

# การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของวัสดุอ่อนที่สัมผัสแบบวงกลมด้วยสารหล่อลื่นนอนนิวโตเนียน

## Soft Elastohydrodynamic Lubrication on Circular Contact with Non-Newtonian Lubricant

เจษฎา พานิชกรณ์ ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระนาครเหนือ

อีเมล: jesdap@kmutmb.ac.th โทรศัพท์ 02-9132500 ต่อ 6407

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกที่สัมผัสแบบวงกลมของวัสดุอ่อนด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนที่ความหนืดเป็นไปตามความสัมพันธ์ของคาร์โอ แก๊สการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ในสภาวะคงตัว สมการการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ สมการการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของสารหล่อลื่น และสมการการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารหล่อลื่นเมื่อสารหล่อลื่นเป็นของไหลอัดตัวได้ โดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเปอร์เทอร์เบชัน ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน ร่วมกับระเบียบวิธีมัลติกริด เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ในช่วงการสัมผัส เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่ทรงกลมได้รับ ความเร็วของทรงกลม และขนาดของทรงกลม จากการจำลองผลพบว่าเมื่อภาระที่ทรงกลมได้รับเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง การเพิ่มขึ้นของความเร็วของทรงกลม ทำให้ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลงเมื่อขนาดของทรงกลมมีค่าเพิ่มขึ้น

**คำสำคัญ :** การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของไหลนอนนิวโตเนียนความหนืดตามความสัมพันธ์ของคาร์โอ ระเบียบวิธีเปอร์เทอร์เบชัน ระเบียบวิธีมัลติกริด

### Abstract

This paper presents the performance characteristics of soft elastohydrodynamic lubrication with non-Newtonian fluid base on Carreau viscosity model in circular contact. The time independent modified Reynolds equation, elastic equation and lubricant viscosity equation were formulated for compressible fluid. Perturbation method, Newton-Raphson method, finite different method and full adaptive multi-grid method were implemented to obtain the film pressure, film thickness profiles and friction coefficient in the contact region at various applied loads, speeds and radius of sphere. Simulation results show that, the minimum film thickness and friction coefficient decrease when applied load increases. For increasing of sphere speed, the minimum film thickness and friction coefficient increase. When radius of sphere increases, the minimum film thickness increases but friction coefficient decreases.

**Key words :** Elastohydrodynamic lubrication (EHL), non-Newtonian fluid, Carreau viscosity model, Perturbation method, Full adaptive multi-grid method.

### 1. บทนำ

ปัจจุบันวัสดุในกลุ่มของพอลิเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงต่ำ (Soft Material) ใช้งานอย่างแพร่หลาย

เช่นพวกเฟืองพลาสติกที่ใช้ในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์รวมทั้งการใช้งานในระบบลำเลียงของอุตสาหกรรมผลิตอาหารสำเร็จรูปเนื่องจากทนต่อการสึกหรอและมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นใบแจ้งระเบียบข้อนี้แล้ว ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษา พฤติกรรมการหล่อลื่นในอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้วัสดุในกลุ่มพอลิเมอร์ จึงมีความสำคัญ Dowson and Higginson[1] ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกที่มีสัมพัทธ์เป็นเส้นตรงโดยวิธีเชิงตัวเลข พบว่าฟลุมสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นบางมาก Rattapasakorn [2] ได้นำเสนอพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกที่มีสัมพัทธ์เป็นวงกลมด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมแบบของไหลนิวโตเนียนเมื่อผิวของวัสดุเป็นผิวหยาบ พบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นขึ้นกับลักษณะของความหยาบผิว Wongseedakaew[3] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบฟลุมบางของวัสดุอ่อน พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าน้อยมากจนสามารถคิดเป็นการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางที่ไม่เกิดผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารหล่อลื่น การศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิก สมการที่ 1 มีความไม่แม่นยำสูง ดังนั้นการหาค่าตอบมีความยุ่งยากและใช้เวลาการจำลองผลมาก Lubrecht[4] และ Goodyer[5] จึงได้นำเสนอวิธี มัลติกริดที่มีประสิทธิภาพ เพื่อลดระยะเวลาการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

**2. ทฤษฎี**

**2.1 สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์**

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราความเครียดเฉือน ของสารหล่อลื่นที่เป็นของไหลนอนนิวโตเนียนแสดงได้ตามความสัมพันธ์

$$\tau_{xz} = \mu (\partial u / \partial z) \text{ และ } \tau_{yz} = \mu (\partial v / \partial z) \quad (1)$$

ความหนืดของสารหล่อลื่นเป็นไปตามความสัมพันธ์

ของ Carreau Viscosity Model [6]

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

$$\text{โดยที่ } I = (\partial u / \partial z)^2 + (\partial v / \partial z)^2$$

ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเปอร์เทอร์เบชัน (Perturbation Method) เข้ากับสมการเรย์โนลด์ ได้สมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์ เมื่อคิดในสภาวะคงตัว ดังนั้น

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{12 \mu_u^*} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{12 \mu_v^*} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} (\rho h) + \bar{v} \frac{\partial}{\partial y} (\rho h) \quad (2)$$

เมื่อ  $\mu_u^* = \mu^* + 2(\partial u^* / \partial z)^2 (\partial \mu / \partial I)_{I=I^*}$

$$\mu_v^* = \mu^* + 2(\partial v^* / \partial z)^2 (\partial \mu / \partial I)_{I=I^*}$$

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

$$I^* = (\partial u^* / \partial z)^2 + (\partial v^* / \partial z)^2$$

$$\frac{\partial u^*}{\partial z} = \frac{u_2 - u_1}{h}, \quad \frac{\partial v^*}{\partial z} = \frac{v_2 - v_1}{h}$$

$$\left( \frac{\partial \mu}{\partial I} \right)_{I=I^*} = \lambda^2 (n-1) (\mu_0 - \mu_\infty) (1 + \lambda^2 I^*)^{\frac{n-3}{2}}$$

โดยมีเงื่อนไขขอบของสมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์

$$p(x_{in}, y) = p(x_{out}, y) = (\partial p / \partial x)_{x=x_{out}} = 0$$

$$p(x, y_{in}) = p(x, y_{out}) = (\partial p / \partial y)_{y=y_{out}} = 0$$

**2.2 สมการความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่น**

ความหนาของฟลุมสารหล่อลื่น ที่อยู่ในช่วงการสัมผัสขึ้นอยู่กัลักษณะกายภาพและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุตามความดันของฟลุมสารหล่อลื่น

$$h(x, y) = h_0 + \frac{x^2}{2R_x} + \frac{y^2}{2R_y} + \frac{2}{\pi E'} \int_{y_{in}}^{y_{out}} \int_{x_{in}}^{x_{out}} \frac{p(x', y') dx' dy'}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} \quad (3)$$

**2.3 สมการความหนาแน่นของฟิล์มสารหล่อลื่น**

ความหนาแน่นของสารหล่อลื่นขึ้นอยู่กับความดันของฟลุมสารหล่อลื่น[1]

$$\rho = \rho_0 \left( 1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p} \right) \quad (4)$$

**2.4 สมการความหนืดของฟลุมสารหล่อลื่น**

ความหนืดของสารหล่อลื่นนอนนิวโตเนียน มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอัตราความเครียดเฉือนและความดันของฟลุมสารหล่อลื่น

$$\mu = \mu_0 \bar{\mu}_s \bar{\mu}_p \quad (5)$$

โดยความหนืดของสารหล่อลื่นแบบนอนนิวโตเนียนที่เปลี่ยนแปลงตามอัตราความเครียดเฉือนเป็นไปตามความสัมพันธ์ของ Carreau Viscosity Model

$$\bar{\mu}_s = \mu_\infty / \mu_0 + (1 - \mu_\infty / \mu_0) (1 + \lambda^2 I^*)^{\frac{n-1}{2}}$$

โดยความหนืดของสารหล่อลื่นที่เปลี่ยนแปลงตามความดันของฟลุมสารหล่อลื่น[7]

$$\bar{\mu}_p = \exp \left\{ (\ln \mu_0 + 9.67) [-1 + (1 + 1.5 \times 10^{-9} p)]^{2.1} \right\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ปฏิบัติงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 สมการสมดุลแรง

ภาระที่กระทำกับผิวสัมผัสจะเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำผ่านฟลอมของสารหล่อลื่น

$$\int_{y_{in}}^{y_{out}} \int_{x_{in}}^{x_{out}} p(x, y) dx dy = w_z \quad (6)$$

## 2.6 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงเนื่องจากความเค้นเฉือนกับภาระที่ผิวสัมผัสได้รับ

$$f = \frac{\sqrt{F_X^2 + F_Y^2}}{w_z} \quad (7)$$

$$\text{เมื่อ } F_X = \int_{y_{in}}^{y_{out}} \int_{x_{in}}^{x_{out}} \left\{ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\}_{z=0} dx dy$$

$$F_Y = \int_{y_{in}}^{y_{out}} \int_{x_{in}}^{x_{out}} \left\{ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\}_{z=0} dx dy$$

## 3. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

การหาคำตอบของสมการโมดิไฟด์เรย์โนลด์ซึ่งเป็นสมการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ดังนั้นเพื่อหาความดันและความหนาของฟลอมสารหล่อลื่น จึงได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน ทำการหาคำตอบซ้ำๆ จนกระทั่ง

$$\sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} |p_{i,j}^{k+1} - p_{i,j}^k| \left/ \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} |p_{i,j}^{k+1}| \right. \leq 0.0001 \quad \text{และ}$$

$$\left| 1 - \int_{y_{in}}^{y_{out}} \int_{x_{in}}^{x_{out}} p(x, y) dx dy / w_z \right| \leq 0.0001$$

## 4. ผลการคำนวณ

คุณสมบัติของวัสดุและสารหล่อลื่นที่ใช้ในบทความนี้ แสดงตามตารางที่ 1 และตารางที่ 2 พิกัดที่ใช้ในการจำลองผลแสดงดังรูปที่ 1

รูปที่ 2 และรูปที่ 3 แสดงลักษณะของความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น และความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงการสัมผัสของทรงกลมและแผ่นเรียบ ทรงกลมมีรัศมีเท่ากับ 100 mm ภาระที่กระทำกับทรงกลมและแผ่นเรียบเท่ากับ 500 N ความเร็วผิวของทรงกลมเท่ากับ 1.00 m/s โดยที่แผ่นเรียบไม่มีการเคลื่อนที่ พบว่าการกระจายของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีลักษณะคล้ายครึ่งทรงกลม โดยความดันสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางของการสัมผัส ที่บริเวณใกล้ทางออกของช่วงการสัมผัสความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ความดันสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด

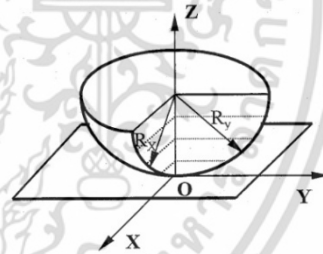
และความหนาฟิล์มที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัสมีค่าเท่ากับ 47.48 MPa, 0.828  $\mu\text{m}$  และ 1.431  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติของวัสดุ	ทรงกลม	แผ่นเรียบ
Modulus of Elasticity, GPa	3.10	210.0
Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.39	0.30

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสารหล่อลื่น

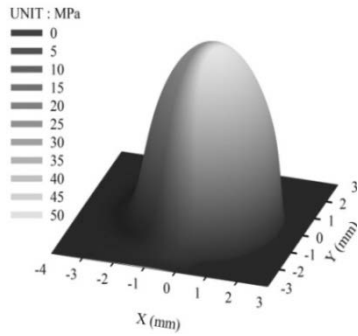
คุณสมบัติของสารหล่อลื่น	Silicon Oil
Inlet density ( $\rho_0$ ), kg/m <sup>3</sup>	922.0
Low shear strain rate viscosity ( $\mu_0$ ), Pa-s	0.0893
High shear strain rate viscosity ( $\mu_\infty$ ), Pa-s	0.0400
Time relaxation ( $\lambda$ ), s	5.952x10 <sup>-7</sup>
Power index ( $n$ )	0.577
Viscosity-Pressure index ( $Z_1$ )	0.4055



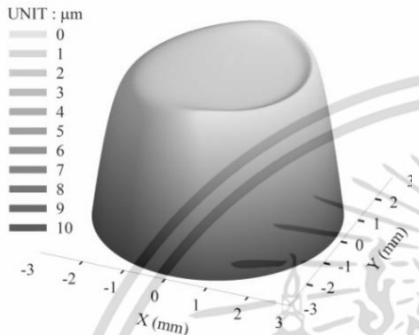
รูปที่ 1 พิกัดที่ใช้ในการจำลองผล

ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นและความกว้างของการสัมผัสเมื่อทรงกลมรับภาระเท่ากับ 250 N, 500 N และ 750 N ทรงกลมมีรัศมีเท่ากับ 100 mm ความเร็วผิวทรงกลมเท่ากับ 1.00 m/s แสดงดังรูปที่ 4 รูปที่ 5 และรูปที่ 6 ตามลำดับ พบว่า เมื่อภาระที่กระทำกับทรงกลมเพิ่มขึ้นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของทรงกลมและแผ่นเรียบมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความกว้างของการสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น รวมทั้งส่งผลให้ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าลดลง ค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด เมื่อทรงกลมรับภาระ 250 N, 500 N และ 750 N มีค่าเท่ากับ 0.967  $\mu\text{m}$ , 0.828  $\mu\text{m}$  และ 0.747  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ

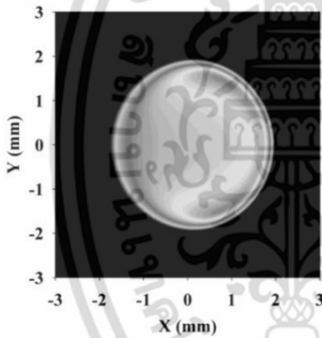
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงการสัมผัส

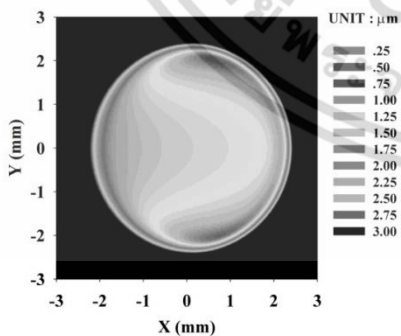


รูปที่ 3 ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงการสัมผัส



รูปที่ 4 ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงการสัมผัส

เมื่อทรงกลมรับภาระที่ 250 N



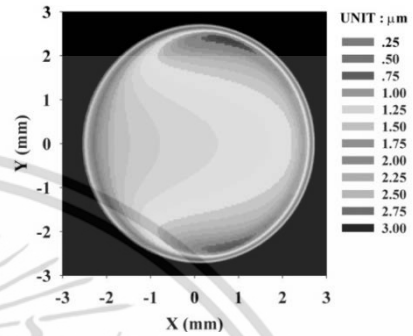
รูปที่ 5 ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงการสัมผัส

เมื่อทรงกลมรับภาระที่ 500 N

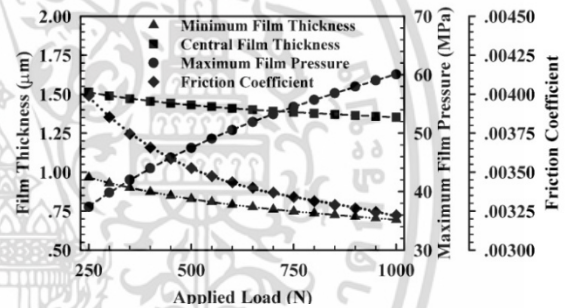
รูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด ความหนาฟิล์มหล่อลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัส ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่กระทำกับทรงกลม พบว่าเมื่อภาระที่กระทำกับทรงกลมเพิ่มขึ้น ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัสและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง



รูปที่ 6 ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในช่วงการสัมผัสเมื่อทรงกลมรับภาระที่ 750 N

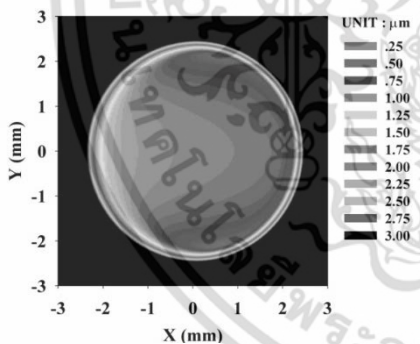


รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด ความหนาฟิล์มหล่อลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัส ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่กระทำ

รูปที่ 8 รูปที่ 9 และ รูปที่ 10 แสดงความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ทรงกลมรับภาระเท่ากับ 500 และมีรัศมีเท่ากับ 100 mm ที่ความเร็วผิวของทรงกลมเท่ากับ 0.50 m/s , 1.00 m/s และ 1.50 m/s ตามลำดับ พบว่าเมื่อความเร็วของผิวทรงกลมเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราการไหลของสารหล่อลื่นที่เข้าสู่ช่องของการสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น โดยความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเท่ากับ 0.517 μm, 0.828 μm และ 1.086 μm เมื่อความเร็วผิวของทรงกลมเท่ากับ 0.50 m/s , 1.00 m/s และ 1.50 m/s ตามลำดับ

การเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด ความหนาฟิล์มหล่อลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัส ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วผิวของทรงกลม แสดงดังรูปที่ 11 พบว่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด ความหนาฟิล์มหล่อลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัส และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าลดลงเมื่อความเร็วผิวของทรงกลมมีค่าเพิ่มขึ้น

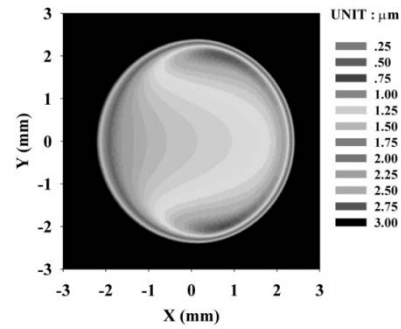
การเปลี่ยนแปลงรัศมีของทรงกลมเท่ากับ 50 mm, 100 mm และ 150 mm โดยที่ทรงกลมรับภาระเท่ากับ 500 ความเร็วผิวของทรงกลมเท่ากับ 1.00 m/s ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อ ที่รัศมีของทรงกลมเท่ากับ 50 mm, 100 mm และ 150 mm แสดงดังรูปที่ 12 รูปที่ 13 และรูปที่ 14 ตามลำดับ พบว่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลง จากความกว้างของการสัมผัสที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเท่ากับ 0.471  $\mu\text{m}$ , 0.828  $\mu\text{m}$  และ 1.138  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ



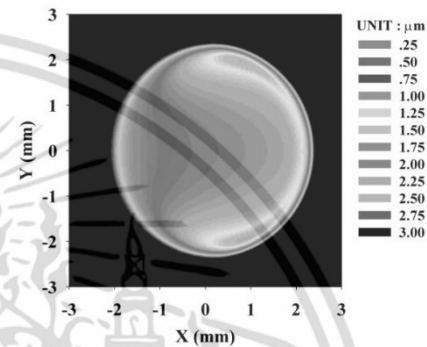
รูปที่ 8 ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความเร็วผิวของทรงกลมเท่ากับ 0.50 m/s

รูปที่ 15 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด ความหนาฟิล์มหล่อลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัส ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เมื่อเปลี่ยนแปลงรัศมีของทรงกลม พบว่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด และความหนาฟิล์มหล่อลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลงเมื่อรัศมีของทรงกลมเพิ่มขึ้น

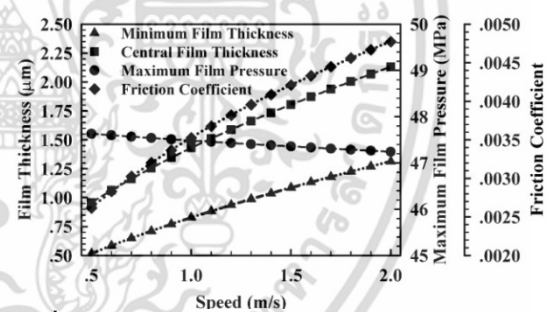
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



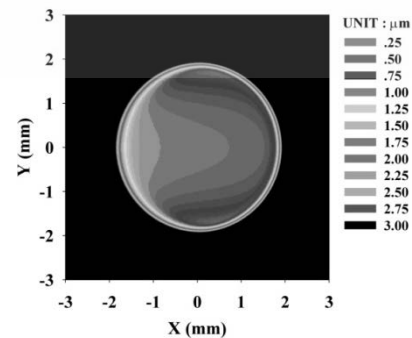
รูปที่ 9 ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความเร็วผิวของทรงกลมเท่ากับ 1.00 m/s



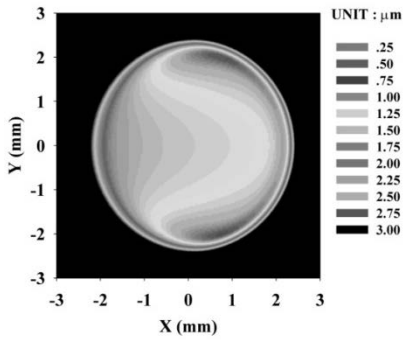
รูปที่ 10 ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ความเร็วผิวของทรงกลมเท่ากับ 1.50 m/s



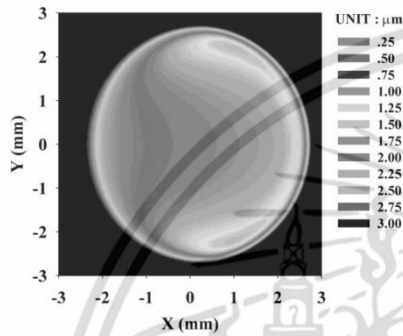
รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด ความหนาฟิล์มหล่อลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัส ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วผิวของทรงกลม



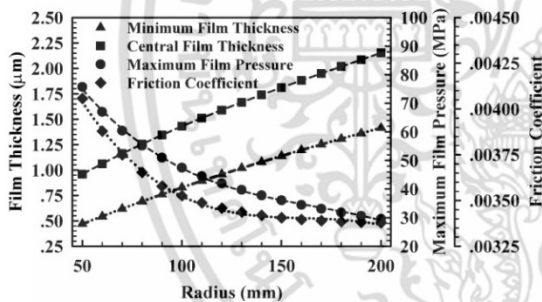
รูปที่ 12 แสดงความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่รัศมีของทรงกลมเท่ากับ 50 mm



รูปที่ 13 ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่รัศมีของทรงกลมเท่ากับ 100 mm



รูปที่ 14 แสดงความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่รัศมีของทรงกลมเท่ากับ 50 mm



รูปที่ 15 การเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด ความหนาฟิล์มหล่อลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัส ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วผิวของทรงกลม

5. สรุปผล

จากการจำลองผลพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของวัสดุอ่อนที่สัมผัสเป็นวงกลมพบว่า

- ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง เมื่อภาวะที่กระทำกับทรงกลมได้รับเพิ่มขึ้น

- เมื่อความเร็วของผิวทรงกลมมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเพิ่มขึ้นของรัศมีของทรงกลม ทำให้ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ KMUTNB-NEW-75-12

7. สัญลักษณ์

- $E_1, E_2$  Young's modulus of sphere and plate, Pa
- $\nu_1, \nu_2$  Poisson's ratio of sphere and plate
- $E'$  Equivalent Young's modulus, Pa
- $1/E' = (1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2$
- $h$  Film thickness, m
- $p$  Film pressure, Pa
- $R_x, R_y$  Equivalent radius of curvature, m
- $w_z$  Applied load, N
- $x, y$  Coordinate, m
- $\mu$  Film viscosity, Pa-s
- $\rho$  Film density, kg/m<sup>3</sup>

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Dowson, and G.R. Higginson, "Elastohydrodynamic Lubrication : The Fundamental of Roller and Gear Lubrication.", Pergamon, Oxford, 1969.
- [2] S. Rattapasakorn and K. Wongseedakaew, "The Effect of Surface Roughness to Performance Characteristics of EHL in Circular Contact with Newtonian Fluid", Ladkrabang Engineering Journal, Vol.28, No.3, September 2011, pp.7-12.
- [3] K. Wongseedakaew, "Transient Thermoelastohydrodynamic Lubrication of Rough Surface in Soft Material", Advanced Materials Research, Vol. 651, 2013, pp 505-510.
- [4] 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 Journal of Tribology, Vol. 108, 1986, pp. 551-556.
- [5] C.E. Goodyer, "Adaptive Numerical Methods for Elastohydrodynamic Lubrication", PhD Thesis, School of Computing, The University of Leeds, 2001.
- [6] R.I. Tanner, "Engineering Rheology", Clarendon Press, Vol. 14-15, 1985, Oxford, pp. 359.
- [7] C.J.A. Roelands, "Correlational Aspects of the Viscosity-Temperature-Pressure Relationship of Lubricating Oils", Druk, V.R.B., Groingen, Netherland, 1969.