

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูก
FOUR-BALL WEAR TEST MACHINE



เลขหมู่.....

61465

เลขทะเบียน.....

วัน,เดือน,ปี 17 ก.ค. 2549

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง เครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูก
FOUR-BALL WEAR TEST MACHINE

ผู้จัดทำ

1. นายรณรงค์ โคมอินทร์
2. นายวิชรัตน์ ศรีรักษ์



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องทดสอบการสีกหรือด้วยบอลสี่ลูก

นายรณรงค์	โฉมอินทร์	44010806
นายวชิรวัฒน์	ศรีรักษ์	44010814

รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์
ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเทคโนโลยีสมัยใหม่ทำให้เครื่องจักรได้ถูกพัฒนาให้มีความแม่นยำและความเที่ยงตรงสูง การสีกหรือต่ำ และใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เครื่องทดสอบการสีกหรือด้วยบอลสี่ลูกและการทดสอบการสีกหรือได้ถูกพัฒนาเพราะจำเป็นในการใช้หาคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ การหล่อลื่นและการสีกหรือ ซึ่งสามารถทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบการสีกหรือด้วยบอลสี่ลูก โครงการนี้จึงได้นำเสนอเครื่องทดสอบการสีกหรือด้วยบอลสี่ลูกเพื่อที่จะช่วยทำความเข้าใจคุณสมบัติการสีกหรือของวัสดุ โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์ของการสีกหรือ และการหล่อลื่นในสภาวะการทดสอบต่างๆ และหากมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทดสอบก็จะทำให้ความสัมพันธ์บางอย่างเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งสามารถนำผลการทดลองไปใช้ประยุกต์ เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ชิ้นส่วนเครื่องจักรต่อไป



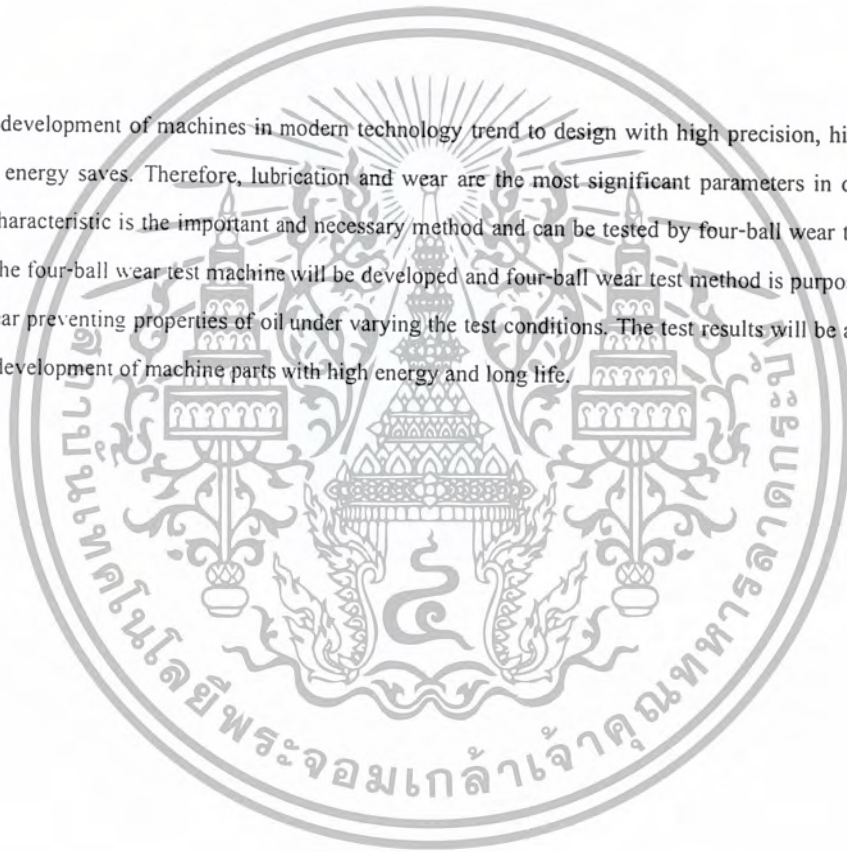
FOUR-BALL WEAR TEST MACHINE

Ronnarong Chom-in
Wachirawat Srirug

Assoc. Prof. Mongkol Mongkolwongroj
Advisor

Abstract

The development of machines in modern technology trend to design with high precision, high accuracy, low wear and energy saves. Therefore, lubrication and wear are the most significant parameters in design. Wear preventative characteristic is the important and necessary method and can be tested by four-ball wear test machine. In this study, the four-ball wear test machine will be developed and four-ball wear test method is purposed to obtain the relative wear preventing properties of oil under varying the test conditions. The test results will be able to apply in design and development of machine parts with high energy and long life.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดีเนื่องด้วยความช่วยเหลือ และความร่วมมือจากหลายบุคคลด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่สุดที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จลงได้ก็คือ รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา รวมถึงท่านคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทั้งมวล ตลอดการศึกษาที่ผ่านมา ซึ่งข้าพเจ้าได้ระลึกถึงพระคุณเป็นอย่างยิ่งตลอดมา และขอขอบคุณทางภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องจุลทรรศน์แบบถ่ายภาพรูปได้ รวมถึง อ.มณฑา ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านเครื่องมือช่าง รวมถึงคำแนะนำทางเทคนิคในขั้นตอนการสร้างเครื่องทดสอบ

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมาในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบของพระคุณมา ณ ที่นี้



นายรณรงค์ โฉมอินทร์
นายวชิรวัฒน์ ศรีรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	IX
ตารางสัญลักษณ์	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาของโครงการ	1
1.2 ความสำคัญและแนวคิดในการทำโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและแนวทางการดำเนินงานของโครงการ	1
บทที่ 2 หลักพื้นฐานการหล่อลื่น	2
2.1 การหล่อลื่นชิ้นงาน	2
2.2 ชนิดของการหล่อลื่น	3
2.3 การเกิดแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น	4
2.4 ความหนืดของสารหล่อลื่น	5
2.5 สมการเรโนลด์	6
2.6 สมการเรโนลด์สำหรับกาวรองลื่นที่มีความยาวมาก	10
2.7 สมการเรโนลด์สำหรับกาวรองลื่นที่สั้นมาก	11
2.8 การหาค่าความหนาของฟิล์มน้ำมันในรูปฟังก์ชันของ X	12
2.9 การอินทิเกรตสมการเรโนลด์	12
2.10 การหาแรงเสียดทานระหว่างผิวของทรงกลม	14
บทที่ 3 ชนิดของสารหล่อลื่น	16
3.1 สารหล่อลื่นสถานะของเหลว	16
3.2 สารหล่อลื่นสถานะกึ่งของแข็ง	21
3.3 สารหล่อลื่นสถานะของแข็ง	22
3.3.1 สารหล่อลื่นของแข็งเป็นผง (Particulate)	22
3.3.2 แกรไฟต์	22
3.3.3 วัสดุประกอบ (Composites)	24
3.3.4 โลหะอ่อนนุ่ม	25
บทที่ 4 น้ำมันหล่อลื่น	26
4.1 น้ำมันแร่	25
4.2 น้ำมันสังเคราะห์	28
4.2.1 ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์ (Synthesized hydrocarbons)	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 เอสเทอร์อินทรีย์ (Organic esters)	28
4.2.3 โพลีไกลคอลส์ (Polyglycols)	29
4.2.4 ฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate esters)	29
4.2.5 น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์อื่นๆ	29
4.3 สารเพิ่มคุณภาพ	29
4.3.1 สารลดจุดไหลเท (Pour point depressants)	30
4.3.2 สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (Viscosity index improvers)	30
4.3.3 สารป้องกันการเกิดฟอง (Defoamants)	30
4.3.4 สารป้องกันออกซิเดชัน (Oxidation inhibitors)	30
4.3.5 สารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion inhibitors)	30
4.3.6 สารป้องกันสนิม (Rust inhibitors)	31
4.3.7 สารชะล้างและกระจายสิ่งสกปรก (Detergents and dispersants)	31
4.3.8 สารป้องกันการสึกหรอ (Antiwear additives)	31
4.4 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น	31
4.4.1 ความหนืด (Viscosity)	31
4.4.2 ดัชนีความหนืด (Viscosity index)	34
4.4.3 กากคาร์บอน (Carbon residue)	35
4.4.4 สี (Color)	35
4.4.5 ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (Density and gravity)	36
4.4.6 จุดวาบไฟและจุดติดไฟ (Flash and fire points)	36
4.4.7 จุดไหลเท (Pour point)	36
4.4.8 ตัวเลขความเป็นกลาง (Neutralization number)	36
บทที่ 5 การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบ	38
5.1 การออกแบบ	38
5.1.1 การศึกษาลักษณะการทำงานของเครื่อง	38
5.1.2 การออกแบบทางกล	38
5.1.3 การออกแบบระบบควบคุม	44
5.2 การสร้างเครื่องทดสอบ	46
5.2.1 การสร้างโครงสร้างยึดจับทางกล	46
5.2.2 การสร้างอุปกรณ์ยึดจับบอลและการหล่อลื่น	46
5.2.3 การสร้างระบบกลไกส่งถ่ายแรงต่างๆ	47
5.2.4 การประกอบชุดควบคุม	48
5.2.5 การ Calibrate หาค่าแรงบิด	50
บทที่ 6 การทดลอง	54
6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	54
6.2 วิธีการทดลอง	54
6.3 ผลการทดลอง	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7 บทวิจารณ์และสรุปผลการทดลอง	64
7.1 ผลที่ได้จากโครงการ	64
7.2 ข้อจำกัดของเครื่อง Four ball wear test machine	64
7.3 สรุปผลการทดลอง	64
ภาคผนวก	65
ก. ตารางแสดงข้อมูลการทดลองที่สภาวะต่างๆ	65
ข. ภาพแสดงรอบสึกหรอของลูกบอลที่สภาวะต่างๆ	90
บรรณานุกรม	95



สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 2-1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยเฉลี่ย	3
ตารางที่ 2-2 ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นที่ 25°C	6
ตารางที่ 3-1 ผลของส่วนผสมของน้ำมันปิโตรเลียมต่อคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น	17
ตารางที่ 3-2 ชนิดของน้ำมันหล่อลื่นแบ่งตามเบอร์ SAE	17
ตารางที่ 3-3 ตารางแสดงค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นในทางอุตสาหกรรมกำหนดโดย ASLE-ASTM ซึ่งได้ใช้เป็นมาตรฐานของ ISO คือ Standard 3448 ของ ISO	18
ตารางที่ 3-4 แสดงตัวอย่างการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารเติมแต่ง	20
ตารางที่ 3-5 สารเติมแต่งที่นิยมใช้	20
ตารางที่ 3-6 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารหล่อลื่นสถานะของแข็ง	23
ตารางที่ 3-7 ความแข็งแรงเฉือนของโลหะ	25
ตารางที่ 5-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดและความต่างศักย์	50
ตารางที่ 5-2 ตารางค่าที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ a และ b	51
ตารางที่ 6-1 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะแรงกดที่ระนาบลูกบอลเหล็กกับคัมน์น้ำหนัก	58
ตารางที่ 6-2 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะแรงกดที่ระนาบลูกบอลเหล็กสามลูก กับความต่างศักย์ไฟฟ้า	58
ตารางที่ ก-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุนของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 10 kg	65
ตารางที่ ก-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุนของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 2 kg	66
ตารางที่ ก-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุนของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 4 kg	67
ตารางที่ ก-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุนของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 16 kg	68
ตารางที่ ก-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุนของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 18 kg	69
ตารางที่ ก-6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 10 kg	70
ตารางที่ ก-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 12 kg	71
ตารางที่ ก-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 14 kg	72
ตารางที่ ก-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุนของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 16 kg	73

ตารางที่ ก-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 18 kg	74
ตารางที่ ก-11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 ที่แรงกดที่ระนาบ 10 kg	75
ตารางที่ ก-12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 ที่แรงกดที่ระนาบ 12 kg	76
ตารางที่ ก-13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 ที่แรงกดที่ระนาบ 14 kg	77
ตารางที่ ก-14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 ที่แรงกดที่ระนาบ 16 kg	78
ตารางที่ ก-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 ที่แรงกดที่ระนาบ 18 kg	79
ตารางที่ ก-16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่แรงกดที่ระนาบ 10 kg	80
ตารางที่ ก-17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่แรงกดที่ระนาบ 12 kg	81
ตารางที่ ก-18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่แรงกดที่ระนาบ 14 kg	82
ตารางที่ ก-19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่แรงกดที่ระนาบ 16 kg	83
ตารางที่ ก-20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่แรงกดที่ระนาบ 18 kg	84
ตารางที่ ก-21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน สภาวะไม่มีน้ำมันหล่อลื่น ที่แรงกดที่ระนาบ 10 kg	85
ตารางที่ ก-22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน สภาวะไม่มีน้ำมันหล่อลื่น ที่แรงกดที่ระนาบ 12 kg	86
ตารางที่ ก-23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน สภาวะไม่มีน้ำมันหล่อลื่น ที่แรงกดที่ระนาบ 14 kg	87
ตารางที่ ก-24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน สภาวะไม่มีน้ำมันหล่อลื่น ที่แรงกดที่ระนาบ 16 kg	88
ตารางที่ ก-25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน สภาวะไม่มีน้ำมันหล่อลื่น ที่แรงกดที่ระนาบ 18 kg	89

สารบัญภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 2-1 ชนิดของการหล่อลื่น	2
รูปที่ 2-2 แสดงการไหลของสารหล่อลื่นในแผ่นรองลื่นเอียง	4
รูปที่ 2-3 การกระจายแรงดันและความเร็วของน้ำมันหล่อลื่นในแผ่นรองลื่น	4
รูปที่ 2-4 แสดงการไหลของสารหล่อลื่นผ่านหน้าตัดเล็กลงตามทิศทางการไหลในแบร์ริง	7
รูปที่ 2-5 แสดงแรงกระทำต่อสารหล่อลื่นในทิศทางการไหลในแบร์ริง	7
รูปที่ 2-6 ภาพรองลื่นที่มีความยาวมากและการกระจายของความดันตามแกน X	10
รูปที่ 2-7 แสดงความหนาของฟิล์มน้ำมันระหว่างดิสก์ 2 แผ่น	12
รูปที่ 3-1 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น	19
รูปที่ 3-2 โครงสร้างเป็นชั้นแลททิซของแกรไฟต์	22
รูปที่ 4-1 กลั่นน้ำมันดิบ	27
รูปที่ 4-2 ขบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น	27
รูปที่ 4-3 หลักการของความหนืด	32
รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นบางชนิด	33
รูปที่ 4-5 ผลของความดันต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE40	34
รูปที่ 4-6 การหาค่าดัชนีความหนืด	35
รูปที่ 5-1 ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบ Four ball wear test machine	38
รูปที่ 5-2 การส่งผ่านแรงไปหมุนลูกบอลทางด้านบนโดยแรงหมุนจากมอเตอร์	39
รูปที่ 5-3 การส่งผ่านแรงที่ทำให้เกิดแรงกดทับที่ผิวของลูกบอลโดยใช้จุดหมุนและคาน และการยึดอุปกรณ์ยึดจับลูกบอลสามลูกทางด้านล่างเข้ากับ Link	39
รูปที่ 5-4 Link และ ป्लอกบังคับทิศทางการเคลื่อนที่	40
รูปที่ 5-5 การประกอบชุดยึดจับลูกบอลทั้งสี่ลูกและขนาดของอุปกรณ์ยึดจับ	40
รูปที่ 5-6 ขนาดของอุปกรณ์ยึดจับลูกบอลทั้งสี่ลูก	41
รูปที่ 5-7 Wheatstone Bridge circuit และการติด Strain gage	41
รูปที่ 5-8 การรองรับอุปกรณ์ทางกลบนระนาบต่างๆ ด้วยเหล็กรูปตัว C	42
รูปที่ 5-9 โครงสร้างยึดจับระบบทางกล	43
รูปที่ 5-10 แบร์ริงรองรับป้องกันการส่งแรงกดไปสู่เพลลาวิดแรงบิด	43
รูปที่ 5-11 แบบโครงสร้างทางกลของเครื่อง Four ball wear test machine	44
รูปที่ 5-12 แสดงตำแหน่งของ Four-ball การติดตั้ง Thermocouple และ Heater	45
รูปที่ 5-13 วงจรไฟฟ้าควบคุมสถานะควบคุม	45
รูปที่ 5-14 โต๊ะที่เป็นฐานรองรับและเหล็กรูปตัว C และเหล็กฉากที่เป็นโครงสร้างสำหรับยึดอุปกรณ์	46
รูปที่ 5-15 อุปกรณ์ยึดจับลูกบอล	46
รูปที่ 5-16 คาน จุดหมุน ตัวส่งแรงสู่ระนาบลูกบอลสามลูก เพลลาที่จะใช้หาค่าแรงบิด และแบร์ริงรองรับแรงกดที่ลูกบอลเหล็กหมุนทางด้านบน	48
รูปที่ 5-17 เครื่อง Four ball wear test machine	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5-18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Voltage และ Torque	51
รูปที่ 5-19 รูปจำลองทางเรขาคณิตของ Four ball	52
รูปที่ 6-1 ติดตั้งลูกบอลเหล็กเข้ากับเครื่องมือทดสอบ	55
รูปที่ 6-2 เทนน้ำมันทดสอบชนิดที่หนึ่ง	55
รูปที่ 6-3 แขนงตุ้มน้ำหนัก	56
รูปที่ 6-4 ปรับตู้ควบคุม	56
รูปที่ 6-5 ปรับค่าความเร็วของการหมุน	57
รูปที่ 6-6 บันทึกค่า Output	57
รูปที่ 6-7 กราฟแสดงค่าการ Calibrate ของ stain-gage	59
รูปที่ 6-8 กราฟความสัมพันธ์แรงเสียดทานกับแรงกดที่ระนาบลูกบอล ของน้ำมัน SAE40+5% palm oil	59
รูปที่ 6-9 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับแรงกดที่ระนาบลูกบอล ของน้ำมัน SAE90+5% palm oil	60
รูปที่ 6-10 กราฟสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของน้ำมัน SAE40	60
รูปที่ 6-11 กราฟสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของน้ำมัน SAE90	61
รูปที่ 6-12 กราฟสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับแรงกดที่ระนาบลูกบอล แบบไม่มีการหล่อลื่น	61
รูปที่ 6-13 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับแรงกระทำบนระนาบลูกบอล ที่ความเร็ว 600 rpm	62
รูปที่ 6-14 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับแรงกระทำบนระนาบลูกบอล ที่ความเร็ว 900 rpm	62
รูปที่ 6-15 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับแรงกระทำบนระนาบลูกบอล ที่ความเร็ว 1200 rpm	63
รูปที่ ข-1 ลูกบอลบนของน้ำมัน SAE 40	90
รูปที่ ข-2 ลูกบอลบนของน้ำมัน SAE 40+palm oil 5%	90
รูปที่ ข-3 ลูกบอลบนของน้ำมัน SAE 90	91
รูปที่ ข-4 ลูกบอลบนของน้ำมัน SAE 90+palm oil 5%	91
รูปที่ ข-3 ลูกบอลบนของน้ำมัน SAE 90	92
รูปที่ ข-4 ลูกบอลบนของน้ำมัน SAE 90+palm oil 5%	92
รูปที่ ข-7 ลูกบอลล่างของน้ำมัน SAE 40+palm oil 5%	93
รูปที่ ข-8 ลูกบอลล่างของน้ำมัน SAE 90	93
รูปที่ ข-9 ลูกบอลล่างของน้ำมัน SAE 90+palm oil 5%	94
รูปที่ ข-10 ลูกบอลล่างของสภาวะที่ไม่มีสารหล่อลื่น	94

ตารางสัญลักษณ์

R	รัศมีของแผ่นดิสก์หรือลูกบอลทรงกลม
U	Surface speed
μ	Viscosity
H	Film thickness
\bar{h}	Maximum film thickness
P^*	Dimensionless pressure
W/L	Load carried per unit axial length
τ	Shear stress
F^*	Dimensionless viscous friction
M^*	Dimensionless mass
f	Friction Coefficient
V	Voltage
T	Torque
P	Test Load



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของโครงการ

เนื่องจากปัจจุบันเครื่องทดสอบการสึกหรอมีความจำเป็นในการทดสอบวัสดุที่จะนำไปใช้ในงานต่างๆ ที่ต้องการความละเอียดและมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้เพื่องานในสภาวะต่างๆได้ และผลที่ตามมาอีกอย่างหนึ่งคือหากในการทดลองแต่ละครั้งได้เปลี่ยนชนิดของน้ำมันหล่อลื่นเราก็สามารถทราบความสามารถในการหล่อลื่นหรือทำนายคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดที่สภาวะต่างๆได้ นอกจากนี้เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ในห้องทดลองของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลซึ่งยังไม่มีชุดการทดลองนี้ ทำให้เป็นอุปสรรคในการศึกษาทดลองในวิชาที่เกี่ยวข้องกับความเสียดทาน การสึกหรอ และการหล่อลื่น (Tribology) ซึ่งหากไม่มีการทดลองให้เห็นผลชัดเจนก็จะไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงต่างๆได้

1.2 ความสำคัญและแนวคิดในการทำโครงการ

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นจึงเป็นที่มาของโครงการนี้โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะนำมาใช้เป็นอุปกรณ์การทดลองของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลเพื่อให้นักศึกษาในวิชาดังกล่าวข้างต้นบรรลุถึงจุดประสงค์ นั่นคือสามารถทำงานทดลองได้และนำผลการทดลองไปใช้สรุปหาคุณสมบัติต่างๆ ทั้งของวัสดุคือลูกบอล และของน้ำมันหล่อลื่นในสภาวะโหลดต่างๆกัน และอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นต่างๆกันได้อย่างมีประสิทธิภาพและถูกต้อง

1.3 ขอบเขตและแนวทางการดำเนินงานของโครงการ

ขอบเขตและแนวทางการดำเนินงานของโครงการนี้ คือ เริ่มจากการศึกษาถึงลักษณะการเคลื่อนที่ที่มีการสัมผัสกัน ระหว่างฟิล์มน้ำมันกับผิวลูกบอล ซึ่งจะมีผลต่อการสึกหรอของลูกบอลทั้งนี้ยังขึ้นกับชนิดของน้ำมันหรือเกรดของน้ำมันหล่อลื่น เมื่อทำการศึกษาแล้วก็จะเป็นกระบวนการออกแบบเครื่องทดสอบโดยอิงทฤษฎีของวัสดุ น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ ในการออกแบบจะมีการออกแบบทางกล การออกแบบระบบควบคุมการทำงานต่างๆ และอื่นๆ ซึ่งจะได้ออกแบบในหัวข้อถัดไป

เมื่อทำการออกแบบแล้วก็จะเป็นขั้นตอนการสร้างชุดทดลองเพื่อนำมาใช้งานจริง โดยจะทำการสร้างตามลำดับที่ได้ออกแบบไว้ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

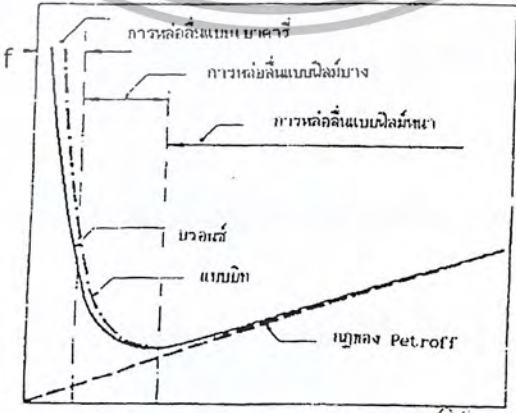
บทที่ 2 หลักพื้นฐานการหล่อลื่น

2.1 การหล่อลื่นชิ้นงาน

การหล่อลื่นชิ้นงาน คือการแยกชิ้นงานออกจากกันด้วยฟิล์มสารหล่อลื่น ขณะผิวชิ้นงานสองชิ้นเคลื่อนไถลกันด้วยความเร็วสัมพัทธ์ ฟิล์มสารหล่อลื่นจะถูกเฉือนโดยผิวของชิ้นงานทั้งสองไม่เกิดความเสียหาย แต่ถ้าไม่มีฟิล์มหรือมีฟิล์มเฉพาะบางพื้นที่ผิว ผิวชิ้นงานจะเกิดการแตะสัมผัสกัน ทำให้ผิวของชิ้นงานเคลื่อนไถลกันระหว่างผิวโลหะทำให้เนื้อโลหะหลุดออกมา เกิดการสึกหรอของชิ้นงาน ดังนั้นการหล่อลื่นชิ้นงานสามารถลดการสึกหรอลงได้ทำให้เครื่องจักรมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น และทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ซึ่งจะทำให้เครื่องจักรมีขนาดเล็กลง เกิดการประหยัดและลดมลพิษ การหล่อลื่นจำเป็นต้องให้เกิดฟิล์มสารหล่อลื่นที่มีความหนาเพียงพอเพื่อไม่ให้เกิดการแตะกันของผิวโลหะขณะที่มีการเคลื่อนไถล การหล่อลื่นแบบนี้พบในกาบหล่อลื่นเพลากลม แผ่นรองลื่นรับแรงดล เรียกว่าการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก หรือการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก สารหล่อลื่นที่นิยมใช้มักจะเป็นน้ำมันหล่อลื่นแร่ น้ำ อากาศ หรือน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ ฯลฯ

จากเหตุผลที่ว่าอุตสาหกรรมได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เครื่องจักรเครื่องมือสมัยใหม่ได้ถูกพัฒนาให้ชิ้นงานมีความเที่ยงตรงสูง ความเร็วรอบสูง ทำให้การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกได้ถูกนำไปใช้ในการหล่อลื่นเครื่องจักรต่างๆ เช่น กังหันไอน้ำ กังหันแก๊ส เครื่องอัดอากาศเครื่องยนต์ และเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น การหล่อลื่นแบบแห้งและการหล่อลื่นแบบเบาดารี ใช้สารหล่อลื่นที่เป็นไข อาจเป็นจาระบีหรือไขน้ำมัน มักจะใช้ในงานที่มีความเร็วรอบต่ำ หรือนานที่ผิวชิ้นงานเคลื่อนไถลบนผิวชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งที่มีความเร็วสัมพัทธ์ต่ำ ซึ่งผิวที่เคลื่อนไถลกันของผิวชิ้นงานอาจมีการหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ หรืออาจไม่มีการหล่อลื่นเป็นผิวแห้งก็ได้

วิชาการวิทยาศาสตร์การหล่อลื่น ได้เริ่มมีการศึกษาตั้งแต่ประมาณปี ค.ศ. 1785 นายคูลอมบ์ (Coulomb) ได้อธิบายปรากฏการณ์การเกิดความฝืดและยังได้อธิบายความแตกต่างของความฝืดสถิตและความฝืดจลน์ (Static friction and kinetic friction) ต่อมาในปี ค.ศ. 1886 นายเรโนลด์ (Reynold) ได้เขียนทฤษฎีการหล่อลื่นด้วยฟิล์มของไหลเป็นครั้งแรก ทำให้วิชาการทางด้านการศึกษาการหล่อลื่นได้ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว จนปัจจุบันวิชาการหล่อลื่นได้เป็นวิชาการที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่



รูปที่ 2-1 ชนิดของการหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ชนิดของการหล่อลื่น

พฤติกรรมของการเคลื่อนไถลของผิวชิ้นงานจะขึ้นกับฟิล์มสารหล่อลื่นที่คั่นอยู่ระหว่างผิวของชิ้นงานทั้งสอง และสภาวะการทำงาน จากรูป 2-1 สำหรับการรองลื่นเพลากลมได้แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน f และค่าโดยที่ μ คือค่าความหนืดของสาร N คือความเร็วรอบของเพล และ P คือภาระที่การรองลื่นรับต่อพื้นที่ภาพฉาย เรียกว่าภาระจำเพาะ จากกราฟพบว่าที่ค่า $\mu N/P$ สูงๆ การรองลื่นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $\mu N/P$ และให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำซึ่งเป็นการหล่อลื่นแบบฟิล์มหนาหรือการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก เมื่อลดค่า $\mu N/P$ ลงจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะลดลงด้วยจนมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งเป็นการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง ในการหล่อลื่นแบบนี้ ถ้าลดค่า $\mu N/P$ ให้มีค่าต่ำลงไปอีกจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว การหล่อลื่นแบบนี้เรียกว่าการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง และถ้าลดค่า $\mu N/P$ ให้ต่ำลงไปอีก จากกราฟพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกอย่างรวดเร็ว และยังพบว่าฟิล์มสารหล่อลื่นบางส่วนจะถูกทำลายไป ซึ่งเรียกการหล่อลื่นแบบนี้ว่า การหล่อลื่นแบบเบาดารี ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยเฉลี่ยของการหล่อลื่นแบบต่างๆ ได้แสดงในตาราง 2-1

ชนิดของการหล่อลื่น	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	การสึกหรอ
ไม่มีการหล่อลื่น	1.0 — 2.0	การสึกหรอสูงมาก
การหล่อลื่นแบบเบาดารี	0.05 — 0.15	การสึกหรอเล็กน้อย
การหล่อแบบฟิล์มหนา	0.001	ไม่มีการสึกหรอ

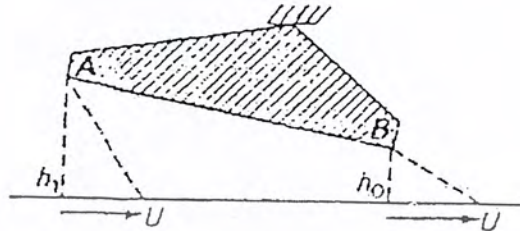
ตารางที่ 2-1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยเฉลี่ย

การหล่อลื่นแบบฟิล์มหนา เป็นการหล่อลื่นที่มีสารหล่อลื่นคั่นระหว่างผิวชิ้นงานหนาขณะที่ชิ้นงานเคลื่อนไถลถูกกัน ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่นเพียงอย่างเดียวไม่ขึ้นกับคุณสมบัติของผิวโลหะชิ้นงาน และไม่เกิดการสึกหรอ ดังนั้นจึงเป็นชนิดการหล่อลื่นที่ต้องการของผู้ออกแบบเครื่องจักรโดยทั่วไป

การหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง เป็นการหล่อลื่นที่มีสารหล่อลื่นเป็นฟิล์มบางๆ คั่นระหว่างผิวของชิ้นงาน ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผิวชิ้นงานและขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่น จากรูป 2-1 จะเห็นว่าการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางเมื่อค่า $\mu N/P$ มีค่าต่ำลงฟิล์มสารหล่อลื่นจะบางลงจนกระทั่งยอดขรุขระของผิวชิ้นงานแตะสัมผัสกัน แล้วค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะขึ้นอยู่กับความขรุขระของผิวชิ้นงาน คุณสมบัติของโลหะชิ้นงาน และคุณสมบัติของสารหล่อลื่นที่ใช้ด้วย ในการหล่อลื่นแบบเบาดารีจะพบว่าฟิล์มสารหล่อลื่นบางมาก ฟิล์มหนาดั้งแต่ 10^{-4} เซนติเมตร ถึงความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเท่ากับความหนาของโมเลกุลของสารหล่อลื่นเท่านั้น ถ้าชิ้นงานทำงานที่ความเร็วต่ำเกิดการระเหยขึ้น ก็จะทำให้ฟิล์มสารหล่อลื่นบางกว่าความสูงของยอดขรุขระที่ผิวชิ้นงาน และถ้าผิวขรุขระนี้มีสารหล่อลื่นจับเป็นชั้นโมเลกุล สารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติที่ดีคือโมเลกุลของสารหล่อลื่นที่สามารถจับตัวเป็นลูกโซ่ยาวได้แก่ ไชกรदन้ำมัน เมื่อใช้กับชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้า การหล่อลื่นแบบนี้จะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.1 เท่านั้น

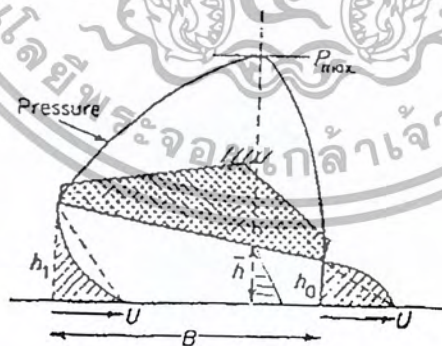
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การเกิดแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น



รูปที่ 2-2 แสดงการไหลของสารหล่อลื่นในแผ่นรองลื่นเอียง

เมื่อชิ้นงาน A เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว U จะทำให้ของไหลหรือน้ำมันหล่อลื่นไหลเข้าแผ่นรองลื่น (Bearing) เอียง B ที่ทางเข้าเกิดฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นหนาเท่ากับ h_1 และที่ทางออกจะเกิดฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นหนาเท่ากับ h_0 ถ้าสมมติว่าการกระจายของความเร็วในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นเป็นเส้นตรง โดยที่ผิวของชิ้นงาน A ความเร็วของน้ำมันหล่อลื่นที่แตะกับผิว A มีค่าเท่ากับ U ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นที่ทางเข้า $q_{x1} = Uh_1/2$ และอัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นที่ทางออก $q_{x0} = Uh_0/2$ เนื่องจากค่าความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นที่ทางเข้าแผ่นรองลื่นหนากว่าที่ทางออกจากแผ่นรองลื่น ($h_1 > h_0$) เพราะฉะนั้น $q_{x1} > q_{x0}$ ซึ่งเป็นไปไม่ได้ตามกฎทรงมวล เพื่อให้เป็นไปตามกฎทรงมวลคือที่สภาวะคงตัว อัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นที่ไหลเข้าแผ่นรองลื่นจะต้องเท่ากับอัตราการไหลออกของน้ำมันหล่อลื่นที่ไหลออกจากแผ่นรองลื่น ซึ่งทำให้เกิดแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นขณะที่น้ำมันหล่อลื่นไหลผ่านแผ่นรองลื่น แรงดันนี้จะทำให้การกระจายของความเร็วในน้ำมันหล่อลื่นแปรเปลี่ยนไปดังรูป 2-3



รูปที่ 2-3 การกระจายแรงดันและความเร็วของน้ำมันหล่อลื่นในแผ่นรองลื่น

เพราะฉะนั้นอัตราการไหลของน้ำมันตามแกน x ที่ตำแหน่ง x ใดๆ จะเขียนได้ดังนี้

$$q_x = \frac{Uh}{2} - f(P) \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $f(P)$ เป็นเทอมที่ขึ้นกับความชันของแรงดันของน้ำมันหล่อลื่น ตามแกน X และค่าความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น h ที่ตำแหน่งใดๆ และค่า $f(P)$ มีค่าดังนี้

$$f(P) = \frac{h^3}{\mu} \cdot \frac{dP}{dX} \quad (2.2)$$

เพราะฉะนั้นอัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นในแผ่นรองลื่น สามารถเขียนได้ดังนี้

$$q_x = \frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{\mu} \left(\frac{dP}{dX} \right) \quad (2.3)$$

หรือ

$$q_x = \frac{Uh}{2} \quad (2.4)$$

โดยที่ h คือความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นที่ตำแหน่งที่เกิดแรงดันสูงสุด จะเห็นว่าสมการ (2.3) และสมการ (2.4) ต่างก็เท่ากัน ดังนั้น dP/dX จึงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dP}{dX} = \frac{\mu U}{2} \left(\frac{h-h}{h^3} \right) \quad (2.5)$$

สมการ (2.5) เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาการกระจายของแรงดันในน้ำมันหล่อลื่น

2.4 ความหนืดของสารหล่อลื่น

ค่าความหนืดของสารเป็นตัวแสดงถึงความเข้มข้นของสารนั้นๆ ตามปกติเมื่อสารหล่อลื่น เช่น น้ำมันหล่อลื่นเมื่อได้รับความร้อน อุณหภูมิจะสูงขึ้น ทำให้ความหนืดลดลง

สำหรับของไหลที่เป็นของไหลนิวตอเนียน ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนในชั้นของของไหลกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในชั้นของของไหล สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.6)$$

โดยที่ τ คือความเค้นเฉือนหรือแรงเสียดทานต่อพื้นที่สัมผัส

μ คือค่าความหนืดของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\frac{\partial u}{\partial y}$ คืออัตราความเค้น

จากสมการ (2.4) สามารถเขียนสมการหาค่าความหนืดได้ดังนี้

$$\mu = \frac{F}{A \left(\frac{du}{dy} \right)} \quad (2.7)$$

ซึ่งมีหน่วยของความหนืดคือ

$$\mu = \text{นิวตัน*วินาที} / (\text{ตารางเมตร} * (\text{เมตรต่อวินาที} / \text{เมตร})) = \text{นิวตัน*วินาที} / \text{ตารางเมตร}$$

ชนิดของสารหล่อลื่น	ค่าความหนืด (นิวตัน*วินาที / ตารางเมตร)
น้ำผึ้ง	15×10^{-4}
น้ำมันหล่อลื่น SAE 50	8×10^{-4}
น้ำมันหล่อลื่น SAE 30	3×10^{-4}
น้ำมันหล่อลื่น SAE 10	0.7×10^{-4}
น้ำมันหล่อลื่น SAE 5	0.32×10^{-4}
น้ำมันมะกอก	1×10^{-4}
ปรอท	0.15×10^{-5}
น้ำ	0.1×10^{-5}
อากาศ	0.018×10^{-5}

ตารางที่ 2-2 ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นที่ 25°C

2.5 สมการเรโนลด์

สมการเรโนลด์ เป็นสมการหลักในวิชาการศึกษาการหล่อลื่น ใช้อธิบายการเกิดแรงดันของของไหลขณะที่ของไหลไหลในแบริ่ง เป็นแผ่นฟิล์มบางโดยที่ฟิล์มของไหลนี้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลงตามทิศทางการไหลซึ่งลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดแรงดันขึ้นในของไหล

ข้อสมมติในการเขียนสมการเรโนลด์

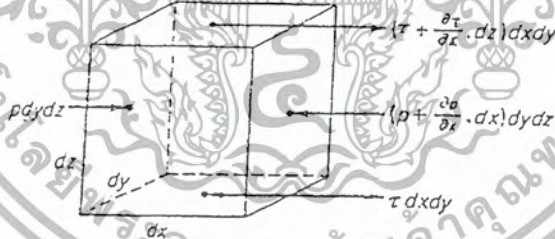
- 1) ไม่คิดแรงภายนอกที่กระทำต่อสารหล่อลื่น เช่น ไม่คิดแรงเนื่องจากน้ำหนักของสารหล่อลื่น แรงแม่เหล็กไฟฟ้า
- 2) แรงดันที่เกิดขึ้นในของไหลหรือสารหล่อลื่นจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามแกนความหนาของของไหลซึ่งหมายความว่าฟิล์มของสารหล่อลื่นนั้นบางมาก
- 3) การไหลของสารหล่อลื่นในกาบรองลื่นหรือแผ่นรองลื่นที่มีผิวโค้งนั้น ถูกสมมติว่าเป็นการไหลในแกนตรง ไม่คิดผลเนื่องจากผิวโค้งของกาบรองลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) ไม่เกิดการสิ้นเปลืองของสารหล่อลื่นในกาบรองลื่น ดังนั้นสารหล่อลื่นที่ตะจับผิวกาบรองลื่นหรือเพลลาจะมี ความเร็วเท่ากับผิวกาบรองลื่นหรือผิวเพลลา
- 5) สารหล่อลื่นมีคุณสมบัติเป็นของไหลแบบนิวตันเนียน (Newtonian fluid)
- 6) การไหลของสารหล่อลื่นเป็นการไหลอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเรียกว่าการไหลแบบ ลามินาร์ (Laminar)
- 7) ไม่คิดแรงเฉื่อยของสารหล่อลื่น เนื่องจากฟิล์มสารหล่อลื่นบางมาก
- 8) ความหนืดของสารหล่อลื่นมีค่าคงที่ ไม่แปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิหรือความดัน
- 9) ความเร็ว $U=U(x,z)$



รูปที่ 2-4 แสดงการไหลของสารหล่อลื่นผ่านหน้าตัดเล็กกลางตามทิศทางการไหลในแบริ่ง



รูปที่ 2-5 แสดงแรงกระทำต่อสารหล่อลื่นในทิศทางตามแกน X

พิจารณาชั้นงานสองชั้น ชั้นบนมีความเร็ว U_1 ตามแกน X และชั้นล่างมีความเร็วเท่ากับ U_2 ตามแกน X มีสารหล่อลื่นระหว่างชั้นวัตถุทั้งสอง ดังรูป 2-4 เมื่อพิจารณาการสมดุลของแรงที่กระทำต่อสารหล่อลื่นชั้นเล็ก ๆ ตามรูป 2-5 จะพบว่าแรงกระทำบนชั้นสารหล่อลื่นประกอบด้วยแรงเฉือนระหว่างสารหล่อลื่นและแรงเนื่องจากแรงดันของสารหล่อลื่น ซึ่งสามารถเขียนสมการการสมดุลของแรงตามแกน X ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial X} \right) \frac{\partial}{\partial X} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial Z} \right) = 6\mu U \frac{dh}{dX} + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial Z} \right) = 6 \frac{\partial(Uh)}{\partial X} \quad (2.8)$$

สมการแสดงการสมดุลของแรงตามแกน Z

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} \quad (2.9)$$

จากสมการความเค้นเฉือนของนิวตัน

$$\tau_{xy} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.10)$$

และ

$$\tau_{zy} = \mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.11)$$

แทนค่าความเค้นเฉือนจากสมการ (2.10) และ (2.11) ลงในสมการ (2.8) และ (2.9) ตามลำดับ จะได้สมการความเร็วของสารหล่อลื่นตามแกน X; u และตามแกน Z; v ตามลำดับ ดังนี้

$$\frac{\partial P}{\partial X} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

และ

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (2.12)$$

อินทิเกรตสมการ (2.12) เทียบกับ y สองครั้งจะได้

$$u = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial X} \right) \frac{y^2}{2} + C_1 y + C_2 \quad (2.13)$$

และ

$$v = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial Z} \right) \frac{y^2}{2} + D_1 y + D_2 \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ C_1 , C_2 , D_1 , และ D_2 เป็นค่าคงที่ ค่า C_1 และ C_2 สามารถหาได้จากรูป 2-4 ตามสมภาวะเงื่อนไขของเขตดังต่อไปนี้คือ

$$\text{ที่ } y = 0; u = U_2; v = V_2$$

$$\text{ที่ } y = h; u = U_1; v = V_1$$

จะได้

$$u = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) (y^2 - yh) + (U_1 - U_2) \frac{y}{h} + U_2$$

และ

$$u = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) (y^2 - yh) + (V_1 - V_2) \frac{y}{h} + V_2$$

อัตราการไหลของสารหล่อลื่นตามแกน X; q_x

$$q_x = \int_0^h u dy \quad (2.15)$$

อัตราการไหลของสารหล่อลื่นตามแกน Z; q_z

$$q_z = \int_0^h v dy \quad (2.16)$$

แทนสมการ (2.13) ลงในสมการ (2.14) จะได้

$$q_z = \frac{-h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial Z} + (U_1 + U_2) \frac{h}{2} \quad (2.17)$$

ทำนองเดียวกันแทนสมการ (2.14) ลงในสมการ (2.15) แล้วอินทิเกรตจะได้อัตราการไหลของสารหล่อลื่นตามแกน Z; q_z เป็นดังนี้

$$q_z = \frac{-h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial Z} + (V_1 + V_2) \frac{h}{2} \quad (2.18)$$

จากสมการกฎทรงมวล

$$\frac{\partial q_x}{\partial X} + \frac{\partial q_z}{\partial Z} = 0 \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามปกติในกาบรองลื่น ผิวกาบรองลื่นจะไม่มีเคลื่อนไหลตามแกน Z
 ดังนั้น $V_1 = V_2 = 0$ และให้ $U_1 = U$ และ $U_2 = 0$
 จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial Z} \right) = 6 \frac{\partial(Uh)}{\partial X} \quad (2.20)$$

ตามปกติแล้วความหนืดของสารหล่อลื่นนั้นถูกสมมติให้มีค่าคงที่เท่ากันตลอดในกาบรองลื่นหรือแผ่นรอง
 ลื่น และความเร็วของผิวกาบรองลื่นหรือผิวเพลลาจะมีความเร็วคงที่ U ตามแกน X ดังนั้นสมการข้างบนจึงสามารถ
 เขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial Z} \right) = 6\mu U \frac{dh}{dX} \quad (2.21)$$

2.6 สมการเรโนลด์สำหรับกาบรองลื่นที่มีความยาวมาก



รูปที่ 2-6 กาบรองลื่นที่มีความยาวมากและการกระจายของความดันตามแกน X

เมื่อพิจารณาแบร์ริงที่มีความยาวมาก ตามแกน Z ดังนั้นไม่มีการไหลของสารหล่อลื่นตามแกน Z
 เพราะฉะนั้นไม่เกิดความแตกต่างของความดันตามแกน Z หรือ $\partial p / \partial Z$ เท่ากับศูนย์ จากสมการเรโนลด์ ไม่คิด
 สารหล่อลื่นไหลออกด้านข้างตามแกน Z จะได้

$$\frac{dP}{dX} = 6\mu U \left(\frac{h - \bar{h}}{h^3} \right) \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ h เป็นความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งที่เกิดความดันสูงสุด P_{\max} จะได้สมการแสดงการกระจายของความดันเป็น

$$P = 6\mu U \left\{ \int_0^x \frac{dx}{h^2} - \bar{h} \int_0^x \frac{dx}{h^3} + C \right\} \quad (2.23)$$

โดยที่ P คือความดันของสารหล่อลื่นตามแกน X ที่ตำแหน่ง X ใดๆ มีความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเป็น h และ C คือค่าคงที่ที่ได้จากการอินทิเกรต ซึ่งสามารถหาได้จากสมภาวะของกาบร่องลื่น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งที่เกิดความดันสูงสุด, h

$$\bar{h} = \frac{\int_0^B \frac{dx}{h^2}}{\int_0^B \left(\frac{dx}{h^3} \right)} \quad (2.24)$$

โดยที่ B คือความยาวของกาบร่องลื่นตามแกน X

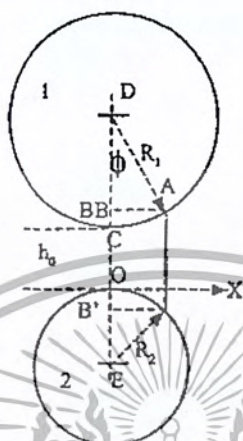
2.7 สมการเรโนลด์สำหรับกาบร่องลื่นที่สั้นมาก

กาบร่องลื่นที่ถูกสมมติว่ามีความยาวสั้นมาก ตามแกน Z ดังนั้นไม่มีการไหลของสารหล่อลื่นตามแกน X และไม่มี ความแตกต่างของความดันตามแกน X เพราะฉะนั้นสารหล่อลื่นจะไหลในแกน Z เท่านั้น และ $\partial p / \partial Z$ เท่ากับศูนย์ จากสมการเรโนลด์ อินทิเกรตจะได้

$$P = 6\mu U \left(\frac{dh/dx}{h^3} \right) \frac{z^2}{2} + C_1 z + C_2 \quad (2.25)$$

โดยที่ C_1 และ C_2 เป็นค่าคงที่ สามารถหาได้จากสมภาวะของแผ่นร่องลื่น

2.8 การหาค่าความหนาของฟิล์มน้ำมันในรูปฟังก์ชันของ x



รูปที่ 2-7 แสดงความหนาของฟิล์มน้ำมันระหว่างดิสก์ 2 แผ่น

พิจารณาแผ่นดิสก์ 1 และ 2 ซึ่งรัศมี R_1 และ R_2 ค่าความหนาของฟิล์มน้ำมันที่น้อยที่สุด (h_0) อยู่บนเส้นศูนย์กลางให้จุด Origin อยู่บนผิวของแผ่นดิสก์ 2 บนเส้นผ่านศูนย์กลาง DOE เมื่อ D และ E เป็นจุดศูนย์กลางของแผ่นดิสก์ 1 และ 2

จากการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ จะได้สมการของความหนาของฟิล์มน้ำมันในรูปของฟังก์ชัน x ดังนี้

$$h(x) = h_0 \left\{ 1 + \frac{x^2}{2h_0} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right\} \quad (2.26)$$

นิยามให้ R เป็น Reduce Radius โดยที่ $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ จะได้

$$h(x) = h_0 \left\{ 1 + \left(\frac{x^2}{2Rh_0} \right) \right\} \quad (2.27)$$

2.9 การอินทิเกรตสมการเรโนลด์

การอินทิเกรตสมการเรโนลด์เป็นวิธีหาสมการแสดงการกระจายแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวทรงกลม จากสมการเรโนลด์ แสดงการไหลของของไหลหนึ่งมิติซึ่งมีการไหลแบบคงตัวไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dP}{dX} = 6(U_1 + U_2)\mu \left(\frac{h - \bar{h}}{h^3} \right) = 6U\mu \left(\frac{h - \bar{h}}{h^3} \right) \quad (2.28)$$

เมื่อ U = ผลรวมของความเร็วที่ผิวทรงกลมทั้งสอง

μ = ค่าความหนืด

\bar{h} = ความหนาของฟิล์มน้ำมันที่ตำแหน่งแรงดันสูงสุด

จากสมการ (2.27) ดังนั้นจะได้

$$\frac{dP}{dX} = 6U\mu \frac{h_0 \left\{ 1 + (x^2 / 2h_0 R) \right\} - h_0 \left\{ 1 + \bar{x}^2 / 2h_0 R \right\}}{h_0^3 \left\{ 1 + (x^2 / 2h_0 R) \right\}^3} \quad (2.29)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (2.28) จะได้สมการกระจายของแรงดันไร้มิติของน้ำมันหล่อลื่นดังนี้

$$P^* = \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{4} + \frac{\sin 2\gamma}{4} - \sec^2 \gamma \left\{ \frac{3}{\gamma} \left(\gamma + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{\sin 2\gamma}{4} + \frac{\sin 4\gamma}{32} \right\} \quad (2.30)$$

ค่าคงที่ γ เป็นค่าที่สามารถคำนวณหาได้จากสภาวะของน้ำมันหล่อลื่นที่เป็นไปได้ในสภาวะใดสภาวะหนึ่งดังนี้

- สภาวะ Full Summerfield

คือ $P = 0$ ที่ $x = \infty$ ดังนั้น $P = 0$ ที่ $\gamma = +\pi/2$

แทนค่าลงในสมการ (2.29) จะได้การกระจายความดันไร้มิติคือ

$$P^* = -\frac{1}{12} \left\{ \sin 2\gamma + \frac{\sin 4\gamma}{2} \right\} \quad (2.31)$$

- สภาวะ Half Summerfield

คือ $P = 0$ ที่ $x \geq 0$

สามารถหาแรงต่อหน่วยความยาวในแนวแกนได้ดังนี้

$$\frac{W}{L} = \int_{-\infty}^{\infty} P dx \text{ แทนค่า } P = -2U\mu \frac{x}{h^2} \text{ จะได้}$$

$$\frac{W}{L} = 2U\mu \frac{R}{h_0} \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สภาวะเรโนลด์

คือ $P = 0$ เมื่อ $\frac{dP}{dx} = 0$ ที่ $x \geq 0$

แทนค่าสภาวะลงในสมการที่ (2.29) จะได้ค่าสมการการกระจายแรงดันไรมิติ ดังนี้

$$\frac{1}{2} \left[\gamma + \frac{\pi}{2} + \frac{\sin 2\gamma}{2} - 1.2257 \left\{ \frac{3}{4} \left(\gamma + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{\sin 2\gamma}{2} + \frac{\sin 4\gamma}{16} \right\} \right] \quad (2.33)$$

หาแรงเนื่องจากแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นต่อความยาวในแนวแกน จะได้

$$\frac{W}{L} = \int_{-\infty}^{x_2} P dx = \int_{-\pi/2}^{\gamma_2} \frac{12U\mu R}{h_0} P^* \sec^2 \gamma d\gamma \quad (2.34)$$

2.10 การหาแรงเสียดทานระหว่างผิวของทรงกลม

จากสมการความเค้นเฉือนของนิวตัน โดยสมมติว่าค่าความหนืดของสารหล่อลื่นคงที่

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.35)$$

ที่ $z=0, h$ และ $u = U_1, U_2$ จะได้สมการการเปลี่ยนแปลงความเร็วในชั้นน้ำมัน ดังนี้

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial X} \left(z - \frac{h}{2} \right) + \frac{U_1 - U_2}{h} \quad (2.36)$$

ดังนั้นค่าความเค้นเฉือนเนื่องจากความฝืดที่ผิวทรงกลม

$$\tau_{0,h} = \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right)_{0,h} = \frac{\mu}{h} (U_1 - U_2) \pm \frac{h}{2} \frac{\partial P}{\partial X} \quad (2.37)$$

เมื่อเครื่องหมายลบในทอมสุดท้ายใช้กับ τ_0 เครื่องหมายบวกใช้กับ τ_h
แรงเสียดทานเนื่องจากความหนืดสำหรับ Pressure zone คือ

$$\iint_{0, x_1}^{L, x_2} \tau dx dy = \iint_{0, x_1}^{L, x_2} \left(\frac{\mu (U_1 - U_2)}{h} \pm \frac{h}{2} \frac{\partial P}{\partial X} \right) dx dy \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ x_1 และ x_2 คือตำแหน่งของจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของ Pressure zone ในบริเวณที่มีชั้นฟิล์มอยู่เต็ม (Full film)

ถัดจากตำแหน่ง $x_1 = x$ ชั้นของฟิล์มจะแตกตัวเป็นกระแส ทำให้เกิดแรงจุดเนื่องจากแรงเสียดทานของกระแสซึ่งสามารถหาค่าสมการแรงเสียดทานได้ดังนี้

$$F = \mu(U_1 - U_2)L\sqrt{2R/h_0} \left\{ F^* + 6 \left(\frac{U_1 + U_2}{U_1 - U_2} \right) W^* X^* \right\} \quad (2.39)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ชนิดของสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ใช้ในระบบการหล่อลื่นจะทำหน้าที่หลักใหญ่ ๆ สองประการคือ ทำหน้าที่ลดหรือควบคุมแรงเสียดทาน ประการที่สอง ช่วยลดการสึกหรอที่ผิวชิ้นงาน ระหว่างชิ้นงานที่มีการหมุนหรือการเคลื่อนที่ ในการออกแบบระบบการหล่อลื่นและการเลือกสารหล่อลื่น จะต้องพิจารณาถึง

1. ระยะห่างระหว่างผิวชิ้นงาน
2. แรงกระทำบนผิวชิ้นงาน
3. คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของผิวชิ้นงาน

แฟกเตอร์ทั้งสามตัวนี้จะเป็นการกำหนดชนิดของการหล่อลื่น ซึ่งการหล่อลื่นโดยทั่วไป จะแบ่งเป็นสองชนิดคือ

1. การหล่อลื่นที่มีฟิล์มของไหลหนาหรือการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์เป็นชนิดของการหล่อลื่นที่ผิวชิ้นงานมีสารหล่อลื่นหนา ดังนั้นสมรรถนะของการหล่อลื่นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการหล่อลื่นเป็นหลัก
2. การหล่อลื่นแบบเบาคาร์รี เป็นชนิดของการหล่อลื่นที่ผิวชิ้นงานมีสารหล่อลื่นคั่นอยู่เพียงหนึ่งถึงสองโมเลกุลเท่านั้น ดังนั้นสมรรถนะของการหล่อลื่นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการหล่อลื่นและคุณสมบัติของผิวชิ้นงานด้วย

สารหล่อลื่นที่จะกล่าวต่อไป คือสารหล่อลื่นสถานะของเหลว สารหล่อลื่นสถานะกึ่งของแข็ง และสารหล่อลื่นสถานะของแข็ง

3.1 สารหล่อลื่นสถานะของเหลว

น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่นสถานะของเหลวที่ได้จากปิโตรเลียม ถ่านหิน เป็นต้นส่วนใหญ่ น้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากปิโตรเลียม ดังนั้นในที่นี้จะพูดเฉพาะน้ำมันหล่อลื่นที่เป็นน้ำมันปิโตรเลียมเท่านั้น น้ำมันปิโตรเลียมดิบส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมของคาร์บอนอยู่ประมาณ 83-87% มีไฮโดรเจนประมาณ 11-14% และมีส่วนผสมอื่นๆ ได้แก่ กำมะถัน ออกซิเจน และไนโตรเจน จะเห็นว่าน้ำมันปิโตรเลียมดิบมีส่วนผสมส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนและไฮโดรเจน การจับตัวของคาร์บอนและไฮโดรเจนจะสามารถจับตัวได้หลายๆแบบ ซึ่งจะทำให้ได้คุณสมบัติของน้ำมันแตกต่างกันไป สามารถจำแนกออกเป็น พาราฟิน (Paraffins) โอลีฟิน (Olefins) เอโรมาติก (Aromatics) แนฟทีน (Naphthen) และ เอสพาเทิน (Asphalten) ผู้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นปิโตรเลียมสามารถเลือกชนิดหรือแหล่งน้ำมันปิโตรเลียมดิบและกำหนดอัตราส่วนของน้ำมันดิบจากแหล่งน้ำมันดิบต่างๆ ในโลกปริมาณ 0-40% เพื่อให้ได้ น้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ น้ำมันปิโตรเลียมสามารถใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นได้เป็นอย่างดี เนื่องจากทำให้ผิวชิ้นงานที่มีน้ำมันหล่อลื่นเปียก เป็นชั้นน้ำมันขณะทำงานมีการเคลื่อนไถลถูกกัน น้ำมันปิโตรเลียมเป็นน้ำมันที่มีพิสัยความหนืดสูงสามารถเลือกใช้ได้ง่ายให้เหมาะกับงาน และน้ำมันปิโตรเลียมมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นมากกว่าของไหลอื่นเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น ส่วนผสมชนิดของน้ำมันปิโตรเลียม เช่น ส่วนผสมของพาราฟิน อโรมาติก และ แนฟทีน จะมีผลต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์อย่างมากตามตารางที่ 3-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ตารางที่ 3-1 ผลของส่วนผสมของน้ำมันปิโตรเลียมต่อคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น คือ อัตราส่วนของค่าความเค้นเฉือนต่อความเครียดเฉือนของชั้นของน้ำมันหล่อลื่น โดยสมมติว่าน้ำมันหล่อลื่นเป็นของไหลนิวตันเนียน (Newtonian fluid) ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นตัวกำหนดความสูญเสียพลังงานเนื่องจาก ความฝืด ประสิทธิภาพทางกล ความร้อนที่เกิดขึ้น การไหลของน้ำมัน ภาวะที่สามารถรับได้ และความสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักร เช่น การรองลื่น หรือ เฟือง เป็นต้น

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ น้ำมันหล่อลื่น จะทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าต่ำลง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในทางปฏิบัติ สำหรับเครื่องยนต์ SAE ได้กำหนดน้ำมันหล่อลื่นตามค่าความหนืดที่อุณหภูมิที่กำหนดให้ ตามตาราง 3-2

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

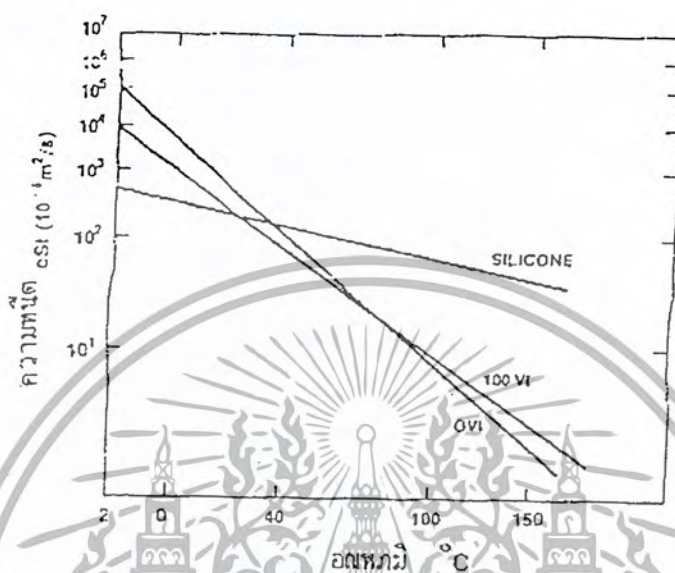
ตารางที่ 3-2 ชนิดของน้ำมันหล่อลื่นแบ่งตามเบอร์ SAE

เกรดน้ำมัน ISO VG	ความหนืดโดยเฉลี่ย M^2/s ที่ $40^{\circ}C$	พิสัยค่าความหนืด m^2/s ที่ $40^{\circ}C$	
		ต่ำสุด	สูงสุด
2	2.2	1.98	2.24
3	3.2	2.88	3.52
5	4.6	4.14	5.06
7	6.8	6.12	7.48
10	10	9.0	11
15	15	13.5	16.5
22	22	19.8	24.2
32	32	28.8	35.2
46	46	41.4	50.6
68	68	61.2	74.8
100	100	90	110
150	150	135	165
220	220	198	242
320	320	288	352
460	460	414	506
680	680	612	748
1000	1000	900	1100
1500	1500	1350	1650

ตารางที่ 3-3 ตารางแสดงค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นในทางอุตสาหกรรม กำหนดโดย ASLE-ASTM ซึ่งได้ใช้เป็นมาตรฐานของ ISO คือ Standard 3448 ของ ISO

เนื่องจากอุณหภูมิทำให้ค่าความหนืดของน้ำมันเปลี่ยนไป กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าความหนืดจะลดลง การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืดได้แสดงด้วยดัชนีความหนืด (Viscosity Index) หรือ VI ค่า VI สูงแสดงว่าค่าความหนืดมีค่าเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิน้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีค่า VI ต่ำ รูป 3-1 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น เมื่อเปรียบเทียบกับซิลิคอน (Silicone)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-1 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น

เนื่องจากแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นจะทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนไป ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะมีผลต่อสมรรถนะของวาล์วหรือแผ่นรองลิ้น เช่น ทำให้ภาวะที่สามารถรับได้มีค่าเปลี่ยนไป ทำให้แรงเสียดทานและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จะทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีค่าความหนืดลดลง ในทางปฏิบัติเมื่อเพิ่มแรงดันของน้ำมันหล่อลื่น 38 เท่า ของแรงดันบรรยากาศ จะมีผลต่อค่าความหนืดเท่ากับลดอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นลง 1°C

คุณสมบัติอื่นที่ควรพิจารณา ได้แก่ ความหนาแน่น ความดันไอ ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ ความสามารถในการดูดซับแก๊ส ความร้อนจำเพาะ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน จุดเยือกแข็ง เป็นต้น

การใช้น้ำมันปิโตรเลียมเป็นน้ำมันหล่อลื่นมีข้อได้เปรียบที่สำคัญ คือ น้ำมันปิโตรเลียมมีส่วนผสมที่แตกต่างกัน ซึ่งจะให้คุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้นสามารถผสมหรือทำน้ำมันหล่อลื่นปิโตรเลียมให้มีคุณสมบัติตามความต้องการได้ไม่ยาก อย่างไรก็ตามน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของสารเติมแต่ง (Additive) เพื่อให้ได้น้ำมันที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับงานที่สุด รวมทั้งต้นทุนที่เหมาะสมด้วย เช่น น้ำมันหล่อลื่นของเครื่องทำความเย็น จะต้องมีส่วนผสมที่ไม่เป็นไขที่อุณหภูมิต่ำ น้ำมันหล่อลื่นกังหันจะต้องสามารถต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน เพื่อจะได้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เป็นต้น

ชนิด	ชนิดน้ำมันปิโตรเลียม	คุณสมบัติของสารเติมแต่ง
น้ำมันเครื่องยนต์	พาราฟิน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน สามารถละลายสิ่งสกปรก เพิ่มค่าดัชนีความหนืด ต้านทานการสึกหรอ ต้านทานการเกิดฟอง ต้านทานต่อการเกิดสนิม
น้ำมันหล่อลื่นกึ่งกัน น้ำมันไฮดรอลิก	พาราฟิน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานต่อการเกิดสนิม ต้านทานการสึกหรอ ต้านทานการเกิดฟอง
น้ำมันหล่อลื่นเครื่องทำความเย็น	แน็พทีน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานการกัดกร่อน
น้ำมันหล่อลื่นเครื่องจักรสิ่งทอ	พาราฟิน แน็พทีน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานต่อการเกิดสนิม
น้ำมันเกียร์	พาราฟิน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ป้องกันการเกิดสนิม ต้านทานต่อการเกิดสนิม ต้านทานการเกิดฟอง เพิ่มความสามารถในการรับแรงดัน

ตารางที่ 3-4 แสดงตัวอย่างการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารเติมแต่ง

สารเพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน	Phenolic amines, hindered phenols
สารเพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อน	Zinc dithiophosphates, sulfurized olefins
สารเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอ	Tricresyl phosphate, lead naphthenate
การเพิ่มความสามารรถในการละลายสิ่งสกปรก	Calcium and barium sulfonates, phosphonates, phenates, salicylates, polyimides, polyesters
สารเพิ่มความต้านทานการเกิดสนิม	Calcium and barium sulfonates, acid phosphate esters, petroleum sodium sulfonates, lanolin, terpenes, dithio phosphates, dithio carbonates
สารเพิ่มคุณสมบัติดัชนีความหนืด	Polyisobutylenes, polyacrylates
สารเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มน้ำมัน	Chlorine-phosphorus, sulfur-containing oils and waxes, lead soaps
สารป้องกันการเกิดฟอง	Silicones, organic copolymers

ตารางที่ 3-5 สารเติมแต่งที่นิยมใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สารหล่อลื่นสถานะกึ่งของแข็ง

จาระบีเป็นสารหล่อลื่นที่เป็นส่วนผสมของน้ำมันแร่ กับสารเติมให้ข้น เช่น โลหะลิ้นเหมือนสบู่ผสม หรือ อาจจะเป็นน้ำมันสังเคราะห์ได้แก่ ซิลิโคน หรือ เอสเตอร์ (Esters) ผสมกับสารเติมชั้นอาจจะเป็นดิน (Bentones) ซิลิกา คาร์บอนเบลค และ เทพลอน เป็นต้น

จาระบีเป็นของไหล Non-Newtonian คือ ให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือนไม่เชิงเส้น จาระบีได้ถูกนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นซึ่งมีทั้งข้อดีและข้อเสีย กล่าวคือ การใช้จาระบีเป็นสารหล่อลื่นมีข้อดีคือ สามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นที่ความเร็วต่ำ ข้อเสียคือสามารถระบายความร้อนได้ต่ำ ไม่สามารถไหลพาเอาเศษโลหะที่เกิดจากการสึกหรอออกจากการบรอนลงหรือแผ่นรองลิ้น จาระบีไม่เหมาะที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่นที่ความเร็วสูงๆ อย่างไรก็ตาม จาระบีสามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นดัดลูปปืนได้ที่ความเร็วสูงถึง 100,000 รอบต่อนาที เป็นเวลานานถึง 100 ชั่วโมง

จาระบีที่มีส่วนผสมของลิเทียม (Lithium-base grease) เป็นจาระบีที่เป็นส่วนผสมของลิเทียม (Lithium soap) ซึ่งเป็นกรด 12-ไฮดรอกซิล (12-hydroxy acid) และ/หรือ ไกลเซอไรด์ (Glyceride) ร่วมกับกรดไขมัน (Fatty acid) จาระบีชนิดนี้จะให้ความเสถียรของแรงเฉือนดีมาก สามารถจับกับผิวชิ้นงานได้ดี สามารถใช้กับสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงได้ดี เป็นจาระบีที่นิยมใช้มากที่สุดในยานยนต์และอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่

จาระบีที่มีส่วนผสมของแคลเซียม (Calcium-base grease) มีลักษณะคล้ายเนย มีอุณหภูมิที่ทำให้จาระบีชนิดนี้เริ่มหยดตัวได้ (Dropping point) ที่ 66-104 °C ใช้เป็นสารหล่อลื่นเครื่องจักรที่มีความเร็วต่ำ อุณหภูมิต่ำ มีการกักความร้อนสูง เนื่องจากจาระบีชนิดนี้มีคุณสมบัติสามารถต้านทานต่อการกักความร้อนได้ดี

จาระบีที่มีส่วนผสมของโซเดียม (Sodium-base grease) เป็นจาระบีที่มีอุณหภูมิเริ่มหยดตัว (Dropping point) 121-232 °C โครงสร้างมีความเสถียรสูง มีความสามารถทนต่อการกักความร้อนได้ไม่ดี แต่สามารถใช้กับงานที่มีอุณหภูมิสูงได้เป็นอย่างดี

จาระบีที่มีส่วนผสมของอลูมิเนียม (Aluminium-base grease) มีลักษณะคล้ายวุ้นใส มีอุณหภูมิเริ่มหยดตัวได้ (Dropping point) 66-104 °C สามารถต้านทานน้ำได้อย่างดี ทนต่อแรงบิดได้ดี มีโครงสร้างเสถียร ใช้เป็นจาระบีสำหรับหล่อลื่นชิ้นส่วนช่วงล่างของรถยนต์ ใช้ในการหล่อลื่นเครื่องจักรสิ่งทอ และเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหารสำเร็จรูป

จาระบีที่มีส่วนผสมของแบเรียม (Barium-base grease) เป็นจาระบีที่มีอุณหภูมิเริ่มหยดตัวได้ (Dropping point) สูงมาก จึงเหมาะสมสำหรับใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงๆ

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

จาระบีที่มีส่วนผสมของเบนโทน (Bentone-base grease) เป็นจาระบีที่มีคุณสมบัติสามารถต้านทานต่อน้ำ สามารถจับตัวกับผิวโลหะได้ดี ไม่มีอุณหภูมิเริ่มหยดตัวจึงเหมาะที่จะใช้กับงานที่มีอุณหภูมิสูงมากๆ ได้

จาระบีสังเคราะห์ (Synthetic grease) เป็นจาระบีที่ได้จากการนำเอาของไหลสังเคราะห์ เช่น ซิลิโคน (Silicon) ไปผสมกับสารทำให้ข้น อนินทรีย์ ทำให้มีคุณสมบัติสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี ส่วนใหญ่จะใช้ในการหล่อลื่นเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรในเครื่องบิน

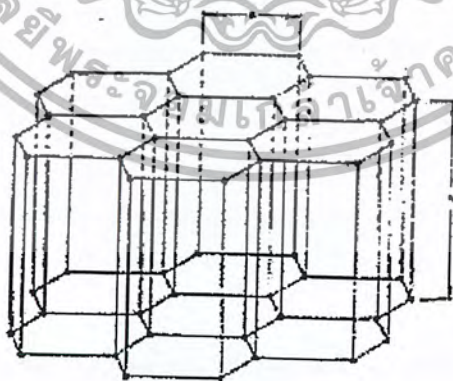
3.3 สารหล่อลื่นสถานะของแข็ง

สารหล่อลื่นสถานะของแข็งมักจะใช้กับงานอุตสาหกรรมที่สารหล่อลื่นสถานะของเหลวไม่สามารถใช้ได้ เช่น งานอุตสาหกรรมที่มีอุณหภูมิสูงมากเกินไป หรือในงานที่เกิดความเค้นสูงที่ผิวชิ้นงานซึ่งสารหล่อลื่นสถานะของแข็งสามารถรับความเค้นได้มากกว่าสารหล่อลื่นสถานะของเหลว สารหล่อลื่นของแข็งยังมีข้อดีในการใช้งานเหนือสารหล่อลื่นสถานะของเหลว คือไม่จำเป็นต้องมีภาชนะบรรจุสารหล่อลื่น และไม่จำเป็นต้องมีซีล (Seal) ที่ใช้ในการป้องกันการรั่วไหลของน้ำมันหล่อลื่น และยังสามารถป้องกันสิ่งสกปรกหรือสิ่งแปลกปลอมเข้าไปในระบบหล่อลื่น

สารหล่อลื่นสถานะของแข็งจำพวกผง ยังใช้ผสมลงในน้ำมันหล่อลื่นจาระบี และแก๊สเพื่อช่วยในการหล่อลื่น สารหล่อลื่นสถานะของแข็งยังนิยมทำเป็นฟิล์มหรือชั้นของสารหล่อลื่นของแข็ง สมรรถนะของการหล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นของแข็ง จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผิวชิ้นงานและชนิดของสารหล่อลื่นของแข็ง จะเห็นว่าสารหล่อลื่นสถานะของแข็งไม่สามารถใช้ในงานทั่วๆไป แต่จะใช้เป็นสารหล่อลื่นกับงานประเภทที่มีสภาวะอุณหภูมิสูงมาก ๆ สภาวะอุณหภูมิต่ำมาก ๆ สภาวะสุญญากาศภายในสภาวะการะสูงมาก ๆ ในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีรุนแรงและในอุปกรณ์นิวเคลียร์

3.3.1 สารหล่อลื่นของแข็งเป็นผง (Particular)

สารหล่อลื่นมีลักษณะเป็นผงทำมาจากวัสดุอินทรีย์ อาจจะใช้สารหล่อลื่นคั่นระหว่างชิ้นงานที่ต้องการหล่อลื่น หรืออาจใช้ผงสารหล่อลื่นผสมลงในสารหล่อลื่นสถานะของเหลว เช่น น้ำมันหล่อลื่น หรือ จาระบี ผงสารหล่อลื่นอาจจะเป็น แกรไฟต์ โมลิตินัมไดซัลไฟด์ (Molydenum disulfide) แทลค์ (Talc) ไมก้า (Mica) เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) เทฟลอน (Teflon) และ เกล็ดอินทรีย์อื่นๆ สารหล่อลื่นที่ได้กล่าวมานี้จะมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นที่ดี กล่าวคือมีโครงสร้างเป็นชั้น แลททิซ (Lattice) ตามรูป 3-2 ยอมให้ถูกเลื่อนได้ง่าย ดังนั้นจึงมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ตามตาราง 3-6



รูปที่ 3-2 โครงสร้างเป็นชั้นแลททิซของแกรไฟต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารหล่อลื่นของแข็งที่นิยมใช้กันมาก คือ แกรไฟต์ และโมลิติน้ำมไคซัลไฟด์ มักจะทำเป็นผงใช้ผสมลงในสารหล่อลื่นอื่น เช่น น้ำ หรือน้ำมันหล่อลื่น เป็นต้น บางครั้งอาจจะเติมผงเทปลอน หรือ ผงตะกั่วเนื่องจากเทปลอน และผงตะกั่วจะช่วยป้องกันหรือชะลอการจับตัวของผิวชิ้นงาน เมื่อฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นถูกทำลาย เนื่องจากรับภาระสูงเกินไป ทำให้ผิวชิ้นงานร้อนจัด จะเกิดการจับติดกันของผิวชิ้นงาน

ปริมาณของสารหล่อลื่นของแข็งที่ใช้เติมลงในจาระบี หรือน้ำมันหล่อลื่นจะมีค่าประมาณตั้งแต่ 0.5%-60% ตามปกติสำหรับงานทั่วไปจะใช้แกรไฟต์ และโมลิติน้ำมไคซัลไฟด์ เป็นผงสารหล่อลื่น ใช้เติมลงในจาระบี หรือน้ำมันหล่อลื่นประมาณ 5%

วัสดุ	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน		
	26.7°C	260°C	93.8°C
LiF	0.3-0.4	0.9	0.65-0.75
AlPO ₄	0.6	-	0.51
PbS	0.47	0.27-0.47	0.15-0.19
PbS / MaS ₂	0.16-0.13	0.13	0.37
PbS / แกรไฟต์	0.2	0.24	0.21
แกรไฟต์	0.14-0.30	0.06-0.12	0.20-0.27
MoS ₂	0.34	0.10	-
BN	0.3	0.15	-
PbF ₂	0.6	0.6	-
TuS ₂	0.7	0.6	-
WS ₂	0.7-1.6	0.2	-
ไมก้า	0.38-0.89	-	-
แร่ทัลลิต	0.13-0.89	-	-

ตารางที่ 3-6 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารหล่อลื่นสถานะของแข็ง

3.3.2 แกรไฟต์

แกรไฟต์สามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นได้อย่างดี เนื่องจากมีคุณสมบัติที่สำคัญ ดังนี้คือ เป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือไม่เกิดออกซิเดชัน มีโครงสร้างเป็นแผ่นหรือชั้นตามรูป 3-2 จะให้ค่าความเค้นเฉือนต่ำ หรือให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ เนื่องจากอะตอมที่จับตัวกันอย่างไม่ถูกตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อนทำให้เกิดแรงพันธะหรือ แรงดึงดูดระหว่างอะตอมต่ำเกินไป จึงทำให้แกรไฟต์มีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงแตกหักง่าย มีทฤษฎีหนึ่งอธิบายว่าแก๊สหรือไอน้ำที่ถูกแกรไฟต์ดูดสะสมจะทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของชั้นแกรไฟต์สูงขึ้น เป็นผลทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ ทำให้มีคุณสมบัติที่ดีในการหล่อลื่น สารหล่อลื่นสถานะของแข็งได้แก่ แกรไฟต์ โมลิติน้ำมไคซัลไฟด์ โบรอนไนไตรด์ (Boron nitride) และ แทลลิต (Talc) จะมีโครงสร้างเป็นผลึกจับตัวกันทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ

ถึงแม้ว่าแกรไฟต์จะไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่สภาวะอุณหภูมิต่ำเหมือนโลหะ แต่แกรไฟต์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ที่อุณหภูมิสูง แกรไฟต์บริสุทธิ์จะสูญเสียน้ำหนักของมัน 1% ของน้ำหนักทั้งหมดในเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 520-560°C ในอากาศ หรือแกรไฟต์มีอัตราการเกิดออกซิเดชัน เท่ากับ 30 กรัม ต่อ ตารางเมตร ในหนึ่งชั่วโมง สารที่ผสมอยู่ในแกรไฟต์มีผลต่อการเกิดออกซิเดชันของแกรไฟต์ เช่น เมื่อแกรไฟต์มีส่วนผสมของแบเรียม (Barium) เพียง 1% จะทำให้แกรไฟต์มีอัตราการเกิดออกซิเดชันเป็น 2000 กรัม ต่อตารางเมตร ในหนึ่งชั่วโมง และถ้าแกรไฟต์มีส่วนผสมของสังกะสีโบเรท (Zinc borate) เพียง 2% ก็จะสามารถช่วยลดอัตราการเกิดออกซิเดชันลงเหลือเพียง 7.4 กรัม ต่อตารางเมตร ในหนึ่งชั่วโมง โมลิตินัมไดซัลไฟด์และแกรไฟต์ฟลูออไรด์ (Graphite fluoride) จะเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500°C

แกรไฟต์และโมลิตินัมไดซัลไฟด์จะมีปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกับเหล็กและอลูมิเนียม ทำให้เกิดการกัดกร่อน ความชื้นจะไม่ทำให้การกัดกร่อนเปลี่ยนไปได้ สำหรับอลูมิเนียมสามารถป้องกันการกัดกร่อนด้วยการทำให้ผิวอลูมิเนียมมีสภาพเป็นขี้ขาว

โมลิตินัมไดซัลไฟด์ MoS_2 มีโครงสร้างเป็นผลึกเหมือนโครงสร้างของแกรไฟต์ มีคุณสมบัติสามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นได้ดี มีอุณหภูมิระเหิดที่ 450°C และทำปฏิกิริยากับอากาศที่อุณหภูมิ 400°C แสดงว่าโมลิตินัมไดซัลไฟด์ MoS_2 ไม่เหมาะที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นโมลิตินัมไดซัลไฟด์สามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นได้ดีในแก๊สไนโตรเจนแห้ง และไม่เหมาะในการใช้เป็นสารหล่อลื่นในแก๊สออกซิเจน ไม่ควรใช้โมลิตินัมไดซัลไฟด์เป็นสารหล่อลื่นในบริเวณที่มีอากาศชื้น ยิ่งพบว่าโมลิตินัมไดซัลไฟด์ทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าในการหล่อลื่นแบบเบาดารี ทำให้เกิด FeS

เมื่อใช้โมลิตินัมไดซัลไฟด์ผสมในน้ำมันจะต้องผสมอย่างน้อย 10% จึงจะทำให้มีผลของ MoS_2 ในน้ำมันหล่อลื่น

3.3.3 วัสดุประกอบ (Composites)

เนื่องจากสารหล่อลื่นสถานะของแข็งจะต้องจับตัวกับโลหะ ในระบบการหล่อลื่นวิธีการให้สารหล่อลื่นเกาะจับตัวกับโลหะ สามารถทำได้หลายวิธี วิธีที่นิยมมากที่สุด คือ บอนฟิล์ม (Bonded films)

บอนฟิล์มจะประกอบด้วยชั้นของสารหล่อลื่นของแข็งจับยึดกับผิวโลหะที่ต้องการ การหล่อลื่นด้วยน้ำยาประสาน ได้แก่ เรซิน ซิลลิเกต (Silicate) หรือ เซรามิก (Ceramic) แล้วอบให้ความร้อน หรือทิ้งให้แห้งในบรรยากาศ สารหล่อลื่นที่นิยมใช้มากที่สุดได้แก่ MoS_2 แกรไฟต์ เทปลอน และ WS_2 บางครั้งใช้ส่วนผสมของสารหล่อลื่นผสมกันตามอัตราส่วนเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานเฉพาะ

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

ตัวประสานสำหรับให้สารหล่อลื่นแห้งจับตัวที่อุณหภูมิบรรยากาศ คือ เทอร์โมพลาสติก เรซิน (Thermoplastic resin) เช่น พวกลูเซลลูซิก (Cellulosics) และอะครีลิก (Acrylics) จะได้ฟิล์มของสารหล่อลื่นที่ค่อนข้างแข็งจับประสานกับผิวโลหะ

สารหล่อลื่นของแข็งที่ได้จาก เรซินบอน (Resin Bonded) ที่ต้องใช้ความร้อนในการอบให้แห้งและแข็งเป็นที่นิยมมากที่สุด ตามปกติประกอบด้วยส่วนผสมของ MoS_2 90% และแกรไฟต์ 10% ในเรซินเทอร์โมเซตติง (Thermosetting resin) ได้แก่ อัลคิด์ (Alkyds) ฟีนอลิก (Phenolics) อีพ็อกซี (Epoxyes) และซิลิคอน (Silicone) บางครั้งจะมีส่วนผสมของเงินและตะกั่ว การอบจะต้องใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 150 – 200°C การอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แข็งด้วยความร้อนจะให้ผลดีกว่าอบแห้งที่อุณหภูมิบรรยากาศ จะใช้ในงานที่มีภาระสูง และทำให้อายุการใช้งานยาวนานขึ้น

3.3.4 โลหะอ่อนนุ่ม

ได้มีการใช้โลหะอ่อนนุ่มทำเป็นฟิล์มโลหะ เช่น ดีบุก อินเดียม (Indium) ตะกั่ว และเงิน เป็นต้น ทำเป็นฟิล์มในกาบรองลื่น แต่ในปัจจุบันและอนาคตเชื่อว่า ดีบุก ทองแดง และตะกั่ว จะถูกนำไปเคลือบหรือชุบบนผิวโลหะเพื่อใช้เป็นสารหล่อลื่น ตามปกติจะเคลือบฟิล์มโลหะอ่อนเพียงบางๆ เท่านั้นบนผิวโลหะแข็ง การใช้งานของกาบรองลื่นแบบนี้จะใช้กับงานที่มีอุณหภูมิสูงมากๆ หรือในสภาวะสิ่งแวดล้อมที่รุนแรง เช่น ใช้ในงานรีดเหล็กที่อุณหภูมิสูงมากๆ ฟิล์มของ ทองคำ เงิน และโลหะมีค่าอื่นได้ถูกใช้เป็นสารหล่อลื่นในยานอวกาศ เครื่องบินไอพ่น เครื่องจักรที่ทำงานที่ความเร็วรอบสูง และภาระสูง ได้มีการรายงานว่าชุบทองคำบนผิวเหล็กกล้า และสแตนเลส ทำให้การสึกหรอลดลง แต่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงขึ้น การชุบโลหะเงิน ทองแดง และทองคำ จะมีผลน้อยกว่าในการลดการสึกหรอของผิวโลหะ และควรชุบโลหะนิกเกิล (Nickel) จะไม่มีผลต่อการสึกหรอของผิวโลหะเลย

กาบรองลื่นที่เคลือบด้วยโลหะอินเดียม (Indium-coated bearings) จะใช้ในเครื่องบิน เครื่องยนต์ดีเซล เครื่องยนต์แก๊สโซลีน เพราะว่ากาบรองลื่นที่เคลือบด้วยโลหะอินเดียมกับตะกั่วบนผิวเพลลาเหล็กกล้า โลหะอินเดียมจะเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแก่กาบรองลื่น และยังช่วยให้สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และช่วยให้มีคุณสมบัติต่างๆที่อุณหภูมิสูงดีขึ้น การรองลื่นที่ใช้งานหนักๆ บางครั้งจะเคลือบด้วยเงิน

โลหะอ่อนนุ่มจะมีค่าความเค้นเฉือนต่ำ ดังแสดงในตาราง 3-7 เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ และกาบรองลื่นสามารถรับภาระได้สูง จำเป็นต้องเคลือบโลหะนุ่มเป็นฟิล์มบางๆ ความหนาของฟิล์มโลหะนุ่มจะอยู่ระหว่าง 10^{-4} – 10^{-5} เซนติเมตร

รูปที่ 3-3 แสดงการเปรียบเทียบการหล่อลื่นที่มีฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น การหล่อลื่นที่มีฟิล์มโลหะ กับในกรณีที่ไม่มีสารหล่อลื่น พบว่าในกรณีที่ไม่มีสารหล่อลื่นจะคล้ายกับในกรณีที่มีน้ำมันหล่อลื่น กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าที่เหมือนกัน แต่ในกรณีที่มีฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่ไม่มีสารหล่อลื่น สำหรับในกรณีที่มีสารหล่อลื่นเป็นโลหะอินเดียมเคลือบผิวเหล็กกล้า จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะลดลงไปตามภาวะ

โลหะ	ความแข็งแรงเฉือน (กรัมต่อตารางมิลลิเมตร)	
	คำนวณจากแรงเสียดทาน	สำหรับโลหะบริสุทธิ์
อินเดียม	325	220
ตะกั่ว	1600	750
ทองแดง	28000	16000
เหล็กกล้า	140000	90000

ตารางที่ 3-7 ความแข็งแรงเฉือนของโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

น้ำมันหล่อลื่น

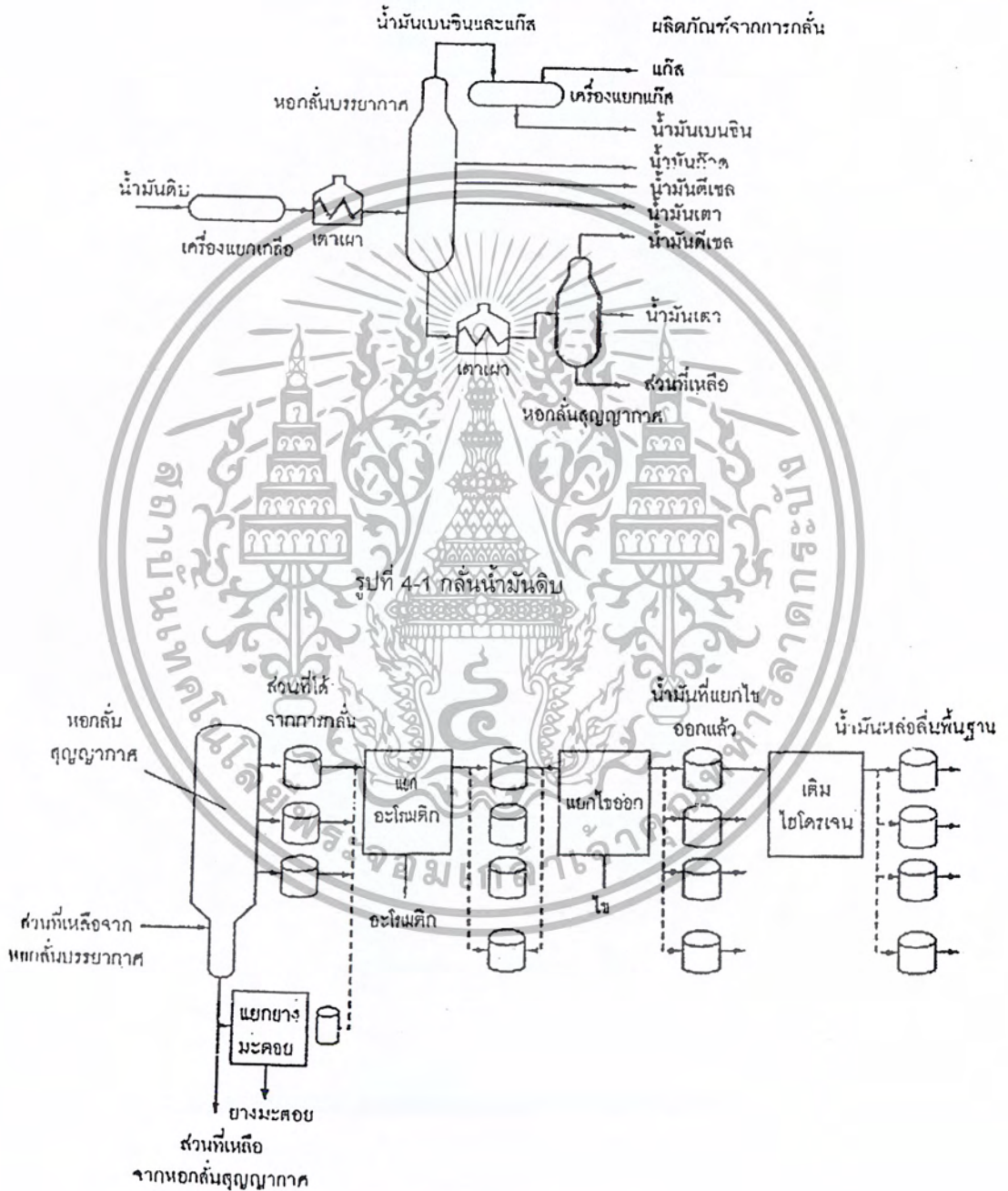
สารหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมาย ซึ่งถ้าแบ่งตามสถานะจะแบ่งได้เป็นสี่ชนิด คือ ก๊าซของเหลว สารกึ่งแข็ง(Semi-solid) และของแข็ง ในจำนวนของสารหล่อลื่นทั้งหมดที่ใช้กัน สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กันมากที่สุด และรองลงมาก็คือ สารกึ่งแข็งซึ่งได้แก่ จาระบี

การที่สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวนิยมใช้กันแพร่หลายมากนั้น เพราะสามารถแยกผิววัตถุทั้งสองได้อย่างสมบูรณ์ และสามารถรับแรงที่กระทำได้มาก ของเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นมีน้ำ สารละลายกับน้ำ (Aqueous solution) น้ำมันแร่ (Mineral oil) น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ และน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic oil) ในบรรดาสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวนี้น่าจะมีการใช้งานค่อนข้างจำกัด เช่น ใช้ในการหล่อลื่นแบริ่งไม้ หรือแบริ่งยางของกังหันวิดน้ำ หรือเครื่องสูบน้ำบางประเภท ส่วนสารละลายกับน้ำจะใช้เฉพาะในการหล่อลื่นชิ้นงานของเครื่องกลึง เครื่องเจียรไน และเครื่องไสเป็นหลัก สำหรับ สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวที่ใช้กันมากที่สุดคือ น้ำมันหล่อลื่นซึ่งจะมีอยู่สองชนิดคือน้ำมันแร่ และน้ำมันสังเคราะห์ ส่วนน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากมีราคาแพง

4.1 น้ำมันแร่

น้ำมันแร่เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ (Crude oil) น้ำมันหล่อลื่นได้มาจากส่วนที่หนัก ของน้ำมันดิบที่เหลือจากการกลั่นเอาส่วนที่เบา ได้แก่ ก๊าซน้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด และน้ำมันดีเซลออกไปโดยหอกลั่น บรรยากาศ (Atmospheric tower) ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4-1 กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นจากน้ำมันดิบเริ่มต้นจากการนำเอา ส่วนที่เหลือจากหอกลั่นบรรยากาศเข้าไปกลั่นอีกครั้งหนึ่งในหอกลั่นสุญญากาศ (Vacuum tower) เพื่อแยกส่วนที่เหลือจากหอกลั่นบรรยากาศออกเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีจุดเดือด (Boiling point) เหมือนกัน โดยความดันในหอกลั่นสุญญากาศจะมีค่าต่ำกว่าหนึ่งส่วนสิบของความดันบรรยากาศ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการแตกสลาย (Cracking) ที่อุณหภูมิสูง คุณสมบัติที่สำคัญที่ถูกควบคุมโดยการกลั่นสุญญากาศก็คือความหนืด (Viscosity) จุดวาบไฟ (Flash point) และกากคาร์บอน (Carbon residue) ซึ่งก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดต่างๆกันออกมา หลังจากที้ออกจากหอกลั่นสุญญากาศแล้วก็จะนำไปผ่าน กระบวนการต่างๆ เพื่อแยกส่วนที่ไม่ต้องการออกให้เหลือผลิตภัณฑ์หรือน้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติตามต้องการ ตัวอย่าง ของกระบวนการเหล่านี้ได้แก่ กระบวนการแยกยางมะตอยออกโดยใช้โพรเพนเป็นสารละลาย (Propane deasphalting) กระบวนการแยกเอาสารประกอบพวกอะโรมาติก (Aromatic compounds) ออกจากพวกที่ไม่ใช่อะโรมาติก (Nonaromatic compounds) ซึ่งเป็นการเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น ได้แก่ การเพิ่มเสถียรภาพในด้านความร้อนและการรวมตัวกับ ออกซิเจน และเพิ่มดัชนีความหนืด (Viscosity index) กระบวนการอันต่อไปก็คือ กระบวนการแยกเอาไขออก (Dewaxing) เพื่อลดจุดไหลเทให้ต่ำลง ให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนกระบวนการสุดท้ายก็คือ การเติมไฮโดรเจน (Hydro-finishing) เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดสีและสารที่ไม่เสถียรทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีสีจางลง และช่วยเพิ่มคุณสมบัติบางประการ กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นดังกล่าวได้แสดงไว้ตามรูปที่ 4-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-2 ขบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

4.2 น้ำมันสังเคราะห์

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่ที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบนั้น แม้ว่า จะผ่านกระบวนการมากมายที่ใช้กำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป แต่น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้ออกมานั้นยังคงเป็นของผสมของสารประกอบหลายตัว ซึ่งไม่มีทางที่จะเลือกเอาเฉพาะสารที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดได้ หรือถ้ามีก็จะได้ผลผลิตต่ำให้การผลิตไม่คุ้มค่า ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่จึงมีคุณสมบัติเฉลี่ยของของผสมซึ่งประกอบด้วยสารประกอบที่เหมาะสมมากที่สุดและน้อยที่สุด เป็นผลให้น้ำมันแร่มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันสังเคราะห์ขึ้นมา น้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันพื้นฐานที่ได้จากกระบวนการทางเคมี ซึ่งเป็นการรวมตัวของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำให้ได้น้ำมันที่มีความหนืด เพียงพอที่จะเป็นสารหล่อลื่น โดยสารประกอบเริ่มต้นที่ใช้ในการผลิตน้ำมันสังเคราะห์ มักจะได้ออกมาจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม และเนื่องจากน้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันที่สร้างขึ้นจากกระบวนการเคมี จึงสามารถควบคุมให้มีโครงสร้างโมเลกุลตามที่ต้องการ และมีคุณสมบัติที่คาดหวังไว้ได้ข้อได้เปรียบที่สำคัญของน้ำมันสังเคราะห์ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่คือ สามารถนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าน้ำมันแร่ คือ ใช้ได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าและสูงกว่าของน้ำมันแร่ นอกจากนี้ น้ำมันสังเคราะห์บางประเภท ยังให้คุณสมบัติเฉพาะ เช่น ผสมเข้ากันกับน้ำได้ และไม่ติดไฟ เป็นต้น

สำหรับน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ที่ใช้กันอยู่ สามารถแบ่งได้เป็นห้ากลุ่ม คือ

4.2.1 ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์ (Synthesized hydrocarbons)

เป็นไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์ที่ผลิตจากวัตถุดิบ ที่ได้มาจากน้ำมันดิบที่ใช้กันมากมีอยู่สามชนิด คือ โอลิฟินโอลิโกเมอร์ (Olefin oligomers) อัลคิลเอเตดอะโรมาติก (Alkylated aromatics) และโพลิบิวทีนส์ (Polybutenes) ข้อเปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ มีความมั่นคง มีอุณหภูมิสูง อายุการใช้งานยาวมีดัชนีความหนืดสูง มีการไหลที่อุณหภูมิต่ำไม่มีไข และมีการระเหยต่ำ

4.2.2 เอสเทอร์อินทรีย์ (Organic esters)

เป็นสารหล่อลื่นที่ได้มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสารหล่อลื่นของเครื่องยนต์เจ็ทของอากาศยาน และใช้ในระบบไฮดรอลิก เป็นต้น เอสเทอร์อินทรีย์ที่ใช้กันอยู่ สองชนิด ชนิดแรกคือ ไดเบสิกเอซิดเอสเทอร์ (Dibasic acid esters) บางครั้งเรียกว่า ไดเอสเทอร์ (Diesters) ซึ่งได้ จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างไดเบสิกเอซิด (Dibasic acid) กับโมโนไฮดรอลกอฮอล์ (Monohydric alcohol) อีกชนิดหนึ่งก็คือ โพลีโอลเอสเทอร์ (Polyol ester) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง โพลีไฮดรอลกอฮอล์ (Polyhydric alcohol) กับ โมโน

เบสิกเอซิด (Monobasic acid) ข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ มีความมั่นคงที่อุณหภูมิสูง มีการไหลที่อุณหภูมิต่ำ และมีอายุการใช้งานยาว

4.2.3 โพลีไกลคอลส์ (Polyglycols)

เป็นสารหล่อลื่นที่มีจุดเดือดสูงและจุดไหลเทต่ำเหมาะสำหรับสภาพการ ใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น ใช้เป็นน้ำมันเบรก และน้ำมันไฮดรอลิกที่ติดไฟได้

4.2.4 ฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate esters)

เป็นสารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติทนไฟ จึงใช้เป็นน้ำมันไฮดรอลิก สำหรับอากาศยาน และน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟด้วย

4.2.5 น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์อื่น ๆ

ไดแกซิลิโคน ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นที่มีดัชนีความหนืดสูงมาก (300 หรือ มากกว่า) และมีจุดไหลเทต่ำ จึงเหมาะสมสำหรับการใช้งานในช่วงอุณหภูมิกว้าง และใช้เป็นน้ำมันไฮดรอลิกในกรณีพิเศษ เช่น ใช้เป็นสปริงของเหลว และซิลิเกตเอสเทอร์ (Silicate esters) เป็นสารหล่อลื่นที่มีดัชนีความหนืด สูงและจุดไหลเทต่ำเช่นกัน

แม้ว่าน้ำมันสังเคราะห์จะมีความสมบัติโดยทั่วไปดีกว่าน้ำมันแร่ก็ตาม แต่สำหรับการนำไปใช้งานบางประเภทน้ำมันสังเคราะห์ก็อาจจะยังไม่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมทุกด้าน จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันสังเคราะห์โดยการใส่สารเพิ่มคุณภาพเข้าไปเช่นเดียวกับการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันแร่

4.3 สารเพิ่มคุณภาพ

สารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน โดยทั่วไปเป็นสารประกอบทางเคมีซึ่งใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายตัว สารเพิ่มคุณภาพแต่ละตัวจะมีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเฉพาะอย่างโดยพอที่จะแบ่งตามผลที่มีต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานออกได้เป็นสามพวก คือ พวกแรก จะเป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ให้คุณสมบัติใหม่ที่เป็นประโยชน์ต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน พวกที่สองเป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ปรับปรุงคุณสมบัติที่มีอยู่แล้วให้ดีขึ้น และพวกสุดท้ายเป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ทำหน้าที่ในการลดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการซึ่งเกิดในช่วงการทำงานลง

การที่จะเติมสารเพิ่มคุณภาพตัวใดและจำนวนเท่าใดลงไปในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานนั้น จะขึ้นอยู่กับลักษณะของการนำไปใช้งาน โดยจะต้องคำนึงถึงผลข้างเคียงที่เกิดขึ้นด้วย เนื่องจากสารเพิ่มคุณภาพบางตัวแม้ว่าจะทำให้คุณสมบัติประการใดประการหนึ่งดีขึ้น แต่ก็อาจจะทำให้คุณสมบัติประการอื่นเสื่อมลงไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าใส่เข้าไปมากเกินไป หรือถ้าสารเพิ่มคุณภาพนั้นไปทำปฏิกิริยากับสารเพิ่มคุณภาพแต่ละตัวจึงต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ น้ำมันหล่อลื่นทำงานได้อย่างดีที่สุด และจะต้องมีการทดสอบให้แน่ใจว่าจะไม่มีผลข้างเคียงที่ไม่ต้องการเกิดขึ้น ซึ่งในกรณีต่างๆไปจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเติมสารเพิ่มคุณภาพเข้าไปอีก น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่อเติมสารเพิ่มคุณภาพเข้าไปแล้วก็จะเรียกว่า น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป ซึ่งบริษัทผู้ผลิตแต่ละราย มักจะตั้งชื่อเฉพาะของแต่ละผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมา สำหรับสารเพิ่มคุณภาพที่นิยมใช้กันมี ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 สารลดจุดไหลเท (Pour point depressants)

เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการยับยั้งการเกิดผลึกไขที่ป้องกันไม่ให้น้ำมันไหลที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นสารนี้จึงช่วยให้จุดไหลเทของน้ำมันหล่อลื่นต่ำลง ทำให้สามารถ ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้ สารที่ช่วยลดจุดไหลเทจะเป็นพวกโพลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งที่ใช้งานอยู่มีสองชนิด คือ อัลคิลอะโรมาติกโพลิเมอร์ (Alkylaromatic polymers) ทำหน้าที่ในการดูกลืนผลึกของไขเมื่อเกิดขึ้น เพื่อป้องกันไม่ให้ผลึกเติบโต สำหรับอุณหภูมิของจุดไหลเทของน้ำมันหล่อลื่นเมื่อเติมสารนี้เข้าไปแล้วโดยทั่วไปจะลดลงประมาณ 11-17 องศาเซลเซียส

4.3.2 สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (Viscosity index improvers)

เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยไม่ให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงมาก เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืดจะเป็นพวกโพลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีโครงสร้างเป็นลูกโซ่ยาว (Long chain) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการเพิ่มความหนืดสัมพัทธ์ของน้ำมันหล่อลื่นที่อุณหภูมิสูงมากกว่าการเพิ่มความหนืดสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่ำซึ่งจะเป็นผลมาจากเวลาที่โพลิเมอร์ดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลจะยืดออกและมีปฏิริยากันระหว่างโมเลกุล ให้ความหนืดเพิ่มขึ้น สำหรับสารที่นิยมใช้เป็นสารเพิ่มค่าดัชนีความหนืดมีหลายตัว เช่น เมทาคริเลตโพลิเมอร์ (Methacrylate polymers) โอลิฟินโพลิเมอร์ (Olefin polymers) และอะคริเลตโพลิเมอร์ (Acrylate polymers) เป็นต้น

4.3.3 สารป้องกันการเกิดฟอง (Defoamants)

ใช้ป้องกันการเกิดฟองอากาศที่ผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่นเมื่อน้ำมันถูกหมุนเวียนใช้ในระบบ สารนี้จะทำหน้าที่โดยโมเลกุลของสารจะเข้าไปติดกับฟองอากาศทำให้ฟองอากาศเล็กจรวมตัวกันเป็นฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้นลอยขึ้นผิวและแตกออกในที่สุด สำหรับสารที่นิยมใช้เป็นสารป้องกัน การเกิดฟอง คือ ซิลิโคนโพลิเมอร์ (Silicone polymers) และพวกโพลิเมอร์อินทรีย์ (Organic polymers)

4.3.4 สารป้องกันออกซิเดชัน (Oxidation inhibitors)

เมื่อน้ำมันหล่อลื่นร้อนและสัมผัสกับอากาศก็จะเกิด ปฏิริยาระหว่างน้ำมันหล่อลื่นและออกซิเจนในอากาศที่เรียกว่าออกซิเดชันขึ้น ผลของการเกิดออกซิเดชันจะทำให้ ความหนืดและความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดวารนิช และตะกอน สารป้องกันออกซิเดชันก็คือ สังกะสีไดไทโอฟอสเฟต (Zinc dithiophosphate)

4.3.5 สารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion inhibitors)

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในระบบหล่อลื่นโดยน้ำมันหล่อลื่นนั้น มีหลายชนิด แต่ที่สำคัญที่สุดมีสองชนิดคือ การกัดกร่อนจากกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในตัวของตัวเอง และการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากสารปนเปื้อนที่ถูกนำ และพาไปโดยน้ำมัน สำหรับสารป้องกันการกัดกร่อนที่ใช้กันทั่วไป เป็นสารตัวเดียวกับสารป้องกันออกซิเดชัน ซึ่งก็คือ สังกะสีไดไทโอฟอสเฟต แต่สารที่มีซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสถูกนำมาใช้ด้วย

4.3.6 สารป้องกันสนิม (Rust inhibitor)

ใช้เพื่อป้องกันสนิมที่อาจจะเกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นส่วนโลหะที่มีการหล่อลื่น ด้วยน้ำมันสารที่ใช้โดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบที่มีการยึดติดกับผิวของโลหะได้ดี โดยสารป้องกันสนิมจะทำปฏิกิริยากับผิวโลหะเกิดเป็นฟิล์มเกาะติดกับผิวเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำเข้าถึงผิวโลหะ สารที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ อะไมนซัคซิเนต (Amine succinates) และอัลคาไลเอิร์ทซัลโฟเนต (Alkaline earth sulfonates)

4.3.7 สารชะล้างและกระจายสิ่งสกปรก (Detergents and dispersants)

ใช้เพื่อชะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวของชิ้นส่วน และกระจายมิให้รวมตัวกันเป็นโคลนหรือตะกอน ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน ได้แก่ เครื่องยนต์เบนซิน และเครื่องยนต์ดีเซล โคลนหรือตะกอนที่เกิดขึ้นจะอุดช่องทางนำมันหล่อลื่น และจะไปรวมกันอยู่ด้านหลังของแหวนลูกสูบ ซึ่งอาจทำให้แหวนติดตายได้ สารชะล้างจะทำหน้าที่ในการป้องกันไม่ให้เกิดโคลนหรือตะกอน สารที่เป็นตัวชะล้างที่ใช้กันในปัจจุบัน ได้แก่ สบูอินทรีย์ (Organic soaps) และบาเรียม (Barium) แคลเซียมและแมกนีเซียมซัลโฟเนต (Magnesium sulfonates) เป็นต้น ส่วนสารกระจายสิ่งสกปรกจะทำหน้าที่ในการกระจายหรือทำให้สารที่จะรวมตัวกันเป็นโคลนแขวนลอยอยู่ในน้ำมันสารที่เป็นตัวกระจายที่ใช้กัน ได้แก่ โพลีเมอร์ซัคซิไนด์ (Polymeric succinimides) และเบนซิลาไมด์ (Benzylamides) เป็นต้น

4.3.8 สารป้องกันการสึกหรอ (Antiwear additives)

เป็นสารที่ช่วยลดความเสียหายและการสึกหรอ ภายใต้สภาวะการหล่อลื่นแบบเบาร์วารี (Boundary lubrication) ซึ่งก็คือในสภาวะที่ฟิล์มของน้ำมันที่จะแยกผิวสัมผัสได้อย่างสมบูรณ์ไม่สามารถคงอยู่ได้ สารป้องกันการสึกหรอที่ใช้กันแบ่งออกเป็นสองประเภทตามความต้องการของการใช้งาน ประเภทแรกเป็นสารที่ช่วยลดความเสียหายและการสึกหรอสำหรับสภาวะการทำงานเบา สารนี้บางครั้งเรียกว่าสารเพิ่มคุณภาพสำหรับการหล่อลื่นแบบเบาร์วารี (Boundary lubrication additives) ได้แก่ กรดไขมัน (Fatty acid) และน้ำมันไขมัน (Fatty oil) ประเภทที่สองเป็นสารที่ช่วยลดความเสียหายและการสึกหรอภายใต้ สภาวะความดันสูงมาก เรียกว่า Extreme Pressure Additive (EP) ซึ่งจะทำหน้าที่โดยทำปฏิกิริยาทางเคมีกับผิวโลหะ โดยจะเกิดเป็นฟิล์มเคลือบที่ผิวโลหะป้องกันการสัมผัสโดยตรงของผิวโลหะ สาร EP โดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบ ของซัลเฟอร์ คลอรีน หรือ ฟอสฟอรัส ตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัวรวมกัน

4.4 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นประเภทน้ำมันแร่มีหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นในการเลือกใช้ จึงจำเป็นต้องรู้ถึงคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น และในการผลิตก็ต้องมีการควบคุมคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น ให้ได้ตามต้องการ สำหรับคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่สำคัญทางด้านฟิสิกส์และเคมี มีดังต่อไปนี้

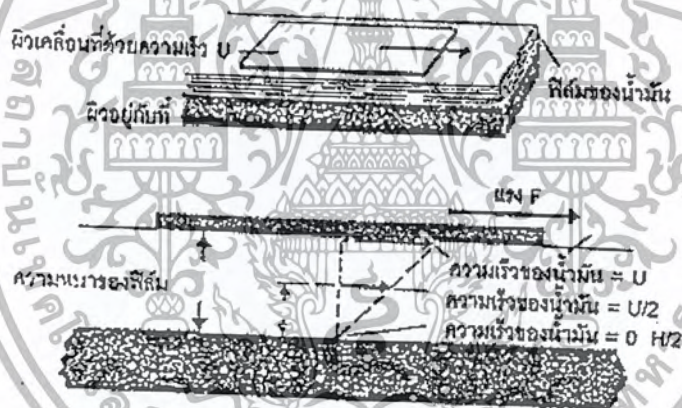
4.4.1 ความหนืด (Viscosity)

เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัส และมีผลต่อการเกิดความร้อนขึ้นในระหว่างผิวสัมผัสที่มีการหล่อลื่นด้วยน้ำมัน ความหนืดหมายถึง ความข้นหรือความใสของน้ำมันเป็นคุณสมบัติของของไหลซึ่งวัดในรูปของความต้านทานในการไหล

หลักการของความหนืดตามที่แสดงในรูปที่ 4-3 ประกอบด้วยแผ่นวัตถุถูกดึงไปบนฟิล์มของน้ำมันด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ฟิล์มของน้ำมันติดอยู่กับหัวผิววัตถุที่เคลื่อนที่และที่อยู่กับที่ ซึ่งเมื่อพิจารณาให้น้ำมันประกอบขึ้นด้วยชั้นน้ำมันหลายๆชั้น ชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่เคลื่อนที่ก็เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเดียวกับผิวที่เคลื่อนที่ (U) ส่วนชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่อยู่กับที่ ก็มีความเร็วเป็นศูนย์ ชั้นน้ำมันที่อยู่ระหว่างชั้นบนสุดและชั้นล่างสุดก็จะถูกดึงไปด้วยชั้นน้ำมันที่ติดอยู่ด้านบนถัดไป ให้มีความเร็วส่วนหนึ่งของความเร็ว U ซึ่งความเร็วของแต่ละชั้นน้ำมันดังกล่าวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากผิววัตถุที่อยู่กับที่ แรง (F) ที่ต้องใช้ในการดึงให้ผิววัตถุอันบนเคลื่อนที่ไปก็คือ แรงที่ต้องเอาชนะความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นน้ำมันนั่นเอง และเนื่องจากแรงนี้เป็นผลมาจากความหนืด โดยแรงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนืด ดังนั้นความหนืดสามารถหาได้จากการวัดแรงที่ต้องใช้เพื่อเอาชนะความเสียดทานของน้ำมัน ความหนืดที่หาได้ในที่นี้เรียกว่า ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute viscosity) หรือความหนืดเชิงพลศาสตร์ (Dynamic viscosity) หน่วยความหนืดเชิงพลศาสตร์ที่นิยมใช้กันคือ หน่วยเป็น Poise (P) ซึ่งเป็นหน่วยในระบบ CGS (Centimeter Gram Second) โดย

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

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



รูปที่ 4-3 หลักการของความหนืด

แต่ค่าของความหนืดเชิงพลศาสตร์ของน้ำมันหล่อลื่นค่อนข้างกว้าง คือมีค่าอยู่ในช่วง 2 ถึง 400 cP และโดยทั่วไปเครื่องมือวัดความหนืดจะไม่สามารถวัดค่าความหนืดเชิงพลศาสตร์ได้โดยตรง ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดค่าความหนืดในอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเรียกว่า ความหนืดเชิงจลศาสตร์ (Kinematic viscosity) โดยให้ความหนืดเชิงจลศาสตร์ เท่ากับความหนืดเชิงพลศาสตร์ หารด้วยความหนาแน่นของน้ำมันหรือของไหลนั้นๆ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้คือ

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

ν = ความหนืดเชิงจลศาสตร์

η = ความหนืดเชิงพลศาสตร์

ρ = ความหนาแน่น

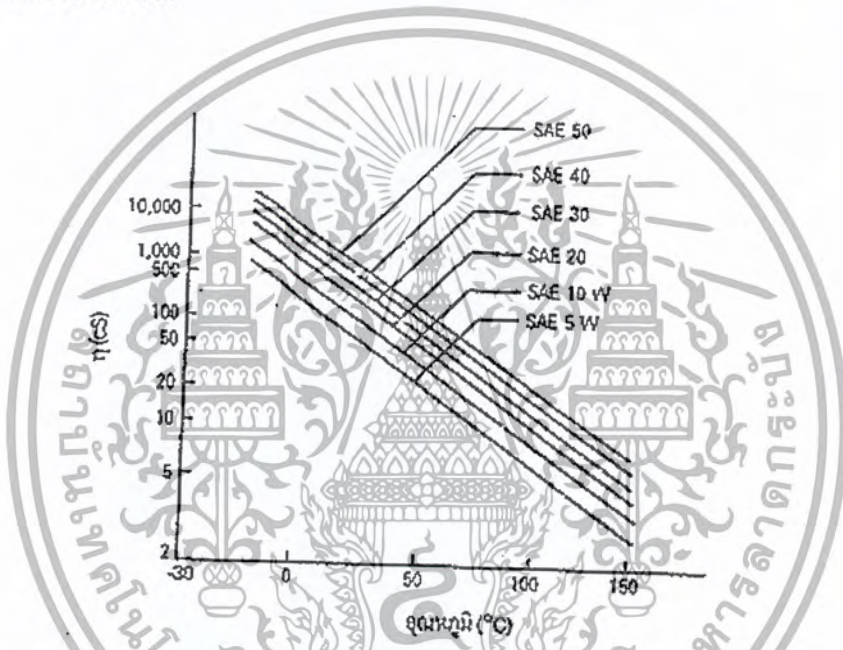
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยความหนืดเชิงจลศาสตร์ที่นิยมใช้กันก็คือหน่วย Stock (St) ซึ่งเป็นหน่วยในระบบ CGS เช่นเดียวกัน โดย

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

$$1 \text{ Centistoke (cSP)} = 1 \times 10^2 \text{ stoke (St)}$$

นอกจากหน่วยของความหนืดที่ใช้กันข้างต้นแล้วยังมีการวัดความหนืดในหน่วยอื่นได้อีก ได้แก่ Saybolt Universal Seconds (SUS), Saybolt Furlo Seconds (SFS), Redwood Seconds และ Engler Degree ซึ่งความหนืดในหน่วยเหล่านี้กำหนดขึ้นตามชนิดของเครื่องมือวัดที่ใช้วัดความหนืด (Viscosity) และสภาวะการทดสอบ (อุณหภูมิของการทดสอบ) แต่อย่างไรก็ตามค่าความหนืดในหน่วยต่างๆ ข้างต้นก็สามารถที่จะแปลงเป็นค่าในหน่วยความหนืดเชิงจลศาสตร์ได้



รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นบางชนิด

ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะไม่คงที่ แต่จะแปรผันตามสภาวะการใช้งานโดยเฉพาะอย่างยิ่งจะแปรผันกับอุณหภูมิและความดันในการใช้งาน ในด้านของอุณหภูมิ ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมัน ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของเหลวจะขยายตัว โมเลกุลของน้ำมันจะเคลื่อนออกห่างกัน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลง และเป็นผลให้ความหนืดลดลงด้วย รูปที่ 4-4 เป็นกราฟแสดงถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดเชิงพลศาสตร์ ของน้ำมันหล่อลื่น และเนื่องจากความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงน้อยมากกับอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดเชิงจลศาสตร์ด้วย นอกจากแสดงด้วยกราฟแล้วผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดก็ยังสามารถได้ด้วยสมการ แต่เป็นเพียงสมการโดยประมาณเท่านั้นคือ

$$\text{Log } \eta = A + B / T$$

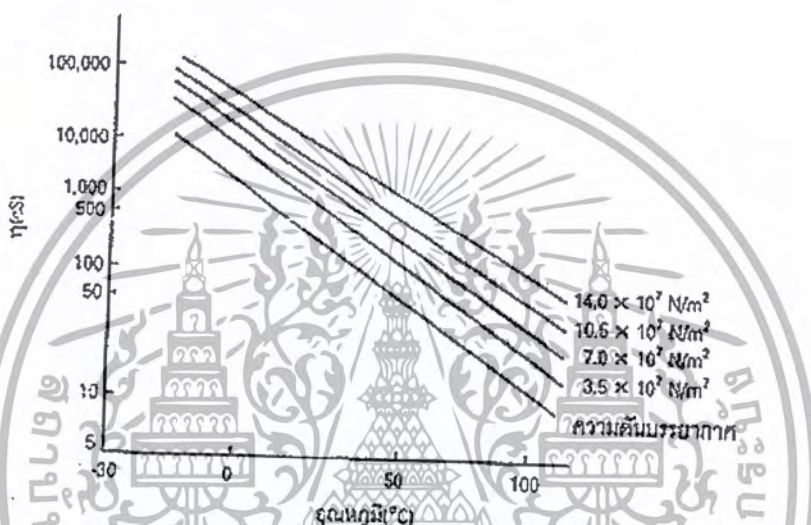
$$\eta = \text{ความหนืดเชิงพลศาสตร์}$$

$$A \text{ และ } B = \text{ค่าคงที่ (ขึ้นอยู่กับชนิดของของเหลว)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T = อุณหภูมิ

สำหรับผลของความดันต่อความหนืดนั้น จะเห็นได้ชัดเจนก็ต่อเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นมาก ซึ่งเมื่อความดันของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น โมเลกุลของน้ำมันก็จะถูกบีบให้เข้าใกล้กัน ทำให้แรงยึดติดระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น และเป็นผลให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นด้วย รูปที่ 4-5 แสดงถึงผลของความดันที่มีผลต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 ซึ่งความหนืดจะเปลี่ยนแปลงจนเห็นได้ชัดเจนเมื่อความดันเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 2×10^7 N / m² (Pascal)



รูปที่ 4-5 ผลของความดันต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE40

และค่าความหนืดเพิ่มเป็น 3.5×10^7 N / m² ความหนืดก็จะเพิ่มเป็นสองเท่าของความหนืดที่ความดันบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงของความหนืดอันเนื่องมาจากความดันสามารถแสดงได้ด้วยสมการโดยประมาณ คือ

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

η = ความหนืดเชิงพลศาสตร์ที่ความดัน P

η_0 = ความหนืดเชิงพลศาสตร์ที่ความดันบรรยากาศ

η_a = สัมประสิทธิ์ของความดันกับความหนืด

P = ความดันของน้ำมันหล่อลื่น

e = 2.71828

4.2.2 ดัชนีความหนืด (Viscosity index)

น้ำมันหล่อลื่นต่างชนิดกันจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืด อันเนื่องมาจากอุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดดัชนีความหนืดขึ้นมา เพื่อใช้แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ โดยการใช้การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นที่จะหาดัชนีความหนืดกับน้ำมันหล่อลื่นที่เลือกสองชนิด เช่น น้ำมันหล่อลื่น Gulf Coast ซึ่งความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิมาก ให้มี

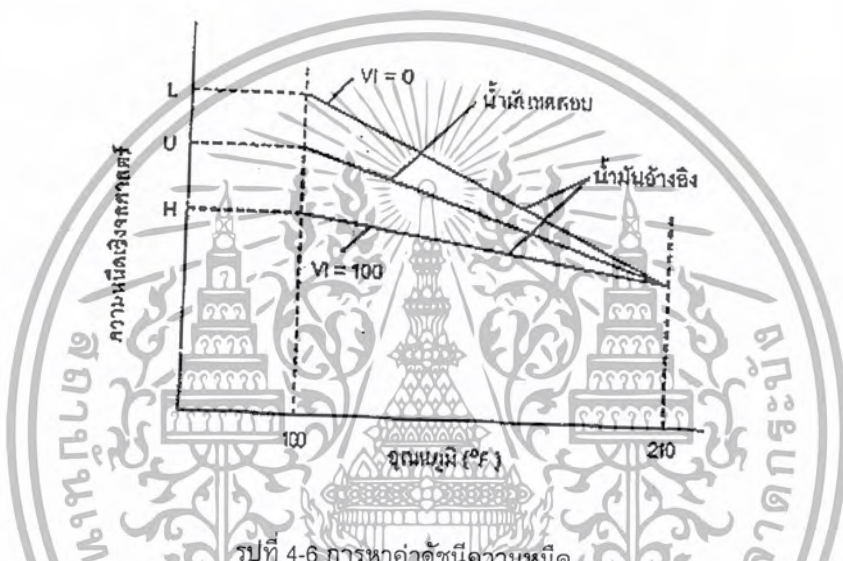
ดัชนีความหนืดเท่ากับ 0 และน้ำมันหล่อลื่น Pennsylvanian ซึ่งความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิน้อยให้มีดัชนีความหนืดเท่ากับ 100

การหาดัชนีความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นกระทำได้โดยการหาความหนืดเชิงจลศาสตร์ของน้ำมันหล่อลื่นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 100°F และ 120°C แล้วหาค่าดัชนีความหนืดตามสมการคือ

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

V.I = ดัชนีความหนืด (Viscosity index)

ค่า L, U และ H ให้ดูตามรูปที่ 4-6



รูปที่ 4-6 การหาค่าดัชนีความหนืด

4.4.3 กากคาร์บอน (Carbon residue)

หมายถึง สิ่งที่ตกค้างอยู่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายหลังจากเผาไหม้น้ำมันหล่อลื่นในสภาวะที่กำหนดปริมาณกากคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นจะไม่ค่อยมีความสำคัญนักสำหรับการใช้งาน เนื่องจากจะไม่มี การเผาไหม้โดยตรงของน้ำมันหล่อลื่นในการนำไปใช้งาน แต่ปริมาณกากคาร์บอนจะมีความสำคัญสำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงเพราะจะมีการเผาไหม้โดยตรง ดังนั้นการหาปริมาณกากคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจึงเป็นการหาสำหรับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเพื่อดูว่าขบวนการผลิตเป็นไปตามกำหนดหรือไม่

4.4.4 สี (Color)

สีน้ำมันหล่อลื่นที่เห็นเมื่อมีแสงผ่านนั้นจะมีสีต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ใสมากจนถึงดำ ซึ่งอาจมีสีเหลือง แดง และน้ำตาล เป็นต้น ความแตกต่างกับของสีของน้ำมันหล่อลื่น เป็นผลมาจากชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นแตกต่างกัน ทั้งวิธีการกลั่นและผลิต, จำนวน และชนิดของสารเพิ่มคุณภาพ ดังนั้น สีของน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปจึงไม่มีความสำคัญนักในด้านการใช้งาน ยกเว้นกรณีที่เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (Density and gravity)

ความหนาแน่น หมายถึงมวลสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิมาตรฐานที่กำหนด ส่วนความถ่วงจำเพาะ (ความหนาแน่นสัมพัทธ์) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของน้ำมัน และความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน ในสหรัฐอเมริกา มักนิยมกำหนดค่าความถ่วงจำเพาะในรูปของหน่วยของศอา API (American Petroleum Institute) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\text{องศา API} = \text{องศา API ที่ } 60^{\circ}\text{F Sp gr } 60/60^{\circ}\text{F} = \text{ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันที่ } 60^{\circ}\text{F}$$

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

4.4.6 จุดวาบไฟและจุดติดไฟ (Flash and fire points)

หมายถึงอุณหภูมิที่น้ำมันระเหยกลายเป็นไอ เพียงพอที่ผิวและสามารถลุกไหม้ได้เมื่อโดนเปลวไฟ แต่ที่อุณหภูมินี้การระเหยกลายเป็นไอจะไม่เพียงพอที่จะทำให้การลุกไหม้คงอยู่ต่อไป เปลวไฟจึงดับลงเองทันที แต่หากมีการให้ความร้อนแก่น้ำมันต่อไปอีก อุณหภูมิก็จะสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่การระเหยกลายเป็นไอเพียงพอที่จะทำให้เกิดการลุกไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง อุณหภูมินี้เรียกว่า จุดติดไฟ จุดวาบไฟของน้ำมันหล่อลื่นใหม่จะแปรผันกับความหนืด โดนน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดสูงก็จะมีจุดวาบไฟสูงด้วย นอกจากนี้ชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานก็มีผลต่อจุดวาบไฟด้วย

จุดวาบไฟ และจุดติดไฟของน้ำมันจะใช้ในการควบคุมการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและจะใช้ในการพิจารณาในด้านความปลอดภัยในการใช้งาน

4.4.7 จุดไหลเท (Pour point)

หมายถึง อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันหล่อลื่นจะเริ่มไหลภายใต้สภาวะที่กำหนด ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นทั่วไปจะมีไขส่วนหนึ่งละลายอยู่ด้วย เมื่อน้ำมันเย็น ไขก็จะตกผลึกและเกาะกันเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง โดยกักเอาน้ำมันไว้ และเมื่อผลึกของไขเกิดขึ้นมากพอ น้ำมันก็จะไม่สามารถไหลได้ต่อไป

ความสำคัญของจุดไหลเทจะขึ้นอยู่กับสภาวะของการทำงาน ตัวอย่างเช่น ในประเทศหนาวจะต้องเลือกใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำ เพื่อให้สามารถไหลได้ ถึงแม้อุณหภูมิของอากาศโดยรอบจะต่ำ ในทางตรงข้ามน้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำก็ไม่มีความจำเป็นสำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูงตลอดเวลา

4.4.8 ตัวเลขความเป็นกลาง (Neutrallization number)

น้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะมีสภาพความเป็นกรดอยู่เล็กน้อย ซึ่งสภาพความเป็นกรดนี้จะวัดเป็นปริมาณของเบสมาตรฐานที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำมันมีสภาพเป็นกลาง

สภาพความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจน (Oxidation) ซึ่งทำให้เกิดกรดอินทรีย์ขึ้น

สภาพความเป็นกรดนี้อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะได้ ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่น โดยเฉพาะ น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซล จึงนิยมเติมสารเพิ่มคุณภาพที่มีสารที่เป็นต่างเข้าไป เพื่อให้สารที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งมีสภาพเป็นกรดให้มีสภาพเป็นกลาง และเมื่อนำน้ำมันหล่อลื่นไปใช้งาน อัตราการสิ้นเปลือง สารที่เป็นต่างที่ตรวจสอบได้ก็จะเป็นตัวชี้ถึงอายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่น การวัดความเป็นต่างนี้จะวัดในรูปของจำนวนเบสทั้งหมด (Total base number)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบ

5.1 การออกแบบ

การออกแบบเครื่องทดสอบการสึกหรอโดยใช้ลูกบอลสี่ลูก แบ่งขั้นตอนการออกแบบเป็น 4 ขั้นตอน คือ การศึกษาลักษณะการทำงานของเครื่อง การออกแบบทางกล การออกแบบสถานะควม และการสร้างเครื่องทดสอบ ดังนี้

5.1.1 การศึกษาลักษณะการทำงานของเครื่อง

Four ball wear test machine เป็นเครื่องมือที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติของสารหล่อลื่นในสภาวะควบคุมต่างๆ เพื่อหาผลต่างๆที่เกิดขึ้น ขณะที่ผิวชิ้นงานสองชิ้นขึ้นไปเคลื่อนไถลกัน ซึ่งชิ้นงานที่ใช้ คือ โลหะเหล็กทรงกลม ในที่นี้ของเรียกว่า “ลูกบอลเหล็ก” ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร 4 ลูก สามลูกวางในระนาบ XY ซิดติดกันทั้งสามลูกเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ลูกบอลอีกลูกหมุนรอบแกน Z เคลื่อนไถลไปบนจุดศูนย์กลางของระนาบลูกบอลสามลูก ซึ่งผิวของลูกบอลที่เคลื่อนไถลกันจะถูกแยกออกจากกันด้วยฟิล์มสารหล่อลื่น ฟิล์มสารหล่อลื่นจะถูกฉีกโดยผิวของลูกบอลไม่ให้เกิดความเสียหาย ลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 5-1



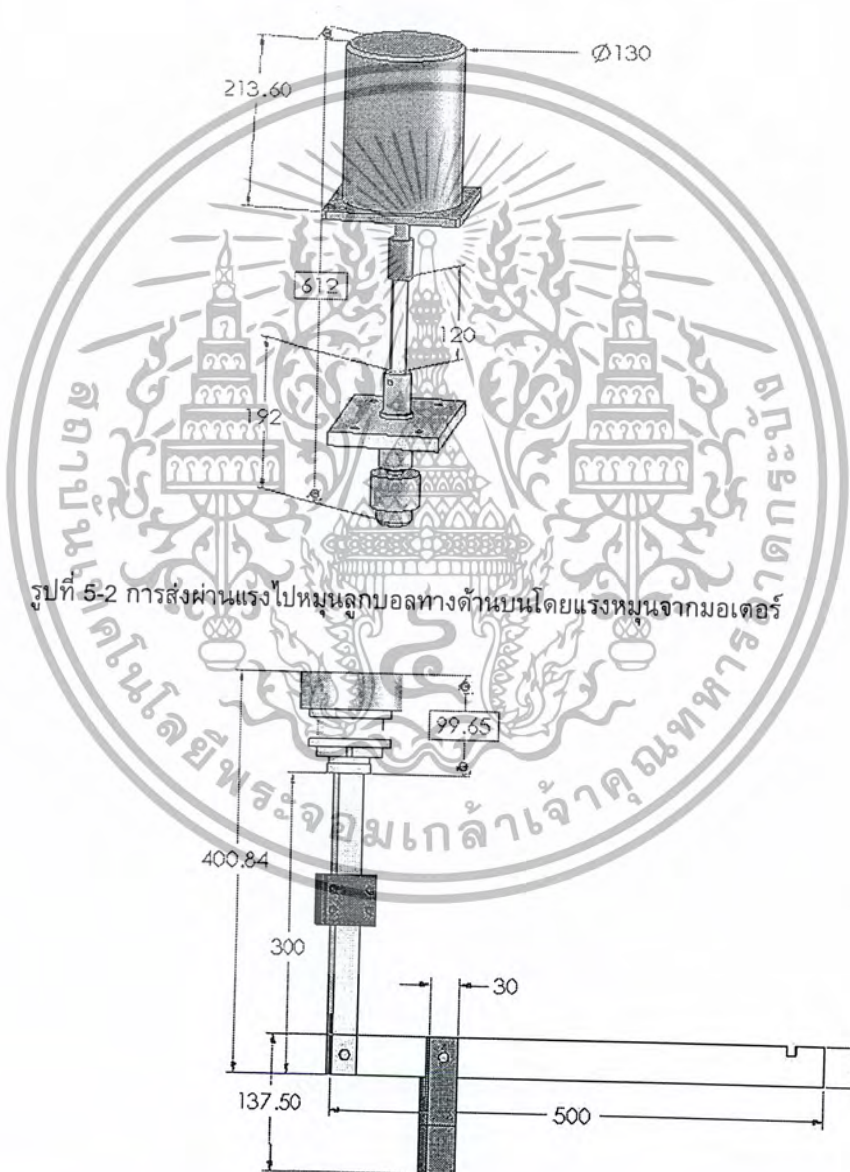
รูปที่ 5-1 ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบ Four ball ware test machine

5.1.2 การออกแบบทางกล

1. การออกแบบระบบกลไกส่งถ่ายแรงต่างๆ

รูปแบบลักษณะการทำงานของ Four ball wear test machine คือ มีการหมุนของลูกบอลที่อยู่บนจุดศูนย์กลางของระนาบลูกบอลสามลูก ออกแบบให้มีการหมุนของลูกบอลทางด้านบนโดยใช้เครื่องมือยึดจับและทำให้หมุนโดยใช้แรงขับจากการใช้มอเตอร์ ส่งผ่านแรงบิดผ่านเพลลาขับเพลลาวัดแรงบิดที่ใช้สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานของผิวลูกบอลที่มีการลื่นไถล และส่งการหมุนไปสู่ลูกบอลทางด้านบนโดยการยึดลูกบอลด้วยหัวยึดจับแบบเดียวกับตัวยึดจับดอกสว่าน ดังรูปที่ 5-2 ออกแบบให้มีการส่งผ่านแรงที่ทำให้เกิดแรง

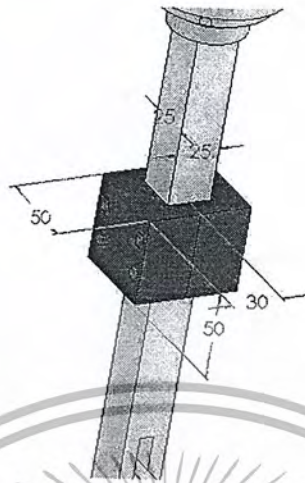
กดทับที่ผิวของลูกบอลโดยส่งแรงในแนวแกน Z ทางด้านล่างของระนาบลูกบอลสามลูกโดยใช้จุดหมุนและคานเพื่อความได้เปรียบเชิงกลและใช้ตุ้มน้ำหนักเป็นแรงที่ใช้ส่งผ่านโดยอัตราส่วนแรงคือ 1:4 ดังรูปที่ 5-3 และ Link ที่ใช้ส่งแรงไปดันลูกบอลทางด้านล่างจะยึดติดกับชุดอุปกรณ์ยึดจับลูกบอลทางด้านล่างโดยการยึดด้วยสกรูเพื่อสามารถถอดชุดยึดจับลูกบอลออกมาเปลี่ยนถ่ายสารหล่อลื่น ชุดลูกบอล และทำความสะอาดได้ง่าย ดังรูปที่ 5-4 และ Link จะมีปลอกบังคับทิศทางการเคลื่อนที่ให้เคลื่อนในแนวขั้วลงโดยเป็นปลอกสี่เหลี่ยม และ Link ก็เป็นแท่งสี่เหลี่ยมเพื่อบังคับไม่ให้ชุดจับลูกบอลสามลูกในระนาบทางด้านล่างหมุนตามการหมุนลูกบอลทางด้านบนอีกด้วย ดังรูปที่ 5-3



รูปที่ 5-2 การส่งผ่านแรงไปหมุนลูกบอลทางด้านบนโดยแรงหมุนจากมอเตอร์

รูปที่ 5-3 การส่งผ่านแรงที่ทำให้เกิดแรงกดทับที่ผิวของลูกบอลโดยใช้จุดหมุนและคาน และการยึดอุปกรณ์ยึดจับลูกบอลสามลูกทางด้านล่างเข้ากับ Link

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

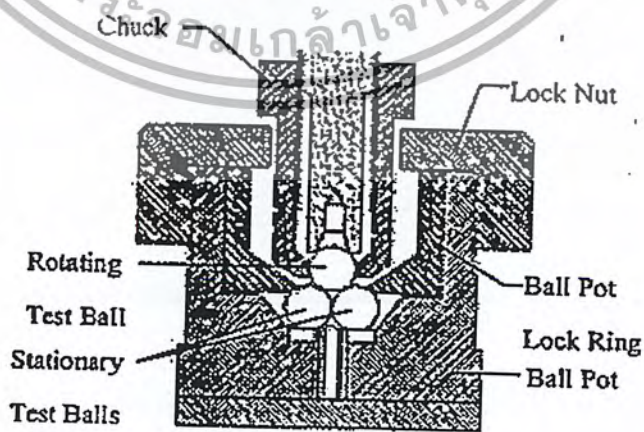


รูปที่ 5-4 Link และ ป्लอกบังคับทิศทางเคลื่อนที่

2. การออกแบบอุปกรณ์ยึดจับบอลและการหล่อลื่น

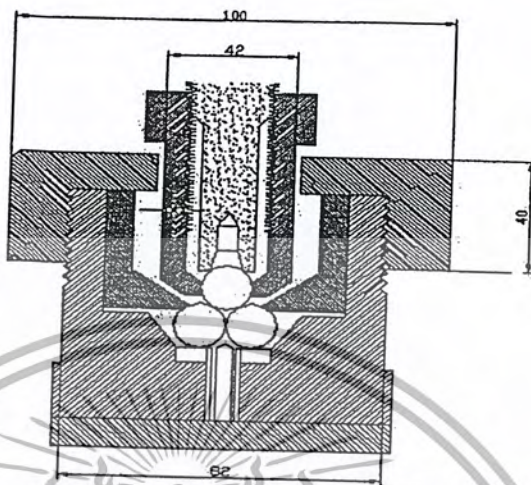
ลูกบอลทางด้านบนที่มีการหมุนใช้อุปกรณ์ยึดจับโดยการบีบยึดที่ผิวของลูกบอลโดยใช้หัวจับแบบเดียวกับที่ใช้ยึดจับดอกสว่าน ลูกบอลในระนาบสามลูกทางด้านล่างการจับยึดอยู่ในระนาบและวางชิดกันโดยบรรจุในภาชนะทรงกลมมีการล็อกให้ไม่เคลื่อนที่โดยมีตัวกดและการใช้สกรูเป็นตัวกดทับไว้อีกที โดยประกอบด้วย

- 1) Ball pot เป็นอ่างรองรับบอลสามลูก และรองรับสารหล่อลื่น
- 2) Ball pot lock ring เป็นตัวประคองให้ลูกบอลอยู่ในระนาบและวางชิดติดกันทั้งสามลูก
- 3) Lock nut ทำให้เกิดการกดลูกบอลให้อยู่กับที่ไม่เลื่อนไหลไปตามลูกบอลที่หมุนทางด้านบน การประกอบชุดอุปกรณ์ยึดจับนี้กับลูกบอลสามลูกในระนาบและ การยึดจับลูกบอลที่มีการหมุนทางด้านบนแสดงให้เห็นดัง รูปที่ 5-5 และขนาดแสดงให้เห็นในรูปที่ 5-6



รูปที่ 5-5 การประกอบชุดยึดจับลูกบอลทั้งสี่ลูกและขนาดของอุปกรณ์ยึดจับ

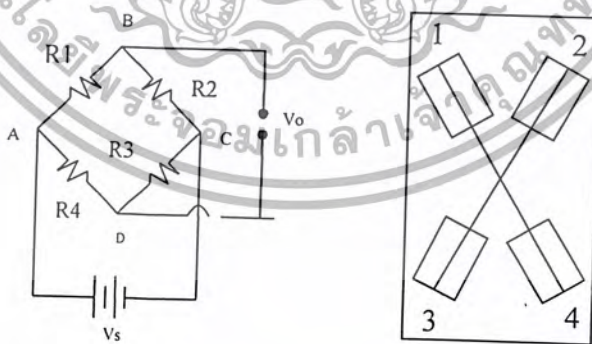
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-6 ขนาดของอุปกรณ์ยึดจับลูกบอลทั้งสี่ลูก

3. การออกแบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การเสียตทาน

ในที่นี้เราต้องการหาค่าสัมประสิทธิ์การเสียตทานของสารหล่อลื่น เนื่องจากลูกบอลด้านบนมีการหมุน แรงบิดที่เกิดขึ้นสามารถนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การเสียตทานได้ การวัดแรงบิดที่เกิดขึ้นใช้การวัดแรงบิดโดยใช้ strain gage ติดที่เพลลาที่มีแรงบิดเกิดขึ้นตามลักษณะของการหาค่าแรงบิด ซึ่งใช้ strain gage สี่ตัว ติดวางทำมุมระหว่างกัน 45 องศาบนเพลลา และต่อเป็นวงจรไฟฟ้าเป็นแบบ Wheatstone Bridge แสดงดังรูปที่ 5-7 จ่ายกระแสไฟฟ้าเป็น Input 10 Volt และวัดค่า Output ออกมาเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่มีหน่วยเป็น มิลลิโวลต์



เพลลาติด

Strain gage

$V_s = \text{Input (V = 10 Volt)}$

$V_o = \text{Output(V, milli volt)}$

รูปที่ 5-7 Wheatstone Bridge circuit และการติด Strain gage

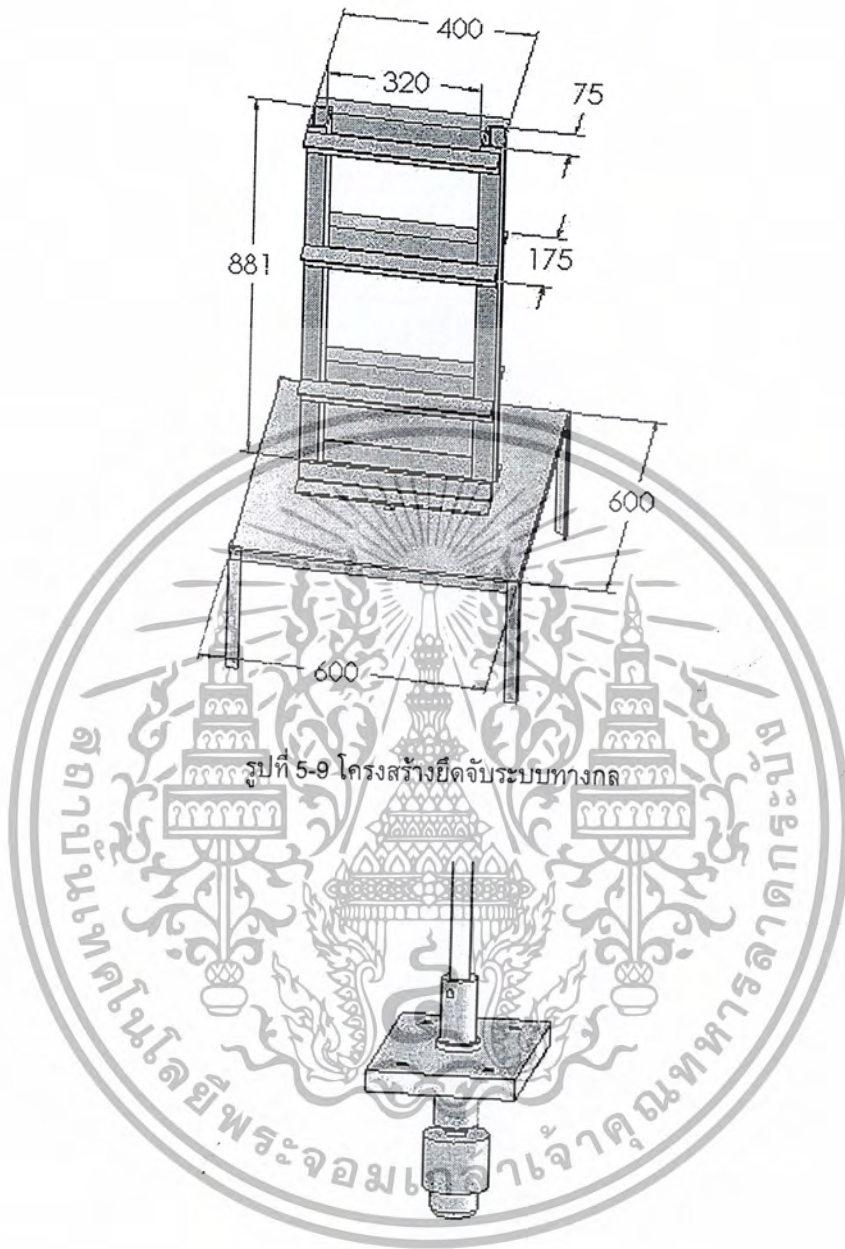
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การออกแบบโครงสร้างยึดจับระบบทางกล

จากระบบทางกลจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ต่างๆ อยู่ในระนาบหลายระนาบ ซ้อนกันเป็นชั้นๆ จึงออกแบบโครงสร้างให้เป็นเสาและคานรองรับ โดยใช้เหล็กรูปตัว C เป็นเสารองรับ มี 2 เสา เพื่อเป็นที่ยึดของเหล็กฉากที่ใช้รองรับอุปกรณ์ที่อยู่ในแต่ละระนาบ แสดงดังรูป 5-8 การยึดโครงสร้างและอุปกรณ์ต่างๆ ใช้สลักและน็อตเพื่อความสะดวกในการซ่อมแซม ไม่เกิดการโก่งตัวเนื่องจากการเชื่อม และความสะดวกในการปรับระยะต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5-9 และในการส่งแรงจากมอเตอร์ไปหมุนลูกบอลทางด้านบนซึ่งผ่านเพลลาที่ใช้วัดหาค่าแรงบิดจำเป็นต้องมีแบร์ริงรองรับเป็นแบบรับแรงแนวแกนหมุน เพื่อไม่ให้เกิดการส่งผ่านแรงกดที่เกิดจากการใช้ Load ดันให้เกิดการกดทับที่ผิวสัมผัสลูกบอล แสดงดังรูปที่ 5-10 และแบบที่เสร็จสมบูรณ์แสดงดังรูป 5-11



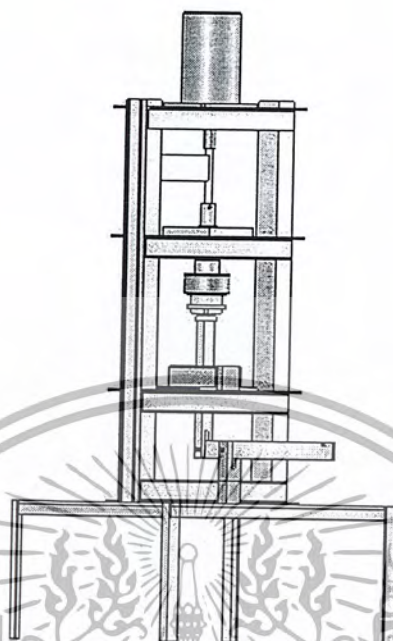
รูปที่ 5-8 การรองรับอุปกรณ์ทางกลบนระนาบต่างๆ ด้วยเหล็กรูปตัว C



รูปที่ 5-9 โครงสร้างยึดจับระบบทางกล

รูปที่ 5-10 แบร์ริงรองรับป้องกันการส่งแรงกดไปสู่เพลาวัดแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-11 แบบโครงสร้างทางกลของเครื่อง Four ball wear test machine

5.1.3 การออกแบบระบบควบคุม

1. การออกแบบชุดควบคุมเวลา

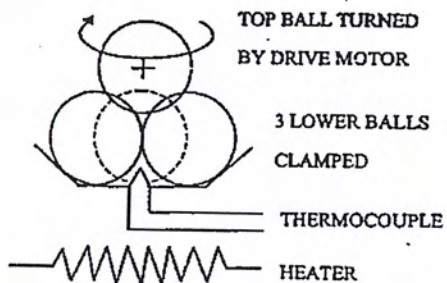
การควบคุมเวลาใช้ควบคุมเวลาที่ลูกบอลด้านบอลหมุนเวลาที่หมุนจะมีผลต่อเนื้อโลหะที่หลุดออกมาจากการเสียดสีและรอยที่เกิดการสึกหรอ การควบคุมเวลาใช้ ทามเมอร์ควบคุม

2. การออกแบบชุดควบคุมความเร็วของการหมุนลูกบอล

ใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมการจ่ายกระแสไฟให้มอเตอร์โดยการป้อนอินพุตให้อินเวอร์เตอร์ใช้การป้อนในหน่วยเฮิร์ตทำให้ทราบความถี่ของการหมุนของลูกบอลทางด้านบน

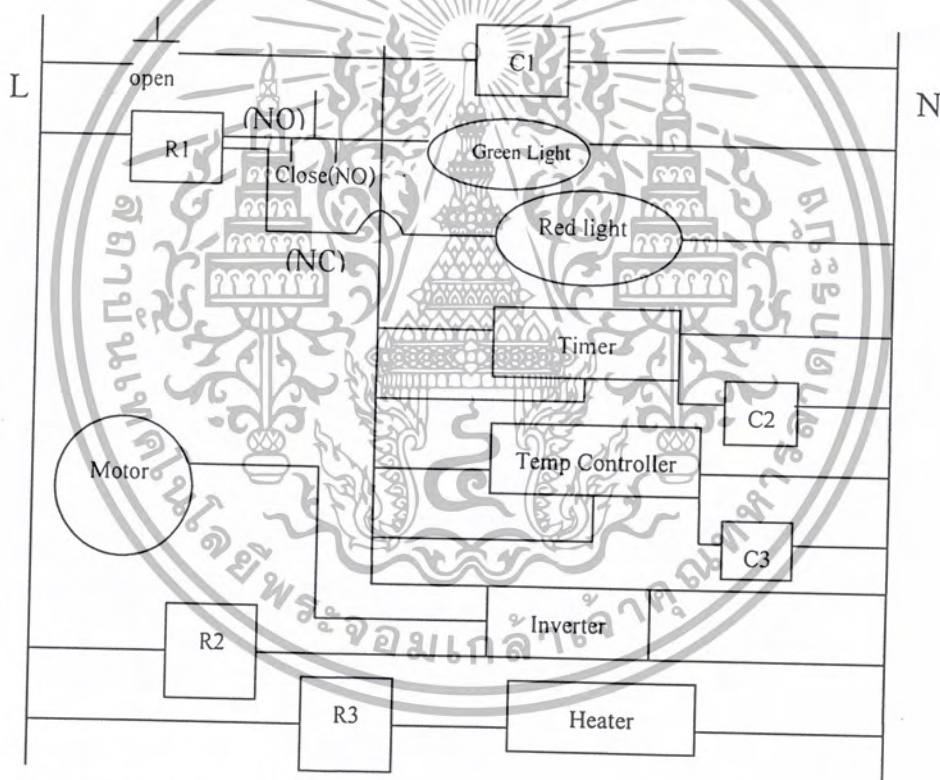
3. การออกแบบชุดควบคุมอุณหภูมิ

ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆจะมีผลต่อการหล่อลื่นของสารหล่อลื่น การควบคุมอุณหภูมิจะทำให้สามารถควบคุมปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการหล่อลื่นได้ โดยการใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งจะมี Thermo Couple วัดอุณหภูมิรับ สัญญาณป้อนเข้าสู่ตัวควบคุมอุณหภูมิซึ่งควบคุมการจ่ายไฟให้ Heater สำหรับให้ความร้อนอีกทีให้ได้ตามอุณหภูมิที่ได้ตั้งไว้ แสดงดังรูปที่ 5-12



รูปที่ 5-12 แสดงตำแหน่งของ Four-ball การติดตั้ง Thermocouple และ Heater

4. การออกแบบชุดแผงควบคุมรวมวงจรไฟฟ้ารวม แสดงดังรูป 5-13



C1=coil 1, R1=contact 1
 C2=coil 2, R2=contact 2
 C3=coil 3, R3=contact 3

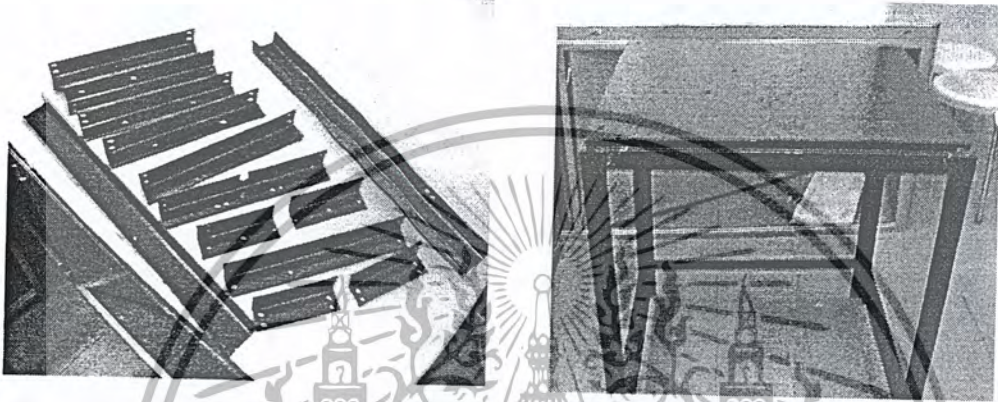
รูปที่ 5-13 วงจรไฟฟ้าควบคุมสถานะควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การสร้างเครื่องทดสอบ

5.2.1 การสร้างโครงสร้างยึดจับทางกล

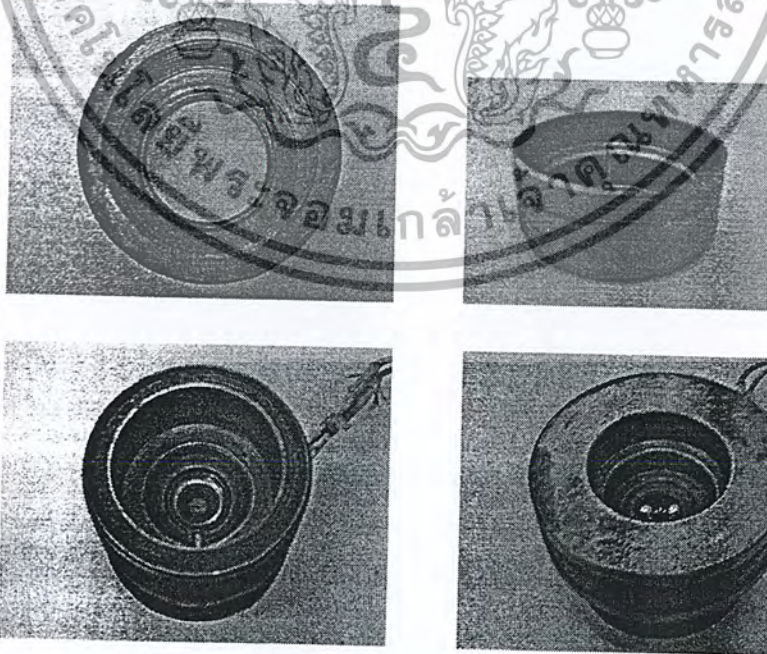
ใช้เหล็กรูปตัว C และเหล็กฉากตัดและเจาะรูสำหรับยึดตามที่ได้ออกแบบไว้ และสร้างโต๊ะสำหรับเป็นฐานตั้งเครื่อง ดังรูปที่ 5-14



รูปที่ 5-14 โต๊ะที่เป็นฐานรองรับและเหล็กรูปตัว C และเหล็กฉากที่เป็นโครงสร้างสำหรับยึดอุปกรณ์

5.2.2 การสร้างอุปกรณ์ยึดจับบอลและการหล่อขึ้น

สร้างอุปกรณ์สำหรับยึดบอลโดยใช้เหล็ก กลึงตามแบบที่ได้ออกแบบ ดังรูปที่ 5-15

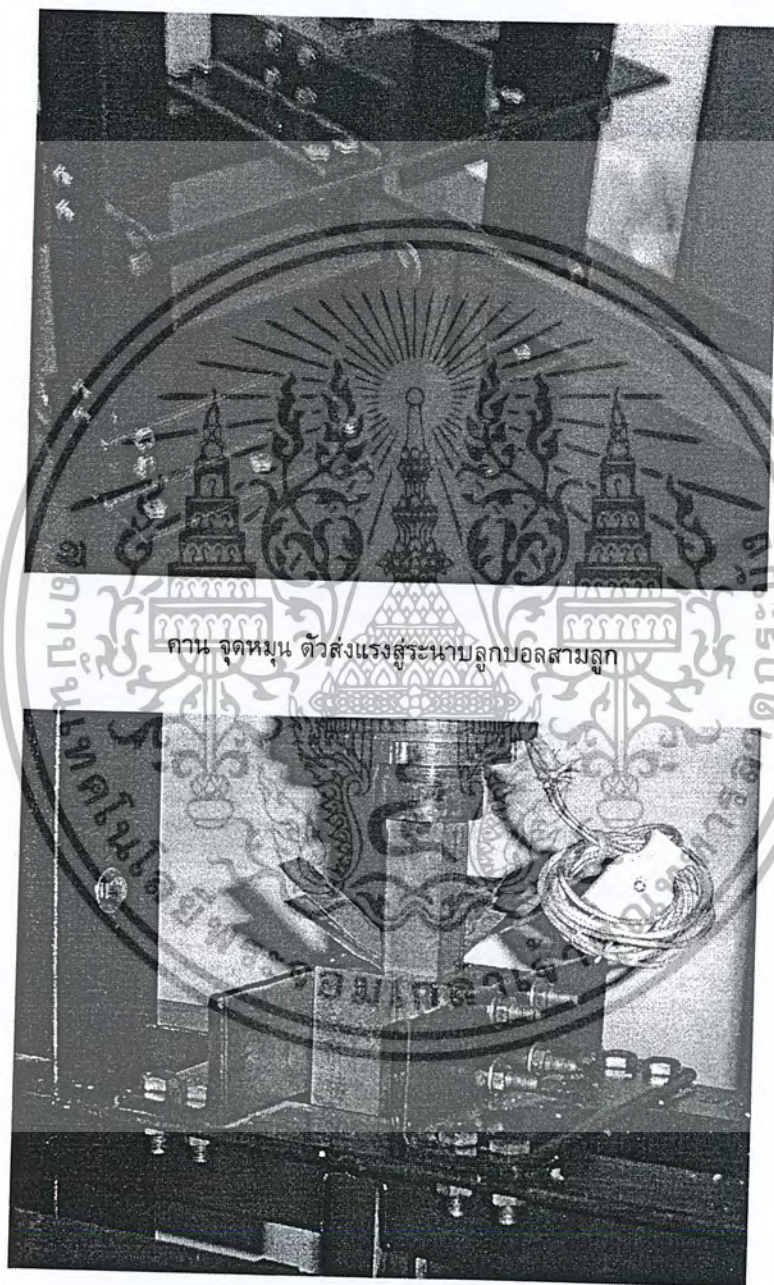


รูปที่ 5-15 อุปกรณ์ยึดจับลูกบอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

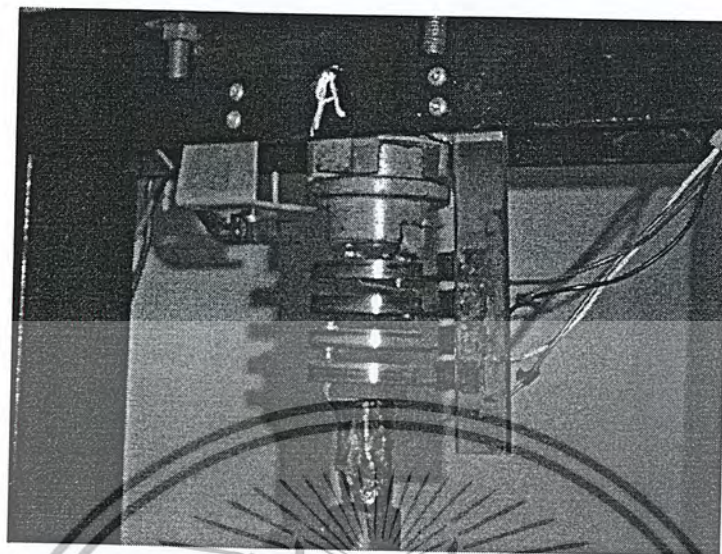
5.2.3 การสร้างระบบกลไกส่งถ่ายแรงต่าง ๆ

สร้างคาน จุดหมุน ตัวส่งแรงสู่ระนาบลูกบอลสามลูก ปลอกบังคับตัวส่งแรง เฟลาที่จะใช้หาค่าแรงบิด และแบร์ริงรองรับแรงกดที่ลูกบอลเหล็กหมุนทางด้านบน ดังรูปที่ 5-16



ปลอกบังคับการเคลื่อนที่ของตัวส่งแรงและตัวส่งแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เพลาดัด Strain gage สำหรับหาค่าแรงบิด



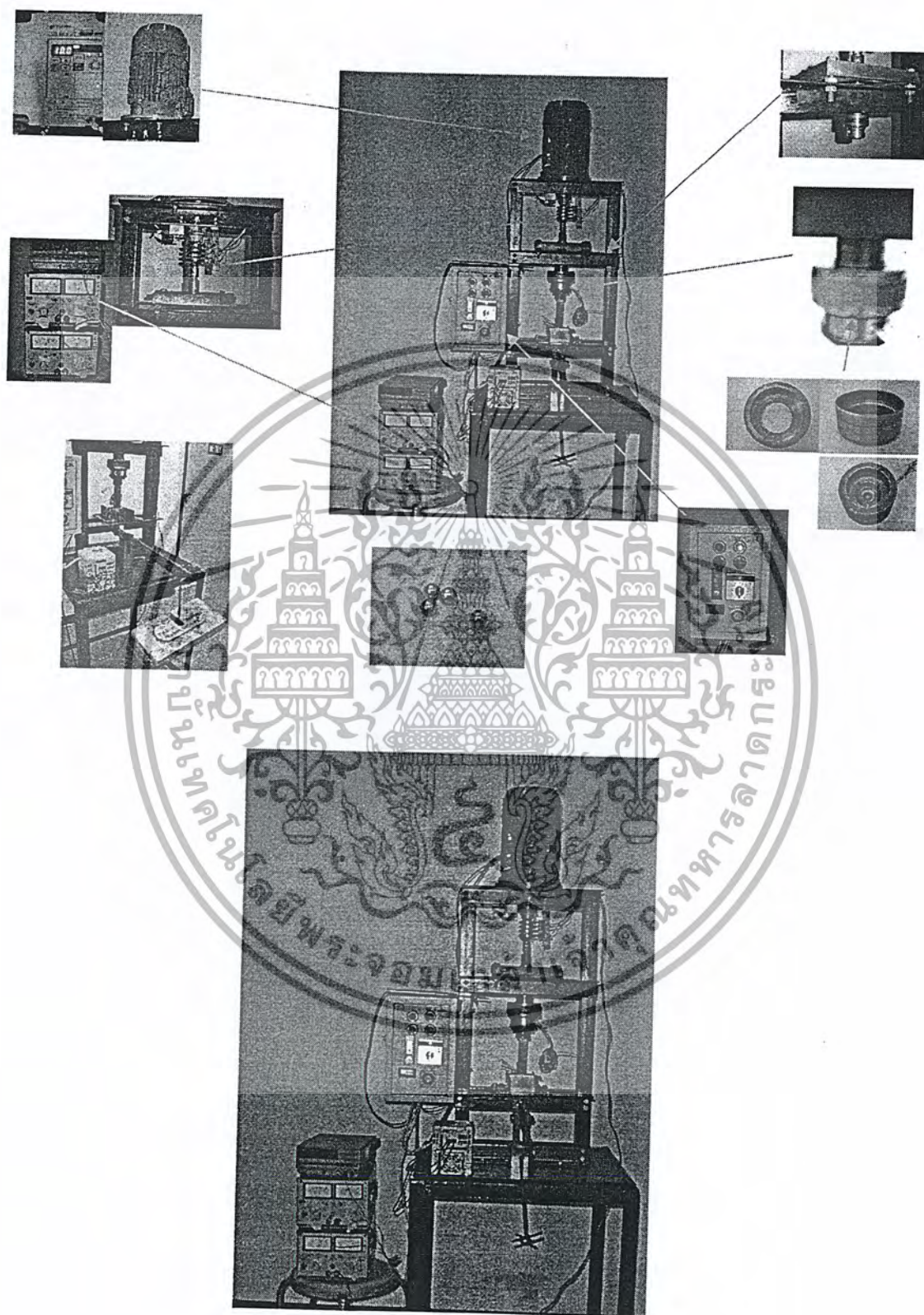
แบร์ริงรองรับแรงกดที่ลูกบอลเหล็กทางด้านบนมีการหมุน

รูปที่ 5-16 คาน จุดหมุน ตัวส่งแรงสู่ระนาบลูกบอลสามลูก เพลาที่จะใช้หาค่าแรงบิด และแบร์ริงรองรับแรงกดที่ลูกบอลเหล็กหมุนทางด้านบน

5.2.4 การประกอบชุดควบคุม

การประกอบชุดควบคุมสถานะและวงจรไฟฟ้าทั้งหมด และประกอบเข้าเป็นเครื่อง Four ball wear test machine ดังรูปที่ 5-17สถานะและวงจรไฟฟ้าทั้งหมด และประกอบเข้าเป็นเครื่อง Four ball wear test machine ดังรูปที่ 5-17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-17 เครื่อง Four ball wear test machine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.5 การ Calibrate หาค่าแรงบิด

การ Calibrate หาค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นบนเพลาวัดแรงบิด และการคำนวณสัมประสิทธิ์การเสียดทาน การ Calibrate ทำโดยการใช้ น้ำหนักและคานแขวนที่ปลายอีกด้านหนึ่งของเพลที่ใช้วัดค่าแรงบิด ทำการ ถ่วงน้ำหนัก ที่ระยะต่างๆ ของคาน คำนวณหาค่าแรงบิดซึ่งเท่ากับผลคูณของแรงและระยะถ่วงจากจุดหมุน เปรียบเทียบกับค่า ความต่างศักย์ที่ได้ และคำนวณหาสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความต่างศักย์ จากวิธี Method of Least Square คือ

$$y = a + bx \quad (5.1)$$

และ

$$ma + b \sum x_i = \sum y_i \quad (5.2)$$

$$a \sum x_i + b \sum x_i^2 = \sum x_i y_i \quad (5.3)$$

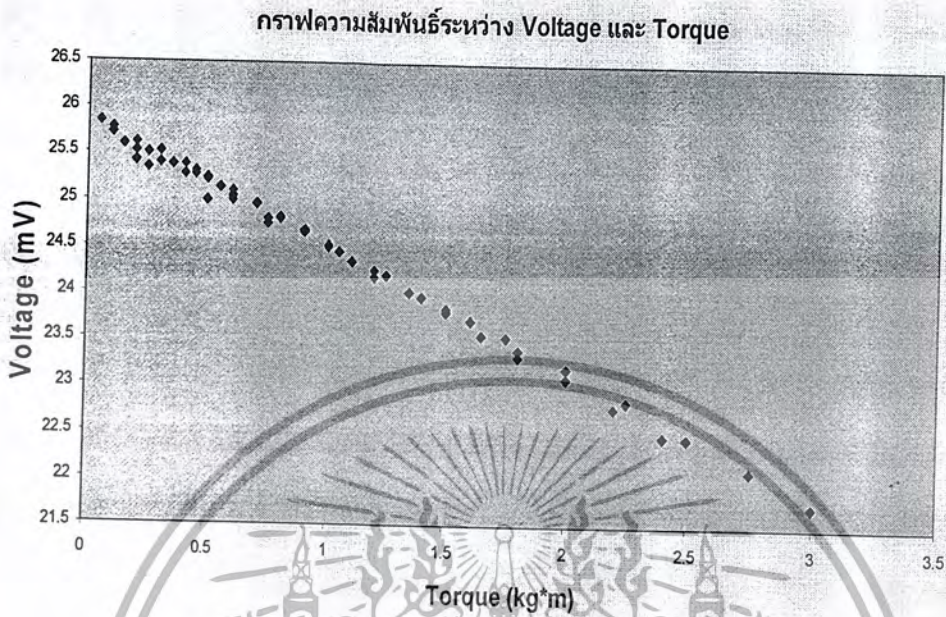
ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดและความต่างศักย์จากการ Calibrate แสดงดังตารางที่ 5-1

น้ำหนัก (kg)	ระยะห่าง (m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.5	ค่า voltage (mV)	25.84	25.72	25.6	25.42	25.35
1		25.77	25.62	25.4	25.27	25
1.5		25.59	25.52	25.28	25	24.75
2		25.52	25.39	25.05	24.8	24.5
2.5		25.5	25.25	24.79	24.52	24.2
3		25.52	25.1	24.67	24.24	23.84
3.5		25.39	24.95	24.45	23.96	23.54
4		25.39	24.82	24.25	23.71	23.21
4.5		25.31	24.66	24.02	23.4	22.84
5		25.22	24.5	23.8	23.1	22.46
5.5		25.14	24.34	23.55	22.78	22.1
6		25.03	24.18	23.32	22.47	21.73

ตารางที่ 5-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดและความต่างศักย์

จะได้กราฟแสดงค่า Voltage ที่ Torque ค่าต่างๆ ดังรูปที่ 5-18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Voltage และ Torque

จากข้อมูลในตารางที่ 5-1 นำไปคำนวณในสมการ (5.2) และสมการ (5.3) โดย x คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และ y คือ ค่าแรงบิด ได้ดังตารางที่ 5-2

	x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
Σ	1471.64	58.5	36156.08	1390.636

ตารางที่ 5-2 ตารางค่าที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ a และ b

ได้สมการ

$$60a + 1471.64b = 58.5 \tag{5.4}$$

และ

$$1471.64a + 36156.08b = 1390.636 \tag{5.5}$$

ได้ค่าคงที่ a และ b ดังนี้ $a = 18.84766401$ และ $b = -0.7286835374$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดและความต่างศักย์ได้ดังสมการที่ 5-3 คือ

$$y = 18.84766401 - 0.7286835374x \tag{5.6}$$

โดย x คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) และ y คือ ค่าแรงบิด (T)

ดังนั้นสมการ จะได้เป็น

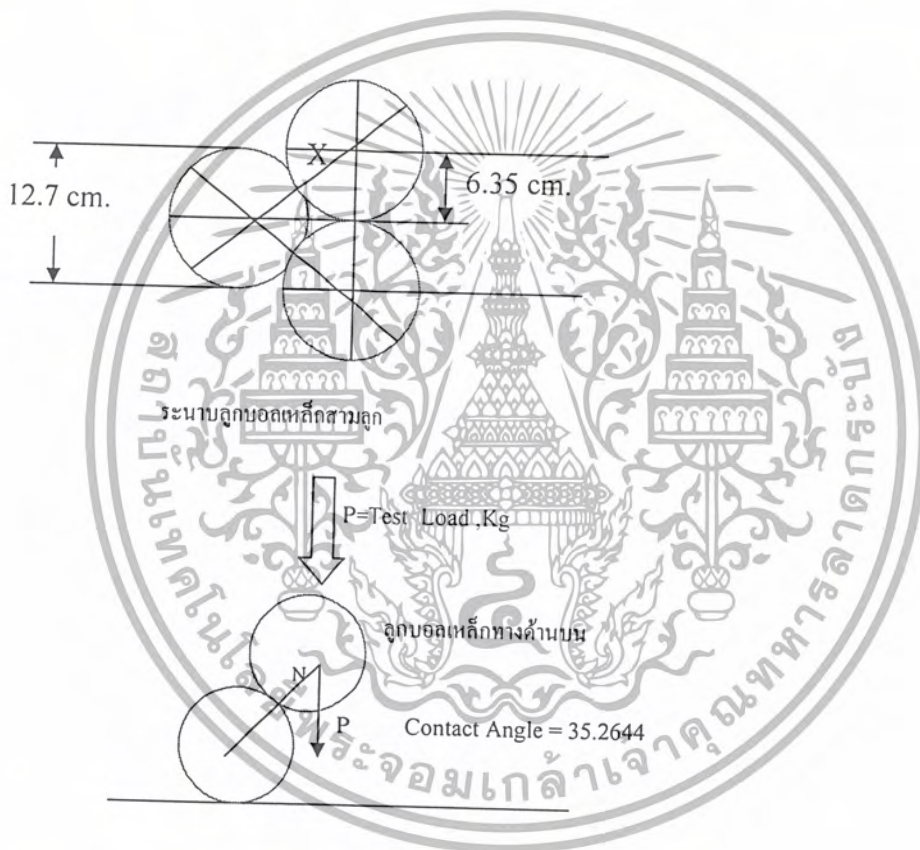
$$T = 18.84766401 - 0.7286835374V$$

$$T = \text{Torque}(kg * m)$$

$$V = \text{Voltage}(mV)$$

(5.7)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานหาได้จากการคำนวณทางเรขาคณิตของการจัดวางและการกระทำระหว่างระนาบลูกบอลเหล็กสามลูกและลูกบอลที่มีการหมุนทางด้านบนได้จากรูปจำลองทางเรขาคณิต แสดงดัง รูปที่ 5-19



รูปที่ 5-19 รูปจำลองทางเรขาคณิตของ Four ball

จากรูป

$$x = \frac{6.35}{\cos 30} = 0.73324 \times 10^{-2}$$

$$\text{Friction Radius} = \frac{1}{2}x = 0.36662 \times 10^{-2}$$

$$P = \cos(35.2644)N = 0.8164965$$

$$N = 1.224745P$$

$$T = fNL = f(1.22475P) \times 0.36662 \times 10^{-2} = 0.44902 \times 10^{-2} fP$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้สมการ

$$f = 2.222707 \times 10^{-2} \frac{T \left(\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{kg}} \right)}{P} \quad (8.8)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การทดลอง

การทดลองในที่นี้จะทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การเสียดทานที่เกิดขึ้น กับสภาวะแรงกดต่างๆ ความเร็วรอบของการหมุนต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างสารหล่อลื่นหลายๆชนิด และทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ได้แก่

1. น้ำมันหล่อลื่น SAE40
2. น้ำมันหล่อลื่น SAE90
3. น้ำมันหล่อลื่น SAE40 ผสมน้ำมันปาล์ม 5%
4. น้ำมันหล่อลื่น SAE90 ผสมน้ำมันปาล์ม 5%
5. ไม่มีสารหล่อลื่น

6.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูก
2. น้ำมันหล่อลื่น ได้แก่
 - 2.1 น้ำมันหล่อลื่น SAE40
 - 2.2 น้ำมันหล่อลื่น SAE90
 - 2.3 น้ำมันปาล์ม
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก

6.2 วิธีการทดลอง

6.2.1 ทำการผสมสารหล่อลื่นที่มีน้ำมันปาล์ม 5% ได้แก่ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 ผสมน้ำมันปาล์ม 5%, น้ำมันหล่อลื่น SAE90 ผสมน้ำมันปาล์ม 5% โดยใช้น้ำหนักน้ำมันหล่อลื่น 290 กรัม ผสมกับน้ำมันปาล์ม 10 กรัม ดังรูปที่

6.2.2 ติดตั้งลูกบอลเหล็กเข้ากับเครื่องมือทดสอบ ทั้งสี่ลูก ดังรูปที่ 6-1





รูปที่ 6-1 ติดตั้งลูกบอลเหล็กเข้ากับเครื่องมือทดสอบ

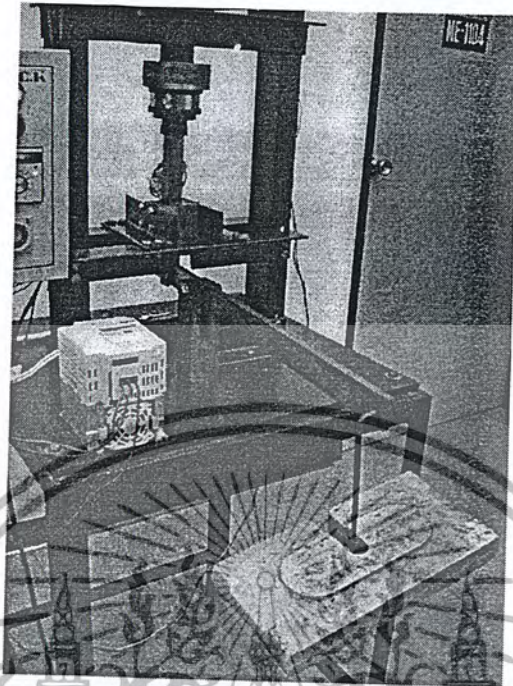
6.2.3 เหน้มนทดสอบชนิดที่หนึ่งลงในอุปกรณ์ยึดจับลูกบอลทางด้านล่าง ดังรูปที่ 6-2



รูปที่ 6-2 เหน้มนทดสอบชนิดที่หนึ่ง

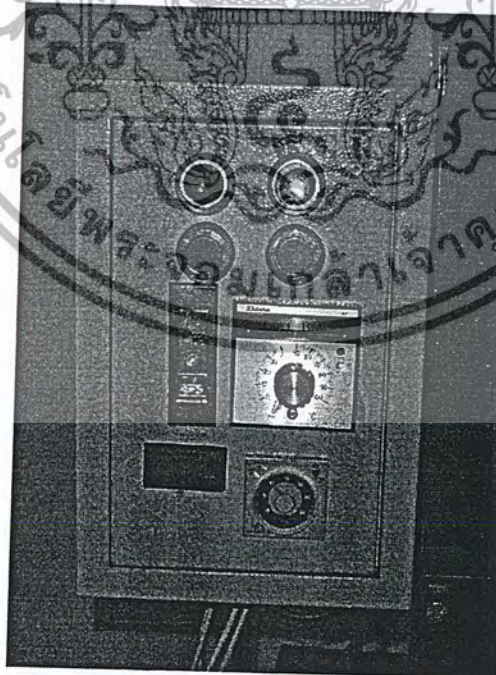
6.2.4 แวนดุ่มน้ำหนักที่ใช้สำหรับสร้างสภาวะแรงกด ดังรูปที่ 6-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-3 แขนงัดน้ำหนัก

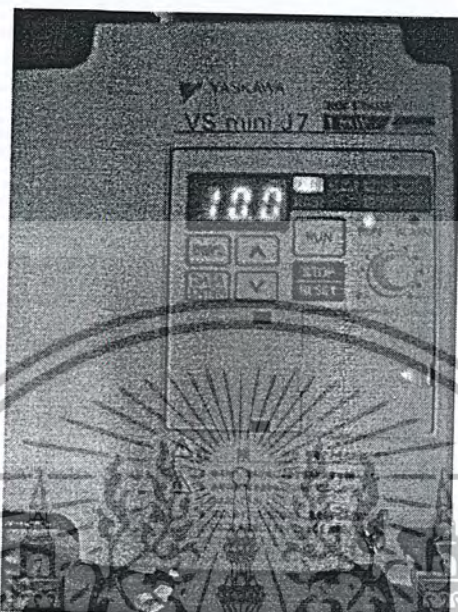
6.2.5 ปรับตู้ควบคุมให้ไม่ใช้การควบคุมอุณหภูมิคือทำการทดลองที่อุณหภูมิ ห้อง ดังรูปที่ 6-4



รูปที่ 6-4 ปรับตู้ควบคุม

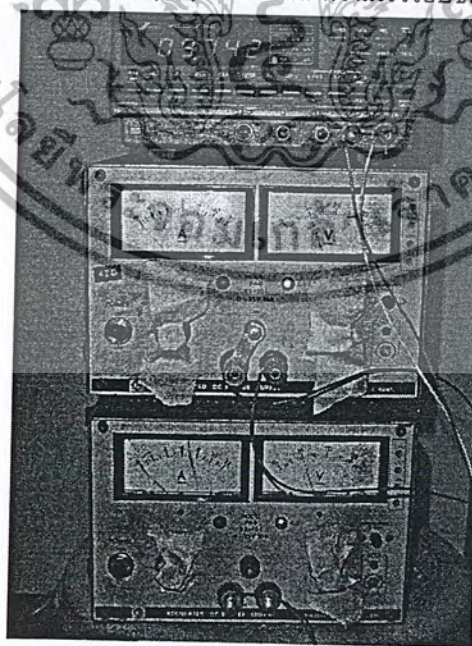
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.6 ปรับค่าความเร็วของการหมุน แล้วจึงกด Run ให้มอเตอร์ทำงาน ดังรูปที่ 6-5



รูปที่ 6-5 ปรับค่าความเร็วของการหมุน

6.2.7 บันทึกค่า Output ที่ออกมาจากชุด Strain gage ซึ่งวัดออกมาเป็นกระแสไฟฟ้า (mA) ทำการทดลองที่สภาวะ การแขวนตุ้มน้ำหนักขนาด 10, 12, 14, 16, 18 กิโลกรัม ความเร็วรอบของการหมุน 10, 15, 20 Hz



รูปที่ 6-6 บันทึกค่า Output

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.8 ทำการทดลองกับสารหล่อลื่นชนิดอื่นและแบบไม่มีน้ำมันหล่อลื่น ในสภาวะเดียวกัน โดยการเปลี่ยนลูกบอลโลหะชุดใหม่เข้าไป ต้องทำความสะอาดอุปกรณ์ยึดจับลูกบอลโดยใช้น้ำมันเบนซินเป็นสารทำความสะอาด

6.3 ผลการทดลอง

จากการทดลอง เนื่องจากอัตราส่วนคาน คือ 1:4 แรงกดที่ระนาบลูกบอลเหล็กจึงเป็น 4 เท่าของคัม น้ำหนักที่ถ่วงแขวน ดัง ตารางที่ 6-1 และความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะแรงกดที่ระนาบลูกบอลเหล็กสามลูก กับ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ สภาวะความเร็วการหมุนของลูกบอลด้านบน 10,15,20 Hz ได้ดังได้ดังตาราง 6-1

คัมน้ำหนักถ่วง (kg)	แรงกดที่ระนาบลูกบอล (kg)
10	40
12	48
14	56
16	64
18	72

ตารางที่ 6-1 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะแรงกดที่ระนาบลูกบอลเหล็กกับคัมน้ำหนัก

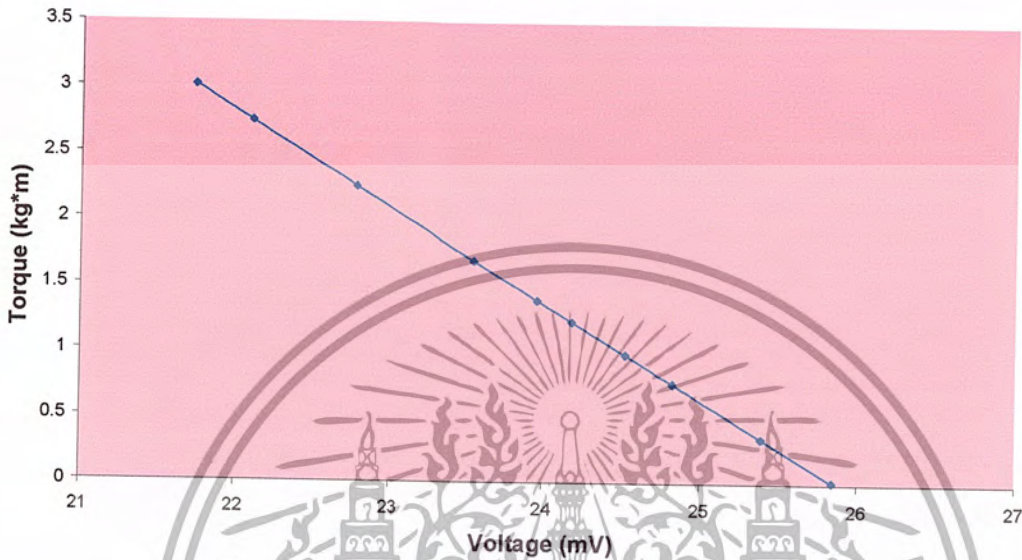
น้ำหนัก (kg)	ระยะห่าง (m)	ค่า voltage (mV)				
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.5		20.84	20.72	20.6	20.42	20.35
1		20.77	20.62	20.4	20.27	20
1.5		20.59	20.52	20.28	20	19.75
2		20.52	20.39	20.05	19.8	19.5
2.5		20.5	20.25	19.79	19.52	19.2
3		20.52	20.1	19.67	19.24	18.84
3.5		20.39	19.95	19.45	18.96	18.54
4		20.39	19.82	19.25	18.71	18.21
4.5		20.31	19.66	19.02	18.4	17.84
5		20.22	19.5	18.8	18.1	17.46
5.5		20.14	19.34	18.55	17.78	17.1
6		20.03	19.18	18.32	17.47	16.73

ตารางที่ 6-2 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะแรงกดที่ระนาบลูกบอลเหล็กสามลูก กับความต่างศักย์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ได้จากการ Calibrate คือ สมการ (5.7) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะทดลองต่างๆ กับค่าแรงบิด ดัง ตารางที่ 6-2 ถึงตารางที่ 6-25

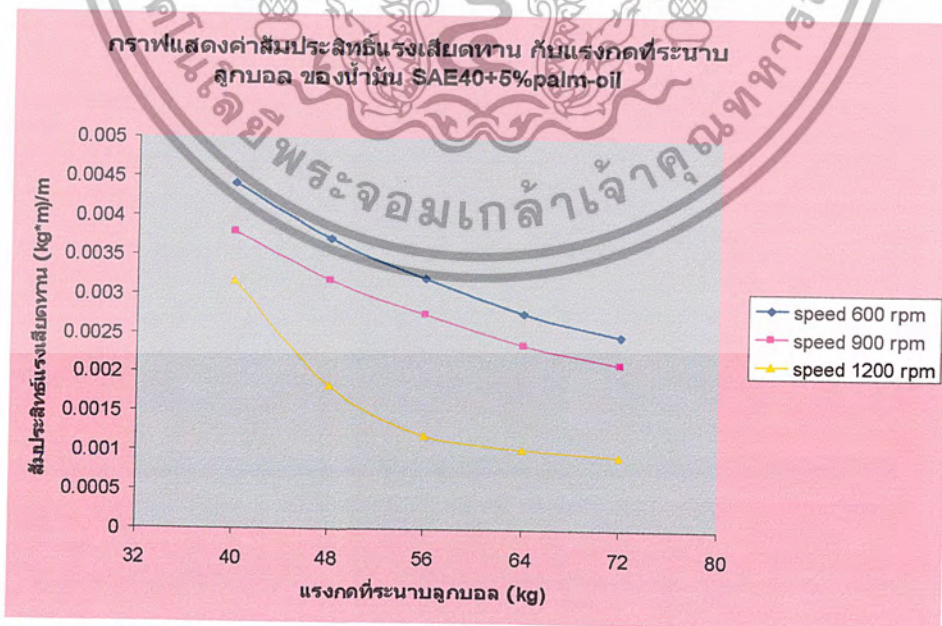
กราฟแสดงค่าการ calibrate ของ stain-gage



รูปที่ 6-7 กราฟแสดงค่าการ Calibrate ของ stain-gage

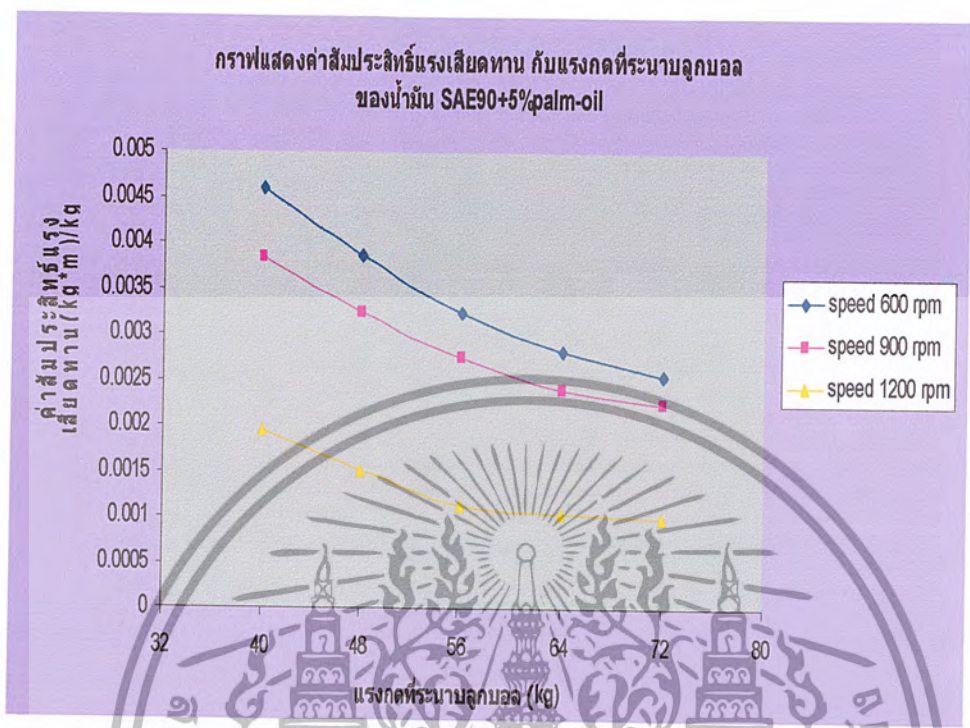
สามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การเสียดทานกับสภาวะทดสอบต่างๆ ได้จากการคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และสภาวะแรงกดที่ระนาบลูกบอลเหล็กสามลูก จากสมการ (5.7) ที่ความเร็วการหมุนของลูกบอลด้านบนต่างๆ ได้ความสัมพันธ์ดังกราฟด้านล่าง

กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน กับแรงกดที่ระนาบลูกบอล ของน้ำมัน SAE40+5%palm-oil

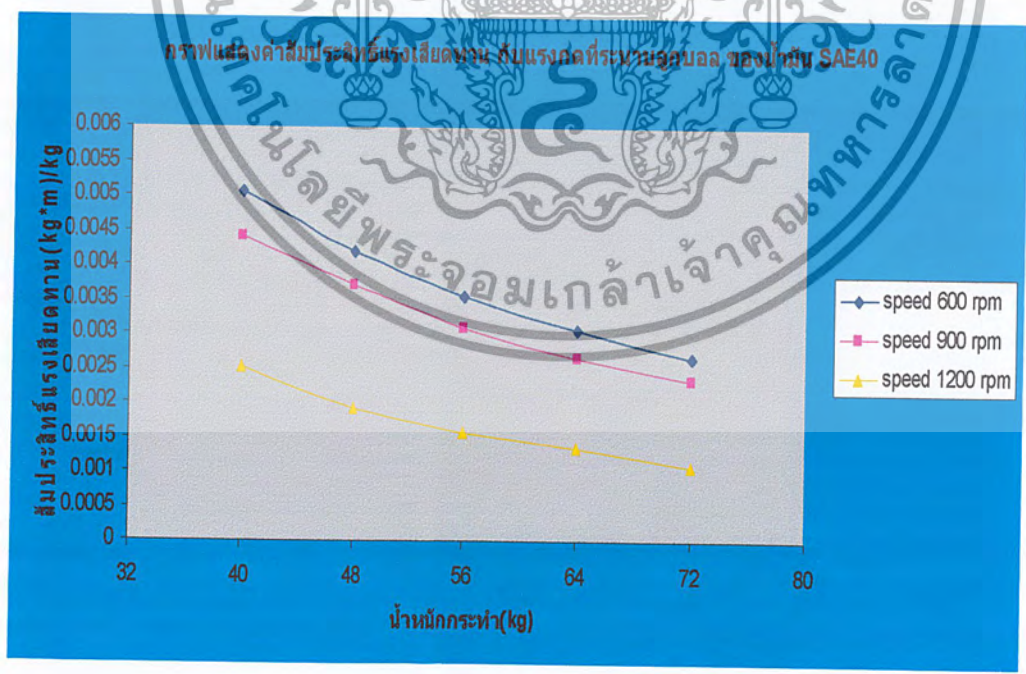


รูปที่ 6-8 กราฟความสัมพันธ์แรงเสียดทานกับแรงกดที่ระนาบลูกบอลของน้ำมัน SAE40+5% palm oil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

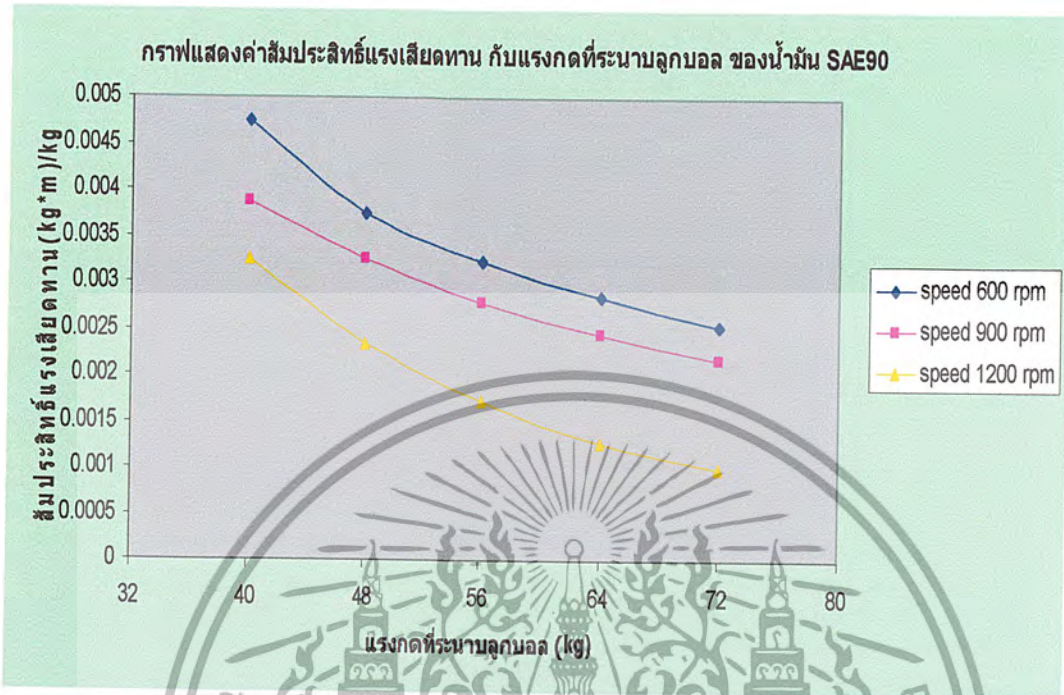


รูปที่ 6-9 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับแรงกตที่ระนาบลูกบอล ของน้ำมันSAE90+5% palm oil

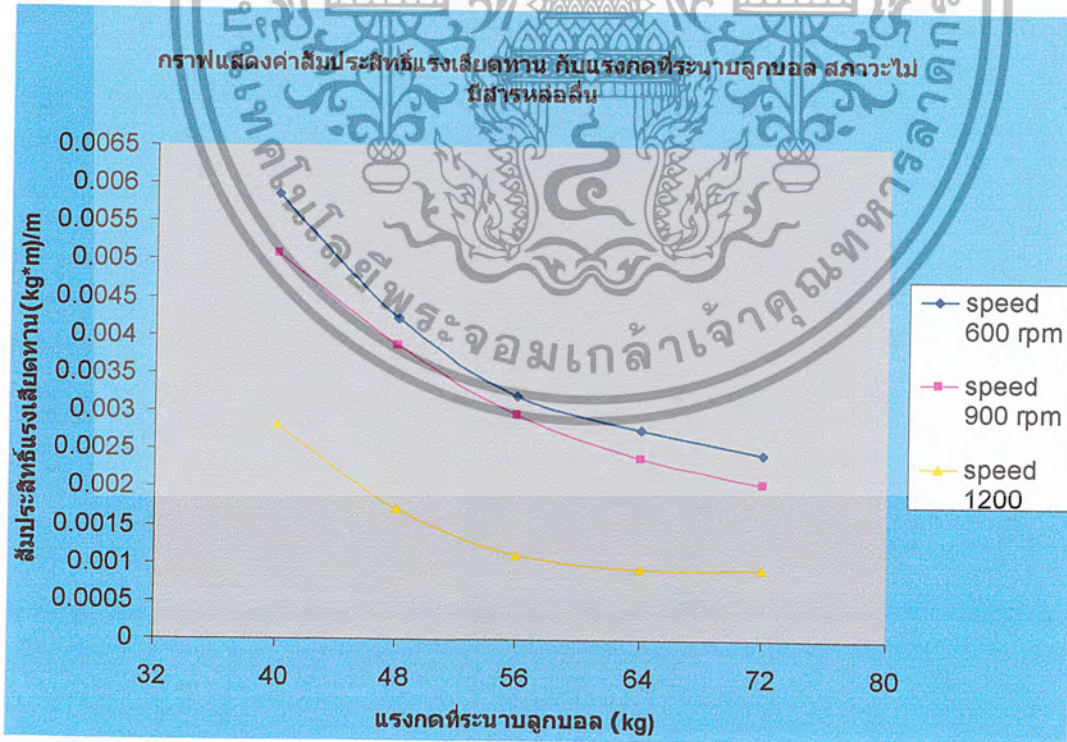


รูปที่ 6-10 กราฟสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของน้ำมัน SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



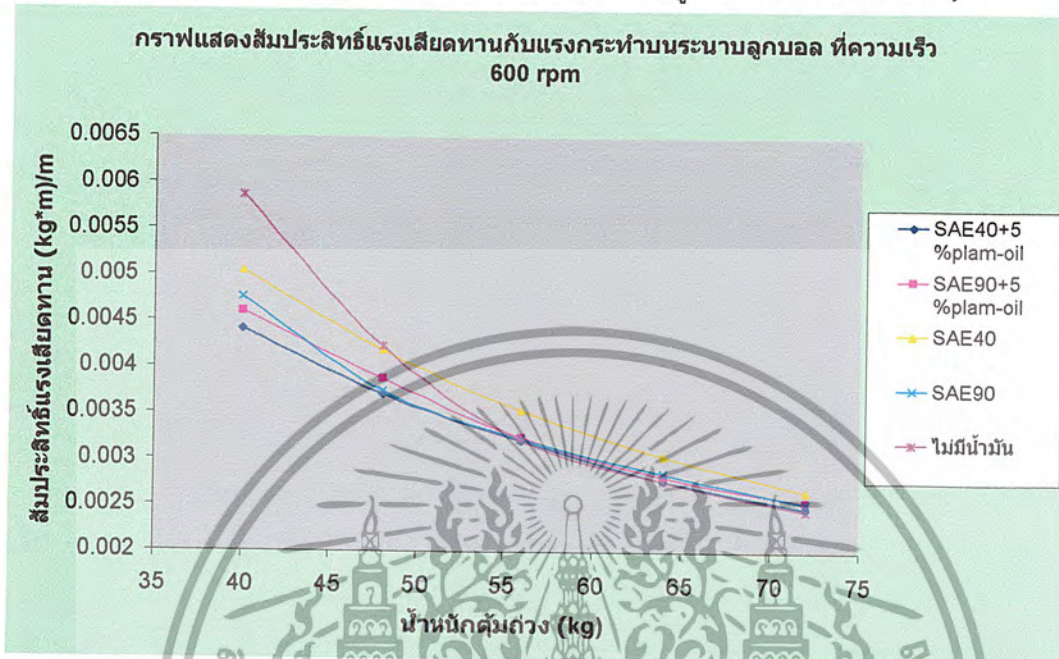
รูปที่ 6-11 กราฟสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของน้ำมัน SAE90



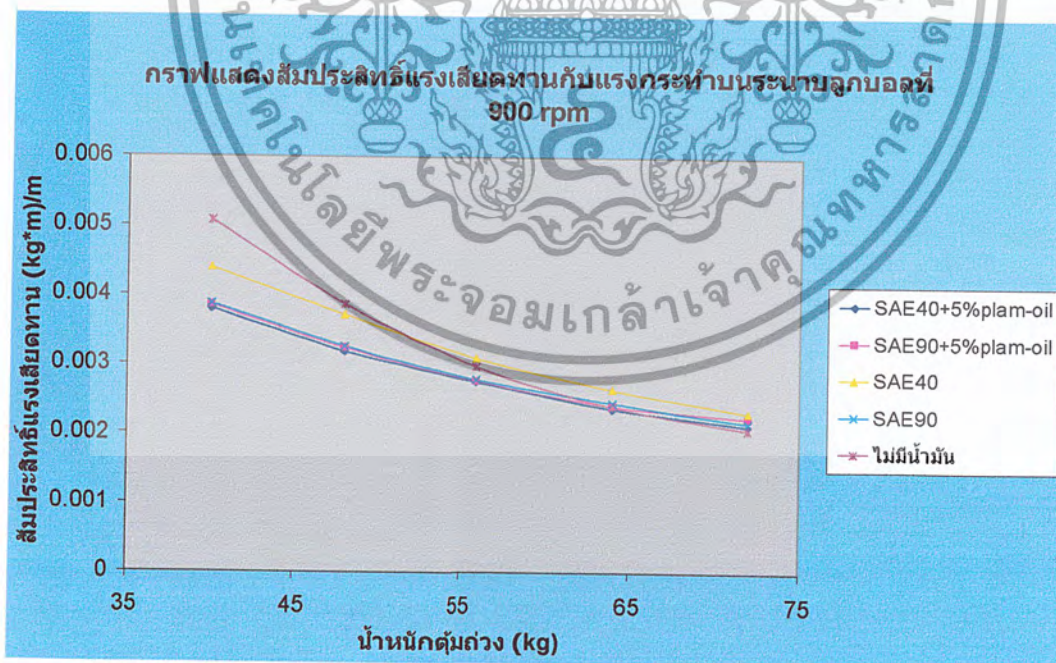
รูปที่ 6-12 กราฟสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับแรงกดที่ระนาบลูกบอล แบบไม่มีการหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับแรงกระทำบนระนาบลูกบอล ของน้ำมันชนิดต่างๆ

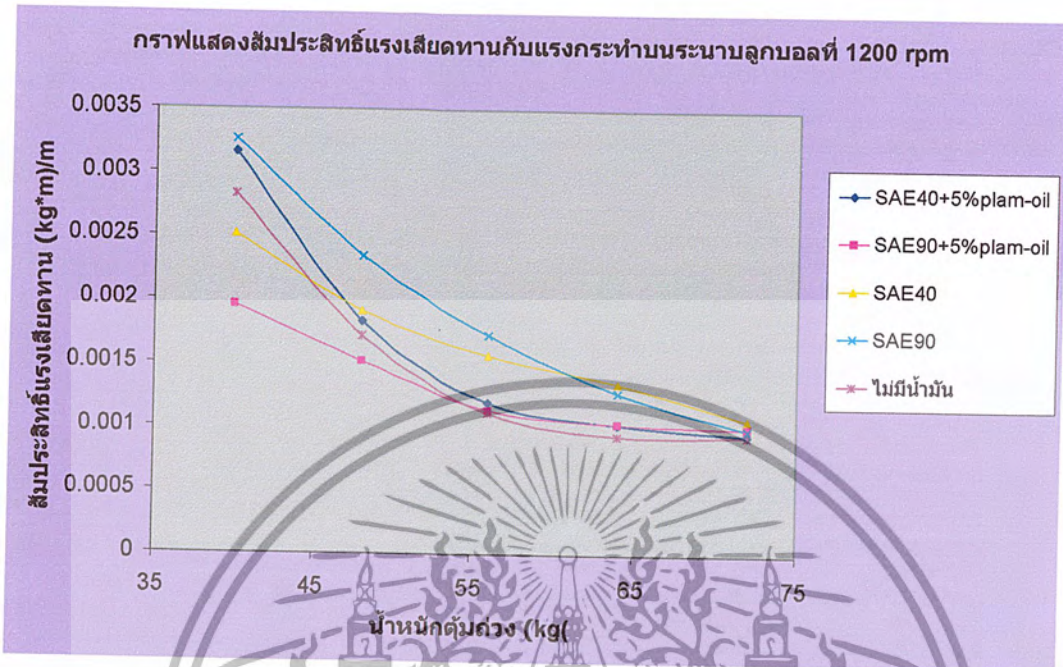


รูปที่ 6-13 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับแรงกระทำบนระนาบลูกบอล ที่ความเร็ว 600 rpm



รูปที่ 6-14 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับแรงกระทำบนระนาบลูกบอล ที่ความเร็ว 900 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-15 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับแรงกระทำบนระนาบลูกบอล ที่ความเร็ว 1200 rpm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

บทวิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

7.1 ผลที่ได้จากโครงการ

- ทฤษฎี หลักการและความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการหล่อลื่นและการสึกหรอ
- แนวความรู้เชิงเทคนิคในการพัฒนาหลักการการทำงานของเครื่องทดสอบ Four ball wear test machine และการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
- ผลการทดลองที่เป็นแนวโน้มในการหาตัวอย่างของสารหล่อลื่นที่เหมาะสมกับเครื่องจักรชนิดต่างๆ
- การนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาความสามารถในการป้องกันการสึกหรอของสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ

7.2 ข้อจำกัดของเครื่อง Four ball wear test machine

- เนื่องจากการหาค่าแรงบิดโดยวิธีการสร้างชุดเพลวูดแรงบิดที่ให้ค่าออกมาเป็นความต่างศักย์ ค่าที่ได้ยังไม่เพียงพอ ทำให้จำเป็นต้องหาค่าเฉลี่ยในการทดลองจำนวนครั้งที่ยาวนาน

7.3 สรุปผลการทดลอง

1. สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อแรงกดที่ระนาบลูกบอลมีค่าเพิ่มขึ้น
2. ที่สภาวะแรงกดที่ระนาบลูกบอลเท่ากัน
 - ในแต่ละความเร็วรอบของลูกบอลเหล็กที่หมุน ที่ความเร็วต่ำจะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าสูงกว่าที่ความเร็วของการหมุนสูงเนื่องจากการเกิดฟิล์มหล่อลื่นที่ความเร็วสูงจะมีค่ามากกว่า ในทุกชนิดสารหล่อลื่นที่ใช้ทดสอบ คือ น้ำมันหล่อลื่น SAE40, น้ำมันหล่อลื่น SAE90, น้ำมันหล่อลื่น SAE40 ผสมน้ำมันปาล์ม 5%, น้ำมันหล่อลื่น SAE90 ผสมน้ำมันปาล์ม 5%
3. ที่ความเร็วรอบการหมุนเท่ากันและสภาวะแรงกดเท่ากัน
 - ที่สภาวะแรงกดต่ำ สภาวะที่ไม่มีน้ำมันหล่อลื่นจะมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุด
 - การทดลองที่ใช้สารหล่อลื่นชนิดต่างๆ และไม่มีสารหล่อลื่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสภาวะที่ไม่มีสารหล่อลื่นจะเปลี่ยนแปลงมากที่สุดในแต่ละสภาวะแรงกด
4. ที่รอบต่ำ การเติมน้ำมันปาล์ม 5% ในน้ำมัน SAE40 และ SAE90 จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลง แต่น้ำมัน SAE40 จะเห็นผลชัดเจนกว่า เนื่องจากน้ำมันปาล์มที่ผสมลงไปจะไปทำให้การยึดเกาะของน้ำมันที่ผิวลูกบอลดีขึ้น
5. ที่รอบสูง การเติมน้ำมันปาล์ม 5% ในน้ำมัน SAE90 จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลงชัดเจนกว่า
6. ที่สภาวะแรงกดสูงจะทำให้ไม่มีฟิล์มน้ำมันเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการทดลองที่สารหล่อลื่นแต่ละชนิดมีแนวโน้มที่จะเท่ากัน

ภาคผนวก

ก. ตารางแสดงข้อมูลการทดลองที่สภาวะต่างๆ

น้ำมันหล่อลื่น SAE40 + palm oil 5%		
load 10kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
14.911	16.447	18.257
14.83	16.445	18.177
14.915	16.607	18.077
14.827	16.69	17.869
14.847	16.666	17.927
14.9	16.561	18.034
14.948	16.431	18.112
14.854	16.444	17.967
14.999	16.544	18.094
15.006	16.602	17.891
15.132	16.47	18.011
15.174	16.414	18.304
15.076	16.502	17.901
15.056	16.376	19.014
15.149	16.371	17.778
15.164	16.422	18.099
15.154	16.604	17.899
15.002	16.7	17.884
15.077	16.427	18.2
14.914	16.39	17.942

ตารางที่ ก-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 10 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น SAE40 + palm oil 5%		
load12kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
14.684	16.337	22.447
14.817	16.312	21.79
14.701	16.39	22.034
14.702	16.511	22.244
14.778	16.4	22.697
14.82	16.5	21.876
14.73	16.52	20.603
14.716	16.4	21.419
14.654	16.42	22.225
14.866	16.289	23.77
15.09	16.35	21.876
15.099	16.463	20.5
15.026	16.428	20.401
15.061	16.339	22.617
15.074	16.52	22.625
15.03	16.537	22.988
15.044	16.72	20.832
15.055	16.6	22.05
15.037	16.322	21.276
15.004	16.5	22.252

ตารางที่ ก-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 2 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น SAE40 + palm oil 5%		
load14kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
14.979	16.477	20.543
14.624	16.364	21.756
14.596	16.385	21.963
14.894	16.311	20.93
14.996	16.3	22.263
14.512	16.255	22.224
14.711	16.29	21.987
14.587	16.35	20.859
14.82	16.32	22.23
14.993	16.369	22.087
15.002	16.416	22.64
15.009	16.383	20.59
14.885	16.34	22.399
14.894	16.47	22.542
14.75	16.389	21.556
14.65	16.45	21.624
14.446	16.429	22.224
14.738	16.43	21.909
14.583	16.106	20.032
14.998	16.359	22.314

ตารางที่ ก-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 4 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น SAE40 + palm oil 5%		
load16kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
14.997	16.556	20.224
14.805	16.441	22.1
14.806	16.502	22.14
14.729	16.555	20.897
14.914	16.523	22.34
14.809	16.44	22.153
14.777	16.611	20.202
14.69	16.56	22
14.824	16.473	21.876
15.124	16.544	22.144
15.117	16.618	23.008
14.995	16.58	22.24
14.726	16.552	20.765
15.089	16.402	22.227
15.124	16.499	22.533
15.1	16.567	22.34
15.134	16.511	20.593
14.997	16.536	23.09
14.904	16.58	20.75
15.201	16.551	22.471

ตารางที่ ก-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 16 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น SAE40 + palm oil 5%		
load18kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
14.671	16.633	21.937
14.516	16.407	22.505
14.62	16.409	21.679
15.071	16.458	20.567
15.105	16.38	20.879
14.994	16.376	22.145
14.921	16.394	22.225
14.886	16.469	22.037
14.851	16.509	21.959
14.94	16.569	20.14
14.81	16.577	20.493
14.771	16.443	23.396
14.971	16.52	22.284
14.758	16.411	22.04
15.034	16.382	21.66
15.011	16.511	21.344
14.833	16.404	21.59
14.94	16.453	20.748
14.991	16.53	21.119
14.95	16.432	22.22

ตารางที่ ก-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 18 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น SAE90 + palm oil 5%		
load10kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
14.5	16.444	20.566
14.625	16.313	21.669
14.482	16.605	20.005
14.444	16.355	20.476
14.477	16.505	19.85
14.35	16.404	19.255
14.249	16.211	22.007
14.423	16.4	22.577
14.441	16.519	20.25
14.679	16.33	21.257
14.772	16.305	23.005
14.611	16.4	19.979
14.556	16.441	20.122
14.307	16.222	20.705
14.369	16.211	23.1
14.361	16.447	20.8
14.597	16.27	20.77
14.642	16.5	22.055
14.677	16.44	19.997
14.739	16.23	22.256

ตารางที่ ก-6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 10 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น SAE90 + palm oil 5%		
load12kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
14.51	16.029	22.39
14.358	16.005	20.442
14.27	16.025	21.872
14.333	16.007	22.404
14.5	16.101	20.567
14.147	15.99	19.925
14.525	15.969	19.98
14.361	15.961	22.797
14.49	16.43	21.876
14.403	16.004	20.416
14.556	15.924	20.699
14.184	15.914	21.116
14.42	15.893	20.763
14.5	15.955	21.817
14.334	15.899	22.21
14.612	15.781	21.765
14.285	16.032	20.409
14.471	15.904	20.995
14.49	16.002	23.096
14.311	15.997	22.094

ตารางที่ ก-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 12 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น SAE90 + palm oil 5%		
load 14 kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
14.604	16.19	22.706
14.502	16.207	22.015
14.67	16.227	21.776
14.663	16.541	20.779
14.591	16.369	21.666
14.789	16.299	21.114
14.744	16.409	22.58
14.552	16.224	23.949
14.776	16.406	19.569
14.901	16.446	20.407
14.714	16.308	22.287
14.566	16.25	20.708
14.677	16.403	21.876
14.607	16.18	23.167
14.753	16.441	21.543
14.702	16.305	20.555
14.502	16.361	23.944
14.611	16.107	23.077
14.605	16.702	23.455
14.822	16.16	21.466

ตารางที่ ก-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 14 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น SAE90 + palm oil 5%		
load 16 kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
14.71	16.3	21.305
14.779	16.554	20.997
14.754	16.44	21.456
14.68	16.28	21
14.744	16.23	22.225
14.81	16.494	22.445
14.845	16.203	20.024
14.667	16.381	22.292
14.72	16.4	21.776
14.805	16.551	22.666
14.726	16.331	22.292
14.72	16.58	20.04
14.825	16.511	20.966
14.813	16.253	21.503
14.731	16.336	20.047
14.826	16.3	21.245
14.8	16.239	21.496
14.71	16.266	20.145
14.663	16.54	22.576
14.805	16.255	21.139

ตารางที่ ก-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 16 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น SAE90 + palm oil 5%		
load 18 kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
14.741	16.414	22.225
14.807	16.407	21.756
14.847	16.293	20.776
14.887	16.372	20.774
14.721	16.396	22.225
14.826	16.384	23.445
14.799	16.495	20.515
14.809	16.51	22.255
14.724	16.41	20.737
14.811	16.411	22.177
14.77	16.3	23.476
14.846	16.357	21.831
14.777	16.409	21.599
14.811	16.291	21.551
14.903	16.323	19.662
14.7	16.417	16.991
14.834	16.451	20.441
14.924	16.284	22.776
14.803	16.6	20.54
14.807	16.4	20.576

ตารางที่ ก-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 + palm oil 5% ที่แรงกดที่ระนาบ 18 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น SAE40		
load 10 kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
12.678	14.991	19.666
13.468	15.023	21.084
14.309	14.942	18.187
13.78	15.012	12.006
13.646	14.985	21.915
13.506	15.005	18.732
12.199	14.992	21.855
12.375	15.042	21.571
13.659	15.011	19.824
13.322	14.871	18.532
13.591	15.049	19.172
13.48	14.93	18.755
13.39	14.909	19.87
13.491	15.024	20.776
13.487	15.93	19.356
13.451	15.042	21.404
14.285	14.98	20.925
13.531	14.913	19.562
13.411	15	19.823
13.653	14.905	20.2012

ตารางที่ ก-11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 ที่แรงกดที่ระนาบ 10 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น SAE40		
load 12 kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
13.511	14.9	19.123
13.611	14.807	18.921
13.409	14.931	21.537
13.27	14.835	20.595
13.402	14.925	20.24
13.338	14.93	20.515
13.587	14.8	20.05
13.624	14.866	19.372
13.802	14.899	21.69
13.673	14.877	19.359
13.546	14.97	20.763
13.201	14.865	19.947
13.567	14.831	20.07
13.413	14.917	20.28
13.645	14.887	19.975
13.445	14.922	20.85
13.221	14.905	20.22
13.411	14.911	19.954
13.256	14.812	19.52
13.431	14.95	21.144

ตารางที่ ก-12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 ที่แรงกดที่ระนาบ 12 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น SAE40		
load 14 kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
13.79	15.107	19.976
13.67	15.149	20.222
13.592	15.111	20.107
13.777	15.089	21.234
13.707	15.007	19.995
13.677	15.125	20.666
13.509	15.339	19.111
13.642	15.1	21.3
13.524	15.201	20.85
13.53	14.998	20.654
13.709	14.905	20.405
13.66	15.403	21.261
13.703	15.225	19.78
13.677	15.2	20.007
13.712	15.476	19.995
13.555	15.581	21.115
13.711	15.39	21.542
13.653	15.13	20.23
13.644	15.233	19.237
13.505	15.144	21.254

ตารางที่ ก-13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 ที่แรงกดที่ระนาบ 14 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น SAE40		
load 16 kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
13.877	15.321	18.495
13.802	15.313	20.405
13.775	15.46	19.97
13.804	15.533	20.804
13.914	15.39	22.149
13.9	15.225	18.972
13.901	15.3	19.005
13.814	15.442	20.777
13.911	15.516	24.041
13.876	15.5	20.562
13.805	15.566	20.005
13.778	15.346	19.654
13.882	15.446	22.724
13.925	15.29	18.7
13.941	15.601	19.372
13.952	15.57	20.877
13.904	15.367	22.225
13.842	15.527	20.105
13.817	15.459	21.259
13.936	15.3	20.409

ตารางที่ ก-14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 ที่แรงกดที่ระนาบ 16 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น SAE40		
load 18 kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
13.906	15.484	20.603
13.923	15.389	20.842
14.168	15.386	21.776
14	15.566	20.945
13.982	15.519	20.779
14.01	15.711	20.366
14.192	15.704	19.954
14.305	15.752	22.484
13.987	15.444	22.756
14.105	15.58	20.736
13.999	15.742	22.254
14.117	15.404	22.005
14.305	15.84	19.874
13.924	15.53	21.31
14.111	15.599	20.441
13.837	15.485	19.997
14.077	15.9	21.877
14.225	15.71	20.078
14	15.667	20.743
14.107	15.509	22.504

ตารางที่ ก-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE40 ที่แรงกดที่ระนาบ 18 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น SAE90		
load 10 kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
14.071	16.302	17.774
14.004	16.212	17.982
14.017	16.128	17.808
14.263	16.333	17.89
14.022	16.315	17.85
14.11	16.405	17.986
14.26	16.334	17.77
14.111	16.339	17.88
14.304	16.4	17.811
14.2	16.21	17.7
14	16.211	17.661
14.02	16.29	17.92
14.022	16.371	17.911
14.157	16.404	17.77
14.311	16.277	17.877
14.279	16.326	17.88
14.269	16.31	17.994
14.17	16.392	17.776
14.27	16.41	17.884
14.039	16.477	17.455

ตารางที่ ก-16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่แรงกดที่ระนาบ 10 kg

น้ำมันหล่อลื่น SAE90		
load 12 kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
14.773	16.201	17.1
14.8	16.21	17.224
14.717	16.293	17.111
14.805	16.306	17.225
14.666	16.304	17.49
14.9	16.189	17.554
14.912	16.076	17.63
14.779	16.25	17.667
14.829	16.23	17.775
14.774	16.28	17.88
14.669	16.146	17.666
14.904	16.326	17.55
14.777	16.187	17.809
14.704	16.22	17.399
14.884	16.122	17.26
14.776	16.101	17.109
14.833	16.395	17.204
14.752	16.366	17.513
14.835	16.345	17.202
14.77	16.122	17.696

ตารางที่ ก-17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่แรงกดที่ระนาบ 12 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น SAE90		
load 14 kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
14.712	16.2	17.9
14.601	16.245	18.145
14.628	16.4	17.991
14.701	16.333	17.778
14.973	16.121	17.843
14.754	16.422	17.794
14.93	16.23	17.875
14.677	16.171	17.99
14.666	16.13	17.904
14.659	16.209	17.721
14.79	16.387	17.806
14.804	16.147	17.546
14.751	16.281	17.786
14.703	16.333	17.758
14.557	16.101	17.667
14.783	16.444	17.717
14.665	16.33	17.781
14.731	16.193	17.974
14.607	16.401	17.873
14.824	16.2	17.77

ตารางที่ ก-18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่แรงกดที่ระนาบ 14 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น SAE90		
load 16 kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
14.702	16.119	17.704
14.552	16.05	17.511
14.771	16.1	18
14.56	16.177	17.723
14.71	16.256	17.2
14.689	16.39	17.7
14.631	16.054	17.622
14.555	16.354	17.528
14.526	16.311	17.804
14.605	16.07	17.747
14.66	16.125	17.614
14.445	16.4	17.601
14.668	16.111	17.719
14.624	16.395	17.301
14.6	16.222	17.89
14.721	16.229	17.77
14.596	16.19	17.7
14.51	16.2	17.647
14.709	16.402	17.604
14.663	16.041	17.734

ตารางที่ ก-19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่แรงกดที่ระนาบ 16 kg

น้ำมันหล่อลื่น SAE90		
load 18 kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
14.778	16.11	20.925
14.5	16.269	21.512
14.555	16.447	22.11
14.753	16.391	20.342
14.504	16.311	22.024
14.625	16.404	21.336
14.53	16.175	20.059
14.794	16.206	23.145
14.607	16.34	20.2
14.447	16.288	22.287
14.8	16.34	19.997
14.708	16.211	21.924
14.611	16.253	22.9
14.477	16.327	22.88
14.667	16.246	21.117
14.796	16.189	20.914
14.702	16.3	22.005
14.357	16.164	20.667
14.67	16.215	22.225
14.901	16.22	20.776

ตารางที่ ก-20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน ของน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่แรงกดที่ระนาบ 18 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะไม่มีน้ำมันหล่อลื่น		
load 10 kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
12.2	12.9	17.6
10.9	11.7	19.7
10.1	12.9	18.7
10	14.7	19.9
9.2	13.1	18.7
10.7	14	17.1
10.6	14.4	18.7
11	13.9	21.1
11.5	12.8	18.4
13.3	12.9	18.9
12.2	13.1	18.2
12.8	13	19.9
11.7	14.3	20.6
13.1	14.1	20.3
13	13.6	22
11.6	13	16.2
11.4	13.7	16.7
11.9	11.7	18.9
10.8	13.6	17.4
10.3	13.8	18.8

ตารางที่ ก-21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน สภาวะไม่มีน้ำมันหล่อลื่น ที่แรงกดที่ระนาบ 10 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะไม่มีน้ำมันหล่อลื่น		
load 12 kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
15.2	14.9	20.2
14.4	14.9	21.8
13.7	15	22.3
12	13.8	21.7
11.8	13	21.5
13.8	13.4	20.3
13.5	14.8	17.4
14	15.7	20
14.8	15.7	20.1
14.7	14.6	18.9
14.2	13.5	17.9
13.6	13	21.5
12	12.7	22.5
13.2	14.9	22
12.6	13.9	20.1
12.5	15	21.8
11.2	16.2	23
13.3	15.9	20.6
14	12.6	22.1
12.6	15.2	20.1

ตารางที่ ก-22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน สภาวะไม่มีน้ำมันหล่อลื่น ที่แรงกดที่ระนาบ 12 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะไม่มีน้ำมันหล่อลื่น		
load 14 kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
15.3	15.7	20
15.2	16.1	18.2
15	16.5	17.8
14.8	15.1	17.6
15	15.7	20
15.2	13.4	19.1
14.1	14	18.7
14.2	16	17.9
15.4	15.9	20.6
15.1	13.8	18.7
15	14.5	15
12.6	15.6	18
14.1	16.2	19.7
13.7	15.9	20
14.9	16	18
14.8	14	18.6
15.1	14.6	18.2
14.9	15.9	17.6
15.2	15.7	19.9
15.7	14.8	17.7

ตารางที่ ก-23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน สภาวะไม่มีน้ำมันหล่อลื่น
ที่แรงกดที่ระนาบ 14 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะไม่มีน้ำมันหล่อลื่น		
load 16 kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
15	15.5	21
15.1	16.5	22.5
15.2	16.4	22.8
14.3	16.5	22.9
14.8	16.4	22.5
14.6	16.3	22.6
15	16.4	22.6
14.9	16.3	22.5
15.1	16.4	22.4
14.9	16.6	22.2
15.2	16.6	22.4
15.2	16.4	21.8
15	16.5	21.6
14.9	16.5	23.2
15	16.5	22.9
15.2	16.3	21.8
14.7	16.3	21
15.2	16.6	20.8
14.5	16.4	21.8
15.1	16.8	21.7

ตารางที่ ก-24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน สภาวะไม่มีน้ำมันหล่อลื่น ที่แรงกดที่ระนาบ 16 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะไม่มีน้ำมันหล่อลื่น		
load 18 kg		
Speed 10hz	Speed 15hz	Speed 20hz
ค่า voltage (mV)		
14.9	17	22.9
15.3	16.2	20.1
15.3	16.7	21.4
15.1	16.8	23
14.8	16.9	21.5
15	16.7	20.3
14.9	16.8	20.8
14.9	16.6	20.7
15.2	16.5	22.1
14.9	16.8	20.8
15.1	16.7	21.7
15	16.6	21.3
14.9	16.5	22.5
15.1	16.4	20.8
14.7	16.9	21
15.2	17	18.9
14.6	16.5	19
14.9	17	20.3
14.8	16.7	22
15.4	16.7	22.8

ตารางที่ ก-25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความเร็วในการหมุน สภาวะไม่มีน้ำมันหล่อลื่น
ที่แรงกดที่ระนาบ 18 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

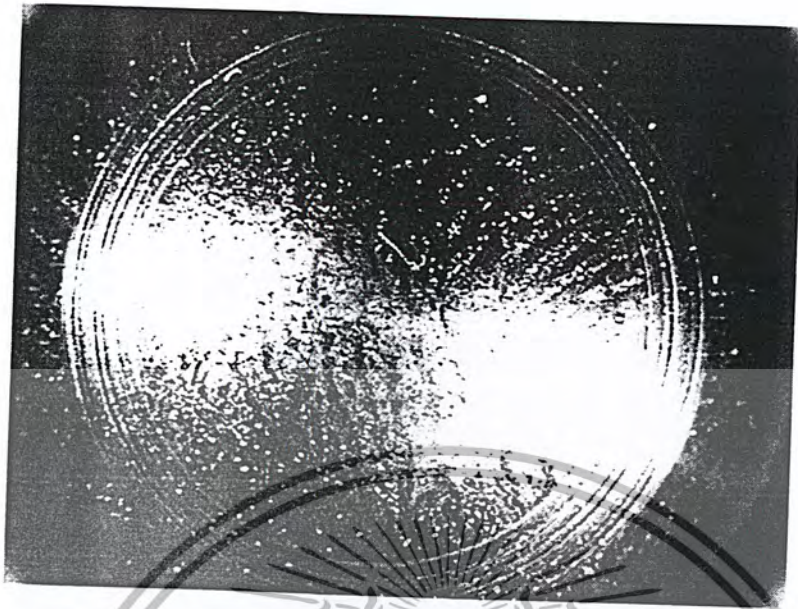
ข. ภาพแสดงรอบสีหรือของลูกบอลที่สภาวะต่างๆ

- รูปรอยสีหรือที่ลูกบอลลูกบน



รูปที่ ข-2 ลูกบอลบนของน้ำมัน SAE 40+palm oil 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

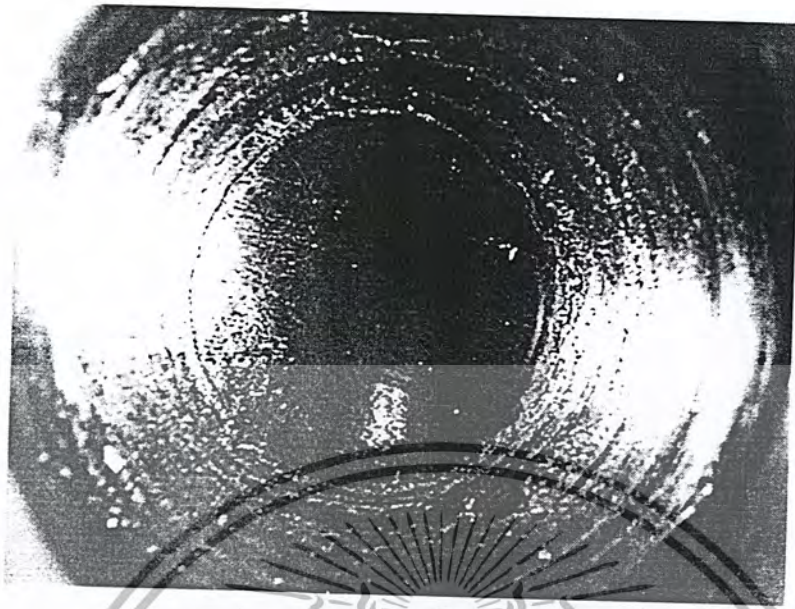


รูปที่ ข-3 ลูกบอลบนของน้ำมัน SAE 90



รูปที่ ข-4 ลูกบอลบนของน้ำมัน SAE 90+palm oil 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



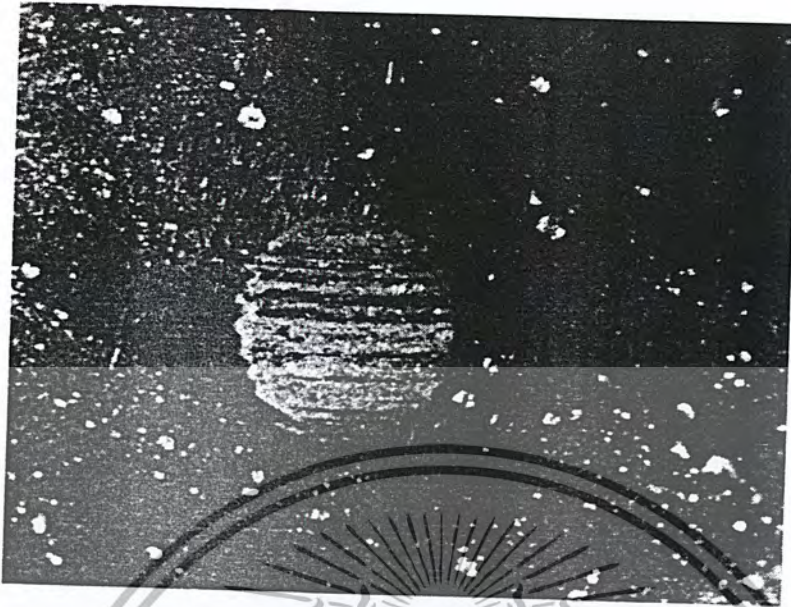
รูปที่ ข-5 ลูกบอลบนของสภาวะไม่มีสารหล่อลื่น

- รูปรอยสึกหรอที่ลูกบอลลูกกลาง

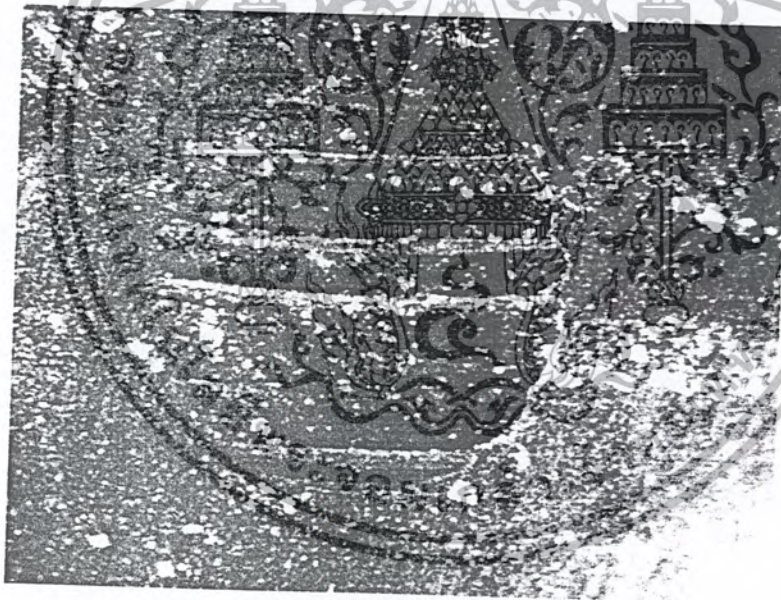


รูปที่ ข-6 ลูกบอลล่างของน้ำมัน SAE 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-7 ลูกบอลล่างของน้ำมัน SAE 40+palm oil 5%

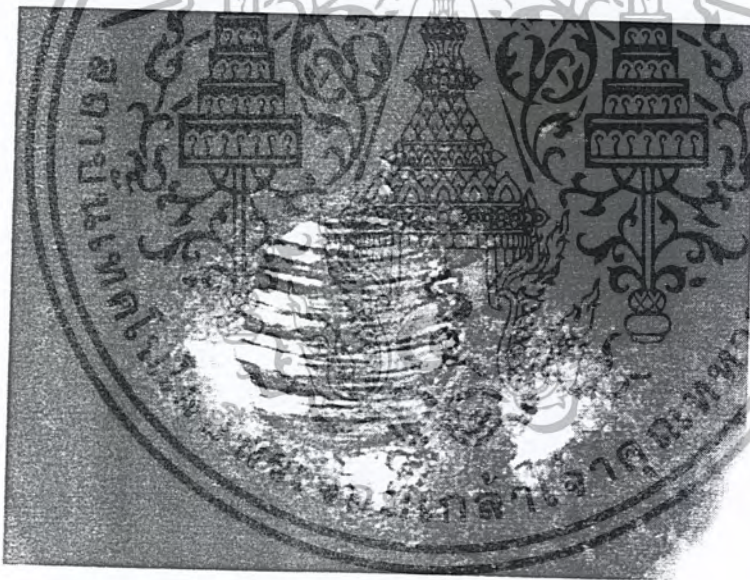


รูปที่ ข-8 ลูกบอลล่างของน้ำมัน SAE 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-9 ลูกบอลล่างของน้ำมัน SAE 90+palm oil 5%



รูปที่ ข-10 ลูกบอลล่างของสภาวะไม่มีสารหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke, Richard G. Budynas, "Mechanical Engineering Design", Seventh Edition, International Edition 2003, New York McGraw-Hill, pp.607-618
- [2] กิตติ พลอยเจริญศรีกุล, ก้องเกียรติ บวรนิรัตติศัย, เอกภพ เพ็ชรรักษ์, "เครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูก", ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ปีการศึกษา 2543
- [3] W.F. Stoecker, "Design of Thermal Systems", Third Edition, McGraw-Hill, pp.67-70
- [4] Annual Book of ASTM Standard. Vol10501, Designation: D5183-91



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้