ว่าการสึกหรอแบบแนบติดจะเป็นกลไกหลักของการสึกหรอแบบไถล แต่ก็ยังมีกลไกรูปแบบอื่นที่สำคัญที่อาจเกิดร่วมกันได้อีก เช่น การแตกแยกชั้น (Delamination) การเกิดออกซิเดชัน การไถลในระดับจุลภาค (Microploughing) และ การหลอม เป็นต้น

3.1.2 การเกิด Transfer Layer และ Third Body film



รูปที่ 3.2 แสดงการเกิด Transfer layer ระหว่างผิววัสดุในกรณีที่ผิวเชื่อมติดกันได้ง่าย

รูปที่ 3.3 แสดงการเกิด Transfer layer ระหว่างผิววัสดุในกรณีที่ผิวเชื่อมติดกันได้ยาก

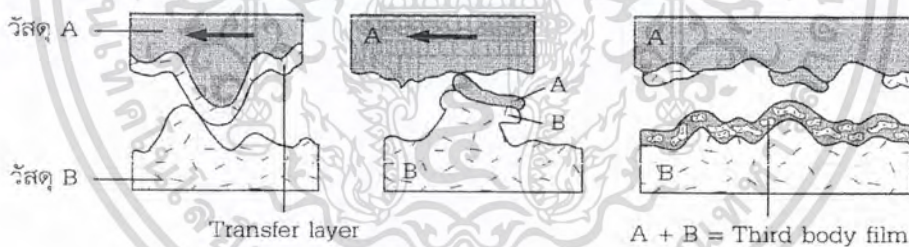
การสึกหรอแบบถูครูด (Fretting wear) คือการสึกหรอที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างผิววัสดุ 2 ผิวที่ไถลผ่านกันและกัน ทำให้เกิดกาขูดผิววัสดุออกไปโดยกลไกการสึกหรอแบบเกาะติด ความยาวของการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไกลไปกลับจะถูกจำกัดไว้ระหว่าง 1-100 ไมครอน การสึกหรอแบบบดครูดมักจะเกิดในการใช้งานที่มีการสั่นสะเทือนร่วมด้วย เช่น เฟลากับรองลื่น เป็นต้น

เมื่อผิวสัมผัสเคลื่อนที่สัมผัสกันภายใต้แรงกดระดับหนึ่ง ถ้าความเค้นที่จุดสัมผัสสูงมากจนทำให้ผิวเสียรูปอย่างถาวร (Plastic deformation) และผิวแนบติดกัน ซึ่งถ้าการเคลื่อนที่ซึ่งดำเนินต่อไป จุดที่ติดกันและยอดสูงจะแตกหลุดออกเป็นอิสระไปเกาะติดบนอีกผิวหนึ่ง โดยส่วนใหญ่แล้ว ยอดสูงเหล่านี้จะฉีกแตกเนื่องจากแรงเฉือน (Shear) ที่ฐานของยอดสูงแทนที่จะเป็นที่จุดสัมผัส ทำให้เกิดการถ่ายโอนเนื้อวัสดุจากผิวหนึ่งไปอีกผิวหนึ่ง ถ้าหากคู่สัมผัสเป็นโลหะที่ต่างชนิดกันอย่างชัดเจน (เชื่อมติดได้ยากกว่า) ในช่วงต้นอาจมีการแนบติดเกิดขึ้นน้อย แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป ผิวของตัวที่อ่อนแอกว่า จะหลุดไปพอกผิวที่แข็งกว่า จนในที่สุดผิวทั้งสองแทบไม่มีความแตกต่างกัน ทำให้การเชื่อมติดของผิวทั้งสองสามารถเกิดได้ง่ายขึ้น เมื่อการถ่ายโอนเนื้อโลหะเกิดขึ้นซ้ำๆ กัน ก็จะมีการสะสมเป็นชั้นที่เรียกว่า Transfer layer ขึ้น เพราะฉะนั้น Transfer layer นี้จะประกอบด้วยเนื้อโลหะที่ผ่านการเสียรูปเข้าไปเข้ามา นอกจากนี้ ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานก็จะทำให้ผิวโลหะเกิดการออกซิเดชันกลายเป็นสารประกอบออกไซด์ ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ก็จะหลุดแตกออกและถูกดึงเข้าไปผสมผสานอยู่ใน Transfer layer ด้วยเช่นกัน

ถ้า Transfer layer บนผิวโลหะ A ไปแนบติดกับผิวโลหะคู่สัมผัส B ซึ่งเกิดได้ง่ายเพราะ Transfer layer มักประกอบด้วยเนื้อโลหะจากคู่สัมผัส B อยู่แล้ว หรือถ้า Transfer layer แตกหลุดออกมาเป็นเศษของการสึกหรอแล้วถูกกดบีบให้ติดลงบนผิวของโลหะคู่สัมผัส B นี้ ชั้นนี้จะเรียกว่า Third body film ซึ่งเป็นชั้นที่ประกอบด้วยเนื้อวัสดุจาก Transfer layer และเศษของการสึกหรอจากผิวโลหะ A



รูปที่ 3.4 แสดงการสร้างชั้น Third body film จาก Transfer layer

ส่วนใหญ่แล้ว เศษของการสึกหรอที่พบจะเป็นเนื้อวัสดุที่แตกหลุดออกมา Transfer layer และ Third body film โดยสาเหตุของการแตกหลุดก็จะมาจากแรงกระทำที่เกินขีดจำกัดของค่าความเหนียว (Fracture toughness) ของ Transfer layer และ Third body film นี้ ซึ่งมักจะมีค่าค่อนข้างต่ำ ไม่ว่าจะเป็นความเหนียวของโลหะที่ผ่านการเสียรูปมาแล้ว หรือความเหนียวของสารประกอบออกไซด์ที่ปะปนอยู่ก็ตาม เศษของการสึกหรอที่สึกออกมาก็สามารถไปทำให้เกิดการสึกหรอบนผิวโลหะทั้งสองต่อไปอีก นอกจากลักษณะการเกาะติดของยอดสูงที่กล่าวมาแล้ว การแนบติดและการโอนถ่ายเนื้อโลหะก็สามารถเกิดได้จากการที่ยอดสูงของผิวที่แข็งมากไปไถขูดเข้าไปในผิวคู่สัมผัสที่อ่อนนุ่มกว่า เช่น การผิวเหล็กกล้าไถขูดลงบนผิวของรองลื่นที่ทำจากโลหะสัมฤทธิ์ (Bronze bearing) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การสึกหรอแบบไถลในสภาวะที่ไม่มีการหล่อลื่น

การสึกหรอแบบไถลในสภาวะที่ไม่มีการหล่อลื่น (Dry sliding wear) เป็นการสึกหรอที่เกิดเมื่อสารหล่อลื่นเสื่อมสภาพ หรือระบบที่ตั้งใจ ไม่ใช่สารหล่อลื่น เช่น ในระบบเบรกและคลัตช์ เป็นต้น คู่สัมผัสโลหะที่ไม่มีสารหล่อลื่นคั่นอยู่ระหว่างกลางจะเกิดการแนบติดสลับกับการฉีกแตกของเนื้อโลหะเข้าไปเข้ามาและเกิดการเสียดสีแบบพลาสติกอย่างรุนแรง ทำให้มีทั้งกลไกการสึกหรอแบบแนบติด และกลไกการแตกแยกชั้นเกิดขึ้น นอกจากนี้ความร้อนจากแรงเสียดทานที่บางบริเวณก็อาจจะสูงพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างของผิวโลหะ ในระบบรองเพลาคู่ผิวโลหะอาจจะสัมผัสกันโดยตรงได้โดยเฉพาะในช่วงที่กำลังเปิด-ปิดเครื่องที่สารหล่อลื่นอาจจะถูกปล่อยออกจากระบบ หรือถ้าแกนเพลาลดมาไม่ได้ ศูนย์ ผิวชิ้นส่วนที่อาจสัมผัสกันได้เช่นกัน ดังนั้น เพื่อให้สามารถเปิดเครื่องในช่วงที่มีการสัมผัสกันระหว่างผิวโลหะนี้โดยไม่ให้มีการเชื่อมติดหรือการสึกหรออย่างรุนแรงเกิดขึ้นและให้เวลาแก่ระบบจนสามารถสร้างชั้นของสารหล่อลื่นระหว่างผิวชิ้นมาได้ การเลือกวัสดุคู่สัมผัสที่เหมาะสมจึงมีความสัมพันธ์เป็นอย่างมาก

3.3 การสึกหรอแบบขี้ด

3.3.1 ชนิดของการสึกหรอแบบขี้ด

การสึกหรอแบบขี้ด (Abrasive wear) เกิดจากการที่อนุภาคหรือเศษวัสดุแข็งขนาดเล็กมาขัดสีที่ผิวชิ้นงาน ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายจากความเสียหายจากงานต่างๆมากมาย เช่น ในเหมืองแร่ งานวิศวกรรมโยธา ซิเมนต์ โรงหล่อ และอุตสาหกรรมต่างๆ ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนชิ้นส่วนแต่ละปีมีมูลค่าสูงมาก การจัดประเภทของการสึกหรอแบบขี้ดที่พบในภาคอุตสาหกรรมในสภาวะการทำงานต่างๆสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดหลัก ตามแบบของ Avery คือ

- ชนิดที่เกิดจากการชนด้วยแรงค่อนข้างมาก มักจะมีแรงปะทะเข้ามาเกี่ยวข้อง (Gouging abrasion)
- ชนิดที่เกิดที่ความเค้นสูง (High stress หรือ Grinding abrasion)
- ชนิดที่เกิดที่ความเค้นต่ำ (Low stress scratching abrasion หรือ Erosion)

1.การสึกหรอแบบ Gouging Abrasion

การสึกหรอชั้นรุนแรงจากการชนของอนุภาคหรือวัตถุแข็ง หรือการสึกหรอแบบ Gouging หรือ Gouging abrasion คือ การสึกหรอแบบขี้ดที่เกิดที่ความเค้นสูงมาก มักที่แรงปะทะ (Impact force) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ผิวที่สึกหรอจะมีลักษณะสึกเป็นร่องขนาดใหญ่ สามารถมองเห็นได้ค่อนข้างชัดเจน การสึกหรอแบบ Gouging เกิดขึ้นเมื่อวัสดุที่มีความแข็งและความเป็น Abrasive สูง เข้ามาตัดเฉือนที่ผิวของชิ้นงานด้วย แรงตัดเฉือนที่สูงพอที่จะทำให้ผิวของชิ้นงานถูกขูดหรือขูดเป็นร่องและมีเศษของการสึกหรอขนาดใหญ่หลุดออกมา เมื่อสังเกตที่ผิวชิ้นงานจะพบร่องขูดที่เรียกว่า ร่อง Gouge มีอยู่เป็นจำนวนมาก การ

สึกหรอแบบ Gouge อาจเกิดที่ความเร็วปะทะที่ค่อนข้างต่ำ เช่น ที่ผิวตัดของเครื่องขุดตัก(Digger) เมื่อขุด โคนก้อนหินหรือเกิดที่ความเร็วสูง เช่น ที่ผิวแท่นบดในเครื่องข่อยหิน เป็นต้น

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ในการต้านทานสึกหรอแบบ Gouging ผิวโลหะจะต้องมีความแข็งสูง มากเพื่อลดการตัดเฉือนจากวัสดุที่มีความแข็งและความเป็น Abrasive สูง นอกจากนี้ โลหะที่ใช้ยังต้องมีความเหนียวสูงเพื่อลดการแตกร้าวที่เกิดจากแรงปะทะขั้นรุนแรงที่มักเกิดขึ้นด้วย โลหะที่นิยมใช้เพื่อต้านทานการสึกหรอแบบ Gouging ได้แก่ เหล็กกล้าแมงกานีสสูง (High manganese steel) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความเหนียวค่อนข้างสูง และเมื่อผ่านการสึกหรอไประยะหนึ่งจะทำให้แข็งด้วยความเครียด (Work hardening) ซึ่งทำให้ผิวแข็งขึ้นและการสึกหรอเกิดช้าลง ในงานบางอย่างมีการนำเซรามิกมาประกอบกับ โพลีเมอร์ในการป้องกันความเสียหายจากการชน โดยเซรามิกจะมีหน้าที่ต้านทานการเจาะ ส่วนโพลีเมอร์ ซึ่งมีความยืดหยุ่นที่ดีก็จะช่วยพยุงโครงสร้างวัสดุไว้ เช่น การใช้วัสดุอะลูมินาชนิดเพิ่มความเหนียว (ZrO_2 toughened Al_2O_3) มายึดติดไว้กับ โพลีเมอร์ เป็นต้น

2. การสึกหรอแบบขัดถูที่เกิดที่ความเค้นสูง

การสึกหรอแบบขัดถูที่เกิดที่ความเค้นสูง (High stress abrasion หรือ Grinding abrasion) เกิดจากการที่ผิวขัดถูกันที่ความเค้นสูงจนกระทั่งเป็นเศษผงที่จะไปทำให้เกิดการสึกหรอต่อไปได้อีกถึงแม้ว่าในสภาวะการสึกหรอจะดูเหมือนไม่มีความเค้นสูงมากกระทำที่ผิว แต่ถ้าความเค้นเฉพาะที่จุดสัมผัสสูงพอที่จะเรียกว่า การสึกหรอแบบขัดถูที่ความเค้นสูงเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น ในหม้อบดโดยใช้ลูกบด (Crushing strength) ก็จะทำให้ลูกบดแตกหรือทำให้ผิวลูกบดเกิดการสึกหรอขึ้น เศษของลูกบดที่แตกก็จะทำให้เกิดการสึกหรอต่อไป

ความเหนียว (Fracture toughness) ในที่นี้หมายถึง ความทนทานต่อการแตกหักของวัสดุ ความเหนียวของวัสดุ คือ ความสามารถในการต้านทานการ โดอย่างเฉียบพลันของรอยแตกในเนื้อวัสดุ ค่าความเหนียว (Fracture toughness) ใช้สัญลักษณ์ K_{IC} มีหน่วยเป็น $MPa \cdot m^{1/2}$ สามารถทำการทดสอบเพื่อวัดค่าความเหนียวของวัสดุ ได้ด้วยการเตรียมชิ้นงานทดสอบที่มีรอยแตกตามขนาดที่กำหนด ให้แรงกระทำกับชิ้นงาน ไปเรื่อยๆจนกระทั่งเกิดการแตกอย่างเฉียบพลัน วัดค่าแรงกระทำที่ใช้และคำนวณหา K_{IC}

นอกจากการเร่งอัตราการสึกหรอโดยเศษของการสึกหรอที่กล่าวมาแล้ว ลักษณะการทำงานของเครื่องจักรที่มีเศษผง ถึงแปลกปลอม หรืออนุภาคแข็งถูกกักไว้ระหว่างผิวก็ทำให้เกิดการสึกหรอแบบขัดถูที่ความเค้นสูงได้ เช่น การสึกหรอของโซ่ที่ใช้ระบบสายพานลำเลียง รอกดึงโซ่ (Sprocket) หรือ ระบบฟันเฟือง เป็นต้น

3. การสึกหรอแบบขัดถูที่เกิดที่ความเค้นต่ำ หรือการสึกกร่อน (Erosion)

การสึกหรอแบบขัดถูที่ความเค้นต่ำ หมายถึง การสึกหรอในกรณีที่มีความเค้นที่จุดสัมผัสมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงของอนุภาคที่เข้ามาขัดถูให้เกิดการสึกหรอ การสึกหรอลักษณะนี้จะเกิดในสภาวะที่อนุภาคแข็งขนาดเล็กสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ โดยอาจแขวนลอย หรือเคลื่อนที่อยู่ในอากาศ หรือของเหลวซึ่งกำลังวิ่งเข้ามาปะทะผิวชิ้นงาน ทำให้มีการชนระหว่างอนุภาคแข็งและผิวชิ้นงานที่ความเค้น

ต่ำเกิดขึ้น หรือที่รู้จักกันว่า การสึกหรอแบบ Erosion หรือการสึกกร่อน นั่นเอง ยกตัวอย่างเช่นในท่อลำเลียงทรายหรือสารละลาย ปิ๊ม และอุปกรณ์พ่นทราย เป็นต้น โดยทั่วไปแรงในการปะทะจะค่อนข้างต่ำ เพราะอนุภาคแข็งมีขนาดเล็กมาก (แรงในการปะทะ (Impact force) = มวล x ความเร็ว/ระยะเวลา) ยกเว้นถ้าอนุภาคแข็งไปเกาะตัวกับสิ่งปลอมปนขนาดใหญ่ในอากาศหรือของเหลวก็จะมีมวลสูงขึ้นซึ่งจะทำให้แรงในการปะทะสูงขึ้นได้ ดังนั้น วัสดุที่จะทนต่อการสึกกร่อนได้ ก็ไม่จำเป็นต้องมีค่าความเหนียวสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกันการสึกหรอสองชนิดแรก แต่มักจะเลือกใช้วัสดุกลุ่มที่มีค่าความแข็งสูงมากเพื่อดำเนินงานการตัดเฉือน เป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของวัสดุชนิดต่างๆ

ในสภาพแวดล้อมที่สามารถเกิดการกัดกร่อนได้ เช่น น้ำทะเล หรือน้ำดินสเคอร์ต่างๆ วาล์วบีบเปิด ต้องทนทั้งการสึกกร่อนและการกัดกร่อน มีการนำเซรามิก เช่น อะลูมินา ซิลิกอนคาร์ไบด์ ซิลิกอนไนไตรด์ และเซอร์โคเนียประเภทต่างๆมาใช้เพื่อทดแทนเหล็กหล่อ หรือ โลหะเคลือบผิวได้

จะเห็นว่าการแบ่งประเภทการสึกหรอเป็น 3 ชนิดข้างต้นตามแบบของ Avery ถึงแม้จะได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง แต่เป็นการแบ่งอย่างง่าย ๆ โดยไม่มีขอบเขตของกลไกที่ชัดเจนเกิดขึ้น มีการเหลื่อมล้ำระหว่างการสึกหรอแบบหนึ่งไปอีกแบบหนึ่งค่อนข้างมาก ในหลายกรณี เราจะพบว่าการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานหนึ่งๆ จะเกิดจากกลไกมากกว่าหนึ่งและบางทีก็เกิดขึ้นพร้อมกัน แต่โดยทั่วไปแล้วมักจะเกิด 2 กลไกการสึกหรอประเภทหนึ่งๆที่เด่นชัดออกมา ซึ่งเราสามารถหิบบอกกลไกหลักตัวนี้มาเป็นเงื่อนไขในการกำหนดวัสดุที่ใช้ในการต้านทานการสึกหรอ

การแบ่งประเภทของการสึกหรออีกรูปแบบหนึ่งที่นิยมใช้ คือ การแบ่งตามจำนวนเนื้อผิวสัมผัส ได้แก่ การสึกหรอชนิดสองเนื้อ (2 Body condition) หรือ การสึกหรอชนิดสามเนื้อ (3 Body condition) การสึกหรอชนิดสองเนื้อ หมายถึง กรณีที่อนุภาค Abrasive มาสัมผัสกับผิววัสดุเพียง 1 ผิวเท่านั้น จึงมีเพียง 1 คู่สัมผัส ส่วนการสึกหรอชนิดสามเนื้อ หมายถึง กรณีที่อนุภาค Abrasive ถูกกักไว้ระหว่างผิววัสดุ 2 ผิวที่ไถลผ่านกันจึงเกิดเป็น 2 คู่สัมผัสขึ้น ถึงแม้ว่า การสึกหรอชนิดสองเนื้อ และการสึกหรอชนิดสามเนื้อ จะเป็นคำศัพท์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายแล้ว แต่ก็ยังมีการเข้าใจผิดและสับสนเมื่อนำมาใช้ งาน ผู้อ่านอาจจะพบว่าหนังสือแต่ละเล่มนำมาใช้ในลักษณะที่แตกต่างกัน จึงควรตรวจสอบนิยามของคำศัพท์เฉพาะในหนังสือเล่มนั้นๆเสียก่อน



รูปที่ 3.5 (ก) การสึกหรอชนิดสองเนื้อ [2 Body wear] และ (ข) การสึกหรอชนิดสามเนื้อ [3 Body wear]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 การแบ่งประเภทของการสึกหรอแบบขัดถู โดยใช้กลไกและสถานการณ์เป็นเกณฑ์

		ระดับความเค้นที่จุดสัมผัส		
		ต่ำ (อนุภาคไม่แตก)	รุนแรง (อนุภาคแตก)	รุนแรงที่สุด (เกิดการเสีรูปร่างอย่างถาวร ทั้งหมด)
อนุภาค	อิสระ	ความเค้นต่ำ อนุภาคเคลื่อนที่อิสระ	ความเค้นสูง อนุภาคเคลื่อนที่อิสระ	-
	อิสระ	ความเค้นต่ำ อนุภาคถูกยึดอยู่ระหว่าง ผิว	ความเค้นสูง อนุภาคถูกยึดอยู่ระหว่าง ผิว	ความเค้นสูงมาก อนุภาคถูกยึดอยู่ระหว่าง ผิว

ตารางที่ 3.4 การแบ่งประเภทของการสึกหรอแบบขัดถู โดยใช้ระดับความรุนแรงของการสึกหรอเป็นเกณฑ์

ปัจจัยที่พิจารณา	ชนิดของ abrasion		
	อ่อน เล็ก	รุนแรง กลาง	รุนแรงที่สุด ใหญ่
ขนาดอนุภาค	เคลื่อนที่ อิสระ ไม่ถูกยึด ติด	พอเคลื่อนที่ได้บ้าง	ติดระหว่างผิว กลิ้งไม่ได้
รูปร่างอนุภาค	รูปร่างมน	รูปร่างเป็นเหลี่ยม	รูปร่างเป็นเหลี่ยม
ความเค้นที่จุด สัมผัส	ต่ำ ไม่เพียงพอที่จะทำให้ อนุภาคแตก	กลาง เพียงพอที่จะทำให้ อนุภาคแตก	สูงมาก จนอาจทำให้ อนุภาคเสีรูปร่าง หรือแตก อย่างเห็นได้ชัด
กลไกที่เด่นชัด	- การไถ (Microploughing)	- การตัดเฉือน (Microcutting)	- การตัดเฉือน (Microcutting) - การแตกหัก (Microfracture)
ชนิดของการขัดถูที่ เกี่ยวข้อง	- ชนิดความเค้นต่ำ - ชนิดขีดข่วน - ชนิดสามเนื้อ ความเค้น ต่ำ	- ชนิดความเค้นสูง - การบด - ชนิดสามเนื้อ ความเค้น สูง	- แบบ Gouging - ชนิดสองเนื้อ ความเค้น สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเพื่อลดปัญหาความสับสนที่เกิดจากการแบ่งประเภทของการสึกหรอตามกลไกและสถานการณ์ที่เกิด ทั้งแบบ Avery และแบบ 2-3 Body wear จึงได้เสนอให้มีการจัดรูปแบบการสึกหรอใหม่เพื่อมาใช้อ้างอิงแทน โดยจัดตามระดับความรุนแรงของการสึกหรอ ตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 เป็นตัวอย่างการเปรียบเทียบวิธีการจัดประเภทของการสึกหรอ

3.3.2 ลักษณะความเป็น Abrasive ของอนุภาค

ความเป็น Abrasive ของอนุภาค เป็นระดับความสามารถของอนุภาคที่จะทำให้เกิดการสึกหรอ ซึ่งเป็นค่าที่ยากจะประเมินในเชิงปริมาณ เนื่องจากขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร อาทิเช่น

- ความแข็ง (Hardness)
- ความแข็งแรงหรือการทนต่อการบด (Crushing strength)
- คุณสมบัติทางกลของอนุภาคในการปะทะ (Impact properties) เช่น ความเหนียว
- รูปร่างและขนาดของอนุภาค
- ตัวกลางของไหล เช่น อนุภาคแขวนลอยอยู่ในของเหลวหรือไม่

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าความแข็งโดยประมาณของวัสดุแร่และโลหะในกลุ่มเหล็ก ในการทดสอบการสึกหรอ เราจะพบว่าอนุภาคที่มีความแข็งสูง เช่น อะลูมินาหรือควอตซ์ จะทำให้เกิดการสึกหรอบนผิวโลหะที่เร็วกว่า และอัตราการสึกหรอของผิวโลหะจะไม่ต่างกันมากเมื่อเปรียบเทียบในโลหะกลุ่มเหล็กด้วยกัน ในขณะที่อนุภาคที่มีความแข็งต่ำจะทำให้อัตราการสึกหรอลดลง ดังนั้น ความแข็งของอนุภาคมีผลต่ออัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ในกรณีที่ความแข็งของอนุภาคเปลี่ยนแปลงก็จะสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราการสึกหรอด้วย (เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราการสึกหรออย่างเฉียบพลันที่ค่าความแข็งของอนุภาคค่าหนึ่งหรือช่วงหนึ่งที่เรียกว่า Critical hardness) เมื่อเปรียบเทียบที่ค่าความแข็งเท่ากัน ความเป็น Abrasive ของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับรูปร่างและความแข็งแรงแบบกด (Compressive strength) ของอนุภาคนั้นๆอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุม มีความคม มีความแข็งแรงแบบกดสูง ไม่แตกง่าย จะทำให้อัตราการสึกหรอสูง

นอกจากนี้เมื่อขนาดของอนุภาค Abrasive ลดลง ก็มักจะพบว่าอัตราการสึกหรอลดลงด้วย สาเหตุน่าจะเป็นเพราะว่า อนุภาคขนาดเล็กสามารถไหลตัวได้ง่ายกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ระดับความเค้นที่เกิดขึ้น ณ จุดสัมผัสที่ผิวชิ้นงานมีค่าต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม จากการศึกษที่ผ่านมาพบว่าผลกระทบของขนาดและรูปร่างของอนุภาคต่อความรุนแรงของการสึกหรอนั้นซับซ้อนมาก นอกจากจะต้องพิจารณาขนาดและรูปร่างของอนุภาคแล้ว ยังต้องคำนึงถึงสถานะแวดล้อมของการสึกหรอ คุณสมบัติ และสภาพของผิวชิ้นงานประกอบด้วย

ตารางที่ 3.5 ค่าความแข็งของแร่ และวัสดุต่างๆ

แร่	ความแข็ง			วัสดุ	ความแข็ง	
	MOHS	KNOOP	H _v		KNOOP	H _v
แป้งทัลก์ (Talc)	1	20		เหล็กกลุ่มเฟอร์ไรต์	235	70/100
คาร์บอน ถ่านหินบิทูมินัส		35		เหล็กกลุ่มเฟอร์ไรต์ ไม่มีธาตุผสม		250/320
ยิปซัม (Gypsum)	2	40	36	เหล็กผสมกลุ่มเฟอร์ไรต์	305	240/460
แคลไซต์ (Calcite)	3	130	140	เหล็กกลุ่มออกสเตนไนต์ เช่น 12%Mn Steel	645	170/230
ฟลูออไรต์ (Fluorite)	4	175	190	เหล็กกลุ่มออกสเตนไนต์ เช่น 12%Mn Steel		
				เพิ่มความแข็งด้วยความเครียด		
อะพาไทต์ (Apatite)	5	335/345	540	เหล็กผสมต่ำกลุ่มออกสเตนไนต์		250/350
แก้ว		455	500	เหล็กผสมกลุ่มออกสเตนไนต์ โครเมียมสูง		300/600
เฟลสปาร์ (Feldspa)	6	550	600/750	เหล็กผสมมาร์เทนไซต์ ที่มีคาร์บอน 0.3%	550	500
แมกนีไทต์ (Magnetite)		575		เหล็กผสมมาร์เทนไซต์ ที่มีคาร์บอน 0.4%	710	650
ออร์โทคลาส (Orthoclase)	6	620		เหล็กผสมมาร์เทนไซต์ ที่มีคาร์บอน 0.6%	800	800/1000
ฟลินต์ (Flint)		820	950	เหล็กกลุ่มซีเมนไทต์ (Fe ₃ C)	1025	840/1100
ควอตซ์ (Quartz, Silica)	7	840	800/1280	เหล็ก โครเมียมสูง ที่มีอนุภาคคาร์ไบด์ในโครงสร้าง		1060/1200
โทแพซ (Topaz)	8	1330	1300/1430	โครเมียมคาร์ไบด์ (CrFe) ₇ C ₃	1735	1200/1800
การ์เนต (Garnet)	7	1360	800/1000	โมลิบดีนัมคาร์ไบด์ (Mo ₂ C)	800	1500
อิมเออรี่ (Emery)	9	1400		ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC)	1800/2080	2400
คอร์ันดัม (Corundum, Al ₂ O ₃)	9	2020	1800/1200	วานาเดียมคาร์ไบด์ (VC)	2660	2800
ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide)		2585	2500/2600	ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC)	2470/2955	3200
เพชร	10	7575	800/10000	โบรอนคาร์ไบด์ (B ₄ C)	2800	3700

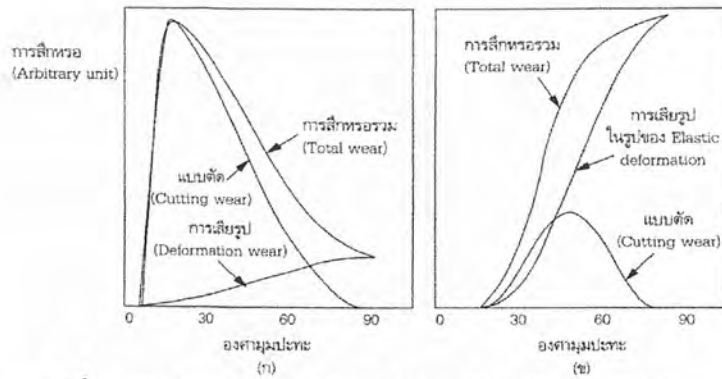
3.3.3 ผลของขนาด ความเร็ว และทิศทางของแรงกระทำ

ในการศึกษา ขนาด และ รูปร่าง ของอนุภาคขัดถู (Abrasive particles) เราจะไม่สามารถพิจารณาปัจจัยทั้งสองแยกจากกันได้ เพราะว่าในระหว่างกระบวนการสึกหรอ ความเค้นที่เกิดขึ้น ณ จุดสัมผัสจะทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของทั้งสองปัจจัยได้ในเวลาเดียวกัน ในกระบวนการสึกหรอแบบขัดถูที่ความเค้นสูง เช่น ในการบดโดยใช้ลูกบด (Ball milling) อนุภาคที่มาจากขี้ผึ้งจะเริ่มคั้นมีรูปร่างโค้งมนและมีผิวค่อนข้างเรียบ ในระหว่างขั้นตอนการบด อนุภาคโค้งมนเหล่านี้จะแตกออก ทำให้มีขนาดเล็กลงและมีรูปร่างที่เปลี่ยนไปโดยมีมุมแหลมคมเพิ่มขึ้น การศึกษาจากการจำลองแบบการเกิดโดยใช้ Track abrasion testing ผลปรากฏว่าอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทดสอบและเพิ่มขึ้นตามแรงกระทำ แต่ไม่เป็นการเพิ่มแบบเชิงเส้นตรง อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาการทดสอบนานขึ้นไปอีก และแรงกระทำสูงขึ้น อนุภาคขัดถูมีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ อัตราการสึกหรอก็จะลดลง

สำหรับกระบวนการสึกหรอแบบขัดถูที่ความเค้นต่ำ เช่น การสึกกร่อน (Erosion) ความเค้นที่เกิดขึ้น ณ จุดสัมผัสจะมีค่าน้อยจนไม่ทำให้อนุภาคแตกออกได้ (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในกรณีที่อนุภาคขัดถูมีขนาดไม่ใหญ่มาก และความเร็วในการชนไม่สูงเกินไป) ซึ่งทำให้เราสามารถเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับขนาดและรูปร่างเริ่มต้นของอนุภาคได้ แต่ถ้าผิวชิ้นงานมีความแข็งมากเมื่อเทียบกับอนุภาคขัดถู เช่น วัสดุชิ้นส่วนที่เป็นอะลูมิเนียมกับอนุภาคทรายการแตกก็จะเกิดได้ง่าย ยิ่งความเร็วมากยิ่งมีโอกาสแตกได้มาก

ความเร็วในการเคลื่อนที่เข้าปะทะของอนุภาคขัดถูและมุมของการเข้าชน ณ จุดสัมผัสนั้นเป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของการใช้งาน ในเครื่องจักรกลหนึ่งๆเราจะพบว่า การปรับเปลี่ยนตัวแปรทั้งสองนั้นทำได้ยาก และยังส่งผลให้ลักษณะการทำงานของเครื่องจักรนั้นต้องเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งในหลายกรณีจะไม่ใช่ที่ขอมรับ ในการสึกหรอแบบขัดถูที่เกิดจากการใช้งานเครื่องจักรกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสึกหรอที่เกิดจากการชน เช่น การสึกกร่อนหรือการสึกหรอที่เกิดจากการกระแทกอย่างรุนแรง (Gouging) จะพบว่าความเร็วยิ่งสูงระดับความเสียหายก็จะเพิ่มสูงขึ้นตาม สำหรับการสึกหรอจากการกระแทกอย่างรุนแรง ถ้าความเร็วของการชนเพิ่มขึ้น โอกาสที่อนุภาคจะแตกที่สูงขึ้นด้วย

นอกจากความเร็วในการชนแล้วอัตราการสึกหรอยังขึ้นอยู่กับทิศทางในการชนด้วย จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการสึกกร่อนถึงทิศทางในการชน โดยใช้เครื่องยิงกริตแบบแห้ง (Shot blasting) และเครื่องพ่นอนุภาคแขวนลอยแบบน้ำสเลอรี (Slurry spraying) จากการศึกษาทั้งสองแบบพบว่า รอยของการสึกหรอมักจะมีลักษณะเป็นคลื่นบนผิวที่ถูกยิงด้วยกริตหรือด้วยน้ำสเลอรี ซึ่งลักษณะที่แตกต่างของร่องคลื่นเหล่านี้จะเป็นผลมาจากรูปแบบและทิศทางการไหลของเม็ดกริตหรือน้ำสเลอรีที่แตกต่างกันไป นอกจากนี้การไหลวนแบบเอ็ดดี้ (Eddy current) ของน้ำสเลอรีบนผิวชิ้นงานก็จะส่งผลให้ลักษณะการสึกหรอต่างไปด้วยเช่นกัน จากการศึกษาที่สามารถสรุปได้ว่าระดับความเสียหายของการสึกกร่อนที่เกิดขึ้น ซึ่งรวมถึงการเสีรูปร่างและการตัดเฉือนจะขึ้นอยู่กับทิศทางการชนของอนุภาคขัดถูบนผิวชิ้นงาน กลไกการเสีรูปร่างและการตัดเฉือนก็จะมีผล โดยตรงต่อการสึกหรอของชิ้นงานแต่กลไกไหนจะมีผลกระทบมากกว่ากันนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติต่างของวัสดุชิ้นงาน



รูปที่ 3.6 การสึกหรอของ(ก)วัสดุเหนียว (ข)วัสดุเปราะ ที่มุมปะทะต่างๆ

ยกตัวอย่างเช่น วัสดุเหนียวและวัสดุเปราะจะตอบสนองต่อการชนไม่เหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 3.6 มุมการชนหรือการตกกระทบค่าการสึกหรอของโลหะส่วนใหญ่จะเกิดจากการตัดเฉือน(Cutting wear) วัสดุที่สามารถทนต่อการชนที่มุมต่ำจะเป็นกลุ่มที่มีความแข็งที่ผิวสูง และไม่จำเป็นต้องมีความเหนียวสูงมากเหมือนกับผิวที่ต้องการให้ทนต่อการสึกหรอแบบGouging หรือการสึกหรอแบบขั้วคู้ที่มีความเค้นสูง เมื่อมุมของการตกกระทบสูงขึ้น (ประมาณ 70-90) จะพบว่า การเสียหายเนื่องจากการเสียรูปอย่างถาวร (Deformation wear) จะเป็นกลไกหลักที่นำไปสู่การสึกหรอ ในขณะที่การตัดเฉือนจะเกิดขึ้นน้อยมากทำให้วัสดุที่มีความเหนียวสูงและไม่จำเป็นต้องมีความแข็งสูงมากสามารถต้านทานการสึกหรอได้ดี ตัวอย่างเช่น วัสดุกลุ่มโลหะเหนียว ขาง และโพลีเมอร์บางประเภท เช่น Polyurethane เป็นต้น เนื่องจากวัสดุเหล่านี้จะสามารถรับแรงกระทำจากอนุภาคแบบยืดหยุ่นได้ดี(Elastic behaviour)มีการเสียรูปอย่างถาวรเกิดขึ้นน้อย ในขณะที่วัสดุกลุ่มเซรามิกหรือพวกที่มีความเปราะสูงจะเกิดการแตกและการสึกหรอรุนแรงที่สุด

หลายปีที่ผ่านมาได้มีการเสนอทฤษฎีขึ้นมาว่า การปะทะ/การกระแทกและการขั้วคู้ เมื่อเกิดขึ้นพร้อมกันจะเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันจนทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นสูงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโลหะที่ประกอบด้วยหลายเฟส รวมทั้งเฟสยูเทคติกของการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้นมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโลหะที่ประกอบด้วยหลายเฟส รวมทั้งเฟสยูเทคติกของคาร์ไบด์ในโครงสร้าง เช่น เหล็กหล่อขาวผสม เป็นต้น ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาในหัวข้อ 'Impact wear' หรือการสึกหรอจากการปะทะเกิดขึ้นมากมายโดยใช้วิธีทดสอบหลากหลายแต่ก็ยังไม่สามารถสรุปกลไกของ Impact wear ได้ แต่เมื่อเร็ว ๆ นี้ งานวิจัยในปี ค.ศ.2001 กลับพบว่าระหว่างการสึกหรอแบบขั้วคู้และกลไกการเสียหายโดยการหลุดล่อนจากการปะทะนั้น ไม่มีกลไกที่ส่งเสริมกันที่จะเร่งอัตราการสึกหรอให้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม วิธีการทดสอบการสึกหรอที่ใช้ในงานวิจัยเหล่านี้ก็ยังไม่สามารถจำลองการสึกหรอที่เกิดขึ้นจริงได้อย่างแม่นยำ ทำให้ผลการวิจัยที่ได้ยังไม่ได้รับการยอมรับ

3.4 การสึกหรอและความล้าที่เกิดจากการถูครูด

เนื่องจากในหัวข้อนี้มีศัพท์เฉพาะทางเทคนิคค่อนข้างมาก จึงได้มีการบัญญัติศัพท์ที่จะนำมาใช้ไว้ ณ ที่นี้ เพื่อให้เกิดความเข้าใจตรงกัน และเพื่อให้ผู้อ่านสามารถอ้างอิงกลับมาได้ง่าย ดังต่อไปนี้

- การแตกหัก
- การล้า การล้าตัว ความล้า
- การถูครูด
- การสึกหรอแบบถูครูด
- การล้าแบบถูครูด
- อายุการล้า
- เศษของการสึกหรอ
- ยอดสูงของผิวสัมผัส
- ความเค้นวงรอบ
- รอยแตกจากการล้า
- กระบวนการถูครูด

ในเนื้อหาที่ผ่านมา เราจะพบว่า ความเสียหายจากการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลนั้นมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับองค์ประกอบมากมาย นอกเหนือจากการแตกหักและการล้า ซึ่งอยู่ในความสนใจของวิศวกรทั่วไปแล้ว ความเสียหายเนื่องจากการสึกหรอแบบถูครูด และความเสียหายเนื่องจากความล้าแบบถูครูด ได้มีบทบาทในงานทางวิศวกรรมมากขึ้น ทั้งในด้านความรุนแรงและจำนวนครั้งที่ถูกพบ ซึ่งกลไกของความเสียหายทั้งสองอย่างนี้ต่างก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการถูครูด()ทั้งสิ้น ในที่นี้เราจะใช้คำว่า กระบวนการถูครูดเพื่อจะหมายถึง กระบวนการเชิงกลและกระบวนการเชิงเคมีที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัสดุแข็งสองชิ้นซึ่งกดให้สัมผัสกันด้วยแรงตั้งฉาก ในขณะที่เดียวกันก็เคลื่อนที่ไถลสลับทิศไปมา โดยมีขนาดของแรงตั้งฉากมากพอและระยะการไถลที่จำกัดจนทำให้เศษของการสึกหรอค้างอยู่บริเวณที่สัมผัส

ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าการสึกหรอแบบถูครูดและการล้าแบบถูครูดมีผลกระทบมาจากความร้อนการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของยอดสูงของผิวสัมผัส การเชื่อมต่อและการแตกหักของคูยอดสูงของผิวสัมผัสความเค้นเฉือนภายใต้ผิวสัมผัส การกัดกร่อนทางเคมีของผิวสัมผัส การสะสมและขัดถูของเศษ การสึกหรอบริเวณผิวสัมผัส การเกิดและขยายตัวของรอยแตก การหลุดล่อนของผิว เป็นต้น ความเสียหายของชิ้นส่วนทางกลที่เกิดจากกระบวนการถูครูดนี้อาจทำให้เกิดการสึกหรอของผิวสัมผัสและส่งผลให้เกิดการคลายตัวของอุปกรณ์ที่สวมอัดกันกัเช่น ในกรณีของการสึกหรอแบบถูครูด หรือนอกจากนี้อาจเกิดการสะสมของความเสียหายในรูปของการเกิดและขยายตัวของรอยแตกซึ่งจะนำไปสู่การแตกหักในที่สุด ดังเช่นในกรณีของการล้าแบบถูครูด โดยทั่วไปแล้วความเสียหายประเภทนี้มักจะเกิดในบริเวณที่มีการสวมอัด เช่น สลัก ลิ่ม หมุดย้ำ บริเวณสัมผัสของลวดและมัดลวด แบร็งก์ที่มีการสั่นสะเทือน เป็นต้น บริเวณเหล่านี้สามารถพบได้ทั่วไปในรถยนต์ เรือ เครื่องบิน ระบบส่งกำลัง เครื่องมือวัด ฯลฯ การออกแบบและใช้

งานระบบเหล่านี้โดยอาศัยความรู้ความเข้าใจในกลไกของกระบวนการอุดจะส่งผลให้เกิดการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ และยังสามารถป้องกันหรือหลีกเลี่ยงความเสียหายประเภทนี้ได้อีกด้วย

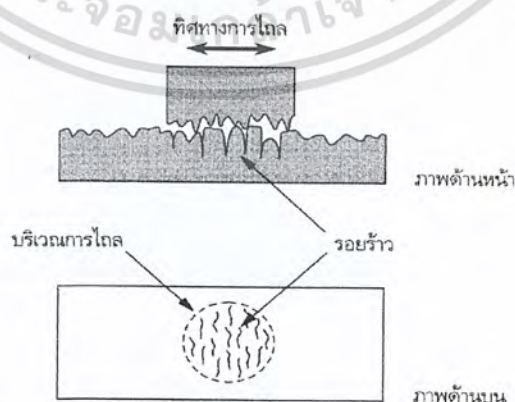
ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอุดจำนวนมากกว่า 50 ปัจจัยได้รายงานไว้ในเอกสารทางวิชาการต่างๆ โดยวิศวกรและนักวิจัย เราสามารถสรุปปัจจัยหลักได้ดังต่อไปนี้

- ระยะเคลื่อนที่ไกลสลับทิศไปมาระหว่างผิวสัมผัส
- ขนาดและการกระจายของแรงบริเวณผิวสัมผัส
- ขนาด ทิศทาง และการเปลี่ยนแปลงของความเค้นบริเวณผิวสัมผัส
- จำนวนรอบของการเคลื่อนที่ไกลสลับทิศไปมาระหว่างผิวสัมผัส
- วัสดุ และลักษณะพื้นผิวของคู่สัมผัส
- ความถี่ของการเคลื่อนที่ไกลสลับทิศไปมาระหว่างผิวสัมผัส
- อุณหภูมิบริเวณผิวสัมผัส
- สภาพแวดล้อมทางเคมีบริเวณผิวสัมผัส

แต่ละปัจจัยต่างก็แสดงผลกระทบซึ่งกันและกัน ส่งผลให้เกิดความซับซ้อนในการอธิบายพฤติกรรมและทำนายการเกิดความเสียหายประเภทนี้ ปัจจุบันเราได้ให้ความสนใจเป็นอย่างมากต่อพฤติกรรมของการสึกหรอแบบอุดและการล้าแบบอุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การศึกษาวิจัยถึงผลกระทบต่อความเสียหายจากการผสมผสานของปัจจัยตั้งแต่สองปัจจัยขึ้นไปแต่อย่างไรก็ตามความรู้และความเข้าใจในความเสียหายประเภทนี้ก็ยังคงมีไม่เพียงพอและจำเป็นต้องทำการศึกษาต่อไป

3.4.1 การสึกหรอแบบอุด

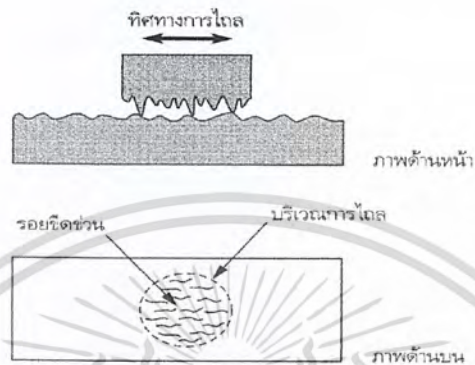
การสึกหรอแบบอุดเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพื้นผิวจากการสึกหรอด้วยกระบวนการอุด ซึ่งกลไกของการสึกหรอนี้อาจเกิดจากกลไกอย่างใดอย่างหนึ่งหรือเกิดจากการผสมผสานของการขีดข่วนที่ผิวสัมผัส (Pit-digging action) รอยแตกจากการสัมผัสระหว่างยอดสูงของผิวคู่สัมผัส รอยแตกจากความเค้นวงรอบเนื่องจากแรงเสียดทานบริเวณผิวสัมผัส การหลุดล่อนของผิวเนื่องจากความเค้นเฉือนวงรอบภายใต้ผิวสัมผัส



รูปที่ 3.7 แสดงการเกิดรอยขีดข่วนขนาดเล็กบริเวณผิวสัมผัสในกลไกการสึกหรอแบบอุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยขีดข่วนบริเวณผิวสัมผัสเกิดจากสมมุติฐานที่ว่า การเคลื่อนที่ไถลสลับทิศไปมาของยอดสูงของผิวสัมผัสและของเศษการสึกหรือซึ่งติดค้างอยู่ระหว่างผิวสัมผัส จะทำให้เกิดรอยขีดข่วนขนาดเล็กในบริเวณผิวสัมผัส ซึ่งจะเพิ่มจำนวนขึ้นเรื่อยๆ ระหว่างการเสียดสีซึ่งจะนำไปสู่ความเสียหายจากการสึกหรอในที่สุด โดยทิศทางของรอยขีดข่วนเหล่านี้จะขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของผิวสัมผัสดังแสดงในรูปที่ 3.7

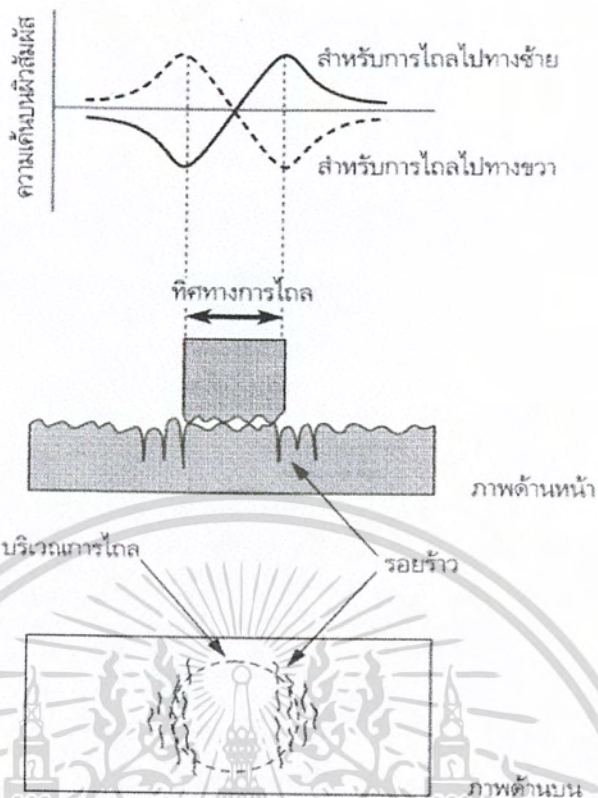


รูปที่ 3.8 แสดงรอยแตกจากการสัมผัสระหว่างยอดสูงของผิวคู่สัมผัส

รอยแตกจากการเสียดสีระหว่างยอดสูงของผิวสัมผัสเกิดจากแรงกระทำระหว่างยอดสูงของผิวคู่สัมผัส โดยแรงนี้จะเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางตามการเคลื่อนที่ไถลสลับทิศไปมาของผิวสัมผัส ซึ่งอาจทำให้เกิดการแตกหักของยอดสูงของผิวในการสัมผัสครั้งแรกได้ นอกจากนี้ยังอาจทำให้เกิดการสะสมของความเสียหายตามจำนวนรอบของการเคลื่อนที่ไถลสลับทิศไปมาในรูปของรอยแตกขนาดเล็กจากการล้าที่บริเวณฐานของยอดสูงของผิวสัมผัส โดยทิศทางของรอยแตกเหล่านี้จะตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของผิวสัมผัสดังแสดงในรูป 3.8

รอยแตกจากความเค้นวงรอบเนื่องจากแรงเสียดทานบริเวณสัมผัส เกิดจากการที่พื้นผิวของวัสดุแข็งสองชิ้นถูกลมัดให้สัมผัสด้วยแรงตั้งฉาก ซึ่งจะทำให้เกิดแรงเสียดทาน และเมื่อผิวสัมผัสเกิดการเคลื่อนที่ไถลก็จะส่งผลให้เกิดความเค้นอัดในบริเวณส่วนหน้าของการเคลื่อนที่ไถล และความเค้นดึงในบริเวณส่วนหลังของการเคลื่อนที่ไถล ซึ่งความเค้นเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงทิศทางจากดึงเป็นอัด และจากอัดเป็นดึงตามทิศทางการเคลื่อนที่ไถลของผิวสัมผัสซึ่งสลับทิศไปมา ส่งผลให้เกิดการสะสมของความเสียหายตามจำนวนรอบของการเคลื่อนที่ไถลสลับทิศไปมาในรูปของรอยแตกขนาดเล็กจากการล้าที่บริเวณฐานของยอดสูงของผิวสัมผัส โดยทิศทางของรอยแตกเหล่านี้จะตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของผิวสัมผัสดังแสดงในรูป 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงรอยแตกจากความเค้นวงรอบเนื่องจากแรงเสียดทานบริเวณผิวสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

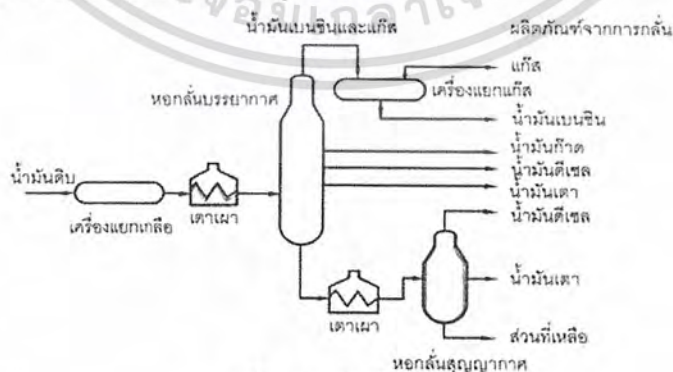
น้ำมันหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมาย ซึ่งถ้าแบ่งตามสถานะจะแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด คือ ก๊าซ ของเหลว สารกึ่งแข็ง (Semi - Solid) และ ของแข็งในจำนวนของสารหล่อลื่นทั้งหมดที่ใช้กัน สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กัน มากที่สุด และรองลงมาก็คือ สารกึ่งแข็งซึ่งได้แก่ จาระบี

การที่สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวนิยมใช้กันแพร่หลายมากนั้น เพราะสามารถแยกผิววัตถุทั้งสองได้อย่างสมบูรณ์ และสามารถรับแรงที่กระทำได้มาก ของเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นมีน้ำ สารละลายกับน้ำ (Aqueous solution) น้ำมันแร่ (mineral oil) น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ และน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic oil) ในบรรดาสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวนี้น้ำจะมี การใช้งานค่อนข้างจำกัด

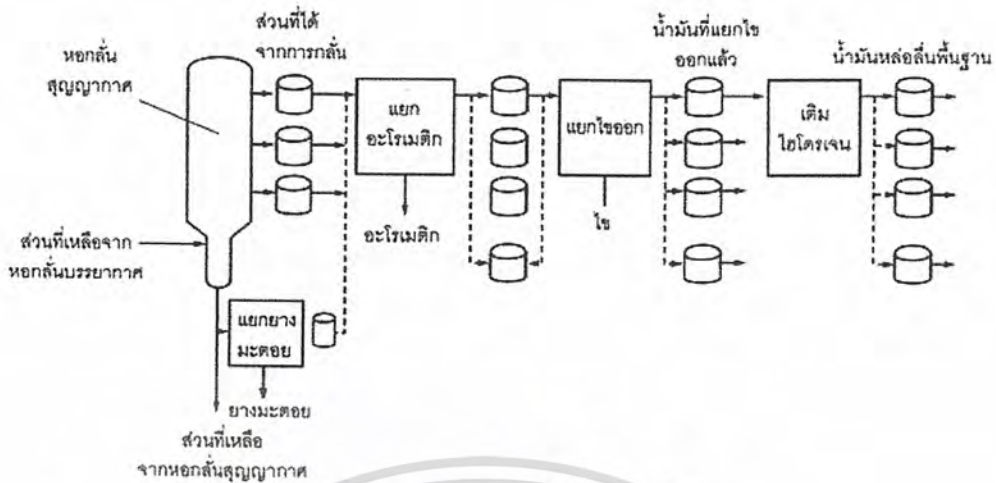
4.1 น้ำมันแร่

น้ำมันแร่เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ (Crude oil) น้ำมันหล่อลื่นได้มาจากส่วนที่หนัก ของน้ำมันดิบที่เหลือจากการกลั่นเอาส่วนที่เบา ได้แก่ ก๊าซน้ำมัน เบนซิน น้ำมันก๊าด และน้ำมันดีเซล ออกไปโดยหอกลั่น บรรยากาศ (Atmospheric tower) ตามที่แสดงในรูปที่ 4.1 กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นจากน้ำมันดิบเริ่มต้นจากการนำเอา ส่วนที่เหลือจากหอกลั่นบรรยากาศเข้าไปกลั่นอีกครั้งหนึ่งในหอกลั่นสุญญากาศ (Vacuum tower) เพื่อแยกส่วนที่เหลือจาก หอกลั่นบรรยากาศออกเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีจุดเดือด (Boiling point) เหมือนกัน โดยความดันในหอกลั่นสุญญากาศจะ มีค่าต่ำกว่าหนึ่งส่วนสิบของความดันบรรยากาศ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการแยกสลาย (cracking) ที่อุณหภูมิสูง คุณสมบัติที่สำคัญที่ถูกควบคุมโดยหอกลั่นสุญญากาศก็คือความหนืด (Viscosity) จุดวาบไฟ (Flash point) และกากคาร์บอน (Carbon residue) ซึ่งก็จะ ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดต่าง ๆ กันออกมาหลังจากที่ออกจากหอกลั่นสุญญากาศแล้วก็จะนำไปผ่าน กระบวนการต่าง ๆ เพื่อแยกส่วนที่ไม่ต้องการออกให้เหลือผลิตภัณฑ์หรือน้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติตาม ต้องการกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นดังกล่าวได้แสดงไว้ตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กลั่นน้ำมันดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ขบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากการผลิตตามกระบวนการผลิตดังกล่าวข้างต้นเรียกว่า น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (lube base stock) ซึ่งโดยทั่วไปยังไม่สามารถนำไปใช้ในการหล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลได้ ทั้งนี้เนื่องจากยังมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเสียก่อน วิธีที่นิยมใช้กันก็คือการใส่สารเพิ่มคุณภาพ (additives) เข้าไป

4.2 น้ำมันสังเคราะห์

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่ที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบนั้น แม้ว่าจะผ่านกระบวนการ กลั่นน้ำมันดิบนั้น แม้ว่าจะผ่านกระบวนการมากมายที่ใช้กำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป แต่ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้ ออกมานั้นยังคงเป็นของผสมของสารประกอบหลายตัว ซึ่งไม่มีทางที่จะเลือกเอาเฉพาะสารที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดได้ หรือถ้ามีก็จะได้ผลผลิตต่ำทำให้การผลิตไม่คุ้มค่า ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่จึงมีคุณสมบัติเฉลี่ยของของผสมซึ่งประกอบด้วยสารประกอบที่เหมาะสมมากที่สุดและน้อยที่สุด เป็นผลให้น้ำมันแร่มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาน้ำมันหล่อลื่น พื้นฐานประเภทน้ำมันสังเคราะห์ขึ้นมา น้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมัน พื้นฐานที่ได้จากกระบวนการทางเคมี ซึ่งเป็นการรวม ตัวของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำให้น้ำมันที่มีความหนืด เพียงพอที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่น โดยสารประกอบเริ่มต้นที่ใช้ในการผลิตน้ำมันสังเคราะห์มักจะ ได้มาจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม และเนื่องจากน้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันที่ทำขึ้นจากกระบวนการเคมี จึงสามารถควบคุมให้มีโครงสร้าง โมเลกุลตามที่ต้องการ และมีคุณสมบัติตามที่คาดหวังไว้ได้

ข้อได้เปรียบที่สำคัญของน้ำมันสังเคราะห์ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ สามารถนำไปใช้งานในช่วง อุณหภูมิที่กว้างกว่าน้ำมันแร่ คือ ใช้ได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าและสูงกว่าของน้ำมันแร่ นอก

จากนี้ น้ำมันสังเคราะห์บางประเภท ยังให้คุณสมบัติเฉพาะ เช่น ผสมเข้ากันกับน้ำได้ และไม่ติดไฟ เป็นต้น

สำหรับน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ที่ใช้กันอยู่ สามารถแบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม คือ

1.ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์ (synthesized hydrocarbons) ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ได้มาจากน้ำมันดิบที่ใช้กันมากมีอยู่สามชนิด คือ โอลิฟิน โอลิโกเมอร์ (olefin oligomer) , อัลคิลเลตอะโรมาติก (alkylated aromatics) และ โพลิบิวทีนส์ (polybutenes) ข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ มีความมั่นคง ที่อุณหภูมิสูง อายุการใช้งานยาวมีดัชนีความหนืดสูง มีการไหลที่อุณหภูมิต่ำไม่มีไข และมีการระเหยต่ำ

2.เอสเทอร์อินทรีย์ (organic esters) เป็นสารหล่อลื่นที่ได้มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสารหล่อลื่นของเครื่องยนต์เจ็ทของอากาศยาน และใช้ในระบบไฮดรอลิก เป็นต้นเอสเทอร์อินทรีย์ที่ใช้กันมีอยู่ 2 ชนิด ชนิดแรกคือ ไดเบสิกเอซิดเอสเทอร์ (dibasic acid esters) บางครั้งเรียกว่า ไดเอสเทอร์ (diesters) ซึ่งได้ จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างไดเบสิกเอซิด (dibasic acid) กับ โมโนไฮดริคแอลกอฮอล์ (monohydric alcohol) อีกชนิดหนึ่งก็คือ โพลีโอลเอสเทอร์ (polyol esters) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง โพลีไฮดริคแอลกอฮอล์ (polyhydric alcohol) กับ โมโนเบสิกเอซิด (monobasic acid) ข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ มีความมั่นคงที่อุณหภูมิสูง มีการไหลที่อุณหภูมิต่ำ และมีอายุการใช้งานยาว

3.โพลีไกลคอลส์ (polyglycols) เป็นสารหล่อลื่นที่มีจุดเดือดสูงและจุดไหลเทต่ำเหมาะสำหรับสภาพการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น ใช้เป็นน้ำมันเบรก และน้ำมันไฮดรอลิกที่ติดไฟได้

4. ฟอสเฟตเอสเทอร์ (phosphate esters) เป็นสารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติทนไฟ จึงใช้เป็นน้ำมันไฮดรอลิกสำหรับอากาศยาน และน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟด้วย

5.น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์อื่น ได้แก่ ซิลิโคน ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นที่มีดัชนีความหนืดสูงมาก (300 หรือ มากกว่า) และมีจุดไหลเทต่ำ จึงเหมาะสมสำหรับการใช้งานในช่วงอุณหภูมิกว้าง และใช้เป็นน้ำมันไฮดรอลิกในกรณีพิเศษ เช่น ใช้เป็นสปริงของเหลว และซิลิเคตเอสเทอร์ (Silicate esters) เป็นสารหล่อลื่นที่มีดัชนีความหนืดสูงและจุดไหลเทต่ำเช่นกัน

แม้ว่าน้ำมันสังเคราะห์จะมีคุณสมบัติโดยทั่วไปดีกว่าน้ำมันแร่ก็ตาม แต่สำหรับการนำไปใช้งานบางประเภท น้ำมันสังเคราะห์ก็อาจจะยังไม่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมทุกด้าน จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันสังเคราะห์ โดยการใส่สารเพิ่มคุณภาพเข้าไปเช่นเดียวกับการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันแร่

4.3 สารเพิ่มคุณภาพ

สารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน โดยทั่วไปเป็นสารประกอบทางเคมี ซึ่งที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายตัว สารเพิ่มคุณภาพแต่ละตัวจะมีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมัน หล่อลื่นพื้นฐานเฉพาะอย่างโดยพอที่จะแบ่งตามผลที่มีต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานออกได้เป็นสามพวก คือ พวกแรก จะเป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ให้คุณสมบัติใหม่ที่เป็นประโยชน์ต่อน้ำมัน

หล่อลื่นพื้นฐาน พวกที่สองเป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ปรับปรุงคุณสมบัติที่มีอยู่แล้วให้ดีขึ้น และพวกสุดท้ายเป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ทำหน้าที่ในการลดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการซึ่งเกิดในช่วงการทำงานลง การที่จะเติมสารเพิ่มคุณภาพตัวใด และจำนวนเท่าใดลงไปนั้น น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานนั้น จะขึ้นอยู่กับลักษณะ ของการนำไปใช้งาน โดยจะต้องคำนึงถึงผลข้างเคียงที่เกิดขึ้นด้วย เนื่องจากสารเพิ่มคุณภาพบางตัวแม้ว่าจะทำให้ คุณสมบัติประการใดประการหนึ่งดีขึ้น แต่ก็อาจจะทำให้คุณสมบัติประการอื่นเสื่อมลงไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าใส่ เข้าไปมากเกินไป หรือถ้าสารเพิ่มคุณภาพนั้น ไปทำปฏิกิริยากับสารเพิ่มคุณภาพแต่ละตัวจึงต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ น้ำมันหล่อลื่นทำงานได้อย่างดีที่สุด และจะต้องมีการทดสอบให้แน่ใจว่าจะไม่มีผลข้างเคียงที่ไม่ต้องการเกิดขึ้น ซึ่งในกรณีทั่ว ๆ ไปจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเติมสารเพิ่มคุณภาพเข้าไปอีก

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่อเติมสารเพิ่มคุณภาพเข้าไปแล้วก็จะเรียกว่า น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป ซึ่งบริษัท ผู้ผลิตแต่ละราย มักจะตั้งชื่อเฉพาะของแต่ละผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมา สำหรับสารเพิ่มคุณภาพที่นิยมใช้กันมีดังต่อไปนี้

1. สารลดจุดไหลเท (pour point depressants) เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการยับยั้งการเกิดผลึกไขที่ ป้องกันไม่ให้ น้ำมันไหลที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นสารนี้จึงช่วยให้จุดไหลเทของน้ำมันหล่อลื่นต่ำลง ทำให้สามารถ ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ได้ สารที่ใช้ลดจุดไหลเทจะเป็นพวกโพลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งที่ใช้กันอยู่มีสองชนิด คือ อัลคิลอะโรมาติกโพลิเมอร์ (alkylaromatic polymers) ทำหน้าที่ในการลดการเกิดผลึกของไขเมื่อเกิดขึ้นเพื่อป้องกัน ไม่ให้ผลึกเติบโตและยึดติดกันชนิดที่สองคือ โพลิเมทาคริเลต (polymethacrylates) ทำหน้าที่ตกผลึกร่วมกับไขเพื่อ ป้องกันไม่ให้ผลึกเติบโต สำหรับอุณหภูมิของจุดไหลเทของน้ำมันหล่อลื่นเมื่อเติมสารนี้เข้าไปแล้ว โดยทั่วไปจะลดลงประมาณ 11-17 องศาเซลเซียส

2. สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (viscosity index improvers) เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยไม่ให้ความหนืดของ น้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงมาก เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสารเพิ่มค่าดัชนี ค่าหนืดจะเป็นพวกโพลิเมอร์ที่มีน้ำหนัก โมเลกุลสูง และมีโครงสร้างเป็นลูกโซ่ยาว (long chain) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการเพิ่มความหนืดสัมพัทธ์ของน้ำมัน หล่อลื่นที่อุณหภูมิสูงมากกว่าการเพิ่มความหนืดสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะเป็ผลมาจากกาที่โพลิเมอร์ดังกล่าวมี การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลจะขี้ออกและมีปฏิกริยากันระหว่างโมเลกุล ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น สำหรับสารที่นิยมใช้เป็นสารเพิ่มค่าดัชนีความหนืดมีหลายตัว เช่น เมทาคริเลตโพลิเมอร์ (methacrylate polymers) , โอลิฟิน โพลิเมอร์ (olefin polymers) และอะคริเลตโพลิเมอร์ (acrylate polymers) เป็นต้น

3. สารป้องกันการเกิดฟอง (defoamants) ใช้ป้องกันการเกิดฟองอากาศที่ผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่นเมื่อน้ำมันถูกหมุนเวียนใช้ในระบบ สารนี้จะทำหน้าที่โดยโมเลกุลของสารจะเข้าไปติดกับฟองอากาศทำให้ฟองอากาศ เล็ก ๆ รวมตัวกันเป็นฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้น ลอยขึ้นผิวและแตกออกในที่สุด สำหรับสารที่นิยมใช้เป็นสารป้องกันการเกิดฟอง คือ ซิลิโคนโพลิเมอร์ (silicone polymer) และพวกโพลิเมอร์อินทรีย์ (organic polymer)

4. สารป้องกันออกซิเดชัน (oxidation inhibitors) เมื่อน้ำมันหล่อลื่นร้อนและสัมผัสกับอากาศก็จะเกิด ปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันหล่อลื่นและออกซิเจนในอากาศที่เรียกว่าออกซิเดชันขึ้น ผลของการเกิด

ออกซิเดชันจะทำให้ ความหนืดและความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิด วาร์นิช และตะกอนสารป้องกัน ออกซิเดชันก็คือ สังกะสีไดไธโอฟอสเฟต (zinc dithiophosphate)

5.สารป้องกันการกัดกร่อน (corrosion inhibitors) การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในระบบหล่อลื่นโดย น้ำมันหล่อลื่น นั้นมีหลายชนิด แต่ที่สำคัญที่สุดมีสองชนิดก็คือ การกัดกร่อนซึ่งเกิดจากกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในตัวขนานเองและการกัดกร่อนอื่นเนื่องมาจากสารปนเปื้อนที่ถูกนำและพาไปโดย น้ำมัน สำหรับสารป้องกันการกัดกร่อนที่ใช้กันทั่วไป เป็นสารตัวเดียวกับสารป้องกันออกซิเดชัน ซึ่งก็คือสังกะสี ไดไธโอฟอสเฟต แต่สารที่มีซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสก็ถูกนำมาใช้ด้วย

6.สารป้องกันสนิม (rust inhibitor) ใช้เพื่อป้องกันสนิมที่อาจเกิดขึ้นผิวของชิ้นส่วน โลหะที่มีการหล่อลื่น ด้วยน้ำมันสารที่ใช้โดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบที่มีการยึดติดกับผิวของโลหะได้ดี โดยสาร ป้องกันสนิมจะทำปฏิกิริยากับผิวโลหะเกิดเป็นฟิล์มเกาะติดกับผิวเพื่อป้องกันไม่ให้ น้ำเข้าถึงผิวโลหะ สาร ที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ อะไมนัสซัคซิเนต(amine succinates) และอัลคาไลเอิร์ทซัลไฟเนต (alkaline earth sulfonates)

7.สารชะล้างและกระจายสิ่งสกปรก (detergents and dispersants) ใช้เพื่อชะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวของ ชิ้นส่วน และกระจายมิให้รวมตัวกันเป็นโคลนหรือตะกอน ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับ น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เผาไหม้ ภายใน ได้แก่ เครื่องยนต์เบนซิน และเครื่องยนต์ดีเซลโคลนหรือ ตะกอนที่เกิดขึ้นจะอุดช่องทางน้ำมันหล่อลื่น และ จะไปรวมกันอยู่ด้านหลังของแหวนลูกสูบ ซึ่งอาจทำให้แหวนติดตายได้สารชะล้างจะทำหน้าที่ในการป้องกันไม่ให้ เกิดโคลนหรือตะกอน สารที่เป็นตัวชะ ล้างที่ใช้กันในปัจจุบัน ได้แก่ สบูอินทรีย์ (organic soaps) และบารีอัม (barium), แมกนีเซียมซัลไฟเนต (magnesium sulfonates) เป็นต้น ส่วนสารกระจายสิ่งสกปรกจะทำหน้าที่ในการ กระจายหรือทำให้สารที่จะรวมตัวกันเป็น โคลนแขวนลอยอยู่ในน้ำมัน สารที่เป็นตัวกระจายที่ใช้กัน ได้แก่ โพลีเมอร์ซัคซิไมด์ (polymeric succinimides) และ เบนซิลไมด์ (benzylamides) เป็นต้น

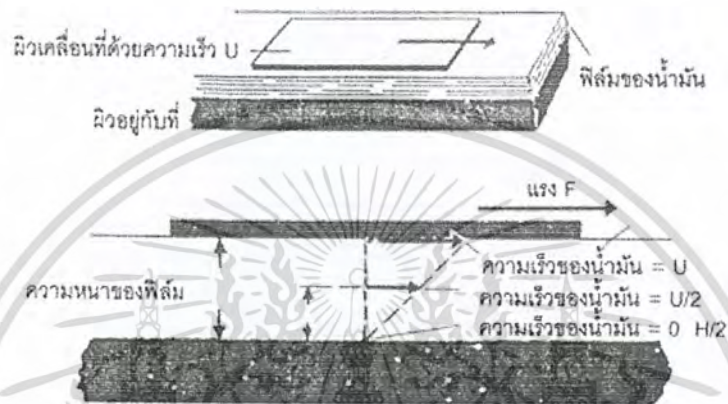
8.สารป้องกันการสึกหรอ (antiwear additives) เป็นสารที่ช่วยลดความเสียดทานและการสึก หรอ ภายใต้ สภาวะการหล่อลื่นแบบเบาน์ดารี (boundary lubrication) ซึ่งก็คือในสภาวะที่ฟิล์มของ น้ำมันที่ชะแยกผิวสัมผัสได้ อย่างสมบูรณ์ไม่สามารถคงอยู่ได้ สารป้องกันการสึกหรอที่ใช้กันแบ่ง ออกเป็นสองประเภทตามความต้องการของการ ใช้งาน ประเภทแรกเป็นสารที่ใช้ลดความเสียดทานและ การสึกหรอสำหรับสภาวะการทำงานเบา สารนี้บางครั้ง เรียกว่าสารเพิ่มคุณภาพสำหรับกรหล่อลื่นแบบ เบาน์ดารี (boundary lubrication additives) ได้แก่ กรดไขมัน (fatty acids) และน้ำมัน ไขมัน (fatty oils) ประเภทที่สองเป็นสารที่ใช้ลดความเสียดทานและการสึกหรอภายใต้ สภาวะความ ดันสูงมาก เรียกว่า Extreme Pressure Additive (EP) ซึ่งจะทำหน้าที่โดยทำปฏิกิริยาทางเคมีกับผิว โลหะ โดยจะเกิดเป็นฟิล์มเคลือบที่ผิวโลหะป้องกันการสัมผัสโดยตรงของผิวโลหะ สาร EP โดยทั่วไป จะเป็นสารประกอบของซัลเฟอร์ คลอรีน หรือฟอสฟอรัส ตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัวรวมกัน

4.4 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นประเภทน้ำมันแร่มีหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นใน

การเลือกใช้ จึงจำเป็นที่จะต้องรู้ถึงคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น และในการผลิตก็จะต้องมีการควบคุมคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นให้ได้ตามต้องการ สำหรับคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่สำคัญทั้งคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์และเคมี มีดังต่อไปนี้

1.ความหนืด (viscosity) ถือว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัส และมีผลต่อการเกิดความร้อนขึ้นในระหว่างผิวสัมผัสที่มีการหล่อลื่นด้วย น้ำมัน ความหนืด หมายถึง ความข้นหรือความใสของน้ำมันเป็นคุณสมบัติของของไหลซึ่งวัดในรูปของความต้านทาน ในการไหล



รูปที่ 4.3 หลักการของความหนืด

หลักการของความหนืดตามที่แสดงในรูปที่ 4.3 ประกอบด้วยแผ่นวัตถุถูกดึงไปบนฟิล์มของน้ำมันด้วยความเร็ว U ส่วนผิวสัมผัสของน้ำมันติดอยู่กับผิววัตถุที่เคลื่อนที่และที่อยู่กับที่ ซึ่งเมื่อพิจารณาให้น้ำมันประกอบขึ้นด้วยชั้นน้ำมันหลายๆ ชั้น ชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่เคลื่อนที่ก็จะเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเดียวกับผิวที่เคลื่อนที่ (U) ส่วนชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่อยู่กับที่ก็จะมีความเร็วเป็นศูนย์ ชั้นน้ำมันที่อยู่ระหว่างชั้นบนสุดและชั้นล่างสุดก็จะถูกดึงไปด้วยชั้นน้ำมันที่อยู่ด้านบน ด้วยความเร็วส่วนหนึ่งของความเร็ว U ซึ่งความเร็วของแต่ละชั้นของน้ำมันดังกล่าวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ระยะจากผิววัตถุที่อยู่กับที่ แรง (F) ที่ต้องใช้ในการดึงให้ผิววัตถุอันบนเคลื่อนที่ไปนี่ก็คือ แรงที่ต้องเอาชนะความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นน้ำมันนั่นเอง และเนื่องจากแรงนี้เป็นผลมาจากความหนืด โดยแรงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนืด ดังนั้น ความหนืดก็สามารถได้จากการวัดแรงที่ต้องใช้เพื่อเอาชนะความเสียดทานของน้ำมัน ความหนืดที่หาได้ในที่นี้ เรียกว่า ความหนืดสัมบูรณ์

(absolute viscosity) หรือความหนืดเชิงพลศาสตร์ (dynamic viscosity)

หน่วยความหนืดเชิงพลศาสตร์ที่นิยมใช้กันคือ หน่วยเป็น Poise (P) ซึ่งเป็นหน่วยในระบบ CGS (Centimetre Gram Second) โดย

$$1 \text{ poise} = 1 \text{ dyne s/cm}^2 = 1 \text{ g/cm.s}$$

$$1 \text{ centipoise (cP)} = 1 \times 10^{-2} \text{ poise (P)}$$

แต่ค่าของความหนืดเชิงพลศาสตร์ของน้ำมันหล่อลื่นค่อนข้างกว้าง ก็มีค่าอยู่ในช่วง 2 ถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

400 cP และ โดยทั่วไปเครื่องมือวัดความหนืดจะไม่สามารถวัดค่าความหนืดเชิงพลศาสตร์ได้โดยตรง ดังนี้ จึงได้มีการกำหนด ค่าความหนืดในอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเรียกว่า ความหนืดเชิงจลศาสตร์ (kinematic viscosity) โดยให้ความหนืดเชิงจลศาสตร์ เท่ากับความหนืดเชิงพลศาสตร์ หารด้วยความหนาแน่นของน้ำมันหรือของไหลนั้นๆ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้คือ

$$\nu = \eta / \rho$$

ν = ความหนืดเชิงจลศาสตร์

η = ความหนืดเชิงพลศาสตร์

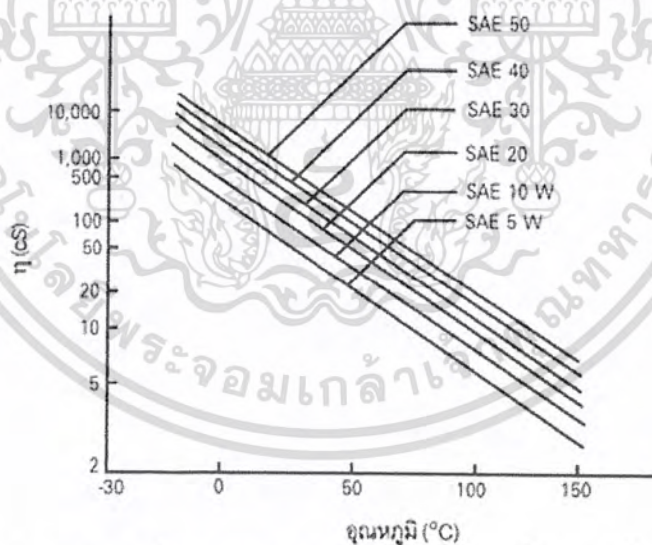
ρ = ความหนาแน่น

หน่วยความหนืดเชิงจลศาสตร์ที่นิยมใช้กันก็คือหน่วย Stoke (St) ซึ่งเป็นหนึ่งในระบบ CGS เช่นเดียวกันโดย

$$1 \text{ stoke (St)} = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$1 \text{ centistoke (cSt)} = 1 \times 10^{-2} \text{ stoke (St)}$$

นอกจากหน่วยของความหนืดที่ใช้กันข้างต้นแล้วยังมีการวัดความหนืดในหน่วยอื่นอีก ได้แก่ Saybolt Universal Seconds (SUS), Saybol furlo Seconds (SFS), Redwood Seconds และ Engler Degree ซึ่งความหนืดในหน่วยเหล่านี้กำหนดขึ้นตามชนิดของเครื่องมือที่ใช้วัดความหนืด (viscometer) และสภาวะการทดสอบ (อุณหภูมิ ของการทดสอบ) แต่อย่างไรก็ตามค่าความหนืดในหน่วยต่างๆ ข้างต้นก็สามารถที่จะแปลงเป็นค่าในหน่วยความหนืด เชิงจลศาสตร์ได้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นบางชนิด

ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะไม่คงที่ แต่จะแปรผันตามสภาวะการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะแปรผัน กับอุณหภูมิและความดันในการใช้งาน ในด้านของอุณหภูมิความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลของน้ำมัน ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของเหลวจะขยายตัว โมเลกุลของน้ำมันจะเคลื่อนออกห่างกัน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ลดลง และเป็นผลให้ความหนืดลดลงด้วย รูปที่ 4.4 เป็นกราฟ แสดงถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดเชิงพลศาสตร์ ของน้ำมันหล่อลื่น และเนื่องจากความหนาแน่น ของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงน้อยมากกับอุณหภูมิที่มีต่อความหนืด เชิงพลศาสตร์ได้ด้วย นอกจากแสดง ด้วยกราฟแล้วผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดก็ยังสามารถแสดงได้ด้วยสมการแต่เป็นเพียงสมการโดย ประมาณเท่านั้นคือ

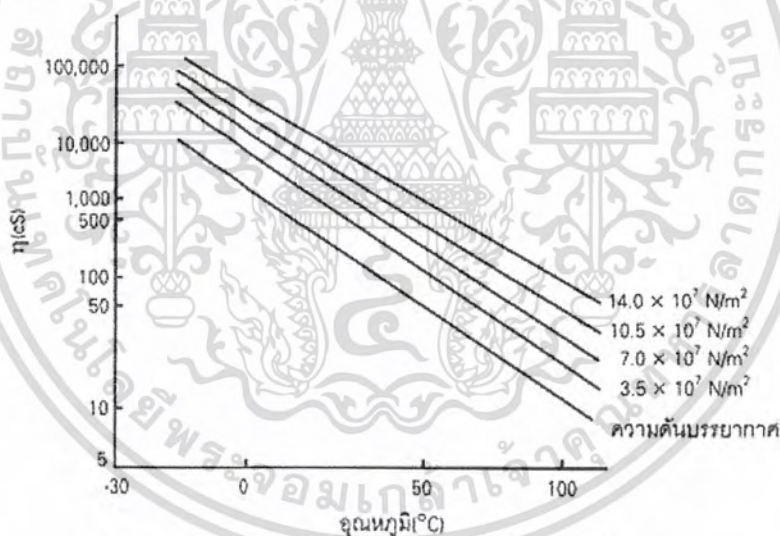
$$\log \eta = A + B/T$$

η = ความหนืดเชิงพลศาสตร์

A และ B = ค่าคงที่ (ขึ้นอยู่กับชนิดของของเหลว)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

สำหรับผลของความดันต่อความหนืดนั้น จะเห็นได้ชัดเจนก็ต่อเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นมาก ซึ่งเมื่อความดัน ของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น โมเลกุลของน้ำมันก็จะถูกบีบให้เข้าใกล้กัน ทำให้แรงยึดติด ระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น และ เป็นผลให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นด้วย รูปที่ 4.5 แสดงถึงผล ของความดันที่มีต่อความหนืดของน้ำมัน หล่อลื่น SAE 40 ซึ่งความหนืดจะเปลี่ยนแปลงจน เห็นได้ ชัดเจนเมื่อความดันเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ $2 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ (Pascal)



รูปที่ 4.5 ผลของความดันต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40

และเมื่อความดันเพิ่มเป็น $3.5 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ ความหนืดก็จะเพิ่มเป็นสองเท่าของความหนืดที่ความดันบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงของความหนืดอันเนื่องมาจากความดันสามารถแสดงได้ด้วยสมการโดยประมาณ คือ

$$\eta = \eta_0 e^{\alpha P}$$

η = ความหนืดเชิงพลศาสตร์ที่ความดัน P

η_0 = ความหนืดเชิงพลศาสตร์ที่ความดันบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P = ความดันของน้ำมันหล่อลื่น

μ = สัมประสิทธิ์ของความดันกับความหนืด

e = 2.71828

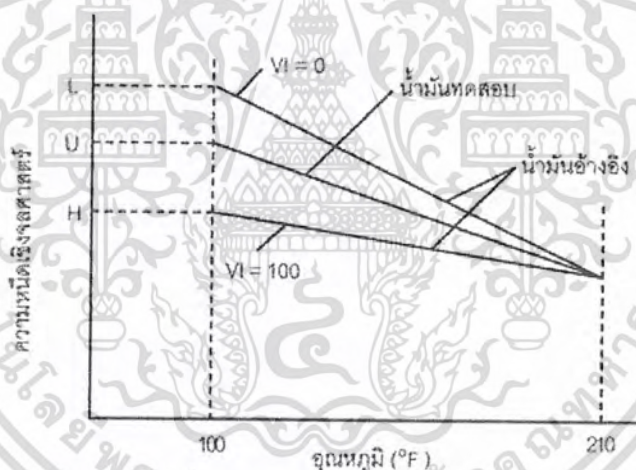
2.ดัชนีความหนืด (viscosity index) น้ำมันหล่อลื่นต่างชนิดกันจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืด อันเนื่องมาจากอุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดดัชนีความหนืดขึ้นมาเพื่อใช้แสดงอัตราการเปลี่ยน-แปลงความหนืดอันเนื่องมาจากอุณหภูมิโดยใช้การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นที่จะหาดัชนีความหนืดกับน้ำมันหล่อลื่นที่เลือกสองชนิดเช่น น้ำมันหล่อลื่น Gulf Coast ซึ่งความหนืดเปลี่ยน-แปลงกับอุณหภูมิมาก ให้มีดัชนีความหนืดเท่ากับ 0 และน้ำมันหล่อลื่น Pennsylvanian ซึ่งความหนืดเปลี่ยนแปลง กับอุณหภูมิน้อยให้มีดัชนีความหนืดเท่ากับ 100

การหาดัชนีความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นกระทำได้โดยการหาความหนืดเชิงจลศาสตร์ของน้ำมันหล่อลื่น ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 100 °F และ 120 °C แล้วหาค่าดัชนีความหนืดตามสมการคือ

$$V.I. = \frac{L-U}{L-H} \times 100$$

V.I. = ดัชนีความหนืด (viscosity index)

ค่า L, U และ H ให้ดูตามรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การหาค่าดัชนีความหนืด

3.กากคาร์บอน (carbon residue) หมายถึง สิ่งที่ตกค้างอยู่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายหลังจากเผาไหม้น้ำมันหล่อลื่นในสภาวะที่กำหนด ปริมาณกากคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นจะไม่ค่อยมีความสำคัญนัก สำหรับการใช้งาน เนื่องจากจะไม่มีกการเผาไหม้โดยตรงของน้ำมันหล่อลื่นในการนำไปใช้งาน แต่ปริมาณกาก คาร์บอนจะมีความสำคัญสำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงเพราะจะมีการเผาไหม้โดยตรง ดังนั้นการหาปริมาณกากคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจึงเป็นการหาสำหรับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน เพื่อดูว่าขบวนการผลิตเป็นไปตามกำหนดหรือไม่

4.สี (color) สีของน้ำมันหล่อลื่นที่เห็นเมื่อมีแสงผ่านนั้นจะมีสีต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ใสมากจนถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า ซึ่งอาจ มีสีเหลือง แดง และน้ำตาล เป็นต้น ความแตกต่างกันของสีของน้ำมันหล่อลื่น เป็นผลมาจาก ชนิดของน้ำมันดิบ ที่นำมาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นแตกต่างกัน ทั้งวิธีการกลั่นและผลิต, จำนวน และชนิด ของสารเพิ่มคุณภาพ ดังนั้นสีของน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป จึงไม่มีความสำคัญนักในด้านการใช้งาน ยกเว้น กรณีที่เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา

5.ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (density and gravity) ความหนาแน่นหมายถึงมวลของ สารต่อ หนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิมาตรฐานที่กำหนด ส่วนความถ่วงจำเพาะ (ความหนาแน่นสัมพัทธ์) หมายถึงอัตรา ส่วนระหว่างความหนาแน่นของน้ำมัน และความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน ในสหรัฐอเมริกา มักนิยมกำหนดค่าความถ่วงจำเพาะ ในรูปของหน่วยของสภา API(American Petroleum Institute) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\text{องศา API} = \frac{141.5}{\text{Sp.gr.}_{60/60^\circ\text{F}}} - 131.5$$

องศา API = องศา API ที่ 60° F Sp gr 60/60° F = ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันที่ 60° F

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าเมื่อค่าองศา API เพิ่มขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะจะลดลง ค่าความถ่วงจำเพาะนี้ จะเป็นตัวช่วยในการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้แล้ว ซึ่งถ้ามีค่า ความถ่วงจำเพาะลดลง (ค่าองศา API เพิ่มขึ้น) ก็อาจแสดงว่ามีน้ำมันเชื้อเพลิงเข้ามาผสมกับน้ำมันหล่อลื่นและถ้ามีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นก็อาจแสดงว่ามีสิ่งแปลกปลอม เช่น เชม่าหรือ สารที่เกิดจากการรวมตัวกับออกซิเจนผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่น

6.จุดวาบไฟและจุดติดไฟ (flash and fire points) หมายถึงอุณหภูมิที่น้ำมันระเหยกลายเป็นไอ เพียงพอที่ผิวและสามารถลุกไหม้ได้เมื่อ โคนเปลวไฟ แต่ที่อุณหภูมินี้การระเหยกลายเป็นไอจะไม่เพียงพอที่จะ ทำให้การลุกไหม้คงอยู่ต่อไป เปลวไฟจึงดับลงเองทันที แต่หากมีการให้ความร้อนแก่น้ำมันต่อไปอีก อุณหภูมิ ก็จะสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่การระเหยกลายเป็นไอเพียงพอที่จะทำให้เกิดลุกไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง อุณหภูมินี้ เรียกว่า จุดติดไฟ จุดวาบไฟของน้ำมันหล่อลื่นใหม่จะแปรผันกับความหนืด โดย น้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืด สูงก็จะมีจุดวาบไฟสูงด้วย นอกจากนี้ชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาใช้ผลิต น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานก็มีผลต่อจุดวาบไฟด้วย

จุดวาบไฟ และจุดติดไฟของน้ำมันจะใช้ในการควบคุมการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและจะใช้ในการพิจารณาในด้านความปลอดภัยในการใช้งาน

7.จุดไหลเท (pour point) หมายถึง อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันหล่อลื่นจะเริ่มไหลภายใต้สภาวะที่กำหนด ซึ่งน้ำมันทั่วไปจะมีไขส่วนหนึ่งละลายอยู่ด้วย เมื่อน้ำมันเย็น ไขก็จะตกผลึกและเกาะกันเป็น โครงสร้างที่แข็งแรง โดยกักเอาน้ำมันไว้ และเมื่อผลึกของไขเกิดขึ้นมากพอ น้ำมันก็จะไม่สามารถไหลได้ต่อไป

ความสำคัญของจุดไหลเทจะขึ้นอยู่กับสภาวะของการใช้งาน ตัวอย่างเช่น ในประเทศหนาว จะต้อง เลือกใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำ เพื่อให้ น้ำมันสามารถไหลได้ ถึงแม้อุณหภูมิของอากาศโดยรอบจะต่ำ ในทาง ตรงกันข้ามน้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำก็ไม่มีความจำเป็นสำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานในสภาวะ อุณหภูมิสูงตลอดเวลา

8.ตัวเลขความเป็นกลาง (neutrallization number) น้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะมีสภาพความเป็นกรด อยู่เล็กน้อย ซึ่งสภาพความเป็นกรดนี้จะวัดเป็นปริมาณของเบสมาตรฐานที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำมันมีสภาพเป็นกลาง

สภาพความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่น โดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจน (oxidation) ซึ่งทำให้เกิดกรดอินทรีย์ขึ้น

สภาพความเป็นกรดนี้อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะได้ ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่น โดยเฉพาะน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนตดีเซล จึงนิยมเติมสารเพิ่มคุณภาพที่มีสารที่เป็นด่างเข้าไป เพื่อให้สารที่เกิด จากการเผาไหม้ซึ่งมีสภาพเป็นกรดให้มีสภาพเป็นกลาง และเมื่อน้ำมันหล่อลื่นไปใช้งาน อัตราการสิ้นเปลืองสารที่เป็นด่างที่ตรวจสอบได้ก็จะเป็นตัวชี้ถึงอายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่น การวัดความเป็นด่างนี้จะวัดใน รูปของจำนวนเบสทั้งหมด (total base number)

4.5 รีโโลยี (Rheology)

4.5.1 ความหมายของรีโโลยี

รีโโลยีเป็นวิชาที่เกี่ยวกับการไหล โดยมีตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องอัน ได้แก่ ความเค้นเฉือน อัตราความเครียดเฉือน และความหนืด เป็นต้น

4.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน อัตราความเครียดเฉือน และความหนืด

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดเฉือนและความเค้นเฉือนแล้ว เราสามารถแบ่งของไหลออกเป็น 2 ประเภท คือ

1.ของไหลนิวโตเนียน(Newtonian Fluid)

เราจะเรียกของไหลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนเป็นสัดส่วนโดยตรง หรือเป็นเชิงเส้นกับอัตราความเครียดเฉือนว่าของไหลนิวโตเนียน ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการ ได้ดังนี้

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (4.1)$$

สมการที่ 4.1 เรียกว่ากฎของนิวตันสำหรับความหนืด(Newton's Law of Viscosity)โดยที่ τ คือ ความเค้นเฉือน(Shear Stress) และ $\frac{du}{dy}$ คือ อัตราความเครียดเฉือน(Shear Strain Rate)ส่วน μ คือค่าความหนืดสัมบูรณ์(Absolute Viscosity)ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของความหนาแน่น ρ และความหนืดจลน์ ν ได้ดังนี้

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4.2)$$

2. ของไหลอนินิวโตเนียน(Non-Newtonian Fluid)

ของไหลอนินิวโตเนียน จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการต่างๆ ได้ดังนี้

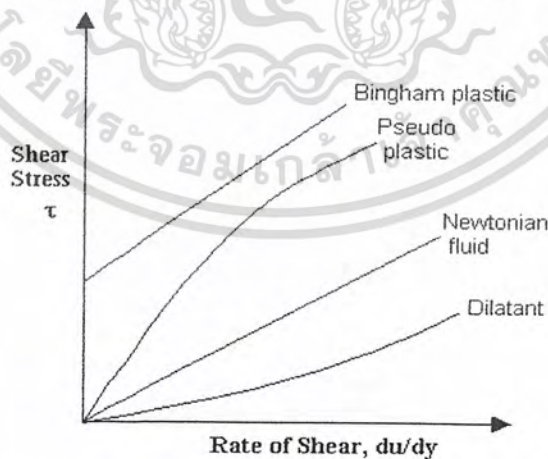
$$\tau = m \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (4.3)$$

$$\tau + k\tau^3 = \mu \frac{du}{dy} \quad (4.4)$$

$$\tau = \tau_y + \mu_p \frac{du}{dy} \quad (4.5)$$

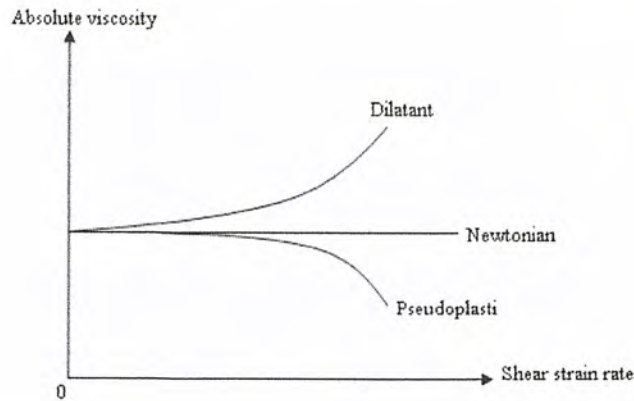
ในสมการที่ 4.3 ถ้า $n = 1$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนิวโตเนียน และถ้า $n > 1$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลอนินิวโตเนียนชนิดไคลลาแตนท์(Dilatant) หรือถ้า $n < 1$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลอนินิวโตเนียนชนิดซูโดพลาสติก(Pseudoplastic) ส่วนในสมการที่ 4 ถ้า $k = 0$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนิวโตเนียน และถ้า $k > 0$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลอนินิวโตเนียนชนิดซูโดพลาสติก(Pseudoplastic) หรือถ้า $k < 0$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลอนินิวโตเนียนชนิดไคลลาแตนท์(Dilatant)

สำหรับสมการที่ (4.5) เราเรียกของไหลชนิดนี้ว่าของไหลชนิดพลาสติกบิงแฮม ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับอัตราความเครียดเฉือนเป็นแบบเชิงเส้นเหมือนกับของไหลนิวโตเนียน แต่จะแตกต่างกับสารหล่อลื่นนิวโตเนียนตรงที่ค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้นของของไหลไม่เริ่มต้นที่ศูนย์ เราเรียกค่าความเค้นเฉือนที่จุดเริ่มต้นนี้ว่าความเค้นเฉือนที่จุดคราก(Yield point) τ_y โดย ถ้า $\tau_y = 0$ จะมีคุณสมบัติเป็นสารหล่อลื่นนิวโตเนียน



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราความเครียดเฉือน

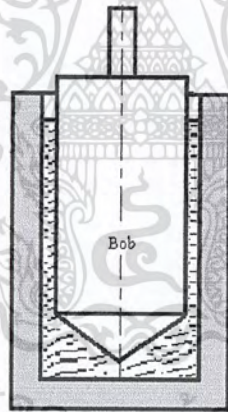
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสัมบูรณ์กับอัตราความเครียดเฉือน

4.5.3 เครื่องมือวัดทางรีโอโลยี

เครื่องมือวัดทางรีโอ โลยีที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายชนิด ซึ่งในการเลือกใช้เครื่องมือชนิดใดนั้นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่จะต้องคำนึงถึง ได้แก่ชนิดของของไหลที่จะนำมาทดสอบด้วย ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการใช้เครื่องมือวัดทางรีโอ โลยีกับจารบี ควรที่จะใช้กับเครื่องวัดความหนืดแบบกรวยบนแผ่นระนาบ(Cone and Plate Viscometer)เป็นต้นเครื่องมือวัดทางรีโอ โลยีที่ใช้กันส่วนใหญ่ได้แก่เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน(Rotational Viscometer)



รูปที่ 4.9 เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน

เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน(Rotational Viscometer) นี้จะประกอบไปด้วยทรงกระบอกสองอันที่มีรัศมีต่างกัน โดยทรงกระบอกอันในจะเป็นท่อทรงกระบอกตันที่หมุนอยู่ภายในท่อทรงกระบอกกลวงซึ่งอยู่กันที่ในการใช้งานจะใส่ของเหลวลงไประหว่างช่องว่างของท่อทรงกระบอกทั้งสอง เมื่อท่อทรงกระบอกอันในหมุนจะทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ภายใต้ความเค้นเฉือน ที่เกิดจากการหมุนของทรงกระบอกอันในและเกิดอัตราความเครียดเฉือนเกิดขึ้นซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราความเครียดเฉือน สามารถอธิบายได้ด้วยเส้นกราฟแสดงการไหล(Flow Curve) ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

Gear

5.1 ชนิดเฟือง

1. Spur Gear หรือเฟืองตรงชนิดนี้จะมีพื้นที่ขนานกับแกนการหมุนของเฟืองและถ่ายทอคกำลังจากหนึ่งสู่อีเพลานหนึ่ง

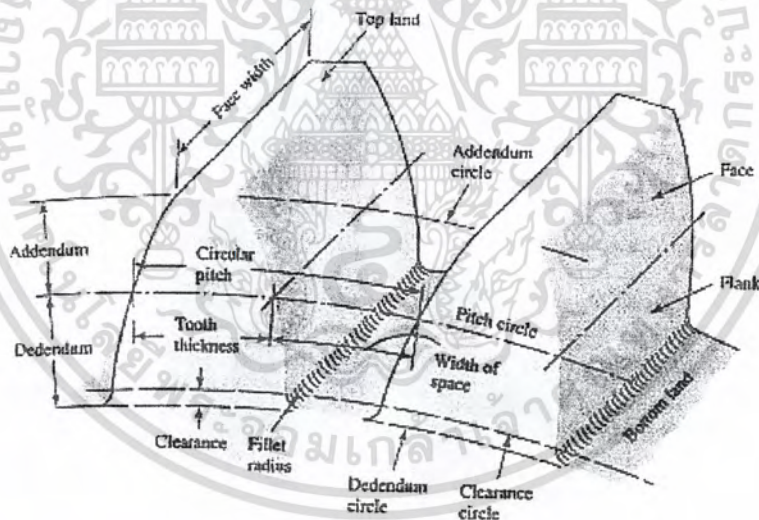
2. Helical Gear หรือเฟืองเฉียงจะมีพื้นที่ทำมุมกับแนวแกนการหมุนของเฟือง สามารถใช้งานเช่นเดียวกับเฟืองตรง เฟืองชนิดนี้จะทำงานเงียบกว่าเฟืองตรงแต่จะมีแรงรุนเกิดขึ้นมา

3. Bevel Gear จะมีเฟืองรูปกรวยตัดมีใช้มากในการถ่ายทอคกำลังที่ต้องการเปลี่ยนทิศทางการหมุน เช่น เฟืองท้าย

4. Worms and worms Gear มีลักษณะคล้ายสกรูทิศทางการหมุนไปตามแนวแกน จะมีทั้งหมุนซ้ายและหมุนขวา

5.2 คำจำกัดความของเกียร์

เป็นคำที่ใช้ในการเรียกส่วนต่างๆของเฟืองโดยพิจารณาตามรูป



รูปที่ 5.1 แสดงส่วนต่างๆของเฟือง

5.2.1 วงกลมพิตช์ (Pitch Circle) d เป็นมิติหลักในการเรียกขนาดของเฟือง โดยบอกขนาดของเฟืองด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพิตช์ (Pitch Diameter) ในทางทฤษฎีแล้วเฟืองที่ขบกันต้องมีเส้นสัมผัส ณ วงกลมพิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 เซอร์คิวลาพิทช์ (Circular Pitch) เป็นระยะที่วัดบน วงกลมพิทช์ จากจุดหนึ่งบนฟันเฟืองไปยังอีกจุด ณ ตำแหน่งเดียวกันบนเฟืองถัดไป

5.2.3 โมดูล (Module) m เป็นอัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิทช์กับจำนวนฟันเฟือง หน่วยที่ใช้วัดคือมิลลิเมตรในหน่วย SI

5.2.4 ไดอะมิทริคัลพิทช์ (Diametral Pitch) P เป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนฟันเฟืองต่อเส้นผ่านศูนย์กลางพิทช์ ดังนั้นจึงเป็นส่วนกลับของ โมดูล ไดอะมิทริคัลพิทช์นี้เป็นหน่วยอังกฤษ

5.2.5 แอดเดนดัม (Addendum) a หรือช่วงสูงบน เป็นระยะที่วัดในแนวรัศมีระหว่างยอดฟัน (top land) ถึงวงกลมพิทช์

5.2.6 ดีเดนดัม (Dedendum) d หรือ ช่วงสูงล่าง เป็นระยะที่วัดในแนวรัศมีระหว่างโคนฟัน (Bottom land) ถึงวงกลมพิทช์ ฉะนั้นความสูงของฟันเฟืองคือ ผลรวมของแอดเดนดัมและดีเดนดัม

5.2.7 เคลียร์นซ์ (Clearance) c ในการที่เฟืองสองอันขบกัน ดีเดนดัมของเฟืองหนึ่งต้องมากกว่า แอดเดนดัมของอีกเฟืองหนึ่ง เพื่อจะไม่ให้เกิดการขัดกัน ผลต่างระหว่างค่าดีเดนดัมและแอดเดนดัม เรียกว่า clearance

5.2.8 แบ็คแลช (Backlash) คือผลต่างระหว่างความกว้างของฟันเฟืองหนึ่งกับความกว้างของอีกฟันเฟืองหนึ่งที่ขบกัน โดยวัดตามแนวเส้นวงกลมพิทช์ ฉะนั้นในการขบด้วยเฟืองที่มีแบ็คแลช เฟืองขับจะหมุนไปได้เล็กน้อยก่อนที่เฟืองตามจะหมุน ซึ่งแบ็คแลชนี้ต้องมีอยู่เสมอเพื่อให้มีช่องว่างให้น้ำมันเข้าไปหล่อลื่น

$$P = \frac{N}{d} \quad (5.1)$$

$$m = \frac{d}{N} \quad (5.2)$$

$$p = \frac{\pi d}{N} = \pi m \quad (5.3)$$

$$pP = \pi \quad (5.4)$$

เมื่อ P คือ ไดอะมิทริคัลพิทช์

m คือ โมดูล

d คือ วงกลมพิทช์

N คือ จำนวนฟัน

p คือ เซอร์คิวลาพิทช์

5.2.9 ความหนาของฟัน (Face width) b คือความหนาของฟันเฟืองวัดในทิศทางแนวเดียวกับแกนเฟือง

5.2.10 แฟล็ง (Flank) คือผิวด้านข้างของฟันเฟืองซึ่งอยู่ระหว่างวงกลมพิทช์กับวงกลมดีเดนดัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.11 อัตราทด (Velocity ratio) m_w คืออัตราส่วนระหว่างความเร็วเชิงมุมของเฟืองขับต่อความเร็วเชิงมุมของเฟืองตาม ถ้าให้ 1 และ 2 แทนเฟืองขับและเฟืองตาม ตามลำดับแล้วจะได้ว่า

$$m_w = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (5.5)$$

โดยที่ ω แทนความเร็วเชิงมุม rad/s

n ความเร็วรอบ

d เส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ mm

N จำนวนฟันเฟือง

อัตราส่วนเฟือง (Gear ratio) m_g คืออัตราส่วนระหว่างจำนวนฟันเฟืองต่อจำนวนฟันเฟืองของพิเนียน ถ้าพิเนียนเป็นตัวขับแล้ว

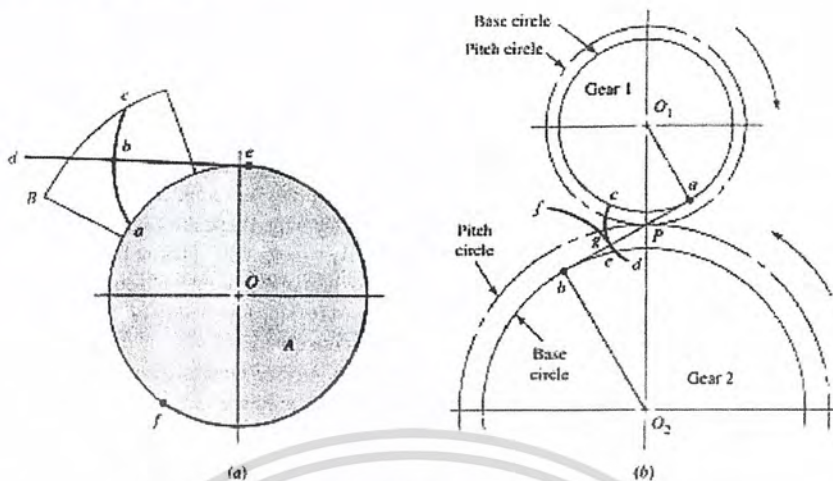
$$m_g = m_w = \frac{N_1}{N_2} \quad (5.6)$$

ตารางที่ 5.1 แสดงขนาดเฟืองมาตรฐาน

โมดูล m (mm.)	โมดูล m (mm.)	โมดูล m (mm.)	Diametral Pitch P(1/in.)	Diametral Pitch P(1/in.)	Diametral Pitch P(1/in.)
1	4	16	20	5	1.25
1.25	5	20	16	4	1
1.5	6	25	12	3	0.75
2	8	32	10	2.5	0.625
2.5	10	40	8	2	0.5
3	12	50	6	1.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

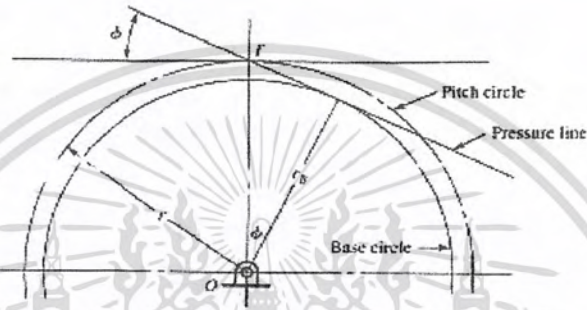
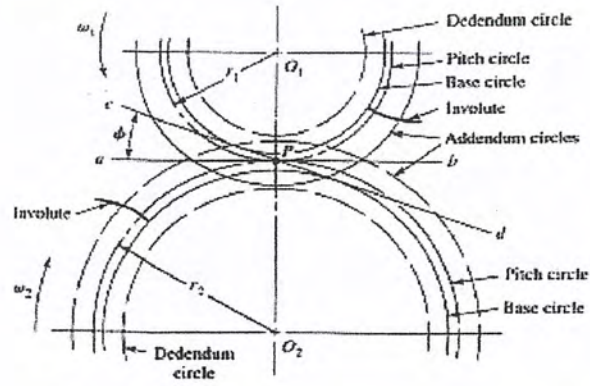
5.3 คุณสมบัติแบบ Involute



รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะเฟืองแบบ Involute curve

เฟืองแบบ Involute curve สามารถสร้างได้จากรูปที่ 5.2 (a) โดยแผ่นกระดาษ B ซัดติดกับทรงกระบอก A แล้วใช้เชือก def พันส่วนโค้งรอบทรงกระบอกแล้วกำหนดจุดที่บนแผ่นกระดาษเป็นจุดเคลื่อนที่คือจุด b ในรูปเมื่อหมุนทรงกระบอกจะทำให้เกิดเป็นเส้นโค้งจากการเคลื่อนที่ของจุด b ซึ่งเป็นลักษณะของ Involute curve ซึ่งความยาวของ ab จะเท่ากับความยาวของ de วงกลมที่เป็นฐานของ Involute curve เรียกว่าวงกลมฐาน (Base circle)

เมื่อพิจารณาในรูปที่ 5.2 (a) ซึ่งทรงกระบอกถูกขีดไว้ที่จุด O_1 และ O_2 และมีรัศมี O_1a และ O_2b และให้มีเชือกตึงระหว่างจุด a และ b แล้วหมุนทรงกระบอกให้เชือกตึงตลอดเวลาจะทำให้เกิดเป็นเส้นการเคลื่อนที่คือเส้น cd และ cf ในรูปซึ่งเส้น ab จะตั้งฉากกับเส้น cd และ cf ตลอดเวลาและทำให้เป็นจุดที่เกิดการสัมผัสกันตลอดเวลา เมื่อเป็นอย่างนี้จะไม่เกิดการถูกันที่หน้าสัมผัสเฟืองและจุด p นี้เป็นเส้นวงกลมพิตซ์



รูปที่ 5.3 แสดงส่วนทั้งหมดของเฟือง

เมื่อลากเส้นสัมผัสวงกลมฐาน ไปตัดกับจุด P จะเป็นเส้นแสดงถึงแนวแรงที่กระทำซึ่งเรียกว่ามุมกด (pressure angle) ที่นิยมสร้างคือมุมกด 20, 25 และ 145 องศา โดยที่วงกลมฐานสามารถหาจากสมการ

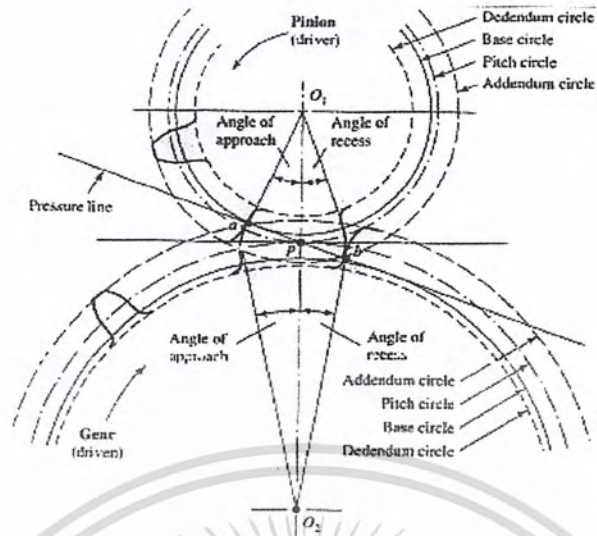
$$r_b = r \cos \phi \tag{5.7}$$

เมื่อ r_b คือรัศมีวงกลมฐาน
 r คือรัศมีวงกลมพิทช์

5.4 กฎการขับเฟืองและการทำงานของฟันเฟือง

รูปร่างของฟันเฟืองจะต้องทำให้เส้นตั้งฉากร่วม (Common normal) ที่ลาก ณ จุดสัมผัสระหว่างฟันทั้งสองผ่านจุดคงที่จุดหนึ่ง ซึ่งอยู่บนเส้นที่โยงระหว่างศูนย์กลางของฟันเฟืองทั้งสองและจุดนี้เรียกว่าจุดพิทช์โดยพิจารณาจากรูป จุด P ซึ่งอยู่ระหว่างจุด O1 และ O2 ของเฟืองทั้งสองรูปร่างฟันเฟืองที่เป็นลักษณะนี้เรียกว่า คอนจูเกตเคอฟ (Conjugate curve) และที่นิยมใช้กันมากคือแบบอินโวลูตเคอฟ (Involute curve) แนวสัมผัสที่กระทำผ่านจุด a, b และ P แนวของแรงกดนี้เรียกว่า มุมกด ในปัจจุบันนิยมใช้ คือ 20 และ 25 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แสดงลักษณะการขบของเฟือง

จากรูปจุด a จะเป็นจุดที่เริ่มต้นการขบและจุด b เป็นจุดที่เฟืองกำลังที่จะจากกันซึ่งการขบกันของเฟืองจะต้องขบกันมากกว่าหนึ่งคู่

ตารางที่ 5.2 มาตรฐาน SI ของฟันเฟือง

รายละเอียด	14.5 FD	20 FD พิตซ์ หยาบ	20 FD พิตซ์ ละเอียด	20 FD Stub	25 FD
แอดเดนดัม	m	m	M	0.8m	m
ดีเดนดัม	1.157m	1.25m	1.2m+0.05	m	1.25m
เคิร์ยรันซ์	0.157m	0.25m	0.2m+0.05	0.2m	0.25m
รายละเอียด	14.5 FD	20 FD พิตซ์ หยาบ	20 FD พิตซ์ ละเอียด	20 FD Stub	25 FD
ความสูงใช้งาน	2m	2m	2m	1.6m	2m
ความสูงฟัน	2.157m	2.25m	2.2+0.05	1.8m	2.25m

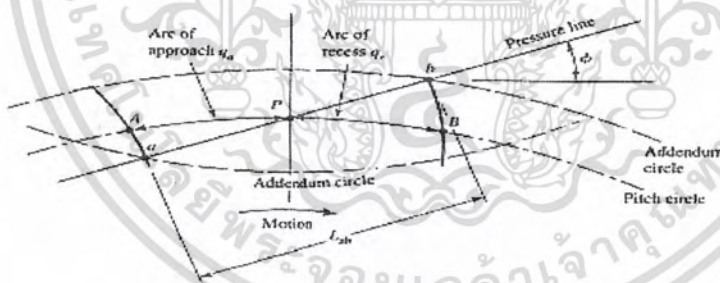
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 มาตรฐานอังกฤษฟันเฟือง

รายละเอียด	14.5 FD	20 FD พิตช์ หยาบ	20 FD พิตช์ ละเอียด	20 FD Stub	25 FD
แอดเดนดัม	1/P	1/P	1/P	0.8/P	1/P
ดีเดนดัม	1.157/P	1.25/P	1.2/P+0.002	1/P	1.25P
ครีรันซ์	0.157/P	0.25/P	0.2/P+0.002	0.2/P	0.25/P
ความสูงใช้งาน	2/P	2/P	2/P	1.6/P	2/P
ความสูงฟัน	2.157/P	2.25/P	2.2/P+0.002	1.8/P	2.25/P

5.5 ระยะการขบและอัตราการขบ

เมื่อเฟืองขบกันจุดสัมผัสระหว่างฟันเฟืองเริ่มขึ้นเมื่อผิวด้านข้างของฟันเฟืองจับสัมผัสกับปลายฟันเฟืองของเฟืองตาม และการสัมผัสสิ้นสุดลงเมื่อปลายฟันเฟืองของเฟืองจับสัมผัสกับผิวด้านข้างของฟันเฟืองตาม เนื่องจากปลายฟันอยู่บนวงกลมแอดเดนดัม การสัมผัสระหว่างฟันเฟืองเริ่มขึ้นเมื่อวงกลมแอดเดนดัมของเฟืองตามตัดกับแนวแรงกด ระยะการสัมผัสสิ้นสุดลงเมื่อวงกลมแอดเดนดัมของเฟืองจับตัดกับแนวแรงกดอีกครั้งหนึ่งคือจุด a และ b



รูปที่ 5.5 แสดงระยะการขบของฟันเฟือง

ในขณะที่เฟืองขบกันนั้นจะต้องมีเฟืองอย่างน้อยหนึ่งคู่ที่จับกันอยู่ตลอดเวลา โดยปกติการขบกันมักมากกว่าหนึ่งคู่การบอกรับจำนวนฟันที่ขบกันจะบอกเป็นอัตราส่วนการขบ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะการขบและ พิตช์ฐานเขียนเป็นสมการ

$$m_c = \frac{AB}{p \cos \phi} \quad (5.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้การทำงานราบรื่นอัตราส่วนการขบควรรู้อยู่ระหว่าง 1.2 ถึง 1.5 ในกรณีอัตราส่วนการขบ น้อยกว่าหนึ่งหมายความว่าฟันของเฟืองคู่หนึ่งจะจากกันก่อนที่ฟันเฟืองอีกคู่หนึ่งจะมาขบกันซึ่งทำให้การทำงานของเฟืองไม่ราบรื่นและมีแรงจากการกระแทกที่หน้าสัมผัสเฟืองมาก

5.6 การขัดกัน

ในการสร้างเฟืองแบบอินโวลูตเคฟ (Involute curve) จะเริ่มจากวงกลมฐาน ฉะนั้นในส่วนของ ฟันที่อยู่ต่ำกว่าวงกลมฐานจะไม่ใช่ Involute curve ซึ่งทำให้ใช้กฎการขบของเฟืองตรงส่วนนี้ไม่ได้ดังนั้น การขบกันที่ส่วนต่ำกว่าวงกลมฐานอาจเกิดการขัดกัน ได้จุด A และ B เรียกว่าจุดขัดกัน (Interference point)

เฟืองในรูป 5.6 เป็นเฟืองที่ไม่มีเกิดการขัดกันเมื่อการสัมผัสระหว่างฟันเฟืองนอกจุด A และ B ก็คือ วงกลมแอดเดนดัมคัมคัตแนวแรงกคนอกจุดนี้จะทำให้ไม่เกิดการขัดกันซึ่งในรูปจุด C และ D



รูปที่ 5.6 การขบของเฟืองไม่ขัดกัน

วิธีการป้องกันการขัดกันของฟันเฟืองทำได้หลายวิธีต่อไปนี้

5.6.1 ใช้วิธีการตัดเนื้อ โลหะที่ต่ำกว่าวงกลมฐานออกบ้าง เพื่อไม่ให้เกิดการสัมผัสระหว่างเฟือง ตรงบริเวณนี้ แต่มีข้อเสียคือทำให้อัตราส่วนการขบลดลงเฟืองอ่อนแอลง

5.6.2 การตัดปลายเฟืองให้สั้นลง แต่ทำให้อัตราส่วนการขบลดลง

5.6.3 การเพิ่มมุมกดจะลดขนาดของวงกลมฐานทำให้ส่วนของ Involute curve เพิ่มขึ้นจึงสามารถ จำกัดการขัดได้แต่การทำเช่นนี้จะทำให้แรงปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นทำให้ความราบเรียบน้อยลง

5.6.4 การใช้เฟืองที่ไม่เป็นมาตรฐาน คือให้เฟืองอันเล็กมีแอดเดนดัมคัมเพิ่มขึ้นและให้เฟืองอันใหญ่ มีแอดเดนดัมคัมลดลง

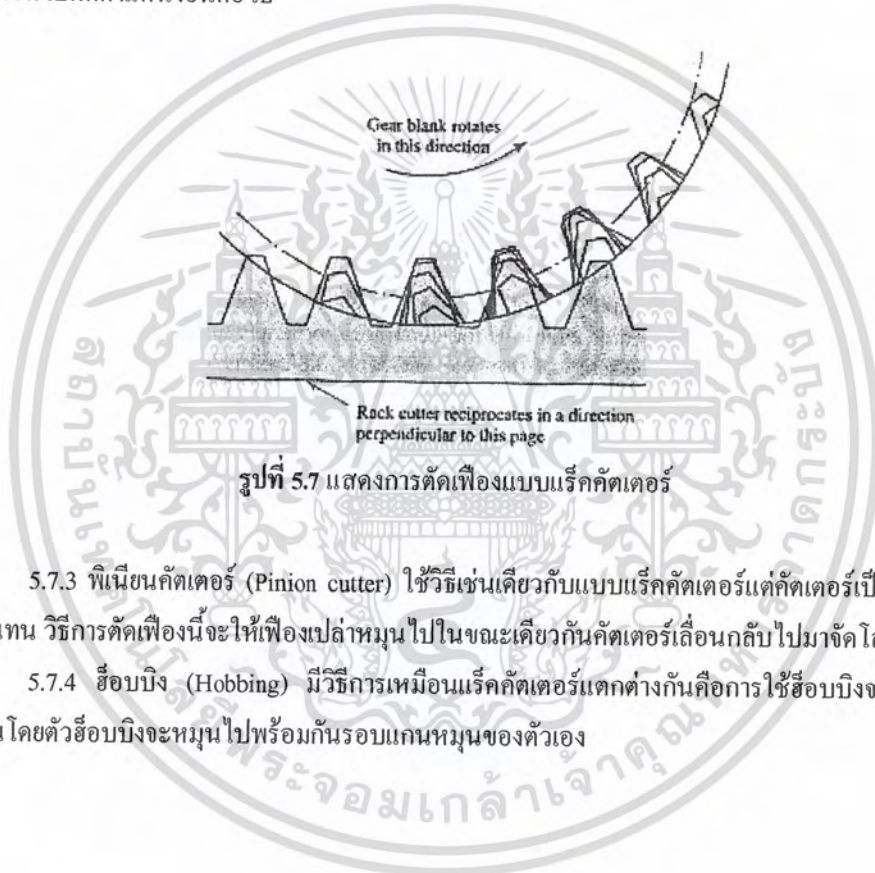
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7 วิธีการตัดเฟือง

การผลิตเฟืองนอกจากการหล่อขึ้นรูปแล้วยังมีวิธีการผลิตเฟืองโดยการตัดด้วยวิธีการต่าง ๆ กัน ดังนี้

5.7.1 มิลลิ่งคัตเตอร์ (Milling cutter) ซึ่งตัวตัดเฟืองเรียกว่า มิลลิ่งคัตเตอร์ มีรูปร่างตัดตามลักษณะช่องว่างระหว่างฟันเฟือง วิธีการคือการให้คัตเตอร์หมุนตัดโลหะ โดยคัตเตอร์จะอยู่กับที่และจะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่างานแบ่งเป็นตัวหมุนโลหะที่จะตัดเฟือง ซึ่งงานแบ่งสามารถปรับระยะในการหมุนให้สอดคล้องกับจำนวนฟันเฟือง

5.7.2 แร็คคัตเตอร์ (Rack cutter) โดยตัวตัดเฟืองนี้จะไม่มีความโค้งจะเป็นลักษณะเฟืองสะพาน โดยในการตัดจะเลื่อนไปมาเพื่อค่อยๆตัดเนื้อโลหะจนกระทั่งวงกลมพิทช์ของคัตเตอร์และเฟืองสัมผัสกันแล้วเลื่อนไปตัดตำแหน่งอื่นต่อไป



รูปที่ 5.7 แสดงการตัดเฟืองแบบแร็คคัตเตอร์

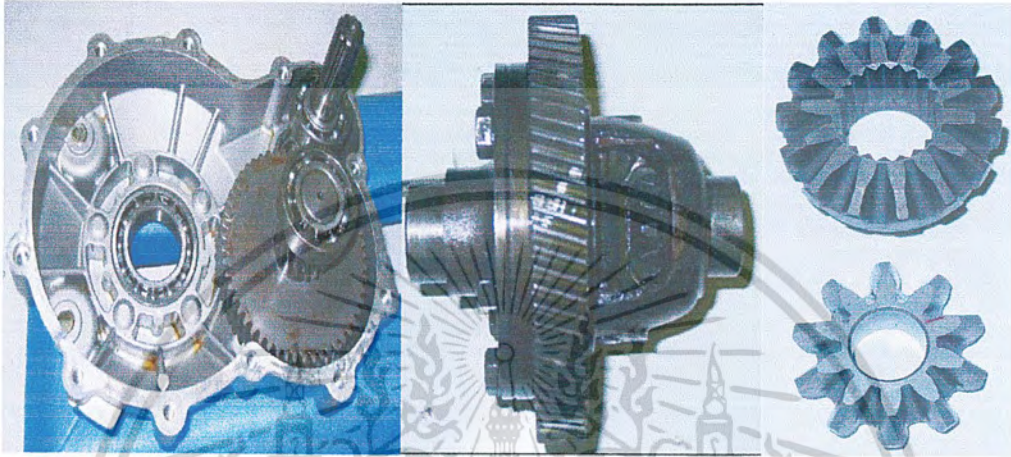
5.7.3 พิเนียนคัตเตอร์ (Pinion cutter) ใช้วิธีเช่นเดียวกับแบบแร็คคัตเตอร์แต่คัตเตอร์เป็นลักษณะเฟืองแทน วิธีการตัดเฟืองนี้จะให้เฟืองเปล่าหมุนไปในขณะเดียวกันคัตเตอร์เลื่อนกลับไปมาจัดโลหะ

5.7.4 ฮ็อบบิง (Hobbing) มีวิธีการเหมือนแร็คคัตเตอร์แตกต่างกันคือการใช้ฮ็อบบิงจะคล้ายตัวหนอน โดยตัวฮ็อบบิงจะหมุนไปพร้อมกันรอบแกนหมุนของตัวเอง

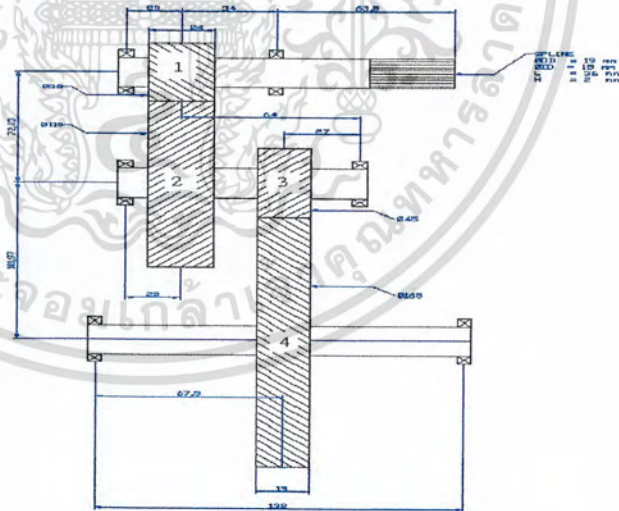
บทที่ 6

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

6.1 เฟือง (Gear)





รูปที่ 6.1 แสดงเฟืองที่ใช้สำหรับการทดลอง



รูปที่ 6.2 แสดงไดอะแกรมชุดเฟืองของระบบส่งถ่ายกำลังที่ใช้สำหรับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 แสดงข้อมูลของเฟืองที่ใช้สำหรับการทดลอง

รายละเอียด	โมดูล (mm)	ความ หนาของ เฟือง (mm)	จำนวน ฟันเฟือง	มุมกด นอมัล (Φ_n)	มุมซี ลิกซ์	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง พิตซ์ (mm)
เฟือง 1	2	24	17	14.45	16	38
เฟือง 2	2	24	53	14.45	16	110
เฟือง 3	2	24	20	14.45	16	45
เฟือง 4	2	24	79	14.45	16	165
 Bevel Gear	3.57		14	55	-	50
 Bevel Pinion	4		10	35	-	40

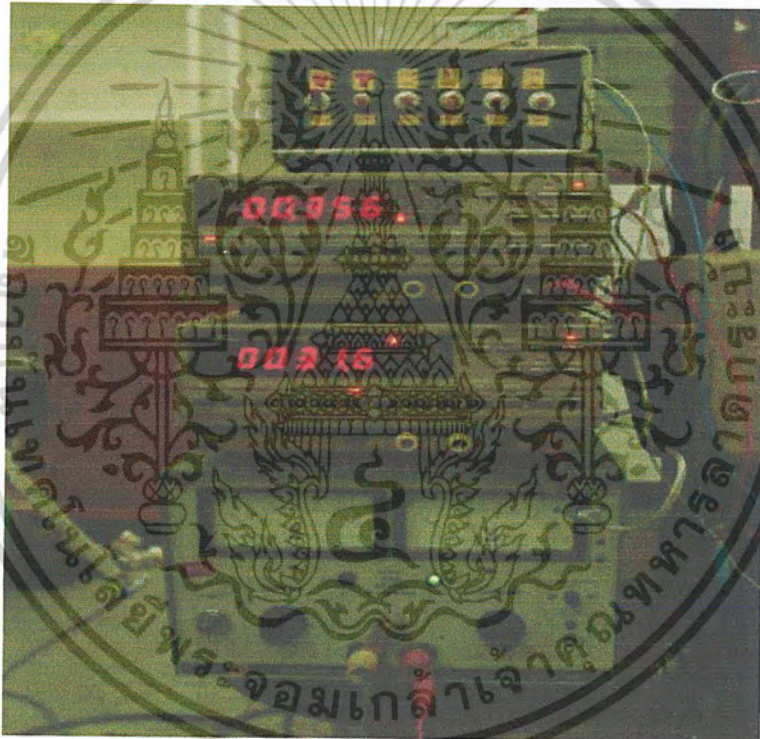
6.2 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับวัดอุณหภูมิจะประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิดนำมาเชื่อมปลายเข้าด้วยกัน ซึ่งจะเป็นจุดที่นำไปใช้วัดอุณหภูมิ (Hot Junction) และปลายอีกด้านเป็นปลายที่ใช้สำหรับอ้างอิง (Cold Junction) เมื่อจุดเชื่อมนี้ได้รับความร้อนก็จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของความร้อนขึ้นซึ่งขนาดและแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิแตกต่างที่ปลายทั้งสองและขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาเชื่อมต่อกัน ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 แสดงขั้วปรอทวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)

6.3 เครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า

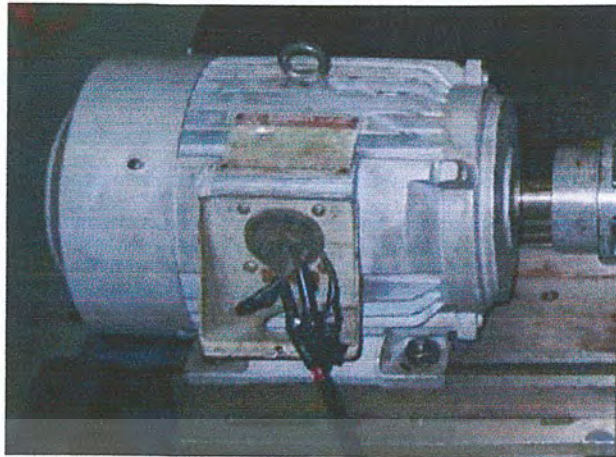


รูปที่ 6.4 แสดงเครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า

6.4 มอเตอร์ (Motor)

ใช้มอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า และความเร็วรอบที่ 1420 รอบต่อนาที เป็นตัวส่งกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 แสดงมอเตอร์ที่ใช้ส่งกำลัง

6.5 Strain gage



รูปที่ 6.6 แสดง Strain gage

6.6 น้ำมัน (Oil)

น้ำมันทดสอบที่นำมาศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นน้ำมัน SAE-90



รูปที่ 6.7 แสดงน้ำมันที่ใช้ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

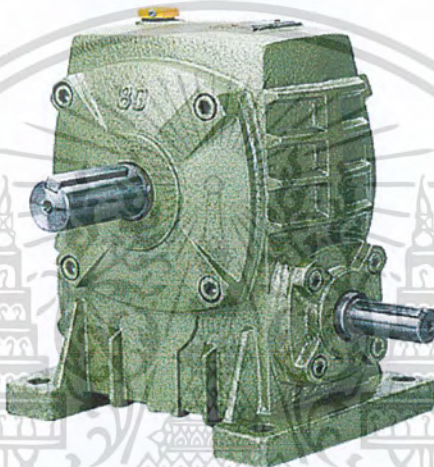
6.7 แปรรงถ่าน



รูปที่ 6.8 แสดงแปรรงถ่าน

6.8 อุปกรณ์ลดความเร็วรอบ (Worm Gear Reducer)

อุปกรณ์ลดความเร็วรอบของเพลาที่อัตราทด 1:60



รูปที่ 6.9 แสดง Worm Gear Reducer

6.9 อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของน้ำมัน



รูปที่ 6.10 แสดงอุปกรณ์ Rheology lab test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

7.1 วิธีทำการทดลอง

ทำการทดลองที่ชุดเฟืองท้ายของรถกอล์ฟที่ได้ยังไม่ได้ทำการปรับปรุงและชุดเฟืองท้ายของรถกอล์ฟที่ได้ทำการปรับปรุงแล้ว

1. ติดตั้งและปรับแต่งอุปกรณ์ให้มีความถูกต้องและเที่ยงตรง
2. เทียบค่าอุปกรณ์การวัดขนาดของทอร์คจากค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากสเตรนเกต (Strain gage) ที่อ่านจากมัลติมิเตอร์โดยจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับสเตรนเกตเท่ากับ 10 โวลต์ กับค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดขนาดทอร์ค (Pony brake)
3. ชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของเฟืองที่ใช้ในทดสอบ
4. ทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางรีโอโลยี (Rheology) ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่สถานะเริ่มต้นก่อนการทดลองโดยเครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน (Rotational Viscometer) ซึ่งทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (30 °C) และอุณหภูมิใช้งาน (75 °C) ตามลำดับ
5. เดินเครื่องทดลองชุดเฟืองท้ายของรถกอล์ฟที่ความเร็วรอบ 2840 rpm โดยปรับทอร์คที่คัมเบรกทั้งสองด้านให้ได้ทอร์ควมเท่ากับ 10 N.m โดยอ่านค่าเอาต์พุตของสเตรนเกต (Stain gage) จากมัลติมิเตอร์ (Multimeter)
6. ขณะเดินเครื่องทำการบันทึกอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นในห้องเกียร์ ทุกๆ 12,000 รอบ
7. เมื่อทำการเดินเครื่องถึง 1,500,000 รอบ จะตรวจสอบดังต่อไปนี้
 - 7.1 นำชุดเฟืองคิฟเฟอร์เรนเซียลไปตรวจสอบความสึกหรอ โดยการส่องดูผิวสัมผัสของฟันเฟืองกับกล้องจุลทรรศน์
 - 7.2 นำน้ำมันหล่อลื่นไปตรวจสอบคุณสมบัติทางรีโอโลยี (Rheology) ให้ห้องทดสอบโดยเครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน (Rotational Viscometer)
8. ทำการตรวจสอบดังข้อที่ 7 ทุกๆ 1,500,000 รอบ จนครบ 7,500,000 รอบ
9. เมื่อทำการทดลองจนครบ 7,500,000 แล้ว
 - 9.1 บันทึกค่าต่างๆที่ได้จากการทดลองแล้วนำไปพล็อตกราฟเพื่อแสดงผลเปรียบเทียบ
 - 9.2 ชั่งน้ำหนักของเฟืองที่ใช้ในทดสอบครบ 7,500,000 รอบ
10. ปรับระยะแบคเลสซ์ (Backlash) ของชุดเฟืองชุดเฟืองท้ายโดยการรองแหวนของชุดเกียร์
11. ทำการทดลอง ตามข้อที่ 3 จนถึง 9 อีกครั้ง
12. เปรียบเทียบผลการทดลองของชุดทดสอบที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุงกับชุดทดสอบที่ได้ทำการปรับปรุงแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.1 แสดงเงื่อนไขสำหรับการทดสอบ

ความเร็วรอบของมอเตอร์	1420 rpm
ความเร็วรอบของเพลาขับฟันเนียน	2840 rpm
น้ำมันหล่อลื่น	SAE90

ซึ่งการวิธีการทดลองจะสามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการวัด ขั้นตอนการทดลองทางรีโอโลยี และขั้นตอนการปรับแต่งชุดเฟืองท้ายของรถกอล์ฟ

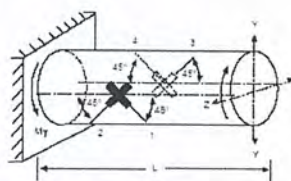
7.2 ขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

7.2.1 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดขนาดทอร์ก

อุปกรณ์สำหรับวัดขนาดทอร์กที่ใช้ในการทดลองในปริณยานิพนธ์นี้คือ Torque Full Torsion Bridge ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาจาก Strain Gage ในการสอบเทียบค่าอุปกรณ์ Torque Full Torsion Bridge เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า ทอร์ก (Torque) รวมทั้งเกิดขึ้นจากเพลาทังสองข้างของชุดเฟืองท้ายกับค่าแรงดันทางไฟฟ้าเอาต์พุตจาก Torque Full Torsion Bridge นี้ ได้ทำการติดตั้ง Torque Full Torsion Bridge เข้ากับเพลามอเตอร์แล้วต่อสายของติดตั้ง Torque Full Torsion Bridge เข้ากับ Power supply และ Multimeter เพื่ออ่านค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ดังในรูปที่ 7.1 และติดตั้งชุดอุปกรณ์วัดทอร์ก (Pony brake) เข้าที่ด้านปลายสุดของเพลามอเตอร์ จากนั้นทำการเพิ่มค่าทอร์กให้กับเพลามอเตอร์ได้โดยรัศที่คัมของ Pony brake แล้วจึงบันทึกค่าที่อ่านได้จาก Multimeter และน้ำหนักที่ตกลงบนตาชั่งของ Pony brake ซึ่ง สามารถนำไปคำนวณเพื่อหาทอร์กรวมของระบบ แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับค่าทอร์ก

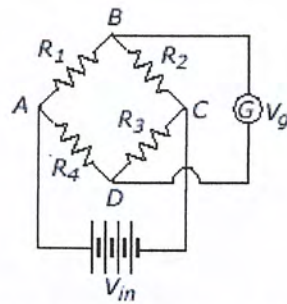
รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดความดันได้แสดงในรูปที่ 7.1 ซึ่งจะประกอบด้วย

- 7.2.1.1 Motor
- 7.2.1.2 Torque Full Torsion Bridge
- 7.2.1.3 Pony brake
- 7.2.1.4 Power supply
- 7.2.1.5 Multimeter

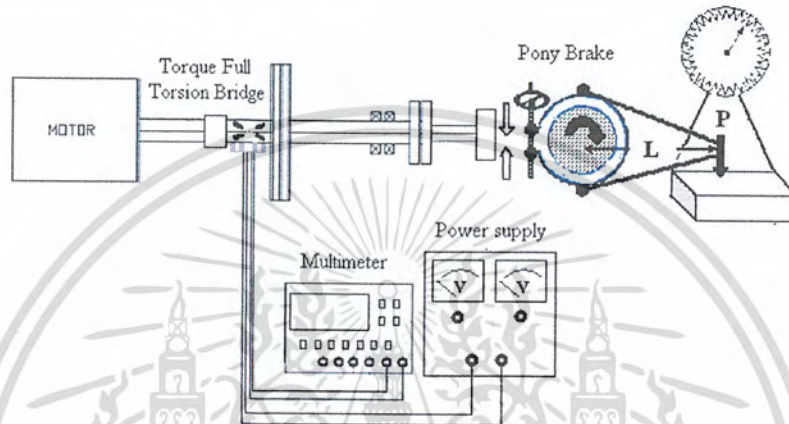


รูปที่ 7.1 แสดงการติดตั้ง Strain Gage ของ Torque Full Torsion Bridge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.2 แสดงวงจร Wheatstone Bridge Circuit



รูปที่ 7.3 แสดงผังโคดและแกรมของการติดตั้งชุดสอบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดทอร์ก

จากรูปที่ 7.1 สามารถคำนวณหาทอร์กที่เพลามอเตอร์ได้จาก

$$T = PL \quad (7.1)$$

สมการที่ (7.1) คือสมการหาค่าทอร์ก โดยที่ T ทอร์ก (Torque) รวมที่เกิดจากเพลาทิ้งสองข้างของชุดเฟืองท้าย, P คือน้ำหนักที่ตกลงบนตาชั่ง และ L คือระยะค้ำจากแกนเพลามอเตอร์ถึงแกนที่ตกลงบนตาชั่ง เมื่อได้ค่าดิบของ แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทและทอร์กที่วัดได้จาก Pony Brake แล้วจะนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ ระหว่าง แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท ($V(x)$) จาก Torque Full Torsion Bridge และ ทอร์ก (T) ได้ด้วยวิธี "การถดถอยแบบเชิงเส้น" (Linear regression) ดังนี้

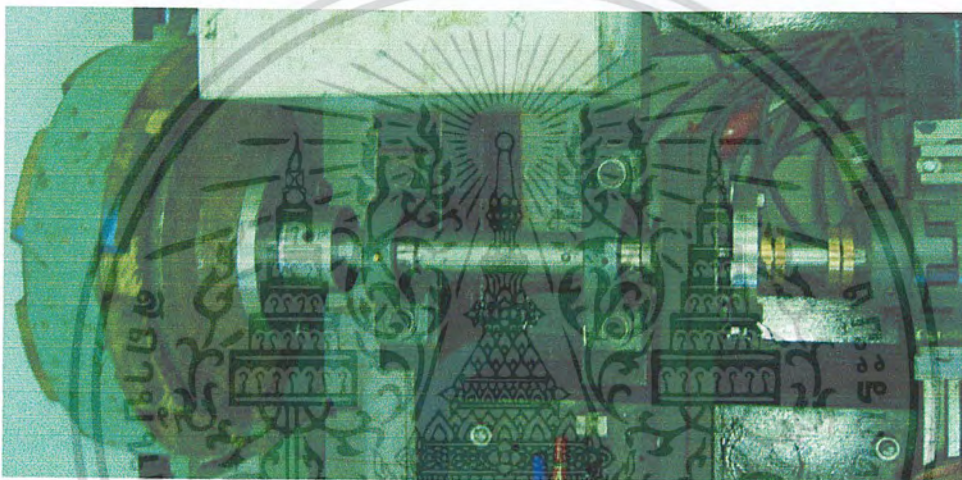
$$V(x) = a_0 + a_1 T \quad (7.2)$$

โดยที่ a_0 และ a_1 หาได้จาก

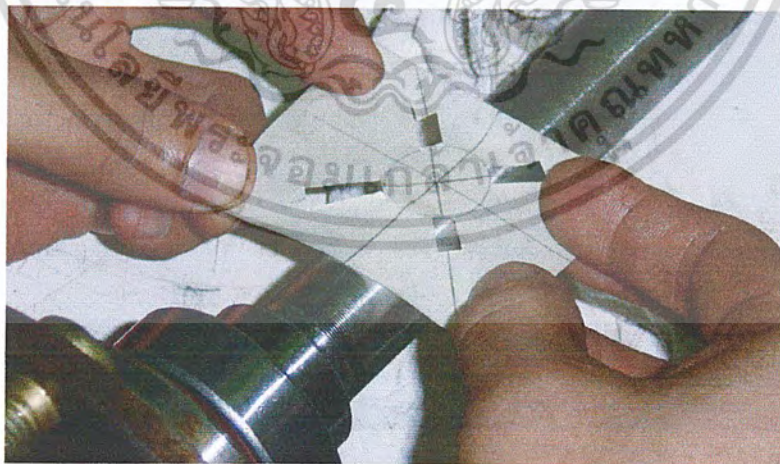
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_0 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)\left(\sum x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i\right)\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)}{n\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \quad (7.3)$$

$$a_1 = \frac{n\left(\sum_{i=1}^n x_i y_i\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)}{n\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \quad (7.4)$$



รูปที่ 7.4 แสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์วัดทอร์ก (Pony Brake)



รูปที่ 7.5 แสดงการติด Strain Gage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2.2 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่น

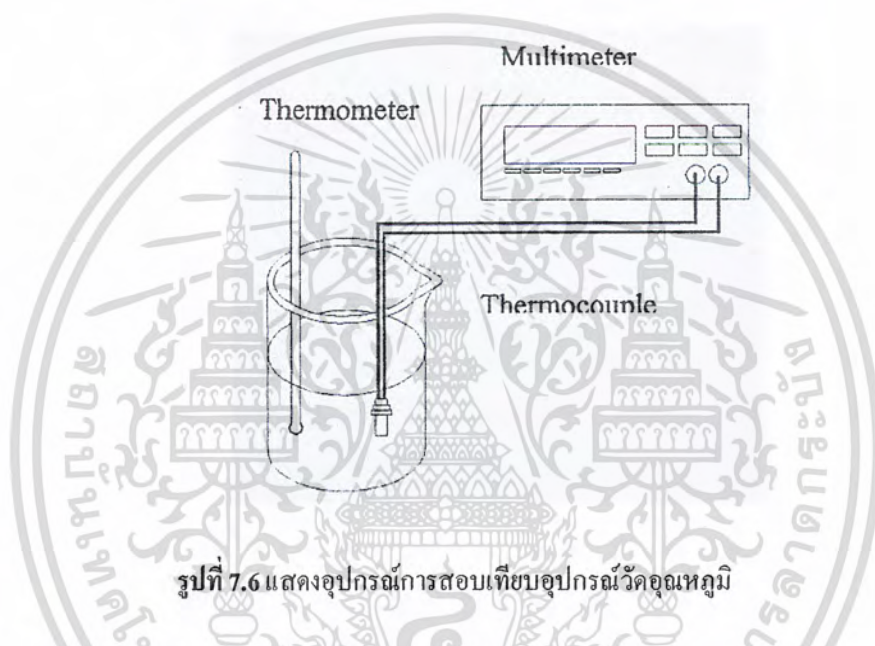
เครื่องมือสำหรับวัดอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นให้ห้องเกียร์ ในการทดสอบค่าอุปกรณ์ Thermocouple จะทำการทดสอบเทียบที่อุณหภูมิต่างๆ กับ Thermometer โดยบันทึกค่าที่อ่านได้จากเครื่อง Voltmeter ดังแสดงในรูปที่ 7.6

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิของน้ำมันให้ห้องเกียร์ได้ แสดงในรูปที่ 7.6 ประกอบด้วย

7.2.2.1 Thermometer

7.2.2.2 Thermocouple

7.2.2.3 Multimeter



รูปที่ 7.6 แสดงอุปกรณ์การสอบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

7.3 ขั้นตอนการทดลองทางรีโอโลยี (Rheology Lab Test)

การทดลองทางรีโอโลยีเพื่อหาเส้นกราฟแสดงการไหล (Flow Curve) หรือเป็นการหาความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress) และค่าอัตราเฉือน (Shear Rate) ของน้ำมันทดสอบ โดยทดสอบน้ำมันที่ใช้ผ่านการ ใช้เมื่อครบรอบการทำงานในช่วงการทำงานดังนี้

น้ำมัน SAE90 ที่ผ่านการใช้งานครบ 1,500,000 รอบ ของทั้งสองชุดทดสอบ

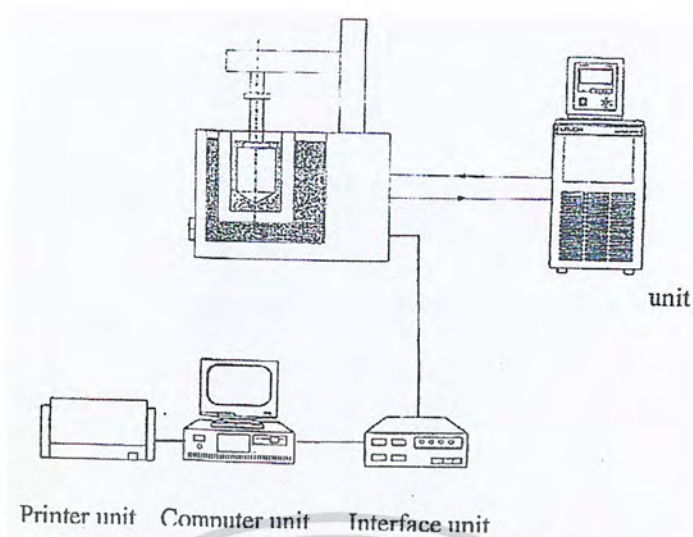
น้ำมัน SAE90 ที่ผ่านการใช้งานครบ 3,000,000 รอบ ของทั้งสองชุดทดสอบ

น้ำมัน SAE90 ที่ผ่านการใช้งานครบ 4,500,000 รอบ ของทั้งสองชุดทดสอบ

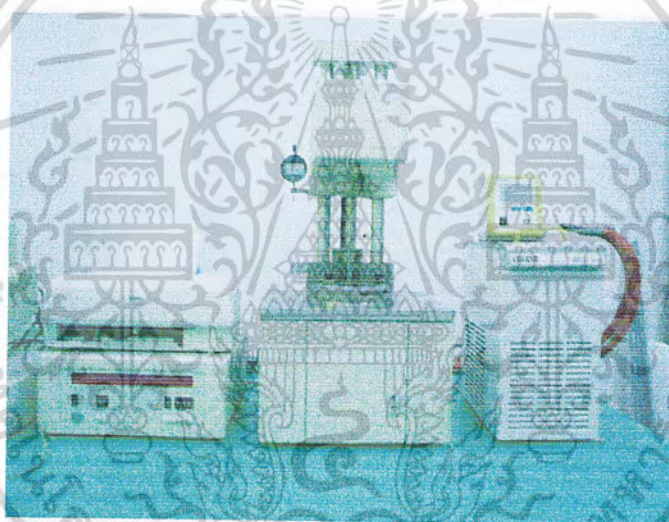
น้ำมัน SAE90 ที่ผ่านการใช้งานครบ 6,000,000 รอบ ของทั้งสองชุดทดสอบ

น้ำมัน SAE90 ที่ผ่านการใช้งานครบ 7,500,000 รอบ ของทั้งสองชุดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Printer unit Computer unit Interface unit
รูปที่ 7.7 แสดงผัง ไตอะแกรมของอุปกรณ์ Rheology lab test

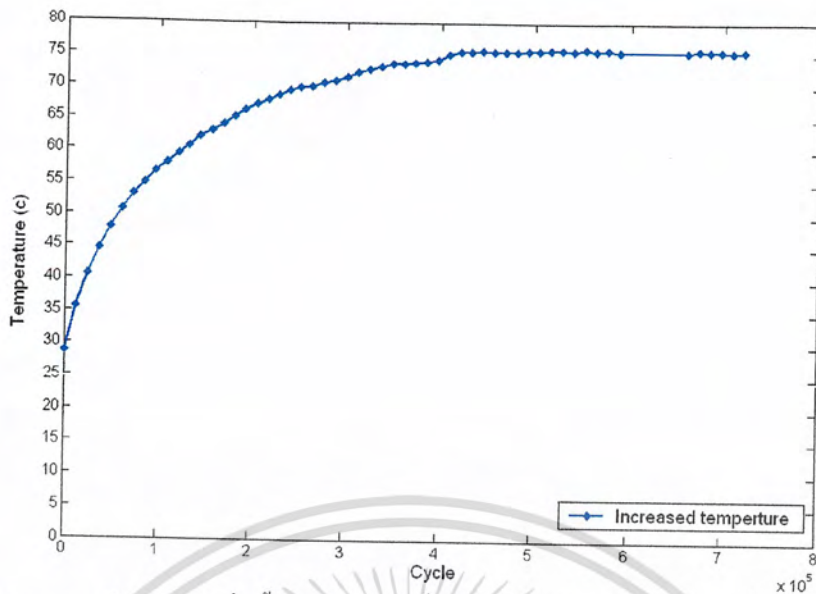


รูปที่ 7.8 แสดงอุปกรณ์ Rheology lab test

7.4 ผลการทดลอง

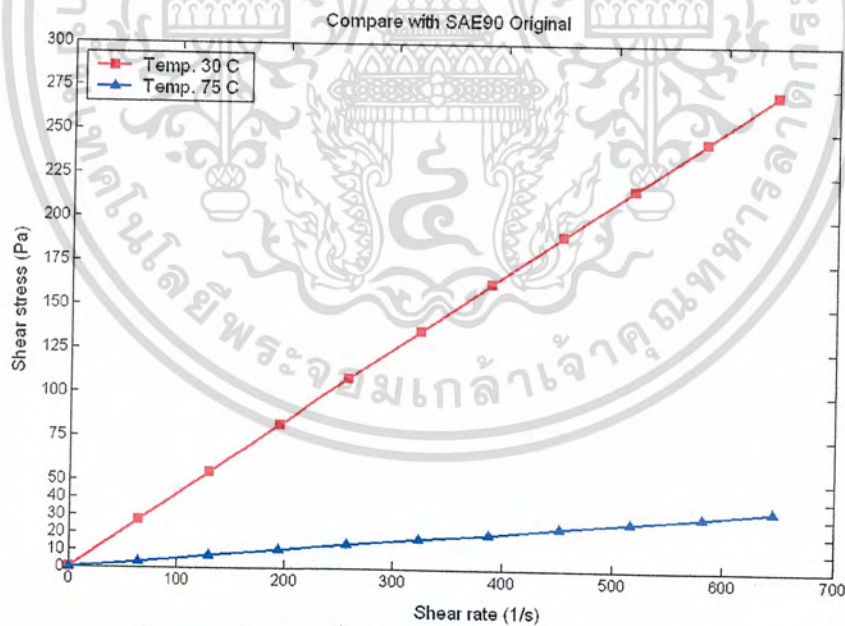
ในการทดลองนี้จะทำการทดลองชุดอุปกรณ์ของเฟืองท้ายที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุงและชุดที่ทำการปรับปรุงแล้ว โดยใช้ น้ำมันหล่อลื่น SAE90 เป็นสารหล่อลื่น ซึ่งทำการทดลองชุดการทดลองทั้งสองเป็นช่วงๆการทำงาน ช่วงละ 1,500,000 รอบ แล้วนำเฟืองและน้ำมันหล่อลื่นไปทำการทดสอบหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ณ รอบต่างๆ ซึ่งลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของน้ำมัน ได้สร้างเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบลักษณะการไหลของ และพฤติกรรมความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นที่เปลี่ยนแปลงของชุดทดสอบที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุงและที่ได้ทำการปรับปรุงแล้ว เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ถึงอัตราการสึกหรอของชุดทดสอบทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



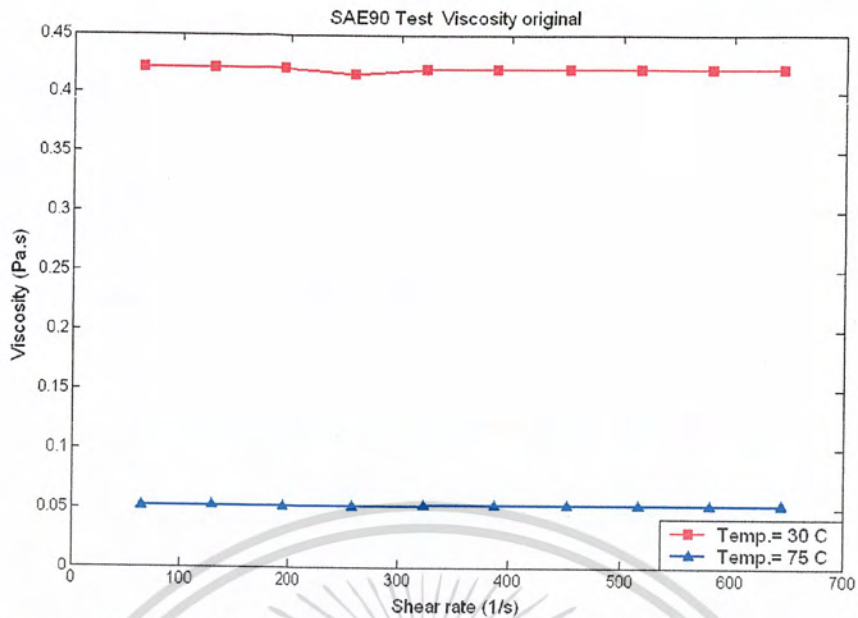
รูปที่ 7.9 แสดงผลพฤติกรรมกรเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ขณะเดินเครื่องใช้งานอย่างต่อเนื่อง

7.4.1 กราฟแสดงพฤติกรรมกรไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 และกราฟแสดงพฤติกรรมความหนืดกับอัตราการความเร็วเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่สถานะต่างๆ



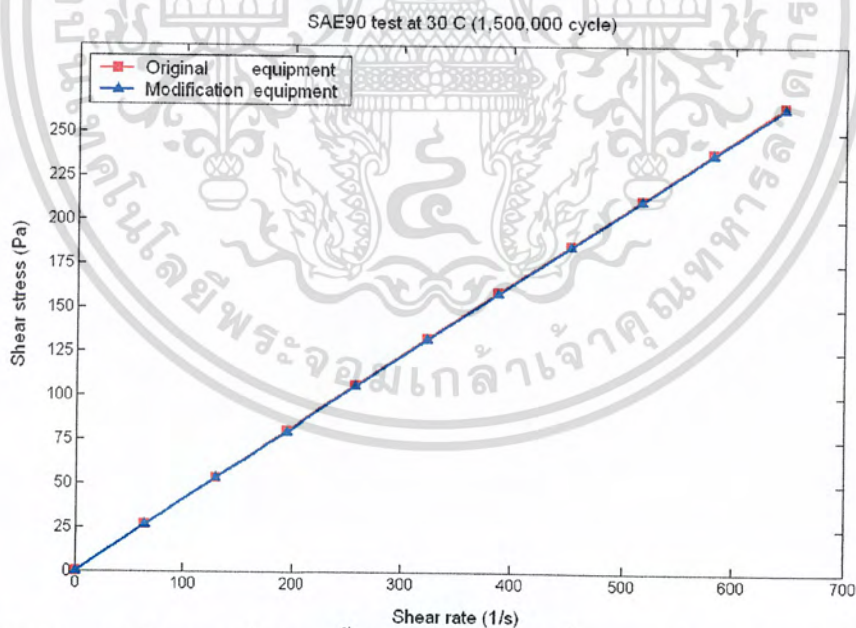
รูปที่ 7.10 แสดงผลพฤติกรรมกรไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่สถานะยังไม่ได้ใช้งาน เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำมันระหว่างอุณหภูมิห้อง = 30 °C และที่อุณหภูมิใช้งาน = 75°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



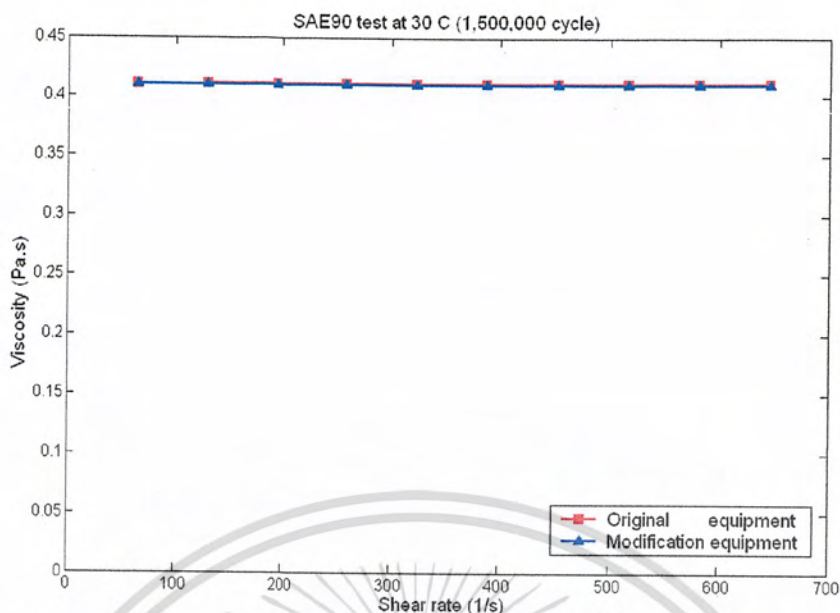
รูปที่ 7.11 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่สภาวะยังไม่ได้ใช้งาน เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำมันระหว่างอุณหภูมิห้อง = 30 °C และที่อุณหภูมิใช้งาน = 75°C

ในรูปที่ 7.10 และ 7.11 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นระหว่างการใช้งานมีผลต่อค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น โดยความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น เป็นสัดส่วนผกผันกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

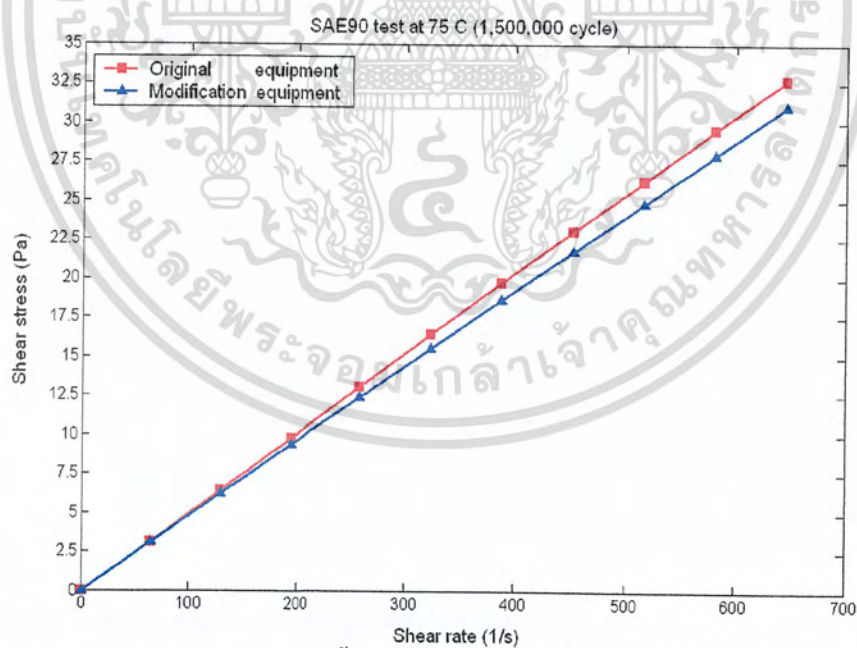


รูปที่ 7.12 แสดงผลพฤติกรรมการไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 1.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

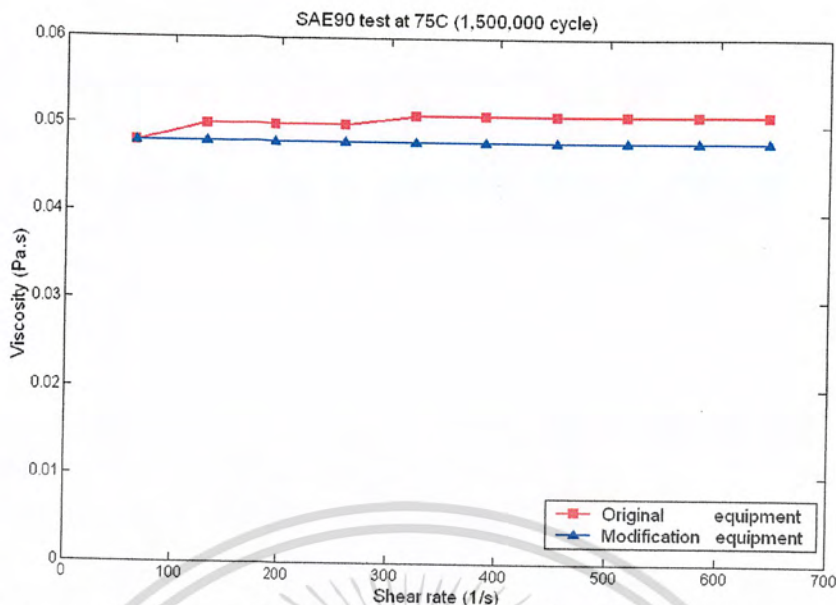


รูปที่ 7.13 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเร็วเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 1.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C

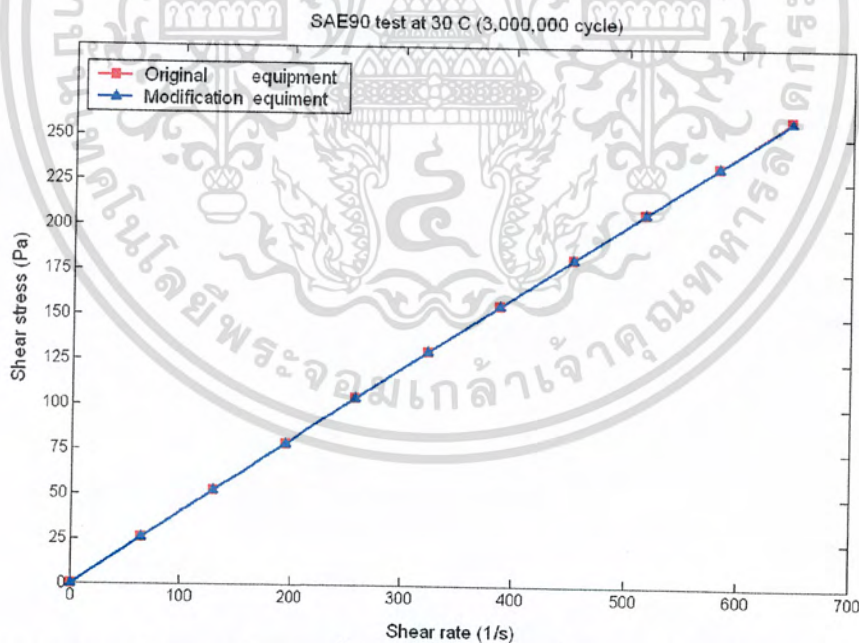


รูปที่ 7.14 แสดงผลพฤติกรรมการไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 1.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิการใช้งาน = 75 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

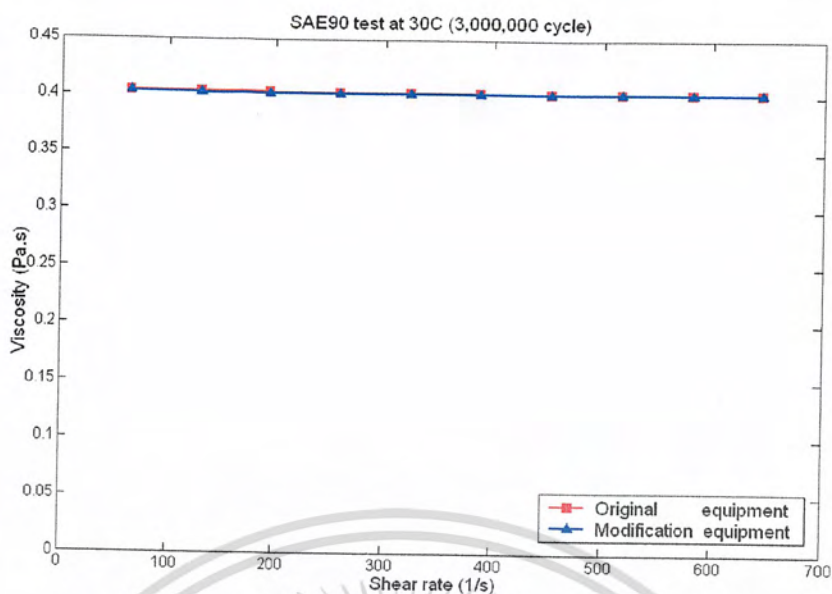


รูปที่ 7.15 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเร็วเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 1.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิใช้งาน = 75 °C

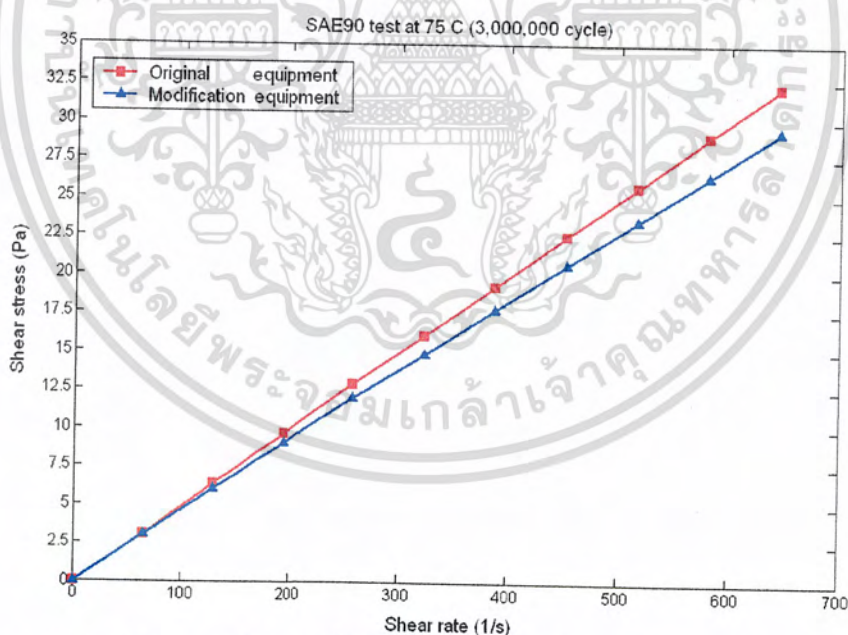


รูปที่ 7.16 แสดงผลพฤติกรรมการไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 3 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

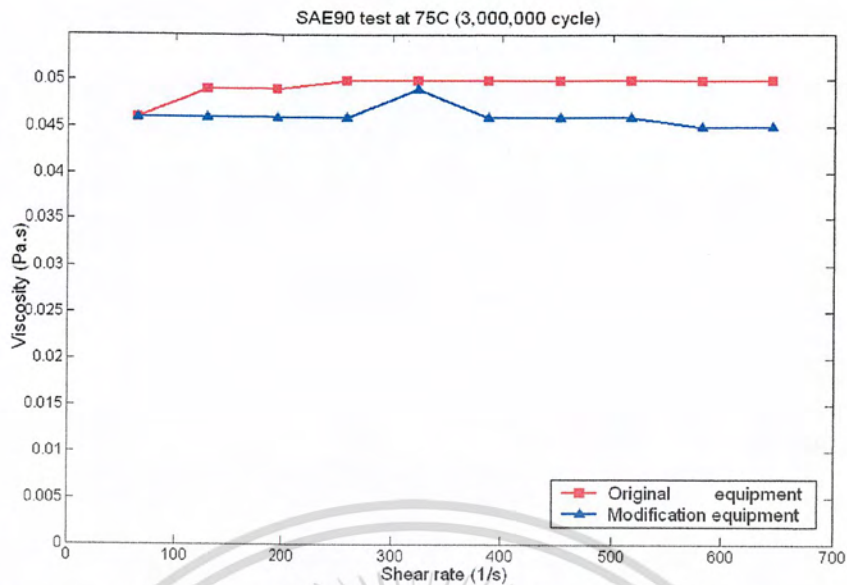


รูปที่ 7.17 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 3 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C

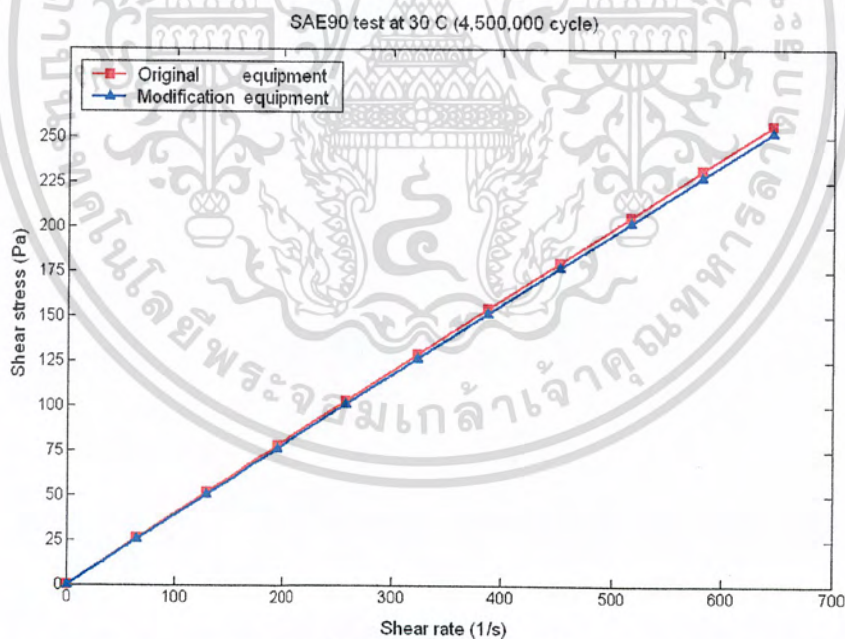


รูปที่ 7.18 แสดงผลพฤติกรรมการไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 3 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิการใช้งาน = 75 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

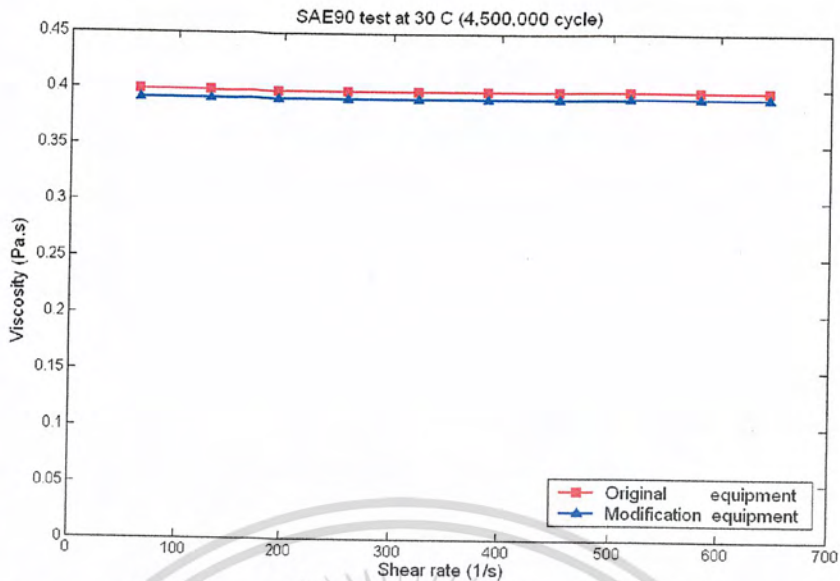


รูปที่ 7.19 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 3 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิใช้งาน = 75 °C

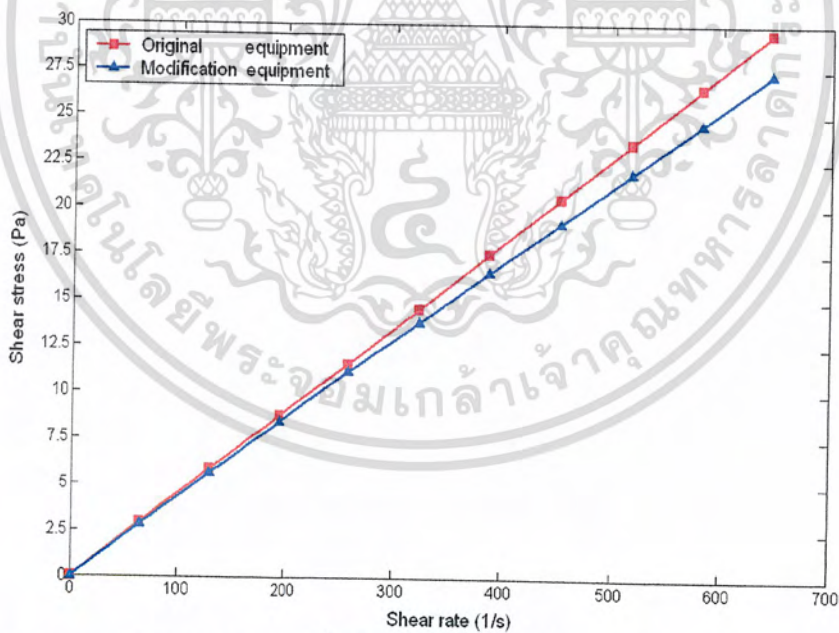


รูปที่ 7.20 แสดงผลพฤติกรรมการไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 4.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

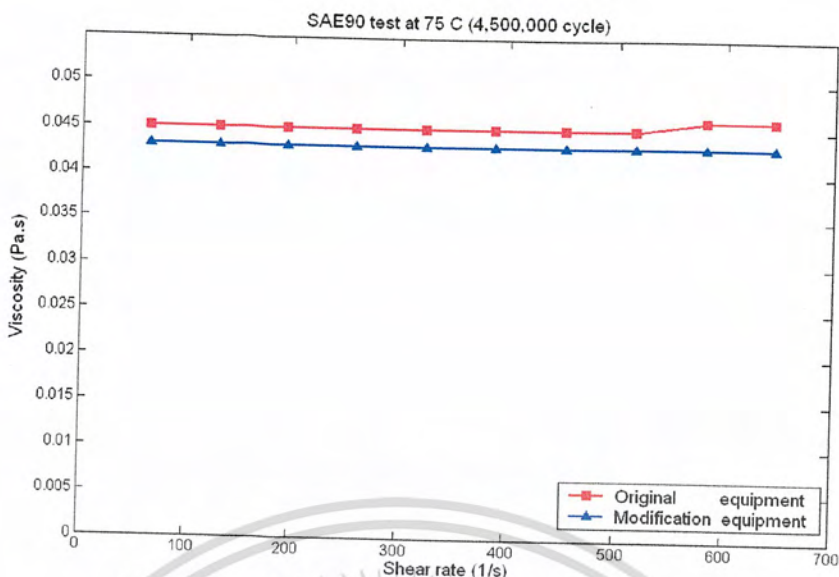


รูปที่ 7.21 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเค้นเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 4.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C

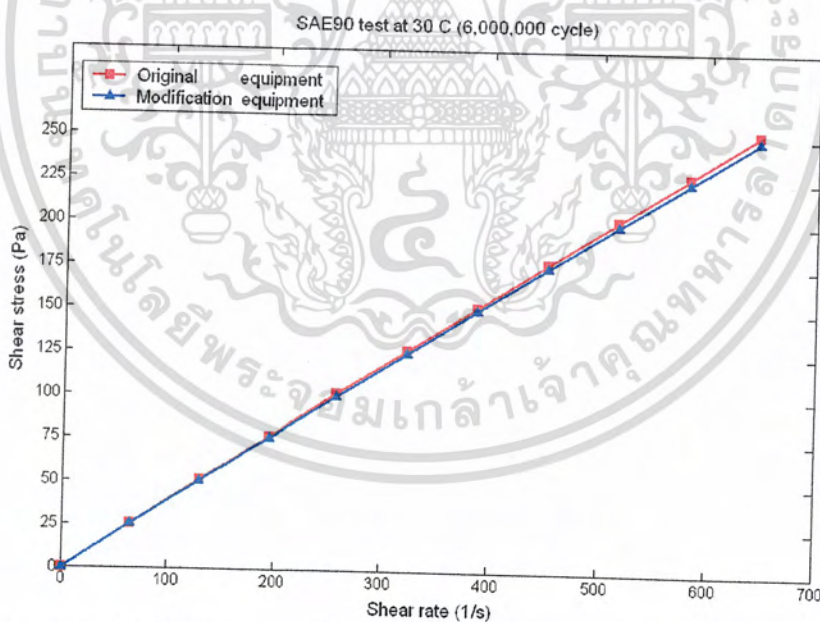


รูปที่ 7.22 แสดงผลพฤติกรรมการไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 4.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิการใช้งาน = 75 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

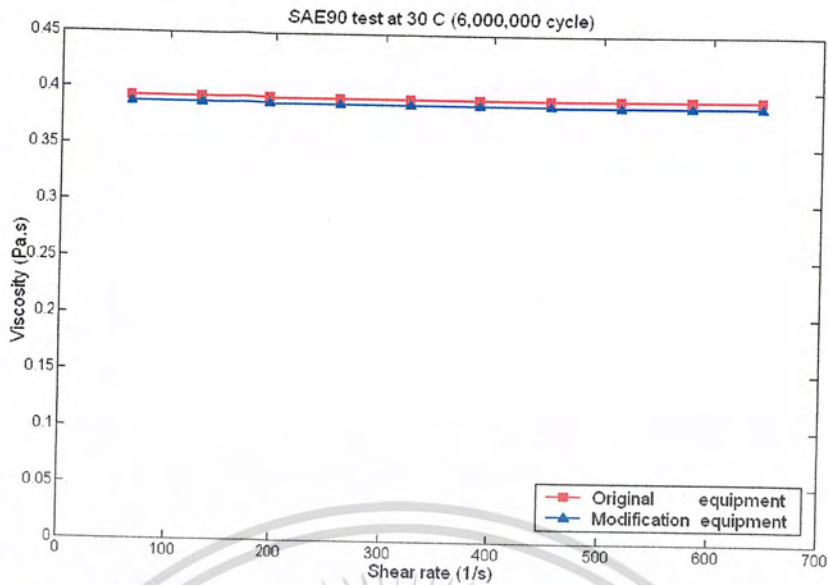


รูปที่ 7.23 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 4.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิใช้งาน = 75 °C

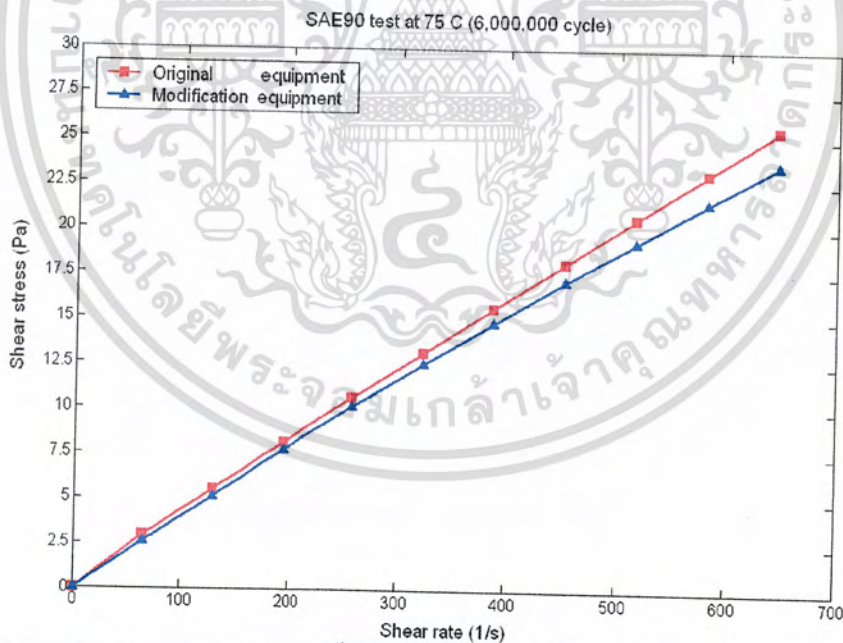


รูปที่ 7.24 แสดงผลพฤติกรรมการไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 6 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

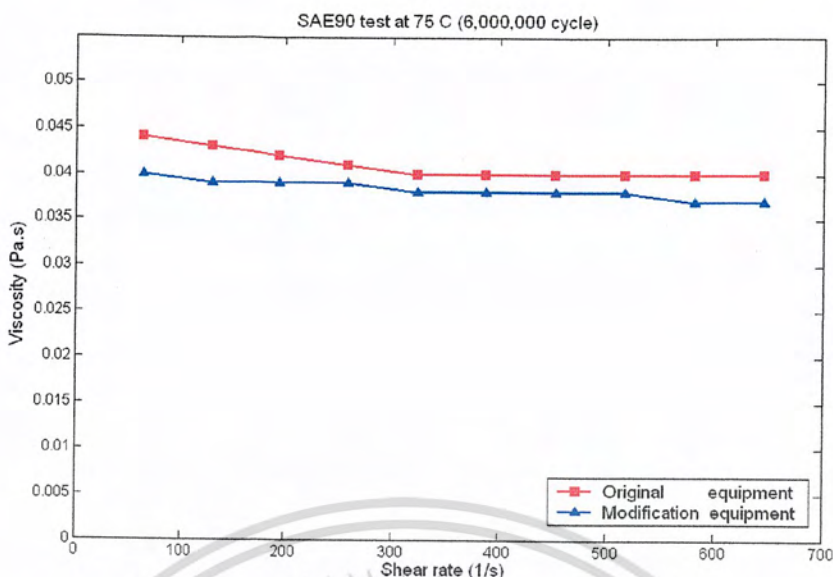


รูปที่ 7.25 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 6 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C

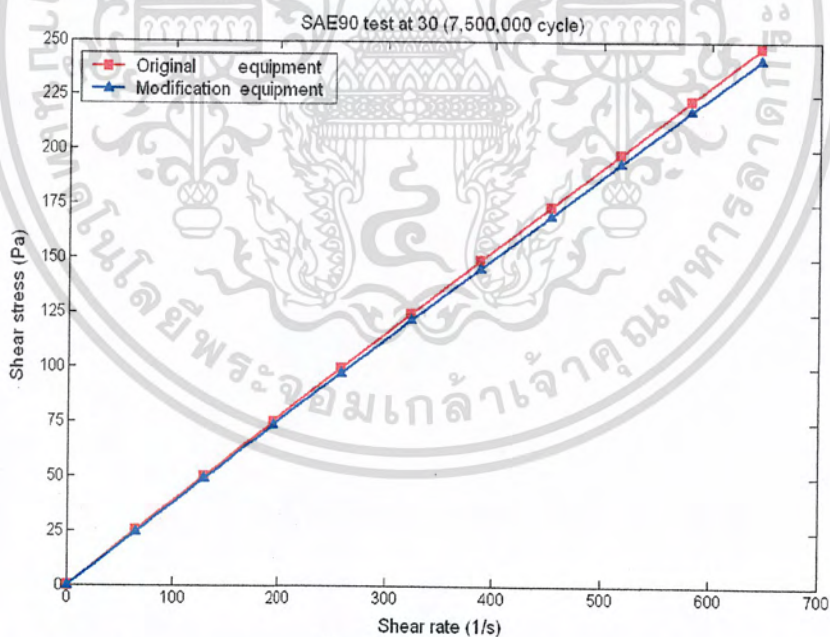


รูปที่ 7.26 แสดงผลพฤติกรรมการไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 6 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิการใช้งาน = 75 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

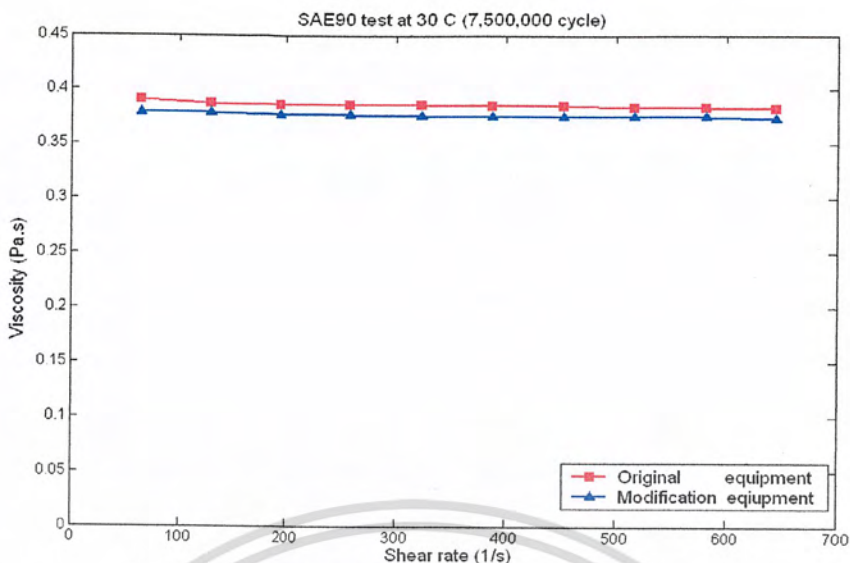


รูปที่ 7.27 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 6 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิใช้งาน = 75 °C

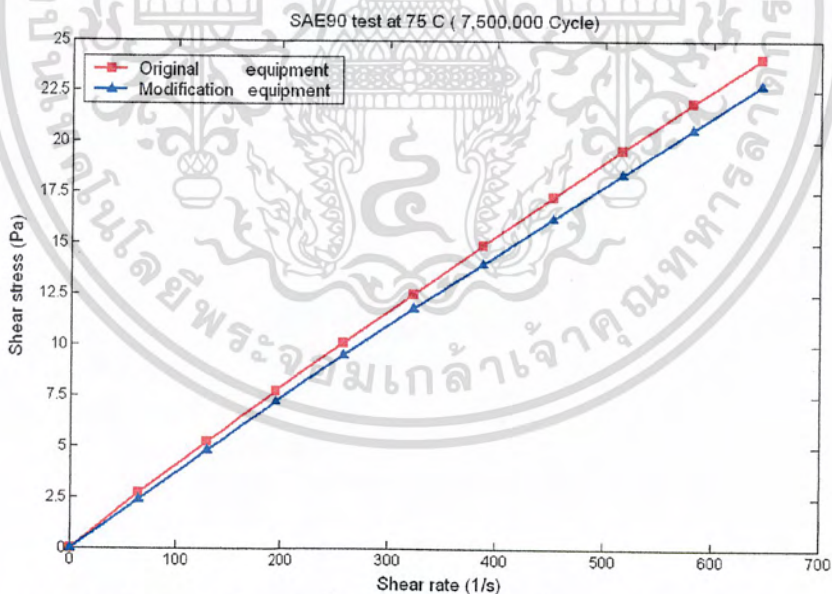


รูปที่ 7.28 แสดงผลพฤติกรรมการไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 7.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

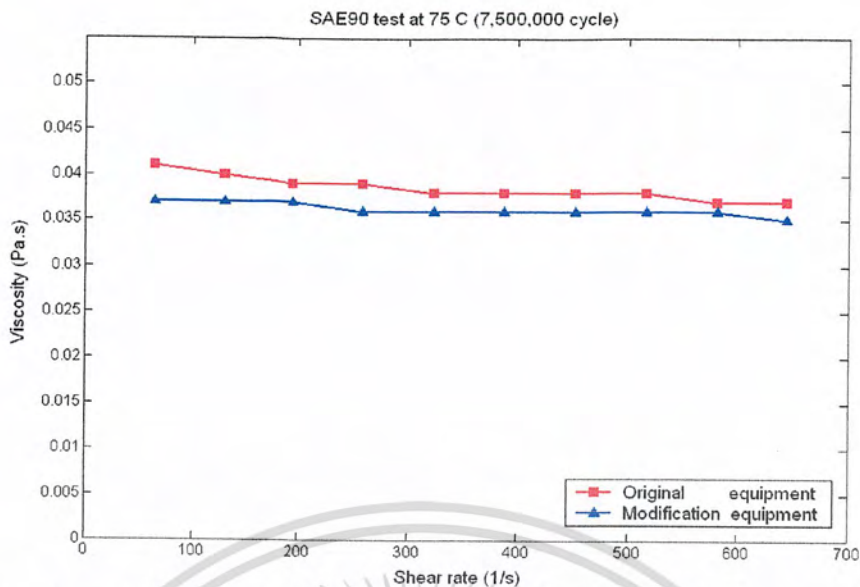


รูปที่ 7.29 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 7.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิห้อง = 30 °C



รูปที่ 7.30 แสดงผลพฤติกรรมการไหลของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 7.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิการใช้งาน = 75 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.31 แสดงผลพฤติกรรมความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่รอบการใช้งานเท่ากับ 7.5 ล้านรอบ ณ อุณหภูมิใช้งาน = 75 °C

ในรูปที่ 7.12 - 7.31 แสดงให้เห็นว่าค่าพฤติกรรมความหนืดของสารหล่อลื่นที่ใช้ในอุปกรณ์ชุดทดสอบ เพื่อท้ายที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุง มีค่ามากกว่าชุดทดสอบที่ได้ทำการปรับปรุงแล้ว โดยจะสังเกตจากค่าความชันของกราฟ ความเครียดเฉือน (Shear Stress) และอัตราความเครียดเฉือน (Shear rate) ซึ่งเส้นกราฟที่มีความชันมากก็จะแสดงว่ามีความหนืดสมบูรณ์ (Absolute Viscosity) มากด้วยเช่นกัน หรือจะสังเกตจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนืดและอัตราความเครียดเฉือน ก็จะได้ว่าเส้นกราฟของอุปกรณ์ชุดทดสอบที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุงจะมีค่าสูงกว่าชุดอุปกรณ์ที่ทำการปรับปรุงแล้ว โดยความแตกต่างของความหนืดน้ำมันหล่อลื่น SAE90 จะเห็น ได้ชัดเจนที่อุณหภูมิใช้งาน = 75 °C

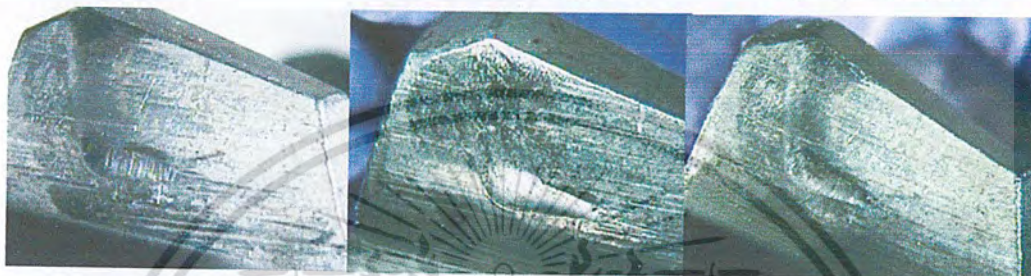
7.4.2 รอยแผลที่เกิดขึ้นที่ผิวฟันเฟืองที่สภาวะต่างๆ



Original

1.5 Million cycle

3.0 Million cycle



4.5 Million cycle

6.0 Million cycle

7.5 Million cycle

BPIL-Orig

รูปที่ 7.32 แสดงรอยแผลที่เกิดขึ้นที่ผิวฟันเฟืองด้านซ้ายของ Bevel Pinion ของชุดทดสอบที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุง



Original

1.5 Million cycle

3.0 Million cycle



4.5 Million cycle

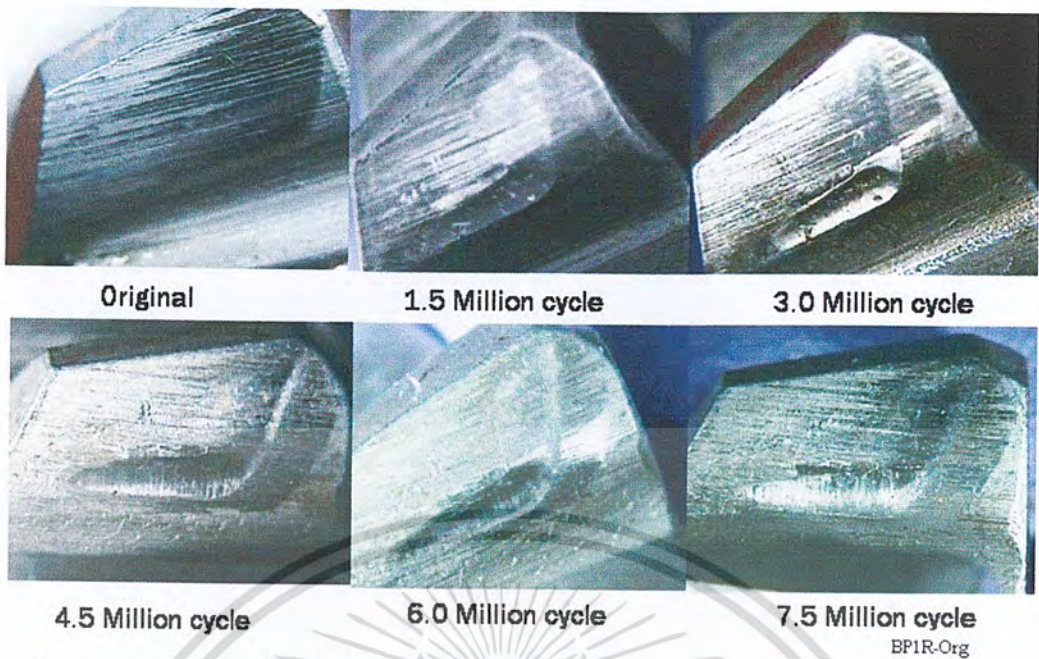
6.0 Million cycle

7.5 Million cycle

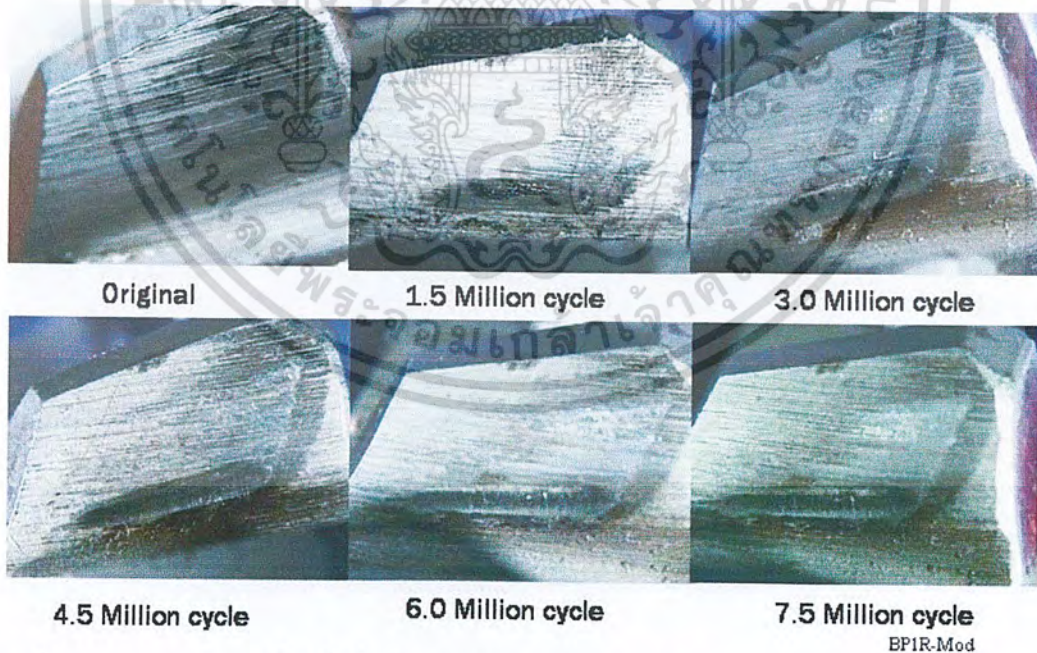
BPIL-Mod

รูปที่ 7.33 แสดงรอยแผลที่เกิดขึ้นที่ผิวฟันเฟืองด้านซ้ายของ Bevel Pinion ของชุดทดสอบที่ได้ทำการปรับปรุงแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.34 แสดงรอยแผลที่เกิดขึ้นที่ผิวฟันเฟืองด้านขวาของ Bevel Pinion ของชุดทดสอบที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุง



รูปที่ 7.35 แสดงรอยแผลที่เกิดขึ้นที่ผิวฟันเฟืองด้านขวาของ Bevel Pinion ของชุดทดสอบที่ได้ทำการปรับปรุงแล้ว

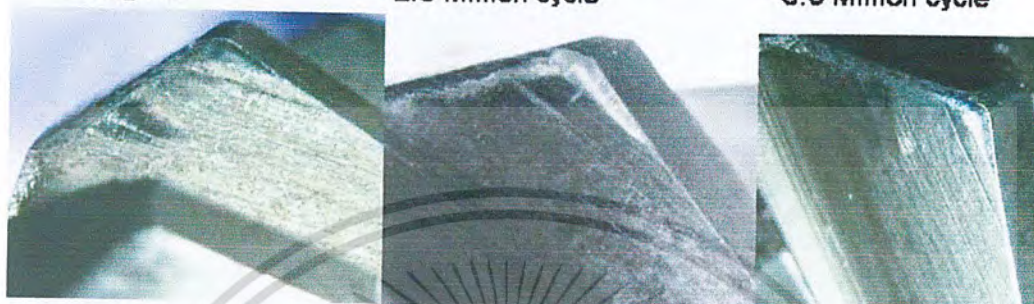
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Original

1.5 Million cycle

3.0 Million cycle

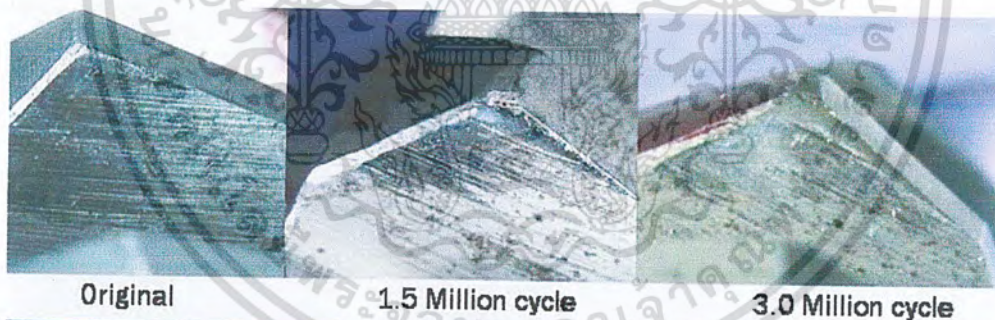


4.5 Million cycle

6.0 Million cycle

7.5 Million cycle

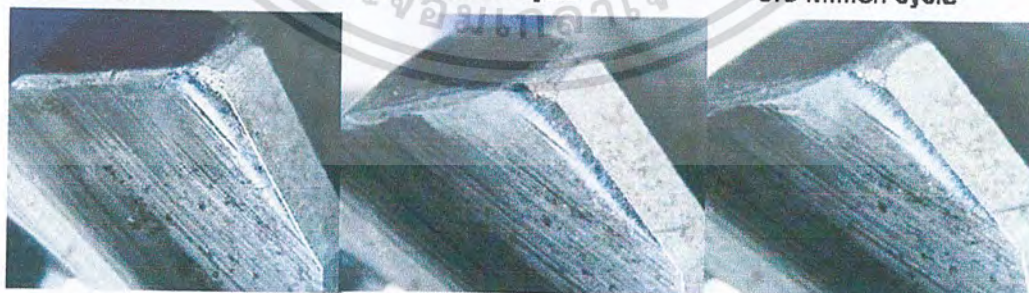
รูปที่ 7.36 แสดงรอยแผลที่เกิดขึ้นที่ผิวฟันเฟืองคี่ นซ. เบของ Bevel Gear ของชุดทดสอบที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุง



Original

1.5 Million cycle

3.0 Million cycle



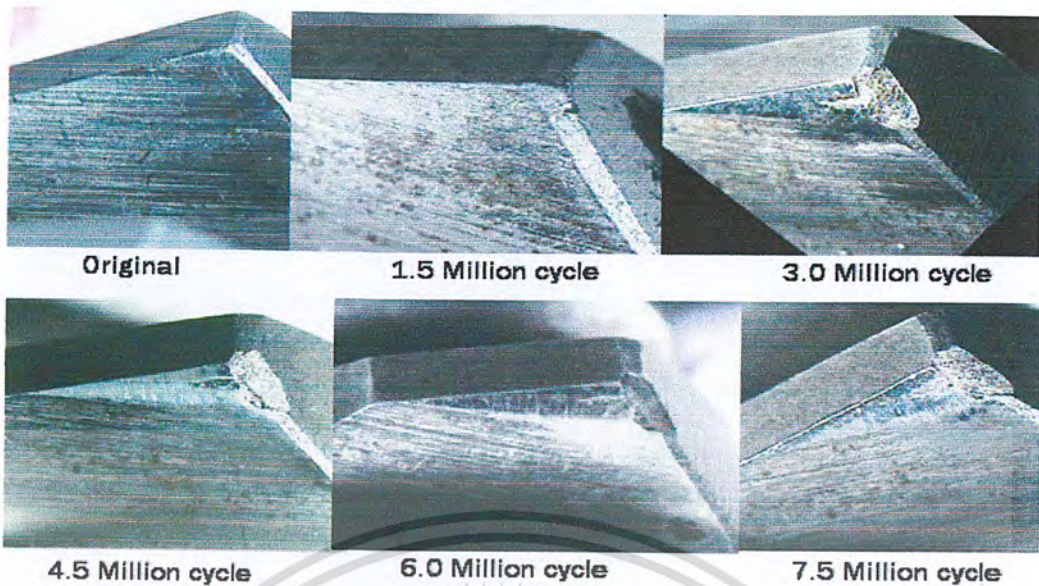
4.5 Million cycle

6.0 Million cycle

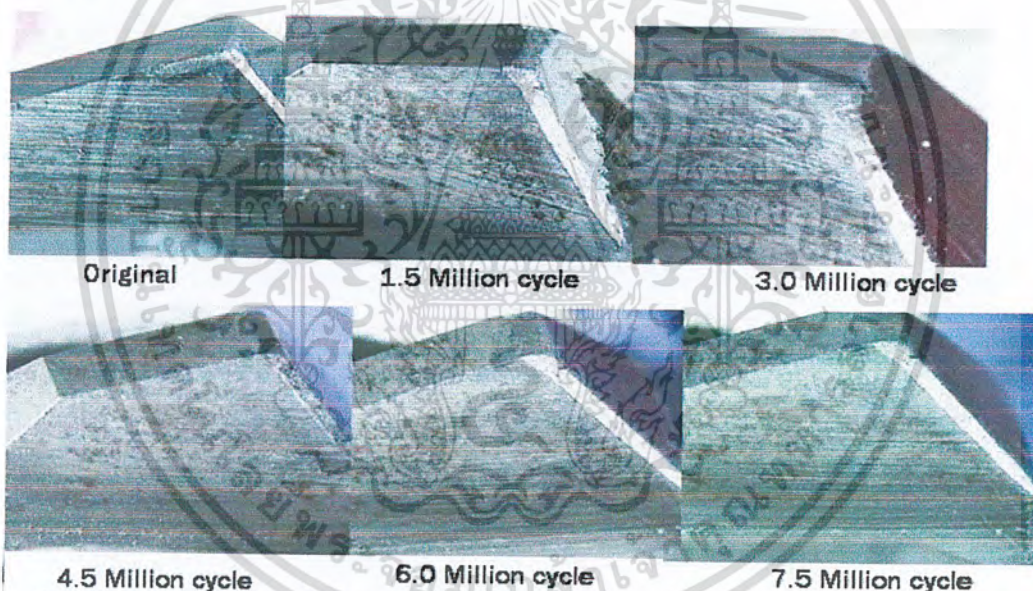
7.5 Million cycle

รูปที่ 7.37 แสดงรอยแผลที่เกิดขึ้นที่ผิวฟันเฟืองด้านซ้ายของ Bevel Gear ของชุดทดสอบที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.38 แสดงรอยแผลที่เกิดขึ้นที่ผิวฟันเฟืองด้านขวาของ Bevel Gear ของชุดทดสอบที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุง



รูปที่ 7.39 แสดงรอยแผลที่เกิดขึ้นที่ผิวฟันเฟืองด้านขวาของ Bevel Gear ของชุดทดสอบที่ได้ทำการปรับปรุงแล้ว

จากรูปที่ 7.32 ถึง 7.39 แสดงให้เห็นว่ารอยแผลที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของฟันเฟืองจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการใช้งาน โดยที่เฟืองชุดที่ยังไม่ได้ปรับปรุงรอยแผลที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่กว่าเฟืองชุดที่ได้ทำการปรับปรุงแล้ว ซึ่งรอยแผลที่เกิดขึ้นจะสอดคล้องกับกราฟดังรูปที่ 7.12 ถึง 7.31 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจากการปรับปรุงชุดเฟืองทำให้มีการทำงานที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 บทสรุป

ในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสึกห่อของระบบส่งถ่ายกำลังของชุดเพื่อง่ายของรถกอล์ฟ โดยศึกษาเฉพาะที่ส่วนของคิฟเฟอร์เรนเซียลเกียร์ซึ่งจะตั้งเกิดการสึกหรอที่จุดจุดเคียวบนพื้นเพื่อง่ายที่ทุกทุกช่วงการใช้งานที่เพิ่มขึ้น และได้นำน้ำมันหล่อลื่นไปทดสอบทางรีโอ โลยีที่ทุกช่วงการใช้งานด้วยเช่นกัน เพื่อที่จะนำผลที่ได้จากการทดลองจากชุดทดสอบทั้งสองมาเปรียบเทียบค่ารอยแผลที่เกิดขึ้น และค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งในการทดลองของชุดทดสอบทั้งสองจะกำหนดให้อยู่ในที่มียอร์ก, ความเร็วรอบและอุณหภูมิของน้ำมันในห้องเกียร์เป็นค่าเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบการพฤติกรรมการสึกหรอ และพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นจากเครื่องทดสอบทั้งสองชุด สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ที่ภายใต้ทอร์ก , ความเร็วรอบและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นให้ห้องเกียร์คงที่พบว่ารอยแผลที่เกิดขึ้นบนพื้นเพื่อง่ายของชุดทดสอบที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุงมีรอยแผลที่ใหญ่กว่ารอยแผลที่เกิดขึ้นจากพื้นเพื่อง่ายจากเครื่องทดสอบที่ได้ทำการปรับปรุงแล้ว
2. ที่ภายใต้ทอร์ก , ความเร็วรอบ และอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นให้ห้องเกียร์คงที่พบว่าค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่นำมาทดสอบหลังการใช้งานที่ช่วงรอบการทำงานต่างๆ ค่าความหนืดของชุดทดสอบที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุงจะมีค่ามากกว่า ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในเครื่องทดสอบที่ได้ทำการปรับปรุงแล้ว อันเนื่องมาจากปริมาณผงโลหะที่เกิดขึ้นในน้ำมันหล่อลื่นจากชุดทดลองที่ยังไม่ได้มีการปรับปรุงมีจำนวนมากกว่าผงโลหะในน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องทดสอบที่ได้ทำการปรับปรุงแล้ว
3. ความหนืดของน้ำมัน SAE90 ลดลงตามจำนวนระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มขึ้น
4. ความเสียหายของพื้นเพื่อง่ายจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มขึ้น
5. ปริมาณผงโลหะ ในน้ำมันหล่อลื่นจะมีผลต่อค่าความหนืดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้น

8.2 ข้อเสนอแนะ

ในปฏิญานิพนธ์นี้ขาดในส่วนของการทดสอบเพื่อหาปริมาณการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนพื้นเพื่อง่ายเพื่อหาปริมาณการสึกหรอที่เกิดขึ้นจริงจากการใช้งานและไม่ได้ทำการศึกษาเพื่อหาระยะแบคแลช (Backlash) ที่เหมาะสมที่สุดของชุดคิฟเฟอร์เรนเซียลเกียร์ ที่ทำให้เกิดการสึกหรอที่เกิดขึ้นน้อยที่สุดรวมถึงไม่ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบจากการเพิ่มทอร์กต่อการสึกหรอที่เกิดขึ้นด้วย

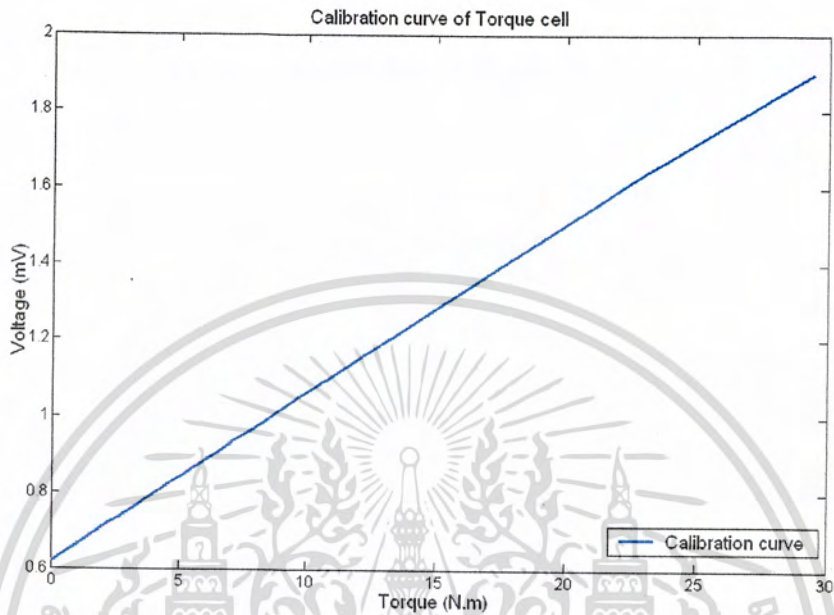
เนื่องจากเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองต่างๆ ของภาควิชาไม่ค่อยมีความพร้อมทำให้การทำงานบางอย่างล่าช้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

กราฟแสดง Calibration curve ของ Torque Full Torsion Bridge



รูปที่ ก.1 กราฟแสดง Calibration curve ของ Torque Full Torsion Bridge

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าของการเทียบอุปกรณ์วัดขนาดทอร์ก

ทอร์ก (N.m)	แรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุต
0	0.62
22.0725	1.6
22.563	1.69
29.43	1.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงผลการทดลองทางรีโอโลยี (Rheology Lab Test) ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90

ข.1 น้ำมันหล่อลื่น SAE90 ของชุดอุปกรณ์ที่ยังไม่ได้ปรับปรุง

ตารางที่ ข.1.1 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 0 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง = 30 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	27.2	64.6	0.421
100	54.3	129	0.421
150	81.6	194	0.421
200	108.5	258	0.421
250	135.8	323	0.42
300	162.7	387	0.42
350	190	452	0.42
400	216.9	516	0.42
450	244.2	581	0.42
500	271.1	645	0.42

ตารางที่ ข.1.2 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 1,500,000 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง = 30 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	26.5	64.6	0.41
100	53	129	0.411
150	79.7	194	0.411
200	106	258	0.411
250	132.7	323	0.411
300	159	387	0.411
350	185.7	452	0.411
400	212	516	0.411
450	238.7	581	0.411
500	265	645	0.411

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1.3 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 3,000,000 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง = 30 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	26.1	64.6	0.404
100	52.1	129	0.404
150	78.3	194	0.404
200	104	258	0.403
250	130.1	323	0.403
300	155.8	387	0.403
350	181.9	452	0.402
400	207.6	516	0.402
450	233.7	581	0.402
500	259.4	645	0.402

ตารางที่ ข.1.4 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 4,500,000 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง = 30 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	25.8	64.6	0.399
100	51.5	129	0.399
150	77.4	194	0.398
200	102.9	258	0.398
250	128.8	323	0.398
300	154.3	387	0.398
350	180.2	452	0.398
400	205.7	516	0.398
450	231.6	581	0.398
500	257.1	645	0.398

ตารางที่ ข.1.5 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 6,000,000 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง = 30 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	25.4	64.6	0.393
100	50.7	129	0.393
150	76.2	194	0.393
200	101.3	258	0.392
250	126.8	323	0.392
300	151.9	387	0.392
350	177.4	452	0.392
400	202.5	516	0.392
450	228	581	0.392
500	253.1	645	0.392

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1.6 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 7,500,000 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง = 30 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	25.2	64.6	0.39
100	50	129	0.387
150	75	194	0.386
200	99.6	258	0.386
250	124.5	323	0.385
300	149	387	0.385
350	173.7	452	0.384
400	198	516	0.384
450	222.6	581	0.383
500	246.8	645	0.383

ตารางที่ ข.1.7 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 0 รอบ ที่อุณหภูมิการใช้งาน = 75 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	3.3	64.6	0.051
100	6.7	129	0.052
150	10.1	194	0.051
200	13.4	258	0.051
250	16.7	323	0.052
300	20	387	0.052
350	23.5	452	0.052
400	27	516	0.052
450	30.5	581	0.052
500	34	645	0.053

ตารางที่ ข.1.8 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 1,500,000 รอบ ที่อุณหภูมิการใช้งาน = 75 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	3.1	64.6	0.048
100	6.4	129	0.05
150	9.7	194	0.05
200	13	258	0.05
250	16.4	323	0.051
300	19.7	387	0.051
350	23	452	0.051
400	26.2	516	0.051
450	29.5	581	0.051
500	32.7	645	0.051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1.9 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 3,000,000 รอบ ที่อุณหภูมิการใช้งาน = 75 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	3	64.6	0.046
100	6.3	129	0.049
150	9.6	194	0.049
200	12.8	258	0.05
250	16	323	0.05
300	19.2	387	0.05
350	22.5	452	0.05
400	25.7	516	0.05
450	29	581	0.05
500	32.2	645	0.05

ตารางที่ ข.1.10 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 4,500,000 รอบ ที่อุณหภูมิการใช้งาน = 75 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	2.9	64.6	0.045
100	5.8	129	0.045
150	8.7	194	0.045
200	11.5	258	0.045
250	14.5	323	0.045
300	17.5	387	0.045
350	20.5	452	0.045
400	23.5	516	0.045
450	26.5	581	0.046
500	29.5	645	0.046

ตารางที่ ข.1.11 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 6,000,000 รอบ ที่อุณหภูมิการใช้งาน = 75 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	2.9	64.6	0.044
100	5.5	129	0.043
150	8.1	194	0.042
200	10.6	258	0.041
250	13.1	323	0.04
300	15.6	387	0.04
350	18.1	452	0.04
400	20.6	516	0.04
450	23.1	581	0.04
500	25.6	645	0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1.12 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 7,500,000 รอบ ที่อุณหภูมิการใช้งาน = 75 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	2.7	64.6	0.041
100	5.2	129	0.04
150	7.7	194	0.039
200	10.1	258	0.039
250	12.5	323	0.038
300	14.9	387	0.038
350	17.3	452	0.038
400	19.6	516	0.037
450	21.9	581	0.037
500	24.1	645	0.037

ข.2 น้ำมันหล่อลื่น SAE90 ของชุดอุปกรณ์ที่ได้ปรับปรุงแล้ว

ตารางที่ ข.2.1 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 0 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง = 30 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	27.2	64.6	0.421
100	54.3	129	0.421
150	81.6	194	0.421
200	108.5	258	0.421
250	135.8	323	0.42
300	162.7	387	0.42
350	190	452	0.42
400	216.9	516	0.42
450	244.2	581	0.42
500	271.1	645	0.42

ตารางที่ ข.2.2 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 1,500,000 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง = 30 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	26.5	64.6	0.41
100	52.9	129	0.41
150	79.5	194	0.41
200	105.7	258	0.41
250	132.3	323	0.41
300	158.5	387	0.41
350	185.1	452	0.41
400	211.3	516	0.409
450	237.9	581	0.409
500	264	645	0.409

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2.3 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 3,000,000 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง = 30 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	26.1	64.6	0.404
100	52	129	0.403
150	78.1	194	0.402
200	103.8	258	0.402
250	129.9	323	0.402
300	155.6	387	0.402
350	181.7	452	0.402
400	207.4	516	0.402
450	233.5	581	0.402
500	259.2	645	0.402

ตารางที่ ข.2.4 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 4,500,000 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง = 30 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	25.3	64.6	0.391
100	50.5	129	0.391
150	76	194	0.391
200	101.1	258	0.391
250	126.6	323	0.391
300	151.7	387	0.391
350	177.2	452	0.391
400	202.3	516	0.392
450	227.8	581	0.392
500	253	645	0.392

ตารางที่ ข.2.5 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 6,000,000 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง = 30 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	25.1	64.6	0.388
100	50.1	129	0.388
150	75.3	194	0.388
200	100	258	0.387
250	125.1	323	0.387
300	149.8	387	0.387
350	174.8	452	0.387
400	199.4	516	0.386
450	224.4	581	0.386
500	249	645	0.386

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2.6 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 7,500,000 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง = 30 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	24.5	64.6	0.379
100	48.9	129	0.379
150	73.3	194	0.377
200	97.3	258	0.377
250	121.6	323	0.376
300	145.5	387	0.375
350	169.7	452	0.375
400	193.5	516	0.375
450	217.6	581	0.374
500	241.3	645	0.374

ตารางที่ ข.2.7 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 0 รอบ ที่อุณหภูมิการใช้งาน = 75 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	3.3	64.6	0.051
100	6.7	129	0.052
150	10.1	194	0.051
200	13.4	258	0.051
250	16.7	323	0.052
300	20	387	0.052
350	23.5	452	0.052
400	27	516	0.052
450	30.5	581	0.052
500	34	645	0.053

ตารางที่ ข.2.8 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 1,500,000 รอบ ที่อุณหภูมิการใช้งาน = 75 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	3.1	64.6	0.048
100	6.2	129	0.048
150	9.3	194	0.048
200	12.4	258	0.048
250	15.5	323	0.048
300	18.6	387	0.048
350	21.7	452	0.048
400	24.8	516	0.048
450	27.9	581	0.048
500	31	645	0.048

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2.9 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 3,000,000 รอบ ที่อุณหภูมิการใช้งาน = 75 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	3	64.6	0.046
100	6	129	0.047
150	9	194	0.046
200	11.9	258	0.046
250	14.8	323	0.046
300	17.7	387	0.046
350	20.6	452	0.046
400	23.5	516	0.045
450	26.4	581	0.045
500	29.3	645	0.045

ตารางที่ ข.2.10 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 4,500,000 รอบ ที่อุณหภูมิการใช้งาน = 75 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	2.8	64.6	0.043
100	5.6	129	0.043
150	8.4	194	0.043
200	11.1	258	0.043
250	13.8	323	0.043
300	16.5	387	0.043
350	19.2	452	0.043
400	21.9	516	0.042
450	24.6	581	0.042
500	27.3	645	0.042

ตารางที่ ข.2.11 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 6,000,000 รอบ ที่อุณหภูมิการใช้งาน = 75 C

Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	2.6	64.6	0.04
100	5.1	129	0.039
150	7.7	194	0.039
200	10.1	258	0.039
250	12.5	323	0.038
300	14.8	387	0.038
350	17.1	452	0.038
400	19.3	516	0.037
450	21.5	581	0.037
500	23.6	645	0.036

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2.12 น้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งาน 7,500,000 รอบ ที่อุณหภูมิการใช้งาน = 75 C

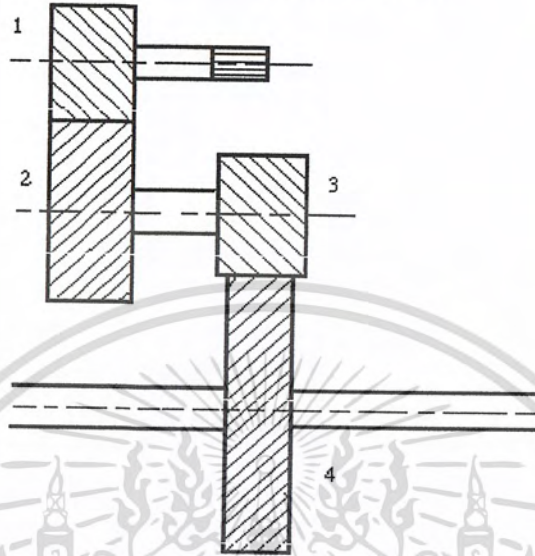
Speed (rpm)	Shear stress (Pa)	Shear rate(1/s)	viscosity
50	2.4	64.6	0.037
100	4.8	129	0.037
150	7.2	194	0.037
200	9.5	258	0.036
250	11.8	323	0.036
300	14	387	0.036
350	16.2	452	0.036
400	18.4	516	0.036
450	20.6	581	0.035
500	22.8	645	0.035



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
การคำนวณค่าต่างๆ ตามทฤษฎี

1. ระบบส่งถ่ายกำลังของเฟือง (Transmission System of gear)



รูปที่ 1 แสดงไดอะแกรมชุดเฟืองของระบบส่งถ่ายกำลังที่ใช้สำหรับการทดลอง

จำนวนฟันเฟือง (N) และเส้นผ่านศูนย์กลางพิตซ์ (D)

$N_1 = 17$	$D_1 = 38 \text{ mm}$
$N_2 = 53$	$D_2 = 110 \text{ mm}$
$N_3 = 20$	$D_3 = 45 \text{ mm}$
$N_4 = 79$	$D_4 = 165 \text{ mm}$
$n_1 = 2840 \text{ rpm}$	

โมดูล (m) = 2

มอเตอร์ $P = 3 \text{ HP}$ $n = 1420 \text{ rpm}$

จากอัตราส่วนความเร็วของเฟือง

$$m_\omega = \frac{n_1}{n_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{D_1}{D_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (1.1)$$

ดังนั้นจะได้

$$\left(\frac{n_2}{n_1} \right) \left(\frac{n_4}{n_3} \right) = \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \left(\frac{N_3}{N_4} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

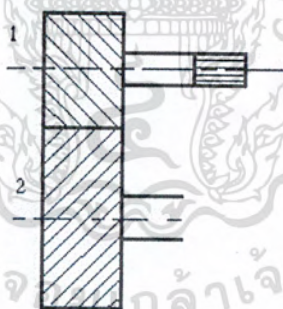
เนื่องจาก $n_2 = n_3$ เพราะอยู่บนเพลาเดียวกัน
ดังนั้น จะได้

$$\begin{aligned}\frac{n_4}{n_1} &= \left(\frac{N_1}{N_2}\right)\left(\frac{N_3}{N_4}\right) \\ n_4 &= n_1\left(\frac{N_1}{N_2}\right)\left(\frac{N_3}{N_4}\right) \\ &= (2840)\left(\frac{17}{53}\right)\left(\frac{20}{79}\right) \\ &= 230.6 \text{ rpm}\end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราทดของเฟืองทั้งระบบ คือ

$$\begin{aligned}m_\omega &= \frac{n_1}{n_4} \\ &= \frac{2840}{230.6} \\ &= 12.3\end{aligned}$$

คำนวณหาค่าแรงต่างๆที่เกิดขึ้นบนฟันเฟือง



รูปที่ 2 แสดงการส่งกำลังจากเฟือง 1 ไปเฟือง 2

ทอร์กจากมอเตอร์

$$\begin{aligned}T &= \frac{P}{\omega} \\ &= \frac{(3)(746)(60)}{(2\pi)(1420)}\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 15 \text{ N.m}$$

จากข้อมูลของเฟือง

$$N_1 = 17 \qquad D_1 = 38 \text{ mm}$$

$$N_2 = 53 \qquad D_2 = 110 \text{ mm}$$

$$\psi = 16^\circ$$

$$\phi = 15^\circ$$

$$\phi_n = 14.45^\circ$$

ทอร์กที่ Spline

$$T = \frac{P}{\omega}$$

$$= \frac{(3)(746)(60)}{(2\pi)(2840)}$$

$$= 7.5 \text{ N.m}$$

จาก

$$V = \pi dn$$

$$= \pi \left(\frac{38}{1000} \right) \left(\frac{2840}{60} \right)$$

$$= 5.65 \text{ m/s}$$

แรงที่ส่งผ่านเฟือง

$$F_t = \frac{HP}{V}$$

$$= \frac{(3)(746)}{5.65}$$

$$= 396 \text{ N}$$

$$F_r = F_t \tan \phi$$

$$= (396) \tan 14.45$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 102.04 \text{ N}$$

$$F_a = F_t \tan \psi$$

$$= (396) \tan 16$$

$$= 113.55 \text{ N}$$

$$F_t = \frac{F_i}{\cos \phi_n \cdot \cos \psi}$$

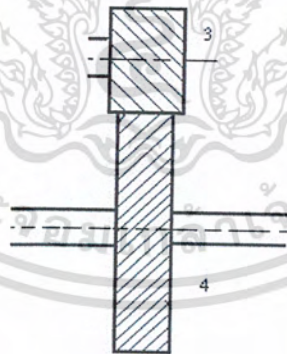
$$= \frac{396}{(\cos 14.45)(\cos 16)}$$

$$= 425.42 \text{ N}$$

$$T_2 = F_t \cdot r_2$$

$$= \frac{(396)(55)}{1000}$$

$$= 21.78 \text{ N} \cdot \text{m}$$



รูปที่ 3 แสดงการส่งกำลังจากเฟือง 1 ไปเฟือง 2

$$n_2 = n_1 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 2480 \left(\frac{17}{53} \right)$$

$$= 910 \text{ rpm}$$

เนื่องจาก $n_2 = n_3$ ดังนั้น จะได้ว่า

$$T_2 = T_3$$

$$(F_t \cdot r)_2 = (F_t \cdot r)_3$$

$$F_t = \frac{(21.78)(1000)}{22.5}$$

$$= 968 \text{ N}$$

$$F_r = F_t \tan \phi$$

$$= (968) \tan 14.45$$

$$= 249.44 \text{ N}$$

$$F_a = F_t \tan \psi$$

$$= (968) \tan 16$$

$$= 277.57 \text{ N}$$

$$F_n = \frac{F_t}{\cos \phi_n \cdot \cos \psi}$$

$$= \frac{968}{(\cos 14.45)(\cos 16)}$$

$$= 1039.9 \text{ N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

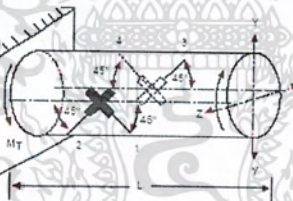
$$\begin{aligned}
 T_4 &= F_t \cdot r_4 \\
 &= 968 \left(\frac{82.5}{1000} \right) \\
 &= 79.86 \text{ N} \cdot \text{m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{n}_4 &= \bar{n}_3 \left(\frac{N_3}{N_4} \right) \\
 &= 910 \left(\frac{20}{79} \right) \\
 &= 230.38 \text{ rpm}
 \end{aligned}$$

2 การคำนวณหาทอร์กจากทฤษฎีเปรียบเทียบกับที่ได้จากการ Calibate ที่อ่านได้จาก Strain Gage



รูปที่ 4 แสดงการติดตั้ง Strain Gage



จาก

$$T = (D^3 E V_g) / 16(1 + \nu) S_g V_{in} (1000) \quad (1.2)$$

- เมื่อ
- T = ทอร์ก (N . m)
 - D = เส้นผ่านศูนย์กลางเพลลา (m)
 - E = Modulus of elasticity (GPa)
 - ν = อัตราส่วนปัวซอง
 - S_g = Sensitivity of strain gage
 - V_{in} = โวลต์ที่จ่ายเข้า (V)
 - V_g = โวลต์ที่ออกมา (mV)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลสำหรับการคำนวณ ดังนี้

$$E = 200 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0.3$$

$$S_g = 2.09$$

$$V_{in} = 10 \text{ V}$$

$$D = 0.019 \text{ m}$$

แทนค่าต่างๆลงในสูตรที่ 1.2 จะได้

$$T = 9.9 V_g \quad (1.3)$$

เมื่อกำหนดให้
จะได้

$$T = 10 \text{ N.m}$$

ผลจากการ Calibrate จากการทดลองได้

$$V_g = 1.01 \text{ mV}$$

$$V_g \text{ (mV)} = 0.64 + 0.043T$$

(1.4)

เมื่อกำหนดให้
จะได้

$$T = 10 \text{ N.m}$$

$$V_g = 1.07 \text{ mV}$$

จะเห็นว่าค่าที่ได้จากสมการที่ 1.3 ใกล้เคียงกับสมการที่ 1.4

เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ และ ศ.ดร.อิโรมุ, “ ทฤษฎีการหล่อลื่น ”, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่อง
KMITL, พ.ศ.2535
- [2] ดร.วริทธิ์ อึ้งภากรณ์,ชาญ ถนัดงาน, “ การออกแบบเครื่องจักรกล (Mechine Design เล่ม 2) ”,ซีเอ็ด
ยูเคชั่น , 2541
- [3] ดร.ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์ และคณะ, “ การสึกหรอในงานอุตสาหกรรม:ความรู้เบื้องต้นและการ
ป้องกัน”, สำนักพิมพ์ ศ.ศ.ท.,2547
- [4] A.Z.Szeri, “ Tribology;Friction,Lubrication, Wear ” , Hemisphere Publishing Corporation ,
1980
- [5] JisephE.Shigley,CharlesR.Mischke,Richard G.Bodynas,“Machical Engineering(seventh edition) ”
, McGraw-Hill Education(Asia), 2003
- [6] ROBERT W.FOX and ALAN T. McDONALD, “Introduction to Fluid Mechanics(Fifth Edetion)”,
John Wiley & SONS,INC. ,1998



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้