

การจำลองแบบแผ่นอลูมิเนียมในกรรมวิธีลดความหนาผนังและการวิเคราะห์ตัวแปร
กรรมวิธีที่เหมาะสมเพื่อลดขนาดเอียร์ริง

**Finite Element Modeling of Ironing Process of Aluminum Alloy Sheets and Analysis
of Process Parameters to Reduce Earing**

จิรัชัย สุภาสุทธากุล^{1*}

¹ ศูนย์ปฏิบัติการทาง CAD/CAM/CAE, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ตำบลกำแพงแสน
อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

*ติดต่อ: fengjcs@ku.ac.th, (034) 351897 ต่อ 7208

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและจำลองการก่อตัวของเอียร์ริง (Earing) ที่เกิดขึ้นบนถ้วยอลูมิเนียมทรงกระบอกที่ผ่านกรรมวิธีลากขึ้นรูปและกรรมวิธีลดความหนาผนัง และพิจารณาตัวแปรต่างๆ ของกรรมวิธีลดความหนาผนังที่ส่งผลต่อขนาดเอียร์ริง ในการจำลองแบบของการขึ้นรูปของโลหะแผ่น สมบัติ Planar Anisotropy ของแผ่นงานถูกพิจารณาอย่างสำคัญเนื่องด้วยแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนรูปที่ไม่สม่ำเสมอของขอบถ้วยซึ่งถูกเรียกว่า เอียร์ริง การก่อตัวของเอียร์ริงสามารถถูกอธิบายโดยฟังก์ชันของการครากตัวของวัสดุที่อยู่บนฐานของสมบัติ Planar Anisotropy ในงานวิจัยนี้ ฟังก์ชันของการครากตัวของ Hill ถูกนำมาใช้ ซึ่งสามารถแสดงแบบจำลองของถ้วยที่มีสี่ยอดคลื่นของเอียร์ริง สิ่งนี้สอดคล้องกับผลของงานวิจัยก่อนหน้านี้สำหรับแผ่นอลูมิเนียม A1100-H12 ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ขนาดเอียร์ริงที่ถูกทำนายจากการจำลองแบบด้วยฟังก์ชันของการครากตัวของ Hill ถูกเปรียบเทียบกับผลของการทดลอง นอกจากนี้ งานวิจัยนี้จะพิจารณาตัวแปรกรรมวิธีที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีลดความหนาผนัง ได้แก่ อัตราส่วนของการลดขนาดและมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ เป็นต้น โดยมุ่งเน้นเพื่อลดขนาดเอียร์ริงให้น้อยที่สุด งานวิจัยจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกรรมวิธีเหล่านั้นและเลือกค่าที่เหมาะสมของตัวแปรกรรมวิธีผ่านวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

คำหลัก: กรรมวิธีลดความหนาผนัง, เอียร์ริง, Planar Anisotropy, ฟังก์ชันของการครากตัว, วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This work is to study and model the earing evolution on cylindrical cups produced by deep drawing and ironing processes and to consider process parameters of ironing affecting the earing size. In modeling the sheet metal forming, the planar anisotropy is considered importantly since it represents non-uniform deformation on the cup edge; this is so-called earing. The earing evolution can be predicted by the yield function of material based on planar anisotropy. In the work, Hill's 1948 yield function is used and able to predict 4 ears; this is coincident with the experimental results for aluminum alloy AA1100 H12 sheet. Thus, in the work, the earing size predicted by the finite element simulation with Hill's 1948 yield

function is compared with the earing size obtained from the experiments. In addition, this work is to consider two process parameters - reduction ratio and semi die angle - to reduce the earing. The relationship between those two parameters is described and analyzed to find appropriate parameters for the ironing process with minimum earing.

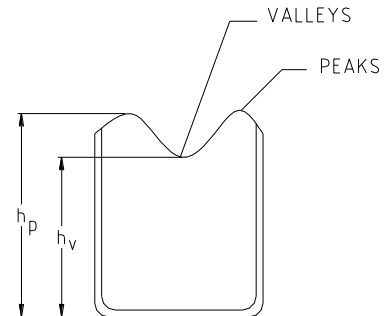
Keywords: Ironing Process, Earing, Planar Anisotropy, Yield Function, Finite Element Method

1. บทนำ

กรรมวิธีลดความหนาผนัง (Ironing Process) เป็นกรรมวิธีหนึ่งของการขึ้นรูปโลหะแผ่นและถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตกระป๋องน้ำอัดลมและกระสุนปืน ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ต้องการรูปทรงที่สูงมากเมื่อเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของตัวผลิตภัณฑ์และยังคงรักษาสภาพความแข็งแรงตลอดทั้งผนังได้อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากกรรมวิธีลดความหนาผนังเป็นกรรมวิธีที่ถูกทำหลังจากกรรมวิธีลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing Process) ดังนั้นสภาพทางกายภาพและสมบัติบางอย่างของผลิตภัณฑ์ที่เป็นรูปถ้วยจะถูกปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงไป

เอียร์ริงเป็นสภาพทางกายภาพอย่างหนึ่งที่ปรากฏบนถ้วยที่ถูกขึ้นรูปดังแสดงในรูปที่ 1 แต่เป็นสิ่งซึ่งผู้ผลิตไม่ต้องการ กล่าวคือผู้ผลิตต้องจัดหากรรมวิธีตัดขอบเพื่อได้รับผลิตภัณฑ์ที่มีขอบเรียบสม่ำเสมอ ซึ่งจะถูกใช้ในขั้นตอนถัดไปของการทำงาน เช่น กรรมวิธีประกอบ เป็นต้น แม้ว่าเอียร์ริงเป็นข้อบกพร่องที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ขนาดเอียร์ริงที่ใหญ่ยิ่งส่งผลกระทบต่อการผลิต กล่าวคือหลังจากการตัดขอบที่มีขนาดเอียร์ริงที่ใหญ่ ผลิตภัณฑ์จะมีความสูงที่น้อย ฉะนั้นเพื่อให้ได้รับความสูงของผลิตภัณฑ์ตามแบบ ผู้ผลิตจำเป็นต้องเพิ่มขั้นตอนของการขึ้นรูปซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงขึ้น ในอีกมุมมองหนึ่ง การตัดขนาดเอียร์ริงที่ใหญ่ออกบ่งบอกถึงการสูญเสียเนื้อวัสดุ ผู้ผลิตต้องเตรียมแผ่นงานที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้ได้รับผลิตภัณฑ์ที่มีความสูงตามต้องการ ด้วยเหตุนี้พฤติกรรมของการเกิดเอียร์ริงได้ถูกศึกษาอย่างแพร่หลาย รวมถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขนาดเอียร์ริง แต่มีจำนวนน้อยของบทความที่กล่าวถึงวิธีการจำลองแบบของกรรมวิธีลดความหนาผนังและการก่อตัวของ

เอียร์ริงร่วมกับสมบัติของการเปลี่ยนรูปถาวรและประเภทของวัสดุแผ่น เช่น อลูมิเนียมผสมแผ่น AA 2090-T3 แสดงเอียร์ริง 6 ตำแหน่ง [1] ขณะที่อลูมิเนียมผสมแผ่น AA 2024-T4 มีเอียร์ริง 4 ตำแหน่ง [2]



รูปที่ 1 ลักษณะการเกิดเอียร์ริงของถ้วย

ในรูปที่ 1 เอียร์ริงสามารถถูกแสดงเป็นร้อยละของขนาดเอียร์ริง [3]

$$\%เอียร์ริง = \{(h_p - h_v) / [(h_p + h_v) / 2]\} \times 100 \quad (1)$$

งานวิจัยนี้มุ่งที่จะพิจารณาฟังก์ชันการครากตัวที่เหมาะสมกับอลูมิเนียมผสม AA 1100 H12 ซึ่งในการทดลอง ถ้วยมีเอียร์ริง 4 ตำแหน่ง [3] รวมถึงการศึกษาตัวแปรของกรรมวิธี คืออัตราส่วนของการลดขนาดและมุมของการไหลเข้าของแม่พิมพ์ตัวเมีย

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ข้อมูลต่างๆ ของวัสดุแผ่นที่ถูกกล่าวถึงในลำดับถัดมา เป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทำแบบจำลองของวัสดุแผ่นในโปรแกรมด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่ออธิบายพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุ ได้แก่ การยืดหยุ่น, การเปลี่ยนรูปถาวร และ Planar Anisotropy เป็นต้น

2.1 สมบัติเชิงกลจากการทดสอบของการดึง

ในการทดสอบของการดึงสำหรับวัสดุแผ่นที่ผ่านกรรมวิธีรีดขึ้นรูปซึ่งเป็นกรรมวิธีสุดท้ายของการผลิตแผ่นวัสดุ โดยทั่วไป แนวการรีดอยู่ตามแนวความยาวของแผ่นงานทดสอบ จากการดึงของกรณีนี้ ค่า Modulus of Elasticity และข้อมูลคู่ของความเค้นและความเครียดของวัสดุแผ่นจะถูกได้รับและมักถูกใช้ร่วมกับฟังก์ชันของการครากตัวของ von Mises สำหรับวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบ Isotropic อย่างไรก็ตาม เมื่อนำวัสดุแผ่นดังกล่าวมาผ่านกรรมวิธีขึ้นรูปสภาพทางกายภาพบางอย่างปรากฏขึ้น คือ เอียง ซึ่งถูกอธิบายในฐานะที่เป็นสมบัติ Planar Anisotropy ของวัสดุแผ่น เพื่อให้ได้รับสมบัตินี้ แผ่นงานทดสอบจะถูกตัดตามทิศทางของการรีด, ทำมุม 45 องศา กับแนวรีด, และทำมุม 90 องศา กับแนวรีด และถูกทดสอบ [4] ค่าที่แสดงพฤติกรรม Planar Anisotropy คือค่าของอัตราส่วนของความเครียดถาวร (Plastic Strain Ratio, r) ซึ่งประกอบด้วย r_0 , r_{45} และ r_{90}

2.2 ฟังก์ชันของการยืดหยุ่นและการครากตัว

ฟังก์ชันของการยืดหยุ่นของอลูมิเนียมแผ่นถูกสมมติให้เป็นไปตามกฎของฮุก คือ

$$\sigma = E \epsilon \quad (2)$$

ซึ่ง E คือ Modulus of Elasticity

ในส่วนของการครากตัวของวัสดุแผ่น โปรแกรมด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ส่วนใหญ่จัดหาไว้ 2 ฟังก์ชัน คือ ฟังก์ชันของการครากตัวของ von Mises สำหรับวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบ Isotropic และฟังก์ชันของ Hill สำหรับวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบ Planar Anisotropy ฟังก์ชันของการครากตัวของ Hill 1948 [5] คือ

$$f(\sigma) = [F (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L \sigma_{23}^2 + 2M \sigma_{31}^2 + 2N \sigma_{12}^2]^{1/2} \quad (3)$$

ซึ่ง F , G , H , L , M และ N เป็นค่าคงที่จากการทดสอบของการดึงในทิศทางที่แตกต่างกัน และสัมพันธ์กับอัตราส่วนของความเครียดถาวร r

ฟังก์ชันนี้สามารถถูกใช้เพื่อจะทำนายเอียง 4 ตำแหน่ง [6] อย่างไรก็ตาม ในปี 1993 Hill [7] กล่าว

ว่าฟังก์ชันของ Hill 1948 ไม่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่มีค่า r ผันแปรในทิศทางต่างๆ ที่ทำมุมกับทิศทางของการรีด และวัสดุที่มีค่าของ Tensile Yield Stress เท่ากันในทิศของการรีดและทิศที่ขวางกับการรีด สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันของการครากตัวของ Hill ได้ถูกพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง กล่าวคือ Hill [8] เสนอฟังก์ชันของการครากตัวสำหรับวัสดุแผ่นบางที่อยู่ภายใต้ความเค้นระนาบ (Plane Stress) และต่อมาพัฒนาเป็นฟังก์ชันของ Hill 1993 [7] ซึ่งช่วยในการแก้ปัญหาที่ฟังก์ชันของ Hill 1948 [5] ไม่สามารถกระทำได้แต่ถูกจำกัดสำหรับกรณีของความเค้นระนาบ นอกจากฟังก์ชันของการครากตัวของ Hill ฟังก์ชันของการครากตัวอื่นๆ ถูกเสนอ Hosford [9] ได้เสนอฟังก์ชันในอีกรูปแบบหนึ่งคือ Non-Quadratic (คือฟังก์ชันที่ไม่ใช่กำลังสอง) โดยตั้งอยู่บนฐานของการเปลี่ยนรูปของผลึก (Polycrystal) ถัดมาฟังก์ชันของ Hosford [9] ได้ถูกพัฒนาโดย Cazacu และ Barlat [10] เพื่อจะทำนายเอียงที่มีมากกว่า 4 ตำแหน่ง เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ ฟังก์ชันของการครากตัวของ Hill 1948 [5] ถูกใช้เนื่องจากในการทดสอบ [3] เอียงที่เกิดขึ้นบนถั่วอลูมิเนียมมี 4 ตำแหน่ง นอกจากนี้ การหาค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชัน เช่น F , G , และ H เป็นต้น มีความสะดวกโดยใช้เพียงอัตราส่วนของความเครียดถาวร r ในทิศ 0, 45, และ 90 องศาจากทิศทางของการรีด

3. การดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัย โปรแกรมด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ชื่อ ABAQUS ถูกใช้สำหรับการการคำนวณจำลองของกรรมวิธีขึ้นรูปโลหะแผ่น ใน ABAQUS กรรมวิธีขึ้นรูปที่ไม่คำนึงถึงความร้อนสามารถถูกกำหนดในฐานะที่เป็นปัญหาทาง Static หรือปัญหาทาง Quasi-static งานวิจัยนี้กำหนดปัญหาเป็น Quasi-static ซึ่ง ABAQUS/Explicit เป็นวิธีการวิเคราะห์สำหรับปัญหานี้ ข้อได้เปรียบของ ABAQUS/Explicit คือความสะดวกในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการสัมผัสกันที่

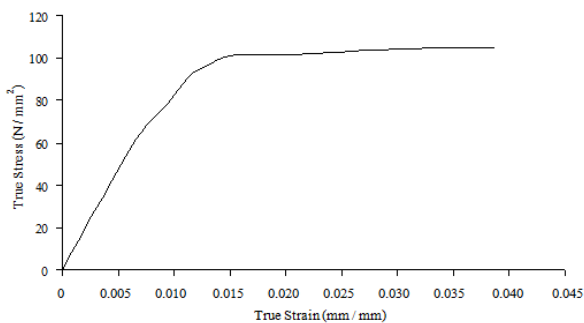
ซับซ้อน ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันกับปัญหาของการวิเคราะห์กรรมวิธีขึ้นรูปโลหะแผ่น

ในงานวิจัย แบบจำลองประกอบด้วยแผ่นงานวงกลมของวัสดุที่ฉีดรูปได้และถูกจำลองเป็น Solid Elements C3D8R และชุดแม่พิมพ์ - แม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) แม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) และแผ่นกดจับชิ้นงาน (Blank Holder) ที่ถูกจำลองเป็นพื้นผิวแข็งเกร็ง (Rigid Surfaces) ในชุดแม่พิมพ์ แม่พิมพ์ตัวเมียเป็นการประกอบกันของแม่พิมพ์ตัวเมียของการลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing Die) และแม่พิมพ์ตัวเมียของการลดความหนาแผ่น (Ironing Die)

ในแบบจำลอง ข้อมูลต่างๆ ที่ถูกให้มีดังนี้ สำหรับอลูมิเนียมแผ่น AA1100 H12:

Modulus of Elasticity	70 GPa
r_0	0.829
r_{45}	0.748
r_{90}	0.629

และข้อมูลของความเค้นและความเครียดจากการทดสอบการดึงของอลูมิเนียมแผ่นเมื่อแผ่นงานถูกตัดในทิศทางของการรีด ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความเค้น-ความเครียดของ AA1100 H12

สำหรับชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก:

สัมประสิทธิ์ของความเสียหาย	0.01
แรงกดจับชิ้นงาน	2,000 N

สำหรับชุดแม่พิมพ์ลดความหนาแผ่น:

สัมประสิทธิ์ของความเสียหาย	0.01
มุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ α	5, 10, 15 องศา

- เส้นผ่านศูนย์กลาง D_d 0.0316 ม.

- เส้นผ่านศูนย์กลาง D_d 0.0317 ม.

- เส้นผ่านศูนย์กลาง D_d 0.0318 ม.

ในส่วนของการทดลอง งานวิจัยนี้ได้นำผลการทดลองก่อนหน้า [3] มาเปรียบเทียบกับผลของแบบจำลอง ข้อสรุปโดยสังเขปของการทดลองมีดังนี้

วัสดุชิ้นงานคืออลูมิเนียมแผ่น A1100-H12 (JIS) ซึ่งมีความหนาเท่ากับ 1 mm วัสดุสำหรับทำแม่พิมพ์ตัวผู้กับแม่พิมพ์ตัวเมียคือ SKD 11 (JIS) สารหล่อลื่นคือ ISOLUBE 4686 (PETROFER) ซึ่งสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของความเสียหายระหว่างผิวของแผ่นงานและผิวของแม่พิมพ์ เริ่มต้นโดยนำแผ่นงานมาตัดให้เป็นแผ่นวงกลมด้วยแม่พิมพ์ตัด (Blanking Die) ให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm แล้วนำแผ่นงานวงกลมที่ได้มาผ่านกรรมวิธีลากขึ้นรูปลึก ให้เป็นถ้วยทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 30 mm และมีความสูงเท่ากับ 15 mm หรือใช้อัตราส่วนของการลากขึ้นรูปเท่ากับ 1.67 หลังจากนั้นนำถ้วยที่ผ่านกรรมวิธีลากขึ้นรูปลึกมาผ่านกรรมวิธีลดความหนาแผ่น โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์ตัวผู้ในกรรมวิธีลดความหนาแผ่นเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์ตัวผู้ในกรรมวิธีลากขึ้นรูปลึก จากนั้นกำหนดให้แม่พิมพ์ตัวเมียในกรรมวิธีลดความหนาแผ่นมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่แตกต่างกัน 3 ค่า และมีมุมที่แตกต่างกัน 3 มุม ดังที่ถูกล่าวก่อนหน้านี้

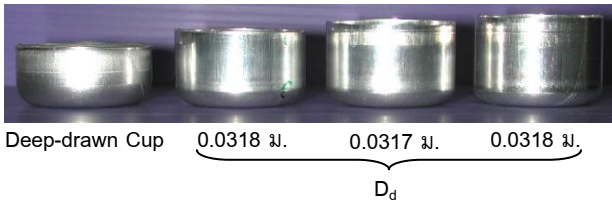
4. ผลของการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ในการทดลอง เอียงริงของถ้วยที่ถูกลากขึ้นรูปถูกวัดขนาดและถูกเปรียบเทียบกับเอียงริงที่ถูกทำนายจากแบบจำลอง จากนั้น วิเคราะห์และวิจารณ์ผลของแบบจำลองที่อยู่บนฐานของฟังก์ชันของการครากตัวของ Hill 1948 [5] ในกรรมวิธีลดความหนาแผ่นตามตัวแปรของกรรมวิธี

4.1 เอียงริงของกรรมวิธีลากขึ้นรูปลึก

ในรูปที่ 3 การทดลองพบว่าเอียงริงปรากฏที่มุม 0 องศาและ 90 องศา [3] ซึ่งสอดคล้องกับเอียงริงในแบบจำลองในรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาขนาดเอียงริง การ

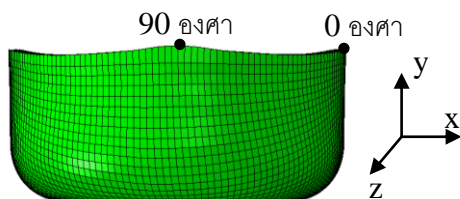
ทดลองผลิตขนาดเอียงเท่ากับ 2.034% ขณะที่แบบจำลองทำนายขนาดเอียงเท่ากับ 5.852% ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองภายใต้ฟังก์ชันของการครากตัวที่มีรากฐานจากอัตราส่วนของความเครียดถาวร r สามารถทำนายขนาดเอียงที่สูงกว่าขนาดเอียงของการทดลอง หากพิจารณาถ้วยที่ถูกลากขึ้นรูปลึก การทดลองพบว่า ณ จุดต่ำสุดของขอบที่เป็นคลื่น มีส่วนหนูนเล็ก ๆ สิ่งนี้แสดงว่าอลูมิเนียมแผ่น AA1100 H12 มีพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปร่างบางอย่าง ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ฟังก์ชันของ Hill 1948 [5] ไม่ได้อธิบายถึง



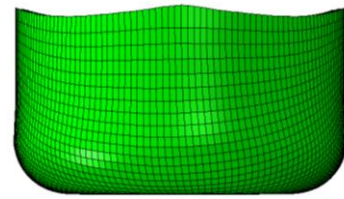
รูปที่ 3 เอียงบนถ้วยที่ผ่านกรรมวิธีลากขึ้นรูปลึกและถ้วยที่ผ่านกรรมวิธีลดความหนาผนังในการทดลอง [3]

4.2 เอียงของกรรมวิธีลดความหนาผนัง

จากรูปที่ 4 และตารางที่ 1 แบบจำลองแสดงให้เห็นว่าขนาดเอียงจากกรรมวิธีลดความหนาผนัง ณ มุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ 5 องศา กับ $D_d = 0.0318$ ม. มีค่าต่ำกว่าขนาดเอียงจากกรรมวิธีลากขึ้นรูปลึก สิ่งนี้แสดงว่ากรรมวิธีลดความหนาผนังสามารถทำให้ขนาดเอียงลดลง แต่เมื่อ D_d เล็กลงเป็น 0.0317 ม. ซึ่งแสดงถึงความรุนแรงที่เพิ่มขึ้นของการลดความหนาผนัง ขนาดเอียงในกรณีนี้มีค่าสูงกว่าขนาดเอียงจากกรรมวิธีลากขึ้นรูปลึก ดังนั้นการเลือกตัวแปรของกรรมวิธีเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการลดขนาดเอียง



ถ้วยที่ผ่านกรรมวิธีลากขึ้นรูป



ถ้วยที่ผ่านกรรมวิธีลดความหนาผนัง

รูปที่ 4 เอียงบนถ้วยที่ผ่านกรรมวิธีลากขึ้นรูปลึกและที่ผ่านกรรมวิธีลดความหนาผนังในแบบจำลอง

ตารางที่ 1 ขนาดเอียง เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง D_d ของการลดความหนาผนังมีหลายค่า (หน่วย: %)

ตัวแปรกรรมวิธีลดความหนาผนัง	%เอียง
มุมของการไหลเข้า 5 องศา	
- $D_d = 0.0318$ ม.	5.828
- $D_d = 0.0317$ ม.	6.18
- $D_d = 0.0316$ ม.	6.664
มุมของการไหลเข้า 10 องศา	
- $D_d = 0.0318$ ม.	5.692
- $D_d = 0.0317$ ม.	5.505
- $D_d = 0.0316$ ม.	5.884
มุมของการไหลเข้า 15 องศา	
- $D_d = 0.0318$ ม.	5.034
- $D_d = 0.0317$ ม.	5.978
- $D_d = 0.0316$ ม.	5.658

จากตารางที่ 1 สำหรับมุมของการไหลเข้าเท่ากับ 5 องศา แบบจำลองพบว่าขนาดเอียงมีค่าสูงขึ้นสัมพันธ์กับความรุนแรงที่เพิ่มขึ้นของการลดความหนาผนัง สิ่งนี้สอดคล้องกับการทดลอง ขณะที่มุมของการไหลเข้าเท่ากับ 10 องศา และ 15 องศา ผลของแบบจำลองไม่สอดคล้องกับผลของการทดลอง

ในกรณีที่เส้นผ่านศูนย์กลาง D_d คงที่และมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์มี 2 ค่า คือ 5 องศา และ 10 องศา ดังแสดงในตารางที่ 2 แบบจำลองพบว่าขนาดเอียงเล็กลงกับการเพิ่มขึ้นของมุมของการไหลเข้า ผลนี้ของแบบจำลองสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับผลของการทดลอง

แต่ในกรณีของมุม 15 องศา ขนาดเอียงจึงมีความแปรปรวน

ตารางที่ 2 ขนาดเอียงนี้ เมื่อมุมของการไหลเข้ามีหลายค่า (หน่วย: %)

ตัวแปรกรรมวิธีลดความหนาผนัง	%เอียง
$D_d = 0.0318$ ม.	
- มุม $\alpha = 5$ องศา	5.828
- มุม $\alpha = 10$ องศา	5.692
- มุม $\alpha = 15$ องศา	5.034
$D_d = 0.0317$ ม.	
- มุม $\alpha = 5$ องศา	6.18
- มุม $\alpha = 10$ องศา	5.505
- มุม $\alpha = 15$ องศา	5.978
$D_d = 0.0316$ ม.	
- มุม $\alpha = 5$ องศา	6.664
- มุม $\alpha = 10$ องศา	5.884
- มุม $\alpha = 15$ องศา	5.658

5. สรุปผลการวิจัย

ในกรณีของการลากขึ้นรูปลึก แบบจำลองที่อยู่บนพื้นฐานของฟังก์ชันของการครากตัวของ Hill 1948 [5] ทำนายขนาดเอียงที่สูงกว่าผลของการทดลอง สิ่งนี้เป็นเพราะฟังก์ชันของการครากตัวของ Hill 1948 [5] ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมที่ก่อให้เกิดคลื่นเล็กๆ บนแอ่งของขอบถ้วยได้ เพื่อให้การจำลองแบบมีความแม่นยำขึ้น ฟังก์ชันของการครากตัวที่เหมาะสมควรถูกพิจารณา

ในกรณีของการลดความหนาผนัง แบบจำลองสามารถทำนายขนาดเอียงที่สอดคล้องกับผลของการทดลองในบางกรณี คือหนึ่ง สำหรับมุมของการไหลเข้า 5 องศา ซึ่งแบบจำลองมีเส้นผ่านศูนย์กลางหลายค่า สอง สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลาง D_d คงที่และมุมของการไหลเข้ามี 2 ค่า คือ 5 องศา และ 10 องศา อย่างไรก็ตาม ในกรณีของมุมของการไหล 15 องศา มีความผันผวนของผลจากแบบจำลอง สิ่งนี้แสดงให้เห็น

ว่า แบบจำลองสามารถนำมาใช้ได้ในช่วงหนึ่งของกรรมวิธีลดความหนาผนัง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และขอขอบคุณ ดร.หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ ที่ให้คำปรึกษาและจัดหาอุปกรณ์ของงานวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร.พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์ และรศ.ดร.วารุณี เปรมมานนท์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เป็นที่ยปรึกษาในการทำการทดลอง มา ณ ที่นี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yoon, J.W., Barlat, F., Dick, D.E. and Karabin, M.E. (2006). Prediction of six or eight ears in a drawn cup based on a new anisotropic yield function, *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, vol. 41(3), February 1998, pp. 559 – 584.
- [2] Hashmi, M.S.J., Mridha, S. and Naher, S. (2011). Investigation on Earing Behavior of AA 2024-T4 and AA 5754-O Aluminum Alloys, *Advanced Materials Research*, vol. 264 - 265, June 2011, pp. 12 - 17.
- [3] จีระชัย สุภาสุทธากุล, กอบสิน ทวีสิน, วารุณี เปรมมานนท์ และ พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์ (2545). การศึกษาเพื่อลดขนาดเอียงในการผลิตถ้วยทรงกระบอก, *การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย*, ครั้งที่ 16, 14 - 16 ตุลาคม, โรงแรมกะตะบิซริสอร์ท, จังหวัดภูเก็ต, หน้า 454 - 459
- [4] ASTM Designation: E 517 - 81, Reapproved 1987, Standard test method for plastic strain ratio for sheet metal.
- [5] Hill, R. (1948). A theory of yielding and plastic flow of anisotropic metals, *Proceeding of the*

Royal Society of London, vol. A193, pp. 281 - 297.

[6] Yoon, J.W., Dick, R.E. and Barlat, F. (2011). A new analytical theory for earing generated from anisotropic plasticity, *International Journal of Plasticity*, vol. 27(8), August 2011, pp. 1165 - 1184.

[7] Hill, R. (1993). A user-friendly theory of orthotropic plasticity in sheet metals, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 35(1), January 1993, pp. 19 - 25.

[8] Hill, R. (1995). *The Mathematical Theory of Plasticity*, Clarendon Press, Oxford.

[9] Hosford, W.F. (1979). On yield loci of anisotropic cubic metals, paper presented in *North America Research Conference: Proceeding 7th 1979*, Michigan, United State of America.

[10] Cazacu, O. and Barlat F. (2004). A criterion for description of anisotropy and yield differential effects in pressure-insensitive metals, *International Journal of Plasticity*, vol. 20(11), November 2004, pp. 2027 - 2045.