

พฤติกรรมการณ์หล่อลื่นของร่องลื่นกันรุนอากาศแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบ

Behavior of Lubrication in Tapered-land Type Air Thrust Bearing

สรวิศ โชติวิสุทธิ^{1*} เจษฎา ปานิชกรณ² ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว²¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ²ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Soravit Chotvisut^{1*} Jesda Panichakorn² Khanittha Wongseedakaew²¹Master Student, ²Assistant Professor

Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology

King Mongkut's University of Technology North Bangkok,

1518 Prachrat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, 10800

*Corresponding author: Email: soravit.chotvisut@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมการณ์หล่อลื่นทางทฤษฎีแบบไฮโดรไดนามิกของร่องลื่นกันรุนอากาศแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบ (Tapered-land Type Air Thrust Bearing) ในสภาวะคงตัว เมื่อไม่พิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มอากาศที่อยู่ภายในร่องลื่นกันรุน โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและระเบียบวิธีมัลติกริดร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน แก้สมการโมดิฟายเรย์โนลด์ เพื่อหาการกระจายตัวของความดันฟิล์มของอากาศและความหนาฟิล์มของอากาศ เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับ ความเร็วรอบของเพลลา ความสูงของแผ่นเอียง และอุณหภูมิของอากาศที่เข้าร่องลื่นกันรุน จากการจำลองผลพบว่าเมื่อภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับเพิ่มขึ้นทำให้ความดันฟิล์มของอากาศสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาของฟิล์มของอากาศต่ำสุดมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนของเพลลาทำให้ความดันฟิล์มของอากาศสูงสุดมีค่าลดลงแต่ความหนาของฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของความสูงของแผ่นเอียงทำให้ความดันของฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความหนาของฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลง และเมื่ออุณหภูมิอากาศที่เข้าร่องลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความดันของฟิล์มของอากาศสูงสุดมีค่าลดลงแต่ค่าความหนาฟิล์มของอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก การหล่อลื่นด้วยอากาศ ร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียง-แผ่นเรียบ สมการโมดิฟายเรย์โนลด์

ABSTRACT

The paper presents the theoretical behavior of hydrodynamic air lubrication of Tapered-land type air thrust bearing under steady state condition. When not considering the effect of temperature changes on the air film in thrust bearing. Using the finite difference method and multi-grid multilevel

technique with Newton-Raphson method for solving modified Reynolds Equation to obtain the air film pressure and air film thickness profiles in thrust bearing surface with various the applied load, shaft speeds, thrust tapered height and air inlet temperature. The simulation results shown the increasing of applied load, the maximum film pressure increases but the minimum film thickness decreases. When shaft speed increases cause the maximum film pressure decreases but minimum film thickness increases. For increasing of thrust tapered height, the maximum film pressure increases but minimum film thickness decreases, and air inlet temperature increases cause the maximum film pressure decreases but minimum film thickness increases.

Keyword: Hydrodynamic lubrication, air lubrication, tapered-land type thrust bearing, modified Reynolds equation.

1. บทนำ

ปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าในภาคอุตสาหกรรมเป็นไปอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้โรงงานอุตสาหกรรมต้องปรับตัวอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะตอบสนองต่อการแข่งขันที่สูงขึ้น ดังนั้นเครื่องจักรกลจำเป็นต้องมีประสิทธิภาพและความแม่นยำในการทำงานสูง การศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักรหรือเพิ่มอายุการใช้งานได้ยาวนานขึ้น ร่องลื่นกันรุนมีหน้าที่รองรับเพลลาให้ทำงานได้อย่างเที่ยงตรงตามแนวแกนเพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวหรือเปลี่ยนตำแหน่งเกินค่าที่ออกแบบไว้ ร่องลื่นกันรุนที่ใช้อากาศเป็นสารหล่อลื่นใช้งานอย่างแพร่หลายในเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่มีระบบการส่งกำลังด้วยเพลลาหมุนและทำงานด้วยความเร็วรอบสูง เช่น เครื่องยนต์เทอร์โบโมเตอร์ความเร็วสูง เป็นต้น เนื่องจากง่ายต่อการใช้งาน ราคาถูก และมีค่าการสูญเสียความเสียดทานที่ต่ำ รวมทั้งยังไม่เกิดปัญหาเรื่องควาวิเดชั่น (Lubricant Cavitation) ในขณะทำงาน และปัญหาเกี่ยวกับซีลเนื่องจากอุปกรณ์ออกแบบให้ปราศจากการใช้น้ำมันหล่อลื่นจึงทำให้มีการบำรุงรักษาได้ง่าย

Lbrahim et al. [1] ได้ประยุกต์ใช้วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการออกแบบร่องลื่นกันรุนอากาศสำหรับมอเตอร์ความเร็วสูง พบว่าความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เหมาะสมมีผล

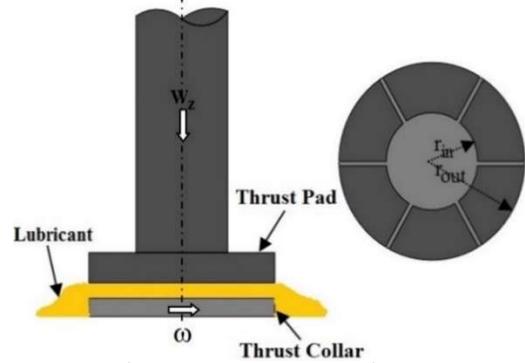
จากค่าความหนาฟิล์มอากาศที่ยอมรับได้ ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับพิกัดความเผื่อของร่องลื่นกันรุน Masayoshi [2] ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุนอากาศของอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยความเร็วรอบสูงด้วยการจำลองเปรียบเทียบกับการทดลอง พบว่าความเร็วรอบเพลลาที่มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยและภาวะที่กระทำมีค่าเพิ่มขึ้นมีผลให้ความหนาฟิล์มอากาศมีค่าลดลง ชนิษฐา [3] ได้นำเสนอพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียง พบว่าความดันเกิดขึ้นสูงสุดที่บริเวณทางออกของแผ่นร่องลื่นกันรุน A. Charki et al. [4] ได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับการทดลองของร่องลื่นกันรุนอากาศแบบมีหลายช่องทางเข้า พบว่าความหนาฟิล์มอากาศแปรผกผันกับภาวะที่กระทำ P. R. Kiohora et al. [5] ได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงจำนวนแผ่นร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียงภายใต้การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก พบว่าจำนวนแผ่นร่องลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้การกระจายตัวของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลง Dimitrios G Fouflias et al. [6] ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของร่องลื่นกันรุนแบบต่างๆ ด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมแบบนอนนิวโตเนียน พบว่าภาวะที่กระทำและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลง Y. Henry et al. [7], A. Charitopoulos et

al. [8] ได้ศึกษาการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบด้วยการทดลองพบว่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อความเร็วรอบเพลามากกว่าภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับ และการกระจายตัวของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมักเกิดจากภาระที่กระทำต่อร่องลื่นกันรุนที่มีค่าเพิ่มขึ้น เจษฎาและคณะ [9] นำเสนอพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบด้วยสารหล่อลื่นที่เป็นของไหลนิวโตเนียนพบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเกิดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของตำแหน่งที่เป็นรอยต่อของแผ่นเอียงกับแผ่นเรียบ Farooq et al. [10] ศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของร่องลื่นกันรุนด้วยสารหล่อลื่นน้ำมันเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดกริดที่ใช้คำนวณมีผลต่อค่าความเที่ยงตรงของการกระจายตัวความดันฟิล์มสารหล่อลื่น การหาค่าตอบด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมีความยุ่งยากและใช้เวลาคำนวณนาน Lubrecht [11], Francisco [12] ได้นำเสนอวิธีลดกริดเพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณ

บทความนี้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการหล่อลื่นทางทฤษฎีของร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบ ภายใต้การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกโดยใช้อากาศเป็นสารหล่อลื่นมีพฤติกรรมเป็นของไหลนิวโตเนียน ด้วยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษา Fortran เพื่อหาความดันของฟิล์มอากาศและความหนาของฟิล์มอากาศ เมื่อทำการเปลี่ยนภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับ (Applied load) ความเร็วรอบของเพล (Shaft speed) ความสูงของแผ่นเอียง (Thrust tapered height) อุณหภูมิของอากาศที่เข้าร่องลื่นกันรุน (Air inlet temperature) และเปรียบเทียบผลของการพิจารณาการเคลื่อนไถลของชั้นโมเลกุลอากาศ (Molecular slip flow) และไม่พิจารณาผลของการเคลื่อนไถลของชั้นโมเลกุลอากาศ (Continuous flow)

2. ทฤษฎี

รูปร่างของแผ่นร่องลื่นกันรุน และลักษณะการลอยตัวเมื่อมีสารหล่อลื่นแทรกตัวระหว่าง Thrust Pad และ Thrust Collar แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะของแผ่นร่องลื่นกันรุน

2.1 สมการโมดิฟาย์เรย์โนลด์

จากสมการนาเวียร์-สโตกเมื่อไม่คิดผลของ body force จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของความดันและความเค้นเฉือน ตามพิกัด $r-\theta-z$ เป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

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

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

สมมติให้อากาศเป็นก๊าซในอุดมคติ (Ideal gas) และพิจารณาผลการเลื่อนไถลของโมเลกุลชั้นอากาศ ที่ค่า $0.01 \leq K_N \leq 15$ เมื่อ $K_N = \lambda_a / h_a$ จะได้สมการโมดิฟาย์เรย์โนลด์ในพิกัดทรงกระบอก สำหรับร่องลื่นกันรุนในสภาวะคงตัวดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{ph^3}{\mu r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} (pr) \right\} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{ph^3}{\mu r} \left(\frac{\partial p}{\partial \theta} \right) \right] = 6\omega \frac{\partial}{\partial \theta} (ph) \quad (2)$$

$$\text{โดยที่ } \mu = \mu_M \cdot \mu_T$$

$$\text{เมื่อ } \mu_M = \left(\frac{\mu_0}{1 + (6K_N p_a h_a / \rho h)} \right) [14]$$

และ $\mu_T = \left(\frac{bT^{3/2}}{S+T} \right)$ [15]

$b = 1.458 \times 10^{-6} \text{ kg / m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{1/2}$, $S = 110.4 \text{ K}$

มีเงื่อนไขขอบสมการโมดิฟายเรย์โนลด์ดังนี้

$p(r_{in}, \theta) = p(r_{out}, \theta) = p_a$
 $p(r, \theta_{in}) = p(r, \theta_{out}) = p_a$

2.2 สมการความหนาฟิล์มของอากาศ

ลักษณะทางกายภาพและพิกัดต่างๆ ของแผ่นรองลื่นกันรุนที่ใช้ในบทความนี้ แสดงดังรูปที่ 2 เมื่อไม่คิดผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรองลื่นกันรุน จะได้สมการความหนาฟิล์มอากาศดังนี้

เมื่อ $\theta \leq \theta_{out} - \theta_0$

$$h_{r,\theta} = h_{r,\theta_{out}} + S_H \left[\frac{\theta - \theta_{in}}{\theta_{out} - \theta_{in} - \theta_0} \right]$$

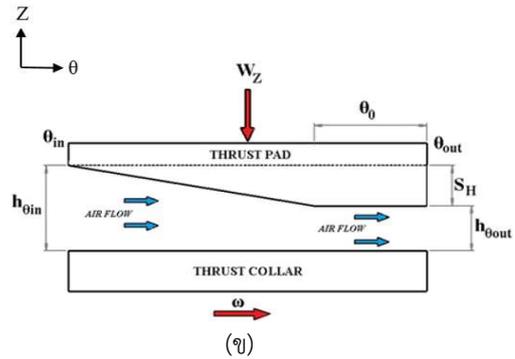
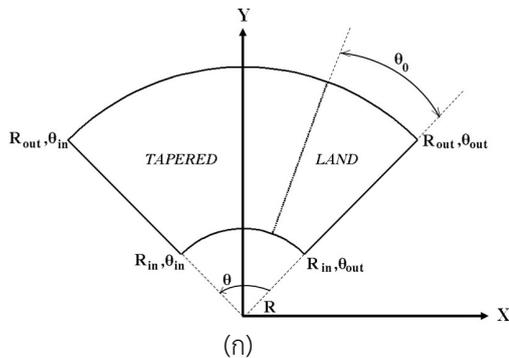
เมื่อ $\theta \geq \theta_{out} - \theta_0$

$h_{r,\theta} = h_{r,\theta_{out}}$ (3)

2.3 สมการสมดุลแรงที่กระทำ

บทความนี้รองลื่นกันรุนมีจำนวน 6 แผ่น โดยกำหนดให้แผ่นรองลื่นกันรุนแต่ละแผ่นรับภาระเท่ากัน ดังนั้นภาระที่กระทำต่อแผ่นรองลื่นกันรุนแต่ละแผ่นเท่ากับผลรวมของภาระที่กระทำ เนื่องจากความดันที่กระทำต่ออากาศ

$$\int_{R_{in}}^{R_{out}} \int_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} (p - p_a) r d\theta dr = \frac{W_z}{6}$$
 (4)



รูปที่ 2 แสดงพิกัดที่ใช้ในการจำลองของแผ่นรองลื่นกันรุน (ก) พิกัด x-y (ข) พิกัด z-θ

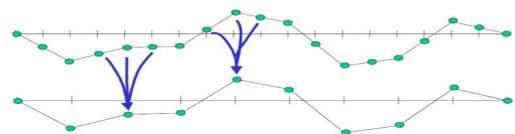
3. ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข

3.1 ระเบียบวิธีมีลติกริด

วิธีมีลติกริดช่วยลดเวลาการแก้ปัญหาสมการไม่เป็นเชิงเส้นโดยเริ่มจากการจัดสมการให้อยู่ในรูปแบบสมการไม่ต่อเนื่อง (Discretise equation) ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง โดยแบ่งกริดออกเป็นระดับๆ แต่ละระดับจะมีจำนวนกริดไม่เท่ากัน การคำนวณอาจจะเริ่มจากระดับที่มีความละเอียดของกริดมากที่สุดแล้วส่งค่าลงไปยังระดับที่กริดหยาบกว่าลงเรื่อยๆ จนถึงระดับที่หยาบที่สุดหลังจากนั้นส่งค่าที่คำนวณได้กลับมาที่ระดับกริดละเอียดที่สุดทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าผลเฉลยจะเข้าสู่ค่าตอบที่มีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้

3.2 การถ่ายโอนค่า (Grid Transfer)

การถ่ายโอนค่า คือ การส่งค่าหาค่าตัวดำเนินการถ่ายโอน (Operator) โดยส่งค่าจากระดับกริดละเอียดไปยังระดับที่มีจำนวนกริดน้อยกว่า ตัวดำเนินการถ่ายโอนจากระดับกริดละเอียด (Ω_h) ไประดับกริดหยาบกว่า (Ω_H) เรียกว่าตัวดำเนินการถ่ายโอนจำกัด (Restriction Operator, $I_{\Omega_h}^{\Omega_H}$)

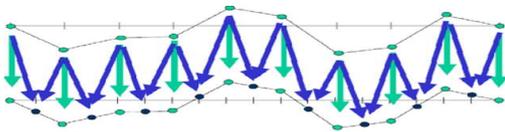


รูปที่ 3 แสดงการประมาณค่าเวกเตอร์การส่งถ่ายของระดับที่มีจำนวนกริดแบบหยาบ (Ω_H) จากการถ่ายโอนค่าจากระดับที่ละเอียดกว่า (Ω_h)

การถ่ายโอนค่าจากระดับที่มีจำนวนกริดน้อยกว่า (Ω_H) ไปยังระดับที่มีจำนวนกริดมากกว่า (Ω_h) จะเรียกตัวดำเนินการในการถ่ายโอนว่าตัวดำเนินการถ่ายโอนแบบเชิงเส้น (Linear Interpolation Operator, $I_{\Omega_H}^{\Omega_h}$) กำหนดให้ n คือจำนวนกริด และ h คือความกว้างของแต่ละกริดมีค่าเท่ากับ $\Omega_h = 1/n$

$$I_{\Omega_H}^{\Omega_h} I_{\Omega_H}^{\Omega_H} = U^{\Omega_h} \quad (5)$$

เมื่อ U^{Ω_H} คือ เวกเตอร์บนระดับที่มีจำนวนแบบหยาบ
 U^{Ω_h} คือ เวกเตอร์บนระดับที่มีจำนวนแบบละเอียด



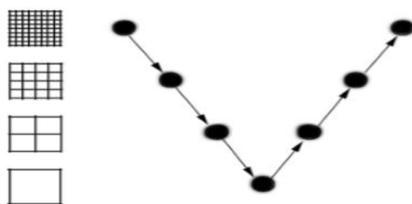
รูปที่ 4 แสดงการประมาณค่าเวกเตอร์จากระดับที่มีจำนวนกริดแบบหยาบ (Ω_H) ไปเป็นระดับที่มีจำนวนกริดแบบละเอียด (Ω_h)

ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{\Omega_H}^{\Omega_h}$ และ $I_{\Omega_h}^{\Omega_H}$ สามารถเขียนได้ดังนี้

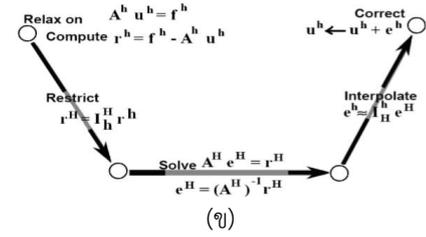
$$I_{\Omega_h}^{\Omega_H} = \frac{1}{2} \left(I \frac{\Omega_h}{\Omega_H} \right)^T \quad (6)$$

3.3 วัฏจักรของมัลติกริดแบบวี (Multigrid V-cycle)

เริ่มต้นคำนวณที่กริดละเอียดก่อนและส่งค่าเศษตกค้าง (Residual) ไประดับที่กริดหยาบและจะปรับแก้ค่าความผิดพลาด (Error) จากค่าความผิดพลาดที่ได้จากระดับที่กริดหยาบและทำการคำนวณซ้ำอีกครั้งที่กริดละเอียดจนกว่าจะได้คำตอบที่มีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้แสดงดังรูปที่ 5



(ก)



รูปที่ 5 แสดงวิธีการของมัลติกริดแบบวี (ก) วัฏจักรของมัลติกริดแบบวี (ข) การถ่ายโอนค่าระหว่างระดับ

สมการโมดิไฟด์เรย์โนลด์เป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้นสูงจึงได้ประยุกต์ใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน และระเบียบวิธีมัลติกริดหาค่าคำตอบของสมการโมดิไฟด์เรย์โนลด์ โดยสมมติค่าของความหนาของฟิล์มอากาศ เพื่อคำนวณหาค่าความดันของฟิล์มอากาศทำการคำนวณซ้ำจนกระทั่ง

$$\frac{\sum_{r_{in}}^{r_{out}} \sum_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} |p(r, \theta)^{k+1} - p(r, \theta)^k|}{\sum_{r_{in}}^{r_{out}} \sum_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} |p(r, \theta)^{k+1}|} \leq 0.0001$$

และการรับภาระเนื่องจากความดันของฟิล์มอากาศ

$$\left| 1 - \frac{6}{w_z} \int_{R_{in}}^{R_{out}} \int_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} (p - p_a) r d\theta dr \right| \leq 0.0001 \quad (7)$$

4. การจำลองผล

บทความนี้สนใจเรื่องสั่นกันรูนอากาศที่เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยความเร็วรอบสูง เช่น เครื่องยนต์เทอร์โบขนาดเล็ก (Micro gas turbine) หรือ มอเตอร์ความเร็วสูง (Spindle motor) จึงได้กำหนดมิติและขนาดของรอกสั่นกันรูนอากาศที่มีขนาดใกล้เคียงกับการใช้งานจริงเพื่อศึกษาแนวโน้มของปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการหล่อลื่น [7], [16]

ขนาดของรอกสั่นกันรูนแสดงดังตารางที่ 1 และคุณสมบัติของอากาศแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ขนาดของร่องลื่นกันรุน

มิติของร่องลื่นกันรุน	ขนาด
Inlet radius, r_i	0.005 m
Outlet radius, r_{out}	0.015 m
Inlet angle, θ_{in}	$-\pi/8$ rad
Outlet angle, θ_{out}	$+\pi/8$ rad
Land angle, θ_0	$\pi/16$

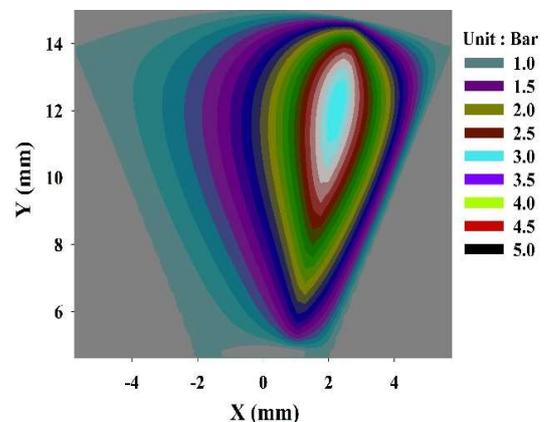
ตารางที่ 2 คุณสมบัติของอากาศ

คุณสมบัติของอากาศ	หน่วย
Atmosphere pressure, p_a	1.01325 bar
Absolute viscosity at 15 °C, μ_a	1.78×10^{-5} kg/m-s
Density at 15 °C, ρ	1.225 kg/m ³
Molecular mean Free path, λ	64.3 nm

จากการจำลองผล เมื่อภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับ (w_2) เท่ากับ 30 N ความเร็วรอบในการหมุนของเพลลา เท่ากับ 10,000 rpm อุณหภูมิอากาศที่เข้าร่องลื่นกันรุนเท่ากับ 15 °C ระยะความยาวของแผ่นเรียบ (θ_0) เท่ากับ $\pi/16$ rad ความสูงของแผ่นเอียงเท่ากับ (S_H) 1×10^{-6} m และพิจารณาผลจากการเลื่อนไหลของโมเลกุลของชั้นอากาศ พบว่าความดันฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดบริเวณตำแหน่งรอยต่อของแผ่นเอียงและแผ่นเรียบทำให้พื้นที่ภายใต้การไหลของอากาศถูกบีบให้มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้การไหลของอากาศถูกเปลี่ยนจากความเร็วไปเป็นความดัน หลังจากนั้นจึงมีค่าลดลงเมื่อใกล้บริเวณทางออกจนมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ โดยความดันฟิล์มอากาศสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 3.17 bar และความหนาฟิล์มอากาศมีค่าน้อยสุดมีค่าเท่ากับ 1.65 μ m แสดงดังรูปที่ 6

เมื่อเปรียบเทียบกับร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียง (Tapered Type Thrust Bearing) ขนิษฐา [3] พบว่าการลดลงของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ

ที่บริเวณทางเข้าจนมีค่าสูงสุดที่บริเวณใกล้ทางออกของแผ่นร่องลื่นกันรุน จากนั้นความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศที่บริเวณทางออก เจษฎาและคณะ [9] แต่ร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบ (Tapered-land Type Thrust Bearing) ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นที่เกิดมีค่าสูงสุดที่บริเวณประมาณ 75% ของความยาวของแผ่นร่องลื่นกันรุน จากนั้นความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นจึงมีค่าลดลงจนเท่ากับความดันบรรยากาศ ที่บริเวณทางออกของร่องลื่นกันรุนเป็นผลให้ร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบสามารถรับภาระได้สูงกว่า หรือในสภาวะการรับภาระเดียวกัน ความดันฟิล์มอากาศของร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบจะมีค่าต่ำกว่า จึงส่งผลให้อากาศเกิดความเสียหายน้อยกว่า ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกศึกษาร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบที่มีการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยความเร็วรอบสูง



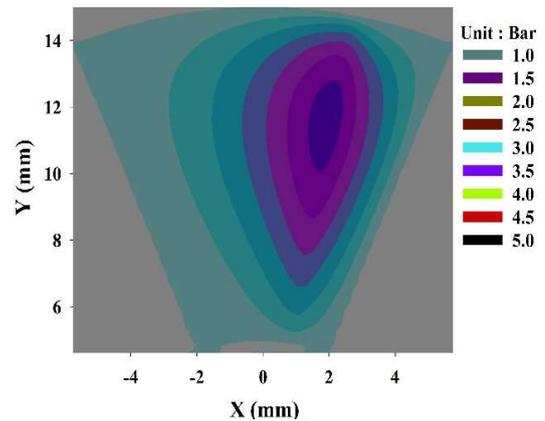
รูปที่ 6 แสดงการกระจายตัวของความดันฟิล์มอากาศที่แผ่นร่องลื่นกันรุน เมื่อ $w_2 = 30$ N, Shaft speed = 10,000 rpm, $\theta_0 = \pi/16$ rad, $S_H = 1 \times 10^{-6}$ m และ Air inlet temperature = 15 °C

4.1 การจำลองผลเมื่อเปลี่ยนภาระที่ร่องลื่นกันรุนที่ได้รับ

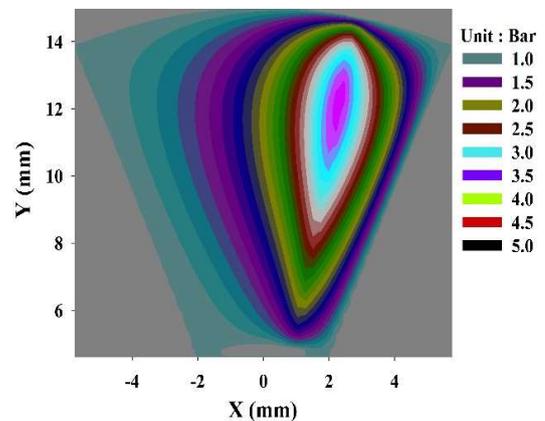
รูปที่ 7 รูปที่ 8 และรูปที่ 9 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มอากาศ เมื่อภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับเท่ากับ

10 N, 35 N และ 60 N ตามลำดับ ความเร็วรอบในการหมุนของเพลาเท่ากับ 10,000 rpm อุณหภูมิของอากาศที่ขาเข้าร่องลื่นกันรุนมีค่าเท่ากับ 15 °C ระยะความยาวของแผ่นเรียบเท่ากับ $\pi/16$ rad ความสูงของแผ่นเอียงเท่ากับ 1×10^{-6} m และพิจารณาผลจากการเลื่อนไหลของโมเลกุลของชั้นอากาศ พบว่าภาระที่แผ่นร่องลื่นกันรุนได้รับมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความดันฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาฟิล์มอากาศมีค่าลดลง โดยความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด มีค่าเท่ากับ (1.67 bar, 3.27 μ m), (3.57 bar, 1.48 μ m) และ (5.70 bar, 0.98 μ m) ตามลำดับ

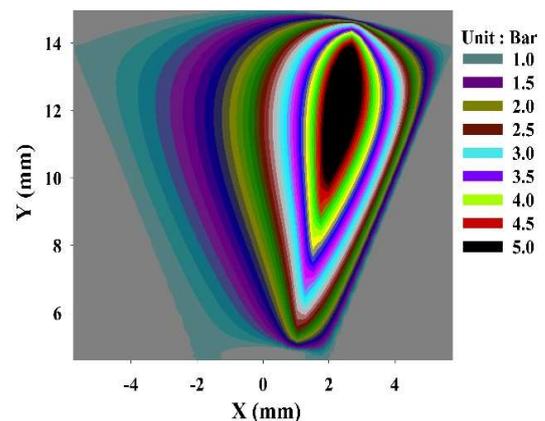
การเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและความดันฟิล์มอากาศสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับ แสดงดังรูปที่ 10 พบว่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลงแต่ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาผลจากการเลื่อนไหลของโมเลกุลของชั้นอากาศ พบว่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด เมื่อคิดผลของการเลื่อนไหลของโมเลกุลอากาศมีค่าน้อยกว่าเมื่อไม่คิดผลจากการเลื่อนไหลของชั้นโมเลกุลอากาศ เนื่องจากผลของการเลื่อนไหลของโมเลกุลอากาศทำให้ความหนืดของอากาศมีค่าลดลงตามสมการ (2) เป็นผลให้อากาศไหลออกจากร่องลื่นกันรุนได้ง่ายขึ้นมีผลให้ระยะห่างระหว่างร่องลื่นกันรุนและ Thrust Collar น้อยลงหรือความหนาของฟิล์มอากาศมีค่าลดลง และผลของการลดลงของความหนาฟิล์มอากาศทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอากาศไหลของอากาศในลักษณะขัดขวางการไหลส่งผลให้ความดันฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของความดันฟิล์มอากาศและความหนาฟิล์มอากาศค่อนข้างมาก



รูปที่ 7 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศเมื่อภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับเท่ากับ 10 N

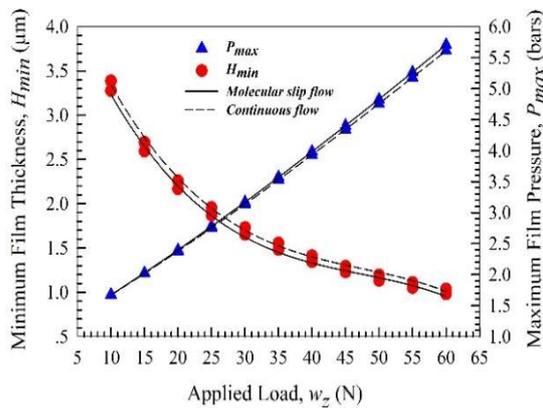


รูปที่ 8 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศเมื่อภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับเท่ากับ 35 N



รูปที่ 9 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศเมื่อภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับเท่ากับ 60 N

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

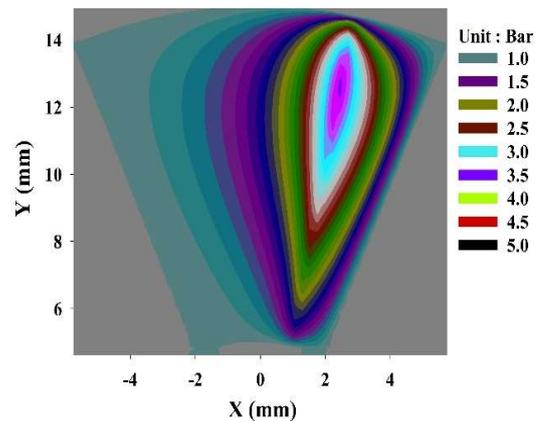


รูปที่ 10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและความดันฟิล์มอากาศสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่รอลื่นกันรุนได้รับ

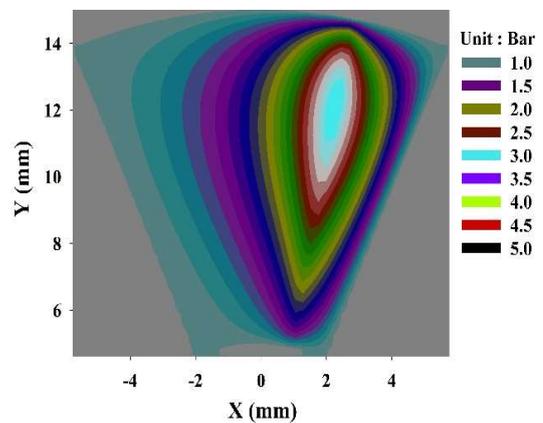
4.2 การจำลองผลเมื่อเปลี่ยนความเร็วรอบเพลา

รูปที่ 11 รูปที่ 12 และรูปที่ 13 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มอากาศ เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลาเท่ากับ 5,000 rpm, 10,000 rpm และ 15,000 rpm ตามลำดับ ภาระที่รอลื่นกันรุนได้รับเท่ากับ 30 N อุณหภูมิของอากาศที่เข้ารอลื่นกันรุนมีค่าเท่ากับ 15 °C ระยะความยาวของแผ่นเรียบเท่ากับ $\pi/16$ rad ความสูงของแผ่นเอียงเท่ากับ 1×10^{-6} m และพิจารณาผลจากการเลื่อนไหลของโมเลกุลของชั้นอากาศ พบว่าเมื่อความเร็วรอบเพลาที่มีค่าเพิ่มขึ้นความดันของฟิล์มอากาศที่อยู่ภายใต้ผิวของรอลื่นกันรุนมีค่าลดลง แต่ความหนาฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้นจากความเร็วรอบเพลาที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด มีค่าเท่ากับ (3.66 bar, 0.91 μm), (3.17 bar, 1.65 μm) และ (2.96 bar, 2.24 μm) ตามลำดับ

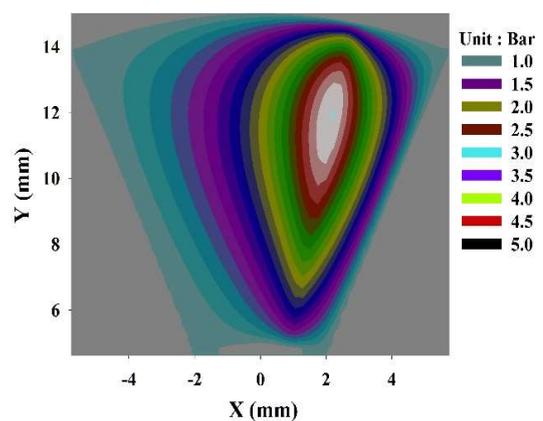
รูปที่ 14 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด พบว่าความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าลดลง แต่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่รอลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบเพลาที่มีอิทธิพลต่อความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดค่อนข้างมาก



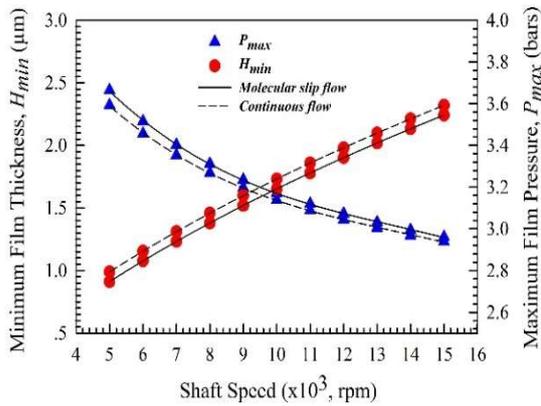
รูปที่ 11 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์ม เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลาเท่ากับ 5,000 rpm



รูปที่ 12 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์ม เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลาเท่ากับ 10,000 rpm



รูปที่ 13 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์ม เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลาเท่ากับ 15,000 rpm



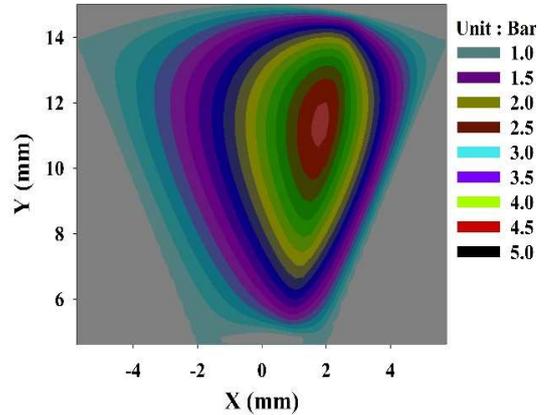
รูปที่ 14 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและความดันฟิล์มอากาศสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเพลลา

4.3 การจำลองผลเมื่อเปลี่ยนความสูงของแผ่นเอียง

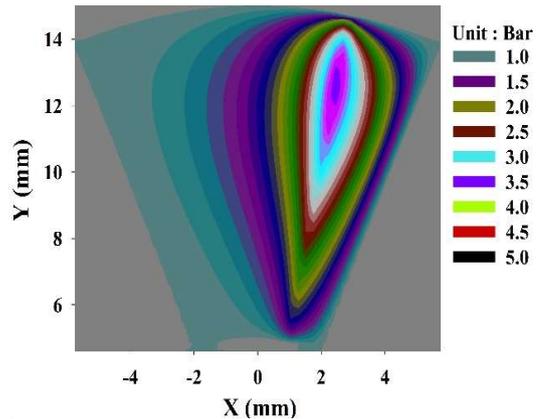
รูปที่ 15 รูปที่ 16 และรูปที่ 17 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มอากาศ เมื่อความสูงของแผ่นเอียงมีค่าเท่ากับ 5 μm, 15 μm และ 25 μm ตามลำดับ ภาระที่รองรับกันรุนได้รับเท่ากับ 30 N ความเร็วรอบในการหมุนของเพลลาเท่ากับ 10,000 rpm อุณหภูมิของอากาศที่เข้าเข้าร่องลื่นกันรุนมีค่าเท่ากับ 15 °C ระยะความยาวของแผ่นเรียบเท่ากับ π/16 rad และพิจารณาผลจากการเลื่อนไถลของโมเลกุลของชั้นอากาศ พบว่าเมื่อความสูงของแผ่นเอียงมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลง เนื่องจากพื้นที่การไหลของอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงตามความสูงของแผ่นเอียง โดยความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด มีค่าเท่ากับ (2.67 bar, 2.07 μm), (3.73 bar, 1.25 μm) และ (4.77 bar, 0.72 μm)

การเปลี่ยนแปลงความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นเอียงแสดงดังรูปที่ 18 พบว่าความดันสูงสุดของฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลง เนื่องจากความสูงของแผ่นเอียงที่มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้รูปร่างการไหลของอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะ

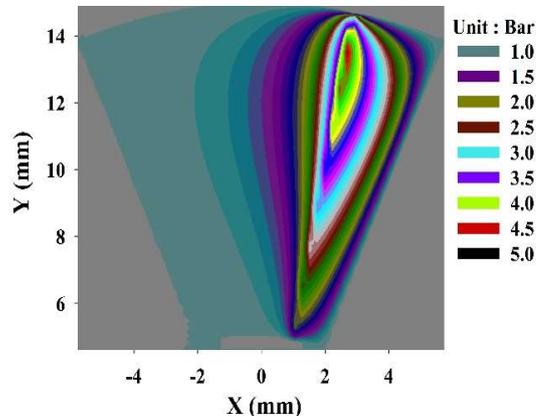
ซัดขวาง ส่งผลให้ความดันฟิล์มอากาศมีค่าสูงขึ้นจากการเปลี่ยนสถานะของความเร็วไปเป็นความดัน



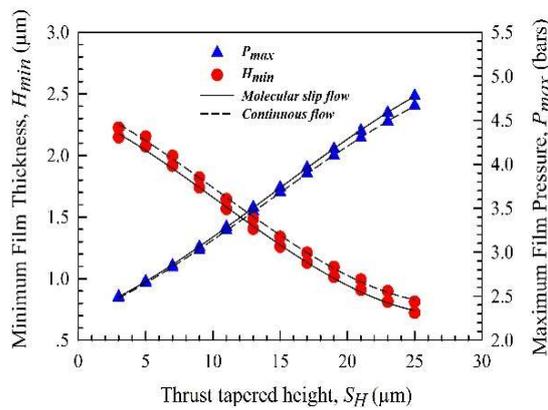
รูปที่ 15 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์มอากาศเมื่อความสูงของแผ่นเอียงมีค่าเท่ากับ 5 μm



รูปที่ 16 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์มอากาศเมื่อความสูงของแผ่นเอียงมีค่าเท่ากับ 15 μm



รูปที่ 17 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์มอากาศเมื่อความสูงของแผ่นเอียงมีค่าเท่ากับ 25 μm



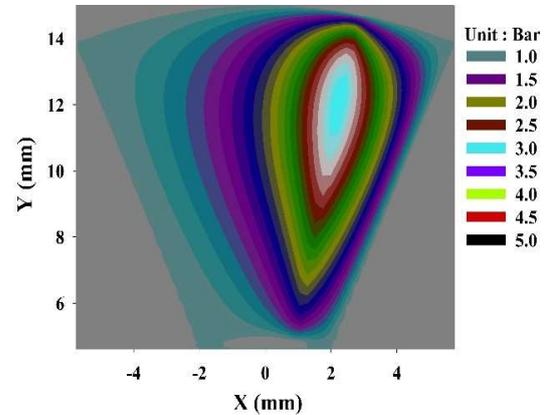
รูปที่ 18 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและความดันฟิล์มอากาศสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นเอียง

4.4 การจำลองผลเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศที่เข้าร่องลื่นกันรุน

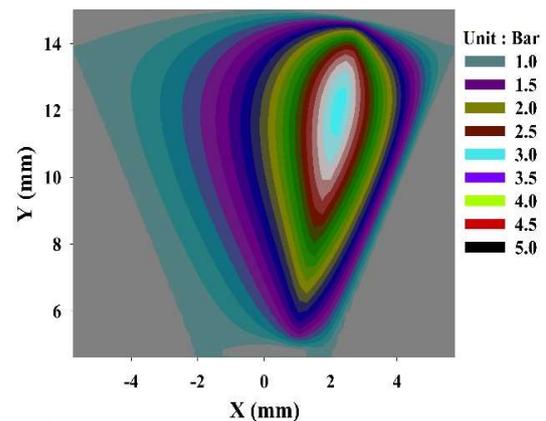
รูปที่ 19 รูปที่ 20 และรูปที่ 21 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มอากาศ เมื่ออุณหภูมิของอากาศที่เข้าร่องลื่นกันรุนมีค่าเท่ากับ 10 °C, 35 °C และ 60 °C ภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับเท่ากับ 30 N ความเร็วรอบในการหมุนของเพลเท่ากับ 10,000 rpm ระยะความยาวของแผ่นเรียบเท่ากับ $\pi/16$ rad ความสูงของแผ่นเอียงเท่ากับ 1×10^{-6} m และพิจารณาผลจากการเลื่อนไถลของโมเลกุลของชั้นอากาศ พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่เข้าร่องลื่นกันรุนได้รับมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าลดลง แต่ค่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนืดของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด มีค่าเท่ากับ (3.16 bar, 1.66 μ m), (3.13 bar, 1.74 μ m) และ (3.09, 1.83 μ m)

การเปลี่ยนแปลงความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เข้าร่องลื่นกันรุนแสดงดังรูปที่ 22 พบว่าความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าลดลง แต่ค่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศที่เข้าร่องลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนืดอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นตามสมการ (2) [14] และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

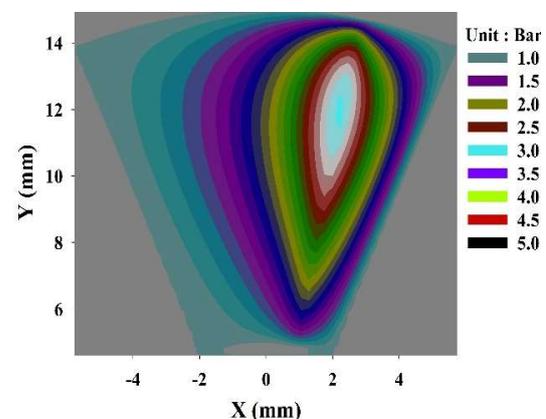
อากาศที่เข้าร่องลื่นกันรุนมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของความดันฟิล์มอากาศค่อนข้างน้อย



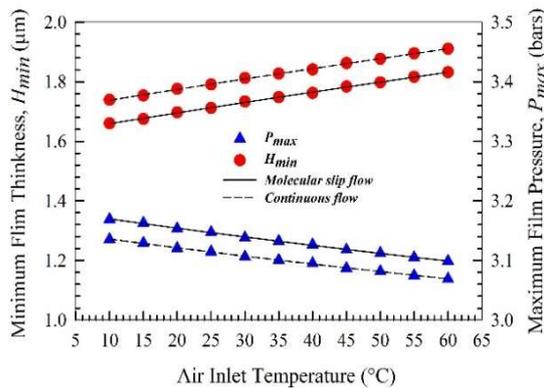
รูปที่ 19 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์มอากาศเมื่ออุณหภูมิของอากาศเข้าร่องลื่นกันรุนเท่ากับ 10 °C



รูปที่ 20 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์มอากาศเมื่ออุณหภูมิของอากาศเข้าร่องลื่นกันรุนเท่ากับ 35 °C



รูปที่ 21 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์มอากาศเมื่ออุณหภูมิของอากาศเข้าร่องลื่นกันรุนเท่ากับ 60 °C



รูปที่ 22 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและความดันฟิล์มอากาศสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศที่ขาเข้าร่องลื่นกันรุน

5. สรุปผลการจำลอง

5.1 ผลการเลื่อนไหลของโมเลกุลของชั้นอากาศทำให้ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลงกว่าเมื่อไม่คิดผลของการเลื่อนไหลของชั้นโมเลกุลอากาศ แต่ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าสูงกว่าเมื่อคิดผลของการเลื่อนไหลของชั้นโมเลกุลอากาศ

5.2 เมื่อภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับเพิ่มขึ้นพบว่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลง แต่ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น

5.3 ความดันของฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าลดลงแต่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลามีค่าเพิ่มขึ้น

5.4 การเพิ่มขึ้นของความสูงของแผ่นเอียงส่งผลให้ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลง

5.5 เมื่ออุณหภูมิอากาศที่ขาเข้าร่องลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าลดลง เนื่องจากความหนืดของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

7. สัญลักษณ์

p lubricant film pressure, Pa

p_a atmosphere pressure, bar

r radius coordinate, m

r_{in} inlet radius, mm

r_{out} outlet radius, mm

$\tau_{rz}, \tau_{\theta z}$ shear stress, Pa

ω angular velocity, rad/s

ρ lubricant film density, kg/m³

h lubricant film thickness, m

S_H thrust tapered height, mm

θ angular coordinate, rad

θ_{in} inlet angle, rad

θ_{out} outlet angle, rad

θ_0 land angle, rad

T temperature, °C

K_N knudsen number, λ_a / h_a

b constant sutherland, $kg / m \cdot s \cdot K^{1/2}$

S constant sutherland, K

μ lubricant viscosity, Pa-s

μ_0 initial viscosity, Pa-s

μ_a absolute viscosity, kg/m-s

μ_M molecular slip flow viscosity, Pa-s

μ_T temperature viscosity, Pa-s

W_z applied load, N

λ_a mean free molecular path, nm

$I_{\Omega_h}^{\Omega_f}$ The coarse to fine grid transfer operator

$I_{\Omega_f}^{\Omega_h}$ The fine to coarse grid transfer operator

U^{Ω_f} The vector of fine grid

U^{Ω_h} The vector of coarse grid

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. D. Ibrahim, T. Namba, M. Ochiai and H. Hashimoto, "Optimum design of thrust air bearing for hard disk drive spindle motor," J. Advanced Mech. Design, Syst. Manufac., vol. 4, no. 1, pp. 70-81, 2010.
- [2] M. Otsuka, "Self-acting Air-lubricated bearing without oil lubrication," R&D review of Toyota CRDL, vol. 41, no. 1, pp. 24-35, 2006.
- [3] ชนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว, "ผลของความหยาบผิวต่อการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกในร่องลื่นกันรุนด้วยสารหล่อลื่นนอนนิวโตเนียน," วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 26 ฉบับที่ 4, หน้า 48-53, 2552.
- [4] A. Charki, K. Diop, S. Champmartin and A. Ambari, "Numerical simulation and experimental study of thrust air bearing with multiple orifices," Inter. J. Mech. Sci., vol. 72, no. 1, pp. 28-38, 2013.
- [5] P. R. Kiogora, M. N. Kinyanjui and D. M. Theuri, "A Conservative scheme model of an inclined pad thrust bearing," Inter. J. Eng. Sci. Innovative Tech., vol. 3, no. 1, pp. 446-453, 2014.
- [6] D. Fouflias, A. Charitopoulos, C. I. Papadopoulos, L. Kaiktsis and M. Fillon, "Performance comparison between textured, pocket, and tapered-land sector-pad thrust bearings using computational fluid dynamics thermohydrodynamic analysis," J. Eng. Tribol., vol. 229, no. 1, pp. 376-397, 2015.
- [7] Y. Henry, J. Bouyer and M. Fillon, "An experimental hydrodynamic thrust bearing device and its application to the study of a tapered-land thrust bearing," J. Tribol., vol. 136, no. 2, pp. 1-11, 2014.
- [8] A. Charitopoulos, D. Fouflias, C. I. Papadopoulos, L. Kaiktsis and M. Fillon, "Thermohydrodynamic analysis of a textured sector- pad thrust bearing: effects on mechanical deformations," Mech. Industrial, vol. 15, no. 5, pp. 403-411, 2014.
- [9] เจษฎา พานิชกรณ์, ชนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว และ วัชรพงษ์ พรหมณ์กระโทก, "การหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุนแบบเอียงและแผ่นเรียบ," การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, จังหวัดขอนแก่น, หน้า 195-201, 2557.
- [10] F. A. Najar and G. A. Harmain, "Numerical investigation of pressure profile in hydrodynamic lubrication thrust bearing," Inter. Scholarly Res. Notices, vol. 2014, no. 1, pp. 1-8, 2014.
- [11] A. A. Lubrecht, W. E. ten Napel and R. Bosma, "Multigrid, an alternative method for calculating film thickness and pressure profiles in elastohydrodynamically lubricated line contacts," ASME J. Tribol., vol. 108, no. 4, pp. 551-556, 1986.
- [12] A. Francisco, J. Frene, and A. Blouin, "Multilevel Solution to Elastohydrodynamic Contact for the Water Lubricated 3D Line Contact," Tribol. Transac., vol. 45, no. 1, pp. 110-116, 2002.
- [13] B. J. Hamrock, *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*. New York; Basel: Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [14] C. F. Yong et al., "Design and Modeling of Femto Air Bearing Slider," J. Des. Manuf. Autom., vol. 2, no. 11, pp. 841-854, 2010.
- [15] P. J. Pritchard and J. C. Leylegian, "Fox and Mcdonald' s Introduction to Fluid

Mechanics,” 8th Ed, U.S.A., John Wiley & Sons.
Inc., 2011.

- [16] S. Aggarwal and R. K. Pandey, “Performance behaviour of sector shape taper-flat pad thrust bearing with different taper surface profiles,” in National Tribology Conference (NTC- 2014), Bangaluru, India, 2014, pp. 1-8.