

พฤติกรรมแบบสถิตย์ของการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ของการสัมผัสแบบเส้น Static Characteristics of Elastohydrodynamic Lubrication under Line Contact

สมนึก ยะวงษ์¹, มงคล มงคลวงศ์โรจน์², เมธี ลิ้มกุล³

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ โครงการสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 E-mail: s5060606@kmitl.ac.th¹, Kmmongko@kmitl.ac.th²

Somnuk Yawong¹, Mongkol Mongkolwongrojn², Matee Limkul³

Department of Mechanical Engineering, ReCCIT, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

Tel: 0-2326-4197 Fax: 0-2326-4198 E-mail: s5060606@kmitl.ac.th¹, Kmmongko@kmitl.ac.th²

บทคัดย่อ

บทความนี้จะอธิบายถึงพฤติกรรมทางสถิตย์ของการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ที่มีการสัมผัสเป็นแบบเส้น โดยใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์และวิธีนิวตันราฟสันร่วมกันในการแก้สมการเรย์โนลด์ประยุกต์สำหรับการสัมผัสแบบเส้นและสารหล่อลื่นจะมีพฤติกรรมเป็นแบบนิวทอนเนียน โดยในการจำลองจะศึกษาถึงผลของความเร็ว, ภาระที่กระทำ, ความหนืดของสารหล่อลื่นและวัสดุที่ใช้ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองพบว่า เมื่อความเร็ว, ความหนืดและค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความดันของสารหล่อลื่นที่จุดสัมผัสมีค่าลดลงแต่ความหนาฟิล์มจะเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันถ้าเพิ่มภาระในการกระทำมากขึ้นจะส่งผลให้ความดันที่จุดสัมผัสสูงขึ้นความหนาฟิล์มลดลงและเมื่อเพิ่มค่าภาระที่กระทำหรือความเร็วในการหมุนจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานมีค่าสูงขึ้น ซึ่งลักษณะของความดันที่เกิดขึ้นหลังจากที่ผ่านจุดศูนย์กลางของการสัมผัสแล้วจะเกิดยอดหนามแหลมสูงขึ้นมาและลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งค่าความดันสูงที่สุดและความหนาฟิล์มจะบางที่สุด

Abstract

This paper presents the static characteristics of elastohydrodynamic lubrication under sliding line contact of two surfaces. The modified Reynolds equation and elastic equation were formulated for compressible Newtonian fluid between the surfaces. The finite differences with Newton's Raphson methods were used to calculate the static characteristics of the elastohydrodynamic lubrication. Pressure profile, film thickness profile and friction coefficient were calculated at various loads speed and surface material used. The results, show that the pressure increases significantly but the film thickness decreases due to the increase of viscosity at high load and high elastic modulus materials. The coefficient of friction

increase with the increase of load and speed. At severe condition the film pressure will be increase to approach the Hertzian contact pressure. At constant loads and velocity, the film pressure increases gradually at lubricant inlet and reaches the maximum pressure to form pressure spike at minimum film thickness.

1. บทนำ

ในการหล่อลื่นอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์จะใช้สมการเรย์โนลด์ประยุกต์, สมการความหนาฟิล์มที่พิจารณาการเปลี่ยนรูปของวัสดุ, สมการความสัมพันธ์ของค่าความหนืดกับความดัน และสมการบาลานซ์ภาระในการแก้สมการ สมการเรย์โนลด์ดังสมการที่ (1) เป็นสมการที่ใช้ในการอธิบายการเกิดความดันของของไหลในขณะของไหลไหลเป็นแผ่นบางโดยที่ของไหลนี้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลงตามทิศทางการไหล ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดความดันขึ้นในของไหล ในกรณีนี้ได้ประยุกต์สมการเรย์โนลด์กับสภาวะการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ของวัตถุทรงกระบอกสัมผัสเป็นเส้นตรง จะได้สมการเรย์โนลด์ประยุกต์ดังนี้ [1]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 12 \bar{u} \left(\frac{\partial(\rho h)}{\partial x} \right) \quad (1)$$

ทำการอินทิเกรตจะได้

$$\therefore \frac{\partial p}{\partial x} = 12 \bar{u} \eta \left(\frac{\rho h - \rho_m h_m}{\rho h^3} \right) \quad (2)$$

ทำสมการ (2) ให้เป็นตัวแปรแบบไร้หน่วย เมื่อ

$$\begin{aligned} P &= p_H \bar{P}_r & \rho &= \rho_0 \bar{\rho} & \eta &= \eta_0 \bar{\eta} \\ U &= \frac{\eta_0 \bar{u}}{E'R} & G &= \xi E' & W &= \frac{w_z}{E'R} \end{aligned}$$

$$x = R_x \left(\frac{8W'}{\pi} \right)^{1/2} X \quad h = \frac{8R_x W'}{\pi} H_r$$

$$p_H = E' \left(\frac{W'}{2\pi} \right)^{1/2} \quad \frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left(\frac{1-v_a^2}{2} + \frac{1-v_b^2}{2} \right)$$

จะได้สมการเรย์โนลด์ประยุกต์แบบไร้หน่วยดังนี้

$$\therefore \left(\frac{dP_r}{dX_r} \right)_i = \bar{K} \eta_i \left(\frac{\bar{\rho}_i H_{r,i} - \bar{\rho}_m H_{r,m}}{\rho_i H_{r,i}^3} \right), \quad \bar{K} = \frac{3U\pi^2}{4(W')^2} \quad (3)$$

2. การประยุกต์วิธีเชิงตัวเลข

ในการแก้สมการ (3) เป็นการพิจารณาปัญหาแบบ 1 มิติ ซึ่งจะแบ่งกริดของการสัมผัสออก 320 กริด เพื่อจะใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference scheme) แบบ Forward approximation ในการแก้สมการ โดยจะกำหนดให้จุดเริ่มที่ $X_{min} = -4.5$ และจุดสุดท้ายที่ $X_{max} = 1.5$ เราสามารถเขียนรูปแบบของความดัน ที่จุดต่อได้ดังนี้

$$\left(\frac{\partial P}{\partial X} \right)_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{\Delta X} \quad (4)$$

ในสมการเรย์โนลด์ประยุกต์เราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงตัวเลขได้โดยในเอกสารนี้จะพิจารณาเลือกวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ เพื่อแก้สมการหาค่าการกระจายความดันของน้ำมันที่เกิดจากการสัมผัส ทำการจัดรูปสมการ (3) ใหม่ ดังนี้

$$\therefore \bar{f}_i = H_{r,i}^3 (P_{i+1} - P_i) - \bar{K} \Delta \eta_i \left(H_{r,i} - \frac{\rho_m H_m}{\rho_i} \right) = 0 \quad (5)$$

สมการความหนาฟิล์มที่รวมผลจากการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความดันดังนี้ [2]

$$H_{r,i} = H_{r,0} + \frac{X_i^2}{2} - \frac{\Delta X}{2\pi} \sum_{j=1}^N P_j \ln \left(\left| \frac{X_{i+1} + X_i}{2} - X_j \right| \frac{X_{i-1} + X_i}{2} - X_j \right) \quad (6)$$

สมการความหนืดที่มีผลเปลี่ยนแปลงตามความดัน ดังนี้

$$\bar{\eta}_i = \exp \left[\ln(\eta_0) + 9.67 \left[-1 + \left(1 + 5.1 \times 10^{-9} p_H P_{r,i} \right)^{1/2} \right] \right] \quad (7)$$

สมการความหนาแน่นที่มีผลเปลี่ยนแปลงตามความดัน ดังนี้

$$\bar{\rho}_i = 1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p_H P_{r,i}}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p_H P_{r,i}} \quad (8)$$

สมการแสดงการบาลานซ์ภาระ

$$\int_{X_{r,min}}^{X_{r,end}} P_r dX = \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

จากสมการนิวตัน - ราฟสัน จะเห็นว่าแต่ละโนดที่พิจารณาจะมีรูปแบบดังนี้

$$\left[\frac{\partial f_i}{\partial \rho_m H_m} \right] [A(\rho_m H_m)]^0 + \sum_{j=2}^N \left(\frac{\partial f_i}{\partial P_{r,j}} \right) (AP_{r,j})^n + \left(\frac{\partial f_i}{\partial H_{r,o}} \right) (AH_{r,o})^n = -f_i^0 \quad (10)$$

ค่าคงที่ในการบาลานซ์ภาระแบบไร้หน่วย จะหาได้ดังนี้

$$\int_{X_{r,min}}^{X_{r,end}} (AP_r)^n dX = \frac{\pi}{2} - \int_{X_{r,min}}^{X_{r,end}} (P_r)^0 dX_r$$

$$= \frac{\pi}{2} - \sum_{j=2}^N C_j (AP_{r,j})^n \quad (11)$$

จากสมการ (5), (6), (7), (8) และ (9) ก็จะสามารถแก้สมการหาตัวแปรที่ไม่ทราบได้คือ

$$\rho_m H_{r,m}, H_{r,0}, P_{r,i}$$

นำตัวแปรต่างๆ มาแทนในสมการของเรย์โนลด์และแก้สมการด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน ดังนี้

$$(\rho_m H_{r,m})^n = (\rho_m H_{r,m})^0 + [A(\rho_m H_{r,m})]^n$$

$$P_{r,j}^n = P_{r,j}^0 + (AP_{r,j})^n \quad (12)$$

$$H_{r,o}^n = H_{r,o}^0 + (AH_{r,o})^n$$

จัดรูปแบบแบบเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \rho_m H_{r,m}} & \frac{\partial f_1}{\partial P_{r,2}} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial P_{r,N}} & \frac{\partial f_1}{\partial H_{r,0}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \rho_m H_{r,m}} & \frac{\partial f_2}{\partial P_{r,2}} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial P_{r,N}} & \frac{\partial f_2}{\partial H_{r,0}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial \rho_m H_{r,m}} & \frac{\partial f_N}{\partial P_{r,2}} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial P_{r,N}} & \frac{\partial f_N}{\partial H_{r,0}} \\ 0 & C_1 & \dots & C_N & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(\rho_m H_{r,m})^n \\ \Delta(P_{r,2})^n \\ \vdots \\ \Delta(P_{r,N})^n \\ \Delta(H_{r,o})^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_1^0 \\ -f_2^0 \\ \vdots \\ -f_N^0 \\ \Delta W' \end{bmatrix} \quad (13)$$

เมื่อ

$$\frac{\partial f_i}{\partial H_{r,0}} = 3H_{r,i}^2 (P_{i+1} - P_i) - \Delta X \bar{K} \eta_i \quad (14)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial (\rho_m H_{r,m})} = \frac{\Delta X \bar{K}}{\rho_i} \quad (15)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial P_j} = H_{r,i}^3 (\delta(i+1, j) - \delta(i, j)) + (P_{i+1} - P_i) \left(3H_{r,i}^2 \left(\frac{\partial H_{r,i}}{\partial P_j} \right) - \Delta X \bar{K} A \right) \quad (16)$$

เมื่อ

$$A = \left[\eta_i \left(\frac{\partial H_{r,i}}{\partial P_j} \right) + H_{r,i} \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial P_j} \right) - \eta_i \left[\frac{\rho_i \Delta \rho_m H_m - \rho_m H_m \frac{\partial \rho_i}{\partial P_j}}{\rho_i^2} \right] - \frac{\rho_m H_m}{\rho_i} \frac{\partial \eta_i}{\partial P_j} \right]$$

โดยที่ $\frac{\partial H_{r,i}}{\partial P_j}, \frac{\partial \eta_i}{\partial P_j}, \frac{\partial \rho_i}{\partial P_j}$ จะหาได้ดังนี้

$$\frac{\partial H_{r,i}}{\partial P_j} = -\frac{\Delta X}{2\pi} \ln \left(\left| \frac{X_{i+1} + X_i}{2} - X_j \right| \frac{X_{i-1} + X_i}{2} - X_j \right) \quad (17)$$

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial P_j} = \exp \left[\ln(\eta_0) + 9.67 \left[-1 + \left(1 + 5.1 \times 10^{-9} p_H P_{r,i} \right)^{1/2} \right] \right] \left[\ln \eta_0 + 9.67 \right] (Z_i) \left(1 + 5.1 \times 10^{-9} p_H P_{r,i} \right)^{1/2-1} (5.1 \times 10^{-9} p_H) \delta(i, j) \quad (18)$$

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial P_j} = \frac{0.6 \times 10^{-9} p_H \delta(i, j)}{\left(1 + 1.7 \times 10^{-9} p_H P_{r,i} \right)^2} \quad (19)$$

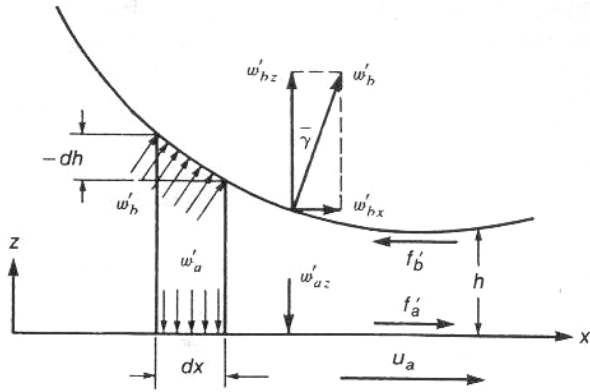
สมการแสดงการสมมูลความดันเริ่มต้นในการคำนวณ จะให้มีการกระจายความดันแบบเอิร์ท [4] ดังนี้

$$P_{r,i} = \sqrt{1 - X^2} \quad (20)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบดังนี้

$$P = 0 \text{ ที่ } X_{in}$$

$$P = 0, \frac{dP}{dX} = 0 \text{ ที่ } X_{out} \quad (21)$$



รูปที่ 1 แสดงแรงเฉือนและภาระที่กระทำต่อวัสดุ

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าแรงเฉือนที่กระทำต่อทรงกระบอกและพื้นที่หน่วยความกว้างดังสมการ (22)

$$f'_a = \int (\tau)_{z=0} dx = \int \left(\eta \frac{du}{dz} \right)_{z=0} dx \quad (22)$$

โดยที่

$$\eta \frac{du}{dz} = \frac{2z - h}{2} \frac{dp}{dx} - \frac{\eta(u_a - u_b)}{h} \quad (23)$$

ดังนั้น จากสมการ (22) จะได้ว่า

$$f'_a = - \int \left[\frac{h}{2} \frac{dp}{dx} + \frac{\eta(u_a - u_b)}{h} \right] dx \quad (24)$$

และแรงในแนวเฉียงจะหาได้ดังนี้

$$w'_{bx} = \int h \frac{dp}{dx} dx \quad (25)$$

ทำให้สมการ (25) เป็นแบบไร้มิติ จะได้

$$W'_{bx} = \frac{w'_{bx}}{ER_x}$$

$$= 2 \left(\frac{2W}{\pi} \right)^{3/2} \int H_r \frac{dP_r}{dX_r} dX_r \quad (26)$$

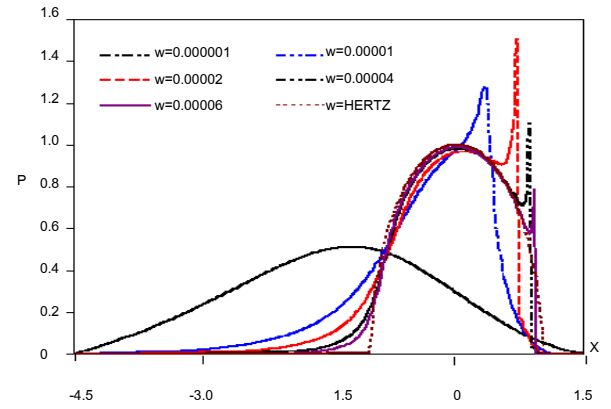
ทำสมการ (24) ให้เป็นแบบไร้มิติจะได้

$$F'_a = \frac{f'_a}{ER_x} = - \frac{W'_{bx}}{2} - \left(\frac{u_a - u_b}{u_a + u_b} \right) U \left(\frac{\pi}{2W} \right)^{1/2} \int \frac{\bar{\eta}}{H_r} dX_r \quad (27)$$

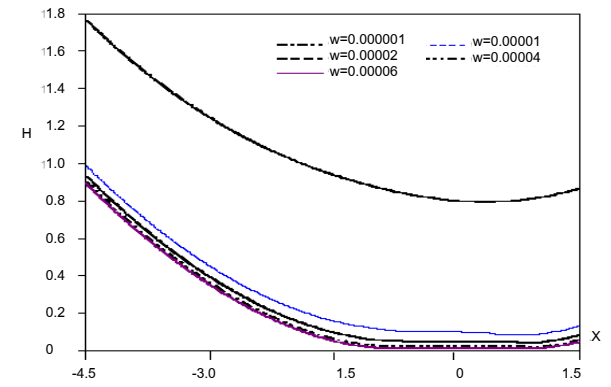
ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของทรงกระบอกจะหาได้ดังนี้

$$\mu = - \frac{F'_a}{W} \quad (28)$$

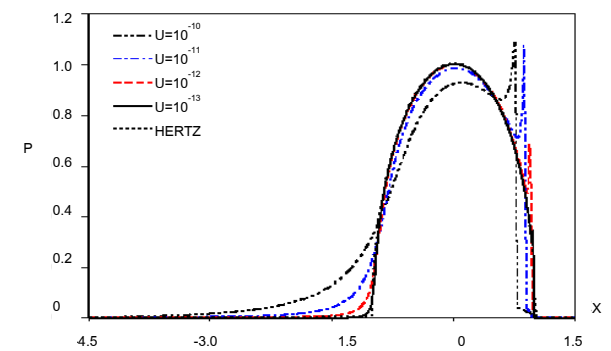
3. วิเคราะห์ผลจากการจำลอง



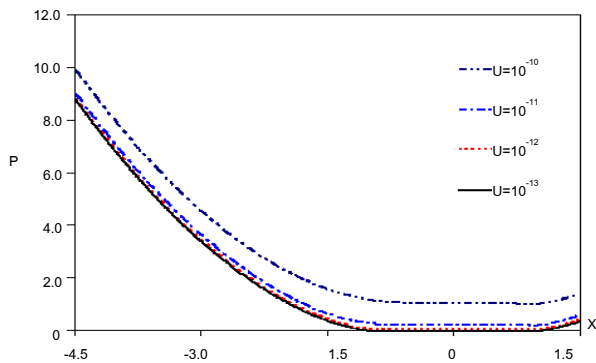
รูปที่ 2 การกระจายความดันเมื่อภาระที่กระทำเปลี่ยนแปลงที่ความเร็วคงที่, $U = 1 \times 10^{-11}$



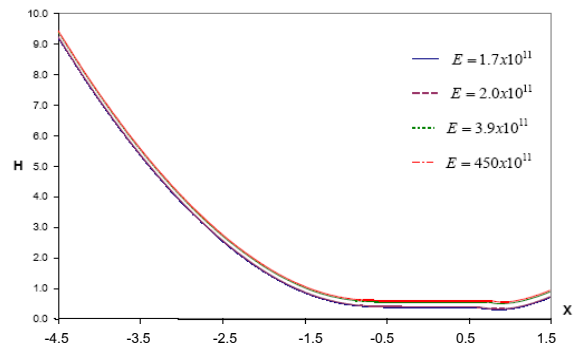
รูปที่ 3 การกระจายความหนาฟิล์มเมื่อภาระที่กระทำเปลี่ยนแปลงที่ความเร็วคงที่, $U = 1 \times 10^{-11}$



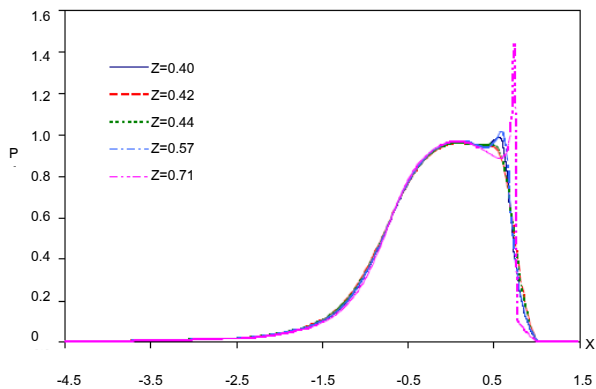
รูปที่ 4 การกระจายความดันเมื่อความเร็วเปลี่ยนแปลงและค่าภาระคงที่, $W = 4 \times 10^{-5}$



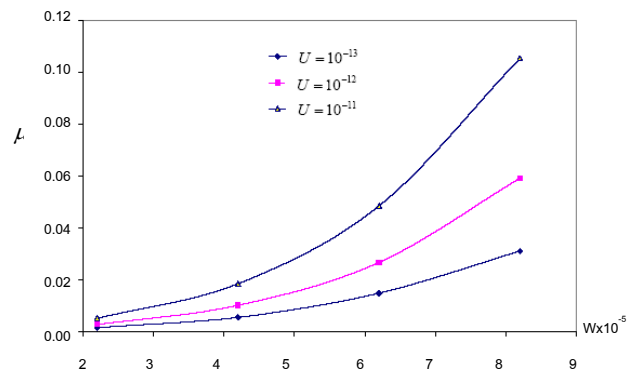
รูปที่ 5 การกระจายความหนาฟิล์มเมื่อความเร็วเปลี่ยนแปลง
และค่าภาระคงที่, $W = 4 \times 10^{-5}$



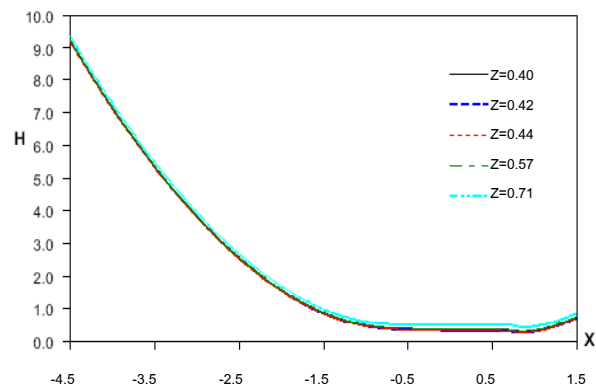
รูปที่ 9 การกระจายความหนาฟิล์มเมื่อค่าวัสดุเปลี่ยนแปลง



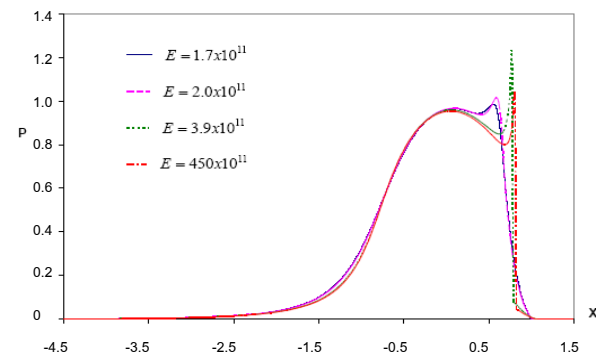
รูปที่ 6 การกระจายความหนาฟิล์มเมื่อความหนืดเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 10 ค่าความเร็วและภาระที่กระทำที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์
แรงเสียดทาน



รูปที่ 7 การกระจายความหนาฟิล์มเมื่อความหนืดเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 8 การกระจายความหนาฟิล์มเมื่อค่าวัสดุเปลี่ยนแปลง

กำหนดข้อมูลเริ่มต้น

- ค่าความเร็วเปลี่ยนแปลงและค่าภาระคงที่ (ศึกษาผลจากความเร็ว)

$$U = 10^{-10}, 10^{-11}, 10^{-12}, 10^{-13}$$

$$W = 4 \times 10^{-5}$$

- ค่าภาระเปลี่ยนแปลงและค่าความเร็วคงที่ (ศึกษาผลจากภาระ)

$$W = 10^{-6}, 10^{-5}, 2 \times 10^{-5}, 4 \times 10^{-5}, 6 \times 10^{-5}$$

$$U = 1 \times 10^{-11}$$

- ค่าความหนืดเปลี่ยนโดยค่าความเร็วและภาระคงที่

$$z_1 = 0.4, 0.42, 0.44, 0.57, 0.71$$

$$U = 10^{-11}, W = 2 \times 10^{-5}$$

- ค่าวัสดุเปลี่ยนแปลง โดยค่าความเร็วและภาระคงที่

$$E = 170 \times 10^{11}, 200 \times 10^{11}, 390 \times 10^{11}, 450 \times 10^{11}$$

$$U = 1 \times 10^{-11}, W = 2 \times 10^{-5}$$

- ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยภาระและความเร็วเปลี่ยนแปลง

$$U = 10^{-11}, 10^{-12}, 10^{-13}$$

$$W = [2 \times 10^{-5}, 8 \times 10^{-5}]$$

$$\text{ค่าวัสดุของโลหะผสม } E = 2 \times 10^{11} \text{ Pa.}$$

$$\text{ค่าความหนืดสัมบูรณ์ ของ C-ether } \eta_o = 0.029$$

$$\text{ค่าดัชนีความดัน - ความหนืด ของ C-ether } z_1 = 0.57$$

$$\text{ค่าความผิดพลาด} = 10^{-6}$$

$$\text{ขอบเขตการคำนวณ } X_a = -4.5, X_b = 1.5$$

$$\text{จำนวนโนดที่ใช้ } N = 320 \therefore \Delta X = 0.01875$$

จากการแก้สมการเรย์โน้ดที่ประยุกต์ที่จำลองการสัมผัสของวัตถุทรงกระบอกสัมผัสเป็นเส้นตรง โดยมีการหล่อเส้นแบบฮิสโตไดโครไดนามิกส์ จากการฟรู่ที่ 4 ความดันที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเข้าใกล้จุดศูนย์กลางของการสัมผัสและจะลดลงเมื่อผ่านจุดศูนย์กลาง กลางของการสัมผัส แต่บริเวณใกล้ทางออกจะเกิดความดันสูงอีกครั้งและลดลงอย่างรวดเร็ว (Pressure Spike) ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนรูปของทรงกระบอกและจากการเปลี่ยนความเร็วจะเห็นว่าเมื่อขนาดของความเร็วลดลงจะทำให้ความดันมีค่าสูงขึ้นขณะเดียวกัน ขนาดของความหนาฟิล์มก็จะลดลง และยอดแหลมของความดันที่เกิดขึ้นตอนทางออกก็ลดลงเช่นกัน และเมื่อทำการลดขนาดความเร็วลงเรื่อยๆ จะทำให้ความหนาของฟิล์มบางมากและลักษณะการกระจายของความดันก็จะคล้ายกับลักษณะการสัมผัสแบบเอิร์ท ดังรูปที่ 5 และจากรูปที่ 2 และ 3 จะเห็นว่าที่ภาระน้อยๆ จะมีการกระจายความดันที่ไม่สูงนักและไม่เกิดความดันขึ้นที่ทางออกขณะเดียวกันความหนาของฟิล์มก็จะหนาคล้ายกับการหล่อเส้นแบบไฮโดรไดนามิกส์ เนื่องจากว่าไม่มีการเสียรูปของทรงกระบอกและเมื่อทำการเปลี่ยนค่าภาระที่กระทำต่อทรงกระบอกให้สูงขึ้นก็จะมีผลทำให้ลักษณะของการกระจายความดันมีค่าสูงขึ้นและความหนาของฟิล์มก็จะบางมาก ที่ค่าภาระ $W = 6 \times 10^{-5}$ ลักษณะการกระจายของความดันที่ได้จะคล้ายกับของการสัมผัสแบบเอิร์ท สำหรับค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ความดันลดลงแต่ความหนาฟิล์มจะมากขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความเร็วสูงขึ้นและภาระมากขึ้น สำหรับรูปที่ 6 และ 7 เป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืด เมื่อความหนืดสูงขึ้นค่าความดันจะลดลงแต่ความหนาฟิล์มจะหนาขึ้น และรูปที่ 8 และ 9 เป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนวัสดุที่มีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นมากขึ้น ค่าความดันจะเพิ่มขึ้นและความหนาฟิล์มจะลดลง สำหรับรูปที่ 10 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงขึ้นตามค่าภาระและความเร็วที่เพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องมาจากชั้นฟิล์มมากขึ้นจึงทำให้แรงเสียดทานมากขึ้นจากการเปรียบเทียบผลที่จำลองได้กับผลการจำลองของดอร์สัน[3] ก็มีลักษณะพฤติกรรมที่คล้ายกัน

4. บทสรุป

ค่าภาระจะมีผลต่อขนาดของความดันและความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้น เมื่อค่าภาระมีค่าสูงๆก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นมากขึ้น และลักษณะการกระจายของความดันจะคล้ายกับของการสัมผัสแบบเอิร์ท

1. ค่าความเร็วในการหมุนของทรงกระบอกก็จะมีผลต่อขนาดของความดันและความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นเมื่อค่าความเร็วลดลงก็จะทำให้ความหนาฟิล์มบางลงและความดันเพิ่มขึ้นและลักษณะการกระจายของความดันจะคล้ายกับของการสัมผัสแบบเอิร์ท
2. ค่าความดันจะลดลงแต่ความหนาฟิล์มจะมากขึ้น เมื่อค่าความหนืดและวัสดุเพิ่มขึ้น
3. ค่าความดันจะลดลงแต่ความหนาฟิล์มจะมากขึ้นเมื่อค่าโมดูลัสของวัสดุมากขึ้น

4. ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานจะมากขึ้นเมื่อความเร็วและภาระที่กระทำมีค่าสูงขึ้น
5. ในการคำนวณทางเชิงตัวเลขจะเข้าสู่คำตอบซ้ำหากขนาดของภาระที่กระทำสูง, ค่าความเร็วต่ำ, ค่าความหนืดต่ำ และค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นต่ำ

5. สัญลักษณ์

a	ของแข็ง a (Plate)
b	ของแข็ง b (Roller)
C_j	ค่าแฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก ในสมการ (11)
E'	ค่าโมดูลัสสัมบูรณ์ของวัสดุ, $Pa.(N/m^2)$
E_a	ค่าโมดูลัสของวัสดุ a, $Pa.(N/m^2)$
E_b	ค่าโมดูลัสของวัสดุ b, $Pa.(N/m^2)$
F'_a	แรงแบบไร้มิติที่กระทำกับของแข็ง a
f'_a	แรงที่กระทำกับของแข็ง a, N .
G	ตัวแปรไร้หน่วยของวัสดุ, $\xi E'$
$H_{r,o}$	ค่าคงที่ของแบบไร้หน่วยสำหรับการสัมผัสแบบเส้น
$H_{r,i}$	ค่าความหนาฟิล์มแบบไร้มิติที่ตำแหน่ง i
h	ค่าความหนาฟิล์ม, m .
$\bar{K}$	ค่าคงที่, $3\pi^2 U / 4(W')^2$
$P_{r,i}$	ค่าความดันแบบไร้หน่วย
P_H	ค่าความดันสูงสุดของเออร์เซียน $Pa.(N/m^2)$
p	ค่าความดัน $Pa.(N/m^2)$
R_x	คาร์ตีสที่สัมผัส ในทิศทางแกน x, m .
U	ค่าความเร็วของการสัมผัสแบบไร้หน่วย, $\eta_0 \bar{u} / (E' R_x)$
$\bar{u}$	ค่าความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน $X, (u_a + u_b) / 2, m/s$.
u_a	ค่าความเร็วที่ผิวสัมผัส a, m/s .
u_b	ค่าความเร็วที่ผิวสัมผัส b, m/s .
v	อัตราส่วนของปัวซอง
W'	ค่าภาระที่กระทำแบบไร้หน่วย, $w_z / E' R_x$
W'_{bx}	ค่าภาระที่กระทำต่อของแข็ง b แบบไร้หน่วย
w_z	ค่าภาระที่กระทำในแนวตั้งฉากต่อหน่วยความกว้าง, N/m .
$X_{r,i}$	ค่าแนวแกน X แบบไร้หน่วยของการสัมผัสแบบเส้น
$X_{r,min}$	ค่าแนวแกน X แบบไร้หน่วยของการสัมผัสแบบเส้นที่จุดเริ่มคำนวณกริด $X_{r,min} = -4.5$
$X_{r,max}$	ค่าแนวแกน X แบบไร้หน่วยของการสัมผัสแบบเส้นที่จุดเริ่มคำนวณกริด $X_{r,max} = 1.5$
z	ค่าแนวแกนความสูงจากผิวสัมผัส a ไปยังผิว b
z_1	ค่าดัชนีของความหนืด - ความดัน แบบไร้มิติ
ζ	ค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืด - ความดัน, m^2 / N
ρ	ค่าความหนาแน่น, $N \cdot s^2 / m^4$
ρ_m	ค่าความหนาแน่น เมื่อ $dP/dX = 0, Ns^2 / m^4$
H_m	ค่าความหนาฟิล์มแบบไร้หน่วย สำหรับการสัมผัสแบบเส้น เมื่อ $dP/dX = 0$

ρ_0	ค่าความหนาแน่น เมื่อ $P = 0, Ns^2 / m^4$
$\bar{\rho}$	ความหนาแน่นแบบไร้หน่วย ρ / ρ_0
η_0	ค่าความหนืดสัมบูรณ์ ที่ $P = 0$ และ ค่าอุณหภูมิคงที่ $Pa.s$ (or $N.s / m^2$)
η	ค่าความหนืดสัมบูรณ์, $Pa \cdot s$
$\bar{\eta}$	ค่าความหนืดสัมบูรณ์แบบไร้มิติ $\frac{\eta}{\eta_0}$
ΔX	ค่าช่วงความยาวที่แบ่งแนวแกน X
μ	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
$\delta(i, j)$	ค่าคงที่จากการเปรียบเทียบแรงดัน ถ้า $i = j, \delta = 1$ และ $i \neq j, \delta = 0$
τ	ค่าความเค้นเฉือน, Pa .

เอกสารอ้างอิง (Reference)

- [1] Bernard J. Hamrock, "Fundamentals of fluid film lubrication", 1994
- [2] H. Okamura, "A Contribution to the Numerical Analysis of Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication", Tribology of Reciprocating Engines. D. Dowson et al. (eds) Butterworths, Guilford, England, pp 313-320, 1982
- [3] Dawson, D., and Higison, G.R., Elastohydrodynamic Lubrication, "The Fundament of Roller and Gear Lubrication". Pergamon Oxfor, 1996
- [4] Bernard J. Hamrock and Jacobson, B.O. "Elastohydrodynamic Lubrication of Line Contacts". ASLE Trans., vol. 24, no.4, pp.275-287.1984