

การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของซีลโอริงภายในเครื่องจับยึดหัวอ่านภายใต้การหล่อลื่นแบบ อิลาสโตไฮโดรไดนามิก

Theoretical Analysis of Seal O-Rings for HGA Clamp under Elastohydrodynamic Lubrication

นพดล สุขแสงปัญญา กิติธัญ คำพันธ์ มงคล มงคลวงศ์โรจน์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

E-Mail : kmmongko@kmitl.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมทางทฤษฎีของการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกของซีลโอริงภายในเครื่องจับยึดหัวอ่าน ภายใต้แรงกดอัดเป็นเส้นตรง เมื่อสารหล่อลื่นเป็นอากาศ ซึ่งซีลโอริงมีการเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมาภายในเครื่องจับยึดหัวอ่าน และวิเคราะห์ซีลโอริงนี้เป็นวัสดุประเภทยาง และในการหล่อลื่นได้นำผลเนื่องจากการสั่นไถลของโมเลกุลอากาศมาร่วมวิเคราะห์ด้วย โดยนำสมการโมติฟายด์เรย์โนลด์ซึ่งขึ้นกับเวลาร่วมกับสมการโบลทซ์แมนอันดับ 1 และสมการการเปลี่ยนรูปของวัสดุ มาประยุกต์ร่วมกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งได้นำวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับวิธีผลต่างสืบเนื่องและวิธีมัลติกริดเพื่อศึกษาการกระจายความดันและความหนาฟิล์มอากาศของการหล่อลื่นในซีลโอริงภายในเครื่องจับยึดหัวอ่าน เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นอิลาสติกและวิสโคอิลาสติก พบว่าความหนาฟิล์มอากาศแปรผันตามและความดันแปรผกผันกับความเร็วของซีลโอริง ความหนาฟิล์มอากาศแปรผกผันและความดันแปรผันตามภาระที่กระทำ และความหนาฟิล์มอากาศเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติกจะมากกว่าเมื่อซีลเป็นอิลาสติก โดยที่ความเร็วมากจะเห็นความแตกต่างมากกว่าความเร็วต่ำ และความดันเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติกจะน้อยกว่าเมื่อซีลเป็นอิลาสติก

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.

Key word : Elastohydrodynamic lubrication, Seal O-Rings, Reynolds equation, Line contact, Elasticity, Viscoelasticity, Reciprocating motion.

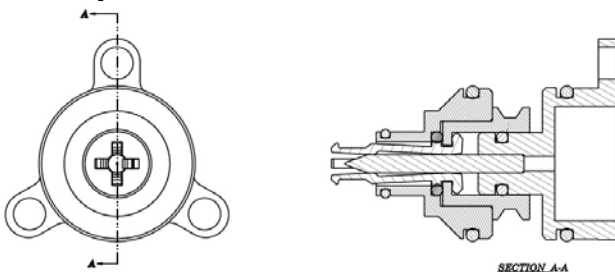
1. บทนำ

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของซีลโอริงในเครื่องจับยึดหัวอ่าน เนื่องจากซีลโอริงภายในเครื่องจับยึดหัวอ่านมีอายุการใช้งานค่อนข้างต่ำอันเนื่องมาจากการสึกหรอที่เกิดขึ้น จำเป็นต้องมีการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของซีลนี้เพื่อยืดอายุการใช้งาน อีกทั้งในงานวิจัยของการหล่อลื่นที่ผ่านมามุ่งศึกษาวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นอีลาสติก แต่ในปัจจุบันวัสดุประเภทยาง (Rubber) ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม ซึ่งวัสดุประเภทยางมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก การศึกษาการหล่อลื่นเมื่อวัสดุมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติกจึงมีความสำคัญในอุตสาหกรรมปัจจุบัน และสำหรับการหล่อลื่นเมื่อสารหล่อลื่นเป็นอากาศ ซึ่งความหนาฟิล์มสารหล่อบางมาก จึงก่อให้เกิดผลเนื่องจากการลื่นไถลของโมเลกุลอากาศ ดังนั้นการศึกษากการหล่อลื่นของวัสดุประเภทยาง จึงต้องนำทฤษฎีของวิสโคอีลาสติกและผลเนื่องจากการลื่นไถลของโมเลกุลอากาศเข้าร่วมในการคำนวณด้วย เพื่อให้ผลการคำนวณใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น

2. ทฤษฎี

2.1 ลักษณะซีลโอริงในเครื่องจับยึดหัวอ่าน

ลักษณะงานที่ทำการศึกษาคือซีลในเครื่องจับยึดหัวอ่านทำหน้าที่ทดสอบสภาพหัวอ่าน ซึ่งลักษณะของเครื่องจับยึดหัวอ่านมีแท่นประกอบ (Nest) และกระบอกสูบ (Collar) ประกอบเข้าด้วยกัน และมีตำแหน่งจ่ายลมเข้าเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนลูกสูบขึ้นลง โดยซีลที่ใช้ในเครื่องจับยึดหัวอ่านเป็นซีลโอริง (O-ring seal) ซึ่งสวมอยู่ที่กระบอกสูบ ดังแสดงในรูป 1



รูป 1 แสดงลักษณะกระบอกสูบและซีลโอริงที่สวมอยู่

กระบอกสูบมีส่วนเคลื่อนที่และส่วนอยู่หนึ่งมีซีลโอริงสวมอยู่ภายในเพื่อป้องกันการสัมผัสกันระหว่างส่วนเคลื่อนที่กับส่วนอยู่หนึ่ง โดยลักษณะของซีลโอริงสวมอยู่ในกระบอกสูบดังรูป 2 มีห้าชั้น ซึ่งชั้นที่ 1,3,4,5 เคลื่อนที่แบบไถล (Translation motion) แบบไปกลับ (Reciprocating motion) และชั้นที่ 2 จะรับแรงแบบถูกกด โดยซีลโอริงชั้นที่ 3 จะนำมาศึกษาทางไตรโบโลยี (Tribology)

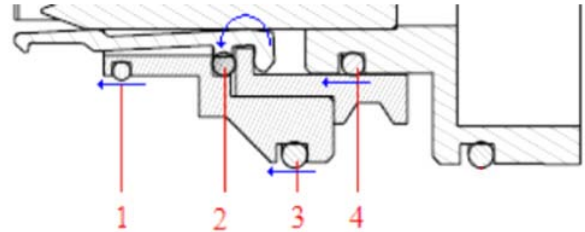
เมื่อพิจารณาซีลชั้นที่ 3 ซึ่งเคลื่อนที่แบบไป-กลับ เป็นการหล่อลื่นที่มีสารหล่อลื่นเป็นอากาศดังแสดงในรูป 3

2.2 สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์

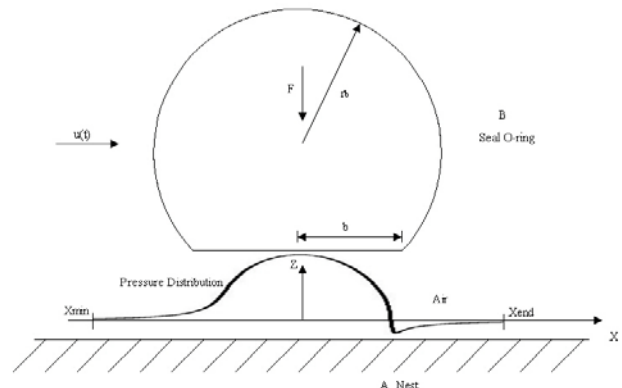
สมการเรย์โนลด์ ในรูปแบบไร้มิติ สำหรับการหล่อลื่นแบบวิสโคอีลาสโตไฮโดรไดนามิก แบบสัมผัสเชิงเส้นเมื่อสารหล่อลื่นเป็นอากาศคือ

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[Q \frac{\partial P}{\partial X} \right] = K(t) \left[C_{UT} \frac{\partial(PH)}{\partial X} + \frac{\partial(PH)}{\partial T} \right] \quad (1)$$

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



รูป 2 แสดงตำแหน่งซีลโอริงที่สวมอยู่ในกระบอกสูบ



รูป 3 แสดงลักษณะการหล่อลื่นแบบวิสโคอีลาสโตไฮโดรไดนามิกแบบชั่วขณะของซีลภายในเครื่องจับยึดหัวอ่าน เมื่อสารหล่อลื่นเป็นอากาศ

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

โดยที่เงื่อนไขขอบสำหรับสมการเรย์โนลด์

$$P(x_{\min}) = P(x_{\end}) = 1.0 \quad (4)$$

2.3 สมการความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่น

สมการความหนาฟิล์ม จะขึ้นอยู่กับลักษณะกายภาพของซีลโอริงและการเสียรูปของซีล

$$H_i = H_0 + \frac{X^2}{2} - \frac{2p_a R_{x0}}{C_{EQ} C_{BT} \pi E' b} \left\{ \int_{X_{IN}}^{X_{OUT}} (P' - 1) \ln(X - X')^2 dX \right\} \quad (5)$$

2.4 สมการสมดุลแรง

ภาวะที่ซีลโอริงได้รับจะเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำผ่านฟิล์มของอากาศ

$$\int_{x_{\min}}^{x_{\end}} (P - 1) dX = C_{WT} \frac{f_0}{p_a C_{BT} b} \quad (6)$$

2.5 สมการวิสโคอีลาสติก

การศึกษาพฤติกรรมวัสดุวิสโคอีลาสติกนั้นสามารถแสดงให้เห็นได้ง่ายโดยอาศัยการเปรียบเทียบกับพฤติกรรมของสปริงและแดม

เปอร์ โดยโมเดลที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมครั้งนี้เป็นโมเดลวิสโคอีลาสติกแบบเส้นตรง (Standard linear model) ดังรูป 4 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ (7)

$$\frac{1}{G(t)} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \left[1 - e^{-t/\tau} \right] \quad (7)$$

3. ผลการคำนวณ

ในการศึกษาการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของซีลโอริงในเครื่องจับยึดหัวอ่าน คุณสมบัติของซีลและสารหล่อลื่นเป็นดังตาราง 1 และตาราง 2

G_1	σ_1, γ_1	G_2	σ_2, γ_2
		η	σ_3, γ_3

รูป 4 แสดงโมเดลวิสโคอีลาสติกแบบเส้นตรง (Standard linear model)

ตาราง 1 คุณสมบัติของวัสดุ

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

การเคลื่อนที่ของซีลในเครื่องจับยึดหัวอ่าน 1 รอบ มีความเร็วดังแสดงในรูป 5 โดยการเคลื่อนที่ไปกลับ 1 รอบใช้เวลา 1.5 วินาที โดยใช้เวลาเคลื่อนที่ไป 0.5 วินาที แล้วหยุดนิ่ง 0.5 วินาที แล้วเคลื่อนที่กลับ 0.5 วินาที ซึ่งมีความเร็วสูงสุดเป็น 2 mm/s

จากกราฟดังแสดงในรูป 6 แสดงความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีล พบว่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดเปลี่ยนแปลงตามความเร็วที่เปลี่ยนไป โดยความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อความเร็วลดลง โดยที่ความเร็วเป็น 0 ไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากไม่มีฟิล์มอากาศเกิดขึ้น จากกราฟดังแสดงในรูป 7 แสดงความดันสูงสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีล พบว่าความดันสูงสุดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามความเร็วที่เปลี่ยนไป โดยความดันสูงสุดจะลดลงเล็กน้อยเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความเร็วลดลง โดยที่ความเร็วเป็น 0 ไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากไม่มีฟิล์มอากาศเกิดขึ้น

จากกราฟดังแสดงในรูป 8 แสดงความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีล ที่ภาวะต่าง ๆ พบว่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดเปลี่ยนแปลงตามภาวะที่เปลี่ยนไป โดยความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดลดลงเมื่อภาวะเพิ่มขึ้น โดยความหนาฟิล์มอากาศจะเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ความเร็วสูง และเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่ความเร็วต่ำ จากกราฟดังแสดงในรูป 9 แสดงความดันสูงสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับ

ของซีลที่ภาวะต่าง ๆ พบว่าความดันสูงสุดเปลี่ยนแปลงตามภาวะที่เปลี่ยนไป โดยความดันสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อภาวะเพิ่มขึ้น

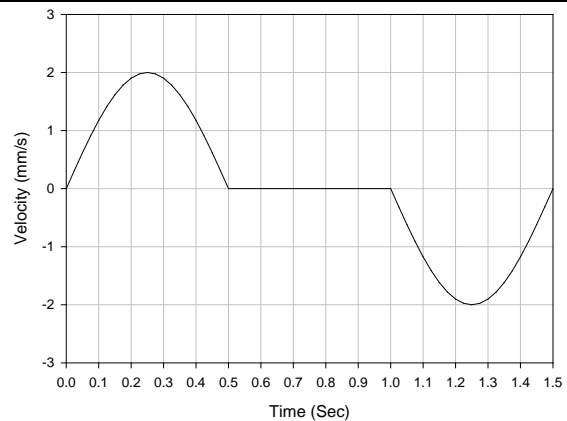
จากกราฟดังแสดงในรูป 10 แสดงความเร็วของซีล ในการเคลื่อนที่ของซีลในเครื่องจับยึดหัวอ่าน 1 รอบ โดยการเคลื่อนที่ไปกลับ 1 รอบใช้เวลา 0.75, 1.5, 2.25 วินาที โดยใช้เวลาเคลื่อนที่ไป 0.25, 0.5, 0.75 วินาที แล้วหยุดนิ่ง 0.25, 0.5, 0.75 วินาที แล้วเคลื่อนที่กลับ 0.25, 0.5, 0.75 วินาที ซึ่งมีความเร็วสูงสุดเป็น 4, 2.1.33 mm/s ตามลำดับ

จากกราฟดังแสดงในรูป 11 แสดงความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีลที่ภาวะต่าง ๆ พบว่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดเปลี่ยนแปลงตามเวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบเนื่องจากความเร็วที่เปลี่ยนไป โดยความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น

จากกราฟดังแสดงในรูป 12 แสดงความดันสูงสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีลที่ภาวะต่าง ๆ พบว่าความดันสูงสุดเปลี่ยนแปลงตามเวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบเนื่องจากความเร็วที่เปลี่ยนไป ความดันสูงสุดลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น

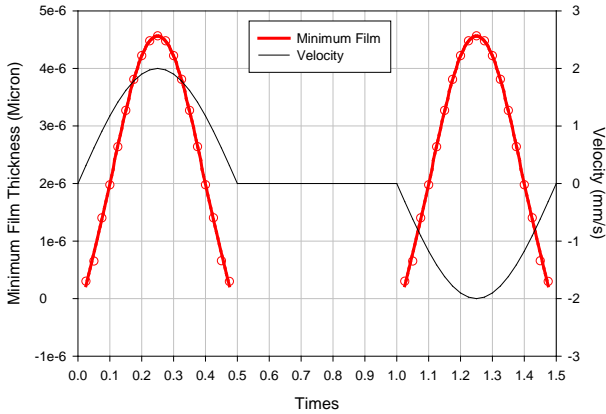
ตาราง 2 คุณสมบัติของสารหล่อลื่น

คุณสมบัติสารหล่อลื่น	อากาศ
Density (Kg/m ³)	1.225
Viscosity (Pa.s)	1.8e-5
Molecular mean free path (nm)	64.3

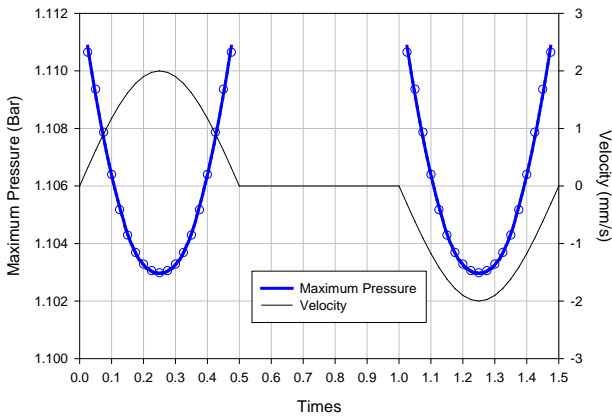


รูป 7 กราฟแสดงความเร็วของการเคลื่อนที่ที่เครื่องจับยึดหัวอ่าน 1 รอบ

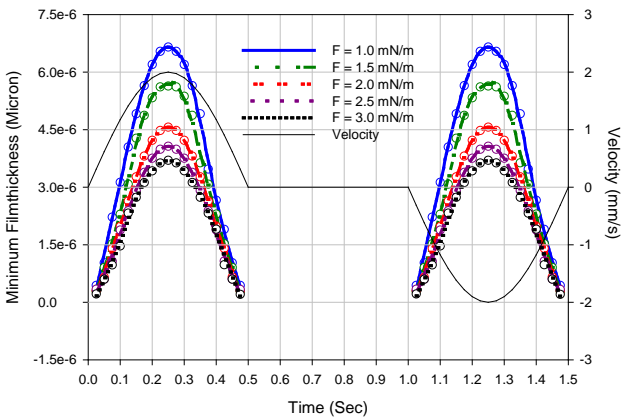
จากกราฟดังแสดงในรูป 13 แสดงโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยที่เปลี่ยนไปและความเร็วของซีลที่เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ของซีลในเครื่องจับยึดหัวอ่าน 1 รอบ ซึ่งใช้เวลา 1.5 วินาที โดยโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จากกราฟดังแสดงในรูป 14 แสดงความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซีล เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก พบว่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเปลี่ยนแปลงตามความเร็วและโมดูลัสความยืดหยุ่นที่เปลี่ยนไป โดยเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้น



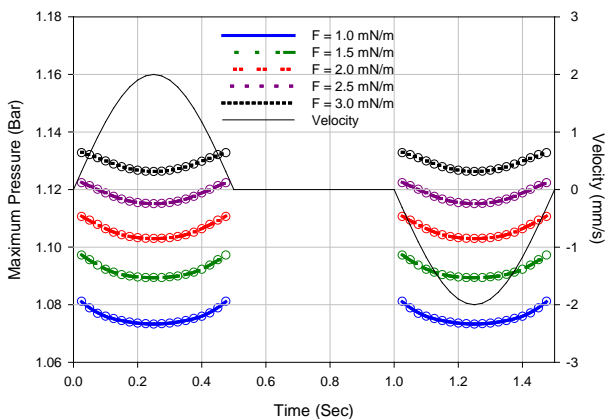
รูป 6 กราฟแสดงความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด ณ เวลาต่าง ๆ



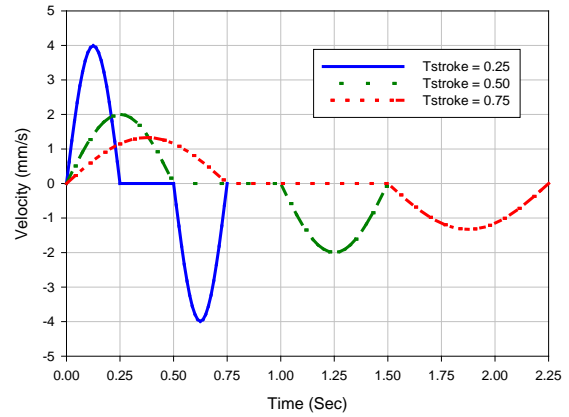
รูป 7 กราฟแสดงความดันสูงสุด ณ เวลาต่าง ๆ



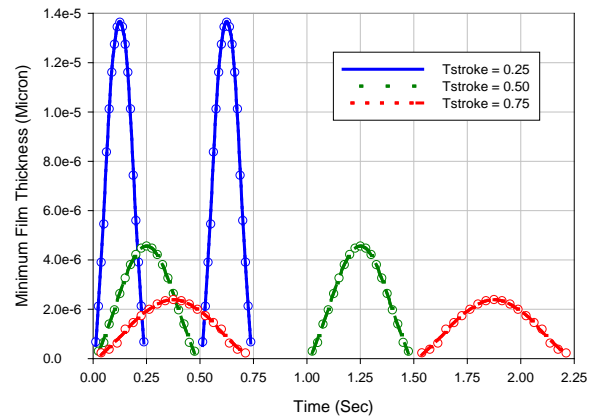
รูป 8 กราฟแสดงความหนาฟิล์มต่ำสุดที่ภาวะต่าง ๆ



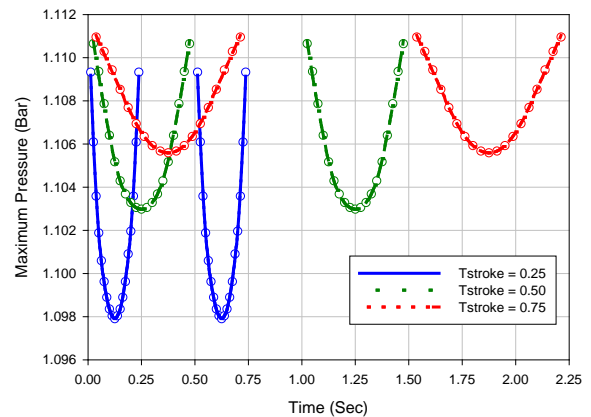
รูป 9 กราฟแสดงความดันสูงสุดที่ภาวะต่าง ๆ



รูป 10 กราฟแสดงความเร็วเมื่อเวลาการเคลื่อนที่ไป-กลับเปลี่ยนแปลง



รูป 111 กราฟแสดงความหนาฟิล์มต่ำสุดที่เวลาเคลื่อนที่ไป-กลับต่าง ๆ



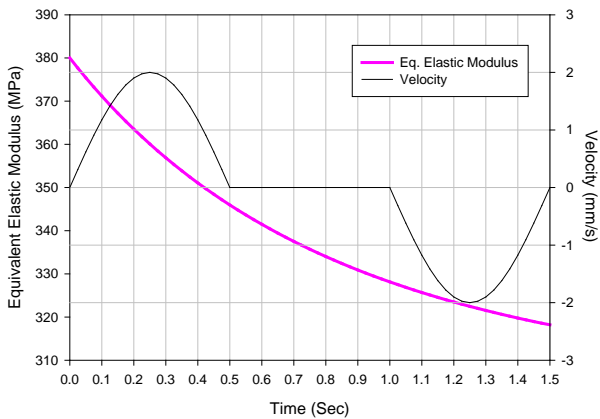
รูป 12 กราฟแสดงความดันสูงสุดที่เวลาเคลื่อนที่ไป-กลับต่าง ๆ

ต่ำสุดจะเพิ่มขึ้น และเมื่อโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง ความหนาฟิล์มจะเพิ่มขึ้น จากกราฟดังแสดงในรูป 15 แสดงโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยที่เปลี่ยนไปและความเร็วของซิลที่เวลาต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ของซิลในเครื่องจับยึดหัวอ่าน 1 รอบ ซึ่งใช้เวลา 1.5 วินาที โดยโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

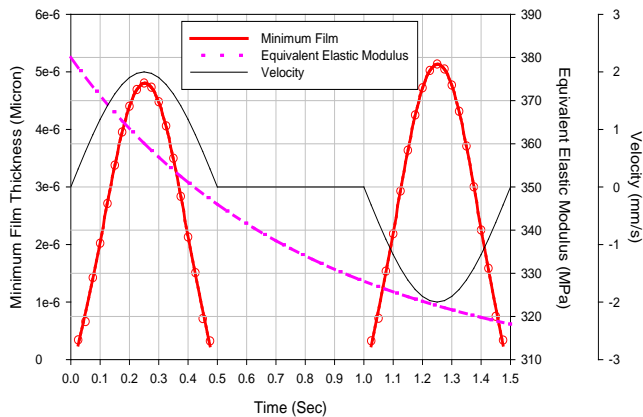
จากกราฟดังแสดงในรูป 14 แสดงความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซิล เมื่อซิลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก พบว่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเปลี่ยนแปลงตามความเร็วและโมดูลัสความยืดหยุ่นที่เปลี่ยนไป โดยเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ความหนาฟิล์มต่ำสุดจะเพิ่มขึ้น และเมื่อโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง ความหนาฟิล์มจะเพิ่มขึ้น

จากกราฟดังแสดงในรูป 15 แสดงความผันผวนสูงสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซิล เมื่อซิลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก พบว่าความผันผวนสูงสุดเปลี่ยนแปลงตามความเร็วและโมดูลัสความยืดหยุ่นที่เปลี่ยนไป โดยเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ความผันผวนสูงสุดจะลดลง และเมื่อโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง ความผันผวนจะลดลง

จากกราฟดังแสดงในรูป 16 แสดงความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซิลที่ภาวะต่าง ๆ เมื่อซิลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก พบว่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดเปลี่ยนแปลงตามภาวะที่เปลี่ยนไป โดยเมื่อภาวะเพิ่มขึ้น ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดลดลง ซึ่งความหนาฟิล์มอากาศจะเปลี่ยนแปลงมากกว่าความเร็วสูง และ



รูป 13 กราฟแสดงโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยและความเร็วของซิล เมื่อซิลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก



รูป 14 กราฟแสดงความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ย เมื่อซิลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก

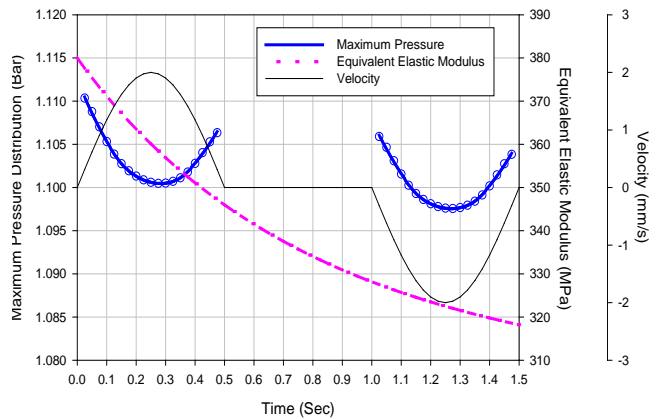
เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่ความเร็วต่ำ และเมื่อโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดจะเพิ่มขึ้น

จากกราฟดังแสดงในรูป 17 แสดงความผันผวนสูงสุดในการเคลื่อนที่ไป-กลับของซิลที่ภาวะต่าง ๆ เมื่อซิลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก พบว่าความผันผวนสูงสุดเปลี่ยนแปลงตามภาวะที่เปลี่ยนไป โดยเมื่อภาวะเพิ่มขึ้น ความผันผวนสูงสุดเพิ่มขึ้น และเมื่อโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง ความผันผวนสูงสุดจะลดลง

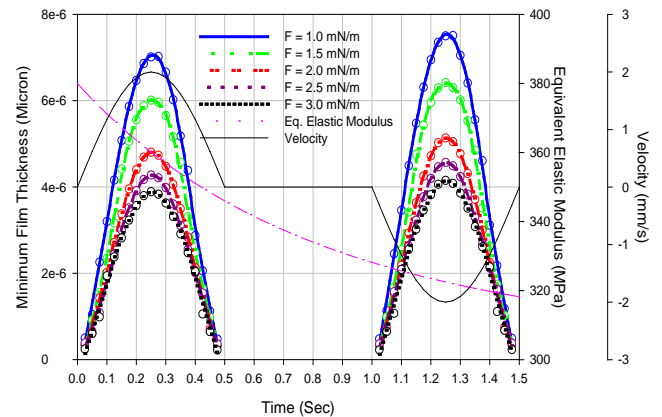
จากกราฟดังแสดงในรูป 18 แสดงโมดูลัสความยืดหยุ่น ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อสปริงตัวที่ 1 เปลี่ยนแปลง สปริงตัวที่ 2 และแดมเปอร์คงที่ พบว่าเมื่อค่าสปริงตัวที่ 1 เพิ่มขึ้นส่งผลให้โมดูลัสความยืดหยุ่น

โดยรวมเพิ่มขึ้น จากกราฟดังแสดงในรูป 19 แสดงโมดูลัสความยืดหยุ่น ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อสปริงตัวที่ 2 เปลี่ยนแปลง สปริงตัวที่ 1 และแดมเปอร์คงที่ พบว่าเมื่อสปริงตัวที่ 2 ส่งผลให้โมดูลัสความยืดหยุ่นที่สภาวะคงที่ (Steady state) เปลี่ยนแปลงไป โดยที่เมื่อสปริงตัวที่ 2 มีค่ามากขึ้น โมดูลัสความยืดหยุ่นที่สภาวะคงที่จะเพิ่มขึ้น

จากกราฟดังแสดงในรูป 21 แสดงการเปรียบเทียบความหนาฟิล์มต่ำสุดเมื่อซิลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติกและอีลาสติก พบว่าความหนาฟิล์มต่ำสุดเมื่อซิลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติกมากกว่าเมื่อซิลมีคุณสมบัติเป็นอีลาสติก โดยที่ความเร็วสูงจะเห็นความแตกต่างมากกว่าความเร็วต่ำ



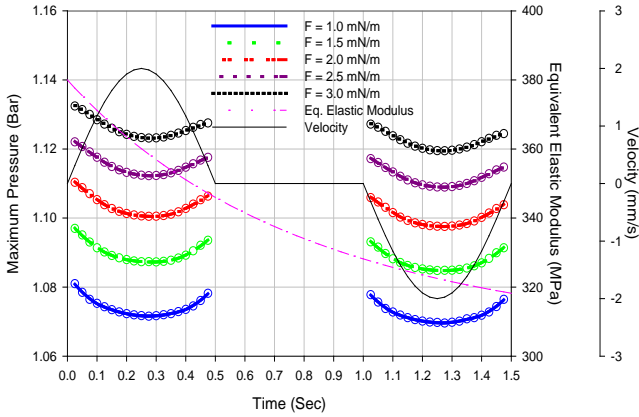
รูป 15 กราฟแสดงความผันผวนสูงสุดและโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ย เมื่อซิลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก



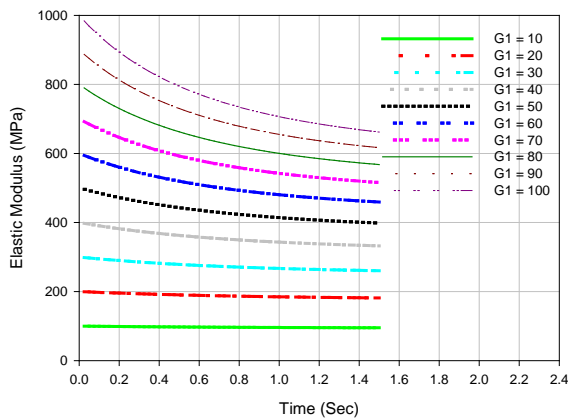
รูป 16 กราฟแสดงความหนาฟิล์มต่ำสุดและโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ย เมื่อซิลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก ที่ภาวะต่าง ๆ

4. สรุปผล

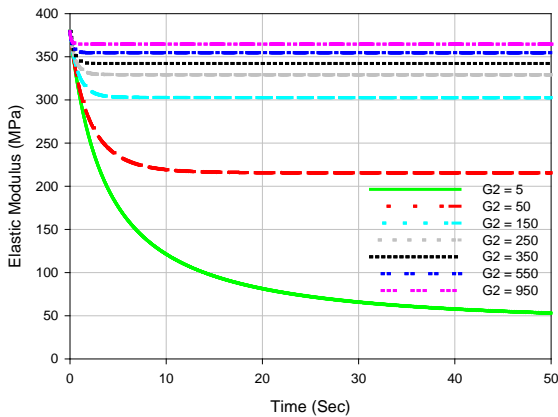
งานวิจัย นี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกแบบชั่วขณะ เมื่อสารหล่อลื่นเป็นอากาศ โดยคิดผลเนื่องจากการลื่นไถลของโมเลกุล และไม่คิดผลเนื่องจากอุณหภูมิ การคำนวณเชิงตัวเลขทำได้โดยอาศัยวิธีผลต่างสืบเนื่อง วิธีนิวตันราฟสัน



รูป 17 กราฟแสดงความดันสูงสุดและโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ย เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก ที่ภาระต่าง ๆ



รูป 18 กราฟแสดงโมดูลัสความยืดหยุ่น ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อสปริงตัวที่ 1 เปลี่ยนแปลง สปริงตัวที่ 2 และแดมเปอร์คงที่



รูป 19 กราฟแสดงโมดูลัสความยืดหยุ่น ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อสปริงตัวที่ 2 เปลี่ยนแปลง สปริงตัวที่ 1 และแดมเปอร์คงที่

และวิธีอื่นที่เกรตเชิงตัวเลขร่วมกันในการแก้สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์สมการสมดุลแรง และสมการความหนาฟิล์มอากาศในสภาวะชั่วขณะจากการจำลองพฤติกรรมสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการจำลองเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นอีลาสติก

- ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดแปรผันตามความเร็วซีลโอริง
- ความดันสูงสุดแปรผันตรงกับความเร็วซีลโอริง

- ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดแปรผันกับภาระที่กระทำ
- ความดันสูงสุดแปรผันตรงกับภาระที่กระทำ
- การเปลี่ยนเวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบ ของซีลโอริง ส่งผลต่อ ความเร็วของซีลโอริง โดยความเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการเคลื่อนที่ 1 รอบลดลง

4.2 ผลการจำลองเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก

- เมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก ส่งผลให้โมดูลัสความยืดหยุ่นเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดย โมดูลัสความยืดหยุ่นจะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น
- ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดแปรผันตามความเร็วซีลโอริง
- ความดันสูงสุดแปรผันกับความเร็วซีลโอริง
- ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดแปรผันกับภาระที่กระทำ
- ความดันสูงสุดแปรผันตรงกับภาระที่กระทำ
- ผลเนื่องจากสปริงและแดมเปอร์ของโมเดลวิสโคอีลาสติก
 - สปริงตัวที่ 1 เพิ่มขึ้น โมดูลัสความยืดหยุ่นโดยรวมเพิ่มขึ้น
 - สปริงตัวที่ 2 เพิ่มขึ้น โมดูลัสความยืดหยุ่นที่สภาวะคงที่เพิ่มขึ้น
 - แดมเปอร์เพิ่มขึ้น ช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลง โมดูลัสความยืดหยุ่นกว้างขึ้น

4.3 ผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมการณ์การหล่อลื่นระหว่างอีลาสติกกับวิสโคอีลาสติก

- ความหนาฟิล์มต่ำสุดเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติกมีค่ามากกว่าเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นอีลาสติก โดยที่ความเร็วสูงจะเห็นความแตกต่างมากกว่าความเร็วต่ำ
- ความดันเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติกมีค่าต่ำกว่าเมื่อซีลมีคุณสมบัติเป็นอีลาสติก

5. สัญลักษณ์ที่ใช้ในบทความ

- b ค่าความกว้างครึ่งหนึ่งของการสัมผัส, $b = R(8W/\pi)^{1/2}$
- C_{WT} สัดส่วนภาระที่กระทำที่ตำแหน่งใด ๆ เทียบกับภาระอ้างอิง, $C_{WT} = w'(t)/w'_0$
- C_{EQ} สัดส่วนโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยที่กระทำที่เวลาใด ๆ เทียบกับโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยอ้างอิง, $C_{EQ} = E'(t)/E'$
- C_{BT} สัดส่วนค่าความกว้างครึ่งหนึ่งของการสัมผัสเชิงเส้นที่กระทำที่เวลาใด ๆ เทียบกับค่าอ้างอิง, $C_{BT} = b(t)/b$
- E โมดูลัสความยืดหยุ่นของผิวสัมผัส, Pa
- E' โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ย, $1/E' = 1/2[(1-\nu_a^2)/E_a + (1-\nu_b^2)/E_b]$
- f_0 ภาระที่กระทำต่อผิวสัมผัส, N/m
- G โมดูลัสวิสโคอีลาสติก, Pa
- h ค่าความหนาฟิล์มที่ตำแหน่งใด ๆ, m
- H ค่าความหนาฟิล์มไร้มิติ $H = h(R/b^2)$
- p ความดัน, Pa
- P_a ความดันบรรยากาศ, Pa
- P ความดันไร้มิติ $P = p/P_a$

- R รัศมีความโค้งเฉลี่ย, m
- R_x รัศมีความโค้งเฉลี่ยตามแนวแกน x , $1/R_x = 1/r_{ax} + 1/r_{bx}$
- r_{ax} รัศมีความโค้งของผิวล่างตามแนวแกน x , m
- r_{bx} รัศมีความโค้งของผิวบนตามแนวแกน x , m
- t เวลา, s
- T เวลาไร้มิติ, $T = (\bar{u}/b)t$
- u_0 ความเร็วผิวสัมผัสอ้างอิงตามแนวแกน x , m/s
- u_1 ความเร็วผิวสัมผัสที่ 1 ที่ตำแหน่งใดๆ ในแนวแกน x , m/s
- u_2 ความเร็วผิวสัมผัสที่ 2 ที่ตำแหน่งใดๆ ในแนวแกน x , m/s
- \bar{u} ความเร็วเฉลี่ยของผิวสัมผัสตามแนวแกน x , $\bar{u} = u_1 + u_2/2$
- x โคออร์ดิเนต x ตามแนวสัมผัส, m
- X โคออร์ดิเนต x ไร้มิติ สัมผัสเชิงเส้น, $x = Xb$
- W' ภาระที่กระทำต่อผิวสัมผัสที่สัมผัสเชิงเส้น, $W' = f_0/E'R$
- μ ค่าความหนืด, Pa·s
- U_b ค่าอัตราเร็วของของผิวบน
- U_a ค่าอัตราเร็วของของผิวล่าง
- σ ความเค้น, N/m²
- γ ความเครียด, m
- τ อัตราส่วนความหนืดพลวัตกับโมดูลัสวิสโคอิลาสติก,
 $\tau = \eta/G_2$

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Dowson and G.R. Higginson, *Elastohydrodynamic Lubrication: The Fundamental of Roller and Gear Lubrication*. Pergamon, Oxford, 1966.
- [2] R.F. Salant, 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, 1966.
- [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.
- [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.