

## การหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกของผิวหยาบในวัสดุอ่อน

ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว\*

### บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกในวัสดุอ่อนเมื่อเกิดผลจากความหยาบของผิว ด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองความหนืดเพาเวอร์ลอว์ ด้วยการใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน – ราฟสัน และประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีมัลติกริด แก๊สมการเรย์โนลด์ และสมการการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุ เพื่อหาการกระจายตัวของความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการทำงาน จากการจำลองผลพบว่า ความหยาบของผิวสัมผัสมีผลต่อความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าลดลง แต่ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อภาระที่กระทำกับทรงกระบอกเพิ่มขึ้น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด มีค่าลดลงเมื่อความเร็วของผิวทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้น

**คำสำคัญ :** การหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิก, วัสดุอ่อน, ความหยาบผิว, ระเบียบวิธีมัลติกริด

---

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\*ผู้ติดต่อ, อีเมล: khaniithaw@kmutmb.ac.th รับเมื่อ 9 สิงหาคม 2555 ตอบรับเมื่อ 24 ตุลาคม 2555

## Elastohydrodynamic Lubrication of Rough Surface in Soft Material

**Khanittha Wongseedakaew\***

### Abstract

This paper presents elastohydrodynamic lubrication (EHL) of rough surface in soft material with non-Newtonian fluids base on Power law model. The time independent modified Reynolds equation and elasticity equation were solved numerically using finite different method, Newton-Raphson method and multigrid multilevel method to obtain the film pressure profiles, film thickness profiles and traction coefficient in the contact region. The simulation results show that surface roughness has effect on film thickness. The minimum film thickness decreases but film pressure and friction coefficient increase when applied load increases. For increasing roller surface speed, the minimum film thickness and friction coefficient increase but the maximum film pressure decreases.

**Keywords:** Elastohydrodynamic Lubrication, Soft Material, Rough Surface, Multigrid Multilevel Method.

---

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

\*Corresponding author, E-mail: khanitthaw@kmutnb.ac.th Received 9 August 2012, Accepted 24 October 2012

## 1. บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้วัสดุในกลุ่มของโพลีเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีแข็งแรงต่ำ (Soft Material) กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากทนต่อการสึกหรอรวมทั้งมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ เช่นพวกเฟืองพลาสติกที่ใช้ในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ รวมทั้งการใช้งานในระบบลำเลียงของอุตสาหกรรมผลิตอาหารสำเร็จรูป ดังนั้น การศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นในอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้วัสดุในกลุ่มของโพลีเมอร์จึงมีความสำคัญ

Dowson and Higginson [1] ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกที่มีสัมผัสเป็นเส้นโดยใช้วิธีเชิงตัวเลข พบว่าฟิล์มสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นบางมาก Bair [2] ได้ทำการทดลองและศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการหล่อลื่นฟิล์มบางเมื่อสารหล่อลื่นเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนตามแบบจำลองความหนืดต่าง ๆ Bair [3] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นฟิล์มบางเมื่อสารหล่อลื่นเป็นของไหลนอนนิวโตเนียน เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองพบว่าผลที่ได้สอดคล้องกัน Wongseedakaew [4] ศึกษาการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกในโรลเลอร์แบร์ริงด้วยสารหล่อลื่นนอนนิวโตเนียนพบว่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงเมื่อความเครียดเฉือนที่ฟิล์มสารหล่อลื่นได้รับเพิ่มขึ้น Venner [5] ได้ศึกษาถึงผลของความหยาบของผิวสัมผัสที่มีต่อพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกที่มีการสัมผัสเป็นเส้นพบว่าความหยาบของผิวสัมผัสมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการหล่อลื่นอย่างรุนแรง การศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก สมการที่ใช้มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ดังนั้น การหาคำตอบมีความยุ่งยากและใช้เวลาการจำลองผล Lubrecht [6,9] Venner [7] และ Goodyer [8] จึงได้นำเสนอวิธีมัลติกริดที่มีประสิทธิภาพเพื่อลดระยะเวลาการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

บทความนี้ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของวัสดุอ่อนเมื่อเกิดผลจากความหยาบผิว

ของวัสดุ ด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมเป็นของไหลนอนนิวโตเนียน โดยประยุกต์ใช้ระเบียบผลต่างสี่เหลี่ยม วิธีนิวตัน-ราฟสัน ร่วมกับระเบียบวิธีมัลติกริด เพื่อคำนวณหาพฤติกรรมการกระจายตัวของความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่น และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างทรงกระบอก 2 อัน

## 2. ทฤษฎีการหล่อลื่น

### 2.1 สมการเรย์โนลด์

สมการเรย์โนลด์ในรูปแบบไร้มิติสำหรับการหล่อลื่นแบบ อีลาสโตไฮโดรไดนามิกที่มีการสัมผัสเป็นเส้นด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมเป็นของไหลนอนนิวโตเนียน

$$\frac{\partial}{\partial X} \left( \Phi \frac{\partial P}{\partial X} \right) = \Lambda \left\{ \frac{\partial}{\partial X} (\bar{\rho} H) + \left( \frac{S_0}{2} \right) \frac{\partial}{\partial X} \left( \bar{\rho} H \left( -2 \frac{\frac{1}{\mu_{e1}}}}{\frac{1}{\mu_{e0}}} \right) \right) \right\} \quad (1)$$

เมื่อ

$$\Lambda = \frac{\bar{\mu}_0 R_x^2}{b^3 P_H} \quad (2)$$

$$\Phi = \bar{\rho} H^3 \left( \frac{1}{\mu_{e2}} - \frac{\left( \frac{1}{\mu_{e1}} \right)}{\left( \frac{1}{\mu_{e0}} \right)} \right) \quad (3)$$

$$\frac{1}{\mu_{ei}} = \int_0^1 \frac{Z^i}{\mu} dZ \quad (4)$$

เงื่อนไขขอบสำหรับสมการเรย์โนลด์

$$P(X_{inlet}) = P(X_{exit}) = \frac{\partial P(X_{exit})}{\partial X} = 0$$

$$P(X) \geq 0, \quad X_{inlet} < X < X_{exit}$$

### 2.2 สมการความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่น

สมการความหนาฟิล์มขึ้นอยู่กับลักษณะกายภาพและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของทรงกระบอกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น

$$H = H_0 + \frac{X^2}{2R_X} + D(X) - \frac{1}{\pi} \int_{X_{inlet}}^{X_{exit}} P(X') \ln|-X'| dX' \quad (5)$$

เมื่อ  $D(X)$  เป็นค่าความหยาบผิวแบบสุ่มแบบ Gaussian Distribution ในรูปแบบไร้มิติ

**2.3 สมการความหนาแน่นของฟิล์มสารหล่อลื่น**

ความหนาแน่นของสารหล่อลื่นขึ้นอยู่กับความดันที่ฟิล์มสารหล่อลื่นได้รับในรูปแบบไร้มิติ[1]

$$\bar{\rho} = 1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} P_H P}{1 + 1.7 \times 10^{-9} P_H P} \quad (6)$$

**2.4 สมการความหนืดของฟิล์มสารหล่อลื่น**

ความหนืดของสารหล่อลื่นแบบนอนนิวโตเนียนเปลี่ยนแปลงตามความเครียดเฉือน และความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นและในรูปแบบไร้มิติ

$$\bar{\mu} = \bar{\mu}_S \bar{\mu}_R \quad (7)$$

ความหนืดของสารหล่อลื่นเป็นไปตามแบบจำลองความหนืด Power Law Model

$$\bar{\mu}_S = \frac{m_0}{\mu_0} \left| \frac{\mu_0 R_0}{b^2} \right|^{n-1} \left| \frac{1}{H} \frac{\partial u^*}{\partial Z} \right|^{n-1} \quad (8)$$

ความหนืดของสารหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงตามความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น[10]

$$\bar{\mu}_R = \exp \left\{ \frac{(\ln(\mu_0) + 9.67) \times (-1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} P_H P)^{z_1})}{z_1} \right\} \quad (9)$$

**2.5 สมการสมดุลแรง**

ภาระที่กระทำกับผิวสัมผัสจะเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำผ่านฟิล์มของสารหล่อลื่น ในรูปแบบไร้มิติ

$$\int_{X_{inlet}}^{X_{exit}} P dX = \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

**2.6 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน**

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นในรูปแบบไร้มิติเป็นไปตามสมการ

$$f = \left( \frac{\mu_0 u_0 R_0}{w_z b C_{WT}} \right) \int_{X_{inlet}}^{X_{exit}} \left( \frac{\bar{\mu}}{H} \right) \left( \frac{\partial u^*}{\partial Z} \right)_{Z=0} dX \quad (11)$$

**3. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข**

การหาคำตอบของสมการเรย์โนลด์ เป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้นสูง เพื่อหาความดันและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน ทำการหาคำตอบซ้ำๆ จนกระทั่ง

$$\sum_{i=0}^N |P_i^{k+1} - P_i^k| / \sum_{i=0}^N P_i^{k+1} \leq 0.0001 \quad (12)$$

$$\left| 1 - \frac{\int_{X_{inlet}}^{X_{exit}} P dX}{\frac{\pi}{2}} \right| \leq 0.0001 \quad (13)$$

**4. ผลการคำนวณ**

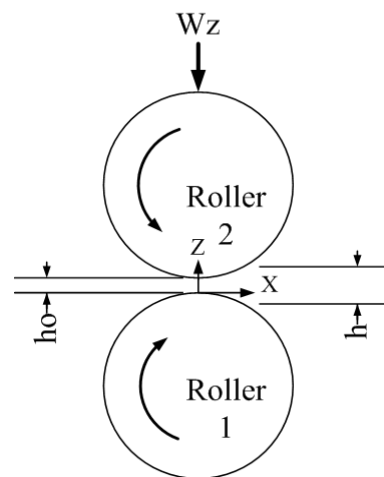
คุณสมบัติของวัสดุและสารหล่อลื่น ที่ใช้ในบทความนี้แสดงตามตารางที่ 1 และตารางที่ 2 พิกัดที่ใช้ในการจำลองผลแสดงดังรูปที่ 1

**ตารางที่ 1** คุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติของวัสดุ	ทรงกระบอก	ทรงกระบอก
	1	2
Modulus of Elasticity (GPa)	200.0	5.0
Poisson ratio	0.30	0.40

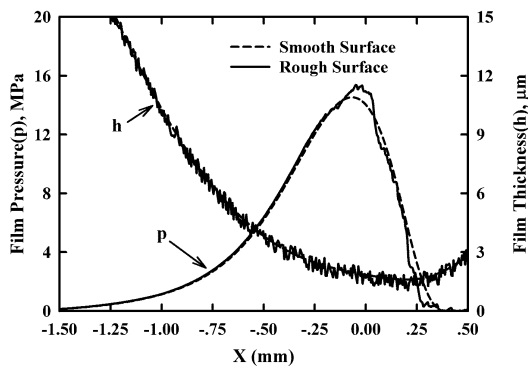
**ตารางที่ 2** คุณสมบัติของสารหล่อลื่น

คุณสมบัติของสารหล่อลื่น	
Inlet Density (kg/m <sup>3</sup> )	892.80
Inlet Viscosity (Pa-s)	0.100
Viscosity-Pressure Index (Z <sub>1</sub> )	0.5685
Power Law Index (n)	0.985



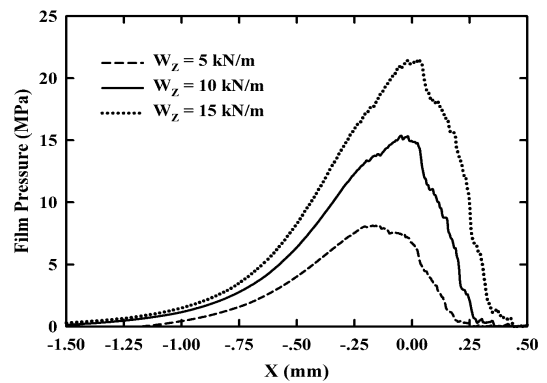
**รูปที่ 1** พิกัดที่ใช้ในการจำลองผล

จากการจำลองพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกสัมผัสแบบเส้นระหว่างทรงกระบอก 2 อัน ด้วยสารหล่อลื่นที่เป็นของไหลนอนนิวโตเนียน (Pseudoplastic Fluid,  $n < 1$ ) เมื่อค่าความหยาบผิวของทรงกระบอกเป็นแบบสุ่มที่มีการกระจายตัวแบบ Gaussian โดยมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Root mean square,  $R_{rms}$ ) ของทรงกระบอกเท่ากับ  $0.50 \mu\text{m}$  ทรงกระบอกหมุนด้วยความเร็วเฉลี่ย  $0.50 \text{ m/s}$  โดยมีอัตราส่วน Slip/Slide Ratio เท่ากับ  $0.50$  และภาระที่กระทำกับทรงกระบอกเท่ากับ  $10 \text{ kN/m}$  พบว่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงตามความหยาบของผิวทรงกระบอก แต่ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงตามความหยาบผิวน้อยมาก เนื่องจากทรงกระบอกทำด้วยวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงต่ำ เมื่อได้รับภาระจากความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามความดันอย่างมาก เป็นผลให้ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงตามลักษณะความหยาบผิว ซึ่งค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด และค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ในกรณีที่เป็นผิวเรียบและกรณีที่เกิดค่าความหยาบของผิวสัมผัสมีค่าเท่ากับ  $1.602 \mu\text{m}$ ,  $14.526 \text{ MPa}$  และ  $1.054 \mu\text{m}$ ,  $15.367 \text{ MPa}$ , ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2

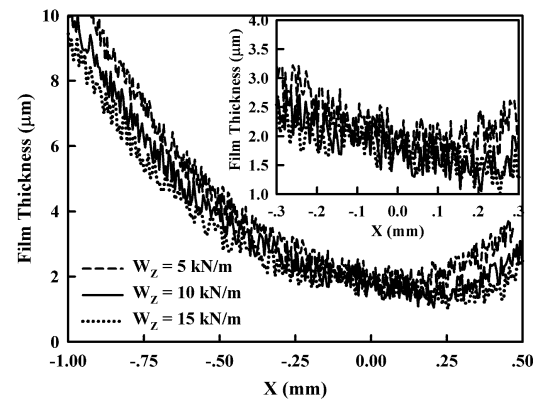


รูปที่ 2 การกระจายของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นและความดันฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อผิวสัมผัสเป็นผิวเรียบ และผิวหยาบ

เมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับเพิ่มขึ้นพบว่า ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและความกว้างของการสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลง โดยที่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงตามความหยาบผิวเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่ทรงกระบอกได้รับเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด และค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $1.481 \mu\text{m}$ ,  $8.128 \text{ MPa}$ ,  $1.054 \mu\text{m}$ ,  $15.367 \text{ MPa}$ ,  $1.015 \mu\text{m}$  และ  $21.524 \text{ MPa}$  เมื่อภาระที่กระทำกับทรงกระบอกมีค่าเท่ากับ  $5 \text{ kN/m}$ ,  $10 \text{ kN/m}$  และ  $15 \text{ kN/m}$  ลำดับ แสดงดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4



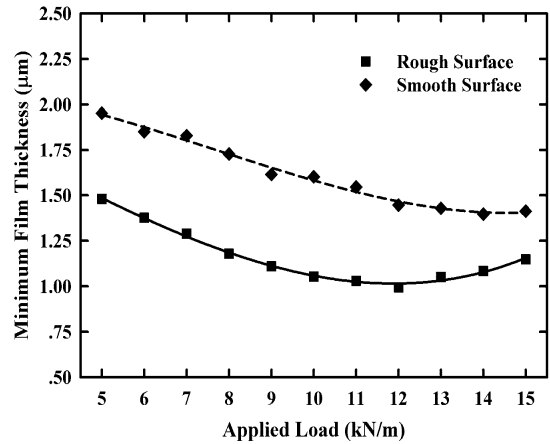
รูปที่ 3 การกระจายของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่กระทำกับทรงกระบอก ผิวของทรงกระบอกเป็นผิวหยาบที่  $R_{rms} = 0.50 \mu\text{m}$



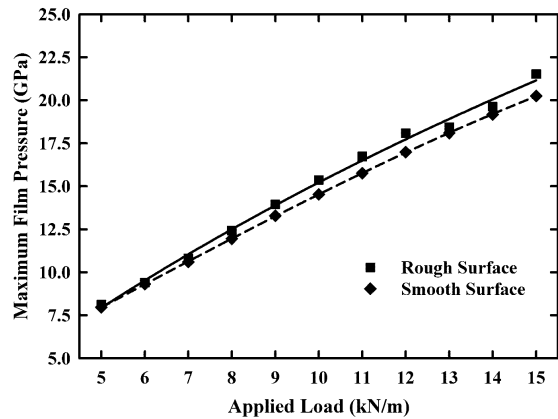
รูปที่ 4 การกระจายของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่กระทำกับทรงกระบอก ผิวของทรงกระบอกเป็นผิวหยาบที่  $R_{rms} = 0.50 \mu\text{m}$

รูปที่ 5 รูปที่ 6 และรูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่กระทำกับทรงกระบอก พบว่าเมื่อภาระที่กระทำกับทรงกระบอกเพิ่มขึ้น ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นแต่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง เนื่องจากความหนืดของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงจากความเครียดเฉือนที่ฟิล์มสารหล่อลื่นได้รับ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าลดลงในช่วงแรก แต่เมื่อภาระที่กระทำกับทรงกระบอกมีค่ามากกว่า 12 kN/m ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อภาระที่กระทำกับทรงกระบอกเพิ่มขึ้นความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นที่กระทำกับทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้น ทรงกระบอกก็จะเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากขึ้นตามความดันที่ได้รับเป็นผลให้ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น

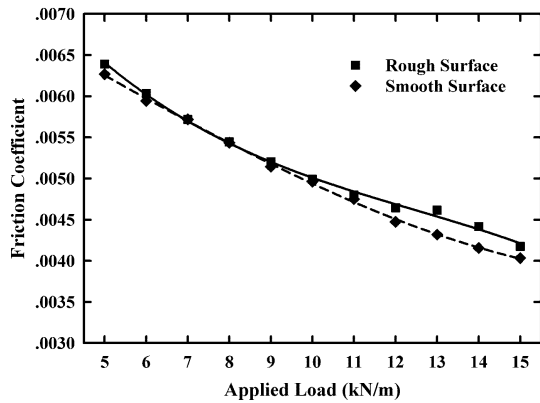
ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดในกรณีผิวของทรงกระบอกเป็นผิวหยาบมีค่าน้อยกว่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดในกรณีผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบ แต่ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในกรณีผิวของทรงกระบอกเป็นผิวหยาบมีค่ามากกว่าในกรณีที่ผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Mongkolwongroj และคณะ[11] การหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกในโรดเลอร์กับโรลเลอร์เมื่อสารหล่อลื่นมีพฤติกรรมเป็นของไหลนิวโตเนียน โดยวัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็น UHMWPE (วัสดุอ่อน) และ โลหะ (CoCr) พบว่าผลของความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นจากการทดลองสอดคล้องกัน



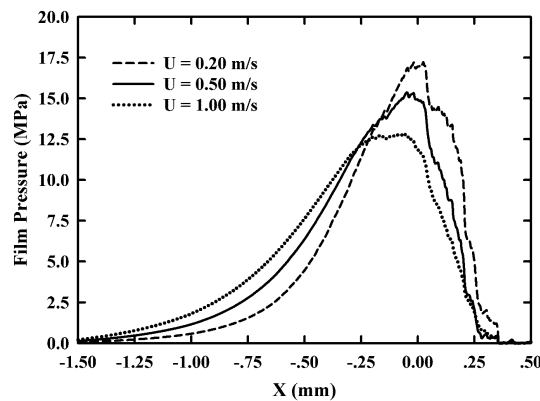
รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่ทรงกระบอกได้รับ ในกรณีผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวทรงกระบอกเป็นผิวหยาบที่  $R_{rms} = 0.50 \mu m$



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่ทรงกระบอกได้รับ ในกรณีผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวทรงกระบอกเป็นผิวหยาบที่  $R_{rms} = 0.50 \mu m$



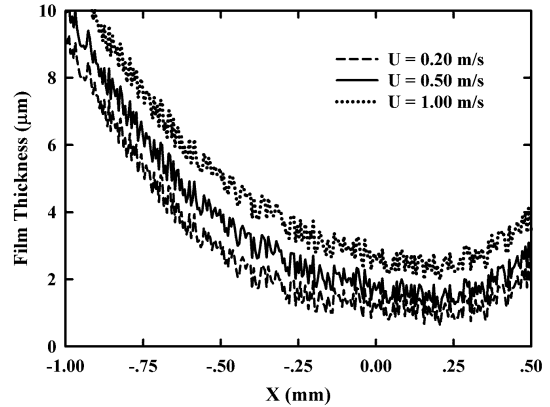
รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่ทรงกระบอกได้รับ ในกรณีผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวทรงกระบอกเป็นผิวหยาบที่  $R_{rms} = 0.50 \mu m$



รูปที่ 8 การกระจายของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของผิวทรงกระบอก ผิวของทรงกระบอกเป็นผิวหยาบที่  $R_{rms} = 0.50 \mu m$

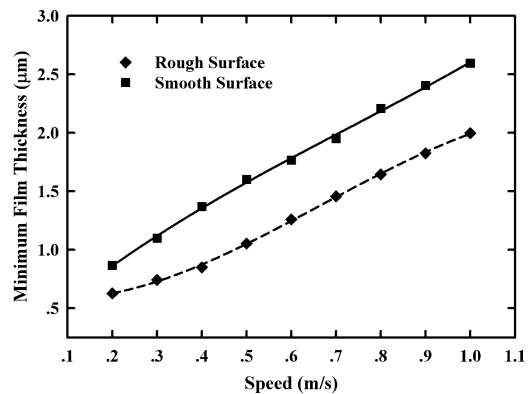
ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นที่บริเวณกึ่งกลางของการสัมผัสมีค่าลดลง แต่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของผิวสัมผัสของทรงกระบอกเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงตามความหยาบผิวของผิวสัมผัส โดยค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดและค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $0.627 \mu m$ ,  $17.216 \text{ MPa}$ ,  $1.054 \mu m$ ,  $15.367 \text{ MPa}$  และ  $1.997 \mu m$ ,  $12.807 \text{ MPa}$  เมื่อความเร็วเฉลี่ยของผิว

ทรงกระบอกมีค่าเท่ากับ  $0.20 \text{ m/s}$ ,  $0.50 \text{ m/s}$  และ  $1.00 \text{ m/s}$  ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9

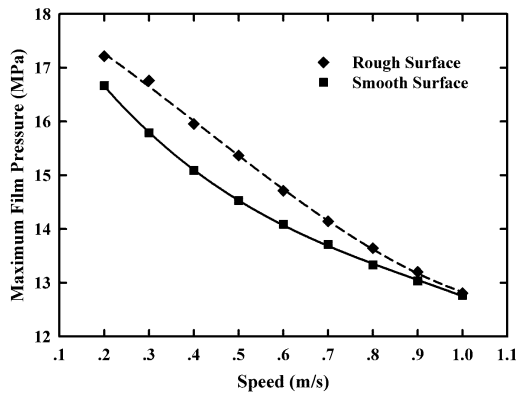


รูปที่ 9 การกระจายของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของผิวทรงกระบอก ผิวของทรงกระบอกเป็นผิวหยาบที่  $R_{rms} = 0.50 \mu m$

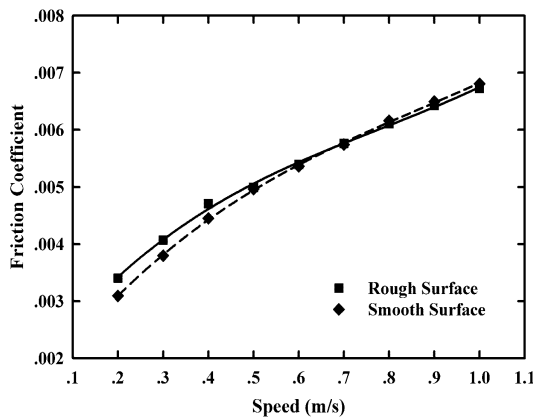
ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าลดลงเมื่อความเร็วของผิวทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเค้นเฉือนที่ฟิล์มสารหล่อลื่นได้รับมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นจากค่าความหนืดของสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของผิวทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของผิวทรงกระบอก ในกรณีผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวทรงกระบอกเป็นผิวหยาบที่  $R_{rms} = 0.50 \mu m$



รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของผิวทรงกระบอก ในกรณีผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวทรงกระบอกเป็นผิวหยาบที่  $R_{rms} = 0.50 \mu m$



รูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของผิวทรงกระบอก ในกรณีผิวของทรงกระบอกเป็นผิวเรียบและผิวทรงกระบอกเป็นผิวหยาบที่  $R_{rms} = 0.50 \mu m$

### 5. สรุปผล

จากการจำลองผลพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบฮิสเทรีซิสไฮโดรไดนามิก เมื่อคิดผลของความหยาบผิวในวัสดุอ่อนด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนสรุปได้ว่าความหยาบของผิวสัมผัสมีผลต่อความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น แต่มีผลน้อยต่อความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าลดลงแต่ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดและสัมประสิทธิ์ความ

เสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผิวของทรงกระบอกเป็นผิวหยาบเทียบกับทรงกระบอกที่เรียบ

เมื่อภาระที่กระทำกับทรงกระบอกเพิ่มขึ้นความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นแต่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าลดลง ในช่วงแรกและเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่กระทำกับทรงกระบอกมีค่ามากกว่า 12 kN/m

เมื่อความเร็วของผิวทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้นความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าลดลง

### 6. สัญลักษณ์

$b$  : Semi-width of Hertzian contact under load,  $w'_z$ , m,

$$b = R_x \left( \frac{8W_z}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$E_{1/2}$  : Elastic modulus of Roller, Pa

$E'$  : Effective elastic modulus, Pa,

$$\frac{2}{E'} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$

$f$  : Friction coefficient of pinion

$h$  : Lubricant film thickness, m

$h_0$  : Rigid central film thickness, m

$H$  : Dimensionless film thickness,

$$H = h \left( \frac{R_x}{b^2} \right)$$

$H_0$  : Dimensionless rigid central film thickness,

$$H_0 = h_0 (R_x / b^2)$$

$n$  : Power law index

$\Lambda$  : Constant in Reynolds equation

$p$  : Pressure, Pa

$P$  : Dimensionless pressure,

$$P = \frac{p}{P_H}$$

$P_H$  : Maximum Hertzian pressure, Pa,



$$P_H = E' \left( \frac{W_Z}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$r_{1/2}$  : Radius of Roller, m

$R_X$  : Curvature sum, m,

$$\frac{1}{R_X} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$$

$u$  : Film velocity, m/s

$u_{1/2}$  : Surface velocity of Roller, m/s

$\bar{u}$  : Entrainment velocity, m/s,

$$\bar{u} = \frac{u_1 + u_2}{2}$$

$u^*$  : Dimensionless film velocity,

$$u^* = \frac{u}{\bar{u}}$$

$w_Z$  : Applied load, N/m

$W_Z$  : Dimensionless load,

$$W'_Z = \frac{w_Z}{E' R_X^2}$$

$x$  : Coordinate, m

$X$  : Dimensionless coordinate,

$$X = \frac{x}{b}$$

$z$  : Coordinate, m

$Z$  : Dimensionless coordinate,

$$Z = \frac{z}{h}$$

$Z_1$  : Viscosity-Pressure index

$\mu$  : Equivalent viscosity, Pa · s

$\bar{\mu}$  : Dimensionless equivalent viscosity,

$$\bar{\mu} = \mu / \mu_0$$

$\mu_0$  : Inlet viscosity, Pa · s

$\rho$  : Density of lubricant, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_0$  : Inlet density of lubricant, kg/m<sup>3</sup>

$\bar{\rho}$  : Dimensionless density of lubricant,

$$\bar{\rho} = \rho / \rho_0$$

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Dowson, G.R. Higginson, “Elastohydrodynamic lubrication, the fundamentals of roller and gear lubrication”, Oxford: Pergamon, 1966.
- [2] S. Bair and F.Qureshi, “The Generalized Newtonian Fluid Model and Elastohydrodynamic Film Thickness”, Journal of tribology, 125, 2003, pp 70-75.
- [3] S. Bair, “A Reynolds-Ellis Equation for Line Contact with Shear-Thinning”, Tribology International, 39, 2005, pp.310-316.
- [4] K.Wongseedakaew, “Performance Characteristics of Elastohydrodynamic Lubrication in Roller Bearing with non-Newtonian Lubricant”, The Journal of Industrial Technology, 7, No. 1, 2011, pp.29-37. (in Thai)
- [5] C.H. Venner and W.E. Ten Napal, “Surface Roughness Effects in an EHL Line Contact.” Tran. ASME. Journal of Tribology , 114, 1992, pp. 616-662.
- [6] 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, 108, 1986, pp. 551-556.
- [7] C.H. Venner, “Multilevel solution of the EHL line and point contact problems.” PhD. Thesis, The University Twenty, 1991.
- [8] C.E.Goodyer, “Adaptive Numerical Methods for Elastohydrodynamic Lubrication”, PhD Thesis, School of Computing, The University of Leeds, 2001.

- [9] A. Francisco, J. Frene and A. Blouin, “Multilevel Solution to Elastohydrodynamic Contact for the Water Lubricated 3D Line Contact”, STLE Tribology Transactions, 45, 2002, pp. 110-116.
- [10] C.J.A. Roelands, “Correlational Aspects of the Viscosity-Temperature-Pressure Relationship of Lubricating Oils”, Druk, V.R.B., Groingen, Netherland, 1969.
- [11] M. Mongkolwongrojn, K. Wongseedakaew and F.E. Kennedy, “Elastohydrodynamic Lubrication of Rough Surfaces under Oscillatory Line Contact with Non-Newtonian Lubricant”, Tribology Transactions, 51, 2008, pp. 552-561.