

พฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกในสภาวะไม่คงตัว ของสารหล่อลื่นชนิดนิวโตเนียน

Characteristics of Transient Thermoelastohydrodynamic Lubrication with Newtonian Lubricant

สุนทรี รัตมาสาร^{1*}, เจษฎา พานิชกร² และ ชนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว²

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

² ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

*ติดต่อ: sountaree.t@bu.ac.th, (662)9020299

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของทรงกระบอกในสภาวะไม่คงตัว ด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมแบบสารหล่อลื่นนิวโตเนียน โดยประยุกต์ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องและระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน แก๊สมการเรย์โนลด์สประยุกต์ สมการพลังงาน และสมการการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ เพื่อหาการกระจายของความดันฟิล์มสารหล่อลื่น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เปรียบเทียบกับพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกในสภาวะไม่คงตัวเมื่อไม่คิดผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อภาระที่กระทำกับทรงกระบอกเปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่าความกว้างของการสัมผัส ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลง เมื่อภาระที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ทรงกระบอกได้รับมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับมีค่าลดลง ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง แต่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น

คำหลัก: การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก, สมการเรย์โนลด์สประยุกต์, สารหล่อลื่นนิวโตเนียน

Abstract

This paper presents the result of transient thermoelastohydrodynamic lubrication of two cylinders in line contact with Newtonian lubricant. The simultaneous systems of time-dependent modified Reynolds equation, elasticity equation and energy equation with initial conditions were solved numerically using Newton-Rapson method with full approximation technique. Film pressure, film temperature and film thickness profiles were determined in the contact region at transient load and compared with isothermal condition. The results show contact area, film pressure, film temperature and friction coefficient increase but film thickness decreases when transient load increased. In other words, film pressure, film temperature and friction coefficient decrease but film thickness increases when transient load decreased.

Keywords: Thermoelastohydrodynamic Lubrication, Modified Reynolds Equation, Newtonian Lubricant

TSF-213

1. บทนำ

ในการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง อุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการสัมผัสมีความสำคัญมาก ต่อความหนาของฟิล์มหล่อลื่น โดย Lee และ Hamrock ได้แสดงการคำนวณการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกในสภาวะไม่คงตัวด้วยระเบียบวิธีนิวตันราฟสันภายใต้ภาระที่กระทำต่ำ [1] Khonsari, Wang และ Qi [2] ได้นำเสนอสมการเรย์โนลด์และสมการพลังงานสำหรับของไหลนอนิวโตเนียนแบบ Liquid-Solid Lubricant ที่มีการสัมผัสเป็นเส้น ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องอย่างมากต่อความหนาของฟิล์มน้ำมัน อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน ภาระที่กระทำ และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน Mongkolwongrojn และคณะ [3] ได้นำเสนอผลของการหล่อลื่นแบบ Liquid-Solid Lubricant ว่ามีผลต่ออุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่รับภาระแบบทันทีทันใด และในกรณีที่เป็นการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกในสภาวะคงตัว พบว่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงแต่ความดันและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มมากขึ้น [4] รวมทั้งความหยาบของผิววัสดุมีผลทำให้ความดันและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง [5]

2. ทฤษฎีการหล่อลื่น

พฤติกรรมของสารหล่อลื่นในขณะที่ยังคงเกาะกอดอัดกันโดยมีสารหล่อลื่นแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของทรงกระบอก ลักษณะการกระจายตัวของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ที่อยู่ระหว่างผิวสัมผัสของทรงกระบอกสามารถอธิบายพฤติกรรมได้ด้วยสมการเรย์โนลด์ประยุกต์ร่วมกับสมการพลังงาน โดยพฤติกรรมของการหล่อลื่นดังกล่าวเรียกว่าการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก

2.1 สมการเรย์โนลด์ประยุกต์

สมการเรย์โนลด์ประยุกต์ในรูปแบบไร้มิติสำหรับการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของ

$$\frac{\partial}{\partial X} \left\{ \Phi \frac{\partial P}{\partial X} \right\} = \Lambda \left\{ C_{UT}(\bar{t}) \frac{\partial}{\partial X} (\bar{\rho}H) + \frac{\partial}{\partial \bar{t}} (\bar{\rho}H) \right\}$$

ทรงกระบอกที่มีการสัมผัสเป็นเส้นในสภาวะไม่คงตัวด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมเป็นของไหลนิวโตเนียน

(1)

เมื่อ

$$\Phi = \frac{\bar{\rho}H^3}{\bar{\mu}} \quad \text{และ} \quad \Lambda = \frac{12\mu_0 R_0^2 u_0}{P_H b^3}$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขต

$$P(X_{in}, \bar{t}) = P(X_{out}, \bar{t}) = \left(\frac{\partial P}{\partial X} \right)_{X=X_{out}} = 0$$

$$P(X, \bar{t}) \geq 0 ; X_{in} \leq X \leq X_{out}$$

2.2 สมการความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่น

สมการความหนาฟิล์มในรูปแบบไร้มิติขึ้นอยู่กับลักษณะกายภาพของผิวสัมผัสและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผิวสัมผัสเนื่องจากความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$H = H_0 + \frac{X^2}{2C_{RT}} - \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(X', \bar{t}) \ln |X - X'| dX' \quad (2)$$

2.3 สมการความหนาแน่นของสารหล่อลื่น

ความหนาแน่นของสารหล่อลื่นในรูปแบบไร้มิติขึ้นอยู่กับความดันที่ฟิล์มสารหล่อลื่นได้รับและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นในรูปแบบไร้มิติ [6]

$$\bar{\rho} = \left(1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} P_H P}{1 + 1.7 \times 10^{-9} P_H P} \right) (1 - \beta T_0 (\theta - 1)) \quad (3)$$

2.4 สมการความหนืดของสารหล่อลื่น

ความหนืดของฟิล์มสารหล่อลื่นแบบนิวโตเนียนเปลี่ยนแปลงตามความดันที่ฟิล์มสารหล่อลื่นและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นในรูปแบบไร้มิติ [7]

TSF-213

$$\mu_R = \exp\{(\ln(\mu_0) + 9.67)(-1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} p)^{2.2}) - \gamma(T - T_0)\}$$

(4)

2.5 สมการพลังงาน

ขณะที่ทรงกระบอกสัมผัสกันโดยมีฟิล์มสารหล่อลื่นแทรกอยู่ระหว่างผิวสัมผัสจะเกิดพลังงานความร้อนขึ้นจากการสัมผัสกันของผิวทรงกระบอก ดังนั้นสมการพลังงานในรูปแบบไร้มิติในฟิล์มสารหล่อลื่นในสถานะไม่คงตัวด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมเป็นของไหลนิวโตเนียนจะได้เป็น

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} = K_{T1} \frac{\bar{\rho} H^2}{\bar{k}} \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + u^* \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) - K_{T2} \frac{\bar{\mu}}{\bar{k}} \left(\frac{\partial u^*}{\partial X} \right)^2 - K_{T3} \frac{\theta H^2}{\bar{k}} \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + u^* \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) \quad (5)$$

เมื่อ

$$K_{T1} = \frac{u_0 \rho_0 c_p b^3}{k_0 R_0^2} \quad K_{T2} = \frac{\mu_0 u_0^2}{k_0 T_0} \quad K_{T3} = \frac{\beta u_0 b^3 P_H}{k_0 R_0^2}$$

เงื่อนไขอุณหภูมิที่ผิววัสดุ [8]

$$\theta_{\frac{1}{2}} = 1 \pm \frac{k_0 R_0}{\sqrt{\pi \rho_1 c_{p1} k_{12} b^3 u_0 C_{VT} (1 - \frac{S_g}{2})}} \int_{X_{inlet}}^{X_{exit}} \left(\frac{\bar{k}}{H} \right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial Z} \right)_{Z=0/1} \frac{dX'}{\sqrt{X - X'}}$$

$$\theta(X_{inlet}) = 1 \quad (6)$$

2.6 สมการการนำความร้อนของฟิล์มสารหล่อลื่น

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารหล่อลื่นมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความดันที่ฟิล์มสารหล่อลื่นได้รับ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนดังสมการ [9]

$$\bar{k} = 1 + \frac{1.72 \times 10^{-9} p}{1 + 6.91 \times 10^{-9} p} \quad (7)$$

2.7 สมการสมดุลแรง

ภาระที่ทรงกระบอกได้รับจะเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำผ่านฟิล์มของสารหล่อลื่น

$$\int_{X_{IN}}^{X_{OUT}} P(X, t) dX = C_{WT} \left(\frac{\pi}{2} \right) \quad (8)$$

2.8 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

สมการสัมประสิทธิ์ความเสียดทานดังสมการ

$$f = \left(\frac{\mu_0 u_0 R_0}{w_0' b C_{WT}} \right) \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\bar{\mu}}{H} \right) \left(\frac{\partial u^*}{\partial Z} \right)_{Z=0} dX \quad (9)$$

2.9 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

การหาคำตอบของสมการเรย์โนลด์และสมการพลังงานในสถานะไม่คงตัว ซึ่งเป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้นสูง เพื่อหาความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น มีความยุ่งยากมากจึงได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน ในสถานะไม่คงตัว ทำการหาคำตอบซ้ำๆ จนกระทั่ง

$$\frac{\sum_{i=0}^N |P_i^{k+1} - P_i^k|}{\sum_{i=0}^N P_i^{k+1}} \leq 0.0001$$

และ

$$\left| 1 - \frac{2}{\pi C_{WT}} \int_{X_{IN}}^{X_{OUT}} P(X, t) dX \right| \leq 0.0001 \quad (10)$$

3. ผลการคำนวณ

ในบทความนี้เป็นการจำลองผลพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกแบบไม่คงตัวที่มีการสัมผัสแบบเส้น คุณสมบัติของทรงกระบอกและสารหล่อลื่น ที่ใช้ในการจำลองผลของบทความนี้แสดงตามตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของทรงกระบอก

คุณสมบัติของทรงกระบอก	ทรงกระบอก 1	ทรงกระบอก 2
Modulus of Elasticity (GPa)	200	200
Poisson ratio	0.30	0.30

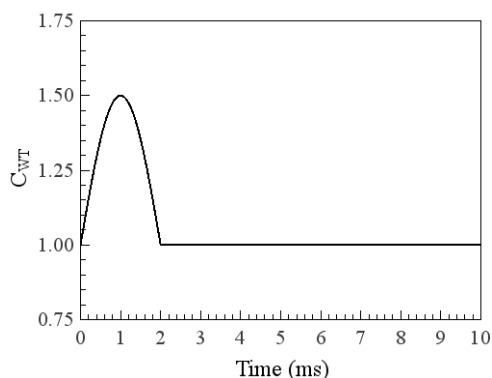
TSF-213

Density (kg/m ³)	7850	7850
Thermal conductivity (W/m-K)	50.2	50.2
Specific heat (J/kg-K)	475	475

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสารหล่อลื่น

คุณสมบัติของสารหล่อลื่น	SAE-90
Inlet Density (kg/m ³)	892.80
Inlet Viscosity (Pa-s)	0.195
Viscosity-Pressure Index	0.5685
Viscosity-Temperature coefficient (K ⁻¹)	0.05763
Coefficient of thermal expansively (K ⁻¹)	0.00074
Thermal conductivity (W/m-K)	0.126
Specific heat (J/kg-K)	1870

ภาระแบบไรมิตีที่ทรงกระบอกได้รับ ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดตามเวลา เมื่อทรงกระบอกรับภาระเริ่มต้น, $w_0' = 200 \text{ kN/m}$ ไม่คิดผลจากความหยาบของผิวทรงกระบอก ทรงกระบอกหมุนด้วยความเร็ว, $n_0 = 1.0 \text{ m/s}$ ทรงกระบอกหมุนด้วยความเร็วที่แตกต่างกันโดยมีค่า Slip/Slide Ratio, $S_x = 0.50$ และรัศมีความโค้งสมมูลของทรงกระบอก, $R_0 = 50 \text{ mm}$ แสดงดังรูปที่ 1

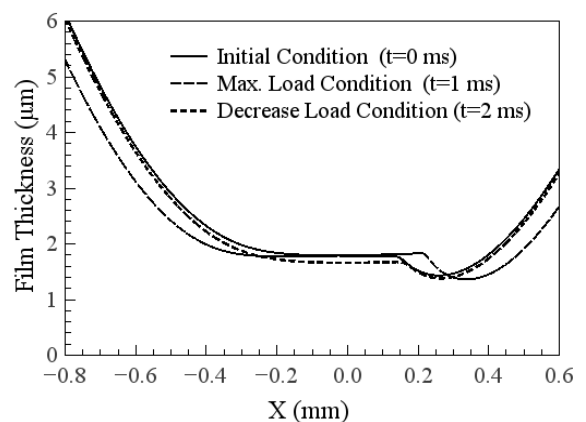


รูปที่ 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของภาระแบบไรมิตีที่ทรงกระบอกได้รับ เมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับ

เปลี่ยนแปลงตามเวลา

จากการจำลองการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกสัมผัสแบบเส้นของทรงกระบอกด้วยสารหล่อลื่นที่เป็นของไหลนิวโตเนียน ที่สภาวะเริ่มต้น ($t = 0 \text{ ms}$) ที่สภาวะที่ทรงกระบอกรับภาระที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสูงสุด ($t = 1.0 \text{ ms}$) และที่สภาวะที่ภาระที่ทรงกระบอกได้รับลดลงสู่สภาวะเริ่มต้น ($t = 2.0 \text{ ms}$) การเปลี่ยนแปลงของความดันฟิล์มของสารหล่อลื่น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น แสดงดังรูปที่ 2 รูปที่ 3 และรูปที่ 4 ตามลำดับ

รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของความดันฟิล์มของสารหล่อลื่น ที่สภาวะเริ่มต้น ($t = 0 \text{ ms}$) ที่สภาวะที่ทรงกระบอกรับภาระที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสูงสุด ($t = 1.0 \text{ ms}$) และที่สภาวะที่ภาระที่ทรงกระบอกได้รับลดลงสู่สภาวะเริ่มต้น ($t = 2.0 \text{ ms}$)



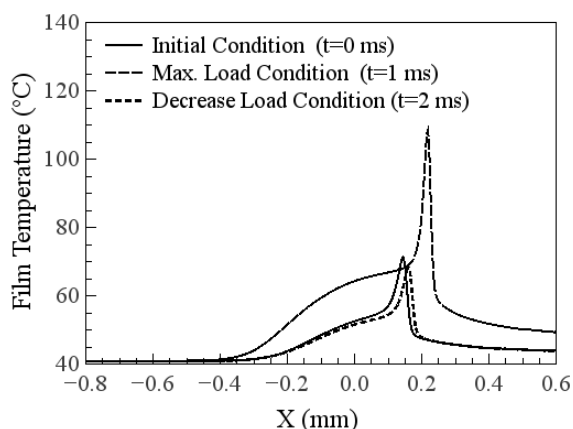
รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ที่สภาวะเริ่มต้น ($t = 0 \text{ ms}$) ที่สภาวะที่ทรงกระบอกรับภาระที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสูงสุด

TSF-213

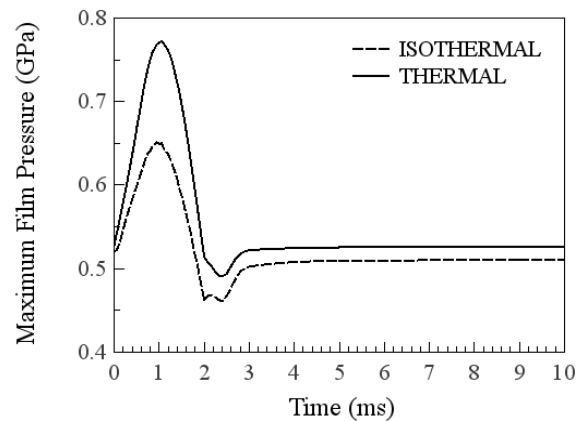
($t = 1.0$ ms) และที่สภาวะที่ภาระที่ทรงกระบอกได้รับ ลดลงสู่สภาวะเริ่มต้น ($t = 2.0$ ms) และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น

พบว่าความกว้างของการสัมผัส ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลง เมื่อภาระที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ทรงกระบอกได้รับมีค่าสูงสุด ($t = 1.0$ ms) เป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของทรงกระบอกและค่าความเค้นเฉือนของฟิล์มสารหล่อลื่นที่เพิ่มขึ้นจากภาระที่ทรงกระบอกได้รับมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับมีค่าลดลงสู่สภาวะเริ่มต้น ($t = 2.0$ ms) พบว่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับสภาวะเริ่มต้น

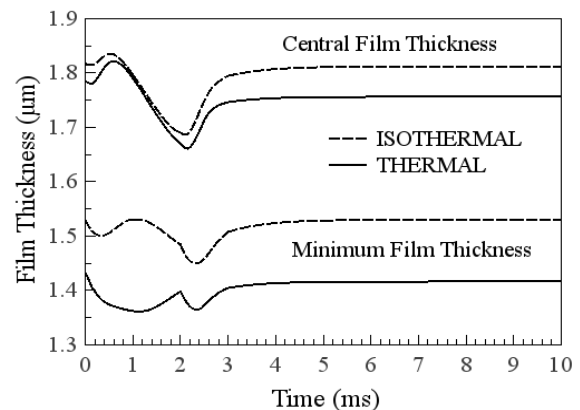
ค่าของความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่สภาวะเริ่มต้น ($t = 0$ ms) มีค่าเท่ากับ **0.528 GPa**, **1.434 μm** , **1.785 μm** , **71.34 $^{\circ}\text{C}$** และ **0.042** ตามลำดับ และมีค่าเท่ากับ **0.771 GPa**, **1.362 μm** , **1.791 μm** , **106.44 $^{\circ}\text{C}$** และ **0.067** ตามลำดับที่สภาวะที่ทรงกระบอกรับภาระที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสูงสุด ($t = 1$ ms) เมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับลดลงสู่สภาวะเริ่มต้น ($t = 2.0$ ms) ค่าของความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเท่ากับ **0.514 GPa**, **1.399 μm** , **1.671 μm** , **69.48 $^{\circ}\text{C}$** และ **0.043** ตามลำดับ



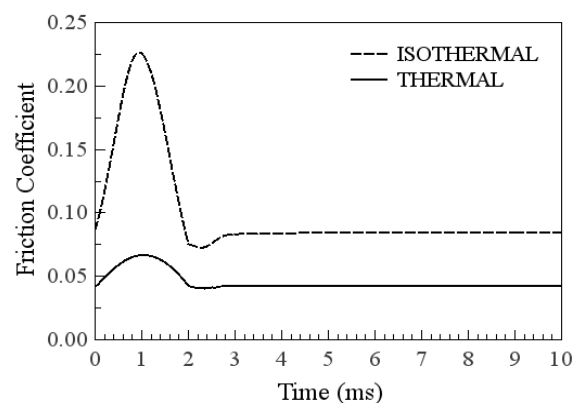
รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ที่สภาวะเริ่มต้น ($t = 0$ ms) ที่สภาวะที่ทรงกระบอกรับภาระที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสูงสุด ($t = 1.0$ ms) และที่สภาวะที่ภาระที่ทรงกระบอกได้รับ ลดลงสู่สภาวะเริ่มต้น ($t = 2.0$ ms)



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นที่เวลาต่างๆ เมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับเปลี่ยนแปลงตามเวลา

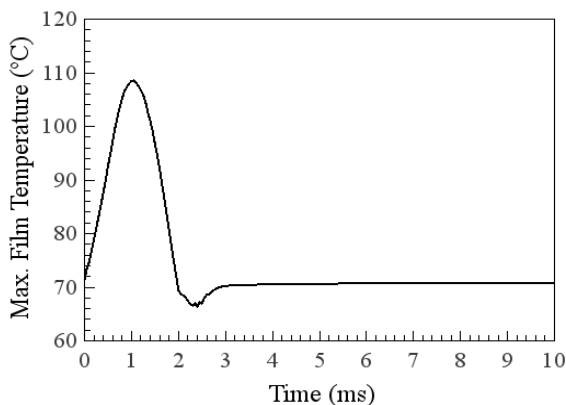


รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นที่เวลาต่างๆ เมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับเปลี่ยนแปลงตามเวลา



TSF-213

รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่เวลาต่างๆ เมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับ



เปลี่ยนแปลงตามเวลา

รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่เวลาต่างๆ เมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับเปลี่ยนแปลงตามเวลา

รูปที่ 5 รูปที่ 6 รูปที่ 7 และ รูปที่ 8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัส ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายและค่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับเปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่าเมื่อภาระกระทำกับทรงกระบอกซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา มีค่าเพิ่มขึ้นจากสภาวะเริ่มต้น ($t=0$ ms) ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระที่ทรงกระบอกได้รับทั้งในกรณีที่ไม่คิดผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น และในกรณีที่คิดผลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เป็นผลเนื่องจากภาระที่เพิ่มขึ้นของทรงกระบอกทำให้ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของฟิล์มสารหล่อลื่นและความเค้นเฉือนในชั้นฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นตาม

ความดันที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย ทั้งในกรณีที่ไม่นับผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น และในกรณีที่คิดผลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น เกิดขึ้นสูงสุดที่ตำแหน่งที่ที่สภาวะที่ทรงกระบอกรับภาระที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสูงสุด ($t = 1.0$ ms) โดยความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย มีค่าเท่ากับ (0.650 GPa, 0.226) ในกรณีที่ไม่นับผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย มีค่าเท่ากับ (0.771 GPa, 108.44 °C, 0.067) ในกรณีที่คิดผลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นตามลำดับ เมื่อภาระที่กระทำกับทรงกระบอกลดลงตามเวลา จนมีค่าเท่ากับภาระที่กระทำกับทรงกระบอกที่สภาวะเริ่มต้น ($t = 2.0$ ms) พบว่า ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่าลดลงตามภาระที่ทรงกระบอกได้รับ ทั้งในกรณีที่ไม่นับผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นและในกรณีที่คิดผลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น และมีค่าลดลงไปอีกจนกระทั่งมีค่าน้อยสุดที่เวลาเท่ากับ 2.40 ms จากนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งและปรับเข้าสู่สมดุลใหม่ โดยความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่าเท่ากับ (0.461 GPa, 0.074) ในกรณีที่ไม่นับผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่าเท่ากับ (0.491 GPa, 66.38 °C, 0.041) ในกรณีที่คิดผลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นตามลำดับ

เมื่อภาระที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งกระทำกับทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นน้อยสุดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในกรณีคิดผล

TSF-213

จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลง จนไปมีค่าน้อยสุดที่สภาวะที่ทรงกระบอกรับภาระที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสูงสุด ($t = 1.0 \text{ ms}$) เมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับลดลงตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเพิ่มขึ้นจากนั้นจึงมีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นกลับอีกครั้งก่อนปรับเข้าสู่สมดุลใหม่ ความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นน้อยสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ $1.362 \text{ }\mu\text{m}$ แต่ในกรณีไม่คิดผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นพบว่าในช่วงแรก ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าลดลง จากนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นจนไปมีค่าสูงสุดที่สภาวะที่ทรงกระบอกรับภาระที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสูงสุด ($t = 1.0 \text{ ms}$) เป็นผลเนื่องมาจากความหนืดของสารหล่อลื่นที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากความดันที่เพิ่มขึ้น จากภาระที่ทรงกระบอกได้รับเพิ่มขึ้น โดยความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นน้อยสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ $1.531 \text{ }\mu\text{m}$ เมื่อภาระที่ทรงกระบอกทำกับทรงกระบอกมีค่าลดลงตามเวลาความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าลดลง จนมีค่าน้อยสุดที่เวลาเท่ากับ 2.35 ms โดยความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นน้อยสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ $1.531 \text{ }\mu\text{m}$ จากนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นและปรับตัวเข้าสู่สมดุลใหม่

4. สรุปผลการคำนวณ

จากการจำลองผลพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮดรอลิกไดนามิกของทรงกระบอกในสภาวะไม่คงตัว ด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมแบบของไหลนิวโตเนียน สามารถสรุปได้ดังนี้

- ทรงกระบอกรับภาระที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเพิ่มขึ้นพบว่าความกว้างของการสัมผัส ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลง
- ทรงกระบอกรับภาระที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาลดลงพบว่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น และอุณหภูมิ

ของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับสภาวะเริ่มต้น

- เมื่อภาระกระทำกับทรงกระบอกซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่มีค่าเพิ่มขึ้น ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระที่ทรงกระบอกได้รับทั้งในกรณีที่ไม่นับผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น และในกรณีที่คิดผลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น
- เมื่อภาระที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งกระทำกับทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นน้อยสุดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในกรณีคิดผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงเมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับลดลงตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเพิ่มขึ้นจากนั้นจึงมีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นกลับอีกครั้งก่อนปรับเข้าสู่สมดุลใหม่

5. สัญลักษณ์

TSF-213

b	Semi-width of Hertzian contact under load, w'_0 , m,	$\bar{k}$	Dimensionless Thermal conductivity of lubricant
C_{RT}	Transient dimensionless curvature sum,	K_{T1}	Constant in Energy equation
C_{UT}	Transient dimensionless entrainment velocity,	K_{T2}	Constant in Energy equation
C_{WT}	Transient dimensionless load,	K_{T3}	Constant in Energy equation
$E_{1/2}$	Modulus of elasticity of roller No. 1 and roller No.2, Pa	p	Film pressure, pa
E'	Effective modulus of elasticity, Pa	P	Dimensionless film pressure
f	Friction coefficient	P_H	Maximum Hertzian pressure, pa
h	Lubricant film thickness, m	$r_{1/2}$	Radius of Roller No. 1 and Roller No.2, m
h_0	Central film thickness, m	$r_{01/02}$	Reference radius of roller No. 1 and roller No.2 , m
H	Dimensionless film thickness	R_X	Curvature sum, m
H_0	Dimensionless central film thickness	R_0	Reference curvature sum, m
Λ	Constant in Reynolds equation	t	Time, s
k	Thermal conductivity of lubricant, W/m-K	$\bar{t}$	Dimensionless time
k_0	Thermal conductivity of lubricant at ambient pressure, W/m-K	T	Film temperature, K
		$T_{1/2}$	Surface temperature of roller no.1 and roller no.2, K
		u	Lubricant film velocity, m/s
		$u_{1/2}$	Surface velocity of roller no.1 and roller no.2, m/s
		$\bar{u}$	Average surface velocity, m/s
		u_0	Reference surface velocity, m/s
		u^*	Dimensionless film velocity
		$w'_Z(t)$	Transient load, N/m
		w'_0	Reference load, N/m
		x	Coordinate, m
		X	Dimensionless coordinate

TSF-213

z	Dimensionless coordinate
Z	Dimensionless coordinate
Z_1	Viscosity-Pressure index
θ	Dimensionless film temperature
θ_1	Dimensionless surface temperature of roller no. 1
θ_2	Dimensionless surface temperature of roller no. 2
μ	Equivalent film viscosity, Pa-s
$\bar{\mu}$	Dimensionless equivalent film viscosity
μ_0	Inlet film viscosity, Pa-s
ρ	Density of lubricant, kg/m ³
ρ_0	Inlet density of lubricant, kg/m ³
$\bar{\rho}$	Dimensionless density of lubricant

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lee, R. and Hamrock, B.J. (1989). Squeeze and Entraining Motion in Nonconformal Line Contacts Part II: Elastohydrodynamic Lubrication, *ASME J. Tribol.*, vol. 111, 1989. pp. 8–16.
- [2] Khonsari, M. M., Wang, H. S. and Qi, Y.I. (1989). A Theory of Liquid-Solid Lubrication in Elastohydrodynamic Regime, *ASME J. Tribol.*, vol. 111, 1989. pp. 256–265.
- [3] Mongkolwongrojn M., Aiumpornsin C. and Thammakosol K. (2006). Theoretical Investigation in Thermoelastohydrodynamic Lubrication With Non-Newtonian Lubricants Under Sudden Load Change, *Journal of Tribology*, vol. 128, 2006. pp. 771–777.
- [4] สุนทรี รัตภาสกร และชนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว (2533). พฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกด้วยสารหล่อลื่นแบบของไหลนิวโตเนียน, *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, ฉบับที่ 2, ปีที่ 21, หน้า 93 - 99.

เนียน, *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, ฉบับที่ 2, ปีที่ 21, หน้า 93 - 99.

- [5] สุนทรี รัตภาสกร และชนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว (2533). ผลของความหยาบผิวต่อพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกที่สัมผัสแบบเส้นในสภาวะคงตัวด้วยสารหล่อลื่นนิวโตเนียน, *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ฉบับที่ 2, ปีที่ 27, หน้า 31 - 36.

- [6] Dowson, D. and Higginson, G.R. (1966). *Elastohydrodynamic Lubrication: The Fundamental of Roller and Gear Lubrication*, Pergamon, Oxford.

- [7] Roelands, C.J.A. (1969). *Correlational Aspects of the Viscosity-Temperature-Pressure Relationship of Lubricating Oils*, Druk: V.R.B., Groingen, Netherland.

- [8] Carslaw, J. W. and Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of Heat in Solids*, Oxford University Press.

- [9] Wang, S., Cusano C. and Conry, T. F. (1991). Thermal analysis of elastohydrodynamic lubrication of line contact using the Ree-Eyring fluid model, *Journal of Tribology*, vol. 113, 1991, pp. 232-244.