



การทำนายความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นในข้อสะโพกเทียมขณะเดิน

Prediction of Lubricating Film Thickness in Artificial Hip Joint under Walking conditions

เจษฎา พานิชกรณ^{1*} และ ชนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว²

^{1,2} ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

*ติดต่อ: jesdap@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้วิเคราะห์พฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกที่เกิดขึ้นในข้อสะโพกเทียมแบบโลหะ (Metal on Metal hip joint) และแบบวัสดุอ่อน (UHMWPE hip joint) ในขณะเดิน โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ร่วมกับระเบียบวิธีมัลติกริด หาคำตอบของสมการโมดิฟายด์ในสภาวะไม่คงตัวและสมการการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ เพื่อหาการกระจายของความดันฟิล์มและความหนาฟิล์มของข้อสะโพก รวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่เกิดจากการจำลองผลพบว่า ในขณะเดิน ความหนาฟิล์ม ความดันฟิล์ม และสัมประสิทธิ์ความเสียหาย มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากนั้นจึงมีค่าลดลงเนื่องจากเคลื่อนที่ไป-กลับ ของข้อสะโพก ค่าความหนาฟิล์มของข้อสะโพกเทียมแบบวัสดุอ่อน (UHMWPE hip joint) มีค่ามากกว่าค่าความหนาฟิล์มของข้อสะโพกเทียมแบบโลหะ (Metal on Metal hip joint) แต่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของข้อสะโพกเทียมแบบวัสดุอ่อน (UHMWPE hip joint) มีค่าน้อยกว่าค่าความหนาฟิล์มของข้อสะโพกเทียมแบบโลหะ (Metal on Metal hip joint)

คำหลัก: การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกในสภาวะไม่คงตัว, ข้อสะโพกเทียม, สภาวะการเดิน

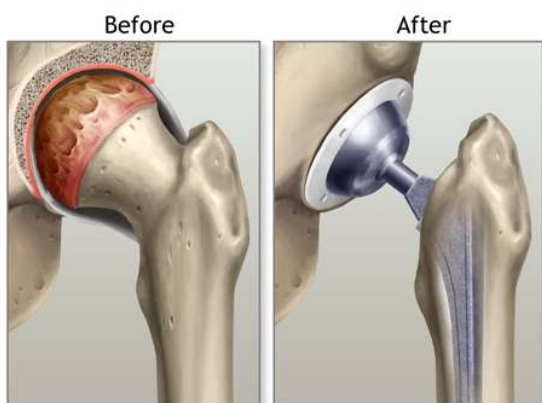
Abstract

This paper presents the analysis of elastohydrodynamic lubrication (EHL) for metal on metal and UHMWPE hip joint replacements under walking conditions. The time-dependent modified Reynolds equation and elasticity equation with initial conditions were formulated and solved numerically using a multi-grid multilevel with full approximation technique for a hip replacements to obtain film pressure distributions, film thickness distribution and friction coefficient. The simulation results show that during walking conditions, time dependent film thickness, film pressure and friction coefficient are increased and then decreased because of reverse motion. For UHMWPE hip joint, film thickness value is larger than the value of film thickness for metal-on-metal hip joint but the friction coefficient value for UHMWPE hip joint is less than the value of the friction coefficient for metal-on-metal hip joint.

Keywords: Time dependent elastohydrodynamic lubrication (EHL), Artificial hip joint, Walking conditions.

1. บทนำ

ในผู้ป่วยที่ป่วยเป็นโรคข้อกระดูกสะโพกเสื่อม จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนข้อสะโพกเทียม เพื่อรักษาให้สามารถเดินและใช้ชีวิตได้โดยปกติ แสดงดังรูปที่ 1 แต่ข้อสะโพกเทียมในปัจจุบันมีอายุการใช้งานอยู่ประมาณ 10-15 ปี เพื่อให้สามารถใช้งานได้ยาวนานขึ้น ในการออกแบบและการใช้งานข้อสะโพกเทียม จำเป็นต้องทราบถึงพฤติกรรมการทำงานจริงของข้อสะโพกเทียม ทั้งแบบ Metal-on-Metal และแบบ UHMWPE-on-Metal จึงได้ทำการจำลองพฤติกรรมของการหล่อลื่นที่เกิดขึ้นในข้อสะโพกเทียมดังกล่าวในรูปแบบของการหล่อลื่นของทรงกลมและแผ่นเรียบในสถานะไม่คงตัว



รูปที่ 1 แสดงข้อสะโพกเสื่อมและการเปลี่ยนข้อสะโพกเทียมทดแทน

Dowson and Higginson[1] ศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบฮิสเทอโรไดนามิกที่มีสัมผัสเป็นเส้นโดยใช้วิธีเชิงตัวเลข พบว่าฟิล์มสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นบางมาก Vanner[2] ศึกษาผลกระทบจากการอัดตัวได้ของสารหล่อลื่นที่มีต่อความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นสำหรับการสัมผัสเป็นเส้นและวงกลม Rattapasakorn [3],[4] ได้นำเสนอพฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบฮิสเทอโรไดนามิกที่มีสัมผัสเป็นวงกลมด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมแบบของไหลนิวโตเนียน พบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นขึ้นกับลักษณะของความหยাবผิว Panichakorn[5] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรม

การหล่อลื่นแบบฮิสเทอโรไดนามิกของวัสดุอ่อนที่สัมผัสเป็นวงกลมพบว่าเมื่อขนาดของทรงกลมเพิ่มขึ้นความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นแต่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง Vahid และคณะ[6][7] ได้นำเสนอพฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบฮิสเทอโรไดนามิกในสถานะไม่คงตัวที่มีสัมผัสเป็นวงกลม และทำนายความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นขณะทำงานของข้อสะโพกเทียมแบบ UHMWPE hip joint Dowson and Jin[8] ได้นำเสนอการทำงานของข้อสะโพกเทียมแบบ Metal-on-Metal hip joint รวมทั้งประมาณความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในข้อสะโพกเทียมขณะเดิน แต่การศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบฮิสเทอโรไดนามิก สมการที่ใช้มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ดังนั้นการหาคำตอบมีความยุ่งยากและใช้เวลาการจำลองผลมาก Lubrecht[9] และ Goodyer[10] จึงได้นำเสนอวิธีมัลติกริด ที่มีประสิทธิภาพสูงในการลดระยะเวลาในการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

บทความนี้ศึกษาการทำงานจริงของข้อสะโพกเทียมทั้งแบบ Metal-on-Metal และแบบ UHMWPE-on-Metal ซึ่งเป็นพฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบฮิสเทอโรไดนามิกในสถานะไม่คงตัวด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมเป็นของไหลนอนนิวโตเนียน เมื่อไม่คิดผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสารหล่อลื่น โดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method) ร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) และระเบียบวิธีมัลติกริด (Multi-grid Method) สำหรับหาคำตอบของสมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ เพื่อหาการกระจายตัวของความดันฟิล์ม ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ Metal-on-Metal และแบบ UHMWPE-on-Metal

2. ทฤษฎีการหล่อลื่น

พฤติกรรมการทำงานของข้อสะโพกเทียม ทั้งแบบ Metal-on-Metal และแบบ UHMWPE-on-Metal เป็น

พฤติกรรมการหล่อลื่นแบบฮิสเทอติกในสภาวะไม่คงตัวด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมเป็นของไหลนอนนิวโตเนียน เมื่อไม่คิดผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสารหล่อลื่น สามารถทำนายพฤติกรรมการทำงานได้ด้วยสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation) ร่วมกับสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) หรือสมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ (Modified Reynold Equation)

2.1 สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือนสำหรับของไหลนอนนิวโตเนียน เมื่อไม่คิดผลจาก Body Force ในบทความนี้แสดงดังสมการ

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

งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองความหนืดของคาร์โอ (Carreau Viscosity Model) [11]

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

$$\text{เมื่อ} \quad I = \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2$$

ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเปอร์เทอร์เบชัน จะได้สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ในสภาวะคงตัวแบบไร้มิติที่สัมผัสเป็นจุด

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\bar{\varepsilon}_U \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \left(\frac{1}{k} \right)^2 \frac{\partial}{\partial Y} \left(\bar{\varepsilon}_V \frac{\partial P}{\partial Y} \right) \quad (3)$$

$$= \Lambda \left\{ \cos \varphi \frac{\partial}{\partial X} (\bar{\rho} H) + \frac{\sin \varphi}{k} \frac{\partial}{\partial Y} (\bar{\rho} H) + \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} H) \right\}$$

$$\text{เมื่อ} \quad \Lambda = \frac{96 \mu_0 R^2 V}{P_H D_X D_Y^2}$$

$$\bar{\varepsilon}_U = \frac{\bar{\rho} H^3}{\bar{\mu}_U^*}$$

$$\bar{\varepsilon}_V = \frac{\bar{\rho} H^3}{\bar{\mu}_V^*}$$

$$\mu_U^* = \bar{\mu}_R \left[\bar{\mu}_S^* + (n-1) \left(\bar{\mu}_S - \frac{\mu_\infty}{\mu_0} \right) \times \right.$$

$$\left. \left(\frac{\lambda^2 K_{SH} \bar{I}_X^*}{1 + \lambda^2 K_{SH} \bar{I}^*} \right) \right] \\ \left(\bar{\mu}_S - \frac{\mu_\infty}{\mu_0} \right) \times \left(\frac{\lambda^2 K_{SH} \bar{I}_Y^*}{1 + \lambda^2 K_{SH} \bar{I}^*} \right) \right]$$

โดยที่เงื่อนไขขอบสำหรับสมการเรย์โนลด์

$$P(X_{IN}, Y) = 0 ; \quad \frac{\partial P}{\partial X} \Big|_{X=X_{OUT}} = 0$$

$$P(X, Y_{IN}) = 0 ; \quad \frac{\partial P}{\partial Y} \Big|_{Y=Y_{OUT}} = 0$$

2.2 สมการความหนืดของสารหล่อลื่น

ความหนืดของสารหล่อลื่นนอนนิวโตเนียน ขึ้นอยู่กับความเครียดเฉือนที่ฟิล์มสารหล่อลื่นได้รับและความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น[12] ความหนืดของสารหล่อลื่นในรูปแบบไร้มิติ

$$\bar{\mu}^* = \bar{\mu}_S^* \bar{\mu}_R \quad (4)$$

โดยที่

$$\bar{\mu}_S^* = \frac{\mu_\infty}{\mu_0} + \left(1 - \frac{\mu_\infty}{\mu_0} \right) (1 + \lambda^2 K_{SH} \bar{I}^*)^{\frac{n-1}{2}} \\ \bar{\mu}_R = \exp \left[(\ln \mu_0 + 9.67) \times \left\{ -1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} P_H P)^{Z_1} \right\} \right]$$

2.3 สมการความหนาแน่นของสารหล่อลื่น

ความหนาแน่นของสารหล่อลื่น ขึ้นอยู่กับความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาแน่นของสารหล่อลื่นในรูปแบบไร้มิติ[1]

$$\bar{\rho} = 1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} P_H P}{1 + 1.7 \times 10^{-9} P_H P} \quad (5)$$

2.4 สมการความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่น

ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น ขึ้นอยู่กับลักษณะกายภาพของผิวสัมผัสและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของ

ผิวสัมผัสเนื่องจากความดันฟิล์มของสารหล่อลื่น ดังนั้น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในรูปแบบไร้มิติ

$$H(X, Y) = H_0 + \frac{1}{2k} \frac{X^2}{(R_X/R)} + \frac{k}{2} \frac{Y^2}{(R_X/R)} + \frac{4P_H R}{\pi E' D_X} \int_{Y_{IN}}^{Y_{OUT}} \int_{X_{IN}}^{X_{OUT}} \frac{P(X', Y') dX' dY'}{\sqrt{(X - X')^2 + (Y - Y')^2}} \quad (6)$$

2.5 สมการสมดุลแรง

ภาระที่ทรงกลมกับแผ่นเรียบได้รับจะเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำผ่านฟิล์มของสารหล่อลื่น ในรูปแบบไร้มิติ

$$\int_{Y_{IN}}^{Y_{OUT}} \int_{X_{IN}}^{X_{OUT}} P(X, Y) dX dY = \frac{2}{3} \pi \quad (7)$$

2.6 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงเนื่องจากความเค้นเฉือนกับภาระที่ผิวสัมผัสได้รับ

$$f = \frac{(F_X^2 + F_Y^2)^{\frac{1}{2}}}{w_Z} \quad (8)$$

โดยที่

$$F_X = \mu_0 u R \int_{Y_{IN}}^{Y_{OUT}} \int_{X_{IN}}^{X_{OUT}} \left(\frac{\bar{\mu}^*}{H} \right) \frac{\partial u^*}{\partial Z} \Big|_{Z=0} dX dY$$

$$F_Y = \mu_0 u R \int_{Y_{IN}}^{Y_{OUT}} \int_{X_{IN}}^{X_{OUT}} \left(\frac{\bar{\mu}^*}{H} \right) \frac{\partial v^*}{\partial Z} \Big|_{Z=0} dX dY$$

3. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

การหาคำตอบของสมการโมดิไฟด์เรย์โนลด์เป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้นสูง เพื่อหาความดันและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นจึงได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน ทำการหาคำตอบซ้ำๆ จนกระทั่ง

$$\frac{\sum_{i=0}^{N_X} \sum_{j=0}^{N_Y} |P_{i,j}^{k+1} - P_{i,j}^k|}{\sum_{i=0}^{N_X} \sum_{j=0}^{N_Y} |P_{i,j}^{k+1}|} \leq 0.0001$$

และ

$$\left| 1 - \frac{3}{2\pi} \int_{Y_{IN}}^{Y_{OUT}} \int_{X_{IN}}^{X_{OUT}} P(X, Y) dX dY \right| \leq 0.0001$$

4. การจำลองผล

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำข้อสะโพกเทียม และสารหล่อลื่นที่ใช้ในบทความนี้แสดงตามตาราง 1 และตาราง 2 ในการจำลองผลฟิสิกส์ของข้อสะโพกเทียมสามารถจำลองให้อยู่ในลักษณะพื้นฐานแสดงดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติของวัสดุ	Cup	Head	
	Co-Cr	Co-Cr	UHMWPE
Young Modulus, GPa	240	240	0.8
Poisson's ratio	0.30	0.30	0.40

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติของสารหล่อลื่น	Synovial Fluid	
Inlet density, kg/m ³		1000.0
Low shear strain rate viscosity, Pa-s		0.0025
High shear strain rate viscosity, Pa-s		0.0009
Time relaxation, s		0.090
Power index		0.50
Viscosity-Pressure index		0.10

ในบทความนี้ ใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ Head ของกระดูกสะโพกขนาด 43 mm. ภาระที่กระดูกสะโพกได้รับและความเร็วในการเคลื่อนที่ของข้อสะโพกในขณะเดิน [8] แสดงดังรูปที่ 3

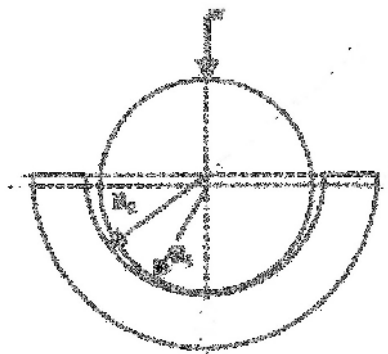
จากการจำลองผล ที่เวลา 0.125 s เมื่อภาระที่ข้อสะโพกเทียมได้รับ เท่ากับ 3.02 kN และข้อสะโพกเทียมเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุม 1.40 rad/s ข้อสะโพกเทียมที่ใช้เป็นแบบ Metal-on-Metal จากการจำลองผล ได้ลักษณะของการกระจายของความดันฟิล์มและความหนาของสารหล่อลื่นข้อกระดูกเทียม แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า

แสดงลักษณะการกระจายของความดันของฟิล์มของมีลักษณะคล้ายครึ่งทรงกลมโดยความดันสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางของการสัมผัส ที่บริเวณใกล้ทางออกของช่องการสัมผัสความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ความดันสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดและความหนาฟิล์มที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัสมีค่าเท่ากับ 50.04 MPa, และ 50.83 nm ตามลำดับ

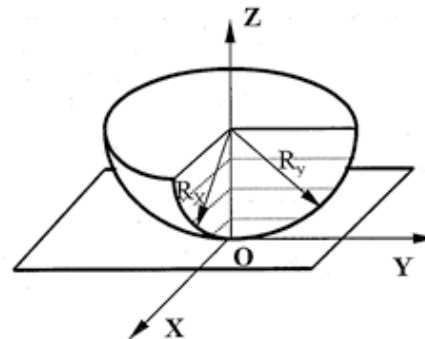
รูปที่ 5 แสดงการกระจายความดันฟิล์มและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นข้อกระดูกเทียมที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัส เมื่อข้อกระดูกเทียมเป็นแบบ Metal-on-Metal และเป็นแบบ UHMWPE-on-Metal พบว่าความดันฟิล์มของข้อกระดูกเทียมทั้งแบบ Metal-on-Metal และเป็นแบบ UHMWPE-on-Metal เป็นแบบ

รูปประฆังคว่ำ โดยที่ช่วงการสัมผัสของข้อกระดูกเทียมทั้งแบบ Metal-on-Metal มีค่าประมาณ 4.22 mm. และช่วงการสัมผัสของข้อกระดูกเทียมแบบ UHMWPE-on-Metal มีค่าประมาณ 19.95 mm.

ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นข้อสะโพกเทียม มีค่าเท่ากับ 50.04 MPa, และ 50.83 nm และ 2.23 MPa, และ 479.07 nm เมื่อข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ Metal-on-Metal และเป็นแบบ UHMWPE-on-Metal ตามลำดับ การเสียรูปของข้อสะโพกเทียม มีค่าเท่ากับ 3.68 μm , และ 81.42 μm เมื่อข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ Metal-on-Metal และเป็นแบบ UHMWPE-on-Metal ตามลำดับ

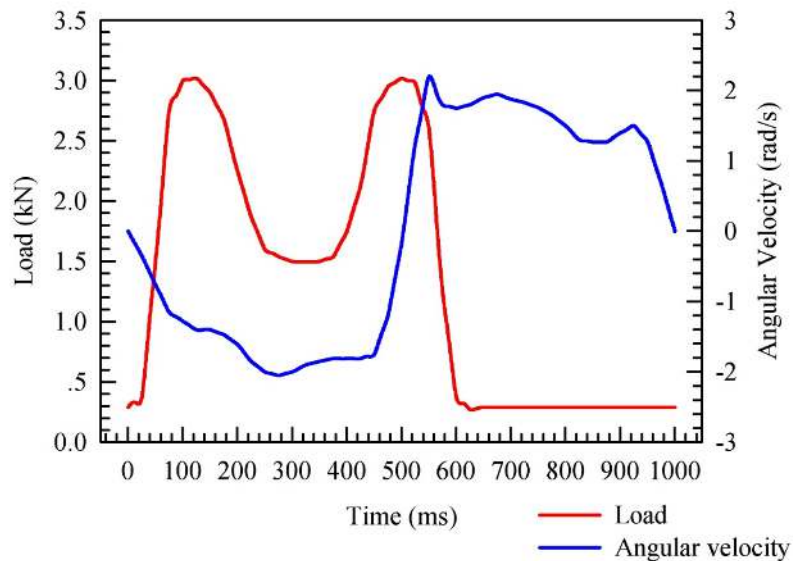


รูปที่ 2 (a) ลักษณะของข้อสะโพกแบบ ball-in-socket



รูปที่ 2 (b) การจำลองลักษณะข้อสะโพกแบบ ทรงกลมกับแผ่นเรียบ

รูปที่ 2 การจำลองลักษณะของข้อสะโพกเทียม

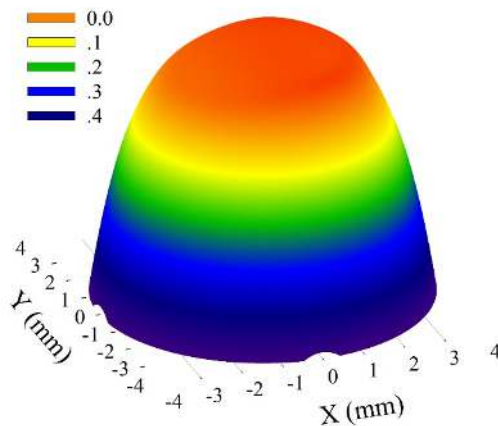


รูปที่ 3 ภาระที่กระดูกสะโพกได้รับและความเร็วในการเคลื่อนที่ของข้อสะโพกในขณะเดิน

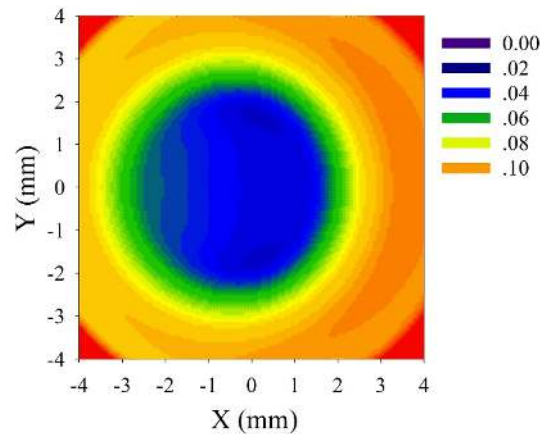
รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดในขณะเดิน เมื่อข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ Metal-on-Metal และเป็นแบบ UHMWPE-on-Metal พบว่าในช่วงแรกของการก้าวเดิน ความหนาฟิล์มน้อยสุดของสารหล่อลื่นข้อกระดูกในกรณีที่ข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ Metal-on-Metal มีค่าลดลง จากการเพิ่มขึ้นของภาระที่ข้อกระดูกได้รับ แต่ความหนาฟิล์มน้อยสุดของสารหล่อลื่นข้อกระดูกในกรณีที่ข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ UHMWPE-on-Metal มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างการช่วงการสัมผัสที่เพิ่มขึ้นของภาระที่ข้อกระดูกได้รับ

จากนั้นความหนาฟิล์มน้อยสุดของสารหล่อลื่นข้อกระดูกทั้ง 2 แบบ มีค่าลดลงจากความเร็วของการ

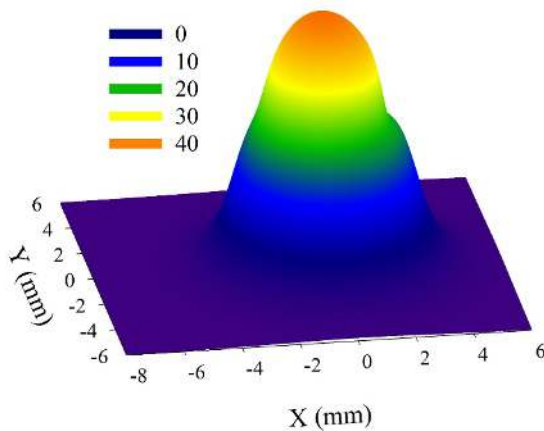
เคลื่อนที่ของข้อกระดูกที่ลดลง โดยความหนาฟิล์มน้อยสุดของสารหล่อลื่นข้อกระดูกทั้ง 2 แบบ มีค่าน้อยสุดที่เวลาประมาณ 0.5 s ซึ่งความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นความหนาฟิล์มน้อยสุดของสารหล่อลื่นข้อกระดูก มีค่าเพิ่มขึ้นจากภาระที่ได้รับมีค่าลดลง และความเร็วที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาฟิล์มน้อยสุดของสารหล่อลื่นข้อกระดูกในกรณีที่ข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ UHMWPE-on-Metal มีค่ามากกว่า ความหนาฟิล์มน้อยสุดของสารหล่อลื่นข้อกระดูกในกรณีที่ข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ Metal-on-Metal ในสภาวะการเดิน



รูปที่ 4 (a) แสดงการกระจายตัวของความหนาฟิล์มของสาร
หล่อลื่นข้อกระดูกสะโพก



รูปที่ 4 (b) แสดงการกระจายตัวของความหนาฟิล์มของ
สารหล่อลื่นข้อกระดูกสะโพก

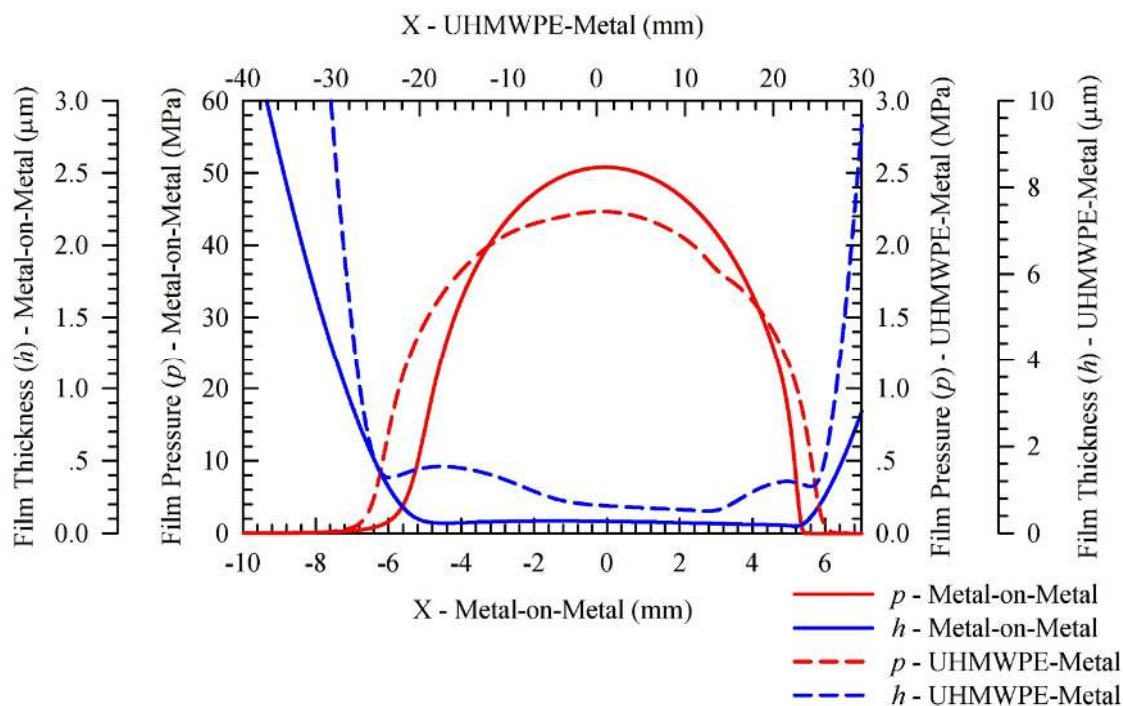


รูปที่ 4 (c) แสดงการกระจายตัวของความหนาฟิล์มของสาร
หล่อลื่นข้อกระดูกสะโพก

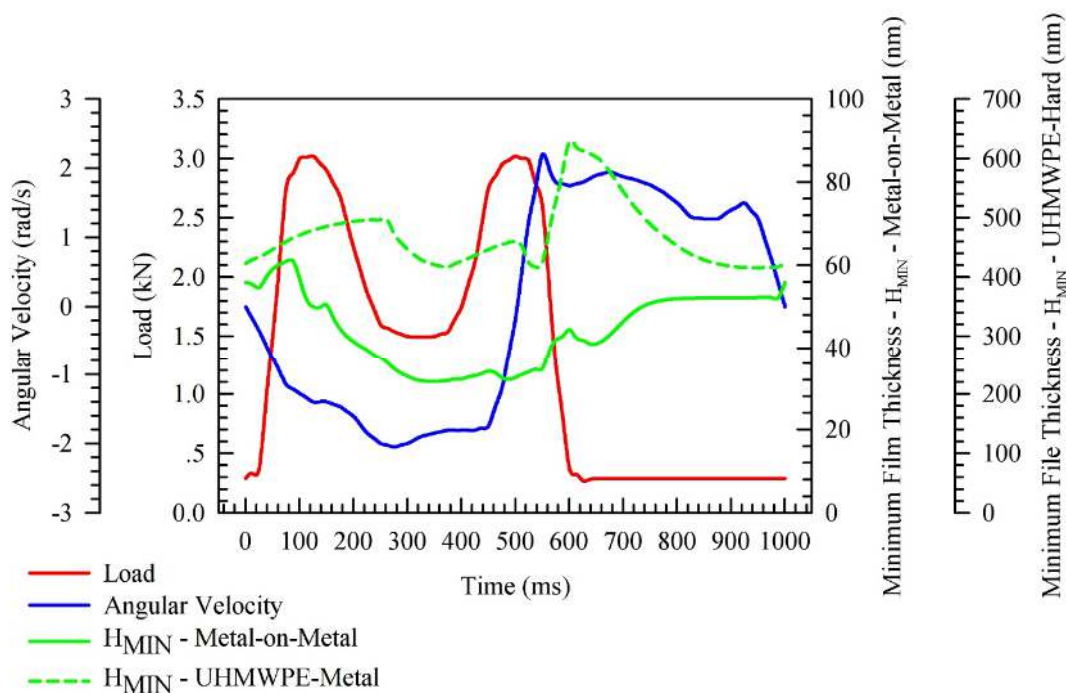
รูปที่ 4 แสดงการกระจายตัวของความหนาฟิล์มและความ
หนาฟิล์ม ของสารหล่อลื่นข้อกระดูกสะโพก

แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในขณะเดิน เมื่อข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ Metal-on-Metal และเป็นแบบ UHMWPE-on-Metal แสดงดังรูปที่ 7 พบว่าในช่วงแรกของการก้าวเดิน ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของสารหล่อลื่นข้อกระดูกในกรณีข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ Metal-on-Metal และในกรณีที่ข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ UHMWPE-on-Metal มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของภาระที่ข้อกระดูกได้รับ

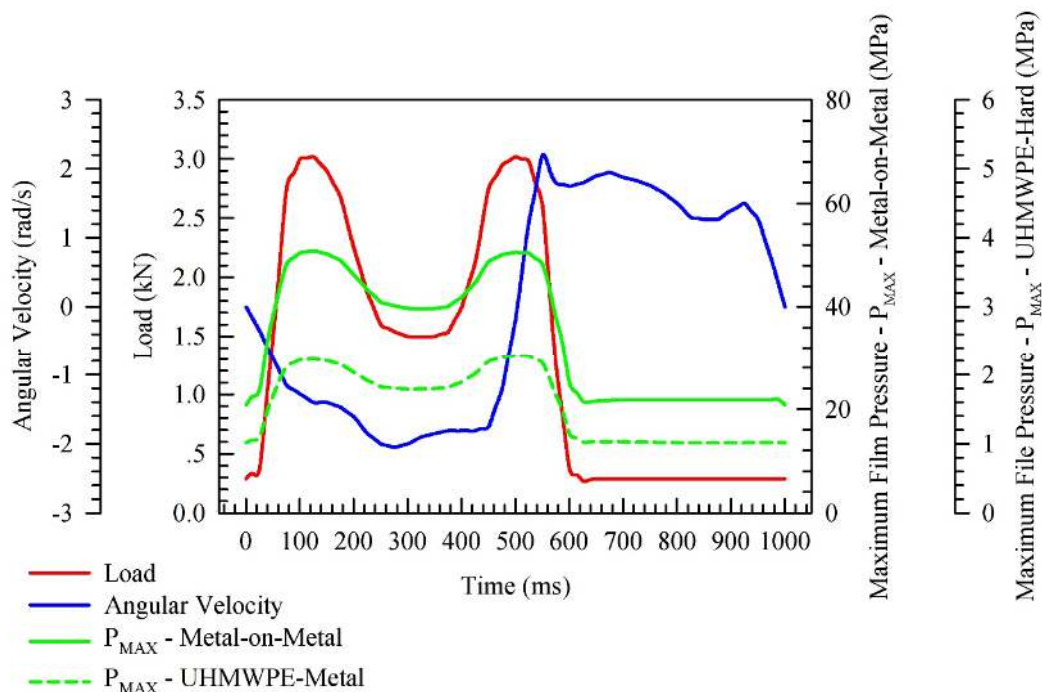
จากนั้นความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีที่ข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ Metal-on-Metal และในกรณีที่ข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ UHMWPE-on-Metal มีค่าลดลงจากการเพิ่มขึ้นของภาระที่ข้อกระดูกได้รับ โดยที่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของสารหล่อลื่นข้อกระดูกในกรณีที่ข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ UHMWPE-on-Metal มีค่าน้อยกว่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของสารหล่อลื่นข้อกระดูกในกรณีที่ข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ Metal-on-Metal ในทุกสภาวะการเดิน



รูปที่ 5 แสดงการกระจายความดันฟิล์มและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นข้อกระดูกเทียมที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการสัมผัส เมื่อข้อกระดูกเทียมเป็นแบบ Metal-on-Metal และเป็นแบบ UHMWPE-on-Metal



รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดในขณะเดิน เมื่อข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ Metal-on-Metal และเป็นแบบ UHMWPE-on-Metal



รูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันฟิล์มของสารหล่อลื่นสูงสุดในขณะเดิน เมื่อข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ Metal-on-Metal และเป็นแบบ UHMWPE-on-Metal

4. สรุปผล

จากการจำลองผลหาพฤติกรรมการทำงานของข้อสะโพกเทียม เมื่อข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ Metal-on-Metal และเป็นแบบ UHMWPE-on-Metal โดยการแก้สมการโมติฟายด์เรย์โนลด์ร่วมกับสมการการเปลี่ยนแปลงรูปร่างพบว่า

1. ในขณะเดินความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเปลี่ยนแปลงตามภาระข้อสะโพกเทียมได้รับและความเร็วในการเคลื่อนที่ข้อกระดูกสะโพกเทียม ตามสภาวะที่ข้อสะโพกเทียมได้รับ ความหนาฟิล์มน้อยสุดของสารหล่อลื่นข้อกระดูกในกรณีข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ UHMWPE-on-Metal มีค่ามากกว่า ความหนาฟิล์มน้อยสุดของสารหล่อลื่นข้อกระดูกในกรณีข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ Metal-on-Metal ในทุกสภาวะการเดิน

2. ในขณะเดินความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเปลี่ยนแปลงตามภาระข้อสะโพกเทียมได้รับ โดย

เปลี่ยนแปลงตามสภาวะที่ข้อสะโพกเทียมได้รับ ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของสารหล่อลื่นข้อกระดูกในกรณีข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ UHMWPE-on-Metal มีค่าน้อยกว่า ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดของสารหล่อลื่นข้อกระดูกในกรณีข้อสะโพกเทียมเป็นแบบ Metal-on-Metal ในทุกสภาวะการเดิน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

6. สัญลักษณ์

$D_x/2$ Semi-width of Hertzian contact under load on x-direction, m

$$\frac{D_x}{2} = \left(\frac{6\xi w_z R}{\pi k E'} \right)^{\frac{1}{3}}$$



$D_Y/2$	Semi-width of Hertzian contact under load on y-direction, m	$\bar{u}$	Average velocity in x-direction, m/s $\bar{u} = \frac{u_1 + u_2}{2}$
	$\frac{D_Y}{2} = \left(\frac{6k^2 \xi w_Z R}{\pi E'} \right)^{\frac{1}{3}}$	v_1	Velocity of plate in y-direction, m/s
E'	Equivalent modulus of elasticity, Pa $\frac{2}{E'} = \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} + \frac{1 - \nu_1^2}{E_1}$	v_2	Velocity of sphere in y-direction, m/s
E_1	Young Modulus of Plate, Pa	$\bar{v}$	Average velocity in y-direction, m/s $\bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2}$
E_2	Young Modulus of Sphere, Pa	V	Average surface velocity, m/s $V = (\bar{u}^2 + \bar{v}^2)^{\frac{1}{2}}$
h	Lubricant film thickness, m	w_Z	Applied load, N
H	Dimensionless film thickness $H = \frac{4Rh}{D_X D_Y}$	x, y, z	Coordinate, m
k	Elliptic ratio $k = \frac{D_Y}{D_X}$	X	Dimensionless coordinate $X = \frac{x}{(D_X/2)}$
p	Film pressure, Pa	Y	Dimensionless coordinate $Y = \frac{y}{(D_Y/2)}$
P	Dimensionless pressure $P = \frac{p}{P_H}$	Z	Dimensionless coordinate $Z = \frac{z}{h}$
P_H	Hertzian's contact pressure, Pa $P_H = \frac{6w_Z}{\pi D_X D_Y}$	μ_0	Inlet viscosity, Pa-s
r_{X1}	Radius of plate in x-direction, m	μ	Lubricant viscosity, Pa-s
r_{Y1}	Radius of plate in y-direction, m	$\bar{\mu}$	Dimensionless viscosity $\bar{\mu} = \frac{\mu}{\mu_0}$
r_{X2}	Radius of sphere in x-direction, m	ρ_0	Inlet density, kg/m ³
r_{Y2}	Radius of sphere in y-direction, m	ρ	Lubricant density, kg/m ³
R	Radius of curvature, m $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_X} + \frac{1}{R_Y}$	$\bar{\rho}$	Dimensionless viscosity $\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0}$
R_X	radii of curvature on x-direction, m $\frac{1}{R_X} = \frac{1}{r_{X1}} + \frac{1}{r_{X2}}$	ξ	Elliptic ratio coefficient $\xi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{k^2} \right) \sin^2 \zeta \right]^{\frac{1}{2}} d\zeta$
R_Y	Radius of curvature on y-direction, m $\frac{1}{R_Y} = \frac{1}{r_{Y1}} + \frac{1}{r_{Y2}}$	φ	Velocity angle, Radian $\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{v}}{\bar{u}} \right)$
t	Time (s)	ν_1	Poisson ratio of Plate
$\bar{t}$	Dimensionless time $\bar{t} = \frac{t}{(2V/D_x)}$	ν_2	Poisson ratio of Sphere
u_1	Velocity of plate in x-direction, m/s		
u_2	Velocity of sphere in x-direction, m/s		

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Dowson, D. and Higginson, G.R. (1969). Elastohydrodynamic Lubrication : The Fundamen-



- tal of Roller and Gear Lubrication, Pergamon, Oxford.
- [2] Venner, C.H. and Bos, J. (1994). Effects of lubricant compressibility on the film thickness in EHL line and circular contacts, *Wear*, vol. 173, pp. 151-165.
- [3] สุนทรี รัตภาสกร และ ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว (2553). พฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกด้วยสารหล่อลื่นแบบของไหลนิวโตเนียน, *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 21(2), หน้า 93-99.
- [4] สุนทรี รัตภาสกร และ ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว (2554). ผลของความหนืดที่มีต่อพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกที่สัมผัสเป็นวงกลมด้วยสารหล่อลื่นนิวโตเนียน, *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 28(3), หน้า 7-12.
- [5] Panichakorn, J. and Wongseedakeaw, K. (2015). Rough Soft-EHL with Non-Newtonian Lubricant, *Applied Mechanics and Materials*, vol. 736, pp. 57-63.
- [6] Vahid, D.J., Rahnejat, H., Jin, Z.M. and Dowson, D. (2001). Transient analysis of isothermal elastohydrodynamic circular point contacts, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 215, pp. 1159-1172.
- [7] Vahid, D.J., Jagatia, M., Jin, Z.M. and Dowson, D. (2001). Prediction of lubricating film thickness in UHMWPE hip joint replacements, *Journal of Biomechanics*, Vol. 34, pp. 261-266.
- [8] Dowson, D. and Jin, Z.M. (2006). Metal-on-metal hip joint tribology, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, Vol. 220, pp. 107-118.
- [9] Lubrecht, A.A., Napel, W.E. Ten and Bosma, R. (1986). Multigrid an Alternative Method for Calculating Film Thickness and Pressure Profiles in Elastohydrodynamically Lubricated Line Contacts, *ASME Journal of Tribology*, vol. 108, pp. 551-556.
- [10] Goodyer, C.E. (2001). Adaptive Numerical Methods for Elastohydrodynamic Lubrication, PhD Thesis, School of Computing, The University of Leeds.
- [11] Tanner, R.I. (1985). *Engineering Rheology*, Clarendon Press 14-15, Oxford, pp. 359.
- [12] Roelands, C.J.A. (1969). Correlational Aspects of the Viscosity Temperature Pressure Relationship of Lubricating Oils, Druk, V.R.B., Groingen, Netherland.