

พฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกในเฟืองฟันตรง ด้วยสารหล่อลื่นนอนนิวโตเนียน

Performance Characteristics of Elastohydrodynamic Lubrication in Spur Gear with non-Newtonian Lubricant

ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

khanitthaw@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกในเฟืองฟันตรงที่มีการสัมผัสเป็นเส้นในสภาวะไม่คงตัวด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนที่เป็นไปตามแบบจำลองความหนืดของคาร์โอเมื่อไม่คิดผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารหล่อลื่น โดยการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเปอร์เทอร์เบชันเพื่อลดความซับซ้อนและความไม่เป็นเชิงเส้นของสมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์ เพื่อแก้สมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์ในสภาวะไม่คงตัว สมการการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ สมการการเปลี่ยนแปลงความหนืดและความหนาแน่นของสารหล่อลื่น ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสันกับระเบียบวิธีมัลติกริด หากการกระจายตัวของความดันและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นและสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระและความเร็วในการทำงานของเฟืองฟันตรง จากการจำลองผลพบว่าเมื่อเฟืองเริ่มขบกันความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าน้อยสุด เมื่อระยะการสัมผัสของเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้นความหนาของฟิล์มมีค่าน้อยสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ที่ระยะพิทช์สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าน้อยสุด เมื่อภาระที่เฟืองได้รับเพิ่มขึ้น ความดันฟิล์มของสารหล่อลื่นและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลง ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: เฟืองฟันตรง, สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์, ระเบียบวิธีมัลติกริด, ของไหลนอนนิวโตเนียน

Abstract

This paper presents the performance characteristics of transient isothermal elastohydrodynamic lubrication in line contact of spur gear with non-Newtonian fluids base on Carreau viscosity model. The perturbation method used for reduced nonlinearity of the modified Reynold Equation. The time dependent Reynolds equation, elastic equation and viscosity equation were formulated for compressible fluid. Finite Difference method, Newton-Raphson method and multigrid method were implemented to obtain the film pressure profiles, film thickness profiles and traction coefficient in the contact region at various loads and speeds. The simulation results show that the film thickness reaches its minimum at approach point. The minimum film thickness increase when the line of action increased. The traction coefficient has minimum value at pitch point. For increasing load, film pressure and traction coefficient increase but film thickness decrease. The film thickness and traction coefficient increase when the speed increased.

Keywords: Spur gear, Modified Reynolds equation, Multigrid method, non-Newtonian fluid.

1. บทนำ

เครื่องจักรและเครื่องมือกลต่างๆ ที่มีระบบส่งกำลังและต้องการอัตราทด ส่วนใหญ่ใช้เฟืองในการส่งถ่ายกำลังเพื่อให้เฟืองทำงานตามที่ออกแบบไว้จำเป็นต้องมีการหล่อลื่นที่ดีเพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้น ดังนั้นการศึกษา

พฤติกรรมการทำงานของเฟืองจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์และศึกษาการเกิดการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากการหล่อลื่นไม่ดีพอและลักษณะการทำงานของฟันเฟือง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ ศึกษาและออกแบบเฟืองให้มีประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ยาวนานขึ้น Larsson[1] ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของเฟืองฟันตรงที่ทำงานในสภาวะไม่คงตัวด้วยสารหล่อลื่นนอนนิวโตเนียนพบว่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งฟันเฟืองเริ่มขบกันและมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะการขบกันของฟันเฟือง Wang[2] ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกในเฟืองฟันตรงเมื่อสารหล่อลื่นมีพฤติกรรมเป็นของไหลนิวโตเนียนพบว่าความหนาฟิล์มจะมีค่าลดลงแต่อุณหภูมิสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่ฟันเฟืองได้รับเพิ่มขึ้น การศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกเมื่อของไหลเป็นของไหลแบบนอนนิวโตเนียน สมการที่ใช้มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงดังนั้นการหาคำตอบมีความยุ่งยากและใช้เวลาคำนวณนาน Lubrecht[3] และ Francisco [4] จึงได้นำเสนอวิธีมัลติกริดที่มีประสิทธิภาพเพื่อลดระยะเวลาการคำนวณ

บทความนี้ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกในเฟืองฟันตรงที่มีการสัมผัสเป็นเส้นในสภาวะไม่คงตัวด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนที่เป็นไปตามแบบจำลองความหนืดของคาร์โอ โดยไม่คิดผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารหล่อลื่น เนื่องจากสมการที่ใช้มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงจึงได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเพอร์เทอเบชันและระเบียบวิธีมัลติกริด ในการคำนวณหาพฤติกรรมการกระจายตัวของฟิล์มสารหล่อลื่น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้น

2. ทฤษฎีการหล่อลื่น

2.1 ลักษณะทางกายภาพของฟันเฟือง

การทำงานของเฟืองแบบฟันตรงและลักษณะทางกายภาพของฟันเฟืองตามรูปที่ 1

การขบกันของฟันเฟืองที่ระยะ \bar{S} จากตำแหน่งพิตซ์ของเฟืองที่มีรัศมีพิตซ์ r_a และ r_b มีมุม pressure angle $\bar{\psi}$ สามารถอธิบายได้ด้วยการสัมผัสกันของทรงกระบอก 2 ตัวที่มีความเร็วในการหมุน ω_a และ ω_b ตามลำดับ ดังนั้นที่ระยะการขบกันต่างๆ ของเฟืองจะได้

$$\begin{aligned} R_1(\bar{S}) &= r_b \sin \bar{\psi} + \bar{S} \\ R_2(\bar{S}) &= r_a \sin \bar{\psi} - \bar{S} \end{aligned} \quad (1)$$

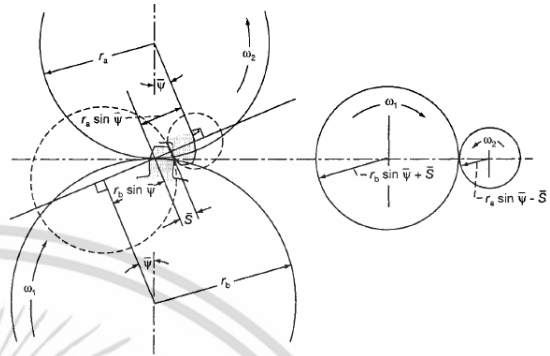
ความเร็วที่ผิวของฟันเฟืองที่ขบกัน

$$\begin{aligned} u_1(\bar{S}) &= \omega_b R_1(\bar{S}) \\ u_2(\bar{S}) &= \omega_a R_2(\bar{S}) \end{aligned} \quad (2)$$

ระยะการขบกันทั้งหมดของฟันเฟือง

$$\bar{S} = \sqrt{(r_a + a_a)^2 - (r_a \cos \bar{\psi})^2} - r_a \sin \bar{\psi} + \quad (3)$$

เมื่อ a_a, a_b ค่าแอดเดนดัมของเฟืองขับและเฟืองตาม
 r_a, r_b รัศมีวงกลมพิตซ์ของเฟืองขับและเฟืองตาม
 $\bar{\psi}$ ค่า Pressure angle



รูปที่ 1 แสดงระยะรัศมีวงกลมพิตซ์ของเฟืองขับและเฟืองตามของเฟืองแบบฟันตรง

2.2 สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์

งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองความหนืดของคาร์โอ (Carreau Viscosity Model) [5]

$$\mu(I) = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) (1 + \lambda^2 I)^{\frac{n-1}{2}} \quad (4)$$

$$I = (\partial u / \partial z)^2 + (\partial v / \partial z)^2 \quad (5)$$

สมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์ในสภาวะไม่คงตัวแบบไร้มิติที่สัมผัสเป็นเส้น จะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\varepsilon \frac{\partial P}{\partial X} \right) = K \left\{ C_{UT}(t) \frac{\partial}{\partial X} (\bar{\rho} H) + \frac{\partial}{\partial T} (\bar{\rho} H) \right\} \quad (6)$$

$$\text{เมื่อ } \varepsilon = \bar{\rho} H^3 / \bar{\mu}_U^* \quad (7)$$

$$K = 12 u_0 \mu_0 R_0^2 / b^3 P_H \quad (8)$$

$$\bar{\mu}_U^* = \bar{\mu}_P \left(\bar{\mu}_S^* + (n-1) \left(\bar{\mu}_S^* - \frac{\mu_\infty}{\mu_0} \right) \left(\frac{\lambda^2 K_{SH} \bar{T}_X^*}{1 + \lambda^2 K_{SH} \bar{T}_X^*} \right) \right) \quad (9)$$

โดยที่เงื่อนไขขอบสำหรับสมการเรย์โนลด์

$$P(X_{IN}, T) = 0, \quad P(X_{OUT}, T) = (\partial P / \partial X)_{OUT} = 0 \quad (10)$$

$$P \geq 0 \quad (X_{IN} < X < X_{OUT}) \quad (11)$$

2.3 สมการความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่น

สมการความหนาฟิล์มขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของฟันเฟืองและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของฟันเฟืองจากความคั่นของสารหล่อลื่น

$$H = H_0 + \frac{X^2}{2C_{RT}} - \frac{1}{\pi} \int_{\bar{x}_{IN}}^{\bar{x}_{OUT}} P(X, T) \ln |X - X'| dX' \quad (12)$$

2.4 สมการความหนาแน่นของสารหล่อลื่น

ความหนาแน่นของสารหล่อลื่นขึ้นอยู่กับความคั่นที่ฟิล์มสารหล่อลื่นได้รับ [6]

$$\bar{\rho} = 1 + 0.6 \times 10^{-9} p / (1 + 1.7 \times 10^{-9} p) \quad (13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สมการความหนืดของสารหล่อลื่น

ความหนืดของสารหล่อลื่นขึ้นอยู่กับความดันและความเครียดเฉือนที่ฟิล์มสารหล่อลื่นได้รับ

$$\mu = \mu_0 \bar{\mu}_R^* \bar{\mu}_s^* \quad (14)$$

ความหนืดของสารหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงตามความดันที่สารหล่อลื่นได้รับในรูปแบบไร้มิติ [7]

$$\bar{\mu}_R^* = \exp\left[\left(\ln(\mu_0) + 9.67\right)\left(-1 + \left(1 + 5.1 \times 10^{-9} p\right)^z\right)\right] \quad (15)$$

ความหนืดของสารหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงตามความเครียดเฉือนที่สารหล่อลื่นได้รับเป็นไปตาม Carreau Viscosity Model ตามสมการ (4) ในรูปแบบไร้มิติ

$$\bar{\mu}_s^* = \mu_{\infty} / \mu_0 + (1 - \mu_{\infty} / \mu_0) \left(1 + \lambda^2 K_{SH} \bar{\Gamma}^*\right)^{\frac{n-1}{2}} \quad (16)$$

2.6 สมการสมดุลแรง

ภาระที่ฟันเฟืองได้รับจะเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำผ่านฟิล์มของสารหล่อลื่น

$$\int_{x_{IN}}^{x_{OUT}} P dX = C_{WT} (\pi/2) \quad (17)$$

2.7 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นในการทำงานของเฟืองฟันตรงแบบไร้มิติ

$$f = \left(\frac{\mu_0 \mu_0 R_0}{C_{WT} w_0 b}\right) \int_{x_{IN}}^{x_{OUT}} \left(\frac{\bar{\mu}_R^* \bar{\mu}_s^*}{H}\right) \left(\frac{\partial u^*}{\partial z}\right)_{z=0} dX \quad (18)$$

3. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

สมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์ เป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้นสูงจึงได้ประยุกต์ใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องกระจายสมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์ จะได้ว่า

$$F(P_i) = \frac{\varepsilon_{i+\frac{1}{2}} (P_{i+1} - P_i) / \Delta X - \varepsilon_{i-\frac{1}{2}} (P_i - P_{i-1}) / \Delta X}{\Delta X} \quad (19)$$

$$-K \left(C_{UT}(t) \left\{ (\bar{\rho}H)_i - (\bar{\rho}H)_{i-1} \right\} / \Delta X \right) + \left\{ (\bar{\rho}H)_i - (\bar{\rho}H)_{i-1} \right\} / \Delta T$$

เมื่อ $\Phi_{i+\frac{1}{2}} = (\Phi_{i+1} + \Phi_i) / 2$ (20)

$$\Phi_{i-\frac{1}{2}} = (\Phi_i + \Phi_{i-1}) / 2 \quad (21)$$

เมื่อประยุกต์ระเบียบวิธีนิวตันราฟสันกับสมการเรย์โนลด์เพื่อหาค่าคำตอบจะได้ว่า

$$[\partial F(P_i) / \partial P_i] [\Delta P_i] = [-F(P_i)] \quad (22)$$

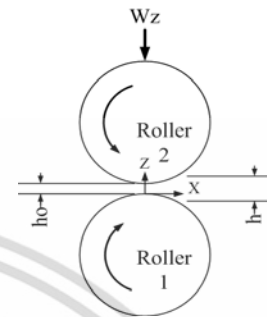
ทำการคำนวณซ้ำจนกระทั่ง

$$\sum_{i=0}^N |1 - P_i^k / P_i^{k+1}| < 0.0001 \quad (23)$$

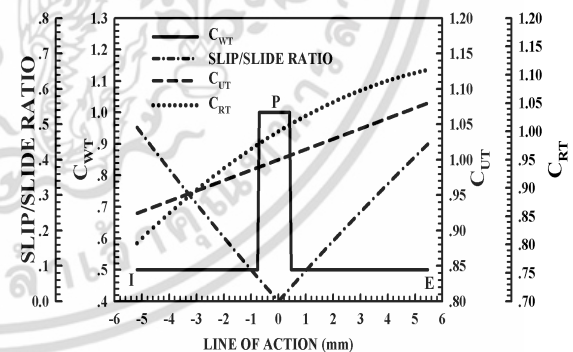
$$\left| 1 - \int_{x_{IN}}^{x_{OUT}} P dX \right| / C_{WT} (\pi/2) < 0.001 \quad (24)$$

4. ผลการคำนวณ

ภาระที่ฟันเฟืองได้รับ สภาวะการทำงานของฟันเฟืองที่ระยะการขบต่างๆ และพิกัดที่ใช้ ในการจำลองผลแสดงดังรูปที่ 2 และรูปที่ 1 คุณสมบัติของฟันเฟืองและสารหล่อลื่นแสดงดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2



รูปที่ 2 พิกัดที่ใช้ในการจำลองผล



รูปที่ 3 สภาวะการทำงานของฟันเฟืองที่ระยะการขบต่างๆ และพิกัดที่ใช้ ในการจำลองผล

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของฟันเฟือง

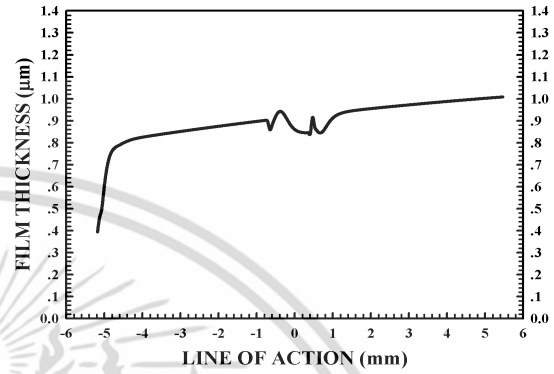
คุณสมบัติของฟันเฟือง	PINION	GEAR
จำนวนฟันเฟือง	50	100
โมดูล (m), mm.	2	2
Pressure Angle (ψ), องศา	20	
ความกว้างของฟันเฟือง, mm.	25	
MATERIAL	AISI 304	

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสารหล่อลื่น

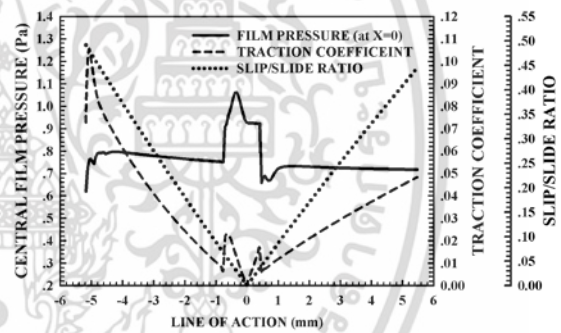
คุณสมบัติของสารหล่อลื่น	PAO 40
Inlet Density (ρ_0), kg/m ³	845.0
Low Shear rate Viscosity (μ_0), Pa-s	0.3338
High Shear rate Viscosity (μ_∞), Pa-s	0.0000
Power Law Index (n)	0.625
Time Relaxation (λ), s ⁻¹	2.12x10 ⁻⁷
Viscosity-Pressure Index (Z)	0.366

พบว่าที่ตำแหน่งพื้นเฟืองเริ่มขบกัน ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าน้อยสุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.393 μm ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าใกล้เคียงกับค่าสูงสุด โดยมีค่า 0.073 เมื่อระยะการขบกันของพื้นเฟืองเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ระยะการขบกันของพื้นเฟืองเท่ากับ -5.07 mm. จากตำแหน่งพิตช์ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.106 และมีค่าลดลงเมื่อระยะการขบกันของพื้นเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะการขบกันของพื้นเฟืองมากกว่า -4.81 mm. จากตำแหน่งพิตช์ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดเริ่มมีค่าคงที่ พื้นเฟืองเปลี่ยนจากการขบกัน 2 คู่มาเป็นขบกัน 1 คู่ ที่ระยะการขบกันของพื้นเฟืองเท่ากับ -0.71 mm. จากตำแหน่งพิตช์ ทำให้ภาระของพื้นเฟืองเพิ่มขึ้นทันทีที่ทันไคเป็น 2 เท่า ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าลดลงอย่างทันทีทันใดที่ตำแหน่งพิตช์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นทันทีที่ทันไคตำแหน่งดังกล่าวโดยที่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเปลี่ยนลดลงจาก 0.902 μm ไปเป็น 0.859 μm สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.008 ไปเป็น 0.023 จากนั้นความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงอีกครั้ง สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลงจนมีค่าน้อยสุดเท่ากับ 0.0001 ที่ตำแหน่งพิตช์ เนื่องจากที่ตำแหน่งพิตช์ความเร็วของพื้นเฟืองจับและพื้นเฟืองตามมีค่าเท่ากัน (Pure Rolling) ส่งผลให้ค่าเครีชดเนียนและความเค้นเฉือนมีค่าน้อยสุดที่ตำแหน่งพิตช์จากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะการขบกันของพื้นเฟืองมากกว่าตำแหน่งพิตช์ ที่ระยะการขบกันของพื้นเฟืองเท่ากับ 0.46 mm. จากตำแหน่งพิตช์พื้นเฟืองเปลี่ยนจากการขบกัน 1 คู่มาเป็นขบกัน 2 คู่ ภาระของพื้นเฟืองลดลงทันทีทันไค 2 เท่า ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด มีค่าเพิ่มขึ้นแบบทันทีทันไค จาก 0.845 μm ไปเป็น 0.915 μm และลดลงอย่างรวดเร็ว

จากนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้ง แต่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลงทันทีทันไคตำแหน่งดังกล่าวโดยมีค่าลดลงจาก 0.017 ไปเป็น 0.006 และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะการขบกันของพื้นเฟือง จนถึงระยะการขบกันของพื้นเฟืองเท่ากับ 1.16 mm. จากตำแหน่งพิตช์ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดเริ่มมีค่าคงที่แสดงดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 4 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเฟือง



รูปที่ 5 แสดงสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและ Slip/Slide Ratio ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเฟือง

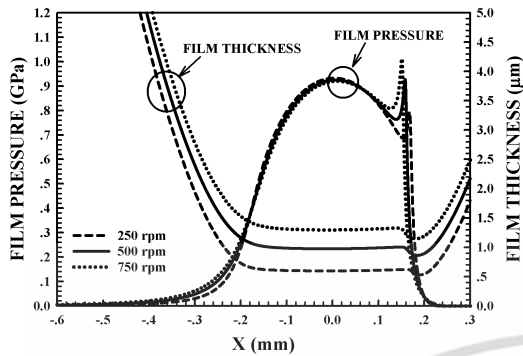
การเพิ่มขึ้นของความเร็วของเฟืองส่งผลให้ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งพิตช์มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราการใช้ของสารหล่อลื่นที่เพิ่มขึ้น แต่ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นไม่เปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปที่ 6 ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ระยะการขบกันต่างๆ ของพื้นเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของเฟืองเพิ่มขึ้น หลังจากผ่านตำแหน่งพิตช์ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8

ภาระที่เฟืองได้รับเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและความกว้างของการสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงแสดงดังรูปที่ 9 ความ

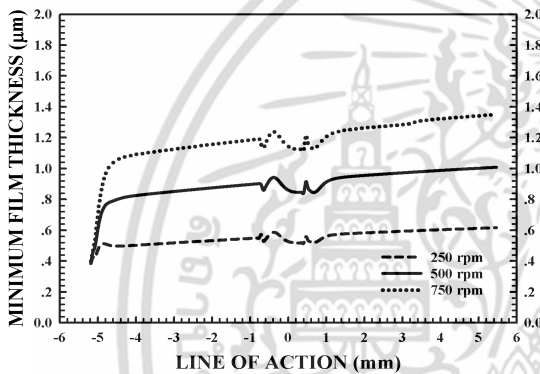
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

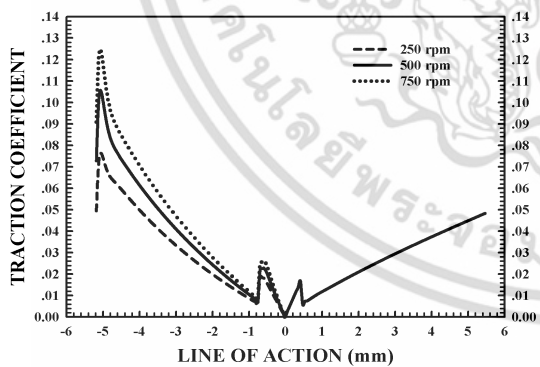
หนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าลดลงแต่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11



รูปที่ 6 แสดงการกระจายตัวของความดันและความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งพิตช์ ที่ความเร็วต่างๆ



รูปที่ 7 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเร็วต่างๆ



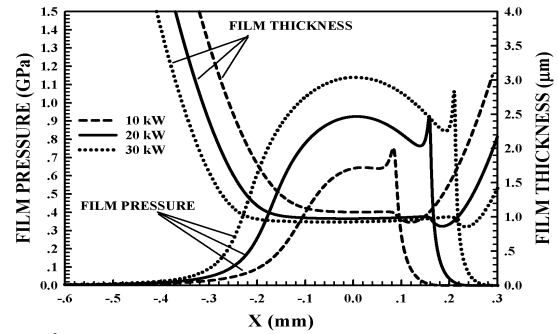
รูปที่ 8 แสดงสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง ที่ความเร็วต่างๆ

5. สรุปผล

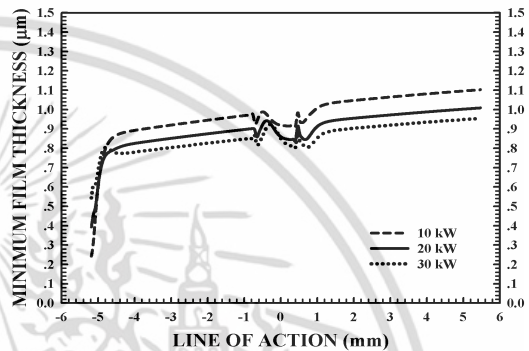
จากการจำลองผลพฤติกรรมกรรการหล่อลื่นแบบฮิลาสโตไฮโดรไดนามิกในเฟืองฟันรูปได้ว่า

- 5.1 ที่บริเวณฟันเฟืองเริ่มขบกันความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าน้อยสุดแต่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงสุด

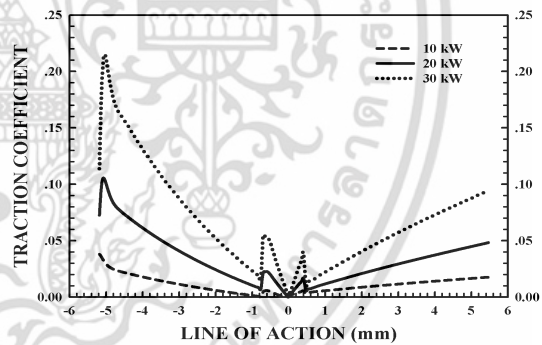
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 แสดงการกระจายตัวของความดันและความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งพิตช์ เมื่อเฟืองรับภาระต่างๆ



รูปที่ 10 แสดงความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อฟันเฟืองรับภาระต่างๆ



รูปที่ 11 แสดงสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเฟือง เมื่อฟันเฟืองรับภาระต่างๆ

5.2 ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะการขบกันของฟันเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น

5.3 ที่ตำแหน่งพิตช์ ความกว้างของการสัมผัสและความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่ามากที่สุดแต่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าน้อยสุด

5.4 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าลดลงเมื่อเฟืองรับภาระเพิ่มขึ้น

5.5 เมื่อความเร็วของเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยนักวิจัยรุ่นใหม่ ประจำปี 2553 จากสำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

7. สัญลักษณ์

b	ความกว้างครึ่งหนึ่งของการสัมผัส, m $b = R_0(8W_0/\pi)^{1/2}$
C_{RT}	สัดส่วนความโค้งที่ตำแหน่งใดๆ, $C_{RT} = R_x/R_0$
C_{UT}	สัดส่วนความเร็วที่ตำแหน่งใดๆ, $C_{UT} = \bar{u}/u_0$
C_{WT}	สัดส่วนภาระที่ตำแหน่งใดๆ, $C_{WT} = w'_z/w_0$
E	โมดูลัสความยืดหยุ่นของพื้นเฟือง, Pa
E'	โมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยของพื้นเฟือง, Pa $1/E' = 1/2[(1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2]$
f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
h	ความหนาฟิล์มที่ตำแหน่งใดๆ, m
h_0	ความหนาฟิล์มที่ตำแหน่งกึ่งกลาง, m
H	ความหนาฟิล์มไร้มิติ, $H = h(R_0/b^2)$
H_0	ความหนาฟิล์มที่ตำแหน่งกึ่งกลางไร้มิติ $H_0 = h_0(R_0/b^2)$
n	ดัชนีเพาเวอร์ลอว์
p	ความดัน, Pa
P	ความดันไร้มิติ, $P = p/P_H$
P_H	ความดันสูงสุดในการสัมผัสของ Hertz, Pa $P_H = E'(W_0/2\pi)^{1/2}$
R_0	รัศมีความโค้งเฉลี่ยที่ตำแหน่ง Pitch, m $1/R_0 = 1/r_a \sin(\bar{\psi}) + 1/r_b \sin(\bar{\psi})$
R_x	รัศมีความโค้งเฉลี่ยที่ตำแหน่งใดๆ, m $1/R_x = 1/R_1 + 1/R_2$
R_1	รัศมีความโค้งของพื้นเฟืองขับ, m
R_2	รัศมีความโค้งของพื้นเฟืองตาม, m
r_a	รัศมีของวงกลมพิตช์ของเฟืองขับ, m
r_b	รัศมีของวงกลมพิตช์ของเฟืองตาม, m
t	เวลา, s
T	เวลาไร้มิติ, $T = (u_0/b)t$
u_2	ความเร็วที่ผิวสัมผัสของเฟืองตาม, m
u_1	ความเร็วที่ผิวสัมผัสของเฟืองขับ, m
\bar{u}	ความเร็วเฉลี่ยของผิวพื้นเฟืองตำแหน่งใดๆ, m $\bar{u} = (u_1 + u_2)/2$
u_0	ความเร็วเฉลี่ยผิวพื้นเฟืองตำแหน่งพิตช์, m
w'	แรงที่ตำแหน่งใดๆในการขบกันของพื้นเฟือง, N/m

w_0	แรงที่ตำแหน่งพิตช์ของพื้นเฟือง, N/m
W_0	น้ำหนักไร้มิติตำแหน่งพิตช์, $W_0 = w_0/E'R_0^2$
x	โคออร์ดิเนต x ตามแนวสัมผัส, m
X	โคออร์ดิเนต X ไร้มิติ, $X = x/b$
Z	ดัชนีความหนืด-ความดัน
μ	ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute viscosity), Pa-s
μ_0	ความหนืดที่ความเครียดเฉือนมีค่าน้อย, Pa-s
μ_∞	ความหนืดที่ความเครียดเฉือนมีค่าสูง, Pa-s
$\bar{\mu}_R^*$	ความหนืดแบบไร้มิติที่ขึ้นกับความดัน
$\bar{\mu}_s^*$	ความหนืดแบบไร้มิติที่ขึ้นกับความเครียดเฉือน
ρ	ความหนาแน่นของสารหล่อลื่นหล่อลื่น, kg/m ³
ρ_0	ความหนาแน่นของสารหล่อลื่นที่ความดันบรรยากาศและที่อุณหภูมิอ้างอิง, kg/m ³
$\bar{\rho}$	ความหนาแน่นของสารหล่อลื่นแบบไร้มิติ, $\bar{\rho} = \rho/\rho_0$
$\bar{\psi}$	Pressure angle, degree
λ	Time relaxation, s ⁻¹

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Larsson, R., "Transient non-Newtonian elastohydrodynamic lubrication analysis of an involute spur gear", *Wear*, Vol. 207, pp 67-73, 1997.
- [2] Youqiang Wang, Hongqi Li, Jingwei Tong, Peiran Yang, "Transient thermoelastohydrodynamic lubrication analysis of and involute spur gear", *Tribology International* Vol. 37, pp 773-782, 2004.
- [3] Lubrecht, A.A., ten Napel, W.E. and Bosma, R., "Multigrid, an Alternative Method for Calculating Film Thickness and Pressure Profiles in Elastohydrodynamically Lubricated Line Contacts", *ASME J. Tribology*, vol.108, pp. 551-556, 1986.
- [4] Francisco, A., Frene, J. and Blouin, A., "Multilevel Solution to Elastohydrodynamic Contact for the Water Lubricated 3D Line Contact", *STLE Tribology Transactions*, vol.45, pp. 110-116, 2002.
- [5] R.I. Tanner, "Engineering Rheology", Vol. 14-15, Clarendon Press, Oxford, p. 359, 1985.
- [6] Dowson, D. and Higginson, G.R., "Elastohydrodynamic Lubrication: The Fundamental of Roller and Gear Lubrication", Pergamon, Oxford, 1966.
- [7] Roelands, C.J.A., "Correlational Aspects of the Viscosity-Temperature-Pressure Relationship of Lubricating Oils", Druk, V.R.B., Groingen, Netherland, 1969.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้