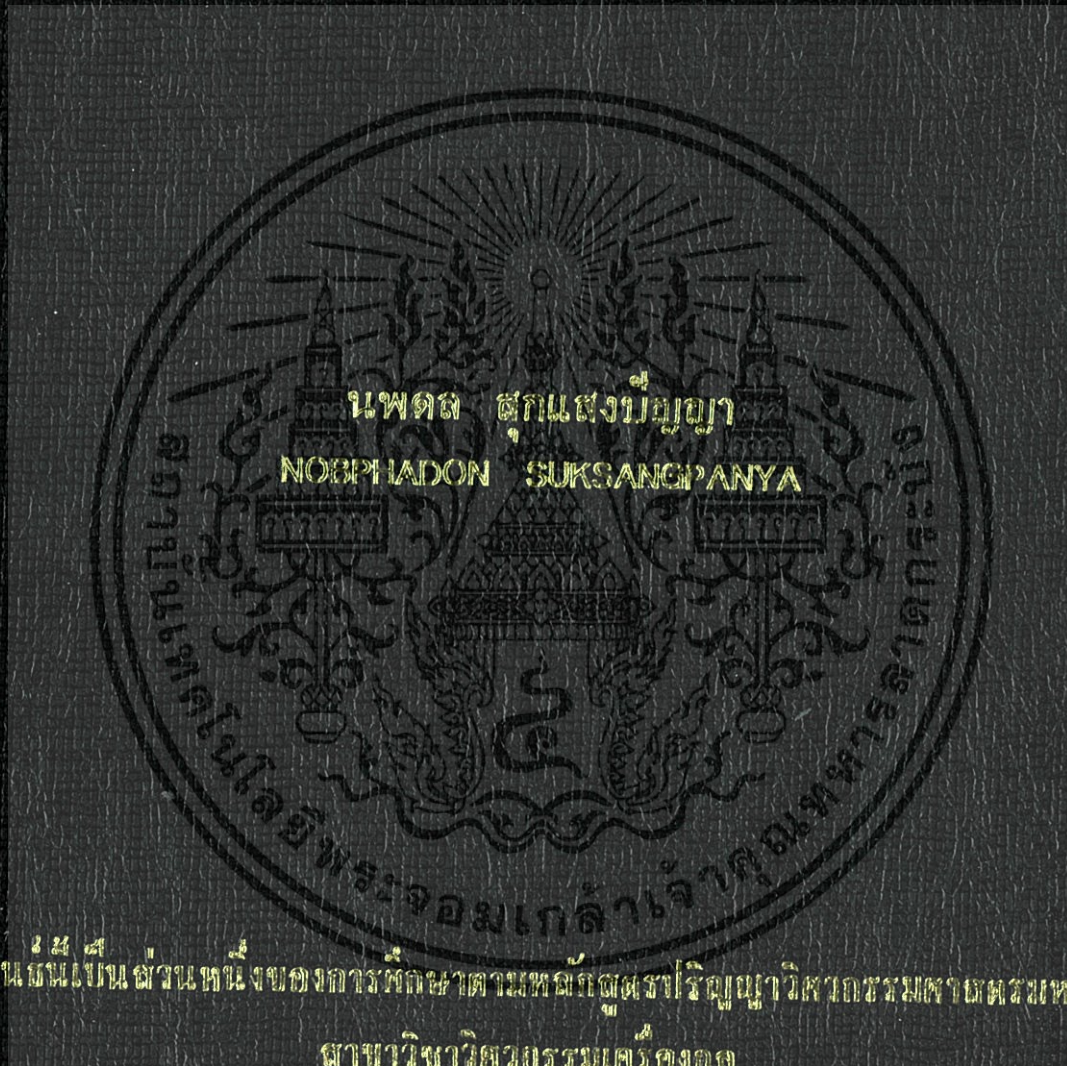


การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของซีลโอริงภายในเครื่องจับยึดหัวถ่านภายใต้การหล่อ
ลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก

THEORETICAL ANALYSIS OF SEAL O-RINGS FOR HGA CLAMP
UNDER ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-030-022

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของซีลโอริงภายในเครื่องจับยึดหัวอ่านภายใต้การหล่อ
ลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก

THEORETICAL ANALYSIS OF SEAL O-RINGS FOR HGA CLAMP
UNDER ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION



นพดล สุกแสงปัญญา

NOBPHADON SUKSANGPANYA

พ.
2669ก
2552

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 95662
วัน,เดือน,ปี... 27 พ.ค. 2552

12091510
b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-030-022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THEORETICAL ANALYSIS OF SEAL O-RINGS FOR HGA CLAMP
UNDER ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2009

KMITL-2009-EN-M-030-022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า.
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของซีล โอริงภายในเครื่องจับยึดหัวอ่านภายใต้การหล่อลื่นแบบ
อิตาสโตไฮโดรไดนามิก

Thesis Title Theoretical Analysis of Seal O-rings for HGA Clamp under Elastohydrodynamic
Lubrication

นักศึกษา นายนพดล สุกแสงปัญญา

รหัสประจำตัว 50060310

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-030-022

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จาร์วัตร	เจริญสุข	
รศ.ดร.จำลอง	ปราบแก้ว	
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์	พิมสาร	
รศ.ดร.ศิริศักดิ์	หาญชูวงศ์	
รศ.ดร.มงคล	มงคลวงศ์โรจน์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2552 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRAKABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของซีลโอริงภายในเครื่องจับยึดหัวอ่าน ภายใต้การหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิก
นักศึกษา	นายนพดล สุกแสงปัญญา
รหัสนักศึกษา	50060310
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมทางทฤษฎีของการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกของซีลโอริงภายในเครื่องจับยึดหัวอ่าน ภายใต้แรงกดอัดเป็นเส้นตรง เมื่อสารหล่อลื่นเป็นอากาศ ซึ่งซีลโอริงมีการเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมาระหว่างเครื่องจับยึดหัวอ่าน และวิเคราะห์ซีลโอริงนี้เป็นวัสดุประเภทยาง และในการหล่อลื่นได้นำผลเนื่องจากการคืนเด้งของโมเลกุลอากาศมาร่วมวิเคราะห์ด้วย โดยนำสมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ซึ่งขึ้นกับเวลาร่วมกับสมการโบวส์แมนอันดับ 1 และสมการการเปลี่ยนรูปของวัสดุ มาประยุกต์ร่วมกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งได้นำวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและวิธีมัลติกริดเพื่อศึกษาการกระจายความดันและความหนาฟิล์มอากาศของการหล่อลื่นในซีลโอริงภายในเครื่องจับยึดหัวอ่าน เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นอิลาสติกและวิสโคอิลาสติก พบว่าความหนาฟิล์มอากาศแปรผันตามและความดันแปรผกผันกับความเร็วของซีลโอริง ความหนาฟิล์มอากาศแปรผกผันและความดันแปรผันตามภาวะที่กระทำ และความหนาฟิล์มอากาศเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติกจะมากกว่าเมื่อซีลเป็นอิลาสติก โดยที่ความเร็วมากขึ้นจะเห็นความแตกต่างมากกว่าความเร็วต่ำ และความดันเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติกจะน้อยกว่าเมื่อซีลเป็นอิลาสติก

Thesis Title	Theoretical Analysis of Seal O-rings for HGA Clamp under Elastohydrodynamic Lubrication
Student	Mr. Nobphadon Suksangpanya
Student ID.	50060310
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Dr. Mongkol Mongkolwongrojn , Assc. Prof.

ABSTRACT

This research presents the theoretical analysis of elastohydrodynamic lubrication in seal o-rings for HGA clamp under line contact using air as lubricant. The seal o-rings oscillate in HGA clamp and the seal o-rings are rubber material. The molecular slip condition is considered its effect. To analyze, the modified time dependent Reynolds equation based on 1st order of Boltzmann equation and deformation equation were formulated. Numerical scheme based on the finite difference method and multi-grid multilevel technique with Newton's method were implemented to obtain the pressure distribution and air film thickness of lubrication in seal o-rings for HGA clamp when the seal materials are assumed to be elastic and viscoelastic materials. The simulation results found that the air film thickness increase and pressure decrease with the increase of seal velocity. The air film thickness decrease and pressure increase with the increase of applied load. The maximum pressure of viscoelastic seal is lower than that of elastic seal. The air film thickness of viscoelastic seal is greater than that of elastic seal, especially at high velocity.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์
โรจน์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณองค์กร IDSTA, NECTEC ที่ได้สนับสนุนเงินทุนในการทำงานวิจัยและ
วิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณองค์กร Seagate Company Thailand Limited ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือ ตลอดจน
ข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ เจษฎา พานิชกรณ์ และชนิษฐา วงษ์สีดาแก้วที่ช่วยให้คำแนะนำการเขียน
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และข้อเสนอแนะต่าง ๆ

ขอขอบคุณ พุทธา จินครวี ที่ช่วยให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เกี่ยวกับทฤษฎี
โคอิลาสติก

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือ
ในเรื่องต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ
และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

นพดล สุกแสงปัญญา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1	
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 บททความวิจัยที่ผ่านมา.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2	
ทฤษฎีวิส โคลิลาสติก.....	3
2.1 ความหมายวิส โคลิลาสติก.....	3
2.2 โมเดลวิส โคลิลาสติก.....	3
บทที่ 3	
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการหล่อลื่นซีล โอริง ในเครื่องจับยึดหัวอ่าน.....	6
3.1 ซีล โอริง ในเครื่องจับยึดหัวอ่าน.....	6
3.2 สมการสมมุติฐานของเฮิร์ตซ์.....	8
3.3 สมการ โมดิฟายด์ เรย์ โนลด์.....	8
3.3.1 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นอิลาสติก.....	14
3.3.2 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นวิส โคลิลาสติก.....	16
3.4 สมการความหนาฟิล์ม.....	18
3.4.1 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นอิลาสติก.....	18
3.4.2 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นวิส โคลิลาสติก.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 สมการสมมูลแรง.....	19
3.5.1 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นอริสติก.....	20
3.5.2 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นวิส โคอริสติก.....	20
3.6 สมการเงื่อนไขขอบ.....	20
บทที่ 4 วิธีเชิงตัวเลข.....	21
4.1 วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม.....	21
4.1.1 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นอริสติก.....	21
4.1.2 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นวิส โคอริสติก.....	22
4.2 วิธีนิวตันราฟสัน.....	23
4.2.1 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นอริสติก.....	24
4.2.2 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นวิส โคอริสติก.....	25
4.3 การอินทิเกรตเชิงตัวเลข.....	25
4.3.1 สมการความหนาฟิล์ม.....	26
4.3.1.1 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นอริสติก.....	26
4.3.1.2 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นวิส โคอริสติก.....	27
4.3.2 สมการสมมูลแรง.....	27
4.3.2.1 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นอริสติก.....	27
4.3.2.2 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นวิส โคอริสติก.....	27
บทที่ 5 ผลการจำลอง.....	28
5.1 ผลการจำลองเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นอริสติก.....	28
5.1.1 ผลการจำลองเมื่อภาระที่กระทำเปลี่ยนแปลง.....	33
5.1.2 ผลการจำลองเมื่อเวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบเปลี่ยนแปลง.....	35
5.2 ผลการจำลองเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิส โคอริสติก.....	37
5.2.1 ผลการจำลองเมื่อภาระที่กระทำเปลี่ยนแปลง.....	42
5.2.2 ผลเนื่องจากสปริงและแคมเปอร์ใน โมเดลของวิส โคอริสติก.....	43
5.3 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการหล่อลื่นระหว่างอริสติกกับวิส โคอริสติก.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	46
6.1 สรุปผลการการวิจัย.....	46
6.1.1 ผลการจำลองเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นอีลาสติก.....	46
6.1.1.1 ผลการจำลองเมื่อภาระที่กระทำเปลี่ยนแปลง.....	46
6.1.1.2 ผลการจำลองเมื่อเวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบเปลี่ยนแปลง.....	46
6.1.2 ผลการจำลองเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก.....	47
6.1.2.1 ผลการจำลองเมื่อภาระที่กระทำเปลี่ยนแปลง.....	47
6.1.2.2 ผลเนื่องจากสปริงและแดมเปอร์ของ โมเดลวิสโคอีลาสติก....	47
6.1.3 ผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมการหล่อลื่นระหว่างอีลาสติกกับวิสโคอีลาสติก.....	47
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	48
บรรณานุกรม.....	49
ภาคผนวก.....	51
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	51
ประวัติผู้เขียน.....	52

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 คุณสมบัติของวัสดุ.....	28
5.2 คุณสมบัติของสารหล่อลื่น.....	28



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงโมเดลวิสโคอิลาสติกแบบเส้นตรง (Standard linear model).....	3
3.1	แสดงลักษณะเครื่องจับยึดหัวอ่าน (HGA Clamp) และส่วนประกอบ.....	6
3.2	แสดงลักษณะกระบอกสูบและซีลโอริงที่สวมอยู่.....	6
3.3	แสดงกระบอกสูบทั้งสองส่วน คือ ส่วนเคลื่อนที่และส่วนอยู่นิ่ง จากซ้ายไปขวาตามลำดับ.....	7
3.4	แสดงตำแหน่งซีลโอริงที่สวมอยู่ในกระบอกสูบ.....	7
3.5	แสดงลักษณะการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกแบบชั่วขณะของซีลภายในเครื่องจับยึดหัวอ่าน เมื่อสารหล่อลื่นเป็นอากาศ.....	7
3.6	แสดงแรงที่กระทำต่ออิลิเมนต์ของของไหล.....	9
3.7	แสดงสมมูลมวลที่เข้าและออกอิลิเมนต์ของของไหล.....	12
4.1	แสดงขนาดความกว้างระหว่างโนด.....	21
4.2	แสดงการอินทิเกรตโดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู.....	26
5.1	กราฟแสดงความเร็วของการเคลื่อนที่เครื่องจับยึดหัวอ่าน 1 รอบ.....	30
5.2	กราฟแสดงการกระจายความหนาฟิล์มอากาศ ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขาไป...	30
5.3	กราฟแสดงการกระจายความดัน ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขาไป.....	31
5.4	กราฟแสดงการกระจายความหนาฟิล์มอากาศ ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขากลับ..	31
5.5	กราฟแสดงการกระจายความดัน ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขากลับ.....	32
5.6	กราฟแสดงความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีล.....	32
5.7	กราฟแสดงความดันสูงสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีล.....	33
5.8	กราฟแสดงความหนาฟิล์มต่ำสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีล ที่ภาระต่าง ๆ.....	34
5.9	กราฟแสดงความดันสูงสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีล ที่ภาระต่าง ๆ.....	34
5.10	กราฟแสดงความเร็วของซีล ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อเวลาการเคลื่อนที่ไป-กลับเปลี่ยนแปลง.....	35
5.11	กราฟแสดงความหนาฟิล์มต่ำสุด ที่เวลาการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีลต่าง ๆ.....	36
5.12	กราฟแสดงความดันสูงสุด ที่เวลาการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีลต่าง ๆ.....	36
5.13	สปริงและแคมเปอร์ในโมเดลของวิสโคอิลาสติก.....	37
5.14	กราฟแสดงโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยและความเร็วในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีลเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก.....	37
5.15	กราฟแสดงการกระจายความหนาฟิล์มอากาศ ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขาไป เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสำนักพิมพ์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.16	กราฟแสดงการกระจายความดัน ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขาไป เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก.....	38
5.17	กราฟแสดงการกระจายความหนาฟิล์มอากาศ ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขากลับ เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก.....	39
5.18	กราฟแสดงการกระจายความดัน ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขากลับ เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก.....	39
5.19	กราฟแสดงความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและ โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีล เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก.....	40
5.20	กราฟแสดงความดันสูงสุดและ โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีล เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก.....	40
5.21	กราฟแสดงความหนาฟิล์มต่ำสุดและ โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีล เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก ที่ภาวะต่าง ๆ.....	42
5.22	กราฟแสดงความดันสูงสุดและ โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีล เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก ที่ภาวะต่าง ๆ.....	43
5.23	กราฟแสดง โมดูลัสความยืดหยุ่น ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อสปริงตัวที่ 1 เปลี่ยนแปลงสปริงตัวที่ 2 และแคมเปอร์คองท์.....	44
5.24	กราฟแสดง โมดูลัสความยืดหยุ่น ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อสปริงตัวที่ 2 เปลี่ยนแปลง สปริงตัวที่ 1 และแคมเปอร์คองท์.....	44
5.25	กราฟแสดง โมดูลัสความยืดหยุ่น ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อแคมเปอร์เปลี่ยนแปลง สปริงตัวที่ 1 และสปริงตัวที่ 2 คองท์.....	45
5.26	กราฟแสดงความหนาฟิล์มต่ำสุดเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติกและอีลาสติก.....	46
5.27	กราฟแสดงความดันสูงสุดเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติกและอีลาสติก.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

b	ค่าความกว้างครึ่งหนึ่งของการสัมผัสเชิงเส้น	$b = R \left(\frac{8W}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}$
C_{UT}	สัดส่วนความเร็วระหว่างความเร็วเฉลี่ยที่ตำแหน่งใด ๆ เทียบความเร็วอ้างอิง	$C_{UT} = \frac{\bar{u}(t)}{u_0}$
C_{WT}	สัดส่วนภาระที่กระทำที่ตำแหน่งใด ๆ เทียบกับภาระอ้างอิง	$C_{WT} = \frac{w'(t)}{w'_0}$
C_{EQ}	สัดส่วน โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยที่กระทำที่เวลาใด ๆ เทียบกับ โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยอ้างอิง	$C_{EQ} = \frac{E'(t)}{E'}$
C_{BT}	สัดส่วนค่าความกว้างครึ่งหนึ่งของการสัมผัสเชิงเส้นที่กระทำที่เวลาใด ๆ เทียบกับค่าอ้างอิง	$C_{BT} = \frac{b(t)}{b}$
E	โมดูลัสความยืดหยุ่นของผิวสัมผัส, Pa	
E'	โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ย	$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left[\frac{(1-\nu_a^2)}{E_a} + \frac{(1-\nu_b^2)}{E_b} \right]$
f_0	ภาระที่กระทำต่อผิวสัมผัสเริ่มต้นของการสัมผัสแบบจุด, N/m	
G	โมดูลัสวิสโคอิลาสติก, Pa	
h	ค่าความหนาฟิล์มที่ตำแหน่งใด ๆ, m	
H	ค่าความหนาฟิล์มไรรวม	$H = h \left(\frac{R}{b^2} \right)$
p	ความดัน, Pa	
p_a	ความดันบรรยากาศ, Pa	
P	ความดันไรรวม	$P = \frac{p}{p_a}$
R	ค่ารัศมีความโค้งเฉลี่ย, m	
R_x	ค่ารัศมีความโค้งเฉลี่ยตามแนวแกน x, m	$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{r_{ax}} + \frac{1}{r_{bx}}$
r_{ax}	ค่ารัศมีความโค้งของผิวล่างตามแนวแกน x, m	
r_{bx}	ค่ารัศมีความโค้งของผิวบนตามแนวแกน x, m	

รายการคำย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

t	เวลา, s	
T	เวลาไร้มิติ	$T = \left(\frac{\bar{u}}{b}\right)t$
u_0	ความเร็วผิวสัมผัสอ้างอิงตามแนวแกน x, m/s	
v_0	ความเร็วผิวสัมผัสอ้างอิงตามแนวแกน y, m/s	
u_1	ความเร็วผิวสัมผัสที่ 1 ที่ตำแหน่งใดๆ ในแนวแกน x, m/s	
u_2	ความเร็วผิวสัมผัสที่ 2 ที่ตำแหน่งใดๆ ในแนวแกน x, m/s	
v_1	ความเร็วผิวสัมผัสที่ 1 ที่ตำแหน่งใดๆ ในแนวแกน y, m/s	
v_2	ความเร็วผิวสัมผัสที่ 2 ที่ตำแหน่งใดๆ ในแนวแกน y, m/s	
\bar{u}	ความเร็วเฉลี่ยของผิวสัมผัสตามแนวแกน x, m	$\bar{u} = \frac{u_1 + u_2}{2}$
\bar{v}	ความเร็วเฉลี่ยของผิวสัมผัสตามแนวแกน y, m	$\bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2}$
U	เวกเตอร์ประมาณค่าคำตอบ U	
V	ความเร็วเฉลี่ยของผิวสัมผัส, m/s	$V = (\bar{u}^2 + \bar{v}^2)^{\frac{1}{2}}$
x	โคออร์ดิเนต x ตามแนวสัมผัส, m	
X	โคออร์ดิเนต x ไร้มิติ สัมผัสเชิงเส้น $x = Xb$ และ สัมผัสแบบจุด $x = bX$	
z	โคออร์ดิเนต z , m	
Z	โคออร์ดิเนต z ไร้มิติ $z = hZ$	
f_0	ภาระที่กระทำต่อผิวสัมผัสเริ่มต้นของการสัมผัสแบบจุด, N/m	
W'	ภาระที่กระทำต่อผิวสัมผัสที่สัมผัสเชิงเส้น	$W' = \frac{f_0}{E'R}$

Greek symbols

μ	ค่าความหนืด, Pa·s
η	ค่าความหนืดพลวัต, Pa·s
τ_{xz}	ความเค้นเฉือนตามแกน x ตั้งฉากกับ z , Pa
τ_{yz}	ความเค้นเฉือนตามแกน y ตั้งฉากกับ z , Pa
ν_b	ค่าอัตราปัวซองของผิวบน
ν_a	ค่าอัตราปัวซองของผิวล่าง

รายการค่าย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

Λ	ค่าคงที่ในสมการเรย์โนลด์	$\Lambda = \frac{12\mu_0\bar{u}_0 R_x^2}{p_a b^3}$
σ	ความเค้น, N/m ²	
γ	ความเครียด, m	
τ	อัตราส่วนความหนืดพลวัตกับโมดูลัสวิสโคอิลาสติก	$\tau = \frac{\eta}{G_2}$



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบัน อุปกรณ์ต่าง ๆ โดยเฉพาะในเครื่องจักรจำเป็นจะต้องมีการหล่อลื่น เพื่อยืดอายุการใช้งานและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน เพื่อลดค่าใช้จ่ายและลดการสูญเสียกำลังการผลิตอันเนื่องจากการเปลี่ยนอุปกรณ์ของเครื่องจักรหรือการปิดซ่อมบำรุง อันเนื่องมาจากการใช้อุปกรณ์ที่ไม่เหมาะสมกับการทำงานหรือเกิดการชำรุด ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นในอุปกรณ์ต่าง ๆ ในเครื่องจักรจึงมีความสำคัญในการออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงาน อุปกรณ์ที่เราใช้ในเครื่องจักรที่พบเห็นได้เช่น ซีล แบริ่ง เฟือง เป็นต้น

ในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของซีล โอริง ในเครื่องจับยึดหัวอ่าน เนื่องจากซีล โอริงภายในเครื่องจับยึดหัวอ่านมีอายุการใช้งานค่อนข้างต่ำอันเนื่องมาจากการสึกหรอที่เกิดขึ้น จำเป็นต้องมีการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของซีลนี้เพื่อยืดอายุการใช้งาน อีกทั้งในงานวิจัยของการหล่อลื่นที่ผ่านมามุ่งศึกษาวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นอีลาสติค แต่ในปัจจุบันวัสดุประเภทยาง (Rubber) ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม ซึ่งวัสดุประเภทยางมีคุณสมบัติเป็นวิส โคอีลาสติค การศึกษาการหล่อลื่นเมื่อวัสดุมีคุณสมบัติเป็นวิส โคอีลาสติคจึงมีความสำคัญในอุตสาหกรรมปัจจุบัน และสำหรับการหล่อลื่นเมื่อสารหล่อลื่นเป็นอากาศ ซึ่งความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นบางมาก จึงก่อให้เกิดผลเนื่องจากการสั่น ไถลของ โมเลกุลอากาศ ดังนั้นการศึกษากการหล่อลื่นของวัสดุประเภทยาง จึงต้องนำทฤษฎีของวิส โคอีลาสติคและผลเนื่องจากการสั่น ไถลของ โมเลกุลอากาศเข้าร่วมในการคำนวณด้วย เพื่อให้ผลการคำนวณใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น

1.2 บทความวิจัยที่ผ่านมา

Reynolds ได้เขียนสมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของการไหลและความหนาแน่นของสารหล่อและแรงดันของไหลและความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้น โดยสารหล่อลื่นเป็นแบบนิวโทเนียน เพื่อใช้จำลองการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก และต่อมาในปี ค.ศ. 1896 Hertz ได้ประยุกต์ทฤษฎีความยืดหยุ่นเข้ากับสมการเรย์โนลด์ ทำให้งานวิจัยด้านอีลาสโตไฮโดรไดนามิกมีความก้าวหน้าอย่างมาก

การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกเป็นการหล่อลื่นที่ฟิล์มสารหล่อลื่นบางมาก ซึ่งเริ่มแรก Dowson และ Higginson ได้นำเสนอวิธีการเชิงตัวเลขในการศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก

Richard F. Salant ได้ศึกษาการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของซีลน้ำมัน ที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไปจนกว่าจะนำไปใช้ประโยชน์ในการค้า การเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมา โดยกำหนดซีลมีคุณสมบัติเป็นอีลาสติค และสารหล่อลื่นเป็นไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมัน ซึ่งใช้ทฤษฎีทางกลศาสตร์ของไหล กลศาสตร์การเปลี่ยนรูป และกลศาสตร์การสัมผัส ร่วมกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของการหล่อลื่นในชิลน้ำมัน ที่มีการเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมา

Hooke และ Huang ได้ศึกษาการหล่อลื่นแบบฮิสเทรีติกไฮโดรไดนามิกของวัสดุอ่อนที่มีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก ภายใต้แรงกดอัดเส้นตรง โดยสารหล่อลื่นเป็นน้ำมัน โดยใช้โมเดลของวิสโคอิลาสติกแบบเส้นตรง เพื่อศึกษาผลของวิสโคอิลาสติกที่มีต่อการหล่อลื่น พบว่าคุณสมบัติวิสโคอิลาสติกมีผลต่อพฤติกรรมของการหล่อลื่นอย่างมาก

นพดล สุกแสงปัญญา ได้ศึกษาการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของฮาร์ดดิส เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการลื่นตัวของหัวอ่านเมื่อตัวแปรต่าง ๆ ของชุดหัวอ่านเปลี่ยนแปลงไป โดยเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองพฤติกรรมดังกล่าว โดยงานวิจัยชิ้นนี้เป็นพื้นฐานของวิทยานิพนธ์นี้ อีกทั้งเป็นแนวทางการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองอีกด้วย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบฮิสเทรีติกไฮโดรไดนามิกแบบชั่วขณะ ของชิลโอริงในเครื่องจับยึดหัวอ่าน เมื่อสารหล่อลื่นเป็นอากาศ โดยเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้วิธีนิวตันราฟสันและแก๊สมการ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นของชิลโอริงในเครื่องจับยึดหัวอ่าน

- ศึกษาผลการจำลองเมื่อชิลมีคุณสมบัติเป็นฮิสเทรีติก
 - ศึกษาผลการจำลองเมื่อภาวะที่กระทำเปลี่ยนแปลง
 - ศึกษาผลการจำลองเมื่อเวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบเปลี่ยนแปลง
- ศึกษาผลการจำลองเมื่อชิลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก
 - ศึกษาผลการจำลองเมื่อภาวะที่กระทำเปลี่ยนแปลง
 - ศึกษาผลเนื่องจากสปริงและแคมเปอร์ของโมเดลวิสโคอิลาสติก
- เปรียบเทียบผลการจำลองเมื่อชิลมีคุณสมบัติเป็นฮิสเทรีติกและเป็นวิสโคอิลาสติก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สิ่งที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้คือ ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของการหล่อลื่นของชิลโอริงในเครื่องจับยึดหัวอ่านที่เป็นการหล่อลื่นแบบฮิสเทรีติกไฮโดรไดนามิกแบบชั่วขณะ และสารหล่อลื่นเป็นอากาศ คือ ลักษณะการเกิดฟิล์มอากาศและการกระจายความดันในการหล่อลื่นของชิลในเครื่องจับยึดหัวอ่าน ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา รวมถึงทำให้ทราบถึงความแตกต่างของพฤติกรรมของการหล่อลื่นของชิลโอริงในเครื่องจับยึดหัวอ่านเมื่อชิลมีคุณสมบัติเป็นฮิสเทรีติกกับวิสโคอิลาสติก ซึ่งเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องจับยึดหัวอ่านให้ชิลโอริงมีอายุการใช้งานนานขึ้น อีกทั้งยังเป็นสามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาวิชาการทางด้าน

บทที่ 2

วิสโคอีลาสติก (Viscoelasticity)

2.1 ความหมายวิสโคอีลาสติก

ความเป็นวิสโคอีลาสติก (Viscoelasticity) คือ การที่วัสดุมีสมบัติทั้งเหนียวหนืด (viscous) เหมือนของเหลว และยืดหยุ่น (elastic) เหมือนของแข็งในเวลาเดียวกัน ซึ่งเป็นสมบัติที่มีอยู่ในยางและวัสดุพอลิเมอร์ การศึกษาพฤติกรรมวัสดุวิสโคอีลาสติกนั้นสามารถแสดงให้เห็นได้ง่ายโดยอาศัยการเปรียบเทียบกับพฤติกรรมของสปริงและแดมเปอร์ โดยโมเดลที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมครั้งนี้เป็น โมเดลวิสโคอีลาสติกแบบเส้นตรง (Standard linear model) ดังรูป 2.1 เมื่อ โมดูลัสวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic modulus, G) เปรียบเสมือนค่าคงที่ของสปริง และความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity, η) เปรียบเสมือนแดมเปอร์ ซึ่งความเค้น (Stress, σ) ที่กระทำ เปรียบเสมือนแรงที่กระทำต่อสปริงและแดมเปอร์ และความเครียด (Strain, γ) เปรียบเสมือน ระยะขยับหรือยืดตัวของสปริงและแดมเปอร์

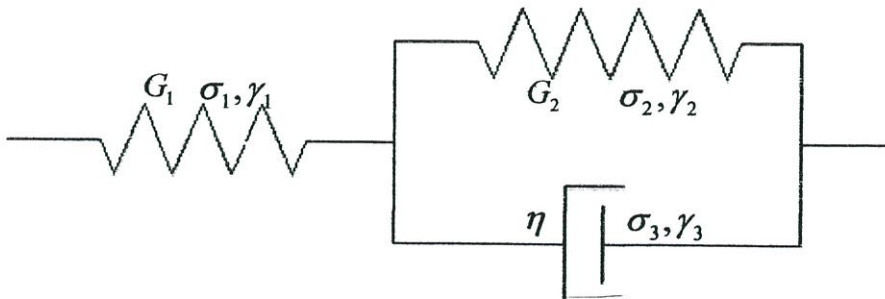
2.2 โมเดลวิสโคอีลาสติก

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุวิสโคอีลาสติกที่มีคุณสมบัติของอีลาสติกและความหนืดด้วยสปริงและแดมเปอร์ สามารถหารูปแบบของโมเดลได้ดังนี้

$$\gamma_2 = \gamma_3 \quad (2.1)$$

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_3 \quad (2.2)$$

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 + \sigma_3 \quad (2.3)$$



รูป 2.1 แสดง โมเดลวิสโคอีลาสติกแบบเส้นตรง (Standard linear model)

จากคุณสมบัติของอีลาสติก

$$G = \frac{\sigma}{\gamma} \quad (2.4)$$

แทนสมการ (2.4) ลงสมการ (2.2) ได้

$$\gamma = \frac{\sigma_1}{G_1} + \frac{\sigma_2}{G_2} \quad (2.5)$$

แทนสมการ (2.3) ลงสมการ (2.5) ได้

$$\gamma = \frac{\sigma}{G_1} + \frac{(\sigma - \sigma_3)}{G_2} \quad (2.6)$$

จากคุณสมบัติของแดมเปอร์

$$\sigma_3 = \eta \frac{d\gamma_3}{dt} \quad (2.7)$$

แทนสมการ (2.7) ลงสมการ (2.6) ได้

$$\gamma = \frac{\sigma}{G_1} + \frac{\left(\sigma - \eta \frac{d\gamma_3}{dt} \right)}{G_2}$$

ให้ $\tau = \frac{\eta}{G_2}$ จะได้

$$\gamma = \frac{\sigma}{G_1} + \frac{\sigma}{G_2} - \tau \frac{d\gamma_3}{dt} \quad (2.8)$$

แทนสมการ (2.2) ลงสมการ (2.8) ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\gamma = \frac{\sigma}{G_1} + \frac{\sigma}{G_2} - \tau \frac{d(\gamma)}{dt} + \tau \frac{d(\gamma_1)}{dt}$$

$$\gamma = \frac{\sigma}{G_1} + \frac{\sigma}{G_2} - \tau \frac{d(\gamma)}{dt} + \tau \frac{1}{G_1} \frac{d(G_1 \gamma_1)}{dt} \quad (2.9)$$

แทนสมการ (2.4) ลงสมการ (2.9) ได้

$$\gamma = \frac{\sigma}{G_1} + \frac{\sigma}{G_2} - \tau \frac{d\gamma}{dt} + \frac{\tau}{G_1} \frac{d\sigma}{dt}$$

$$\gamma + \tau \frac{d\gamma}{dt} = \sigma \left(\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \right) + \frac{\tau}{G_1} \frac{d\sigma}{dt}$$

เนื่องจากความเค้นที่กระทำไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้น $\frac{d\sigma}{dt} = 0$ จะได้

$$\gamma + \tau \frac{d\gamma}{dt} = \sigma \left(\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \right)$$

แก้สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equation) ได้

$$\gamma(t) = \frac{1}{G_1} \sigma + \frac{1}{G_2} \sigma [1 - e^{-t/\tau}]$$

แทน $\frac{1}{G(t)} = \frac{\gamma(t)}{\sigma}$ จะได้โมเดลวิสโคอิลาสติกแบบเส้นตรงดังสมการ (2.10)

$$\frac{1}{G(t)} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} [1 - e^{-t/\tau}] \quad (2.10)$$

เมื่อ $\tau = \frac{\eta}{G_2}$

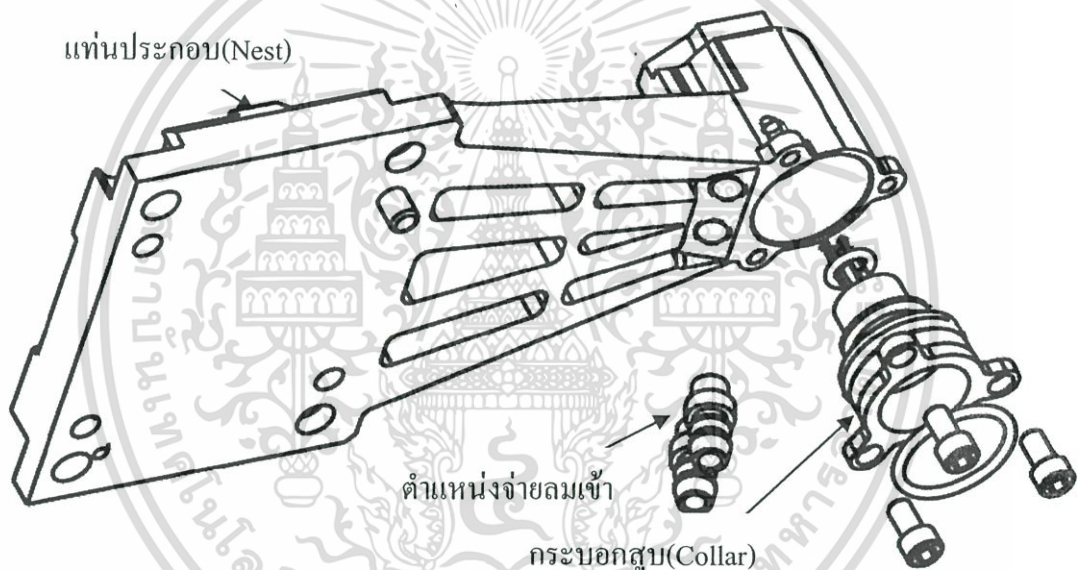
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

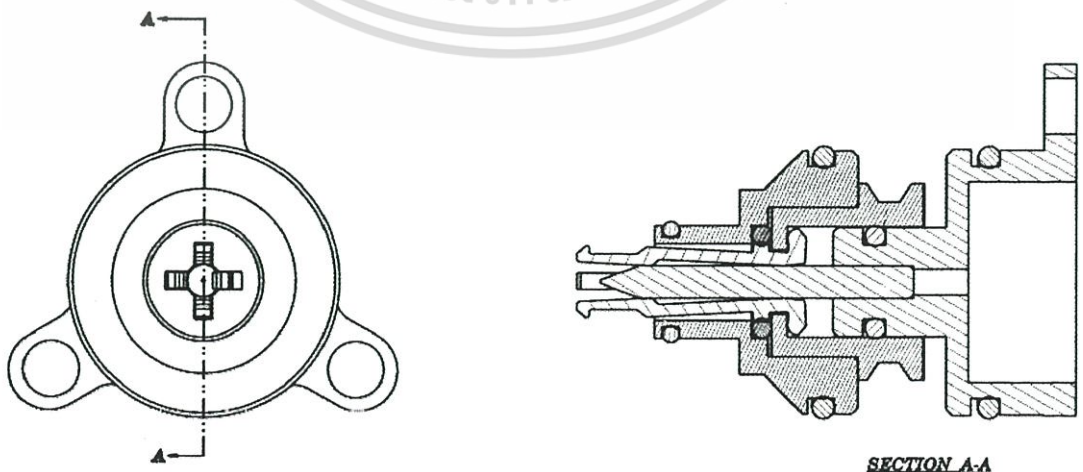
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการหล่อขึ้นชีลโอริงในเครื่องจับยึดหัวอ่าน

3.1 ชีลโอริงในเครื่องจับยึดหัวอ่าน

ลักษณะงานที่ทำการศึกษาคือชีลในเครื่องจับยึดหัวอ่าน (HGA Clamp) ซึ่งทำหน้าที่ทดสอบสภาพหัวอ่าน ซึ่งลักษณะของเครื่องจับยึดหัวอ่านแสดงดังรูป 3.1 ซึ่งมีแท่นประกอบ (Nest) และกระบอกสูบ (Collar) ประกอบเข้าด้วยกัน และมีตำแหน่งจ่ายลมเข้าเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนลูกสูบขึ้นลง โดยชีลที่ใช้ในเครื่องจับยึดหัวอ่านเป็นชีลโอริง (O-ring seal) ซึ่งสวมอยู่ที่กระบอกสูบตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในรูป 3.2



รูป 3.1 แสดงลักษณะเครื่องจับยึดหัวอ่าน (HGA Clamp) และส่วนประกอบ

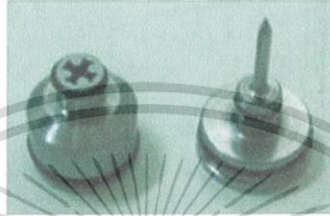


รูป 3.2 แสดงลักษณะกระบอกสูบและชีลโอริงที่สวมอยู่

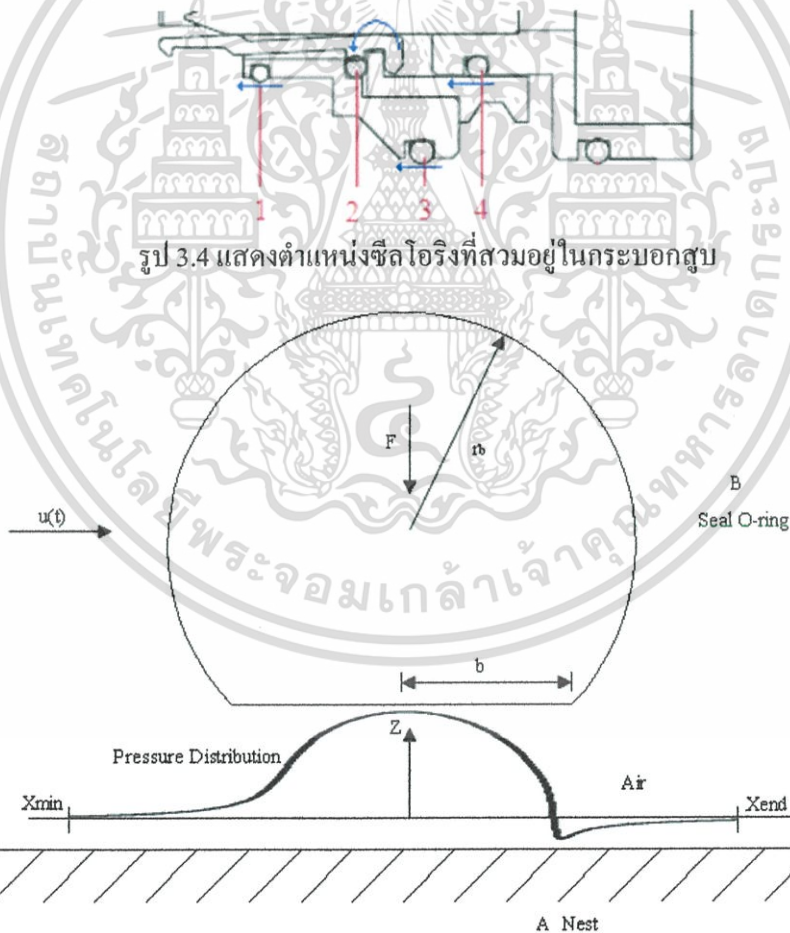
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบอกสูบมีส่วนเคลื่อนที่และส่วนอยู่นิ่งดังแสดงในรูป 3.3 ซึ่งมีซีลโอริงสวมอยู่ภายใน เพื่อป้องกันการสัมผัสกันระหว่างส่วนเคลื่อนที่กับส่วนอยู่นิ่ง โดยลักษณะของซีลโอริงสวมอยู่ภายในกระบอกสูบดังรูป 3.4 มีห้าชั้น ซึ่งชั้นที่ 1,3,4,5 เคลื่อนที่แบบไถล (Translation motion) แบบไปกลับ (Reciprocating motion) และชั้นที่ 2 จะรับแรงแบบถูกกด โดยซีลโอริงชั้นที่ 3 จะนำมาศึกษาทางไตรโบโลยี (Tribology)

เมื่อพิจารณาซีลชั้นที่ 3 ซึ่งเคลื่อนที่แบบไป-กลับ เป็นการหล่อลื่นที่มีสารหล่อลื่นเป็นอากาศ จะได้ดังแสดงในรูป 3.5



รูป 3.3 แสดงกระบอกสูบทั้งสองส่วน คือ ส่วนเคลื่อนที่และส่วนอยู่นิ่ง จากซ้ายไปขวาตามลำดับ



รูป 3.4 แสดงตำแหน่งซีลโอริงที่สวมอยู่ในกระบอกสูบ

รูป 3.5 แสดงลักษณะการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดร ไดนามิกแบบชั่วขณะของซีลภายในเครื่องจับยึดหัวอ่าน เมื่อสารหล่อลื่นเป็นอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสารหล่อลื่นที่ใช้เป็นอากาศ ความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นจึงบางมาก ดังนั้น การศึกษาพฤติกรรมของสารหล่อลื่นของซิลิโคนในเครื่องจักรหัวอ่านครั้งนี้ กำหนดการหล่อลื่น เป็นการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกแบบชั่วขณะ โดยคิดผลเนื่องจากการสั่นไถลของ โมเลกุล และไม่คิดผลเนื่องจากอุณหภูมิ สมการที่ใช้ในการคำนวณที่เกี่ยวข้องสามารถแบ่งได้เป็น 5 สมการ หลัก คือ

- สมมติฐานของเฮิร์ตซ์
- สมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์
- สมการความหนาฟิล์ม
- สมการสมดุลแรง
- สมการเงื่อนไขขอบ

3.2 สมมติฐานของเฮิร์ตซ์

เนื่องจากการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก จะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ของส่วนที่เกิดการสัมผัสกัน ดังนั้น เฮิร์ตซ์จึงได้ทำการพิจารณาความเค้นและการเปลี่ยนแปลง รูปร่างของรูปทรงวงรี (Ellipsoidal) สองอันสัมผัสกัน โดยทั้งผิวสองเป็นแบบราบเรียบ ซึ่ง ประยุกต์ทฤษฎีความยืดหยุ่นเพื่อกำหนดรูปแบบของปัญหา โดยมีสมมติฐานดังนี้

1. วัสดุเป็นเนื้อเดียวกันและอยู่ในช่วงที่วัสดุยืดหยุ่น
2. ไม่มีแรงตามแนวสัมผัสระหว่างของแข็ง
3. ช่วงของการสัมผัสมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับรัศมี
4. ของแข็งจะอยู่กับที่และอยู่ในสภาวะสมดุล

3.3 สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์

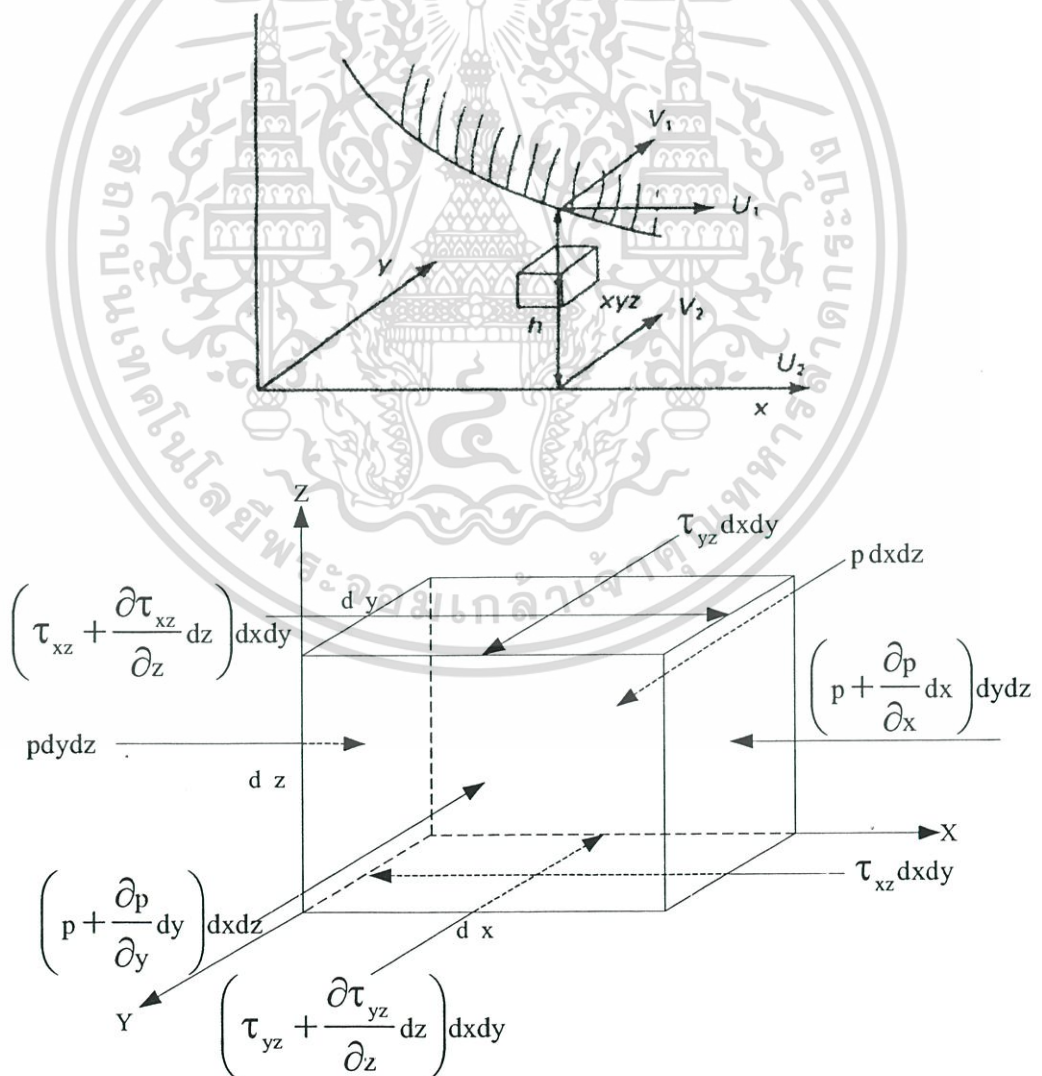
การหล่อลื่นระหว่างวัตถุสองชิ้นที่เคลื่อนที่จะเกิดฟิล์มของสารหล่อลื่นขึ้น โดยความเร็ว ของฟิล์มสารหล่อลื่นสามารถหาได้จากสมการ โมเมนตัม(Momentum equation) และเงื่อนไข ขอบเขตของการศึกษา แทนค่าความเร็วในสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) จะได้ สมการเรย์โนลด์ การศึกษานี้พฤติกรรมของสารหล่อลื่นเป็นนิวโตเนียน มีสมมติฐานดังนี้

1. การไหลของของไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ
2. ของไหลที่ใช้เป็นอากาศ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ไม่คิดแรงจากน้ำหนักของของไหลและแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำบนของไหล
4. ไม่มีการลื่นไถลของของไหลที่ผิวสัมผัสทั้งสองด้าน
5. ความหนาฟิล์มบางมากเมื่อเปรียบเทียบกับด้านอื่น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความดันตลอดความหนาฟิล์มของไหลจึงมีผลน้อย
6. ไม่คิดผลของความโค้งของผิวสัมผัสเนื่องจากความหนาฟิล์มมีขนาดน้อยมาก
7. แรงเฉื่อยของของไหลมีผลน้อยมาก เนื่องจากมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเทอมของผลต่างของความดัน รวมทั้งไม่คิดผลเนื่องจากความเร่งของของไหล
8. ไม่คิดผลเนื่องจากอุณหภูมิ

เมื่อพิจารณาสมดุลของแรงในอิลิเมนต์ของของไหล ตามรูป 3.6



รูป 3.6 แสดงแรงที่กระทำต่ออิลิเมนต์ของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูป 3.6 สมดุลแรงตามแนวแกน X คือ

$$pdydz + \left(\tau_{xz} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} dz \right) dxdy = \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dydz + \tau_{xz} dxdy$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (3.1)$$

ในทำนองเดียวกัน สมดุลแรงตามแนวแกน Y จะได้

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad (3.2)$$

จากสมการความเค้นเฉือนของนิวตัน

$$\tau_{xz} = \mu \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.3)$$

$$\tau_{yz} = \mu \frac{\partial v}{\partial z} \quad (3.4)$$

แทนค่าสมการ (3.3) และ (3.4) ลงในสมการ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (3.6)$$

อินทิเกรตสมการ (3.5) และ (3.6) สองครั้งเทียบกับ z เพื่อหาความเร็วตามแนวแกน X และแกน Y จะได้

$$u = \frac{z^2}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} + A \frac{z}{\mu} + B \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$v = \frac{z^2}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} + C \frac{z}{\mu} + D \quad (3.8)$$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตีพิมพ์และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ A, B, C และ D คือ ค่าคงที่ของการอินทิเกรต ซึ่งสามารถคำนวณได้จากเงื่อนไขขอบดังนี้

$$z = 0 ; u = U_2 ; v = V_2$$

$$z = h ; u = U_1 ; v = V_1$$

แทนเงื่อนไขขอบดังกล่าวลงสมการ (3.7) และ (3.8) จะได้

$$u = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) (z^2 - zh) + (U_1 - U_2) \frac{z}{h} + U_2 \quad (3.9)$$

$$v = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) (z^2 - zh) + (V_1 - V_2) \frac{z}{h} + V_2 \quad (3.10)$$

จากสมการอัตราการไหลของสารหล่อลื่นตามแกน X และแกน Y คือ

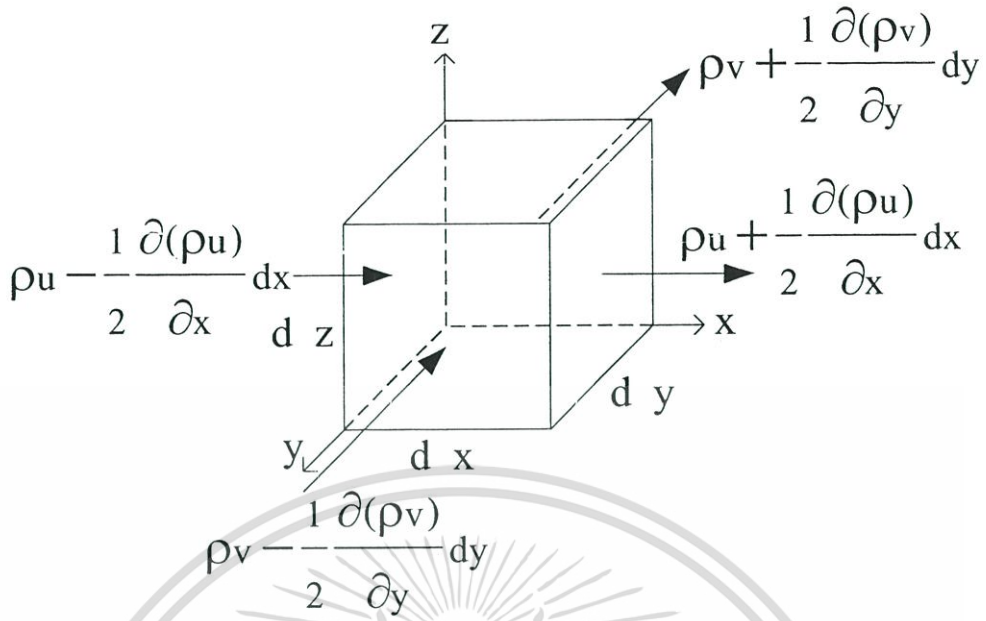
$$q'_x = \int_0^h u dz \quad (3.11)$$

$$q'_y = \int_0^h v dz \quad (3.12)$$

ดังนั้นอัตราการไหลของสารหล่อลื่นตามแกน X และแกน Y สามารถหาได้จากการนำสมการ (3.9) และ (3.10) แทนลงในสมการ (3.11) และ (3.12) ตามลำดับ จะได้

$$q_x = \int_0^h u dz = \frac{-h^3}{12\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + (U_2 + U_1) \frac{h}{2} \quad (3.13)$$

$$q_y = \int_0^h v dz = \frac{-h^3}{12\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) + (V_1 + V_2) \frac{h}{2} \quad (3.14)$$



รูป 3.7 แสดงสมมูลมวลที่เข้าและออกอีลิเมนต์ของของไหล

จากสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) หรือกฎทรงมวล ดังแสดงในรูป 3.7 จะได้

$$\begin{aligned} & \left(\rho u + \frac{1}{2} \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right) dydz + \left(\rho v + \frac{1}{2} \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy \right) dx dz - \left(\rho u - \frac{1}{2} \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right) dydz \\ & - \left(\rho v - \frac{1}{2} \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy \right) dx dz = - \frac{\partial(\rho)}{\partial t} dx dy dz \\ & \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \\ & \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

ทำการอินทิเกรตสมการ (3.15) เทียบกับ z จะได้

$$\int_0^h \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right] dz = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \int_0^h u dz \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \int_0^h v dz \right) + \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = 0 \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการ (3.14) และ (3.14) ลงในสมการ (3.16) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \rho \left\{ \frac{-h^3}{12\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + (u_1 + u_2) \frac{h}{2} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \rho \left\{ \frac{-h^3}{12\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) + (v_1 + v_2) \frac{h}{2} \right\} + \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\rho h^3}{12\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\rho h^3}{12\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) \right\} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{(u_1 + u_2)}{2} h \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{(v_1 + v_2)}{2} h \right) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho h)$$

เมื่อ $\bar{u} = (u_1 + u_2)/2$ และ $\bar{v} = (v_1 + v_2)/2$ จะได้สมการเรย์โนลด์เป็นดังสมการ (3.17)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\rho h^3}{12\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\rho h^3}{12\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) \right\} = \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}h) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}h) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) \quad (3.17)$$

สำหรับปัญหาของซีลโอริงในเครื่องจับยึดหัวอ่าน เนื่องจากการไหลของอากาศในแนวแกน Y น้อยมากเมื่อเทียบกับแนวแกน X ดังนั้นสมการ (3.17) จึงลดลงรูปเป็น 1 มิติคือ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\rho h^3}{12\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \right\} = \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}h) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) \quad (3.18)$$

เนื่องจากซีลโอริงในเครื่องจับยึดหัวอ่านเป็นการเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมา ซึ่งทำให้ความเร็วไม่คงที่ ดังนั้นสมการเรย์โนลด์จะเป็น

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right] = C_{UT} \bar{u}_0 \frac{\partial (\rho h)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho h)}{\partial t} \quad (3.19)$$

เมื่อ $C_{UT} = \frac{\bar{u}(t)}{\bar{u}_0}$

\bar{u}_0 คือความเร็วอ้างอิงตามแนวแกน X

เนื่องจากอากาศมีพฤติกรรมเป็นแก๊สในอุดมคติ ($\frac{P}{\rho} = \bar{R}T$) และเป็น Isothermal จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{p}{RT} h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right] = C_{ur} \bar{u}_0 \frac{\partial \left(\frac{p}{RT} h \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\frac{p}{RT} h \right)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{ph^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right] = C_{ur} \bar{u}_0 \frac{\partial(ph)}{\partial x} + \frac{\partial(ph)}{\partial t} \quad (3.20)$$

พิจารณาอิทธิพลเนื่องจากการลื่นไถลของโมเลกุลอากาศ ซึ่งส่งผลต่อความหนืดของอากาศซึ่งใช้สมการโบว์ซ์แมนน์อันดับที่ 1 (1st order slip model) ในการอธิบาย คือ

$$\mu = \frac{\mu_0}{\left(1 + \frac{6\lambda_a p_a}{ph} \right)} \quad (3.21)$$

แทนค่าสมการ (3.21) ลงสมการ (3.20) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{ph^3}{12\mu_0 \left(1 + \frac{6\lambda_a p_a}{ph} \right)} \frac{\partial p}{\partial x} \right] = C_{ur} \bar{u}_0 \frac{\partial(ph)}{\partial x} + \frac{\partial(ph)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ph^3 \left(1 + \frac{6\lambda_a p_a}{ph} \right) \frac{\partial p}{\partial x} \right] = 12\mu_0 \left[C_{ur} \bar{u}_0 \frac{\partial(ph)}{\partial x} + \frac{\partial(ph)}{\partial t} \right] \quad (3.22)$$

ในการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์นั้นนิยมทำให้สมการมีรูปแบบไร้มิติ ซึ่งในกรณีที่วัสดุมีคุณสมบัติเป็นอิลาสติกกับวิสโคอีลาสติกนั้นแตกต่างกัน ดังนี้

3.3.1 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นอิลาสติก

ทำการสมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์ให้เป็นรูปแบบไร้มิติ เมื่อวัสดุมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก โดยกำหนดตัวแปรดังนี้

$$p = p_a P$$

$$x = bX$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t = \left(\frac{b}{\bar{u}}\right)T$$

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{r_{ax}} + \frac{1}{r_{bx}}$$

$$W' = \frac{f_0}{E'R_x}$$

$$b = \frac{D_x}{2} = R_x \left(\frac{8W'}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\delta_m = \frac{2W'R_x}{\pi} \left[\ln\left(\frac{2\pi}{W'}\right) - 1 \right]$$

$$p_h = E' \left(\frac{W'}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$F' = \frac{2}{\frac{1-\nu_a^2}{E_a} + \frac{1-\nu_b^2}{E_b}}$$

แทนค่าลงไปนสมการ (3.22) และทำให้อยู่ในรูปแบบไร้มิติจะได้

$$\frac{\partial}{\partial(bX)} \left[(p_a P) \left(\frac{b^2}{R_x} H\right)^3 \left(1 + \frac{6\lambda_a p_a}{(p_a P) \left(\frac{b^2}{R_x} H\right)} \right) \frac{\partial(p_a P)}{\partial(bX)} \right]$$

$$= 12\mu_0 \left[C_{UT} \bar{u}_0 \frac{\partial(p_a P) \left(\frac{b^2}{R_x} H\right)}{\partial(bX)} + \frac{\partial(p_a P) \left(\frac{b^2}{R_x} H\right)}{\partial\left(\frac{b}{\bar{u}_0} T\right)} \right]$$

$$\frac{b^4 p_a^2}{R_x^3} \frac{\partial}{\partial X} \left[PH^3 \left(1 + \frac{6\lambda_a R_x}{b^2 PH} \right) \frac{\partial P}{\partial X} \right] = 12\mu_0 \left[C_{UT} \bar{u}_0 \frac{p_a b^2}{b R_x} \frac{\partial PH}{\partial X} + \bar{u}_0 \frac{p_a b^2}{b R_x} \frac{\partial PH}{\partial T} \right]$$

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[PH^3 \left(1 + \frac{6\lambda_a R_x}{b^2 PH} \right) \frac{\partial P}{\partial X} \right] = \frac{12\mu_0 \bar{u}_0 R_x^2}{p_a b^3} \left[C_{UT} \frac{\partial(PH)}{\partial X} + \frac{\partial(PH)}{\partial T} \right]$$

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[PH^3 \left(1 + \left(\frac{6\lambda_a R_x}{b^2}\right) \frac{1}{PH} \right) \frac{\partial P}{\partial X} \right] - \frac{12\mu_0 \bar{u}_0 R_x^2}{p_a b^3} \left[C_{UT} \frac{\partial(PH)}{\partial X} + \frac{\partial(PH)}{\partial T} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
จะได้สมการโมดิไฟด์เรย์โนลด์ในรูปแบบไร้มิติคือ

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากท่านมีข้อสงสัยประการใด กรุณาติดต่อทางอาจารย์อึ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[Q \frac{\partial P}{\partial X} \right] = \Lambda \left[C_{UT} \frac{\partial(PH)}{\partial X} + \frac{\partial(PH)}{\partial T} \right] \quad (3.23)$$

$$\text{เมื่อ} \quad Q = PH^3 \left(1 + \left(\frac{6\lambda_a R_x}{b^2} \right) \frac{1}{PH} \right)$$

$$\Lambda = \frac{12\mu_0 \bar{u}_0 R_x^2}{p_a b^3}$$

3.3.2 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก

ทำการสมการโมดิไฟด์เรย์โนลด์ส์ให้เป็นรูปแบบไร้มิติ เมื่อวัสดุมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก โดยกำหนดตัวแปรดังนี้

$$\frac{1}{E(t)} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \left[1 - e^{-t/\tau} \right] \quad \text{เมื่อ} \quad \tau = \frac{\eta}{G_2}$$

$$E'(t) = \frac{2}{\frac{1-\nu_a^2}{E_a} + \frac{1-\nu_b^2}{E_b(t)}} \quad C_{EQ} = \frac{E'(t)}{E'}$$

$$W'(t) = \frac{f_0}{E'(t) R_{x0}} \quad C_{WT} = \frac{W'(t)}{W'}$$

$$b(t) = R_{x0} \left(\frac{8W'(t)}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad C_{BT} = \frac{b(t)}{b}$$

$$p = p_a P$$

$$x = C_{BT} b X$$

$$h = \frac{C_{BT}^2 b^2}{R_{x0}} H$$

$$t = \left(\frac{C_{BT} b}{\bar{u}} \right) T$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แทนค่าลงไปในสมการ (3.22) และทำให้อยู่ในรูปแบบไร้มิติจะได้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial(C_{BT}bX)} \left[(p_a P) \left(\frac{C_{BT}^2 b^2}{R_{x0}} H \right)^3 \left(1 + \frac{6\lambda_a p_a}{(p_a P) \left(\frac{C_{BT}^2 b^2}{R_{x0}} H \right)} \right) \frac{\partial(p_a P)}{\partial(C_{BT}bX)} \right] \\ & = 12\mu_0 \left[C_{UT} \bar{u}_0 \frac{\partial(p_a P) \left(\frac{C_{BT}^2 b^2}{R_{x0}} H \right)}{\partial(C_{BT}bX)} + \frac{\partial(p_a P) \left(\frac{C_{BT}^2 b^2}{R_{x0}} H \right)}{\partial \left(\frac{C_{BT} b}{\bar{u}_0} T \right)} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{C_{BT}^4 b^4 p_a^2}{R_{x0}^3} \frac{\partial}{\partial X} \left[PH^3 \left(1 + \frac{6\lambda_a R_{x0}}{C_{BT}^2 b^2 PH} \right) \frac{\partial P}{\partial X} \right] \\ & = 12\mu_0 \left[C_{UT} \bar{u}_0 \frac{p_a C_{BT}^2 b^2}{C_{BT} b R_{x0}} \frac{\partial PH}{\partial X} + \bar{u}_0 \frac{p_a C_{BT}^2 b^2}{C_{BT} b R_{x0}} \frac{\partial PH}{\partial T} \right] \\ & \frac{\partial}{\partial X} \left[PH^3 \left(1 + \frac{6\lambda_a R_{x0}}{C_{BT}^2 b^2 PH} \right) \frac{\partial P}{\partial X} \right] = \frac{12\mu_0 \bar{u}_0 R_{x0}^2}{p_a C_{BT}^3 b^3} \left[C_{UT} \frac{\partial(PH)}{\partial X} + \frac{\partial(PH)}{\partial T} \right] \\ & \frac{\partial}{\partial X} \left[PH^3 \left(1 + \left(\frac{6\lambda_a R_{x0}}{C_{BT}^2 b^2} \right) \frac{1}{PH} \right) \frac{\partial P}{\partial X} \right] = \frac{12\mu_0 \bar{u}_0 R_{x0}^2}{p_a C_{BT}^3 b^3} \left[C_{UT} \frac{\partial(PH)}{\partial X} + \frac{\partial(PH)}{\partial T} \right] \end{aligned}$$

จะได้สมการ โมดิไฟด์รีโนลด์ในรูปแบบไร้มิติคือ

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[Q \frac{\partial P}{\partial X} \right] = K(t) \left[C_{UT} \frac{\partial(PH)}{\partial X} + \frac{\partial(PH)}{\partial T} \right] \quad (3.24)$$

เมื่อ $Q = PH^3 \left(1 + \left(\frac{6\lambda_a R_{x0}}{C_{BT}^2 b^2} \right) \frac{1}{PH} \right)$

$$K(t) = \frac{12\mu_0 \bar{u}_0 R_{x0}^2}{p_a C_{BT}^3 b^3}$$

3.4 สมการความหนาฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 สมการความหนาฟิล์ม

ในการหล่อลื่นของซีลโอริงในเครื่องจับยึดหัวอ่านจะมีความหนาฟิล์มที่บางมาก ๆ ซึ่งเป็นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก อีกทั้งวัสดุของซีลโอริงมีเป็นวัสดุแบบนิ่ม (Soft material) ซึ่งส่งผลให้ผิวของซีลโอริงพื้นมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ดังนั้นสมการของความหนาฟิล์มอากาศจะมีผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของซีลโอริงด้วย สมการความหนาของฟิล์มอากาศจึงเป็นดังนี้

$$h_i = h_0 + \frac{x^2}{2R_x} + \delta(x) \quad (3.25)$$

เมื่อ $\delta(x)$ คือสมการการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ ซึ่งเป็นไปตามสมการ (3.26)

$$\delta(x) = \frac{-2}{\pi E'} \int_{x_{\min}}^{x_{\text{end}}} (p' - p_a) \ln(x - x')^2 dx' \quad (3.26)$$

ทำสมการความหนาฟิล์มเป็นรูปไร้มิติได้ดังนี้

3.4.1 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นอีลาสติก

$$\begin{aligned} \frac{b^2}{R_x} H_i &= \frac{b^2}{R_x} H_0 + \frac{b^2 X^2}{2R_x} + \delta(x) \\ H_i &= H_0 + \frac{X^2}{2} + \bar{\delta}(x) \end{aligned} \quad (3.27)$$

เมื่อ $\bar{\delta}(x) = \frac{R_x}{b^2} \delta(x)$

ทำสมการการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเป็นรูปไร้มิติ และทำการจัดรูปจะได้

$$\begin{aligned} \bar{\delta}(x) &= \frac{R_x}{b^2} \frac{-2}{\pi E'} \int_{x_{\min}}^{x_{\text{end}}} (p_a P' - p_a) \ln(bX - bX')^2 d(bX') \\ \bar{\delta}(x) &= \frac{-2R_x P_a b}{\pi E' b^2} \left\{ \int_{x_{\min}}^{x_{\text{end}}} (P' - 1) \ln(X - X')^2 d(X') + \int_{x_{\min}}^{x_{\text{end}}} (P' - 1) \ln(b^2) d(X') \right\} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{\delta}(x) = \frac{-2R_x p_a}{\pi E' b} \left\{ \int_{x_{\min}}^{x_{\text{end}}} (P' - 1) \ln(X - X')^2 d(X') + 2 \ln|b| \int_{x_{\min}}^{x_{\text{end}}} (P' - 1) d(X') \right\}$$

จากสมการสมดุลแรง $\int_{x_{\min}}^{x_{\text{end}}} (P' - 1) dX = \frac{w'_z}{p_a b}$ จะได้

$$\bar{\delta}(x) = \frac{-2R_x p_a}{\pi E' b} \left\{ \int_{x_{\min}}^{x_{\text{end}}} (P' - 1) \ln(X - X')^2 d(X') + \frac{2w'_z}{p_a b} \ln|b| \right\}$$

$$\text{กำหนด } H_0 = \frac{h_0}{\left(\frac{b^2}{R_x}\right)} - \frac{2p_a R_x}{\pi E' b} \left\{ \frac{2w'_z}{p_a b} \ln|b| \right\} = \frac{h_0}{\left(\frac{b^2}{R_x}\right)} - \frac{4w'_z R_x \ln|b|}{\pi E' b^2}$$

$$\bar{\delta}(X) = -\frac{2p_a R_x}{\pi E' b} \left\{ \int_{x_{\min}}^{x_{\text{end}}} (P' - 1) \ln(X - X')^2 dX \right\} \quad (3.28)$$

แทนสมการ (3.27) ลงสมการ (3.26) จะได้สมการความหนาฟิล์มอากาศในรูปไร้มิติเมื่อวัสดุมีคุณสมบัติเป็นอีลาสติกคือ

$$H_i = H_0 + \frac{X^2}{2} - \frac{2p_a R_x}{\pi E' b} \left\{ \int_{x_{\min}}^{x_{\text{end}}} (P' - 1) \ln(X - X')^2 dX \right\} \quad (3.29)$$

3.4.2 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นวิสต์โคอีลาสติก

สมการความหนาฟิล์มอากาศในรูปไร้มิติเมื่อวัสดุมีคุณสมบัติเป็นอีลาสติก คือ

$$H_i = H_0 + \frac{X^2}{2} - \frac{2p_a R_{x0}}{C_{EQ} C_{BT} \pi E' b} \left\{ \int_{X_{IN}}^{X_{OUT}} (P' - 1) \ln(X - X')^2 dX \right\} \quad (3.30)$$

3.5 สมการสมดุลแรง

แรงภายนอกที่กระทำต่อวัสดุจะเท่ากับผลรวมการกระจายของความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นบนฟิล์มสารหล่อลื่น จะได้

$$\int_{x_{\min}}^{x_{\text{end}}} (p - p_a) dx = f(t)$$

ทำสมการสมมูลแรงแบบไร้มิติได้ดังนี้

3.5.1 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นอีลาสติก

$$\int_{x_{\min}}^{x_{\text{end}}} (p_a P - p_a) d(bX) = \frac{f_0}{f_0} f(t)$$

$$\int_{x_{\min}}^{x_{\text{end}}} (P - 1) dX = C_{WT} \frac{f_0}{p_a b} \quad (3.31)$$

เมื่อ $C_{WT} = \frac{f(t)}{f_0}$

3.5.2 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก

$$\int_{x_{\min}}^{x_{\text{end}}} (P - 1) dX = C_{WT} \frac{f_0}{p_a C_{BT} b} \quad (3.32)$$

3.6 สมการเงื่อนไขขอบ

การศึกษาครั้งนี้กำหนดให้เงื่อนไขขอบที่ใช้ในการคำนวณหาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกเป็นดังนี้คือ

$$P(x_{\min}) = 1.0$$

$$P(x_{\text{end}}) = 1.0$$

บทที่ 4

วิธีเชิงตัวเลข (Numerical method)

ในบทที่แล้วได้นำเสนอสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาจะเห็นได้ว่าสมการ โมดิฟายด์ เรย์โนลด์นั้นเป็นสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ดังนั้นการแก้สมการ โดยวิธีการหาผลเฉลยแบบแม่นยำ (Exact solution) ไม่สามารถทำได้ จึงใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Method) เข้ามาประยุกต์ในการหาคำตอบ

4.1 วิธีผลต่างสืบเนื่อง

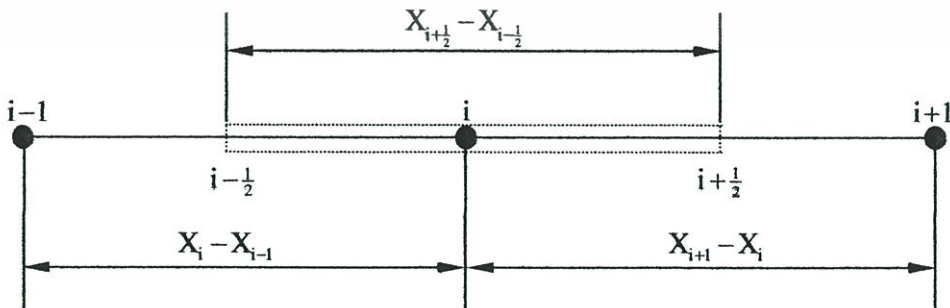
4.1.1 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นอีลาสติก

จากสมการ โมดิฟายด์ เรย์โนลด์แบบไร้มิติ ในสมการ (3.23)

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[Q \frac{\partial P}{\partial X} \right] = \Lambda \left[C_{UT} \frac{\partial(PH)}{\partial X} + \frac{\partial(PH)}{\partial T} \right]$$

$$\text{เมื่อ } Q = PH^3 \left(1 + \left(\frac{6\lambda_a R_x}{b^2} \right) \frac{1}{PH} \right), \quad \Lambda = \frac{12\mu_0 \bar{u}_0 R_x^2}{p_a b^3}$$

การแก้สมการเรย์โนลด์โดยวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method) สามารถทำได้โดยพิจารณาจากรูป 4.1 โดยที่ตำแหน่ง i ของสมการ โมดิฟายด์ เรย์โนลด์ แทนอนุพันธ์อันดับ 2 ด้วยผลต่างแบบกึ่งกลาง (Central difference) และแทนอนุพันธ์อันดับ 1 ด้วยผลต่างแบบถอยหลัง (Backward difference) ดังนั้นสมการ โมดิฟายด์ เรย์โนลด์เมื่อกระจายด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องจะได้ดังนี้



รูป 4.1 แสดงขนาดความกว้างระหว่างโนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left[\frac{\left(Q \frac{\partial P}{\partial X} \right)_{i+\frac{1}{2}} - \left(Q \frac{\partial P}{\partial X} \right)_{i-\frac{1}{2}}}{X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}}} \right] = \Lambda \left\{ C_{UT} \left[\frac{(PH)_i - (PH)_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right] + \left[\frac{(PH)_i^T - (PH)_i^{T-\Delta T}}{\Delta T} \right] \right\}$$

$$\left[\frac{Q_{i+\frac{1}{2}} \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{X_{i+1} - X_i} \right) - Q_{i-\frac{1}{2}} \left(\frac{P_i - P_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right)}{X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}}} \right] = \Lambda \left\{ C_{UT} \left[\frac{(PH)_i - (PH)_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right] + \left[\frac{(PH)_i^T - (PH)_i^{T-\Delta T}}{\Delta T} \right] \right\}$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$F(P_i^T) = \left[\frac{Q_{i+\frac{1}{2}} \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{X_{i+1} - X_i} \right) - Q_{i-\frac{1}{2}} \left(\frac{P_i - P_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right)}{X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}}} \right] - \Lambda \left\{ C_{UT} \left[\frac{(PH)_i - (PH)_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right] + \left[\frac{(PH)_i^T - (PH)_i^{T-\Delta T}}{\Delta T} \right] \right\} \quad (4.1)$$

$$\text{โดยที่ } Q_{i+\frac{1}{2}} = \frac{Q_{i+1} + Q_i}{2}, \quad Q_{i-\frac{1}{2}} = \frac{Q_i + Q_{i-1}}{2}$$

4.1.2 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก

จากสมการโมดิไฟด์เรย์โนลด์แบบไร้มิติ ในสมการ (3.23) แก้สมการเรย์โนลด์โดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม แล้วจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$F(P_i^T) = \left[\frac{Q_{i+\frac{1}{2}} \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{X_{i+1} - X_i} \right) - Q_{i-\frac{1}{2}} \left(\frac{P_i - P_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right)}{X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}}} \right] \quad (4.2)$$

$$- K(t) \left\{ C_{UT} \left[\frac{(PH)_i - (PH)_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right] + \left[\frac{(PH)_i^T - (PH)_i^{T-\Delta T}}{\Delta T} \right] \right\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{โดยที่ } Q_{i+\frac{1}{2}} = \frac{Q_{i+1} + Q_i}{2}, \quad Q_{i-\frac{1}{2}} = \frac{Q_i + Q_{i-1}}{2}$$

$$K(t) = \frac{12\mu_0 \bar{n}_0 R_{x_0}^2}{p_a C_{BT}^3 b^3}$$

6.2 วิธีนิวตันราฟสัน

ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) เป็นวิธีที่มีรากฐานมาจากอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor's series) โดยอนุกรมเทย์เลอร์เป็นอนุกรมที่ใช้ในการหาค่าฟังก์ชันที่ตำแหน่ง x จากค่าของฟังก์ชันและค่าอนุพันธ์ (derivatives) ที่อันดับต่าง ๆ กันของฟังก์ชันนั้นที่ตำแหน่ง x_0 ซึ่งจะหาได้ดังนี้

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}(x-x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x-x_0)^2 + \dots \quad (4.3)$$

การประมาณสมการ $f(x)$ จะถูกต้องยิ่งขึ้นถ้าสมการ $f(x)$ อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น ทำนองเดียวกันหากฟังก์ชันที่กำหนดให้เป็นฟังก์ชันที่ไม่เชิงเส้นหรือไม่สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันสมการพหุนามได้ จะรวมเทอมของเทเลอร์ถึงพจน์อนันต์จึงจะได้คำตอบที่ถูกต้อง ซึ่งในวิธีนิวตัน-ราฟสัน ให้เทอมอนุพันธ์ตั้งแต่อนุพันธ์อันดับสองเป็นต้นคิดว่ามีค่าน้อยมากหรือเท่ากับศูนย์ ($f''(x) = 0, f'''(x) = 0, \dots$) ดังนั้นการประมาณฟังก์ชันด้วยอนุกรมเทเลอร์ที่ประกอบด้วยพจน์เพียง 2 พจน์ ดังแสดงในสมการ ต่อไปนี้

$$f(x) = f(x_0) + (x-x_0)f'(x_0) = 0$$

$$x - x_0 = -\frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (4.4)$$

คำนวณซ้ำทำให้ได้ค่าใหม่ดังนี้

$$x_{k+1} = x_k + \omega \Delta x_{k+1}$$

$$\Delta x_{k+1} = -\frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (4.5)$$

เมื่อ ω คือ Relaxation
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และตรวจสอบความถูกต้องจากเงื่อนไขดังนี้

$$\left| \frac{X_{k+1} - X_k}{X_{k+1}} \right| < \varepsilon \quad ; \varepsilon = 1.0 \times 10^{-4} \quad (4.6)$$

เมื่อประยุกต์ระเบียบวิธีนิวตันกราฟเส้นกับสมการเรย์โนลด์เพื่อหาค่าคำตอบสามารถได้จากสมการที่ (4.7)

$$P_{i,j}^{new} = P_{i,j}^{old} + \omega \Delta P_{i,j} \quad (4.7)$$

เมื่อ $[\Delta P_i] = [-F_i] / \left[\frac{\partial F_i}{\partial P_i} \right]$ (4.8)

จากสมการ (4.1) ทำการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน $F(P_i^T)$ เทียบกับความดัน จะได้ดังนี้

4.2.1 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นอิลาสติก

$$\frac{\partial F(P_i^T)}{\partial P_i^T} = \frac{1}{X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}}} \left\{ \left[Q_{i+\frac{1}{2}} \frac{\partial}{\partial P_i} \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{X_{i+1} - X_i} \right) + \frac{P_{i+1} - P_i}{X_{i+1} - X_i} \frac{\partial}{\partial P_i} \left(Q_{i+\frac{1}{2}} \right) \right] \right. \\ \left. - \left[Q_{i-\frac{1}{2}} \frac{\partial}{\partial P_i} \left(\frac{P_i - P_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right) + \frac{P_i - P_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \frac{\partial}{\partial P_i} \left(Q_{i-\frac{1}{2}} \right) \right] \right\} \\ - \Lambda \left\{ C_{UT} \left[\frac{\left(\frac{P_{i,j}}{X_{i,j}} \frac{\partial H_{i,j}}{\partial P_{i,j}} + H_{i,j} \right) - 0}{X_{i,j} - X_{i-1,j}} \right] + \left[\frac{\left(P_{i,j} \frac{\partial H_{i,j}}{\partial P_{i,j}} + H_{i,j} \right)^T - 0}{\Delta T} \right] \right\}$$

$$\frac{\partial F(P_i^T)}{\partial P_i^T} = \frac{1}{X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}}} \left\{ \left(\frac{1}{X_{i+1} - X_i} \right) \left[(P_{i+1} - P_i) \frac{\partial Q_i}{\partial P_i} - Q_{i+\frac{1}{2}} \right] \right. \\ \left. - \left(\frac{1}{X_i - X_{i-1}} \right) \left[(P_i - P_{i-1}) \frac{\partial Q_i}{\partial P_i} + Q_{i-\frac{1}{2}} \right] \right\} \\ - \Lambda \left\{ C_{UT} \left[\frac{P_i \frac{\partial H_i}{\partial P_i} + H_i}{X_i - X_{i-1}} \right] + \left[\frac{P_i \frac{\partial H_i}{\partial P_i} + H_i}{\Delta T} \right] \right\} \quad (4.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก $Q_i = P_i H_i^3 \left(1 + \left(\frac{6\lambda_a R_{x0}}{b^2} \right) \frac{1}{P_i H_i} \right)$ จะได้

$$\frac{\partial Q_i}{\partial P_i} = \frac{\partial}{\partial P_i} \left\{ H_i^3 \left(P_i + \left(\frac{6\lambda_a R_{x0}}{b^2} \right) \left(\frac{1}{H_i} \right) \right) \right\}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial P_i} = (3H_i^2) \left(P_i + \left(\frac{6\lambda_a R_{x0}}{b^2} \right) \left(\frac{1}{H_i} \right) \right) \frac{\partial H_i}{\partial P_i} + (H_i^3) \left(1 - \left(\frac{6\lambda_a R_{x0}}{b^2} \right) \left(\frac{1}{H_i^2} \right) \frac{\partial H_i}{\partial P_i} \right) \quad (4.10)$$

4.2.2 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก

$$\frac{\partial F(P_i^T)}{\partial P_i^T} = \frac{1}{X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}}} \left\{ \left[\left(\frac{1}{X_{i+1} - X_i} \right) \left[(P_{i+1} - P_i) \frac{\partial Q_i}{\partial P_i} - Q_{i+\frac{1}{2}} \right] \right] - \left[\left(\frac{1}{X_i - X_{i-1}} \right) \left[(P_i - P_{i-1}) \frac{\partial Q_i}{\partial P_i} + Q_{i-\frac{1}{2}} \right] \right] \right\} - K(t) \left\{ C_{UT} \left[\frac{P_i \frac{\partial H_i}{\partial P_i} + H_i}{X_i - X_{i-1}} \right] + \left[\frac{P_i \frac{\partial H_i}{\partial P_i} + H_i}{\Delta T} \right] \right\} \quad (4.11)$$

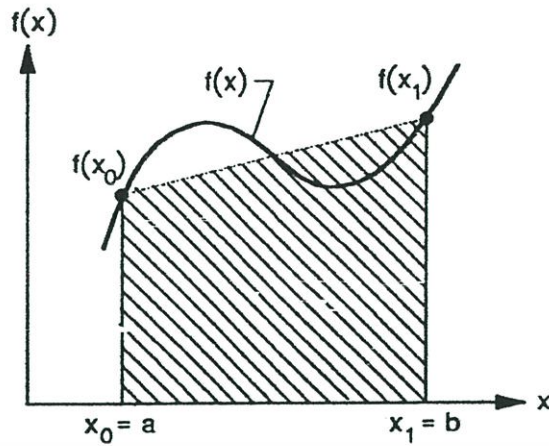
$$\frac{\partial Q_i}{\partial P_i} = (3H_i^2) \left(P_i + \left(\frac{6\lambda_a R_{x0}}{C_{BT}^2 b^2} \right) \left(\frac{1}{H_i} \right) \right) \frac{\partial H_i}{\partial P_i} + (H_i^3) \left(1 - \left(\frac{6\lambda_a R_{x0}}{C_{BT}^2 b^2} \right) \left(\frac{1}{H_i^2} \right) \frac{\partial H_i}{\partial P_i} \right) \quad (4.12)$$

4.3 การอินทิเกรตเชิงตัวเลข

เมื่อพิจารณาสมการความหนาฟิล์มและสมการสมดุลแรง พบว่ามีการอินทิเกรตจำกัดเขต ซึ่งมีความซับซ้อนและความยุ่งยากในการอินทิเกรต จึงจะจำเป็นต้องนำวิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลข เข้าช่วย ซึ่งในที่นี้ได้ใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule) ในการอินทิเกรต

วิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมูสามารถหาได้จากสูตรการหาพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูทางคณิตศาสตร์ เมื่อนำมาประยุกต์กับการอินทิเกรตสามารถพิจารณาได้จากรูป

4.2



รูป 4.2 แสดงการอินทิเกรตโดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู

จากรูป 4.2 สามารถเขียนสูตรการอินทิเกรตเชิงตัวเลข โดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมูได้โดย

$$I = \left(\frac{b-a}{2} \right) (f(x_1) + f(x_2)) \quad (4.13)$$

4.3.1 สมการความหนาฟิล์ม

4.3.1.1 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นอิลาสติก

จากสมการความหนาฟิล์มในเทอมการเปลี่ยนรูปของวัสดุมีการอินทิเกรต จึงนำกฎสี่เหลี่ยมคางหมูมาประยุกต์กับสมการการเปลี่ยนรูปของวัสดุในสมการ (3.27)

$$\bar{\delta}_i(X) = -\frac{2p_a R_{x_0}}{\pi E' b} \left\{ \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} (P' - 1) \ln(X - X')^2 dX \right\}$$

นำวิธีสี่เหลี่ยมคางหมูมาประยุกต์จะได้

$$\bar{\delta}_i(X) = -\frac{2p_a R_{x_0}}{\pi E' b} \left\{ \sum_{j=0}^{N_X} 2(P_j - 1) \left(\frac{\Delta X}{2} \right) \left[\ln \left| X_i - \left(X_j + \frac{\Delta X}{2} \right) \right| + \ln \left| X_i - \left(X_j - \frac{\Delta X}{2} \right) \right| \right] \right\}$$

$$\bar{\delta}_i(X) = -\frac{2p_a R_{x_0}}{\pi E' b} (\Delta X) \left\{ \sum_{j=0}^{N_X} (P_j - 1) \left[\ln \left| X_i - X_j - \frac{\Delta X}{2} \right| + \ln \left| X_i - X_j + \frac{\Delta X}{2} \right| \right] \right\}$$

$$\bar{\delta}_i(X) = -\left(\frac{2p_a R_{x_0}}{\pi E' b} \right) (\Delta X) \left\{ \sum_{j=0}^{N_X} (P_j - 1) \ln \left(\left| \frac{X_{i+1} + X_i}{2} - X_j \right| \left| \frac{X_i + X_{i-1}}{2} - X_j \right| \right) \right\} \quad (4.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้สมการความหนาฟิล์มอากาศเป็น

$$H_i = H_0 + \frac{X^2}{2} - \left(\frac{2p_a R_{x0}}{\pi E'b} \right) (\Delta X) \left\{ \sum_{j=0}^{N_x} (P_j - 1) \ln \left(\left| \frac{X_{i+1} + X_i}{2} - X_j \right| \left| \frac{X_i + X_{i-1}}{2} - X_j \right| \right) \right\} \quad (4.15)$$

4.3.1.2 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก

$$H_i = H_0 + \frac{X^2}{2} - \left(\frac{2p_a R_{x0}}{C_{EQ} C_{BT} \pi E'b} \right) (\Delta X) \left\{ \sum_{j=0}^{N_x} (P_j - 1) \ln \left(\left| \frac{X_{i+1} + X_i}{2} - X_j \right| \left| \frac{X_i + X_{i-1}}{2} - X_j \right| \right) \right\} \quad (4.16)$$

4.3.2 สมการสมดุลแรง

4.3.2.1 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นอิลาสติก

จากสมการสมดุลแรงในสมการ (3.29)

$$\int_{x_{min}}^{x_{end}} (P - 1) dX = C_{wt} \frac{f_0}{p_a b}$$

นำวิธีสี่เหลี่ยมคางหมูมาประยุกต์จะได้

$$\Delta X \sum_{i=0}^{N_x} (P_i - 1) = C_{wt} \frac{w_0}{p_a b} \quad (4.17)$$

4.3.2.2 กรณีวัสดุมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก

$$\Delta X \sum_{i=0}^{N_x} (P_i - 1) = \frac{C_{wt}}{C_{BT}} \frac{f_0}{p_a b} \quad (4.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการจำลอง

ในการจำลองพฤติกรรมของซีลในเครื่องจับยึดหัวอ่านซึ่งเป็นการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกในสถานะชั่วขณะที่สารหล่อลื่นเป็นอากาศ โดยคิดผลเนื่องจากการสั่นไถลของโมเลกุลด้วย มีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตาราง 5.1 และ 5.2 โดยการเคลื่อนที่ของซีลในเครื่องจับยึดหัวอ่านเป็นเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมา (Reciprocating motion)

5.1 ผลการคำนวณเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นอิลาสติก

จากการศึกษาการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกของซีลในเครื่องจับยึดหัวอ่านเมื่อซีลรับภาระ 2.0 mN/m ใช้เวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบ เป็น 1.5 วินาที เมื่อสารหล่อลื่นเป็นอากาศ โดยคิดผลเนื่องจากการสั่นไถลของโมเลกุล และซีลมีคุณสมบัติเป็นอิลาสติก จะได้ความเร็วของซีล การกระจายความดัน และความหนาฟิล์มอากาศ ณ เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในรูป 5.2 -5.7

ตาราง 5.1 คุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติสารหล่อลื่น	วัสดุ	
	Rubber	Titanium
Radial (mm.)	0.3356	∞
Poisson ratio	0.5	0.41
Elastic modulus(GPa.)	0.038	116

ตาราง 5.2 คุณสมบัติของสารหล่อลื่น

คุณสมบัติสารหล่อลื่น	อากาศ
Density (kg/m^3)	1.225
Viscosity ($Pa \cdot s$)	1.8e-5
Molecular mean free path (m)	64.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.1 แสดงความเร็วของซีด ในการเคลื่อนที่ของซีดในเครื่องจับยัดหัวอ่าน 1 รอบ โดยการเคลื่อนที่ไปกลับ 1 รอบใช้เวลา 1.5 วินาที โดยใช้เวลาค่อยเคลื่อนที่ไป 0.5 วินาที แล้วหยุดนิ่ง 0.5 วินาที แล้วเคลื่อนที่กลับ 0.5 วินาที ซึ่งมีความเร็วสูงสุดเป็น 2 mm/s

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.2 แสดงการกระจายความหนาฟิล์มอากาศ ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขาไปของซีด พบว่าเมื่อซีดเริ่มเคลื่อนที่ไป ความหนาฟิล์มอากาศจะมีค่าน้อย และความหนาฟิล์มอากาศจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเร็วสูงสุดที่เวลา 0.25 วินาที แล้วความหนาฟิล์มอากาศจึงลดลงตามความเร็วที่ลดลง

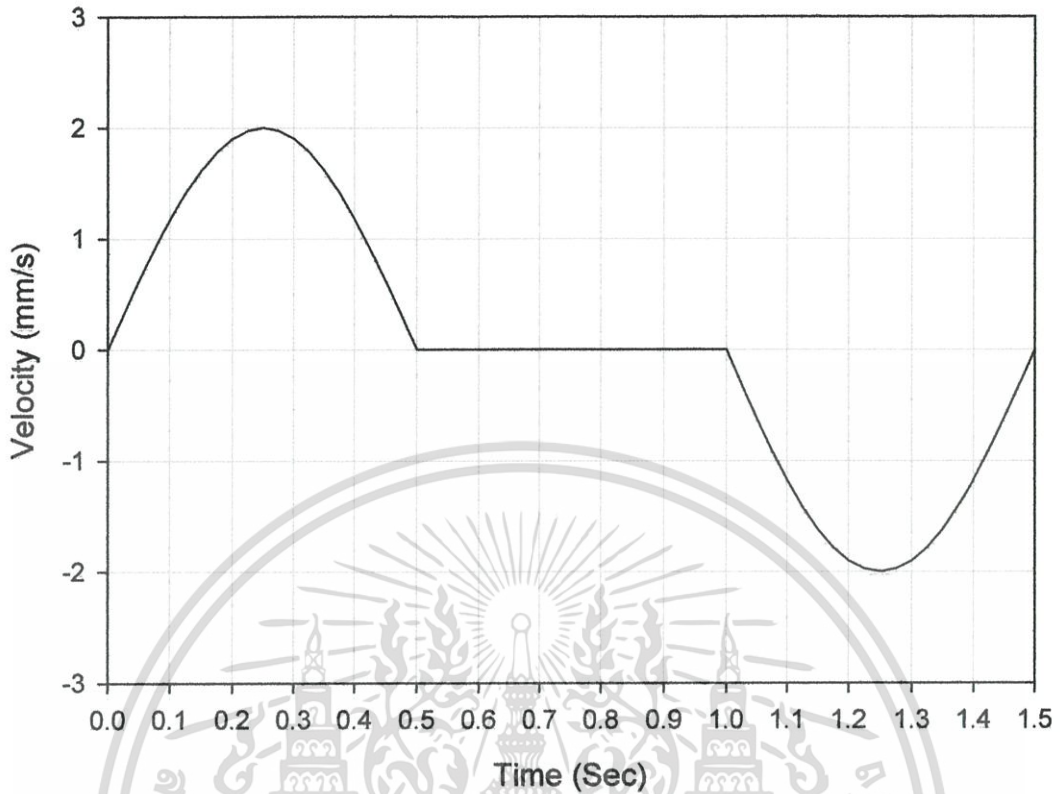
จากกราฟดังแสดงในรูป 5.3 แสดงการกระจายความดัน ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขาไปของซีด พบว่าเมื่อซีดเริ่มเคลื่อนที่ไป ความดันจะลดลงหลังจากที่ซีดเริ่มเคลื่อนที่จนกระทั่งความเร็วสูงสุดที่เวลา 0.25 วินาที แล้วความดันจึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความเร็วที่ลดลง

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.4 แสดงการกระจายความหนาฟิล์มอากาศ ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขากลับของซีด พบว่าเมื่อซีดเริ่มเคลื่อนที่กลับ ความหนาฟิล์มอากาศจะมีค่าน้อย และความหนาฟิล์มอากาศจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเร็วสูงสุดที่เวลา 1.25 วินาที แล้วความหนาฟิล์มอากาศจึงลดลงตามความเร็วที่ลดลง โดยลักษณะความหนาฟิล์มอากาศของการเคลื่อนที่ขากลับจะกลับทิศกับการเคลื่อนที่ขาไป

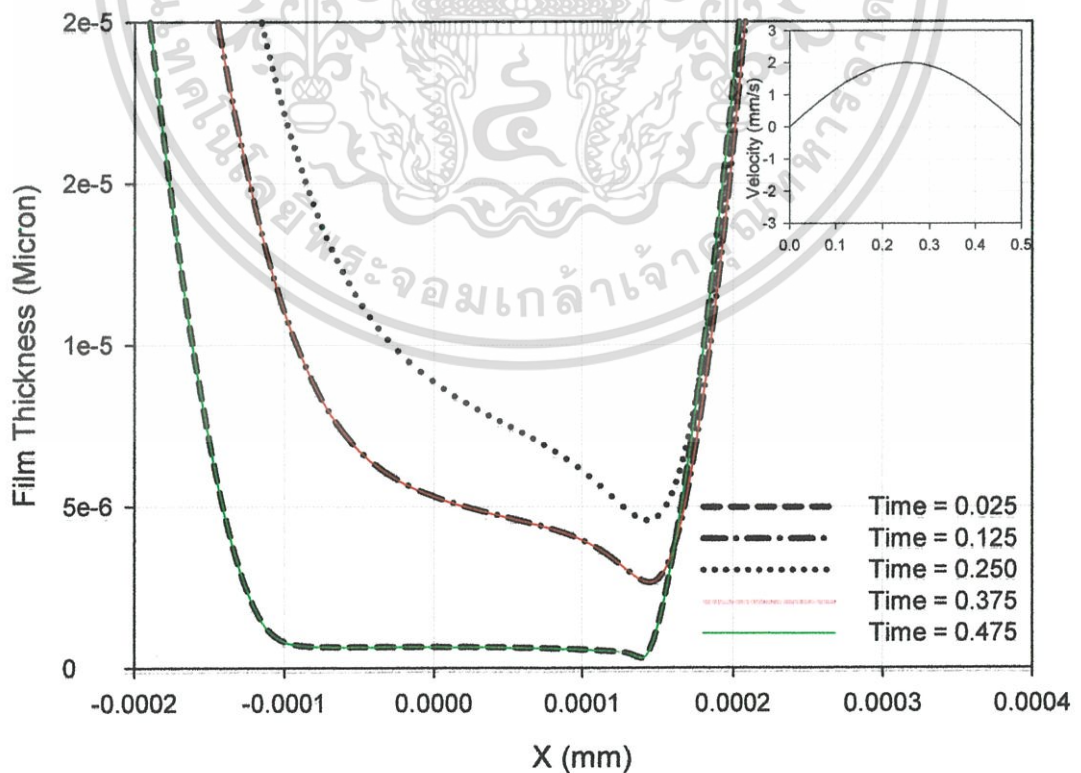
จากกราฟดังแสดงในรูป 5.5 แสดงการกระจายความดัน ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขากลับของซีด พบว่าเมื่อซีดเริ่มเคลื่อนที่กลับ ความดันจะลดลงหลังจากที่ซีดเริ่มเคลื่อนที่จนกระทั่งความเร็วสูงสุดที่เวลา 0.25 วินาที แล้วความดันจึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความเร็วที่ลดลง โดยลักษณะความหนาฟิล์มอากาศของการเคลื่อนที่ขากลับจะกลับทิศกับการเคลื่อนที่ขาไป

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.6 แสดงความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีด พบว่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดเปลี่ยนแปลงตามความเร็วที่เปลี่ยนไป โดยความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อความเร็วลดลง โดยที่ความเร็วเป็น 0 ไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากไม่มีฟิล์มอากาศเกิดขึ้น

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.7 แสดงความดันสูงสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีด พบว่าความดันสูงสุดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามความเร็วที่เปลี่ยนไป โดยความดันสูงสุดจะลดลงเล็กน้อยเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความเร็วลดลง โดยที่ความเร็วเป็น 0 ไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากไม่มีฟิล์มอากาศเกิดขึ้น

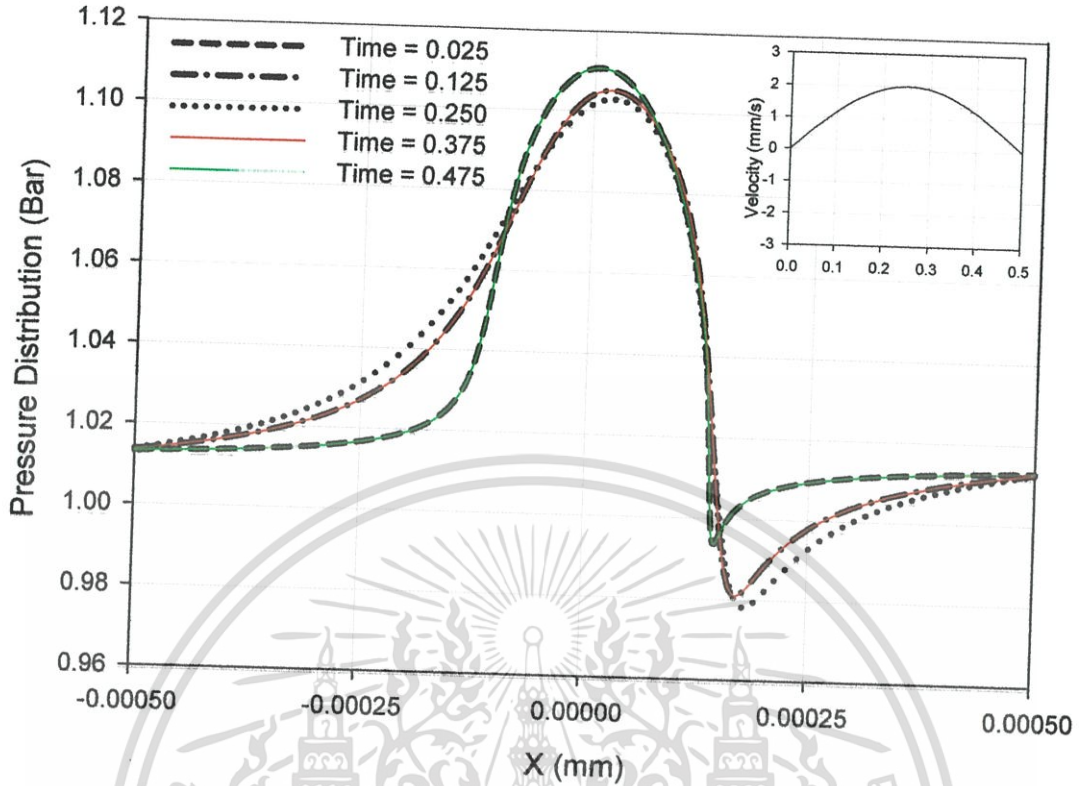


รูป 5.1 กราฟแสดงความเร็วของการเคลื่อนที่เครื่องจับยึดหัวอ่าน 1 รอบ

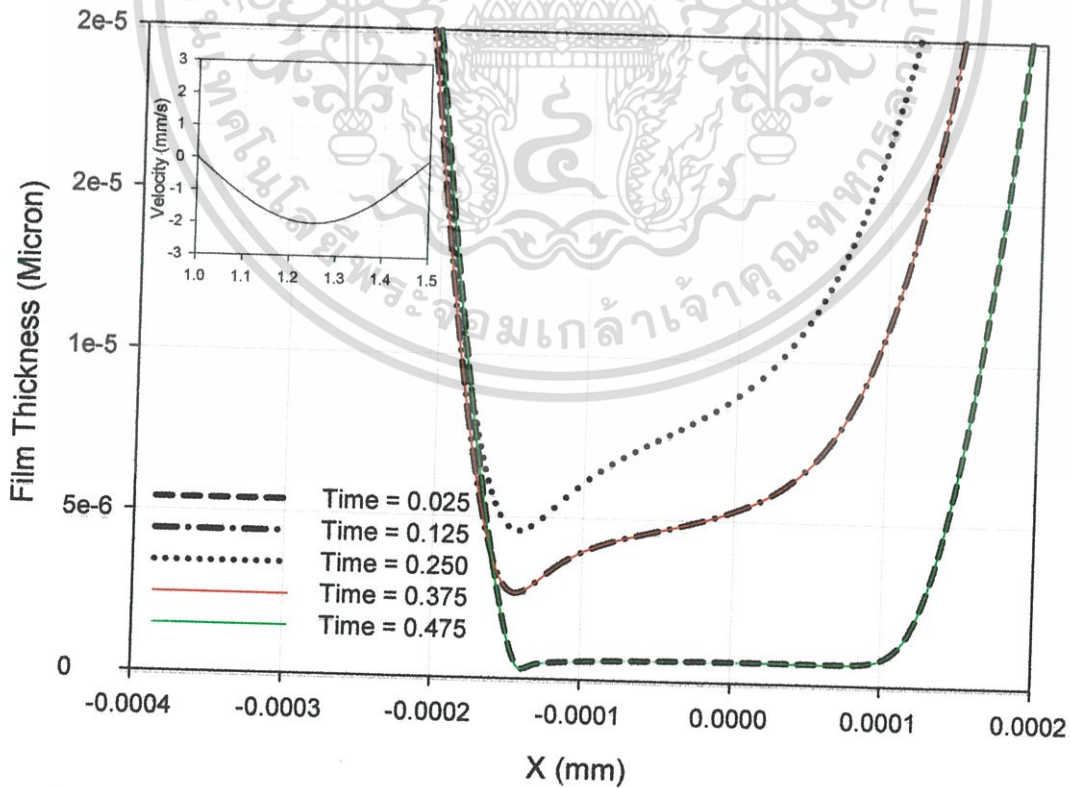


รูป 5.2 กราฟแสดงการกระจายความหนาฟิล์มอากาศ ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขาไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

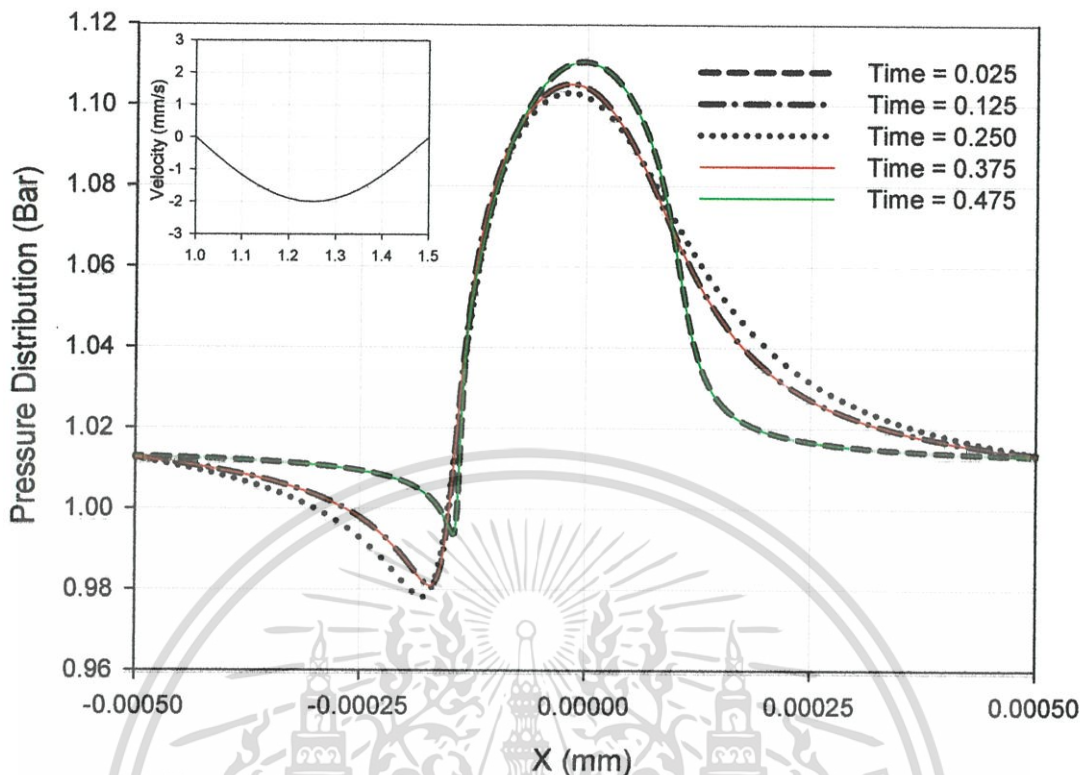


รูป 5.3 กราฟแสดงการกระจายความดัน ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขาไป

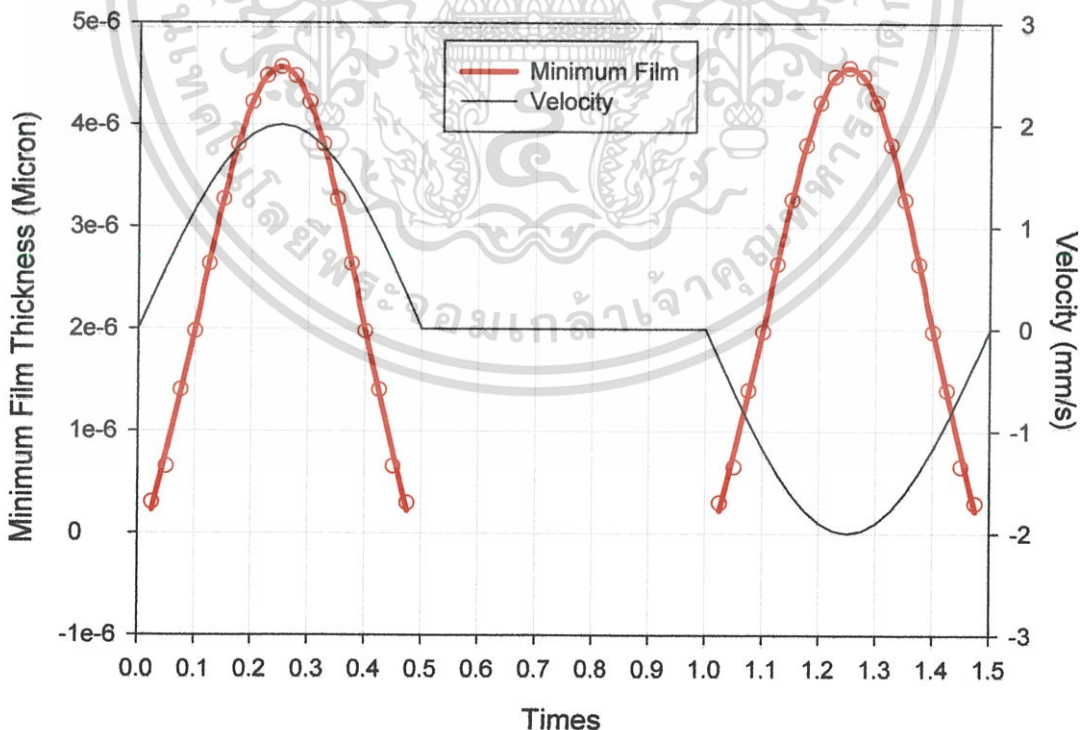


รูป 5.4 กราฟแสดงการกระจายความหนาฟิล์มอากาศ ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขากลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

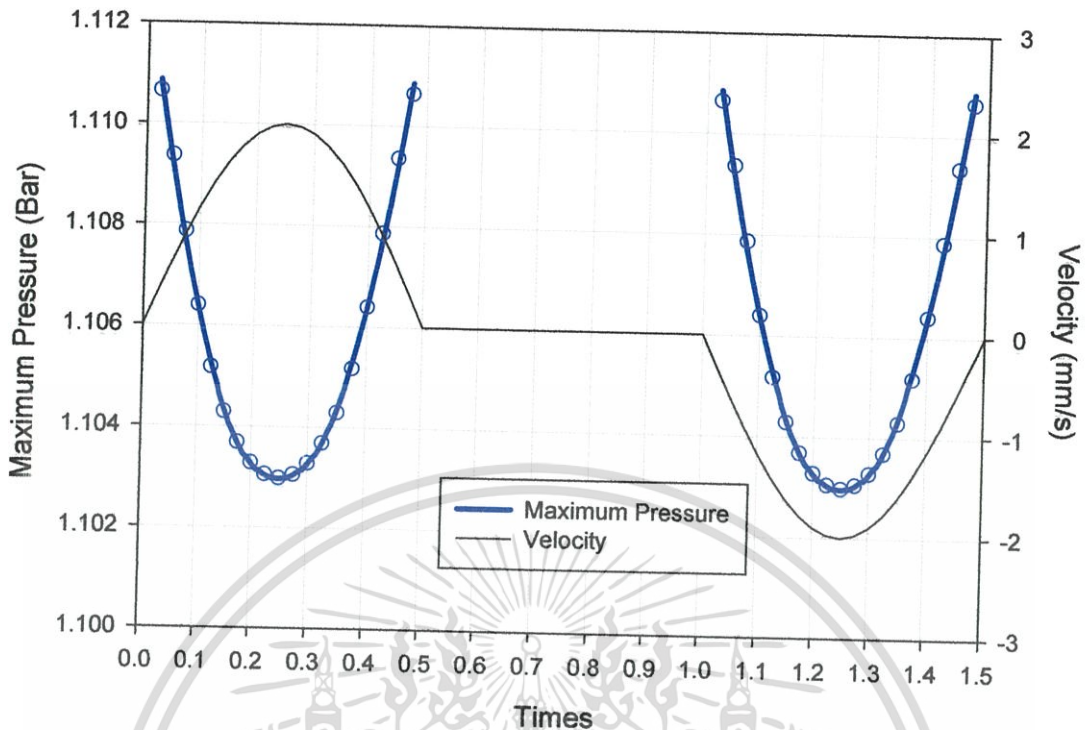


รูป 5.5 กราฟแสดงการกระจายความดัน ณ เวลาต่างๆ ในการเคลื่อนที่ขากลับ



รูป 5.6 กราฟแสดงความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



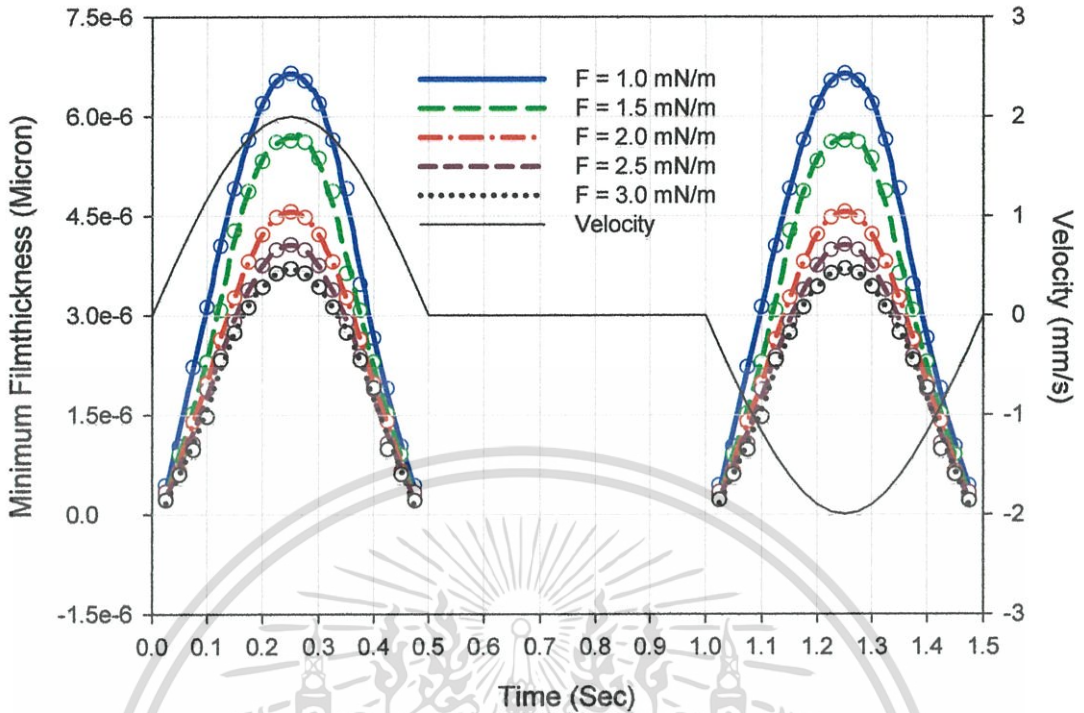
รูป 5.7 กราฟแสดงความดันสูงสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีล

5.1.1 ผลจากจำลองเมื่อภาวะที่กระทำเปลี่ยนแปลง

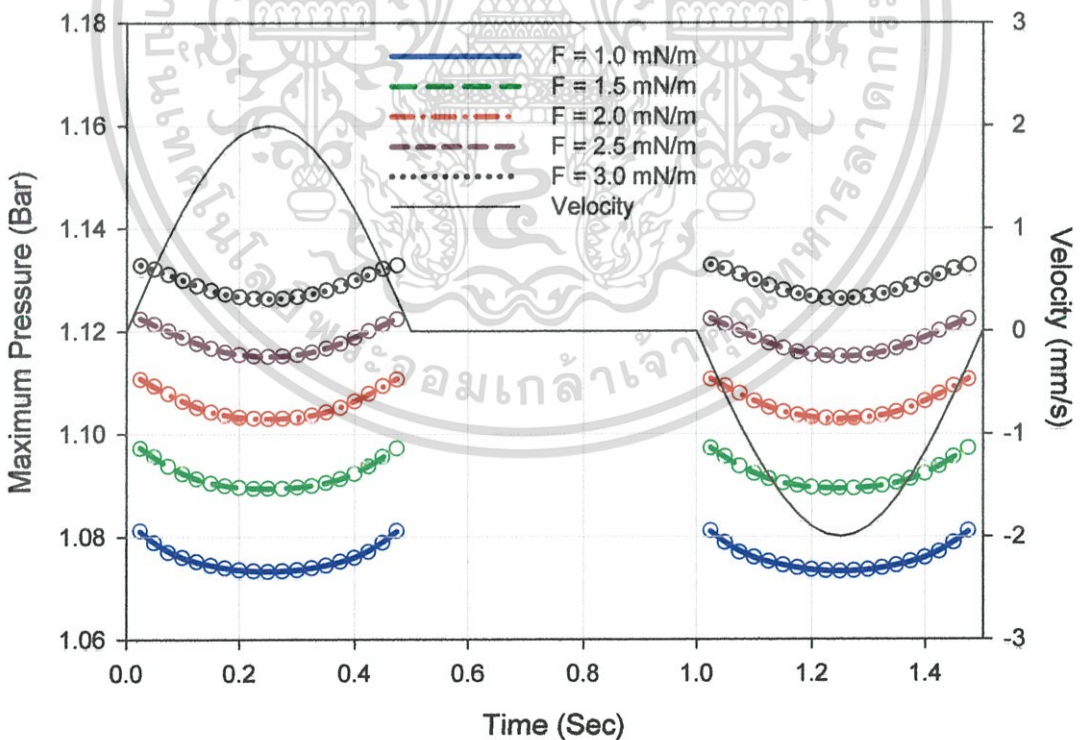
เพื่อศึกษาผลเนื่องจากภาวะที่กระทำต่อซีลในเครื่องจับยึดหัวอ่าน จึงทำการเปลี่ยนแปลงภาวะที่กระทำ ซึ่งได้ความหนาฟิล์มต่ำสุดและความดันสูงสุดในกราฟดังแสดงในรูป 5.8 - 5.9

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.8 แสดงความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีลที่ภาวะต่าง ๆ พบว่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดเปลี่ยนแปลงตามภาวะที่เปลี่ยนไป โดยความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดลดลงเมื่อภาวะเพิ่มขึ้น โดยความหนาฟิล์มอากาศจะเปลี่ยนแปลงมากที่ความเร็วสูง และเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่ความเร็วต่ำ

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.9 แสดงความดันสูงสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีลที่ภาวะต่าง ๆ พบว่าความดันสูงสุดเปลี่ยนแปลงตามภาวะที่เปลี่ยนไป โดยความดันสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อภาวะเพิ่มขึ้น



รูป 5.8 กราฟแสดงความหนาฟิล์มต่ำสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีด ที่ภาระต่าง ๆ



รูป 5.9 กราฟแสดงความดันสูงสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีด ที่ภาระต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

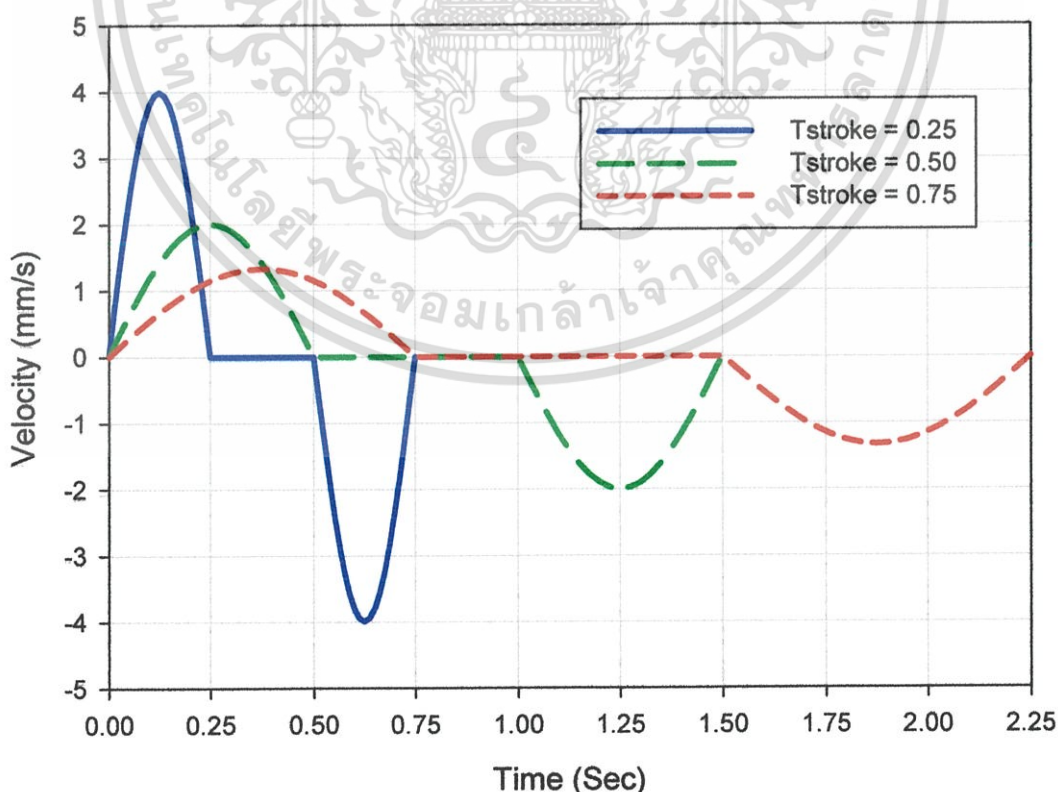
5.1.2 ผลจากจำลองเมื่อเวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบเปลี่ยนแปลง

เพื่อศึกษาผลเนื่องจากเวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบของซีลในเครื่องจับยึดหัวอ่าน จึงทำการเปลี่ยนแปลงเวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบ คือ 0.75, 1.50, 2.25 วินาที ซึ่งส่งผลให้ความเร็วของซีลที่เวลาต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงไปดังกราฟแสดงในรูป 5.10 และได้ผลความหนาฟิล์มต่ำสุดและความดันสูงสุดดังกราฟแสดงในรูป 5.11 - 5.12

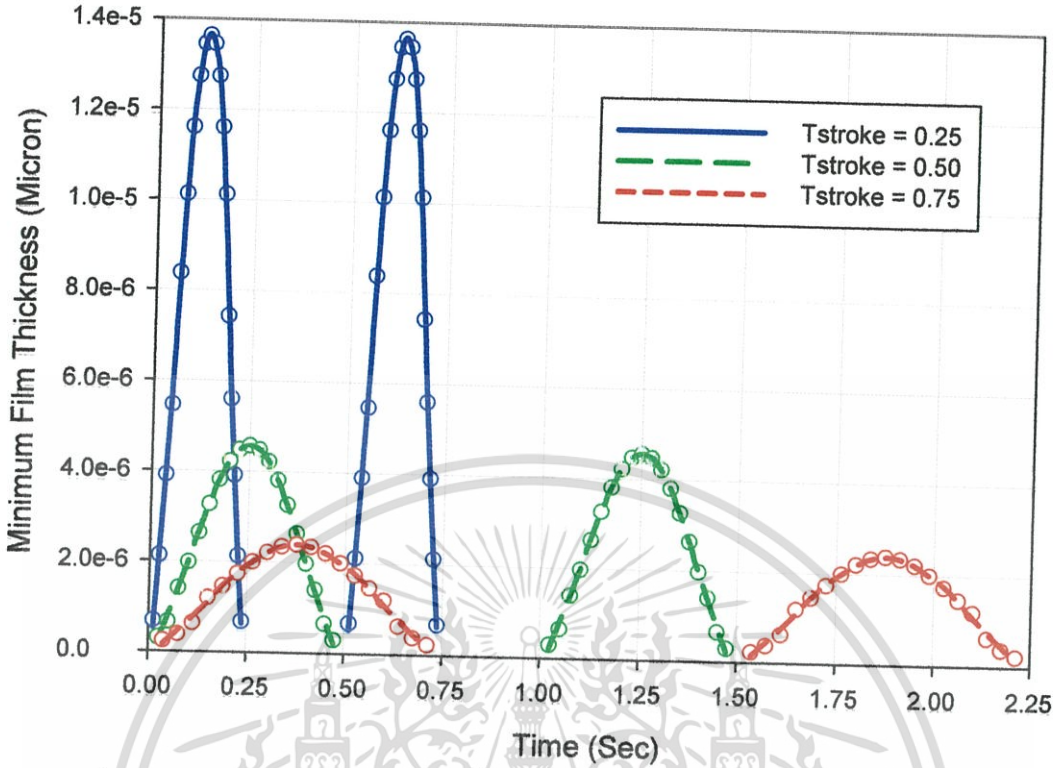
จากกราฟดังแสดงในรูป 5.10 แสดงความเร็วของซีล ในการเคลื่อนที่ของซีลในเครื่องจับยึดหัวอ่าน 1 รอบ โดยการเคลื่อนที่ไปกลับ 1 รอบใช้เวลา 0.75, 1.5, 2.25 วินาที โดยใช้เวลาเคลื่อนที่ไป 0.25, 0.5, 0.75 วินาที แล้วหยุดนิ่ง 0.25, 0.5, 0.75 วินาที แล้วเคลื่อนที่กลับ 0.25, 0.5, 0.75 วินาที ซึ่งมีความเร็วสูงสุดเป็น 4, 2, 1.33 mm/s ตามลำดับ

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.11 แสดงความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีลที่ภาวะต่าง ๆ พบว่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดเปลี่ยนแปลงตามเวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบ เนื่องจากความเร็วที่เปลี่ยนไป โดยความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น

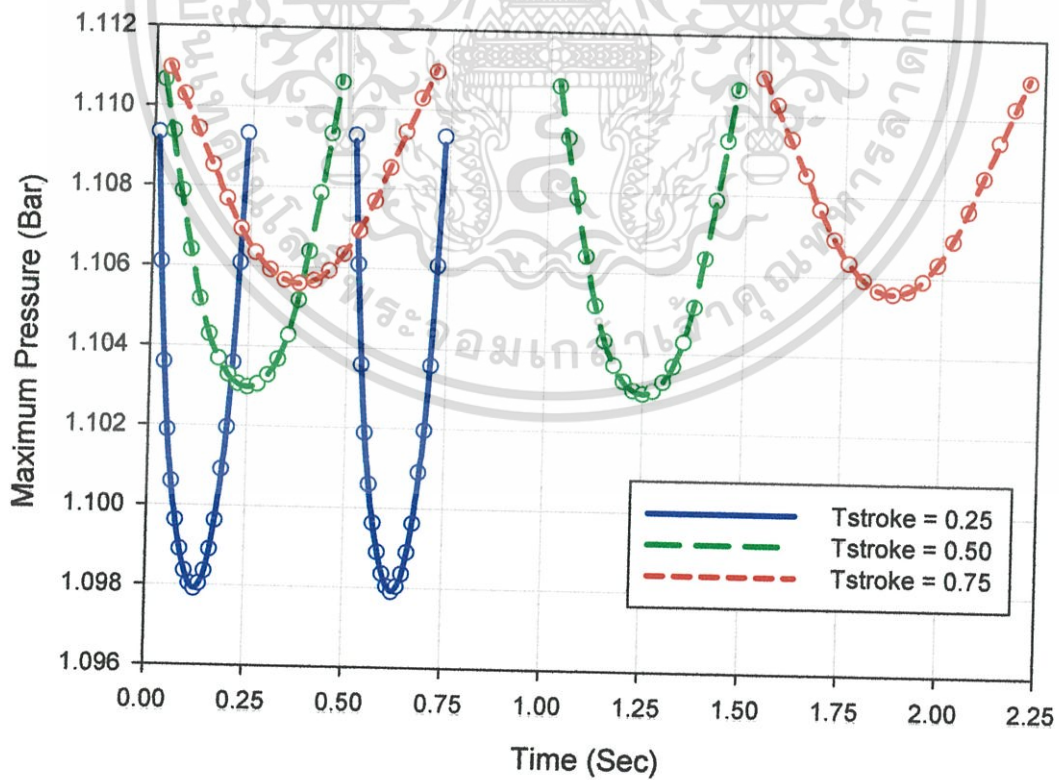
จากกราฟดังแสดงในรูป 5.12 แสดงความดันสูงสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีลที่ภาวะต่าง ๆ พบว่าความดันสูงสุดเปลี่ยนแปลงตามเวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบเนื่องจากความเร็วที่เปลี่ยนไป ความดันสูงสุดลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น



รูป 5.10 กราฟแสดงความเร็วของซีล ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อเวลาการเคลื่อนที่ไป-กลับเปลี่ยนแปลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.11 กราฟแสดงความหนาฟิล์มต่ำสุด ที่เวลาการเคลื่อนที่ไป-กลับของชิลด์ต่างๆ

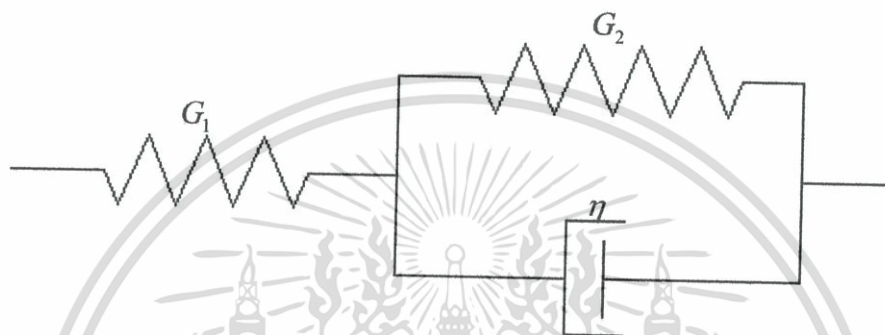


รูป 5.12 กราฟแสดงความดันสูงสุด ที่เวลาการเคลื่อนที่ไป-กลับของชิลด์ต่างๆ

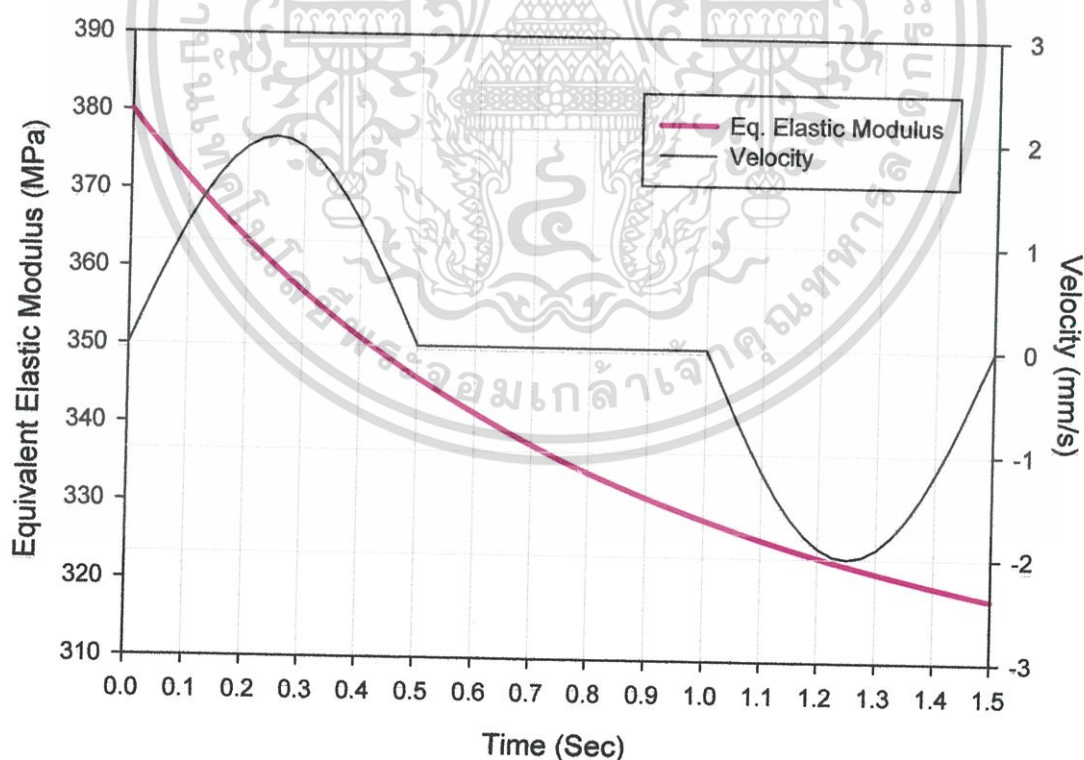
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลการคำนวณเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิส โคอีลาสติก

จากการศึกษาการหล่อลื่นแบบออสโตไซโครไดนามิกของซีลในเครื่องจับยึดหัวอ่าน เมื่อซีลรับภาระ 2.0 mN/m ใช้เวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบ เป็น 1.5 วินาที เมื่อสารหล่อลื่นเป็นอากาศ โดยคิดผลเนื่องจากการสั่นไถลของโมเลกุล และซีลมีคุณสมบัติเป็นวิส โคอีลาสติกซึ่งใช้โมเดลดัง รูป 5.13 โดยที่ $G_1 = 38$ MPa, $G_2 = 152$ MPa และ $\eta = 152$ MPa จะได้โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ย ความเร็วของซีล การกระจายความดัน และความหนาฟิล์มอากาศ ณ เวลาต่าง ๆ ดังแสดงใน รูป 5.14 -5.20

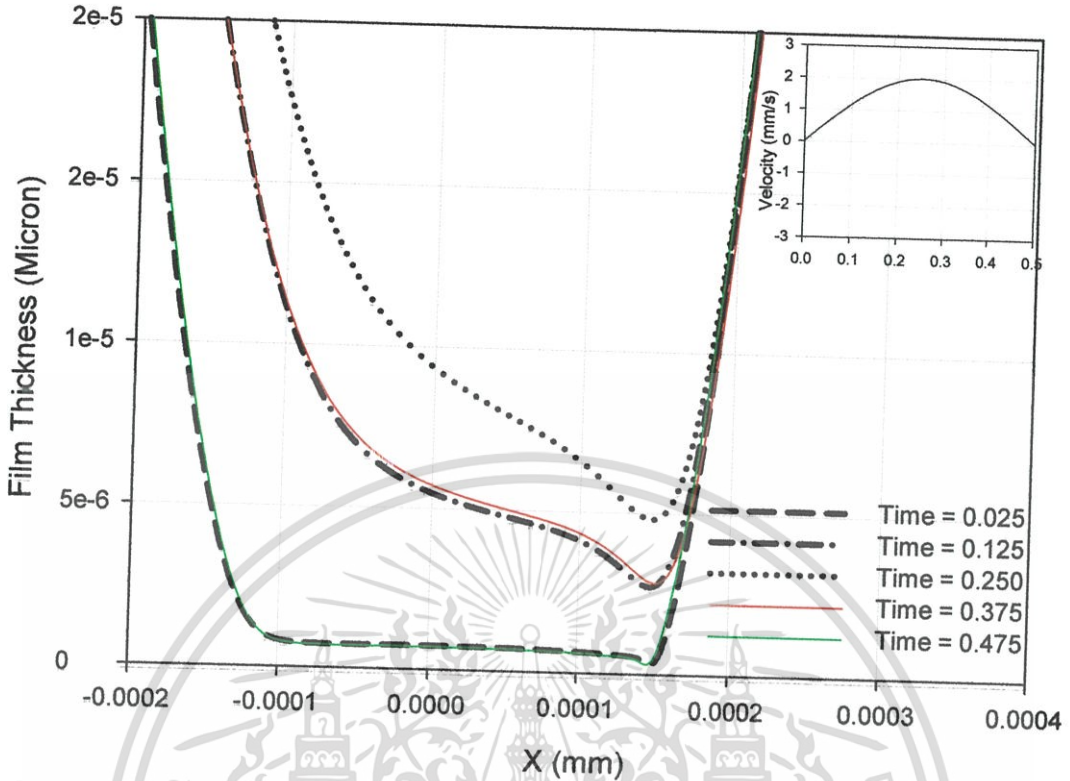


รูป 5.13 สปริงและแดมเปอร์ในโมเดลของวิส โคอีลาสติก

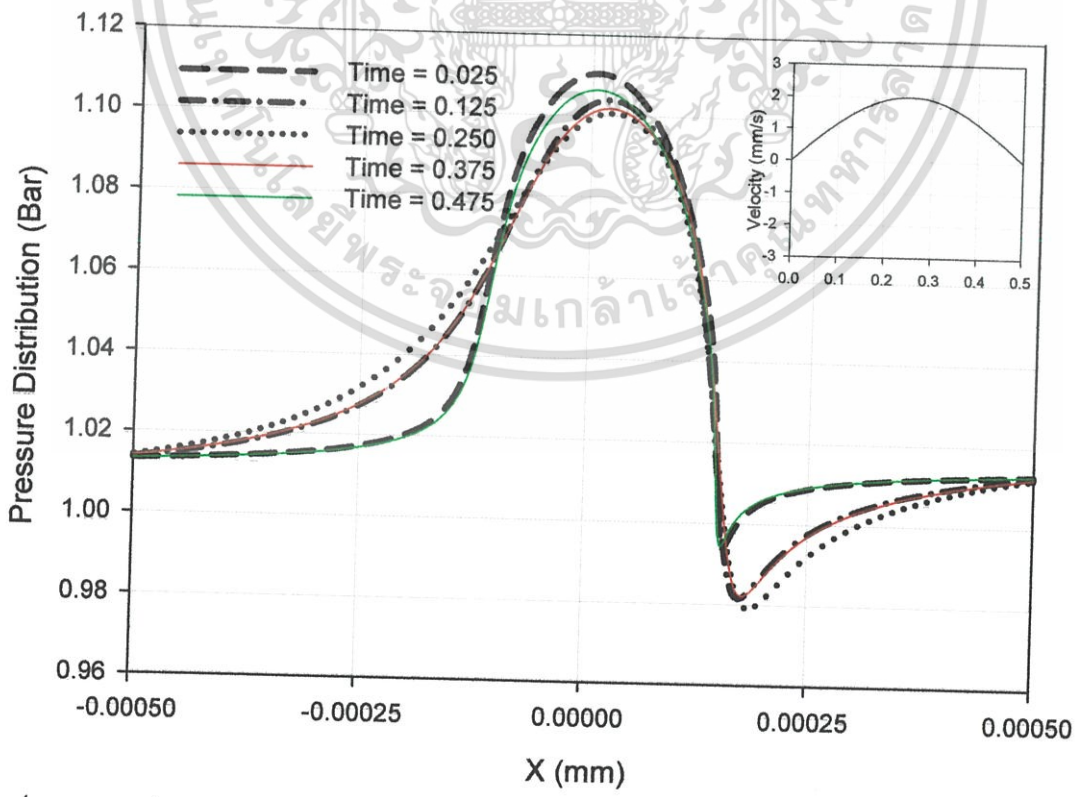


รูป 5.14 กราฟแสดง โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยและความเร็วในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีล เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิส โคอีลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

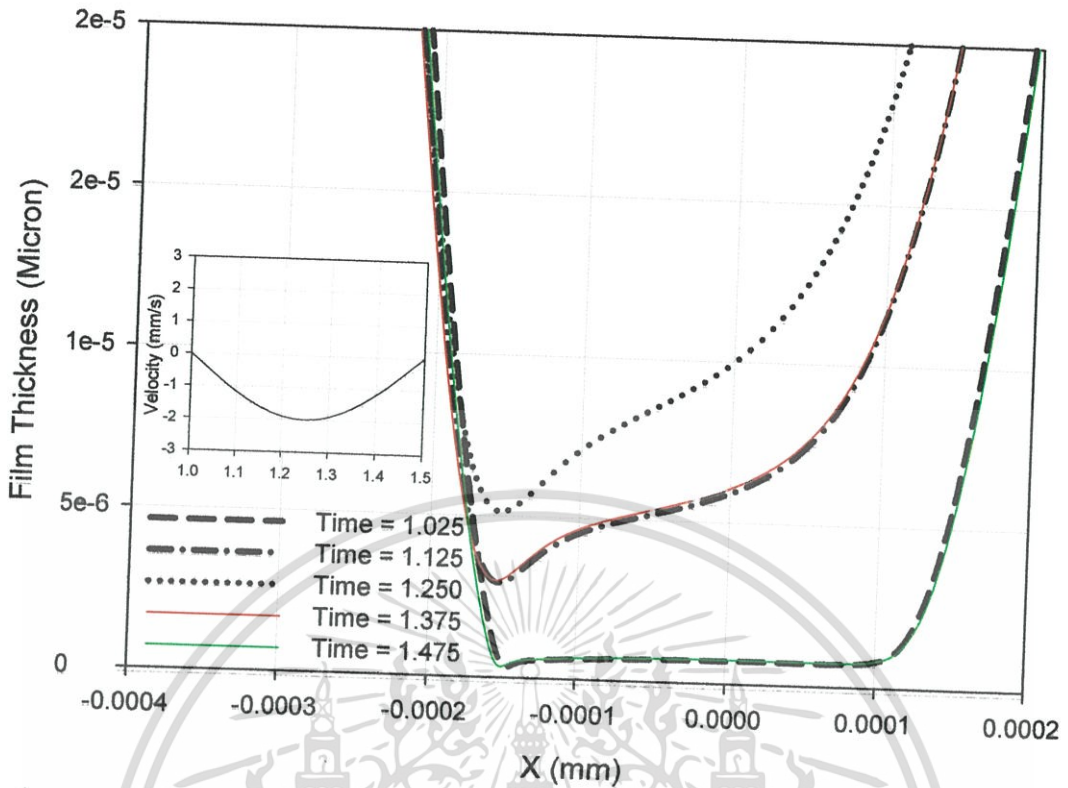


รูป 5.15 กราฟแสดงการกระจายความหนาฟิล์มอากาศ ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่เข้าไป เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก

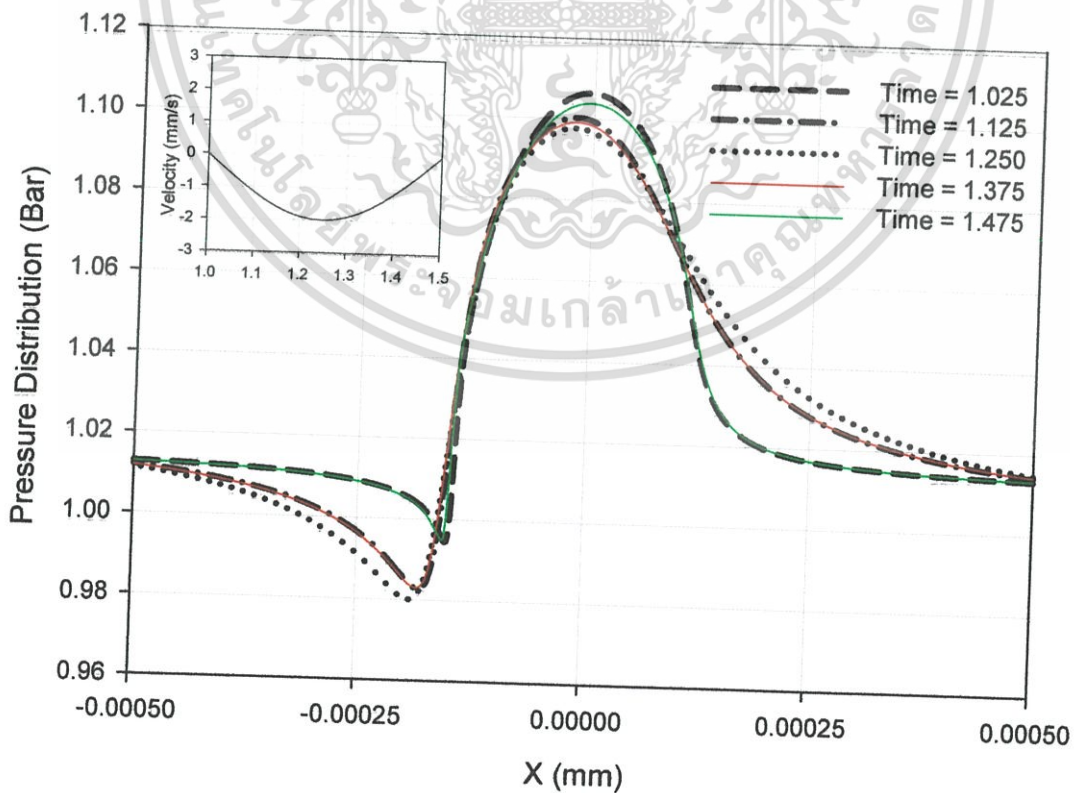


รูป 5.16 กราฟแสดงการกระจายความดัน ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่เข้าไป เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ของมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.17 กราฟแสดงการกระจายความหนาฟิล์มอากาศ ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขากลับ เมื่อซิลิโคนสมบัติเป็นวิส โคอีลาสติก

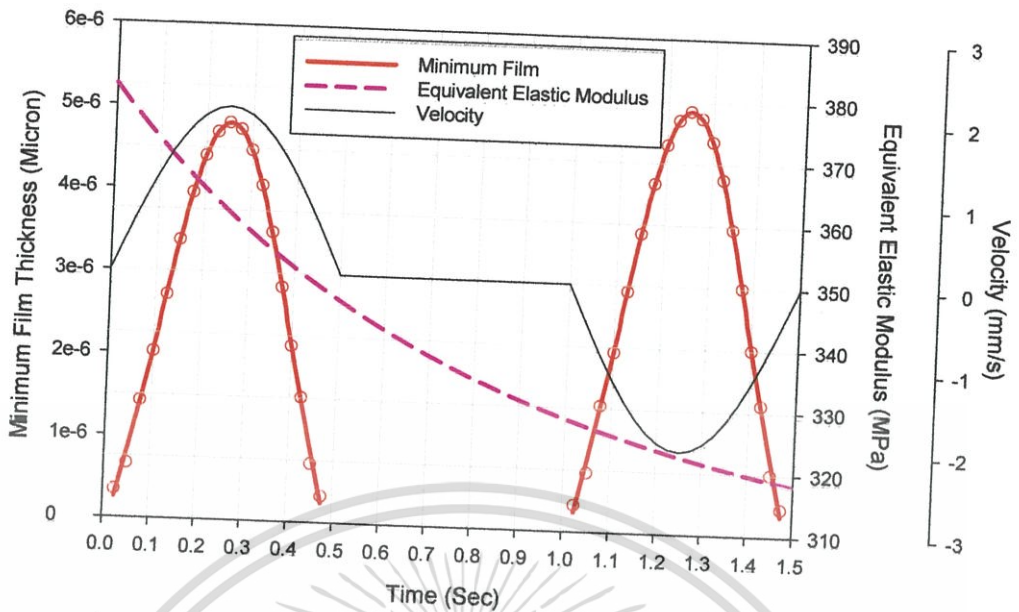


รูป 5.18 กราฟแสดงการกระจายความดัน ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขากลับ เมื่อซิลิโคน

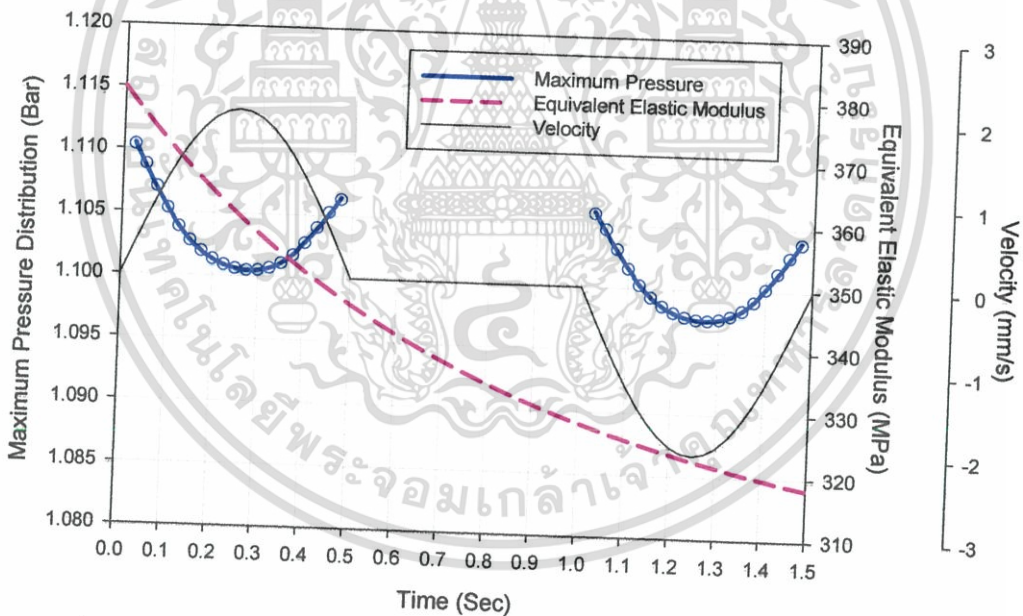
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

คุณสมบัติเป็นวิส โคอีลาสติก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.19 กราฟแสดงความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและ โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีล เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิส โคอีลาสติก



รูป 5.20 กราฟแสดงความดันสูงสุดและ โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีล เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิส โคอีลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.14 แสดงโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยที่เปลี่ยนไปและความเร็วของซีลที่เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ของซีลในเครื่องจับยึดหัวอ่าน 1 รอบ ซึ่งใช้เวลา 1.5 วินาที โดยโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.15 แสดงการกระจายความหนาฟิล์ม ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขาไปของซีล เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก ความหนาฟิล์มจะมีค่าน้อยเมื่อซีลเริ่มเคลื่อนที่ไปและเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเร็วสูงสุดที่เวลา 0.25 วินาที แล้วจึงลดลงตามความเร็วที่ลดลง และ โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยที่ลดลงส่งผลให้ความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้น

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.16 แสดงการกระจายความดัน ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขาไปของซีล เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก พบว่าความดันจะลดลงหลังจากที่ซีลเริ่มเคลื่อนที่จนกระทั่งความเร็วสูงสุดที่เวลา 0.25 วินาที แล้วจึงเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่ลดลง และ โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยที่ลดลงส่งผลให้ความดันลดลง

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.17 แสดงการกระจายความหนาฟิล์มอากาศ ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขากลับของซีล เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก พบว่า ความหนาฟิล์มจะมีค่าน้อยเมื่อซีลเริ่มเคลื่อนที่กลับและเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเร็วสูงสุดที่เวลา 1.25 วินาที แล้วจึงลดลงตามความเร็วที่ และ โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยที่ลดลงส่งผลให้ความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้น

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.18 แสดงการกระจายความดัน ณ เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ขากลับของซีล เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติกพบว่าความดันจะลดลงหลังจากที่ซีลเริ่มเคลื่อนที่จนกระทั่งความเร็วสูงสุดที่เวลา 1.25 วินาที แล้วจึงเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่ลดลง และ โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยที่ลดลงส่งผลให้ความดันลดลง และ โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยที่ลดลงส่งผลให้การกระจายความดันลดลง

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.19 แสดงความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีล เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก พบว่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเปลี่ยนแปลงตามความเร็วและโมดูลัสความยืดหยุ่นที่เปลี่ยนไป โดยเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ความหนาฟิล์มต่ำสุดจะเพิ่มขึ้น และเมื่อ โมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง ความหนาฟิล์มจะเพิ่มขึ้น

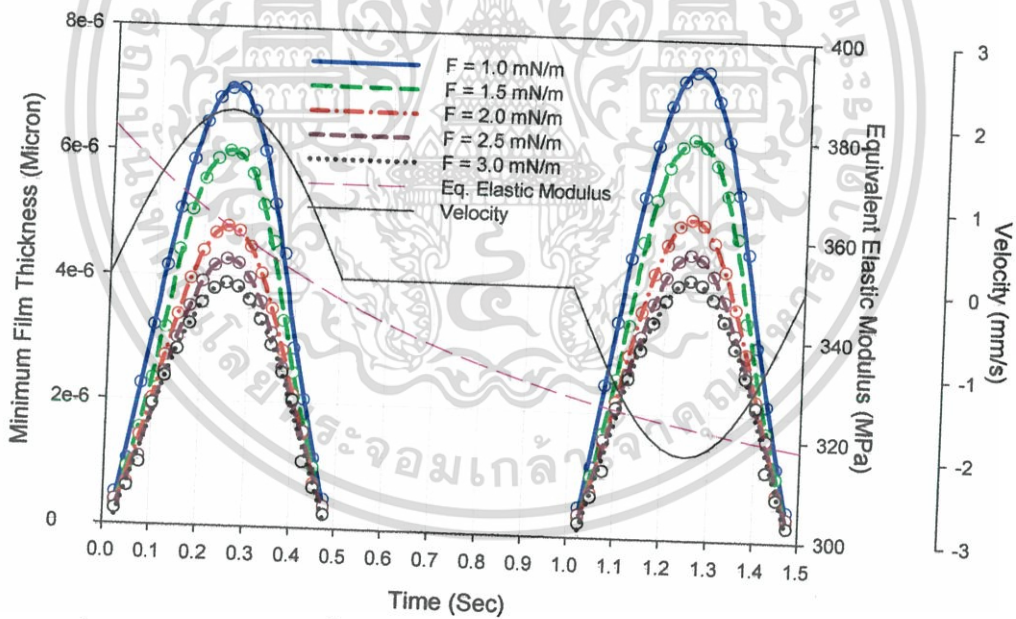
จากกราฟดังแสดงในรูป 5.20 แสดงความดันสูงสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีล เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก พบว่าความดันสูงสุดเปลี่ยนแปลงตามความเร็วและโมดูลัสความยืดหยุ่นที่เปลี่ยนไป โดยเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ความดันสูงสุดจะลดลง และเมื่อ โมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง ความดันจะลดลง

5.2.1 ผลการจำลองเมื่อภาวะที่กระทำเปลี่ยนแปลง

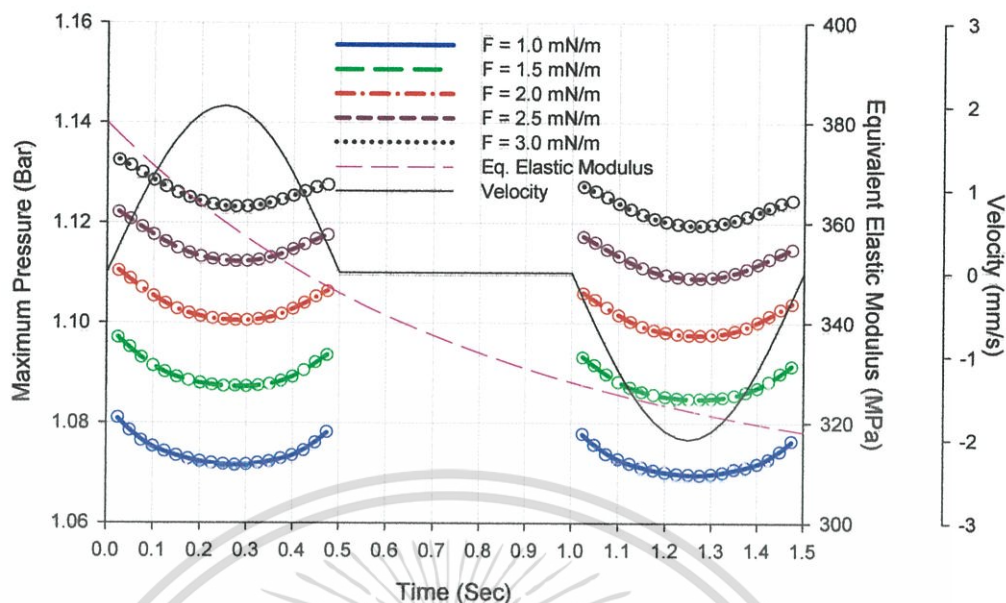
เพื่อศึกษาผลเนื่องจากภาวะที่กระทำต่อซึล เมื่อซึลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก จึงทำการเปลี่ยนแปลงภาวะที่กระทำ ซึ่งได้ความหนาฟิล์มต่ำสุดและความดันสูงสุดในการแสดงดังแสดงในรูป 5.21 - 5.22

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.21 แสดงความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซึลที่ภาวะต่าง ๆ เมื่อซึลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก พบว่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดเปลี่ยนแปลงตามภาวะที่เปลี่ยนไป โดยเมื่อภาวะเพิ่มขึ้น ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดลดลง ซึ่งความหนาฟิล์มอากาศจะเปลี่ยนแปลงมากที่ความเร็วสูง และเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่ความเร็วต่ำ และเมื่อโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดจะเพิ่มขึ้น

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.22 แสดงความดันสูงสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซึลที่ภาวะต่าง ๆ เมื่อซึลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก พบว่าความดันสูงสุดเปลี่ยนแปลงตามภาวะที่เปลี่ยนไป โดยเมื่อภาวะเพิ่มขึ้น ความดันสูงสุดเพิ่มขึ้น และเมื่อ โมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง ความดันสูงสุดจะลดลง



รูป 5.21 กราฟแสดงความหนาฟิล์มต่ำสุดและ โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซึล เมื่อซึลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก ที่ภาวะต่าง ๆ



รูป 5.22 กราฟแสดงความดันสูงสุดและโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซิล เมื่อซิลมีคุณสมบัติเป็นวิส โคอีลาสติก ที่ภาระต่าง ๆ

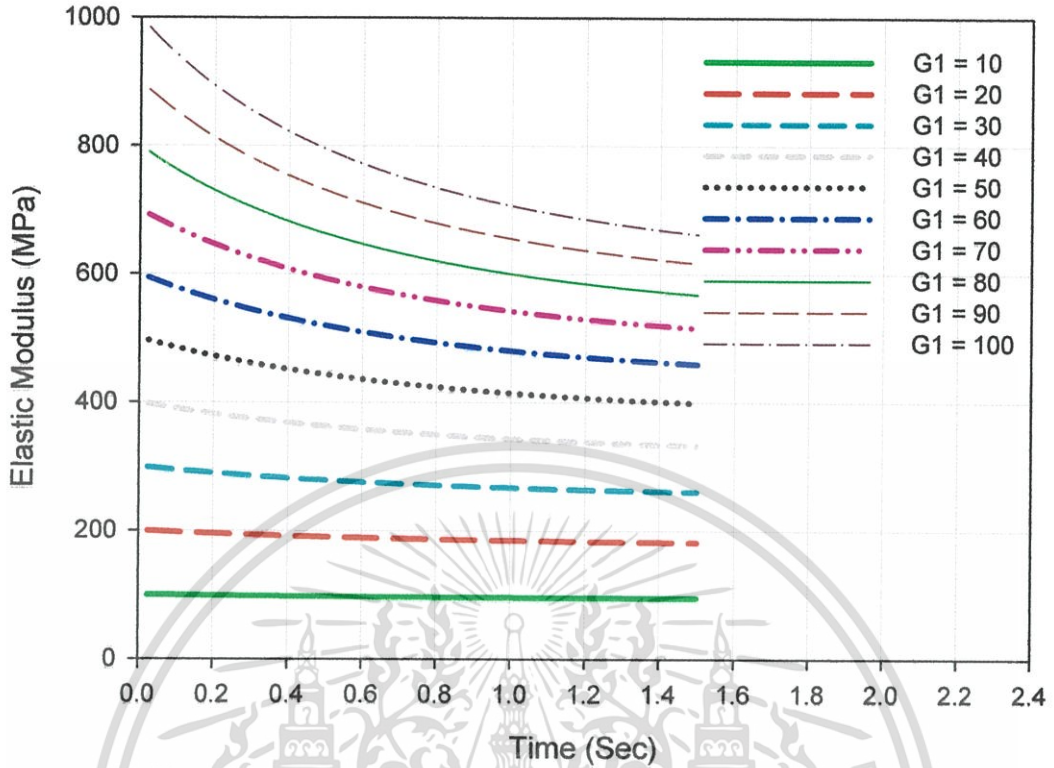
5.2.2 ผลเนื่องจากสปริงและแดมเปอร์ใน โมเดลของวิส โคอีลาสติก

เนื่องจาก โมเดลของวิส โคอีลาสติกที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เปรียบเสมือนประกอบด้วย สปริง 2 ตัว และแดมเปอร์ดังรูป 5.13 ดังนั้นจึงทำการศึกษาผลของสปริงและแดมเปอร์โดยการ เปลี่ยนแปลงค่าสปริง G_1 , G_2 และแดมเปอร์ η ซึ่งส่งผลให้โมดูลัสความยืดหยุ่นของซิล เปลี่ยนไปดังกราฟแสดงในรูป 5.23 – 5.25

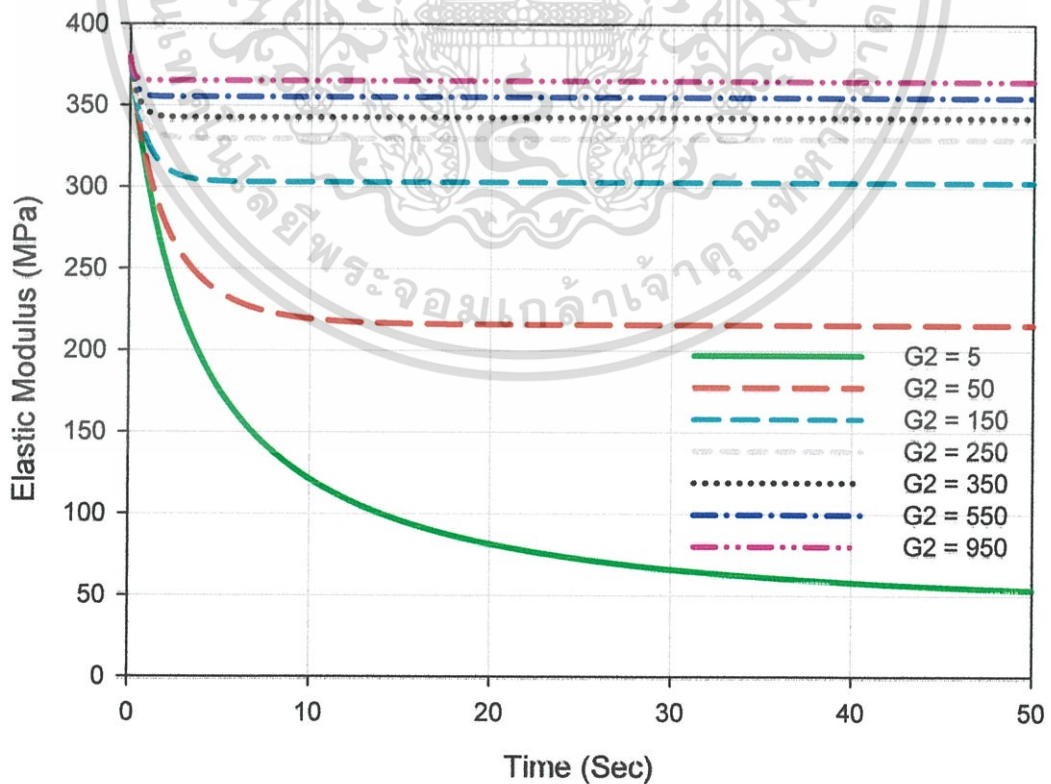
จากกราฟดังแสดงในรูป 5.23 แสดง โมดูลัสความยืดหยุ่น ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อสปริงตัวที่ 1 เปลี่ยนแปลง สปริงตัวที่ 2 และแดมเปอร์คงที่ พบว่าเมื่อค่าสปริงตัวที่ 1 เพิ่มขึ้นส่งผลให้โมดูลัส ความยืดหยุ่นโดยรวมเพิ่มขึ้น

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.24 แสดง โมดูลัสความยืดหยุ่น ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อสปริงตัวที่ 2 เปลี่ยนแปลง สปริงตัวที่ 1 และแดมเปอร์คงที่ พบว่าเมื่อสปริงตัวที่ 2 ส่งผลให้โมดูลัสความ ยืดหยุ่นที่สภาวะคงที่ (Steady state) เปลี่ยนแปลงไป โดยที่เมื่อสปริงตัวที่ 2 มีค่ามากขึ้น โมดูลัส ความยืดหยุ่นที่สภาวะคงที่จะเพิ่มขึ้น

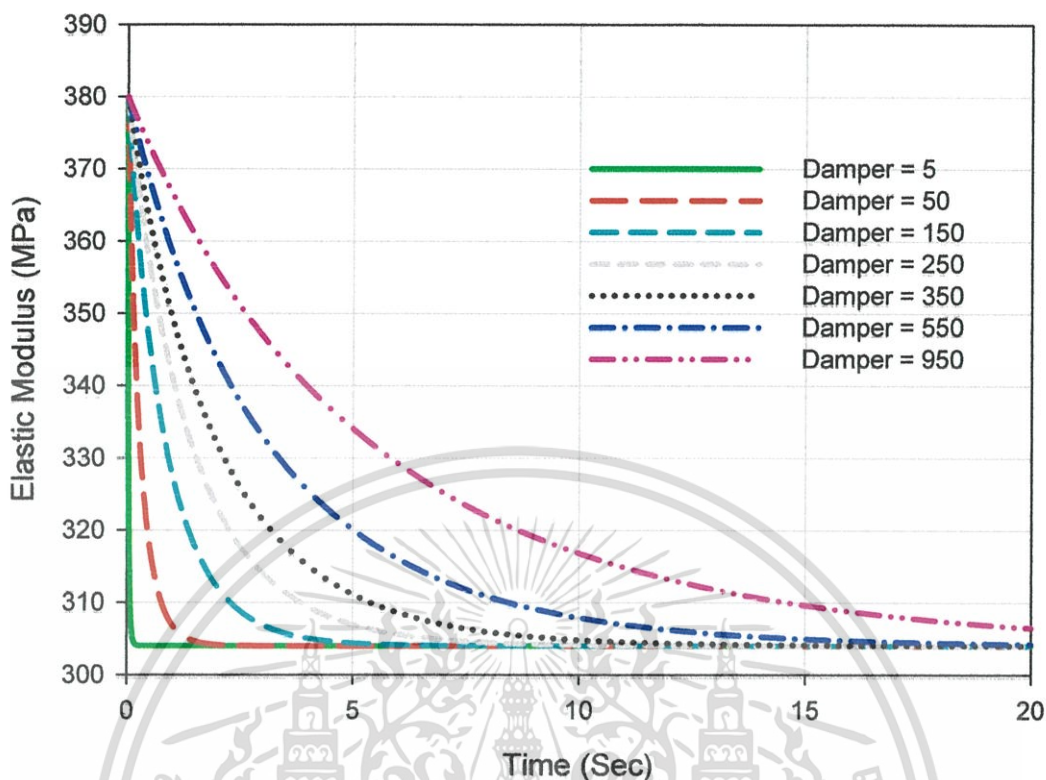
จากกราฟดังแสดงในรูป 5.25 แสดง โมดูลัสความยืดหยุ่น ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อแดมเปอร์ เปลี่ยนแปลง สปริงตัวที่ 1 และ 2 คงที่ พบว่าเมื่อแดมเปอร์ส่งผลให้ช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลง โมดูลัสความยืดหยุ่น (Transient state) เปลี่ยนแปลงไป โดยที่เมื่อแดมเปอร์เพิ่มขึ้น ช่วงเวลาที่ โมดูลัสความยืดหยุ่นเปลี่ยนแปลงจะกว้างขึ้น



รูป 5.23 กราฟแสดงโมดูลัสความยืดหยุ่น ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อสปริงตัวที่ 1 เปลี่ยนแปลง สปริงตัวที่ 2 และแอมเปอร์คงที่



รูป 5.24 กราฟแสดง โมดูลัสความยืดหยุ่น ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อสปริงตัวที่ 2 เปลี่ยนแปลง สปริงตัวที่ 1 และแอมเปอร์คงที่
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



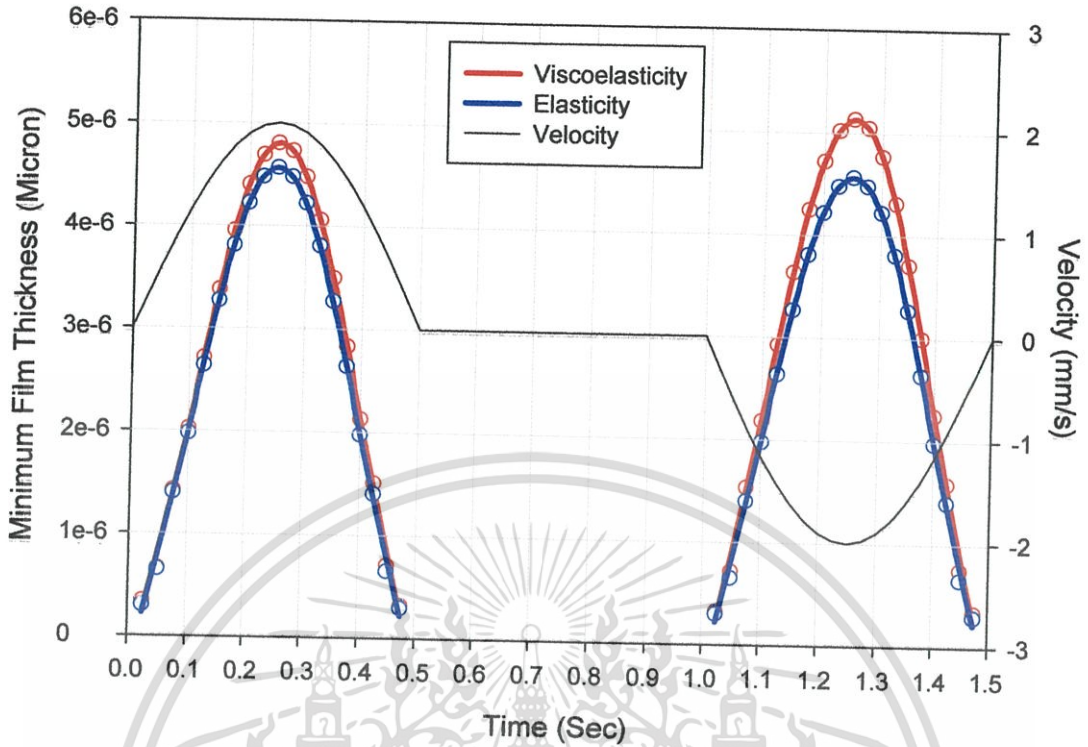
รูป 5.25 กราฟแสดงโมดูลัสความยืดหยุ่น ณ เวลาต่างๆ เมื่อแดมเปอร์เปลี่ยนแปลง สปริงตัวที่ 1 และสปริงตัวที่ 2 คงที่

5.3 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการหล่อลื่นระหว่างอีลาสติกกับวิสโคอีลาสติก

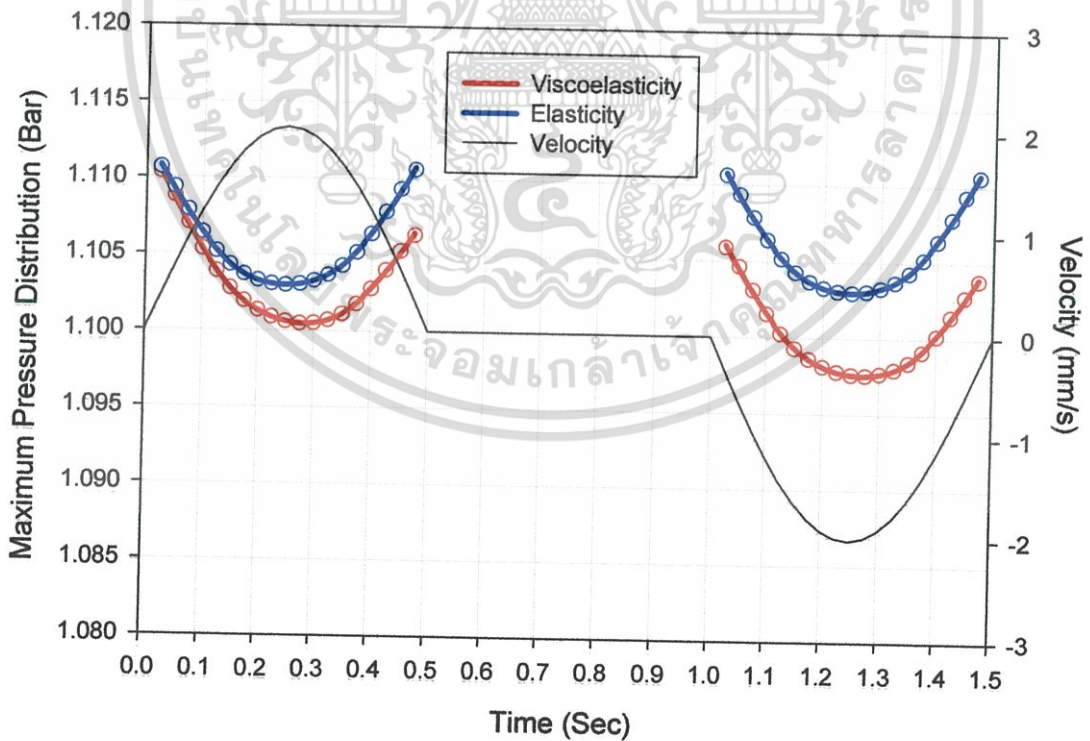
จากผลการจำลองพฤติกรรมการหล่อลื่นของซีลในเครื่องจับยึดหัวอ่านเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นอีลาสติกและวิสโคอีลาสติก สามารถนำผลดังกล่าวมาเปรียบเทียบกันได้ดังกราฟในรูป 5.26 – 5.27

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.26 แสดงการเปรียบเทียบความหนาฟิล์มต่ำสุดเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติกและอีลาสติก พบว่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติกมากกว่าเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นอีลาสติก โดยที่ความเร็วสูงจะเห็นความแตกต่างมากกว่าความเร็วต่ำ

จากกราฟดังแสดงในรูป 5.27 แสดงการเปรียบเทียบความดันสูงสุดเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติกและอีลาสติก พบว่าความดันเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติกต่ำกว่าเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นอีลาสติก



รูป 5.26 กราฟแสดงความหนาฟิล์มต่ำสุดเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติกและอีลาสติก



รูป 5.27 กราฟแสดงความดันสูงสุดเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติกและอีลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการจำลอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกแบบชั่วขณะ เมื่อสารหล่อลื่นเป็นอากาศ โดยคิดผลเนื่องจากการสั่นไถลของโมเลกุล และไม่คิดผลเนื่องจากอุณหภูมิ การคำนวณเชิงตัวเลขทำได้โดยอาศัยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม วิธีนิวตันราฟสัน และวิธีอินทิเกรตเชิงตัวเลขร่วมกันในการแก้สมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์ส สมการสมดุลแรง และสมการความหนาฟิล์มอากาศในสภาวะชั่วขณะ จากการจำลองพฤติกรรมสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

6.1.1 ผลการจำลองเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นอิลาสติก

- ความหนาฟิล์มอากาศจะมีค่าน้อยเมื่อซีลเริ่มเคลื่อนที่ที่ทั้งขาไปและขากลับ และเพิ่มขึ้นตามความเร็วของซีลที่เพิ่มขึ้น และลดลงตามความเร็วของซีลที่ลดลง โดยลักษณะการกระจายความหนาฟิล์มอากาศของการเคลื่อนที่ขาไปและขากลับเหมือนกัน แต่จะมีทิศทางตรงข้ามกัน
- ความดันจะลดลงเล็กน้อยเมื่อซีลเริ่มเคลื่อนที่ที่ทั้งขาไปและขากลับ และลดลงเล็กน้อยตามความเร็วของซีลที่เพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความเร็วของซีลที่ลดลง โดยลักษณะการกระจายความดันของการเคลื่อนที่ขาไปและขากลับเหมือนกัน แต่จะมีทิศทางตรงข้ามกัน

6.1.1.1 ผลการจำลองเมื่อภาระที่กระทำเปลี่ยนแปลง

- ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดเปลี่ยนแปลงตามภาระที่เปลี่ยนไป โดยความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดลดลงเมื่อภาระเพิ่มขึ้น โดยความหนาฟิล์มอากาศจะเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ความเร็วสูง และเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่ความเร็วต่ำ
- ความดันสูงสุดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามภาระที่เปลี่ยนไป โดยความดันสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อภาระเพิ่มขึ้น

6.1.1.2 ผลการจำลองเมื่อเวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบเปลี่ยนแปลง

- ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดเปลี่ยนแปลงตามเวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบเนื่องจากความเร็วที่เปลี่ยนไป โดยความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น
- ความดันสูงสุดเปลี่ยนแปลงตามเวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบเนื่องจากความเร็วที่เปลี่ยนไป ความดัน

สูงสุดลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น

ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.2 ผลการจำลองเมื่อซิลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก

- เมื่อซิลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก ส่งผลให้โมดูลัสความยืดหยุ่นเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดย โมดูลัสความยืดหยุ่นจะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น
- ความหนาฟิล์มอากาศจะมีค่าน้อยเมื่อซิลเริ่มเคลื่อนที่ทั้งขาไปและขากลับ และเพิ่มขึ้นตามความเร็วของซิลที่เพิ่มขึ้น และลดลงตามความเร็วของซิลที่ลดลง และ โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยที่ลดลงส่งผลให้ความหนาฟิล์มอากาศเพิ่มขึ้น โดยลักษณะการกระจายความหนาฟิล์มอากาศของการเคลื่อนที่ขาไปและขากลับจะมีทิศทางตรงข้ามกัน
- ความดันจะลดลงเล็กน้อยเมื่อซิลเริ่มเคลื่อนที่ทั้งขาไปและขากลับ และลดลงเล็กน้อยตามความเร็วของซิลที่เพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความเร็วของซิลที่ลดลง และ โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยที่ลดลงส่งผลให้ความดันลดลง โดยลักษณะการกระจายความดันของการเคลื่อนที่ขาไปและขากลับจะมีทิศทางตรงข้ามกัน

6.1.2.1 ผลการจำลองเมื่อภาวะที่กระทำเปลี่ยนแปลง

- ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดเปลี่ยนแปลงตามภาวะที่เปลี่ยนไป โดยเมื่อภาวะเพิ่มขึ้น ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดลดลง ซึ่งความหนาฟิล์มอากาศจะเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ความเร็วสูง และเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่ความเร็วต่ำ และเมื่อ โมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดจะเพิ่มขึ้น
- ความดันสูงสุดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามภาวะที่เปลี่ยนไป โดยเมื่อภาวะเพิ่มขึ้น ความดันสูงสุดเพิ่มขึ้น และเมื่อ โมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง ความดันสูงสุดจะลดลง

6.1.2.2 ผลเนื่องจากสปริงและแดมเปอร์ของ โมเดลวิสโคอิลาสติก

- สปริงตัวที่ 1 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ โมดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น
- เมื่อสปริงตัวที่ 2 มีค่าน้อย ส่งผลให้ โมดูลัสความยืดหยุ่นลดลงอย่างมากตามเวลาที่เพิ่มขึ้น และเมื่อสปริงตัวที่ 2 มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ โมดูลัสความยืดหยุ่นเปลี่ยนแปลงน้อยลงตามค่าสปริงตัวที่ 2 ที่มากขึ้น
- เมื่อแดมเปอร์มีค่าน้อย โมดูลัสความยืดหยุ่นจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสั้น ๆ และเมื่อแดมเปอร์มีค่ามากขึ้น โมดูลัสความยืดหยุ่นจะลดลงในช่วงเวลาที่นานขึ้น

6.1.3 ผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมการณ์ระหว่างอิลาสติกกับวิสโคอิลาสติก

- ความหนาฟิล์มต่ำสุดเมื่อซิลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติกมีค่ามากกว่าเมื่อซิลมีคุณสมบัติเป็นอิลาสติก โดยที่ความเร็วสูงจะเห็นความแตกต่างมากกว่าความเร็วต่ำ
- ความดันเมื่อซิลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติกมีค่าต่ำกว่าเมื่อเมื่อซิลมีคุณสมบัติเป็นอิลาสติก

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีข้อสมมุติฐานให้การหล่อลื่นของซีล โอริงในเครื่องจับยึดหัวอ่าน เป็นพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิก ซึ่งสมมุติให้ระหว่างผิวสัมผัสของซีล และแท่นประกอบ มีสารหล่อลื่นอยู่ระหว่างกลางตลอดเวลา และไม่มี การสัมผัสกันของผิวสัมผัส แต่ปกติในการทำงานของซีล โอริงในเครื่องจับยึดหัวอ่าน บางช่วงขณะ จะเกิดการสัมผัสกัน ระหว่างผิวของซีลและแท่นประกอบ ทำให้บางส่วนไม่มีฟิล์มอากาศเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัส ดังนั้นเพื่อให้ได้พฤติกรรมการหล่อลื่นของซีล โอริงภายในเครื่องจับยึดหัวอ่านที่ถูกต้องแม่นยำขึ้น ควรทำการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบมิก (Mixed lubrication)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] D. Dowson and G.R. Higginson, **Elastohydrodynamic Lubrication: The Fundamental of Roller and Gear Lubrication**. Pergamon, Oxford, 1966.
- [2] R.F. Saiant, N. Maser, B. Yang, **Numerical Model of a Reciprocating Hydraulic Rod Seal**. ASME, Journal of Tribology, 2007, Vol.129, pp.91-97
- [3] C.J. Hooke and P. Huang, **Elastohydrodynamic Lubrication of Soft Viscoelastic Materials in Line Contact**. IMechE, 1997, Vol.211, pp.185-194.
- [4] Bernard J. Hamrock and Jacobson, B.O., **Elastohydrodynamic Lubrication of Line Contacts**. ASME Trans., vol. 24, no.4, pp.275-287, 1984
- [5] Lubrecht, A.A., ten Napel, W.E. and Bosma, R., **Multigrid: an Alternative Method for Calculating Film Thickness and Pressure Profiles in Elastohydrodynamically Lubricated Line Contacts**. ASME J. Tribology, 1986, Vol. 108, pp. 551-556.
- [6] Y. Wang, H. Li, J. Tong, P. Yang, **Transient Thermoelastohydrodynamic Lubrication Analysis of an Involute Spur Gear**. Tribology International, 2004, Vol.37, pp.773-782.
- [7] M. Anaya Dufresne, **On the Development of a Reynolds Equation for Air Bearings with Contact**. Ph.D. Dissertation, Carnegie Mellon University.
- [8] A. Burgdorfer, **The influence of the molecular mean free path on the performance of hydrodynamic gas lubricated bearings**. ASME Journal of Basic Eng, 1959, Vol.81, pp.94-100.
- [9] N. Suksangpanya, M. Mongkolwongrojn, **"Theoretical Analysis of Sub-ambient Pressure Sliders in HDD,"** The 1st International Data Storage Technology Conference (DST-CON 2008), pp. 45, Bangkok, Thailand, April 21-23, 2008.
- [10] Bernard J. Hamrock, **Fundamental of fluid film lubrication**. McGraw-Hill, Singapore, 1994.
- [11] Andras Z. Szeri, **Fluid Film Lubrication: Theory and Design**. Cambridge, Cambridge University Press, 1998.
- [12] Gohar R. , **Elastohydrodynamics** , New York: JOHN WILEY & SONS, Inc1988.
- [13] K.L. Johnson, **Contact Mechanics**. Cambridge, Cambridge University Press, 1987.
- [14] S.P. Timochenko, J.N. Goodier, **Theory of Elasticity**. 3rd Ed., Auckland, McGraw-Hill, 1987.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] S.C. Chapra and R.P. Canale, **Numerical Methods for Engineers**. 4th Ed., New York, McGraw-Hill, 2002.
- [16] S.C. Chapra and R.P. Canale. **Numerical Methods for Engineers**. 4th Ed. New York: McGraw-Hill Inc., 2002.
- [17] W.L. Briggs, V.E. Henson and S.F. McCormick. **A Multigrid Tutorial**. 2nd Ed. Philadelphia. SIAM, 2000.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

N. Suksangpanya, M. Mongkolwongroj, “**Theoretical Analysis of Sub-ambient Pressure Sliders in HDD,**” The 1st International Data Storage Technology Conference (DST-CON 2008), pp. 45, Bangkok, Thailand, April 21-23, 2008.

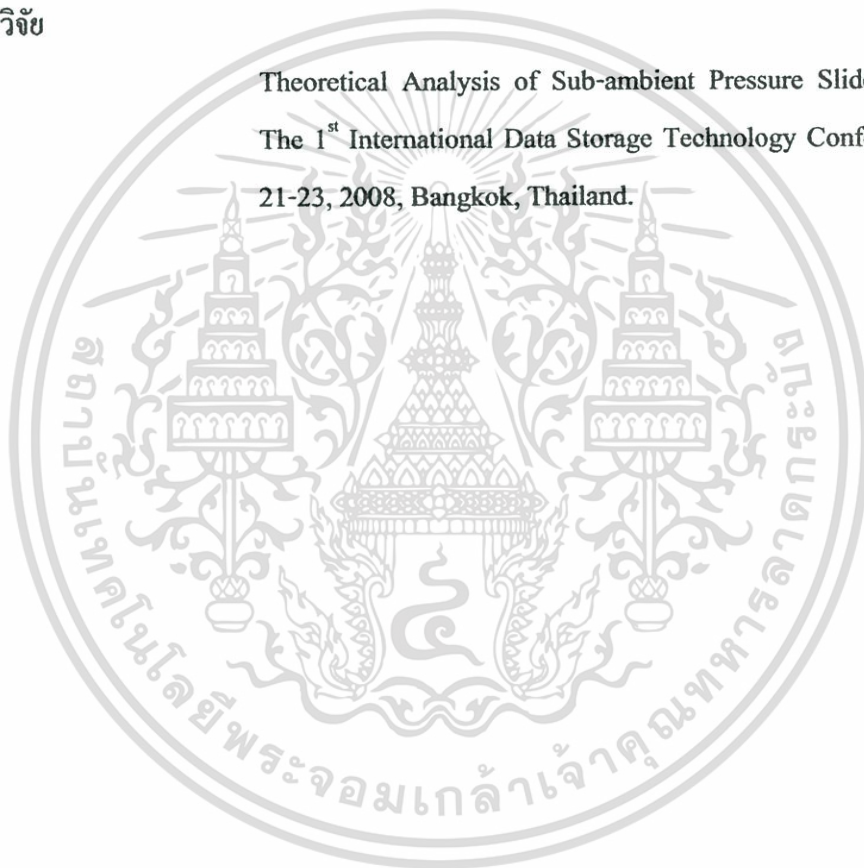
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

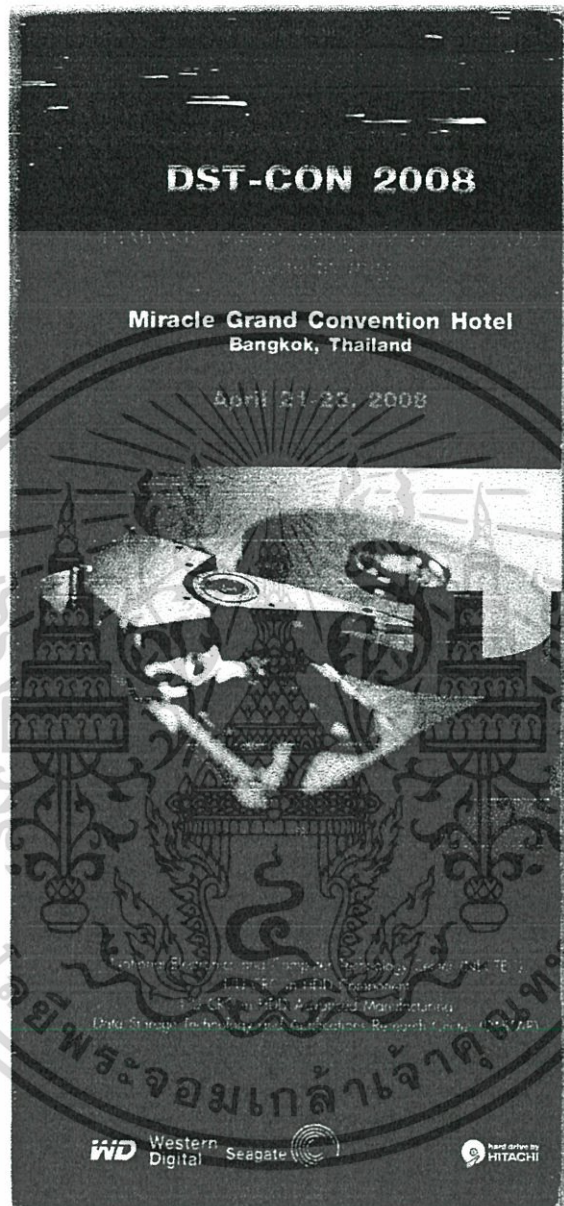
ชื่อผู้เขียน นายนพดล สุกแสงปัญญา
 วัน เดือน ปีเกิด 10 พฤศจิกายน 2527
 ที่อยู่ 260 หมู่ 7 ถ.ราชสีมา-ปึกธงชัย ต.ปรุใหญ่ อ.เมือง จ.นครราชสีมา
 ประวัติการศึกษา 2549 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
 วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง

ผลงานวิจัย

2551 Theoretical Analysis of Sub-ambient Pressure Sliders in HDD,
 The 1st International Data Storage Technology Conference, April
 21-23, 2008, Bangkok, Thailand.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I D - 2 6

Title: Development of a Data Acquisition Board for Measuring HDD Signals

Author: ¹Thongthai Lerkraisit
²Wanchalerm Pora

Affiliation: Chulalongkorn University, Department of Electrical Engineering, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand

Email: ¹Thongthai_ler@gmail.com
²Wanchalerm.P@chula.ac.th

Abstract: *The rapid improvement of digital technology leads to its frequent uses in monitoring systems. Data from external world is read, processed, and, eventually, output by a digital system. This paper presents development of a data acquisition board which communicates with computers via USB port. In the same board, a Low Noise Amplifier (LNA) will be incorporated in order to make this board suitable for measuring hard disk reader signals. The system is composed of a low noise amplifier, an Analog to Digital Converter (ADC), a controller unit and USB controller. The LNA has a gain of 10 VV, and a bandwidth of 300 MHz. Its 12-bit ADC samples an input at 240 MSPS, 70 microseconds consecutively every 100 millisecond cycle.*

I D - 2 7

Title: Theoretical Analysis of Sub-ambient Pressure Sliders in HDD

Author: ¹Mongkol Mongkolwongroj
²Nobphadon Suksangpanya

Affiliation: Electro-Mechanical Engineering Lab., Mechanical Engineering Department, ReCCIT, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

Email: ¹kmmongko@kmitl.ac.th

Abstract: *This paper describes the theoretical analysis of sub-ambient pressure sliders with straight rails for the magnetic storage system in hard disk drives. The modified Reynolds equation based on a linearized version of the Boltzmann equation was formulated. Numerical scheme based on the finite difference method and multi-grid multilevel technique with Newton's method were implemented to obtain the flying characteristics of ultra-thin head sliders in steady state. The pressure profile and flying height were calculated by varying the recess depth, rail length, rail width, step length, pad length, pad width, taper angle, load and disk velocity. The recess depth, rail width and pad width have a significant effect on the performance characteristics of the sub-ambient pressure sliders air bearing in the hard disk drives. The simulation result of the sub-ambient air bearing for minimum flying height is approximately 14 nm.*

044

DST-CON 2008

045

DST-CON 2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Theoretical Analysis of Sub-ambient Pressure Sliders in HDD

Mongkolwongroj, M., Suksangpanya, N.
Electro-Mechanical Engineering Lab.
Mechanical Engineering Department
ReCCIT Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand

Abstract

This paper describes the theoretical analysis of sub-ambient pressure sliders with straight rails for the magnetic storage system in hard disk drives. The modified Reynolds equation based on a linearized version of the Boltzmann equation were formulated. Numerical scheme based on the finite difference method and multi-grid multilevel technique with Newton's method were implemented to obtain the flying characteristics of ultra-thin head sliders in steady state. The pressure profile and flying height were calculated by varying the recess depth, rail length, rail width, step length, pad length, pad width, taper angle, load and disk velocity. The recess depth, rail width and pad width have a significant effect on the performance characteristics of the sub-ambient pressure sliders air bearing in the hard disk drives. The simulation result of the sub-ambient air bearing for minimum flying height is approximately 14 nm.

1. Introduction

In order to increase the recording density and interface performance of magnetic hard disk drives (HDD), it is essential to minimize spacing between the slider and disk surface at the trailing edge. Presently, the flying height for commercially available disk drives with a recording density of 100 Gb/in^2 is approximately 10 nm [1]. Moreover, the rotational speed of the disk has been increased to improve the transfer rate. Therefore, the geometry and pressure on the air bearing surface become significant for design considerations, such as flying heights and flying attitudes.

Recently, much research work has been done to reduce the flying height in HDD system. In this research, the sub-ambient pressure sliders were investigated by E. Cha and D.B. Bogy (1995) who developed a numerical scheme using a control volume formulation to simulate static flying condition and dynamic response of sub-ambient pressure sliders with straight rails and guppy sliders [2]. J.W. White (1997) presented flying height and air bearing force of transverse and negative pressure contour (TNP) [3]. Y. Hu and D.B. Bogy (1998) solved the problem of high bearing number of magnetic heads by

using a multi-grid control volume method [4]. Y. Hu, P.M. Jones and K. Li (1999) shows air bearing suction force, air bearing lifting force and flying height of sub-ambient pressure slider during dynamic unloading [5]. Q.H. Zeng and D.B. Bogy (1999) analyzed the characteristics of dynamic air bearing properties by contrasting many types of head sliders [6]. Hashimoto H. And Hattori Y. (2000) developed the optimum design method to find optimum flying height of head slider by using the finite difference method and hybrid optimization technique [7].

The sub-ambient pressure slider is utilized according to figure 1 which can produce sub-ambient pressure in the recessed region. The objective of this study is to analyze the phenomenon of each parameter on minimum flying height by simulation.

2. Modified Reynolds Equation

Analyzing lubrication theory, Reynolds equation has been utilized to calculate pressure distribution and flying height. The governing equation for each of these models and the no-slip model can be written in the dimensionless form as equation (1).

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(Q \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \lambda^2 \frac{\partial}{\partial Y} \left(Q \frac{\partial P}{\partial Y} \right) = \Lambda \frac{\partial}{\partial X} (PH) \quad (1)$$

While $Q = \phi(P, H)PH^3$ and $\phi(P, H)$ is poiseuille flow factor which takes the Boltzmann-Reynolds model as shown in equation (2) and A_0, A_1, A_2 and A_3 are constants that depend on Kn/PH .

$$\phi(P, H) = A_0 + A_1 \left(\frac{Kn}{PH} \right) + A_2 \left(\frac{Kn}{PH} \right)^2 + A_3 \left(\frac{Kn}{PH} \right)^3 \quad (2)$$

The equation of flying height is analyzed from the surface of the air bearing of the head slider that can be written in the dimensionless form as equation (3).

$$H = H_{TR} + (1-X)(H_{LD} - H_{TR}) + \delta \quad (3)$$

When δ is the depth parameter that depends on its position on the surface.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

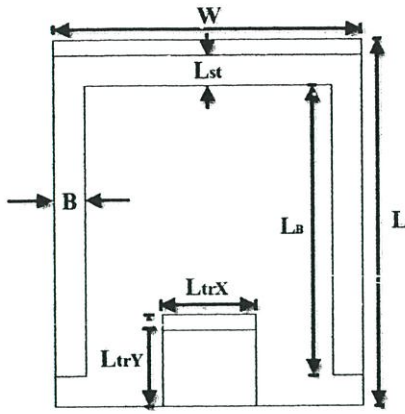


Figure 1. Parameter on the slider

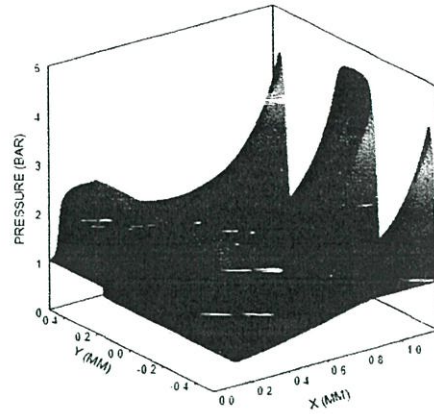


Figure 2. Pressure Distribution

There are two degree of freedom in the motion of the head slider, that is force balance and moment balance, which must to be balanced. The dimensionless force balance equation is

$$\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \int_0^1 (P-1) dXdY = F_0 \quad (4)$$

The dimensionless moment balance equation is

$$\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \int_0^1 X(P-1) dXdY = X_G F_0 \quad (5)$$

After that, the finite difference and Newton-Raphson methods were utilized with the boundary condition in equation (6).

$$P(0, Y) = P(1, Y) = P\left(X, \frac{1}{2}\right) = P\left(X, -\frac{1}{2}\right) = 1 \quad (6)$$

3. Simulation results

The dimension of the sub-ambient pressure sliders in this study is 1.20 mm in length and 1.00 mm in width. The head slider can establish the pressure profile as shown in figure 3 when the recess depth is 3.0 μm, disk velocity is 20 m/s, load is 20 mN, pad length is 0.40 mm, pad width is 0.30 mm, step length is 0.15 mm, rail width is 0.10 mm and taper angle is 15 mRad. In this study, the flying heights were calculated with varying recess depths, rail lengths, rail widths, taper angles, step lengths, pad widths, pad lengths, loads and disk velocities which are shown in figure 3 to figure 11.

The rail width has a significant effect on the pressure distribution and flying height. When increasing the rail width, pressure at both the leading edge and the trailing edge drop due to the enlargement of the contact area of the air bearing. Moreover, the sub-ambient pressure decreases as a result of load balancing. Hence, the flying height on both sides of the slider is dramatically increased as shown in figure 3.

The rail length has a significant effect on the pressure

distribution and flying height at the trailing edge, but it has little effect on pressure distribution and flying height at the leading edge. When the rail length is reduced, the pressure on the cut area disappears, which causes a rise in pressure on the bearing pad under the condition of load balancing. Consequently, the flying height at the trailing edge is then reduced; on the contrary, the flying height at the leading edge increases slightly as shown in figure 4.

The step length has a significant effect on the pressure distribution and flying height at the leading edge, but only marginal effects on the pressure distribution and flying height at the trailing edge. The increase in the step length induces a huge decrease of pressure at the leading edge because of the enlargement of contact area. At the trailing edge, the pressure is increased by the condition of load balancing. According to the pressure distribution and geometry of the air bearing surface, the higher flying height at the leading edge appears to be enlarged by the step length as shown in figure 5.

The pad length has a moderate effect on pressure distribution and flying height on both sides of the head slider. By increasing the pad length, pressure at the leading edge is steady; on the other hand, the pressure at the trailing edge drops because of the enlargement of the contact area. Due to the effects of the pressure distribution, the flying height is increased slightly as shown in figure 6.

The pad width has a large effect on the pressure distribution and flying height at the trailing edge but only a small effect at the leading edge. When enlarging the pad width, the pressure distribution at the leading edge is stable, but at the trailing edge pressure is decreased because of the increase in the contact area. Due to the pressure distribution and geometry of the air bearing surface, the flying height at the trailing edge increases sharply with the increased pad length; on the other hand, the flying height at the leading edge is steady as shown in figure 7.

The recess depth has a significant effect on both pressure distribution and flying height. When the recess depth is increased, the sub-ambient pressure increases until its depth is approximately 2.0 μm, after that the sub-

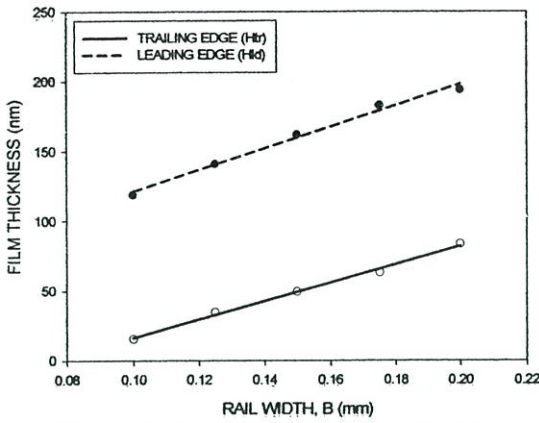


Figure 3. Flying Height versus rail width

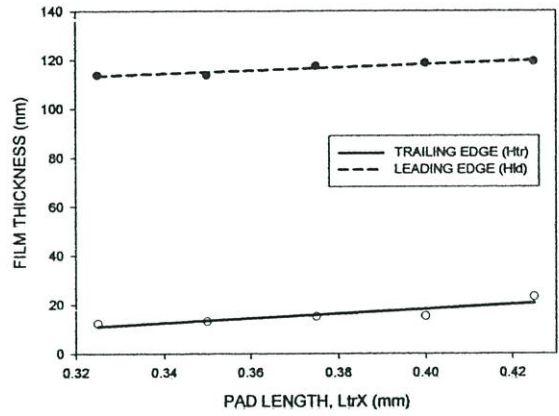


Figure 6. Flying Height versus pad length

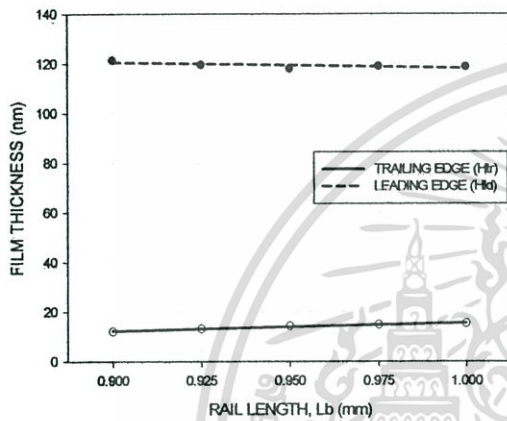


Figure 4. Flying Height versus rail length

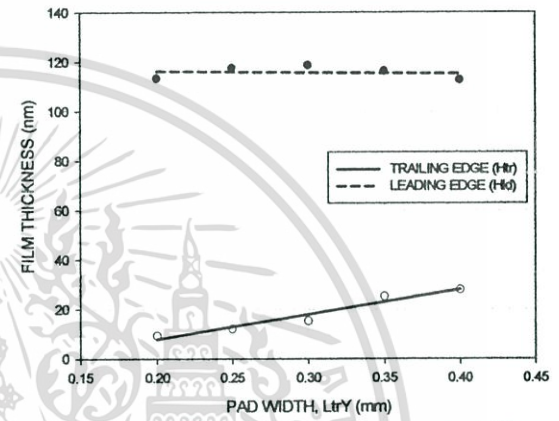


Figure 7. Flying Height versus pad width

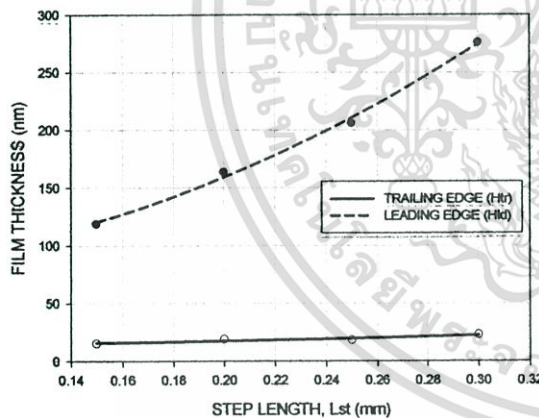


Figure 5. Flying Height versus step length

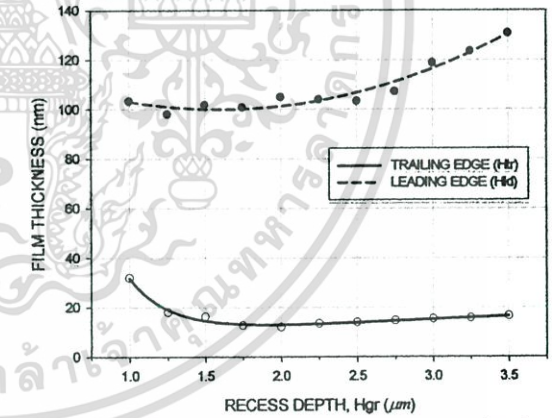


Figure 8. Flying Height versus recess depth

ambient pressure decreases if the recess depth is increased. To satisfy the load balance, the pressure distribution must rise and fall together with the changing of the sub-ambient pressure. For these reasons, the flying height at the trailing edge decreases rapidly. The flying height gradually increases with the increase in recess depth. Meanwhile, at the leading edge, the flying height decreases slowly at first, and then suddenly increases as shown in figure 8.

The taper angle effects the flying height but only has a small effect on the pressure distribution. As the taper angle increases, the pressure distribution increases marginally at the leading edge and decreases slightly at

the trailing edge. However, the flying height decreases sharply at the leading edge, whereas at the trailing edge it gradually increases as shown in figure 9.

The load has a moderate effect on both the pressure distribution and the flying height. By increasing the load, the pressure rises to satisfy the load balancing. Therefore, the flying height drops to generate a higher pressure as shown in figure 10.

In the general, the head slider disk velocity has no effect on the pressure distribution, but it has a most significant effect on the flying height which suddenly increases a height along with the increases in the disk velocity. But on the sub-ambient pressure slider, the

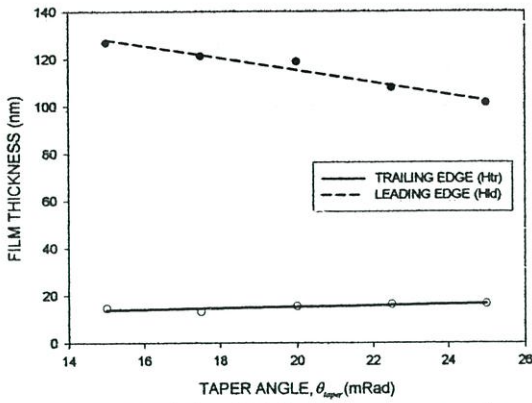


Figure 9. Flying Height versus taper angle

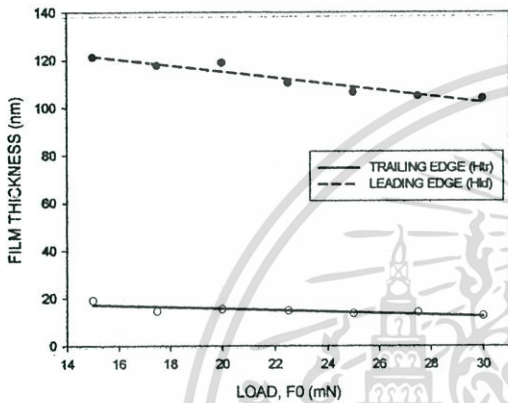


Figure 10. Flying Height versus load

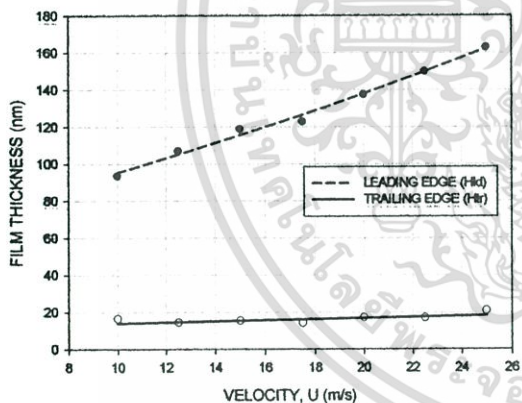


Figure 11. Flying Height versus velocity

effects of the disk velocity can be reduced as the slider can generate a sub-ambient pressure that increases together with the disk velocity. For this reason, the pressure on the contact area will increase to satisfy the load balancing condition. Accordingly, the flying height must not be too high so that it can generate the desired pressure. For this reason, the disk velocity only has a slight effect on the flying height of the sub-ambient pressure slider, especially at the trailing edge as shown in figure 11.

4. Conclusion

The theoretical analysis of the sub-ambient pressure sliders in a HDD have been examined and it can be

concluded that the bearing geometry has a significant effect on the flying characteristics of the air bearing in both flying height and pressure profiles. The priorities for good performance in a sub-ambient pressure slider is that it should have a small air bearing with a narrow rail width, pad width and an optimum recess depth of approximately $2.0 \mu m$.

5. Nomenclatures

B	Rail width	P	Pressure,
F_0	Load,	$P \equiv p/p_a$	
	$F_0 = f_0/P_a LW$	X_G	Support position,
H	Film thickness,	$X_G = x_g/L$	
	$H = h/h_a$	X	Cartesian coordinate,
H_{gr}	Recess depth	$X = x/L$	
h_a	Reference film	Y	Cartesian coordinate,
	Thickness	$Y = y/W$	
h_{tr}	Trailing edge	U	Disk velocity
h_{ld}	Leading edge	W	Slider width
K_N	Knudsen number,	λ_a	Mean free path,
	$K_N = \lambda_a/h_a$	$\lambda_a \approx 64 nm$	
L	Slider length	λ	Length-width ratio,
L_B	Rail length	$\lambda = L/W$	
L_{st}	Step length	Λ	Bearing number,
L_{trX}	Pad length	$\Lambda = 6\mu_0 UL/p_a h_a^2$	
L_{trY}	Pad width	μ_0	Gas viscosity
p_a	Atmosphere pressure	θ_{taper}	Taper angle

9. References

- [1] A.K. Menon. Interface Tribology for $100 Gb/in^2$, *Tribology International*, Vol.33, 2000, 299-308.
- [2] E. Cha. And D.B. Bogy. A Numerical scheme for static and dynamic simulation of sub-ambient pressure shaped rail sliders, *Journal of Tribology*, ASME, Vol.117, 1995, 36-46.
- [3] J.W. White. Flying Characteristics of the transverse and negative pressure contour (TNP) slider air bearing, *Trans. Journal of Tribology*, ASME, Vol.119, April 1997, 241-249.
- [4] Y. Hu. And D.B. Bogy. Solution of the rarefied gas lubrication equation using an additive correction based multigrid control volume method, *Journal of Tribology*, Trans. ASME, Vol.120, 1998, 280-288
- [5] Y. Hu., P.M. Jones and K. Li. Air bearing dynamics of sub-ambient pressure sliders during dynamic unload, *Journal of Tribology*, ASME, Vol.121, 1999, 553-559.
- [6] Q.H. Zeng and D.B. Bogy. Stiffness and damping evaluation of air bearing sliders and new designs with high damping, *Journal of Tribology*, Trans. ASME, Vol.121, No.2, April 1999, 341-347.
- [7] H. Hashimoto and Y. Hattori. Improvement of the Static and Dynamic Characteristics of magnetic head sliders by optimum design, *Journal of Tribology*, Trans. ASME, Vol.122, January 2000. 280-287.