

การหล่อลื่นของรองลื่นกันรุนแบบขั้นบันได

Hydrodynamic Lubrication of Step Type Thrust Bearing

ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว^{1*}, เจษฎา พานิชกรณ² และ ประกาศิต ธิปัตติ³

^{1,2,3} ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

*ติดต่อ: khanitthaw@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมการหล่อลื่นของรองลื่นกันรุนแบบขั้นบันได (Step Type) ด้วยน้ำมันหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมแบบของไหลนิวโตเนียน เมื่อไม่คิดผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ น้ำมันหล่อลื่นและอยู่ในสภาวะคงตัว โดยประยุกต์ระเบียบวิธีผลต่างสลับเชิงเส้นและระเบียบวิธีนิวตัน -ราฟสัน ร่วมกับระเบียบวิธีมัลติกริด เพื่อแก้สมการเรย์โนลด์ส หากการกระจายของความดันฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นและความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่รองลื่นกันรุนได้รับ ความเร็วของเพลลาและความสูงของแผ่นเรียบที่เป็นขั้นบันได จากการจำลองพบว่าเมื่อความเร็วในการหมุนของเพลลาเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของภาระที่รองลื่นกันรุนได้รับพบว่าความดันของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมีค่าลดลง ความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความดันฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นสูงสุดมีค่าลดลง เมื่อความสูงของแผ่นเรียบที่เป็นขั้นบันไดมีค่าน้อยกว่า 0.025 mm จากนั้นความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมีค่าลดลง เมื่อความสูงของแผ่นเรียบที่เป็นขั้นบันไดมีค่าเพิ่มขึ้น

คำหลัก: การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก, รองลื่นกันรุนแบบขั้นบันได, ระเบียบวิธีผลต่างสลับเชิงเส้น

Abstract

This paper presents the performance characteristics with film thickness and film pressure profiles of step type thrust bearing with Newtonian lubricant. The isothermal Reynolds equation was formulated and solved numerically using finite difference, Newton-Raphson and multigrid methods. The effects of applied loads, shaft speeds and thrust step height are examined. The simulation results show the film thickness increases when shaft speed increases. When applied load increases, film thickness decreases but film pressure increases. For increasing of thrust step height, first, the minimum film thickness increases but the maximum film pressure increases when the thrust step height is less than 0.025 mm then the minimum film thickness decreases when the thrust step height increases.

Keywords: Hydrodynamic lubrication, Taper-Land type thrust bearing, Multigrid method.

1. บทนำ

ปัจจุบันเครื่องจักรถูกผลิตให้มีขนาดเล็กแต่สามารถทำงานได้เร็ว มีความผิดพลาดในการทำงานน้อย ระยะห่างระหว่างชิ้นส่วนต่างๆ มีค่าน้อย จึง

จำเป็นต้องใช้ รองลื่นกันรุนป้องกันไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวของเพลลาตามแนวแกนเกินค่าที่ออกแบบไว้ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ต่างๆ

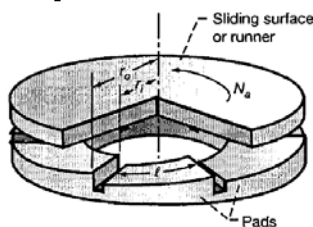
CST-187

การศึกษาการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกมีความสลับซับซ้อนมากสมการที่ใช้มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง Rathish, et al[1] และ Yürüsoy and Bayrakceken[2] ได้นำเสนอการหาคำตอบด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เพื่อหาพฤติกรรมของการหล่อลื่น พฤติกรรมการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกแบบแผ่นเอียงถูกนำเสนอโดย ขนิษฐา[3] พบว่าเมื่อภาระที่รองรับกันรุนได้รับเพิ่มขึ้น ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลง เพื่อลดเวลาการจำลองผล Lubrecht, et al[4] และ Goodyer, et al[5] นำเสนอวิธีมัลติกริดที่มีประสิทธิภาพ เพื่อลดระยะเวลาการคำนวณ

บทความนี้ศึกษาการทำงานของรองรับกันรุนมีพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกเมื่อไม่พิจารณาผลของอุณหภูมิสารหล่อลื่นและสารหล่อลื่นมีพฤติกรรมเป็นของไหลนิวโตเนียนเมื่อเปลี่ยนแปลงตัวแปร ภาระที่รองรับกันรุนได้รับ ความเร็วรอบของเพลลา และความสูงของส่วนที่เป็นขั้นบันได เพื่อหาความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อทำการเปลี่ยน เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์และศึกษาการยืดอายุการใช้งานรองรับกันรุนให้มีอายุการใช้งานได้นานที่สุด

2. ทฤษฎี

ลักษณะของแผ่นรองรับกันรุนแบบแผ่นเอียงและลักษณะการลอยตัวเมื่อรับภาระของแผ่นรองรับกันรุน ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะของแผ่นรองรับกันรุน

2.1 สมการโมดิฟาย์เรย์โนลด์

จากสมการนาเวียร์-สโตก ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนกับอัตราการ

เปลี่ยนแปลงของความดัน ตามฟังก์ชันของสารหล่อลื่นนิวโตเนียน เมื่อไม่คิดผลของ body force เป็นไปตามความสัมพันธ์

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (pr) = \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} \text{ และ } \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial r} \quad (1)$$

$$\text{เมื่อ } \tau_{rz} = \mu \frac{\partial u_r}{\partial z} \text{ และ } \tau_{\theta z} = \mu \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \quad (2)$$

จะได้สมการเรย์โนลด์ตามฟังก์ชัน ในสภาวะคงตัว ในรูปแบบไร้มิติ ดังสมการ

$$\frac{\partial}{\partial R} \left(H^3 \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (PR) \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(H^3 \frac{1}{R} \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) = \Lambda \frac{1}{R} \frac{\partial H}{\partial \theta} \quad (3)$$

$$\text{เมื่อ } \Lambda = \frac{6\omega r_o^2 \mu}{S_H^2 P_{MAX}}$$

$$P_{MAX} = \frac{\mu \omega r_o^2 (\theta_{out} - \theta_{in})}{S_H^2}$$

โดยมีเงื่อนไขขอบสมการเรย์โนลด์

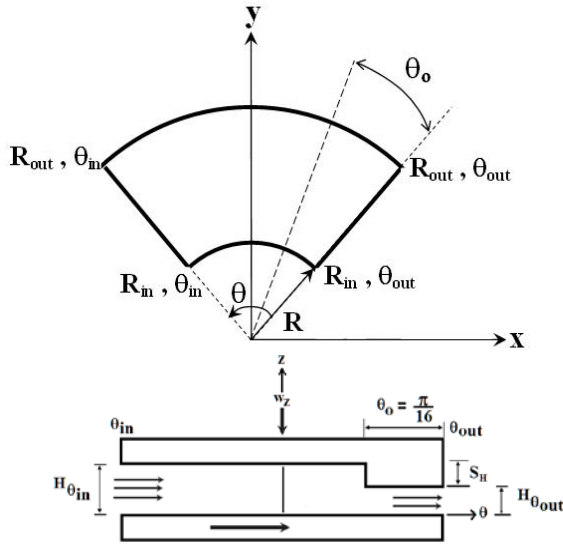
$$P(R_{in}, \theta) = P(R_{out}, \theta) = \left(\frac{\partial P}{\partial R} \right)_{R_{out}} = 0$$

$$P(R, \theta_{in}) = P(R, \theta_{out}) = \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \right)_{\theta_{out}} = 0$$

2.2 สมการความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่น

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรองรับกันรุนเนื่องจากความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ดังนั้นความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นจึงขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของผิวแผ่นรองรับกันรุน ฟังก์ชันที่ใช้ในการจำลองผล แสดงดังรูปที่ 2

CST-187



รูปที่ 2 พิกัดที่ใช้ในการจำลองผลแผ่นรองลื่นกันรุน

จะได้ว่า ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \theta \leq \theta_0, H_{R,\theta} &= 1 + H_{\theta_{out}} \\ \theta > \theta_0, H_{R,\theta} &= H_{\theta_{out}} \end{aligned} \quad (4)$$

2.3 สมการสมดุลแรง

บทความนี้จำลองการทำงานของรองลื่นกันรุนที่มีแผ่นรองลื่นกันรุนจำนวน 6 แผ่นโดยกำหนดให้แผ่นรองลื่นกันรุนแต่ละแผ่นรับภาระเท่ากัน ดังนั้นภาระที่กระทำกับแผ่นรองลื่นกันรุนแต่ละแผ่นเท่ากับผลรวมของภาระที่กระทำเนื่องจากความดันที่กระทำต่อสารหล่อลื่น

$$\int_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} \int_{R_{in}}^{R_{out}} PR dR d\theta = \frac{W_z}{6r_o^2 P_{MAX}} \quad (5)$$

3. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ประยุกต์ใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน กับสมการเรย์โนลด์และสมการสมดุลแรง เพื่อหาคำตอบของสมการเรย์โนลด์ ทำการคำนวณซ้ำจนกระทั่ง

$$\begin{aligned} \frac{\sum_{R_{in}}^{R_{out}} \sum_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} |P(R,\theta)^{k+1} - P(R,\theta)^k|}{\sum_{R_{in}}^{R_{out}} \sum_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} |P(R,\theta)^{k+1}|} &\leq 0.0001 \text{ และ} \\ \left| 1 - \frac{6r_o^2 P_{MAX}}{W_z} \int_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} \int_{R_{in}}^{R_{out}} PR dR d\theta \right| &\leq 0.0001 \end{aligned}$$

4. การจำลองผล

การศึกษาการหล่อลื่นของรองลื่นกันรุน ขนาดของรองลื่นกันรุนแสดงตามตารางที่ 1 และคุณสมบัติของสารหล่อลื่นแสดงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ขนาดของรองลื่นกันรุน

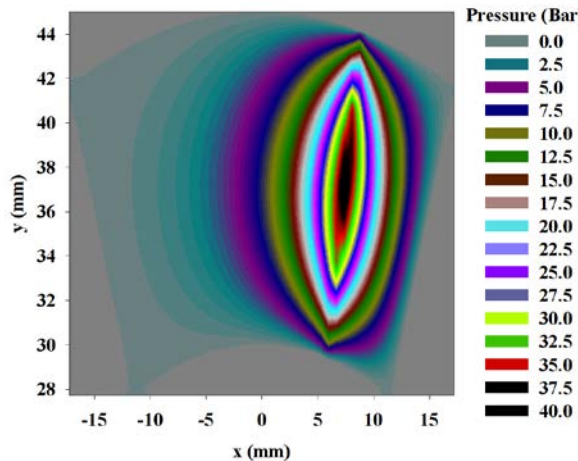
มิติของรองลื่นกันรุน	ขนาด
รัศมีวงใน, r_{in}	35 mm
รัศมีวงนอก, r_{out}	45 mm
มุมทางเข้า, θ_{in}	$-\pi/8$ rad
มุมทางออก, θ_{out}	$+\pi/8$ rad
ความยาวของส่วนที่เป็นขั้นบันได, θ_0	$\pi/16$ rad

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสารหล่อลื่น

คุณสมบัติของสารหล่อลื่น	หน่วย
ความหนาแน่น, ρ	834 kg/m ³
ความหนืด, μ	0.0698 Pa-s

จากการจำลองผลเมื่อภาระที่รองลื่นกันรุนได้รับ (w_z) เท่ากับ 2,000 N เฟลาหมุนด้วยความเร็ว 3,000 rpm ที่ความสูงของส่วนที่เป็นขั้นบันได (S_H) เท่ากับ 0.05 mm พบว่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น จนมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งแผ่นรองลื่น กันรุนมีเปลี่ยนเป็นขั้นบันได เนื่องจากการเปลี่ยนลักษณะของแผ่นรองลื่นกันรุนแบบขั้นบันได ดังนั้นค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าเป็นศูนย์ที่บริเวณทางออกของแผ่นรองลื่นกันรุน โดยความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 41.12 บาร์ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเท่ากับ 18.08 μ m แสดงดังรูปที่ 3

CST-187



รูปที่ 3 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นของแผ่นรองลื่นกันรุน

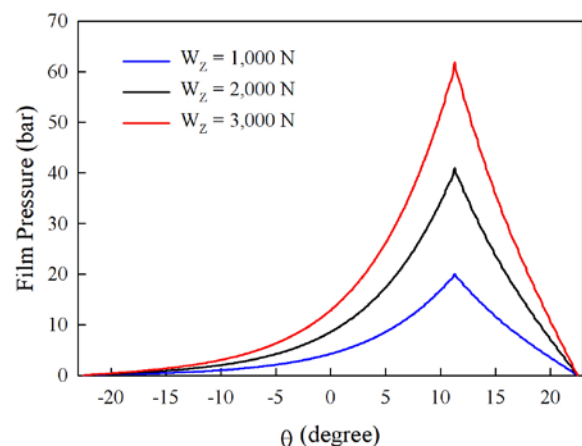
รูปที่ 4 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นรองลื่น เมื่อภาระที่รองลื่นกันรุนรับภาระเท่ากับ 1,000 N, 2,000 N และ 3,000 N พบว่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นที่อยู่ภายใต้ผิวของรองลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงเมื่อภาระที่แผ่นรองลื่นได้รับเพิ่มขึ้น โดยความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด มีค่าเท่ากับ (20.16 บาร์ และ 34.99 μm), (41.12 บาร์ และ 18.04 μm) และ (62.20 บาร์ และ 9.59 μm) เมื่อภาระที่รองลื่นกันรุนได้รับเท่ากับ 1,000 N, 2,000 N และ 3,000 N ตามลำดับ

รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดและความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่รองลื่นกันรุนได้รับ พบว่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าลดลง แต่ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อภาระที่แผ่นรองลื่นได้รับเพิ่มขึ้น

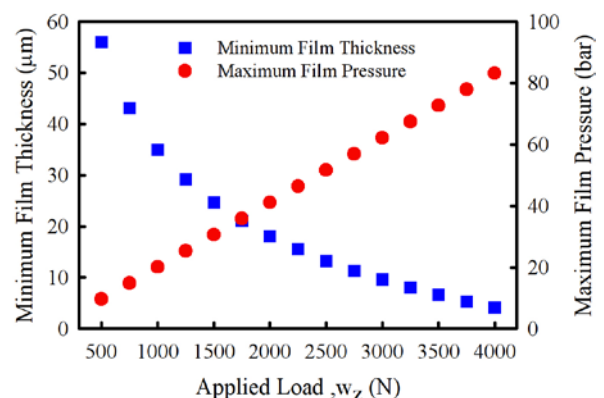
การกระจายของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นรองลื่นกันรุน เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลากับ 1,500 rpm, 3,000 rpm และ 4,500 rpm ตามลำดับ พบว่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยความดัน

ฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าลดลงแต่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น จากอัตราการไหลของสารหล่อลื่นที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลามีค่าเพิ่มขึ้น โดยความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด มีค่าเท่ากับ (41.60 บาร์ และ 4.12 μm), (41.12 บาร์ และ 18.04 μm) และ (40.74 บาร์ และ 27.57 μm) เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลากับ 1,500 rpm, 3,000 rpm และ 4,500 rpm ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 6

รูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดและความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุนของเพล่าพบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าลดลงแต่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลามีค่าเพิ่มขึ้น

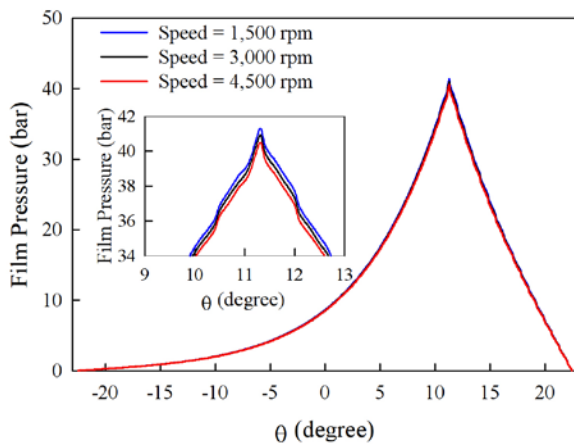


รูปที่ 4 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นรองลื่นกันรุน เมื่อภาระที่รองลื่นเท่ากับ 1,000 N, 2,000 N และ 3,000 N

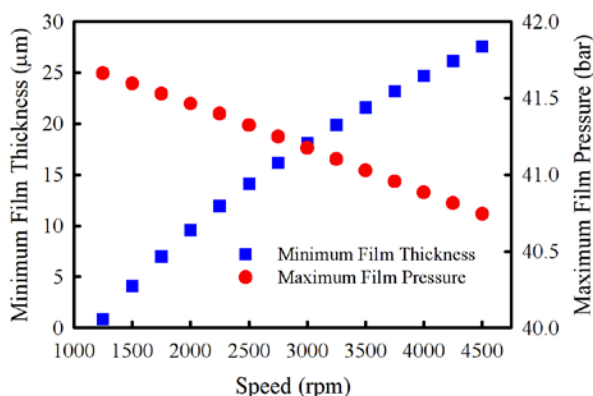


CST-187

รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดและความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่รองรับกันรับ



รูปที่ 6 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลาคือ 1500 rpm, 3,000 rpm และ 4,500 rpm



รูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดและความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุนของเพลาคือ

การกระจายของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นที่อยู่ใต้แผ่นรองรับกันรับที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นรองรับกันรับ เมื่อความสูงของส่วนที่เป็นชั้นบันได (S_H) มีค่าเท่ากับ 0.03 mm, 0.05 mm และ 0.07 mm แสดงดังรูปที่ 8 เมื่อความสูงของส่วนที่เป็นชั้นบันไดมีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งแผ่นรองรับกันรับมีลักษณะเป็นชั้นบันไดมีค่าเพิ่มขึ้นจากลักษณะความไม่ต่อเนื่องของการไหล ส่งผลให้ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลง โดยความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด (P_{MAX}) และความหนาของ

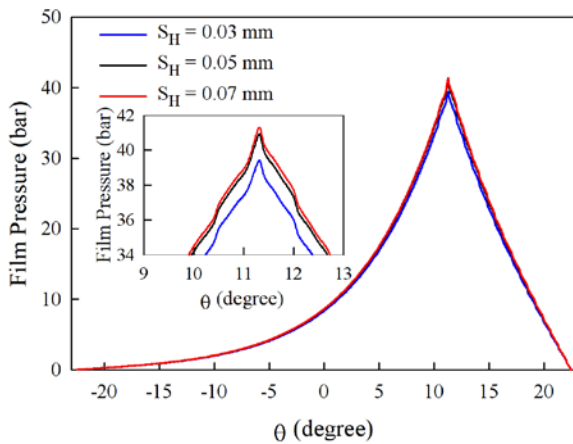
ฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด มีค่าเท่ากับ (37.00 บาร์ และ 26.60 μm), (41.12 บาร์ และ 18.04 μm) และ (41.58 บาร์ และ 6.28 μm) เมื่อความสูงของส่วนที่เป็นชั้นบันได (S_H) มีค่าเท่ากับ 0.03 mm, 0.05 mm และ 0.07 mm ตามลำดับ

รูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดและความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงแบบชั้นบันไดของแผ่นรองรับกันรับ (S_H) พบว่าเมื่อความสูงแบบชั้นบันไดของแผ่นรองรับกันรับ (S_H) มีค่าน้อยๆ ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น สูงสุด (P_{MAX}) มีค่าสูง แต่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าน้อย เนื่องจากความสามารถในการรับภาระของแผ่นรองรับกันรับขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลของสารหล่อลื่นที่ไหลผ่านแผ่นรองรับกันรับ ดังนั้นแผ่นรองรับกันรับที่เป็นแบบชั้นบันไดที่มีความสูงแบบชั้นน้อยๆ มีลักษณะเกือบจะเป็นแผ่นเรียบซึ่งมีความสามารถในการรับภาระได้ต่ำ เมื่อแผ่นรองรับกันรับรับภาระทำให้ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าสูงแต่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าน้อย เมื่อความสูงแบบชั้น บันไดของแผ่นรองรับกันรับ (S_H) มีค่าเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงการลักษณะการไหลของสารหล่อลื่นที่ไหลผ่านแผ่นรองรับกันรับมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลง ส่งผลให้ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น

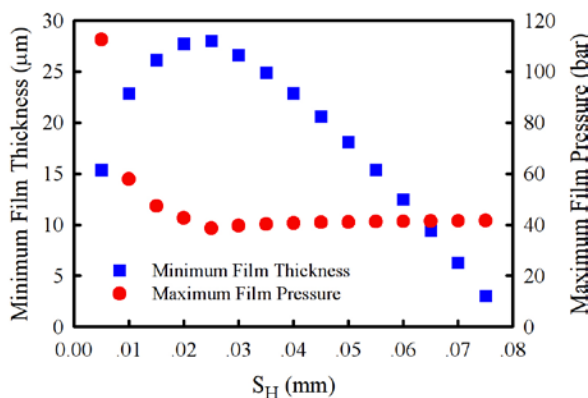
เมื่อความสูงแบบชั้น บันไดของแผ่นรองรับกันรับ (S_H) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.025 mm ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด (P_{MAX}) มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อย แต่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าสูงสุด เมื่อความสูงแบบชั้นของแผ่นรองรับกันรับ (S_H) มีค่าเพิ่มขึ้นอีก ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าลดลง เนื่องจากการรับภาระของแผ่นรองรับกันรับส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณส่วนที่ไม่ได้เป็นพื้นที่ชั้นบันไดและระยะห่างของแผ่นรองรับกันรับกับเพลามีค่าค่อนข้างคงที่ ทำให้เมื่อความสูงแบบชั้น บันไดของแผ่นรองรับกันรับ (S_H) มีค่าเพิ่มขึ้นบริเวณด้านหลังของ

CST-187

แผ่นรองลื่นกันรุน จึงทำให้ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่บริเวณทางออกของแผ่นรองลื่นกันรุนมีค่าลดลง



รูปที่ 8 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นรองลื่นกันรุน เมื่อความสูงแบบขึ้นของแผ่นรองลื่นกันรุน (S_H) เท่ากับ 0.03 mm, 0.05 mm และ 0.07 mm



รูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดและความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงแบบขึ้นของแผ่นรองลื่นกันรุน (S_H)

5. สรุปผล

จากการจำลองผลพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของของรองลื่นกันรุนแบบเอียงและแผ่นเรียบ จะได้ว่า

1. ความหนาของฟิล์มหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าลดลง แต่ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่รองลื่นกันรุนได้รับเพิ่มขึ้น

2. เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลามีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าลดลงแต่มีค่าเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย

3. เมื่อความสูงแบบขึ้นบันไดของแผ่นรองลื่นกันรุน (S_H) มีค่าเพิ่มขึ้น ช่วงแรกความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความสูงแบบขึ้นของแผ่นรองลื่นกันรุน (S_H) มีค่ามากกว่า 0.025 mm ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเริ่มมีค่าลดลง

4. ความสูงแบบขึ้นบันไดของแผ่นรองลื่นกันรุน (S_H) มีค่าน้อยจะมีค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด (P_{MAX}) มีค่าสูง แต่เมื่อความสูงแบบขึ้นของแผ่นรองลื่นกันรุน (S_H) มีค่าเพิ่มขึ้นความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด (P_{MAX}) จะมีค่าลดลง และเมื่อความสูงแบบขึ้นบันไดของแผ่นรองลื่นกันรุน (S_H) มีค่ามากกว่า 0.025 mm ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด (P_{MAX}) มีค่าค่อนข้างคงที่

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

7. สัญลักษณ์

h	ความฟิล์มสารหล่อลื่น, m
H	ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นไร้มิติ,

$$H = \frac{h}{S_H}$$

p	ความดันฟิล์มสารหล่อลื่น, Pa
P	ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นไร้มิติ,

$$P = \frac{P}{P_{MAX}}$$

P_{MAX}	ค่าความดันอ้างอิง, Pa
r_{out}	รัศมีวงนอก, mm
r_{in}	รัศมีวงใน, mm
R	รัศมีไร้มิติ

CST-187

	$R = \frac{r}{r_{out}}$
R_{in}	รัศมีวงในไร้มิติ
	$R_{in} = \frac{r_{in}}{r_{out}}$
R_{out}	รัศมีวงนอกไร้มิติ
	$R_{out} = \frac{r_{out}}{r_{out}}$
S_H	ความสูงชั้นบันไดของร่องลื่นกันรุน, m
ω	ความเร็วรอบของเพลลา, rad/s
w_z	ภาระที่กระทำ, N
θ_o	ความยาวของชั้นบันได, degree
r, θ, z	พิกัดอ้างอิง, m, degree, m
u_r, u_θ	ความเร็วของเพลลาในแกน r, θ , m/s
ρ	ความหนาแน่นของสารหล่อลื่น, kg/m ³
μ	ความหนืดของสารหล่อลื่น, Pa-s
$\tau_{rz}, \tau_{r\theta}$	ความเค้นเฉือน, Pa

Calculating Film Thickness and Pressure Profiles in Elastohydrodynamically Lubricated Line Contacts, *ASME J. Tribology*, vol.108, pp. 551-556.

- [5] Goodyer C.E., Fairlie R., Berzins M. and Scales L.E. (2001), Adaptive Mesh Methods for Elastohydrodynamic Lubri-cation, *ECCOMAS Computational Fluid Dynamics Conference 2001*, Swansea, Wales, UK.
- [6] Khonsari M. and Booser E.R. (2001), *Bearing Design and Lubrication*, John Wiley & Sons, NewYork, USA.
- [7] Hamrock B.J. (2004), *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, Marcel Dekker, Inc.

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Rathish Kumar B. V., Srinivasa Rao P. and Sinha P. (2001), A numerical study of performance of a slider bearing with heat conduction to the pad, *Finite Elements in Analysis and Design*, pp. 533-547.
- [2] Yürüsoy M. and Bayrakçeken H. (2005), Numerical method in the analysis of slider bearing with Power-law fluid, *Applied Mathematics and Computation*, vol.162, pp. 491-501.
- [3] ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว (2009), ผลของความหยาบผิวต่อการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกในร่องลื่นกันรุนด้วยสารหล่อลื่นนอนนิวโตเนียน , *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 26 ฉบับที่ 4, ธันวาคม 2552, pp. 48-53.
- [4] Lubrecht A.A., Ten Napel W.E. and Bosma R. (1986), Multigrid, an Alternative Method for