

พฤติกรรมทางทฤษฎีของการหล่อขึ้นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกของ วัสดุอ่อนด้วยอากาศ

เจษฎา พานิชกรณ์ และ ขนิษฐา วงษ์ลีดาแก้ว*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมการหล่อขึ้นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกของวัสดุอ่อนที่มีการสัมผัสแบบเส้น เมื่อใช้อากาศเป็นสารหล่อขึ้นและคิดผลของการเลื่อนไหลของโมเลกุลของชั้นอากาศ โดยใช้ระเบียบวิธีคณิตศาสตร์เชิงตัวเลขร่วมกับระเบียบวิธีมัลติกริด แก๊สการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์และสมการการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพื่อหาการกระจายของความดันฟิล์มอากาศและความหนาฟิล์มของฟิล์มอากาศ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงภาวะที่กระทำกับทรงกระบอกและความเร็วผิวของทรงกระบอก จากการจำลองผลพบว่าความหนาฟิล์มอากาศน้อยสุดเกิดขึ้นที่บริเวณทางออกของการสัมผัส ความดันของฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความหนาของฟิล์มอากาศน้อยสุดและความหนาของฟิล์มอากาศที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัสมีค่าลดลง เมื่อภาวะที่ทรงกระบอกได้รับเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วผิวของทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มอากาศน้อยสุดและความหนาของฟิล์มอากาศที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : อิลาสโตไฮโดรไดนามิก, การหล่อขึ้นด้วยอากาศ, การสัมผัสเป็นเส้น, สมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์, วัสดุอ่อน

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: khanitthaw@kmutnb.ac.th รับเมื่อ 5 กรกฎาคม 2556 ตอบรับเมื่อ 11 กันยายน 2556

Theoretical Investigation of Elastohydrodynamic Lubrication of Soft Material with Air Lubricant

Jesda Panichakorn and Khanittha Wongseedakeaw *

Abstract

This paper presented the elastohydrodynamic lubrication of soft material with air lubricant in line contact under the effect of air molecular slip. The time independent modified Reynolds equation and elastic equations were formulated for compressible fluid. The Newton-Raphson method and multigrid method were implemented to obtain the air film pressure and air film thickness profiles in the contact region at various loads and speeds. The simulation results showed the minimum air film thickness reaches at the exit of the contact region. The maximum air film pressure increases but the minimum air film thickness and central air film thickness decrease when the applied load increases. For increasing of surface speed, the minimum air film thickness and central air film thickness increases.

Keywords : Elastohydrodynamic, Air lubrication, Line contact, Modified Reynolds equation, Soft material

Combustion Technology and Alternative Energy Research Centre (CTAE), College of Industrial Technology, King Mongkut
University of
Technology North Bangkok.

* Corresponding author, E-mail: khanitthaw@kmutnb.ac.th Received 5 July 2013, Accepted 11 September 2013

1. บทนำ

พฤติกรรมการหล่อลื่นของวัสดุอ่อนเช่น ซิลิโคน ระบบ นิวเมติก การทำงานของซิลสามารถจำลองเป็นการหล่อลื่นโดยใช้อากาศเป็นสารหล่อลื่น แต่วัสดุที่ใช้ทำซิล เป็นวัสดุที่มี Modulus of Elasticity น้อยหรืออาจเรียกว่าวัสดุอ่อน จึงจำเป็นต้องคิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุด้วย Hayashi [1] ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของคุณสมบัติทางพลวัตของการหล่อลื่นด้วยก๊าซภายใต้สภาวะที่ Knudsen Number มีค่าสูง โดยใช้สมการหล่อลื่นที่อยู่บนพื้นฐานของสมการ โบลทซ์แมน (Boltzmann equation) และนำการวิเคราะห์ดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับสมการประมาณค่าการรั่วไหล Chang [2] ศึกษาการไหลของอากาศระหว่างแผ่นฟิล์มกับโรลเลอร์ พบว่าความหนาของฟิล์มอากาศมีค่าอยู่ระหว่าง 1-10 ไมโครเมตร ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวเรียกว่า Air Elastohydrodynamic Lubrication (Air-EHL) Hashimoto [3] ได้ทำการคำนวณหาความหนาของชั้นอากาศระหว่างลูกกลิ้งและแผ่นฟิล์มที่กำลังเคลื่อนที่โดยคำนวณจากสมการเรย์โนลด์ (Reynolds equation) และผลจากการคำนวณทางตัวเลขได้ถูกนำมาเขียนเป็นโมเดลเพื่อประมาณค่าความหนาของฟิล์มอากาศ และได้ทำการทดลองยืนยันผลของการประมาณค่าความหนาฟิล์มอากาศจากโมเดล Wongseedakaew [4-5] ได้นำเสนอพฤติกรรมการหล่อลื่นของวัสดุอ่อน พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าน้อยมากจนสามารถคิดเป็นพฤติกรรมการหล่อลื่นที่ไม่คิดผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น Lubrecht [6] ได้นำเสนอเทคนิคมัลติกริด ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน สำหรับ

การแก้ปัญหา EHL จากนั้นเทคนิคมัลติกริดถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหา TEHL โดย Osborn [7]

บทความนี้ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกของวัสดุอ่อนที่มีการสัมผัสแบบเส้น โดยสมมติให้อากาศเป็นก๊าซในอุดมคติ และคิดผลจากการเลื่อนไถลของโมเลกุลของชั้นอากาศด้วยการใช้สมการเรย์โนลด์ประยุกต์ร่วมกับสมการการเสียรูปของวัสดุ

2. ทฤษฎีการหล่อลื่นด้วยอากาศ

การจำลองผลพฤติกรรมการหล่อลื่นของอากาศแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกของวัสดุอ่อน และไม่คิดผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศเมื่อพิจารณาผลของการเลื่อนไถลของโมเลกุลของชั้นอากาศ

2.1 สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์

พฤติกรรมของการหล่อลื่นของอากาศแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกอธิบายได้จากสมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ เกิดจากการรวมสมการสองสมการ ได้แก่ สมการนาเวีย-สโต๊ก (Navier-Stokes equation) และสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) โดยของไหลเป็นแบบอัดตัวได้ (Compressible fluid) เมื่ออากาศเป็นของไหลนิวโตเนียนในสภาวะคงตัวที่สัมผัสเป็นเส้น

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

เมื่อสมมติให้อากาศมีคุณสมบัติเป็นก๊าซในอุดมคติ และพิจารณาผลจากการเลื่อนไถลของโมเลกุลของชั้นอากาศ จะได้

$$\frac{p}{p_a} = \frac{\lambda_a}{\lambda} \quad \text{และ} \quad K_N = \frac{\lambda_a}{h_a} \quad (2)$$

จะได้ว่า

$$\lambda = \frac{K_N p_a h_a}{p} \quad (3)$$

เมื่อพิจารณาผลของการเลื่อนไหลของโมเลกุลของชั้นอากาศ จะได้ความสัมพันธ์ของความหนืดของอากาศ [8]

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + (6K_N p_a h_a / ph)} \quad (4)$$

โดยที่

λ_a = Free molecular length,

K_N = Knudsen Number

เมื่อ

$K_N < 0.001$ = Continuous flow

$0.01 \leq K_N < 15$ = Slip flow

$K_N > 15$ = Molecular flow

แทนค่าจากสมการ (2), (3) และ (4) ในสมการ (1) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\rho h^3}{12\mu_0} \left(1 + \frac{6K_N p_a h_a}{ph} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \right\} = \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} (\rho h) \quad (5)$$

จัดรูปสมการให้อยู่ในรูปไร้มิติ โดยที่ตัวแปรไร้มิติคือ

$$x = bX, \quad p = p_a P \quad \text{และ} \quad h = \left(\frac{b^2}{R_x} \right) H$$

แทนค่าตัวแปรไร้มิติลงในสมการ (5) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\Psi \frac{\partial P}{\partial X} \right) = \Lambda \frac{\partial}{\partial X} (PH) \quad (6)$$

โดยที่

$$\Psi = PH^3 \frac{\partial}{\partial X} \left\{ 1 + 6 \left(\frac{\lambda_a R_x}{b^2} \right) \left(\frac{1}{PH} \right) \right\}$$

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

เงื่อนไขขอบสำหรับสมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์

$$P(X_{inlet}) = P(X_{exit}) = 1.0 \quad \text{และ} \quad \left(\frac{\partial P}{\partial X} \right)_{X=X_{exit}} = 0$$

2.2 สมการความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่น

สมการความหนาฟิล์มของอากาศขึ้นอยู่กับลักษณะกายภาพและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของทรงกระบอกและแผ่นเรียบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น ในรูปแบบไร้มิติ

$$H = H_0 + \frac{X^2}{2R_x} - \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(X') \ln |X - X'| dX' \quad (7)$$

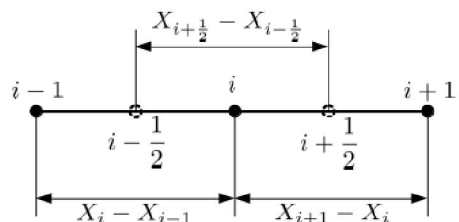
2.3 สมการสมดุลแรง

ภาระที่กระทำกับผิวสัมผัสจะเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำผ่านฟิล์มอากาศ ในรูปแบบไร้มิติ

$$\int_{-\infty}^{\infty} \{P(X) - 1\} dX = \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

3. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

สมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์ เป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้นสูงจึงได้ประยุกต์ใช้ วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสันมาใช้ในการแก้สมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์ โดยทำการแบ่งโหนดออกเป็นได้ดังรูป 1



รูปที่ 1 ขนาดความกว้างระหว่างโหนด

การศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดให้ความกว้างระหว่างโนดเท่ากัน

$$X_{i+1} - X_i = X_i - X_{i-1} = \Delta X$$

กระจายสมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์(6) ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเนื่องร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน จะได้ว่า

$$F(P_i) = \frac{\Psi_{i+\frac{1}{2}}(P_{i+1} - P_i) - \Psi_{i-\frac{1}{2}}(P_i - P_{i-1})}{\Delta X} - \Lambda \{ (PH)_i - (PH)_{i-1} \} \quad (9)$$

เมื่อ

$$\Psi_{i+\frac{1}{2}} = \frac{\Psi_{i+1} + \Psi_i}{2} \text{ และ } \Psi_{i-\frac{1}{2}} = \frac{\Psi_i + \Psi_{i-1}}{2}$$

เมื่อประยุกต์ระเบียบวิธีนิวตันราฟสันกับสมการเรย์โนลด์เพื่อหาคำคำตอบจะได้ว่า

$$\left(\frac{\partial F_{P_i}}{\partial P_i} \right) \{ \Delta P_i \} = - \{ F_{P_i} \} \quad (10)$$

ทำการคำนวณซ้ำจนกระทั่ง

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

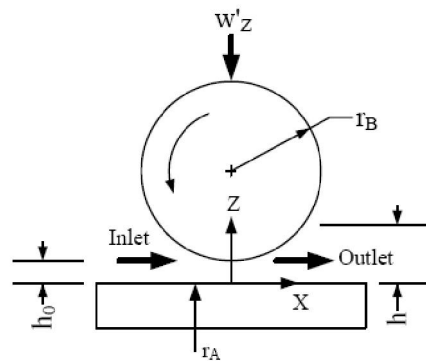
$$\left| 1 - \frac{2}{\pi} \int_{X_{inlet}}^{X_{exit}} [P(X) - 1] dx \right| \leq 0.0001$$

4. ผลการคำนวณ

คุณสมบัติของทรงกระบอก แผ่นเรียบ และอากาศที่ใช้ในบทความนี้ แสดงตามตารางที่ 1 และพิกัดที่ใช้ในการจำลองผลแสดงดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุ

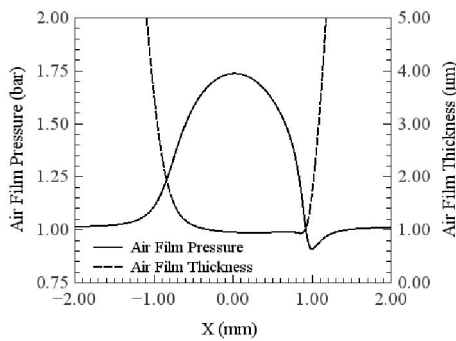
คุณสมบัติของวัสดุ	แผ่นเรียบ	ทรงกระบอก
Modulus of Elasticity (GPa)	200.0	0.005
Poisson ratio	0.30	0.40
Air viscosity, Pa-s	1.789 x 10 ⁻⁵	



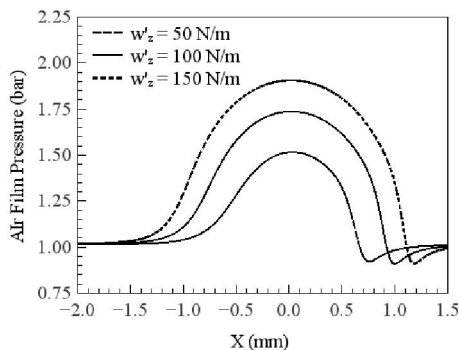
รูปที่ 2 พิกัดที่ใช้ในการจำลองผล

การจำลองผลพฤติกรรมการหล่อลื่นของอากาศแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกที่มีการสัมผัสแบบเส้นของวัสดุอ่อน ระหว่างทรงกระบอกกับแผ่นเรียบเมื่อไม่เกิดผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มอากาศ และพิจารณาผลของการเลื่อนไหลของโมเลกุลของชั้นอากาศที่รัศมีของทรงกระบอกเท่ากับ 35 mm และแผ่นเรียบไม่มีการเคลื่อนที่ ความเร็วผิวของทรงกระบอกเท่ากับ 10 m/s ภาวะที่ทรงกระบอกและแผ่นเรียบได้รับเท่ากับ 100 N/m พบว่าความดันของฟิล์มอากาศในช่วงการสัมผัสมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ ความดันของฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจากบริเวณทางเข้าจนมีความดันสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้กับจุดกึ่งกลางของการสัมผัส โดยมีค่าความดันของฟิล์มอากาศสูงสุดเท่ากับ 1.737 บาร์ โดยเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง X = +0.027 mm จากนั้นความดันจึงมีค่าลดลงจนมีค่าน้อยสุดที่บริเวณทางออก

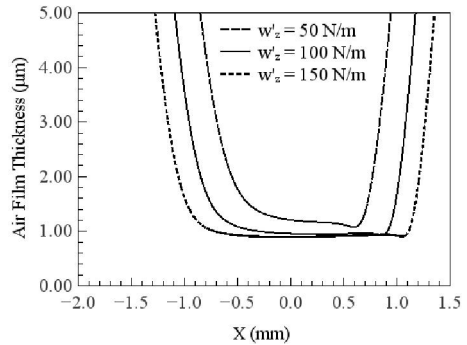
ของการสัมผัส ที่ตำแหน่ง $X = +1.001 \text{ mm}$ โดยมีค่าความดันฟิล์มอากาศน้อยสุดเท่ากับ 0.909 บาร์ และมีความดันเพิ่มขึ้นจนมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ความหนาของฟิล์มอากาศในช่วงการสัมผัสมีความหนาใกล้เคียงกัน เป็นผลเนื่องจากลักษณะของกายภาพและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเนื่องจากความดันของฟิล์มอากาศและความหนาฟิล์มน้อยสุดเกิดขึ้นที่บริเวณทางออกของการสัมผัส โดยมีความหนาฟิล์มน้อยสุดเท่ากับ $0.938 \text{ }\mu\text{m}$ ที่ตำแหน่ง $X = +0.852 \text{ mm}$ แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงความดันและความหนาของฟิล์มอากาศภายใต้ช่วงสัมผัส เมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับเท่ากับ 100 N/m ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 10 m/s



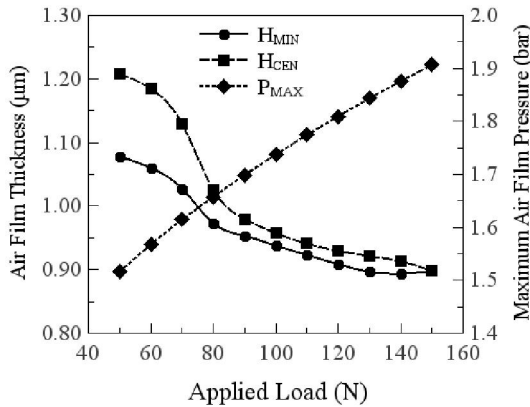
รูปที่ 4 แสดงความดันของฟิล์มอากาศภายใต้ช่วงสัมผัสเมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับเท่ากับ 50 N/m 100 N/m และ 150 N/m ที่ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 10 m/s



รูปที่ 5 แสดงความหนาของฟิล์มอากาศภายใต้ช่วงสัมผัสเมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับเท่ากับ 50 N/m, 100 N/m และ 150 N/m ที่ความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 10 m/s

เมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับเพิ่มขึ้น พบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและความกว้างของการสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลง แสดงดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ความดันของฟิล์มอากาศสูงสุดและความหนาของฟิล์มอากาศน้อยสุดในช่วงสัมผัส มีค่าเท่ากับ 1.516 บาร์และ 1.078 μm เมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับมีค่าเท่ากับ 50 N/m 100 N/m และ 150 N/m ความดันของฟิล์มอากาศสูงสุดและความหนาของฟิล์มอากาศน้อยสุดในช่วงสัมผัสมีค่าเท่ากับ 1.737 บาร์และ 0.938 μm และ 1.906 บาร์และ 0.898 μm ตามลำดับ

รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาของฟิล์มอากาศน้อยสุด ความหนาฟิล์มอากาศที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัส และความดันฟิล์มอากาศสูงสุดในช่วงสัมผัสเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่ทรงกระบอกได้รับ พบว่าความดันของฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาของฟิล์มอากาศน้อยสุด และความหนาของฟิล์มอากาศที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัสมีค่าลดลงเมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับเพิ่มขึ้น

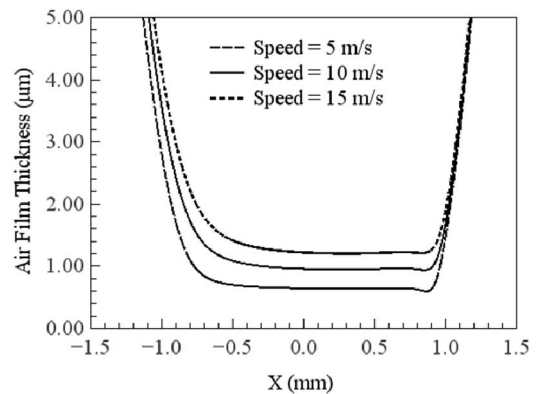


รูปที่ 6 แสดงความหนาของฟิล์มอากาศน้อยสุด ความหนาฟิล์มอากาศที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัส และความดันฟิล์มอากาศสูงสุด ในช่วงสัมผัสเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่ทรงกระบอกได้รับที่ความเร็วของทรงกระบอก เท่ากับ 10 m/s

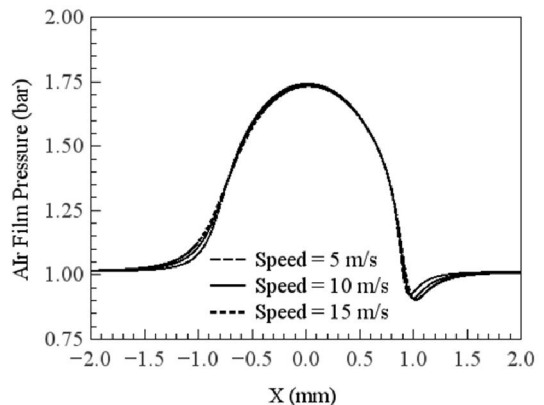
ความเร็วผิวของทรงกระบอกเพิ่มขึ้น พบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและความกว้างของการสัมผัสมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากเนื่องจากภาระที่กระทำกับทรงกระบอกมีค่าคงที่แต่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มอากาศน้อยสุดในช่วงสัมผัสมีค่าเท่ากับ 1.078 µm, 1.078 µm และ 1.078 µm เมื่อความเร็วผิวของทรงกระบอกมีค่าเท่ากับ 5 m/s, 10 m/s และ 15 m/s ตามลำดับ เป็นผลมาจากอัตราการใช้ของฟิล์มอากาศระหว่างผิวสัมผัสของทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วของผิวของทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8

เมื่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาของฟิล์มอากาศน้อยสุด ความหนาฟิล์มอากาศที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัส และความดันฟิล์มอากาศสูงสุดในช่วงสัมผัส เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วผิวของทรงกระบอก พบว่า

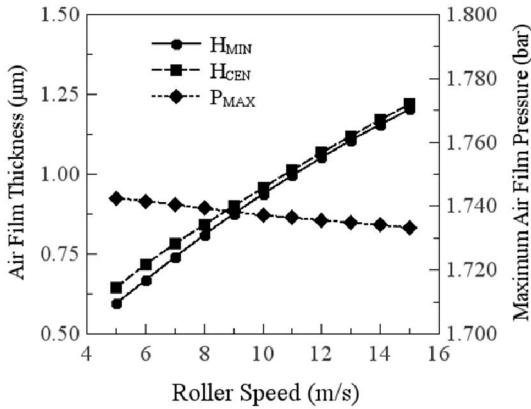
ความดันของฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าลดลงแต่ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดที่ลดลงมีค่าน้อยมาก ความหนาของฟิล์มอากาศน้อยสุดและความหนาของฟิล์มอากาศที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วผิวของทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 7 แสดงความดันของฟิล์มอากาศภายใต้ช่วงสัมผัสเมื่อความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 5 m/s, 10 m/s และ 15 m/s ที่ภาระทรงกระบอกได้รับเท่ากับ 100 N/m



รูปที่ 8 แสดงความหนาของฟิล์มอากาศภายใต้ช่วงสัมผัสเมื่อความเร็วของทรงกระบอกเท่ากับ 5 m/s, 10 m/s 15 m/s ที่ภาระทรงกระบอกได้รับเท่ากับ 100 N/m



รูปที่ 9 แสดงความหนาของฟิล์มอากาศน้อยสุด ความหนาฟิล์มอากาศที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัส และความดันฟิล์มอากาศสูงสุด ภายใต้ช่วงสัมผัสเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของทรงกระบอก ที่ภาระทรงกระบอกได้รับเท่ากับ 100 N/m

5. สรุปผล

การจำลองผลพฤติกรรมการหล่อลื่นของอากาศแบบ อีลาสโตไฮโดรไดนามิกที่มีการสัมผัสแบบเส้นของวัสดุอ่อนด้วยอากาศเมื่อพิจารณาผลของการเลื่อนไถลของโมเลกุลของชั้นอากาศ พบว่าความดันของฟิล์มอากาศในช่วงการสัมผัสมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ โดยที่ความดันสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้กับจุดกึ่งกลางของการสัมผัส ความหนาฟิล์มอากาศน้อยสุดเกิดขึ้นที่บริเวณทางออกของการสัมผัส เมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับเพิ่มขึ้นความดันของฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาของฟิล์มอากาศน้อยสุด และความหนาของฟิล์มอากาศที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัสมีค่าลดลง และเมื่อความเร็วผิวของทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มอากาศน้อยสุดและความหนาของฟิล์มอากาศที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น

6. สัญลักษณ์

- b = Semi-width of Hertzian contact, m
- $b = R_x (8w'_z / \pi)^{1/2}$
- E' = Equivalent modulus of elasticity, Pa
- $E' = \frac{2}{(1-\nu_A^2) / E_A} + \frac{2}{(1-\nu_B^2) / E_B}$
- E_A = Elastic Modulus of Plate, Pa
- E_B = Elastic Modulus of Roller, Pa
- h = Air film thickness, m
- h_0 = Central air film thickness, m
- H = Dimensionless air film thickness
- $H = \frac{h}{(b^2 / R_x)}$
- H_0 = Dimensionless central air film thickness
- $H_0 = \frac{h^0}{(b^2 / R_x)}$
- p = Air film pressure, Pa
- p_a = Ambient pressure, Pa
- P = Dimensionless air film pressure
- $P = \frac{p}{p_a}$
- r_A = Radius of plate, m
- r_B = Radius of roller, m
- R_x = Curvature sum, m
- $\frac{1}{R_x} = \frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B}$
- u_A = Surface velocity of plate, m/s
- u_B = Surface velocity of roller, m/s
- \bar{u} = Average surface velocity, m/s
- $\bar{u} = \frac{u_A + u_B}{2}$
- w'_z = Applied load, N/m
- x = Coordinate x axis, m

X = Dimensionless coordinate

$$X = \frac{x}{b}$$

U_A = Poisson's ratio of plate

U_B = Poisson's ratio of roller

μ = Equivalent air viscosity, Pa

μ_0 = Inlet air viscosity, P

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Hayashi, "Dynamic characteristics of gas-lubricated slider bearings under high Knudsen number conditions", *Trans. ASME Journal of Technology* 112, 1990, pp. 111-118.
- [2] Y.B. Chang, F.W. Chambers and J.J. Shekton Chang, "Elastohydrodynamic lubrication of air-lubricated rollers", *ASEM J. Tribology* 118, 1996, pp. 623-628.
- [3] H. Hashimoto, "Experimental study of porous foil bearings for web-handling", *Tribology International* 33, 2000, pp. 191-196.
- [4] K. Wongseedakaew, "Transient thermo elastohydrodynamic lubrication of rough surface in soft material", *Advanced Materials Research* 651, 2013, pp 505-510.
- [5] K. Wongseedakaew, "Elastohydrodynamic lubrication of rough surface in soft material", *The Journal of Industrial Technology* 9, 2013, (in Thai).
- [6] A.A. Lubrecht, W.E. Napel and R. Bosma, "Multigrid and alternative method for calculating film thickness and pressure profiles in elastohydro-dynamically lubricated line contacts", *ASME Journal of Tribology* 108, 1986, pp. 551-556.
- [7] F.K. Osborn and F. Sadeghi, "Time dependent line ehd lubrication using the multigrid/multi-level technique", *ASME J. Tribology* 114, 1992, pp. 68-74.
- [8] M. Zhang, S. Yu, J. Liu, and B. Liu, "Flying height adjustment by slider's air bearing surface profile control", *Journal of Applied Physics*, 97, 2005, p.10P309.