

การศึกษาพฤติกรรมการดีดกลับจากการดัดรูปตัววีของโลหะแผ่นแอนไอโซทรอปิก

The Study of Springback In V-Bending of Anisotropic Sheet Metals

ชาญ ถนัดงาน

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
กรุงเทพฯ 10802

โทร 02-9132500, โทรสาร 02-5870029, E-Mail : chn@kmitnb.ac.th

ศิริศักดิ์ หาญชูวงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
กรุงเทพฯ 10802

โทร 02-9132500, โทรสาร 02-5870026, E-Mail : shw@kmitnb.ac.th

พิชัย จันทรมณี

คณะเทคโนโลยีการผลิต สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ
กรุงเทพฯ 10120

โทร 02-2873211-25 ต่อ 141

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมการดีดกลับจากการดัดรูปตัววีของโลหะแผ่นแอนไอโซทรอปิก โดยเปรียบเทียบค่าการดีดกลับจากทฤษฎีกับผลการทดลองในทิศทางที่ทำมุมกับแนวการรีดโลหะตั้งแต่ 0 ถึง 90° องศา นอกจากนี้ยังนำเสนอผลกระทบของค่าแอนไอโซทรอปิกในแนวตั้งฉาก (R) ที่มีต่อการดีดกลับ โลหะแผ่นที่ใช้ในการทดลองได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ขนาด 40x80x2 mm ทดสอบการดีดกลับด้วยแม่พิมพ์ดัดรูปตัววี 90° ความกว้างตาย 50 mm รัศมีที่ปลายพื้นผิวมีค่าระหว่าง 2-10 mm แล้ววัดขนาดด้วยเครื่องมือวัด 3 แกน นำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากผลการทดลองพบว่า R มีค่าสูงสุด 1.066 ในทิศทางทำมุม 45° กับแนวการรีดโลหะ และการดีดกลับมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่า R เพิ่มขึ้น และ/หรือเมื่ออัตราการดัด (r/t) มากขึ้น จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณมุมดีดกลับกับผลการทดลองพบว่ามีความแตกต่างกันสูงสุด 15% หรือเป็นมุม 0.41°

Abstract

This paper presents the springback action in V-bending of anisotropic sheet metal by comparing its theoretical with its experimental springback obtained in direction to the rolling direction from 0 to 90°. Moreover, the effect of normal anisotropic value R on springback is also included.

This sheet metal used in the experiment is stainless steel strip SUS 304 with the dimensions of 40x80x2 mm. The experiment is conducted in V-bending die of 90° angle, 50 mm width. The springback angle was measured using CMM. The results reveal that the greatest R -value is of 1.066 at angle 45° to the rolling direction; and springback increases as the R -value and/or bending ratio r/t increase. The maximum difference of springback angles between predicted value and experimental one is 15% or 0.41°.

1. บทนำ

การขึ้นรูปโลหะแผ่นทั่วไป สิ่งที่มีความสำคัญนอกจากเครื่องมือและกรรมวิธีแล้ว สมบัติเชิงกลของโลหะแผ่นก็มีความสำคัญมากด้วย เนื่องจากสมบัติเชิงกลของโลหะแผ่นขึ้นอยู่กับทิศทางผลึกหรือโครงสร้าง ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางที่ทำมุมกับทิศทางการรีดโลหะแผ่น เมื่อนำไปขึ้นรูปในทิศทางที่ต่างกันจึงให้ผลที่แตกต่างกันด้วย

ปัญหาสำคัญในการดัดขึ้นรูปโลหะแผ่นก็คือการดีดกลับ (springback) หลังจากการเลื่อนพ้นข้อออกจากชิ้นงาน ทำให้รูปทรงของชิ้นงานไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ขนาด รูปทรง และความแม่นยำของชิ้นงานลดลง และเนื่องจากสมบัติเชิงกลของโลหะแผ่นแตกต่างกันไปในหลายทิศทาง การดีดกลับที่เกิดขึ้น

จึงแตกต่างกันด้วย

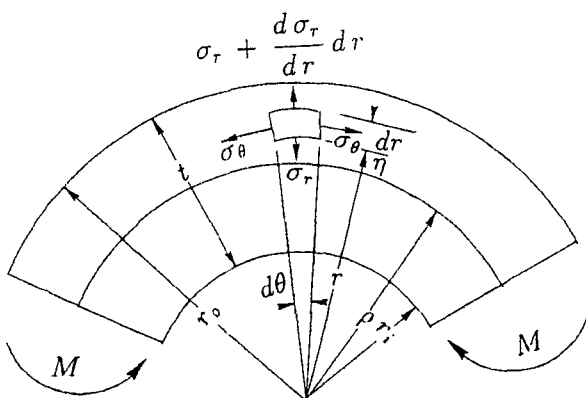
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาเปรียบเทียบผลของแอนไอโซทรอปีในแนวตั้งฉาก R ที่มีต่อการติดกลับจากการติดกลับของโลหะแผ่น และเปรียบเทียบการติดกลับจากการคำนวณกับการทดลองของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ขนาด $40 \times 80 \times 2$ mm ซึ่งตัดเป็นรูปตัววี 90° ในด้ายกว้าง 50 mm โดยใช้พื้นที่ที่มีรัศมีปลายพื้นขนาดตั้งแต่ 2 ถึง 10 mm โดยเพิ่มขนาดครึ่งละ 1 mm

2. ทฤษฎี

การตัดแผ่นโลหะบางมักใช้สมมติฐานเพื่อให้สามารถสร้างตัวแบบแบบเชิงคณิตศาสตร์อย่างง่ายคือ: (ก) วัสดุมีสมบัติแข็งเกร็ง-พลาสติก, แข็งด้วยความเครียด และแอนไอโซทรอปี, (ข) การเปลี่ยนรูปในการตัดเป็นแบบความเครียดในระนาบ, (ค) ไม่มีผลของเบาชิงเงอร์ (Bauschinger effect) และอัตราความเครียด, และ (ง) ใช้ทฤษฎีสภาพพลาสติกแอนไอโซทรอปีของฮิลล์ (Hill's theory of plastic anisotropy) เพื่อใช้อธิบายลักษณะเฉพาะแอนไอโซทรอปีของโลหะแผ่น และสมมติว่าลักษณะเฉพาะของการทำให้แข็งด้วยความเครียดของโลหะแผ่นอยู่ในรูปแบบ

$$\sigma_e = K \varepsilon_e^n \quad (1)$$

เมื่อ σ_e คือความเค้นยังผล (effective stress), ε_e คือความเครียดยังผล, K คือสัมประสิทธิ์ความต้านแรง และ n คือเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด.

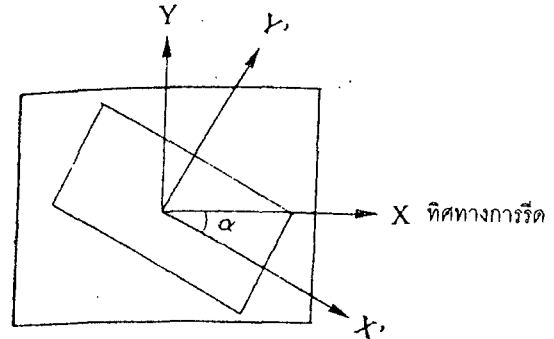


รูปที่ 1 แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์การตัดบริสุทธิ

พิจารณาการตัดบริสุทธิดังรูปที่ 1 ฮิลล์ [2] เลือกใช้แกนหลักเป็นแกนคาร์ทีเซียน เกณฑ์ที่ใช้อธิบายการครากใกล้เคียงกับเกณฑ์การครากของฟอนมิเชส (von Mises) ซึ่งเขียนในรูปแบบของสมการกำลังสองดังนี้

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

เมื่อ F, G, H, L, M, N คือพารามิเตอร์ลักษณะเฉพาะของสภาพแอนไอโซทรอปี. ถ้า $L = M = N = 3F = 3G = 3H$ แล้วจะเป็นการสมมาตรของทรงกลมคือสภาพไอโซทรอปีและสมการ (2) ลดรูปลงเป็นเกณฑ์การครากของฟอนมิเชส



รูปที่ 2 แผ่นโลหะที่ตัดเอียงทำมุม α กับทิศทางการรีด

สำหรับแผ่นโลหะที่เอียงทำมุม α กับทิศทางการรีดดังรูปที่ 2 เงื่อนไขการครากของฮิลล์หลังจากละพจน์อันดับสูงและผลการเงื่อนไขได้

$$2f(\sigma_{ij}) = F'(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G'(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H'(\sigma_x - \sigma_y)^2 = 1 \quad (3)$$

เมื่อ $F' = F \cos^2 \alpha + G \sin^2 \alpha$, $G' = F \sin^2 \alpha + G \cos^2 \alpha$,

$$H' = H(\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)^2 + 2N \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + (F + G) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha$$

จากรูปที่ 1 สามารถเขียนสมการสมดุลในแนวรัศมีได้ดังนี้

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = -\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = \pm \frac{C}{r} \quad (4)$$

Leu [6] ได้เสนอผลเฉลยของสมการ (4) ที่สอดคล้องกับกฎการไหลของวัสดุไอโซทรอปีคล้ายกับสมการของ Levy-Mises คือ $d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}}$ จึงเขียนเกณฑ์การครากได้ดังนี้

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \sqrt{\frac{F' + H'}{F'H' + F'G' + G'H'}} = \pm C \quad (4)$$

เมื่อ C เป็นฟังก์ชันของมุม α

กรณีของวัสดุแอนไอโซทรอปิกซึ่งมีค่าแอนไอโซทรอปิกในแนวตั้งฉาก R เมื่อสมมติว่า R มีค่าคงตัวตลอดการขึ้นรูปจึงสามารถเขียนสมการ (4) ได้ใหม่เป็น

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \pm \frac{1+R}{\sqrt{1+2R}} \sigma_e \quad (5)$$

เมื่อ σ_e คือความเค้นยังผลเฉลี่ยและสมมติว่าคงตัว ความเค้น σ_θ ที่รัศมี r_0 คือ

$$\sigma_\theta = \frac{1+R}{\sqrt{1+2R}} \sigma_e \quad (6)$$

การขึ้นตัวยืดหยุ่นหลังจากการตัดทำให้เกิดการบิดกลับซึ่งมักสมมติว่า โมเมนต์ที่คลายออก ΔM มีค่าเท่ากับโมเมนต์ดัดที่กระทำ M แต่มีทิศทางตรงข้าม

จากการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นหลังการคลายโหลด เมื่อพิจารณาความเครียดในระนาบ $\Delta\epsilon_\theta = E' \Delta\epsilon_\theta$ ซึ่ง E' คือโมดูลัสยืดหยุ่นสำหรับความเครียดในระนาบ และ

$$\Delta\epsilon_\theta = \frac{\eta}{\rho} - \frac{\eta}{\rho^*} \quad (7)$$

เมื่อ ρ และ ρ^* คือรัศมีของแกนสะเทินก่อนและหลังการคลายโหลด

จากทฤษฎีการดัดอย่างง่าย โมเมนต์ที่คลายออกคือ

$$\Delta M = 2b \int_0^{t/2} \Delta\sigma_\theta \eta \, d\eta = \frac{b E t^3}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho^*} \right) \quad (8)$$

สมมติให้ความเค้นยังผล $\sigma_e = (1+n) \sigma_e$ มีค่าคงตัว เมื่อ σ_e คือความเค้นยังผลเฉลี่ย ดังนั้นโมเมนต์ดัดที่กระทำคือ

$$\begin{aligned} M &= \frac{1+R}{\sqrt{1+2R}} \frac{\sigma_e}{(1+n)} \frac{b t^2}{4} \\ &= K \left(\frac{1+R}{\sqrt{1+2R}} \right)^{1+n} \frac{b t^2 (t/2\rho)^n}{4(1+n)} \end{aligned} \quad (9)$$

เมื่อ $\sigma_e = K \left(\frac{1+R}{\sqrt{1+2R}} \right)^n \left(\ln \frac{r_0}{\rho} \right)^n \approx K \left(\frac{1+R}{\sqrt{1+2R}} \right)^n \left(\frac{t}{2\rho} \right)^n$

และ $K = \frac{R_m}{e^{-n/n}}$, ดังนั้นเมื่อมีการคลายโหลดทำให้เกิดการขึ้นตัวยืดหยุ่น $\Delta M = M$ ได้

$$\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho^*} = K \left(\frac{1+R}{\sqrt{1+2R}} \right)^{1+n} \frac{3(1-\nu^2)(t/2\rho)^n}{E(1+n)t} \quad (10)$$

จากความสัมพันธ์ $\rho \theta = \rho^* \theta^*$ จึงเขียนสมการข้างต้นได้เป็น

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{1/\rho - 1/\rho^*}{1/\rho}$$

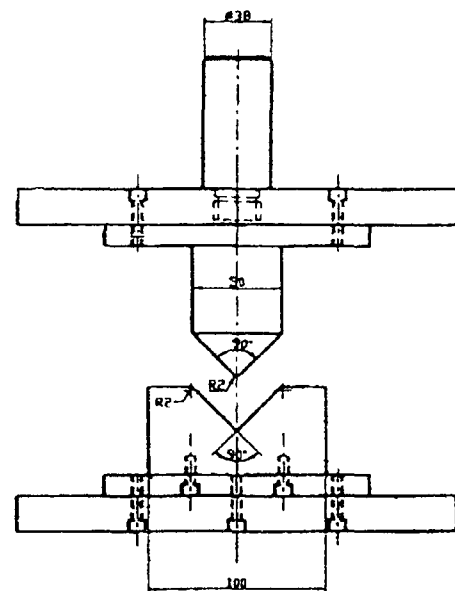
$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = K \left(\frac{1+R}{\sqrt{1+2R}} \right)^{1+n} \frac{3(1-\nu^2)(t/2\rho)^{n-1}}{2E(1+n)} \quad (11)$$

สมการนี้ใช้หามุมบิดกลับในทิศทางต่างๆ ที่ทราบค่า R

3. การทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ทดลองหาค่า R คือเครื่องทดสอบการดึง และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E517-92a ส่วนการทดสอบการบิดกลับได้ออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ตัดรูปตัววี 90° 1 ชุด ซึ่งสามารถถอดเปลี่ยนพื้นที่ที่มีรัศมีปลายพื้นที่ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 mm ส่วนดายเป็นรูปตัววีมีมุม 90° กว้าง 50 mm ดังรูปที่ 3 ชิ้นทดสอบตัดจากเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ขนาดกว้าง 40 mm ยาว 80 mm หนา 2 mm โดยตัดทำมุมกับทิศทางการรีด 0, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90°



รูปที่ 3 แม่พิมพ์ที่ใช้ทดสอบ

3.2 วิธีการทดลอง

- นำชิ้นทดสอบมาติดตั้งในแม่พิมพ์ โดยกดลงไปจนกระทั่งระยะห่างระหว่างพื้นที่กับด้ายเท่ากับความหนาของชิ้นทดสอบเพื่อไม่ให้เกิดการกดอัด
- นำออกมาวัดมุมและรัศมีการดัดด้วยเครื่องมือวัดสามแกน

4. ผลการทดลอง

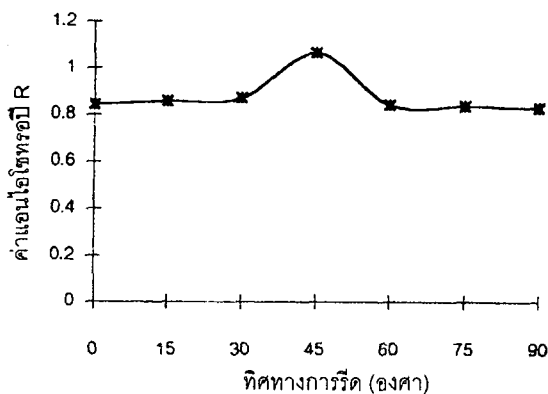
จากผลการทดลองหาคุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ซึ่งตัดมุมต่างๆ กับทิศทางการรีด ได้ค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด n , ค่าแอนไอโซทรอปิกในแนวตั้งฉาก

R , อัตราส่วนของผิวของ v , ความต้านแรงดึงคราก R_p , ความต้านแรงดึง R_m และเปอร์เซ็นต์ความยืดก่อนขาด $Elon.$ ดังตารางที่ 1

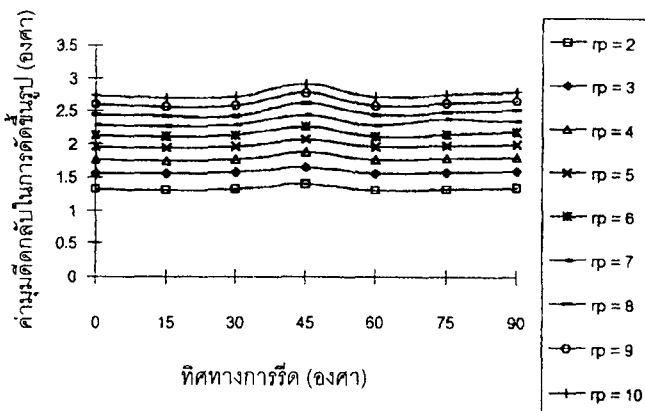
ตารางที่ 1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304

มุม	ค่า n	ค่า R	v	R_p (MPa)	R_m (MPa)	Elon. %
0	0.459	0.843	0.286	303.13	640.31	53.23
15	0.464	0.857	0.290	302.84	640.20	53.15
30	0.472	0.871	0.278	301.99	640.10	53.22
45	0.455	1.066	0.278	304.93	640.72	55.04
60	0.459	0.842	0.280	302.79	639.83	52.32
75	0.448	0.838	0.283	301.55	639.38	52.22
90	0.446	0.832	0.278	301.33	638.97	51.86

เมื่อนำค่า R ไปลงจุดเทียบกับทิศทางการรีดได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4



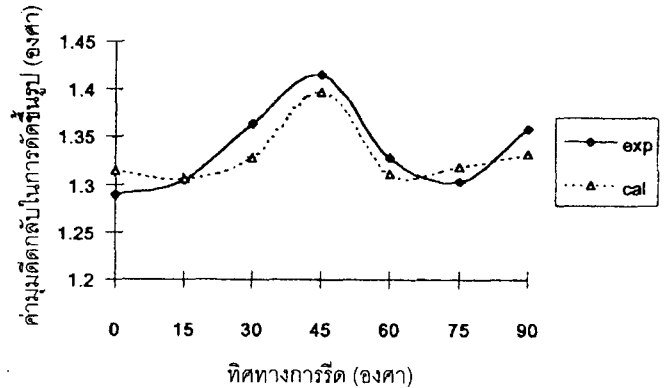
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R กับทิศทางการรีด



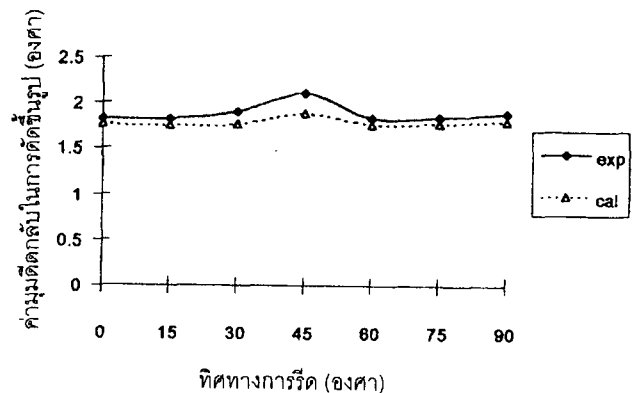
รูปที่ 5 มุมดัดกลับจากการทดลองดัดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 เป็นรูปตัววี 90°

ผลการทดลองวัดมุมดัดกลับของชิ้นทดสอบซึ่งดัดทำมุมต่างๆ กับทิศทางการรีด แล้วดัดในแม่พิมพ์รูปตัววี 90° โดยวัดด้วยเครื่องวัดโคออร์ดิเนต แสดงในรูปที่ 5

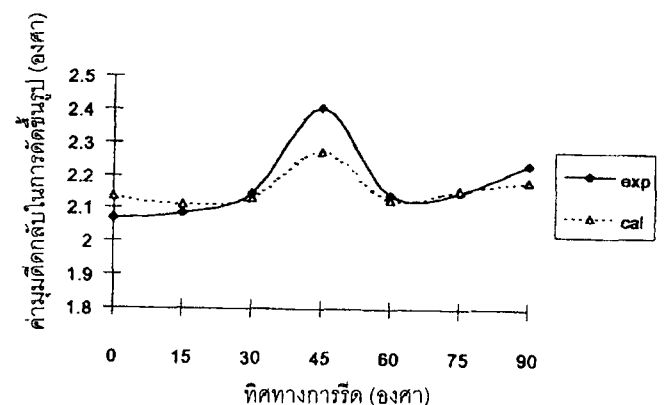
การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณมุมดัดกลับของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ที่รัศมีพื้นที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 2, 4, 6, 8 และ 10 mm แสดงในรูปที่ 6 ถึง 10



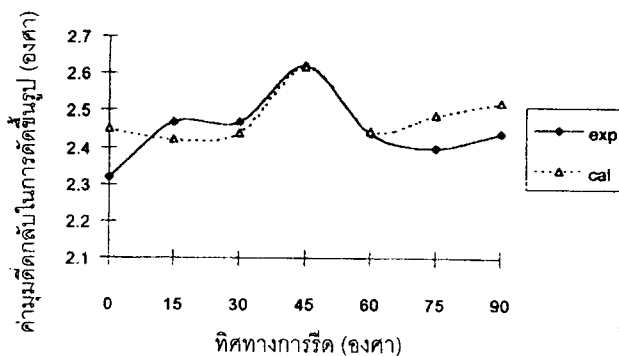
รูปที่ 6 ผลต่างของมุมดัดกลับจากการทดลองกับการคำนวณในการดัดรูปตัววี 90°, รัศมีพื้นที่ 2 mm



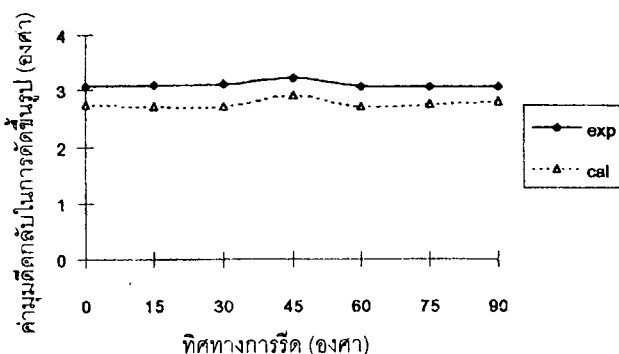
รูปที่ 7 ผลต่างของมุมดัดกลับจากการทดลองกับการคำนวณในการดัดรูปตัววี 90°, รัศมีพื้นที่ 4 mm



รูปที่ 8 ผลต่างของมุมดัดกลับจากการทดลองกับการคำนวณในการดัดรูปตัววี 90°, รัศมีพื้นที่ 6 mm



รูปที่ 9 ผลต่างของมุมตีกลับจากการทดลองกับการคำนวณ ในการดัดรูปตัววี 90°, รัศมีพื้นซ์ 8 mm



รูปที่ 10 ผลต่างของมุมตีกลับจากการทดลองกับการคำนวณ ในการดัดรูปตัววี 90°, รัศมีพื้นซ์ 10 mm

5. สรุป

1. ค่าแอนไอโซทรอปีในแนวตั้งฉาก R มีค่าสูงสุด 1.066 ในทิศทางทำมุม 45° กับทิศทางเกร็ด และมีค่าต่ำสุด 0.832 ในทิศทางทำมุม 90° กับทิศทางเกร็ด
2. การตีกลับมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่า R เพิ่มขึ้น

3. อัตราการตัด r/t มาก มีการตีกลับมาก และ r/t น้อย มีการตีกลับน้อย

4. การคำนวณมุมตีกลับให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] พิชัย จันทรมณี, "การศึกษาพฤติกรรมการตีกลับในการดัดขึ้นรูปตัววีของโลหะแผ่นที่มีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปีก", วิทยานิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2542
- [2] R. Hill, "The Mathematical Theory of Plasticity", Clarendon Press, Oxford, 1967
- [3] A. Chandra, "Real-Time Identification and Control of Springback in Sheet Metal Forming", ASME Journal of Engineering for Industry, V. 109, 1977, pp. 265-273
- [4] Z. Marciniak and J.L. Duncan, "The Mechanics of Sheet Metal Forming", Edward Arnold, 1992
- [5] W.F. Hosford and R.M. Caddell, "Metal Forming: Mechanics and Metallurgy", Prentice Hall, 1993
- [6] D. K. Leu, "A Simplified Approach for Evaluating Bendability and Springback in Plastic Bending of Anisotropic Sheet Metals", Journal of Material Processing Technology, V. 66, 1997, pp. 9-17
- [7] J. Danckert and K.B. Nielsen, "Determination of the Plastic Anisotropy r in Sheet Metal Using Automatic Tensile Test Equipment", Journal of Material Processing Technology, V. 73, 1998, pp. 276-280