การศึกษาการเกิดรอยติ่งของกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกของถ้วยทรงกระบอกกลม
Study of Earing Effects of Cup Drawing

สุรวุฒิ ยะนิล

ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ1518 ถนนประชาราษฎร1 บางซื่อ กทม.
sarawuty@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดรอยติ่งบนชิ้นงานซึ่งเกิดจากกรรมวิธีดึงขึ้นรูปลึก โดยใช้วัสดุอะลูมิเนียมชนิด AA1100 วัสดุเหล็กกล้า ชนิด SPCC โดยแผ่นชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 90 mm หนาเท่ากับ 1 mm กรรมวิธีดึงขึ้นรูปลึกให้ได้เป็นรูปถ้วยกลมทรงกระบอก แล้วทำการวัดหาขนาดของรอยติ่ง เนื่องจากรอยติ่งเป็นข้อบกพร่องของกรรมวิธีขึ้นรูปลึกทำให้ขอบด้านบนของชิ้นงานไม่เรียบมีลักษณะเป็นคลื่น จึงต้องเสียเวลามาตัดขอบส่วนดังกล่าวก่อนนำไปใช้งานหรือนำไปเข้ากรรมวิธีผลิตอื่น พบว่าวัสดุเหล็กกล้าชนิด SPCC มีความสูงเฉลี่ยที่จุดสูงสุดของรอยติ่งเท่ากับ 26.22 mm และมีความสูงเฉลี่ยที่จุดต่ำสุดเท่ากับ 24.93 mm มีเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยการเกิดรอยติ่งเท่ากับ 2.73 เปอร์เซ็นต์ วัสดุอะลูมิเนียมชนิด A1100 มีความสูงเฉลี่ยที่จุดสูงสุดของรอยติ่ง เท่ากับ 26.76 mm และมีความสูงเฉลี่ยที่จุดต่ำสุดเท่ากับ 24.76 mm มีเปอร์เซ็นต์การเกิดรอยติ่งเฉลี่ยเท่ากับ 2.84 เปอร์เซ็นต์การทดลองนี้เพื่อให้ได้ผลของความสูงและเปอร์เซ็นต์การเกิดรอยติ่งของวัสดุแต่ละชนิด เพื่อที่จะเป็นข้อมูลในการศึกษาการเกิดรอยติ่งและแก้ไขต่อไป

Abstract

This research aims to study the behavior of a earing on the workpiece caused by the deep-drawn process. Using AA1100 aluminum material with SPCC steel plate diameter of 90 mm and a thickness of 1 mm, creators of the deep-drawn cup has a circular shape. Then measure the size of a polyp. The earing is a flaw of the creators of the deep edge of the top piece resembles a smooth wave. It must be time to cut the edge of the first to use one method or the other Manufacturer. Found that steel SPCC average height of the highest point of a earing of 26.22 mm and an average height at the lowest point of 24.93 mm, with the percentage of marks earing of 2.73 percent aluminum type A1100 has a high average. The peak of a earing of 26.76 mm and an average height at the lowest point of 24.76 mm and the percentage of marks earing were 2.84 percent this experiment to get the effect of a high percentage of a projection of each material. To the data in the study of aging and improve projection.

คำสำคัญ: รอยติ่ง/กรรมวิธีดึงขึ้นรูปลึก/แม่พิมพ์

1.บทนำ

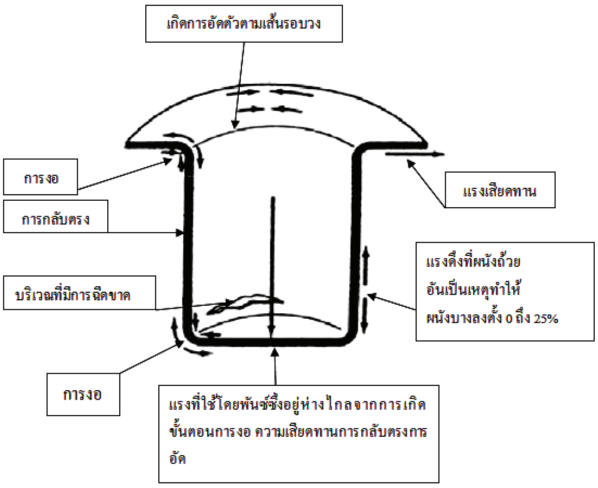
การดึงขึ้นรูปลึก (Deep drawing) เป็นการขึ้นรูปโลหะที่สำคัญอย่างหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปส่วนประกอบคือ พันช์ (Punch) ดาย (Die) และแบลงก์โฮลเดอร์ (Blank Holder) การดึงขึ้นรูปลึกเป็นการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยการดึงและการกด โดยที่พันช์เคลื่อนที่กดแผ่นชิ้นงานเข้าไปในดายเกิดความเค้นกดในแนวเส้นรอบวงกลมและความเค้นดึงในแนวรัศมีโดยมีแบลงก์โอลเดอร์กดที่ขอบ (Flange) ในกระบวนการขึ้นรูปลึก สมบัติทางกลของโลหะแผ่น (Sheet Metal) ที่ผ่านขบวนการรีดมีค่าไม่เท่ากันในระนาบ (Plane) ค่า Plastic Strain Ratio (R-valve) คือสมบัติที่ไม่เหมือนกันทุกทิศทาง (Anisotropy) ของโลหะการขึ้นรูปถ้วยกลมทรงกระบอกในกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกจะเกิด Planar Anisotropy ($\overline{R}$) เนื่องจากแผ่นโลหะมีความแข็งแรงในแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดรอยติ่งที่ขอบชิ้นงานเรียกรอยติ่งนี้ว่า Earing

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ ที่มีผลต่อความสูงของรอยติ่ง ในแต่ละชนิดของแผ่นโลหะ วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้คือเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304, เหล็กกล้า SPCC และเหล็กกล้า JIS G 3141 มีความหนาเริ่มต้น 1 mm จากการศึกษาพบว่าความสูงของรอยติ่งของแต่ละวัสดุเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์มีค่าใกล้เคียงกันและเหล็กกล้า SPCC มีความสูงของรอยติ่งมากที่สุด [3]

2.1 การดึงขึ้นรูปลึก (Deep Drawing)

ขบวนการการกดบนโลหะแผ่นทุกขบวนการ จะเห็นได้ว่าขบวนการดึงขึ้นรูป (Drawing) นั้นสลับซับซ้อนมากที่สุด และยากต่อการควบคุม ขั้นตอนของกระบวนการนี้ ได้ถูกวางแผนไว้สำหรับขบวนการตัดและขบวนการดัดงอด้วย คนที่มีความชำนาญงานในด้านการดึงขึ้นรูปโลหะแผ่นมาหลายปี ก็ยังไม่อาจที่จะสามารถทำนายผลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการดึงขึ้นรูปชิ้นงานอันใหม่ได้อย่างถูกต้องการดึง (Tension) การทำการดึงขึ้นรูปทั้งหมดได้ถูกทำโดยการใช้แรงที่พันซ์ผลักลงบนก้นถ้วยที่แบน ตำแหน่งของแรงที่พันซ์ใช้บนแผ่นชิ้นงานเริ่มจะถูกห่างไกลจากตำแหน่งที่โลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเสียดทาน ขณะที่ถ้วยถูกทำให้ลึกลงในตำแหน่งที่กล่าวถึงนี้ จะอยู่ห่างมากยิ่งขึ้นตามลำดับ ผนังถ้วยจึงได้ทำหน้าที่ส่งแรงที่พันซ์ไปยังพื้นที่ ที่ถูกงอโดยทำให้ตรง เกิดความเสียดทาน และถูกอัด ผลที่เกิดขึ้นก็คือจะเกิดการดึงที่สูงขึ้นที่ผนังของถ้วย ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ผลที่เกิดขึ้นจากแรงดึงที่ผนังของถ้วย

ผนังถ้วยที่อยู่ใกล้กับรัศมีของพันซ์จะเกิดความเค้นสูงสุด และจะมีขนาดบางกว่าโลหะเดิมทำให้มีการฉีกขาด ที่อาจจะเกิดขึ้นบ่อยที่บริเวณนี้ ดังนั้นการลากขึ้นรูปจึงเกี่ยวข้องกับการแปรเปลี่ยนของแรงดึงที่สูง หรือการยืดที่มากขึ้นซึ่งเป็นผลจากการออกแบบดายที่ใช้

2.2 สมบัติของวัสดุ (Material Properties)

1. อะลูมิเนียม AA1100

อะลูมิเนียมมีน้ำหนักเบาค่าความแข็งแรงดึงต่ำ ทนต่อไอน้ำ ทนต่อการกักกร่อนของสารเคมีบางชนิด นำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีสามารถสะท้อนแสงและความร้อนได้ดีสามารถนำไปตัดเฉือนและขึ้นรูปได้ง่ายการขึ้นรูปสามารถทำได้ทั้งร้อนและเย็น และสามารถนำไปเชื่อมและบัดกรี ได้ดี อะลูมิเนียมที่ใช้มีอยู่ด้วยกันหลาย

2. เหล็ก SPCC

เหล็กกล้า SPCC เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น (Cold Rolled Carbon Steel Sheet or Strip) เหล็กเกรดนี้สามารถใช้ทำ

Application ได้หลากหลายมากเช่น ชิ้นส่วนอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า ตู้เย็น ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ เป็นต้น

2.3 รอยติ่ง (Earing)

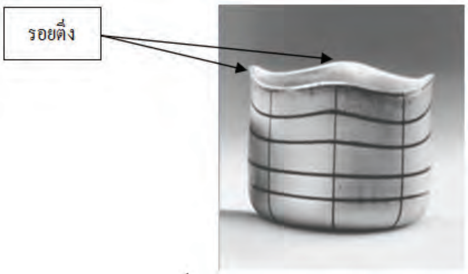
รอยติ่งจะเกิดจากขอบด้านบนสุดของถ้วยไม่เรียบมีลักษณะเป็นคลื่นซึ่งเป็นผลจากพฤติกรรมแอนไอโซทรอปิก (Anisotropy) จึงต้องตัดส่วนดังกล่าวออกก่อนนำไปใช้งานหรือนำไปเข้ากรรมวิธีผลิตอื่นต่อไป ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองวัสดุ พฤติกรรมแอนไอโซทรอปิก (Anisotropy) เป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงเทคโนโลยี เช่น สมบัติด้านความยืดหยุ่นและพลาสติก สมบัติเชิงกล ความต้านแรงดึง และสมบัติทางด้านฟิสิกส์เช่นการนำไฟฟ้าและความร้อน ความเป็นแม่เหล็กและการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโลหะต่างก็ขึ้นกับทิศทางทั้งสิ้น ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดของพฤติกรรมแอนไอโซทรอปิก (Anisotropy) ก็คือการเกิดรอยติ่ง (Earing) ที่ชิ้นงานดึงขึ้นรูปลึก รวมทั้งชิ้นงานที่มีความหนาไม่สม่ำเสมอ เมื่อขึ้นรูปมากขึ้น ผลของแอนไอโซทรอปิกทำให้รอยติ่งสูงขึ้น ความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุแตกต่างกันบริเวณที่ขึ้นรูปมากจะเกิดรอยติ่ง การเกิดรอยติ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของสมบัติเชิงกลในทิศทางต่างๆ ที่ทำมุมกับทิศทางการรีดโลหะแผ่นความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยติ่งกับสมบัติของวัสดุชิ้นงาน

รอยติ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนรูปถาวรที่มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในแต่ละทิศทางโดยที่ขอบด้านบนสุดของถ้วยที่ผ่านกรรมวิธีลากขึ้นรูปลึก มีขอบไม่เรียบและมีลักษณะเป็นคลื่นนั่นคือ ประกอบด้วยยอดคลื่น (Peaks) และท้องคลื่น (Valleys) [1] เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยติ่ง (%) คือ ร้อยละของขนาดรอยติ่งดังสมการที่ 1

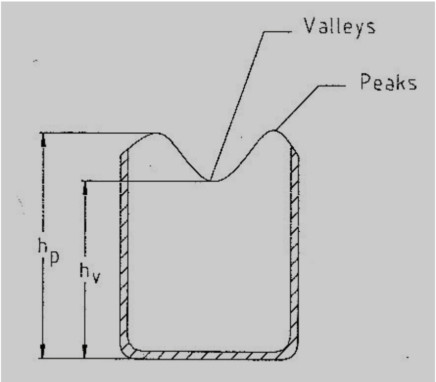
$$(\%)Earing = \frac{(h_p - h_v)}{h_v} \times 100 \qquad (1)$$

h_p คือ ความสูงของยอดคลื่น วัดจากก้นถ้วย

h_v คือ ความสูงของท้องคลื่น วัดจากก้นถ้วย



ภาพที่ 3 ลักษณะการเกิดเอียริ่งของถ้วยทรงกระบอกกลม



ภาพที่ 4 แสดงยอดคลื่น (Peaks) และท้องคลื่น (Valleys)

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ทำขึ้นเพื่อศึกษาการเกิดรอยติ่งในกรรมวิธีการดึงขึ้นรูปลึกชิ้นงานถ้วยทรงกระบอกกลม โดยการสร้างชุดแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลึกและทำการทดลองดึงขึ้นรูปลึกชิ้นงานถ้วยทรงกระบอกกลม ซึ่งในการทดลองนี้ได้เลือกวัสดุมาทำการทดลอง 2 ชนิดคือ อะลูมิเนียม ชนิด AA1100 และเหล็กกล้าชนิด SPCC มาทำการดึงขึ้นรูปลึกชิ้นงานถ้วยทรงกระบอกกลม เมื่อได้ชิ้นงานถ้วยทรงกระบอกกลมแล้ว จึงมาทำการวัดหาค่าความสูงของรอยติ่งที่เกิดขึ้นในชิ้นงานทดลอง เพื่อเปรียบเทียบความความสูงของรอยติ่งในชิ้นงานแต่ละชิ้น

3.1 ดำเนินการออกแบบชิ้นงานถ้วยทรงกระบอกกลม

ในการออกแบบชิ้นงานถ้วยทรงกระบอกกลมออกแบบมาเพื่อเป็นตัวกำหนดในการคำนวณค่าต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบออกแบบสร้างแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลึกชิ้นงานถ้วยทรงกระบอกกลมซึ่งชิ้นงานถ้วยทรงกระบอกกลมได้ออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 mm, หนา 1 mm และรัศมีก้นถ้วย 5 mm โดยโปรแกรมออกแบบ ดังในภาพที่ 5

3.2 คำนวณหาค่าต่างๆที่ใช้ในการทดลองดึงขึ้นรูปลึก

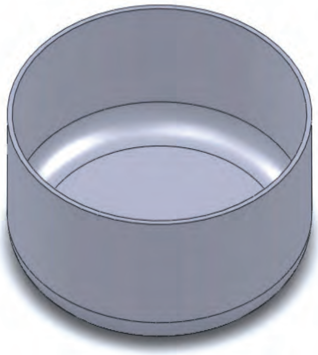
ในการคำนวณหาค่าต่างๆที่ใช้ในการทดลองดึงขึ้นรูปลึกนี้ เพื่อนำผลลัพธ์มาทำการออกแบบแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลึก และกำหนดขนาดส่วนประกอบต่างๆของแม่พิมพ์

3.2.1 การคำนวณหาขนาดของแผ่นชิ้นงาน (Blank Size)

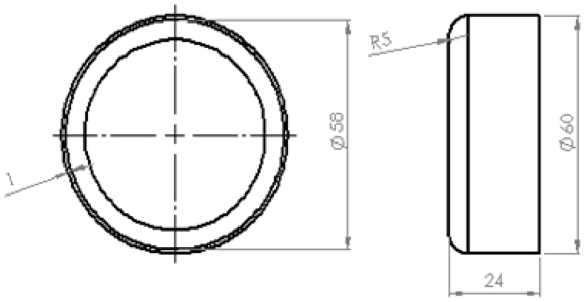
3.2.2 คำนวณหาแรงสูงสุดในการดึงขึ้นรูปที่ไม่ทำให้วัสดุเกิดการฉีกขาด

3.2.3 คำนวณแรงกดบนแผ่นจับยึดชิ้นงานในการดึงขึ้นรูปลึก

3.2.4 คำนวณหาค่าแรงสปริง



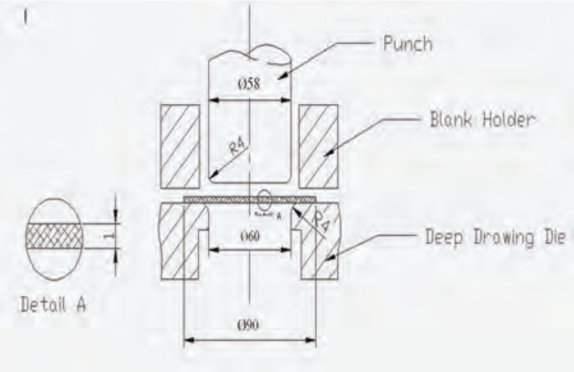
ภาพที่ 5 ลักษณะของชิ้นงานถ้วยทรงกระบอกกลม

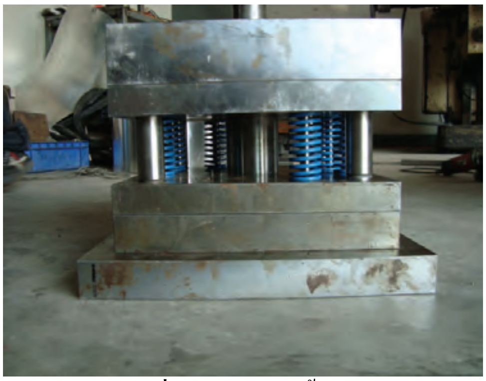


ภาพที่ 6 ขนาดของชิ้นงานถ้วยทรงกระบอกกลม

3.3 ทำการออกแบบแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลึกชิ้นงานถ้วยทรงกระบอกกลม

กำหนดขนาดชิ้นงานเริ่มต้นและนำค่าที่ได้จากการคำนวณ และนำค่าที่คำนวณได้มาช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์ ซึ่งแม่พิมพ์ขึ้นรูปลึกจะมีส่วนประกอบดังภาพที่ 7 ในภาพที่ 8 คือแม่พิมพ์ที่ได้จากการออกแบบนำไปทดลองการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอกกลม





ภาพที่ 8 แม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลึก

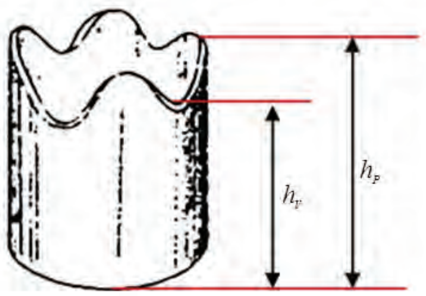
3.4 การทดลองดึงขึ้นรูปลึกชิ้นงาน

การขึ้นรูปถ้วยทรงกลมดังภาพที่ 9 พบว่าที่ขอบถ้วยมีลักษณะไม่สม่ำเสมอเนื่องจากการไหลของแผ่นโลหะ

ภาพที่ 9 ชิ้นงานที่ผ่านการดึงขึ้นรูปลึกและการวัดความสูงถ้วยทรงกระบอกกลม

3.5 การวัดความสูงของรอยติ่งและคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเกิดของรอยติ่ง

วัดค่าความสูงที่ขอบถ้วยโดยรอบเพื่อหาค่า h_P และ h_V ดังภาพที่ 10 โดยใช้เวอร์เนียร์ไฮเกจ



ภาพที่ 10 การวัดความสูงของรอยติ่ง

4. ผลที่ได้จากการทดลองดึงขึ้นรูปลึก

การทดลองขึ้นรูปลึกถ้วยทรงกระบอกกลมโดยใช้แม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลึกในภาพที่ 8 วัสดุที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด คือ เหล็กกล้าชนิด SPCC และอะลูมิเนียม ชนิด AA1100 โดยตัดวัสดุทดลองทั้ง 2 ชนิดนี้ให้เป็นแผ่นกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 90 mm. มีความหนาเท่ากับ 1 mm. แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปเท่ากับ 5 ตัน ซึ่งค่าแรงนี้ได้จากการคำนวณแรงขึ้นรูปและใช้เครื่องเพรสไฮดรอลิกส์ (Hydraulic Press) ในการขึ้นรูป ใช้น้ำมันหล่อลื่นเบอร์ SAE 40 ช่วยหล่อลื่นในการขึ้นรูป ซึ่งจากการทดลองดึงขึ้นรูปลึกของวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ ปรากฏผลการทดลองว่าสามารถดึงขึ้นรูปชิ้นงานได้ทั้ง 2 ชนิด ซึ่งชิ้นงานถ้วยทรงกระบอกกลมที่ได้จากการดึงขึ้นรูปมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 60 mm สูง 24 mm และตรงบริเวณขอบชิ้นงานเกิดความไม่สม่ำเสมอโดยเกิดรอยติ่งขึ้นมา 4 ติ่ง ดังวัตถุประสงค์ของการทดลอง จึงได้ทำการวัดความสูงของรอยติ่งโดยมีผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 1 พบว่าค่าความสูงที่จุดสูงสุดของรอยติ่ง (h_p) และความสูงที่จุดต่ำสุดของรอยติ่ง (h_v) จากกรรมวิธีดึงขึ้นรูปลึกของวัสดุเหล็กกล้า ชนิด SPCC ในแต่ละชิ้นเมื่อทำการวัดแล้ว

องศา	ความสูงของถ้วยทรงกระบอกกลมของวัสดุเหล็กกล้า SPCC (mm)				
	ชิ้นงานที่1	ชิ้นงานที่ 2	ชิ้นงานที่ 3	ชิ้นงานที่ 4	ชิ้นงานที่ 5
$h_P 0^\circ,360^\circ$	26.15	26.20	26.25	26.30	26.15
$h_V 45^\circ$	25.25	25.50	25.35	25.40	25.60
$h_P 90^\circ$	26.10	25.95	25.75	25.95	26.05
$h_V 135^\circ$	25.35	25.35	24.95	25.05	25.65
$h_P 180^\circ$	26.15	26.00	25.45	25.95	26.25
$h_V 225^\circ$	25.75	24.95	24.70	25.40	25.50
$h_P 270^\circ$	26.50	25.65	25.25	26.10	25.85
$h_V 315^\circ$	25.75	25.20	24.75	25.60	25.10

ตารางที่ 2 พบว่าค่าความสูงเฉลี่ยที่จุดสูงสุดของรอยติ่ง ($h_{avg,P}$) และความสูงเฉลี่ยที่จุดต่ำสุดของรอยติ่ง ($h_{avg,V}$) และเปอร์เซ็นต์การเกิดรอยติ่งของวัสดุเหล็กกล้าชนิด SPCC ในแต่ละชิ้น

ชิ้นที่	$h_{avg,P}$	$h_{avg,V}$	เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยติ่ง(%)
1	26.22	25.52	2.74
2	25.95	25.25	2.77
3	25.67	24.93	2.95
4	26.07	25.36	2.80
5	26.07	25.46	2.40
		ค่าเฉลี่ย	2.73

ตารางที่ 3 พบว่าค่าความสูงที่จุดสูงสุดของรอยติ่ง (h_P) และความสูงที่จุดต่ำสุดของรอยติ่ง (h_V) จากกรรมวิธีดึงขึ้นรูปลึกของวัสดุอะลูมิเนียม ชนิด AA1100 ในแต่ละชิ้นเมื่อทำการวัดแล้ว

องศา	ความสูงของถ้วยทรงกระบอกกลมของวัสดุอะลูมิเนียม AA1100 (mm)				
	ชิ้นงานที่1	ชิ้นงานที่ 2	ชิ้นงานที่ 3	ชิ้นงานที่ 4	ชิ้นงานที่ 5
$h_P 0^\circ,360^\circ$	26.35	26.55	27.20	25.75	26.80
$h_V 45^\circ$	25.15	26.10	26.60	25.25	26.10
$h_P 90^\circ$	25.90	26.35	27.00	25.35	26.70
$h_V 135^\circ$	25.30	25.50	25.55	24.35	25.80
$h_P 180^\circ$	26.05	25.95	26.15	25.15	26.05
$h_V 225^\circ$	25.45	25.35	25.45	24.50	25.15
$h_P 270^\circ$	26.25	26.20	26.70	25.50	26.10
$h_V 315^\circ$	25.90	25.85	26.30	24.95	25.75

ตารางที่ 5 พบว่าค่าความสูงเฉลี่ยที่จุดสูงสุดของรอยติ่ง ($h_{avg,P}$) และความสูงเฉลี่ยที่จุดต่ำสุดของรอยติ่ง ($h_{avg,V}$) และเปอร์เซ็นต์การเกิดรอยติ่งของวัสดุอะลูมิเนียม ชนิด AA1100 ในแต่ละชิ้น

ชิ้นที่	$h_{avg,P}$	$h_{avg,V}$	เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยติ่ง (%)
1	26.13	25.45	2.70
2	26.26	25.70	2.18
3	26.76	25.97	3.03
4	25.43	24.76	2.72
5	26.41	25.70	2.77
		ค่าเฉลี่ย	2.68

5. สรุปผลการวิเคราะห์

จากการทดลองดึงขึ้นรูปลึกชิ้นงานถ้วยทรงกระบอกกลม เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การเกิดรอยติ่งของวัสดุทั้งสองชนิด คือ วัสดุอะลูมิเนียม ชนิด AA1100 และวัสดุเหล็กกล้า ชนิด SPCC โดยวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 90 mm. และหนาเท่ากับ 1 mm. แรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูปเท่ากับ 5 ตัน ใช้เครื่องเพรสในการขึ้นรูปสารหล่อลื่นที่ใช้คือน้ำมันเครื่องเบอร์ SAE 40 จากการดึงขึ้นรูปลึกปรากฏว่าสามารถดึงขึ้นรูปชิ้นงานถ้วยทรงกระบอกกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 60 mm และสูง 24 mm เมื่อวัดความสูงที่รอยติ่งของชิ้นงานถ้วยทรงกระบอกกลมทั้งสามชนิดแล้วทำการหาเปอร์เซ็นการเกิดรอยติ่งออกมาและสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้ คือ วัสดุเหล็กกล้าชนิด SPCC มีความสูงเฉลี่ยที่จุดสูงสุดของรอยติ่ง (Peak) เท่ากับ 26.22 mm และมีความสูงเฉลี่ยที่จุดต่ำสุด (Valley) เท่ากับ 24.93 mm มีเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยการเกิดรอยติ่งเท่ากับ 2.73 เปอร์เซ็นต์ วัสดุอะลูมิเนียมชนิด A1100 มีความสูงเฉลี่ยที่จุดสูงสุดของรอยติ่ง เท่ากับ 26.76 mm และมีความสูงเฉลี่ยที่จุดต่ำสุดเท่ากับ 24.76 mm มีเปอร์เซ็นต์การเกิดรอยติ่งเฉลี่ยเท่ากับ2.84 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเกิดรอยติ่งของวัสดุทั้ง 2 ชนิด จะเห็นได้ว่าวัสดุที่เกิดรอยติ่งมากที่สุดก็คือ เหล็กกล้า ชนิด SPCC ส่วนวัสดุที่เกิดรอยติ่งน้อยที่สุดคือ อะลูมิเนียม ชนิด AA1100

6. เอกสารอ้างอิง

[1] วารุณี เปรมานนท์, “แม่พิมพ์โลหะแผ่น”, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2552.

[2] ชัยวัฒน์ ยิ่งสุขวัฒนา, สำรวจ อินแบน, “การวิเคราะห์ผลกระทบของรัศมีด้านบนของแม่แบบและอัตราส่วนการขึ้นรูปในกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์”, วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2549

[3] สุรวุฒิ ยะนิล, วิรัช จิรเสาวภาคย์ และวิเชียร สิงห์ใหม่, “ศึกษาการเกิดรอยติ่งของกระบวนการขึ้นรูปลึกถ้วยทรงกระบอกเนื่องจากสมบัติแอนไอโซโทรปิกของโลหะแผ่น”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.