การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22
15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

ศึกษาการเกิดรอยติ่งของกระบวนการขึ้นรูปลึกถ้วยทรงกระบอกเนื่องจากสมบัติแอนไอโซโทรปิกของโลหะแผ่น

Study of Earing in Deep Drawing processes for Cylinder Cups Depending on Anisotropic Property of Sheet Metal

สุรวุฒิ ยะนิล[1] วิรัช จิรเสาวภาคย์[2] และวิเชียร สิงห์ใหม่
ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทร 0-2913-2500-24 ต่อ 3288 โทรสาร 0-2587-8261 อีเมล์ [1]swut2000@hotmail.com [2]wjr@kmitnb.ac.th

บทคัดย่อ

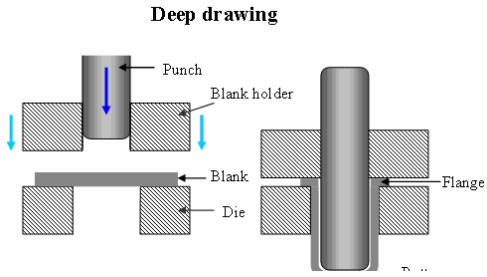
การขึ้นรูปโลหะแผ่นในการผลิตชิ้นส่วนถ้วยทรงกระบอกของกระบวนการขึ้นรูปลึกมักจะเกิดปัญหาการฉีกขาด และรอยติ่ง ทั้งนี้กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นมีการกำหนดค่าตัวแปรการผลิตที่สำคัญเช่นแรงกดของแบลงก์โฮลเดอร์ และขนาดรูปร่างของแบลงก์ เป็นต้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาสมบัติแอนไอโซโทรปิกของโลหะแผ่นโดยประยุกต์ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นสำหรับจำลองกระบวนการขึ้นรูปและใช้สมการเกรฑ์การครากของ Hill'R(1948) นำมาศึกษาการเกิดรอยติ่งของถ้วยทรงกระบอกโดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงของ Naval [7] ในผลการทดลองจริงใช้วัสดุชิ้นงานโลหะแผ่นชนิด EDD ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นชิ้นงานเท่ากับ 88.82mm ผลลัพธ์ค่าความสูงของรอยติ่งในแบบจำลองFEM กับการทดลองจริงมีค่าใกล้เคียงกัน และทำการศึกษาถึงอิทธิพลของแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ ที่มีผลต่อความสูงของรอยติ่ง ในแต่ละชนิดของแผ่นโลหะ วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้คือ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304, เหล็กกล้า SPCC และเหล็กกล้า JIS G 3141 มีความหนาเริ่มต้น 1 mm จากการศึกษาพบว่าความสูงของรอยติ่งของแต่ละวัสดุเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์มีค่าใกล้เคียงกันและ เหล็กกล้า SPCC มีความสูงของรอยติ่งมากที่สุด

Abstract

The sheet metal forming for cylinder cups deep drawing parts has often encountered tearing and earing problems. In the sheet metal forming, many important parameters, such as blank holder force and blank configurations need to be defined. This research studied on anisotropic property for sheet metal by applying nonlinear Finite Element Method for modeling deep drawing process and using Hill'R (1948) Yield Criterion. This work was compared the experiment result of Naval [7]. This experiment used material EDD sheet steel diameter of blank sheet is 88.52 mm. Result from finite element modeling and experiment were closely related. Furthermore, this experiment studied the affecting to height of earing. The metal sheet used in this study is AISI 304 stainless steel, SPCC steel and JIS G 3141 steel with the initial thickness of 1 mm. From the study, heights of earing from each sheet metal depended were closely related and SPCC steel had the most height earing.

คำสำคัญ : Planar Anisotropy, Earing, Deep Drawing

1. การขึ้นรูปลึก (Deep Drawing)



รูปที่1 แสดงลักษณะของกระบวนการขึ้นรูปลึก

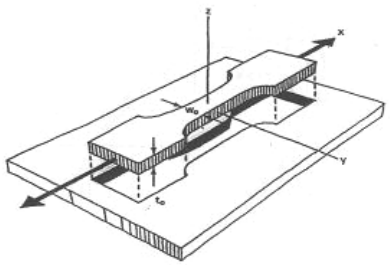
ชาญ [1] การดึงขึ้นรูปลึก (Deep drawing) เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่สำคัญมากอย่างหนึ่งการดึงขึ้นรูปลึกเป็นการขึ้นรูปด้วยการดึงและการกดแผ่นโลหะขึ้นรูปด้วยความเค้นกดในแนวเส้นรอบวง และความเค้นดึงในแนวรัศมีแม่พิมพ์ประกอบด้วยพั้นช์ดาย และแบลงก์โฮลเดอร์เมื่อพันช์เคลื่อนที่จะ ดึงแผ่นแบลงก์ให้ผ่านเข้าไปในช่องดายการขึ้นรูปเริ่มต้นด้วยการยืดก่อน เมื่อเริ่มเกิดกันชิ้นงานขึ้นแล้วจึงมีการดึงขึ้นรูปลึกต่อไปจนสำเร็จแรงดึงขึ้นรูปส่งผ่านจากกันชิ้นงานไปยังผนังชิ้นงานในบริเวณที่มีการขึ้นรูป ความเค้นดึงในแนวแกน σ_Z กระทำที่ผนังชิ้นงานซึ่งอยู่ระหว่างรัศมีขอบดายกับกันชิ้นงาน

2. พลาสติกแอนไอโซทรอปิก

ชาญ [1] กรรมวิธีการขึ้นรูปส่วนมากใช้สมมติฐานว่าโลหะมีพฤติกรรมไอโซโทรปิก (Isotropy) และมีสมบัติเท่ากันในทุกๆ ทิศทางซึ่งเป็นสมมติฐานที่ไม่ถูกต้องสมบัติของวัสดุมัก ขึ้นอยู่กับทิศทางนั่นคือวัสดุมีพฤติกรรมแอนไอโซโทรปิก (Anisotropy) ลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงเทคโนโลยีเช่นสมบัติด้านความยืดหยุ่นและพลาสติกสมบัติเชิงกลความต้านแรงดึง และสมบัติทางด้านฟิสิกส์เช่นการนำไฟฟ้า และความร้อน ความเป็นแม่เหล็ก และการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโลหะต่างก็ขึ้นกับทิศทางทั้งสิ้น

Hosford [4] พารามิเตอร์ที่มีประโยชน์คืออัตราส่วน R ของความเครียดพลาสติกมื่อ w และ t คือทิศทางความกว้างและความหนาของชิ้นทดสอบการดึงตามลำดับดังนั้น $\varepsilon_w = \ln(w/w_0)$, $\varepsilon_t = \ln(t/t_0)$ สำหรับวัสดุไอโซทรอปิก $R = 1$

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon t} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \qquad (1)$$



รูปที่ 2 ชิ้นทดสอบการดึงที่เป็นแผ่นแถบตัดมาจากแผ่น ค่า R

สำหรับเหล็กกล้าค่า R และโมดูลัสยืดหยุ่น R มักแปรผันคล้ายกันตามเนื้อรูปผลึกแม้ว่าสหสัมพันธ์พื้นฐานไม่แม่นตรงแต่ก็มีพื้นฐาน สำหรับใช้กับเครื่องมือวัดเชิงอุตสาหกรรมขนาดเล็กซึ่งวัดค่า E ของแผ่นแถบบางด้วย Sonic Velocity และปรับให้อ่านค่า R ได้โดยปกติค่า R มักแปรผันตามทิศทางทดสอบ θ และมักใช้แสดงคุณลักษณะของวัสดุโดยค่า R เฉลี่ยคือ R ซึ่ง

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \qquad (2)$$

2.1 ทฤษฎีสภาพแอนไอโซทรอปีของHill1948

[3] ทฤษฎีของ Hill จะพิจารณาสภาวะของ Orthotropic Anisotropy อย่างง่ายคือจะพิจารณาค่าทุกๆ จุดในเนื้อวัสดุจะมีระนาบที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน 3 ระนาบซึ่งมีความสมมาตรแนวเส้นที่เกิดจากการตัดของPlane ทั้งสามจะเป็ยแกนหลัก(Principle axes)ของแอนไอโซโทรปิกHillได้เสนอสมการของเกณฑ์การคราก(Yield Criterion) ดังนี้

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \qquad (3)$$

เมื่อ F, G, H, L, M และ N คือค่าคงตัวซึ่งแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปีสังเกตว่าถ้า $F = G = H$ และ $L = M = N = 3F$ สมการนี้ลดรูปลงเป็นเกณฑ์ของฟอนมิเซสทฤษฎีจะสมมติว่าไม่มี Bauschinger effect และ Hydrostatic stress จะไม่มีอิทธิพลต่อการครากค่าคงตัว F, G และ H สามารถประเมินได้จากการทดสอบการดึงเราจะตั้งสมมติฐานเช่นเดียวกับ Isotropic Material คือให้ $f(\sigma_{ij})$ เป็น Plastic potential ซึ่งทำให้เราสามารถหาการเพิ่มขึ้นของ Strain ได้จาก Partial Differential ของ $f(\sigma_{ij})$ ด้วย σ_{ij} ดังนี้

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial f(\sigma_{ij})} \qquad (4)$$

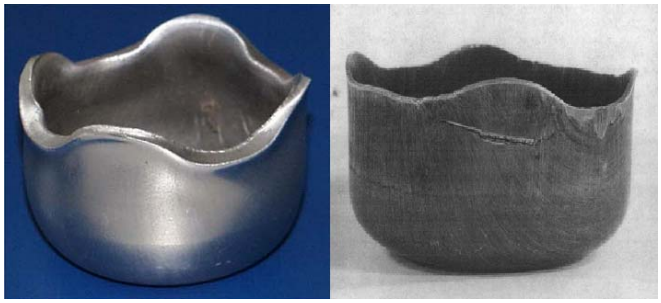
อัตราส่วนระหว่างค่าความเครียดของความกว้างต่อความหนา เรียกว่า "R-value"หาได้จาก $R_x = \frac{d\varepsilon_y^p}{d\varepsilon_z^p}$ ถ้าพิจารณา ค่าความเครียดน้อยๆ ค่าความเครียดเพิ่มขึ้นในด้านกว้างของแท่งวัสดุหาได้จากสมการ ดังนั้นค่า R-value จะได้

$$R_\alpha = \frac{H + (2N - F - G - 4H)\sin^2\alpha\cos^2\alpha}{F\sin^2\alpha + G\cos^2\alpha} \qquad (5)$$

สมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดประสิทธิผลที่เรียกว่ากฎยกกำลัง (Power Law) $\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon}^n$ เมื่อ K คือ สัมประสิทธ์ความต้านแรง และ n คือ เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด

3. รอยติ่ง

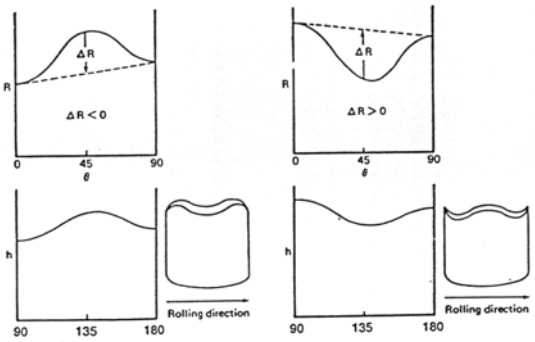
รอยติ่ง (Earing) จะเกิดจากการขึ้นรูปลึกของโลหะแผ่นซึ่งจะมีลักษณะเป็นรอยยักโค้งเว้าบริเวณขอบของชิ้นงาน แต่การใช้งานจริงแล้วเราไม่ได้ต้องการส่วนที่เป็นรอยติ่งนี้จึงต้องมีการตัดออกซึ่งจะทำให้เสียเนื้อวัสดุซึ่งเมื่อทำในปริมาณมากจะมีผลต่อต้นทุนจึงมีการวิจัยและหา ทางแก้ไขเพื่อหาวิธีที่จะลดขนาดของรอยติ่งให้มีน้อยที่สุด



รูปที่ 3 แสดงลักษณะรอยติ่งของถ้วยทรงกระบอก

ชาญ[1] ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดของพฤติกรรมแอนไอโซโทรปิกก็คือการเกิดรอยติ่งที่ชิ้นงานดึงขึ้นรูปลึกรวมทั้งชิ้นงาน ที่มีความหนาที่ขอบไม่สม่ำเสมอเมื่อขึ้นรูปมากขึ้นผลของแอนไอโซโทรปิกทำให้รอยติ่งสูงขึ้นความสามารถ ในการขึ้นรูปของวัสดุแตกต่างกันบริเวณที่ขึ้นรูปมากจะ เกิดรอยติ่งการเกิดรอยติ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของสมบัติเชิงกลในทิศทางต่าง ๆที่ทำมุมกับทิศทางการรีดโลหะแผ่น นั่นคือทิศทางของเกรนที่ได้จากการรีดโลหะแผ่นมีแอนไอโซโทรปิก 2 ทิศทาง คือแอนไอโซโทรปิกในแนวตั้งฉาก (แนวความหนา) และในแนวระนาบ

Hosford [4] ขอบด้านบนของถ้วยที่ได้จากการดรอว์ไม่เรียบอย่างสมบูรณ์แต่ค่อนข้างมีตำแหน่งที่สูงหรือเรียกว่ารอยติ่ง พร้อมทั้งมีแอ่ง (Valleys) อยู่ระหว่างรอยติ่งลักษณะทั่วไปคือมีรอยติ่ง 4รอยแต่บางครั้ง



รูปที่ 4 แสดงลักษณะของรอยติ่งที่ทิศทางต่าง ๆ

ก็อาจพบว่ามี 2, 6 หรือ 8 รอย รอยติ่งเกิดจากผลของแอนไอโซทรอปิกในระนาบและมีความสัมพันธ์ กับการแปรผันเชิงมุมของค่า Planar Anisotropy คือ การวัดผลต่างของค่า R – value ในแต่ละทิศทางในการรีดโลหะแผ่น และสามารถบอกการเกิดรอยติ่งที่ชิ้นงานได้ โดยหาได้จากสมการ

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2} \qquad (6)$$

เมื่อ $\Delta R = 0$ จะไม่เกิดรอยติ่ง

$\Delta R > 0$ เกิดรอยติ่งที่ 0° และ 90°

$\Delta R < 0$ เกิดรอยติ่งที่ประมาณ $\pm 45^\circ$

4. วิธีการ

การดำเนินการวิจัยการวิเคราะห์ศึกษาสมบัติAnisotropyของโลหะแผ่นในกระบวนการขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองและนำผลลัพธ์ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงของNava [5] ซึ่งได้ทำการศึกษาขนาดของแผ่นชิ้นงานเพื่อให้เกิดรอยติ่งน้อยที่สุดในการทดลองได้ใช้วัสดุชิ้นงานคือ EDD steel sheet ค่าสมบัติของวัสดุดังในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 แสดงค่าสมบัติของวัสดุ EDD Steel Sheet [7]

Material	n	K	R_0	R_{45}	R_{90}	ΔR	$\bar{R}$
EDD	0.237	431	1.67	1.16	1.76	0.55	1.43

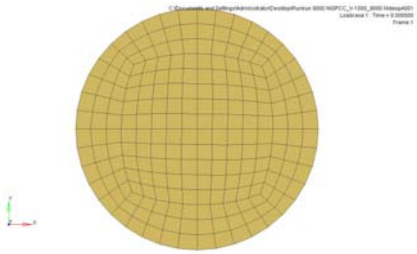
ตารางที่ 2 แสดงค่าสมบัติการต้านแรงดึงของ EDD Steel Sheet

Material	Yield stress (N/mm^2)	Ultimate tensile stress (N/mm^2)	Percentage elongation (using 50 mm gauge length)
EDD	155	250	45

ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องนำผลลัพธ์ของแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของการทดลองจริงเมื่อค่าที่ได้ใกล้เคียงกันจึงนำแบบจำลองนี้ ไปวิเคราะห์การเกิดรอยติ่งของวัสดุชนิดอื่นๆในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุ3 ชนิด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304, เหล็กกล้า JIS G3141 และเหล็กกล้า SPCC ซึ่งมีความหนา 1 mmและวัดความสูงเปรียบเทียบกันของรอยติ่งที่เกิดขึ้นของถ้วย ทรงกระบอกของแต่ละวัสดุ

4.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการขึ้นรูปลึก

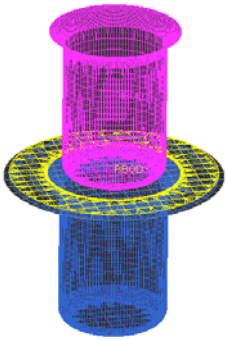
ในแบบจำลองการขึ้นรูปกำหนดให้พันช์และดายเป็นวัตถุแข็งเกร็ง แผ่นชิ้นงานมีสมบัติแบบ Elastic-Plastic และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 88.52 mm ขั้นตอนต่อมาแบ่งเอลิเมนต์บนแผ่นชิ้นงานโดยเลือกใช้รูปทรงเอลิเมนต์โครงสร้างแบบเปลือก (Shell Element) แบบสี่เหลี่ยมถูกสร้างในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์การกำหนดขนาดของเอลิเมนต์เล็กมีผลทำให้จำนวนเอลิเมนต์ที่แบบจำลองชิ้นงานมีจำนวนมากจะใช้เวลาในการคำนวณช้ามากดังนั้นการกำหนดให้จำนวนเอลิเมนต์ที่มีความเหมาะสมในงานวิจัยนี้กำหนดให้ใช้เอลิเมนต์ขนาด 10mm และใช้คำสั่งกำหนดเอลิเมนต์แบบอัตโนมัติ (Auto Mesh) นำผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับการทดลองจริงให้ผลลัพธ์มีความใกล้เคียงและเลือกจำนวนของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 5 แสดงการกำหนดเอลิเมนต์ที่แบบจำลองแผ่นชิ้นงาน

4.2 ขั้นตอนการสร้าง สร้างเครื่องมือ และกำหนดให้วัสดุ

การสร้างพันช์ ดาย และ แบลงก์โฮลเดอร์ สร้างจากโปรแกรมออกแบบ โดย Import เข้ามาในโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์ และกำหนดเอลิเมนต์ให้กับ พันช์ และดาย และกำหนดให้วัสดุ พันช์ และดายเป็นวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid) และแบลงก์โฮลเดอร์ ซึ่งสร้างมาจากผิวของดายในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์กำหนดให้เป็นวัสดุแข็งเกร็งเช่นเดียวกันโดยให้พันช์อยู่บนสุดเคลื่อนที่ตามแนวแกน Z กดแผ่นชิ้นงานเข้าสู่ดายแบลงก์โฮลเดอร์อยู่ตำแหน่งเหนือผิวดายเพื่อกดแผ่นชิ้นงานเพื่อควบคุมการไหลของเนื้อโลหะไหลเข้าไปในดายมากเกินไป



รูปที่ 6 แสดงลักษณะแบบจำลองพันช์ ดาย และ แบลงก์โฮลเดอร์

การกำหนดสมบัติของวัสดุ เป็นแบบสมบัติแอนไอโซโทรปิก ซึ่งโดยทั่วไปโลหะจะผ่านกระบวนการรีด (Roling) โดยใช้ทฤษฎีพลาสติกซิตี้ของ Hill [5] ในการวิเคราะห์ปัญหา โดยกำหนดอัตราส่วนค่าความเครียดความกว้าง ต่อความหนา ในทิศทางตามแนวรีด ทำมุมกับแนวรีด 45° และ 90° ของวัสดุแต่ละชนิด ดังในตารางที่ 3 และได้แสดงขั้นตอนการกำหนดสมบัติของวัสดุ

ตารางที่ 3 แสดงค่าสมบัติของวัสดุ

Material	n	K	R_0	R_{45}	R_{90}	ΔR	$\overline{R}$
JISG3141	0.221	426.01	1.513	1.398	1.709	0.215	1.497
AISI304	0.47	1527	0.92	1.30	0.78	-0.45	1.075
SPCC	0.180	607	1.232	0.878	1.302	0.389	1.072

4.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

การกำหนดเงื่อนไขขอบ แบ่งการกำหนดเงื่อนไขขอบให้กับแบบจำลอง โดยสามารถแบ่งออกเป็นเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้

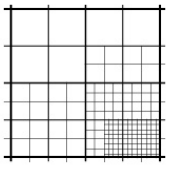
1. การกำหนดการเคลื่อนที่ของพันช์ ซึ่งเป็นวัตถุแข็งเกร็งเป็น 200 mm/s โดยกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ให้อยู่ในแนวดิ่ง
2. กำหนดเงื่อนไขขอบให้ตายอยู่นิ่งไม่มีการเคลื่อนที่
3. กำหนดทิศทาง และแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์เป็น 20 kN ให้เคลื่อนที่อยู่ในแนวดิ่งตามแนวแกน z

5.4 การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของคู่สัมผัส

ตารางที่ 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของคู่สัมผัสระหว่างแผ่นชิ้นงาน กับ Tooling

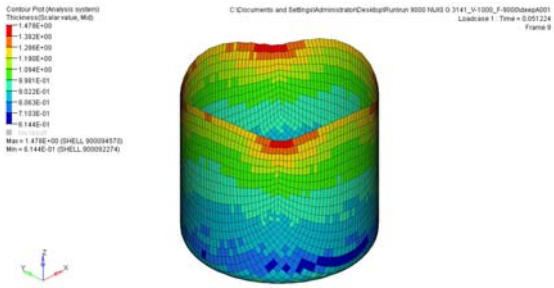
Tooling	แผ่นชิ้นงาน	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน(μ)
Steel	JIS G3141	0.15
Steel	AISI304	0.2
Steel	SPCC	0.11

ก่อนการประมวลผลต้องกำหนดค่าแรงกดของแบลงก์โฮลเดอร์ ความเร็วของพันช์ และขั้นตอนต่อมาก็ทำการกำหนด Number of states ในงานวิจัยนี้กำหนด 10 States ขั้นตอนต่อมา RUN โปรแกรม และเมื่อแบบจำลองชิ้นงานมีการเสียรูปมากๆ เอลิเมนต์บนแผ่นชิ้นงานจะทำการ Adaptive Meshing ให้เอลิเมนต์มีขนาดเล็กลง เนื่องมาจากบริเวณที่เกิดแรงกดมาก ในโปรแกรมนี้จะแบ่งให้เอลิเมนต์เล็กลง



รูปที่ 7 แสดงลักษณะการ Adaptive Meshing ของเอลิเมนต์

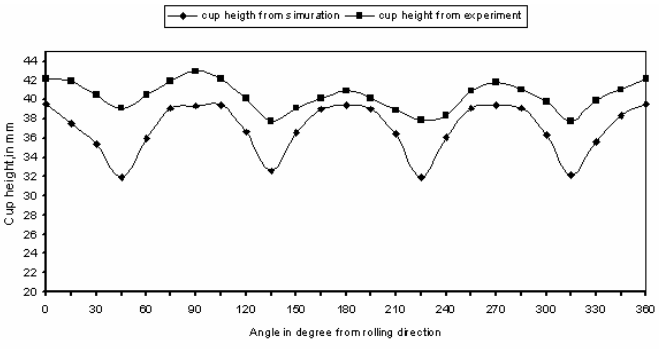
ในขั้นตอนการแสดงผลลัพธ์ ของการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พิจารณาความสูงของรอยติ่ง ของการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก โดยนำผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกับการทดลองจริง และนำแบบจำลองที่น่าเชื่อถือได้ไปวิเคราะห์การเกิดรอยติ่ง ของวัสดุ 3 ชนิด แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ของกระบวนการขึ้นรูปลึก แสดงในรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้เกิดรอยติ่ง 4 รอย เนื่องจากสมบัติของวัสดุแบบแอนไอโซโทรปิก



รูปที่ 8 แสดงลักษณะการเกิดรอยติ่ง ในการจำลองการขึ้นรูปลึก

5. ผลการวิจัย

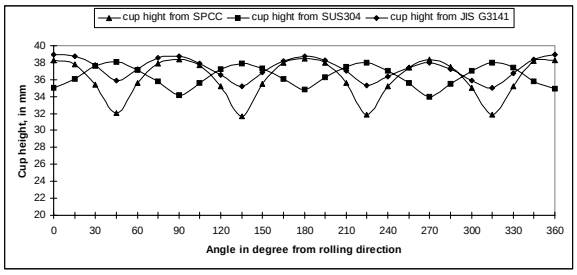
จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ค่า ความสูงรอยติ่งของถ้วยทรงกระบอกในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลองจริงของวัสดุเป็นเหล็กกล้าชนิดEDD Sheet Steelโดยใช้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 20 kN พบว่าค่าความสูงของถ้วยทรงกระบอกของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลองจริงมีค่าใกล้เคียงกันที่ความสูงของถ้วยทรงกระบอกที่มุม 0, 90, 180, 270 และ360 องศา คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยเท่ากับ 6.05% และพบว่าที่มุม 45, 135, 225 และ315 องศา ค่าความสูงของถ้วยทรงกระบอกมีแตกต่างกันเฉลี่ยเท่ากับ 14.96% จะเห็นได้ว่าในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ที่มุม 45, 135, 225 และ 315 องศา ค่าความสูงของถ้วยทรงกระบอก เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองจริงมีค่าแตกต่างมากกว่าที่มุม 0, 90, 180, 270 และ360 องศา และวัดค่าความสูงของรอยติ่งของแบบจำลองFEM เฉลี่ยเท่ากับ4.97 mm และค่าความสูงเฉลี่ยของการทดลองจริงเท่ากับ3.85 mm พบว่าความสูงของรอยติ่งมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 9



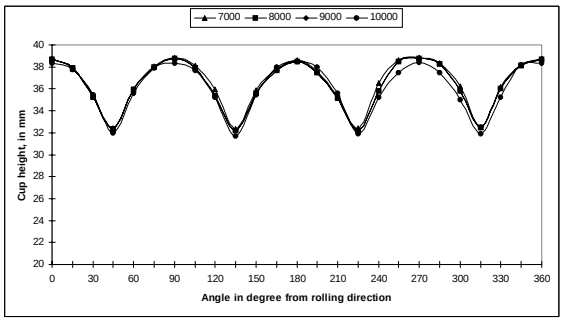
รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ค่าความสูงของถ้วยทรงกระบอกของ FEM กับการทดลองจริง

เนื่องจากที่ความสูงของรอยติ่งที่มุมถ้วยทรงกระบอกซึ่งมีค่าความสูงใกล้เคียงกับการทดลองจริงจึงสามารถนำแบบจำลองไปวิเคราะห์การเกิดรอยติ่งของวัสดุชนิดอื่นต่อไป

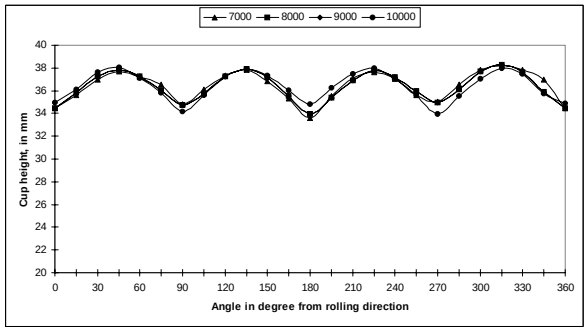
ในการศึกษาสมบัติแนไอโซโทรปิกของวัสดุ ทั้ง 3 ชนิดโดยการหาค่าความสูงของรอยติ่งของถ้วยทรงกระบอก ในการวิจัยนี้ได้ปรับค่าแรงกดของแบลงก์โฮลเดอร์ เท่ากับ 7 kN, 8 kN, 9 kN และ 10 kN เพื่อหาความสูงของรอยติ่งที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละวัสดุ การปรับค่าแรงกดของแบลงก์โฮลเดอร์ค่าต่าง ๆ ในแต่ละวัสดุค่าความสูงของรอยติ่งในแต่ละวัสดุแสดงในรูปที่ 9 ถึง รูปที่ 12



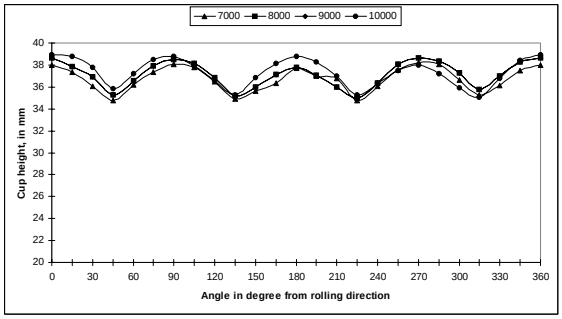
รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบความสูงของรอยติ่งของวัสดุ 3 ชนิด ที่แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 10 kN



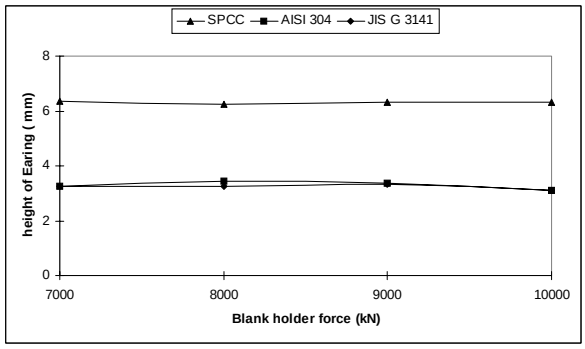
รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบความสูงของรอยติ่งของวัสดุเหล็กกล้า SPCC เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าแรงกดของแบลงก์โฮลเดอร์



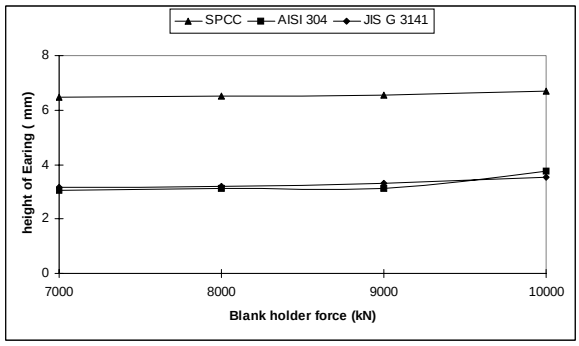
รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบความสูงของรอยติ่งของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าแรงกดของแบลงก์โฮลเดอร์



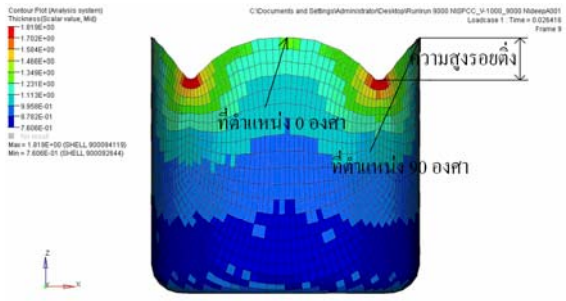
รูปที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบความสูงของรอยติ่งของวัสดุเหล็กกล้า JIS G 3141 เมื่อปรับเปลี่ยนค่าแรงกดของแบลงก์โฮลเดอร์



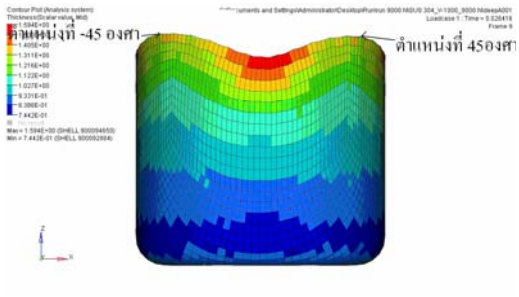
รูปที่ 14 แสดงการเพิ่มขึ้นของความสูงรอยติ่งในแต่ละวัสดุ เมื่อปรับค่าแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ที่ตำแหน่ง 0-90 องศา



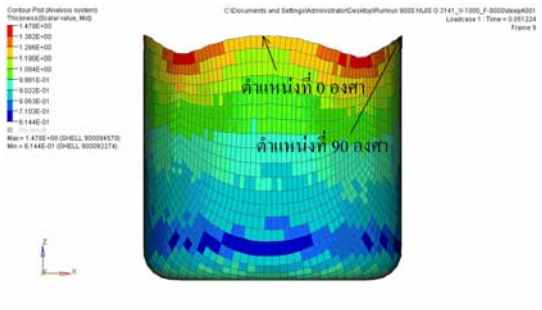
รูปที่ 15 แสดงการเพิ่มขึ้นของความสูงรอยติ่งในแต่ละวัสดุ เมื่อปรับค่าแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ที่ตำแหน่ง 90-180 องศา



รูปที่ 16 แสดงรอยติ่งเกิดขึ้นที่มุม 0°และ 90°ของถ้วยทรงกระบอก วัสดุเหล็กกล้า SPCC



รูปที่ 17 แสดงรอยติ่งเกิดขึ้นที่มุม $\pm 45^{\circ}$ ของถ้วยทรงกระบอก วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304



รูปที่ 18 แสดงรอยติ่งเกิดขึ้นที่มุม 0°และ 90°ของถ้วยทรงกระบอก วัสดุเหล็กกล้า JIS G 3141

6. การวิจารณ์ผล และสรุปผล

6.1 การวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ของกระบวนการขึ้นรูปลึกถ้วยทรงกระบอกโดยสร้างแบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงของ [7] ของวัสดุเป็นเหล็กกล้าชนิด EDD Sheet Steel ขนาดของแผ่นชิ้นงานที่ใช้เปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ88.52mm มีความหนาเท่ากับ 1 mm โดยใช้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 20 kN พบว่าค่าความสูงของถ้วยทรงกระบอกของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลองจริงมีค่าใกล้เคียงกันที่ความสูงของถ้วยทรงกระบอกที่มุม 0, 90, 180, 270 และ360 องศาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยเท่ากับ 6.05% และพบว่าที่มุม 45, 135, 225 และ315 องศาค่าความสูงของถ้วยทรงกระบอกมีแตกต่างกันเฉลี่ยเท่ากับ14.9% และวัดค่าความสูงของรอยติ่งของแบบจำลองFEM เฉลี่ยเท่ากับ 4.97 mm เปรียบเทียบกับการทดลองจริงเฉลี่ยเท่ากับ 3.85 mmพบว่าความสูงของรอยติ่งมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน จากการศึกษาการเกิดรอยติ่งของวัสดุ 3 ชนิดคือเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304, เหล็กกล้า JIS G3141 และเหล็กกล้า SPCC พบว่ารอยติ่งมีค่าความสูงแตกต่างกัน ตำแหน่งการเกิดรอยติ่งของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมAISI304 แตกต่างกับเหล็กกล้า JIS G3141 และเหล็กกล้า SPCC เพราะว่า เหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 มีค่า Planar Anisotropyเท่ากับ -0.261 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าศูนย์ เกิดรอยติ่งที่ประมาณ $\pm 45^{\circ}$ แต่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และเหล็กกล้า JIS G3141 มีค่าPlanar Anisotropy เท่ากับ 0.389 และ 0.215 มีค่ามากกว่าศูนย์ รอยติ่งจะเกิดที่ เกิดรอยติ่งที่ 0° เมื่อศึกษาการความสูงของรอยติ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อปรับแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ พบว่าค่าความสูงของรอยติ่งต่างกันเล็กน้อย

6.2 สรุป

เมื่อนำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไปศึกษาสมบัติแอนไอโซโทรปิกของวัสดุ 3 ชนิด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304, เหล็กกล้า JIS G3141 และเหล็กกล้า SPCC และโดยปรับค่า แรงกดของแบลงก์โฮลเดอร์ เท่ากับ 7 kN, 8 kN, 9 kN และ 10 kN เพื่อคึกษาความสูงของรอยติ่งที่มีการเปลี่ยนแปลง จากการศึกษาสรุปได้ว่า

1 วัสดุเหล็กกล้า SPCC มีค่า Planar Anisotropy เท่ากับ 0.389 ซึ่งมีค่ามากกว่าศูนย์รอยติ่งจะเกิดที่เกิดรอยติ่งที่ 0° และ 90° ตรงตามเงื่อนไข

2 เหล็กล้าJIS G3141 มีค่า Planar Anisotropyเท่ากับ 0.215 ซึ่งมีค่ามากกว่าศูนย์รอยติ่ง จะเกิดที่เกิดรอยติ่งที่ 0° และ 90° ตรงตามเงื่อนไข

3 วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมAISI304 มีค่า Planar Anisotropy เท่ากับ -0.261 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าศูนย์ เกิดรอยติ่งที่ประมาณ $\pm 45^{\circ}$ ตรงตามเงื่อนไข

4 เมื่อปรับแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์เพิ่มมากขึ้นพบว่า ค่าความสูงของรอยติ่งของถ้วยทรงกระบอก มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

5 จากผลลัพธ์ค่าความสูงของรอยติ่งพบว่าเหล็กกล้า SPCC มีค่ารอยติ่งมากที่สุดเท่ากับ และเมื่อปรับโฮลเดอร์เพิ่มมากขึ้นพบว่า ค่าความสูงของรอยติ่ง ของวัสดุทั้ง 3 ชนิดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 เหล็กกล้า JIS G3141 มีค่าความสูงของรอยติ่งใกล้เคียงกัน แต่มีตำแหน่งการเกิดต่างกัน

เอกสารอ้างอิง

1. ชาญ ถนัดงาน, เอกสารประกอบการสอนวิชา Metal Forming Analysis ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มจพ.
2. ชาญ ถนัดงาน, เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะพื้นฐานและการขึ้นรูปโลหะแผ่น, กรุงเทพฯ ศูนย์ผลิตตำราเรียน สจพ. 2547.
3. R. Hill, Mathematical theory of plasticity, Cambridge University Press, Cambridge (1948).
4. William F. Hosford and R.M. Cadell., Metal Forming Mechanics and Metallurgy, 2d. ed., New Jersey: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. 1993.
5. Naval Kishor, “Optimization of initial blank shape to minimize earing in deep drawing usingfinite element method” Journal of Materials Processing Technology Volumes 130-131 20 December 2002, Pages 20-30.