



พฤติกรรมทางทฤษฎีของการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของร่องลื่นเพลากลมอากาศผสมฮีเลียม

อภิชาติ ฉัตรพงศ์เจริญ* ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว และ เจษฎา พานิชกรณ

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 5895 6541 อีเมล: s5903017810111@kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.07.007

รับเมื่อ 14 กันยายน 2563 แก้ไขเมื่อ 12 พฤศจิกายน 2563 ตอรับเมื่อ 5 มกราคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 27 กรกฎาคม 2565

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมพฤติกรรมทางทฤษฎีของการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของร่องลื่นเพลากลมอากาศผสมฮีเลียม ในสภาวะคงตัวสารหล่อลื่นที่เป็นอากาศและอากาศผสม เมื่อไม่พิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่อยู่ภายในร่องลื่นเพลากลม โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method) และระเบียบวิธีนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson Method) แก้ปัญหาสมการโมดิไฟด์เรย์โนลด์ จากผลการจำลองพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียม และความเร็วรอบในการหมุนเพลาลง ส่งผลให้ค่าความดันฟิล์มสูงสุดกับค่าการเยื้องศูนย์สูงสุดมีค่าลดลง แต่ความหนาฟิล์มต่ำสุด และตำแหน่งมุมที่เกิดความหนาฟิล์มต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ตรงข้ามกับเมื่อลดอัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียม และความเร็วรอบในการหมุนเพลาลง ส่งผลให้ค่าความดันฟิล์มสูงสุดและการเยื้องศูนย์สูงสุดที่มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาฟิล์มต่ำสุด และตำแหน่งมุมที่เกิดความหนาฟิล์มต่ำสุดมีค่าลดลง ส่วนการเปลี่ยนแปลงภาระที่เพลารับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความดันฟิล์มสูงสุดเพิ่มขึ้น แต่ความหนาฟิล์มต่ำสุดลดลง ให้ผลเหมือนกันกับสารหล่อลื่นที่เป็นอากาศและอากาศผสมฮีเลียม

คำสำคัญ: การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก การหล่อลื่นด้วยอากาศผสมฮีเลียม ร่องลื่นเพลากลมแบบแบริงสมมาตร สมการโมดิไฟด์เรย์โนลด์



Theoretical Characteristics of Hydrodynamic Journal Bearings lubricated with Air Helium Mixture

Apichart Chutpongcharoen*, Khanittha Wongseedakaew and Jesda Panichakorn

Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 5895 6541, E-mail: s5903017810111@kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.07.007

Received 14 September 2020; Revised 12 November 2020; Accepted 5 January 2021; Published online: 27 July 2022

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This paper presents the theoretical hydrodynamic lubricating characteristics of air-helium gas mixture in journal bearings under a steady-state condition. The method is using Finite Difference Method and Newton Raphson Method to solve the Modified Reynolds equation without considering the temperature change effect of the lubricant film on the surface of the round shaft. From the simulation results, it was found that when the air-helium gas mixture ratio and the shaft rotation speed increased, the maximum film pressure and the maximum eccentricity decreased as a consequence while the minimum film thickness and the angle position at the minimum film thickness increased. On the contrary, when reducing the air-helium gas mixture ratio and the rotational speed of the shaft, the maximum film pressure and maximum eccentricity increased while the minimum film thickness and the angle position at the minimum film thickness decreased. When increasing the load on the shaft, the maximum film pressure increased while the minimum film thickness decreased giving the same results as when using air and air-helium gas mixtures as lubricants.

Keywords: Hydrodynamic Lubrication, Air Helium Mixture Lubrication, Finite Length Journal Bearing, Modified Reynolds Equation

Please cite this article as: A. Chutpongcharoen, K. Wongseedakaew, and J. Panichakorn, "Theoretical characteristics of hydrodynamic journal bearings lubricated with air helium mixture," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 4, pp. 934–945, Oct.–Dec. 2022 (in Thai).



1. บทนำ

วิทยาการการหล่อลื่นเป็นสิ่งจำเป็นตั้งแต่ยุคอดีตถึงปัจจุบันสำหรับเครื่องจักรกลที่ต้องการลดความสึกหรอ ลดความร้อนจากความเสียดทาน ยืดอายุการใช้งาน และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน โดยเคลือบสารหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัสสองผิวที่เคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆ สารหล่อลื่นที่ใช้กันมีทั้งของเหลว ของแข็ง หรือก๊าซ การหล่อลื่นที่เหมาะสมจะมีความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นที่เพียงพอต่อการป้องกันชิ้นงานทั้งสองไม่ให้สัมผัสกัน โดยงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นที่เป็นอากาศผสมฮีเลียมในร่องลื่นเพลากลม และใช้ความรู้ทางกลศาสตร์ของไหลแก่สมการคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ของความดันฟิล์ม ความหนาฟิล์ม อัตราส่วนการเยื้องศูนย์เพลา และระยะระหว่างร่องลื่นเพลากลม

การทำงานของสารหล่อลื่นที่เป็นก๊าซ โดยการก่อกำเนิดความดันกระจายตัวเป็นฟิล์มสารหล่อลื่น และจากสารหล่อลื่นที่เป็นก๊าซมีคุณสมบัติความเสียดทานต่ำ ความละเอียดแม่นยำสูง และมลภาวะต่ำ ดังนั้นจึงประสบผลสำเร็จในการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมพาณิชย์ เช่น ระบบนำทางการขับเคลื่อนเครื่องยนต์ เครื่องมือความละเอียดสูง และเซนเซอร์ เครื่องมือเจาะทางการแพทย์ เครื่องมือกล และเครื่องอัดอากาศแบบเทอร์โบ [1] อัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียมในอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์พบว่า ค่า 0.75 เหมาะสมที่สุดและให้ประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด [2] ถ้าอัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียมในอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์พบว่า ถ้าค่าน้อยกว่า 0.50 จะไม่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของแถบบันทึกข้อมูล แต่จะมีผลเมื่ออัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียมมากกว่า 0.50 [3] โดยอุณหภูมิการทำงานในฮาร์ดดิสก์ที่เพิ่มขึ้นในขณะทำงานส่งผลให้ Mean Free Path เพิ่มขึ้นทุกช่วงอัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียม และตามด้วยความหนืดที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนผสมเข้าใกล้ค่า 0.75 ความหนืดจะมีค่าน้อยลง จนถึงค่า 1.00 [4] จะได้ว่าพฤติกรรมของการหล่อลื่นของสารหล่อลื่นกันรุนอากาศผสมฮีเลียมพบว่า เมื่ออัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียมต่อหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้นมากกว่า 0.80 ส่งผลให้ความดันฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนา

ฟิล์มมีค่าลดลง [5] โดยใช้สมการระยะทางเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซ คำนวณโดยใช้ทฤษฎีจลน์ของก๊าซ และสมการความหนาแน่น [6] วิธีการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์เชิงตัวเลขทั้งหมดจะได้รับการแก้สมการใน 2 รูปแบบ คือ การวิเคราะห์ประมาณค่าเชิงตัวเลข และการวิเคราะห์เชิงตัวเลขทางตรง [7] โดยสมการเรย์โนลด์สของร่องลื่นเพลากลมอากาศ ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์ย่อยไม่เชิงเส้นที่มีความยากในการแก้ปัญหาเชิงตัวเลข ทำให้การแก้สมการทางตรงต้องเปลี่ยนรูปสมการเป็นสมการอนุพันธ์เชิงเส้น เพื่อการประมาณค่าที่เหมาะสมและแก้ไขปัญหาคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (FDM) การศึกษาแสดงให้เห็นว่าการประมาณค่าเชิงตัวเลขที่ดีและการแก้ไขปัญหาคำนวณเชิงตัวเลขมีข้อมูลเหมาะสมสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากกว่าการแก้ไขปัญหาคำนวณทางตรง และใช้เวลาในการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ที่น้อยกว่า จากเดิมที่คิดว่าการแก้ไขปัญหาคำนวณทางตรงดีกว่าอีกอย่างที่น่าสนใจคือ อัตราการเยื้องศูนย์ที่ถูกแก้ไขปัญหาคำนวณโดยวิธีประมาณเชิงตัวเลขมีข้อมูลที่เหมาะสมสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองภายใต้ความแตกต่างเมื่อเปลี่ยนแปลงแบริงนัมเบอร์ โดยการแก้ไขปัญหาคำนวณเชิงตัวเลขจะมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย เมื่ออัตราการเยื้องศูนย์น้อยๆ และมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย เมื่ออัตราการเยื้องศูนย์มากๆ [8] ซึ่งสอดคล้องกับการเปรียบเทียบวิธีการแก้ปัญหาคำนวณเชิงตัวเลขของการหล่อลื่นแบบแบริงนัมเบอร์ จากอัตราส่วนการเยื้องศูนย์ที่เพิ่มขึ้นของการหล่อลื่นด้วยวิธีการประมาณค่าแก่สมการเชิงตัวเลข (FDM) ซึ่งอัตราส่วนการเยื้องศูนย์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความดันสูงสุด และความดันสูงสุดมากขึ้นตามลำดับด้วย [9] โดยมีหลักในการออกแบบตัวแปรสำหรับแบริงเพลากลมแบบสมมาตร คือ การวิเคราะห์ค่าที่แสดงความสามารถในการรับภาระโหลดมุมที่ความดันสูงสุด ที่มีผลสอดคล้องกับการแก้สมการแบบเชิงตัวเลขพบว่า ให้ผลใกล้เคียงมากกับงานวิจัยรุ่นก่อน โดยการเปรียบเทียบผลการแก้สมการเรย์โนลด์สแบบวิธี Analysis, FEM, FDM, และ CFD ซึ่งให้ผลไปในทิศทางเดียวกันในการเพิ่มค่าอัตราการเยื้องศูนย์ทำให้ความดันฟิล์มเพิ่มขึ้นตาม [10] และจากอิทธิพลของการลื่นไหลแบบ Slip Flow บนร่องลื่นเพลากลมก๊าซของเครื่องจักรกลหมุนขนาดเล็ก อธิบายถึง

ผลการลื่นไหลแบบ Slip Flow ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ไม่มีนัยสำคัญในการรับภาระโหลด สำหรับการลื่นไหลแบบ Slip Flow ที่อุณหภูมิ 1,600 เคลวิน มีผลกระทบอย่างเด่นชัดในการลดความสามารถรับภาระโหลด เนื่องจากสัดส่วนของภาระโหลดที่น้อยลงจากความดันก่อดันที่ใกล้ความหนาฟิล์มต่ำสุดลดลง และมีความแตกต่างของการรับภาระโหลดที่ Non-slip กับ Slip Flow (300 K) ลดลงเล็กน้อยที่แบริงนัมเบอร์เดียวกัน [11]

บทความนี้ศึกษาพฤติกรรมของการลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของร่องลื่นเพลากลมอากาศผสมฮีเลียมในอุปกรณ์มอเตอร์ฮาร์ดดิสก์ โดยใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงตัวเลข แก๊สมาร์โมดิฟายด์เรย์โนลด์ในอุปกรณ์มอเตอร์ฮาร์ดดิสก์รุ่น WD5000 Series เนื่องจากมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ซีรี่ส์รุ่นก่อนใช้บอลแบริงขนาดเล็กรองรับเพลากลมของมอเตอร์ทำให้ประสิทธิภาพการบรรจุข้อมูลได้น้อยกว่าการลื่นแบบแก๊สซึ่งเปลี่ยนมาใช้อากาศผสมฮีเลียมเป็นสารหล่อลื่นที่ดีของการลื่นด้วยแก๊สนั้น ให้ความสะอาด ยืดอายุการใช้งาน และความเสียหายทานต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพการบรรจุข้อมูลเพิ่มขึ้นมาก

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 ทฤษฎี

ลักษณะของร่องลื่นเพลากลม มีสารหล่อลื่นแทรกตัวระหว่างเพลากับแบริงแสดงดังรูปที่ 1

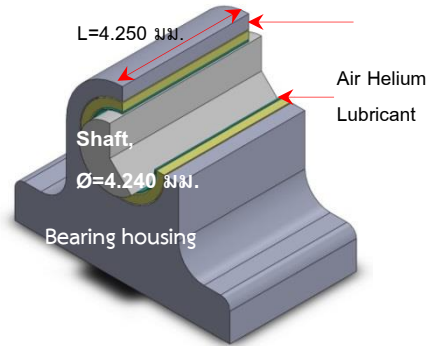
2.2 สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์

จากสมการนาเวียร์-สโตกส์ของแรงที่เกิดขึ้นกับอนุภาคของของไหลตามแกน x, y, z และเป็นความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความดันและความเค้นเฉือน ดังสมการที่ (1) และ (2) ดังนี้

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial x} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial y} \quad (1)$$

$$\tau_{xz} = \mu \frac{\partial u}{\partial z} \quad \text{และ} \quad \tau_{yz} = \mu \frac{\partial v}{\partial z} \quad (2)$$

จากสมมติฐานการลื่นด้วยแก๊สเป็น Ideal Gas ที่



รูปที่ 1 ลักษณะของร่องลื่นเพลากลม

สามารถอัดตัวได้ ($p = \rho RT$) และเป็นของไหลนิวโทเนียน (Newtonian Fluid) แบบ Non-slip Flow เมื่อพิจารณาผลจาก Molecular Slip Flow ($0.01 < K_N < 15$) จะได้ว่า ($p_a \lambda_a = p \lambda$ และ $K_N / \lambda_a h_a$)

เมื่อ p_a คือ ความดันบรรยากาศ (บาร์) p คือ ความดันใดๆ (บาร์) λ_a คือ ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของอากาศที่ความดันบรรยากาศ (นาโนเมตร) λ คือ ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของอากาศที่ความดันใดๆ (นาโนเมตร) h_a คือ ระยะห่างระหว่างผิวของชิ้นงาน (นาโนเมตร) K_N คือ Knudsen Number และคิดผลร่วมกับสมการเรย์โนลด์ จะได้สมการเรย์โนลด์สารหล่อลื่นก๊าซในสภาวะคงตัว ดังสมการที่ (3) ดังนี้

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{ph^3}{12\mu_m} \left(1 + \frac{6K_N p_a h_a}{ph} \right) \frac{\partial p}{\partial x} \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{ph^3}{12\mu_m} \left(1 + \frac{6K_N p_a h_a}{ph} \right) \frac{\partial p}{\partial y} \right\} \\ & = \left(\frac{u_2 + u_1}{2} \right) \frac{\partial}{\partial x} (ph) + \left(\frac{v_2 + v_1}{2} \right) \frac{\partial}{\partial y} (ph) \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นฟิล์มสารหล่อลื่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) μ คือ ความหนืดฟิล์มสารหล่อลื่น (ปาสคัลวินาที) h คือ ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น (นาโนเมตร) μ_2, μ_1 คือ ความเร็วตามแนวแกน x ของเพลากลมและของแบริง (เมตรต่อวินาที) ตามลำดับ v_2, v_1 คือ ความเร็วตามแนวแกน y ของเพลากลมและของแบริง (เมตรต่อวินาที) ตามลำดับ t คือ เวลา (วินาที) และแปลงเป็นสมการเรย์โนลด์สารหล่อลื่นก๊าซให้

อยู่ในระบบพิกัดไร้หน่วย สำหรับร่องลื่นเพลากลมอากาศผสมฮีเลียมแบบแบริงสมมาตร (Finite Type Air Journal Bearing) ในสภาวะคงตัว ดังสมการที่ (4)-(6)

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \Pi(P, H) \frac{\partial P}{\partial \theta} \right\} + \left(\frac{R^2}{L^2} \right) \frac{\partial}{\partial Y} \left\{ \Pi(P, H) \frac{\partial P}{\partial Y} \right\} \quad (4)$$

$$= \Gamma \frac{\partial(PH)}{\partial \theta}$$

$$\Pi(P, H) = PH^3 \left(1 + \frac{6K_N H_a}{PH} \right) \quad (5)$$

$$\Gamma = \frac{6\mu_m \omega R^2}{p_a c^2} \quad (6)$$

เมื่อ Π คือ Flow Factor P คือ ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นแบบไร้หน่วย H คือ ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นแบบไร้หน่วย R คือ รัศมีแบริงแบบไร้หน่วย L คือ ความยาวแบริงแบบไร้หน่วย Γ คือ Bearing Number θ คือ มุมที่เปลี่ยนแปลง (องศา) ω คือ ความเร็วเชิงมุมของเพลลา (เรเดียนต่อวินาที) p_a คือ ความดันอากาศ (บาร์) c คือ ช่องว่างระหว่างเพลลา กับแบริง (มิลลิเมตร) K_N คือ Knudsen Number, λ_a/h_a μ_m คือ ความหนืดอากาศผสมฮีเลียม (ปาสคัลวินาที)

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตสมการโมดิไฟด์เรย์โนลด์ ดังนี้

$$\theta = 0; P = 1$$

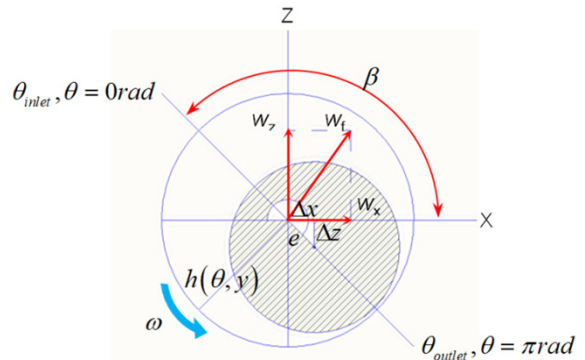
$$\theta = \pi; P = 1 \text{ and } \frac{\partial P}{\partial \theta} = 0$$

$$Y = \pm \frac{1}{2}; P = 1$$

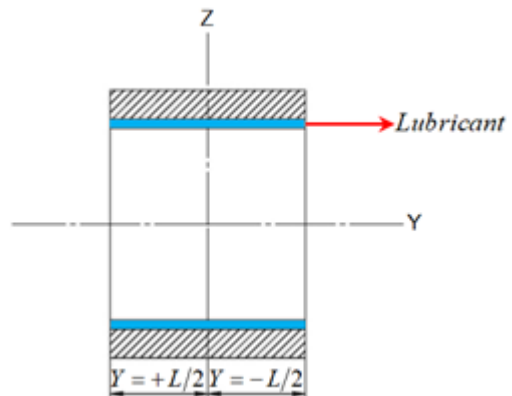
เมื่อ $\theta = 0$ คือ มุมที่สารหล่อลื่นเข้า (เรเดียน) $\theta = \pi$ คือ มุมที่สารหล่อลื่นออก (เรเดียน) P คือ ความดันสารหล่อลื่นแบบไร้หน่วย Y คือ ครึ่งหนึ่งของความยาวแบริง (มิลลิเมตร)

2.3 สมการความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่น

รูปแบบระบบพิกัดร่องลื่นเพลากลม แสดงดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 เมื่อไม่พิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของร่องลื่นเพลากลม จะได้สมการความหนาฟิล์ม ดังนี้



รูปที่ 2 การจำลองลักษณะร่องลื่นเพลากลมแบบแบริงสมมาตรระบบพิกัด X-Z-θ



รูปที่ 3 การจำลองลักษณะร่องลื่นเพลากลมแบบแบริงสมมาตรระบบพิกัด Y-Z

เมื่อ θ_{inlet} คือ มุมที่สารหล่อลื่นเข้า (เรเดียน) θ_{outlet} คือ มุมที่สารหล่อลื่นออก (เรเดียน) $h(\theta, y)$ คือ ความหนาฟิล์มใดๆ ที่มุมและความยาวใดๆ w_r, w_x คือ แรงกระทำต่อเพลลาตามแนวแกน Z และแกน X (นิวตัน) ตามลำดับ w_t คือ แรงลัพท์ระหว่าง w_r และ w_x (นิวตัน) $\Delta x, \Delta z$ คือ ระยะเยื้องแกนหมุนสมดุลเพลลาตามแนวแกน X และแกน Z (มิลลิเมตร) ตามลำดับ

$$h = c + e \cos \theta \quad (7)$$

สมการที่ (7) [12] โดย h คือ ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น

(มิลลิเมตร) c คือ ช่องว่างระหว่างเพลากับแบริง (Bearing Clearance, มิลลิเมตร) e คือ ระยะเยื้องศูนย์ระหว่างเพลากับแบริง (มิลลิเมตร) θ คือ $\arctan^{-1}\Delta z/\Delta x$ (องศา)

เมื่อทำให้อยู่ในรูปไร้หน่วย

$$H = 1 + \varepsilon \cos \theta \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) [12] โดย H คือ ความหนาฟิล์มแบบไร้หน่วย ε คือ อัตราการเยื้องศูนย์ระหว่างเพลากับแบริง θ คือ $\arctan^{-1}\Delta z/\Delta x$ (องศา)

2.4 สมการสมดุลแรงที่กระทำ

เมื่อเพลาทนจะเกิดสมดุลแรงตามแกน X และแกน Z ในสภาวะคงตัว ยกเพลาก็เกิดสมดุลอยู่บนสารหล่อลื่น โดยจะมีแรงกระทำในแต่ละมุมที่เปลี่ยนแปลงไป ภายในขอบเขตมุมทางเข้าเริ่มต้นที่ 0 rad จนถึงมุมทางออกที่ rad ดังนั้นภาระที่กระทำต่อร่องลื่นเพลากลมเท่ากับผลรวมของแรงกระทำตามแนวแกน X และแนวแกน Z ตลอดความยาวแบริงและมุมที่เปลี่ยนแปลงไป เพราะความดันที่กระทำต่อเพลาคือ

$$\frac{W_x}{Lp_a r_b} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\pi} P \cos \theta d\theta dY = 0 \quad (9)$$

$$\frac{W_z}{Lp_a r_b} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\pi} P \sin \theta d\theta dY \quad (10)$$

จากสมการที่ (9) และ (10) เมื่อ p_a คือ ความดันฟิล์มสารหล่อลื่น (บาร์) r_b คือ รัศมีแบริง (มิลลิเมตร) θ คือ $\arctan^{-1}\Delta z/\Delta x$ (องศา)

2.5 ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข

เป็นการแก้สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ที่เป็นสมการไม่เชิงเส้นชั้นสูงเพื่อหาคำตอบ โดยการประยุกต์ใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องร่วมกับระเบียบวิธีนิวตันราฟสัน จากการสมมติค่าความหนาฟิล์มเพื่อคำนวณหาค่าความดันฟิล์ม อัตราการ

เยื้องศูนย์เพลาค และตำแหน่งมุมที่เปลี่ยนแปลงไป คำนวณจนกระทั่ง

$$\frac{\sum_{-\pi/2}^{\pi/2} \sum_0^{\pi} |P(\theta, Y)^{k+1} - P(\theta, Y)^k|}{\sum_{-\pi/2}^{\pi/2} \sum_0^{\pi} |P(\theta, Y)^{k+1}|} \leq 0.00001 \quad (11)$$

จากสมการที่ (11) เมื่อ $P(\theta, Y)$ คือ ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นแบบไร้หน่วยที่ตำแหน่ง θ และ Y ใดๆ และการรับภาระเนื่องจากความดันฟิล์มอากาศ

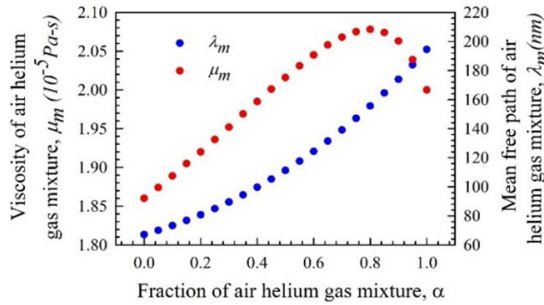
$$\left| 1 - \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\pi} LPp_a r_b \sin \theta d\theta dY}{w_z} \right| \leq 0.0001 \quad (12)$$

$$\left| \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\pi} LPp_a r_b \cos \theta d\theta dY \right| \leq 0.0001 \quad (13)$$

จากสมการที่ (12) และ (13) เมื่อ L คือ ความยาวแบริง (มิลลิเมตร) P คือ ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นแบบไร้หน่วย p_a คือ ความดันอากาศ (บาร์) r_b คือ รัศมีแบริง (มิลลิเมตร) คือ $\arctan^{-1}\Delta z/\Delta x$ (องศา)

2.6 วิธีดำเนินการวิจัย

บทความวิจัยนี้ศึกษาอุปกรณ์ร่องลื่นเพลากลมในมอเตอร์ฮาร์ดดิสก์ และได้ตรวจวัดขนาดเพลากับแบริงจริง แสดงดังตารางที่ 1 มีสมบัติของอากาศและฮีเลียม แสดงดังตารางที่ 2 คุณสมบัติของส่วนผสมระหว่างอากาศและฮีเลียม แสดงในรูปที่ 4 เพื่อศึกษาแนวโน้มของพฤติกรรมจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ในอัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียมที่เปลี่ยนแปลง จากการหาผลการจำลองด้วยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาฟอร์แทรน (FORTRAN)



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียม และระยะทางเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลอากาศผสมฮีเลียม [5]

ตารางที่ 1 ขนาดของร่องลื่นเพลากลมแบบแบริงสมมาตร

ลักษณะร่องลื่นเพลากลม	ขนาด
Bearing radius, r_b	2.125 มม.
Shaft radius, r_s	2.120 มม.
Bearing length, L	4.250 มม.

ตารางที่ 2 สมบัติของอากาศและฮีเลียม อ้างอิงที่อุณหภูมิเท่ากับ 300 K ความดันเท่ากับ 1 atm [13]

สมบัติทางกายภาพ	อากาศ	ฮีเลียม
Molecular diameter	0.366 นม.	0.215 นม.
Molecular weight, M	4.003 กรัมต่อโมล	28.96 กรัมต่อโมล
Density, ρ	1.164 กก.ต่อลบ.ม.	0.160 กก.ต่อลบ.ม.
Absolute dynamic viscosity, μ	0.0186 ปาสคัลวินาที	0.0200 ปาสคัลวินาที
Critical temperature, T_c	132.53 เคลวิน	5.19 เคลวิน
Critical pressure, P_c	37.86 บาร์	2.27 บาร์

2.7 ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method)

แสดงดังสมการที่ (14) และ (15)

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \Psi(P, H) \frac{\partial P}{\partial \theta} \right\} + \frac{\partial}{\partial Y} \left\{ \Psi(P, H) \frac{\partial P}{\partial Y} \right\} \left(\frac{R^2}{L^2} \right) = \Lambda \frac{\partial(PH)}{\partial \theta} \tag{14}$$

$$F(P_{i,j}) = \frac{1}{(\Delta \theta)^2} \left\{ \Psi(P, H)_{i+\frac{1}{2},j} (P_{i+1,j} - P_{i,j}) \right\} - \Psi(P, H)_{i-\frac{1}{2},j} (P_{i,j} - P_{i-1,j}) \left\} + \frac{1}{(\Delta Y)^2} \left(\frac{R^2}{L^2} \right) \left\{ \Psi(P, H)_{i,j+\frac{1}{2}} (P_{i,j+1} - P_{i,j}) \right\} - \Psi(P, H)_{i,j-\frac{1}{2}} (P_{i,j} - P_{i,j-1}) \left\} - \Lambda \frac{(PH)_{i,j} - (PH)_{i-1,j}}{\Delta \theta} = 0 \tag{15}$$

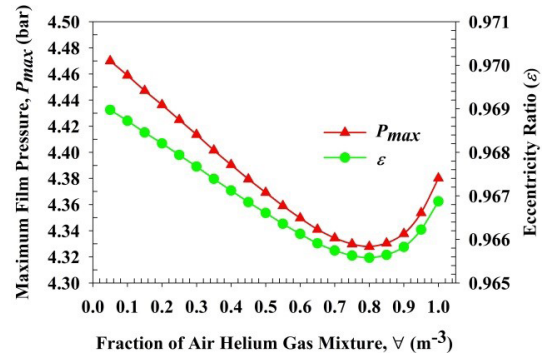
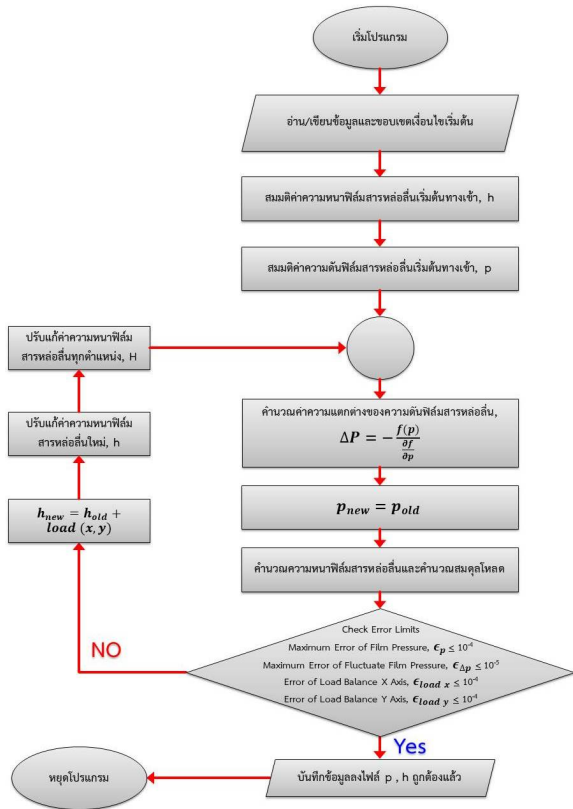
2.8 ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method)

แสดงดังสมการที่ (16) และ (17)

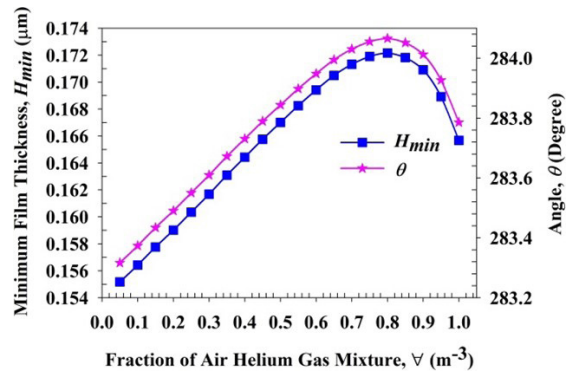
$$P_{i,j}^{k+1} - P_{i,j}^k = - \frac{F(P_{i,j}^k)}{\frac{\partial F(P_{i,j}^k)}{\partial P_{i,j}^k}} \tag{16}$$

$$\frac{\partial F(P_{i,j}^k)}{\partial P_{i,j}^k} = \frac{1}{(\Delta \theta)^2} \frac{\partial}{\partial P_{i,j}^k} \left\{ \Psi^k(P, H)_{i+\frac{1}{2},j} (P_{i+1,j}^k - P_{i,j}^k) \right\} - \Psi^k(P, H)_{i-\frac{1}{2},j} (P_{i,j}^k - P_{i-1,j}^k) \left\} + \frac{1}{(\Delta Y)^2} \left(\frac{R^2}{L^2} \right) \frac{\partial}{\partial P_{i,j}^k} \left\{ \Psi^k(P, H)_{i,j+\frac{1}{2}} (P_{i,j+1}^k - P_{i,j}^k) \right\} - \Psi^k(P, H)_{i,j-\frac{1}{2}} (P_{i,j}^k - P_{i,j-1}^k) \left\} - \Lambda \frac{\partial}{\partial P_{i,j}^k} \left\{ \frac{(PH)_{i,j}^k - (PH)_{i-1,j}^k}{\Delta \theta} \right\} \tag{17}$$

2.9 ขั้นตอนโปรแกรมการคำนวณ (Flowchart Diagram)



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 การกระจายตัวของความดันฟิล์มสูงสุด ความหนาฟิล์มต่ำสุด อัตราส่วนการเยื้องศูนย์ และมุมที่ความหนาฟิล์มต่ำสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียม

3. ผลการทดลอง

ผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียม ดังรูปที่ 5 แสดงการกระจายตัวของความดันฟิล์มอากาศผสมฮีเลียม อัตราการเยื้องศูนย์ ความหนาฟิล์มต่ำสุด และตำแหน่งมุมที่เกิดความหนาฟิล์มต่ำสุด เมื่ออัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียมต่อหน่วยปริมาตรมีค่าเท่ากับ 0.10, 0.30, 0.50, 0.70, และ 0.90 ภาวะที่ร่องลื่นเพลากลมได้รับเท่ากับ 0.95 นิวตัน ความเร็วรอบในการหมุนของเพลากลมเท่ากับ 7,200 รอบต่อนาที ระยะร่องลื่นเพลากลมเท่ากับ 5 ไมโครเมตร และอุณหภูมิที่ทางเข้าร่องลื่นเพลากลมเท่ากับ 300 เคลวิน พบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียมทำให้ความดันฟิล์มและอัตราส่วนการเยื้องศูนย์มีค่าลดลงในช่วง 0.05 ถึง 0.80 และจะเพิ่มขึ้นจาก 0.80 ถึง 1.00 อีกครั้งตามรูปที่ 5 (ก) โดยมีความดันฟิล์มอากาศผสมฮีเลียม

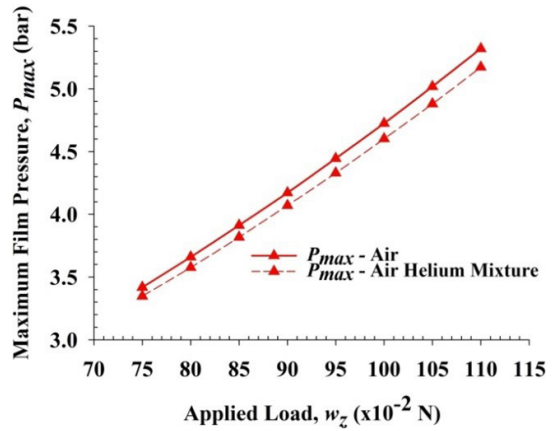
สูงสุด และอัตราส่วนการเยื้องศูนย์สูงสุดมีค่าเท่ากับ (4.4589 บาร์, 0.9687), (4.4135 บาร์, 0.9677), (4.3692 บาร์, 0.9666), (4.3344 บาร์, 0.9657) และ (4.3377 บาร์, 0.9658) ตามลำดับจากอัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียมน้อยไปหามาก เนื่องจากระยะทางเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลอากาศผสมฮีเลียม (Mean Free Path) และความหนืดที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามตารางที่ 3 และรูปที่ 4 จากนั้นเมื่ออัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียมต่อหน่วยปริมาตรมีค่ามากกว่า 0.80 ส่งผลให้ความดันฟิล์มและอัตราส่วนการเยื้องศูนย์มีค่าเพิ่มขึ้นเพราะ Mean Free Path ที่ยังคงเพิ่มขึ้น แต่ความหนืดกลับมีค่าลดลงในทางตรงกันข้ามแสดงในรูปที่ 5 (ข) พบว่า การเพิ่มขึ้น



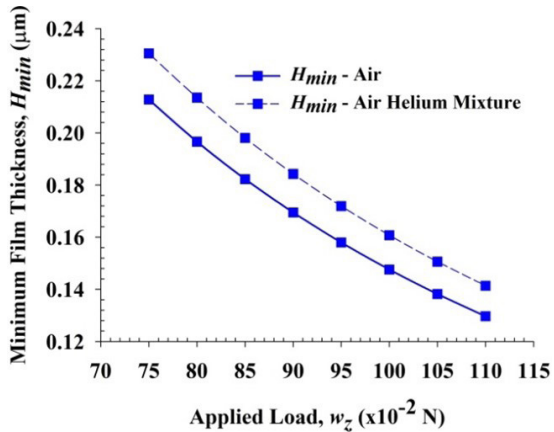
ของอัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียมทำให้ความหนาฟิล์มต่ำสุด และตำแหน่งมุมที่ความหนาฟิล์มต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงอัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียมต่อหน่วยปริมาตรที่ 0.05 ถึง 0.80 และจะลดลงจาก 0.80 ถึง 1.00 อีกครั้ง โดยความหนาฟิล์มอากาศผสมฮีเลียมต่ำสุด และตำแหน่งมุมที่เกิดความหนาฟิล์มต่ำสุดมีค่าเท่ากับ (0.1564 ไมโครเมตร, 283.3735 องศา), (0.1617 ไมโครเมตร, 283.6093 องศา), (0.1670 ไมโครเมตร, 283.8436 องศา), (0.1713 ไมโครเมตร, 284.0301 องศา) และ (0.1709 ไมโครเมตร, 284.0123 องศา) ตามลำดับจากอัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียมน้อยไปหามาก เนื่องจากระยะทางเฉลี่ยในการเคลื่อนของโมเลกุลระหว่างอากาศผสมฮีเลียมที่มากขึ้นทำให้เพลลา (Shaft) และแบริง จะมีระยะห่างออกจากกันมากขึ้น แต่ถ้า Mean Free Path ที่มีค่าน้อยหมายถึงระยะห่างเพลลากับแบริงจะแยกตัวออกจากกันได้น้อย ต่อมาความหนืดที่ลดลงทำให้ระยะห่างระหว่างเพลลากับแบริงต่ำลง เป็นผลให้ความหนาฟิล์มต่ำสุด และตำแหน่งมุมที่ความหนาฟิล์มต่ำสุดมีค่าลดลง แต่ความดันฟิล์มสูงสุดและอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางสูงสุดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศผสมฮีเลียม [5]

Fraction of Air Helium Gas Mixture, α	Mean Free Path, λ_m (นม.) of Air Helium Gas Mixture	Viscosity, μ_m (10^{-5} ปาสคัล วินาที) of Air Helium Gas Mixture
0	67.10	1.860
0.1	73.27	1.874
0.2	80.72	1.920
0.3	89.50	1.952
0.4	99.65	1.985
0.5	111.25	2.016
0.6	124.37	2.045
0.7	139.12	2.068
0.8	155.62	2.078
0.9	174.01	2.063
1.0	194.45	2.000



(ก)



(ข)

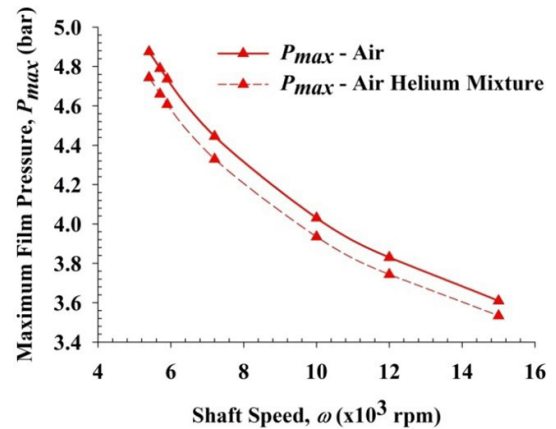
รูปที่ 6 การกระจายตัวของความดันฟิล์มสูงสุด ความหนาฟิล์มต่ำสุดของอากาศและอากาศผสมฮีเลียม เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่เพลลาได้รับ

กรณีการเปรียบเทียบความแตกต่างของสารหล่อลื่นที่เป็นอากาศกับสารหล่อลื่นที่เป็นอากาศผสมฮีเลียม เมื่อความเร็วรอบในการหมุนเพลลาเท่ากับ 7,200 รอบต่อนาที ระยะร่องลื่นเพลลากลมกับแบริงเท่ากับ 5 ไมโครเมตร และเมื่อภาระที่ร่องลื่นเพลลากลมได้รับเท่ากับ 0.75, 0.80, 0.85 0.90, 0.95, 1.00, 1.05 และ 1.10 นิวตัน ในรูปที่ 6 (ก) พบว่าความดันฟิล์มสูงสุดทั้งในกรณีที่เป็นอากาศ และอากาศผสมฮีเลียมมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความดันฟิล์มสูงสุดของอากาศผสมฮีเลียมเมื่อเทียบกับความดันฟิล์มสูงสุดของอากาศมีค่าลดลง

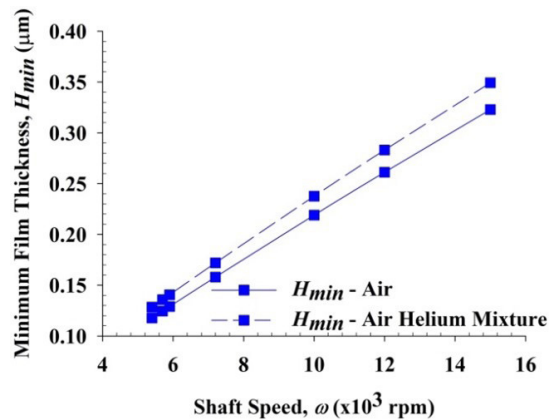
โดยมีค่าเท่ากับ 2.81%, 3.34%, 3.79%, 4.05%, 4.62%, 4.89%, 5.51%, 5.90% ตามลำดับ จากภาระโหลดน้อยไปมาก และความหนาฟิล์มต่ำสุดทั้งในกรณีที่เป็นอากาศและอากาศผสมฮีเลียมมีค่าลดลง แต่เมื่อพิจารณาความหนาฟิล์มต่ำสุดของอากาศผสมฮีเลียมเทียบกับความหนาฟิล์มต่ำสุดของอากาศพบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 14.73%, 14.05%, 13.15%, 12.34%, 11.61%, 10.94%, 10.32%, 9.76% ตามลำดับ จากภาระที่ได้รับน้อยไปมากตามรูปที่ 6 (ข)

จากรูปที่ 6 แสดงการกระจายตัวของความดันฟิล์มสูงสุด ความหนาฟิล์มต่ำสุดของอากาศและอากาศผสมฮีเลียม เมื่อความเร็วรอบในการหมุนเพลาท่ากับ 7,200 รอบต่อนาที ระยะร่องลื่นเพลากลมกับแบริงเท่ากับ 5 ไมโครเมตร และภาระที่ร่องลื่นเพลากลมได้รับเท่ากับ 0.75, 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 1.00, 1.05 และ 1.10 นิวตัน พบว่า เมื่อภาระที่ร่องลื่นเพลากลมได้รับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความดันฟิล์มสูงสุดเพิ่มขึ้นตามรูปที่ 6 (ก) แต่ความหนาฟิล์มต่ำสุดลดลงตามรูปที่ 6 (ข) ให้ผลทั้งในภาพรวมของสารหล่อลื่นที่เป็นอากาศและอากาศผสมฮีเลียม เนื่องจากความดันฟิล์มที่เพิ่มขึ้นเป็นไปตามสมการที่ (10) และ (12) สัมพันธ์กับมุมที่ลดลงเพื่อให้เกิดสมดุลการลอยตัวของเพลากับแบริง

กรณีการเปรียบเทียบความแตกต่างของสารหล่อลื่นที่เป็นอากาศกับสารหล่อลื่นที่เป็นอากาศผสมฮีเลียมเมื่อภาระที่ร่องลื่นเพลากลมได้รับเท่ากับ 0.95 นิวตัน ระยะร่องลื่นเพลากลมกับแบริงเท่ากับ 5 ไมโครเมตร และเมื่อความเร็วรอบในการหมุนเพลาท่ากับ 5,400, 5,700, 5,900, 7,500, 10,000, 12,000 และ 15,000 รอบต่อนาที ในรูปที่ 7 (ก) พบว่า ความดันฟิล์มสูงสุดทั้งในกรณีที่เป็นอากาศและอากาศผสมฮีเลียมมีค่าลดลง และความดันฟิล์มสูงสุดของอากาศผสมฮีเลียมเมื่อเทียบกับความดันฟิล์มสูงสุดของอากาศมีค่าลดลงโดยมีค่าเท่ากับ 8.22%, 8.14%, 8.09%, 7.22%, 5.97%, 5.42%, 4.47% ตามลำดับ จากความเร็วรอบน้อยไปมาก แต่ความหนาฟิล์มต่ำสุดทั้งในกรณีที่เป็นอากาศและอากาศผสมฮีเลียมมีค่าเพิ่มขึ้นและความหนาฟิล์มต่ำสุดของอากาศผสมฮีเลียมเมื่อเทียบกับความหนาฟิล์มต่ำสุดของอากาศพบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 3.55%, 3.74%, 3.86%, 4.64%,



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 การกระจายตัวของความดันฟิล์มสูงสุดความหนาฟิล์มต่ำสุดของอากาศและอากาศผสมฮีเลียม เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบที่เพลาดรับ

6.23%, 7.30%, 8.80% ตามลำดับ จากความเร็วรอบน้อยไปมากตามรูปที่ 7 (ข) เนื่องจากความแตกต่างของความหนืดอากาศผสมฮีเลียมมีค่ามากกว่าอากาศจึงทำให้ระยะการลอยตัวของเพลากับแบริงมากขึ้น รวมทั้งส่งผลให้ค่าความดันฟิล์มลดลงและความหนาฟิล์มมากขึ้นตาม

จากรูปที่ 7 แสดงการกระจายตัวของความดันฟิล์มสูงสุด ความหนาฟิล์มต่ำสุดของอากาศและอากาศผสมฮีเลียม เมื่อภาระที่ร่องลื่นเพลากลมได้รับเท่ากับ 0.95 นิวตัน ระยะร่องลื่นเพลากลมกับแบริงเท่ากับ 5 ไมโครเมตร และเมื่อ



ความเร็วรอบในการหมุนเพลากับ 5,400, 5,700, 5,900, 7,500, 10,000, 12,000 และ 15,000 รอบต่อนาที พบว่า เมื่อความเร็วรอบที่เพลาดูได้รับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความดันฟิล์มสูงสุดลดลงตามรูปที่ 7 (ก) แต่ความหนาฟิล์มต่ำสุดเพิ่มขึ้นตามรูปที่ 7 (ข) ให้ผลทั้งในภาพรวมของสารหล่อลื่นที่เป็นอากาศและอากาศผสมฮีเลียม เนื่องจากความเร็วรอบการหมุนของเพลาก็เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการไหลก๊าซที่เข้าและออกจากร่องลื่นเพลากลับมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งความดันฟิล์มที่อัตราการไหลสูงจะลดลงสอดคล้องกับผลของการลื่นไหลของโมเลกุลก๊าซที่มีค่าอัตราการไหลก๊าซเพิ่มขึ้น ทำให้ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นก๊าซลดลง และความสามารถในการรับภาระโหลดของแบริ่งก๊าซถูกลดลงด้วย [14] รวมทั้งช่องว่างระหว่างเพลากับแบริ่งจะเพิ่มขึ้นตามการลอยตัวที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น

4. อภิปรายผลและสรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของร่องลื่นเพลากลับอากาศผสมฮีเลียม (Air Helium Mixture) ที่มีพฤติกรรมไหลแบบของไหลนิวโทเนียน เพื่อหาความหนาฟิล์มและความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ด้วยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณเชิงตัวเลขตามระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง และระเบียบวิธีนิวตันราฟสัน ในการแก้สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ จากผลการจำลองสามารถสรุปพฤติกรรมได้ดังต่อไปนี้

1) การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียมทำให้ความดันฟิล์มสูงสุด และอัตราส่วนการเยื้องศูนย์สูงสุดมีค่าลดลง แต่ความหนาฟิล์มต่ำสุดและตำแหน่งมุมที่เกิดความหนาฟิล์มต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ในช่วงอัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียม 0.05 ถึง 0.80 และเมื่ออัตราส่วนผสมอากาศกับฮีเลียมเพิ่มขึ้นในช่วง 0.80 ถึง 1.00 จะทำให้มีผลของพฤติกรรมตรงกันข้ามกับช่วงแรก เนื่องจากระยะทางเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Mean Free Path) และความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ระยะทางเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลระหว่างอากาศผสมฮีเลียมสูงขึ้น มีผลกับระยะห่างระหว่างเพลากับแบริ่งมากขึ้นตาม และเมื่อความหนืดลดลงทำให้ระยะห่างระหว่างเพลากับแบริ่งต่ำลงด้วย สอดคล้อง

กับงานวิจัยพฤติกรรมของการหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุนอากาศด้วยส่วนผสมของอากาศและฮีเลียม [5]

2) การเพิ่มขึ้นของภาระที่เพลาดูได้รับส่งผลให้ความดันสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้น แต่ความหนาฟิล์มต่ำสุดของสารหล่อลื่นลดลง ให้ผลทั้งในภาพรวมของสารหล่อลื่นที่เป็นอากาศและอากาศผสมฮีเลียม

3) การเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบที่เพลาดูได้รับส่งผลให้ความดันสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นลดลง แต่ความหนาฟิล์มต่ำสุดของสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ให้ผลทั้งในภาพรวมของสารหล่อลื่นที่เป็นอากาศและอากาศผสมฮีเลียม

4) ความดันฟิล์มสูงสุดของสารหล่อลื่นที่เป็นอากาศผสมฮีเลียมจะต่ำกว่าสารหล่อลื่นที่เป็นอากาศอย่างเดียว เมื่อภาระที่เพลาดูได้รับเพิ่มขึ้น หรือความเร็วรอบที่เพลาดูได้รับเพิ่มขึ้น

5) ความหนาฟิล์มต่ำสุดของสารหล่อลื่นที่เป็นอากาศผสมฮีเลียมจะสูงกว่าสารหล่อลื่นที่เป็นอากาศอย่างเดียว เมื่อภาระที่เพลาดูได้รับเพิ่มขึ้น หรือความเร็วรอบที่เพลาดูได้รับเพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] W. A. Gross, *Fluid Film Lubrication*. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [2] K. S. Park, "The optimal helium fraction for air-helium gas mixture HDDs," *Microsystem Technologies*, vol. 22, no. 6, pp. 1307–1314, 2016.
- [3] Z. Tang, P. A. S. Mendez, and F. E. Talke, "Investigation of head/disk contacts in helium-air gas mixtures," *Tribology Letters*, vol. 54, no. 3, pp. 279–286, 2014.
- [4] C. Jonghak, "Analysis of thermal flying-height control for air-helium gas mixture in hard disk drives," M.S. thesis, Department of Mechanical Engineering and the Graduate School, Yonsei University, Seoul, 2012.

- [5] S. Chotvisut, "Characteristic of lubrication in air thrust bearing with air-helium mixture," M.S. thesis, Department of Mechanical Engineering Technology, College of Mechanical Engineering Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2018 (in Thai).
- [6] G. A. Bird, *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*, New York: Oxford University Press, 1994.
- [7] V. Casteli and J. Pirvics, "Review of numerical method in gas bearing film analysis," *Journal of Lubrication Technology*, vol. 90, no. 4, pp. 777-790, 1968.
- [8] H. Zhang, C. Zhu, and Q. Yang, "Approximate numerical solution of hydrodynamic gas journal bearing," in *Intelligent Robotics and Applications*. ICIRA 2008. Lecture Notes in Computer Science, Zhejiang, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, pp. 260-268.
- [9] D. Sfyris and A. Chasalevris, "An exact analysis solution of the Reynolds equation for the finite journal bearing lubrication," *Tribology International*, vol. 55, pp. 46-58, 2012.
- [10] A. Chasalevris and D. Sfyris, "Analytical evaluation of the finite journal bearing impedance forces using the exact analytical solution of the Reynolds equation," *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, vol. 2, no. 5, pp. 423-432, 2014.
- [11] Y. B. Lee, H. D. Kwak, C. H. Kim, and N. S. Lee, "Numerical prediction of slip flow effect on gas-lubricated journal bearing for MEMS/MST-based micro-rotating machinery," *Tribology International*, vol. 38, no. 2, pp. 89-96, 2005.
- [12] B. J. Hamrock, S. R. Schmid, and B. O. Jacobson, *Fundamental of Fluid Film Lubrication*, 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2004.
- [13] N. Liu, J. Zheng, and D. Bogy, "Thermal flying-height control slider in hard disk drives filled with air-helium gas mixtures," in *Applied Physics Letters*, vol. 95, no. 21, pp. 213505-213505-3, 2009.
- [14] H. Huang, G. Meng, and J. Chen, "Investigations of slip effect on the performance of micro gas bearing and stability of micro rotor-bearing systems," *Sensors*, vol. 7, no. 8, pp. 1399-1414, 2007.