



การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโค้งและการขึ้นรูปแบบสลับทางที่มีต่อการบางลงของถั่วกันโค้ง

วารุณี เปรमानนท์^{*} พงษ์นที ถนอมกุลบุตร และ จิราพร ศรีประเสริฐ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

^{*} ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: varunee.pre@kmutt.ac.th

วันที่รับบทความ: 8 มีนาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 11 พฤศจิกายน 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 15 พฤศจิกายน 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโค้งของหัวฟันซี่ในการลากขึ้นรูปถั่ว ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของถั่วกันโค้งอะลูมิเนียมผสม เกรด 5052 H32 โดยทดสอบขึ้นรูปแบบขั้นบันไดและแบบสลับทาง (2 ขั้นบันได) จากการทดสอบขึ้นรูปแบบขั้นบันไดพบว่าการขึ้นรูปด้วยฟันซี่ที่มีอัตราส่วนโค้งต่ำ ทำให้ส่วนโค้งกันถั่วบางลงมากกว่าบริเวณอื่น โดยตำแหน่งที่บางลงมากที่สุดอยู่ที่บริเวณส่วนโค้งกันถั่ว ในขณะที่การขึ้นรูปด้วยฟันซี่ที่มีอัตราส่วนโค้งสูง (เข้าใกล้ถั่วกันแบน) ตำแหน่งที่เกิดการบางลงมากที่สุดอยู่ที่ผนังตรงใกล้กับโค้งกันถั่ว การลากขึ้นรูปแบบสลับทางช่วยลดการบางลงของชิ้นงานกรณีที่มีอัตราส่วนโค้งต่ำ และถั่วสำเร็จมีความยาวส่วนผนังตรงไม่มาก กลไกการขึ้นรูปของถั่วกันโค้งที่มีส่วนของผนังตรงพบว่า การขึ้นรูปช่วงแรกเป็นการขึ้นรูปส่วนโค้งกันถั่วซึ่งเกิดการดึงยืดทุกทิศทาง และตามด้วยการขึ้นรูปบริเวณผนังตรง ซึ่งเกิดความเค้นแรงดึงสูงตามแนวรัศมีส่งผลให้เกิดการบางลงมากที่บริเวณผนังตรงใกล้รัศมีฟันซี่ ดังนั้นการขึ้นรูปแบบสลับทางจึงมีผลกับการกระจายความหนาได้เฉพาะในการขึ้นรูปช่วงแรก กรณีถั่วที่มีอัตราส่วนโค้งสูงมีความยาวส่วนผนังตรงมาก การขึ้นรูปส่วนใหญ่อยู่ที่การขึ้นรูปช่วงที่สอง จึงมีส่วนช่วยลดการบางลงได้น้อย

คำสำคัญ: การลากขึ้นรูปลึก; อัตราส่วนโค้ง; การลากขึ้นรูปแบบสลับทาง; ถั่วกันโค้ง; กลไกการบางลง



Study on Influences of Curved Ratio and Reverse Drawing Technique on Thinning of Curved Bottom Cup

Varunee Premanond^{*}, Pongnatee Thanomkulbud and Jiraporn Sripraserd

Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's University of Technology Thonburi

^{*} Corresponding author, E-mail: varunee.pre@kmutt.ac.th

Received: 8 March 2024; Revised: 11 November 2024; Accepted: 15 November 2024

Online Published: 21 December 2024

Abstract: This work studied the influences of the punch head curve ratio on thickness changing of cup by deep drawing process using one step or conventional drawing and reverse drawing (2-step) from 1 mm thick Aluminum 5052 H32. For conventional drawing, it was found that the curve bottom part of cup was thinner than other area when deep drawing with lower curve ratio punch. The maximum thinning area was found on curve bottom part of cup. While deep drawing with high curve ratio punch, the thinnest area had shift to straight wall close to bottom of cup. Deep drawing of 2 steps using reverse drawing could reduce thinning with low curve ratio punch and short straight wall cup. The mechanism for deep drawing of curve bottom cup could be divided into two parts; the curve bottom with main stretching was formed initially and followed by forming the straight wall with main radial tensile stress. Thus, reverse drawing could help reduce thinning only on the first part of curved bottom cup forming. Therefore, using reverse drawing had less effect on thinning for cup with high curve bottom ratio with large straight wall due to second part of forming straight wall area was dominated.

Keywords: Deep drawing process; curve ratio; Reverse drawing; Curve bottom cup; Thinning



1. บทนำ

การขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกกันโค้งมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างอุตสาหกรรมการผลิตถึงความดันสูง ถึงแก๊ส ปัจจุบันเริ่มมีความต้องการสิ่งที่ทำจากวัสดุที่มีน้ำหนักเบาเช่นอะลูมิเนียม เพื่อให้ง่ายต่อการเคลื่อนย้าย ขณะเดียวกันความแข็งแรงสูงยังเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นเพื่อความปลอดภัย การขึ้นรูปทั่วไปส่งผลให้เกิดการบางลงเฉพาะบริเวณ เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดทางด้านความปลอดภัยต้องทำการปรับความหนาเริ่มต้น ซึ่งต้นทุนวัสดุของแผ่นอะลูมิเนียมสูงกว่าแผ่นเหล็กทั่วไปมาก การศึกษาเพื่อลดการบางลงขณะขึ้นรูปจึงมีความสำคัญเพื่อลดต้นทุนการผลิต

เป็นที่ทราบกันดีว่าด้วยที่ผ่านกระบวนการลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing Process) รูปทรงถ้วยกันแบน ตำแหน่งการบางลงมากที่สุดของถ้วยจะอยู่ที่ส่วนผนังตรงของถ้วยใกล้กับรัศมีพันธ์ [1, 2, 3] ซึ่งเกิดจากค่าความเค้นแรงดึงสูงในแนวความสูงของถ้วยตามทิศทาง การให้แรงจากพันธ์ ส่วนกันถ้วยแทบจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนา ในขณะที่การขึ้นรูปด้วยกันโค้ง จะเกิดการยืดตัวตามแนวรัศมีของบริเวณส่วนโค้งกันถ้วยที่สัมผัสกับพันธ์ ส่วนที่บางที่สุดอยู่บริเวณโค้งกันถ้วย มีการศึกษาเพื่อลดการบางลงของถ้วยที่ผ่านการลากขึ้นรูปลึก Zein และคณะ [4] ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยตัวแปรรูปร่างแม่พิมพ์ประกอบด้วย รัศมีพันธ์ รัศมีตาย ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ที่เหมาะสมตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปค่าแรงจับแผ่นจับยึดชิ้นงานและความเสียหายผ่านการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมถึงงานของ Olguner [5] สนับสนุนผลการบางลงมากขึ้นของถ้วยจากค่าความเสียหายที่เพิ่มมากขึ้น Mahdi [6] ลดการบางลงของถ้วยกันโค้ง

ด้วยการปรับรัศมีตายให้มีรูปร่างเฉพาะแบบ Tractrix เทคนิคการลากขึ้นรูปแบบสลับทาง (Reverse Drawing) มีการศึกษาอยู่หลากหลาย Zhang [7] ศึกษา ร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิในแต่ละบริเวณเพื่อเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปให้กับแผ่นอะลูมิเนียม Liu [8] และ Mu [9] ศึกษา ร่วมกับการใช้ Magnetorheological Fluid พบว่าการลากขึ้นรูปสลับทางสามารถลดการยืดตัวของบริเวณกันด้วยทรงครึ่งวงกลม ทำให้เกิดการกระจายตัวของความหนาอย่างสม่ำเสมอ รวมถึงงานวิจัยของ Zhang [10] ขึ้นรูปด้วยกันโค้งทรงครึ่งวงกลมจากเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่า พบว่าการลากขึ้นรูปสลับทาง 3 ครั้ง ให้ผลการกระจายความหนาที่มีความสม่ำเสมอมากที่สุด การศึกษาเพื่อลดปัญหาการบางลงของถ้วยกันแบนและถ้วยกันโค้งทรงครึ่งวงกลม (Hemispherical End) มีมาแล้วอย่างกว้างขวาง แต่ยังคงขาดผลการศึกษากรณี ที่กันถ้วยมีรูปแบบโค้งที่ไม่ได้เป็นทรงครึ่งวงกลม เช่นกรณี ของโค้งกันถึงแก๊ส ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษารูปทรงผิวโค้งของหัวพันธ์ซึ่งนิยามโดยอัตราส่วนโค้ง (Curve Ratio, CR) แสดงอยู่ในรูปของค่าอัตราส่วนรัศมีต่อความสูงบริเวณโค้ง (R/H) และการใช้เทคนิคการขึ้นรูปสลับทาง เพื่อศึกษาอิทธิพลที่เกิดกับการบางลงของถ้วยกันโค้งโลหะอะลูมิเนียมผสม

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้แผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสม เกรด 5052 H32 ความหนา 1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการศึกษาทางด้านพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนรูปในช่วงการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรมาแล้วอย่างกว้างขวาง [11, 12] สมบัติทางกลที่สำคัญแสดงในตารางที่ 1 การทำงานของแม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานทรงกระบอกกันโค้งแสดงในรูปที่ 1 ชุดแม่พิมพ์ทำมาจากวัสดุ JIS-SKD11 ผ่านการชุบแข็ง

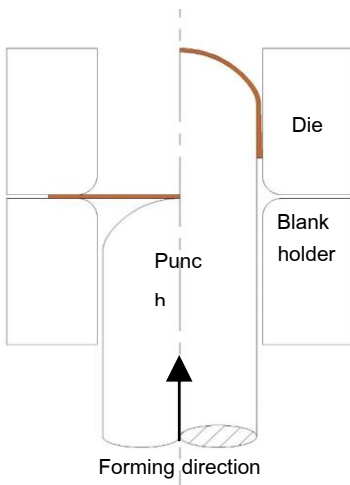


บทความวิจัย

ที่ 60 ± 2 HRC แม่พิมพ์ออกแบบให้มีระยะช่องว่าง (Tool Clearance) 1.5 มิลลิเมตร และรัศมีตาย 5 มิลลิเมตร ใช้พื้นที่ปลายโค้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร ใช้เครื่อง Universal Sheet Metal Testing 350 kN ในการขึ้นรูป ใช้สารหล่อลื่น Forming oil ทุกเงื่อนไขการทดสอบ โดยทำการทดสอบซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งสำหรับแต่ละเงื่อนไขการทดสอบ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของวัสดุ AL5052-H32 [12]

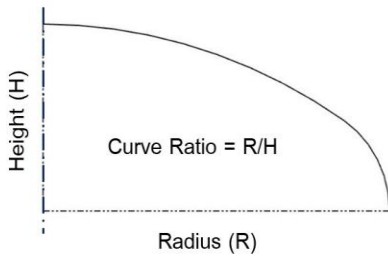
Yield strength	167.75 MPa
Ultimate tensile strength	216.21 MPa
Total elongation	9.7%
Hardening coefficient	341.25 MPa
Strain-hardening exponent	0.148



รูปที่ 1 การลากขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียว (Conventional drawing)

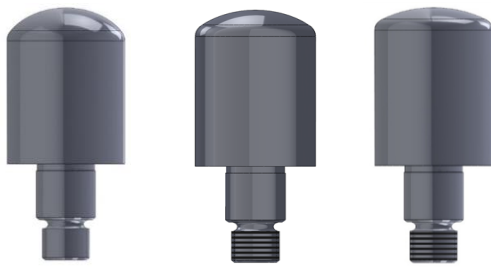
เบื้องต้นทำการทดสอบค่าขีดความสามารถในการขึ้นรูป (Limiting Drawing Ratio) จากพื้นที่ที่มีอัตราส่วนโค้ง (CR) 1.35 1.7 และ 2 โดยนิยามอัตราส่วนโค้งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างรัศมีต่อความสูง ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นอะลูมิเนียม (Blank Size) เริ่มต้นที่ 80 มิลลิเมตร (อัตราส่วนการลากขึ้นรูป, Drawing Ratio, DR 2.0) ปรับค่าแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blank Holder Force, F_{BH}) ให้ขึ้นรูปได้สำเร็จ ปราศจากรอยแตกและการย่นในกรณีที่ขึ้นรูปไม่สำเร็จ จะทำการปรับลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นลง และปรับแรงที่ใช้ในการกดแผ่นจับยึดชิ้นงานจนกระทั่งได้ถ้วยสำเร็จในแต่ละชุดการทดลอง โดยจะเลือกใช้ชุดการทดลองที่ปรับตั้งค่า F_{BH} ต่ำที่สุดที่ขึ้นรูปได้ในแต่ละกรณี เนื่องจากการเพิ่มค่า F_{BH} ส่งผลให้การจับยึดที่ปีกถ้วยเพิ่มเนื้อวัสดุไหลตัวได้ยาก ทำให้เกิดการบางลงเพิ่มมากขึ้น และการศึกษาการบางลงของถ้วยจะเลือกสถานะการทำงานที่อัตราส่วนการขึ้นรูป และค่าแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานที่เท่ากันในการเปรียบเทียบต่อไป

การศึกษาการบางลงของถ้วยจากการลากขึ้นรูปแบ่งเป็น 2 ส่วนคือศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโค้งของหัวพื้นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาถ้วยที่ผ่านการลากขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียว (Conventional Drawing) และศึกษาอิทธิพลของการขึ้นรูปแบบสลับทาง (Reverse Drawing) ที่มีต่อการบางลง โดยทำการลากขึ้นรูป 2 ขั้นตอน แบบสลับทิศทางกัน ดังแสดงในรูปที่ 3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ ระยะเวลาเคลื่อนที่ (Stroke) ของพื้นที่ขึ้นรูปแรก (Pre-draw)



การวัดความหนาหลังขึ้นรูปทำโดยตัดผ่าด้วย อะลูมิเนียม ใช้ไมโครมิเตอร์แบบหัวบอลวัดที่ตำแหน่ง ตามแสดงในรูปที่ 4 โดยเบี่ยงต้นวัดแต่ละตำแหน่งห่าง กัน 2.5 มิลลิเมตร และขยับตำแหน่งอย่างละเอียดเพื่อ แสดงตำแหน่งและค่าความหนาในตำแหน่งที่บางลง มากที่สุด

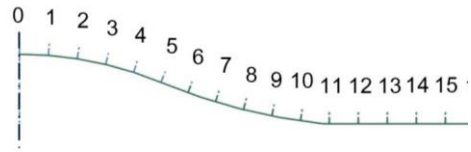
ก) นิยามอัตราส่วนโค้งของหัวพินซ์



ข) CR 1.35

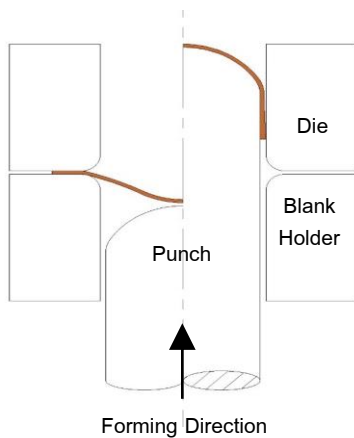
ค) CR 1.7

ง) CR 2

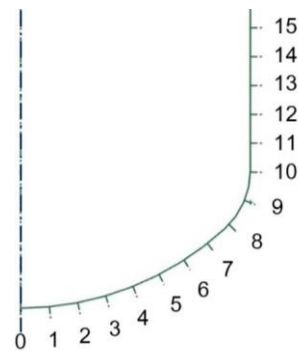


ก) ถ้วยที่ผ่านการขึ้นรูปขั้นตอนที่ 1 Pre-draw

รูปที่ 2 พินซ์ที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3 การลากขึ้นรูปแบบสลัทาง (Reverse Drawing)



ข) ถ้วยสำเร็จ

รูปที่ 4 ตำแหน่งการวัดความหนาของถ้วย

3. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดสอบอิทธิพลของอัตราส่วนโค้งของ หัวพินซ์

ทดสอบการลากขึ้นรูปโดยใช้พินซ์ที่มีอัตราส่วนโค้ง ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1.35 1.7 และ 2



3.1.1 ผลการทดสอบความสามารถในการลากขึ้นรูป

ทดสอบการลากขึ้นรูปโดยใช้พันธที่มีอัตราส่วนโค้ง CR เท่ากับ 1.35 1.7 และ 2 ทดสอบบนแผ่นขึ้นงานเริ่มต้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 70 และ 68 มิลลิเมตร (DR เท่ากับ 2 1.75 และ 1.7 ตามลำดับ) ใช้แรงกดแผ่นจับยึดเริ่มต้น 1.3 kN ทำการเพิ่มค่า F_{BH} กรณีที่พบการย่น และลด F_{BH} กรณีที่แตกจนกระทั่งได้ชิ้นงานสำเร็จ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความสามารถในการขึ้นรูปด้วยพันธที่มีอัตราส่วนโค้ง 1.35 1.7 และ 2

CR	F_{BH} (kN)	Drawing Ratio (DR)		
		2	1.75	1.7
1.35	0	แตก	-	-
	1.3	แตก	ย่น	✓
	2	แตก	ย่น	-
1.7	2.2	-	✓	-
	1.3	ย่น	ย่น	✓
	2	ย่น	✓	-
	3.5	ย่น	-	-
2	4	✓	-	-
	1.3	ย่น	ย่น	✓
	2	ย่น	✓	-
	2.1	แตก	-	-

หมายเหตุ: ✓ หมายถึง ขึ้นรูปสำเร็จ
- หมายถึง ไม่ได้ทำการทดสอบ

กรณีที่ใช้พันธที่มีอัตราส่วนโค้ง 1.35 ที่ DR 2 ไม่สามารถขึ้นรูปได้สำเร็จ กรณีใช้แรงจับยึดชิ้นงานที่ 1.3 และ 2 kN เกิดคอคอด (Necking) และฉีกขาด เมื่อไม่มีการจับยึดชิ้นงาน ($F_{BH} = 0$ kN) เกิดการย่นและส่งผลให้ฉีกขาด ดังรูปที่ 5(ก) เมื่อลดขนาดแผ่นขึ้นงานเริ่มต้นลงที่ DR 1.75 ถ้วยเกิดการย่นเมื่อใช้ F_{BH} 1.3 และ 2

kN ขึ้นรูปได้สำเร็จเมื่อใช้แรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ 2.2 kN ดังแสดงในรูปที่ 5(ข) และที่ DR 1.7 ขึ้นรูปได้สำเร็จด้วยการใช้ F_{BH} 1.3 kN

กรณีที่ใช้พันธ CR 1.7 ขึ้นรูปชิ้นงานที่ DR 2 ขึ้นรูปได้สำเร็จเมื่อใช้แรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงาน 4 kN (ทดลองลดแรงกดที่ 3.5 kN พบว่าชิ้นงานเกิดรอยย่นขึ้นเล็กน้อยที่ขอบ จึงนำเสนอผลขึ้นรูปได้ดังตารางที่ 2) แรงกดที่ 2 kN เกิดรอยย่นที่เห็นได้ชัดเจนดังรูปที่ 6 และที่ DR 1.75 และ 1.7 ขึ้นรูปได้สำเร็จด้วยการใช้ F_{BH} 2 และ 1.3 kN ตามลำดับ



$F_{BH} = 0$ kN

$F_{BH} = 1.3$ kN

$F_{BH} = 2$ kN

ก) การขึ้นรูปโดยใช้ DR 2



$F_{BH} = 1.3$ kN

$F_{BH} = 2$ kN

$F_{BH} = 2.2$ kN

ข) การขึ้นรูปโดยใช้ DR 1.75

รูปที่ 5 ชิ้นงานที่ได้จากการปรับค่าแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงาน โดยใช้พันธที่มีอัตราส่วนโค้ง CR 1.35



$F_{BH} = 2$ kN

$F_{BH} = 3.5$ kN

$F_{BH} = 4$ kN

รูปที่ 6 ตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากการปรับค่าแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานโดยใช้พันธที่มีอัตราส่วนโค้ง CR 1.7 ที่ DR 2



กรณีของพันธ์ CR 2 ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่ DR 2 ได้สำเร็จ ดังแสดงในรูปที่ 7 ถ้วยมีรอยย่นที่ขอบเมื่อใช้ F_{BH} 2 kN หรือน้อยกว่า เมื่อทำการเพิ่มแรงจับยึดเป็น 2.1 kN เกิดการฉีกขาด ส่วนที่ DR 1.75 และ 1.7 ขึ้นรูปได้สำเร็จด้วยการใช้ F_{BH} 2 และ 1.3 kN ตามลำดับ

จากข้อมูลในตารางที่ 2 พบว่าพันธ์ CR 1.7 ให้ค่าขีดความสามารถในการขึ้นรูปได้สูงสุด (DR 2) ส่วนพันธ์ CR 1.35 และพันธ์ CR 2 ขึ้นรูปได้มากที่สุดที่ DR 1.75 เท่ากันโดยใช้ค่า F_{BH} ที่ต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่ากรณีที่ DR สูง คือกรณีใช้แผ่นชิ้นงานเริ่มต้นขนาดใหญ่ ขณะขึ้นรูปเกิดความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงเพิ่มขึ้น จึงต้องเพิ่มแรงจับยึดแผ่นชิ้นงานให้สูงขึ้นด้วยความเค้นแรงอัดในแนวเส้นรอบวงเป็นต้นเหตุให้เกิดการย่นของขอบถ้วย แรงจับยึดที่ไม่เพียงพอส่งผลให้เกิดการย่น โดยการทดลองด้วยพันธ์ที่มี CR ต่างกันให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน ที่ DR 2 (กรณีของ CR 1.7 ที่ขึ้นรูปได้สำเร็จ) ใช้แรงจับยึดสูงกว่า DR 1.75 และ DR 1.7 ตามลำดับ ส่วนที่ DR 2 ซึ่งเกิดจากการใช้แผ่นเปล่าที่มีขนาดใหญ่ที่สุด พันธ์ CR 1.35 และ 2 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ แรงจับยึดที่สูงเกินไปส่งผลให้เกิดการแตกของถ้วยที่เกิดจากความเค้นแรงดึงในแนวรัศมีแผ่นเริ่มต้นขนาดใหญ่ที่มีพื้นที่สัมผัสบริเวณปีกถ้วยมากเกิดแรงต้านทานการไหลตัวของแผ่นโลหะลงไปในดาดสูง จึงทำให้เกิดการฉีกขาด

3.1.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโค้งของหัวพันธ์ที่มีต่อความหนาของชิ้นงาน

การเปรียบเทียบค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อขึ้นรูปด้วยพันธ์ทั้ง 3 ตัว (CR 1.35 1.7 และ 2) วัดความหนาจากถ้วยกรณี DR 1.7 เนื่องจากขึ้นรูปได้สำเร็จโดยใช้ F_{BH} เท่ากันที่ 1.3 kN เพื่อตัดอิทธิพลการบางลง



$F_{BH} = 1.3 \text{ kN}$ $F_{BH} = 2 \text{ kN}$ $F_{BH} = 2.1 \text{ kN}$

รูปที่ 7 ตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากการปรับค่าแรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงานโดยใช้พันธ์ที่มีอัตราส่วนโค้ง CR 2 ที่ DR 2

ของถ้วยที่เกิดจากแรงจับยึดงานที่ต่างกัน ถ้วยที่ได้จากพันธ์ทั้ง 3 ชุด ที่มีอัตราส่วนโค้งต่างกัน แสดงในรูปที่ 8 และผลการกระจายค่าความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 9 ส่วนโค้งกันถ้วยจนถึงผนังตรง (ตำแหน่งที่ 0-9) เกิดการบางลง และขอบถ้วย (ตำแหน่งที่ 13-14) มีความหนาเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นกลไกปกติของกระบวนการลากขึ้นรูปถ้วยกลม [6] โดยพบว่าถ้วยที่ขึ้นรูปโดยใช้พันธ์ CR 1.35 ซึ่งมีลักษณะโค้งมากที่สุด เกิดการบางลงมากที่สุด (จากความหนา 1 มิลลิเมตร เหลือ 0.834 มิลลิเมตร คิดเป็นการบางลง 16.6%) ที่บริเวณโค้งตำแหน่ง 3-4 ดังแสดงในรูปที่ 10 (ก) เมื่อใช้พันธ์ที่มีความโค้งน้อยลง (CR 1.7 และ 2 ตามลำดับ) เกิดการบางน้อยลง การใช้พันธ์ CR 2 ให้ถ้วยที่มีการบางลงของชิ้นงานน้อยที่สุด (จากความหนา 1 มิลลิเมตร เหลือ 0.932 มิลลิเมตร คิดเป็นการบางลง 6.8%) และตำแหน่งที่บางที่สุดของถ้วยที่ขึ้นรูปด้วยพันธ์ CR 2 เลื่อนออกจากกึ่งกลางกันถ้วยเข้าใกล้ส่วนผนังตรง (ตำแหน่ง 8-9) ดังแสดงในรูปที่ 10 (ค)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ C. Zhang และคณะ [10] ขึ้นรูปโดยใช้พันธ์ที่มี CR 1 (ทรงครึ่งวงกลม) ตำแหน่งที่บางที่สุดจากการลากขึ้นรูปอยู่ที่ตำแหน่งยอดของส่วนโค้ง และในกรณีถ้วยกันแบน ส่วนที่บางที่สุดจะอยู่ส่วนผนังตรงที่ใกล้กับกันถ้วย ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ แสดงให้

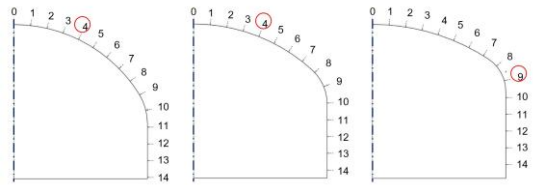


บทความวิจัย



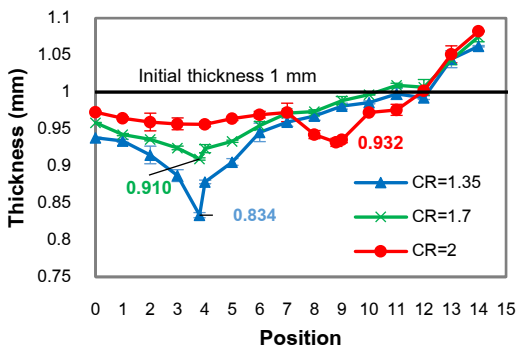
ก) CR 1.35 ข) CR 1.7 ค) CR 2

รูปที่ 8 ถ้วยที่ได้จากการลากขึ้นรูปด้วยพื้นที่มีอัตราส่วนโค้งต่างกัน (DR 1.7, F_{BH} 1.3 kN)



ก) CR 1.35 ข) CR 1.7 ค) CR 2

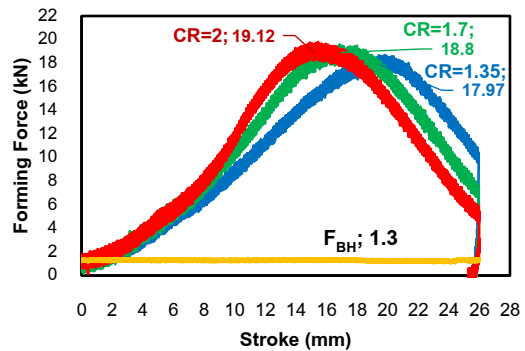
รูปที่ 10 ตำแหน่งที่บางที่สุดของถ้วยที่มีอัตราส่วนโค้งต่างกัน



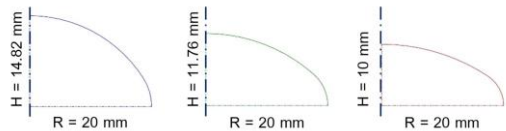
รูปที่ 9 ความหนาของถ้วยอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยพื้นที่ที่มีอัตราส่วนโค้งต่างกัน (DR 1.7)

เห็นว่าเมื่อความโค้งที่กันถ้วยลดลง (ค่า CR เพิ่มขึ้น) ตำแหน่งที่เกิดการบางลงมากที่สุดเลื่อนจากกึ่งกลางกันถ้วยไปยังส่วนผนังตรง

รูปที่ 11 แสดงแผนภาพแรง-ระยะทางของการลากขึ้นรูปถ้วย (DR 1.7) โดยใช้พื้นที่ที่มีอัตราส่วนโค้ง 1.35 1.7 และ 2 พบว่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูปขึ้นงานอยู่ที่ 17.97 18.80 และ 19.12 kN ตามลำดับ ค่าความโค้งกันถ้วยที่ต่างกัน ส่งผลให้ ระยะ Stroke ที่พื้นที่พาแผ่นขึ้นงานเริ่มต้นส่วนที่อยู่ปีกถ้วย ลงในช่องตายที่ระยะต่างกัน รูปที่ 12 แสดงให้เห็นถึงระยะ Dome height ของพื้นที่ที่มีอัตราส่วนโค้งต่างกัน โดยหัวพื้นที่ที่มีลักษณะโค้งน้อย (CR 2) ระยะทางในการขึ้นรูปส่วน



รูปที่ 11 Load stroke diagram ของการขึ้นรูปขึ้นงาน โดยใช้พื้นที่อัตราส่วนโค้งต่างกัน ที่ DR 1.7



ก) CR 1.35 ข) CR 1.7 ค) CR 2

รูปที่ 12 ระยะความสูง Dome height (H) ของพื้นที่ที่มีอัตราส่วนโค้งต่างกัน

โค้งต่ำกว่า เกิดส่วนที่เป็นผนังตรงก่อน และผนังตรงยาวกว่าโค้งที่มีอัตราส่วนมาก ระยะที่เกิดแรงสูงสุดจึงเกิดก่อน และใช้แรงสูงสุดที่มากกว่าพื้นที่ที่มีลักษณะความโค้งมากกว่าเล็กน้อย



จากผลการทดสอบอิทธิพลของอัตราส่วนโค้งของหัวพินซ์ที่มีต่อการลากขึ้นรูป แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปโดยในช่วงแรกเป็นการขึ้นรูปส่วนโค้งที่หัวพินซ์ เกิดการดึงยืด (Stretching) พินซ์ที่มีความโค้งมาก จะใช้ Stroke ในช่วงนี้ที่ยาวกว่าพินซ์ที่มีความโค้งน้อย ส่งผลให้ส่วนของแผ่นโลหะกันถ้วยมีการยืดตัวที่มากกว่า กรณีกันถ้วยที่มีอัตราส่วนโค้ง 1.7 ตำแหน่งที่ บางที่สุดต่างจากกรณีกันถ้วยที่มีอัตราส่วนโค้ง 1.35 ไม่มากนัก อาจเนื่องมาจากค่าความโค้งที่ไม่ต่างกันมาก เมื่อระยะเคลื่อนที่ลงของพินซ์เพิ่มมากขึ้นถึงส่วนที่สร้างผนังตรง ส่วนที่ใกล้กับรัศมีพินซ์จะเป็นบริเวณที่รับ ความเค้นแรงดึงมากที่สุดเพื่อส่งแรงขึ้นไปใช้ในการดึงแผ่นขึ้นงานบริเวณปีกลงมาในช่องตาย การเปลี่ยนรูป บริเวณปีกถ้วยจะเกิดความเค้นแรงอัดในแนวเส้นรอบวง ที่เป็นตัวที่ส่งผลให้ขอบถ้วยมีความหนาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งกรณีของถ้วยที่มีความโค้งน้อยจะเหลือส่วนที่เป็นผนังตรงยาวกว่า ทำให้กลไกส่วนนี้รุนแรงกว่าจึงเกิดการบางลงมากที่สุดที่ตำแหน่งที่ใกล้กับผนังตรง

จากผลที่ได้เอานำมาใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ที่พินซ์ CR 1.7 ได้ค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปที่สูงกว่าพินซ์ CR 1.35 และ CR 2 (ขึ้นรูป DR 2 ได้สำเร็จ) จากการที่ เกิดการบางลงของกันถ้วย 2 กลไก ในช่วงแรกที่เป็น การบางลงของกันถ้วย และจากนั้นเปลี่ยนผ่านเป็นการขึ้นรูปส่วนผนังตรง พินซ์ CR 1.35 ด้วยความโค้งมากของพินซ์ทำให้ถ้วยเกิดการฉีกขาดตั้งแต่ช่วงแรกของการขึ้นรูปดังรูป 5 (ก) ในขณะที่ CR 1.7 พินซ์โค้งน้อยลง ลดภาระการเปลี่ยนรูปช่วงแรก กระจายการบางลงของถ้วยไปที่บริเวณผนังตรงจึงทำให้การขึ้นรูปสำเร็จ ส่วนกรณี CR2 ความโค้งพินซ์น้อยที่สุด เกิดการเปลี่ยนรูปช่วงแรกที่สัน ส่วนผนังตรงในช่วงการขึ้นรูปจังหวะที่ 2

จึงรับภาระในการดึงยืดเพื่อเปลี่ยนรูป บางลงมากจนเกิดการฉีกขาด ดังแสดงตำแหน่งการฉีกขาดที่ใกล้ผนังตรงรูปที่ 7

3.2 ผลการทดสอบการลากขึ้นรูปสลับทาง

ทำการทดสอบการลากขึ้นรูปสลับทาง (Reverse Drawing) 2 กรณีศึกษา โดยกรณีแรกใช้พินซ์ CR 1.35 ที่ DR 1.7 ซึ่งเกิดการบางลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพินซ์ CR 1.7 และ 2 จากรูปที่ 9 หัวข้อ 3.1.2 และกรณีที่ 2 ใช้พินซ์ที่ CR 1.7 ที่ DR 2 ซึ่งเป็นสภาวะการทำงานที่รุนแรงที่สุดจากข้อมูล que แสดงในตารางที่ 2 โดยแต่ละชุดการทดลอง ใช้พินซ์ตัวเดียวกันในการขึ้นรูปทั้งในขั้นตอนที่ 1 Pre-draw และขั้นตอนที่ 2 Reverse Draw

3.2.1 การลากขึ้นรูปสลับทางด้วยพินซ์ CR 1.35 DR 1.7

ผลการทดสอบการขึ้นรูปสลับทาง โดยใช้พินซ์ที่มีอัตราส่วนโค้ง 1.35 ที่ DR 1.7 ใช้ F_{BH} 1.3 kN ทั้ง 2 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 ชิ้นงานถูกลากขึ้นรูปที่ความสูง 5 7 9 และ 11 มิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็น 33.74 47.23 60.7 และ 74.22 % ของระยะความสูงส่วนโค้งของหัวพินซ์ (H) จากนั้นทำการสลับทิศทางเพื่อขึ้นรูปในขั้นตอนที่ 2 ให้ได้ถ้วยสำเร็จ ชิ้นงานทดสอบแสดงในรูปที่ 13 และตำแหน่งการวัดความหนาของถ้วยทั้ง 2 ขั้นตอน แสดงในรูปที่ 14

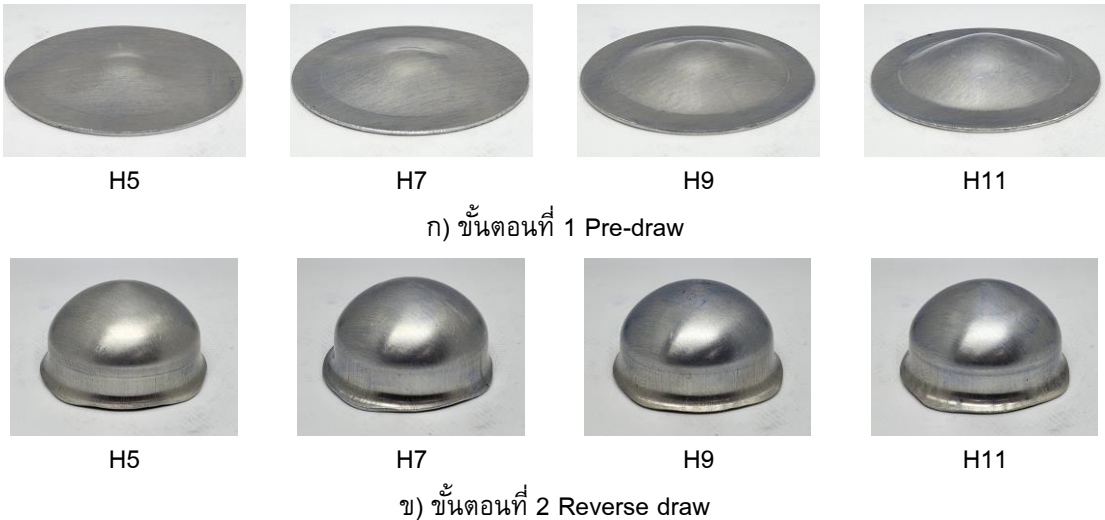
การกระจายตัวของความหนาถ้วยจากการลากขึ้นรูปสลับทางทั้ง 2 ขั้นตอน แสดงในรูปที่ 15 การขึ้นรูปในขั้นตอนที่ 1 แสดงโดยกราฟเส้นทึบ เมื่อระยะการขึ้นรูปเพิ่มมากขึ้น ตำแหน่งที่เกิดการบางลงมากที่สุด จะเลื่อนออกห่างจากกึ่งกลางตามความสูงที่เพิ่มขึ้นของ



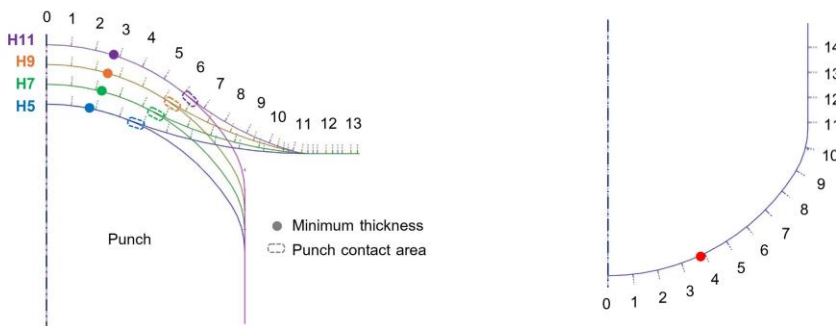
บทความวิจัย

ขั้นตอนแรก จากระยะ Stroke ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่สัมผัสระหว่างหัวพunchกับแผ่นชิ้นงานเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 14 (ก) เกิดการดึงยืดมากขึ้นจึงทำให้ชิ้นงานบางลงเมื่อระยะการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น หลังจากการขึ้นรูปในขั้นตอนที่ 2 ค่าความหนาแสดงโดยเส้นประในกราฟที่กันถ้วยบางลงมากขึ้นทุกตำแหน่งและหนาขึ้นบริเวณ

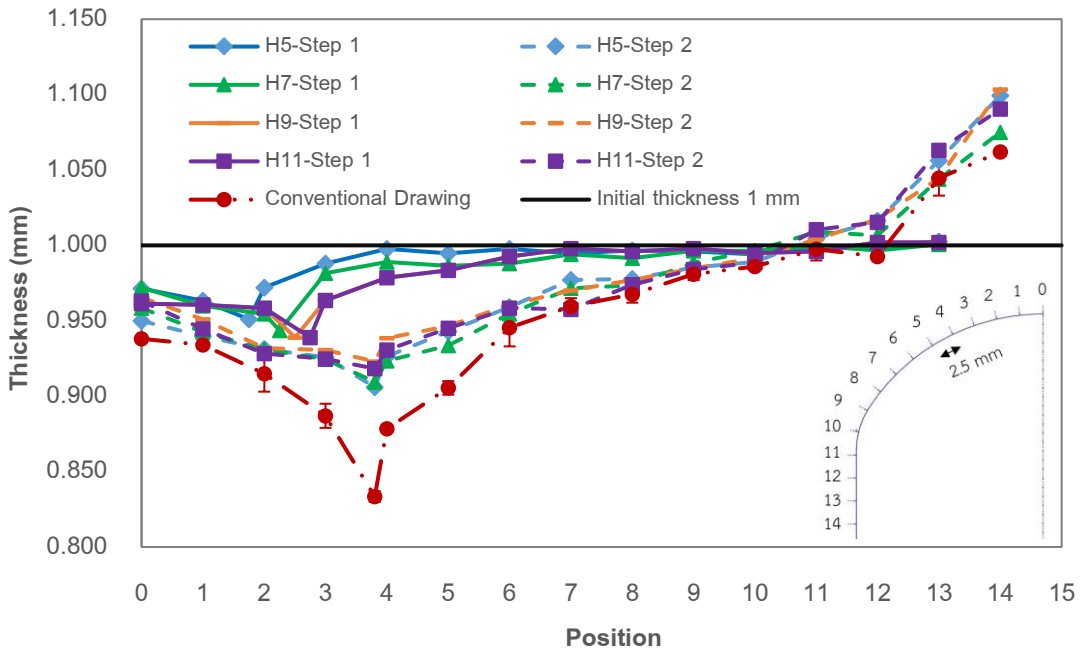
ผนังตรง การขึ้นรูปแบบสลับทางทั้ง 4 กรณี บางลงน้อยกว่าการลากขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียว สังเกตได้ว่าตำแหน่งที่บางที่สุดของทั้ง 4 ชุดการทดลองอยู่ในบริเวณเดียวกันคือใกล้กับตำแหน่งที่ 4 (รูปที่ 14 (ข)) ซึ่งเป็นบริเวณส่วนโค้งของถ้วย รวมถึงการลากขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียวด้วย



รูปที่ 13 ชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปสลับทางด้วยพunch CR 1.35 ที่ DR 1.7



รูปที่ 14 ตำแหน่งการวัดความหนาจากการลากขึ้นรูปแบบสลับทาง ด้วยพunch CR 1.35 ที่ DR 1.7

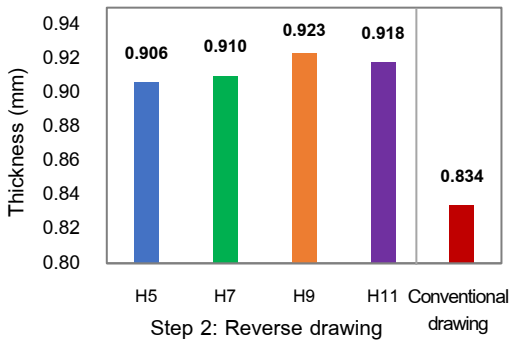


รูปที่ 15 การกระจายตัวของความหนาถั่วจากการลากขึ้นรูปสลับทางทั้ง 2 ขั้นตอนด้วยพันธ์ CR 1.35 และ DR 1.7

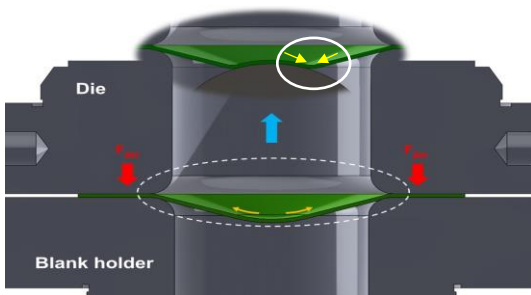
ค่าความหนาที่ตำแหน่งบางที่สุดของชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปสลับทาง ทั้ง 4 กรณี เทียบกับการลากขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียว แสดงในรูปที่ 16 โดยที่การลากขึ้นรูปสลับทางที่ความสูงในขั้นตอนแรก 9 มิลลิเมตร เกิดการบางลงน้อยที่สุด อยู่ที่ 0.923 มิลลิเมตร (บางลง 7.7%) เมื่อเทียบกับถั่วที่ขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียวที่มีความหนาของถั่ว ณ ตำแหน่งที่บางที่สุด คือ 0.834 มิลลิเมตร (บางลง 16.6%)

กลไกการเปลี่ยนรูปทั้ง 2 ขั้นตอนแสดงในรูปที่ 17 การขึ้นรูปครั้งแรก เกิดการยืดตัวของแผ่นชิ้นงานไปบนผิวโค้งของพันธ์เกิดความเค้นแรงดึงในแนวรัศมี (Tensile Radial Stress) เมื่อทำการขึ้นรูปครั้งที่ 2 แบบ

สลับทิศทาง บริเวณแนวเส้นที่เกิดจากการขึ้นรูปสลับทิศทางทำให้ผิวในของโค้งเกิดความเค้นอัดในแนวรัศมี (Radial Compressive Stress) ดังแสดงกลไกในรูปที่ 17 เมื่อระยะการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ชิ้นงานบริเวณปีกถั่วไหลลงมาในช่องตาย เกิดความเค้นแรงอัดในแนวเส้นรอบวง (Circumferential Compressive Stress) เข้ามารวมด้วย ความเค้นแรงอัดที่เกิดขึ้นนี้ ทำให้ชิ้นงานบางส่วนหนาขึ้น และบางส่วนด้านกรบางลงของชิ้นงานได้ รวมถึงจากการขึ้นรูปในขั้นตอนแรก เกิดกลไกความเครียดแข็ง (Work Hardening) [10] ช่วยสนับสนุนให้ลดการบางลงตรงบริเวณโค้งร่วมด้วย



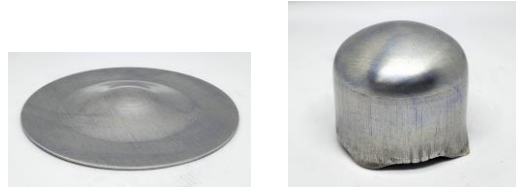
รูปที่ 16 ความหนาชิ้นงานตำแหน่งที่บางที่สุดของถ้วยสำเร็จจากการลากขึ้นรูปสลับทางเทียบกับถ้วยที่ขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียวด้วยพันธ CR 1.35 ที่ DR 1.7



รูปที่ 17 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของการลากขึ้นรูปขั้นตอนแรกและขึ้นรูปสลับทางในขั้นตอนที่ 2

3.2.2 การลากขึ้นรูปสลับทางด้วยพันธ CR 1.7 DR 2

ผลการทดสอบการขึ้นรูปสลับทาง โดยใช้พันธที่มีอัตราส่วนโค้ง 1.7 ที่ DR 2 ใช้ F_{BH} 4 kN ทั้ง 2 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 ชิ้นงานถูกขึ้นรูปที่ความสูง 4 6 9 และ 11 มิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็น 34.01 51.02 76.53 และ 93.53% ของระยะความสูงส่วนโค้งของหัวพันธ (H) ตัวอย่างงานหลังผ่านการขึ้นรูปขั้นตอนที่ 1 ที่ระยะ 9 มิลลิเมตร และถ้วยสำเร็จแสดงในรูปที่ 18



ก) ขั้นตอนที่ 1 (H9) ข) ขั้นตอนที่ 2

รูปที่ 18 ชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปสลับทางด้วยพันธ CR 1.7 ที่ DR 2

ผลการกระจายตัวความหนาของถ้วยที่ได้จากการลากขึ้นรูปสลับทางทั้ง 2 ขั้นตอน แสดงในรูปที่ 19 พบว่า หลังการขึ้นรูปขั้นตอนที่ 1 เมื่อขึ้นรูปที่ระดับความสูงเพิ่มขึ้น ชิ้นงานเกิดการบางลงมากขึ้นและตำแหน่งที่บางลงขยับออกห่างจากยอดส่วนโค้งไปบริเวณผนังตรง หลังผ่านการขึ้นรูปขั้นตอนที่ 2 ตำแหน่งที่บางที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันทั้งหมด รวมถึงการลากขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียวด้วย คือระหว่างตำแหน่งที่ 10 และ 11 ซึ่งเป็นบริเวณผนังตรงเหนือรัศมีกันถ้วย ค่าความหนาของชิ้นงาน ณ ตำแหน่งที่บางที่สุดที่ได้จากการลากขึ้นรูปสลับทาง ทั้ง 4 กรณี เทียบกับการลากขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียว แสดงในรูปที่ 20 จะเห็นได้ว่าเฉพาะถ้วยที่ใช้ความสูงในขั้นตอนแรกที่ 6 มิลลิเมตร หลังผ่านการขึ้นรูปแบบสลับทางแล้ว บางลงน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียว (หนา 0.893 มิลลิเมตร) อย่างไรก็ตามการลากขึ้นรูปสลับทางในกรณีนี้ช่วยลดการบางลงได้ไม่มากนัก

จากการขึ้นรูปด้วยอัตราส่วนการขึ้นรูป DR 2 มีขนาดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นที่ใหญ่กว่า DR 1.7 ดังนั้นเมื่อขึ้นรูปเป็นถ้วยสำเร็จมีส่วนสูงของถ้วยส่วนผนังตรงมากกว่า ช่วงแรกของการขึ้นรูปส่วนโค้งมีระยะการขึ้นรูปที่สั้น (การขึ้นรูปสลับทางในขั้นตอนแรกมีผลกับ

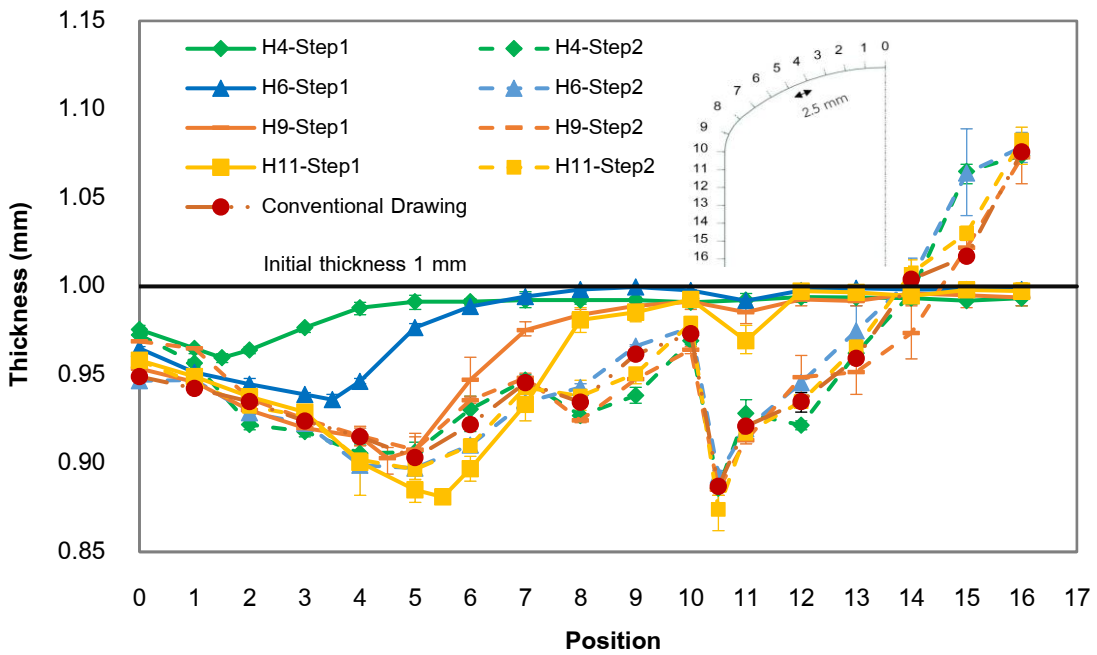


บทความวิจัย

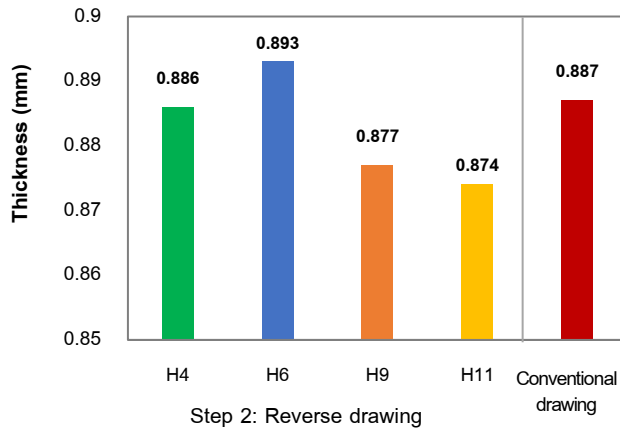
การเปลี่ยนรูปช่วงการขึ้นรูปส่วนโค้งกันด้วยเท่านั้น) ซึ่งการขึ้นรูปในส่วนผนังตรงเกิดการยืดตัวช่วงผนังบริเวณเหนือรัศมีพันธ์ [5] สร้างความเค้นแรงดึงสูงจึงทำให้เกิดการบางลงมากที่สุดที่ตำแหน่งระหว่าง 10-11 จึงเป็นข้อสังเกตที่การขึ้นรูปแบบสลัทางในกรณีขึ้นรูปด้วยพันธ์ที่มีอัตราส่วนโค้ง CR 1.7 ที่ DR 2 ไม่สามารถช่วยลดการบางลงของถ้วยสำเร็จได้มากนักเนื่องจากกลไกการขึ้นรูปส่วนใหญ่เป็นการขึ้นรูปในช่วงที่เป็นผนังตรงของถ้วย เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีขึ้นรูปด้วยพันธ์ที่มีอัตราส่วนโค้ง CR 1.35 ที่ DR 1.7 ถ้วยสำเร็จมีส่วนที่เป็นผนังตรงสั้น การขึ้นรูปส่วนใหญ่เป็นการยืดตัว

ของโค้งกันด้วย ตำแหน่งที่บางที่สุดจึงอยู่บริเวณโค้ง (ตำแหน่งที่ 4 จากรูปที่ 15)

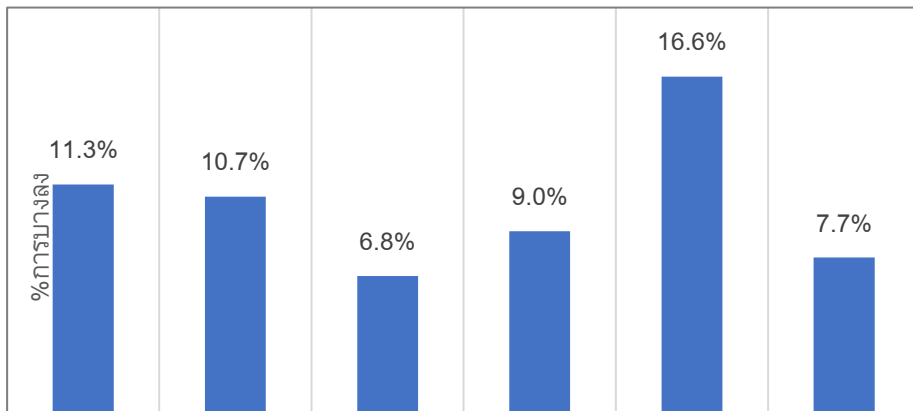
เปอร์เซ็นต์การบางลงของถ้วยทุกสภาวะที่ทำการทดสอบ (กรณีการขึ้นรูปแบบสลัทางนำเสนอสู่ชุดการทดลองที่ถ้วยบางลงน้อยที่สุด) และตำแหน่งที่บางลงมากที่สุด แสดงในรูปที่ 21 ที่ DR 2 ถ้วยสำเร็จมีส่วนสูงของถ้วยส่วนผนังตรงมาก การเปลี่ยนรูปช่วงผนังตรงรุนแรงกว่าจึงบางลงมากที่สุดบริเวณ 10-11 ส่วนที่ DR 1.7 ถ้วยสำเร็จมีส่วนผนังตรงที่สั้น ถ้วยที่โค้งมากกว่า (CR 1.35) จึงบางลงมากกว่าและการใช้เทคนิคการขึ้นรูปสลัทางช่วยลดการบางลงได้ในกรณีนี้



รูปที่ 19 การกระจายตัวของความหนาของการลากขึ้นรูปแบบปกติและแบบสลัทาง 2 ขั้นตอน ด้วยพันธ์ CR 1.7 และ DR 2



รูปที่ 20 ความหนาชิ้นงานตำแหน่งที่บางที่สุดของถ้วยสำเร็จจากการลากขึ้นรูปสลับทางเทียบกับถ้วยที่ขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียวด้วยพรีซ์ CR 1.7 ที่ DR 2



	DR 2		DR 1.7			
DR	CR 1.7	CR 1.7	CR 2	CR 1.7	CR 1.35	CR 1.35
รูปแบบการลากขึ้นรูป	Conventional	Reverse	Conventional	Conventional	Conventional	Reverse
ตำแหน่งที่บางที่สุด	10-11	10-11	9	4	4	4

รูปที่ 21 เปอร์เซนต์การบางลงและตำแหน่งที่บางลงมากที่สุดของถ้วยสำเร็จที่สภาวะการขึ้นรูปต่างกัน



4. สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษางานลากขึ้นรูปลึกด้วยทรงกระบอกกันโค้ง โดยใช้พันทซ์ที่มีอัตราส่วนโค้งที่แตกต่างกัน คือ 10.35 1.7 และ 2 รวมถึงใช้เทคนิคการลากขึ้นรูปแบบสลับทาง ได้ข้อสรุปดังนี้

- ถ้วยที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยพันทซ์ที่มีอัตราส่วนโค้งต่ำ CR 1.35 และ CR 1.7 จะเกิดการบางลงในบริเวณส่วนโค้งของชิ้นงาน (ตำแหน่ง 3-4) ในขณะที่การขึ้นรูปด้วยพันทซ์ที่มีอัตราส่วนโค้งสูง CR 2 (ส่วนผนังตรงของถ้วยสำเร็จยาวกว่า) ตำแหน่งการบางลงมากที่สุดเลื่อนเข้าใกล้ผนังตรงห่างออกจากศูนย์กลางของถ้วย (ตำแหน่ง 9) และการใช้พันทซ์ CR 2 เกิดการบางลงน้อยที่สุด โดยบางลง 6.8 % จากความหนาเริ่มต้น (เปรียบเทียบกับที่ DR เท่ากันที่ 1.7)

- การลากขึ้นรูปแบบสลับทาง ช่วยลดการบางลงในการลากขึ้นรูปด้วยกันโค้ง จาก 16.6% เหลือเพียง 7.7% จากความหนาเริ่มต้นในกรณีการขึ้นรูปด้วย CR 1.35 ที่ DR 1.7 ด้วยกลไกการเปลี่ยนทิศทางการสร้างความเค้นแรงอัดในแนวรัศมี และกลไกความเครียดแข็งจากการขึ้นรูปในขั้นตอนแรก

- กรณีถ้วยกันโค้งที่มีส่วนของผนังตรงยาว การขึ้นรูปช่วงแรกเป็นการขึ้นรูปส่วนโค้งกันถ้วย และการขึ้นรูปช่วงที่ 2 เป็นส่วนที่ขึ้นรูปบริเวณผนังตรง โดยการขึ้นรูปบริเวณผนังตรง เกิดความเค้นแรงดึงสูงที่บริเวณผนังตรงใกล้รัศมีพันทซ์ การขึ้นรูปแบบสลับทางช่วยลดการบางลงได้เฉพาะในการขึ้นรูปช่วงแรกจึงช่วยลดการบางลงในกรณี CR 1.35 ที่ DR 1.7 ซึ่งมีส่วนโค้งกันถ้วยมาก และส่วนผนังตรงที่สั้น และแทบไม่ส่งผลต่อกลไกการบางลงในกรณี CR 1.7 ที่ DR 2.0 ที่มีส่วนโค้งกันถ้วยน้อย และส่วนผนังตรงที่ยาว

5. กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัทสหมิตรถึงแก๊ส จำกัด ที่สนับสนุนทุนในการศึกษาวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

1. H.I. Demirci, M. Yasar, K. Demiray and M.Karali, The theoretical and experiment investigation of blank holder forces plate effect in deep drawing process of AL1050 material, *Materials and Design*, 29, 2008, 526-532.
2. A.I.O. Zaid, Deep drawing mechanism, parameters, defects and recent results: State of the art, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 146, 2016.
3. L. The-Thanh, B. Tien-Long, T. The-Van and N. Duc-Toan, A study on a deep drawing process with two shaping states for a fuel-filter cup using combined simulation and experiment, *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, vol. 11(8) 1-11.
4. H. Zein, M. El-Sherbiny, M. Abd-Rabou and M. El Shazly, Effect of die design parameters on thinning of sheet metal in the deep drawing process, *American Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 1(2), 20-29.
5. S. Olguner and A.T. Bozdana, The effect of friction coefficient on punch load and thickness reduction in deep drawing process, *International Journal of Materials*, 2016, 3, 64-68.



6. M. Vahdati and M. Gerdooei, Numerical analysis of hot deep drawing process of the thick hemispherical head without the blank-holder, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2021, 74, 1775-1786.
7. Z. Zhang, Y. Xu and S.Yuan, Analysis of thickness variation of reverse deep drawing of preformed 5A06 aluminum alloy cup under different temperatures, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86, 521-529.
8. Y. Liu, F. Li, C. Li and J. Xu, Effect of reverse pre-bulging on magnetic medium deep drawing formability of aluminum spherical bottom cylindrical parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103, 4649-4657.
9. Y.Y. Mu, F. Li, C. Li, Y.Q. Zang and J. Xu, Mechanism of pre-deformation effect on sheet deep-drawing forming under magnetic field condition using a magnetorheological fluid (MRF) medium, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 116(3-4), 863–875.
10. C. Zhang, W. Huang, C. Xi, P. Xue, B. Tian and J. Luo, Alternate deep drawing process for spherical parts in near equal-thickness wall, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111, 517-524.
11. J.W. Park, J. Kim and S.S. Kang, Development on a prediction model for experimental condition of flexibly reconfigurable roll forming process, *Metals*, 2019, 9, 869.
12. M. Murugesan, M. Sajjad and D.W. Jung, Experimental and numerical investigation of AA5052-H32 Al alloy with u-profile in cold roll forming, *Materials*, 2021, 14, 470.