

การวิเคราะห์การดันขึ้นรูปไปด้านหน้าผ่านแม่พิมพ์หมุนกับที่ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Analysis of Forward Extrusion Through Steadily Rotating Dies by Finite Element Method

อดิศักดิ์ ชมมิ¹ ^ รศ.สมชัย นรเศรษฐโสภณ¹ ศ.คาซุนาริ โยชิดะ²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยโตไก ประเทศญี่ปุ่น

^E-mail: cadisak@hotmail.com

Adisak Chommi¹ ^ Assoc. Prof. Somchai Norasethasopon¹ Prof. Kazunari Yoshida²

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520

² School of Engineering, Tokai University, Japan

^E-mail: cadisak@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์ การดันขึ้นรูปไปด้านหน้าของเส้นลวดอลูมิเนียม AA6063 รูปทรงกระบอก ผ่านแม่พิมพ์รูปกรวยที่หมุนอยู่กับที่ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการทำให้แม่พิมพ์หมุนนี้แสดงให้เห็นว่าแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปลดลง และทำให้เกิดความเครียดเฉือนบิดในส่วนของแท่งบิลเล็ท โดยการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ครั้งนี้ ได้เปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีจากการวิจัยที่ผ่านมา นอกจากนี้แรงที่ใช้ดันขึ้นรูปแล้วยังได้ศึกษาอิทธิพลจากตัวแปรอื่นด้วยคือ ครึ่งมุมของแม่พิมพ์ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ และสภาพการหล่อลื่น

คำหลัก การดันขึ้นรูป, แม่พิมพ์หมุน, ไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This paper presents forward extrusion of a cylindrical rod aluminum alloy AA6063 carried out through steadily rotating conical dies by finite element method. Die rotation was shown to decrease the extrusion load and impose a twist shear strain into the partially extruded billet. This study was compared with other method of other researchers. The influences of various process parameters on the extrusion load are also studied, including die semi-cone angle, die rotating speed and lubrication condition.

Keywords: Forward Extrusion, Rotating Dies, Finite Element

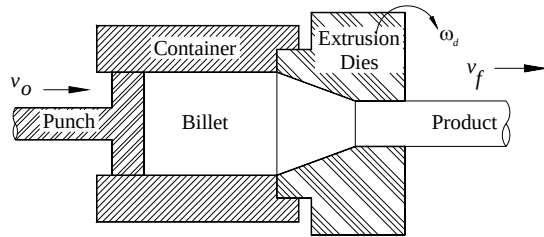
1. บทนำ

ในการวิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะนั้น ทฤษฎีพลาสติก ที่นำมาใช้มีอยู่หลายวิธี เช่น Slab Method, Exact Solution, Slip Line Theory, Upper Bound, Lower Bound, Hill's Method, Viscoplasticity, Finite Difference, Finite Element ซึ่งการจะเลือกใช้วิธีใดมาวิเคราะห์ ขึ้นอยู่

กับสภาวะของการขึ้นรูป เช่น Slip Line Theory ใช้ได้กับปัญหาที่มีสภาวะความเครียดตามแนวระนาบ (plane-strain) เท่านั้น Upper Bound Method ไม่สามารถวิเคราะห์ผลกระทบทางอุณหภูมิ จากการขึ้นรูปได้ เป็นต้น ในส่วนของการดันขึ้นรูปหรือการอัดรีดขึ้นรูปนั้น เป็นการขึ้นรูปขั้นพื้นฐาน ให้ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแนวตรงยาว และมีรูปร่างของหน้าตัดตามแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูป วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปหรือที่เรียกว่าบิลเล็ท (billet) จะถูกแรงกระทำให้ไหลผ่านแม่พิมพ์แบบเปิด (open dies) ซึ่งมีเบ้าแม่พิมพ์ (container) เป็นตัวประกอบบิลเล็ทก่อนเข้าแม่พิมพ์ ตามที่แสดงในรูปที่ 1 โดยมีตัวแปรหนึ่งที่สำคัญคือ อัตราส่วนการดันขึ้นรูป (reduction ratio) มีค่าเท่ากับ อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ได้ต่อพื้นที่หน้าตัดของบิลเล็ท ซึ่งเป็นตัวแปรที่กำหนดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป เมื่ออัตราส่วนการขึ้นรูปมีค่าสูง แรงดันก็จะสูงตามด้วย แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงาน และเครื่องมือก็เป็นตัวกำหนดแรงดันด้วยเช่นกัน ดังนั้นด้วยข้อจำกัดนี้จึงเป็นตัวจำกัดความยาวของแท่งบิลเล็ท การศึกษาวิจัยมากมายจึงมุ่งเน้นไปที่ความพยายามในการลดแรงดันที่ใช้ขึ้นรูป และจะเป็นการเพิ่มอัตราส่วนการขึ้นรูป และแท่งบิลเล็ทที่ยาวขึ้น อย่างเช่นการวิจัยการขึ้นรูปแบบไฮโดรสแตติก (hydrostatic extrusion) การใช้แม่พิมพ์ที่มีลักษณะเพริวย (streamlined dies) และการหมุนของตัวกด (punch) หรือแม่พิมพ์ โดยบทความนี้เน้นไปที่การศึกษาการดันขึ้นรูปไปด้านหน้าของเส้นลวดอลูมิเนียมเบอร์ AA6063 ผ่านแม่พิมพ์รูปกรวยที่หมุนด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

งานวิจัยที่ผ่านมา มีการศึกษาว่าการหมุนของแม่พิมพ์หรือตัวกดจะทำให้ลดแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปได้ เช่น Sergeev ได้ทำการทดลองการหมุนของตัวกดและแม่พิมพ์ โดยหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างเครื่องมือกับชิ้นงานหาโดย Mikhailenko และ Sergeev ต่อมาการศึกษาวิจัยของ Loginov และ Burgin ได้รายงานผลการวิจัยถึง

ความเร็วเชิงมุมของแม่พิมพ์ที่มีผลต่อสภาพการหล่อลื่น ที่แตกต่างกัน ขณะที่ทิศทางหมุน ก็ได้มีการวิจัยเช่นกัน โดย Bochniak และ Korble ได้ศึกษาการหมุนของแม่พิมพ์ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ลักษณะโครงสร้างของวัสดุ ขณะที่ Hodgson และ Kong ได้ทดลองโดยใช้การดันขึ้นรูปร่วมกับแรงบิดหมุน [1]



รูปที่ 1 ส่วนประกอบเครื่องมือการดันขึ้นรูปไปด้านหน้าผ่านแม่พิมพ์ หมุนกับที่

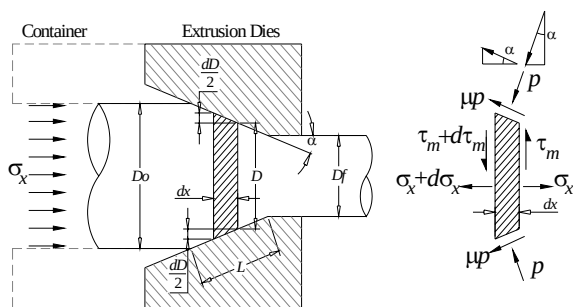
การศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นนี้ยืนยันว่า การหมุนของแม่พิมพ์ หรือตัวกด จะทำให้ลดแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปได้ อย่างไรก็ตามมี ปัญหาสำคัญที่ต้องศึกษาคือ ลักษณะการกระจายความเค้นของวัสดุใน แม่พิมพ์ที่หมุนระหว่างการขึ้นรูป และความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นใน ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป คำตอบของปัญหาเหล่านี้จะทำให้เข้าใจการขึ้น รูปที่มีการหมุนของแม่พิมพ์ได้ดียิ่งขึ้น และการวิเคราะห์ปัญหานี้ด้วยวิธี ไฟไนต์อีลิเมนต์สามารถทำนายคำตอบนี้ได้ ซึ่งก็มีบางงานวิจัยที่ผ่านมา ได้ศึกษาถึงระดับโครงสร้างของวัสดุ (micro structure) เช่นกัน

2. การวิเคราะห์ทางทฤษฎี

2.1 การวิเคราะห์แผนภาพสมดุลแรง (Freebody Equilibrium Approach)

รูปที่ 2 แสดงแผนภาพสมดุลแรงที่เกิดขึ้นจากการดันขึ้นรูป ของ ชิ้นงานรูปกระบอกผ่านแม่พิมพ์ที่มีค่าครึ่งมุมของแม่พิมพ์ α สามารถ เขียนสมการสมดุลของแรงตามแนวแกน x ได้ตามสมการที่ (1)

$$\sum F = (\sigma_x + d\sigma_x) \frac{\pi}{4} (D + dD)^2 - \sigma_x \frac{\pi}{4} D^2 + p \left(\pi D \cdot \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha + \mu p \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha = 0 \quad (1)$$



รูปที่ 2 แผนภาพสมดุลแรงในการดันขึ้นรูป

หากพิจารณาเทอมแรกของสมการมีค่าน้อย ไม่นำมาพิจารณา และกำหนดให้ τ คือความเค้นเฉือนเสียดทาน (friction shear stress) มีค่าเท่ากับ $m\bar{\sigma}/\sqrt{3}$ โดยที่ m คือ สัดส่วนความเค้นเฉือนคราก (frictional shear factor) และ $\bar{\sigma}$ คือความเค้นไหลเฉลี่ย (mean flow stress) แทนค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง D ด้วยรัศมี $2r$ และจัดรูปสมการ ใหม่ได้สมการที่ (2)

$$2r dr \sigma_x + r^2 d\sigma_x + 2pr dr + \frac{2r dr \tau}{\tan \alpha} = 0 \quad (2)$$

ในกรณีเดียวกันสำหรับแรงตามแนวเส้นรอบวง สามารถเขียน สมการสมดุลของแรงได้ว่า

$$\sum F_r = \sigma_r (\pi D dx) + \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha - \mu p \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha = 0 \quad (3)$$

โดยที่ σ_r คือ die-breaking stress

$$\sigma_r = -p(1 - \mu \tan \alpha) \quad (4)$$

เมื่อรวมสมการที่ (2) และ (3) เข้าด้วยกันด้วยเงื่อนไข yield criterion และกำหนดให้ $B = \mu \cot \alpha$ แล้วอินทิเกรตได้สมการความ เค้นเฉลี่ยที่ใช้ดันขึ้นรูป $\bar{\sigma}_x$ คือ

$$\frac{\sigma_x}{\bar{\sigma}} = \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{D_f}{D_o} \right)^{2B} \right] \quad (5)$$

D_o และ D_f คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนและ หลังการดันขึ้นรูปตามลำดับ

2.2 การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีขอบเขตบน (Upper Bound Approach)

การวิเคราะห์การขึ้นรูปด้วยทฤษฎีขอบเขตบน เป็นการวิเคราะห์ หาพลังงานที่ใช้ในการขึ้นรูปน้อยที่สุด ซึ่ง ผศ.ดร.อำไพศักดิ์ และคณะ [2] ได้ให้สมการสำหรับวิเคราะห์การดันขึ้นรูปด้วยทฤษฎีขอบเขตบนคือ

$$\frac{\sigma_x}{\bar{\sigma}} = \left(\frac{1}{R_o U_i} \right) \left(\frac{m}{2} \overline{ABV}_{AB}^* + \overline{ADV}_{AD}^* + \overline{DFV}_{DF}^* + \overline{ACV}_{AC}^* + \overline{DCV}_{DC}^* + \overline{CBV}_{CB}^* + \overline{CEV}_{CE}^* + \overline{FEV}_{FE}^* \right) \quad (6)$$

เมื่อ U_i คือ ความเร็วในแนวแกนที่ทางเข้าแม่พิมพ์

V^* คือ ความเร็วในแต่ละแนวระนาบการไหล ตามรูปที่ 3

และ Avitzur [3] ได้ทำการแก้สมการจากทฤษฎีขอบเขตบนได้ สมการการดันขึ้นรูปตามสมการ (7)

$$\frac{\sigma_x}{\bar{\sigma}} = -2f(\sigma) \ln \frac{R_o}{R_f} - \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cos \alpha + m(\cos \alpha) \ln \frac{R_o}{R_f} + m \frac{L}{R_o} \right] \quad (7)$$

เมื่อ $\bar{\sigma}$ คือ ความเค้นไหลเฉลี่ยในสภาวะพลาสติกสมบูรณ์ (perfectly plastic) ซึ่งในกรณีนี้กำหนดให้ใช้ Von Mises yield criterion

m คือ สัดส่วนความเค้นเฉือน (frictional shear factor)

L คือ ความยาวของผิวสัมผัสแม่พิมพ์

จากสมการที่ (10) เป็นต้นมาจะเห็นว่ามีตัวแปร β_1 คือ slippage parameter ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้หาสัดส่วน

ความเร็วเชิงมุม ของชิ้นงาน เทียบกับความเร็วเชิงมุมของแม่พิมพ์ตามสมการที่

$$\omega_l = \beta_l \omega_d \left(\frac{R_f}{R} \right)^3 \quad (26)$$

โดยที่ ω_l คือความเร็วเชิงมุมชิ้นงานที่ตำแหน่งแม่พิมพ์ ซึ่งค่า β_l หาได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสม (optimization procedure) ของสมการ (25) ซึ่งได้ค่าที่เหมาะสม คือ 0.3

2.4 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์

ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะเย็น (cold forming) วัสดุที่วิเคราะห์เป็นอีลิเมนต์นั้นมีอยู่สองรูปแบบคือ Elastic-Plastic (E-P FEM) และ Rigid-Plastic (R-P FEM) การวิเคราะห์แบบ E-P นั้นจะวิเคราะห์วัสดุเป็นสองช่วงคือช่วงอีลาสติก ตามสมการ ที่ (27) และช่วงพลาสติกที่ใช้ขอบเขตจุดครากของ Von Mises ตามสมการ (28) ถึง (31)

$$d\varepsilon_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \left(d\sigma_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu} \delta_{ij} d\sigma_{kk} \right) \quad (27)$$

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (28)$$

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \sigma'_{ij} \quad (29)$$

$$\sigma'_{ij} \sigma'_{ij} = \frac{2}{3} \bar{\sigma}^2 \quad (30)$$

$$d\sigma_{ij} = 2G \left[d\varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \frac{\nu}{1-2\nu} d\varepsilon_{kk} - \sigma'_{ij} \frac{\sigma'_{kl} d\varepsilon_{kl}}{S} \right] \quad (31)$$

ในส่วนของการวิเคราะห์แบบ R-P นั้นจะแบ่งวัสดุเป็นช่วงของวัตถุแข็งเกร็ง และช่วงพลาสติก ตามสมการที่ (32) ซึ่งจะเห็นว่าการวิเคราะห์แบบ E-P มีสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) ซึ่งทำให้ใช้เวลาคำนวณ (computer time) สูง แต่ก็มีราคาถูกกว่า สามารถวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง แรงดันกลับในวัสดุ (springback) ได้ ซึ่งจะไม่สามารถหาค่าได้หากใช้การวิเคราะห์ด้วยสมการของ R-P

$$\sigma_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\varepsilon}} \dot{\varepsilon}_{ij} \quad (32)$$

$$\bar{\sigma} < \sigma_y \rightarrow \text{rigid material}, \bar{\sigma} = \sigma_y \rightarrow \text{plastic region}$$

3. การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 1 เป็นคุณสมบัติของเส้นลวดอลูมิเนียม AA6063 ที่ใช้วิเคราะห์ขึ้นรูป โดยใช้โปรแกรม MARC® ในการวิเคราะห์ในครั้งนี้เงื่อนไขและค่าที่แตกต่างกันในแต่ละกรณี จะถูกวิเคราะห์ด้วยเช่นกัน ได้แก่ ค่ารีงมุมของแม่พิมพ์ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ และสภาพการหล่อลื่น โดยวิเคราะห์ด้วยสมการแบบ E-P ที่ไม่คิดผลกระทบของอุณหภูมิ (isothermal)

ในการวิเคราะห์ จะวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปแบบ 3 มิติที่มีลักษณะของชิ้นงานที่สมมาตรตามแนวแกน (axisymmetric) โดยวิเคราะห์ครึ่งหนึ่งของชิ้นงาน ถึงแม้ว่าในทางทฤษฎีแล้ว ปัญหาที่มีความสมมาตรตามแนวแกนจะสามารถวิเคราะห์เป็นรูปแบบ 2 มิติได้ [6] แต่การวิเคราะห์ครึ่งนี้ก็มีแรงกระทำที่ผิวตามแนวเส้นรอบวง ตามที่แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นลักษณะของแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน โดยในส่วนของความเค้นเฉือน τ_m ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการหมุนของแม่พิมพ์ ซึ่งการขึ้นรูปปกติจะมีความเค้นเฉือนนี้

Yield Stress, σ_y (MPa)	130		
Modulus of Elasticity (GPa)	67000		
Poisson's Ratio, ν	0.34		
ความเร็วของการขึ้นรูป (mm./sec.)	10		
ความยาวผิวสัมผัสแม่พิมพ์= L/D_o (%)	37		
Semi-Dies Angle (degree)	8	15	45
ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ (rps.)	0	1	5
สภาพหล่อลื่น (friction coefficient, μ)	0.07		0.3

ตารางที่ 1 แสดงค่าสมบัติของวัสดุ และค่าที่ใช้ในแต่ละกรณี

ขั้นตอนเริ่มต้นจากการขึ้นรูปอีลิเมนต์ของชิ้นงาน โดยแบ่งออกเป็น 2550 อีลิเมนต์ ซึ่งประกอบไปด้วยจุด 8 จุดของแต่ละอีลิเมนต์เป็นอีลิเมนต์แบบ hexahedral ความยาวของเบ้าแม่พิมพ์ 20 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดบิลเล็ท 10 มิลลิเมตร

ลักษณะของเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) นั้นได้กำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนตัว (fixed displacement) ที่แกนกลางของเส้นลวด และกำหนดให้แม่พิมพ์ และเบ้าของแม่พิมพ์ รวมถึงตัวกดเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body)

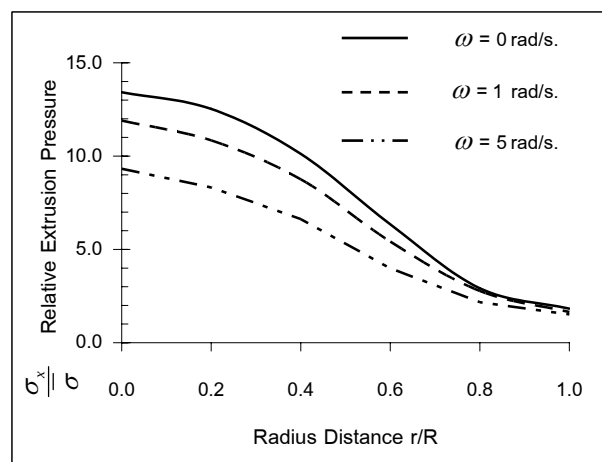
การวิเคราะห์ขอบเขตของจุดครากของวัสดุใช้ Von Mises yield criterion ซึ่งจะหาความเค้นไหลเฉลี่ย (mean flow stress) ได้จาก

$$\bar{\sigma} = 2k \quad (33)$$

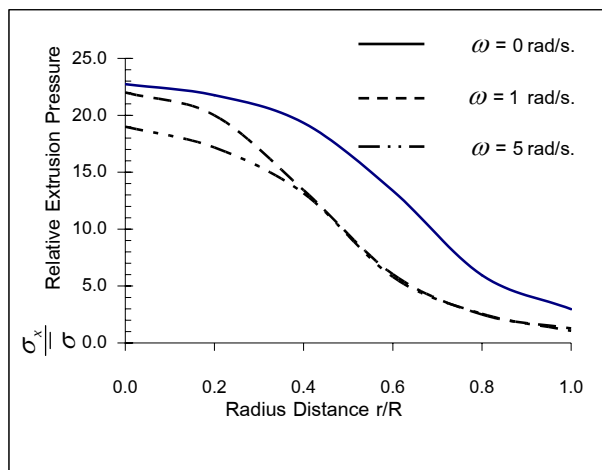
$$k = \text{Shear Yield Stress} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (34)$$

4. ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

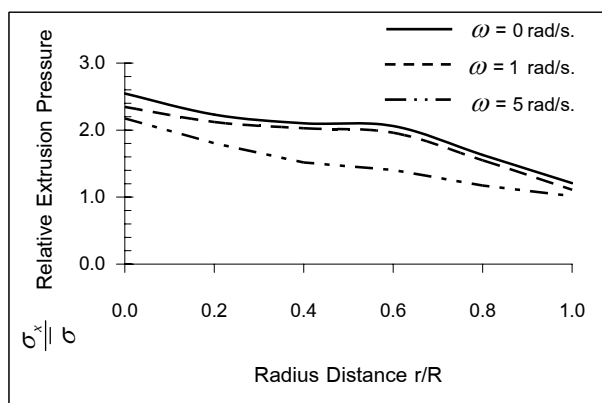
จากผลของการวิเคราะห์การขึ้นรูปด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป ตามรูปที่ 4, 5 และ 6 เป็นการขึ้นรูปที่มีการหล่อลื่นขนาดรีงมุมของแม่พิมพ์ 8, 15 และ 45 องศาตามลำดับ ที่มีความเร็วรอบต่างกัน ซึ่งจะเห็นว่าแรงดันที่ใช้ในการขึ้นรูปเมื่อมีการหมุนของแม่พิมพ์โดยความเร็วรอบของแม่พิมพ์ที่เร็วกว่าจะลดแรงดันได้มากกว่า



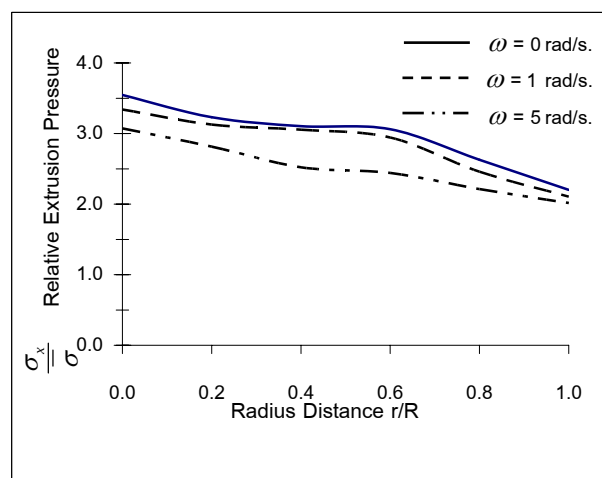
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันขึ้นรูปกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของเส้นลวดอลูมิเนียมที่มุมแม่พิมพ์ 8 องศา ที่มีการหล่อลื่น $\mu = 0.07$



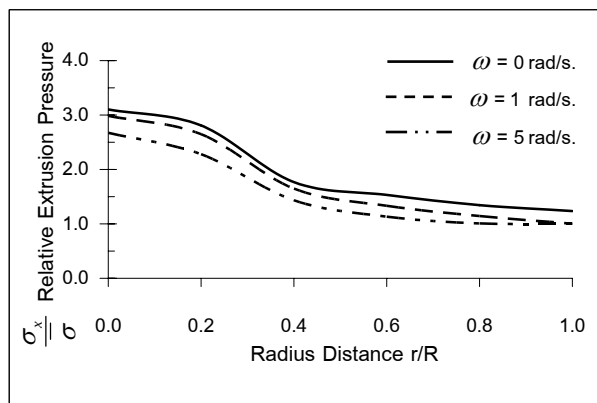
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันขึ้นรูปกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของเส้นลวดอลูมิเนียมที่ม้วนแม่พิมพ์ 8 องศา ที่ไม่มีการหล่อลื่น $\mu = 0.3$



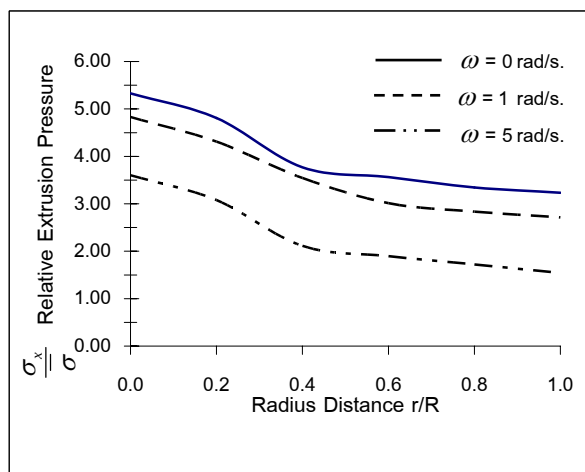
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันขึ้นรูปกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของเส้นลวดอลูมิเนียมที่ม้วนแม่พิมพ์ 15 องศา ที่มีการหล่อลื่น $\mu = 0.07$



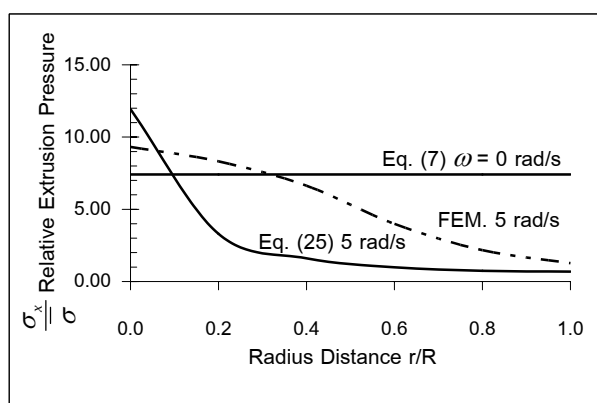
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันขึ้นรูปกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของเส้นลวดอลูมิเนียมที่ม้วนแม่พิมพ์ 15 องศาที่ไม่มีการหล่อลื่น $\mu = 0.3$



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันขึ้นรูปกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของเส้นลวดอลูมิเนียมที่ม้วนแม่พิมพ์ 45 องศา ที่มีการหล่อลื่น $\mu = 0.07$

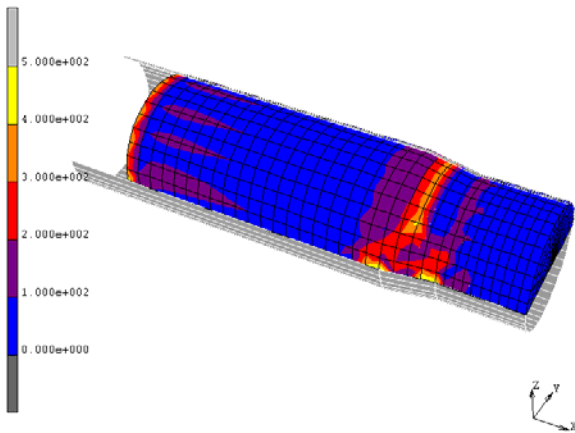


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันขึ้นรูปกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของเส้นลวดอลูมิเนียมที่ม้วนแม่พิมพ์ 45 องศาที่ไม่มีการหล่อลื่น $\mu = 0.3$

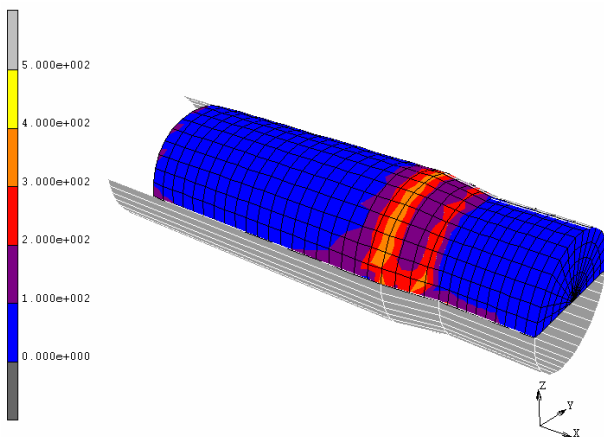


รูปที่ 10 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความดันขึ้นรูปกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของเส้นลวดอลูมิเนียมที่ม้วนแม่พิมพ์ 8 องศา $\mu = 0.07$ ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 5 rad/s ด้วยวิธี FEM กับสมการที่ (7) และ (25)

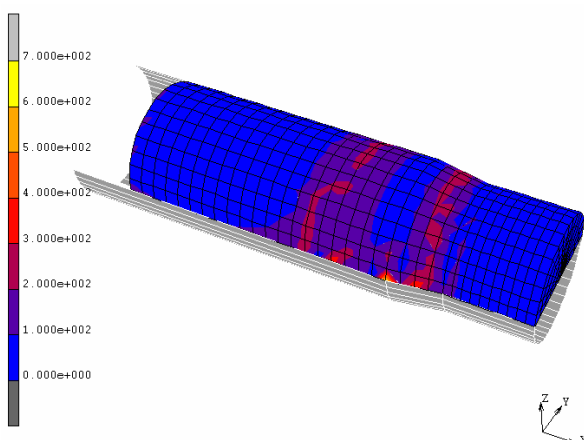
ค่า $\bar{\sigma}$ ที่ใช้ตามกราฟที่แสดงเป็นเป็นความเค้นเฉลี่ยเทียบเท่า ความเค้นของ Von Mises (equivalent mean Von Mises stress)



รูปที่ 11 การกระจายความเค้นเฉือนที่ผิวของเส้นลวด $\omega = 0$ rad/s.



รูปที่ 12 การกระจายความเค้นเฉือนที่ผิวของเส้นลวด $\omega = 1$ rad/s.



รูปที่ 13 การกระจายความเค้นเฉือนที่ผิวของเส้นลวด $\omega = 5$ rad/s.

5. สรุป

จากผลการวิเคราะห์การดันขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์หมุนกับที่ด้วยวิธี ไฟไนต์อีลิเมนต์ครั้งนี้สรุปได้ว่า แรงที่ใช้ดันขึ้นรูปลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ที่ไม่หมุน และในสภาพที่มีการหล่อลื่นในกระบวนการดันขึ้นรูปจะใช้แรงดันน้อยกว่าที่ไม่มีการหล่อลื่น ในส่วนของค่าครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา จะใช้แรงดันขึ้นรูปน้อยกว่าแม่พิมพ์ที่มีค่าครึ่งมุม 8 องศา และ 45 องศา

จากผลการวิเคราะห์ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีขอบเขตบน ตามรูปที่ 10 แล้วจะได้ค่าที่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน

ตามรูปที่ 12 และ 13 เป็นการแสดงลักษณะการกระจายความเค้นเฉือนที่ผิวของเส้นลวดที่มีการหมุนของแม่พิมพ์ แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการหมุนของแม่พิมพ์ จะทำให้เกิดความเค้นเฉือนที่ผิวที่ก่อให้เกิดเครียดเฉือนบิด จากบริเวณแม่พิมพ์เข้าไปถึงบริเวณเข้าแม่พิมพ์ ซึ่งต่างจากรูปที่ 11 ที่ไม่มีการหมุนของแม่พิมพ์ ซึ่งความเร็วรอบที่มากกว่า

อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อทำนายการกระจายความเค้นภายในชิ้นงาน หรือการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีขอบเขตบน ควรมีการทดลองจริงเพื่อดูแนวโน้มว่าเป็นไปในทางเดียวกันหรือไม่ นอกจากนั้นควรพัฒนาสมการจากทฤษฎีอื่นเพิ่มเติมเพื่อยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์ เพื่อนำการวิเคราะห์นี้ไปใช้จริงในการปฏิบัติ และประยุกต์ใช้ได้กับการขึ้นรูปในงานอุตสาหกรรมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] X. Ma, M.R. Barnett and Y.H. Kim, "Forward Extrusion Through Steadily Rotating Conical Dies. Part I: Experiments." International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 46, 2004, pp. 449-464.
- [2] อำไพศักดิ์ ที่บุญมา ศิริศักดิ์ หาญชูวงศ์ และ ชาญ ถนัดงาน "การวิเคราะห์กระบวนการดึงขึ้นรูปและกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปด้วยทฤษฎีสานวนเส้นเลื่อนไหล" วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 11 ฉบับที่ 4 พ.ศ. 2544 หน้า 33-39.
- [3] E.M. Mielnik, Metal Working Science and Engineering, McGraw-Hill, 1991, pp. 409.
- [4] X. Ma, M.R. Barnett and Y.H. Kim, "Forward Extrusion Through Steadily Rotating Conical Dies. Part II: Theoretical Analysis." International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 46, 2004, pp. 465-489.
- [5] B. Avitzur, Metal Forming: Process and Analysis, McGraw-Hill, 1968.
- [6] T.R. Chandrupatla and A.D. Belegundu, Introduction to Finite Elements in Engineering, New Jersey, Prentice Hall, 1991, pp. 165-166.