

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการหล่อลื่นของเฟือง
EXPERIMENTAL STUDY ON GEAR LUBRICATION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เลขที่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี - 4 เม.ย. 2548

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

การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการหล่อลื่นของเฟือง
EXPERIMENTAL STUDY ON GEAR LUBRICATION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการหล่อลื่นของเฟือง

EXPERIMENTAL STUDY ON GEAR LUBRICATION

ผู้จัดทำ

1. นาย นกคด พวงสอน รหัสประจำตัว 44015383

2. นาย นันทวุฒิ นวลแก้ว รหัสประจำตัว 44015384

3. นาย ปิยะ นิลตะออบ รหัสประจำตัว 44015391

4. นาย อภิเดช จันทพันธ์ รหัสประจำตัว 44015416

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการหล่อลื่นของเฟือง

นาย นกคณ พวงสอน 44015383

นาย นันทวุฒิ นวลแก้ว 44015384

นาย ปิยะ นิลละอ 44015391

นาย อภิเดช จันทพันธ์ 44015416

รศ.ดร มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2546

บทคัดย่อ

ในโครงการนี้จะทำการศึกษาดังพฤติกรรมการหล่อลื่นและอิทธิพลของน้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดที่มีผลต่อการสึกหรอของเฟือง โดยทดลองกับเฟืองตรงแบบ Involute curve ซึ่งทำจากเหล็กกล้าและอะลูมิเนียมมีอัตราทด 1:1 ด้วยชุดทดลองที่ได้สร้างขึ้นมา น้ำมันหล่อลื่นที่นำมาทดสอบใช้น้ำมันเกียร์ SAE 90 น้ำมันปาล์มและน้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% ซึ่งในการทดลองจะแยกออกเป็นกรณีตามชนิดของน้ำมันหล่อลื่น โดยแต่ละกรณีจะถูกควบคุมตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ น้ำมันที่ผ่านการทดลองจะถูกนำไปตรวจสอบคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปและเฟืองนำไปตรวจวัดการสึกหรอค่าที่ได้มาแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบผลของการทำงานในแต่ละสถานะและนำไปเป็นข้อมูลเพื่อการศึกษาและพัฒนา น้ำมันปาล์มเพื่อใช้ในการหล่อลื่นต่อไป

EXPERIMENTAL STUDY ON GEAR LUBRICATION

Nopphadon Phuangson

Nantawut Naulkaew

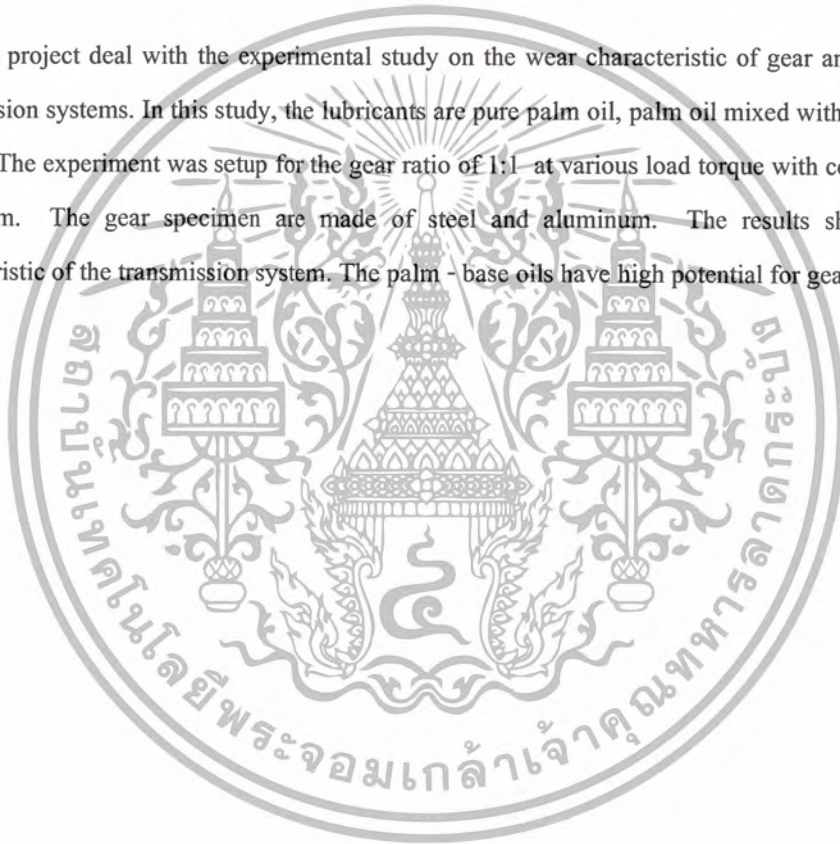
Piya Nillaor

Apidat Jantapan

Assoc. Prof. Dr. Mongkol Mongkolwongrojh Advisor

Abstract

This project deal with the experimental study on the wear characteristic of gear and pinion in the transmission systems. In this study, the lubricants are pure palm oil, palm oil mixed with ZDDP 2% and SAE90. The experiment was setup for the gear ratio of 1:1 at various load torque with constant speed at 1500 rpm. The gear specimen are made of steel and aluminum. The results shown the wear characteristic of the transmission system. The palm - base oils have high potential for gear lubrication.



กิติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดีเพราะได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และ แนะนำให้คำปรึกษาในทุกๆด้าน ไม่ว่าจะเป็นเรื่องการแก้ปัญหา การให้ความดูแลเอาใจใส่ และต้องขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่คอยดูแลเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณมณฑา และ โก๋ ในด้านการให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และเครื่องจักรพร้อมทั้งคำแนะนำต่างๆ ในการปฏิบัติงาน

นาย นกมล พวงสอน

นาย นันทวุฒิ นวลแก้ว

นาย ปิยะ นิลละอ

นาย อภิเดช จันทพันธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
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 น้ำมันหล่อลื่น	3
2.1 น้ำมันหล่อลื่น	3
2.2 หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น	4
2.3 ประเภทของน้ำมันหล่อลื่น	5
2.4 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน	6
2.5 ชนิดของการหล่อลื่น	8
2.6 ประเภทของสารหล่อลื่น	9
บทที่ 3 สารเพิ่มคุณภาพ	12
3.1 สารเพิ่มคุณภาพ	12
3.2 การผลิตน้ำมันพีชในประเทศ	15
3.3 องค์ประกอบของน้ำมันพีช	16
3.4 ประเภทของกรดไขมัน	16
3.5 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันพีช	18
3.6 สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันพีช	18
3.7 คุณสมบัติของน้ำมันพีช	19
บทที่ 4 เฟือง	23
4.1 ชนิดของเฟือง	23
4.2 คำจำกัดความของเกียร์	23
4.3 คุณสมบัติแบบ Involute	25

4.4 กฎการขับเฟืองและการทำงานของฟันเฟือง	26
4.5 ระยะเวลาขบและอัตราการขบ	28
4.6 การขัดกัน	29
4.7 วิธีการตัดเฟือง	30
บทที่ 5 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	31
5.1 การออกแบบชุดทดลอง	31
5.2 อุปกรณ์การทดลอง	33
บทที่ 6 วิธีการทดลองและผลการทดลอง	35
6.1 วิธีการทดลอง	35
6.2 ผลการทดลอง	35
บทที่ 7 สรุป	47
7.1 วิจารณ์ผลการทดลอง	47
7.2 ข้อเสนอแนะในการทดลอง	47
ภาคผนวก	48
ภาคผนวก ก. ตารางแสดงค่าน้ำมันไม่ผสมที่ทดลองกับเฟืองเหล็ก	49
ภาคผนวก ข. ตารางแสดงค่าน้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% โดยน้ำหนักที่ทดลองเฟืองเหล็ก	54
ภาคผนวก ค. ตารางแสดงค่าน้ำมัน SAE 90 ที่ทดลองเฟืองเหล็ก	61
ภาคผนวก ง. ตารางแสดงค่าน้ำมันปาล์มไม่ผสมที่ทดลองกับเฟืองอลูมิเนียม	67
ภาคผนวก จ. ตารางแสดงค่าน้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% โดยน้ำหนักที่ทดลองกับเฟืองอลูมิเนียม	71
ภาคผนวก ฉ. ตารางแสดงค่าน้ำมัน SAE 90 ที่ทดลองกับเฟืองอลูมิเนียม	75
ภาคผนวก ช. ตารางแสดงน้ำหนักของเฟืองที่เปลี่ยนแปลง	77
ภาคผนวก ซ. การออกแบบโครงสร้าง	80
เอกสารอ้างอิง	83

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้าที่
2.1	แสดงค่าดัชนีความหนืด	7
3.1	ตารางแสดงสารเพิ่มคุณภาพ	13
3.2	แสดงผลผลิตของน้ำมันพืช	15
3.3	แสดงโครงสร้างของกรดไขมันชนิดต่างๆ	17
3.4	ชนิดของกรดไขมันในน้ำมันพืช	17
3.5	แสดงจุดหลอมเหลว ของน้ำมันพืช	19
3.6	แสดงค่าความหนืดของน้ำมันพืช	20
3.7	คุณสมบัติของน้ำมันพืช	21
3.8	คุณสมบัติของสารเติมแต่ง	21
4.1	แสดงขนาดเฟืองมาตรฐาน	25
4.2	มาตรฐาน SI ของฟันเฟือง	27
4.3	มาตรฐานอังกฤษฟันเฟือง	28
5.1	แสดงอุปกรณ์ของเครื่องทดสอบ	34
6.1	แสดงน้ำมันและข้อมูลที่ใช้ทดสอบ	35

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้าที่
2.1	แสดงขอบเขตของการหล่อลื่น	9
2.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือน	10
2.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสมบูรณ์และอัตราความเครียดเฉือน	11
4.1	แสดงส่วนต่างๆของเฟือง	23
4.2	แสดงลักษณะเฟืองแบบ Involute curve	25
4.3	แสดงส่วนทั้งหมดของเฟือง	26
4.4	แสดงลักษณะการขบของเฟือง	27
4.5	แสดงระยะการขบของฟันเฟือง	28
4.6	การขบของเฟืองไม่ขัดกัน	29
4.7	แสดงการตัดเฟืองแบบเรีอกัตเตอร์	30
5.1	โคอะแกรมแสดงหุุดทดลอง	31
5.2	แสดงแรงที่กระทำกับเพลาคูทดลอง	32
5.3	แสดงเครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน(Concentric Rotational Viscometer)	33
5.4	แสดงหุุดทดลองที่ประกอบเสร็จ	34
5.5	แสดงเฟืองเหล็กและเฟืองอลูมิเนียมที่ใช้ทดลอง	34
6.1	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ ความหนืดสัมบูรณ์กับความเครียดเฉือน น้ำมันปาล์มไม่ผสมทดลองเฟืองเหล็ก	36
6.2	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ ความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือน น้ำมันปาล์มไม่ผสมทดลองเฟืองเหล็ก	36
6.3	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ ความหนืดสัมบูรณ์กับความเครียดเฉือน น้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2 % โดยน้ำหนักทดลองเฟืองเหล็ก	37
6.4	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ ความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือน น้ำมันปาล์มผสมZDDP 2 % โดยน้ำหนักทดลองเฟืองเหล็ก	37
6.5	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ ความหนืดสัมบูรณ์กับความเครียดเฉือน น้ำมันหล่อลื่น SAE 90 ทดลองเฟืองเหล็ก	38
6.6	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ ความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือน น้ำมันหล่อลื่น SAE 90 ทดลองเฟืองเหล็ก	38
6.7	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปาล์มไม่ผสมกับผสม ZDDP 2%	

โดยนำนักพล็อตระหว่างความหนืดสัมบูรณ์และความเครียดเฉือนทดลองเฟืองเหล็ก

39

6.8	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปาล์มไม่ผสมกับผสม ZDDP 2% โดยน้ำหนักพล็อตระหว่างความข้นเหนียวและความเครียดเฉือนทดสอบเฟืองเหล็ก	39
6.9	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนืดสัมบูรณ์กับความเครียดเฉือน น้ำมันปาล์มไม่ผสมทดสอบเฟืองอลูมิเนียม	40
6.10	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความข้นเหนียว กับความเครียดเฉือน น้ำมันปาล์มไม่ผสมทดสอบเฟืองอลูมิเนียม	40
6.11	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ ความหนืดสัมบูรณ์กับความเครียดเฉือน น้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2 % โดยน้ำหนักทดสอบเฟืองอลูมิเนียม	41
6.12	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ ความข้นเหนียว กับความเครียดเฉือน น้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2 % โดยน้ำหนักทดสอบเฟืองอลูมิเนียม	41
6.13	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำมัน SAE 90 ทดสอบเฟืองอลูมิเนียม ความหนืดสัมบูรณ์กับความเครียดเฉือน	42
6.14	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำมัน SAE 90 ทดสอบเฟืองอลูมิเนียม ความข้นเหนียว กับความเครียดเฉือน	42
6.15	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปาล์มไม่ผสมกับผสม ZDDP 2% โดยน้ำหนักพล็อตระหว่าง ความหนืดสัมบูรณ์กับความเครียดเฉือนทดสอบเฟืองอลูมิเนียม	43
6.16	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปาล์มไม่ผสมกับผสม ZDDP 2% โดยน้ำหนักพล็อตระหว่าง ความข้นเหนียว กับความเครียดเฉือนทดสอบเฟืองอลูมิเนียม	43
6.17	กราฟแสดงการเปลี่ยนน้ำหนักเฟืองเหล็กที่ทดสอบกับน้ำมันหล่อลื่น	44
6.18	กราฟแสดงการเปลี่ยนน้ำหนักเฟืองอลูมิเนียมที่ทดสอบกับน้ำมันหล่อลื่น	44
6.19	แสดงการสึกหรอที่เกิดกับหน้าสัมผัสเฟืองเหล็กทดสอบกับน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์	45
6.20	แสดงการสึกหรอที่เกิดกับหน้าสัมผัสเฟืองเหล็กทดสอบกับน้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% โดยน้ำหนัก	45
6.21	แสดงการสึกหรอที่เกิดกับหน้าสัมผัสเฟืองเหล็กทดสอบกับน้ำมัน SAE 90	46

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันน้ำมันหล่อลื่นมีราคาแพงขึ้นบวกกับประเทศไทยเป็นประเทศที่มีผลผลิตทางการเกษตรมาก โดยเฉพาะการผลิตน้ำมันพืชภายในประเทศมีมากประกอบกับการใช้น้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากน้ำมันแร่หรือน้ำมันสังเคราะห์ที่มีผลต่อสภาวะแวดล้อมอย่างมากยากแก่การทำลายและเสื่อมสลายเองได้ ยก ดังนั้นจึงนำน้ำมันพืชที่คาดว่าจะนำมาทดแทนน้ำมันหล่อลื่นในงานบางอย่างได้มาวิจัยและพัฒนา เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน

ปัญหาการสึกหรอของเฟืองยังคงพบอยู่เสมอซึ่งมีหลายลักษณะเช่นความเค้นที่ฐานมีค่าสูง ความดันที่หน้าสัมผัสสูงและ hardening cracks สาเหตุหนึ่งที่สำคัญคือการหล่อลื่นที่ไม่เหมาะสม การศึกษาเรื่องนี้ภายในประเทศยังมีน้อยเนื่องจากเป็นเรื่องที่ยาก มีตัวแปรเยอะ ต้องอาศัยความรู้จากหลายสาขาการทดลองเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถศึกษาถึงพฤติกรรมการหล่อลื่นและอิทธิพลของน้ำมันในการสึกหรอของเฟืองได้ดี ซึ่งต้องอาศัยความแม่นยำจากอุปกรณ์ทดลอง และการปฏิบัติที่ถูกต้อง โครงการนี้ได้ทำการออกแบบ สร้างอุปกรณ์สำหรับทดลอง และทำการทดลองเพื่อหาข้อมูลเกี่ยวกับการสึกหรอของเฟืองจากการหล่อลื่นด้วยน้ำมันที่ต่างชนิดกัน โดยจำลองการใช้งานในหลายสภาวะ ผลจากการทดลองนี้สามารถนำไปศึกษาเพื่อการใช้งานที่ถูกต้องยิ่งขึ้นเพื่อลดการสึกหรอ

ในปฏิญานิพนธ์นี้จะทำการทดลองน้ำมันพืช คือน้ำมันปาล์มไปหล่อลื่นเฟืองและการเติมสารเพิ่มคุณภาพ ZDDP 2% และไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองกับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้โดยทั่วไปเพื่อนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำมันที่ผสมสารเพิ่มคุณภาพต่อการสึกหรอของเฟือง
- 1.2.2 ทดลองหาสภาวะการสึกหรอของเฟืองกับน้ำมันที่ใช้หล่อลื่น
- 1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปของน้ำมันที่ผ่านการทดลอง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบสร้างชุดอุปกรณ์ทดลองและติดตั้งอุปกรณ์
- 1.3.2 ทดลองกับเฟืองตรงทำจากวัสดุเหล็กกล้าและอะลูมิเนียมอย่างละ 3 คู่ขนาด 18 ฟัน โมดูล 4 อัตราทด ในการทดลอง 1:1
- 1.3.3 น้ำมันหล่อลื่นที่นำมาทดลองใช้น้ำมันเกียร์ SAE 90 น้ำมันปาล์มและน้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% โดยน้ำหนัก
- 1.3.4 ทดลองที่ โหลด (Load) คงที่ และความเร็วรอบคงที่
- 1.3.5 ตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำมันที่ทำทดลอง และตรวจวัดการสึกหรอของเฟืองทุกๆช่วงการทำงานที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.6 นำข้อมูลที่ได้นำไปพล็อตเป็นกราฟแสดงคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่เปลี่ยนไปของแต่ละช่วงการทำงาน และกราฟการสึกหรอของเฟืองเพื่อนำไปวิเคราะห์และศึกษา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันปาล์มในการหล่อลื่น
- 1.4.2 เรียนรู้ลักษณะการสึกหรอที่หน้าสัมผัสเฟือง
- 1.4.3 เพื่อรักษาสิ่งแวดล้อมเพราะน้ำมันพืชสามารถสลายตัวได้ดี

1.5 วิธีการดำเนินงาน

ในขั้นแรกจะทำการออกแบบและสร้างเครื่องทดลองน้ำมัน โดยการออกแบบให้โครงสร้างมีความแข็งแรง แล้วนำมอเตอร์และไดนาโมมิเตอร์มาติดตั้ง แล้วทำการปรับตั้งอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของทั้งมอเตอร์และไดนาโมมิเตอร์

ในการติดตั้งเฟืองทดลองต้อง Alignment ก่อนการทดลองทุกครั้งที่มีการติดตั้งเฟือง แล้วนำน้ำมันมาติดตั้งแล้วใส่น้ำมันที่จะทดลองลงไป จากการทดลองจะทดสอบคุณสมบัติด้านต่างๆ ดังนี้

- 1.ความหนืดที่เปลี่ยนแปลง
- 2.น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของเฟือง
- 3.ความถี่เสียง

โดยคุณสมบัติด้านความหนืดและความถี่เสียงจะหาได้จากเครื่องวัดความหนืดแบบแกนมุน (Rotational viscometer) ส่วนน้ำหนักที่หายไปใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียดสองตำแหน่ง โดยน้ำหนักเฟืองไม่เกิน 30000 กรัม

บทที่ 2

น้ำมันหล่อลื่น

สารหล่อลื่นเป็นสารที่ใช้ในการหล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของของแข็ง ของแข็งที่บดเป็นผง ของเหลว และก๊าซ แต่สารหล่อลื่นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางจะอยู่ในรูปของของเหลว เช่น น้ำมันหล่อลื่น หรือสารที่มีลักษณะเหนียว เช่น จาระบี

2.1 น้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่น(lubricating oil)เป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม การผลิตน้ำมันหล่อลื่นเพื่อให้ได้น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปที่มีคุณภาพดีและเหมาะสมกับการใช้งานของเครื่องจักรและเครื่องยนต์แต่ละชนิดนั้น ขั้นตอนในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป โดยการเติมสารเพิ่มคุณภาพต่าง ๆ ลงไปในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (base oil) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีใช้อยู่ในแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ น้ำมันแร่ น้ำมันสังเคราะห์ โดยส่วนใหญ่แล้วจะนำน้ำมันแร่มาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป เพราะมีคุณภาพดีและราคาถูก ส่วนน้ำมันพืชหรือน้ำมันจากสัตว์และน้ำมันสังเคราะห์นั้นจะนำไปใช้ในงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางอย่างเท่านั้น ที่มาของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีดังนี้

1. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากพืชและสัตว์ (vegetable or animal base oil) ในปัจจุบันมีการใช้น้อยมากเนื่องจากมีการคงค้างทางเคมีต่ำเสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะที่ใช้งาน เมื่อนำมาใช้งานจะต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ทำให้มีราคาแพง แต่ยังมีใช้ในงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางอย่าง โดยส่วนใหญ่ใช้เป็นสารเพิ่มคุณภาพ ให้น้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียมมีความลื่นขึ้น และความสามารถในการผสมกับน้ำได้ เป็นต้น ตัวอย่างของน้ำมันพวกนี้ได้แก่ น้ำมันละหุ่ง น้ำมันปาล์ม น้ำมันหมูและน้ำมันปลา เป็นต้น

2. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมหรือน้ำมันแร่ (mineral base oil) มีการใช้งานกันมากที่สุด เนื่องจากมีคุณภาพที่ดีและราคาถูก เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในหอกลั่นส่วนเบาที่มีจุดเดือดต่ำได้แก่ แก๊ซโซลีน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล จะระเหยแยกเป็นไอออกมา ส่วนหนักที่มีจุดเดือดสูงจะไม่ระเหยเป็นไอจะเหลืออยู่เป็นพวกน้ำมันเตา ไซและยางมะตอย ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานได้ น้ำมันแร่ที่ได้จากการเอาส่วนที่อยู่ก้นหอกลั่นบรรยากาศมาผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศ แยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดใสและชนิดข้นออกมา ที่เหลือเป็นกากที่ใช้ทำยางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบที่นำมากลั่น น้ำมันดิบบางอย่างไม่เหมาะในการนำมาผลิตเป็นน้ำมันแร่ น้ำมันแร่ที่ได้จากพวกพาราฟินิกมักจะมีไฮโดรเจนสูง จะต้องผ่านกระบวนการเอาไฮโดรเจน น้ำมันแร่ที่ได้จากกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศปกติจะมีคุณภาพไม่ดีพอในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นจึงต้องผ่านกระบวนการต่างๆเพื่อกำจัดเอาสารที่ไม่ต้องการออก และเพื่อให้มีความอยู่ตัวทางเคมีและเชิงความร้อนที่ดีพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. น้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Base Oil) เป็นการสังเคราะห์ขึ้น โดยกระบวนการทางเคมีวัสดุ เริ่มต้นที่ไขมันจะมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งน้ำมันสังเคราะห์มีอยู่หลายชนิดแต่มีราคาค่อนข้างแพง โดยใช้ในงานหล่อลื่นในงานพิเศษด้านดัชนีความข้นใสสูง จุดไหลเทต่ำและมีการระเหยต่ำ เป็นต้น ที่นิยมใช้มีดังนี้

3.1 พอลิอัลฟาโอเลฟิน (Polyalphaolephins ; PAO) ซึ่งมีดัชนีความข้นใสสูงมาก มีจุดไหลเทต่ำมาก มีการระเหยต่ำและมีความต้านทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน นิยมใช้กันมาก

3.2 พวกลีเอสเทอร์ (Ester) ซึ่งใช้กับสภาวะการทำงานที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมากๆ เช่น น้ำมันเทอร์โบชาร์จเจอร์ของเครื่องยนต์ไอพ่น

3.3 พวกลีซิลิโคน (Silicones) ใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง

3.4 พวกลีฮาโลเจนเนเตด ไฮโดรคาร์บอน (Halogenated Hydrocarbon) เช่น คลอโรฟลูออไรด์คาร์บอน (Chlorofluorocarbons) หรือสาร (CFC) ใช้ทำน้ำมันเครื่องอัดอ็อกซิเจนเพราะมีความอยู่ตัวทางเคมีและความร้อนดี

2.2 หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น

2.2.1 ช่วยในการหล่อลื่น คุณภาพของการหล่อลื่นขึ้นอยู่กับดัชนีความหนืดของน้ำมันชนิดนั้น ซึ่งฟิล์มบางๆของน้ำมันหล่อลื่นจะทำหน้าที่เคลือบผิว โลหะหรือชิ้นงานที่มีการเคลื่อนที่ เพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสีกันโดยตรง หรือเป็นการลดการสึกหรอของชิ้นงาน น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการคงความหนืดของฟิล์มน้ำมันให้เกือบคงที่ตลอดเวลาแม้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ก็จะต้องไม่บางเกินไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และไม่หนาเกินไปเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง

2.2.2 ช่วยระบายความร้อน คุณสมบัติข้อนี้เป็นคุณสมบัติที่สำคัญข้อหนึ่งของน้ำมันหล่อลื่น สำหรับเครื่องยนต์ ซึ่งจะช่วยลดความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในขณะที่เครื่องยนต์ทำงาน และช่วยระบายความร้อนจากการเสียดสีของชิ้นส่วนต่างๆในเครื่องยนต์เช่นระบบเกียร์หรือเฟืองท้าย

2.2.3 ช่วยรักษาความสะอาด ขณะที่หล่อลื่นจะต้องเป็นตัวที่ทำหน้าที่ในการทำความสะอาดชิ้นงานนั้นไปด้วย คือต้องสามารถชะล้างหรือขจัดคราบสกปรกต่างๆจากผิวชิ้นงานได้เป็นอย่างดี

2.2.4 ช่วยป้องกันการเกิดสนิมและการกัดกร่อน น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องไม่มีสารที่เป็นตัวทำให้เกิดการกัดกร่อนเสียเอง นอกจากนี้เมื่อมีสารจากภายนอกที่อาจจะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ เช่น ก๊าซไอเสีย ละอองน้ำหรือไอน้ำ น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการทำให้กรดนั้นเจือจางลงและไม่สามารถที่จะไปกัดกร่อน โลหะของชิ้นงาน

2.2.5 ช่วยกระจายสิ่งสกปรก น้ำมันหล่อลื่นที่ดีต้องมีคุณสมบัติในการกระจายความสกปรกต่างๆที่มีการปนในน้ำมันหล่อลื่นอันเนื่องมาจากการกำจัดสิ่งสกปรกออกจากชิ้นงานเพื่อไม่ให้สิ่งสกปรกต่างๆเหล่านั้นรวมตัวกันง่าย เพราะเมื่อสิ่งสกปรกเหล่านั้นรวมตัวกันจะทำให้เกิดเป็นยางเหนียว

2.2.6 ป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (antioxidant) สารนี้จะช่วยให้การทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันหล่อลื่นและออกซิเจนในอากาศเกิดได้ช้าลง ถ้าไม่มีสารนี้ น้ำมันหล่อลื่นจะทำปฏิกิริยาดังกล่าวได้ง่ายขึ้นและทำให้เกิดยางเหนียว เป็นผลให้น้ำมันหล่อลื่นมีความหนืดเพิ่มขึ้นได้

2.2.7 มีสารป้องกันการสึกหรอ สารนี้จะช่วยให้ฟิล์มน้ำมันคงทนต่อแรงเสียดสีได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.8 มีสารป้องกันการเกิดฟอง เมื่อขึ้นส่วนที่หมุนกวาดน้ำมันหล่อลื่นให้กระจายตัวทำให้เกิดฟอง ซึ่งเป็นการลดประสิทธิภาพการหล่อลื่นลง ซึ่งสารนี้จะเป็นตัวช่วยให้ฟองละลายตัวได้เร็ว

2.2.9 มีสารป้องกันการเกิดสนิม สารนี้จะทำให้ให้น้ำมันหล่อลื่นเคลือบไม่ให้ขึ้นส่วนเกิดสนิม

2.2.10 มีการระเหยตัวต่ำ (low volatility) น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีจุดวาบไฟสูง ทำให้การระเหยตัวต่ำและทนความร้อนสูงๆได้ ไม่เกิดการเผาไหม้ได้ง่าย ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงน้ำมันหล่อลื่น

2.2.11 มีจุดไหลต่ำ (low pour point) เพื่อการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

2.3 ประเภทของน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้โดยทั่วไปมี 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ ชนิดเกรดเดียวและชนิดหลายเกรด ซึ่งแต่ละชนิดจะเหมาะสมกับสภาพการทำงานแต่ละอย่าง ลักษณะที่สำคัญของน้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดมีดังนี้

2.3.1 น้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดเดียว (single viscosity หรือ sing grade) SAE เป็นมาตรฐานเกี่ยวกับการแบ่งค่าความหนืดของน้ำมันแต่ละชนิด ถ้าน้ำมันหล่อลื่นมีตัวเลขแสดงค่าความหนืดต่ำ ความหนืดจะน้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีตัวเลขแสดงค่าความหนืดสูง ตัวอย่างเช่นน้ำมันหล่อลื่นสองชนิดคือ SAE 20 และ SAE50 ซึ่งแสดงว่า SAE 50 จะมีความหนืดมากกว่า

น้ำมันหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดต่ำกว่าเบอร์ที่แสดงไว้หลัง SAE จะตามด้วย W ซึ่งเป็นการแสดงการทดลองวัดความหนืดที่ 0 องศาฟาเรนไฮต์ (ในกรณีที่ไม่มี W จะเป็นการทดสอบที่ 210 องศาฟาเรนไฮต์) ตัวอย่างเช่น น้ำมันหล่อลื่น SAE 20 และน้ำมันหล่อลื่น SAE 20 W แสดงว่าน้ำมันหล่อลื่น SAE 20 W มีความหนืดน้อยกว่า SAE 20 น้ำมันหล่อลื่นที่มีตัว W ตามหลังจะใช้กับฤดูหนาวหรือในที่ที่มีอากาศเย็น เพื่อช่วยไม่ให้ความหนืดต่ำเกินไป ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นเกรดเดียวที่มีใช้ในปัจจุบันนี้ได้แก่ SAE 20 W, SAE 10 W, SAE 20, SAE 20 W, SAE 30, SAE 40, SAE 50

2.3.2 น้ำมันหล่อลื่นชนิดครดรวม (multi viscosity หรือ multi grade) น้ำมันหล่อลื่นประเภทนี้ อนุกรมจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดน้อยกว่าชนิดเกรดเดียว ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่นชนิดนี้สามารถใช้แทนน้ำมันเครื่องชนิดเกรดเดียวได้ ตัวอย่างเช่น น้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE 10/50 หมายความว่าที่อุณหภูมิ 0 องศาฟาเรนไฮต์ น้ำมันหล่อลื่นชนิดนี้จะมีค่าความหนืดเท่ากับน้ำมันเครื่องชนิด SAE 10 W ที่อุณหภูมิ 210 องศาฟาเรนไฮต์ น้ำมันหล่อลื่นชนิดนี้จะมีค่าความหนืดเท่ากับน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE 50 หมายความว่า น้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE 10 W/50 นี้สามารถใช้แทนน้ำมันหล่อลื่นต่อไปนี้ได้ เช่น SAE 10 W, SAE 20 W, SAE 20, SAE 30, SAE 40 และ SAE 20 เป็นต้น

สาเหตุที่น้ำมันหล่อลื่นชนิดครดรวมมีคุณสมบัติได้ดังนี้ ก็เพราะน้ำมันหล่อลื่นได้เติมสารประกอบบางอย่างลงไป เรียกว่าสารปรับปรุงค่าดัชนีความหนืด (viscosity index improve หรือ VI improve) ซึ่งเป็นสารที่เรียกว่า โพลีเมอร์ (polymer) โดยสารนี้จะเข้าไปรวมตัวกับบริเวณส่วนประกอบ (open chain) ของโมเลกุลของสารพอลิโครคาร์บอน เพื่อจะฟอร์มตัวให้เป็นโมเลกุลที่ยาวมาก และตรึงโมเลกุลที่อุณหภูมิมีการลดลง โมเลกุลที่มีสายยาวนี้จะคลายตัวออกไปพร้อมกับโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่น ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นและเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ไปอีก โมเลกุลนี้จะยิ่งคลายตัวอีก ความหนืดจึงเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าน้ำมันชนิดเกรดเดียว

2.4 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่อผ่านออกมาจากโรงกลั่นก็มีคุณสมบัติที่สำคัญบางอย่างอยู่แล้ว ซึ่งคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้ ได้แก่

2.4.1 ความหนืด (viscosity) เป็นตัวที่ต้านการไหลของน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งขึ้นอยู่กับความข้นใสของน้ำมันหล่อลื่น โดยน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดต่ำจะไหลได้ง่ายแต่เชื้อหล่อลื่นก็จะบางมากด้วยโดยความหนืดแปรผันกับอุณหภูมิสำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดมากจะมีฟิล์มหล่อลื่นที่หนากว่าหนือแข็งกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดต่ำ หน่วยวัดความหนืดมีอยู่ด้วยกันหลายระบบแต่ที่นิยมใช้คือเซตีสโตกน์ (centistokes, cSt)

2.4.2 ความต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน น้ำมันเป็นส่วนประกอบที่ซับซ้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เมื่อสารไฮโดรคาร์บอนสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศก็จะเกิดปฏิกิริยากัน ทำให้เกิดสิ่งที่ไม่พึงประสงค์หลายชนิด เช่น กรด ความเหนียว นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิสูงอัตราการรวมตัวก็ยิ่งเร็วขึ้นอีก น้ำมันที่ดีจะรวมตัวกับออกซิเจนได้ยาก

2.4.3 จุดวาบไฟ คืออุณหภูมิที่น้ำมันหล่อลื่นได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอ แล้วลุกวาบเมื่อโดนเปลวไฟ จุดวาบไฟมีความสำคัญกับความปลอดภัย

2.4.4 จุดไหลเท คืออุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันจะไหลได้โดยไม่มีอะไรบกวน สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำจำเป็นต้องเลือกใช้งานน้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำ

2.4.5 ดัชนีความหนืด (viscosity index VI) เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนืดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของน้ำมันหล่อลื่น โดยถ้าค่าดัชนีความหนืดมีค่าสูงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดจะมีค่าน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมาก แต่ถ้าค่าดัชนีความหนืดต่ำอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดจะเปลี่ยนแปลงมากเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงน้อยซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$VI = \left(\frac{\bar{L} - x}{\bar{L} - \bar{H}} \right) \times 100 \quad (2.1)$$

เมื่อ \bar{L} คือค่าความหนืดเซร์โบลท์สากล (saybolt universal viscosity, SUV) ของน้ำมันมาตรฐานที่ $VI = 0$

\bar{H} คือค่าความหนืดเซร์โบลท์สากลของน้ำมันมาตรฐานที่มีค่า $VI = 100$

x คือค่าความหนืดเซร์โบลท์สากลของน้ำมันมาตรฐานที่ต้องการหาค่า VI

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าดัชนีความหนืด

SUV at 100 °C \bar{x}	SUV at 38 °C		SUV at 100 °C \bar{x}	SUV at 38 °C		SUV at 100 °C \bar{x}	SUV at 38 °C	
	H	L		H	L		H	L
40	93	107	---	---	---	---	---	---
41	109	137	81	810	1674	121	1643	3902
42	124	167	82	829	1721	122	1665	3966
43	140	197	83	849	1769	123	1688	4031
44	157	228	84	868	1817	124	1710	4097
45	173	261	85	888	1865	125	1733	4163
46	189	291	86	907	1914	126	1756	4229
47	205	325	87	927	1964	127	1779	4296
48	222	356	88	947	2014	128	1802	4363
49	238	389	89	966	2064	129	1825	4430
50	255	422	90	986	2115	130	1848	4498
51	272	456	91	1006	2166	131	1871	4567
52	288	491	92	1026	2217	132	1894	4636
53	308	525	93	1046	2270	133	1981	4705
54	322	561	94	1066	2322	134	1941	4775
55	339	596	95	1087	2375	135	1965	4845
56	356	632	96	1107	2428	136	1988	4915
57	374	669	97	1128	2481	137	2012	4986
58	391	706	98	1148	2536	138	2036	5058
59	408	743	99	1168	2591	139	2060	5130
60	426	481	100	1189	2546	140	2084	5202

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าดัชนีความหนืด (ต่อ)

61	443	819	101	1210	2701	141	2108	5275
62	461	857	102	1231	2757	142	2132	5348
63	478	897	103	1252	2814	143	2156	5422
64	496	936	104	1273	2870	144	2180	5496
65	514	976	105	1294	2928	145	2205	5570
66	532	1016	106	1315	2985	146	2229	5645
67	550	1057	107	1337	3043	147	2254	5721
68	568	1098	108	1358	3102	148	2278	5796
69	586	1140	109	1379	3161	149	2503	5873
70	604	1182	110	1401	3220	150	2328	5949
71	623	1225	111	1422	3280	151	2353	6026
72	641	1268	112	1444	3340	152	2378	6104
73	660	1311	113	1466	3400	153	2403	6182
74	678	1355	114	1488	3462	154	2428	6260
75	697	1399	115	1510	3524	155	2453	6339
76	716	1444	116	1532	3585	156	2178	6418
77	734	1489	117	1554	3648	157	2503	6498
78	753	1534	118	1576	3711	158	2529	6578
79	772	1580	119	1598	3774	159	2554	6659
80	791	1627	120	1620	3838	160	2580	6740

2.5 ชนิดของการหล่อลื่น

แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

1) ฟิล์มแบบแห้ง (dry film) เป็นฟิล์มของสารหล่อลื่นแข็ง ส่วนมากจะใช้ในการหล่อลื่นแข็ง เช่น แกรไฟน์หรือโมลิบดินัมซันไฟต์โดยสารหล่อลื่นนี้จะลดการเสียดสีลงได้ เช่นแหวนลูกสูบของปั๊มลมที่ทำด้วยแกรไฟต์

2) ฟิล์มน้ำมันแบบเปียก (wet film) ซึ่งคือฟิล์มน้ำมันใช้หล่อลื่นในเครื่องจักรกลแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

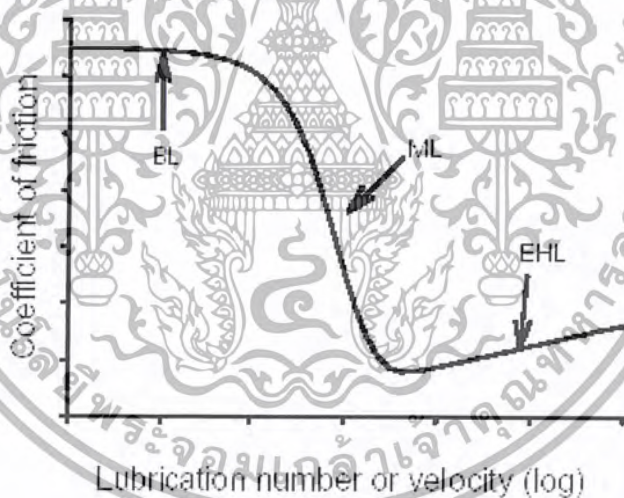
2.1 พิล์มชนิดกึ่งสมบูรณ์ (boundary film) ซึ่งเกิดจากการหล่อลื่นที่ไม่สมบูรณ์ของ น้ำมันหล่อลื่น เช่นการหล่อลื่นของเฟืองทำยลักษณะของฟิล์มที่ไม่สมบูรณ์นี้ยังแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

2.1.1 แบบโพลาร์ (polar type) ลักษณะฟิล์มแบบนี้จะเป็นฟิล์มที่มีสารเพิ่มคุณภาพผสม อยู่ จะช่วยให้สารไฮโดรคาร์บอนไปจับตัวกันที่ผิวของ โลหะอีชั้นหนึ่งทำให้ลดการสึกหรอ

2.1.2 แบบอีพี (EP Type) เป็นฟิล์มที่เกิดจากการเติมสารประเภทคลอรีนซันเฟสหรือ ฟอสเฟต ซึ่งสารนี้จะทำปฏิกิริยากับผิวสัมผัสของ โลหะที่มีอุณหภูมิสูงๆ จะทำให้เป็นแผ่นฟิล์มเหนียว เคลือบผิวโลหะอีชั้นหนึ่ง ซึ่งจะลดการสึกหรอ

2.2 พิล์มน้ำมันชนิดสมบูรณ์ (Full Film) เป็นฟิล์มที่ให้การหล่อลื่นที่ดีที่สุดหรือสมบูรณ์ที่สุด โดยผิวสัมผัสจะลอยตัวหรือแยกจากกัน โดยเด็ดขาด ซึ่งจะลดการสึกหรอและความร้อนที่เกิดขึ้น แต่จะมี แรงที่เกิดจากความหนืดของน้ำมัน ซึ่งจะมีลักษณะการหล่อลื่นแบบลูกปืน

นอกจากนี้ยังมีฟิล์มน้ำมันอีกลักษณะหนึ่งคือ อีเอสดี (elasto hydrodynamic; EHD) ซึ่งเป็น ลักษณะฟิล์มที่เกิดจากการยุบตัวเนื่องจากการรับแรงกดมากเป็นพิเศษบนพื้นที่เล็กๆ โดยการยุบตัวจะเพิ่ม พื้นที่รับน้ำหนักสมมากขึ้นและความชันไตของน้ำมันหล่อลื่นก็เพิ่มขึ้นด้วยในเวลาเดียวกันเนื่องจากแรงกด การหล่อลื่นแบบนี้จะพบในการหล่อลื่นเกียร์และลูกปืน



รูปที่ 2.1 แสดงขอบเขตของการหล่อลื่น

ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าการหล่อลื่นแบ่งออกเป็นสามช่วง คือ ช่วง Boundary Lubrication (BL), Mixed Lubrication (ML), Elastohydrodynamic Lubrication (EHL) โดยจะเห็นได้ว่าในช่วงที่เป็นการหล่อลื่นแบบ Elastohydrodynamic Lubrication เป็นการหล่อลื่นที่มีฟิล์มหนา

2.6 ประเภทของสารหล่อลื่น

โดยปกติของเหลวที่ใช้ในการหล่อลื่นแบ่งตามคุณสมบัติมีอยู่ 2 ประเภท คือ

2.6.1 ของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid)

ของไหลที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนเป็นสัดส่วน โดยตรง หรือเชิงเส้น เราเรียกว่าของไหลแบบนิวโตเนียนซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.1)$$

สมการที่ (2.1) เรียกว่ากฎของนิวตันสำหรับความหนืด (Newton's law of viscosity) โดย คือความเค้นเฉือน (shear stress), $\frac{du}{dy}$ คืออัตราความเครียดเฉือน (shear strain rate) และ μ คือความหนืดสัมบูรณ์ (absolute viscosity)

2.6.2 ของไหลแบบนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian fluid)

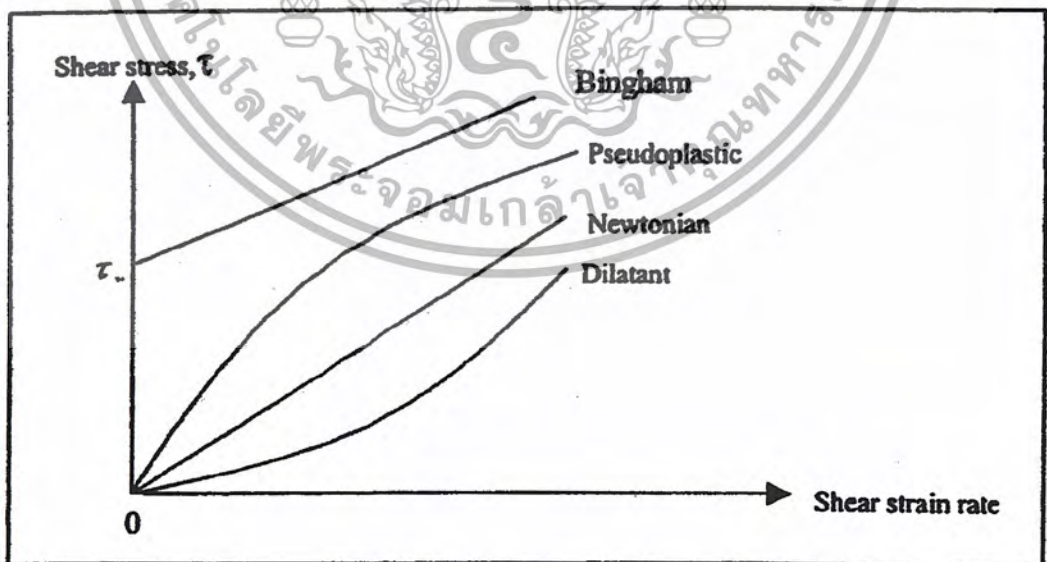
ของไหลที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นเฉือนอัตราความเครียดเฉือนไม่เป็นเชิงเส้นเราเรียกว่าของไหลแบบนอนนิวโตเนียนซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\tau = m \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (2.2)$$

$$\tau + k \tau^3 = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.3)$$

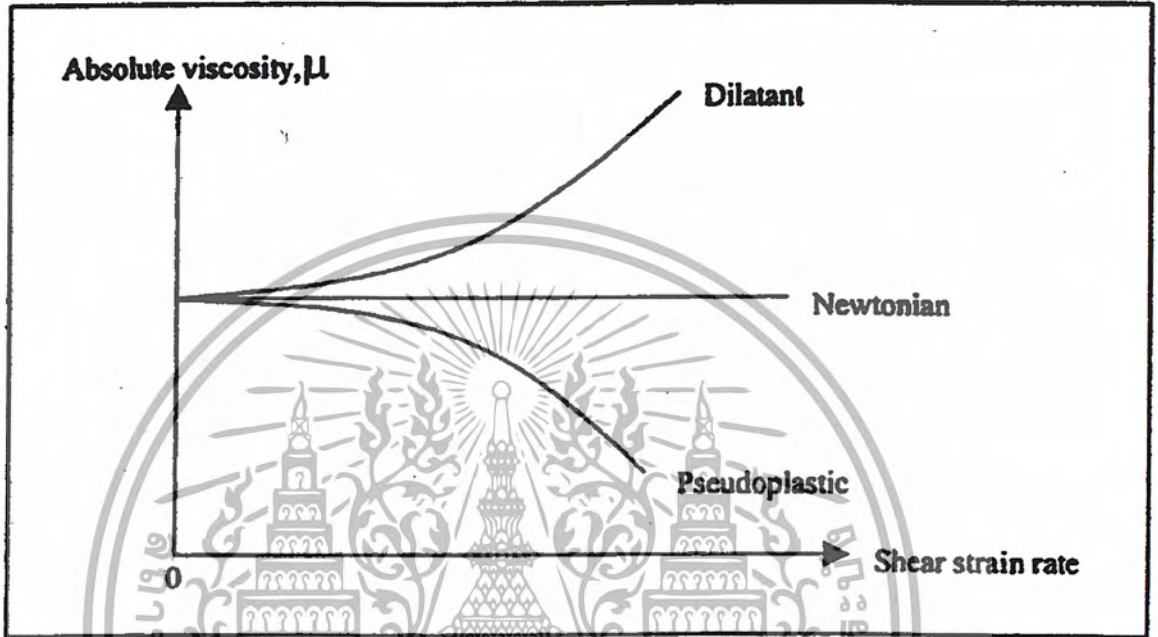
$$\tau = \tau_y + \mu_p \frac{du}{dy} \quad (2.4)$$

ในสมการที่ (2.2) ถ้า $n=1$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน และถ้า $n > 1$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนชนิดไดลาแตนท์ (dilatant) หรือ ถ้า $n < 1$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนชนิดซูโดพลาสติก (pseudoplastic) ในส่วนสมการที่ 2.3 ถ้า $k=0$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน และ ถ้า $k > 0$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลแบบนอนนิวโตเนียนชนิดซูโดพลาสติก ถ้า $k < 0$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนชนิดไดลาแตนท์



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือน

สมการที่ (2.4) เราเรียกของไหลชนิดนี้ว่าของไหลชนิดพลาสติกบิงแฮม ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับอัตราความเครียดเฉือนเป็นแบบเชิงเส้นเหมือนกับของไหลชนิดนิวโตเนียน แต่ต่างกับสารหล่อลื่นนิวโตเนียนตรงที่ค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้นของของไหลไม่เริ่มต้นที่ศูนย์ ซึ่งเราเรียกว่าความเค้นเฉือนที่จุดเริ่มต้นนี้ว่า ความเค้นเฉือนที่จุดคราก (yield point) τ_y โดยถ้า $\tau_y = 0$ จะมีคุณสมบัติเป็นสารหล่อลื่นแบบนิวโตเนียน



รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสัมบูรณ์และอัตราความเครียดเฉือน

บทที่ 3

สารเพิ่มคุณภาพ

3.1 สารเพิ่มคุณภาพ

เครื่องจักรกลและเครื่องยนต์ปัจจุบันได้รับการออกแบบให้มีขนาดเล็กลง ทำงานเร็วขึ้นและภาวบน้ำหนักก็สูงขึ้น น้ำมันหล่อลื่นในเครื่องจักรเครื่องยนต์ดังกล่าวมักต้องประสบกับสภาวะ ด้านอุณหภูมิ ความเครียด และภาวบน้ำหนักน้ำหนักสูง น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานล้วนๆ มักจะยังมีคุณภาพดีไม่เพียงพอที่จะทำหน้าที่ต่างๆ ให้ได้ครบถ้วน โดยมีอายุการใช้งานที่สั้นตามสมควรดังนั้น จึงต้องมีการเติมสารบางอย่าง ทั้งในด้านชนิดและปริมาณที่พอดีเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานให้ดีเหมาะสมกับงานที่ต้องการ การเพิ่มคุณภาพ อาจใช้เพิ่มคุณสมบัติเชิงเคมีหรือคุณสมบัติของน้ำมันพื้นฐาน

น้ำมันหล่อลื่นมักจะผลิตขึ้นมาเพื่อใช้งานเฉพาะอย่าง เช่น น้ำมันเครื่องยนต์ น้ำมันเกียร์ น้ำมันไฮดรอลิก เป็นต้น ในการที่จะผลิตน้ำมันหล่อลื่นชนิดใดชนิดหนึ่งมานั้น จะมีการพิจารณาถึงหน้าที่ที่น้ำมันหล่อลื่นนั้น และสภาวะต่างๆ ที่น้ำมันหล่อลื่นนั้นจะต้องประสบในขณะที่ทำงานหล่อลื่นจากนั้นจึงสามารถกำหนดคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ต้องการ แล้วจึงเลือกสรรน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและชนิด / ปริมาณของสารเพิ่มคุณภาพที่เหมาะสมเพื่อผลิตน้ำมันหล่อลื่นให้มีคุณภาพดีเหมาะสมกับงานที่ต้องการ จากนั้นจึงการทดลองกับงานจริง และประเมินผลเพื่อให้แน่ใจว่าน้ำมันหล่อลื่นดังกล่าวมีคุณภาพดีตรงตามความต้องการ น้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดจึงใช้น้ำมันพื้นฐาน ชนิดและปริมาณของสารเพิ่มคุณภาพ ไม่เหมือนกัน ดังนั้น การเลือกใช้งานจึงต้องเลือกให้ถูกชนิดด้วย น้ำมันจึงจะสามารถทำการหล่อลื่น ได้มีประสิทธิภาพ ในการเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นสำหรับงานใดงานหนึ่งนั้นจะต้องพิจารณาทั้งด้านความข้นใสและด้านสมรรถนะหรือคุณสมบัติประกอบกัน จะพิจารณาเฉพาะด้านใดด้านหนึ่งไม่ได้ ดังนั้น จึงมีการกำหนดมาตรฐานของน้ำมันหล่อลื่นทั้งด้านความข้นใส เช่น มาตรฐานความข้นใส SAE น้ำมันเครื่องยนต์ และมาตรฐานความข้นใส ISO สำหรับน้ำมันอุตสาหกรรม และทางด้านสมรรถนะ เช่น มาตรฐานด้านสมรรถนะของน้ำมันเกียร์รถยนต์ของ API เป็นต้น

เนื่องจากสารคุณภาพต่างๆ ที่เติมในน้ำมันหล่อลื่นนั้น เป็นสารเคมีซึ่งปกติแล้วถ้าไม่เป็นกรดอ่อนก็เป็นเป็นด่างอ่อน ที่เป็นกลางก็มีอยู่บ้าง ความซับซ้อนในการออกสูตรน้ำมันหล่อลื่นอยู่ตรงที่การเลือกสรรสารเพิ่มคุณภาพชนิดต่างๆ ที่จะต้องมาอยู่ด้วยกันแล้วไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อกันและบางครั้งก็ช่วยเสริมคุณสมบัติซึ่งกันและกัน ดังนั้น โดยปกติแล้วการนำน้ำมันต่างชนิดกันมาผสมปะปนกันจึงเป็นสิ่งที่ไม่ควรกระทำ เพราะมีความเสี่ยงที่สารเคมีเพิ่มคุณภาพในน้ำมันทั้งสองชนิดนั้นเกิดทำปฏิกิริยาต่อสารตกตะกอนและเสื่อมคุณสมบัติไปได้นอกจากจะได้มีการทดสอบอย่างแน่ชัดแล้วว่าน้ำมันทั้งสองชนิดสามารถปะปนกันได้

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงสารเพิ่มคุณภาพ

ประเภทของสารเพิ่มคุณภาพ	ชนิดของสารเคมีที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติต่างๆ	เหตุผลที่ใช้
สารเพิ่มคุณภาพเชิงเคมี สารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Anti-Oxidants)	-Zinc Dialky Dithiophosphate -Bis – Phenols -Aromatic Amines	ใช้กับน้ำมันหล่อลื่นในงานที่มีอุณหภูมิและน้ำมันสัมผัสกับอากาศหมุนเวียน ใช้ลดการเกิดวานิชและตะกอนจากน้ำมันยืดอายุการใช้งานของน้ำมัน
สารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion Inhibitors)	-High Base Additives Sulfonates, Phosphates -Zinc Dialkyl Dithiophosphates -d Terpenes	ใช้เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของสาร เช่น กรดที่จะกระทำต่อผิวชิ้นส่วนเครื่องกล เช่น ในเครื่องยนต์
สารป้องกันสนิม (Anti-Rust Additives)	-Polar Compounds Such as Metallic soap, Ester, Ethers -Organic Acid -Amines	ใช้เพื่อป้องกันสนิมในงานที่อาจมีความชื้นหรือน้ำเข้ามาสัมผัสผิวโลหะ
สารป้องกันการสึกหรอ (Anti – Wear Additives)	-Zinc Dialky Dithiophosphate -Tricresyl Phosphate	ป้องกันการสึกหรอของผิวชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่รับภาระน้ำหนักสูงซึ่งมักจะเกิด Boundary Lubrication ขึ้นบ่อยๆ
สารรับแรงกดสูง (Extreme Pressure Additives)	-Organic Compounds of Sulfur, Phosphorus or Chlorine Lead Naphthenate, Lead Soap	ใช้เพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มน้ำและเพิ่มความสามารถในการรับภาระน้ำหนัก ป้องกันที่สึกหรอและหลอมติดในภาชนะน้ำหนักสูง
สารชะล้างและกระจายสิ่งสกปรก (Detergents and Dispersants)	-Metallic Sulfonates, Phenates and phosphates -Amines , phenol -Alkyl substituted salicylates -Succinimides	ใช้ชะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวชิ้นส่วนเครื่องจักร และกระจายมิให้รวมตัวเป็นโคลนตะกอนจำเป็นสำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์
สารเป็นด่าง (Alkaline Agents)	-Overbased metallic sulfonates, phenates and phosphates	ใช้ทำลายกรดที่เกิดจากการเผาไหม้กำมะถันในเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่หรือใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารลดปฏิกิริยาแรงของผิวโลหะ (Metal Deactivators)	-Zinc Dialky Dithiophosphate -Metal Phenates OrganicNitrogenCompound	ใช้ลดและป้องกันผลจากปฏิกิริยาแรงของผิวโลหะต่างๆ เช่นทองแดง ตะกั่ว เหล็ก โครเมียมในเครื่องจักรกลที่กระตุ้นให้น้ำมัน ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้น้ำมันเสื่อมสภาพช้าลง
สารเปลี่ยนแปลงความฝืด (Friction Modifiers)	-Molybdenum Disulfide -Amides , Amines	ใช้เปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดของผิวชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่สัมผัสกับน้ำมัน
สารเพิ่มคุณภาพเชิงกายภาพ สารเพิ่มดัชนีความข้นใส (Viscosity – Index Improver)	-Polyisobutylene -Methacrylate -Acrylatecopolymers	ใช้ลดอัตราการเปลี่ยนแปลงความข้นใสตามอุณหภูมิของน้ำมันใช้ในน้ำมันมัลติเกรด
สารลดจุดไหลเท (pour Point Depressants)	-Methacrylate Polymer -Wax Alkylated phenol its polymers	ใช้ลดจุดไหลแข็งตัวของน้ำมันซึ่งเกิดขึ้นเพราะไขในน้ำมันแยกตัวเป็นผลึกโดยป้องกันมิให้ผลึกไขเกาะตัวเป็นกลุ่มทำให้น้ำมันสามารถไหลได้ในอุณหภูมิต่ำ
สารป้องกันฟอง (Anti - Foamants)	-Silicone Polymer -Organic Polymer	ใช้ป้องกันการเกิดฟองถาวรเมื่อน้ำมันถูกหมุนเวียน ใช้ในระบบเช่น ในอ่างน้ำมันเครื่องเทอร์โบรูดลิก
สารเพิ่มความข้นและความแข็งแรงของฟิล์มน้ำมัน (Oiliness & film strength)	-Lard oil -Tallow, Sperm oil -Blown rapeseed oil synthetic esters of fatty acid	ใช้เพิ่มความข้นและเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มน้ำมัน และทำให้น้ำมัน และทำให้น้ำมันเข้ากับน้ำได้บ้าง
สารช่วยให้น้ำมันเข้ากับน้ำ (Emulsifiers)	-Surfactant -Soap of fats and fatty acid -Sodium sulfonates polar compounds	ใช้ลดแรงผิวระหว่างน้ำกับน้ำมันสามารถแขวนตัวเป็นเม็ดละเอียดในน้ำใช้ใส่น้ำมันสูญ
สารหล่อลื่นที่เป็นของแข็ง (Solid lubricants)	-Graphite -Molydenum disulfide	ใช้เพิ่มคุณสมบัติในการหล่อลื่นในสถานะอุณหภูมิสูงมาก และ

สารหล่อลื่นที่เป็นของแข็ง (Solid lubricants)	-Graphite -Molydenum disulfide	ใช้เพิ่มคุณสมบัติในการหล่อลื่น ในสภาวะอุณหภูมิสูงมาก และ ภาระน้ำหนักกระแทกกระทั้น
สี (Dyes)	-Alkylated aniline dyes -Azo dyes -Anthraquinone dyes	ใช้เติมเพื่อให้น้ำมันหล่อลื่นและ จารบีมีสีตามต้องการเพื่อสังเกต แยกชนิดได้

3.2 การผลิตน้ำมันพืชในประเทศ

การผลิตน้ำมันพืชภายในประเทศในระยะที่ผ่านมาผลผลิตน้ำมันพืชในประเทศไทยมักไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการผลิตไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ ทำให้ผลผลิตที่ได้มีน้อย ต่อมาได้มีการนำเอาเครื่องจักรมาช่วยในการผลิตทำให้สามารถผลิตน้ำมันพืชได้มากขึ้น สำหรับผลผลิตที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดได้แก่ น้ำมันปาล์ม รองลงมาได้แก่ น้ำมันมะพร้าว ไขถั่วเหลือง น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันถั่วเหลือง ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 แสดงผลผลิตของน้ำมันพืช (หน่วย : เมตริกตัน)

ชนิดของน้ำมันพืช	ผลผลิต		
	2522	2523	2524
น้ำมันมะพร้าว	14,965	19,000	14,000
น้ำมันถั่วลิสง	3,028	14,000	12,000
น้ำมันรำข้าว	10,288	16,500	14,000
น้ำมันถั่วเหลือง	6,104	13,200	11,000
น้ำมันเมล็ดนุ่น	1,979	6,200	5,000
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	5,455	3,000	2,500
น้ำมันปาล์ม	12,000	16,000	20,000
น้ำมันละหุ่ง	2,704	13,000	17,000
อื่นๆ	4,000	5,500	5,000
รวม/เฉลี่ย	60,523	106,400	100,000

ที่มา : ฝ่ายวิชาการ ธนาคารแห่งประเทศไทย

3.3 องค์ประกอบของน้ำมันพืช

น้ำมันพืชเป็นสารอินทรีย์จำพวกหนึ่ง ซึ่งส่วนประกอบของกลีเซอรอล (Glycerol) กับกรดไขมัน (fatty acid) ดังนี้



เมื่อ R', R'', R''' = โข่ของกรดไขมัน

3.4 ประเภทของกรดไขมัน

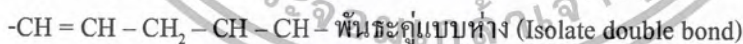
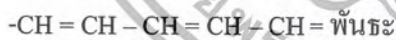
กรดไขมันเป็นสารซึ่งประกอบด้วยหมู่ คาร์บอกซิล (carboxyl group) ต่ออยู่กับโซ่ไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon chain) ในโมเลกุลของกรดไขมันอาจมีการจับกันระหว่างธาตของคาร์บอนทั้ง 1 บอนด์ และ 2 บอนด์ โดยพวกที่มี 1 บอนด์ จะเป็นกรดไขมันอิ่มตัว (Saturated) พวกที่มี 2 บอนด์ จะเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated)

1. กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acids)

กรดไขมันอิ่มตัวเป็นกรดไขมันที่ไม่มีพันธะคู่ (Double bond) บนสายโซ่จะต่ออยู่กับไฮโดรเจนอย่างน้อย 2 ตัว หากในน้ำมันพืชมีกรดไขมันอิ่มตัวอยู่มากจะทำให้ในน้ำมันพืชนั้นเป็นไขมัน ตัวอย่างของกรดไขมันอิ่มตัวนี้ได้แก่ กรดสเตียริก (Stearic acid) กรดปาล์มมิติก (Palmitic acid) กรดลอริก (Lauric) และ กรดไมริสติก (Myristic) เป็นต้น โครงสร้างของกรดไขมันเหล่านี้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

2. กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acids)

กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่โซ่ไฮโดรคาร์บอนจะประกอบด้วยพันธะคู่ตั้งแต่ 1 คู่พันธะขึ้นไป ซึ่งตำแหน่งของพันธะคู่ของกรดไขมันแต่ละชนิดก็จะแตกต่างกันออกไป โดยถ้ามีพันธะเดียวคั่นอยู่ระหว่างพันธะคู่จะเรียกแบบนี้ว่า พันธะเดี่ยวสลับคู่ (Conjugate double bond) ดังแสดงเป็นตัวอย่างดังนี้



ตารางที่ 3.3 แสดงโครงสร้างของกรดไขมันชนิดต่างๆ

ชื่อของกรดไขมัน	จำนวนคาร์บอน	สูตรโครงสร้าง
กรดลอริก(Lauric)	C 12	$CH_3 - (CH_2)_{10} - COOH$
กรดไมริสติก (Myristic)	C 14	$CH_3 - (CH_2)_{12} - COOH$
กรดปาล์มมิติก (Palmitic)	C 16	$CH_3 - (CH_2)_{14} - COOH$
กรดสเตียริก (Stearic)	C 18	$CH_3 - (CH_2)_{16} - COOH$
กรดออลีอิก (Oleic)	C 18.1	$CH_3 - (CH_2)_7 - CH = CH - (CH_2)_7 - COOH$
กรดลิโออิก (Linoleic)	C 18.2	$CH_3 - (CH_2)_4 - CH = CH - CH_2 - CH = CH - (CH_2)_7 -$
กรดลิโนลีนิก (Linolenic)	C 18.3	$COOH$ $CH_3 - CH_2 - CH = CH - CH_2 - CH = CH - CH_2 - CH = CH -$ $(CH_2)_7 - COOH$

ตารางที่ 3.4 ชนิดของกรดไขมันในน้ำมันพืช

No.fo		Palm	Cotton	Rape	Soybean					
Carbon		Coconut	kernel	Palm	seed	seed	Tallow	Tallow		
Atoms	Name of acid	oil	oil	oil	oil	oil	(beef)	(mutton)	Lard	oil
Saturated Acids										
12	Lauric	44-51	47-52	...	...	...	...	...	...	...
14	Myristic	13-19	14-18	0.5-3	1	1	3-6	4-10	1-2	1
16	Palmitic	8-11	7-9	32-45	26-31	1-5	25-37	24-38	22-31	10
18	Stearic	1-3	1-3	4-7	3-5	1-3	14-29	15-30	16-24	2

Total (Typical).....		92	81	40-50	28-35	3-8	50-55	52-57	35-40	13
Unsaturated Acids										
Monounsaturated										
18	Oleic	5-8	11-19	38-53	19-26	14-38	26-50	38-48	38-44	29
Diunsaturated										
18	Linoleic	1.0-2.5	0.5-2	6-12	37-50	10-22	1-3	...	4-9	51
22	Erucic	...	...	...	...	40-64	...	...	...	...
Triunsaturated										
18	Linoleic	...	...	...	...	...	8-12	...	1-2	7

Total (Typical) ...		8	19	50-60	60-70	92-97	44-52	40-50	60-65	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันพืช (Oxidation Mechanisms)

น้ำมันพืชเป็นสารประกอบอินทรีย์ (Organic compound) สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายกว่า ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ (Chain reaction) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นเริ่มต้น (initiatin) เป็นขั้นตอนที่มีการเกิดอนุมูลอิสระ หรือที่เรียกว่า radical reaction



เมื่อ RH คือ กรดไขมัน

R* คือ alkyl radical

RO₂* คือ alkylperoxy radical

2. ขั้นแพร่กระจาย (Propabation) เป็นขั้นตอนที่อนุมูลอิสระ หรือ free radical จับกับโมเลกุลของออกซิเจนเกิดเป็นเปอร์ออกซิอิสระ (peroxy radical) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของกรดไขมัน (RH) เพื่อเกิดเป็น เปอร์ออกไซด์ และอนุมูลอิสระตัวใหม่ (R*) ซึ่งสามารถจับโมเลกุลของออกซิเจน (O₂) ในอากาศได้อีกด้วย ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ จนกว่า ออกซิเจน หรือ RH จนหมดไป ส่วนสารเปอร์ออกไซด์ที่ได้จะเป็นสารที่ไม่เสถียรซึ่งจะสลายตัวได้ง่าย สารเปอร์ออกไซด์เหล่านี้จะเป็นตัวทำให้เกิดตะกอน (sludge) หรือ ยางเหนียว (gum) ในน้ำมันพืช



3. ขั้นสิ้นสุด (Terminal) ของปฏิกิริยา เป็นขั้นที่อนุมูลอิสระหรือ free radical เข้าทำปฏิกิริยากันเอง ได้สารที่ไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยา (nonradical products) ซึ่งเกิดจาก

ก. อนุมูลอิสระของ Peroxy radicals (RO₂*) เข้าทำปฏิกิริยากันเองดังนี้



ข. เกิดการ cross terminal ของ alkyl radical (R*) กับ peroxy radicals (RO₂*)



ค. เกิดการทำปฏิกิริยากันเอง ของ alkyl radical (R*) ด้วยกันเองดังนี้



3.6 สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันพืช

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า น้ำมันพืชเป็นสารประกอบอินทรีย์ จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย โดยเฉพาะถ้าในน้ำมันพืชมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่ในโมเลกุลมาก จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ง่าย ดังนั้นจึงได้มีการพยายามหาสารที่มาช่วยยับยั้งหรือ หน่วงให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์จนเกิดได้ช้าลง หรือไม่เกิดขึ้นเลย

โดยปกติในน้ำมันพืชจะมีสารต้านทานการเกิดออกซิไดซ์ชั้นอยู่ในโมเลกุลของน้ำมันพืชด้วย เช่น สารโทโคฟีรอล (Tcopherol) และอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งในน้ำมันพืชแต่ละชนิดก็จะมีปริมาณของสารมากน้อยไม่เท่ากัน

สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่มีอยู่ในน้ำมันนั้นอาจถูกทำลายหรือสูญเสียไปในระหว่างขั้นตอนกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงได้มีการเติมสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันเพิ่มเข้าไปในน้ำมันพืชด้วยสารที่เติมเข้าไปจะยับยั้ง หรือเข้าไปหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) ซึ่งอาจเป็น ตอนเริ่มต้น (initiation) หรือในขั้นตอนการแพร่กระจาย (Propagation) ก็ได้ ขึ้นอยู่กับประเภทและชนิดของสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันนั้น สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันกับอากาศมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดก็มีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ในรูปที่ 3.1 เป็นการแสดงผลของการใช้น้ำมันซิลิโคน (silicone) เป็นสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันใส่ลงในน้ำมันปาล์ม (5) จากรูปจะเห็นว่าค่าของกรด และค่าเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันพืชที่ไม่ได้ใส่น้ำมันซิลิโคน และจากการวิจัยของ Freeman(10) พบว่าการผสมน้ำมันซิลิโคนลงในน้ำมันพืชยังสามารถป้องกันการเกิดฟองได้ด้วยซึ่งโดยปกติจะใช้ในปริมาณน้อยโดยประมาณ 1 – 2 ppm

3.7 คุณสมบัติของน้ำมันพืช

1. จุดหลอมเหลว (Melting point)

คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง ได้แก่จุดหลอมเหลว ซึ่งในตารางที่ 3.6 จะเห็นว่าน้ำมันปาล์มมีจุดหลอมเหลวสูง จึงทำให้น้ำมันปาล์มปรากฏเป็นไขมันเหลว ที่อุณหภูมิ 35 ส่วน น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันถั่วเหลือง จะมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 25 องศา และ -16 องศา ตามลำดับซึ่งต่ำกว่าน้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 3.5 แสดงจุดหลอมเหลว ของน้ำมันพืช

ชนิดของน้ำมันพืช	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
น้ำมันปาล์ม	35 องศาเซลเซียส
น้ำมันมะพร้าว	25 องศาเซลเซียส
น้ำมันถั่วเหลือง	16 องศาเซลเซียส

2. ค่าความหนืด (Viscosity)

ค่าความหนืดเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในความสามารถในการต้านทานการไหล หากน้ำมันพืชมีค่าความหนืดต่ำก็จะไหลได้ง่ายและให้ชั้นฟิล์มน้ำมันที่บาง ส่วนในน้ำมันพืชที่มีค่าความหนืดสูง ก็จะใช้ฟิล์มที่หนากว่า ค่าความหนืดของน้ำมันพืชในแต่ละชนิดก็จะมีค่าแตกต่างกันออกไปดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าความหนืดของน้ำมันพืช

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนืด		
	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันปาล์ม
25	51.7	52.3	73.3
40	31.7	33.4	42.3
60	18.5	20	23.7
80	11.1	12.9	12.9
100	9.5	9.09	9.09

3. การดูดซับน้ำมันพืชกับ โลหะ (Adsorption)

จากที่กล่าวมาข้างต้นแล้วว่าในน้ำมันพืชประกอบไปด้วยโมเลกุลของกรดไขมัน (fatty acid) ซึ่งจะประกอบไปด้วยหมู่ที่มีขั้ว (Polar group) ซึ่งก็คือส่วนของ $-COOH$ และในหมู่ที่ไม่มีขั้ว (non polar group) คือส่วนของ $-CH_2$ ซึ่งการมีขั้วของกรดไขมันในน้ำมันพืชนี้ จะมีความสำคัญอย่างมากต่อกลไกการยึดเกาะของกรดไขมันกับผิวของโลหะ กลไกการยึดเกาะของกรดไขมันนี้เราเรียกว่า การดูดซับ (Absorption) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

3.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical absorption หรือ Physisorption)

การดูดซับทางกายภาพของกรดไขมันบนผิวโลหะนี้ เกิดจากการที่หมู่ที่มีขั้ว ($-COOH$) หัวขั้วเข้าหาผิวโลหะ อันเนื่องมาจากแรงดึงดูดทางฟิสิกส์ หรือที่เรียกกันว่าแรงวานเดอร์วาลส์ (van der Waals) ในขณะเดียวกันก็จะเอาส่วน ไม่มีขั้ว ($-CH_3$) หันเข้าหาส่วนที่ไม่มีขั้วของโมเลกุลพวกเดียวกัน ทำให้เกิดการเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบของโมเลกุลของกรดไขมันตลอดผิวโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งความสามารถในการดูดซับทางกายภาพนี้จะขึ้นอยู่กับขั้ว (Polar) โมเลกุลของกรดไขมันชนิดนั้นๆ ด้วย

3.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption)

การดูดซับทางเคมีของกรดไขมันบนผิวโลหะนี้ เกิดจากการทำปฏิกิริยากันของกรดไขมันกับโลหะซึ่งจะได้สารประกอบของโลหะ หรือที่เรียกว่าออกไซด์ ยกตัวอย่างเช่น การเกิดปฏิกิริยาของกรดสเตียริก (stearic acid) กับโลหะที่เป็นเหล็ก จะก่อให้เกิดสารประกอบของโลหะที่เรียกว่าสเตียเรท (Iron stearate) และสนิมของโลหะ หรือเหล็กออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งจะเห็นว่า การดูดซับทางเคมีนี้จะทำให้เกิดการสร้างชั้นของสนิมซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นบางๆ (surface layer) ล้อมรอบผิวโลหะนั้นไว้

การดูดซับทางเคมีนี้อาจจะมีการสร้างชั้นสนิมของกรดไขมันบนผิวโลหะขึ้น การดูดซับทางเคมีนี้ จะมีการสร้างชั้นสนิมของกรดไขมันบนผิวโลหะ ซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นบางๆ ตลอดรอบผิวของโลหะ

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติของน้ำมันพืช

คุณสมบัติ	น้ำมันปาล์มรีไฟน์	น้ำมันมะพร้าว
ความหนืดสัมบูรณ์, mPa.s		
@25 องศาเซลเซียส	71.6	5839
@40 องศาเซลเซียส	42.3	33.5
@60 องศาเซลเซียส	26.7	19.8
@80 องศาเซลเซียส	12.9	12.5
@100 องศาเซลเซียส	9.09	10.3
ความหนืดจลน์, cSt		
@40 องศาเซลเซียส	30.92	29.79
@100 องศาเซลเซียส	6.5	6.06
จุดหลอมเหลว (Melting point)	35 องศาเซลเซียส	25 องศาเซลเซียส
ค่าไอโอดีน (Iodine number), g	44-60	7.5-10
ค่าซาปอนิฟิเคชัน	190-195	246-265

ตารางที่ 3.8 คุณสมบัติของสารเติมแต่ง

ประเภทของสารเติมแต่ง	คุณสมบัติ
สารเพิ่มดัชนีความหนืด Polyisobutylene Polymethacrylate Styrene based polyester Styrene based copolymer Ethylene propylene copolymer	เป็นสารที่ช่วยลดอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปช่วยให้ น้ำมันหล่อลื่นสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่ต่าง ๆ กัน
สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันกับอากาศ Zinc dithiophosphate Phenate sulfide Phospho sulfide Aromatic amine Sulfurized esters Hindered phenol	เป็นสารที่ช่วยหน่วง หรือต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศ ไม่ให้ทำปฏิกิริยากับน้ำมัน โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงๆ
สารช่วยกระจายเขม่าตะกอน Polyisobutenyl succinimide Polyisobutenyl succinic ester	สารชนิดนี้จะทำหน้าที่คอยจับสิ่งสกปรก หรือสิ่งแปลกปลอมที่ปนอยู่ในน้ำมันให้รวมตัวกันอยู่ที่ก้นอ่างน้ำมัน ในรูปของตะกอนน้ำมัน หรือวานิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารต้านการสึกกร่อน Zinc ditthiophosphate Dithiocarbamate Alkaline detergent	เป็นสารที่ช่วยลดการสึกกร่อนที่เกิดจากการกัดกร่อน
สารป้องกันการเกิดสนิม Alkaline detergent Alkenylsuccinic acid Alkelate phenoxy alkaline oxide	เป็นสารที่ทำหน้าที่ให้สารหล่อลื่นจับตัวกันจับตัวกัน ช่วยลดการทำปฏิกิริยาระหว่างความชื้นกับโลหะ ลดการเกิดออกไซด์
สารช่วยชะล้างทำความสะอาด (Detergentes) Sulfonate Phenate Phosphonate Salicylate	จะทำหน้าที่ป้องกันการรวมตัวของคราบตะกอนที่เกิดขึ้น
สารลดจุดไหลเท (Pour point depressante) Polymethacrylate Styrene based polyester Crosslinked alkyl phenols Alkyl naphthalene	เป็นสารที่ใช้ควบคุมการเกิดเป็นขี้ผึ้ง ในน้ำมัน โดยเฉพาะในที่อุณหภูมิต่ำๆ ทำให้น้ำมันหล่อลื่นไม่แข็งตัว
สารต้านทานการเกิดฟอง (Anti-foaming agents) Silicone Polycrylates	มีหน้าที่ขจัดขว้าง หรือลดการเกิดฟองทั้งที่เกิดจากน้ำมันและสารเติมแต่งตัวอื่น จะลดแรงตึงผิวของสารหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

GEAR

4.1 ชนิดของเฟือง

4.1 Spur Gear หรือเฟืองตรงเฟืองชนิดนี้จะมีพื้นที่ขนานกับแกนการหมุนของเฟืองและถ่ายทอดกำลังจากเพลานึงสู่อีกเพลานึง

4.2 Helical Gear หรือเฟืองเฉียงจะมีพื้นที่ทำมุมกับแนวแกนการหมุนของเฟือง สามารถใช้งานเช่นเดียวกับเฟืองตรง เฟืองชนิดนี้จะทำงานเงียบกว่าเฟืองตรงแต่จะมีแรงรบกวนเกิดขึ้นมา

4.3 Bevel Gear จะมีเฟืองรูปกรวยตัดมีใช้มากในการถ่ายทอดกำลังที่ต้องการเปลี่ยนทิศทางการหมุน เช่นเฟืองท้าย

4.4 Worms and worms Gear มีลักษณะคล้ายสกรูทิศทางการหมุนไปตามแนวแกน จะมีทั้งหมุนซ้ายและหมุนขวา

4.2 คำจำกัดความของเกียร์

เป็นคำที่ใช้ในการเรียกส่วนต่างๆ ของเฟืองโดยพิจารณาตามรูป



รูปที่ 4.1 แสดงส่วนต่างๆของเฟือง

4.2.1 วงกลมพิตช์ (pitch circle) d เป็นมิติหลักในการเรียกขนาดของเฟือง โดยบอกขนาดของเฟืองด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ (pitch diameter) ในทางทฤษฎีแล้วเฟืองที่ขบกันต้องมีเส้นสัมผัส ณ วงกลมพิตช์

4.2.2 เซอร์คิวลาพิตช์ (circular pitch) p เป็นระยะที่วัดบนวงกลมพิตช์ จากจุดหนึ่งบนพื้นเฟืองไปยังอีกจุด ณ ตำแหน่งเดียวกันบนพื้นถัดไป

4.2.3 โมดูล(module) m เป็นอัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์กับจำนวนฟันเฟือง หน่วยที่ใช้วัดคือมิลลิเมตรในหน่วย SI

4.2.4 ไดอะมิทริคพิตช์ (diametral pitch) P เป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนฟันเฟืองต่อเส้นผ่าน

ศูนย์กลางพิตช์ ดังนั้นจึงเป็นส่วนกลับของโมดูล ไดอะมิทริคพิตช์นี้เป็นหน่วยของอังกฤษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 แอดเดนดัม (addendum) a หรือช่วงสูงบน เป็นระยะที่วัดในแนวรัศมีระหว่างยอดฟัน (top land) ถึงวงกลมพิตช์

4.2.6 ดีเดนดัม (dedendum) d หรือช่วงสูงล่าง เป็นระยะที่วัดในแนวรัศมีระหว่างโคนฟัน (bottom land) ถึงวงกลมพิตช์ฉะนั้นความสูงของฟันเฟืองคือ ผลรวมของแอดเดนดัมและดีเดนดัม

4.2.7 เคลียร์รันซ์ (clearance) c ในการที่เฟืองสองอันขบกันดีเดนดัมของเฟืองหนึ่งต้องมากกว่า แอดเดนดัมของอีกเฟืองหนึ่ง เพื่อจะไม่ให้เกิดการขัดกัน ผลต่างระหว่างค่าดีเดนดัมและแอดเดนดัมเรียกว่า clearance

4.2.8 เบ็คแล็ช (backlash) คือผลต่างระหว่างความกว้างของฟันเฟืองหนึ่งกับความกว้างของอีก ฟันเฟืองหนึ่งที่ขบกัน โดยวัดตามแนวเส้นวงกลมพิตช์ฉะนั้นในการขบด้วยเฟืองที่มีเบ็คแล็ชเฟืองขับจะ หมุนไปได้เล็กน้อยก่อนที่เฟืองตามจะหมุน ซึ่งเบ็คแล็ชนี้ต้องมีอยู่เสมอเพื่อให้มีช่องว่างให้น้ำมันเข้าไปหล่อลื่น

$$P = \frac{N}{d} \tag{4.1}$$

$$m = \frac{d}{N} \tag{4.2}$$

$$p = \frac{\pi d}{N} = \pi m \tag{4.3}$$

$$pP = \pi \tag{4.4}$$

- เมื่อ P คือโคะสมิทรัลพิตช์
- m คือโมดูล
- d คือวงกลมพิตช์
- N คือจำนวนฟัน
- p คือเซอร์คิวลาพิตช์

4.2.9 ความหนาของฟัน (face width) b คือความหาของฟันเฟืองวัดในทิศทางแนวเดียวกับแกนเฟือง

4.2.10 แฟล็ง (flank) คือผิวด้านข้างของฟันเฟืองซึ่งอยู่ระหว่างวงกลมพิตช์กับวงกลมดีเดนดัม

4.2.11 อัตราทด (velocity ratio) m_w คืออัตราส่วนระหว่างความเร็วเชิงมุมของเฟืองขับต่อความเร็วเชิงมุมของเฟืองตามถ้าให้ 1 และ 2 แทนเฟืองขับและเฟืองตามลำดับแล้วจะได้ว่า

$$m_w = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{N_2}{N_1} \tag{4.5}$$

- โดยที่ ω แทนความเร็วเชิงมุม rad/sec n ความเร็วรอบ
- d เส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ mm N จำนวนฟันเฟือง

อัตราส่วนเฟือง (gear ratio) m_g คืออัตราส่วนระหว่างจำนวนฟันเฟืองต่อจำนวนฟันของพิเนียนถ้าพิเนียนเป็นตัวขับแล้ว

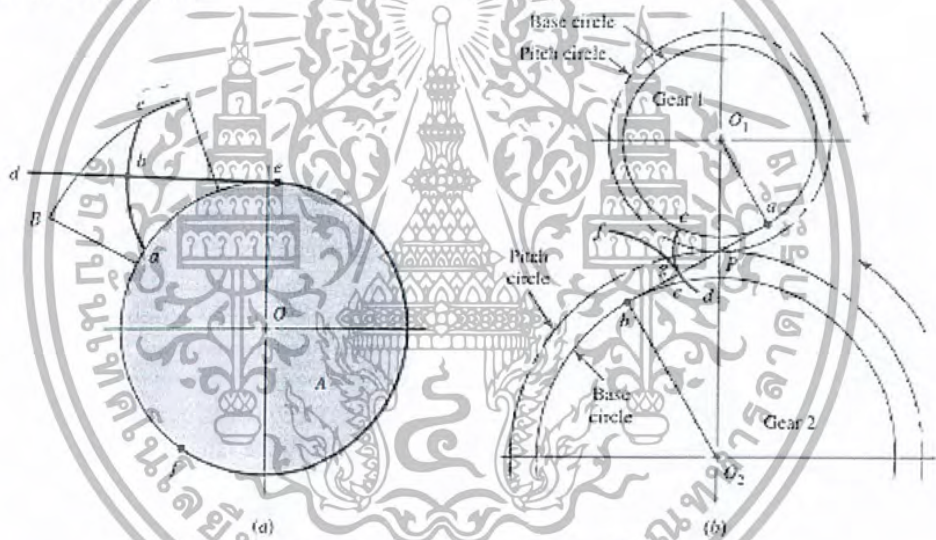
$$m_g = m_\omega = \frac{N_1}{N_2} \tag{4.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 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	

4.3 คุณสมบัติแบบ Involute

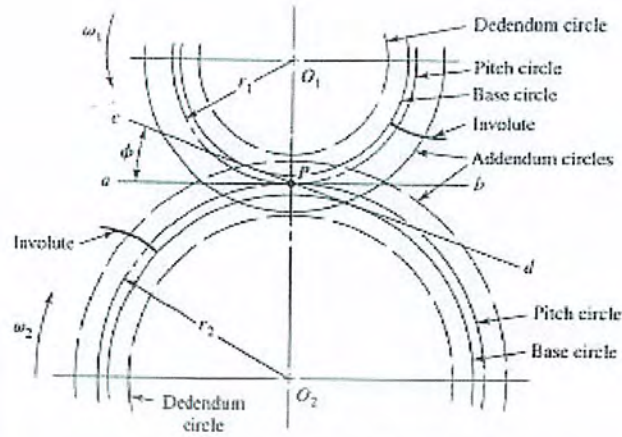


รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะเฟืองแบบ Involute curve

เฟืองแบบ Involute curve สามารถสร้างได้จากรูปที่ 4.2 (a) โดยแผ่นกระดาษ B ยึดติดกับทรงกระบอก A แล้วใช้เชือก def พันส่วนโค้งรอบทรงกระบอกแล้วกำหนดจุดที่บนแผ่นกระดาษเป็นจุดเคลื่อนที่คือจุด b ในรูปเมื่อหมุนทรงกระบอกจะทำให้เกิดเป็นเส้นโค้งจากการเคลื่อนที่ของจุด b ซึ่งเป็นลักษณะของ Involute curve ซึ่งความยาวของ ab จะเท่ากับความยาวของ de วงกลมที่เป็นฐานของ Involute curve เรียกว่าวงกลมฐาน (base circle)

เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.2 (b) ซึ่งทรงกระบอกถูกยึดไว้ที่จุด O_1 และ O_2 และมีรัศมี O_1a และ O_2b และให้มีเชือกตึงระหว่างจุด a และ b แล้วหมุนทรงกระบอกให้เชือกตึงตลอดเวลาจะทำให้เกิดเป็นเส้นการเคลื่อนที่คือเส้น cd และ ef ในรูปซึ่งเส้น ab จะตั้งฉากกับเส้น cd และ ef ตลอดเวลาและทำให้เป็นจุดที่เกิดการสัมผัสกันตลอดเวลา เมื่อเป็นอย่างนี้จะทำให้ไม่เกิดการฉุดกันที่หน้าสัมผัสเฟืองและจุด P นี้เป็นเส้นวงกลมพิทช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงส่วนทั้งหมดของเฟือง

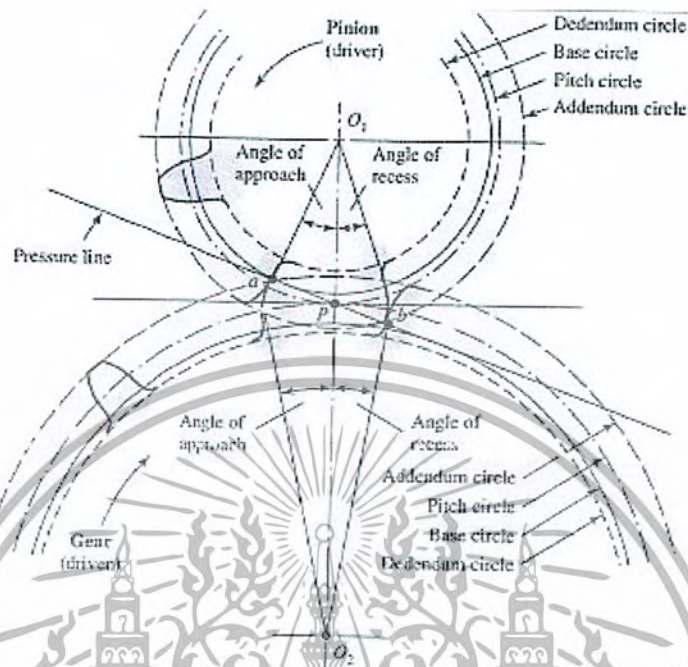
เมื่อลากเส้นสัมผัสกับวงกลมฐาน ไปตัดกับจุด P จะเป็นเส้นแสดงถึงแนวแรงที่กระทำซึ่งเรียกว่า มุมกด (pressure angle) ที่นิยมสร้างคือมุมกด 20, 25 และ 14.5 องศา โดยที่วงกลมฐานสามารถหาจากสมการ

$$r_b = r \cos \phi \tag{4.7}$$

เมื่อ r_b คือรัศมีวงกลมฐาน
 r คือรัศมีของวงกลมพิช

4.4 กฎการขับเฟืองและการทำงานของฟันเฟือง

รูปร่างของฟันเฟืองจะต้องทำให้เส้นตั้งฉากร่วม (common normal) ที่ลาก ณ จุดสัมผัสระหว่างฟันทั้งสองผ่านจุดคงที่จุดหนึ่ง ซึ่งอยู่บนเส้นที่โยงระหว่างศูนย์กลางของเฟืองทั้งสองและจุดนี้เรียกว่า จุดพิช โดยพิจารณาจากรูป จุด P ซึ่งอยู่ระหว่างจุด O1 และ O2 ของเฟืองทั้งสองรูปร่างฟันเฟืองที่เป็นลักษณะนี้เรียกว่า คอนจูเกตเคอฟ (conjugate curves) และที่นิยมใช้กันมากคือแบบอิน วอลูตเคอฟ (Involute curve) แนวเส้นแรงที่กระทำผ่านจุด a, b และ P แนวของแรงกดนี้เรียกว่า มุมกดในปัจุบันที่นิยมใช้คือ 20 และ 25 องศา



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะการขบของเฟือง

จากรูปจุด a จะเป็นจุดที่เริ่มต้นการขบและจุด b เป็นจุดที่เฟืองกำลังที่จะจากกันซึ่งการขบกันของเฟืองจะต้องขบกันมากกว่าหนึ่งคู่

ตารางที่ 4.2 มาตรฐาน SI ของฟันเฟือง

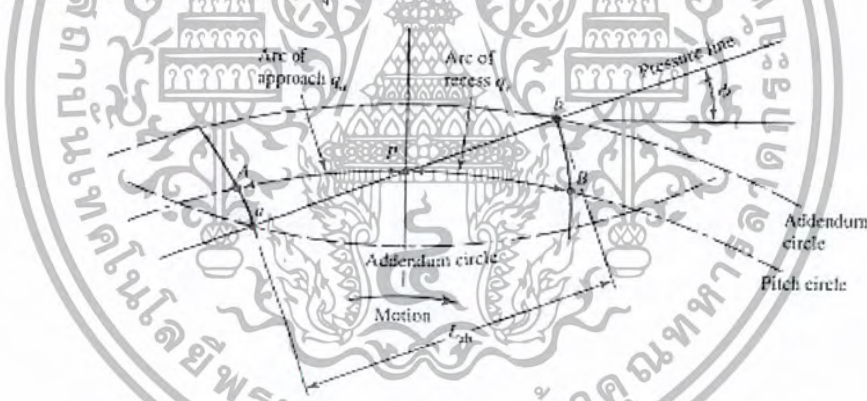
รายละเอียด	14.5 FD	20 FD พิตช์ หยาบ	20 FD พิตช์ ละเอียด	20 FD Stub	25 FD
แอดเดนดัม	m	m	M	0.8m	m
ดีเดนดัม	1.157m	1.25m	1.2m+0.05	m	1.25m
เครียร์นซ์	0.157m	0.25m	0.2m+0.05	0.2m	0.25m
ความสูงใช้งาน	2m	2m	2m	1.6m	2m
ความสูงฟัน	2.157m	2.25m	2.2+0.05	1.8m	2.25m

ตารางที่ 4.3 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	1.25/P
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

4.5 ระยะเวลาขบและอัตราการขบ

เมื่อเฟืองขบกันจุดสัมผัสระหว่างฟันเฟืองเริ่มขึ้นเมื่อผิวด้านข้างของฟันเฟืองเข้าสัมผัสกับปลายฟันเฟืองของเฟืองตาม และการสัมผัสจะสิ้นสุดลงเมื่อปลายฟันเฟืองของเฟืองเข้าสัมผัสกับผิวด้านข้างของฟันเฟืองตาม เนื่องจากปลายฟันอยู่บนวงกลมแอดเดนดัม การสัมผัสระหว่างฟันเฟืองเริ่มขึ้นเมื่อวงกลมแอดเดนดัมของเฟืองตามตัดกับแนวแรงกด และการสัมผัสสิ้นสุดลงเมื่อวงกลมแอดเดนดัมของเฟืองเข้าตัดกับแนวแรงกดอีกครั้งหนึ่งดังจุด a และ b



รูปที่ 4.5 แสดงระยะเวลาขบของฟันเฟือง

ในขณะที่เฟืองขบกันนั้นจะต้องมีเฟืองอย่างน้อยหนึ่งคู่ที่ขบกันอยู่ตลอดเวลา โดยปกติการขบกันมักมากกว่าหนึ่งคู่การบอกจำนวนฟันที่ขบกันจะบอกเป็นอัตราส่วนการขบ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะเวลาขบและพิตช์ฐานเขียนเป็นสมการ

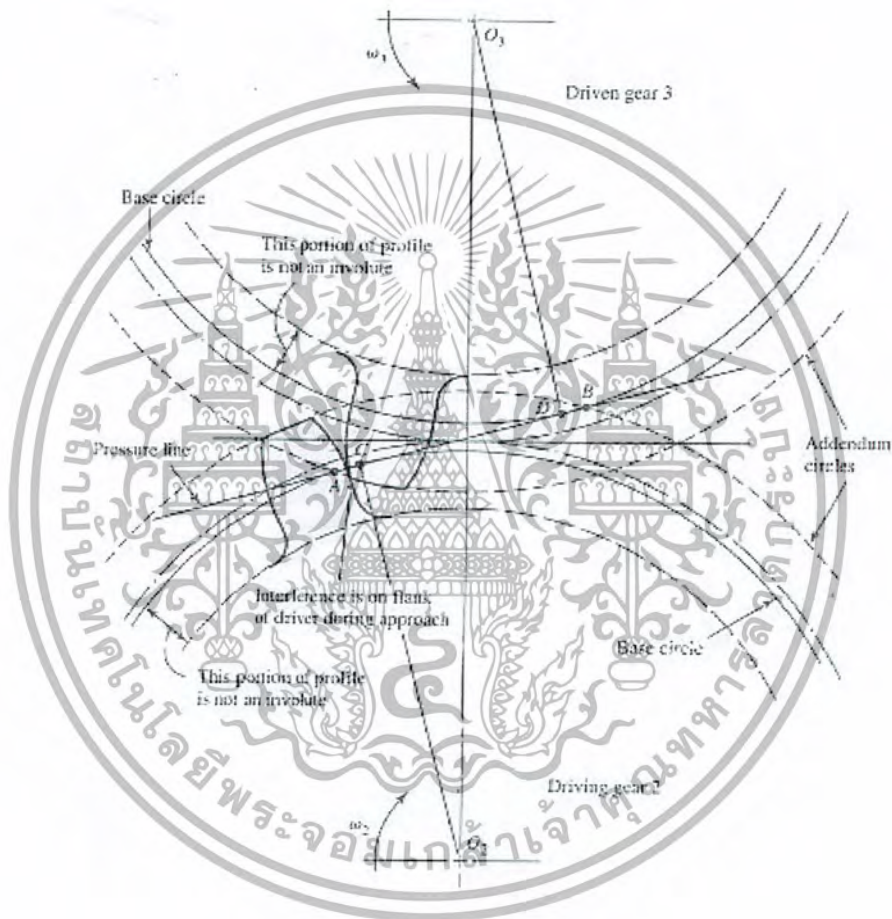
$$m_c = \frac{AB}{p \cos \phi} \quad (4.8)$$

เพื่อให้การทำงานราบรื่นอัตราส่วนการขบควรอยู่ระหว่าง 1.2 ถึง 1.5 ในกรณีอัตราส่วนการขบน้อยกว่าหนึ่งหมายความว่าฟันของเฟืองคู่หนึ่งจะจากกันก่อนที่ฟันเฟืองอีกคู่หนึ่งจะมาขบกันซึ่งทำให้การทำงานของเฟืองไม่ราบรื่นและมีแรงจากการกระแทกที่หน้าสัมผัสเฟืองมาก

4.6 การขัดกัน

ในการสร้างเฟืองแบบอินโวลูตเคอฟ (Involute curve) จะเริ่มจากวงกลมฐาน ฉะนั้นในส่วนของฟันที่อยู่ต่ำกว่าวงกลมฐานจะไม่ใช่ Involute curve ซึ่งทำให้ใช้กฎการขบของเฟืองตรงส่วนนี้ไม่ได้ ดังนั้นการขบกันที่ส่วนต่ำกว่าวงกลมฐานอาจเกิดการขัดกันได้จุด A และ B เรียกว่าจุดขัดกัน (Interference point)

เฟืองในรูป 4.4 เป็นเฟืองที่ไม่มีการขัดกันเมื่อการสัมผัสระหว่างฟันเฟืองนอกจุด A และ B ก็คือ วงกลมแอดเดนดัมคัมตัดแนวแรงกดนอกจุดนี้จะทำให้ไม่เกิดการขัดกันซึ่งในรูปจุด C และ D



รูปที่ 4.6 การขบของเฟืองไม่ขัดกัน

วิธีการป้องกันการขัดกันของฟันเฟืองทำได้หลายวิธีต่อไปนี้

- 4.6.1 ใช้วิธีการตัดเนื้อ โลหะที่ต่ำกว่าวงกลมฐานออกบ้าง เพื่อไม่ให้เกิดการสัมผัสระหว่างเฟืองตรงบริเวณนี้ แต่มีข้อเสียคือทำให้อัตราส่วนการขบลดลงเฟืองอ่อนแอลง
- 4.6.2 การตัดปลายเฟืองให้สั้นลง แต่ทำให้อัตราส่วนการขบลดลง
- 4.6.3 การเพิ่มมุมกดจะลดขนาดของวงกลมฐานทำให้ส่วนของ Involute curve เพิ่มขึ้นจึงสามารถจำกัดการขัดได้แต่การทำเช่นนี้จะทำให้แรงปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นทำให้ความราบเรียบน้อยลง
- 4.6.4 การใช้เฟืองที่ไม่เป็นมาตรฐาน คือให้เฟืองอันเล็กมีแอดเดนดัมคัมเพิ่มขึ้นและให้เฟืองอัน

ใหญ่มีแอดเดนดัมคัมลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 วิธีการตัดเฟือง

การผลิตเฟืองนอกจากการหล่อขึ้นรูปแล้วยังมีวิธีการผลิตเฟืองโดยการตัดด้วยวิธีการต่างๆกัน ดังนี้

4.7.1 มิลลิ่งคัตเตอร์ (milling cutter) ซึ่งตัวตัดเฟืองเรียกว่ามิลลิ่งคัตเตอร์มีรูปร่างฟันตัดตามลักษณะช่องว่างระหว่างฟันเฟือง วิธีการคือทำให้คัตเตอร์หมุนตัดโลหะ โดยคัตเตอร์จะอยู่กับที่และจะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่างานแบ่งเป็นตัวหมุนโลหะที่จะตัดเฟือง ซึ่งงานแบ่งสามารถปรับระยะในการหมุนให้สอดคล้องกับจำนวนฟันเฟือง

4.7.2 แร็คคัตเตอร์ (rack cutter) โดยตัวตัดเฟืองนี้จะไม่มีความโค้งจะเป็นลักษณะเฟืองสะพาน โดยในการตัดจะเลื่อนไปมาเพื่อค่อยๆ ตัดเนื้อโลหะจนกระทั่งวงกลมพิตซ์ของคัตเตอร์และเฟืองสัมผัสกันแล้วเลื่อนไปตัดตำแหน่งอื่นต่อไป



รูปที่ 4.7 แสดงการตัดเฟืองแบบแร็คคัตเตอร์

4.7.3 พินเนียนคัตเตอร์ (pinion cutter) ใช้วิธีเช่นเดียวกับแบบแร็คคัตเตอร์แต่คัตเตอร์เป็นลักษณะเฟืองแทน วิธีการตัดเฟืองนี้จะให้เฟืองเปล่าหมุนไปในขณะเดียวกันคัตเตอร์เลื่อนกลับไปมาตัดโลหะ

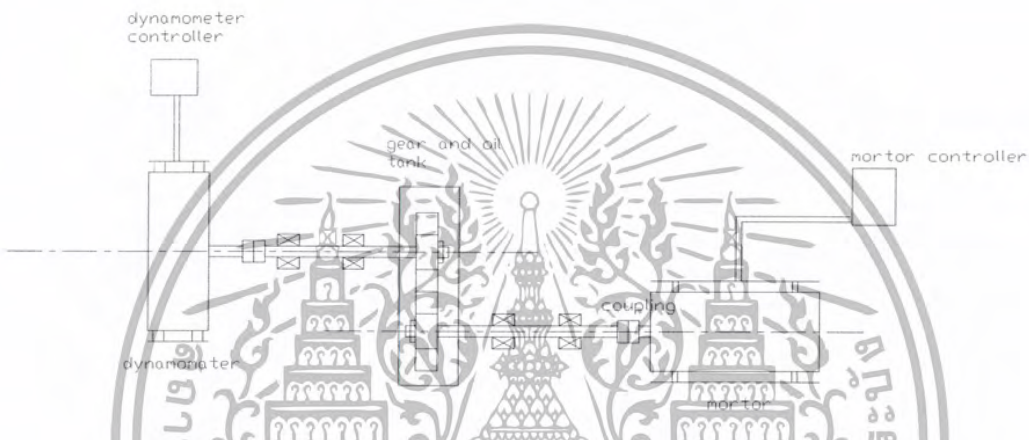
4.7.4 ฮีบบิง (hobbing) มีวิธีการเหมือนแร็คคัตเตอร์แตกต่างกันคือการใช้ฮีบบิงจะคล้ายตัวหนอน โดยตัวฮีบบิงจะหมุนไปพร้อมกันรอบแกนหมุนของตัวเอง

บทที่ 5

เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

5.1 การออกแบบชุดทดลอง

ชุดทดสอบได้ออกแบบมาเพื่อให้ง่ายต่อการปรับระยะต่างๆ โดยทำเป็นร่อง slide สำหรับวาง อุปกรณ์ ตัวฐานเป็นคอนกรีตเพื่อลดการสั่นสะเทือน ต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3 hp ความเร็วรอบ 1500 rpm ผ่านคัปปลิง



รูปที่ 5.1 โคอะแกรมแสดงชุดทดลอง

5.1.1 การหาขนาดเพลาคู

การคำนวณหาขนาดของเพลาคู เมื่อเพื่องมีขนาด $m = 4$ มีจำนวนฟัน 18 ฟัน

ดังนั้น

$$m = \frac{d}{N}$$

$$d = mN = 18 \times 4 = 72 \text{ mm}$$

หาทอร์กจากสมการ

$$P = 2\pi TN$$

$$3 \text{ hp} \times 746 \text{ watt / hp} = 2\pi T \times 1420 \text{ rpm} \times 1 / 60 \text{ s}$$

$$T = 15.1 \text{ Nm}$$

แรงที่กระทำตั้งฉากกับหน้าเฟืองหาได้จาก

$$T = Fr$$

$$15.1 = F \left(\frac{72 \times 10^{-3}}{2} \right)$$

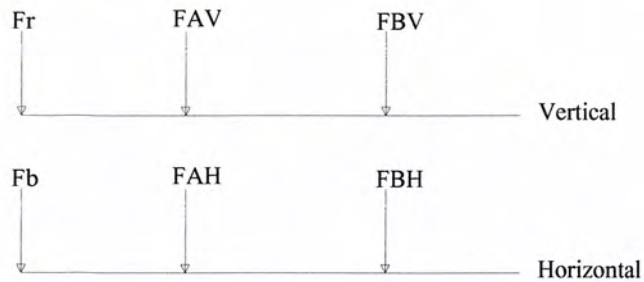
$$F_n = 418.1 \text{ N}$$

ดังนั้นแรงในแนวรัศมีและแนวสัมผัส

$$F_r = 418.1 \sin 20^\circ = 142.985 \text{ N}$$

$$F_t = 418.1 \cos 20^\circ = 392.85 \text{ N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ให้ผู้ใดนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แสดงแรงที่กระทำกับเพลาชุดทดลอง

หาแรงรอบจุดหมุนในแนวตั้ง

$$F_r \times 100\text{mm} = F_B \times 120\text{mm}$$

$$F_{BV} = 119.15\text{N}$$

$$F_r \times 22\text{mm} = F_A \times 120$$

$$F_{AV} = 262.14\text{N}$$

หาแรงรอบจุดหมุนในแนวระดับ

$$F_{BH} = 327.375\text{N}$$

$$F_{AH} = 720.225\text{N}$$

หาโมเมนต์รอบจุดหมุนในแนวตั้ง

$$M_{AV} = (100\text{mm})(142.985\text{N})$$

$$= 14298.5\text{Nmm}$$

$$M_{BV} = (142.985\text{N})(220\text{mm}) - (119.15\text{N})(120\text{mm})$$

$$= 17158.7\text{Nmm}$$

หาโมเมนต์รอบจุดหมุนในแนวระดับ

$$M_{AH} = (392.85\text{N})(100\text{mm})$$

$$= 39285\text{Nmm}$$

$$M_{BH} = (392.85\text{N})(220\text{mm}) - (327.975\text{N})(120\text{mm})$$

$$= 47070\text{Nmm}$$

$$M_A = \sqrt{M_{AV}^2 + M_{AH}^2} = \sqrt{14298.5^2 + 39285^2} = 41806.2\text{Nmm}$$

$$M_B = \sqrt{M_{BV}^2 + M_{BH}^2} = \sqrt{17158.7^2 + 47070^2} = 50099.95\text{Nmm}$$

ดังนั้น โมเมนต์เกิดสูงสุดที่จุด B

จาก Machine Design ตารางจะได้ค่า $C_m = 1.5$ และ $C_t = 1.0$

แทนค่าลงในสมการ

$$d^3 = \frac{16}{\pi\tau} [(C_T T)^2 + (C_m M_B)^2]^{1/2}$$

$$= \frac{16}{(\pi)(41\text{N/mm}^2)} [(15 \times 10^3)^2 + (1.5 \times 50099.95)^2]^{1/2}$$

$$= 21.193$$

เลือกใช้ค่า Safety Factor อีก 1.5 จาก จาก Machine Design ตารางที่เลือกใช้เพลามีขนาด 30 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 การหาขนาดแบร์ริง

เนื่องจากการทดลองใช้เฟืองตรงจึงไม่มีแรงในแนวแกน เลือกใช้บอลแบร์ริง โดยอายุในการใช้งานทนแต่ไม่ควรใช้นานเกินไปเพราะเป็นจุดทดลองกำหนดประมาณ 5000 hr ทหารแรงรวมทั้งกระทำที่จุด A และ B

$$F_A = \sqrt{F_{AV}^2 + F_{AH}^2} = \sqrt{262.14^2 + 720.225^2} = 766.45 \text{ N}$$

$$F_B = \sqrt{F_{BV}^2 + F_{BH}^2} = \sqrt{119.15^2 + 327.375^2} = 348.38 \text{ N}$$

เนื่องจากแรงกระทำที่จุด A มากกว่าจึงพิจารณาการออกแบบ

ให้วงแหวนตัวในเป็นตัวหมุน $V=1$ จากสมการ $k=3$ เมื่อเป็นบอลแบร์ริง

$$P = VF_r = (1)(142.985) = 142.985 \text{ N}$$

$$L_{10} = \frac{5000 \times 1000 \times 60}{10^6} = 300 \text{ mr}$$

$$L_{10} = \left[\frac{C}{P} \right]^k = \left[\frac{C}{142.985} \right]^3 = 300$$

$$C = 957.2 \text{ N}$$

$$= 9.572 \text{ KN}$$

จากตารางเลือกบอลแบร์ริง Single-row deep groove อนุกรมมิติ 02 ขนาดรูสวม 30 mm จะมีค่า $C_0 = 10 C = 14.95$ ซึ่งมากกว่าการคำนวณจึงใช้ได้

5.2 อุปกรณ์การทดลอง

5.2.1 เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน

เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุนประกอบด้วยทรงกระบอกสองอันที่มีรัศมีที่ต่างกัน โดยทรงกระบอกด้านในจะตันตรงส่วนปลายจะทำเป็นลักษณะรูปโดน ในการใช้งานจะใส่น้ำมันที่จะทดลองลงในช่องว่างของกระบอกทั้งสอง เมื่อทรงกระบอกด้านในหมุนจะทำให้ของไหลภายในเคลื่อนที่ภายใต้ความเค้นเฉือนที่เกิดจากการหมุน



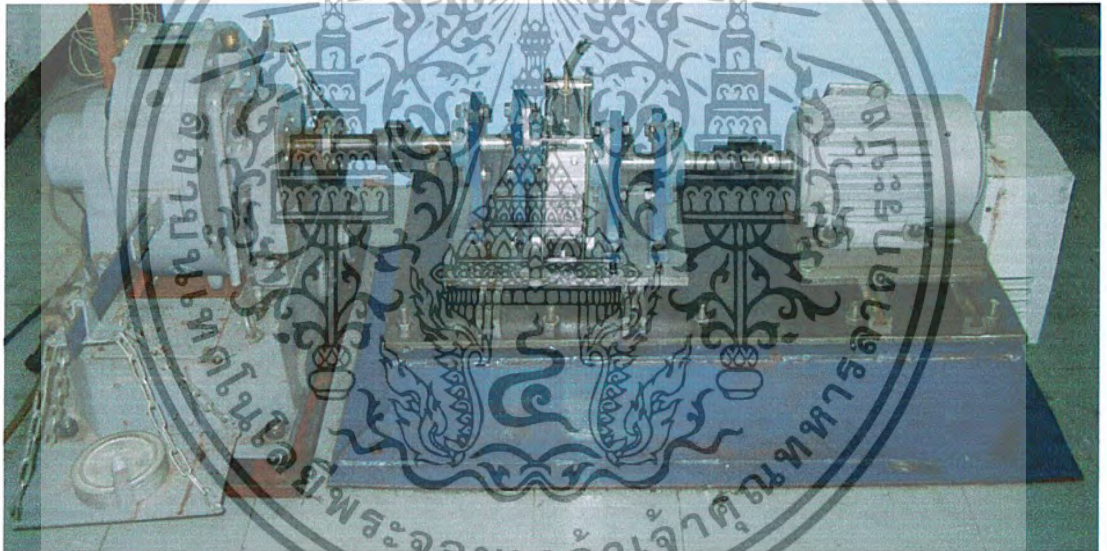
รูปที่ 5.1 แสดงเครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ (Concentric Rotational Viscometer) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบนี้เรียกการทดสอบรีโอ โลยีซึ่งทดสอบในห้อง Lubrication Laboratory ของภาค
เครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ 5.1 แสดงอุปกรณ์ของเครื่องทดสอบ

ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด
มอเตอร์ไฟฟ้า	3 hp ความเร็วรอบ 1420 rpm
ชุดวัดทอร์ค	calculation
ฐานเครื่อง	ทำจากคอนกรีตเสริมเหล็ก
เพลลา	diameter 30 mm
แบร์ริง	ball bearing
coupling	แบบแยกสองส่วน



รูปที่ 5.2 แสดงชุดทดลองที่ประกอบเสร็จ



รูปที่ 5.3 แสดงเฟืองเหล็กและเฟืองอลูมิเนียมที่ใช้ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

6.1 วิธีการทดลอง

ทำการทดลองแยกตามชนิดของน้ำมันหล่อลื่นและวัสดุเฟืองที่ใช้ โดยแต่ละครั้งมีรายละเอียดดังนี้

- 6.1.1 ติดตั้งและปรับแต่งอุปกรณ์ให้มีความถูกต้องและเที่ยงตรง
- 6.1.2 ปรับระยะ backlash ของเฟืองตามค่าที่ตั้งไว้เป็นค่าเริ่มต้น โดยใช้ dial gauge
- 6.1.3 ทดลองเฟืองอะลูมิเนียมที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ 1480 rpm ถ่วงน้ำหนักที่แขนไดนาโม 1.5 กิโลกรัมและเดินเครื่องอย่างต่อเนื่องครั้งละ 2 แส่นรอบ
- 6.1.4 ทดลองเฟืองเหล็กกล้าที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ 1460 rpm ถ่วงน้ำหนักที่แขนไดนาโม 2 กิโลกรัมและเดินเครื่องอย่างต่อเนื่องครั้งละ 5 แส่นรอบ
- 6.1.5 เมื่อครบจำนวนรอบที่ทดลองนำเฟืองไปตรวจสอบความสึกหรอโดยการชั่งละเอียดและ โดยการส่องดูผิวสัมผัสกับกล้องจุลทรรศน์
- 6.1.6 นำน้ำมันหล่อลื่นไปตรวจสอบคุณสมบัติในห้อง lab ด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน (Concentric Rotational Viscometer)
- 6.1.7 บันทึกค่าต่างๆที่ได้จากการทดลองแล้วนำไปพล็อตกราฟเพื่อแสดงผลเปรียบเทียบ

ตารางที่ 6.1 แสดงน้ำมันและข้อมูลที่นำมาทดลอง

ชนิดน้ำมัน	Load ในการทดลอง	ทดลองที่ความเร็วรอบ
น้ำมันปาล์มไม่ผสม	2 kg เฟืองเหล็ก	1460 rpm
	1.5 kg เฟืองอะลูมิเนียม	1480 rpm
น้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2%	2 kg เฟืองเหล็ก	1460 rpm
	1.5 kg เฟืองอะลูมิเนียม	1480 rpm
SAE90	2 kg เฟืองเหล็ก	1460 rpm
	1.5 kg เฟืองอะลูมิเนียม	1480 rpm

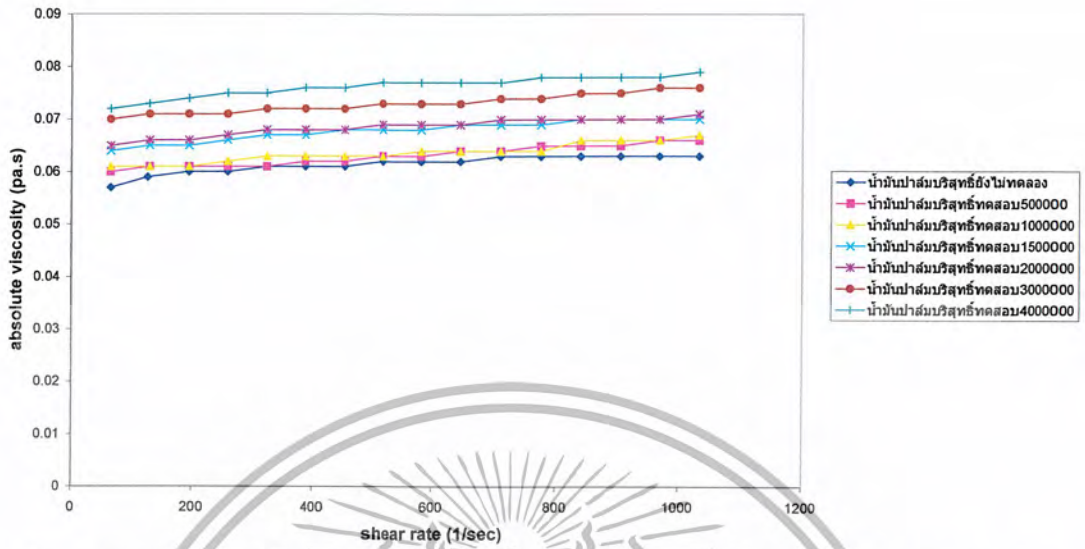
6.2 ผลการทดลอง

น้ำมันที่ใช้ในการทดลองนั้นมี 3 ชนิด คือน้ำมันปาล์มไม่ผสมสารเพิ่มคุณภาพ น้ำมันปาล์มผสมสารเพิ่มคุณภาพ ZDDP 2% โดยน้ำหนักและน้ำมันหล่อลื่น SAE 90 โดยเฟืองเหล็กทำการทดลองเป็นช่วงไปเรื่อยๆ ช่วงละห้าแส่นรอบส่วนเฟืองอะลูมิเนียมทดลองทุกสองแส่นรอบ แล้วนำน้ำมันและเฟืองไปทำการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

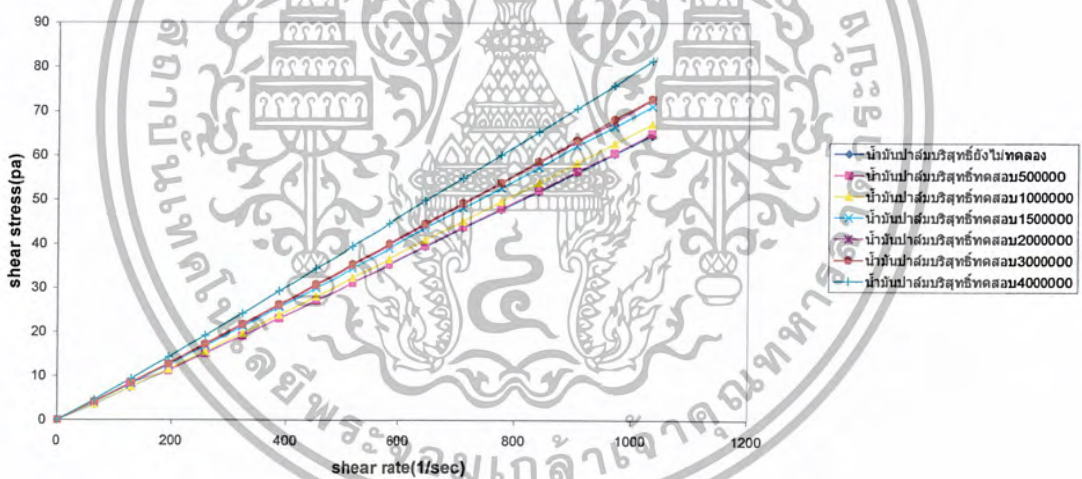
ข้อมูลที่ได้สร้างเป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันที่เกิดขึ้น และนำกราฟการเปลี่ยนแปลงแต่ละน้ำมันหล่อลื่นมาทำการเปรียบเทียบ ซึ่งจากผลการทดลองนั้นแสดงให้เห็นว่า น้ำมันหล่อลื่นมีความหนืดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทำงานของเฟือง โดยความหนืดที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มีลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ในโครงการวิจัยด้านวิชาการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนืดน้อยกว่าน้ำมันปาล์มที่ไม่ผสมสารเพิ่มคุณภาพนี้ และการสึกหรอของเฟืองมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมัน SAE 90 ขึ้นด้วย โดยกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงมีดังนี้

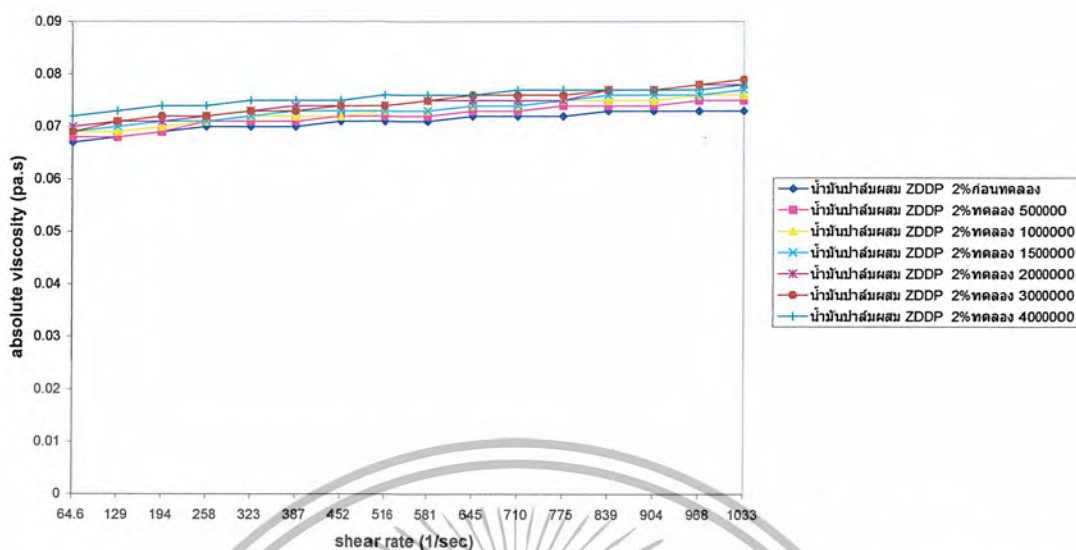


รูปที่ 6.1 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ ความหนืดสัมบูรณ์กับความเค้นเฉือนน้ำมันปาล์มไม่ผสม ทดลองเฟืองเหล็ก

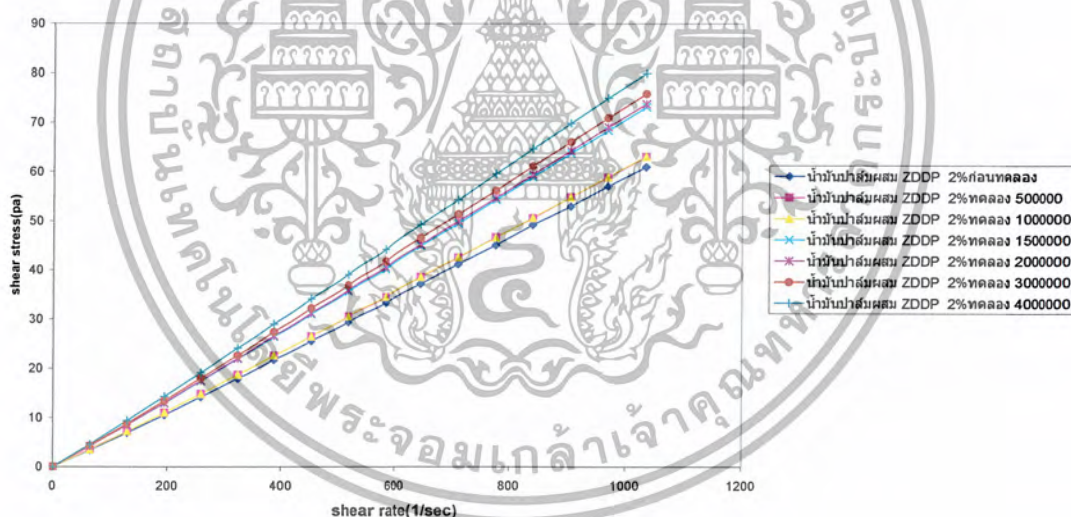


รูปที่ 6.2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ ความเค้นเฉือนกับความเค้นเฉือนน้ำมันปาล์มไม่ผสม ทดลองเฟืองเหล็ก

การเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จะมีความหนืดเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบการทำงานเพราะเกิดจากผงของโลหะที่ผสมเข้ากับน้ำมันทำให้้ำมันมีความหนืดเพิ่มขึ้น โดยที่ความหนืดในช่วงแรกจะเปลี่ยนแปลงน้อยเนื่องจากผงโลหะมีขนาดใหญ่ แต่เมื่อทำงานที่นานขึ้นผงโลหะจะมีขนาดเล็กลงและผสมกับน้ำมันกระจายรวมตัวกับน้ำมันมากขึ้น ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น

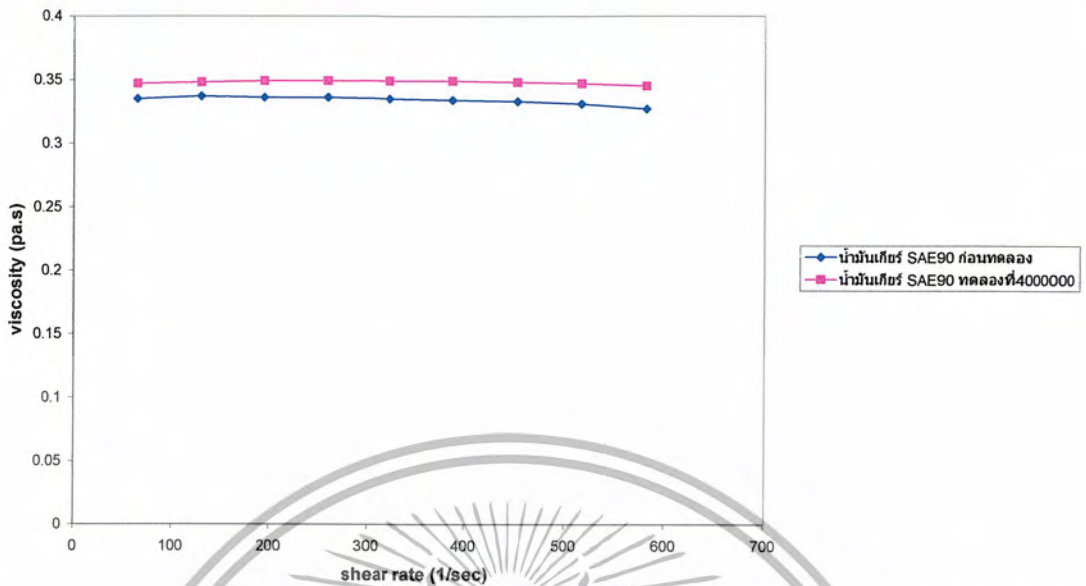


รูปที่ 6.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ ความหนืดสัมบูรณ์กับความเครียดเฉือนน้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2 % โดยน้ำหนักทดลองเพียงหลัก

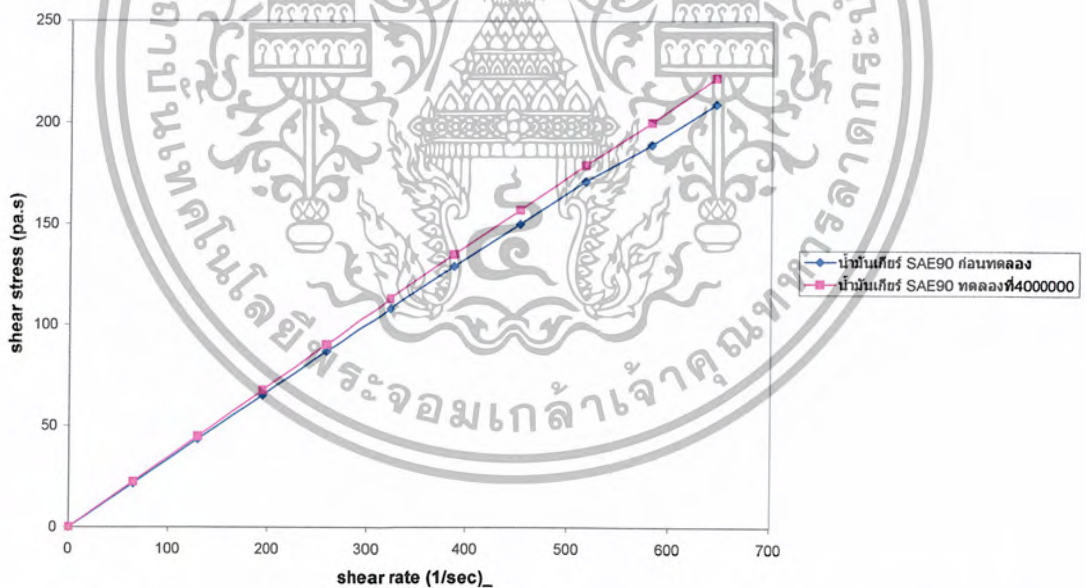


รูปที่ 6.4 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ ความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือนน้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2 % โดยน้ำหนักทดลองเพียงหลัก

น้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% จะมีการเปลี่ยนแปลงตามรอบการทำงานเช่นกันแต่การเปลี่ยนแปลงความหนืดจะอยู่ในช่วงที่น้อยกว่าน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ซึ่งในช่วงแรกก็จะมีค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงน้อยและมากขึ้นเมื่อทำงานที่รอบนานขึ้น การเปลี่ยนแปลงความหนืดที่น้อยนี้แสดงให้เห็นว่าดัชนีความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าสูง ซึ่งทำให้การสึกหรอของเฟืองน้อยลง

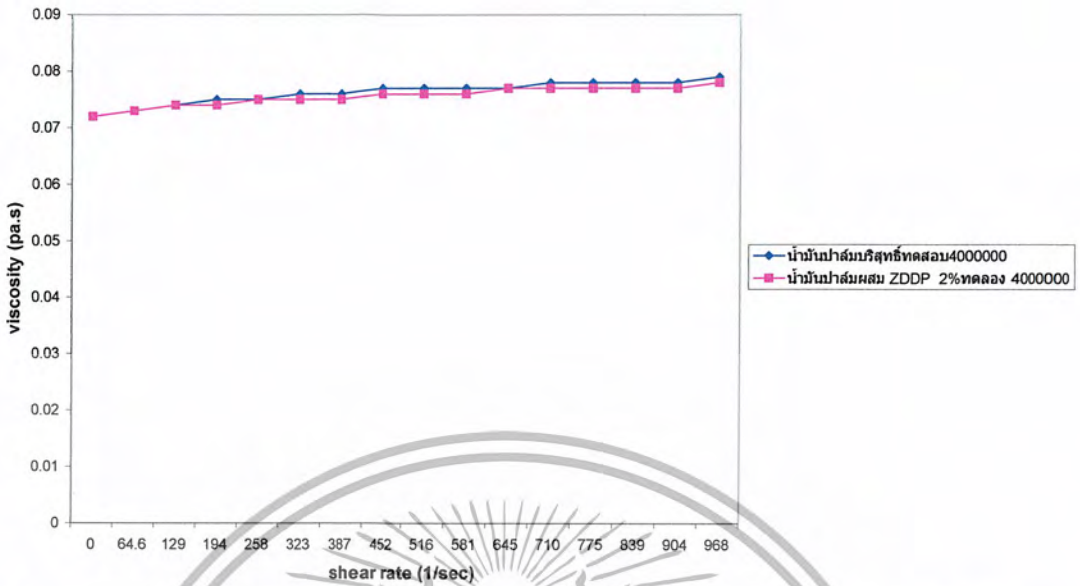


รูปที่ 6.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนืดสัมบูรณ์กับความเครียดเฉือนน้ำมันหล่อลื่น SAE 90 ทดลองเพียงหลัก

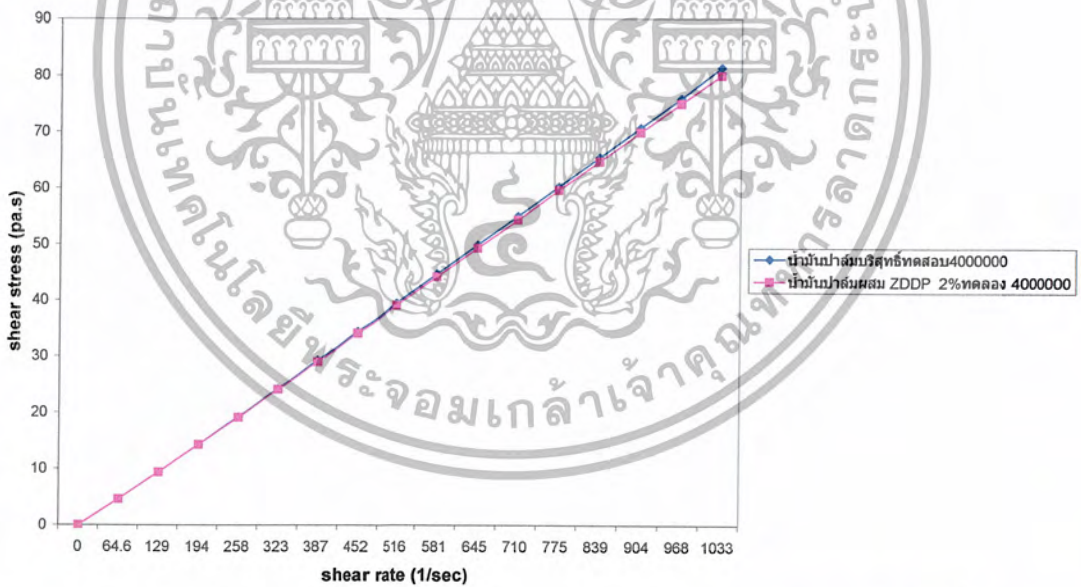


รูปที่ 6.6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือนน้ำมันหล่อลื่น SAE 90 ทดลองเพียงหลัก

การเปลี่ยนแปลงของน้ำมันเกียร์ SAE 90 จะอยู่ในช่วงที่แคบกว่าน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และน้ำมันปาล์มผสม ZDDP ซึ่งแสดงให้เห็นว่าดัชนีความหนืดของน้ำมันมีค่าสูง การสึกหรอของเฟืองจึงมีค่าน้อยกว่าน้ำมันทั้งสองชนิดที่กล่าวมา ซึ่งตรงกับความเป็นจริงที่น้ำมัน SAE 90 มีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดีกว่า

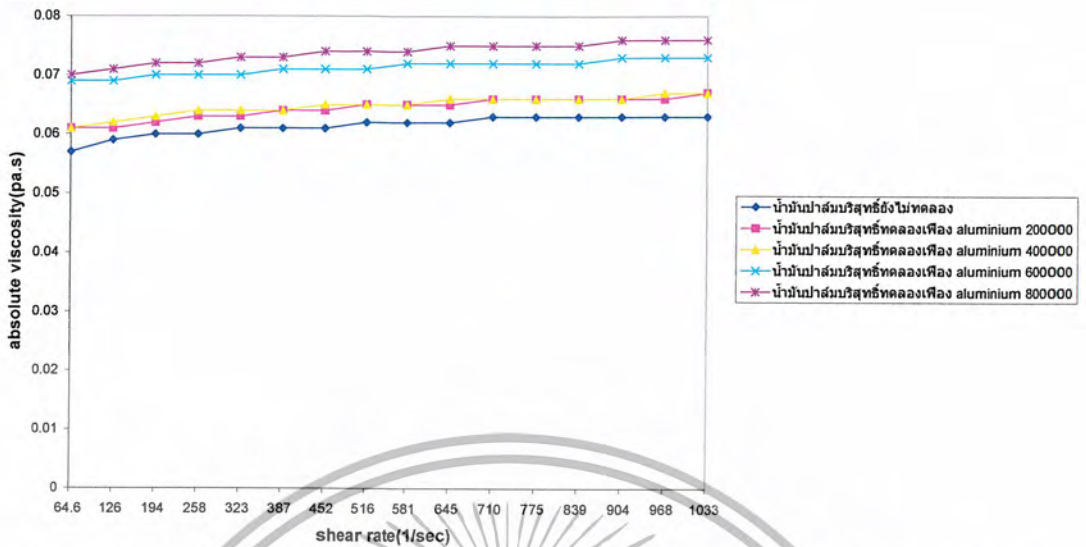


รูปที่ 6.7 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปาล์มไม่ผสมกับผสม ZDDP 2% โดยน้ำหนัก พล็อตระหว่างความหนืดสัมบูรณ์และความเครียดเฉือนทดลองเพียงหลัก

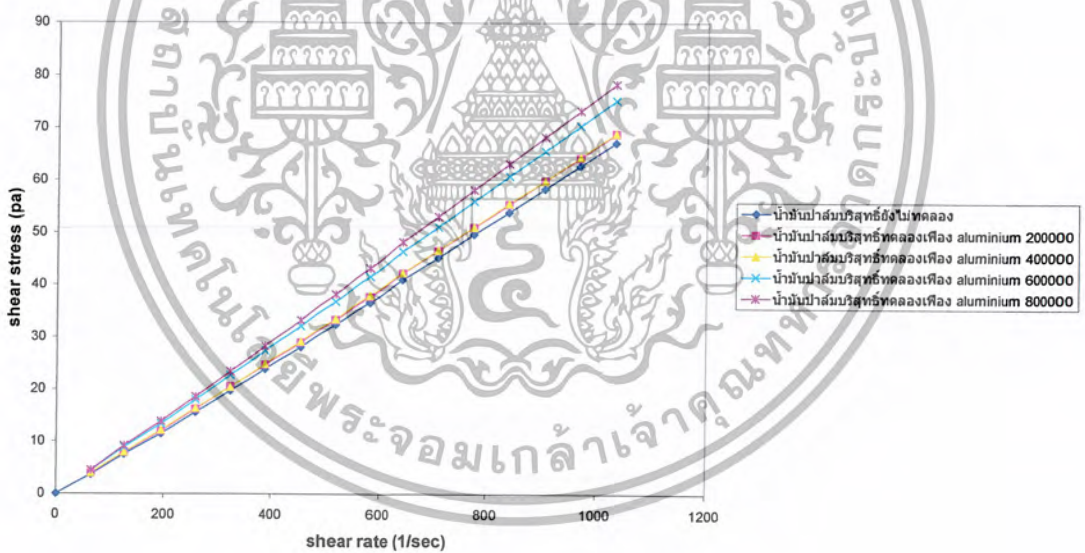


รูปที่ 6.8 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปาล์มไม่ผสมกับผสม ZDDP 2% โดยน้ำหนัก พล็อตระหว่างความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนทดลองเพียงหลัก

จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าในสภาวะการทำงานที่นานขึ้นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และน้ำมันปาล์มผสม ZDDP จะมีความหนืดใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากน้ำมันที่ผสมสาร ZDDP มีคุณสมบัติเฉพาะตัวในการหล่อลื่นจึงทำให้การลดการสึกหรอของเฟืองมากกว่า

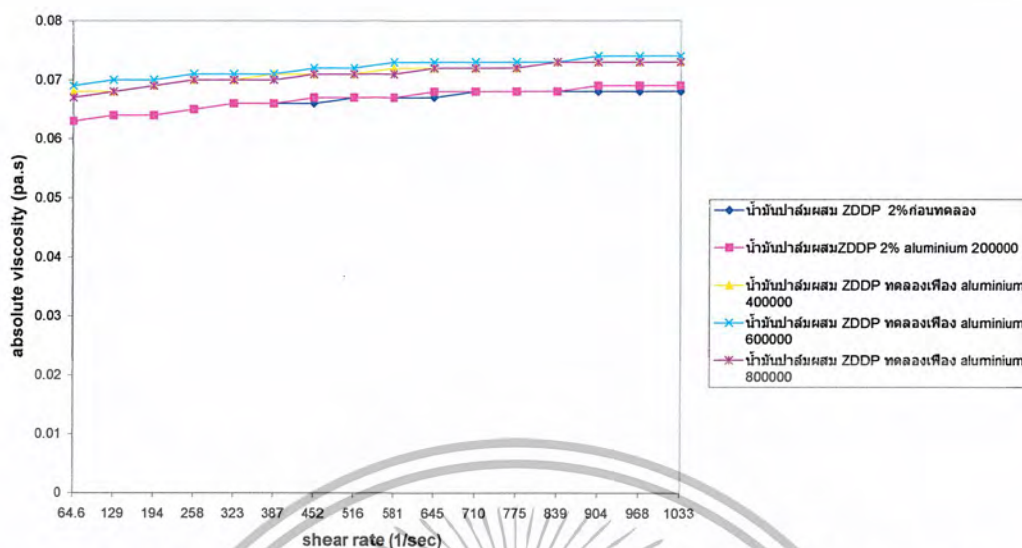


รูปที่ 6.9 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนืดสัมบูรณ์กับความเครียดเฉือน้ำมันปาล์มไม่ผสม
ทอดเกลืออลูมิเนียม

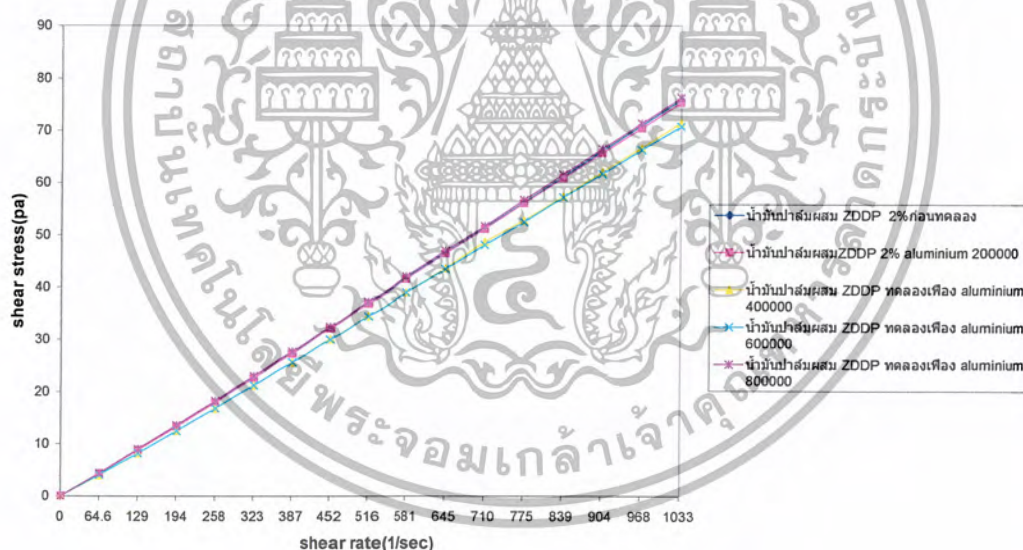


รูปที่ 6.10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือน้ำมันปาล์มไม่ผสม
ทอดเกลืออลูมิเนียม

การเปลี่ยนแปลงความหนืดจะมีค่าสูงกว่าของเหล็กเพราะอลูมิเนียมมีความแข็งน้อยกว่าเหล็กจึงทำให้ผงของอลูมิเนียมผสมลงได้มากกว่าเป็นผลให้การเปลี่ยนแปลงความหนืดมีค่าสูงและช่วงการเปลี่ยนแปลงกว้างขึ้น ซึ่งในช่วงแรกจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดน้อยเนื่องจากผงโลหะที่มีเศษขนาดใหญ่แต่เมื่อทำงานที่รอบนานๆ จะมีเศษที่เล็กลงและรวมตัวกับน้ำมันปาล์มได้ดีขึ้นเป็นผลให้ความหนืดเพิ่ม

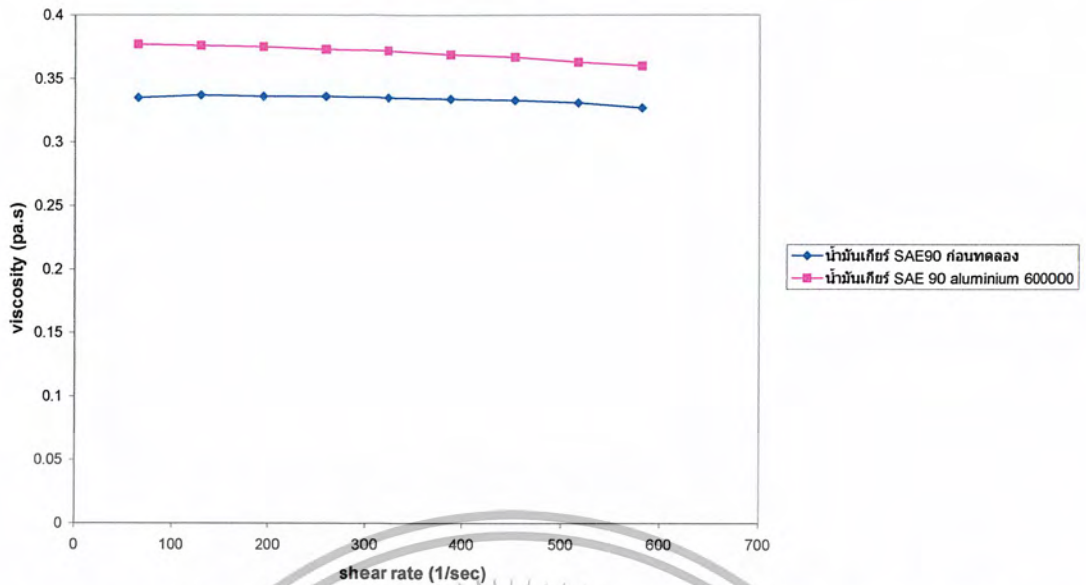


รูปที่ 6.11 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ ความหนืดสัมบูรณ์กับความเครียดเฉือน้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2 % โดยนำหนักทดลองเฟืองอลูมิเนียม

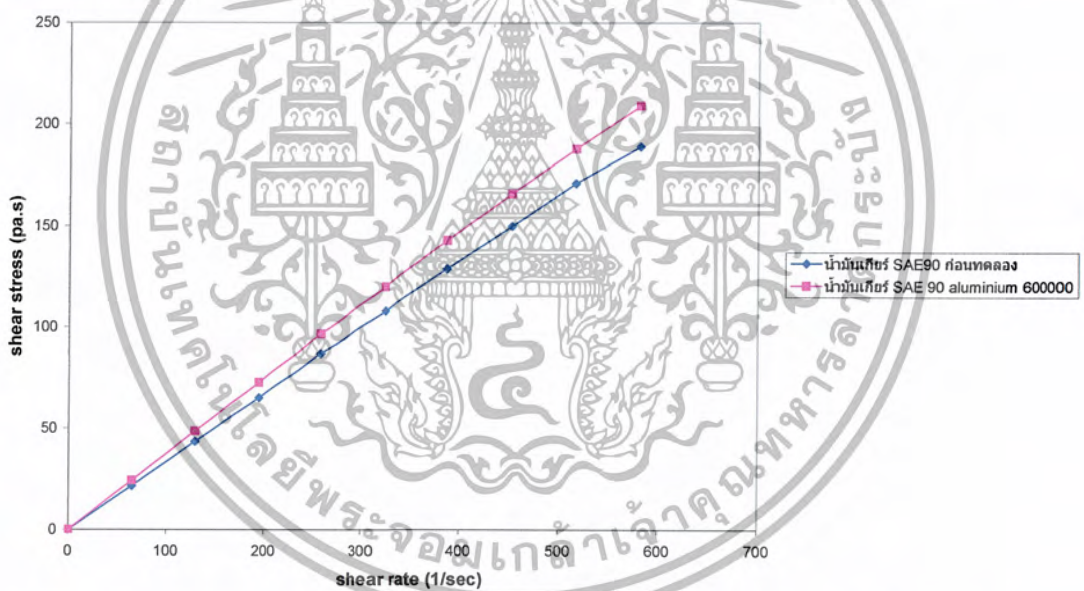


รูปที่ 6.12 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ ความเค้นเฉือน กับความเครียดเฉือน้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2 % โดยนำหนักทดลองเฟืองอลูมิเนียม

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% จะมีค่าอยู่ในช่วงที่แคบกว่าน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อทำงานที่จำนวนรอบสูงๆ แสดงให้เห็นว่าในการสึกหรอของเฟืองจะน้อยลงและสึกหรอในลักษณะเพิ่มขึ้นเกือบจะคงที่ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จะมีค่าดัชนีความหนืดสูงกว่าน้ำมันปาล์มที่ผสมสาร ZDDP

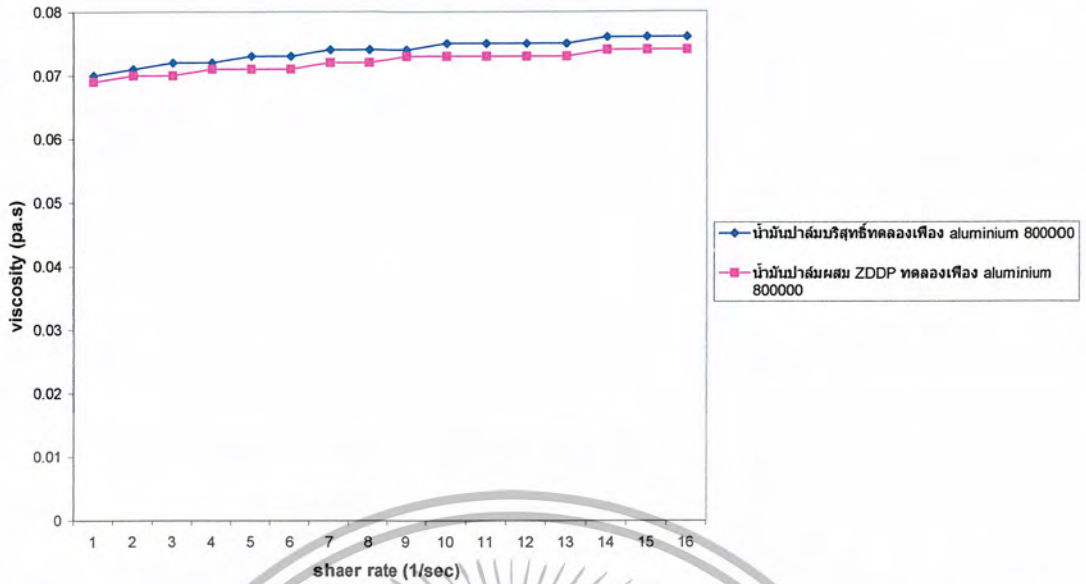


รูปที่ 6.13 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำมัน SAE 90 ทดลองเพื่ออุณหภูมิ ความหนืดสัมพันธ์กับ ความเครียดเฉือน

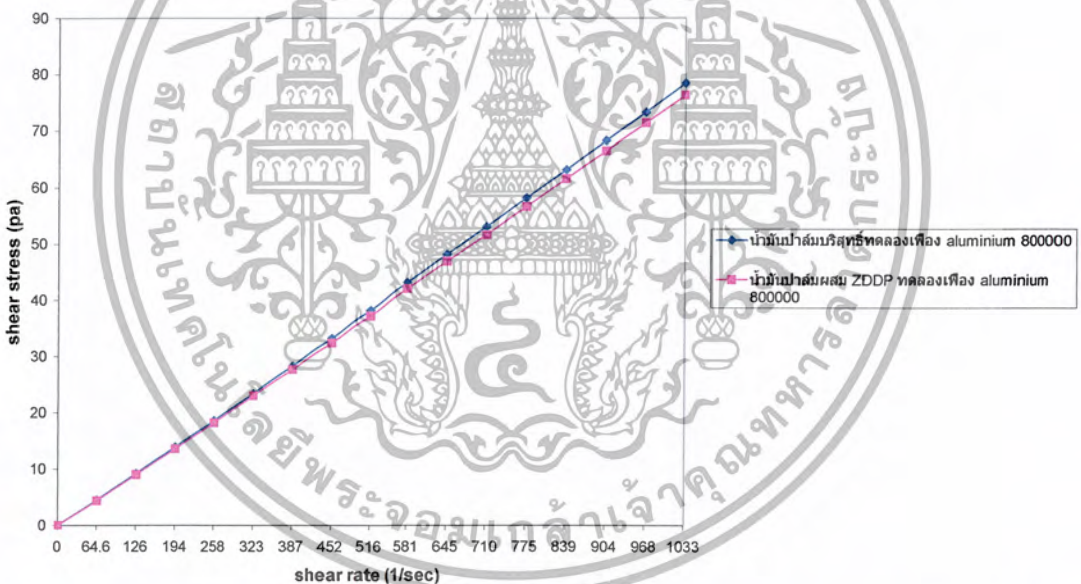


รูปที่ 6.14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำมัน SAE 90 ทดลองเพื่ออุณหภูมิ ความเค้นเฉือน กับ ความเครียดเฉือน

จากกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำมัน SAE 90 จะน้อยกว่าน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับ น้ำมันปาล์มผสมสาร ZDDP 2% ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่น้อยนี้แสดงให้เห็นว่าการรักษาดัชนี ความหนืดของน้ำมัน SAE 90 ดีกว่าน้ำมันที่นำมาทดลองทั้งสองชนิดดังกล่าว

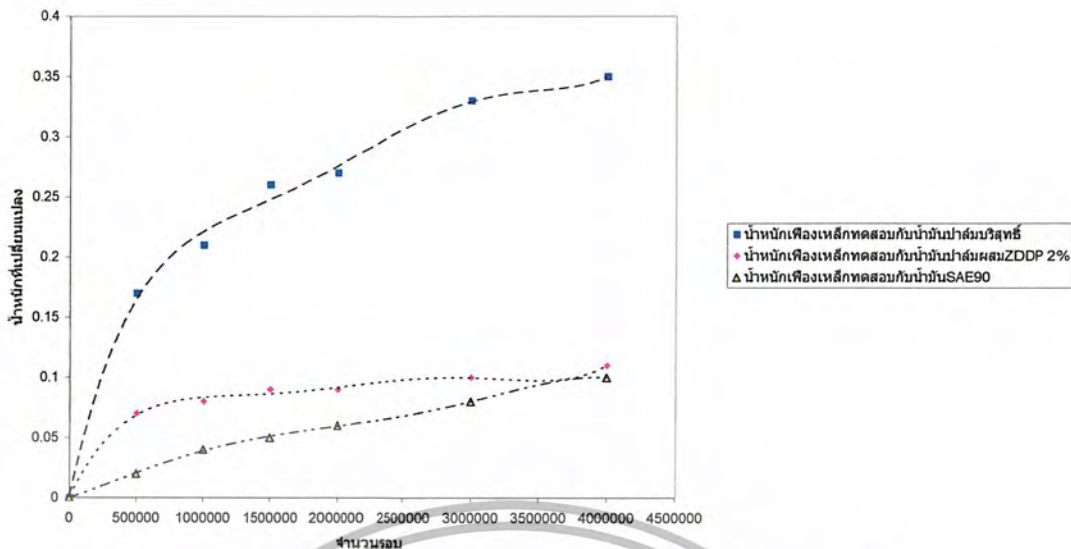


รูปที่ 6.15 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปาล์มไม่ผสมกับผสม ZDDP 2% โดยน้ำหนัก พล็อตระหว่าง ความหนืดสัมบูรณ์กับความเครียดเฉือนทดลองเพื่ออุณหภูมิเยือก



รูปที่ 6.16 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปาล์มไม่ผสมกับผสม ZDDP 2% โดยน้ำหนัก พล็อตระหว่าง ความเค้นเฉือน กับความเครียดเฉือนทดลองเพื่ออุณหภูมิเยือก

การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำมันทั้งสองชนิดความหนืดจะเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน โดยน้ำมันที่ผสมสาร ZDDP จะเปลี่ยนน้อยกว่าอยู่เล็กน้อยอันเนื่องมาจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารนี้ โดยความหนืดที่เปลี่ยนแปลงน้อยนี้จะเป็นผลให้การสึกหรอลดลง



รูปที่ 6.17 กราฟแสดงการเปลี่ยนน้ำมันที่ตลลงกับน้ำมันหล่อลื่น

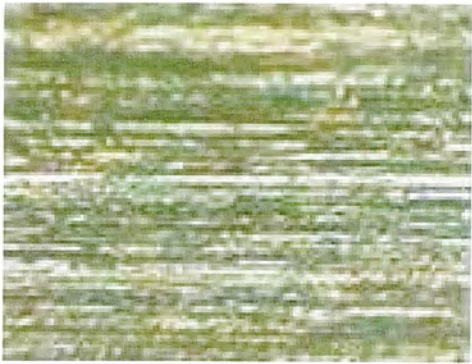


รูปที่ 6.18 กราฟแสดงการเปลี่ยนน้ำมันที่ตลลงกับน้ำมันหล่อลื่น

จากกราฟการสึกหรอของเฟืองเหล็กที่ตลลงกับน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์การสึกหรอจะมีค่าสูงมาก แต่เมื่อเติมสาร ZDDP 2% ทำให้การสึกหรอของเฟืองน้อยลงและเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมัน SAE 90 การสึกหรอสามารถลดลงจนใกล้เคียงกับการสึกหรอของเฟืองที่ตลลงกับน้ำมัน SAE 90 โดยการสึกหรอในช่วงแรกจะมีการสึกหรอที่สูงอันเนื่องมาจากการที่เฟืองปรับสภาพการขบ และเมื่อเลขช่วงนี้ไปจะอยู่ในช่วงการทำงานซึ่งการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นที่ละน้อยจนถึงสภาวะที่การสึกหรอสูงอีกครั้งหนึ่งซึ่งเป็นการเสียหายการสึกหรอจะสูงมากที่สุด

ส่วนของกราฟการสึกหรอของเฟืองอลูมิเนียมก็เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับเฟืองเหล็ก การเปลี่ยนแปลงแบ่งเป็นสามช่วง คือช่วงปรับสภาพการทำงาน ช่วงการทำงานและช่วงการสึกหรอซึ่งลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารของน้ำมันที่ผสมสาร ZDDP จะใกล้เคียงกับน้ำมัน SAE 90 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



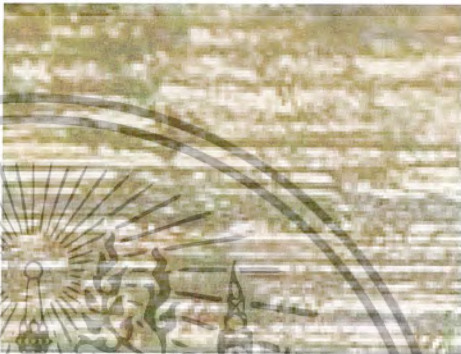
ก่อนทดลอง



1000000 ரொப



2000000 ரொப



3000000 ரொப

รูปที่ 6.19 แสดงการสีกรรอกที่เกิดกับหน้าสัมผัสเพียงเหล็กทดลองกับน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์



ก่อนทดลอง

1000000 ரொப



2000000 ரொப



3000000 ரொப

รูปที่ 6.20 แสดงการสีกรรอกที่เกิดกับหน้าสัมผัสเพียงเหล็กทดลองกับน้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% โดย

หน้าหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



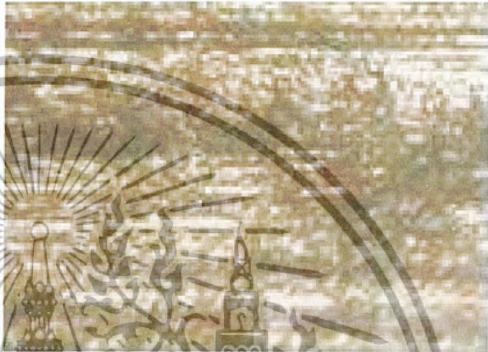
ก่อนทอลง



1000000 รอบ



2000000 รอบ



3000000 รอบ

รูปที่ 6.21 แสดงการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของเหล็กทอลงกับน้ำมัน SAE 90



บทที่ 7

สรุปผลการทดลอง

7.1 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความหนืดของน้ำมันจะเพิ่มตามระยะเวลาการทำงานของน้ำมัน โดยความหนืดที่เพิ่มนี้มีผลมาจากผลของโลหะผสมอยู่ในน้ำมัน ซึ่งเป็นผลให้การสึกหรอของเฟืองเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% จะน้อยกว่าน้ำมันปาล์มไม่ผสมสาร ZDDP แต่สามารถลดการสึกหรอของเฟืองได้ดีกว่าน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ทั้งในเฟืองเหล็กและเฟืองอลูมิเนียม ในการเพิ่มสาร ZDDP จะทำให้การสึกหรอของเฟืองมีผลใกล้เคียงกับน้ำมัน SAE 90 ซึ่งสามารถเพิ่มช่วงการทำงานของเฟืองได้มากขึ้น

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำมันที่น้อยแสดงให้เห็นว่าน้ำมันนั้นมีดัชนีความหนืดที่สูงซึ่งเป็นตัวบอกระดับการรักษาสภาพการหล่อลื่นของน้ำมันหล่อลื่นที่ดีและเป็นส่วนสำคัญในการลดการสึกหรอของเฟือง

ในส่วนของเฟืองจะแบ่งเป็น 3 ช่วงการทำงาน 1. ช่วง Run in 2. ช่วงการทำงานของเฟือง 3. ช่วงการสึกหรอมาก (Fail) ซึ่งในการทดลองนี้สามารถทดลองต่อไปได้เรื่อยๆ เพื่อแสดงการสึกหรอของเฟืองจนเฟืองไม่สามารถใช้งานได้ จากราฟของเฟืองเหล็กอายุการทำงานของเฟืองเมื่อทดลองกับน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์อยู่ที่ประมาณ 4000000 รอบ ทดลองน้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% โดยน้ำหนักประมาณ 5000000 รอบ ส่วนที่ทดลองน้ำมัน SAE 90 การสึกหรอสูงกว่า 5000000 รอบของการทำงาน

เฟืองอลูมิเนียมที่ทดลองน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์อายุการทำงานอยู่ที่ประมาณ 600000 รอบ ที่ทดลองกับน้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% ประมาณ 800000 รอบ ส่วนที่ทดลองน้ำมัน SAE 90 สูงกว่า 800000 รอบการทำงาน

7.2 ข้อเสนอแนะในการทดลอง

7.2.1 ในการทดลองควรเปลี่ยนแปลงโหลดที่ให้แก่เฟืองเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันที่โหลดต่างๆ กัน

7.2.2 เปลี่ยนแปลงสารเพิ่มคุณภาพหรือผสมสารเพิ่มคุณภาพในน้ำมันที่ทดลองอีก

7.2.3 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการทดลองว่ามีผลต่อการสึกหรอของเฟืองมากน้อยแค่ไหน

7.2.4 ใช้อุปกรณ์ในการวัดค่าที่มีมีความเที่ยงตรงให้มากขึ้น เช่น ใช้ strain gauge ในการวัดทอร์ค การนำน้ำมันมาทดลองกับเครื่องทดสอบความหนืด

7.2.5 เปลี่ยนแปลงวัสดุของเฟืองที่จะนำมาทดลองกับน้ำมันหรือใช้เฟืองที่มีใช้กันในระบบส่งกำลังของอุปกรณ์ทางเครื่องกล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ยังไม่ทอด

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	3.7	64.6	0.057
100	7.6	126	0.059
150	11.5	194	0.06
200	15.6	258	0.06
250	19.7	323	0.061
300	23.9	387	0.061
350	28.1	452	0.061
400	32.4	516	0.062
450	36.6	581	0.062
500	41	645	0.062
550	45.2	710	0.063
600	49.7	775	0.063
650	53.9	839	0.063
700	58.4	904	0.063
750	62.8	968	0.063
800	67.2	1033	0.063

ตารางที่ 2 น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ทดสอบ 500000

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	4	64.6	0.06
100	8.2	129	0.061
150	12.5	194	0.061
200	16.8	258	0.061
250	21.2	323	0.061
300	25.6	387	0.062
350	30	452	0.062
400	34.5	516	0.063
450	39	581	0.063

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

500	43.7	645	0.064
550	48.2	710	0.064
600	52.7	775	0.065
650	57.3	839	0.065
700	62.3	904	0.065
750	66.5	968	0.066
800	71.2	1033	0.066

ตารางที่ 3 น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ทดสอบ 1000000

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	4	64.6	0.061
100	8.3	129	0.061
150	11.2	194	0.061
200	15.1	258	0.062
250	19.1	323	0.063
300	23.1	387	0.063
350	27.2	452	0.063
400	31.2	516	0.063
450	35.4	581	0.064
500	39.6	645	0.064
550	43.9	710	0.064
600	48	775	0.064
650	52.2	839	0.066
700	56.5	904	0.066
750	60.6	968	0.066
800	65	1033	0.067

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ทดสอบ1500000

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	4.1	64.6	0.064
100	8.4	129	0.065
150	12.7	194	0.065
200	17.1	258	0.066
250	21.6	323	0.067
300	26	387	0.067
350	30.6	452	0.068
400	35.2	516	0.068
450	39.8	581	0.068
500	44.4	645	0.069
550	49.1	710	0.069
600	53.8	775	0.069
650	58.5	839	0.07
700	63.2	904	0.07
750	67.7	968	0.07
800	72.7	1033	0.07

ตารางที่ 5 น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ทดสอบ2000000

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	4.2	64.6	0.065
100	8.5	129	0.066
150	12.8	194	0.066
200	17.3	258	0.067
250	21.8	323	0.068
300	26.3	387	0.068
350	30.9	452	0.068
400	35.5	516	0.069
450	40.1	581	0.069

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

500	44.7	645	0.069
550	49.4	710	0.07
600	54	775	0.07
650	58.8	839	0.07
700	63.5	904	0.07
750	68.3	968	0.07
800	72.9	1033	0.071

ตารางที่ 6 น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ทดสอบ 3000000

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	3.6	64.6	0.07
100	7.4	129	0.071
150	11.3	194	0.071
200	15.2	258	0.071
250	19.1	323	0.072
300	23.1	387	0.072
350	27.1	452	0.072
400	31.2	516	0.073
450	35.3	581	0.073
500	39.4	645	0.073
550	43.7	710	0.074
600	47.8	775	0.074
650	51.9	839	0.075
700	56.2	904	0.075
750	60.4	968	0.076
800	64.6	1033	0.076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ทดสอบ 4000000

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	4.6	64.6	0.072
100	9.4	129	0.073
150	14.3	194	0.074
200	19.2	258	0.075
250	24.2	323	0.075
300	29.3	387	0.076
350	34.4	452	0.076
400	39.5	516	0.077
450	44.7	581	0.077
500	49.9	645	0.077
550	55	710	0.077
600	60.2	775	0.078
650	65.4	839	0.078
700	70.7	904	0.078
750	75.9	968	0.078
800	81.4	1033	0.079

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8 น้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% ก่อนทดลอง

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	4.3	64.6	0.067
100	8.8	129	0.068
150	13.4	194	0.069
200	18	258	0.07
250	22.6	323	0.07
300	27.4	387	0.07
350	32.2	452	0.071
400	36.9	516	0.071
450	41.8	581	0.071
500	46.6	645	0.072
550	51.4	710	0.072
600	56.2	775	0.072
650	61.2	839	0.073
700	66.1	904	0.073
750	71	968	0.073
800	75.9	1033	0.073

ตารางที่ 9 น้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% ทดลอง 500000

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	3.4	64.6	0.068
100	6.9	129	0.068
150	10.5	194	0.069
200	14.2	258	0.071
250	17.9	323	0.071
300	21.7	387	0.071
350	25.5	452	0.072
400	29.4	516	0.072
450	33.3	581	0.072

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

500	37.2	645	0.073
550	41.2	710	0.073
600	45.1	775	0.074
650	49.2	839	0.074
700	53	904	0.074
750	57.1	968	0.075
800	61	1033	0.075

ตารางที่ 10 น้ำหนักรีดผสม ZDDP 2% ที่ลดลง 1000000

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	4.2	64.6	0.069
100	8.5	129	0.069
150	12.9	194	0.07
200	17.4	258	0.071
250	21.9	323	0.072
300	26.4	387	0.072
350	31	452	0.072
400	35.6	516	0.073
450	40.2	581	0.073
500	44.9	645	0.074
550	49.5	710	0.074
600	54.3	775	0.075
650	59	839	0.075
700	63.8	904	0.075
750	68.4	968	0.076
800	73.2	1033	0.076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 11 น้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% ทดลอง 1500000

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	4.2	64.6	0.069
100	8.5	129	0.07
150	13	194	0.071
200	17.5	258	0.071
250	22	323	0.072
300	26.6	387	0.073
350	31.2	452	0.073
400	35.9	516	0.073
450	40.6	581	0.073
500	45.2	645	0.074
550	50	710	0.074
600	54.7	775	0.075
650	59.5	839	0.076
700	64.3	904	0.076
750	69.1	968	0.076
800	73.8	1033	0.077

ตารางที่ 12 น้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% ทดลอง 2000000

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	3.5	64.6	0.07
100	7.2	129	0.071
150	11	194	0.071
200	14.8	258	0.072
250	18.7	323	0.073
300	22.6	387	0.074
350	26.5	452	0.074
400	30.6	516	0.074
450	34.6	581	0.075

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

500	38.6	645	0.075
550	42.7	710	0.075
600	46.6	775	0.075
650	50.7	839	0.077
700	54.9	904	0.077
750	59	968	0.078
800	63.2	1033	0.078

ตารางที่ 13 น้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% ที่ลดลง 3000000

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	3.6	64.6	0.069
100	7.2	129	0.071
150	11	194	0.072
200	14.8	258	0.072
250	18.7	323	0.073
300	22.6	387	0.073
350	26.5	452	0.074
400	30.5	516	0.074
450	34.5	581	0.075
500	38.6	645	0.076
550	42.6	710	0.076
600	46.7	775	0.076
650	50.6	839	0.077
700	54.9	904	0.077
750	58.9	968	0.078
800	63.1	1033	0.079

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 14 น้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% ทดลอง 4000000

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	4.6	64.6	0.072
100	9.4	129	0.073
150	14.3	194	0.074
200	19.1	258	0.074
250	24.1	323	0.075
300	29	387	0.075
350	34.1	452	0.075
400	39.1	516	0.076
450	44.2	581	0.076
500	49.3	645	0.076
550	54.3	710	0.077
600	59.6	775	0.077
650	64.7	839	0.077
700	69.9	904	0.077
750	75	968	0.077
800	80	1033	0.078

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 15 น้ำมันเกียร์ SAE90 ก่อนทดลอง

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	21.6	64.6	0.335
100	43.5	129	0.337
150	65.1	194	0.336
200	86.9	258	0.336
250	108	323	0.335
300	129	387	0.334
350	150	452	0.333
400	171	516	0.331
450	189	581	0.327
500	209	645	0.323
550	226	710	0.318
600	240	775	0.292
650	243	839	0.269
700	245	904	0.25
750	247	968	0.233
800	248	1033	0.219

ตารางที่ 16 น้ำมันเกียร์ SAE90 ทดลองที่ 500000

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	28.6	64.6	0.445
100	57.3	129	0.443
150	85.4	194	0.443
200	113	258	0.438
250	141	323	0.437
300	169	387	0.433
350	193	452	0.428
400	219	516	0.422
450	226	581	0.389

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

500	230	645	0.35
550	234	710	0.318
600	238	775	0.291
650	240	839	0.269
700	242	904	0.25
750	243	968	0.233
800	244	1033	0.219

ตารางที่ 17 น้ำมันเกียร์ SAE90 ทดลองที่ 1000000

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	25.4	64.6	0.393
100	50.8	129	0.393
150	76	194	0.393
200	101	258	0.391
250	126	323	0.39
300	150	387	0.387
350	174	452	0.385
400	197	516	0.381
450	219	581	0.378
500	226	645	0.35
550	230	710	0.318
600	233	775	0.292
650	236	839	0.269
700	239	904	0.25
750	242	968	0.233
800	245	1033	0.219

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 18 น้ำมันเกียร์ SAE90 ทดลองที่1500000

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	22.8	64.6	0.345
100	45.2	129	0.346
150	67.6	194	0.347
200	90.2	258	0.347
250	113	323	0.346
300	135	387	0.346
350	157	452	0.345
400	177	516	0.344
450	199	581	0.34
500	218	645	0.339
550	226	710	0.318
600	230	775	0.292
650	233	839	0.269
700	237	904	0.25
750	240	968	0.233
800	242	1033	0.219

ตารางที่ 19 น้ำมันเกียร์ SAE90 ทดลองที่2000000

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	18.4	64.6	0.285
100	36.2	129	0.28
150	54	194	0.28
200	71.7	258	0.277
250	89	323	0.277
300	107	387	0.275
350	124	452	0.274
400	141	516	0.272
450	157	581	0.271

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

500	175	645	0.27
550	190	710	0.268
600	206	775	0.264
650	220	839	0.263
700	226	904	0.25
750	228	968	0.233
800	230	1033	0.228

ตารางที่ 20 น้ำมันเกียร์ SAE90 ทดลองที่ 3000000

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	18.9	64.6	0.292
100	37.9	129	0.294
150	57.1	194	0.295
200	76.1	258	0.295
250	95.1	323	0.295
300	113	387	0.292
350	132	452	0.292
400	150	516	0.291
450	168	581	0.29
500	186	645	0.288
550	203	710	0.286
600	220	775	0.282
650	226	839	0.269
700	229	904	0.249
750	232	968	0.233
800	234	1033	0.218

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 21 น้ำมันเกียร์ SAE90 ทดลองที่ 40000000

rpm	shear stress Pa	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	22.5	64.6	0.347
100	44.8	129	0.348
150	67.6	194	0.349
200	90.2	258	0.349
250	113	323	0.349
300	135	387	0.349
350	157	452	0.348
400	179	516	0.347
450	200	581	0.345
500	222	645	0.341
550	226	710	0.318
600	226	775	0.292
650	226	839	0.269
700	226	904	0.25
750	226	968	0.233
800	226	1033	0.219

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 22 น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ทดลองเฟืองอลูมิเนียม 200000

rpm	shear stress (Pa)	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	4.5	64.6	0.061
100	8.9	126	0.061
150	13.4	194	0.062
200	18	258	0.063
250	22.7	323	0.063
300	27.4	387	0.064
350	32.1	452	0.064
400	36.8	516	0.065
450	41.6	581	0.065
500	46.4	645	0.065
550	51.1	710	0.066
600	56	775	0.066
650	60.8	839	0.066
700	65.6	904	0.066
750	70.4	968	0.066
800	75.3	1033	0.067

ตารางที่ 23 น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ทดลองเฟืองอลูมิเนียม 400000

rpm	shear stress (Pa)	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	3.9	64.6	0.061
100	7.9	126	0.062
150	12	194	0.063
200	16.2	258	0.064
250	20.5	323	0.064
300	24.7	387	0.064
350	29	452	0.065
400	33.3	516	0.065
450	37.7	581	0.065

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

500	42.2	645	0.066
550	46.6	710	0.066
600	51	775	0.066
650	55.4	839	0.066
700	59.9	904	0.066
750	64.3	968	0.067
800	68.9	1033	0.067

ตารางที่ 24 นำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ลดลงที่อุณหภูมิ 600000

rpm	shear stress (Pa)	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	4	64.6	0.069
100	8	126	0.069
150	12.2	194	0.07
200	16.4	258	0.07
250	20.4	323	0.07
300	24.9	387	0.071
350	29.2	452	0.071
400	33.5	516	0.071
450	38	581	0.072
500	42.3	645	0.072
550	46.7	710	0.072
600	51.1	775	0.072
650	55.6	839	0.072
700	59.9	904	0.073
750	64.5	968	0.073
800	69	1033	0.073

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 25 น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ทดลองเพื่ออุณหภูมิเหนียว 800000

rpm	shear stress (Pa)	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	4.5	64.6	0.07
100	9.2	126	0.071
150	13.9	194	0.072
200	18.6	258	0.072
250	23.4	323	0.073
300	28.3	387	0.073
350	33.2	452	0.074
400	38.2	516	0.074
450	43.2	581	0.074
500	48.2	645	0.075
550	53.1	710	0.075
600	58.2	775	0.075
650	63.2	839	0.075
700	68.3	904	0.076
750	73.3	968	0.076
800	78.4	1033	0.076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 26 น้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% อลูมิเนียม 200000

rpm	shear stress (Pa)	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	4.4	64.6	0.063
100	8.8	126	0.064
150	13.3	194	0.064
200	17.9	258	0.065
250	22.6	323	0.066
300	27.3	387	0.066
350	32.1	452	0.067
400	36.8	516	0.067
450	41.6	581	0.067
500	46.5	645	0.068
550	51.2	710	0.068
600	56.1	775	0.068
650	60.9	839	0.068
700	65.7	904	0.069
750	70.5	968	0.069
800	75.4	1033	0.069

ตารางที่ 27 น้ำมันปาล์มผสม ZDDP ทดลองเพียงอลูมิเนียม 400000

rpm	shear stress (Pa)	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	4	64.6	0.063
100	8.2	126	0.064
150	12.5	194	0.064
200	16.8	258	0.065
250	21.2	323	0.066
300	25.6	387	0.066
350	30.1	452	0.066
400	34.5	516	0.067
450	39	581	0.067

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

500	43.7	645	0.067
550	48.7	710	0.068
600	52.8	775	0.068
650	57.4	839	0.068
700	62.1	904	0.068
750	66.7	968	0.068
800	71.5	1033	0.068

ตารางที่ 28 น้ำมันปาล์มผสม ZDDP ทดลองที่องศาอุณหภูมิ 600000

rpm	shear stress (Pa)	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	4.1	64.6	0.068
100	8.2	126	0.068
150	12.5	194	0.069
200	16.8	258	0.07
250	21.2	323	0.07
300	25.6	387	0.071
350	30	452	0.071
400	34.4	516	0.071
450	39	581	0.072
500	43.5	645	0.072
550	48.1	710	0.072
600	52.5	775	0.072
650	57.2	839	0.073
700	61.7	904	0.073
750	66.3	968	0.073
800	70.8	1033	0.073

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 29 น้ำมันปาล์มผสม ZDDP ทดลองเพียง อลูมิเนียม 800000

rpm	shear stress (Pa)	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	4.4	64.6	0.069
100	9	126	0.07
150	13.6	194	0.07
200	18.2	258	0.071
250	23	323	0.071
300	27.7	387	0.071
350	32.4	452	0.072
400	37.2	516	0.072
450	42.1	581	0.073
500	47	645	0.073
550	51.7	710	0.073
600	56.7	775	0.073
650	61.6	839	0.073
700	66.5	904	0.074
750	71.4	968	0.074
800	76.3	1033	0.074

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 30 น้ำมันเกียร์ SAE 90 อลูมิเนียม 600000

rpm	shear stress (Pa)	shear rate (1/sec)	viscosity (Pa.s)
0	0	0	0
50	24.3	64.6	0.377
100	48.7	126	0.376
150	72.6	194	0.375
200	96.7	258	0.373
250	120	323	0.372
300	143	387	0.369
350	166	452	0.367
400	188	516	0.363
450	209	581	0.36
500	226	645	0.35
550	228	710	0.318
600	231	775	0.292
650	234	839	0.269
700	236	904	0.25
750	238	968	0.233
800	241	1033	0.219

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 31 น้ำหนักเพียงเหล็กทดสอบกับน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

จำนวนรอบการทดลอง	น้ำหนัก	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง
0	258.13	0
500000	257.96	0.17
1000000	257.92	0.21
1500000	257.87	0.26
2000000	257.86	0.27
3000000	257.8	0.33
4000000	257.78	0.35

ตารางที่ 32 น้ำหนักเพียงเหล็กทดสอบกับน้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2%

จำนวนรอบการทดลอง	น้ำหนัก	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง
0	256.96	0
500000	256.89	0.07
1000000	256.88	0.08
1500000	256.87	0.09
2000000	256.87	0.09
3000000	256.86	0.1
4000000	256.85	0.11

ตารางที่ 33 น้ำหนักเพียงเหล็กทดสอบกับน้ำมัน SAE90

จำนวนรอบการทดลอง	น้ำหนัก	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง
0	248.98	0
500000	248.96	0.02
1000000	248.94	0.04
1500000	248.93	0.05
2000000	248.92	0.06
3000000	248.9	0.08
4000000	248.88	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 34 น้ำหนักเฟืองอลูมิเนียมทดสอบกับน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

จำนวนรอบการทดลอง	น้ำหนัก	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง
0	107.38	0
200000	107.25	0.13
400000	107.22	0.16
600000	107.13	0.25
800000	107.06	0.32

ตารางที่ 35 น้ำหนักเฟืองอลูมิเนียมทดสอบกับน้ำมันปาล์มผสมZDDP 2%

จำนวนรอบการทดลอง	น้ำหนัก	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง
0	102.93	0
200000	102.91	0.04
400000	102.91	0.05
600000	102.9	0.06
800000		

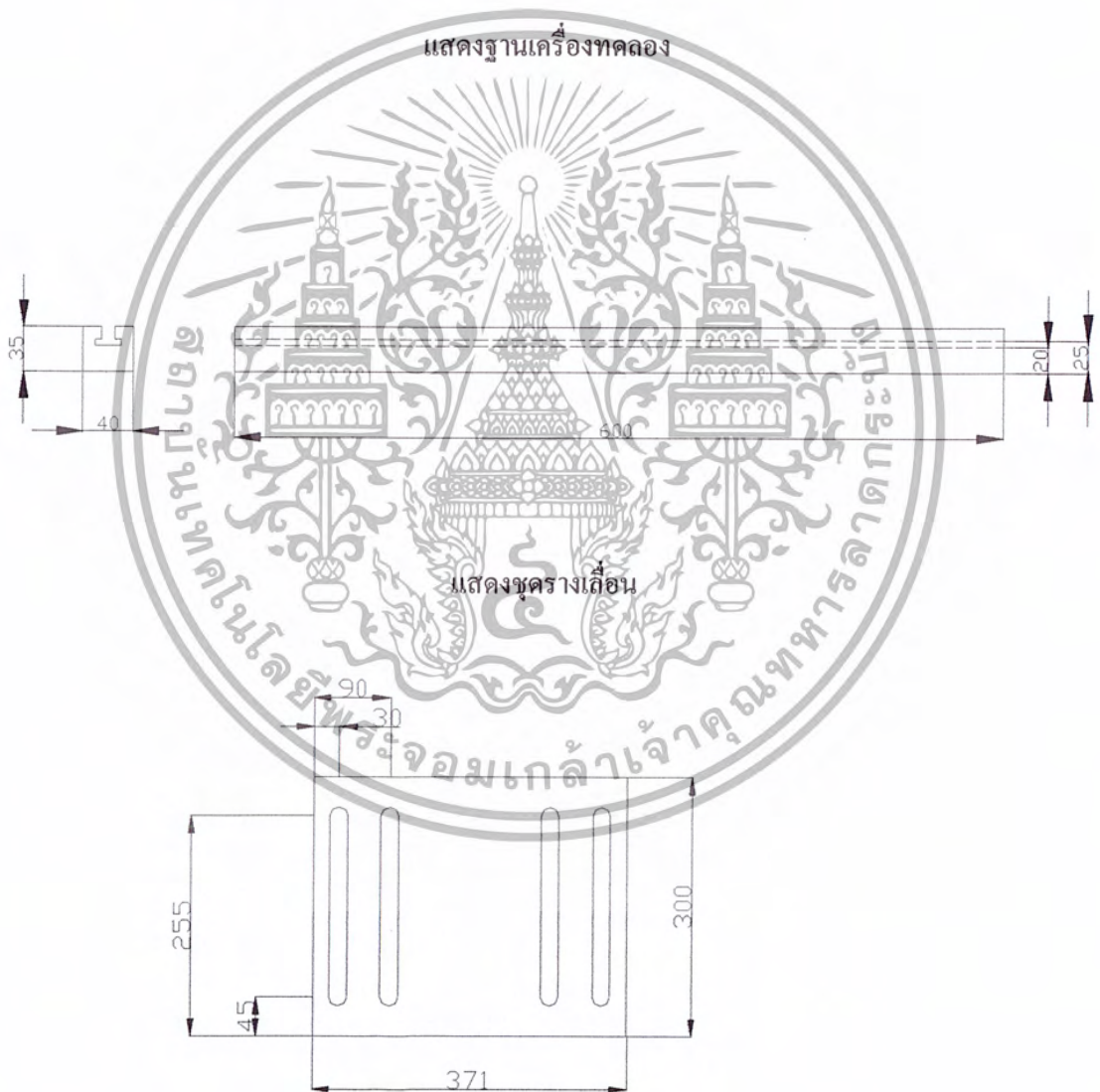
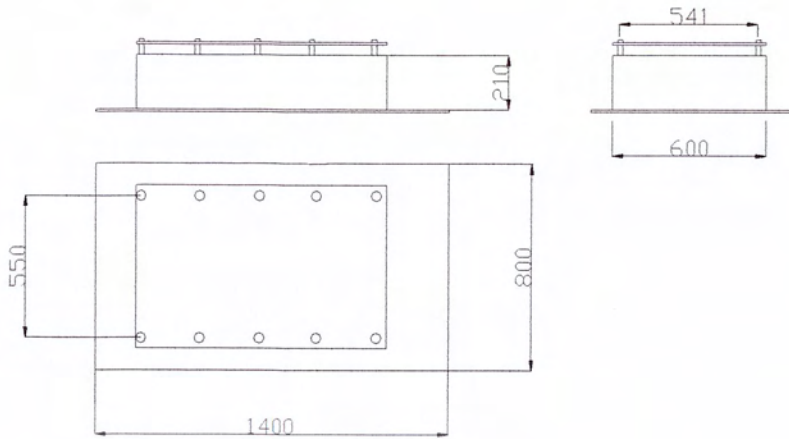
ตารางที่ 36 น้ำหนักเฟืองอลูมิเนียมทดสอบกับน้ำมันSAE90

จำนวนรอบการทดลอง	น้ำหนัก	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง
0	106.02	0
200000	106.01	0.03
400000	105.98	0.04
600000	105.98	0.04
800000		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

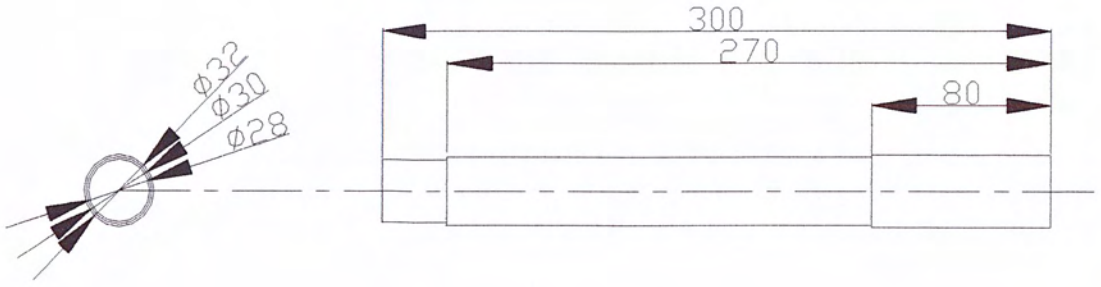


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

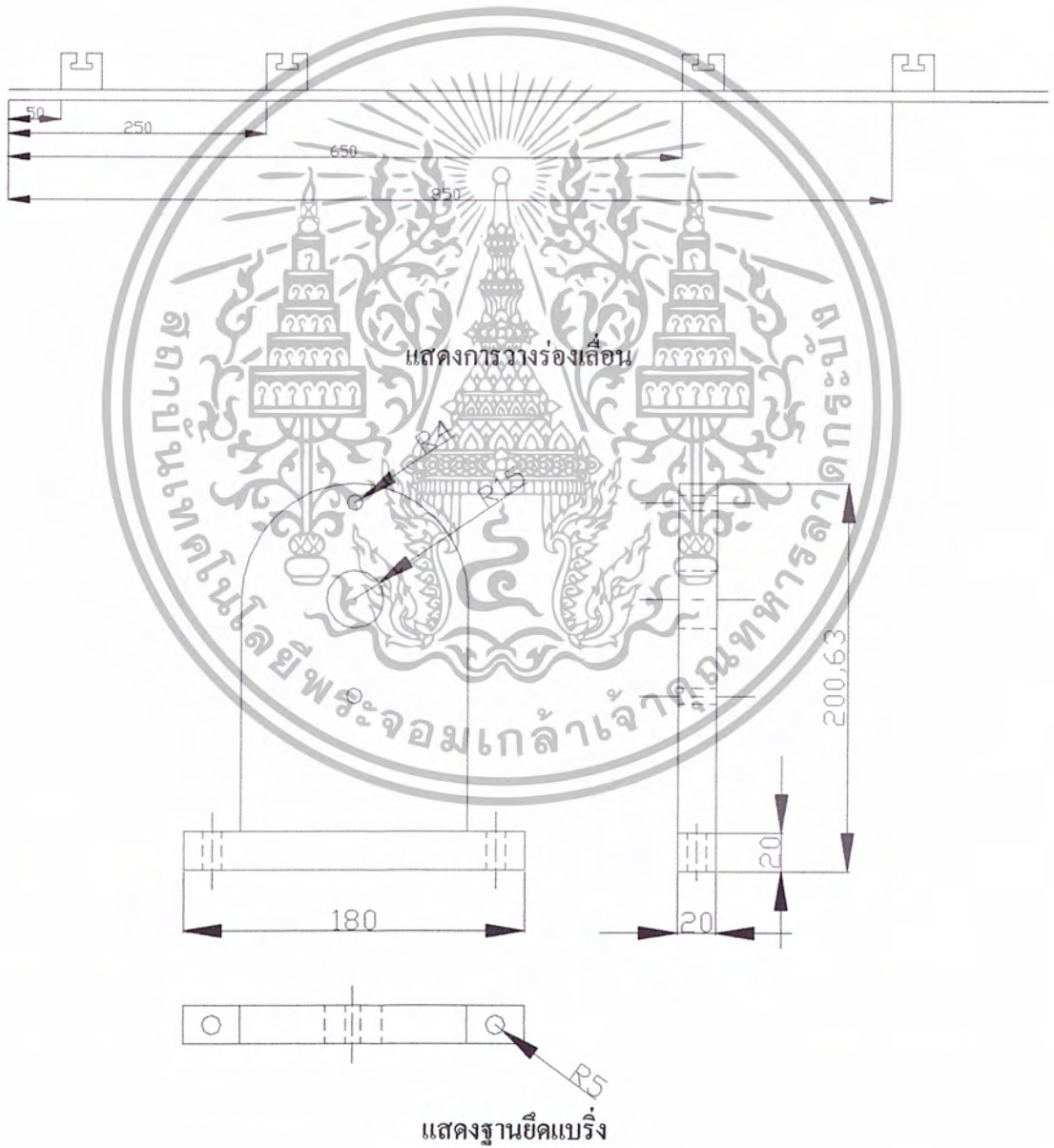


แสดงชุดฐานร่องเลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แสดงเพลาชุดทดลอง



แสดงฐานยึดแปรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ และ ศ.ดร. ฮิโรมุ ฮาชิโมโตะ : “ ทฤษฎีการหล่อลื่น “ : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล KMITL , พ.ศ. 2536
- [2] รศ.บรรเลง ศรีนิล, ผศ.ประเสริฐ ก๊วยสมบุญ, “ตารางงานโลหะ,” สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [3] Dr.Hiromu HASHIMOTO and Dr.Mongkol MONGKOLWONGROJN : “ Advanced Lubrication Thery “ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล “ KMITL , พ.ศ.2536
- [4] J.E. SHIGLEY, “Mechanical Engineering Design,” 3rd. ,McGrawHill, 1997.
- [5] Bernard J. Hamrock, “Fundamentals Of Fluid Film Lubrication,” McGrawHill.



การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการหล่อลื่นของเฟือง
EXPERIMENTAL STUDY ON GEAR LUBRICATION



ชุดทดสอบเฟือง เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน เฟืองทดสอบ
ชนิด ทรงแบน, น้ำมันทูตริ นวาลแก๊ว, บีเยะ นิลละอ, อคิเคช จันทพันธ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

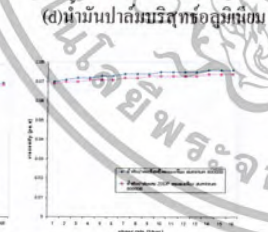
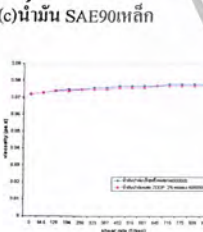
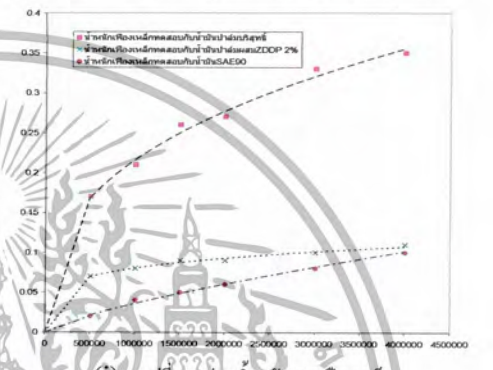
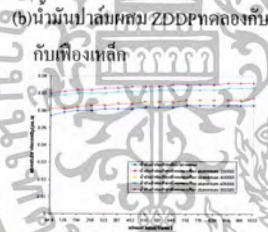
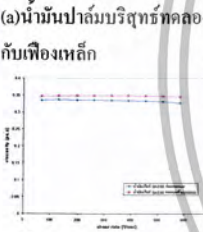
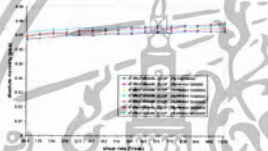
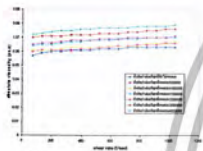
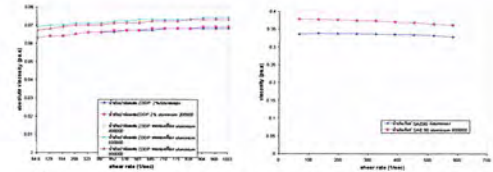
รศ.ดร มงคล มงคลวงศิริโรจน์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำมันที่ผสมสารเพิ่มคุณภาพต่อการสึกหรอของเฟือง
2. ทดลองหาสภาวะการสึกหรอของเฟืองกับน้ำมันที่ใช้หล่อลื่น
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปของน้ำมันที่ผ่านการทดลอง

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบสร้างชุดอุปกรณ์ทดลองและติดตั้งอุปกรณ์
2. ทดลองกับเฟืองตรงทำจากวัสดุเหล็กกล้าและอะลูมิเนียม 18 ฟัน โมดูล 4 อัตราทด 1:1
3. น้ำมันหล่อลื่นที่นำมาทดลองใช้น้ำมันเกียร์ SAE90 น้ำมันปาล์มและน้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% โดยน้ำหนัก
4. ทดลองที่ load คงที่ และความเร็วรอบคงที่



สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความหนืดของน้ำมันจะเพิ่มตามระยะเวลาการทำงานของน้ำมัน โดยความหนืดที่เพิ่มนี้มีผลมาจากผลของโลหะผสมอยู่ในน้ำมัน ซึ่งเป็นผลให้การสึกหรอของเฟืองเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำมันปาล์มผสม ZDDP 2% จะน้อยกว่าน้ำมันปาล์มไม่ผสมสาร ZDDP แต่สามารถลดการสึกหรอของเฟืองได้ดีกว่าน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ทั้งในเฟืองเหล็กและเฟืองอะลูมิเนียม ในการเพิ่มสาร ZDDP จะทำให้การสึกหรอของเฟืองมีผลใกล้เคียงกับน้ำมัน SAE 90 ซึ่งสามารถเพิ่มช่วงการทำงานของเฟืองได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้