

พฤติกรรมการหล่อลื่นสำหรับกระบวนการบ่มขึ้นรูปโลหะ Lubrication Characteristics for Metal Forming Process

ดาวรัตน์ ปัญญากาญจน์¹ มงคล มงคลวงศ์โรจน์² ประสิทธิ์ พันคำยิม³
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ReCCIT คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เขต ลาดกระบัง จังหวัด กรุงเทพมหานคร 10520
โทร 0-23264197 โทรสาร 0-23264198 E-mail: yodrukaa@hotmail.com¹, kmmongko@kmitl.ac.th²

Daorut Panyakarn¹ Mongkol Mongkolwongrojn² Prasit Pankamyim³
Department of Mechanical Engineering ReCCIT, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
Tel: 0-23264197 Fax: 0-23264198 E-mail: yodrukaa@hotmail.com¹, kmmongko@kmitl.ac.th²

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของการบ่มขึ้นรูปโลหะที่หล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นชนิดนิวตอเนียนและนอนนิวตอเนียน โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อหาสารหล่อลื่นชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันบ่มขึ้นรูปโลหะหรือฟอรัมมิ่งออยล์มาใช้ทดแทน โดยทำการทดลองเพื่อหาค่าความเค้นเฉือน อัตราการเฉือน ความหนืด และความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่น และสารหล่อลื่นผสมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ แล้วนำมาประมาณค่าคงที่ของโมเดล และค่าดัชนีของเพาเวอร์ลอจจากนั้นนำมาคำนวณ โดยการประมาณโมเดลทางคณิตศาสตร์แล้วประยุกต์ใช้สมการเรโนลด์ สมการความหยาบของพื้นผิวโลหะ และสมการความหนาฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น เพื่อคำนวณหาค่าการกระจายแรงดันของสารหล่อลื่นของสารต่างๆ โดยโลหะจะถูกแปรสภาพจากแผ่นเรียบเป็นภาชนะรูปถ้วย จากผลการคำนวณและผลการทดลอง จะพบว่าเมื่อแม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน จะทำให้เกิดฟิล์มสารหล่อลื่นอยู่ระหว่างพื้นผิวทั้งสอง และเกิดการกระจายแรงดันในฟิล์มสารหล่อลื่นขึ้น และพบว่าความหนาฟิล์มและความหนืดของสารหล่อลื่น มีผลต่อค่าการกระจายแรงดันของสารหล่อลื่นในกระบวนการบ่มขึ้นรูปโลหะ

Abstract

This research work describes the theoretical characteristic of the lubrication for metal forming process with Newtonian and Non-Newtonian lubricants. Both power law model index and the relationship between shear stress and shear rate as well as viscosity and shear rate were obtained experimentally. The model of Newtonian and Non-Newtonian lubricants were implemented to obtain the modified Reynolds equation included roughness effects. Film thickness distribution is also derived.

Minimum film thickness was measured using gap sensor in order to obtain the film distribution. The results show that pressure distribution can be generated in the fluid film between two surfaces when the surfaces are moving toward each another. Film thickness and viscosity have significantly effected the performance characteristic of metal forming process.

1. บทนำ

ความเสียหายเนื่องจากแรงกระแทกที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ลงมายังชิ้นงานในกระบวนการบ่มขึ้นรูปโลหะ จะทำให้เกิดการสึกหรอ และมีผลทำให้แม่พิมพ์และชิ้นงานเกิดการชำรุดเสียหาย ความเสียหายดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการใช้สารหล่อลื่น[3-5] สารหล่อลื่นจะทำให้เกิดฟิล์มสารหล่อลื่นระหว่างชิ้นงานและแม่พิมพ์ ซึ่งช่วยลดการสึกหรอที่เกิดขึ้น และยังช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยขีดข่วนที่ผิวของชิ้นงานทำให้ผิวของชิ้นงานเรียบสวย สารหล่อลื่นที่นิยมใช้โดยทั่วไปได้แก่ น้ำมันหล่อลื่นที่เป็นสารสังเคราะห์ หรือ ฟอรัมมิ่งออยล์ เป็นต้น การเลือกใช้สารหล่อลื่น ควรคำนึงถึงการเลือกชนิดของสารหล่อลื่นให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยพิจารณาจากภาวะ และความเร็วของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการกดชิ้นงาน และพิจารณาจากชิ้นงานว่าเป็นโลหะชนิดใด ซึ่งเหมาะสมกับสารหล่อลื่นชนิดใด ในบทความนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติของสารหล่อลื่นชนิด นิวตอเนียน และ นอนนิวตอเนียน ที่ใช้ในกระบวนการบ่มขึ้นรูปโลหะ โดยขณะที่เกิดการบ่มขึ้นรูปโลหะสารหล่อลื่นจะอยู่ระหว่างแม่พิมพ์และชิ้นงาน ทำให้เกิดความหนาของฟิล์มของสารหล่อลื่น จะทำให้ไม่เกิดการสัมผัสกันระหว่างแม่พิมพ์และชิ้นงาน และได้ศึกษาถึงการกระจายของแรงดันที่เกิดขึ้นในฟิล์มน้ำมันที่ใช้หล่อลื่นในกระบวนการบ่มขึ้นรูปโลหะ โดยทั่วไปแล้วการกระจายของแรงดันสามารถพบได้ในของไหล ที่อยู่ระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิว และเมื่อพื้นผิวนั้นเคลื่อนที่เข้าหากันจะทำให้เกิดฟิล์มน้ำมันอยู่

ระหว่างพื้นผิวทั้งสอง และเกิดการกระจายของแรงดันในฟิล์มสารหล่อลื่นนั้นขึ้น ซึ่งการกระจายของแรงดันที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความหนาฟิล์มและความหนืดของสารหล่อลื่นแต่ละชนิด

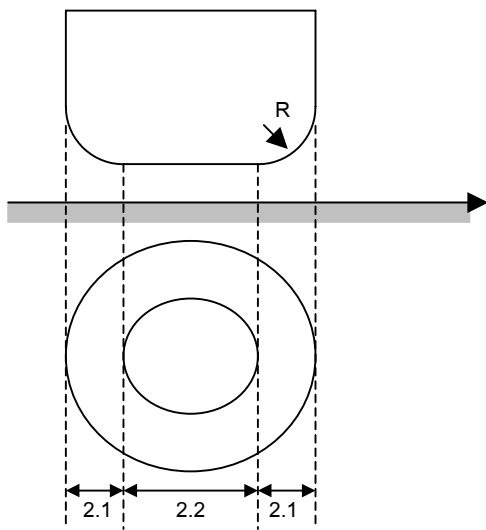
2. การคำนวณ

การคำนวณถึงการกระจายแรงดันที่เกิดขึ้นในฟิล์มสารหล่อลื่นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

2.1 บริเวณส่วนโค้งด้านข้างของถ้วย[2]

2.2 บริเวณแผ่นกลมแบนราบที่เป็นส่วนพื้นของถ้วย[1]

ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงรูปร่างและส่วนต่างๆของชิ้นงานที่ใช้ในการคำนวณ

2.1 บริเวณส่วนโค้งด้านข้างของถ้วย

สมการเรโนด์ที่ใช้นี้คือ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^{n+2}}{12mn} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = (U)^n \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

เมื่อคิดว่าพื้นที่ผิวสัมผัสมีความหยาบ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\phi_x \frac{h^{n+2}}{12mn} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = U^n \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{(U_1 - U_2)^n}{2} \sigma \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \quad (2)$$

ค่าความหยาบของพื้นผิว

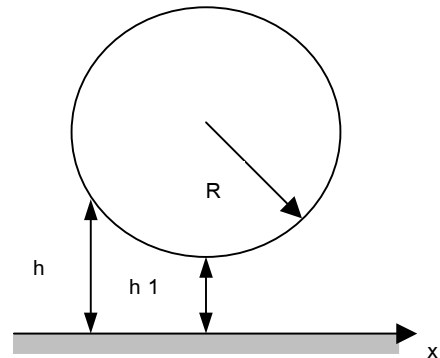
$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (3)$$

pressure และ shear flow factor

$$\phi_x = 1 - \frac{3}{2} \left(\frac{\sigma}{h} \right)^2 \quad (4)$$

$$\phi_s = \frac{3}{2} \frac{\sigma}{h} \frac{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}{\sigma^2}$$

ในบริเวณส่วนโค้งของการบีบขึ้นรูปโลหะความหนาฟิล์มน้ำมันจะกระจายออกตามพื้นผิวส่วนโค้งดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงความหนาฟิล์มน้ำมันที่กระจายออกตามพื้นผิวส่วนโค้ง

และเป็นไปตามสมการ

$$h = h_1 + \frac{x^2}{2R} \quad (5)$$

กำหนดสมการเงื่อนไข

$$x=0, h=h_1, p=p_0, \partial p/\partial x=0, x=\infty, h=\infty, p=0 \quad (6)$$

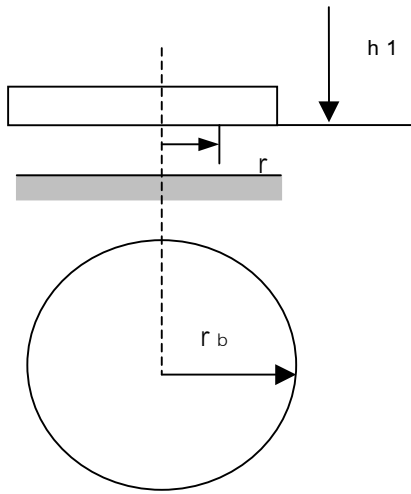
เพื่อทำให้ความยุ่งยากในการคำนวณน้อยลงสมมุติให้เป็นภาวะ steady state และไม่คิดการเปลี่ยนรูปร่างของแผ่นโลหะ เมื่อแทนค่าสมการ (3) ถึงสมการ (5) ลงในสมการ (2) แล้วอินทิเกรตตามเงื่อนไข (6)

$$\left(1 - \frac{3}{2} \left(\frac{\sigma}{h} \right)^2 \right) \frac{h^{n+2}}{12mn} \frac{\partial p}{\partial x} = U^n \frac{x^2}{2R} + \frac{3}{4} (U_1 - U_2)^n (\sigma_1^2 - \sigma_2^2) \left(\frac{1}{h} - \frac{1}{h_1} \right) \quad (7)$$

2.2 บริเวณแผ่นกลมแบนราบที่เป็นส่วนพื้นของถ้วย

ดังแสดงในรูปที่ 3 ถ้าพื้นผิวขนานแกนสมมาตรและความดันเป็นฟังก์ชันของรัศมีดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r h_1^{n+2} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = -12 m n r U \quad (8)$$



รูปที่ 3 แสดงพื้นที่บริเวณแผ่นกลมแบนราบที่เป็นส่วนหนึ่งของถ้วย

เมื่อคิดว่าพื้นที่ผิวสัมผัสมีความหยาบ

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\phi_x r_1^{n+2} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = -12 m n r U \quad (9)$$

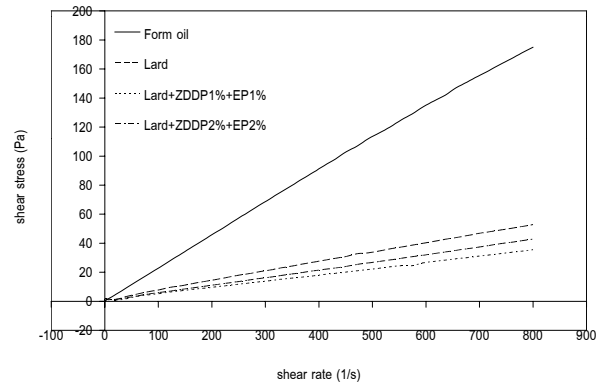
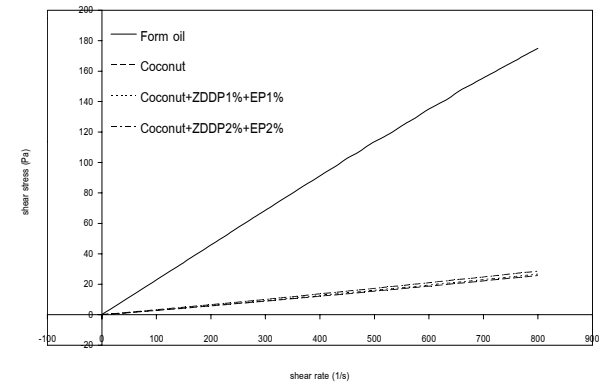
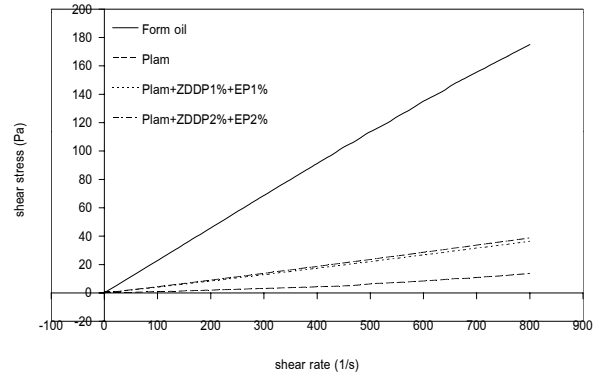
กำหนดสมการเงื่อนไข

$$r=0, \quad \partial p / \partial r=0, \quad r=r_b, \quad h=\infty, \quad p=0 \quad (10)$$

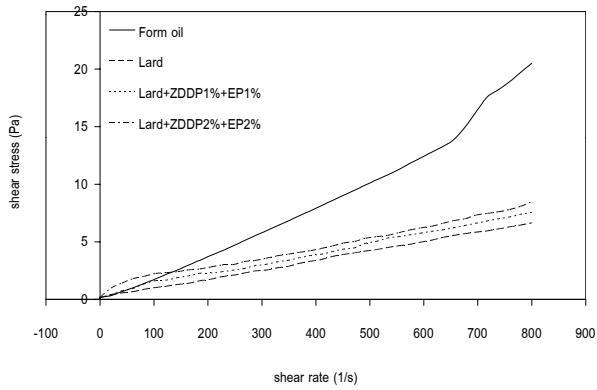
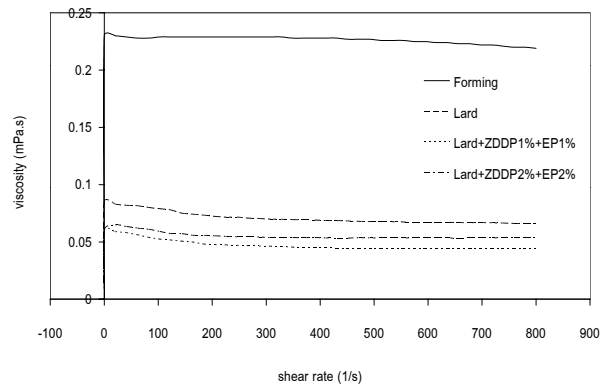
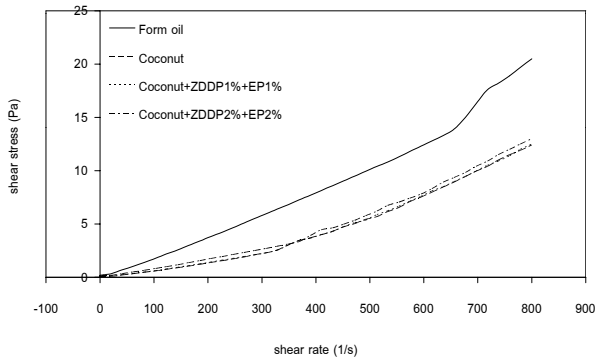
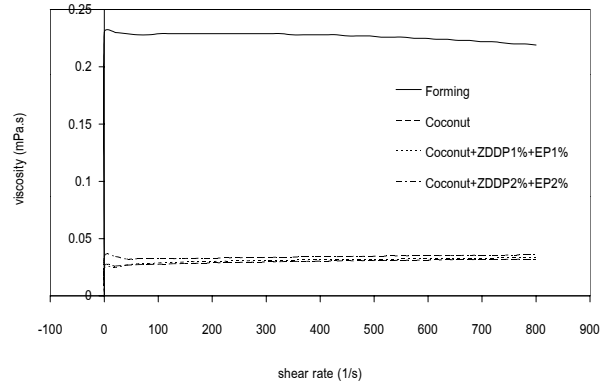
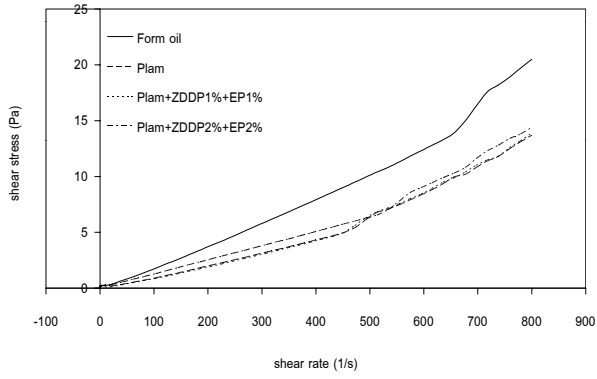
จะได้

$$p = \frac{3 m n U}{\phi_x h_1^{n+2}} (r_b^2 - r^2) \quad (11)$$

3. ผลการทดลอง

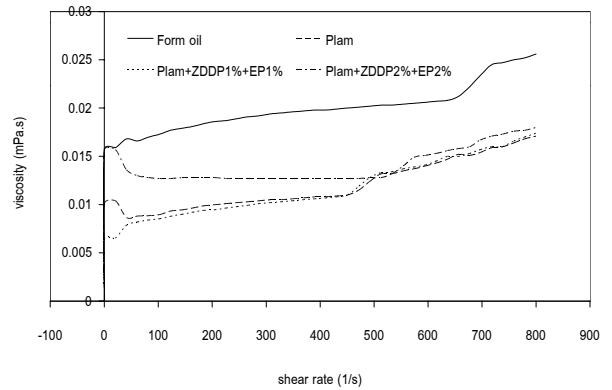
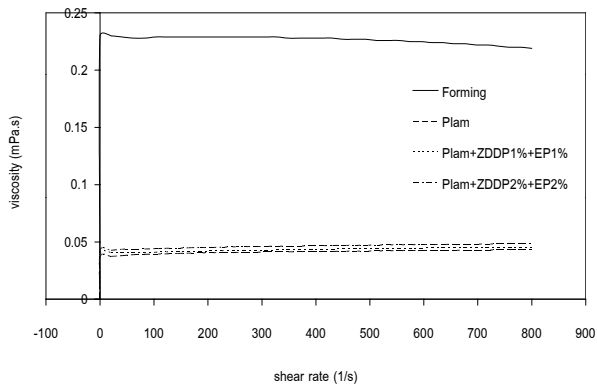


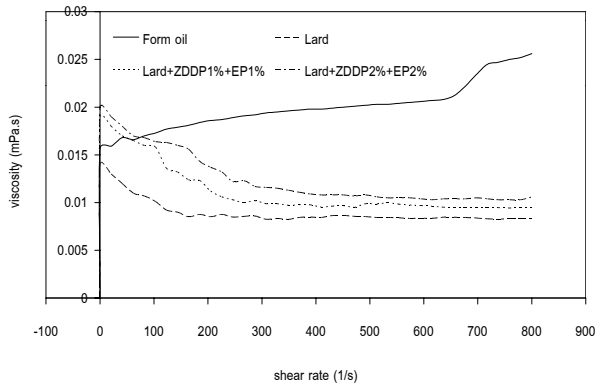
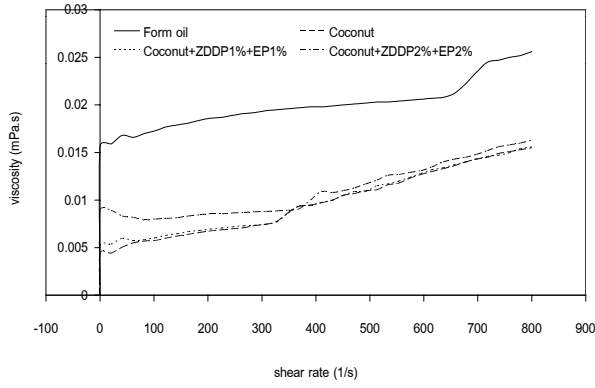
รูปที่ 3.1 ผลการทดลองหาค่าความเค้นเฉือนของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ



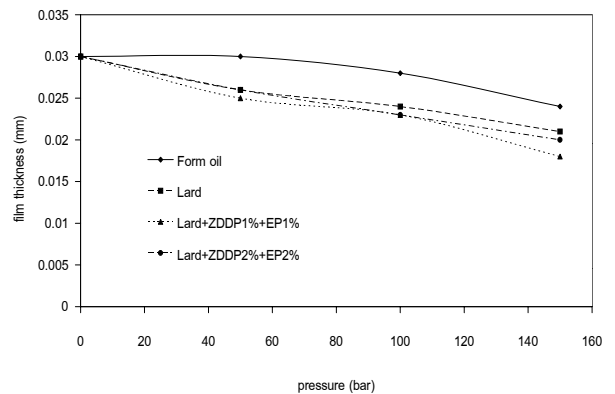
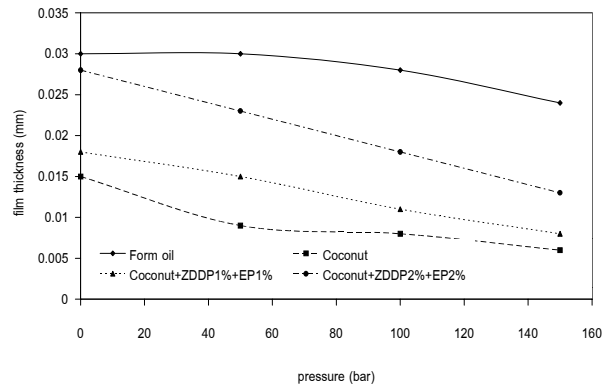
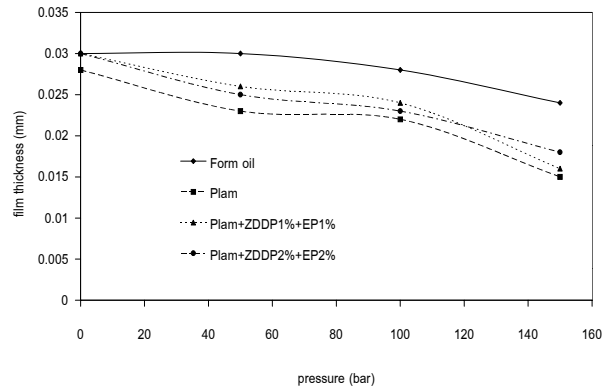
รูปที่ 3.3 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 40 C

รูปที่ 3.2 ผลการทดลองหาค่าความเค้นเฉือนของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 100 C





$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx$$



รูปที่ 3.4 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 100

C

ชื่อสารหล่อลื่น	ผสมสารเติม แต่ง 0 %		ผสมสารเติม แต่ง 1 %		ผสมสารเติม แต่ง 2 %	
	m	n	m	n	m	n
Forming oil	0.2	1	-	-	-	-
Plam oil	0.032	1.043	0.03	1.05	0.036	1.044
Coconut oil	0.02	1.07	0.02	1.07	0.026	1.045
Lard oil	0.096	0.92	0.064	0.915	0.086	0.887

รูปที่ 3.5 ผลการทดลองหาค่าความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่น

ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่ของโมเดล m และค่าดัชนีเพาเวอร์ลน n

โดยการทำการหาสภาพที่เหมาะสมที่สุดของข้อมูล (curve fitting) จากผลการทดลองหาค่าความหนืดของสารแต่ละชนิด

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองวัดค่าความหยาบที่ผิวโลหะ

ความหยาบ	วัดครั้งที่ (หน่วย μm)			
	1	2	3	4
ที่ ผิว ของ แม่พิมพ์	0.40	0.59	0.43	0.54
ที่ ผิว ของ ชิ้นงาน	0.81	0.83	0.84	0.90

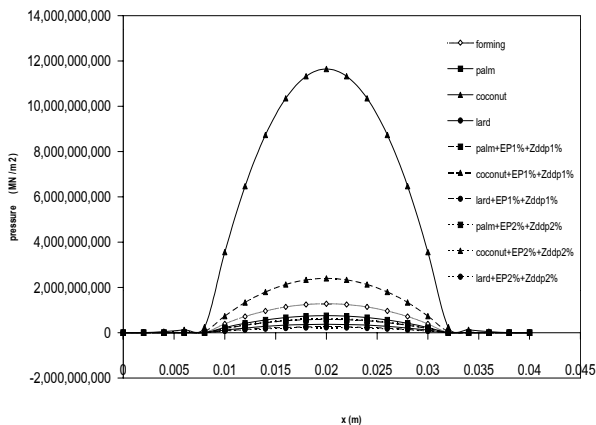
ค่าความหยาบของผิวโลหะที่วัดได้จะเป็นค่าความหยาบเฉลี่ยมาตรฐาน (Ra) โดยที่

$$(12)$$

โดยที่ L คือระยะทางที่วัดความหยาบ (cut off) และ y คือ ระยะความสูงต่ำของผิวตามแนวตั้งฉาก

4. ผลการคำนวณ

บทความนี้ได้นำค่าที่ได้จากการทดลอง ไปคำนวณค่าการกระจายแรงดันสารหล่อลื่น โดยกำหนดให้ $U_1=0.8 \text{ m/s}$, $U_2 = 0 \text{ m/s}$, $\sigma_1 = 0.49 \mu\text{m}$, $\sigma_2 = 0.845 \mu\text{m}$, $\sigma = 0.98 \mu\text{m}$, จะได้ค่าการกระจายแรงดันของสารหล่อลื่นชนิดต่างๆดังนี้



รูปที่ 4 แสดงค่าการกระจายแรงดันของสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ

5. การวิเคราะห์ผลการทดลองและผลการคำนวณ

จากรูปที่ 3.1 ผลการทดลองหาค่าความเค้นเฉือนของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 40°C พบว่า สารหล่อลื่นชนิดน้ำมันพืชที่ผสมสารเติมแต่ง EP 2 % และ Zddp 2% จะให้ค่าความเค้นเฉือนใกล้เคียงน้ำมันปาล์มขึ้นรูปโลหะหรือฟอร์มมิ่งน้อยที่สุด และในสารหล่อลื่นชนิดน้ำมันหมูที่ไม่ได้ผสมสารเติมแต่ง จะให้ค่าความเค้นเฉือน ใกล้เคียงน้ำมันปาล์มขึ้นรูป

โลหะหรือฟอร์มมิ่งน้อยที่สุด และจากรูป 3.2 ผลการทดลองหาค่าความเค้นเฉือนของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 100°C พบว่าทั้งสารหล่อลื่นชนิดน้ำมันพืชและน้ำมันหมูที่ผสมสารเติมแต่ง EP 2 % และ Zddp 2% จะให้ค่าความเค้นเฉือน ใกล้เคียงน้ำมันปาล์มขึ้นรูปโลหะหรือฟอร์มมิ่งน้อยที่สุด จากรูป 3.3 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 40°C พบว่า สารหล่อลื่นชนิดน้ำมันพืชที่ผสมสารเติมแต่ง EP 2 % และ Zddp 2% จะให้ค่าความหนืดใกล้เคียงน้ำมันปาล์มขึ้นรูปโลหะหรือฟอร์มมิ่งน้อยที่สุด และในสารหล่อลื่นชนิดน้ำมันหมูที่ไม่ได้ผสมสารเติมแต่ง จะให้ค่าความหนืดใกล้เคียงน้ำมันปาล์มขึ้นรูปโลหะหรือฟอร์มมิ่งน้อยที่สุด และจากรูป 3.4 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 100°C พบว่าทั้งสารหล่อลื่นชนิดน้ำมันพืชและน้ำมันหมูที่ผสมสารเติมแต่ง EP 2 % และ Zddp 2% จะให้ค่าความเค้นเฉือน ใกล้เคียงน้ำมันปาล์มขึ้นรูปโลหะหรือฟอร์มมิ่งน้อยที่สุด และจากรูป 3.5 ผลการทดลองหาค่าความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นพบว่า สารหล่อลื่นชนิดน้ำมันพืชที่ผสมสารเติมแต่ง EP 2 % และ Zddp 2% จะให้ค่าความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นใกล้เคียงน้ำมันปาล์มขึ้นรูปโลหะหรือฟอร์มมิ่งน้อยที่สุด และในสารหล่อลื่นชนิดน้ำมันหมูที่ไม่ได้ผสมสารเติมแต่ง จะให้ค่าความหนาฟิล์มใกล้เคียงน้ำมันปาล์มขึ้นรูปโลหะหรือฟอร์มมิ่งน้อยที่สุด และจากการคำนวณหาค่าการกระจายแรงดันของสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ โดยการประยุกต์ใช้สมการเรโนลด์ สมการความหยาบของพื้นผิวโลหะ และสมการความหนาฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น พบว่าสารหล่อลื่นชนิดน้ำมันปาล์มที่ไม่ได้ผสมสารเติมแต่งชนิดใดเลย จะให้ค่าการกระจายแรงดันสารหล่อลื่นใกล้เคียงน้ำมันปาล์มขึ้นรูปโลหะหรือฟอร์มมิ่งน้อยที่สุด โดยที่สารหล่อลื่นชนิดน้ำมันมะพร้าวที่ไม่ได้ผสมสารเติมแต่ง จะให้ค่าการกระจายแรงดันมากที่สุด และสารหล่อลื่นชนิดน้ำมันหมูที่ผสมสารเติมแต่ง EP 2 % และ Zddp 2% จะให้ค่าการกระจายแรงดันน้อยที่สุด

6. สรุป

บทความนี้เป็นการนำเสนอ การศึกษาพฤติกรรมของการปัมขึ้นรูปโลหะ ที่หล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นชนิดนิวตอเนียน และ นอนนิวตอเนียน เพื่อทดลองและพิจารณาการกระจายแรงดันสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นในกระบวนการปัมขึ้นรูปโลหะ พบว่า

1. ในสารหล่อลื่นชนิดเดียวกันเมื่อความเค้นเฉือนเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เกิดค่าการกระจายแรงดันของสารหล่อลื่นลดลง
2. ในสารหล่อลื่นชนิดเดียวกันเมื่อความหนืดเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เกิดค่าการกระจายแรงดันของสารหล่อลื่นลดลง
3. เมื่อความหนืดเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความหนาฟิล์มเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เกิดค่าการกระจายแรงดันของสารหล่อลื่นลดลง
4. สารเติมแต่งมีผลทำให้ค่าความเค้นเฉือนเพิ่มมากขึ้น ค่าความหนืดเพิ่มมากขึ้น ค่าความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นเพิ่มมากขึ้น และทำให้ค่าการกระจายแรงดันของสารหล่อลื่นลดลง

7. สัญลักษณ์

A = ค่าคงที่จากการอินทิเกรต

B	=	ค่าคงที่จากการอินทิเกรต
U_1	=	ความเร็วของแม่พิมพ์
U_2	=	ความเร็วของชิ้นงาน
U	=	ความเร็วเฉลี่ยของแม่พิมพ์และชิ้นงาน
R	=	รัศมีความโค้งด้านข้าง
h	=	ความหนาฟิล์มที่ส่วนโค้ง
h_1	=	ความหนาฟิล์ม
l	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นกลม
L	=	ระยะทางที่วัดความหยาบ
m	=	ค่าคงที่ของโมเดล
n	=	ค่าดัชนีเพาเวอร์ลอ
p	=	ความดัน
r	=	ระยะต่างๆ บนแผ่นกลม
r_b	=	รัศมีของแผ่นกลม
x	=	ระยะทางตามแนวแกน
y	=	ระยะความสูงต่ำผิวตามแนวตั้งฉาก
μ	=	ความหนืด
σ_1	=	ความหยาบที่ผิวของแม่พิมพ์
σ_2	=	ความหยาบที่ผิวของชิ้นงาน
σ	=	ความหยาบเฉลี่ยที่ผิวของแม่พิมพ์และชิ้นงาน
ϕ_s	=	shear flow factor
ϕ_x	=	pressure flow factor

เอกสารอ้างอิง

- [1] B.J. Hamrock , “ Fundamentals of Fluid Film Lubrication ,” McGraw-Hill , 1994.
- [2] W.R.D. Wilson , T-C. Hsu , X - B. Huang , “ A Realistic Friction Model for Computer Simulation of Sheet Metal Forming Processes,” Trans. of the ASME J.of Engineering for Industry, vol.117,1995.
- [3] W.R.D. Wilson , “ Tribology in Cold Metal Forming , ” Trans . of the ASME J. of Manufacturing Science And Engineering , vol.119,1997.
- [4] H. Hashimoto , M. Mongkolwongrojn , “ Lubrication Theory ,” King Mongkut’s Institue of Technology Ladkrabang ,1992.
- [5] J. Olds , “ Lubricants,Cutting Fluids & Coolants ,” Cahners book ,1973.