

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบอิสระที่ส่งผลต่อ พฤติกรรมการติดตัวกลับของโลหะแผ่นอลูมิเนียมผสม AA6016

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ*

คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ถนนเพชรเกษม ตำบลหนองแก อำเภอบางพลี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

รับบทความ 6 กันยายน 2560 ตอรับบทความ 13 พฤศจิกายน 2560

บทคัดย่อ

พฤติกรรมการติดตัวกลับเป็นปัญหาสำคัญในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยเฉพาะวัสดุประเภทอลูมิเนียมผสมซึ่งมักจะพบปัญหาดังกล่าวบ่อยครั้ง ซึ่งในปัจจุบันอลูมิเนียมถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์มากขึ้นเพื่อทดแทนวัสดุจำพวกเหล็กกล้า เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและพื้นผิวสวยงาม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการติดตัวกลับของอลูมิเนียมผสมชนิดรีดเย็นเกรด AA6016 ในระหว่างกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ (Air-bending) โดยการทดสอบตามมาตรฐาน ISO:7438/2010 เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการดัดขึ้นรูปประกอบด้วย ความหนาของวัสดุ รัศมีของฟันซ์ (Punch) ขนาดมุมการดัด ความกว้างปากตาย และอัตราส่วนของรัศมีของฟันซ์ (Punch) และความหนาของวัสดุ (r/t) ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการติดตัวกลับของแผ่นวัสดุ ผลการทดลองเห็นได้ชัดว่าการติดตัวกลับของชิ้นทดสอบจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อขนาดของรัศมีหัวคดฟันซ์ ระยะช่องว่างปากตาย และอัตราส่วนระหว่างรัศมีของฟันซ์และความหนาของแผ่นวัสดุเพิ่มมากขึ้น และการติดตัวกลับจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าความหนาของแผ่นวัสดุและขนาดมุมการดัดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขนาดมุมการดัดที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้พื้นผิวบริเวณการดัดมีความหยาบมากขึ้นและเกิดรอยแตกร้าวตามมา จึงส่งผลให้แรงดัดขึ้นรูปและขนาดมุมดัดตัวกลับ

คำสำคัญ: มุมดัดตัวกลับ; อลูมิเนียมผสม; การดัดขึ้นรูปแบบอิสระ; รัศมีของฟันซ์; ความหนาชิ้นทดสอบ

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Effect of Process Parameters on Springback Behaviour during Air Bending of Aluminum Alloy Sheet AA6016

Natthasak Pornputsiri*

Faculty of Industry and Technology Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Phetchakaseam Road, Nhong-kea, Hua-Hin, prachuapkhirikhan 77110

Received 6 September 2017 ; accepted 13 November 2017

Abstract

Springback behavior is a major problem of sheet metal forming process. Especially aluminum alloy, which often encounter such problems often. At present, aluminum alloy is increasingly of used in the automotive industry for replace of the steels, due to its lightweight and good finished surface. This work aims study to springback behavior of cold rolled aluminum alloy (AA6016) during air-bending process by ISO7438/2010 test standard. To analyze the influence of bending process parameter are included: sheet thickness, punch radius, bending angle, die open, and the ratio of bending radius and material thickness (r/t), effecting to springback behavior. The results are clearly that, the springback angle is likely to increase with increase of the punch radius, size of die open and the ratio of punch radius and sheet thickness, and the springback tenor to decrease when the sheets thickness and bending angle increased. The increased bending angle will resulted to bending surface region is roughness increase and crack occurred to follow. As a result, the bending force and the springback angle decreased.

Keywords: Bending Angle; Aluminum Alloy; Air Bending; Punch Radius; Sheet Thickness

1. บทนำ

การดัดขึ้นรูปแบบอิสระ (Air Bending) เป็นกระบวนการดัดขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขอบข่ายกว้างกว่าการดัดขึ้นรูปในลักษณะอื่น เนื่องจากสามารถดัดขึ้นรูปวัสดุที่มีความหนาแตกต่างกันเพื่อให้ได้ขนาดมุมที่ต้องการโดยใช้เครื่องมือเพียงชุดเดียวและเป็นลักษณะการขึ้นรูปจากความเค้นดัดล้วน (Pure Bending Stress) จากความต้องการด้านความแม่นยำของขนาดชิ้นงานที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นปัญหาที่สำคัญในการออกแบบเครื่องมือและข้อกำหนดของกระบวนการขึ้นรูป [1] เพื่อการผลิตชิ้นงานที่มีขนาดถูกต้องเที่ยงตรง เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นมีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงาน เช่น ลักษณะของแม่พิมพ์ชนิดของวัสดุชิ้นงาน ค่าความหนาและคุณสมบัติทางกลของแผ่นชิ้นงาน เป็นต้น ทั้งนี้ปัญหาสำคัญที่สุดในการขึ้นรูปโลหะแผ่น คือการเปลี่ยนแปลงของขนาดมุมชิ้นงานภายหลังการดัดขึ้นรูปจากการคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Recovery) ของวัสดุหรือที่เรียกว่าการคืนตัวกลับ (Springback) โดยเฉพาะวัสดุประเภทอลูมิเนียมซึ่งมักพบปัญหาดังกล่าวอยู่บ่อยครั้ง [2] ปัจจุบันวัสดุประเภทอลูมิเนียมผสมถูกนำมาใช้ในงานวิศวกรรมเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เพื่อใช้ทดแทนวัสดุประเภทเหล็กกล้าเนื่องจากมีน้ำหนักเบากว่าเหล็กกล้าประมาณ 3 เท่า มีลักษณะพื้นผิวที่สวยงาม ด้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี และขึ้นรูปทางกลได้ง่าย เนื่องจากมีโครงสร้างผลึกแบบ Face Center Cubic (FCC) มีคุณสมบัติด้านการไหลตัว (Fluidity) ที่ดีและมีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวต่ำ (660 °C) [3] จากคุณสมบัติที่โดดเด่นดังกล่าว ทำให้อลูมิเนียมถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอย่างหลากหลาย

การประเมินความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากในการออกแบบแม่พิมพ์และการกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อน ซึ่งความเที่ยงตรงของชิ้นงานจากการขึ้นรูปเป็นอีก

เงื่อนไขที่สำคัญในการประเมินความสามารถด้านการขึ้นรูปของวัสดุ [4] ความเที่ยงตรงของวัสดุสามารถประเมินได้จากความถูกต้องของขนาดมุมและลักษณะของชิ้นงานที่ได้ภายหลังการขึ้นรูป ในกระบวนการดัดขึ้นรูป แรงกดจะถูกกระทำลงบนแผ่นวัสดุโดยตรงเมื่อเอาแรงกระทำดังกล่าวออก ค่าความเครียดโดยรวมของแผ่นชิ้นงานลดลงและเกิดการคืนตัวจากคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นของวัสดุ ทำให้ชิ้นงานสำเร็จมีขนาดมุมที่แตกต่างไปจากมุมขณะขึ้นรูป เรียกพฤติกรรมดังกล่าวว่าการคืนตัวกลับ [5] ซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมการคืนตัวกลับเป็นสิ่งสำคัญสำหรับนักออกแบบแม่พิมพ์ เพื่อการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ให้มีขนาดถูกต้องตามที่กำหนดและสะดวกต่อการนำไปใช้งาน ดังนั้นการควบคุมและชดเชยการคืนตัวกลับจึงเป็นเรื่องสำคัญ ที่ผ่านมามีการศึกษาพฤติกรรมการคืนตัวกลับในระหว่างกระบวนการดัดขึ้นรูปได้รับความสนใจเป็นอย่างมากซึ่งปัจจัยเกี่ยวข้องที่สำคัญบางส่วนได้รับการตรวจสอบโดยนักวิจัยหลายท่าน เช่น Inamdar et al. [6] ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการดัดที่ส่งผลต่อการคืนตัวกลับของโลหะแผ่น 5 ชนิด โดยการทดสอบการดัดขึ้นรูปตัววี ซึ่งสรุปได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการคืนตัวกลับอย่างชัดเจนคือ รัศมีของพUNCH (Punch Radius) รัศมีของตาย (Die Radius) ระยะช่องว่างปากตาย (Die Open) และขนาดมุมดัดขึ้นรูป (Bending Angle), Bruni et al. [7] ทำการทดสอบการดัดขึ้นรูปโลหะผสมแมกนีเซียม AZ31 ในสภาพการขึ้นรูปแบบอุ่นและร้อนเพื่อศึกษาพฤติกรรมการคืนตัวกลับ โดยพบว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการคืนตัวกลับคือ รัศมีของพUNCH และอุณหภูมิชิ้นงาน Fei and Hodgson [8] ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการคืนตัวกลับของเหล็กกล้ารีดเย็นชนิด 3 เฟส (TRIP Steel) ในกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ Romeu et al. [9] ดำเนินการทดลองด้วยวิธีการดัดแบบอิสระของโลหะแผ่นอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อตรวจสอบการคืนตัวกลับ จากการดัดขึ้นรูปที่มีขนาดมุมแตกต่างกัน

สรุปได้ว่าวัสดุแต่ละชนิดมีพฤติกรรมการตีตัวกลับที่แตกต่างกันโดยมุมตีตัวกลับจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมุมการตัดเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยไม่มากนักที่ได้ศึกษาถึงกระบวนการตัดขึ้นรูปและพฤติกรรมการตีตัวกลับของโลหะแผ่นชนิดอลูมิเนียมผสมที่มีค่าความหนาและมีรัศมีการตัดแตกต่างกันด้วยวิธีการตัดขึ้นรูปแบบอิสระ เนื่องจากวัสดุประเภทนี้แม้จะสามารถขึ้นรูปได้ง่ายแต่มีข้อจำกัดในการขึ้นรูปเนื่องจากมีความยืดหยุ่นไม่สูงนัก มีความไวต่อค่าความเครียดแข็ง (Strain Hardening) และแตกร้าวดังง่าย [10]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตีตัวกลับของโลหะแผ่นอลูมิเนียมผสมเกรด AA6016 ซึ่งนิยมนำไปใช้เพื่อการผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์อย่างแพร่หลาย ด้วยวิธีการทดสอบการตัดขึ้นรูปแบบอิสระ (Air Bending) ตามมาตรฐาน ISO 7438:2010 [11] โดยมุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของรัศมีหัวกดของพินซ์ ความกว้างปากตาย ความหนาของแผ่นชิ้นงาน ขนาดมุมการตัด และอัตราส่วนรัศมีของพินซ์ (Punch) และความหนาชิ้นงาน (r/t) ที่ส่งผลต่อขนาดมุมตีตัวกลับและลักษณะของชิ้นงานสำเร็จ โดยจะตรวจสอบผลการตัดขึ้นรูปทุก ๆ 15 องศา เพื่อเปรียบเทียบและประเมินผลจากแรงตัดขึ้นรูป ลักษณะพื้นผิวการตัด และขนาดมุมตีตัวกลับของชิ้นงาน เพื่อประเมินความสามารถในการขึ้นรูปและใช้ผลการวิจัยนี้เป็นแนวทางในการออกแบบแม่พิมพ์และกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการตัดขึ้นรูปที่เหมาะสม เพื่อการผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพและลดความเสียหายจากการขึ้นรูป

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุชิ้นทดสอบ

เพื่อศึกษาผลกระทบจากข้อกำหนดของกระบวนการตัดขึ้นรูปแบบอิสระที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการตีตัวกลับของวัสดุอลูมิเนียมผสมชนิดแผ่นบาง เกรด AA6016 ที่ได้จากกระบวนการรีดขึ้นรูปเย็น ที่มีขนาด

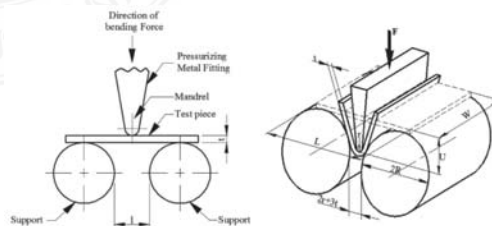
ความหนาต่างกัน 4 ขนาดคือ 1, 2, 3 และ 4 มิลลิเมตร ทำการตัดเตรียมชิ้นทดสอบในทิศทางตามแนวการรีด ซึ่งมีขนาดความกว้าง \times ยาว = 12×45 มิลลิเมตร และคุณสมบัติทางกลของวัสดุการทดลองจากการทดสอบแรงดึงมาตรฐาน ASTM E8M-92a แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ AA6016

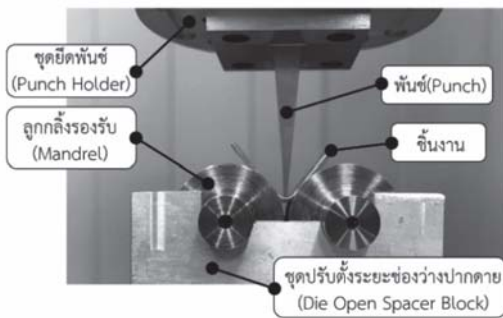
Material	Yield Stress (N/mm ²)	UTS (N/mm ²)	Ultimate Elongation (%)	Total Elongation (%)	n (at 5%)
AA6016	124	241	22.5	26	0.26

2.2 มาตรฐานการทดสอบ

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดสอบการตัดแบบอิสระตามมาตรฐาน ISO 7438 : 2010 ซึ่งใช้สำหรับทดสอบผลิตภัณฑ์โลหะแผ่น โดยลักษณะของการทดสอบการตัดแบบอิสระแสดงดังรูปที่ 1 ขั้นตอนการทดสอบจะดำเนินการโดยนำชิ้นทดสอบวางบนฐานรองรับรูปทรงกระบอกที่มีรัศมี (R) 10 มิลลิเมตร และให้แรงกดที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ โดยใช้พินซ์ที่มีรัศมีหัวกด (r) เท่ากับ 0.25 และ 1 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างผิวทรงกระบอกตามมาตรฐานการทดสอบ (L) = $2r + 3t$ โดยที่ r คือรัศมีการตัดโค้งหรือรัศมีส่วนปลายของพินซ์ และ t คือ ขนาดความหนาของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 1 การทดสอบการตัดแบบอิสระตามมาตรฐาน ISO 7438:2010



รูปที่ 2 แม่พิมพ์ทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ

2.3 แม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปแบบอิสระ (Air-Bending Die)

ออกแบบชุดแม่พิมพ์สำหรับการทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบอิสระตามมาตรฐาน ISO7438 : 2010 ดังรูปที่ 2 โดยคำนึงถึงขอบเขต วัตถุประสงค์ของการวิจัย และมาตรฐานการทดสอบ โดยรายละเอียดสำคัญของแม่พิมพ์ประกอบด้วย ขนาดรัศมีของทรงกระบอกรองรับมีขนาด (R) = 10 มิลลิเมตร ติดตั้งบนตัวกำหนดตำแหน่งเพื่อให้พื้นผิวทรงกระบอกมีระยะห่างตามมาตรฐาน ทำการติดตั้งชุดแม่พิมพ์และทดสอบการดัดขึ้นรูปบนเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ รุ่น Zwick / 2020 โดยวางชิ้นทดสอบบนฐานรองรับทรงกระบอกทำการกดดัดโดยการควบคุมระยะการกดที่เครื่องทดสอบ กดค้างไว้ 5 วินาทีแล้วจึงยกพินซ์ขึ้น

2.4 เงื่อนไขการทดลอง

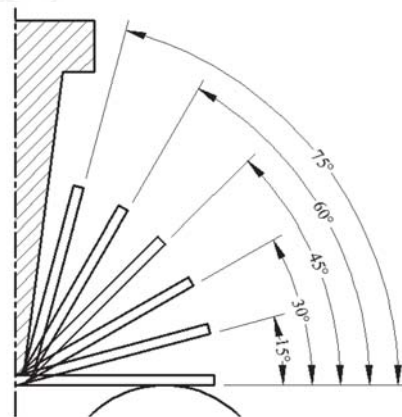
ทำการทดลองการดัดขึ้นรูปด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ โดยกำหนดปัจจัยที่สำคัญเพื่อศึกษาผลกระทบต่อของดัดตัวกลับ ซึ่งประกอบด้วย

1. ขนาดความหนาของชิ้นทดสอบ 4 ขนาด คือ 1, 2, 3 และ 4 มิลลิเมตร
2. รัศมีหัวกดของพินซ์ 2 ขนาด คือ 0.25 และ 1 มิลลิเมตร
3. กำหนดระยะช่องว่างปากตาย 4 ขนาด คือ 6, 9, 12 และ 15 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ทำการทดสอบการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็วในการกดดัดที่ 120 มิลลิเมตร/นาที และไม่ใช่สารหล่อลื่น บันทึกผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลที่มุมการดัดทุก 15 องศา คือ 15, 30, 45, 60 และ 75 องศาตามลำดับ ดังรูปที่ 3

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากการทดสอบการดัดขึ้นรูป เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดัดขึ้นรูปของแผ่นอลูมิเนียมผสมเกรด AA6016 โดยบันทึกผลการทดลองเพื่อการวิเคราะห์และประเมินผล จากแรงดัดขึ้นรูปมุมดัดตัวกลับของวัสดุ และลักษณะพื้นผิวการดัดซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

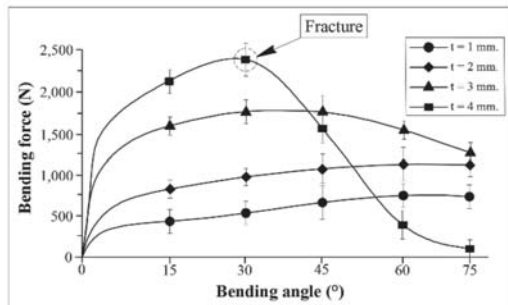


รูปที่ 3 การกำหนดขนาดมุมการดัด

3.1 แรงดัดขึ้นรูปชิ้นงาน (Bending Force)

จากการทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบอิสระที่อุณหภูมิห้อง และไม่ใช่สารหล่อลื่น โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยทำการดัดขึ้นรูปอลูมิเนียมผสมเกรด AA6016 ที่มี 4 ระดับความหนา ทำการทดสอบการดัดและบันทึกผลการทดลองที่มุมการดัดทุก 15 องศา คือ 15, 30, 45, 60 และ 75 องศาตามลำดับ จากการทดลองดัดขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียมผสมที่มีค่าความหนา 1, 2, 3 และ 4 มิลลิเมตร โดยใช้แม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปแบบอิสระที่มีรัศมีของพินซ์ขนาด

0.25 และ 1 มิลลิเมตร และค่าช่องว่างปากตายหรือระยะห่างระหว่างพื้นผิวทรงกระบอกรองรับ(L) กำหนดตามมาตรฐาน ISO 7438 : 2010 คือ $L = 2r + 3t$ ผลการทดลองพบว่าค่าแรงดัดขึ้นรูปจะแปรผันตามค่าความหนาของชิ้นทดสอบ และค่าแรงดัดจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมุมการดัดขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น



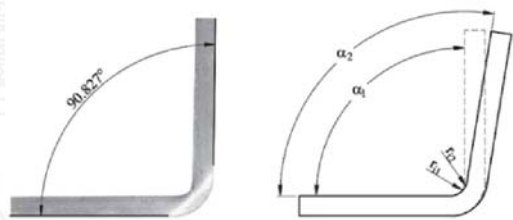
รูปที่ 4 แรงดัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบที่ความหนาแผ่นต่างกัน

จากกราฟผลการทดลองรูปที่ 4 แสดงผลการเปรียบเทียบแรงดัดขึ้นรูปโลหะแผ่นอลูมิเนียมผสมที่มีค่าความหนาแตกต่างกัน โดยใช้พื้นที่รีดที่มีหัวกดขนาด 0.25 มิลลิเมตร พบว่าชิ้นทดสอบที่มีความหนา (t) 1 มิลลิเมตร ใช้แรงในการดัดขึ้นรูปน้อยที่สุดและค่าแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อมุมการดัดเพิ่มมากขึ้นจนถึงมุมการดัดที่ 75 องศา ส่วนชิ้นทดสอบที่มีค่าความหนา 4 มิลลิเมตร ใช้แรงในการดัดขึ้นรูปสูงที่สุด โดยในช่วงเริ่มต้นการดัดพบว่าแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจนถึงมุมการดัด 30 องศา หลังจากนั้นพบว่าแรงดัดมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วจากผลของแรงกดที่เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้พื้นผิวภายนอกบริเวณมุมการดัดของชิ้นทดสอบมีค่าความเค้นดึงเกิดขึ้นสูง และเมื่อค่าความเค้นบริเวณดังกล่าวมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุ จึงส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวและการฉีกขาดที่พื้นผิวภายนอกซึ่งทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง

3.2 พฤติกรรมการดัดตัวกลับ (Springback Behavior)

ทำการถ่ายภาพด้านข้างชิ้นทดสอบด้วยกล้อง DSLR และวัดค่ามุมของชิ้นงานด้วยโปรแกรม Auto CAD โดยสร้างเส้นอ้างอิงตามแนวขอบชิ้นทดสอบและวัดขนาดมุมของชิ้นงานด้วยคำสั่งบอกขนาด เพื่อเปรียบเทียบหาค่ามุมดัดตัวกลับของชิ้นทดสอบดังรูปที่ 5 และคำนวณขนาดมุมดัดตัวกลับโดยสมการที่ (1)

$$\Delta\theta = \alpha_2 - \alpha_1 \tag{1}$$



รูปที่ 5 การวัดเพื่อเปรียบเทียบค่ามุมดัดตัวกลับ

เมื่อ

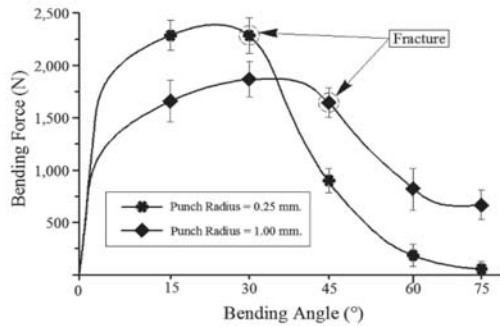
$\Delta\theta$ = มุมดัดตัวกลับ

α_2 = ขนาดมุมของชิ้นงาน

α_1 = ขนาดมุมการดัด

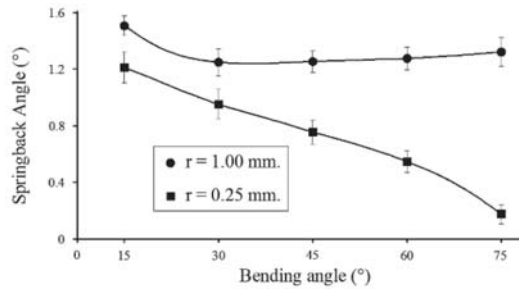
3.2.1 อิทธิพลของรัศมีหัวกดพื้นที่ (Punch Radius)

ผลการทดลองการดัดขึ้นรูปโดยใช้พื้นที่รีดที่มีขนาดรัศมีหัวกดแตกต่างกันที่ส่งผลต่อแรงดัดขึ้นรูปและขนาดมุมดัดตัวกลับ แสดงดังรูปที่ 6 และ รูปที่ 7 ตามลำดับ ซึ่งอิทธิพลของรัศมีหัวกดพื้นที่ส่งผลต่อแรงดัดขึ้นรูป จากผลการทดลองรูปที่ 6 แสดงผลการเปรียบเทียบแรงดัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบความหนา 4 มิลลิเมตร โดยใช้พื้นที่รีดที่มีรัศมีแตกต่างกันพบว่า การดัดขึ้นรูปโดยใช้พื้นที่รีดที่มีรัศมีขนาดเล็ก ($r=0.25$ มิลลิเมตร) ใช้แรงดัดขึ้นรูปสูงกว่าในช่วงเริ่มต้นจนถึงมุมการดัด 30 องศา



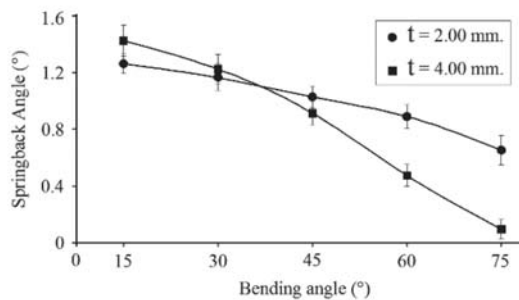
รูปที่ 6 แรงดัดขึ้นรูปของพินซ์ที่มีรัศมีหัวกดต่างกัน

ทั้งนี้หากเป็นการดัดขึ้นรูปโดยทั่วไป (แบบตัว V หรือแบบตัว U) การดัดด้วยพินซ์ที่มีรัศมีขนาดเล็กกว่าจะใช้แรงดัดขึ้นรูปต่ำกว่า เนื่องจากการดัดขึ้นรูปแบบอิสระตามมาตรฐาน ISO:7438/2010 กำหนดขนาดความกว้างปากตายหรือระยะห่างระหว่างผิวทรงกระบอกรองรับ (L) ไว้ดังสมการคือ $L = 2r + 3t$ ดังนั้นเมื่อขนาดรัศมีของพินซ์ (Punch) เล็กลง จึงส่งผลให้ขนาดความกว้างของปากตายลดลงไปด้วย ทำให้ต้องใช้แรงในการขึ้นรูปมากขึ้น เนื่องจากเป็นลักษณะการขึ้นรูปในพื้นที่แคบกว่า ทั้งนี้พบว่าเมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้นสูงกว่า 30 องศา ขนาดของแรงดัดขึ้นรูปจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการแตกร้าวของพื้นผิวชิ้นทดสอบ ส่วนการดัดขึ้นรูปโดยใช้พินซ์ที่มีรัศมีขนาดโตกว่า ($r=1$ มิลลิเมตร) จะใช้แรงในการดัดขึ้นรูปต่ำกว่า เนื่องจากมีระยะความกว้างของปากตายมากกว่า โดยแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยในช่วงเริ่มต้นการดัดจนถึงมุมการดัดที่ 45 องศา หลังจากนั้นแรงดัดจะมีแนวโน้มลดลง จะเห็นได้ว่าการดัดโดยใช้พินซ์ที่มีรัศมีขนาดเล็กจะส่งผลทำให้พื้นผิวของชิ้นทดสอบเกิดการแตกร้าวเร็วกว่าการดัดโดยใช้พินซ์ที่มีขนาดรัศมีใหญ่ เนื่องจากพินซ์ที่มีรัศมีขนาดเล็กจะมีพื้นที่สัมผัสกับชิ้นทดสอบน้อยกว่าทำให้พื้นผิวมีอัตราการยืดตัวและค่าความเค้นดึงเพิ่มขึ้นสูงกว่าการดัดด้วยพินซ์ที่มีรัศมีขนาดใหญ่ จึงส่งผลให้พื้นผิวของชิ้นทดสอบเกิดการแตกร้าวได้ง่ายกว่าและส่งผลให้ค่าแรงดัดขึ้นรูปลดลง



รูปที่ 7 มุมดัดตัวกลับของชิ้นทดสอบจากการดัดขึ้นรูปด้วยพินซ์ที่มีรัศมีต่างกัน

จากผลการทดลองรูปที่ 7 พบว่าการดัดขึ้นรูปด้วยพินซ์ที่มีรัศมีหัวกดขนาดเล็ก ชิ้นงานจะมีขนาดมุมดัดตัวกลับต่ำกว่าและมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อมุมการดัดเพิ่มมากขึ้น ส่วนการดัดขึ้นรูปโดยใช้พินซ์ที่มีรัศมีขนาดใหญ่พบว่ามุมดัดตัวกลับของชิ้นทดสอบเกิดขึ้นสูงกว่าและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมุมการดัดเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการดัดขึ้นรูปด้วยพินซ์ที่มีรัศมีหัวกดขนาดเล็ก จะมีระยะช่องว่างระหว่างจุดสัมผัสที่ปลายส่วนโค้งของพินซ์และคายน้อยกว่า จึงเป็นการขึ้นรูปภายใต้พื้นที่แคบซึ่งมีความเครียดสูงและมีขนาดของการเปลี่ยนรูปถาวรมากกว่า (Kim et al., 2007) [12] จึงส่งผลให้ขนาดของมุมดัดตัวกลับลดลงสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Inamdar et al. [6] ซึ่งได้ทำการศึกษาผลกระทบของขนาดรัศมีหัวกดของพินซ์และคายนที่ส่งผลต่อการดัดตัวกลับของโลหะแผ่นบาง



รูปที่ 8 มุมดัดตัวกลับของชิ้นทดสอบที่มีขนาดความหนาต่างกัน

3.2.2 อิทธิพลของความหนาขึ้นทดสอบ

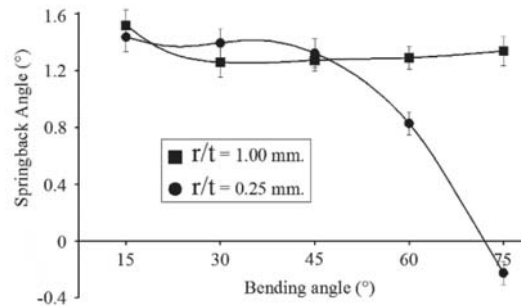
จากรูปที่ 8 เป็นผลการเปรียบเทียบมุมบิดตัวกลับของขึ้นทดสอบความหนา (t) = 2 และ 4 มิลลิเมตร จากการตัดขึ้นรูปด้วยพื้นที่รีรัศมีหัวกด (r) = 0.25 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่าขนาดมุมบิดตัวกลับมีแนวโน้มลดลงเมื่อมุมการตัดเพิ่มมากขึ้น โดยขึ้นทดสอบที่มีความหนามากจะมีมุมบิดตัวกลับสูงกว่าในช่วงเริ่มต้นการตัดตั้งแต่ 15 ถึง 30 องศา และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมุมการตัดเพิ่มมากขึ้น และที่มุมการตัด 45 องศา พบว่าขนาดมุมบิดตัวกลับลดลงต่ำกว่าขึ้นทดสอบที่มีความหนาน้อย ซึ่งขนาดมุมบิดตัวกลับยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงมุมการตัด 75 องศา เนื่องจากขึ้นทดสอบความหนาจะมีปริมาณการเปลี่ยนรูปถาวรบริเวณมุมตัดสูงกว่า จึงส่งผลทำให้การบิดตัวกลับเกิดขึ้นน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [1] ที่สรุปไว้ว่าการตัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบที่มีความหนามาก ลักษณะความเค้นจะมีแนวโน้มเป็นแบบแนวแกน (Biaxial Stress) มากขึ้น ค่าความหนาบริเวณมุมตัดลดลงและจะส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวของพื้นผิวส่วนขึ้นทดสอบที่มีความหนาน้อยจะเกิดการเปลี่ยนรูปจากความเค้นระนาบ (Normal Stress) และมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาเพียงเล็กน้อย [13]

3.2.3 อิทธิพลของอัตราส่วน r/t

เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างรัศมีหัวกดของพื้นที่และความหนาขึ้นทดสอบ (r/t) ที่ส่งผลต่อขนาดมุมบิดตัวกลับของขึ้นทดสอบ ด้วยการกำหนดให้รัศมีหัวกดของพื้นที่ (Punch) คงที่เพื่อเปรียบเทียบผลการบิดตัวกลับจาก 2 เงื่อนไข คือ

1. กำหนดรัศมีการตัด (r) = 1 มิลลิเมตร/ความหนาขึ้นทดสอบ (t) = 1 มิลลิเมตร
2. กำหนดรัศมีการตัด (r) = 1 มิลลิเมตร/ความหนาขึ้นทดสอบ (t) = 4 มิลลิเมตร ซึ่งรายละเอียดผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 9

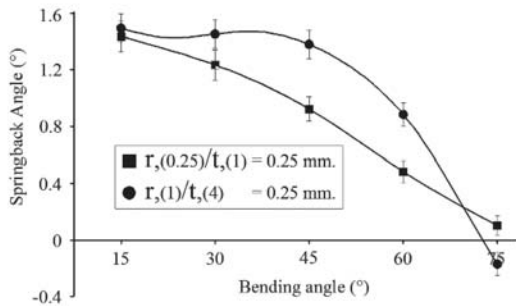
พบว่าเมื่ออัตราส่วน (r/t) เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ขนาดมุมบิดตัวกลับของขึ้นทดสอบเพิ่มมากขึ้น การตัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน r/t ต่ำ ($r/t = 0.25$) ขนาดมุมบิดตัวกลับเกิดขึ้นสูงในช่วงเริ่มต้นและมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากขนาดของการเปลี่ยนรูปถาวรและผลกระทบจากการแตกร้าวของพื้นผิว ส่วนการตัดด้วยอัตราส่วน r/t สูง ($r/t = 1$) พบว่าที่มุมการตัด 15 องศา มีขนาดมุมบิดตัวกลับสูงกว่าและมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อมุมการตัดเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีความยืดหยุ่นตักสูงกว่าขึ้นทดสอบที่มีความหนามากทำให้มีขนาดมุมบิดตัวกลับสูงกว่า



รูปที่ 9 มุมบิดตัวกลับของขึ้นทดสอบจากการตัดด้วยอัตราส่วน r/t ต่างกัน

ในการศึกษาผลการบิดตัวกลับของแผ่นวัสดุกรณีที่มีอัตราส่วน r/t เท่ากัน ส่วนขนาดรัศมีหัวกดของพื้นที่และความหนาขึ้นทดสอบแตกต่างกัน โดยให้มีอัตราส่วน $r/t = 0.25$ เท่ากันจาก 2 เงื่อนไขคือ

1. กำหนดรัศมีหัวกดของพื้นที่ (r) = 0.25 มิลลิเมตร/ความหนาขึ้นทดสอบ (t) = 1 มิลลิเมตร
2. กำหนดรัศมีหัวกดของพื้นที่ (r) = 1 มิลลิเมตร/ความหนาขึ้นทดสอบ (t) = 4 มิลลิเมตร ซึ่งรายละเอียดผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 10



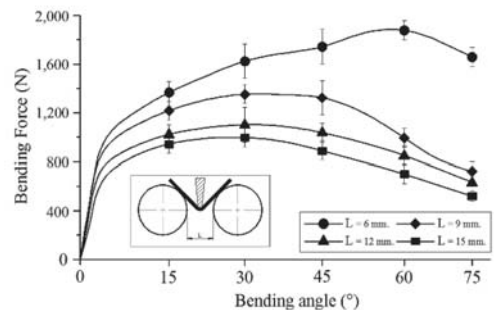
รูปที่ 10 มุมดัดตัวกลับของชิ้นทดสอบที่มีความหนา (t) ต่างกัน และดัดขึ้นรูปโดยพunchที่มีรัศมีหัวกด (r) ต่างกัน

จากผลการทดลองกรณีกำหนดให้อัตราส่วน r/t มีค่าเท่ากันแต่รัศมีหัวกดของพunchและความหนาชิ้นทดสอบมีขนาดแตกต่างกัน พบว่าภายใต้เงื่อนไขการดัดที่ 1 คือ กรณีการดัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร ด้วยพunchที่มีขนาดรัศมีหัวกด 0.25 มิลลิเมตร พบว่า การดัดตัวกลับเกิดขึ้นน้อยกว่าและมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้น ส่วนเงื่อนไขที่ 2 ทำการดัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบขนาดความหนา 4 มิลลิเมตรโดยใช้พunchที่มีรัศมีหัวกดขนาด 1 มิลลิเมตร พบว่า การดัดตัวกลับเกิดขึ้นสูงกว่าตั้งแต่เริ่มต้นการดัด และลดลงเล็กน้อยจนถึงมุมการดัด 45 องศา จากนั้นมุมดัดตัวกลับจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดการแตกร้าวบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบ ทั้งนี้ความแตกต่างของพฤติกรรมการดัดตัวกลับจาก 2 เงื่อนไขข้างต้น เนื่องจากในเงื่อนไขที่ 1 จะเป็นลักษณะการดัดขึ้นรูปโลหะแผ่นบางแม้จะมีรัศมีการดัดต่ำกว่าแต่การเปลี่ยนรูปของวัสดุยังอยู่ภายใต้รูปแบบของความเครียดระนาบ (Plane Strain) และมีขนาดของโมเมนต์ดัดน้อยกว่า จึงส่งผลให้มีขนาดมุมดัดตัวกลับน้อยกว่าและไม่พบรอยแตกร้าวบนพื้นผิวชิ้นทดสอบ ส่วนการดัดภายใต้เงื่อนไขที่ 2 ซึ่งขนาดรัศมีของพunchและความหนาของชิ้นทดสอบมีค่ามากกว่า ระหว่างการดัดขึ้นรูปจะเกิดความเค้นแบบหลายแนวแกน (Biaxial Stress) ซึ่งมีขนาดของการเปลี่ยนรูปสูงกว่า แต่ทั้งนี้กลับ

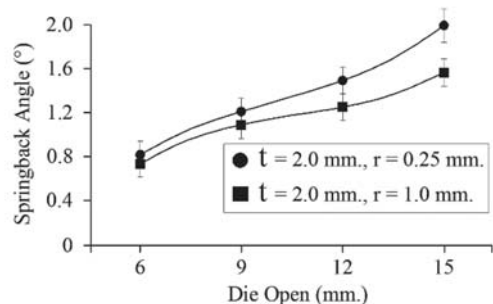
พบว่า การดัดตัวกลับเกิดขึ้นมากกว่า เนื่องจากรัศมีการดัดหรือรัศมีของพunch (Punch) จะส่งผลต่อพฤติกรรมการดัดตัวกลับมากกว่าขนาดความหนาของชิ้นทดสอบ [14]

3.2.4 อิทธิพลของช่องว่างปากตาย

การทดสอบการดัดโดยใช้แม่พิมพ์ตัดแบบอิสระจะให้แรงกดที่พunch โดยส่วนรองรับด้านล่างจะเป็นแท่งทรงกระบอกที่มีรัศมี (R) 10 มิลลิเมตร ซึ่งทำหน้าที่ลักษณะเดียวกับรัศมีมุมตายในแม่พิมพ์ตัดรูปตัวยูหรือรูปตัววี ดังนั้นระยะช่องว่างปากตายในงานวิจัยนี้จึงหมายถึงระยะห่างระหว่างผิวของแท่งทรงกระบอกรองรับ ซึ่งผลการเปรียบเทียบแรงดัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ตัดแบบอิสระที่มีขนาดช่องว่างปากตายต่างกัน



รูปที่ 11 แรงดัดขึ้นรูปชิ้นงานความหนา 1 มิลลิเมตร ที่มีขนาดช่องว่างปากตายแตกต่างกัน

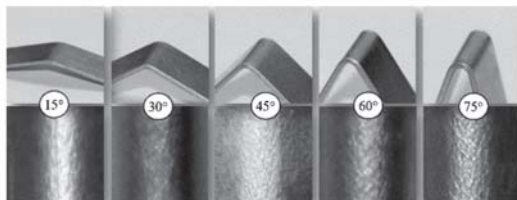


รูปที่ 12 มุมดัดตัวกลับที่ความกว้างปากตายแตกต่างกัน

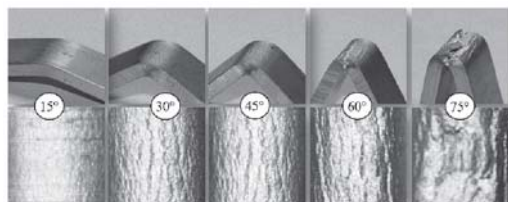
จากผลการทดลองรูปที่ 11 พบว่าเมื่อระยะช่องว่างปากตายเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าแรงดัดขึ้นรูปลดลง เนื่องจากระยะช่องว่างที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความเสียหายระหว่างพื้นผิวสัมผัสของชิ้นทดสอบและลูกกลิ้งรองรับลดลงและมีพื้นที่ในการเปลี่ยนรูปมากขึ้น จึงส่งผลให้แรงดัดขึ้นรูปลดลง และผลการทดลองรูปที่ 12 เห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อระยะช่องว่างปากตายเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดมุมดัดตัวกลับเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากระยะช่องว่างที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ชิ้นทดสอบมีพื้นที่ในการเปลี่ยนรูปมากขึ้นทำให้ใช้แรงในการดัดขึ้นรูปน้อยลง แต่จะส่งผลให้มีความยืดหยุ่นตงค้ำสูงและความเค้นจากการดัดเกิดการกระจายตัวมากกว่า [9] ดังนั้นเมื่อระยะช่องว่างปากตายมากขึ้น จึงส่งผลทำให้ขนาดมุมดัดตัวกลับเพิ่มสูงขึ้น

3.2.5 การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวการดัด

ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบบริเวณมุมดัด ซึ่งเป็นส่วนที่ได้รับความเค้นแรงดึงสูงสุดและเป็นส่วนเริ่มต้นของความเสียหาย ทำการตรวจสอบด้วยวิธีการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัล DSLR และการวัดค่าความเรียบผิวเฉลี่ยภายหลังการดัดขึ้นรูปที่มุมการดัดเพิ่มขึ้นทุก 15 องศา จากผลการทดลองสังเกตได้ชัดเจนว่าพื้นผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบบริเวณมุมดัด จะมีลักษณะพื้นผิวที่หยาบมากขึ้นเมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้น



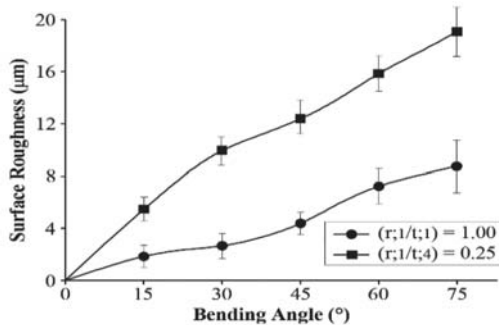
รูปที่ 13 ลักษณะพื้นผิวการดัดด้วยอัตราส่วน $r=1/t=1$



รูปที่ 14 ลักษณะพื้นผิวการดัดด้วยอัตราส่วน $r=1/t=4$

ในกรณีที่ชิ้นทดสอบมีค่าความหนาแน่นหรือมีค่าอัตราส่วน r/t สูง ลักษณะพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าดังรูปที่ 13 ซึ่งแสดงลักษณะพื้นผิวของชิ้นทดสอบความหนา 1 มิลลิเมตร ที่ผ่านการดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $r/t = 1$ พบว่าความขรุขระของพื้นผิวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้นและไม่พบรอยแตกร้าวบนพื้นผิว และรูปที่ 14 เป็นลักษณะพื้นผิวของชิ้นทดสอบที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร จากการดัดด้วยพื้นที่ที่มีรัศมีหัวกด 1 มิลลิเมตร หรือ อัตราส่วน $r/t = 0.25$ พบว่าพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้น โดยพื้นผิวจะมีความขรุขระสูงและเกิดเป็นแนวร่องตลอดความกว้างของชิ้นทดสอบ โดยร่องดังกล่าวจะขยายตัวกว้างจนปรากฏเป็นรอยแตกร้าวอย่างชัดเจนเมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้นสูงกว่า 60 องศา และขยายตัวอย่างต่อเนื่องจนปรากฏเป็นรอยฉีกขาดที่รุนแรง เนื่องจากเมื่อขนาดความหนาของชิ้นทดสอบเพิ่มมากขึ้นหรืออัตราส่วน r/t ลดลง จะส่งผลต่อโมเมนต์การดัด [15] ที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความเค้นดึงที่พื้นผิวด้านนอกของมุมการดัด ส่วนชิ้นทดสอบที่มีขนาดความหนามากซึ่งถูกขึ้นรูปด้วยพื้นที่ที่มีรัศมีขนาดเล็กหรือมีอัตราส่วน r/t ต่ำ เมื่อมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้พื้นผิวเกิดการยึดตัวในลักษณะของความเครียดแนวแกน (Biaxial Stress) ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าค่าความเครียดจากการดัดจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับระยะห่างจากพื้นผิวถึงกึ่งกลางความหนาของชิ้นทดสอบ เมื่อรัศมีการดัดและขนาดความหนาชิ้นทดสอบมีความแตกต่างเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้โมเมนต์ดัดเพิ่มสูงขึ้นพื้นผิวด้านนอกเกิดการยึดตัวอย่างรุนแรง ส่งผลให้ค่าความหนาบริเวณมุมดัดลดลง เมื่อค่าความเค้นดัดที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุจึงส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุบริเวณดังกล่าวเกิดการเลื่อนตัวในลักษณะของระนาบการเฉือน [16] พื้นผิวด้านนอกเกิดเป็นผิวคลื่นและปรากฏเป็นรอยแตกร้าวในที่สุด ส่วนชิ้นทดสอบที่มีค่าความหนาแน่น การเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นจะอยู่

ภายใต้ความเครียดแบบระนาบ (Plane Strain) ซึ่งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดความหนาและความยาวเส้นแกนกลาง พื้นผิวการตัดมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า เพื่อให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวที่ชัดเจนมากขึ้น จึงได้ทำการตรวจสอบค่าความเรียบพื้นผิวเฉลี่ย (Ra) ด้วยเครื่องวัดค่าความเรียบพื้นผิวภายหลังการตัดขึ้นรูปที่มุมการตัดเพิ่มขึ้นทุก 15 องศา



รูปที่ 15 กราฟเปรียบเทียบความเรียบพื้นผิวจากการตัดที่อัตราส่วน r/t ต่างกัน

จากผลการทดลองรูปที่ 15 จะเห็นได้ชัดเจนว่าการตัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน r/t ต่ำ (0.25) ค่าความหยาบผิวจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อขนาดมุมการตัดเพิ่มมากขึ้น ส่วนการตัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน r/t สูง (1.00) พบการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวน้อยกว่าและมีค่าความหยาบผิวต่ำกว่า เมื่อมุมการตัดเพิ่มสูงขึ้น พบว่าค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นน้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะภาพถ่ายของพื้นผิวการตัดที่แสดงไว้ข้างต้น

4. สรุป

จากผลการศึกษาอิทธิพลของข้อกำหนดในกระบวนการตัดขึ้นรูปที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการตีตัวกลับของโลหะแผ่นอลูมิเนียมผสม AA6016 ด้วยวิธีการทดสอบการตัดขึ้นรูปแบบอิสระ สรุปได้ว่า

1. การตัดขึ้นรูปโดยพื้นที่ที่มีรัศมีขนาดเล็ก ขึ้นทดสอบเกิดการตีตัวกลับน้อยกว่า เนื่องจากการขึ้นรูปภายใต้พื้นที่แคบและมีขนาดของการเปลี่ยน

รูปถาวรมากกว่า

2. ขนาดความหนาของแผ่นวัสดุที่มากขึ้นจะส่งผลให้ต้องแรงดัดขึ้นรูปสูงขึ้น ส่วนมุมตีตัวกลับจะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากมีขนาดการเปลี่ยนรูปถาวรมากกว่า

3. ระยะช่องว่างของปากตายที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่ามุมตีตัวกลับเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากความเค้นบริเวณการตัดกระจายตัวสูงและมีความยืดหยุ่นตกค้างมากกว่า

4. การตัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน r/t ที่ต่ำลง จะส่งผลให้ขนาดมุมการตีตัวกลับลดลง เนื่องจากการขึ้นรูปในพื้นที่แคบและมีปริมาณการเปลี่ยนรูปถาวรสูงขึ้น

5. เมื่อขนาดมุมการตัดขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้พื้นผิวบริเวณมุมตัดของชิ้นทดสอบมีความหยาบผิวเพิ่มขึ้นและจะส่งผลต่อการแตกร้าวนพื้นผิว

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี ที่อนุเคราะห์เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการวิจัย จนงานวิจัยฉบับนี้ดำเนินการสำเร็จจุล่งไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] E. Saric, M. Mehmedovic and M. Butkovic, "Analysis of springback in air bending process," *Journal for Technology of Plasticity*, vol. 41, pp. 35-43, 2016.
- [2] J. Sarkar, T.R. Kutty, D.S. Wilkinson, J.D. Embury and D.J. Lloyd, "Tensile properties and bendability of T4 treated AA6111 aluminum alloys," *Materials Science*

- and *Engineering A*, vol. 369, pp. 258–266, 2004.
- [3] S. Kumar, D. Sardana, M.P. Rajpara and S.S. Patel, “Study of springback analysis in air bending process after difference heat treatment of aluminium 6063 alloy,” *Advance Research in Science and Engineering*, vol. 14, pp. 1880-1887, 2015.
- [4] H. Hayashi and T. Nakagawa, “Recent trends in sheet metals and their formability in manufacturing automotive panels” *Materials Processing Technology*, vol. 46, pp. 455-487, 1994.
- [5] K.H. Seok and M. Koç, “Numerical investigations on springback characteristics of aluminum sheet metal alloys in warm forming conditions,” *materials processing technology*, vol. 204, pp. 370-383, 2008.
- [6] M.V. Inamdar, P.P. Date and S.V. Sabnis, “On the effects of geometric parameters on springback in sheets of five materials subjected to air vee bending,” *Materials Processing Technology*, vol. 123, pp. 459-463, 2002.
- [7] C. Bruni, A. Forcellese, F. Gabrielli and M.Simoncini, “Air bending of AZ31 magnesium alloy in warm and hot forming conditions,” *Materials Processing Technology*, vol. 177, pp. 373-376, 2006.
- [8] D. Fei and P. Hodgson, “Experimental and numerical studies of springback in air v-bending process for cold rolled TRIP steels,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 236, pp. 1847-1851, 2006.
- [9] M.L. Garcia-Romeu, J. Ciurana and I. Ferrer, “Springback determination of sheet metals in an air bending process based on an experimental work,” *Materials Processing Technology*, vol. 191, pp. 174-177, 2007.
- [10] R. Echempati and V.M. Dev, “Springback studies in aluminium alloys,” SAE Technical Paper, vol. 1, 2002.
- [11] ISO 7438:2010, “Metallic materials Bend test,” The Government Gazette, vol. 129, pp. 7–14.
- [12] S.Y. Kim, W.J. Choi and S.Y. Park, “Spring-back characteristics of fiber metal laminate (GLARE) in brake forming process,” *Advanced Manufacturing Technology*, vol. 32, pp. 445-451, 2007.
- [13] M.S. Buang, S.A. Abdullah and J. Saedon, “Effect of die and punch radius on springback of stainless steel sheet metal in the air v-die bending process,” *Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 8, pp. 1322-1331, 2015.
- [14] T. Kartik and R. Rajesh, “Effect of Punch Radius and Sheet Thickness on Spring-back in V-die Bending,” *Advances in Natural and Applied Sciences*, pp. 178-183, 2017.
- [15] K.V. Rahul and A. Haldar, “Effect of normal anisotropy on springback,” *Materials Processing Technology*, vol. 190, pp. 300-304, 2007.
- [16] L. Mattei, D. Daniel, G. Guiglionda, H. Klocker and J. Driver, “Strain localization and damage mechanisms during bending of AA6016 sheet,” *Materials Science & Engineering A*, vol. 559, pp. 812–821, 2013.