

พฤติกรรมการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของร่องลื่นเพลากลมอากาศ

อภิชาติ ฉัตรพงศ์เจริญ^{1,*}, ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว², เจษฎา พานิชกรณ³

^{1,2,3} วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Received: 12 March 2020

Revised: 7 October 2020

Accepted: 7 October 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมการหล่อลื่นทางทฤษฎีแบบไฮโดรไดนามิกของร่องลื่นเพลากลมหล่อลื่นด้วยอากาศแบบแบร์ริงสมมาตร ในสภาวะคงตัวสารหล่อลื่น เมื่อไม่พิจารณาผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ภายในร่องลื่นเพลากลม ด้วยการจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสลับเนื่องร่วมกับระเบียบวิธีนิวตันราฟสัน แก๊สการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ เพื่อหาการกระจายตัวของความดันฟิล์มอากาศ การกระจายตัวของความหนาฟิล์มอากาศ รวมถึงการกระจายตัวของอัตราส่วนการเยื้องศูนย์ของเพลากับแบร์ริง ภายใต้มุมการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุน ภาระที่ร่องลื่นได้รับ ช่องว่างระหว่างเพลากับแบร์ริง และอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า จากผลการจำลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนและอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า ทำให้ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและอัตราส่วนการเยื้องศูนย์สูงสุดมีค่าลดลง แต่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและตำแหน่งมุมที่เกิดความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มภาระที่ร่องลื่นได้รับและค่าช่องว่างระหว่างเพลากับแบร์ริง ทำให้ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและอัตราส่วนการเยื้องศูนย์สูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและตำแหน่งมุมที่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลง

คำสำคัญ : การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก การหล่อลื่นด้วยอากาศ ร่องลื่นเพลากลมอากาศแบบแบร์ริงสมมาตร
สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์

*ผู้ประสานงานหลัก; อีเมล: s5903017810111@kmutnb.ac.th

Lubrication Behavior of Hydrodynamic Lubrication in Air Journal Bearing

Apichart Chutpongcharoen^{1,*}, Khanittha Wongseedakaew², Jesda Panichakorn³

^{1,2,3} College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North

Received: 12 March 2020

Revised: 7 October 2020

Accepted: 7 October 2020

ABSTRACT

This paper presents the theoretical behavior of hydrodynamic air lubrication of finite type air journal bearing under steady-state condition without considering the effect of temperature changes on the air film in the journal bearing. A numerical scheme based on the finite difference method with the Newton-Raphson method for solving modified Reynolds equation to obtain the air film pressure and air film thickness profiles include eccentricity ratio profiles under angle profile with various shaft speeds, applied load, bearing clearance and air inlet temperature. The simulation results show the increasing of shaft speed and the air inlet temperature, the maximum film pressure and eccentricity ratio decrease but the minimum film thickness and angle increase. Whereas when the increase of applied load and the bearing clearance occur, the maximum film pressure and eccentricity ratio increase but minimum film thickness and angle decrease.

Keywords: hydrodynamic lubrication, air lubrication, finite type air journal bearing, modified Reynolds equation

*Corresponding author; Email: s5903017810111@kmutnb.ac.th

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หลักการหล่อลื่นในยุคอดีตจนถึงปัจจุบันมีความสำคัญเพื่อลดความเสียหาย ลดการสึกหรอ และเพื่อช่วยรับภาระโหลดของผิวสัมผัสสองผิวที่เคลื่อนที่สัมผัสกัน โดยใช้สารหล่อลื่นเคลือบระหว่างผิวสัมผัสสองผิว สารหล่อลื่นอาจจะเป็นของเหลว ของแข็ง หรือก๊าซ ซึ่งการหล่อลื่นที่ดีจำเป็นต้องทำให้ฟิล์มสารหล่อลื่นมีความหนาเพียงพอเพื่อป้องกันการแตะสัมผัสกันทั้งสองชิ้นงาน โดยจะทำให้เกิดความเสียหายที่ผิวชิ้นงานทั้งสอง การศึกษาพฤติกรรมหล่อลื่นของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล จึงเป็นเหตุผลในการเพิ่มประสิทธิภาพ และเพิ่มแนวทางการบำรุงรักษาเครื่องจักรให้มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมสารหล่อลื่นที่เป็นก๊าซ (อากาศ) ในร่องลื่นเพลากลมมีหน้าที่รองรับเพลาลูกเบี้ยวทำงานได้อย่างเหมาะสมตามแนวรัศมีการหมุนของเพลาลูกเบี้ยว และถูกใช้งานเป็นที่แพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรเฉพาะ เช่น มอเตอร์ฮาร์ดดิสก์ โดยใช้องค์ความรู้ทางกลศาสตร์ของไหลเน้นการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เกี่ยวกับพฤติกรรมสารหล่อลื่นแบบก๊าซบนรูปร่างต่างๆ ของพื้นผิวการไหล ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการทำแบบจำลองเหตุการณ์การทดลอง เพื่อหาความหนาฟิล์มที่สัมพันธ์กับความดันฟิล์มของสารหล่อลื่นภาระโหลด อัตราส่วนการเยื้องศูนย์เพลาลูกเบี้ยว และช่องว่างระหว่างเพลาลูกเบี้ยวกับแบร็ง Piekos (2000) แบร็งแบบลักษณะสันมีพฤติกรรมการรั่วไหลของสารหล่อลื่นออกด้านข้างทั้งสองอย่างมาก ซึ่งเหมือนกับว่าแบร็งจะไม่ได้รับแรงกดของไหลเลย และเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้การรับภาระโหลดหายไปจากผลของการที่ไม่สามารถอัดตัวของไหลได้ Huang et al. (2007) ผลของการลื่นไหลของโมเลกุลก๊าซที่มีค่าอัตราการไหลก๊าซเพิ่มขึ้น ทำให้ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นก๊าซลดลงและความสามารถในการรับภาระโหลดของแบร็งก๊าซถูกลดลงด้วย Zhang et al. (2008) ได้นำเสนอการแก้สมการเรย์โนลด์ของร่องลื่นเพลากลมอากาศ ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์ย่อยไม่เชิงเส้นที่มีความยากในการแก้ปัญหาเชิงตัวเลข ทำให้การแก้สมการทางตรงต้องเปลี่ยนรูปสมการเป็นสมการอนุพันธ์เชิงเส้น เพื่อการประมาณค่าที่เหมาะสมและแก้ไขปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (FDM) การศึกษาแสดงให้เห็นว่าการประมาณค่าเชิงตัวเลขที่ดีและการแก้ไขปัญหาลักษณะเชิงตัวเลข มีข้อมูลเหมาะสมสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากกว่าการแก้ไขปัญหาลักษณะเชิงตัวเลขทางตรง และใช้เวลาในการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ที่น้อยกว่า จากเดิมที่คิดว่าการแก้ไขปัญหาลักษณะเชิงตัวเลขทางตรงดีกว่า อีกอย่างที่น่าสนใจ คือ อัตราการเยื้องศูนย์ที่ถูกแก้ไขปัญหาลักษณะเชิงตัวเลขมีข้อมูลที่เหมาะสมสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองภายใต้ความแตกต่างเมื่อเปลี่ยนแปลงแบร็งนมเบอร์ โดยการแก้ไขปัญหาลักษณะเชิงตัวเลขจะมีค่ามากกว่าเล็กน้อย เมื่ออัตราการเยื้องศูนย์น้อยๆ และมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย เมื่ออัตราการเยื้องศูนย์มากๆ Andrés (2010) รูปแบบการหล่อลื่นด้วยก๊าซมีลักษณะเป็นฟิล์มสารหล่อลื่นของแบร็ง และกลายเป็นองค์ประกอบทางกลที่ให้ความแข็งแรง (ความเป็นสปริงอากาศ) ความหน่วง และความเฉื่อย โดยทำหน้าที่เป็นตัวแปรโครงสร้างความเสถียรของพฤติกรรมเคลื่อนที่ของระบบโรเตอร์ Sfyris and Chasalevris (2012) นำเสนอการเปรียบเทียบวิธีการแก้ปัญหาลักษณะเชิงตัวเลขของการหล่อลื่นแบบแบร็งสมมาตร โดยการศึกษาการเปรียบเทียบอัตราส่วนการเยื้องศูนย์ที่เพิ่มขึ้นของการหล่อลื่นแบบแบร็งสมมาตรด้วยวิธีการประมาณค่าแก้สมการเชิงตัวเลข (FDM) โดยอัตราส่วนการเยื้องศูนย์ที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดความดันสูงสุดมากขึ้นตามลำดับด้วย Chasalevris and Dimitris (2014) หลักในการดำเนินการออกแบบตัวแปรสำหรับแบร็งเพลากลมแบบสมมาตร คือ การวิเคราะห์ค่าที่แสดงความสามารถในการรับภาระโหลด มุมที่ความดันสูงสุด ที่มีผลสอดคล้องกับการแก้สมการแบบเชิงตัวเลข พบว่าให้ผลใกล้เคียงมากกับงานวิจัยรุ่นก่อน โดยการเปรียบเทียบผลการแก้สมการเรย์โนลด์แบบวิธี Analysis, FEM, FDM, CFD ซึ่งให้ผลไปในทิศทางเดียวกันในการเพิ่มค่าอัตราการเยื้องศูนย์ ทำให้ความดันฟิล์มเพิ่มขึ้นตาม Müller et al. (2017) ช่องว่างระหว่างเพลาลูกเบี้ยวกับแบร็ง (Air gap bearing) มีผลอย่างมากกับ

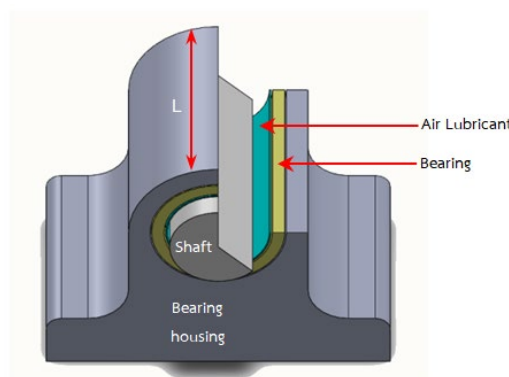
ความแข็งแรง และความถี่ธรรมชาติของโรเตอร์ นั้นหมายถึง ช่องว่างเล็กๆ จะเป็นผลให้ความแข็งแรงสูง และความถี่ธรรมชาติสูง รวมทั้งความยาวแบร์ริงมีความสำคัญในการเพิ่มภาวะเงื่อนไขการกระจายตัวของเสถียรอย่างมาก Chotvisut et al. (2018) ได้ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบด้วยสารหล่อลื่นอากาศ เมื่อพิจารณาการเลื่อนไหลของโมเลกุลชั้นอากาศ พบว่าความดันฟิล์มอากาศสูงที่สุดมีค่ามากกว่าการไม่พิจารณาผลการเลื่อนไหลของโมเลกุลชั้นอากาศ และความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าน้อยลง ส่วนภาระที่เพิ่มขึ้นทำให้ความดันฟิล์มอากาศเพิ่มขึ้น แต่ความหนาฟิล์มอากาศลดลง และเมื่อเพิ่มความเร็วยกกับอุณหภูมิอากาศทางเข้าทำให้ความดันฟิล์มอากาศลดลง แต่ความหนาฟิล์มอากาศเพิ่มขึ้น Bumrungpuech et al. (2018) ได้ศึกษาการหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุนแบบคิมเบอร์ลีย์ด้วยสารหล่อลื่นชนิดนอนนิวโตเนียน โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน แก๊สการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ เพื่อหาการกระจายตัวของความดัน และความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของร่องลื่นเพลากลมอากาศ ในอุปกรณ์มอเตอร์ฮาร์ดดิสก์รุ่น WD5000AAKX โดยใช้อากาศเป็นสารหล่อลื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงสภาวะความเร็วรอบ ภาระโหลด ช่องว่างระหว่างเพลากับแบร์ริง และอุณหภูมิอากาศทางเข้า โดยที่อุณหภูมิภายในขณะทำงานคงที่

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ลักษณะรูปร่างของร่องลื่นเพลากลม ขณะลอยตัวเมื่อมีสารหล่อลื่นแทรกตัวระหว่าง Shaft และ Bearing แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ลักษณะของแผ่นร่องลื่นเพลากลม

1. สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์

จากสมการนาเวียร์-สโตก เป็นสมการของแรงที่เกิดขึ้นกับอนุภาคของของไหลตามแกน x, y, z เมื่อความหนาของสารหล่อลื่นหรือของไหลที่อยู่ระหว่างผิวสัมผัสมีความหนาน้อยมาก เมื่อเทียบกับรัศมีของผิวสัมผัส จึงไม่คิดผลจากความโค้งของผิวสัมผัส สามารถพิจารณาเป็นการไหลในพิกัด x, y, z และพิจารณาค่า Reynolds Number ของสารหล่อลื่นน้อยกว่า 1.0 จึงเป็นการหล่อลื่นแบบการไหลราบเรียบ (Laminar flow) ที่อยู่ในช่วง Fully

ปัญญา เชี่ยวชาญ เบิกบาน คุณธรรม

Intellectual, Professional, Cheerfulness, Morality

developed และไม่คิดผลของแรงที่เกิดจาก Body force ดังนั้นการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นในฟิล์มสารหล่อลื่นจากสมมุติฐานที่เข้าร่วมกับขนาดของแรงที่กระทำกับฟิล์มสารหล่อลื่นแบบ Order of magnitude จะได้ความดันตลอดความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าคงที่ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความดันและความเค้นเฉือนตามพิกัด x, y, z ดังนี้

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

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

ภายใต้ขอบเขตสารหล่อลื่นเป็นของไหลนิวโตเนียน (Newtonian fluid) แบบ Non-slip flow จะได้สมการเรย์โนลด์ (Reynolds equation)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\rho h^3}{12\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\rho h^3}{12\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) \right\} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{u_2 - u_1}{2} \right) \rho h \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\frac{v_2 - v_1}{2} \right) \rho h \right\} + \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \quad (3)$$

สำหรับ Finite bearing มีค่า L/D อยู่ระหว่าง $1/4$ ถึง 4 หรือให้ L/D เท่ากับ 1 ในสภาวะคงตัว (Steady state) เมื่อสมมติให้อากาศเป็นก๊าซในอุดมคติ (Ideal gas) คิดในกรณีไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศ และอากาศเป็นของไหลอัดตัวได้ (ความหนาแน่นไม่คงที่) และพิจารณาผลการเลื่อนไถลของโมเลกุลชั้นอากาศ (Molecular slip flow) ที่ค่า $0.01 \leq K_N \leq 15$ จะได้สมการเรย์โนลด์ในรูปแบบระบบพิกัด $R - \theta - Y$ สำหรับร่องลื่นเพลากลมแบบแบร์ริงสมมาตร (Finite type air journal bearing) ในสภาวะคงตัว ดังนี้

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

$$\text{เมื่อให้ } \Psi(P, H) = PH^3 \left(1 + \frac{6K_N H_a}{PH} \right)$$

$$\Lambda = \frac{6\mu_o \bar{\mu} \omega R^2}{p_a c^2} \quad (5)$$

$$\text{และ } \bar{\mu} = \frac{bT^{3/2}}{S+T} \quad (6)$$

$$b = 1.485 \times 10^{-6} \text{ kg / m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{1/2}, S = 110.4 \text{ K}$$

โดยมีเงื่อนไขขอบสมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ ดังนี้

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

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

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

2. สมการความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่น

ลักษณะทางกายภาพและพิกัดต่างๆ ของร่องลื่นเพลากลม แสดงดังภาพที่ 2 (ก) และภาพที่ 2 (ข) เมื่อไม่คิดผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของร่องลื่นเพลากลม จะได้สมการความหนาฟิล์มอากาศ ดังนี้

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

เมื่อทำให้อยู่ในรูปไร้มิติ

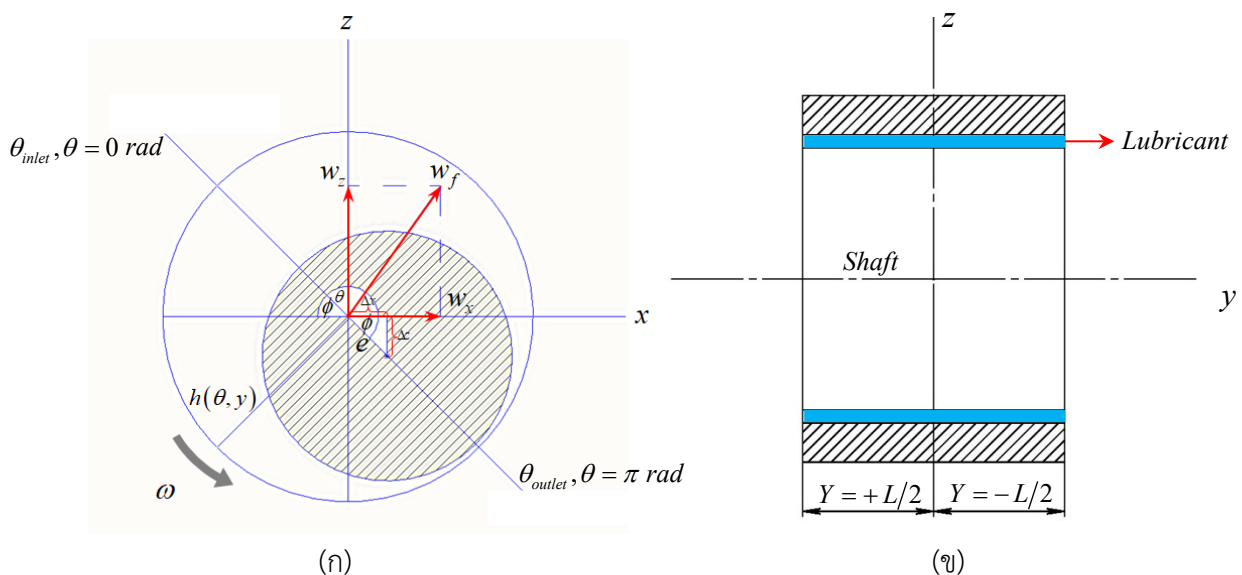
$$H = 1 + \varepsilon \cos \theta \quad (8)$$

3. สมการสมดุลแรงที่กระทำ

จากการหมุนเพลาลูกทำให้สารหล่อลื่นเกิดผลรวมสมดุลแรงตามแนวแกน x และ z ในสภาวะคงตัว เมื่อเพลาลูกหมุนผ่านแต่ละมุมที่เปลี่ยนไปในขอบเขตตั้งแต่มุมเริ่มต้นที่ 0 จนถึงมุมทางออกที่ (π) ดังนั้นภาระที่กระทำต่อร่องลื่นเพลากลมอากาศเท่ากับผลรวมของภาระที่กระทำตามแนวแกน x และ z ตลอดความยาวแบร์ริงและตลอดมุมที่เปลี่ยนไป เนื่องจากมีความดันที่กระทำต่อเพลาลูก

$$w_x = \int_{-L/2}^{L/2} \int_0^\pi p r_b \cos \theta d\theta dy \quad (9)$$

$$w_z = \int_{-L/2}^{L/2} \int_0^\pi p r_b \sin \theta d\theta dy \quad (10)$$



ภาพที่ 2 แสดงพิกัดที่ใช้ในการจำลองของร่องลื่นเพลากลมอากาศพิกัด (ก) $x - z - \theta$, (ข) $y - z$

4. ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข

การประยุกต์ใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมร่วมกับระเบียบวิธีนิวตันราฟสันแก้สมการโมดิไฟด์เรย์โนลด์ ซึ่งเป็นสมการไม่เชิงเส้นชั้นสูงเพื่อหาคำตอบ โดยสมมติค่าความหนาของฟิล์มอากาศ เพื่อคำนวณหาค่าความดันของฟิล์มอากาศ อัตราการเยื้องศูนย์เพลลา ตำแหน่งมุมที่เปลี่ยนแปลงไปและทำการคำนวณซ้ำจนกระทั่ง

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

และการรับภาระเนื่องจากความดันของฟิล์มอากาศ

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

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

วิธีดำเนินการวิจัย

บทความวิจัยนี้พิจารณาองล้อเพลากลมอากาศ ที่เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ มอเตอร์ฮาร์ดดิสก์ หรือมอเตอร์ความเร็วสูง (Spindle motor) จึงได้ทำการตรวจวัดอุปกรณ์จากมอเตอร์ตัวอย่างในฮาร์ดดิสก์ รุ่น WD5000AAKX ซึ่งเป็นขนาดใช้งานจริงเพื่อศึกษาแนวโน้มของพฤติกรรมจากอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ขององล้อเพลากลมแสดงดังตารางที่ 1 และสมบัติของอากาศแสดงดังตารางที่ 2 โดยจะศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการหล่อลื่นทางทฤษฎีขององล้อเพลากลมอากาศแบบเบริงสมมาตร (Finite type air journal bearing) ภายใต้การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกโดยใช้อากาศเป็นสารหล่อลื่น และมีพฤติกรรมเป็นของไหลนิวโตเนียน ด้วยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษา Fortran

ตารางที่ 1 ขนาดขององล้อเพลากลม

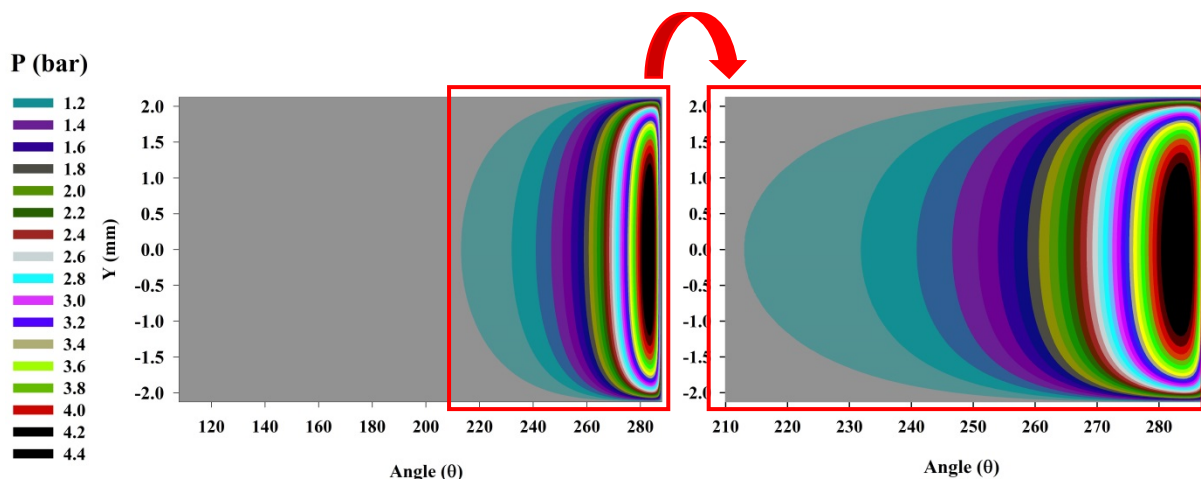
มิติขององล้อเพลากลม	ขนาด
Bearing radius, r_b	2.125 mm
Shaft radius, r_s	2.120 mm
Bearing length, L	4.250 mm

ตารางที่ 2 สมบัติของอากาศ

สมบัติของอากาศ	หน่วย
Atmosphere pressure, p_a	1.01325 bar
Absolute viscosity at 40 °C, μ_a	1.91×10^{-5} kg/m-s
Density at 40 °C, ρ	1.13 kg/m ³
Molecular mean free path, λ_a	64.3 nm

ผลการวิจัย

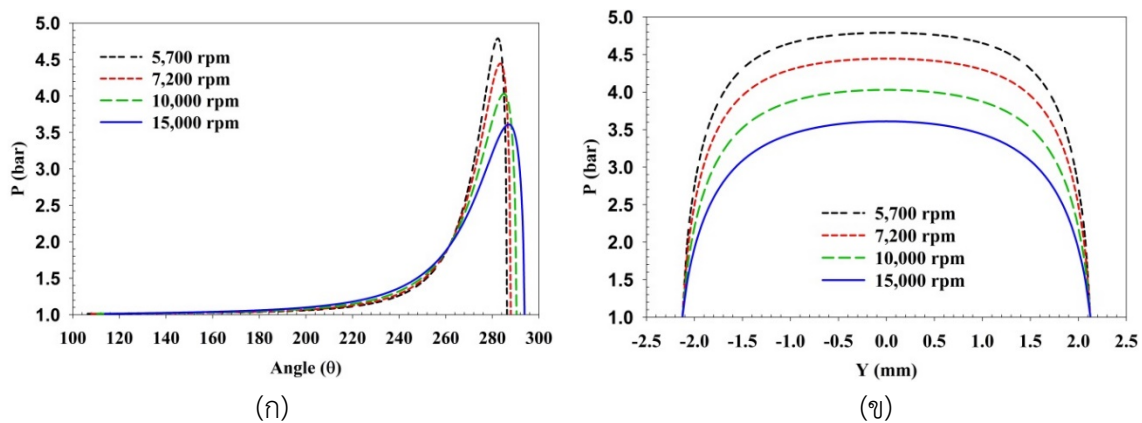
จากการจำลองผล เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลาท่อกับ 7,200 rpm ภาระที่ร่อนเส้นเพลากลมได้รับ เท่ากับ 0.95 N อุณหภูมิอากาศที่เข้าร่อนเส้นเพลากลมเท่ากับ 40 °C ช่องว่างระหว่างเพลากับแบร้ง เท่ากับ 5 μ m เมื่อพิจารณาผลจากการเลื่อนไหลของโมเลกุลของชั้นอากาศ พบว่าความดันฟิล์มอากาศเริ่มต้นเท่ากับความดันบรรยากาศตั้งแต่มุมที่อากาศเริ่มเข้าและมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจนถึงความดันฟิล์มอากาศสูงสุดใกล้บริเวณทางออกของมุมที่เกิดความหนาฟิล์มต่ำสุดหรือประมาณ 97% ของมุมทางออก (π) ส่วนตามแนวความยาวของแบร้งบริเวณตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวแบร้งจะมีค่าความดันฟิล์มอากาศสูงสุดเกิดขึ้น และมีค่าลดลงมาเล็กน้อยแบบรูปทรงพลาไปว่าค่าตามความยาวแบร้งทั้ง 2 ฝั่งที่ประมาณ 70% ของความยาวแบร้ง และลดลงอย่างรวดเร็วใกล้บริเวณทางออกตามความยาวแบร้งที่ประมาณ 30% ตลอดความยาวแบร้ง เนื่องจากพื้นที่ภายใต้การไหลของอากาศถูกเปลี่ยนจากความเร็วไปเป็นความดัน และความดันฟิล์มอากาศจะมีค่าลดลงเมื่อใกล้บริเวณทางออกจนมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศอีกครั้ง โดยความดันฟิล์มอากาศสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 4.44 bar ตำแหน่งมุมที่อากาศเข้า (Angle) เท่ากับ 107.943 องศา และตำแหน่งมุมที่อากาศออกเท่ากับ 287.943 องศา แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงการกระจายตัวของความดันฟิล์มอากาศที่แผ่นร่อนเส้นเพลากลม เมื่อ Shaft speed = 7,200 rpm, Load = 0.95 N, Air inlet temperature = 40 °C และ Bearing clearance = 5 μ m

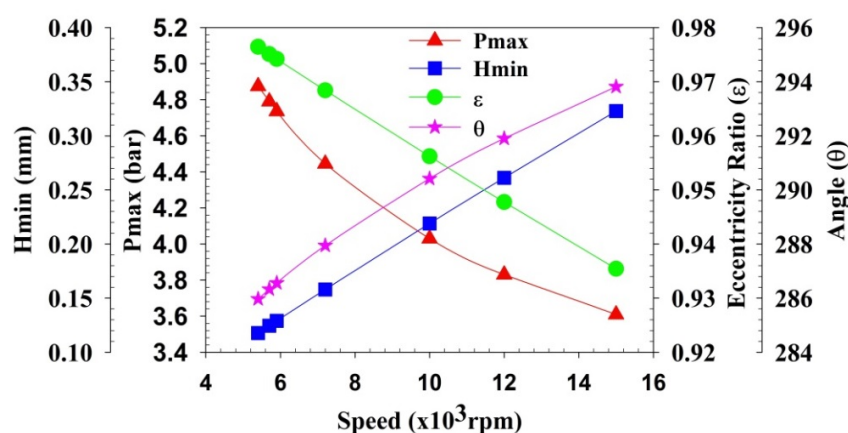
ภาพที่ 4 นำเสนอการเปลี่ยนแปลงค่าความดันฟิล์มอากาศเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของมุม θ ที่เพิ่มขึ้น ภายใต้ความเร็วรอบในการหมุนของเพลาคือ 5,700, 7,200, 10,000, 15,000 rpm ภาระที่ร่อนเส้นเพลากลมได้รับ

เท่ากับ 0.95 N อุณหภูมิของอากาศที่เข้าร่องลื่นเพลากลมมีค่าเท่ากับ 40 °C ช่องว่างระหว่างเพลากับแบร็งเท่ากับ 5 μm พบว่าเมื่อความเร็วรอบเพลามีค่าเพิ่มขึ้น ความดันของฟิล์มอากาศที่อยู่ภายใต้ผิวของร่องลื่นมีค่าลดลง เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับความเร็วรอบของเพลที่เพิ่มขึ้น โดยความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและความเร็วรอบในการหมุนของเพลามีค่าเท่ากับ (4.79 bar, 5,700 rpm), (4.44 bar, 7,200 rpm), (4.03 bar, 10,000 rpm) และ (3.61 bar, 15,000 rpm)



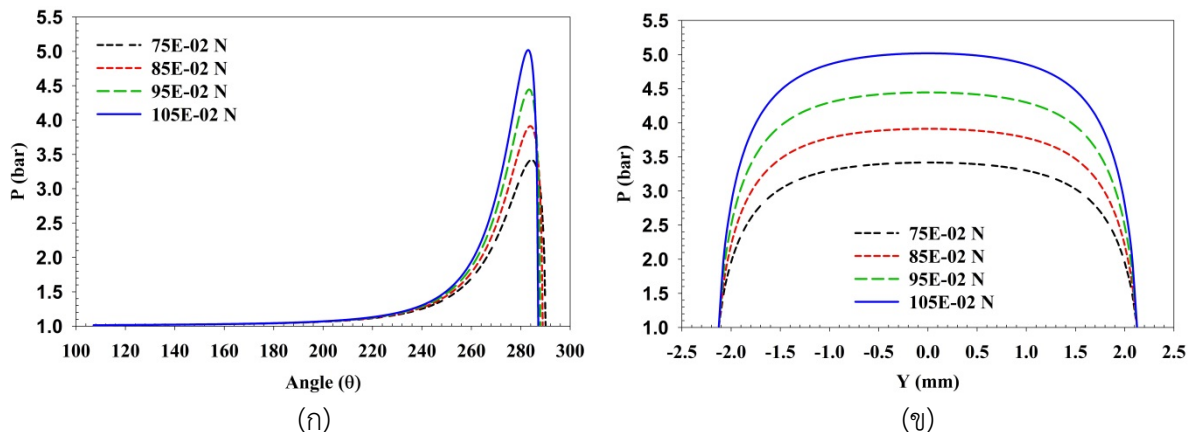
ภาพที่ 4 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศ เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลเท่ากับ 5,700 rpm, 7,200 rpm, 10,000 rpm, 15,000 rpm (ก) ระบบพิกัด $P-\theta$ (ข) ระบบพิกัด $P-Y$

ภาพที่ 5 พบว่าความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางสูงสุดมีค่าลดลง แต่ตำแหน่งมุมที่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วรอบการหมุนเพลเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่ร่องลื่นเพลากลมและออกจากร่องลื่นเพลากลมมีค่าเพิ่มขึ้น รวมทั้งการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบเพลามีอิทธิพลต่อความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดค่อนข้างมาก



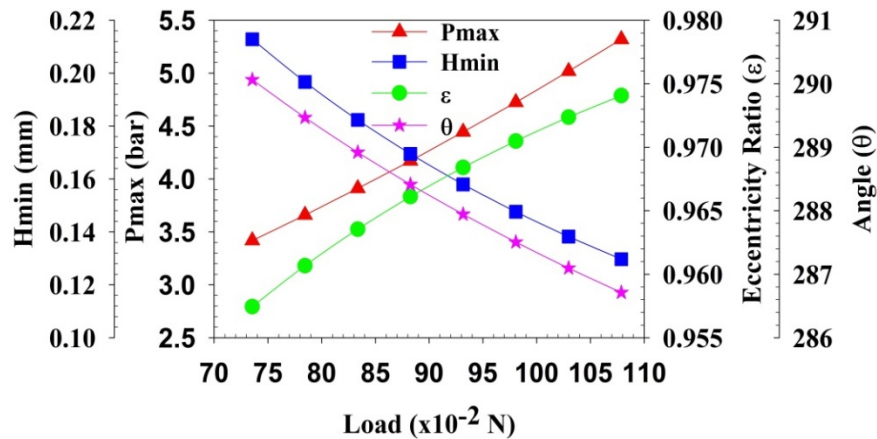
ภาพที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันฟิล์มอากาศสูงสุด อัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางสูงสุด ตำแหน่งมุมที่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด และความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเพล

ภาพที่ 6 นำเสนอการเปลี่ยนแปลงค่าความดันฟิล์มอากาศเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของมุม θ ที่เพิ่มขึ้น ภายใต้ภาระที่ร่องลื่นเพลากลมได้รับที่ 0.75, 0.85, 0.95, 1.05 N ความเร็วรอบในการหมุนของเพลากับ 7,200 rpm อุณหภูมิของอากาศที่เข้าร่องลื่นเพลากลมมีค่าเท่ากับ 40 °C ช่องว่างระหว่างเพลากับแบร็ริงเท่ากับ 5 μm พบว่าภาระที่ร่องลื่นเพลากลมได้รับมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความดันของฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น โดยความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและภาระที่ร่องลื่นเพลากลมได้รับ มีค่าเท่ากับ (3.42 bar, 0.75 N), (3.91 bar, 0.85 N), (4.44 bar, 0.95 N) และ (5.02 bar, 1.05 N)



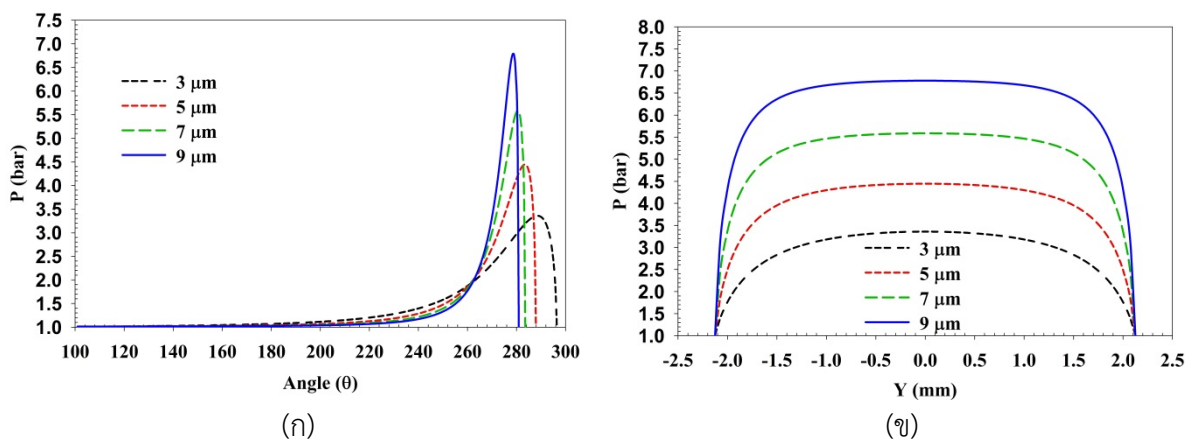
ภาพที่ 6 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศ เมื่อภาระที่ร่องลื่นเพลากลมเท่ากับ 0.75 N, 0.85 N, 0.95 N, 1.05 N (ก) ระบบพิกัด P- θ (ข) ระบบพิกัด P-Y

แสดงดังภาพที่ 7 พบว่าความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและอัตราส่วนการเอียงศูนย์สูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและตำแหน่งมุมที่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาผลการเลื่อนไหลของโมเลกุลชั้นอากาศ Chotvisut et al. (2018) ทำให้ความหนืดของอากาศมีค่าลดลง เป็นผลให้อากาศไหลออกจากร่องลื่นเพลากลมได้ง่ายขึ้น ทำให้ช่องว่างระหว่างเพลากับแบร็ริงน้อยลง หรือความหนาของฟิล์มอากาศมีค่าลดลง และผลจากการลดลงของความหนาฟิล์มอากาศทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของการไหลของอากาศในลักษณะขัดขวางการไหล ส่งผลให้ความดันฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของภาระที่ร่องลื่นเพลากลมได้รับมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของความดันฟิล์มอากาศและความหนาฟิล์มอากาศค่อนข้างมาก ส่วนตำแหน่งมุมที่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลงตามภาระที่ร่องลื่นเพลากลมได้รับ เพื่อให้เกิดสมดุลตามสมการ (9) แนวแกน x และสมการ (10) แนวแกน z ทำให้ตำแหน่งมุมของแรงลัพธ์สมดุลมีค่าลดลงตาม รวมทั้งอัตราส่วนการเอียงศูนย์สูงสุดที่เพิ่มขึ้นตามมุมที่เกิดแรงลัพธ์สมดุล (w_f) เนื่องจากภาระที่ร่องลื่นเพลากลมได้รับ



ภาพที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันฟิล์มอากาศสูงสุด อัตราส่วนการเยื้องศูนย์สูงสุด ตำแหน่งมุมที่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด และความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่เพลลาได้รับ

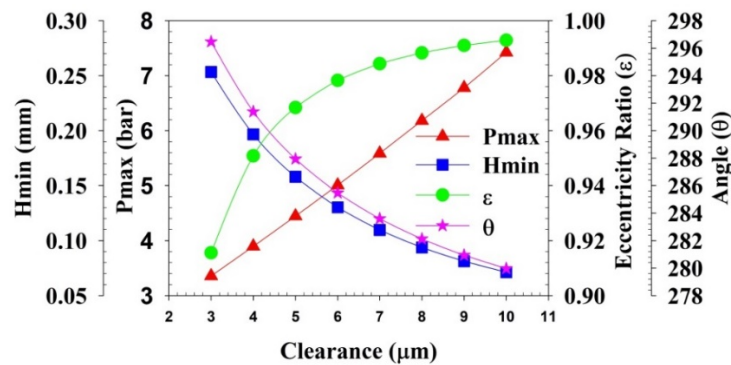
ภาพที่ 8 นำเสนอการเปลี่ยนแปลงค่าความดันฟิล์มอากาศเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของมุม θ ที่เพิ่มขึ้น ภายใต้ช่องว่างระหว่างเพลลากับแบร็ริงหรือระยะห่างร่องลื่นเพลลากลมอากาศ (Bearing clearance) ที่ 3, 5, 7 และ 9 μm ภาระที่ร่องลื่นเพลลากลมได้รับเท่ากับ 0.95 N ความเร็วรอบในการหมุนของเพลลาเท่ากับ 7,200 rpm อุณหภูมิของอากาศที่เข้าร่องลื่นเพลลากลมมีค่าเท่ากับ 40 °C พบว่าเมื่อ Bearing clearance มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่การไหลของอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงตามระยะ Clearance โดยความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและช่องว่างระหว่างเพลลากับแบร็ริง มีค่าเท่ากับ (3.36 bar, 3 μm), (4.44 bar, 5 μm), (5.58 bar, 7 μm) และ (6.78 bar, 9 μm)



ภาพที่ 8 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศ เมื่อ Bearing clearance เท่ากับ 3 μm , 5 μm , 7 μm , 9 μm (ก) ระบบพิกัด P- θ (ข) ระบบพิกัด P-Y

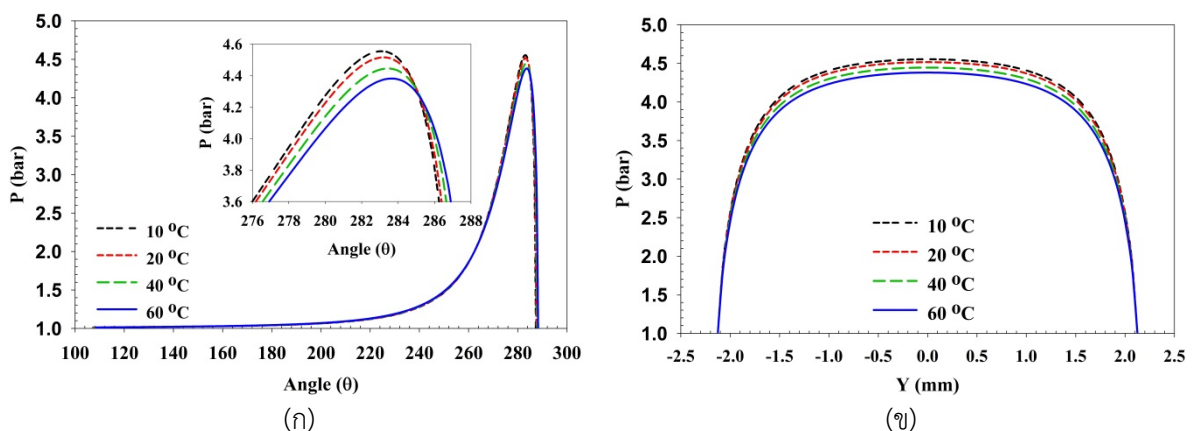
ภาพที่ 9 พบว่าความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและอัตราส่วนการเยื้องศูนย์สูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า Bearing clearance ที่มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะช่องว่างระหว่างเพลลากับแบร็ริงที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้อากาศไหลออกจากร่องลื่นเพลลากลมได้ง่ายขึ้น และมีผลให้ระยะ Bearing clearance ลดลง หรือความหนาฟิล์มอากาศลดลง ซึ่งจะเปลี่ยนแปลง

ไปในลักษณะขัดขวางการไหลหล่อลื่นของอากาศ และเกิดการเปลี่ยนสถานะจากความเร็วเป็นความดัน ส่วนตำแหน่งมุมที่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลงตาม Bearing clearance ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดความดันฟิล์มอากาศที่สูงเป็นผลให้เกิดแรงสมดุลการลอยตัวเพลานในสภาวะการทำงาน เมื่อความดันฟิล์มอากาศสูงทำให้แรงในแนวแกน z มีค่าเพิ่มขึ้นตามสมการ (10) เป็นผลให้ตำแหน่งมุมของแรงลัพธ์สมดุลมีค่าลดลงตามขนาดแรงลัพธ์สมดุลที่เปลี่ยนแปลงไป



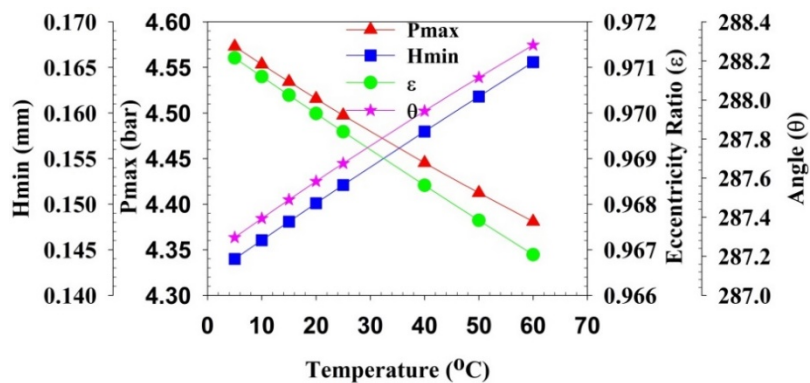
ภาพที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงความดันฟิล์มอากาศสูงสุด อัตราส่วนการเยื้องศูนย์สูงสุด ตำแหน่งมุมที่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด และความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงช่องว่างระหว่างเพลากับแบร้งหรือระยะห่างรองรับเพลากลมอากาศ (Bearing clearance)

ภาพที่ 10 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มอากาศ เมื่ออุณหภูมิของอากาศที่เข้าเครื่องลื่นเพลากลมมีค่าเท่ากับ 10 °C, 20 °C, 40 °C และ 60 °C ภาระที่รองรับเพลากลมได้รับเท่ากับ 0.95 N ความเร็วรอบในการหมุนของเพลากับ 7,200 rpm พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่เข้าเครื่องลื่นเพลากลมได้รับมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าลดลง เนื่องจากความหนืดของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิตามสมการ (6) โดยความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและอุณหภูมิของอากาศที่เข้าเครื่องลื่นเพลากลม มีค่าเท่ากับ (4.55 bar, 10 °C), (4.51 bar, 20 °C), (4.44 bar, 40 °C) และ (4.38 bar, 60 °C)



ภาพที่ 10 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศ เมื่ออุณหภูมิของอากาศที่เข้าเครื่องลื่นเพลากลมมีค่าเท่ากับ 10 °C, 20 °C, 40 °C และ 60 °C (ก) ระบบพิกัด P-θ (ข) ระบบพิกัด P-Y

ภาพที่ 11 พบว่าความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและอัตราส่วนการเยื้องศูนย์สูงสุดมีค่าลดลง แต่ค่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและตำแหน่งมุมที่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิอากาศที่เข้าร่องลื่นเพลากลมมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนืดอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นตามสมการ (6) และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศที่เข้ามีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของความดันฟิล์มอากาศค่อนข้างน้อย



ภาพที่ 11 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันฟิล์มอากาศสูงสุด อัตราส่วนการเยื้องศูนย์สูงสุด ตำแหน่งมุมที่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด และความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศที่เข้าร่องลื่นเพลากลม

อภิปรายผล

1. เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลามีค่าเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและอัตราส่วนการเยื้องศูนย์สูงสุดของเพลามีค่าลดลง แต่ตำแหน่งมุมที่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยังส่งผลให้ค่าความหนืดของอากาศที่เข้าร่องลื่นเพลากลมและออกจากร่องลื่นเพลากลมมีค่าเพิ่มขึ้น รวมทั้งการเพิ่มขึ้นของความเร็วยังส่งผลให้ค่าความหนืดของอากาศที่เข้าร่องลื่นเพลากลมมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกับพฤติกรรมของของไหลที่ไหลผ่านช่องแคบ (Chotvisut et al. (2018))

2. การเพิ่มขึ้นของภาระที่ร่องลื่น ส่งผลให้ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและอัตราส่วนการเยื้องศูนย์สูงสุดของเพลามีค่าเพิ่มขึ้น แต่ตำแหน่งมุมที่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลงเพราะภาระที่ร่องลื่นเพลากลมได้รับมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของความดันฟิล์มอากาศและความหนาฟิล์มอากาศค่อนข้างมาก ส่วนตำแหน่งมุมที่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลงตามภาระที่ร่องลื่นเพลากลมได้รับ เพื่อให้เกิดสมดุลตามสมการ (9) แนวแกน x และสมการ (10) แนวแกน z ทำให้ตำแหน่งมุมของแรงลัพธ์สมดุลมีค่าลดลงตาม รวมทั้งอัตราส่วนการเยื้องศูนย์สูงสุดที่เพิ่มขึ้นตามมุมที่เกิดแรงลัพธ์สมดุล (w_f) เนื่องจากภาระที่ร่องลื่นเพลากลมได้รับ โดยจะสอดคล้องกับงานวิจัยพฤติกรรมของของไหลที่ไหลผ่านช่องแคบ (Chotvisut et al. (2018))

3. ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและอัตราส่วนการเยื้องศูนย์สูงสุดของเพลามีค่าเพิ่มขึ้น แต่ตำแหน่งมุมที่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลง เมื่อช่องว่างระหว่างเพลากับแบร็กร้อยระหว่างร่องลื่น

เพลากลมอากาศ (Bearing clearance) มีค่าเพิ่มขึ้น โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sfyris and Chasalevris (2012) และงานวิจัยของ Chasalevris and Dimitris (2014)

4. ค่าอุณหภูมิอากาศที่เพิ่มขึ้นหาเข้าร่องลื่นเพลากลมมีผลต่อพฤติกรรมการณ์หล่อลื่น โดยความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและอัตราการเยื้องศูนย์สูงสุดของเพลามีค่าลดลง แต่ตำแหน่งมุมที่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chotvisut et al. (2018)

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ไม่คิดผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายใน และเป็นการจำลองผลด้วยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณ ทำให้มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงอยู่บ้าง ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และควรศึกษาผลจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่

เอกสารอ้างอิง

- Andrés, L.S. (2010). *Modern Lubrication Theory Gas Film Lubrication Note 15*. Texas, USA: Texas A & M University Digital Libraries.
- Bumrungpuech, A., Wongseedakaew, K., and Panichakorn, J. (2018). Lubrication of Kimberly type Thrust Bearing with non-Newtonian Lubricant. *Sripatum Review of Science and Technology*, 10, 46-57. (in Thai)
- Chasalevris, A., and Sfyris, D. (2014). Analytical Evaluation of the Finite Journal Bearing Impedance Forces using the Exact Analytical Solution of the Reynolds Equation. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2, 423-432.
- Chotvisut, S., Panichakorn, J., and Wongseedakaew, K. (2018). Behavior of Lubrication in Tapered-land Type Air Thrust Bearing. *SWU Engineering Journal*, 13, 118-130. (in Thai)
- Huang, H., Meng, G., and Chen, J. (2007). Investigations of Slip Effect on the Performance of Micro Gas Bearing and Stability of Micro Rotor-Bearing Systems. *Sensor*, 7, 1399-1414.
- Müller, C., Greco, S., Kirsch, B., and Aurich, J.C. (2017). A Finite element analysis of air bearing applied in compact air bearing spindles. *Procedia CIRP*, 58, 607-612.
- Piekos, E.S. (2000). *Numerical Simulation of Gas-Lubricated Journal Bearings for Microfabricated Machines*. Thesis of the Degree of Doctor of Philosophy in Aeronautics and Astronautics. Massachusetts, USA. Massachusetts Institute of Technology.
- Sfyris, D., and Chasalevris, A. (2012). An exact analysis solution of the Reynolds equation for the finite journal bearing lubrication. *Tribology International*, 55, 46-58.
- Zhang, H., Zhu, C., and Yang, Q. (2008). Approximate Numerical Solution of Hydrodynamic Gas Journal Bearing. *ICIRA*, 15-17 October 2008 at Wuhan China, 260-268.

ภาคผนวก

สัญลักษณ์สมการ

p	lubricant film pressure, Pa	λ_a	mean free molecular path, nm
p_a	atmosphere pressure, bar	ε	eccentricity ratio
L	bearing length, mm	e	eccentricity, mm
D	bearing diameter, mm	Λ	bearing number
r_b	bearing radius, mm	Ψ	flow factor
r_s	shaft radius, mm	θ	angle, degree
τ_{xz}, τ_{yz}	shear stress, Pa	μ	lubricant viscosity, Pa-s
ω	angular velocity, rad/s	w_z	axial force z, N
ρ	lubricant film density, kg/m ³	w_x	axial force x, N
h	lubricant film thickness, m		
h_a	lubricant air film thickness, m		
c	bearing clearance, mm		
T	temperature, °C		
K_N	knudsen number, λ_a / h_a		
b	constant sutherland, $kg / m.s.K^{1/2}$		
S	constant sutherland, K		
$\bar{\mu}$	temperature viscosity, Pa-s		
μ_0	initial viscosity, Pa-s		