

เครื่องทดสอบการสึกหรอบนพื้นอนดิสก์  
PIN - ON - DISK WEAR TEST MACHINE



นายกฤษดา บู่แก้ว  
นายศิริพงศ์ พันธุ์เพ็ง  
นายศุภชัย บู่คำ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2544

ปจ.  
ก.ร.ม.ค.  
2544

เลขที่.....  
เลขทะเบียน **45988**  
วัน, เดือน, ปี **27 ก.พ. 2546**

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

เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์  
PIN - ON - DISK WEAR TEST MACHINE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องทดสอบการสึกหรอบนพื้นพินออนดิสก์

Pin-on-Disk wear Test Machine

ผู้จัดทำ

1. นายกฤษดา บู่แก้ว รหัสประจำตัว 42015334
2. นายศิริพงษ์ พันธุ์เพ็ง รหัสประจำตัว 42015368
3. นายสุภชัย บู่คำ รหัสประจำตัว 42015370



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องทดสอบความสึกหรอแบบพินออนดิสก์

นายภุชญา	บุ๋แก้ว	42015334
นายศิริพงษ์	พันธ์เพ็ญ	42015368
นายศุภชัย	บุ๋คำ	42015370
รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2544		

### บทคัดย่อ

การศึกษาถึงคุณสมบัติทางไทรโบโลยีของวัสดุวิศวกรรมสมัยใหม่กำลังเป็นที่นิยมนำมาอย่างสูงและได้พัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีที่สุด และเหมาะสมต่อสภาพการใช้งานในสภาวะต่างๆ คำศัพท์ประสิทธิภาพของความเสียหาย ตลอดจนการสึกหรอ ถือได้ว่าเป็นปัจจัยหลักและเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของการพัฒนา ด้วยเหตุจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเสียหาย การสึกหรอ และการหล่อลื่นภายใต้การทดลองที่สภาวะต่าง ๆ โครงการนี้จึงได้นำเสนอเครื่องทดสอบแบบ Pin-on-Disk ซึ่งเป็นเครื่องทดลองอีกชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมอย่างสูงเพื่อใช้ในการทดลอง ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆข้างต้นที่ได้กล่าวมา โดยการจำลองสภาวะการทดสอบต่างๆ และหากมีการเปลี่ยนสภาวะการทดสอบก็จะทำให้ความสัมพันธ์บางอย่างเปลี่ยนไป ผลที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปประยุกต์ เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล และเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับชนิดของการหล่อลื่นในงานวิศวกรรมมากที่สุด

## Pin On Disk Wear Test Machine

Kridsda      Bookeaw

Siripong      Punpeng

Suphachai      Bookham

Assoc. Prof. Mongkol Mongkolwongroj      Advisor

### Abstract

The study of Tribological properties of modern machine parts is very popular and it has developed continuously to get the best quality. Friction and wear are the most important in design and development of machines at high precisional and high operating speed. In this study, the pin-on-disk wear test machine is under design and development in order to be able to measure both friction and wear conditions at varying load and speed. The maximum load and speed for the test machine are 100 N and 1500 rpm respectively. The test results will be beneficial to the design and development of machine parts for selecting the right material and for casting the lift of machine parts correctly.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดีไปได้ หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลง ได้ก็คือ รศ.ดร.มงคล วงศ์โรจน์อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความรู้ ความเอาใจใส่ แนะนำและช่วยเหลือ เป็นเสมอมาซึ่งต้องขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่ง ได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณและขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



นายกฤษฎา

บุญแก้ว

นายศิริพงศ์

พันธ์เฟื่อง

นายศุภชัย

บุ๋คำ

## สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 แนวความคิดและแนวคิดในการทำโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและแนวทางของการดำเนินโครงการ	1
บทที่ 2 ทฤษฎี	2
2.1 การศึกษาหรือ	2
2.1.1 สูตรพื้นฐานของการศึกษาหรือ	2
2.1.2 ตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อการศึกษาหรือ	2
2.2 แรงเสียดทาน	3
2.3 หลักพื้นฐานของการศึกษาหรือ	6
2.3.1 การหล่อลื่นชิ้นงาน	6
2.3.2 ชนิดของการหล่อลื่น	7
2.4 ชนิดของสารหล่อลื่น	8
2.4.1 สารหล่อลื่นสถานะของเหลว	8
2.4.2 สารหล่อลื่นสถานะกึ่งของแข็ง	13
2.4.2.1 จาระบี	13
2.4.2.2 คุณสมบัติของจาระบี	14
2.4.2.3 การเลือกใช้จาระบี	15
2.4.2.4 คำแนะนำในการใช้งาน	15
2.4.3 สารหล่อลื่นสถานะของแข็ง	16
2.4.3.1 สารหล่อลื่นของแข็งเป็นผง	17
2.4.3.2 แกรไฟต์	18
2.4.3.3 วัสดุประกอบ	19
2.4.3.4 โลหะอ่อนนุ่ม	20
2.4.4 จุดไหลเท	21

2.4.4.1	ตัวเลขความเป็นกลาง	21
2.4.5	สารเพิ่มคุณภาพ	22
2.4.5.1	สารลดจุดไหลเท	22
2.4.5.2	สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด	23
2.4.5.3	สารป้องกันการเกิดฟอง	23
2.4.5.4	สารป้องกันการออกซิเดชัน	23
2.4.5.5	สารป้องกันการกัดกร่อน	23
2.4.5.6	สารป้องกันสนิม	23
2.4.5.7	สารชะล้างและกระจายสิ่งสกปรก	23
2.4.6	น้ำมันสังเคราะห์	24
2.4.6.1	ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์	25
2.4.6.2	เอสเทอร์อินทรีย์	25
2.4.6.3	โพลีไกลคอลส์	25
2.4.6.4	ฟอสเฟลเอสเทอร์	25
2.4.6.5	น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์อื่นๆ	25
2.4.7	น้ำมันเครื่อง	25
2.4.7.1	คุณสมบัติในการหล่อลื่น	25
2.4.7.2	คุณสมบัติในการรักษาความสะอาด	25
2.4.7.3	คุณสมบัติระบายความร้อน	25
2.4.7.4	กลไกของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันพืช	25
2.4.7.5	ป้องกันการรั่วซึมของแก๊ส	25
2.4.7.6	ส่วนผสมของน้ำมันเครื่อง	26
2.4.7.7	สารเคมีเพิ่มคุณภาพที่ใช้ผสมน้ำมันเครื่อง	27
2.4.7.8	การแยกประเภทน้ำมันเครื่อง	27
2.4.7.9	การเปรียบเทียบประเภทน้ำมันเครื่องตามสภาพการใช้งาน	29
2.4.8	น้ำมันพืช	31
2.4.8.1	การผลิตน้ำมันพืชภายในประเทศ	31
2.4.8.2	องค์ประกอบของน้ำมันพืช	32
2.4.8.3	ประเภทของกรดไขมัน	32
2.4.8.4	กลไกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันพืช	33
2.4.8.5	สารต้านการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันพืช	34
2.4.8.6	คุณสมบัติของน้ำมันพืช	36
2.4.8.6.1	ค่าไอโอดีน	37
2.4.8.6.2	จุดหลอมเหลว	37

2.4.8.6.3	ค่าความหนืด	37
2.4.8.6.4	ค่าซาปอนนิไฟเคชั่น	37
2.4.8.6.5	การดูดซับของน้ำมันพืชกับโลหะ	38
2.4.9	น้ำมันหล่อลื่น	40
2.4.9.1	การผลิตน้ำมันหล่อลื่น	40
2.4.9.2	น้ำมันหล่อลื่นสำหรับอุตสาหกรรม	41
2.4.9.3	การแยกประเภทน้ำมันหล่อลื่นสำหรับอุตสาหกรรม	41
2.4.9.4	สารป้องกันการสึกหรอ	45
2.4.9.5	คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น	45
2.4.9.5.1	ความหนืด	45
2.4.9.5.2	ดัชนีความหนืด	48
2.4.9.5.3	กากคาร์บอน	50
2.4.9.5.4	สี	50
2.4.9.5.5	ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ	50
2.4.9.5.6	จุดวาบไฟและจุดติดไฟ	50
2.5	ทฤษฎีการบิดของเพลลา	51
2.5.1	การบิดของเพลลา	51
2.5.2	การคำนวณทอร์กที่เกิดขึ้นขึ้นบนเพลลา	52
2.5.3	Strian Gauge	53
2.5.4	Gauge Factor	53
2.5.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง Strian ที่เกิดขึ้นกับ Output ของวงจร	53
2.5.6	วงจรรขยายสัญญาณ	55
บทที่ 3	การออกแบบและพัฒนาเครื่องทดสอบ	56
3.1	การคำนวณชิ้นส่วนของเครื่องทดสอบ	56
3.1.1	มอเตอร์	56
3.1.2	เพลลาส่งกำลัง	56
3.1.3	คัปปลิ่ง	57
3.2	การออกแบบเครื่องทดสอบ	58
3.2.1	การออกแบบโดยทั่วไป	58
3.2.2	การสร้างเครื่องทดสอบ	59
บทที่ 4	วิธีการทดลองและผลการทดลอง	62
4.1	ขั้นตอนการทดลอง	62
4.2	ผลการทดลอง	68

บทที่ 5 บทสรุปข้อเสนอแนะและวิจารณ์ผลการทดลอง	79
5.1 ผลที่ได้จากโครงการ	79
5.2 ข้อจำกัดของเครื่องทดสอบความถี่หรือ	79
5.3 ข้อเสนอแนะ	79
5.4 สรุปผลการทดลอง	79
ภาคผนวก ก.	81
ภาคผนวก ข.	91
บรรณานุกรม	104



## สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 2-1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยเฉลี่ย	7
ตารางที่ 2-2 ผลของส่วนผสมของน้ำมันปิโตรเลียมต่อคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น	9
ตารางที่ 2-3 ชนิดของน้ำมันหล่อลื่นแบ่งตามเบอร์ SAE	10
ตารางที่ 2-4 ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นในทางอุตสาหกรรม	10
ตารางที่ 2-5 แสดงตัวอย่างการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารแต่งเติม	12
ตารางที่ 2-6 สารเติมแต่งที่นิยมใช้	12
ตารางที่ 2-7 เปรียบเทียบเบอร์จากระบี	14
ตารางที่ 2-8 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารหล่อลื่นสถานะของแข็ง	18
ตารางที่ 2-9 ความแข็งแรงเฉือนของโลหะ	20
ตารางที่ 2-10 มาตรฐานการวัดความหนืดของน้ำมันเครื่อง	28
ตารางที่ 2-11 แสดงผลการผลิตของน้ำมันพืช	31
ตารางที่ 2-12 แสดงโครงสร้างของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ	33
ตารางที่ 2-13 ชนิดของกรดไขมันในน้ำมันพืช	33
ตารางที่ 2-14 แสดงปริมาณของสาร โทโคฟีรอลในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ	35
ตารางที่ 2-15 แสดงค่าไอโอดีนของน้ำมันพืช	36
ตารางที่ 2-16 แสดงจุดหลอมเหลวของน้ำมันพืช	37
ตารางที่ 2-17 แสดงความหนืดของน้ำมันพืช	37
ตารางที่ 2-18 แสดงค่าซาโปนิฟิเคชันของน้ำมันพืช	38
ตารางที่ 4-1 แสดงผลที่ได้จากการ calibrate เครื่องทดสอบ	68
ตารางที่ 4-2 ผลการทดลองกรณีที่ไม่มีการหล่อลื่นรัศมีการทดสอบ 47 mm	69
ตารางที่ 4-3 ผลการทดลองกรณีที่ไม่มีการหล่อลื่นรัศมีการทดสอบ 64 mm	70
ตารางที่ 4-4 การคำนวณมวลไวมิตกรณีที่ไม่มีการหล่อลื่นที่รัศมี 47 mm	71
ตารางที่ 4-5 การคำนวณมวลไวมิตกรณีที่ไม่มีการหล่อลื่นที่รัศมี 64 mm	71
ตารางที่ 4-6 ผลการทดลองกรณีที่ใช้ น้ำมันเครื่องสังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง	73
ตารางที่ 4-7 ผลการทดลองกรณีที่ใช้ น้ำมันเครื่องสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	74
ตารางที่ 4-8 ผลการทดลองกรณีที่ใช้ น้ำมันถั่วเหลือง	75
ตารางที่ 4-9 ผลการทดลองกรณีที่ใช้ น้ำมันถั่วเหลืองผสมแกรไฟต์	76
ตารางที่ 4-10 การคำนวณมวลไวมิตเพื่อเปรียบเทียบกรณีที่ใช้สารหล่อลื่นชนิดต่าง ๆ	77
ตารางที่ 4-11 แสดงการเปรียบเทียบ Friction Coefficient ที่การทดลองแบบต่าง ๆ	78

## สารบัญภาพ

## หน้าที่

รูปที่ 2-1 แรงเสียดทานระหว่างกล่องและพื้นที่ผิวหน้าที่ขรุขระ	3
รูปที่ 2-2 ชนิดของการหล่อลื่น	7
รูปที่ 2-3 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น	11
รูปที่ 2-4 โครงสร้างเป็นชั้นส่วนแลททิซของแกรไฟต์	17
รูปที่ 2-5 การวัดจุดไหลเท	21
รูปที่ 2-6 แสดงผลของการใส่สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันปาล์ม	36
รูปที่ 2-7 การดูดซับทางกายภาพของกรดไขมันบนผิวโลหะ	39
รูปที่ 2-8 การดูดซับทางเคมีของกรดไขมันบนผิวโลหะ	39
รูปที่ 2-9 การสร้างชั้นของสบู่ของกรดไขมันบนผิวโลหะ	39
รูปที่ 2-10 การผลิตน้ำมันหล่อลื่น	41
รูปที่ 2-11 แสดงการแยกความหนืดตามระบบ ISO	43
รูปที่ 2-12 การผลิต ผลิตภัณฑ์หล่อลื่น	44
รูปที่ 2-13 หลักการของความหนืด	46
รูปที่ 2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นบางชนิด	47
รูปที่ 2-15 ผลของความดันที่มีต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE40	48
รูปที่ 2-16 การหาค่าดัชนีความหนืด	49
รูปที่ 2-17 ลักษณะการติดตั้ง Strain Gauge บนเพลลา	51
รูปที่ 2-18 วงกลมโมร์สำหรับการบิด	51
รูปที่ 2-19 วงจร Bridge	54
รูปที่ 2-20 ภาพประกอบการคำนวณวงจร Bridge	54
รูปที่ 2-21 วงจรขยายสัญญาณแบบ Differential Amplifier	55
รูปที่ 3-1 การเลือกขนาดคลีปปีง	57
รูปที่ 3-2 ลักษณะการใส่ชิ้นทดสอบกับหัวกด	58
รูปที่ 3-3 ลักษณะการวางหัวกดทดสอบกับงานทดสอบ	58
รูปที่ 3-4 แสดงเครื่องทดสอบพินออนดิกส์	59
รูปที่ 3-5 ชุดหัวกดทดสอบและงานทดสอบ	60
รูปที่ 3-6 หัวจับยึดชิ้นทดสอบ	60
รูปที่ 3-7 ชุดทำความร้อน	61
รูปที่ 3-8 การใช้งานของชิ้นส่วนต่าง ๆ	61
รูปที่ 4-1 การ calibrate เครื่องทดสอบ	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-2 ทฤษฎีในการวัดแรงบิด	62
รูปที่ 4-3 แท่งทดสอบและงานทดสอบ	63
รูปที่ 4-4 เครื่องชั่งมวลแบบ Analytical Balance	63
รูปที่ 4-5 การใส่แท่งทดสอบเข้ากับหัวจับ	64
รูปที่ 4-6 การใส่งานทดสอบ	64
รูปที่ 4-7 การวางน้ำหนักลงบนชุดหัวกด	65
รูปที่ 4-8 การวัดความเร็วรอบในการทดสอบ	65
รูปที่ 4-9 แสดงการวางวัสดุทดสอบบนรีซีททดสอบ	66
รูปที่ 4-10 การหล่อลื่นผิววัสดุทดสอบ	66
รูปที่ 4-11 การวัดค่าสัญญาณ output จากมัลติมิเตอร์	67
รูปที่ 4-12 กราฟที่ได้จากการ calibrate เครื่องทดสอบ	68
รูปที่ 4-13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับเวลากรณีไม่มีการหล่อลื่นรีซีททดสอบ 47 mm	69
รูปที่ 4-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับเวลากรณีไม่มีการหล่อลื่นรีซีททดสอบ 64 mm	70
รูปที่ 4-15 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างมวล ไร้มิติกับเวลากรณีไม่มีการหล่อลื่น	72
รูปที่ 4-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่หายไปกับเวลา กรณีที่ใช้น้ำมันเครื่อง SAE 40 ที่อุณหภูมิห้อง	73
รูปที่ 4-17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่หายไปกับเวลา กรณีที่ใช้น้ำมันเครื่อง SAE 40 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	74
รูปที่ 4-18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่หายไปกับเวลา กรณีที่ใช้น้ำมันถั่วเหลือง	75
รูปที่ 4-19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่หายไปกับเวลา กรณีที่ใช้น้ำมันถั่วเหลือง ผสมแกรไฟต์	76
รูปที่ 4-20 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างมวล ไร้มิติกับเวลา	77
รูปที่ 4-21 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Friction Coefficient กับเวลาในการทดลอง	78

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

ปัจจุบันวัสดุวิศวกรรมสมัยใหม่ถูกวิจัยและพัฒนา คุณสมบัติให้มีความสามารถสูงในหลาย ๆ ด้าน เพื่อตอบสนองความต้องการในงานแต่ละด้านของอุตสาหกรรม คุณสมบัติบางประการที่น่าสนใจมากและมีผลต่ออายุการใช้งานของเครื่องจักร คือการสึกหรอของวัสดุ ดังนั้นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของคุณสมบัติ ด้านความเสียดทานของวัสดุ อันเป็นสาเหตุหลักของการสึกหรอ ตลอดจนการใช้สารหล่อลื่นที่ถูกต้องและเหมาะสมที่สุดเพื่อยืดอายุการใช้งานให้ยาวนานขึ้น

### 1.2 แนวความคิดและแนวคิดในการทำโครงการ

จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้เกิดแนวความคิดซึ่งเป็นที่มาของโครงการนี้ เพื่อที่จะนำมาใช้เป็นอุปกรณ์การทดลอง ซึ่งสามารถใช้งานได้จริง สามารถที่จะปรับเปลี่ยนการทำงานได้ในหลากหลายลักษณะ อีกทั้งยังมีราคาที่เหมาะสม และสามารถให้ผลการทดลองที่แม่นยำ และนำผลทดลองที่ได้ หาข้อสรุปและข้อแตกต่างของสารหล่อลื่นแต่ละชนิด ที่สภาวะต่าง ๆ กัน

### 1.3 ขอบเขตและแนวทางของการดำเนินโครงการ

ขอบเขตของการดำเนินการเริ่มตั้งแต่การกำหนดคุณสมบัติของการสร้างเครื่องทดสอบ รูปร่างของเครื่องทดสอบ น้ำหนักกดที่ใช้ในการทดสอบ ความเร็วในการทดสอบ เพื่อนำไปออกแบบ และกำหนดวัสดุที่จะนำมาสร้างเครื่องทดสอบ หลังจากนั้นก็เป็นการสร้างเครื่องทดสอบที่ได้เขียนแบบร่างของการทำงานแต่ละชิ้นส่วนเอาไว้หลังจากเสร็จสิ้นการสร้างเครื่อง ก็จะเป็นการทดสอบการทำงานของเครื่อง และดำเนินการทดลองตามสภาวะต่าง ๆ ที่แปรเปลี่ยนไป เพื่อนำมาหาข้อสรุปของการทดลองการหล่อลื่นและนำมาเปรียบเทียบเป็นแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องทดสอบ ต่อไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 การสึกหรอ

การสึกหรอของวัสดุ โดยส่วนใหญ่เกิดจากการเสียดสีกันของผิวสัมผัส อัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาของการสัมผัสซึ่งมีตัวประกอบอื่น ๆ ที่ต้องพิจารณาอีกมากมาย อย่างเช่น ลักษณะของผิวสัมผัส, อุณหภูมิ, สปส. ความเสียดทานของวัสดุ, ความแข็ง, ความเปราะ ฯลฯ

การสึกหรอของวัสดุมีหลายแบบ แต่ละแบบเองก็มีการศึกษาเจาะลึกในเนื้อหา มีการตีพิมพ์เป็นบทความ, หนังสือ เยอะมาก ซึ่งให้รายละเอียดของแต่ละแบบอยู่แล้ว โดยในส่วนเนื้อหาของ การสึกหรอ ใครงานนี้มุ่งประเด็นไปที่การศึกษาคุณภาพโดยรวมของการเกิดการสึกหรอ เช่น สูตรที่ใช้ในการคำนวณเรื่องการสึกหรอ ตัวแปรที่สำคัญของการสึกหรอ ตลอดจนผลกระทบจากสาเหตุต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสึกหรอซึ่งจะได้นำมาแจกแจงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

##### 2.1.1 สูตรพื้นฐานของการสึกหรอ

ARCHARD'S EXPERIMENTAL WEAR LAW.

$$V = kND/H$$

(2.1)

เมื่อ

$k$  = ค่า สปส. ของการสึกหรอ (Wear coefficient)

$N$  = แรงกระทำในแนวตั้งฉาก (Normal load)

$D$  = ระยะทางของการเคลื่อนที่ (Distance moved)

$H$  = ความแข็ง (Hardness)

##### 2.1.2 ตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อ การสึกหรอ

1. ความเรียบหรือหยาบของผิวสัมผัสของวัสดุ
2. ภาระที่ใช้ในการทดสอบ
3. ความเร็วในการทดสอบ
4. สปส. ความเสียดทานของวัสดุที่นำมาใช้ทดสอบ
5. ความแข็งของวัสดุ, ความเปราะ, ความเหนียว
6. ชนิดของการหล่อลื่น, ปริมาณของการหล่อลื่น, ความหนาของชั้นฟิล์มน้ำมัน
7. อุณหภูมิของการทดลอง
8. และอื่น ๆ อีกมาก

## 2.2 แรงเสียดทาน (Frictional forces)

เป็นแรงที่กระทำในทิศต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุเกิดที่ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุ 2 อัน

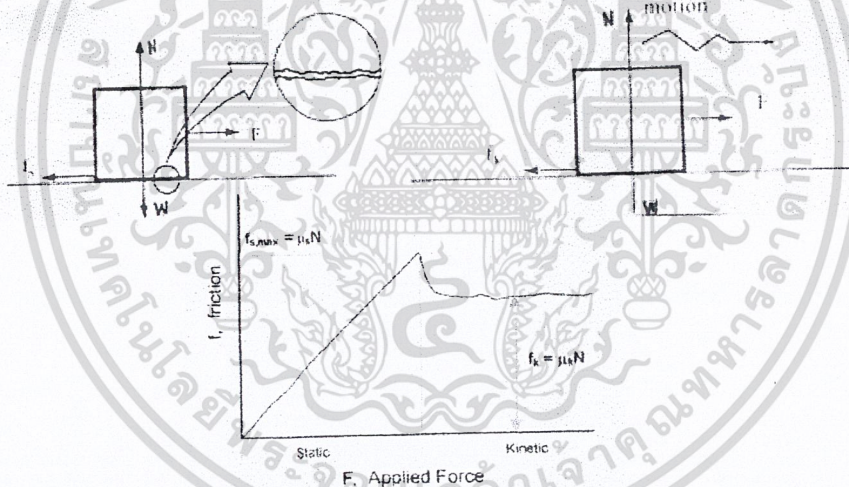
แรงเสียดทานแบ่งเป็นหลายประเภท เช่น

- แรงหนืด (viscous frictional force) เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ในอากาศ

หรือในของเหลว เช่น แรงที่อากาศกระทำต่อรถยนต์ที่วิ่งด้วยความเร็วสูง เป็นต้น

- แรงเสียดทานที่เกิดจากการไถลของวัตถุ (sliding frictional force) เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเมื่อผิวหน้าของวัตถุ 2 ชนิดสัมผัสกัน และจะมีทิศตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ไถลไปบนอีกวัตถุหนึ่งเสมอ

แรงเสียดทานมีความสำคัญมากเพราะการที่เราสามารถเดินไปบนถนนหรือรถวิ่งทางโค้ง หรืออื่น ๆ อีกได้โดยไม่ลื่นไถลก็เนื่องจากมีแรงเสียดทานคอยต้านเอาไว้ แต่บางครั้งเวลาออกแบบสร้างเครื่องมืองต่าง ๆ เราจะต้องพยายามลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเพื่อประสิทธิภาพในการทำงาน เช่นการใส่ลูกกลิ้งหรือการใช้ของเหลว เช่นพวกน้ำมันในการหล่อลื่นตามรอยต่อต่าง ๆ แม้ว่าในของเหลวจะมีแรงเสียดทานซึ่งเราเรียกว่าแรงหนืดก็ตาม แต่แรงเสียดทานในของเหลวจะน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงเสียดทานที่เกิดจากของแข็ง



รูป 2-1 แรงเสียดทาน  $\vec{f}$  ระหว่างกล่องและพื้นผิวที่ผิวหน้าขรุขระที่มีแรง  $\vec{F}$  กระทำในทิศทางตรงข้ามกัน

- แรงเสียดทานสถิต = แรง  $\vec{F}$
- เมื่อ  $\vec{F} > \vec{f}_{s,max}$  กล่องเคลื่อนที่ด้วยความเร่งไปทางขวา
- กราฟระหว่างแรงเสียดทานกับแรงภายนอกที่กระทำต่อกล่องสังเกตว่า  $\vec{f}_{s,max} > \vec{f}_k$

พิจารณากล่องที่วางอยู่บนโต๊ะดังรูป 2.1 ถ้าเราออกแรง  $\vec{F}$  ในแนวระดับ กระทำต่อกล่องไปทางขวา กล่องจะยังคงหยุดนิ่งถ้าแรง  $\vec{F}$  ที่กระทำไม่มากพอ เพราะมีแรงกระทำต่อกล่องไปทางซ้ายซึ่งเรียกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงเสียดทาน ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย  $\vec{f}_s$  จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าแรงนี้เกิดเนื่องจากธรรมชาติของผิวหน้าของวัตถุ 2 ชนิดที่สัมผัสกัน มีความขรุขระของผิวหน้าต่าง ๆ กัน ความขรุขระนี้อาจจะเกิดเพียงบางแห่งที่สัมผัสกันก็ได้ ดังแสดงในวงกลมรูปที่ 2-1 ถ้าเราเพิ่มขนาดของแรง  $\vec{F}$  ให้มากขึ้น ดังในรูป 2-1 ก้อนจะเริ่มเคลื่อนที่ เมื่อก้อนเริ่มจะเคลื่อนที่  $\vec{f}_s$  จะมีค่ามากที่สุด เมื่อ  $\vec{F}$  มีค่ามากกว่า  $\vec{f}_{s,max}$  ดังรูป 2-1 เราเรียกแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะวัตถุกำลังเคลื่อนที่ว่า แรงเสียดทานจลน์ (force of kinetic friction) ใช้สัญลักษณ์ว่า  $\vec{f}_k$  และเรียกแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะวัตถุยังไม่เคลื่อนที่ว่า แรงเสียดทานสถิต,  $\vec{f}_s$  (force of static friction) โดยแรงเสียดทานจลน์,  $\vec{f}_k$  มีค่าน้อยกว่าแรงเสียดทานสถิต,  $\vec{f}_s$  ขณะวัตถุเริ่มจะเคลื่อนที่ซึ่งมีค่าสูงที่สุด

จากรูป 2-1 แรงลัพธ์ในทิศ +X =  $\vec{F} - \vec{f}_k$  ทำให้วัตถุมีความเร่งไปทางขวา ถ้า  $\vec{F} = \vec{f}_k$  ก้อนจะเคลื่อนที่ไปทางขวาด้วยความเร็วคงที่ ถ้า  $\vec{F} = 0$  แรงเสียดทานจะกระทำไปทางซ้ายของก้อนจะทำให้ก้อนลดความเร็วลงจนกระทั่งหยุดนิ่ง

จากการทดลองพบว่า สำหรับวัตถุคู่หนึ่ง ๆ  $\vec{f}_k$  และ  $\vec{f}_s$  เป็นสัดส่วนกับแรงปฏิกิริยาพื้นที่สัมผัสกับวัตถุในแนวตั้งฉากหรือ  $\vec{F}_N$  (Normal force) ในที่นี้เราจะสัญลักษณ์แทน Normal force เป็น  $\vec{N}$  ซึ่งจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของวัตถุที่วางในแนวราบ และจะขึ้นกับธรรมชาติระหว่ววัตถุ 2 ชนิดด้วย ถ้าผิวสัมผัสมีความขรุขระมากก็จะมีแรงเสียดทานมาก จากผลการทดลองเขียนเป็นความสัมพันธ์ดังนี้

$$\vec{f}^w = \vec{N}$$

หรือ

$$\vec{f}^w = \mu \vec{N}$$

(2.2)

เมื่อ  $\vec{f}^w$  = แรงเสียดทานที่มากที่สุดมีหน่วยเป็นนิวตัน

$\mu$  = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เป็นค่าคงที่สำหรับวัตถุคู่หนึ่ง ๆ

$\vec{N}$  = แรงที่พื้นที่กระทำต่อวัตถุในแนวตั้งฉาก

ถ้าเป็นกรณีแรงเสียดทานสถิต

$$\vec{f}_s^w = \mu_s \vec{N}$$

(2.3)

$\mu_s$  = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต

ถ้าเป็นกรณีแรงเสียดทานจลน์

$$\vec{f}_k^w = \mu_k \vec{N}$$

(2.4)

$\mu_k$  = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปสมบัติจากแรงเสียดทานจากการทดลอง

1.  $f_{s,max}^w$  ไม่ขึ้นกับขนาดพื้นที่ผิวที่สัมผัสกัน เช่น ถ้าเดิมกล่องมีขนาดครึ่งหนึ่ง มีแรงเสียดทาน  $f_{s,max}^w$  ค่าหนึ่งเมื่อเปลี่ยนกล่องให้ใหญ่เป็นสองเท่า แต่น้ำหนักเท่าเดิม ดังรูปประ แรงเสียดทาน  $f_{s,max}^w$  ก็ไม่เปลี่ยนแปลง
2. สำหรับวัตถุคู่หนึ่ง ๆ  $f_{s,max}^w$  เป็นสัดส่วนกับ normal force  $N^w$
3. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต  $\mu_s$  มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่าง  $f_{s,max}^w$  กับ  $N^w$
4. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์  $\mu_k$  ไม่ขึ้นกับความเร็วของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ และเนื่องจาก  $f_k^w < f_{s,max}^w$  ดังนั้น  $\mu_k < \mu_s$
5. แรงเสียดทานจลน์  $f_k^w$  มีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของวัตถุมีค่า

$$f_k^w = \mu_k N^w$$

6. แรงเสียดทานสถิตมีทิศตรงข้ามกับแรงภายนอกที่กระทำวัตถุมีค่า

$$f_s^w = \mu_s N^w$$

และ  $f_{s,max}^w = \mu_s N^w$

เพราะเมื่อวัตถุหยุดนิ่ง แรงเสียดทานจะกระทำกับวัตถุ โดยยังคงทำให้วัตถุมีความเร็ว = 0 เมื่อเทียบกับผิวหน้าต่อไป

7.  $\mu_k$  และ  $\mu_s$  ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผิวหน้า แต่  $\mu_k < \mu_s$  เสมอ ค่า  $\mu$  จะอยู่ในช่วง 0.01 สำหรับวัตถุผิวเรียบถึง 1.5 สำหรับวัตถุผิวขรุขระดังตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

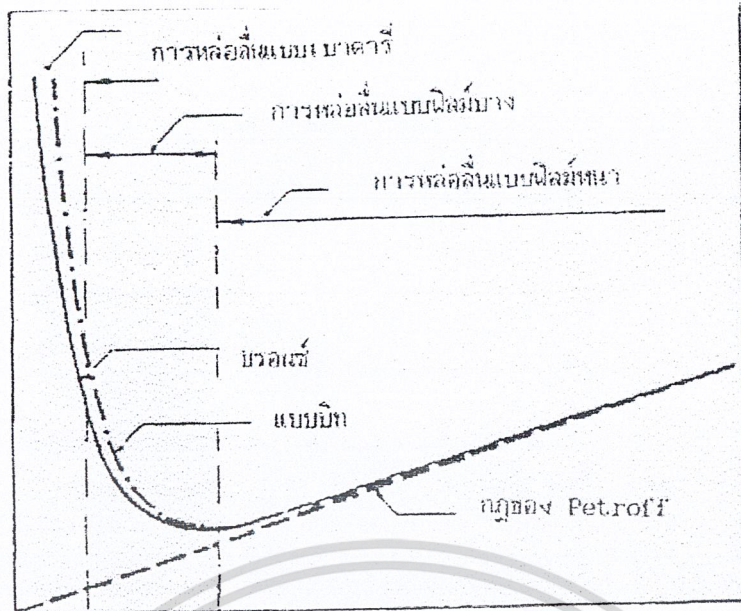
## 2.3 หลักพื้นฐานการหล่อลื่น

### 2.3.1 การหล่อลื่นชิ้นงาน

การหล่อลื่นชิ้นงาน คือ การแยกชิ้นงานออกจากกันด้วยฟิล์มสารหล่อลื่น ขณะที่ผิวชิ้นงานตั้ง แต่สิ่งชิ้นขึ้นไปไหลถูกัน ฟิล์มสารหล่อลื่นจะถูกฉีกโดยผิวของชิ้นงานทั้งสองไม่เกิดความเสียหาย ถ้าหากว่ามีฟิล์มน้ำมันคั่นอยู่ระหว่างผิวของชิ้นงาน แต่ถ้าไม่มีฟิล์มหรือมีฟิล์มเฉพาะบางพื้นที่ของผิวชิ้นงาน ผิวชิ้นงานที่ไม่เกิดฟิล์มจะเกิดการแตะสัมผัสของผิวโลหะชิ้นงานทั้งสอง เมื่อชิ้นงานเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสัมพัทธ์ ก็จะทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดการเคลื่อนไหลระหว่างผิวโลหะทำให้เนื้อโลหะหลุดออกจากผิวเกิดการสึกหรอของชิ้นงาน จะเห็นว่าสารหล่อลื่นชิ้นงาน สามารถลดการสึกหรอ ทำให้เครื่องจักรมีอายุยาวนานขึ้น และยังทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ซึ่งทำให้เครื่องจักรมีขนาดเล็กลง ประหยัดพลังงานรวมทั้งลดมลพิษให้แก่สิ่งแวดล้อมด้วย การหล่อลื่นนั้นจำเป็นต้องให้เกิดฟิล์มสารหล่อลื่นซึ่งเป็นของไหลที่มีความหนาเพียงพอเพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่เกิดการแตะสัมผัสของผิวโลหะชิ้นงาน หรือไม่สึกหรอของผิวชิ้นงาน ขณะที่ชิ้นงานชิ้นงานหนึ่งเคลื่อนไหลไปบนผิวของชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่ง การหล่อลื่นแบบนี้จะพบในการรองรับแรงกด แผ่นรองรับแรงดัน ซึ่งเรียกรวมการหล่อลื่นด้วยฟิล์มของไหลหรือการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก สารหล่อลื่นที่นิยมใช้มักจะเป็นน้ำมันหล่อลื่น แร่ น้ำ อากาศ หรือน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ ฯลฯ

จากเหตุผลที่ว่าอุตสาหกรรมมีการพัฒนาตัวอย่างรวดเร็ว เครื่องจักรเครื่องมือสมัยใหม่ได้ถูกพัฒนาให้ชิ้นงานมีความเที่ยงตรงสูง ความเร็วรอบสูง ทำให้การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกได้ถูกนำไปใช้ในการหล่อลื่นเครื่องจักรต่างๆ เช่น กังหันไอน้ำ กังหันแก๊ส เครื่องอัดอากาศเครื่องยนต์ และเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น การหล่อลื่นแบบแห้งและการหล่อลื่นแบบเบาตัว ใช้สารหล่อลื่นที่เป็นไข อาจเป็นจาระบีหรือน้ำมันไข มักจะใช้ในงานที่มีความเร็วรอบต่ำ หรืองานที่ผิวชิ้นงานเคลื่อนไหลบนผิวชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งที่มีความเร็วสัมพัทธ์ต่ำ ซึ่งผิวที่เคลื่อนไหลถูกันของผิวชิ้นงาน อาจมีการหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ หรืออาจไม่มีการหล่อลื่นเป็นผิวแห้งก็ได้

วิชาวิทยาศาสตร์การหล่อลื่น ได้เริ่มมีการศึกษาตั้งแต่ประมาณ ปี ค.ศ. 1785 นายคูลอมบ์ (Coulomb) ได้อธิบายปรากฏการณ์การเกิดความฝืดและยังได้อธิบายความฝืดสถิตย์และความฝืดจลน์ (Static friction and Kinetic friction) ต่อมาในปี ค.ศ. 1886 นายเรโนลด์ (Reynold) ได้เขียนทฤษฎีการหล่อลื่นด้วยฟิล์มของไหลเป็นครั้งแรก ทำให้วิชาการทางด้านการหล่อลื่นได้ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว จนปัจจุบันวิชาการหล่อลื่นได้เป็นวิชาที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่



รูปที่ 2-2 ชนิดของการหล่อลื่น

### 2.3.2 ชนิดการหล่อลื่น

พฤติกรรมของการเคลื่อนไถลของผิวชิ้นงานจะขึ้นกับฟิล์มสารหล่อลื่นที่คั่นอยู่ระหว่างผิวของชิ้นงานทั้งสอง และสภาวะการทำงาน จากรูป 2-2 สำหรับการรองลื่นเพลากลมได้แสดงความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน  $f$  และค่า  $\mu N/P$  โดยที่  $\mu$  คือ ค่าความหนืดของสารหล่อลื่น  $N$  คือความเร็วรอบของเพลลา และ  $P$  คือภาระที่การรองลื่นรับต่อพื้นที่ภาพฉาย หรือเรียกว่าภาระจำเพาะ จากกราฟพบว่าค่าที่  $\mu N/P$  สูงๆ การรองลื่นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า  $\mu N/P$  และให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ซึ่งเป็นการหล่อลื่นแบบฟิล์มหนาหรือการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก เมื่อลดค่า  $\mu N/P$  ลงจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะลดลงด้วยจนมีค่าต่ำสุด ซึ่งเป็นการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง ในการหล่อลื่นแบบนี้ถ้าลดค่า  $\mu N/P$  ให้มีค่าต่ำลงไปอีกจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว การหล่อลื่นในลักษณะนี้เรียกว่าการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง และถ้าลดค่า  $\mu N/P$  ลงไปอีก จากรูปจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกอย่างรวดเร็ว และยังพบว่าฟิล์มหล่อลื่นบางส่วนถูกทำลายไป ซึ่งเรียกการหล่อลื่นแบบนี้ว่า การหล่อลื่นแบบเบาคาร์รี่ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยเฉลี่ยของการหล่อลื่นแบบต่างๆ ได้แสดงในตาราง 2-1

ชนิดของการหล่อลื่น	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	การสึกหรอ
ไม่มีการหล่อลื่น (ผิวแห้ง)	1.0 - 2.0	การสึกหรอสูงมาก
การหล่อลื่นแบบเบาคาร์รี่หรือแบบฟิล์มบาง	0.05 - 0.15	การสึกหรอเล็กน้อย
การหล่อลื่นแบบฟิล์มหนา	0.001	ไม่มีการสึกหรอ

ตารางที่ 2-1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ชนิดของสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ทำหน้าที่ในระบบการหล่อลื่นจะทำหน้าที่หลักใหญ่ๆ สองประการ คือ ทำหน้าที่ลดหรือควบคุมแรงเสียดทาน ประการที่สอง ช่วยลดการสึกหรอที่ผิวชิ้นงานระหว่างที่ชิ้นงานมีการหมุนหรือเคลื่อนที่ ในการออกแบบระบบการหล่อลื่นและเลือกสารหล่อลื่นจะต้องพิจารณาถึง

1. ระยะห่างระหว่างผิวชิ้นงาน
2. แรงกระทำบนผิวชิ้นงาน
3. คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของผิวชิ้นงาน

แฟกเตอร์ทั้งสามนี้เป็นตัวกำหนดชนิดของการหล่อลื่น ซึ่งการหล่อลื่นโดยทั่วไป จะแบ่งเป็นสองชนิดคือ

1. การหล่อลื่นที่มีฟิล์มของไหลหนา หรือเรียกการหล่อลื่นแบบไฮโดร ไดนามิก เป็นชนิดของการหล่อลื่นที่ผิวชิ้นงานมีสารหล่อลื่นที่เป็นฟิล์มของไหลหนา ดังนั้นสมรรถนะการหล่อลื่นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่นเป็นหลัก
2. การหล่อลื่นแบบเบาคาร์ เป็นชนิดการหล่อลื่นที่ผิวชิ้นงานมีสารหล่อลื่นคั่นอยู่หนาเพียงหนึ่งหรือสองโมเลกุลเท่านั้น ดังนั้นกระบวนการหล่อลื่นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่นและคุณสมบัติของผิวชิ้นงานด้วย

สารหล่อลื่นที่จะกล่าวต่อไปนี้ คือสารหล่อลื่นสถานะของเหลว สารหล่อลื่นสถานะกึ่งของแข็ง และสารหล่อลื่นสถานะของแข็ง

### 2.4.1 สารหล่อลื่นสถานะของเหลว

น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่นสถานะชนิดของเหลวที่ได้จากปิโตรเลียม ถ่านหิน น้ำมันดิน เป็นต้น ส่วนใหญ่น้ำมันหล่อลื่นเป็นน้ำมันที่ได้จากปิโตรเลียม ดังนั้นในที่นี้จะพูดถึงน้ำมันหล่อลื่นที่เป็นน้ำมันปิโตรเลียมเท่านั้น น้ำมันปิโตรเลียมคิบบส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมของคาร์บอนอยู่ประมาณ 83 - 87 % มีไฮโดรเจนประมาณ 11-14 % และมีส่วนผสมอื่นๆ ได้แก่กำมะถัน ออกซิเจน และไนโตรเจน จะเห็นว่าน้ำมันปิโตรเลียมคิบบมีส่วนผสมส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนและไนโตรเจน จะสามารถจับตัวได้หลายๆ แบบ ซึ่งทำให้คุณสมบัติของน้ำมันแตกต่างกันไป สามารถจำแนกออกเป็น พาราฟิน โอลีฟิน เอโรมาติก แน้ทรีน และเอสพาเทิน ผู้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นปิโตรเลียม สามารถเลือกชนิดหรือแหล่งน้ำมันปิโตรเลียมคิบบและกำหนดอัตราส่วนของน้ำมันคิบบจากแหล่งน้ำมันคิบบต่างๆ ในโลกประมาณ 0 - 40 % เพื่อให้ได้น้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณภาพตามความต้องการ น้ำมันปิโตรเลียมสามารถใช้แทนน้ำมันปิโตรเลียมได้อย่างดี เนื่องจากทำให้ผิวชิ้นงานที่มีน้ำมันหล่อลื่นเปียก เป็นชั้นน้ำมันขณะที่ชิ้นงานมีการเคลื่อน ไถลถูกัน น้ำมันปิโตรเลียมเป็นน้ำมันที่มีพิสัยความหนืดสูง สามารถเลือกใช้ได้ง่ายให้เหมาะกับงาน และน้ำมันปิโตรเลียมมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นมากกว่าของไหลอื่นเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น ส่วนผสมชนิดของน้ำมันปิโตรเลียม เช่น ส่วนผสมของพาราฟิน เอโรมาติก และแน้ทรีน จะมีผลต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์อย่างมาก ตามตารางที่ 2-2

คุณสมบัติ	พาราฟิน	เอโรมาติก	เน็ทรีน
ความหนาแน่น	ต่ำ	สูง	สูง
จุดไฟวาบ	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน	ต่ำ	สูง	ต่ำ
ดัชนีความหนืด	สูง	ต่ำ	ต่ำ

ตารางที่ 2-2 ผลของส่วนผสมของน้ำมันปิโตรเลียมต่อคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น คือ อัตราส่วนของความเค้นเฉือนต่อความเครียดเฉือนของชั้นของน้ำมันหล่อลื่น โดยสมมติว่าน้ำมันหล่อลื่นเป็นของเหลวนิวตันเนียน (newtonian fluid) ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นตัวกำหนดความสูญเสียพลังงานเนื่องจากความฝืดประสิทธิภาพทางกล ความร้อนที่เกิดขึ้น การไหลของน้ำมัน ภาระที่สามารถรับได้ และความสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักร เช่น กาบรอลื่น หรือ เฟือง เป็นต้น

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ น้ำมันหล่อลื่น จะทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าต่ำลง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในทางปฏิบัติ สำหรับเครื่องยนต์ SAE ได้กำหนดน้ำมันหล่อลื่นตามค่าความหนืดที่อุณหภูมิที่กำหนดให้ ตามตาราง 2-3

ความหนืดเบอร์ SAE	ความหนืด ( $\mu\text{m}^2/\text{s}$ )			
	$-17.8^\circ\text{C}$		$99^\circ\text{C}$	
	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
ความหนืดเบอร์ SAE	ความหนืด ( $\mu\text{m}^2/\text{s}$ )			
	$-17.8^\circ\text{C}$		$99^\circ\text{C}$	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
75W	-	3257	-	-
80W	3257	21716	-	-
90W	-	-	14.24	25.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

140W	-	-	25.0	42.7
250W	-	-	42.7	-

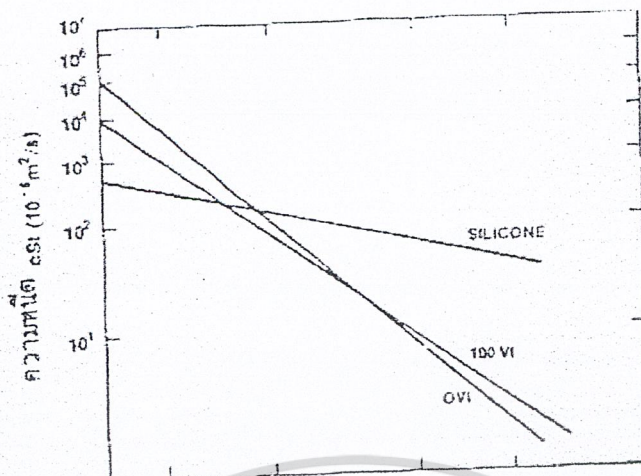
ตารางที่ 2-3 ชนิดของน้ำมันหล่อลื่นแบ่งตามเบอร์ SAE

เกรดน้ำมัน ISO VG	ความหนืดโดยเฉลี่ย $M^2/s$ ที่ $40^{\circ}C$	พิสัยค่าความหนืด $M^2/s$ ที่ $40^{\circ}C$	
		ต่ำสุด	สูงสุด
2	2.2	1.98	2.24
3	3.2	2.88	3.52
5	4.6	4.14	5.06
7	6.8	6.12	7.48
10	10	9.0	11
15	15	13.5	16.5
22	22	19.8	24.2
32	32	28.8	35.2
46	46	41.4	50.6
68	68	61.2	74.8
100	100	90	110
150	150	135	165
220	220	198	242
320	320	288	352
460	460	414	506
680	980	612	748
1000	1000	900	1100
1500	1500	1350	1650

ตารางที่ 2-4 ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นในทางอุตสาหกรรม

เนื่องจากอุณหภูมิทำให้ค่าความหนืดเปลี่ยนของน้ำมันเปลี่ยนไป กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าความหนืดจะลดลง การเปลี่ยนแปลงค่าของความหนืด ได้แสดงด้วยค่าดัชนีความหนืด (Viscosity Index) หรือ VI ค่า VI สูง แสดงว่าค่าความหนืดมีค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมिन้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีค่า VI ต่ำ รูป 2-3 แสดงผลอุณหภูมิต่อค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น เมื่อเปรียบเทียบกับซิลิคอน (Silicone)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-3 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น

เนื่องจากแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนไป ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะมีผลต่อสมรรถนะของ กาบรองลื่นหรือแผ่นรองลื่น เช่น ทำให้ภาระที่สามารถรับได้มีค่าเปลี่ยนไป ทำให้แรงเสียดทานและ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่ง ตรงกันข้ามกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จะทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีค่าความหนืดลดลง ในทางปฏิบัติเมื่อ เพิ่มแรงดันน้ำมันหล่อลื่น 38 เท่า ของแรงดันบรรยากาศ จะมีผลของค่าความหนืดเท่ากับอุณหภูมิของ น้ำมันหล่อลื่นเท่ากับ 1 °c

คุณสมบัติอื่นที่ควรพิจารณา ได้แก่ ความหนาแน่น ความดันไอ ความสามารถในการผสมเข้า กันได้ ความสามารถในการดูดซับแก๊ส ความร้อนจำเพาะ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน จุดเยือกแข็ง เป็นต้น

การใช้น้ำมันปิโตรเลียมเป็นน้ำมันหล่อลื่นนั้นมีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือ น้ำมันปิโตรเลียมมีส่วนผสมที่แตกต่างกัน ซึ่งจะให้คุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้นสามารถผสมหรือทำน้ำมันหล่อลื่นปิโตรเลียม ให้มีคุณสมบัติตามความต้องการได้ไม่ยาก อย่างไรก็ตามน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของสารเติมแต่ง (additive) เพื่อให้ได้น้ำมันที่มีคุณภาพเหมาะสมกับงานที่สุด รวมทั้งต้นทุนที่เหมาะสมด้วย เช่น น้ำมันหล่อลื่นของเครื่องทำความเย็น จะต้องมอบคุณสมบัติไม่เป็นไขเมื่ออุณหภูมิต่ำ น้ำมันหล่อลื่นกังหัน จะต้องสามารถต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน เพื่อจะได้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เป็นต้น

ชนิด	ชนิดน้ำมันปิโตรเลียม	คุณสมบัติของสารเติมแต่ง
น้ำมันเครื่องยนต์	พาราฟิน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน สามารถละลายสิ่งสกปรก เพิ่มค่าดัชนีความหนืด ต้านทานการสึกหรอ

		ต้านทานการเกิดฟอง ต้านทานต่อการเกิดสนิม
น้ำมันหล่อลื่นกึ่งหนัก น้ำมันไฮโดรลิก	พาราฟิน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานต่อการเกิดสนิม ต้านทานการสึกหรอ ต้านทานการเกิดฟอง
น้ำมันหล่อลื่นเครื่อง ทำความสะอาด	แฉะพรีน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานต่อการกัดกร่อน
น้ำมันหล่อลื่นเครื่อง จักร กลสิ่งทอ	พาราฟินและ แฉะพรีน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานต่อการเกิดสนิม
น้ำมันเกียร์	พาราฟิน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานการเกิดฟอง ต้านทานต่อการเกิดสนิม เพิ่มความสามารถในการรับแรงดัน

ตารางที่ 2-5 แสดงตัวอย่างการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารเติมแต่ง

สารเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน	Phenolic amines, hindered phenol
สารเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันและ การกัดกร่อน	Zinc dithiophosphate, Sulfurized olefins
สารเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอ	Tricresyl Phosphate, lead naphthenate
สารเพิ่มความสามารถในการละลายสิ่งสกปรก	calcium and barium sulfonate, Phosphates ,phenates, salicylates, Polyimides, Polyesters
สารเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดสนิม	calcium and barium sulfonate, acid Phosphates esters, petroleum sodium sulfonates, lanolin , terpenes, dithio, phosphate, dithio carbonates
สารเพิ่มคุณสมบัติดัชนีความหนืด	Polybutylenes , polyacrylate
สารเพิ่มความแข็งแรงในน้ำมันฟิล์ม	Chlorine-,Phosphorus , sulf-containing oil and waxes, lead soaps
สารป้องกันการเกิดฟอง	Silicoes organic copolymers

ตารางที่ 2-6 สารเติมแต่งที่นิยมใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.2 สารหล่อลื่นสถานะกึ่งของแข็ง

### 2.4.2.1 จาระบี

จาระบีเป็นสารหล่อลื่นที่เป็นส่วนผสมของน้ำมันแร่ กับสารเติมให้ข้น เช่น โลหะลิ้นเหมือนสบู่ผสม หรือ อาจจะเป็นน้ำมันสังเคราะห์ได้แก่ ซิลิโคน หรือเอสเตอร์ (esters) ผสมกับสารเติมข้น อาจจะเป็นดิน (bentones) ซิลิกา คาร์บอนเบลค และเทปลอน เป็นต้น

จาระบีเป็นของไหล Non-Newtonian คือ ให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือนไม่เชิงเส้น จาระบีได้ถูกนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่น ซึ่งมีทั้งข้อดีและข้อเสีย กล่าวคือ การใช้จาระบีเป็นสารหล่อลื่นมีข้อดี คือ สามารถใช้เป็นหล่อลื่นที่ความเร็วต่ำ ข้อเสียคือสามารถระบายความร้อนได้ต่ำ ไม่สามารถไหลพาเอาเศษโลหะที่เกิดจากการสึกหรอออกจากคานบรอนหรือแผ่นรองลิ้น จาระบีไม่เหมาะที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่นที่ความเร็วสูงๆ อย่างไรก็ตาม จาระบีสามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นหล่อลื่นได้ที่ความเร็วสูงถึง 100,000 รอบต่อนาที เป็นเวลานานถึง 100 ชั่วโมง

ส่วนผสมการผลิตจาระบี

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน + สารเพิ่มคุณภาพทางเคมี + สบู่

สบู่ที่ผสมลงไปจะทำให้จาระบีข้นเหนียว เป็นผลิตภัณฑ์กึ่งแข็งกึ่งเหลว ช่วยอุ้มและเกาะจับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และสารเพิ่มคุณภาพทางเคมีไว้ ณ จุดหล่อลื่น โดยไม่เอี่ยมทะลักออกมาภายนอก

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานผสมกับสารเพิ่มคุณภาพทางเคมี ก็คือน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปชนิดต่างๆ ที่เราใช้งานกันอยู่นั่นเอง ความแตกต่างของจาระบีแต่ละชนิดอยู่ที่คุณสมบัติของสบู่ที่ผสม โดยทั่วไปสบู่ได้มาจากปฏิกิริยาระหว่างด่าง และกรดไขมันหรือไขมันพืช ยกเว้นบางกรณีอาจใช้สารอื่นๆ เป็นส่วนผสมแทนสบู่

คุณสมบัติของสบู่แต่ละชนิดมีผลโดยตรงถึงคุณสมบัติของจาระบี ดังนี้

จาระบีที่มีส่วนผสมของลิเทียม (Lithium-base grease) เป็นจาระบีที่เป็นส่วนผสมของลิเทียม (Lithium soap) ซึ่งเป็นกรด 12-ไฮดรอกซิล (2-hydroxy acid) และ/หรือ ไกลเซอไรด์ (Glyceride) ร่วมกับกรดไขมัน (fatty acid) จาระบีชนิดนี้จะให้ความเสถียรของแรงเสียดสีมาก สามารถจับกับผิวชิ้นงานได้ดี สามารถใช้กับสถานะที่มีอุณหภูมิสูงได้ดี เป็นจาระบีที่นิยมใช้มากที่สุดในยานยนต์ และอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่

จาระบีที่มีส่วนผสมของแคลเซียม (Calcium -base grease) มีลักษณะคล้ายเนย มีอุณหภูมิที่ทำให้จาระบีชนิดนี้เริ่มหยดตัวได้ (dropping point) ที่  $66-104^{\circ}\text{C}$  ใช้เป็นสารหล่อลื่นเครื่องจักรกลที่มีความเร็วต่ำ อุณหภูมิต่ำที่มีการกักความร้อนสูง เนื่องจากจาระบีชนิดนี้มีคุณสมบัติ สามารถต้านทานการกักความร้อนได้ดี

จาระบีที่มีส่วนผสมของโซเดียม (Sodium-base grease) เป็นจาระบีที่มีอุณหภูมิเริ่มหยดตัวได้ (dropping point)  $121-232^{\circ}\text{C}$  โครงสร้างมีความเสถียรสูง มีความสามารถทนต่อการกักความร้อนได้ไม่ดี แต่สามารถใช้กับงานที่มีอุณหภูมิสูงได้เป็นอย่างดี

จาระบีที่มีส่วนผสมของอลูมิเนียม (Aluminium-base grease) มีลักษณะเหมือนวุ้นใส มีอุณหภูมิเริ่มหยดตัวได้ (dropping point)  $66-104^{\circ}\text{C}$  สามารถต้านทานน้ำได้อย่างดี ทนต่อแรงบิดได้ต่ำ มีโครงสร้างเสถียร ใช้เป็นจาระบีสำหรับหล่อลื่นชิ้นส่วนช่วงล่างของรถยนต์ ใช้ในการหล่อลื่นเครื่องจักรตั้งทอ และเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหารสำเร็จรูป

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

จาระบีที่มีส่วนผสมของตะกั่ว (Lead- base grease) เป็นจาระบีที่ให้ความสามารถในการรับแรงอัดหรือแรงดันได้สูง จึงเหมาะสำหรับใช้ในการหล่อลื่นเฟือง จาระบีชนิดนี้มักจะมีส่วนผสมของกำมะถัน (sulfur) คลอไรด์ (Chloride) และฟอสฟอรัส (Phosphorus) เพื่อให้มีคุณสมบัติสามารถต้านทานต่อการออกซิเดชัน

จาระบีที่มีส่วนผสมของเบนโทน (Bentone- base grease) เป็นจาระบีที่มีคุณสมบัติสามารถต้านทานต่อน้ำ สามารถจับตัวกับผิวโลหะได้ดี ไม่มีอุณหภูมิเริ่มหยดตัว จึงเหมาะที่จะใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงมากๆ ได้

#### 2.4.2.2 คุณสมบัติอื่นๆ ของจาระบี

##### 1. ความอ่อนแข็ง (CONSISTENCY)

จาระบีชนิดเดียวกัน อาจมีความอ่อนแข็งต่างกัน สถาบันจาระบีในสหรัฐอเมริกา (NATIONAL LUBRICATING GREASE INSTITUTE หรือชื่อย่อ NLGI) ได้กำหนดความอ่อนแข็งของจาระบีออกเป็นเบอร์ โดยปล่อยเครื่องมือรูปกรวยปลายแหลมให้ปักจมลงไปเนื้อจาระบี (อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$ ) ระยะจม (PENETRATION) เป็นหน่วย  $1/10$  ของมิลลิเมตรของแต่ละเบอร์ แตกต่างกันดังนี้

เบอร์จาระบี NLGI NO.	ระยะจม (1/10มม.) ที่ $25^{\circ}\text{C}$
000	444-475
00	400-430
0	355-385
1	310-340
2	265-295
3	220-250
4	175-205
5	130-160
6	85-115

ตาราง 2-7 เปรียบเทียบเบอร์จาระบี

เบอร์ต่ำเป็นจาระบีเหลวหรืออ่อน (ระยะ จมมาก) ส่วนเบอร์สูงเป็นจาระบีประเภทแข็ง (ระยะจมน้อย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. จุดหยด (DROPPING POINT)

เนื่องจากจาระบีเป็นส่วนผสมของน้ำมันหล่อลื่นและสบู่ ซึ่งแน่นอนว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โอกาสที่น้ำมันจะแยกตัวออกมาย่อมเป็นไปได้มาก จุดหยดของจาระบีคืออุณหภูมิ ซึ่งจาระบีหมดความคงตัว เยิ้มไหลกลายเป็นของเหลว

## 3. สารเพิ่มคุณภาพทางเคมี (ADDITIVES)

สารเพิ่มคุณภาพทางเคมีที่ผสมอยู่ในจาระบีมีผลในการใช้งาน สารเพิ่มคุณภาพทางเคมีที่ผสมได้แก่ สารรับแรงกดแรงกระแทก สารช่วยป้องกันสนิมและการกัดกร่อน ฯลฯ นอกจากนั้นถ้าเป็นจาระบีใช้งานพิเศษบางชนิดอาจจะผสมสารช่วยหล่อลื่นลงไปด้วย เช่น โมลิบดีนัม ไควด์ไฟต์ กราไฟต์ ฯลฯ

### 2.4.2.3 การเลือกใช้จาระบี

จาระบีที่จำหน่ายอยู่ท้องตลาดมีอยู่หลายประเภท ผู้ใช้ต้องพิจารณาเลือกใช้ให้ถูกต้อง และเหมาะสม ข้อควรคำนึงในการเลือกใช้ มีดังนี้

1. สัมผัสกับน้ำและความชื้นหรือไม่ ถ้าสัมผัสหรือเกี่ยวข้องต้องเลือกใช้จาระบีประเภทน้ำ ถ้าเลือกใช้ไม่ถูก จาระบีจะถูกน้ำชะหลุดออกจากจุดหล่อลื่น
2. อุณหภูมิใช้งานสูงมากน้อยแค่ไหน จุดใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 °C ควรเลือกใช้จาระบีประเภททนความร้อน ถ้าเลือกใช้ไม่ถูกต้อง จาระบีจะเยิ้มเหลว ทะลักออกจากจุดหล่อลื่น
3. ในกรณีที่สัมผัสทั้งน้ำและความร้อน ควรเลือกใช้จาระบีประเภทอเนกประสงค์ (MULTIPURPOSE) คุณภาพดี หรือจาระบีคอมเพล็กซ์ (COMPLEX) ซึ่งแน่นอนว่าราคาแพงกว่าจาระบีประเภทน้ำ หรือทนความร้อนเพียงอย่างเดียว
4. มีแรงกดแรงกระแทกกระหว่างการใช้งาน ถ้ามากคงพิจารณาเลือกใช้จาระบีประเภทผสมสารรับแรงกดแรงกระแทก (EP ADDITIVES)
5. สภาพแวดล้อมทั่วไป เช่น ฝุ่นละอองและสิ่งสกปรก จะเป็นปัจจัยสำคัญทำให้การอัดจาระบีบ่อยครั้งขึ้น
6. วิธีการใช้งาน ซึ่งมีอยู่หลายวิธี ถ้าเป็นระบบแบบจุดจ่ายกลาง (CENTRALIZED SYSTEM) ก็ควรจาระบีอ่อน คือเบอร์ 0 หรือเบอร์ 1 ถ้าอัดด้วยปืนอัดจาระบีมักจะใช้เบอร์ 2 หรือเบอร์ 3 ถ้าอัดด้วยคัตบออาจใช้เบอร์ 3 หรือแข็งกว่านี้ และถ้าอัดหรือทาด้วยมือ ความอ่อนแข็งไม่สำคัญมากนัก นอกจากนั้นถ้าเป็นพวกกระปุกเฟืองเกียร์ที่ใช้จาระบี ก็ควรใช้จาระบีประเภทอ่อน คือเบอร์ 0 หรือเบอร์ 1

### 2.4.2.4 คำแนะนำการใช้งาน

1. อัดจาระบีตามอัตราที่คู่มือระบุไว้หากละพิจารณาสภาพใช้งานประกอบด้วย เช่น ความร้อนสูง ลูกชะล้างค้ำวน้ำ ฝุ่นละอองมาก ควรอัดจาระบีบ่อยครั้งขึ้น
2. ตรวจสอบสภาพซีลเพลา อย่าให้ชำรุดเพราะจาระบีจะไหลทะลักออกมาได้เป็นการสิ้นเปลือง
3. ตรวจสอบเครื่องมืออัดจาระบี โดยเฉพาะหัวอัดอย่าปล่อยให้อุดตัน จาระบีจะไม่เข้าไปที่จุดใช้งาน เกิดความเสียหายขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. อย่าเลือกใช้จาระบีเพราะราคาถูก หรือสีมันสวยงามมาใช้ แต่ขอให้พิจารณาจากคุณภาพและสภาพการใช้งานเป็นหลัก การใช้จาระบีที่เหมาะสมจะช่วยประหยัด ลดการสิ้นเปลืองและไม่เกิดความเสียหาย

5. การใช้จาระบีคุณภาพสูงเกินความจำเป็นไม่เป็นการประหยัด เนื่องจากราคาแพงเกินไป เช่น จาระบีทนความร้อนสูงมากไม่ควรนำไปใช้ที่อุณหภูมิใช้งานต่ำ เป็นต้น

6. จาระบีอเนกประสงค์ ทนน้ำและทนความร้อน แต่ไม่ได้หมายความว่า เป็นจาระบีที่ใช้งานได้ทุกสภาพ ถ้าอุณหภูมิใช้งานสูงมาก มีแรงกดแรงกระแทก ฯลฯ ควรพิจารณาเลือกใช้จาระบีพิเศษ

7. พยายามใช้จาระบีอย่างประหยัดและคุ้มค่า เช่น ถ้าวิธีการบรรจุเป็นแบบอัดเพิ่มอย่างสม่ำเสมอ ไม่จำเป็นต้องอัดไล่จาระบีเก่าออกจนหมด อัดเพียงจาระบีเก่าเริ่มทะลักออกมาบ้างก็พอแล้ว เพราะจาระบีเก่าส่วนที่เหลือยังสามารถใช้งานได้อีก

8. การใช้จาระบีคนละชนิด, เบอร์, ยี่ห้อปนกัน

ก. ไม่ควรใช้จาระบีคนละชนิดปนกัน เพราะสารเคมีที่ผสมในจาระบีคนละชนิด อาจไม่ถูก กัน อาจเกิดการเสียหายได้

ข. ใช้คนเบอร์แต่ชนิดเดียวกันได้

ค. การใช้จาระบีคนละยี่ห้อปนกัน ถ้าเป็นประเภทสบู่อายุเดียวกัน ทำได้

หมายเหตุ ถ้าเป็นการอัดจาระบีด้วยปืน ซึ่งเมื่ออัดไล่จาระบีเก่าออก และจาระบีใหม่ปลิ้นออกมาแล้ว การใช้จาระบีปนกันก็อนุโลมให้ได้

#### 2.4.2.5 วิธีการผลิตจาระบี

เริ่มต้นเราต้องนำเอาไฮดรอกไซด์ของโลหะ (ด่าง) มาผสมกับไขสัตว์ หรือน้ำมันพืชให้เข้าสบู่อายุแล้ว จึงผสมกับน้ำมันพื้นฐานกับสบู่อายุขึ้นไปก็เติมสารเพิ่มคุณภาพต่างๆ ตามต้องการ ปกติแล้วกระบวนการทั้งหมด จะทำในภาชนะอันเดียว เรียกว่า เป็นถังเหล็ก มีลักษณะกลมสูง ตอนล่างเป็นรูปกรวย ภายในมีเครื่องกวน ซึ่งหมุนอยู่ในแนวตั้ง เครื่องกวนจะกวนน้ำมัน และสบู่อายุเข้าด้วยกัน ภายใต้อุณหภูมิที่กำหนด ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์จาระบี

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

#### 2.4.3 สารหล่อลื่นสถานะของแข็ง

สารหล่อลื่นสถานะของแข็งมักจะถูกใช้กับงานอุตสาหกรรม ที่สารหล่อลื่นสถานะของเหลวไม่สามารถใช้ได้ดี เช่น งานอุตสาหกรรมที่มีอุณหภูมิสูงมากเกินไป หรือในงานที่เกิดความเค้นสูงที่ผิวชิ้นงาน ซึ่งสารหล่อลื่นสถานะของแข็งสามารถรับความเค้นได้มากกว่าสารหล่อลื่นสถานะของเหลว สารหล่อลื่นของแข็งยังมีข้อดีในการใช้งานเหนือสารหล่อลื่นสถานะของเหลว คือไม่จำเป็นต้องมีภาชนะบรรจุสารหล่อลื่น และไม่จำเป็นต้องมีซีล (Seal) ที่ใช้ในการป้องกันการรั่วไหลของน้ำมันหล่อลื่น และยังสามารถป้องกันสิ่งสกปรก หรือสิ่งแปลกปลอมเข้าไปในระบบหล่อลื่น

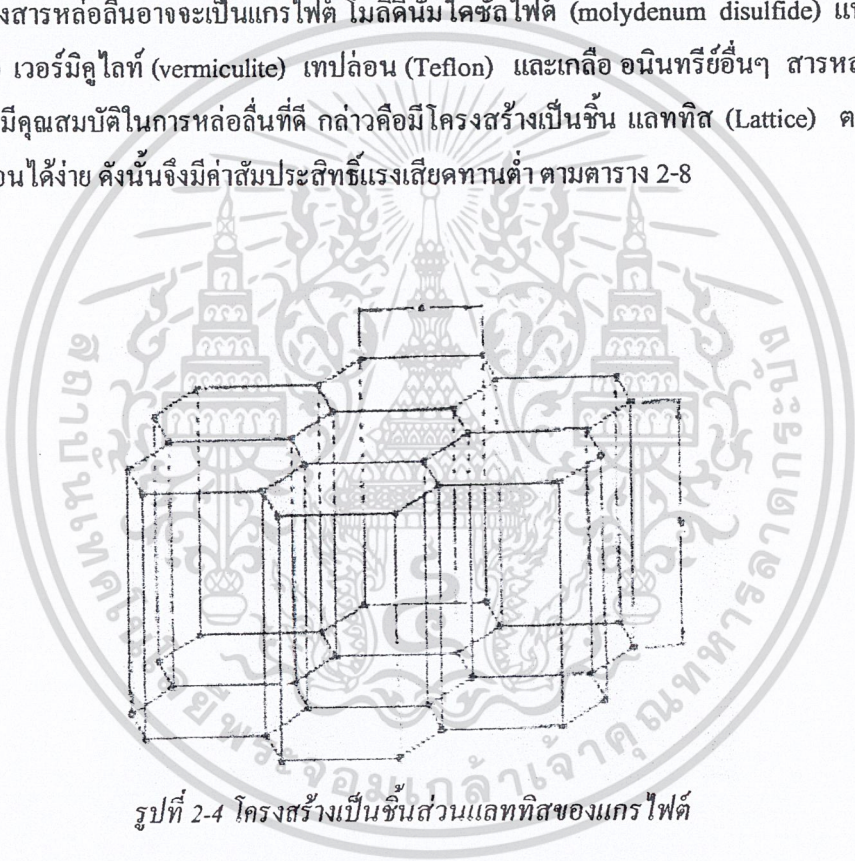
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารหล่อลื่นสถานะของแข็งจำพวกผง ยังใช้ผสมลงในน้ำมันหล่อลื่นจาระบี และแก๊สเพื่อช่วยในการหล่อลื่น สารหล่อลื่นสถานะของแข็งยังนิยมทำเป็นฟิล์มหรือชั้นของสารหล่อลื่นของแข็ง สมรรถนะของการหล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นของแข็ง จะขึ้นกับคุณสมบัติของผิวชิ้นงานและชนิดของสารหล่อลื่นของแข็ง จะเห็นว่าสารหล่อลื่นสถานะของแข็งไม่สามารถใช้ในงานทั่วๆ ไป แต่จะใช้เป็นสารหล่อลื่นกับงานประเภทที่มีสภาวะอุณหภูมิสูงมากๆ สภาวะอุณหภูมิต่ำมากๆ สภาวะสูญญากาศภายในสภาวะภาระสูงมากๆ ในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีรุนแรง และในอุปกรณ์นิวเคลียร์

2.4.3.1 สารหล่อลื่นของแข็งเป็นผง (Particulate)

สารหล่อลื่นมีลักษณะเป็นผงทำมาจากวัสดุอนินทรีย์ อาจจะใช้สารหล่อลื่นคั่นระหว่างงานที่ต้องการหล่อลื่น หรืออาจจะใช้ผงสารหล่อลื่นผสมลงในสารหล่อลื่นสถานะของเหลว เช่น น้ำมันหล่อลื่นหรือจาระบี ผงสารหล่อลื่นอาจจะเป็นแกรไฟต์ โมลิตินัมไดซัลไฟด์ (molydenum disulfide) แทลค์ (talc) ไมก้า (mica) เวอร์มิคูไลต์ (vermiculite) เทฟลอน (Teflon) และเกลือ อนินทรีย์อื่นๆ สารหล่อลื่นที่ได้กล่าวมานี้ จะมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นที่ดี กล่าวคือมีโครงสร้างเป็นชั้น แลททิซ (Lattice) ตามรูป 2-4 ยอมให้ถูกเลื่อนได้ง่าย ดังนั้นจึงมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ตามตาราง 2-8



รูปที่ 2-4 โครงสร้างเป็นชั้นส่วนแลททิซของแกรไฟต์

สารหล่อลื่นของแข็งที่นิยมใช้กันมาก คือ แกรไฟต์ และโมลิตินัมไดซัลไฟด์ มักจะทำเป็นผงใช้ผสมลงในสารหล่อลื่นอื่น เช่น น้ำ หรือน้ำมันหล่อลื่น เป็นต้น บางครั้งอาจเติมผงเทฟลอน หรือผงตะกั่วเนื่องจากเทฟลอน และผงตะกั่วจะช่วยป้องกันหรือชะลอการจับตัวของผิวชิ้นงาน เมื่อฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นถูกทำลาย เนื่องจากรับภาระสูงเกิดความเค้นสูงมากเกินไป ทำให้ผิวชิ้นงานร้อนจัด จะเกิดการจับติดกันของผิวชิ้นงาน

ปริมาณของสารหล่อลื่นของแข็งที่ใช้เติมลงใน จาระบีหรือน้ำมันหล่อลื่นจะมีค่าประมาณตั้งแต่ 0.5% ถึง 60% ตามปกติสำหรับงานทั่วไปจะใช้แกรไฟต์ และ โมลิตินัม ไดซัลไฟด์ เป็นผงสารหล่อลื่น ใช้เติมลงในจาระบีหรือน้ำมันหล่อลื่นประมาณ 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุ	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน		
	26.7 <sup>o</sup> c	260 <sup>o</sup> c	93.8 <sup>o</sup> 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	-	-
แร่ทัลลัค	0.13-0.89	-	-

ตารางที่ 2-8 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารหล่อลื่นสถานะของแข็ง

#### 2.4.3.2 แกรไฟต์

แกรไฟต์สามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีคุณสมบัติที่สำคัญ ดังนี้คือ เป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือไม่เกิดออกซิเดชัน มีโครงสร้างเป็นแผ่นหรือชั้นตามรูป 2-4 จะให้ค่าความเค้นเฉือนต่ำ หรือให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำเนื่องจากอะตอมที่จับตัวกันอย่างไม่ถูกตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อนทำให้เกิดแรงพันธะหรือแรงดึงดูดระหว่างอะตอมต่ำเกินไป จึงทำให้เกิดแกรไฟต์มีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงแตกหักง่าย มีทฤษฎีหนึ่งอธิบายว่า แก๊สหรือไอน้ำที่ถูกแกรไฟต์ดูดสะสมจะทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของชั้นแกรไฟต์สูงขึ้น เป็นผลให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ ทำให้มีคุณสมบัติที่ดีในการหล่อลื่น สารหล่อลื่นสถานะของแข็ง ได้แก่ แกรไฟต์ โมลิตินัมไดซัลไฟด์ โบรอนไนไตรด์ (Boronitride) และ แทลลัค (talc) จะมีโครงสร้างในผลึกจับตัวกัน ทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ

ถึงแม้ว่าแกรไฟต์ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำสภาวะอุณหภูมิค่าเหมือนโลหะ แต่แกรไฟต์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ที่สภาวะอุณหภูมิสูง แกรไฟต์บริสุทธิ์จะเสียน้ำหนักของมัน 1% ทั้งหมดในเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 520<sup>o</sup>-560<sup>o</sup> c ในอากาศ หรือแกรไฟต์มีอัตราการเกิดออกซิเดชัน เท่ากับ 30 กรัม ต่อตารางเมตรในหนึ่งชั่วโมง สารที่ผสมในแกรไฟต์จะมีผลต่อการเกิดออกซิเดชันของแกรไฟต์ เช่น เมื่อแกรไฟต์มีส่วนผสมของแบเรียม (Barium) เพียง1% จะทำให้แกรไฟต์มี

อัตราการเกิดออกซิเดชันเป็น 2000 กรัม ต่อตารางเมตรในหนึ่งชั่วโมง และถ้าแกรไฟต์มีส่วนผสมของสังกะสีบอเรท (Zinc borate) เพียง 2% ก็สามารถลดอัตราการเกิดออกซิเดชันลงเหลือเพียง 7.4 กรัม ต่อตารางเมตรในหนึ่งชั่วโมง โมลิตินัมไดซัลไฟด์ฟลูออไรด์ (Graphite fluoride) จะเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $500^{\circ}\text{C}$

แกรไฟต์โมลิตินัมไดซัลไฟด์จะมีปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกับเหล็กอลูมิเนียม ทำให้เกิดการกัดกร่อน ความชื้นจะไม่ทำให้การกัดกร่อนเปลี่ยนไปได้ สำหรับอลูมิเนียมสามารถป้องกันการกัดกร่อนด้วยการทำให้ผิวอลูมิเนียมมีสภาพเป็นขี้ผึ้ง

โมลิตินัมไดซัลไฟด์  $\text{MoS}_2$  มีโครงสร้างเป็นผลึกเหมือนโครงสร้างของแกรไฟต์ มีคุณสมบัติสามารถเป็นสารหล่อลื่นได้ดี มีอุณหภูมิระเหิดที่  $450^{\circ}\text{C}$  และทำปฏิกิริยากับอากาศที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}\text{C}$  แสดงว่าโมลิตินัมไดซัลไฟด์  $\text{MoS}_2$  ไม่เหมาะที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นโมลิตินัมไดซัลไฟด์ สามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นได้ดีในแก๊สในโครเจนแห้ง และไม่เหมาะสมในการใช้เป็นสารหล่อลื่นในแก๊สออกซิเจน ไม่ควรใช้โมลิตินัมไดซัลไฟด์เป็นสารหล่อลื่นในบริเวณที่มีอากาศชื้น ยังพบว่าโมลิตินัมไดซัลไฟด์ทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าในการหล่อลื่นแบบเบาดารี ทำให้เกิด  $\text{FeS}$

เมื่อใช้โมลิตินัมไดซัลไฟด์ผสมในน้ำมันจะต้องผสมอย่างน้อย 10% จึงจะทำให้มีผลของ  $\text{MoS}_2$  ในน้ำมันหล่อลื่น

#### 2.4.3.3 วัสดุประกอบ (composites)

เนื่องจากการหล่อลื่นสถานะของแข็งจะต้องจับตัวกับโลหะ ในระบบการหล่อลื่นวิธีการให้สารหล่อลื่นเกาะจับตัวกับโลหะ สามารถทำได้หลายวิธีที่นิยมมากที่สุดคือ บอนฟิล์ม (Bonded films)

บอนฟิล์มจะประกอบด้วยชั้นของสารหล่อลื่นของแข็งจับยึดติดกับผิวโลหะที่ต้องการ การหล่อลื่นด้วยน้ำยาประสาน ได้แก่ เรซิน ซิลลิเกต (Silicate) หรือ เซรามิก (Ceramic) แล้วอบให้ความร้อนหรือทิ้งให้แห้งในบรรยากาศ สารหล่อลื่นที่นิยมใช้มากที่สุดคือ  $\text{MoS}_2$  แกรไฟต์ เทปลอน และ  $\text{WS}_2$  บางครั้งใช้ส่วนผสมของสารหล่อลื่นผสมกันตามอัตราส่วน เพื่อให้เหมาะกับการใช้งานเฉพาะ

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

ตัวประสานสำหรับให้สารหล่อลื่นแห้งจับตัวที่อุณหภูมิบรรยากาศ คือ เทอร์โมพลาสติก เรซิน (Thermoplastic resin) เช่น พวกลเซลลูโลซิก (Cellulose) และอะคริลิก (Acrylics) จะได้ฟิล์มของสารหล่อลื่นที่ค่อนข้างแข็งจับประสานกับผิวโลหะ

สารหล่อลื่นของแข็งที่ได้จาก เรซินบอน (Resin bonded) ที่ต้องใช้ความร้อนในการอบให้แห้ง และแข็งเป็นที่นิยมมากที่สุด ตามปกติประกอบด้วยส่วนผสมของ  $\text{MoS}_2$  90% และแกรไฟต์ 10% ในเรซินเทอร์โมเซตติง (Thermosetting resin) ได้แก่ อัลไคด์ (Alkyds) ฟีนอลิก (Phenolics) อีพ็อกซี (Epoxy) และซิลิคอน (Silicone) บางครั้งจะมีส่วนผสมของเงินและตะกั่ว การอบจะต้องใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$ – $200^{\circ}\text{C}$  การอบแข็งด้วยความร้อนจะให้ผลดีกว่าอบแห้งที่อุณหภูมิบรรยากาศ จะใช้ในงานที่มีภาระสูงและทำให้อายุการใช้งานยาวนานขึ้น

#### 2.4.3.4 โลหะอ่อนนุ่ม

ได้มีการใช้โลหะอ่อนนุ่มทำเป็นฟิล์มโลหะ เช่น ดีบุก อินเดียม (Indium) ตะกั่ว และเงิน เป็นต้น ทำเป็นฟิล์มในกาบรองลื่น แต่ในปัจจุบันและในอนาคตเชื่อว่า ดีบุก ทองแดง และตะกั่วจะถูกนำไปเคลือบหรือชุบบนผิวโลหะ เพื่อใช้เป็นสารหล่อลื่น ตามปกติจะชุบเคลือบฟิล์มโลหะอ่อนเพียงบางๆ เท่านั้น บนผิวโลหะแข็ง การใช้งานของกาบรองลื่นแบบนี้จะใช้กับงานที่มีอุณหภูมิสูงมากๆ หรือในสภาวะสิ่งแวดล้อมที่รุนแรง เช่น ใช้ในการรีดเหล็กที่อุณหภูมิสูงมากๆ ฟิล์มของทองคำ เงิน และโลหะมีค่าอื่น ได้ถูกใช้เป็นสารหล่อลื่นในยานอวกาศ เครื่องบินไอพ่น เครื่องจักรที่ทำงานที่ความเร็วรอบสูงและภาระสูง ได้มีการรายงานว่าชุบทองคำบนผิวเหล็กกล้าและสแตนเลส ทำให้การสึกหรอลดลง แต่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงขึ้น การชุบโลหะเงิน ทองแดง ทองคำ จะมีผลน้อยกว่าในการลดการสึกหรอของผิวโลหะ และการชุบโลหะนิกเกิล (Nickel) จะไม่มีผลต่อการสึกกร่อนของผิวโลหะเลย

กาบรองลื่นที่เคลือบด้วยโลหะอินเดียม (Indium-coated bearings) จะใช้ในเครื่องบิน เครื่องยนต์ดีเซล เครื่องยนต์แก๊สโซลีน เพราะว่ากาบรองลื่นที่เคลือบด้วยโลหะอินเดียมกับตะกั่วบนพื้นผิวเพลทเหล็กกล้าโลหะอินเดียมจะเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแกร่งแก่กาบรองลื่น และยังช่วยให้สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และช่วยให้มีคุณสมบัติต่างๆ ที่อุณหภูมิสูงดีขึ้น กาบรองลื่นที่ใช้กับงานหนักๆ บางครั้งจะเคลือบด้วยเงิน

โลหะอ่อนนุ่มจะมีค่าความเค้นเฉือนต่ำ เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ และกาบรองลื่นสามารถรับภาระได้สูง จำเป็นต้องเคลือบด้วยโลหะนุ่มเป็นฟิล์มบางๆ ความหนาของฟิล์มโลหะนุ่มจะอยู่ระหว่าง  $10^{-4}$  -  $10^{-5}$  เซนติเมตร

รูปที่ 2-8 แสดงการเปรียบเทียบการหล่อลื่นที่มีฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น การหล่อลื่นที่มีฟิล์มโลหะกับในกรณีที่ไม่มีสารหล่อลื่น พบว่าในกรณีที่ไม่มีสารหล่อลื่นจะคล้ายกับในกรณีที่มีน้ำมันหล่อลื่น กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าคงที่เหมือนกัน 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 2-9 ความแข็งแรงเฉือนของโลหะ

- จุดวาบไฟมีประโยชน์ในการแบ่งประเภทน้ำมันในการเก็บรักษา เช่น น้ำมันเบนซิน (จุดวาบไฟ  $-40^{\circ}\text{C}$ ) ต้องเก็บในถังใต้ดินในขณะที่น้ำมันดีเซล (จุดวาบไฟ  $60^{\circ}\text{C}$ ) เก็บในถังบนดินได้
- จุดวาบไฟสามารถบ่งบอกถึงความเจือปนของน้ำมันชนิดต่างๆ เช่น น้ำมันก๊าดปลอมปนในเบนซิน จุดวาบไฟจะเปลี่ยนไป หรือการที่จุดวาบไฟในน้ำมันเครื่องต่ำลงเนื่องจากรวมน้ำมันเชื้อเพลิงแทรกซึมเข้าไป

#### 2.4.4 จุดไหลเท (pour point)

หมายถึง อุณหภูมิต่ำสุดที่มีน้ำมันหล่อลื่นจะเริ่มไหลภายใต้สภาวะที่กำหนด ซึ่งน้ำมันทั่วไปจะมีไขส่วนหนึ่งละลายอยู่ด้วย เมื่อน้ำมันเย็นไขก็จะตกผลึกและเกาะกันเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง โดยกักเอาน้ำมันไว้และเมื่อผลึกของไขเกิดขึ้นมากพอ น้ำมันก็จะไม่สามารถไหลได้ต่อไป

ความสำคัญของจุดไหลเทจะขึ้นอยู่กับสภาวะของการใช้งาน ตัวอย่างเช่นในประเทศหนาว จะต้องเลือกใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำ เพื่อให้ น้ำมันสามารถไหลได้ ถึงแม้อุณหภูมิของอากาศโดยรอบจะต่ำ ในทางตรงกันข้ามน้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำก็ไม่มีควมจำเป็นสำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูงตลอดเวลา

- ไข (Wax) ที่มีอยู่ในเนื่อน้ำมันจะแข็งตัว (Crystallize) เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าจุดไหลเทของน้ำมันนั้น ทำให้น้ำมันไหลได้ยาก
- ในการใช้น้ำมันในที่อุณหภูมิต่ำมาก เช่น ห้องเย็น หรือ โรงน้ำแข็ง หรือในฤดูหนาว ต้องใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำกว่าอุณหภูมิใช้งาน



รูปที่ 2-5 การวัดจุดไหลเท

##### 2.4.4.1 ตัวเลขความเป็นกลาง (neutrallization number)

น้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะมีสภาพความเป็นกรดอยู่เล็กน้อย ซึ่งสภาพความเป็นกรดนี้จะวัดเป็นปริมาณของเบสมาตรฐานที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำมันมีสภาพเป็นกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่น โดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจน (oxidation) ซึ่งทำให้เกิดกรดอินทรีย์ขึ้น

สภาพความเป็นกรดนี้อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะได้ ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่นโดยเฉพาะน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซล จึงนิยมเติมสารเพิ่มคุณภาพที่มีสารที่เป็นด่างเข้าไป เพื่อให้สารที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งมีสภาพเป็นกรดให้มีสภาพเป็นกลาง และเมื่อนำน้ำมันหล่อลื่นไปใช้งานอัตราการสิ้นเปลืองสารที่เป็นด่างที่ตรวจสอบได้ก็จะเป็นตัวชี้ถึงอายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่น การวัดความเป็นด่างนี้จะวัดในรูปของจำนวนเบสทั้งหมด (total base number)

#### 2.4.5 การเพิ่มคุณภาพ

สารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน โดยทั่วไปเป็นสารประกอบทางเคมีซึ่งที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายตัว สารเพิ่มคุณภาพแต่ละตัวจะมีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเฉพาะอย่าง โดยพอที่จะแบ่งตามผลที่มีต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ออกได้เป็น สาม พวก คือ

1. เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ให้คุณสมบัติใหม่ที่เป็นประโยชน์ต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน
2. เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ปรับปรุงคุณสมบัติที่มีอยู่แล้วให้ดีขึ้น
3. เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ทำหน้าที่ในการลดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการ ซึ่งเกิดในช่วงการทำงานลง

การที่จะเติมสารเพิ่มคุณภาพตัวใดและจำนวนเท่าใดลงไป ในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานนั้น จะขึ้นอยู่กับลักษณะของการนำไปใช้งาน โดยจะต้องคำนึงถึงผลข้างเคียงที่เกิดขึ้นด้วย เนื่องจากสารเพิ่มคุณภาพบางตัวแม้ว่าจะทำให้ คุณสมบัติประการใดประการหนึ่งดีขึ้น แต่ก็อาจทำให้คุณสมบัติประการอื่นเสื่อมลงไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าใส่เข้าไปมากเกินไป หรือถ้าสารเพิ่มคุณภาพนั้นไปทำปฏิกิริยากับสารเพิ่มคุณภาพแต่ละตัวจึงต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ น้ำมันหล่อลื่นทำงานได้อย่างดีที่สุด และจะต้องมีการทดสอบให้แน่ใจว่าจะไม่มีผลข้างเคียงที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น ซึ่งในกรณีทั่วไป จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเติมสารเพิ่มคุณภาพเข้าไปอีก

##### 2.4.5.1 สารลดจุดไหลเท (Pour Point Depressants)

เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการยับยั้งการเกิดผลึกไขที่ป้องกันไม่ให้น้ำมันไหลที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นสารนี้จึงช่วยให้จุดไหลเทของน้ำมันหล่อลื่นต่ำลง ทำให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้ สารที่ใช้ลดจุดไหลเทจะเป็นพวกโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลซึ่งที่ใช้กันอยู่มี 2 ชนิด คือ

1. อัลคิลอะโรมาติกโพลีเมอร์ (Alkylaromatic Polymers) ทำหน้าที่ในการลดการเกิดผลึกของไขเมื่อเกิดขึ้น เพื่อป้องกันไม่ให้ผลึกเติบโตและยึดติดกัน
2. โพลีเมทาคริเลต (Polymethacrylates) ทำหน้าที่แตกผลึกร่วมกันไขเพื่อป้องกันไม่ให้ผลึกเติบโต สำหรับอุณหภูมิของจุดไหลเทของน้ำมันหล่อลื่นเมื่อเติมสารนี้เข้าไปแล้ว โดยทั่วไปจะลดลงประมาณ 11 ถึง 17 องศาเซลเซียส

#### 2.4.5.2 สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (Viscosity index Improvers)

เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยไม่ให้ความหนืดของ น้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงไปมาก เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสารเพิ่มค่าดัชนี ค่าหนืดจะเป็นพวกโพลิเมอร์ที่มีน้ำหนัก โมเลกุลสูง และมีโครงสร้างเป็นลูกโซ่ยาว (Long Chain) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการเพิ่มความหนืดสัมพัทธ์ของน้ำมันหล่อลื่นที่อุณหภูมิสูงกว่า การเพิ่มความหนืดสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่ำซึ่งเป็นผลมาจากการที่โพลิเมอร์ดังกล่าวมี การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลจะยืดออกและมีปฏิริยากันระหว่าง โมเลกุล ให้ความหนืดเพิ่มขึ้น สำหรับสารที่นิยมใช้เป็นสารเพิ่มค่าดัชนีความหนืดมีหลายตัว เช่น เมทาคริเลต โพลิเมอร์ (methacrylate polymers), โอลิฟินโพลิเมอร์ (olefin Polymers) และคริเลตโพลิเมอร์ (acrylate polymers) เป็นต้น

#### 2.4.5.3 สารป้องกันการเกิดฟอง (defoamants)

ใช้ป้องกันการเกิดฟองอากาศที่ผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่นเมื่อน้ำมันถูกหมุนเวียนใช้ในระบบ สารนี้จะทำหน้าที่โดยโมเลกุลของสารจะเข้าไปติดกับฟองอากาศทำให้ฟองอากาศเล็กๆ รวมตัวกันเป็นฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้น ลอยขึ้นผิวและแตกออกในที่สุด สำหรับสารที่นิยมใช้เป็นสารป้องกัน การเกิดฟอง คือ ซิลิโคนโพลิเมอร์ (silicone polymer) และพวกโพลิเมอร์อินทรีย์ (organic polymer)

#### 2.4.5.4 สารป้องกันการออกซิเดชัน (corrosion inhibitors)

เมื่อน้ำมันหล่อลื่นร้อนและสัมผัสอากาศก็จะเกิด ปฏิริการะหว่างน้ำมันหล่อลื่นและออกซิเจนที่เรียกว่าออกซิเดชันขึ้น ผลของการเกิดออกซิเดชันจะทำให้ ความหนืดและความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดวาร์นิช และตะกอนสารป้องกัน ออกซิเดชันก็คือ สังกะสีไดไทโอฟอสเฟต (zinedithiophosphate)

#### 2.4.5.5 สารป้องกันการกัดกร่อน (corosion inhibitors)

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในระบบหล่อลื่น โดยน้ำมันหล่อลื่น นั้นมีหลายชนิด แต่ที่สำคัญที่สุดมีสองชนิดก็คือ การกัดกร่อนซึ่งเกิดจากรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในตัวของน้ำมันเอง และการกัดกร่อนอันเนื่องมาจาก สารปนเปื้อนที่ถูกนำและพาไปโดยน้ำมัน สำหรับสารป้องกันการกัดกร่อนที่ใช้กันทั่วไป เป็นสารตัวเดียวกับสารป้องกันการออกซิเดชัน ซึ่งก็คือสังกะสีไดไทโอฟอสเฟต แต่สารที่มีซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสก็ถูกนำมาใช้ด้วย

#### 2.4.5.6 สารป้องกันสนิม (rust inhibitor)

ใช้เพื่อป้องกันสนิมที่อาจเกิดขึ้นผิวของชิ้นส่วนโลหะที่มีการหล่อลื่น ด้วยน้ำมันสารที่ใช้โดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบที่มีการยึดติดกับผิวของโลหะได้ดี โดยสารป้องกันสนิมจะทำปฏิริการกับผิวโลหะ เกิดเป็นฟิล์มเกาะติดกับผิวเพื่อป้องกันไม่ให้ น้ำเข้าถึงผิว โลหะ สารที่ใช้ทั่วไปได้แก่ อะมีนซัคซิเนต (amine succinates) และอัลคาไลเอิร์ทซัลโฟเนต (alkaline earth sulfonates)

#### 2.4.5.7 สารชะล้างและกระจายสิ่งสกปรก (detergents and dispersants)

ใช้เพื่อชะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวของชิ้นส่วนและกระจายมิให้รวมตัวกันเป็นโคลนหรือตะกอน ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เผาไหม้ ภายใน ได้แก่ เครื่องยนต์เบนซิน และเอ็กสวอนเป็นอีกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องยนต์ซีเซล โคลนหรือตะกอนที่เกิดขึ้นจะอุดช่องทางน้ำมันหล่อลื่น และจะไปรวมกันอยู่ด้านหลังของแหวนลูกสูบ ซึ่งอาจทำให้แหวนติดตายได้ สารชะล้างจะทำหน้าที่ในการป้องกันไม่ให้เกิดโคลนหรือตะกอน สารที่เป็นตัวชะล้าง ในปัจจุบันได้แก่ สบู่อินทรีย์ (organic soaps) และบาเรียม (barium), แคลเซียมและแมกนีเซียมซัลโฟเนต (magnesium sulfonates) เป็นต้น ส่วนสารกระจายสิ่งสกปรกจะทำหน้าที่ในการกระจายหรือทำให้สารที่จะรวมตัวกันเป็นโคลนแขวนลอยอยู่ในน้ำมัน สารที่เป็นตัวกระจายที่ใช้กัน ได้แก่ โพลีเมอร์ซัคซิมิไมด์ (polymeric succinimides) และเบนซิลาไมด์ (benzylamides) เป็นต้น

#### 2.4.6 น้ำมันสังเคราะห์

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำที่ได้อาจจะมาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบนั้น แม้ว่าจะผ่านกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบนั้น แม้ว่าจะผ่านกระบวนการมากมายที่ใช้กำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป แต่น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้ออกมานั้น ยังคงเป็นของผสมของสารประกอบหลายตัว ซึ่งไม่มีทางที่จะเลือกเอาเฉพาะสารที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด ได้ หรือถ้ามีก็จะ ได้ผลผลิตต่ำทำให้การผลิตไม่คุ้มค่า ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่จึงมีคุณสมบัติเฉลี่ยของของผสม ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบที่เหมาะสมมากที่สุด และน้อยที่สุด เป็นผลให้น้ำมันแร่มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันสังเคราะห์ขึ้นมา น้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันพื้นฐานที่ได้อาจจะมาจากกระบวนการทางเคมี ซึ่งเป็นกรรวมตัวของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ให้ได้น้ำมันที่มีความหนืดเพียงพอที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่น โดยสารประกอบเริ่มต้นที่ใช้ในการผลิตน้ำมันสังเคราะห์มักจะได้มาจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม และเนื่องจากน้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันที่สร้างขึ้นจากกระบวนการเคมี จึงสามารถควบคุมให้มีโครงสร้างโมเลกุลตามที่ต้องการ และมีคุณสมบัติตามที่คาดหวังไว้ได้

ข้อได้เปรียบที่สำคัญของน้ำมันสังเคราะห์ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ สามารถนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าน้ำมันแร่ คือ ใช้ได้ทั้งอุณหภูมิที่ต่ำกว่า และสูงกว่าของน้ำมันแร่ นอกจากนี้ น้ำมันสังเคราะห์บางประเภท ยังให้คุณสมบัติเฉพาะ เช่น ผสมเข้ากับน้ำได้ และไม่ติดไฟ เป็นต้น

##### 2.4.6.1 ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์ (synthesized hydrocarbons)

เป็นไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ได้มาจากน้ำมันดิบที่ใช้กันมากมีอยู่สามชนิด คือ โอลิฟิน โอลิโกเมอร์ (olefin oligomers), อัลคิลเลเตดอะโรมาติก (alkylated aromatics) และโพลีบิวทีนส์ (polybutenes) ข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ มีความมั่นคง ที่อุณหภูมิสูง อายุการใช้งาน ยาวมีดัชนีความหนืดสูง มีการไหลที่อุณหภูมิต่ำไม่มีไข และมีการระเหยต่ำ

##### 2.4.6.2 เอสเทอร์อินทรีย์ (organic esters)

เป็นสารหล่อลื่นที่ได้มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสารหล่อลื่นของเครื่องยนต์เจ็ทของอากาศยาน และใช้ในระบบไฮดรอลิก เป็นต้น เอสเทอร์อินทรีย์ที่ใช้กันอยู่มีสองชนิด ชนิดแรกคือ ไดเบสิกเอซิดเอสเตอร์ (dibasic acid esters) บางครั้งเรียกว่า ไดเอสเทอร์ (diesters) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างไดเบสิกเอซิด (dibasic acid) กับ โมโนไฮดรอลิกแอลกอฮอล์ (monohydric alcohol) อีกชนิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งก็คือ โพลีเอสเทอร์ (poly esters) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง โพลีไฮดรอลิกแอลกอฮอล์ (polyhydric alcohol) กับ โมโนเบสิกแอซิด (monobasic acid) ข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ มีความมั่นคงที่อุณหภูมิสูง มีการไหลที่อุณหภูมิต่ำ และมีอายุการใช้งานยาว

#### 2.4.6.3 โพลีไกลคอลส์ (polyglycols)

เป็นสารหล่อลื่นที่มีจุดเดือดสูงและจุดไหลเห่าเหมาะสมสำหรับสภาพการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น ใช้เป็นน้ำมันเบรก และน้ำมันไฮดรอลิกที่ติดไฟได้

#### 2.4.6.4 ฟอสเฟตเอสเทอร์ (phosphate esters)

เป็นสารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติทนไฟ จึงใช้เป็นน้ำมันไฮดรอลิก สำหรับอากาศยาน และน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟด้วย

#### 2.4.6.5 น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์อื่นๆ

ได้แก่ ซิลิโคน ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นที่มีดัชนีความหนืดสูงมาก (300 หรือมากกว่า) และมีจุดไหลเห่าจึงเหมาะสมสำหรับการใช้งานในช่วงอุณหภูมิกว้าง และใช้เป็นน้ำมันไฮดรอลิกในกรณีพิเศษ เช่น ใช้เป็นสปริงของเหลว และซิลิเคตเอสเทอร์ (Silicate esters) เป็นสารหล่อลื่นที่มีดัชนีความหนืดสูงและจุดไหลเห่าเช่นกัน

แม้ว่าน้ำมันสังเคราะห์จะมีความสมบัติโดยทั่วไปดีกว่าน้ำมันแร่ก็ตาม แต่สำหรับการนำไปใช้งานบางประเภท น้ำมันสังเคราะห์ก็อาจจะยังไม่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมทุกด้าน จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันสังเคราะห์ โดยการใส่สารเพิ่มคุณภาพเข้าไปเช่นเดียวกับการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันแร่

#### 2.4.7 น้ำมันเครื่อง

น้ำมันเครื่องที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ หมายถึงน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้กับเครื่องยนต์ที่มีการเผาไหม้ภายในเพื่อหล่อลื่นที่ส่วนที่เคลื่อนไหวข้างในเครื่องยนต์ เช่น ลูกสูบ, เพลาข้อเหวี่ยง, เพลาลูกเบี้ยวและแบร้งค์ต่างๆ

หน้าที่โดยทั่วไปของน้ำมันเครื่องที่ดี มีดังนี้ :

1. ให้การหล่อลื่น
2. รักษาความสะอาดภายในเครื่อง
3. ช่วยระบายความร้อน
4. ป้องกันสนิมและการกัดกร่อน
5. ป้องกันการรั่วซึมของแก๊สผ่านแหวนลูกสูบ

##### 2.4.7.1 คุณสมบัติในการหล่อลื่น

คุณภาพการหล่อลื่นของน้ำมันเครื่อง ขึ้นอยู่กับความหนืดของน้ำมันเป็นสิ่งแรก เยื่อบางๆ ของน้ำมันจะเคลือบผิวของโลหะไม่ให้เกิดการเสียดสีกันโดยตรง อันจะทำให้เกิดการสึกหรอ ความหนานของเยื่อน้ำมันขึ้นอยู่กับความหนืด ถ้าความหนืดของน้ำมันสูง เยื่อน้ำมันจะหนามาก น้ำมันที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการรักษาความหนาของเยื่อน้ำมันให้เกือบคงที่อยู่ได้ในทุกๆ อุณหภูมิคือไม่บางเกินไป (ใสมาก) เมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิสูงและไม่หนาเกินไป (ขึ้นมาก) ที่อุณหภูมิต่ำ น้ำมันที่มีคุณสมบัติเช่นนี้ เรียกว่า มีดัชนีความหนืดสูง

ตามปกติ ก่อนติดเครื่องยนต์ น้ำมันเครื่องซึ่งไหลไปรวมอยู่ในส่วนล่างของอ่างน้ำมันเครื่องยังเย็นและข้น เมื่อเครื่องยนต์เดินจำเป็นจะต้องมีน้ำมันไปหล่อเลี้ยงส่วนที่เคลื่อนไหวทันที ถ้าน้ำมันข้นมาก การปั๊มส่งน้ำมันจะล่าช้า อาจทำให้เกิดการสึกหรอได้ และเมื่อเครื่องยนต์ร้อนแล้วน้ำมันเครื่องจะใสลงและยังคงตอนที่การจราจรติดขัด อุณหภูมิจะสูงขึ้นมาก ทำให้เยื่อน้ำมันบาง ชั้นส่วนของเครื่องยนต์อาจจะเสียดสีกันโดยตรง ทำให้เกิดการสึกหรอได้ เพราะฉะนั้นน้ำมันเครื่องที่ดี จะต้องมิดชนีความหนืดสูง

#### 2.4.7.2 คุณสมบัติในการรักษาความสะอาด

โดยทั่วไปเครื่องยนต์ที่มีการเผาไหม้ภายในจะมีเขม่าที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงบางส่วนที่รั่วผ่านแหวนลูกสูบ และผนังห้องลูกสูบขึ้นไปอยู่ในฝาครอบวาล์ว ตลอดจนส่วนอื่นๆ ภายในเครื่องยนต์ น้ำมันเครื่องที่ดีจะต้องสามารถชะล้างขจัดคราบสกปรกคังกล่าวออกจากผิวโลหะได้ นอกจากนี้แล้วยังต้องมีคุณสมบัติในการกระจายเขม่าและสิ่งสกปรกไม่ให้รวมตัวกันเป็นก้อน สิ่งสกปรกเหล่านี้จะต้องลอยตัววนเวียนอยู่ในน้ำมัน โดยไม่ตกตะกอน และจะถูกถ่ายออกจากเครื่องยนต์ เมื่อมีการเปลี่ยนน้ำมันเครื่อง เป็นที่สังเกตได้ว่า น้ำมันเครื่องที่ใสแล้วจะมีสีดำ ซึ่งแสดงว่าน้ำมัน ได้ทำหน้าที่ชะล้างสิ่งสกปรกอย่างสมบูรณ์แล้ว

#### 2.4.4.3 คุณสมบัติระบายความร้อน

น้ำมันเครื่องจะถูกส่งไปหล่อลื่นตามจุดต่างๆ เช่น แบริ่ง แหวน ลูกสูบ เพลา และกระเดื่องปิดเปิดลิ้น ฯลฯ ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้จะถูกถ่ายเทจากเครื่องยนต์โดยอาศัยน้ำมันเครื่องเป็นตัวช่วยส่วนหนึ่ง จากการทดสอบพบว่า ประมาณ 30% ของความร้อนถูกระบายออก โดยอาศัยน้ำมันเครื่องเป็นตัวถ่ายเท จึงทำให้อุณหภูมิของน้ำมันเครื่องค่อนข้างสูง อุณหภูมิสูงทำให้อัตราการรวมตัวระหว่างน้ำมันกับออกซิเจนในอากาศเร็วขึ้น ด้วยเหตุนี้ น้ำมันเครื่องที่ดีจึงต้องมีสารเคมีเพิ่มคุณภาพในการป้องกันการรวมตัวกับออกซิเจน เพื่อยืดอายุการใช้งานให้ยาวนานขึ้น

#### 2.4.7.4 คุณสมบัติในการป้องกันสนิมและการกัดกร่อน

เมื่อเริ่มติดเครื่องยนต์ใหม่ๆ ในขณะที่เครื่องยนต์และน้ำมันเครื่องยังเย็นอยู่ การเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงจะยังไม่สมบูรณ์ดี จะมีแก๊สและไอน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้รั่วผ่านแหวนลูกสูบลงไปยังส่วนล่างของเครื่องยนต์มากกว่าปกติ แก๊สที่รั่วผ่านเหล่านี้จะรวมตัวกันกับไอน้ำ กลายเป็นกรดสามารถจะกัดกร่อนชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ และทำให้เกิดสนิมได้ สารเคมีจะช่วยป้องกันไม่ให้เหล็กเป็นสนิม และต้านทานการกัดกร่อนที่เป็นอันตรายเหล่านี้ ทำให้อายุการใช้งานของเครื่องยนต์ยืนนานขึ้น

#### 2.4.7.5 ป้องกันการรั่วซึมของแก๊ส

ความหนืดของน้ำมันมีความสำคัญในการป้องกันการรั่วซึมของแก๊สผ่านแหวนลูกสูบได้ โดยทำหน้าที่เป็นเยื่ออุดช่องว่างระหว่างแหวนลูกสูบกับกระบอกสูบ น้ำมันเครื่องที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการเคลือบและจับกับผิวโลหะ เพื่อทำหน้าที่ป้องกันการรั่วซึมของแก๊ส

#### 2.4.7.6 ส่วนผสมของน้ำมันเครื่อง

น้ำมันเครื่องที่ดี = น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน + สารเคมีเพิ่มคุณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเคมีเพิ่มคุณภาพ จะถูกผสมเข้ากับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานด้วยสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้มีคุณสมบัติอื่นๆ นอกเหนือไปจากการหล่อลื่นเพิ่มขึ้นมา น้ำมันเครื่องที่ผสมแล้ว จะต้องผ่านการทดสอบกับเครื่องยนต์นานาชนิดเป็นเวลานาน เพื่อให้แน่ใจว่าได้มาตรฐาน และมีคุณภาพสูงพอ แต่ก็ไม่สูงเกินความจำเป็น เพราะจะทำให้ราคาของน้ำมันเครื่องแพงเกินไป น้ำมันเครื่องจึงมีหลายชนิด เพื่อให้เหมาะสมกับเครื่องยนต์แต่ละประเภท และการใช้งานที่แตกต่างกัน

#### 2.4.7.7 สารเคมีเพิ่มคุณภาพที่ใช้ผสมน้ำมันเครื่อง

1. เพิ่มดัชนีความหนืด
2. ชะล้างทำความสะอาด
3. กระจายเขม่าตะกอน
4. ต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน
5. ป้องกันสนิมและการกัดกร่อน
6. ลดการสึกหรอ
7. ต้านทานการเกิดฟอง

#### 2.4.7.8 การแยกประเภทน้ำมันเครื่อง

การแยกประเภทน้ำมันเครื่องต่างๆ ไป มีอยู่ 2 ระบบด้วยกัน คือ :

1. แยกตามความหนืด
2. แยกตามสภาพการใช้งาน โดยผ่านการทดสอบกับเครื่องยนต์แล้วเทียบเป็นมาตรฐานต่างๆ ได้แก่ มาตรฐานของ American Petroleum Institute (API) มาตรฐานทางทหารของสหรัฐฯ และของบริษัทรถยนต์

1. มาตรฐานการแยกน้ำมันเครื่องตามความหนืด

สมาคมวิศวกรยานยนต์ (Society of Automotive Engineers ชื่อย่อ SAE) ได้ตั้งมาตรฐานการวัดความหนืดน้ำมันเครื่องไว้ดังนี้ (SAE J 300 - ล่าสุด เมื่อกันยายน 1980)

เบอร์ SEA	ความหนืด cP <sup>(1)</sup> สูงสุดที่อุณหภูมิ (°ซ)	ความหนืด cSt ที่ 100° ซ	
		ต่ำสุด	สูงสุด
OW	3250 ที่ -30	-	
5W	3500 ที่ -25	3.8	-
10W	3500 ที่ -20	4.1	-
15W	3500 ที่ -15	5.6	-
20W	4500 ที่ -10	5.6	-
25W	6000 ที่ -5	9.3	-
	ความหนืด SUS ที่ 210 ฟ		
20	45-58	5.6	ต่ำกว่า 9.3
30	58-70	9.3	ต่ำกว่า 12.5
40	70-85	12.5	ต่ำกว่า 16.3
50	85-110	16.3	ต่ำกว่า 21.9

ตาราง 2-10 มาตรฐานการวัดความหนืดของน้ำมันเครื่อง

## 2. มาตรฐานการแยกประเภทน้ำมันเครื่องตามสภาพการใช้งาน

ในเดือนพฤษภาคม 1970 API ได้เริ่มกำหนดมาตรฐานแบบใหม่ขึ้นมาเพื่อแบ่งแยกน้ำมันตามสภาพการทำงานของเครื่องยนต์ ด้วยความร่วมมือกับ SAE และ ASTM (American Society for Testing and Materials) ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับวิวัฒนาการของเครื่องยนต์สมัยใหม่

ก) สภาพการทำงานของเครื่องยนต์ตามศูนย์บริการทั่วไป (ส่วนใหญ่เป็นเครื่องยนต์เบนซิน)  
SA - แต่เดิมสำหรับสภาพงานเบาของเครื่องยนต์เบนซินและดีเซล น้ำมันสำหรับสภาพงานนี้ไม่มีสารเพิ่มคุณภาพ จึงไม่ควรจะใช้กับเครื่องยนต์ใดๆ สมัยนี้

SB - สำหรับสภาพงานเบาของเครื่องยนต์เบนซิน น้ำมันสำหรับสภาพงานนี้มีสารเพิ่มคุณภาพผสมเล็กน้อย สำหรับป้องกันการรวมตัวกับออกซิเจน และกัดกร่อน และลดการสึกหรอ ไม่ควรใช้กับเครื่องยนต์สมัยใหม่เช่นกัน

SC - สำหรับสภาพงานเครื่องยนต์เบนซิน รดยนต์นั่งและรถบรรทุกอเมริกันรุ่น 1964-1967 น้ำมันสำหรับสภาพงานเช่นนี้ มีสารเพิ่มคุณภาพด้านทานการรวมตัวของเขม่าและตะกอนทั้งที่อุณหภูมิสูงและต่ำ ป้องกันการสึกหรอ สนิมและการกัดกร่อน

SD - สำหรับสภาพงานเครื่องยนต์เบนซิน รดยนต์นั่งอเมริกันและรถบรรทุกเล็กรุ่น 1968-1970 และรถรุ่น 1971 บางแบบ น้ำมันสำหรับสภาพงานเช่นนี้ มีสารเพิ่มคุณภาพมากกว่า SC เพื่อด้านทานการรวมตัวของเขม่าและตะกอนทั้งที่อุณหภูมิสูงและต่ำ ป้องกันการสึกหรอ สนิมและการกัดกร่อน เหมาะกับเครื่องยนต์ที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้น้ำมันมาตรฐาน SC ด้วย

SE - สำหรับสภาพงานเครื่องยนต์เบนซิน รดยนต์นั่งอเมริกันและรถบรรทุกเล็กรุ่น 1972 เป็นต้นไป และรถรุ่น 1971 บางแบบ น้ำมันสำหรับสภาพงานเช่นนี้ มีสารเพิ่มคุณภาพมากกว่า SD และ SC เพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้องกันการรวมตัวกับออกซิเจน ด้านทานการรวมตัวของเขม่า ตะกอน ป้องกันสนิมและการกัดกร่อน เหมาะกับเครื่องยนต์ที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้น้ำมันมาตรฐาน SD และ SC ด้วย

SF - สำหรับสภาพงานเครื่องยนต์เบนซิน รถยนต์นั่งอเมริกันและรถบรรทุกบางชนิด ตั้งแต่รุ่น 1980 เป็นต้นไป น้ำมันสำหรับสภาพงานเช่นนี้ มีสารเพิ่มคุณภาพสำหรับด้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน และป้องกันการสึกหรอสูงกว่า SE นอกจากนี้ยังรักษาความสะอาด ป้องกันสนิมและการกัดกร่อน เหมาะกับเครื่องยนต์ที่ได้รับคำแนะนำให้ใช้น้ำมันมาตรฐาน SE SD หรือ SC ด้วย

ข) สภาพการทำงาน of เครื่องยนต์ที่ใช้ในการพาณิชย์งานอุตสาหกรรม งานก่อสร้างและเกษตรกรรม (ส่วนใหญ่เป็นเครื่องดีเซล)

CA - สำหรับสภาพงานเครื่องยนต์ดีเซลธรรมดาที่ทำงานเบา และปานกลาง ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงคุณภาพสูง รวมทั้งเครื่องยนต์เบนซินที่ทำงานเบาๆ น้ำมันสำหรับสภาพงานนี้สามารถป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อนในแบร์ริง และชะล้างเขม่า ตะกอนในอุณหภูมิต่ำได้

CB - สำหรับสภาพงานเครื่องยนต์ดีเซลธรรมดาที่ทำงานเบา และปานกลาง แต่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำกว่า (กัมมันต์สูงกว่า) ที่ใช้ใน CA รวมทั้งเครื่องยนต์เบนซินที่ทำงานเบาๆ น้ำมันสำหรับสภาพงานนี้สามารถป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อนในแบร์ริง และชะล้างเขม่า ตะกอนในอุณหภูมิต่ำได้

CC - สำหรับสภาพงานเครื่องยนต์ดีเซลธรรมดาหรือที่มีซูเปอร์ชาร์จ หรือเทอร์โบชาร์จ อย่างเบา ทำงานปานกลางและงานหนัก รวมทั้งเครื่องยนต์เบนซินทำงานหนักบางชนิด น้ำมันสำหรับสภาพงานเช่นนี้ มีคุณสมบัติในการชะล้างเขม่า การกระจายตัวของเขม่าและตะกอนในอุณหภูมิต่ำในเครื่องยนต์ดีเซล และที่อุณหภูมิต่ำในเครื่องยนต์เบนซิน ป้องกันสนิมและการกัดกร่อนได้ดี

CD - สำหรับสภาพงานเครื่องยนต์ดีเซลธรรมดาหรือที่มีซูเปอร์ชาร์จ หรือเทอร์โบชาร์จ อย่างเบา ทำงานหนักมาก รอบสูง ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีปริมาณกำมะถันสูง น้ำมันสำหรับสภาพงานเช่นนี้ มีคุณสมบัติสูงมากเพื่อชะล้างและกระจายตัวของเขม่าและตะกอนในอุณหภูมิต่ำด้านทานการสึกหรอ และป้องกันการกัดกร่อนของแบร์ริงได้ดี

การที่จะเทียบว่าน้ำมันเครื่องชนิดใดได้มาตรฐานใดดังกล่าวนี้ ต้องผ่านการทดสอบกับเครื่องยนต์ของบริษัต่างๆ ในห้องทดลอง ASTM เป็นผู้กำหนดวิธีทดสอบ (รายละเอียดจะไม่กล่าวถึงในที่นี้)

ส่วนมาตรฐานทางทหารสหรัฐฯ และผู้ผลิตเครื่องยนต์ ก็ต้องผ่านการทดสอบกับเครื่องยนต์ต่างๆ ดังกล่าว มาตรฐานทางทหารจะสังเกตได้ว่า มีคำ "MIL" นำหน้า มาตรฐานที่กำหนดโดยผู้ผลิตเครื่องยนต์ก็มีของฟอร์ด, เชนเนอเวอริตมอเตอร์ส และแคตเตอร์พิลลาร์ เป็นต้น

#### 2.4.7.9 การเปรียบเทียบประเภทน้ำมันเครื่องตามสภาพการใช้งาน

เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบประเภทน้ำมันเครื่องมาตรฐานต่างๆ จึงสรุปไว้ดังต่อไปนี้ :

##### 1. ตามศูนย์บริการทั่วๆ ไป (Service Station)

API ใหม่	API เก่า	มาตรฐานทหารหรืออุตสาหกรรม
SA	ML	-
SB	MM	-
SC	MS 1964-67	Ford M 2 C 101-A

		GM-4745-M
SD	MS 1968-71	Ford M 2 C 101-B
		GM-6041-M
SE	รถอเมริกันรุ่น 1972	MIL-L-L46152
		Ford M 2 C 101-C
		GM-6136-M
SF	รถอเมริกันรุ่น 1980	MIL-L-46152 B
		Ford M 2 C 153-B
		GM-6148-M

### 2. สำหรับการพาณิชย์ อุตสาหกรรม ก่อสร้าง และเกษตรกรรม (Commercial)

API ใหม่	API เก่า	มาตรฐานทหารหรืออุตสาหกรรม
CA	DG	MIL-L-2104A (MIL-A)
CB	DM	Supplement 1 (Sup 1)
CC	DM	MIL-L-2104B (MIL-B)
CD	DS	MIL-L-46152 B Series 3, MIL-L-45199 B (MIL-C)

### 3. ถ้าจะเอามาตรฐานทางการทหารเป็นหลักก็จะเปรียบเทียบได้ดังนี้

มาตรฐานทหาร/ผู้ผลิต	มาตรฐาน API
MIL-L-2104 A	CA/SB
Supplement 1	CB/SC
MIL-L-2104 B	CC/SC
Series 3	CD
MIL-L-45199 B	CD
MIL-L-46512	SE/CC
MIL-L-2104 C	CD/SC
MIL-L-2104 D	สูงกว่า CD/SE
MIL-L-46512 B	SF/CC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ :

- 1) ในเดือนตุลาคม 1972 บริษัท แคตเตอร์ฟิลล์ประกาศว่าต่อไปนี้จะอ้างถึงน้ำมันมาตรฐาน CD/MIL-C แทนที่จะอ้างถึง Series 3
- 2) มาตรฐานทางการทหาร เริ่มใช้ MIL-2104 D เมื่อเดือนเมษายน 1983 และ MIL-L-46152 B เมื่อเดือนเมษายน 1980 ดังนั้นมาตรฐาน MIL อื่นๆ จึงยกเลิกไปตามทางการ แต่ในวงอุตสาหกรรมและพาณิชย์ ยังต้องมักอ้างถึงอยู่เสมอ

## 2.4.8 น้ำมันพืช

### 2.4.8.1 การผลิตน้ำมันพืชในประเทศไทย

ในระยะเวลาที่ผ่านมาผลผลิตน้ำมันพืชในประเทศไทยมักไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการผลิตไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ ทำให้ผลผลิตที่ได้มีน้อย ต่อมาได้มีการนำเอาเครื่องจักรมาช่วยในการผลิตทำให้สามารถผลิตน้ำมันพืชได้มากขึ้น สำหรับผลผลิตของน้ำมันพืชจากรายที่ 2-11 จะพบว่าในปี พ.ศ. 2524 มีทั้งสิ้น 100,500 เมตริกตัน ผลผลิตที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดได้แก่ น้ำมันปาล์ม รองลงมาได้แก่ น้ำมันละหุ่ง น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันรำข้าว และน้ำมันถั่วเหลือง ตามลำดับ

(หน่วย:เมตริกตัน)

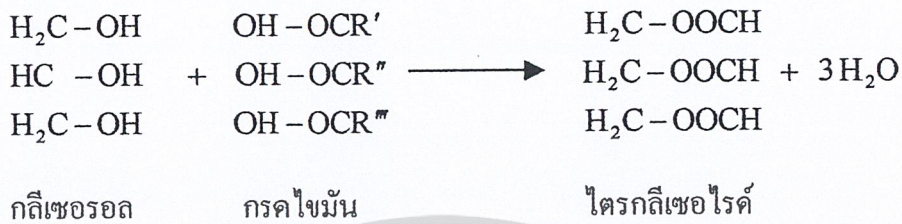
ชนิดของน้ำมันพืช	ผลผลิต*		
	2522	2523	2524
น้ำมันมะพร้าว	14,965	19,000	14,000
น้ำมันถั่วลิสง	3,028	14,000	12,000
น้ำมันรำข้าว	10,288	16,500	14,000
น้ำมันถั่วเหลือง	6,104	13,200	11,000
น้ำมันเมล็ดนุ่น	1,979	6,200	5,000
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	5,455	3,000	2,500
น้ำมันปาล์ม	12,000	16,000	20,000
น้ำมันละหุ่ง	2,704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

\*ที่มา : ฝ่ายวิชาการ ธนาคารแห่งประเทศไทย

ตารางที่ 2-11 แสดงผลผลิตของน้ำมันพืช

### 2.4.8.2 องค์ประกอบของน้ำมันพืช

น้ำมันพืชเป็นสารอินทรีย์จำพวกหนึ่ง ซึ่งส่วนประกอบของกลีเซอรอล(glycerol) กับกรดไขมัน(fatty acid)ดังนี้



เมื่อ  $R', R'', R''' =$  โซ่ของกรดไขมัน

### 2.4.8.3 ประเภทของกรดไขมัน

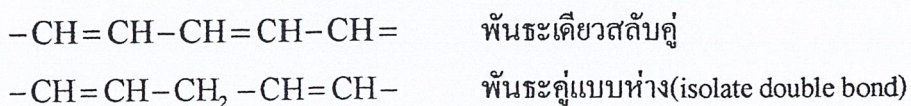
กรดไขมันเป็นสารซึ่งประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล(carboxyl group) ต่ออยู่กับโซ่ไฮโดรคาร์บอน(hydrocarbon chain) ในโมเลกุลของกรดไขมันอาจมีการจับกันระหว่างธาตุของคาร์บอนทั้ง 1 บอนด์ และ 2 บอนด์ โดยพวกที่มี 1 บอนด์ จะเป็นกรดไขมันอิ่มตัว(saturated) พวกที่มี 2 บอนด์ จะเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว(unsaturated)

#### 1. กรดไขมันอิ่มตัว(Saturated fatty acids)

กรดไขมันอิ่มตัวเป็นกรดไขมันที่ไม่มีพันธะคู่(double bond) อยู่ในโครงสร้าง ซึ่งคาร์บอนแต่ละตัวบนสายโซ่จะต่อกับไฮโดรเจนอย่างน้อย 2 ตัว หากในน้ำมันพืชมีกรดไขมันอิ่มตัวอยู่มากจะทำให้ น้ำมันพืชนั้นเป็นไขมัน ตัวอย่างของกรดไขมันอิ่มตัวนี้ได้แก่ กรดสเตียริก(stearic acid) กรดปาล์มมิก(palmitic acid) กรดลอริก(Lauric) และ กรดไมริสติก(Myristic) เป็นต้น โครงสร้างของกรดไขมันเหล่านี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-11

#### 2. กรดไขมันไม่อิ่มตัว(Unsaturated fatty acids)

กรดไขมันไม่อิ่มตัว ที่โซ่ไฮโดรคาร์บอนจะประกอบด้วยพันธะคู่ตั้งแต่ 1 คู่พันธะขึ้นไป ซึ่งตำแหน่งของพันธะคู่ของกรดไขมันแต่ละชนิดก็จะแตกต่างกันออกไป โดยถ้ามีพันธะเดียวคั่นอยู่ระหว่างพันธะคู่จะเรียกพันธะแบบนี้ว่า พันธะเดี่ยวสลับคู่(conjugate double bond) ดังแสดงเป็นตัวอย่างดังนี้



ชื่อของกรดไขมัน	จำนวนคาร์บอน	สูตรโครงสร้าง
กรดลอริก(Lauric)	C 12	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{10}-\text{COOH}$
กรดไมริสติก(Myristic)	C 14	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{12}-\text{COOH}$
กรดปาล์มมิติก(palmitic)	C16	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{14}-\text{COOH}$
กรดสเตียริก(stearic)	C18	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}-\text{COOH}$
กรดโอลีอิก(Oleic)	C18:1	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$
กรดลินอเลอิก(Linoleic)	C18:2	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$
กรดลินอเลอิก(Linolenic)	C18:3	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$

ตารางที่ 2-12 แสดงโครงสร้างของกรดไขมันชนิดต่างๆ

No. of carbon atoms	Name of acid	Coconut oil	Palm kernel oil	Palm oil	Cotton-seed oil	Rape-seed oil	Tallow (beef)	Tallow (mutton)	Lard
<b>Saturated Acids</b>									
12	Lauric	44-51	47-52	...	...	...	...	...	...
14	Myristic	13-19	14-18	0.5-3	1	1	3-6	4-10	1-2
16	Palmitic	8-11	7-9	32-45	26-31	1-5	25-37	24-38	22-31
18	Stearic	1-3	1-3	4-7	3-5	1-3	14-29	15-30	16-24
Total (typical)		92	81	40-50	28-35	3-8	50-55	52-57	35-40
<b>Unsaturated Acids</b>									
<b>Monounsaturated</b>									
18	Oleic	5-8	11-19	38-53	19-26	14-38	26-50	38-48	38-44
<b>Diunsaturated</b>									
18	Linoleic	1.0-2.5	0.5-2	6-12	37-50	10-22	1-3	...	4-9
22	Erucic	...	...	...	...	40-64	...	...	...
<b>Triunsaturated</b>									
18	Linolenic	...	...	...	...	8-12	...	...	1-2
Total (typical)		8	19	50-60	60-70	92-97	44-52	40-50	60-65

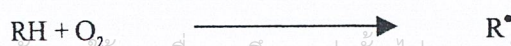
ตารางที่ 2-13 ชนิดของกรดไขมันในน้ำมันพืช

#### 2.4.8.4 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันพืช (Oxidation Mechanisms)

น้ำมันพืชเป็นสารประกอบอินทรีย์(organic compound) สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาอาจเป็นปฏิกิริยาแบบลูกโซ่(chain reaction) ซึ่งจะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. ขั้นเริ่มต้น(initiation) เป็นขั้นตอนที่มีการเกิดอนุมูลอิสระ หรือที่เรียกว่า radical chain

reaction



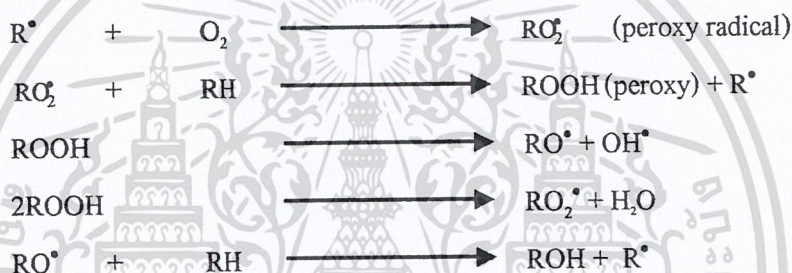
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ RH คือ กรดไขมัน

$R^\bullet$  คือ alkyl radical

$RO_2^\bullet$  คือ alkylperoxy radical

2. ขั้นแพร่กระจาย(Propagation) เป็นขั้นตอนที่อนุมูลอิสระ หรือ free radical จับกับโมเลกุลของออกซิเจนเกิดเป็น เปอร์ออกซิอิสระ(peroxy radical) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของกรดไขมัน (RH) เพื่อเกิดเป็น เปอร์ออกไซด์ และอนุมูลอิสระตัวใหม่ ( $R^\bullet$ ) ซึ่งสามารถจับโมเลกุลของออกซิเจน( $O_2$ )ในอากาศได้อีก ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆจนกว่า ออกซิเจน หรือ RH จะหมดไป ส่วนสารเปอร์ออกไซด์ที่ได้จะเป็นสารที่ไม่เสถียรซึ่งจะสลายตัวได้ง่าย สารเปอร์ออกไซด์เหล่านี้จะเป็นตัวทำให้เกิดตะกอน(sludge) หรือ ยางเหนียว(gum) ในน้ำมันพืช



3. ขั้นสิ้นสุด(Terminal) ของปฏิกิริยาเป็นขั้นที่อนุมูลอิสระ หรือ free radical เข้าทำปฏิกิริยากันเอง ได้สารที่ไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยา(nonradical products)ซึ่งเกิดจาก

ก. อนุมูลอิสระของ peroxy radicals ( $RO_2^\bullet$ ) เข้าทำปฏิกิริยากันเองดังนี้



ข. เกิดการ cross terminal ของ alkyl radical ( $R^\bullet$ ) กับ peroxy radicals ( $RO_2^\bullet$ ) ดังนี้



ค. เกิดการทำปฏิกิริยากันเอง ของ alkyl radical ( $R^\bullet$ ) ด้วยกันเองดังนี้



#### 2.4.8.5 สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันพืช

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า น้ำมันพืชเป็นสารประกอบอินทรีย์ จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้โดยง่าย โดยเฉพาะถ้าในน้ำมันพืชมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่ในโมเลกุลมาก จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ง่าย ดังนั้นจึงได้มีการพยายามหาสารที่จะมาช่วยยับยั้งหรือ หน่วงให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิไดเซชันเกิด ได้ช้าลง หรือไม่เกิดขึ้นเลย

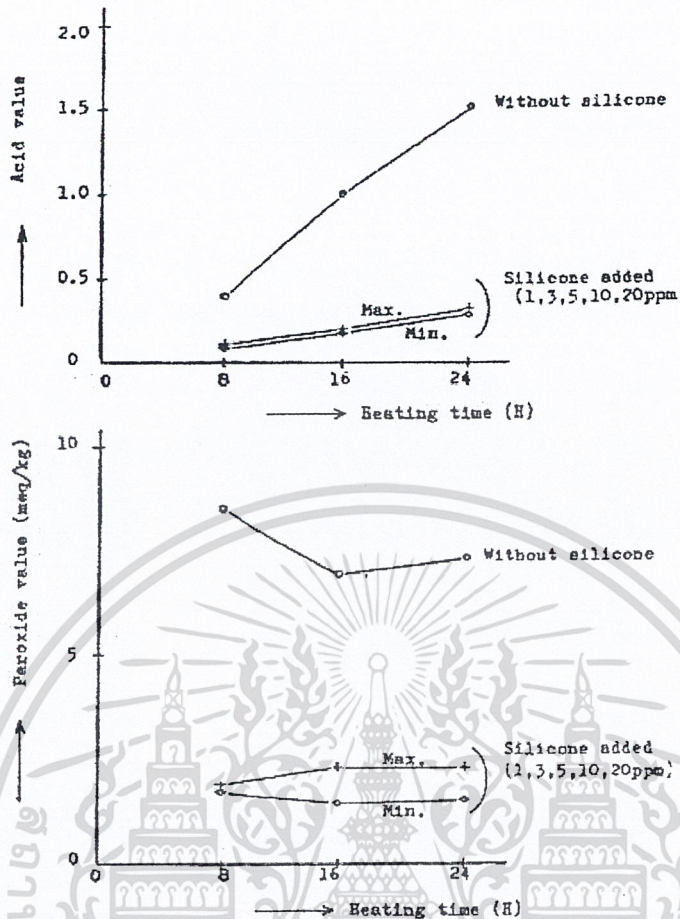
โดยปกติในน้ำมันพืชจะมีสารต้านทานการเกิดออกซิไดเซชันอยู่ในโมเลกุลของน้ำมันพืชด้วย เช่น สารโทโคฟีรอล(Tocopherol) และอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งในน้ำมันพืชแต่ละชนิดก็จะมีปริมาณของสารมาก น้อยไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 2-14

	Tocopherols (mg/kg)						
	$\alpha$ -T	$\beta$ -T	$\gamma$ -T	$\delta$ -T	Total	$\alpha$ -T <sub>3</sub>	$\gamma$ -T <sub>3</sub>
Anchovy					60		
Capelin					45		
Cocoa butter	11		170	17		2	
Coconut				4		20	
Corn	134	18	412	39			
Cottonseed	573	40	317	10			
Ground nut	169	5	144	13			
Lard	7						2
Menhaden					30		
Olive	93		7				
Palm	279		61			274	398
Rape	70	16	178	7			
Safflower	477		44	10			
Sesame	12	6	244	32			
Soyabean	116	34	737	275			
Sunflower	608	17	11				

ตารางที่ 2-14 แสดงปริมาณของสารโทโคฟีรอลในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ

สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่มีอยู่ในน้ำมันพืชนั้นอาจถูกทำลายหรือสูญเสียไปในระหว่างขั้นตอน กระบวนการผลิต ดังนั้นจึงได้มีการเติมสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันเพิ่มเข้าไปในน้ำมันพืชด้วย สารที่ เติมเข้าไปจะไปยับยั้ง หรือเข้าไปหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่(chain reaction) ซึ่งอาจเป็นขั้น ตอนเริ่มต้น (initiation)หรือในขั้นตอนการแพร่กระจาย(propagation)ก็ได้ ขึ้นอยู่กับประเภทและชนิดของสารต้านทาน การเกิดออกซิเดชันนั้น ดังนั้นในการสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิด ก็มีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป รูปที่ 2-14 เป็นแสดงผลของการใช้น้ำมันซิลิโคน(silicone)เป็นสารต้าน ทานการเกิดออกซิเดชันใส่ลงในน้ำมันปาล์ม[5] จากรูปจะเห็นว่าปริมาณของกรด และค่าเปอร์ออกไซด์ที่ เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันพืชที่ไม่ได้ใส่น้ำมันซิลิโคน และจากการวิจัยของ Freeman พบว่าการผสมน้ำมันซิลิโคนลงไปในน้ำมันพืชยังสามารถป้องกันการเกิดฟองได้ด้วยซึ่งโดยปกติจะใช้ ในปริมาณน้อยโคนประมาณ 1-2 ppm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงผลของการใส่สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันปาล์ม

#### 2.4.8.6 คุณสมบัติของน้ำมันพืช

##### 2.4.8.6.1 ค่าไอโอดีน (Iodine number)

ค่าไอโอดีน คือจำนวนกรัมของไอโอดีนซึ่งถูกดูดซับไว้ด้วยไขมัน 100 กรัม ซึ่งค่าไอโอดีนนี้ยังสามารถแสดงถึงความอึดตัวมากน้อยของกรดไขมันในน้ำมันพืช และการแห้งตัว (drying) ได้มากหรือน้อยของน้ำมันพืชแต่ละชนิดอีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น ถ้าน้ำมันพืชใดมีค่าไอโอดีนสูง (ประมาณ 160-230) ก็แสดงว่าน้ำมันพืชชนิดนั้นเป็นน้ำมันพืชประเภทแห้งเร็ว (dry oil) และถ้ามีค่าไอโอดีนปานกลาง (ประมาณ 125-150) ก็แสดงว่าน้ำมันพืชชนิดนั้นเป็นน้ำมันพืชประเภทกึ่งแห้งเร็ว (semi-drying oil) แต่ถ้ามีค่าไอโอดีนต่ำ (น้อยกว่า 120) ก็แสดงว่าน้ำมันพืชชนิดนั้นเป็นน้ำมันพืชประเภทไม่แห้งเร็ว (non-drying oil) ซึ่งค่าไอโอดีนได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-15

ชนิดของน้ำมันพืช	ค่าไอโอดีน
น้ำมันมะพร้าว	7.5 - 10
น้ำมันปาล์ม	44-60
น้ำมันถั่วเหลือง	120-141

ตารางที่ 2-15 แสดงค่าไอโอดีนของน้ำมันพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.8.6.2 จุดหลอมเหลว(Melting point)

คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งได้แก่จุดหลอมเหลว ในซึ่งจากตารางที่ 3.6 จะเห็นว่าน้ำมันปาล์มมีจุดหลอมเหลวสูง จึงทำให้น้ำมันปาล์มปรากฏเป็นของไข ที่อุณหภูมิ 35°C ส่วนน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันถั่วเหลือง จะมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 25° และ -16°C ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าน้ำมันปาล์ม

ชนิดของน้ำมันพืช	จุดหลอมเหลว , °C
น้ำมันปาล์ม	35°C
น้ำมันมะพร้าว	25°C
น้ำมันถั่วเหลือง	-16°C

ตารางที่ 2-16 แสดงจุดหลอมเหลว ของน้ำมันพืช

#### 2.4.8.6.3 ค่าความหนืด(Viscosity)

ค่าความหนืดเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการต้านทานการไหล หากน้ำมันพืชมีค่าความหนืดต่ำก็จะไหลได้ง่ายและให้ชั้นฟิล์มน้ำมันที่บาง ส่วนในน้ำมันพืชที่มีค่าความหนืดสูง ก็จะให้ชั้นฟิล์มที่หนากว่า ค่าความหนืดของน้ำมันพืชในแต่ละชนิดก็จะมีค่าแตกต่างกันออกไปดังแสดงไว้ในตารางที่ 2-17

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนืด , mPa.s		
	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันปาล์ม
25	51.7	52.3	73.3
40	31.7	33.4	34.6
60	18.5	20	22.6
80	11.1	12.9	8.93
100	9.5	9.09	4.66

ตารางที่ 2-17 แสดงความหนืดของน้ำมันพืช

#### 2.4.8.6.4 ค่าซาปอนิฟิเคชัน(Saponification number)

ค่าซาปอนิฟิเคชัน คือจำนวนมิลลิกรัมของโพตัสเซียมไฮดรอกไซด์(KOH) ที่ใช้ในการทำให้น้ำมันหรือไขมันหนัก 1 กรัม กลายเป็นสบู่ ค่าซาปอนิฟิเคชันนี้ยังสามารถใช้เป็นตัวบ่งบอกถึงจำนวนพันธะคู่(double bond) ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวว่ามีอยู่มากหรือน้อย เช่น ถ้าค่าซาปอนิฟิเคชันมีค่าสูงก็แสดงว่าจะมีพันธะคู่ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวอยู่น้อย ในทางกลับกันถ้าค่าซาปอนิฟิเคชันมีค่าต่ำก็แสดงว่าจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีพันธะคู่ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวอยู่มาก ซึ่งค่าซาปอนนิฟิเคชันของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-18

ชนิดน้ำมันพืช	ค่าซาปอนนิฟิเคชัน
น้ำมันมะพร้าว	246 – 265
น้ำมันปาล์ม	190 – 195
น้ำมันถั่วเหลือง	190 – 197

ตารางที่ 2-18 แสดงค่าซาปอนนิฟิเคชันของน้ำมันพืช

#### 2.4.8.6.5 การดูดซับของน้ำมันพืชกับโลหะ(Adsorption)

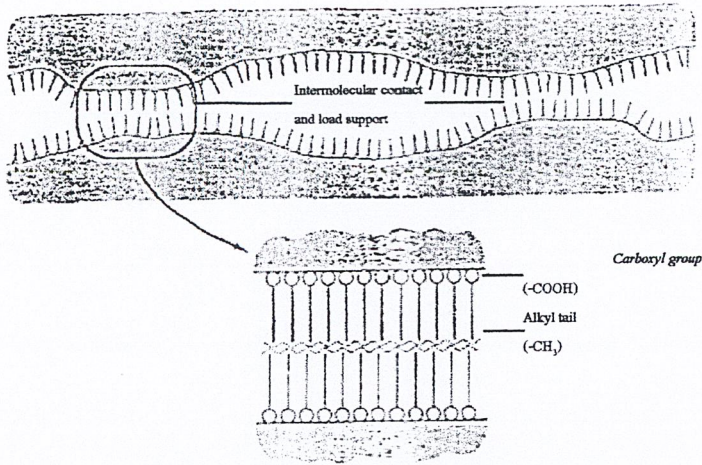
จากที่กล่าวมาข้างต้นแล้วว่า ในน้ำมันพืชจะประกอบไปด้วยโมเลกุลของกรดไขมัน(fatty acid) ซึ่งจะประกอบไปด้วยหมู่ที่มีขั้ว(polar group) ซึ่งก็คือส่วนของ  $-COOH$  และหมู่ที่ไม่มีขั้ว(non-polar group) คือส่วนของ  $-CH_3$  ซึ่งการมีขั้วของกรดไขมันในน้ำมันพืชนี้จะมีความสำคัญอย่างมากต่อการยึดเกาะของกรดไขมันกับผิวของโลหะ กลไกการยึดเกาะของกรดไขมันนี้เราเรียกว่า การดูดซับ(adsorption) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

##### 1. การดูดซับทางกายภาพ(Physical adsorption หรือ physisorption)

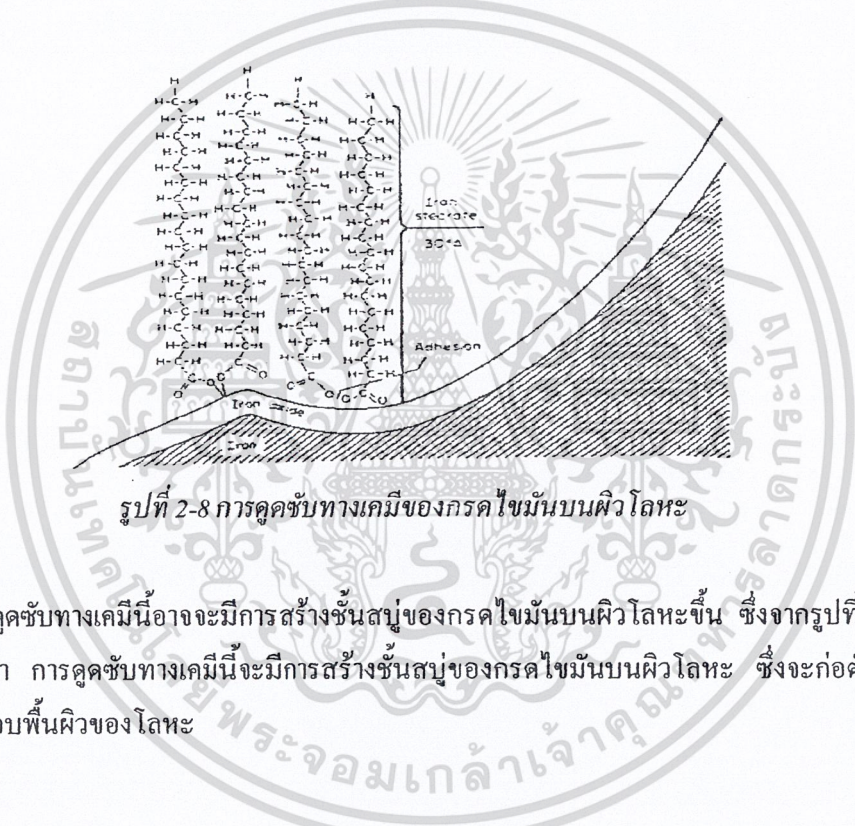
การดูดซับทางกายภาพของกรดไขมันบนผิวโลหะนี้ เกิดจากการที่หมู่ที่มีขั้ว ( $-COOH$ ) หันเข้าหาผิวโลหะ อันเนื่องจากแรงดึงดูดทางฟิสิกส์ หรือที่เรียกกันว่าแรงวานเดอร์วาลส์(van der Waals) ในขณะเดียวกันก็จะเอาส่วนที่ไม่มีขั้ว ( $-CH_3$ ) หันเข้าหาส่วนที่ไม่มีขั้วของโมเลกุลพวกเดียวกัน ทำให้เกิดการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบของโมเลกุลของกรดไขมันตลอดพื้นผิวโลหะ (ดังแสดงในรูปที่ 2-7) ซึ่งความสามารถในการดูดซับทางกายภาพนี้จะขึ้นอยู่กับขั้ว(polar)โมเลกุลของกรดไขมันชนิดนั้นๆ ด้วย

##### 2. การดูดซับทางเคมี(Chemical adsorption หรือ Chemisorption)

การดูดซับทางเคมีของกรดไขมันบนผิวโลหะนี้ เกิดจากการทำปฏิกิริยากันของกรดไขมันกับโลหะ ซึ่งจะได้สารประกอบของโลหะ หรือที่เรียกว่าออกไซด์ ยกตัวอย่างเช่น การเกิดปฏิกิริยากันของกรดสเตียริก(stearic acid) กับโลหะที่เป็นเหล็ก จะก่อให้เกิดสารประกอบของโลหะที่เรียกว่าเหล็กสเตียเรท(iron stearate) และสนิมของโลหะ หรือเหล็กออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2-8 ซึ่งจะเห็นว่าการดูดซับทางเคมีนี้จะทำให้เกิดการสร้างชั้นของสนิมโลหะซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นบางๆ(surface layer) ล้อมรอบผิวโลหะนั้นไว้

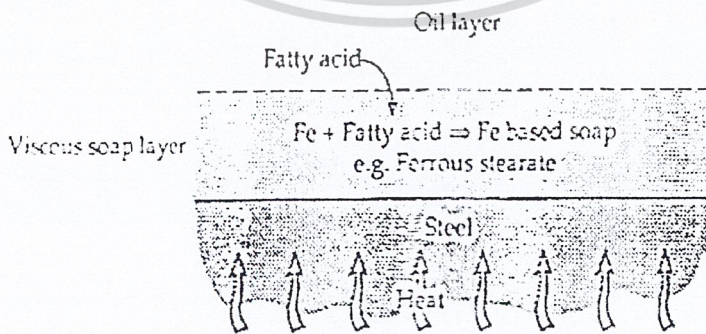


รูปที่ 2-7 การดูดซับทางกายภาพของกรดไขมันบนผิวโลหะ



รูปที่ 2-8 การดูดซับทางเคมีของกรดไขมันบนผิวโลหะ

การดูดซับทางเคมีนี้อาจจะมีการสร้างชั้นสบู่ของกรดไขมันบนผิวโลหะขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 2-9 ได้แสดงให้เห็นว่า การดูดซับทางเคมีจะมีการสร้างชั้นสบู่ของกรดไขมันบนผิวโลหะ ซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นบางๆตลอดรอบพื้นผิวของโลหะ



รูปที่ 2-9 การสร้างชั้นของสบู่ของกรดไขมันบนผิวโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.9 น้ำมันหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมาย ซึ่งถ้าแบ่งออกตามสถานะจะแบ่งออกได้เป็นสี่ชนิด คือ ก๊าซ ของเหลว สารกึ่งแข็ง (Semi - Solid) และของแข็ง ในจำนวนของสารหล่อลื่นทั้งหมดที่ใช้กัน สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กันมากที่สุด และรองลงมาคือ สารกึ่งแข็ง ซึ่ง ได้แก่ จาระบี

การที่สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากนั้น เพราะสามารถแยกผิวของวัตถุทั้งสองได้อย่างสมบูรณ์ และสามารถรับแรงกระทำได้มาก ของเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นมีน้ำ สารละลายกับน้ำ น้ำมันแร่ น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ น้ำมันสังเคราะห์ ในบรรดาสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวนี้ น้ำจะมีการใช้งานค่อนข้างจำกัด เช่น ใช้ในการหล่อลื่นแบริ่งไม้ หรือ แบริ่งยางของกังหันวิดน้ำ หรือ เครื่องสูบน้ำบางประเภท ส่วนสารละลายกับน้ำจะใช้เฉพาะในการหล่อลื่นชิ้นงานของเครื่องกลึง เครื่องเจียระไนและเครื่องไสเป็นหลัก สำหรับสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวที่ใช้กันมากที่สุดคือ น้ำมันหล่อลื่นซึ่งจะมีอยู่สองชนิดคือ น้ำมันแร่ และ น้ำมันสังเคราะห์ ส่วนน้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ ไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากมีราคาแพง

### 2.4.9.1 การผลิตน้ำมันหล่อลื่น

การผลิตน้ำมันหล่อลื่นอาจแยกออกเป็น 2 ตอน คือ

1. การผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานใน โรงกลั่น
2. การผสมน้ำมันพื้นฐานด้วยกันเอง และกับสารเคมีเพื่อให้ได้น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปที่มีความหนืดและคุณสมบัติเหมาะสมกับงานที่ใช้ตามต้องการ

#### โรงกลั่นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเป็นส่วนที่เราแยกจากหอกลั่นน้ำมันดิบ แล้วกลั่นต่อในหอ สูญญากาศ หลังจากนั้นเราทำให้น้ำมันหล่อลื่นบริสุทธิ์ และมีคุณภาพดีด้วยการแยกส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยผ่านกระบวนการต่างๆ ซึ่งอาจจะต่อเนื่องกันหรือไม่ก็ได้ ดังนี้

1. การกลั่น ในโรงงานกลั่นน้ำมันเชื้อเพลิง เราแยกเชื้อเพลิงต่างๆ ออกด้วยหอกลั่นบรรยากาศ ในโรงกลั่นน้ำมันหล่อลื่น เราเอาส่วนที่เหลือไปผ่านหอสูญญากาศ เพื่อให้ส่วนหลักๆที่เป็นน้ำมันหล่อลื่นระเหย แล้วกลั่นตัวแยกออกไป โดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าในหอกลั่นบรรยากาศ
2. การสกัดด้วยตัวทำละลาย คือการกำจัดสารพวกอะโรแมติก ด้วยตัวทำละลาย ซึ่งโดยมากใช้ฟีนอล เพื่อให้ น้ำมันมีดัชนีความหนืดสูงขึ้น สีสดใส และไม่รวมตัวกับออกซิเจนได้ง่าย
3. ไฮโดรไฟนิง คือกรรมวิธีในการเติมไฮโดรเจนเพื่อแปลงรูปโมเลกุลของสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจน, กรด และไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว ทำให้น้ำมันมีสีสวยขึ้น, สีคงตัวได้นาน, เขม่าลดลงและอายุการใช้งานยาวนานขึ้น
4. การแยกไขออก เพื่อให้มีจุดไหลเทต่ำ สามารถใช้งานในที่อุณหภูมิต่ำได้
5. การแยกแอสฟัลท์ คือการแยกแอสฟัลท์ออกจากน้ำมันหล่อลื่นส่วนหนักๆ

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์เหล่านี้ทั้งหมด ทั้งนี้แล้ว

แต่ละชนิดของน้ำมันดิบ และขึ้นกับงานที่ต้องการใช้

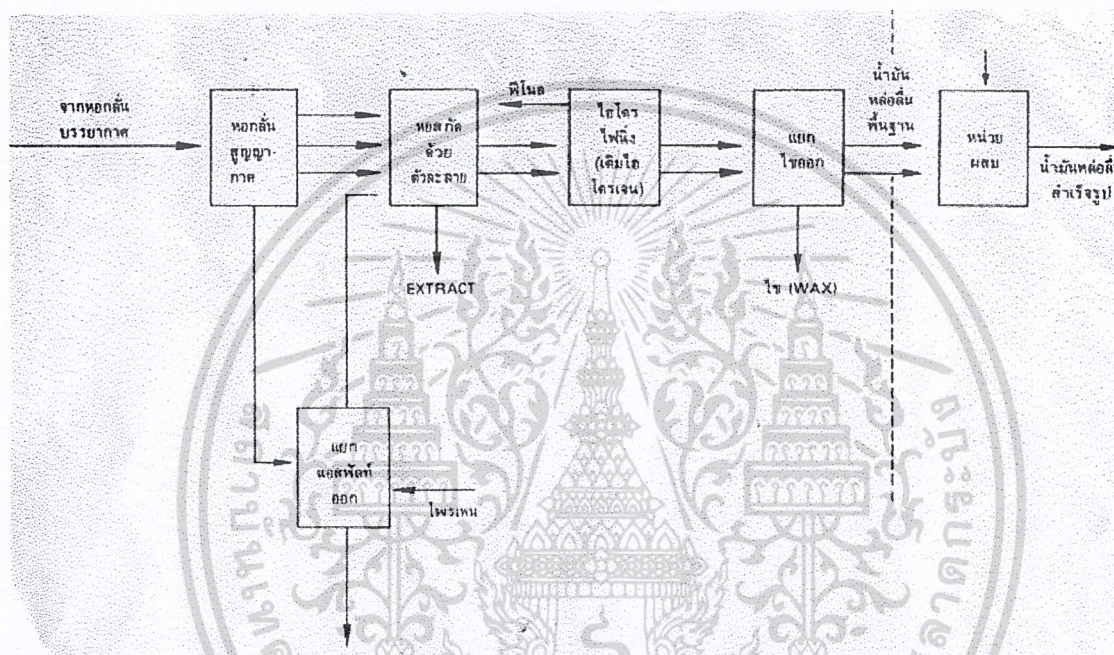
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้บริการเพื่อนำไปใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป

ขณะนี้เรายังไม่มีโรงกลั่นน้ำมันหล่อลื่นในประเทศไทย เราจึงนำมันพื้นฐานและสารเพิ่มคุณภาพจากต่างประเทศแล้วเอามาผสมกัน

การผสมและการเติมสารเพิ่มคุณภาพ น้ำมันหล่อลื่นต้องมีการผสมกัน เพื่อให้ได้ความหนืดตามต้องการและเติมสารเคมีลงไป ทำให้น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปมีคุณภาพพิเศษมากขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานต่างๆ



รูปที่ 2.10 การผลิตน้ำมันหล่อลื่น

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

### 2.4.9.2 น้ำมันหล่อลื่นสำหรับอุตสาหกรรม

เครื่องจักรกลสมัยใหม่ส่วนมากมีกำลังขับสูง หรือรับแรงกดสูง หรือมีอุณหภูมิทำงานสูง และบางกรณีก็ทำงานต่อเนื่องกันโดยไม่มีหยุด เครื่องจักรกลเหล่านี้จำเป็นต้องหล่อลื่นด้วยน้ำมันที่มีคุณภาพถูกต้อง เพื่อช่วยลดความเสียหาย ป้องกันการสึกหรอ หรือการกัดกร่อน และรักษาเครื่องจักรกลให้ทำงานได้ประสิทธิภาพดีที่สุด การใช้ผลิตภัณฑ์และการหล่อลื่นที่ถูกต้อง จะช่วยลดความถี่ในการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น ช่วยเพิ่มผลผลิต และประหยัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.9.3 การแยกประเภทน้ำมันหล่อลื่นสำหรับอุตสาหกรรม

น้ำมันหล่อลื่นน้ำมันหล่อลื่นสำหรับอุตสาหกรรม มีการแยกโดยอาศัยช่วงความหนืดหลายระบบด้วยกัน

- ASTM (American Society for Testing and Materials)
- BSI (British Standards Institution)
- AGMA (American Gear Manufacturers Association)
- DIN (Deutsche Industrie Normen)

ระบบต่างๆ เหล่านี้ ใช้หน่วยความหนืดต่างกันและวัดที่อุณหภูมิต่างๆ กัน ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Standardization Organization : ISO ) จึงได้กำหนดระบบสากลขึ้นมาสำหรับน้ำมันหล่อลื่นในงาน อุตสาหกรรม ( ISO : VG ISO Industrial Lubricant Standardization) โดยให้หน่วย Centi-stoke (cSt) วัดที่ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นมาตรฐาน และเป็นที่คาดหมายว่าต่อไปในระบบ ISO นี้จะใช้กันแพร่หลายทั่วโลก

บริษัทเอสโซ่ ฯ ได้เริ่มใช้ระบบ ISO VG กับน้ำมันหล่อลื่นสำหรับอุตสาหกรรมทั่วไป ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2519 แล้ว แต่ยังไม่สามารถใช้กับผลิตภัณฑ์พิเศษ (เช่น น้ำมันถ่ายเทความร้อน, น้ำมันหม้อแปลง, น้ำมันขาว)

#### ระบบ ISO - VG (ISO 3448-75)

- ระบบ ISO - VG (International Organization for Standardization Standardization ) เป็นความหนืดในระบบมาตรฐานสากลที่ใช้กันทั่วโลก
- ระบุความหนืดเป็นหน่วยเซ็นติสโตกส์ (cSt) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส
- เริ่มจาก 2 ถึง 1500 (cSt) (ครอบคลุมจากน้ำมัน Kerosene จนถึง Cylinder Oils)
- แต่ละเกรดจะมีค่าความหนืดอยู่ในช่วง  $\pm 10\%$  ของค่าเฉลี่ย
- ในที่นี้ใช้สำหรับน้ำมันหล่อลื่นในงานอุตสาหกรรมเท่านั้น

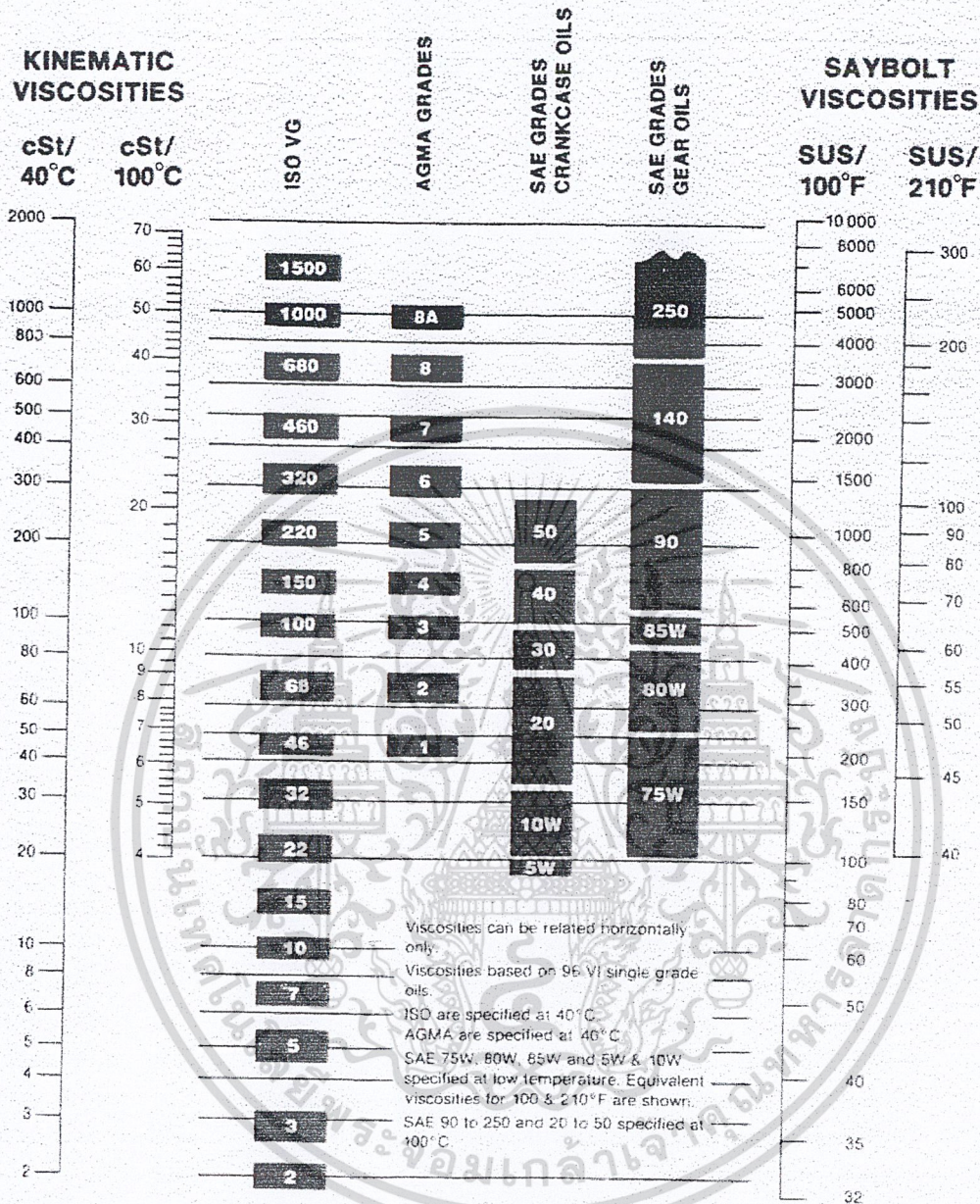
#### หมายเหตุ

เพื่อความสะดวกในการจดจำ

- ISO เบอร์ 2,3,5,7,10,15,22 เป็นเบอร์ไอ ไม่ค่อยพบในประเทศไทย
- ISO 6 เบอร์หลักคือ 10,15,22,32,46,68 ที่เหลือเป็นสิบเท่าของเบอร์หลัก
- ความหนืดของน้ำมันอุตสาหกรรมที่มักพบอยู่ระหว่าง 32- 1000

การแยกความหนืดตามระบบ ISO น้ำมันหล่อลื่นบางชนิดจะมีความหนืดสูงกว่า 1500 ได้แก่ 2200 โดยมีความหนืด 2200 (cSt) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยระหว่าง 1980-2420 (cSt) สำหรับน้ำมันที่มีความหนืดสูงๆ จะใช้สัญลักษณ์ "K" แทน 1000 เช่น 5K เท่ากับ 500 (cSt) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

## Viscosity Classification Equivalents

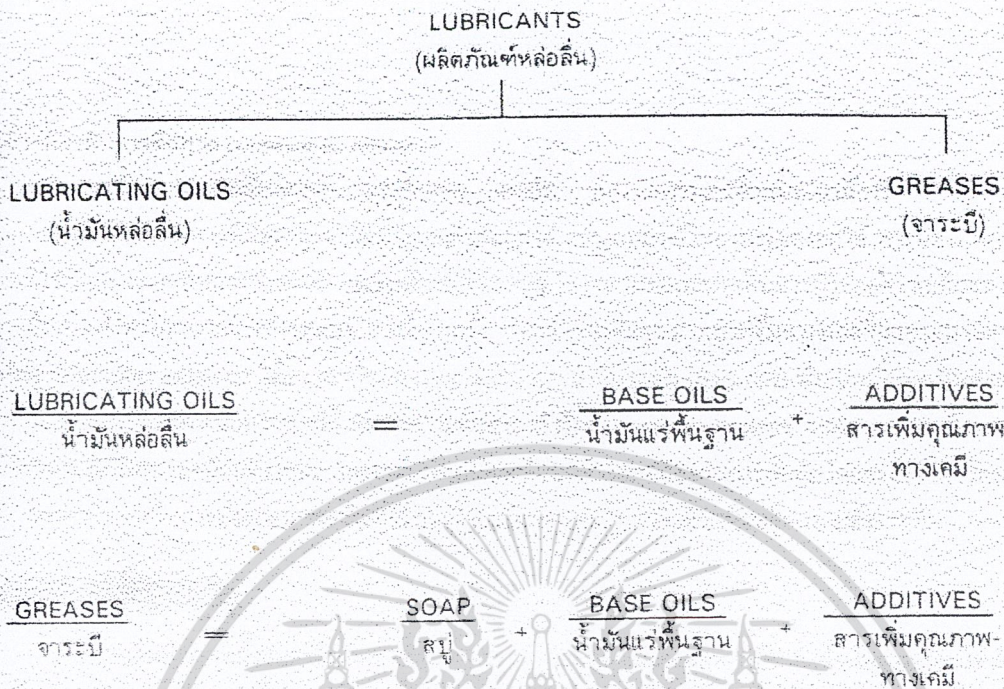


รูป 2-11 แสดงการแยกความหนืดตามระบบ ISO

ประโยชน์จากรูป 2-11 ถ้าต้องการแปลงความหนืดจากหน่วย SUS ที่อุณหภูมิ 100° F เป็นเบอร์ ISO สามารถแปลงโดยใช้สูตร

$$SUS@100^{\circ}F + 5 = cSt@40^{\circ}C$$

ตัวอย่าง น้ำมันหล่อลื่นชนิดหนึ่งมีความหนืด 350 SUS ที่ 100° F หาก 350 ด้วย 5 ได้ 70 เพราะฉะนั้น น้ำมันมีความหนืดเทียบเท่ากับเบอร์ ISO 68



รูปที่ 2-12 การผลิต ผลิตภัณฑ์หล่อลื่น

**การแบ่งประเภทน้ำมันหล่อลื่น**

1. สำหรับยานยนต์ (Automotive Lubes)
  - น้ำมันเครื่อง
  - น้ำมันเกียร์
  - น้ำมันระบบส่งกำลังไฮดรอลิก

2. สำหรับงานอุตสาหกรรม (Industrial Lubes)

แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.1 งานทั่วไป (General Industrial Lubes)

- น้ำมันเกียร์
- น้ำมันไฮดรอลิก
- น้ำมันเทอร์ไบน์
- น้ำมันเครื่องอัดลม

2.2 งานพิเศษ (Specialties)

- งานช่างโลหะ
- น้ำมันถ่ายเทความร้อน
- น้ำมันหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลึกกันสนิม
- น้ำมันขาว
- ฯลฯ

น้ำมันหล่อลื่นสำหรับยานยนต์และงานอุตสาหกรรมทั่วไป จะมีหน้าที่หลัก คือการหล่อลื่น ทาร ป้องกันสนิม ลดการสึกหรอ ถ่ายทอดกำลัง เป็นต้น ส่วนน้ำมันสำหรับงานพิเศษ เป็นน้ำมันที่ไม่ได้ทำ หน้าที่หล่อลื่น แต่จะทำหน้าที่พิเศษ เช่น การนำความร้อน เป็นฉนวนไฟฟ้าในหม้อแปลง ใช้เคลือบผิว โลหะเพื่อป้องกันสนิมหรือ ใช้ผสมเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิต (ยกเว้นงานช่างโลหะที่จัดเป็นงาน พิเศษ เนื่องจากการใช้งานต้องผสมกับน้ำ)

#### 2.4.9.4 สารป้องกันการสึกหรอ (Antiwear additive)

น้ำมันหล่อลื่นช่วยลดความเสียหายและการสึกหรอ ภายใต้สภาวะการหล่อลื่นแบบ เบาน์ดารี (Boundary Lubrication) ซึ่งก็คือสภาวะที่ฟิล์มของน้ำมันที่จะแยกผิวสัมผัสได้ อย่างสมบูรณ์ไม่สามารถ อยู่ได้ สารป้องกันการสึกหรอที่ใช้กัน แบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามความต้องการของการใช้งาน

ประเภทแรกเป็นสารที่ใช้ลดความเสียหายและการสึกหรอสำหรับสภาวะการทำงานเบาสารนี้ บางครั้งเรียกว่าสารเพิ่มคุณภาพสำหรับการหล่อลื่นแบบเบาน์ดารี ได้แก่ กรดไขมัน และ น้ำมันไขมัน

ประเภทที่สองเป็นสารที่ใช้ลดความเสียหายและการสึกหรอภายใต้ สภาวะความดันสูงมาก เรียกว่า Extreme Pressure Additive : EP ซึ่งจะทำหน้าที่ทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวโลหะ โดยจะเกิดเป็นฟิล์ม เคลือบที่ผิวโลหะป้องกันการสัมผัสโดยตรงของผิวโลหะ สาร EP โดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบของ ซัลเฟอร์ คลอรีน ฟอสฟอรัส คิวโคตัวหนึ่งหรือหลายตัวรวมกัน

#### 2.4.9.5 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นประเภทน้ำมันแร่มีหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติต่างกัน ดังนั้นในการ เลือกใช้จึงจำเป็นที่จะต้องรู้ถึงคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น และในการผลิตก็จะต้องมีการควบคุมคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น ให้ได้ตามต้องการ สำหรับคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่สำคัญ ทั้งคุณสมบัติ ทางด้านฟอลติกส์และเคมี มีดังต่อไปนี้

##### 2.4.9.5.1 ความหนืด (Viscosity)

เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิด ฟิล์มของน้ำมัน หล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัส และมีผลต่อการเกิดความร้อนขึ้นในระหว่างผิวสัมผัสที่มีการหล่อลื่นด้วยน้ำมัน ความหนืด หมายถึงความข้นหรือความใสของน้ำมัน เป็นคุณสมบัติของของไหลซึ่งวัดในรูปความต้านทาน ในการไหล

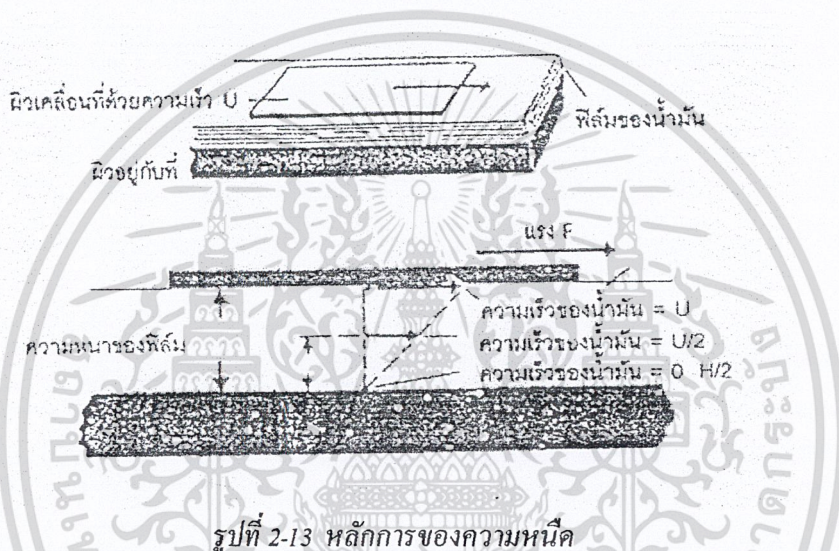
หลักการของความหนืดแสดงในรูปที่ 2-13 ประกอบด้วยแผ่นของวัตถุถูกดึงไปบนฟิล์มของ น้ำมันด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ฟิล์มของน้ำมันติดอยู่กับผิววัตถุที่เคลื่อนที่และอยู่กับที่ ซึ่งเมื่อพิจารณา ให้น้ำมันประกอบขึ้นด้วยหลายๆ ชั้น ชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่เคลื่อนที่ก็เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเดียวกับ ผิวที่เคลื่อนที่ (U) ส่วนชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่อยู่กับที่ ก็จะมีความเร็วเป็นศูนย์ชั้นน้ำมันที่อยู่ระหว่างชั้น บนสุดและชั้นล่างสุดก็จะถูกดึงไปด้วยชั้นน้ำมันที่อยู่ด้านบน ถัดไปให้มีความเร็วส่วนหนึ่งของความเร็ว U ซึ่งความเร็วของแต่ละชั้นน้ำมันดังกล่าวจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับ ระยะจากผิววัตถุที่อยู่กับที่ แรง (F)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ต้องใช้ในการดึงผิววัตถุอันบนเคลื่อนที่ไปนี้ก็คือ แรงที่ต้องเอาชนะความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นน้ำมันนั่นเอง และเนื่องจากแรงนี้เป็นผลมาจากความหนืด โดยแรงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนืด ดังนั้นความหนืดสามารถ ได้จากการวัดแรงที่ต้องให้เพื่อเอาชนะความเสียดทานของน้ำมัน ความหนืดที่หาได้ในที่นี้เรียกว่า ความหนืดสัมบูรณ์ (absolute viscosity) หรือเป็นความหนืดเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Viscosity) หน่วยความหนืดเชิงพลศาสตร์ที่นิยมใช้กันก็คือ หน่วยเป็น Poise (P) ซึ่งเป็นหน่วยในระบบ CGS (Centimetre Gram Second) โดย

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

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



แต่ค่าของความหนืดเชิงพลศาสตร์ของน้ำมันหล่อลื่นค่อนข้างกว้าง คือมีค่าอยู่ในช่วง 2 ถึง 400 cP และโดยทั่วไปเครื่องมือวัดความหนืดจะไม่สามารถวัดค่าความหนืดเชิงพลศาสตร์ได้โดยตรง ดังนี้ จึงได้มีการกำหนด ค่าความหนืดในอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเรียกว่า ความหนืดเชิงจลศาสตร์ (kinematic Viscosity) โดยให้ความหนืดเชิงจลศาสตร์ เท่ากับ ความหนืดเชิงพลศาสตร์ หารด้วยความหนาแน่นของน้ำมันหรือของไหลนั้นๆ ซึ่งเขียนเป็นสมการคือ

$$V = \frac{\eta}{P}$$

$$V = \text{ความหนืดเชิงจลศาสตร์}$$

$$N = \text{ความหนืดเชิงพลศาสตร์}$$

$$P = \text{ความหนาแน่น}$$

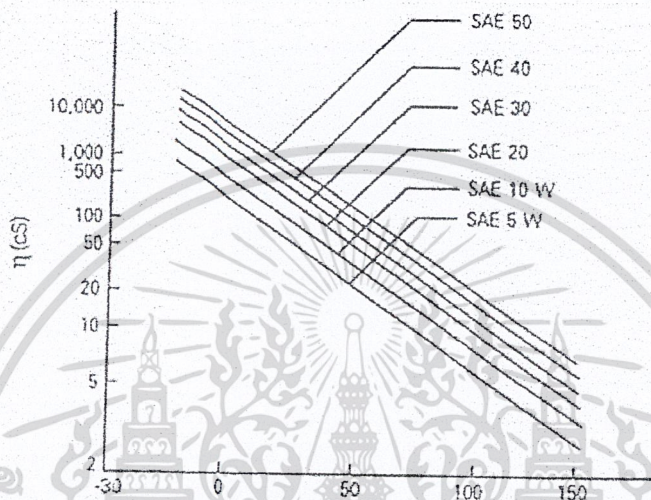
หน่วยความหนืดเชิงจลศาสตร์ที่นิยมใช้กันก็คือหน่วย Stoke (St) ซึ่งเป็นหนึ่งในระบบ CGS เช่นเดียวกัน โดย

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากหน่วยของความหนืดที่ใช้กันข้างต้นแล้ว ยังมีการวัดความหนืดในหน่วยอื่นอีกได้แก่ Saybolt Universal Seconds (SUS), Saybol Furlo Seconds (SFS) , Redwood Seconds และ Engler degree ซึ่งความหนืดในหน่วยเหล่านี้กำหนดขึ้นตามชนิดของเครื่องมือที่ใช้วัดความหนืด (Viscometer) และสภาวะการทดสอบ (อุณหภูมิ ของการทดสอบ) แต่อย่างไรก็ตามค่าความหนืดในหน่วยต่างๆ ข้างต้นก็สามารถที่จะแปลงเป็นค่าในหน่วยความหนืดเชิงพลศาสตร์ได้



รูปที่ 2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นบางชนิด

ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะไม่คงที่ แต่จะแปรผันตามสภาวะการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะแปรผันกับอุณหภูมิและความดันในการใช้งาน ในด้านของอุณหภูมิความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมัน ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ของเหลวจะขยายตัว โมเลกุลของน้ำมันจะเคลื่อนออกห่างกัน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ลดลง และเป็นผลให้ความหนืดลดลงด้วย รูปที่ 2-14 เป็นกราฟแสดงถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดเชิงพลศาสตร์ ของน้ำมันหล่อลื่น และเนื่องจากความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงมีน้อยมากกับอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดเชิงพลศาสตร์ได้ด้วย นอกจากนี้แสดงด้วยกราฟแล้วผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดก็ยังสามารถแสดงได้ด้วยสมการ แต่เป็นเพียงสมการโดยประมาณเท่านั้น คือ

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

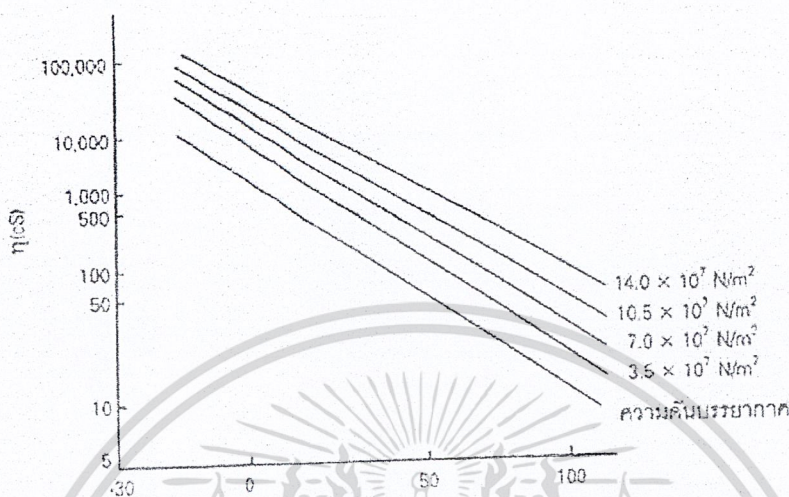
$$\eta = \text{ความหนืดเชิงพลศาสตร์}$$

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

$$T = \text{อุณหภูมิสัมบูรณ์}$$

สำหรับผลของความดันต่อความหนืดนั้น จะเห็นได้ชัดเจนก็ต่อเมื่อความดันสูงเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งเมื่อความดันของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น โมเลกุลของน้ำมันก็จะถูกบีบให้เข้าใกล้กัน ทำให้แรงยึดติดระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น และเป็นผลให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นด้วย รูปที่ 2-15 แสดงถึงผล

ของความดันที่มีต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ซึ่งความหนืดจะเปลี่ยนแปลงจนเห็นได้ชัดเมื่อความดันเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ  $2 \times 10^7 \text{ N/m}^2$  (Pascal)



รูปที่ 2-15 ผลของความดันที่มีต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40

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

$$\begin{aligned} n &= n_0 e^{cP} \\ n &= \text{ความหนืดเชิงพลศาสตร์ที่ความดัน } P \\ n_0 &= \text{ความหนืดเชิงพลศาสตร์ที่ความดันบรรยากาศ} \\ P &= \text{ความดันน้ำมันหล่อลื่น} \\ n_u &= \text{สัมประสิทธิ์ของความดันกับความหนืด} \\ c &= 2.71828 \end{aligned}$$

#### 2.4.9.5.2 ดัชนีความหนืด (Viscosity Index)

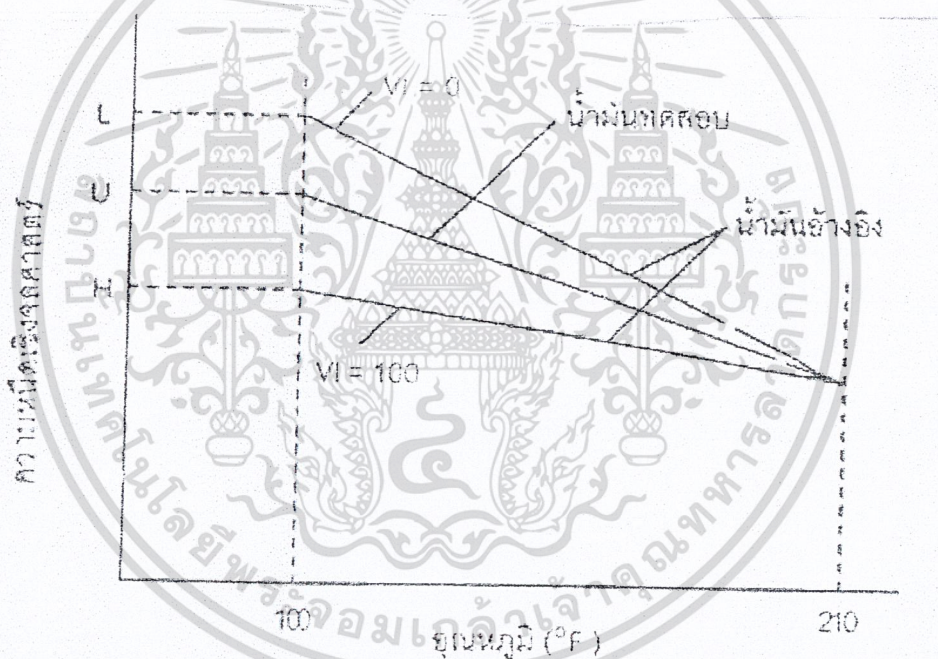
น้ำมันหล่อลื่นต่างชนิดกันจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดอันเนื่องมาจากอุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดดัชนีความหนืดขึ้นมาเพื่อใช้แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดอันเนื่องมาจากอุณหภูมิโดยใช้การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น ที่หาดัชนีความหนืดกับน้ำมันหล่อลื่นที่เลือกสองชนิด เช่น น้ำมันหล่อลื่น Gulf Coast ซึ่งความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิมาก ให้มีดัชนีความหนืดเท่ากับ 0 และ น้ำมันหล่อลื่น Pennsylvanian ซึ่งความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิให้มีดัชนีความหนืดเท่ากับ 100

อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนืดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน

- น้ำมันที่มีดัชนีความหนืดสูงจะเปลี่ยนแปลงความหนืดน้อยเมื่ออุณหภูมิใช้งานเปลี่ยนไป ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีในการหล่อลื่น
- น้ำมันที่มีดัชนีความหนืดสูงสามารถใช้งานได้ดีในช่วงอุณหภูมิกว้าง
- น้ำมันที่มีดัชนีความหนืดต่ำ ในขณะที่อุณหภูมิค่าน้ำมันมักมีความหนืดสูง ชิ้นส่วนเครื่องจักรเคลื่อนไหวลำบาก แต่พอใช้งานสักพักหนึ่งอุณหภูมิสูงขึ้น ความหนืดกลับลดต่ำลงมากทำให้เครื่องจักรสึกหรอ

การหาดัชนีความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นกระทำโดยการหาความหนืดเชิงจลศาสตร์ของน้ำมันหล่อลื่น ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 100 °F 120 °C แล้วหาค่าดัชนีความหนืดตามสมการคือ

VI = ดัชนีความหนืด (Viscosity Index)  
ค่า L, U และ H ให้ดูตามรูปที่ 2-17



รูปที่2-16 การหาค่าดัชนีความหนืด

การรวมตัวกับออกซิเจน

น้ำมันปิโตรเลียมสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศทำให้เกิดเป็นสารประเภทกรดราบริน เหนียว แลคเกอร์ ซึ่งไม่ช่วยในการหล่อลื่น

- น้ำมันหล่อลื่นที่ดีต้องรวมตัวกับออกซิเจนได้ยาก หรือรวมตัวได้ช้า
- ภายใต้อุณหภูมิการใช้งานสูง อัตราการรวมตัวกับออกซิเจนจะเพิ่มมากขึ้น
- ตรวจสอบการรวมตัวกับออกซิเจน ได้โดยวัดค่า Neutralization , Pentane Isolubles, Toluene Isolubles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.5.9.3 กากคาร์บอน (Carbon Residue)

หมายถึงสิ่งตกค้างอยู่เป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายหลังจากเผาไหม้ น้ำมันหล่อลื่นในสถานะที่กำหนดปริมาณคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นจะไม่ค่อยมีความสำคัญนัก สำหรับการใช้งาน เนื่องจากจะไม่มีคาร์บอนโดยตรงของน้ำมันหล่อลื่นในการนำไปใช้งาน แต่ปริมาณกากคาร์บอนจะมีความสำคัญสำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงเพราะจะมีการเผาไหม้โดยตรง ดังนั้น การหาปริมาณกากคาร์บอน ในน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจึงเป็นการหาสำหรับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเพื่อดูว่าขบวนการผลิตเป็นไปตามกำหนดหรือไม่

### 2.4.5.9.4 สี (COLOR)

สีของน้ำมันหล่อลื่นที่เห็นเมื่อมีแสงผ่านนั้นจะมีสีต่างๆ กัน ตั้งแต่ใสมาก จนถึงดำ ซึ่งอาจมีสีเหลือง แดง และน้ำตาล เป็นต้น ความแตกต่างกันของสีของน้ำมันหล่อลื่น เป็นผลมาจากชนิดของน้ำมันดิบ ที่นำมาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นแตกต่างกัน ทั้งวิธีการกลั่น วิธีการผลิต จำนวน และชนิดของสารเพิ่มคุณภาพ ดังนั้น สีของน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปจึงไม่มีความสำคัญนักในด้านการใช้งาน ยกเว้นกรณีที่เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา

### 2.4.9.5.5 ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (Density and Gravity)

ความหนาแน่นหมายถึงมวลของสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิมาตรฐานที่กำหนด ส่วนความถ่วงจำเพาะ (ความหนาแน่นสัมพัทธ์) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของน้ำมันและความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน ในสหรัฐอเมริกานิยมกำหนดค่าความถ่วงจำเพาะในรูปของหน่วยองศา API (American Petroleum Institute) ซึ่งหาค่าได้จากสมการ

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

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าเมื่อค่าองศา API เพิ่มขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะจะลดลง ค่าความถ่วงจำเพาะนี้จะเป็นตัวช่วยในการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้แล้ว และถ้ามีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นก็อาจแสดงว่ามีสิ่งแปลกปลอม เช่น เม้า หรือสารที่เกิดจากการรวมตัวกับออกซิเจนผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่น

### 2.4.5.9.6 จุดวาบไฟและจุดติดไฟ(Flash and Fire Points)

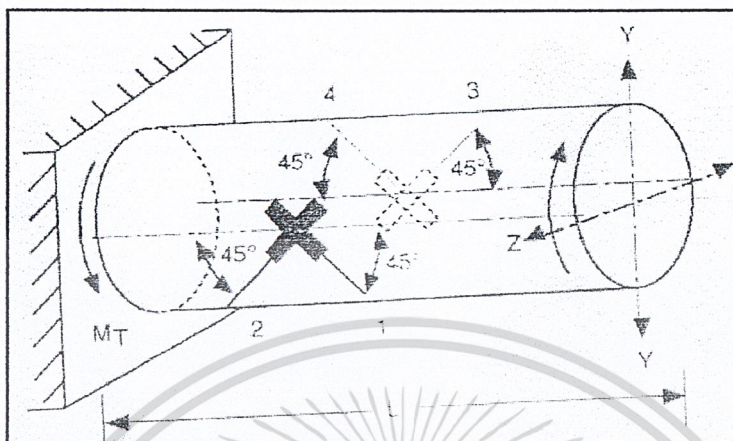
หมายถึงอุณหภูมิที่น้ำมันระเหยกลายเป็นไอ เพียงพอที่ผิวและสามารถลุกไหม้ได้เมื่อโดนเปลวไฟ แต่ที่อุณหภูมินี้การระเหยกลายเป็นไอจะไม่เพียงพอที่จะ ทำให้การลุกไหม้คงอยู่ต่อไป เปลวไฟจึงดับลงเองทันที แต่หากมีการให้ความร้อนแก่น้ำมันต่อไปอีก อุณหภูมิ ก็จะสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่การระเหยกลายเป็นไอเพียงพอที่จะทำให้เกิดลุกไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง อุณหภูมินี้เรียกว่า จุดติดไฟ จุดวาบไฟของน้ำมันหล่อลื่นใหม่จะแปรผกผันกับความหนืด โดยน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดสูงก็จะมีจุดวาบไฟสูงด้วย นอกจากนี้ชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานก็มีผลต่อจุดวาบไฟด้วย

จุดวาบไฟ และจุดติดไฟของน้ำมันจะใช้ในการควบคุมการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและใช้ในการพิจารณาในด้านความปลอดภัยในการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ทฤษฎีการบิดของเพล

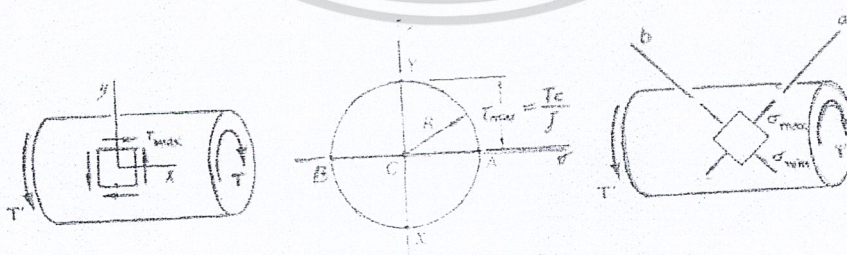
2.5.1 การบิดของเพล



รูปที่ 2-17 ลักษณะการติดตั้ง Strain Gauge บนเพล

จากลักษณะของแรงที่มีแต่การบิด ดังรูปซ้ายมือ เราจะได้  $\sigma_x = \sigma_y = 0$  และ  $\tau_{xy} = \tau_{max} = Tc/J$  หากนำผลไป Plot ลงในวงกลมโมร์จะได้ผลดังรูปกลาง คือในตำแหน่งของ X และ Y ทำมุม  $2\theta_p = 90$  องศา กับแกนความเค้นหลัก ( $\sigma$ )

นั่นคือ ระนาบที่เกิดขึ้น  $\sigma_{max}, \sigma_{min}$  คือระนาบที่ทำมุม  $\theta_p = 45$  องศา กับแกน X ซึ่งถ้าพิจารณา ดังรูปขวามือ ความเค้นในแนว a และ b ซึ่งอยู่บนระนาบทำมุม 45 และ -45 องศา กับแกนเพลจะเกิด  $\sigma_{max}, \sigma_{min}$  ตามลำดับ ซึ่งเป็นตำแหน่ง A และ B บนวงกลมโมร์นั่นเอง เห็นได้ว่าค่าของ  $\sigma_{max} = -\sigma_{min}$



รูปที่ 2-18 วงกลมโมร์สำหรับกรณีการบิด

ความเครียดที่เกิดขึ้นบนตัว Strain Gauge แต่ละตัว สามารถหาได้โดยแทนค่าลงในสมการความสัมพันธ์ของ  $\epsilon(\theta)$ ,  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_{xy}$  และ  $\gamma_{xy}$  โดยจาก

$$\epsilon(\theta) = \epsilon_x \cos^2 \theta + \epsilon_y \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (2.5)$$

$$\epsilon_1 = \epsilon(45^\circ) = (\epsilon_x + \epsilon_y)/2 + \gamma_{xy}/2 \quad (2.6)$$

$$\epsilon_2 = \epsilon(-45^\circ) = (\epsilon_x + \epsilon_y)/2 - \gamma_{xy}/2 \quad (2.7)$$

เนื่องจากไม่มีการยืดในแนวแกน X และ Y ค่าของ  $\epsilon_x = \epsilon_y = 0$  และจากความสัมพันธ์  $\epsilon_1 = -\epsilon_2$  เราจะแทนค่าของ  $\epsilon_1$  ด้วย  $\epsilon$  และ  $\epsilon_2$  ด้วย  $-\epsilon$  เมื่อนำสมการที่ (2.4) ลบด้วยสมการที่ (2.5) จะได้

$$\epsilon_1 - \epsilon_2 = 2\epsilon = \gamma_{xy} \quad (2.8)$$

### 2.5.2 การคำนวณ Torque (T) ที่เกิดขึ้นบนเพลลา

Torque (T) มีความสัมพันธ์กับความเค้นเฉือนที่ผิวนอกของเพลลา ( $\tau_{xy}$ ) รัศมี R ดังนี้คือ

$$T = \tau_{xy} J / R \quad (2.9)$$

โดยมีค่า Polar moment of inertia (J) ของเพลลากลมตันคือ

$$J = \pi R^4 / 2 \quad (2.10)$$

จาก Hook's law สำหรับความเค้นและความเครียดเฉือน

$$\begin{aligned} \tau &= G\gamma \\ \tau_{xy} &= G\gamma_{xy} \end{aligned} \quad (2.11)$$

แทนค่าจากสมการ ที่ (2.6) และ (2.8) ลงในสมการที่ (2.7) ได้

$$T = G(2\epsilon)J/R$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = GE\pi R^4 / R$$

$$T = GE\pi R^3 \quad (2.12)$$

### 2.5.3 Strain gauge

Strain gauge มีหลักการบนพื้นฐานที่ว่า ถ้าตัวนำไฟฟ้าถูกทำให้ยืดตัวหรืออัดตัว ค่าความต้านทานของมันจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เนื่องจากความยาว พื้นที่หน้าตัดหรือพิกัดความต้านทาน(Resistivity) เปลี่ยนแปลง โดยจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$R = \rho L / A \quad (2.13)$$

Strain gauge ที่ใช้กันในปัจจุบันนี้มีอยู่ 3 ประเภท คือ

- Unbonded strain gauge
- Bonded foil strain gauge
- Semiconductor strain gauge

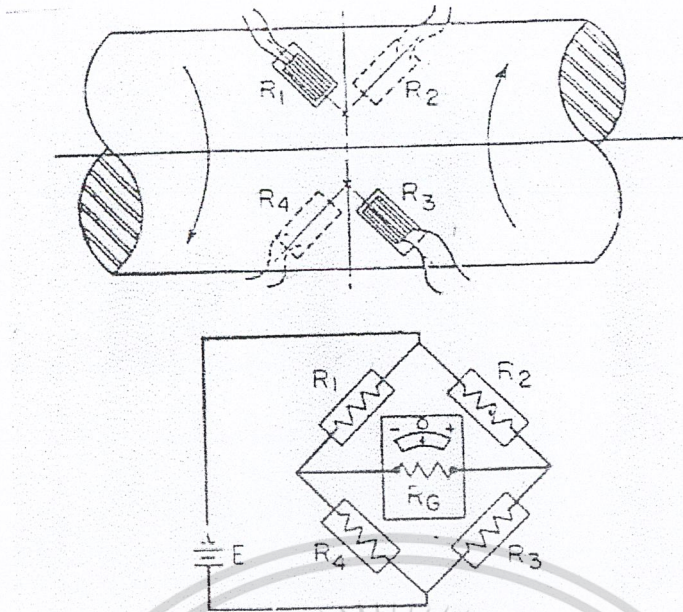
### 2.5.4 Gauge factor

Gauge factor หรือ GF ของ Strain gauge คือ การวัดความเปลี่ยนแปลงของความต้านทานกับความเครียด เป็นเครื่องชี้ความไวของ Gauge

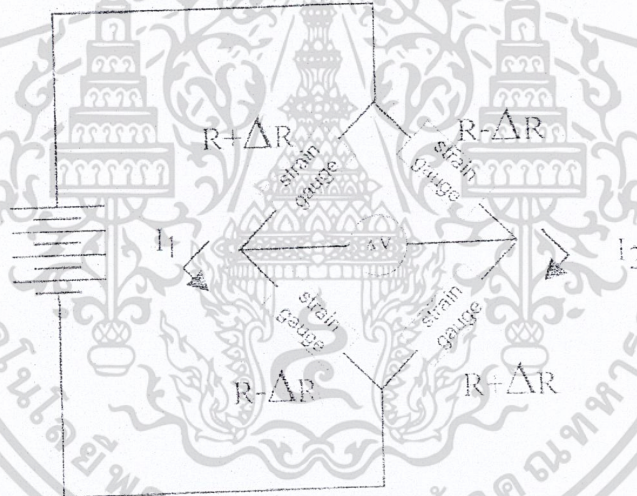
$$GF = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} \quad (2.14)$$

### 2.5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain (E) ที่เกิดขึ้นกับ Output ของวงจรวัด

ในการวัดเราใช้ Strain gauge ติดตั้งอยู่ในวงจร Bridge ดังรูปที่ 2-19



รูปที่ 2-19 วงจร Bridge



รูปที่ 2-20 ภาพประกอบการคำนวณวงจร Bridge

จากรูปที่ 2.20 เราสามารถคำนวณหาค่า  $\Delta V$  เมื่อออกแบบให้ติดตั้ง Strain gauge 4 ตัว โดยวิธีทาง Circuit ได้ดังนี้

$$I_1 = I_2 = \frac{V}{(R - \Delta R) + (R + \Delta R)} = I$$

$$\Delta V = I(R + \Delta R) - I(R - \Delta R)$$

$$V = V \Delta R / R$$

(2.15)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

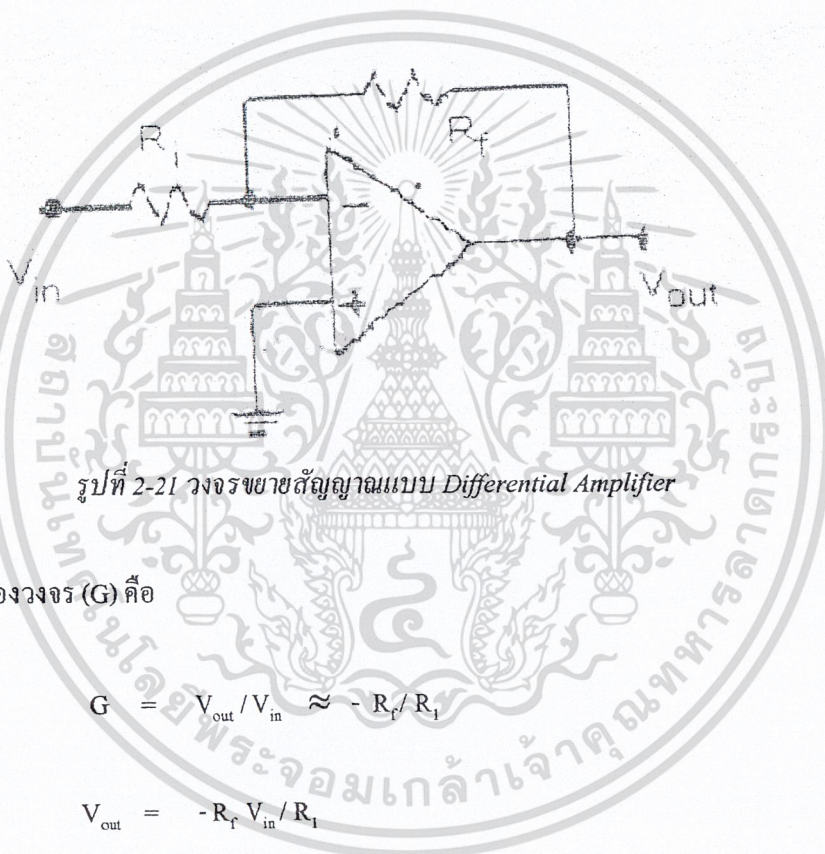
กลายเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Output ( $\Delta V$ ) กับ Strain ( $\epsilon$ ) ที่เกิดขึ้นดังนี้คือ

$$\Delta V = GF \cdot \epsilon \cdot V \quad (2.16)$$

### 2.5.6 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier)

เครื่องขยายสัญญาณ ทำหน้าที่ขยายสัญญาณเพื่อเพิ่มระดับสัญญาณต่ำจาก Strain gauge ให้มีระดับสัญญาณเพียงพอที่จะอ่านได้จากเครื่องมือวัด วงจรขยายใช้ออปแอมป์ในการต่อวงจร

วงจรขยายสัญญาณแบบ Differential Amplifier



อัตราขยายของวงจร (G) คือ

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} \approx -R_f/R_1 \quad (2.17)$$

$$V_{out} = -R_f V_{in}/R_1 \quad (2.18)$$

## บทที่ 3

### การออกแบบและการสร้างเครื่องทดสอบ

#### 3.1 การคำนวณชิ้นส่วนของเครื่องทดสอบ

##### 3.1.1 มอเตอร์

เนื่องจากใช้มอเตอร์เป็นตัวส่งกำลังในการขับเคลื่อนชุดงานทดสอบ ซึ่งการทดสอบใช้ความเร็วรอบที่ 1500 รอบต่อนาที น้ำหนักที่ใช้ทดสอบสูงสุด 10 กิโลกรัม โดยสมมุติค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ( $\mu$ ) เท่ากับ 0.5 และรัศมีการกดสูงสุด 75 มิลลิเมตร

จากสมการพื้นฐาน

$$T = \mu NR$$

จะได้ 
$$T = (0.5)(10)(9.81)(0.075)$$

$$= 3.68 \text{ นิวตันเมตร}$$

จากสมการ

$$P = 2\pi nT / 60$$

$$= (2\pi)(1500)(3.68) / 60$$

$$= 578 \text{ วัตต์}$$

เนื่องจาก 746 วัตต์เท่ากับ 1 แรงม้า เพราะฉะนั้นกำลังของมอเตอร์ที่ใช้เท่ากับ 0.775 แรงม้าแต่เนื่องจากการออกแบบยังไม่ได้คิดค่าความปลอดภัยผู้ออกแบบจึงเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าในการสร้างเครื่องทดสอบ

##### 3.1.2 เพลาส่งกำลัง

เนื่องจากเพลาส่งกำลังเป็นเหล็กกล้าตามท้องตลาดจึงสมมุติว่าเป็น เหล็กกล้าคาร์บอน (carbon Steel) และต้องมีการเจาะรูให้มีลักษณะเป็นเพลาลวง เพื่อที่จะส่งแรงบิดให้ได้มากที่สุดเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการติดตั้ง Strian gauge ทำให้สามารถอ่านค่าสัญญาณได้ง่าย จึงเลือกทดลองใช้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเพลาท่ากับ 17.5 มิลลิเมตร และจากเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 20 มิลลิเมตร แรงบิดเท่ากับ 3.68 นิวตันเมตร

จากสูตรพื้นฐาน

$$T_d = 16TD / \pi (D^4 - d^4)$$

$$= (16)(3.68)(1000) / \pi (20^4 - 17.5^4)$$

$$= 0.28 \text{ นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร}$$

จากตารางที่ ข.2 [6]

$$\sigma_y = 76 \text{ Ksi}$$

$$= 76 \times 6.895$$

$$= 524 \text{ นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร}$$


จากความต้านแรงเฉือนคราก  $\tau_y = 0.6\sigma_y$

$$= 0.6 \times 524 = 157.20 \text{ นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร}$$

เนื่องจากค่าความเค้นเฉือนออกแบบมีค่าน้อยกว่าค่าแรงเฉือนครากมาก ๆ จึงสามารถออกแบบเพลากลวงเส้นผ่านกลาง 17.5 มิลลิเมตรได้

### 3.1.3 คัปปลิ่ง

เนื่องจากคัปปลิ่งเป็นตัวถ่ายทอดกำลังจากมอเตอร์ไปยังเพลลา จึงออกแบบเลือกใช้คัปปลิ่งสำเร็จรูป super flex coupling เป็นข้อต่อเพลลาาง ที่สะดวกต่อการใช้งาน โดยมีข้อ 2 ข้าง และยางยึดหยุ่น 1 ชั้น ทำให้แรงบิดในตอนที่มอเตอร์เริ่มหมุนมีขนาดเล็ก อีกทั้งยังสะดวกต่อการตั้งศูนย์ และสามารถถอดประกอบได้ง่าย โดยสามารถเลือกใช้ได้จาก Catalog ของตัวแทนจำหน่ายได้เลย จึงเลือกใช้ขนาด AL-071 ดังรูป 3-1



D	L	L1	L2
18.1	210.5	6.5	7.5
27	232.2	13.5	12.2
35	253.9	18.5	12.4
45	274.4	21	12.4

SIZE	TORQUE kg.m	MAX. N
DL-085	0.05	5000
AL-050	0.15	2500
AL-070	0.3	3600
AL-075	0.5	2600

รูปที่ 3-1 การเลือกขนาดคัปปลิ่ง

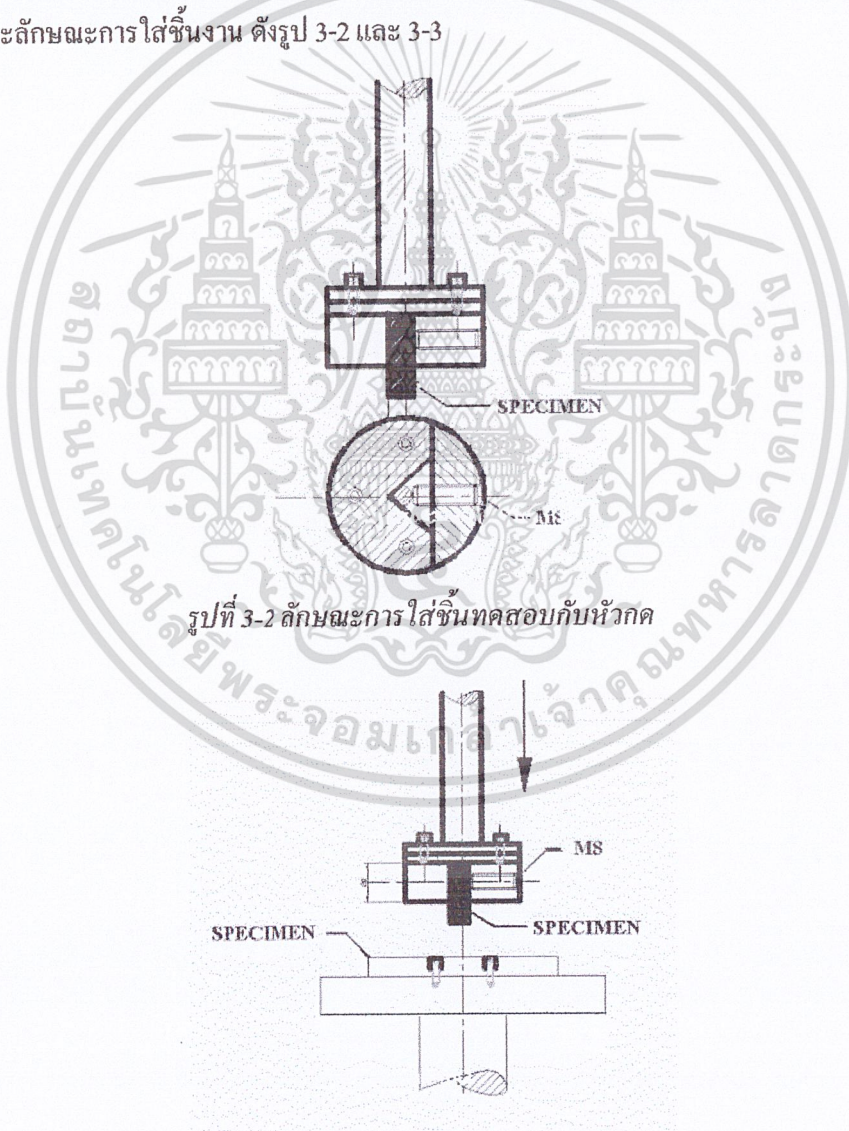
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 การออกแบบเครื่องทดสอบ

#### 3.1.1 การออกแบบโดยทั่วไป

เป็นการออกแบบลักษณะโดยรวมของเครื่อง ซึ่งจะออกแบบถึงลักษณะรูปร่างหน้าตาของเครื่องทดสอบ หน้าที่การทำงานของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องทดสอบ ซึ่งสามารถเคลื่อนที่และใช้งานตามจุดประสงค์ของชิ้นส่วนแต่ละชิ้น ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัย และอีกประการก็เพื่อที่จะให้เครื่องทดสอบมีความเที่ยงตรงเพื่อที่จะให้ผลการทดลองที่มีความแม่นยำเป็นที่ยอมรับได้ ซึ่งส่วนประกอบต่าง ๆ ได้แก่ โครงสร้างตัวเครื่อง ชุดงานทดสอบ ชุดหัวจับชิ้นทดสอบ ชุดทำความร้อน

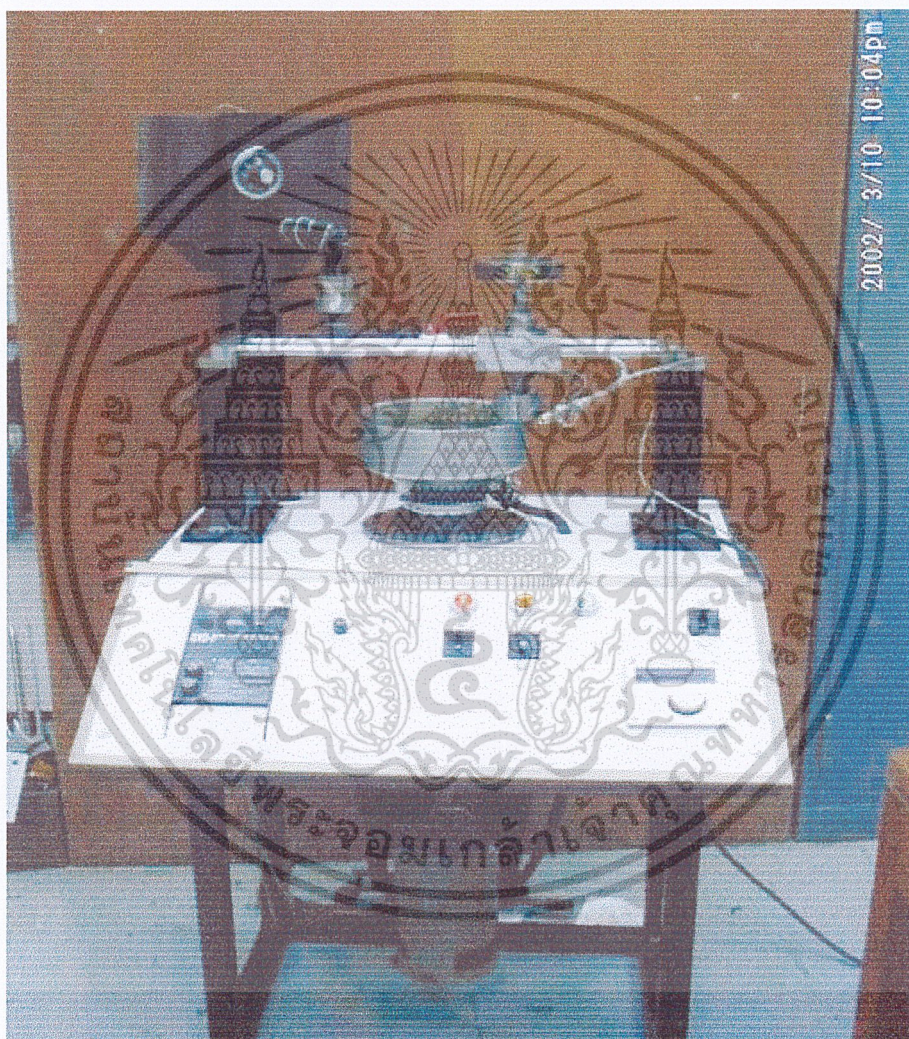
การออกแบบเครื่องทดสอบเริ่มต้นจากการเขียนแบบ โดยวางแบบให้เหมาะสมมีขนาดสัดส่วนที่พอเหมาะ และมีการอ้างอิงจากตัวอย่างของเครื่องทดสอบจริงที่ใช้งานอยู่ ดังรูปแสดงถึงตัวอย่างการออกแบบการทดสอบ และลักษณะการใส่ชิ้นงาน ดังรูป 3-2 และ 3-3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 การสร้างเครื่องทดสอบ

หลังจากได้มีการเขียนแบบเป็นที่เรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อไปก็คือการลงมือสร้างเครื่องทดสอบให้มีลักษณะตามที่ได้กำหนดไว้ เริ่มตั้งแต่การแปรรูปวัสดุเช่น สร้าง โครงของโต๊ะ การกลึงงานตามแบบให้ได้ขนาดตามแบบ การหาซื้ออุปกรณ์ตามท้องตลาดไม่ว่าจะเป็น มอเตอร์ ตัววัดอุณหภูมิ คัปปลิ่ง ฯลฯ แล้วนำมาประกอบรวมกันจนสำเร็จเป็นเครื่องทดสอบ



รูปที่ 3-4 แสดงเครื่องทดสอบ ฟินออนดิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

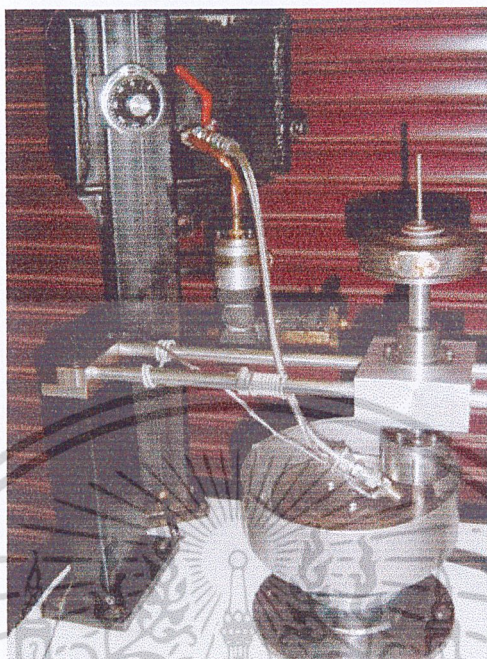


รูปที่ 3-5 ชุดหัวกดทดสอบและงานทดสอบ



รูปที่ 3-6 หัวจับยึดชิ้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-7 ชุดทำความร้อน



รูปที่ 3-8 การใช้งานของชิ้นส่วนต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ทำการทดลอง 2 แบบคือ

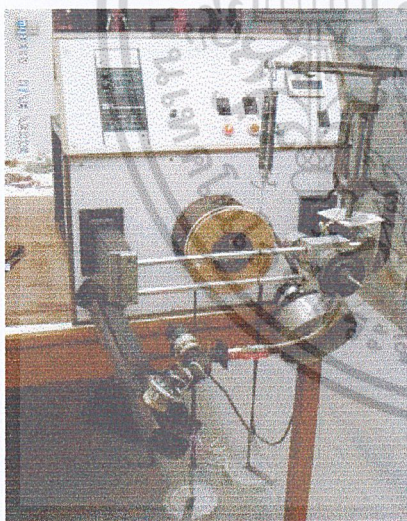
1. การทดลองแบบ Dry
2. การทดลองแบบ Lubrication อุณหภูมิของการทดสอบมีดังนี้

- สารหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิห้อง
- สารหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
- น้ำมันถั่วเหลือง
- น้ำมันถั่วเหลืองผสมแกรไฟต์

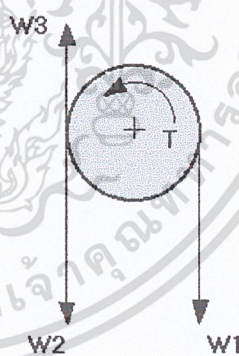
(วัสดุที่ใช้ทดสอบคือเหล็ก ความเร็วรอบการทดสอบ 1000 รอบต่อนาที น้ำหนักกด 1 กิโลกรัม: ยังไม่รวมน้ำหนักชุดหัวกด)

#### 4.1 ขั้นตอนการทดลอง

1.ทำการเปรียบเทียบเครื่องทดสอบ ( calibration ) เพื่อหาค่าแรงบิดในสถานะโหลดต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับค่า output ที่ได้จากชุด strain gauge ซึ่งติดตั้งกับเพลา แล้วนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด T กับค่า out put ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์ (mV)



รูปที่ 4-1 การ calibration เครื่องทดสอบ



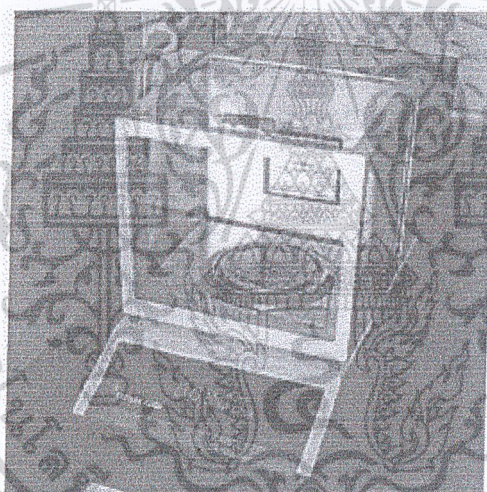
รูป 4-2 ทฤษฎีในการวัดแรงบิด

2. ทำการวัดค่าชิ้นทดสอบเพื่อนำมาทดสอบด้วยเครื่องชั่ง Analytical Balance ซึ่งมีความละเอียดถึง 1 ใน 10000 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



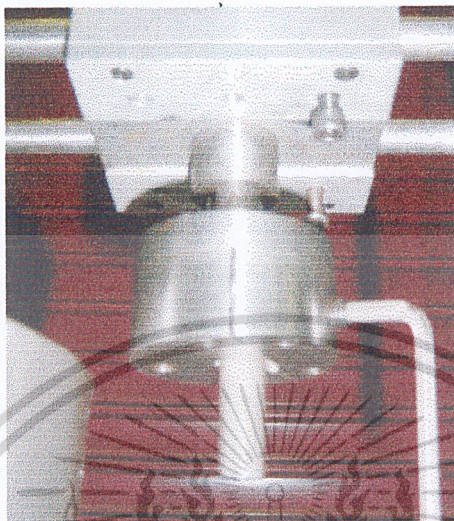
รูปที่ 4-3 แท่งทดสอบและงานทดสอบ



รูปที่ 4-4 เครื่องชั่งมวลแบบ Analytical Balance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใส่แท่งทดสอบในชุดหัวจับยึดด้วยน็อตให้แน่น ดังแสดงในรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 การใส่แท่งทดสอบเข้ากับหัวจับ

4. ใส่งานทดสอบลงบนตัวเครื่องทดสอบ โดยวางบนจานพาแล้วขันยึดด้วยน็อตให้แน่น



รูปที่ 4-6 การใส่งานทดสอบ

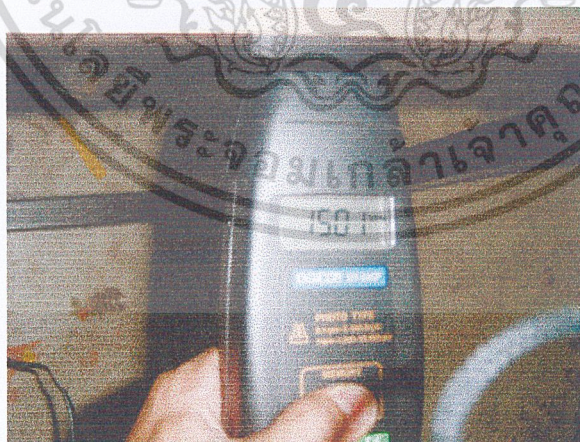
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ใส่น้ำหนักในการทดสอบ ซึ่งมีงานสำหรับวางน้ำหนักสามารถใส่น้ำหนักได้ตั้งแต่ 1- 10 กิโลกรัม



รูปที่ 4-7 การวางน้ำหนักลงบนชุดหวัค

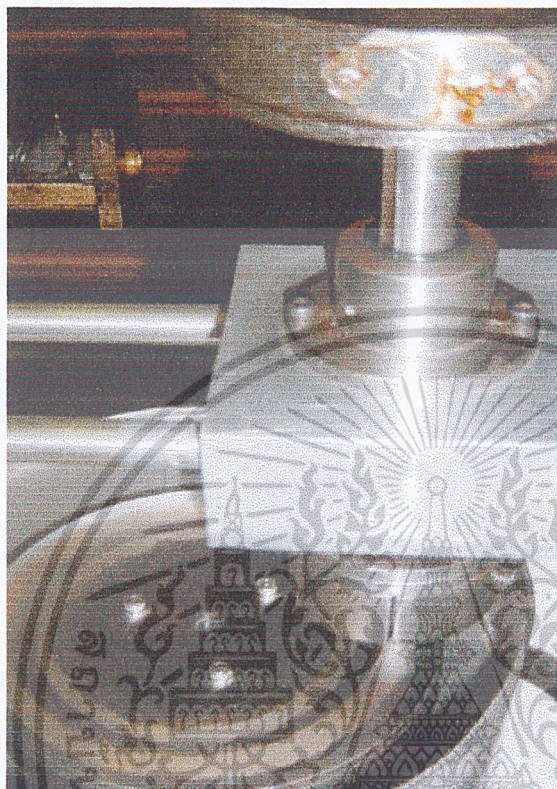
6. เริ่มเดินเครื่องด้วยการเปิดสวิตช์ควบคุมแล้วทำการวัดความเร็วรอบเพื่อให้ได้ตามความเร็วที่กำหนด



รูปที่ 4-8 การวัดความเร็วรอบในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เลื่อนชุดหัวจับไปวางบนจานทดสอบ จัดตำแหน่งให้วัสดุทดสอบอยู่ในตำแหน่งรัศมีที่จะทำการทดสอบ แล้วยึดชุดหัวจับกับ Sliding bar จะพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปจะสังเกตเห็นความสึกหรอ ดังแสดงในรูปที่ 4-9



รูปที่ 4-9 แสดงการวางวัสดุทดสอบบนรัศมีทดสอบ

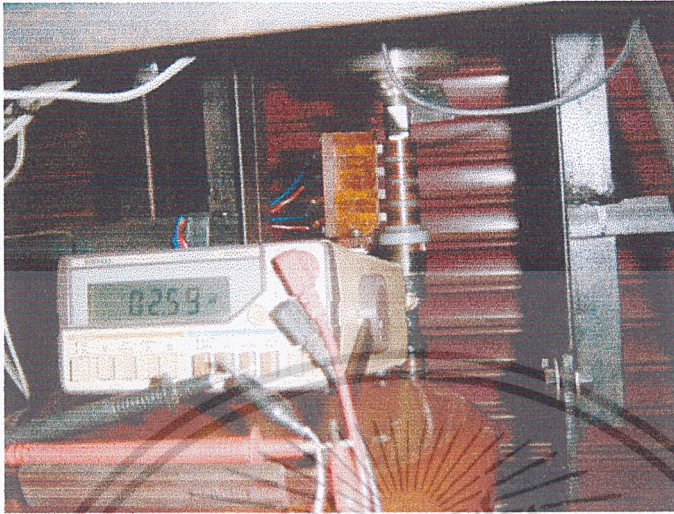
8. ลักษณะการทดสอบแบบใช้สารหล่อลื่นโดยเปิดน้ำมันให้ไหลตามสายเพื่อหล่อลื่นระหว่างชั้นทดสอบทั้ง 2



รูปที่ 4-10 การหล่อลื่นผิววัสดุทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ทำการวัดค่า out put ที่ได้จากมัลติมิเตอร์ที่สภาวะต่าง ๆ ในระหว่างการทดลอง



รูปที่ 4-11 การวัดค่าสัญญาณ output โดยอ่านค่าจากมัลติมิเตอร์

10. ปล่อยให้วัสดุทดสอบเสียดสีกับจานทดสอบเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมงแล้วจึงหยุดเครื่อง ถอดวัสดุทดสอบออกมาทำความสะอาดจากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง Analytical Balance
11. หลังจากชั่งน้ำหนักประกอบวัสดุทดสอบกับชุดหัวจับ จัดให้อยู่ในตำแหน่งเดิมโดยสังเกตจากรอยที่เกิดจากการจับยึดที่เกิดขึ้นบนวัสดุทดสอบ
12. ทดลองเช่นเดิมจนครบสิบชั่วโมง โดยทำการชั่งทุกๆหนึ่งชั่วโมง
13. ในการทดสอบสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องต้องเปิดสวิทซ์ให้อุปกรณ์ทำความร้อนทำงาน การปรับอุณหภูมิทำได้โดยการปรับที่แสงควบคุม

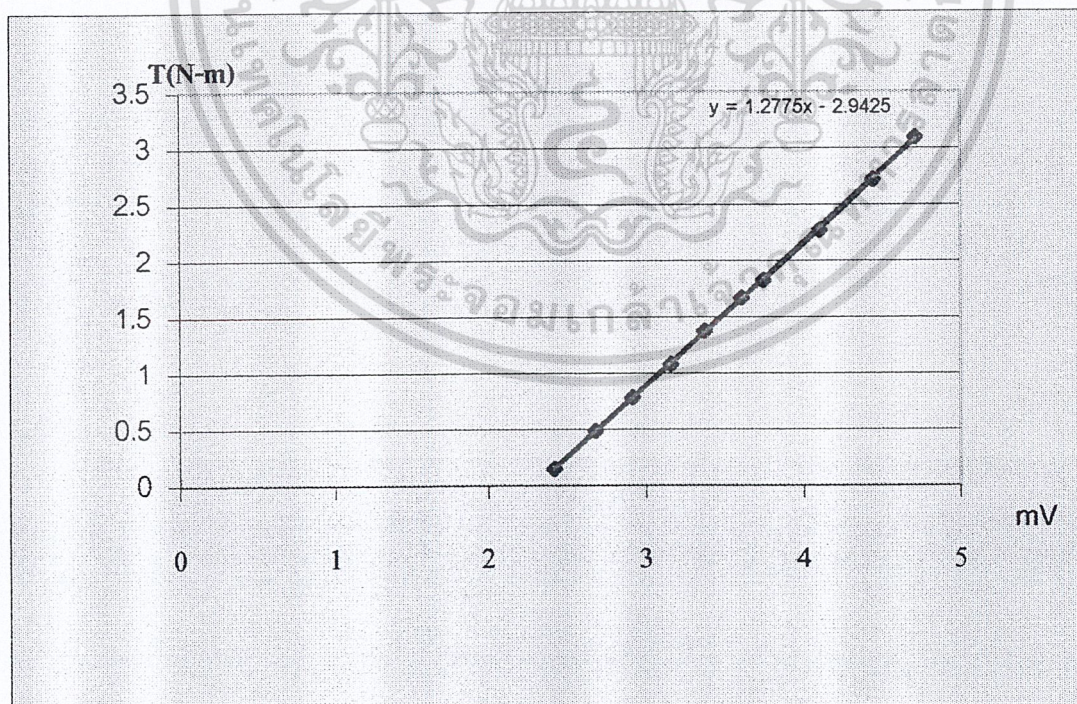
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการทดลอง

## 1.การ Calibrate เครื่องทดสอบ

mV	T(N-m)
2.42	0.149112
2.68	0.484614
2.916	0.782838
3.156	1.081062
3.368	1.3734
3.6	1.6677
3.74	1.826622
4.1	2.273958
4.44	2.721294
4.71	3.094074

ตารางที่ 4-1 แสดงผลที่ได้จากการ calibrate เครื่องทดสอบ



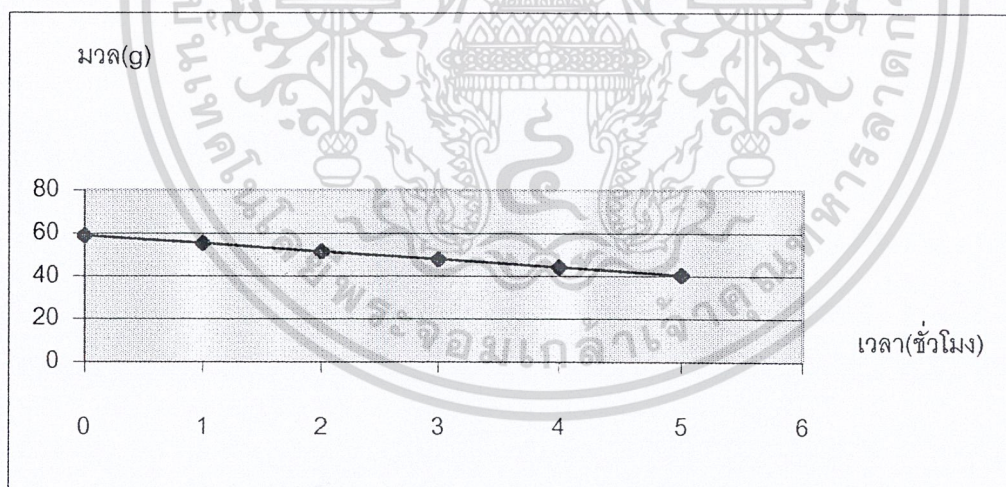
รูปที่ 4-12 แสดงกราฟที่ได้จากการ calibrate เครื่องทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การทดลองแบบไม่มีการหล่อลื่นที่รัศมีทดสอบ 47 มิลลิเมตรโดยแท่งวัสดุที่ใช้คือทองเหลือง

เวลา(ชั่วโมง)	มวล(g)
0	58.8645
1	55.4442
2	51.6097
3	47.8108
4	44.0789
5	40.4158

ตารางที่ 4-2 ผลการทดลองกรณีที่ไม่มีการหล่อลื่น รัศมีการทดสอบ 47 mm



รูปที่ 4-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับเวลา กรณีไม่มีการหล่อลื่นรัศมีการทดสอบ 47 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.การทดลองแบบไม่มีการหล่อลื่นรัศมีทดสอบ 64 มิลลิเมตร แท่งวัสดุทดสอบคือทองเหลือง

เวลา(ชั่วโมง)	มวล(g)
0	61.109
1	56.1206
2	51.0571
3	45.9129
4	40.911

ตารางที่ 4-3 ผลการทดลองกรณี ที่ไม่มีการหล่อลื่นรัศมีทดสอบ 64 mm



รูปที่ 4-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับเวลา กรณีไม่มีการหล่อลื่นรัศมีทดสอบ 64 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. สูตรการคำนวณหามวลไร้มิติ

$$\text{Dimensionless Mass} = \frac{\text{มวลเริ่มต้น} - \text{มวลที่ชั่งได้}}{\text{มวลเริ่มต้น}}$$

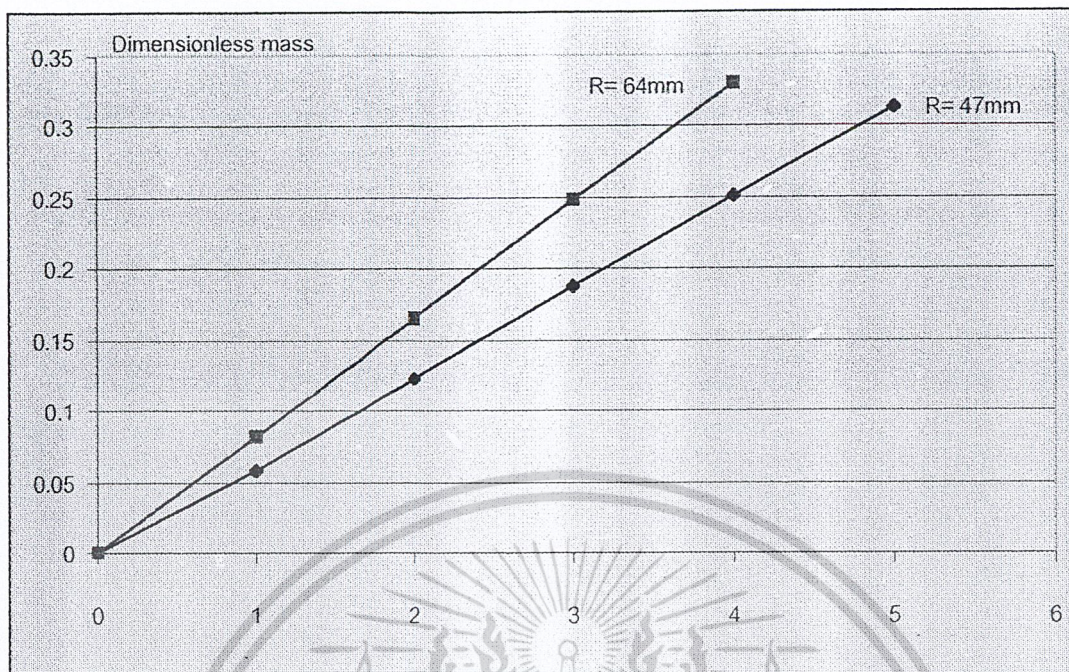
เวลา(ชั่วโมง)	มวลที่ R=47mm(g)	Dimensionless Mass(R=47 mm)
0	58.8645	0
1	55.4442	$(58.8645-55.4442)/58.8645 = 0.05815$
2	51.6097	$(58.8645-51.6097)/58.8645 = 0.12325$
3	47.8108	$(58.8645-47.81087)/58.8645 = 0.18778$
4	44.0789	$(58.8645-44.0789)/58.8645 = 0.25118$
5	40.4158	$(58.8645-40.4158)/58.8645 = 0.31341$

ตารางที่ 4-4 การคำนวณมวลไร้มิติกรณีไม่มีการหลอ่ตื้นที่รัศมี 47 มิลลิเมตร

เวลา(ชั่วโมง)	มวลที่ R=64mm(g)	Dimensionless Mass(R=64 mm)
0	61.109	0
1	56.1206	$(61.1090-56.1206)/61.1090 = 0.08163$
2	51.0571	$(61.1090-51.0571)/61.1090 = 0.16449$
3	45.9129	$(61.1090-45.9129)/61.1090 = 0.24867$
4	40.9119	$(61.1090-40.9119)/61.1090 = 0.33051$

ตารางที่ 4-5 การคำนวณมวลไร้มิติกรณีไม่มีการหลอ่ตื้นที่รัศมี 64 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



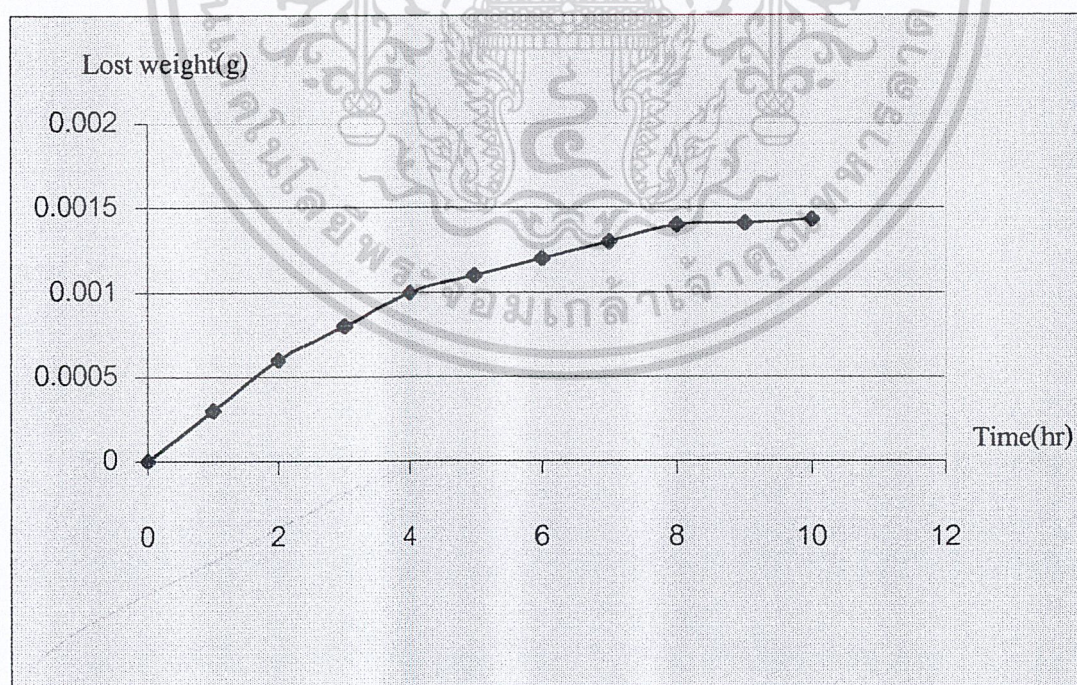
รูปที่ 4-15 แสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างมวลไร้มิติกับเวลากรณีไม่มีการหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5. การทดลองกรณีใช้น้ำมันเครื่อง SAE-40 ที่อุณหภูมิห้องแห่งวัสดุที่ใช้ทดสอบคือเหล็ก

TIME(hr)	Lost weigh (g) = มวลเริ่มต้น - มวลที่ซั่งได้
0	$57.0042 - 57.0042 = 0$
1	$57.0042 - 57.0039 = 0.0003$
2	$57.0042 - 57.0036 = 0.0006$
3	$57.0042 - 57.0034 = 0.0008$
4	$57.0042 - 57.0032 = 0.001$
5	$57.0042 - 57.0031 = 0.0011$
6	$57.0042 - 57.0030 = 0.0012$
7	$57.0042 - 57.0029 = 0.0013$
8	$57.0042 - 57.0028 = 0.0014$
9	$57.0042 - 57.00279 = 0.00141$
10	$57.0042 - 57.00277 = 0.00143$

ตารางที่ 4-6 ผลการทดลองกรณีที่ใช้ น้ำมันเครื่อง SAE-40 ที่อุณหภูมิห้อง



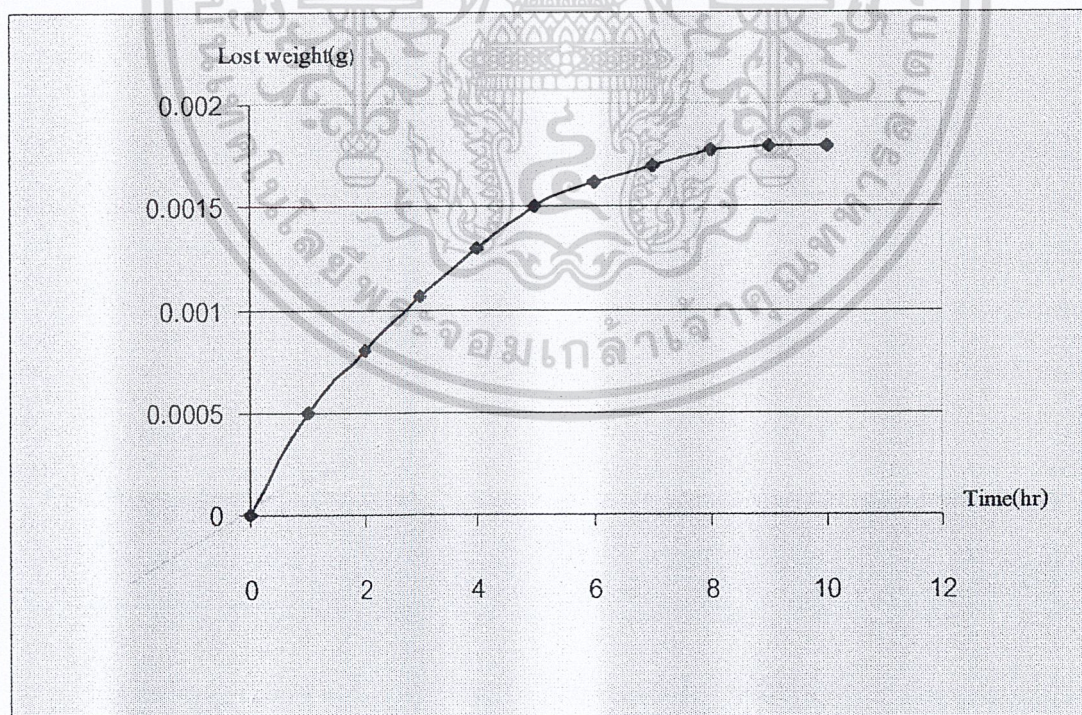
รูปที่ 4-16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่หายไปกับเวลากรณีที่ใช้ น้ำมันเครื่อง SAE-40 ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. น้ำมันเครื่องที่อุณหภูมิ 60 องศา

time(hr)	Pin lost weight(g) = มวลเริ่มต้น - มวลที่ชั่งได้
0	0
1	0.0005
2	0.0008
3	0.0012
4	0.0013
5	0.0015
6	0.0016
7	0.0016
8	0.0017
9	0.0018
10	0.0018

ตารางที่ 4-7 ผลการทดลองกรณีที่ใช้ น้ำมันเครื่องสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



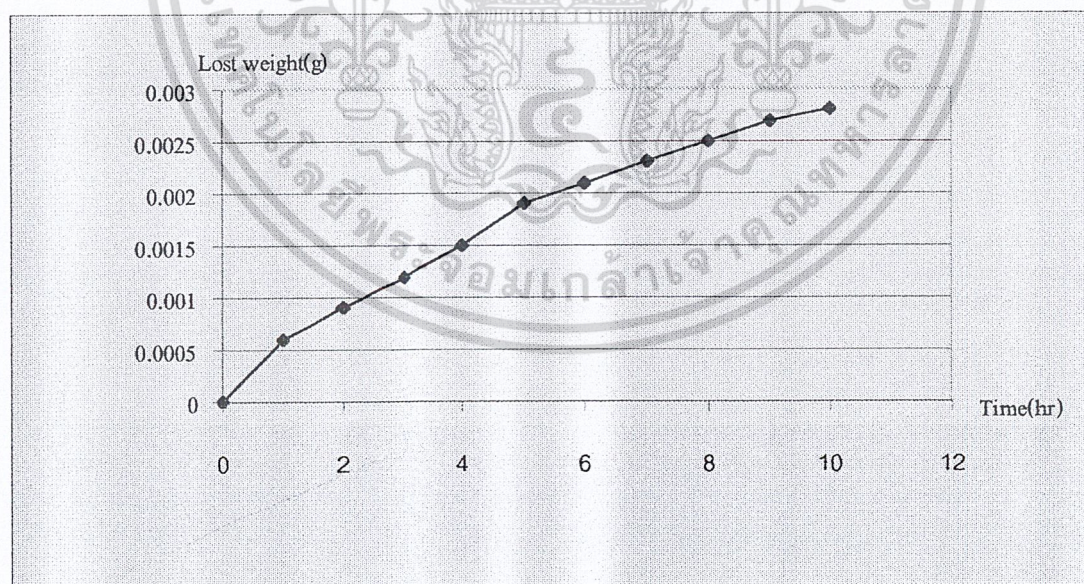
รูปที่ 4-17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่หายไปกับเวลา กรณีที่ใช้น้ำมันเครื่องสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7. น้ำมันถั่วเหลือง

TIME(hr)	Pin lost weight(g)
0	0
1	0.0006
2	0.0009
3	0.0012
4	0.0015
5	0.0019
6	0.0021
7	0.0023
8	0.0025
9	0.0027
10	0.0028

ตารางที่ 4-8 ผลการทดลองกรณีที่ใช้ น้ำมันถั่วเหลือง



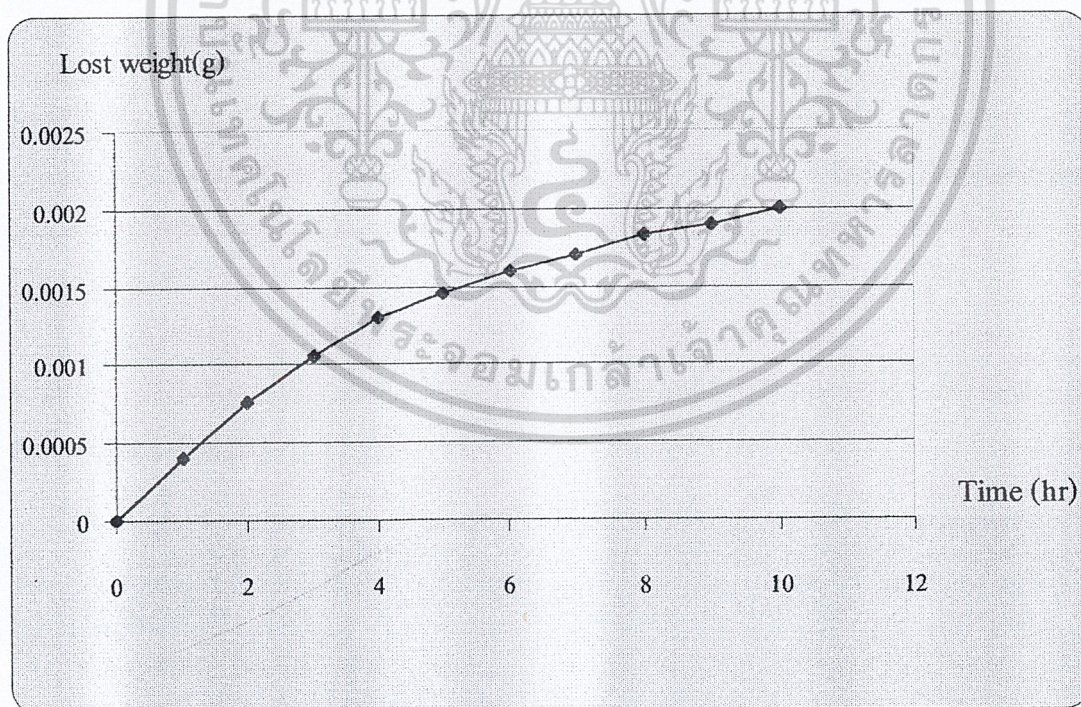
รูปที่ 4-18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่หายไปกับเวลา กรณีที่ใช้ น้ำมันถั่วเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 8. น้ำมันถั่วเหลืองผสมแกรไฟต์

TIME(hr)	Pin lost weight(g)
0	0
1	0.0004
2	0.0007
3	0.0011
4	0.0013
5	0.0014
6	0.0016
7	0.0017
8	0.0018
9	0.0019
10	0.002

ตารางที่ 4-9 ผลการทดลองกรณีที่ใช้ น้ำมันถั่วเหลืองผสมแกรไฟต์



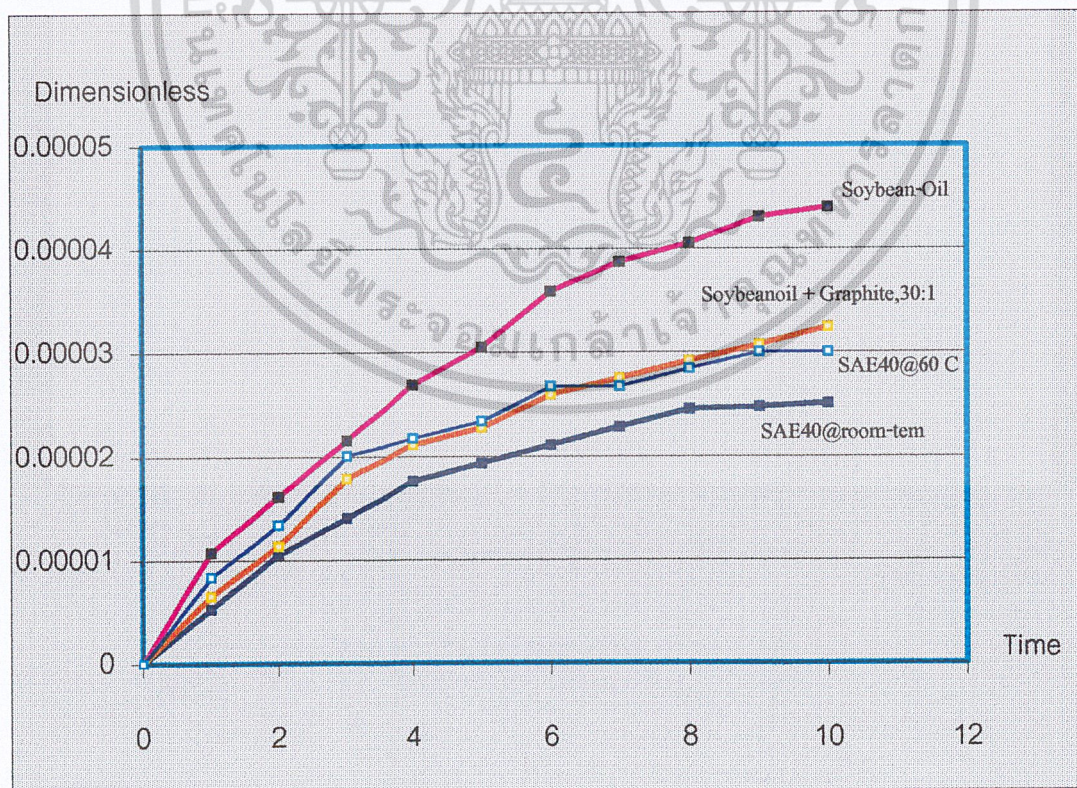
รูปที่ 4-19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่หายไปกับเวลา กรณีที่ใช้ น้ำมันถั่วเหลืองผสมแกรไฟต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 9.การเปรียบเทียบการหล่อลื่นแบบมวลไวมิตติของสารหล่อลื่นต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ

TIME(hr)	SAE40-room-Temp	Soybean-oil	Soybean+Graphite,30:1	SAE40@60C
0	0	0	0	0
1	0.00000526	0.0000107	0.000006484	0.000008357
2	0.0000105	0.0000161	0.00001134	0.00001337
3	0.00001403	0.00002152	0.0000178	0.00002005
4	0.00001754	0.0000269	0.00002107	0.00002173
5	0.00001929	3.04978E-05	0.00002269	0.0000234
6	0.00002105	0.000035879	0.0000259	0.00002674
7	0.0000228	3.76738E-05	0.0000275	0.00002674
8	0.0000245	0.000039467	0.00002917	0.00002841
9	0.00002473	4.30557E-05	0.0000307	0.00003
10	0.00002508	4.39527E-05	0.0000324	0.00003

ตารางที่ 4-10 แสดงผลค่านวมวลไวมิตติเพื่อเปรียบเทียบกรณีใช้สารหล่อลื่นชนิดต่างๆ



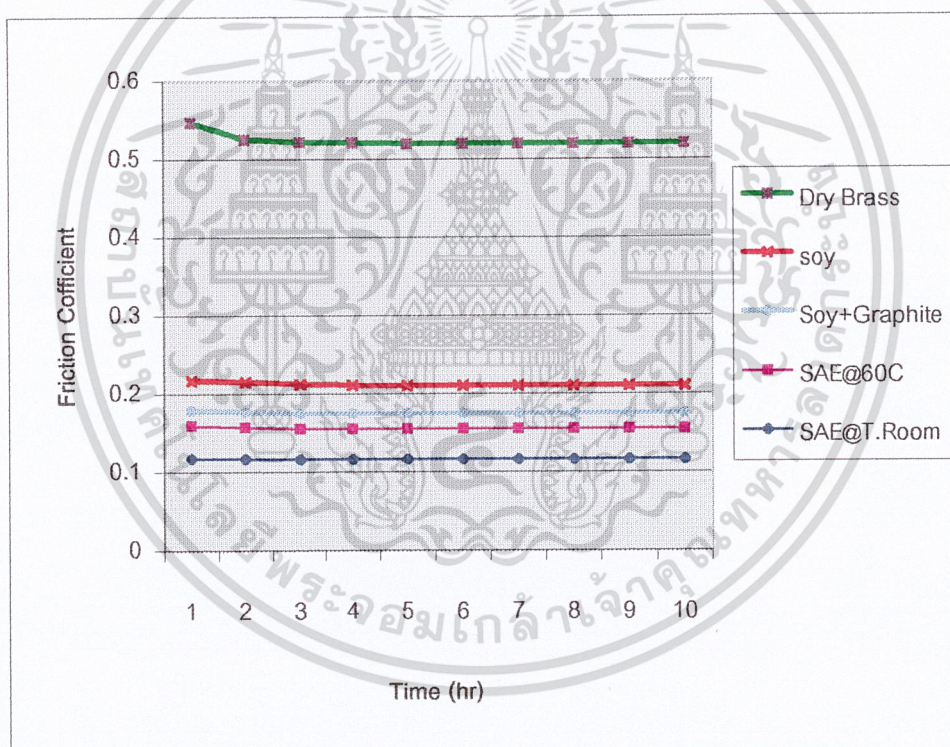
รูปที่ 4-20 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างมวลไวมิตติกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 10. การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการทดลองดังนี้

ชนิดการทดลอง	ค่าที่อ่านได้จากมัลติมิเตอร์ (mV)	กราฟการ Calibrate $T=1.2775v-2.9425$	Friction coefficient $\mu = T/NR$
Dry Brass	2.80	0.6345	0.52
SoyBean Oil	2.52	0.2768	0.21
SoyBean Oil+Graphite	2.48	0.2257	0.175
SAE40@60C	2.46	0.20	0.155
SAE40@Room-temp	2.42	0.15	0.116

ตารางที่ 4- 11 แสดงการเปรียบเทียบ Friction Coefficient ที่การทดลองแบบต่าง ๆ



รูปที่ 4-21 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Friction Coefficient กับเวลาในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทสรุป ข้อเสนอแนะและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 5.1 ผลที่ได้จากโครงการ

- ทฤษฎี หลักการและความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการหล่อลื่นและการสึกหรอที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ
- ผลการทดลองที่เป็นแนวโน้มในการหาตัวอย่างของสารหล่อลื่นที่สามารถใช้ในการทำงานจริงๆ ของเครื่องจักร
- นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความสามารถในการหล่อลื่น การป้องกันการสึกหรอของสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ
- แนวทางและความรู้เชิงเทคนิคในการปรับปรุงพัฒนาเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบ Pin-On-Disk และการใช้งานที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

#### 5.2 ข้อจำกัดของเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบ Pin-On-Disk

- การทดลองต้องใช้เวลานานแลและต้องคิดตามผลตลอด
- การทดลองที่ต้องการอุณหภูมิสารหล่อลื่นสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ความร้อนจะสูญเสียระหว่างท่อส่ง
- ขนาดอุปกรณ์ที่ใช้ปรับความเร็วรอบที่แม่นยำ
- ขนาด Pump ที่จะใช้สำหรับดูดสารหล่อลื่นจากถังเก็บขึ้นไปจนถึงพักและทำความร้อน
- Sliding bar ค้ำกิน ไปทำให้การถอดประกอบวัสดุทดสอบทำได้ยาก

#### 5.3 ข้อเสนอแนะ

- ควรห้มีฉนวนกันความร้อนเป็นการป้องกันการสูญเสียความร้อนที่ท่อส่ง
- ให้เครื่องวัดรอบแบบดิจิตอลช่วยในการปรับความเร็วรอบ
- คิดตั้ง Pump ที่ถังเก็บ
- เพิ่มความสูงของฐาน Sliding bar

#### 5.4 สรุปผลการทดลอง

1. สภาวะไม่มีการหล่อลื่น (Dry friction) วัสดุทดสอบจะสัมผัสเสียดสีกับจานทดสอบแบบ Metal to Metal โดยตรงทำให้เกิดการสึกหรออย่างรวดเร็ว มวลจึงลดลงอย่างรวดเร็วด้วยดังจากกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่หายไปกับเวลาที่แสดงออกมาจึงแปรผันตามกันอย่างชัดเจน

2. ในสถานะที่มีการหล่อลื่น ระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุทดสอบกับงานทดสอบจะถูกกั้นด้วยฟิล์มของสารหล่อลื่นอยู่ ดังนั้นผิวสัมผัสจึงไม่สัมผัสกันโดยตรง การสึกหรอจึงเกิดขึ้นน้อยมาก กราฟที่แสดงมวลที่หายไปกับเวลาจึงเป็นแบบค่อนข้างชัน ในช่วงแรกแล้วค่อยๆลดลงเรื่อยๆตลอดจนจบการทดลอง
3. จากการทดลองใช้สารหล่อลื่นทั้งสามชนิดได้แก่ น้ำมันเครื่องสังเคราะห์ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันถั่วเหลืองผสมแกรไฟต์พบว่าน้ำมันเครื่องสังเคราะห์มีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดีที่สุดเพราะอัตราการสึกหรอน้อยที่สุด น้ำมันถั่วเหลืองมีคุณสมบัติการหล่อลื่นน้อยที่สุด และน้ำมันเครื่องสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสกับน้ำมันถั่วเหลืองผสมแกรไฟต์มีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ใกล้เคียงกัน
4. จากการเติมแกรไฟต์ลงไป ในน้ำมันถั่วเหลือง จะทำให้น้ำมันถั่วเหลืองมีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ใกล้เคียงกับน้ำมันเครื่องสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ก็เพราะว่าน้ำมันเครื่องสังเคราะห์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนืดจะลดลง คุณสมบัติการหล่อลื่นก็จะลดลงด้วย ส่วนน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสมแกรไฟต์นั้น แกรไฟต์ก็เป็นสารหล่อลื่นชนิดหนึ่งจึงทำให้คุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันถั่วเหลืองดีขึ้น
5. น้ำมันถั่วเหลือง หรือน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ หากได้รับการแต่งเติม โดยสารบางอย่างลงไป ซึ่งอาจจะเป็นแกรไฟต์หรือสารชนิดอื่นๆ อาจมีแนวโน้มเป็นไปได้ว่าสามารถนำน้ำมันพืชมาเป็นสารหล่อลื่นได้ แต่จากการศึกษาเพิ่มเติมคุณสมบัติบางอย่างของน้ำมันพืชไม่มีเหมือนน้ำมันเครื่องสังเคราะห์ที่ใช้งาน ได้ทุกสภาวะการใช้งาน

## ภาคผนวก ก.

## A. Frictional properties of materials

Table A-1 Lubrication of various metals on steel

By mineral oil

Surface	$\mu$
Axle steel	0.16
Cast iron	0.21
Gunmetal	0.21
Bronze	0.16
Pure lead	0.5
Lead-base white metal	0.1
Pure tin	0.6
Tin-base white metal	0.11
Brass	0.19

Table A-2 Lubrication of steel by various Mineral oils

Lubricant	$\mu$
Light machine	0.16
Thick gear	0.12
Solvent refined	0.15
Heavy motor	0.2
BP paraffin	0.18
Extreme pressure	0.10
Graphited oil	0.13
Oleir acid	0.08
Trichloroethylene	0.3
Alcohol	0.4
Benzene	0.5
Glycerine	0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## B.Common Solid Lubricants

Material	Acceptable Usage Temperature, °C				Av Friction Coefficient, $f$		Remarks
	Minimum		Maximum		In N <sub>2</sub> or		
	In Air	In N <sub>2</sub> or Vacuum	In Air	In N <sub>2</sub> or Vacuum	In-Air	Vacuum	
Molybdenum disulfide, MoS <sub>2</sub>	-240	-240	370	820	0.10-0.25	0.05-0.10	Low $f$ , carries high load, good overall lubricant, can promote metal corrosion.
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	-70	-70	290	290	0.02-0.15	0.02-0.15	Lowest $f$ of solid lubricants, load capacity moderate and decreases at elevated temp
Fluoroethylene-propylene copolymer (FEP)	-70	-70	200	200	0.02-0.15	0.02	Low $f$ , lower load capacity than PTFE
Graphite	-240		540	Unstable in vacuum	0.10-0.30	0.02-0.45	Low $f$ and high load capacity in air, high $f$ and wear in vacuum, conducts electricity (in air or vacuum)
Niobium diselenide, NbSe <sub>2</sub>			370	1,320	0.12-0.40	0.07	Low $f$ , high load capacity, conducts electricity (in air or vacuum)
Tungsten diselenide, WS <sub>2</sub>	-240	-240	430	820	0.10-0.20		$f$ not as low as MoS <sub>2</sub> temp capability in air a little higher
Tungsten diselenide, WSe <sub>2</sub>			370	1,320			Same as for WS <sub>2</sub>
Lead sulfide, PbS			480		0.10-0.30		Very high load capacity, used primarily as additive with other solid lubricants
Lead oxide, PbO			650		0.10-0.30		Same as for PbS
Calcium fluoride-barium fluoride eutectic,	430	430	820	820	0.10-0.25	Same as in air	Can be used at higher temp than other solid lubricants, high $f$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CaF <sub>2</sub> -BaF <sub>2</sub>	0.25-0.40	below 540 <sup>o</sup> C
Antimony trioxide, Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	below 540 <sup>o</sup>	C
		High load capacity, used as Corrosion inhibitor in MoS <sub>2</sub> lubricants

From Lipp, L. C., *Lubrication Engineering*, 32, 574-584, 1976. Reprinted by permission of Society of Tribologists and Lubrication Engineers. All rights reserved.

### C. Friction Coefficient Values: Metal on Metal

	Identical	Compatible	Partially Compatible	Partially Incompatible	Incompatible
Unlubricated	0.80	0.63	0.50	0.42	0.35
Poor lubricant	0.38	0.30	0.25	0.21	0.18
Good lubricant	0.20	0.17	0.15	0.13	0.10
Excellent lubrication	0.10	0.09	0.08	0.08	0.07

Sources: Based on E. Rabinowicz, The dependence of the adhesive wear coefficient on the surface energy of adhesion, pp. 36-40 of *Wear of Materials – 1977*, ASME, NY, 1977; E. Rabinowicz, Practical approach to friction coefficients, *Product Engineering*, pp. 62-64, September 26, 1960; F. P. Bowden and D. Tabor, *Friction and Lubrication of Solids*, Clarendon, Oxford, pp. 322-327, 1950.

### UNLUBRICATED SURFACES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**D. Friction of metals**

Conditions	Metals											
	Ag	Al	Cd	Cu	Cr	Fe	In	Mg	Mo	Ni	Pb	Pt
$\mu_s$ on itself in air	1.4	1.3	0.5	1.3	0.4	1.0	2	0.5	0.9	0.7	1.5	1.3
$\mu_s$ on itself in vacuo	S	S	-	S	1.5	1.5	-	0.8	1.1	2.4	-	4
$\mu_s$ metal on steel (0.13% C, 3.42% Ni normalized) in air	0.5	0.5	0.4	0.8	0.5	-	2	-	0.5	0.5	1.2	-

**E. The friction of alloys on steel (0.13% C, 3.4% Ni)**

Alloys	$\mu_s$
Copper-lead	0.2
White metal (tin base)	0.8
White metal (lead base)	0.5
Phosphor bronze	0.3
Brass (Cu 70, Zn 30)	0.5
Constantan	0.4
Steel (0.13% C, 3.42% Ni)	0.8
Cast iron	0.4

**F. The friction of ferrous alloys on themselves**

Alloys	$\mu_s$
Bali race steel	0.7
Austenitic steel	1.0
Cast iron	0.4
Chromium plate	0.7
Tool steel	0.4
$3\frac{1}{2}\%$ silicon iron	0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**G. Coefficient of Friction  $\mu$  for Various Material Combinations**

Materials	$\mu_s$ Static		$\mu_s$ Sliding (kinetic)	
	Dry	Greasy	Day	Greasy
Hard steel on hard steel	0.78	0.11	0.42	0.029
		0.23		0.081
		0.15		0.080
		0.11		0.058
		0.0075		0.084
		0.0052		0.105
		0.96		0.108
Mild steel on mild steel	0.74		0.57	0.09
				0.19
Hard steel on graphite	0.21	0.09		
Hard steel on babbitt (ASTM 1)	0.70	0.23	0.33	0.16
		0.15		0.06
		0.08		0.11
		0.085		
Hard steel on babbitt (ASTM 8)	0.42	0.17	0.35	0.14
		0.11		0.065
		0.09		0.07
		0.08		0.08
Hard steel on babbitt (ASTM 10)		0.25		0.13
		0.12		0.06
		0.10		0.055
		0.11		
Mild steel on cadmium silver				0.097
Mild steel on phosphor bronze			0.34	0.173
Mild steel on copper lead				0.145
Mild steel on cast iron		0.183	0.23	0.133
Mild steel on lead	0.95	0.5	0.95	0.3
Nickel on mild steel			0.64	0.178


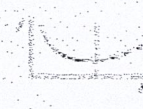

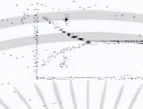




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่น การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Aluminum on mild steel	0.61		0.47	
Magnesium on mild steel			0.42	
Magnesium on magnesium	0.6	0.08		
Teflon on Teflon	0.04			0.04
Teflon on steel	0.04			0.04
Tungsten carbide on tungsten	0.2	0.12		
Carbide				
Tungsten carbide on steel	0.5	0.08		
Tungsten carbide on copper	0.35			
Tungsten carbide on iron	0.8			
Bonded carbide on copper	0.35			
Bonded carbide on iron	0.8			
Cadmium on mild steel			0.46	
Copper on mild steel	0.53		0.36	0.18
Nickel on nickel	1.10		0.53	0.12
Brass on mild steel	0.51		0.44	
Brass on cast iron			0.30	
Zinc on cast iron	0.85		0.21	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**H. INFLUENCE OF THE VARIOUS FACTORS ON COEFFICIENT OF FRICTION<sup>7</sup>**  
**(ELASTOPLASTIC CONTACT)**

Parameter	Type of Friction		Comments
	Dry	Boundary	
Load			- Transition to dry friction.
Speed			- Small pressure. - High pressure.
Size of a nominal contact area (contact of rough and smooth surfaces)			- At extremely small nominal areas, nominal & real areas are identical.
Roughness (with friction)			
Roughness (with sliding friction)	- The plasticity of a material joining friction is owing to the surface roughness.		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**I. Early Table of Friction Coefficient Values Compiled by Rankin (1926) from the Results of Morin (1833)**

Material	$f$
Wood on wood, dry	0.25-0.50
Wood on wood, soapy	0.20
Metals on oak, dry	0.50-0.60
Metals on oak, wet	0.24-0.26
Metals on oak, soapy	0.20
Metals on elm, dry	0.20-0.25
Hemp on oak, dry	0.53
Leather on oak	0.33
Leather on metals, dry	0.27-0.38
Leather on metals, wet	0.56
Leather on metals, greasy	0.36
Leather on metals, oily	0.23
Metals on metals, dry	0.15
Metals on metals, wet	0.15-0.20
Smooth surfaces, occasionally greased	0.30
Smooth surfaces, continually greased	0.07-0.08
Smooth surfaces, best results	0.05
Steel on agate, dry	0.03-0.036
Steel on agate, oiled	0.20
Iron on stone	0.107
Wood on stone	0.30-0.70
Masonry on brick work, dry	About 0.40
Masonry on brick work, damp mortar	0.60-0.70
Masonry on dry clay	0.74
Masonry on moist clay	0.51
	0.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

J.Basic Physical Properties of Vegetable Oils<sup>2</sup>

ASTM Test Method No.: Vegetable Oil	Color <sup>c</sup> D1500	Flash Point COC	Acid Number <sup>c</sup>	Kinematic Viscosity		VI D2270	Pour Point
		D92	D974	D2270			D97
		°C		CSt @ 40° C	CSt @ 100° C		°C
Canola oil	L0.5	328	0.1	34	7.8	215	-21
Canola oil, high oleic (75% oleic)	L0.5	326	0.2	37.3	8.4	212	-21
Canola oil, high oleic, low linolenic	L0.5	325	0	38.6	8.6	210	-18
Castor oil	L0.5	>200	0.6	255.	19.5	87	-33
Coconut oil	L1.0	294	0.1	6	5.9		25
Corn Oil	L0.5		0.1	27.6	7.7	223	-15
Corn oil, high oleic (62% oleic)	L1.0	320	0	31.9	8.2	214	-18
Cottonseed oil				2			
Lesquerella oil	L3.0	230	0.2	36.1	14.2	124	-27
Linseed oil							
Meadowfoam		320		115.	10.3		6
Medium chain triglycerides <sup>d</sup>	L0.5	232	0.1	4	3.5	130	-21
Olive oil	L1.0		0.2		8.4	203	-9
Peanut oil	L0.5		0.01	48.9	8.3	212	3
Rapeseed oil, high erucic	L2.5		0.62	13.8	9.08	217	-18
Rice bran oil	L1.0		0.1	38.3	8.4	208	-6
Safflower oil	L0.5		0.03	36.9	7.5	231	-18
Sesame oil	L0.5		0.05	40.2	7.9	215	-6
Soybean oil	L0.5	320	0.07	7	7.6	227	-9
Sunflower oil	L0.5	325	0.04	37.6	7.7	226	
Sunflower oil, high oleic (80% oleic)	L0.5	326	0.03	30.2	8.5	205	-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

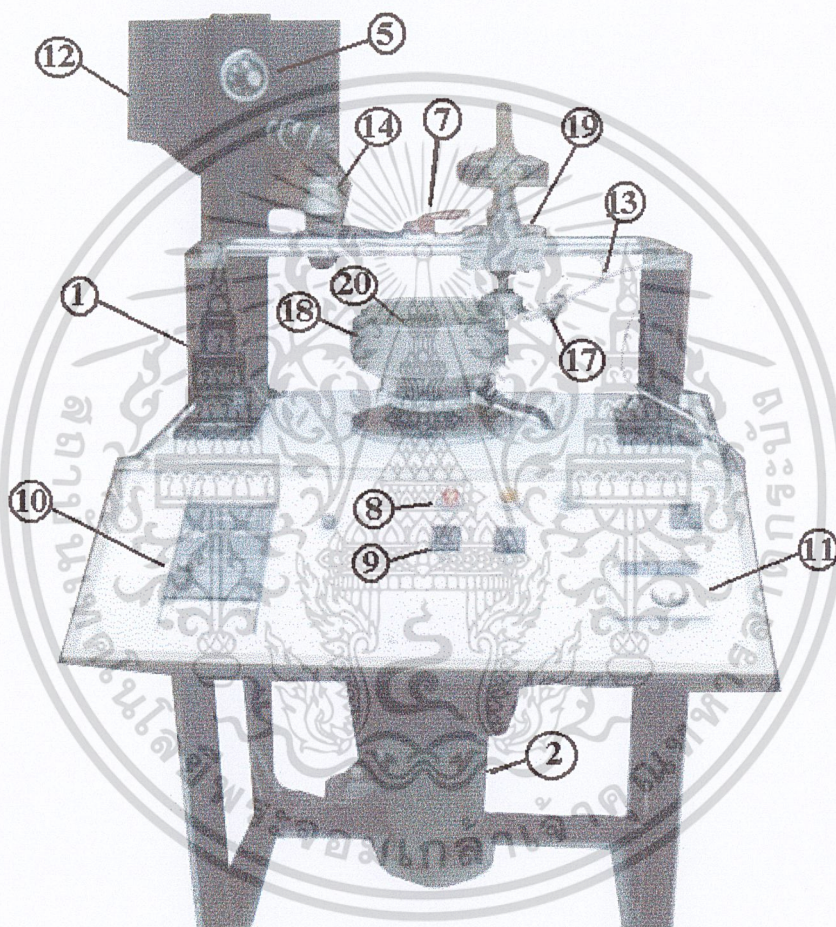
Sunflower oil, high oleic (90% oleic)	I.0.5	330	0.27	34.6	8.7	203	-15
Walnut oil	L2.5	257	20.9	31	6.9	232	-15
				31.6			
				38.8			
				39.9			
				27			



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

## ภาพประกอบรวมและชิ้นส่วนของเครื่องทดสอบ

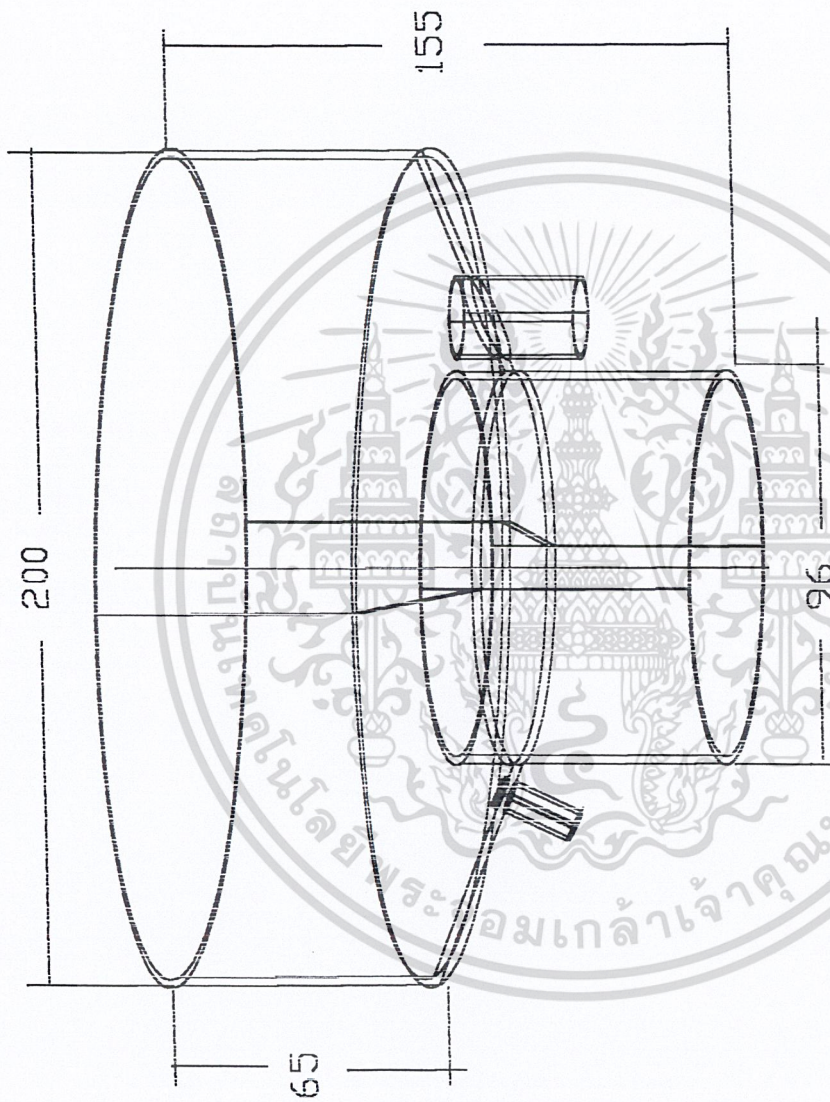


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการอุปกรณ์

หมายเลข	จำนวนชิ้น	ชื่ออุปกรณ์	ขนาด	หมายเลขเขียนแบบ
1	1	โครงเครื่องทดสอบ	40 x 60 x 80 cm	-
2	1	มอเตอร์ DC ขนาด 1 แรงม้า	-	-
3	1	คัปปลิ่ง	AL-071	-
4	1	ชุด SLIP RING	-	-
5	1	THERMOSTAT	-	-
6	1	HEATER	1000 W	-
7	1	ก๊อกลเปิด-ปิดน้ำมัน	1/2 นิ้ว	-
8	3	PILOT LIGHT	-	-
9	3	BREAKER SWITCH	10 A	-
10	1	ตัวควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์	-	-
11	1	DIGITAL THERMOMETER	-	-
12	1	ถังใส่น้ำมัน	30 x 20 x 25 cm	-
13	2	สายกันความร้อน	-	-
14	1	กรองน้ำมัน	-	-
15	2	น็อตล็อกเพลา	M20 x 1.5	-
16	2	สลักลูกปืน	D40,D20	-
17	1	THERMO COUPLE	-	-
18	1	ถาดรองน้ำมัน	-	A-001
19	1	ชุดคคน้ำหนัก	-	A-002
20	1	ชุดงานทดสอบ	-	A-003

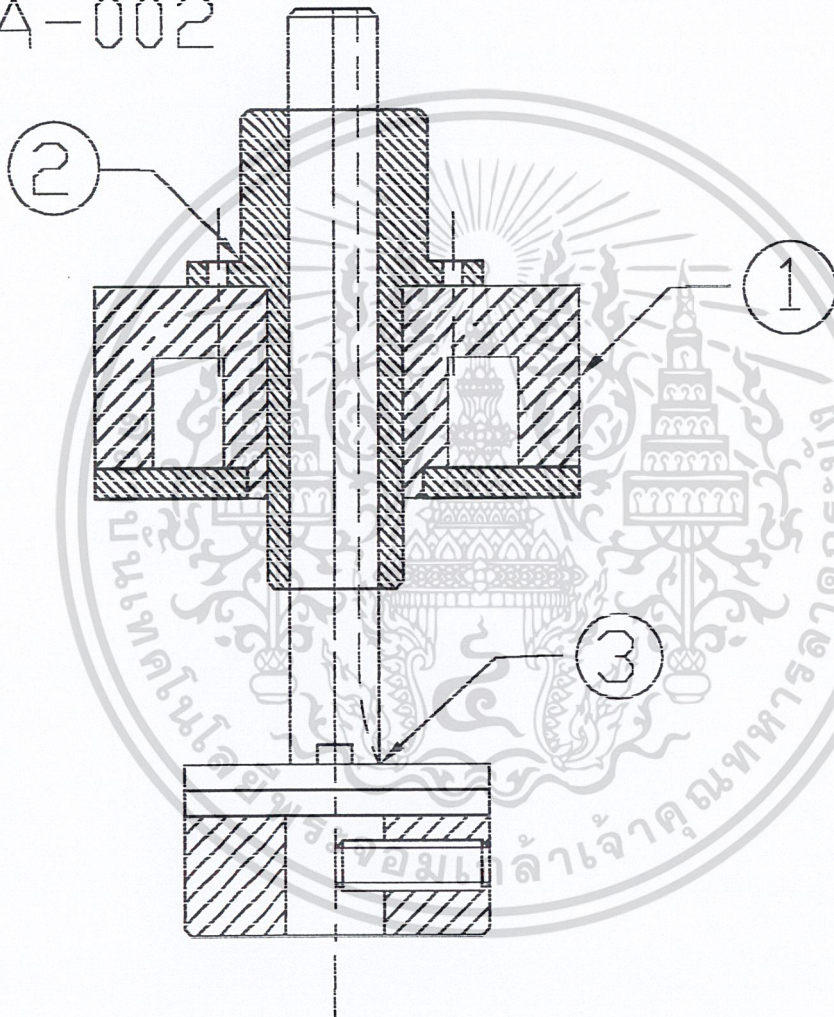
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Part-No	Nomenclature	No of Piece	Materials	reference
	OIL BATH			King Mongkut's Institute of Technology
		Name: P. Siripong		
		Date: 25/3/2545		
		NO/A-001		

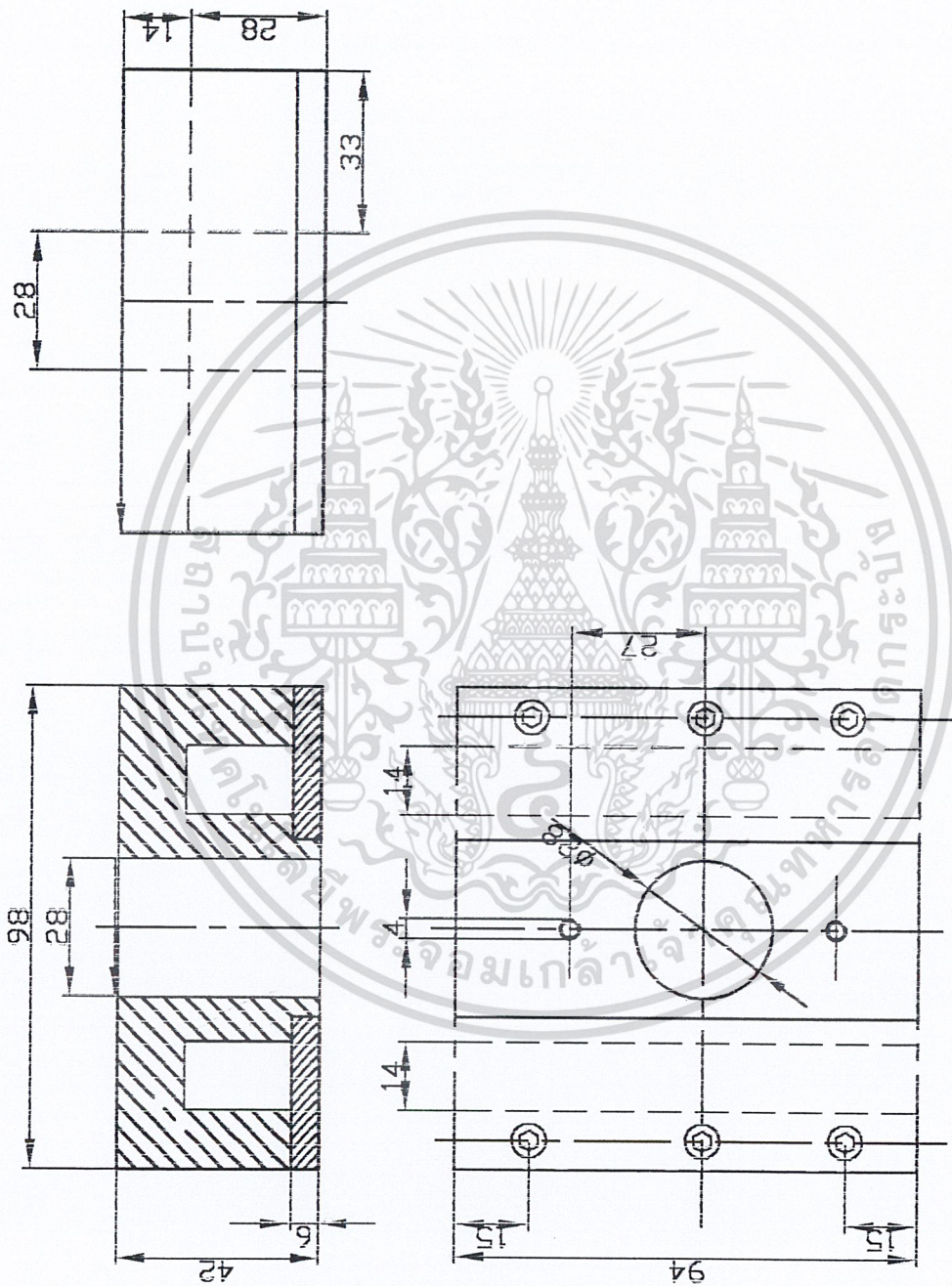
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A-002



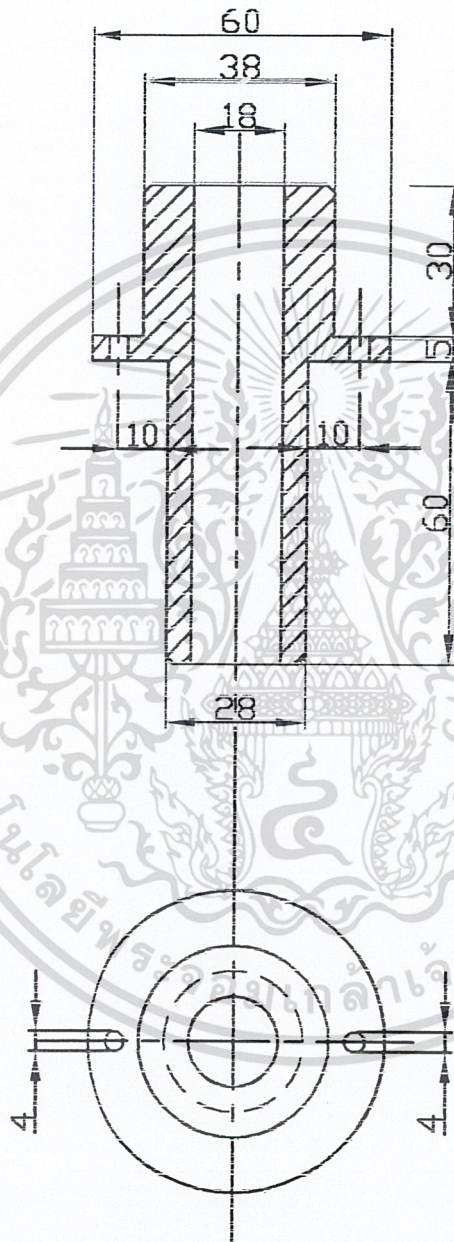
3	HOLDER	1	Stainless St	C-003
2	SLEEVE	1	Mild Steel	C-002
1	SLEEVE BOX	1	Al Alloy	C-001
Pos-No	Nomenclature	No. of Piece	Materials	reference
Scale	ASSEMBLY	Name: p.siripong	King Mongkut's Institute of Technology	
1:2.5	( PART A-002 )	Date: 29/3/2545		
		NO.A-002		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง

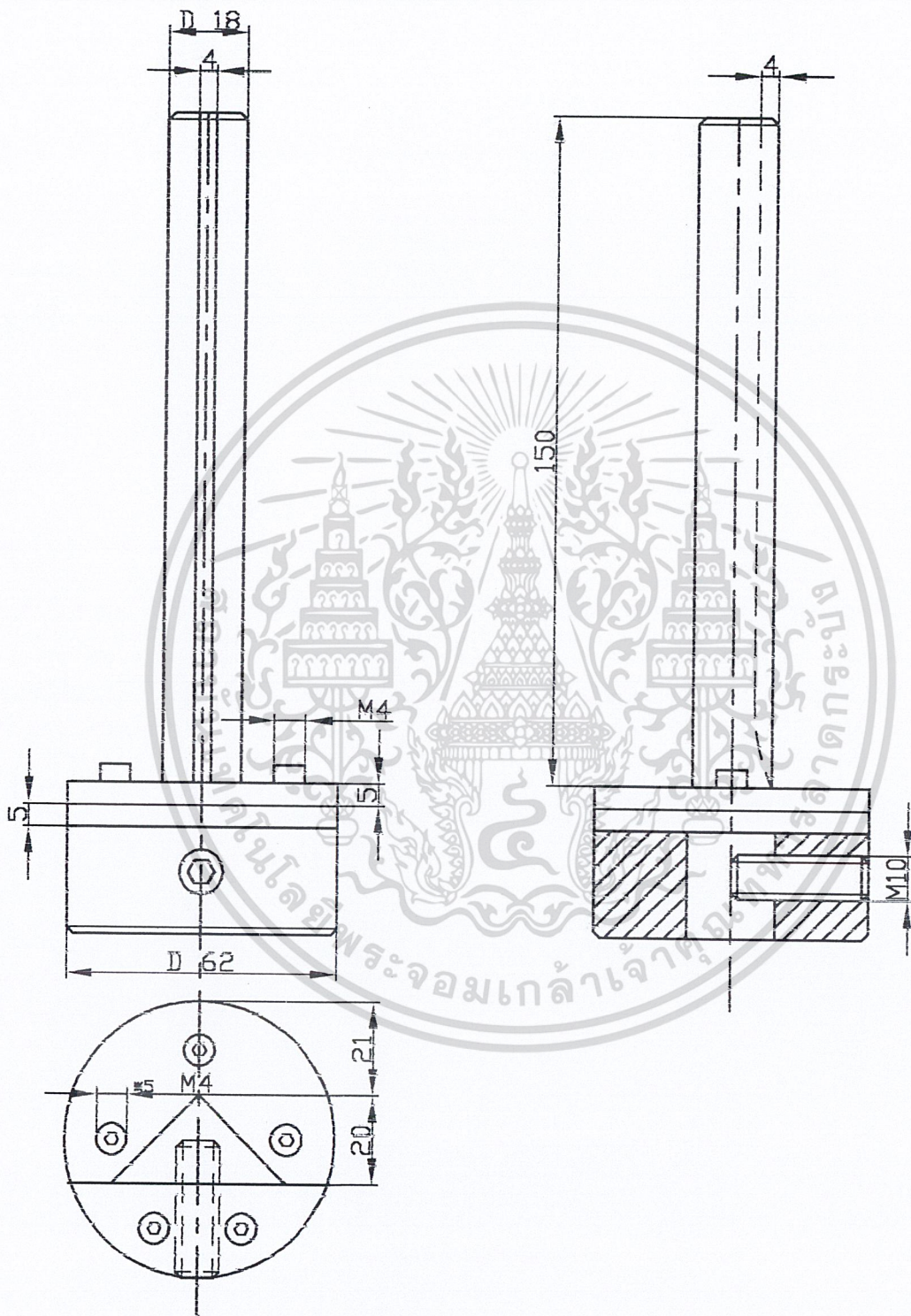


Pos-No	Nomenclature	No. of Piece	Materials	reference
Scale 1:1.5	SLEEVE BOX	Name: p.siripong	King Mongkut's Institute Of Technology	
		Date: 29/3/2545		
		NDC-001		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



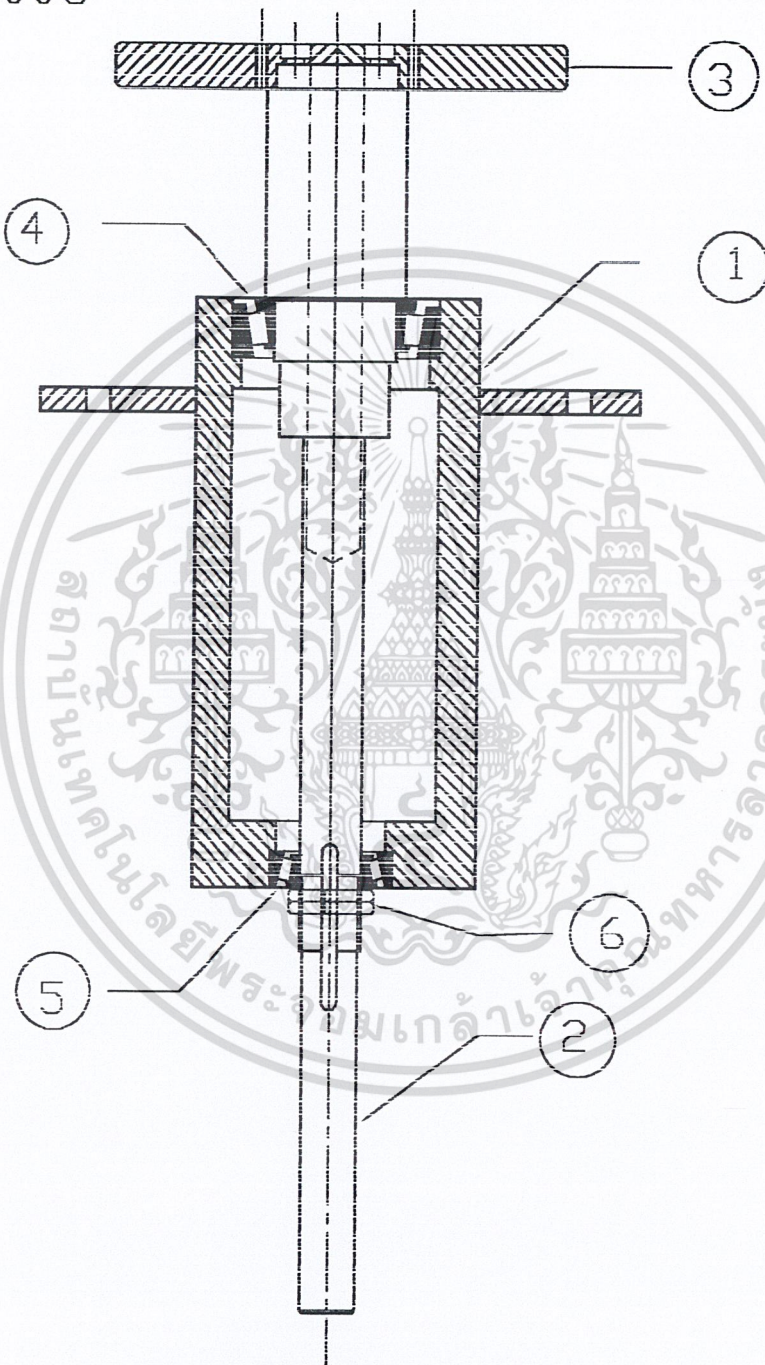
Pos-No	Nomenclature	No. of Piece	Materials	reference
Scale 1:1.5	SLEEVE	Name: p.siripong Date: 29/3/2545 NO.C-002	King Mongkut's Institute of Technology	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนและเพื่อเผยแพร่ความรู้ไปยังหน่วยงานที่เกี่ยวข้องโดยไม่หวังผลตอบแทน

Pos-No	Nomenclature	No. of Piece	Materials	reference
Scale 1:1.5	Holder	Name: p.siripong	King Mongkut's Institute of Technology	
		Date: 29/3/2545		
		NO.C-003		

A-003



6	LOCKNUT	1	-	-
5	TAPER BEARING 20 mm	1	-	-
4	TAPER BEARING 40 mm	1	-	-
3	DISK	1	Mild Steel	B-003
2	SHAFT	1	Mild Steel	B-002
1	HOUSING	1	Mild Steel	B-001
Pos-No	Nomenclature	No. of Piece	Materials	reference

Scale  
1:2.5

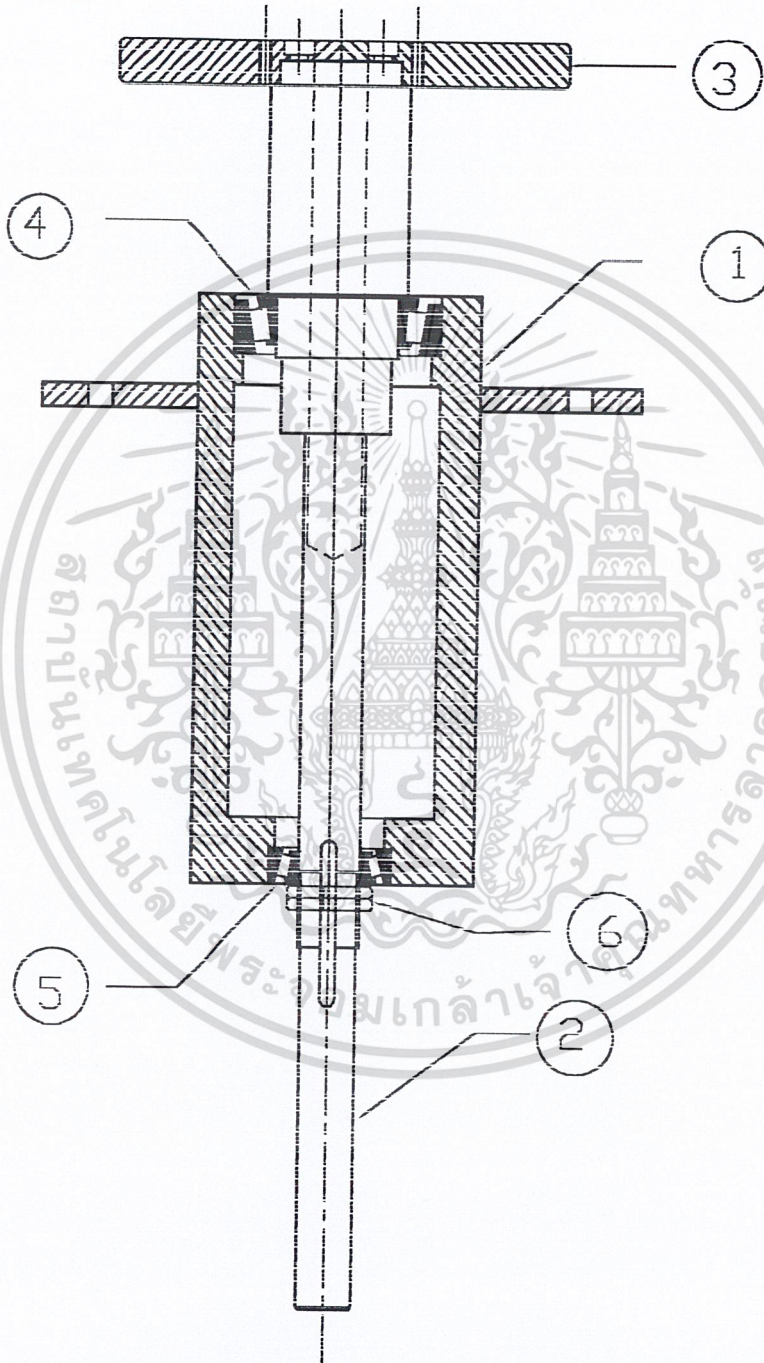
ASSEMBLY  
( PART )

Name: p.siripong  
Date: 29/3/2545  
NO.A-003

King Mongkut's  
Institute of  
Technology

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก... และต้องอ...

A-003



6	LOCKNUT	1	-	-
5	TAPER BEARING 20 mm	1	-	-
4	TAPER BEARING 40 mm	1	-	-
3	DISK	1	Mild Steel	B-003
2	SHAFT	1	Mild Steel	B-002
1	HOUSING	1	Mild Steel	B-001
Pos-No	Nomenclature	No. of Piece	Materials	reference

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นในสถาบันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อื่นๆ ที่เห็นมีที่ติดแปะลงนียก และต้องยี่

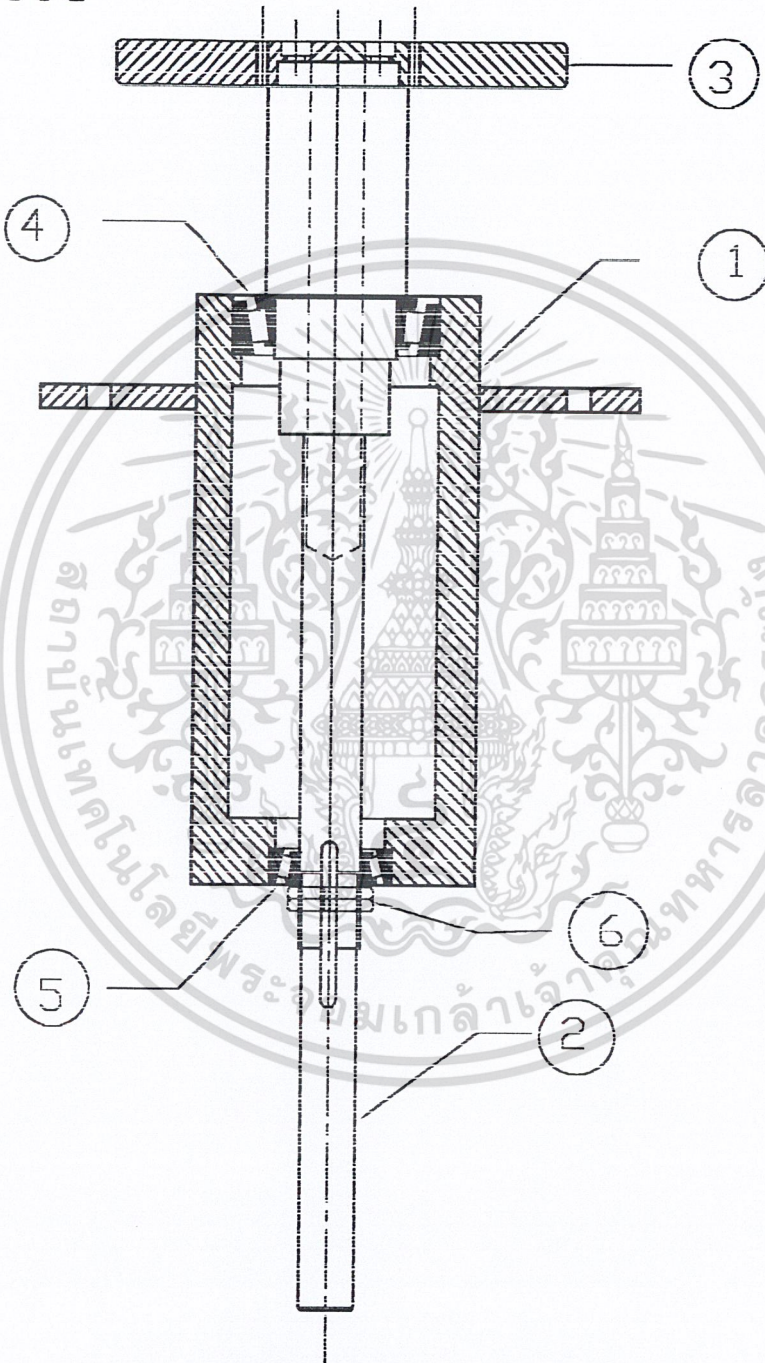
Scale  
1:2.5

ASSEMBLY  
( PART )

Name: p.siripong  
Date: 29/3/2545  
NO.A-003

King Mongkut's  
Institute of  
Technology

A-003



6	LOCKNUT	1	-	-
5	TAPER BEARING 20 mm	1	-	-
4	TAPER BEARING 40 mm	1	-	-
3	DISK	1	Mild Steel	B-003
2	SHAFT	1	Mild Steel	B-002
1	HOUSING	1	Mild Steel	B-001
Pos-No	Nomenclature	No. of Piece	Materials	reference

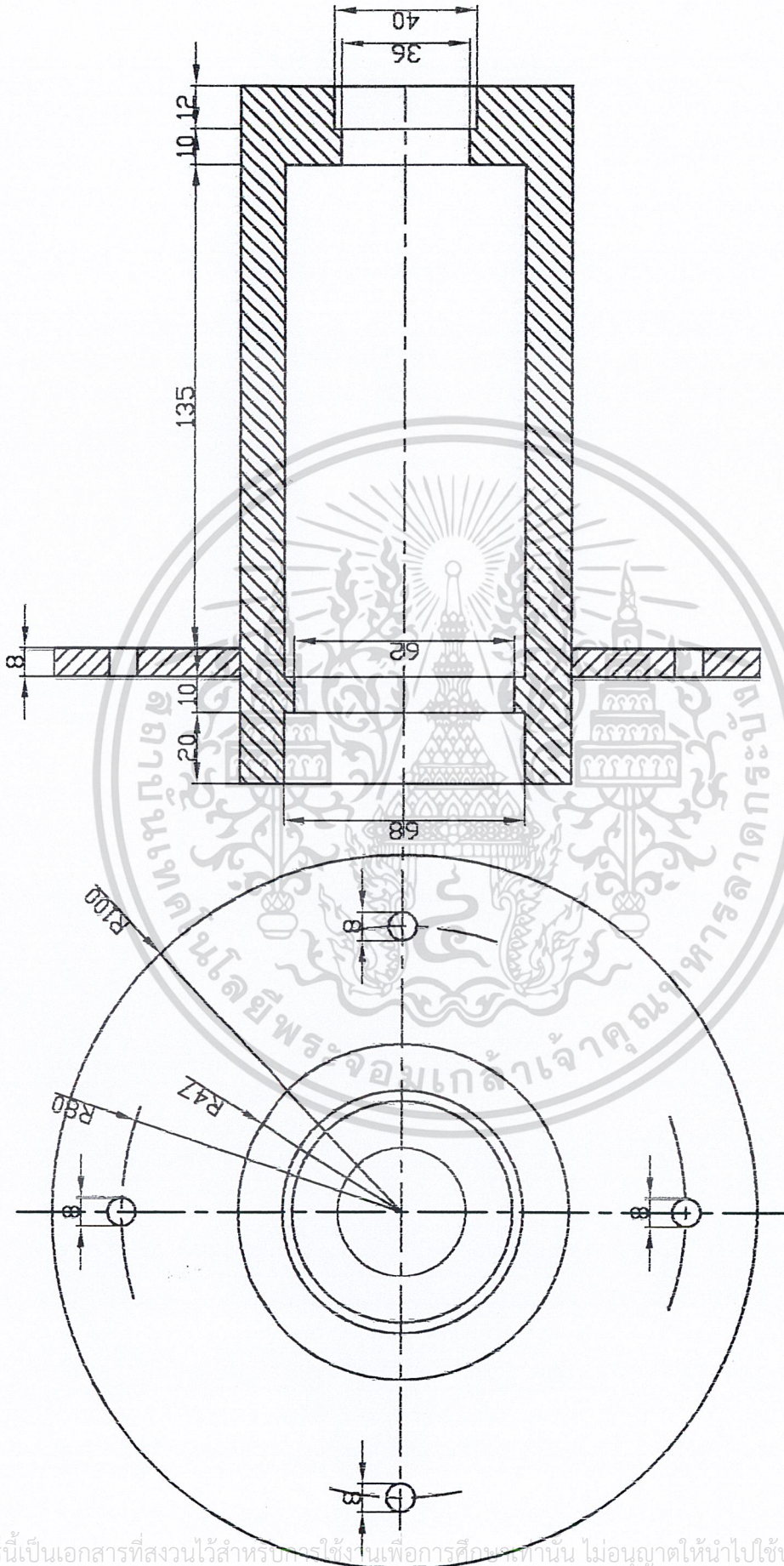
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามคัดลอกและต้องขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ

Scale  
1:2.5

ASSEMBLY  
( PART )

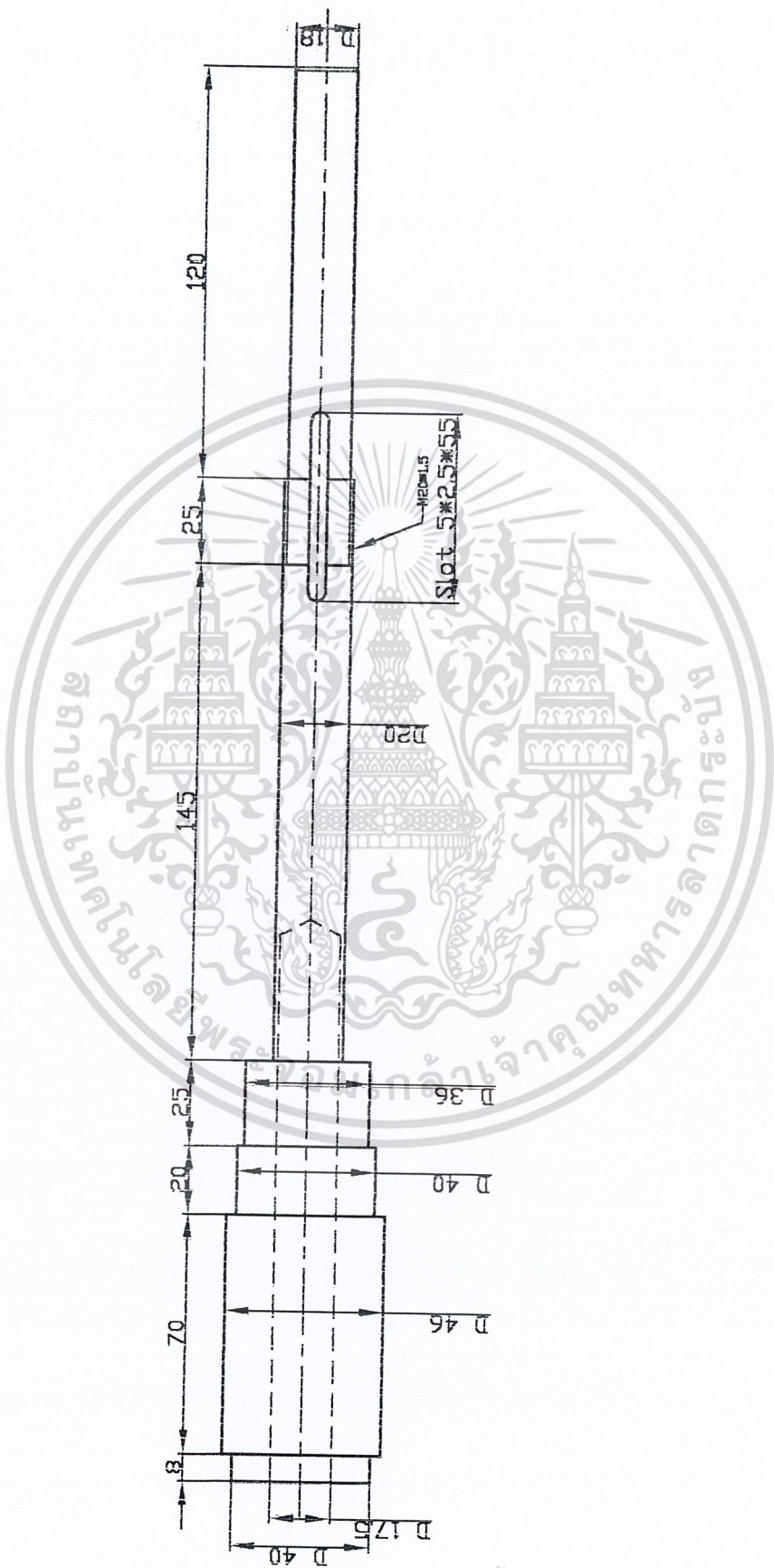
Name: p.siripong  
Date: 29/3/2545  
NO.A-003

King Mongkut's  
Institute of  
Technology



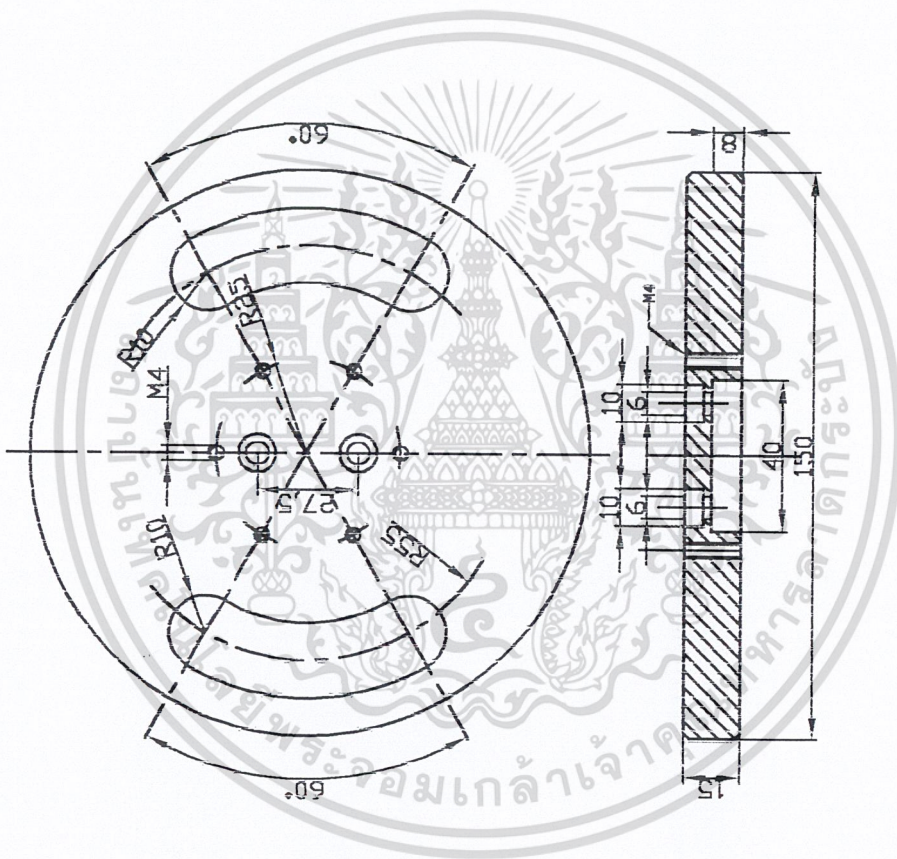
Pos-No	Nomenclature	No. of Piece	Materials	reference
	HOUSING	Name: p.siripong		King Mongkut's
		Date: 29/3/2545		Institute of
		NO. B-001		Technology
Scale				
1:1.8				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Pos-No	Nomenclature		No. of Piece	Materials	reference
Scale 1/2	SHAFT		Name: p.isiripong		King Mongkut's Institute of Technology
			Date: 29/3/2545		
			NO. B-002		

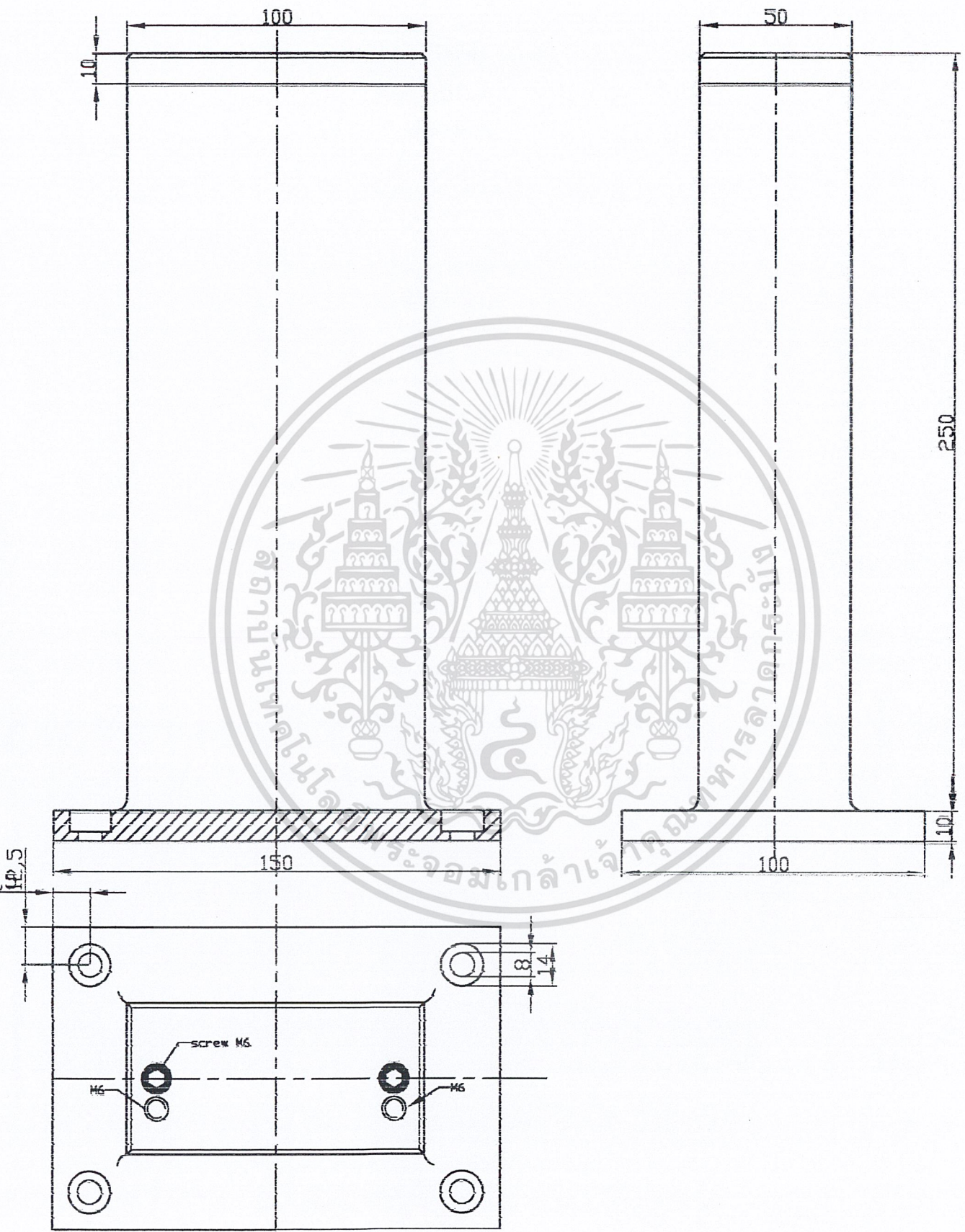
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Pos-No	Nomenclature	No. of Piece	Materials	reference
	DISK			King Mongkut's Institute Of Technology
		Name: p.siripong		
		Date: 29/3/2545		
		NO. B-003		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในหน่วยงานนี้ ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้วยเอกสาร  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิง

Pos-No	Nomenclature	No. of Piece	Materials	reference
Scale 1:1.8	COLUMN	Name: p.siripong Date: 29/3/2545		King Mongkut's Institute Of Technology

### บรรณานุกรม

- [1] กิตติ พลอยเจิมศรีภูด , ก้องเกียรติ บวรนิรัตติชัย , เอกภพ เพ็ชรภักดิ์ “เครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยบอลสี่ลูก”, ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543
- [2] Rabinowiz, E., Wear coefficient, CRC Handbook of Lubrication, Vol 2, CRC Press, Boca Rotar, FI,1984,201-207
- [3] Kruschov, M.M and Babichiv, M.A. Resistance to abrasive wear of structurally in homogeneous materials, Friction and Wear in Machinery, 12, ASTM, New York, 1958, 5-23
- [4] Tribology Data Handbook, Richard Booser, 1996
- [5] Ferdinand P. Beer and E. Russell Johnston, Jr. "Mechanics of Material" Second Edition Copyright 1992 by McGraw-Hill inc.
- [6] ศ.ดร. วรวิทย์ อิงภากรณ์, รศ.ชาญ ถนัดงาน, “การออกแบบเครื่องจักรกล”, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด ,2521



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้