การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17 15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี

การทำนายการเสียหายแบบอ่อนหนืดในการขึ้นรูปลึก แผ่นอลูมิเนียมรูปถ้วยทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส Ductile Fracture Prediction in Deep Drawing of a Square Cup of Aluminium Sheets

อดิศร ประสิทธิ์ศักดิ์ และ อนุชา พรมวังขวา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง เชียงใหม่ 50200 โทร 0-5394-4146 โทรสาร 0-5394-4145 E-mail: adisornprasitsak@hotmail.com

Adisorn PRASITSAK and Anucha PROMWUNGKWA Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University 239 Huaykaew Rd. Suthap, Muang, Chiang Mai 50200, Thailand Tel: 0-5394-4146 Fax: 0-5394-4145 E-mail: adisornprasitsak@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำนายการเสียหายแบบอ่อนหนืด ของการขึ้นรูปลึกแผ่นอลูมิเนียมรูปถ้วยทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบจำลอง สภาพทางคณิตศาสตร์ใช้วิธีวิเคราะห์ไฟในต์เอลิเมนต์ใน 3 มิติ เกณฑ์ ความเสียหายอยู่ในรูปของงานทางพลาสติกค่าสูงสุดที่วัสดุสามารถรับ ไว้ได้ วัสดุจะพิจารณาเป็นแบบแอนไอโซโทรปิก ตัวแปรที่ศึกษา ประกอบด้วย ระยะกดขึ้นรูป และแรงกดยึดชิ้นงาน ตัวอย่างชิ้นงานที่ทำ การศึกษาเป็นแผ่นอลูมิเนียมแบนมีความหนา 1.20 mm มีรูปร่างสุด ท้ายเป็นถ้วยทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 70x70 mm² ด้วยอัตราส่วนการ ขึ้นรูปเป็น 1.93 เมื่อวิเคราะห์การเกิดความเสียหายของชิ้นงานตัวอย่าง พบว่าใช้แรงกดยึดชิ้นงานได้สูงสุด 12 kN ที่ระยะกดขึ้นรูป 20 mm ชิ้น งานยังไม่เกิดความเสียหาย ชิ้นงานจะเริ่มเสียหายที่ระยะกดขึ้นรูป 25 mm เมื่อทำการทดสอบขึ้นรูปลึกจริงเพื่อเปรียบเทียบผลกับแบบจำลอง พบว่าตัวแปรที่ศึกษาและตำแหน่งที่เกิดความเสียหายในชิ้นงานมีค่า ตรงกันคือ เกิดความเสียหายที่มุมด้านในหัวกดขึ้นรูป ที่ระยะกดขึ้นรูป เท่ากับ 25 mm สำหรับรูปร่างของชิ้นงานจากการจำลองสภาพและจาก การทดสอบขึ้นรูปลึกมีลักษณะใกล้เคียงกัน ในส่วนของความหนาที่ ตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลองชิ้นงานและชิ้นงานทดสอบขึ้นรูปมีค่า ใกล้เคียงกันเช่นกัน โดยตำแหน่งที่มีความหนาน้อยที่สุดอยู่ที่บริเวณมุม ้ด้านในหัวกดขึ้นรูปซึ่งค่าความหนาจากแบบจำลองสภาพสูงกว่าความ หนาจากการทดสอบขึ้นรูปประมาณ 6%

Abstract

The objective of this study is to predict a ductile fracture in deep drawing of a square aluminum cup. Three dimensional finite element analyses is used to simulate the drawing process.

Aluminum sheet is considered as anisotropic material. Plastic works of the elements are monitored and used as ductile fracture criteria. The study variables are punch depths and blank holder forces. The thickness of a sample aluminum flat sheet is 1.20 mm. Final shape like a square cup is 70x70 mm² and deep drawing ratio is 1.93. The simulation results show that the model could be drawn without damage by the maximum blank holder force of 12 kN with 20 mm of punch depth. Crack along innercorner of the cup is found at the punch depth of 25 mm. A deep drawing experiment is performed to compare the results with the simulation. Final shapes of drawn cups from the experiments are also the same as the ones from simulation results. Fracture location and damage shape of the experiment and the simulation results are also the same. Thickness of the sheet at inner-corner of the cup from the simulation result is higher than the experimental result approximately 6%.

1. บทนำ

การขึ้นรูปลึกโลหะเป็นกระบวนการผลิตขั้นพื้นฐานของการผลิต ชิ้นส่วนทางอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภทที่มีส่วนสำคัญต่อการนำราย ได้เข้าสู่ประเทศ อาทิเช่น ชิ้นส่วนของรถยนต์ ชิ้นส่วนภายในอุปกรณ์ ไฟฟ้า และส่วนประกอบของเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ เป็นต้น ปัญหาที่ สำคัญประการหนึ่งซึ่งพบในกระบวนการขึ้นรูปลึกโลหะก็คือความไม่ สมบูรณ์ของชิ้นงาน เช่น รอยฉีกขาด รอยคอด รอยย่น ซึ่งมีสาเหตุจาก การกำหนดตัวแปรการทำงานของการขึ้นรูปที่ไม่เหมาะสม อาทิเช่น แรงกดขึ้นรูป แรงกดยึดแผ่น ความเร็วขึ้นรูป และคุณสมบัติของวัสดุขึ้น

รูปรวมทั้งรูปร่างชุดอุปกรณ์ขึ้นรูปที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้แล้วในกรณี ของการขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนแล้วจะเป็นการยากที่จะออก แบบรูปร่างชุดอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องและกำหนดตัวแปรของการขึ้นรูปที่ เหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานสุดท้ายมีรูปร่างตรงกับความต้องการ การ ทดสอบแบบลองผิดลองถูกย่อมทำให้เกิดความสูญเสียในหลายๆ ด้าน ซึ่งหากได้นำข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปลึกมาทำการจำลองสภาพ และวิเคราะห์การเกิดความเสียหายเสียก่อนก็จะช่วยลดความสูญเสียที่ ้เกิดขึ้นได้ ในการศึกษาที่ผ่านมา Takuda *et al.* [5] ได้หาตำแหน่งที่เกิด ้ความเสียหายในชิ้นงานขึ้นรูปลึกที่มีรูปร่างเป็นถ้วยทรงกระบอกกลม โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ใน 2 มิติ ร่วมกับเกณฑ์ความเสียหาย แบบอ่อนหนืด ซึ่งพบว่าสามารถทำนายจุดที่เกิดความเสียหายได้ใกล้ เคียงกับความเสียหายบนชิ้นงานขึ้นรูป แต่เนื่องจากรูปร่างของชิ้นงาน ที่ศึกษามีความสมมาตรรอบแกนทำให้ปัญหาที่มีรูปร่างใน 3 มิติ ถูก วิเคราะห์แบบ 2 มิติ ซึ่งการวิเคราะห์แบบสมมาตรรอบแกนไม่สามารถ ้นำมาใช้กับการวิเคราะห์การขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนกว่าได้ ซึ่งในการศึกษานี้ได้ทำการหาตัวแปรการขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับการ ขึ้นรูปลึกชิ้นงานรูปถ้วยทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดตามที่ได้กำหนดไว้ โดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ใน 3 มิติ ร่วมกับเกณฑ์ความเสีย หายแบบอ่อนหนืดโดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบขึ้นรูปลึก ้อย่างง่าย ซึ่งมีตัวแปรการขึ้นรูปที่ทำการศึกษาคือ ระยะกดขึ้นรูป และ แรงกดยึดแผ่น

2. ทฤษฎี

เมื่อพิจารณาการเสียรูปของวัสดุแบบอ่อนหนึดจะมีการเสียรูปใน 2 ส่วนคือ การเสียรูปในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติก แต่จะพบว่าการเสีย รูปในช่วงยืดหยุ่นมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับการเสียรูปทั้งหมด ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงพิจารณาเฉพาะการเสียรูปในช่วงพลาสติกโดยได้ ให้ความสนใจที่ความเครียดพลาสติกเท่านั้น

เกณฑ์ความเสียหายแบบอ่อนหนึดเป็นเกณฑ์ที่ใช้พิจารณาการ เกิดความเสียหายในวัสดุที่มีคุณสมบัติแบบอ่อนหนึด (Ductile material) โดยนำงานทางพลาสติก (Plastic work) ค่าสูงสุดที่วัสดุ สามารถรับได้ก่อนเกิดความเสียหายมากำหนดเป็นค่าคงที่ความเสีย หาย ซึ่งมีรูปแบบเป็น

$$w_{\max} = \int_{0}^{(\varepsilon_{ij})_{f}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} = c_{f}$$
(1)

เมื่อ w_{max} คือ งานทางพลาสติกค่าสูงสุด σ_{ij} คือ ความเค้นในแกน ต่างๆ ε_{ij} คือความเครียดในแกนต่างๆ และ (ε_{ij})_f คือ ความเครียด ในแกนต่างๆ ที่จุดเสียหาย เมื่อ i และ j แทนด้วยแกน x, y และ z

สำหรับในการศึกษานี้ได้พิจารณาว่าวัสดุมีพฤติกรรมเป็นแบบแอน ไอโซโทรปิกจึงได้นำเกณฑ์การครากของฮิลล์ [2] มาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งมีรูปแบบเป็น

$$F(\sigma_{y} - \sigma_{z})^{2} + G(\sigma_{z} - \sigma_{x})^{2} + H(\sigma_{x} - \sigma_{y})^{2} + 2L\tau_{yz}^{2} + 2M\tau_{zx}^{2} + 2N\tau_{xy}^{2} = \frac{2}{3}(F + G + H)\overline{\sigma}^{2}$$
(2)

เมื่อ F, G, H, L, M และ N เป็นตัวแปรแอนไอโซโทรปิก ซึ่งจะหาได้จาก การทดสอบ เมื่ออาศัยลักษณะทางกายภาพที่เกิดขึ้นกับเนื้อวัสดุใน ระหว่างกระบวนการขึ้นรูปลึกรูปแบบหนึ่งก็คือ เนื้อวัสดุเกิดการดึงใน หนึ่งแกน มาร่วมกำหนดเงื่อนไขในการพิจารณาเพื่อลดรูปสมการ (2) ซึ่งประกอบด้วย

- ในการพิจารณาจะถือว่าเกิดความเค้นตั้งฉากเฉพาะในแนวแกน
 ที่พิจารณาเท่านั้น ความเค้นตั้งฉากในแนวอื่นและความเค้นเฉือนที่เกิด
 ขึ้นจะถือว่าไม่มีผลต่อการพิจารณา

- ในการวิเคราะห์จะถือว่าเกิดผลของแอนไอโซโทรปิกในแนวตั้ง ฉาก (Normal anisotropic) เท่านั้น ไม่เกิดผลของแอนไอโซโทรปิกใน แนวระนาบ (Planar anisotropic)

เมื่อพิจารณาแนวรีดแผ่น กำหนดให้แกน x อยู่ในทิศทางทำมุม
 0 องศากับทิศทางของการรีดแผ่น และแกน y อยู่ในทิศทางทำมุม 90
 องศากับทิศทางของการรีดแผ่น

เมื่อใช้กฎการไหล (Flow rule) ร่วมกับการกำหนดเงื่อนไขข้างต้น จะได้สมการของความเค้นสำหรับการวิเคราะห์เนื้อวัสดุที่เกิดการดึงใน หนึ่งแกน คือ

$$\sigma_{x} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(2+\overline{\phi})}{(1+\overline{\phi})}} .\overline{\sigma}$$
(3)

เมื่อ σ_x เป็นความเค้นในแกน x โดยพิจารณาว่าเกิดการดึงในแนวแกน x ส่วน $\overline{\phi}$ เป็นอัตราส่วนความเครียดพลาสติกเฉลี่ย (Average plastic strain ratio) และ $\overline{\sigma}$ เป็นความเค้นประสิทธิผล (Effective stress)

สำหรับการพิจารณาการเกิดความเสียหายจะได้พิจารณาจากค่า ของอินทิกรัลความเสียหาย ซึ่งมีรูปแบบเป็น

$$I = \frac{1}{C_f} \cdot w \tag{4}$$

เมื่อ / คือค่าอินทิกรัลความเสียหาย C_f คือค่าคงที่ความเสียหาย และ w คืองานในวัสดุขณะที่พิจารณา โดยมีเงื่อนไขการพิจารณาการ เกิดความเสียหายคือ ถ้าค่าอินทิกรัลความเสียหายนี้มีค่ามากกว่าหนึ่ง หน่วยจะถือว่าเป็นสภาวะที่วัสดุเกิดความเสียหาย แต่หากยังมีค่าต่ำ กว่าหนึ่งหน่วยจะถือว่าวัสดุยังคงอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงแบบ พลาสติก

3. การดำเนินการวิจัยและผล

3.1 การทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นอลูมิเนียม

ในการศึกษานี้ได้ใช้แผ่นอลูมิเนียมความหนา 1.20 mm จึงได้ทำ การทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของแผ่นอลูมิเนียมเพื่อนำข้อมูลที่ ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ไฟในต์เอลิเมนต์และหาค่าคงที่ความเสียหาย โดยทำการทดสอบอ้างอิงจาก ASTM คือ E8M-93, E517-92a และ E646-91 สำหรับการทดสอบดึง การทดสอบหาอัตราส่วนความเครียด พลาสติก (Plastic strain ratio) และ การทดสอบหาเลขยกกำลังของ การทำให้แข็ง (Strain hardening exponent) ตามลำดับ ซึ่งมีผลการ ทดสอบดังตารางที่ 1

คุณสมบัติเชิงกล	ผลการทดสอบ				
ມอดูลัสของยัง	75,000 MPa				
ความแข็งแรงคราก	105 MPa				
ความแข็งแรงประลัย	134 MPa				
ความเครียดเสียหาย	0.365				
อัตราส่วนความเครียดพลาสติกเฉลี่ย	0.340				
เลขยกกำลังของการทำให้แข็ง	0.096				
ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง	212.9 MPa				
ความหนาแน่น	2,705 kg/m ³				
สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	0.27				

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นอลูมิเนียม

3.2 การทำนายการเกิดความเสียหาย

ในขั้นตอนนี้เป็นการวิเคราะห์ว่าในการขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีรูปร่าง ตามที่กำหนดไว้ด้วยชุดอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบและตัวแปรการขึ้นรูปตาม ที่ได้กำหนดไว้ ชิ้นงานขึ้นรูปจะเกิดความเสียหายเมื่อตัวแปรการขึ้นรูป ที่ทำการศึกษามีค่าเป็นเท่าใด โดยมีรายละเอียดของการดำเนินการ คือ

3.2.1 การกำหนดข้อมูลของกระบวนการขึ้นรูปลึก

เป็นการกำหนดรูปร่างชิ้นงาน ออกแบบรูปร่างชุดอุปกรณ์ที่เกี่ยว ข้อง และกำหนดตัวแปรการขึ้นรูป ซึ่งมีข้อมูลต่างๆ เป็นดังนี้

ตารางที่ 2 ข้อมูลของกระบวนการขึ้นรูปลึก

ข	ข				
ข้อมูล	ค่าการออกแบบ				
แผ่นอลูมิเนียม	ความหนา 1.20 mm				
ขนาดเริ่มต้นของแผ่นอลูมิเนียม	ขนาด 135x135 mm ²				
รูปร่างสุดท้ายของชิ้นงานขึ้นรูป	ขนาด 70x70 mm ²				
ส่วนโค้งทุกส่วนของชิ้นงาน	รัศมี 10 mm				
ส่วนโค้งของหัวกดขึ้นรูป	รัศมี 10 mm				
ส่วนโค้งของแม่แบบ	รัศมี 10 mm				
แรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน	ค่าสูงสุด 12 kN				
ระยะกดขึ้นรูป	ค่าสูงสุด 50 mm				
แรงกดขึ้นรูป	40 kN				
ความเร็วขึ้นรูป	0.14 m/s				





3.2.2 การจำลองสภาพการขึ้นรูปลึกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เป็นการนำข้อมูลต่าง ๆ ในหัวข้อ 3.2.1 มาทำการจำลองสภาพของ กระบวนการขึ้นรูปลึก โดยข้อมูลของรูปร่างชุดอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องได้นำ มาสร้างเป็นแบบจำลอง ซึ่งประกอบด้วย

- ก. แผ่นอลูมิเนียมรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส
- ข. หัวกดขึ้นรูป
- ค. ชุดกดยึดแผ่น
- ง. ชุดแม่แบบ

โดยได้สร้างแบบจำลองเพียง 1 ใน 4 ของอุปกรณ์จริงเท่านั้น เนื่องจาก มีความสมมาตรรอบแกน ดังรูปที่ 1

ในการแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ นั้น แบบจำลอง ของหัวกดขึ้นรูป ชุดกดยึดแผ่น และชุดแม่แบบ ได้แบ่งให้มีจำนวนของ เอลิเมนต์เป็น 252, 138 และ 324 เอลิเมนต์ ตามลำดับ โดยได้กำหนด ให้เป็นเอลิเมนต์แบบวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) เหมือนกันทั้งสามแบบ จำลอง เนื่องจากเป็นเอลิเมนต์แบบแข็งเกร็งจึงไม่ต้องกำหนดคุณสมบัติ ของเอลิเมนต์ สำหรับแบบจำลองแผ่นอลูมิเนียมได้แบ่งให้มีจำนวนเอลิ เมนต์เป็น 2,025 เอลิเมนต์ โดยได้กำหนดให้เป็นเอลิเมนต์แบบเปลือก (Shell element) และได้กำหนดคุณสมบัติต่างๆ ให้กับแบบจำลองซึ่ง สอดคล้องกับวัสดุที่มีรูปแบบเป็น Elastic-hardening and perfectly plastic

ในส่วนของการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตได้กำหนดการบังคับการ ขจัด ภาระที่กระทำ และการกำหนดคู่สัมผัส ซึ่งประกอบด้วย

- การบังคับการขจัดของแบบจำลองหัวกดขึ้นรูปและแบบจำลอง ชุดกดยึดแผ่น คือ $u_x = u_y = 0$ และ $\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$

- การบังคับการขจัดของแบบจำลองชุดแม่แบบ คือ $u_x = u_y = u_z = 0$ และ $\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$

- การบังคับการขจัดของแบบจำลองแผ่นอลูมิเนียม โดยขอบของ แบบจำลองด้านที่ขนานแกน x ได้กำหนดให้ $u_y = 0$ และ $\theta_x = \theta_z = 0$ ส่วนขอบของแบบจำลองด้านที่ขนานแกน y ได้กำหนดให้ $u_x = 0$ และ $\theta_y = \theta_z = 0$

- ขนาดการขจัดของแบบจำลองหัวกดขึ้นรูป ได้กำหนดให้เป็นไป ตามค่าของระยะกดขึ้นรูปที่ศึกษา คือ 10, 15, 20, 25 และ 30 mm.

- ภาระที่กระทำของแบบจำลองหัวกดขึ้นรูป คือ 40 kN

ภาระที่กระทำของแบบจำลองชุดกดยึดแผ่น ได้กำหนดให้เป็นไป
 ตามค่าของแรงกดยึดแผ่นที่ศึกษา คือ 0, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 kN.

การกำหนดคู่สัมผัส ซึ่งประกอบด้วย คู่สัมผัสระหว่างแบบจำลอง
 หัวกดขึ้นรูปซึ่งกำหนดเป็นผิวหลักและผิวด้านบนของแบบจำลองแผ่น
 อลูมิเนียมซึ่งกำหนดเป็นผิวรอง คู่สัมผัสระหว่างแบบจำลองชุดกดยึด
 แผ่นซึ่งกำหนดเป็นผิวหลักและผิวด้านบนของแบบจำลองแผ่น
 อลูมิเนียมซึ่งกำหนดเป็นผิวรอง คู่สัมผัสระหว่างแบบจำลองชุดแม่แบบ
 ซึ่งกำหนดเป็นผิวรอง คู่สัมผัสระหว่างแบบจำลองชุดแม่แบบ
 ซึ่งกำหนดเป็นผิวรอง คู่สัมผัสระหว่างแบบจำลองชุดแม่แบบ
 ซึ่งกำหนดเป็นผิวรอง คู่สัมผัสระหว่างแบบจำลองชุดแม่แบบ
 ชึ่งกำหนดเป็นผิวหลักและผิวด้านล่างของแบบจำลองแผ่นอลูมิเนียมซึ่ง
 กำหนดเป็นผิวรอง โดยสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของทุกคู่สัมผัสมีค่า
 เป็น 0.27

สำหรับรูปแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นได้กำหนด ให้เป็นแบบพลศาสตร์ เนื่องจากเวลาที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปนั้นค่อน ข้างสั้น เมื่อจำลองสภาพด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ABAQUS แล้วจะได้ผลลัพธ์เป็น ความหนา การเปลี่ยนตำแหน่ง ความ เค้นหลักสูงสุด และความเครียดหลักสูงสุดในทุกๆ เอลิเมนต์ สำหรับนำ ไปพิจารณาความหนาในตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลองชิ้นงาน รูปร่าง ของชิ้นงาน และหางานทางพลาสติกในแต่ละเอลิเมนต์ ตามลำดับ

3.2.3 การหาเกณฑ์ความเสียหายแบบอ่อนหนึด

เมื่อพิจารณาว่าเนื้อวัสดุเกิดการดึงในหนึ่งแกน (กำหนดให้เป็น การดึงตามแกน *x*) จะสามารถหาเกณฑ์ความเสียหายแบบอ่อนหนืดซึ่ง อยู่ในรูปของงานทางพลาสติกค่าสูงสุดจากสมการ (1) โดยแทนความ เค้นจากสมการ (3) ความเค้นประสิทธิผลจากสมการของการทำให้แข็ง ด้วยความเครียด ($\overline{\sigma} = \kappa \overline{\varepsilon}^n$) ค่าคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ จากตารางที่ 1 ซึ่งจะหาค่าคงที่ความเสียหายได้คือ 58.3 MJ

3.2.4 การวิเคราะห์การเกิดความเสียหาย

เมื่อนำผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ไฟในต์เอลิเมนต์มาหางานทาง พลาสติกของแต่ละเอลิเมนต์ในทุกๆ เอลิเมนต์บนแบบจำลองชิ้นงาน แล้วนำมาหาค่าอินทิกรัลความเสียหายเพื่อวิเคราะห์ว่าเอลิเมนต์ใดเกิด ความเสียหายบ้าง โดยมีเงื่อนไขการวิเคราะห์การเกิดความเสียหายคือ ถ้าค่าอินทิกรัลความเสียหายของเอลิเมนต์ใดๆ มีค่ามากกว่าหนึ่งหน่วย จะถือว่าเป็นสภาวะที่เอลิเมนต์นั้นเกิดความเสียหาย แต่หากยังมีค่าต่ำ กว่าหนึ่งหน่วยจะถือว่าเอลิเมนต์นั้นยังคงอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลง แบบพลาสติก โดยที่อินทิกรัลความเสียหายค่าสูงสุดของการจำลอง สภาพในแต่ละครั้งเป็นดังตารางที่ 3

A .	<u> </u>	A 4	A		0
m 1 5 1 990 7	ວາມ	າງກຽ	202201120100	າຍຄາສາ	ເຊດຍເລ ເກດຮວດວວ ເຊກາແ
	PILA	1111		171911015	
				01	0

ระยะกดขึ้นรป	อินทิกรัลความเสียหายค่าสูงสุด						
ูข (mm)	แรงกดยึดแผ่น (kN)						
(11111)	0	2	4	6	8	10	12
10	0.25	0.30	0.29	0.29	0.30	0.30	0.30
15	0.44	0.53	0.53	0.53	0.52	0.51	0.50
20	0.72	0.84	0.83	0.83	0.88	0.90	0.91
25	1.29	1.30	1.30	1.37	1.38	1.37	1.47
30	2.36	2.62	2.66	2.67	2.74	2.72	2.74

จากตารางที่ 3 พบว่าการจำลองสภาพที่ระยะกดขึ้นรูปเป็น 25 และ 30 mm นั้น มีอินทิกรัลความเสียหายค่าสูงสุดเกินหนึ่งหน่วยในทุก ค่าของแรงกดยึดแผ่น จึงวิเคราะห์ได้ว่าความเสียหายจะเกิดขึ้นเมื่อ แบบจำลองแผ่นอลูมิเนียมถูกกดขึ้นรูปตั้งแต่ระยะ 25 mm ขึ้นไป สำหรับตำแหน่งที่เกิดความเสียหายจะได้พิจารณาจากค่าอินทิกรัล ความเสียหายของแต่ละเอลิเมนต์ โดยจะได้นำเสนอค่าจากการจำลอง สภาพที่ระยะกดขึ้นรูป 20 และ 25 mm ด้วยแรงกดยึดแผ่นเท่ากับ 12 kN ซึ่งตำแหน่งของเอลิเมนต์ที่นำเสนอนั้นอยู่ในแนวอ้างอิงต่าง ๆ ดังรูป ที่ 2 ส่วนค่าอินทิกรัลความเสียหายของแต่ละเอลิเมนต์ในแต่ละแนวอ้าง อิงได้นำเสนอในรูปที่ 3 ถึง 6

ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าอินทิกรัลความเสียหายที่แสดงพบว่าในการ จำลองสภาพที่ระยะกดขึ้นรูปเป็น 20 mm เอลิเมนต์ต่าง ๆ ในแต่ละแนว อ้างอิงยังไม่เกิดความเสียหาย สำหรับการจำลองสภาพที่ระยะกดขึ้นรูป เป็น 25 mm ทุกๆ เอลิเมนต์ที่อยู่ในแนวอ้างอิง 1A และ 2A ยังไม่เกิด ความเสียหายเช่นกัน แต่ในเอลิเมนต์ที่ 5 ของแนวอ้างอิง 3A จะพบว่า เกิดความเสียหาย ซึ่งเอลิเมนต์ดังกล่าวนี้อยู่ในบริเวณมุมด้านในหัวกด ขึ้นรูปของแบบจำลองชิ้นงาน เมื่อพิจารณาที่แนวอ้างอิง 4A จะพบว่ามี ความเสียหายเกิดขึ้นในเอลิเมนต์ที่ 19, 20 และ 21 ซึ่งทั้งสามเอลิเมนต์ นี้อยู่ในบริเวณมุมด้านในหัวกดขึ้นรูปของแบบจำลองแผ่นอลูมิเนียมโดย วางตัวอยู่ในแนวของเส้นรอบรูป ดังนั้นจึงสามารถระบุได้ว่าแบบจำลอง ชิ้นงานจะมีความเสียหายเกิดขึ้นในแนวของเส้นรอบรูปที่บริเวณมุมด้าน ในหัวกดขึ้นรูป



รูปที่ 2 แนวอ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์การเกิดความเสียหาย





ูรูปที่ 5 ค่าอินทิกรัลความเสียหายของแต่ละเอลิเมนต์ในแนวอ้างอิง 3A



รูปที่ 6 ค่าอินทิกรัลความเสียหายของแต่ละเอลิเมนต์ในแนวอ้างอิง 4A

3.2.5 รูปร่างและความหนาของแบบจำลองชิ้นงาน

สำหรับรูปร่างของแบบจำลองชิ้นงานนั้นได้พิจารณาจากการเสีย รูปของแบบจำลองแผ่นอลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งเป็นด้วอย่าง ของแบบจำลองชิ้นงานจากการจำลองสภาพที่ระยะกดขึ้นรูปแตกต่าง กัน ด้วยแรงกดยึดแผ่นเป็น 12 kN ซึ่งพบว่าแบบจำลองชิ้นงานจะมีรูป ร่างเป็นถ้วยชัดเจนขึ้นเมื่อระยะกดขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ซึ่งในกรณีที่ทำการ จำลองสภาพด้วยแรงกดยึดแผ่นก่าอื่นๆ ก็จะได้ภาพรูปร่างของแบบ จำลองชิ้นงานใกล้เคียงกัน

สำหรับในส่วนของความหนาของแบบจำลองชิ้นงานนั้นได้นำเสนอ ตัวอย่างเส้นรูปร่างความหนาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของแบบจำลองชิ้นงาน ซึ่งเป็นแบบจำลองจากการจำลองสภาพที่ระยะกดขึ้นรูป 25 mm ด้วย แรงกดยึดแผ่นเท่ากับ 12 kN ดังรูปที่ 8 ซึ่งจะพบว่าตำแหน่งที่แบบ จำลองชิ้นงานมีความหนาต่ำที่สุดอยู่ที่บริเวณมุมด้านในหัวกดขึ้นรูป ของแบบจำลอง (ตำแหน่ง A ของรูปที่ 8) โดยความหนาในตำแหน่งดัง กล่าวจากทุกการจำลองสภาพเป็นดังตารางที่ 4 นอกจากนี้จะพบว่าใน บางตำแหน่งจะมีความหนาเพิ่มขึ้น (ตำแหน่ง B และ C ของรูปที่ 8)



ตารางที่ 4 ความหนาน้อยที่สุดของแบบจำลองชิ้นงาน

ระยะกดขึ้นรป		ความหนาน้อยที่สุด (mm)							
(mm)		แรงกดยึดแผ่น (kN)							
(((((((((((((((((((((((((((((((((((((((0	2	4	6	8	10	12		
10	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.10	1.10		
15	1.10	1.02	1.02	1.01	1.01	1.01	1.00		
20	0.93	0.86	0.87	0.87	0.87	0.86	0.86		
25	0.76	0.74	0.74	0.73	0.73	0.72	0.71		



รูปที่ 8 เส้นรูปร่างความหนาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของแบบจำลองชิ้นงาน

3.3 การทดสอบขึ้นรูปลึกอย่างง่าย

การดำเนินงานในหัวข้อนี้ได้นำข้อมูลรูปร่างของชุดอุปกรณ์ขึ้นรูป ลึกและตัวแปรการทำงานตามที่ได้ดำเนินการในการจำลองสภาพมาทำ การทดสอบขึ้นรูปลึกอย่างง่าย เพื่อนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับ ผลการจำลองสภาพ โดยในการทดสอบนี้ได้ตรวจสอบการเกิดความเสีย หาย รูปร่าง และความหนาของชิ้นงานทดสอบ สำหรับเครื่องมือที่ใช้ใน การทดสอบเป็นเครื่องแบบกดหนึ่งจังหวะ ดังรูปที่ 9 และการติดตั้งชุด ทดสอบเป็นดังรูปที่ 10

เมื่อทำการทดสอบขึ้นรูปลึกอย่างง่ายด้วยระยะกดขึ้นรูปและแรงกด ยึดแผ่นที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อแผ่นอลูมิเนียมถูกกดขึ้นรูปจนมีความ ลึกเป็น 25 mm ด้วยแรงกดยึดแผ่นเป็น 0 kN ได้มีรอยฉีกขาดเกิดขึ้นที่ บริเวณมุมด้านในหัวกดขึ้นรูปของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งรอยฉีกขาดนี้วาง ด้วอยู่ในแนวของเส้นรอบรูป (รูปที่ 11) เมื่อขึ้นรูปด้วยความลึกค่าเดียว กันด้วยแรงกดยึดแผ่นเป็น 2 kN พบว่ารอยฉีกขาดจะยาวขึ้น (รูปที่ 12) ส่วนการขึ้นรูปด้วยแรงกดยึดแผ่นเป็น 4 kN พบว่าที่ส่วนล่างของชิ้น งานทดสอบจะเกิดรอยฉีกขาดเป็นทางยาวตลอดทั้งด้าน (รูปที่ 13)



รูปที่ 9 เครื่องทดสอบแบบกดหนึ่งจังหวะ



รูปที่ 10 การติดตั้งชุดทดสอบขึ้นรูปลึกอย่างง่าย



ูรูปที่ 11 ชิ้นงานทดสอบที่ระยะกดขึ้นรูป 25 mm แรงกดยึดแผ่น 0 kN



รูปที่ 12 ชิ้นงานทดสอบที่ระยะกดขึ้นรูป 25 mm แรงกดยึดแผ่น 2 kN





นอกจากความเสียหายที่เกิดขึ้นเป็นรอยฉีกขาดแล้ว ยังพบว่าใน กรณีที่ขึ้นรูปด้วยแรงกดยึดแผ่นในช่วง 2 ถึง 6 kN จะพบว่าเกิดรอยย่น ที่บริเวณปีกของชิ้นงานทดสอบ แต่รอยย่นนี้จะไม่เกิดขึ้นในกรณีที่ขึ้น รูปด้วยแรงกดยึดแผ่นที่สูงขึ้น

สำหรับรูปร่างของชิ้นงานทดสอบนั้นพบว่าจะมีรูปร่างเป็นถ้วยทรง สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ชัดเจนขึ้นเมื่อระยะกดขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ในส่วนของการ ตรวจสอบความหนานั้นได้วัดความหนาของชิ้นงานทดสอบบนแนวอ้าง อิงที่ได้กำหนดขึ้นมาโดยสอดคล้องกับแนวอ้างอิง 1A, 2A และ 3A ใน รูปที่ 2 ซึ่งได้ความหนาที่จุดต่างๆ จากชิ้นงานทดสอบที่ระยะกดขึ้นรูป 25 mm แรงกดยึดแผ่นเป็น 2 kN ดังแสดงในรูปที่ 14



จากรูปที่ 14 พบว่าในแนวอ้างอิง 3A จะมีความหนาต่ำสุดเท่ากับ 0.57 mm ที่บริเวณมุมด้านในหัวกดขึ้นรูปของชิ้นงานทดสอบ สำหรับ ความหนาของซิ้นงานทดสอบอื่นๆ ก็จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงใกล้ เคียงกับรูปที่ 14 โดยเมื่อนำค่าความหนาจากจุดดังกล่าวมาพิจารณาจะ ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 5

					v	
a		¥ 6	4	0	8	
@ 7 5 7 9 9 A	5	0000100010010010	າຊລຸຄາວ າມາມານ	ລ້າລວ	90009190	191
91 I J I J I I	5	พมพทหาหยุกเ	101411070701	บเลย	J D M J	ιи

ระยะกดขึ้นรป			ความหน	าน้อยที่เ	สุด (mm)		
(mm)			ดยึดแผ่น (kN)				
(1111)	0	2	4	6	8	10	12
10	1.15	1.09	1.10	1.12	1.06	1.05	1.04
15	1.09	0.96	1.01	1.08	1.06	0.94	1.02
20	0.89	0.84	0.86	0.82	0.78	0.79	0.81
25	0.54	0.57	0.63	-	-	-	-

หมายเหตุ : เนื่องจากตรวจพบความเสียหายของชิ้นงานทดสอบที่ระยะกดขึ้นรูป 25 mm และใช้แรงกดยึดแผ่น เป็น 0, 2 และ 4 kN จึงสิ้นสุดการทดสอบ

4 สรุปผล

ในการทำนายการเกิดความเสียหายพบว่าการขึ้นรูปของแบบ จำลองชิ้นงานรูปถ้วยทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดปากกว้าง 70x70 mm² สามารถขึ้นรูปโดยมีระยะกดขึ้นรูปเท่ากับ 20 mm ด้วยแรงกดยึด ี้ชิ้นงานสูงสุดเท่ากับ 12 kN ชิ้นงานขึ้นรูปไม่เกิดความเสียหาย แต่เมื่อ ใช้ระยะกดขึ้นรูปเท่ากับ 25 mm ด้วยแรงกดยึดชิ้นงานทุกๆ ค่าที่ศึกษา พบว่าแบบจำลองชิ้นงานมีความเสียหายเกิดขึ้นที่บริเวณมุมด้านในหัว กดขึ้นรูป ซึ่งความเสียหายจะเกิดขึ้นเป็นทางยาวในแนวของเส้นรอบรูป สำหรับการทดสอบขึ้นรูปลึกอย่างง่ายพบว่าเกิดรอยฉีกขาดเป็นทางยาว ในแนวของเส้นรอบรูปที่บริเวณมุมด้านในหัวกดขึ้นรูปของชิ้นงาน ทดสอบ โดยตัวแปรการทดสอบขึ้นรูปที่ทำให้เกิดความเสียหายคือ ระยะกดขึ้นรูปเป็น 25 mm และ แรงกดยึดชิ้นงานเท่ากับ 0, 2 และ 4 kN นอกจากนี้ยังพบการเกิดรอยย่นที่บริเวณปีกของชิ้นงานในกรณีที่ ทดสอบขึ้นรูปด้วยแรงกดยึดชิ้นงานในช่วง 2 ถึง 6 kN จึงสรุปได้ว่าการ ทำนายการเกิดความเสียหายสามารถระบุตำแหน่งและตัวแปรการขึ้น รูปที่ก่อให้เกิดความเสียหายได้ตรงกับความเสียหายบนชิ้นงานจากการ ทดสอบขึ้นรูปลึกอย่างง่าย ในส่วนของรูปร่างของแบบจำลองชิ้นงาน และชิ้นงานทดสอบพบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกันโดยจะมีรูปร่างเป็นถ้วย ทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสชัดเจนขึ้นเมื่อระยะกดขึ้นรูปเพิ่มขึ้น สำหรับในส่วน ของความหนานั้นพบว่าตัวอย่างของความหนาในตำแหน่งต่างๆ ของ แบบจำลองชิ้นงานและชิ้นงานทดสอบเป็นดังแสดงในรูปที่ 15 โดยได้ ้อ้างอิงจากแนวอ้างอิง 1A, 2A และ 3A จากรูปที่ 2



ในรูปที่ 15 เป็นความหนาของแต่ละจุดในแนวอ้างอิงของแบบ จำลองชิ้นงานและชิ้นงานทดสอบที่มีระยะกดขึ้นรูปเป็น 25 mm ด้วย แรงกดยึดชิ้นงานเท่ากับ 2 kN ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ของแต่ละแนว อ้างอิงมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ความหนาของแบบจำลองชิ้นงาน จะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย สำหรับจุดที่มีความหนาน้อยที่สุดของแบบ จำลองชิ้นงานอยู่ในจุดที่ 5 ส่วนของชิ้นงานทดสอบอยู่ในจุดที่ 7 ซึ่งทั้ง สองจุดนี้อยู่ในบริเวณมุมด้านในหัวกดขึ้นรูป เมื่อพิจารณาความหนาใน บริเวณนี้จากตารางที่ 4 และ 5 จะพบว่าค่าความหนาของแบบจำลอง ชิ้นงานจะมากกว่าประมาณ 1 ถึง 6% จึงสรุปได้ว่าการจำลองสภาพ สามารถระบุตำแหน่งที่มีความหนาน้อยที่สุดของแบบจำลอง กับตำแหน่งบนชิ้นงานทดสอบคือที่มุมด้านในหัวกดขึ้นรูปของชิ้นงาน รวมทั้งความหนาในส่วนต่าง ๆ พบว่าแบบจำลองชิ้นงานและชิ้นงาน ทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน โดยตำแหน่งที่มีความหนาน้อยที่สุดค่าความ หนาจากการจำลองสภาพจะสูงกว่าความหนาจากการทดสอบขึ้นรูป ประมาณ 6%

เอกสารอ้างอิง

[1] อดิศร ประสิทธิ์ศักดิ์, "การทำนายการเสียหายแบบอ่อนหนึดในการ ขึ้นรูปลึกแผ่นอลูมิเนียมรูปถ้วยทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส", วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546

[2] Hill, R. (1983).*The Mathematical Theory of Plasticity*, Hong Kong : OXFORD.

[3] Hosfort, F.W. and Caddell, M.R. (1993). Metal Forming :

Mechanics and Metallurgy. 2nd ed. New Jersey : Prentice Hall. [4] Lange, K. (1985). Handbook of Metal Forming. New York : McGraw-Hill.

[5] Takuda, H., Mori, K. and Hatta, N. (1999). The application of some criteria for ductile fracture to the prediction of the forming limit of sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 95, 116-121.