การวิเคราะห์สมรรถนะของถาบรองลื่นเพลากลมชนิดหุ้มเพลาไม่เต็มวงหล่อลื่น ด้วยสารหล่อลื่นชนิด นัน - นิวตอเนียน

PERFORMANCE ANALYSIS OF HYDRODYNAMIC PARTIAL JOURNAL BEARING WITH NON-NEWTONIAN LUBRICANTS

นายพรศักดิ์ อรรถวานิช

MR. PORNSAK ATTAVANICH

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2541

ISBN 974-622 349-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การวิเคราะห์สมรรถนะของกาบรองลื่นเพลากลมชนิดหุ้มเพลาไม่เติมวงหล่อลื่น ด้วยสารหล่อลื่นชนิดนัน-นิวตอเนียน

PERFORMANCE ANALYSIS OF HYDRODYNAMIC PARTIAL JOURNAL BEARING WITH NON-NEWTONIAN LUBRICANTS

นายพรศักดิ์ อรรถวานิช

MR. PORNSAK ATTAVANICH

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2541

ISBN 974-622-349-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERFORMANCE ANALYSIS OF HYDRODYNAMIC PARTIAL JOURNAL BEARING WITH NON-NEWTONIAN LUBRICANTS

PORNSAK ATTAVANICH

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
1998

ISBN 974-622-349-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์สมรรถนะของกาบรองลื่นเพลากลมชนิดหุ้มเพลาไม่เต็มวงหล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่น ชนิด นัน-นิวตอเนียน

PERFORMANCE ANALYSIS OF HYDRODYNAMIC PARTIAL JOURNAL BEARING WITH NON-NEWTONIAN LUBRICANTS

ชื่อนักศึกษา นายพรศักดิ์ อรรถวานิช **รหัสประจำตัว** 34624002

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต **สาขาวิชา** วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์	
ผศ.จำลอง ปราบแก้ว	
ผศ.ดร.บัณฑิต ฟุ้งธรรมสาร	
ดร.จารุวัตร เจริญสุข	

ค่าระดับคะแนนที่ผ่านเป็นเอกฉันท์จากคณะกรรมการสอบ GOOD

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 30 ตุลาคม 2541 เวลา 13.30 – 15.30 น.

สถานที่สอบ ห้องสอบวิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตึก 12 ชั้น ชั้น 4 ห้อง (E12-404)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

(รศ.ดร.มนัส สังวรศิลป์)

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่............เดือน.........................พ.ศ................

<u>หมายเหตุ</u> การวัดผลวิทยานิพนธ์ให้ใช้ค่าระดับคะแนนดังนี้

ค่าระดับคะแนน	ผลการศึกษา	
O	Outstanding	(ดีเยี่ยม)
G	Good	(ดี)
P	Pass	(ผ่าน)
F	Fail	(ไม่ผ่าน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สมรรถนะของกาบรองลื่นเพลากลมชนิดหุ้มเพลาไม่เต็มวงหล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นชนิดนัน-นิวตอเนียน
นักศึกษา	นายพรศักดิ์ อรรถวานิช
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.	2541

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของกาบรองลื่นเพลากลมชนิดรูปครึ่งวงกลม มีค่ารัศมีเคลียเรน 0.15 มิลลิเมตร และชนิดรูปครึ่งวงรี มีค่ารัศมีเคลียเรนตามแนวแกนเมเยอร์ตั้งแต่ 0.375 มิลลิเมตร ถึง 0.5 มิลลิเมตร และค่ารัศมีเคลียเรนตามแนวแกนไมเนอร์ 0.25 มิลลิเมตร ถึง 0.375 มิลลิเมตร น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นผสมโพลีไอโซบิวทิลีน เป็นสารเติมแต่งที่ทำให้ค่าความหนืดของน้ำมันมีค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ และให้คุณสมบัติเป็นของไหล นัน-นิวตอเนียน การวิเคราะห์ทางทฤษฎี ใช้สมการเรย์โนลด์ โดยสมมติว่าเป็นกาบรองลื่นชนิดสั้นมาก และใช้ค่าความหนืดโดยประมาณด้วยวิธีการประมาณแบบเชิงเส้น

การทดลองได้ทำการทดลองหาการกระจายแรงดันของฟิล์มน้ำมัน ความหนาของฟิล์มน้ำมัน โดยทดลองที่ค่าภาระและความเร็วรอบ 10,15,20 และ 25 กิโลกรัม และ 1000, 1500, 2000, 2500 และ 3000 รอบต่อนาที การวัดแรงดันของฟิล์มน้ำมัน ใช้ตัววัดสัญญาณแรงดันโมโตโรลล่า รุ่น เอ็มพีเอ็ก 700 การวัดความหนาฟิล์มน้ำมัน ใช้ตัววัดสัญญาณที่อาศัยหลักการสูญเสียเนื่องจากการไหลวนของกระแสไฟฟ้า เออีซีรุ่น เออีซี 5505 ผลการทดลองพบว่ากาบรองลื่นเพลากลมที่หล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่นผสมพีไอบี จะสามารถรับภาระได้สูง และมีฟิล์มน้ำมันโดยเฉลี่ยหนากว่าและได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงกว่า กาบรองลื่นเพลากลมที่หล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่นชนิดที่ไม่ได้ผสมสารเติมแต่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Performance Analysis of Hydrodynamic Partial Journal Bearing with Non-newtonian Lubricants
Student	MR. PORNSAK ATTAVANICH
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Mongkol Mongkolwongrojn
Level of Study	Master of Engineering in Mechanical Engineering
Department	Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang.
Year	1998

Abstract

This research described the study of the behavior of journal bearings. The 180 degree of circular journal bearings with 0.15 mm clearance and the 180 degree elliptical journal bearings with radial clearance on major axis between 0.375 mm and 0.5 mm and on minor axis between 0.25 mm and 0.375 mm are investigated experimentally. The lubricant oil was mixed with poly isobutelene to improve viscosity index which has non-newtonian property. Reynolds equation has been derived analytically for newtonian lubricant with infinitely short bearing by using linearized method to obtained the approximated viscosity.

In the experiment, the pressure distribution, oil film thickness are obtained under varying loads and varying speeds; 5, 10, 15, 20, 25 kilogram of loads and 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 rpm respectively. In this experiment pressure sensor are motorolla MPX 700, gap sensors are eddy type gap sensor model AEC 5505.

Experimental results showed that journal bearing with PIB additive has slightly more load capacity, larger film thickness and higher friction loss.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำเสนอแนะหัวข้อวิทยานิพนธ์ หลักการ แนวทางในการทำ วิทยานิพนธ์ การออกแบบชุดทดลอง วิธีการทดลอง และการแก้ปัญหาต่างๆในระหว่างการทำการทดลอง ตลอดจนการเขียนวิทยานิพนธ์ พร้อมกันนี้ขอขอบคุณ อาจารย์เอกพจน์ ตันตราภิวัฒน์ ที่ให้การช่วยเหลือ ในด้านการจัดสร้างชุดเครื่องมือทดลอง การดำเนินการทดลอง และการทำเอกสารประกอบวิทยานิพนธ์ พร้อมกันนี้ ขอขอบคุณ ดร. สรรพสิทธ์ ลิ่มนรรัตน์ ดร. จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์อุดม จันทร์จรัสสุข อาจารย์สกนธ์ คล่องบุญจิต อาจารย์วิภู ศรีสืบสาย ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการเขียนโปรแกรม บางส่วน และจัดทำเอกสารวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ คุณสุรีย์ รอดแจ่ม คุณวาสนา ม่วงโพธิ์ ที่คอยให้การช่วยเหลือในการจัดทำเอกสารประกอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้กำลังใจและให้การช่วยเหลือในด้านต่างๆ ขอขอบพระคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ ประจำบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในขั้นตอนการนำเสนอวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณกรรมการควบคุมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้ให้คำเสนอแนะในการจัดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ เป็นไปตามวัตถุประสงค์

พรศักดิ์ อรรถวานิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	XIII
บทที่	
1. **บทนำ**	1
1.1 ลักษณะของการหล่อลื่นในระบบเครื่องจักรกล	1
1.2 ฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นรูปลิ่ม	4
1.3 กฎของพีทรอฟฟี	6
1.4 ความหนืด	8
2. **สมการเรย์โนลด์ สมการพลังงานและสมการเนเวียร์สโตกส์**	12
2.1 สมมติฐานของสมการเรย์โนลด์	12
2.2 สมดุลย์ของอนุภาค	12
2.3 การไหลของสารหล่อลื่น	14
2.4 สมการเรย์โนลด์สำหรับกาบรองลื่นยาวมาก	15
2.5 สมการเรย์โนลด์สองมิติและสามมิติอย่างง่าย	17
2.6 สมการเรย์โนลด์ในสามมิติ	19
2.7 อัตราส่วนการนำและการพาความร้อน	23
2.8 ฟังก์ชันการกระจายความร้อนในรูปสมการอนุพันธ์แบบง่าย	25
2.9 ฟังก์ชันของพลังงานรวมและการไหลของงาน	26
2.10 สมการเนเวียร์-สโตกส์	29
2.11 สมการพลังงาน	35
2.12 การแก้ความถูกต้องจากผลของความเฉื่อย	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ หน้า

3. **กาบรองลื่นเพลากลม** 42
   3.1 คำนำ 42
   3.2 ความหนาของฟิล์มน้ำมันและการหาความหนาฟิล์มโดยประมาณ 42
   3.3 ลักษณะของฟิล์มและการหาความหนาฟิล์มอย่างละเอียด 42
   3.4 สมการเรย์โนลด์สำหรับกาบรองลื่นเพลากลม 44
   3.5 สมการความดัน 44
   3.6 สมมติฐานและสมการความดันของกาบรองลื่นสั้น 56
   3.7 ภาระบนกาบรองลื่นสั้น 59
   3.8 กาบรองลื่นสั้น มุมแอตติจูดและการไหลของน้ำมัน 60
   3.9 ความเสียดทานในกาบรองลื่นเพลากลม 62
   3.10 กาบรองลื่นสั้น 63
   3.11 กาบรองลื่นวงกลมชนิดหุ้มเพลาไม่เต็มวงประเภทสั้น 63
   3.12 การกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น 66
4. **การทดลองหาสมรรถนะของกาบรองลื่นเพลากลม** 76
   4.1 หลักการทดลองหาสมรรถนะของกาบรองลื่นเพลากลม 76
   4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 77
   4.3 วิธีการทดลองหาสมรรถนะของกาบรองลื่นเพลากลม 89
   4.4 ผลการทดลอง 89
   4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง 162
5. **สรุปผลการทดลอง การวิจารณ์และข้อเสนอแนะ** 165
   5.1 สรุปผลการวิจัยทดลอง 165
   5.2 การวิจารณ์และข้อเสนอแนะ 165

บรรณานุกรม 167

ภาคผนวก 168

ภาคผนวก ก. ข้อมูลผลการทดสอบคุณลักษณะของน้ำมันหล่อลื่น 169

ภาคผนวก ข. โปรแกรมคำนวณความสัมพันธ์ของ Shear Stress VS. Shear rate ของน้ำมันหล่อลื่น 174

ประวัติผู้เขียน 182

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในกรณีกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น (Short Partial Circular Journal Bearing) ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม โพลิไอโซบิวทิลีน(PIB) 1%	91
4.2	แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในกรณีกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น (Short Partial Circular Journal Bearing) ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม โพลิไอโซบิวทิลีน(PIB) 2%	95
4.3	แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในกรณีกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น (Short Partial Circular Journal Bearing) ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม โพลิไอโซบิวทิลีน(PIB) 5%	99
4.4	แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในกรณีกาบรองลื่นครึ่งวงกลมยาวจำกัด (Finite Partial Circular Journal Bearing) ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสมโพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 1%	103
4.5	แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในกรณีกาบรองลื่นครึ่งวงกลมยาวจำกัด (Finite Partial Circular Journal Bearing) ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสมโพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 2%	107
4.6	แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในกรณีกาบรองลื่นครึ่งวงกลมยาวจำกัด (Finite Partial Circular Journal Bearing) ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสมโพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 5%	111
4.7	แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในกรณีกาบรองลื่นครึ่งวงรีขนาดแกนเมเยอร์เท่ากับ 50.75 มิลลิเมตร ขนาดแกนไมเนอร์เท่ากับ 50.58 มิลลิเมตร มีความยาว 50 มิลลิเมตร (Finite Partial Elliptical Journal Bearing) ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสมโพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 1%	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.8 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในกรณีกาบรองลื่นครึ่งวงรี ขนาดแกนเมเยอร์เท่ากับ 50.75 มิลลิเมตร ขนาดแกนไมเนอร์เท่ากับ 50.5 มิลลิเมตร มีความยาว 50 มิลลิเมตร (Finite Partial Elliptical Journal Bearing) ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสมโพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 2%....................119

4.9 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในกรณีกาบรองลื่นครึ่งวงรี ขนาดแกนเมเยอร์เท่ากับ 50.75 มิลลิเมตร ขนาดแกนไมเนอร์เท่ากับ 50.5 มิลลิเมตร มีความยาว 50 มิลลิเมตร (Finite Partial Elliptical Journal Bearing) ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสมโพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 5%....................123

4.10 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในกรณีกาบรองลื่นครึ่งวงรี ขนาดแกนเมเยอร์เท่ากับ 51.0 มิลลิเมตร ขนาดแกนไมเนอร์เท่ากับ 50.5 มิลลิเมตร มีความยาว 50 มิลลิเมตร (Finite Partial Elliptical Journal Bearing) ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสมโพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 1%....................127

4.11 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในกรณีกาบรองลื่นครึ่งวงรี ขนาดแกนเมเยอร์เท่ากับ 51.0 มิลลิเมตร ขนาดแกนไมเนอร์เท่ากับ 50.5 มิลลิเมตร มีความยาว 50 มิลลิเมตร (Finite Partial Elliptical Journal Bearing) ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสมโพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 2%....................131

4.12 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในกรณีกาบรองลื่นครึ่งวงรี ขนาดแกนเมเยอร์เท่ากับ 51.0 มิลลิเมตร ขนาดแกนไมเนอร์เท่ากับ 50.5 มิลลิเมตร มีความยาว 50 มิลลิเมตร (Finite Partial Elliptical Journal Bearing) ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสมโพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 5%....................135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

1.1 กลไกของการหล่อลื่น มุมเยื้องศูนย์ ϕ กำหนดตำแหน่ง h_o 3

1.2 การเกิดรูปการเปลี่ยนแปลงความเร็วในรองลื่นแบบแผ่นรองเอียง....................................4

1.3 ความเสียดทาน ZN'/PS ที่เกิดในกาบรองลื่นเพลากลม
จากการทดลองของ McKee..8

1.4 การไหลระหว่างแผ่นขนาน..9

1.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิ....................................11

2.1 สมดุลย์ของอนุภาค..12

2.2 ความดันใน slider..16

2.3 การไหลอย่างต่อเนื่องของคอลัมน์..18

2.4 การไหลอย่างต่อเนื่องของแท่งของเหลว..20

2.5 ความเร็วและอุณหภูมิในแผ่น..23

2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการนำความร้อน/การพาความร้อนต่อ
ความดันที่เกิดจากการป้อนน้ำมันสำหรับกาบรองลื่นเพลากลมยาว 6 นิ้ว....................24

2.7 ความเฉื่อยและความเร็วในอนุภาคของเหลว..25

2.8 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความหนาแน่นและพลังงานภายในคอลัมน์....................................27

2.9 การเสียรูปของอนุภาค..30

2.10 การหมุนรอบแกน x และแกน y..31

3.1 รูปทรงเรขาคณิต แสดงความสัมพันธ์ของความหนาฟิล์มน้ำมัน
โดยประมาณ..42

3.2 รูปทรงเรขาคณิต แสดงความสัมพันธ์ของความหนาฟิล์มน้ำมัน
อย่างละเอียด..42

3.3 การคลี่ความหนาฟิล์มน้ำมัน..45

3.4 Curve แสดงความดันแบบของ Sommerfeld 48

3.5 Curve ของความดันและมุมแอตติจูด..49

3.6 แนวเส้นทะแยงมุม และภาระรวม..50

3.7 รูปทรงเรขาคณิตของกาบรองลื่นหุ้มเพลาไม่เต็มวง..64

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่ หน้า

3.8 การกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลม......66

3.9 – 3.23 การกระจายความดันในกาบรองลื่นสั้นที่ได้จากการคำนวนในทางทฤษฎี......67

4.1 ลักษณะของชุดทดลองหาสมรรถนะของกาบรองลื่นเพลากลม......77

4.2 ลักษณะของกาบรองลื่นครึ่งวงกลม......77

4.3 ลักษณะของกาบรองลื่นครึ่งวงรี......78

4.4 ลักษณะของเพลา......78

4.5 ลักษณะของ Gap Sensor......79

4.6 รูปร่างและคุณลักษณะของ Pressure Sensor......80

4.7 ผลการทดสอบคุณสมบัติของสารหล่อลื่น......81

4.8 อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์......82

4.9 การประกอบกาบรองลื่นชนิดครึ่งวงกับปลอกยึดแขวนและ
ข้อต่อ Pressure Sensor และ Gap Sensor......83

4.10-4.19 ชุดทดลองหาสมรรถนะของกาบรองลื่นเพลากลมชนิดต่างๆ......84

4.20-4.24 แสดงการกระจายของความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น
(Short Partial Circular Journal Bearing) เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม
ความเร็วของเพลา 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40
ผสม โพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 1%......92

4.25-4.29 แสดงการกระจายของความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น
(Short Partial Circular Journal Bearing) เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม
ความเร็วของเพลา 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40
ผสม โพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 2%......96

4.30-4.34 แสดงการกระจายของความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น
(Short Partial Circular Journal Bearing) เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม
ความเร็วของเพลา 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40
ผสม โพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 5%......100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.35-4.39 แสดงการกระจายของความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลม ยาวจำกัด (Finite Partial Circular Journal Bearing) เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม ความเร็วของเพลา 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม โพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 1% 104

4.40-4.44 แสดงการกระจายของความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลม ยาวจำกัด (Finite Partial Circular Journal Bearing) เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม ความเร็วของเพลา 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม โพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 2% 108

4.45-4.49 แสดงการกระจายของความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลม ยาวจำกัด (Finite Partial Circular Journal Bearing) เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม ความเร็วของเพลา 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม โพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 5% 112

4.50-4.54 แสดงการกระจายของความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงรี ขนาดแกนเมเยอร์ เท่ากับ 50.7 มิลลิเมตร ขนาดแกนไมเนอร์ เท่ากับ 50.5 มิลลิเมตร มีความยาวจำกัด (Finite Partial Elliptical Journal Bearing) เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม ความเร็วของเพลา 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม โพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 1% 116

4.55-4.59 แสดงการกระจายของความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงรี ขนาดแกนเมเยอร์ เท่ากับ 50.7 มิลลิเมตร ขนาดแกนไมเนอร์ เท่ากับ 50.5 มิลลิเมตร มีความยาวจำกัด (Finite Partial Elliptical Journal Bearing) เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม ความเร็วของเพลา 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม โพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 2%. 120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.50-4.54 แสดงการกระจายของความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงรี ขนาดแกนเมเยอร์ เท่ากับ 50.7 มิลลิเมตร ขนาดแกนไมเนอร์เท่ากับ 50.5 มิลลิเมตร มีความยาวจำกัด (Finite Partial Elliptical Journal Bearing) เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม ความเร็วของเพลา 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม โพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 5% 124

4.65-4.69 แสดงการกระจายของความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงรี ขนาดแกนเมเยอร์ เท่ากับ 51.0 มิลลิเมตร ขนาดแกนไมเนอร์เท่ากับ 50.5 มิลลิเมตร มีความยาวจำกัด (Finite Partial Elliptical Journal Bearing) เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม ความเร็วของเพลา 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่น เกรด SAE-40 ผสม โพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 1% 128

4.70-4.74 แสดงการกระจายของความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงรี ขนาดแกนเมเยอร์ เท่ากับ 51.0 มิลลิเมตร ขนาดแกนไมเนอร์ เท่ากับ 50.5 มิลลิเมตร มีความยาวจำกัด (Finite Partial Elliptical Journal Bearing) เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม ความเร็ว ของเพลา 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่น เกรด SAE-40 ผสม โพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 2% 132

4.75-4.79 แสดงการกระจายของความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงรี ขนาดแกนเมเยอร์ เท่ากับ 51.0 มิลลิเมตร ขนาดแกนไมเนอร์ เท่ากับ 50.5 มิลลิเมตร มีความยาวจำกัด (Finite Partial Elliptical Journal Bearing) เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม ความเร็วของเพลา 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่น เกรด SAE-40 ผสม โพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 5% 136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.80-4.84 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของความดัน ที่ได้จากการทดลองและการคำนวนทางทฤษฎี สำหรับกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น (Short Partial Circular Journal Bearing) เส้นผ่านศูนย์กลางของกาบรองลื่นและความยาวเท่ากับ 50.3 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร ตามลำดับ เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลากลมเท่ากับ 50.0 มิลลิเมตร เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม และความเร็วรอบของเพลาเท่ากับ 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม โพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 1%....................139

4.85-4.89 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของความดัน ที่ได้จากการทดลองและการคำนวนทางทฤษฎี สำหรับกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น (Short Partial Circular Journal Bearing) เส้นผ่านศูนย์กลางของกาบรองลื่นและความยาวเท่ากับ 50.3 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร ตามลำดับ เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลากลมเท่ากับ 50.0 มิลลิเมตร เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม และความเร็วรอบของเพลาเท่ากับ 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม โพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 2%...................142

4.90-4.94 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของความดัน ที่ได้จากการทดลองและการคำนวนทางทฤษฎี สำหรับกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น (Short Partial Circular Journal Bearing) เส้นผ่านศูนย์กลางของกาบรองลื่นและความยาวเท่ากับ 50.3 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร ตามลำดับ เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลากลมเท่ากับ 50.0 มิลลิเมตร เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม และความเร็วรอบของเพลาเท่ากับ 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม โพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 5%...................145

4.95-4.97 เปรียบเทียบการกระจายความดันของกาบรองลื่นเพลากลมรูปร่างและขนาดต่างๆ ที่สภาวะ 25 kg, น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 +โพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) 5% ความเร็วของเพลา 2000, 2500และ 3000 rpm.........148

เอกสารนี้ได้รับการคุ้มครองตามกฎหมายลิขสิทธิ์ ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.98-4.100 ผลของภาระและความเร็วรอบของเพลาต่อ ความดันสูงสุด สำหรับกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.3 มม. ยาว 20 มม. เพลามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มม. เติมน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 + 1%,2% และ 5%โพลิไอโซบิวทิลีน....151

4.101-4.102 ผลของส่วนผสม โพลิไอโซบิวทิลีน(PIB) และความเร็วรอบของเพลา ต่อความดันสูงสุดสำหรับกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.3 มม. ยาว 20 มม. เพลามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มม. เมื่อรับภาระ 15 และ 25 กิโลกรัม....154

4.103-4.105 ผลของภาระและความเร็วรอบของเพลาต่อ ความดันสูงสุด สำหรับกาบรองลื่นครึ่งวงรียาวจำกัด มีความยาวแกนเมเยอร์ 50.75 มม. ความยาวแกนไมเนอร์ 50.5 มม. ความยาวของกาบรองลื่น 50.0 มม. เพลามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มม. เติมน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 + 1%, 2% และ 5% โพลิไอโซบิวทิลีน....156

4.106-4.107 ผลของส่วนผสม โพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) และความเร็วรอบของเพลา ต่อความดันสูงสุดสำหรับกาบรองลื่นครึ่งวงรียาวจำกัด มีความยาวแกนเมเยอร์ 50.75 มม. ความยาวแกนไมเนอร์ 50.5 มม. ความยาวของกาบรองลื่น 50.0 มม. เพลามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มม. เมื่อรับภาระ 15 และ 25 กิโลกรัม 159

4.108 เปรียบเทียบผลของส่วนผสม โพลิไอโซบิวทิลีน (PIB) ต่อความดันสูงสุดสำหรับกาบรองลื่น 2 ชนิด....161

4.109 การไหลของน้ำมันหล่อลื่นเข้าช่องว่างระหว่างกาบรองลื่นและเพลา....164

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

กาบรองลื่นเพลากลม หรือ เจอร์นัล แบริ่ง เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ที่ประยุกต์ใช้ในเครื่องจักรผลิตกำลังเครื่องจักรกลการผลิตในทางอุตสาหกรรมแบบต่างๆ ที่ต้องการให้สามารถรับภาระได้สูง ที่ความเร็วรอบในการหมุนของเพลาสูงมาก การคำนวนออกแบบกาบรองลื่นเพลากลมให้มีประสิทธิภาพสูง ต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบหลายอย่างได้แก่ การคำนวนออกแบบโดยอาศัยหลักทฤษฎีในวิชาการหล่อลื่น หรือวิชาไตรโบโลยี การออกแบบเชิงเรขาคณิต การเลือกใช้วัสดุทำกาบรองลื่นเพลากลม ลักษณะของการหล่อลื่น และการเลือกใช้สารหล่อลื่นที่เหมาะสม ซึ่งได้มีการศึกษาวิจัยโดยนักวิทยาศาสตร์ และวิศวกร เพื่อที่จะพัฒนาระบบการทำงานของกาบรองลื่นเพลากลมให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

กาบรองลื่นเพลากลม ประกอบด้วยส่วนสำคัญ สองส่วน คือ เพลากลม (Journal) และกาบรองลื่น (Bearing) โดยที่เพลากลมจะหมุนอยู่ในกาบรองลื่น ในขณะที่เพลาหมุน จะเติมสารหล่อลื่นเพื่อลดความเสียดทาน ความสึกหรอและความร้อนที่เกิดขึ้น ปรกติสารหล่อลื่นจะอยู่ในรูปของเหลว เรียกว่า น้ำมันหล่อลื่น (Lubricant oil) น้ำมันหล่อลื่นที่อยู่ในระหว่างกาบรองลื่นและเพลา จะมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ กาบรองลื่นจะรับภาระในแนวรัศมี (radial load) ในขณะที่เพลายังไม่หมุน ผิวของเพลาและกาบรองลื่นจะสัมผัสกัน เมื่อเพลาเริ่มหมุน ในช่วงแรกจะมีการเสียดสีเกิดขึ้น ตรงจุดสัมผัส สารหล่อลื่นจะเข้าไปแทรกอยู่ในระหว่างผิวสัมผัส เมื่อความเร็วของเพลาสูงขึ้น จะเกิดความดันที่ชั้นแผ่นฟิล์มบางของสารหล่อลื่น และจะยกเพลาให้ลอยขึ้นพ้นจากผิวของกาบรองลื่น

การหล่อลื่น มีความสำคัญและจำเป็นมากในการเสริมให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีจุดประสงค์เพื่อแยกผิว สองส่วน ที่มีการเลื่อนไถล (sliding) แยกจากกัน โดยแผ่นฟิล์มบางของสารหล่อลื่น ซึ่งสามารถถูกเลื่อนออกได้โดยไม่ทำให้ผิวของวัตถุเสียหาย ขบวนการเลื่อนไถล จะพยายามลดความเสียดทานให้มีน้อยที่สุดเท่าที่สามารถทำได้ แผ่นฟิล์มบางของสารหล่อลื่น จะต้องมีความหนาพอที่จะไม่ให้ผิวที่จะเลื่อนไถลแยกจากกันสัมผัสกัน เป็นการลดความเสียดทานและความสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ลักษณะของการหล่อลื่นในระบบเครื่องจักรกล

การหล่อลื่นในระบบเครื่องจักรกลโดยทั่วไป แบ่งออกได้เป็น 5 แบบ คือ

1) การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิค (Hydrodynamic Lubrication)

2) การหล่อลื่นแบบไฮโดรสแตติก (Hydrostatic Lubrication)

3) การหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิค (Elastohydrodynamic Lubrication)

4) การหล่อลื่นแบบเบาน์ดารี (Boundary Lubrication)

5) การหล่อลื่นแบบฟิล์มของแข็ง (Solid-Film Lubrication)

1.1.1 การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิค

การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิค หรือการหล่อลื่นแบบฟิล์ม (film layer) หมายถึงการหล่อลื่นผิวสัมผัสของกาบรองลื่น ด้วยน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนาเพียงพอ ที่จะป้องกันไม่ให้ผิวของโลหะสัมผัสกันได้ ความดันที่เกิดขึ้นภายในชั้นของน้ำมันหล่อลื่น (Lubricant film) จะช่วยในการรับแรงที่กระทำต่อกาบรองลื่น โดยที่การเคลื่อนที่ของผิวหน้าของเพลาจะดึงเอาน้ำมันหล่อลื่น เข้าไปในช่องรูปลิ่ม (wedge-shaped) ด้วยความเร็วที่สูงพอ ที่จะทำให้เกิดความดัน เพื่อรับแรงดังกล่าว ดังนั้น การหล่อลื่นแบบนี้ จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นเพียงพอ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความเร็วในการหมุนของเพลา ตลอดจนความหนืด (viscosity) ของน้ำมันหล่อลื่นอีกด้วย

1.1.2 การหล่อลื่นแบบไฮโดรสแตติก

การหล่อลื่นแบบไฮโดรสแตติก หมายถึง การหล่อลื่น โดยการอัดของไหลหล่อลื่นเข้าไปด้วยความดันสูงเพียงพอที่จะแยกผิวสัมผัสออกจากกันได้ โดยที่ไม่ต้องอาศัยการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างผิวสัมผัส ซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณีที่เพลาหมุนด้วยความเร็วรอบต่ำ ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิคได้ และจำเป็นต้องใช้การหล่อลื่นแบบไฮโดรสแตติกเข้าช่วย หรือใช้ความดันไฮโดรสแตติกเข้าช่วยในขณะเริ่มต้นหมุนของเพลาขนาดใหญ่

1.1.3 การหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิค

การหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิค ความดันที่เกิดขึ้นภายในชั้นของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าสูงมาก ผิวหน้าของกาบรองลื่นจะเกิดการยุบตัว (deformation) โดยที่ผิวหน้าของกาบรองลื่นและเพลาไม่สัมผัสกัน การหล่อลื่นชนิดนี้เรียกว่า การหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิค เช่น การหล่อลื่นของรองลื่นแบบลูกกลิ้ง (rolling bearing) และการหล่อลื่นฟันเฟือง เป็นต้น

1.1.4 การหล่อลื่นแบบเบาน์ดารี

ในขณะที่กาบรองลื่นอยู่ในสภาวะการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิค ถ้าความเร็วของเพลาลดลง หรือแรงกระทำต่อกาบรองลื่นเพิ่มมากขึ้น หรือปริมาณน้ำมันหล่อลื่นไม่เพียงพอแล้ว ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

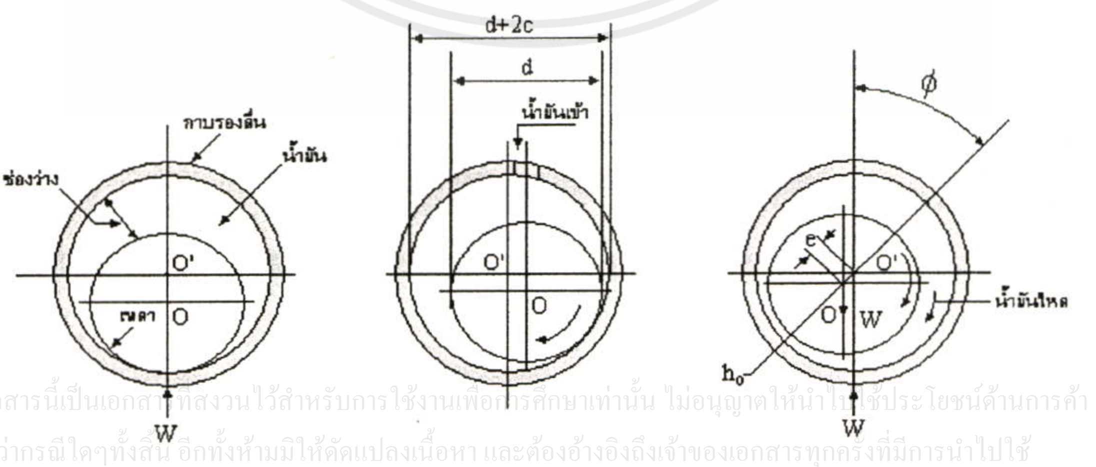
หนาของชั้นน้ำมันหล่อลื่นจะลดลง ทำให้ผิวหน้าของกาบรองลื่นมีการสัมผัสกันบ้างเป็นบางครั้ง เรียกว่าการหล่อลื่นแบบเบาน์ดารี

1.1.5 การหล่อลื่นแบบฟิล์มของแข็ง

ในกรณีที่กาบรองลื่นต้องทำงานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงมาก สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะไม่สามารถทำงานได้ จึงมีการนำเอาของแข็งมาใช้ เช่น กราไฟท์ หรือ โมลิบเดนัมไดซัลไฟด์ (Molybdenum disulfide) เคลือบที่ผิวหน้าของกาบรองลื่นแทน เรียกว่า การหล่อลื่นแบบฟิล์มของแข็ง ของแข็งที่ใช้เคลือบผิวหน้านี้จะต้องมีอัตราการสึกหรอช้า และมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ

การหล่อลื่นที่ใช้ในกาบรองลื่น และเพลากลมที่มีการหมุนด้วยความเร็วรอบสูง และรับภาระได้สูง เป็นการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิค หรือการหล่อลื่นอุทกพลวัต (hydrodynamic Lubrication) ซึ่งมีกลไกการหล่อลื่น โดยการเติมน้ำมันหล่อลื่นเข้าไปในช่องว่างระหว่างกาบรองลื่นและเพลากลม น้ำมันหล่อลื่นจะไหลเข้าไปในช่องว่างรูปลิ่ม (wedge shape channel) ทั้งนี้เพื่อจะได้เกิดความดันภายในชั้นน้ำมันเพื่อรับแรง พิจารณารูปที่ 1.1.ก เป็นรูปแสดงกาบรองลื่นและเพลากลมขณะอยู่กับที่ ผิวของกาบรองลื่นและเพลาจะสัมผัสกันอยู่ เมื่อเพลากลมเริ่มหมุนตามเข็มนาฬิกา จะยังมีการสัมผัสระหว่างผิวหน้าอยู่ โดยเพลากลมหมุนปีนขึ้นไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 1.1.ข ในขณะนี้เอง น้ำมันจะไหลเข้าไปในช่องรูปลิ่ม ทำให้เกิดความดันขึ้นในชั้นน้ำมัน เมื่อเพลามีความเร็วพอเหมาะ ความดันที่เกิดขึ้นนี้ มีค่ามากพอที่จะรับแรง W ทำให้เพลาลอยตัวขึ้น และเคลื่อนที่มาอยู่ทางด้านซ้ายดังรูป 1.1.ค เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการหล่อลื่นสำหรับกาบรองลื่นเพลากลม

ภาพที่ 1.1



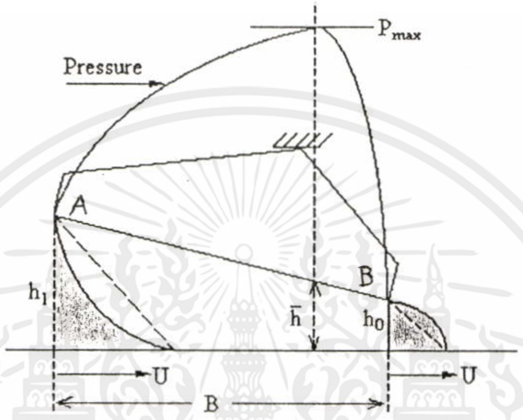
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกของการหล่อลื่นมุมเยื้องศูนย์ ϕ กำหนดตำแหน่ง h_0

1.2 ฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นรูปลิ่ม (Converging Wedge)

การก่อเกิดความดันในระหว่างการหล่อลื่นเนื่องจากชั้นฟิล์มน้ำมันลักษณะรูปลิ่ม ดังรูปที่ 1.2 กำหนดให้แผ่นระนาบ AB ถูกยึดอยู่กับที่ มีรันเนอร์ เคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็ว U กำหนดให้ระบบจมอยู่ในสารหล่อลื่นของเหลว หรือน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืด

ภาพที่ 1.2



การเกิดรูปการเปลี่ยนแปลงความเร็วในรองลื่นแบบแผ่นรองเอียง

สมมุติไม่มีการไหลออกทางด้านข้าง ดังนั้นการไหลของน้ำมันหล่อลื่นเข้าในรองลื่นที่ x=o, $(h=h_1)$ ออกจากรองลื่นที่ x=B,$(h=h_0)$ จะเท่ากับ q_x ซึ่งประกอบด้วย 2 เทอม

$$q_x = Uh - f(p) \quad (1.1)$$

เมื่อ q_x เป็นการไหลของน้ำมันหล่อลื่นเข้าไปในช่องรูปลิ่ม

U เป็นความเร็วของส่วนเคลื่อนที่ (รันเนอร์)

H เป็นความหนาของฟิล์มน้ำมันที่ตำแหน่งอื่นๆ

f(p) เป็นเทอมที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความดัน (dp/dx) ความหนาของฟิล์มน้ำมัน (h) และความหนืดของน้ำมัน (η)

f(p) มีค่าเป็นลบแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความดันในทางบวก คือความดันจะเพิ่มขึ้น ดังนั้น

$$f(p)\,\alpha\, h^{a}(dp/dx)^{b}\eta^{c} \quad (1.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ a,b และ c เป็นตัวเลขซึ่งสามารถหาได้จากการพิจารณาถึงมิติของปริมาณ โดยที่ความหนืด η จะมีหน่วย $\left[\frac{force}{area}.time\right]$ การเปลี่ยนแปลงความดัน $\frac{dp}{dx}$ มีหน่วย $\frac{(force/area)}{length}$ และโดยการทำให้หน่วยของแรง (force) หายไป สุดท้ายหน่วยจะอยู่ในรูป L^2/T

จะได้ b = -c = 1 และ a = 3 คือ

$$f(p)\,\alpha\, h^3\left[\frac{force}{area\ \times\ length}\right]\times\left[\frac{area}{force\ \times\ tim}\right]=\frac{L^2}{T}$$

นั่นคือ $f(p)\,\alpha\,\frac{h^3}{\eta}\frac{dp}{dx}$ หรือ $f(p)=\frac{kh^3}{\eta}.\frac{dp}{dx}$

เมื่อ k เป็นค่าคงที่

จะได้สมการการไหลอยู่ในรูป

$$q_x=\frac{Uh}{2}-\frac{kh^3}{\eta}.\frac{dp}{dx} \qquad (1.3)$$

การไหลของน้ำมันหล่อลื่น ผ่านช่องรูปลิ่มจะมีตำแหน่งที่ (dp/dx) = 0 กำหนดให้ $h=\bar{h}$ เมื่อ (dp/dx) = 0 จะได้

$$q_x=\frac{U\bar{h}}{2}$$

หรือ

$$q_x=\frac{U\bar{h}}{2}=\frac{Uh}{2}-\frac{kh^3}{\eta}.\frac{dp}{dx} \qquad (1.4)$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$\frac{dp}{dx}=\frac{U\eta}{2k}.\frac{h-\bar{h}}{h^3} \qquad (1.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ตลอดทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ได้ คือ สมการเรย์โนลด์ แสดงการไหลของน้ำมันหล่อลื่นใน 1 ทิศทาง

อินทิเกรทสมการข้างบนจะได้ p ที่ x ใดๆ

$$P = \int \frac{U\eta}{2k}\left(\frac{h-\bar{h}}{h^3}\right)dx + C \qquad (1.6)$$

เมื่อ C เป็นค่าคงที่จากการอินทิเกรท

สิ่งที่น่าสนใจสำหรับผู้ออกแบบระบบการไหลของน้ำมันหล่อลื่นผ่านช่องว่างรูปลิ่ม คือการคำนวนหาช่องว่าง เล็กสุด h_o จากทฤษฎีที่ได้พัฒนาแล้วแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความเร็ว U และความหนืด η ของสารหล่อลื่น ภาระต่อหน่วยความกว้าง W/L จะลดลง (L เป็นระยะทางตั้งฉากกับทิศทางการไหล) ถ้าระยะทางในการไหลเท่ากับ B จะพบว่า $h_o \alpha\, B\sqrt{\frac{\eta U}{W/L}}$ ตัวแปร $\frac{\eta U}{W/L}$ จะพบในการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิค

ในกาบรองลื่นเพลากลม (Journal Bearing) ที่มีระยะช่องว่างในแนวรัศมี c (radial clearance) h_o แทนที่จะอยู่ในรูปของ B แต่จะอยู่ในรูปของรัศมี R คือ

$$\frac{\eta U}{W/L}\left(\frac{R}{c}\right)^2 \qquad (1.7)$$

1.3 กฎของพีทรอฟฟ์

พีทรอฟฟ์ ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมความเสียดทานของกาบรองลื่น สมมุติว่าสารหล่อลื่นเหนียวติดกับพื้นผิวของเพลาและกาบรองลื่น โดยเพลาจะอยู่ในสภาพเยื้องศูนย์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความเร็วของสารหล่อลื่นสามารถกำหนดอยู่ในรูป U/c เมื่อ U เป็นความเร็วของพื้นผิวของเพลา และ c คือ ความหนาของชั้นฟิล์มน้ำมัน (สมมุติมีค่าคงที่) หรือเท่ากับความแตกต่างของรัศมีของเพลาและกาบรองลื่น แรงบิดเนื่องจากแรงเสียดทาน T บนเพลา คือ

$$T = \frac{\eta R U}{c} \times \text{พื้นที่ที่สัมผัสกับสารหล่อลื่น}$$

จากสมการนี้ ความเสียดทานจะไม่ขึ้นกับภาระและจะเป็นสัดส่วนตรงกับความเร็วของพื้นผิว ความเสียดทานลักษณะนี้จะเกิดบนเครื่องจักรกลที่ทันสมัย ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง และสูตรนี้ใช้ได้กับเพลาขนาดใหญ่ที่มีความเร็วสูงมากพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นความเสียดทานรั้ง (frictional drag) F คือ $F = \left(\frac{\eta U}{c}\right) 2\pi RL$ เมื่อ c = ความแตกต่างของรัศมี R และ L คือรัศมีและความยาวของกาบรองลื่น η = ความหนืด และ U = ความเร็วพื้นผิว

ถ้า μ เป็นสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน นิยามไว้ว่า μ = F/W เมื่อ W คือภาระรวม ดังนั้น

$$\mu = \frac{F}{W} = 2\pi \frac{\eta U}{W/L} \cdot \frac{R}{c} \tag{1.8}$$

สมการข้างบนนี้คือกฎของพีทรอฟฟ์

เทอม $\frac{\eta U}{W/L}$ เป็นสมการไร้มิติ ในสมการข้างบน $\frac{R}{c}$ กำลังหนึ่ง

ทฤษฎีที่สมบูรณ์ที่สร้างขึ้นในเวลาต่อมาจะมีตัวคูณ $\frac{R}{c}$ กำลังสอง ซึ่งจะอยู่ในรูปตัวแปร $\frac{\eta U}{W/L}\left(\frac{R}{c}\right)^2$ สำหรับกาบรองลื่นเพลากลมบ่อยครั้งที่แสดงว่า U อยู่ในรูป ωR หรือ 2π NR เมื่อ ω มีหน่วยเป็น เรเดียน/วินาที N มีหน่วยเป็น rps (เพื่อหลีกเลี่ยงความสับสนเมื่อเทียบกับ rpm จึงกำหนดให้มีค่าเป็น N') และถ้า P = ภาระต่อหน่วยพื้นที่ คือ

P = W/2RL ดังนั้น

$$\frac{\eta U}{W/L}\left(\frac{R}{C}\right) = \frac{\pi\eta N}{P} \cdot \frac{R}{c} \tag{1.9}$$

ถ้าให้ $\delta = 1000\, d/D = 1000\, c/R$ คืออัตราส่วนช่องว่างในแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง (หรือแนวรัศมี) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเพลา (หรือรัศมีเพลา) คูณ 1000

ดังนั้น
$$\mu = 2\pi^2 \frac{\eta N}{P} \cdot \frac{1000}{\delta} \tag{1.10}$$

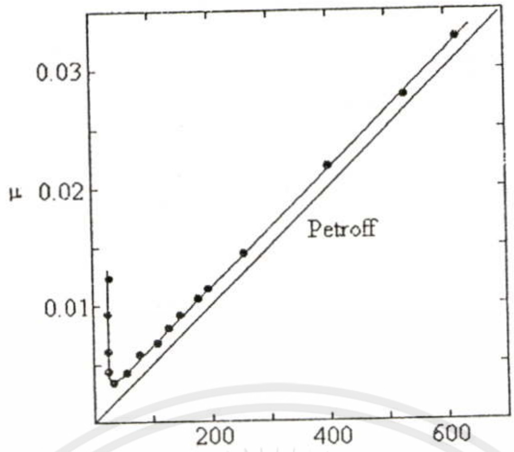
บ่อยครั้งมากที่กำหนดความหนืดในรูปของ Z คือ

$$\mu \,\alpha\, \frac{ZN}{P\delta} \qquad (2\pi^2\eta \times 1000 = \text{คงที่})$$

จากการทดลองหาความเสียดทานในกาบรองลื่นเพลากลม โดยใช้น้ำมันหล่อลื่น ชนิดต่างๆ ให้ผลดังภาพที่ 1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 1.3



ความเสียดทาน $ZN'/P\delta$ ที่เกิดในกาบรองลื่นเพลากลม จากการทดลองของ McKee

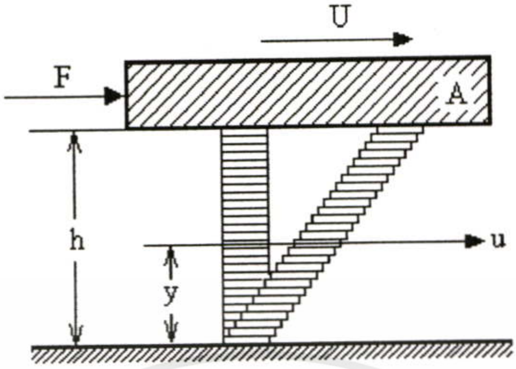
จากภาพที่ 1.3 พิจารณาจากด้านขวามือของแผนภาพ ที่ค่า $ZN'/P\delta$ มีค่าสูง เช่น ที่ความเร็วสูงและภาระต่ำ จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในทางทฤษฎีจะสอดคล้องกับผลการทดลอง ช่วงแรกอยู่ในช่วงของความหนาฟิล์มน้ำมัน มีความหนามากกว่าค่า c เป็นช่วงการหล่อลื่นแบบฟิล์มหนา เมื่อ $ZN'/P\delta$ มีค่าลดลงความหนาฟิล์มน้ำมันจะลดลงอย่างต่อเนื่องและมีค่าน้อยกว่า c จะอยู่ในช่วงของการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะน้อยลง กระทั่ง $ZN'/P\delta$ ลดลงจนถึงค่าหนึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าต่ำสุดเมื่อ $ZN'/P\delta$ ลดลงอีก สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในส่วนนี้เกิดจากผิวของทั้งสองส่วนสัมผัสกันและเสียดสีกันโดยตรงทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

1.4 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดเป็นสมบัติของการไหลที่ต่อต้านการเคลื่อนที่สัมพันธ์ภายในตัวเอง พิจารณาผิวเรียบ A เคลื่อนที่ไปบนชั้นน้ำมันหนา h ด้วยความเร็ว U ดังรูปที่ 1.4 แรง F จะทำให้น้ำมันเกิดการไหลเป็นชั้นๆ โดยชั้นที่ติดกับผิว A มีความเร็ว U และชั้นล่างสุดมีความเร็วเป็นศูนย์ ในชั้นระหว่างกลางของน้ำมันจะมีความเร็วแปรผันตามระยะ y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 1.4



การไหลระหว่างแผ่นขนาน

กฎความหนืดของนิวตัน (Newton's law of viscous flow) กล่าวไว้ว่า ความเค้นเฉือนในของเหลว เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็ว เมื่อเทียบกับระยะ y นั่นคือ

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \qquad (1.11)$$

โดยที่ μ เป็นค่าคงที่ของสัดส่วนดังกล่าว เรียกว่า ความหนืดสัมบูรณ์ (absolute viscosity) หรือความหนืดพลวัต (dynamic viscosity) หรือความหนืด (Viscousity) ส่วน du/dy เรียกว่า เกรเดียนท์ ความเร็ว (velocity gradient) หรืออัตราเฉือน (shear rate) ค่าความหนืดนี้เป็นดัชนีที่ใช้วัดความต้านทานของของเหลวต่อการไหล ซึ่งทำให้เกิดความเสียดทานขึ้น ถ้าสมมุติให้อัตราเฉือนมีค่าคงที่แล้ว du/dy = U/h ดังนั้นจากสมการ 1.11 จะได้

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{h} \qquad (1.12)$$

หน่วยของความหนืด ในระบบหน่วยอังกฤษ เป็น $lb.s/in^2$ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า เรน (reyn) เพื่อเป็นเกียรติแก่ Sir Osborne Reynolds ที่ได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาการหล่อลื่นทางคณิตศาสตร์ได้อย่างถูกต้องเป็นคนแรก ในระบบหน่วยเมตริก ความหนืดมีหน่วยเป็น $dyne.s/cm^2$ หรือเรียกว่า พ๊อยซ์ (poise) โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

100 เซนติพ๊อยซ์ (cP) = 1 พ๊อยซ์ (P)

สำหรับในระบบ เอส ไอ ความหนืดจะมีหน่วยเป็น ปาสกาล วินาที (Pa.s) หรือ $N.s/m^2$ นั่นเอง การแปลงหน่วยระหว่างระบบหน่วยทั้งสาม เป็นไปดังนี้คือ

1 Pa.s = 1000 cP

1 reyn = 689×10^6 cP

1 reyn = 6890 Pa.s

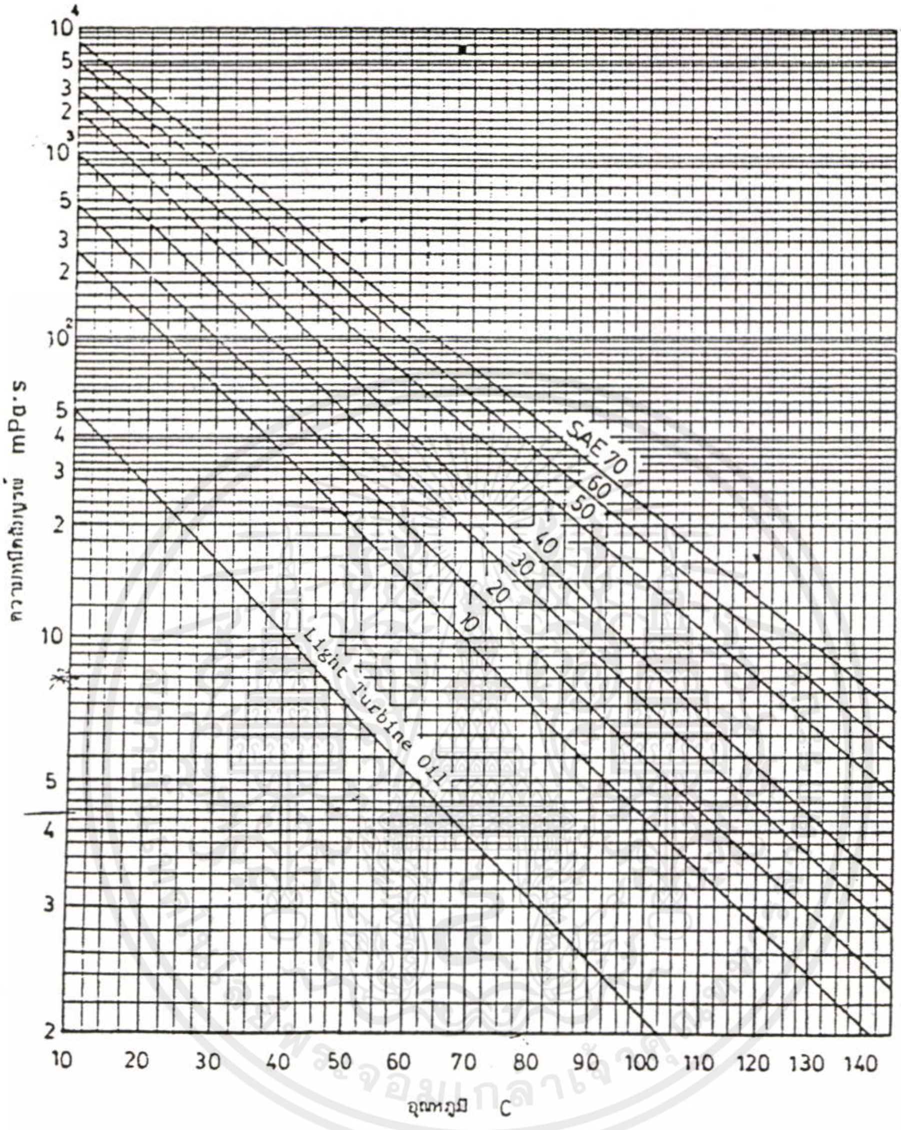
ถ้าหารค่าความหนืด μ ด้วยความหนาแน่นของของเหลวนั้น จะได้ค่าเรียกว่า ความหนืดคิเนเมติก (Kinematic Viscousity) ν มีหน่วยในระบบเมตริกคือ stoke ในระบบเอสไอ เป็น m^2/s ความหนืดคิเนเมติก อาจหาได้โดยใช้เครื่องทดสอบ ที่กำหนดเป็นมาตรฐานโดย ASTM วัดเวลา ณ อุณหภูมิหนึ่ง จนของเหลวไหลออกหมด โดยผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.6 ม.ม. และยาว 12.25 ม.ม. ซึ่งสามารถหาค่า ν ได้จาก สมการ

$$\nu = \left(0.22t - \frac{180}{t}\right)\left(10^{-6}\right) \tag{1.13}$$

โดยที่ t เป็น s และ V เป็น m^2/S ภาพที่ 1.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของน้ำมันเกรดต่างๆ ที่ใช้ในการหล่อลื่น เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 1.5



แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
สมการเรย์โนลด์ สมการพลังงาน และสมการเนเวียร์-สโตกส์

สมการเรย์โนลด์เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นโดยเรย์โนลด์เพื่ออธิบายพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบไฮโดรนามิคในการหล่อลื่นเพลากลม

2.1 สมมุติฐานของสมการเรย์โนลด์

สมการเรย์โนลด์ได้สร้างขึ้นภายใต้สมมุติฐานดังนี้คือ

1.) ไม่คิดผลของแรงโน้มถ่วงและแรงของแม่เหล็กไฟฟ้า

2.) ฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นมีลักษณะบางมากดังนั้นความดันจะคงที่ตลอดความหนาของน้ำมัน

3.) ของเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นเป็นแบบนิวตอเนียน

4.) การไหลของน้ำมันหล่อลื่นเป็นแบบลามินา

5.) สารหล่อลื่นเป็นแบบอัดตัวไม่ได้(incompressible)

6.) ไม่คิดแรงเนื่องจากความเฉื่อย(inertia)ของสารหล่อลื่น

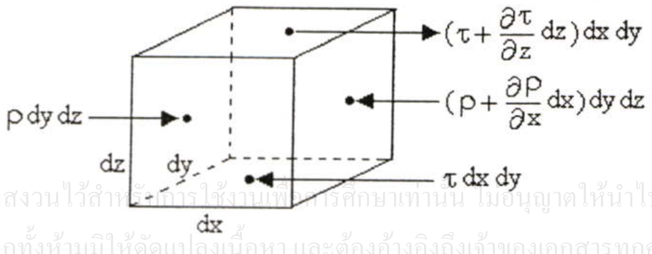
7.) ไม่มีการลื่น(slip)ระหว่างน้ำมันหล่อลื่นกับผนังของของกาบรองลื่น

8.) ความโค้งของพื้นผิวกาบรองลื่นมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับความหนาของฟิล์มน้ำมัน

2.2 สมดุลย์ของอนุภาค

พิจารณาสภาวะสมดุลย์ของอนุภาคขนาดเล็กของสารหล่อลื่นที่มีความยาวด้าน dx,dy และ dz ดังภาพ 2.1 ที่อยู่ภายใต้ความเค้นเฉือนและความดัน

ภาพที่ 2.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมดุลย์ของอนุภาค

จากสภาวะสมดุลย์ของอนุภาค ดังรูปที่ 2.1 จะได้สมการของแรงดังนี้ คือ

$$pdydz + \left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial z}dz\right)dxdy = \tau dxdy + \left(p + \frac{\partial P}{\partial x}dx\right)dydz \qquad (2.1)$$

ทำการคูณและลบ ในสมการ (2.1) จะได้

$$\frac{\partial \tau}{\partial z}dxdydz = \frac{\partial P}{\partial x}dxdydz \qquad (2.2)$$

หรือ $\frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{\partial P}{\partial x}$ (2.3)

ค่าความเค้นเฉือน τ เขียนอยู่ในรูปเต็มคือ τ_{xz} ซึ่งหมายถึงความเค้นที่กระทำตามทิศทาง x และระนาบซึ่งตั้งฉาก กับทิศทางในแนวแกน z

ในทำนองเดียวกัน

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \qquad (2.4)$$

สำหรับการเปลี่ยนแปลงความดันตามแกน z เป็นศูนย์ (ตามสมมุติฐานข้อ 2)

ดังนี้ $\frac{\partial P}{\partial z} = 0$ (2.5)

กำจัดความเค้นเฉือนจากสมการ จะใช้สมการ Newton’s Law of Viscous Flow คือ

$$\tau_{xz} = \eta\frac{\partial u}{\partial z} \quad \text{และ} \quad \tau_{yz} = \eta\frac{\partial v}{\partial z} \qquad (2.6)$$

เมื่อ u และ v เป็นความเร็วของอนุภาค ในทิศทาง x และ y แทนสมการ (2.6) ลงในสมการ (2.3) และ (2.4) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\eta \frac{\partial u}{\partial z}\right) \quad \text{และ} \quad \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\eta \frac{\partial v}{\partial z}\right) \tag{2.7}$$

2.3 การไหลของสารหล่อลื่น

เมื่อ P และ η ไม่ขึ้นกับค่า z ดังนั้นสมการ (2.7) สามารถเขียนได้ดังนี้ คือ

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial P}{\partial y} = \eta \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \tag{2.8}$$

ซึ่งสามารถทำการอินเทิเกรตได้โดยตรง พิจารณาเฉพาะเทอม x (เทอม y จะสามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน)

ดังนั้น
$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{\eta}\frac{\partial P}{\partial x} \tag{2.9}$$

ทำการอินทิเกรต
$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\partial Pz}{\partial x} + C_1 \tag{2.10}$$

อินทิเกรตอีกครั้งหนึ่ง จะได้

$$u = \frac{1}{\eta}\frac{\partial P}{\partial x} \cdot \frac{z^2}{2} + C_1 z + C_2 \tag{2.11}$$

เมื่อ C_1 และ C_2 เป็นค่าคงที่ของการอินทิเกรต ซึ่งต้องใช้เงื่อนไขขอบเขตสองเงื่อนไขมาแก้สมการ จากสมมุติฐานข้อ 4 คือ ความเร็วของของเหลวที่ติดกับขอบเขต จะมีความเร็วเท่ากับความเร็วของขอบเขตนั้น ความหนาฟิล์มน้ำมันที่ตำแหน่งใดๆ เท่ากับ h ดังนั้น ที่ z=h, $u=U_1$ และที่ z=o, $u=U_2$ U_1 และ U_2 เป็นความเร็วของพื้นผิว แทนค่า z=o และ $u=U_2$ จะได้ $C_2 = U_2$ และที่ z=h เมื่อ $u=U_1$

$$U_1 = \frac{1}{\eta}\frac{\partial P}{\partial x} \cdot \frac{h^2}{2} + C_1 h + U_2 \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น $\frac{U_1 - U_2}{h} - \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \frac{h}{2} = C_1$ (2.13)

แทนสมการ (2.13) ในสมการ (2.10) จะได้

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial x}\left(z - \frac{h}{2}\right) + \left(\frac{U_1 - U_2}{h}\right) \quad (2.14)$$

และ แทนค่า C_1 และ C_2 ในสมการ (2.11) จะได้

$$u = \frac{\partial P}{2\eta \partial x}\left(z^2 - zh\right) + \left(U_1 - U_2\right)\frac{z}{h} + U_2 \quad (2.15)$$

ในขณะที่ อัตราการไหลของสารหล่อลื่น ในทิศทาง x อยู่ในรูปสมการอินทิกรัล $\int_o^h udz$ เขียนอยู่ในรูป q_x และในทำนองเดียวกัน $q_y = \int_o^h vdz$ เป็นอัตราการไหลต่อหน่วยความกว้าง ดังนั้น

$$q_x = \int_o^h udz = \frac{\partial P}{2\eta \partial x}\left|\frac{z^3}{3} - \frac{z^2 h}{2}\right|_o^h + \left|\left(U_1 - U_2\right)\frac{z^2}{2h}\right|_o^h + \left|U_2 z\right|_o^h$$

จะได้ $q_x = -\frac{h^3}{12\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \left(U_1 + U_2\right)\frac{h}{2}$ (2.16)

ในทำนองเดียวกัน

$$q_y = -\frac{h^3}{12\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial y} + \left(V_1 + V_2\right)\frac{h}{2} \quad (2.17)$$

2.4 สมการเรย์โนลด์สำหรับกาบรองลื่นยาว

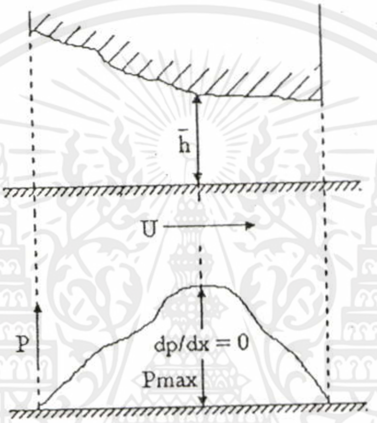
กำหนดให้กาบรองลื่นมีความยาวมากในแกน y ดังนั้น การไหลของสารหล่อลื่นในทิศทาง y, q_y จะเท่ากับศูนย์ (การเปลี่ยนแปลงความดัน $\frac{\partial P}{\partial y} = o$) ถ้าสารหล่อลื่นมีความหนาแน่นคงที่ ดังนั้นอัตราการไหลของปริมาตร q_x จะมีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง ที่จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_x = \left(U_1 + U_2\right)\frac{h}{2} - \frac{h^3}{12\eta}\cdot\frac{\partial P}{\partial x} \tag{2.18}$$

ให้ระบบที่พิจารณาเป็นไปดังรูป 2.2 ซึ่งมีพื้นผิวส่วนบนวางอยู่ในแนวเอียงและพื้นผิวส่วนล่างอยู่ในแนวระดับ พื้นผิวเอียงจะถูกจำกัดอยู่กับที่ คือ $U_1 = o$ พื้นผิวส่วนล่าง จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว U คือ $U_2 = U$ เข้าพื้นผิวส่วนบน

ภาพที่ 2.2



ความดันใน slider

สมการการไหลสามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$q_x = U\frac{h}{2} - \frac{h^3}{12\eta}\cdot\frac{dP}{dx} \tag{2.19}$$

ความดันจะเริ่มเกิดจากจุดหนึ่งและไปจบที่จุดอื่นๆ ดังนั้นจะมีบางตำแหน่งที่การเปลี่ยนแปลงความดัน เป็นศูนย์ คือ $\frac{dP}{dx} = o$ (ความดันสูงสุด) ที่จุดนี้ ความหนาฟิล์มเขียนเป็น $\bar{h}$

ที่จุดความดันสูงสุดนี้ การไหลของน้ำมันหล่อลื่น q_x ด้วย $\frac{U\bar{h}}{2}$ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ห้ามทำการปรับแก้ไขเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_x = \frac{U\bar{h}}{2} = \frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{12\eta}\cdot\frac{dP}{dx} \tag{2.20}$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

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

2.5 สมการเรย์โนลด์ ในสองและสามมิติ อย่างง่าย

ถ้ากาบรองลื่นกำหนดให้มีความยาวในแกน y มีขนาดแน่นอน และจะมีการไหลในทิศทางดังกล่าวด้วย ดังนั้น q_y จะไม่เท่ากับศูนย์ สมการการไหลอย่างต่อเนื่องจะได้

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = o \tag{2.22}$$

โดยไม่มีการไหลในทิศทาง z

ในกาบรองลื่นส่วนใหญ่ จะไม่มีการเคลื่อนที่ของพื้นผิวในทิศทาง y ดังนั้น $V_1 = V_2 = o$ และถ้า U_1 เท่ากับศูนย์ด้วย และ U_2 เท่ากับ U ดังนั้น

$$q_x = \frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{12\eta}\frac{\partial P}{\partial x}$$

และ $$q_y = -\frac{h^3}{12\eta}\cdot\frac{\partial P}{\partial y}$$ ในขณะที่ V เป็นศูนย์ (2.23)

แทนค่าเหล่านี้ในสมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$$

จะได้ $$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{12\eta}\cdot\frac{\partial P}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(-\frac{h^3}{12\eta}\cdot\frac{\partial P}{\partial y}\right) = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดรูปสมการใหม่ จะได้

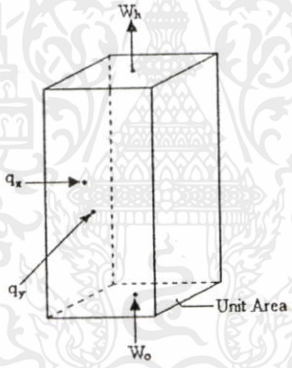
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{h^3}{\eta}\cdot\frac{\partial P}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{h^3}{\eta}\cdot\frac{\partial P}{\partial y}\right)=6\frac{\partial}{\partial x}(Uh) \qquad (2.24)$$

สมการ 2.24 เป็นสมการเรย์โนลด์ ในสองมิติ

ถ้าพื้นผิวสองส่วนมีการเคลื่อนไหวด้วยความเร็ว w_h สำหรับพื้นผิวส่วนบน และ w_o สำหรับพื้นผิวส่วนล่าง สมการความต่อเนื่องอย่างง่าย 2.22 จะเป็น

$$\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}+\frac{\partial q_z}{\partial z}=0 \qquad (2.25)$$

ภาพที่ 2.3



การไหลอย่างต่อเนื่องของคอลัมน์ (column)

ตอนนี้ ชิ้นของของเหลวจะสัมผัสอย่างทันทีทันใดกับแต่ละพื้นผิว จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว w_h และ w_o เข้าหน่วยพื้นที่พื้นผิวที่พิจารณา สอดคล้องกับปริมาณที่ถูกกวาดด้วยความเร็ว w_h และ w_o ต่อหน่วยเวลา คือ อัตราการไหล w_h และ w_o ดังนั้นความต่างของการไหลเหนือพื้นผิวทั้งสอง $\frac{\partial q_z}{\partial z}=(w_h - w_o)$ สมการสำหรับ q_x และ q_y ที่แสดงในสมการ (2.23) และสำหรับ $V_1 = V_2 = o$ จะได้

$$q_x=\frac{Uh}{2}-\frac{h^3}{12\eta}\cdot\frac{\partial P}{\partial x} \quad \text{และ} \quad q_y=-\frac{h^3}{12\eta}\cdot\frac{\partial P}{\partial y} \qquad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และให้อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสมการ 2.25 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$0 = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}$$

$$= \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{12\eta}\cdot\frac{\partial P}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(-\frac{h^3}{12\eta}\cdot\frac{\partial P}{\partial y}\right) + \left(w_h + w_o\right)$$

หรือ $$= \frac{\partial}{\partial x}\left(h^3\cdot\frac{\partial P}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(h^3\frac{\partial P}{\partial y}\right) = 6\eta\left\{U\frac{dh}{dx} + 2\left(w_h + w_o\right) - \right\} \qquad (2.27)$$

สมการ (2.27) เป็นสมการสามมิติ โดยปกติ W_h และ W_o จะเท่ากับศูนย์ และถ้า $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$ ดังเช่นกาบรองลื่นที่ยาวมาก สมการจะลดเป็น

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(h^3\frac{\partial P}{\partial x}\right) = 6U\eta\frac{dh}{dx} \qquad (2.28)$$

อินทิเกรทสมการ (2.28) จะได้

$$h^3\frac{dP}{dx} = 6U\eta h + C$$

เมื่อ C เป็นค่าคงที่จากการอินทิเกรท สามารถเขียนใหม่โดยใส่ค่าความหนาฟิล์ม h เป็น $\bar{h}$ ดังนั้น C = $-6U\eta\bar{h}$ จะได้สมการดังนี้

$$\frac{dP}{dx} = 6U\eta\frac{h - \bar{h}}{h^3}$$

2.6 สมการเรย์โนลด์ในสามมิติ

ความต่อเนื่องของการไหลของแท่งของเหลว

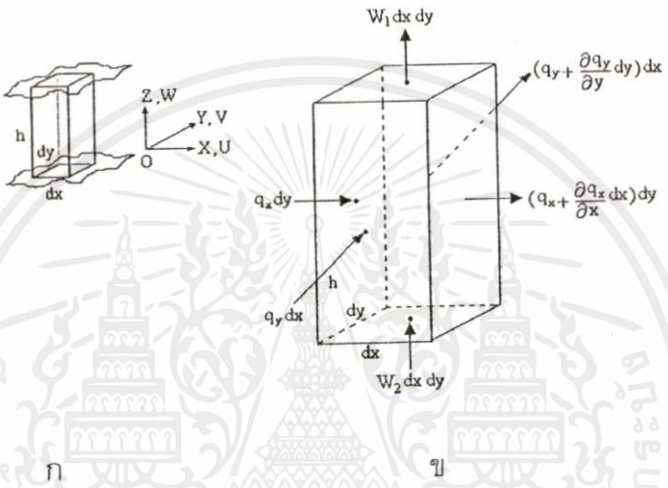
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาพื้นผิวซึ่งเป็นฐานของแท่งของเหลว มีพื้นที่ dxdy ระยะห่างระหว่างพื้นผิวส่วนบนและส่วนล่าง =h ดังนั้นความสูงของแท่งของเหลวจะเท่ากับ h ความหนาของฟิล์มของเหลว

เฉพาะตำแหน่ง (รูปที่ 2.4 ก) กำหนดแกน x,y,z และ ความเร็วของอนุภาคที่สอดคล้องตามแกนทั้งสาม ในรูปที่ 2.4 ข เป็นลักษณะของแท่งของเหลวเป็นรูปขยาย แสดงถึงอัตราการไหลของน้ำมัน

มวลของของเหลวที่ไหลเข้าปริมาตรที่กำหนด จะเท่ากับมวลที่ไหลออก เป็นผลให้ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลง ถ้าปริมาตรในแท่งของเหลวมีค่าคงที่ ดังนั้นอัตราการไหลของปริมาตรเข้าและออกจะคงที่

ภาพที่ 2.4 ก และ ข



การไหลอย่างต่อเนื่องของแท่งของเหลว

ให้อัตราการไหลของปริมาตรเข้าไปในผิวด้านซ้ายมือ ในทิศทาง x เป็น q_x ต่อหน่วยความกว้างในทิศทาง y ซึ่งแสดงว่าปริมาณการไหลเข้าในแท่งของเหลวในหนึ่งหน่วยเวลา เป็น $q_x dy$ เมื่อ dy เป็นความกว้างของแท่งของเหลว ปริมาณการไหลออก ในทิศทาง x คือ

$$\left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx\right) dy$$

เมื่อ $\partial q_x / \partial x$ เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของการไหลในทิศทาง x ในทำนองเดียวกัน ปริมาณการไหลเข้าในแท่งของเหลว ในทิศทาง y เป็น $q_y dx$ เมื่อ q_y คือ อัตราการไหลในทิศทาง y ต่อหน่วยความกว้างในทิศทาง x ปริมาณการไหลออก คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy\right) dx$$

อัตราการไหลเข้าในทิศทาง x คือ

$$q_x dy - \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) dy$$

ในทิศทาง y คือ

$$q_y dx - \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) dx$$

ดังนั้นการไหลเข้าสุทธิ จะเป็น

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) dxdy$$

แท่งของเหลว ประกอบด้วยด้านที่มีขนาดเล็กมาก มีพื้นที่ฐาน dxdy ฐานส่วนนี้สามารถเคลื่อนไหวด้วยความเร็ว ในทิศทาง z เท่ากับ w_2 ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในแท่งของเหลวในอัตรา ($w_2$dxdy) ถ้า w_2 เป็นบวกจะเป็นผลให้ปริมาตรลดลง ในทำนองเดียวกันการเคลื่อนที่ของฐานส่วนบนด้วยความเร็ว w_1 (ถ้า w_1 เป็นบวก) จะเป็นผลให้ปริมาตรของแท่งของเหลวเพิ่มขึ้นในอัตรา ($w_1$dxdy) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรสุทธิจะเท่ากับ (w_1-w_2)dxdy การเปลี่ยนแปลงปริมาตรนี้ จะเท่ากับผลที่เกิดจากการที่ของเหลวไหลเข้า ในแท่งของเหลว ในอัตรา $w_2$dxdy หรือไหลออกในอัตรา $w_1$dxdy

สร้างสมการ การไหลสุทธิ ในรูปของอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของอนุภาค จะได้

$$(w_1 - w_2) dxdy = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) dxdy$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + (w_1 - w_2) = 0 \qquad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น

เมื่อ q_x และ q_y เป็นอัตราการไหล ในทิศทาง x และ y ที่จุดใดๆ (x,y) ต่อหน่วยความกว้างของเหลว และ w_1 และ w_2 เป็นความเร็วของอนุภาค (หรือพื้นผิว) ที่ z=h, z=o

q_x และ q_y อยู่ในรูปของสมการอินทิกรัลของความเร็ว ตามแกน z จาก o ถึง h คือ

$$q_x = \int_o^h udz \quad \text{และ} \quad q_y = \int_o^h vdz \tag{2.30}$$

นำสมการที่ (2.30) แทนในสมการ (2.29) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x}\int_o^h udz + \frac{\partial}{\partial y}\int_o^h vdz + (w_1 - w_2) = o \tag{2.31}$$

นำสมการที่ (2.16) และ (2.17) มาแทนในสมการ (2.31) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x}\left\{(U_1 + U_2)\frac{h}{2} - \frac{h^3}{12\eta}.\frac{\partial P}{\partial x}\right\} + \frac{\partial}{\partial y}\left\{(V_1 + V_2)\frac{h}{2} - \frac{h^3}{12\eta}.\frac{\partial P}{\partial y}\right\} + (w_1 - w_2) = o \tag{2.32}$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{h^3}{\eta}.\frac{\partial P}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{h^3}{\eta}.\frac{\partial P}{\partial y}\right) = 6\left\{\frac{\partial}{\partial x}(U_1 + U_2)h + \frac{\partial}{\partial y}(V_1 + V_2)h + 2(W_1 - W_2)\right\} \tag{2.33}$$

ถ้าความเร็วและความหนืดมีค่าคงที่ตามแกน x และ y สามารถเขียนใหม่เป็น

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(h^3\frac{\partial P}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(h^3\frac{\partial P}{\partial y}\right) = 6\eta\left\{(U_1 + U_2)\frac{\partial h}{\partial x} + (V_1 + V_2)\frac{\partial h}{\partial y} + 2(W_1 - W_2)\right\} \tag{2.34}$$

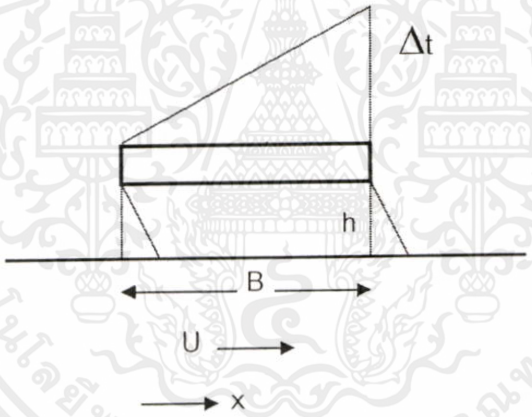
ถ้าความเร็วทั้งหมดเป็นศูนย์ ยกเว้น U_2 ซึ่งให้เท่ากับ U ซึ่งจะเป็นสมการเรย์โนลด์ในสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 อัตราส่วน การนำและการพาความร้อน

พิจารณาแผ่นเรียบจำกัดอยู่กับที่ขนานกับพื้นผิวที่เคลื่อนที่ (รูปที่ 2.5) ช่องว่างระหว่างพื้นผิวทั้งสองจะคงที่ ระยะห่างเท่ากับ h สมมติว่าพื้นผิวที่เคลื่อนที่ อยู่ที่อุณหภูมิศูนย์องศาเซลเซียส (หรืออุณหภูมิห้อง) ในขณะที่อุณหภูมิของผิวอยู่กับที่ จะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น จากศูนย์ที่ทางเข้าเป็น ΔT ที่ทางออก ที่ตำแหน่ง x ใดๆ อุณหภูมิจะเท่ากับ (x/B) ΔT เมื่อ B เป็นความยาวของแผ่นพื้นผิวและมีความกว้างหนึ่งหน่วย การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดความหนาฟิล์มน้ำมันเป็นเชิงเส้น และที่จุด x ใดๆ เท่ากับ (xΔt/Bh) ถ้าสภาพนำความร้อนของน้ำมันเท่ากับ K อัตราการไหลของความร้อน ผ่านตลอดแผ่นพื้นผิวที่มีความยาวน้อยๆ dx เท่ากับ (xΔt/Bh)Kdx ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ไหลทั้งหมด คือ

ภาพที่ 2.5



ความเร็วและอุณหภูมิในแผ่น

$$\int_{O}^{B} \frac{\Delta t K}{Bh}(xdx) = \frac{\Delta t}{h} K \frac{B}{2}$$

ผลที่ได้จากการพิจารณาว่าความร้อนที่เกิดขึ้นสม่ำเสมอตลอดแผ่นฟิล์มน้ำมัน และไหลออกจากแผ่นพื้นผิว และแผ่นรันเนอร์ ที่อยู่ในสภาพเย็น จะมีการกระจายของอุณหภูมิเป็นรูปพาราโบลา การพาความร้อนจะเท่ากับผลคูณของการไหลของน้ำมัน ซึ่งเท่ากับ $Uh/2$ กับความร้อนจำเพาะ σ ความหนาแน่น ρ และอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ย ฟิล์มน้ำมัน ซึ่งสมมุติว่ามีโพรไฟล์ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วเป็นเชิงเส้น และมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ตลอดความหนา ที่ทางออกอุณหภูมิเฉลี่ยจะเท่ากับ Δt/2 ดังนั้นอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ย เท่ากับ Δt/2

การพาความร้อนจะเป็นดังนี้ คือ

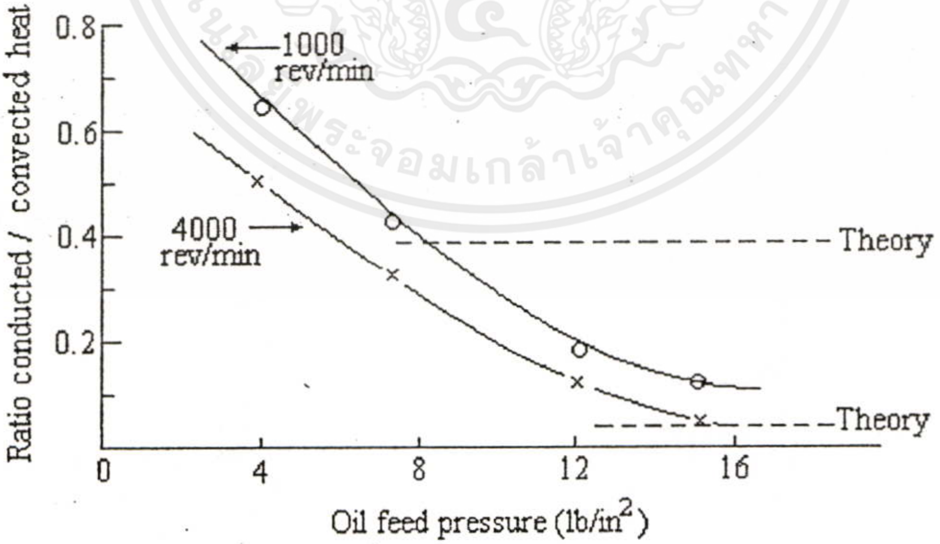
$$\frac{Uh}{2}\sigma\rho\frac{\Delta t}{2}$$

อัตราส่วนระหว่าง การนำความร้อนและการพาความร้อน คือ

$$\left(\frac{\Delta t}{h}\cdot\frac{KB}{2}\right)\Big/\left(\frac{Uh}{4}\sigma\rho\Delta t\right)=\left(\frac{K}{\sigma\rho}\right)\frac{2B}{Uh^2}$$

ส่วนที่อยู่ในวงเล็บด้านซ้าย คือ สภาพการแพร่ของความร้อน (Thermal diffusivity) ของสารหล่อลื่น มีหน่วยเป็น L^2/T

ภาพที่ 2.6



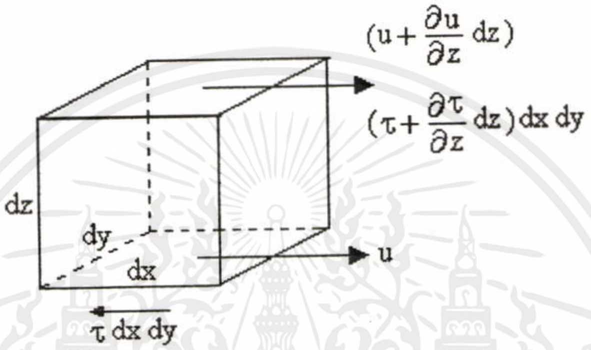
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการนำความร้อน/การพาความร้อน ต่อ ความดันที่เกิดจากการป้อนน้ำมันสำหรับกาบรองลื่นเพลากลมยาว 6 นิ้ว

2.8 ฟังก์ชั่นการกระจายความร้อนในรูปสมการอนุพันธ์แบบง่าย

ฟังก์ชั่นการกระจายความร้อนจะเท่ากับงานที่กระทำโดยแรงเฉือนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของของไหลหนืด วิธีการหาความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ แบบง่ายที่สุดโดย สมมุติว่า ความร้อนที่กระจายทั้งหมดเป็นผลจากการพาความร้อนและสามารถหางานที่ต้องใช้ตลอดแผ่นฟิล์มได้ดังนี้ คือ

ภาพที่ 2.7



แรงเฉื่อย และความเร็วในอนุภาคของเหลว

พิจารณาอนุภาคขนาดเล็กที่มีความยาวด้าน dx, dy, dz ดังแสดงในรูปที่ 2.7

ความแตกต่างของความเร็วที่ผิวด้านบน และด้านล่างของอนุภาค เท่ากับ $\left(\partial u/\partial z\right)dz$ แรงเฉื่อยบนผิวด้านล่าง เท่ากับ $\tau dxdy$ บนผิวด้านบน เท่ากับ $\left\{\tau + \left(\partial \tau/\partial z\right)dz\right\}dxdy$ งานที่ต้องใช้บนอนุภาค เมื่อตัดปริมาณที่อยู่ในรูปกำลังสองออกไป จะเท่ากับ $\tau dxdy\left(\partial u/\partial z\right)dz = \left(\tau \partial u/\partial z\right)dxdydz$ หรือเท่ากับ $\left(\tau \partial u/\partial z\right)$ ต่อหน่วยปริมาตร ในขณะที่ $\tau = \eta \partial u/\partial z$ ดังนั้น พลังงานความหนืดที่ใช้ไป ต่อหน่วยปริมาตรเท่ากับ

$$\tau \frac{\partial u}{\partial z} = \eta \frac{\partial u}{\partial z} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} = \eta \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \qquad 2.35$$

พลังงานที่กระจายไป เนื่องจากการไหลด้วยความเร็ว v ในทิศทาง y สามารถหาได้ในทำนองเดียวกันคือ เท่ากับ $\eta\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ พลังงานที่กระจายไปทั้งหมดเท่ากับ

$$\eta\left[\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2\right] \qquad 2.36$$

2.9 ฟังก์ชั่นของพลังงานรวมและการไหลของงาน

พังก์ชั่นของการกระจายความร้อยหรือพลังงานรวม ตลอดความสูง h ของแท่งของเหลว เริ่มพิจารณาเฉพาะเทอม $\eta\left(\partial u/\partial z\right)^2$ และ $\eta\left(\partial v/\partial z\right)^2$ ในเวลาต่อมา ในลักษณะเดียวกัน ทำการอินทิเกรทแยกส่วน และกำหนดให้ η เปลี่ยนแปลงตาม Z

$$\int_0^h \eta\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 dz = \left|\eta u\frac{\partial u}{\partial z}\right|_0^h - \int_0^h u\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta\frac{\partial u}{\partial z}\right)dz \qquad 2.37$$

ในขณะที่ $\eta\frac{\partial u}{\partial z} = \tau$ และ $\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta\frac{\partial u}{\partial z}\right) = \frac{\partial P}{\partial x}$

ดังนั้น $\int_0^h \eta\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 dz = \left|u\tau\right|_o^h - \int_o^h u\frac{\partial P}{\partial x}dz$

ค่า $\partial P/\partial x$ จะไม่ขึ้นกับค่า z และ $\int_o^h udz = q_x$ ถ้าค่าของ u ที่ z=h คือ U_1 และค่า $\tau=\tau_h$ และที่ z=o, $u=U_2$ และ $\tau=\tau_o$ การอินทิเกรทจะได้

$$\int_o^h \eta\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 dz = \left(U_1\tau_h - U_2\tau_o\right) - q_x\frac{\partial P}{\partial x} \qquad 2.38$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\int_o^h \eta\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 dz = \left(V_1\tau_h - V_2\tau_o\right) - q_y\frac{\partial P}{\partial y} \qquad 2.39$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ $= -\left(q_y \,\partial P \big/ \partial y\right)$ เมื่อ V_1 และ V_2 มีค่าเป็นศูนย์

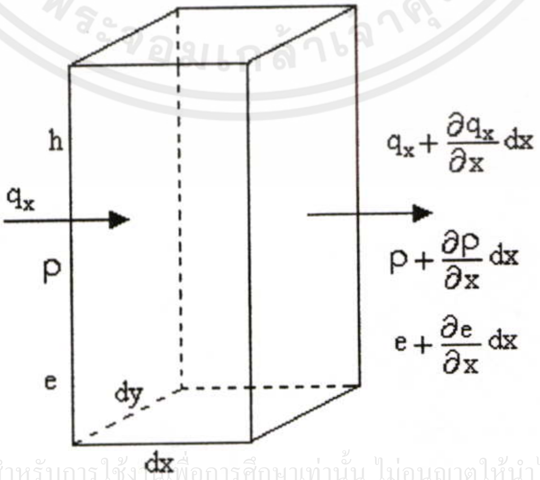
โดยทำการได้ง่ายขึ้นอีก กำหนด $U_1=0$ ภายใต้สภาวะดังกล่าว $\partial u \big/ \partial z$ จะมีค่าเป็นลบ เป็นผลให้ τ_0 ต้องเป็นลบ (U ปรกติจะเป็นบวก) ดังนั้น $-U_2\ \tau_0$ จะมีค่าเป็นบวกเสมอ และเขียนอยู่ในรูปง่ายๆ เป็น U_τ เทอมของการสูญเสียจะเป็นดังนี้

$$U_\tau - \left(q_x \frac{\partial P}{\partial x} + q_y \frac{\partial P}{\partial y}\right) \qquad 2.40$$

นี่คือความร้อนที่สูญเสียออกไปในคอลัมน์ของเหลว ที่มีความสูง h และมีฐาน dxdy ต่อไปจำเป็นต้องเพิ่มพลังงาน เนื่องจากงานที่เกิดขึ้นในคอลัมน์ของเหลว

พิจารณาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่น ของพลังงานภายใน เช่น $h\rho_{av} = \int_0^h \rho dz$ และ $he_{av} = \int_0^h \rho dz$ สำหรับ x และ y ใดๆ พิจารณา ค่าเฉลี่ยของ ρ และ e ตลอดฟิล์มในคอลัมน์ที่มีความสูง h และมีฐาน dxdy รูป 2.10 การไหลในทิศทาง x คือ q_x ต่อหน่วยความกว้าง

ภาพที่ 2.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงปริมาณความหนาแน่น และพลังงานภายในคอลัมน์

เช่นเดียวกันในกรณีก่อนหน้านี้ความหนาแน่น เท่ากับ ρ และพลังงานภายในของของเหลว e ไหลออกจากคอลัมน์ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงคือ $\left\{q_x + \left(\partial q_x / \partial x\right)dx\right\}, \left\{\rho + \left(\partial \rho / \partial x\right)dx\right\}$ และ $\left\{e + \left(\partial e / \partial x\right)dx\right\}$ ตามลำดับ ดังนั้นพลังงานที่ไหลเข้าในอนุภาค จะเท่ากับ $(q_x \rho e)dy$ และพลังงานที่ไหลออกจะเท่ากับ

$$\left\{q_x + \left(\partial q_x / \partial x\right)dx\right\}\left\{\rho + \left(\partial \rho / \partial x\right)dx\right\}\left\{e + \left(\partial e / \partial x\right)dx\right\}dy \qquad 2.41$$

ดังนั้นพลังงานที่เพิ่มขึ้น (ไม่คิดเทอมที่อยู่ในรูปกำลังสอง) จะเท่ากับ

$$\left(\rho e \frac{\partial q_x}{\partial x} + q_x e \frac{\partial \rho}{\partial x} + q_x \rho \frac{\partial e}{\partial x}\right)dxdy \qquad 2.42$$

หรือ $\partial(q_x \rho e)/\partial x$ ต่อหน่วยพื้นที่ฐาน จากการพิจารณาในลักษณะเดียวกันนำมาซึ่ง การเพิ่มของ $\partial(q_y \rho e)/\partial y$ ในทิศทาง y การเพิ่มทั้งหมดจะเป็น

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho q_x e) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho q_y e)$$

ทำการดิฟเฟอเรนทิเอท แยกส่วนและให้การไหลของมวลคงที่ ตลอดฟิล์มของเหลว คือ

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho q_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho q_y) = o$$

ดังนั้นการเพิ่มจะกลายเป็น

$$\rho\left(q_x \frac{\partial e}{\partial x} + q_y \frac{\partial e}{\partial y}\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น

พลังงานภายใน e ปรกติ พิจารณาว่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิ t นั่นคือ $e=\sigma t$ เมื่อ σ คือความร้อนจำเพาะ กระจายอยู่ในรูปของหน่วยพลังงาน ซึ่งจะไม่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ

การเพิ่มของพลังงานคือ

$$\rho\sigma\left(q_x\frac{\partial t}{\partial x}+q_y\frac{\partial t}{\partial y}\right)$$

สมดุลย์ของความร้อนคือ

$$U_\tau-\left(q_x\frac{\partial p}{\partial x}+q_y\frac{\partial p}{\partial y}\right)=\rho\sigma\left(q_x\frac{\partial t}{\partial x}+q_y\frac{\partial t}{\partial y}\right) \qquad 2.43$$

สมการที่ได้นี้ คล้ายกับสมการที่สร้างขึ้นโดย Charnes, Osterle และ Saibel เทอมแรกทางด้านซ้ายมือ เป็นผลคูณของ แรงเสียดทานรั้งของพื้นผิวกับความเร็ว เทอมที่สอง(ในวงเล็บ) เป็นเทอมในด้านอุณหพลศาสตร์ ในรูปการไหลของงาน (flow work) นั่นคืองานที่ทำเนื่องจากการไหลต่อต้าน ความดัน ในเทอมที่สองนี้ ทำการอินทิเกรท ตลอดพื้นที่ของรองลื่น จะเท่ากันศูนย์ ซึ่งอาจเป็นไปตามที่ทำนายไว้

พิจารณาการรวมการไหลของงาน ตลอดพื้นผิวของรองลื่น ซึ่งคือ

$$\iint\left(q_x\frac{\partial p}{\partial x}+q_y\frac{\partial p}{\partial Y}\right)dxdy$$

โดยการทำอินทิเกรทแยกส่วน จะได้

$$\left|q_xp+q_yp\right|-\iint p\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}\right)dxdy \qquad 2.44$$

2.10 สมการ Navier - Stokes

สมการ Navier - Stokes เป็นสมการพื้นฐานที่ใช้ในการศึกษา พฤติกรรมของของไหลหนืด สมการได้จากการศึกษาของ Navier และ Stokes ในปี ค.ศ. 1845

จากกฏการเคลื่อนที่ ข้อที่สองของนิวตัน แรงทั้งหมดที่กระทำบนมวลของของไหลปริมาณคงที่ในสเปซ จะเท่ากับ

$$\rho\frac{Du}{Dt}=x+\frac{\partial\sigma_x}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial z}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ถ้าต้องการนำไปใช้เพื่อการศึกษา ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho\frac{Dv}{Dt}=y+\frac{\partial\tau_{yx}}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_y}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial z} \qquad 2.45$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = z + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z}$$

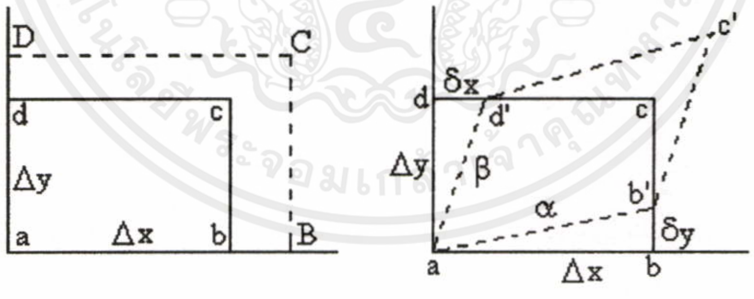
เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น และ

$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + u\frac{\partial}{\partial x} + v\frac{\partial}{\partial y} + w\frac{\partial}{\partial z} \qquad 2.46$$

x, y และ z คือ องค์ประกอบในแนวแกน x, y และ z ของแรงเนื่องจากรูปร่าง

ความเค้นตั้งฉากกับพื้นผิว คือ σ_x, σ_y และ σ_z ตัวอักษรห้อยต่อหลัง แสดงถึงทิศทางตามแนวแกน ความเค้นเฉือน คือ τ อักษรห้อยต่อหลังตัวแรก แสดงถึงทิศทางความเค้นกระทำ อักษรห้อยหลังต่อที่สองหมายถึงทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นผิวที่ความเค้นกระทำ ความเค้นจะสัมพันธ์กับความเร็ว ซึ่งจะอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับความเครียดในสภาพยืดหยุ่น ความเครียดยืดหยุ่น คือการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง แต่ในทางอุทกพลศาสตร์ (hydrodynamics) ความเครียด คือการเปลี่ยนรูปของความเร็ว

ภาพที่ 2.9



ก ข

การเสียรูปของอนุภาค

ความเครียดยืดหยุ่นตั้งฉากกับสี่เหลี่ยม abcd ของด้าน Δx, Δy (รูป 2.9 ก.) เปลี่ยนรูปเป็น aBCD คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon_x = \frac{\delta x}{\Delta x} \quad \text{และ} \quad \varepsilon_y = \frac{\delta y}{\Delta y}$$

ในกรณีความเครียดเฉือน บนสี่เหลี่ยม abcd ที่ เปลี่ยนรูปเป็นสี่เหลี่ยม $ab'c'd'$ (รูป 2.9 ข) ความเครียดเฉือนจะเป็น

$$\gamma_{yx} = \alpha + \beta = \frac{\delta y}{\Delta x} + \frac{\delta x}{\Delta y} \qquad 2.47$$

ในของไหลค่าที่สอดคล้องกับความเครียด คือ

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon y = \frac{\partial v}{\partial y}, \gamma_{yx} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \qquad 2.48$$

ในของเหลวรูปร่างสามมิติ จะมีสมการแสดงคุณลักษณะได้ 6 สมการ เป็นสมการความเครียดตั้งฉาก 3 สมการคือ

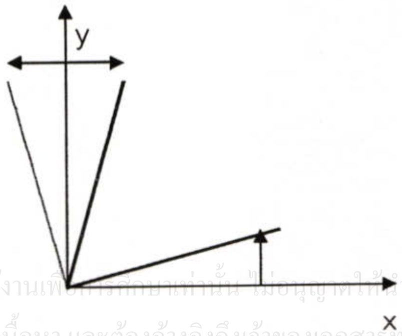
$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \qquad 2.49$$

และความเครียดเฉือน 3 สมการ คือ

$$\gamma_{yx} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \gamma_{zy} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \qquad 2.50$$

ความเครียดเฉือนได้จากผลบวกของปริมาณ $\frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}$ เป็นต้น ค่าในวงเล็บ ซึ่งแสดงในรูปของมุม α หรือ $\frac{\partial v}{\partial x}$ เป็นความเร็วเชิงมุมของแกน x รอบแกน z (รูปที่ 3.6) และ $\frac{\partial u}{\partial y}$ หรือ มุม β เป็นอัตราการหมุนเชิงมุมของแกน y รอบแกน z การหมุนเฉื่อยของอนุภาคของไหล คือ $\left(\frac{1}{2}\right)(-\beta + \alpha)$ หรือ $\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right)$ อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบของการหมุนของอนุภาค คือ

ภาพที่ 2.10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหมุนรอบแกน x และแกน y

$$\omega_z = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right), \omega_x = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}\right), \omega_y = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right) \quad 2.51$$

ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางต่างๆ และความเค้นเฉือน คือ

$$\sigma_x = -p + \lambda\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) + 2\eta\frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\sigma_y = -p + \lambda\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) + 2\eta\frac{\partial v}{\partial y} \quad 2.52$$

$$\sigma_z = -p + \lambda\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) + 2\eta\frac{\partial w}{\partial z}$$

และ $\tau_{yx} = \eta\gamma_{yx}, \tau_{zy} = \eta\gamma_{zy}, \tau_{xz} = \eta\gamma_{xz}$

เมื่อ p เป็นความดันไฮโดรสแตติก ของของไหลไร้ความเสียดทาน η= ความหนืด และ λ เป็นสัมประสิทธิ์ตัวที่สองของความหนืด ความสัมพันธ์ของ η และ λ อยู่ในรูป ดังนี้ คือ

$$3\lambda + 2\eta = 0 \quad 2.53$$

สุดท้ายสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปของการไหลอย่างต่อเนื่องแบบง่าย คือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

หรือ $$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u\frac{\partial \rho}{\partial x} + v\frac{\partial \rho}{\partial y} + w\frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) = 0$$

ซึ่งอาจเขียนเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ตลอดทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho\Delta = 0 \quad 2.54$$

เมื่อ D/Dt เป็น Stokesian Operator และ Δ คือ

$$\Delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \qquad 2.55$$

รวมสมการที่ 2.45 และ 2.52 จะได้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = X - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left\{2\eta \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda\Delta\right\} + \frac{\partial}{\partial y}\left\{\eta\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)\right\} + \frac{\partial}{\partial z}\left\{\eta\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)\right\}$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y}\left\{2\eta \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda\Delta\right\} + \frac{\partial}{\partial z}\left\{\eta\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)\right\} + \frac{\partial}{\partial x}\left\{\eta\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)\right\}$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}\left\{2\eta \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda\Delta\right\} + \frac{\partial}{\partial x}\left\{\eta\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)\right\} + \frac{\partial}{\partial y}\left\{\eta\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)\right\}$$

2.56

กำหนดให้ความหนืดมีค่าคงที่ และเขียนให้ง่ายขึ้นดังนี้ คือ

$$\rho \frac{Du}{Dt} = X - \frac{\partial p}{\partial x} + (\lambda + \eta)\frac{\partial \Delta}{\partial x} + \eta\nabla^2 u$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = Y - \frac{\partial p}{\partial y} + (\lambda + \eta)\frac{\partial \Delta}{\partial y} + \eta\nabla^2 v$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = Z - \frac{\partial p}{\partial z} + (\lambda + \eta)\frac{\partial \Delta}{\partial z} + \eta\nabla^2 w \qquad 2.57$$

ปรกติ $(\lambda + \eta) = \eta/3$ แต่สัมประสิทธิ์ทั้งสองค่าจะเขียนแยกจากกัน

สัญญลักษณ์ ∇^2 คือ Laplace operator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น มีสิทธิ์ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \qquad 2.58$$

ถ้าระบบเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ค่า Δ จะเท่ากับศูนย์ และถ้าแรงเนื่องจากรูปร่าง X,Y,Z, เป็นศูนย์ด้วย สมการจะเป็น

$$\rho\frac{Du}{Dt}+\frac{\partial p}{\partial x}=\eta\nabla^2 u$$

$$\rho\frac{Dv}{Dt}+\frac{\partial p}{\partial y}=\eta\nabla^2 v$$

$$\rho\frac{Dw}{Dt}+\frac{\partial p}{\partial z}=\eta\nabla^2 w \qquad 2.59$$

ถ้าของไหลมีความหนาแน่นคงที่ ค่า Stokesian operator D/Dt เป็น ($u\,\partial/\partial x + v\,\partial/\partial y + w\,\partial/\partial z$) การวิเคราะห์ขนาดของกำลัง ของเทอม $\nabla^2 u$ แสดงถึง $\nabla^2 u$ สามารถเขียนง่ายๆ เป็น $\partial^2 u/\partial z^2$ และในทำนองเดียวกัน $\nabla^2 v$ เป็น $\partial^2 v/\partial z^2$ ดังนั้น

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)+\frac{\partial p}{\partial x}=\eta\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad 2.59\text{ ก}$$

ค่าในวงเล็บในเทอมแรก คือ เทอมที่เกี่ยวข้องกับความเฉื่อย ซึ่งจะไม่นำมาคิด ดังในหัวข้อ 2.13

ในที่สุด $\partial p/\partial z$ ซึ่งเป็นความดันที่เปลี่ยนไปตลอด ฟิล์มน้ำมัน กำหนดให้เท่ากับศูนย์ ดังนั้น สมการที่ 2.59 จึงเหลืออยู่ในรูป

$$\frac{\partial p}{\partial x}=\eta\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$2.60$$

$$\frac{\partial p}{\partial y}=\eta\frac{\partial^2 y}{\partial z^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 สมการพลังงาน

สมการพลังงานแบบสมบูรณ์ กระจายอยู่ในรูป กฎความคงตัวของพลังงาน สำหรับอนุภาคของ ปริมาณในของไหล คือ

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial\left(u_i\tau_{ij}\right)}{\partial x_j}-\frac{\partial\left(E_t\rho u_j\right)}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(K\frac{\partial T}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial E_t\rho}{\partial t}=0 \qquad 2.61$$

ในข้อกำหนดของ I,j, = 1,2,3 สำหรับแกนต่างๆ กัน สัญลักษณ์และเทอมต่างๆ จะเขียนเป็น $\partial Q/\partial t$ คือ อัตราของความร้อนที่เกิดขึ้นโดย แหล่งภายนอกเช่น ความร้อนจากไฟฟ้าในฟิล์ม ซึ่งจะลดลงในการหล่อลื่น ในงานทุกประเภท t คือเวลา และ T คือ อุณภูมิ ต่อไป U_j คือองค์ประกอบลำดับที่ I ของความเร็ว และ τ_{ij} เป็นองค์ประกอบของความเค้นหนืด เทอมนี้คือ อัตราที่ความร้อนถูกก่อเกิดขึ้นมา โดยความเค้นหนืด ในส่วนที่สัมผัสกับพื้นผิวรอบตัว E_t คือ เอนธาลปี (enthalpy) รวมของระบบต่อหน่วยมวลและ นั่นคือ

$$E_t = \frac{1}{2}\, u_iu_i + E + P \qquad 2.62$$

เมื่อ

$$u_iu_i = u_1u_1 + u_2u_2 + u_3u_3 \qquad 2.63$$

ดังนั้น $\frac{1}{2}u_iu_i$ คือ พลังงานจลน์ต่อหน่วยมวล E คือ พลังงานภายใน และ P คือ พลังงานศักย์ เทอมมีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงถึงพลังงานที่สูญเสียไปโดยการพาความร้อน เทอม $\partial(K\partial T/\partial x_j)/\partial x_j$ คือพลังงานความร้อนที่สูญเสียไป เนื่องจากการนำความร้อน K คือสัมประสิทธิ์ของสภาพนำความร้อน ถ้า K มีค่าคงที่ตลอดของไหล เทอมนี้ สามารถเขียนเป็น $K\partial^2T/\partial x_j^2$ หรือ $K\nabla^2T$ เมื่อ ∇^2 คือ Laplace operator ซึ่งแสดงถึงการกำจัดความร้อนออกไป โดยความร้อนจะไหลในทิศทางที่อุณหภูมิลดลง ส่วนเทอมสุดท้าย คือการเปลี่ยนแปลงของพลังงานตามเวลา ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ห้ามทำซ้ำ ดัดแปลง แก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial\left(E_t\rho u_j\right)}{\partial x_j}+\frac{\left(\partial E_t\rho\right)}{\partial t}=E_t\left(\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial\rho u_j}{\partial x_j}\right)+\rho\left(\frac{\partial E_t}{\partial t}+u_j\frac{\partial E_t}{\partial x_j}\right)=\rho\frac{DE_t}{Dt} \qquad 2.64$$

ในขณะที่ค่าในวงเล็บแรกเท่ากับศูนย์ จากสมการ (2.61) และเมื่อ K เป็นค่าคงที่จะได้เป็น

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial\left(u_i\tau_{ij}\right)}{\partial x_j}-\rho\frac{DE_t}{Dt}+K\frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2}=0 \qquad 2.65$$

ความเค้นเฉือนอาจกระจายอยู่ในเทอมของสมการ (2.45) และ (2.52) เป็นผลให้ความเค้นและ E_t กระจาย ดังนี้

$$\rho\left\{\frac{DE}{Dt}+p\frac{D(1/\rho)}{Dt}\right\}=\frac{\partial Q}{\partial t}+K\nabla^2 T+\Phi \qquad 2.66$$

เทอมแรก ρ DE/Dt คือการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายใน ρ DE/Dt ปรกติจะเขียนเป็น $\rho D(\sigma T)/Dt$ เมื่อ σ คือความร้อนจำเพาะ และได้ชี้ให้เห็นโดย Drs Dowson และ Hingley ว่าไม่ค่อยถูกนักสำหรับของไหล จากการที่ได้พบเห็นในการวิเคราะห์ต่อไปนี้ ซึ่งนำมาจากตำรา Modern Developments in Fluid Dynamics (Vol. 1, Oxford 1956) เพื่อที่จะสร้างความต่อเนื่องจากข้างบน จะใช้ E_j แทนค่า I สำหรับ enthalpy ต่อหน่วยปริมาตรของมวล ซึ่งแสดงความหมาย โดยความสัมพันธ์

$$E_j = E + pV \qquad 2.67$$

เมื่อ V เท่ากับ ปริมาตรจำเพาะ และจะเท่ากับ $1/\rho$

ดิฟเฟอเรนทิเอท $dE_j = dE + pdV + Vdp$

ทำนองเดียวกัน $$dE_j=\sigma dT+\left\{V-T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p\right\}dp \qquad 2.68$$

เมื่อ σ = ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่

ดังนั้น $$dE=\sigma dT-T(\partial V/\partial T)dp-pdV \qquad 2.69$$

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน α จำกัดความไว้ว่า

$$\alpha=\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น $$dE=\sigma dT-\alpha TVdp-pdV$$

หรือ $dE = \sigma dT - \alpha T dp/\rho - p d 1/\rho$

ดังนั้นจากการใช้ Stokesian ค่าทางด้านซ้ายมือ เปลี่ยนเป็น $\rho\left(DE/Dt + pD\left[\frac{1}{\rho}\right]/Dt\right)$ ใน ขณะที่ $pd\left(\frac{1}{\rho}\right)$ ถูกตัดออกไป สมการที่ (2.66) จะเปลี่ยนเป็น

$$\rho\sigma \frac{DT}{Dt} - \alpha T \frac{Dp}{Dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + K\nabla^2 T + \Phi \qquad 2.70$$

เทอม $\partial Q/\partial t$ เข้าสู่การไม่เปลี่ยนแปลง จะมีการเพิ่มพลังงานแก่น้ำมัน จากแหล่งภายนอก เทอม $K\nabla^2 T$ จะปล่อยการนำความร้อนออก สัมประสิทธิ์การนำความร้อน กำหนดให้คงที่ สุดท้าย Φ คือฟังชั่นของการกระจาย กำหนด ในรูปของอัตราที่แรงเนื่องจากความหนืดทำงาน เป็นพลังงานความเครียด แบบหนึ่ง และคือ

$$\Phi = \eta\left\{2\left(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2\right) + \gamma_{yx}^2 + \gamma_{zy}^2 + \gamma_{xz}^2\right\} + \lambda\left(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z\right)^2 \qquad 2.71$$

ในขณะที่ความเครียดตั้งฉาก คือ $\varepsilon_x = \partial u/\partial x, \varepsilon_y = \partial \upsilon/\partial y$ และ $\varepsilon_z = \partial w/\partial z$ และ ความเครียดเฉือน $\gamma_{yx} = \partial u/\partial y + \partial \upsilon/\partial x, \gamma_{zy} = \partial \upsilon/\partial z + \partial w/\partial y, \gamma_{xz} = \partial w/\partial x + \partial u/\partial z, \lambda$ เป็นสัมประสิทธิ์ของความหนืดตัวที่สอง และค่า $\Delta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$

ดังนั้น

$$\Phi = \eta\left[2\left\{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \upsilon}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right\} + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial \upsilon}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \upsilon}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 - \right] + \lambda\Delta^2 \qquad 2.72$$

ถ้าทำปัญหาให้ง่ายขึ้นโดยการพิจารณา (ก) v=w=o และนี้คือ รองลื่นที่มีความยาวไม่จำกัด และมีการหมุนสม่ำเสมอ (ข) ระบบสม่ำเสมอตามเวลา และ (ค) การแปรเปลี่ยนในทิศทาง y สามารถตัดทิ้งได้ เป็น สมการที่ (2.66) นำสมการ (2.70) มาพิจารณา

$$\rho\sigma u \frac{\partial T}{\partial x} - \alpha T u \frac{dp}{dx} = K\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \Phi \qquad 2.73$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสมการ (3.15)

$$\Phi = \eta\left\{2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2\right\} + \lambda\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \qquad 2.74$$

เทอม $\partial u / \partial x$ สามารถเปลี่ยนแปลงโดยใช้ สมการความต่อเนื่อง (2.54) จะลดภายใต้สถานการณ์ที่ $\partial(\rho u)/\partial x = o$ จะได้

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{u}{\rho}.\frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{u\rho\partial(1/\rho)}{\partial x}$$

สมการการอัดตัวของของไหล C จำกัดความไว้ดังนี้ คือ $C \equiv (-1/V)(dV/dp)$ และ $V = {}^{1}\!/_{\rho}$ ดังนั้น

$$-C = \rho\frac{d(1/\rho)}{dp} = \rho\frac{d(1/\rho)}{dx}.\frac{dx}{dp} \quad \text{หรือ} \quad \frac{-d\rho}{dx}C = \rho\frac{d(1/\rho)}{dx}$$

และดังนั้น $$\frac{\partial u}{\partial x} = -u\frac{dp}{dx}C \qquad 2.75$$

ดังนั้น

$$\Phi = \eta\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + (\lambda + 2\eta)\left(u\frac{dp}{dx}C\right)^2 \qquad 2.76$$

จากการรีดสัมผัส ฟิล์มน้ำมันที่ยาวมาก และเมื่อความร้อนถูกกำจัดออกโดย การพาความร้อน ที่เป็นเพียงสัดส่วนที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับการสูญเสียโดยการนำความร้อน ในขณะที่ $\left(\partial^2 T/\partial z^2\right)$ $\left(\partial^2 T/\partial x^2\right)$ และดังนั้นสมการตอนนี้ คือ

$$0 = \alpha u\frac{dp}{dx}T + K\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(u\frac{dp}{dx}C\right)^2(\lambda + 2\eta) \qquad 2.77$$

เมื่อ η คือ ความหนืดตั้งฉาก (เฉือน) และ λ เป็นสภาพหนืด ตัวที่สอง ตามปรกติจะไม่คิดเทอมสภาพการอัดตัว ดังนั้น สมการจะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 = -K\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \qquad 2.78$$

2.12 การแก้ความถูกต้องจากผลของความเฉื่อย

สมการสภาวะสม่ำเสมอ ที่คิดถึงความเฉื่อย สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$\eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{dp}{dx} + \rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) \qquad 2.79$$

มีความจำเป็นที่หาผลของเทอมสุดท้าย (เทอมเกี่ยวกับความเฉื่อย) ในรูปของความดัน ปรกติเทอมสุดท้ายจะตัดทิ้งไป และดังนั้นสมการจะลดลงเป็นสมการแบบง่ายๆ นำไปสู่สมการ เรย์โนลด์ ในหนึ่งมิติ

$$\eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{dp}{dx} \qquad 2.80$$

คำตอบที่ประกอบด้วยความเฉื่อย จะยุ่งยากมาก วิธีการหาค่าโดยประมาณโดย Kablert จะทำการคำนวณ พบว่าผลของความเฉื่อยมีผลน้อยมาก

สมการสถานะสม่ำเสมอในหนึ่งมิติ คือ

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{\eta}.\frac{dp}{dx} + \frac{\rho}{\eta}\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) \qquad 2.81$$

และสมมุติว่า ในขณะที่ความเฉื่อยมีค่าน้อย สามารถหาค่าเฉลี่ยตลอดความหนาฟิล์ม h (x) จะได้สมการเป็น

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{\eta}.\frac{dp}{dx} + \frac{\rho}{\eta h}\int_o^h\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right)dz \qquad 2.82$$

ส่วนด้านซ้ายเป็นฟังก์ชั่นของ x อย่างเดียว ซึ่งสามารถเขียนเป็น A ดังนั้น $\partial u/\partial z = Az + B$ และ $u = Az^2/2 + Bz + C$ ใช้เงื่อนไขขอบเขตง่ายๆ ที่ $z = 0, u = U$, และที่ $z = h,\ u = 0$ ดังนั้น C=U และ $-B = U/h + Ah/2$ จะได้

$$u = \frac{Az^2}{2} - \frac{Uz}{h} - \frac{Ah z}{2} + U \qquad 2.83$$

ทำการดิฟเฟอเรนทิเอท ตาม z

$$\frac{\partial u}{\partial z} = Az - \frac{U}{h} - \frac{Ah}{2} \qquad 2.84$$

และทำการดิฟเฟอเรนทิเอท ตาม x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ... และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial u}{\partial x} = A'\frac{z^2}{2} + \frac{Uzh'}{h^2} - \frac{Azh'}{2} - \frac{hzA'}{2} \qquad 2.85$$

(เมื่อเครื่องหมาย primes แสดงถึง ค่าดิริเวทีฟ ตาม x) จะเท่ากับ $-\frac{\partial w}{\partial z}$ จากสมการความต่อเนื่อง $\partial u / \partial x + \partial w / \partial z = 0$ ในขณะที่ทุกเทอมใน v จะเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$w = -\frac{A'z^3}{6} - \frac{Uz^2h'}{2h^2} + \frac{Az^2h'}{4} + \frac{hz^2A'}{4} \qquad 2.86$$

ทำการคูณและอินทิเกรท ระหว่าง 0 ถึง h ค่า A สามารถกระจายได้ดังนี้คือ

$$A = \frac{1}{\eta}.\frac{dp}{dx} + \frac{\rho}{\eta h}\left(\frac{AA'h^5}{60} - \frac{AUh'h^2}{4} + \frac{A^2h'h^4}{24} - \frac{UA'h^3}{12} + \frac{U^2h'}{3}\right) \qquad 2.87$$

เทอมนี้ $$\int_o^h u\, dy = +\frac{Uh}{2} - \frac{Ah^3}{12} = \frac{U\bar{h}}{2} \qquad 2.88$$

ดังนั้น $$A = \frac{6U\left(h - \bar{h}\right)}{h^3}$$

และ $$A' = \frac{6Uh'}{h^2}\left(\frac{\bar{h}}{h} - 1\right)$$

แทนสมการเหล่านี้ลงในสมการข้างบนจะได้

$$\frac{dp}{dx} = 6U\eta\frac{h - \bar{h}}{h^3} + \frac{\rho U^2 h'}{30h}\left\{9\left(\frac{\bar{h}}{h}\right)^2 - 4\right\} \qquad 2.89$$

ถ้าความหนาแน่นเท่ากับศูนย์ สมการก็จะลดลงเป็นสมการเรย์โนลด์ในหนึ่งมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
กาบรองลื่นเพลากลม

3.1 คำนำ

การวิเคราะห์ที่เกี่ยวกับกาบรองลื่นเพลากลม เป็นส่วนที่สำคัญที่สุด ของทฤษฎีการหล่อลื่นแบบอุทกพลวัต จัดว่าเป็นเรื่องที่ยากมาก การอินทิเกรทสมการของกาบรองลื่นเพลากลม มีความสลับซับซ้อนมากกว่า ชิ้นส่วนของดิส เนื่องจากลักษณะรูปร่างมีส่วนเกี่ยวข้องเป็นอย่างมาก

3.2 ความหนาของฟิล์มน้ำมัน และการหาความหนาโดยประมาณ

วิธีการหาความหนาของฟิล์มน้ำมันสัมพันธ์กับระยะต่างๆ ในกาบรองลื่นเพลากลม มีรายละเอียดดังนี้ คือ

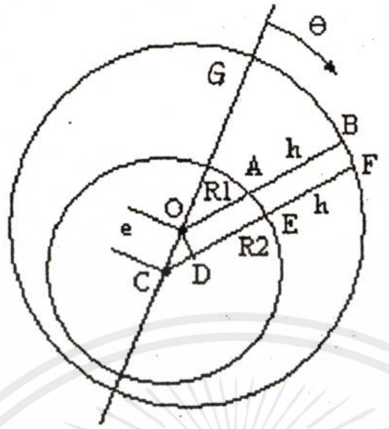
กาบรองลื่นลักษณะกลม (รูปที่ 4.1) ที่มีรัศมี R_1 มีจุดศูนย์กลางที่ จุด 0 เพลากลมมีรัศมี R_2 อยู่ภายในกาบรองลื่น และมีจุดศูนย์กลางที่จุด C ระยะ OC คือ ระยะการเยื้องศูนย์ของเพลา กำหนดให้ OC เท่ากับ e ระยะห่างเชิงมุม วัดจากตำแหน่งความหนาฟิล์มมากที่สุด คือเส้นที่ต่อจาก OC ไปตัดกับผิวของกาบรองลื่น ที่ G

พิจารณาจุด B ที่ตำแหน่งใดๆ บนกาบรองลื่น ให้มุม GOB เท่ากับ θ ระยะ OB คือ รัศมี R_1 ของกาบรองลื่น เส้น OB ตัดกับเพลาที่จุด A และ AB คือความหนาฟิล์ม เท่ากับ h ที่ต้องการหา

ลากเส้นจากจุดศูนย์กลางของเพลา C ขนานเส้น OB ตัดเพลาที่ E และ กาบรองลื่นที่ F ระยะ AB และ EF มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ OA และ CE OB และ CF จะมีขนาดใกล้เคียงกันมาก (OC คือระยะเยื้องศูนย์ จะมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับรัศมี) ดังนั้นสามารถพิจารณาได้ว่า AB=EF และสี่เหลี่ยม ABFE เป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากลากเส้นตั้งฉากจาก O ไป CE ตัด CE ที่ D ความหนาฟิล์ม $h=EF=OB-DE=OB-(CE-CD)$ และ $CD=e\cos\theta$ ในทำนองเดียวกัน $OB-CE=R_1-R_2=c$ เมื่อ c คือระยะช่องว่างในแนวรัศมีของกาบรองลื่น ดังนั้น $h=c+e\cos\theta=c\{1+(e/c)\cos\theta\}$ อัตราส่วน e/c เรียกว่า อัตราการเยื้องศูนย์ของเพลากำหนดให้เป็น ε ดังนั้น $h=c(1+\varepsilon\cos\theta)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าในกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3.1



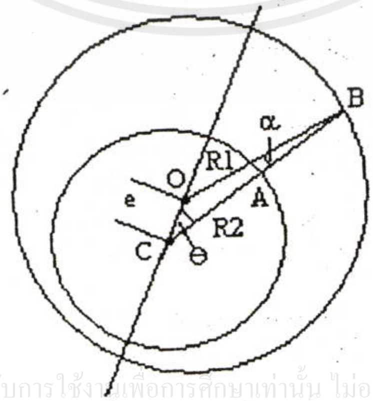
รูปทรงเรขาคณิต แสดงความสัมพันธ์ของความหนาฟิล์มน้ำมันโดยประมาณ

3.3 ลักษณะของฟิล์มและการหาความหนาฟิล์มอย่างละเอียด

วิธีการหาความหนาฟิล์มน้ำมันอย่างละเอียด ดังนี้คือ

กำหนดให้จุดศูนย์กลางของเพลาและกาบรองลื่น ที่จุด C และ O ตามลำดับ (รูปที่ 3.2) พิจารณาจุด A ที่ตำแหน่งใดๆ บนผิวของเพลา มุม OAC เท่ากับ θ

ภาพที่ 3.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปทรงเรขาคณิต แสดงความสัมพันธ์ของความหนาฟิล์มน้ำมันอย่างละเอียด

ให้ CA สัมผัสกับผิวของกาบรองลื่นที่ B ให้มุม OBC เท่ากับ α AB คือความหนาของฟิล์มน้ำมัน h ระยะ OB คือรัศมีของกาบรองลื่น R_1 และ $CB = CA+AB = R_2+h = e\cos\theta+R_1\cos\alpha$

จากกฎของไซน์ ในสามเหลี่ยม

$$\frac{\sin\alpha}{e}=\frac{\sin\theta}{R_1} \quad \text{เมื่อ} \quad \cos\alpha=\sqrt{\left(1-\frac{e^2}{R_1^2}\sin^2\theta\right)}$$

ดังนั้น

$$h=-R_2+e\cos\theta+R_1\sqrt{\left(1-\frac{e^2}{R_1^2}\sin^2\theta\right)} \tag{3.1}$$

รากที่สองสามารถกระจาย และเขียนได้ดังนี้คือ

$$h\approx -R_2+e\cos\theta+R_1\left(1-\frac{e^2}{2R_1^2}\sin^2\theta\right)$$

จาก $R_1-R_2=c$ และ $\varepsilon\equiv e/c$ ดังนั้น

$$h=c\left(1+\varepsilon\cos\theta-\frac{\varepsilon^2}{2}.\frac{c}{R_1}\sin^2\theta\right) \tag{3.2}$$

ขณะที่ c/R_1 ปรกติจะมีกำลังเป็น 10^{-3} ดังนั้นความหนาฟิล์มสามารถกำหนดให้ $h=c(1+\varepsilon\cos\theta)$

ค่าที่คลาดเคลื่อนมากที่สุดจะเกิดที่มุม $\theta=90^{\circ}$ เมื่อความสัมพันธ์ให้ค่า h=c ค่าที่ละเอียดกว่าเป็น

$$h=c\left(1-\frac{\varepsilon^2}{2}.\frac{c}{R_1}\right) \tag{3.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ที่เป็นการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความคลาดเคลื่อนจะน้อยกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์ ค่าความหนาฟิล์มจะถูกต้องที่ $\theta=0$ และ π ซึ่งจะเท่ากับ $c(1+\varepsilon)$ และ $c(1-\varepsilon)$

3.4 สมการเรย์โนลด์สำหรับกาบรองลื่นเพลากลม

ความสัมพันธ์ของความหนาของฟิล์มน้ำมันในรูปของ ช่องว่างในแนวรัศมี c อัตราส่วนการเยื้องศูนย์ ε และค่าโดออดิเนทเชิงมุม θ สามารถแสดงและแทนลงในสมการเรย์โนลด์ การรวมและการประยุกต์ เงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม สามารถที่จะคำนวนหาค่าความดันรอบกาบรองลื่น และสมดุลย์ของแรงบนกาบรองลื่นได้

ค่าอัตราส่วนการเยื้องศูนย์ ε ในขณะที่กาบรองลื่นอยู่ระหว่างการทำงาน ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ของกาบรองลื่น ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคืน ส่วนแรกเป็นรูปทรงทางเรขาคณิต ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของกาบรองลื่น ช่องว่างในแนวรัศมี จะมีค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบ และสร้างกาบรองลื่นขึ้นมา ส่วนที่สองขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบในการทำงาน ความเร็ว ภาระและความหนืดของน้ำมัน จะสามารถเห็นชัดเจนขึ้น เมื่อตัวแปรทั้ง 6 ตัว มารวมอยู่ในสมการไร้มิติ

3.5 สมการความดัน

สมการเรย์โนลด์ ในหนึ่งมิติ สำหรับการหมุนของเพลาอย่างสม่ำเสมอในกาบรองลื่น คือ

$$\frac{dp}{dx} = 6U\eta\frac{h-\bar{h}}{h^3} \tag{3.4}$$

เมื่อ U = ความเร็วพื้นผิว

η = ความหนืด

h = ความหนาฟิล์ม

$\bar{h}$ = ความหนาฟิล์ม เมื่อ dp/dx = o

ในกรณีที่ x เป็นค่าโคออดิเนท ในทิศทางของการเคลื่อนที่ แทนด้วย $R_2\theta$ หรือ ไม่ใส่อักษรห้อย เป็น $R\theta$

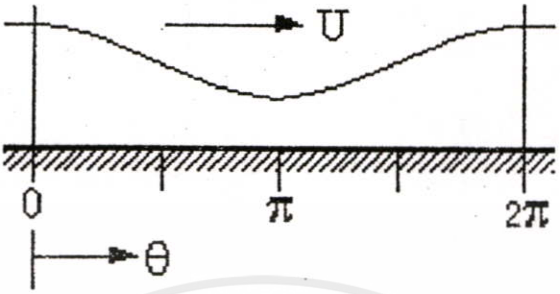
ความหนาฟิล์ม คือ

$$h = c(1+\varepsilon\cos\theta) \tag{3.5}$$

ฟิล์มอาจจะแสดง โดยการคลี่ออก ดังแสดงในรูป 3.3 ซึ่ง มีความเร็ว U คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3.3



การคลี่ความหนาฟิล์มน้ำมัน

แทนค่า $h = c(1+\varepsilon \cos\theta)$ และ $x = R\theta$ ลงในสมการ

$$\frac{dp}{dx} = 6U\eta \frac{h-\bar{h}}{h^3}$$

จะได้
$$\frac{dp}{R\,d\theta} = 6U\eta \left\{ \frac{c(1+\varepsilon \cos\theta) - c(1+\varepsilon \cos\bar{\theta})}{c^3(1+\varepsilon \cos\theta)^3} \right\} \tag{3.6}$$

$\bar{\theta}$ คือตำแหน่งที่ $dp/d\theta = 0$ ดังนั้น $c(1+\varepsilon \cos\bar{\theta}) = \bar{h}$ สมการสามารถเขียนเป็น

$$\frac{c^2 dp}{6U\eta R} = dp^* = \left\{ \frac{d\theta}{(1+\varepsilon \cos\theta)^2} - \frac{(1+\varepsilon \cos\bar{\theta})d\theta}{(1+\varepsilon \cos\theta)^3} \right\} \tag{3.7}$$

เมื่อ $(c^2 / 6U\eta R)p = p^*$ ซึ่ง เป็นสมการไร้มิติ สมการอินทิกรัลของ

$$\frac{d\theta}{(1+\varepsilon \cos\theta)^2} \quad \text{และ} \quad \frac{d\theta}{(1+\varepsilon \cos\theta)^3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเป็นต้องหาค่าให้ได้ เมื่อ $\bar{\theta}$ และ $(1+\varepsilon \cos\bar{\theta})$ มีค่าคงที่ ซึ่งสามารถหาได้ในตอนหลัง เมื่อกำหนดสภาวะของเขต

ในการอินทิเกรท Sommerfeld ได้แทนค่า γ ลงไปโดยกำหนดค่า γ ไว้ดังนี้คือ

$$\cos\gamma = \frac{\varepsilon + \cos\theta}{1 + \varepsilon\cos\theta} \tag{3.8}$$

จากการแทนค่า θ = 0, π และ 2π จะให้ค่า γ=0, π และ 2π ด้วย การที่มีค่าตรงกันนี้จะไม่เกิดขึ้นที่มุมอื่นๆ

ดังนั้น
$$\int \frac{d\theta}{(1 + \varepsilon\cos\theta)^2} = \frac{\gamma - \varepsilon\sin\gamma}{(1 - \varepsilon^2)^{3/2}} \tag{3.9}$$

และ
$$\int \frac{d\theta}{(1 + \varepsilon\cos\theta)^3} = \frac{\gamma - 2\varepsilon\sin\gamma + \varepsilon^2\gamma/2 + (\varepsilon^2/4)\sin 2\gamma}{(1 - \varepsilon^2)^{5/2}} \tag{3.10}$$

แทน $\bar{\theta}$ ในรูปของ $\bar{\gamma}$

จาก
$$\cos\gamma = \frac{\varepsilon + \cos\theta}{1 + \varepsilon\cos\theta}$$

ดังนั้น
$$1 - \varepsilon\cos\gamma = 1 - \frac{\varepsilon(\varepsilon + \cos\theta)}{1 + \varepsilon\cos\theta} = \frac{1 - \varepsilon^2}{1 + \varepsilon\cos\theta}$$

หรือ
$$1 + \varepsilon\cos\theta = \frac{1 - \varepsilon^2}{1 - \varepsilon\cos\gamma} \tag{3.11}$$

ต่อไปเขียนสมการอยู่ในรูปของ P*

$$p^* = \int \frac{d\theta}{(1 + \varepsilon\cos\theta)^2} - \{1 + \varepsilon\cos\bar{\theta}\}\int \frac{d\theta}{(1 + \varepsilon\cos\theta)^3} + C \tag{3.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้
$$p^* = \frac{\gamma - \varepsilon\sin\gamma}{(1 - \varepsilon^2)^{3/2}} - \left\{\frac{1 - \varepsilon^2}{1 - \varepsilon\cos\bar{\gamma}}\right\}\frac{\gamma - 2\varepsilon\sin\gamma + \varepsilon^2\gamma/2 + (\varepsilon^2\sin 2\gamma)/4}{(1 - \varepsilon^2)^{5/2}} + C \tag{3.13}$$

3.5.1 สภาวะขอบเขต

ในการหาค่า $\bar{\gamma}$ และค่า C ($\cos\bar{\gamma}$ แปลงมาจากค่า $\bar{h}$) จำเป็นต้องใช้สภาวะขอบเขต 2 สภาวะ

สภาวะความดันเริ่มต้น สามารถใช้ในการหาค่า C ได้ โดยค่าความดันเป็นศูนย์ เมื่อ θ=O ด้วยเหตุผลที่สำคัญ 2 ประการที่แสดงว่าบ่อยครั้งมากที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขนี้ ประการแรก กาบรองลื่นจะไม่ได้แยกออกเป็น $\pm 90^0$ ตามแนวของภาระ ดังนั้น p=0 ที่แนวแบ่งแยก และ θ ไม่เท่ากับศูนย์ ส่วนอีกเหตุผล คือถึงแม้ว่ากาบรองลื่นไม่ได้แยกออกเป็นสองส่วน ความดันก็สามารถ เริ่มต้นได้ที่ค่าของ θ ใดๆ ที่มากกว่าศูนย์ จากการคำนวนตามสภาพเป็นจริง แสดงให้เห็นว่าสภาวะที่กล่าวมานี้ ไม่อยู่ในสภาวะวิกฤตทั้งหมด และถึงแม้ว่าความดันจะไม่เริ่มต้นที่ θ=0 แต่ที่ 90^0 กับแนวเส้นของภาระค่าแรงสุทธิที่รองรับภาระไว้ จะแตกต่างไปจากที่พบ เมื่อกำหนดให้ p=0 ที่ θ=0 ดังนั้นสภาวะนี้จึงใช้ได้ การศึกษาถึงสมการความดัน แสดงให้เห็นว่าทุกเทอมที่เกี่ยวข้อง ไม่ว่าจะเป็น γ, sinγ หรือ sin2γ ดังนั้น ถ้า p=0 ที่ γ=0 (คือ θ=0) เมื่อ c จะต้องเท่ากับศูนย์ สมการความดันเป็นดังนี้ คือ

$$p^* = \frac{\gamma - \varepsilon \sin\gamma}{\left(1-\varepsilon^2\right)^{3/2}} - \left\{\frac{1}{1-\varepsilon\cos\bar{\gamma}}\right\}\frac{\gamma - 2\varepsilon\sin\gamma + \varepsilon^2\gamma/2 + \left(\varepsilon^2 \sin 2\gamma\right)/4}{\left(1-\varepsilon^2\right)^{3/2}} \qquad (3.14)$$

ขั้นตอนต่อไปจำเป็นต้องตัดสินใจกับค่าของ $\bar{\gamma}$ ในกรณีนี้ ความดันจะต้อง กำหนดไว้ที่มุม θ ที่มีค่า คือ ไม่ใช้ที่ θ=0 ในการที่บอกว่า p=0 เป็นการเพียงพอซึ่งมีความเป็นไปได้ 3 แนวทางหลักที่จะกระทำได้

นั้นคือ p=0 เมื่อ

(I) ที่ $\theta = 2\pi$ (Sommerfeld)

(ii) ที่ $\theta \geq \pi$ (Half Sommerfeld)

(iii) เมื่อ dp/dθ = 0 ที่ $\theta > \pi$ (Reynolds)

3.5.2 สภาวะ Sommerfeld

ใช้สภาวะแบบแรก ถ้า $\theta = 2\pi$, และ $\gamma = 2\pi$ ทั้ง sin2π และ sin4π จะเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p^* = 0 = 2\pi - \frac{1}{\left(1-\varepsilon\cos\bar{\gamma}\right)}\left(2\pi + \frac{\varepsilon^2}{2}2\pi\right) \qquad (3.15)$$

จะได้ $1+\frac{\varepsilon^2}{2}=1-\varepsilon\cos\bar{\gamma}$ และ $\cos\bar{\gamma} \;=-\frac{\varepsilon}{2}$

แทนค่าเหล่านี้ลงใน p* และ ทำตามวิธีการทางคณิตศาสตร์

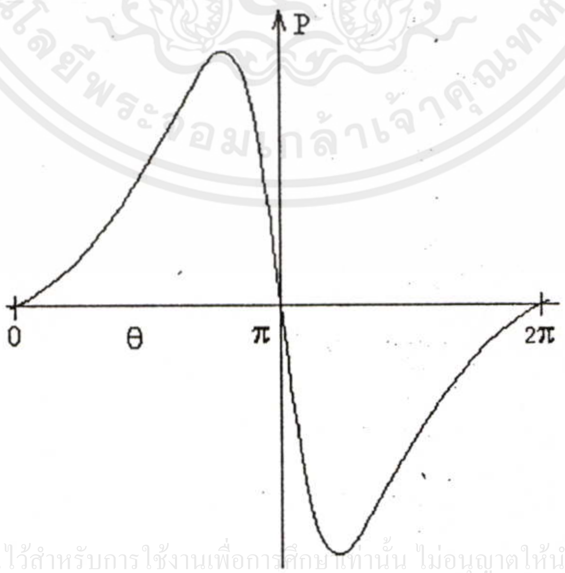
$$p^*=\frac{\varepsilon\sin\gamma\left(2-\varepsilon^2-\varepsilon\cos\gamma\right)}{\left(1-\varepsilon^2\right)^{3/2}\left(2+\varepsilon^2\right)} \tag{3.16}$$

แทนค่า cosγ และ sinγ ด้วยสมการที่สอดคล้องกัน ในรูป θ จะได้ว่า

$$p^*=\frac{\varepsilon\sin\theta(2+\varepsilon\cos\theta)}{\left(2+\varepsilon^2\right)(1+\varepsilon\cos\theta)^2} \quad \text{และ} \quad \cos\bar{\theta} \;=\frac{-3\varepsilon}{2+\varepsilon^2} \tag{3.17}$$

ค่านี้จะเท่ากับศูนย์ เมื่อ sinθ เท่ากับศูนย์ คือไม่เพียงแต่ที่ 0 และ 2π ตามที่เป็นไปตามสภาวะขอบเขต แต่ในขณะที่ θ=π ความดันจะมีลักษณะเป็นรูป antisymmetric รอบค่า π ลักษณะรูปแบบของ curve สำหรับ θ=0.6 แสดงในภาพที่ 3.4

ภาพที่ 3.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

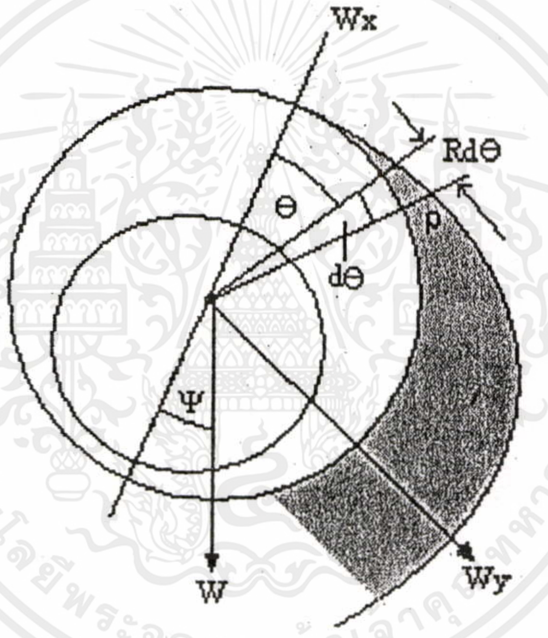
Curve แสดงความดันแบบของ Sommerfeld

3.5.3 การรองรับภาระและ มุมแอตติจูด

การหาค่าของภาระรวม จากความดันที่เกิดขึ้นในกาบรองลื่น ซึ่ง เป็นการหาขนาดและทิศทางของภาระจากภายนอก ซึ่งจะสมดุลย์กับความดันที่เกิดในฟิล์มน้ำมัน

มโนภาพ curve ของความดัน (รูปที่ 3.5) พิจารณาหน่วยย่อยขนาดเล็ก บนพื้นผิวของเพลา $Rd\theta$ ที่มุม θ ที่ซึ่งความดัน p กระทำ แรงลัพย์ต่อหน่วยความยาวตามแกน ($pRd\theta$) จะมีส่วนประกอบของแรง

ภาพที่ 3.5



Curve ของความดันและ มุมแอตติจูด

ตามแนวเส้นของจุดศูนย์กลาง เท่ากับ ($pRd\theta\cos\theta$) และที่มุมฉาก มีขนาด ($pRd\theta\ \sin\theta$) แรงบนหน่วยย่อยขนาดเล็ก สามารถอินทิเกรทตลอดสนามความดัน ถ้า W_X เป็นแรงรวมที่กระทำในทิศทาง X และ W_Y เป็นแรงในแนวตั้งฉาก กับทิศทางในแกน Y ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

$$W_X = L\int_0^{2\pi} pR\,d\theta\,\cos\theta \quad \text{และ} \quad W_Y = L\int_0^{2\pi} pR\,d\theta\,\sin\theta \qquad (3.18)$$

เมื่อ L เป็นความยาวตามแนวแกนที่พิจารณา p จะไม่เปลี่ยนแปลงในแกนเหล่านี้ คือ p≠f(y) ในขณะที่กาบรองลื่นมีความยาวมาก (infinitely long) และจาก $p=6U_{\eta}(R/c_2)p^*$ และเป็นไปได้ที่จะเขียนเป็น

$$W_X = 6U\eta \frac{R^2}{c^2} L \int_0^{2\pi} p^* \cos\theta \, d\theta \tag{3.19}$$

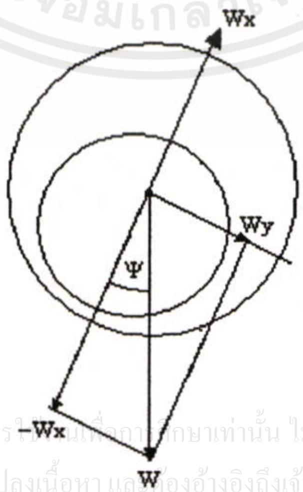
เช่นเดียวกัน สามารถกำหนดให้ W_X^* และ W_Y^* คือ $W_X^* = \int_0^{2\pi} p^* \cos\theta \, d\theta$ คือ $W^* = Wc^2 / 6U\eta R^2 L$ และในลักษณะเดียวกัน $W_Y^* = \int_0^{2\pi} p^* \sin\theta \, d\theta$ แรงลัพย์บนกาบรองลื่น W ซึ่งจะต้องสมดุลกับภาระที่ประยุกต์ สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบง่ายๆ คือ

$$W = \sqrt{\left(W_Y^2 + W_X^2\right)} \quad \text{หรือ} \quad W^* = \sqrt{\left(W_Y^{*2} + W_X^{*2}\right)} \tag{3.20}$$

มุมระหว่างเส้นแนวศูนย์กลางกับ เส้นภาระรวม ซึ่ง เรียกว่ามุม ψ กำหนดไว้ว่า

$$\tan\psi = -\frac{W_Y}{W_X} \tag{3.21}$$

ภาพที่ 3.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวเส้นทะแยงมุม และภาระรวม

ขณะนี้

$$W_X^* = \int_0^{2\pi} p^* \cos\theta \, d\theta \quad \text{และ} \quad W_Y^* = \int_0^{2\pi} p^* \sin\theta \, d\theta \tag{3.22}$$

ทำการอินทิเกรทแยกส่วน

$$W_X^* = \left| p^* \sin\theta \right|_0^{2\pi} - \int_0^{2\pi} \frac{dp^*}{dx} \sin\theta \, d\theta \tag{3.23}$$

และ

$$W_Y^* = -\left| p^* \cos\theta \right|_0^{2\pi} + \int_0^{2\pi} \frac{dp^*}{dx} \cos\theta \, d\theta \tag{3.24}$$

เมื่อ p=0 ที่ $\theta = 0$ ดังนั้น

$$W_X^* = -\int_0^{2\pi} \frac{dp^*}{d\theta} \sin\theta \, d\theta \quad \text{และ} \quad W_Y^* = +\int_0^{2\pi} \frac{dp^*}{d\theta} \cos\theta \, d\theta \tag{3.25}$$

แทน $$\frac{dp^*}{d\theta} = \frac{1}{(1+\varepsilon\cos\theta)^2} - \frac{(1-\varepsilon^2)}{(1+\varepsilon^2/2)} \cdot \frac{1}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3} \tag{3.26}$$

และจาก $\overline{h^*} = (1-\varepsilon^2)/(1+\varepsilon^2/2)$ เมื่อ $h^* = h/c$ ซึ่งสามารถอินทิเกรท พบว่า W_x เท่ากันศูนย์ ใช้ค่าของ Sommerfeld แทนค่าสำหรับ $1/(1+\varepsilon\cos\theta)$ และสำหรับ $\cos\theta \, d\theta$, W_Y^* สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$W_Y^* = \int_0^{2\pi} \frac{dp^*}{d\theta} \cos\theta \, d\theta$$

$$= \left| \frac{\sin\gamma - \varepsilon\gamma}{(1-\varepsilon^2)^{3/2}} - \frac{\overline{h^*}}{(1-\varepsilon^2)^{5/2}} \left\{ (\sin\gamma)(1+\varepsilon^2) - \varepsilon\left(\gamma + \frac{\gamma}{2} + \frac{\sin 2\gamma}{4}\right) \right\} \right|_0^{2\pi}$$

ได้

$$W_Y^* = \frac{\pi\varepsilon}{(1-\varepsilon^2)^{1/2}(1+\varepsilon^2/2)} \tag{3.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่ W_X เท่ากับศูนย์ $\tan\psi = \infty$ ดังนั้น $\psi = \pi/2$ ทางเดินของแนวศูนย์กลางของเพลา จะเป็นเส้นตรงทำมุมฉากกับเส้นแนวภาระ

3.5.4 ค่า Sommerfeld

ภาระที่พอดีทำให้กาบรองลื่น อยู่ภายใต้สภาวะซอมเมอร์เฟลด์ ปรกติจะอยู่ในแนวเส้นศูนย์กลาง คือ $W = W_Y$

ในเทอมไร้มิติ

$$W^* = W_Y^* = \frac{\pi\varepsilon}{\left(1-\varepsilon^2\right)^{3/2}\left(1+\varepsilon^2/2\right)} \tag{3.28}$$

ซึ่งอยู่ในรูปองค์ประกอบของ ε ทำให้อยู่ในรูปปริมาณที่มีมิติจะได้

$$W = \frac{6U\eta LR^2W^*}{c^2} = \frac{6U\eta R^2L\pi\varepsilon}{c^2\left(1-\varepsilon^2\right)^{3/2}\left(1+\varepsilon^2/2\right)} \tag{3.29}$$

หรือ

$$\frac{W/L}{U\eta}\cdot\frac{c^2}{R^2} = \frac{6\pi\varepsilon}{\left(1-\varepsilon^2\right)^{3/2}\left(1+\varepsilon^2/2\right)} \tag{3.30}$$

เมื่อ W = ภาระทั้งหมด

L = ความยาวตามแนวแกน

U = ความเร็วของพื้นผิว

η = ความหนืด

c = ระยะช่องว่างตามแนวรัศมี

R = รัศมีของกาบรองลื่น

ตัวแปรทางด้านซ้ายมือ รู้จักในรูปของ ค่าซอมเมอร์เฟลด์ ซึ่ง ปรกติจะเขียนเป็น Δ ค่าซอมเมอร์เฟลด์เองมีเลข 6 อยู่ด้วย เรียกว่า β ซึ่งนิยมเขียนในรูปส่วนกลับ

$$\frac{1}{\Delta} = \frac{U\eta}{W/L}\cdot\frac{R^2}{c^2} \tag{3.31}$$

ถ้าให้ $U=\omega R$ และ $P=W/LD = W/2RL$ โดยที่ ω=ความเร็วเชิงมุม หน่วยเรเดียน/วินาที และ P=ภาระ/พื้นที่ของกาบรองลื่น

และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\Delta = \frac{2Wc^2}{LD.\omega\eta R^2} = \frac{2Pc^2}{\omega\eta R^2} = 2S_o \tag{3.32}$$

เมื่อ

$$S_o = \frac{P}{\omega\eta}.\frac{c^2}{R^2} \tag{3.33}$$

ซึ่ง คือสัญญลักษณ์ปรกติ บางครั้งเรียกว่า ค่า Gumbel ในรูปแบบนี้เสนอโดย Vogelpohl ซึ่งแตกต่างไปจากค่า Sommerfeld

ในสหรัฐอเมริกา ความเร็วแทนที่จะเขียนอยู่ในรูป ω ซึ่งมีหน่วยเป็นเรเดียน/วินาที บ่อยครั้งที่เขียนในรูป N เมื่อ N เป็นจำนวนรอบต่อวินาที P คือ ภาระต่อหน่วยพื้นที่ จะได้สัญญลักษณะที่ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นตัวแปรในรูปของ r.p.s. สามารถเขียนเป็น $S \equiv (P/N\eta)(c^2/R^2)$ เป็นการใช้หน่วยผสม (วินาที/นาที) สำหรับตัวเลข ความสัมพันธ์ ของ ω และ N อยู่ในรูป

$$\omega = 2\pi N = 120\pi N'$$

เมื่อ N = rps และ N′ = rpm ดังนั้น

$$\Delta = 2S_o = \frac{2Pc^2}{2\pi N\eta R^2} = \frac{2Pc^2}{120\pi N'\eta R^2} \tag{3.34}$$

$$\Delta = 2S_o = \frac{S}{\pi} = \frac{Sm}{60\pi} \tag{3.35}$$

3.5.5 สภาวะเรย์โนลด์

สภาวะที่ถูกต้องเท่าที่สามารถเห็นได้ในขณะนั้น จุดสุดท้ายในเส้นโค้งความดัน คือจุดที่ $dp/d\theta$ และมีค่าเท่ากับศูนย์

จุดเริ่มต้นของเส้นโค้งปรกติอาจจะเป็นจุดที่มีความหนาฟิล์มมากที่สุด คือ เมื่อ $\theta = 0$ หรือที่ตำแหน่งน้ำมันไหลเข้าปรกติที่มุม 90° กับเส้นภาระ (load line)

ทฤษฎีของกาบรองลื่นลักษณะยาวมาก ซึ่งมีจุดเริ่มต้นของเส้นโค้งความดันที่ $\theta = 0$ ความหนาฟิล์มจะเป็นดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า หรือการแสวงหากำไร และห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการความดัน คือ

$$P^* = \frac{1}{\left(1-\varepsilon^2\right)^{3/2}}\left[\gamma - \varepsilon \sin\gamma - \frac{\gamma - 2\varepsilon \sin\gamma + \varepsilon^2\gamma/2 + \left(\varepsilon^2 \sin 2\gamma\right)/4}{1-\varepsilon \cos\bar{\gamma}}\right] + C \qquad (3.36)$$

ถ้าความดันเริ่มต้นที่ $\theta = 0$ ดังนั้น P* = 0 ที่ $\gamma = 0$ และ C = 0 ถ้า P* = 0 ที่ค่า θ อื่นๆ ค่า C จะไม่เท่ากับศูนย์

สภาวะเรย์โนลด์ คือ P=0 เมื่อ dp/dθ = 0 ที่บางจุด นอกเหนือจาก $\theta = \pi$ ถ้า h=c (1+cosθ) ดังนั้น $\bar{h} = c\left(1+\varepsilon \cos\bar{\theta}\right)$ เมื่อ $\bar{h}$ คือค่าความหนาของฟิล์ม เมื่อ dp/dθ ที่มุม $\theta = \bar{\theta}$ เนื่องจาก c = ช่องว่างตามแนวรัศมี ε คือ อัตราส่วนการเยื้องศูนย์ ค่าของ $\bar{\theta}$ จะมีได้ 2 ค่า สมมาตรกันที่มุม 180°C ค่า dp/dθ = 0 ส่วนแรกจะสอดคล้องกับความดันสูงสุด dp/dθ ส่วนที่สองจะสอดคล้องกับส่วนต่ำสุด หรือส่วนปลายสุด ของเส้นโค้งความดัน ในสภาวะเรย์โนลด์ในกาบรองลื่นยาวมาก จะถือว่าไม่มีการไหลของน้ำมันหล่อลื่นตามความยาว

จากสภาพสมมาตร เพื่อความสะดวก จะกำหนดค่า $\bar{\theta} = \pi \pm \alpha$ ที่ (π - α) เมื่อ dp/dθ = 0 , P มีขนาดสุงสุด และที่ (π + α), dp/dθ = 0 p=0 และเป็นส่วนสุดท้ายในเส้นโค้งความดัน ถ้า $\bar{\theta}$ เป็น ($\pi \pm \alpha$) ดังนั้นบนสเกลของ γ ให้ $\bar{\gamma}$ = ($\pi \pm \beta$) เมื่อสเกล γ และ β สอดคล้องกับ α บนสเกล θ ถ้าให้ P* เท่ากับศูนย์ที่ $\gamma = \pi + \beta$ และโดยที่ sin (π+β) = -sinβ และ cos(π + β) = -cosβ ดังนั้นสามารถที่จะหาค่า β ได้ โดยการแทน π + β สำหรับ γ ในสมการก่อนหน้านี้ ดังนั้น

P* = 0

$$= \frac{1}{\left(1-\varepsilon^2\right)^{3/2}}\left\{(\pi+\beta) + \varepsilon \sin\beta - \frac{(\pi+\beta) + 2\varepsilon \sin\beta + \varepsilon^2(\pi+\beta)/2 + \left(\varepsilon^2 \sin 2/\beta\right)/4}{1+\varepsilon \cos\beta}\right\}$$

ทำการคูณ และจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$0 = \varepsilon \sin\beta \cos\beta + 2(\pi+\beta)\cos\beta - (\pi+\beta)\varepsilon - 2\sin\beta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ $$\varepsilon = \frac{2\{\sin\beta - (\pi+\beta)\cos\beta\}}{\sin\beta \cos\beta - (\pi+\beta)} \qquad (3.37)$$

ซึ่ง เป็นวิธีการหาค่า β การคำนวนค่า ε และ β (เป็นเรเดียน โดย Cameron และ Wood) ดังนี้ คือ จากที่เรารู้ว่า β บนสเกลจะสอดคล้องกับ α บน สเกลของมุม θ และที่ $\theta=\pi+\alpha$, p=0

β =	0.8871	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.352
ε =	0.1	0.9727	0.7574	0.5383	0.3204	0.1073	0

นำค่ามุม β แทนในสมการความดัน และทำการอินทิเกรทอีกครั้ง จะได้ค่าภาระ W_X และ W_Y

ในการหาค่ามุม Ψ ระหว่างแนวของเส้นศูนย์กลาง กับแนวเส้นภาระ แล้วอินทิเกรท

$$\int_0^{\pi+\alpha} p\sin\theta\, d\theta \quad \text{และ} \quad \int_0^{\pi+\alpha} p\cos\theta\, d\theta$$

ซึ่ง สามารถหาค่า lan Ψ ได้ดังนี้คือ

$$\tan\psi = \frac{W\sin\psi}{W\cos\psi} = \frac{\int_0^{\pi+\alpha} p\sin\theta\, d\theta}{\int_0^{\pi+\alpha} p\cos\theta\, d\theta} \tag{3.38}$$

จากการหาค่าโดยใช้วิธีการเดียวกันกับกรณี สภาวะขอบเขตของซอมเมอร์เฟลด์

$$W\sin\psi = \int_0^{\pi+\alpha} p\sin\theta\, d\theta = -\left| p\cos\theta \right|_0^{\pi+\alpha} + \int_0^{\pi+\alpha} \frac{dp}{d\theta}\cos\theta\, d\theta \tag{3.39}$$

เทอมแรกจะเท่ากับศูนย์ ในขณะ p=0 ที่ θ=0 และ ($\pi+\alpha$) ใช้การแทนค่าแบบของซอมเมอร์เฟลด์ จะได้สมการอินทิเกรทใน เทอมของ γ

และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_0^{\pi+\alpha} \frac{dp}{d\theta}\cos\theta \, d\theta = \int_0^{\pi+\beta} \left(1 - \frac{1-\varepsilon\cos\gamma}{1+\varepsilon\cos\beta}\right)\frac{(\cos\gamma-\varepsilon)}{\left(1-\varepsilon^2\right)^{3/2}} d\gamma$$

$$= -\frac{\varepsilon\{\sin\beta\cos\beta - (\pi+\beta)\} + 2\varepsilon^2\{(\pi+\beta)\cos\beta - \sin\beta\}}{2\left(1-\varepsilon^2\right)^{3/2}(1+\varepsilon\cos\beta)} \qquad (3.40)$$

ในวงเล็บแรกของเศษสามารถกระจายให้อยู่ในเทอมที่สองโดยใช้วิธีการหาค่า β ดังกล่าวแล้วข้างบน โดยการแทนค่า และทำการคูณเข้าไปจะได้

$$W\sin\psi = \frac{(\pi+\beta)\cos\beta - \sin\beta}{\left(1-\varepsilon^2\right)^{1/2}(1+\varepsilon\cos\beta)} \qquad (3.41)$$

หาค่า $W\cos\psi$ ในทำนองเดียวกันจะได้

$$W\cos\psi = -\int_0^{\pi+\alpha} \frac{dp}{d\theta}\sin\theta \, d\theta$$

$$= -\frac{1}{1-\varepsilon^2}\int_0^{\pi+\alpha}\left(1 - \frac{(1-\varepsilon\cos\gamma)}{(1+\varepsilon\cos\beta)}\right)\sin\gamma \, d\gamma$$

ดังนั้น

$$W\cos\psi = -\frac{\varepsilon(1+\cos\beta)^2}{2\left(1-\varepsilon^2\right)(1+\varepsilon\cos\beta)} \qquad (3.42)$$

และ

$$\tan\psi = \frac{2\left(1-\varepsilon^2\right)^{1/2}\{\sin\beta - (\pi+\beta)\cos\beta\}}{\varepsilon(1+\cos\beta)^2} \qquad (3.43)$$

ซึ่งสามารถหาค่า มุม Ψ ได้ และ W ก็สามารถหาได้โดยการแทนค่า Ψ ลงในสมการข้างบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

3.6 สมมุติฐาน และสมการความดันของกาบรองลื่นสั้น

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งจำเป็นต้องได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการแสดงการไหลของน้ำมันหล่อลื่น q_x ในทิศทางการเคลื่อนที่ คือ

$$q_x = \frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{12\eta}\frac{\partial p}{\partial x} \tag{3.44}$$

และการไหลในแนวแกน คือ

$$q_y = -\frac{h^3}{12\eta}\frac{\partial p}{\partial y} \tag{3.45}$$

จากสมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \tag{3.46}$$

ถ้ากาบรองลื่นแคบมากๆ คือ ความยาว L มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับ รัศมี R ได้มีการยืนยันว่า การเปลี่ยนแปลงความดัน $\partial P/\partial x$ จะอยู่ในรูป ความดัน/เส้นรอบวง หรือ $P/2\pi R$ และ $\partial P/\partial y$ จะอยู่ในรูปของ P/L ในขณะที่ R>>L ดังนั้น $\partial P/\partial x$ << $\partial P/\partial y$ ยิ่งกว่านั้น เทอม $\partial P/\partial x$ ใน q_x จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ Uh/2

ดังนั้น สามารถพิจารณาได้ว่า ด้วยค่า q_x ที่มีความเที่ยงตรงพอ สามารถเขียนเป็น Uh/2 ตัดเทอมที่สองที่ประกอบด้วย $\partial P/\partial x$ ออกไป จะได้สมการความต่อเนื่องเป็น

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Uh}{2}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{h^3}{12\eta}\frac{\partial p}{\partial y}\right) = 0 \tag{3.47}$$

เนื่องจาก h เป็นฟังก์ชั่นของ x เพียงอย่างเดียว สมการสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{h^3}{12\eta}.\frac{d^2 p}{dy^2} = \frac{U}{2}.\frac{dh}{dx} \quad \text{หรือ} \quad \frac{d^2 p}{dy^2} = \frac{6U\eta}{h^3}.\frac{dh}{dx} \tag{3.48}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการอินทิเกรทสมการข้างบนสองครั้งจะได้

$$\frac{dp}{dy} = \frac{6U\eta}{h^3} \cdot \frac{dh}{dx} y + C_1 \tag{3.49}$$

และ

$$p = \frac{3U\eta}{h^3} \cdot \frac{dh}{dx} y^2 + C_1 y + C_2 \tag{3.50}$$

เมื่อ C_1 และ C_2 เป็นค่าคงที่จากการอินทิเกรท ในการหาค่าจะต้องพิจารณาสถานะที่ความดันเท่ากับศูนย์ที่ส่วนข้างของกาบรองลื่นที่มีความกว้างตามแนวแกน L นั่นคือ p=0 ที่ y = $\pm$L/2 และจากความสมมาตร $\partial P/\partial y$ จะเท่ากับศูนย์บนเส้นแนวศูนย์กลางที่ y=0 จากสภาวะในส่วนหลัง C_1=0 ในขณะที่ $\partial P/\partial y = 0$ ที่ y=0

จากสภาวะขอบเขตส่วนแรก C_2 จะเท่ากับ

$$-\frac{3U\eta}{h^3} \cdot \frac{dh}{dx}\left(\frac{L^2}{4}\right)$$

ดังนั้น $p = \frac{3U\eta}{h^3}\left(y^2 - \frac{L^2}{4}\right)\frac{dh}{dx}$

แทนค่า $h = c(1 + \varepsilon \cos\theta)$ และ $x = R\theta$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{dh}{Rd\theta} = -\frac{c\varepsilon \sin\theta}{R}$$

ดังนั้น

$$p = \frac{3U\eta\varepsilon \sin\theta}{c^2 R(1 + \varepsilon \cos\theta)^3}\left(\frac{L^2}{4} - y^2\right) \tag{3.51}$$

สัญญลักษณ์ U = ความเร็ว η = ความหนืด C = ระยะห่างในแนวรัศมี R = รัศมี และ ε = อัตราส่วนการเยื้องศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ในกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ทำการดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ภาระบนกาบรองลื่นสั้น

ส่วนประกอบของภาระสองส่วน คือ W_Y และ W_X สามารถหาได้โดยวิธีเดียวกับข้อที่ 4.5 แต่ในกรณีนี้จะต้องอินทิเกรทสองครั้ง ในขณะที่ความดันแปรเปลี่ยนทั้งในทิศทาง θ และ y W_X เป็นส่วนประกอบของภาระในแนวเส้นต่อระหว่างศูนย์กลาง และ W_Y จะตั้งฉากกับเส้นต่อระหว่างศูนย์กลางระหว่างกาบรองลื่นและเพลา รูปที่ 3.5

ดังนั้น

$$W_Y = \int_{-L/2}^{+L/2} \int_0^{\pi} p \sin\theta \, R \, d\theta \, dy \tag{3.52}$$

$$W_X = \int_{-L/2}^{+L/2} \int_0^{\pi} p \cos\theta \, R \, d\theta \, dy \tag{3.53}$$

สมการอินทิเกรทที่มีประโยชน์คือ

$$\int_{-L/2}^{+L/2} \left(\frac{L^2}{4} - y^2 \right) dy = \frac{L^3}{6}$$

และสมการอินทิเกรทที่สลับซับซ้อนคือ

$$\int_0^{\pi} \frac{\varepsilon \sin^2\theta \, d\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3} \text{ สำหรับ } W_Y \text{ และ } \int_0^{\pi} \frac{\varepsilon \sin\theta \cos\theta \, d\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3} \text{ สำหรับ } W_X$$

โดย

$$\int_0^{\pi} \frac{\varepsilon \sin^2\theta \, d\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3} = \frac{\pi\varepsilon}{2(1-\varepsilon^2)^{3/2}}$$

และ

$$\int_0^{\pi} \frac{\varepsilon \sin^2\theta \cos\theta \, d\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3} = \frac{-2\varepsilon^2}{(1-\varepsilon^2)^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$W_Y = \frac{U\eta L^3}{c^2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon^2)^{3/2}} \tag{3.54}$$

และ

$$W_X = \frac{-U\eta L^3}{c^2} \cdot \frac{\varepsilon^2}{\left(1-\varepsilon^2\right)^2} \tag{3.55}$$

ภาระรวม

$$W = \sqrt{W_X^2 + W_Y^2}$$

$$= \frac{U\eta L^3}{c^2} \sqrt{\left\{ \frac{\pi^2 \varepsilon^2}{16\left(1-\varepsilon^2\right)^3} + \frac{\varepsilon^4}{\left(1-\varepsilon^2\right)^4} \right\}}$$

หรือ

$$W = \frac{U\eta L^3}{c^2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\varepsilon}{\left(1-\varepsilon^2\right)^2} \left\{ \left(\frac{16}{\pi^2} - 1 \right) \varepsilon^2 + 1 \right\}^{1/2} \tag{3.56}$$

ในขณะที่ $\left(16/\pi^2 - 1\right) = 0.6211$ ดังนั้น ในวงเล็บสามารถเขียนใหม่ได้เป็น $\left\{0.62\varepsilon^2 + 1\right\}^{1/2}$ จะได้

$$\frac{W/L}{U\eta} \cdot \frac{c^2}{L^2} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\varepsilon}{\left(1-\varepsilon^2\right)^2} \left\{0.62\varepsilon^2 + 1\right\}^{1/2} \tag{3.57}$$

กลุ่มทางซ้ายมือ จะคล้ายกับตัวแปรของ Sommerfeld นอกจากจะมี L^2 เพิ่มเข้ามา แทนที่จะเป็น R^2 ทำการคูณเศษและส่วนด้วย R^2 และ 4 จะได้

$$4\frac{R^2}{L^2} \left(\frac{W/L}{U\eta} \cdot \frac{c^2}{R^2} \right) \equiv \Delta \frac{D^2}{L^2} = \frac{\pi\varepsilon}{\left(1-\varepsilon^2\right)^2} \left\{0.62\varepsilon^2 + 1\right\}^{1/2} \tag{3.58}$$

เมื่อ Δ คือตัวแปรของ Sommerfeld

3.8 กาบรองลื่นสั้น มุมแอตติจูด และการไหลของน้ำมัน

ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมแอตติจูด Ψ กำหนดดังรูปที่ 3.6

$$\tan\psi = \frac{W_Y}{-W_X} \tag{3.59}$$

$$= \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\varepsilon}{\left(1-\varepsilon^2\right)^{3/2}} \cdot \frac{\left(1-\varepsilon^2\right)^2}{\varepsilon^2}$$

$$\tan\psi = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\left(1-\varepsilon^2\right)^{1/2}}{\varepsilon} \tag{3.60}$$

การไหลของน้ำมันหล่อลื่น จะมีลักษณะแบบง่ายๆ การไหลของน้ำมันหล่อลื่นในทิศทาง x หรือในแนวทิศทางเส้นรอบวง หรือ q_x จะเท่ากับ Uh/2 ต่อหน่วยความกว้าง ซึ่ง เป็นสมมุติฐานสำหรับกาบรองลื่นชนิดแคบ การไหลออกทางด้านข้างของกาบรองลื่น Q_c คือความแตกต่างระหว่างน้ำมันไหลเข้า ในช่วงแรกของเส้นโค้งความดัน และน้ำมันไหลออกที่ส่วนปลายสุด คือ

$$\frac{U}{2}\left(h_{start} - h_{end}\right)L \tag{3.61}$$

$$h_{start} = h_{\theta=0} = c(1+\varepsilon) \tag{3.62}$$

และ $$h_{end} = h_{\theta=\pi} = c(1-\varepsilon) \tag{3.63}$$

ดังนั้น $$Q_c = \frac{UL}{2}c\{1+\varepsilon-(1-\varepsilon)\} = ULc\varepsilon \tag{3.64}$$

สมการการไร้มิติของการไหลทางด้านข้าง นิยามตามสมการ

$$Q_c = \frac{ULc}{2}Q_c^* \tag{3.65}$$

ซึ่ง $$Q_c^* = 2\varepsilon \tag{3.66}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 ความเสียดทานในกาบรองลื่นเพลากลม

ในกาบรองลื่นทุกชนิด ที่ใช้สารหล่อลื่นทั้งแบบ อัดตัวได้และแบบอัดตัวไม่ได้ กาบรองลื่นที่มีความยาวจำกัด และยาวมาก กำหนดให้ความหนืดมีค่าคงที่ ตลอดความหนาของฟิล์มน้ำมัน จากกฎความเสียดทานของ นิวตัน ความเค้น τ ที่แต่ละชิ้นของของเหลว คือ

$$\tau = \eta \frac{\partial u}{\partial x}$$

ค่า $\partial u/\partial x$ ได้หาโดยใช้สภาวะขอบเขต $u = U_1, U_2$ ที่ $z = 0$ และ h ตามลำดับ จะพบว่า

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{(U_1 - U_2)}{h} - \frac{dp}{dx}.\frac{h}{\eta}\left(z - \frac{h}{2}\right) \qquad (3.67)$$

ดังนั้น $$\tau_{h,0} = \eta \frac{\partial u}{\partial z} = \pm \frac{dp}{dx}.\frac{h^2}{2} + (U_1 - U_2)\frac{\eta}{h} \qquad (3.68)$$

เครื่องหมายบวก สำหรับ $z = h$ และเครื่องหมายลบ เมื่อ $z = 0$ แรงลากสุทธิ F บนผิวของกาบรองลื่นทั้งหมด ภายใต้การพิจารณาว่าระยะในแนวแกน x และ y เท่ากับ B และ L คือ

$$F = \int_0^L \int_0^B \tau \, dx \, dy = \int_0^L \int_0^{2\pi} \tau \, R \, d\theta \, dy \quad \text{เมื่อ} \quad 2\pi R = B \qquad (3.69)$$

$$= \int_0^L \left(\int_0^{2\pi} \pm \frac{dp}{R \, d\theta}.\frac{h}{2}.R \, d\theta + \int_0^{2\pi} \frac{\eta U}{h} R \, d\theta \right) dy$$

เมื่อ $h = c(1 + \varepsilon \cos\theta)$ และ $dh/d\theta = -c\varepsilon \sin\theta$

ทำการอินทิเกรทเทอมแรกเป็นแบบแยกส่วน (by part) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

$$F = \int_0^L \left(\left| \frac{ph}{2} \right|_0^{2\pi} \pm \int_0^{2\pi} \frac{p}{2} c\varepsilon \sin\theta \, d\theta + \int_0^{2\pi} \frac{\eta U R \, d\theta}{c(1 + \varepsilon \cos\theta)} \right) dy \qquad (3.70)$$

ส่วนแรกของเทอมจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ในขณะที่ P จะเท่ากับศูนย์ ที่ $\theta = 0$ และ 2π

สำหรับเทอมที่สอง การแก้สมการอินทิเกรท จะใช้ความสัมพันธ์

$$\int_0^L \int_0^{2\pi} p\ R\ d\theta \sin\theta\ dy = W \sin\psi \tag{3.71}$$

เทอมที่สาม สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน เนื่องจากความหนืดจะไม่คงที่ที่รอบแนวเส้นรอบวง ถ้ามีส่วนเว้าบางส่วนในกาบรองลื่น จะใช้กฎของความแตกต่างประยุกต์ และที่ขณะใดๆ กาบรองลื่นสมมุติว่าของเหลวมีความหนืดค่าเดียว ใช้สมการซอมเมอร์เฟลด์ แทนค่าดังนี้ คือ

$$\frac{\eta UR}{c}\int_0^L \int_0^{2\pi} \frac{d\theta\ dy}{(1+\varepsilon\cos\theta)} = \frac{\eta URL}{c}\int_0^{2\pi} \frac{(1-\varepsilon\cos\gamma)(1-\varepsilon^2)^{1/2}}{(1-\varepsilon^2)(1-\varepsilon\cos\gamma)}d\gamma$$

$$= \frac{\eta URL}{c(1-\varepsilon^2)^{1/2}}\int_0^{2\pi} dy = \frac{2\pi\eta URL}{c(1-\varepsilon^2)^{1/2}} \tag{3.72}$$

สมการอินทิกรัล สุดท้าย คือ

$$F_{h,0} = \pm\frac{c\varepsilon W}{2R}\sin\psi + \frac{2\pi\eta URL}{c(1-\varepsilon^2)^{1/2}} \tag{3.73}$$

3.10 กาบรองลื่นสั้น

กาบรองลื่นที่ใช้อยู่โดยทั่วไป จะมีอัตราส่วน L/D ระหว่าง 1 และ ½ กาบรองลื่นสั้นจะมีอัตราส่วน L/D สูงถึง ¼ ขณะที่ความดันในกาบรองลื่นยาว จะมีค่าสูงสุดในส่วนกลางของความยาว โดยอัตราส่วน L/D ของกาบรองลื่นยาวมาก จะมีอัตราส่วน L/D $\geq$ 4 ขนาดความยาวของกาบรองลื่นที่ใช้กันอยู่ทั่วไปไม่สามารถจัดอยู่ในแบบสั้นหรือแบบยาวตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในตอนต้นได้ดังนั้นจึงต้องจัดอยู่ในแบบมีความยาวจำกัด (Finite Bearing)

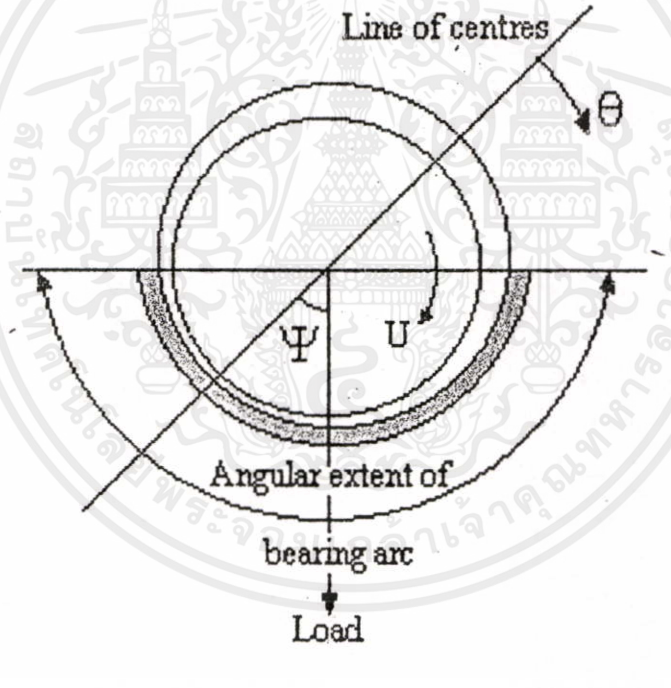
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11 กาบรองลื่นวงกลม ชนิดหุ้มเพลาไม่เต็มวงประเภทสั้น

3.11.1 มุมรองรับเพลาของกาบรองลื่น

การวิเคราะห์ปัญหาของกาบรองลื่นในทางทฤษฎี โดยปรกติจะพิจารณาเป็นกาบรองลื่นที่หุ้มเพลาเต็มวง หรือมุมรองรับเพลา 360^{0} แต่ในทางปฏิบัติจริงๆ มีส่วนน้อยมากที่จะพิจารณาในลักษณะนี้ โดยปรกติจะแยกกาบรองลื่นออกเป็น 2 ส่วนตามแนวระดับ (โดยพิจารณาแนวเส้นของภาระอยู่ในแนวดิ่งลงล่าง) เป็นส่วนมุม 180^{0} สองส่วน นอกจากนี้ยังมีมุมขนาดอื่นๆ อีก เช่นมุม 150^{0} ,120^{0} , 100^{0} , 75^{0} หรือ 60^{0} ในทุกกรณี แนวเส้นภาระจะแบ่งกาบรองลื่นออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน เช่น กาบรองลื่นมุม 180^{0} จะแบ่งเป็น $\pm 90^{0}$ ทั้งสองข้างของแนวเส้นภาระ ดังรูปที่ 3.7 กาบรองลื่นที่สำคัญที่สุดคือ คือแบบมีมุมรับเพลา 360^{0} และ 180^{0}

ภาพที่ 3.7



รูปทรงเรขาคณิตของกาบรองลื่นหุ้มเพลาไม่เต็มวง

3.11.2 ความหนาของฟิล์มน้ำมัน

จากหัวข้อที่ 3.1 ได้แสดงวิธีการคำนวนหาความหนาของฟิล์มน้ำมันที่มีความแม่นยำที่สามารถยอมรับได้ อยู่ในรูปสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่อนุญาตให้ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ ε เรียกว่าอัตราส่วนการเยื้องศูนย์ คืออัตราส่วนระหว่างการเยื้องศูนย์ e (ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเพลาและกาบรองลื่น) ต่อระยะช่องว่างในแนวรัศมี c หรือ $\varepsilon = \frac{e}{c}$ มุม θ วัดจากตำแหน่งช่องว่างระหว่างเพลา และกาบรองลื่นที่มีค่ามากที่สุด คือแนวต่อจุดศูนย์กลางทั้งสองที่ $\theta = 0$ คือตำแหน่งที่ความหนาฟิล์มน้ำมันมากที่สุด $h = c(1 + \varepsilon)$ และ ที่ $\theta = \pi$, $h = (1 - \varepsilon)$ ขนาดเชิงมุมระหว่างเส้นแนวภาระ และแนวความหนาฟิล์มน้อยที่สุด คือ $\theta = \pi$ เรียกว่ามุมแอตติจูด , ψ

3.11.3 สมการเรย์โนลด์ สำหรับกาบรองลื่นรูปวงกลมความยาวจำกัด

สมการที่ใช้ประกอบในการคำนวนเกี่ยวกับกาบรองลื่นที่มีความยาวจำกัด เป็นสมการเรย์โนลด์ใน 2 มิติ คือ

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(h^3 \frac{\partial P}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(h^3 \frac{\partial P}{\partial y}\right) = 6\,U\eta \frac{dh}{dx} \qquad (3.74)$$

เมื่อ $h = c(1 + \varepsilon \cos\theta)$ และ $x = R\theta$

ทำค่า y ให้อยู่ในรูปสมการไร้มิติ ในรูปความยาวตามแนวแกน L

คือ $y = Ly^*$

จะได้ $$\frac{C^3}{R^2}.\frac{\partial}{\partial \theta}\{(1+\varepsilon\cos\theta)^3 \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{C^3}{L^2}.\frac{\partial}{\partial y^*}\left\{(1+\varepsilon\cos\theta)^3 \frac{\partial P}{\partial y^*}\right\} = 6U_\eta \frac{c\varepsilon \sin\theta}{R}$$

หรือ $$\frac{\partial}{\partial \theta}.\{(1+\varepsilon\cos\theta)^3 \frac{\partial P}{\partial \theta}\} + \frac{R^2}{L^2}.\frac{\partial}{\partial y^*}\left\{(1+\varepsilon\cos\theta)^3 \frac{\partial P}{\partial y^*}\right\} = 6U_\eta \frac{R}{C^2}\varepsilon \sin\theta \qquad (3.75)$$

ค่า $U_\eta R/C^2$ เป็นมิติของความดัน ดังนั้นถ้า $PC^2/6U_\eta R$ เป็น P*

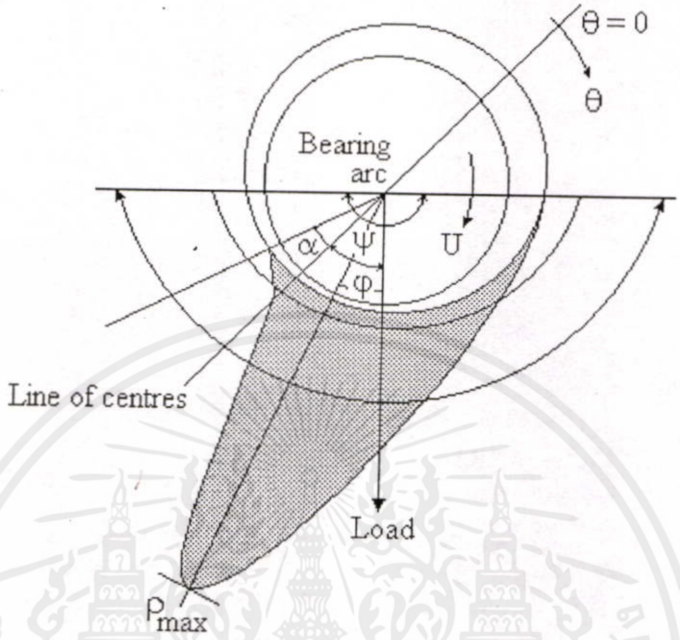
สมการสามารถเขียนได้ใหม่ในรูปสมการไร้มิติคือ

$$\frac{\partial}{\partial \theta}\left\{(1+\varepsilon\cos\theta)^3 \frac{\partial P^*}{\partial \theta} + \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{\partial}{\partial y^*}\left\{(1+\varepsilon\cos\theta)^3 \frac{\partial P^*}{\partial y^*}\right\} = -\varepsilon \sin\theta \qquad (3.76)$$

จากสมการข้างบนนี้ สามารถคำนวนหาการกระจายความดันได้ โดยความดันจะเริ่มเกิดที่ขอบเริ่มต้นของกาบรองลื่น ยกเว้นกรณีกาบรองลื่น 360^0 ที่ความดันจะเริ่มเกิดที่จุดความหนาฟิล์มน้ำมันมากที่สุด $(\theta = 0)$ ในทางปฏิบัติโดยปรกติกาบรองลื่นจะแบ่งออกเป็น $\pm 90^0$ กับแนวเส้นภาระ เพื่อประกอบเป็นกาบรองลื่น 180^0 ซึ่งเป็นกรณีที่สำคัญที่สุด แม้แต่กาบรองลื่น 360^0 ปรกติความดันจะเริ่มเกิดช้า โดยจะเริ่มเกิดที่มุมประมาณ 90^0 กับแนวเส้นภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3.8



การกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลม

3.12 การกระจายของความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น

พิจารณากาบรองลื่นครึ่งวงกลม เป็นกาบรองลื่นลักษณะสั้น โดยกำหนดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.3 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร ซึ่งจัดเป็นกาบรองลื่นสั้นหรือมีความยาวน้อย (Short Partial Circular Journal Bearing) เพลาที่หมุนอยู่ในกาบรองลื่นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มิลลิเมตร

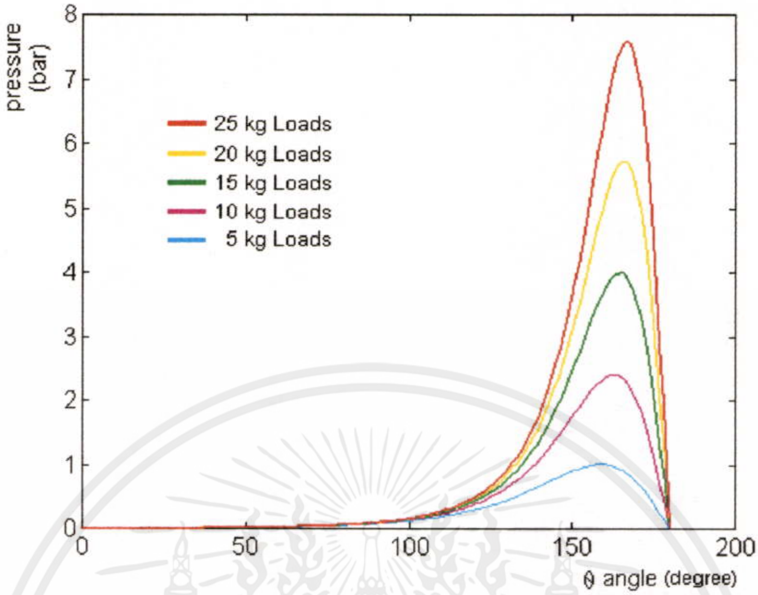
กำหนดให้เพลาหมุนอยู่ในกาบรองลื่นด้วยความเร็ว 1000-3000 RPM เพลารับภาระขนาดตั้งแต่ 10-25 กิโลกรัม เติมน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสมสารเติมแต่ง คือ Poly isobutelene(PIB) 1%, 2% และ 5% มีความหนืด 15.8 mPa.S, 16.2 mPa.S และ 18.5 mPa.S ตามลำดับ จะมีความดันเกิดขึ้นภายในกาบรองลื่น ซึ่งสามารถหาการกระจายความดันโดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการหล่อลื่นของเรย์โนลด์จากหัวข้อ 3.11 คือ

$$P = \frac{3U\eta\varepsilon \sin\theta}{C^2 R(1+\varepsilon\cos\theta)^3}\left(\frac{L^2}{4} - y^2\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

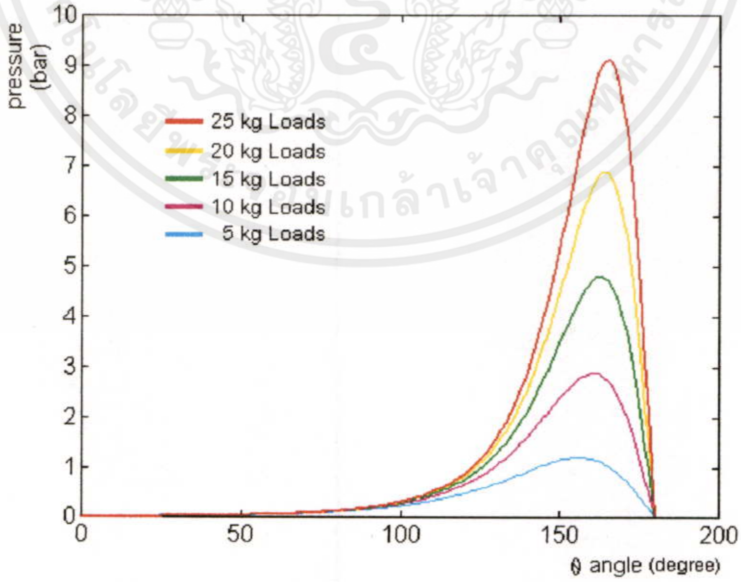
ซึ่งจะสามารถคำนวนหาการกระจายความดันได้ดังแสดงในรูปที่ 3.9-3.23

ภาพที่ 3.9



การกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี โดยใช้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

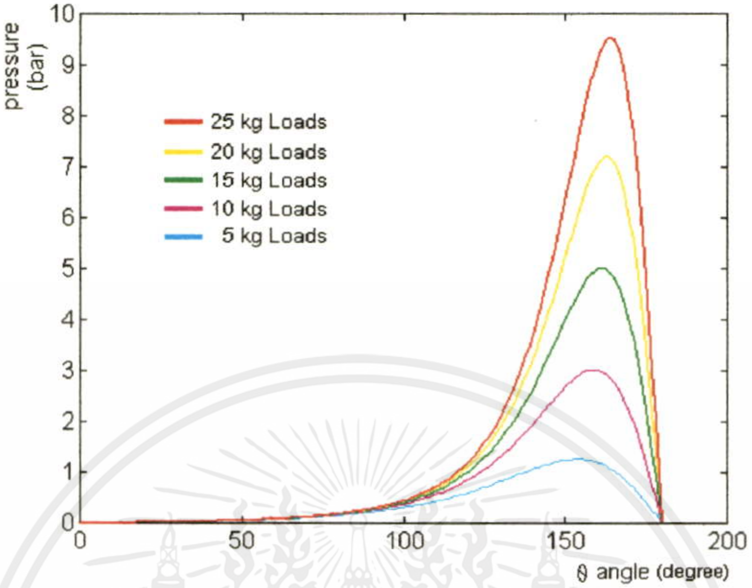
ภาพที่ 3.10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

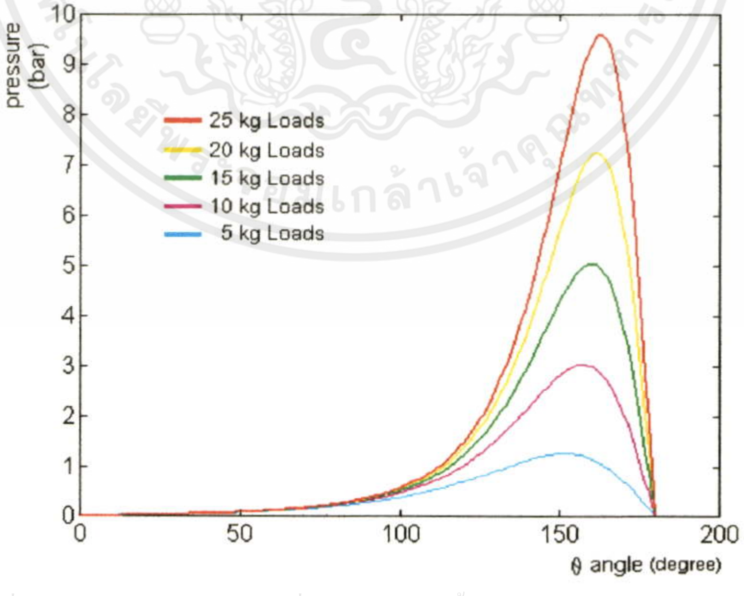
การกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี โดยใช้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 3.11



การกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี โดยใช้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

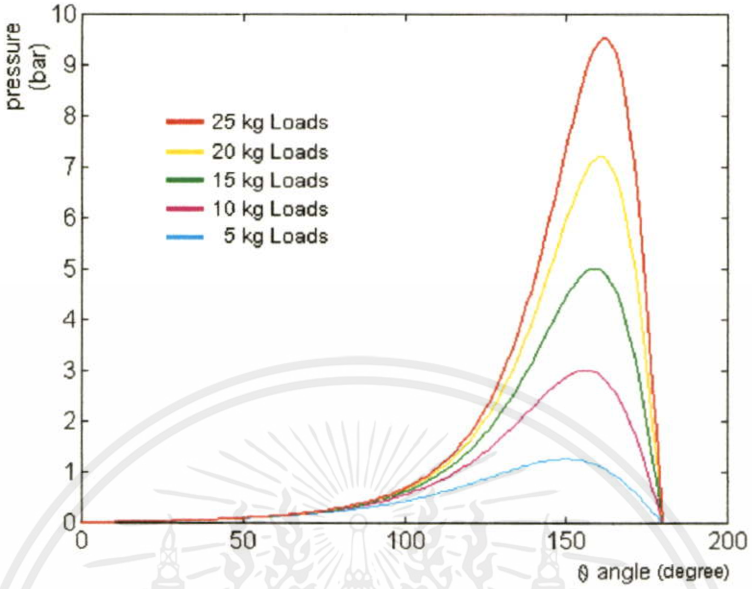
ภาพที่ 3.12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี โดยใช้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

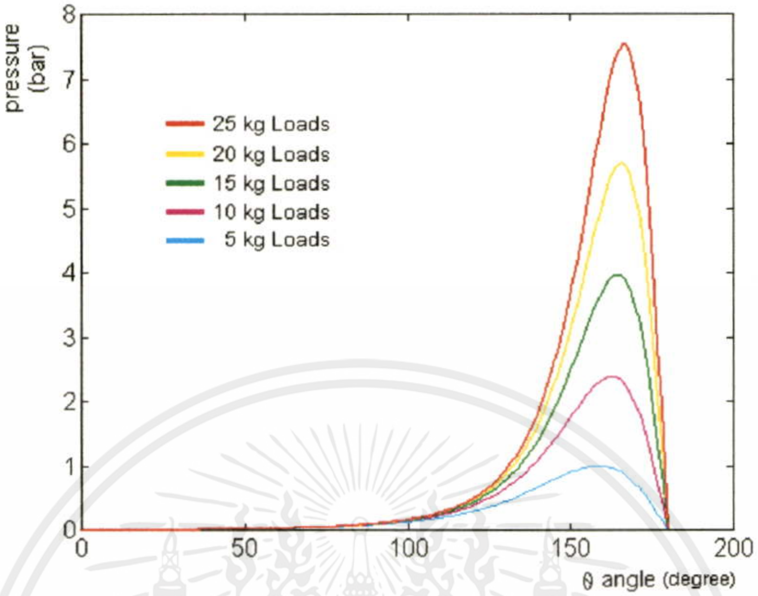
ภาพที่ 3.13



การกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี โดยใช้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

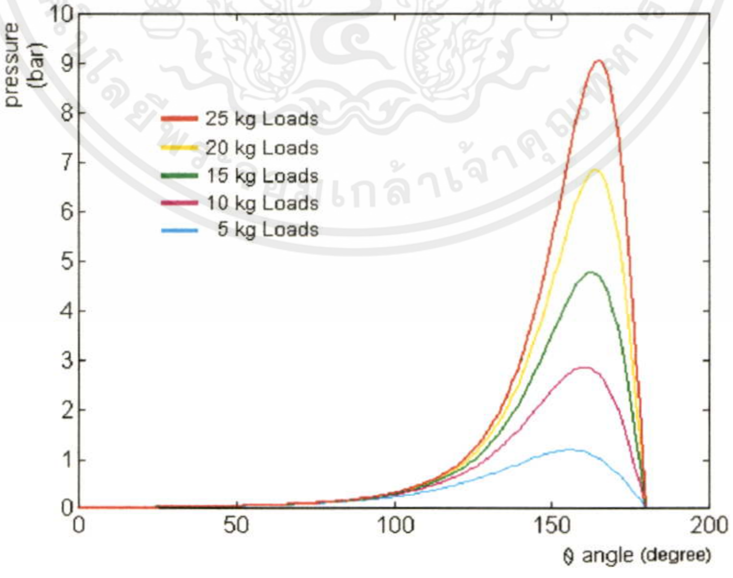
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3.14



การกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี โดยใช้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

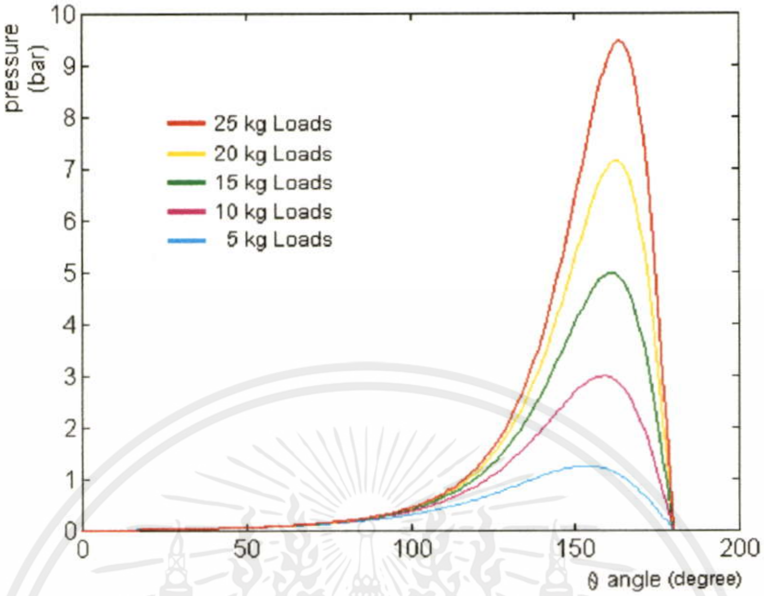
ภาพที่ 3.15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

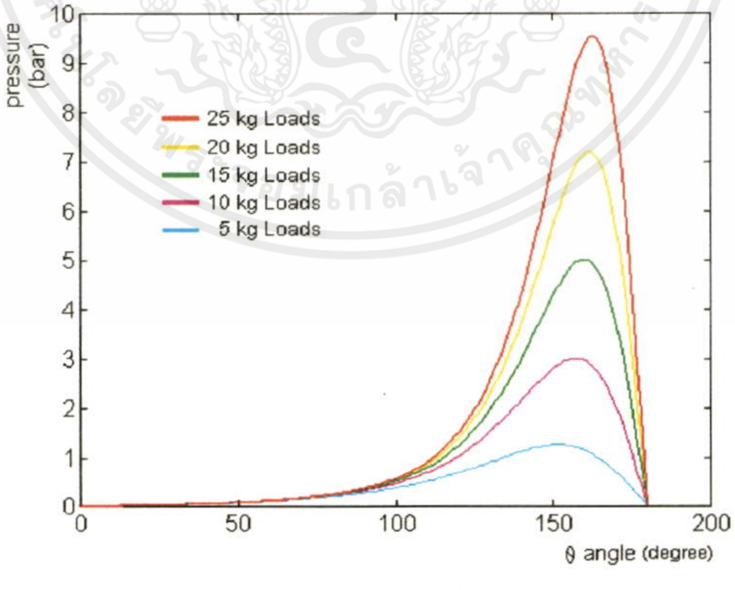
การกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี โดยใช้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 3.16



การกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี โดยใช้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

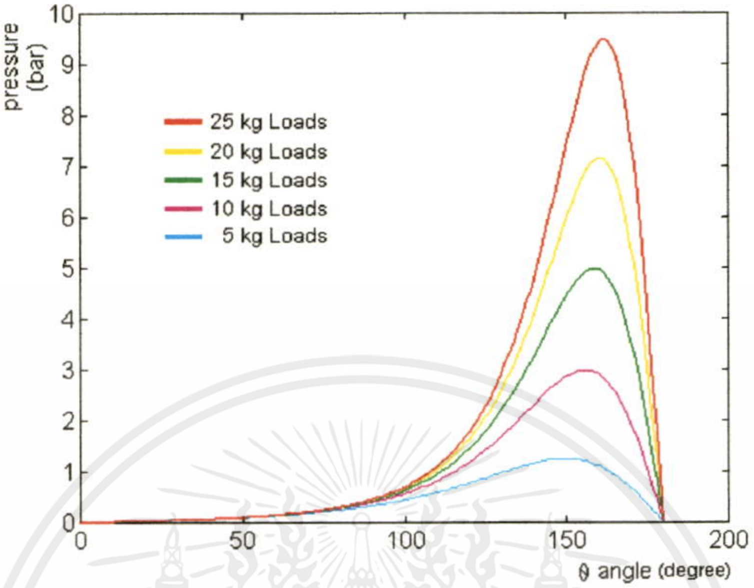
ภาพที่ 3.17



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี โดยใช้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

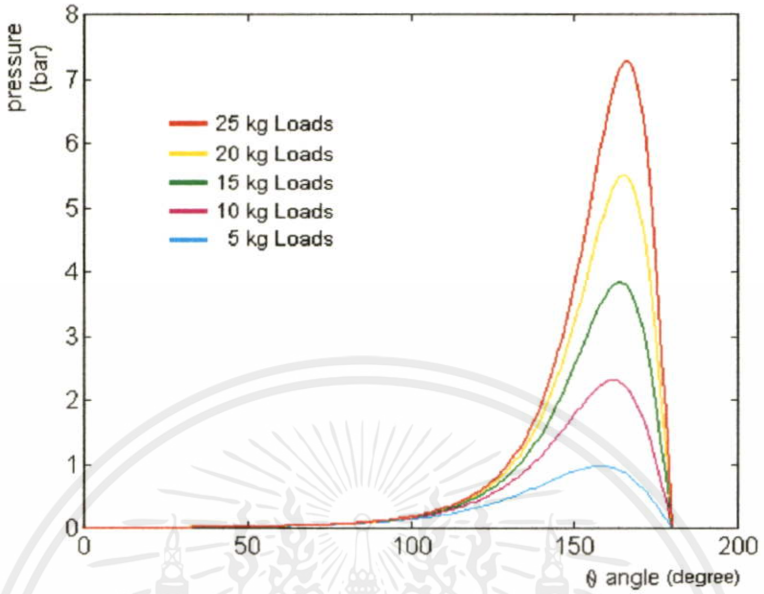
ภาพที่ 3.18



การกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี โดยใช้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

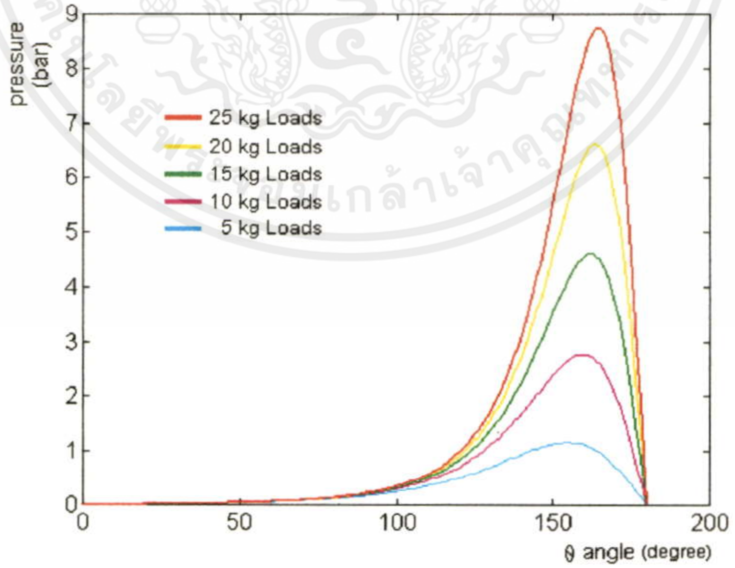
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3.19



การกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี โดยใช้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

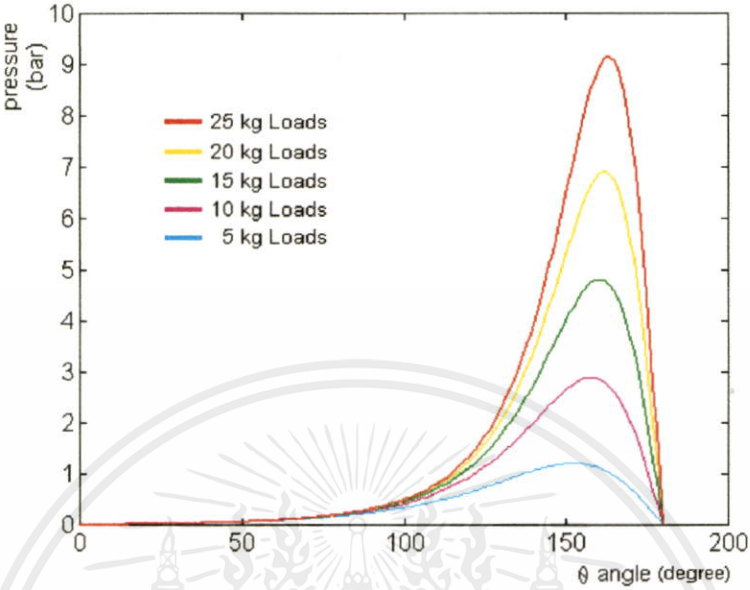
ภาพที่ 3.20



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

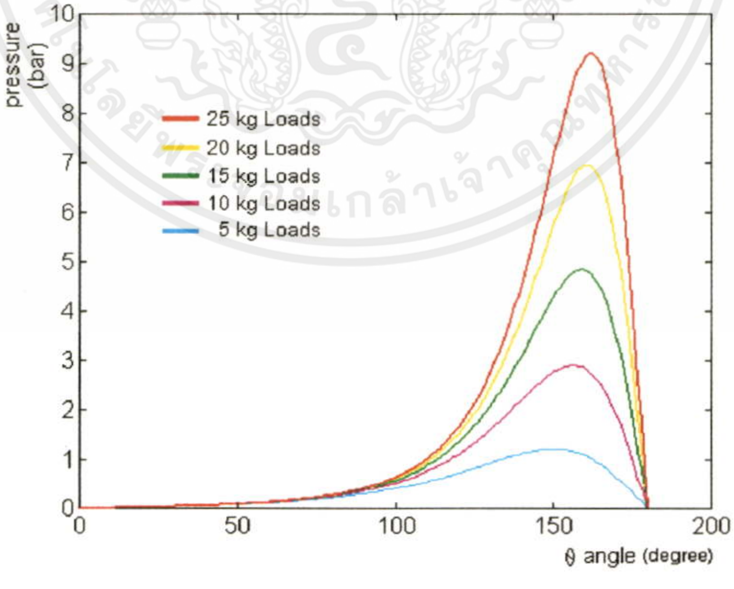
การกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี โดยใช้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 3.21



การกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี โดยใช้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

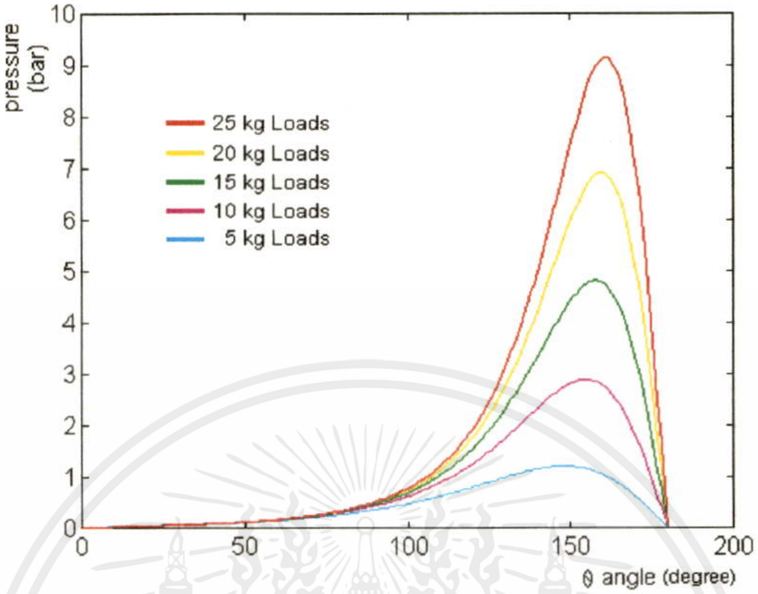
ภาพที่ 3.22



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี โดยใช้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 3.23



การกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี โดยใช้คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การทดลองหาสมรรถนะของกาบรองลื่นเพลากลม

4.1 หลักการทดลองหาสมรรถนะของกาบรองลื่นเพลากลม

การทดลองหาสมรรถนะของกาบรองลื่นเพลากลมสำหรับกาบรองลื่นรูปวงกลมและรูปวงรีชนิดครึ่งวง โดยมีมอเตอร์ขับเพลาหมุนอยู่ในกาบรองลื่น มีน้ำหนักถ่วง เพื่อให้เกิดภาระต่อเพลาและกาบรองลื่น ขณะที่เพลาหมุนเติมน้ำมันหล่อลื่น ที่ผสมสารเติมแต่ง (Additive) เพื่อให้น้ำหล่อลื่นอยู่ในสภาพ Psudo plastic หรือเป็นน้ำมันประเภท นัน-นิวตอเนียน เข้าไปในระหว่างกาบรองลื่นและเพลา ในการทดลองจะเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ขับเพลาให้มีความเร็วรอบต่างๆ กัน เปลี่ยนขนาดของน้ำหนักถ่วงเพลาเพื่อเปลี่ยนขนาดของภาระที่เกิดกับเพลา เปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดหลายๆ ระดับความหนืด ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของสารเติมแต่ง ซึ่งได้แก่ Poly isobutylene (PIB) ทำการวัดความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ในกาบรองลื่นที่สภาวะต่างๆ โดยใช้เครื่องวัดความดันชนิด Pressure Sensor 5 ตำแหน่งทำมุม 30^0 ซึ่งกันและกันวัดระยะห่างระหว่างกาบรองลื่น และเพลา ด้วย Gap Sensor สองตำแหน่งทำมุม 90^0 ซึ่งกันและกัน รูปเครื่องมือทดลองแสดงไว้ในภาพที่ 4.1

4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.2.1 กาบรองลื่น (Bearing)

กาบรองลื่นที่ใช้ในการทดลองจะมีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมและครึ่งวงรี มีรายละเอียดดังนี้

1) กาบรองลื่นชนิดครึ่งวงกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 50.3 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร (กาบรองลื่นสั้น)

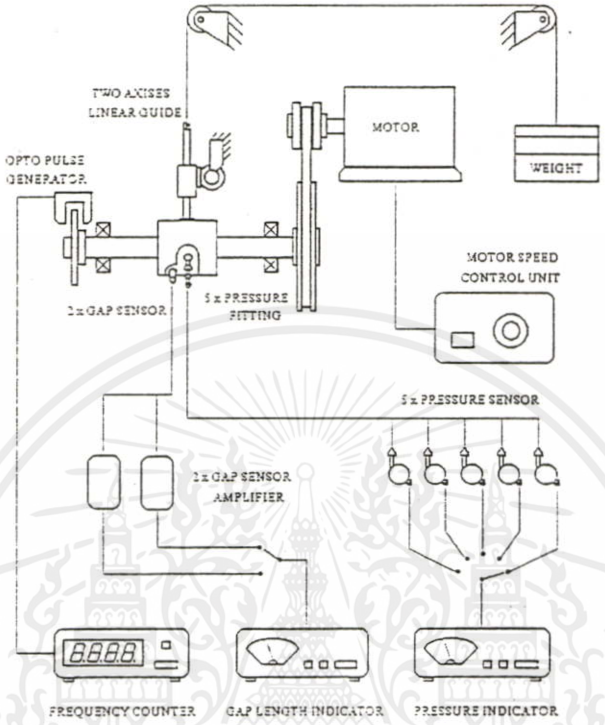
2) กาบรองลื่นชนิดครึ่งวงกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 50.3 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร (กาบรองลื่นมีความยาวจำกัด)

3) กาบรองลื่นชนิดครึ่งวงรี ขนาดของแกนเมเยอร์ของรู เท่ากับ 51.0 มิลลิเมตร ขนาดของแกนไมเนอร์ของรูเท่ากับ 50.5 มิลลิเมตร กาบรองลื่นยาว 50 มิลลิเมตร

4) กาบรองลื่นชนิดครึ่งวงรี ขนาดของแกนเมเยอร์ของรูเท่ากับ 50.75 มิลลิเมตร ขนาดของแกนไมเนอร์ของรู เท่ากับ 50.5 มิลลิเมตร กาบรองลื่นยาว 50 มิลลิเมตร

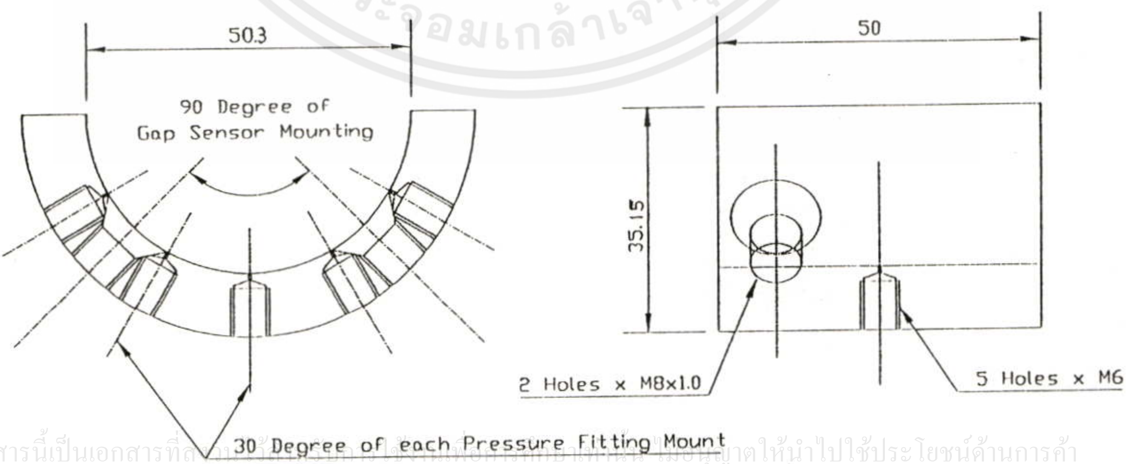
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.1



ลักษณะของชุดทดลองหาสมรรถนะของกาบรองลื่นเพลากลม

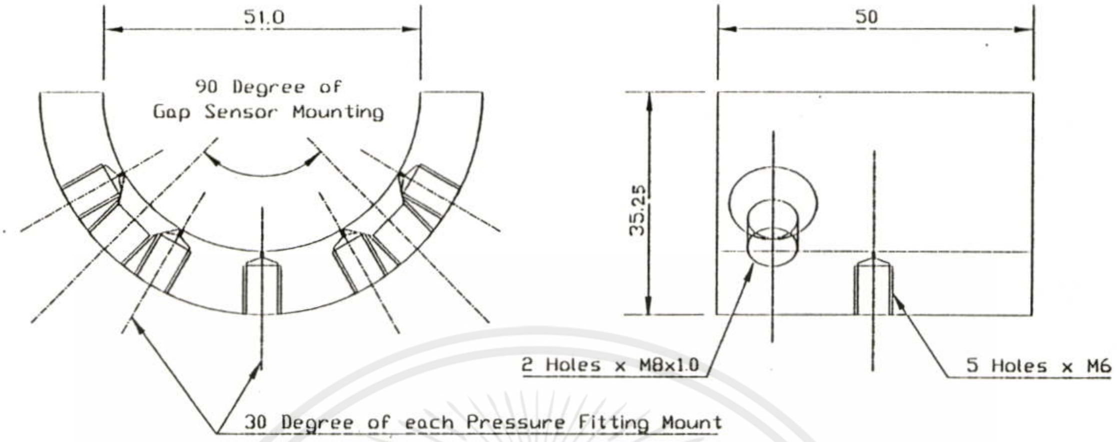
ภาพที่ 4.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของกาบรองลื่นชนิดครึ่งวงกลม

ภาพที่ 4.3

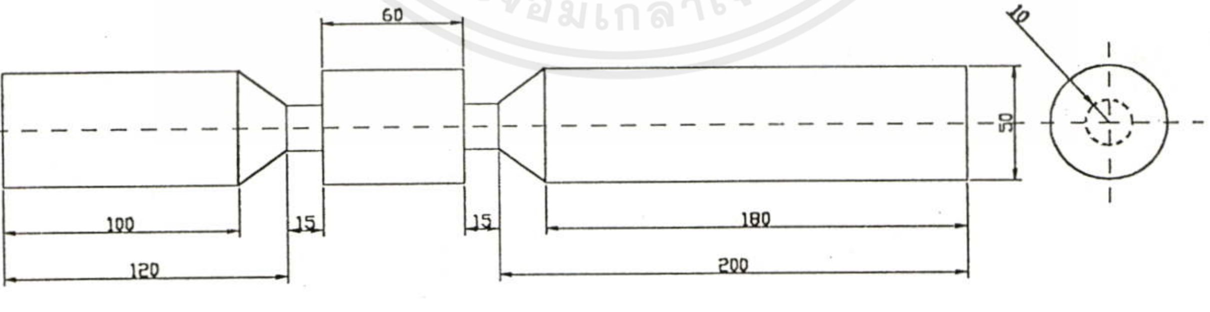


ลักษณะของกาบรองลื่นชนิดครึ่งวงรี

4.2.2 เพลา (Journal)

เพลาที่ใช้ในการทดลองจะใช้เพลามีขนาดเดียวคือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มิลลิเมตร มีความยาวมากกว่าความยาวของกาบรองลื่น

ภาพที่ 4.4



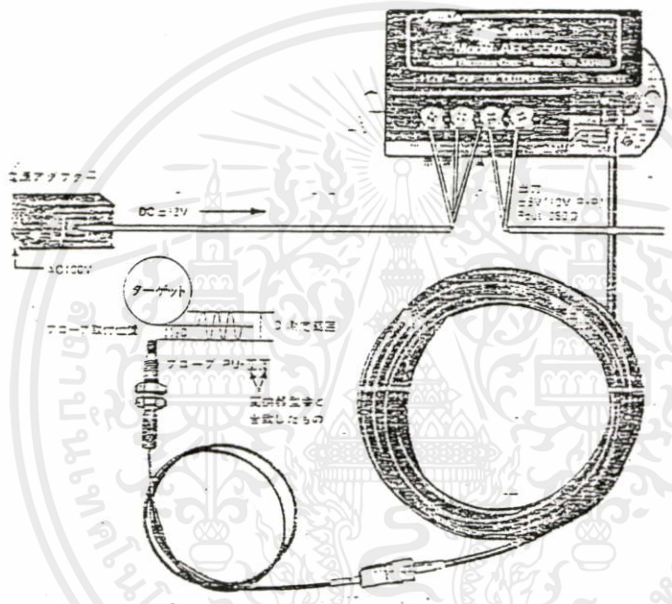
ลักษณะของเพลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 อุปกรณ์วัดความหนาฟิล์มน้ำมัน

การวัดความหนาฟิล์มน้ำมัน หรือระยะช่องว่างระหว่าง เพลา และกาบรองลื่นใช้ Gap Sensor ซึ่งอาศัยหลักการสูญเสียเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลวนที่มีความถี่สูง (high frequency eddy current loss) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดได้ทั้งในสภาพสถิตย์และสภาพพลวัต Gap Sensor ที่ใช้เป็นยี่ห้อ AEC รุ่น AEC – 5505 มีลักษณะ และส่วนประกอบดังภาพที่ 4.5

ภาพที่ 4.5



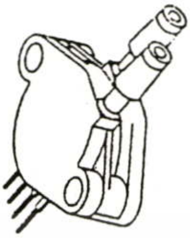
ลักษณะของ Gap Sensor

4.2.4 อุปกรณ์วัดความดัน

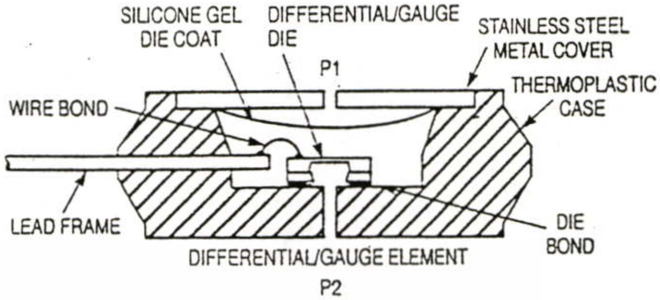
อุปกรณ์วัดความดันที่ใช้ในการทดลองหาสมรรถนะของกาบรองลื่นเพลากลม เป็นแบบ Pressure Sensor ยี่ห้อ Motorolla รุ่น MPX 700 สามารถวัดความดันได้สูงถึง 700 kPa การประกอบยึด Pressure Sensor มีระยะห่างเชิงมุมเท่ากับ 30^0 ซึ่งสามารถพิจารณาตำแหน่งได้จาก ภาพที่ 4.2 และภาพที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

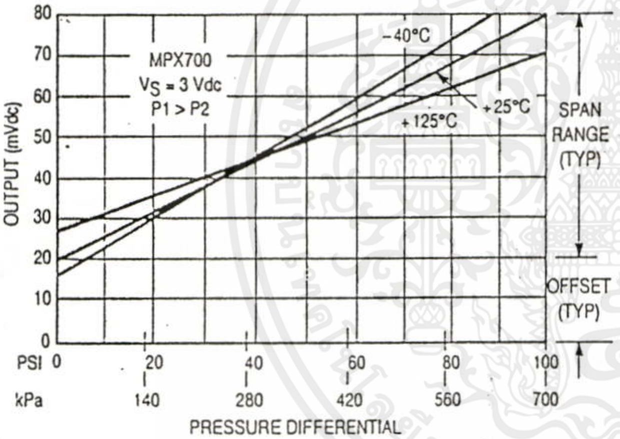
ภาพที่ 4.6



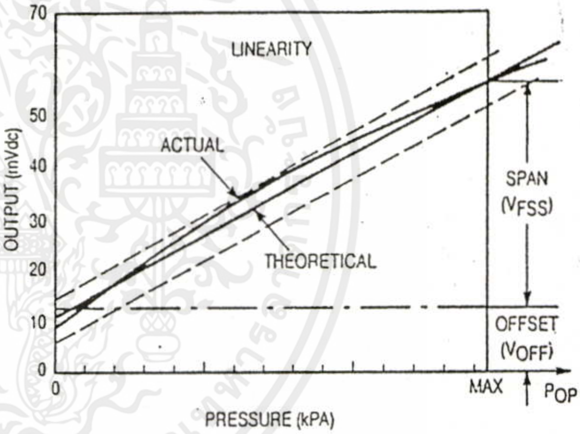
ก.รูปร่างภายนอก



ข.ภาพตัดแสดงรายละเอียดภายใน



ค. Output versus Pressure Differential



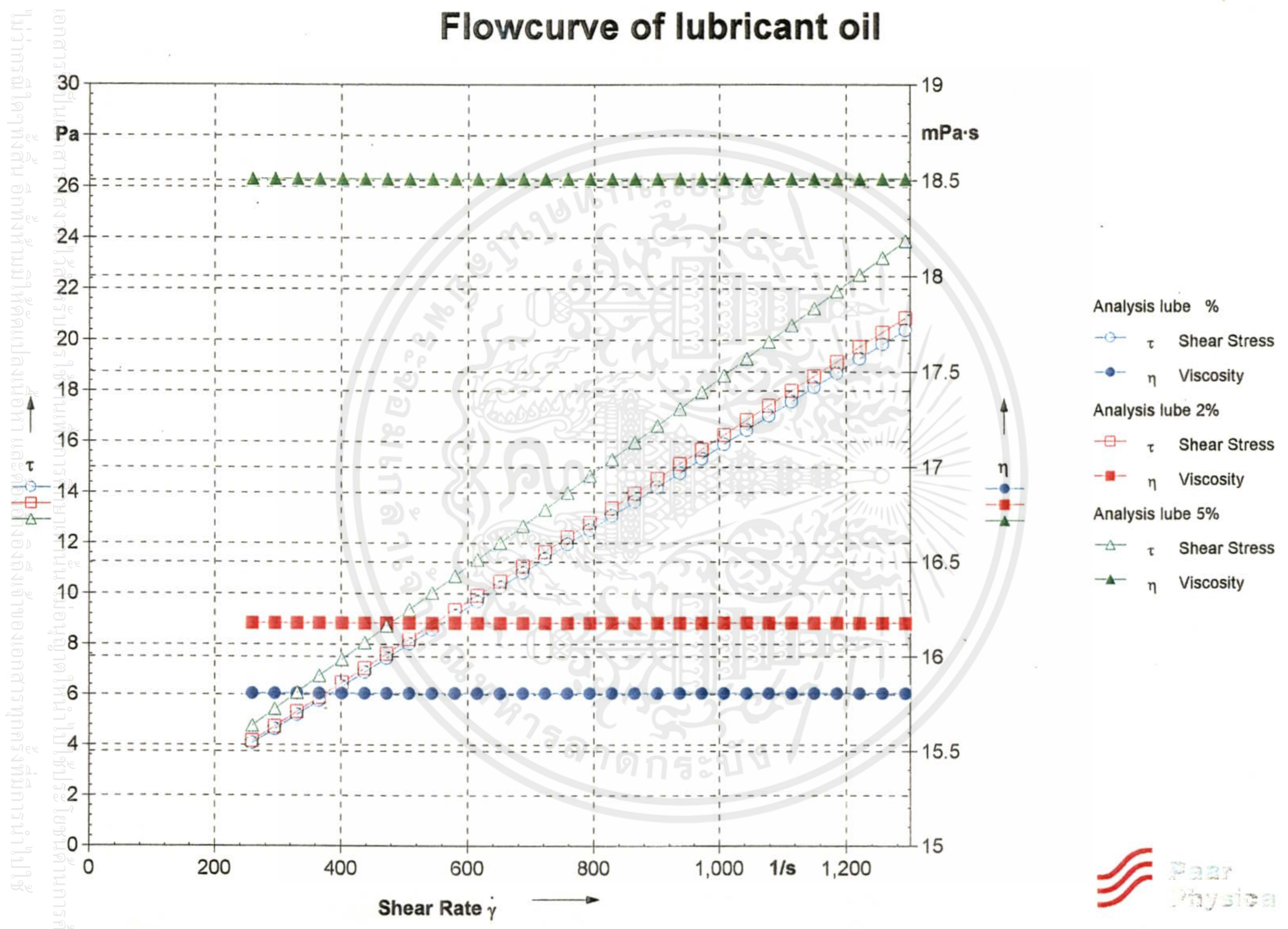
ง.Linearity Specification Comparison

รูปร่างและคุณลักษณะของ Pressure Sensor

4.2.5 น้ำมันหล่อลื่น (Lubricant Oil)

น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE–40 เติมสารเติมแต่ง (Additives) คือ Poly isobutylene (PIB) ในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ 2 เปอร์เซ็นต์ และ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก มีความหนืด 15.8 mPa.S, 16.2 mPa.S และ 18.5 mPa.S ตามลำดับ ซึ่งหาได้จากผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นในภาพที่ 4.7

ภาพที่ 4.7



ผลการทดสอบคุณสมบัติของสารหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 มอเตอร์

มอเตอร์ที่ใช้ในการขับเพลาในกาบรองลื่น เป็นมอเตอร์แบบ Induction Motor ซึ่งสามารถควบคุมความเร็วรอบให้เป็นตามที่ต้องการได้ ตามสมการ

N = (1 – 5) 120 f/p

เมื่อ N = ความเร็วรอบ

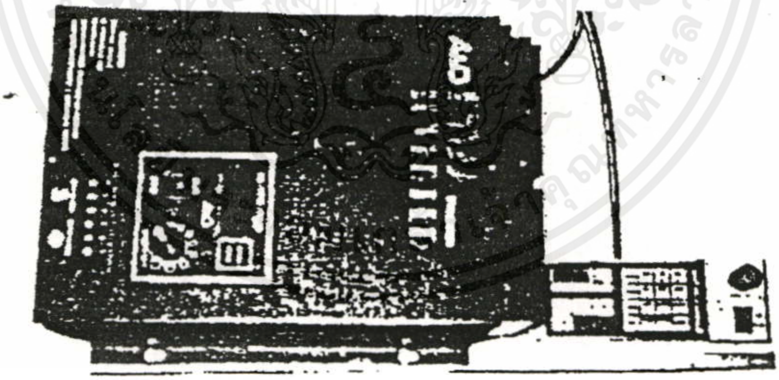
S = ค่า slip

F = ความถี่กระแสไฟฟ้า

P = จำนวน pole

จากสมการ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงความถี่ (f) ความเร็วรอบจะเปลี่ยนจึงต้องใช้อุปกรณ์ในการเปลี่ยนความถี่ของกระแสไฟฟ้า เพื่อปรับความเร็วรอบให้เป็นไปตามข้อกำหนด

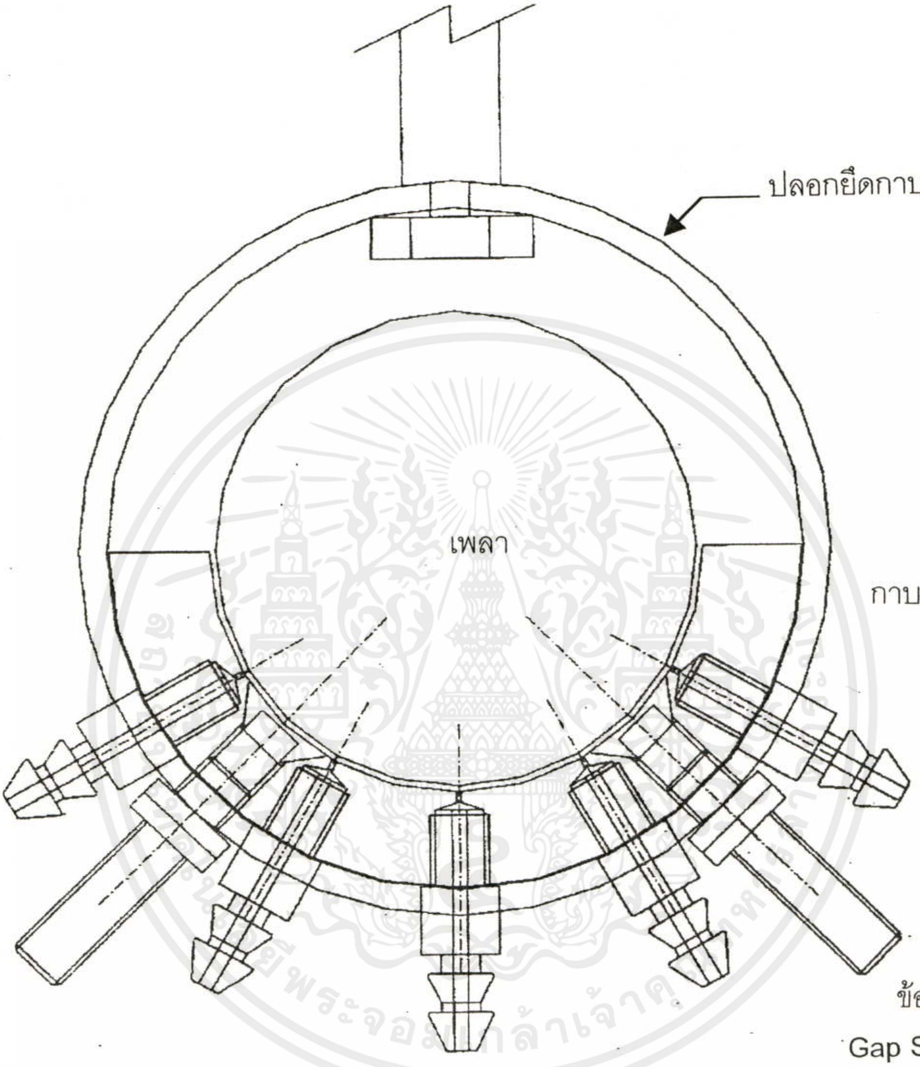
ภาพที่ 4.8



อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.9

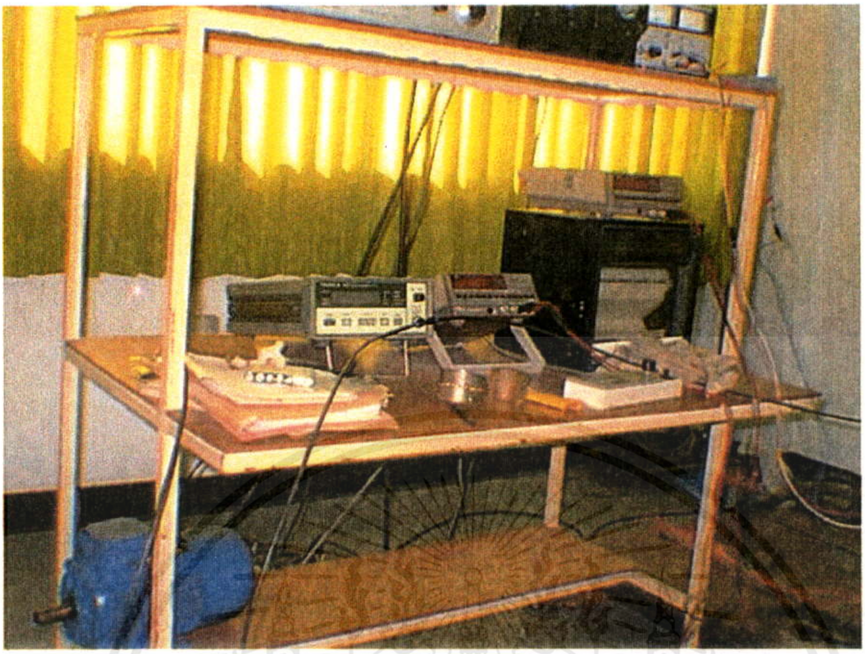


การประกอบกาบรองลื่นชนิดครึ่งวงกับปลอกยึดแขวนและข้อต่อ

Pressure Sensor และ Gap Sensor

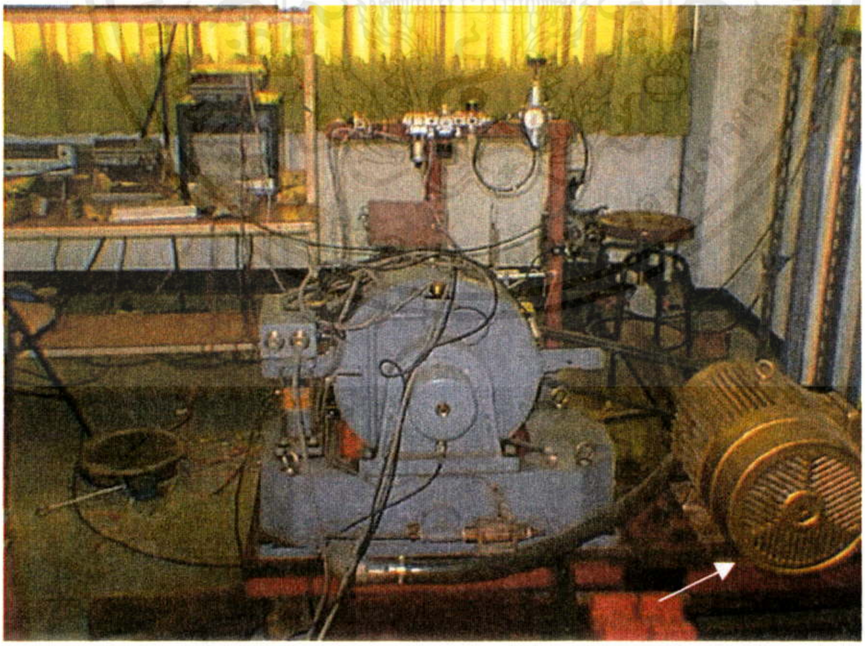
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.10



ชุดอุปกรณ์การทดลอง แสดงเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าแบบต่างๆ

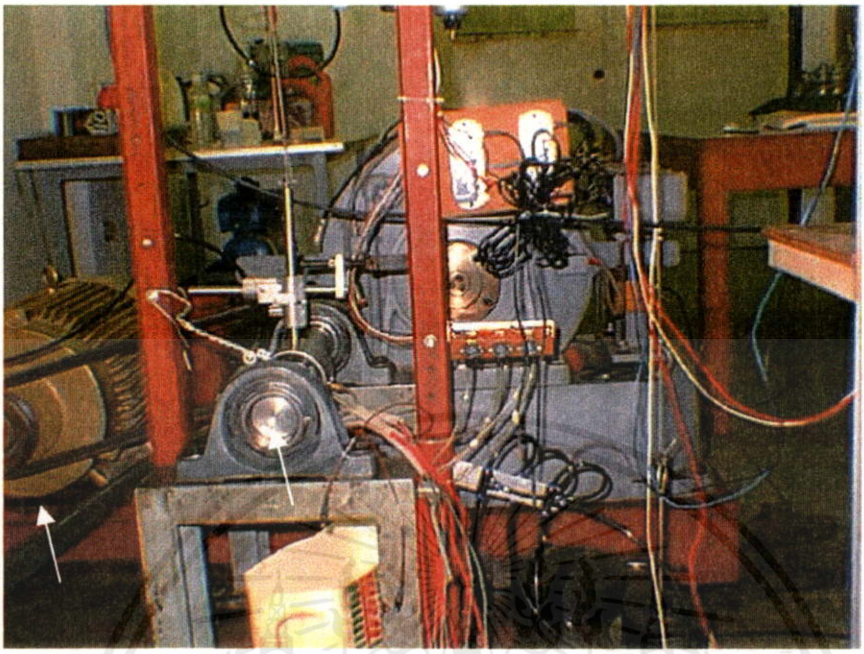
ภาพที่ 4.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม ... อกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

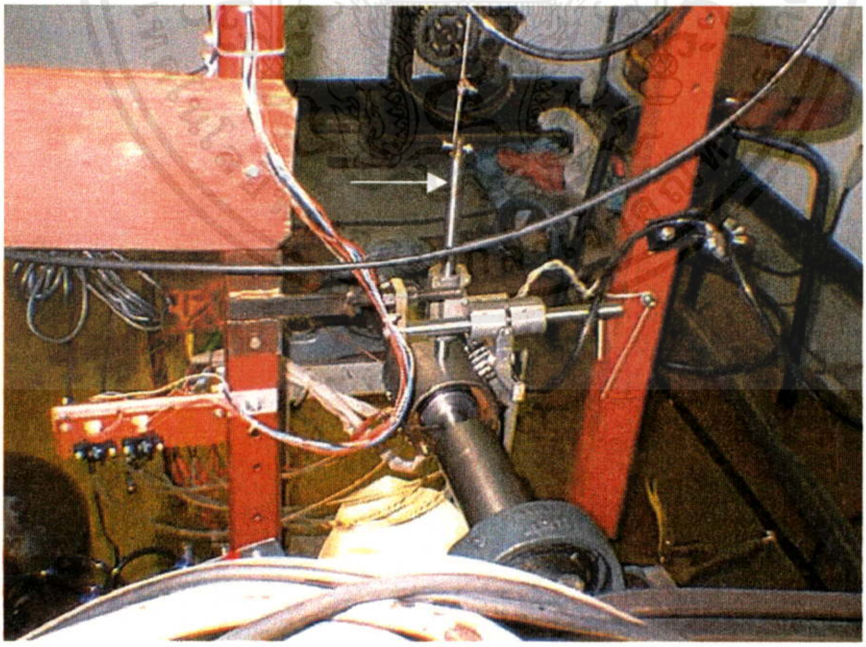
แสดงชุดอุปกรณ์การทดลองพร้อมมอเตอร์

ภาพที่ 4.12



ชุดอุปกรณ์การทดลอง แสดงการต่อมอเตอร์เข้ากับเพลา

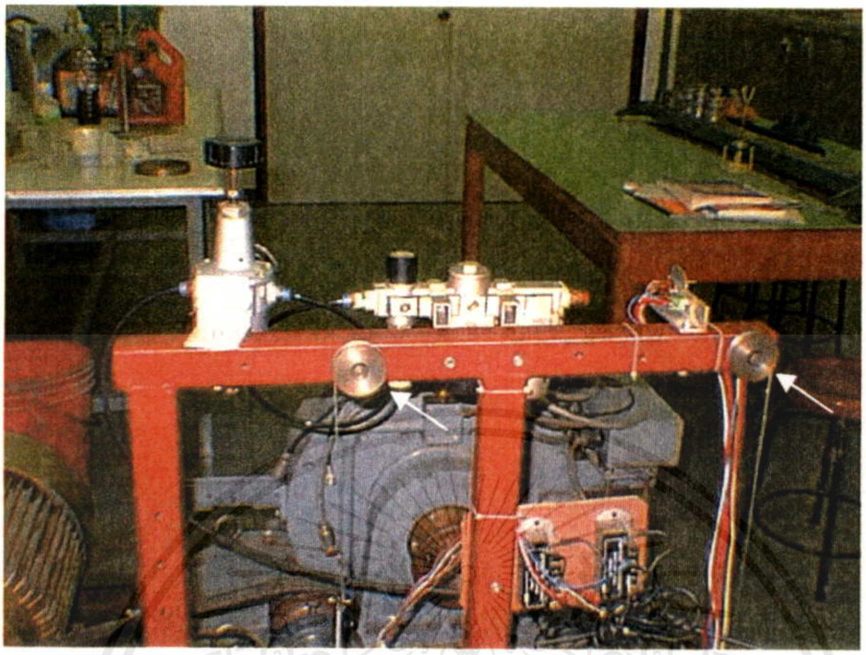
ภาพที่ 4.13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

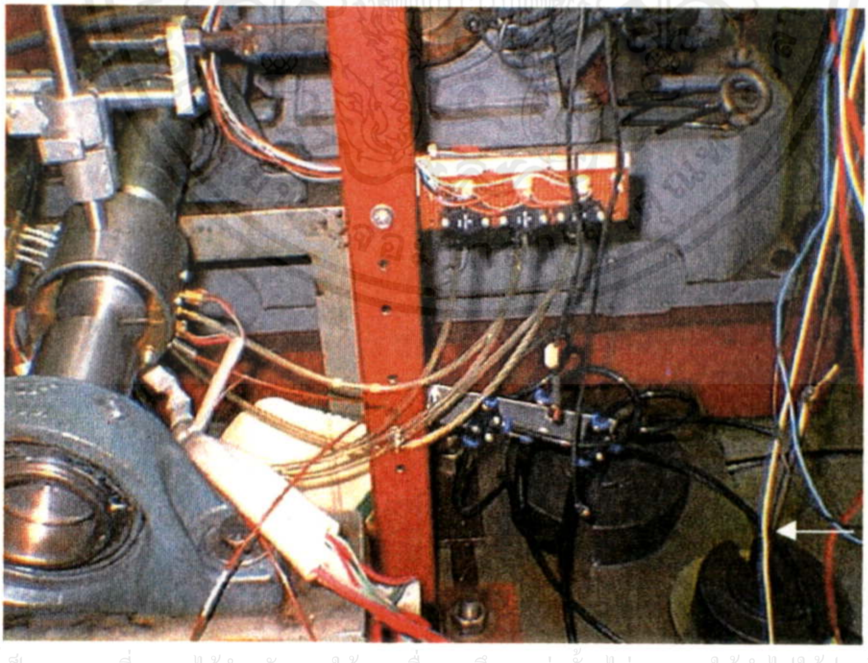
ชุดอุปกรณ์ทดลอง แสดงส่วนต่อจากปลอกแขวนกาบรองลื่นเข้ากับชุดแขวนน้ำหนัก

ภาพที่ 4.14



ชุดอุปกรณ์การทดลองแสดงรอกรองรับชุดแขวนน้ำหนัก

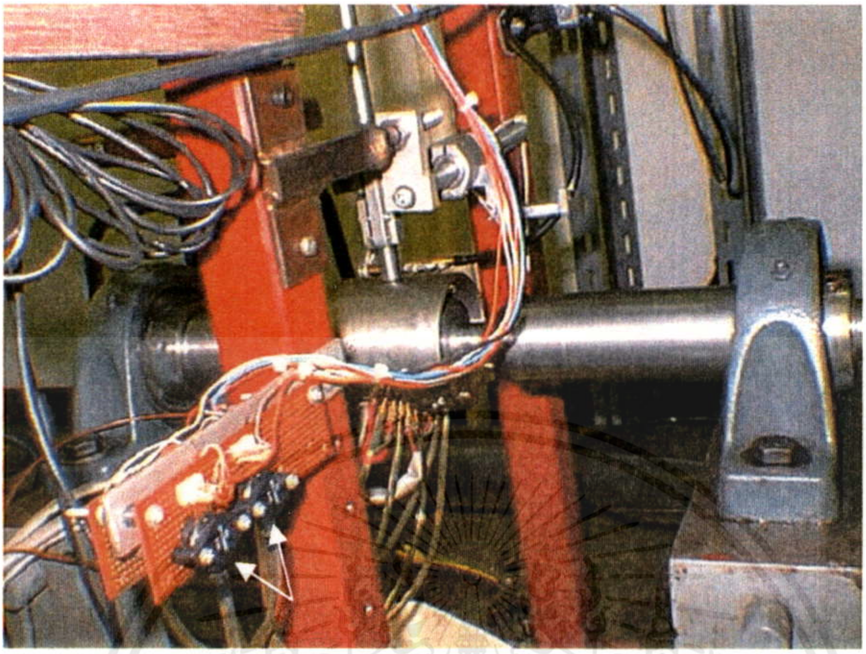
ภาพที่ 4.15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง ... เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

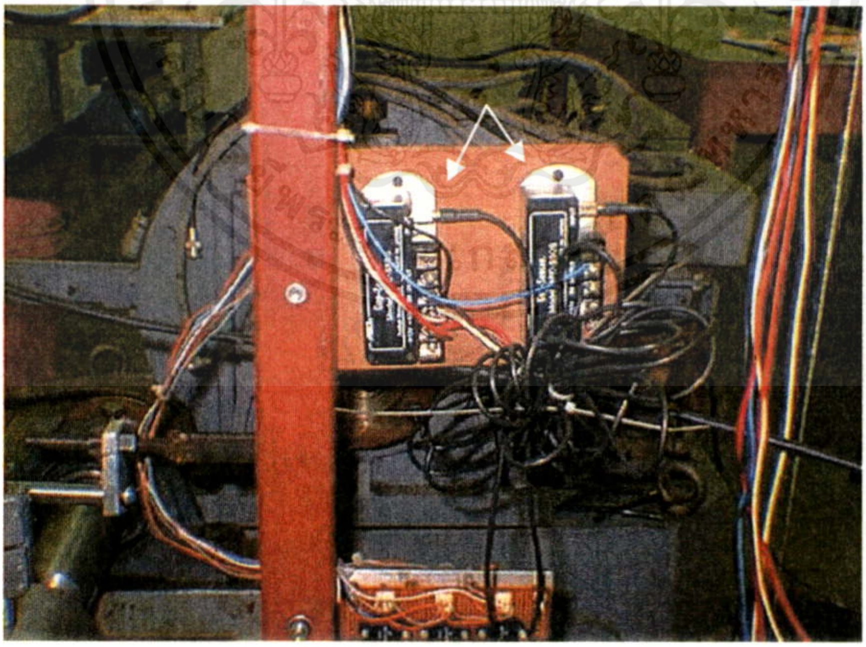
ชุดอุปกรณ์การทดลองแสดงชุดแขวนน้ำหนัก

ภาพที่ 4.16



ชุดอุปกรณ์การทดลอง แสดงตัววัดสัญญาณความดัน

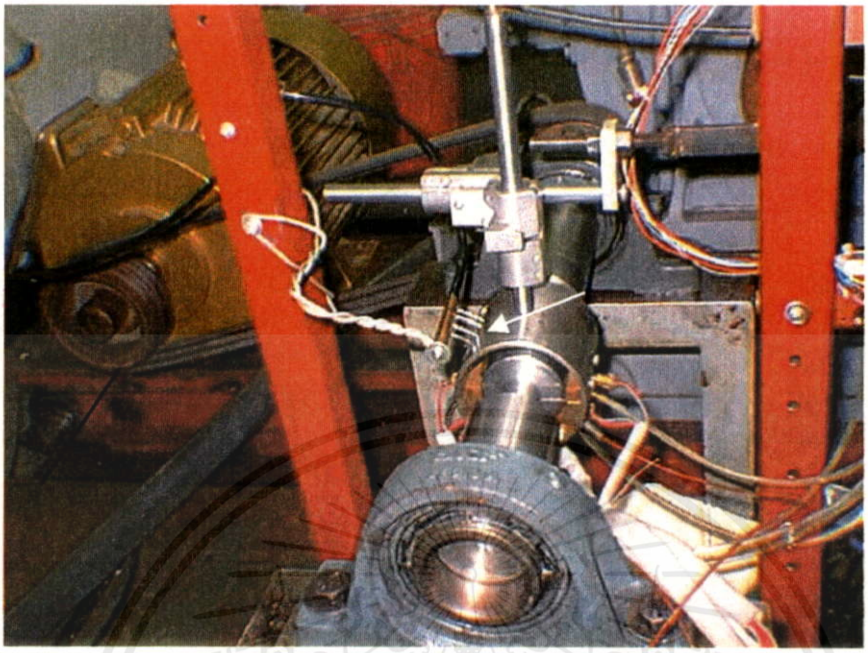
ภาพที่ 4.17



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ทั้งนี้ให้อ้างอิงแหล่งที่มาทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

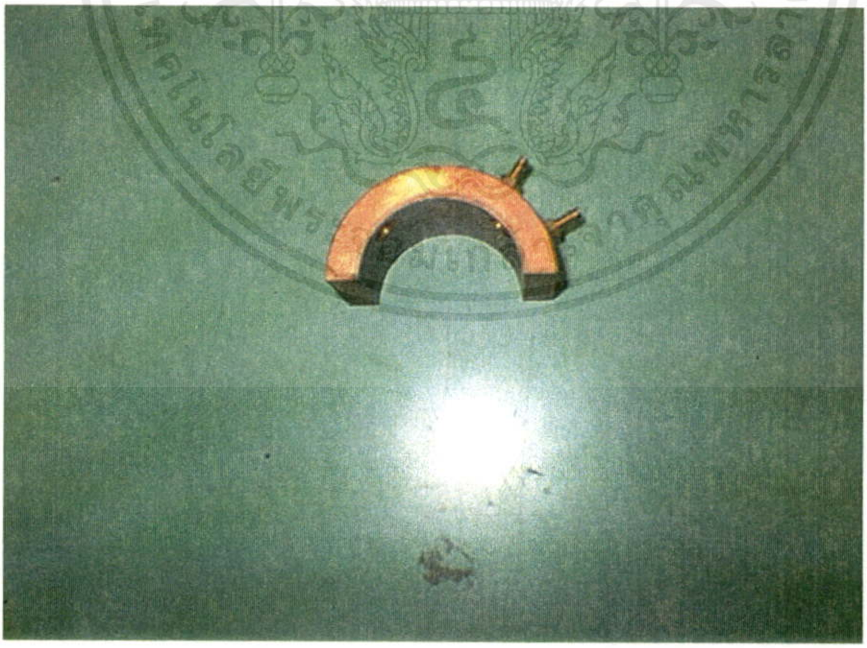
ชุดอุปกรณ์การทดลอง แสดงตัววัดสัญญาณความหนาฟิล์มน้ำมัน

ภาพที่ 4.18



ชุดอุปกรณ์การทดลอง แสดงการปล่อยน้ำมันหล่อลื่นเข้ากาบรองลื่น

ภาพที่ 4.19



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของกาบรองลื่น

4.3 วิธีการทดลองหาสมรรถนะของกาบรองลื่นเพลากลม

1) ประกอบชุดทดลองให้สมบูรณ์ ตามรูปที่ 4.1

2) ปล่อยน้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE – 40 เติม PIB 1%, 2% และ 5% ซึ่งมีความหนืด 15.8 mPa,s 16.2 mPa,s และ 18.5 mPa,s ตามลำดับ เข้าไปในช่องว่างระหว่างกาบรองลื่นและเพลา โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก

3) เปิดสวิตซ์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ควบคุมมอเตอร์ให้หมุนขับเพลา ให้มีความเร็วรอบ 1,000 รอบ/นาที 1,500 รอบ/นาที 2,000 รอบ/นาที 2,500 รอบ/นาที และ 3,000 รอบ/นาที

4) เพิ่มภาระโดยการแขวนน้ำหนักเป็นผลให้เกิดภาระหว่างเพลาและกาบรองลื่น มีขนาดต่างๆ คือ 10 กิโลกรัม 15 กิโลกรัม 20 กิโลกรัม และ 25 กิโลกรัม

5) บันทึกระยะห่าง ระหว่างเพลาและกาบรองลื่น สองตำแหน่งซึ่งทำมุม 90^{o} ซึ่งกันและกัน

6) บันทึกค่าความดันที่ 5 ตำแหน่ง ซึ่งทำมุม 30^{o} ระหว่างกันและกัน

4.4 ผลการทดลอง

จากการทดลองหาสมรรถนะของกาบรองลื่นตามหัวข้อที่ 4.3 ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางและสามารถสร้างแผนภาพแสดงการกระจายความดันในกาบรองลื่นเพลากลมตามลักษณะต่างๆคือ

ตารางที่ 4.1-4.3 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในกรณีกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น (Short Partial Circular Journal Bearing) ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม Poly isobutylene (PIB) 1%, 2% และ 5% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4-4.6 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในกรณีกาบรองลื่นครึ่งวงกลมยาวจำกัด (Finite Partial Circular Journal Bearing) ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม PIB 1%, 2% และ 5% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7-4.9 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในกรณีกาบรองลื่นครึ่งวงรี ขนาดแกนเมเยอร์เท่ากับ 50.75 มิลลิเมตร ขนาดแกนไมเนอร์เท่ากับ 50.5 มิลลิเมตร มีความยาว 50 มิลลิเมตร (Finite Partial Elliptical Journal Bearing) ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม PIB 1%, 2% และ 5% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10-4.12 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในกรณีกาบรองลื่นครึ่งวงรี ขนาดแกนเมเยอร์เท่ากับ 51.0 มิลลิเมตร ขนาดแกนไมเนอร์เท่ากับ 50.5 มิลลิเมตร มีความยาว 50

มิลลิเมตร (Finite Partial Elliptical Journal Bearing) ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม PIB 1%, 2% และ 5%

รูปที่ 4.27-4.41 แสดงการกระจายของความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น (Short Partial Circular Journal Bearing) เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม ความเร็วของเพลา 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม PIB 1%, 2% และ 5%

รูปที่ 4.42-4.56 แสดงการกระจายของความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมยาวจำกัด (Finite Partial Circular Journal Bearing) เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม ความเร็วของเพลา 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม PIB 1%, 2% และ 5%

รูปที่ 4.57-4.71 แสดงการกระจายของความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงรี ขนาดแกนเมเยอร์เท่ากับ 50.75 มิลลิเมตร ขนาดแกนไมเนอร์เท่ากับ 50.5 มิลลิเมตร มีความยาวจำกัด (Finite Partial Elliptical Journal Bearing) เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม ความเร็วของเพลา 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม PIB 1%, 2% และ 5%

รูปที่ 4.72-4.86 แสดงการกระจายของความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงรี ขนาดแกนเมเยอร์เท่ากับ 51.0 มิลลิเมตร ขนาดแกนไมเนอร์เท่ากับ 50.5 มิลลิเมตร มีความยาวจำกัด (Finite Partial Elliptical Journal Bearing) เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม ความเร็วของเพลา 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม PIB 1%, 2% และ 5%

รูปที่ 4.87-4.101 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของความดัน ที่ได้จากการทดลองและการคำนวนทางทฤษฎี สำหรับกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น (Short Partial Circular Journal Bearing) เส้นผ่านศูนย์กลางของกาบรองลื่น และความยาวเท่ากับ 50.3 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร ตามลำดับ เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลากลมเท่ากับ 50.0 มิลลิเมตร เมื่อมีภาระ 10-25 กิโลกรัม และความเร็วรอบของเพลาเท่ากับ 1000-3000 RPM ใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE-40 ผสม PIB 1%, 2% และ 5%

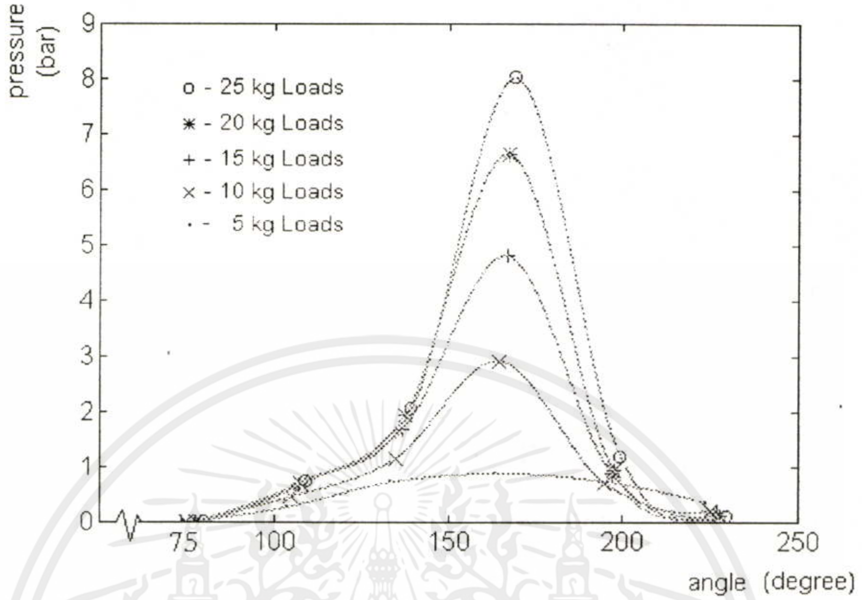
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลจากการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น
โดยใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1%

LOAD (kg)	SPEED (x 100 rpm)	PRESSURE (bar)					GAP LENGTH (mm)	
		P1	P2	P3	P4	P5	H1	H2
5	10	0.27	0.73	0.88	0.75	0.35	0.097	0.121
5	15	0.29	0.75	1.01	0.76	0.35	0.093	0.119
5	20	0.31	0.81	1.14	0.77	0.32	0.089	0.117
5	25	0.33	0.87	1.3	0.77	0.32	0.086	0.116
5	30	0.34	0.89	1.46	0.78	0.31	0.082	0.114
10	10	0.46	1.15	2.92	0.72	0.21	0.073	0.106
10	15	0.5	1.22	3.08	0.78	0.21	0.071	0.105
10	20	0.56	1.29	3.33	0.82	0.22	0.069	0.105
10	25	0.61	1.35	3.61	0.88	0.21	0.068	0.104
10	30	0.68	1.48	3.97	0.94	0.2	0.066	0.104
15	10	0.69	1.69	4.81	0.89	0.17	0.065	0.097
15	15	0.7	1.81	4.99	0.96	0.17	0.064	0.097
15	20	0.74	1.92	5.24	1.07	0.16	0.064	0.098
15	25	0.77	1.99	2.61	1.11	0.16	0.063	0.098
15	30	0.79	2.05	6.13	1.15	0.15	0.06	0.098
20	10	0.72	1.94	6.64	0.94	0.13	0.062	0.094
20	15	0.75	1.99	6.81	0.99	0.12	0.062	0.093
20	20	0.77	2.07	7.11	1.08	0.12	0.061	0.092
20	25	0.79	2.08	7.48	1.15	0.12	0.061	0.091
20	30	0.81	2.11	7.95	1.21	0.11	0.061	0.09
25	10	0.75	2.05	8.02	1.19	0.1	0.061	0.089
25	15	0.79	2.09	8.21	1.23	0.09	0.061	0.088
25	20	0.81	2.14	8.56	1.31	0.09	0.061	0.087
25	25	0.83	2.17	9.09	1.38	0.09	0.06	0.087
25	30	0.84	2.19	9.67	1.46	0.09	0.06	0.085

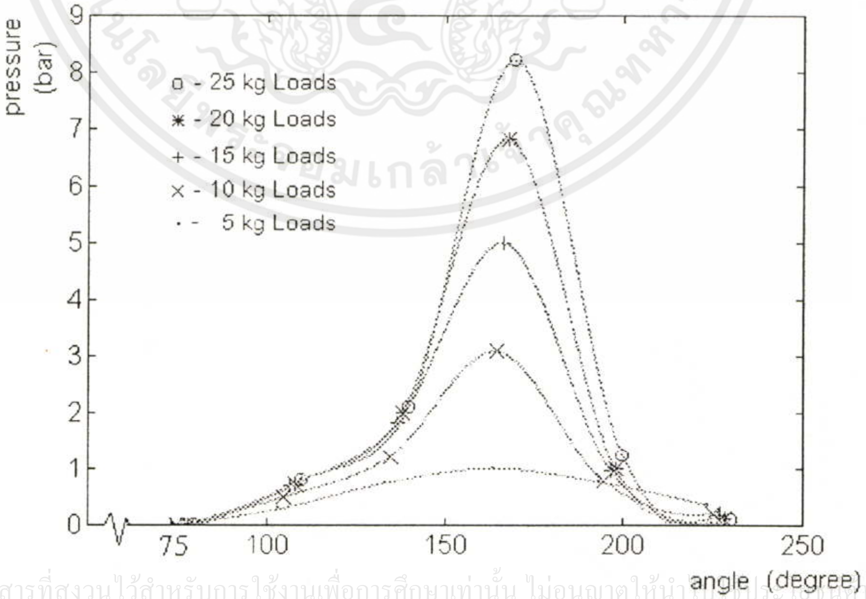
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.20



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

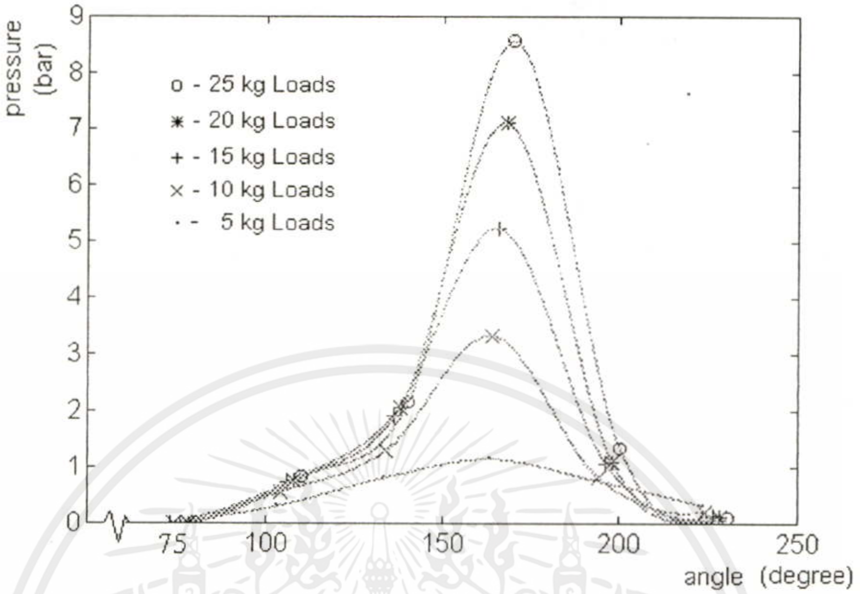
ภาพที่ 4.21



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

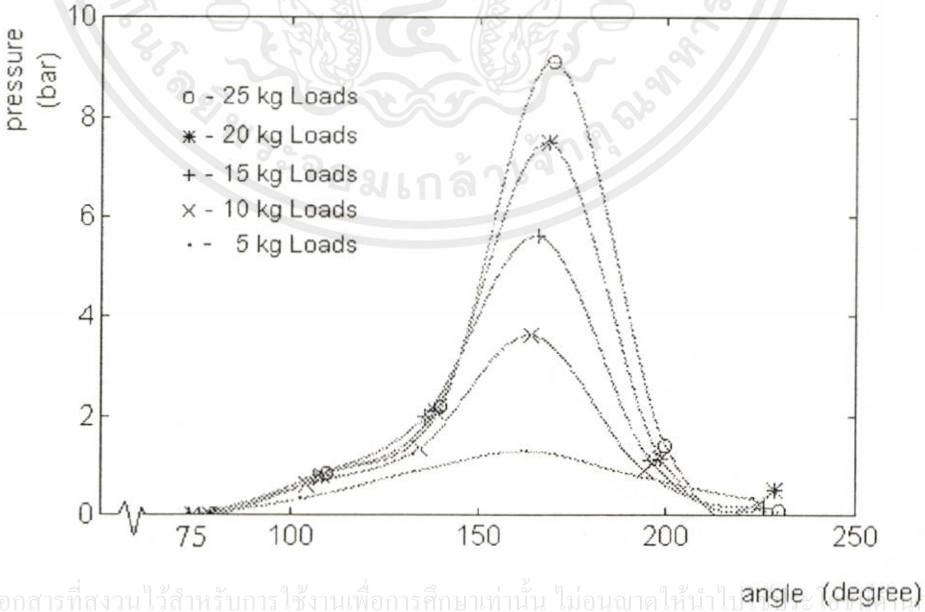
การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.22



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

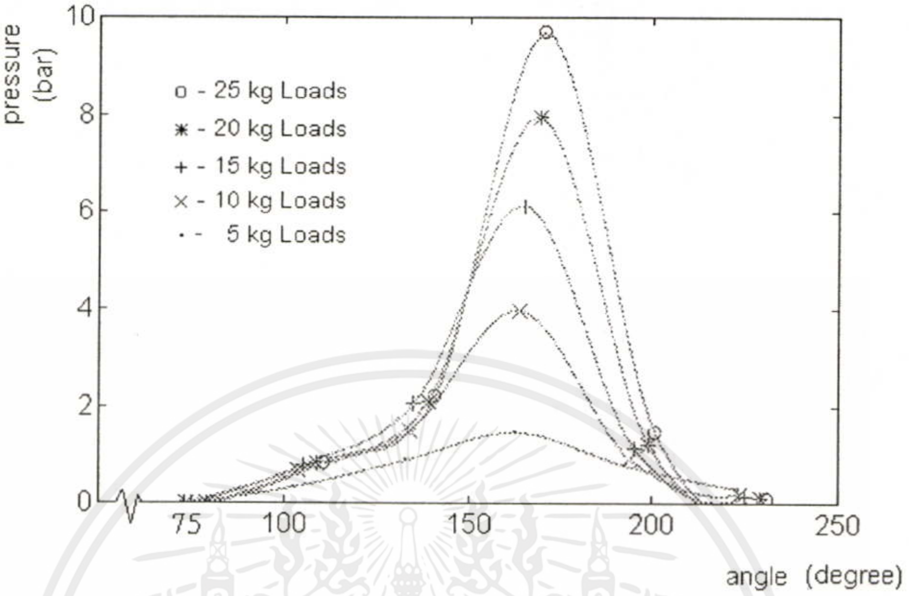
ภาพที่ 4.23



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.24



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

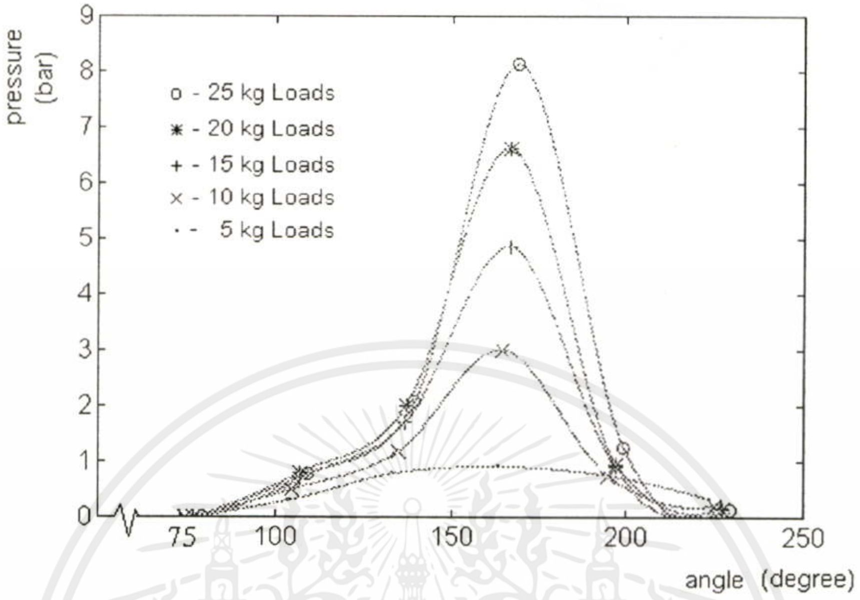
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลจากการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น
น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2%

LOAD (kg)	SPEED (x 100 rpm)	PRESSURE (bar)					GAP LENGTH (mm)	
		P1	P2	P3	P4	P5	H1	H2
5	10	0.3	0.79	0.91	0.76	0.38	0.097	0.121
5	15	0.35	0.84	1.04	0.76	0.33	0.093	0.119
5	20	0.41	0.88	1.2	0.79	0.32	0.089	0.117
5	25	0.44	0.92	1.32	0.81	0.31	0.085	0.116
5	30	0.48	0.95	1.51	0.83	0.31	0.082	0.114
10	10	0.5	1.18	3.01	0.75	0.21	0.073	0.106
10	15	0.58	1.25	3.09	0.79	0.21	0.071	0.105
10	20	0.64	1.37	3.38	0.84	0.19	0.069	0.105
10	25	0.69	1.43	3.64	0.89	0.19	0.067	0.104
10	30	0.72	1.59	3.99	0.95	0.19	0.065	0.104
15	10	0.72	1.71	4.85	0.92	0.18	0.065	0.097
15	15	0.74	1.84	5.09	0.98	0.18	0.064	0.097
15	20	0.79	1.96	5.23	1.05	0.18	0.064	0.098
15	25	0.82	2.07	5.79	1.11	0.18	0.063	0.098
15	30	0.84	2.19	6.3	1.19	0.17	0.061	0.099
20	10	0.8	1.99	6.61	0.94	0.14	0.062	0.095
20	15	0.82	2.07	6.85	1.01	0.14	0.062	0.093
20	20	0.84	2.13	7.2	1.08	0.13	0.061	0.092
20	25	0.85	2.2	7.64	1.15	0.13	0.061	0.091
20	30	0.86	2.24	8.03	1.26	0.13	0.061	0.09
25	10	0.76	2.07	8.13	1.23	0.11	0.061	0.089
25	15	0.79	2.14	8.34	1.31	0.09	0.061	0.088
25	20	0.83	2.23	8.66	1.38	0.09	0.06	0.087
25	25	0.88	2.31	9.3	1.42	0.09	0.06	0.086
25	30	0.9	2.37	9.89	1.57	0.09	0.059	0.085

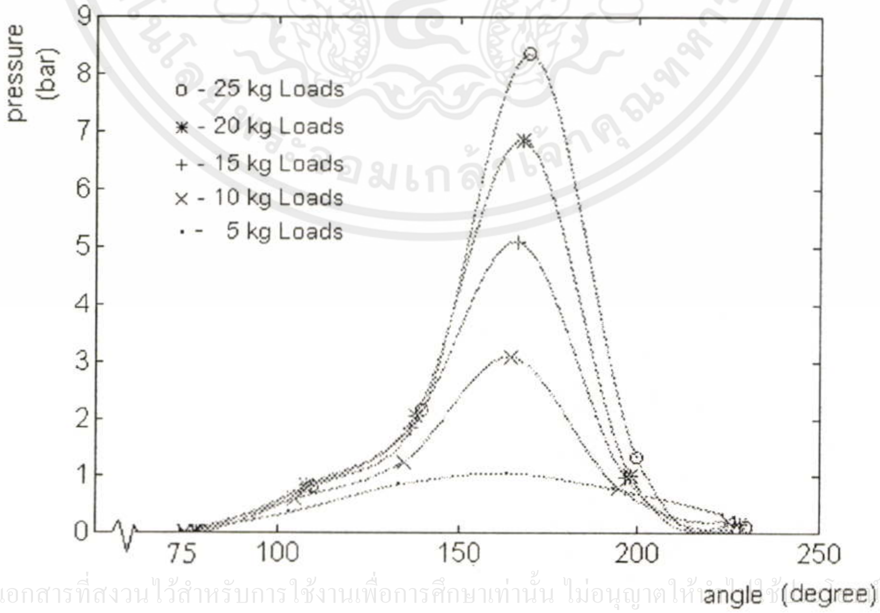
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.25



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

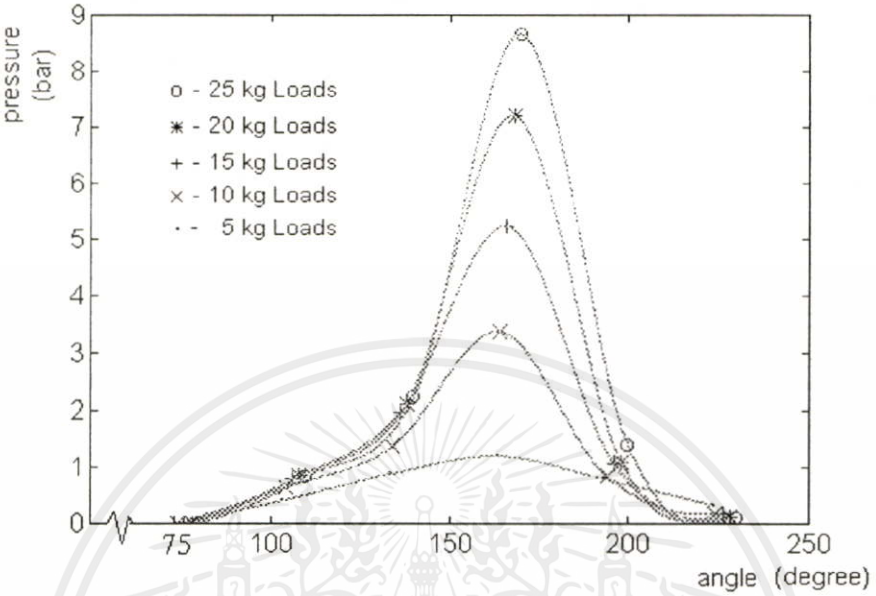
ภาพที่ 4.26



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

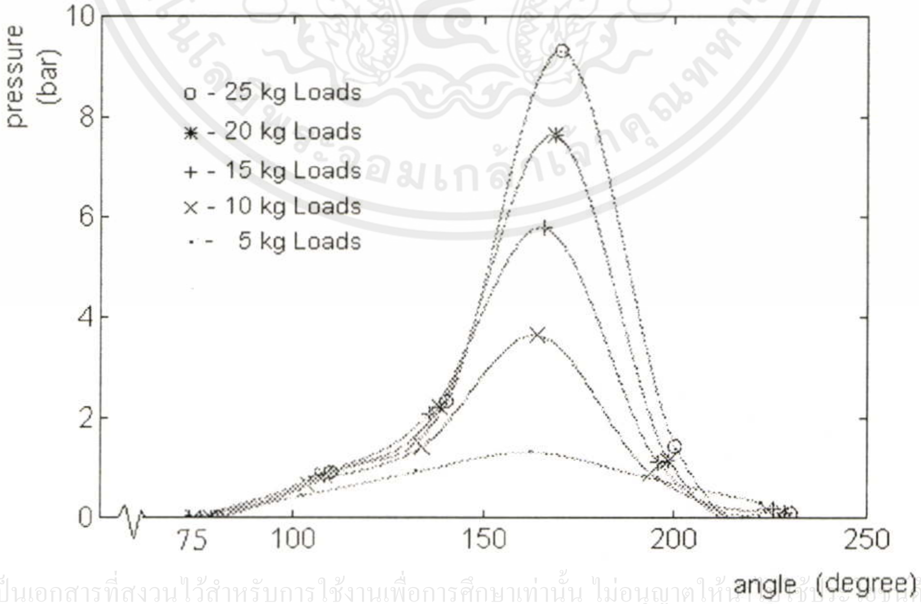
การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.27



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

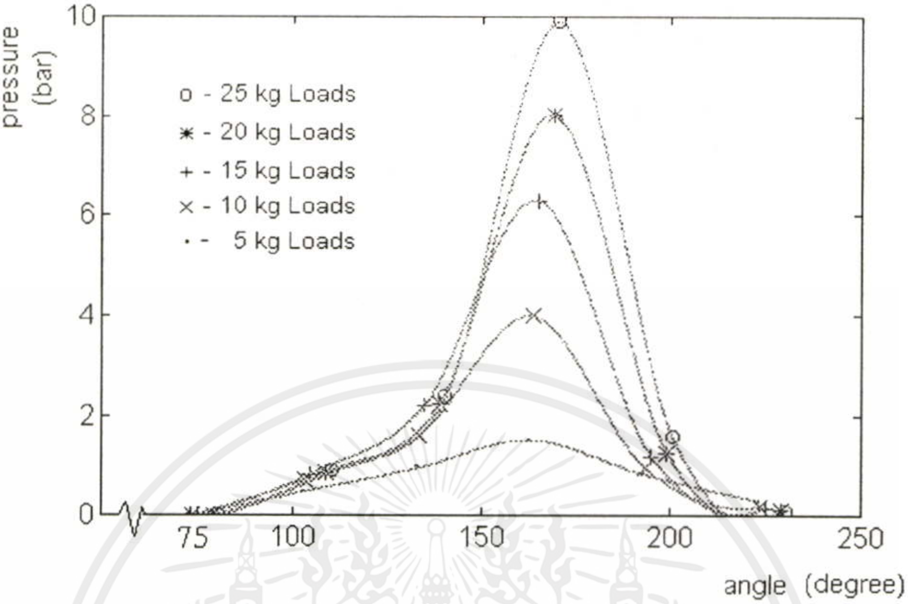
ภาพที่ 4.28



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.29



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

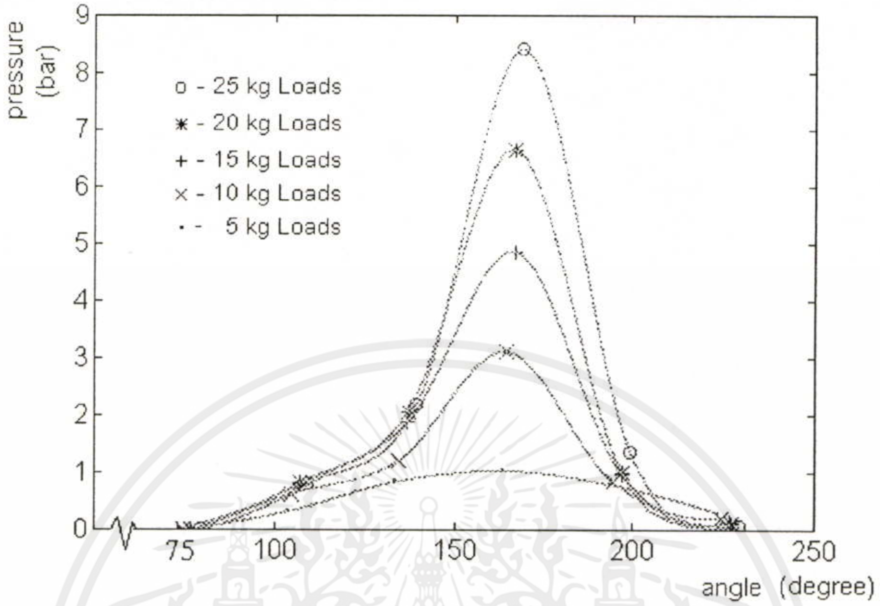
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลจากการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น
น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5%

LOAD (kg)	SPEED (x 100 rpm)	PRESSURE (bar)					GAP LENGTH (mm)	
		P1	P2	P3	P4	P5	H1	H2
5	10	0.32	0.84	1.03	0.79	0.3	0.097	0.121
5	15	0.39	0.9	1.18	0.8	0.29	0.092	0.118
5	20	0.46	0.95	1.33	0.82	0.29	0.088	0.118
5	25	0.51	0.98	1.47	0.84	0.27	0.084	0.117
5	30	0.57	1.03	1.69	0.85	0.27	0.081	0.115
10	10	0.62	1.21	3.12	0.82	0.22	0.074	0.107
10	15	0.68	1.39	3.28	0.88	0.21	0.071	0.105
10	20	0.73	1.52	3.64	0.91	0.2	0.068	0.104
10	25	0.77	1.65	3.83	0.96	0.2	0.067	0.104
10	30	0.81	1.73	4.05	1.01	0.19	0.065	0.104
15	10	0.79	1.88	4.86	0.97	0.16	0.065	0.097
15	15	0.84	1.97	4.98	1.07	0.15	0.064	0.097
15	20	0.89	2.08	5.21	1.12	0.15	0.063	0.098
15	25	0.95	2.19	5.38	1.18	0.14	0.062	0.098
15	30	0.98	2.3	6.56	1.23	0.12	0.061	0.099
20	10	0.81	2.07	6.65	1.01	0.12	0.062	0.095
20	15	0.84	2.13	6.91	1.1	0.11	0.061	0.094
20	20	0.87	2.19	7.52	1.18	0.11	0.061	0.092
20	25	0.9	2.26	7.87	1.26	0.1	0.061	0.091
20	30	0.93	2.31	8.23	1.33	0.09	0.06	0.09
25	10	0.79	2.18	8.41	1.34	0.07	0.061	0.089
25	15	0.85	2.25	8.9	1.46	0.07	0.06	0.089
25	20	0.88	2.31	9.37	1.53	0.07	0.06	0.088
25	25	0.91	2.37	9.76	1.62	0.06	0.06	0.087
25	30	0.94	2.42	10.12	1.73	0.06	0.059	0.086

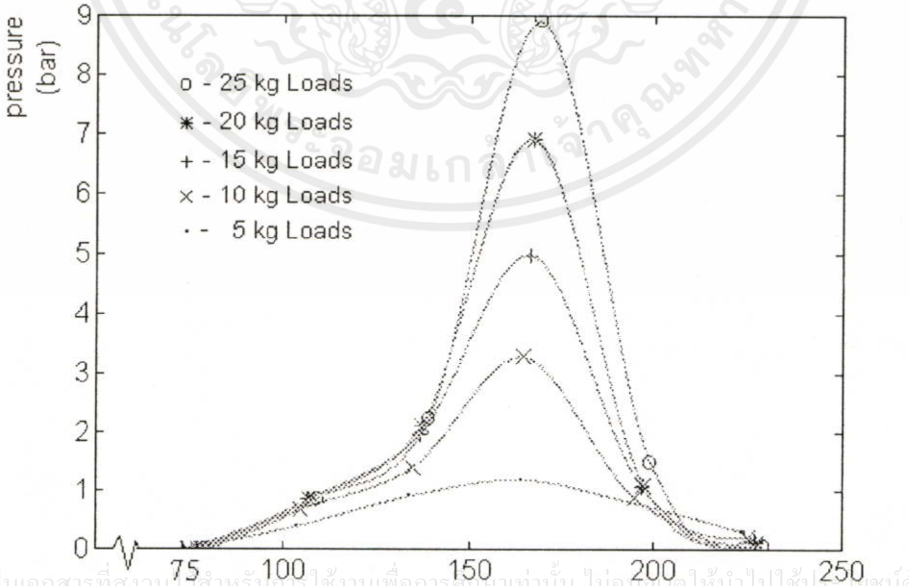
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.30



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

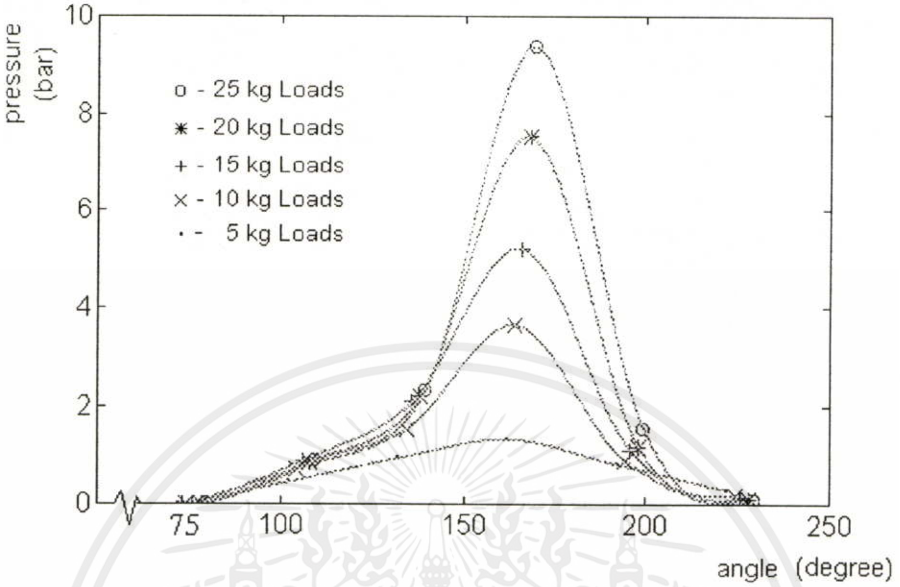
ภาพที่ 4.31



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

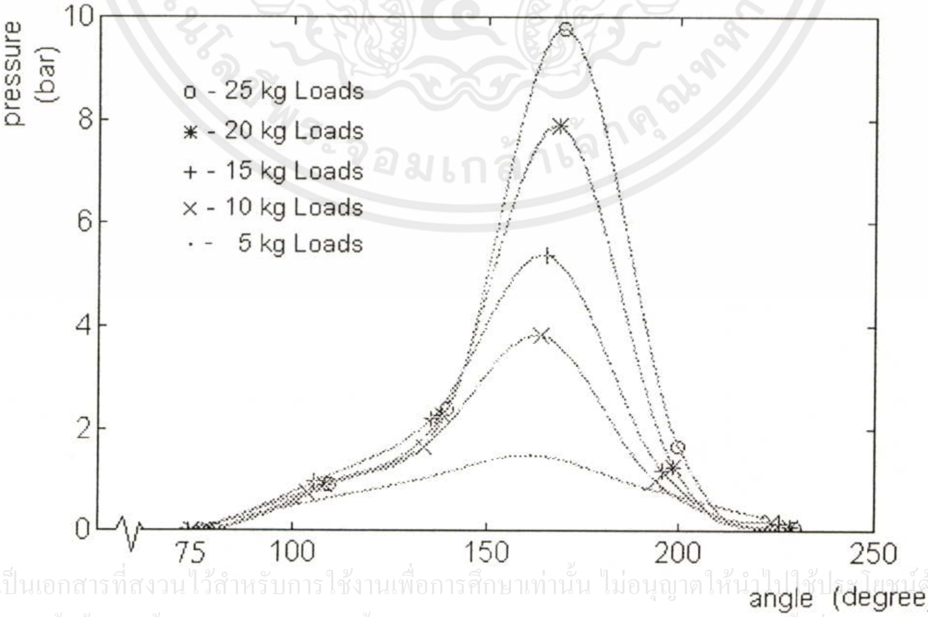
การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.32



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

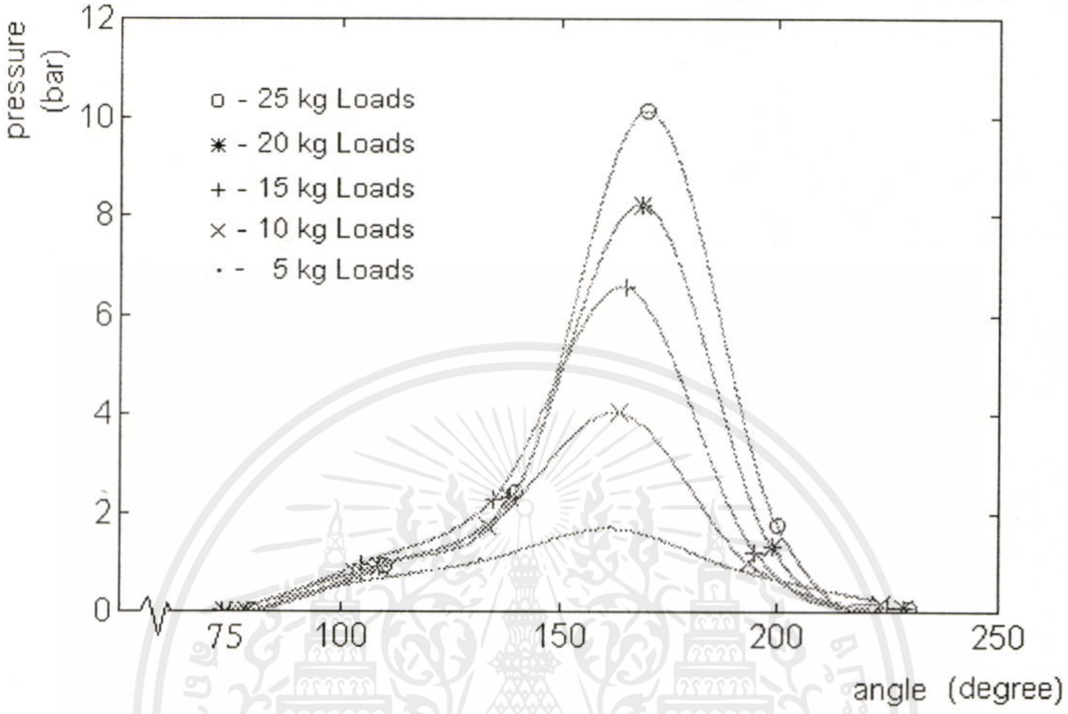
ภาพที่ 4.33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.34



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

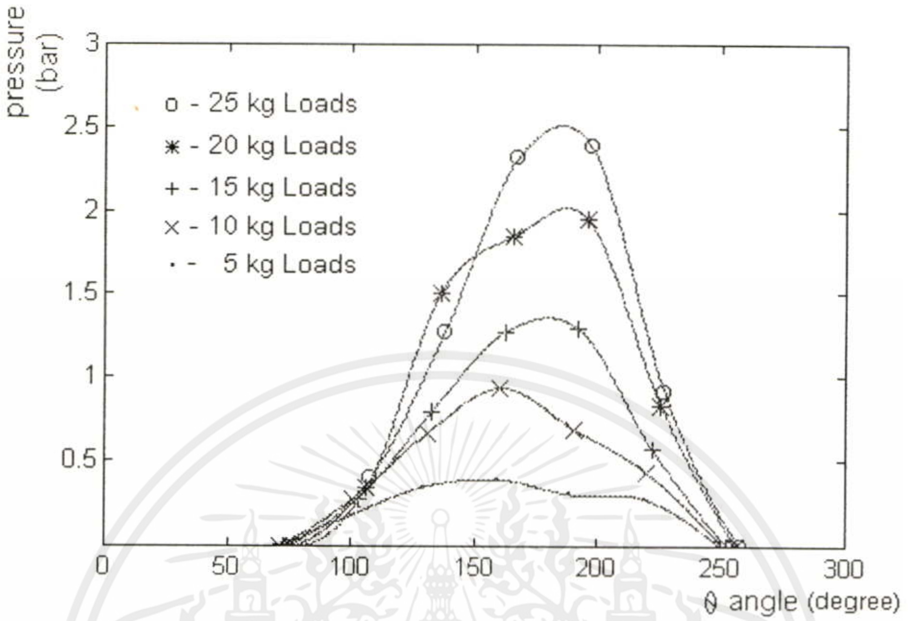
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลจากการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมความยาวจำกัด โดยใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1%

LOAD (kg)	SPEED (x 100 rpm)	PRESSURE (bar)					GAP LENGTH (mm)	
		P1	P2	P3	P4	P5	H1	H2
5	10	0.1784	0.3476	0.3928	0.3035	0.2769	0.119	0.129
5	15	0.2153	0.3753	0.3857	0.2785	0.2984	0.12	0.134
5	20	0.2215	0.3815	0.3499	0.2571	0.3138	0.12	0.134
5	25	0.2276	0.3753	0.3285	0.2214	0.3169	0.121	0.136
5	30	0.0738	0.1692	0.1749	0.1107	0.2369	0.121	0.139
10	10	0.2769	0.6676	0.9321	0.6928	0.4307	0.99	0.114
10	15	0.3138	0.7569	0.9499	0.6321	0.4307	0.99	0.116
10	20	0.2984	0.7907	0.9321	0.6035	0.4276	0.1	0.117
10	25	0.3384	0.7938	0.9535	0.5785	0.483	0.101	0.117
10	30	0.0153	0.6369	1.096	0.6749	0.3415	0.101	0.119
15	10	0.2769	0.7938	1.2678	1.2892	0.5784	0.093	0.11
15	15	0.36	0.8646	1.2107	1.1857	0.6	0.094	0.111
15	20	0.1907	0.9138	1.2749	1.1821	0.5353	0.095	0.111
15	25	0.043	0.9261	1.2928	1.1428	0.5569	0.095	0.112
15	30	0.064	0.8984	1.3142	1.1607	0.5261	0.096	0.113
20	10	0.3446	1.5023	1.8462	1.95	0.8338	0.089	0.105
20	15	0.4461	1.1753	1.8305	1.7892	0.7938	0.09	0.106
20	20	0.2861	1.2461	1.7642	1.6892	0.7753	0.091	0.107
20	25	0.2215	1.3046	1.7999	1.6821	0.7415	0.092	0.107
20	30	0.3507	1.3292	1.8178	1.65	0.7538	0.092	0.108
25	10	0.4	1.2707	2.3178	2.3821	0.9107	0.082	0.099
25	15	0.4984	1.4092	2.2749	2.2749	0.9113	0.083	0.1
25	20	0.5076	1.5138	2.2821	2.1642	0.9107	0.084	0.101
25	25	0.483	1.5876	2.2714	2.1035	0.8984	0.084	0.102
25	30	0.4523	1.6523	2.2821	2.064	0.8894	0.085	0.103

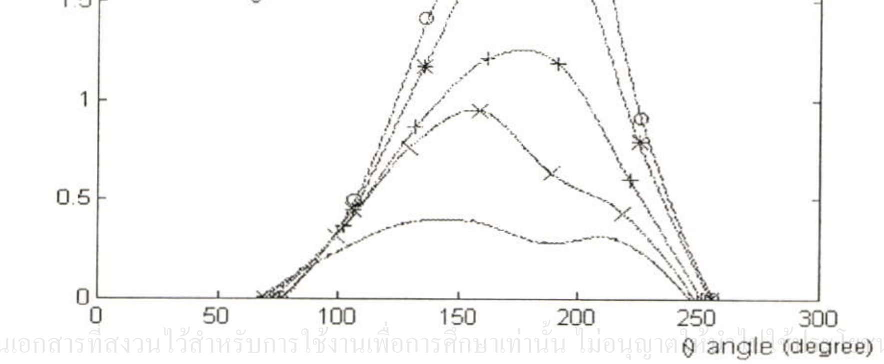
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกส่งเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.35



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

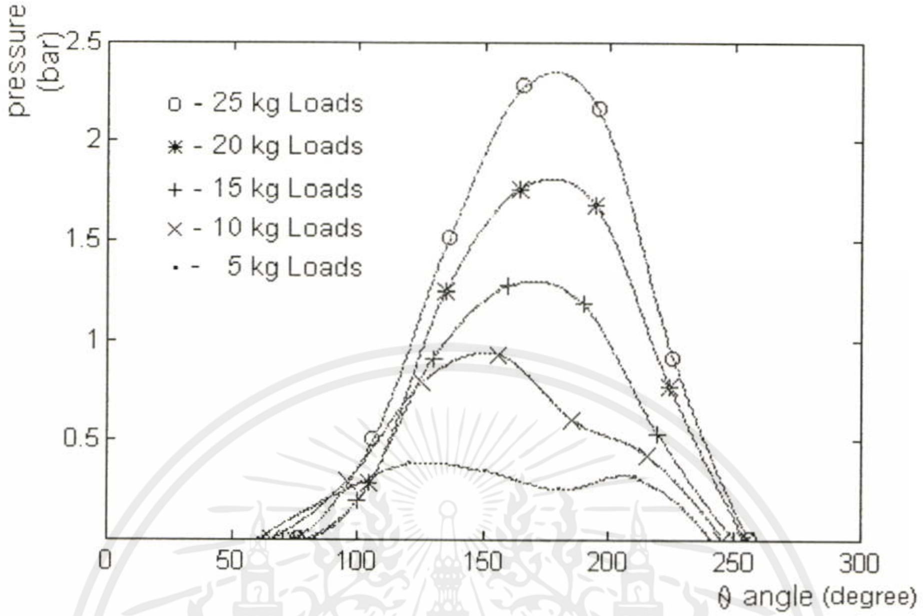
ภาพที่ 4.36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

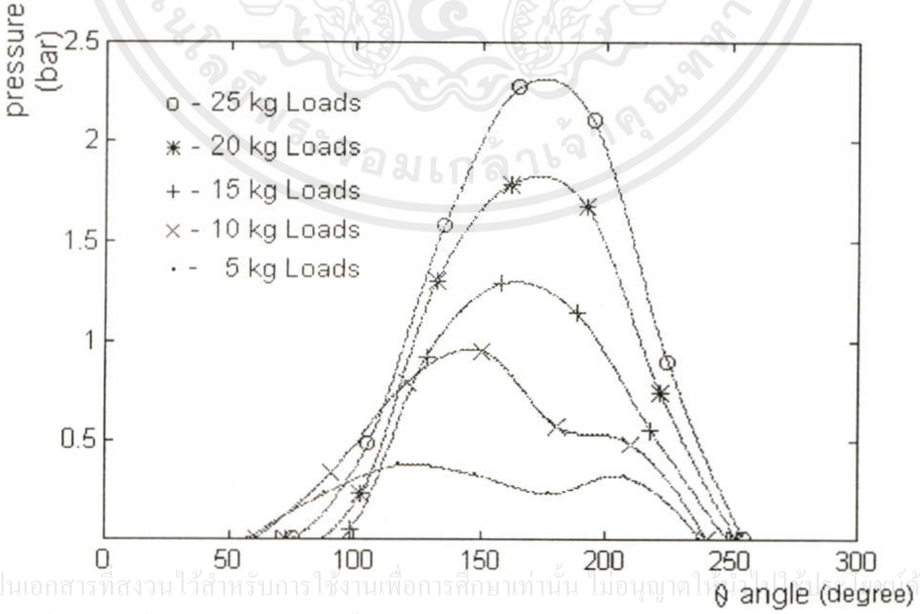
การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.37



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

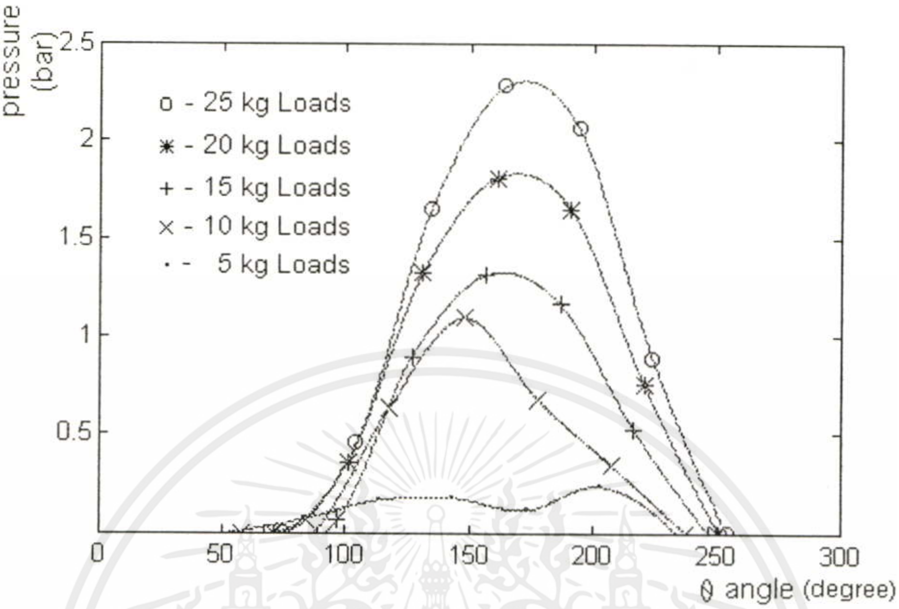
ภาพที่ 4.38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.39



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

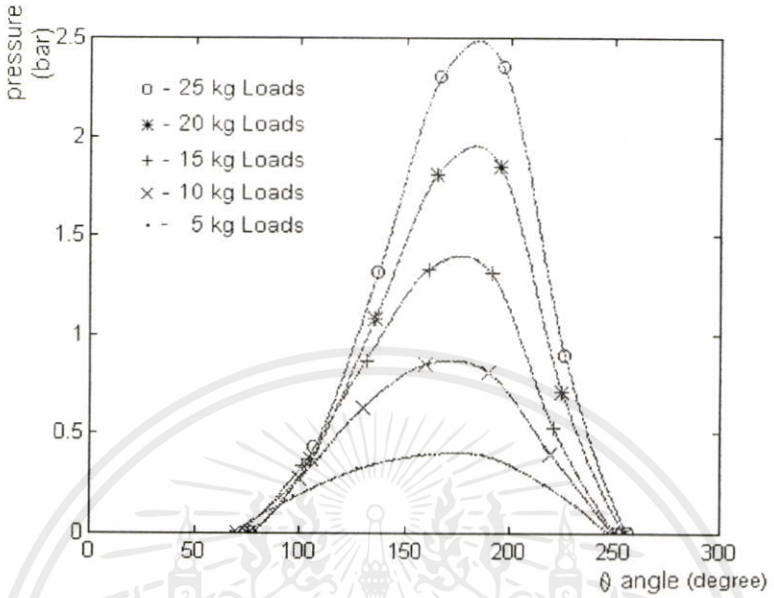
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลจากการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมความยาวจำกัด โดยใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2%

LOAD (kg)	SPEED (x 100 rpm)	PRESSURE (bar)					GAP LENGTH (mm)	
		P1	P2	P3	P4	P5	H1	H2
5	10	0.1846	0.3292	0.3964	0.3964	0.2461	0.121	0.128
5	15	0.1907	0.3476	0.3642	0.3714	0.2523	0.121	0.13
5	20	0.2338	0.4	0.3642	0.3607	0.2615	0.122	0.134
5	25	0.2892	0.3784	0.3142	0.3678	0.3323	0.122	0.137
5	30	0.2461	0.3692	0.3071	0.3678	0.32	0.122	0.14
10	10	0.2769	0.6307	0.85	0.8178	0.4061	0.1	0.115
10	15	0.2923	0.7169	0.8892	0.7784	0.4184	0.101	0.117
10	20	0.2923	0.7384	0.8357	0.7571	0.4215	0.101	0.118
10	25	0.3938	0.7384	0.7785	0.7464	0.4707	0.102	0.12
10	30	0.3969	0.7415	0.7785	0.7285	0.4923	0.102	0.121
15	10	0.3415	0.8799	1.3357	1.3142	0.5384	0.094	0.11
15	15	0.3938	0.9969	1.3785	1.2535	0.52	0.095	0.111
15	20	0.3599	1.0461	1.35	1.1999	0.5415	0.096	0.112
15	25	0.2892	1.0799	1.3035	1.1607	0.5753	0.097	0.112
15	30	0.4061	1.089	1.289	1.1571	0.6061	0.097	0.113
20	10	0.3723	1.0861	1.8178	1.8535	0.7107	0.09	0.106
20	15	0.4523	1.2276	1.7714	1.6964	0.7323	0.091	0.106
20	20	0.4492	1.2984	1.775	1.6321	0.7076	0.092	0.107
20	25	0.4738	1.3538	1.7428	1.5964	0.7323	0.093	0.107
20	30	0.483	1.3876	1.7535	1.5678	0.7169	0.094	0.108
25	10	0.4307	1.3169	2.3	2.3571	0.8953	0.083	0.1
25	15	0.5107	1.4646	2.2892	2.2249	0.8369	0.084	0.1
25	20	0.5353	1.5723	2.2678	2.0999	0.84	0.086	0.1
25	25	0.5015	1.64	2.2535	2.0464	0.8615	0.087	0.101
25	30	0.4738	1.689	2.2714	2.0178	0.8523	0.088	0.102

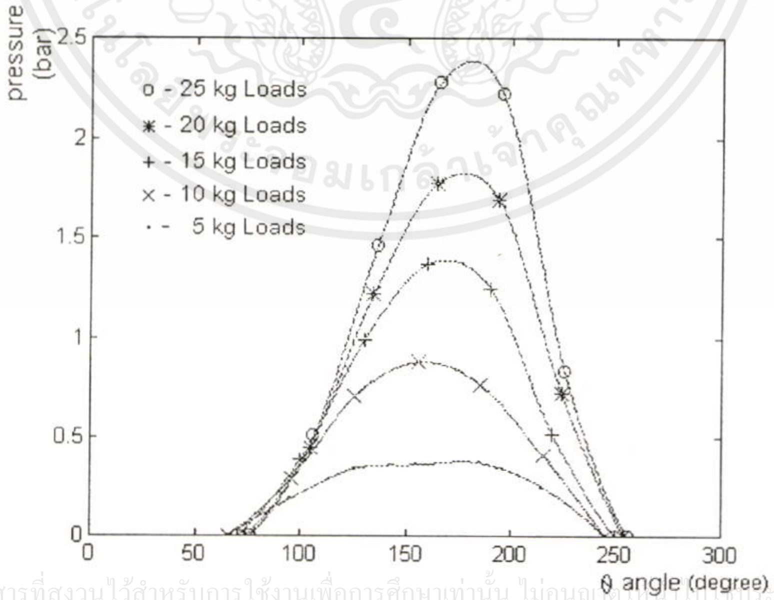
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.40



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

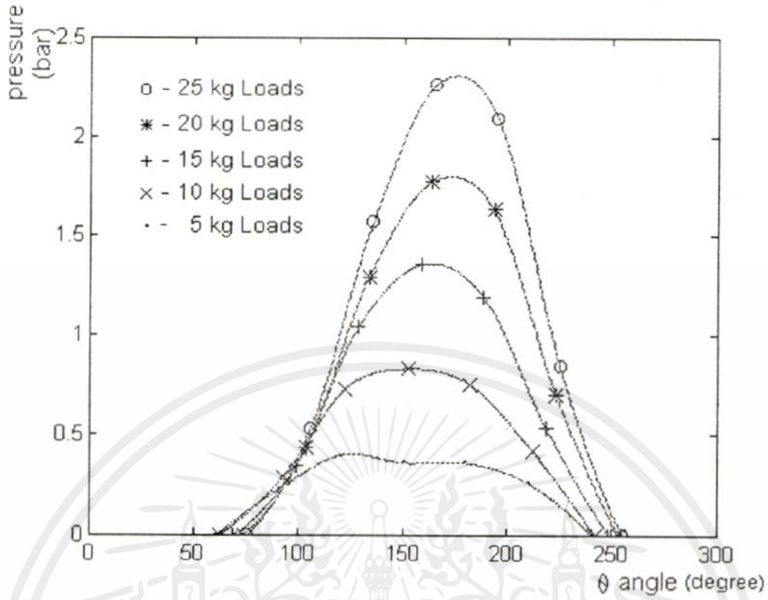
ภาพที่ 4.41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

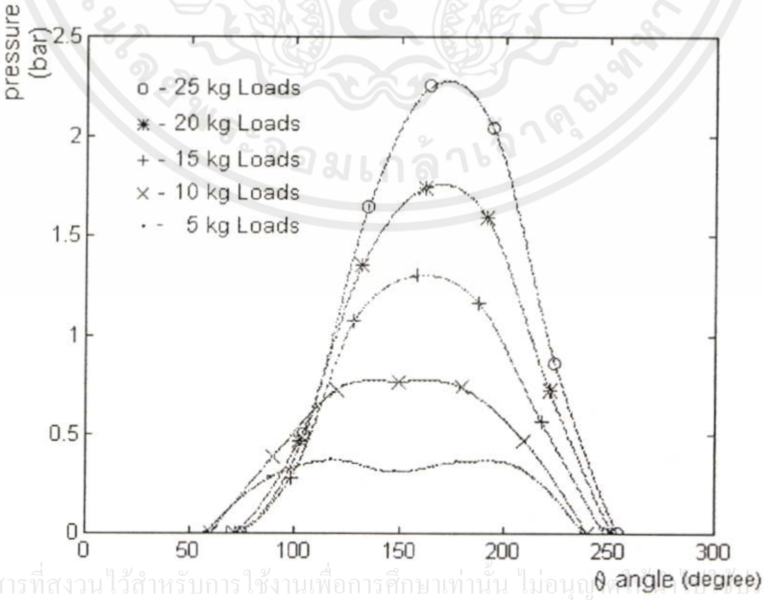
การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.42



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

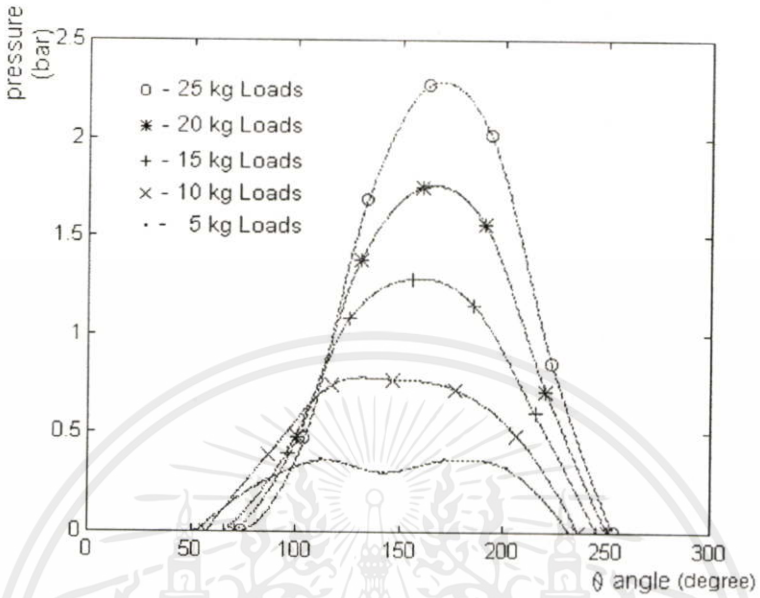
ภาพที่ 4.43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.44



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

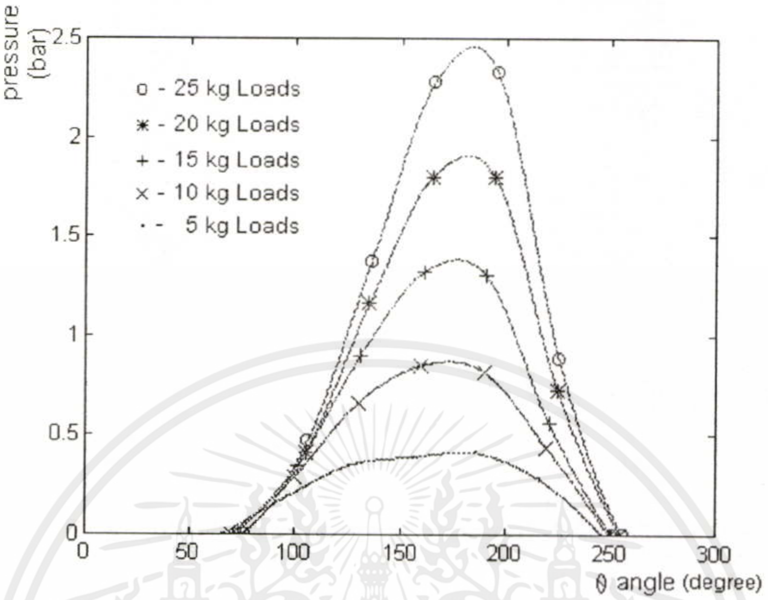
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลจากการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมความยาวจำกัด
โดยใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5%

LOAD (kg)	SPEED (x 100 rpm)	PRESSURE (bar)					GAP LENGTH (mm)	
		P1	P2	P3	P4	P5	H1	H2
5	10	0.1969	0.3507	0.3999	0.4107	0.283	0.121	0.129
5	15	0.2	0.3907	0.4035	0.4035	0.2799	0.122	0.133
5	20	0.2461	0.4	0.3535	0.3928	0.323	0.122	0.126
5	25	0.3015	0.3723	0.2928	0.3785	0.3753	0.123	0.139
5	30	0.3076	0.3723	0.2749	0.3642	0.3784	0.123	0.142
10	10	0.2984	0.6615	0.8571	0.8249	0.44	0.101	0.115
10	15	0.2861	0.7507	0.9142	0.8178	0.403	0.101	0.117
10	20	0.3353	0.7476	0.8285	0.7714	0.4707	0.102	0.119
10	25	0.4276	0.7384	0.7428	0.7499	0.523	0.102	0.12
10	30	0.4153	0.7446	0.7571	0.7464	0.5446	0.103	0.121
15	10	0.3569	0.9076	1.3285	1.3071	0.563	0.096	0.111
15	15	0.3907	1.0246	1.3892	1.2499	0.5415	0.097	0.112
15	20	0.4153	1.0676	1.3214	1.1928	0.6184	0.098	0.113
15	25	0.4523	1.0892	1.2571	1.1607	0.643	0.099	0.113
15	30	0.4646	1.0953	1.2392	1.1357	0.6707	0.099	0.114
20	10	0.4153	1.16	1.8071	1.8	0.7384	0.091	0.106
20	15	0.4061	1.32	1.9321	1.7321	0.6707	0.092	0.106
20	20	0.4615	1.3661	1.8285	1.6392	0.723	0.093	0.107
20	25	0.483	1.4	1.7714	1.5857	0.7569	0.094	0.107
20	30	0.4523	1.4307	1.7928	1.5857	0.7569	0.095	0.107
25	10	0.4738	1.3723	2.2892	2.3357	0.8892	0.084	0.101
25	15	0.3415	1.5507	2.4857	2.3071	0.7507	0.085	0.101
25	20	0.5015	1.6461	2.3392	2.0892	0.8646	0.087	0.101
25	25	0.4923	1.68	2.2214	2.0285	0.923	0.088	0.102
25	30	0.5353	1.7261	2.2571	1.9892	0.9138	0.089	0.102

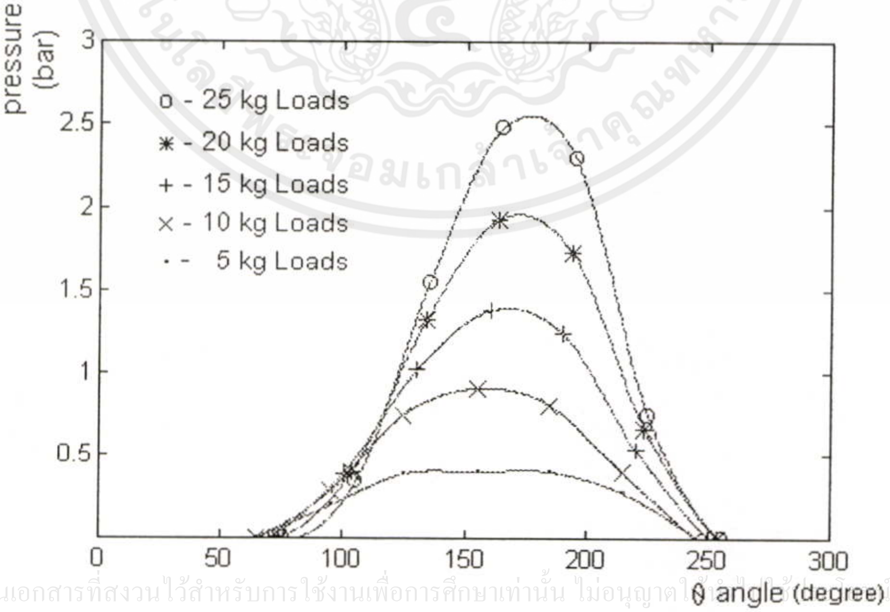
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.45



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

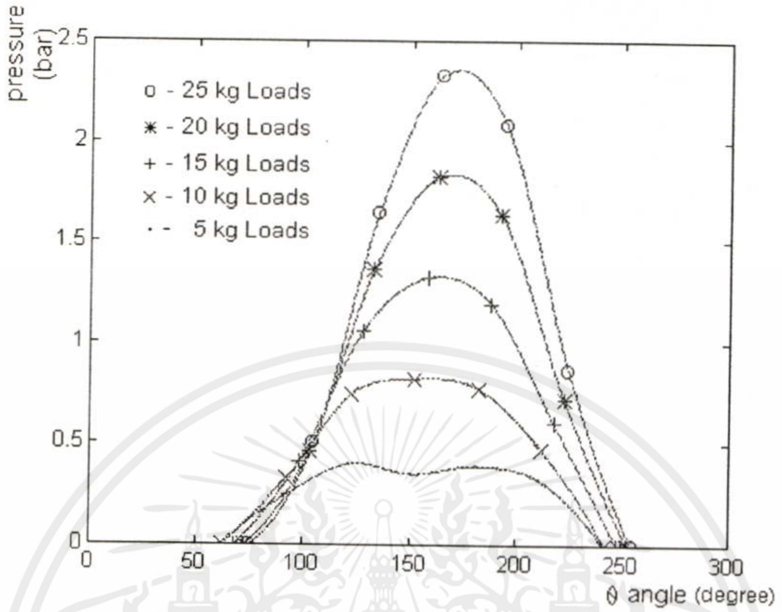
ภาพที่ 4.46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

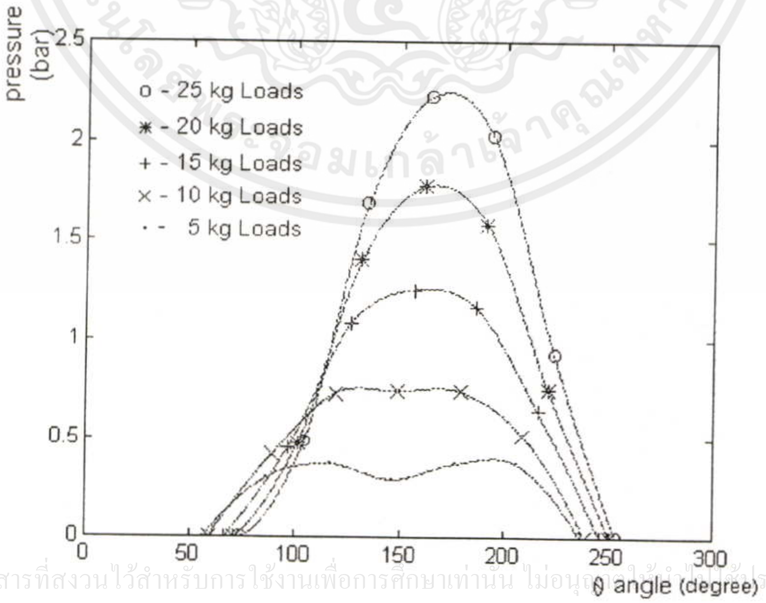
การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.47



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

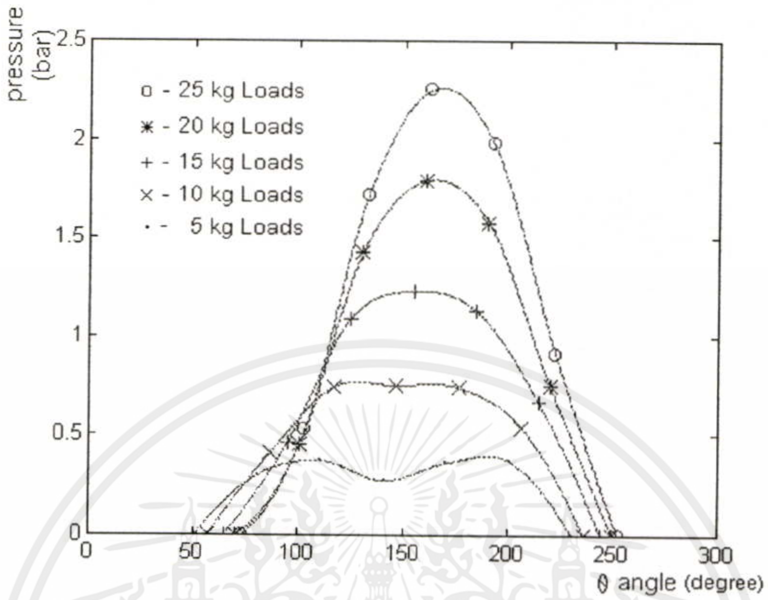
ภาพที่ 4.48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.49



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

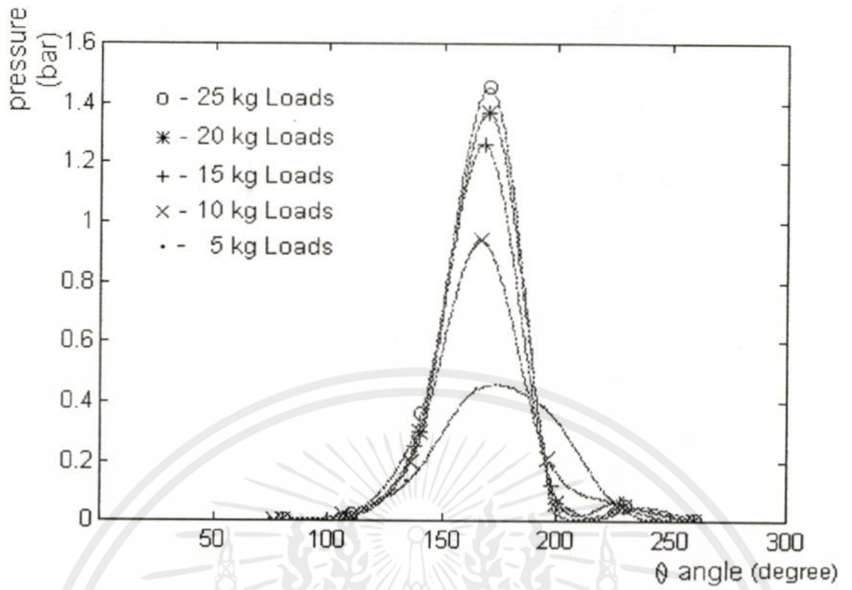
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลจากการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด
แกนเมเยอร์ 50.75 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.
โดยใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1%

LOAD (kg)	SPEED (x 100 rpm)	PRESSURE (bar)					GAP LENGTH (mm)	
		P1	P2	P3	P4	P5	H1	H2
5	10	0.0215	0.1323	0.4428	0.3892	0.0769	0.306	0.321
5	15	-0.0092	0.1384	0.4785	0.3428	0.0646	0.306	0.326
5	20	-0.0153	0.1107	0.5107	0.2999	0.0676	0.307	0.328
5	25	-0.0184	0.003	0.5857	0.2857	0.0615	0.307	0.33
5	30	-0.0215	-0.0123	0.5071	0.2785	0.0584	0.308	0.331
10	10	0.0276	0.2092	0.9428	0.2174	0.0646	0.291	0.31
10	15	-0.0061	0.2276	1.0392	0.3964	0.0615	0.292	0.311
10	20	-0.0215	0.1846	1.1035	0.4178	0.0584	0.292	0.312
10	25	-0.0246	0.0399	1.3	0.1714	0.0584	0.293	0.313
10	30	-0.0246	-0.0123	1.3714	-0.1071	0.0553	0.293	0.314
15	10	0.0092	0.2584	1.2607	0.1285	0.0646	0.288	0.304
15	15	-0.0153	0.3016	1.4571	0.2258	0.0615	0.289	0.305
15	20	-0.0377	0.2953	1.5928	0.2642	0.0553	0.29	0.306
15	25	-0.0276	0.1938	1.7535	0.1107	0.0553	0.291	0.306
15	30	-0.0307	0.0184	1.9071	-0.0964	0.0584	0.292	0.307
20	10	0.0153	0.3046	1.3714	0.0642	0.0584	0.284	0.3
20	15	0.0061	0.3661	1.7464	0.2142	0.0523	0.284	0.301
20	20	-0.0276	0.3753	1.95	0.2464	0.0492	0.285	0.301
20	25	-0.0338	0.323	2.1428	0.1393	0.0492	0.286	0.302
20	30	-0.0338	0.0953	2.3035	-0.0464	0.0492	0.287	0.302
25	10	0.0215	0.3661	1.45	-0.0285	0.0553	0.28	0.297
25	15	-0.0184	0.3938	1.9785	0.0928	0.0553	0.281	0.297
25	20	-0.0307	0.4246	2.2999	0.1249	0.0492	0.282	0.298
25	25	-0.0369	0.3723	2.5321	0.0357	0.0461	0.283	0.298
25	30	-0.0369	0.0707	2.6428	-0.1249	0.0492	0.283	0.299

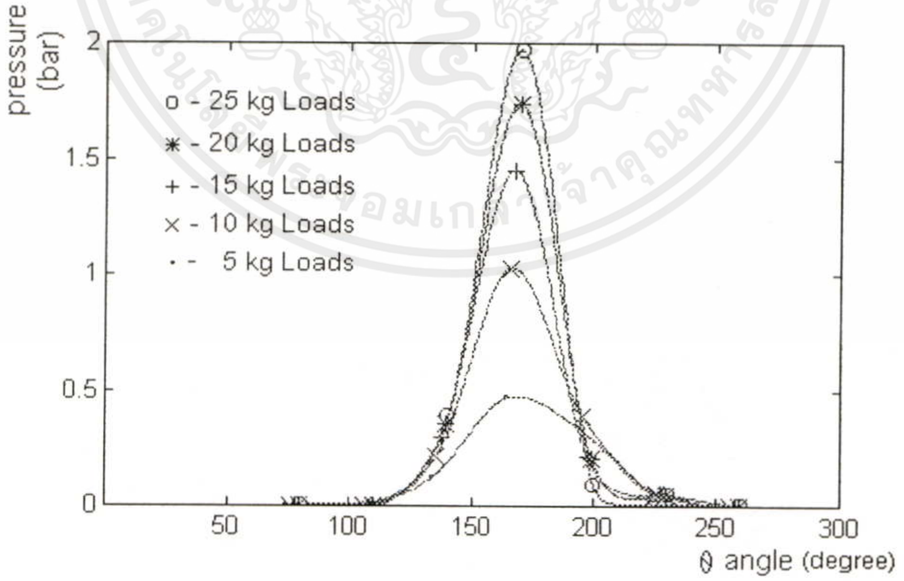
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.50



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 50.75 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

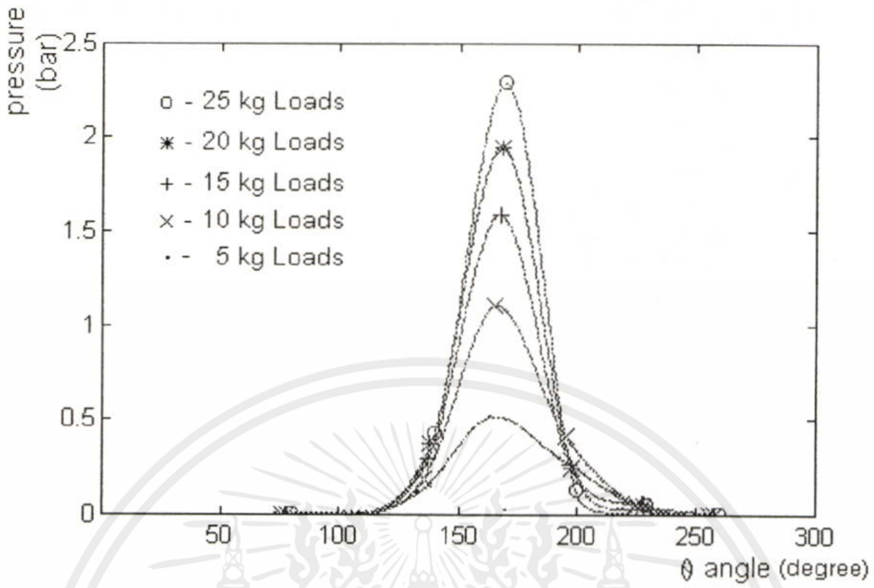
ภาพที่ 4.51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างองถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

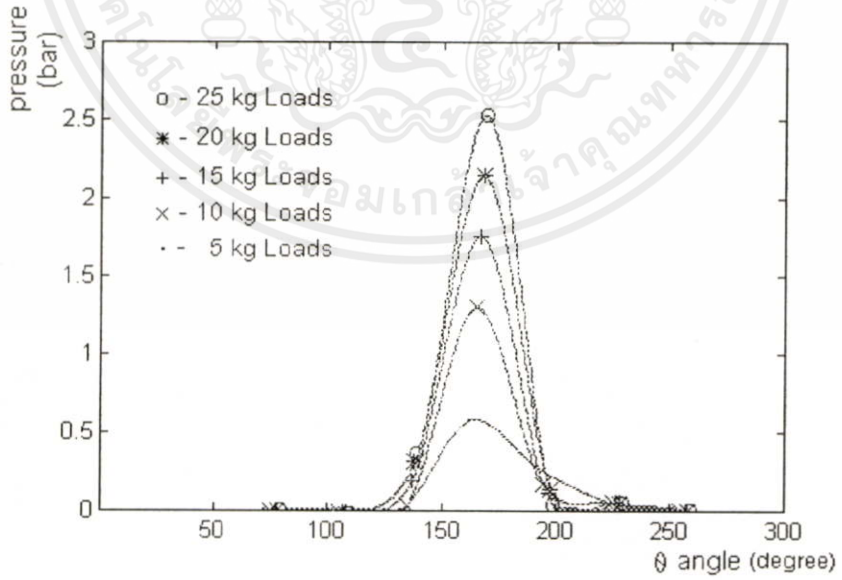
การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 50.75 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.52



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 50.75 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

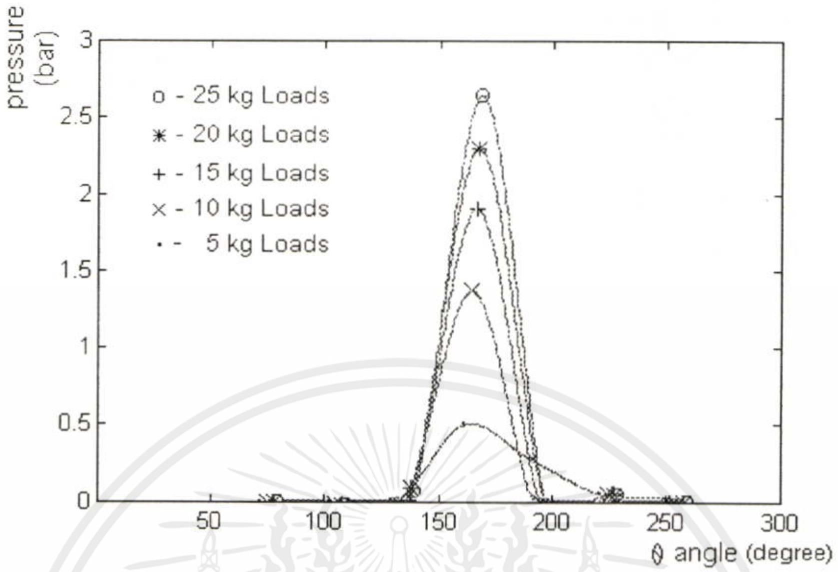
ภาพที่ 4.53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 50.75 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.54



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 50.75 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

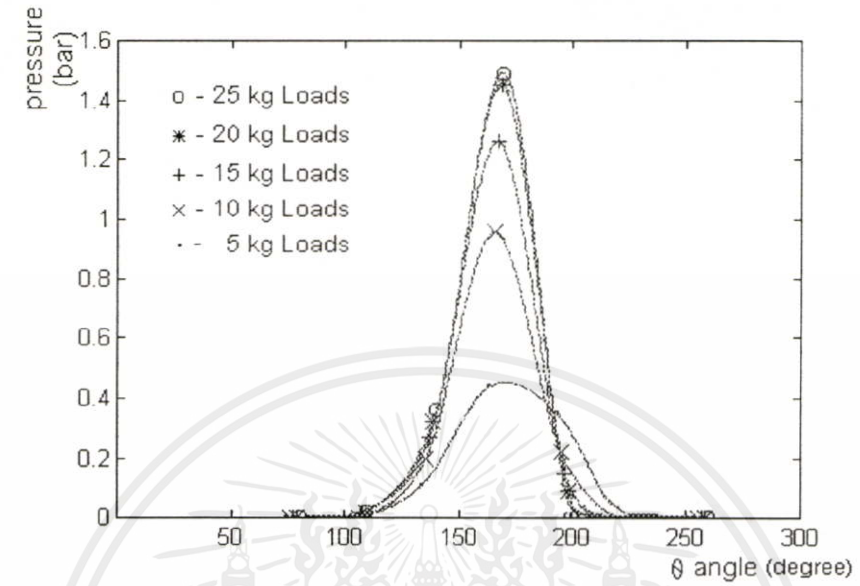
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ข้อมูลจากการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 50.75 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม. โดยใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2%

LOAD (kg)	SPEED (x 100 rpm)	PRESSURE (bar)					GAP LENGTH (mm)	
		P1	P2	P3	P4	P5	H1	H2
5	10	-0.003	0.1169	0.4499	0.3571	-0.0215	0.307	0.327
5	15	-0.0153	0.1476	0.4999	0.3357	-0.0246	0.308	0.329
5	20	-0.0215	0.12	0.5107	0.2928	-0.0276	0.308	0.331
5	25	-0.0246	0.0184	0.6171	0.2714	-0.0338	0.309	0.333
5	30	-0.0246	-0.0184	0.5107	0.2428	-0.0338	0.309	0.335
10	10	0.0061	0.2061	0.9607	0.2214	-0.0215	0.292	0.311
10	15	-0.0246	0.2276	1.0357	0.3964	-0.0276	0.293	0.313
10	20	-0.0246	0.1846	1.1142	0.3999	-0.0307	0.293	0.314
10	25	-0.0276	0.0276	1.2571	0.1499	-0.0338	0.294	0.316
10	30	-0.0246	-0.0184	1.3428	-0.1785	-0.0369	0.294	0.318
15	10	0.0276	0.2799	1.2607	0.1535	-0.0246	0.289	0.305
15	15	0.0184	0.3261	1.4571	0.3249	-0.0307	0.29	0.306
15	20	-0.0246	0.32	1.5785	0.3821	-0.0338	0.291	0.306
15	25	-0.0307	0.2123	1.7607	0.1928	-0.0338	0.292	0.307
15	30	-0.0276	0	1.9178	-0.1035	-0.0369	0.292	0.308
20	10	0.0215	0.323	1.4571	0.0999	-0.0246	0.284	0.301
20	15	-0.0246	0.3753	1.8142	0.1928	-0.0338	0.285	0.301
20	20	-0.0276	0.3907	2.0035	0.2428	-0.0338	0.286	0.302
20	25	-0.0276	0.3138	2.1892	0.1571	-0.0369	0.287	0.302
20	30	-0.0276	0.0553	2.3464	-0.0964	-0.0338	0.289	0.302
25	10	0.0276	0.363	1.4999	-0.0071	-0.0276	0.281	0.298
25	15	-0.0246	0.3969	2.0071	0.1321	-0.0276	0.282	0.298
25	20	-0.0246	0.4498	2.3428	0.1821	-0.0338	0.283	0.299
25	25	-0.0307	0.3661	2.5535	0.0571	-0.0369	0.284	0.299
25	30	-0.0338	0.0246	2.6357	-0.1428	-0.0338	0.285	0.3

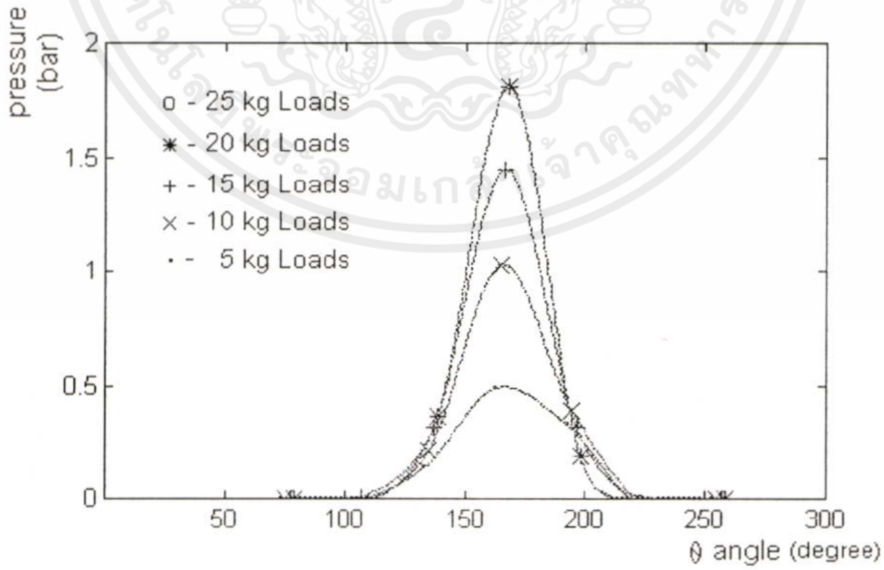
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.55



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 50.75 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

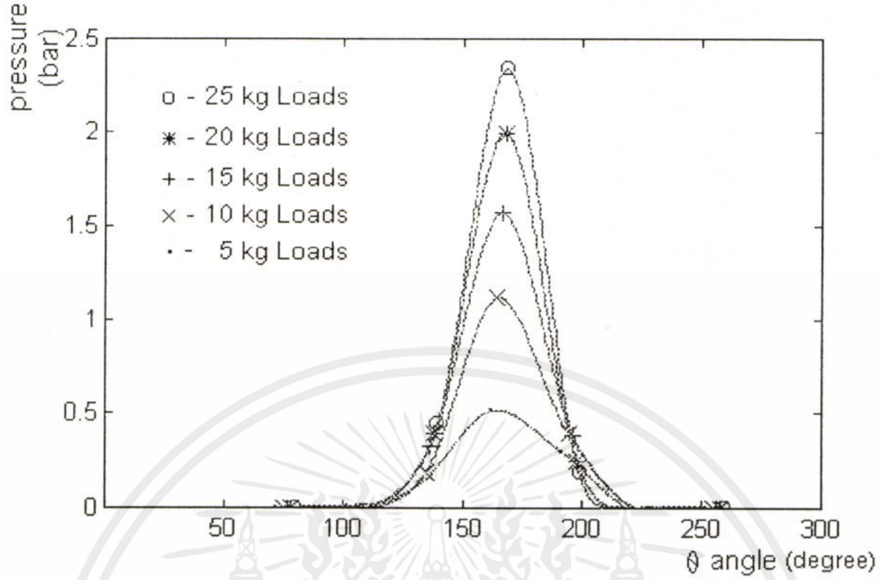
ภาพที่ 4.56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

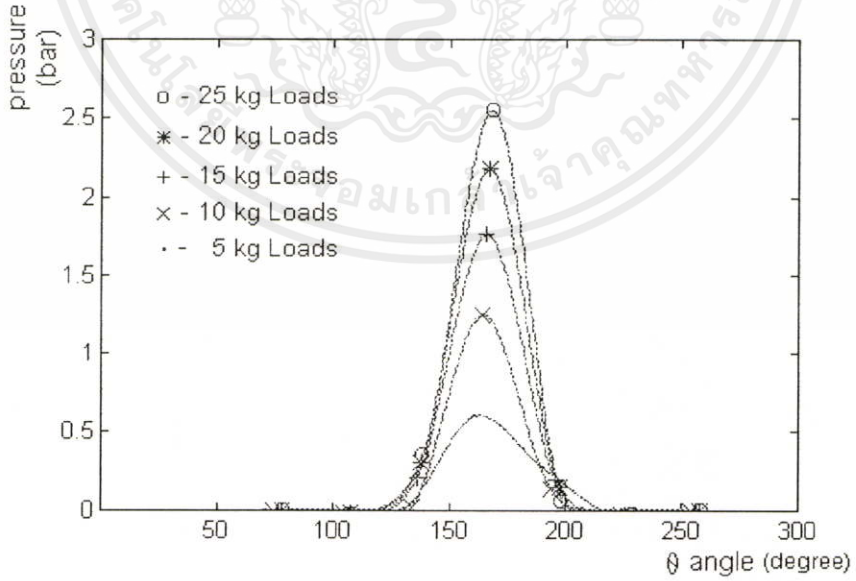
การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 50.75 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.57



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 50.75 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

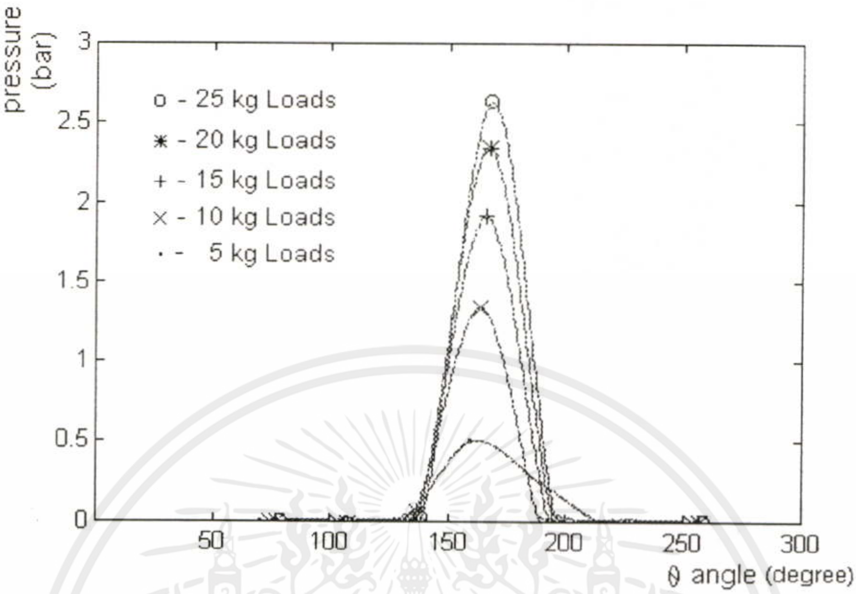
ภาพที่ 4.58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 50.75 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.59



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 50.75 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

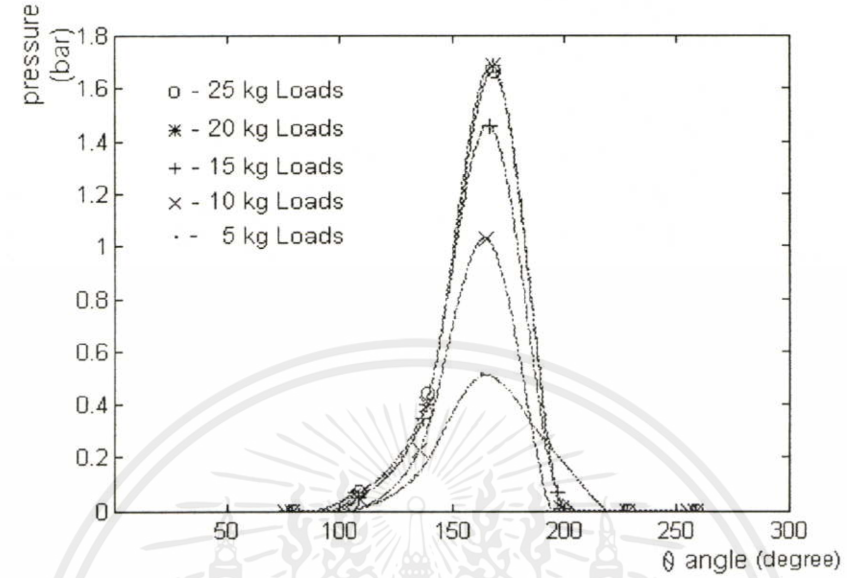
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ข้อมูลจากการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 50.75 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม. โดยใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5%

LOAD (kg)	SPEED (x 100 rpm)	PRESSURE (bar)					GAP LENGTH (mm)	
		P1	P2	P3	P4	P5	H1	H2
5	10	-0.0061	0.1353	0.5178	0.2464	-0.0215	0.308	0.328
5	15	-0.0246	0.1292	0.5464	0.2357	-0.0276	0.309	0.331
5	20	-0.0215	0.1015	0.6	0.2142	-0.0276	0.309	0.333
5	25	-0.0246	-0.0061	0.6964	0.1749	-0.0307	0.309	0.336
5	30	-0.0215	-0.0153	0.625	0.0821	-0.0338	0.31	0.339
10	10	0.0034	0.2307	1.0321	-0.0285	-0.0276	0.293	0.312
10	15	-0.0246	0.2215	1.15	0.2285	-0.0276	0.294	0.314
10	20	-0.0246	0.1692	1.225	0.2285	-0.0338	0.294	0.316
10	25	-0.0246	0.0369	1.4107	0.0392	-0.0338	0.295	0.318
10	30	-0.0246	0.0399	1.1035	0.0321	-0.0338	0.295	0.321
15	10	0.0738	0.3538	1.4678	0.0749	0.0061	0.29	0.306
15	15	0.0092	0.3569	1.6428	0.2321	0.003	0.291	0.306
15	20	0.0061	0.3661	1.7535	0.2785	0	0.291	0.307
15	25	0.0061	0.2492	1.9821	0.0821	-0.003	0.292	0.308
15	30	0.0061	0.1064	2.1714	-0.2571	-0.003	0.292	0.309
20	10	0.0584	0.4061	1.6928	0.0142	0.003	0.285	0.301
20	15	0.0123	0.4184	2.0214	0.0499	0	0.286	0.301
20	20	0.003	0.4246	2.2214	0.0714	-0.0061	0.287	0.302
20	25	0	0.2421	2.4214	0.0178	-0.0061	0.288	0.302
20	30	-0.003	0.1784	2.6214	-0.2357	-0.0092	0.289	0.303
25	10	0.0707	0.4492	1.6678	-0.0464	-0.0092	0.282	0.298
25	15	-0.0061	0.4492	2.1714	0.0142	-0.123	0.284	0.298
25	20	-0.0092	0.5015	2.4857	0.0499	-0.0184	0.285	0.299
25	25	-0.0123	0.3938	2.7071	-0.1071	-0.0215	0.287	0.299
25	30	-0.0092	0.0461	2.775	-0.0749	-0.0184	0.288	0.3

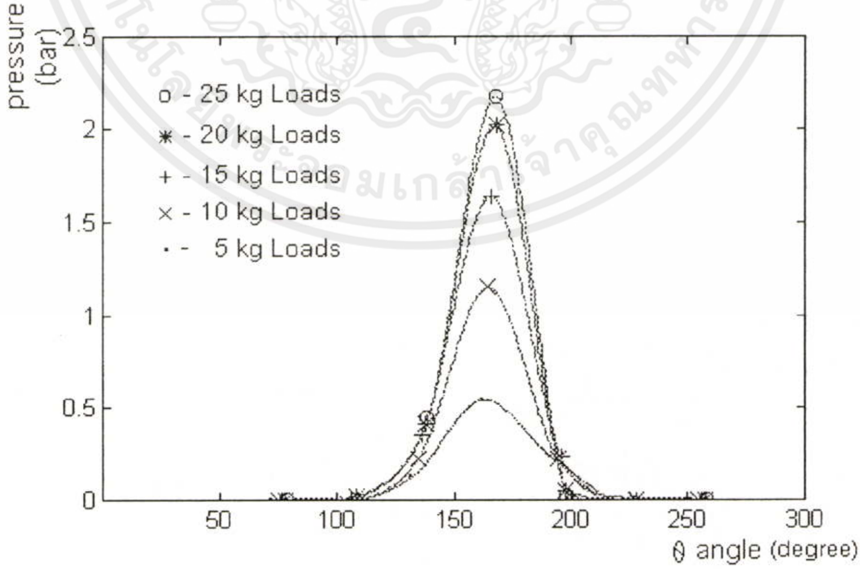
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.60



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 50.75 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

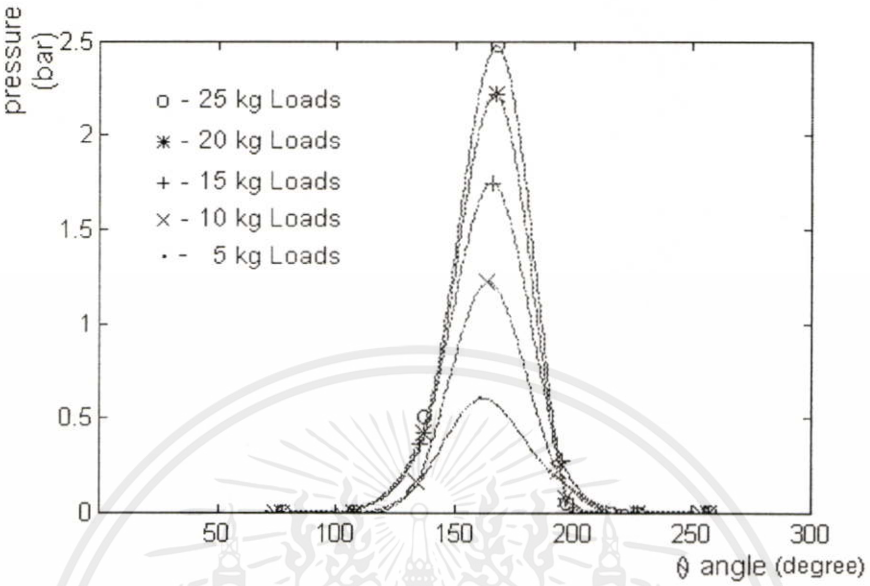
ภาพที่ 4.61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด

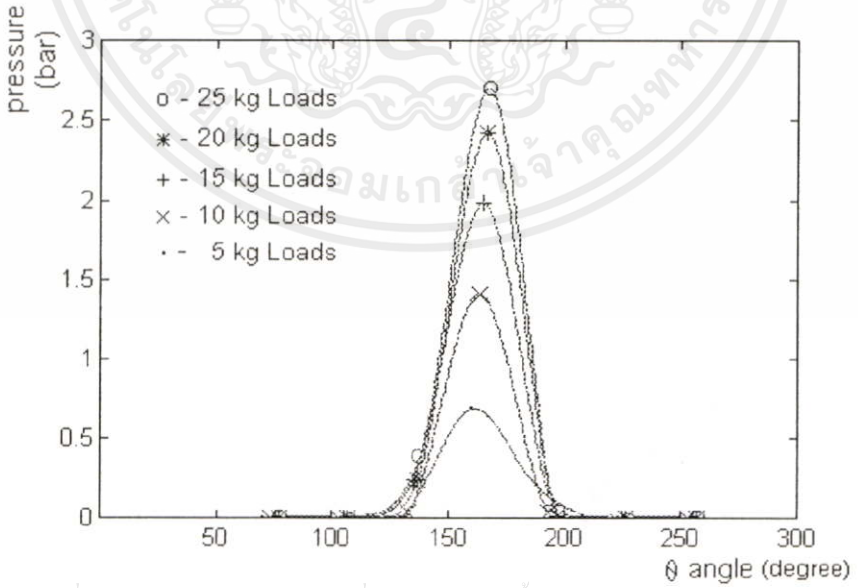
การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 50.75 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.62



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 50.75 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

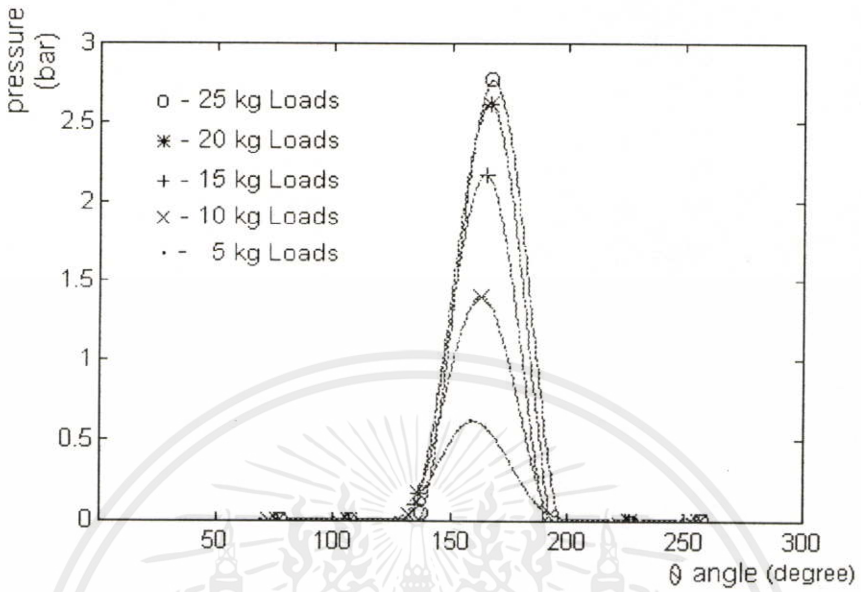
ภาพที่ 4.63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 50.75 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.64



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 50.75 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

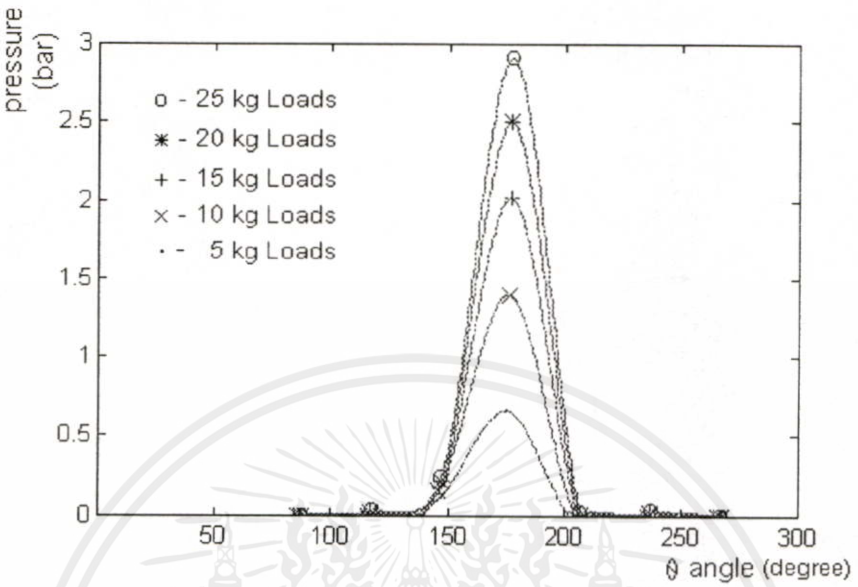
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ข้อมูลจากการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด
แกนเมเยอร์ 51.0 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.
โดยใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1%

LOAD (kg)	SPEED (x 100 rpm)	PRESSURE (bar)					GAP LENGTH (mm)	
		P1	P2	P3	P4	P5	H1	H2
5	10	-0.0123	0.0923	0.6642	-0.0428	-0.0123	0.228	0.247
5	15	-0.0153	0.0892	0.7	-0.0321	-0.0092	0.228	0.25
5	20	-0.0153	0.0184	0.8071	-0.1392	-0.0123	0.229	0.252
5	25	-0.0123	0.003	0.8857	-0.0392	-0.0092	0.229	0.254
5	30	-0.0061	0.003	1.025	-0.0464	-0.0153	0.23	0.256
10	10	0	0.163	1.4035	-0.0107	0	0.213	0.232
10	15	0	0.1692	1.475	-0.0214	0.003	0.214	0.233
10	20	0.003	0.1107	1.6035	-0.0249	0.003	0.214	0.235
10	25	0.003	0.0769	1.7607	-0.0285	0.003	0.215	0.236
10	30	0.0092	0.0215	1.95	-0.0285	0.0061	0.216	0.238
15	10	0.0061	0.1815	2.0214	0	0.0092	0.209	0.225
15	15	0.0092	0.2461	2.0964	-0.0035	0.0153	0.21	0.226
15	20	0.0153	0.2153	2.2142	-0.0107	0.0123	0.211	0.226
15	25	0.0123	0.1784	2.3571	-0.0178	0.0123	0.211	0.227
15	30	0.0123	0.0276	2.7107	-0.0214	0.0153	0.212	0.228
20	10	0.0215	0.2276	2.5	0.0107	0.0246	0.205	0.22
20	15	0.0184	0.2338	2.7821	0.0071	0.0246	0.206	0.22
20	20	0.0215	0.0615	3.2357	0.0071	0.0246	0.208	0.221
20	25	0.0215	0.0676	3.4857	-0.0071	0.0215	0.21	0.222
20	30	0.0246	0.0707	3.6	0	0.0246	0.211	0.222
25	10	0.0338	0.2492	2.9107	0.0249	0.0338	0.201	0.216
25	15	0.0246	0.2676	3.2857	0.0142	0.0307	0.203	0.217
25	20	0.0276	0.1323	3.7357	0.0142	0.0338	0.205	0.217
25	25	0.0276	0.0523	4.0678	0.0107	0.0276	0.207	0.218
25	30	0.0246	0.0338	4.4607	0.0107	0.0276	0.209	0.218

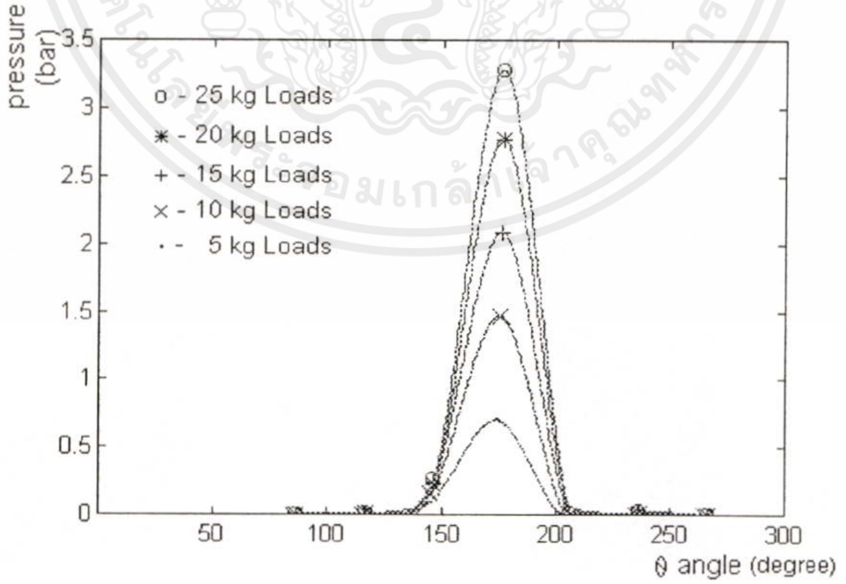
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.65



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 51.0 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

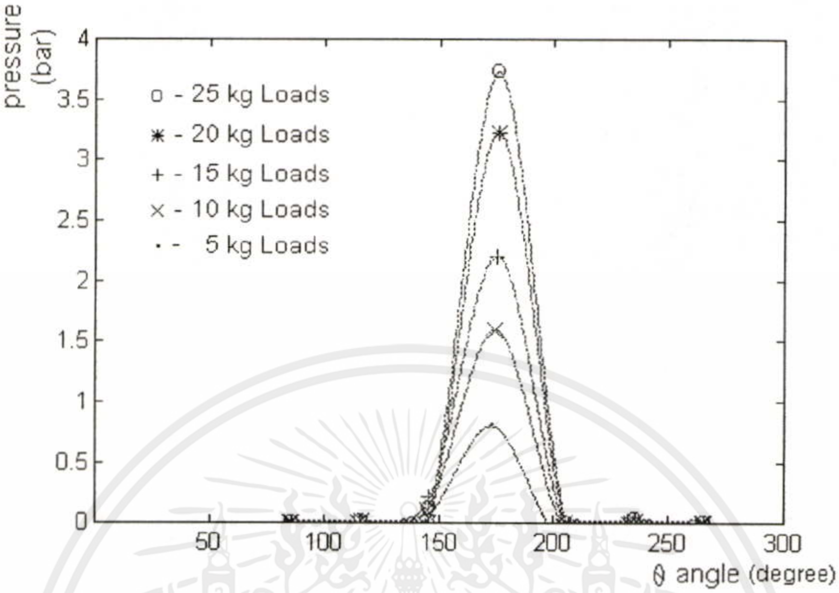
ภาพที่ 4.66



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

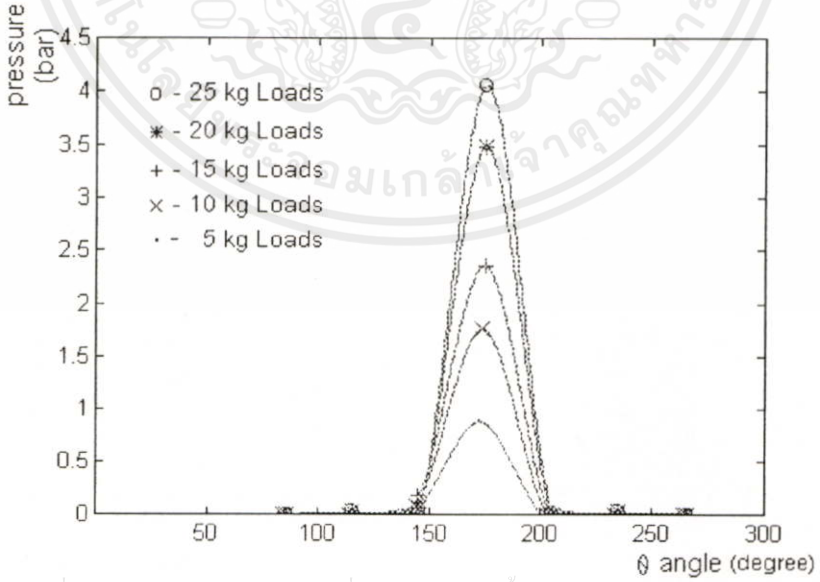
การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 51.0 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.67



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 51.0 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

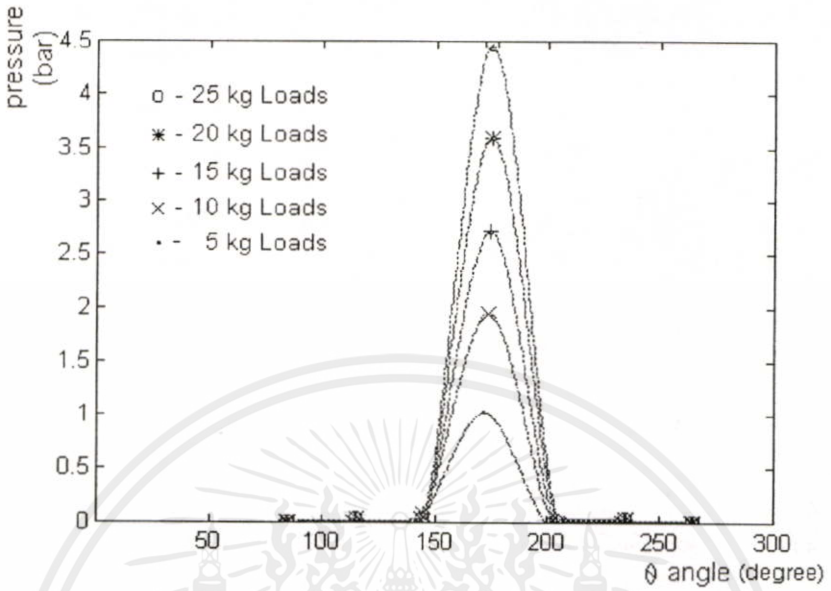
ภาพที่ 4.68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 51.0 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.69



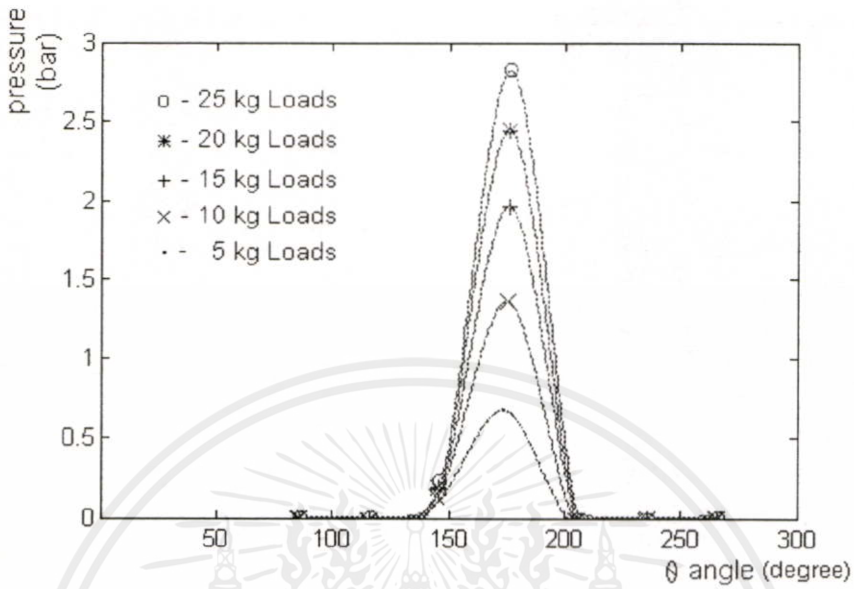
การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 51.0 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ข้อมูลจากการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 51.0 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม. โดยใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2%

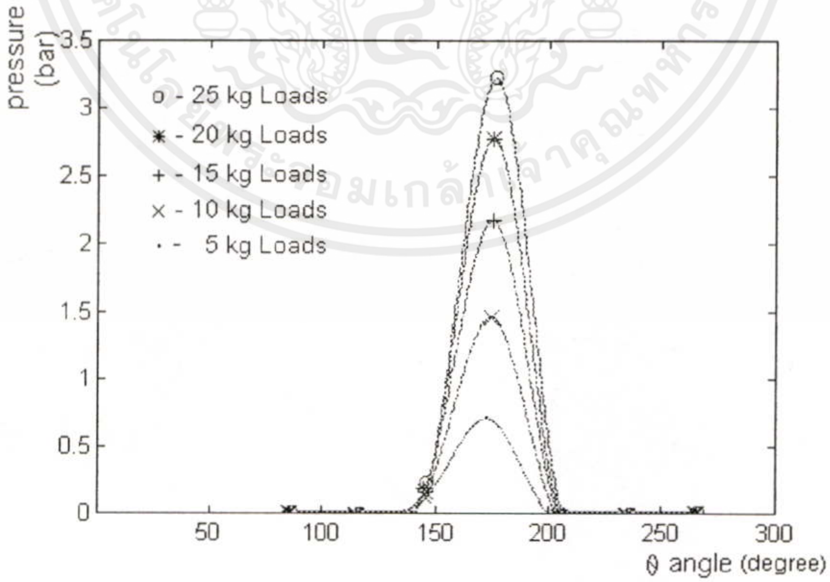
LOAD (kg)	SPEED (x 100 rpm)	PRESSURE (bar)					GAP LENGTH (mm)	
		P1	P2	P3	P4	P5	H1	H2
5	10	-0.0153	0.083	0.6821	-0.0357	-0.0213	0.229	0.249
5	15	-0.0184	0.0799	0.7107	-0.0535	-0.0184	0.229	0.252
5	20	-0.0215	0.0153	0.8035	-0.0607	-0.0215	0.23	0.255
5	25	-0.0184	-0.003	0.8749	-0.0499	-0.0184	0.23	0.257
5	30	-0.0153	-0.0123	0.9607	-0.0571	-0.0184	0.23	0.26
10	10	-0.0153	0.1476	1.3678	-0.0285	-0.0153	0.214	0.234
10	15	-0.0184	0.1446	1.4642	-0.0357	-0.0184	0.214	0.235
10	20	-0.0184	0.0676	1.6178	-0.0392	-0.0153	0.215	0.237
10	25	-0.0153	0.0399	1.7462	-0.0464	-0.0184	0.215	0.239
10	30	-0.0184	-0.003	1.9392	-0.0499	-0.0184	0.216	0.24
15	10	-0.0153	0.1846	1.9678	-0.0214	-0.0153	0.21	0.226
15	15	-0.0153	0.1815	2.1714	-0.0249	-0.0123	0.211	0.227
15	20	-0.0184	0.0184	2.5142	-0.0285	-0.0123	0.212	0.227
15	25	-0.0123	0.0123	2.6249	-0.0392	-0.0153	0.212	0.229
15	30	-0.0123	0	2.9571	-0.0357	-0.0123	0.213	0.229
20	10	-0.0153	0.1938	2.4535	-0.0249	-0.0092	0.206	0.22
20	15	-0.0123	0.163	2.7892	-0.0321	-0.0123	0.208	0.221
20	20	-0.0184	0.0307	3.2178	-0.0392	-0.0184	0.21	0.221
20	25	-0.0153	0	3.475	-0.0184	-0.0184	0.211	0.222
20	30	-0.0184	-0.0123	3.8892	-0.0321	-0.0123	0.213	0.223
25	10	-0.0092	0.2338	2.8392	-0.0178	-0.0123	0.202	0.217
25	15	-0.0123	0.2399	3.2285	-0.0285	-0.0123	0.204	0.217
25	20	-0.0153	0.1507	3.5928	-0.0321	-0.0184	0.206	0.217
25	25	-0.0153	0.0061	3.9607	-0.0321	-0.0153	0.208	0.218
25	30	-0.0184	-0.003	4.3499	-0.0392	-0.0153	0.21	0.218

ภาพที่ 4.70



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 51.0 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

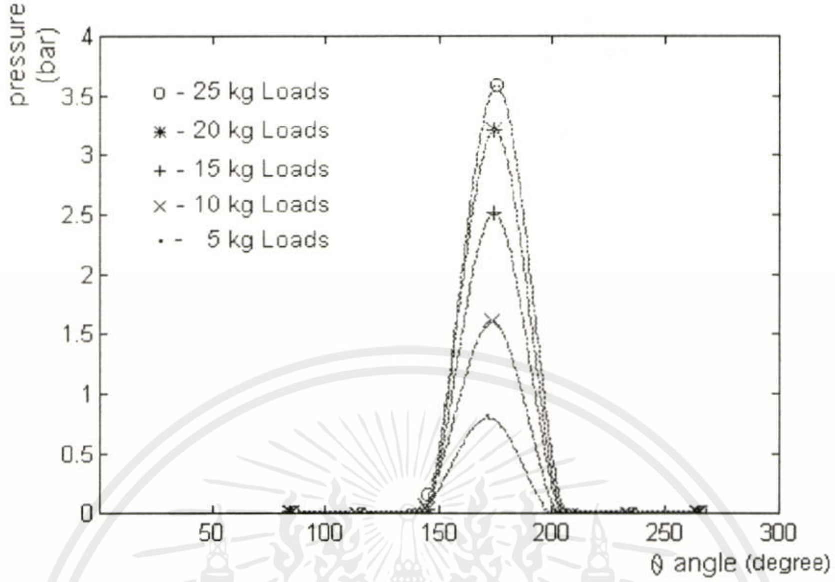
ภาพที่ 4.71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

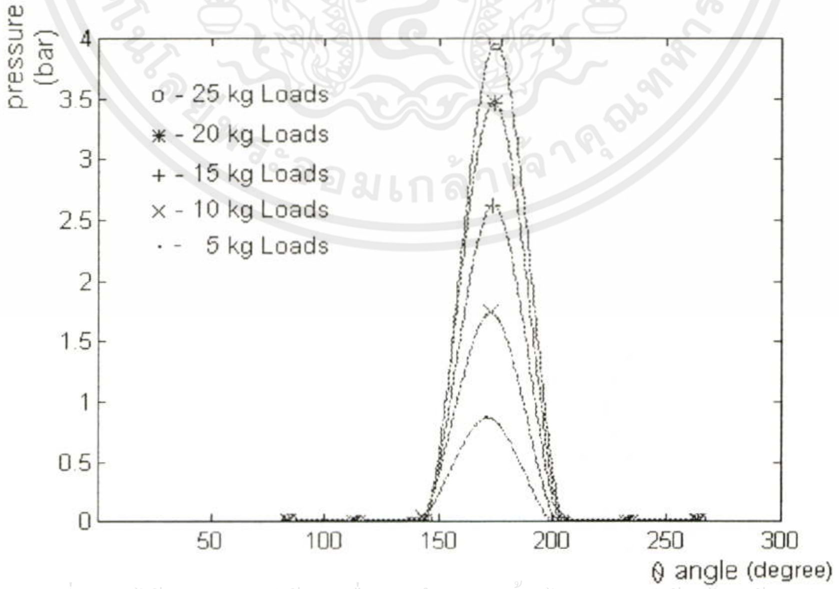
การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 51.0 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.72



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 51.0 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

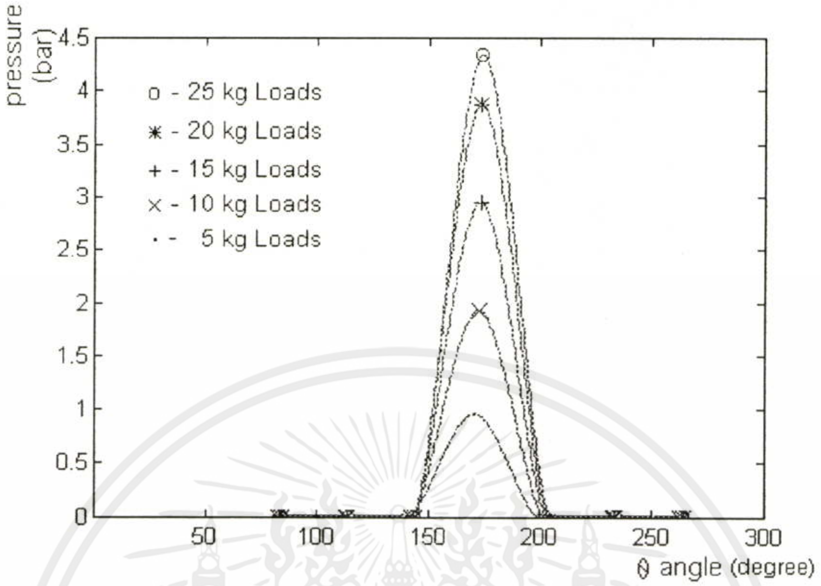
ภาพที่ 4.73



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 51.0 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.74



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 51.0 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

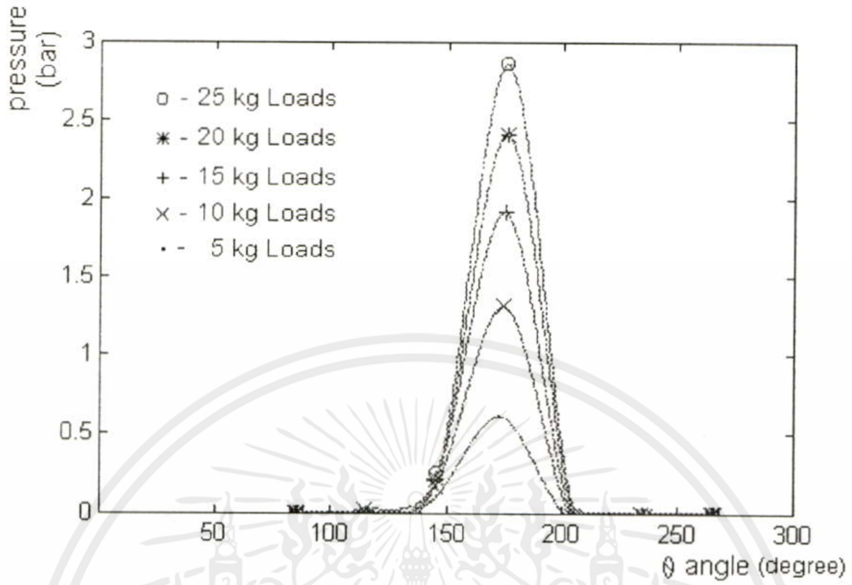
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ข้อมูลจากการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 51.0 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม. โดยใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5%

LOAD (kg)	SPEED (x 100 rpm)	PRESSURE (bar)					GAP LENGTH (mm)	
		P1	P2	P3	P4	P5	H1	H2
5	10	-0.0246	0.0799	0.6178	-0.0214	-0.0123	0.229	0.25
5	15	-0.0215	0.1046	0.6142	-0.1749	-0.0215	0.229	0.252
5	20	-0.0246	0.0092	0.7214	-0.0142	-0.0123	0.23	0.255
5	25	-0.0215	-0.003	0.7571	-0.0821	-0.0123	0.23	0.258
5	30	-0.0184	-0.0153	0.8642	-0.0535	-0.0153	0.23	0.261
10	10	-0.0215	0.1723	1.3142	-0.0285	-0.0061	0.214	0.235
10	15	-0.0215	0.2	1.3571	-0.0392	-0.0092	0.15	0.236
10	20	-0.0184	0.1753	1.4178	-0.0571	-0.0092	0.215	0.238
10	25	-0.0184	0.0707	1.5857	-0.0571	-0.0153	0.216	0.24
10	30	-0.0246	0	1.7821	-0.0571	-0.0092	0.216	0.242
15	10	-0.0092	0.2061	1.9142	-0.0249	-0.0061	0.211	0.227
15	15	-0.0184	0.2307	2.0178	-0.0357	-0.0123	0.212	0.228
15	20	-0.0153	0.243	2.1214	-0.0499	-0.0061	0.213	0.228
15	25	-0.0184	0.1723	2.2571	-0.0607	-0.0123	0.214	0.228
15	30	-0.0276	0.0246	2.4857	-0.0678	-0.0123	0.214	0.229
20	10	-0.0123	0.2276	2.4107	-0.0392	-0.0123	0.207	0.22
20	15	-0.0184	0.283	2.5642	-0.0464	-0.0123	0.2089	0.22
20	20	-0.0215	0.3076	2.7071	-0.0535	-0.0123	0.212	0.221
20	25	-0.0246	0.2553	2.9071	-0.0678	-0.0184	0.215	0.221
20	30	-0.0246	0.1015	3.1857	-0.0785	-0.0184	0.217	0.222
25	10	-0.0153	0.2523	2.8607	-0.0464	-0.0184	0.203	0.218
25	15	-0.0184	0.3138	3.1214	-0.0499	-0.0154	0.205	0.218
25	20	-0.0246	0.3169	3.3642	-0.0607	-0.0215	2.08	0.218
25	25	-0.0307	0.2799	3.5285	-0.0714	-0.0215	0.21	0.219
25	30	-0.0276	0.0738	3.9035	-0.0749	-0.0246	0.211	0.219

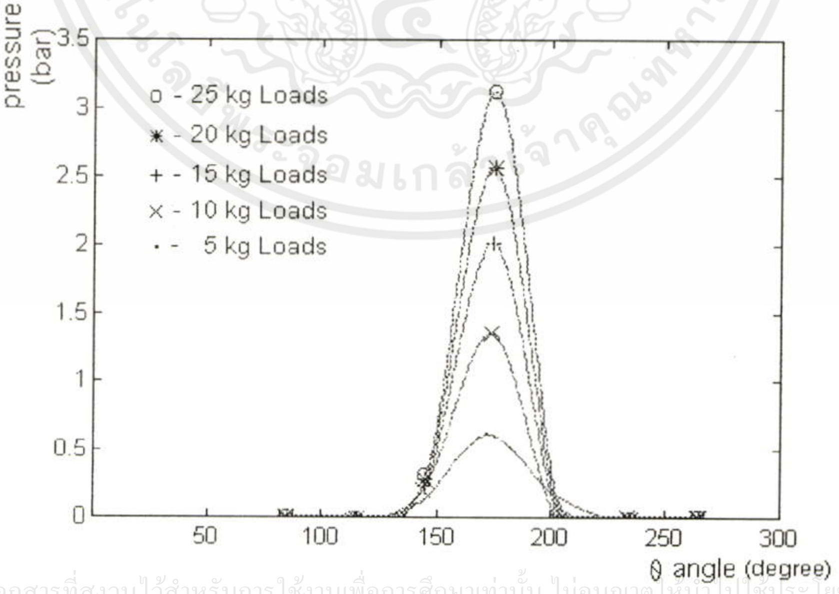
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.75



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 51.0 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

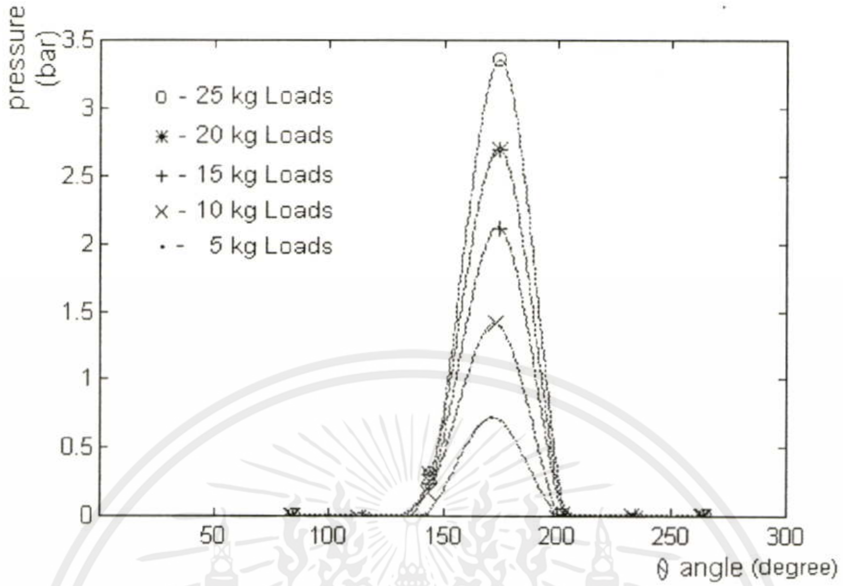
ภาพที่ 4.76



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

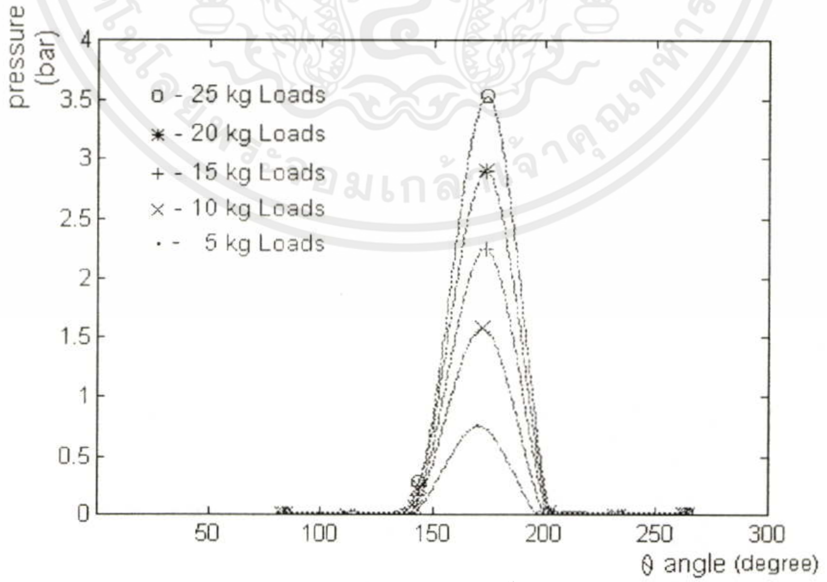
การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 51.0 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.77



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 51.0 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

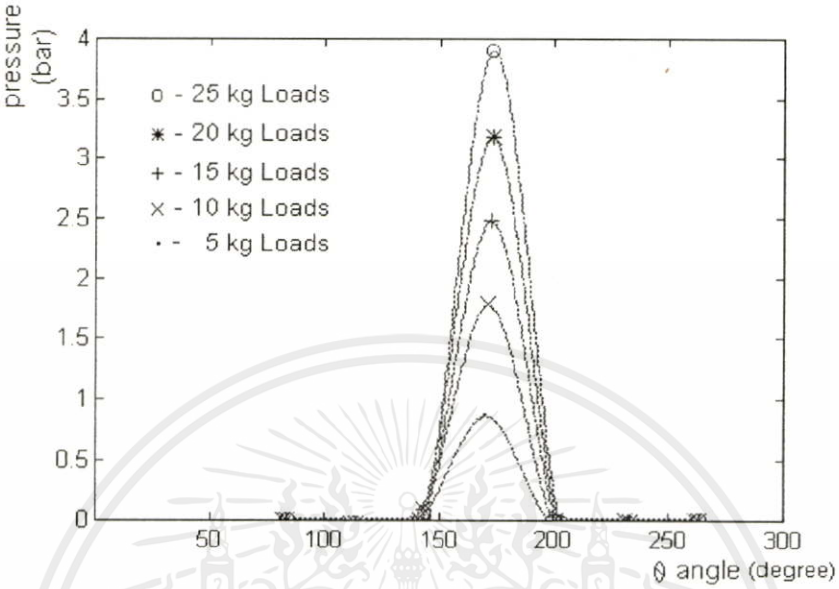
ภาพที่ 4.78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 51.0 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

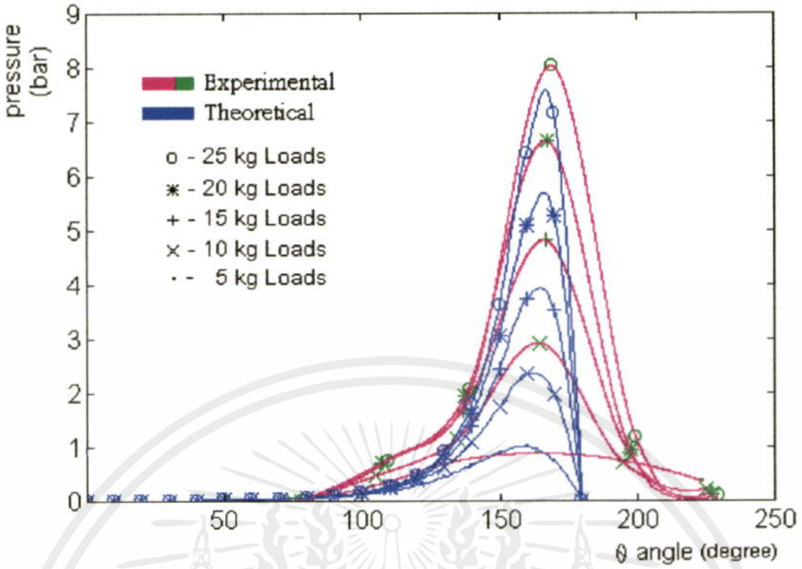
ภาพที่ 4.79



การกระจายความดันจากผลการทดลองกาบรองลื่นครึ่งวงรี ความยาวจำกัด แกนเมเยอร์ 51.0 มม. แกนไมเนอร์ 50.50 มม.น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

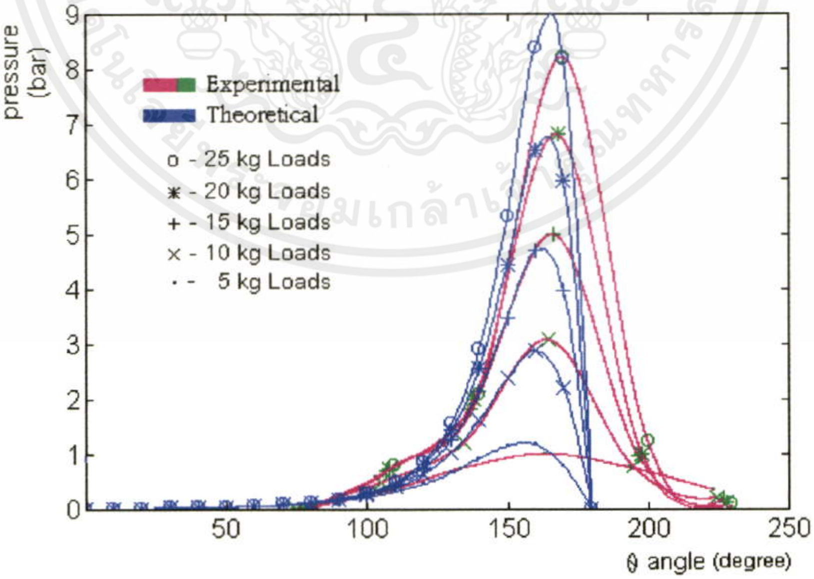
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.80



เปรียบเทียบการกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี และผลการทดลอง โดยใช้สารหล่อลื่น SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

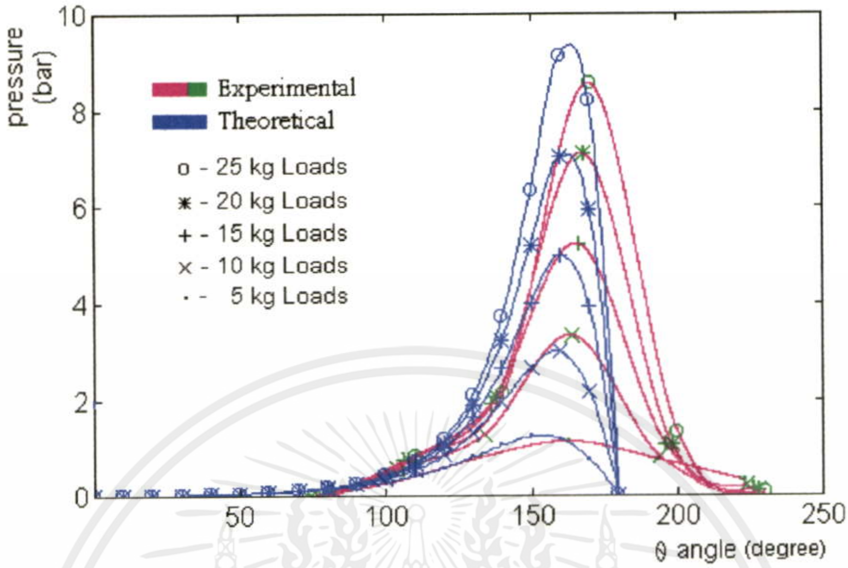
ภาพที่ 4.81



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

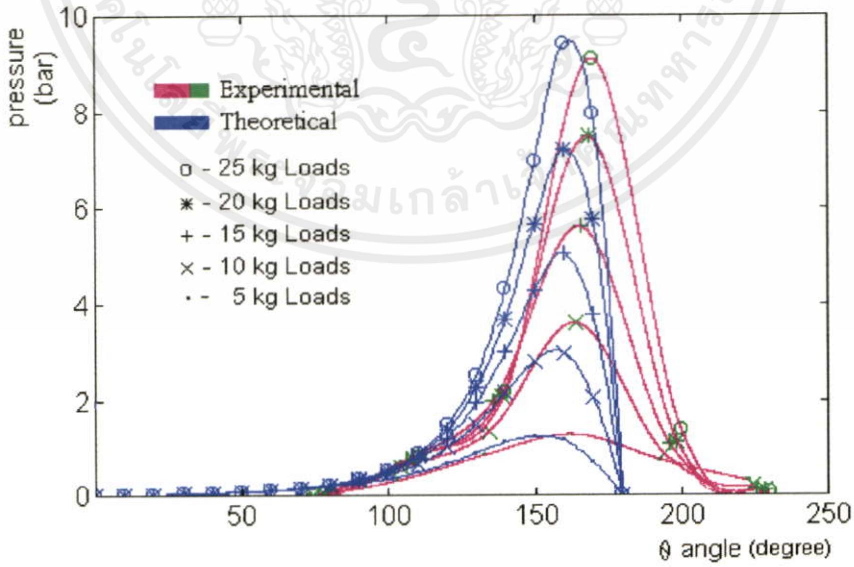
เปรียบเทียบการกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี และผลการทดลอง โดยใช้สารหล่อลื่น SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.82



เปรียบเทียบการกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี และผลการทดลอง โดยใช้สารหล่อลื่น SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

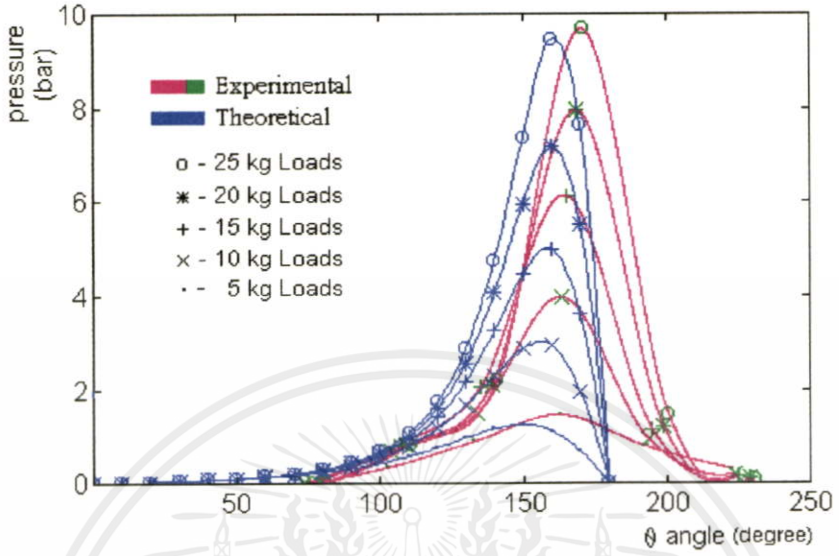
ภาพที่ 4.83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เปรียบเทียบการกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี และผลการทดลอง โดยใช้สารหล่อลื่น SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

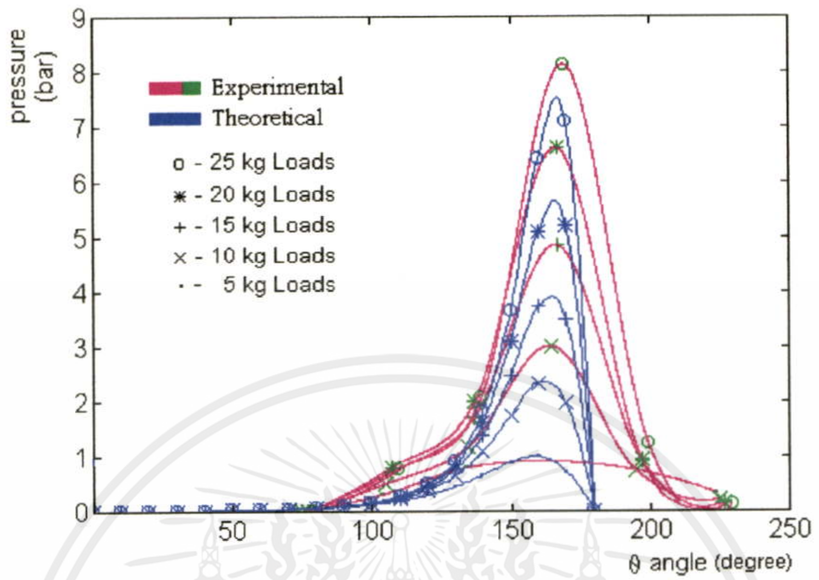
ภาพที่ 4.84



เปรียบเทียบการกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี และผลการทดลอง โดยใช้สารหล่อลื่น SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 1% ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

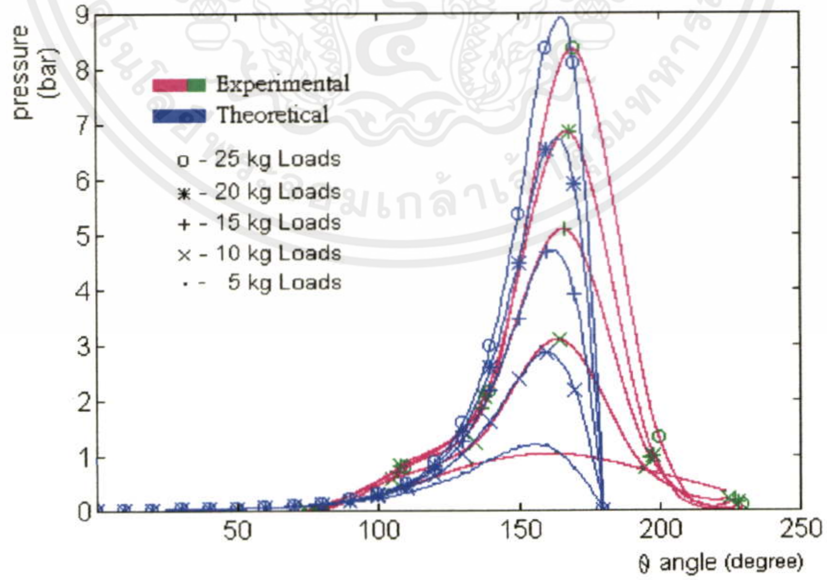
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.85



เปรียบเทียบการกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี และผลการทดลอง โดยใช้สารหล่อลื่น SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

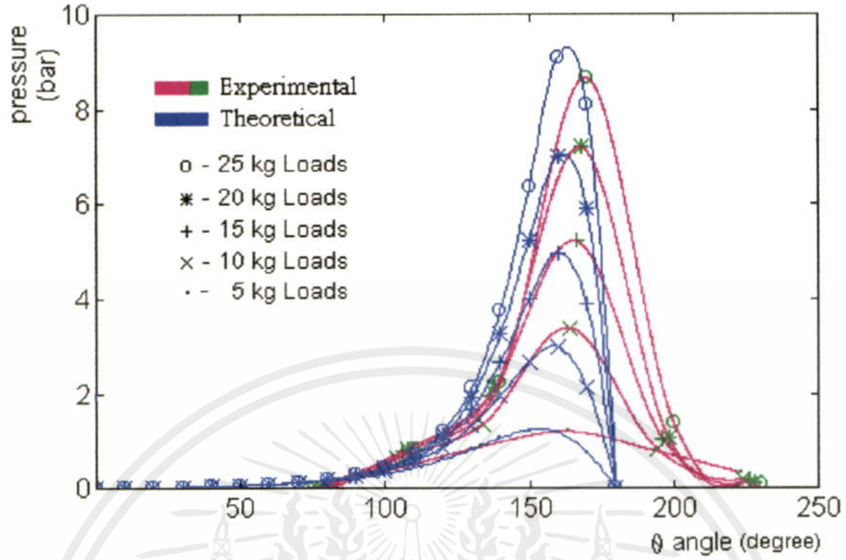
ภาพที่ 4.86



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

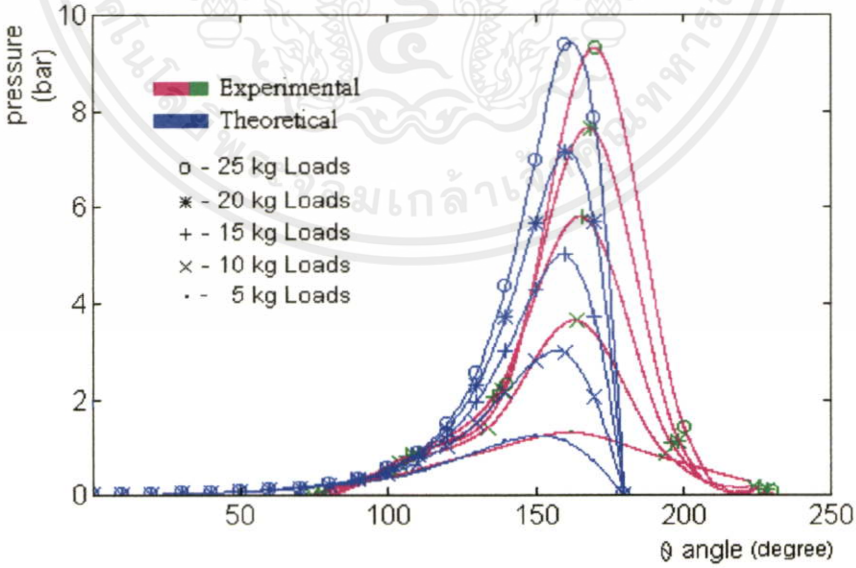
เปรียบเทียบการกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี และผลการทดลอง โดยใช้สารหล่อลื่น SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.87



เปรียบเทียบการกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี และผลการทดลอง โดยใช้สารหล่อลื่น SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

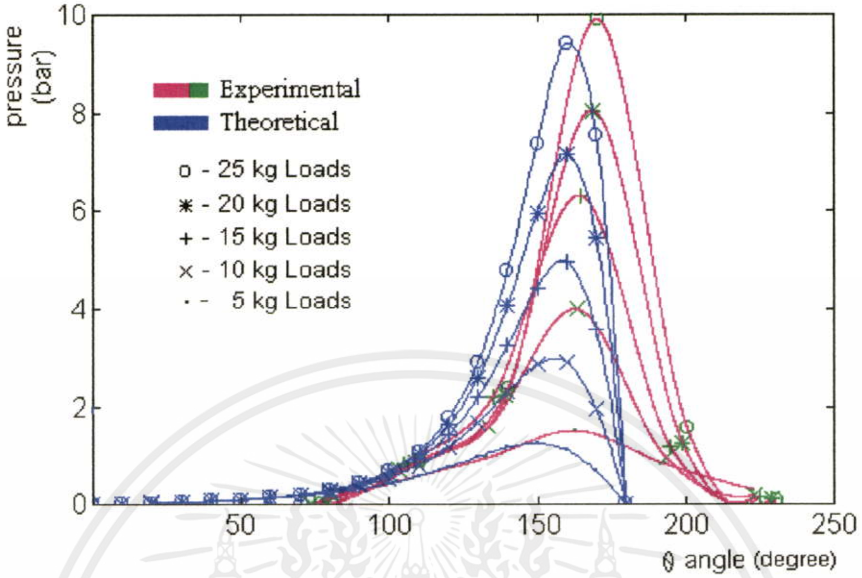
ภาพที่ 4.88



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบการกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี และผลการทดลอง โดยใช้สารหล่อลื่น SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

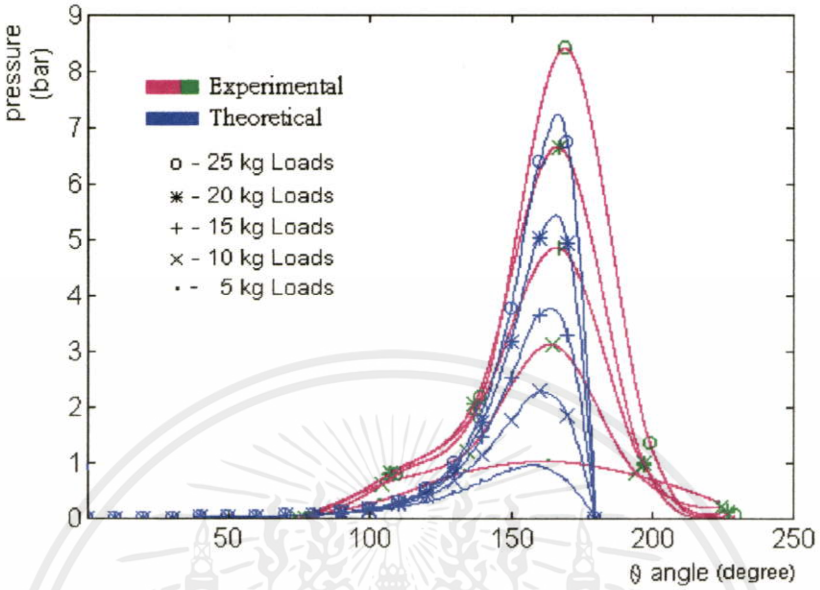
ภาพที่ 4.89



เปรียบเทียบการกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี และผลการทดลอง โดยใช้สารหล่อลื่น SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 2% ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

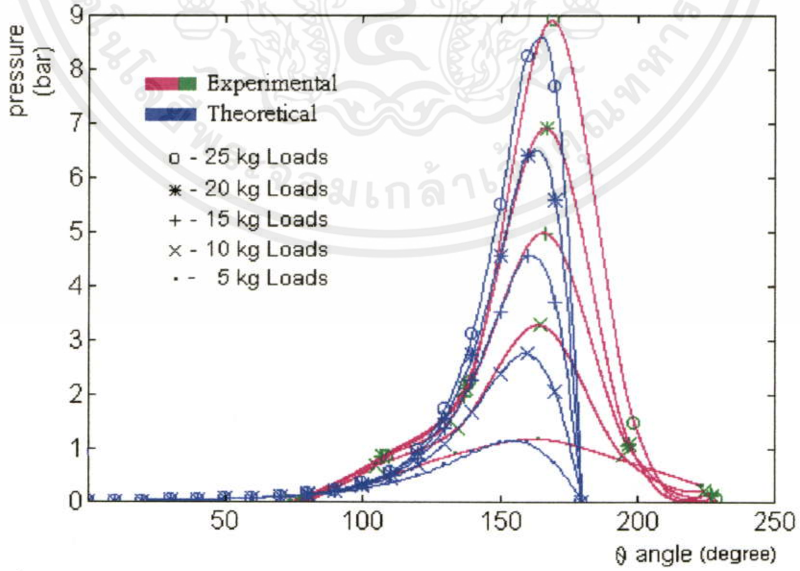
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.90



เปรียบเทียบการกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี และผลการทดลอง โดยใช้สารหล่อลื่น SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

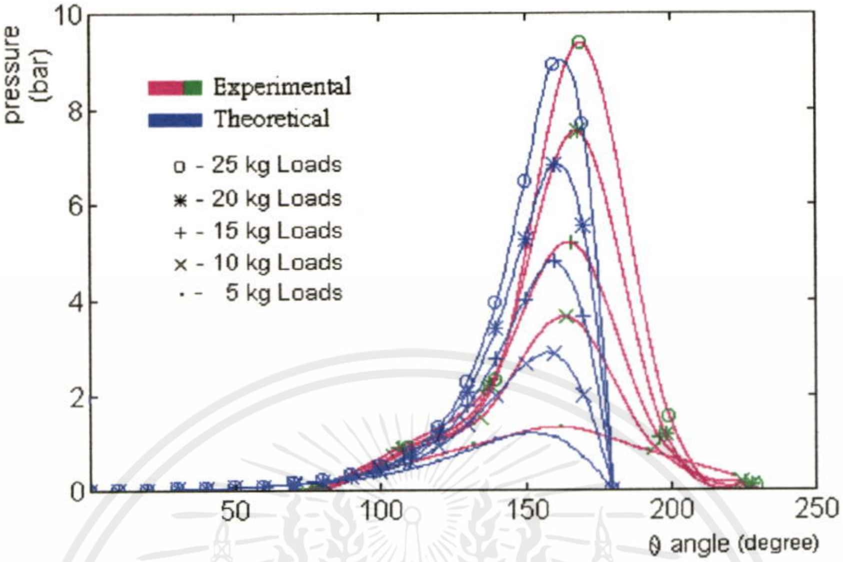
ภาพที่ 4.91



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

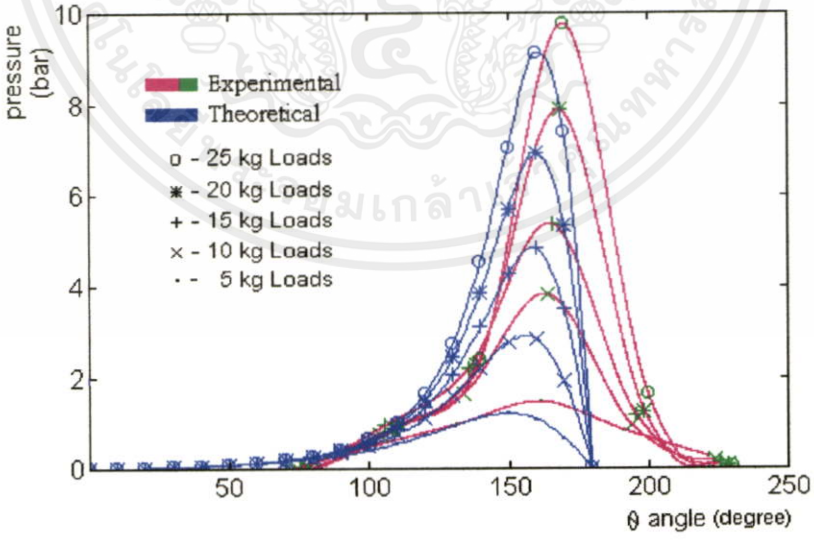
เปรียบเทียบการกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี และผลการทดลอง โดยใช้สารหล่อลื่น SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.92



เปรียบเทียบการกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี และผลการทดลอง โดยใช้สารหล่อลื่น SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

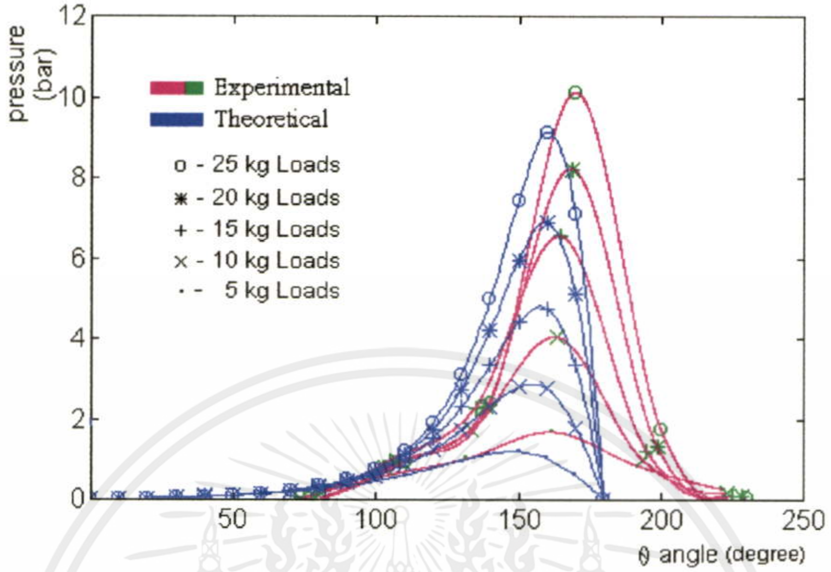
ภาพที่ 4.93



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบการกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี และผลการทดลอง โดยใช้สารหล่อลื่น SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

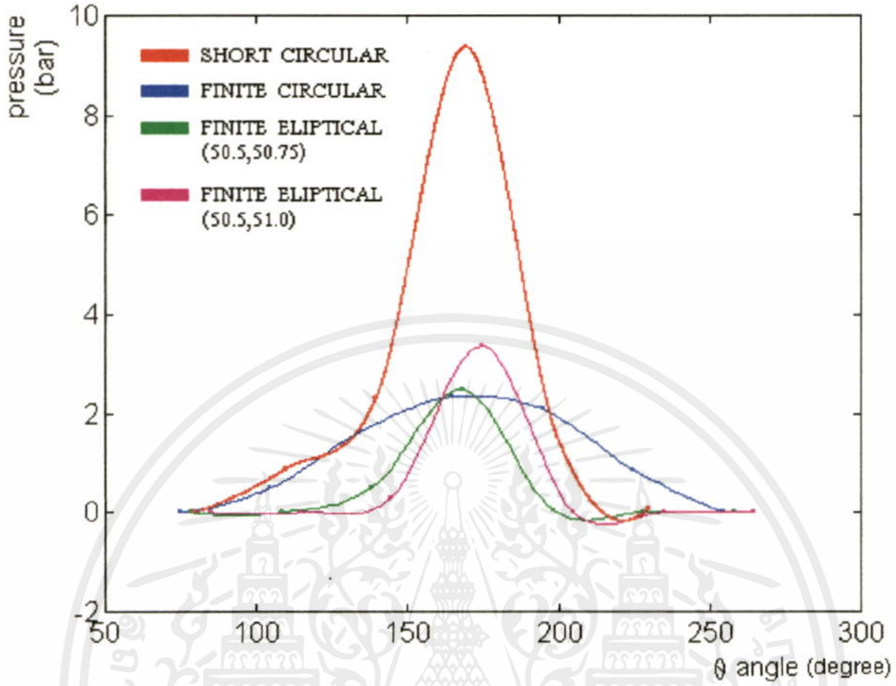
ภาพที่ 4.94



เปรียบเทียบการกระจายความดันในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น จากการคำนวนทางทฤษฎี และผลการทดลอง โดยใช้สารหล่อลื่น SAE 40 + โพลิไอโซบิวทิลีน 5% ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

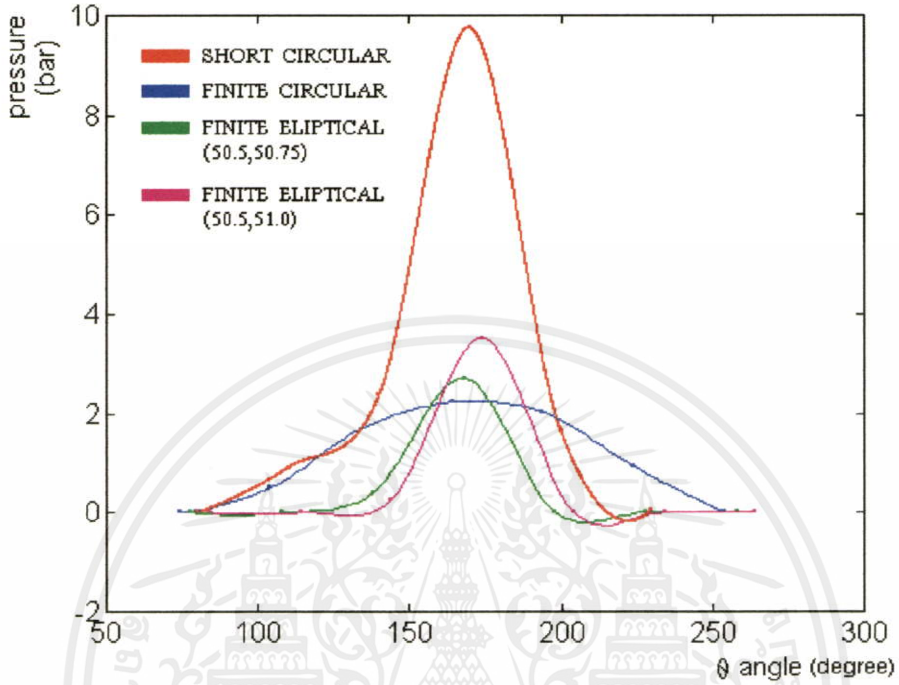
ภาพที่ 4.95



เปรียบเทียบการกระจายความดันของกาบรองลื่นเพลากลมรูปร่างและขนาดต่างๆที่สภาวะ ภาระ 25 kg , ความเร็วของเพลา 2000 rpm ,น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 + PIB 5%

- SHORT CIRCULAR JOURNAL BEARING : ϕ (BEARING) =50.3 mm , ϕ (JOURNAL) = 50.0 mm , LENGTH (BEARING) = 20 mm
- FINITE CIRCULAR JOURNAL BEARING : ϕ (BEARING) =50.3 mm , ϕ (JOURNAL) = 50.0 mm , LENGTH (BEARING) = 50 mm
- FINITE ELLIPTICAL JOURNAL BEARING : MAJOR AXIS (BEARING) = 50.75 mm MINOR AXIS (BEARING) = 50.5 mm , ϕ (JOURNAL) = 50.0 mm , LENGTH (BEARING) = 50 mm
- FINITE ELLIPTICAL JOURNAL BEARING : MAJOR AXIS (BEARING) = 51.0 mm MINOR AXIS (BEARING) = 50.5 mm , ϕ (JOURNAL) = 50.0 mm , LENGTH (BEARING) = 50 mm

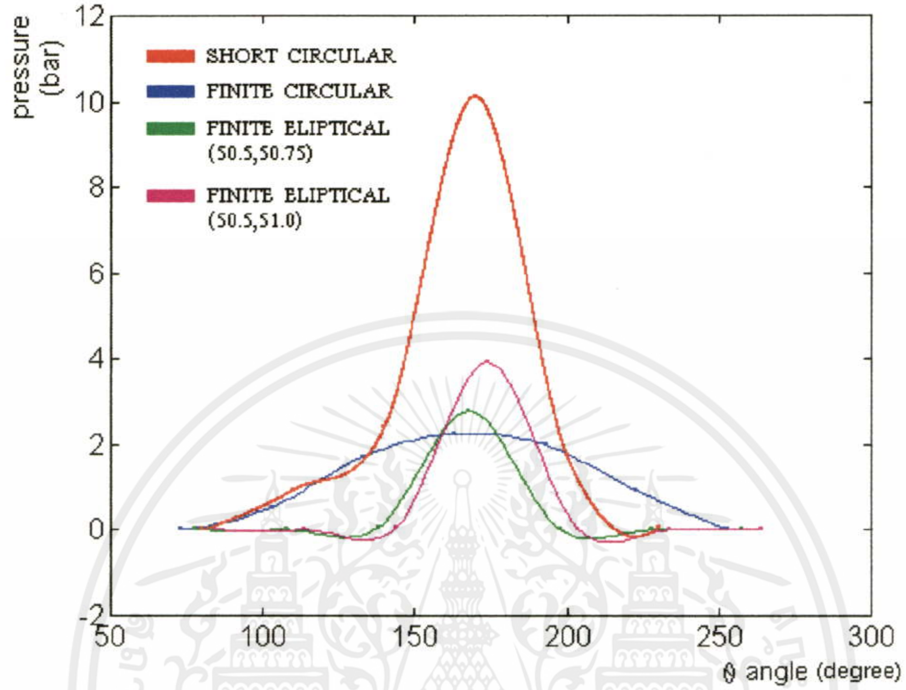
ภาพที่ 4.96



เปรียบเทียบการกระจายความดันของกาบรองลื่นเพลากลมรูปร่างและขนาดต่างๆที่สภาวะ ภาระ 25 kg , ความเร็วของเพลา 2500 rpm ,น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 + PIB 5%

- SHORT CIRCULAR JOURNAL BEARING : ϕ (BEARING) =50.3 mm , ϕ (JOURNAL) = 50.0 mm , LENGTH (BEARING) = 20 mm
- FINITE CIRCULAR JOURNAL BEARING : ϕ (BEARING) =50.3 mm , ϕ (JOURNAL) = 50.0 mm , LENGTH (BEARING) = 50 mm
- FINITE ELLIPTICAL JOURNAL BEARING : MAJOR AXIS (BEARING) = 50.75 mm MINOR AXIS (BEARING) = 50.5 mm , ϕ (JOURNAL) = 50.0 mm , LENGTH (BEARING) = 50 mm
- FINITE ELLIPTICAL JOURNAL BEARING : MAJOR AXIS (BEARING) = 51.0 mm MINOR AXIS (BEARING) = 50.5 mm , ϕ (JOURNAL) = 50.0 mm , LENGTH (BEARING) = 50 mm

ภาพที่ 4.97



เปรียบเทียบการกระจายความดันของกาบรองลื่นเพลากลมรูปร่างและขนาดต่างๆที่สภาวะ ภาระ 25 kg , ความเร็วของเพลา 3000 rpm ,น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 + PIB 5%

SHORT CIRCULAR JOURNAL BEARING : ϕ (BEARING) =50.3 mm , ϕ (JOURNAL) = 50.0 mm , LENGTH (BEARING) = 20 mm

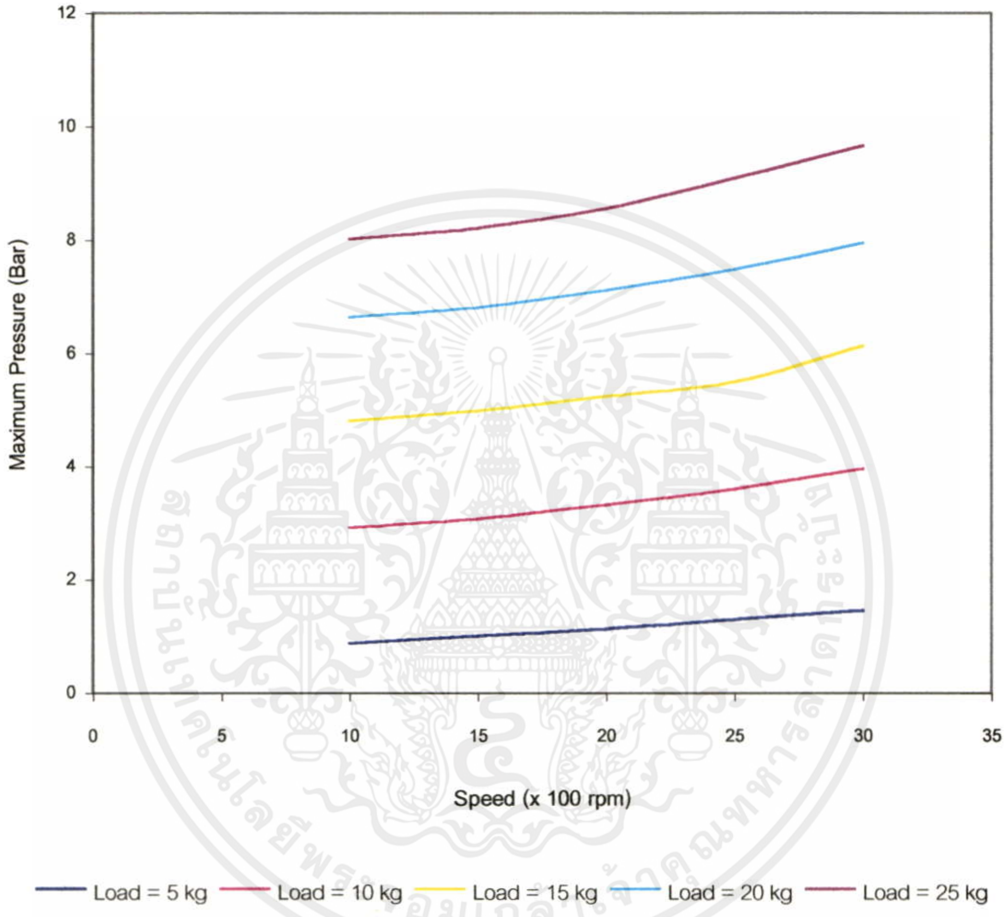
FINITE CIRCULAR JOURNAL BEARING : ϕ (BEARING) =50.3 mm , ϕ (JOURNAL) = 50.0 mm , LENGTH (BEARING) = 50 mm

FINITE ELLIPTICAL JOURNAL BEARING : MAJOR AXIS (BEARING) = 50.75 mmMINOR AXIS (BEARING) = 50.5 mm , ϕ (JOURNAL) = 50.0 mm , LENGTH (BEARING) = 50 mm

FINITE ELLIPTICAL JOURNAL BEARING : MAJOR AXIS (BEARING) = 51.0 mm MINOR AXIS (BEARING) = 50.5 mm , ϕ (JOURNAL) = 50.0 mm , LENGTH (BEARING) = 50 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

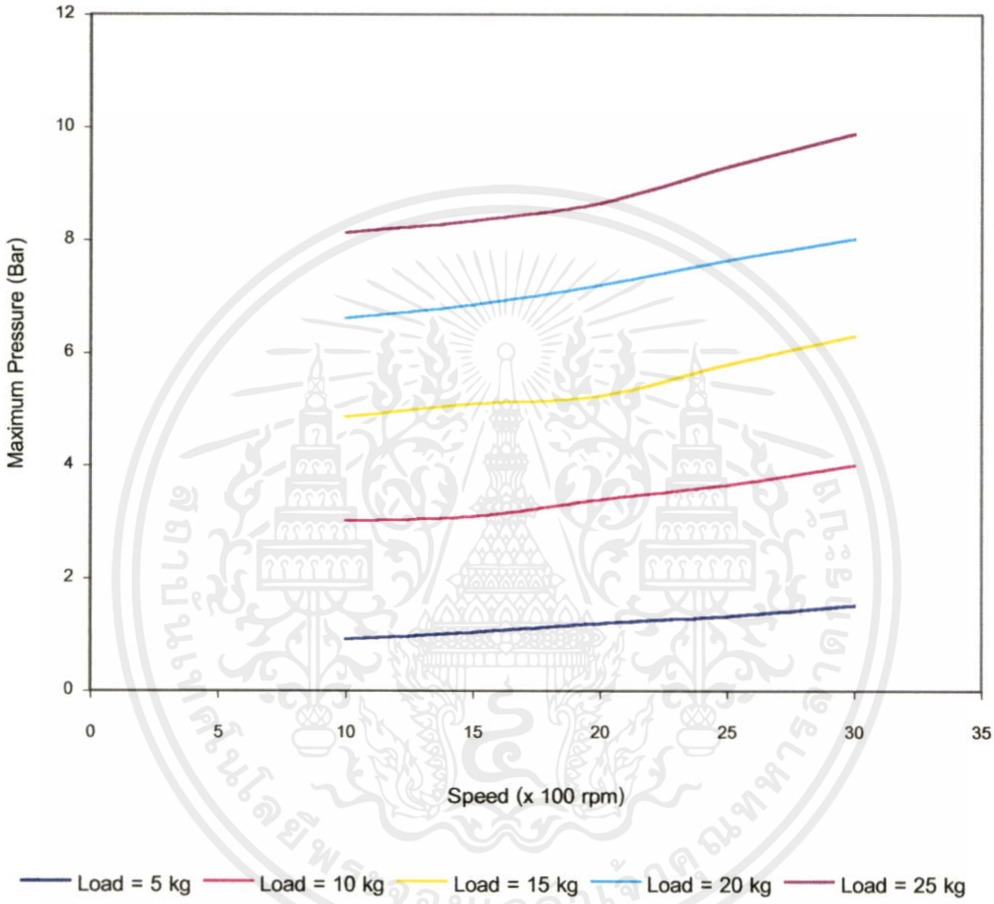
ภาพที่ 98



ผลของภาระและความเร็วรอบของเพลาต่อ ความดันสูงสุด สำหรับกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.3 มม. ยาว 20 มม. เพลามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มม. เติมน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 + 1% โพลีไอโซบิวทิลีน(PIB)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

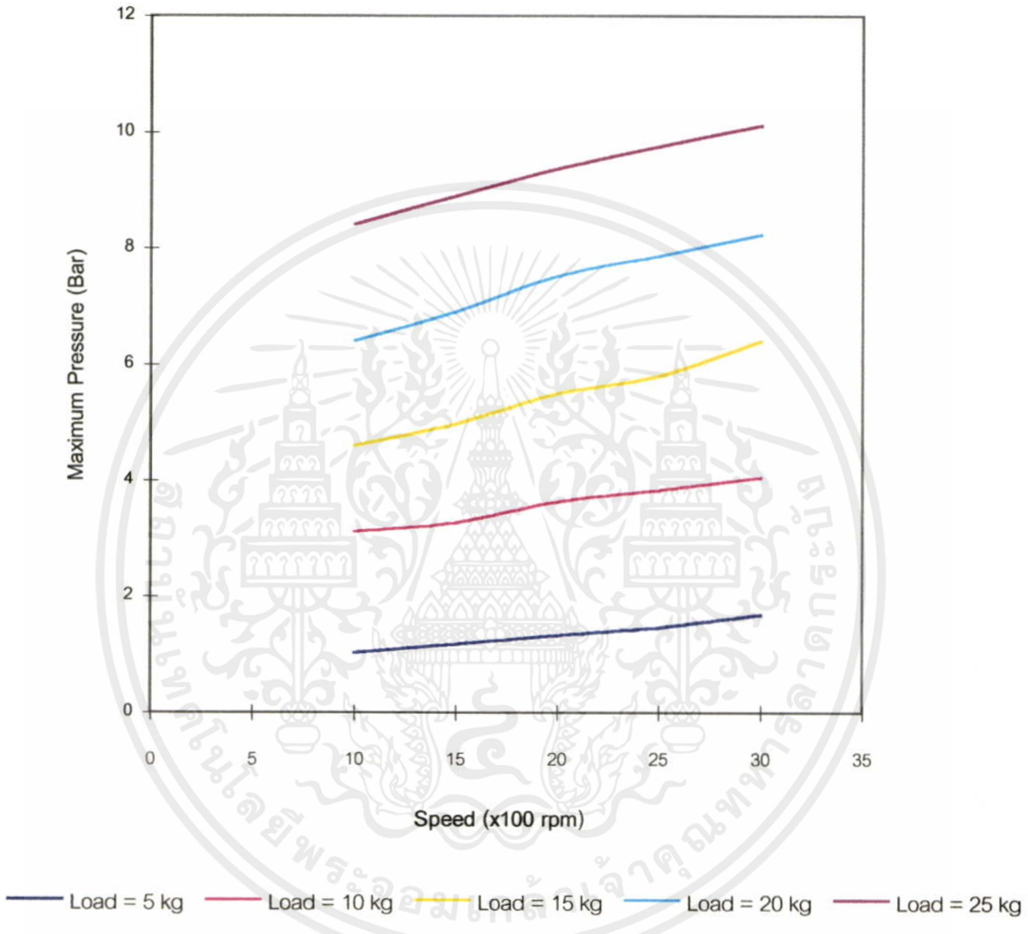
ภาพที่ 99



ผลของภาระและความเร็วรอบของเพลาต่อ ความดันสูงสุด สำหรับกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.3 มม. ยาว 20 มม. เพลามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มม. เติมน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 + 2% โพลีไอโซบิวทิลีน(PIB)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

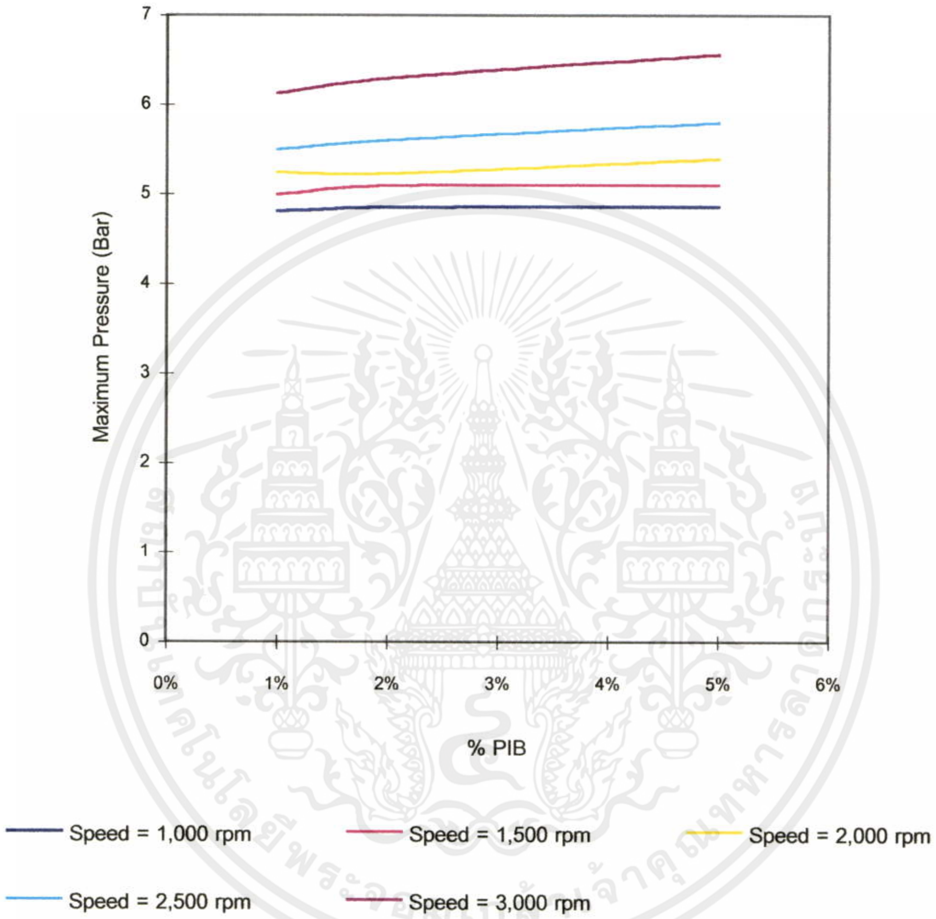
ภาพที่ 100



ผลของภาระและความเร็วรอบของเพลาต่อ ความดันสูงสุด สำหรับกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.3 มม. ยาว 20 มม. เพลามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มม. เติมน้ำมันหล่อลื่นSAE 40 + 5% โพลีไอโซบิวทิลีน(PIB)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

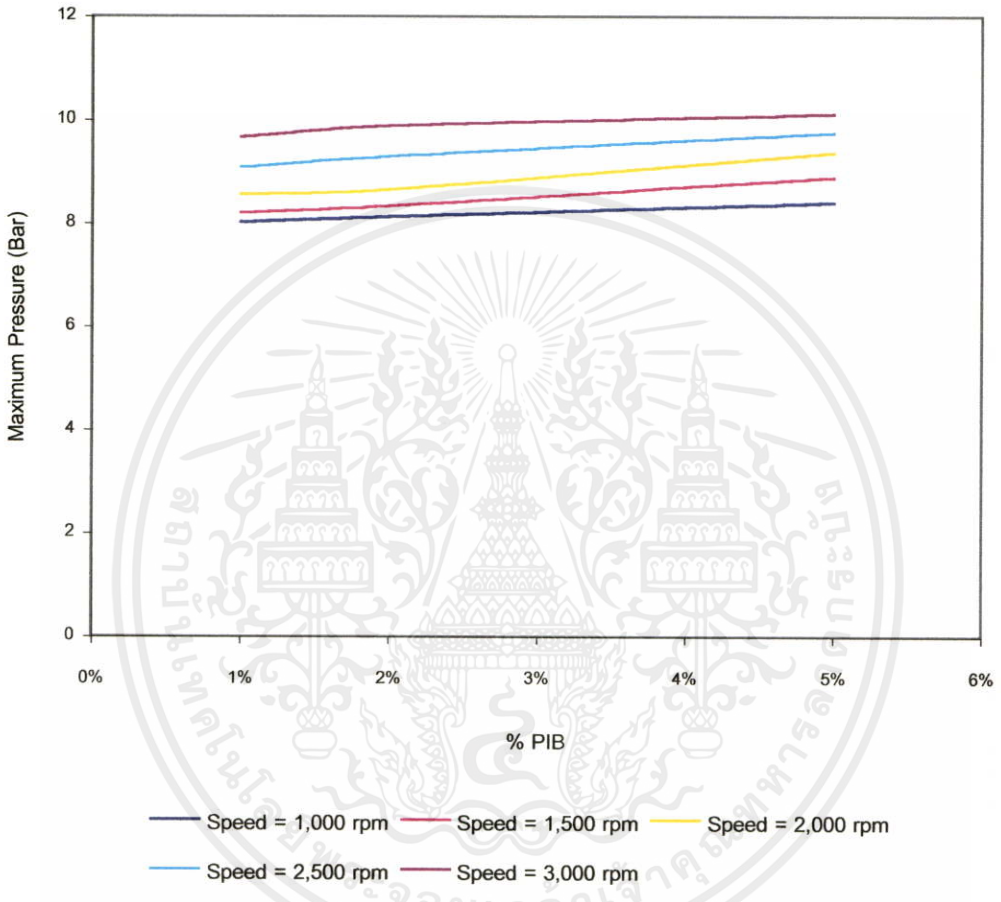
ภาพที่ 101



ผลของส่วนผสม โพลีไอโซบิวทิลีน(PIB) และความเร็วรอบของเพลา ต่อความดันสูงสุด สำหรับกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.3 มม. ยาว 20 มม. เพลามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มม. เมื่อรับภาระ 15 กก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

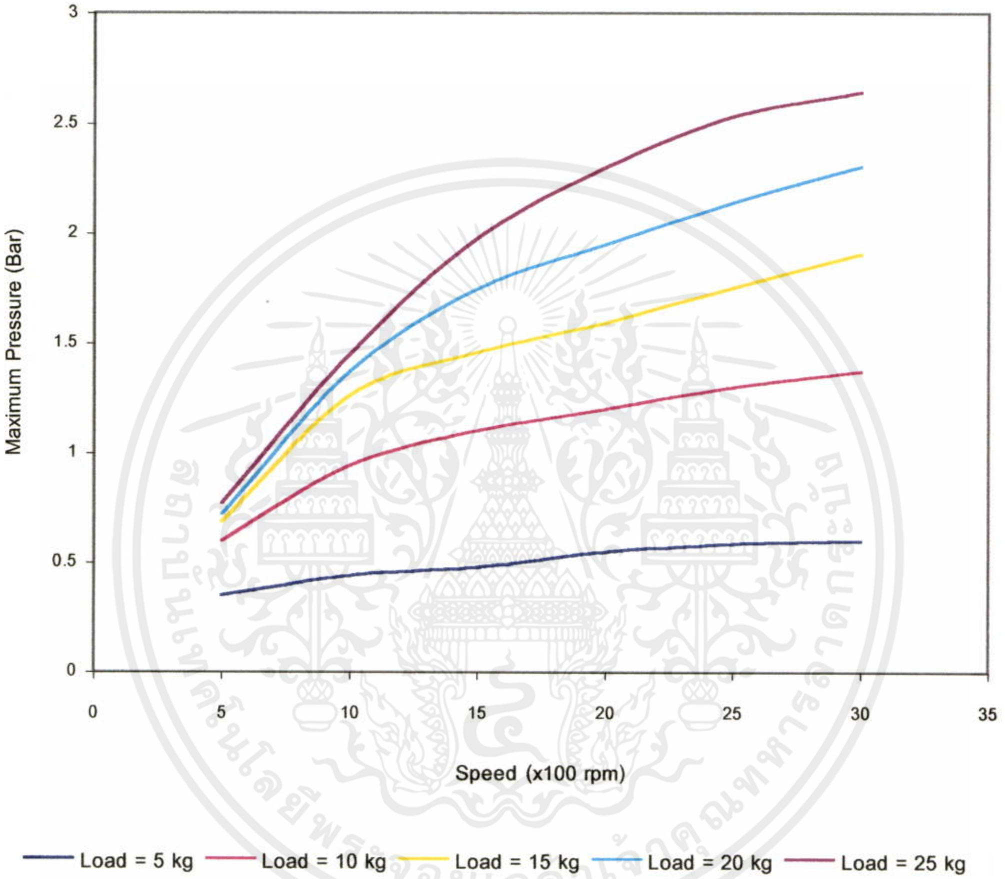
ภาพที่ 102



ผลของส่วนผสม โพลีไอโซบิวทิลีน(PIB) และความเร็วรอบของเพลา ต่อความดันสูงสุด สำหรับกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.3 มม. ยาว 20 มม. เพลามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มม. เมื่อรับภาระ 25 กก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

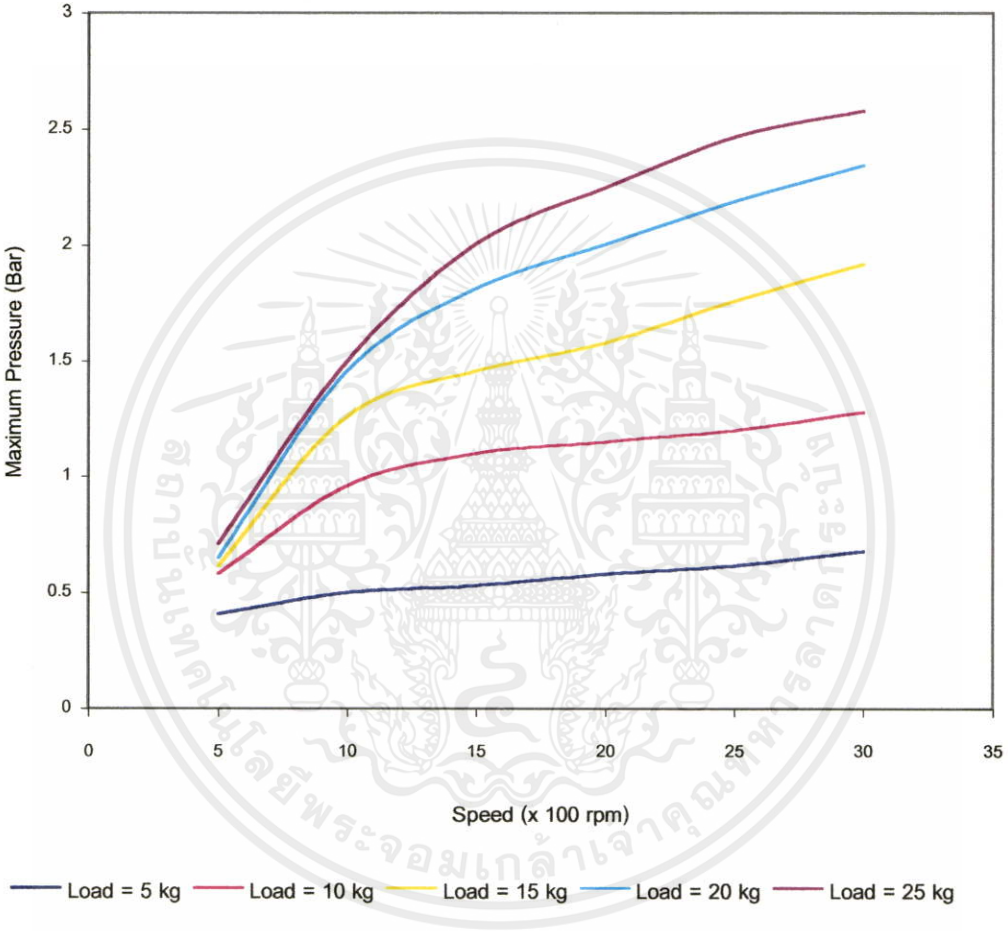
ภาพที่ 103



ผลของภาระและความเร็วรอบของเพลาต่อ ความดันสูงสุด สำหรับกาบรองลื่นครึ่งวงรียาวจำกัด มีความยาวแกนเมเยอร์ 50.75 มม. ความยาวแกนไมเนอร์ 50.5 มม. ความยาวของกาบรองลื่น 50.0 มม. เพลามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มม. เติมน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 + 1% โพลีไอโซบิวทิลีน(PIB)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

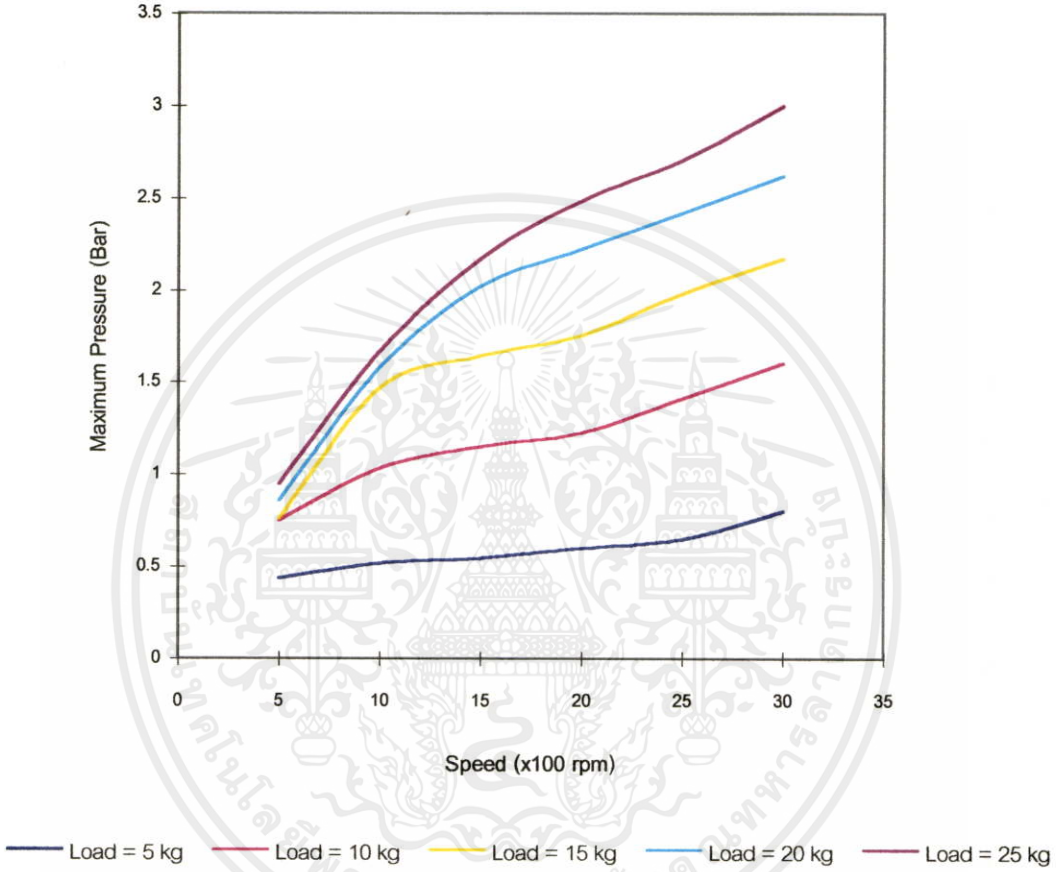
ภาพที่ 104



ผลของภาระและความเร็วรอบของเพลาต่อ ความดันสูงสุด สำหรับกาบรองลื่นครึ่งวงรียาวจำกัด มีความยาวแกนเมเยอร์ 50.75 มม. ความยาวแกนไมเนอร์ 50.5 มม. ความยาวของกาบรองลื่น 50.0 มม. เพลามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มม. เติมน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 + 2% โพลีไอโซบิวทิลีน(PIB)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

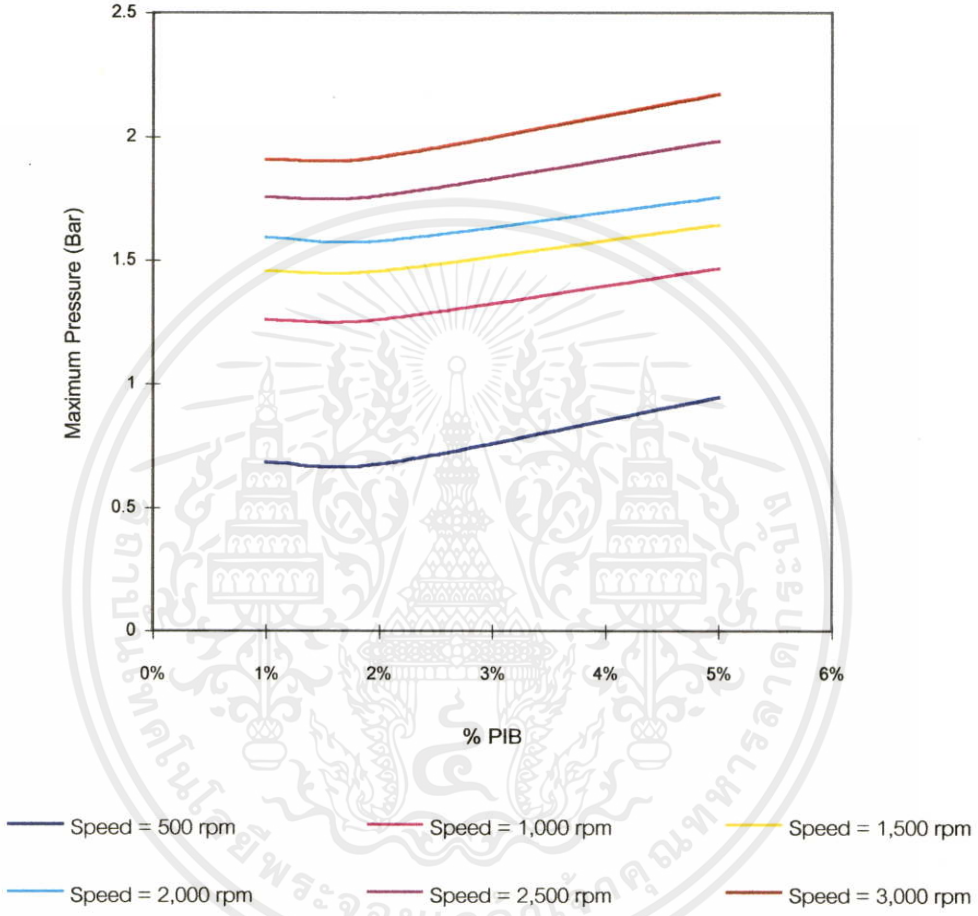
ภาพที่ 105



ผลของภาระและความเร็วรอบของเพลาต่อ ความดันสูงสุด สำหรับกาบรองลื่นครึ่งวงรียาวจำกัด มีความยาวแกนเมเยอร์ 50.75 มม. ความยาวแกนไมเนอร์ 50.5 มม. ความยาวของกาบรองลื่น 50.0 มม. เพลามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มม. เติมน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 + 5% โพลีไอโซบิวทิลีน(PIB)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

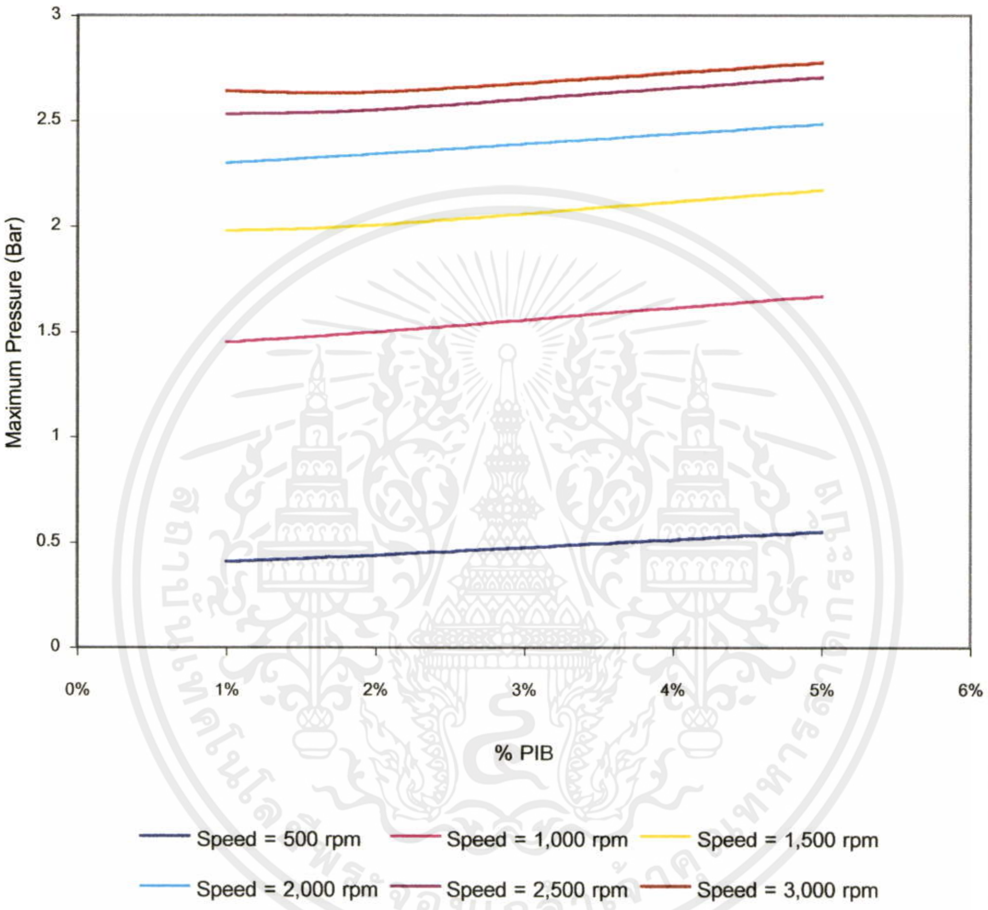
ภาพที่ 106



ผลของส่วนผสม โพลีไอโซบิวทิลีน(PIB) และความเร็วรอบของเพลา ต่อความดันสูงสุด สำหรับกาบรองลื่นครึ่งวงรียาวจำกัด มี ความยาวแกนเมเยอร์ 50.75 มม. ความยาวแกนไมเนอร์ 50.5 มม. ความยาวของกาบรองลื่น 50.0 มม. เพลามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มม. เมื่อรับภาระ 15 กก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

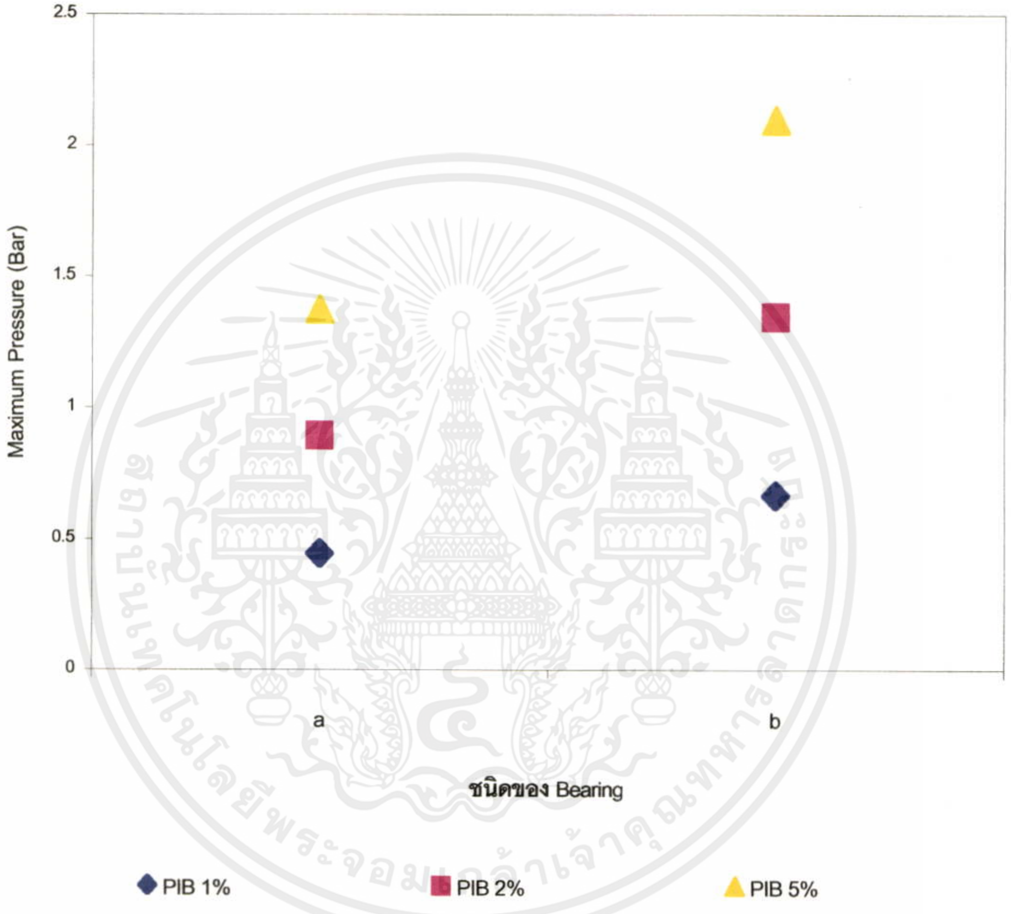
ภาพที่ 107



ผลของส่วนผสม โพลีไอโซบิวทิลีน(PIB) และความเร็วรอบของเพลา ต่อความดันสูงสุด สำหรับกาบรองลื่นครึ่งวงรียาวจำกัด มี ความยาวแกนเมเยอร์ 50.75 มม. ความยาวแกนไมเนอร์ 50.5 มม. ความยาวของกาบรองลื่น 50.0 มม. เพลามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มม. เมื่อรับภาระ 25 กก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 108



เปรียบเทียบผลของส่วนผสม ของโพลีไอโซบิวทิลีน(PIB) ต่อความดันสูงสุด สำหรับกาบรองลื่น 2 ชนิด ที่ความเร็ว 1,000 รอบต่อนาที, ภาระ 5 กิโลกรัม

a คือ FINITE JOURNAL BEARING (ELLIPTICAL 50.5, 50.75 mm.)

b คือ FINITE JOURNAL BEARING (ELLIPTICAL 50.5, 51 mm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.5.1 จากผลการทดลองในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น กาบรองลื่นครึ่งวงกลมยาวจำกัด และกาบรองลื่นครึ่งวงรี (ภาพที่ 4.27-4.86 และภาพที่ 4.105-4.113) ความดันสูงสุดจะเพิ่มตามภาระความเร็วรอบของเพลาที่หมุนและปริมาณเปอร์เซ็นต์ของสารเติมแต่ง โพลิไอโซบิวทิลีน

4.5.2 ความดันสูงสุดในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้นที่ได้จากการคำนวณในทางทฤษฎีโดยสมการการหล่อลื่นของเรย์โนลด์ จะมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองดังภาพที่ 4.87-4.101

4.5.3 ความดันสูงสุดจากภาพที่ 4.102-4.104 กาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้นจะมีค่าความดันสูงสุดสูงกว่า ความดันสูงสุดในกาบรองลื่นครึ่งวงรีครึ่งวงรีความยาวจำกัดและความดันสูงสุดในกาบรองลื่นครึ่งวงกลมความยาวจำกัดจะมีค่าน้อยที่สุด

4.5.4 ความดันสูงสุดในกาบรองลื่นครึ่งวงรีความยาวจำกัด ที่มีความยาวตามแกนเมเยอร์มากกว่าจะมีค่าความดันสูงมากกว่า ในกาบรองลื่นครึ่งวงรีที่มีความยาวแกนเมเยอร์น้อยกว่าดังภาพที่ 4.102-4.104 และภาพที่ 4.115

4.5.5 การวิเคราะห์การกระจายความดันเปรียบเทียบจากผลการทดลอง และผลการคำนวณในทางทฤษฎี กรณีกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น

ในการทดลอง การเติมน้ำมันหล่อลื่นเข้าไปในกาบรองลื่นครึ่งวง เมื่อน้ำมันไหนมาถึงปากช่องว่างระหว่าง กาบรองลื่น และเพลา น้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่จะถูกรีดออกนอกกาบรองลื่นจะมีเพียงส่วนน้อยที่สามารถไหลเข้าไปภายในได้ จึงต้องขยายปากช่องทางไหลเข้าของน้ำมัน ความดันสูงสุดในกาบรองลื่นที่ไหลเข้าในช่องว่างระหว่างกาบรองลื่นและเพลามากกว่าสภาพปกติ จะถูกอัดรีดมากขึ้นเมื่อน้ำมันไหลเข้าสู่ส่วนโค้งปกติของช่องว่าง ทำให้ความดันที่วัดได้จากการทดลองสูงกว่าผลการคำนวณในทางทฤษฎี

จากการวิเคราะห์สมการความดันจากทฤษฎีการหล่อลื่นของเรย์โนลด์

$$P = \frac{3U\eta\varepsilon \sin\theta}{c^2 R(1+\varepsilon\cos\theta)^3}\left[\frac{L^2}{4} - y^2\right]$$

ถ้าความคงตัวของความหนืดของน้ำมันต่ออุณหภูมิมีค่าน้อย คือความหนืด (η) ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันมีค่าน้อยลง และถ้าความเร็ว (U) เพิ่มมากขึ้นค่าความดันจะเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

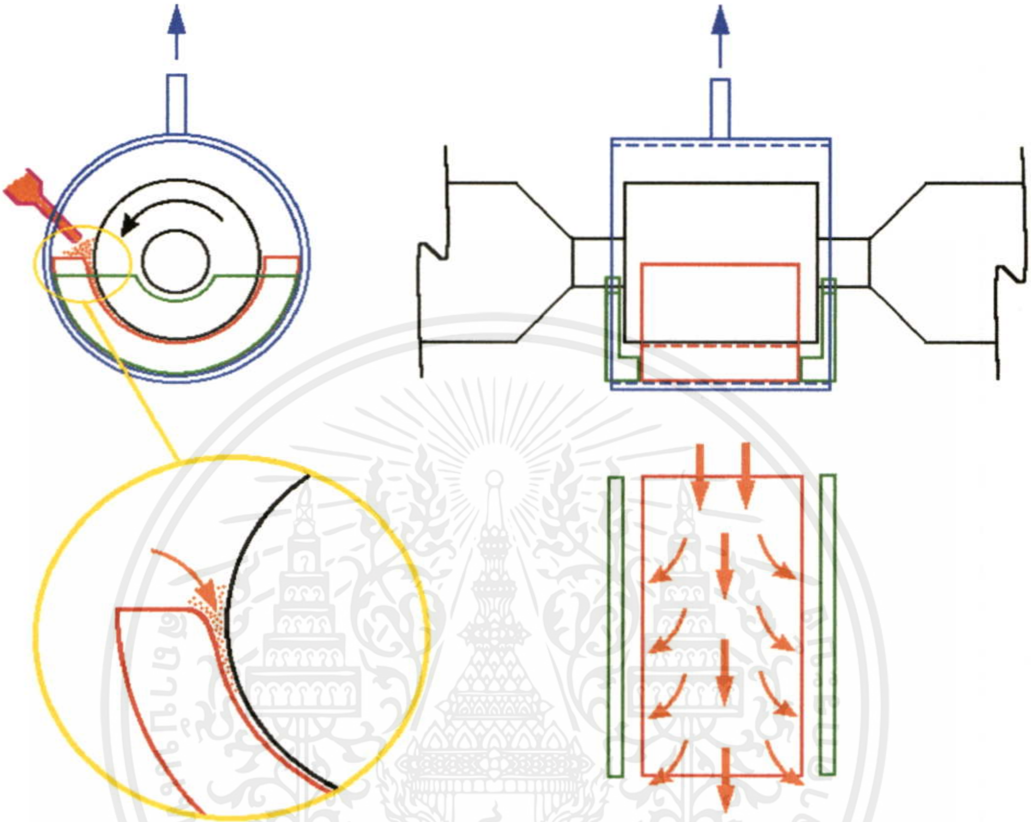
ดังนั้นในการเปรียบเทียบการกระจายความดันที่ได้จากการทดลองและในทางทฤษฎีในภาพที่ 4.87-4.101 สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

1) เมื่อเติมน้ำมันหล่อลื่นผสมกับโพลิไอโซบิวทิลีน 1% และ 2% ภาพที่ 4.87-4.96 ในขณะที่ความเร็วรอบ (U) ต่ำ 1000 รองต่อนาที ค่าความดันสูงสุดที่ได้จากการทดลองจะมีค่าสูงกว่าผลการคำนวณจากทฤษฎีตามเงื่อนไขของการเติมน้ำหล่อลื่นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเนื่องจากในขณะที่ความเร็วรองต่ำ ความร้อนเกิดขึ้นน้อยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นน้อย น้ำมันหล่อลื่นยังมีความไม่เปลี่ยน เมื่อความเร็วสูงระดับกลาง คือ 1500 ถึง 2500 รอบต่อนาที ความร้อนเกิดสูงขึ้นความหนืดลดลง ความดันที่ได้จากการทดลองจะมีค่าน้อยกว่าในทางทฤษฎี ซึ่งในระดับความเร็วนี้ผลของความเร็วมีผลต่อความดันน้อย เมื่อความเร็วสูงมากถึง 3000 รอบต่อนาที ผลของความเร็วจะอัดรีดน้ำมันที่ไหลเข้าไปในช่องว่างระหว่างกาบรองลื่นและเพลาที่มีปริมาณมากกว่าปรกติ ทำให้ผลของความเร็วมีผลมากกว่าการลดของความหนืดและให้ผลของความดันที่ได้จากการทดลองสูงกว่าทางทฤษฎี

2) เมื่อเติมน้ำมันหล่อลื่นผสมโพลิไอโซบิวทิลีน 5% ดังภาพที่ 4.97-4.101 น้ำมันหล่อลื่นจะมีค่าความหนืดคงตัวมาก ความหนืดเปลี่ยนตามอุณหภูมิน้อยมาก เป็นผลให้ความดันที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าในทางทฤษฎีในทุกระดับความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.109



การไหลของน้ำมันหล่อลื่นเข้าช่องว่างระหว่างกาบรองลื่นและเพลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองการวิจารณ์และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากข้อมูลที่ได้จากการบันทึกในระหว่างการทดลองและแผนภาพการกระจายความดันในกาบรองลื่นแบบต่างๆ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้คือ

1) ค่าความดันสูงสุดในกาบรองลื่นจะอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับตำแหน่งที่มีความหนาฟิล์มน้ำมันน้อยที่สุด
2) การเพิ่มความเร็วรอบของเพลาหมุนในกาบรองลื่นที่สภาวะที่มีภาระขนาดหนึ่งๆ ความดันของน้ำมันหล่อลื่นที่เกิดขึ้นรับเพลา จะมีค่าสูงขึ้น
3) การเพิ่มความเร็วรอบของเพลาที่หมุนในกาบรองลื่น ที่สภาวะที่มีภาระขนาดหนึ่งๆ ความหนาฟิล์มน้ำมันน้อยที่สุด จะมีความหนาเพิ่มขึ้น
4) ในสภาวะที่มีภาระสูงขึ้น ความหนาฟิล์มน้ำมันน้อยที่สุดที่มีค่าน้อยลง
5) ในกาบรองลื่นรูปวงรี ความดันสูงสุดจะมีค่าสูงกว่าในกาบรองลื่นรูปวงกลม
6) การกระจายความดันในกาบรองลื่นรูปวงรี จะอยู่ในช่วงแคบกว่าในกาบรองลื่นรูปวงกลม
7) ในกาบรองลื่นรูปวงรี ความรีของกาบรองลื่นส่งผลให้ค่าความดันสูงสุดมีค่าเพิ่มตามความรีของกาบรองลื่น คือในกาบรองลื่นรูปวงรี ถ้าค่าความยาวตามแกนเมเยอร์มากกว่าความยาวตามแกนไมเนอร์มากขึ้น ความดันสูงสุดจะมากขึ้นตามมาด้วย
8) สารหล่อลื่นนัน-นิวตอเนียน ที่ได้จากการเติมสารเติมแต่ง โพลิไอโซนิวทิลีน เปอร์เซ็นต์สูงขึ้น เป็นผลให้มีค่าความหนืดสูงขึ้น และมีความคงตัวมากขึ้น จะสามารถรับภาระได้สูงขึ้น และจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงกว่ากาบรองลื่นที่หล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่นชนิดนิวตอเนียน

5.2 การวิจารณ์และข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์สมรรถนะของกาบรองลื่นเพลากลมชนิดหุ้มเพลาไม่เต็มวงหล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นนัน-นิวตอเนียน เป็นการวิเคราะห์จากการสร้างเครื่องมืออุปกรณ์ทดลอง เพื่อบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องแล้วนำมาประมวลผล สรุปข้อมูลประกอบในการวิเคราะห์ เป็นข้อมูลที่มีค่าละเอียด

มากในการสร้างเครื่องมือทดลองมีอุปสรรคและปัญหาในการเลือกใช้อุปกรณ์วัดค่าต่างๆ ที่เหมาะสมเนื่องจากเครื่องมือที่มีความแม่นยำสูง จะมีราคาแพงมาก จึงต้องพยายามเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีความแม่นยำสูง จะมีราคาแพงมาก จึงต้องพยายามเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ ในการสร้างเครื่องทดลอง ขั้นตอนแรกๆ ก็มีอุปสรรคอยู่เสมอมา เนื่องจากการเลือกใช้อุปกรณ์ที่ไม่เหมาะสม และจำเป็นต้องปรับเปลี่ยน และสุดท้ายก็ได้เครื่องทดลองที่คิดว่ามีความแม่นยำได้ในระดับพอใช้ หากต้องการได้ผลการทดลองออกมาแม่นยำมากๆ จำเป็นต้องเลือกอุปกรณ์ที่มีความแม่นยำสูง ซึ่งก็ต้องใช้ประมาณในการจัดสร้างเครื่องมือ และอุปกรณ์สูงตามไปด้วย

ในการทดลองครั้งนี้ จะพบว่าผลการทดลองในกรณีกาบรองลื่นครึ่งวงกลมสั้น เมื่อเทียบผลในทางทฤษฎี และในการทดลองแล้วจะเห็นว่า มีความใกล้เคียงกัน แสดงว่าผลการทดลองหาการกระจายความดันของกาบรองลื่นครึ่งวงกลมที่มีความยาวจำกัด และกาบรองลื่นรูปวงรีที่มีความยาวจำกัดน่ามีค่าอยู่ในระดับที่เชื่อถือได้

วิธีการเติมน้ำมันหล่อลื่นเข้าไปในกาบรองลื่นและเพลา เพื่อศึกษาสมรรถนะของกาบรองลื่นเพลากลมในการทดลองนี้ได้ทำการขยายปากช่องทางไหลเข้าของน้ำมันหล่อลื่นให้กว้างขึ้น เพื่อให้น้ำมันหล่อลื่นไหลเข้าไปในช่องว่างระหว่างกาบรองลื่นและเพลา อัตราการไหลเข้าของน้ำมันหล่อลื่นจะมากกว่าอัตราการไหลเข้าปรกติในทางทฤษฎี เป็นเหตุให้ผลการวัดค่าความดันในการทดลองมีค่าสูงกว่าในทางทฤษฎี ถ้าสามารถออกแบบการเติมน้ำมันหล่อลื่นให้มีอัตราการไหลเข้าสม่ำเสมอตามทฤษฎี ค่าความดันที่วัดได้จากการทดลองจะมีความถูกต้องมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

Hashimoto, H and M. Mongkolwongrojn "Dynamic Behavior of Short Elliptical Journal Bearing with Non-newtonian" การสัมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกลครั้งที่ 5 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2534

Mongkol Mongkolwongrojn and Pornsak Attavanich. "Static Characteristics of High Speed Journal Bearing with Non-newtonian Lubricants" การประชุมสัมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8 ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2537

Hamrock , Bernard J. "Fundamentals of Fluid Film Lubrication." Singapore: Mc Graw-Hill, Inc., 1994

Cameron, A. "The Principles of Lubrication." 1st edition. London: Longmans Green and Co., Ltd., 1966

Dr. Hiromu Hashimoto and Dr. Mongkol Mongkolwongrojn "Advanced Lubrication theory" พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

Datapool Information

Name:	C:\US200\KMITL.MPH
Last Filesave:	20/8/97 16:15 PM
Number of Data Series:	1 / 10
List of Data Series:	Lubricant 1%

Data Series Information

Name:	Lubricant 1%
Device:	MC200 SN216050
Remarks:	
Customer:	KMITL
Sample:	
Number of Intervals:	1
Measuring Date:	20/8/97
Measuring Time:	14:18 PM
Measuring Systems:	Z3 DIN (25mm)
Interval:	1
Number of Data Points:	30
Interval Data:	30 Meas.Pt.
	Meas. Pt. Duration 10 s
- Speed	n = 200 ... 1E+3 1/min lin

Meas.Pt.	Speed [1/min]	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [mPa·s]	Torque [mNm]	Temperature [°C]
1	200	258.2	3.65	14.14	0.16	26.6
2	227.6	293.8	4.23	14.39	0.19	26.6
3	255.2	329.4	4.75	14.42	0.21	26.6
4	282.8	365.1	5.29	14.5	0.23	26.6
5	310.4	400.7	5.87	14.64	0.26	26.6
6	337.9	436.3	6.44	14.76	0.28	26.6
7	365.5	471.9	7.04	14.91	0.31	26.6
8	393.1	507.5	7.63	15.04	0.33	26.6
9	420.7	543.1	8.23	15.16	0.36	26.6
10	448.3	578.7	8.8	15.2	0.39	26.6
11	475.9	614.3	9.41	15.31	0.41	26.6
12	503.5	650	9.99	15.36	0.44	26.6
13	531	685.6	10.6	15.52	0.47	26.6
14	558.6	721.2	11.3	15.66	0.49	26.6
15	586.2	756.8	11.9	15.72	0.52	26.6
16	613.8	792.4	12.5	15.82	0.55	26.6
17	641.4	828	13.1	15.87	0.58	26.6
18	669	863.6	13.8	15.94	0.6	26.6
19	696.6	899.3	14.4	16	0.63	26.6
20	724.1	934.9	15	16.1	0.66	26.6
21	751.7	970.5	15.6	16.1	0.68	26.6
22	779.3	1,006	16.3	16.15	0.71	26.6
23	806.9	1,042	16.8	16.16	0.74	26.6
24	834.5	1,077	17.5	16.21	0.76	26.6
*** 25 ***	862.1	1,113	34.3	30.78	1.5	26.6
26	889.7	1,149	18.8	16.33	0.82	26.6
27	917.3	1,184	19.4	16.36	0.85	26.6
28	944.8	1,220	20	16.36	0.87	26.6
29	972.4	1,255	20.6	16.37	0.9	26.6
30	1,000	1,291	21.2	16.43	0.93	26.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Datapool Information

Name: C:\US200\KMITL.MPH
Last Filesave: 20/8/97 16:15 PM
Number of Data Series: 1 / 10
List of Data Series: Lubricant 2%

Data Series Information

Name: Lubricant 2%
Device: MC200 SN216050
Remarks:
Customer: KMITL
Sample:
Number of Intervals: 1
Measuring Date: 20/8/97
Measuring Time: 14:32 PM
Measuring Systems: Z3 DIN (25mm)

Interval: 1
Number of Data Points: 30

Interval Data: 30 Meas.Pt.
Meas. Pt. Duration 10 s
- Speed n = 200 ... 1E+3 1/min lin

Meas.Pt.	Speed [1/min]	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [mPa·s]	Torque [mNm]	Temperature [°C]
1	200	258.2	3.87	14.99	0.17	27.1
2	227.6	293.8	4.46	15.18	0.2	27.1
3	255.2	329.4	5	15.19	0.22	27.1
4	282.8	365.1	5.58	15.27	0.24	27.1
5	310.4	400.7	6.18	15.41	0.27	27.1
6	337.9	436.3	6.77	15.52	0.3	27.1
7	365.5	471.9	7.37	15.62	0.32	27.1
8	393.1	507.5	7.96	15.68	0.35	27.1
9	420.7	543.1	8.61	15.86	0.38	27.1
10	448.3	578.7	9.21	15.92	0.4	27.1
11	475.9	614.3	9.83	16	0.43	27.1
12	503.5	650	10.4	16.04	0.46	27.1
13	531	685.6	11.1	16.17	0.49	27.1
14	558.6	721.2	11.7	16.29	0.51	27.1
15	586.2	756.8	12.4	16.36	0.54	27.1
16	613.8	792.4	13	16.43	0.57	27.1
17	641.4	828	13.7	16.51	0.6	27.1
18	669	863.6	14.3	16.55	0.63	27.1
19	696.6	899.3	14.9	16.59	0.65	27.1
20	724.1	934.9	15.6	16.67	0.68	27.1
21	751.7	970.5	16.2	16.72	0.71	27.1
22	779.3	1,006	16.9	16.78	0.74	27.1
23	806.9	1,042	17.4	16.75	0.76	27.1
24	834.5	1,077	18.1	16.8	0.79	27.1
25	862.1	1,113	18.8	16.85	0.82	27.1
26	889.7	1,149	19.4	16.92	0.85	27
27	917.3	1,184	20.1	16.95	0.88	27
28	944.8	1,220	20.7	16.94	0.9	27
29	972.4	1,255	21.3	16.94	0.93	27
30	1,000	1,291	21.9	16.99	0.96	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Datapool Information

Name: C:\US200\KMITL.MPH
Last Filesave: 20/8/97 16:15 PM
Number of Data Series: 1 / 10
List of Data Series: Lubricant 5%

Data Series Information

Name: Lubricant 5%
Device: MC200 SN216050
Remarks:
Customer: KMITL
Sample:
Number of Intervals: 1
Measuring Date: 20/8/97
Measuring Time: 14:45 PM
Measuring Systems: Z3 DIN (25mm)

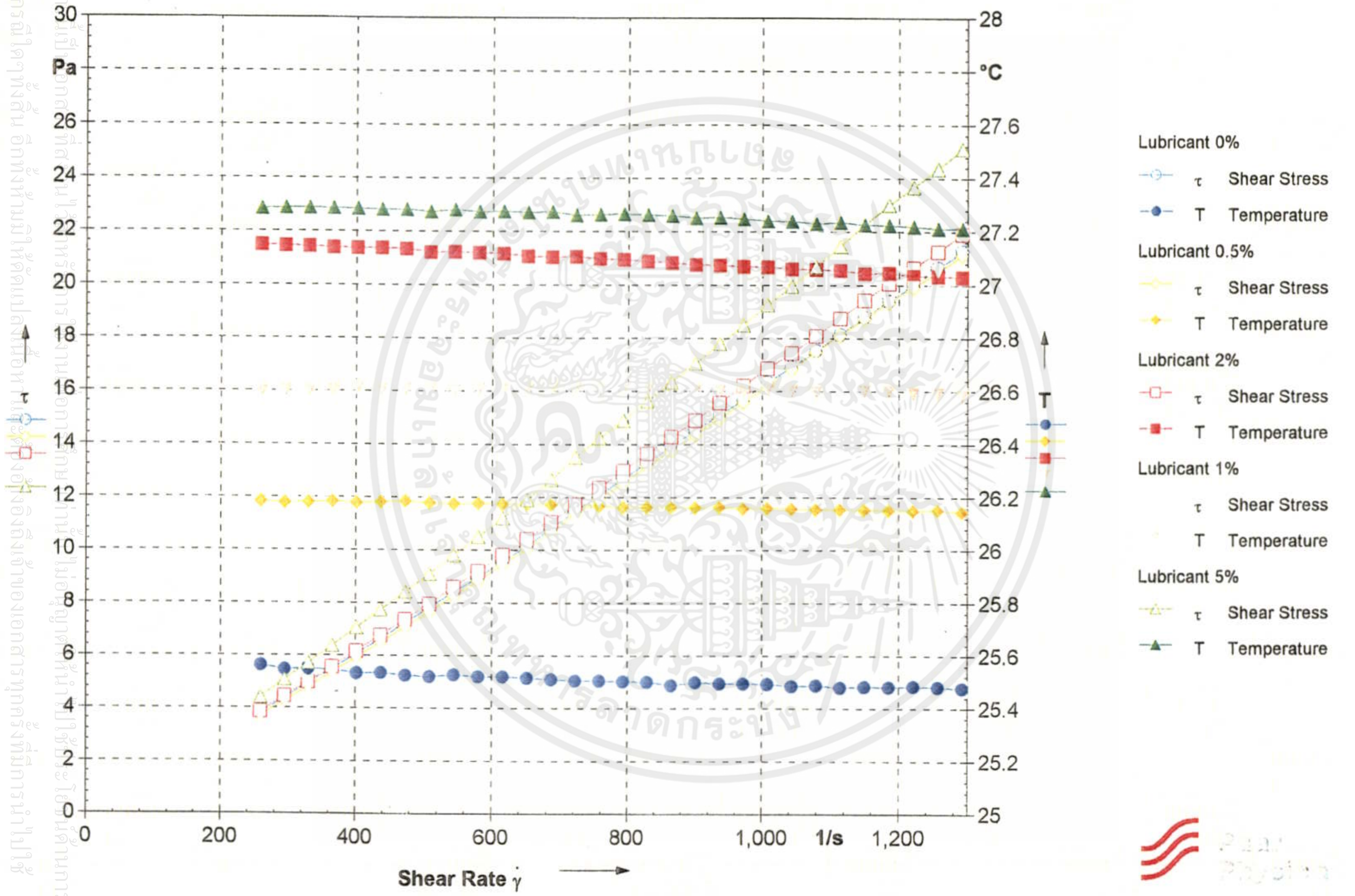
Interval: 1
Number of Data Points: 30

Interval Data: 30 Meas.Pt.
Meas. Pt. Duration 10 s
- Speed n = 200 ... 1E+3 1/min lin

Meas.Pt.	Speed [1/min]	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [mPa·s]	Torque [mNm]	Temperature [°C]
1	200	258.2	4.42	17.11	0.19	27.3
2	227.6	293.8	5.1	17.34	0.22	27.3
3	255.2	329.4	5.73	17.4	0.25	27.3
4	282.8	365.1	6.38	17.48	0.28	27.3
5	310.4	400.7	7.06	17.62	0.31	27.3
6	337.9	436.3	7.74	17.74	0.34	27.3
7	365.5	471.9	8.43	17.86	0.37	27.3
8	393.1	507.5	9.1	17.93	0.4	27.3
9	420.7	543.1	9.82	18.09	0.43	27.3
10	448.3	578.7	10.5	18.17	0.46	27.3
11	475.9	614.3	11.2	18.27	0.49	27.3
12	503.5	650	11.9	18.34	0.52	27.3
13	531	685.6	12.7	18.49	0.56	27.3
14	558.6	721.2	13.5	18.75	0.59	27.3
15	586.2	756.8	14.2	18.82	0.62	27.3
16	613.8	792.4	14.9	18.82	0.65	27.3
17	641.4	828	15.6	18.88	0.68	27.3
18	669	863.6	16.3	18.93	0.72	27.3
19	696.6	899.3	17.1	18.98	0.75	27.3
20	724.1	934.9	17.8	19.05	0.78	27.3
21	751.7	970.5	18.5	19.07	0.81	27.2
22	779.3	1,006	19.3	19.15	0.84	27.2
23	806.9	1,042	20	19.16	0.87	27.2
24	834.5	1,077	20.7	19.22	0.91	27.2
25	862.1	1,113	21.5	19.28	0.94	27.2
26	889.7	1,149	22.3	19.39	0.98	27.2
27	917.2	1,184	23	19.44	1	27.2
28	944.8	1,220	23.7	19.42	1	27.2
29	972.4	1,255	24.4	19.41	1.1	27.2
30	1,000	1,291	25.1	19.46	1.1	27.2

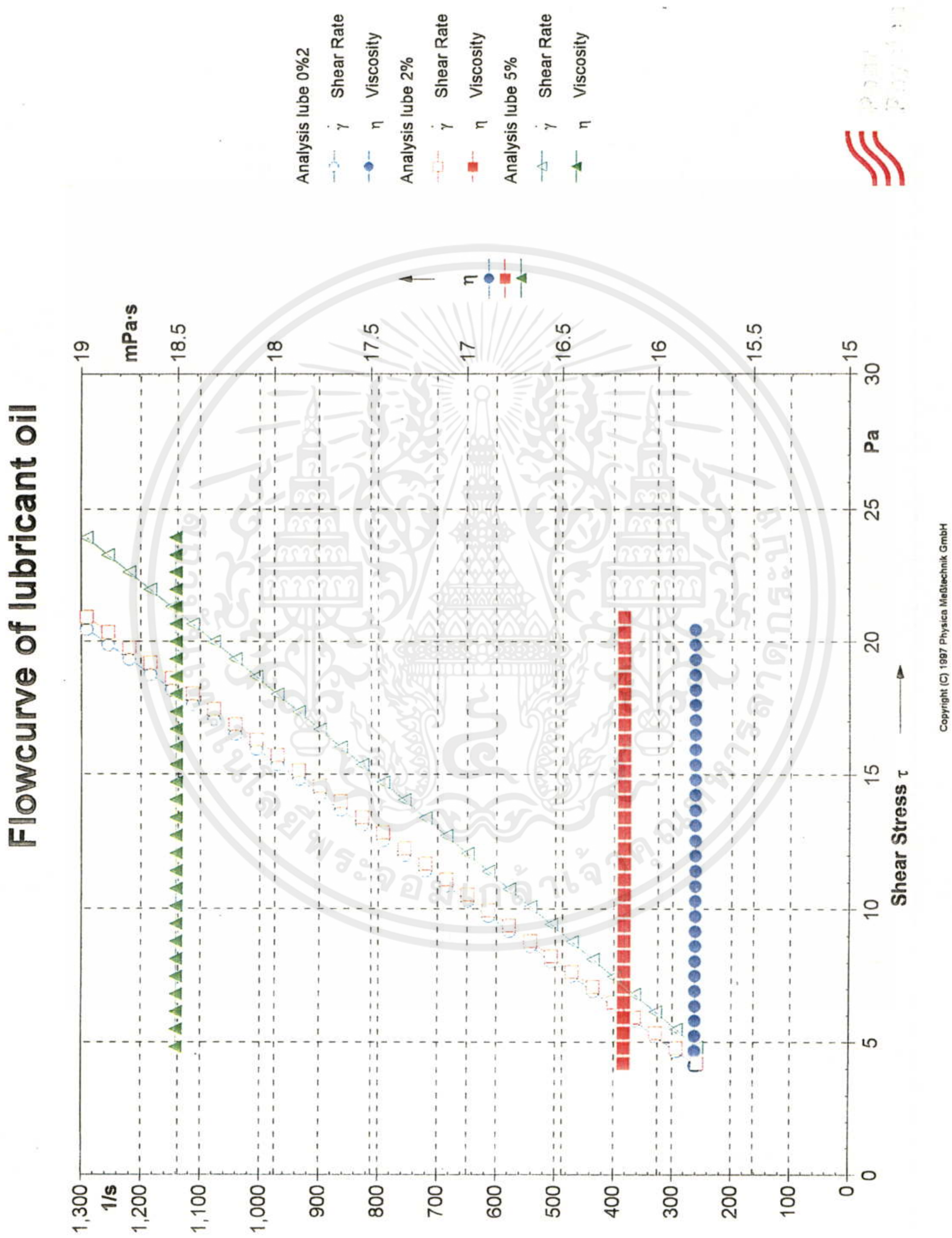
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Flowcurve of lubricant oil



Copyright (C) 1997 Physica Meßtechnik GmbH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

```
Program Least_square;
uses
  crt;
type
  Ma=array[1..6,1..6]of real;
  ter=array[1..40]of real;
  tem=array[1..6]of real;
{.......................................}
function pow(X,Y:real):real;
begin
  pow:=exp(Y*ln(X));
end;
{.......................................}
var
  i,j,n,k,l,q,b:integer;
  r,T:ter;
  A,mij:Ma;
  X,sum,max,sab,scale,team:real;
  s:tem;
begin
  clrscr;
  write('Input amount of data:');
  readln(n);
  write('Input factor of lubricant:');
  readln(X);
  writeln('Input data');
  {....Input data....}
  for i:=1 to n do
    begin
      write('shear rate[',i,']=');
      readln(r[i]);
      gotoxy(35,wherey-1);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      write('shear stress[',i,']=');
      readln(T[i]);
    end;
  {.................}
  for i:=1 to 6 do
    begin
      for j:=1 to 6 do
        a[i,j]:=0;
    end;
  a[1,1]:=n;
  a[1,2]:=X;
  for i:=1 to n do
    begin
      a[1,3]:=a[1,3]+r[i];
      a[1,4]:=a[1,4]+X*r[i];
    end;
  for i:=2 to 4 do
    a[i,1]:=a[1,i];
  a[2,2]:=sqr(X);
  for i:=1 to n do
    begin
      a[2,3]:=a[2,3]+X*r[i];
      a[2,4]:=a[2,4]+r[i]*sqr(X);
    end;
  for i:=3 to 4 do
    a[i,2]:=a[2,i];
  for i:=1 to n do
    begin
      a[3,3]:=a[3,3]+pow(r[i],2);
      a[3,4]:=a[3,4]+X*pow(r[i],2);
    end;
  a[4,3]:=a[3,4];
  for i:=1 to n do
    a[4,4]:=a[4,4]+sqr(X)*pow(r[i],2);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
for i:=1 to n do
  begin
    a[1,5]:=a[1,5]+T[i];
    a[2,5]:=a[2,5]+X*T[i];
    a[3,5]:=a[3,5]+r[i]*T[i];
    a[4,5]:=a[4,5]+X*r[i]*T[i];
  end;
{..Guass Elimination..}
for i:=1 to 4 do
   begin
     s[i]:=0;
     for j:=1 to 4 do
       begin
         if abs(a[i,j])>=s[i] then
           s[i]:=abs(a[i,j]);
       end;
   end;
 for k:=1 to 3 do
   begin
     team:=0;
     max:=0;
     for i:=k to 4 do
       begin
         team:=abs(a[i,k]/s[i]);
         if team>=max then
           begin
             max:=team;
             q:=i;
           end;
       end;
     l:=q;
     sab:=s[k];
     s[k]:=s[l];
     s[l]:=sab;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        for j:=k to 5 do
          begin
            sab:=a[k,j];
            a[k,j]:=a[l,j];
            a[l,j]:=sab;
          end;
        for i:=k+1 to 4 do
          begin
            mij[i,k]:=a[i,k]/a[k,k];
            for b:=1 to 5 do
              a[i,b]:=a[i,b]-a[k,b]*mij[i,k];
          end;
      end;
    s[4]:=a[4,5]/a[4,4];
    for i:=3 downto 1 do
      begin
        sum:=0;
        for j:=i+1 to 4 do
          sum:=sum+a[i,j]*s[j];
        s[i]:=(a[i,5]-sum)/a[i,i];
      end;
    writeln('Equation is:');
    writeln('  T=',s[1],'+',s[2],'*X+',s[3],'*r+',s[4],'*X*r');
    for i:=1 to 12 do
      writeln;
end.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Input amount of data : 30
Input factor of lubricant : 0.005 0.5% PIB
Input data

shear rate [1] = 258.2	shear stress [1] = 3.73
shear rate [2] = 293.8	shear stress [2] = 4.29
shear rate [3] = 329.4	shear stress [3] = 4.81
shear rate [4] = 365.1	shear stress [4] = 5.36
shear rate [5] = 400.7	shear stress [5] = 5.94
shear rate [6] = 436.3	shear stress [6] = 6.51
shear rate [7] = 471.9	shear stress [7] = 7.1
shear rate [8] = 507.5	shear stress [8] = 7.66
shear rate [9] = 543.1	shear stress [9] = 8.27
shear rate [10] = 578.7	shear stress [10] = 8.86
shear rate [11] = 614.3	shear stress [11] = 9.47
shear rate [12] = 650	shear stress [12] = 10.1
shear rate [13] = 685.6	shear stress [13] = 10.7
shear rate [14] = 721.2	shear stress [14] = 11.4
shear rate [15] = 756.8	shear stress [15] = 11.9
shear rate [16] = 792.4	shear stress [16] = 12.6
shear rate [17] = 828	shear stress [17] = 13.2
shear rate [18] = 863.6	shear stress [18] = 13.8
shear rate [19] = 899.3	shear stress [19] = 14.4
shear rate [20] = 934.9	shear stress [20] = 15
shear rate [21] = 970.5	shear stress [21] = 15.6
shear rate [22] = 1006	shear stress [22] = 16.2
shear rate [23] = 1042	shear stress [23] = 16.8
shear rate [24] = 1077	shear stress [24] = 17.5
shear rate [25] = 1113	shear stress [25] = 18.1
shear rate [26] = 1149	shear stress [26] = 18.7
shear rate [27] = 1184	shear stress [27] = 19.3
shear rate [28] = 1220	shear stress [28] = 19.9
shear rate [29] = 1255	shear stress [29] = 20.5
shear rate [30] = 1291	shear stress [30] = 21.1

Equation is :

T = -6.2088171641E-11 + 2.8608056689E + 01*X + 1.1398965421E-02*r + 8.9304623473E-01*X*r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Input amount of data : 30
Input factor of lubricant : le-2 1% PIB
Input data

shear rate [1] = 258.2	shear stress [1] = 3.65
shear rate [2] = 293.8	shear stress [2] = 4.23
shear rate [3] = 329.4	shear stress [3] = 4.75
shear rate [4] = 365.1	shear stress [4] = 5.29
shear rate [5] = 400.7	shear stress [5] = 5.87
shear rate [6] = 436.3	shear stress [6] = 6.44
shear rate [7] = 471.9	shear stress [7] = 7.04
shear rate [8] = 507.5	shear stress [8] = 7.63
shear rate [9] = 543.1	shear stress [9] = 8.23
shear rate [10] = 578.7	shear stress [10] = 8.8
shear rate [11] = 614.3	shear stress [11] = 9.41
shear rate [12] = 650	shear stress [12] = 9.99
shear rate [13] = 685.6	shear stress [13] = 10.6
shear rate [14] = 721.2	shear stress [14] = 11.3
shear rate [15] = 756.8	shear stress [15] = 11.9
shear rate [16] = 792.4	shear stress [16] = 12.5
shear rate [17] = 828	shear stress [17] = 13.1
shear rate [18] = 863.6	shear stress [18] = 13.8
shear rate [19] = 899.3	shear stress [19] = 14.4
shear rate [20] = 934.9	shear stress [20] = 15
shear rate [21] = 970.5	shear stress [21] = 15.6
shear rate [22] = 1006	shear stress [22] = 16.3
shear rate [23] = 1042	shear stress [23] = 16.8
shear rate [24] = 1077	shear stress [24] = 17.5
shear rate [25] = 1113	shear stress [25] = 34.3
shear rate [26] = 1149	shear stress [26] = 18.8
shear rate [27] = 1184	shear stress [27] = 19.4
shear rate [28] = 1220	shear stress [28] = 20
shear rate [29] = 1255	shear stress [29] = 20.6
shear rate [30] = 1291	shear stress [30] = 21.2

Equation is :

T = -1.5522042910E-11 + 3.2492119491E + 01*X + 1.2959383628E-02*r + 3.5695827254E-01*X*r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Input amount of data : 30
Input factor of lubricant : 2e-2 2% PIB
Input data

shear rate [1] = 258.2	shear stress [1] = 3.87
shear rate [2] = 293.8	shear stress [2] = 4.46
shear rate [3] = 329.4	shear stress [3] = 5
shear rate [4] = 365.1	shear stress [4] = 5.58
shear rate [5] = 400.7	shear stress [5] = 6.18
shear rate [6] = 436.3	shear stress [6] = 6.77
shear rate [7] = 471.9	shear stress [7] = 7.37
shear rate [8] = 507.5	shear stress [8] = 7.96
shear rate [9] = 543.1	shear stress [9] = 8.61
shear rate [10] = 578.7	shear stress [10] = 9.21
shear rate [11] = 614.3	shear stress [11] = 9.83
shear rate [12] = 650	shear stress [12] = 10.4
shear rate [13] = 685.6	shear stress [13] = 11.1
shear rate [14] = 721.2	shear stress [14] = 11.7
shear rate [15] = 756.8	shear stress [15] = 12.4
shear rate [16] = 792.4	shear stress [16] = 13
shear rate [17] = 828	shear stress [17] = 13.7
shear rate [18] = 863.6	shear stress [18] = 14.3
shear rate [19] = 899.3	shear stress [19] = 14.9
shear rate [20] = 934.9	shear stress [20] = 15.6
shear rate [21] = 970.5	shear stress [21] = 16.2
shear rate [22] = 1006	shear stress [22] = 16.9
shear rate [23] = 1042	shear stress [23] = 17.4
shear rate [24] = 1077	shear stress [24] = 18.1
shear rate [25] = 1113	shear stress [25] = 18.8
shear rate [26] = 1149	shear stress [26] = 19.4
shear rate [27] = 1184	shear stress [27] = 20.1
shear rate [28] = 1220	shear stress [28] = 20.7
shear rate [29] = 1255	shear stress [29] = 21.3
shear rate [30] = 1291	shear stress [30] = 21.9

Equation is :

T = -9.3132257462E-11 + 7.5038992454E + 03*X + 2.6101412567E-02*r + 4.8188235294E-01*X*r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Input amount of data : 30
Input factor of lubricant : 5e-2   5% PIB
Input data

shear rate [1] = 258.2	shear stress [1] = 4.42
shear rate [2] = 293.8	shear stress [2] = 5.1
shear rate [3] = 329.4	shear stress [3] = 5.73
shear rate [4] = 365.1	shear stress [4] = 6.38
shear rate [5] = 400.7	shear stress [5] = 7.06
shear rate [6] = 436.3	shear stress [6] = 7.74
shear rate [7] = 471.9	shear stress [7] = 8.43
shear rate [8] = 507.5	shear stress [8] = 9.1
shear rate [9] = 543.1	shear stress [9] = 9.82
shear rate [10] = 578.7	shear stress [10] = 10.5
shear rate [11] = 614.3	shear stress [11] = 11.2
shear rate [12] = 650	shear stress [12] = 11.9
shear rate [13] = 685.6	shear stress [13] = 12.7
shear rate [14] = 721.2	shear stress [14] = 13.5
shear rate [15] = 756.8	shear stress [15] = 14.2
shear rate [16] = 792.4	shear stress [16] = 14.9
shear rate [17] = 828	shear stress [17] = 15.6
shear rate [18] = 863.6	shear stress [18] = 16.3
shear rate [19] = 899.3	shear stress [19] = 17.1
shear rate [20] = 934.9	shear stress [20] = 17.8
shear rate [21] = 970.5	shear stress [21] = 18.5
shear rate [22] = 1006	shear stress [22] = 19.3
shear rate [23] = 1042	shear stress [23] = 20
shear rate [24] = 1077	shear stress [24] = 20.7
shear rate [25] = 1113	shear stress [25] = 21.5
shear rate [26] = 1149	shear stress [26] = 22.3
shear rate [27] = 1184	shear stress [27] = 23
shear rate [28] = 1220	shear stress [28] = 23.7
shear rate [29] = 1255	shear stress [29] = 24.4
shear rate [30] = 1291	shear stress [30] = 25.1

Equation is :

T = 3.1044085821E-11 + 3.5197810265E + 00*X + 1.1267572255E-02*r + 1.5144376878E-01*X*r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายพรศักดิ์ อรรถวานิช เกิดวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2495 ที่จังหวัดชุมพร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2517 ผลงานที่เคยได้รับการตีพิมพ์ "Static Characteristic of High Speed Journal Bearing with Non-newtonian Lubricants." ประสบการณ์ในการทำงาน เข้ารับราชการในตำแหน่งอาจารย์ระดับ 3 สังกัดคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อวันที่ 4 สิงหาคม 2520 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ระดับ 8 สังกัดโครงการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้