

การศึกษาอิทธิพลของลักษณะพอกเก็ตแม่พิมพ์ต่อความเร็วในกระบวนการอัดรีด

อลุมิเนียม 6063

Study of Effects of Pocket Die Dimension on Velocity in Extrusion of Aluminum 6063

อนุพงศ์ พรหมสวรรค์* สุรังสี เดชเจริญ ศศิธร พิทักษ์ฐานพงษ์

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

*E-mail: kangmpe@yahoo.com

Anupong Promsawan Surangsee Dechjarern Sasithon Pitakthapanaphong

Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok,

Bangsue, Bangkok 10800

*E-mail: kangmpe@yahoo.com

บทคัดย่อ

ในกระบวนการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดในอุตสาหกรรมนั้น ส่วนใหญ่ใช้ประสบการณ์ของผู้ออกแบบและการลองผิดลองถูกเป็นหลัก ซึ่งวิธีการนี้มีค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานานในการผลิตแม่พิมพ์อัดรีด งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาอิทธิพลของลักษณะแม่พิมพ์ที่มีต่อการไหลของอลูมิเนียมในการอัดรีด โดยศึกษาจากการจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ เพื่อนำผลการศึกษา ไปปรับใช้เพื่อช่วยแก้ปัญหาและเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตในอุตสาหกรรมได้ ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้คุณสมบัติของอลูมิเนียม 6063 ในการจำลองการอัดรีด ตัวแปรที่ศึกษาคือ มุมพอกเก็ต อัตราส่วนการอัดรีด ความเร็วอัดรีดเข้า และปริมาตรของพอกเก็ต โดยศึกษาแม่พิมพ์อัดรีด 2 แบบ ผลที่ได้แสดงว่าอัตราส่วนการอัดรีด และมุมพอกเก็ตมีผลต่อความเร็วอัดรีดออก ส่วนความเร็วอัดรีดเข้า และปริมาตรพอกเก็ตนั้นจะมีผลต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอลูมิเนียมที่ถูกอัดรีด

คำหลัก : การอัดรีด พอกเก็ต อลูมิเนียม แม่พิมพ์

Abstract

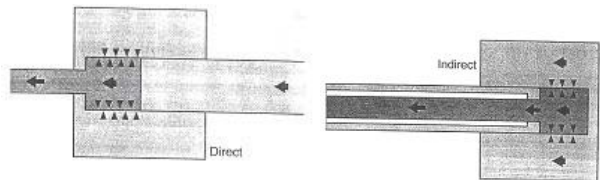
The design process of extrusion die in manufacturing is based on designer's experience and using trials and errors. This requires high level of resources including time and expense. This study aims to understand the extrusion process and the effects of pocket design parameters on the extrudate velocity by systematically investigating via finite element analysis. It focuses on the extrusion of aluminium 6063. The parameters examined are pocket angle, extrusion ratio, input velocity and pocket volume. Two different profiles are investigated. It is found that

the extrusion ratio and pocket angle has strong influence on metal flow velocity. On the other hand, initial velocity and pocket volume has greater effect on damage of the extrudates.

Key words: Extrusion, Pocket, Aluminium and Die

1. หลักการและเหตุผล

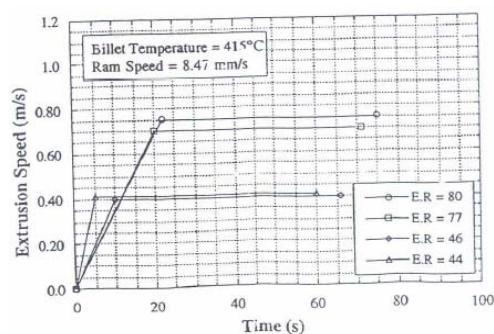
กระบวนการอัดรีดในปัจจุบันแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ การอัดรีดโดยตรง (direct extrusion) และการอัดรีดโดยอ้อม (indirect extrusion) ดังแสดงในรูปที่ 1 แต่ประเภทที่ใช้กันมากได้แก่การอัดรีดโดยตรงที่มีทั้งการอัดรีดร้อนและการอัดรีดเย็น [1-3] วัสดุที่ใช้ในการอัดรีดนั้นต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ ต้องไม่แข็งจนเกิดการแตกกระจายหรืออ่อนจนไม่สามารถขึ้นรูปได้ ส่วนประกอบในการอัดรีดที่สำคัญคือแม่พิมพ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนรูวัสดุให้เป็นตามที่ต้องการ



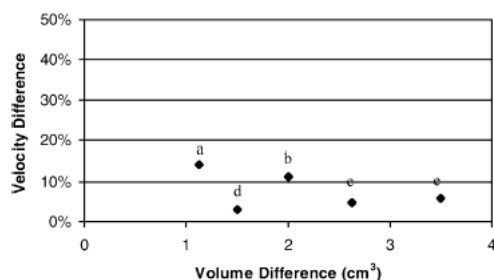
รูปที่ 1 แสดงการอัดรีดแบบโดยตรง และโดยอ้อม [2]

ในการผลิตแม่พิมพ์อัดรีดในภาคอุตสาหกรรมโดยส่วนใหญ่ยังคงเป็นการลองผิดลองถูกในการทำแม่พิมพ์ทำให้เสียทั้งเวลาทั้งค่าใช้จ่ายเป็นอันมาก ดังนั้นการศึกษารูปแบบแม่พิมพ์โดยใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์เข้าช่วยจึงมีความสำคัญ ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูของวัสดุขณะที่อยู่ในแม่พิมพ์และหลังจากออกจากแม่พิมพ์ได้แก่ คุณสมบัติการอ่อนแอของวัสดุ แรงที่ใช้อัดรีด รูปทรงของ

ช่องทางออกของแม่พิมพ์ ความเร็วในการอัดรีด และมุมของพอกเกิด (มุมของช่วงที่เกิดการเปลี่ยนรูปวัสดุ) เป็นต้น ตัวแปรต่างๆเหล่านี้สามารถนำมาวิเคราะห์ผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ โดยวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite element method: FEM) [4-5] ดังรูปที่ 2 และ 3 จะเป็นผลการวิจัยเกี่ยวกับอัตราการอัดรีดกับปริมาตรพอกเกิดที่มีผลต่อความเร็วออก เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลงานวิจัยนี้ต่อไป



รูปที่ 2 กราฟผลของความเร็วการอัดรีดที่สัมพันธ์กับความเร็วออก [3]

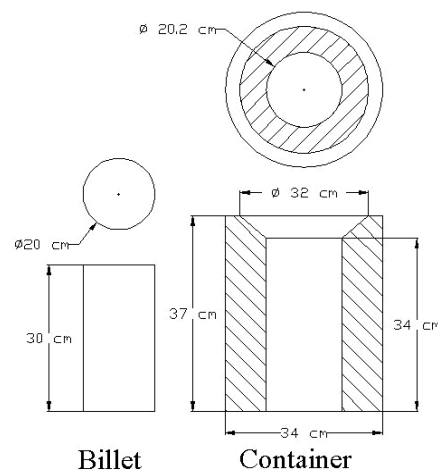


รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาตรพอกเกิดกับความเร็วที่ออก [5]

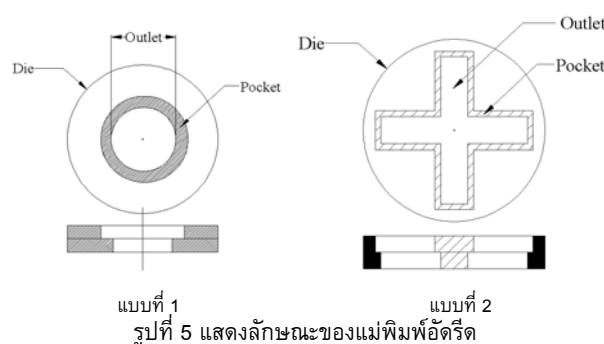
งานวิจัยที่ศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์การอัดรีดโดยใช้วิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์ทั้งแบบสองมิติ และแบบสามมิติสามารถดูได้จากผลงานวิจัยที่ [6-9] โดยงานวิจัยเหล่านี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบแม่พิมพ์ที่มีประสิทธิภาพในการอัดรีดเพิ่มมากขึ้น ในงานวิจัยที่เสนอนานี้ได้ใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ศึกษาถึงผลของตัวแปร เช่น ขนาดของพอกเกิด ปริมาณการไหลของโลหะ และมุมพอกเกิด ที่มีผลต่อชิ้นงานที่มาจาก การอัดรีดโลหะ โดยมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาการขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่มีความเสียหาย อันจะส่งผลกับต้นทุนการผลิตที่ลดลงได้ และยังสามารถต่อยอดไปสู่การขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนขึ้นได้

2. วิธีการดำเนินการ

การจำลองกระบวนการอัดรีดในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์แบบสามมิติ (ABAQUS version 6.4-1) วัสดุที่ใช้คืออลูมิเนียมชนิด 6063 ที่มีคุณสมบัติตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยกำหนดให้แท่งอลูมิเนียมทรงกระบอกยาว 30 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. ทำการลดขนาดดังรูปที่ 4 การจำลองจะเป็นลักษณะสมมาตรหนึ่งในสี่ของการอัดรีดจริงเพราะแบบจำลองสมมาตรกัน ส่วนของแม่พิมพ์กำหนดให้เป็นวัสดุแข็งเกร็งอยู่นิ่ง มีมุมของพอกเกิดเป็นแบบที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมคือแบบมาตรฐาน (Standard pocket) และใช้ลักษณะของแม่พิมพ์ 2 แบบในการจำลองดังในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ลักษณะส่วนประกอบในการอัดรีด



รูปที่ 5 แสดงลักษณะของแม่พิมพ์อัดรีด

ตารางที่ 1 : คุณสมบัติของอลูมิเนียม 6063 [2]

ความหนาแน่น	2700 kg/m ³
โมดูลัสของความยืดหยุ่น	40 GPa
สัดส่วนของปัวซอง	0.35
อัตราการยืดตัว	2.5 X 10 ⁻⁵ / °C
ความร้อนจำเพาะ	900 J/kg °C
การนำความร้อนที่ 0 องศาเซลเซียส	198 W/m °C

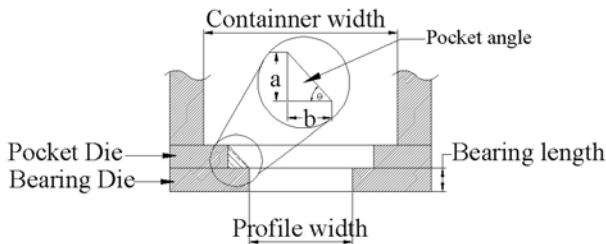
คุณสมบัติของอลูมิเนียมกำหนดให้เป็นแบบ elasto-viscoplastic โดย flow stress (σ_f) มีพฤติกรรมตามสมการที่ 1 โดยมีค่าตัวแปรตามตารางที่ 2 โดยพิจารณาที่ 3 อุณหภูมิคือ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ในการจำลองกระบวนการอัดรีดกำหนดให้มีการอุ่นแท่งอลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส สมบัติการเสียดทานระหว่างผิวของแม่พิมพ์กับแท่งวัสดุมีค่า 0.15 ระยะการอัดรีดที่ 25 ซม.

ตารางที่ 2 : ค่าตัวแปรที่ใช้ในสมการที่ 1 [8]

parameter	used
elastic properties:	
E (MPa)	40000
ν	0.35
plastic properties:	
$\dot{\epsilon}_0$ (1/s)	0.005
s_m (MPa)	25
m	5.4
A (1/s)	6 · 10 ⁹
Q (J/mol)	1.4 · 10 ⁵
R (J/molK)	8.314

$$\sigma_f(\dot{\epsilon}, T) = s_m \operatorname{arcsinh} \left(\left(\frac{\dot{\epsilon} + \dot{\epsilon}_0(T)}{A} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right) \right)^{\frac{1}{n}} \right) \quad (1)$$

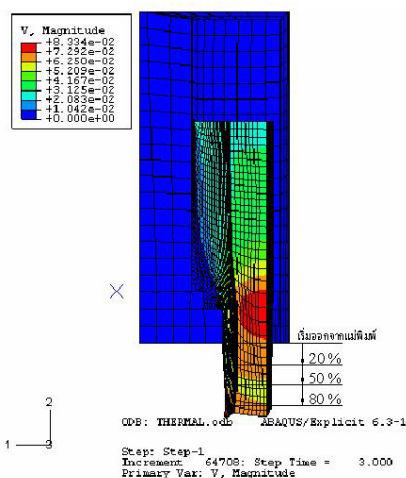
ในการจำลองการอัดรีดได้กำหนดตัวแปรที่ศึกษาดังนี้ แม่พิมพ์แบบที่ 1 ใช้อัตราส่วนการอัดรีด(Extrusion ratio = Billet cross section area / Profile cross section area) ที่ 1.43 1.47 1.49 1.54 และ 1.67 ความเร็วอัดรีดเข้าที่ 0.83 1 และ 2.5 ซม.ต่อวินาที มุมพอกเกิด (Pocket angle(θ) = $\tan^{-1}(a/b)$) ที่ 20 30 40 50 60 และ 70 องศา และ ปริมาตรพอกเกิดที่ 50 100 150 และ 200 ลบ.ซม. (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 ส่วนประกอบของพอกเกิดแม่พิมพ์อัดรีด

หลังจากได้ผลการจำลองในแม่พิมพ์แบบที่ 1 แล้วจึงนำผลที่ได้มาประมวลผลการกำหนดตัวแปรที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลความเร็วสูงที่สุดในแม่พิมพ์แบบที่ 2 ได้แก่ อัตราส่วนการอัดรีดที่ 5 และ 6 อัตราส่วนการลดขนาด (Reduction ratio = Pocket cross section area / Profile cross section area) ที่ 1.5 2 และ 3 และมุมพอกเกิดที่ 30 40 50 และ 60 องศา โดยวิธีการวัดผลความเร็วอัดรีดออกจะวัดจากความเร็วน้ำที่หน้าตัดของอลูมิเนียม ที่ถูกอัดรีดในระยะหลังออกจากแม่พิมพ์ถึงปลายดังรูปที่ 7 พร้อมทั้งตรวจสอบความเสียหายของชิ้นงานที่อัดรีด จากค่าเบี่ยงเบนของความเร็วอัดรีดออก (Deviation) ดังสมการที่ 2 โดย u คือ ค่าความเร็วแต่ละจุดวัดของอลูมิเนียมที่ถูกอัดรีด และ $\bar{u}$ คือค่าเฉลี่ยของความเร็วอัดรีดทั้งหมด

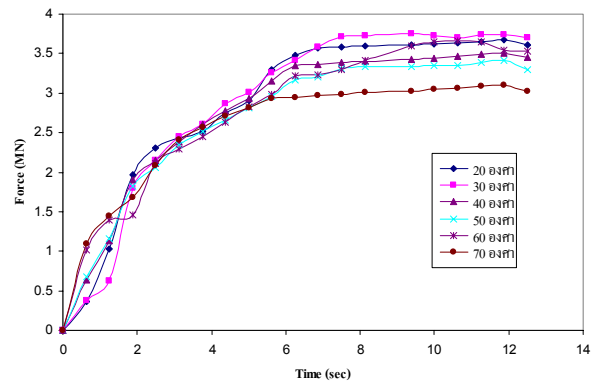
$$d(\text{deviation}) = \sum (u - \bar{u})^2 \quad (2)$$



รูปที่ 7 จุดที่วัดความเร็วอัดรีดออก

3. ผลการศึกษา

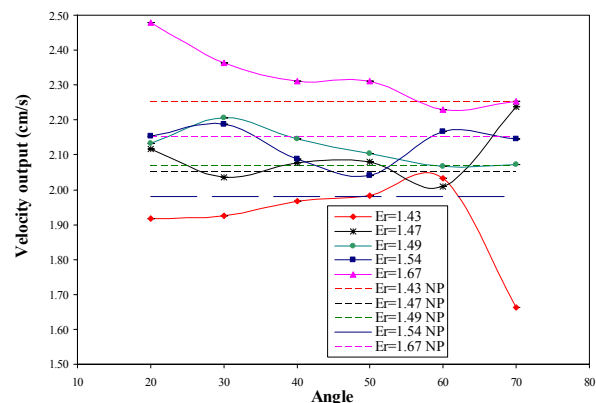
ระยะเวลาในการอัดรีดที่เป็น steady state สามารถดูได้จากกราฟแรงกับระยะเวลาการอัดรีด ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการอัดรีดกับเวลาในการอัดรีดที่มุมพอกเกิดต่างๆกันในแม่พิมพ์แบบที่ 1 (ที่อัตราส่วนการอัดรีดเท่ากับ 1.43 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 cm/s ปริมาตรพอกเกิดที่ 100 cm³)

ผลของการจำลองการอัดรีดจะแบ่งตามแบบของแม่พิมพ์เป็น 2 แบบดังต่อไปนี้ แม่พิมพ์แบบที่ 1 แบ่งผลการจำลองตามตัวแปรที่กำหนดดังนี้

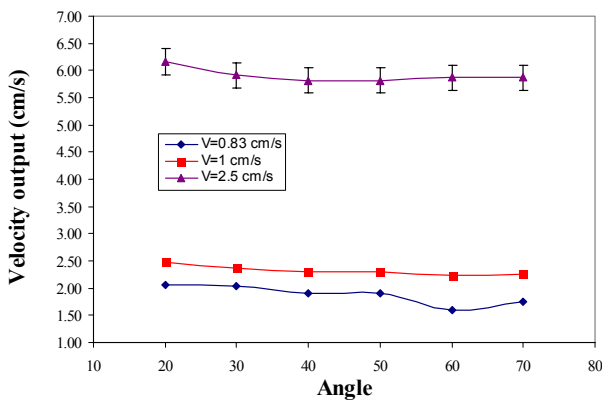
- อัตราส่วนการอัดรีด มีผลต่อความเร็วในแนวทางการแปรผันตรง คือเมื่ออัตราการอัดรีดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วอัดรีดออกเพิ่มขึ้นตาม ดังรูปที่ 9 ซึ่งผลการวิจัยของ P.K. Saha [3] ในรูปที่ 2 จะให้ผลเหมือนกับผลที่ได้จากแบบจำลองที่ศึกษาอยู่ คือที่อัตราการอัดรีดมากขึ้นจะให้ความเร็วอัดรีดออกที่เพิ่มขึ้นตาม



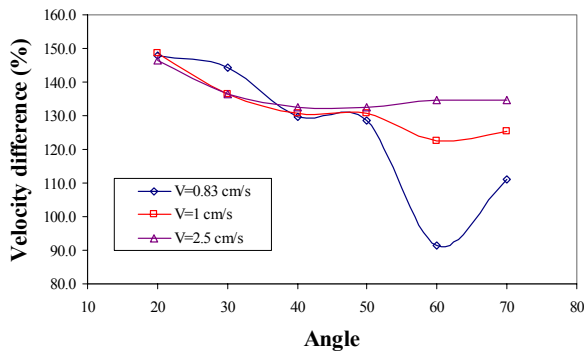
รูปที่ 9 ความเร็วของอลูมิเนียมที่ออกจากแม่พิมพ์อัดรีดกับมุมพอกเกิดที่อัตราส่วนการอัดรีดต่างๆกัน (ที่ปริมาตรช่องพอกเกิด 100 cm³ ความเร็วอัดรีดเข้า 1 cm/s)

- มุมพอกเกิด จากรูปที่ 9 มุมพอกเกิดที่ให้ความเร็วอัดรีดออกมากที่สุดคือช่วงมุมพอกเกิดระหว่าง 30-60 องศา และจากผลการวิจัยของ P.K. Saha [3] มุมพอกเกิดที่ใช้เพื่อให้ได้ความเร็วอัดรีดออกที่สูงที่สุดจะอยู่ที่ระหว่าง 60-75 องศา ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองการอัดรีด

- ความเร็วอัดรีดเข้า มีผลต่อความเร็วออก โดยเมื่อเทียบสัดส่วนแล้วความเร็วอัดรีดเข้าที่ 1 cm/s จะให้ค่าความเร็วอัดรีดออกที่มากที่สุดตามสัดส่วนการเพิ่มตามรูปที่ 10 และ 11 และการเสียหายของชิ้นงานที่ความเร็วอัดรีดเข้าที่ 2.5 cm/s นั้นมีความเสียหายของชิ้นงานมากที่สุดจากเส้นแนวโน้มที่แสดงในรูปที่ 10 ต่างกับอีก 2 ค่าความเร็วที่มีความเสียหายของชิ้นงานน้อยมาก ซึ่งคล้ายกับผลวิจัยของ G. Lee [4] ความเร็วอัดรีดเข้าจะส่งผลต่อความเสียหายชิ้นงาน โดยที่ความเร็วอัดรีดเข้าที่สูงจะทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายได้ แต่ความเร็วที่เหมาะสมจะไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายและยังให้ความเร็วอัดรีดออกที่มากขึ้นด้วย

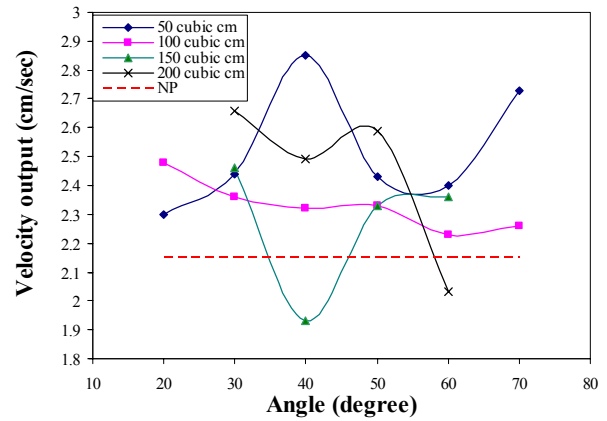


รูปที่ 10 ความเร็วออกกับมุมพอกเกิด ที่ความเร็วการอัดรีดที่ต่างกัน (อัตราส่วนการอัดรีด 1.43 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 cm/s ปริมาตรช่องพอกเกิด 100 cm³)

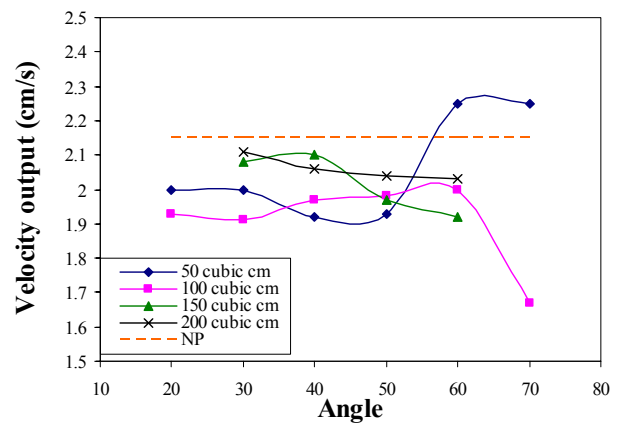


รูปที่ 11 ความเร็วออกกับมุมพอกเกิด ที่ความเร็วการอัดรีดออกที่ต่างกัน (อัตราส่วนการอัดรีด 1.67 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 cm/s ปริมาตรช่องพอกเกิด 100 cm³)

- ปริมาตรพอกเกิดของแม่พิมพ์ จากรูปที่ 12 และ 13 แสดงว่าปริมาตรนั้นไม่ได้มีผลต่อความเร็วอัดรีดออก ผลที่ได้คล้ายกับผลการวิจัยของ Q. Li [5] ตามรูปที่ 3 คือปริมาตรพอกเกิดไม่ได้ส่งผลต่อความเร็วอัดรีดออกที่ได้ แต่เมื่อคิดค่าความเบี่ยงเบนความเร็วของปริมาตรพอกเกิดในตัวแปรต่างๆ พบว่าค่าความเบี่ยงเบนมีค่ามากที่ปริมาตรพอกเกิด 50 cm³ และจะมีค่าน้อยหรือเกิดการเสียหายของชิ้นงานอัดรีดน้อยที่สุด ที่ปริมาตรส่วนพอกเกิด 100 cm³

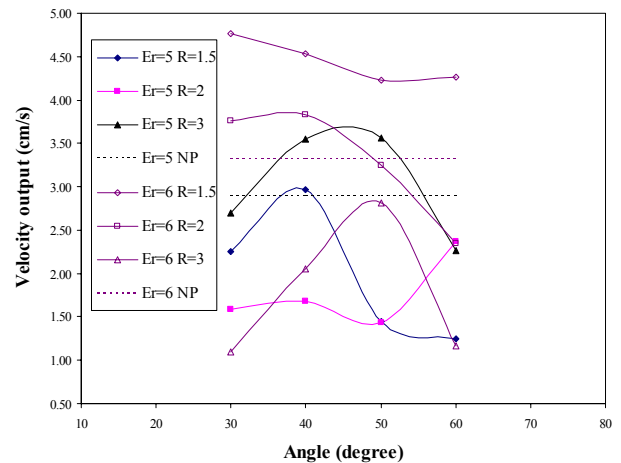


รูปที่ 12 ความเร็วออกของอลูมิเนียมกับมุมพอกเกิด โดยสังเกตปริมาตรช่องพอกเกิดที่ต่างกัน (ที่อัตราส่วนการอัดรีด 1.43 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 cm/s)



รูปที่ 13 ความเร็วออกของอลูมิเนียมกับมุมพอกเกิด โดยสังเกตปริมาตรช่องพอกเกิดที่ต่างกัน (ที่อัตราส่วนการอัดรีด 1.67 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 cm/s)

หลังจากได้ผลของแบบที่ 1 แล้วทำการเปลี่ยนลักษณะแม่พิมพ์เป็นแบบที่ 2 ได้ผลดังนี้

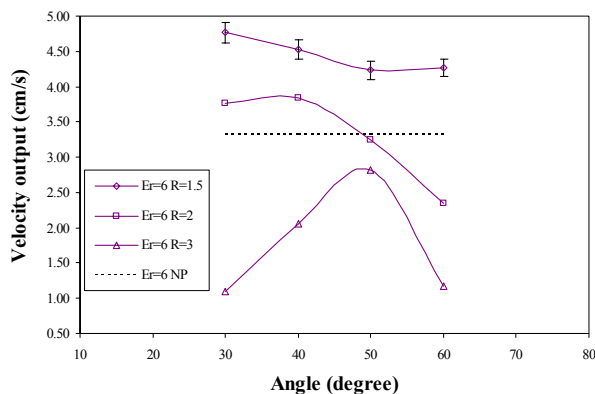


รูปที่ 14 ผลของตัวแปรต่างๆในแม่พิมพ์แบบที่ 2

- มุมพอกเกิด จากความเร็วที่ปรากฏในรูปที่ 14 จุดที่มีความเร็วมากที่สุดในแต่ละตัวแปรจะอยู่ที่ระหว่างมุม 40-50 องศา แสดงว่ามุมพอกเกิดที่ทำให้ความเร็วอัตราเร็วออกมีค่ามากที่สุด จะอยู่ในช่วงมุมพอกเกิดที่ 40-50 องศา

- อัตราส่วนการอัดรีด ในส่วนผลของตัวแปรนี้จากรูปที่ 14 จะมีลักษณะคล้ายกับของแม่พิมพ์แบบที่ 1 คืออัตราส่วนการอัดรีดจะแปรผันตรงกับความเร็วอัตราเร็วออก

- อัตราส่วนการลดขนาด จากผลในรูปที่ 15 ของอัตราส่วนการลดขนาดที่น้อยนั้นจะทำให้เกิดค่าความเบี่ยงเบนของความเร็วที่มากคือมีโอกาสที่ชิ้นงานจะเสียหายมากกว่าอัตราส่วนการลดขนาดที่มีค่ามาก



รูปที่ 15 ผลการศึกษาเทียบกับ อัตราส่วนการอัดรีด และอัตราส่วนการลดขนาด ในมุมพอกเกิดที่กำหนด (ความเร็วการอัดรีดเข้าที่ 1 cm/s อัตราการอัดรีดที่ 6)

4. สรุปผลการวิจัย

ในการจำลองการอัดรีดในแม่พิมพ์ทั้งสองแบบที่ได้แสดงพบว่า

1. ในแม่พิมพ์แบบที่ 1 เมื่อสังเกตพบว่าสามารถแยกตัวแปรเป็น 2 ชนิดตามผลที่ได้จากตัวแปรคือตัวแปรที่มีผลต่อความเร็วได้แก่ อัตราส่วนการอัดรีด และ มุมพอกเกิด ส่วนตัวแปรที่มีผลต่อความเสียหายของอลูมิเนียมที่อัดรีดได้แก่ ความเร็วอัตราเร็วเข้า และ ปริมาตรส่วนพอกเกิดของแม่พิมพ์

2. เมื่อนำผลที่ได้มากำหนดตัวแปรในแม่พิมพ์แบบที่ 2 ทำให้สามารถกำหนดตัวแปรที่มีให้ความเร็วอัตราเร็วออกมากที่สุด คือมุมพอกเกิดที่ 40-50 องศา และอัตราส่วนการอัดรีดที่ 6 ส่วนตัวแปรที่ทำให้ความเสียหายเกิดขึ้นน้อยหรือไม่เกิดคือความเร็วอัตราเร็วเข้าที่ 1 cm/s และหลีกเลี่ยงการใช้อัตราส่วนการลดขนาด หรือปริมาตรส่วนของพอกเกิดที่ 1.5

จากการจำลองทั้งสองแบบ ทำให้สามารถกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบได้ 3 ตัวแปรได้แก่ ความเร็วอัตราเร็วเข้าที่ประมาณ 1 cm/s, มุมพอกเกิดประมาณ 40-50 องศา และหลีกเลี่ยงการใช้อัตราส่วนการลดขนาดที่น้อย แต่อัตราส่วนการอัดรีดนั้นจะถูกกำหนดโดยแบบที่จะใช้อัดรีดอลูมิเนียมแล้ว จึงไม่สามารถที่จะออกแบบได้เองแต่ก็ควรที่จะมีค่ามากไว้

ข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปปรับใช้กับงานอัดรีดจริง หรือนำไปปรับใช้ในแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้ เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์กับอุตสาหกรรมอัดรีดต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เอกสารอ้างอิง

- [1] O.O. Onawola and M.B. Adeyemi, "Warm compression and extrusion test of aluminium", Material Processing Technology, Vol.136, pp.7-11, 2003.
- [2] T. Sheppard, "EXTRUSION OF ALUMINIUM ALLOYS", Kluwer academic publishers, 1999.
- [3] P.K. Saha, "Factors affecting speed and pressure in 6063 aluminium extrusion", Aluminium Extrusion Technology, pp.39-43, 1998.
- [4] J. Gasiorczyk and J. Richert, "Application of FEM Modeling to Simulate Metal Flow Through Porthole Dies", ET 2000, pp.195-201, 2000.
- [5] Q. Li, C.J. Smith, C. Harris and M.R. Jolly, "Finite element investigations upon the influence of pocket die designs on metal flow in aluminium extrusion Part I. Effect of pocket angle and volume on metal flow", Material Processing Technology, Vol.135, pp.189-196, 2003.
- [6] Q. Li, C.J. Smith, C. Harris and M.R. Jolly, "Finite element investigations upon the influence of pocket die designs on metal flow in aluminium extrusion Part II. Effect of pocket geometry configurations on metal flow", Material Processing Technology, Vol.135, pp.197-203, 2003.
- [7] G. Lee, D. Kwak, S. Kim and Y.Im, "Analysis and design of flat-die hot extrusion process", International Journal of Mechanical Sciences, Vol.44, pp. 915-934, 2002.
- [8] J.Lof, J. Huetink, K.E. Neilsen and Boal B.V., "FEM Simulations of the Material Flow in the Bearing Area of the Aluminium Extrusion Process", ET 2000, pp.211-222, 2000.
- [9] P.K. Saha, "Thermodynamics and tribology in aluminium extrusion", Wear, Vol.218, pp.179-190, 1998.