

ผลของความหยาบผิวต่อการหล่อลื่นของรองลื่นกันรุน

The effect of rough surface to thrust – bearing lubrication

ชนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว^{1*}, อานนท์ บำรุงพืช¹ และ เจษฎา พานิชกรณ¹

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

*ติดต่อ: khanitthaw@kmutnb.ac.th , เบอร์โทรศัพท์ 02-555-2000 ต่อ 6407

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลของความหยาบผิวที่มีต่อรองลื่นกันรุนแบบแผ่นเรียบ-แผ่นเอียงในสภาวะคงตัวเมื่อไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น สารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนที่เป็นไปตามแบบจำลองของคาร์โอ โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและระเบียบวิธีมัลติกริดร่วมกับระเบียบวิธี นิวตัน-ราฟสัน แก๊สมการโมดิไฟด์เรย์โนลด์ เพื่อหาการกระจายตัวของความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะคงตัว เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่กระทำ ขนาดของความหยาบผิว และความเร็วรอบของเพลลา จากการจำลองผลพบว่า เมื่อภาระที่กระทำมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง ความหยาบผิวมีผลต่อความหนาฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ โดยความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นมีค่าลดลงแต่ความดันฟิล์มของสารหล่อลื่นสูงสุดและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของความหยาบผิวเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วรอบของเพลลาเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนาฟิล์มต่ำสุดและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น

คำหลัก: การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก, รองลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียง, ความหยาบผิว

Abstract

This paper presents the effect of surface roughness for taper-land type thrust bearing under isothermal time independent with non-Newtonian lubricant base on Carreau viscosity model. Numerical scheme based on the finite difference method and multi-grid multilevel technique with Newton-Raphson method were implemented to obtain the air film pressure profile and air film thickness profile in steady state with various the applied load, the amplitude of surface roughness and shaft speeds. The numerical simulations base on finite difference method, Newton-Raphson method and multigrid method were implemented to obtain the film pressure profile and film thickness profile with various the amplitude of surface roughness and applied loads. The simulation results show the increasing of applied load, the film pressure increases but the minimum film thickness and friction coefficient decreases. The surface roughness has significant effect to lubricant film thickness. The minimum film thickness decreases but maximum film pressure and friction coefficient increase when amplitude of surface roughness increases. The minimum film thickness and friction coefficient increase when shaft speed increases.

Keywords: Hydrodynamic lubrication, Taper type thrust bearing, Surface roughness.

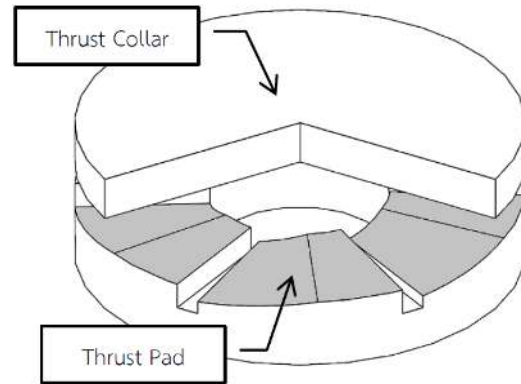
1. บทนำ

เพลาคือใช้เครื่องยนต์หรือเครื่องจักรต่าง ๆ เมื่อมีการหมุนจะมีกัปเพลารองเลื่อนเพื่อรองรับการเคลื่อนที่ของเพลาทั้งในแนวรัศมีของเพลและแนวแกน เพราะถ้าเพลเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งจะทำให้เกิดความเสียหายแก่เพลซึ่งจะส่งผลให้เครื่องจักรได้รับความเสียหาย ดังนั้นเพื่อให้เพลสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพรองเลื่อนกันรุนจะถูกใช้เพื่อป้องกันไม่ให้เพลเปลี่ยนตำแหน่งเกินค่าที่ออกแบบไว้ รองเลื่อนกันรุนเป็นรองเลื่อนชนิดหนึ่งที่ป้องกันไม่เพลเข้ายับเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกน การศึกษาการหล่อลื่นในรองเลื่อนกันรุนจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง การหล่อลื่นที่เกิดขึ้นในรองเลื่อนกันรุนเป็นการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกหรือเป็นแบบฟิล์มหนา

ปี ค.ศ. 2013 Chari [1] ศึกษาพฤติกรรมของรองเลื่อนกันรุนด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่าภาระที่รองเลื่อนกันรุนได้รับมีค่าน้อย ความหนาของฟิล์มอากาศจะมีขนาดมาก ขนึษฐา และคณะ [2] นำเสนอพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของรองเลื่อนกันรุนแบบขั้นบันได พบว่าการเพิ่มขึ้นของภาระที่รองเลื่อนกันรุนได้รับ ทำให้ความดันของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมีค่าลดลง เจษฎา และคณะ [3] นำเสนอพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของรองเลื่อนกันรุนแบบเอียงและแผ่นเรียบพบว่าความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความดันของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมีค่าลดลง เมื่อความเร็วในการหมุนของเพลเพิ่มขึ้น เนื่องจากการศึกษาการหล่อลื่นที่ของไหลมีพฤติกรรมเป็นของไหลแบบนอนนิวโตเนียนมีความสลับซับซ้อนมาก สมการจึงมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงทำให้การคำนวณมีความยุ่งยากและใช้เวลาในการคำนวณนาน Lubrecht [4] และ Francisco [5] ได้นำเสนอวิธีมัลติกริดที่มีประสิทธิภาพเพื่อลดระยะเวลาการคำนวณ

บทความนี้ศึกษาผลของความหยาบผิวที่มีต่อพฤติกรรมการทางทฤษฎีของรองเลื่อนกันรุนแบบแผ่นเอียงโดย

ใช้สารหล่อลื่นที่เป็นของไหลนอนนิวโตเนียนภายใต้การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก โดยประยุกต์ใช้วิธีเปอร์เทอร์เบชัน วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และวิธีมัลติกริด ในการแก้ปัญหาสมการเรย์โนลด์ประยุกต์ที่สภาวะคงตัวและไม่คิดผลเนื่องจากอุณหภูมิ



รูปที่ 1 ลักษณะของรองเลื่อนกันรุนชนิดแผ่นเอียง

2. ทฤษฎี

ลักษณะของแผ่นรองเลื่อนกันรุนแบบแผ่นเอียงและลักษณะการลอยตัวเมื่อรับภาระของแผ่นรองเลื่อนกันรุนดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 1

2.1 สมการโมดิฟายเรย์โนลด์

จากสมการนาเวียร์-สโตก ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความดันเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

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

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

จะได้สมการเรย์โนลด์ตามพิกัด ในสภาวะคงตัวในรูปแบบไร้มิติ ดังสมการที่ (3)

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

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

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

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

ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นจึงขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของผิวแผ่นรองลื่นกันรุนและการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความดัน ดังนั้นสมการความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นแสดงดังสมการที่ (4) พิกัดที่ใช้ในการจำลองผล แสดงดังรูปที่ 2

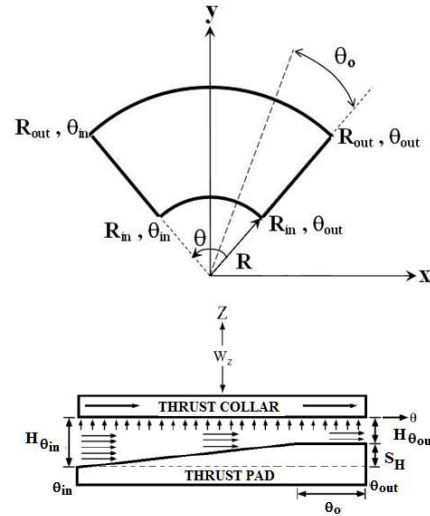
$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \theta \leq \theta_o, H_{R,\theta} &= 1 + H_{\theta_{out}} \\ \theta > \theta_o, H_{R,\theta} &= H_{\theta_{out}} \end{aligned} \quad (4)$$

2.3 สมการความหนืดของสารหล่อลื่น

แบบจำลองความหนืดที่ใช้ในบทความนี้เป็นไปตามแบบจำลองความหนืดของ Carreau Viscosity Model ดังสมการที่ (5)

$$\mu = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \left(1 + \lambda^2 I \right)^{\frac{n-1}{2}} \quad (5)$$

$$\text{โดยที่ } I = \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right)^2$$



รูปที่ 2 พิกัดที่ใช้ในการจำลองผลแผ่นรองลื่นกันรุน

2.4 สมการสมดุลแรง

บทความนี้จำลองการทำงานของรองลื่นกันรุนที่มีแผ่นรองลื่นกันรุนจำนวน 6 แผ่นโดยกำหนดให้แผ่นรองลื่นกันรุนแต่ละแผ่นรับภาระเท่ากัน ดังนั้นภาระที่กระทำกับแผ่นรองลื่นกันรุนแต่ละแผ่นเท่ากับผลรวมของภาระที่กระทำเนื่องจากความดันที่กระทำต่อสารหล่อลื่น

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

2.5 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ค่าความเสียดทานจะขึ้นอยู่กับภาระที่กระทำและ shear strain rate ($\partial u / \partial z$)

$$f = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{W_z} \quad (7)$$

โดยที่

$$F_x = \int_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} \int_{r_{in}}^{r_{out}} \tau_{rz} \cos \beta_1 r dr d\theta + \int_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} \int_{r_{in}}^{r_{out}} \tau_{\theta z} \cos \beta_2 r dr d\theta$$

$$F_y = \int_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} \int_{r_{in}}^{r_{out}} \tau_{rz} \sin \beta_1 r dr d\theta + \int_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} \int_{r_{in}}^{r_{out}} \tau_{\theta z} \sin \beta_2 r dr d\theta$$

$$\text{และ } \beta_1 = \frac{\pi}{2} - \theta_1, \quad \beta_2 = \pi - \theta_2$$

2.6. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ประยุกต์ใช้วิธีผลต่างสลับเนื่องร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน กับสมการเรย์โนลด์และสมการสมดุลแรง เพื่อหาค่าคำตอบของสมการเรย์โนลด์ ทำการคำนวณซ้ำจนกระทั่ง

$$\frac{\sum_{R_{in}}^{R_{out}} \sum_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} |P(R, \theta)^{k+1} - P(R, \theta)^k|}{\sum_{R_{in}}^{R_{out}} \sum_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} |P(R, \theta)^{k+1}|} \leq 0.0001 \text{ และ}$$

$$\left| 1 - \frac{6r_o^2 P_{MAX}}{w_z} \int_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} \int_{R_{in}}^{R_{out}} PR dR d\theta \right| \leq 0.0001$$

3. ผลการจำลองผล

การศึกษาการหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุน ขนาดของร่องลื่นกันรุนแสดงตามตารางที่ 1 และคุณสมบัติของสารหล่อลื่นแสดงตามตารางที่ 2 ตารางที่ 1 ขนาดของร่องลื่นกันรุน [6]

มิติของร่องลื่นกันรุน	ขนาด
รัศมีวงใน, r_{in}	30 mm
รัศมีวงนอก, r_{out}	45 mm
มุมทางเข้า, θ_{in}	$-\pi/8$ rad
มุมทางออก, θ_{out}	$+\pi/8$ rad
ความยาวของส่วนที่เป็นขั้นบันได, θ_o	$\pi/16$ rad

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสารหล่อลื่น [2]

คุณสมบัติของสารหล่อลื่น	หน่วย
ความหนาแน่น, ρ	834 kg/m ³
Low shear rate viscosity, μ_0	0.0698 Pa-s
High shear rate viscosity, μ_∞	0.0000 Pa-s
Power law index, n	0.625
Time relaxation, λ	4.657x10 ⁻⁷ s ⁻¹

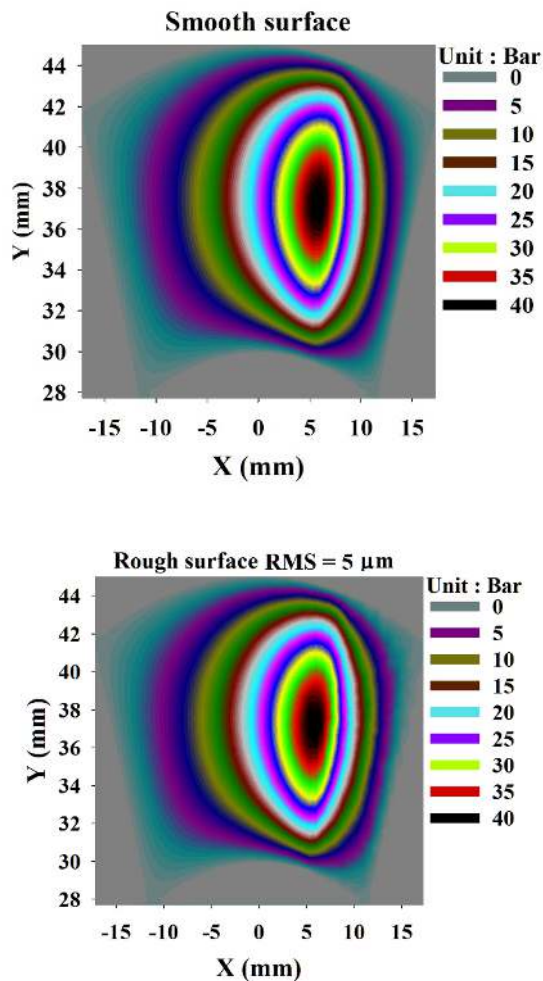
4. การจำลองผล

จากการจำลองผลเมื่อภาระที่ร่อนลื่นกันรุนได้รับเท่ากับ 3,000 N เพลาหมุนด้วยความเร็ว 3,000 rpm และผิวของร่องลื่นกันรุนเป็นผิวเรียบ (RMS=0) พบว่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดบริเวณกึ่งกลางของแผ่นร่องลื่นกันรุนและค่อยๆ น้อยลงเมื่อใกล้บริเวณทางออกและเป็นตำแหน่งที่ปรับเปลี่ยนจากผิวเอียงเป็นผิวเรียบ ทำให้พื้นที่การไหลของ สารหล่อลื่นถูกบีบให้มีขนาดเล็กลง ทำให้การไหลของสารหล่อลื่นถูกเปลี่ยนจากความเร็วเป็นความดัน เมื่อผิวของร่องลื่นกันรุนมีผิวเรียบมีความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 38.06 Bar ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเท่ากับ 29.42 μ m และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.0158 และเมื่อผิวของร่องลื่นกันรุนมีความหยาบผิว RMS = 5 μ m จะมีค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 38.38 Bar ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเท่ากับ 25.08 μ m และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.0159 แสดงดังรูปที่ 3

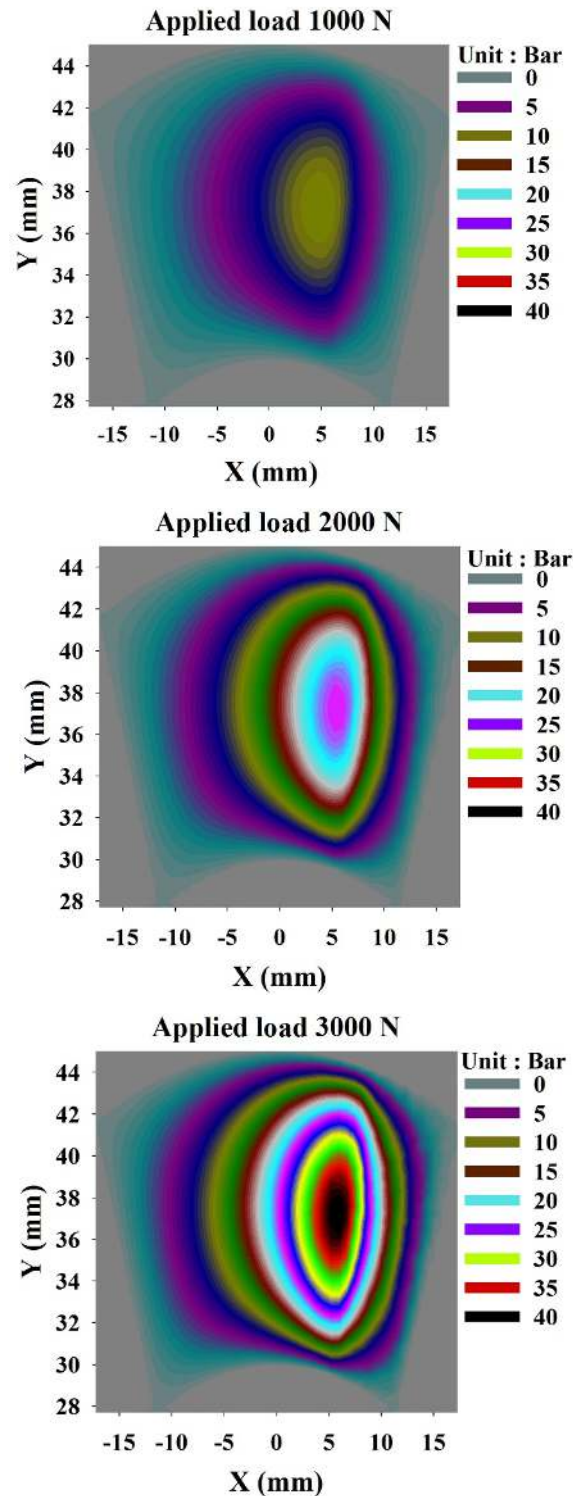
เมื่อความเร็วของเพลากับ 3000 rpm และผิวของร่องลื่นกันรุนมีความหยาบผิวเท่ากับ RMS = 5 μ m โดยทำการเปลี่ยนแปลงภาระที่ร่อนลื่นกันรุนได้รับ 1000 2000 และ 3000 N พบว่าความดันสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 11.06, 24.12 และ 38.38 Bar ตามภาระที่เพิ่มขึ้น ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 45.86, 31.77 และ 25.08 μ m และมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.0316 , 0.0204 และ 0.0159 เมื่อภาระที่ทำเท่ากับ 1000, 2000 และ 3000 N ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4

รูปที่ 5 แสดงค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่ร่อนลื่นกันรุนได้รับที่ ความเร็วรอบเท่ากับ 3000 rpm ทั้งผิวหยาบ (RMS = 5 μ m) และผิวเรียบ (RMS = 0 μ m) เมื่อภาระที่กระทำต่อร่องลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความหนา

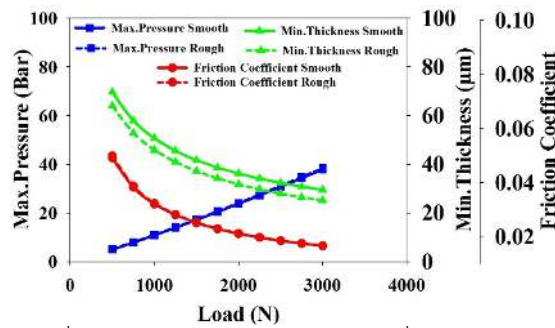
ฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง เนื่องจากความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า shear strain rate ($\partial u/\partial z$) มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นมีค่าลดลงตามสมการที่ (5) ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง เพราะแรงเสียดทานจะขึ้นอยู่กับค่าความหนืด และ shear strain rate



รูปที่ 3 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ภาระที่กระทำเท่ากับ 3000 N และความเร็วยรอบเท่ากับ 3000 rpm ที่ร่องลื่นกันรุนมีผิวเรียบและผิวหยาบ



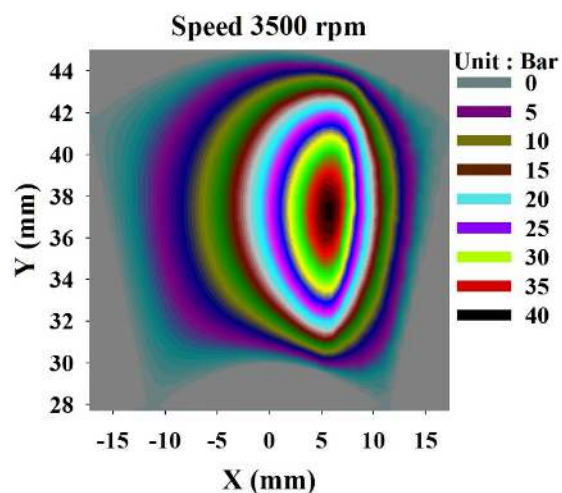
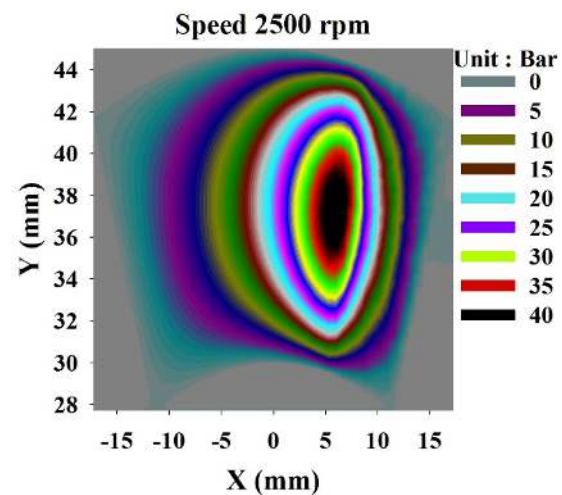
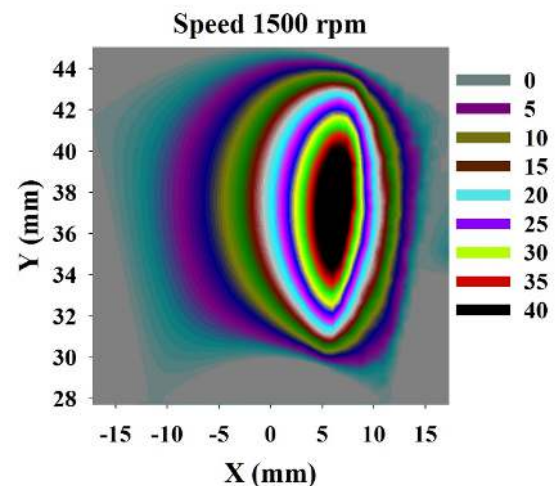
รูปที่ 4 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความเร็วยรอบเท่ากับ 3000 rpm ที่ผิวหยาบ RMS = 5 μm และเปลี่ยนแปลงภาระที่กระทำ 1000, 2000 และ 3000 N



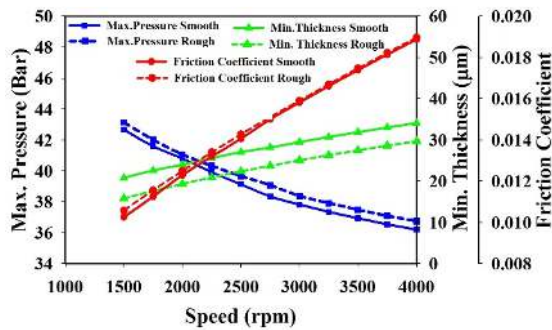
รูปที่ 5 แสดงค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่ร่อนกันรันได้รับ

เมื่อเปลี่ยนความเร็วรอบของเพลาท่อกับ 1500 rpm 2500 rpm และ 3000 rpm ที่ภาระที่ร่อนกันรันได้รับ 3000 N และขนาดของความหยาบผิวของร่อนกันรันมีเท่ากับ $RMS = 5 \mu m$ พบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นทำให้ความดันสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงและค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเท่ากับ 43.14, 39.66 และ 37.48 Bar ตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วรอบมีค่าเท่ากับ 1500, 2500 และ 3000 rpm ตามลำดับ จะมีค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 15.79, 22.34 และ 27.48 μm และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.0106, 0.0143 และ 0.0175 แสดงดังรูปที่ 6

รูปที่ 7 เมื่อภาระที่กระทำเท่ากับ 3000 N ทั้งผิวหยาบ ($RMS = 5 \mu m$) และผิวเรียบ ($RMS = 0 \mu m$) เปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าลดลง แต่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องการอัตราส่วนของการเพิ่มขึ้นของค่า shear strain rate ($\partial u / \partial z$) มีค่าเพิ่มขึ้นเพราะความเร็วรอบเพิ่มจะมีค่ามากกว่าอัตราส่วนของการลดลงของความหนืดจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น



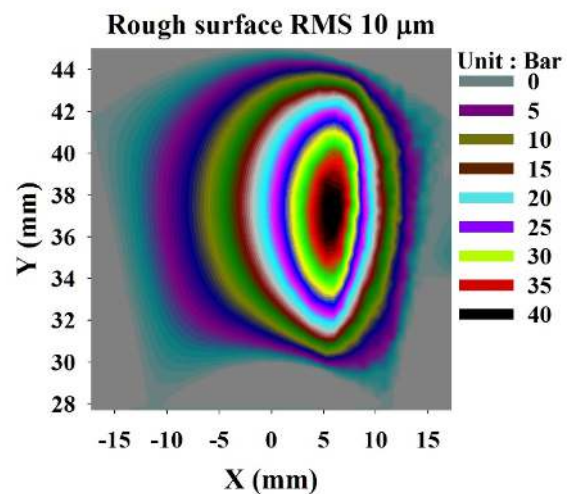
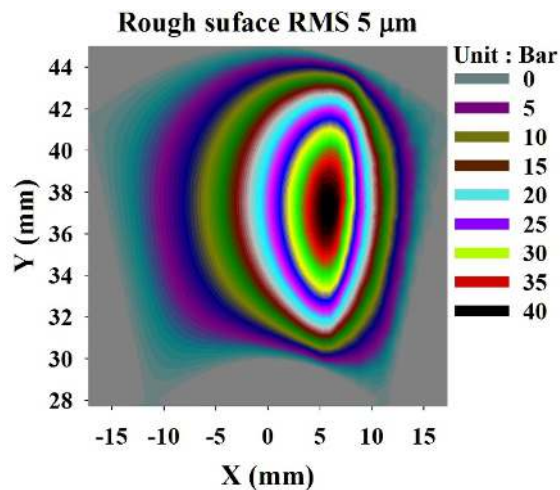
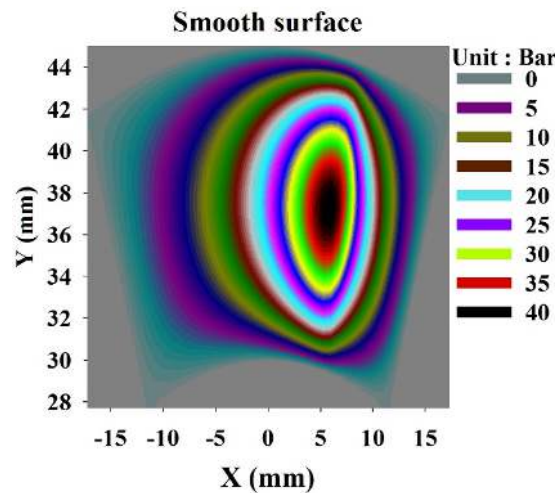
รูปที่ 6 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ภาระที่กระทำ 3000 N ที่ผิวหยาบ $RMS = 5 \mu m$ และเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเท่ากับ 1500, 2500 และ 3500 rpm



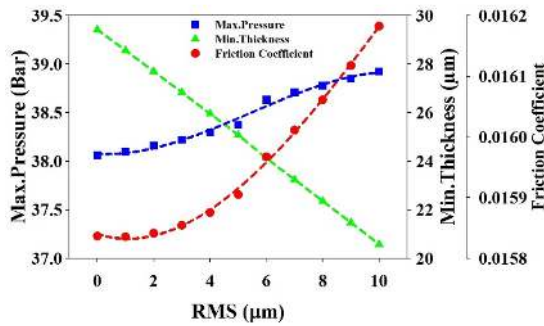
รูปที่ 7 แสดงค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ

รูปที่ 8 แสดงการกระจายความดันฟิล์มสารหล่อลื่นโดยเปลี่ยนแปลงขนาดของความหยาบผิว (RMS) ของรองลื่นกันรุนเท่ากับ 0, 5 และ 10 μm ที่ภาระที่กระทำเท่ากับ 3000 N และความเร็วรอบของเพลาทเท่ากับ 3000 rpm พบว่าเมื่อขนาดของความหยาบผิวมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าลดลง แต่ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อขนาดของความหยาบผิวเท่ากับ 0, 5 และ 10 μm จะมีค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเท่ากับ 38.06, 38.38 และ 38.92 Bar ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเท่ากับ 29.42, 25.08 และ 20.58 μm และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.0158, 0.0159 และ 0.0162 ตามลำดับ

เมื่อขนาดของความหยาบผิวมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เพราะเมื่อผิวของรองลื่นกันรุนมีความหยาบผิวจะทำให้ความหยาบผิวไปขัดขวางการไหลของสารหล่อลื่นทำให้ฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ภาระที่กระทำเท่ากับ 3000 N ความเร็วรอบเท่ากับ 3000 rpm และเปลี่ยนแปลงขนาดของความหยาบผิว (RMS) 0, 5 และ 10 μm



รูปที่ 9 แสดงค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเมื่อเปลี่ยนแปลงและเปลี่ยนแปลงขนาดของความหยาบ (RMS)

5. สรุปผล

จากการจำลองผลของการหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุนด้วยสารหล่อลื่นนอนนิวโตเนียนสามารถสรุปพฤติกรรมที่เกิดขึ้นได้ว่า

- 1) เมื่อภาระที่กระทำต่อร่องลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง
- 2) เมื่อความเร็วรอบของเพลามีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงแต่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น
- 3) เมื่อขนาดของความหยาบผิวมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นลดลงอย่างมีนัยสำคัญแต่ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่สนับสนุนทุนเพื่อนำเสนอบทความนี้

7. สัญลักษณ์

h	ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น, 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	$R = \frac{r}{r_{out}}$
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	ความเร็วรอบของเพล, rad/s	
w_z	ภาระที่กระทำ, N	
θ_o	ความยาวของชั้นบันได, degree	
r, θ, z	พิกัดอ้างอิง, m, degree, m	
u_r, u_θ	ความเร็วของเพลในแกน r, θ , m/s	
ρ	ความหนาแน่นของสารหล่อลื่น, kg/m ³	
μ	ความหนืดของสารหล่อลื่น, Pa-s	
$\tau_{rz}, \tau_{r\theta}$	ความเค้นเฉือน, Pa	

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chari A., Diop K., Champmartin S. and Ambari A. (2013). Numerical simulation and experimental study of thrust air bearing with multiple orifices, International Journal of Mechanical Sciences, vol.72, pp.28-38.
- [2] ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว, เกษภา พานิชกรณ์ และ ประกาศิต ธิปัตต์ (2557). การหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุน

แบบขั้นบันได,การประชุมวิชาการเครือข่าย
วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28

[3] เจษฎา พานิชกรณ, ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว และ วัชรพงษ์ พรหมณ์ กระโทก (2557). การหล่อลื่นของร่อง
ลื่นกันรุนแบบเอียงและแผ่นเรียบ, การประชุมวิชาการ
เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28

[4] Lubrecht, A.A., ten Napel, W.E. and Bosma R.
(1986). Multigrid, an Alternative Method for
Calculating Film Thickness and Pressure Profiles
in Elastohydrodynamically Lubricated Line
Contacts, ASME J. Tribology, vol.108, pp. 551-556.

[5] Francisco, A., Frene, J. and Blouin, A. (2002).
Multilevel Solution to Elastohydrodynamic
Contact for the Water Lubricated 3D Line
Contact, STLE Tribology Transactions, vol.45, pp.
110-116.