วารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ
ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2565

การประเมินผลกระทบของแอนไอโซทรอปิกที่ส่งผลต่อความสามารถในการดัดขึ้นรูปและการดีดตัวกลับของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ

Anisotropic Evaluating Effect to Bendability and Springback of Advanced High Strength Steel Sheet

ณัฐศักดิ์ พรพุฒิศิริ[1*] พงศกร หลีตระกูล[1] คมกริช ละวรรณวงษ์[1]
[1]สาขาวิศวกรรมวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110
Natthasak Pornputsiri[1*], Pongsakorn Leetrakul[1], Komgrit Lawanwong[1]
[1]Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Industry and Technology,
Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wang Klai Kang Won Campus, Huahin,
Prachubkhirikhan, 77110
[*]Corresponding author Email: natthasak.por@rmutr.ac.th
(Received: November 21, 2022; Revised: December 13, 2022; Accepted: December 14, 2022)

บทคัดย่อ

ความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะแผ่นที่มีรัศมีขนาดเล็กและความแม่นยำในการทำนายขนาดมุมดีดตัวกลับหลังการขึ้นรูป เป็นเงื่อนไขสำคัญในการออกแบบเครื่องมือ การควบคุมกระบวนการดัดขึ้นรูป การประเมินความแม่นยำของขนาดและรูปร่างของชิ้นงานสำเร็จชนิดโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ ทั้งนี้เงื่อนไขเกี่ยวกับทิศทางการรีดหรือค่าแอนไอโซทรอปิกและเลขชี้กำลังค่าความเครียดแข็งของวัสดุยังส่งผลต่อความสามารถในการดัดขึ้นรูปของโลหะแผ่นซึ่งเป็นเรื่องที่น่าสนใจ จุดเน้นของบทความวิจัยนี้คือ การกำหนดแนวทางพื้นฐานในการผสมผสานข้อมูลเพื่อประกอบการประเมินผลพฤติกรรมการดีดตัวกลับและความสามารถในการดัดขึ้นรูปของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ โดยวิธีการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิกและเลขชี้กำลังความเครียดแข็งของวัสดุ เพื่อพัฒนาแนวทางในการทำนายเชิงเปรียบเทียบจากผลของแรงดัดขึ้นรูป ขนาดมุมดีดตัวกลับ และความสามารถในการดัดขึ้นรูปจากการเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวและความเสียหายบนพื้นผิวการดัดของโลหะแผ่น ทำการทดสอบด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบอิสระตามมาตรฐาน ISO 7438 : 2010 ที่มุมการดัดทุก 15° ตั้งแต่ 15° – 75° กับวัสดุโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษเกรด SPFC 980 ซึ่งถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของรถยนต์อย่างแพร่หลาย ผลการทดลองพบว่าค่าแรงดัดขึ้นรูปจะแปรผันตามค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุ ส่วนขนาดมุมดีดตัวกลับจะขึ้นอยู่กับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ ในการดัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบแบบขวางแนวการรีดซึ่งมีค่าแข็งแรงดึงสูงสุดมากกว่าจะมีขนาดของมุมดีดตัวกลับสูงกว่า ส่วนการดัดขึ้นรูปแบบตามแนวการรีดซึ่งมีค่าแข็งแรงดึงสูงสุดต่ำกว่าและมีความสามารถในการยืดตัวสูง จะมีขนาดมุมดีดตัวกลับน้อยกว่า ทั้งนี้ขนาดมุมดีดตัวกลับจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้น ส่วนลักษณะพื้นผิวการดัดของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะและทิศทางของแรงกระทำ โดยค่าความหยาบพื้นผิวจะเพิ่มสูงขึ้นและขนาดของรอยแตกร้าวจะมีขนาดใหญ่และกว้างขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้น

คำสำคัญ: การขึ้นรูปโลหะแผ่น ความสามารถในการดัด การดีดตัวกลับ พื้นผิวการดัด เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ

Abstract

The formability of sheet metal part with smaller radius and prediction of the springback angle size after forming. It is an important condition in tool design, controlling the bending process and assessing the size and shape accuracy of high-strength steel sheet finished part. The conditions regarding the rolling direction or anisotropic value (R) and strain hardening exponent (n) of sheet metal also affected the bendability of sheet metal which interested. The purpose of this research is determining a fundamental approach to data integration for evaluating the springback behavior and bendability of high-strength steel sheet by experimental method to study the effects of anisotropic properties and strain hardening exponents of materials for developed a guideline for comparative prediction with the effect of bending forces, springback angle size and the bendability due to changes in surface roughness and damage on the bending surface of sheet metal. The Air-bending tests method were performed in accordance with ISO 7438 : 2010 at every 15° bending angle from 15° to 75° with high strength sheet metal material SPFC 980 grade which is widely used as a car component. The experiment results showed that the bending force varies with the ultimate tensile strength of the material. The size of springback angle depends on the ultimate tensile strength and total elongation. The bending test specimens on the transverse rolling direction with higher ultimate tensile strength, that has a higher springback angle. The bending test on the rolling direction, which has a lower ultimate tensile strength and higher elongation, has a smaller springback angle. However, the springback angle tends to decrease as the bending angle increases. The characteristics of bending surface will depend on the nature and direction of the bending force. The bending surface roughness is increased and the crack size becomes significantly larger and wider as the bending angle is increased.

Keywords: Sheet metal forming, Bendability, Springback, Bending surface, High strength steel

1. บทนำ

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษมีแนวโน้มถูกนำมาใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมยานยนต์เพิ่มมากขึ้นจากความโดดเด่นด้านความแข็งแรงและความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี จึงเหมาะสำหรับการนำไปสร้างเป็นชิ้นส่วนหลักของรถยนต์และชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงสูง [1] ทั้งนี้พบว่าเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษชนิดเฟสคู่ เป็นชนิดที่ถูกนำมาใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมยานยนต์มากที่สุด เนื่องจากมีความโดดเด่นในแง่ของคุณสมบัติทางกลคือ มีค่าความแข็งแรงสูงแต่มีความเค้นคราก่อนข้างต่ำ สามารถเปลี่ยนรูปได้ต่อเนื่องและมีคุณสมบัติด้านความเครียดแข็งสูง [2] จึงมีคุณสมบัติที่ผสมผสานกันระหว่างความสามารถในการขึ้นรูปและมีค่าความแข็งแรงสูง [3] คุณสมบัติด้านความแข็งแรงที่โดดเด่นของเหล็กกล้าชนิดนี้ เกิดจากองค์ประกอบของโครงสร้างจุลภาคซึ่งประกอบด้วย 2 เฟสหลักคือ เฟสชนิดมาเทนไซต์ (martensitic phase) ที่เกิดกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (ferrite matrix) ทำให้เหล็กกล้าชนิดนี้มีคุณสมบัติที่โดดเด่นด้านความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีและมีความแข็งแรงสูง [4] จึงเหมาะสำหรับการใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนประกอบหลักของรถยนต์เพื่อให้มีน้ำหนักเบา ซึ่งจะส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมจากการลดอัตราการสิ้นเปลืองของน้ำมันเชื้อเพลิงและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า ส่วนข้อเสียของเหล็กกล้าชนิดนี้ คือใน

ระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรัศมีขนาดเล็กหรือมีรูปทรงที่ซับซ้อนมักจะเกิดความเสียหายได้ง่าย โดยความเสียหายจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวการดัดจากค่าความเค้นดึงที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญในการขึ้นรูป และพฤติกรรมการดีดตัวกลับที่เกิดขึ้นสูงเป็นอีกหนึ่งปัญหาที่สำคัญในการขึ้นรูปเหล็กกล้าชนิดนี้ [5]

ความสามารถในการดัดขึ้นรูปของวัสดุ หมายถึง ข้อจำกัดของความเครียดหรือสถานะความเค้นที่อนุญาตให้เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการดัดขึ้นรูปโดยไม่เกิดความเสียหายกับแผ่นวัสดุ [6] ซึ่งสามารถประเมินผลความสามารถในการดัดได้โดยการทดสอบการดัดขึ้นรูปจากพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงและความเสียหายของผิวด้านนอกบริเวณการดัดโค้ง โดยจะทำการดัดโค้งชิ้นทดสอบด้วยรัศมีและมุมตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ซึ่งข้อจำกัดในการดัดขึ้นรูปหมายถึง ปริมาณของความเครียดสูงสุดที่อนุญาตให้เกิดขึ้นได้กับชิ้นทดสอบในบริเวณการดัดขึ้นรูป โดยที่ไม่ทำให้ชิ้นทดสอบมีความเสียหายหรือรอยแตกร้าวเกิดขึ้น [7] ซึ่งจะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนจากค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นซึ่งมักเกิดขึ้นกับที่รัศมีการดัดขนาดเล็ก นอกจากนี้สาเหตุดังกล่าวอาจเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น ลักษณะรูปร่างเครื่องมือ คุณสมบัติของวัสดุ ความหนาแผ่นโลหะ พื้นผิวและเงื่อนไขของแผ่นวัสดุเป็นต้น [8] จึงมีความจำเป็นในการศึกษาถึงพฤติกรรมด้านความสามารถในการขึ้นรูปที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรในสภาวะที่รุนแรง [9-12] เพื่อช่วยให้มีความเข้าใจที่ดีถึงค่าความสามารถในการดัด กลไกความเสียหาย และพัฒนาการความเสียหายที่เกิดขึ้นในระหว่างการดัดขึ้นรูป ซึ่งคือจุดประสงค์ที่สำคัญในการศึกษาครั้งนี้

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ให้เกิดผลประโยชน์กับอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะมากที่สุด โดยมุ่งทำการศึกษาถึงผลกระทบของคุณสมบัติจากกระบวนการผลิตของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษที่ส่งผลต่อความสามารถในกระบวนการดัดขึ้นรูป ลักษณะและคุณภาพชิ้นงานที่ได้ รวมทั้งความเสียหายหรือข้อบกพร่องที่อาจจะเกิดขึ้นบนชิ้นงานสำเร็จด้วยการทดสอบการดัดขึ้นรูปที่มีลักษณะการเปลี่ยนรูปที่รุนแรงจากการใช้รัศมีการดัดต่ำ โดยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ (air-bending) ที่ขนาดมุมเพิ่มขึ้นทุกๆ 15° เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์พฤติกรรมการดีดตัวกลับและความสามารถในการดัดขึ้นรูปของโลหะแผ่นชิ้นทดสอบ โดยจะทำการวิเคราะห์ผลจากผลของแรงในการดัดขึ้นรูป (bending force) ค่าความหยาบผิว (surface roughness) ขนาดมุมดีดตัวกลับ (springback angle) และความเสียหายบนพื้นผิวการดัด (bending surface) หลังการดัดขึ้นรูป ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ข้อกำหนดเพื่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษที่เหมาะสม สำหรับการผลิตชิ้นงานให้ได้คุณภาพตามที่กำหนด หลีกเลี่ยงความเสียหายหรือข้อบกพร่องที่อาจจะเกิดขึ้น เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ศึกษาความสามารถในการดัดขึ้นรูปของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ภายในประเทศเกรด SPFC 980 ขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร ก่อนการทดสอบการดัดจะนำโลหะแผ่นไปทำการทดสอบแรงดึงในทิศทางการรีดต่างๆ คือ ตามแนวการรีด (0°) ทำมุม (45°) กับแนวรีด และขวางแนวการรีด (90°) โดยผลการทดสอบแรงดึงแสดงดังตารางที่ 1

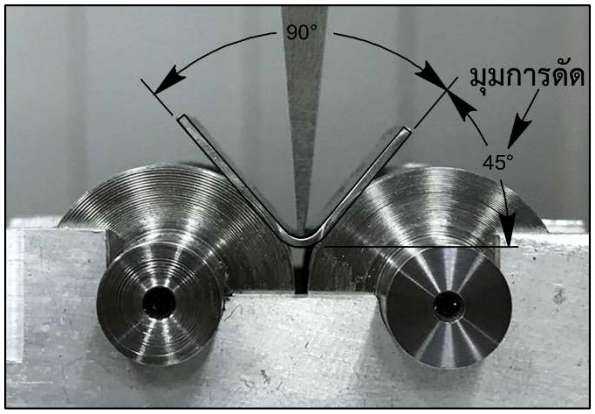
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบในทิศทางการรีดต่างๆ ของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ SPFC 980

Rolling Direction	Yield Stress (MPa)	Ultimate Tensile Stress (MPa)	Total Elongation (%)
0°	765	1050	16
45°	740	1020	14
90°	758	1035	12

2.2 การออกแบบการทดลอง ทำการทดสอบการดัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปแบบอิสระ (air-bending die) ดังรูปที่ 1 โดยมีข้อกำหนดและรายละเอียดการทดลองดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดและรายละเอียดการทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบอิสระเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ SPFC 980

ข้อกำหนด	รายละเอียด	เครื่องมือ
ลักษณะการทดสอบการดัด	การดัดขึ้นรูปแบบอิสระ (air-bending)	
มาตรฐานการทดสอบ	ISO 7438:2010	แม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปแบบอิสระ
รัศมีลูกกลิ้งรองรับ (R)	10 มิลลิเมตร	(air-bending die)
รัศมีหัวกด (r)	0.25 มิลลิเมตร	
ขนาดมุมการดัด (α)	15°, 30°, 45°, 60° และ 75°	เครื่องทดสอบแบบเอนกประสงค์
ความเร็วในการดัด	120 มิลลิเมตร/นาที	(universal testing machine)
การบันทึกผลการทดลอง	ค่าความหยาบผิวของพื้นผิวการดัด	เครื่องวัดค่าความหยาบผิว (surface roughness tester)
	ขนาดมุมชิ้นงาน ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวการดัด	กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (optical microscope)



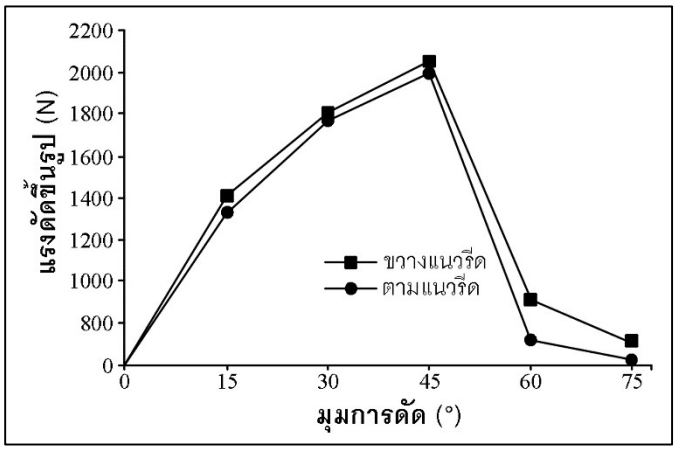
รูปที่ 1 แม่พิมพ์สำหรับการทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ (air-bending die)

3. ผลการทดลอง

จากการทดสอบการดัดขึ้นรูปเพื่อการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษเกรด SPFC 980 ที่มีขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร โดยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ (air-bending) ซึ่งจะทำการประเมินผลและวิเคราะห์ผลการทดเชิงเปรียบเทียบที่มุมการดัดทุก ๆ 15° โดยจะทำการประเมินผลและวิเคราะห์ผลความสามารถในการดัดขึ้นรูปจากแรงดัดขึ้นรูป ขนาดมุมดีดตัวกลับ ค่าความหยาบผิว และลักษณะความเสียหายบนพื้นผิวการดัด ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

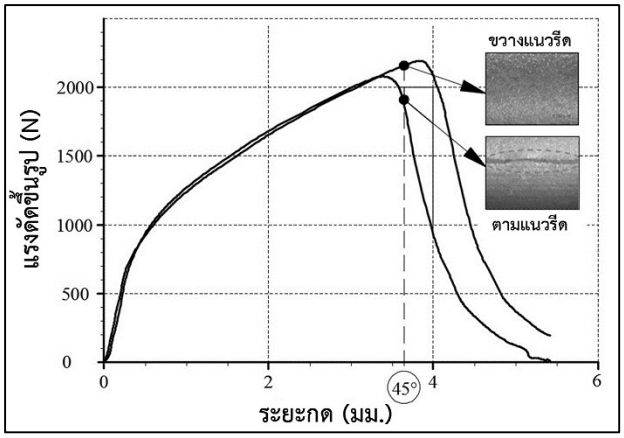
3.1. แรงดัดขึ้นรูปชิ้นงาน (bending force) ทำการทดสอบการดัดขึ้นรูปโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษเกรด SPFC 980 ขนาดความกว้าง 12 มิลลิเมตร x ความยาว 30 มิลลิเมตร x ความหนา 1 มิลลิเมตร ทำการดัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปแบบอิสระที่อุณหภูมิห้องและไม่ใช้สารหล่อลื่น โดยผลการเปรียบเทียบค่าแรงในการดัดขึ้นรูปจะแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งผลการทดลองการดัดขึ้นรูปพบว่า การดัดขึ้นรูปในทิศทางขวางแนวการรีดจะใช้แรงในการดัดขึ้นรูปสูงกว่าการดัดขึ้นรูปตามแนวรีด

เล็กน้อย โดยการดัดขึ้นรูปแบบขวางแนวการรีดที่มุมการดัด 15° ใช้แรงดัดขึ้นรูป 1420.25 N และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยแรงดัดจะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่มุมการดัด 45° ซึ่งใช้แรงในการดัด 2180.5 N จากนั้นแรงดัดจะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบ ส่วนการดัดขึ้นรูปตามแนวการรีดซึ่งใช้แรงในการดัดขึ้นรูปต่ำกว่าพบว่าที่มุมการดัด 15° ใช้แรงดัดขึ้นรูป 1380.65 N และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยแรงดัดเพิ่มขึ้นสูงสุดที่มุมการดัด 45° ซึ่งใช้แรงในการดัด 1960.75 N จากนั้นแรงดัดจะมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดรอยแตกร้าวที่บริเวณพื้นผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบ



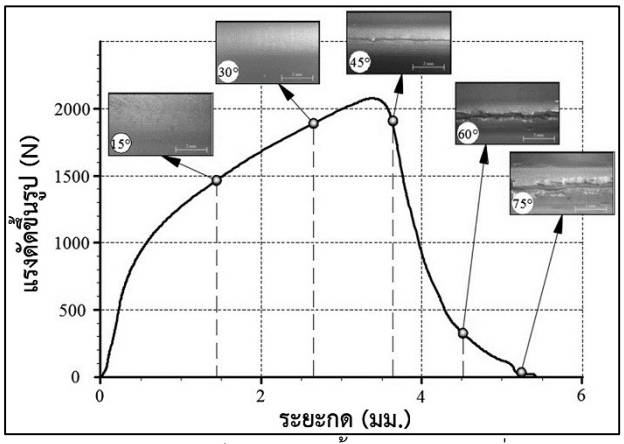
รูปที่ 2 การเปรียบเทียบค่าแรงกดดัดแผ่นวัสดุในทิศทางการรีดที่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองที่กล่าวมาแล้วสรุปได้ว่าการดัดขึ้นรูปโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษแบบขวางแนวการรีดใช้แรงในการขึ้นรูปสูงกว่าซึ่งสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกลซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึงในทิศทางตามแนวการรีด ซึ่งมีค่าความเค้นคราก และค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าการดึงแบบขวางแนวการรีด และเห็นได้ชัดจากการเปรียบเทียบผลการดัดขึ้นรูปที่มุมการดัด 45° ดังรูปที่ 3



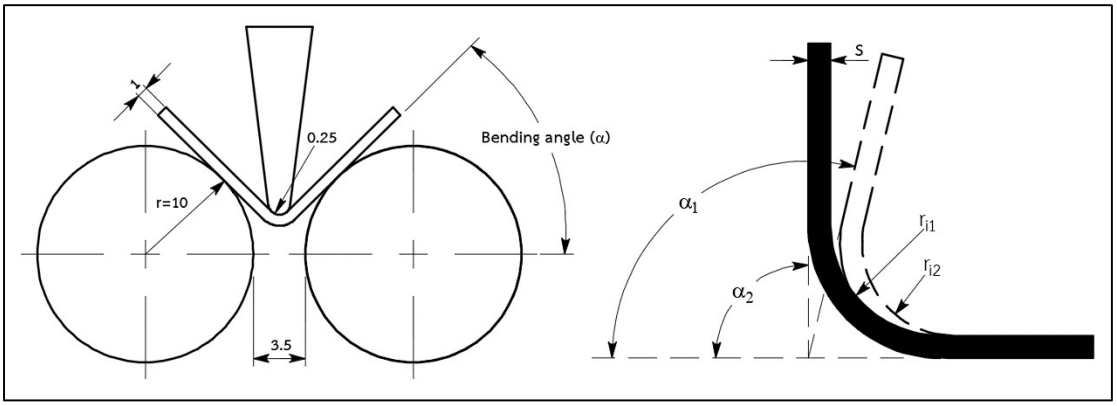
รูปที่ 3 การเปรียบเทียบแรงดัดขึ้นรูปที่มุมการดัด 45° ของวัสดุด้วยทิศทางการดัดที่แตกต่างกัน

จากผลการทดสอบการดัดขึ้นรูปดังรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการดัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบที่ขนาดมุม 45° เท่ากันจะพบว่าการดัดขึ้นรูปแบบขวางแนวการรีดใช้แรงในการดัดขึ้นรูปสูงกว่าและไม่ปรากฏรอยแตกร้าวหรือความเสียหายใด ๆ บนพื้นผิวการดัด ขณะที่ผลการดัดขึ้นรูปแบบตามแนวการรีดพบว่าที่มุมการดัด 45° จะมีขนาดแรงดัดต่ำกว่าเนื่องจากผลของค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ต่ำกว่าและการเกิดรอยแตกร้าวบนพื้นผิวการดัด ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของแรงดัดและการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวชิ้นทดสอบจะเห็นได้ชัดเจนดังรูปที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของแรงดัดขึ้นรูปและการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวการดัดชิ้นทดสอบจากการดัดขึ้นรูปแบบตามแนวการรีดจะพบว่าขนาดแรงดัดขึ้นรูปจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้นจนถึงขนาดมุมการดัด 45° แรงดัดจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเนื่องจากปรากฏรอยแตกเกิดขึ้นบนพื้นผิวการดัด จากนั้นแรงดัดขึ้นรูปจะลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะของรอยแตกที่มีความรุนแรงหรือมีความกว้างเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าค่าแรงในการดัดจะแปรผันตามค่ามุมในการดัดขึ้นรูป คือ เมื่อมุมการดัดเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้ต้องใช้ค่าแรงในการกดดัดสูงขึ้นและแรงดัดจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อปรากฏรอยแตกร้าวบนพื้นผิวการดัด ส่วนอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดัดจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลของวัสดุเป็นหลัก

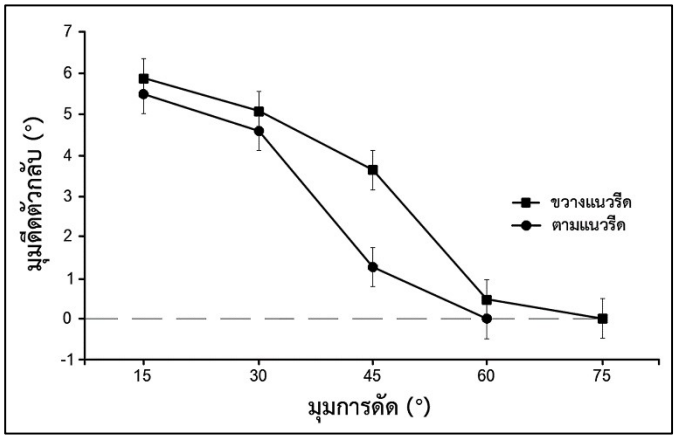


รูปที่ 4 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแรงดัดขึ้นรูปและการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวการดัด

3.2 มุมดีดตัวกลับ (spring back angle) ภายหลังการดัดขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ขนาดมุมการดัดต่างๆ โดยการกำหนดระยะการกดดัดตามที่คำนวณไว้ จากนั้นจะนำชิ้นทดสอบมาถ่ายภาพ และวัดเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของมุมชิ้นงาน เพื่อคำนวณหาขนาดมุมการดีดตัวกลับของชิ้นทดสอบซึ่งแสดงดังรูปที่ 5 โดยผลการวัดขนาดขนาดมุมดีดตัวกลับของชิ้นทดสอบจะแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งผลการทดลองพบว่าการดัดขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ SPFC590 แบบขวางแนวการรีดมีขนาดมุมดีดตัวกลับสูงกว่าการดัดขึ้นรูปแบบตามแนวรีดซึ่งสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกลที่ได้จากผลการทดสอบแรงดึงแบบตามแนวการรีด ซึ่งพบว่ามีค่าความเค้นคราก และค่าความเค้นแรงดึงสูงกว่า อีกทั้งยังพบว่าการทดสอบการดัดขึ้นรูปที่ขนาดมุมการดัดน้อยจะมีขนาดมุมดีดตัวกลับสูงและเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ขนาดมุมดีดตัวกลับมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการดัดขึ้นรูปที่มุมการดัดน้อย ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณมุมการดัดมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุไม่มากนักทำให้มีค่าความยืดหยุ่นตกค้างบริเวณดังกล่าวสูง จึงส่งผลให้เกิดพฤติกรรมการดีดตัวกลับสูงที่สุด และเมื่อมุมการดัดเพิ่มมากขึ้นค่าความเค้นจึงเพิ่มสูงขึ้น และเข้าสู่ช่วงของการเปลี่ยนรูปถาวรมากขึ้นส่งผลทำให้ค่าความยืดหยุ่นตกค้างลดน้อยลง จึงส่งผลให้ขนาดของมุมดีดตัวกลับมีแนวโน้มลดลง [15] ทั้งนี้จากผลการดัดแบบตามแนวการรีดจะพบว่าที่ขนาดมุมการดัด 45° ขนาดมุมดีดตัวกลับจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดการแตกร้าวบนพื้นผิวการดัด

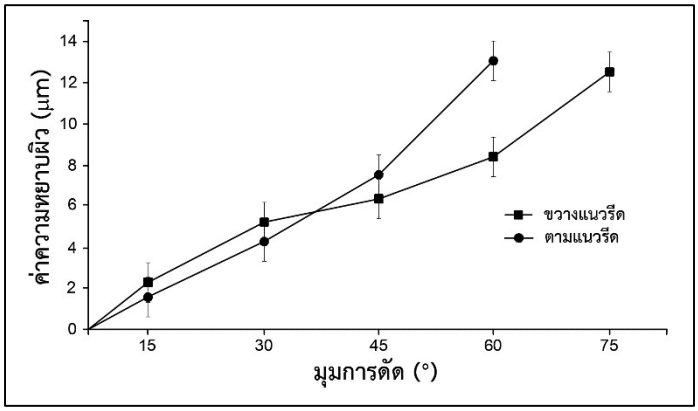


รูปที่ 5 การวัดเพื่อเปรียบเทียบขนาดมุมดีดตัวกลับ [14]



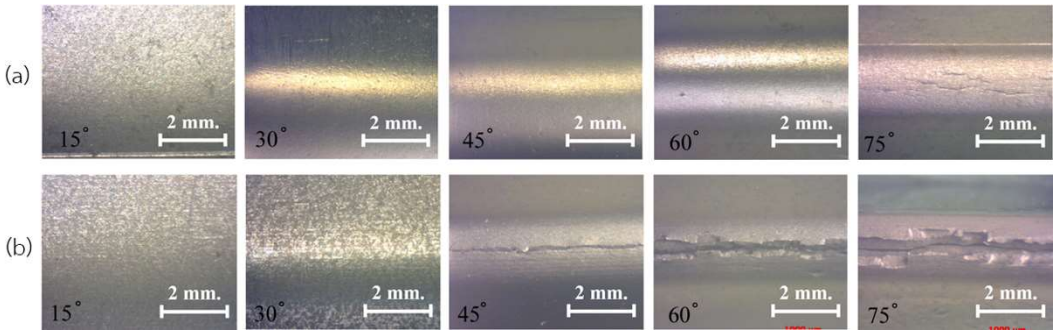
รูปที่ 6 การเปรียบเทียบขนาดมุมดีดตัวกลับของชิ้นทดสอบ

3.3 ค่าความหยาบผิว (surface roughness) ภายหลังการดัดขึ้นรูปของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษในทิศทางขวางและตามแนวการรีด จะนำชิ้นทดสอบมาทำการวัดค่าความหยาบผิวภายนอกของมุมดัด โดยผลการวัดค่าความหยาบผิวจะแสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวการดัดของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษในทั้งสองทิศทางการดัดภายหลังการดัดขึ้นรูปด้วยมุมการดัดที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 15° พบว่าค่าความหยาบผิวจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มมากขึ้น โดยชิ้นทดสอบที่ได้จากการดัดขึ้นรูปแบบขวางแนวการรีดจะมีค่าความหยาบผิวสูงกว่าและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงมุมการดัดที่ 75° ส่วนการดัดขึ้นรูปตามแนวการรีดจะมีค่าความหยาบผิวต่ำกว่าในช่วงมุมการดัด 15°-30° และค่าความหยาบผิวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงกว่าการดัดขึ้นรูปแบบขวางแนวการรีดที่มุมการดัด 45° จากผลของการเกิดรอยแตกร้าวบนพื้นผิวการดัดของโลหะแผ่น ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวการดัดที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อทำการดัดขึ้นรูปแบบตามแนวการรีดด้วยมุมการดัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ชิ้นทดสอบมีลักษณะเป็นผิวคลื่นและเกิดรอยแตกร้าวได้ง่าย ส่วนการดัดขึ้นรูปแบบขวางแนวการรีดซึ่งจะทำให้โลหะแผ่นเกิดการยืดตัวในทิศทางตามแนวการรีดซึ่งมีคุณสมบัติทางกลที่สูงกว่า จึงส่งผลให้พื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยภายหลังการดัดขึ้นรูป



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวชิ้นทดสอบ

3.4 ลักษณะพื้นผิวการดัด (bending surface characteristics) จากการดัดขึ้นรูปวัสดุโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ ตามข้อกำหนดและเงื่อนไขการทดลอง เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการดัดขึ้นรูปไปทำความสะอาดและถ่ายภาพพื้นผิวด้านนอกบริเวณการดัดซึ่งได้รับผลกระทบจากค่าความเค้นดึงสูงสุด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (optical microscope) กำลังขยาย 10 เท่า เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวภายหลังการดัดขึ้นรูปดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวชิ้นทดสอบ (a) ขวางแนวรีด (b) ตามแนวรีด

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวชิ้นทดสอบจากการดัดขึ้นรูปแบบขวางแนวการรีดแสดงดังรูปที่ 8(a) พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวบริเวณการดัดอย่างชัดเจนที่มุมการดัด 60° โดยพื้นผิวมีลักษณะเป็นผิวคลื่นขนาดเล็กเกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับแนวแกนการดัด เมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มขึ้นเป็น 75° พบว่ารอยแตกจะขยายตัวกว้างขึ้นและปรากฏเป็นการแตกร้าวเสียหายอย่างชัดเจน และรูปที่ 8(b) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษจากการดัดขึ้นรูปแบบตามแนวการรีด ซึ่งพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวบริเวณการดัดอย่างชัดเจนที่มุมการดัด 30° และปรากฏเป็นรอยแตกขนาดเล็กเมื่อถูกดัดขึ้นรูปด้วยมุมการดัด 45° โดยรอยแตกจะเกิดขึ้นตลอดแนวความกว้างของชิ้นทดสอบ และรอยแตกจะขยายตัวกว้างขึ้นเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มมากขึ้นจนถึงขนาดมุมการดัดที่ 75° รอยแตกหรือความเสียหายจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงส่งผลให้ชิ้นงานฉีกขาดออกจากกันเป็นสองส่วน ทั้งนี้เนื่องจากโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงสูง มีความสามารถในการยืดตัวจำกัด รวมทั้งเกิดความเครียดแข็งหรือมีค่าความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงส่งผลให้พื้นผิวของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ง่ายเมื่อขนาดมุมการดัดขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดัดขึ้นรูปโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษด้วยวิธีการทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบอิสระในทิศทางการดัดหรือแนวการรีดที่แตกต่างกัน โดยวิเคราะห์ผลจากค่าแรงในการดัดขึ้นรูป ขนาดมุมดีดตัวกลับ ค่าความหยาบผิว และลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวการดัด จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ค่าแรงดัดขึ้นรูปของชิ้นทดสอบจะแปรผันตามค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุ กล่าวคือการดัดขึ้นรูปแบบขวางแนวการรีดจะส่งผลให้วัสดุเกิดการยืดตัวของพื้นผิวการดัดไปตามแนวการรีดซึ่งมีความสามารถในการรับแรงดึงได้สูงกว่า จึงใช้แรงในการดัดขึ้นรูปสูงกว่า ส่วนการดัดแบบตามแนวการรีดจะใช้แรงเพื่อการดัดขึ้นรูปน้อยกว่า

2) ขนาดมุมดีดตัวกลับจะแปรผกผันกับความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ กล่าวคือคุณสมบัติทางกลของวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษที่ได้จากการดึงแบบขวางแนวการรีดจะมีขนาดของมุมดีดตัวกลับสูง ส่วนการทดสอบแรงดึงตามแนวการรีดจะมีขนาดมุมดีดตัวกลับน้อยกว่า

3) ขนาดมุมดีดตัวกลับจะแปรผกผันกับขนาดมุมการดัดกล่าวคือเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ขนาดมุมดีดตัวกลับลดต่ำลง เนื่องจากเมื่อมุมการดัดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเค้นเพิ่มสูงขึ้นเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรมากขึ้นและค่าความยืดหยุ่นตกค้างน้อยลง จึงส่งผลให้ขนาดมุมดีดตัวกลับมีแนวโน้มลดลง

4) วัสดุโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงสูงและเกิดความเครียดแข็งสูง เมื่อมุมการดัดเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้ต้องใช้ค่าแรงในการดัดขึ้นรูปสูงขึ้น ส่วนอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดัดจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลของวัสดุเป็นหลัก ดังนั้นเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้พื้นผิวการดัดมีค่าความหยาบผิวเพิ่มสูงขึ้นและมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยแตกร้าวและฉีกขาดออกจากกันได้ง่าย ทั้งนี้การดัดขึ้นรูปแบบอิสระเป็นลักษณะการขึ้นรูปที่เกิดแรงเสียดทานต่ำเนื่องจากเป็นลักษณะของแรงเสียดทานแบบจุด (point friction) หากเป็นการดัดขึ้นรูปในลักษณะอื่นเช่น การดัดขึ้นรูปแบบตัวยู (U-bending) หรือการดัดขึ้นรูปแบบดึงยืดในลักษณะของการลากขึ้นรูปลึก (deep drawing) ควรมีการใช้สารหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานในระหว่างการขึ้นรูป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และขอบคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่ และนักศึกษาของสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี ที่มีส่วนช่วยเหลือให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

[1] C. D. Horvath, “Advanced Steels for Lightweight Automotive Structures,” *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles (Second Edition)*, pp. 39–95, 2021.

[2] S. Pandre, V. Mhatre, N. Kotkunde and S. K. Singh, “Strain Hardening Behavior of DP 590 Steel Using Dislocation Density Based Kock-Mecking Model,” *Materials Today: Proceedings*, Article in press, 2020.

[3] E. Tamer, G. Ozgultekin, O. Poyraz and C. Seyalioglu, “Formability Analyses of a Novel Alloy Cold Rolled Batch Annealed Dual Phase Steel,” *Procedia Manufacturing*, vol. 47, pp. 1211–1216, 2020.

[4] S. Fan, H. Hao, L. Meng and X. Zhang, "Effect of Deep Cryogenic Treatment Parameters on Martensite Multi-Level Microstructures and Properties in A Lath Martensite/Ferrite Dual-Phase Steel,", *Mater. Sci. Eng. A.,* vol. 810, pp. 141–149, 2021.

[5] G. Béres, Z. Lukács and M. Tisza, "Springback Evaluation of Tailor Welded Blanks At V-Die Bending Made of DP Steels," *Procedia Manufacturing*, vol. 47, pp. 1366–1373, 2020.

[6] S. Nopparat, P. Sansot and S. Tom, "Bendability Evaluation of Sheet Metals in Three-Point Bending Test by Using Acoustic Emission Features," *The Journal of Applied Science*, vol. 16, pp. 15–22, 2017.

[7] W. Wang, M. Li, Y. Zhao and X. Wei, "Study on Stretch Bendability and Shear Fracture Of 800 Mpa Dual Phase Steel Sheet," *Materials and Design*, vol. 56, pp. 907–913, 2014.

[8] A.W. Hudgins, D.K. Matlock, J.G. Speer and C.J.V. Tyne, "Predicting instability at die radii in advanced high strength steels," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, pp. 741–750, 2010.

[9] D.K. Leu and J. Mater, "A Simplified Approach for Evaluating Bendability and Spring Back in Plastic Bending of Anisotropic Sheet Metal," *Material Processing Technology*, vol. 66, pp. 9–17, 1997.

[10] 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.

[11] M. Laurent, D. Dominique, G. Gilles, K. Helmut and D. Julia, "Strain Localization and Damage Mechanisms During Bending of AA6016 Sheet," *Materials Science & Engineering A*, vol. 559, pp. 812–821, 2019.

[12] Davidkov, R.H. Petrov and P.D. Smet, "Microstructure Controlled Bending Response in AA6016 Al Alloys," *Materials Science and Engineering A*, vol. 528, pp. 68–76, 2011.

[13] Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility, vol. 3, pp. 1–7, 1998. https://doi.org/10.1520/E0290-13.Copyright

[14] W.F. Hosford and R.M. Caddell, "Metal Forming: Mechanics and Metallurgy," *Cambridge University Press*, pp. 1–331, 2011.

[15] D. Fei and P. Hodgson, "Experimental and Numerical Studies of Springback in Air V-Bending Process for Cold Rolled TRIP Steels," *Nucl Eng Des*, vol. 236, pp. 1847–1851, 2006.