

การวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นโดยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป Analysis of Wrinkle Behaviors Using Forming Limit Diagrams

นายชัยศ บูรณะชีพ¹ ชาญ ถนัดงาม² และ วิชิต บัวแก้ว³

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800
โทร 0-2913-2500 ต่อ 1015 อีเมลล์ chn@kmitnb.ac.th

³ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120
โทร (037)322625-35 โทรสาร (037)322609 อีเมลล์ vichitb@swu.ac.th

Chaiyos Booranacheep¹, Charn Thanadngarn², and Vichit Buakaew³

^{1,2} Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Bangsue Bangkok 10800, Thailand

Tel: โทร 0-2913-2500 ต่อ 1015 E-mail: chn@kmitnb.ac.th

³ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University,
Ongkharak, Nakhon Nayok, 26120 Thailand

Tel: (037)322625-35, Fax: (037)322609 E-mail: vichitb@swu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการย่นของการขึ้นรูปขึ้นงานจริงกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นจากการขึ้นรูปขึ้นงานโดยใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ชิ้นงานสำหรับการวิจัยนี้คือ ชิ้นส่วนยานยนต์ชื่อ Door Part ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หนา 0.6 mm. ใช้เครื่องเพรสขนาด 300 Ton ในการขึ้นรูป และโปรแกรม Hyper Work v.7.0 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการวิจัยพบว่า พฤติกรรมการย่นของการขึ้นรูปขึ้นงานจริงกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกัน พฤติกรรมการย่นของชิ้นงานขึ้นรูปขึ้นอยู่กับ แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์มากกว่า รัศมีตายและช่องว่างระหว่างพินช์และตายและแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นของชิ้นงานขึ้นรูปได้

Abstract

This research compares the wrinkle behavior of a car door part in forming process and finite element simulation. The analysis of the wrinkle part behavior is by using Forming Limit Diagram. The car door part is made of AISI 304 stainless steel with thickness of 0.6 mm. Forming Process uses a press machine with force of 300 tons and the simulation is done using Hyper Work v.7.0

The results show that the wrinkle behavior in forming process agree with finite element simulation. The wrinkle behavior depends on blank holder force rather than die radius and clearance between punch and die. The Forming Limit Diagram can be used to analyze the problem of wrinkle part in forming process.

1. บทนำ

กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นมีความสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมการผลิต โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ พารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่น เช่น ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ของรูปร่างชิ้นงาน และวัสดุชิ้นงานในช่วงเปลี่ยนรูปถาวร (Plasticity) ค่าความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานกับเครื่องมือ (Sliding Friction Contact Phenomena) เป็นต้น ความรู้เรื่องกลไกของการเปลี่ยนรูปของโลหะและผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีความสำคัญทำให้สามารถออกแบบกระบวนการขึ้นรูปโลหะได้ดีขึ้น ทำให้ช่วยลดการลองผิดลองถูก ช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย

การดึงขึ้นรูปลึก (Deep drawing) เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะที่สำคัญอย่างหนึ่ง ในกระบวนการขึ้นรูปส่วนประกอบคือ พินช์ (Punch) ตาย (Die) และ แบลงก์โฮลเดอร์ (Blank holder) การดึงขึ้นรูปลึกเป็นการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยการดึงและการกด โดยที่พินช์เคลื่อนที่กดแผ่นชิ้นงานเข้าไปในตาย เกิดความเค้นกดในแนวเส้นรอบวง และความเค้นดึงในแนวรัศมี โดยมีแบลงก์โฮลเดอร์กดที่ขอบ (Flange) ของชิ้นงาน

เพื่อควบคุมการไหลของเนื้อโลหะ (Material flow) โดยทั่วไปความเสียหายที่เกิดขึ้นในกรรมวิธีการขึ้นรูปลึกคือ การเกิดรอยย่น และการฉีกขาด (Wrinkling and Tearing)

ในการแก้รอยย่นของชิ้นงาน Door Part ซึ่งทำจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในขั้นตอนการตัดตัว มีผลทำให้ขั้นตอนการตัดขอบ (Trim) ชิ้นงานทำได้ยาก ทำให้ต้องเสียเวลาในการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อลดรอยย่น และการลองผิดลองถูก การจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) และการนำแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram) มาใช้จะช่วยลดเวลาในการวิเคราะห์พฤติกรรมของการขึ้นรูป การขึ้นรูปที่มีความซับซ้อน และลดการลองผิดลองถูกเมื่อเทียบกับการทดลอง ด้วยเหตุนี้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการนำแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram) มาวิเคราะห์พฤติกรรมของการขึ้นรูปโลหะ โดยเฉพาะพฤติกรรมรอยย่น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะแผ่น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เกณฑ์การครากของ Hill 1948[18] หาได้จากสมการ

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (1)$$

เมื่อ F, G, L, M และ N คือค่าคงที่ซึ่งแสดงคุณลักษณะแอนไอโซโทรปิก

2.2 การทำให้แข็งด้วยความเครียด

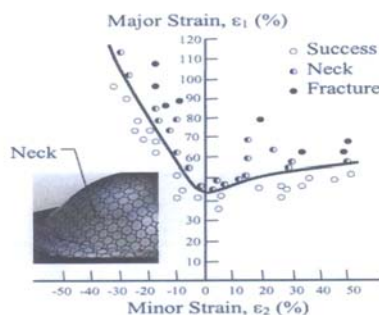
[4] การเปลี่ยนรูปทรงที่ทำให้ความต้านแรงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น หรือ การทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening) หมายถึงการเพิ่มความแข็งแรงจากการเปลี่ยนรูปเย็น ผลที่ตามมาคือสมบัติความเหนียวลดลง และความต้านแรงครากเปลี่ยนไป สมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดประสิทธิภาพที่เรียกว่ากฎยกกำลัง (Power Law) อยู่ในรูป

$$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n \quad (2)$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ความต้านแรง

n คือ เลขชี้กำลังทำให้แข็งด้วยความเครียด

2.3 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming limit diagram: FLD)



รูปที่ 1 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

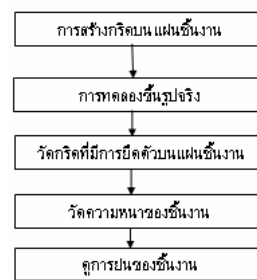
เป็นแผนภาพแสดงลักษณะการกระจายตัวของความเครียดในบริเวณต่างๆ ของชิ้นงาน แสดงขอบเขตชิ้นงานที่เกิดการย่นจุดปลอดภัยและจุดที่เสียหาย

3. วิธีดำเนินการวิจัย

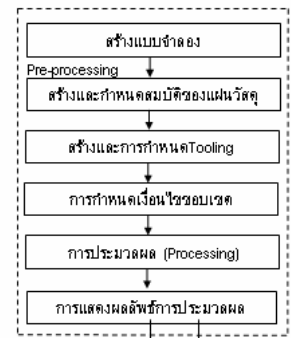
แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. การขึ้นรูปชิ้นงานจริง
2. การจำลองการขึ้นรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การขึ้นรูปชิ้นงานจริง



การจำลองการขึ้นรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



เปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองการขึ้นรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ปรับพารามิเตอร์เพื่อพฤติกรรมการแปรรูป

สรุปผลวิจัย

รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิจัย คือ

รัศมีด้ายเท่ากับ 2, 2.3 และ 3 mm

แรงกดแบบลงกิโลเดอ์เท่ากับ 15,000, 25,000, 35,000 และ 45,000 N

ช่องว่างระหว่างฟันซ์และด้ายเท่ากับ 0.70 และ 0.84 mm

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

ความหนาเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304	เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด(n)	สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (K)	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (R)			
			r_0	r_{45}	r_{90}	$\bar{r}$
0.6 mm	0.4232	1582.0	0.976	1.487	0.839	1.197

เมื่อ r_0, r_{45}, r_{90} และ $\bar{r}$ คือ อัตราส่วนของความเครียด ในแนวกว้าง

ต่อความหนา ในทิศทาง $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ และ เฉลี่ย ตามลำดับ

4. ผลการวิจัย

4.1. เปรียบเทียบพฤติกรรมการย่นและการขึ้นรูปชิ้นงานจากการทดลองกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูป คือ แรงกดแบบคงที่ไฮดรอลิก 40,000 N รัศมีตาย 2.3 mm ช่องว่างระหว่างพินซ์และตาย 0.7 mm ความเร็วในการขึ้นรูป 186 mm/s

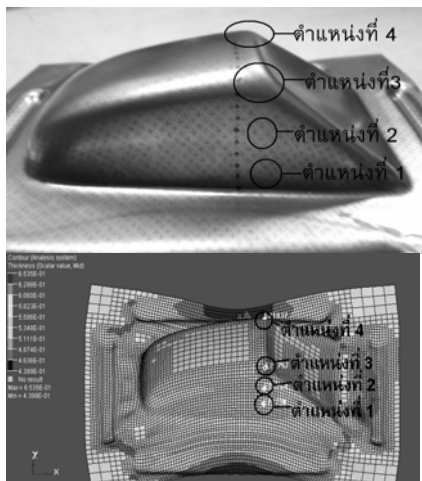
4.1.1 เปรียบเทียบการย่นของชิ้นงานจากการทดลองกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาพซ้ายแสดงลักษณะชิ้นงานจริง ส่วนภาพขวาแสดงลักษณะการจำลองจากโปรแกรมสีเทาแสดงบริเวณที่ปลอดภัย ส่วนสีดำแสดงบริเวณที่มีการย่นหรือรอยแตก สีเหลืองแสดงบริเวณที่ย่นจากการทดลองจริง เทียบกับโปรแกรม

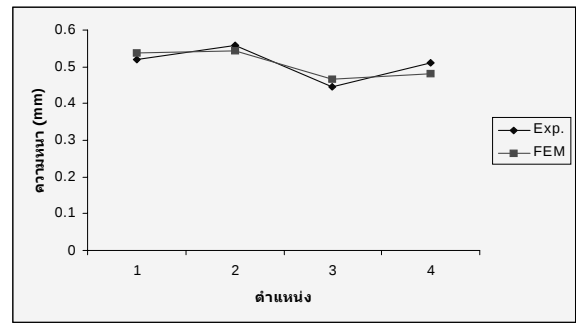


รูปที่ 3 เปรียบเทียบการย่นของชิ้นงานจากการทดลองกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1.2 เปรียบเทียบความหนาของชิ้นงานจากการทดลองกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4 แสดงตำแหน่งที่วัดความหนาของชิ้นงานจากการทดลองกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

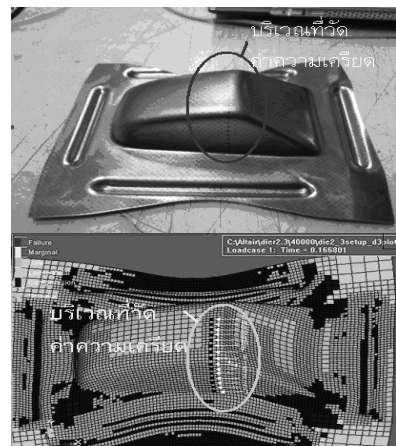


รูปที่ 5 แสดงกราฟเปรียบเทียบความหนาที่จุดต่างๆ ของชิ้นงานจากการทดลองกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

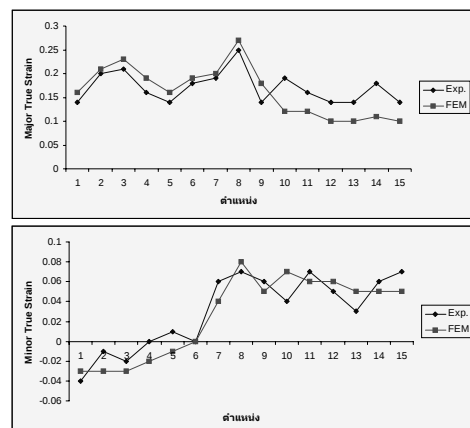
กราฟที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกับกราฟที่ได้จากการทดลองจริง โดยมีความแตกต่างกัน 3.95 %

4.1.3 เปรียบเทียบ ความเครียดหลัก (Major Strain) และ ความเครียดรอง (Minor Strain) ของชิ้นงานจากการทดลองกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการวิเคราะห์พบว่าค่า ความเครียดรองจริง (Minor True Strain) และ ความเครียดหลักจริง (Major True Strain) ของการทดลองกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกัน



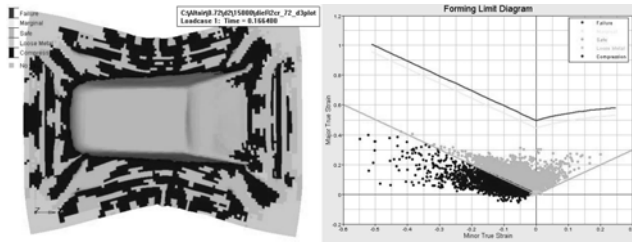
รูปที่ 6 แสดงตำแหน่งที่วัดค่าความเครียดหลักและความเครียดรอง



รูปที่ 7 กราฟแสดงค่า ความเครียดหลัก และ ความเครียดรอง

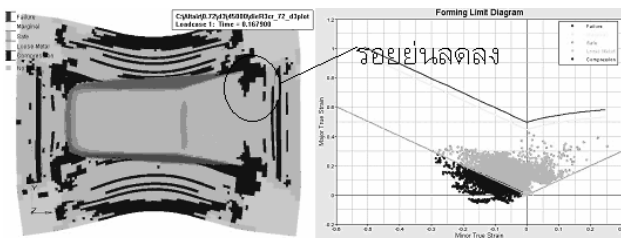
4.2 วิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.2.1 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการขึ้นรูปของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ



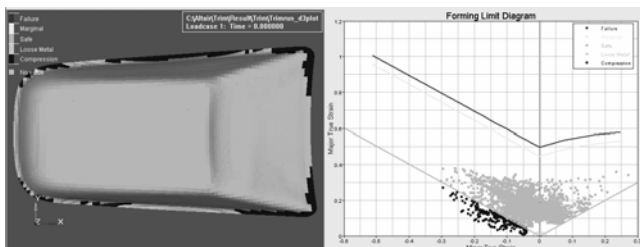
รูปที่ 8 แสดงการขึ้นรูปจากการจำลองชิ้นงานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูป คือ แรงกดแบลงก์โฮลเตอร์ 15,000 N รัศมีตาย 3 mm ช่องว่างระหว่างพินซ์และตาย 0.84 mm ความเร็วขึ้นรูป 186 mm/s ชิ้นงานมีการขึ้นบริเวณขอบชิ้นงานแบลงก์มาก และเมื่อดูแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจะพบว่า รอยยุบจะแสดงอยู่ใต้เส้นแบ่งขอบเขตการขึ้น (สีดำ) ลดลงเมื่อเทียบกับรูปที่ 10



รูปที่ 9 แสดงการขึ้นรูปจากการจำลองชิ้นงานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูป คือ แรงกดแบลงก์โฮลเตอร์ 45,000 N รัศมีตาย 2 mm ช่องว่างระหว่างพินซ์และตาย 0.7 mm ความเร็ว 186 mm/s ชิ้นงานมีการขึ้นบริเวณขอบชิ้นงานแบลงก์ลดลง และเมื่อดูแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจะพบว่า รอยยุบจะแสดงอยู่ใต้เส้นแบ่งขอบเขตการขึ้น (สีดำ) ลดลงเมื่อเทียบกับรูปที่ 8

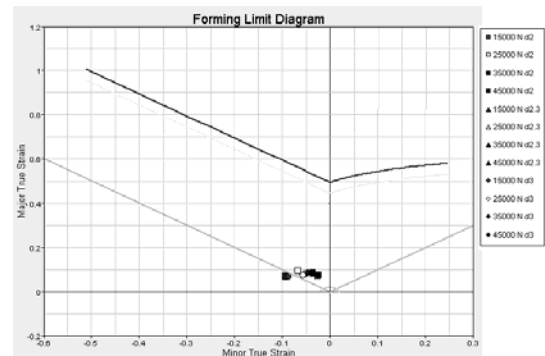


รูปที่ 10 แสดงการขึ้นรูปจากการจำลองชิ้นงานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ผ่านการตัดขอบ (Trim)

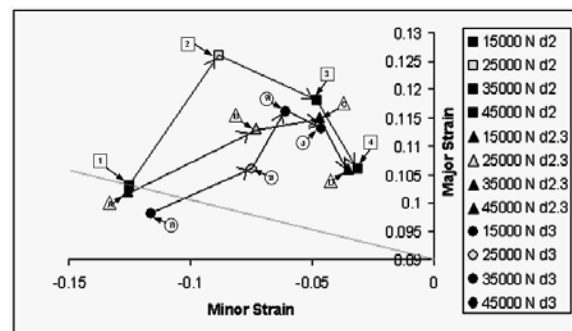
จากรูปที่ 9 นำชิ้นงานมาตัดขอบ รอยยุบยังคงเหลืออยู่ที่ขอบชิ้นงาน (ขอบชิ้นงานถูกพับขอบ (Flange) ในขบวนการขึ้นรูปสุดท้าย)

และเมื่อดูแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจะพบว่า รอยยุบจะแสดงอยู่ใต้เส้นแบ่งขอบเขตการขึ้น (สีดำ) ลดลงเมื่อเทียบกับรูปที่ 10

4.2.2 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการขึ้นรูปของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 11 แสดงบริเวณที่เกิดรอยยุบเมื่อมีการปรับแรงกดแบลงก์โฮลเตอร์ ค่าช่องว่างระหว่างพินซ์และตายเท่ากับ 0.7 mm



รูปที่ 12 ขยายรูปที่ 11 แสดงค่าความเครียดและทิศทางของบริเวณที่เกิดรอยยุบเมื่อปรับแรงกดแบลงก์โฮลเตอร์ค่าช่องว่างระหว่างพินซ์กับตายเท่ากับ 0.7 mm

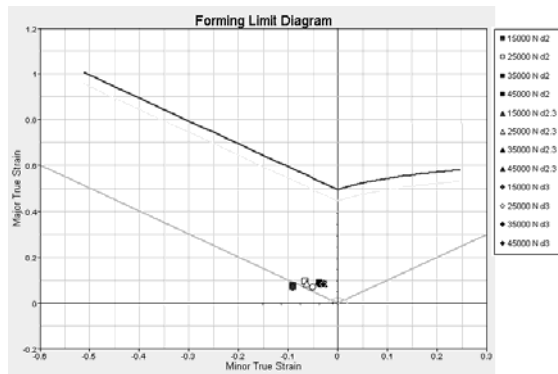
พิจารณาที่รัศมีตาย 2 mm เมื่อให้แรงกดแบลงก์โฮลเตอร์ 15,000N, 25,000N ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรอง มีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มแรงถึง 35,000N และ 45,000N ค่า ความเครียดหลัก มีค่าลดลง ความเครียดรอง มีค่าเพิ่มขึ้น

พิจารณาที่รัศมีตาย 2.3 mm เมื่อให้แรงกดแบลงก์โฮลเตอร์ 15,000N, 25,000N และ 35,000N พบว่าค่า ความเครียดหลัก และความเครียดรอง มีค่าเพิ่มขึ้น และแรงกดแบลงก์โฮลเตอร์ 45,000N ความเครียดหลักมีค่าลดลง ความเครียดรอง มีค่าเพิ่มขึ้น

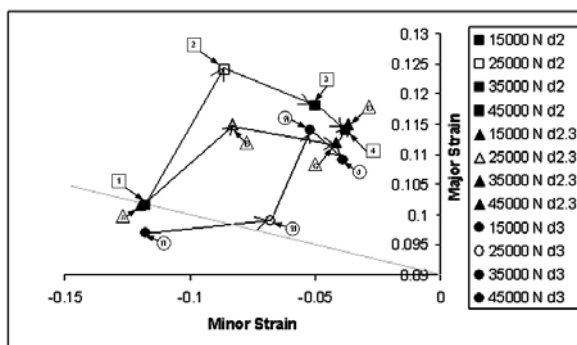
พิจารณาที่รัศมีตาย 3 mm เมื่อให้แรงกดแบลงก์โฮลเตอร์ 15,000N, 25,000N, 35,000N พบว่าค่า ความเครียดหลัก และความเครียดรอง มีค่าเพิ่มขึ้น และให้แรงกดแบลงก์โฮลเตอร์ 45,000N ค่า ความเครียดหลัก มีค่าลดลง ความเครียดรอง มีค่าเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 12 พบว่าแนวโน้มส่วนใหญ่เมื่อเพิ่มแรงกดแบลงก์โฮลเตอร์ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4 ดายรัศมี 2 mm ตำแหน่ง ก, ข, ง ดายรัศมี 2.3 mm และตำแหน่ง A, B, C, D ดายรัศมี 3 mm พลอตในแผนภาพ

ขีดจำกัดการขึ้นรูปมีแนวโน้มสูงขึ้นและลดลงไปทางด้านขวาของแผนภาพและที่แรงกดแบลงก์ไฮดรอล 15,000N ค่าความเครียดที่พลอตในแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปมีค่าต่ำกว่าเส้นแบ่งขอบเขตการย่นเส้นสี่เหลี่ยมและเมื่อเพิ่มแรงกดแบลงก์ไฮดรอลพบว่าค่าความเครียดอยู่ในบริเวณที่ปลอดภัย



รูปที่ 13 แสดงบริเวณที่เกิดรอยย่นเมื่อมีการปรับแรงกดแบลงก์ไฮดรอล ค่าช่องว่างระหว่างพินซ์และตายเท่ากับ 0.84 mm



รูปที่ 14 ขยายรูปที่13แสดงค่าความเครียดและทิศทางของบริเวณที่เกิดรอยย่นเมื่อปรับแรงกดแบลงก์ไฮดรอลค่าช่องว่างระหว่างพินซ์กับตายเท่ากับ 0.84 mm

พิจารณาที่รัศมีตาย 2 mm เมื่อให้แรงกดแบลงก์ไฮดรอล 15,000N, 25,000N ค่าความเครียดหลัก และ ความเครียดรอง มีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มแรงถึง 35,000Nและ45,000N ค่า ความเครียดหลัก มีค่าลดลง ความเครียดรอง มีค่าเพิ่มขึ้น

พิจารณาที่รัศมีตาย 2.3 mm เมื่อให้แรงกดแบลงก์ไฮดรอล 15,000N, 25,000N พบว่าค่า ความเครียดหลัก และ ความเครียดรอง มีค่าเพิ่มขึ้น และ 35,000N พบว่าค่า ความเครียดหลัก มีค่าลดลงและความเครียดรอง มีค่าเพิ่มขึ้น และแรงกดแบลงก์ไฮดรอล 45,000N ความเครียดหลัก และ ความเครียดรอง มีค่าเพิ่มขึ้น

พิจารณาที่รัศมีตาย 3 mm เมื่อให้แรงกดแบลงก์ไฮดรอล 15,000N, 25,000N, 35,000N พบว่าค่า ความเครียดหลัก และ ความเครียดรอง มีค่าเพิ่มขึ้น และให้แรงกดแบลงก์ไฮดรอล 45,000N ค่า ความเครียดหลัก มีค่าลดลง ความเครียดรอง มีค่าเพิ่มขึ้น

จากรูปที่14 พบว่าแนวโน้มส่วนใหญ่เมื่อเพิ่มแรงกดแบลงก์ไฮดรอลตำแหน่งที่1,2,3,4ตายรัศมี 2 mm ตำแหน่ง ก,ข,ค,ง ตายรัศมี 2.3 mm และตำแหน่ง A,B,C,D ตายรัศมี 3 mmพลอตในแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปมีแนวโน้มสูงขึ้นและลดลงไปทางด้านขวาของแผนภาพและที่แรงกดแบลงก์ไฮดรอล 15,000N ค่าความเครียดที่พลอตในแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปมีค่าต่ำกว่าเส้นแบ่งขอบเขตการย่นเส้นสี่เหลี่ยมและเมื่อเพิ่มแรงกดแบลงก์ไฮดรอลพบว่าค่าความเครียดอยู่ในบริเวณที่ปลอดภัย

5. สรุปผลการวิจัย

5.1 ค่า ความเครียดจริง และ ความเครียดหลักจริง จากการทดลองกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกัน

5.2 การวิเคราะห์หาค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่าง การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง บริเวณที่วัดความหนา 4 จุด มีค่าสอดคล้องกัน มีเปอร์เซ็นต์แตกต่างกัน 3.95%

5.3 เกิดรอยย่นมากที่สุดที่แรงกดแบลงก์ไฮดรอล 15,000 N

5.4 เกิดรอยย่นแผ่นแบลงก์น้อยที่สุดที่แรงกดแบลงก์ไฮดรอล 45,000 N รัศมีตาย 2 mm ค่าช่องว่างระหว่างพินซ์และตาย 0.7 mm ค่ารอยย่น 23.59 % และหลังจากตัดขอบแล้วค่ารอยย่นเหลือ 6.81%

5.5 การปรับค่ารัศมีตาย และช่องว่างระหว่างพินซ์และตาย มีผลกับรอยย่นเล็กน้อย

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บริษัท ทองปั้นทูลส์แอนดาย จำกัด ที่เอื้อเฟื้ออนุเคราะห์สถานที่ในการขึ้นรูป ขอกราบขอบพระคุณ ดร.สุวัฒน์ จิระเชียรนาถ ศูนย์วิจัยเอ็มเทคที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือด้านการตีกริดวงกลม

8. เอกสารอ้างอิง

- [1]. กิตติภฏ รัตนจันทร์, ผลกระทบจากดรอว์บีดในการขึ้นรูปโลหะแผ่น วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2542.
- [2]. คมสันต์ งามชา, ขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมอสเตนนิติกSUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา.ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 2549.
- [3]. เดช พุทธเจริญทอง, ทฤษฎีพลาสติกซิตี้และการเปลี่ยนรูปถาวร กรุงเทพฯ: ศูนย์ส่งเสริมกรุงเทพ, 2548.
- [4]. ชามู ถนัดงาน, เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะพื้นฐานและการขึ้นรูปโลหะแผ่น. ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2547.
- [5]. ชามู ถนัดงาน, เอกสารประกอบการสอน วิชา Metal Forming Theory. ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2547.

- [6]. พนา แซ่มสวัสดิ์, การแก้ปัญหาการย่นในงานขึ้นรูปถ้วยที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2541.
- [7]. สวัสดิ์ โสตามุข, การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 2549.
- [8]. สามารถ แซ่มคำ, การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปถาดอลูมิเนียมโดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2546.
- [9]. Antonio, F. A., Proposing a better forming limit diagram prediction comparative study. Journal of Materials Processing Technology. 141 (2003).101-108.
- [10]. B. Logue., Side-wall thickness in draw die forming. Journal of Materials Processing Technology.182 (2007). 191-194.
- [11]. Haroldo, B. Campos., Theoretical and experimental determination of the forming limit diagram for the AISI 304 stainless steel. Journal of Materials Processing Technology. 179 (2006). 56–60.
- [12]. H. Takuda, et al., Finite element Analysis of the Formability of an austenitic stainless sheet in warm deep Drawing. Journal of Materials Processing Technology. 162 (2003).143-144.
- [13]. Mitsutoshi, Kuroda., Forming limit diagrams for anisotropic metal sheets with different yield criteria. International Journal of Solids and Structures. 37 (2000). 5037-5059.
- [14]. P. A. Friedman., Effects of plastic anisotropy and yield criteria prediction of forming limit curves. International Journal of Mechanical Sciences. 42 (2000). 29-48.
- [15]. T. C. Hsu and I. R. Shien., Finite Element Modeling of Sheet Forming Process with Bending Effects. Journal of Materials Processing Technology. 63, (1997). 733-737.
- [16]. T. Meinders, et al., The Implementation of an Equivalent Drawbead Model in a Finite Element Code for Sheet Metal Forming. Journal of Materials Processing Technology.65, (1998). 234-244.
- [17]. Z. Tourki., The kinetic of induced martensitic formation and its effect on forming limit curves in the AISI 304 stainless steel. Journal of Materials Processing Technology. 166 (2005). 330–336.
- [18]. R.Hill., A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metal. Proc.Roy.Soc. London. Ser, A 193 (1948), 281-297.