

การวิเคราะห์กระบวนการดึงขึ้นรูปและกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป ด้วยทฤษฎีสนามเส้นเลื่อนไหล

Analysis of Drawing Process and Extrusion Process by Slip – Line Field Theory

อำไพศักดิ์ ทิบุญมา , ศิริศักดิ์ หาญชูวงศ์ และ ชานู ถนอดงาน
ศูนย์วิจัยวิศวกรรมคำนวณขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถ.พิบูลสงคราม บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทร 02-9132500-24 ต่อ 8531, โทรสาร 02-5870026
E-mail : umphisak@rocketmail.com, shw@kmitnb.ac.th และ chn@kmitnb.ac.th

Umphisak Teeboonma , Sirisak Harnchoowong and Charn Thanadngan

Research Center for Advanced Computational Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
1518 Piboolsongkram Road, Bangkok 10800, Thailand
Tel : 662-9132500-24 Ext. 8531 Fax : 662-5870026

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์กระบวนการดึงขึ้นรูปและอัดรีดขึ้นรูป โดยใช้ทฤษฎีสนามเส้นเลื่อนไหล ผลลัพธ์ที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ ได้แก่ ทฤษฎีค่าขอบเขตบนและวิธีสแล็บ นอกจากนั้นยังเปรียบเทียบความแตกต่างของความดันแม่พิมพ์ระหว่างกระบวนการดึงขึ้นรูปและอัดรีดขึ้นรูป จากผลลัพธ์เชิงตัวเลขสามารถสรุปได้ดังนี้ ในกระบวนการดึงขึ้นรูป การเพิ่มค่าสัดส่วนความเค้นเฉือนและ/หรือมุมแม่พิมพ์ ทำให้ความเค้นดึงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความดันแม่พิมพ์ลดลง ส่วนในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปการเพิ่มค่าสัดส่วนความเค้นเฉือนและ/หรือมุมแม่พิมพ์จะทำให้ทั้งความดันอัดรีดและความดันแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นผลลัพธ์ที่ยังสอดคล้องกับวิธีสแล็บและทฤษฎีค่าขอบเขตบน

the results for drawing and extrusion processes are also compared. According to the numerical results, the following conclusion can be drawn: In the drawing process, increasing the fraction of shear yield stress and/or die angle will increase the drawing stress but decrease the die pressure. In the extrusion process, increasing the fraction of shear yield stress and/or die angle will result in increasing of both extrusion pressure and die pressure. Moreover, these results are in agreement with those of slab analysis and upper-bound theory.

1.บทนำ

การวิเคราะห์ปัญหากระบวนการดึงขึ้นรูปและกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปมีหลายวิธีด้วยกัน[1]ได้แก่ วิธีงานในอุดมคติ ซึ่งใช้หลักการสมดุลพลังงานภายนอกเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง วิธีสแล็บ ซึ่งพิจารณาจากสมดุลแรงบนชิ้นงานอิสระ วิธีทฤษฎีค่าขอบเขตบน ใช้วิธีการสมมุติสนามเส้นเลื่อนไหล ผลลัพธ์ที่ได้คือ แรงสูงสุดที่ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร วิธีไฟไนต์เอเมนต์[2] เป็นอีกวิธีที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน แต่เนื่องจาก

Abstract

This paper presents the analysis of drawing process and extrusion process by slip-line field theory. The numerical results are then compared to ones obtained from other methods, namely, upper-bound theory and slab analysis. Furthermore

กระบวนการดึงและการอัดรีดขึ้นรูปโลหะ มีเงื่อนไขขอบน้อยกว่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า การแก้ปัญหาคงใช้วิธีลองผิดลองถูกซึ่งทำให้มีความซับซ้อนและยุ่งยากมาก

ทฤษฎีสนามเส้นเลื่อนไหล เป็นอีกวิธีที่มีความแม่นยำและสามารถทำนายทิศทางการไหลของวัสดุในระหว่างการขึ้นรูปโลหะ Blazynski T.Z และ Townley S [3] ใช้ทฤษฎีค่าขอบเขตบนและวิธีสลับในการวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปท่อ พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองอยู่ระหว่างค่าที่ได้จากทั้งสองทฤษฎี Collins I.F และ Williams B.K [4] สร้างสมการเส้นเลื่อนไหลการดึงขึ้นรูปท่อ ซึ่งยังไม่คิดผลของแรงเสียดทาน และสรุปว่าแรงที่ใช้เพิ่มขึ้นเมื่อมุมแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น Kobayashi S, Oh I.S และ Altan T [2] ได้วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าเมื่อความเสียดทานเพิ่มขึ้น ความดันแม่พิมพ์การดึงขึ้นรูปลดลง ในขณะที่ความดันแม่พิมพ์การอัดรีดขึ้นรูปเพิ่มขึ้น Chitkara N.R และ Butt M.A [5],[6] สร้างสมการเส้นเลื่อนไหลและสมการการไหลของกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปหลอดและท่อด้วยวิธีเชิงตัวเลข พบว่าผลที่ได้จากการคำนวณและทดลองมีค่าใกล้เคียงกันและสมการการไหลก็สอดคล้องกับผลการทดลอง

บทความนี้จะวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปและการอัดรีดขึ้นรูปแผ่นโลหะ ด้วยทฤษฎีสนามเส้นเลื่อนไหล และยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์โดยนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับวิธีสลับและทฤษฎีค่าขอบเขตบน

2. ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีสนามเส้นเลื่อนไหล

สมมุติฐานของทฤษฎีคือ วัสดุมีคุณสมบัติไอโซโทรปิกและพลาสติกแข็งเกร็งสมบูรณ์ พิจารณาปัญหาเป็นแบบความเครียดในระนาบ ไม่คิดผลของความร้อนที่เกิดขึ้น และการไหลของโลหะเกิดขึ้นตามทิศทางของความเค้นเฉือนสูงสุดซึ่งกำหนดให้มีทิศทางตามเส้น α และ β และในการวิเคราะห์ด้วยสมการสมดุลของแรงไม่คติน้ำหนักของวัสดุจากสมมุติฐานข้างต้นเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\sigma_z = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \quad (1)$$

เมื่อ $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ คือ ความเค้นหลักในทิศแกน x, y และ z

เงื่อนไขวัสดุอัดตัวไม่ได้

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

เมื่อ u_x, v_y คือ ความเร็วในแกน x และ y
สมการสมดุล

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

แกนหลักความเค้นและความเครียดมีทิศทางเดียวกัน

$$\frac{2\dot{\gamma}_{xy}}{\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_y} = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (4)$$

เมื่อ ϵ, γ คือ ความเครียดและความเครียดเฉือนตามลำดับ

ส่วนประกอบของความเค้น

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -p - k \sin 2\phi \\ \sigma_y &= -p + k \sin 2\phi \\ \tau_{xy} &= k \cos 2\phi \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

เมื่อ k คือ ความเค้นเฉือนไหล
 p ความดันไฮโดรสแตติก
 ϕ มุมที่แกน α กระทำกับแกน x

ส่วนประกอบของความเร็ว

$$\left. \begin{aligned} u_x &= u \cos \phi - v \sin \phi \\ v_y &= u \sin \phi + v \cos \phi \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

เมื่อ u, v คือ ความเร็วแกน α และ β

สมการ (1) ถึงสมการ (6) เป็นความสัมพันธ์เบื้องต้นในการสร้างทฤษฎีสนามเส้นเลื่อนไหล ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} p + 2k\phi &= 0 \text{ ตามเส้น } \alpha \\ p - 2k\phi &= 0 \text{ ตามเส้น } \beta \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

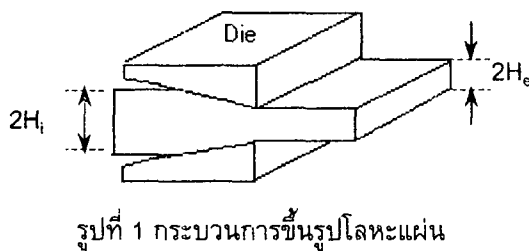
สมการ (7) เรียกว่าสมการของ Hencky

$$\left. \begin{aligned} du - v d\phi &= 0 \text{ ตามเส้น } \alpha \\ dv + u d\phi &= 0 \text{ ตามเส้น } \beta \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

สมการ (8) เรียกว่าสมการของ Geiringer

2.2 กระบวนการดึงขึ้นรูปและกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป

กระบวนการดึงและอัดรีดขึ้นรูป คือ การขึ้นรูปโลหะเพื่อให้ได้ลักษณะตามที่ต้องการ หรือเพื่อลดความหนาของชิ้นงานดังรูปที่ 1 กระบวนการดึงขึ้นรูปจะใช้ต้นกำลังจับยึดแผ่นโลหะที่ทางออกแล้วดึงผ่านแม่พิมพ์ นอกจากชิ้นงานมีความหนาลดลงแล้ว ยังเพิ่มความแข็งแรงตามแนวแกนดึง ในขณะที่การอัดรีดขึ้นรูปใช้ต้นกำลังอัดรีดชิ้นงานที่ทางเข้าผ่านแม่พิมพ์ เพื่อลดความหนาของชิ้นงาน



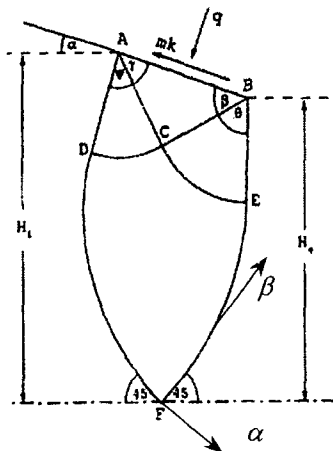
รูปที่ 1 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาและกำหนดเงื่อนไขขอบของกระบวนการดึงขึ้นและกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป หลังจากนั้น วิเคราะห์ปัญหาด้วยทฤษฎีสันนามเส้นเลื่อนไหล โดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องคู่กับวิธีลองผิดลองถูก แล้วนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับวิธีสแล็บและทฤษฎีค่าขอบเขตบน

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองที่สร้างดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีเงื่อนไขขอบ คือ ความเร็วในแกน y ที่ทางเข้าและออกเป็นศูนย์ โลหะไหลขนานกับผิวแม่พิมพ์ และสำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปความเค้นที่ทางเข้าเท่าศูนย์ และถ้าเป็นกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปความเค้นที่ทางออกเท่ากับศูนย์ จากสมการของ Hencky เขียนความสัมพันธ์ของมุมได้ดังนี้ คือ



รูปที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

$$\theta - \psi = \frac{\pi}{4} + \alpha - \beta \quad (9)$$

เมื่อ α คือ มุมแม่พิมพ์

θ, ψ, β มุมที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์

3.2 สมการความเค้นและความดันแม่พิมพ์ในแต่ละวิธี

3.2.1 ทฤษฎีสันนามเส้นเลื่อนไหล

$$\frac{q_d}{2k} = \frac{x_i}{2H_i} + \frac{\pi}{4} - \frac{\sum_0^{H_i} \phi_i \Delta h_i}{H_i} + \theta + \psi + \frac{1}{2} \sin(2\beta) \quad (10)$$

$$\frac{\sigma_d}{2k} = \left(\frac{AB}{H_e} \right) \left(\frac{q_d}{2k} \sin(\alpha) + \frac{m}{2} \cos(\alpha) \right) \quad (11)$$

เมื่อ m คือ สัดส่วนระหว่างแรงเสียดทานต่อหน่วยพื้นที่กับความเค้นเฉือนครากของวัสดุ โดยเรียกย่อๆว่า สัดส่วนของความเค้นเฉือนคราก

x_i ความยาวในแนวระดับจากจุด A ถึง F

Δh_i ช่วงความสูงย่อยที่ทางเข้า

q_d ความดันแม่พิมพ์กระบวนการดึงขึ้นรูป

σ_d ความเค้นกระบวนการดึงขึ้นรูป

$$\frac{q_e}{2k} = \frac{x_e}{2H_e} + \frac{\pi}{4} - \frac{\sum_0^{H_e} \phi_e \Delta h_e}{H_e} + \theta + \psi + \frac{1}{2} \sin(2\beta) \quad (12)$$

$$\frac{P_e}{2k} = \left(\frac{AB}{H_i} \right) \left(\frac{q_e}{2k} \sin(\alpha) + \frac{m}{2} \cos(\alpha) \right) \quad (13)$$

เมื่อ x_e คือ ความยาวในแนวระดับจากจุด F ถึง B

Δh_e ช่วงความสูงย่อยที่ทางออก

q_e ความดันแม่พิมพ์กระบวนการอัดรีดขึ้นรูป

P_e ความดันอัดรีดขึ้นรูป

3.2.2 วิธีสแล็บ

$$\frac{\sigma_d}{2k} = \frac{P_e}{2k} = \left[1 + \frac{m}{\sin(2\alpha)} \right] \ln \left(\frac{H_i}{H_e} \right) \quad (14)$$

$$\frac{q_d}{2k} = \frac{1}{\sin(\alpha)} \left(\frac{\sigma_d H_e}{2k} - \frac{m \cos(\alpha)}{2} \right) \quad (15)$$

$$\frac{q_e}{2k} = \frac{1}{\sin(\alpha)} \left(\frac{p_e H_i}{2k} - \frac{m \cos(\alpha)}{2} \right) \quad (16)$$

3.2.3 ทฤษฎีค่าขอบเขตบน

$$\frac{\sigma_d}{2k} = \left(\frac{1}{2H_e U_e} \right) \left(\frac{m}{2} \overline{AB} V_{AB}^* + \overline{AD} V_{AD}^* + \overline{DF} V_{DF}^* + \overline{AC} V_{AC}^* + \overline{DC} V_{DC}^* + \overline{CB} V_{CB}^* + \overline{CE} V_{CE}^* + \overline{FE} V_{FE}^* \right) \quad (17)$$

$$\frac{P_e}{2k} = \left(\frac{1}{2H_i U_i} \right) \left(\frac{m}{2} \overline{AB} V_{AB}^* + \overline{AD} V_{AD}^* + \overline{DF} V_{DF}^* + \overline{AC} V_{AC}^* + \overline{DC} V_{DC}^* + \overline{CB} V_{CB}^* + \overline{CE} V_{CE}^* + \overline{FE} V_{FE}^* \right) \quad (18)$$

เมื่อ U_i คือ ความเร็วในแนวแกนที่ทางเข้าแม่พิมพ์
 U_e ความเร็วในแนวแกนที่ทางออกแม่พิมพ์
 V^* ความเร็วในแต่ละระนาบการไหล

$$\frac{q_d}{2k} = \frac{1}{\sin(\alpha)} \left(\frac{\sigma_d H_e}{2k} - \frac{m \cos(\alpha)}{2} \right) \quad (19)$$

$$\frac{q_e}{2k} = \frac{1}{\sin(\alpha)} \left(\frac{P_e H_i}{2k} - \frac{m \cos(\alpha)}{2} \right) \quad (20)$$

4. ผลลัพธ์เชิงตัวเลขและวิจารณ์

4.1 ผลลัพธ์วิเคราะห์ด้วยทฤษฎีสหามเส้นเลื่อนไหล

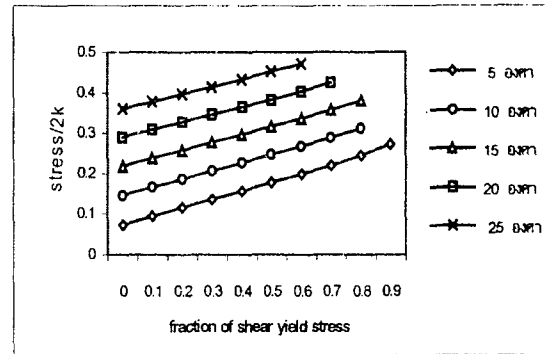
4.1.1 ความเค้นดิ่งขึ้นรูปและความดันอัดรีดขึ้นรูป

ความเค้นดิ่งขึ้นรูปและความดันอัดรีดขึ้นรูปจะมีค่าเท่ากันเมื่อสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์การลดรูปเท่ากัน ดังนั้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความดันอัดรีดในกราฟเดียวกันได้ดังแสดงในรูปที่ 3 สามารถสรุปได้ว่า เมื่อมุมแม่พิมพ์หรือสัดส่วนความเค้นเฉือนเพิ่ม จะทำให้ความเค้นดิ่งขึ้นรูปและความดันอัดรีดขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้น

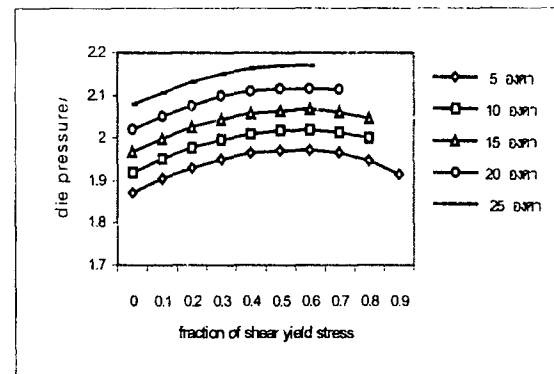
4.1.2 ความดันแม่พิมพ์

สำหรับขบวนการกระบวนการดิ่งขึ้นรูป จากรูปที่ 4 สรุปได้ดังนี้ ความดันแม่พิมพ์ลดลงเมื่อสัดส่วนความเค้นเฉือนหรือมุมแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น และในส่วนของการอัดรีดขึ้นรูปสรุปความสัมพันธ์ได้ดังนี้ ความดันแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนความเค้นเฉือนและมุมแม่พิมพ์มีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5

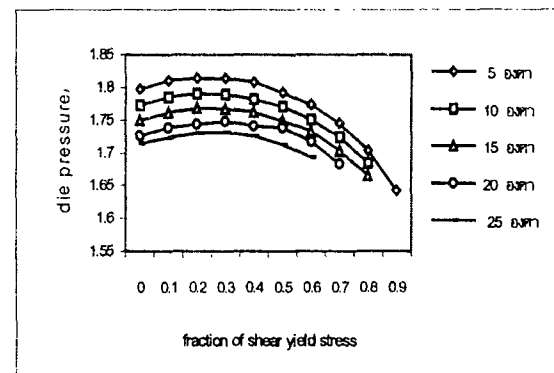
นอกจากนี้ยังสามารถสรุปได้ว่า ที่มุมแม่พิมพ์และสัดส่วนความเค้นเฉือนเดียวกัน ความดันแม่พิมพ์ในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปมีค่าสูงกว่าความดันแม่พิมพ์ของกระบวนการดิ่งขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับสัดส่วนของความเค้นเฉือนครากและมุมแม่พิมพ์ ในกระบวนการดิ่งขึ้นรูปและอัดรีดขึ้นรูป

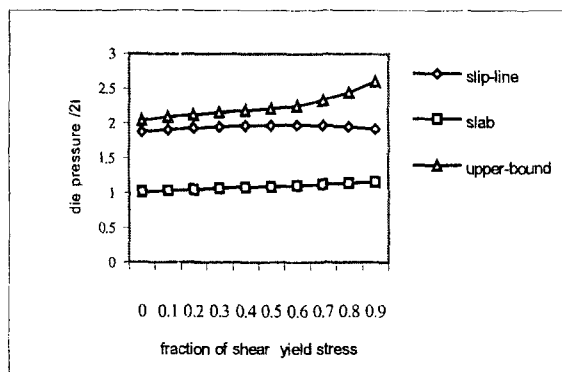


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันแม่พิมพ์กับสัดส่วนความเค้นเฉือนและมุมแม่พิมพ์ ในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป

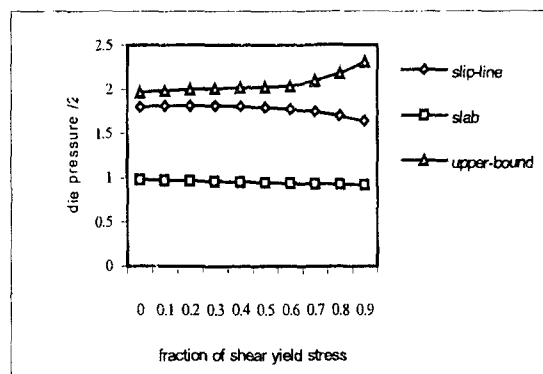


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันแม่พิมพ์กับสัดส่วนความเค้นเฉือนและมุมแม่พิมพ์ในกระบวนการดิ่งขึ้นรูป

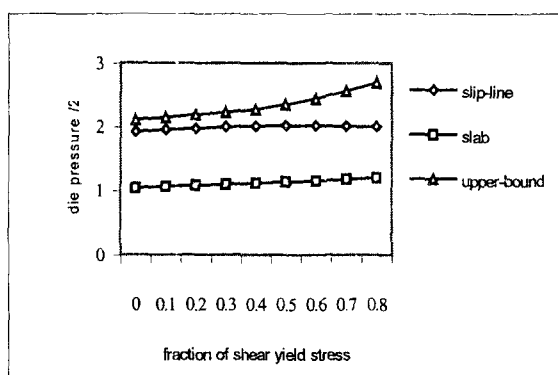
4.2 เปรียบเทียบผลลัพธ์



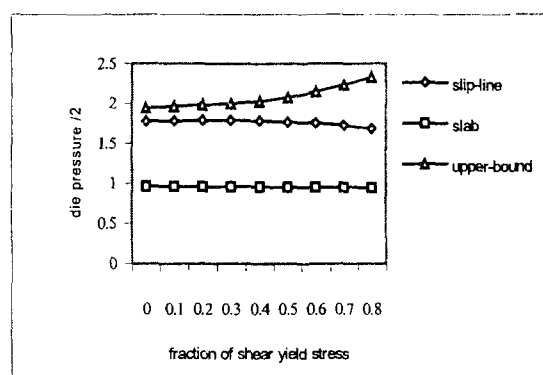
รูปที่ 6 เปรียบเทียบความดันแม่พิมพ์โดยวิธีต่างๆในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป ที่มุมแม่พิมพ์ 5 องศา



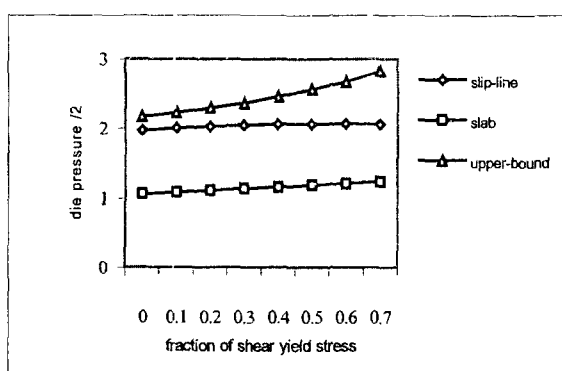
รูปที่ 9 เปรียบเทียบความดันแม่พิมพ์โดยวิธีต่างๆในกระบวนการดึงขึ้นรูป ที่มุมแม่พิมพ์ 5 องศา



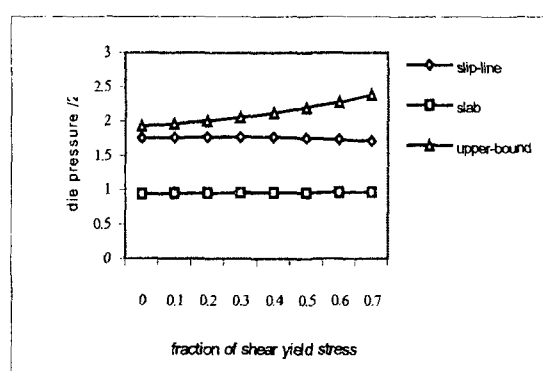
รูปที่ 7 เปรียบเทียบความดันแม่พิมพ์โดยวิธีต่างๆในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป ที่มุมแม่พิมพ์ 10 องศา



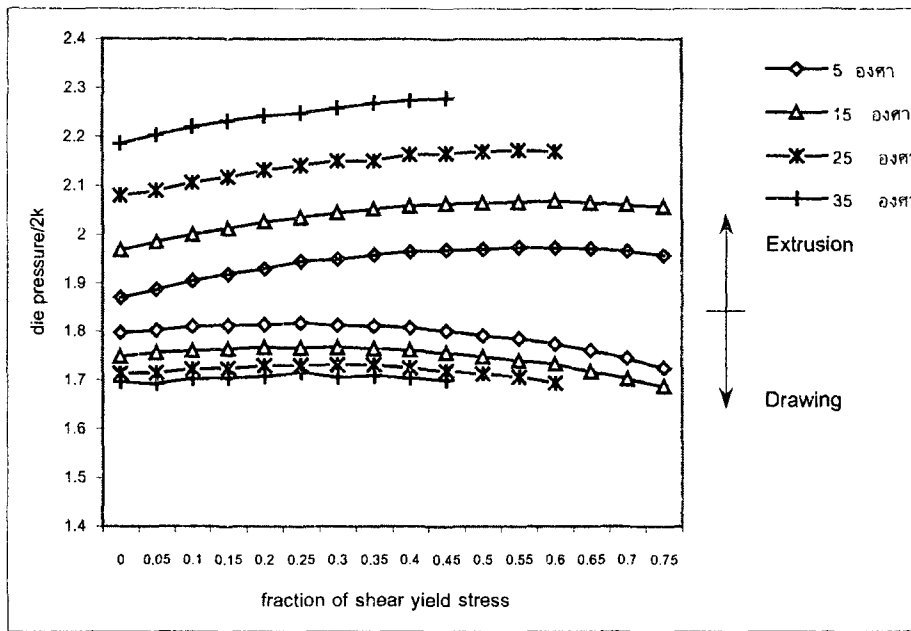
รูปที่ 10 เปรียบเทียบความดันแม่พิมพ์โดยวิธีต่างๆในกระบวนการการดึงขึ้นรูปที่มุมแม่พิมพ์ 10 องศา



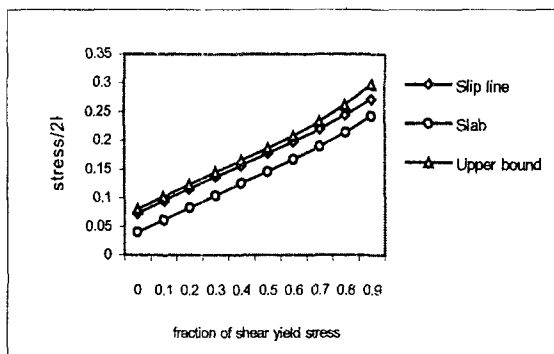
รูปที่ 8 เปรียบเทียบความดันแม่พิมพ์โดยวิธีต่างๆในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป ที่มุมแม่พิมพ์ 15 องศา



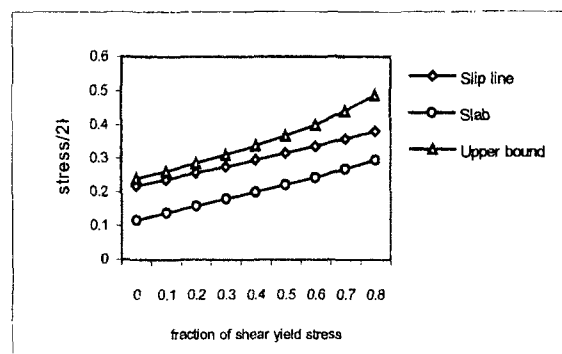
รูปที่ 11 เปรียบเทียบความดันแม่พิมพ์โดยวิธีต่างๆในกระบวนการดึงขึ้นรูป ที่มุมแม่พิมพ์ 15 องศา



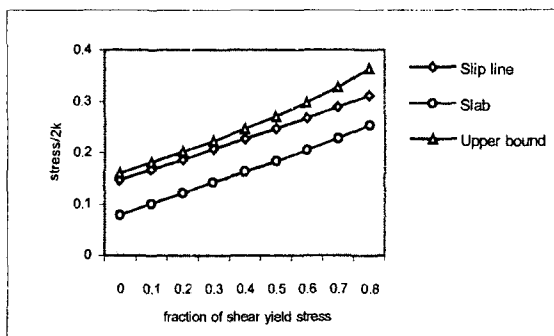
รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบความดันแม่พิมพ์ระหว่างกระบวนการดึงและอัดรีดขึ้นรูป



รูปที่ 13 เปรียบเทียบความเค้น ที่มุมแม่พิมพ์ 5 องศา



รูปที่ 15 เปรียบเทียบความเค้น ที่มุมแม่พิมพ์ 15 องศา



รูปที่ 14 เปรียบเทียบความเค้น ที่มุมแม่พิมพ์ 10 องศา

5. สรุป

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีสนามเส้นเลื่อนไหล พบว่าในกระบวนการดึงขึ้นรูป การเพิ่มค่าสัดส่วนของความเค้นเฉือนหรือมุมแม่พิมพ์ จะทำให้ความดันแม่พิมพ์ลดลง แต่ความเค้นดึงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป การเพิ่มค่าสัดส่วนของความเค้นเฉือนหรือมุมแม่พิมพ์ จะทำให้ทั้งความดันแม่พิมพ์และความดันอัดรีดมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีอื่นๆ พบว่ามีความสอดคล้องกัน โดยทฤษฎีค่าขอบเขตบนจะให้ค่าสูงสุด ในขณะที่ผลลัพธ์จากวิธีสแล็บจะน้อยกว่าทฤษฎีสนามเส้นเลื่อนไหล

6. เอกสารอ้างอิง

1. F. Willaim and M. Robert, "Metal Forming Mechanics and Metallurgy", Prentice-Hall , 1993.
2. S. Kobayashi, S.I Oh, and T. Altan, " Metal Forming and The Finite-Element Method", Oxford University Press Inc , 1989.
3. T.Z Blazynski and S. Townley , "The Methods of Analysis of The Process of Plug Drawing of Bimetallic Tubing Applied to Implosively Welded Composites", Int. J. Mech. Sci. , Vol.20 , 1978, pp. 785-797.
4. I.F Collins and B.K Williams , "Slip line Fields for Axisymmetric Tube Drawing", Int. J. Mech. Sci. , Vol.27, No.4, 1985, pp. 225-233.
5. N.R Chitkara and M.A Butt , "Combined Rod and Tube Extrusion : Numerical Solution of Axi-symmetric Slip-line Fields and associated Velocity Fields", Int. J. Mech. Sci., Vol.39, No.4, 1997, pp. 435-454.
6. N.R Chitkara and M.A Butt , " Axi-symmetric tube extrusion through a smooth conical or cosine die and over a conical or ogival mandrel : numerical construction of axi-symmetric slip-line fields and associated velocity field" , Int. J. Mech. Sci. Vol.41, 1999, pp. 1191-1215.