

Lubrication of Kimberly type Thrust Bearing with non-Newtonian Lubricant

Arnon Bumrungpuech^{1,*}, Khanittha Wongseedakaew², Jesda Panichakorn³

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

Received: 23 February 2018

Revised: 2 May 2018

Accepted: 29 June 2018

ABSTRACT

This paper presents a study of lubrication of Kimberly type thrust bearing with non-Newtonian lubricant under isothermal time independent with non-Newtonian lubricant based 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 film pressure profile, film thickness profile, friction coefficient and angle-pitch of thrust bearing with various applied loads, the amplitude of surface roughness and shaft speeds. The simulation results show the minimum film thickness decreases but film pressure, friction coefficient and angle-pitch of thrust bearing increase when the amplitude of surface roughness increases. With the increasing of applied loads, the film pressure increases but the minimum film thickness, friction coefficient and angle-pitch of thrust bearing decrease. The minimum film thickness, friction coefficient and angle-pitch of thrust bearing increase but the film pressure decreases when shaft speed increases.

Keywords: Kimberly type thrust bearing, Non-Newtonian lubricant, Surface roughness

* Corresponding Author; Email: arnon_bum26@hotmail.com

การหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุนแบบคิมเบอร์ลีด้วยสารหล่อลื่นชนิดนอนนิวโตเนียน

อานนท์ บำรุงพีช^{1,*}, ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว², เจษฎา พานิชกรณ³

^{1,2,3} วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาการหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุนแบบคิมเบอร์ลีในสภาวะคงตัวเมื่อไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนที่เป็นไปตามแบบจำลองของคาร์โอ โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับระเบียบวิธีมัลติกริด แก๊สการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ เพื่อหาการกระจายตัวของความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและมุมพิตช์ของร่องลื่นกันรุน เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับ ขนาดของความหยาบผิวและความเร็วรอบของเพลลา จากการจำลองผลพบว่าเมื่อขนาดของความหยาบผิวมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นลดลง แต่ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และมุมพิตช์ของร่องลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับทำให้ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่าความหนาฟิล์มต่ำสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและมุมพิตช์ของร่องลื่นกันรุนมีค่าลดลง ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและมุมพิตช์ของร่องลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงเมื่อความเร็วรอบของเพลลามีค่าเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ร่องลื่นกันรุนแบบคิมเบอร์ลี สารหล่อลื่นชนิดนอนนิวโตเนียน ความหยาบผิว

* ผู้ประสานงานหลัก; อีเมล: arnon_bum26@hotmail.com

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโลกมีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีของเครื่องจักรกล ยานยนต์ การเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ และอุตสาหกรรมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งโดยทั่วไปการหล่อลื่นเกิดขึ้นตลอดเวลาตั้งแต่เครื่องจักรกลเริ่มทำงาน จนกระทั่งหยุดการทำงาน เพลาที่ใช้เครื่องยนต์หรือเครื่องจักรต่างๆ เมื่อมีการหมุนจะมีร่องลื่น เพื่อรองรับการเคลื่อนที่ของเพลาทันในแนวรัศมีของเพลาลูกเบี้ยวและแนวแกน เพราะถ้าเพลาลูกเบี้ยวที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งจะทำให้เกิดความเสียหายแก่เพลาลูกเบี้ยวส่งผลให้เครื่องจักรได้รับความเสียหาย ดังนั้นเพื่อให้เพลาลูกเบี้ยวสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ ร่องลื่นกันรุนจะถูกใช้เพื่อป้องกันไม่ให้เพลาลูกเบี้ยวเปลี่ยนตำแหน่งเกินค่าที่ออกแบบไว้ ร่องลื่นกันรุนเป็นร่องลื่นชนิดหนึ่งที่ป้องกันไม่ให้เพลาลูกเบี้ยวเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกน ดังนั้นการศึกษาการหล่อลื่นในร่องลื่นกันรุนจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง การหล่อลื่นที่เกิดขึ้นในร่องลื่นกันรุนเป็นการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกหรือเป็นแบบฟิล์มหนา

Zouzoulas & Papadopoulos (2017) ได้วิจัยการวิเคราะห์แบบเทอร์โมไดนามิกใน 3 มิติของ ร่องลื่นกันรุน pivoted-pad ที่ไม่มีน้ำมันผิวร่องแบบร่องลึก พบว่าการทำงานที่มีฟิล์มของสารหล่อลื่น มีความหนาเพิ่มขึ้น สูญเสียพลังงานน้อยลง เนื่องจากแรงเสียดทานทำให้อุณหภูมิสูงสุดของน้ำมันลดลง Chatterton et al. (2016) ได้วิจัยการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลอง Electrical pitting ของร่องลื่น กันรุนแบบแผ่นเอียง พบว่าการเพิ่มขึ้นของภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับ ทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น และความหนืดของสารหล่อลื่นมีค่าลดลงแต่ความอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น Chari et al. (2013) ได้ศึกษาพฤติกรรมของร่องลื่นกันรุนด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่าภาระที่ร่องลื่น กันรุนได้รับมีค่าน้อยความหนาของฟิล์มอากาศจะมีค่าเพิ่มขึ้น Srikanth et al. (2012) ได้วิจัยการกำหนด ค่ามุมพิตช์ของแผ่นร่องลื่นกันรุนขนาดใหญ่แบบแผ่นเอียงไม่ยึดหยุ่น พบว่าความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น มีค่าเพิ่มขึ้นแต่มุมของร่องลื่นกันรุนมีค่าลดลง Wongseedakaew (2009) นำเสนอพฤติกรรมของการหล่อลื่น แบบไฮโดรไดนามิกแบบแผ่นเอียงพบว่า ความดันเกิดขึ้นสูงสุดที่บริเวณทางออกของแผ่นร่องลื่นกันรุน Wongseedakaew et al. (2017) ได้ศึกษาผลของความหยาบผิวแบบสุ่มที่มีต่อการหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบ พบว่าความหยาบผิวมีผลต่อความหนาฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ โดยความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นมีค่าลดลงแต่ความดันฟิล์มของสารหล่อลื่นสูงสุดและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของความหยาบผิวเพิ่มขึ้น Rutpasakorn et al. (2015) ได้ศึกษาพฤติกรรมทางทฤษฎีการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของร่องลื่นกันรุนแบบเอียงและแผ่นเรียบด้วยสารหล่อลื่นนอนนิวโตเนียน พบว่าความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมีค่าลดลงแต่ความดันของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับเพิ่มขึ้น Wongseedakaew et al. (2014) นำเสนอพฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของร่องลื่นกันรุนแบบขั้นบันได พบว่าการเพิ่มขึ้นของภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับทำให้ความดันของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมีค่าลดลง Panichakorn et al. (2014) ได้วิจัยการหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุนแบบเอียงและแผ่นเรียบ พบว่าภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับเพิ่มขึ้นความดันของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น มีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมีค่าลดลง ความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความดันของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมีค่าลดลงเมื่อความเร็วในการหมุนของเพลาลูกเบี้ยวเพิ่มขึ้น

การศึกษาการหล่อลื่นที่ของไหลมีพฤติกรรมเป็นของไหลแบบนอนนิวโตเนียนมีความสลับซับซ้อนมาก สมการไม่เป็นเชิงเส้นสูงทำให้การคำนวณหาคำตอบมีความยุ่งยากและใช้เวลาในการคำนวณนาน Lubrecht et al. (1986) & Francisco et al. (2002) ได้นำเสนอวิธีจำลองที่ซึ่งมีประสิทธิภาพเพื่อลดระยะเวลา การคำนวณ บทความนี้ศึกษาการหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุนแบบคิมเบอร์ลีย์ด้วยสารหล่อลื่นชนิดนอนนิวโตเนียนโดยการหล่อลื่นเป็น

แบบไฮโดรไดนามิก โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสลับและระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับระเบียบวิธีมัลติกริด ในการแก้ปัญหาสมการเรย์โนลด์สประยุกต์ที่สภาวะคงตัวและไม่คิดผลเนื่องจากอุณหภูมิ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกด้วยสารหล่อลื่นชนิดนอนนิวโตเนียนในร่องลื่น ก้านรูนแบบคิมเบอร์ลี
2. เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ภาระที่รองรับลื่นก้านรูน ความเร็วของเพลลา และค่าความหนืดของเพลลาของร่องลื่นก้านรูนที่มีผลต่อการกระจายของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นชนิดนอนนิวโตเนียนที่สภาวะคงตัวและไม่คิดผลเนื่องจากอุณหภูมิ
3. ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับระเบียบวิธีผลต่างสลับเพื่อลดเวลาการคำนวณ

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์

จากสมการนาเวียร์-สโตก ในพิกัดทรงกระบอก เมื่อไม่คิดผลของ body force ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความดันเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

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

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

เมื่อประยุกต์ระเบียบวิธีเปอร์เทอเบชัน สำหรับความเร็วการไหลและความดัน จะได้สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์สำหรับร่องลื่นก้านรูนในสภาวะคงตัว จะได้สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ในรูปแบบไร้มิติ ดังสมการที่ (3)

$$\frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{\bar{\epsilon}_R}{R} \frac{\partial}{\partial R} (PR) \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\bar{\epsilon}_\theta}{R} \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) = \Phi \frac{\partial}{\partial \theta} (\bar{\rho} H) \quad (3)$$

$$\text{เมื่อ } \Phi = \frac{\omega \mu_0 r_0^2}{2 P_{MAX} H_{ref}^2}, \bar{\epsilon}_R = \frac{\bar{\rho} H^3}{12 \mu_r^*}, \bar{\epsilon}_\theta = \frac{\bar{\rho} H^3}{12 \mu_\theta^*}, \bar{\mu}_r^* = \bar{\mu}^*,$$

$$P_{MAX} = \frac{\mu \omega r_o^2 (\theta_{out} - \theta_{in})}{H_{ref}^2}, \bar{\mu}_\theta^* = \bar{\mu}^* + (n-1) \left(\bar{\mu}^* - \frac{\mu_\infty}{\mu_0} \right) \left(\frac{\lambda^2 K_{SH} \bar{I}_\theta^*}{1 + \lambda^2 K_{SH} \bar{I}^*} \right),$$

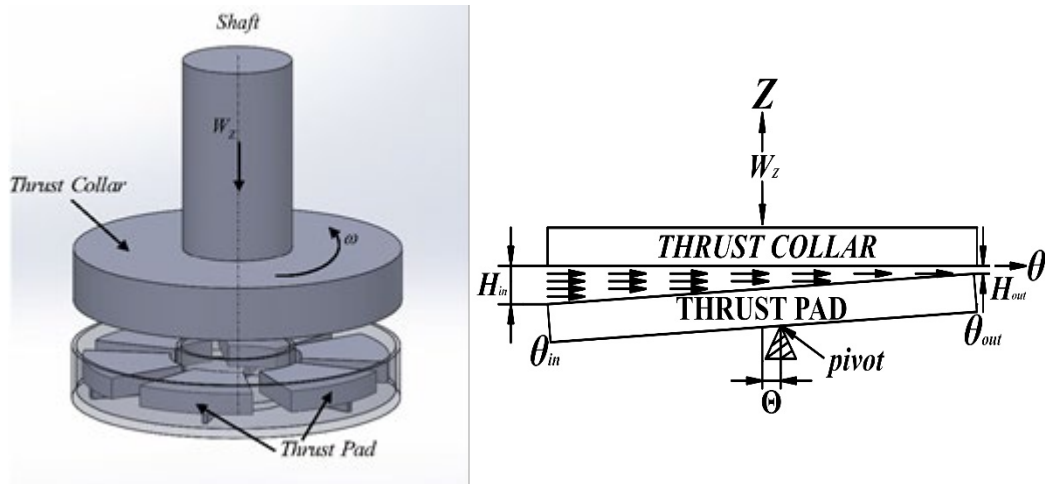
$$\bar{\mu}^* = \left(\frac{\mu_\infty}{\mu_0} \right) + \left(1 - \frac{\mu_\infty}{\mu_0} \right) \left(1 + \lambda^2 K_{SH} \bar{I}^* \right)^{\frac{(n-1)}{2}}$$

โดยมีเงื่อนไขขอบสมการเรย์โนลด์

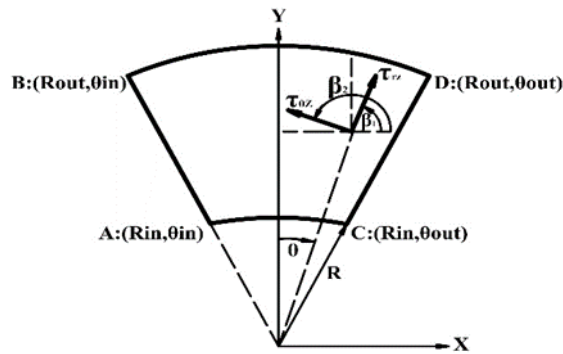
$$P(R_{in}, \theta) = P(R_{out}, \theta) = \left(\frac{\partial P}{\partial R} \right)_{R_{out}} = 0$$

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

2. สมการความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่น



ภาพที่ 1 ลักษณะและการทำงานของร่องลื่นกันรุน



ภาพที่ 2 พิกัดที่ใช้ในการจำลองผลของแผ่นร่องลื่นกันรุน

ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นจึงขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของผิวแผ่นร่องลื่นกันรุนและการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความดัน จากลักษณะและการทำงานของร่องลื่นกันรุนตามภาพที่ 1 และพิกัดที่ใช้ในการจำลองผลดังภาพที่ 2 ดังนั้นสมการความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นแสดงดังสมการที่ (4)

$$H_{R,\theta} = (1-\gamma)[(1-\Re)H_A + \Re H_B] + \gamma[(1-\Re)H_C + \Re H_D] - \delta(R,\theta) \quad (4)$$

โดยที่ $\gamma = (\theta - \theta_{in}) / (\theta_{out} - \theta_{in})$ และ $\Re = (R - R_{in}) / (1 - R_{in})$, $\delta(R,\theta)$

$\delta(R,\theta)$ คือความหยাবผิวแบบสุ่มในรูปแบบไร้มิติ

3. สมการความหนืดของสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ใช้ในบทความนี้ มีพฤติกรรมเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนซึ่งความหนืดของสารหล่อลื่น เป็นไปตามแบบจำลองความหนืดของ Carreau Viscosity Model ในรูปแบบไร้มิติ

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

โดยที่ $\bar{I}^* = \left(\frac{R}{H}\right)^2$

4. สมการสมดุลแรง

บทความนี้จำลองการทำงานของร่องลื่นกันรุนที่มีแผ่นร่องลื่นกันรุนจำนวน 6 แผ่นโดยกำหนดให้แผ่นร่องลื่นกันรุนแต่ละแผ่นรับภาระเท่ากัน ดังนั้นภาระที่กระทำกับแผ่นร่องลื่นกันรุนแต่ละแผ่นเท่ากับผลรวม ของภาระที่กระทำเนื่องจากความดันที่กระทำต่อสารหล่อลื่น

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

5. สมการสมดุลโมเมนต์

โมเมนต์ที่กระทำกับแผ่นร่องลื่นกันรุนแต่ละแผ่นเท่ากับผลรวมของโมเมนต์ที่กระทำเนื่องจากความดันที่กระทำต่อสารหล่อลื่น

$$\int_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} \int_{R_{in}}^{R_{out}} PR^2 \sin \theta dR d\theta = \frac{W_z r_p \sin \Theta}{6r^3 P_{MAX}} \quad (7)$$

6. ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ค่าความเสียดทานจะขึ้นอยู่กับภาระที่กระทำและ shear strain rate $(\partial u / \partial z)$ พิกัดที่ใช้ในการจำลองผลแสดงดังภาพที่ 2

$$f = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{W_z} \quad (8)$$

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

$$F_y = \int_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} \int_{r_{in}}^{r_{out}} \tau_{rz} \sin \beta_1 r dr d\theta + \int_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} \int_{r_{in}}^{r_{out}} \tau_{\theta z} \sin \beta_2 r dr d\theta \text{ และ } \beta_1 = \frac{\pi}{2} - \theta, \beta_2 = \pi - \theta$$

7. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ประยุกต์ใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน เพื่อหาค่าคำตอบของสมการเรย์โนลด์และสมการสมดุลแรงกับสมการสมดุลโมเมนต์ ทำการคำนวณซ้ำจนกระทั่ง

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

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

$$\left| 1 - \frac{6r_o^3 P_{MAX}}{W_z r_p \sin \Theta} \int_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} \int_{R_{in}}^{R_{out}} PR^2 \sin \theta dR d\theta \right| \leq 0.0001$$

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาการหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุน ขนาดของร่องลื่นกันรุนแสดงตามตารางที่ 1 และคุณสมบัติของสารหล่อลื่นแสดงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ขนาดของร่องลื่นกันรุนที่ใช้ในการวิจัย (NE 6159, Kingsbury, Inc)

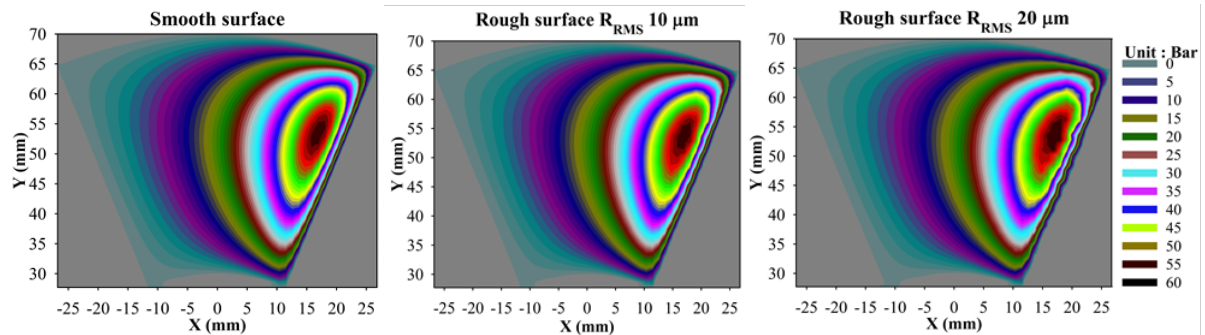
มิติของร่องลื่นกันรุน	ขนาด
รัศมีวงใน, r_{in}	30 mm
รัศมีวงนอก, r_{out}	70 mm
มุมทางเข้า, θ_{in}	$-\pi/8$ rad
มุมทางออก, θ_{out}	$+\pi/8$ rad

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสารหล่อลื่น

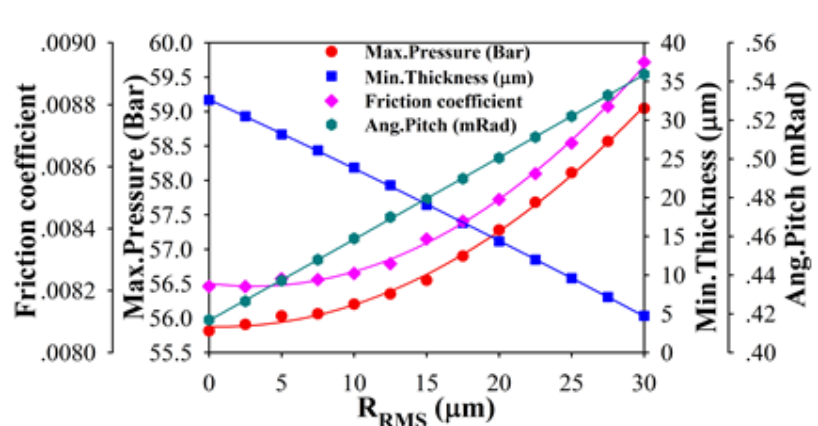
คุณสมบัติของสารหล่อลื่น	หน่วย
ความหนาแน่น, ρ	834 kg/m ³
Low shear strain rate viscosity, μ_0	0.0698 Pa·s
High shear strain rate viscosity, μ_∞	0.0000 Pa·s
Power law index, n	0.625
Time relaxation, λ	4.657×10 ⁻⁷ s ⁻¹

ผลการวิจัย

จากการจำลองผลเมื่อภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับ เท่ากับ 15,000 N เพลาหมุนด้วยความเร็ว 3,000 rpm และผิวของร่องลื่นกันรุนเป็นผิวเรียบ ($R_{RMS}=0$) พบว่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดบริเวณใกล้ทางออกของแผ่นร่องลื่นกันรุนจากนั้นจึงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และมีค่าเป็นศูนย์ ที่ทางออกของร่องลื่นกันรุน เป็นเพราะใกล้บริเวณทางออกพื้นที่การไหลของสารหล่อลื่นถูกบีบให้มีขนาดเล็กลงทำให้การไหลของสารหล่อลื่นถูกเปลี่ยนจากความเร็วเป็นความดัน ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 55.81 Bar ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเท่ากับ 32.62 μm ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.0082 และมุมพิตช์ของร่องลื่นกันรุน เท่ากับ 0.4169 mRad เมื่อผิว ของร่องลื่นกันรุนมีผิวเรียบ และเมื่อผิวของร่องลื่นกันรุนมีความหยาบผิวเท่ากับ $R_{RMS} = 10 \mu\text{m}$ จะมีค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 56.20 Bar ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเท่ากับ 23.89 μm ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.0083 และมุมพิตช์ของร่องลื่นกันรุนเท่ากับ 0.4589 mRad และเมื่อผิวของร่องลื่นกันรุนมีความหยาบผิวเท่ากับ $R_{RMS} = 20 \mu\text{m}$ จะมีค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 57.28 Bar ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเท่ากับ 14.37 μm ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.0085 และมุมพิตช์ของร่องลื่นกันรุนเท่ากับ 0.5005 mRad แสดงดังภาพที่ 3

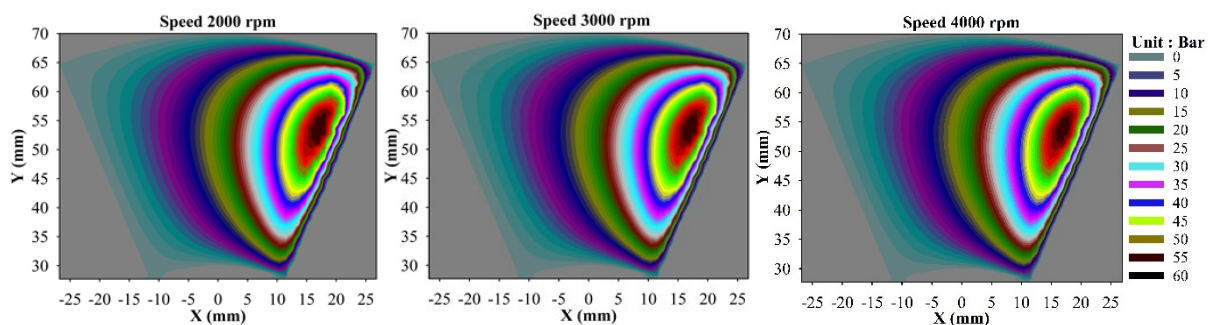


ภาพที่ 3 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ภาระที่กระทำเท่ากับ 15,000 N ความเร็วรอบเท่ากับ 3000 rpm และเปลี่ยนแปลงขนาดของผิวหยาบ R_{RMS} 0, 10 และ 20 μm

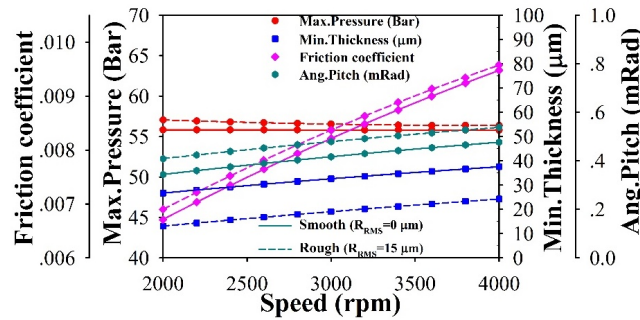


ภาพที่ 4 แสดงค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และมุมพิทช์ของร่องลื่นกันรุน เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดของผิวหยาบ (R_{RMS})

ภาพที่ 4 เมื่อขนาดของความหยาบผิวมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นลดลงเพราะ เมื่อผิวของร่องลื่นกันรุนมีความหยาบผิวจะทำให้ความหยาบผิวไปขัดขวางการไหลของสารหล่อลื่น ทำให้ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าลดลง แต่ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และมุมพิทช์ของร่องลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 5 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ภาระที่กระทำ 15,000 N ที่ผิวหยาบ $R_{RMS} = 15 \mu\text{m}$ และเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเท่ากับ 2,000, 3,000 และ 4,000 rpm

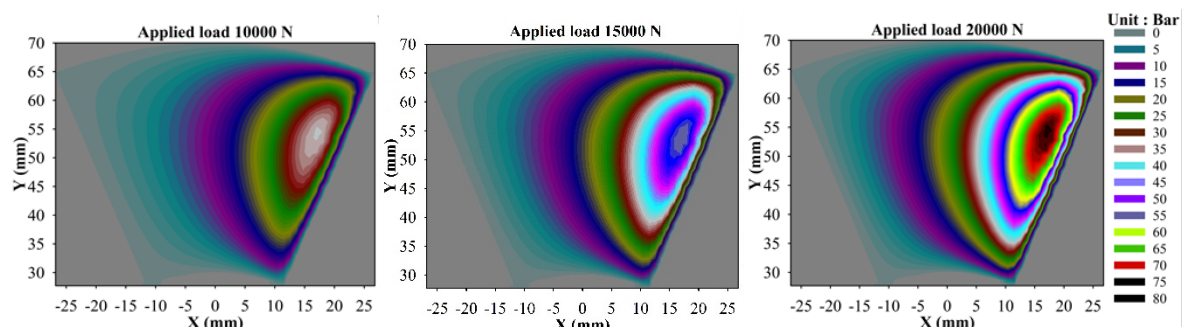


ภาพที่ 6 แสดงค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และมุมพิตช์ของร่องลื่นกันรุน เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของเพลลา

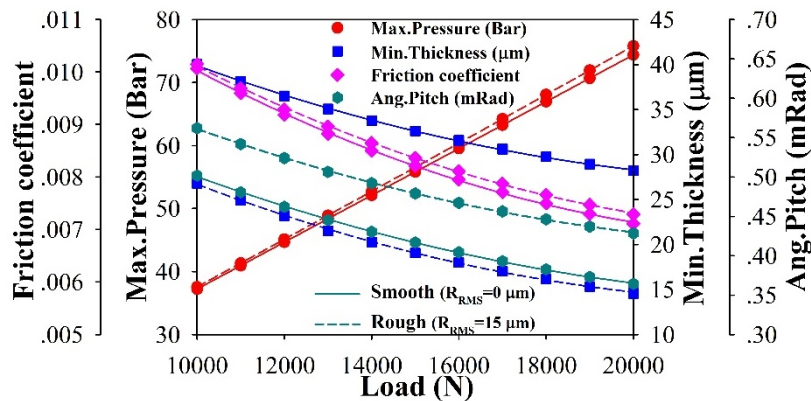
ภาพที่ 5 เมื่อภาระที่ร่อนลื่นกันรุนได้รับเท่ากับ 15,000 N และผิวของร่อนลื่นกันรุนมีความหยาบผิวเท่ากับ $R_{RMS} = 15 \mu m$ โดยทำการเปลี่ยนแปลงเพลลาหมุนด้วยความเร็ว 2,000, 3,000 และ 4,000 rpm พบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นทำให้ความดันสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลง แต่ค่าความหนาฟิล์ม สารหล่อลื่น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และมุมพิตช์ของร่องลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความดันฟิล์ม สารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 57.05, 56.55 และ 56.36 Bar ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 13.05, 19.06 และ 24.30 μm ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.0069, 0.0084 และ 0.0096 และมุมพิตช์ของร่องลื่นกันรุนเท่ากับ 0.4086, 0.4791 และ 0.5382 mRad เมื่อความเร็วรอบของเพลลามีค่าเท่ากับ 2,000, 3,000 และ 4,000 rpm ตามลำดับ

ภาพที่ 6 เมื่อภาระที่กระทำเท่ากับ 15,000 N ทั้งผิวหยาบ ($R_{RMS} = 15 \mu m$) และผิวเรียบ ($R_{RMS} = 0$) เปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าลดลง แต่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และมุมพิตช์ของร่องลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราส่วนของการเพิ่มขึ้นของค่า shear strain rate มีค่าเพิ่มขึ้นเพราะความเร็วรอบเพิ่มจะมีค่ามากกว่าอัตราส่วนของการลดลงของความหนืดจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อความเร็วของเพลลาเท่ากับ 3,000 rpm และผิวของร่อนลื่นกันรุนมีความหยาบผิวเท่ากับ $R_{RMS} = 15 \mu m$ โดยทำการเปลี่ยนแปลงภาระที่ร่อนลื่นกันรุนได้รับ 10,000, 15,000 และ 20,000 N พบว่าความดันสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 37.56, 56.55 และ 75.82 Bar เมื่อภาระที่ร่อนลื่นกันรุนได้รับเท่ากับ 10,000, 15,000 และ 20,000 N ตามลำดับ แต่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 26.80, 19.06 และ 14.57 μm ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.0102, 0.0084 และ 0.0073 และมุมพิตช์ของร่องลื่นกันรุน 0.5621, 0.4791 และ 0.4286 mRad เมื่อภาระที่กระทำเท่ากับ 10,000, 15,000 และ 20,000 N ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความเร็วรอบเท่ากับ 3,000 rpm ที่ผิวหยาบ $R_{RMS} = 15 \mu m$ และเปลี่ยนแปลงภาระที่กระทำ 10,000, 15,000 และ 20,000 N



ภาพที่ 8 แสดงค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และมุมพิตช์ของร่องลื่นกันรุน เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับ

ภาพที่ 8 แสดงค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และมุมพิตช์ของร่องลื่นกันรุน เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับที่ความเร็วรอบเท่ากับ 3,000 rpm ทั้งผิวหยาบ ($R_{RMS} = 15 \mu m$) และผิวเรียบ ($R_{RMS} = 0 \mu m$) พบว่าเมื่อภาระที่กระทำต่อร่องลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้น ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และมุมพิตช์ของร่องลื่นกันรุนมีค่าลดลง เนื่องจากการลดลง ของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นจากภาระที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่า shear strain rate มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นมีค่าลดลงตามสมการที่ (5) เป็นผลให้แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของภาระ ที่ร่องลื่นกันรุนได้รับ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง

อภิปรายผล

จากการวิจัยผลของการหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุนแบบคิมเบอร์ลีด้วยสารหล่อลื่นชนิดนอนนิวโตเนียนสามารถสรุปพฤติกรรมที่เกิดขึ้นได้ว่า

1. เมื่อขนาดของความหยาบผิวมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นลดลง แต่ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และมุมพิตช์ของร่องลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้น
2. เมื่อความเร็วรอบของเพลามีค่าเพิ่มขึ้นค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงแต่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และมุมพิตช์ของร่องลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้น
3. เมื่อภาระที่กระทำต่อร่องลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และมุมพิตช์ของร่องลื่นกันรุนมีค่าลดลง

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแต่ในการทำงานจริง แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นทำให้อุณหภูมิของสารหล่อลื่นขณะทำงานจริงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นต่ำกว่าในงานวิจัย ส่วนความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงกว่าในงานวิจัย

2. ในสภาวะการทำงานจริงของเพลามีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นในการทำงาน ดังนั้นเพื่อให้ผลเป็นไปตามพฤติกรรมการทำงานจริงของร่องลื่นกันรุนควรพิจารณาผลของพลวัตของเพลาด้วย

สัญลักษณ์

h	ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่น, m
H	ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นไร้มิติ, $H = \frac{h}{H_{ref}}$
H_{ref}	ค่าความหนาฟิล์มอ้างอิง, m
p	ความดันฟิล์มสารหล่อลื่น, Pa
P	ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นไร้มิติ, $P = \frac{p}{P_{MAX}}$
P_{MAX}	ค่าความดันอ้างอิง, Pa
r, θ, z	พิกัดอ้างอิง, m, rad, m
r_{out}	รัศมีวงนอก, mm
r_{in}	รัศมีวงใน, mm
r_p	รัศมีวงใน, mm
R	รัศมีไร้มิติ, $R = \frac{r}{r_{out}}$
R_{in}	รัศมีวงในไร้มิติ, $R_{in} = \frac{r_{in}}{r_{out}}$
R_{out}	รัศมีวงนอกไร้มิติ, $R_{out} = \frac{r_{out}}{r_{out}}$
R_{RMS}	ขนาดของความหยาบผิว, μm
u_r, u_θ	ความเร็วของเพลานั่นแกน, m/s
w_z	ภาระที่กระทำ, N
ω	ความเร็วรอบของเพลานั่น, rad/s
θ_{in}	มุมทางเข้าของสารหล่อลื่น, rad
θ_{out}	มุมทางออกของสารหล่อลื่น, rad
Θ	มุมของตำแหน่งจุด pivot, rad
ρ	ความหนาแน่นของสารหล่อลื่น, kg/m^3
μ	ความหนืดของสารหล่อลื่น, Pa-s
$\tau_{rz}, \tau_{r\theta}$	ความเค้นเฉือน, Pa

เอกสารอ้างอิง

- Chari, A., et al. (2013). Numerical simulation and experimental study of thrust air bearing with multiple orifices. *International Journal of Mechanical Sciences*, 72, 28-38.
- Chatterton, S., Pennacchi, P., and Vania, A. (2016). Electrical pitting of tilting-pad thrust bearings: Modelling and Experimental evidence. *International Journal of Mechanical Sciences*, 10, 475-486.
- Francisco, A., Frene, J., and Blouin, A. (2002). Multilevel Solution to Elastohydro-dynamic Contact for the Water Lubricated 3-D Line Contact. *STLE Tribology Transactions*, 45, 110-116.
- Lubrecht, A.A., ten Napel, W.E., and Bosma, R. (1986). Multigrid an Alternative Method for Calculating Film Thickness and Pressure Profiles in Elastohydro-dynamically Lubricated Line Contacts. *ASME J. Tribology*, 108, 551-556.
- Panichakorn, J., Wongseedakaew, K., and Pramkrathok, W. (2014). Hydrodynamic Lubrication Taper-Land Type Thrust Bearing. *The 28th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand*, 15-17 October 2014 at Pullman Khon Kaen Raja Orchid Hotel Khon Kaen, 886-893. (in Thai).
- Rutpasakorn, S., et al. (2015). Theoretical Investigation of Hydrodynamic Lubrication of Taper-Land Type Thrust Bearing with non-Newtonian Lubricant. *The 29th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand*, 30 June - 3 July 2015 at The Greenery Resort Khao Yai Hotel Pakchong Nakhon Ratchasima, 765-772. (in Thai).
- Srikanth, D.V., Chaturvedi, K.K., and Reddy, A.C. (2012). Determination of a large tilting pad thrust bearing angular stiffness. *International Journal of Mechanical Sciences*, 47, 69-76.
- Wongseedakaew, K. (2009). Effect of Surface Roughness on Hydrodynamic Lubrication in Thrust Bearing with non-Newtonian Lubricant. *Ladkrabang Engineering Journal*, 26(4), 37-42. (in Thai).
- Wongseedakaew, K., Bumrungpuech, A., and Panichakorn, J. (2017). The effect of rough surface to thrust – bearing lubrication. *The 31st Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand*, 4-7 July 2017 at Phukhaongam Resort Nakhon Nayok, 778-786. (in Thai).
- Wongseedakaew, K., Panichakorn, J., and Thipatdee, P. (2014). Hydrodynamic Lubrication of Step Type Thrust Bearing. *The 28th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand*, 15-17 October 2014 at Pullman Khon Kaen Raja Orchid Hotel Khon Kaen, 894-900. (in Thai).
- Zouzoulas V. and Papadopoulos C.I. (2017). 3-D thermohydrodynamic analysis of textured, grooved, pocketed and hydrophobic pivoted-pad thrust bearings. *International Journal of Mechanical Sciences*, 110, 426-440.