

## การออกแบบมุมของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมสำหรับการตีขึ้นแท่งอลูมิเนียม Optimum Die Angle Design for Upsetting of an Aluminum Bar

ภาคภูมิ พรหมสิทธิ์<sup>1</sup> และ มนต์ศักดิ์ พิมสาร<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ห้องปฏิบัติการ Electro-Mechanical Engineering (ReCCIT)ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 อีเมล pakpoompromsit@chaiyo.com<sup>1</sup> และ kpmonsak@kmitl.ac.th<sup>2</sup>  
Pakpoom Promsit<sup>1</sup> and Monsak Pimsarn<sup>2</sup>

The ReCCIT Electro-Mechanical Engineering Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Tel:0-2326-4197, Fax: 0-2326-4198  
E-mail: pakpoompromsit@chaiyo.com<sup>1</sup> and kpmonsak@kmitl.ac.th<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการออกแบบแม่พิมพ์ที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียมด้วยวิธีการตีขึ้นแท่งงานที่ผ่านการขึ้นรูปถูกนำไปทำเกลียวเพื่อใช้ในการเชื่อมต่อแท่งอลูมิเนียมสองอันด้วยปลอกเกลียวอีกทีหนึ่ง วิธีการเชื่อมต่อนี้ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาความแข็งแรงที่จุดเชื่อมต่อของโครงสร้าง ในการออกแบบแม่พิมพ์ของการตีขึ้นแท่งมีตัวแปรที่พิจารณาคือมุมของแม่พิมพ์ที่ใช้เพิ่มขนาดของแท่งอลูมิเนียม โดยในบทความนี้จะได้ทำการตีขึ้นแท่งอลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นเท่ากับ 16 มิลลิเมตร ให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้ายเท่ากับ 18,19 และ 20 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องหามุมของแม่พิมพ์ที่ทำให้ใช้แรงในการตีขึ้นแท่งน้อยที่สุด โดยการตีขึ้นแท่งจะกระทำโดยการตีเพียงแต่ครั้งเดียว ในการศึกษาจะกระทำโดยใช้วิธีการคำนวณทางทฤษฎี Slab method และการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกัน จากผลการวิเคราะห์พบว่ามุมของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมคือ 10,15 และ 25 องศา สำหรับแม่พิมพ์ที่ให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้ายเท่ากับ 18,19 และ 20 มิลลิเมตร ตามลำดับ แต่แรงที่ใช้ตีในทางทฤษฎีจะมีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

**คำสำคัญ:** การขึ้นรูปแท่ง, การตีขึ้นแท่ง, การออกแบบแม่พิมพ์

### Abstract

The aim of this research is to optimally design the die used for increasing a cross section of an aluminum bar, an upsetting process. The upset work pieces are later tapped and will be used for connecting two aluminum bars together with a coupling tube. This method is widely used in construction work and enhances connection strength in structures. In the design procedure, the parameter considered is a die angle. In this paper, an initial aluminum bar diameter is 16 mm. After the upsetting process, the diameter is increased to various sizes, such as 18,19 and 20 mm.. The upsetting method used in this study is single stroke process. The study is carried out by using Slab and finite element methods. Later, the results obtained from both methods are compared. The simulated results indicate that the optimum die angle are 10<sup>o</sup>,15<sup>o</sup> and 25<sup>o</sup> when the final diameters are 18,19 and 20 mm., respectively. However, the estimated stroke force obtained from Slab method is higher than the force predicted by finite element model.

**Keywords:** Cold Forming, Upsetting, Die Design

### 1. บทนำ

การต่อเหล็กโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก มักจะใช้การผูกเหล็ก โดยการตอทาบเหล็ก ซึ่งจะมีปัญหาความแข็งแรงที่จุดต่อ และถ้าขนาดเหล็กเพิ่มขึ้น ความยาวเหล็กตอทาบก็จะยาวขึ้นทำให้ต้นทุนการก่อสร้างสูงขึ้นไปด้วย การต่อเหล็กโดยใช้ข้อต่อ (coupler) จะช่วยแก้ปัญหาความแข็งแรงที่จุดเชื่อมต่อ ลดความยาวเหล็กตอทาบและทำงานได้สะดวกและรวดเร็ว

ในบทความนี้วัสดุที่ใช้เป็นอลูมิเนียม แท่งอลูมิเนียมจะทำการขึ้นรูปโดยการตีขึ้น (upsetting) เพื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดก่อนนำไปทำเกลียวเพื่อสวมกับข้อต่อ การขึ้นรูปจะใช้การขึ้นรูปแบบเย็นโดยการตีขึ้นแท่งครั้งเดียว อัตราส่วนการตีขึ้น  $S = \frac{l_0}{d_0}$  มีค่าไม่เกิน 2.6 เมื่อ  $l_0$  เป็นความยาวเริ่มต้น และ  $d_0$  เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้นของแท่งอลูมิเนียม ซึ่งขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งอลูมิเนียมเป็น 16 มม. ทำการตีขึ้นเป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18,19 และ 20 มม. โดยตั้งสมมติฐาน

ว่า ปริมาตรก่อนตีสั้นเท่ากับปริมาตรหลังตีสั้น ในการวิเคราะห์ที่ใช้หลักการของ slab method เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ไฟไนท์เอลิเมนต์ที่มุมแม่พิมพ์ต่าง ๆ

## 2. ทฤษฎี

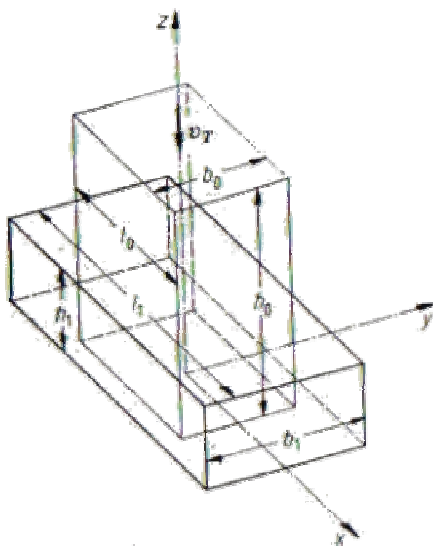
### 2.1 การตีสั้น (Upsetting)

การตีสั้น (upsetting) จัดเป็นการขึ้นรูปแบบ compressive forming โดยทำให้พื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น แต่ปริมาตรรวมยังคงเดิม โดยเป็น กระบวนการเสียรูปแบบ homogeneous ซึ่งเป็นกระบวนการที่ตั้งสมมติฐานว่าเมื่อขึ้นงานเกิดการเสียรูป จุดทุกจุดบนชิ้นงานจะเกิดความเครียดขึ้น จากรูปที่ 1 ชิ้นงานหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉากตีสั้นระหว่างแผ่น plate ที่ขนานกันโดยไม่มีความเสี่ยงตกาน ที่ความเร็วเป็นฟังก์ชันเส้นตรงตามแนวแกน ความเร็วในแกนต่าง ๆ จะได้เป็น

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{v_T}{2h} x \\ v_y &= \frac{v_T}{2h} y \\ v_z &= -\frac{v_T}{h} z \end{aligned} \quad (1)$$

และ normal strain rate จะได้เป็น

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_x &= \frac{v_T}{2h} = \dot{\phi}_l \\ \dot{\epsilon}_y &= \frac{v_T}{2h} = \dot{\phi}_b \\ \dot{\epsilon}_z &= -\frac{v_T}{h} = \dot{\phi}_h \end{aligned} \quad (2)$$



รูปที่ 1 การเสียรูปแบบ homogeneous ของวัตถุทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ความเครียดในทิศทาง z ในช่วงเวลา  $t_1 - t_0$  จะหาได้จาก

$$\phi_h = \int_0^{t_1} \dot{\phi}_h dt = \int_0^{t_1} \left( -\frac{v_T}{h} \right) dt \quad (3)$$

ถ้า  $h_0$  และ  $h_1$  เป็นความสูงชิ้นงานที่เวลา  $t_0$  และ  $t_1$  ตามลำดับแล้ว

$$dh = -v_T dt$$

$$\text{จะได้} \quad \phi_h = \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} = \ln h_1 - \ln h_0 = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad (4)$$

และจากสมการ (3) และ (4) ความเครียดที่แกน x แกน y จะได้

$$\phi_l = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad (5)$$

$$\phi_b = \ln \frac{b_1}{b_0} \quad (6)$$

ค่าของ  $\phi$  เป็น natural strain หรือ true strain โดยที่ปริมาตรก่อนการขึ้นรูป จะเท่ากับปริมาตรหลังการขึ้นรูป พิจารณาวัตถุทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก มีขนาดมิติก่อนการขึ้นรูปเป็น  $h_0, b_0, l_0$  และขนาดมิติหลังการขึ้นรูปเป็น  $h_1, b_1, l_1$  จะเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$V = h_0 b_0 l_0 = h_1 b_1 l_1$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{h_0 b_0 l_0}{h_1 b_1 l_1} = 1$$

ใส่  $\ln$  ทั้ง 2 ข้างของสมการจะได้

$$\ln \frac{h_0}{h_1} + \ln \frac{b_0}{b_1} + \ln \frac{l_0}{l_1} = \phi_h + \phi_b + \phi_l = 0$$

ถ้าชิ้นงานมีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม ความเครียดตามแนวแกนจะเป็น

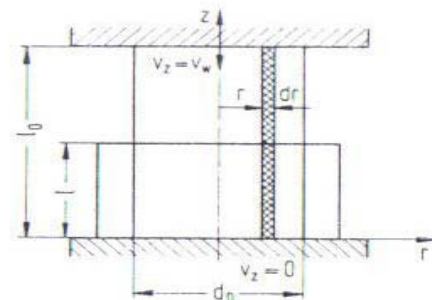
$$\phi_l = \ln \frac{l_1}{l_0}$$

และความเครียดตามแนวรัศมีและแนวเส้นรอบวงจะเป็น

$$\phi_r = \phi_t = \ln \frac{r_1}{r_0}$$

### 2.2 ทฤษฎีพลาสติก (Slab method)

พื้นฐานหลักการของทฤษฎีพลาสติก[1-5] แรงที่ใช้ในการตีสั้นหาได้โดยการประมาณ จากการกระจายความเค้นตั้งฉากระหว่างเครื่องมือและชิ้นงาน การวิเคราะห์หาแรงการตีสั้นแบบแกนสมมาตรตามรูปที่ 2 และ 3 จะได้



รูปที่ 2 กระบวนการตีสั้น

$$\sigma_r r l d\theta - (\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr) l d\theta + 2\sigma_t \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) l dr - 2\mu\sigma_z r d\theta dr = 0 \quad (7)$$

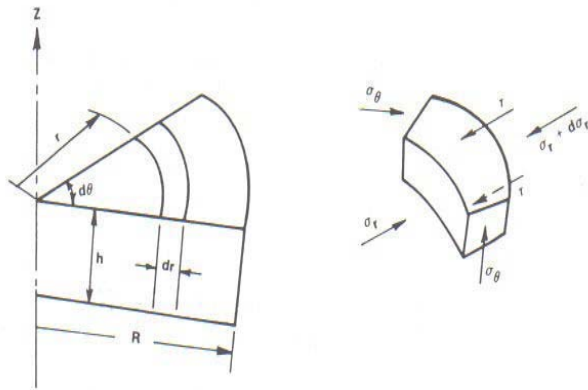
จากสมการ (7) สมมติ  $\sigma_t = \sigma_r$  และเทอมของอนุพันธ์ตัดทิ้ง ไม่นำมาพิจารณา สมการจะลดรูปได้เป็น

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2\mu}{l}\sigma_z = 0 \quad (8)$$

แทน Tresca yield criterion ใน (8)

$$\sigma_r - \sigma_z = \sigma_f \quad (9)$$

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2\mu}{l}\sigma_r = \frac{2\mu}{l}\sigma_f \quad (10)$$



รูปที่ 3 แรงกระทำบนเอลิเมนต์วงแหวนในการขึ้นรูปแบบแกนสมมาตร

จากสมการเฉลยของสมการอนุพันธ์ลำดับ 1 จะได้เป็น

$$\sigma_r = \exp\left(-\frac{2\mu r}{l}\right) \left[ \sigma_f \exp\left(\frac{2\mu r}{l}\right) + C \right] \quad (11)$$

โดยมีเงื่อนไขที่ขอบเป็น

$$\sigma_r = 0 \quad \text{เมื่อ} \quad r = \frac{d}{2} \quad (12)$$

แทน (12) ใน (10) จะได้ค่าคงที่ในการอินทิเกรต

$$C = -\sigma_f \exp\left(\frac{\mu}{l}d\right) \quad (13)$$

ดังนั้นความเค้นตามแนวรัศมี (radial stress) เป็น

$$\sigma_r = -\sigma_f \left\{ \exp\left[\frac{2\mu}{l}\left(\frac{d}{2}-r\right)\right] - 1 \right\} \quad (14)$$

แทนสมการ (14) ในสมการ (9) ความเค้นที่ผิวหน้าจะเป็น

$$\sigma_z = -\sigma_f \exp\left[\frac{2\mu}{l}\left(\frac{d}{2}-r\right)\right] \quad (15)$$

จากอนุกรม Taylor  $e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$  กระจาย

อนุกรมของ exponential function จะได้เป็น

$$\exp\left[\frac{2\mu}{l}\left(\frac{d}{2}-r\right)\right] = 1 + \left[\frac{2\mu}{l}\left(\frac{d}{2}-r\right)\right] + \frac{\left[\frac{2\mu}{l}\left(\frac{d}{2}-r\right)\right]^2}{2} + \dots$$

จากอนุกรมเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความเค้นความเครียดที่ผิวหน้า ซึ่งมีความน้อยกว่า 1 เทอมที่มีค่ายกกำลังสูง ๆ จะมีความน้อยมาก จึงพิจารณาเพียง 2 เทอมแรกของอนุกรมเท่านั้น ดังนั้นจะได้ความเค้นที่ผิวหน้าเป็น

$$\sigma_z = -\sigma_f \left[ 1 + \frac{2\mu}{l}\left(\frac{d}{2}-r\right) \right] \quad (16)$$

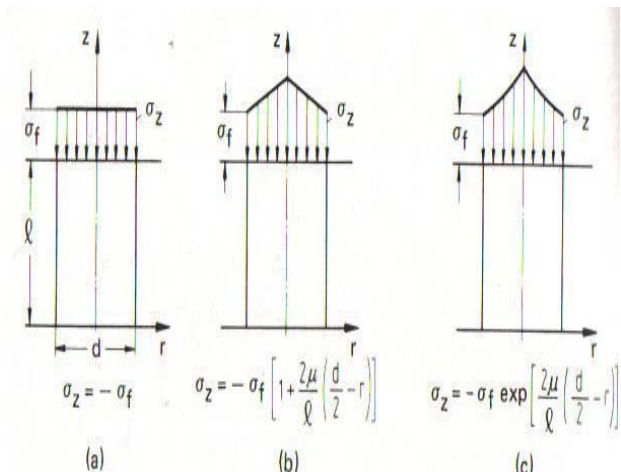
และการตีเย็นที่ไม่มีแรงเค้นความเครียด สมการ (10) จะเป็น

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = 0 \quad (17)$$

จะได้ว่า  $\sigma_r = \text{constant}$  และแทนสมการ (10) ใน (3)

$$\sigma_z = \sigma_r - \sigma_f = -\sigma_f \quad (18)$$

สมการ (18) สอดคล้องกับการแทน  $\mu = 0$  ในสมการ (14) รูปที่ 4 แสดงการกระจายความเค้นที่ผิวหน้าที่ได้จากสมการ (15), (16) และ (18)



รูปที่ 4 การกระจายความเค้นตั้งฉากของการตีเย็นทรงกระบอกแบบแกนสมมาตร

แรงในการขึ้นรูปจะหาได้จากการอินทิเกรตความเค้นที่กระทำที่พื้นที่หน้าสัมผัส A

$$F_z = \int_A \sigma_z dA \quad (19)$$

สำหรับกรณีแกนสมมาตร

$$F_z = -A\sigma_f \left( 1 + \frac{1}{3}\mu\frac{d}{l} \right) \quad (20)$$

และงานที่ใช้ในการตีเย็น

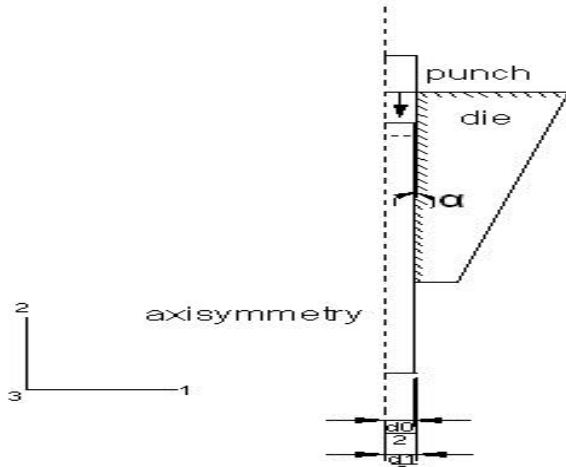
$$W = \int_{s=0}^{s=l_0-l_1} F_z ds \quad (21)$$

$$= -V\sigma_f \left( 1 + \frac{1}{3}\mu\frac{d}{l} \right)$$

สัมประสิทธิ์ความเค้นความเครียด  $\mu$  ขึ้นอยู่กับการหล่อลื่นระหว่างผิวหน้าแม่พิมพ์กับชิ้นงานและอุณหภูมิ โดยมีค่าในช่วง 0.05-0.15 ยกเว้นที่มีการหล่อลื่น

### 3. วิธีการวิเคราะห์ด้วย FEM

สร้างแบบจำลองของแม่พิมพ์ในการตีขึ้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสุดท้ายเป็น 18 และ 20 มม. ตามลำดับ ขนาดมุมแม่พิมพ์  $\alpha$  ตั้งแต่ 10 ถึง 25 องศา แบบจำลองที่ใช้เป็น 2 มิติ axisymmetry รูปที่ใช้ในการวิเคราะห์จะเป็นดังรูป 5 (หน่วยเป็น มม.)



รูปที่ 5 แบบจำลองวิเคราะห์การขึ้นรูป

ในแบบจำลองใช้โปรแกรม ABAQUS โดยให้ punch และ die เป็นวัตถุแข็งเกร็ง และแท่งอลูมิเนียมเป็นวัตถุที่เสียรูปได้ จำนวน element ที่ใช้เป็น 2000 elements โดยเป็นแบบ axisymmetric element  $\mu$  ระหว่างชิ้นงานกับ die เป็น 0.15 และ  $\mu$  ระหว่างชิ้นงานกับ punch เป็น 0.05 การคำนวณแต่ละกรณีแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน และแต่ละขั้นตอนจะมีเงื่อนไขที่ขอบ ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 boundary condition และ load ในแบบจำลอง

ขั้นตอน	เงื่อนไขที่ขอบและภาระ
dieset	แบบจำลองเริ่มต้นดังรูปที่ 5 die : U1=0 U2=0 UR3=0 punch : U1=0 U2=0 UR3=0 fixed (แกนสมมาตร) : U3=UR1=UR2=0
holder	บีบชิ้นงาน die : U1=-0.01 U2=0 UR3=0 punch : U1=0 U2=0 UR3=0 fixed (แกนสมมาตร) : U3=UR1=UR2=0
holder force	เพิ่มแรงการจับไม่ให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ขณะตี die : U1=-0.01 U2=0 UR3=0 , F1=-2E+006 punch : U1=0 U2=0 UR3=0 fixed (แกนสมมาตร) : U3=UR1=UR2=0
contact	punch เคลื่อนที่สัมผัสกับชิ้นงาน die : U1=-0.01 U2=0 UR3=0 , F1=-2E+006 punch : U1=0 U2=ระยะที่ punch สัมผัสชิ้นงาน UR3=0 fixed (แกนสมมาตร) : U3=UR1=UR2=0

forging	punch ตีชิ้นงานระยะตามที่คำนวณ die : U1=-0.01 U2=0 UR3=0 , F1=-2E+006 punch : U1=0 U2=ระยะที่ punch ตีชิ้นงาน UR3=0 fixed (แกนสมมาตร) : U3=UR1=UR2=0
---------	---

โดยที่ U เป็นการขจัดเชิงเส้น UR เป็นการขจัดเชิงมุม และ 1, 2 และ 3 แทนทิศทางในแนวแกน x , y และ z ตามลำดับ

#### 3.1 การคำนวณความยาวเริ่มต้น

การคำนวณจะใช้สมมติฐานว่าปริมาตรการขึ้นรูปจะคงที่ ความยาวเกลียวที่ใช้ค่าที่ 25 มม. ที่เส้นผ่าศูนย์กลางเป็น 18 ทุกมุมแม่พิมพ์ และ 22.5 มม. ที่เส้นผ่าศูนย์กลาง 19 และ 20 มม. ในแบบจำลองตีขึ้นงานครั้งเดียว ดังนั้นความยาวเริ่มต้นต้องไม่ทำให้ค่าสัดส่วนการตีขึ้นไม่เกิน 2.6 การคำนวณความยาวเริ่มต้นชิ้นงานที่มุมแม่พิมพ์ต่าง ๆ โดยเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้น 16 มม. ค่าความยาวเริ่มต้นแสดงดังตาราง

ตารางที่ 2 ความยาวเริ่มต้นเมื่อ  $d_1=18$  มม.

$d_0$ มม.	$d_1$ มม.	$\alpha$ องศา	$l_1$ มม.	$V$ ลบ.มม.	$l_0$ มม.
16	18	10	30.67	7650	38.05
16	18	15	28.73	7210	35.86
16	18	20	27.75	6986	34.75
16	18	25	27.14	6849	34.06

ตารางที่ 3 ความยาวเริ่มต้นเมื่อ  $d_1=19$  มม.

$d_0$ มม.	$d_1$ มม.	$\alpha$ องศา	$l_1$ มม.	$V$ ลบ.มม.	$l_0$ มม.
16	19	10	31.01	8431	41.93
16	19	15	28.10	7729	38.44
16	19	20	26.62	7373	36.67
16	19	25	25.72	7155	35.59

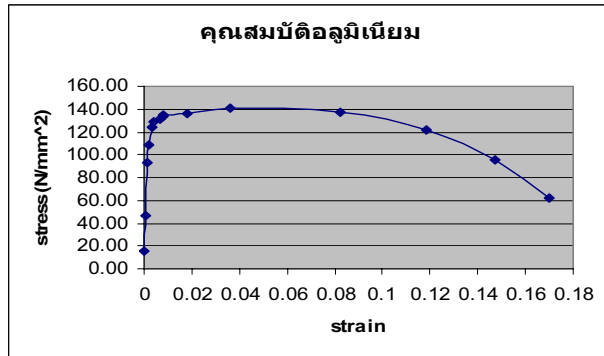
ตารางที่ 4 ความยาวเริ่มต้นเมื่อ  $d_1=20$  มม.

$d_0$ มม.	$d_1$ มม.	$\alpha$ องศา	$l_1$ มม.	$V$ ลบ.มม.	$l_0$ มม.
16	20	10	33.84	9967	49.57
16	20	15	29.96	8976	44.64
16	20	20	27.99	8473	42.14
16	20	25	26.79	8164	40.61

ในการตีขึ้น 1 ครั้งสัดส่วนการตีขึ้นต้องไม่เกิน 2.6 [1] ดังนั้นเมื่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้นเป็น 16 มม. แล้วความยาวเริ่มต้นจะต้องไม่เกิน 41.6 มม. เพื่อป้องกันการแตกที่ผิวรอบนอกและการโค้งงอของชิ้นงานขณะขึ้นรูป

### 3.2 คุณสมบัติของลู่ในแบบจำลอง FEM

ลู่ในแบบจำลอง มีคุณสมบัติดังรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียด

ในการคำนวณแรงในการขึ้นรูป หา flow stress ที่เป็นฟังก์ชันกับความเครียด โดยที่ flow stress เป็นความเค้นที่ทำให้เกิดการเสียรูปถาวร ความสัมพันธ์ของ flow stress กับความเครียดที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของสมการ

$$\sigma_f = H\phi^n \quad (22)$$

เมื่อ  $\sigma_f$  คือ flow stress ,  $H$  เป็นสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงวัสดุ,  $\phi$  เป็นความเครียดที่เกิดขึ้น (true strain) และ  $n$  คือค่ายกกำลัง strain hardening สำหรับลู่ในแบบจำลอง flow stress จะได้เป็น

$$\sigma_f = 240\phi^{0.15} \text{ MPa}$$

### 4. ผลการคำนวณและวิเคราะห์ FEM

แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปจากการวิเคราะห์ไฟไนท์เอลิเมนต์ นำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณตามทฤษฎี ที่มุมแม่พิมพ์แม่พิมพ์ต่าง ๆ ในของเส้นผ่าศูนย์กลาง 18,19 และ 20 มม.จะได้เป็น

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปที่  $d_1=18$  มม.

มุม	10	15	20	25
แรงทฤษฎี (kN)	52.76	53.27	53.54	53.78
แรง FEM (kN)	49.59	51.56	52.23	52.98
%ERROR	6.61	3.21	2.45	1.49

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปที่  $d_1=19$  มม.

มุม	10	15	20	25
แรงทฤษฎี (kN)	62.09	62.98	63.41	63.79
แรง FEM (kN)	55.30	58.38	61.21	62.04
%ERROR	10.94	7.3	3.47	2.74

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปที่  $d_1=20$  มม.

มุม	10	15	20	25
แรงทฤษฎี (kN)	71.02	72.26	73.00	73.45
แรง FEM (kN)	68.63	70.85	71.23	71.78
%ERROR	3.37	1.95	2.42	2.27

จากค่าแรงที่ได้จากวิธี FEM นำมาหางานในการตีขึ้นโดยใช้สมการ (21) เพื่อเปรียบเทียบงานที่ใช้ในแต่ละมุมของแม่พิมพ์

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบงานในการตีขึ้นเมื่อ  $d_1=18$  มม. ที่มุมต่าง ๆ

มุม (องศา)	$l_0 - l_1$ (มม.)	แรง (kN)	งาน (Nm)
10	7.38	49.59	365.93
15	7.13	51.56	367.45
20	7.00	52.23	365.52
25	6.92	52.98	366.61

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบงานในการตีขึ้นเมื่อ  $d_1=19$  มม. ที่มุมต่าง ๆ

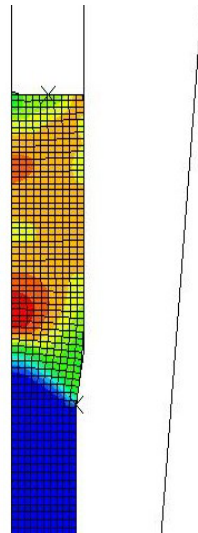
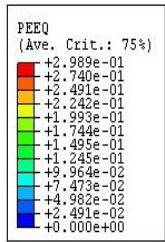
มุม (องศา)	$l_0 - l_1$ (มม.)	แรง (kN)	งาน (Nm)
10	10.92	55.30	604.06
15	10.34	58.38	603.87
20	10.05	61.21	615.13
25	9.87	62.04	612.29

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบงานในการตีขึ้นเมื่อ  $d_1=20$  มม. ที่มุมต่าง ๆ

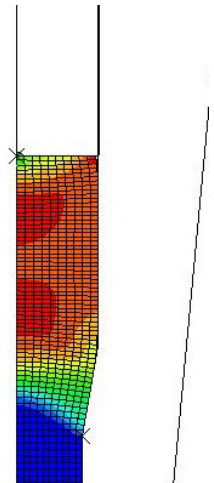
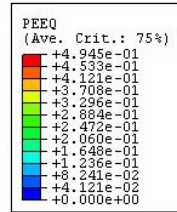
มุม (องศา)	$l_0 - l_1$ (มม.)	แรง (kN)	งาน (Nm)
10	10.92	68.63	1079.43
15	10.34	70.85	1039.92
20	10.05	71.23	1007.51
25	9.87	71.78	991.85

จากตารางเปรียบเทียบแรงจากทฤษฎีและ FEM จะเห็นว่าแรงขึ้นรูปที่มุมแม่พิมพ์น้อย ๆ จะให้แรงในการขึ้นรูปต่ำ แต่เมื่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางการตีขึ้นเพิ่มขึ้น มุมของแม่พิมพ์ที่ความยาวเริ่มต้นเกิน 41.6 มม. ซึ่งทำให้สัดส่วนการตีขึ้นเกิน 2.6 เมื่อตีขึ้นในครั้งเดียว จะทำให้งานในการตีขึ้นสูงกว่ามุมที่ความยาวเริ่มต้นไม่เกิน 41.6 มม. เพราะจากสมมติฐานปริมาตรชิ้นงานคงที่ทั้งก่อนและหลังขึ้นรูป เมื่อตีขึ้นเป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน ชิ้นงานที่มีความยาวมากกว่าจะมีค่างานในการขึ้นรูปสูงกว่า เมื่อชิ้นงานมีงานตีขึ้นกระทำเกิดพลังงานความเครียดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนขนาด โดยเป็นพลังงานที่เกิดในวัสดุเพื่อต้านทานความเครียดที่เกิดจากการเสียรูป รูปการกระจายความเครียดพลาสติกในกรณีต่าง ๆ เป็นดังรูป

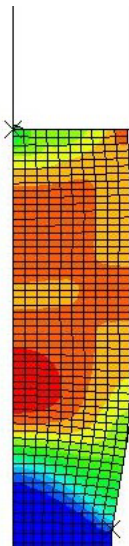
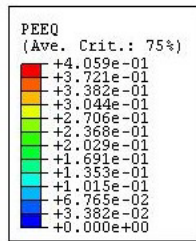
AMM065



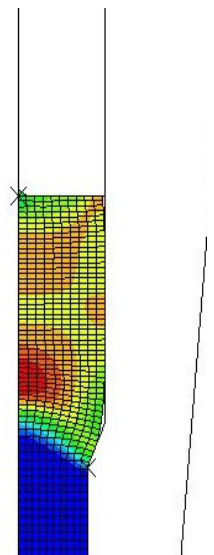
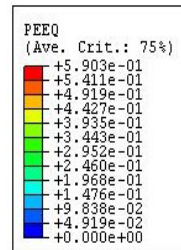
รูปที่ 7 การกระจายความเคียด  $d_1=18$  มม. มุม  $\alpha$  10 องศา



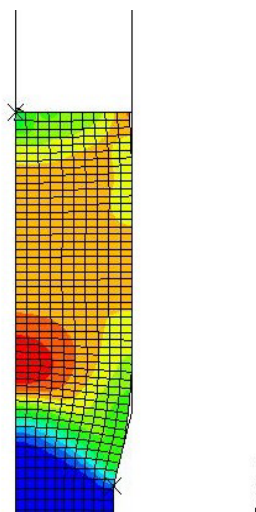
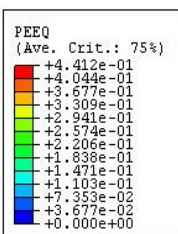
รูปที่ 10 การกระจายความเคียด  $d_1=20$  มม. มุม  $\alpha$  20 องศา



รูปที่ 8 การกระจายความเคียด  $d_1=19$  มม. มุม  $\alpha$  10 องศา



รูปที่ 11 การกระจายความเคียด  $d_1=20$  มม. มุม  $\alpha$  25 องศา



รูปที่ 9 การกระจายความเคียด  $d_1=19$  มม. มุม  $\alpha$  15 องศา

จากตารางเปรียบเทียบงานในการตีขึ้น เมื่อขึ้นรูปขึ้นงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18,19 และ 20 มม. มุมของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมของแม่พิมพ์เป็น 10,15 และ 25 องศาตามลำดับ

5. สรุปและอภิปรายผล

แรงตีขึ้นที่ได้จากการวิเคราะห์ FEM มีค่าใกล้เคียงทฤษฎี มุมแม่พิมพ์จะมีผลต่อขนาดแรงตีขึ้น การตีขึ้นที่มุมแม่พิมพ์น้อย ๆ แรงที่ใช้จะน้อยกว่า เมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหลังการตีขึ้น มุมของแม่พิมพ์จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่มุมขนาดเล็กจะทำให้ความยาวเริ่มต้นมีค่ามากเกินไปอัตราส่วนการตีขึ้นที่กำหนดในการตีครั้งเดียว ทำให้งานในการตีขึ้นสูงกว่ามุมที่ทำให้ความยาวเริ่มต้นไม่เกิน 41.6 มม.

เมื่อนำแท่งอลูมิเนียมที่ตีเย็นไปทำเกลียวไปต่อกับข้อต่อ ในกรณีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18,19 และ 20 มม. กรณีละ 3 ตัวอย่างไปทำการดึงทดสอบ จะได้ผลดังรูป

[5] Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid , Manufacturing Engineering and technology , Fifth Edition ,Pearson Prentice Hall , 2006



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 12 การดึงทดสอบแท่งอลูมิเนียมที่ต่อด้วยข้อต่อจากการตีเย็น

การตีเย็นจะเพิ่มความแข็งให้อลูมิเนียม เมื่อดึงทดสอบจึงไม่ขาดที่จุดต่อ การตีเย็นก่อนนำไปทำเกลียวที่ต่อกับข้อต่อจะแก้ปัญหาความแรงโครงสร้างที่จุดเชื่อมต่อและลดเหล็กต่อทาบได้

## 6. สัญลักษณ์

S	อัตราส่วนการตีเย็น
F	แรงในการขึ้นรูป
H	สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงวัสดุ
V	ปริมาตรชิ้นงาน
W	งานในการตีเย็น
n	ค่ายกกำลัง strain hardening
<i>l</i>	ความยาว
<i>d</i>	เส้นผ่าศูนย์กลาง
$\sigma_f$	flow stress
$\phi$	true strain
$\mu$	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
$\theta, \alpha$	มุม

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์จำลองและอาจารย์มนต์ศักดิ์ ที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะข้อบกพร่องต่าง ๆ และขอขอบคุณพ่อกับแม่ที่สนับสนุนทุนการศึกษามาโดยตลอด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ดำรง ไชยธีรานวัณศิริ , การขึ้นรูปโลหะ , บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน) , 2537
- [2] รศ.ดร.เดช พุทธเจริญทอง , ฤทธิ์พลาสติกซิตีและการเปลี่ยนรูปถาวร,ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ , 2548
- [3] T.Altan, S.Oh and H.Gegal , Metal Forming Fundamentals and Applications , Seventh Edition , American Society for Metals , 2000
- [4] Kurt lange , Hand book of metal forming , Mcgraw-Hill , 1985