

เทอร์โมไฮดรอดนามิกส์เจอร์นัลแบร์ริงหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืช

Thermohydrodynamics Journal Bearings Lubricated with Vegetable-based Oils



ปฏิญานพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

27
๑/๒๓๓
SEM1

เลขหน้.....
เลขทะเบียน..... **46006**
วัน, เดือน, ปี **27 ก.พ. 2546**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคำนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2544

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เทอร์โมไฮโดรไดนามิกส์เจอรันัลแบร์ริงหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืช

Thermohydrodynamics Journal Bearings Lubricated with Vegetable-based Oils

ผู้จัดทำ

1. นายคนัย เฟลินพิศศิริ รหัสประจำตัว 41014612
2. นายวรกุล งานฉม้ง รหัสประจำตัว 41014730



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมไฮดรอลไดนามิกส์เจอร์นัลเบริงหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืช

นายคนัย เพลินพิศศิริ 41014612

นายวรกุล งานฉม้าง 41014730

รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการศึกษาลักษณะทางทฤษฎีของ เทอร์โมไฮดรอลไดนามิกส์เจอร์นัลเบริงหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืชที่เป็นนอนนิวโตเนียน โดยเริ่มจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือนของน้ำมันพืชที่ได้จากการทดลองแล้วใช้สมการเรย์โนลด์กับสมการพลังงานคำนวณโดยใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์หาค่าการกระจายของความดัน และการกระจายของอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันในเจอร์นัลเบริงเปรียบเทียบกับค่าการกระจายความดันและการกระจายอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันในเจอร์นัลเบริงที่ได้จากการทดลองจากการทดลองพบว่า การกระจายของอุณหภูมิมิมีค่าต่ำกว่าทางทฤษฎีมากเนื่องจากในทางปฏิบัติจริงไม่เป็นอะไดเบติกส์

Thermohydrodynamics Journal Bearings Lubricated with Vegetable-based Oils

Danai Plernphissiri

Worakul Garnchamang

Assoc. prof. Mongkol Mongkolwongrojn Adviser

ABSTRACT

This paper presented the theoretical characteristic of thermohydrodynamic journal bearing with non-newtonian vegetable oil. The modified Reynolds equation include non-newtonian effects and energy equation were formulated for circular journal bearing. Starting from the relationship between shear stress and shear strain rate of oil was obtained experimentally and used curve fitting obtain rheological properties of vegetable oil. Finite difference method was used to calculate pressure distribution, temperature distribution.

The results obtained numerically and temperature due compare with the experiment. Temperature distribution from the experiment is lower than the temperature distribution from the theoretical adiabatic condition.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลายๆ ฝ่าย ด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก และอีกคนหนึ่งก็คือพี่อุทาน หนูจันทร์แก้ว ซึ่งช่วยแก้ปัญหา แนะนำ และช่วยเหลือ

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรัก ยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจเอาใจใส่ เสมอมา ในทุกๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณและขอกราบขอบพระคุณ มา ณ ที่นี้

นายคณัย เฟลทินพิศศิริ

นายวรกุล งานฉมัง



สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	IV
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	IV
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	IV
สารบัญภาพ	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 น้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันพืช	3
2.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน	3
2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียม หรือน้ำมันแร่(Mineral base oil)	3
2.1.2 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากการสังเคราะห์(Synthetic base oil)	3
2.2 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น	3
2.2.1 ความหนืด (Viscosity)	3
2.2.2 ดัชนีความหนืด (Viscosity index หรือ VI)	6
2.2.3 ด้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน(Anti-oxidation)	8
2.2.4 จุดวาบไฟ(Flash point)	8
2.2.5 จุดติดไฟ(Fire point)	8
2.2.6 จุดไหลเท (Pour point)	8
2.3 การผลิตน้ำมันพืชภายในประเทศ	8
2.4 องค์ประกอบของน้ำมันพืช	9
2.5 ประเภทของกรดไขมัน	9
2.5.1 กรดไขมันอิ่มตัว(Saturated fatty acids)	10
2.5.2 กรดไขมันไม่อิ่มตัว(Unsaturated fatty acids)	10
2.6 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันพืช (Oxidation Mechanisms)	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันพืช	12
2.8 คุณสมบัติของน้ำมันพืช	14
2.8.1 ค่าไอโอดีน(Iodine number)	14
2.8.2 จุดหลอมเหลว(Melting point)	15
2.8.3 ค่าความหนืด(Viscosity)	15
2.8.4 ค่าซาปอนิฟิเคชัน(Saponification number)	16
2.8.5 การดูดซับของน้ำมันพืชกับโลหะ(Adsorption)	16
บทที่ 3 ทฤษฎีของเจอร์นัลแบร์ริงและการหล่อลื่น	18
3.1 ชนิดของการหล่อลื่น	18
3.1.1 การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก	18
3.1.2 การหล่อลื่นแบบไฮโดรสแตติก	18
3.1.3 การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก	18
3.1.4 การหล่อลื่นแบบเบาว์เคอร์	19
3.1.5 การหล่อลื่นแบบฟิล์มของแข็ง	19
3.2 ชนิดของเจอร์นัลแบร์ริง	19
3.3 กฎของฟิรอฟ	20
3.4 กลไกของการหล่อลื่น	22
3.5 แผนภูมิที่ใช้ในการออกแบบ	23
3.6 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น	25
3.7 Flow Characteristic ของน้ำมันถั่วเหลือง	26
3.8 สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ (Modified Reynolds's equation)	27
3.9 สมการพลังงาน	30
3.10 การคำนวณหาค่า Load bearing	33
บทที่ 4 อุปกรณ์การทดลอง	35
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	35
4.2 วิธีทำThermocouple	35
4.3 การCalibration Thermocouple	35
4.4 การCalibration Pressure transducer	36
4.5 การCalibration Gap sensor	36
4.6 การคำนวณเบื้องต้นในการออกแบบชุดทดลอง	42

บทที่ 5 การคำนวณและสรุปผลการทดลอง	46
5.1 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข	46
5.2 วิธีการทดลอง	47
5.3 ผลการทดลอง	47
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ	56
6.1 สรุป	56
6.2 ข้อเสนอแนะ	56
ภาคผนวก ก.	57
ภาคผนวก ข.	61
ภาคผนวก ค.	70
บรรณานุกรม	71



สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 2.1 แสดงหน่วยวัดความหนืดของระบบต่างๆ	4
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียม[17]	4
ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากปิโตรเลียม	5
ตารางที่ 2.4 แสดงการแบ่งค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์	5
ตารางที่ 2.5 แสดงการแบ่งค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับอุตสาหกรรม	6
ตารางที่ 2.6 แสดงผลผลิตของน้ำมันพืช	9
ตารางที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของกรดไขมันชนิดต่างๆ	10
ตารางที่ 2.8 ชนิดของกรดไขมันในน้ำมันพืช[14,17]	11
ตารางที่ 2.9 แสดงปริมาณ	13
ตารางที่ 2.10 แสดงค่าไอโอดีนของน้ำมันพืช	15
ตารางที่ 2.11 แสดงจุดหลอมเหลวของน้ำมันพืช	15
ตารางที่ 2.12 แสดงความหนืดของน้ำมันพืช	15
ตารางที่ 2.13 แสดงค่าซาปอเนฟิเคชันของน้ำมันพืช	16

สารบัญภาพ

หน้าที่

รูปที่ 2.1 กราฟ Viscosity-temperature chart ของน้ำมันหล่อลื่นแบบเกรดเดี่ยว	7
รูปที่ 2.2 กราฟ Viscosity-temperature chart ของน้ำมันหล่อลื่นแบบเกรดรวม	7
รูปที่ 2.3 แสดงผลของการใส่สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันปาล์ม	14
รูปที่ 2.4 การดูดซับทางกายภาพของกรดไขมันบนผิวโลหะ	17
รูปที่ 2.5 การดูดซับทางเคมีของกรดไขมันบนผิวโลหะ	17
รูปที่ 2.6 การสร้างชั้นของสบู่ของกรดไขมันบนผิวโลหะ	17
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบต่างๆของเจอร์นัลแบร์ริง	19
รูปที่ 3.2 เพลาหมุนอยู่กลางแบร์ริง	20
รูปที่ 3.3 แสดงการหล่อลื่นชนิดต่างๆ	22
รูปที่ 3.4 กลไกการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก	23
รูปที่ 3.5 การกระจายความดันฟิล์มน้ำมัน	24
รูปที่ 3.6 Flow characteristic curve ของน้ำมันถั่วเหลือง	26
รูปที่ 3.7 ทางเรขาคณิตของ กาบร่องลื่นเพลากลม	27
รูปที่ 4.1 รูป pressure transducer	37
รูปที่ 4.2 รูป thermocouple	37
รูปที่ 4.3 รูป gap sensor	38
รูปที่ 4.4 รูป journal bearing	38
รูปที่ 4.5 รูป multimeter	39
รูปที่ 4.6 รูป power supply	39
รูปที่ 4.7 รูป selector	40
รูปที่ 4.8 รูปชุดการทดลอง	40
รูปที่ 4.9 รูปเครื่องมือRheometer ที่ใช้ในการหาคุณสมบัติความหนืดของน้ำมันพืช	41
รูปที่ 4.10 รูปเครื่องมือ dead weight ที่ใช้ในการcalibration pressure transducer	41
รูปที่ 4.11 ภาพตัดของเจอร์นัลแบร์ริงที่ใช้ในการทดลอง	44
รูปที่ 4.12 ภาพคลี่ของเจอร์นัลแบร์ริง	44
รูปที่ 4.13 ภาพคลี่ของเจอร์นัลแบร์ริง	45
รูปที่ 5.1 chartแสดงการคำนวณ โดยไฟไนต์เฟอเรนทซ์เซี่ยล	46
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเอียงศูนย์เท่ากับ 0.771	48

รูปที่ 5.3 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเยื้องศูนย์เท่ากับ 0.771	48
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเยื้องศูนย์เท่ากับ 0.811	49
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเยื้องศูนย์เท่ากับ 0.811	49
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเยื้องศูนย์เท่ากับ 0.8312	50
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเยื้องศูนย์เท่ากับ 0.8312	50
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเยื้องศูนย์เท่ากับ 0.69774	51
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเยื้องศูนย์เท่ากับ 0.69774	51
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเยื้องศูนย์เท่ากับ 0.74132	52
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเยื้องศูนย์เท่ากับ 0.74132	52
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเยื้องศูนย์เท่ากับ 0.6928	53
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเยื้องศูนย์เท่ากับ 0.6928	53
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเยื้องศูนย์เท่ากับ 0.68415	54
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเยื้องศูนย์เท่ากับ 0.68415	54
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง load bearing กับ ค่าอัตราการเยื้องศูนย์ต่างๆ	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

จุดมุ่งหมายของการหล่อลื่นก็เพื่อที่จะลดความเสียหาย ความสึกหรอและความร้อนที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีการเสียดสีกัน การหล่อลื่นทำได้โดยการใส่สารหล่อลื่นเข้าไปอยู่ระหว่างผิวสัมผัสที่เคลื่อนไหวไปมา สารหล่อลื่นนี้อาจจะเป็นน้ำมันหล่อลื่น (lubricating oil) ไขข้นหรือจาระบี (grease) อากาศหรืออื่นๆซึ่งขึ้นอยู่กับการประยุกต์ไปใช้งาน โดยในที่นี้จะกล่าวถึงเจอร์นัลแบร์ริง (journal bearing) โดยใช้ไขมันเป็นสารหล่อลื่น

เนื่องจากชิ้นส่วนของเครื่องมือที่มีการเคลื่อนที่ทำให้เกิดแรงเสียดทาน และความร้อนจึงจำเป็นที่จะต้องมีการหล่อลื่น ซึ่งในปัจจุบันน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่จะเป็นน้ำมันแร่ นับวันยังมีราคาแพงมากขึ้นซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้ทำการศึกษาสารหล่อลื่นที่เป็นน้ำมันพืชซึ่งจะมีราคาถูกกว่าและไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อศึกษาพฤติกรรมการกระจายความดันและการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันพืชที่นำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นซึ่งอาจเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาใช้ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นทางทฤษฎีของเทอร์โมไฮโดรไดนามิกส์เจอร์นัลแบร์ริงที่หล่อลื่นด้วยน้ำมันพืช โดยการหาการกระจายความดันและการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันแล้วนำมาเปรียบเทียบกับ การทดลองเพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้งานจริง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

เริ่มจากการหาคุณสมบัติการไหลของน้ำมันพืช โดยใช้เครื่องrheometerในการทดสอบ ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (shear stress) กับ อัตราส่วนความเค้นเฉือน (shear rate) จากกราฟความสัมพันธ์ก็จะมาหาสมการโมดิฟายเรย์โนลด์ แล้วนำสมการ โมดิฟายเรย์โนลด์ ไปหาสมการการกระจายความดันบนฟิล์มน้ำมัน

ต่อมาก็ให้นำสมการพลังงานมาอินทิเกรตตามแกน y จาก 0 ถึง h ก็จะได้สมการการกระจายอุณหภูมิตั้งบนฟิล์มน้ำมันแล้วนำสมการการกระจายอุณหภูมิกับสมการการกระจายความดันไปคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ได้ค่าการกระจายอุณหภูมิตั้งบนฟิล์มน้ำมัน

การทดลองก็จะทดลองหาค่าการกระจายอุณหภูมิโดยthermocoupleวัดค่าอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันตามเส้นรอบวงของเจอร์นัลแบร์ริงและหาค่าการกระจายความดันจากการใช้pressure transducerวัดค่าความดันของ

ฟิล์มน้ำมันตามเส้นรอบวงของเจอร์นัลแบร์ริง แล้วนำค่าที่ได้จากการทดลองไปเขียนกราฟการกระจายความดันกับการกระจายอุณหภูมิตามแนว θ โดยเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ค่าอัตราการใช้ศูนย์ต่างๆ (E) กับ load bearing (W)

1.4วิธีการดำเนินงาน

การทำโครงการนี้จะเริ่มต้นด้วยการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการหล่อลื่น ซึ่งมีหลักๆคือการโมดิฟาย์สมการเรย์โนล์ส,สมการพลังงาน ซึ่งจะมีรายละเอียดต่างๆของสมการในบทที่3 นอกจากนี้ยังใช้ความรู้ทางไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์คำนวณหาค่าของสมการต่างๆ

จากนั้นก็จะเป็นการทดลองหาค่าการกระจายความดันและอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมัน โดยเริ่มจากการออกแบบเจอร์นัลแบร์ริงตำแหน่งของการติดตั้งthermocouple,pressure transducerและgap sensor แต่ก่อนการทดลองจะต้องทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองก่อนเพื่อความถูกต้องของการทดลอง

ทำการทดลองโดยการใช้ น้ำมันพืชเป็นสารหล่อลื่นในเจอร์นัลแบร์ริงวัดค่าอุณหภูมิ ความดัน ระยะห่างของเพลากับแบร์ริงจากthermocouple,pressure transducerและgap sensorแล้วนำผลการทดลองกับการคำนวณเปรียบเทียบกัน



บทที่ 2

น้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันพืช

น้ำมันหล่อลื่น คือสารหล่อลื่นที่มีลักษณะเป็นของเหลว ทำหน้าที่ลดแรงเสียดทานระหว่างผิวที่สัมผัส ในชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องจักรที่มีการเคลื่อนที่และสัมผัสกัน ในน้ำมันหล่อลื่นประกอบด้วย น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน(Base oil) และสารเพิ่มคุณภาพ(Additives)

2.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน(Base oil)

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียม หรือน้ำมันแร่(Mineral base oil)

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทนี้เป็นผลผลิตที่ได้มาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในหอกลั่นบรรยากาศ โดยส่วนที่เบาที่มีจุดเดือดต่ำ อันได้แก่ ก๊าซ น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด และน้ำมันดีเซล จะระเหยเป็นไอแยกออกมา และส่วนที่หนักที่มีจุดเดือดสูงจะไม่ระเหยเป็นไอ

2.1.2 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากการสังเคราะห์(Synthetic base oil)

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทนี้ ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะนำมาใช้ในงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษเฉพาะในการหล่อลื่น ซึ่งในปัจจุบันนี้มีอยู่ด้วยกัน ประเภท หลายชนิด โดยจะมีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไปตามแต่ละบริษัทผู้ผลิต ซึ่งราคาค่อนข้างจะสูง เมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานชนิดอื่น ตัวอย่างของน้ำมันสังเคราะห์ที่นิยมใช้กัน มีดังนี้

ก) โพลีแอลฟาโอเลฟิน(Polyalphaolefin , PAO) เป็นสารที่มีค่าดัชนีความหนืดค่อนข้างสูง มีจุดไหลเทและการระเหยตัวต่ำ และมีความต้านทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี

ข) เอสเตอร์ (Ester) เป็นสารที่มีค่าดัชนีความหนืดสูงมาก มีการระเหยตัวต่ำ และมีความคงตัวต่อสภาวะที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงมากๆ

ค) โพลีไกลคอล(Polyglycol) เป็นสารที่มีจุดเดือดและจุดไหลเทต่ำ นิยมนำมาใช้งานในที่มีอุณหภูมิสูง เช่น ใช้ทำน้ำมันเบรค และน้ำมันไฮดรอลิก เป็นต้น

ง) ซิลิโคน (Silicone) ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานสำหรับในงานที่มีอุณหภูมิสูง

2.2 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

2.2.1 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดหมายถึงความใส หรือความข้นของน้ำมัน โดยวัดที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง น้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะไหลได้ง่าย และชั้นฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นที่บาง ส่วนน้ำมันที่มีความหนืดสูงจะไหลได้ยาก

และจะให้ชั้นฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นที่หนากว่าของเหลวที่มีความหนืดต่ำ หน่วยวัดความหนืดมีอยู่หลายระบบ ซึ่งแต่ละระบบก็จะอ้างอิงอุณหภูมิที่ใช้ในการวัดแตกต่างกันออกไป ซึ่งอาจสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงหน่วยวัดความหนืดของระบบต่างๆ

ประเทศ หรือระบบ	หน่วยความหนืด	อุณหภูมิอ้างอิงที่ใช้ในการวัด
1. ระบบสากล (เมตริก)	Centistoke (cSt)	40 °C และ 100 °C
2. สหรัฐอเมริกา	Saybolt Universal Second(SUS หรือ SSU)	100°F และ 210°F
3. สหราชอาณาจักร	Redwood No.1 (RW1)	70°F, 100°F, 140°F และ 200°F
4. เยอรมัน	Engler (°E)	F 20 °C, 50 °C และ 100 °C

จากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นว่าในน้ำมันหล่อลื่นจะประกอบด้วย น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน(Base oil) และสารเพิ่มคุณภาพ(Additives) ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ใช้กันส่วนใหญ่มักได้มาจากน้ำมันปิโตรเลียมอันได้แก่ พาราฟินิก(Paraffinic) และเนฟทีนิก(Naphthenic) เป็นต้น น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทนี้เป็นผลผลิตที่ได้มาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ ซึ่งตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติค่าความหนืดและค่าดัชนีความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากปิโตรเลียม

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียม[17]

Molecular weight	Viscosity, mPa.s		Viscosity index
	40 °C	100 °C	
Paraffinic petroleum based oil			
450	48.0	5.9	96
576	144.3	12.2	99
700	523	27.4	91
Naphthenic petroleum based oil			
349	49.9	5.1	23
383	131.4	8.3	8
400	485	15.5	-42

ในการที่จะเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทใดนั้น ควรที่จะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานนี้ๆด้วย เช่นความหนืด ความหนาแน่น จุดไหลเท รวมทั้งความสามารถในการต้านการรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศได้ก็อีกด้วย และทางด้านราคา เป็นต้น ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากปิโตรเลียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากปิโตรเลียม

คุณสมบัติ	Paraffinic	Naphthenic
ความหนาแน่น	ต่ำ	สูง
จุดไหลเท	สูง	ต่ำ
การต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน	ไม่ดี	ไม่ดี
ดัชนีความหนืด	สูง	ต่ำ

น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีมากมายหลายประเภท หลายชนิด ซึ่งจะมีชื่อเรียกกันต่างๆ แล้วแต่ผู้ผลิตจะกำหนดขึ้น ในการเลือกที่จะใช้น้ำมันหล่อลื่นประเภทใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับว่าผู้ใช้นั้นนำไปใช้กับงานประเภทใด หากต้องการนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมควรเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นที่ไม่จำเป็นต้องมีค่าดัชนีความหนืดสูงมากนัก และถ้าหากต้องการนำมาใช้กับเครื่องยนต์ จำเป็นที่จะต้องเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิค่อนข้างกว้าง ซึ่งก็คือค่าความหนืดจะต้องไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิมากนัก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ามีค่าดัชนีความหนืดสูงนั่นเอง นอกจากนี้จะมีค่าดัชนีความหนืดสูงแล้ว ยังจะต้องมีคุณสมบัติอื่นๆเพิ่มเติมด้วย เช่นจะต้องไม่เกิดการกัดกร่อนต่อชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในระบบการหล่อลื่น รวมทั้งจะต้องมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เป็นต้น ดังนั้นทางสมาคมวิศวกรยานยนต์(Society of Automotive Engineers)หรือที่เรียกกันว่า SAE จึงได้กำหนดมาตรฐานเกี่ยวกับความหนืดของน้ำมันของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับใช้ในเครื่องยนต์ และในอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2.4 และ ตารางที่ 2.5 ตามลำดับ ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก

ตารางที่ 2.4 แสดงการแบ่งค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์

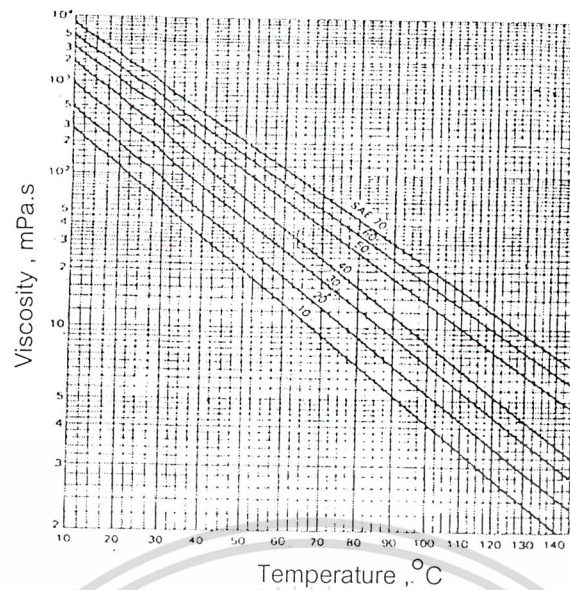
SAE viscosity no.	Viscosity in cSt ($\mu\text{m}^2/\text{s}$)			
	0 °F (-18 °C)		210 °F (100 °C)	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Crankcase oils				
5W	-	869	-	-
10W	1,303	2,606	-	-
20W	2,606	10,423	-	-
20W	-	-	5.73	9.62
30W	-	-	9.62	12.93
40W	-	-	12.93	16.77
50W	-	-	16.77	22.68

ตารางที่ 2.5 แสดงการแบ่งค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับอุตสาหกรรม

Grade identification (ISO VG)	Midpoint viscosity [$\mu\text{m}^2/\text{s}(\text{cSt})$ at 40°C]	Viscosity limits [$\mu\text{m}^2/\text{s}(\text{cSt})$ at 40°C]	
		Minimum	Maximum
2	2.2	1.98	2.42
3	3.2	2.88	3.52
5	4.6	4.14	5.06
7	6.8	6.12	7.48
10	10	9.0	11
15	15	13.5	16.5
22	22	19.8	24.2
32	32	28.8	35.2
46	46	41.4	50.6
68	68	61.2	74.8
100	100	90	110
150	150	135	165
220	220	198	242
320	320	288	352
460	460	414	506
680	680	612	748
1000	1000	900	1100
1500	1500	1350	1650

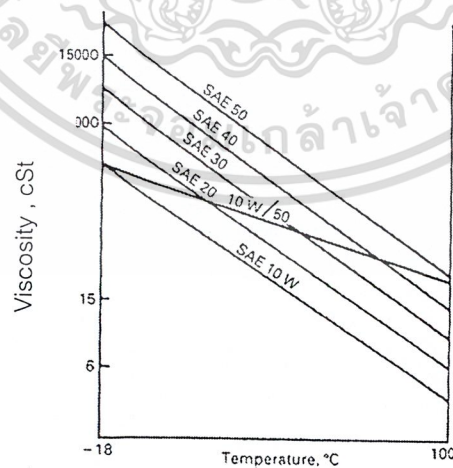
2.2.2 ดัชนีความหนืด (Viscosity index หรือ VI)

โดยปกติแล้วค่าความหนืดของน้ำมันจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดค่าดัชนีความหนืดขึ้นมาเพื่อใช้เป็นตัวเลขที่คอยบ่งบอกว่าน้ำมันชนิดไหนมีการเปลี่ยนแปลงของความหนืดมากกว่ากัน โดยการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนืดระหว่างอุณหภูมิหนึ่งกับอีกอุณหภูมิหนึ่ง แล้วนำค่าไปเปรียบเทียบกับน้ำมันมาตรฐาน ถ้าค่าดัชนีความหนืดยิ่งสูงก็จะมี การเปลี่ยนแปลงของความหนืดน้อย เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป น้ำมันหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดไม่สูงมากนักและมีค่าตรงกับมาตรฐานของ SAE เพียงจุดเดียว เราจะเรียกน้ำมันประเภทนี้ว่า น้ำมันประเภทเกรดเดียว(single grade) เช่น SAE 10 , SAE 20 ,SAE30,SAE40 และ SAE 50 เป็นต้น (ดังแสดงในรูปที่ 2.1)ส่วนน้ำมันหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดสูงและให้ค่าความหนืดตรงกับมาตรฐานของ SAE มากกว่าหนึ่งจุด เราจะเรียกน้ำมันประเภทนี้ว่า น้ำมันประเภทเกรดรวม(multi grade) เช่น น้ำมัน SAE10W/50 (ดังแสดงในรูปที่ 2.2) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 กราฟ Viscosity-temperature chart ของน้ำมันหล่อลื่นแบบเกรดเดี่ยว

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าน้ำมันหล่อลื่น SAE10W/50 จะมีค่าความหนืดอยู่ระหว่าง SAE 10 กับ SAE 50 ทั้งนี้เป็นเพราะได้มีการผสมสารเพิ่มความหนืด(VI improver) ลงไปในน้ำมันประเภทเกรดเดี่ยว(single grade) SAE 10 ทำให้น้ำมันหล่อลื่น SAE10W/50 สามารถใช้งานได้กว้างขึ้น นั่นคือที่อุณหภูมิต่ำ -18°C จะมีค่าความหนืดเท่ากับ น้ำมันหล่อลื่น SAE10 และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ประมาณ 100°C จะมีค่าความหนืดเท่ากับ น้ำมันหล่อลื่น SAE 50



รูปที่ 2.2 กราฟ Viscosity-temperature chart ของน้ำมันหล่อลื่นแบบเกรดรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ด้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน(Anti-oxidation)

เนื่องจากน้ำมันเป็นส่วนผสมของไฮโดรคาร์บอน และเมื่อเกิดการสัมผัสกับอากาศแล้ว ก็อาจเกิดการทำปฏิกิริยากัน เกิดเป็น คราบยางเหนียว(gum) และกรด เป็นต้น และยังถ้ามีสิ่งเร้าภายนอกมากระตุ้นด้วยแล้ว เช่น แสงสว่าง ความร้อน หรือโลหะต่างๆ ก็จะก่อให้เกิดการรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศเกิดเร็วขึ้นอีก

2.2.4 จุดวาบไฟ(Flash point)

อุณหภูมิจุดวาบไฟ เป็นอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มระเหยกลายเป็นไอ และหากนำเข้าไปใกล้เปลวไฟก็จะเกิดการลุกติดไฟขึ้นมา ดังนั้นหากน้ำมันหล่อลื่นมีจุดวาบไฟสูง ก็จะมีความปลอดภัยในการใช้งานสูงขึ้น

2.2.5 จุดติดไฟ(Fire point)

จุดติดไฟ คืออุณหภูมิที่น้ำมันสามารถจุดติดไฟได้อย่างต่อเนื่อง โดยจะมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดวาบไฟ โดยทั่วไปประมาณ 50-75 °F

2.2.6 จุดไหลเท (Pour point)

คืออุณหภูมิต่ำที่สุดที่น้ำมันสามารถลื่นไหลได้โดยไม่มีสิ่งมารบกวน(ยังไม่แข็งตัว) ในการเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ เช่นในที่ที่มีอากาศหนาว ควรพิจารณาเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นที่มีจุดไหลเทต่ำ เพื่อป้องกันการแข็งตัวของน้ำมัน

2.3 การผลิตน้ำมันพืชภายในประเทศ

ในระยะเวลาที่ผ่านมาผลผลิตน้ำมันพืชในประเทศไทยมักไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการผลิตไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ ทำให้ผลผลิตที่ได้มีน้อย ต่อมาได้มีการนำเอาเครื่องจักรมาช่วยในการผลิตทำให้สามารถผลิตน้ำมันพืชได้มากขึ้น สำหรับผลผลิตของน้ำมันพืชจากตารางที่ 2.6 จะพบว่าในปี พ.ศ. 2524 มีทั้งสิ้น 100,500 เมตริกตัน ผลผลิตที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดได้แก่ น้ำมันปาล์ม รองลงมาได้แก่ น้ำมันละหุ่ง น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันรำข้าว และน้ำมันถั่วเหลือง ตามลำดับ

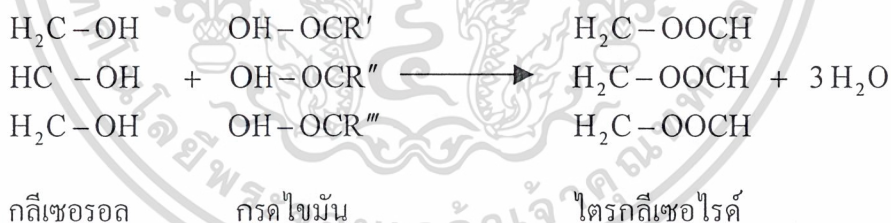
ตารางที่ 2.6 แสดงผลผลิตของน้ำมันพืช

ชนิดของน้ำมันพืช	ผลผลิต*(หน่วย:เมตริกตัน)		
	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

2.4 องค์ประกอบของน้ำมันพืช

น้ำมันพืชเป็นสารอินทรีย์จำพวกหนึ่ง ซึ่งส่วนประกอบของกลีเซอรอล(glycerol) กับกรดไขมัน (fatty acid) ดังนี้



เมื่อ R',R'',R''' = โซ่ของกรดไขมัน

2.5 ประเภทของกรดไขมัน

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

2.5.1 กรดไขมันอิ่มตัว(Saturated fatty acids)

กรดไขมันอิ่มตัวเป็นกรดไขมันที่ไม่มีพันธะคู่(double bond) อยู่ในโครงสร้าง ซึ่งคาร์บอนแต่ละตัวบนสายโซ่จะต่อกันกับไฮโดรเจนอย่างน้อย 2 ตัว หากในน้ำมันพืชมีกรดไขมันอิ่มตัวอยู่มากจะทำให้ น้ำมันพืชนั้นเป็นไขมัน ตัวอย่างของกรดไขมันอิ่มตัวนี้ได้แก่ กรดสเตียริก(stearic acid) กรดปาล์มมิติก (palmitic acid) กรดลอริก(Lauric) และ กรดไมริสติก(Myristic) เป็นต้น โครงสร้างของกรดไขมันเหล่านี้ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.7

2.5.2 กรดไขมันไม่อิ่มตัว(Unsaturated fatty acids)

กรดไขมันไม่อิ่มตัว ที่ไฮโดรคาร์บอนจะประกอบด้วยพันธะคู่ตั้งแต่ 1 คู่พันธะขึ้นไป ซึ่งตำแหน่งของพันธะคู่ของกรดไขมันแต่ละชนิดก็จะแตกต่างกันออกไป โดยถ้ามีพันธะเดี่ยวคั่นอยู่ระหว่างพันธะคู่จะเรียกพันธะแบบนี้ว่า พันธะเดี่ยวสลับคู่ (conjugate double bond) ดังแสดงเป็นตัวอย่างดังนี้



ตารางที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของกรดไขมันชนิดต่างๆ

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	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$
กรดลิโนลีนิก(Linoleic)	C18:2	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$
กรดลิโนลีนิก(Linolenic)	C18:3	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$

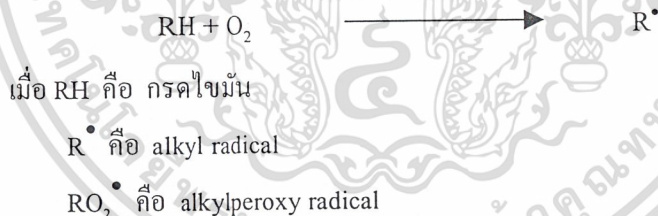
ตารางที่ 2.8 ชนิดของกรดไขมันในน้ำมันพืช[14,17]

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	Soybean oil
Saturated Acids										
12	Lauric	44-51	47-52	...	...	...	...	...	...	...
14	Myristic	13-19	14-18	0.5-3	1	1	3-6	4-10	1-2	1
16	Palmitic	8-11	7-9	32-45	26-31	1-5	25-37	24-38	22-31	10
18	Stearic	1-3	1-3	4-7	3-5	1-3	14-29	15-30	16-24	2
Total (typical)		92	81	40-50	28-35	3-8	50-55	52-57	35-40	13
Unsaturated Acids										
Monounsaturated										
18	Oleic	5-8	11-19	38-53	19-26	14-38	26-50	38-48	38-44	29
Diunsaturated										
18	Linoleic	1.0-2.5	0.5-2	6-12	37-50	10-22	1-3	...	4-9	51
22	Erucic	...	...	...	...	40-64	...	...	...	...
Triunsaturated										
18	Linolenic	...	...	...	...	8-12	...	...	1-2	7
Total (typical)		8	19	50-60	60-70	92-97	44-52	40-50	60-65	87

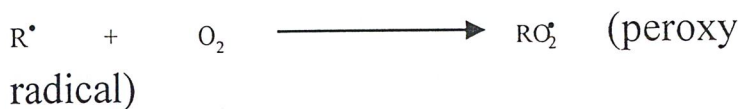
2.6 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันพืช (Oxidation Mechanisms)

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

- 1) ขั้นเริ่มต้น(initiation) เป็นขั้นตอนที่มีการเกิดอนุมูลอิสระ หรือที่เรียกว่า radical chain reaction



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

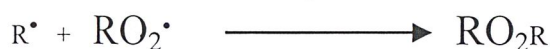


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การนำน้ำมันให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึง RO₂[•] + H₂O ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ขั้นสิ้นสุด(Terminal) ของปฏิกิริยา เป็นขั้นที่อนุมูลอิสระ หรือ free radical เข้าทำปฏิกิริยากันเอง ได้สารที่ไม่ใช่ตัวการทำปฏิกิริยา(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



2.7 สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันพืช

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า น้ำมันพืชเป็นสารประกอบอินทรีย์ จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย โดยเฉพาะถ้าในน้ำมันพืชมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่ใน โมเลกุลมาก จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย ดังนั้นจึงได้มีการพยายามหาสารที่จะมาช่วยยับยั้งหรือ หน่วงให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดได้ช้าลง หรือไม่เกิดขึ้นเลย

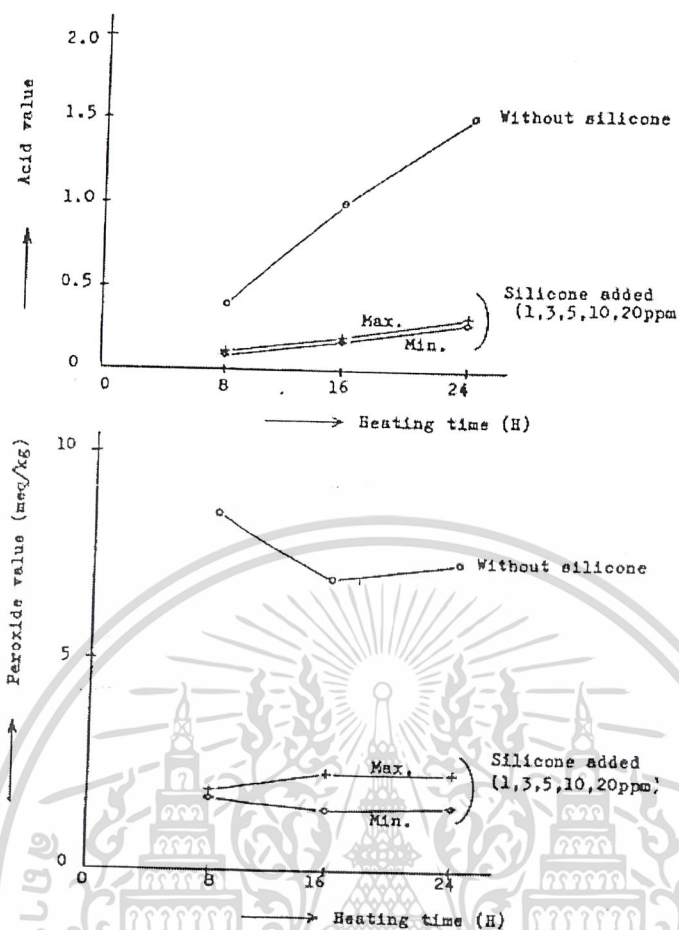
โดยปกติในน้ำมันพืชจะมีสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันอยู่ใน โมเลกุลของน้ำมันพืชด้วย เช่น สารโทโคฟีรอล(Tocopherol) และอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งในน้ำมันพืชแต่ละชนิดก็จะมีปริมาณของสารมากน้อยไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 แสดงปริมาณ

	Tocopherols (mg/kg)						
	α -T	β -T	γ -T	δ -T	Total	α -T ₃	γ -T ₃
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				

ของสารโทโคฟีรอลในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ

สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่มีอยู่ในน้ำมันพืชนั้นอาจถูกทำลายหรือสูญเสียไปในระหว่างขั้นตอนกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงได้มีการเติมสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันเพิ่มเข้าไปในน้ำมันพืชด้วย สารที่เติมเข้าไปจะไปยับยั้ง หรือเข้าไปหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่(chain reaction) ซึ่งอาจเป็นขั้น ตอนเริ่มต้น(initiation)หรือในขั้นตอนการแพร่กระจาย(propagation)ก็ได้ ขึ้นอยู่กับประเภทและชนิดของสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันนั้น ดังนั้นในการสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดก็มีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป รูปที่ 2.3 เป็นแสดงผลของการใช้น้ำมันซิลิโคน(silicone)เป็นสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันใส่ลงในน้ำมันปาล์ม[5] จากรูปจะเห็นว่าปริมาณของกรด และค่าเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันพืชที่ไม่ได้ใส่น้ำมันซิลิโคน และจากการวิจัยของ Freeman[4] พบว่าการผสมน้ำมันซิลิโคนลงไปในน้ำมันพืชยังสามารถป้องกันการเกิดฟองได้ด้วยซึ่งโดยปรกติจะใช้ในปริมาณน้อยโคนประมาณ 1-2 ppm.



รูปที่ 2.3 แสดงผลของการใส่สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันปาล์ม

2.8 คุณสมบัติของน้ำมันพืช

2.8.1 ค่าไอโอดีน (Iodine number)

ค่าไอโอดีน คือจำนวนกรัมของไอโอดีนซึ่งถูกดูดซับไว้ด้วยไขมัน 100 กรัม ซึ่งค่าไอโอดีนนี้ยังสามารถแสดงถึงความอิ่มตัวมากน้อยของกรดไขมันในน้ำมันพืช 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 2.10

ตารางที่ 2.10 แสดงค่าไอโอดีนของน้ำมันพืช

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

2.8.2 จุดหลอมเหลว(Melting point)

คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งได้แก่จุดหลอมเหลว ในซึ่งจากตารางที่ 2.11 จะเห็นว่าน้ำมันปาล์มมีจุดหลอมเหลวสูง จึงทำให้น้ำมันปาล์มปรากฏเป็นของไข ที่อุณหภูมิ 35°C ส่วนน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันถั่วเหลือง จะมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 25° และ -16°C ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าน้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 2.11 แสดงจุดหลอมเหลว ของน้ำมันพืช

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

2.8.3 ค่าความหนืด(Viscosity)

ค่าความหนืดเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการต้านทานการไหล หากน้ำมันพืชมีค่าความหนืดต่ำก็จะไหลได้ง่ายและให้ชั้นฟิล์มน้ำมันที่บาง ส่วนในน้ำมันพืชที่มีค่าความหนืดสูง ก็จะให้ชั้นฟิล์มที่หนากว่า ค่าความหนืดของน้ำมันพืชในแต่ละชนิดก็จะมีค่าแตกต่างกันออกไปดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 แสดงความหนืดของน้ำมันพืช

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

2.8.4 ค่าซาปอนนิฟิเคชัน(Saponification number)

ค่าซาปอนนิฟิเคชัน คือจำนวนมิลลิกรัมของโพตัสเซียมไฮดรอกไซด์(KOH) ที่ใช้ในการทำให้น้ำมันหรือไขมันหนัก 1 กรัม กลายเป็นสบู่ ค่าซาปอนนิฟิเคชันนี้ยังสามารถใช้เป็นตัวบ่งบอกถึงจำนวนพันธะคู่(double bond) ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวว่ามีอยู่มากหรือน้อย เช่น ถ้าค่าซาปอนนิฟิเคชันมีค่าสูงก็แสดงว่าจะมีพันธะคู่ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวอยู่น้อย ในทางกลับกันถ้าค่าซาปอนนิฟิเคชันมีค่าต่ำก็แสดงว่าจะมีพันธะคู่ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวอยู่มาก ซึ่งค่าซาปอนนิฟิเคชันของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 แสดงค่าซาปอนนิฟิเคชันของน้ำมันพืช

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

2.8.5 การดูดซับของน้ำมันพืชกับ โลหะ(Adsorption)

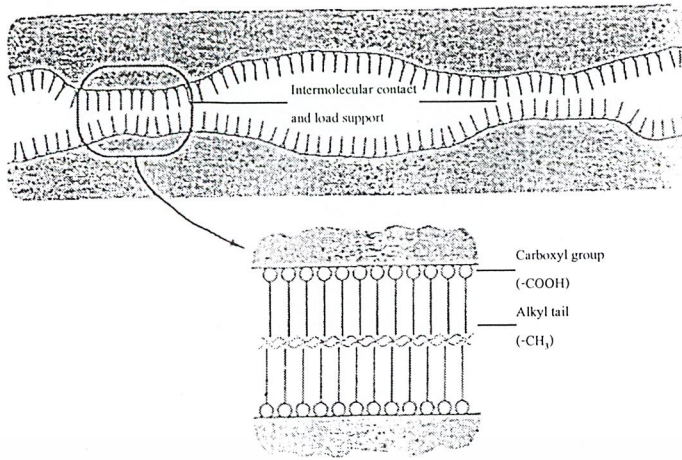
จากที่กล่าวมาข้างต้นแล้วว่าในน้ำมันพืชจะประกอบไปด้วยโมเลกุลของกรดไขมัน(fatty acid) ซึ่งจะประกอบไปด้วยหมู่ที่มีขั้ว(polar group) ซึ่งก็คือส่วนของ $-COOH$ และหมู่ที่ไม่มีขั้ว(non-polar group) คือส่วนของ $-CH_2$ ซึ่งการมีขั้วของกรดไขมันในน้ำมันพืชนี้จะมีค่าสำคัญอย่างมากต่อการกลไกการยึดเกาะของกรดไขมันกับผิวของโลหะ กลไกการยึดเกาะของกรดไขมันนี้เราเรียกว่า การดูดซับ(adsorption) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

1) การดูดซับทางกายภาพ(Physical adsorption หรือ physisorption)

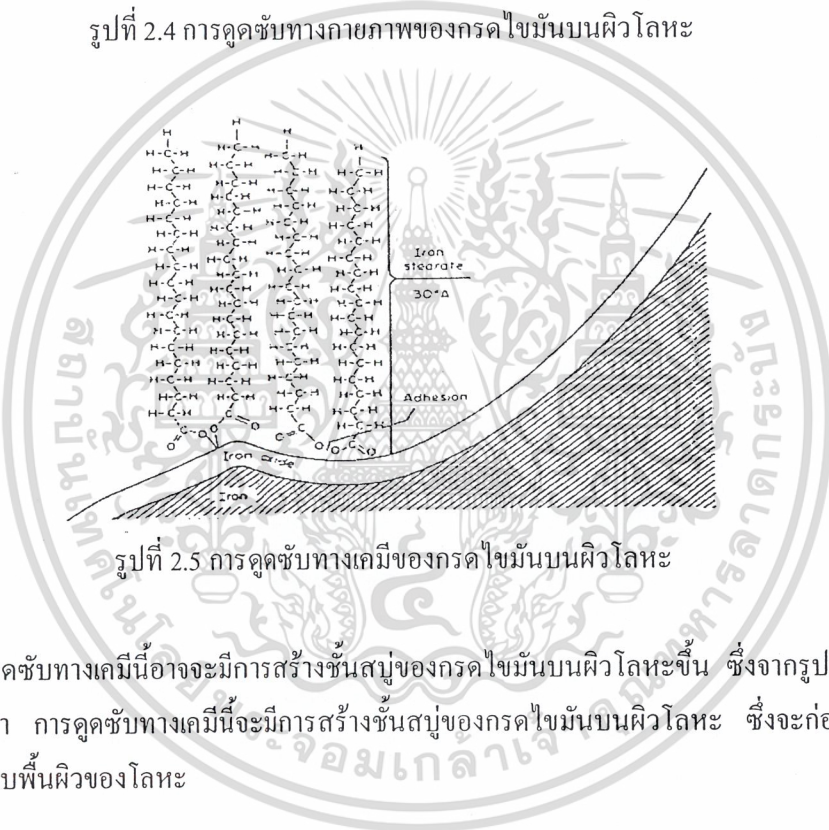
การดูดซับทางกายภาพของกรดไขมันบนผิวโลหะนี้ เกิดจากการที่หมู่ที่มีขั้ว($-COOH$) หันเข้าหาผิวโลหะ อันเนื่องจากแรงดึงดูดทางฟิสิกส์ หรือที่เรียกกันว่าแรงวานเดอวาลส์(van der Waals) ในขณะเดียวกันก็จะเอาส่วนที่ไม่มีขั้ว($-CH_2$) หันเข้าหาส่วนที่ไม่มีขั้วของโมเลกุลพวกเดียวกัน ทำให้เกิดการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบของโมเลกุลของกรดไขมันตลอดพื้นผิวโลหะ (ดังแสดงในรูปที่ 2.4) ซึ่งความสามารถในการดูดซับทางกายภาพนี้จะขึ้นอยู่กับขั้ว(polar)โมเลกุลของกรดไขมันชนิดนั้นๆ ด้วย

2) การดูดซับทางเคมี(Chemical adsorption หรือ Chemisorption)

การดูดซับทางเคมีของกรดไขมันบนผิวโลหะนี้ เกิดจากการทำปฏิกิริยากันของกรดไขมันกับโลหะ ซึ่งจะได้สารประกอบของโลหะ หรือที่เรียกว่าออกไซด์ ยกตัวอย่างเช่น การเกิดปฏิกิริยากันของกรดสเตียริก(stearic acid) กับโลหะที่เป็นเหล็ก จะก่อให้เกิดสารประกอบของโลหะที่เรียกว่าเหล็กสเตียเรท(iron stearate) และสบู่ของโลหะ หรือเหล็กออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งจะเห็นว่าการดูดซับทางเคมีนี้จะทำให้เกิดการสร้างชั้นของสบู่โลหะซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นบางๆ(surface layer) ล้อมรอบผิวโลหะนั้นไว้

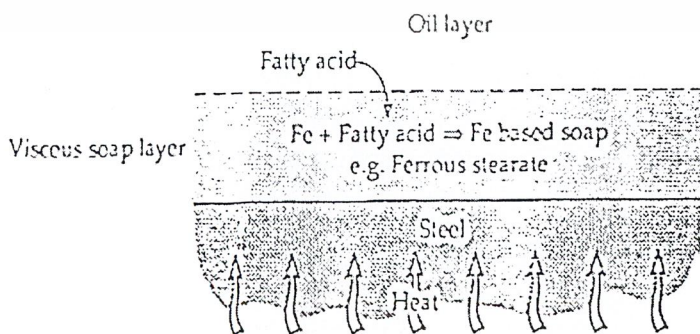


รูปที่ 2.4 การดูซับทางกายภาพของกรดไขมันบนผิวโลหะ



รูปที่ 2.5 การดูซับทางเคมีของกรดไขมันบนผิวโลหะ

การดูซับทางเคมีนี้อาจจะมีการสร้างชั้นสปูของกรดไขมันบนผิวโลหะขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 2.6 ได้แสดงให้เห็นว่า การดูซับทางเคมีจะมีการสร้างชั้นสปูของกรดไขมันบนผิวโลหะ ซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นบางๆตลอดรอบพื้นผิวของโลหะ



รูปที่ 2.6 การสร้างชั้นของสปูของกรดไขมันบนผิวโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีของเจอรันัลแบริงและการหล่อลื่น

3.1 ชนิดของการหล่อลื่น

การหล่อลื่นโดยทั่วไปอาจแบ่งออกได้เป็น 5 ชนิดคือ

- 3.1.1 การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์ (hydrodynamic lubrication)
- 3.1.2 การหล่อลื่นแบบไฮโดรสแตติก (hydrostatic lubrication)
- 3.1.3 การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก (elastohydrodynamic lubrication)
- 3.1.4 การหล่อลื่นแบบบาวนด์รี (boundary lubrication)
- 3.1.5 การหล่อลื่นแบบฟิล์มของแข็ง (solid-film lubrication)

3.1.1 การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก

การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกหรือการหล่อลื่นแบบฟิล์มหนา (thick-film) หมายถึงการหล่อลื่นผิวสัมผัสของแบริงด้วยน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนาเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้ผิวของโลหะสัมผัสกันได้ ความดันที่เกิดขึ้นภายในชั้นของน้ำมันหล่อลื่น (lubricant film) จะช่วยในการรับแรงที่กระทำต่อแบริง โดยที่การเคลื่อนที่ของผิวน้ำแบริงจะดึงเอาน้ำมันหล่อลื่นเข้าไปในช่องรูปสามเหลี่ยม (wedge-shaped) ด้วยความเร็วที่สูงพอที่จะทำให้เกิดความดันเพื่อรับแรงดังกล่าว ดังนั้นการหล่อลื่นแบบนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นเพียงพอ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความเร็วของเจอรันัล (หรือเพลลา) ตลอดจนความหนืด (viscosity) ของน้ำมันหล่อลื่นอีกด้วย

3.1.2 การหล่อลื่นแบบไฮโดรสแตติก

การหล่อลื่นแบบไฮโดรสแตติกหมายถึงการหล่อลื่นโดยการอัดของไหลหล่อลื่นเข้าไปในแบริงด้วย ความดันสูงเพียงพอที่จะแยกผิวสัมผัสออกจากกันได้ โดยที่ไม่ต้องให้มีการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างผิวสัมผัส โดยในที่นี้จะไม่กล่าวถึงการออกแบบแบริงโดยการหล่อลื่นชนิดนี้ ซึ่งก็มีความสำคัญมากเช่นกัน ตัวอย่างเช่น การหล่อลื่นแบริงที่มีความเร็วต่ำ ซึ่งไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกได้ และจำเป็นที่ จะต้องใช้การหล่อลื่นแบบไฮโดรสแตติกเข้าช่วย หรือใช้ความดันไฮโดรสแตติกเข้าช่วยในขณะเริ่มเดินเพลลา ขนาดใหญ่ เป็นต้น

3.1.3 การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก

ในการหล่อลื่นซึ่งความดันที่เกิดขึ้นภายในชั้นของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าสูงมาก ผิวหน้าของแบริงก็จะเกิดการยุบตัวขึ้น (deformation) โดยที่ผิวหน้าของแบริงไม่มีการสัมผัสกันการหล่อลื่นชนิดนี้เรียกว่า การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก เช่นการหล่อลื่นของโรลลิงแบริง (rolling bearing) และการหล่อลื่นฟันเฟือง เป็นต้น ทฤษฎีของการหล่อลื่นชนิดนี้มีความสลับซับซ้อนมาก และกำลังเป็นหัวข้อวิจัยที่น่าสนใจอยู่ในขณะนี้

3.1.4 การหล่อลื่นแบบเบาว์นเครี

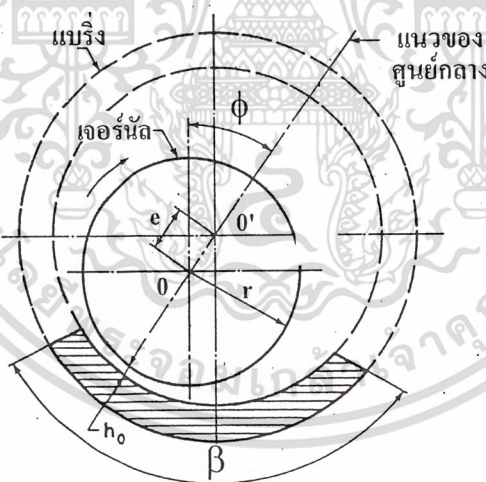
ในขณะที่แบริ่งอยู่ในสถานะของการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก ถ้าความเร็วของเจอร์นัลลดลง หรือแรงที่กระทำต่อแบริ่งเพิ่มมากขึ้น หรือปริมาณน้ำมันหล่อลื่นไม่เพียงพอแล้วความหนาของชั้นของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลงทำให้ผิวหน้าของแบริ่งมีการสัมผัสกันบ้างเป็นบางครั้ง เรียกว่า การหล่อลื่นแบบเบาว์นเครี

3.1.5 การหล่อลื่นแบบฟิล์มของแข็ง

ในกรณีที่แบริ่งต้องทำงานในสถานะที่มีอุณหภูมิสูงมาก สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะไม่สามารถทำงานได้จึงมีการนำเอาของแข็งมาใช้ เช่น แกรไฟไฟต์ หรือโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (molybdenum disulfide) เคลือบที่ผิวหน้าของแบริ่งแทนเรียกว่าการหล่อลื่นแบบฟิล์มของแข็ง ซึ่งของแข็งที่ใช้เคลือบผิวหน้านี้จะต้องมีอัตราการใช้หรือสึกหรอ และมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำด้วย

3.2 ชนิดของเจอร์นัลแบริ่ง

ในการวิเคราะห์ทฤษฎีการหล่อลื่นแบบของไหลยกเจอร์นัลจากผลการคำนวณจะได้พฤติกรรมสถิติของเจอร์นัลแบริ่งอื่นได้แก่การกระจายแรงดันในน้ำมันหล่อลื่นและมุมเอตติจูด เจอร์นัลแบริ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญสองส่วนคือเพลลาที่หมุนเรียกว่า เจอร์นัล และส่วนที่รองรับเพลลา เรียกว่าแบริ่ง ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบต่างๆของเจอร์นัลแบริ่ง

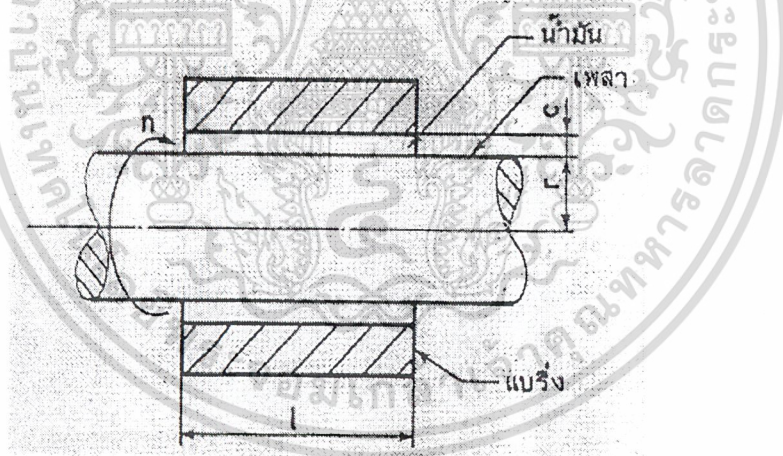
ถ้าแบริ่งล้อมรอบเจอร์นัลเป็นวงกลมตั้งเส้นประในรูปที่ 3.1 จะมีชื่อเรียกว่า ฟูลเจอร์นัลแบริ่ง (full journal bearing) แต่ถ้าแบริ่งล้อมรอบเจอร์นัลเพียงบางส่วนของวงกลมที่รองรับมุม β แล้วจะมีชื่อเรียกว่า พาเชียลเจอร์นัลแบริ่ง (partial journal bearing) β องศา และถ้ามีรัศมีโค้งของเจอร์นัลและแบริ่งมีขนาดเท่ากันแล้วก็

อาจจะเรียกว่า ฟิตแบร์ริง (fitted bearing) ก็ได้ ดังนั้นฟิตแบร์ริงจึงต้องเป็น พาเซี่ยลเจอร์นัลแบร์ริง ทั้งนี้เพื่อให้เจอร์นัลลอยตัวได้ในขณะทำงาน

จากรูปที่ 1 ให้ O และ O' เป็นจุดศูนย์กลางของเจอร์นัลและแบร์ริงตามลำดับ ในขณะที่เจอร์นัลอยู่กึ่งกลางแบร์ริงพอดีจะมีเคลียร์รันซ์ในแนวรัศมี (radial clearance) เหลืออยู่และให้แทนด้วย c แต่ในขณะที่ทำงานจุดศูนย์กลาง O และ O' จะอยู่ห่างกันเป็นระยะ e ซึ่งเรียกว่า ระยะเยื้องศูนย์กลาง (eccentricity) จากทางทฤษฎีพบว่าถ้าโยจระยะระหว่างจุดศูนย์กลางทั้งสองแล้วต่อออกมาจะพบว่าความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นที่น้อยที่สุด h_0 (minimum film thickness) จะอยู่บนเส้นนี้พอดีและตำแหน่งของ h_0 นี้จะบอกได้ด้วยมุม ϕ

3.3 กฎของพีทรอฟ

พีทรอฟ (petroff) เป็นบุคคลแรกที่สามารถอธิบายเกี่ยวกับความเสียดทานภายในเจอร์นัลแบร์ริง โดยอาศัยสมมติฐานว่า เจอร์นัลแบร์ริงเท่านั้น อย่างไรก็ตามถ้าแรงที่มากกระทำมีค่าน้อยและเจอร์นัลหมุนด้วยความเร็วรอบสูง สมการของพีทรอฟก็สามารถที่จะประมาณค่ากำลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากความเสียดทานในเจอร์นัลแบร์ริงได้ดีทีเดียว ส่วนการคำนวณหาค่าความเสียดทานที่แน่นอนขึ้นไปอีก จะได้กล่าวถึงในภายหลังโดยการใช้อุทราฟที่ได้จากทฤษฎีที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น



รูปที่ 3.2 ฟิล์มหนูนอกอยู่กลางแบร์ริง

พิจารณาฟิล์มที่หนูนอกอยู่กึ่งกลางแบร์ริงดังรูปที่ 3.2 ดังนั้นความหนาของชั้นน้ำมันหล่อลื่น h จึงมีค่าเท่ากับเคลียร์รันซ์ c และให้สมมติว่าไม่มีน้ำมันรั่วไหลออกทางด้านข้างของแบร์ริง ถ้าฟิล์มหนูด้วยความเร็ว n rpm. ดังนั้นความเร็วที่ผิวหน้าของฟิล์มคือ

$$U = 2\pi rn \quad \text{m/s} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก $\tau = \mu \frac{U}{h}$ N/m²

ดังนั้น $\tau = \frac{2 \pi r \mu \eta}{c}$ N/m² (3.2)

และโมเมนต์บิดที่ใช้ในการหมุนเพลลาเพื่อเอาชนะความเสียดทานคือ

$$T = \tau Ar$$

$$T = \frac{2\pi r \mu \eta}{c} \cdot (2\pi r l) \cdot r = \frac{4\pi^2 r^3 \mu \eta}{c} \quad \text{N. m} \quad (3.3)$$

และกำลังงานที่สูญเสียไปเป็น W คือ

$$W_p = 2\pi \eta T \quad (3.4)$$

ต่อไปสมมติว่าแรงที่กระทำต่อเจอร์นัลแบร์ริงมีค่าไม่มากนัก และให้เท่ากับ W นิวตัน และให้ P เป็นแรงต่อพื้นที่ภาพฉายของแบร์ริงซึ่งมีชื่อเรียกว่าหน่วยแรง (unit load) หรือความดันแบร์ริง (bearing pressure) ซึ่ง

$$P = \frac{W}{2rl} = \frac{W}{dl} \quad (3.5)$$

และให้ f เป็นสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ดังนั้นโมเมนต์บิดเนื่องจากความเสียดทานคือ

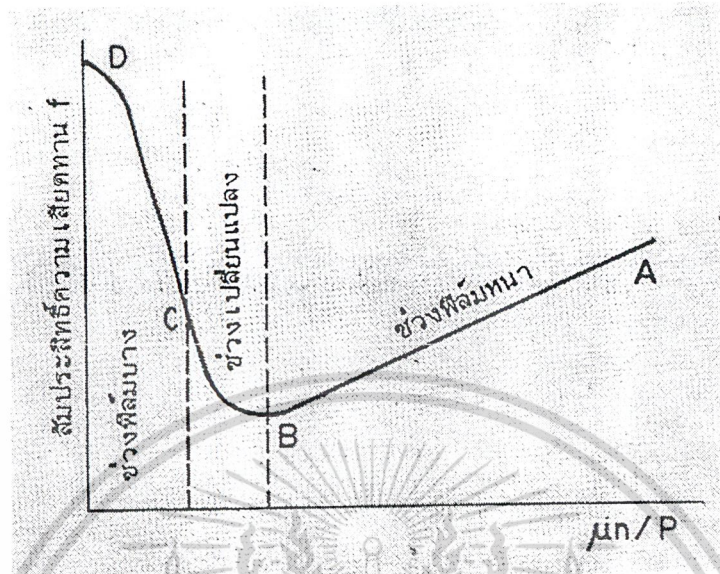
$$T = fWr = f \cdot (2rlP) \cdot r$$

หรือ $T = 2r^2 f l P$ (3.6)

จากการให้สมการ (3.3) เท่ากับสมการ (3.6) จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานคือ

$$f = 2\pi^2 \frac{\mu \eta}{P} \frac{r}{c} \quad (3.7)$$

สมการ (3.7) นี้เรียกว่ากฎของพิทรอฟ $\frac{\mu \eta}{c}$ และ $\frac{r}{c}$ นี้เป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (dimensionless group) และมีความสำคัญมากในทฤษฎีการหล่อลื่นของเจอร์นัลแบร์ริง จากการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะพบว่ากราฟระหว่าง f และ $\frac{\mu \eta}{c}$ จะเป็นไปตามรูปที่ 3.3 ซึ่งอธิบายถึงความสำคัญได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 แสดงการหล่อลื่นชนิดต่างๆ

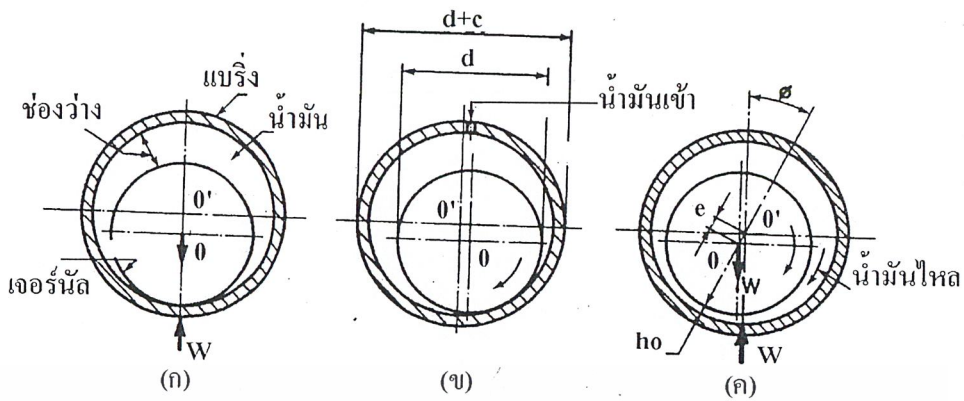
1) ช่วง AB เป็นการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก ชั้นน้ำมันจะแยกผิวหน้าของเจอร์นัลแบร์ริง โดยไม่มีการสัมผัสกันค่าของสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน f จะขึ้นอยู่กับความเร็วและความหนืดของน้ำมันเท่านั้น จุด B เป็นจุดที่ค่า f ต่ำสุดโดยที่ไม่มีการสัมผัสระหว่างผิวของแบร์ริงและเป็นทฤษฎีที่กำลังกล่าวถึงในที่นี้ ในทางปฏิบัติแล้วควรจะให้เจอร์นัลแบร์ริงทำงานที่ค่า $\frac{\mu n}{P}$ มากกว่าที่จุด B ประมาณ 5 เท่า

2) ช่วง BC เรียกว่าการหล่อลื่นแบบผสม (mixed lubrication) ซึ่งเป็นส่วนที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกไปเป็นแบบเบวอันดะรี ในช่วงนี้จะมีการสัมผัสระหว่างผิวบ้างเป็นครั้งคราว เช่น เจอร์นัลแบร์ริงที่รับแรงมากหรือเจอร์นัลมีความเร็วต่ำ โรตติ้งแบร์ริงที่รับแรงน้อย เป็นต้น

3) ช่วง CD เป็นช่วงของการหล่อลื่นที่มีการสัมผัสระหว่างผิวของแบร์ริง อันเนื่องมาจากความหนาของชั้นน้ำมันบางเกินกว่าความหยาบของผิวหน้าวัสดุ และเรียกส่วนนี้ว่าการหล่อลื่นแบบเบวอันดะรี สัมประสิทธิ์ความเสียดทานในกรณีเช่นนี้จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำแบร์ริงตลอดจนความหยาบของผิวหน้าอีกด้วย เช่น แบร์ริงที่มีน้ำมันหล่อลื่นไม่เพียงพอ แบร์ริงที่มีความเร็วต่ำ บอลแบร์ริง และการหล่อลื่นพินเฟือง เป็นต้น

3.4 กลไกของการหล่อลื่น

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก จะเกิดขึ้นได้ก็โดยการให้น้ำมันหล่อลื่นไหลเข้าไปในช่องว่างรูปสามเหลี่ยม (wedge-shaped channel) ทั้งนี้เพื่อที่จะได้เกิดความดันภายในชั้นน้ำมันสำหรับรับแรง ในกรณีของกาบรองลื่นเพลากลม กลไกของการหล่อลื่นที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กลไกการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก

ในรูปที่ 3.4 (ก) เป็นขณะที่เจอร์นัลอยู่นิ่ง และผิวของเจอร์นัลกับแบริ่งสัมผัสกันอยู่ เมื่อเจอร์เริ่มหมุนตามเข็มนาฬิกา ก็ยังมีการสัมผัสระหว่างผิวหน้าอยู่ ดังนั้นเจอร์นัลจึงป็นขึ้น ไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 3.4 (ข) ในขณะนี้อเองน้ำมันก็จะไหลเข้าไปในช่องรูปลิ้น ทำให้เกิดความดันขึ้นภายในชั้นน้ำมัน เมื่อเพลามีความเร็วพอเหมาะ ความดันที่เกิดขึ้นนี้ก็มากพอที่จะรับแรง W และทำให้เพลาลอยตัวขึ้น และเคลื่อนมาอยู่ทางด้านซ้าย ดังรูปที่ 3.4 (ค) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการหล่อลื่นของเจอร์นัลแบริ่ง

3.5 แผนภูมิที่ใช้ในการออกแบบ

Raimondi และ Boyd ได้แก้สมการสำหรับเจอร์นัลแบริ่งที่มีมุม $\beta=60,120,180$ และ 360 องศา ที่ค่า $l/d=1/4,1/2,1$ และ : แล้วสร้างกราฟระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติเพื่อใช้ประโยชน์ในการออกแบบ ในที่นี้จะนำกราฟเฉพาะพลูเจอร์นัลแบริ่งมาใช้ในการออกแบบเท่านั้น ส่วนกราฟของพหุคูณเจอร์นัลแบริ่ง ซึ่งมีมุม β ไม่เท่ากับ 360 องศา ผู้อ่านจะหาได้จากเอกสารอ่านประกอบหมายเลข 1 และ 2

กลุ่มตัวแปรไร้มิติที่สำคัญที่สุดในกราฟที่แสดงจากรูปที่ ก.1 ถึง รูปที่ ก.7 คือเลขจำนวนลักษณะแบริ่ง (bearing characteristic number) หรือเลขจำนวนซัมเมอร์ฟีลด์ (sommerfeld number) s ซึ่งประกอบด้วย

$$s = \left(\frac{r}{c} \right)^2 \frac{\mu n}{P} \quad (3.8)$$

โดยที่ r = รัศมีของเจอร์นัล หน่วย m. หรือ mm.

C = เคลียร์รันซ์ในแนวรัศมี หน่วย m. หรือ mm.

μ = ความหนืด หน่วย Pa.s (Ns/m²)

n = ความเร็วรอบของเจอร์นัล หน่วย rps (รอบต่อวินาที)

P = หน่วยแรง หน่วย N/m² หรือ Pa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับความหมายของกลุ่มตัวแปรไว้มิติอื่นๆในกราฟสามารถดูได้จากรูปที่ 3.5 กลุ่มตัวแปรไว้มิติที่สำคัญอีกกลุ่มหนึ่ง คือ

$$\varepsilon = \frac{e}{c} \quad (3.9)$$

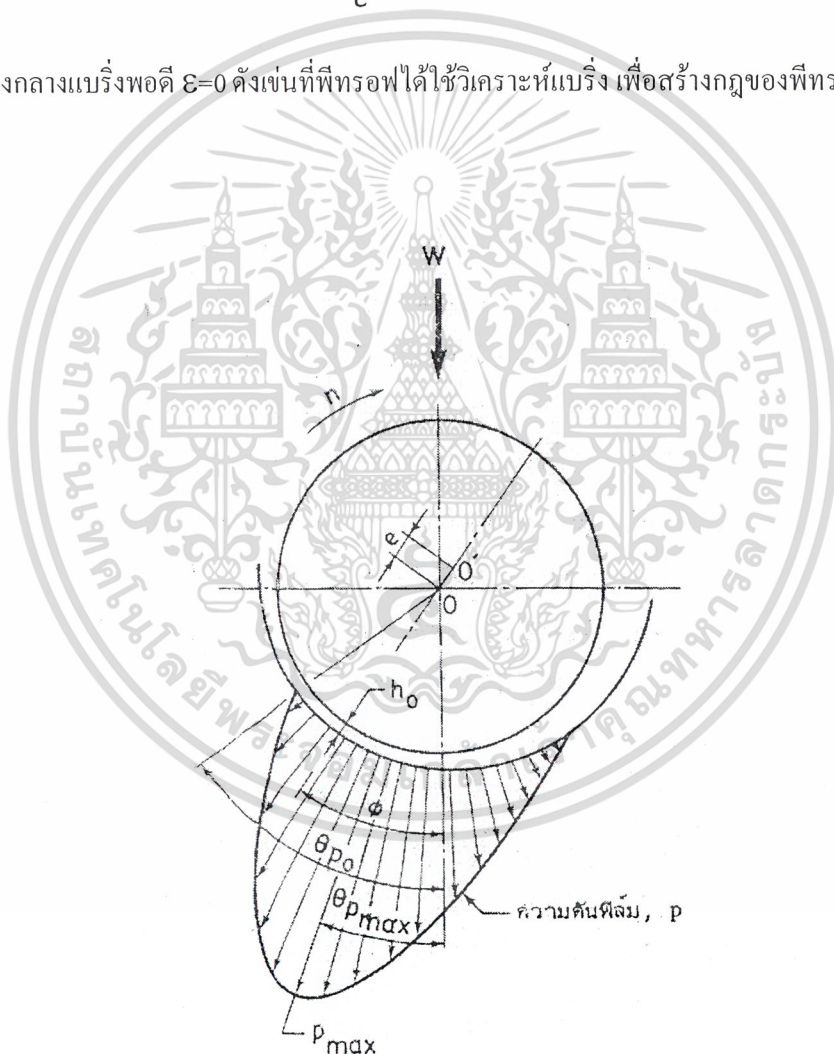
ซึ่งเรียกว่าอัตราส่วนเยื้องศูนย์กลาง (eccentricity ratio) จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า

$$h_0 = c - e \quad (3.10)$$

ดังนั้น

$$\frac{h_0}{c} = 1 - \varepsilon \quad (3.11)$$

ถ้าเจอร์นัลอยู่ตรงกลางแบร์ริงพอดี $\varepsilon=0$ ดังเช่นที่พีทรอฟได้ใช้วิเคราะห์แบร์ริง เพื่อสร้างกฎของพีทรอฟ



รูปที่ 3.5 การกระจายความดันฟิล์มน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 อุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่น

การหาอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่เพิ่มขึ้น นอกจากจะใช้กราฟของ Raimondi และ Boyd แล้วอาจทำได้โดยใช้วิธีการคำนวณ โดยประมาณดังต่อไปนี้

สมมติให้ Q เป็นอัตราไหลของน้ำมันอุณหภูมิ t_1 เข้าไปในเจอร์นัลแบร์ริง และ Q_s เป็นอัตรารั่วไหลของน้ำมันทางด้านข้าง (side leakage) และให้ t_0 เป็นอุณหภูมิของน้ำมันที่ไหลออกจากแบร์ริง (ไม่ใช่ทางด้านข้าง) ดังนั้นปริมาณของน้ำมันที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น $\Delta t = t_0 - t_1$ คือ $Q - Q_s$

สมมติให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำมันปริมาณ Q_s ที่รั่วไหลออกทางด้านข้าง มีค่าครึ่งหนึ่งของ Δt และน้ำมันจะพาเอาปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมดไป ดังนั้นปริมาณความร้อนในน้ำมันต่อหน่วยเวลา คือ

$$H = \rho C_H (Q - Q_s) \Delta t + \rho C_H Q_s \frac{\Delta t}{2}$$

$$H = \rho C_H Q \Delta t \left(1 - \frac{Q_s}{2Q} \right) \quad W \quad (3.12)$$

โดยที่ ρ = ความหนาแน่นของน้ำมัน หน่วย kg/m^3

C_H = ความร้อนจำเพาะของน้ำมัน หน่วย J/kg.K

แต่ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเสียดทานมีค่าเท่ากับ

$$H = 2\pi nT = 2\pi fWrn \quad W \quad (3.13)$$

โดยที่ W = แรงที่กระทำต่อแบร์ริง หน่วย N .

ดังนั้นปริมาณความร้อนในสมการ (3.12) จึงมีค่าเท่ากับสมการ (3.13) นั่นคือ

$$2\pi fWrn = \rho C_H Q \Delta t \left(1 - \frac{Q_s}{2Q} \right) \quad (3.14)$$

ซึ่งเมื่อจัดรูปใหม่จะได้ว่า

$$\Delta t = \frac{4\pi P X}{\rho C_H Y \left(1 - \frac{Q_s}{2Q} \right)} \quad (3.15)$$

โดยที่ $X = \frac{r}{c} f$ = ตัวแปรสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (coefficient of friction variable)

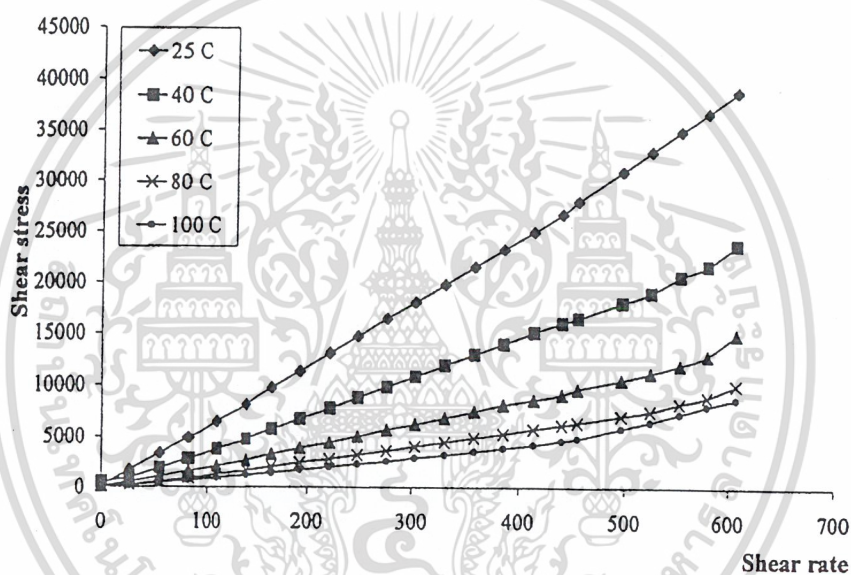
$Y = \frac{Q}{rcnl}$ = ตัวแปรอัตราไหล (flow variable)

$$P = \frac{W}{2rl} = \text{หน่วยแรง (unit load)}$$

จะเห็นได้ว่าสมการ (3.15) สะดวกในการคำนวณมากเพราะค่า X และ Y สามารถอ่านได้จากแผนภูมิรูปที่ ก.3 และ รูปที่ ก.4 ส่วนค่า Q_s/Q สามารถอ่านได้จากแผนภูมิรูปที่ ก.5

3.7 Flow Characteristic ของน้ำมันถั่วเหลือง

ในบทความนี้ได้ใช้น้ำมันถั่วเหลืองโดยไม่ใส่สารเติมแต่งเลข Flow characteristic ของน้ำมันถั่วเหลืองได้มาจากการทดลองดังรูปที่ 1 โดยใช้ rotational rheometer according



Temperature, C	n'	n''	$\mu, \text{mPa.s}$
25	46.862	1.043	60.723
40	23.916	1.071	36.686
60	11.975	1.094	21.100
80	5.744	1.145	13.760
100	0.587	1.497	11.730

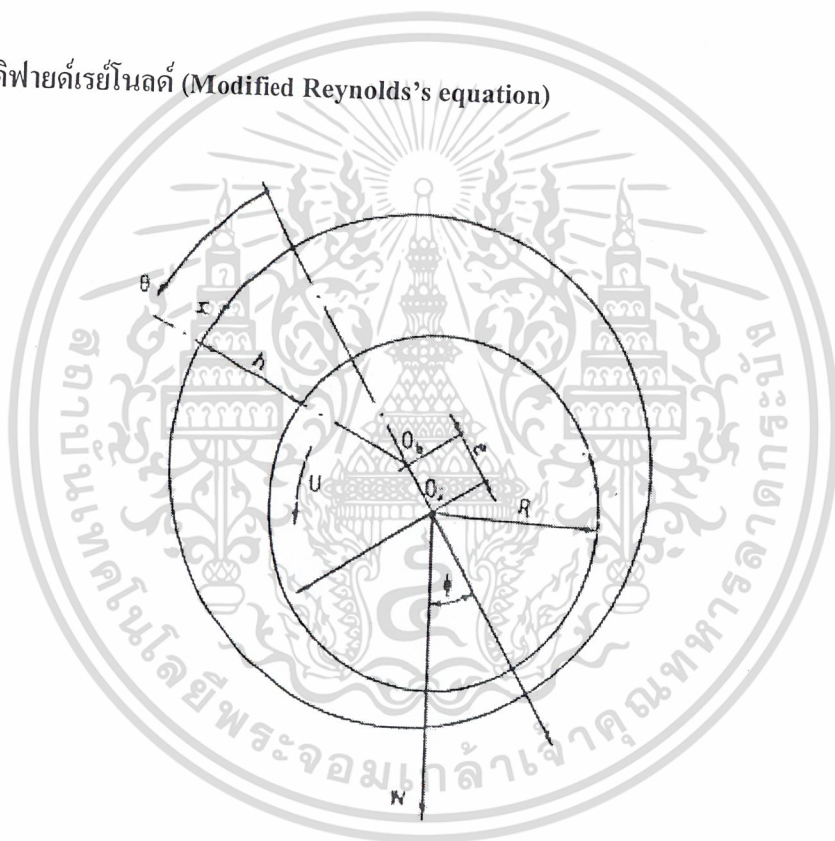
รูปที่ 3.6 Flow characteristic curve ของน้ำมันถั่วเหลือง

จากผลการทดลองเราทราบว่าน้ำมันถั่วเหลืองมีพฤติกรรมเป็นของไหล non-Newtonian แบบ dilatant ซึ่งค่าระหว่าง shear stress และ shear rate เป็น nonlinear ซึ่งเราสามารถประมาณการได้โดยใช้ power-law model

$$\tau = m \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1} \frac{du}{dy} \quad (3.16)$$

ค่า m เป็นค่าของความหนืด, n เป็นค่าดัชนีของ power-law model, τ เป็นค่าความเค้นเฉือน และ du/dy เป็นค่าอัตราการเฉือน

3.8 สมการโมดิไฟด์เรย์โนลด์ (Modified Reynolds's equation)



รูปที่ 3.7 ทางเรขาคณิตของ กาบร่องลื่นเพลากลม
ในกรณีที่เป็น 2 มิติ จากสมการที่ (3.16) จะได้

$$\mu = m \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\}^{\frac{n-1}{2}} \quad (3.17a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_{yz} = m \left(\frac{dw}{dy} \right)^{n-1} \frac{dw}{dy} \tag{3.17b}$$

ค่า τ_{xy} และ ค่า τ_{yz} คือค่าความเค้นเฉือนในทิศทาง x และ ทิศทาง z ตามลำดับ ค่า u ,w เป็นความเร็วในทิศทาง x และ z ตามลำดับจาก power-law model สำหรับ shear viscosity จะได้

$$\mu = m \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\}^{\frac{n-1}{2}} \tag{3.18}$$

จากสมการ Navier-Stokes ในทิศทาง x และ z

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \tag{3.19a}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) = \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \tag{3.19b}$$

จากสมการที่ (3.16) ถึง (3.19) นำมาเขียนใหม่ได้เป็นสมการ modified Realdnolds ดังสมการที่ (3.20)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^{n+2}}{12mn} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^{n+2}}{12m} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{(u)^n}{2} \frac{\partial h}{\partial x} \tag{3.20}$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} \ll \frac{\partial p}{\partial z}$$

สำหรับกรณีแปริ่งสั้นมาก

$$x = R \theta \therefore dx = Rd \theta$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^{n+2}}{12m} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{U^n}{2R} \frac{\partial h}{\partial \theta} \tag{3.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h = c(1 + \varepsilon \cos \theta) \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial h}{\partial \theta} = -c \varepsilon \sin \theta \quad (3.23)$$

แทนค่าสมการ(3.23)ลงในสมการ(3.21)

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^{n+2}}{12m} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{U^n}{2R} (-c \varepsilon \sin \theta)$$

$$\frac{h^{n+2}}{12m} \frac{\partial p}{\partial z} = \left(-\frac{U^n}{2R} c \varepsilon \sin \theta \right) z + c_1$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \left(-\frac{6U^n m}{Rh^{n+2}} c \varepsilon \sin \theta \right) z + c_1$$

$$p = -\frac{6U^n mc \varepsilon \sin \theta}{Rh^{n+2}} \frac{z^2}{2} + zc_1 + c_2 \quad (3.24)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตคือ

$$\text{ที่ } z=0 \quad p=0$$

$$z=L \quad p=0$$

ที่ $z=0 \quad p=0$

$$0 = -\frac{6U^n mc \varepsilon \sin \theta (0)^2}{Rh^{n+2}} + (0)c_1 + c_2$$

$$c_2 = 0$$

(3.25)

ที่ $z=L \quad p=0$

$$0 = -\frac{6U^n mc \varepsilon \sin \theta L^2}{Rh^{n+2}} + Lc_1$$

$$c_1 = \frac{6U^n mc \varepsilon \sin \theta L}{Rh^{n+2}} \quad (3.26)$$

แทนสมการ(3.25)และสมการ(3.26)ลงในสมการ(3.24)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p = -\frac{5U^n mc \mathcal{E} \sin \theta}{Rh^{n+2}} \frac{z^2}{2} + \left(\frac{6U^n mc \mathcal{E} \sin \theta}{Rh^{n+2}} \right) \frac{Lz}{2}$$

$$= \left(\frac{6U^n mc \mathcal{E} \sin \theta}{Rh^{n+2}} \right) \left(\frac{Lz}{2} - \frac{z^2}{2} \right)$$

$$p = \left(\frac{6U^n mc \mathcal{E} \sin \theta}{Rh^{n+2}} \right) (L - z) \frac{z}{2}$$

$$p = \left(\frac{3U^n mc \mathcal{E} \sin \theta}{Rh^{n+2}} \right) (L - z) z$$

กำหนดให้ $m = m_0 e^{\beta(\tau - \tau_0)}$

เพราะฉะนั้นสมการความดันคือ

$$p = \left(\frac{3U^n m_0 e^{\beta(\tau - \tau_0)} c \mathcal{E} \sin \theta}{Rh^{n+2}} \right) (L - z) z$$

3.9 สมการพลังงาน

$$\rho c_r \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \tau_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial w}{\partial y}$$

$$\rho c_r \int_0^h \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) dy - \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=h} - k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} \right) = \int_0^h u \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy + \int_0^h w \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} dy$$

$$\int_0^h \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) dy = h \left(u_m \frac{\partial T_m}{\partial x} + w_m \frac{\partial T_m}{\partial z} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u_m = \frac{1}{h} \int_0^h u dy = \frac{U}{2} - \left(\frac{h^{n+1}}{12 mn U^{n-1}} \right) \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$w_m = \frac{1}{h} \int_0^h w dy = - \left(\frac{h^{n+1}}{12 m U^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial z} \right)$$

$$T_m = \frac{1}{h} \int_0^h T dy$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (\tau_{xy}) = - \frac{\partial p}{\partial x} ; \quad \int_0^h u \frac{\partial p}{\partial x} dy = \frac{\partial p}{\partial x} \int_0^h u dy = u_m \frac{\partial p}{\partial x} = \left(\frac{U}{2} - \frac{h^{n+1}}{12 mn U^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (\tau_{zy}) = - \frac{\partial p}{\partial z} ; \quad \int_0^h w \frac{\partial p}{\partial z} dy = \frac{\partial p}{\partial z} \int_0^h w dy = w_m \frac{\partial p}{\partial z} = - \left(\frac{h^{n+1}}{12 m U^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \frac{\partial p}{\partial z}$$

$$\int_0^h u \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy = \left[\frac{U}{2} - \frac{h^{n+1}}{12 mn U^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial x} \right] \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{U}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{h^{n+1}}{12 mn U^{n-1}} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2$$

$$\int_0^h w \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} dy = \frac{h^{n+1}}{12 m U^{n-1}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^2$$

แทนค่า

$$\rho_c \rho_r h \left\{ \left(\frac{U}{2} - \frac{h^{n+1}}{12 mn U^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \frac{\partial T_m}{\partial x} - \left(\frac{h^{n+1}}{12 m U^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \frac{\partial T_m}{\partial z} \right\} = - \left\{ \frac{U h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{h^{n+2}}{12 mn U^{n-1}} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 \right\} + \left\{ \frac{h^{n+2}}{12 m U^{n-1}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 \right\}$$

$$\rho_c \rho_r \left\{ \left(\frac{U h}{2} - \frac{h^{n+2}}{12 mn U^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \frac{\partial T_m}{\partial x} - \left(\frac{h^{n+2}}{12 m U^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \frac{\partial T_m}{\partial z} \right\} = - \left\{ \frac{U h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{h^{n+2}}{12 mn U^{n-1}} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 \right\} + \left\{ \frac{h^{n+2}}{12 m U^{n-1}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 \right\}$$

$$\frac{1}{R} \left(\frac{U h}{2} - \frac{h^{n+2}}{12 mn U^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \frac{\partial T_m}{\partial \theta} - \left(\frac{h^{n+2}}{12 m U^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \frac{\partial T_m}{\partial z} = - \frac{1}{\rho_c \rho_r} \left\{ \frac{U h}{2} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{h^{n+2}}{12 mn U^{n-1}} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 \right\} + \frac{1}{\rho_c \rho_r} \left\{ \frac{h^{n+2}}{12 m U^{n-1}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 \right\}$$

$$\frac{\rho_c \rho_r}{R} \left(\frac{U h}{2} - \frac{h^{n+2}}{12 mn U^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \frac{\partial T_m}{\partial \theta} - \rho_c \rho_r \left(\frac{h^{n+2}}{12 m U^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \frac{\partial T_m}{\partial z} = - \left\{ \frac{U h}{2} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{h^{n+2}}{12 mn U^{n-1}} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 \right\} + \left\{ \frac{h^{n+2}}{12 m U^{n-1}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 \right\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแก้สมการหาการกระจายอุณหภูมิ ไม่คิดผลของการกระจายอุณหภูมิตามแกน z และไม่คิดเทอมกำลัง 2 จะ
ได้สมการดังนี้

$$\frac{\rho_c}{R} \left(\frac{Uh}{2} - \frac{h^{n+2}}{12 mn U^{n-1}} \left(\frac{\partial p}{R \partial \theta} \right) \right) \frac{\partial T_m}{\partial \theta} = -\frac{Uh}{2} \left(\frac{\partial p}{R \partial \theta} \right) \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \theta} = \frac{3U^n mc \mathcal{E} \cos \theta}{Rh^{n+2}} (L-z)(z) \quad (3.28)$$

นำสมการ (3.28) แทนลงในสมการ (3.27)

$$\left[\frac{\rho_c}{R} \frac{Uh}{2} - \frac{\rho_c}{R} \frac{h^{n+2}}{12 mn U^{n-1}} \frac{1}{R} \left(\frac{3U^n mc \mathcal{E} \cos \theta}{Rh^{n+2}} \right) (L-z)(z) \right] \frac{\partial T_m}{\partial \theta} = -\frac{Uh}{2R} \left(\frac{3U^n mc \mathcal{E} \cos \theta}{Rh^{n+2}} \right) (L-z)(z)$$

$$\left[\frac{\rho_c}{2R} \frac{Uh}{2} - \frac{\rho_c}{R^3} \left(\frac{1}{4} \frac{Uc \mathcal{E} \cos \theta}{n} \right) (L-z)(z) \right] \frac{\partial T_m}{\partial \theta} = -\frac{3U^{n+1} mc \mathcal{E} \cos \theta}{2R^2 h^{n+1}} (L-z)(z)$$

$$\left[\frac{\rho_c}{2} \frac{h}{2} - \frac{\rho_c}{R^2} \left(\frac{1}{4} \frac{c \mathcal{E} \cos \theta}{n} \right) (L-z)(z) \right] \frac{\partial T_m}{\partial \theta} = -\frac{3U^n mc \mathcal{E} \cos \theta}{2Rh^{n+1}} (L-z)(z)$$

กำหนดให้ $A_1 = \frac{\rho_c}{2} \frac{h}{2} - \frac{\rho_c}{4R^2 n} c \mathcal{E} \cos \theta (L-z)(z)$

$$A_2 = -\frac{3U^n mc \mathcal{E} \cos \theta}{2Rh^{n+1}} (L-z)(z)$$

$$h = c(1 + \mathcal{E} \cos \theta)$$

จะได้

$$\frac{A_1 (T_{i,j} - T_{i-1,j})}{\Delta \theta} = A_2$$

$$T_{i,j} = T_{i-1,j} + A_2 \left(\frac{\Delta \theta}{A_1} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 การคำนวณหาค่า Load bearing

$$\begin{aligned}
 W \cos \phi &= - \int_0^L \int_0^\pi p \cos \theta dz d\theta \\
 W \cos \phi &= - \int_0^L \int_0^\pi \frac{3U^n mc \mathcal{E} \sin \theta \cos \theta}{R [c (1 + \mathcal{E} \cos \theta)]^{n+2}} (Lz - z^2) dz d\theta \\
 &= - \int_0^\pi \frac{3U^n mc \mathcal{E} \sin \theta \cos \theta}{R [c^{n+2} (1 + \mathcal{E} \cos \theta)^{n+2}]} \left[L \frac{z^2}{2} - \frac{z^3}{3} \right]_0^L d\theta \\
 &= - \int_0^\pi \frac{3U^n mc \mathcal{E} \sin \theta \cos \theta}{R [c^{n+2} (1 + \mathcal{E} \cos \theta)^{n+2}]} \left[L \frac{L^2}{2} - \frac{L^3}{3} \right] d\theta \\
 &= - \int_0^\pi \frac{\pi 3U^n mc \mathcal{E} \sin \theta \cos \theta \frac{L^3}{6}}{R c^{n+2} (1 + \mathcal{E} \cos \theta)^{n+2}} d\theta \\
 &= - \frac{3U^n mc \mathcal{E} \frac{L^3}{6} \pi}{R c^{n+2}} \int_0^\pi \frac{\cos \theta \sin \theta}{(1 + \mathcal{E} \cos \theta)^{n+2}} d\theta \\
 &= - \frac{U^n m \mathcal{E} L^3 \pi}{2 R c^{n+1}} \int_0^\pi \frac{\cos \theta \sin \theta}{(1 + \mathcal{E} \cos \theta)^{n+2}} d\theta \\
 \therefore W \cos \phi &= - \frac{U^n m \mathcal{E} L^3 \pi}{2 R c^{n+1}} \int_0^\pi \frac{\sin \theta \cos \theta}{(1 + \mathcal{E} \cos \theta)^{n+2}} d\theta
 \end{aligned}$$

$$W \sin \phi = \int_0^L \int_0^\pi p \sin \theta dz d\theta$$

$$W \sin \phi = \int_0^L \int_0^\pi \left(\frac{3U^n mc \mathcal{E} \sin \theta}{R h^{n+2}} \right) (Lz - z^2) \sin \theta dz d\theta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= \int_0^\pi \frac{3U^n mc \mathcal{E} \sin^2 \theta}{Rh^{n+2}} \left[L \frac{z^2}{2} - \frac{z^3}{3} \right]_0^L d\theta \\
 &= \int_0^\pi \frac{3U^n mc \mathcal{E} \sin^2 \theta}{Rh^{n+2}} \left[\frac{L^3}{2} - \frac{L^3}{3} \right] d\theta \\
 &= \int_0^\pi \frac{3U^n mc \mathcal{E} \sin^2 \theta L^3}{Rh^{n+2}} \frac{1}{6} d\theta
 \end{aligned}$$

$$= \int_0^\pi \frac{U^n mc \mathcal{E} \sin^2 \theta L^3}{2R [e(1 + \mathcal{E} \cos \theta)]^{n+2}} d\theta$$

$$= \int_0^\pi \frac{U^n mc \mathcal{E} L^3 \sin^2 \theta}{2Rc^{n+2} (1 + \mathcal{E} \cos \theta)^{n+2}} d\theta$$

$$\therefore W \sin \phi = \frac{U^n m \mathcal{E} L^3}{2Rc^{n+2}} \int_0^\pi \frac{\sin^2 \theta}{(1 + \mathcal{E} \cos \theta)^{n+2}} d\theta$$

จะได้ load bearing คือ

$$W = \sqrt{(W \cos \phi)^2 + (W \sin \phi)^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

อุปกรณ์การทดลอง

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1). เพลลา
- 2). เจอร์นัลเบร็ง
- 3). thermocouple 12 ตัว
- 4). pressure transducer 4 ตัว
- 5). gap senser 2 ตัว
- 6). น้ำมันพืช (ในที่นี้ใช้น้ำมันถั่วเหลือง)
- 7). มอเตอร์
- 8). multimeter
- 9). power supply
- 10). selector 4 ตัว
- 11). ปุ่มสำหรับปิดน้ำมันเข้าเบร็ง
- 12). Load (5 kg.,10 kg.,15 kg.,20 kg.)

4.2 วิธีทำThermocouple

- 1). นำลวด 2 ชนิด คือ chromel-p (ขั้วบวก) กับ alumel (ขั้วลบ) มาพันเป็นกันเป็นเกลียวแล้วเชื่อมปลายลวดทั้งสองให้เป็นกระเปาะ
- 2). นำน็อตมาเจาะรูทะลุเป็นตัวthermocouple แล้วใส่ลวด thermocouple พร้อมทั้งหยอดเรซินลงไป ในรูของน็อตเพื่อยึดลวดกับน็อต
- 3). นำจนวนมาหุ้มตัวลวดthermocoupleแล้วติดหางปลาที่ปลายลวด

4.3 การCalibration Thermocouple

- 1). นำน้ำแข็งและน้ำใส่บีกเกอร์แล้วใช้thermometerวัดให้ได้อุณหภูมิ 0 องศา แล้วอ่านค่าthermocouple ทั้ง12ตัวที่อุณหภูมิต่างๆจากmultimeter
- 2). นำthermometerวัดค่าอุณหภูมิห้องขณะเปิดเครื่องปรับอากาศแล้วอ่านค่าthermocoupleทั้ง12ตัวที่อุณหภูมิต่างๆจากmultimeter
- 3). นำ thermometerวัดค่าอุณหภูมิห้องขณะปิดเครื่องปรับอากาศแล้วอ่านค่าthermocoupleทั้ง12ตัวที่อุณหภูมิต่างๆจากmultimeter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4). นำ thermometer วัดค่าอุณหภูมิ น้ำเดือด แล้วอ่านค่า thermocouple ทั้ง 12 ตัว ที่อุณหภูมิต่างๆ จาก multimeter
- 5). ทำย้อนกลับ ไปโดยเริ่มจากข้อ 3,2 และ 1 ตามลำดับ
- 6). นำข้อมูลอุณหภูมิที่วัดจาก thermometer กับอุณหภูมิที่วัดจาก thermocouple มาเขียนกราฟ หา ค่าเฉลี่ยของ ช่วง forward กับ backward แล้วหาสมการแสดงความสัมพันธ์

4.4 การ Calibration Pressure transducer

- 1). ต่อ Pressure transducer 2 เส้นเข้ากับ power supply ให้จ่ายไฟ 0-5 V. และอีก 2 เส้นต่อเข้ากับ multimeter เพื่ออ่านค่าแรงดันเป็น โวลต์
- 2). ใส่ Load ที่เครื่อง Dead weight tester จากแรงดัน 0-10 bar โดยเพิ่มทีละ 1 bar แล้วบันทึกค่า pressure transducer ที่อ่านได้เป็น DCV. ที่ multimeter ที่ทุกๆ ค่าแรงดัน ทำจนครบทั้ง 4 ตัวของ pressure transducer
- 3). นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง pressure transducer ที่อ่านได้เป็น DCV. ที่ multimeter กับค่าแรงดันของน้ำมันแล้วหาสมการแสดงความสัมพันธ์

4.5 การ Calibration Gap sensor

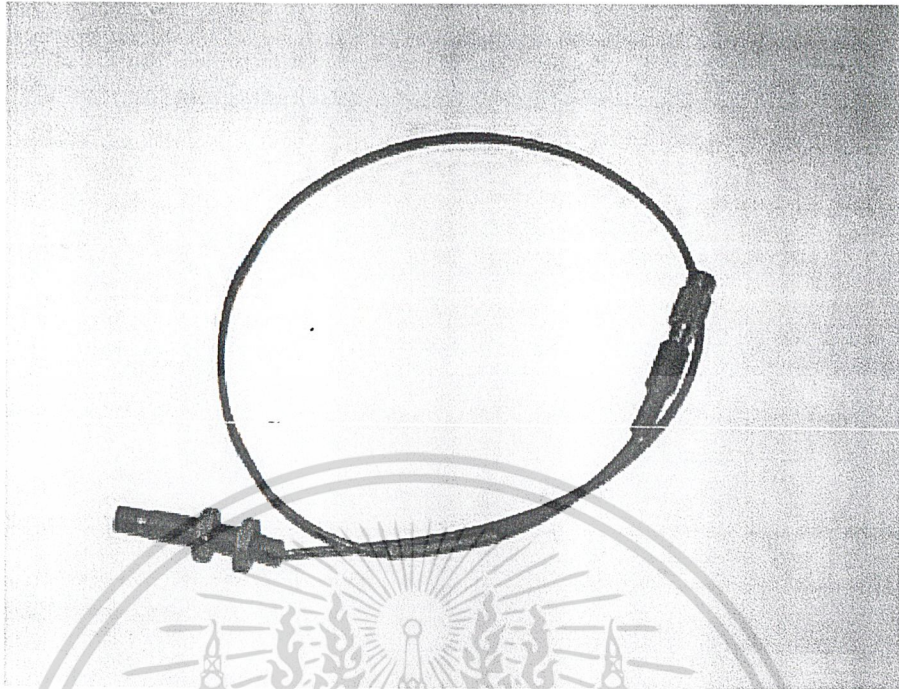
- 1). ติดตั้งชุด gap sensor เข้ากับชุด power supply และ multimeter
- 2). Set power supply ที่บวกลบ 12V.
- 3). นำตัว gap sensor ติดตั้งกับชุด calibration
- 4). ทำการวัดที่ระยะห่าง 0 mm. แล้วอ่านค่าเป็น DCV. จาก multimeter บันทึกผล
- 5). เพิ่มระยะอีกทีละ 0.02 mm. จนกระทั่งถึง 0.2 mm. แล้วบันทึกค่า DCV. จาก multimeter ที่ทุกระยะ
- 6). ทำการ calibration gap sensor ตัวที่ 2 เหมือนกับตัวที่ 1
- 7). นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DCV. ที่อ่านได้จาก multimeter กับระยะห่างของ gap sensor กับ โลหะแล้วหาสมการแสดงความสัมพันธ์



รูปที่ 4.1 รูป pressure transducer

รูปที่ 4.2 รูป thermocouple

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

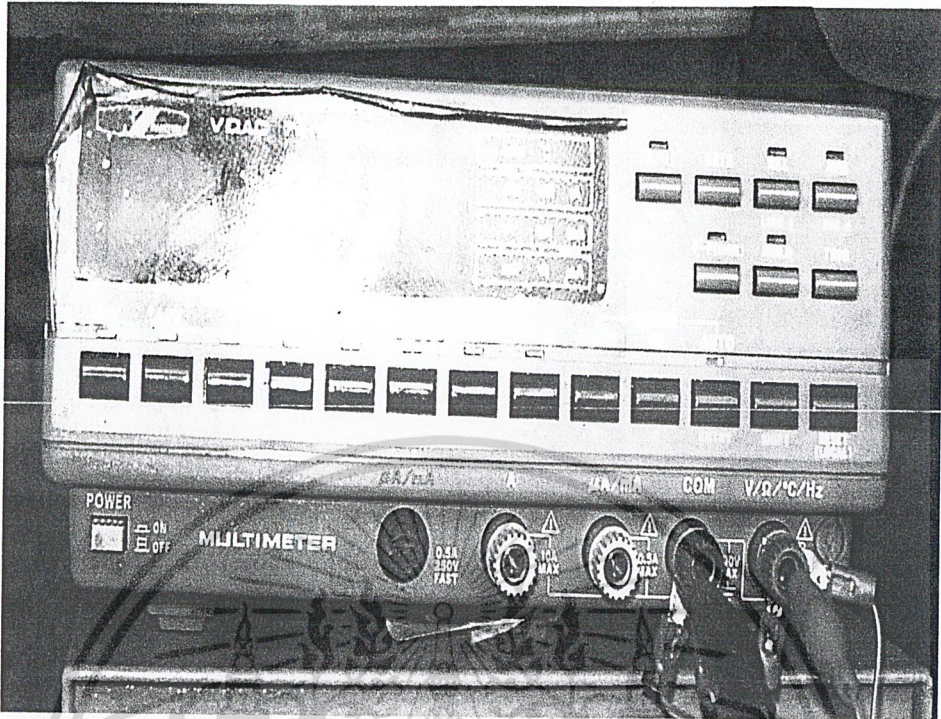


รูปที่ 4.3 รูป gap sensor

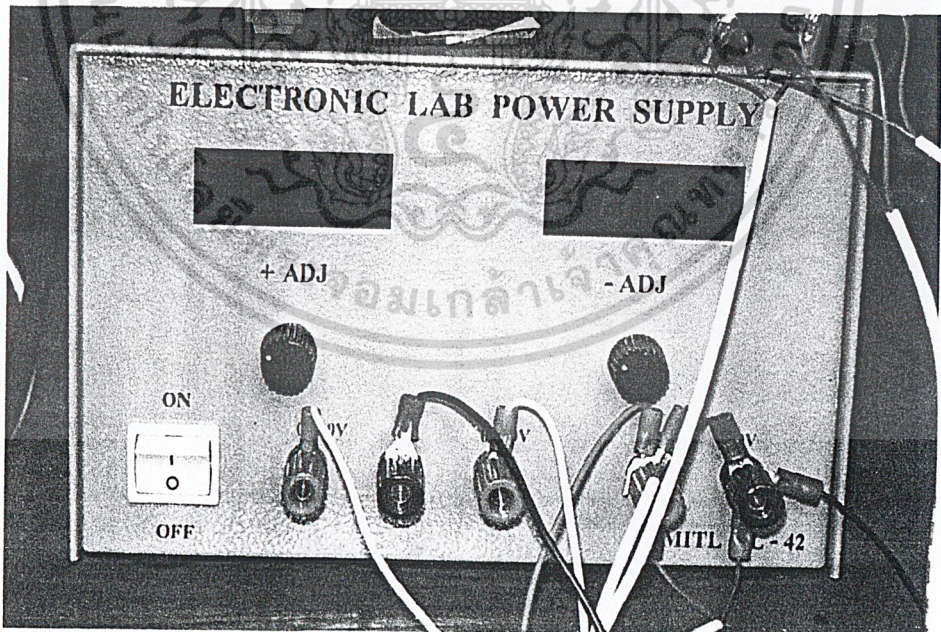


รูปที่ 4.4 รูป journal bearing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

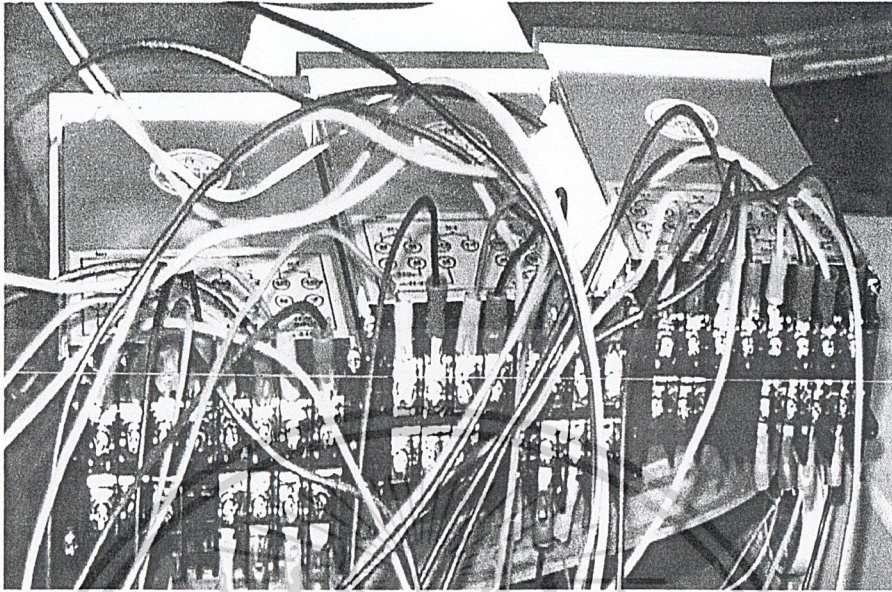


รูปที่ 4.5 รูป multimeter

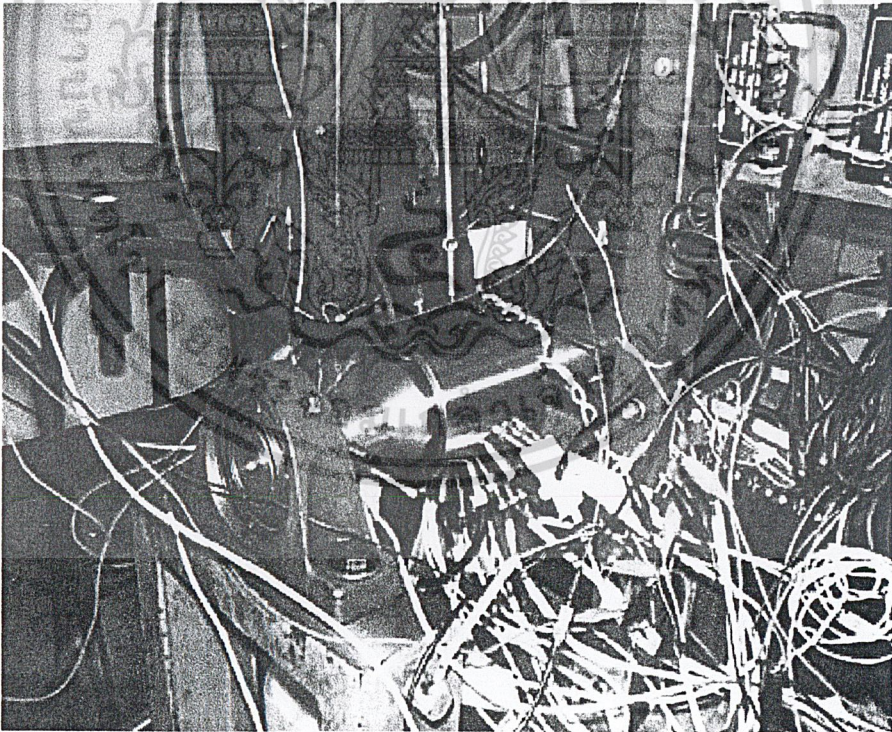


รูปที่ 4.6 รูป power supply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

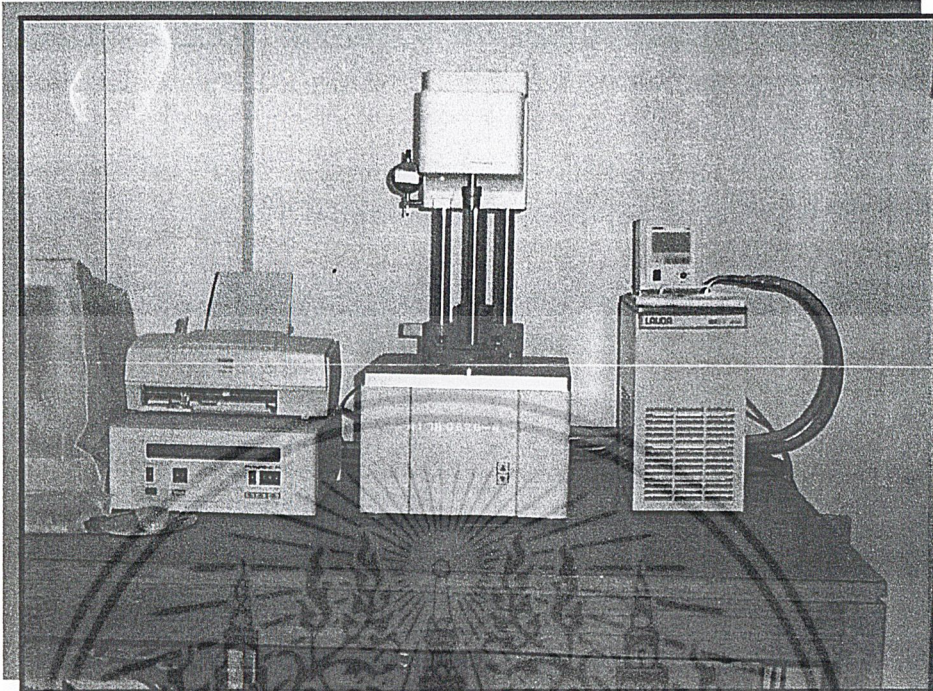


รูปที่ 4.7 รูป selector

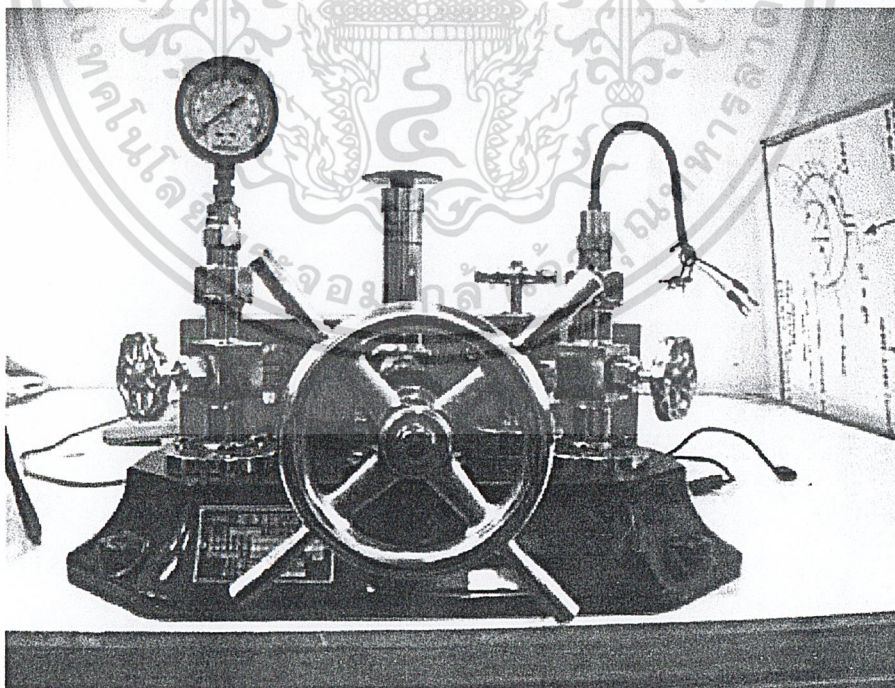


รูปที่ 4.8 รูปชุดการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 รูปเครื่องมือ Rheometer ที่ใช้ในการหาคุณสมบัติความหนืดของน้ำมันพืช



รูปที่ 4.10 รูปเครื่องมือ dead weight ที่ใช้ในการ calibration pressure transducer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การคำนวณเบื้องต้นในการออกแบบชุดทดลอง

กรณีกำหนดให้ $r = 35 \text{ mm}$.

$L = 70 \text{ mm}$.

$c = 0.58 \text{ mm}$.

$n = 1000 \text{ rpm}$.

$\mu = 46.862 \times 10^{-3} \text{ Pa s}$

$W = 200 \text{ N}$.

$$P = \frac{W}{2rL}$$

$$= \frac{200}{2 \times 35 \times 10^{-3} \times 70 \times 10^{-3}}$$

$$= 40816.33 \text{ N/m}^2$$

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \frac{\mu n}{P}$$

$$= \left(\frac{35}{0.58}\right)^2 \times \frac{46.862 \times 10^{-3} \times \left(\frac{1000}{60}\right)}{40816.33}$$

$$= 0.0697$$

จากรูปที่ ก.2 ที่ $S = 0.0697$ จะได้

ตำแหน่งของความหนาฟิล์มน้อยสุด คือ $\phi \approx 43$ องศา

จากรูปที่ ก.7 ที่ $S = 0.0697$ จะได้

ตำแหน่งของความดันฟิล์มสูงสุด คือ $\theta_{p_{\max}} \approx 18.5$ องศา

ตำแหน่งการสิ้นสุดของฟิล์ม คือ $\theta_{r_0} \approx 61$ องศา

กรณีกำหนดให้ $r = 35 \text{ mm}$.

$L = 70 \text{ mm}$.

$c = 0.8 \text{ mm}$.

$n = 1000 \text{ rpm}$.

$\mu = 46.862 \times 10^{-3} \text{ Pa s}$

$W = 200 \text{ N}$.

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{W}{2rL} \\
 &= \frac{200}{2 \times 35 \times 10^{-3} \times 70 \times 10^{-3}} \\
 &= 40816.33 \text{ N/m}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S &= \left(\frac{r}{c}\right)^2 \frac{\mu \eta}{P} \\
 &= \left(\frac{35}{0.8}\right)^2 \times \frac{46.862 \times 10^{-3} \times \left(\frac{1000}{60}\right)}{40816.33} \\
 &= 0.0366
 \end{aligned}$$

จากรูปที่ ก.2 ที่ $S = 0.0697$ จะได้

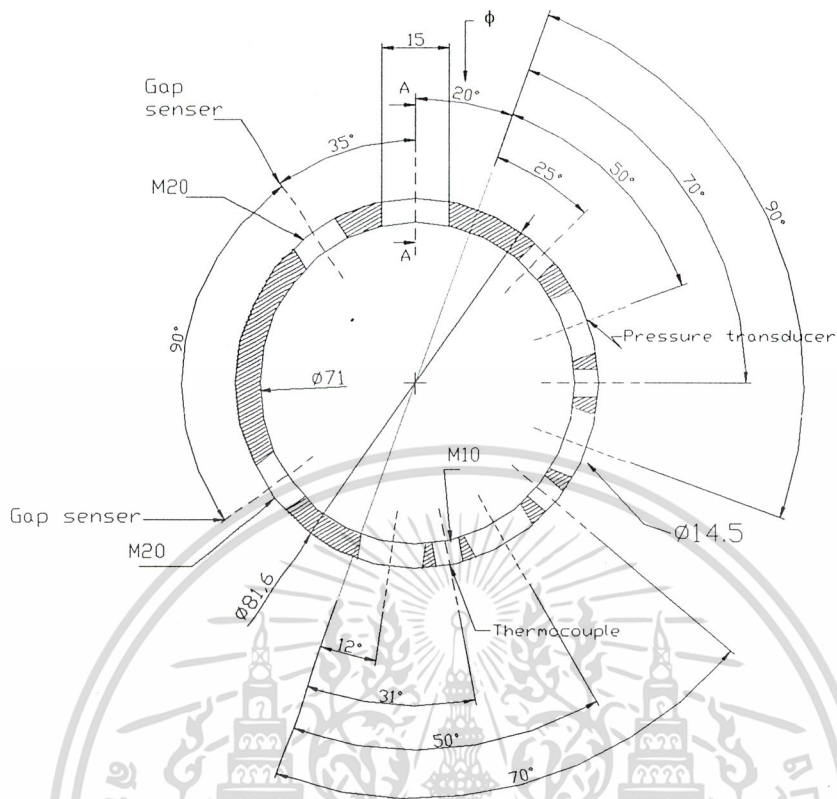
ตำแหน่งของความหนาฟิล์มน้อยสุด คือ $\phi \approx 34$ องศา

จากรูปที่ ก.7 ที่ $S = 0.0697$ จะได้

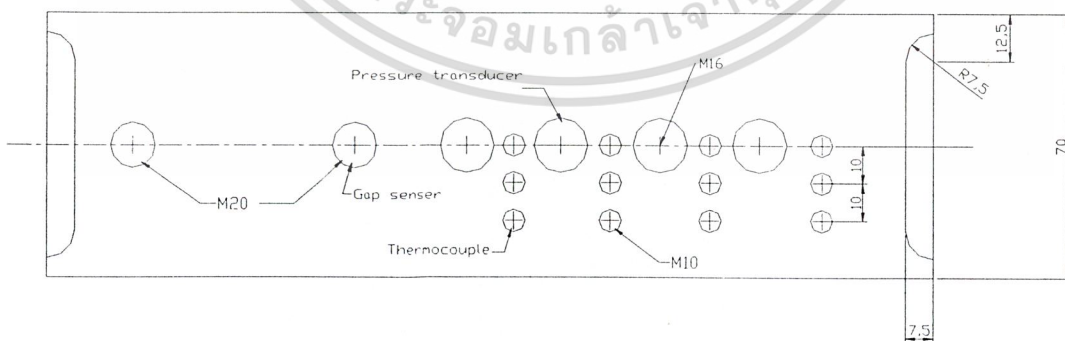
ตำแหน่งของความดันฟิล์มสูงสุด คือ $\theta_{r_{\max}} \approx 17$ องศา

ตำแหน่งการสิ้นสุดของฟิล์ม คือ $\theta_{r_0} \approx 48$ องศา

แต่ในการออกแบบเบรจ์เพื่อใช้ในการทดลองนั้นเราจะต้องออกแบบให้สามารถติดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าได้ เพราะฉะนั้นเราจะกำหนดให้ ค่าตำแหน่งของความหนาฟิล์มน้อยสุดมีค่าเท่ากับ 20 องศาเพื่อความสะดวกในการติดอุปกรณ์ และตำแหน่งในการติด pressure transducer จะติดที่มุม 50 , 90 , 130 , 168 องศา จากตำแหน่งของความหนาฟิล์มน้อยสุด ตำแหน่งในการติด thermocouple จะติดที่มุม 25 , 70 , 110 , 149 องศา จากตำแหน่งของความหนาฟิล์มน้อยสุด ตำแหน่งในการติด gap sensor จะติดที่มุม 35 , 125 องศา จากแนวตั้งของช่องจ่ายน้ำมัน

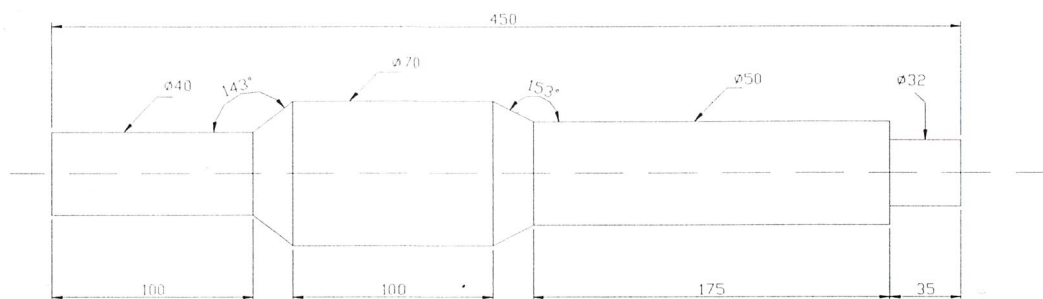


รูปที่ 4.11 ภาพตัดของเจอรันัลเบริงที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.12 ภาพคลี่ของเจอรันัลเบริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ภาพแสดงเพลลาที่ใช้ในการทดลอง



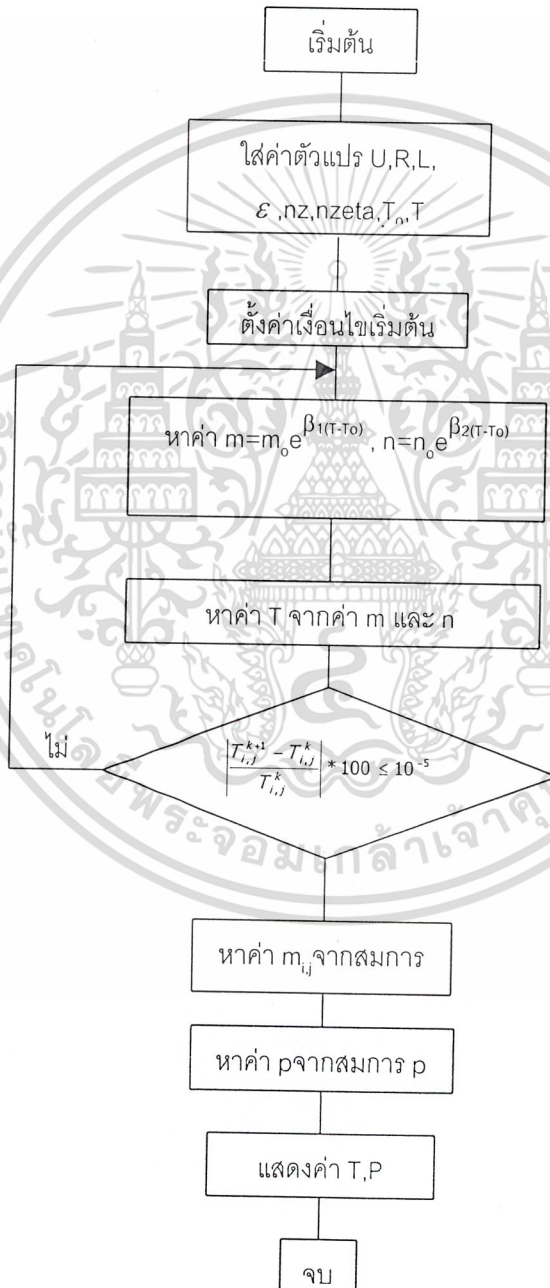
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

บทที่ 5

การคำนวณและสรุปผลการทดลอง

5.1 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข

จากสมการ modified Reynolds และสมการ energy equation สามารถหาการกระจายแรงดันและการกระจายอุณหภูมิโดยใช้วิธี finite difference ตาม flow chart ดังแสดงในรูปที่ 5.1 นี้



รูปที่ 5.1 chart แสดงการคำนวณ โดยไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

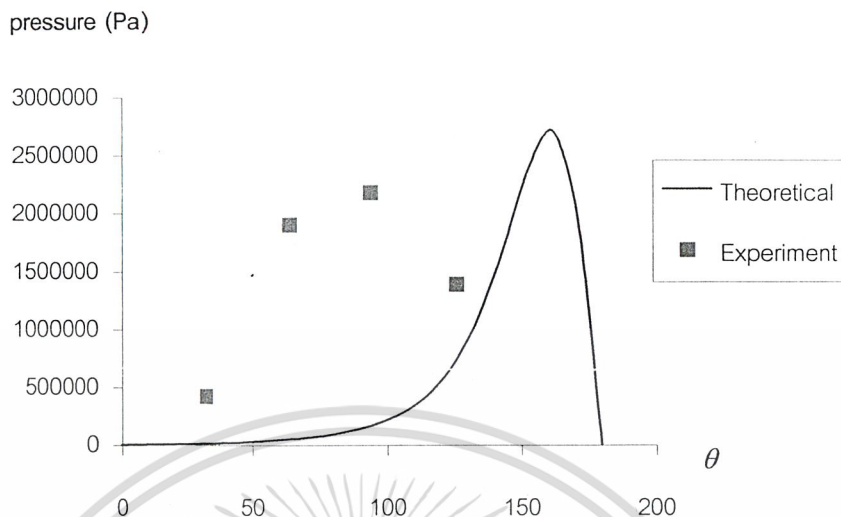
5.2 วิธีการทดลอง

- 1). ติด thermocouple, pressure transducer และ gap sensor ที่เจอร์นัลแบร์ริง
- 2). นำเจอร์นัลแบร์ริงมาประกอบเข้ากับเฟลา
- 3). นำขั้วบวกขั้วลบของเซ็นเซอร์ทั้งหมดต่อกับ selector เพื่อต่อเข้ากับ multimeter เพื่อวัดค่าออกมา
- 4). ป้อนน้ำมันฉีดน้ำมันเข้าไปที่เจอร์นัลแบร์ริง
- 5). ใส่ load 5 kg. แล้วปรับความเร็วของมอเตอร์ให้ได้ 200 rpm. แล้วทำการจดค่าเซ็นเซอร์ (thermocouple, pressure transducer และ gap sensor) ทุกตัว
- 6). จากนั้นปรับความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นทีละ 200 rpm. แล้วจดค่าเซ็นเซอร์ที่ความเร็วทุกค่าจาก 200 ถึง 1200 rpm.
- 7). ปรับ load เพิ่มขึ้นทีละ 5 kg. จาก 5 ถึง 20 kg. โดยทุกครั้งที่ปรับ load เพิ่มขึ้นก็จดค่าเซ็นเซอร์ทุกตัวที่ทุกความเร็วด้วย

5.3 ผลการทดลอง

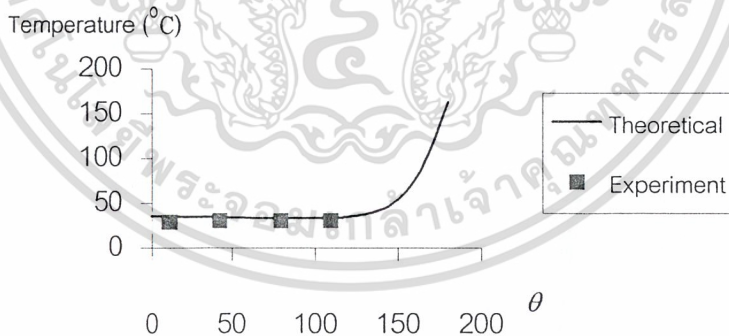
จากการคำนวณและการทดลองของเจอร์นัลแบร์ริงหล่อลื่นด้วยน้ำมันพีช โดยกำหนดความยาวของเจอร์นัลแบร์ริงเท่ากับ 70 mm. ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 mm. และมีระยะเคลียร์เรนซ์เท่ากับ 0.58 mm. ได้ผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณดังต่อไปนี้

Pressure distribution at $\epsilon=0.771$



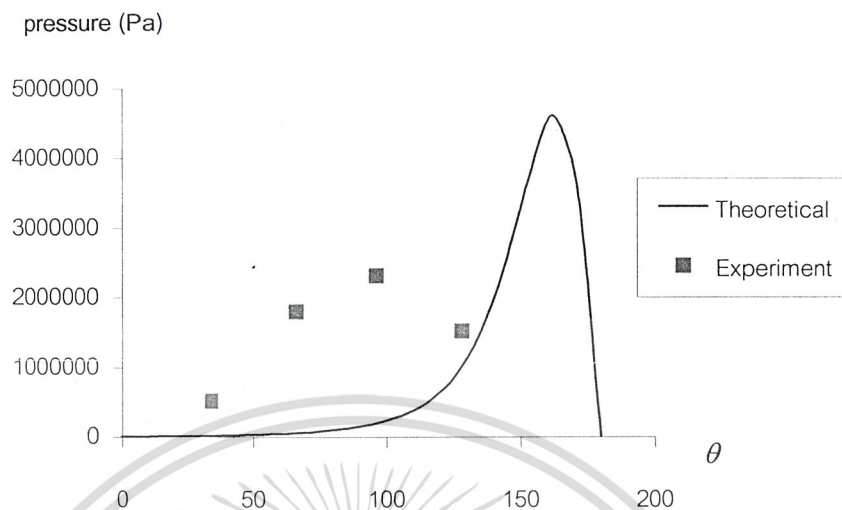
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 0.771

Temperature distribution at $\epsilon=0.771$

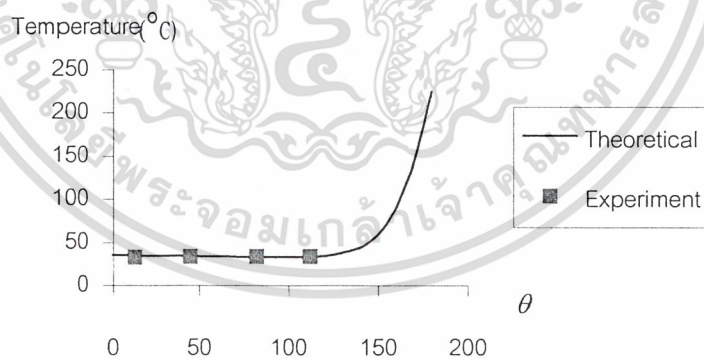


รูปที่ 5.3 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 0.771

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

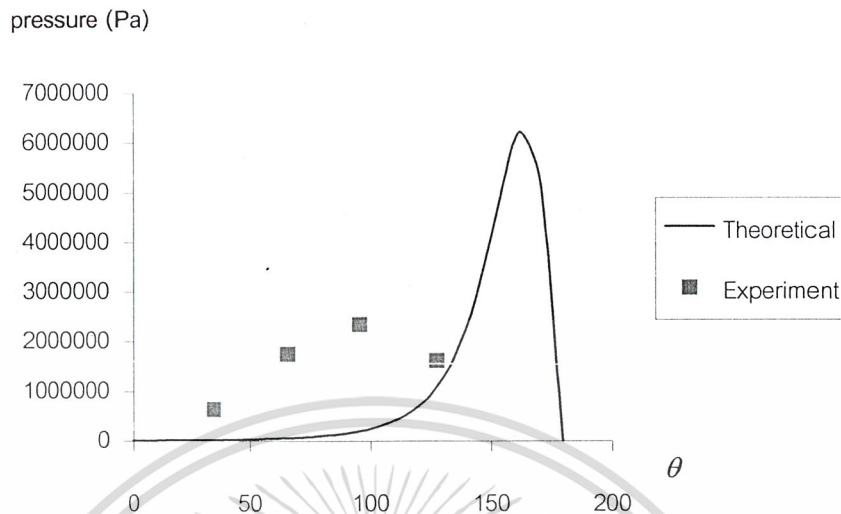
Pressure distribution at $\varepsilon=0.811$ 

รูปที่ 5.4 กราฟแสดงการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเชิงศูนย์กลางเท่ากับ 0.811

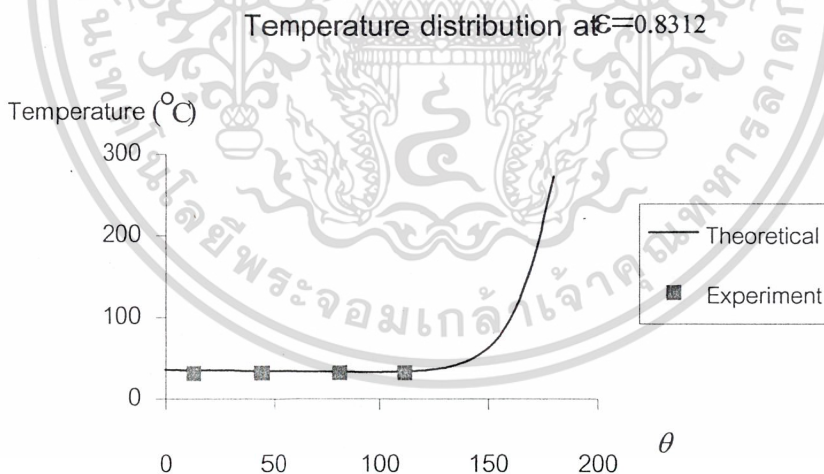
Temperature distribution at $\varepsilon=0.811$ 

รูปที่ 5.5 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเชิงศูนย์กลางเท่ากับ 0.811

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

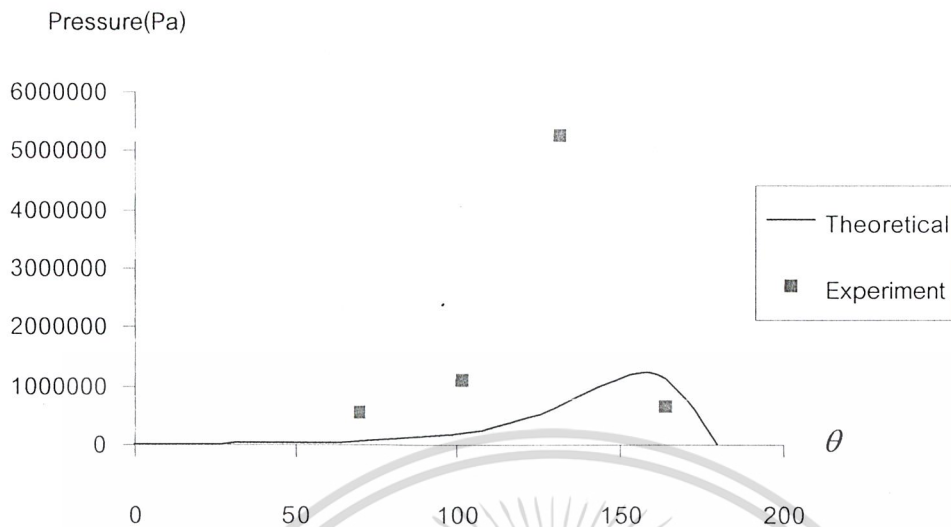
Pressure distribution at $\epsilon=0.8312$ 

รูปที่ 5.6 กราฟแสดงการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเอียงศูนย์เท่ากับ 0.8312



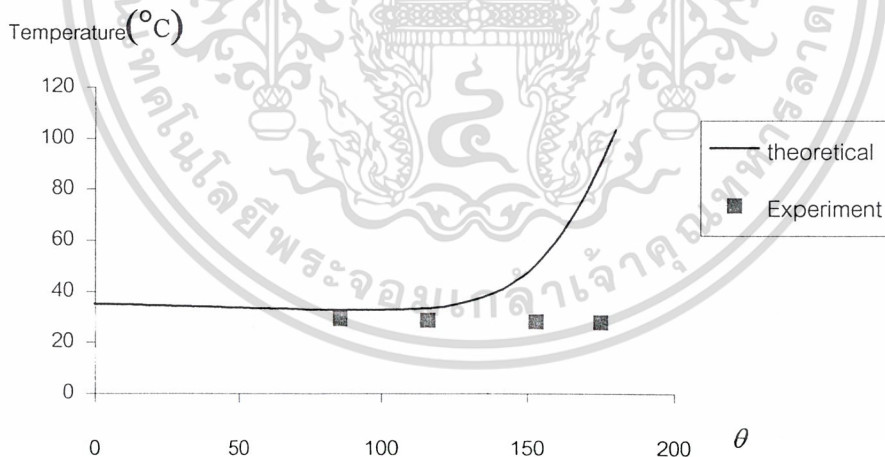
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเอียงศูนย์เท่ากับ 0.8312

Pressure distribution at $\epsilon=0.69774$

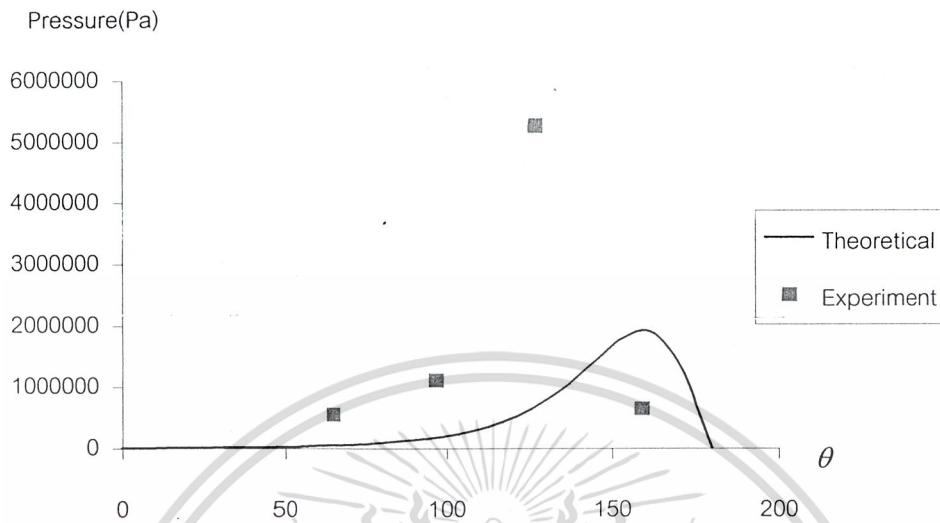


รูปที่ 5.8 กราฟแสดงการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 0.69774

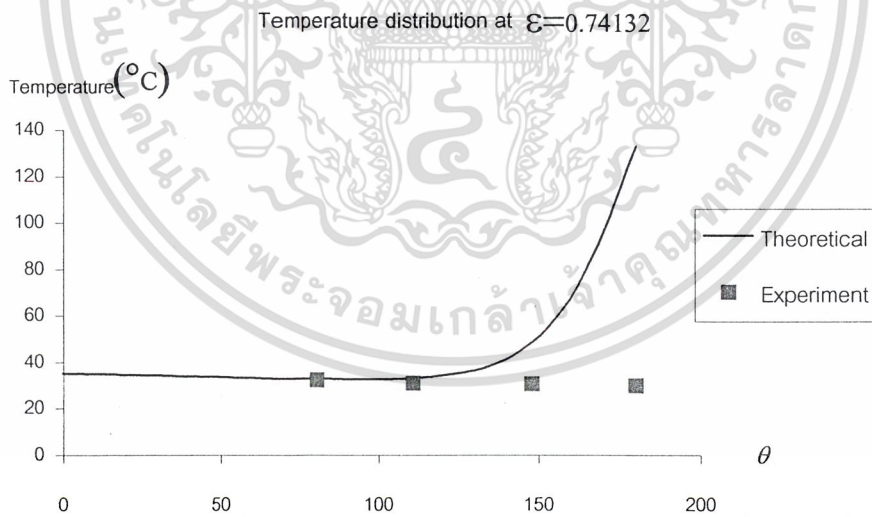
Temperature distribution at $\epsilon=0.69774$



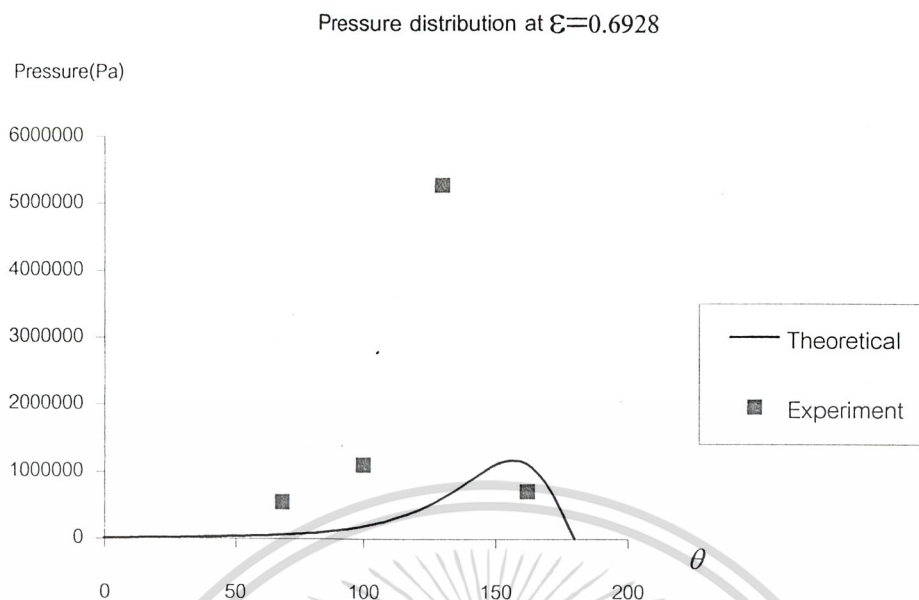
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่อัตราการเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 0.69774

Pressure distribution at $\varepsilon=0.74132$ 

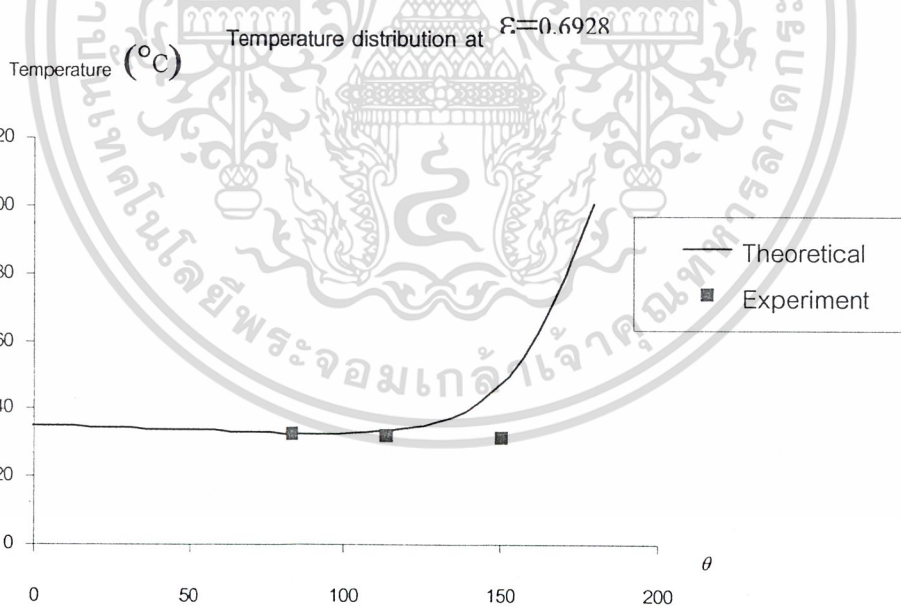
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงการกระจายความดันที่อัตราการเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 0.74132



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิที่อัตราการเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 0.74132

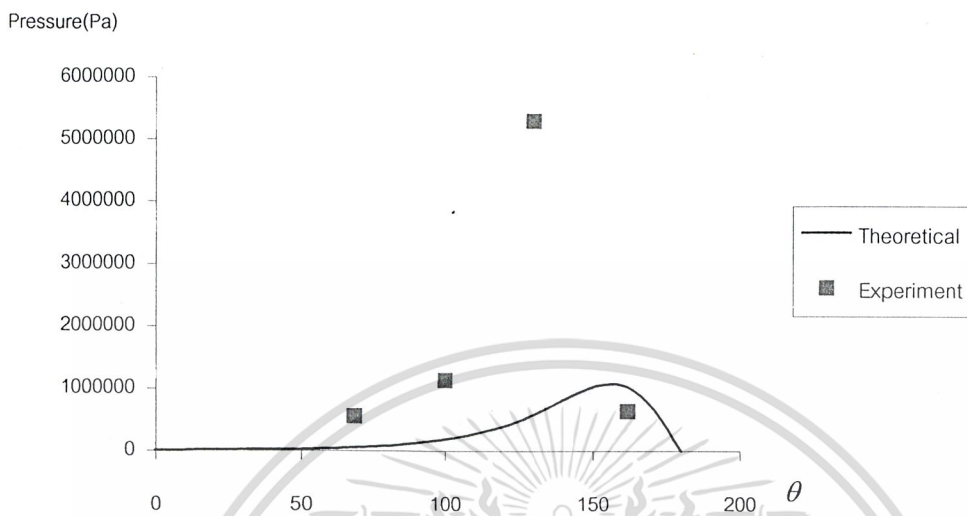


รูปที่ 5.12 กราฟแสดงการกระจายความดันที่อัตราการเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 0.6928



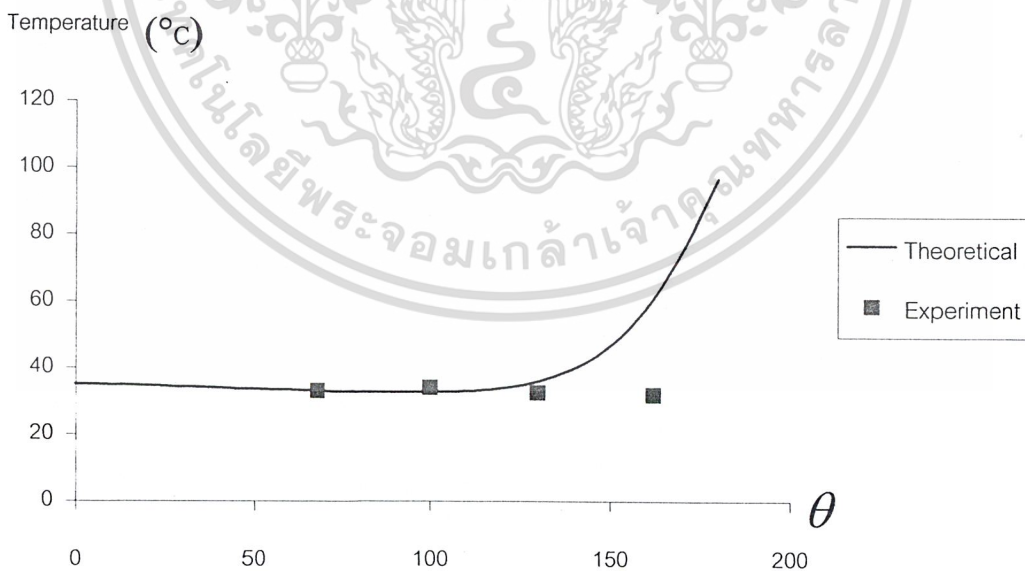
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิที่อัตราการเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 0.6928

Pressure distribution at $\epsilon=0.68415$



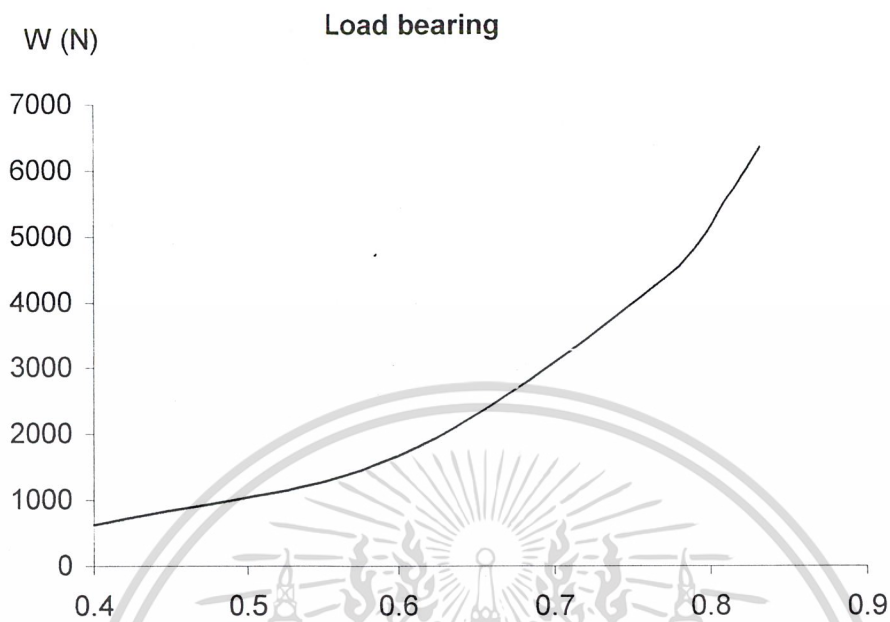
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงการกระจายความดันที่อัตราการแข็งตัวเท่ากับ 0.68415

Temperature distribution at $\epsilon=0.68415$



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิที่อัตราการแข็งตัวเท่ากับ 0.68415

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Load bearing กับ อัตราการเยื้องศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอนะ

6.1 สรุป

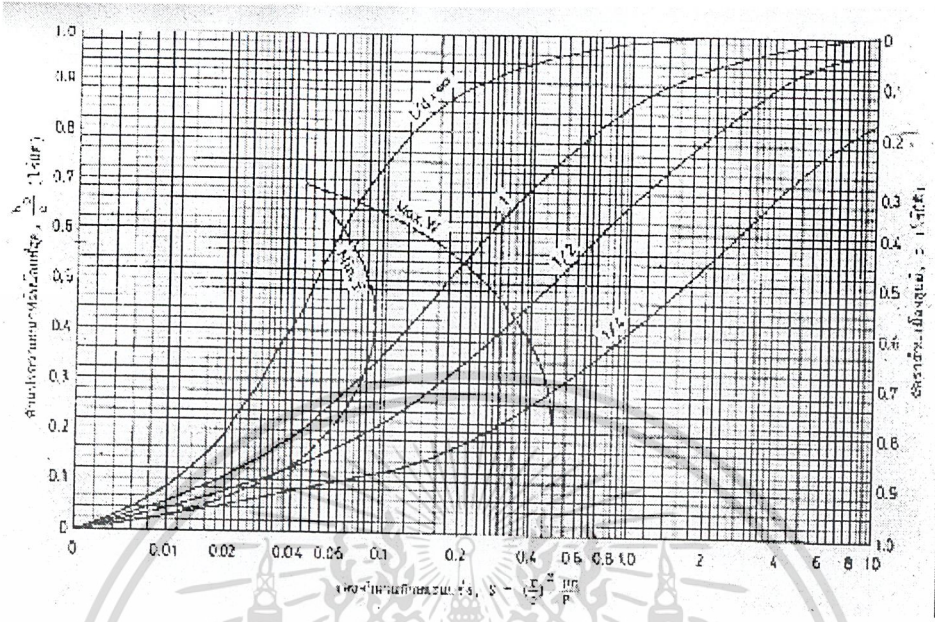
การศึกษาพฤติกรรมของเจอร์นัลแบร์ริงแบบthermohydrodynamicหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืชสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1). คุณสมบัติการไหลของน้ำมันพืชเป็นแบบnon-newtonian ซึ่งสามารถเขียนสมการในรูปของ power-law model
- 2). การกระจายแรงดันของฟิล์มน้ำมันและการกระจายของอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันจะขึ้นต่อกัน คือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิค่าความดันจะเปลี่ยนแปลง
- 3). การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันเกิดขึ้นเนื่องจากความเสียดทานของน้ำมัน
- 4). การกระจายอุณหภูมิและการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันจะขึ้นกับค่าอัตราความเยื้องศูนย์กลาง (ϵ)
- 5). ค่า load bearing (w) จะขึ้นกับค่าอัตราความเยื้องศูนย์กลาง (ϵ)

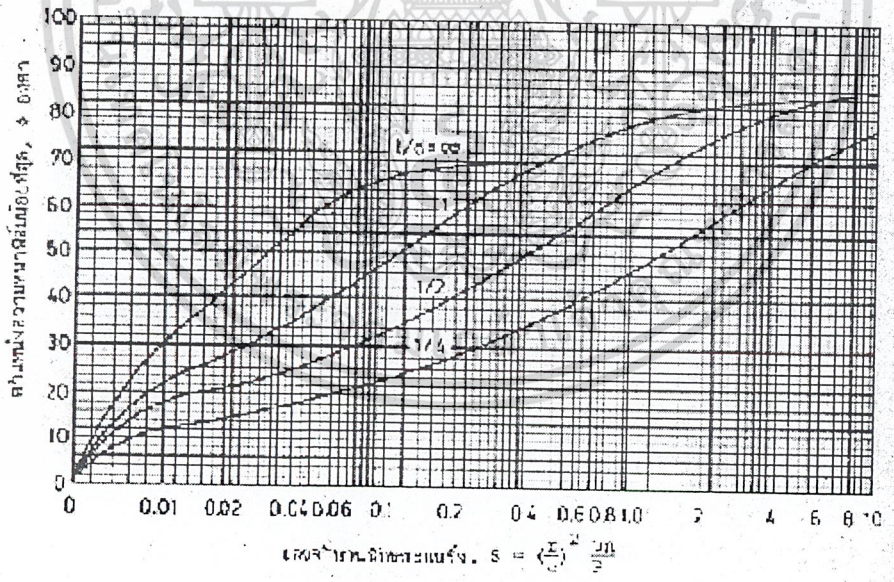
6.2 ข้อเสนอนะ

- 1). ผลที่ได้จากการทดลอง ได้ค่าที่ต่างจากการคำนวณเนื่องจากในทางคำนวณคิดเป็น adiabatic แต่ในการทดลองเกิดความร้อนสูญเสียทำให้ได้ค่าอุณหภูมิจากการทดลองต่ำกว่าทางคำนวณ
- 2). เวลาทดลองใช้ปั๊มที่น้ำมันเข้าไปในชุดทดลองทำให้มีแรงเสียดทานน้อยกว่าที่เป็นจริง
- 3). แรงดันที่ได้จากการทดลองต่างจากการคำนวณเนื่องจากแรงดันมีผลขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจึงทำให้ค่าแรงดันเปลี่ยนตามไปด้วย
- 4). แรงดันที่ได้จากการทดลองมีค่าต่างจากการคำนวณมากเนื่องจากในการทดลองมีเคลียร์เลนซ์มากเกินไปทำให้เกิดฟิล์มน้ำมันได้ไม่ดีทำให้เกิดแรงดันต่ำกว่าที่คำนวณทางทฤษฎี

ภาคผนวก ก.

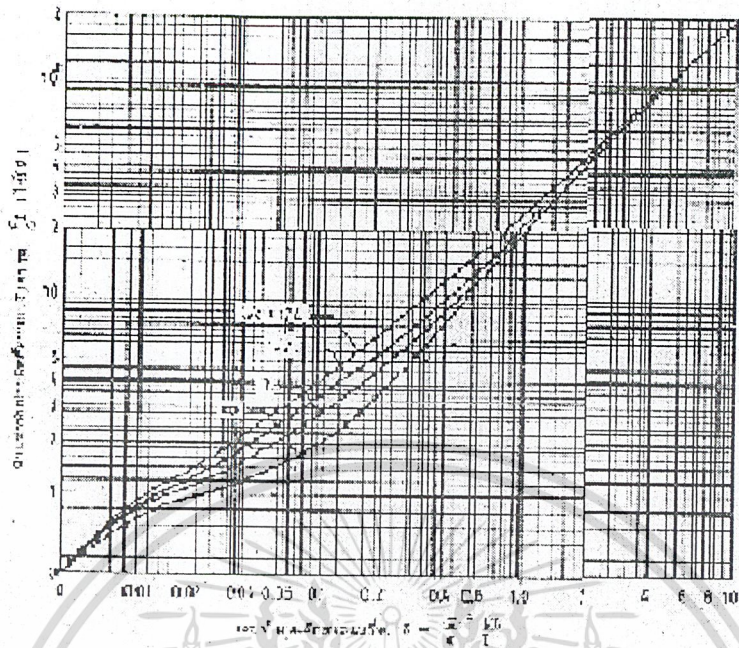


รูปที่ ก.1 แผนภูมิสำหรับตัวแปรความหนาฟิล์มน้อยที่สุดและอัตราการใช้แสง

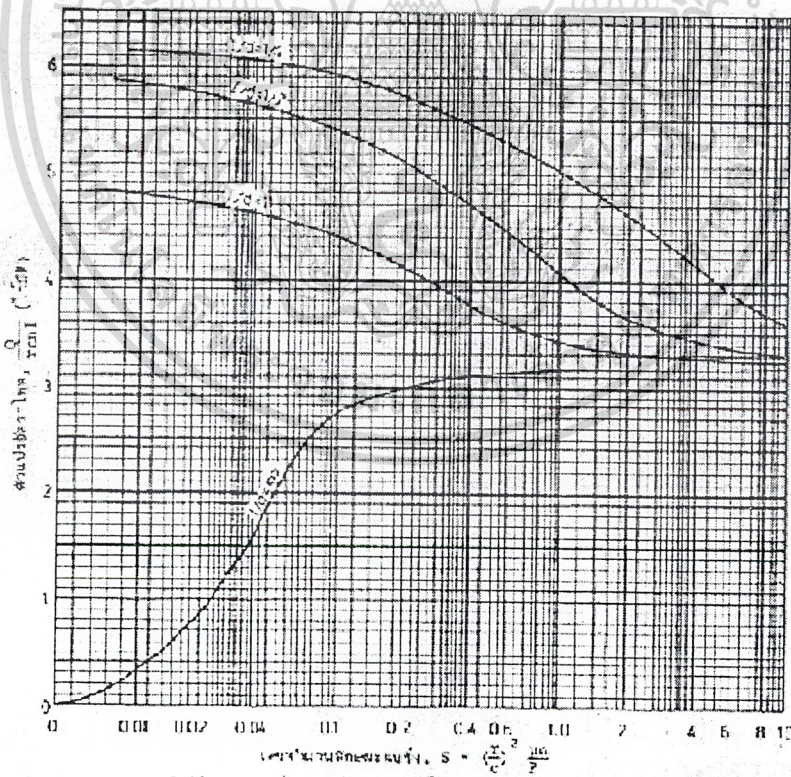


รูปที่ ก.2 แผนภูมิสำหรับตำแหน่งของความหนาฟิล์มน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

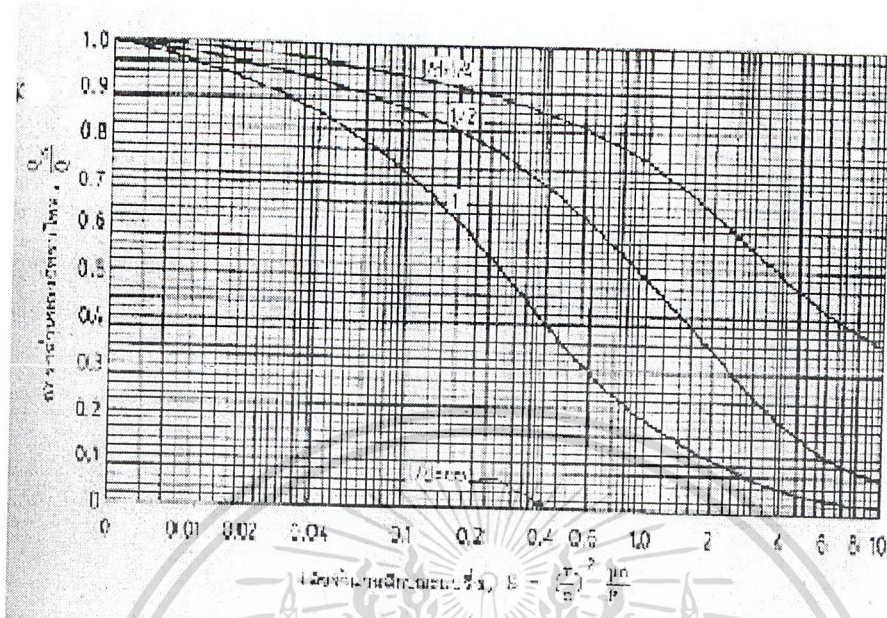


รูปที่ ก.3 แผนภูมิสำหรับหาตัวแปรสัมประสิทธิ์ความเสียหาย

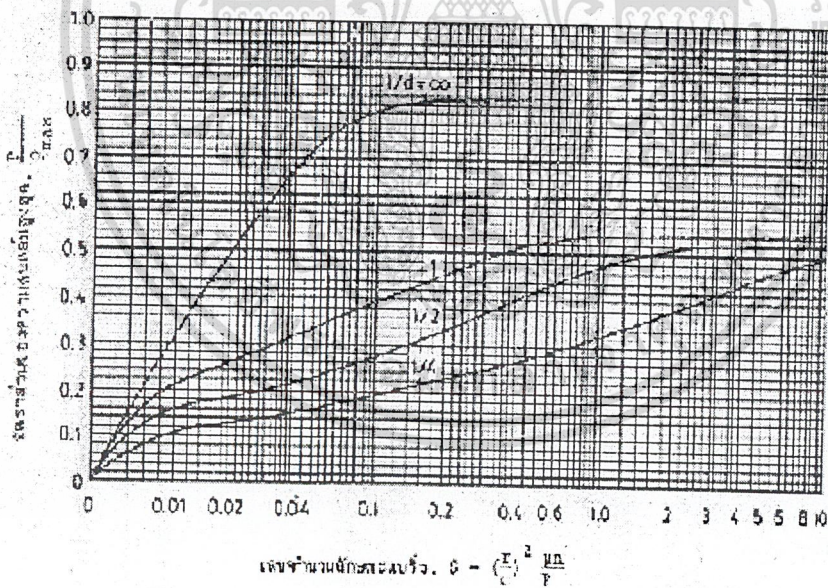


รูปที่ ก.4 แผนภูมิสำหรับหาตัวแปรอัตราไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

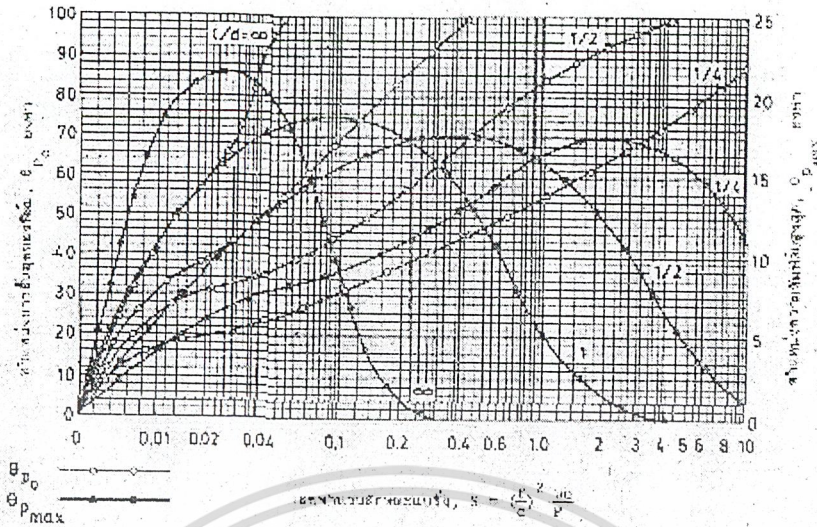


รูปที่ ก.5 แผนภูมิสำหรับหาค่าอัตราส่วนของอัตราเร็วไหลด้านข้าง



รูปที่ ก.6 แผนภูมิสำหรับหาค่าความดันฟิล์มน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

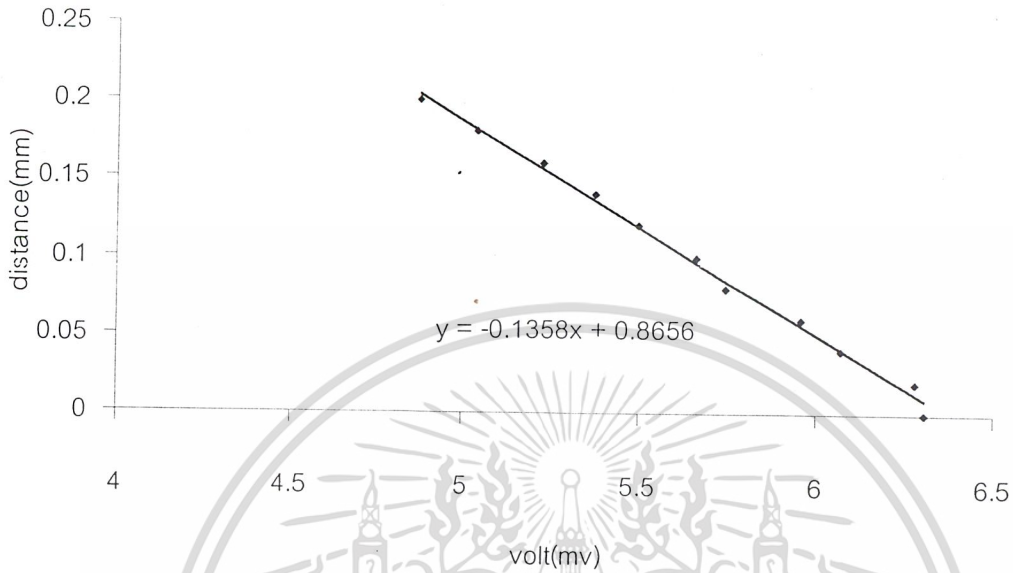


รูปที่ ก.7 แผนภูมิสำหรับหาค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของฟิล์ม น้ำมันหล่อลื่นและตำแหน่งของความดันฟิล์ม น้ำมันสูงสุด



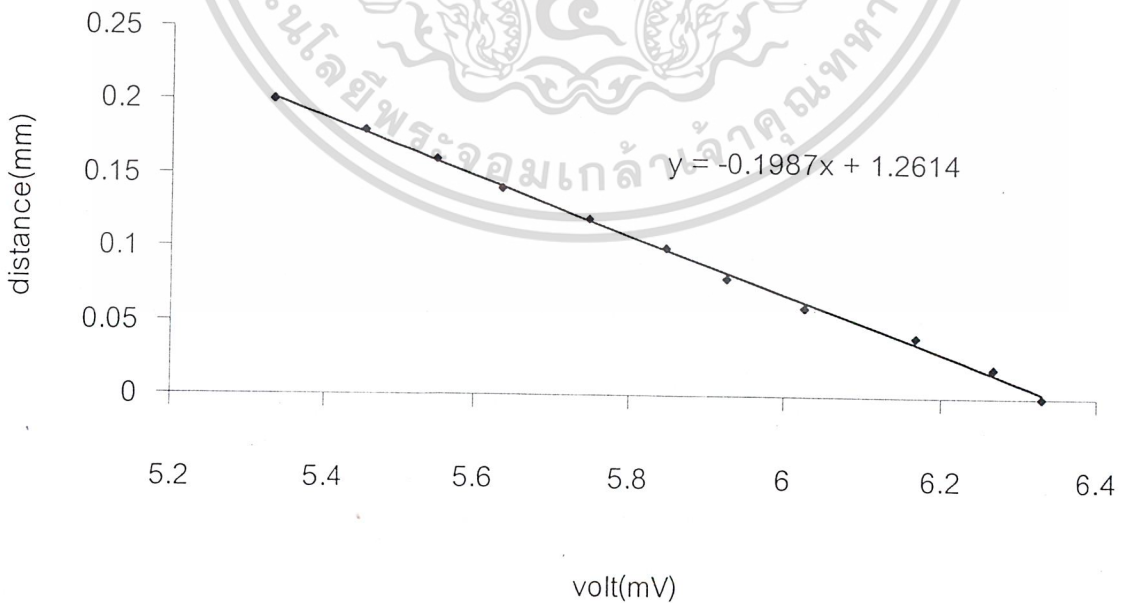
ภาคผนวก ข.

GAP SENSER 1



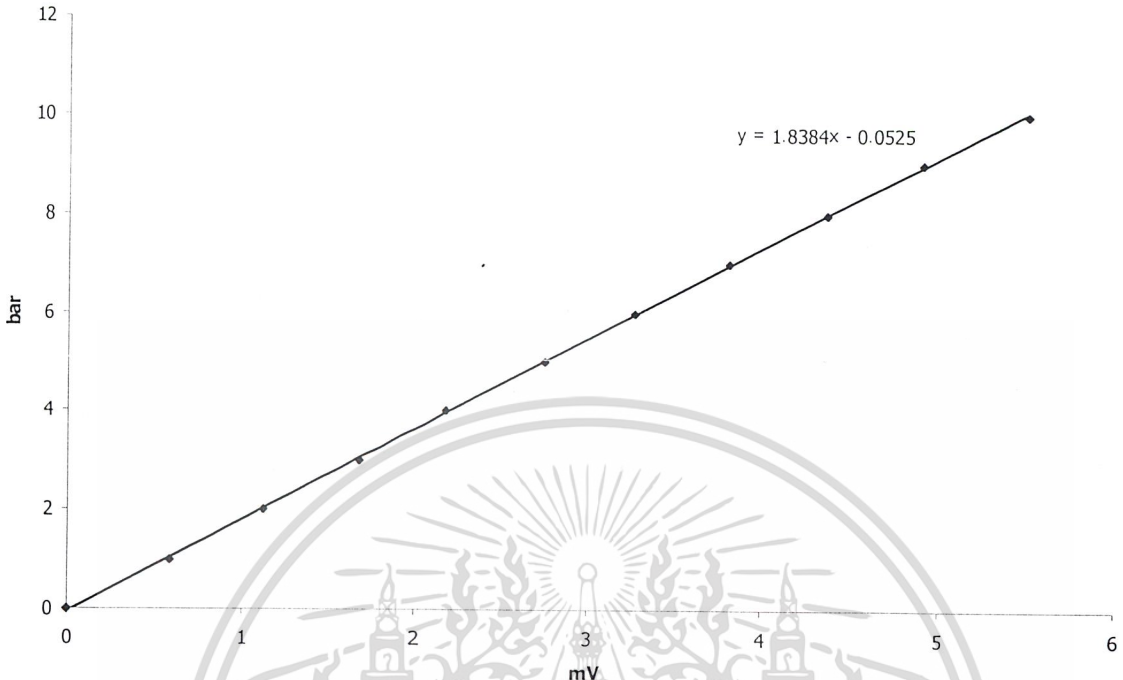
รูปที่ ข.1 กราฟ calibration ของ gap sensor ตัวที่ 1

GAP SENSER 2



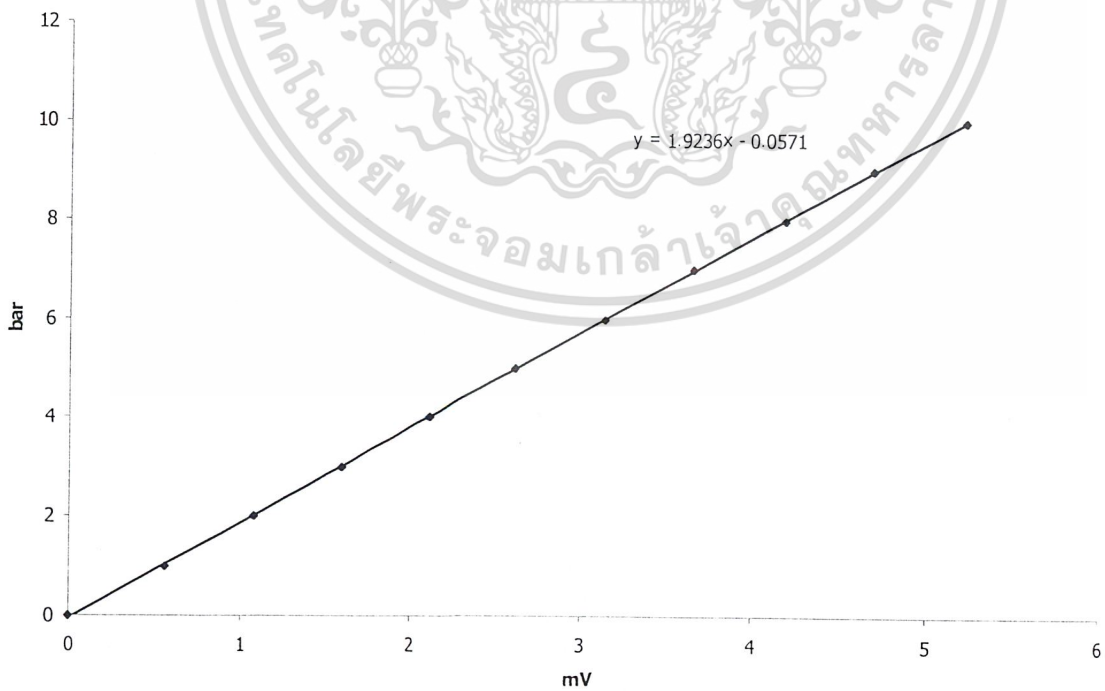
รูปที่ ข.2 กราฟ calibration ของ gap sensor ตัวที่ 2

PRESSURE TRANSDUCER 1



รูปที่ ข.3 กราฟ calibration ของ pressure transducer ตัวที่1

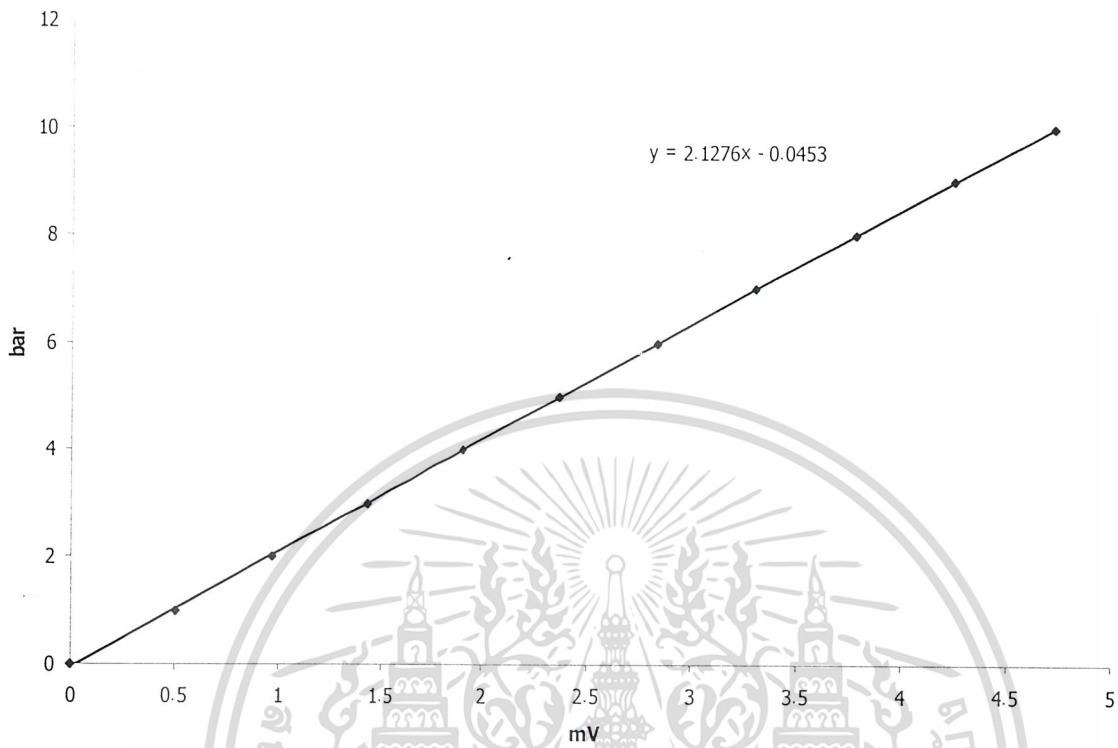
PRESSURE TRANSDUCER 2



รูปที่ ข.4 กราฟ calibration ของ pressure transducer ตัวที่2

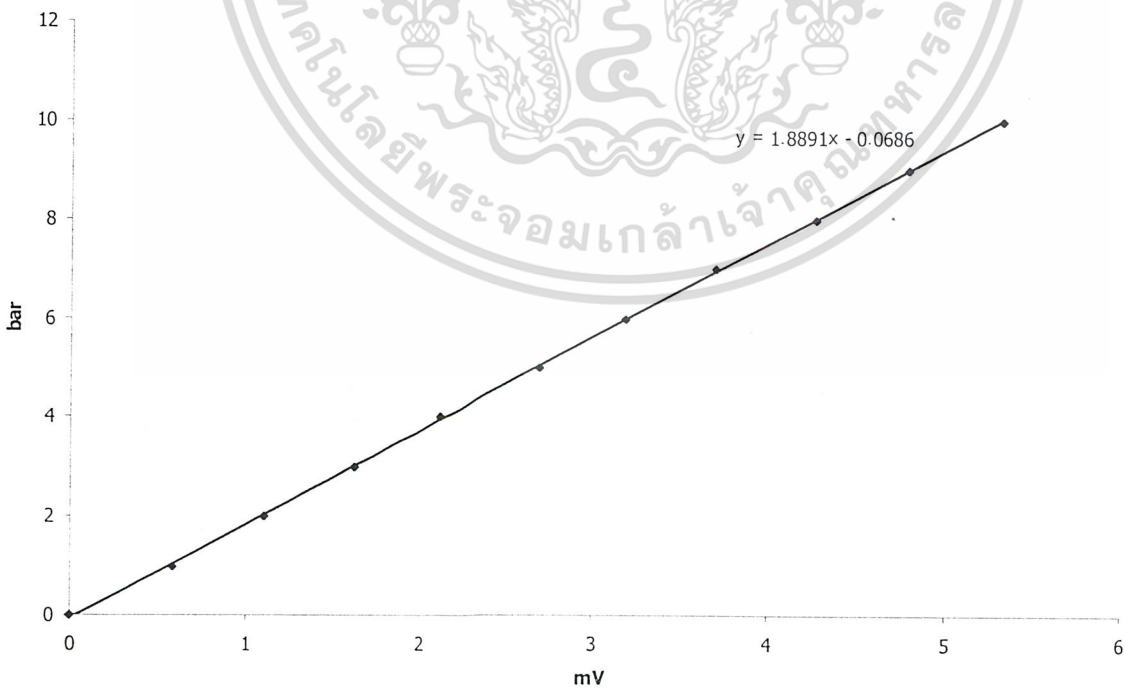
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PRESSURE TRANSDUCER 3



รูปที่ ข.5 กราฟ calibration ของ pressure transducer ตัวที่3

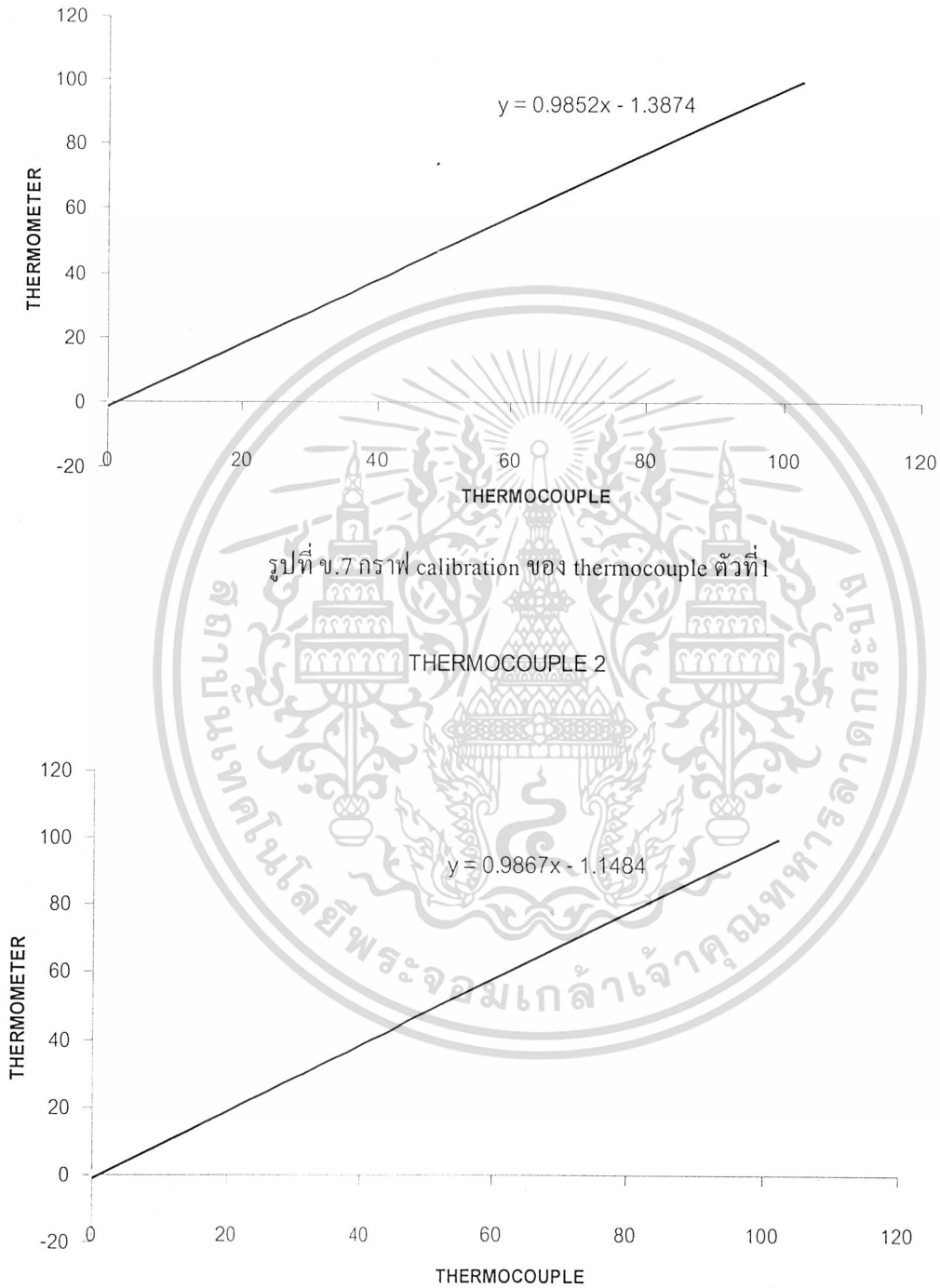
PRESSURE TRANSDUCER 4



รูปที่ ข.6 กราฟ calibration ของ pressure transducer ตัวที่4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

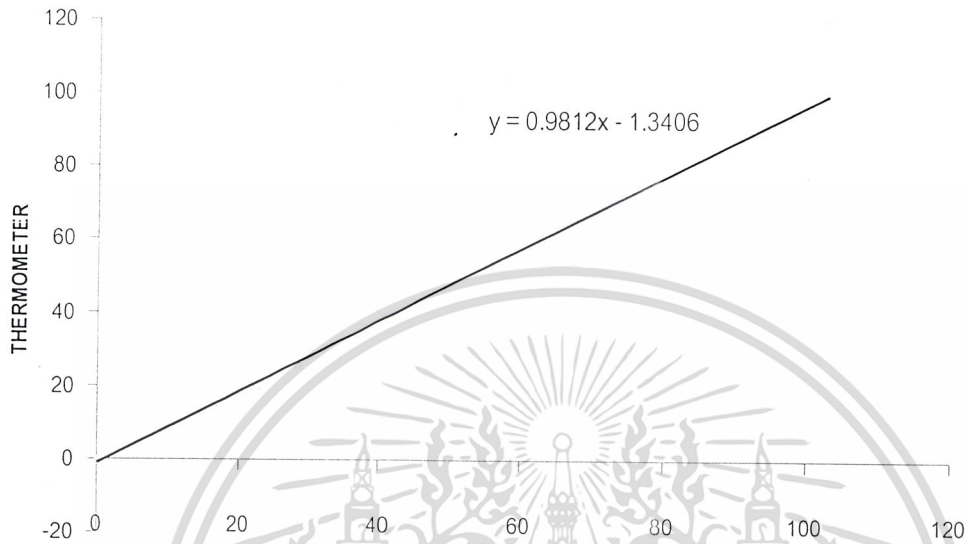
THERMOCOUPLE 1



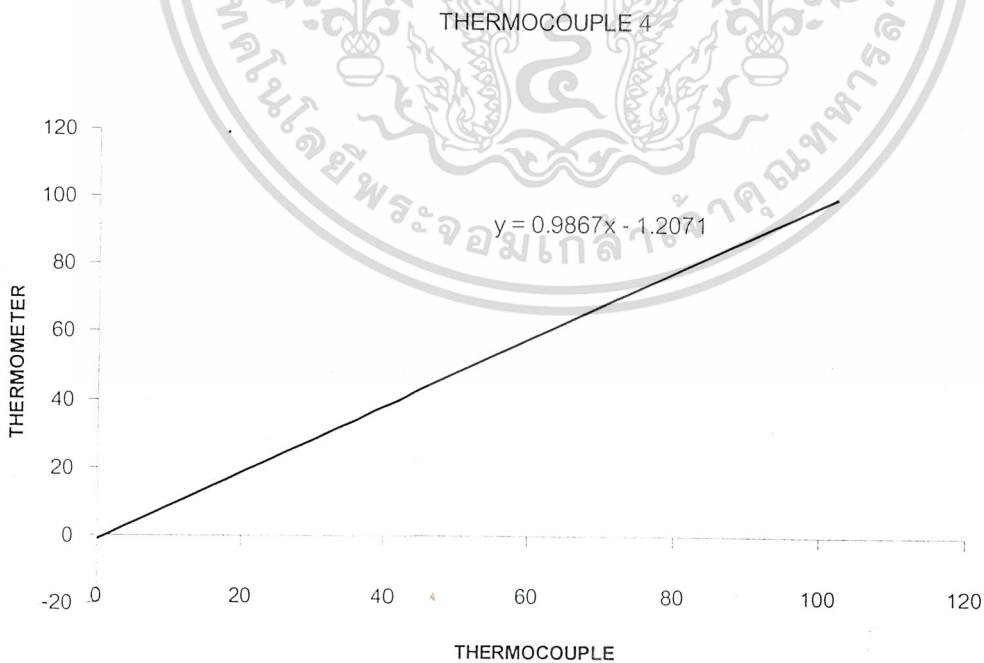
รูปที่ ข.8 กราฟ calibration ของ thermocouple ตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THERMOCOUPLE 3



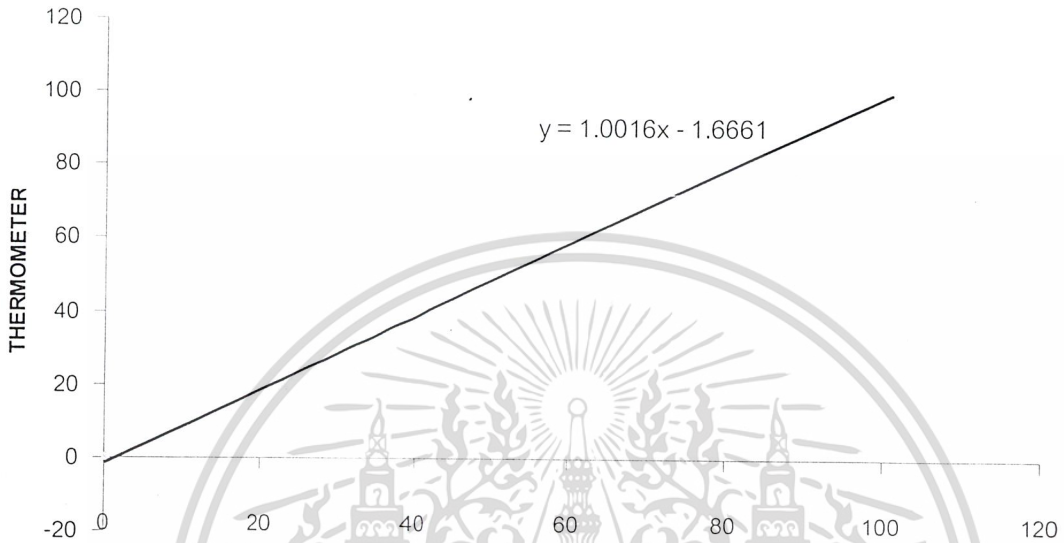
รูปที่ ข.9 กราฟ calibration ของ thermocouple ตัวที่3



รูปที่ ข.10 กราฟ calibration ของ thermocouple ตัวที่4

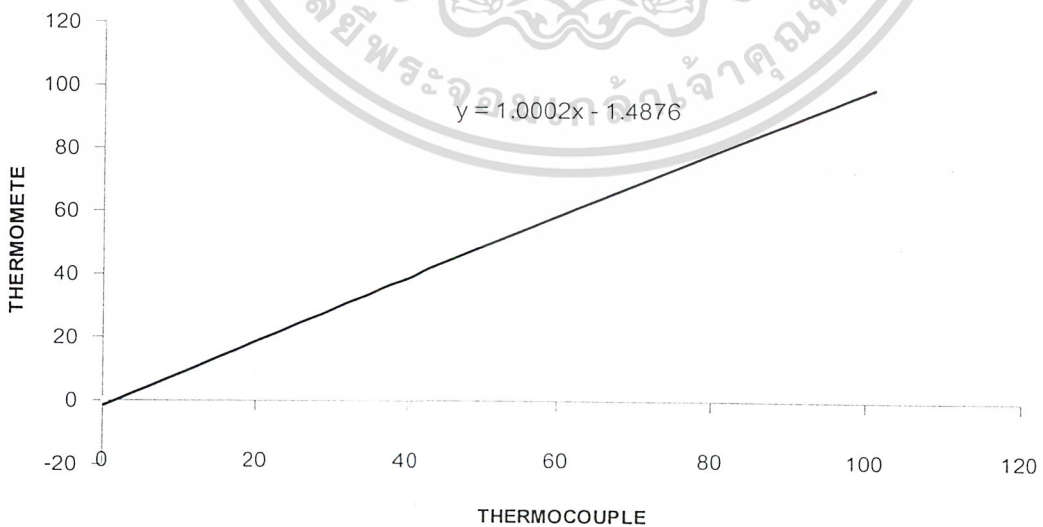
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THERMOCOUPLE 5



รูปที่ ข.11 กราฟ calibration ของ thermocouple ตัวที่ 5

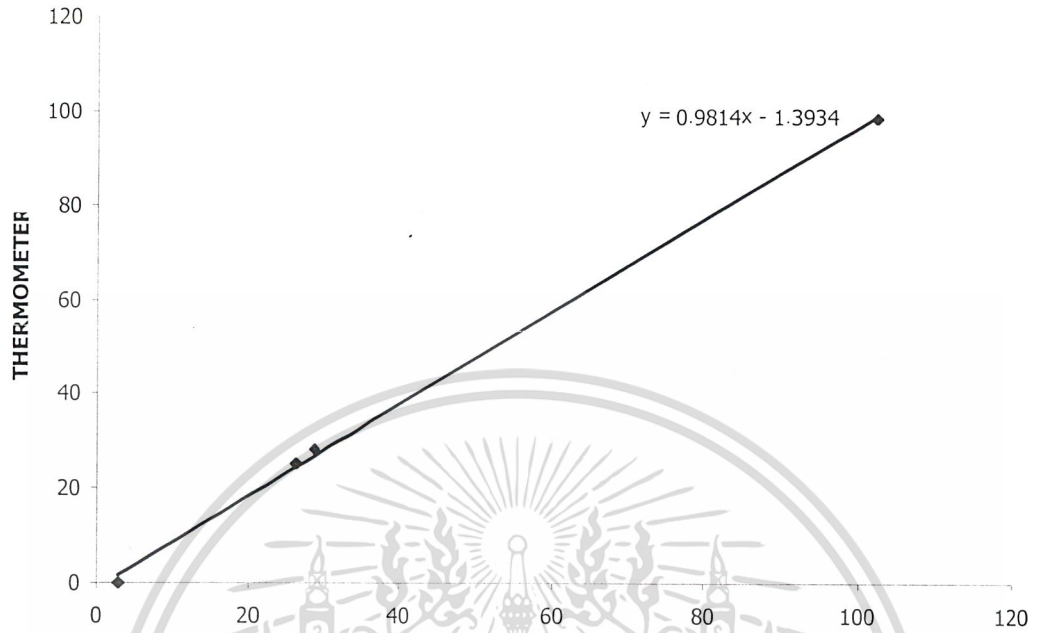
THERMOCOUPLE 6



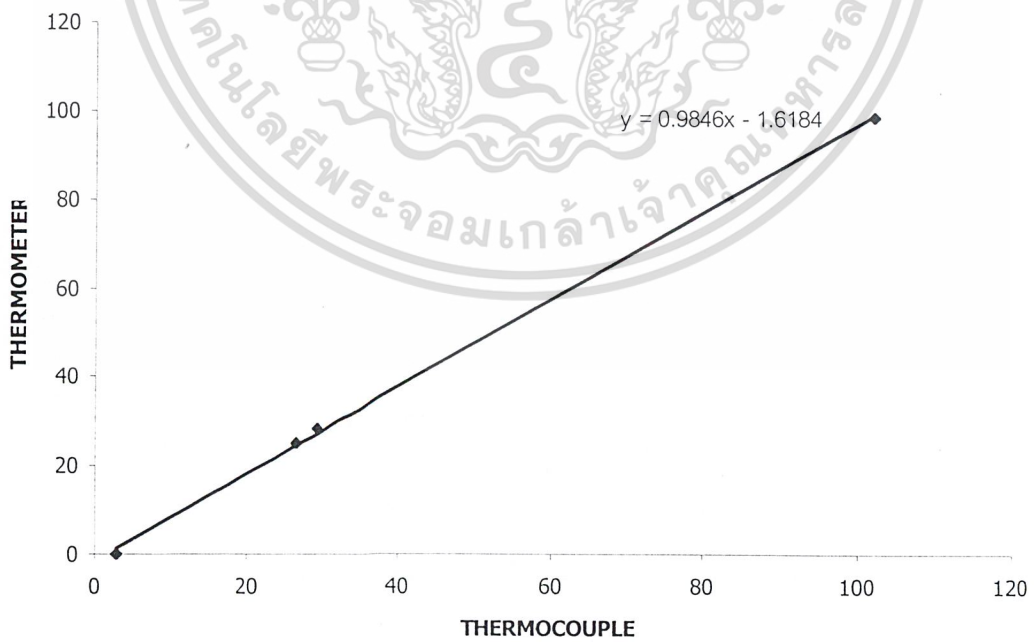
รูปที่ ข.12 กราฟ calibration ของ thermocouple ตัวที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THERMOCOUPLE 7



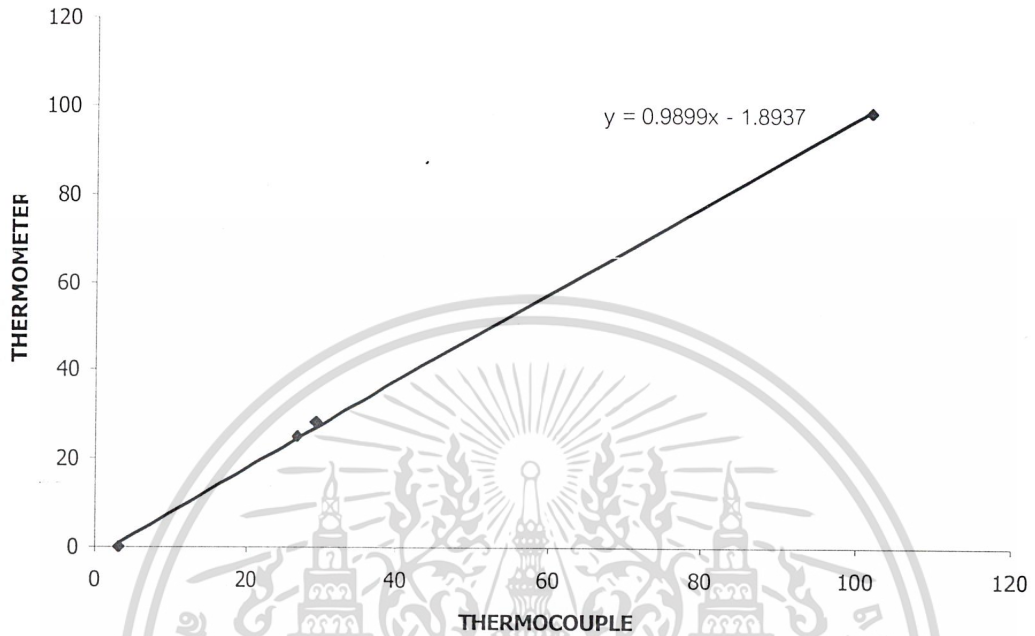
รูปที่ ข.13 กราฟ calibration ของ thermocouple ตัวที่ 7



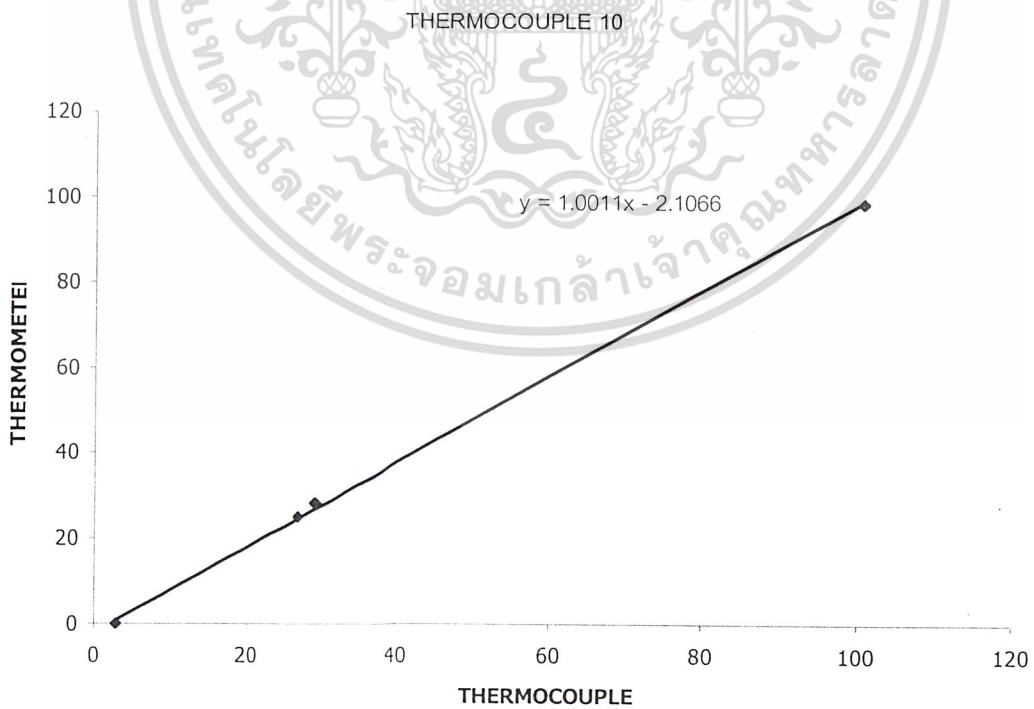
รูปที่ ข.14 กราฟ calibration ของ thermocouple ตัวที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THERMOCOUPLE 9



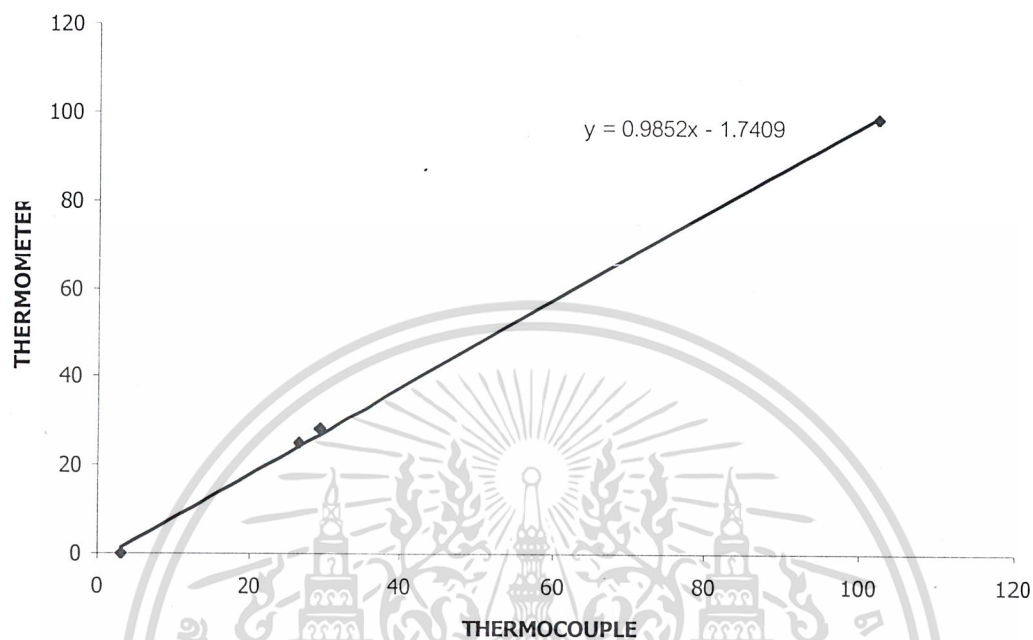
รูปที่ ข.15 กราฟ calibration ของ thermocouple ตัวที่ 9



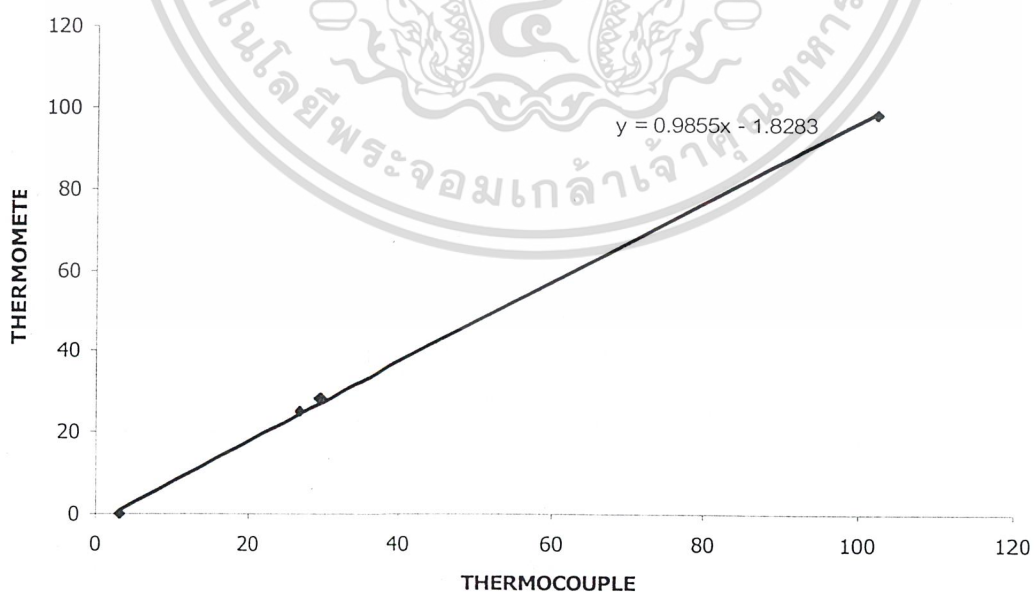
รูปที่ ข.15 กราฟ calibration ของ thermocouple ตัวที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THERMOCOUPLE 11



รูปที่ ข.16 กราฟ calibration ของ thermocouple ตัวที่ 11



รูปที่ ข.17 กราฟ calibration ของ thermocouple ตัวที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

C = รัศมีของช่องว่าง

e = journal eccentricity

h = ความสูงของฟิล์มน้ำมัน

L = ความยาวแบร์ริง

m = consistency constant

n = power-law model index

p = ความดันของฟิล์มน้ำมัน

r = รัศมีเพลลา

U = ความเร็วที่ผิวของเพลลา

W = load carrying capacity

τ = ความเค้นเฉือน

\mathcal{E} = อัตราส่วนเชิงศูนย์กลาง $= e/c$

μ = ค่าความหนืดของสารหล่อลื่น

ϕ = attitude angle



บรรณานุกรม

- [1] ผศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์และศ.ดร.อิโรมุ ฮาจิโมโตะ, "ทฤษฎีการหล่อลื่น" พิมพ์ครั้งที่ 1, ปี พ.ศ.2536 หน้า 1-15
- [2] Dr.H. Hashimoto and Dr.M. Mongkolwongrotn, "Advanced Lubrication Theory", Vol.1, 1993, p. 61-65
- [3] Bernard J. Hamrock, "Fundamentals of fluid film lubrication" McGraw-Hill, c1994, p.147-151
- [4] Andras Z. Szeri, "Fluid film lubrication : theory and design" Cambridge University Press, c1998, p.352-387, 320-323
- [5] Conner, J., Bayd, J., Avallane E.A, "Standard Handbook of Lubrication Engineering", Mc-Graw Hill New York, 1968.
- [6] Horowitz, H.H., Steindler F.E., "The Calculated Journal Bearing Performance of Polymer Thickened Lubricants", ASLE Trans., Vol.3 No.1, 1960
- [7] Horowitz, H.H., Steindler F.E., "Calculated Performance of Non-Newtonian Lubricants in Finite Width Journal Bearing", ASLE Trans., Vol.4, 1961.
- [8] Hashimoto, H., Wada, S., "The Effects of Fluid Inertia Forces in Parallel Circular Squeeze Film Bearings Lubricated with Pseudo-Plastic Fluid", ASME
- [9] Dien, Y.G. and Elrod, H.G., "A Generalized Steady State Reynolds Equation for the Non-Newtonian Fluid with Application to Journal Bearings", Transaction of the ASME Journal of Lubrication Technology, 1983, Vol.105.