

การศึกษาพฤติกรรมการดัดกลับในการดัดขึ้นรูปตัววีของโลหะแผ่นที่มีคุณสมบัติ แอนไอโซทรอปิกโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

A Study of Springback in V-Shape Bending of Anisotropic Sheet Metal by Finite Element Method

อภิชาติ เชื้อเมืองพาน¹ ชาญ ถนัดงาน² ศิริศักดิ์ หามูขุวงศ์³
ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล³ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ถนนพิบูลย์สงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800
โทร 0-65237475¹, 0-29132500-24 ต่อ 1003², 8531³ โทรสาร 0-25870029 E-mail: mpe38024@kmitl.ac.th¹, chn@kmitnb.ac.th²,
chw@kmitnb.ac.th³

Apichart Chuemuangphan¹ Charn Thanadngarn² Sirisak hanchoo Wong³
Department of Production^{1,2}, Mechanical³ Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok,
Bangkok, 10800, Thailand
Tel: 0-65237475¹, 0-29132500-24 Ext: 1003², 8531³ Fax: 0-25870029 E-mail: mpe38024@kmitl.ac.th¹, chn@kmitnb.ac.th²,
chw@kmitnb.ac.th³

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดัดกลับในการดัดขึ้นรูปตัววีของวัสดุโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิกในระนาบโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งทำการศึกษาแผ่นวัสดุขนาด 40 x 80 x 2 mm ในแนวทิศทางการทำมุม 0, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา กับแนวการรีด ที่ขนาดรัศมีพUNCH 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 mm การวิเคราะห์เป็นแบบความเครียดในระนาบ พฤติกรรมของวัสดุขึ้นงานเป็นแบบยืดหยุ่น-พลาสติก ไม่คำนึงถึงผลของแรงเสียดทาน จากการจำลองการดัดขึ้นรูปตัววีโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า มุมดัดกลับที่ได้จากการจำลองการดัด โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าสอดคล้องกับผลการทดลองจริง ดังนั้น สามารถยืนยันได้ว่า แบบจำลองการดัดขึ้นรูปตัววี โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมานั้น สามารถจำลองการดัดขึ้นรูปตัววีได้ถูกต้อง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับการดัดขึ้นรูปตัววีของวัสดุอื่นๆ ได้ จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ทิศทางการทำมุมกับแนวการรีดมีผลต่อการดัดกลับ ซึ่งการดัดกลับจะมีค่ามากที่สุดในแนวทิศทางการทำมุม 45 องศา กับแนวการรีด การดัดกลับจะแปรผันกับค่าแอนไอโซทรอปิก (R-value) โดยที่ค่าแอนไอโซทรอปิกมาก การดัดกลับจะมีค่ามาก และในทางตรงกันข้ามค่าแอนไอโซทรอปิกน้อย การดัดกลับจะมีค่าน้อย ในขณะที่เดียวกันการดัดกลับจะมีค่ามาก เมื่อรัศมีพUNCHมีขนาดใหญ่ และการดัดกลับจะมีค่าน้อย เมื่อรัศมีพUNCHมีขนาดเล็ก

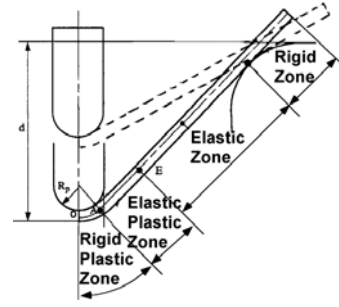
Abstract

The objective of research is to study springback in V-shape bending of planar anisotropic sheet metal by finite element method and then compare with the experimental results. The material of workpieces is stainless steel AISI 304 with the dimensions of 40 x 80 x 2 mm. The workpieces were formed at the angle of 0, 15, 30, 45, 60, 75 and 90 degrees to the rolling direction. Punch radii varied from 2 – 10 mm. By assuming elastic-plastic material and frictionless process, plane strain finite element model was developed to simulate the V-sharp bending. The analytical results show that the workpieces-forming direction affect the amount of springback. The maximum springback occurs at the angle of 45 degrees. Generally speaking, the amount of springback is proportional to the R-value. Furthermore, the springback decreases as punch radius decreases.

1. บทนำ

ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นกับกระบวนการดัดขึ้นรูปโลหะแผ่น คือ โลหะแผ่นเกิดการดัดกลับ หลังจากการคลายแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปออกจากชิ้นงานแล้ว ทำให้รูปทรงของชิ้นงานเปลี่ยนไปและไม่ได้ลักษณะรูปทรงตามต้องการ ในปัจจุบันการแก้ปัญหาดังกล่าว

ควรจะหาเทคโนโลยีที่เหมาะสม เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาใช้ในการวิเคราะห์หาความเหมาะสมในการขึ้นรูปและสามารถนำไปออกแบบเครื่องมือ เพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ตลอดจนนำไปประยุกต์ใช้กับลักษณะงานอื่นๆ ที่ใกล้เคียงกันได้ และยังสามารถทำนายปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการดัดขึ้นรูปได้อย่างรวดเร็วและดีพอที่รู้ถึงสิ่งที่จะเกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูปตลอดกระบวนการดัดขึ้นรูปได้ ดังนั้น จึงนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ศึกษาพฤติกรรมการตีกลับในการดัดขึ้นรูปของโลหะแผ่น



รูปที่ 2 การเปลี่ยนรูปของแผ่นวัสดุในดัดด้วยแรงกด

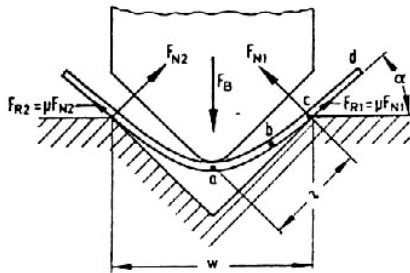
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การดัดในแม่พิมพ์รูปตัววี [3]

การดัดแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นการดัดอิสระ ซึ่งเส้นการดัดของแผ่นวัสดุเลื่อนอยู่ระหว่างขอบตายและพื้นซ์ และช่วงที่สอง เป็นการกดให้แผ่นวัสดุมีรูปทรงตามผิวหน้าพื้นซ์และตายมากขึ้น แผ่นวัสดุมีการดัดอย่างยืดหยุ่นในตอนต้น และแรงเพิ่มขึ้นเกือบเป็นเส้นตรงกับระยะเลื่อนพื้นซ์ จนกระทั่งอัตราส่วนของตีเฟลิกชัน (f) ต่อความกว้างตาย (w) ที่กึ่งกลางของแผ่นวัสดุ ทำให้ความเค้นบริเวณผิวชั้นนอกถึงขีดจำกัดความยืดหยุ่นของวัสดุ จากทฤษฎีสภาพยืดหยุ่นอัตราส่วนนี้ คือ

$$\frac{f}{w} = \frac{1}{6} \frac{R_{p0.2}}{E} \left(\frac{w}{t}\right) \quad (1)$$

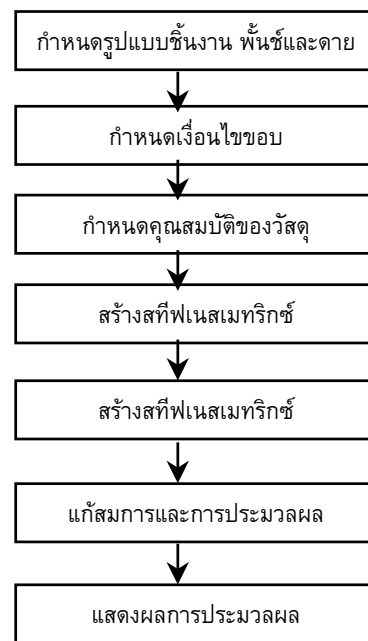
เมื่อพื้นซ์เลื่อนต่ำลงไปอีก บริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปถาวร (รูปที่ 1 และ 2 แสดงโหลดและแรงที่ขอบ พร้อมทั้งลักษณะการเปลี่ยนรูป) ขยายจาก a ไป b แผ่นวัสดุในช่วง bc ยังคงอยู่ในช่วงการดัดยืดหยุ่น ส่วนแผ่นวัสดุในช่วงปลาย cd ยังคงตรงเหมือนเดิมและมีการกระดกขึ้น



รูปที่ 1 แรงดัดในแม่พิมพ์รูปตัววี

2.2 หลักการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้กับปัญหาการขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้น ขั้นตอนทั่วไปในการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อการวิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะ มีดังนี้



1. กำหนดรูปแบบชิ้นงาน พื้นซ์และตาย

โดยทำการแบ่งชิ้นงานเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ รวมทั้งพื้นซ์และตาย

2. กำหนดเงื่อนไขขอบและกำหนดการสัมผัส

โดยให้โหนดของชิ้นงานบนแกนสมมาตรไม่สามารถเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ดัดของพื้นซ์ แต่สามารถเคลื่อนที่ได้เฉพาะในทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ดัดของพื้นซ์ ส่วนการกำหนดการสัมผัสระหว่าง พื้นซ์กับชิ้นงาน และตายกับชิ้นงาน จะกำหนดการสัมผัสด้วยสภาวะแตะกัน

3. กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

1) พื้นซ์และตาย มีคุณสมบัติแข็งเกร็ง เพราะเมื่อเทียบกับชิ้นงานแล้ว พื้นซ์และตายมีการเสียรูปน้อยมาก

2) วัสดุชิ้นงาน กำหนดให้มีพฤติกรรมแบบยืด-หยุ่นพลาสติก คุณสมบัติของวัสดุชิ้นงาน มีดังนี้

- เกณฑ์การครากของวัสดุ เป็นไปตามเงื่อนไขของฮิลล์ [4] คือ

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

- ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ สำหรับวัสดุแผ่นบาง สามารถพิจารณาในระนาบ 2 มิติ แบบ ความเครียดในระนาบ ได้ความสัมพันธ์ คือ

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

โดยที่ $C_{11} = \frac{E_x}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}}$

$$C_{12} = C_{21} = \frac{\nu_{yx}E_x}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} = \frac{\nu_{xy}E_y}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}}$$

$$C_{22} = \frac{E_y}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \quad C_{44} = G_{xy}$$

- การทำให้แข็งด้วยความเครียด ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร สามารถแทนด้วย สมการ

$$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n \quad (4)$$

- การสร้างสที่เฟนสมทริกซ์ จากการสมมูลของแรงในแต้ละ เอลิเมนต์ สามารถเขียนในรูปสมการ

$$[k]\{u\} = \{f\} \quad (5)$$

- การแก้สมการและการประมวลผล วัสดุชิ้นงานจะประกอบด้วย เอลิเมนต์จำนวนมากมาย ซึ่งทั้งหมดจะรวมกันเป็นระบบเดียวกัน ดังนั้น สามารถเขียนสมการสมมูลของแรงทั้งระบบ คือ

$$[K]\{U\} = \{F\} \quad (6)$$

- แสดงผลการประมวลผล การแสดงผลของการแก้สมการสามารถ แสดงผลได้ทั้งภาพกราฟฟิค กราฟความสัมพันธ์และข้อมูลเชิงตัวเลข

3. การดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตีกลับในการตัดชิ้นรูปตัววีของโลหะแผ่น ที่มีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิกในระนาบ โดยใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูปในการวิเคราะห์ มีขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ดังนี้

3.1 ก่อนการประมวลผล

1) การควบคุมกระบวนการจำลอง

- หน่วยที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นระบบ SI

- การวิเคราะห์ปัญหาในระนาบ 2 มิติ แบบความเครียดในระนาบ

- คุณสมบัติของวัสดุเป็นแบบแอนไอโซทรอปิกในระนาบ

- ควบคุมกระบวนการตัดชิ้นรูปโดยการกำหนดระยะเวลา

เคลื่อนที่

2) การสร้างแบบจำลองการตัดชิ้นรูป แบ่งได้เป็น

2.1) แบบจำลองพื้นที่และตาย

- มุมพื้นที่และมุมตาย มีขนาด 90 องศา

- รัศมีขอบพื้นที่มี 9 ขนาด คือ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ

10 mm

- รัศมีขอบตายเท่ากับ 5 mm

- ความกว้างของตายเท่ากับ 50 mm

- ทั้งพื้นที่และตายเป็นวัสดุแข็งเกร็ง

2.2) แบบจำลองของวัสดุชิ้นงาน

- พิจารณาในระนาบ 2 มิติ แบบความเครียดในระนาบ

- กำหนดขนาดวัสดุชิ้นงาน โดยมีความหนา 2 mm และยาว

80 mm

- วัสดุชิ้นงานเป็นวัสดุที่เสียรูปได้ และเปลี่ยนรูปตามทฤษฎี

สภาพพลาสติกแอนไอโซทรอปิกของฮิลล์ (Hill)

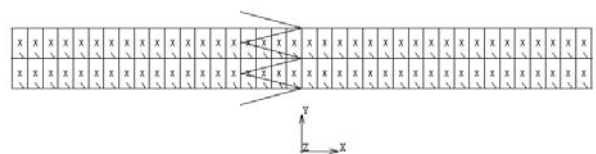
3) กำหนดคุณสมบัติของวัสดุชิ้นงาน โดยคุณสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง [2] ดังนี้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงาน

θ	E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	R	ν	n
0	194.4965	303.134	640.308	0.8434	0.2865	0.4591
15	195.1065	302.835	640.199	0.8570	0.2895	0.4636
30	195.7742	301.988	640.104	0.8710	0.2776	0.4715
45	195.8623	304.931	640.721	1.0664	0.2780	0.4549
60	194.8245	302.793	639.828	0.8419	0.2805	0.4585
75	194.8065	301.551	639.828	0.8385	0.2827	0.4484
90	194.7845	301.328	638.972	0.8316	0.2778	0.4465

4) การแบ่งส่วนเอลิเมนต์ แบบจำลองชิ้นงานใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม บริเวณที่ชิ้นงานถูกพื้นที่กดตัดและมีการเปลี่ยนรูปมากจะแบ่งเอลิเมนต์ บริเวณนี้ให้ความหนาแน่นและละเอียดมากกว่าส่วนอื่นๆ

5) การกำหนดเงื่อนไขขอบ โดยจะกำหนดให้โหนดของแกนสมมาตรบนชิ้นงาน ไม่ให้เคลื่อนที่ในแนวแกน x แต่สามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน y ได้



รูปที่ 3 การแบ่งส่วนเอลิเมนต์และการกำหนดเงื่อนไขขอบ

6) การกำหนดการเคลื่อนที่ โดยกำหนดให้พื้นผิวมีทิศทาง การเคลื่อนที่ตกลง จนกระทั่งพื้นผิวตัดชิ้นงานแนบสนิทกับตาย และกำหนด ให้พื้นผิวมีความเร็วในการเคลื่อนที่ลง เท่ากับ 25 mm/min

7) การกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างคู่ชิ้นงาน ในการวิจัยนี้ไม่คำนึง ถึงผลของความเสียหายระหว่างคู่ชิ้นงาน โดยความสัมพันธ์ระหว่างคู่ ชิ้นงาน ได้แก่ พื้นผิวกับชิ้นงาน และตายกับชิ้นงาน จะกำหนดให้มี การสัมผัสกันแบบแตะกัน (Touching)

3.2 การประมวลผล

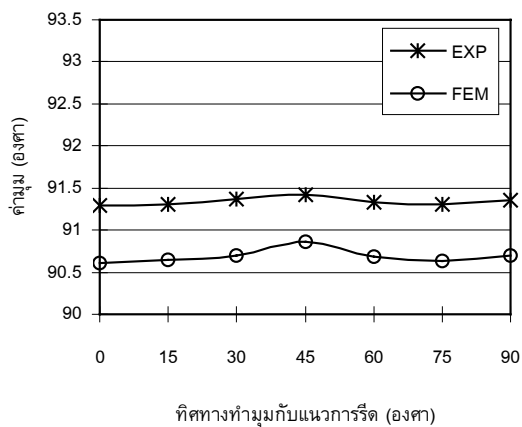
ทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป โดยใช้ระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขของนิวตัน – ราฟสัน ในการวิเคราะห์ปัญหา สำหรับกระบวนการจำลองการตัดชิ้นรูปตัววีของโลหะแผ่น

3.3 แสดงการประมวลผล

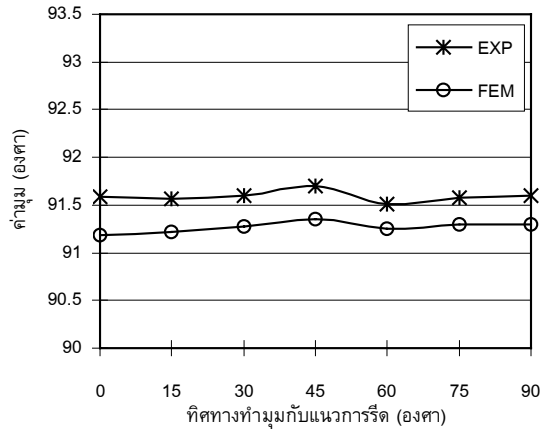
ผลที่ได้จากการประมวลผลจะอยู่ในรูปของข้อมูลเชิงตัวเลข ภาพ กราฟฟิค และกราฟความสัมพันธ์ เช่น กราฟความสัมพันธ์ของแรงต่อ เวลา หรือแรงต่อระยะการเคลื่อนที่ ภาพกราฟฟิคของความเค้นและ ความเครียด เป็นต้น ทำการวัดมุมการติดกลับภายหลังการตัดชิ้นรูป ตัววีมาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

4. ผลการวิจัย

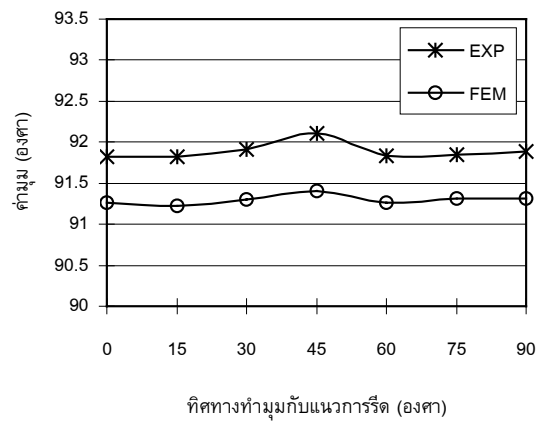
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง [2] ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบค่า มุมภายหลังการตัดชิ้นรูปกับผลการทดลอง เนื่องจากผลของทิศทางทำ มุมกับแนวการรีดของแผ่นวัสดุชิ้นงานและขนาดรัศมีของฟันซ์ ดังนี้



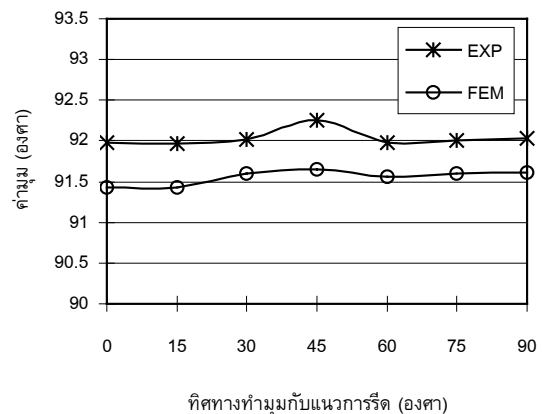
รูปที่ 4 กราฟแสดงค่ามุมภายหลังการตัดชิ้นรูปที่รัศมีฟันซ์ 2 mm



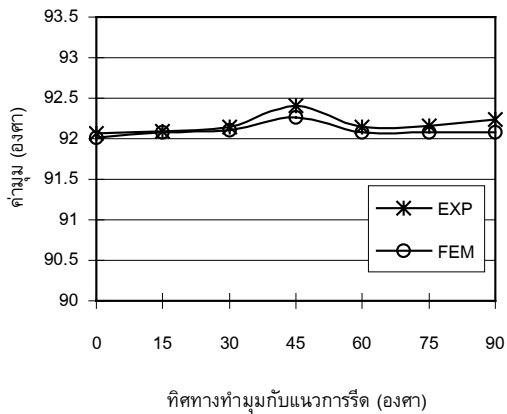
รูปที่ 5 กราฟแสดงค่ามุมภายหลังการตัดชิ้นรูปที่รัศมีฟันซ์ 3 mm



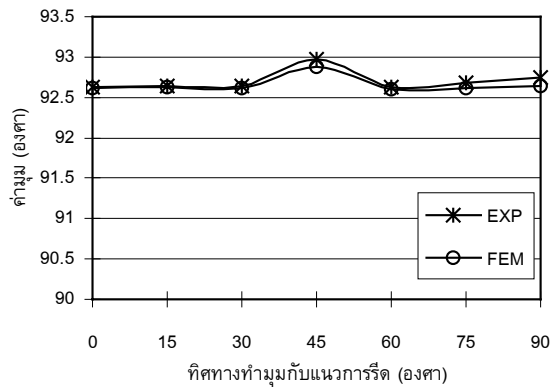
รูปที่ 6 กราฟแสดงค่ามุมภายหลังการตัดชิ้นรูปที่รัศมีฟันซ์ 4 mm



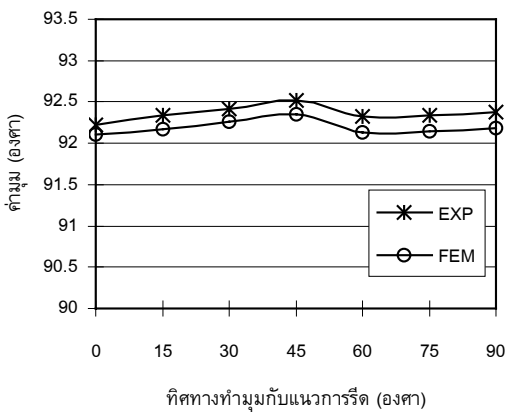
รูปที่ 7 กราฟแสดงค่ามุมภายหลังการตัดชิ้นรูปที่รัศมีฟันซ์ 5 mm



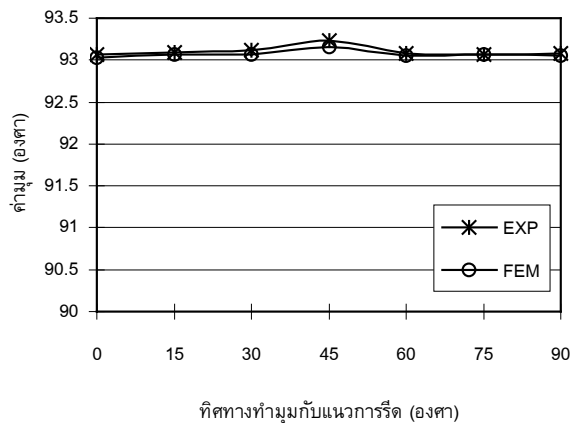
รูปที่ 8 กราฟแสดงค่ามุมภายหลังการดัดขึ้นรูปที่รีตมีพื้นที่ 6 mm



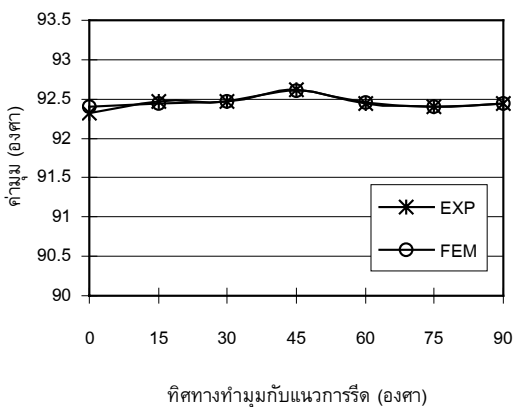
รูปที่ 11 กราฟแสดงค่ามุมภายหลังการดัดขึ้นรูปที่รีตมีพื้นที่ 9 mm



รูปที่ 9 กราฟแสดงค่ามุมภายหลังการดัดขึ้นรูปที่รีตมีพื้นที่ 7 mm



รูปที่ 12 กราฟแสดงค่ามุมภายหลังการดัดขึ้นรูปที่รีตมีพื้นที่ 10 mm



รูปที่ 10 กราฟแสดงค่ามุมภายหลังการดัดขึ้นรูปที่รีตมีพื้นที่ 8 mm

5. อภิปรายผลและสรุปผล

5.1 อภิปรายผล

ผลลัพธ์เชิงตัวเลขจากการวิเคราะห์ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง จากรูปที่ 4 ถึง 12 พบว่า ค่ามุมดัดกลับที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับผลการทดลอง[2] ดังนั้น แบบจำลองของการดัดขึ้นรูปตัววี 90 องศา ของโลหะแผ่นที่มีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการดัดขึ้นรูปแผ่นวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ได้

1) พบว่าที่ค่าแอนไอโซทรอปิก (R-value) ค่ามาก จะเกิดการดัดกลับมาก และที่ค่าแอนไอโซทรอปิกค่าน้อย จะเกิดการดัดกลับน้อย เพราะว่า วัสดุจะมีความต้านทานการเสียรูป ซึ่งจะแปรผันตามค่าแอนไอโซทรอปิก ดังนั้น เมื่อวัสดุที่มีความต้านทานการเสียรูปมาก จะส่งผลทำให้การดัดกลับมีมากด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ในแนวทิศทางทำมุม 45 องศากับการรีด มีค่าแอนไอโซทรอปิกมากที่สุด ดังตารางที่ 1 ส่งผลทำให้มีการดัดกลับมากที่สุด

2) พบว่า มุมตีดกลับจะมีค่ามาก เมื่อขนาดรัศมีพื้นผิวมีค่ามาก และมุมตีดกลับจะมีค่าน้อย เมื่อขนาดรัศมีพื้นผิวมีค่าน้อย เพราะว่า ที่รัศมีพื้นผิวน้อยจะใช้แรงกดตีดมาก ทำให้ความเค้นและความเครียดกระจายสม่ำเสมอ ส่งผลให้วัสดุเกือบเป็นพลาสติกสมบูรณ์ จึงทำให้เกิดการตีดกลับน้อย

5.2 สรุปผล

1) ค่ามุมตีดกลับจะแปรผันกับขนาดรัศมีพื้นผิว โดยรัศมีพื้นผิวใหญ่จะมีการตีดกลับมาก และในทางตรงกันข้ามรัศมีพื้นผิวน้อยจะมีการตีดกลับน้อย

2) ค่ามุมตีดกลับจะแปรผันกับค่าแอนไอโซทรอปิก (R-value) โดยค่าแอนไอโซทรอปิกมาก การตีดกลับจะมีค่ามาก และค่าแอนไอโซทรอปิกน้อย การตีดกลับจะมีค่าน้อย

3) ในแนวทิศทางทำมุม 45 องศา กับแนวการรีด จะเกิดการตีดกลับมากที่สุด เพราะในแนวทิศทางทำมุม 45 องศา กับแนวการรีด มีค่าแอนไอโซทรอปิกมากที่สุด

4) ผลการทำนายค่ามุมตีดกลับภายหลังการดัดขึ้นรูปตัววี โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลสอดคล้องกับการทดลอง โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างสูงสุด เท่ากับ 0.77% ซึ่งสามารถยอมรับได้

6. คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

E	:	โมดูลัสยืดหยุ่น
f	:	การตีเฟลิกชัน
$\{f\}$:	เวกเตอร์ของแรงที่กระทำต่อจุดต่อ
$\{F\}$:	เวกเตอร์ของแรงที่กระทำทั้งระบบ
G	:	โมดูลัสเฉือน
$\{k\}$:	สตีฟเนสเมทริกซ์ของแต่ละเอลิเมนต์
$\{K\}$:	สตีฟเนสเมทริกซ์ของปัญหาทั้งระบบ
K	:	สัมประสิทธิ์ความต้านแรงครากของวัสดุ
$R_{p0.2}$:	ความเค้นโดยประมาณที่ความเครียดเท่ากับ 0.2
t	:	ความหนาแผ่นวัสดุ
$\{u\}$:	เวกเตอร์ของการกระจัดแต่ละจุด
$\{U\}$:	เวกเตอร์ของการกระจัดทั้งระบบ
w	:	ความกว้างแผ่นวัสดุ
$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$:	ส่วนประกอบความเครียดในทิศทาง x, y และ z
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$:	ส่วนประกอบความเค้นในทิศทาง x, y และ z
U	:	อัตราส่วนของบัวซอง

7. เอกสารอ้างอิง

- Annika Nilsson, Lars Melin, and Claes Magnusson. "Finite – element simulation of V – die bending : a comparison with experimental results." Journal of

Materials Processing Technology. 65 (1997) : 52 – 58.

- พิชัย จันทน์มณี. "การศึกษาพฤติกรรมการตีดกลับในการดัดขึ้นรูปตัววีของโลหะแผ่นที่มีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2542.
- ชาญ ถนัดงาน. "เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ1." เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูป. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2543.
- R. Hill. Mathematical Theory of Plasticity. London : Oxford University Press, 1950.