

ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบเย็นต่อสมบัติเชิงกลของแท่งอลูมิเนียม EFFECTS OF PROCESS PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES OF COLD EXTRUDED ALUMINIUM ROD

สมชัย ตันทวิวิรุฬห์^{1*} สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ² กรรณชัย กัลยาศิริ³

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ³ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

*E-mail: smch46auto@yahoo.com

Somchai Tunthawiroon^{1*} Somchai Norasetthasophon² Kannachai Kanlayasiri³

^{1,2} Department of Mechanical Engineering ³ Department of Industrial Engineering

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

*E-mail: smch46auto@yahoo.com

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปแล้วการดัดขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียม ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง หรือดัดขึ้นรูปแบบเย็น (cold extrusion) จะให้รูปร่างและคุณภาพผิวที่ดีกว่าการดัดขึ้นรูปแบบร้อนและลดต้นทุนในการผลิตได้อย่างมาก งานวิจัยนี้นำเสนอ ผลกระทบเนื่องจากตัวแปรในกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบเย็น ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งภายในหน้าตัดของชิ้นงาน โดยการดัดขึ้นรูปที่ใช้ในการศึกษาเป็นการดัดขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียม (billet) ผ่านตายรูปกรวย (conical dies) ด้วยความเร็วในการดัดขึ้นรูปคงที่ จากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบที่มุมตายต่างกัน แต่มีอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดใกล้เคียงกันพบว่า ค่าความแข็งภายในหน้าตัดของชิ้นงานมีค่าไม่แตกต่างกัน

Abstract

Generally, cold extrusion of aluminium billet provides better shape and surface finish than hot extrusion, and may reduce production cost of the extrusion process. This research presents effects of process parameters of cold extrusion on internal hardness of the aluminium billet. The billet was cold-extruded through a conical die at a constant extrusion speed. Result showed that internal hardness of aluminium billet increases as reduction ratio of area increases. When compared between two die angles, internal hardness of extruded aluminium billets are not different if area reduction ratio are not much different.

Keywords: Cold extrusion, Hardness, Dies angle

1. บทนำ

ในกระบวนการดัดขึ้นรูป พื้นที่หน้าตัดของแท่งโลหะจะถูกลด หรือถูกเปลี่ยน โดยใช้แรงกดให้แท่งโลหะไหลผ่านแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างแน่นอน ซึ่งสิ่งสำคัญที่ต้องการจากกระบวนการนี้คือ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสมทางกลตามต้องการ คุณสมบัติของโลหะที่ปราศจากข้อบกพร่อง และ รูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ กระบวนการดัดขึ้นรูปสามารถทำได้ทั้งอุณหภูมิปกติของวัสดุ คือ การดัดขึ้นรูปสภาพเย็น (cold extrusion) หรือทำให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้น (hot extrusion) ตามสภาวะที่เหมาะสมในการดัดขึ้นรูป กระบวนการดัดขึ้นรูปในปัจจุบันแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ การดัดขึ้นรูปโดยตรง (direct extrusion) และการดัดขึ้นรูปโดยอ้อม (indirect extrusion)

โลหะส่วนใหญ่สามารถทำการดัดขึ้นรูปได้หลายวิธี ตามความเหมาะสม ซึ่งโลหะทั่วไปที่สามารถดัดขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิปกติคือ ตะกั่ว อลูมิเนียม และทองแดง การดัดขึ้นรูปในสภาพเย็นของโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (cold extrusion of non-ferrous components) สามารถทำได้ง่าย เพราะ ใช้แรงในการขึ้นรูปหรือทำให้โลหะเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยกว่าโลหะกลุ่มเหล็ก

ตัวแปรหลักๆในกระบวนการดัดขึ้นรูป คือ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด มุมตาย (dies angle) ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของตายกับชิ้นงาน และความเร็วในการดัดขึ้นรูป ในส่วนของมุมต้ามักมีผลกระทบโดยตรงกับแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป และความเสียหายที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ เช่น การเกิดรอยร้าวภายในบางครั้ง เรียกว่า Chevron crack หรือรอยแตกร้าวรูปบั้งนายสิบ [1] ในทางทฤษฎีเราสามารถกำหนดอัตราส่วนการลดขนาด และสภาวะความเสียดทานที่แน่นอนเพื่อที่จะหาขนาดที่ใช้แรงในการดัดขึ้นรูป และความเค้นที่น้อยที่สุดได้ [2] แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ไม่สามารถนำกระบวนการดัดขึ้นรูปที่มุมต้ามานี้

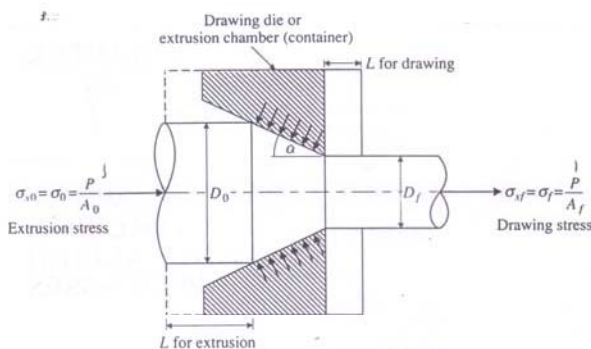
ไปใช้ได้ เพราะจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติอย่างอื่นประกอบกันด้วย เช่น คุณภาพผิว ความเที่ยงตรงของขนาด การบิดเบี้ยวของชิ้นงาน ภายหลังการดัดขึ้นรูป [3] ซึ่งกรณีนี้ถ้าการบิดเบี้ยวมีมากก็หมายความว่าชิ้นงานจะไม่สามารถใช้งานได้ ส่งผลต่อต้นทุนในกระบวนการผลิตที่เพิ่มขึ้นได้

ค่าความแข็งเป็นเกณฑ์อย่างหนึ่งที่ใช้ในการเลือกวัสดุ และการเลือกเครื่องมือให้เหมาะสมกับการผลิต เพื่อที่จะได้ชิ้นงานที่ทนต่อการสึกหรอและเครื่องมือที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการดัดขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียมขนาดเส้นที่อุณหภูมิห้อง และใช้สารหล่อลื่นเพื่อลดความเสียหายระหว่างผิวสัมผัส ตัวแปรที่นำมาศึกษาคือ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด และมุมตาย วัตถุประสงค์ในการทำงานวิจัยนี้เพื่อ ศึกษาว่าตัวแปรทั้ง 2 ชนิดที่ได้เลือกมาข้างต้นนั้นส่งผลกระทบอย่างไร กับค่าความแข็งภายในหน้าตัดของแท่งอลูมิเนียมหลังจากผ่านกระบวนการดัดขึ้นรูป

2. ทฤษฎีพื้นฐานของการดัดขึ้นรูป

สิ่งสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการดัดขึ้นรูปอลูมิเนียม ที่จะต้องพิจารณาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้เลยก็คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุขณะทำการดัดขึ้นรูป เพราะความเค้นที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติต่างๆของอลูมิเนียมที่นำมาทำการดัดขึ้นรูป เช่น ค่าความต้านทานแรงดึง หรือแรงเฉือนในวัสดุ หรือแม้กระทั่งความเค้นดกค้ำที่เกิดขึ้น การออกแบบตายและเครื่องมือที่ดีจะสามารถลดค่าความเค้นนี้ลงได้

ความเค้นที่เกิดขึ้นในแท่งอลูมิเนียมขณะไหลผ่านตาย จะเป็นความเค้นที่มีคุณสมบัติอยู่ในช่วงพลาสติกของอลูมิเนียม นั้นๆ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ อลูมิเนียมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงพลาสติกเช่นกัน คือ เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ลักษณะของแท่งอลูมิเนียมที่ไหลผ่านตาย ความเค้นอัด และความเค้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับตาย แสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงลักษณะของอลูมิเนียมที่ไหลผ่านตาย ความเค้นอัด และความเค้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับตาย [4]

จากหลักสภาวะการแปรรูปของความเค้น การดัดขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียมผ่านตายรูปกรวย เมื่อไม่คิดการสูญเสียเนื่องจากแรงเฉือนภายใน และแรงเสียดทานภายนอก จาก [1] และ [4] สมการความเค้นที่เกิดขึ้นจากการดัดขึ้นรูปในกรณีที่เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบโฮโมจีนีอัส

จะเขียนได้ดังสมการที่ 1

$$\sigma = \bar{\sigma} \ln \frac{A_o}{A_f} = \bar{\sigma} \ln \left(\frac{1}{1-r_e} \right) \quad (1)$$

เมื่อ $\bar{\sigma}$ = ความเค้นอัด

$\bar{\sigma}$ = ความเค้นไหลเฉลี่ย (Mean flow stress)

A_o, A_f = พื้นที่หน้าตัดด้านทางเข้าและทางออกตาย

r_e = อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด

$$= (A_o - A_f) / A_o$$

พิจารณาค่าแก้สำหรับแรงเสียดทานภายนอก และแรงเฉือนภายในที่เกิดขึ้น สมการที่ 1 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

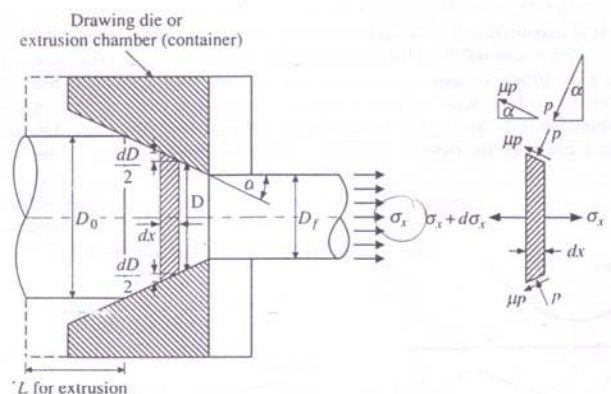
$$\sigma = C_f(\alpha) C_i(\alpha, r_e) \bar{\sigma} \ln \frac{A_o}{A_f} \quad (2)$$

$$\sigma = C_f(\alpha) C_i(\alpha, r_e) \bar{\sigma} \ln \frac{1}{1-r_e} \quad (3)$$

เมื่อ C_f = ฟังก์ชันค่าปรับแก้สำหรับแรงเสียดทานภายนอก

C_i = ฟังก์ชันค่าปรับแก้สำหรับแรงเฉือนภายใน

α = ขนาดครึ่งมุมตาย



รูปที่ 2 แสดงองค์ประกอบของความเค้นที่เกิดขึ้นบนแท่งอลูมิเนียมในช่วงความยาว dx ขณะอลูมิเนียมสัมผัสกับตาย [4]

จากแผนภาพสมดุลแรงในรูปที่ 2 สามารถเขียนสมการผลรวมของแรงในแนวแกน x ได้ คือ

$$(\sigma_x + d\sigma_x) \frac{\pi}{4} (D + dD)^2 - \sigma_x \frac{\pi}{4} D^2 + \dots \quad (4)$$

$$+ p \left(\pi D \cdot \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha + \mu p \left(\pi D \cdot \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha = 0$$

และถ้าไม่คิดผลของเทอมที่มีค่าน้อย สมการจะลดรูปได้ดังนี้

$$D d\sigma_x + 2[\sigma_x + p(1 + \mu \cot \alpha) dD] = 0 \quad (5)$$

$$2r dr \sigma_x + r^2 d\sigma_x + 2p r dr + \frac{2r dr \cdot \tau}{\tan \alpha} = 0 \quad (6)$$

เมื่อ D, r คือเส้นผ่านศูนย์กลางและรัศมีของช่วงความยาว dx

p คือแรงปฏิกริยาระหว่างตายและแท่งอลูมิเนียม
 μ คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส
 τ คือความเค้นเฉือนจากแรงเสียดทาน

ในทำนองเดียวกัน พิจารณาผลรวมของแรงในแนวรัศมี จะได้ความเค้นที่จะทำให้ตายแตก (die-breaking stress) แสดงในสมการที่ 7 จัดรูปสมการใหม่ และไม่คิดเทอมที่มีค่าน้อยจะได้ความเค้นในแนวรัศมีแสดงในสมการที่ 8 คือ

$$\sigma_r \left(\pi D dx \right) + \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha - \mu p \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha = 0 \quad (7)$$

$$\sigma_r = -p(1 - \mu \tan \alpha) \quad (8)$$

ในกรณีที่มุมมีขนาดเล็ก $\mu \tan \alpha$ ไม่จำเป็นต้องนำมาคิดจะได้ $\sigma_r = -p$ และถ้าให้ $B = \mu \cot \alpha$ เมื่อทำการอินทิเกรตผลลัพธ์สมการเชิงอนุพันธ์และจัดรูปสมการใหม่ให้ง่ายขึ้น จะได้สมการความเค้นอัดเฉลี่ยเป็น

$$\frac{\sigma}{\sigma} = \left[1 + \frac{1}{B} \right] \left\{ 1 - \left[\frac{D_o}{D_f} \right]^{2B} \right\} \quad (9)$$

เมื่อ $B = \mu \cot \alpha$
 $D_o, D_f =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป

3. การทดลอง

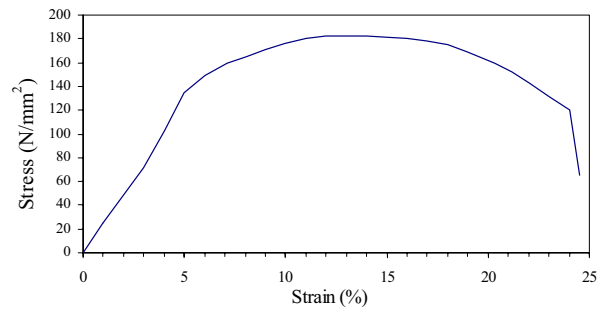
3.1 การเตรียมชิ้นงานในการทดลอง

อลูมิเนียม 6063 เป็นวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมชนิดนี้แสดงในตารางที่ 1 วัสดุก่อนการทดลองนั้นได้ทำการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกล โดยทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบวัสดุ Testometric Testing Machine รับโหลดสูงสุด 10 ตัน ชิ้นงานทดสอบใช้ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Matrial (ASTM) ความยาวชิ้นงานทดสอบ (gauge length) 40 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ความเร็วในการดึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดสอบได้แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 3 ได้ค่า Yield stress เท่ากับ $\sigma_y = 140 \text{ MPa}$

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเป็น แท่งอลูมิเนียมหน้าตัดกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร ถูกตัดเป็นชิ้นสั้นๆ ในแต่ละชิ้นมีความยาว 20 มิลลิเมตร และก่อนทำการดันขึ้นรูป จะเคลือบผิวแท่งอลูมิเนียมด้วยสารหล่อลื่น จากนั้นนำแท่งอลูมิเนียมที่ถูกเคลือบผิวด้วยสารหล่อลื่นนี้ไปใส่ไว้ในเบ้าประคอง (container) เพื่อทำการดันขึ้นรูป

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบหลักของ AI 6063

ส่วนผสม (wt%)				
Cu	Mg	Si	Cr	Al
0.27	1.0	0.6	0.2	REM



รูปที่ 3 Stress-strain curve ของ AI 6063

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองนี้ ประกอบไปด้วย ชุดจับยึดตาย (die holder) เบ้าประคองแท่งอลูมิเนียม (container) ตัวกด (punch) และตาย แสดงไว้ในรูปที่ 4 และ รูปที่ 5 ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดนี้ทำด้วยเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ซึ่งเป็นวัสดุสำหรับทำแม่พิมพ์ขึ้นรูปแบบเย็น ซึ่งตัวกดและตาย ได้ผ่านกระบวนการอบชุบเพื่อให้มีความแข็งแรงและความแข็งแรงมากขึ้น ทนต่อการสึกหรอที่เกิดจากกระบวนการดันขึ้นรูป และมีอายุการใช้งานนาน ค่าความแข็งของตัวกดและตาย ภายหลังการอบชุบแล้วมีค่าเท่ากับ 60 HRC

สารหล่อลื่นที่ใช้ในการดันขึ้นรูปในการทดลองนี้ คือ Sodium stearate soap ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นชนิดผงที่ใช้ในอุตสาหกรรมการดึงและดันขึ้นรูปโลหะเพื่อลดความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ในตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติเฉพาะของสารหล่อลื่นชนิดนี้



รูปที่ 4 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง Die holder, container, ring holder และ punch

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเฉพาะของ Sodium stearate soap (Na-ST)

SPECIFICATION	
FREE FATTY ACID	2% MAX
APPEARANCE	WHITE POWDER
FREE ALKALI	2% MAX
SODIUM CONTENT	7.5-8.5 %
MELTING POINT	> 200°C
LOSS OF MOISTURE AT 105° C	8 % MAX

ชุดตายที่ใช้ในการทดลองมีขนาดครึ่งมุดตาย (α) 2 มุดคือ (1) ครึ่งมุด 22.5 องศา โดยมีอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 4 ขนาด คือ 20 30 35 และ 43% (2) ครึ่งมุด 30 องศา โดยมีอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 41%



รูปที่ 5 ชุดตาย ครึ่งมุด 22.5 และ 30 องศา

3.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

ในการทดสอบคุณสมบัติค่าความแข็งของอลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูปจากการทดลองนี้ ทำการทดสอบและวัดโดย เครื่องทดสอบความแข็ง Micro Vickers Hardness Testing (Vickers scale HV) น้ำหนักกด 0.3 กิโลกรัม ใช้เวลาทดสอบ 10 วินาที ซึ่งเหตุผลที่ใช้เนื่องจากรอยกดมีขนาดเล็กสามารถวัดค่าความแข็งได้อย่างละเอียดบนพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน

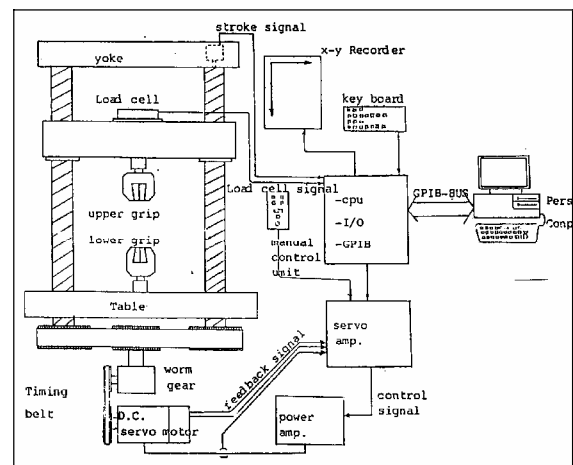
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองขึ้นรูป ค่าความเค้นเฉลี่ยในการดันขึ้นรูป (extrusion stress) แสดงผลไว้ในรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ซึ่งในรูปเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเค้นเฉลี่ยในการดันขึ้นรูปกับระยะทางการเคลื่อนที่ของตัวกดและค่าความเค้นที่คำนวณได้จากสมการที่ 9 โดยที่ค่าความเค้นเฉลี่ยในการดันขึ้นรูปนี้ได้จากเครื่องทดสอบวัสดุ ซึ่งรับแรงจากตัวกดผ่านทางโหลดเซลล์ และประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์ ให้เปลี่ยนเป็นความเค้นขณะดันขึ้นรูป โดยในรูปที่ 6 และ 7 แสดงเครื่องทดสอบวัสดุและไดอะแกรมการทำงานของเครื่องทดสอบวัสดุ รูปที่ 8 เป็นการดันขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุดตาย 22.5 องศา ในอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่างกัน 4 ขนาด พบว่าความเค้นเฉลี่ยในการดันขึ้นรูปมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากขึ้น โดยค่าความเค้นเฉลี่ยในดันขึ้นรูปสูงสุดที่เกิดขึ้นในอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 30 35 และ 43% คือ 254 318 330 และ 452 N/mm² ตามลำดับ และในรูปที่ 9 เป็นการดันขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุดตาย 30 องศา ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 41% ค่าความเค้นเฉลี่ยในการดันขึ้นรูปสูงสุดคือ 440 N/mm² และเมื่อนำผลที่ได้จากรูปที่ 8 และรูปที่ 9 มาเปรียบเทียบกับสมการที่ 9 พบว่าค่าความเค้นอัดที่ได้จากสมการที่ 9 มีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นอัดที่ได้จากการทดลอง ทั้งนี้เพราะในสมการที่ 9 นั้น ไม่ได้พิจารณาถึงแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่าง แท่งอลูมิเนียมกับเบ้าประคองขณะดันขึ้นรูป จากการทดลองของ Bakhshi และ Jooybari (2002) [5] พบว่าผลเนื่องจากแรงเสียดทานนี้จะส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการ

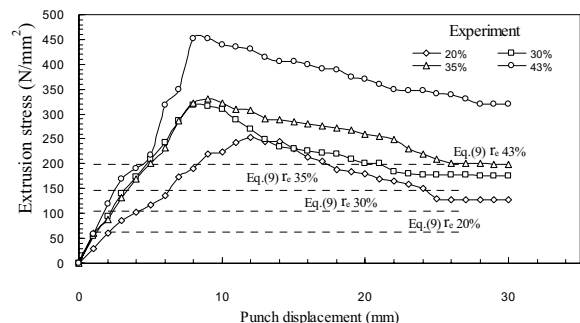
ดันขึ้นรูปด้วย คือ เมื่อความยาวของแท่งอลูมิเนียมมาก ผิวสัมผัสระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับเบ้าประคองก็จะมากขึ้นตาม ทำให้มีแรงเสียดทานมาก แรงเสียดทานนี้จึงส่งผลโดยตรง ทำให้แรงและความเค้นที่ใช้ในการดันขึ้นรูปมากขึ้นไปด้วย ทำให้ผลที่ได้จากการทดลองและสมการที่ 9 ต่างกันค่อนข้างมาก



รูปที่ 6 ภาพด้านหน้าของเครื่องทดสอบวัสดุ

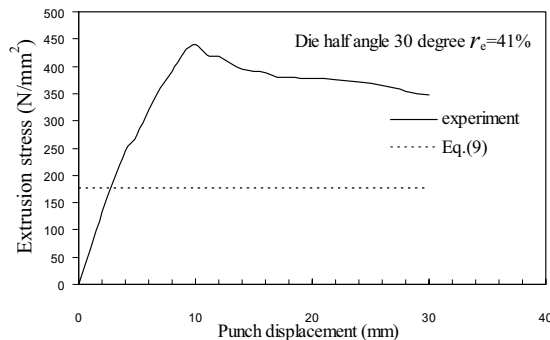


รูปที่ 7 ไดอะแกรมการทำงานของเครื่องทดสอบวัสดุ



รูปที่ 8 แสดงความเค้นในการดันขึ้นรูปที่ $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 20, 30, 35$ และ 43% เปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลอง และสมการที่ 9

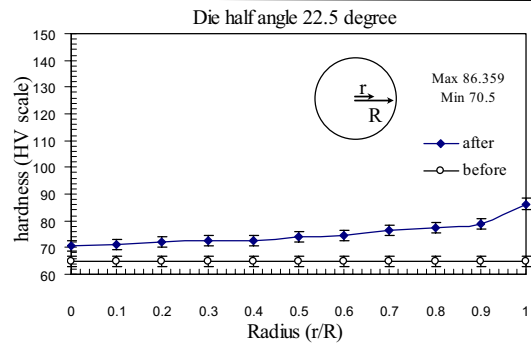
หลังจากการดันขึ้นรูป นำแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการดันขึ้นรูปแล้วไปทำการทดสอบค่าความแข็งภายในหน้าตัดเพื่อศึกษาถึง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็ง เทียบกับค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมก่อน



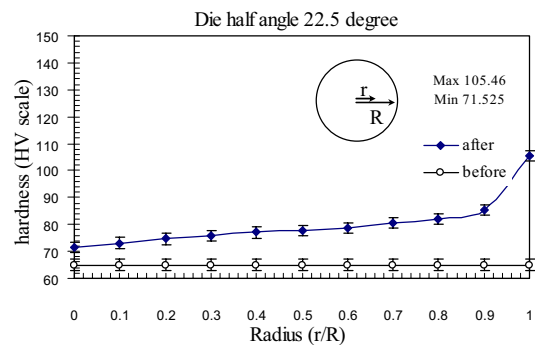
รูปที่ 9 แสดงความเค้นในการดันขึ้นรูปที่ $\alpha = 30^\circ$, $r_e = 41\%$ เปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลอง และสมการที่ 9

ทำการดันขึ้นรูป จากนั้นสร้างกราฟเพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางตามแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลาง จนถึงผิวของแท่งอลูมิเนียม (แกน x) เทียบกับค่าความแข็งที่ได้ (แกน y) แสดงในรูปที่ 10-14 โดยที่ค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมก่อนทำการดันขึ้นรูปมีค่าประมาณ 63-65 HV ทำการทดสอบโดยใช้น้ำหนักกด 0.3 กิโลกรัม เวลาในการกด 10 วินาที

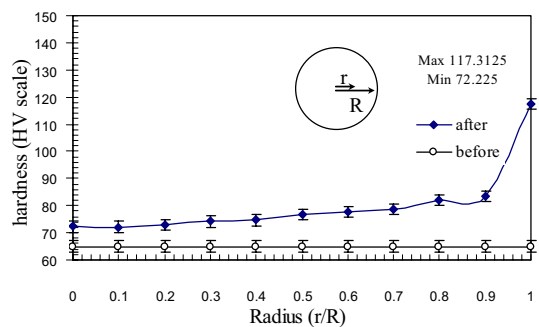
ในรูปที่ 10-13 แสดงค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการดันขึ้นรูปแล้วกับค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมก่อนทำการดันขึ้นรูป โดยทำการทดลองดันขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมตาย 22.5 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 30 35 และ 43% ตามลำดับ ผลที่ได้คือค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยค่าความแข็งนี้ไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัด แต่จะเพิ่มมากในบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมลึกเข้าไป 10-20% จากผิวเท่านั้น และค่าความแข็งที่เกิดขึ้นมากที่สุดในสภาวะครึ่งมุมตาย 22.5 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 30 35 และ 43% นี้วัดได้ที่ผิวเท่ากับ 86.3 105.4 117.3 และ 141 HV ตามลำดับ จากผลการทดลองที่ได้นี้อาจคาดคะเนได้ว่า ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดไม่มาก แท่งอลูมิเนียมจะไหลผ่านตายได้ง่าย โดยที่โครงสร้างภายในแท่งอลูมิเนียมบริเวณที่สัมผัสกับตาย เกิดการอัดตัวและเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิมเพียงเล็กน้อย ทำให้ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มไม่มากนัก แต่เมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากขึ้น แท่งอลูมิเนียมจะไหลผ่านตายผ่านได้ยากขึ้น สังเกตได้จากความเค้นอัดที่มีค่าสูงขึ้นในรูปที่ 8 ทำให้โครงสร้างภายในแท่งอลูมิเนียมบีบอัดมากขึ้นจนไหลผ่านตายจึงทำให้ค่าความแข็งมีค่ามากขึ้นตาม และสาเหตุที่ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นมากเฉพาะบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียม อาจเนื่องมาจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างตายกับผิวของแท่งอลูมิเนียมขณะดันขึ้นรูป แรงเสียดทานนี้จะทำให้เกิดบริเวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation zone) และความเค้นเฉือนภายในเนื้อวัสดุ หลังจากแท่งอลูมิเนียมถูกดันผ่านตายออกมาความเค้นเฉือนนี้จะกลับกลายเป็นความเค้นตกค้าง (residual stress) จึงทำให้ค่าความแข็งบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียม มีค่ามากกว่าบริเวณกลางหน้าตัด ในบริเวณที่แท่งอลูมิเนียมสัมผัสกับตายลึกไปในผิวโลหะเพียง 10-20% ของหน้าตัดเท่านั้น



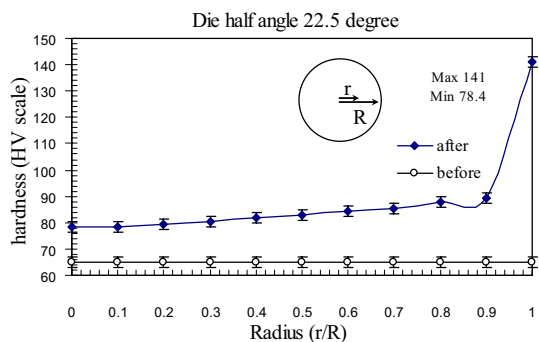
รูปที่ 10 ค่าความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป ที่สภาวะ $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$



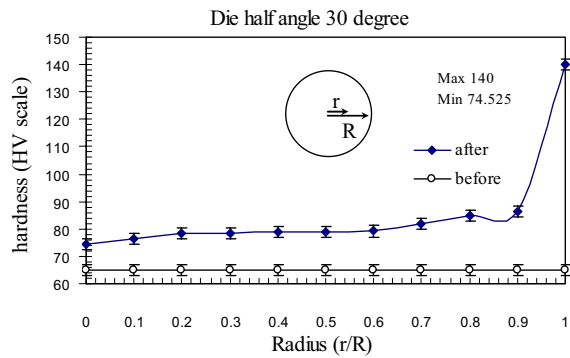
รูปที่ 11 ค่าความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป ที่สภาวะ $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 30\%$



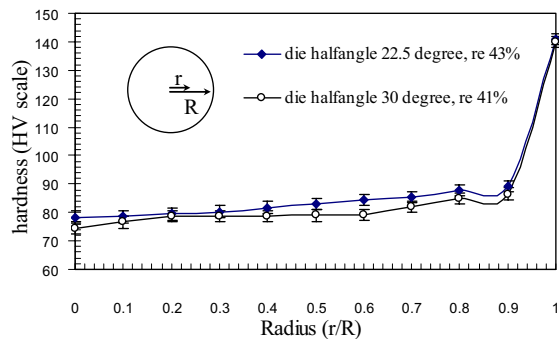
รูปที่ 12 ค่าความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป ที่สภาวะ $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 35\%$



รูปที่ 13 ค่าความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป ที่สภาวะ $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 43\%$



รูปที่ 14 ค่าความแข็งบนหน้าตัดของอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป ที่สภาวะ $\alpha = 30^\circ$, $r_c = 41\%$



รูปที่ 15 แสดงค่าความแข็งเปรียบเทียบระหว่าง ครึ่งมุมตาย 22.5 และ 30 องศา ที่มีอัตราส่วนการลดขนาดใกล้เคียงกัน

ในรูปที่ 14 เป็นผลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะครึ่งมุมตาย 30 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 41% ค่าความแข็งที่วัดได้สูงสุดเกิดขึ้นที่ผิว มีค่าเท่ากับ 140 HV เช่นเดียวกับที่สภาวะครึ่งมุมตาย 22.5 องศา คือความแข็งไม่ได้เพิ่มขึ้นเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัดของอลูมิเนียม ส่วนในรูปที่ 15 เป็นการเปรียบเทียบความแข็งที่ขนาดครึ่งมุมตายต่างกัน แต่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดใกล้เคียงกันคือที่ครึ่งมุมตาย 22.5 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 43% และ ครึ่งมุมตาย 30 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 41% จากผลการทดลองที่ได้ พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดของมุมตายขึ้นแต่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดใกล้เคียงกัน ค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมที่ได้ก็ใกล้เคียงกัน คือ มีค่าความแข็ง 141 และ 140 HV ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันเพียง 1 HV เท่านั้น ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นแนวโน้มว่า ขนาดของครึ่งมุมตายไม่ทำให้ค่าความแข็งในแท่งอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นตาม หากอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดยังคงเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองดันขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียมที่สภาวะอุณหภูมิห้อง เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าความเค้นในการดันขึ้นรูป และค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียม โดยในการทดลองทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 4 ขนาด คือ 20 30 35 และ 43% ที่มุมตาย 22.5 องศา และ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 41% ที่

มุมตาย 30 องศา จากผลการทดลองพบว่าขนาดของอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่มากขึ้น ทำให้ค่าความเค้นในการดันขึ้นรูปมีค่ามากขึ้นตาม แต่เมื่อนำค่าความเค้นที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าความเค้นที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 9 ซึ่งในสมการที่ 9 นั้นไม่คิดแรงเสียดทานขณะดันขึ้นรูประหว่างแท่งอลูมิเนียมกับเบ้าประกอบ ทำให้ผลที่ได้จากการทดลองและสมการที่ 9 มีค่าต่างกันค่อนข้างมาก อันเนื่องมาจากแรงเสียดทานดังกล่าว และในส่วนของคุณค่าความแข็งในแท่งอลูมิเนียม หลังจากการทดลองดันขึ้นรูปที่ขนาดมุมตาย 22.5 องศา พบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจากเดิม เมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบที่ขนาดมุมตายต่างกันคือที่มุม 22.5 และ 30 องศา แต่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดใกล้เคียงกัน ค่าความแข็งที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปได้ว่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าความเค้นในการดันขึ้นรูปในการทดลองนี้ คือ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด และมุมตาย ส่วนในกรณีค่าความแข็ง ขนาดของมุมตาย 22.5 และ 30 องศา ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งของชิ้นงานในกรณีนี้ เพื่อให้ทราบถึงแนวโน้มของค่าความแข็งให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบที่ขนาดของมุมตายให้มีขนาดแตกต่างกันมากๆที่อัตราส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัด ที่เท่าๆกัน ซึ่งทางผู้เขียนเห็นว่าควรจะนำไปเป็นงานวิจัยเพิ่มเติมในภายหลังต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บ.อิมพีเรียล อินดัสเตรียล เคมิคัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนสารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง และคณะอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาแนะนำจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Avitzur, Metal Forming Processes and Analysis, McGraw-Hill, New York, 1986
- [2] M. Noorani, and S.J. Hosseinipour, "Experimental and numerical study of optimal die profile in coldforward rod extrusion of aluminum", Journal of Materials Processing Technology, 2005, pp. 1572-1577.
- [3] S.O. Onuh, M. Ekoja, and M.B. Adeyemi, "Effect of die geometry and extrusion speed on the cold extrusion of aluminum and lead alloy", Journal of Materials Processing Technology, 2002, pp.274-285.
- [4] Edward M. Mielnik, Metalworking Science and Engineering, McGraw-Hill, New York, 1991, pp. 397-463.
- [5] M. Bakhshi, "A theoretical and experiment study of friction in metal forming by the used of the forward extrusion process", Journal of Materials Processing Technology, 2002, pp. 369-374.