

เครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูก  
FOUR-BALL WEAR TEST MACHINE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

เลขที่.....  
เลขทะเบียน 42354  
วัน, เดือน, ปี 17 พ.ค. 2545

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5/17/2018 5x

เครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูก  
FOUR-BALL WEAR TEST MACHINE

โดย

นายกิตติ พลอยเจิมศรีกุล

นายก้องเกียรติ บวรนิรัตติศัย

นายเอกภพ เพ็ชรักษ์



อาจารย์ที่ปรึกษา  
รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2543

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูก

FOUR-BALL WEAR TEST MACHINE

ผู้จัดทำ

1. นายกิตติ พลอยเจิมศรีกุล รหัสประจำตัว 40010043
2. นายก้องเกียรติ บวรนิรัตติศัย รหัสประจำตัว 40010090
3. นายเอกภพ เพ็ชรักษ์ รหัสประจำตัว 40011034



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องทดสอบการศึกษาค้นคว้าด้วยลูกบอลสี่ลูก

นายกิตติ พลอยเจิมศรีกุล 40010043

นายก้องเกียรติ บวรนิรัตติชัย 40010090

นายเอกภพ เพ็ชรรักษ์ 40011034

รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

ปีการศึกษา 2543

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันเทคโนโลยีสมัยใหม่ทำให้เครื่องจักรได้ถูกพัฒนาให้มีความแม่นยำและความเที่ยงตรงสูง การศึกษาค้นคว้า และใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เครื่องทดสอบการศึกษาค้นคว้าโดยใช้บอลสี่ลูกและการทดสอบการศึกษาค้นคว้าได้ถูกพัฒนาเพราะจำเป็นในการใช้หาคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ การหล่อลื่นและการศึกษาค้นคว้า ซึ่งสามารถทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบการศึกษาค้นคว้าโดยบอลสี่ลูก โครงการนี้จึงได้นำเสนอเครื่องทดสอบการศึกษาค้นคว้าโดยใช้บอลสี่ลูก เพื่อที่จะช่วยทำความเข้าใจคุณสมบัติการศึกษาค้นคว้าของวัสดุ โดยทำการศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ของ การศึกษาค้นคว้า และการหล่อลื่น ในสภาวะการทดสอบต่างๆและหากมีการเปลี่ยนสภาวะการทดสอบก็จะทำให้ความสัมพันธ์บางอย่างเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งสามารถนำผลการทดลองไปใช้ประยุกต์ เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ชิ้นส่วนเครื่องจักรต่อไป

12/12/2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

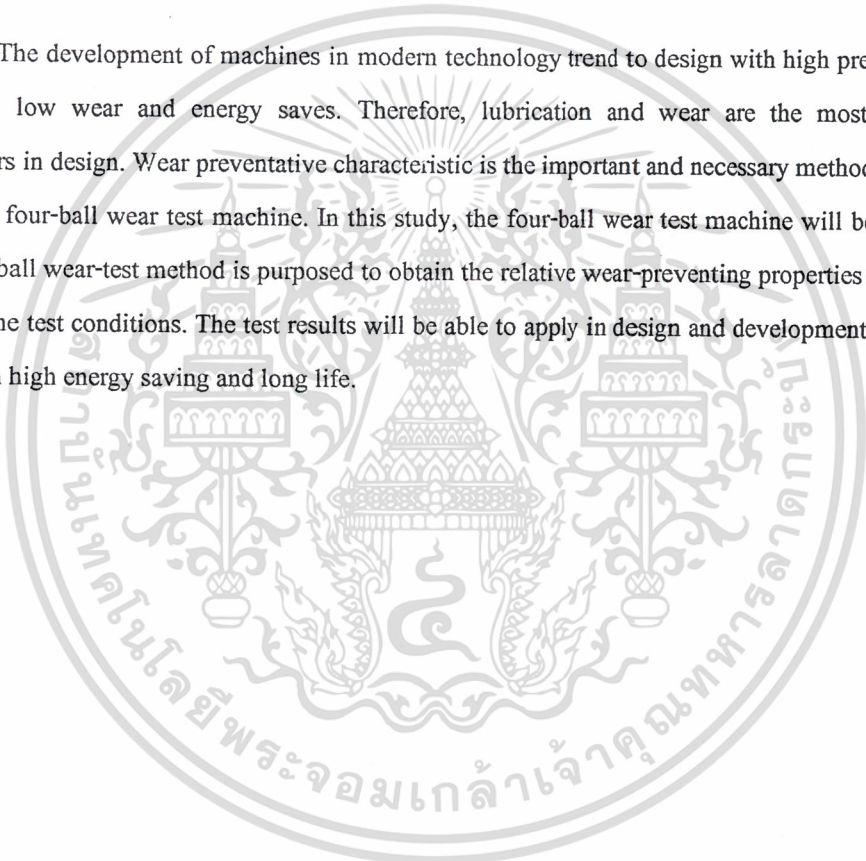
## Four Ball Wear Test Machine

Kitti Ployjermirkul  
Kongkiet Bowornnirattisai  
Ekkaphop Petrak

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 saving and long life.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

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



นายกิตติ พลอยเจิมศรีกุล  
 นายก้องเกียรติ บวรนิรัตติศัย  
 นายเอกภพ เพ็ชรรักษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	VIII
ตารางสัญลักษณ์	X
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 ชนิดการหล่อลื่น	3
2.3 การเกิดแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น	4
2.4 ความหนืดของสารหล่อลื่น	6
2.5 สมการเรโนลด์	7
2.6 สมการเรโนลด์สำหรับกาบร่องลื่นที่มีความยาวมาก	11
2.7 สมการเรโนลด์สำหรับกาบร่องลื่นที่สั้นมาก	12
2.8 การหาค่าความหนาของฟิล์มน้ำมันในรูปฟังก์ชันของ $x$	12
2.9 การอินทิเกรตสมการเรโนลด์	13
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	23
3.3.3 วัสดุประกอบ (composites)	24
3.3.4 โดหะอ่อนนุ่ม	25
บทที่ 4 น้ำมันหล่อลื่น	27
4.1 น้ำมันแร่	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 น้ำมันสังเคราะห์	29
4.2.1 ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์ (synthesized hydrocarbons)	29
4.2.2 เอสเทอร์อินทรีย์ (organic esters)	29
4.2.3 โพลีไกลคอลส์ (polyglycols)	29
4.2.4 ฟอสเฟตเอสเทอร์ (phosphate esters)	29
4.2.5 น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์อื่นๆ	30
4.3 สารเพิ่มคุณภาพ	30
4.3.1 สารลดจุดไหลเท (pour point depressants)	30
4.3.2 สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (viscosity index improvers)	30
4.3.3 สารป้องกันการเกิดฟอง (defoamants)	31
4.3.4 สารป้องกันออกซิเดชัน (oxidation inhibitors)	31
4.3.5 สารป้องกันการกัดกร่อน (corrosion inhibitors)	31
4.3.6 สารป้องกันสนิม (rust inhibitor)	31
4.3.7 สารชะล้างและกระจายสิ่งสกปรก (detergents and dispersants)	31
4.3.8 สารป้องกันการสึกหรอ (antiwear additives)	32
4.4 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น	32
4.4.1 ความหนืด (viscosity)	32
4.4.2 ดัชนีความหนืด (viscosity index)	35
4.4.3 คาร์บอน (carbon residue)	36
4.4.4 สี (color)	36
4.4.5 ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (density and gravity)	36
4.4.6 จุดวาบไฟและจุดติดไฟ (flash and fire points)	36
4.4.7 จุดไหลเท (pour point)	37
4.4.8 ตัวเลขความเป็นกลาง (neutralization number)	37
<b>บทที่ 5 การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบ</b>	<b>38</b>
5.1 การออกแบบ	38
5.1.1 การออกแบบทั่วไป	38
5.1.2 การออกแบบทางกล	39
5.1.3 การออกแบบระบบควบคุม	40
5.2 การสร้างเครื่องทดสอบ	41
<b>บทที่ 6 การทดลอง</b>	<b>45</b>
6.1 ความสามารถของเครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูก	45
6.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	45
6.3 วิธีการทดลอง	47

6.4 ผลการทดลอง	52
<b>บทที่ 7 บทวิจารณ์และสรุปผลการทดลอง</b>	<b>58</b>
7.1 ผลที่ได้จากโครงการ	58
7.2 ข้อจำกัดของเครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูก	58
<b>ภาคผนวก</b>	<b>60</b>
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>72</b>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 2-1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยเฉลี่ย	3
ตารางที่ 2-2 ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นที่ 21°C	7
ตารางที่ 3-1 ผลของส่วนผสมของน้ำมันปิโตรเลียมต่อคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น	17
ตารางที่ 3-2 ชนิดของน้ำมันหล่อลื่นแบ่งตามเบอร์ SAE	18
ตารางที่ 3-3 เป็นตารางแสดงค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นในทางอุตสาหกรรม กำหนดโดย 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	26
ตารางที่ 6-1 ผลการทดลองกรณีที่ไม่ใช้น้ำมันหล่อลื่น (No Oil)	52
ตารางที่ 6-2 ผลการทดลองกรณีใช้น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันหล่อลื่น	53
ตารางที่ 6-3 ผลการทดลองกรณีใช้น้ำมันเครื่องสังเคราะห์ (Synthetic Oil)	54
ตารางที่ 6-4 ผลการทดลองกรณีใช้น้ำมันปาล์มผสมแกรไฟต์ ในอัตราส่วน 30 : 1	55
ตารางที่ 6-5 ตัวอย่างการคำนวณค่ามวลไวมิตกรณีใช้น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันหล่อลื่น	56

## สารบัญภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 2-1 ชนิดของการหล่อลื่น	3
รูปที่ 2-2 แสดงการไหลของสารหล่อลื่นในแผ่นร่องลื่นเอียง	4
รูปที่ 2-3 การกระจายแรงดันและความเร็วของน้ำมันหล่อลื่นในแผ่นร่องลื่น	5
รูปที่ 2-4 แสดงการไหลของสารหล่อลื่นผ่านหน้าตัดเล็กกลงตามทิศทางการไหลในแบร์ริง	8
รูปที่ 2-5 แสดงแรงกระทำต่อสารหล่อลื่นในทิศตามแกน X	8
รูปที่ 2-6 ภาพร่องลื่นที่มีความยาวมากและการกระจายของความดันตามแกน X	11
รูปที่ 2-7 แสดงความหนาของฟิล์มน้ำมันระหว่างดิสก์ 2 แผ่น	12
รูปที่ 3-1 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น	19
รูปที่ 3-2 โครงสร้างเป็นชั้นแลททิซของแกรไฟต์	22
รูปที่ 4-1 กลั่นน้ำมันดิบ	28
รูปที่ 4-2 ขบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น	28
รูปที่ 4-3 หลักการของความหนืด	33
รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นบางชนิด	34
รูปที่ 4-5 ผลของความดันต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40	35
รูปที่ 4-6 การหาค่าดัชนีความหนืด	36
รูปที่ 5-1 Four-ball Test Arrangement	38
รูปที่ 5-2 Four-ball Test with main dimension(All Dimension, mm)	39
รูปที่ 5-3 Four-ball Test Machine- Section Modeling	39
รูปที่ 5-4 รูปแสดงตำแหน่งของ Four-Ball และการติดตั้ง Thermocouple และ Heater	40
รูปที่ 5-5 ลักษณะของคานส่งแรงที่ใช้ทดสอบ	40
รูปที่ 5-6 อ่างน้ำมัน (Ball Pot)	41
รูปที่ 5-7 แหวนล็อก (Ball Pot Lock Ring)	41
รูปที่ 5-8 แหวนยึด (Lock Nut)	42
รูปที่ 5-9 ชุดอ่างน้ำมัน	42
รูปที่ 5-10 ตัวบังคับศูนย์กลางน้ำมัน , บารองรับอ่างน้ำมัน , External tube frame	43
รูปที่ 5-11 หัวจับลูกบอล , ฐานยึดมอเตอร์ , มอเตอร์	43
รูปที่ 5-12 ชุดคานส่งกำลัง	44
รูปที่ 5-13 เครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูก	44
รูปที่ 6-1 ลูกบอลขนาด 12.7 มิลลิเมตร หรือ 0.5 นิ้ว	45
รูปที่ 6-2 น้ำมันปาล์ม(Palm Oil)	45
รูปที่ 6-3 น้ำมันเครื่องสังเคราะห์(Synthetic Oil)	46
รูปที่ 6-4 น้ำมันปาล์มผสมแกรไฟต์อัตราส่วน 30 :1 โดยมวล	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6-5 เครื่องชั่งมวล แบบ Analytical Balance	47
รูปที่ 6-6 ลักษณะการวางบอล 3 ลูกในอ่างน้ำมัน	47
รูปที่ 6-7 บอลถูกล็อกด้วย Ball Pot Lock Ring	48
รูปที่ 6-8 ล็อกบอล 3 ลูกให้แน่นด้วยแหวนล็อก	48
รูปที่ 6-9 ใส่ น้ำมัน ในอ่างน้ำมัน (Ball Pot)	49
รูปที่ 6-10 การจับลูกบอลด้วยหัวจับ (แสดงขณะยังไม่ขึ้นส่วนเป็นเครื่องทดสอบ)	49
รูปที่ 6-11 การนำอ่างน้ำมันใส่เข้ากับชุดรองรับ	50
รูปที่ 6-12 แสดงการแขวนเป็นน้ำหนัก (เครื่องที่ประกอบสมบูรณ์พร้อมทดลอง)	50
รูปที่ 6-13 นำลูกบอลออกจาก Ball Pot	51
รูปที่ 6-14 นำลูกบอลใส่อ่างน้ำมัน เพื่อทดลองครั้งต่อไป	51
รูปที่ 6-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับเวลา กรณีไม่ใช้น้ำมันหล่อลื่น	52
รูปที่ 6-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับเวลา กรณีใช้น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันหล่อลื่น	53
รูปที่ 6-17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับเวลา กรณีใช้น้ำมันเครื่องสังเคราะห์เป็นน้ำมันหล่อลื่น	54
รูปที่ 6-18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับเวลา กรณีใช้น้ำมันปาล์มผสมแกลไฟต์ (30:1) เป็นสารหล่อลื่น	55
รูปที่ 6-19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างมวลไร้มิติ กับเวลา	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางสัญลักษณ์

R	รัศมีของแผ่นดิสก์หรือลูกบอลทรงกลม
U	Surface Speed
$\mu$	Viscosity
H	Film thickness
$\bar{h}$	Maximum Film thickness
$P^*$	Dimensionless pressure
W/L	Load carried per unit axial length
$\tau$	Shear stress
$F^*$	Dimensionless viscous friction
$M^*$	Dimensionless Mass



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาของโครงการ

เนื่องจากปัจจุบันเครื่องทดสอบการสึกหรอมีความจำเป็นในการทดสอบวัสดุที่จะนำไปใช้ในงานต่างๆ ที่ต้องการความละเอียดและมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ เพื่อให้ผลการทดสอบที่ได้มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้เพื่องานในสภาวะต่างๆ ได้และผลที่ตามมาอีกอย่างหนึ่งคือหากในการทดลองแต่ละครั้งได้เปลี่ยนชนิดของน้ำมันที่ใช้ในการหล่อลื่นเราก็สามารถทราบความสามารถในการหล่อลื่นหรือทำนายคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดที่สภาวะต่างๆ ได้ นอกจากนี้เพื่อเพิ่มเป็นอุปกรณ์ในห้องทดลองของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลซึ่งยังไม่มีชุดการทดสอบนี้ ทำให้เป็นอุปสรรคในการศึกษาทดลองในวิชาที่เกี่ยวข้องกับความเสียดทาน การสึกหรอและการหล่อลื่น (Tribology) ซึ่งหากไม่มีการทดลองให้เห็นผลชัดเจนก็จะไม่สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ได้

### 1.2 ความสำคัญและแนวคิดในการทำโครงการ

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นจึงเป็นที่มาของโครงการนี้ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะนำมาใช้เป็นอุปกรณ์การทดลองของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล เพื่อให้การศึกษาในวิชาดังกล่าวข้างต้นบรรลุถึงจุดประสงค์นั้นคือสามารถทำการทดลองได้และนำผลการทดลองไปใช้สรุปหาคุณสมบัติต่างๆ ทั้งของวัสดุคือลูกบอลและของน้ำมันหล่อลื่นในสภาวะไหลแตกต่างกัน และอุณหภูมิน้ำมันต่างๆ กัน ได้อย่างมีประสิทธิภาพและถูกต้อง

### 1.3 ขอบเขตและแนวทางการดำเนินงานของโครงการ

ขอบเขตและแนวทางการดำเนินงานของโครงการนี้ คือ เริ่มจากการศึกษาถึงลักษณะการเคลื่อนที่ที่มีการสัมผัสกัน ระหว่างฟิล์มน้ำมันกับผิวลูกบอล ซึ่งจะมีผลต่อการสึกหรอของลูกบอลทั้งนี้ยังขึ้นกับชนิดของน้ำมันหรือเกรดของน้ำมันหล่อลื่น เมื่อทำการศึกษาแล้วก็จะเป็นการออกแบบเครื่องทดสอบโดยอิงทฤษฎีของวัสดุ น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ ในการออกแบบจะมีการออกแบบทางกล การออกแบบระบบควบคุมการทำงานต่างๆ และอื่นๆ ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

เมื่อทำการออกแบบแล้วก็จะเป็นขั้นตอนการสร้างชุดทดลองเพื่อนำมาใช้งานจริง โดยจะทำการสร้างตามลำดับที่ได้ออกแบบไว้ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

## บทที่ 2

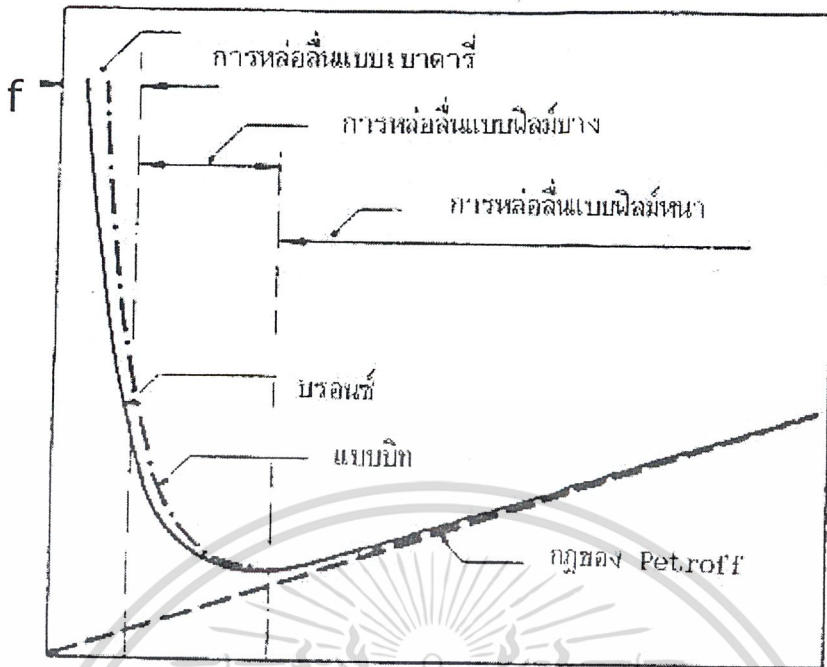
### หลักพื้นฐานการหล่อลื่น

#### 2.1 การหล่อลื่นชิ้นงาน

การหล่อลื่นชิ้นงาน คือการแยกชิ้นงานออกจากกันด้วยฟิล์มสารหล่อลื่น ขณะที่ผิวชิ้นงานตั้งแต่สองชิ้นขึ้นไปเคลื่อนไถลดูกัน ฟิล์มสารหล่อลื่นจะถูกเฉือนโดยผิวของชิ้นงานทั้งสองไม่เกิดความเสียหาย ถ้าหากว่ามีฟิล์มน้ำมันคั่นอยู่ระหว่างผิวของชิ้นงาน แต่ถ้าไม่มีฟิล์มหรือมีฟิล์มเฉพาะบางพื้นที่ของผิวชิ้นงาน ผิวชิ้นงานที่ไม่เกิดฟิล์มจะเกิดการแตะสัมผัสของผิวโลหะชิ้นงานทั้งสอง เมื่อชิ้นงานเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสัมพัทธ์ ก็จะทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดการเคลื่อนไถลดูระหว่างผิวโลหะทำให้เนื้อโลหะหลุดออกจากผิวเกิดการสึกหรอของชิ้นงาน จะเห็นว่าการหล่อลื่นชิ้นงาน สามารถลดการสึกหรอ ทำให้เครื่องจักรมีอายุยาวนานขึ้น และยังทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ซึ่งทำให้เครื่องจักรมีขนาดเล็กลง ประหยัดพลังงานรวมทั้งลดมลพิษให้แก่สิ่งแวดล้อม การหล่อลื่นนั้นจำเป็นต้องให้เกิดฟิล์มสารหล่อลื่นซึ่งเป็นของไหลที่มีความหนาเพียงพอเพื่อให้แน่ใจว่าไม่เกิดการแตะสัมผัสของผิวโลหะชิ้นงาน หรือไม่เกิดการสึกหรอของผิวชิ้นงาน ขณะที่ชิ้นงานชิ้นงานชิ้นหนึ่งเคลื่อนไถลไปบนผิวของชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่ง การหล่อลื่นแบบนี้จะพบในการร่อนดินเพลากลม แผ่นร่อนรับแรงคูนซึ่งเรียกการหล่อลื่นด้วยฟิล์มของไหล หรือการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก สารหล่อลื่นที่นิยมใช้มักจะเป็นน้ำมันหล่อลื่นแร่ น้ำ อากาศ หรือน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ ฯลฯ

จากเหตุผลที่ว่าอุตสาหกรรมได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เครื่องจักรเครื่องมือสมัยใหม่ได้ถูกพัฒนาให้ชิ้นงานมีความเที่ยงตรงสูง ความเร็วรอบสูง ทำให้การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกได้ถูกนำไปใช้ในการหล่อลื่นเครื่องจักรต่างๆ เช่น กังหันไอน้ำ กังหันแก๊ส เครื่องอัดอากาศเครื่องยนต์ และเครื่องคอมพิวเตอร์เป็นต้น การหล่อลื่นแบบแห้งและการหล่อลื่นแบบเบาคาร์รี่ ใช้สารหล่อลื่นที่เป็นไข อาจเป็นจาระบีหรือน้ำมัน มักจะใช้ในงานที่มีความเร็วรอบต่ำ หรืองานที่ผิวชิ้นงานเคลื่อนไถลบนผิวชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งที่มีความเร็วสัมพัทธ์ต่ำ ซึ่งผิวที่เคลื่อนไถลดูกันของผิวชิ้นงานอาจมีการหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ หรืออาจไม่มีการหล่อลื่นเป็นผิวแห้งก็ได้

วิชาการวิทยาศาสตร์การหล่อลื่น ได้เริ่มมีการศึกษาตั้งแต่ประมาณ ปี ค.ศ.1785 นายคูลอมบ์ (Coulomb) ได้อธิบายปรากฏการณ์การเกิดความฝืดและยังได้อธิบายความแตกต่างของความฝืดสถิตย์และความฝืดจลน์ (Static friction และ Kinetic friction) ต่อมาในปี ค.ศ.1886 นายเรโนลด์ (Reynold) ได้เขียนทฤษฎีการหล่อลื่นด้วยฟิล์มของไหลเป็นครั้งแรก ทำให้วิชาการทางด้านการศึกษาการหล่อลื่นได้ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว จนปัจจุบันวิชาการหล่อลื่นได้เป็นวิชาการที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่



รูปที่ 2-1 ชนิดของการหล่อลื่น

## 2.2 ชนิดการหล่อลื่น

พฤติกรรมของการเคลื่อนไถลของผิวชิ้นงานจะขึ้นกับฟิล์มสารหล่อลื่นที่คั่นอยู่ระหว่างผิวของชิ้นงานทั้งสอง และสภาวะการทำงาน จากรูป 2-1 สำหรับการรองรับเส้นเพลากลมได้แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน  $f$  และค่า  $\mu N/P$  โดยที่  $\mu$  คือค่าความหนืดของสารหล่อลื่น  $N$  คือความเร็วรอบของเพล และ  $P$  คือภาระที่การรองรับรับต่อพื้นที่ภาพฉาย เรียกว่าภาระจำเพาะ จากกราฟพบว่าที่ค่า  $\mu N/P$  สูงๆ การรองรับจะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า  $\mu N/P$  และให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ซึ่งเป็นการหล่อลื่นแบบฟิล์มหนาหรือการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก เมื่อลดค่า  $\mu N/P$  ลงจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะลดลงด้วยจนมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งเป็นการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง ในการหล่อลื่นแบบนี้ ถ้าลดค่า  $\mu N/P$  ให้มีค่าต่ำลงไปอีกจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว การหล่อลื่นในลักษณะนี้เรียกว่าการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางและถ้าลดค่า  $\mu N/P$  ให้ต่ำลงไปอีก จากกราฟพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกอย่างรวดเร็ว และยังพบว่าฟิล์มสารหล่อลื่นบางส่วนจะถูกทำลายไป ซึ่งเรียกรูปแบบนี้ว่า การหล่อลื่นแบบเบาดารี ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยเฉลี่ยของการหล่อลื่นแบบต่างๆ ได้แสดงในตาราง 2-1

ชนิดของการหล่อลื่น	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	การสึกหรอ
ไม่มีการหล่อลื่น (ผิวแห้ง)	1.0 – 2.0	การสึกหรอสูงมาก
การหล่อลื่นแบบเบาดารีหรือแบบฟิล์มบาง	0.05 – 0.15	การสึกหรอเล็กน้อย
การหล่อลื่นแบบฟิล์มหนา	0.001	ไม่มีการสึกหรอ

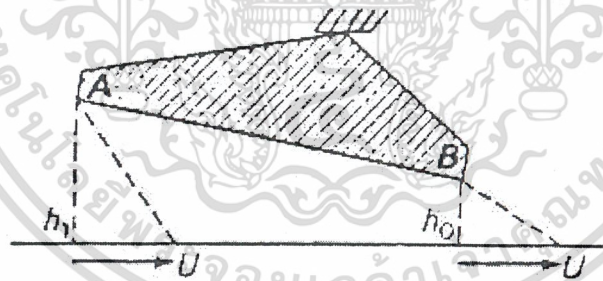
ตารางที่ 2-1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหล่อลื่นแบบฟิล์มหนา เป็นการหล่อลื่นที่มีสารหล่อลื่นคั่นระหว่างผิวชิ้นงานหนาขณะที่ยังงานเคลื่อนไถลกัน ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่นเพียงอย่างเดียวไม่ขึ้นกับคุณสมบัติของผิวโลหะชิ้นงาน และไม่เกิดการสึกหรอ ดังนั้นจึงเป็นชนิดการหล่อลื่นที่ต้องการผู้ออกแบบเครื่องจักรโดยทั่วไป

การหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง เป็นการหล่อลื่นที่มีสารหล่อลื่นเป็นฟิล์มบางๆ คั่นระหว่างผิวของชิ้นงาน ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผิวชิ้นงานและขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่น จากรูป 2-1 จะเห็นว่า การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางเมื่อค่า  $\mu N / P$  มีค่าต่ำลงฟิล์มสารหล่อลื่นจะบางลง จนกระทั่งยอดขรุขระของผิวชิ้นงานแตะสัมผัสกัน แล้วค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะขึ้นอยู่กับความขรุขระของผิวชิ้นงาน คุณสมบัติของโลหะชิ้นงานและคุณสมบัติของสารหล่อลื่นที่ใช้ด้วย ในการหล่อลื่นแบบเบาดริ่งจะพบว่าฟิล์มสารหล่อลื่นบางมาก ฟิล์มหนาดังแต่  $10^{-4}$  เซนติเมตร ถึงความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเท่ากับความหนาของโมเลกุลของสารหล่อลื่นเท่านั้น ถ้าชิ้นงานทำงานที่ความเร็วต่ำเกิดการระเหยขึ้น ก็จะทำให้ฟิล์มสารหล่อลื่นบางกว่าความสูงของยอดขรุขระที่ผิวชิ้นงาน และถ้าผิวขรุขระนี้มีสารหล่อลื่นจับเป็นชั้นของโมเลกุล สารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติที่ดีคือโมเลกุลของสารหล่อลื่นสามารถจับตัวเป็นลูกโซ่ยาวซึ่งได้แก่ ไครดน้ำมัน เมื่อใช้กับชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้า การหล่อลื่นแบบนี้จะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.1 เท่านั้น

### 2.3 การเกิดแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น

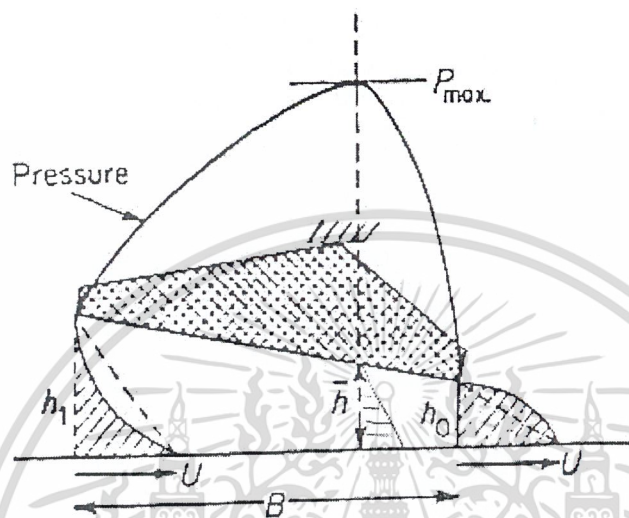


รูปที่ 2-2 แสดงการไหลของสารหล่อลื่นในแผ่นรองลื่นเอียง

เมื่อชิ้นงาน A เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว U จะทำให้ของไหลหรือน้ำมันหล่อลื่นไหลเข้าแผ่นรองลื่น (Bearing) เอียง B ที่ทางเข้าเกิดฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นหนาเท่ากับ  $h_1$  และที่ทางออกจะเกิดฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นหนาเท่ากับ  $h_0$  ถ้าสมมติว่าการกระจายของความเร็วในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นเป็นเส้นตรง โดยที่ผิวของชิ้นงาน A ความเร็วของน้ำมันหล่อลื่นที่แตะกับผิว A มีค่าเท่ากับ U ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นที่ทางเข้า  $q_{x1} = U h_1 / 2$  และอัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นที่ทางออก  $q_{x0} = U h_0 / 2$  เนื่องจากค่าความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นที่ทางเข้าแผ่นรองลื่นหนากว่าที่ทางออกจากแผ่นรองลื่น ( $h_1 > h_0$ ) เพราะฉะนั้น  $q_{x1} > q_{x0}$  ซึ่งเป็นไปไม่ได้ตามกฎทรงมวล เมื่อให้เป็นไปตามกฎทรงมวลคือที่สภาวะตัว อัตราการไหลของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มันหล่อลื่นที่ไหลเข้าแผ่นรองลื่นจะต้องเท่ากับอัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นที่ไหลออกจากแผ่นรองลื่น ซึ่งทำให้เกิดแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นขณะที่น้ำมันหล่อลื่นไหลผ่านแผ่นรองลื่น แรงดันนี้จะทำให้การกระจายของความเร็วในน้ำมันหล่อลื่นแปรเปลี่ยนไป ดังรูป 2-3



รูปที่ 2-3 การกระจายแรงดันและความเร็วของน้ำมันหล่อลื่นในแผ่นรองลื่น

เพราะฉะนั้นอัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นตามแกน X ที่ตำแหน่ง X ใดๆ จะเขียนได้ดังนี้

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$q_x = \frac{U\bar{h}}{2} \quad (2.4)$$

โดยที่  $h$  คือความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นที่ตำแหน่งที่เกิดแรงดันสูงสุด

จะเห็นว่าสมการ (2.3) และสมการ (2.4) ต่างก็เท่ากัน ดังนั้น  $dP/dX$  จึงสามารถเขียนได้ดังนี้

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

สมการ (2.5) เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาการกระจายของแรงดันในน้ำมันหล่อลื่น

#### 2.4 ความหนืดของสารหล่อลื่น

ค่าความหนืดของสารเป็นตัวแสดงความข้นของสารนั้นๆ ตามปกติเมื่อสารหล่อลื่น เช่น น้ำมันหล่อลื่นเมื่อได้รับความร้อน อุณหภูมิจะสูงขึ้น ทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าลดลง

สำหรับของไหลที่เป็นของไหลนิวตอเนียน ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนในชั้นของของไหล กับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในชั้นของของไหล สามารถเขียนได้ดังนี้

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

โดยที่  $\tau$  คือความเค้นเฉือนหรือแรงเฉียดทานต่อพื้นที่สัมผัส

$u$  คือค่าความหนืดของของไหล

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

จากสมการ (2.4) สามารถเขียนสมการหาค่าความหนืดได้ดังนี้

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

ซึ่งมีหน่วยของความหนืดดังนี้

$$\mu = \frac{\text{นิวตัน - วินาที}}{\left( \frac{\text{ตารางเมตร} \cdot \text{เมตรต่อวินาที}}{\text{เมตร}} \right)} = \frac{\text{นิวตัน - วินาที}}{\text{ตารางเมตร}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ตารางที่ 2-1 ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นที่ 21°C

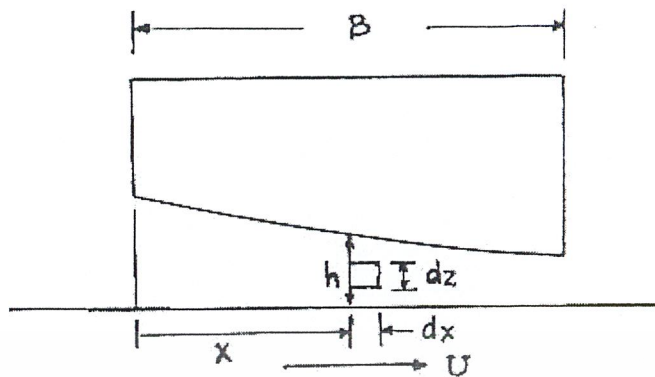
## 2.5 สมการเรโนลด์

สมการเรโนลด์ เป็นสมการหลักในวิชาการหล่อลื่น ใช้อธิบายการเกิดแรงดันของของไหลขณะที่ของไหลไหลในแบริ่ง เป็นแผ่นฟิล์มบางโดยที่ฟิล์มของไหลนี้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลงตามทิศทางการไหล ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดแรงดันขึ้นในของไหล

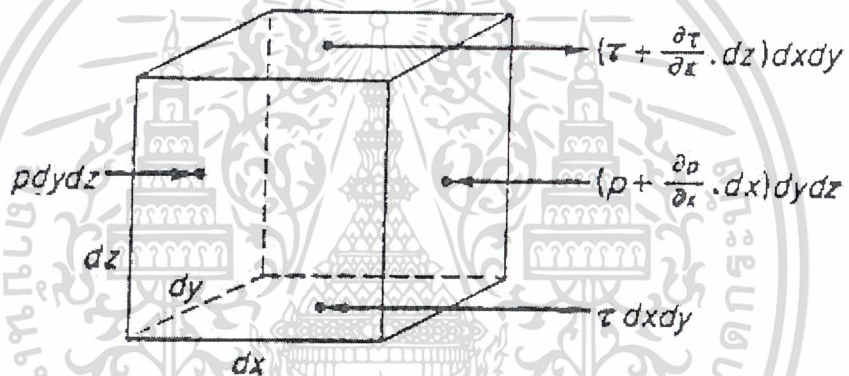
ข้อสมมติในการเขียนสมการเรโนลด์

- 1) ไม่คิดแรงภายนอกที่กระทำต่อสารหล่อลื่น เช่น ไม่คิดแรงเนื่องจากน้ำหนักของสารหล่อลื่น แรงแม่เหล็กไฟฟ้า
- 2) แรงดันที่เกิดขึ้นในของไหลหรือสารหล่อลื่นจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามแกนความหนาของของไหล ซึ่งหมายความว่าฟิล์มของสารหล่อลื่นนั้นบางมาก
- 3) การไหลของสารหล่อลื่นในกาบรองลื่นหรือแผ่นรองลื่นที่มีผิวโค้งนั้น ถูกสมมติว่าเป็นการไหลในแกนตรงไม่คิดผลเนื่องจากผิวโค้งของกาบรองลื่น
- 4) ไม่เกิดการตื่นไทดลของสารหล่อลื่นในกาบรองลื่น ดังนั้นสารหล่อลื่นที่แตะจับผิวกาบรองลื่นหรือเพลลาจะมีความเร็วเท่ากับผิวกาบรองลื่นหรือผิวเพลลา
- 5) สารหล่อลื่นมีคุณสมบัติเป็นของไหลแบบนิวตอเนียน (Newtonian fluid)
- 6) การไหลของสารหล่อลื่นเป็นการไหลอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเรียกว่าการไหลแบบ ลามินาร์ (laminar)
- 7) ไม่คิดแรงเฉื่อยของสารหล่อลื่น เนื่องจากฟิล์มสารหล่อลื่นบางมาก
- 8) ความหนืดของสารหล่อลื่นมีค่าคงที่ ไม่แปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิหรือความดัน
- 9) ความเร็ว  $U = U(x, z)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-4 แสดงการไหลของสารหล่อลื่นผ่านหน้าตัดเล็กกลางตามทิศทาง การไหลในเบริง



รูปที่ 2-5 แสดงแรงกระทำต่อสารหล่อลื่นในทิศตามแกน X

พิจารณาชั้นงานสองชั้น ชั้นบนมีความเร็ว  $U_1$  ตามแกน X และชั้นล่างเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ  $U_2$  ตามแกน X มีสารหล่อลื่นระหว่างชั้นวัตถุทั้งสอง ดังรูป 2-4 เมื่อพิจารณาการสมดุลของแรงที่กระทำต่อสารหล่อลื่นชั้นเล็กๆ ตามรูป 2-5 จะพบว่าแรงกระทำบนชั้นสารหล่อลื่นประกอบด้วยแรงเฉือนระหว่างสารหล่อลื่นและแรงเนื่องจากแรงดันของสารหล่อลื่น ซึ่งสามารถเขียนสมการการสมดุลของแรงตามแกน X ได้ดังนี้จะได้

$$\frac{\partial P}{\partial X} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (2.8)$$

สมการแสดงการสมดุลของแรงตามแกน Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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 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

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

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

$$\text{ที่ } y=0 ; u=U_2 ; v=V_2$$

$$\text{ที่ } y=h ; u=U_1 ; v=V_1$$

จะได้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ;  $q_x$

$$q_x = \int_0^h u dy \quad (2.14)$$

อัตราการไหลของสารหล่อลื่นตามแกน Z ;  $q_z$

$$q_z = \int_0^h v dy \quad (2.15)$$

แทนสมการ (2.13) ลงใน (2.14) จะได้

$$q_x = \frac{-h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} + (U_1 + U_2) \frac{h}{2} \quad (2.16)$$

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

$$q_z = \frac{-h^3}{12\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right) + (V_1 + V_2) \frac{h}{2} \quad (2.17)$$

จากสมการกฏทรงมวล

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad (2.18)$$

ตามปกติในกาบรองลื่น ผิวกาบรองลื่นจะไม่มีเกิดการเคลื่อนไหลตามแกน Z

ดังนั้น  $V_1 = V_2 = 0$  และให้  $U_1 = U$  และ  $U_2 = 0$

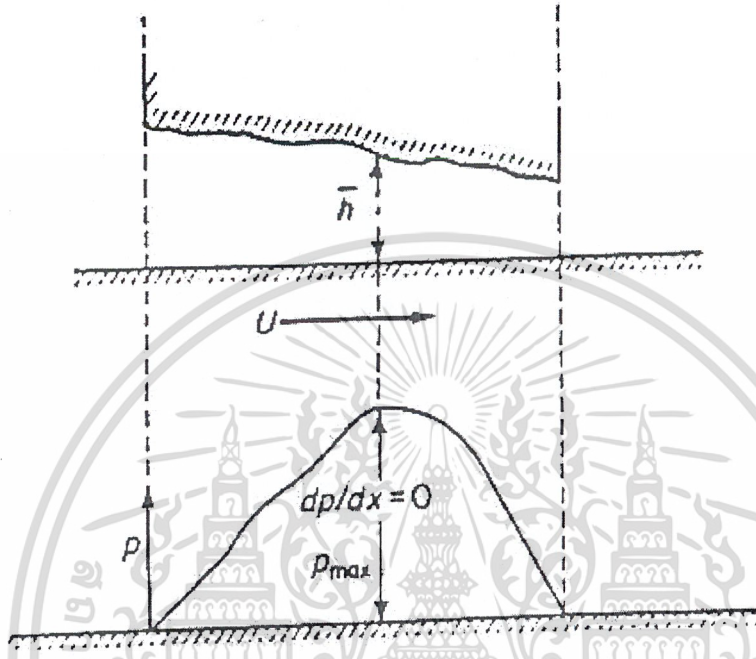
จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 6 \frac{\partial(Uh)}{\partial x} \quad (2.19)$$

ตามปกติแล้วความหนืดของสารหล่อลื่นนั้นถูกสมมติให้มีค่าคงที่เท่ากันตลอดในกาบรองลื่นหรือแผ่นรองลื่น และความเร็วของผิวกาบรองลื่นหรือผิวเพลจะมีค่าคงที่  $U$  ตามแกน X ดังนั้นสมการข้างบนจึงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 6\mu U \frac{dh}{dx} \quad (2.20)$$

## 2.6 สมการเรโนลด์สำหรับกาวรองลื่นที่มีความยาวมาก



รูปที่ 2-6 กาวรองลื่นที่มีความยาวมากและการกระจายของความดันตามแกน X

เมื่อพิจารณาเบริงที่มีความยาวมาก ตามแกน Z ดังนั้นไม่มีการไหลของสารหล่อลื่นตามแกน Z เพราะฉะนั้นไม่เกิดความแตกต่างของความดันตามแกน Z หรือ  $\partial p / \partial z$  เท่ากับศูนย์ จากสมการเรโนลด์ ไม่คิดสารหล่อลื่นไหลออกด้านข้างตามแกน Z จะได้

$$\frac{dP}{dx} = 6\mu U \left( \frac{h - \bar{h}}{h^3} \right) \quad (2.21)$$

โดยที่  $\bar{h}$  เป็นความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งที่เกิดความดันสูงสุด  $P_{\max}$

จะได้สมการแสดงการกระจายของความดันเป็น

$$P = 6\mu U \left\{ \int_0^x \frac{dx}{h^2} - \bar{h} \int_0^x \frac{dx}{h^3} + C \right\} \quad (2.22)$$

โดยที่ P คือความดันของสารหล่อลื่นตามแกน X ที่ตำแหน่ง X ใดๆ มีความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเป็น h และ C คือค่าคงที่ที่ได้จากการอินทิเกรต ซึ่งสามารถหาได้จากสภาวะของกาวรองลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งที่เกิดความดันสูงสุด,  $\bar{h}$

$$\bar{h} = \frac{\int_0^B \frac{dx}{h^2}}{\int_0^B \left( \frac{dx}{h^3} \right)} \quad (2.23)$$

โดยที่ B คือความยาวของกาบรองลื่นตามแกน X

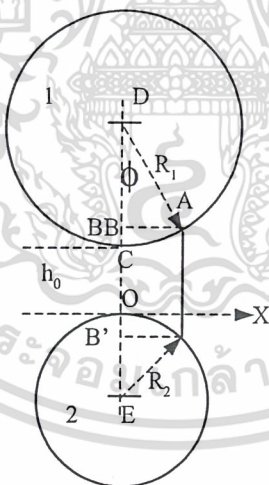
## 2.7 สมการเรโนลด์สำหรับก เบรองลื่นที่สั้นมาก

กาบรองลื่นที่ถูกสมมติว่ามีความยาวสั้นมาก ตามแกน Z ดังนั้นไม่มีการไหลของสารหล่อลื่นตามแกน X และไม่มี ความแตกต่างของความดันตามแกน X เพราะฉะนั้นสารหล่อลื่นจะไหลในแกน Z เท่านั้น และ  $\frac{\partial p}{\partial x}$  เท่ากับศูนย์ จากสมการเรโนลด์ อินทิเกรตจะได้

$$P = 6\mu U \left( \frac{dh/dx}{h^3} \right) \frac{z^2}{2} + C_1 z + C_2 \quad (2.24)$$

โดยที่  $C_1$  และ  $C_2$  เป็นค่าคงที่ สามารถหาได้จากสภาวะของแผ่นรองลื่น

## 2.8 การหาค่าความหนาของฟิล์มน้ำมันในรูปฟังก์ชันของ x



รูปที่ 2-7 แสดงความหนาของฟิล์มน้ำมันระหว่างดิสก์ 2 แผ่น

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

จากการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ จะได้สมการของความหนาฟิล์มน้ำมันในรูปของฟังก์ชัน x ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h(x) = h_0 \left\{ 1 + \frac{x^2}{2h_0} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right\} \quad (2.25)$$

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

จะได้

$$h(x) = h_0 \left\{ 1 + \left( \frac{x^2}{2Rh_0} \right) \right\} \quad (2.26)$$

## 2.9 การอินทิเกรตสมการเรโนลด์

การอินทิเกรตสมการเรโนลด์เป็นวิธีหาสมการแสดงการกระจายแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวทรงกลม จากสมการเรโนลด์ แสดงการไหลของของไหลหนึ่งมิติซึ่งมีการไหลแบบคงตัวไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาคือ

$$\frac{dP}{dx} = 6(U_1 + U_2)\mu \left( \frac{h - \bar{h}}{h^3} \right) = 6U\mu \left( \frac{h - \bar{h}}{h^3} \right) \quad (2.27)$$

เมื่อ U = ผลรวมของความเร็วที่ผิวทรงกลมทั้งสอง

$\mu$  = ค่าความหนืด

$\bar{h}$  = ความหนาของฟิล์มน้ำมันที่ตำแหน่งแรงดันสูงสุด

จากสมการที่ (2.27) ดังนั้นจะได้

$$\frac{dP}{dx} = 6U\mu \frac{h_0 \left\{ 1 + \frac{x^2}{2h_0 R} \right\} - h_0 \left\{ 1 + \frac{\bar{x}^2}{2h_0 R} \right\}}{h_0^3 \left\{ 1 + \frac{x^2}{2h_0 R} \right\}^3} \quad (2.28)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (2.28) จะได้สมการการกระจายของแรงดันไร้มิติของน้ำมันหล่อลื่นดัง

$$P^* = \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{4} + \frac{\sin 2\gamma}{4} - \sec^2 \gamma \left\{ \frac{3}{\gamma} \left( \gamma + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{\sin 2\gamma}{4} + \frac{\sin 4\gamma}{32} \right\} \quad (2.29)$$

ค่าคงที่  $\gamma$  เป็นค่าที่สามารถคำนวณหาได้จากสถานะของน้ำมันหล่อลื่นที่เป็นไปได้ในสถานะใดสถานะหนึ่งดังนี้

- สถานะ Full Sommerfeld

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

แทนค่าลงในสมการ (2.29) จะได้การกระจายความดันไว้มีคือ

$$P^* = -\frac{1}{12} \left\{ \sin 2\gamma + \frac{\sin 4\gamma}{2} \right\} \quad (2.30)$$

- สภาวะ Half Sommerfeld

คือ  $P=0$  ที่  $x \geq 0$

สามารถหาแรงต่อหน่วยความยาวในแนวแกนได้ดังนี้

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

$$\frac{W}{L} = 2U\mu \frac{R}{h_0} \quad (2.31)$$

- สภาวะเรโนลด์

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

แทนค่าสภาวะลงในสมการที่ (2.29) จะได้ค่าสมการการกระจายแรงดันไว้มีคือ ดังนี้

$$P^* = \frac{1}{2} \left[ \gamma + \frac{\pi}{2} + \frac{\sin 2\gamma}{2} - 1.2257 \left\{ \frac{3}{4} \left( \gamma + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{\sin 2\gamma}{2} + \frac{\sin 4\gamma}{16} \right\} \right] \quad (2.32)$$

หาแรงเนื่องจากแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นต่อความยาวในแนวแกน จะได้

$$\frac{W}{L} = \int_{-\infty}^{x_2} P dx = \int_{-\pi/2}^{\gamma_2} \frac{12U\mu R}{h_0} P^* \sec^2 \gamma d\gamma \quad (2.33)$$

## 2.10 การหาแรงเสียดทานระหว่างผิวของทรงกลม

จากสมการความเค้นเฉือนของนิวตัน โดยสมมติว่าค่าความหนืดของสารหล่อลื่นคงที่

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.34)$$

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

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \left( z - \frac{h}{2} \right) + \frac{U_1 - U_2}{h} \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่าความเค้นเฉือนเนื่องจากความฝืดที่ผิวทรงกลม

$$\tau_{0,h} = \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right)_{0,h} = \frac{\mu}{h} (U_1 - U_2) \pm \frac{h}{2} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.36)$$

เมื่อเครื่องหมายลบในเทอมสุดท้ายใช้กับ  $\tau_0$  เครื่องหมายบวกใช้กับ  $\tau_h$   
แรงเสียดทานเนื่องจากความหนืดสำหรับ Pressure zone คือ

$$\int_0^L \int_{x_1}^{x_2} \tau dx dy = \int_0^L \int_{x_1}^{x_2} \left( \frac{\mu(U_1 - U_2)}{h} \pm \frac{h}{2} \frac{\partial P}{\partial x} \right) dx dy \quad (2.37)$$

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

ถัดจากตำแหน่ง  $x_1 = x_2$  ชั้นฟิล์มจะแตกตัวเป็นกระแส ทำให้เกิดแรงดูดเนื่องจากแรงเสียดทานของกระแสซึ่งสามารถหาค่าสมการแรงเสียดทานได้ดังนี้

$$F = \mu(U_1 - U_2)L\sqrt{2R/h_0} \left\{ F^* + 6 \left( \frac{U_1 + U_2}{U_1 - U_2} \right) W^* X^* \right\} \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ชนิดของสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ใช้ในระบบการหล่อลื่นจะทำหน้าที่หลักใหญ่ๆ สองประการคือ ทำหน้าที่ลดหรือควบคุมแรงเสียดทาน ประการที่สองช่วยลดการสึกหรอที่ผิวชิ้นงานระหว่างที่ชิ้นงานมีการหมุนหรือเคลื่อนที่ ในการออกแบบระบบการหล่อลื่นและเลือกสารหล่อลื่นจะต้องพิจารณาถึง

1. ระยะห่างระหว่างผิวชิ้นงาน
2. แรงกระทำบนผิวชิ้นงาน
3. คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของผิวชิ้นงาน

แฟลคเตอร์ทั้งสามนี้จะเป็นตัวกำหนดชนิดของการหล่อลื่น ซึ่งการหล่อลื่นโดยทั่วไป จะแบ่งเป็นสองชนิดคือ

1. การหล่อลื่นที่มีฟิล์มของไหลหนา หรือการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก เป็นชนิดของการหล่อลื่นที่ผิวชิ้นงานมีสารหล่อลื่นที่เป็นฟิล์มของไหลหนา ดังนั้นสมรรถนะการหล่อลื่นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่นเป็นหลัก
2. การหล่อลื่นแบบเบาดารี เป็นชนิดของการหล่อลื่นที่ผิวชิ้นงานมีสารหล่อลื่นคั่นอยู่หนาเพียงหนึ่งหรือสองโมเลกุลเท่านั้น ดังนั้นกระบวนการหล่อลื่นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่นและคุณสมบัติของผิวชิ้นงานด้วย

สารหล่อลื่นที่จะกล่าวต่อไป คือสารหล่อลื่นสถานะของเหลว สารหล่อลื่นสถานะกึ่งของแข็ง และสารหล่อลื่นสถานะของแข็ง

#### 3.1 สารหล่อลื่นสถานะของเหลว

น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่นสถานะของเหลวที่ได้จากปิโตรเลียม ถ่านหิน น้ำมันดิน เป็นต้นส่วนใหญ่น้ำมันหล่อลื่นเป็นน้ำมันที่ได้จากปิโตรเลียม ดังนั้นในที่นี้จะพูดเฉพาะน้ำมันหล่อลื่นที่เป็นน้ำมันปิโตรเลียมเท่านั้น น้ำมันปิโตรเลียมชนิดส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมของคาร์บอนอยู่ประมาณ 83 – 87% มีไฮโดรเจนประมาณ 11 – 14% และมีส่วนผสมอื่นๆ ได้แก่ กำมะถัน ออกซิเจน และไนโตรเจน จะเห็นว่าน้ำมันปิโตรเลียมคิบบมีส่วนผสมส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนและไฮโดรเจน การจับตัวของคาร์บอนและไฮโดรเจนจะสามารถจับตัวได้หลายแบบ ซึ่งจะทำให้ได้คุณสมบัติของน้ำมันแตกต่างกันไป สามารถจำแนกออกเป็น พาราฟิน (Paraffins) โอลีฟิน (Olefins) เอโรมาติก (Aromatics) แนีฟทีน (Naphthen) และ เอสพาทีน (Asphalten) ผู้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นปิโตรเลียมสามารถเลือกชนิดหรือแหล่งน้ำมันปิโตรเลียมคิบบและกำหนดอัตราส่วนของน้ำมันคิบบจากแหล่งน้ำมันคิบบต่างๆ ในโลกประมาณ 0 – 40% เพื่อให้ได้น้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ น้ำมันปิโตรเลียมสามารถใช้เป็นน้ำมันปิโตรเลียมได้อย่างดี เนื่องจากทำให้ผิวชิ้นงานที่มีน้ำมันหล่อลื่นเปียก เป็นชั้นน้ำมันขณะที่ชิ้นงานมีการเคลื่อนไถลดูกัน น้ำมันปิโตรเลียมเป็นน้ำมันที่มีพิสัยความหนืดสูงสามารถเลือกใช้ได้ง่ายให้เหมาะกับงาน และน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปิโตรเลียมมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นมากกว่าของไหลอื่นเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น ส่วนผสมชนิดของน้ำมันปิโตรเลียม เช่น ส่วนผสมของพาราฟิน อโรมาติก และ แนีพรีน จะมีผลต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์อย่างมาก ตามตารางที่ 3-1

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

ตารางที่ 3-1 ผลของส่วนผสมของน้ำมันปิโตรเลียมต่อคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น คือ อัตราส่วนของค่าความเค้นเฉือนต่อความเครียดเฉือนของชั้นของน้ำมันหล่อลื่น โดยสมมติว่าน้ำมันหล่อลื่นเป็นของไหลนิวตอเนียน (newtonian fluid) ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นตัวกำหนดความสูญเสียพลังงานเนื่องจาก ความฝืด ประสิทธิภาพทางกล ความร้อนที่เกิดขึ้น การไหลของน้ำมัน ภาระที่สามารถรับได้ และความสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักร เช่น กาบรอลื่น หรือ เฟือง เป็นต้น

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ น้ำมันหล่อลื่น จะทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าต่ำลง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในทางปฏิบัติ สำหรับเครื่องยนต์ SAE ได้กำหนดน้ำมันหล่อลื่นตามค่าความหนืดที่อุณหภูมิที่กำหนดให้ ตามตาราง 3-2

ความหนืด เบอร์ SAE	ความหนืด ( $\mu\text{m}^2 / \text{s}$ )			
	-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	-	-	14.24	25.0
140W	-	-	25.0	42.7
250W	-	-	42.7	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

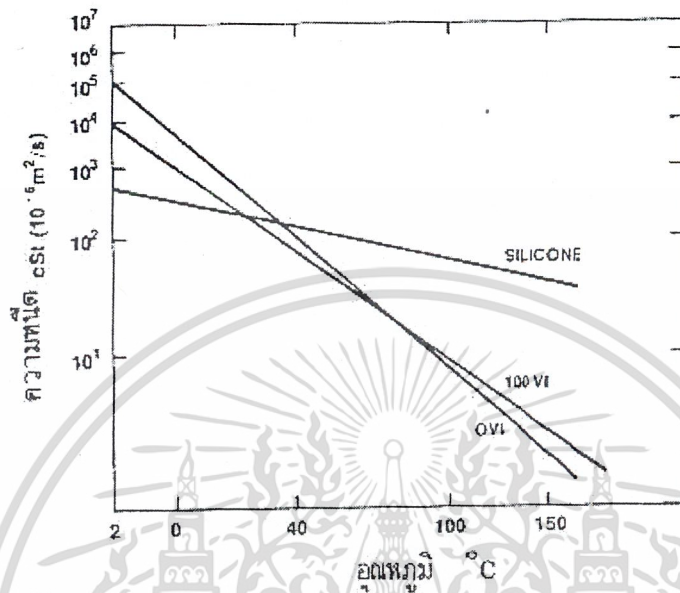
ตารางที่ 3-2 ชนิดของน้ำมันหล่อลื่นแบ่งตามเบอร์ SAE

เกรดน้ำมัน ISO VG	ความหนืดโดยเฉลี่ย M <sup>2</sup> /s ที่ 40°c	พิสัยค่าความหนืด m <sup>2</sup> /s ที่ 40°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 เป็นตารางแสดงค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นในทางอุตสาหกรรม กำหนดโดย ASLE-ASTM ซึ่งได้ใช้เป็นมาตรฐานของ ISO คือ Standard 3448 ของ ISO

เนื่องจากอุณหภูมิทำให้ค่าความหนืดของน้ำมันเปลี่ยนไป กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าความหนืดจะลดลง การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืดได้แสดงด้วยค่าดัชนีความหนืด (Viscosity Index) หรือ VI ค่า VI สูง แสดงว่าค่าความหนืดมีค่าความหนืดเปลี่ยนไปตามอุณหภูมिन้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีค่า VI ต่ำ รูป 3-1 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น เมื่อเปรียบเทียบกับซิลิคอน (Silicone)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-1 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น

เนื่องจากแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นจะทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนไป ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะมีผลต่อสมรรถนะของกาบรองลื่นหรือแผ่นรองลื่น เช่น ทำให้การะที่สามารรถรับได้มีค่าเปลี่ยนไป ทำให้แรงเสียดทานและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จะทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีค่าความหนืดลดลง ในทางปฏิบัติเมื่อเพิ่มแรงดันของน้ำมันหล่อลื่น 38 เท่า ของแรงดันบรรยากาศ จะมีผลของค่าความหนืดเท่ากับลดอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นเท่ากับ 1°C

คุณสมบัติอื่นที่ควรพิจารณา ได้แก่ ความหนาแน่น ความดันไอ ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ ความสามารถในการดูดซับแก๊ส ความร้อนจำเพาะ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน จุดเยือกแข็ง เป็นต้น

การใช้น้ำมันปิโตรเลียมเป็นน้ำมันหล่อลื่นนั้นมีข้อได้เปรียบที่สำคัญ คือ น้ำมันปิโตรเลียมมีส่วนผสมที่แตกต่างกัน ซึ่งจะให้คุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้นสามารถผสมหรือทำน้ำมันหล่อลื่นปิโตรเลียมให้มีคุณสมบัติตามความต้องการได้ไม่ยาก อย่างไรก็ตามน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของสารเติมแต่ง (Additive) เพื่อให้ได้น้ำมันที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับงานที่สุด รวมทั้งต้นทุนที่เหมาะสมด้วย เช่น น้ำมันหล่อลื่นของเครื่องทำความเย็น จะต้องมึคุณสมบัติไม่เป็นไขที่อุณหภูมิต่ำ น้ำมันหล่อลื่นกังหัน จะต้องสามารถต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน เพื่อจะได้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เป็นต้น

ชนิด	ชนิดน้ำมันปิโตรเลียม	คุณสมบัติของสารเติมแต่ง
น้ำมันเครื่องยนต์	พาราฟิน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน สามารถละลายสิ่งสกปรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิด	ชนิดน้ำมันปิโตรเลียม	คุณสมบัติของสารเติมแต่ง
		เพิ่มค่าดัชนีความหนืด ต้านทานการสึกหรอ ต้านทานการเกิดฟอง ต้านทานต่อการเกิดสนิม
น้ำมันหล่อลื่นกึ่งหนัก น้ำมันไฮดรอลิก	พาราฟิน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานต่อการเกิดสนิม ต้านทานการสึกหรอ ต้านทานการเกิดฟอง
น้ำมันหล่อลื่นเครื่องทำความเย็น	เนฟธีน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานต่อการกัดกร่อน
น้ำมันหล่อลื่นเครื่องจักรสิ่งทอ	พาราฟิน และ เนฟธีน	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
สารเพิ่มความสามารถในการละลายสิ่งสกปรก	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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 สารหล่อลื่นสถานะกึ่งของแข็ง

จาระบีเป็นสารหล่อลื่นที่เป็นส่วนผสมของน้ำมันแร่ กับสารเติมให้ข้น เช่น โลหะลิ้นเหมือนสบู่ ผสม หรืออาจจะเป็นน้ำมันสังเคราะห์ได้แก่ ซิลิโคน หรือ เอสเตอร์ (esters) ผสมกับสารเติมข้นอาจจะเป็นดิน (bentones) ซิลิกา คาร์บอนแบล็ค และ เทปลอน เป็นต้น

จาระบีเป็นของไหล Non-Newtonian คือ ให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือนไม่เชิงเส้น จาระบีได้ถูกนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นซึ่งมีทั้งข้อดีข้อเสีย กล่าวคือ การใช้จาระบีเป็นสารหล่อลื่นมีข้อดี คือ สามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นที่ความเร็วต่ำ ข้อเสียคือสามารถระบายความร้อนได้ดี ไม่สามารถไหลพาเอาเศษโลหะที่เกิดจากการสึกหรอออกจากคานรองลื่นหรือแผ่นรองลื่น จาระบีไม่เหมาะที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่นที่ความเร็วสูงๆ อย่างไรก็ตาม จาระบีสามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นคล้ายลูกปืนได้ที่ความเร็วสูงถึง 100,000 รอบต่อนาที เป็นเวลานานถึง 100 ชั่วโมง

จาระบีที่มีส่วนผสมของลิเทียม (Lithium-base grease) เป็นจาระบีที่เป็นส่วนผสมของลิเทียม (Lithium soap) ซึ่งเป็นกรด 12-ไฮดรอกซี (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 ใช้เป็นสารหล่อลื่นเครื่องจักรกลที่มีความเร็วต่ำ อุณหภูมิต่ำที่มีการกักความร้อนสูง เนื่องจากจาระบีชนิดนี้มีคุณสมบัติสามารถต้านทานต่อการกักความร้อนได้ดี

จาระบีที่มีส่วนผสมของโซเดียม (Sodium-base grease) เป็นจาระบีที่มีอุณหภูมิเริ่มหยดตัวได้ (dropping point) 121 – 232°C โครงสร้างมีความเสถียรสูง มีความสามารถทนต่อการกักความร้อนได้ไม่ดี แต่สามารถใช้กับงานที่มีอุณหภูมิสูงได้เป็นอย่างดี

จาระบีที่มีส่วนผสมของอลูมิเนียม (Aluminium-base grease) มีลักษณะเหมือนวุ้นใส 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 ไม่มีอุณหภูมิเริ่มหยดตัวจึงเหมาะที่จะใช้กับงานที่มีอุณหภูมิสูงมากๆได้

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

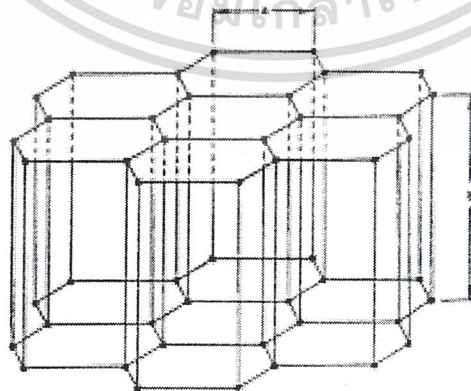
### 3.3 สารหล่อลื่นสถานะของแข็ง

สารหล่อลื่นสถานะของแข็งมักจะใช้กับงานอุตสาหกรรมที่สารหล่อลื่นสถานะของเหลวไม่สามารถใช้ได้ เช่น งานอุตสาหกรรมที่มีอุณหภูมิสูงมากเกินไปหรือในงานที่เกิดความเค้นสูงที่ผิวชิ้นงาน ซึ่งสารหล่อลื่นสถานะของแข็งสามารถรับความเค้นได้มากกว่าสารหล่อลื่นสถานะของเหลว สารหล่อลื่นของแข็งยังมีข้อดีในการใช้งานเหนือสารหล่อลื่นสถานะของเหลว คือไม่จำเป็นต้องมีภาชนะบรรจุสารหล่อลื่น และไม่จำเป็นต้องมีซีล (Seal) ที่ใช้ในการป้องกันการรั่วไหลของน้ำมันหล่อลื่น และยังสามารถป้องกันสิ่งสกปรกหรือสิ่งแปลกปลอมเข้าไปในระบบหล่อลื่น

สารหล่อลื่นสถานะของแข็งจำพวกผง ยังใช้ผสมลงในน้ำมันหล่อลื่นจาระบี และแก๊สเพื่อช่วยในการหล่อลื่น สารหล่อลื่นสถานะของแข็งยังนิยมทำเป็นฟิล์มหรือชั้นของสารหล่อลื่นของแข็ง สมรรถนะของการหล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นของแข็ง จะขึ้นกับคุณสมบัติของผิวชิ้นงานและชนิดของสารหล่อลื่นของแข็ง จะเห็นว่าสารหล่อลื่นสถานะของแข็งไม่สามารถใช้งานทั่วๆ ไป แต่จะใช้เป็นสารหล่อลื่นกับงานประเภทที่มีสภาวะอุณหภูมิสูงมากๆ สภาวะอุณหภูมิต่ำมากๆ สภาวะสูญญากาศภายในสภาวะภาวะสูงมากๆ ในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีรุนแรงและในอุปกรณ์นิวเคลียร์

#### 3.3.1 สารหล่อลื่นของแข็งเป็นผง (Particulate)

สารหล่อลื่นมีลักษณะเป็นผงทำมาจากวัสดุอนินทรีย์ อาจจะใช้สารหล่อลื่นคั่นระหว่างชิ้นงานที่ต้องการหล่อลื่น หรืออาจจะใช้ผงสารหล่อลื่นผสมลงในสารหล่อลื่นสถานะของเหลว เช่น น้ำมันหล่อลื่นหรือ จาระบี ผงสารหล่อลื่นอาจจะเป็น แกรไฟต์ โมลิบดีนัม ไดซัลไฟด์ (molybdenum disulfide) แทลค์ (talc) ไมก้า (mica) เวอร์มิคูไลต์ (vermiculite) เทฟลอน (Teflon) และ เกลืออนินทรีย์อื่นๆ 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 และโมลิติน้ำมโคซัลไฟด์ มักจะทำเป็นผงใช้ผสมลงในสารหล่อลื่นอื่น เช่น น้ำ หรือน้ำมันหล่อลื่น เป็นต้น บางครั้งอาจจะเติมผงเทปลอน หรือ ผงตะกั่วเนื่องจากเทปลอน และผงตะกั่วจะช่วยป้องกันหรือชะลอการจับตัวของผิวชิ้นงาน เมื่อฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นถูกทำลาย เนื่องจากรับภาระสูงเกิดความเค้นสูงมากเกินไป ทำให้ผิวชิ้นงานร้อนจัด จะเกิดการจับติดกันของผิวชิ้นงาน

ปริมาณของสารหล่อลื่นของแข็งที่ใช้เติมลงใน จาระบีหรือน้ำมันหล่อลื่นจะมีค่าประมาณตั้งแต่ 0.5% ถึง 60% ตามปกติสำหรับงานทั่วไปจะใช้แกรไฟต์ และ โมลิติน้ำมโคซัลไฟด์ เป็นผงสารหล่อลื่น ใช้เติมลงในจาระบีหรือน้ำมันหล่อลื่นประมาณ 5%

วัสดุ	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน		
	26.7°c	260°c	93.8°c
LiF	0.3 – 0.4	0.9	0.65 – 0.75
AlPO <sub>4</sub>	0.6	-	0.51
PbS	0.47	0.27 – 0.47	0.15 – 0.19
PbS / MaS <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub>	0.34	0.10	-
BN	0.3	0.15	-
PbF <sub>2</sub>	0.6	0.6	-
TuS <sub>2</sub>	0.7	0.6	-
WS <sub>2</sub>	0.7 – 1.6	0.2	-
ไมก้า	0.38 – 0.89	-	-
แร่แท่งลิค	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 โมลิติน้ำมโคซัลไฟด์ โบรอนไนไตร (Boron

nitride) และ แทลค์ (talc) จะมีโครงสร้างเป็นผลึกจับตัวกัน ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ

ถึงแม้ว่าแกรไฟต์จะไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิต่ำเหมือนโลหะ แต่แกรไฟต์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ที่อุณหภูมิสูง แกรไฟต์บริสุทธิ์จะสูญเสียน้ำหนักของมัน 1% ของน้ำหนักทั้งหมดในเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 520 – 560°C ในอากาศ หรือแกรไฟต์มีอัตราการเกิดออกซิเดชันเท่ากับ 30 กรัม ต่อตารางเมตรในหนึ่งชั่วโมง สารที่ผสมอยู่ในแกรไฟต์จะมีผลต่อการเกิดออกซิเดชันของแกรไฟต์ เช่น เมื่อแกรไฟต์มีส่วนผสมของแบเรียม (Barium) เพียง 1% จะทำให้แกรไฟต์มีอัตราการเกิดออกซิเดชันเป็น 2000 กรัม ต่อตารางเมตรในหนึ่งชั่วโมง และถ้าแกรไฟต์มีส่วนผสมของสังกะสีโบเรท (Zinc borate) เพียง 2% ก็จะสามารถช่วยลดอัตราการเกิดออกซิเดชันลงเหลือเพียง 7.4 กรัม ต่อตารางเมตรในหนึ่งชั่วโมง โมลิตินัมไดซัลไฟด์และแกรไฟต์ฟลูออไรด์ (Graphite fluoride) จะเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500°C

แกรไฟต์และ โมลิตินัมไดซัลไฟด์จะมีปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกับเหล็กและอลูมิเนียม ทำให้เกิดการกัดกร่อน ความชื้นจะไม่ทำให้การกัดกร่อนเปลี่ยนไปได้ สำหรับอลูมิเนียมสามารถป้องกันการกัดกร่อนด้วยการทำให้ผิวอลูมิเนียมมีสภาพเป็นขี้ผึ้ง

โมลิตินัมไดซัลไฟด์  $MoS_2$  มีโครงสร้างเป็นผลึกเหมือนโครงสร้างของแกรไฟต์ มีคุณสมบัติสามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นได้ดี มีอุณหภูมิมะลิดที่ 450°C และทำปฏิกิริยากับอากาศที่อุณหภูมิ 400°C แสดงว่าโมลิตินัมไดซัลไฟด์  $MoS_2$  ไม่เหมาะที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นโมลิตินัมไดซัลไฟด์สามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นได้ดีในแก๊สไนโตรเจนแห้ง และไม่เหมาะในการใช้เป็นสารหล่อลื่นในแก๊สออกซิเจน ไม่ควรใช้โมลิตินัมไดซัลไฟด์เป็นสารหล่อลื่นในบริเวณที่มีอากาศชื้น ยังพบว่าโมลิตินัมไดซัลไฟด์ทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าในการหล่อลื่นแบบเบาดารี ทำให้เกิด  $FeS$

เมื่อใช้โมลิตินัมไดซัลไฟด์ผสมในน้ำมันจะต้องผสมอย่างน้อย 10% จึงจะทำให้มีผลของ  $MoS_2$  ในน้ำมันหล่อลื่น

### 3.3.3 วัสดุประกอบ (composites)

เนื่องจากสารหล่อลื่นสถานะของแข็งจะต้องจับตัวกับโลหะ ในระบบการหล่อลื่นวิธีการให้สารหล่อลื่นเกาะจับตัวกับโลหะ สามารถทำได้หลายวิธีที่นิยมมากที่สุด คือ บอนฟิล์ม (Bonded films)

บอนฟิล์มจะประกอบด้วยชั้นของสารหล่อลื่นของแข็งจับยึดติดกับผิวโลหะที่ต้องการ การหล่อลื่นด้วยน้ำยาประสาน ได้แก่ เรซิน ซิลลิเกต (Silicate) หรือ เซรามิก (Ceramic) แล้วอบให้ความร้อนหรือทิ้งให้แห้งในบรรยากาศ สารหล่อลื่นที่นิยมใช้มากที่สุดได้แก่  $MoS_2$  แกรไฟต์ เทปลอน และ  $WS_2$  บางครั้งใช้ส่วนผสมของสารหล่อลื่นผสมกันตามอัตราส่วน เพื่อให้เหมาะกับการใช้งานเฉพาะ

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

ตัวประสานสำหรับให้สารหล่อลื่นแห้งจับตัวที่อุณหภูมิบรรยากาศ คือ เทอร์โมพลาสติก เรซิน (Thermoplastic resin) เช่น พวกลเซลลูโลซิก (Cellulosics) และ อะครีลิก (Acrylics) จะได้ฟิล์มของสารหล่อลื่นที่ค่อนข้างแข็งจับประสานกับผิวโลหะ

สารหล่อลื่นของแข็งที่ได้จาก เรซินบอนด์ (Rasin bonded) ที่ต้องใช้ความร้อนในการอบให้แห้ง และแข็ง เป็นที่นิยมมากที่สุด ตามปกติประกอบด้วยส่วนผสมของ  $\text{MoS}_2$  90% และแกรไฟต์ 10% ในเรซินเทอร์โมเซตติง (Thermosetting rasin) ได้แก่ อัลไคด์ (Alkyds) ฟีนอลิก (Phenolics) อีพ็อกซี (Epoxies) และซิลิคอน (Silicone) บางครั้งจะมีส่วนผสมของเงินและตะกั่ว การอบจะต้องใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ  $150 - 200^\circ\text{C}$  การอบแข็งด้วยความร้อนจะให้ผลดีกว่าอบแห้งที่อุณหภูมิบรรยากาศ จะใช้ในงานที่มีภาระสูง และทำให้อายุการใช้งานยาวนานขึ้น

### 3.3.4 โลหะอ่อนนุ่ม

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

กาบรองลื่นที่เคลือบด้วยโลหะอินเดียม (Indium-coated bearings) จะใช้ในเครื่องบิน เครื่องยนต์ดีเซล เครื่องยนต์แก๊ส โซลิน เพราะกาบรองลื่นที่เคลือบด้วยโลหะอินเดียมกับตะกั่วบนผิวเหล็กกล้า โลหะอินเดียมจะเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแก่กาบรองลื่น และยังช่วยให้สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และช่วยให้มีคุณสมบัติต่างๆ ที่อุณหภูมิสูงดีขึ้น กาบรองลื่นที่ใช้กับงานหนักๆ บางครั้งจะเคลือบด้วยเงิน

โลหะอ่อนนุ่มจะมีค่าความเค้นเฉือนต่ำ ดังแสดงในตาราง 3-7 เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ และกาบรองลื่นสามารถรับภาระได้สูง จำเป็นจะต้องเคลือบโลหะนุ่มเป็นฟิล์มบางๆ ความหนาของฟิล์มโลหะนุ่มจะอยู่ระหว่าง  $10^{-4} - 10^{-5}$  เซนติเมตร

รูปที่ 3-3 แสดงการเปรียบเทียบการหล่อลื่นที่มีฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น การหล่อลื่นที่มีฟิล์มโลหะ กับในกรณีที่ไม่มีสารหล่อลื่น พบว่าในกรณีที่ไม่มีสารหล่อลื่นจะคล้ายกับในกรณีที่มีน้ำมันหล่อลื่น กล่าวคือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าคงที่เหมือนกัน แต่ในกรณีที่มีฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่ไม่มีสารหล่อลื่น สำหรับในกรณีที่มีสารหล่อลื่นเป็นโลหะอินเดียมเคลือบผิวเหล็กกล้า จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะลดลงไปตามภาระ

โลหะ	ความแข็งแรงเฉือน (กรัมต่อตารางมิลลิเมตร)	
	คำนวณจากแรงเสียดทาน	สำหรับโลหะบริสุทธิ์
อินเดียม	325	220
ตะกั่ว	1,600	750
ทองแดง	28,000	16,000
เหล็กกล้า	140,000	90,000

ตารางที่ 3-7 ความแข็งแรงเฉือนของโลหะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### น้ำมันหล่อลื่น

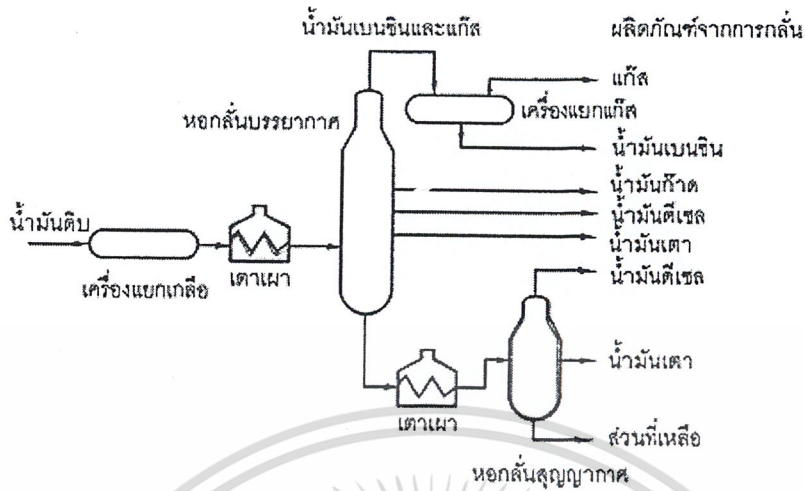
สารหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมาย ซึ่งถ้าแบ่งตามสถานะจะแบ่งออกได้เป็นสี่ชนิด คือ ก๊าซ ของเหลว สารกึ่งแข็ง (semi - solid) และ ของแข็ง ในจำนวนของสารหล่อลื่นทั้งหมดที่ใช้กัน สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กัน มากที่สุด และรองลงมาก็คือ สารกึ่งแข็งซึ่งได้แก่ จาระบี

การที่สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวนิยมใช้กันแพร่หลายมากนั้น เพราะสามารถแยกผิววัตถุทั้งสองได้อย่างสมบูรณ์ และสามารถรับแรงที่กระทำได้มาก ของเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นมีน้ำ สารละลายกับน้ำ (aqueous solution) น้ำมันแร่ (mineral oil) น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ และน้ำมันสังเคราะห์ (synthetic oil) ในบรรดาสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวนี้ น้ำจะมี การใช้งานค่อนข้างจำกัด เช่น ใช้ในการหล่อลื่นเบรียงไม้ หรือเบรียงยางของกังหันวิดน้ำ หรือเครื่องสูบน้ำบางประเภท ส่วนสารละลายกับน้ำจะใช้เฉพาะในการหล่อลื่นชิ้นงานของเครื่องกลึง เครื่องเจียรในและเครื่องไสเป็นหลัก สำหรับ สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวที่ใช้กันมากที่สุดคือ น้ำมันหล่อลื่นซึ่งจะมีอยู่สองชนิดคือ น้ำมันแร่ และน้ำมันสังเคราะห์ ส่วน น้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากมีราคาแพง

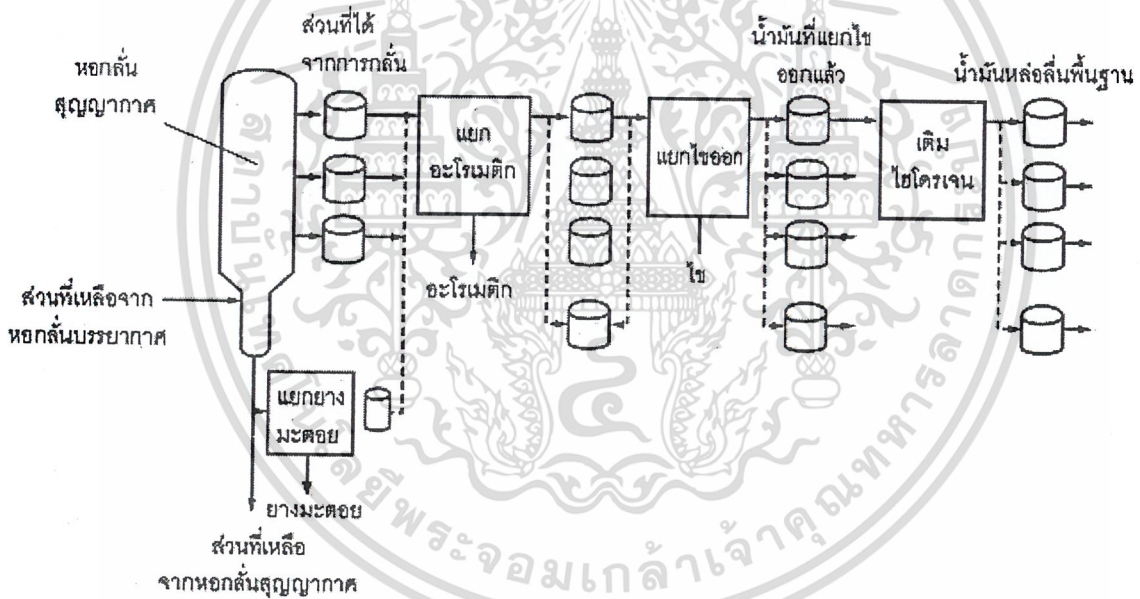
#### 4.1 น้ำมันแร่

น้ำมันแร่เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ (crude oil) น้ำมันหล่อลื่นได้มาจากส่วนที่หนัก ของน้ำมันดิบที่เหลือจากการกลั่นเอาส่วนที่เบา ได้แก่ ก๊าซน้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด และน้ำมันดีเซล ออกไปโดยหอกลั่น บรรยากาศ (atmospheric tower) ตามที่แสดงในรูปที่ 4-1 กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นจากน้ำมันดิบเริ่มต้นจากการนำเอา ส่วนที่เหลือจากหอกลั่นบรรยากาศเข้าไปกลั่นอีกครั้งหนึ่งในหอกลั่นสุญญากาศ (vacuum tower) เพื่อแยกส่วนที่เหลือจาก หอกลั่นบรรยากาศออกเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีจุดเดือด (boiling point) เหมือนกัน โดยความดันในหอกลั่นสุญญากาศจะมีค่าต่ำกว่าหนึ่งส่วนสิบของความดันบรรยากาศ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการแตกสลาย (cracking) ที่อุณหภูมิสูง คุณสมบัติที่สำคัญที่ถูกควบคุมโดยการกลั่นสุญญากาศก็คือความหนืด (viscosity) จุดวาบไฟ (flash point) และกากคาร์บอน (carbon residue) ซึ่งก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดต่าง ๆ กันออกมา หลังจากที้ออกจากหอกลั่นสุญญากาศแล้วก็จะนำไปผ่าน กระบวนการต่าง ๆ เพื่อแยกส่วนที่ไม่ต้องการออกให้เหลือผลิตภัณฑ์หรือน้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติตามต้องการ ตัวอย่าง ของกระบวนการเหล่านี้ได้แก่ กระบวนการแยกยางมะตอยออกโดยใช้โพรเพนเป็นสายละลาย (propane deasphalting) กระบวนการแยกเอาสารประกอบพวอะโรเมติก (aromatic compounds) ออกจากพวกที่ไม่ใช่อะโรเมติก (nonaromatic compound) ซึ่งเป็นการเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น ได้แก่ การเพิ่มเสถียรภาพในด้านความร้อนและการรวมตัวกับ ออกซิเจน และเพิ่มดัชนีความหนืด (viscosity index) กระบวนการอันต่อไปก็คือ กระบวนการแยกเอาไขออก (dewaxing) เพื่อลดจุดไหลเทให้ต่ำลง ให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนกระบวนการสุดท้ายก็คือ การเติม ไฮโดรเจน (hydro - finishing) เพื่อเปลี่ยน โครงสร้างของโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดสีและสารที่ไม่เสถียรทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีสีจางลง และช่วยเพิ่มคุณสมบัติบางประการ กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นดังกล่าวได้แสดงไว้ตามรูปที่ 4-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-1 กลั่นน้ำมันดิบ



รูปที่ 4-2 ขบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากการผลิตตามกระบวนการผลิตดังกล่าวข้างต้นเรียกว่า น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (lube base stock) ซึ่ง โดยทั่วไปยังไม่สามารถนำไปใช้ในการหล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลได้ ทั้งนี้เนื่องจากยังมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นฐานเสียก่อน วิธีที่นิยมใช้กันก็คือการใส่สารเพิ่มคุณภาพ (additives) เข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 น้ำมันสังเคราะห์

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่ที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบนั้น แม้ว่าจะผ่านกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบนั้น แม้ว่าจะผ่านกระบวนการมากมายที่ใช้จ่ายจัดตั้งที่ไม่ต้องการออกไป แต่น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้ออกมานั้นยังคงเป็นของผสมของสารประกอบหลายตัว ซึ่งไม่มีทางที่จะเลือกเอาเฉพาะสารที่มีคุณสมบัติที่สุดได้ หรือถ้ามีก็จะได้ผลผลิตต่ำให้การผลิตไม่คุ้มค่า ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่จึงมีคุณสมบัติเฉลี่ยของของผสมซึ่งประกอบด้วยสารประกอบที่เหมาะสมมากที่สุดและน้อยที่สุด เป็นผลให้น้ำมันแร่มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาน้ำมันหล่อลื่น พื้นฐานประเภทน้ำมันสังเคราะห์ขึ้นมา น้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมัน พื้นฐานที่ได้จากกระบวนการทางเคมี ซึ่งเป็นการรวม ตัวของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ให้ได้น้ำมันที่มีความหนืด เพียงพอที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่น โดยสารประกอบเริ่มต้นที่ใช้ในการผลิตน้ำมันสังเคราะห์มักจะได้มาจากผลิตภัณฑ์ ปิโตรเลียม และเนื่องจากน้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันที่สร้างขึ้นจากกระบวนการเคมี จึงสามารถควบคุมให้มีโครงสร้าง โมเลกุลตามที่ต้องการ และมีคุณสมบัติตามที่คาดหวังไว้ได้

ข้อได้เปรียบที่สำคัญของน้ำมันสังเคราะห์ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ สามารถนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าน้ำมันแร่ คือ ใช้ได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าและสูงกว่าของน้ำมันแร่ นอกจากนี้ น้ำมันสังเคราะห์บางประเภท ยังให้คุณสมบัติเฉพาะ เช่น ผสมเข้ากันกับน้ำได้ และไม่ติดไฟ เป็นต้น

สำหรับน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ที่ใช้กันอยู่ สามารถแบ่งได้เป็นห้ากลุ่ม คือ

### 4.2.1 ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์ (synthesized hydrocarbons)

เป็นไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์ที่ผลิตจากวัตถุดิบ ที่ได้มาจากน้ำมันดิบที่ใช้กันมากมีอยู่สามชนิด คือ โอลิฟิน โอลิโกเมอร์ (olefin oligomers), อัลคิลเตตระอะโรมาติก (alkylated aromatics) และ โพลิบิวทีนส์ (polybutenes) ข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ มีความมั่นคง ที่อุณหภูมิสูง อายุการใช้งานยาวมีดัชนีความหนืดสูง มีการไหลที่อุณหภูมิต่ำไม่มีไข และมีการระเหยต่ำ

### 4.2.2 เอสเทอร์อินทรีย์ (organic esters)

เป็นสารหล่อลื่นที่ได้มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็น สารหล่อลื่นของเครื่องยนต์เจ็ทของอากาศยาน และใช้ในระบบไฮดรอลิก เป็นต้น เอสเทอร์อินทรีย์ที่ใช้กันมีอยู่ สองชนิด ชนิดแรกคือ ไดเบสิกเอซิดเอสเทอร์ (dibasic acid esters) บางครั้งเรียกว่า ไดเอสเทอร์ (diesters) ซึ่งได้ จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างไดเบสิกเอซิด (dibasic acid) กับ โมโนไฮดรอลิกแอลกอฮอล์ (monohydric alcohol) อีก ชนิดหนึ่งก็คือ โพลีโอลเอสเทอร์ (polyol esters) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง โพลีไฮดรอลิกแอลกอฮอล์ (polyhydric alcohol) กับ โมโนเบสิกเอซิด (monobasic acid) ข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ มีความ มั่นคงที่อุณหภูมิสูง มีการไหลที่อุณหภูมิต่ำ และมีอายุการใช้งานยาว

### 4.2.3 โพลีไกลคอลส์ (polyglycols)

เป็นสารหล่อลื่นที่มีจุดเดือดสูงและจุดไหลเทต่ำเหมาะสำหรับสภาพการ ใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น ใช้เป็นน้ำมันเบรก และน้ำมันไฮดรอลิกที่ติดไฟได้

### 4.2.4 ฟอสเฟตเอสเทอร์ (phosphate esters)

เป็นสารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติทนไฟ จึงใช้เป็นน้ำมันไฮดรอลิก สำหรับอากาศยาน และน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.5 น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์อื่นๆ

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

แม้ว่าน้ำมันสังเคราะห์จะมีคุณสมบัติโดยทั่วไปดีกว่าน้ำมันแร่ก็ตาม แต่สำหรับการนำไปใช้งานบางประเภท น้ำมันสังเคราะห์ก็อาจจะยังไม่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมทุกด้าน จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันสังเคราะห์ โดยการใส่สารเพิ่มคุณภาพเข้าไปเช่นเดียวกับการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันแร่

#### 4.3 สารเพิ่มคุณภาพ

สารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน โดยทั่วไปเป็นสารประกอบทางเคมี ซึ่งที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายตัว สารเพิ่มคุณภาพแต่ละตัวจะมีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเฉพาะอย่าง โดยพอที่จะแบ่งตามผลที่มีต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานออกได้เป็นสามพวก คือ พวกแรก จะเป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ให้คุณสมบัติใหม่ที่เป็นประโยชน์ต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน พวกที่สองเป็นสารเพิ่มคุณภาพ ที่ปรับปรุงคุณสมบัติที่มีอยู่แล้วให้ดีขึ้น และพวกสุดท้ายเป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ทำหน้าที่ในการลดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการซึ่งเกิดในช่วงการทำงานลง

การที่จะเติมสารเพิ่มคุณภาพตัวใดและจำนวนเท่าใดลงไปในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานนั้น จะขึ้นอยู่กับลักษณะของการนำไปใช้งาน โดยจะต้องคำนึงถึงผลข้างเคียงที่เกิดขึ้นด้วย เนื่องจากสารเพิ่มคุณภาพบางตัวแม้จะทำให้ คุณสมบัติประการใดประการหนึ่งดีขึ้น แต่ก็อาจจะทำให้คุณสมบัติประการอื่นเสื่อมลงไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าใส่ เข้าไปมากเกินไป หรือถ้าสารเพิ่มคุณภาพนั้นไปทำปฏิกิริยากับสารเพิ่มคุณภาพแต่ละตัวจึงต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ น้ำมันหล่อลื่นทำงานได้อย่างดีที่สุด และจะต้องมีการทดสอบให้แน่ใจว่าจะไม่มีผลข้างเคียงที่ไม่ต้องการเกิด ขึ้น ซึ่งในกรณีทั่ว ๆ ไปจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเติมสารเพิ่มคุณภาพเข้าไปอีก

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่อเติมสารเพิ่มคุณภาพเข้าไปแล้วก็จะเรียกว่า น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป ซึ่งบริษัท ผู้ผลิตแต่ละราย มักจะตั้งชื่อเฉพาะของแต่ละผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมา สำหรับสารเพิ่มสารคุณภาพที่นิยมใช้กันมี ดังต่อไปนี้

##### 4.3.1 สารลดจุดไหลเท (pour point depressants)

เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการยับยั้งการเกิดผลึกไขที่ ป้องกันไม่ให้ น้ำมันไหลที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นสารนี้จึงช่วยให้จุดไหลเทของน้ำมันหล่อลื่นต่ำลง ทำให้สามารถ ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ได้ สารที่ใช้ลดจุดไหลเทจะเป็นพวกโพลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งที่ใช้กันอยู่มีสองชนิด คือ อัลคิลอะโรมาติกโพลิเมอร์ (alkylaromatic polymers) ทำหน้าที่ในการดูกลืนผลึกของไขเมื่อเกิดขึ้นเพื่อป้องกัน ไม่ให้ผลึกเติบโตและยึดติดกันชนิดที่สองคือ โพลิมทาคริเลต (polymethacrylates) ทำหน้าที่ที่ตกผลึกร่วมกับไขเพื่อ ป้องกันไม่ให้ผลึกเติบโต สำหรับอุณหภูมิของจุดไหลเทของน้ำมันหล่อลื่นเมื่อเติมสารนี้เข้าไปแล้ว โดยทั่วไปจะลด ลงประมาณ 11 ถึง 17 องศาเซลเซียส

##### 4.3.2 สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (viscosity index improvers)

เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยไม่ให้ความหนืดของ น้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงมาก เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสารเพิ่มค่าดัชนี ค่าหนืดจะเป็นพวกโพลิเมอร์ที่มีน้ำหนัก โมเลกุลสูง และมีโครงสร้างเป็นลูกโซ่ยาว (long chain) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการเพิ่มความหนืดสัมพัทธ์ของน้ำมัน หล่อลื่นที่อุณหภูมิสูงมากกว่าการเพิ่มความหนืดสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเป็นผลมาจากการที่โพลิเมอร์ดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลจะยืดออกและมีปฏิกิริยากันระหว่างโมเลกุล ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น สำหรับสารที่นิยมใช้เป็นสารเพิ่มค่าดัชนีความหนืดมีหลายตัว เช่น เมทาคริเลตโพลิเมอร์ (methacrylate polymers) , โอลิฟินโพลิเมอร์ (olefin polymers) และ อะคริเลตโพลิเมอร์ (acrylate polymers) เป็นต้น

#### 4.3.3 สารป้องกันการเกิดฟอง (defoamants)

ใช้ป้องกันการเกิดฟองอากาศที่ผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่นเมื่อน้ำมันถูกหมุนเวียนใช้ในระบบ สารนี้จะทำหน้าที่โดยโมเลกุลของสารจะเข้าไปติดกับฟองอากาศทำให้ฟองอากาศ เล็ก ๆ รวมตัวกันเป็นฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้น ลอยขึ้นผิวและแตกออกในที่สุด สำหรับสารที่นิยมใช้เป็นสารป้องกัน การเกิดฟอง คือ ซิลิโคนโพลิเมอร์ (silicone polymer) และ พวกโพลิเมอร์อินทรีย์ (organic polymer)

#### 4.3.4 สารป้องกันการออกซิเดชัน (oxidation inhibitors)

เมื่อน้ำมันหล่อลื่นร้อนและสัมผัสกับอากาศก็จะเกิด ปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันหล่อลื่นและออกซิเจนในอากาศที่เรียกว่าออกซิเดชันขึ้น ผลของการเกิดออกซิเดชันจะทำให้ ความหนืดและความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดวาร์นิช และตะกอนสารป้องกัน ออกซิเดชันก็คือ สังกะสีไดไทโอฟอสเฟต (zinc dithiophosphate)

#### 4.3.5 สารป้องกันการกัดกร่อน (corrosion inhibitors)

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในระบบหล่อลื่นโดยน้ำมันหล่อลื่น นั้นมีหลายชนิด แต่ที่สำคัญที่สุดมีสองชนิดก็คือ การกัดกร่อนซึ่งเกิดจากกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในตัวหรือน้ำมันเอง และ การกัดกร่อนอันเนื่องมาจากสารปนเปื้อนที่ถูกนำและพาไปโดยน้ำมัน สำหรับสารป้องกันการกัดกร่อนที่ใช้กันทั่วไป เป็นสารตัวเดียวกับสารป้องกันการออกซิเดชัน ซึ่งก็คือ สังกะสีไดไทโอฟอสเฟต แต่สารที่มีซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสก็ถูกนำมาใช้ด้วย

#### 4.3.6 สารป้องกันสนิม (rust inhibitor)

ใช้เพื่อป้องกันสนิมที่อาจเกิดขึ้นผิวของชิ้นส่วน โลหะที่มีการหล่อลื่น ด้วยน้ำมันสารที่ใช้โดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบที่มีการยึดติดกับผิวของโลหะได้ดี โดยสารป้องกันสนิมจะทำปฏิกิริยากับผิวโลหะเกิดเป็นฟิล์มเกาะติดกับผิวเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำเข้าถึงผิวโลหะ สารที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ อะไมนซัคซิเนต (amine succinates) และอัลคาไลเอิร์ทซัลโฟเนต (alkaline earth sulfonates)

#### 4.3.7 สารชะล้างและกระจายสิ่งสกปรก (detergents and dispersants)

ใช้เพื่อชะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวของ ชิ้นส่วน และกระจายมิให้รวมตัวกันเป็นโคลนหรือตะกอน ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เผาไหม้ ภายใน ได้แก่ เครื่องยนต์เบนซิน และเครื่องยนต์ดีเซลโคลนหรือตะกอนที่เกิดขึ้นจะอุดช่องทางน้ำมันหล่อลื่น และ จะไปรวมกันอยู่ด้านหลังของแหวนลูกสูบ ซึ่งอาจทำให้แหวนติดตายได้สารชะล้างจะทำหน้าที่ในการป้องกันไม่ให้ เกิดโคลนหรือตะกอน สารที่เป็นตัวชะล้างที่ใช้กันในปัจจุบันได้แก่ สบู่อินทรีย์ (organic soaps) และบาเรียม (barium), แมกนีเซียมและแมกนีเซียมซัลโฟเนต (magnesium sulfonates) เป็นต้น ส่วนสารกระจายสิ่งสกปรกจะทำ หน้าที่ในการกระจายหรือทำให้สารที่จะรวมตัวกันเป็นโคลนแขวนลอยอยู่ในน้ำมัน สารที่เป็นตัวกระจายที่ใช้กัน ได้แก่ โพลิเมอร์ซัคซิไมด์ (polymeric succinimides) และ เบนซิลไมด์ (benzylamides) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.8 สารป้องกันการสึกหรอ (antiwear additives)

เป็นสารที่ช่วยลดความเสียหายและการสึกหรอ ภายใต สภาวะการหล่อลื่นแบบเบาน์ดารี (boundary lubrication) ซึ่งก็คือในสภาวะที่ฟิล์มของน้ำมันที่จะแยกผิวสัมผัสได้ อย่างสมบูรณ์ไม่สามารถคงอยู่ได้ สารป้องกันการสึกหรอที่ใช้กันแบ่งออกเป็นสองประเภทตามความต้องการของการ ใช้งาน ประเภทแรกเป็นสารที่ช่วยลดความเสียหายและการสึกหรอสำหรับสภาวะการทำงานเบา สารนี้บางครั้ง เรียกว่าสารเพิ่มคุณภาพสำหรับกรหล่อลื่นแบบเบาน์ดารี (boundary Lubrication additives) ได้แก่ กรดไขมัน (fatty acids) และน้ำมันไขมัน (fatty oils) ประเภทที่สองเป็นสารที่ช่วยลดความเสียหายและการสึกหรอภายใต สภาวะความดันสูงมาก เรียกว่า Extreme Pressure Additive (EP) ซึ่งจะทาหน้าที่โดยทำปฏิกิริยาทางเคมีกับผิวโลหะ โดยจะเกิดเป็นฟิล์มเคลือบที่ผิวโลหะป้องกันการสัมผัสโดยตรงของผิวโลหะ สาร EP โดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบ ของซัลเฟอร์ คลอรีน หรือไอซไฟอรัส ตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัวรวมกัน

#### 4.4 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นประเภทน้ำมันแร่มีหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นในการเลือกใช้ จึงจำเป็นต้องรู้ถึงคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น และในการผลิตก็จะต้องมีการควบคุมคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น ให้ได้ตามต้องการ สำหรับคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่สำคัญทั้งคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์และเคมี มีดังต่อไปนี้

##### 4.4.1 ความหนืด (viscosity)

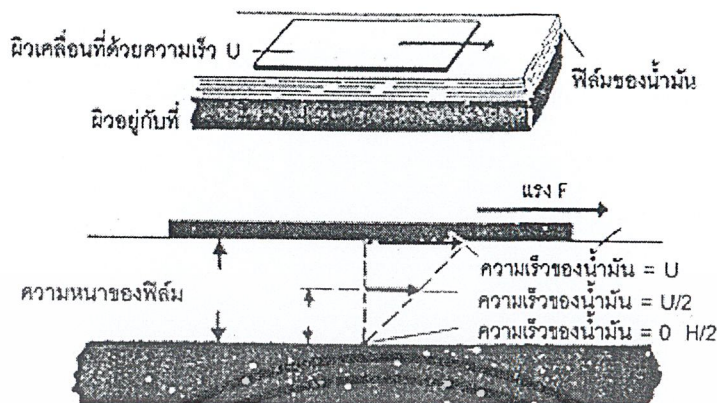
เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิด ฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัส และมีผลต่อการเกิดความร้อนขึ้นในระหว่างผิวสัมผัสที่มีการหล่อลื่นด้วยน้ำมัน ความหนืด หมายถึง ความข้นหรือความใสของน้ำมันเป็นคุณสมบัติของของไหลซึ่งวัดในรูปของความต้านทาน ในการไหล

หลักการของความหนืดตามที่แสดงในรูปที่ 4-3 ประกอบด้วยแผ่นวัตถุถูกดึงไปบนฟิล์มของน้ำมันด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ฟิล์มของน้ำมันติดอยู่กับผิววัตถุที่เคลื่อนที่และที่อยู่กับที่ ซึ่งเมื่อพิจารณาให้น้ำมันประกอบขึ้นด้วยชั้นน้ำมันหลายๆ ชั้น ชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่เคลื่อนที่ก็เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเดียวกับผิวที่เคลื่อนที่ (U) ส่วนชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่อยู่ กับที่ก็จะมีความเร็วเป็นศูนย์ชั้นน้ำมันที่อยู่ระหว่างชั้นบนสุดและชั้นล่างสุดก็จะถูกดึงไปด้วยชั้นน้ำมันที่อยู่ด้านบน ถัดไปให้มีความเร็วส่วนหนึ่งของความเร็ว U ซึ่งความเร็วของแต่ละชั้นของน้ำมันดังกล่าวจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับ ระยะจากผิววัตถุที่อยู่กับที่ แรง (F) ที่ต้องใช้ในการดึงให้ผิววัตถุอันบนเคลื่อนที่ไปนี้ก็คือ แรงที่ต้องเอาชนะความเสียหายที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นน้ำมันนั่นเอง และเนื่องจากแรงนี้เป็นผลมาจากความหนืด โดยแรงจะเป็นสัดส่วน โดย ตรงกับความหนืด ดังนั้นความหนืดสามารถได้จากการวัดแรงที่ต้องใช้เพื่อเอาชนะความเสียหายของน้ำมัน ความหนืดที่ทำได้ในที่นี้เรียกว่า ความหนืดสัมบูรณ์ (absolute viscosity) หรือความหนืดเชิงพลศาสตร์ (dynamic viscosity) หน่วยความหนืดเชิงพลศาสตร์ที่นิยมใช้กันคือ หน่วยเป็น Poise (P) ซึ่งเป็นหน่วยในระบบ CGS (Centimetre Gram Second) โดย

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-3 หลักการของความหนืด

แต่ค่าของความหนืดเชิงพลศาสตร์ของน้ำมันหล่อลื่นค่อนข้างกว้าง คือมีค่าอยู่ในช่วง 2 ถึง 400 cP และ โดยทั่วไปเครื่องมือวัดความหนืดจะไม่สามารถวัดค่าความหนืดเชิงพลศาสตร์ได้โดยตรง ดังนั้น จึงได้มีการกำหนด ค่าความหนืดในอีกรูปแบบหนึ่งที่เรียกว่า ความหนืดเชิงจลศาสตร์ (kinematic viscosity) โดยให้ความหนืดเชิง จลศาสตร์ เท่ากับ ความหนืดเชิงพลศาสตร์ หารด้วยความหนาแน่นของน้ำมันหรือของไหลนั้น ๆ ซึ่งเขียนเป็น สมการได้คือ

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

$$\nu = \text{ความหนืดเชิงจลศาสตร์}$$

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

$$\rho = \text{ความหนาแน่น}$$

หน่วยความหนืดเชิงจลศาสตร์ที่นิยมใช้กันก็คือหน่วย Stoke (St) ซึ่งเป็นหนึ่งในระบบ CGS เช่นเดียวกัน

โดย

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

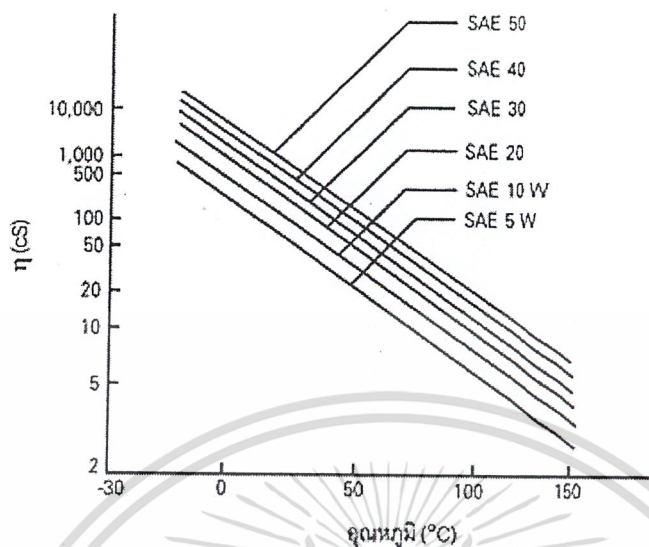
$$1 \text{ centistoke (cSP)} = 1 \times 10^{-2} \text{ stoke (St)}$$

นอกจากหน่วยของความหนืดที่ใช้กันข้างต้นแล้วยังมีการวัดความหนืดในหน่วยอื่นอีกได้แก่

Saybolt

Universal Seconds (SUS), Saybol furlo Seconds (SFS), Redwood Seconds และ Engler Degree ซึ่งความหนืดในหน่วยเหล่านี้กำหนดขึ้นตามชนิดของเครื่องมือที่ใช้วัดความหนืด (viscometer) และสภาวะการทดสอบ (อุณหภูมิ ของการทดสอบ) แต่อย่างไรก็ตามค่าความหนืดในหน่วยต่าง ๆ ข้างต้นก็สามารถที่จะแปลงเป็นค่าในหน่วยความหนืดเชิงจลศาสตร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

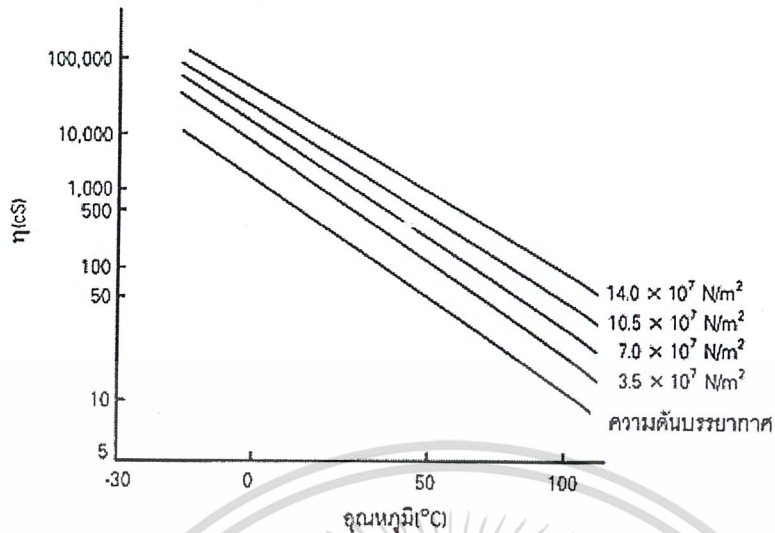


รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นบางชนิด

ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะไม่คงที่ แต่จะแปรผันตามสภาวะการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะแปรผันกับอุณหภูมิและความดันในการใช้งาน ในด้านของอุณหภูมิความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมัน ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของเหลวจะขยายตัว โมเลกุลของน้ำมันจะเคลื่อนออกจากกัน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ลดลง และเป็นผลให้ความหนืดลดลงด้วย รูปที่ 4-4 เป็นกราฟแสดงถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดเชิงพลศาสตร์ ของน้ำมันหล่อลื่น และเนื่องจากความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงน้อยมากกับอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดเชิงพลศาสตร์ได้ด้วย นอกจากแสดงด้วยกราฟแล้วผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดก็ยังสามารถแสดงได้ด้วยสมการ แต่เป็นเพียงสมการโดยประมาณเท่านั้นคือ

$$\begin{aligned} \text{Log } \eta &= A + B/T \\ \eta &= \text{ความหนืดเชิงพลศาสตร์} \\ A \text{ และ } B &= \text{ค่าคงที่ (ขึ้นอยู่กับชนิดของของเหลว)} \\ T &= \text{อุณหภูมิสัมบูรณ์} \end{aligned}$$

สำหรับผลของความดันต่อความหนืดนั้น จะเห็นได้ชัดเจนก็ต่อเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นมาก ซึ่งเมื่อความดันของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น โมเลกุลของน้ำมันก็จะถูกบีบให้เข้าใกล้กัน ทำให้แรงยึดติดระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น และเป็นผลให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นด้วย รูปที่ 4-5 แสดงถึงผลของความดันที่มีต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ซึ่งความหนืดจะเปลี่ยนแปลงจน เห็นได้ชัดเจนเมื่อความดันเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ  $2 \times 10^7 \text{ N/m}^2$  (Pascal)



รูปที่ 4-5 ผลของความดันต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40

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

$$\eta = \eta_0 e^{aP}$$

$\eta$  = ความหนืดเชิงพลศาสตร์ที่ความดัน P

$\eta_0$  = ความหนืดเชิงพลศาสตร์ที่ความดันบรรยากาศ

P = ความดันของน้ำมันหล่อลื่น

$\eta_a$  = สัมประสิทธิ์ของความดันกับความหนืด

$$e = 2.71828$$

#### 4.4.2 ดัชนีความหนืด (viscosity index)

น้ำมันหล่อลื่นต่างชนิดกันจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืด อันเนื่องมาจากอุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดดัชนีความหนืดขึ้นมาเพื่อใช้แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดอันเนื่องมาจากอุณหภูมิโดยใช้การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น ที่จะหาดัชนีความหนืดกับน้ำมันหล่อลื่นที่เลือกสองชนิด เช่น น้ำมันหล่อลื่น Gulf Coast ซึ่งความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิมาก ให้มีดัชนีความหนืดเท่ากับ 0 และน้ำมันหล่อลื่น Pennsylvanian ซึ่งความหนืดเปลี่ยนแปลง กับอุณหภูมิน้อย ให้มีดัชนีความหนืดเท่ากับ 100

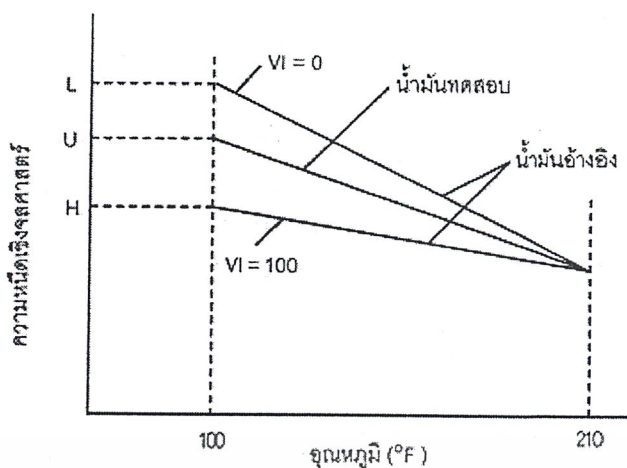
การหาดัชนีความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นกระทำได้โดยการหาความหนืดเชิงพลศาสตร์ของน้ำมันหล่อลื่น ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 100°F และ 120°C แล้วหาค่าดัชนีความหนืดตามสมการคือ

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

V.I. = ดัชนีความหนืด (viscosity index)

ค่า L, U และ H ให้ดูตามรูปที่ 4-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-6 การหาค่าดัชนีความหนืด

#### 4.4.3 กากคาร์บอน (carbon residue)

หมายถึง สิ่งที่ตกค้างอยู่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายหลังจาก เผาไหม้น้ำมันหล่อลื่นในสภาวะที่กำหนด ปริมาณกากคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นจะไม่ค่อยมีความสำคัญนัก สำหรับการใช้งาน เนื่องจากจะไม่มี การเผาไหม้โดยตรงของน้ำมันหล่อลื่นในการนำไปใช้งาน แต่ปริมาณกากคาร์บอนจะมีความสำคัญสำหรับน้ำมันเชื้อเพลิง เพราะจะมีการเผาไหม้โดยตรง ดังนั้นการหาปริมาณกากคาร์บอน ในน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจึงเป็นการหาสำหรับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเพื่อดูว่าขบวนการผลิตเป็นไปตามกำหนดหรือไม่

#### 4.4.4 สี (color)

สีของน้ำมันหล่อลื่นที่เห็นเมื่อมีแสงผ่านนั้นจะมีสีต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ใสมากจนถึงดำ ซึ่งอาจ มีสีเหลือง แดง และน้ำตาล เป็นต้น ความแตกต่างกันของสีของน้ำมันหล่อลื่น เป็นผลมาจากชนิดของน้ำมันดิบ ที่นำมาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นแตกต่างกัน ทั้งวิธีการกลั่นและผลิต, จำนวน และชนิดของสารเพิ่มคุณภาพ ดังนั้น สีของน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปจึงไม่มีความสำคัญนักในด้านการใช้งาน ยกเว้นกรณีที่เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา

#### 4.4.5 ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (density and gravity)

ความหนาแน่นหมายถึงมวลของสารต่อ หนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิมาตรฐานที่กำหนด ส่วนความถ่วงจำเพาะ (ความหนาแน่นสัมพัทธ์) หมายถึงอัตรา ส่วนระหว่างความหนาแน่นของน้ำมัน และความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน ในสหรัฐอเมริกา มักนิยม กำหนดค่าความถ่วงจำเพาะในรูปของหน่วยของสภา 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 ค่าความถ่วงจำเพาะนี้ จะเป็นตัวช่วยในการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้แล้ว ซึ่งถ้ามีค่า ความถ่วงจำเพาะลดลง (ค่าองศา API เพิ่มขึ้น) ก็อาจแสดงว่ามีน้ำมันเชื้อเพลิงเข้ามาผสมกับน้ำมันหล่อลื่น และถ้ามีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นก็อาจแสดงว่ามีสิ่งแปลกปลอม เช่น เหม่า หรือสารที่เกิดจากการรวมตัว กับออกซิเจนผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่น

#### 4.4.6 จุดวาบไฟและจุดติดไฟ (flash and fire points)

หมายถึงอุณหภูมิที่น้ำมันระเหยกลายเป็นไอ เพียงพอที่ผิวและสามารถลุกไหม้ได้เมื่อโดนเปลวไฟ แต่ที่อุณหภูมินี้การระเหยกลายเป็นไอจะไม่เพียงพอที่จะ ทำให้การลุกไหม้คงอยู่ต่อไป เปลวไฟจึงดับลงเองทันที แต่หากมีเอกซอสเป็นเอกซอสที่สว่างไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การให้ความร้อนแก่น้ำมันต่อไปอีก อุณหภูมิ ก็จะสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่การระเหยกลายเป็นไอเพียงพอที่จะทำให้เกิด ลูกไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง อุณหภูมินี้ เรียกว่า จุดติดไฟ จุดวาบไฟของน้ำมันหล่อลื่นใหม่จะแปรผันกับความหนืด โดยน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืด สูงก็จะมีจุดวาบไฟสูงด้วย นอกจากนี้ชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ก็มีผลต่อจุดวาบไฟด้วย

จุดวาบไฟ และจุดติดไฟของน้ำมันจะใช้ในการควบคุมการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและจะใช้ในการพิจารณาในด้านความปลอดภัยในการใช้งาน

#### 4.4.7 จุดไหลเท (pour point)

หมายถึง อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันหล่อลื่นจะเริ่มไหลภายใต้สภาวะที่กำหนด ซึ่งน้ำมันทั่วไปจะมีไขส่วนหนึ่งละลายอยู่ด้วย เมื่อน้ำมันเย็นไขก็จะตกผลึกและเกาะกันเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง โดยกักเอาน้ำมันไว้ และเมื่อผลึกของไขเกิดขึ้นมากพอ น้ำมันก็จะไม่สามารถไหลได้ต่อไป

ความสำคัญของจุดไหลเทจะขึ้นอยู่กับสภาวะของการใช้งาน ตัวอย่างเช่น ในประเทศหนาวจะต้อง เลือกใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำ เพื่อให้ น้ำมันสามารถไหลได้ ถึงแม้อุณหภูมิของอากาศโดยรอบจะต่ำ ในทาง ตรงกันข้ามน้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำก็ไม่ได้มีความจำเป็นสำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูงตลอดเวลา

#### 4.4.8 ตัวเลขความเป็นกลาง (neutrallization number)

น้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะมีสภาพความเป็นกรดอยู่เล็กน้อย ซึ่งสภาพความเป็นกรดนี้จะวัดเป็นปริมาณของเบสมาตรฐานที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำมันมีสภาพเป็นกลาง

สภาพความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่น โดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่ม ขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจน (oxidation) ซึ่งทำให้เกิดกรดอินทรีย์ขึ้น

สภาพความเป็นกรดนี้อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะได้ ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่น โดยเฉพาะน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซล จึงนิยมเติมสารเพิ่มคุณภาพที่มีสารที่เป็นด่างเข้าไป เพื่อให้สารที่เกิด จากการเผาไหม้ซึ่งมีสภาพเป็นกรดให้มีสภาพเป็นกลาง และเมื่อน้ำมันหล่อลื่นไปใช้งาน อัตราการสิ้นเปลือง สารที่เป็นด่างที่ตรวจสอบได้ก็จะเป็นตัวชี้ถึงอายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่น การวัดความเป็นด่างนี้จะวัดในรูปของจำนวนเบสทั้งหมด (total base number)

## บทที่ 5

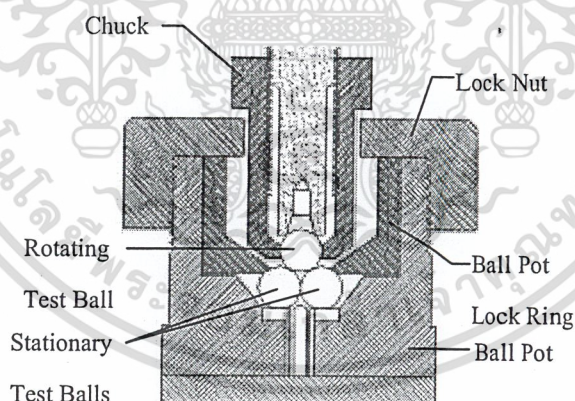
### การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบ

#### 5.1 การออกแบบ

ในการออกแบบเครื่องทดสอบการเครื่องทดสอบการสึกหรอโดยใช้ลูกบอลสี่ลูก แบ่งขั้นตอนการออกแบบเป็นทั้งหมด 3 ขั้นตอน ได้แก่

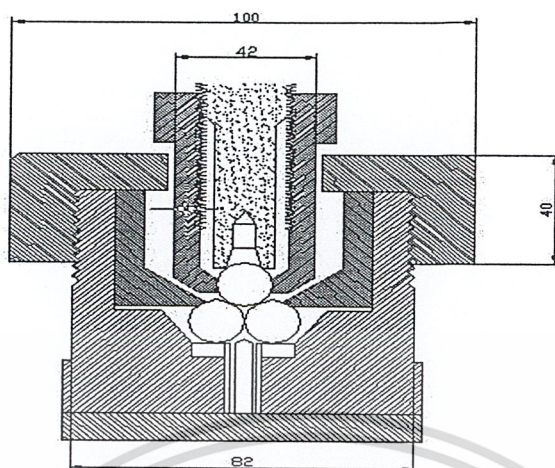
##### 5.1.1 การออกแบบทั่วไป

เป็นการออกแบบส่วนประกอบภายนอกของเครื่องทดสอบ ซึ่งส่วนประกอบต่างๆ ส่วนใหญ่จะเป็นส่วนประกอบที่อยู่กับที่ ซึ่งในการออกแบบสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงอย่างยิ่งคือความสามารถในการทนต่อความร้อนเพราะว่าในขณะที่เครื่องทดสอบทำงาน สภาวะที่ได้ควบคุมคืออุณหภูมิของน้ำมัน ซึ่งอยู่ในระดับที่สูงพอสมควร ดังนั้นจึงเลือกเหล็กมาเป็นส่วนประกอบ เพราะสามารถทนความร้อนได้ดี ส่วนประกอบดังกล่าวได้แก่ อ่างน้ำมัน(Ball Pot) แหวนล็อก(Ball Pot Lock Ring) น็อตยึด(Lock Nut) และโครงสร้างภายนอก(External Tube Frame) และส่วนประกอบอื่นๆ แสดงดังรูป 5-1 และรูปที่ 5-2 แสดงขนาดของชิ้นส่วนสำคัญบางชิ้น



รูปที่ 5-1 Four-ball Test Arrangement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

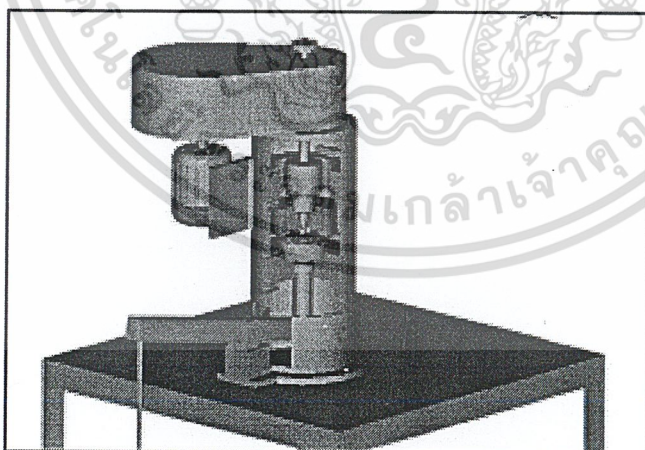


รูปที่ 5-2 Four-ball Test with main dimension (All Dimension, mm)

### 5.1.2 การออกแบบทางกล

เป็นการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบโดยตรง โดยชิ้นส่วนแต่ละส่วนจะมีกลไกการเคลื่อนที่ ทำให้ต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของความเสียดทานของวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นชิ้นส่วนประกอบ เนื่องจากชิ้นส่วนที่ได้เหล่านี้มีการเคลื่อนที่ในขณะที่ทำการทดสอบ ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่ที่จะเป็น การเคลื่อนที่แบบหมุน และการเคลื่อนที่รอบจุดหมุน จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วยลดความเสียดทานได้แก่ แบริ่งกันรุน (Thrust Bearing) แสดงแบบจำลองของเครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูก ดังรูปที่

5-3



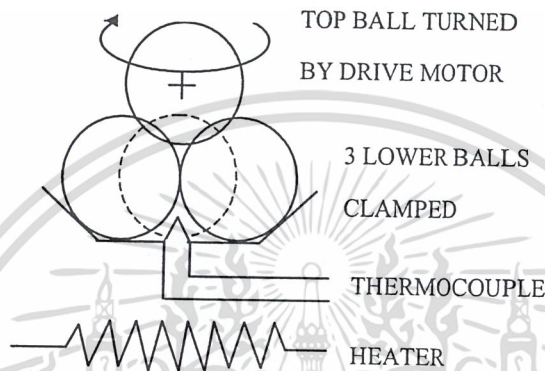
รูปที่ 5-3 Four-ball Test Machine- Section Modeling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 การออกแบบระบบควบคุม

เนื่องจากในสภาวะต่างๆที่ถูกควบคุมในขณะที่ทำการทดลองโดยใช้เครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูก ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิ น้ำมัน ความเร็วรอบของการหมุน แรงกดลูกบอล(Load) และระยะเวลาในการทดสอบ ทำให้ต้องมีระบบควบคุมต่างๆเข้ามาเป็นส่วนประกอบเพื่อให้ง่ายในการใช้เครื่องทดสอบ

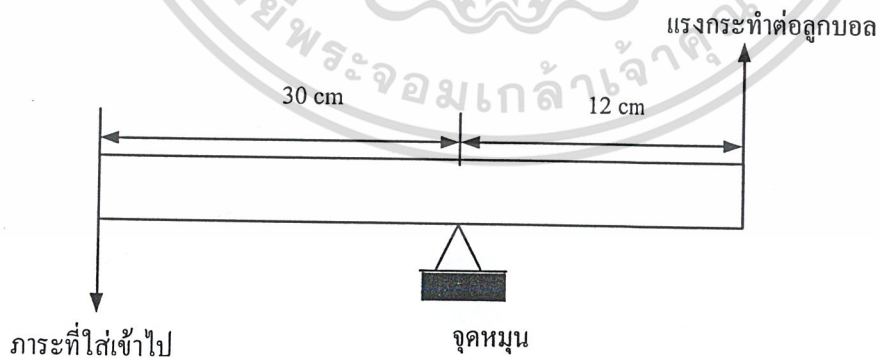
การควบคุมอุณหภูมิ จะใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิ(Thermostat) เพื่อควบคุมอุณหภูมิ โดยตัวควบคุมอุณหภูมิจะทำงานร่วมกับขดลวดไฟฟ้า(Heater) คือ เมื่อขดลวดร้อนจนถึงค่าที่กำหนดไว้ก็จะส่งสัญญาณให้ตัวควบคุมอุณหภูมิทำงาน



รูปที่ 5-4 รูปแสดงตำแหน่งของ Four-Ball และการลักษณะการติดตั้ง Thermocouple และ Heater

ความเร็วของการหมุน ได้จากความเร็วของมอเตอร์ซึ่งจะหมุนที่ความเร็วรอบสูง ดังนั้นจึงมีการทดรอบมอเตอร์เพื่อให้ได้ค่าความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที ซึ่งในการออกแบบจะทำการทดสอบที่ความเร็วรอบคงที่ค่าหนึ่งก่อน

แรงกดลูกบอล ในการสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูกจะใช้แรงกดกระทำต่อลูกบอล 300 นิวตัน แรงกดลูกบอลได้จากการส่งแรงผ่านคาน ซึ่งมีจุดหมุนอยู่ระหว่างแรงที่ใส่เข้าไปและแรงที่นำไปกดลูกบอล ซึ่งมีลักษณะการทำงานดังรูปที่ 5-5

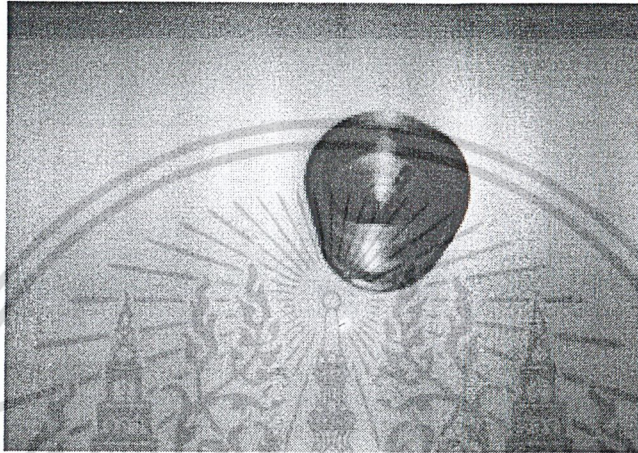


รูปที่ 5-5 ลักษณะของคานส่งแรงที่ใช้กดลูกบอล

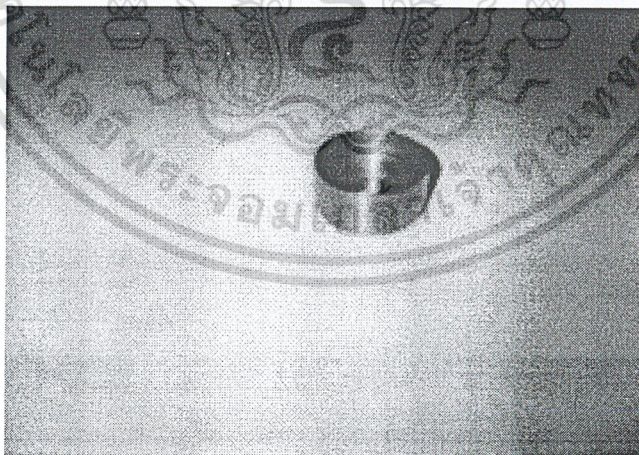
## 5.2 การสร้างเครื่องทดสอบ

ในการสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสตีลคู่กันนั้นจะมีกระบวนการสร้างตามลำดับดังนี้

- ทำในส่วนการออกแบบทั่วไปให้เสร็จตามขนาดที่ได้ออกแบบไว้ ได้แก่ อ่างน้ำมัน(Ball Pot) แหวนล็อก(Ball Pot Lock Ring) แหวนยึด(Lock Nut) และส่วนประกอบอื่นๆ ดังนี้



รูปที่ 5-6 อ่างน้ำมัน (Ball Pot)



รูปที่ 5-7 แหวนล็อก (Ball Pot Lock Ring)

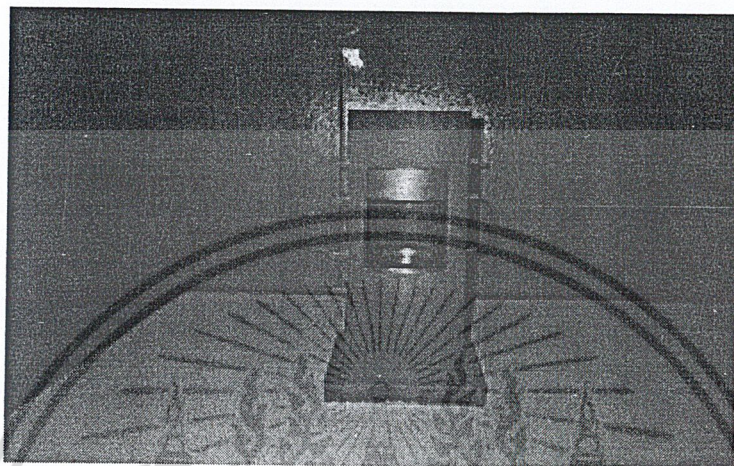
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



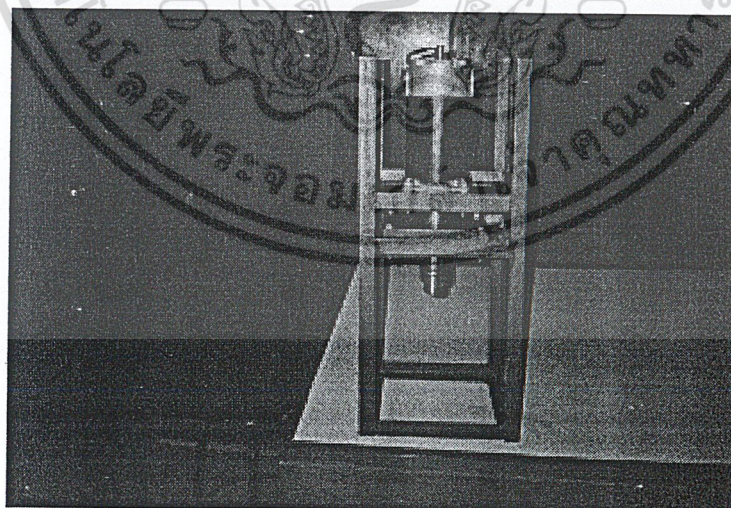
รูปที่ 5-8 แหวนยึด (Lock Nut)

รูปที่ 5-9 ชุดอ่างน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

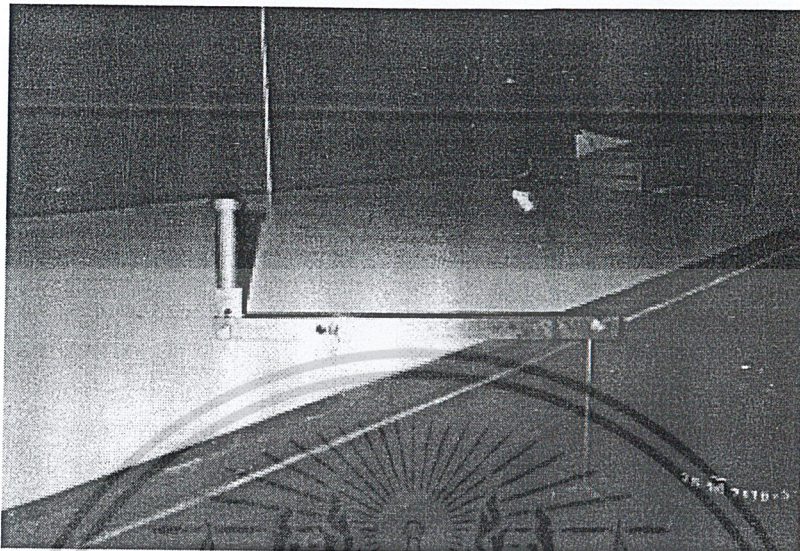


รูปที่ 5-10 ตัวบังคับศูนย์กลางน้ำมัน, บำรุงรับอ่างน้ำมัน, External tube frame



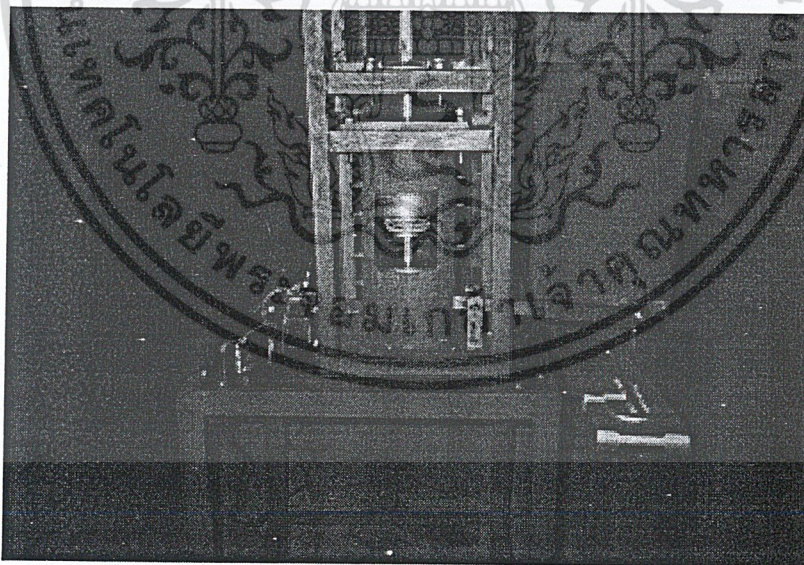
รูปที่ 5-11 หัวจับลูกบอล, ฐานยึดมอเตอร์, มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-12 ชุดคานส่งกำลัง

- ทำการประกอบชิ้นส่วนต่างๆที่ได้สร้างขึ้น เป็นเครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูก ดังรูป 5-5-13



รูปที่ 5-13 เครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

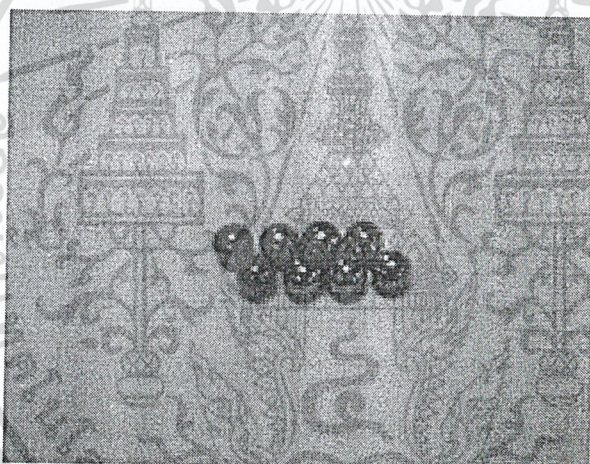
## บทที่ 6

### การทดลอง

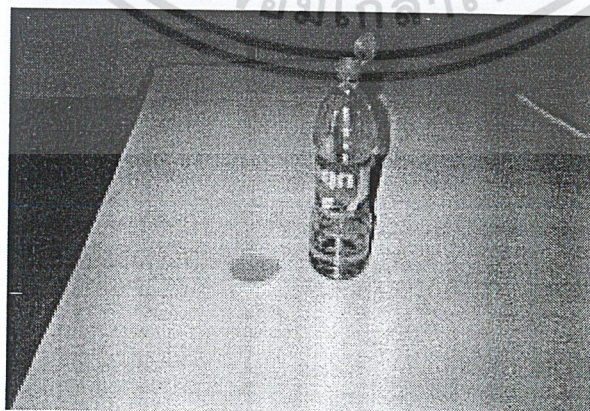
#### 6.1 ความสามารถของเครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูก

1. ความเร็วรอบในขณะที่ไม่มีโหลด 1180 รอบต่อนาที
2. ความเร็วรอบในขณะที่มีโหลด 970 รอบต่อนาที
3. แรงกระทำต่อลูกบอล 300 นิวตัน
4. ภาระที่ใส่เข้าไปสูงสุด 13.06 กิโลกรัม
5. มอเตอร์กระแสตรง แรงดัน 100 โวลต์

#### 6.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

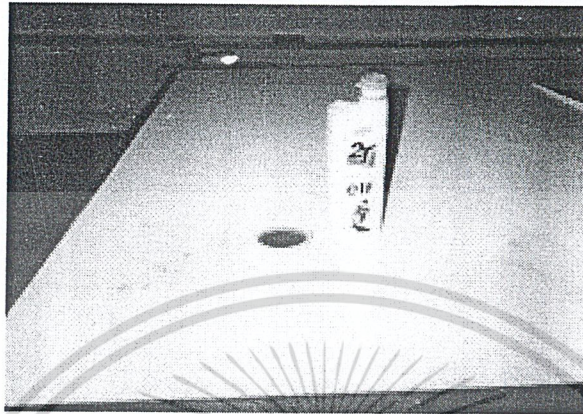


รูปที่ 6-1 ลูกบอลขนาด 12.7 มิลลิเมตร หรือ 0.5 นิ้ว

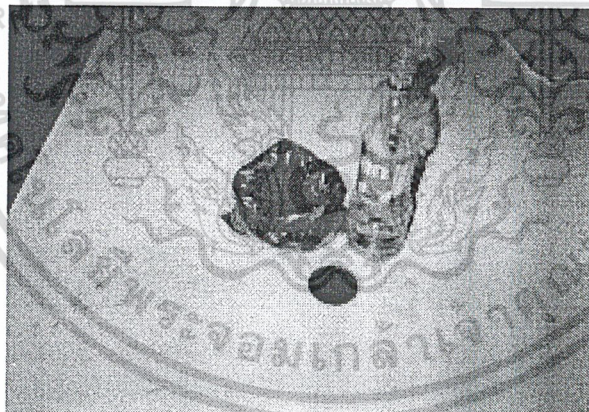


รูปที่ 6-2 น้ำมันปาล์ม (Palm Oil)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

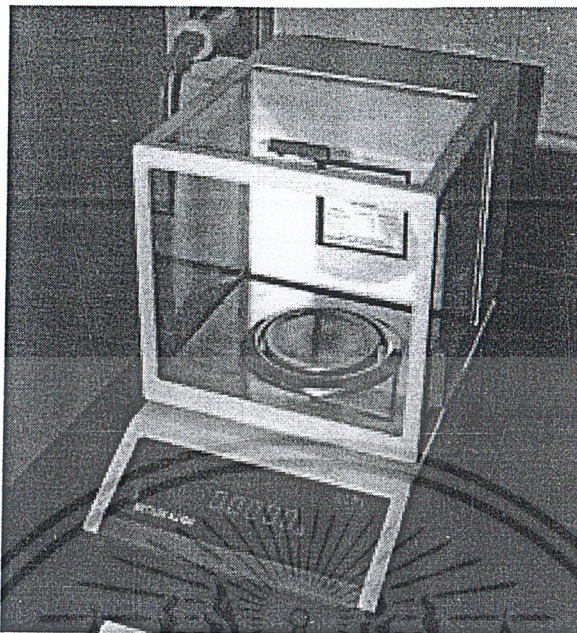


รูปที่ 6-3 น้ำมันเครื่องสังเคราะห์ (Synthetic Oil)



รูปที่ 6-4 น้ำมันปาล์มผสมเกรไฟต์อัตราส่วน 30:1 โดยมวล

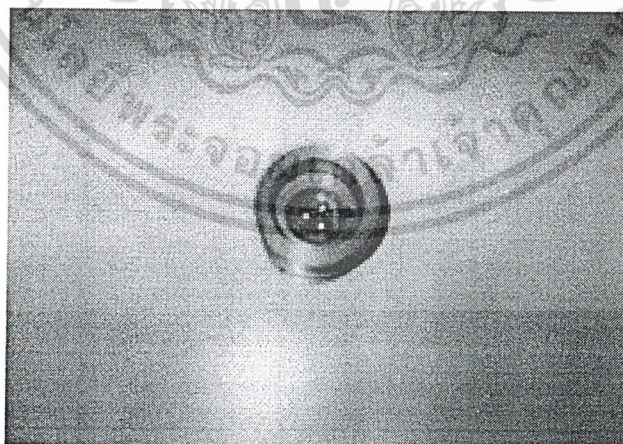
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-5 เครื่องชั่งมวล แบบ Analytical Balance

### 6.3 วิธีการทดลอง

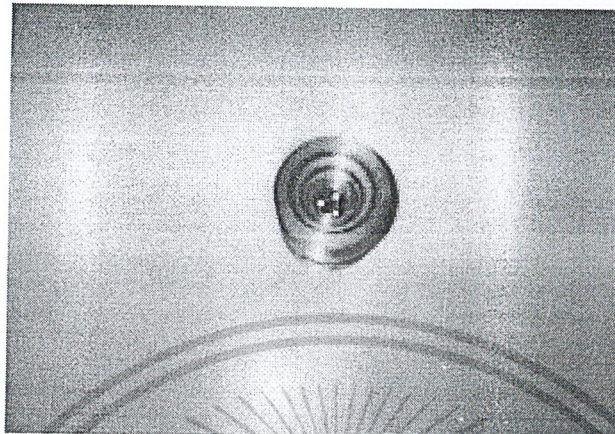
นำลูกบอล 3 ลูกใส่ลงในอ่างน้ำมัน แล้วจัดตำแหน่งของบอลให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมดังรูป  
ที่ 6-6



รูปที่ 6-6 ลักษณะการวางบอล 3 ลูกในอ่างน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำ Ball Pot Lock Ring ใส่งไปใน Ball Pot เพื่อทำการล็อกตำแหน่งของลูกบอล 3 ลูกที่อยู่ข้างล่างให้อยู่กับที่



รูปที่ 6-7 บอลถูกล็อกด้วย Ball Pot Lock Ring

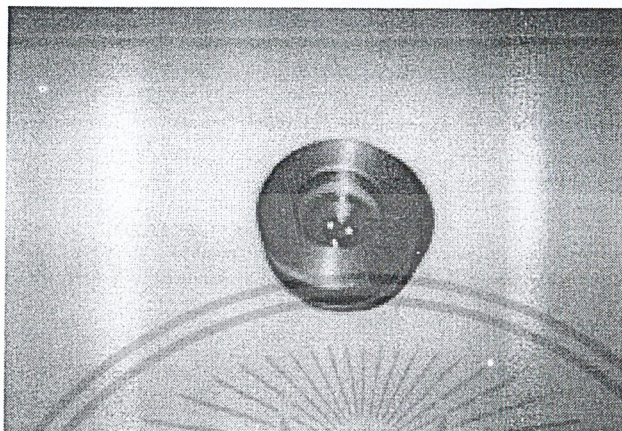
นำ Lock Nut หรือฝาปิดบน มาปิดที่ตัว Ball Pot โดยบิดเกลียวที่มีอยู่บนชิ้นส่วนทั้งสอง เพื่อทำการกดตัว Ball Pot Lock Ring ให้ตกลงไปที่ลูกบอล



รูปที่ 6-8 ล็อกบอล 3 ลูกให้แน่นด้วยแหวนล็อก

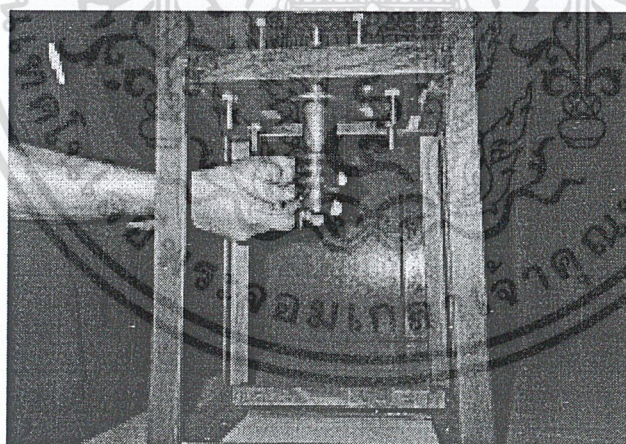
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใส่น้ำมันหล่อลื่นลงไป ใน Ball Pot (กรณีที่มีน้ำมัน) ซึ่งปิดด้วย หัว Lock Nut แล้วใส่น้ำมันหล่อลื่นให้ท่วมลูกบอลทั้งสองที่อยู่ด้านล่าง



รูปที่ 6-9 ใส่น้ำมันในอ่างน้ำมัน(Ball Pot)

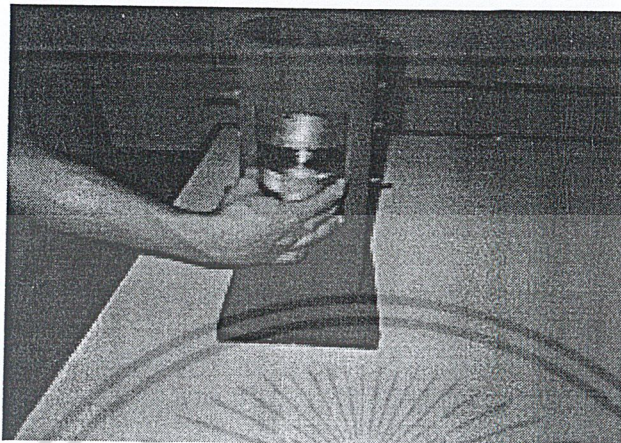
ใส่ลูกบอลเข้าไปในหัวจับ(Chuck) โดยให้ลูกบอลยื่นออกมาพอสมควรแล้วจึงใช้คอกจําขันหัวจับให้แน่น



รูปที่ 6-10 การจับลูกบอลด้วยหัวจับ(แสดงขณะยังไม่ขึ้นส่วเป็นเครื่องทดสอบ)

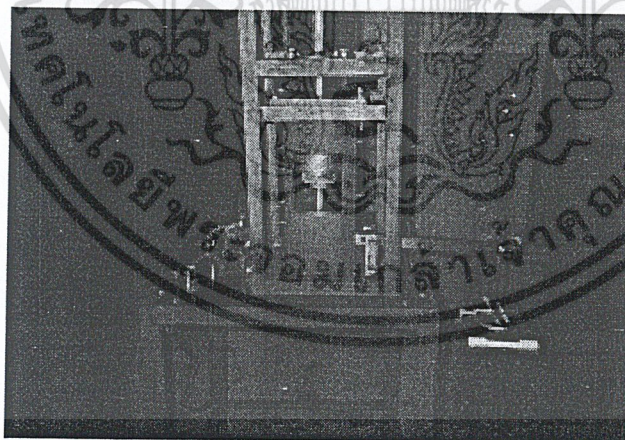
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำตัว Ball Pot ที่ใส่น้ำมันหล่อลื่นแล้วใส่เข้าไปในตัวเปลือกนอกซึ่งภายในมีฐานรองซึ่งรองรับอยู่ด้านล่างและมีฐานนำศูนย์อยู่ด้านบน



รูปที่ 6-11 การนำอ่างน้ำมันใส่เข้ากับชุดรองรับ

ใส่เป็นน้ำหนัก ลงไปในขอเกี่ยว ซึ่งอยู่ที่ด้านปลายของคานทำให้ลูกกระทุงที่อยู่ทีปลายอีกด้านหนึ่งของคานกระดกขึ้น ไปดันตัว Ball Pot ให้เลื่อนขึ้น ผ่านตัวนำศูนย์จนกระทั่งลูกบอล 3 ลูกที่อยู่ในตัว Ball Pot สัมผัสกับลูกบอลด้านบนที่ถูกจับด้วยหัวจับ



รูปที่ 6-12 แสดงการแขวนเป็นน้ำหนัก(เครื่องที่ประกอบสมบูรณ์พร้อมทดลอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปล่อยให้ลูกบอลทั้งสี่ลูกเสียดสีกันเป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วจึงยกเป็นน้ำหนักออก และนำ Ball Pot ออกมา

ถอด Lock Nut กับ Ball Pot Lock Ring ออกจากตัว Ball Pot แล้วนำลูกบอลทั้งสามลูกมาเช็ดให้แห้ง หลังจากนั้นจึงนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง



รูปที่ 6-13 นำลูกบอลออกจาก Ball Pot

หลังจากที่ได้ชั่งน้ำหนักแล้วจึงนำลูกบอลใส่ลงไปใน Ball Pot แล้วจัดตำแหน่งรอยสักของลูกบอลให้อยู่ในตำแหน่งเดิม



รูปที่ 6-14 นำลูกบอลใส่อ่างน้ำมัน เพื่อทดลองครั้งต่อไป

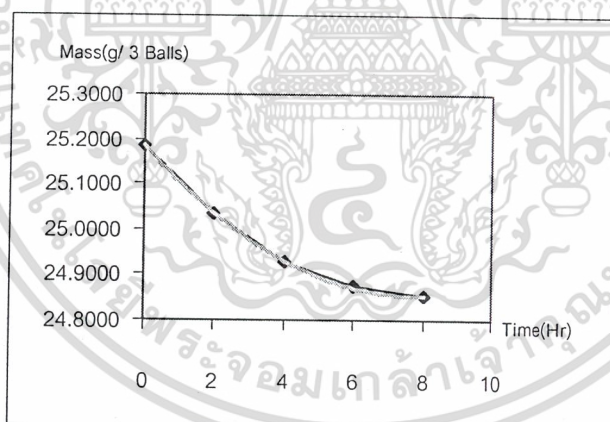
ใส่ Ball Pot Lock Ring และ Lock Nut แล้วนำไปทดลองเช่นเดิมจนครบ 8 ชั่วโมง โดยทำการชั่งน้ำหนักทุกๆ 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.4 ผลการทดลอง

เวลา(ชั่วโมง)	มวล(กรัมต่อบอล 3 ลูก)
0	25.1859
2	25.0345
4	24.9267
6	24.8748
8	24.8523

ตารางที่ 6-1 ผลการทดลองกรณี ที่ไม่ใช้น้ำมันหล่อลื่น (No Oil)

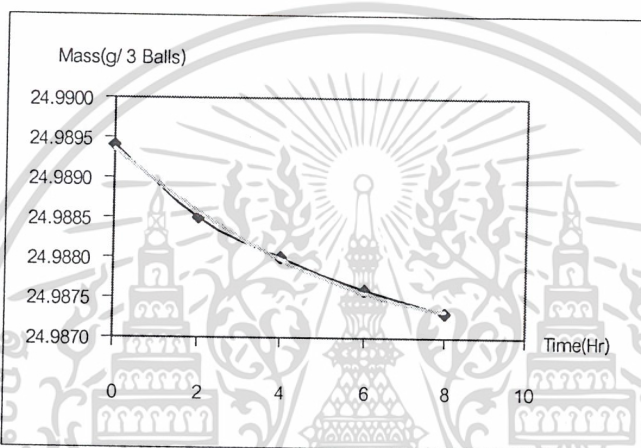


รูปที่ 6-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับเวลา กรณีไม่ใช้น้ำมันหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา(ชั่วโมง)	มวล(กรัม ต่อ บอล 3 ลูก)
0	24.9894
2	24.9885
4	24.9880
6	24.9876
8	24.9873

ตารางที่ 6-2 ผลการทดลองกรณีใช้น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันหล่อลื่น

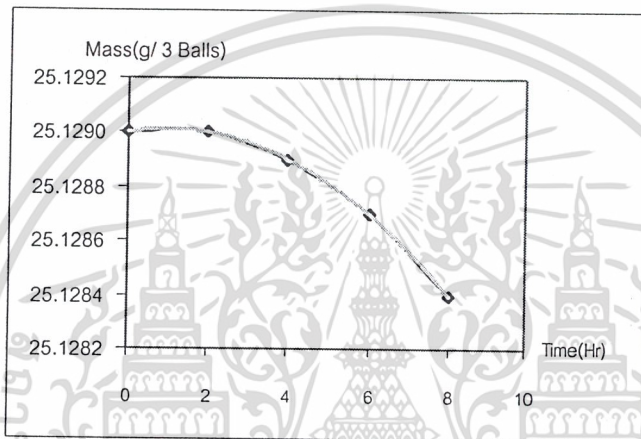


รูปที่ 6-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับเวลา กรณีใช้น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา(ชั่วโมง)	มวล(กรัม ต่อ บอล 3 ลูก)
0	25.1920
2	25.1920
4	25.1289
6	25.1287
8	25.1284

ตารางที่ 6-3 ผลการทดลองกรณีที่ใช้ น้ำมันเครื่องสังเคราะห์(Synthetic Oil)

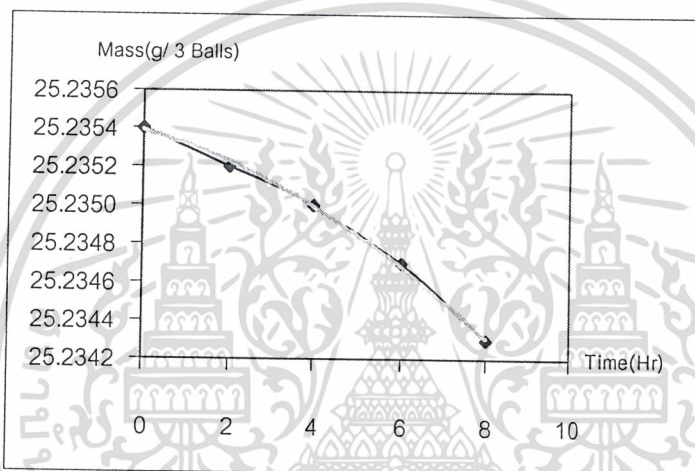


รูปที่ 6-17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับเวลา กรณีใช้น้ำมันเครื่องสังเคราะห์เป็นน้ำมันหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา(ชั่วโมง)	มวล(กรัม ต่อ บอล 3 ลูก)
0	25.2354
2	25.2352
4	25.2350
6	25.2347
8	25.2343

ตารางที่ 6-4 ผลการทดลองกรณีที่ใช้น้ำมันปาล์มผสมแกรไฟต์ ในอัตราส่วน 30 : 1



รูปที่ 6-18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับเวลา กรณีใช้น้ำมันปาล์มผสมแกรไฟต์(30:1)เป็นสารหล่อลื่น

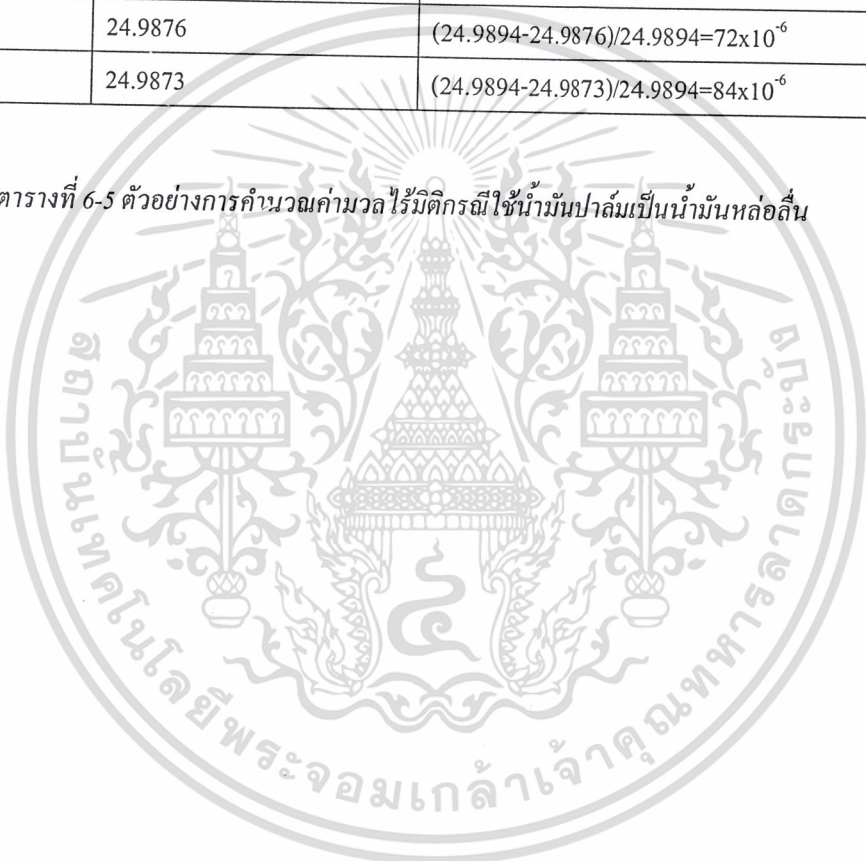
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.5 สูตรการคำนวณหามวลไร้มิติ

$$\text{Dimensionless Mass}(M^*) = \frac{\text{มวลเริ่มต้น} - \text{มวลที่ซั่งได้}}{\text{มวลเริ่มต้น}}$$

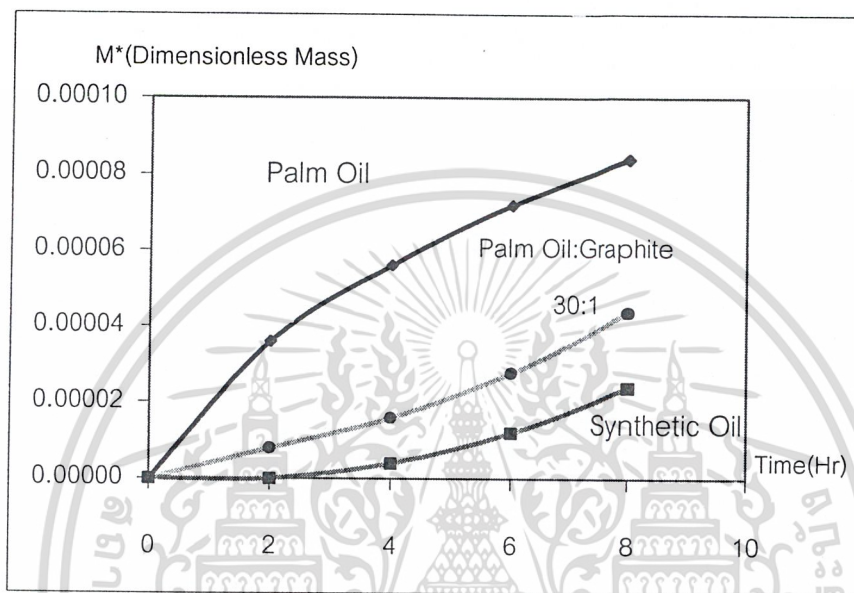
เวลา(ชั่วโมง)	มวล(กรัม ต่อ บอล 3 ลูก)	Dimensionless Mass
0	24.9894	0
2	24.9885	$(24.9894-24.9885)/24.9894=36 \times 10^{-6}$
4	24.9880	$(24.9894-24.9880)/24.9894=56 \times 10^{-6}$
6	24.9876	$(24.9894-24.9876)/24.9894=72 \times 10^{-6}$
8	24.9873	$(24.9894-24.9873)/24.9894=84 \times 10^{-6}$

ตารางที่ 6-5 ตัวอย่างการคำนวณค่ามวลไร้มิติกรณีใช้น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันหล่อลื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณค่ามวลไร้มิติของแต่ละสภาวะสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลไร้มิติกับเวลา เพื่อดูความแนวโน้มการสึกหรอของลูกบอลในสภาวะต่างได้ การทำเป็นค่ามวลไร้มิติก็ เพราะว่าลูกบอลที่ใช้ทดสอบนั้นมีมวลเริ่มต้นไม่เท่ากันทำให้เปรียบเทียบความสัมพันธ์กัน โดยตรงไม่ได้ ต้องทำเป็นตัวแปรไร้มิติหรือมวลไร้มิติ ดังสูตรการคำนวณและตัวอย่างการคำนวณข้างต้น



รูปที่ 6-19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างมวลไร้มิติกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### บทวิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

#### 7.1 ผลที่ได้จากโครงการ

- ทฤษฎี หลักการ และความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการหล่อลื่นและการสึกหรอที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ
- แนวทางและความรู้เชิงเทคนิคในการพัฒนาเครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูก และการใช้งานให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น
- ผลการทดลองที่เป็นแนวโน้มในการหาตัวอย่างของสารหล่อลื่นที่สามารถใช้ในการทำงานจริงๆ ของเครื่องจักรกล
- นำผลทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ความสามารถในการป้องกันการสึกหรอของสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ

#### 7.2 ข้อจำกัดของเครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูก

- เครื่องยังขาดอุปกรณ์การวัดที่สามารถหาค่าการสึกหรอได้ดีกว่านี้
- มีปัญหาเกี่ยวกับระบบจ่ายไฟให้กับมอเตอร์บ่อยทำให้การทดลองล่าช้า
- การทดลองต้องใช้เวลาในการทดลองที่นาน และต้องติดตามผลการทดลองอยู่ตลอดเวลา

#### 7.3 สรุปผลการทดลอง

1. สภาวะที่ปราศจากน้ำมันหล่อลื่น (No oil) ลูกบอลค้ำบนจะเสียดสีแบบ Metal to Metal Contact กับลูกบอลทั้ง 3 ลูกที่วางอยู่ใน Ball Pot โดยตรง ทำให้มวลของลูกบอลลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลลูกบอลกับเวลาที่ปรากฏออกมาจึงแปรผกผันซึ่งกันอย่างชัดเจน ในสภาวะที่มีน้ำมันหล่อลื่น(Use Oil) ลูกบอลค้ำบนจะไม่เสียดสีกับลูกบอล 3 ลูกล่าง โดยตรงเพราะว่ามีฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นกั้นอยู่ระหว่างลูกบอล เป็นการหล่อลื่นแบบ Fluid Film Lubrication ทำให้มวลของลูกบอลลดลงน้อยมาก ดังนั้นรูปกราฟมวลของลูกบอลกับเวลาที่ปรากฏออกมา จึงเป็นเส้นโค้งที่มีความชันน้อยมากจนเกือบขนานกับแกนเวลา
2. จากการทดลองใช้น้ำมันหล่อลื่นทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันเครื่องสังเคราะห์ และน้ำมันปาล์มผสมกับแกรไฟต์ พบว่าน้ำมันเครื่องสังเคราะห์มีคุณสมบัติในการหล่อลื่นดีที่สุดในแง่การสึกหรอของลูกบอลทดสอบเมื่อใช้น้ำมันเครื่องสังเคราะห์มีค่าน้อยที่สุด รองลงมาคือน้ำมันปาล์มผสมแกรไฟต์ และน้ำมันปาล์มตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเราเติมแกรไฟต์ลงไปน้ำมันปาล์ม จะทำให้น้ำมันปาล์ม มีคุณสมบัติการหล่อลื่นใกล้เคียงกับน้ำมันเครื่องสังเคราะห์ ทำให้รูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามวลไร้มิติ (Dimensionless Mass) กับเวลา มีลักษณะใกล้เคียงกัน
4. หากน้ำมันพืชไม่ว่าจะเป็นน้ำมันปาล์มหรือน้ำมันพืชอื่นๆก็ตาม ได้รับการแต่งเติมโดยเติมสารบางอย่างลงไป ซึ่งอาจจะไม่ใช่แกรไฟต์ตามที่ได้ทดลอง อาจจะมีแนวโน้มเป็นไปได้ว่าสามารถนำน้ำมันพืชมาเป็นน้ำมันหล่อลื่นแทนน้ำมันสังเคราะห์ที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดได้ทำให้ลดงบประมาณของประเทศในส่วนที่ต้องสั่งซื้อน้ำมันดิบมาเพื่อผลิตน้ำมันหล่อลื่น แต่จากการศึกษาเพิ่มเติมยังพบว่าน้ำมันพืชก็ยังมีคุณสมบัติบางอย่างที่ไม่อาจใช้แทนน้ำมันเครื่องสังเคราะห์ได้ทุกสภาวะการใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

## วงจรควบคุมการทำงานของ Heater



ปุ่มควบคุมต่างๆ ของวงจรควบคุม Heater

ปุ่ม	หน้าที่การทำงาน
RST	RESET ใช้สำหรับรีเซ็ตการทำงานของบอร์ดควบคุม
↶	ESCAPE ใช้สำหรับยกเลิกหรือย้อนกลับลำดับชั้นของเมนูควบคุม
←	ENTER ใช้สำหรับตกลงเลือกเมนูที่ปรากฏบนหน้าจอ LCD
↑	UP ใช้สำหรับเลือกเมนูลำดับก่อนหน้า
↓	DOWN ใช้สำหรับเลือกเมนูลำดับถัดไป

## ลำดับชั้นของเมนูต่างๆ

## 4-BALL WEARING TESTING MACHINE

START HEATER (เริ่มต้นการทำงานของ Heater)

TEMP: อุณหภูมิปัจจุบัน

SET TEMPERATURE (ตั้งค่าอุณหภูมิเป้าหมาย)

TEMP: 30.0 (สำหรับทดสอบ)

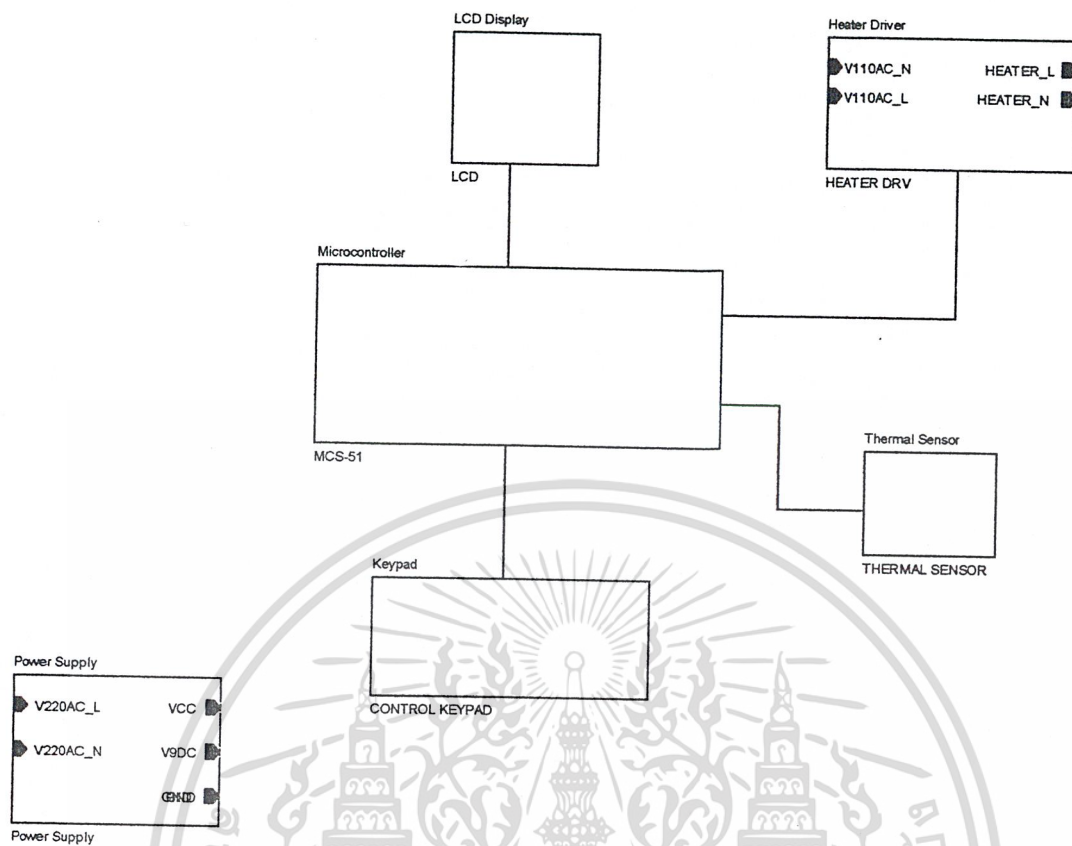
TEMP: 55.0

TEMP: 65.0

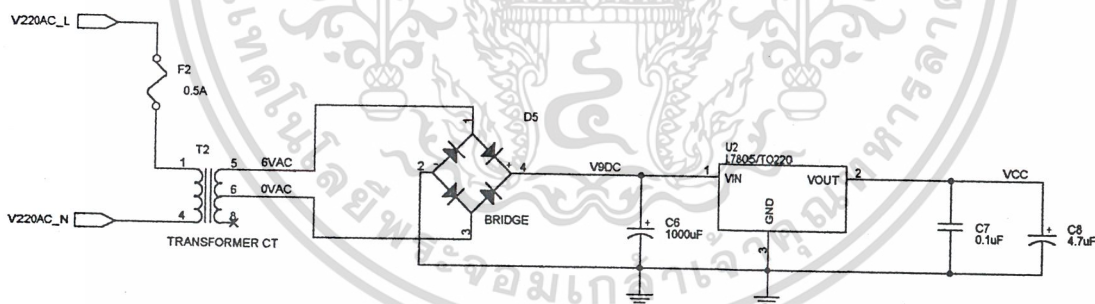
TEMP: 75.0 (ค่ามาตรฐาน)

TEMP: 85.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

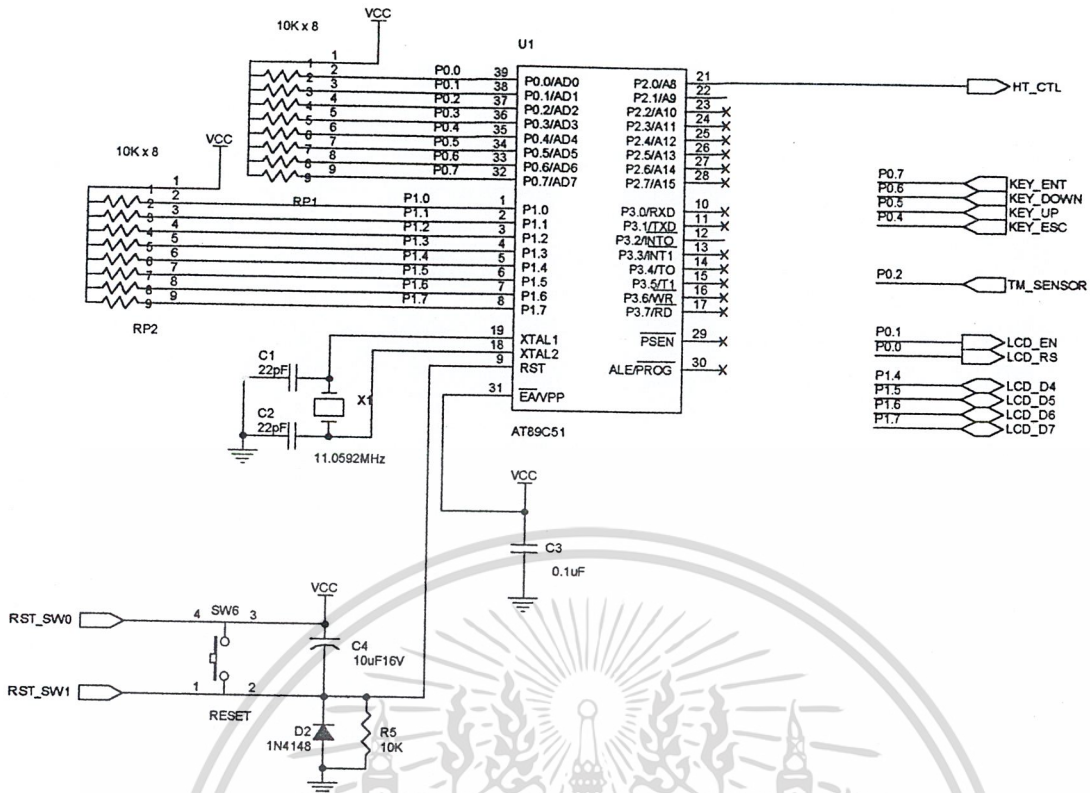


บล็อก ไดอะแกรมของวงจรควบคุมการทำงานของ Heater

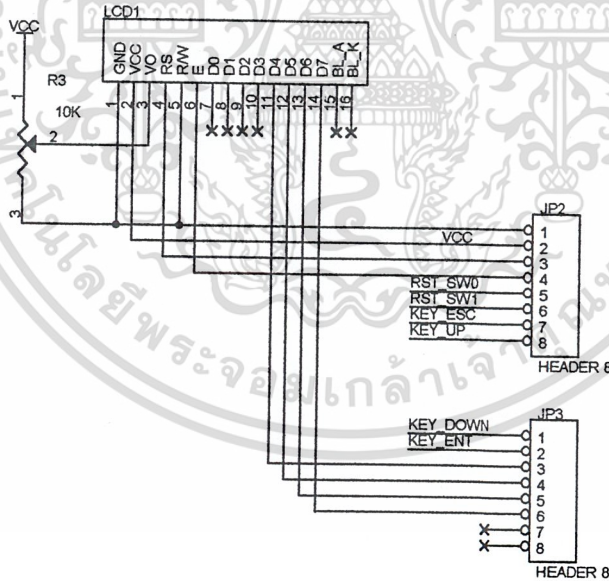


วงจรภาคจ่ายไฟให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

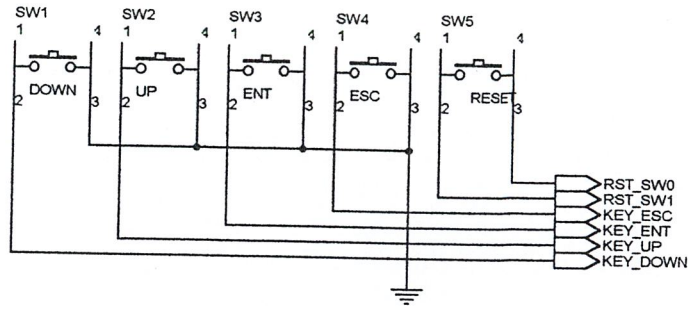


วงจรส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

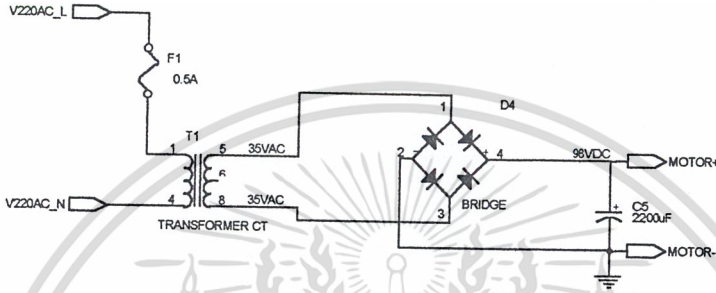


วงจรแสดงผลด้วย LCD 1 บรรทัด 16 ตัวอักษร

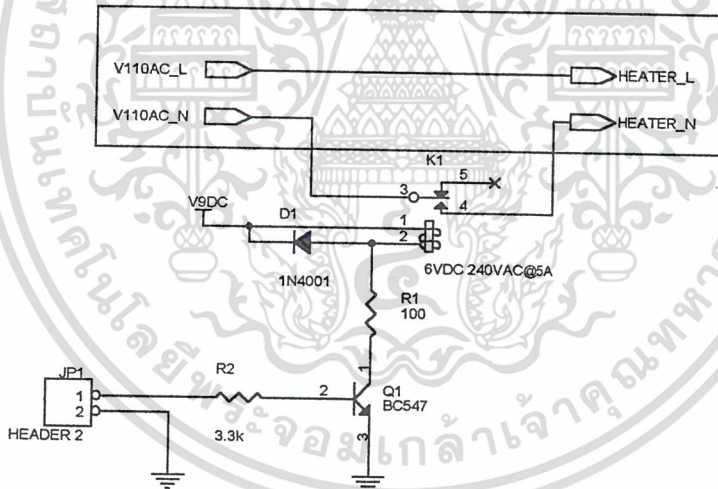
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



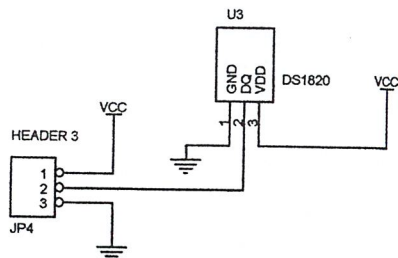
วงจรส่วนปุ่มควบคุมการทำงาน



วงจรภาคจ่ายไฟสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์



วงจรรีเลย์ควบคุมการทำงานของ Heater



วงจรเซนเซอร์อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ซอร์สโค้ดของโปรแกรม

```

#include<reg51.h>

// Keycode constants
#define UP_KEY          0xD0
#define DOWN_KEY       0xB0
#define ESC_KEY        0xE0
#define ENT_KEY        0x70

sbit p10 = 0x90;
sbit p11 = 0x91;
sbit p12 = 0x92;
sbit p13 = 0x93;
sbit p14 = 0x94;
sbit p15 = 0x95;
sbit p16 = 0x96;
sbit p17 = 0x97;

sbit p20 = 0xa0;
sbit p21 = 0xa1;
sbit p22 = 0xa2;
sbit p23 = 0xa3;
sbit p24 = 0xa4;
sbit p25 = 0xa5;
sbit p26 = 0xa6;
sbit p27 = 0xa7;

sbit b0 = 0xf0;
sbit b1 = 0xf1;
sbit b2 = 0xf2;
sbit b3 = 0xf3;
sbit b4 = 0xf4;
sbit b5 = 0xf5;
sbit b6 = 0xf6;
sbit b7 = 0xf7;

void delayx(unsigned int datax);
void write_dec(unsigned char datax);

// LCD Prototype and Declaration
void str2lcd(char *string, bit clear);
void gotoxy(unsigned char x);
void write(unsigned char datax);
void writelcd(unsigned char datax);
void initlcd(void);
void clearlcd(void);
void swap8to4(unsigned char);
void latchlcd(void);

sbit E_LCD = 0x81;
sbit RS_LCD = 0x80;

unsigned char px = 1;

// DS1820 Temperature Sensor Prototype
void treset(void);
bit tpresence(void);
bit read_tbit(void);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

unsigned char read_tbyte(void);
void write_tbyte(unsigned char);
void write_tbit(bit);
unsigned char read_temp(void);
void show_temp(unsigned char datax);

sbit DQ_TEMP = 0x82;

sbit RL_CTL = 0xa0;

unsigned char cur_temp;

unsigned char key;

unsigned char level = 0;
unsigned char index = 0;

#define MAX_ON_COUNT          220
#define MAX_OFF_COUNT         240

unsigned char on_count;
unsigned char off_count;
bit heater_state = 0;
unsigned char new_temp;
unsigned char set_temp_index = 3;
bit start = 0;
unsigned char avail_temp[5] = {30*2, 55*2, 65*2, 75*2, 85*2};

void main(void)
{
    unsigned char i = 0;
    delayx(0xffff);
    RL_CTL = 0;
    initlcd();
    while ((P0 & 0xf0) == 0xf0)
    {
        str2lcd(" 4-BALL WEARING ", 1);
        delayx(0xffff);
        str2lcd("TESTING MACHINE", 1);
        delayx(0xffff);
    }
    str2lcd(" START HEATER ", 1);
    delayx(0xffff);
    while(1)
    {
        P0 |= 0xf0;
        if ((key = P0 & 0xf0) != 0xf0)
        {
            switch (key) {
                case ENT_KEY:
                    if ((level == 0) && (index == 0))
                    {
                        level = 1;
                        index = 0;
                        start = 1;
                    }
                else
                    if ((level == 0) && (index == 1))
                    {
                        level = 1;
                        index = set_temp_index;
                    }
            }
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        show_temp(avail_temp[index]);
    }
    else
        if ((level == 1) && (!start)) {
            set_temp_index = index;
            level = 0;
            index = 1;
            str2lcd("SET TEMPERATURE", 1);
        }
    break;
case UP_KEY:
if ((level == 0) && (index == 0)) {
    index = 1;
    str2lcd("SET TEMPERATURE", 1);
}
else
    if ((level == 0) && (index == 1)) {
        index = 0;
        str2lcd(" START HEATER ", 1);
    }
    else
        if ((level == 1) && (!start)) {
            if (index == 4)
                index = 0;
            else
                index++;
            show_temp(avail_temp[index]);
        }
    break;
case DOWN_KEY:
if ((level == 0) && (index == 0)) {
    index = 1;
    str2lcd("SET TEMPERATURE", 1);
}
else
    if ((level == 0) && (index == 1)) {
        index = 0;
        str2lcd(" START HEATER ", 1);
    }
    else
        if ((level == 1) && (!start)) {
            if (index == 0)
                index = 4;
            else
                index--;
            show_temp(avail_temp[index]);
        }
    break;
case ESC_KEY:
if (start)
    {
        start = 0;
        heater_state = 0;
        str2lcd(" START HEATER ", 1);
        index = 0;
        level = 0;
    }
else
    {
        index = 1;
        level = 0;
    }

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        str2lcd("SET TEMPERATURE", 1);
    }
    break;
}
}
if (start)
{
    new_temp = read_temp();
    if (new_temp != cur_temp)
    {
        cur_temp = new_temp;
        heater_state = (cur_temp < avail_temp[set_temp_index]);
        show_temp(cur_temp);
    }
}
if (heater_state)
{
    if (RL_CTL) {
        if (on_count++ > MAX_ON_COUNT) {
            RL_CTL = 0;
            off_count = 0;
            on_count = 0;
        }
    }
    else
    {
        if (off_count++ > MAX_OFF_COUNT) {
            RL_CTL = 1;
            off_count = 0;
            on_count = 0;
        }
    }
    else
        RL_CTL = 0;
}
}

void delayx(unsigned int datax)
{
    unsigned int i;
    for (i=0;i<datax;i++){
}

void write_dec(unsigned char datax)
{
    if (datax >= 0xc8) {
        datax -= 0xc8;
        write('2');
    } else if (datax >= 0x64) {
        datax -= 0x64;
        write('1');
    } else write(' ');
    if (datax >= 90) {
        datax -= 90;
        write('9');
    } else if (datax >= 80) {
        datax -= 80;
        write('8');
    } else if (datax >= 70) {
        datax -= 70;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    write('7');
} else if (datax >= 60) {
    datax -= 60;
    write('6');
} else if (datax >= 50) {
    datax -= 50;
    write('5');
} else if (datax >= 40) {
    datax -= 40;
    write('4');
} else if (datax >= 30) {
    datax -= 30;
    write('3');
} else if (datax >= 20) {
    datax -= 20;
    write('2');
} else if (datax >= 10) {
    datax -= 10;
    write('1');
} else write('0');
write(datax+'0');
}

/*****
*****
* LCD Subroutines
*****
*****/
void str2lcd(char *string, bit clear)
{
    if (clear)
        clearlcd();
    while (*string != '\0') {
        write(*string++);
    }
}

void gotoxy(unsigned char x)
{
    x = x | 0x80;
    RS_LCD = 0;
    swap8to4(x);
}

void write(unsigned char datax)
{
    writelcd(datax);
    px++;
    if (px == 9) gotoxy(0x40);
    if (px > 16) {px = 1; gotoxy(0);}
}

void writelcd(unsigned char datax)
{
    RS_LCD = 1;
    swap8to4(datax);
    RS_LCD = 0;
}

void initlcd(void)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    delayx(0x00ff);
    RS_LCD = 0;
    swap8to4(0x33);
    swap8to4(0x32);
    swap8to4(0x28);
    swap8to4(0x0c);
    swap8to4(0x06);
    swap8to4(0x01);
}

void clearlcd(void)
{
    px = 1;
    RS_LCD = 0;
    swap8to4(0x01);
    swap8to4(0x02);
}

void swap8to4(unsigned char datax)
{
    B = datax;
    P1 = 0xff;
    while (P1 != 0xff) {}
    if (b7 == 1) p17 = 1; else p17 = 0;
    if (b6 == 1) p16 = 1; else p16 = 0;
    if (b5 == 1) p15 = 1; else p15 = 0;
    if (b4 == 1) p14 = 1; else p14 = 0;
    latchlcd();
    if (b3 == 1) p17 = 1; else p17 = 0;
    if (b2 == 1) p16 = 1; else p16 = 0;
    if (b1 == 1) p15 = 1; else p15 = 0;
    if (b0 == 1) p14 = 1; else p14 = 0;
    latchlcd();
}

void latchlcd(void)
{
    E_LCD = 0;
    delayx(0x00ff);
    E_LCD = 1;
}

/*****
*****
* Temperature Sensor Subroutines
*****
*****/

void show_temp(unsigned char datax)
{
    unsigned char tvalue, cvalue;
    str2lcd("TEMP: ", 1);
    tvalue = datax >> 1;
    cvalue = datax & 0x01;
    write_dec(tvalue);
    write('.');
    if (cvalue) {
        write('5');
    } else {
        write('0');
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}

unsigned char read_temp()
{
    unsigned char dataxx;
    treset();
    if (!tpresence()) return -1;
    delayx(20);
    write_tbyte(0xcc);
    write_tbyte(0x44);
    treset();
    delayx(20);
    treset();
    if (!tpresence()) return -1;
    delayx(20);
    write_tbyte(0xcc);
    write_tbyte(0xbe);
    dataxx = read_tbyte();
    treset();
    if (!tpresence()) return -1;
    return dataxx;
}

void treset()
{
    DQ_TEMP = 0;
    delayx(50);
    DQ_TEMP = 1;
    DQ_TEMP = 1;
}

bit tpresence()
{
    unsigned char i;
    i = 0;
    while(DQ_TEMP && (i>=200)) {i++;}
    i = 0;
    while(!DQ_TEMP && (i>=200)) {i++;}
    if (i>=200) return 0;
    return 1; // ok re p16 exist return 1;
}

unsigned char read_tbyte()
{
    b0 = read_tbit();
    b1 = read_tbit();
    b2 = read_tbit();
    b3 = read_tbit();
    b4 = read_tbit();
    b5 = read_tbit();
    b6 = read_tbit();
    b7 = read_tbit();
    return B;
}

bit read_tbit()
{
    bit retx;
    DQ_TEMP = 0;
    DQ_TEMP = 0;
    DQ_TEMP = 0;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DQ_TEMP = 1;
DQ_TEMP = 1;
DQ_TEMP = 1;
DQ_TEMP = 1;
DQ_TEMP = 1;
retx = DQ_TEMP;
delayx(2);
return retx;
}

void write_tbyte(unsigned char temp_id)
{
    B = temp_id;
    write_tbit(b0);
    write_tbit(b1);
    write_tbit(b2);
    write_tbit(b3);
    write_tbit(b4);
    write_tbit(b5);
    write_tbit(b6);
    write_tbit(b7);
}

void write_tbit(bit tbitx)
{
    if (tbitx == 0) {
        DQ_TEMP = 0;
        delayx(3);
        DQ_TEMP = 1;
    }
    else {
        DQ_TEMP = 0;
        DQ_TEMP = 0;
        DQ_TEMP = 1;
        delayx(3);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] มงคล มงคลวงศ์โรจน์, อิโรมุ ฮาชิโมโตะ, “ตำราทฤษฎีการหล่อลื่นฉบับภาษาไทย”, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] SZERI, A.Z., 1980 Tribology-friction, lubrication and wear, New York: Hemisphere.
- [3] CAMERON, 1966 The principles of Lubrication, LONDON LONGMAN.
- [4] Fuller D.D. 1956 Theory and Practice of Lubrication for Engineers, New York Wiley.
- [5] Annual Book of ASTM Standard.Vol0501, Designation:D2266-86



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้