

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

ความสามารถในการดัดขึ้นรูปและกลไกความเสียหายของโลหะแผ่น อลูมิเนียม AA6016

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ*

คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ถนนเพชรเกษม ตำบลหนองแขก อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

รับบทความ 28 กันยายน 2563 แก้ไขบทความ 6 พฤษภาคม 2564 ตอรับบทความ 4 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

อลูมิเนียมผสมถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เพื่อทดแทนวัสดุประเภทเหล็กกล้าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีพื้นผิวที่สวยงาม น้ำหนักเบา ด้วยอลูมิเนียมผสมมีคุณสมบัติทางกลหรือความแข็งแรงค่อนข้างต่ำ แม้จะสามารถทำการขึ้นรูปได้ง่าย แต่มีข้อจำกัดด้านความสามารถในการขึ้นรูปที่ค่อนข้างต่ำ โดยเฉพาะในการขึ้นรูปชิ้นส่วนที่มีรัศมีขนาดเล็กซึ่งมักจะเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ง่าย ในงานวิจัยนี้จึงได้กำหนดอัตราส่วนของความหนาขึ้นทดสอบและรัศมีของพื้นที่ 5 ระดับ เพื่อศึกษาความสามารถในการดัดขึ้นรูปของอลูมิเนียมผสมชนิดรีดเย็นเกรด AA6016 ที่รัศมีการดัดขึ้นรูปต่ำ ทำการทดสอบด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบอสิระ (Air-bending) ตามมาตรฐาน ISO7438/2010 เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างความหนาของแผ่นวัสดุและรัศมีการดัดที่ส่งผลต่อความสามารถในการดัดขึ้นรูป โดยทำการดัดขึ้นรูปและเปรียบเทียบผลทุก 15 องศา ทำการวิเคราะห์และประเมินจากพฤติกรรมทางกล ลักษณะพื้นผิวการดัด การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคและวิวัฒนาการความเสียหายจากการดัดขึ้นรูป ผลการทดลองแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าขนาดมุมดัดตัวกลับและความสามารถในการดัดขึ้นรูป จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดมุมการดัดและอัตราส่วนระหว่างความหนาและรัศมีการดัด (t/r) เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของค่าความเค้นดึงที่เกิดขึ้นสูงบริเวณพื้นผิวด้านนอกของมุมดัดซึ่งส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและนำไปสู่การแตกร้าวเสียหายของชิ้นทดสอบ โดยรอยแตกร้าวจะเริ่มก่อตัวในตำแหน่งกึ่งกลางของส่วนโค้งผิวด้านนอกสุดของมุมดัดและขยายตัวไปตามระนาบการเฉือนตามแนวรอยต่อขอบเกรนในทิศทางสู่กึ่งกลางของชิ้นความหนาขึ้นงาน ซึ่งเป็นผลกระทบเนื่องจากพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุระหว่างการดัดขึ้นรูป

คำสำคัญ : ความสามารถในการดัด; อลูมิเนียมผสม; การดัดขึ้นรูปแบบอสิระ; กลไกความเสียหาย

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

Bendability and Damage Mechanisms of Aluminium Sheet AA6016

Natthasak Pornputsiri*

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

Received 30 September 2020; Revised 6 May 2021; Accepted 4 June 2021

Abstract

Aluminium alloys was used in the automotive parts industry increased, for compensate steel parts material, due to its lightweight and good surface. Since, aluminium alloys are there relatively low mechanical properties, although they can be deformed easily, but the major limitation is their low formability. Especially, the less bending radius, which is often bending surface damaged easily. In the present work, five-difference ratio of sheet thickness and bending radius for study to the bendability of cold rolled aluminum alloys AA6016 at low bending radius. The bending test by Air-bending method, according to ISO 7438: 2010. To compare the results every 15 degrees. The mechanical behaviour, surface roughness, microstructure and damage evolution in the fillet region were analysed by experimental research. The experiment clearly showed that the Spring-back angle and bendability tend to decrease as the bending angle and material thickness increase. Due to the high tensile stress on the bending surface, it effected to the surface roughness increases rapidly and led to the damage on the specimen bending surface. The initial cracks occur on the middle of the outer surface curvature and propagation in the shear plane pattern to the middle of the sheet thickness along the grain boundary. This is the consequence of plastic deformation by bending test.

Keywords : Bendability; Aluminium Alloy; Air Bending; Damage Mechanisms

**Corresponding Author. Tel; +668 6667 6802, Email Address: natthasak_idt@hotmail.com*

1. บทนำ

กรรมวิธีการดัดขึ้นรูป (Bending) มีความสำคัญและเป็นส่วนหนึ่งในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่น เช่น การผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องใช้สำนักงานและเครื่องใช้ในครัวเรือน เป็นต้น เนื่องจากการดัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการพื้นฐานในการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยเฉพาะกรรมวิธีการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ (Air-Bending) ซึ่งเป็นกรรมวิธีการดัดที่เกิดแรงเสียดทานด้านข้างต่ำ อีกทั้งการดัดขึ้นรูปแบบอิสระยังสามารถออกแบบการพับได้หลากหลายรูปแบบจากแม่พิมพ์เพียงชุดเดียวทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการจัดสร้างแม่พิมพ์ สามารถใช้ขึ้นรูปวัตถุดิบที่มีรูปร่างหลากหลาย เช่น โลหะแผ่น ท่อ เหล็กกลม และเหล็กรูปพรรณเป็นต้น ทั้งนี้ปัญหาสำคัญที่มักพบในชิ้นงานที่ผ่านการดัดขึ้นรูป คือ พฤติกรรมการดีดตัวกลับ (Spring-Back) การเกิดรอยย่น (Wrinkle) และการแตกร้าว (Crack) ที่พื้นผิวเป็นต้น โดยเฉพาะวัสดุประเภทอลูมิเนียมผสมที่มักจะมีปัญหาดังกล่าวอยู่บ่อยครั้ง [1] ด้วยปัจจุบันวัสดุประเภทอลูมิเนียมผสมถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ เพื่อทดแทนวัสดุประเภทเหล็กกล้าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากน้ำหนักเบา มีลักษณะพื้นผิวที่สวยงาม ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย ด้วยโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมมีผลึกแบบ Face Center Cubic (FCC) มีสมบัติทางด้านการไหลตัว (Fluidity) ที่ดีและมีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวต่ำ (660 องศาเซลเซียส) [2] จากคุณสมบัติที่โดดเด่นดังกล่าวทำให้อลูมิเนียมถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอย่างหลากหลาย ผลิตภัณฑ์อลูมิเนียมโดยส่วนใหญ่จะได้จากการผลิตโดยกรรมวิธีการขึ้นรูปเย็น เนื่องจากสามารถขึ้นรูปได้ง่าย ทั้งนี้ความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) มีความสำคัญอย่างมากสำหรับขั้นตอนของการผลิตหรือขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วน เช่นเดียวกับการใช้งานซึ่งต้องการคุณสมบัติด้านความเหนียวสูงเพื่อการดูดซับพลังงาน ซึ่งโดยส่วนใหญ่การ

ทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุจะนิยมใช้วิธีการทดสอบแรงดึงแบบแนวแกนเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลและความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุประเภทโลหะ อย่างไรก็ตามการทดสอบลักษณะนี้ยังไม่สามารถใช้อธิบายถึงความสามารถในการขึ้นรูปได้อย่างชัดเจน การทดสอบการดัดแบบอิสระจึงเป็นอีกวิธีการที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้อธิบายถึงความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่นได้ดี [3]–[5] เนื่องจากปัญหาสำคัญในการดัดขึ้นรูปคือ ชิ้นงานมักมีรอยแตกร้าวตามแนวการพับและพฤติกรรมการดีดตัวกลับภายหลังการดัดขึ้นรูป จากการกำหนดรัศมีการดัดที่ไม่สอดคล้องกับค่าความหนาและขนาดมุมในการดัดขึ้นรูปชิ้นงาน

ความสามารถในการดัดขึ้นรูป (Bendability) คือคุณสมบัติของวัสดุที่สามารถดัดโค้งด้วยรัศมีการดัดน้อยที่สุด (Minimum Bend Radius) โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายหรือรอยแตกร้าวบนพื้นผิวชิ้นงาน การกำหนดรัศมีการดัดขึ้นรูปจะถูกกำหนดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาของวัสดุ [6] ดังนั้นความสามารถในการดัดโค้งจึงใช้บอกเป็นจำนวนเท่าของความหนาของชิ้นงาน เช่น 3t คือ สามารถทำการดัดโค้งได้ด้วยรัศมีต่ำสุดเป็น 3 เท่าของความหนาชิ้นงานโดยไม่เกิดรอยแตก โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากการดัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการสุดท้ายของการผลิตชิ้นงานซึ่งต้องการความสวยงามของพื้นผิว ความแข็งแรง และมุมชิ้นงานที่ต้องการ การออกแบบแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปจึงจำเป็นต้องทราบถึงขีดจำกัดในการเปลี่ยนรูปของวัสดุ การกำหนดรัศมีมุมดัดที่สัมพันธ์กับค่าความหนาของแผ่นวัสดุที่เหมาะสม รวมไปถึงผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่อาจส่งผลต่อความเสียหายหรือคุณภาพของชิ้นงานสำเร็จ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการดัดขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียมผสม โดยมุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของตัวแปรด้านกระบวนการออกแบบแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูป ด้วยวิธีการทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ (Air-Bending) ตามมาตรฐาน ISO

7438:2010 [7] โดยเลือกศึกษาทดลองกับแผ่นวัสดุชนิดอลูมิเนียมผสมเกรด AA6016 ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมนำไปใช้ในการผลิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์และผลิตภัณฑ์อย่างแพร่หลาย [8] เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนความหนาชิ้นงานและรัศมีพื้นที่ส่งผลต่อลักษณะและคุณภาพชิ้นงานที่ได้ รวมทั้งรูปแบบความเสียหายหรือข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น โดยทำการทดสอบการดัดในลักษณะการเปลี่ยนรูปที่รุนแรง จากการเลือกใช้รัศมีการดัดต่ำและตรวจสอบผลการดัดทุกๆ 15 องศา เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมการดัดตัวกลับ (Spring-Back) ค่าความเรียบผิว (Surface Roughness) แรงดัดขึ้นรูป (Bending Force) ลักษณะความเสียหายที่พื้นผิว และ รูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างจุลภาคของวัสดุชิ้นงาน เพื่อใช้ผลการวิจัยนี้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ข้อกำหนดของอัตราส่วนระหว่างค่าความหนาชิ้นงานและรัศมีการดัดขึ้นรูปที่เหมาะสม ในการดัดขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรัศมีการดัดต่ำ เพื่อการผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพและหลีกเลี่ยงความเสียหายหรือข้อบกพร่องที่จะเกิดกับชิ้นงานในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นต่อไป

2. ทฤษฎีการดัดขึ้นรูป

2.1 การดัดตัวกลับ (Spring-Back)

การดัดขึ้นรูปเป็นกรรมวิธีที่ทำให้ชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยชิ้นงานจะมีความโค้งและมุมเกิดขึ้นหลังการดัด ซึ่งขนาดของมุมขึ้นงานภายหลังการดัดขึ้นรูปหากมีค่ามากกว่ามุมการดัดจะเรียกว่าการดัดตัวกลับหรือสปริงแบค (Spring-Back) และหากค่ามุมขึ้นงานน้อยกว่ามุมการดัดจะเรียกว่าสปริงโก (Spring-Go) ซึ่งตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อของขนาดมุมขึ้นงานหลังการดัดขึ้นรูปจะประกอบไปด้วยปัจจัยหลายประการเช่น คุณสมบัติทางกลของวัสดุ ขนาดความหนาชิ้นงาน และรัศมีการดัดขึ้นรูป เป็นต้น [9] ทั้งนี้ขนาดมุมดัดตัวกลับ

โดยประมาณสามารถหาค่าได้ด้วยวิธีการคำนวณและการวัดเชิงเปรียบเทียบ โดยขนาดมุมการดัดสามารถกำหนดได้จากระยะการกดของพินซ์ โดยการคำนวณจากสมการตามมาตรฐานของทฤษฎีการทดสอบการดัดขึ้นรูป [10] ดังนั้นในเบื้องต้นจึงต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อการดัดตัวกลับของวัสดุในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์

ในกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ ค่าความเค้นดัดจะมีลักษณะการกระจายแบบเชิงเส้น ซึ่งจะมีค่าสูงสุดที่ปลายของพินซ์และค่าความเค้นเป็นศูนย์ที่จุดสัมผัสของด้าย ส่งผลทำให้พื้นที่การดัดมีรูปแบบของความยืดหยุ่นสมบูรณ์ (Fully Elastic) และการเปลี่ยนรูปถาวรบางส่วน (Elastic-Plastic Deformation) ทั้งนี้เพื่อลดความซับซ้อนเกี่ยวกับการเปลี่ยนรูปทรงของชิ้นงาน การประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติจึงมักกำหนดให้มีรัศมีการดัดมีค่าคงที่ ซึ่งยังคงให้ผลที่มีความเที่ยงตรงและเชื่อถือได้ โดย Hosford and Caddell [11] ได้นำเสนอสมการเพื่อใช้ประมาณค่ามุมดัดตัวกลับสำหรับวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงดังสมการที่ (1)

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{r} = \frac{2\sqrt{3}Y(1-\nu^2)}{ET} \quad (1)$$

โดยที่ R คือรัศมีภายในของชิ้นงานขณะกดดัด r คือ รัศมีชิ้นงานภายหลังการกดดัดหรือเมื่อมีการดัดตัวกลับ Y คือค่าความเค้นคลาก E คือ ค่ายังส์โมดูลัส ν คือ ค่าอัตราส่วนปัวส์ซอง และ T คือค่าความหนาของแผ่นวัสดุ

สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติด้านความเครียดเชิงสูง การคำนวณขนาดมุมดัดตัวกลับจะแสดงดังสมการที่ (2) และ (3)

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{r} = \left(\frac{6}{2-n}\right) \left[\frac{K(1-\nu^2)}{ET}\right] \left(\frac{T}{2R}\right)^n \quad (2)$$

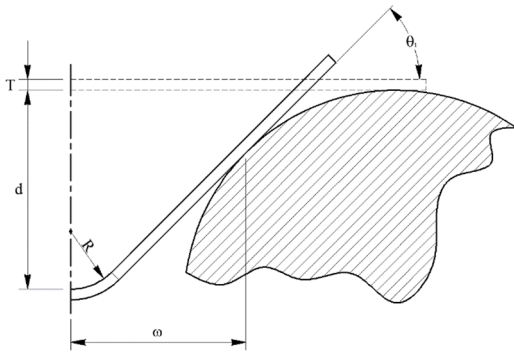
$$K' = K \left(\frac{4}{3}\right)^{(n+1)/2} \quad (3)$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุ และ n คือ ค่ายกกำลังของความเครียดแข็ง

ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาโดย Gardiner [12] เพื่อให้สามารถคำนวณมุมดัดตัวกลับให้มากยิ่งขึ้น แสดงดังสมการที่ (4)

$$\frac{R}{r} = 4 \left(\frac{RY}{ET} \right)^3 - 3 \left(\frac{RY}{ET} \right) + 1 \quad (4)$$

สมมติให้ส่วนโค้งของรัศมีการดัดมีการสัมผัสกับส่วนรองรับที่เป็นเส้นตรง, รัศมีส่วนโค้งจากการดัดเริ่มต้น (R) ประมาณได้จากขนาดของรัศมีพื้นผิว ความหนาแผ่นวัสดุ และจากการวัดขนาดของมุมการดัดดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การประมาณการรัศมีการดัดโค้ง

$$R = \frac{\omega \tan \theta_1 + \frac{T}{2} - d}{\sec \theta_1 - 1} \quad (5)$$

เมื่อ ω คือขนาดความกว้างโดยประมาณของครึ่งมุมดัด θ_1 คือ ขนาดมุมดัด และ d คือ ระยะการกดของพื้นที่ที่มีการชดเชยค่าความหนาแผ่นวัสดุ

หลักการพื้นฐานของสมการที่ (1)–(5) เป็นการประเมินผลของการดัดตัวกลับที่ได้รับผลกระทบจากค่าความหนาและคุณสมบัติของวัสดุ (E , Y , และ n) มุมการดัดตัวกลับจะแสดงในรูปของ $(1/R) - (1/r)$ และนำมาพล็อตเปรียบเทียบกับค่าร้อยละของตัวแปร แม้ว่าจะมี

ความสัมพันธ์ไม่เป็นแบบเชิงเส้น แต่ผลการศึกษาพบว่าผลกระทบของตัวแปรข้างต้นมีค่าเข้าใกล้เชิงเส้น ซึ่งมีช่วงของความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ ± 20

2.2 ความสามารถในการดัดขึ้นรูป (Bendability)

ความสามารถในการดัดขึ้นรูปหมายถึง การที่วัสดุสามารถถูกดัดขึ้นรูปด้วยรัศมีการดัดน้อยที่สุดหรือขนาดมุมการดัดสูงสุดได้ โดยไม่ก่อให้เกิดรอยแตกร้าวหรือความเสียหายเกิดขึ้นภายหลังการดัด ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายระหว่างการดัดขึ้นรูป โดยส่วนใหญ่จะพิจารณาจากพัฒนาการของความหยาบผิวและค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงาน ซึ่งมีนักวิจัยหลายท่านได้สรุปไว้ว่า การเริ่มต้นของรอยแตกและพัฒนาการของระนาบการฉีกเกิดจากขนาดความหนาที่ไม่สม่ำเสมอและการเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวของชิ้นทดสอบที่เกิดจากการดัดขึ้นรูป [13]–[15] และใช้วิธีการจำลองการเปลี่ยนรูปถาวรบริเวณมุมการดัดเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการขึ้นรูปและความสามารถในการตัดของโลหะแผ่น [16]–[18] สรุปได้ว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการดัดขึ้นรูป คือความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวและค่าความเครียดบริเวณมุมการดัด เนื่องจากการอธิบายถึงตำแหน่งการเกิดความเครียดสูงสุดด้วยวิธีการทดลองจะทำได้ยาก ดังนั้นการทดลองส่วนใหญ่จะเลือกใช้วิธีการเปรียบเทียบความแตกต่างจากลักษณะของเฟสในโครงสร้างจุลภาคที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นทฤษฎีการวิเคราะห์ความเสียหายที่มุ่งเน้นศึกษาถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปเฉพาะจุดที่มีแนวโน้มของการเกิดรอยแตกในรูปแบบของระนาบการฉีก ซึ่งการแตกหักในกระบวนการขึ้นรูปโลหะสามารถจำแนกได้ 2 ลักษณะ คือ การแตกหักแบบเปราะ (Brittle Fracture) และการแตกหักแบบเหนียว (Ductile Fracture) [19]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่จะอ้างอิงเกณฑ์การแตกหักแบบเหนียวสำหรับการประเมินความสามารถในดัดขึ้นรูปและรูปแบบของความเครียดระนาบ (Plane Strain) จะถูกใช้เพื่อทำนายพฤติกรรมของการเกิดรอยแตกเนื่องจากความเค้นดิ่งที่เกิดจากการดัดขึ้นรูปของโลหะแผ่นบาง โดยคณะผู้วิจัยได้นำเสนอรูปแบบของเกณฑ์การแตกหักแบบเหนียว เช่น Clift และคณะ [20] และ Bao และ Wierzbicki [21] เป็นต้น ซึ่งเกณฑ์ที่นิยมใช้อ้างอิงจะอยู่ในรูปของ

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} g([\sigma]) d\bar{\epsilon} = C_0 \quad (6)$$

เมื่อ g คือ ฟังก์ชันขององค์ประกอบหรือค่าคงที่ของเมทริกซ์ความเครียด ($[\sigma]$), $\bar{\epsilon}$ คือ ค่าประสิทธิภาพความเครียดโดยเฉลี่ย และ $\bar{\epsilon}_f$ คือ ค่าประสิทธิภาพความเครียดวิกฤต ณ จุดแตกหัก ในขณะที่ C_0 เป็นเกณฑ์ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ดังนั้นค่าประสิทธิภาพความเครียดโดยเฉลี่ยจึงถูกกำหนดเป็นเกณฑ์การแตกหักสำหรับการประเมินค่าความสามารถในการดัดขึ้นรูป

3. วัสดุการทดลอง

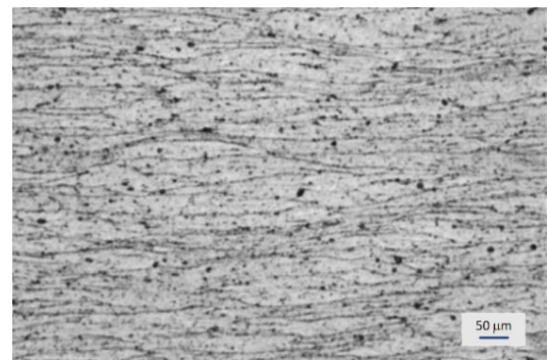
ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาความสามารถในการดัดขึ้นรูปของวัสดุอลูมิเนียมผสมแบบแผ่น เกรด AA6016 ที่ได้จากกระบวนการรีดเย็นที่มีขนาดความหนาต่างกัน 5 ขนาดคือ 1, 2, 3, 4, และ 5 มิลลิเมตร โดยทำการตัดเตรียมชิ้นทดสอบตามมาตรฐานซึ่งมีขนาดความกว้าง $\times$ ยาว = 12 $\times$ 30 มิลลิเมตร และลักษณะโครงสร้างจุลภาคในภาคตัดขวางของแผ่นวัสดุก่อนการทดสอบการดัด จากการตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ทางโลหะวิทยาดังรูปที่ 2 พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันตลอดความหนาของแผ่นวัสดุ ซึ่งอลูมิเนียมเกรด AA6016 เป็นอลูมิเนียมชนิดที่มีส่วนผสมของอนุภาคโลหะ และ Mg_2Si ขนาดเล็ก

กระจายตัวสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ในโครงสร้างจุลภาคโดยมีปริมาณโดยเฉลี่ยร้อยละ 1.16 ซึ่งแสดงไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [22]

คุณสมบัติทางกลของแผ่นอลูมิเนียม AA6016 ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง ตามมาตรฐาน ASTM E8M-92a ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ขนาด 2 ตัน รุ่น Zwick Z20 แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าความเค้นคราก (Yield Stress, YS) ค่าความเค้นดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Stress, UTS) ค่าการยืดตัวสม่ำเสมอ (Uniform Elongation, UE) ค่าการยืดตัวโดยรวม (Total Elongation, TE) และ เลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (strain hardening exponent, n)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุอลูมิเนียมผสมเกรด AA6016

Material	YS (MPa)	UTS (MPa)	UE (MPa)	TE (%)	n (at 5%)
AA6016	124	241	22.5	26	0.26



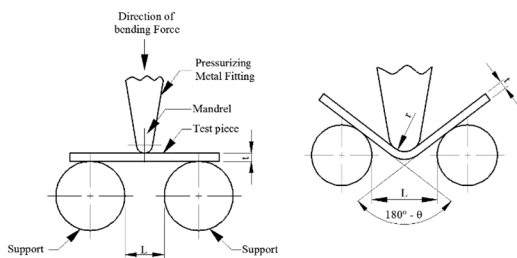
รูปที่ 2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคก่อนการดัดของวัสดุ AA6016

4. ข้อกำหนดการทดลอง

4.1 มาตรฐานการทดสอบ

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดสอบการดัดแบบอิสระตามมาตรฐาน ISO7438 : 2010 [7] ซึ่งใช้สำหรับ

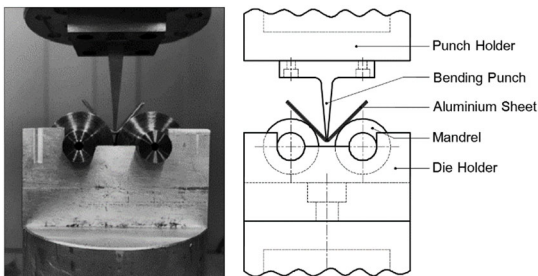
ทดสอบผลิตภัณฑ์ประเภทโลหะแผ่น โดยลักษณะของการทดสอบการดัดแบบอิสระแสดงดังรูปที่ 3 ส่วนขั้นตอนในการทดสอบจะดำเนินการโดยนำชิ้นทดสอบวางบนฐานรองรับรูปทรงกระบอกที่มีรัศมี 10 มิลลิเมตร และให้แรงกดที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ โดยใช้พื้นที่ที่มีรัศมีหัวกดเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร กำหนดระยะห่างระหว่างผิวทรงกระบอกที่ใช้ในการทดสอบ (L) $L = 2r + 3t$ โดยที่ r คือรัศมีการดัดโค้งหรือรัศมีส่วนปลายของพื้นที่ และ t คือ ขนาดความหนาของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 3 รูปแบบการทดสอบการดัดตามมาตรฐาน ISO 7438 : 2010 [7]

4.2 แม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปแบบอิสระ

ออกแบบชุดแม่พิมพ์สำหรับทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบอิสระตามมาตรฐาน ISO7438: 2010 ตามข้อกำหนดของวัตถุประสงค์การวิจัย ขอบเขตการวิจัย และมาตรฐานการทดสอบดังรูปที่ 4 โดยติดตั้งชุดแม่พิมพ์เพื่อทดสอบการดัดขึ้นรูปบนเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ รุ่น Zwick / 2020



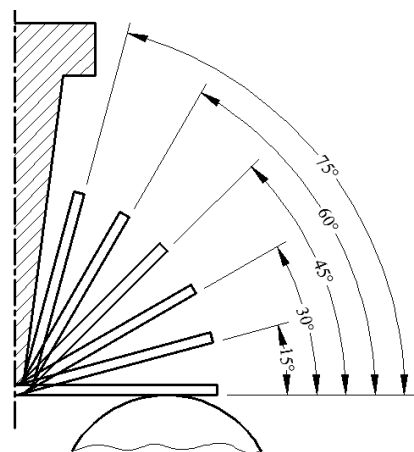
รูปที่ 4 เครื่องมือทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ

4.3 เงื่อนไขการทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษาความสามารถในการดัดขึ้นรูปและกลไกความเสียหายของโลหะแผ่นอลูมิเนียมผสม AA6016 ด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่างความหนาชิ้นงานและรัศมีพื้นที่ (t/r) 5 ระดับ คือ 4(1/0.25), 8(2/0.25), 12(3/0.25), 16(4/0.25) และ 20(5/0.25) ตามลำดับ ซึ่งการคำนวณค่าอัตราส่วนระหว่างความหนาชิ้นงานและรัศมีพื้นที่ (t/r) แสดงดังตารางที่ 2 ทำการทดสอบการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความเร็วในการกดดัด 120 มิลลิเมตร/นาที และไม่ใช่สารหล่อลื่น บันทึกผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการดัดขึ้นรูปและวิวัฒนาการความเสียหาย ที่มุมการดัดทุก 15 องศา คือ 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา ตามลำดับ ดังรูปที่ 5

ตารางที่ 2 การคำนวณค่าอัตราส่วนระหว่างความหนาชิ้นงานและรัศมีพื้นที่ (t/r)

ชั้นที่	ความหนา (t) (มิลลิเมตร)	รัศมีพื้นที่ (r) (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน t/r
1	1	0.25	4
2	2	0.25	8
3	3	0.25	12
4	4	0.25	16
5	5	0.25	20



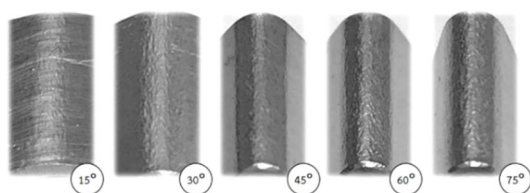
รูปที่ 5 ขนาดช่วงของมุมในการทดสอบการดัด

5. ผลการทดลอง

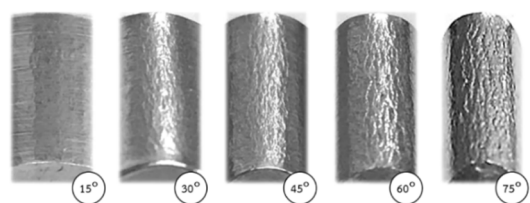
บันทึกผลการทดลองเพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของอัตราส่วน t/r ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดัดขึ้นรูปของอลูมิเนียมผสมที่ขนาดมุมการดัดเพิ่มขึ้นทุก 15 องศา ซึ่งรายละเอียดผลการทดลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และประเมินผลประกอบด้วย ลักษณะพื้นผิวการดัด แรงดัดขึ้นรูป มุมดัดตัวกลับ ค่าความเรียบผิว และการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

5.1 ลักษณะของพื้นผิวการดัด

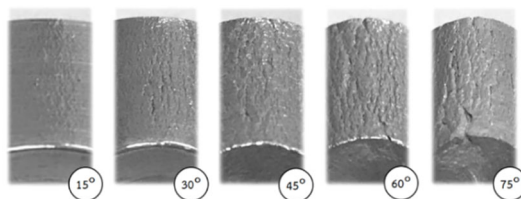
พื้นผิวด้านนอกของมุมขึ้นงานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการดัดขึ้นรูปเนื่องจากเป็นส่วนที่ได้รับความเค้นแรงดึงสูงสุดและเป็นส่วนเริ่มต้นของความเสียหายที่เกิดขึ้นในงานดัดขึ้นรูป หลังการดัดขึ้นรูปได้ทำการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (Optical Microscope) ลักษณะพื้นผิวการดัดของขึ้นททดสอบที่ผ่านการดัดขึ้นรูปด้วยมุมการดัดเพิ่มขึ้นทุก 15 องศา ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6-10



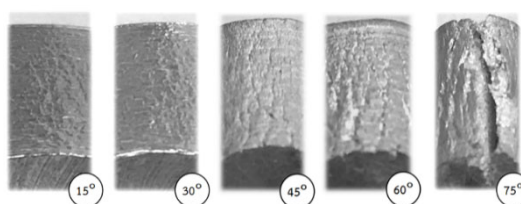
รูปที่ 6 วิวัฒนาการของพื้นผิวขึ้นททดสอบที่ได้รับความเค้นแรงดึงจากการดัดขึ้นรูป กรณี $t/r = 4$



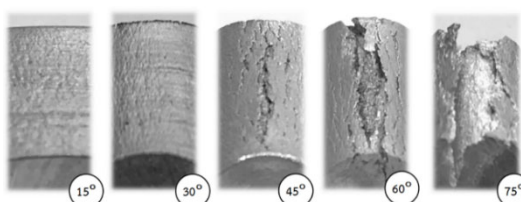
รูปที่ 7 วิวัฒนาการของพื้นผิวขึ้นททดสอบที่ได้รับความเค้นแรงดึงจากการดัดขึ้นรูป กรณี $t/r = 8$



รูปที่ 8 วิวัฒนาการของพื้นผิวขึ้นททดสอบที่ได้รับความเค้นแรงดึงจากการดัดขึ้นรูป กรณี $t/r = 12$



รูปที่ 9 วิวัฒนาการของพื้นผิวขึ้นททดสอบที่ได้รับความเค้นแรงดึงจากการดัดขึ้นรูป กรณี $t/r = 16$



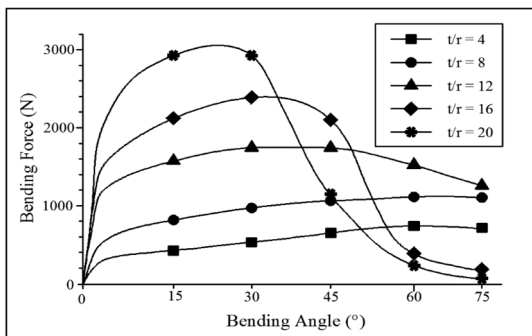
รูปที่ 10 วิวัฒนาการของพื้นผิวขึ้นททดสอบที่ได้รับความเค้นแรงดึงจากการดัดขึ้นรูป กรณี $t/r = 20$

จากผลการดัดด้วยอัตราส่วน $t/r = 4$ (ดังรูปที่ 6) พบว่าพื้นผิวขึ้นททดสอบจะมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยเมื่อมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้น การดัดด้วยอัตราส่วน $t/r = 8$ (ดังรูปที่ 7) พบว่าลักษณะพื้นผิวจะมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นเมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้น โดยที่มุมการดัด 45 องศา จะปรากฏริ้วรอยขนาดเล็กบนพื้นผิว และที่มุมดัด 75 องศา ขนาดของรอยแตกบนพื้นผิวจะมีความลึกที่ชัดเจนมากขึ้น ขึ้นททดสอบที่ผ่านการดัดด้วยอัตราส่วน $t/r = 12$ (ดังรูปที่ 8) พบว่าที่มุมการดัด 45 องศา จะปรากฏร่องลึกที่ชัดเจนบนพื้นผิวขึ้นและที่มุม

การดัด 75 องศา รอยแตกขยายตัวกว้างและเกิดตลอดแนวความกว้างของชิ้นทดสอบ ลักษณะพื้นผิวชิ้นทดสอบที่ผ่านการดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 16$ (ดังรูปที่ 9) พบว่าที่มุมการดัด 45 และ 75 องศา พบว่ารอยแตกกว้างเกิดการขยายตัวมากขึ้นจนเป็นรอยฉีกขาดขนาดใหญ่เกิดขึ้นตลอดแนวความกว้างของชิ้นทดสอบ และลักษณะของพื้นผิวชิ้นทดสอบที่ผ่านการดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 20$ ดังรูปที่ 10 พบว่าที่มุมการดัด 45 องศา จะปรากฏรอยแตกกว้างตลอดแนวความกว้างของพื้นผิวชิ้นทดสอบ เมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้นเป็น 60 องศา รอยแตกกว้างจะขยายตัวเกิดเป็นรอยแตกขนาดใหญ่ และเมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้นเป็น 75 องศา รอยแตกจะขยายตัวมากขึ้นทั้งในแนวความกว้างและความหนาของชิ้นทดสอบ ปรากฏเป็นรอยฉีกขาดที่รุนแรงให้เห็นอย่างชัดเจน

5.2 แรงดัดขึ้นรูปชิ้นงาน

จากการทดลองดัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยไม่ใช้สารหล่อลื่น ที่อัตราส่วนความหนาชิ้นงานและรัศมีการดัด 5 ระดับ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดขึ้นรูปและขนาดมุมการดัด

จากกราฟผลการทดลองรูปที่ 11 พบว่าขนาดแรงดัดขึ้นรูปจะแปรผันตามอัตราส่วน t/r และขนาดมุมการดัดที่เพิ่มขึ้น โดยการดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r =$

20 ใช้แรงในการดัดขึ้นรูปสูงสุด ค่าแรงดัดจะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่มุมดัด 30 องศา หลังจากนั้นแรงดัดจะมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งสัมพันธ์กับการการเกิดรอยแตกกว้างบนพื้นผิวการดัดที่ปรากฏตลอดแนวความกว้างของชิ้นทดสอบ ส่วนการดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 12$ ใช้แรงดัดจะสูงสุดที่มุมดัด 45 องศา จากนั้นแรงดัดจะมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนการดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 12$ ใช้แรงดัดจะสูงสุดที่มุมดัด 45 องศา จากนั้นแรงดัดจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ส่วนเงื่อนไขการดัดด้วยอัตราส่วน $t/r = 4$ และ 8 ค่าแรงดัดจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยจนถึงขนาดมุมการดัดที่ 75 องศา เนื่องจากไม่ปรากฏรอยแตกกว้างบนพื้นผิว

5.3 พฤติกรรมการดัดตัวกลับ

การตรวจสอบขนาดมุมดัดตัวกลับของชิ้นทดสอบจะใช้วิธีการถ่ายภาพด้วยกล้อง DSLR และวัดค่ามุมชิ้นงานด้วยโปรแกรม Auto CAD โดยการสร้างเส้นอ้างอิงตามแนวขอบชิ้นทดสอบและวัดขนาดมุมด้วยคำสั่งบอกขนาด เพื่อเปรียบเทียบหาค่ามุมดัดตัวกลับของชิ้นทดสอบดังรูปที่ 12 ซึ่งวิธีการคำนวณขนาดมุมดัดตัวกลับแสดงดังสมการที่ (7)

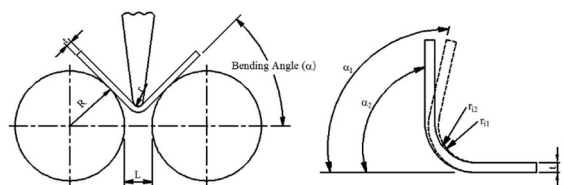
$$\Delta\theta = \alpha_2 - \alpha_1 \quad (7)$$

เมื่อ

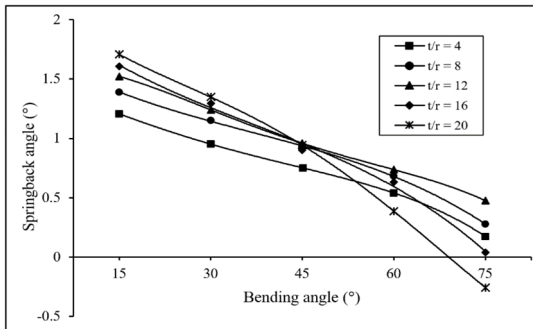
$\Delta\theta$ คือ มุมดัดตัวกลับ

α_2 คือ ขนาดมุมชิ้นงาน

α_1 คือ ขนาดมุมการดัด



รูปที่ 12 รูปแบบการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ



รูปที่ 13 อัตราส่วนของ t/r ที่ส่งผลต่อขนาดมุมดัดตัวกลับหลังการดัดขึ้นรูป

จากกราฟผลการทดลองรูปที่ 13 พบว่าขนาดมุมดัดตัวกลับจะเกิดขึ้นสูงเมื่อทำการดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน t/r ที่สูงขึ้น โดยขนาดมุมดัดตัวกลับจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมา [23] ดังรายละเอียดผลการทดลองซึ่งพบว่า การดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน t/r ต่ำสุด ($t/r = 4$) มีขนาดมุมดัดตัวกลับต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วน t/r ขนาดอื่นๆ โดยที่มุมดัด 15 องศา มีมุมดัดตัวกลับ 1.208 องศา และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงมุมดัดที่ 75 องศา ซึ่งมีมุมดัดตัวกลับ 0.175 องศา การดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 8$ พบว่าที่มุมดัด 15 องศา มีค่ามุมดัดตัวกลับ 1.390 องศา และที่มุมการดัด 75 องศา มีมุมดัดตัวกลับ 0.279 องศา การดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 12$ พบว่าที่มุมดัด 15 องศา มีมุมดัดตัวกลับ 1.522 องศา และค่ามุมดัดตัวกลับลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงการดัด 75 องศา มีมุมดัดตัวกลับ 0.476 องศา ผลการดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 16$ พบว่าที่มุมการดัด 15 องศา มีมุมดัดตัวกลับ 1.609 องศา และที่มุมการดัด 75 องศา มีมุมดัดตัวกลับ 0.040 องศา และการดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 20$ ซึ่งมีค่าสูงสุด พบว่าค่ามุมดัดตัวกลับเกิดขึ้นสูงที่สุดในช่วงมุมการดัด 15-45 องศา และมุมดัดตัวกลับมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมุมการ

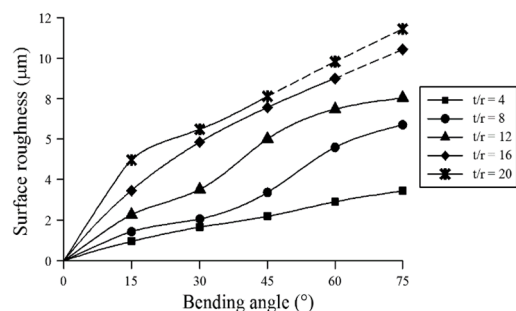
ดัดเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่าที่มุมการดัด 15 องศา มีค่ามุมดัดตัวกลับ 1.7088 องศา หลังจากนั้นเมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้นค่ามุมดัดตัวกลับจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อมุมการดัดเพิ่มสูงกว่า 30 องศา พบว่าขนาดมุมดัดตัวกลับจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากผลของการแตกร้าบนพื้นผิว โดยพบว่าที่มุมการดัด 75 องศา มีค่ามุมดัดตัวกลับที่ -0.226 องศา

5.4 การเปลี่ยนแปลงค่าความเรียบผิว

ในการเปรียบเทียบอิทธิพลของอัตราส่วน t/r และขนาดมุมการดัด ที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงค่าความเรียบผิวเฉลี่ย (R_a) ของชิ้นทดสอบ โดยทำการวัดค่าความเรียบผิวบริเวณพื้นผิวด้านนอกของมุมการดัด ซึ่งเป็นส่วนที่ได้รับผลกระทบจากความเค้นดึงสูงสุดและเป็นส่วนเริ่มต้นของการแตกร้าและความเสียหายของชิ้นงาน โดยจะทำการวัดค่าความเรียบผิวในทิศทางตามแนวความกว้างของชิ้นทดสอบดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ทิศทางการวัดค่าความเรียบพื้นผิว



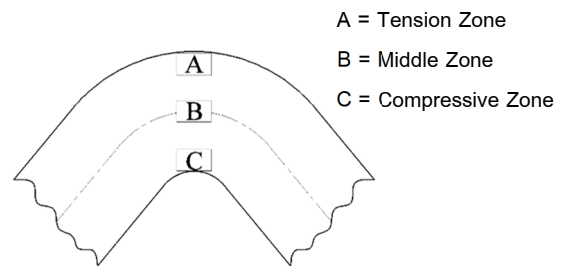
รูปที่ 15 อิทธิพลของอัตราส่วน t/r และขนาดมุมการดัดที่ส่งผลต่อความเรียบพื้นผิว (R_a)

ผลการวัดค่าความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra) บริเวณพื้นผิวการตัดของชิ้นทดสอบที่ผ่านการตัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน t/r และขนาดมุมการตัดที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 15 พบว่าค่าความเรียบผิวเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น (ผิวหยาบขึ้น) อย่างต่อเนื่องเมื่อขนาดของมุมการตัดเพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่ออัตราส่วน t/r เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเรียบผิวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนดังรายละเอียดผลการทดลอง ซึ่งพบว่าการตัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 4$ มีค่าความเรียบผิวโดยเฉลี่ยต่ำสุด (เรียบที่สุด) เมื่อเริ่มต้นการตัดที่มุมการตัด 15 องศา มีค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 0.97 ไมโครเมตร และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงมุมการตัดที่ 75 องศา มีค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 3.455 ไมโครเมตร ในการตัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 8$ ที่มุมตัด 15 องศา มีค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 1.43 ไมโครเมตร และที่มุมการตัด 75 องศา มีค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 6.72 ไมโครเมตร ในส่วนของการตัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 12$ พบว่าค่าความเรียบผิวเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากขึ้น โดยพบว่าที่มุมการตัด 15 องศา มีค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 2.29 ไมโครเมตร และค่าความเรียบผิวเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงมุมการตัดที่ 45 องศา จากนั้นพบว่าค่าความเรียบผิวเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการขยายตัวของรอยแตกที่ชัดเจนขึ้นและที่มุมการตัด 75 องศา มีค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 8.085 ไมโครเมตร ในส่วนของการตัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 16$ พบว่าค่าความเรียบผิวเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่เริ่มต้นการตัดจนถึงมุมการตัด 60 องศา ซึ่งมีความเรียบผิวเฉลี่ย 8.975 ไมโครเมตร ส่วนที่มุมตัด 75 องศา ไม่สามารถวัดค่าความเรียบผิวได้เนื่องจากพื้นผิวการตัดมีการฉีกขาดที่รุนแรงเกิดเป็นร่องลึกขนาดใหญ่ และจากการตัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 20$ ซึ่งมีค่าสูงสุด พบว่ามีค่าความเรียบผิวเฉลี่ยสูงสุด (หยาบที่สุด) ตั้งแต่เริ่มต้นการตัดที่ 15 องศา ซึ่งมีค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 5.04 ไมโครเมตร และค่าความเรียบผิวจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงมุมการตัด 45 องศา ซึ่งมีค่า

ความเรียบผิวเฉลี่ย 8.075 ไมโครเมตร หลังจากนั้นเมื่อมุมการตัดเพิ่มขึ้นที่ 60 และ 75 องศา ซึ่งไม่สามารถวัดค่าความเรียบผิวที่มุมการตัดนี้ได้เนื่องจากการขยายตัวของรอยแตกจนเกิดการฉีกขาดของพื้นผิวที่รุนแรง

5.5 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ภายหลังการตัดขึ้นรูป

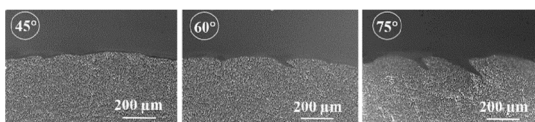
ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคและลักษณะการแตกร้าวของชิ้นทดสอบ ในตำแหน่ง A ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นดึงสูงสุดและเป็นส่วนเริ่มต้นของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน ดังรูปที่ 16



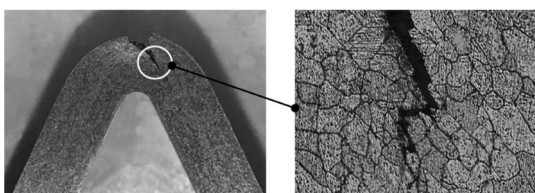
รูปที่ 16 ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบหลังการตัดขึ้นรูปแบบอิสระ

ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคในแนวภาคตัดขวางของชิ้นทดสอบที่มุมการตัดตั้งแต่ 15–75 องศา พบว่าลักษณะของเกรนที่ชั้นผิวด้านนอก (A) ซึ่งเป็นส่วนที่ได้รับความเค้นดึงจากการตัดขึ้นรูป เกรนมีลักษณะยึดตัวหนาแน่นกับแนวขอบผิวยานนอกชิ้นทดสอบ ส่วนบริเวณกึ่งกลางความหนาชิ้นงาน (B) ลักษณะเกรนมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและบริเวณพื้นผิวด้านใน (C) ซึ่งส่วนนี้เป็นส่วนที่ได้รับความเค้นอัด เกรนมีลักษณะเป็นแถบบางยึดตัวไปในแนวเดียวกับการกดของพันธ์ จากผลการทดลองของงานวิจัยนี้และงานวิจัยเกี่ยวข้องที่ผ่านมา ซึ่งพบว่าจุดเริ่มต้นของความเสียหายหรือการก่อตัวของรอยแตกร้าวจะเริ่มเกิดขึ้นบนพื้นผิวยานนอกของชิ้นทดสอบ

(บริเวณจุด A) ดังนั้นเพื่อการเปรียบเทียบผลกระทบของอัตราส่วนความหนาขึ้นทดสอบต่อรัศมีการดัด (t/r) ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดัดขึ้นรูปและวิวัฒนาการความเสียหายที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกเปรียบเทียบจากโครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางบริเวณพื้นผิวด้านนอก (A) ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดความเค้นดึงสูงสุดและเป็นบริเวณเริ่มต้นของการเกิดรอยแตกร้าวภายหลังการดัด



รูปที่ 17 วิวัฒนาการของรอยแตกร้าวในโครงสร้างจุลภาค กรณีทำการดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 12$



รูปที่ 18 ลักษณะของรอยแตกในแนวภาคตัดขวาง หลังการดัดด้วยมุมดัด 60 องศา กรณี $t/r = 20$

จากผลการทดลองการดัดขึ้นรูปโดยการกำหนดอัตราส่วน t/r ต่ำ ($t/r=4$) พบว่าเมื่อมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้นเกรนจะมีลักษณะยืดตัวยาวขนานกับขอบผิวด้านนอกของขึ้นทดสอบและขอบผิวจะมีลักษณะผิวคลื่น เมื่ออัตราส่วน t/r เพิ่มมากขึ้นพบว่าขนาดของผิวคลื่นและความลึกของร่องผิวจะมีความลึกมากขึ้น และเมื่อมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้นพบว่าขอบผิวด้านนอกจะปรากฏรอยแตกขนาดเล็กในตำแหน่งกึ่งกลางของส่วนโค้ง เมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้นที่ 75 องศา พบว่ารอยแตกร้าวเกิดการขยายตัวกว้างขึ้นดังรูปที่ 17 และจากการดัดขึ้นรูปใช้อัตราส่วน t/r สูง ($t/r=20$) พบว่าจำนวนเส้นของการแตกร้าวจะเพิ่มมากขึ้น (ดังรูปที่ 9) ซึ่งรอยแตกร้าวจะเริ่มต้นเกิดขึ้นที่มุมการดัด 30 องศา และเมื่อมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้นรอยแตกร้าวดังกล่าวจะขยายตัวไปตามแนวขอบเกรน ในทิศ

ทางเข้าสู่กึ่งกลางขึ้นทดสอบอย่างต่อเนื่องจนถึงที่มุมการดัด 75 องศา พบว่ารอยแตกร้าวมีการขยายตัวผ่านส่วนกึ่งกลางความหนาเข้าสู่พื้นผิวด้านในของขึ้นทดสอบและรอยแตกที่ขอบผิวด้านนอกเกิดการขยายตัวกว้างมากขึ้น ดังรูปที่ 18

6. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

6.1 แรงดัดขึ้นรูปและการดัดตัวกลับ

จากผลการทดลองซึ่งพบว่าแรงดัดขึ้นรูปมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนของความหนาขึ้นงานและรัศมีการดัดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้รัศมีการดัดคงที่และเลือกการเปลี่ยนแปลงขนาดความหนาของแผ่นวัสดุเพื่อให้ได้อัตราส่วน t/r ตามข้อกำหนดการทดลอง เมื่ออัตราส่วน t/r เพิ่มสูงขึ้นจึงต้องใช้แรงในการดัดขึ้นรูปเพิ่มมากขึ้น เพื่อเอาชนะค่าความเค้นครากของวัสดุ ดังนั้นการขึ้นรูปขึ้นงานเพื่อให้ได้ขนาดมุมเพิ่มขึ้นจึงต้องเพิ่มแรงเพื่อให้วัสดุขึ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรมากขึ้นและชดเชยพฤติกรรมความเครียดแข็งซึ่งทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นรวมทั้งผลกระทบจากแรงกดด้านข้างและความเสียหายจากลูกกลิ้งรองรับทั้งสองด้าน เมื่อขึ้นงานถูกกดให้ไหลตัวลึกมากขึ้นจึงส่งผลให้เกิดพื้นที่สัมผัสระหว่างพื้นผิวขึ้นงานและผิวลูกกลิ้งรองรับเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงทำให้มีค่าความเสียหายเพิ่มขึ้น

ผลการศึกษาพฤติกรรมการดัดตัวกลับของวัสดุพบว่าขนาดของมุมดัดตัวกลับมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วน t/r เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่าน [24]–[26] ได้รายงานผลการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการดัดตัวกลับของวัสดุ กล่าวโดยสรุปคือขนาดการดัดตัวกลับของแผ่นวัสดุจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดของการเปลี่ยนรูปถาวรเพิ่มขึ้น ซึ่งการดัดขึ้นรูปโดยใช้รัศมีพันซ์ขนาดเล็กหรืออัตราส่วนระหว่างความหนาของแผ่นขึ้นงานและขนาดของรัศมีพันซ์ (t/r) มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะเป็นลักษณะของการขึ้น

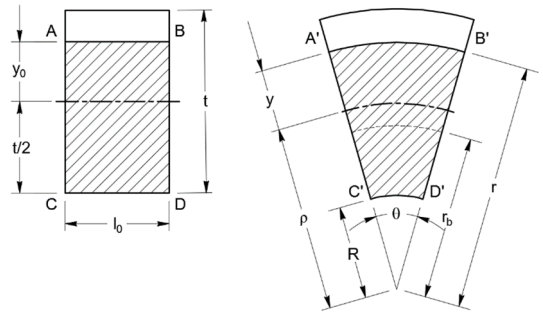
รูปชิ้นงานในพื้นที่แคบ ทำให้ค่าความเค้นบริเวณดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ร่วมกับเมื่อมีแรงกดเพิ่มขึ้นเพื่อการเพิ่มขนาดมุมชิ้นงาน ทำให้ขนาดของการเปลี่ยนรูปถาวรบริเวณดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลทำให้ขนาดของมุมติดตัวกลับน้อยลง

6.2 การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวและวิวัฒนาการ

ความเสียหาย

จากผลการทดลองซึ่งพบว่ากรณีใช้อัตราส่วน t/r มีค่าต่ำชิ้นงานจะมีคุณภาพพื้นผิวที่ดีกว่า และกรณีทำการตัดด้วยอัตราส่วน t/r สูง เมื่อมุมการตัดเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้พื้นผิวมีค่าความหยาบเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนปรากฏเป็นรอยแตก และเกิดการขยายตัวของรอยแตกเข้าสู่กึ่งกลางความหนาชิ้นงานมากขึ้น เนื่องจากกรณีอัตราส่วน t/r สูงหรือเมื่อมุมการตัดชิ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลต่อโมเมนต์การตัด ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความเค้นดึงบริเวณพื้นผิวภายนอกของมุมตัด ดังนั้นบริเวณพื้นผิวการตัดที่ถูกขึ้นรูปด้วยพันธขนาดเล็กหรือมีอัตราส่วน t/r สูง รวมทั้งเมื่อมุมการตัดเพิ่มสูงขึ้นทำให้พื้นผิวด้านนอกเกิดการยึดตัวในลักษณะของความเครียดแนวแกน (Biaxial Stress) [27] ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าค่าความเครียดจากการตัดเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของระยะห่างจากพื้นผิวการตัดถึงกึ่งกลางของความหนาแผ่นชิ้นงาน ส่วนขึ้นทดสอบที่มีค่าความหนาน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับรัศมีการตัดหรือมีอัตราส่วน t/r ต่ำ การเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นจากการตัดจะอยู่ภายใต้ความเครียดแบบระนาบ (Plane Strain) และอยู่ภายใต้เงื่อนไขของความหนาและความยาวของเส้นแกนกลาง (Neutral Axis) คงที่ ซึ่งรูปแบบการเปลี่ยนรูปภายใต้ความเค้นแบบระนาบดังรูปที่ 19

โดยระยะจากจุดศูนย์กลางการตัดถึงเส้นแกนกลางจะถูกแทนด้วย p เมื่อขนาดของมุมการตัดเพิ่มสูงขึ้นและแผ่นชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวที่พื้นผิวภายนอก ($A' - B'$) หรือ l_a ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7)



รูปที่ 19 ตัวแปรของกลไกการเปลี่ยนรูปจากการตัดชิ้น

รูป [11]

$$l_a = \rho \theta \quad (7)$$

และ ปริมาณการเปลี่ยนรูปจากการตัด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$\frac{\theta}{2} (R_0^2 - R^2) \cdot 1 \quad (8)$$

ดังนั้นจากทฤษฎีของความเครียดระนาบ ซึ่งกำหนดให้ขนาดความหนาชิ้นงานมีค่าคงที่ ทำให้ขนาดความยาว y (ระยะจากพื้นผิวด้านนอกถึงเส้นแกนกลาง) จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายหลังการตัดชิ้นรูป ส่วนการตัดชิ้นรูปด้วยรัศมีพันธขนาดเล็กหรือแผ่นชิ้นงานมีค่าความหนาสูง (ค่า t/r สูง) เมื่อมุมการตัดเพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลให้พื้นผิวภายนอกเกิดการยึดตัวอย่างต่อเนื่องและมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนา เมื่อค่าความเค้นที่เกิดขึ้นสูงกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุ ส่งผลให้เกรนภายในโครงสร้างของวัสดุบริเวณดังกล่าวมีการเลื่อนตัวในลักษณะของระนาบการเฉือน [28] ทำให้พื้นผิวภายนอกมีลักษณะเป็นผิวคลื่น พื้นผิวมีความหยาบมากขึ้น จากนั้นจะปรากฏเป็นรอยแตกขนาดเล็กและขยายตัวไปตามแนวขอบเกรนซึ่งเป็นส่วนที่มีความแข็งแรงน้อยกว่า จนเกิดเป็นรอยฉีกขาดขนาดใหญ่เมื่อมุมการตัดเพิ่มสูงขึ้น

ดังนั้นในการประยุกต์ใช้สำหรับงานอุตสาหกรรม หากต้องการตัดชิ้นรูปโลหะแผ่นอลูมิเนียมเกรด

AA6016 ด้วยรัศมีการดัดต่ำ (0.25 มิลลิเมตร) ที่มุมการดัดสูงสุด 75 องศา จึงไม่ควรให้แผ่นวัสดุมีความหนาเกิน 1 มิลลิเมตร หรืออัตราส่วน $t/r \leq 4$ หรือหากต้องใช้แผ่นวัสดุที่มีค่าความหนามากกว่า 1 มิลลิเมตร จะต้องเพิ่มขนาดของรัศมีพันซ์ เพื่อควบคุมไม่ให้ค่าความหนามากกว่าค่ารัศมีพันซ์เกิน 4 เท่า หรือใช้วิธีการลดขนาดมุมการดัดลง ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายของชิ้นงานหลังการดัดขึ้นรูป

7. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความสามารถในการดัดขึ้นรูปวัสดุ ด้วยวิธีการทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบอิสระจากผลการทดลองสรุปได้ว่า

1. เมื่ออัตราส่วนของความหนาชิ้นงานและรัศมีการดัด (t/r) เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ความสามารถในการดัดขึ้นรูปของวัสดุลดลง

2. อัตราส่วน t/r ที่เพิ่มสูงขึ้นหรือเมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้พื้นผิวการดัดของชิ้นทดสอบมีความหยวบมากขึ้นและชิ้นทดสอบมีแนวโน้มเกิดรอยแตกร้าวและฉีกขาดได้ง่ายขึ้น

3. มุมดัดตัวกลับจะแปรผกผันกับอัตราส่วน (t/r) กล่าวคือเมื่ออัตราส่วน (t/r) สูงขึ้นจะส่งผลให้ขนาดมุมการดัดตัวกลับลดลง

4. รอยแตกร้าวจะเริ่มก่อตัวที่บริเวณกึ่งกลางของพื้นผิวภายนอกมุมดัดเมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราส่วน t/r เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้จำนวนของรอยแตกร้าวบนพื้นผิวมีปริมาณมากขึ้น

5. รอยแตกร้าวจะขยายตัวอย่างต่อเนื่องในรูปแบบระนาบการเฉือนไปตามแนวขอบเกรนในทิศทางเข้าสู่กึ่งกลางความหนาของชิ้นทดสอบเมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้การสนับสนุน

งบประมาณในการดำเนินการวิจัย งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Sarkar, T.R.G. 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.
- [2] J. R. Davis, "Aluminum and aluminum alloys," *ASM specialty handbook*. Metals Park, Ohio USA. 1994.
- [3] N. Nargundkar, "Bend allowance and springback in air bending," *Stamping Journal*, 2005.
- [4] J. Wang, S. Verma, R. Alexander and J.T. Gau, "Springback control of sheet metal air bending process," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 10, pp. 21-27, 2008.
- [5] 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.
- [6] M. Gedeon, "Formability and bend testing," *Technical Tidbits*, no. 9, 2009.
- [7] ISO 7438:2010, "Metallic materials Bend test," *The Government Gazette*, vol. 129, pp. 7–14, 2010.
- [8] A. Davidkov, R. H. Petrov and P. D. Smet, "Microstructure controlled bending response in AA6016 Al alloys," *Materials Science and Engineering A*, vol. 528, pp. 7068–76, 2011.

- [9] L. J. Vin, "Curvature prediction in air bending of metal sheet," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 100, pp. 257-261, 2000.
- [10] Bending Test, Steel Institute of Thailand, <https://www.mtec.or.th/mcu/phml/index.php/th/2014-09-12-03-39-42/18-bending-test>.
- [11] W. F. Hosford, and R. M. Caddell, *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*, (3rd ed.), pp. 195-205, 2007.
- [12] F.J. Gardiner, "The Spring Back of Metals," *Trans. ASME*, vol. 79, 1975.
- [13] W. Y. Chien, J. Pan and S. C. Tang, "A combined necking and shear localization analysis for aluminum sheets under biaxial stretching conditions," *International Journal of Plasticity*, vol. 20, pp. 1953-1981, 2010.
- [14] J. Steninger and A. Melander, "The roles of sulphides, oxides and pearlite in the ductile fracture of a niobium micro alloyed steel," *Materials Science and Engineering*, vol. 52, pp. 239-248, 1982.
- [15] J. Sarkar, T. R. G. Kutty, K. T. Conlon, D. S. Wilkinson, J. D. Embury and D. J. Lloyd, "Tensile and bending properties of AA5754 aluminum alloys," *Materials Science and Engineering A*, vol. 316, pp. 52-59, 2001.
- [16] A. Davidkov, M. K. Jain and R. H. Petrov, "Strain localization and damage development during bending of Al-Mg alloy sheets," *Materials Science and Engineering A*, vol. 550, pp. 395-407, 2012.
- [17] 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.
- [18] K. Markus and M. Marion, "Bendability of advanced high strength steels-A new evaluation procedure," *Manufacturing Technology*, vol. 62, pp. 247-250, 2013.
- [19] B. Silva, K. Isik, A. E. Tekkaya, A. G. Atkins and P. A. F. Martins, "Fracture toughness and failure limits in sheet metal forming," *Materials Processing Technology*, vol. 234, pp. 249-258, 2016.
- [20] S. E. Clift, P. Hartley, C. E. Sturgess and G. W. Rawe, "Fracture prediction in plastic deformation processes," *Int. Mechanical Science*, vol. 32, no. 1, pp. 1-17, 1990.
- [21] Y. B. Bao and T. Wierzbicki, "On cut-off value of negative triaxiality for fracture," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 72, pp. 1049-1069, 2005.
- [22] P. Castany, F. Despois, C. Bezençon and A. Mortensena, "Influence of quench rate and microstructure on bendability of AA6016 aluminum alloys," *Materials Science and Engineering A*, vol. 559, pp. 558-565, 2013.
- [23] N. Pornputsiri, "Effect of process parameters on springback behaviour during air bending of aluminum alloy sheet AA6016," *RMUTP Research Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 155-166, 2017.
- [24] 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.
- [25] K. K. Dilip, K. K. Appukuttan, V. L. Neelakantha and P. S. Naik, “Experimental determination of spring back and thinning effect of aluminum sheet metal during L-bending operation,” *Materials & Design*, vol. 56, pp. 613-619, 2014.
- [26] D. Vasudevan, R. Srinivasan and P. Padmanabhan, “Effect of process parameters on springback behavior during air bending of electrogalvanised steel sheet,” *Journal of Zhejiang University Science A*, vol. 12, pp. 183-189, 2011.
- [27] F. Yoshida, T. Okada and M. Itoh, “Bendability of Aluminium and Steel Clad Chromium Plates,” *Metals and material*, vol. 4, no. 3, pp. 426-431, 1998.
- [28] 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.