

การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ดัดรูปตัววีแบบปรับค่าได้สำหรับโลหะแผ่นบาง

Design and Construction of Adjustable V-bending Die for Thin Metal Sheets

ณัฐกร แซ่เอี้ยว¹ พัตร์พิมล สุวรรณกาญจน์¹ และกัลยา อุบลทิพย์^{1*}

Nuttakorn Sae-eaw¹ Patpimol Suwankan¹ and Kanlaya Ubontip^{1*}

¹ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

¹Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

*Corresponding author: kanlaya.u@cit.kmutnb.ac.th

Received: December 16, 2025

Revised: February 11, 2026

Accepted: February 17, 2026

บทคัดย่อ

การดัดขึ้นงานเป็นรูปตัววีนั้นสามารถพบเห็นได้ง่ายในชิ้นส่วนต่าง ๆ โดยอุปกรณ์ในการดัดขึ้นรูปที่เหมาะสมจะต้องสามารถขึ้นรูปชิ้นงานภายใต้เงื่อนไขของชนิดวัสดุ ความหนาโลหะแผ่น และขนาดเครื่องมือที่แตกต่างกันได้ ในงานวิจัยนี้ แม่พิมพ์ดัดแบบปรับค่าได้สำหรับกระบวนการดัดแบบ 3 จุด (3-point bending) ถูกออกแบบและพัฒนาเพื่อรองรับการขึ้นรูปที่หลากหลาย โดยแม่พิมพ์สามารถปรับเปลี่ยนขนาดของเครื่องมือให้เหมาะสมกับเงื่อนไขการศึกษาได้ โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ถูกใช้ในการศึกษาอิทธิพลของเครื่องมือได้แก่รัศมีของพunch (R_p) รัศมีของแม่พิมพ์ (R_d) และความกว้างของแม่พิมพ์ (W) พบว่า ค่ามุมดัดมีความสัมพันธ์กับค่าระยะกดของพunch จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวมุมดัดจะมีลักษณะแหลมขึ้นเมื่อระยะกดของพunch และรัศมีของเครื่องมือมีค่ามากขึ้น ในขณะที่ความกว้างของช่องแม่พิมพ์น้อยลง การวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่ผลิตจากวัสดุ AISI1045 แสดงให้เห็นว่าชิ้นส่วน Insert punch และ Insert die สามารถรับแรงได้โดยไม่มีการเสียรูปแบบถาวร การตรวจสอบเครื่องมือโดยการดัดขึ้นรูปชิ้นงานจริงพบว่าค่าความแตกต่างของมุมระหว่างการทดลองจริงกับการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าความแตกต่างไม่เกิน 3% แสดงให้เห็นความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของแม่พิมพ์ที่ออกแบบ นอกจากนี้แม่พิมพ์ดัดถูกใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการดัดกลับของแผ่นโลหะ AA1100 และ AISI1005 การทดลองดัดขึ้นงานให้ได้มุม 80 90 และ 100 องศา สามารถทำได้โดยการชดเชยการดัดกลับด้วยการเพิ่มค่าระยะกดของพunch ให้เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: กระบวนการดัดโลหะแผ่น การดัดแบบ 3 จุด การดัดรูปตัววี แม่พิมพ์ดัด การชดเชยการดัดกลับ

Abstract

V-shaped profiles are commonly found in sheet metal bending applications. The selection of an appropriate bending die is essential for producing workpieces under various forming conditions, including material type, sheet thickness, and tool geometry. In this study, an adjustable V-bending die for a three-point bending process was designed and developed to enhance forming flexibility. The tool components were designed to be interchangeable, allowing different configurations to be tested. Finite Element Modeling: FEM was employed to investigate the effects of key tool geometrical parameters, including Punch Radius: R_p , Die Radius: R_d , and Die Opening: W . The results indicated that the bending angle was strongly dependent on the punch stroke. Sensitivity analysis revealed that sharper bending angles were achieved with increased punch stroke and larger tool radii, while a smaller die opening resulted in greater bending deformation. Structural analysis of the die components manufactured from AISI 1045 steel confirmed that both the punch insert and die insert possessed sufficient strength to withstand the applied forming loads without undergoing plastic deformation. Experimental validation demonstrated that the deviation between the simulated and measured bending angles was less than 3%, confirming the accuracy and reliability of the developed die. Furthermore, the developed tool was applied to investigate the springback behavior of AA1100 aluminum alloy and AISI 1005 steel. Specimens were tested at target bending angles of 80° , 90° , and 100° , and springback compensation was successfully achieved by increasing the punch stroke.

Keywords: sheet bending, 3-point bending, V-bending, bending die, springback compensation

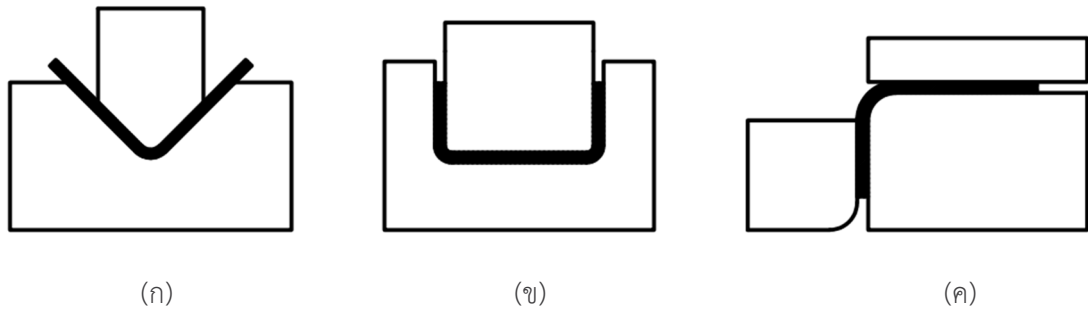


บทนำ

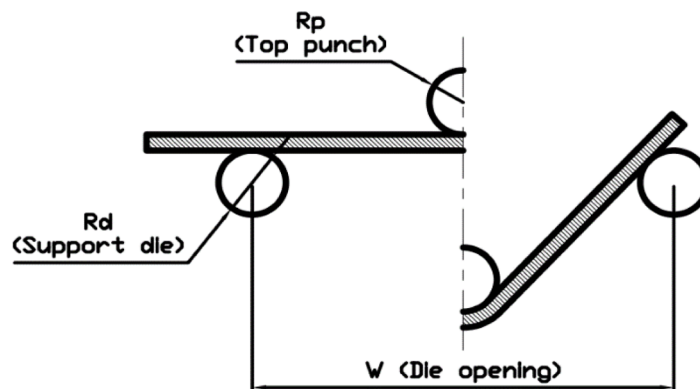
การขึ้นรูปโลหะแผ่น (sheet forming) เป็นกระบวนการที่นำแผ่นโลหะ (blank sheet) มาทำให้เกิดรูปร่างที่ซับซ้อนตามแบบ ซึ่งวิธีการแปรรูปที่พบได้บ่อยประกอบด้วย การตัด (shearing) การลากขึ้นรูป (drawing) การรีดลดความหนา (ironing) และการดัด (bending) (Billur & Altan, 2010) สำหรับชิ้นงานที่มีรูปทรงเรขาคณิตที่ไม่ซับซ้อน การดัดโลหะแผ่นถือเป็นกระบวนการที่เหมาะสม โดยรูปแบบการดัดที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ การดัดเป็นรูปตัววี (V-profile) รูปตัวยู (U-profile) และรูปตัวย่อ (L-profile) ซึ่งพบได้ในชิ้นส่วนเครื่องกลและอุตสาหกรรมยานยนต์ ภาพ 1 แสดงกระบวนการดัดแบบต่าง ๆ โดยใช้แม่พิมพ์ สำหรับการดัดรูปตัววีสามารถแบ่งออกได้เป็นสองวิธี ได้แก่ การดัดด้วยแม่พิมพ์รูปตัววี (V-die bending) และการดัดแบบ 3 จุด (3-point bending) วิธีแรกสามารถให้รูปร่างและมุมดัดที่แม่นยำตามรูปแบบแม่พิมพ์ แต่ไม่สามารถปรับค่ามุมดัดได้ ทำให้ต้องเตรียมแม่พิมพ์หลายชุดถ้าหากต้องการมุมดัดที่แตกต่างกันหลายองศา (Thipprakmas, 2010) ในขณะที่การดัดแบบ 3 จุดจัดเป็นการดัดแบบอิสระ (air bending) เนื่องจากไม่มีแม่พิมพ์รองรับชิ้นงาน (Pornputsiri, 2017)

พินช์จะกดแผ่นโลหะลงในช่องว่าง ทำให้สามารถดัดได้มุมหลากหลายค่า ส่วนประกอบของกระบวนการดัดแบบ 3 จุดแสดงในภาพ 2

ในกระบวนการดัดมีตัวแปรที่สามารถส่งผลกระทบต่อมุมดัดของชิ้นงานได้โดยมาจากอิทธิพลของเครื่องมือและอิทธิพลของวัสดุ (Gupta, 2017) นักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาอิทธิพลของเครื่องมือ โดยทำการจำลองกระบวนการดัดขึ้นรูปในห้องปฏิบัติการ (simulate testing) แม่พิมพ์ดัดรูปตัววีขนาดเล็กได้ถูกออกแบบและทดลองดัดขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้ขนาดของเครื่องมือที่แตกต่างกัน (Nur et al., 2023; Watcharasresomroeng et al., 2022) ข้อดีของการทดสอบในห้องปฏิบัติการคือสามารถควบคุมตัวแปรที่สนใจศึกษาได้ สำหรับกระบวนการดัดรูปตัววีนั้นตัวแปรที่สนใจได้แก่ รัศมีของพินช์ (R_p) รัศมีของแม่พิมพ์ (R_d) และความกว้างของช่องแม่พิมพ์ (W) เพื่อเปลี่ยนขนาดของเครื่องมือขึ้นส่วน Insert punch และ Insert die ถูกนำมาใช้แทนที่แม่พิมพ์แบบคงที่ (fixed punch และ die) มุมดัดของชิ้นงานที่ได้รับจะถูกวัดผลและใช้เป็นตัวบ่งชี้อิทธิพลของตัวแปรที่กำลังศึกษา



ภาพ 1 กระบวนการดัดโลหะแผ่น (sheet bending processes) (ก) V-bending (ข) U-bending และ (ค) L-bending



ภาพ 2 กระบวนการดัดแบบ 3 จุด (3-point bending)

ในกระบวนการดัดมีปัญหาที่สำคัญ คือ การดีดกลับของชิ้นงาน (springback) ทำให้ค่าของมุมดัดภายหลังเสร็จสิ้นการขึ้นรูปเปลี่ยนแปลงไป เครื่องมือที่ใช้ศึกษากระบวนการดัดสามารถนำมาใช้ศึกษาพฤติกรรมการดีดกลับของวัสดุได้ จากการค้นคว้าพบว่า การดีดกลับมีสาเหตุมาจากการคืนตัวของช่วงการเสียรูปในช่วงอีลาสติกภายในวัสดุ (Alhammadi et al., 2018; Boonchua & Thanakijkasem, 2012) ซึ่งมีผลมาจากเงื่อนไขการขึ้นรูปทางด้านวัสดุและเครื่องมือที่ใช้ สมบัติทางกลอย่างเช่นค่าความแข็งแรงของวัสดุ (yield และ tensile strength) และความอดุลลัสยืดหยุ่น (young's modulus) ล้วนมีผลต่อปริมาณการดีดกลับของวัสดุ ขนาดของมุมดัดที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้คุณภาพด้านขนาดและรูปร่างของชิ้นงานไม่เหมาะสม นับเป็นปัญหาสำหรับวิศวกรผู้ผลิต แนวทางศึกษาการชดเชยการดีดกลับ (springback compensation) จึงได้ถูกทำการวิจัย (Wang et al., 2008; Karabulut et al., 2024; Kut et al., 2023) สำหรับกระบวนการดัดรูปตัววีสามารถทำได้โดยวิธีการกดย้ำ (coining) และวิธีการดัดเพิ่ม (overbending) (Lange, 1985) ทั้ง 2 แนวคิดใช้หลักการเดียวกันคือการทำให้ชิ้นงาน

เกิดการเสียรูปแบบพลาสติกเพิ่มมากขึ้น เพื่อลดปริมาณการคืนตัวในช่วงอีลาสติกให้น้อยลง ชิ้นงานที่ได้จะแสดงการดีดกลับที่ลดลง

วัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ในงานวิศวกรรมตอบสนองต่อการดัดและการดีดกลับแตกต่างกัน เพื่อให้ครอบคลุมการศึกษาอิทธิพลของวัสดุและเครื่องมือจำเป็นต้องใช้ชุดแม่พิมพ์ทดสอบที่สามารถปรับค่าได้ แทนที่จะใช้เครื่องมือแบบคงที่ (fixed die)

ในงานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ดัดรูปตัววีแบบปรับค่าได้ สำหรับศึกษากระบวนการดัด ศึกษาอิทธิพลของเครื่องมือ และศึกษาวิธีการชดเชยการดีดกลับ ดังนั้นชุดแม่พิมพ์จะต้องปรับค่าได้เพื่อรองรับเงื่อนไขการทดสอบต่าง ๆ โดยเริ่มต้นของการวิจัยจะศึกษาวิเคราะห์กระบวนการดัดด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษาเพื่อสังเกตอิทธิพลของเครื่องมือที่ส่งผลต่อค่ามุมดัดที่เกิดขึ้น จากนั้นจะออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ดัดตามหลักการทางวิศวกรรม การวิเคราะห์ความแข็งแรงของเครื่องมือสุดท้าย คือ การใช้อุปกรณ์ที่ออกแบบดัดขึ้นรูปชิ้นงานจริง การตรวจสอบการทำงานของเครื่องมือจะถูกวิเคราะห์

และการศึกษาการชดเชยการบิดกลับในกระบวนการดัดรูปตัววี วัสดุแต่ละชนิดจะถูกนำมาทดลอง

$$\lambda = \left| \frac{k_i - k_0}{k_0} \right| \quad (1)$$

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ศึกษากระบวนการดัดขึ้นงานรูปตัววีด้วยวิธีการดัดแบบ 3 จุด (3-point bending) และศึกษาอิทธิพลของเครื่องมือต่อมุมดัดของชิ้นงานโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์
2. ออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ดัดรูปตัววีแบบปรับค่าได้ตามหลักการทางวิศวกรรม
3. ตรวจสอบการทำงานของแม่พิมพ์ด้วยการทดลองดัดขึ้นรูปจริงและนำเครื่องมือที่พัฒนามาใช้ศึกษาพฤติกรรมการบิดกลับ รวมถึงการศึกษาวิธีการชดเชยการบิดกลับในกระบวนการดัดแบบ 3 จุด

วิธีดำเนินการวิจัย

แผนดำเนินการวิจัยแสดงในภาพ 3 โดยงานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ระยะ

การวิเคราะห์กระบวนการดัดขึ้นรูปด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองกระบวนการดัดขึ้นรูปตัววีด้วยวิธีการดัดแบบ 3 จุด (3-point bending) ถูกสร้างโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรม นั่นคือ โปรแกรม DEFORM2D เพื่อวิเคราะห์ผลของการดัดที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขของขนาดเครื่องมือที่แตกต่างกัน ได้แก่ ขนาดของรัศมีพันซ์ (Rp) รัศมีแม่พิมพ์ (Rd) และความกว้างของช่องแม่พิมพ์ (W) เพื่อสังเกตค่ามุมดัดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานในกระบวนการดัดแบบ 3 จุด ตาราง 1 แสดงค่าขนาดของเครื่องมือที่ใช้ศึกษา ความสัมพันธ์ระหว่างมุมดัดกับระยะกดของพันซ์จะถูกบันทึกเพื่อใช้เป็นเงื่อนไขสำหรับการออกแบบการทดลองดัดขึ้นรูปชิ้นงานจริง

นอกจากนี้อิทธิพลของเครื่องมือต่อมุมดัดจะถูกวิเคราะห์โดยใช้หลักการการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (sensitivity analysis) (Zhang et al., 2009) ค่าความอ่อนไหวของมุมดัด (λ) ภายใต้เงื่อนไขของขนาดเครื่องมือที่แตกต่างกันจะถูกคำนวณโดยสมการที่ (1) การวิเคราะห์อิทธิพลของเครื่องมือจะเป็นข้อมูลที่สำคัญในการออกแบบแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปตัววีแบบปรับค่าได้

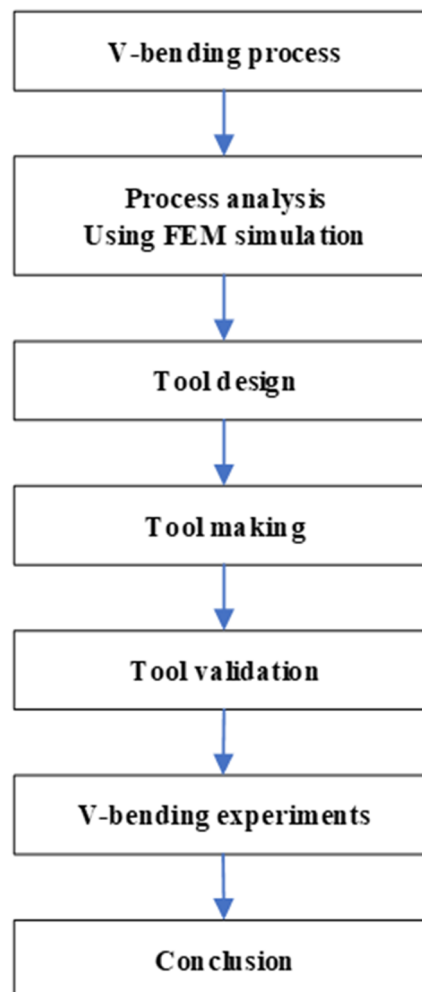
โดยที่ k_0 คือ มุมดัดของชิ้นงานเริ่มต้น (องศา)

k_i คือ มุมดัดของชิ้นงานภายใต้ขนาด

เครื่องมือใด ๆ (องศา)

การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ดัดรูปตัววีแบบปรับค่าได้

การทำบทบทวนวรรณกรรมของ Kut et al. (2023) และ Pornputsiri (2017) กระบวนการดัดขึ้นงานด้วยวิธีแบบ 3 จุด ทำให้พบลักษณะรูปแบบที่เหมาะสมของเครื่องมือ แม่พิมพ์จะต้องสามารถใช้ดัดขึ้นงานภายใต้เงื่อนไขขนาดแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันได้เพื่อรองรับชิ้นงานที่มีขนาดหลากหลาย โดยขนาดของรัศมีพันซ์ ขนาดรัศมีของแม่พิมพ์ และความกว้างของช่องแม่พิมพ์จะต้องเปลี่ยนแปลงค่าได้



ภาพ 3 แผนดำเนินการวิจัย

ตาราง 1

ตัวแปรที่ศึกษาสำหรับกระบวนการดัดขึ้นรูป

ตัวแปร	รายละเอียด
รัศมีของพินช์ (Rp)	4, 7, 10 mm
รัศมีของแม่พิมพ์ (Rd)	4, 7, 10 mm
ความกว้างช่องแม่พิมพ์ (W)	50, 60, 70 mm

การออกแบบเครื่องมือจะเป็นไปตามหลักการทางวิศวกรรม การวิเคราะห์ความแข็งแรงของเครื่องมือโดยใช้โปรแกรมออกแบบทางวิศวกรรม โดยพิจารณาค่าความเค้น (stress) ค่าความเครียด (strain) และค่าความปลอดภัยทางวิศวกรรม (Safety Factor: F.O.S) เครื่องมือที่ออกแบบจะต้องสามารถรับภาระได้โดยไม่มีการเสียหายขณะทำการขึ้นรูปดัดขึ้นงาน

การทดสอบดัดขึ้นรูปขึ้นงานจริง

การทดลองแรก คือ การตรวจสอบการทำงานของแม่พิมพ์ดัด ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวแสดงให้เห็นเงื่อนไขที่เหมาะสมในการดัดขึ้นงาน ที่สามารถแสดงรูปตัววีที่มีมุมดัดหลาย ๆ ขนาด เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตาราง 2 เป็นการทดสอบดัดขึ้นรูปขึ้นงานที่ระยะกุดของพินช์แตกต่างกันหลายระดับ มุมดัดที่เกิดขึ้นจะถูกวัดค่าและนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างผลการทดลองจริงกับการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์แสดงในสมการที่ (2) เพื่อบ่งบอกถึงความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของเครื่องมือที่พัฒนา

$$Error = \left| \frac{\theta_{EXP} - \theta_{FEM}}{\theta_{FEM}} \right| 100\% \quad (2)$$

โดยที่ θ_{EXP} คือ มุมดัดจากการทดลองจริง (องศา)

θ_{FEM} คือ มุมดัดจากการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (องศา)

ตาราง 2

เงื่อนไขการทดสอบการดัดขึ้นงานสำหรับการตรวจสอบเครื่องมือ

เงื่อนไข	รายละเอียด
รัศมีของพินช์ (Rp)	4 mm
รัศมีของแม่พิมพ์ (Rd)	4 mm
ความกว้างช่องแม่พิมพ์ (W)	60 mm
วัสดุขึ้นงาน	
ความหนาแผ่นโลหะ	AA1100
ระยะกุดของพินช์	1 mm
	10, 20, 30, 40 mm

ตาราง 3

เงื่อนไขการทดสอบการดัดขึ้นงานสำหรับการศึกษาพฤติกรรมการดีดกลับและการชดเชยการดีดกลับ

เงื่อนไข	รายละเอียด
1. การศึกษาพฤติกรรม	
การดีดกลับ	
รัศมีของพินช์ (Rp)	4 mm
รัศมีของแม่พิมพ์ (Rd)	4 mm
ความกว้างช่องแม่พิมพ์ (W)	60 mm
วัสดุขึ้นงาน	AA1100, AISI1005
ความหนาแผ่นโลหะ	1 mm
ระยะกุดของพินช์	10, 20, 30, 40 mm
2. การชดเชยการดีดกลับ	
มุมที่ต้องการดัด	80, 90, 100 Deg.

การทดลองถัดไปคือการใช้เครื่องมือเพื่อศึกษาพฤติกรรมการดีดกลับของขึ้นงาน วัสดุที่แตกต่างกันนำมาทดสอบดัดขึ้นรูป เงื่อนไขการทดลองแสดงในตาราง 3 มุมดัดของขึ้นงานก่อนและหลังการดีดกลับจะถูกวัดค่าและบันทึกผลเพื่อแสดงปริมาณการดีดกลับที่เกิดขึ้นของขึ้นงานทดสอบ

เป้าหมายของการศึกษาการดีดกลับคือการหาวิธีชดเชยการดีดกลับ (springback compensation)

สำหรับการดัดขึ้นงานแบบ 3 จุด สามารถชดเชยการบิดกลับได้ด้วยวิธี Overbending โดยทางปฏิบัติทำได้โดยกดดัดขึ้นงานด้วยระยะกดที่ลึกมากกว่าเดิม ผลของการศึกษาพฤติกรรมการบิดกลับของวัสดุจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาค่าระยะกดลึกใหม่ที่สามารถชดเชยการบิดกลับได้ ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบดัดขึ้นงานให้ได้ค่ามุมที่ 80 90 และ 100 องศา การทดลองทั้งหมดจะถูกทดลองโดยใช้แม่พิมพ์ดัดที่ถูกพัฒนา

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ผลการวิเคราะห์กระบวนการดัดแบบ 3 จุด (3-point bending) ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองกระบวนการดัดแบบ 3 จุดแสดงในภาพ 4 เนื่องจากชิ้นส่วนของเครื่องมือและชิ้นงานมีความสมมาตร (symmetry) ดังนั้นแบบจำลองแบบครึ่งส่วน (half model) ถูกใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการดัดเพื่อลดเวลาในการคำนวณ ตาราง 4 แสดงเงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ที่กำหนดในแบบจำลอง วัสดุที่เลือกใช้คือแผ่นอลูมิเนียมชนิด AA1100 ที่มีความหนาแผ่น 1 มิลลิเมตร ค่าสมบัติทางกลและเส้นโค้งความเค้น-โหลของวัสดุในช่วงการเสียรูปแบบพลาสติกใช้ค่าที่กำหนดในตัวโปรแกรม DEFORM2D ขนาดของเครื่องมือแสดงในตาราง 1 ชิ้นส่วนพันธจะเคลื่อนที่ลงมากดชิ้นงานให้เข้าไปในช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์เพื่อทำการดัดขึ้นรูป ระยะการเคลื่อนที่ของพันธสูงสุดกำหนดที่ 40 มิลลิเมตร ผลลัพธ์จากการจำลองกระบวนการขึ้นรูปจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์การเสียรูปของชิ้นงานและการวิเคราะห์อิทธิพลของเครื่องมือต่อมุมดัดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน

พฤติกรรมการเสียรูปถูกพิจารณาตั้งแต่เริ่มกดขึ้นงานจนถึงระยะกดสูงสุดของพันธ ผลลัพธ์จากการจำลองกระบวนการดัดขึ้นรูปแสดงในภาพ 5 โดยค่าความเค้นที่กระจายตัวบนชิ้นงานแสดงถึงภาระที่วัสดุโดนกระทำจากแรงภายนอกแสดงในภาพ 6(ก) ความเค้นเฉลี่ย (mean stress) บ่งบอกสถานะความเค้นโดยเฉลี่ยที่วัสดุโดนกระทำ ซึ่งสามารถบอกสถานะการเสียรูปภายใต้ความเค้นดึงหรือความเค้นกด พบว่า ค่าความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณชิ้นงานรอบรัศมีของพันธ ที่บริเวณรอบรัศมีการดัดจะมีสถานะ

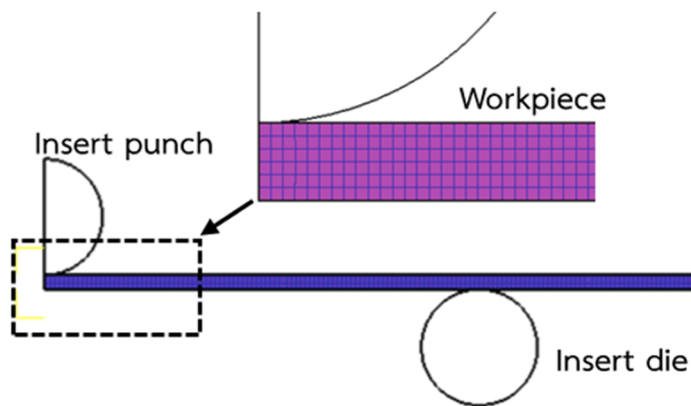
ความเค้นที่แตกต่างกันเกิดขึ้น โดยความเค้นดึงจะเกิดขึ้นที่ด้านนอกของชิ้นงานและความเค้นกดจะเกิดขึ้นที่ด้านในของชิ้นงานฝั่งติดกับตัวพันธ การกระจายตัวของค่าความเค้นแสดงให้เห็นว่า ค่าความเค้นดึงและกดจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณขอบด้านนอกของชิ้นงาน ในขณะที่บริเวณตรงกลางของความหนาแผ่นโลหะจะมีค่าความเค้นเกิดขึ้นน้อยมาก นี่คือนิยามเฉพาะของความเค้นที่เกิดขึ้นในกระบวนการดัดโลหะแผ่นซึ่งโปรแกรมจำลองกระบวนการขึ้นรูปสามารถแสดงผลได้จริง จากการศึกษาพบว่าค่าความเค้นเหล่านี้จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะกดของพันธเพิ่มขึ้น ในภาพ 6(ข) ค่าความเครียดสามารถแสดงถึงปริมาณการเสียรูปที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานได้ พบว่า ค่าความเครียดสัมพันธ์กับค่าความเค้นบริเวณที่เสียรูปสูงสุดพบที่ขอบที่ด้านนอกและขอบด้านในของแผ่นโลหะ บริเวณตรงกลางแผ่นโลหะเกิดการเสียรูปที่น้อยมาก ทำให้การเสียรูปที่เกิดขึ้นยังคงอยู่ในช่วงการเสียรูปแบบอีลาสติก และนี่คือสาเหตุของการเกิดการบิดกลับของชิ้นงานภายหลังการดัดขึ้นรูป การคืนตัวของวัสดุในช่วงอีลาสติก (elastic recovery) คือ ตัวการบริเวณที่ไม่เกิดการเสียรูปแบบถาวรจะคืนตัวกลับสู่รูปร่างเดิม เมื่อพันธกดขึ้นงานลึกขึ้นค่าความเครียดก็จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

นอกจากนี้ผลการจำลองกระบวนการดัดขึ้นรูปยังสามารถบันทึกค่ามุมดัดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานได้ เริ่มต้นการดัดนั้นมุมดัดจะมีค่าเท่ากับ 180 องศา และเมื่อพันธกดดัดขึ้นงานพบว่า มุมดัดนั้นจะมีเริ่มมีค่าน้อยลง ทำให้ชิ้นงานที่ถูกดัดนั้นมีลักษณะเป็นมุมแหลม

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมดัดกับระยะกดของพันธภายใต้เงื่อนไขขนาดของเครื่องมือที่แตกต่างกันแสดงในภาพ 7 ขนาดของเครื่องมือส่งผลต่อมุมดัดของชิ้นงานชัดเจน ที่ระยะกดเท่ากันนั้นขนาดเครื่องมือของพันธและแม่พิมพ์ขนาดใหญ่จะให้ค่ามุมดัดที่แหลมกว่า โดยพบว่า ที่รัศมีพันธ 10 มิลลิเมตร กับรัศมีแม่พิมพ์ 10 มิลลิเมตร ได้มุมแหลมมากกว่าที่รัศมีพันธ 4 มิลลิเมตร กับรัศมีแม่พิมพ์ 4 มิลลิเมตร ในขณะที่ความกว้างของช่องแม่พิมพ์เมื่อปรับให้มีค่าน้อยลงก็จะทำให้ได้ชิ้นงานที่เป็นมุมแหลมมากขึ้น การที่ขนาดของเครื่องมือมีขนาดใหญ่ขึ้นและความกว้างของช่องแม่พิมพ์แคบลงจะส่งผลให้ช่องว่างภายในแม่พิมพ์ (die cavity) ถูกลดปริมาตรลงเช่นกัน แม่พิมพ์จะเป็นตัวบังคับให้เกิดการดัดเป็นมุมแหลมได้ขึ้น

อิทธิพลของเครื่องมือต่อมุมตัดของชิ้นงานถูกพิจารณาโดยใช้หลักการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (sensitivity analysis) จากสมการ (1) ค่าความอ่อนไหวของมุมตัด (λ) สามารถคำนวณได้และแสดงผลลัพธ์ในภาพ 8 ผลการคำนวณสอดคล้องกับการวิเคราะห์กระบวนการตัดขึ้นรูป โดยแสดงให้เห็นว่าที่มุมตัดจะมีค่าน้อยลง (เป็นมุมแหลม

มากขึ้น) ในกรณีที่ขนาดของเครื่องมือ (ขนาดรัศมีของฟันซ์ และรัศมีของแม่พิมพ์) ใหญ่ขึ้น และในกรณีที่ความกว้างของช่องแม่พิมพ์น้อยลง กรณีเหล่านี้จะให้ค่าความอ่อนไหวของมุมตัด (λ) ที่สูง ดังนั้นในกระบวนการตัดขึ้นรูปแบบ 3 จุด ความสัมพันธ์ของมุมตัดกับระยะกดของฟันซ์จะเปลี่ยนแปลงตามขนาดของเครื่องมือที่ใช้

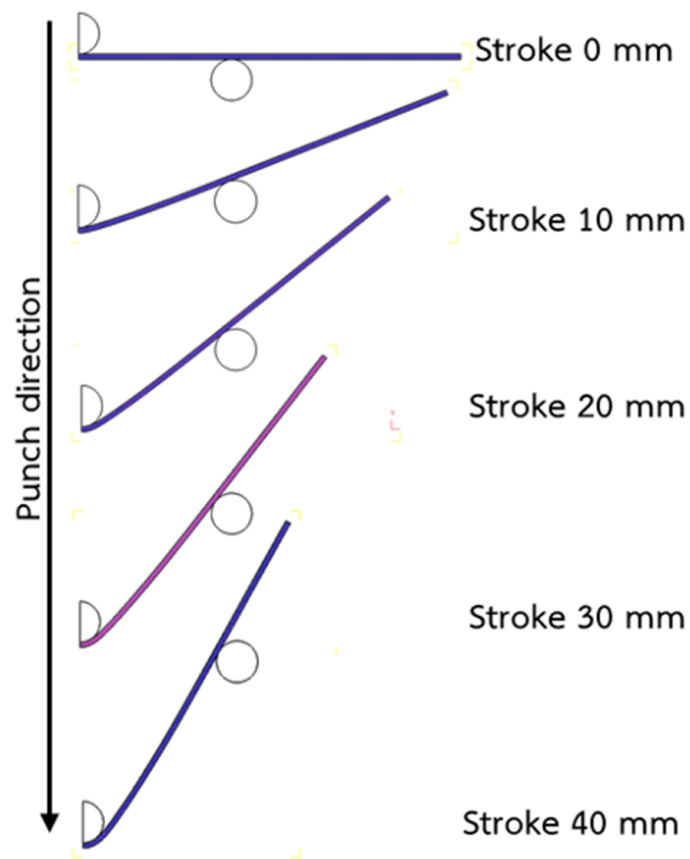


ภาพ 4 แบบจำลองกระบวนการตัดแบบ 3 จุด

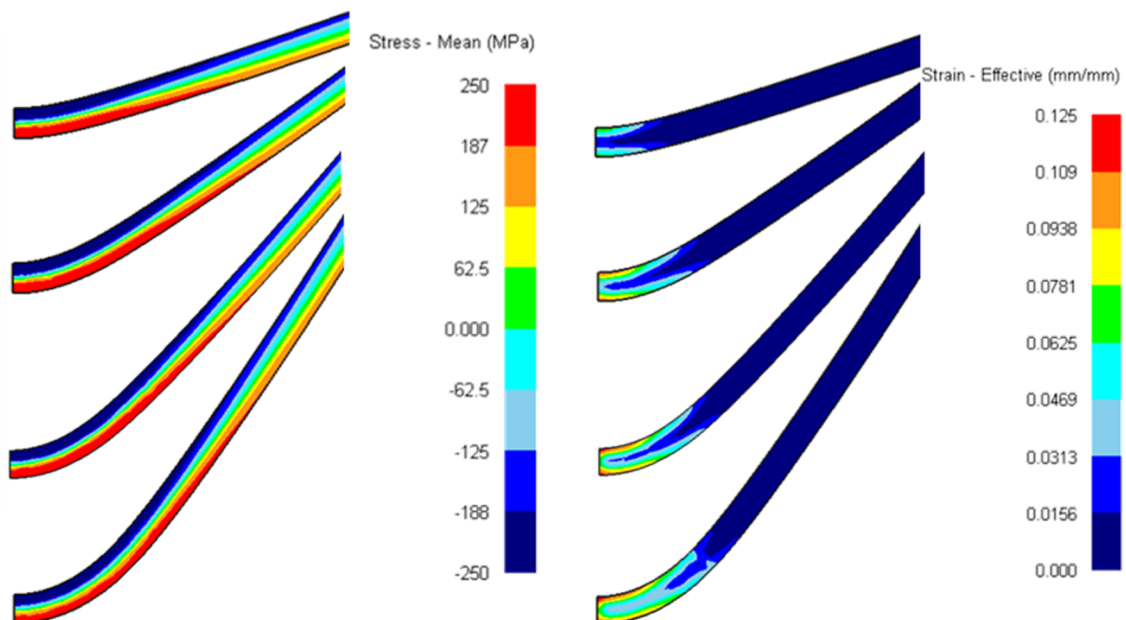
ตาราง 4

เงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองกระบวนการตัดขึ้นรูป (boundary conditions)

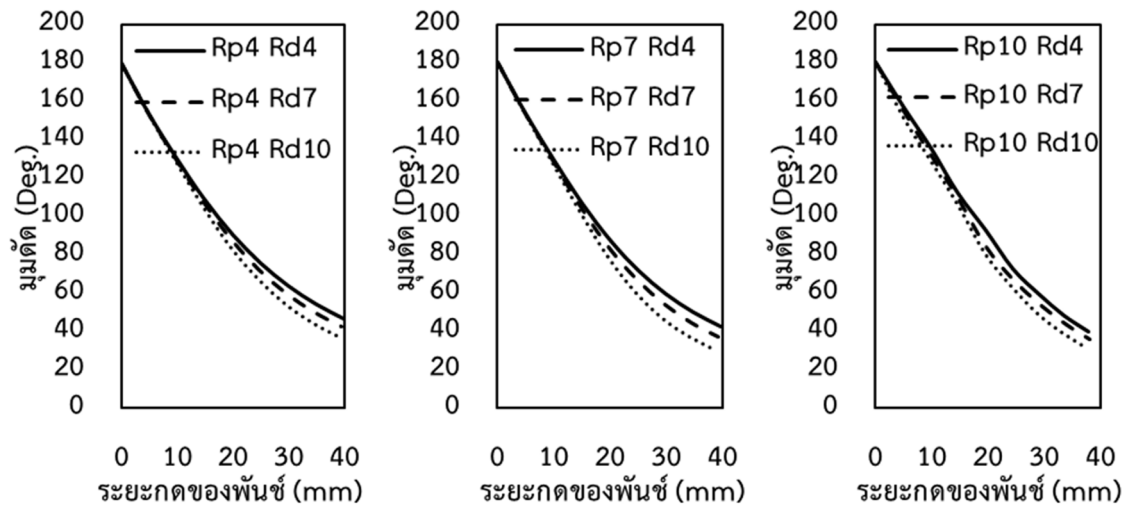
เงื่อนไข	รายละเอียด
แบบจำลอง	
รูปแบบของแบบจำลอง	2D ½ model
ชิ้นงาน	
ชนิดของวัสดุ	AA1100
เส้นโค้งความเค้น-โหลของวัสดุ	DEFORM2D
ชนิดของเอลิเมนต์	2D quad element
จำนวนของเอลิเมนต์	3,000 elements
เครื่องมือ	
ชนิดของฟันซ์และแม่พิมพ์	Rigid body
เงื่อนไขการขึ้นรูป	
ความเร็วของฟันซ์	1 mm/s
ระยะกดสูงสุดของฟันซ์	40 mm
ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ)	0.1



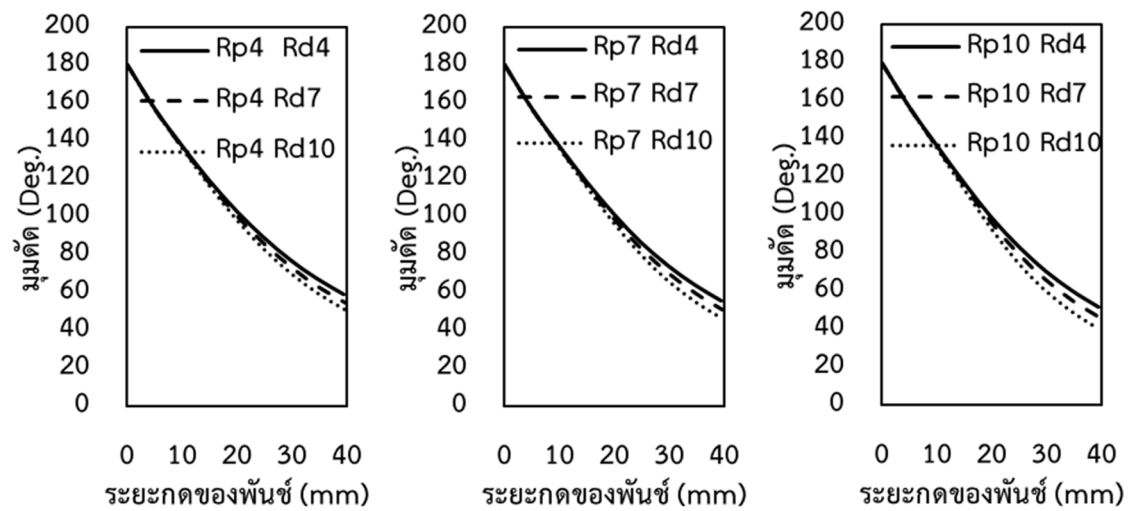
ภาพ 5 ผลลัพธ์การจำลองกระบวนการดัดขึ้นรูป (เงื่อนไข Rp 4 mm Rd 4 mm และ W 60 mm)



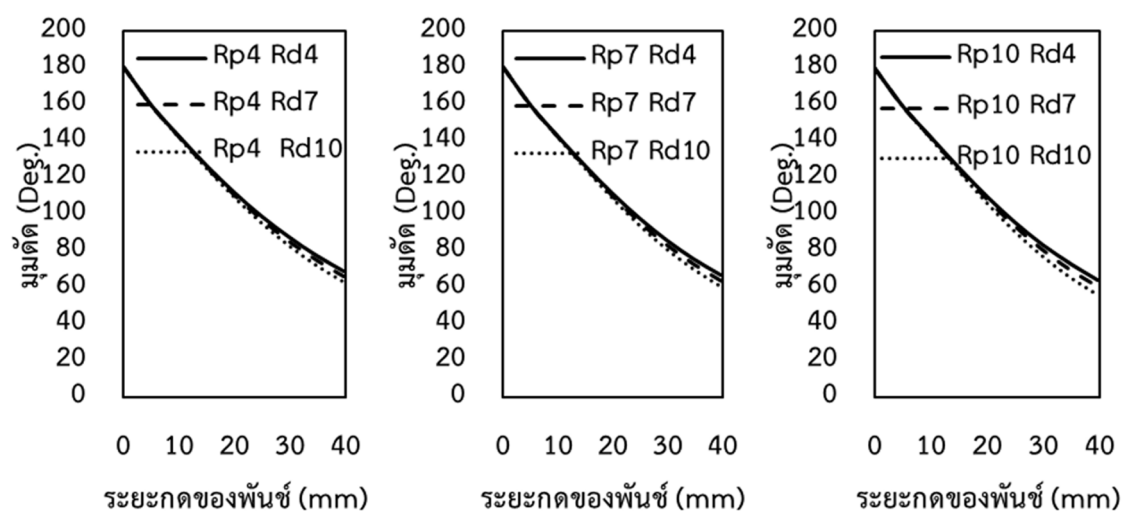
ภาพ 6 ผลลัพธ์การจำลองกระบวนการดัดขึ้นรูป (เงื่อนไข Rp 4 mm Rd 4 mm และ W 60 mm) (ก) ค่าความเค้นเฉลี่ย (mean stress) และ (ข) ค่าความเครียดประสิทธิผล (effective strain)



(ก)

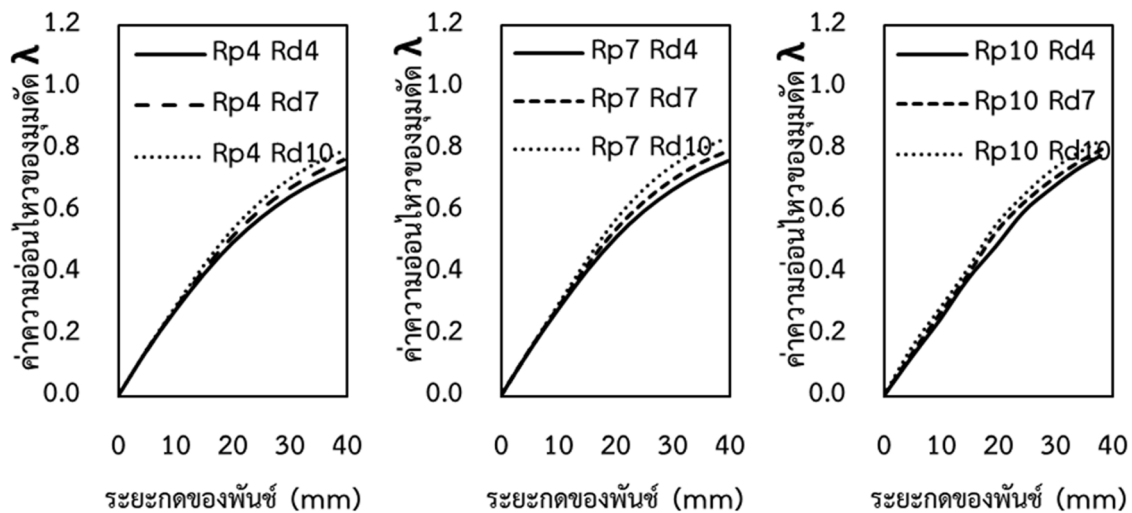


(ข)

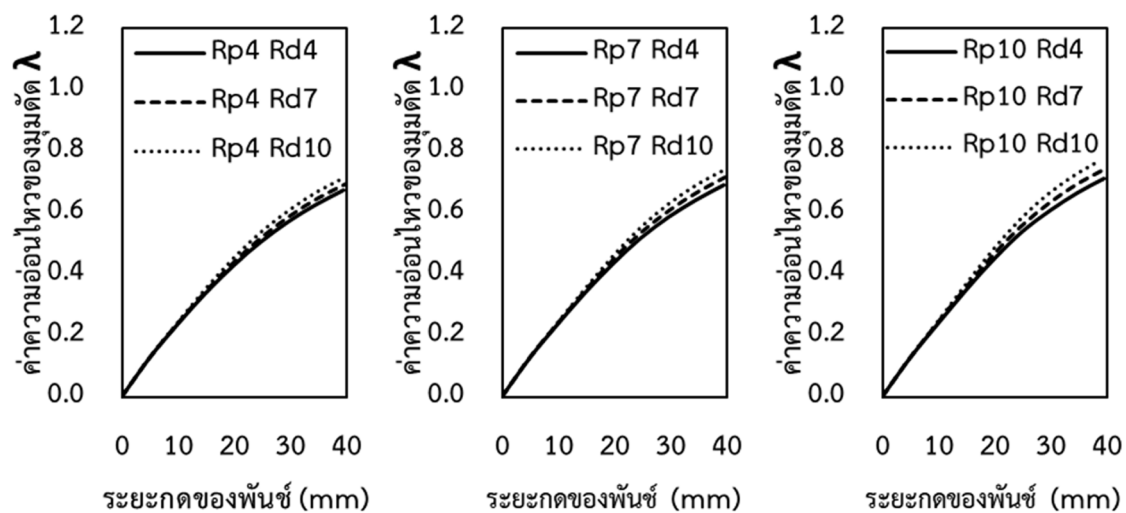


(ค)

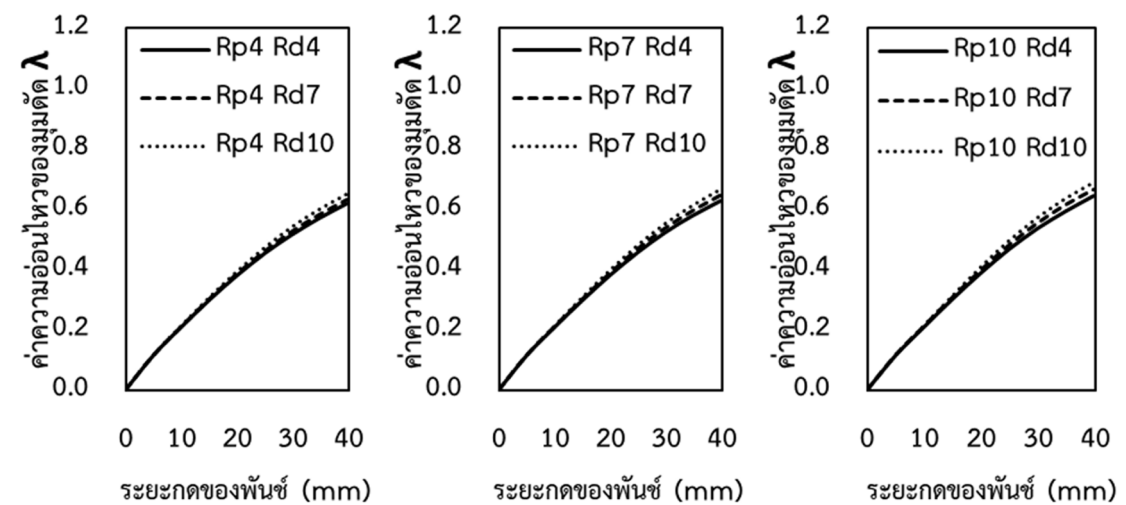
ภาพ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตัดกับระยะกดของฟันซ์ (ก) W 50 mm (ข) W 60 mm และ (ค) W 70 mm



(ก)



(ข)



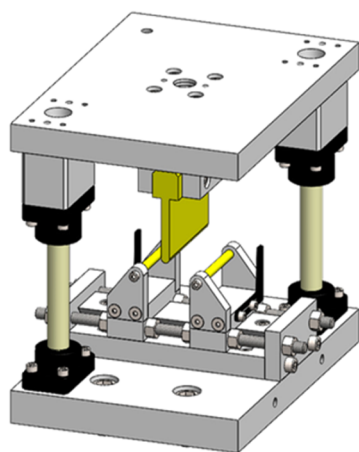
(ค)

ภาพ 8 ค่าความอ่อนไหวของมุมตัด (ก) W 50 mm (ข) W 60 mm และ (ค) W 70 mm

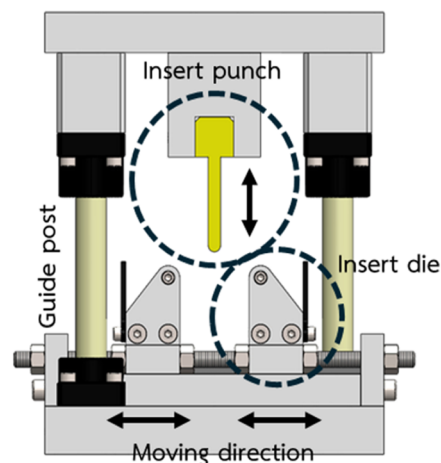
การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ตัดขึ้นรูปตัววีแบบปรับค่าได้

ภาพ 9 แสดงชุดแม่พิมพ์ที่ถูกพัฒนาสำหรับกระบวนการตัดขึ้นรูปแบบ 3 จุด ส่วนประกอบหลักได้แก่ ชุดฟันซ์ ชุดแม่พิมพ์ตัวล่าง และชุดไกด์ เพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนขนาดของเครื่องมือทดสอบได้ Insert punch และ Insert die ถูกเลือกนำมาใช้งาน ทำให้ขนาดของรัศมีฟันซ์และรัศมีของแม่พิมพ์สามารถเลือกใช้ตามที่ต้องการได้ ที่ชุดแม่พิมพ์ตัวล่างสามารถเคลื่อนที่เข้าและออกได้บนร่องทางเหยี่ยว ทำให้สามารถตั้งค่าความกว้างของช่องแม่พิมพ์ได้ เมื่อได้ค่าความกว้างที่ต้องการจะใช้นัทสกรูล็อกตำแหน่งให้อยู่กับที่ขณะโดนกดขึ้นรูป นอกจากนี้ชุดเครื่องมือยังได้ติดตั้งเสา Guide post เป็นตัวประคองการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของแม่พิมพ์ตัวบน ทำให้แม่พิมพ์มีการเคลื่อนที่ร่วมศูนย์กันในการตัดขึ้นงานแต่ละชิ้น

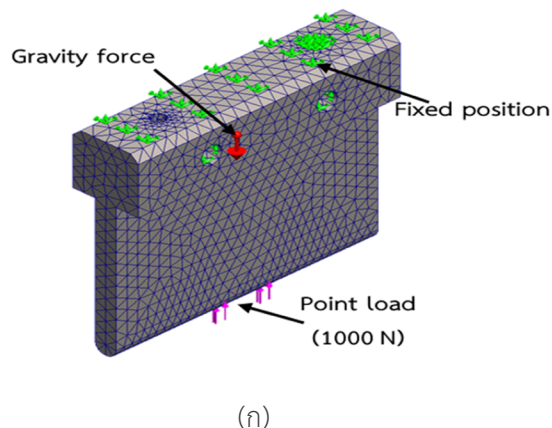
แบบจำลองของเครื่องมือที่ออกแบบถูกนำมาวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยโปรแกรม Solidworks simulation แบบจำลองของชุด Insert punch และ Insert die แสดงในภาพ



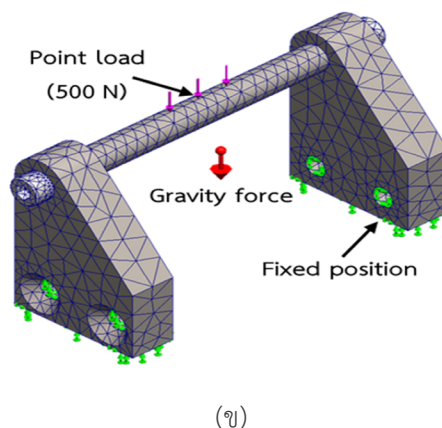
10 วัสดุที่นำมาสร้างเครื่องมือ คือ เหล็กกล้า AISI1045 มีค่าสมบัติทางกลดังนี้ค่าอัตราส่วนปัวซอง (poisson's ratio) ที่ 0.29 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (young's modulus) ที่ 205000 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และค่าความแข็งแรงที่จุดคราก (yield strength) ที่ 530 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ในการคำนวณจะกำหนดให้วัสดุมีลักษณะแบบ Isotropic elastic และสำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบ (boundary condition) เพื่อต้องการตรวจสอบความแข็งแรงของเครื่องมือขณะทำการขึ้นรูปจะกำหนดแรงกระทำแบบจุดกับเครื่องมือ (point load) ที่ขนาดแรงกดเท่ากับ 1000 นิวตัน และ 500 นิวตัน สำหรับชุด Insert punch และ Insert die ขนาดแรงกดนี้สูงกว่าแรงที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปเหล็กกล้าทั่วไปประมาณ 10 เท่า ซึ่งสามารถครอบคลุมแรงตัดขึ้นรูปวัสดุชนิดอื่น ๆ ได้ การกำหนดการจับยึดจะเลียนแบบของจริงโดยชุด Insert punch จะจับยึดที่ผิวด้านบนและชุด Insert die จะจับยึดที่ผิวด้านล่าง ในการคำนวณเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมถูกสร้างบนชิ้นงาน



ภาพ 9 โมเดลแม่พิมพ์ตัดรูปตัววีแบบปรับค่าได้

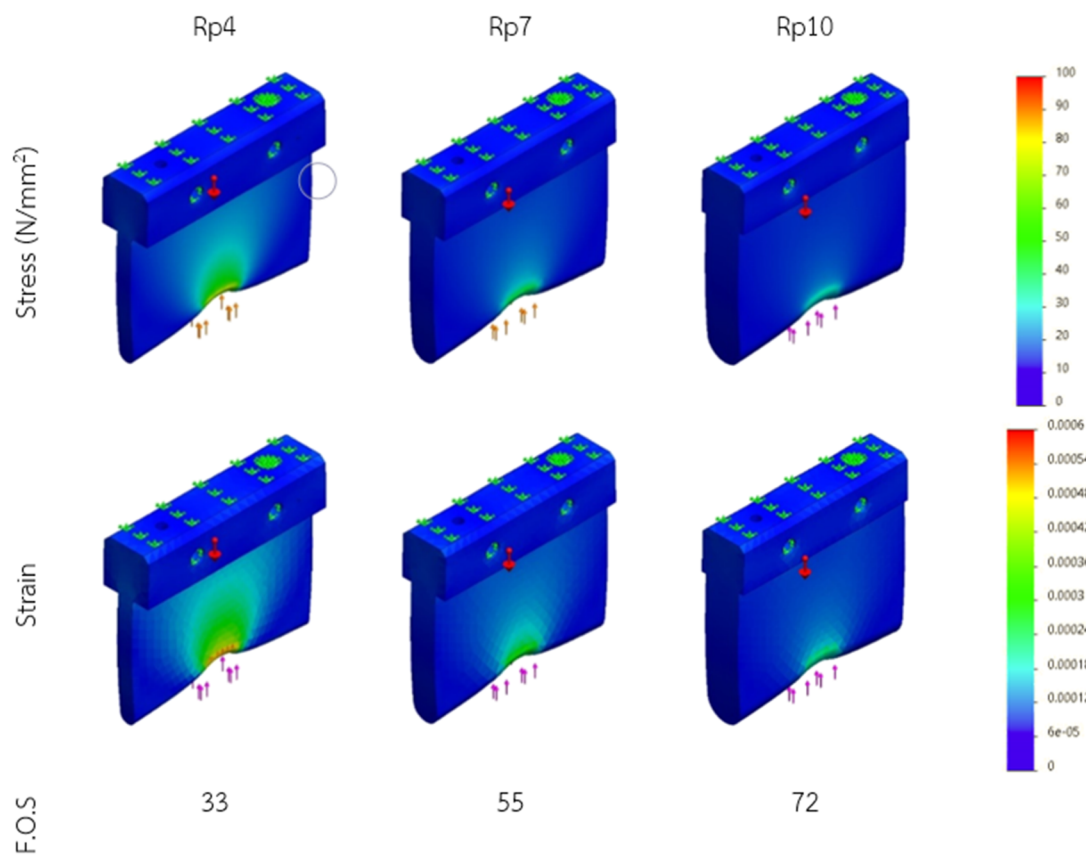


(ก)

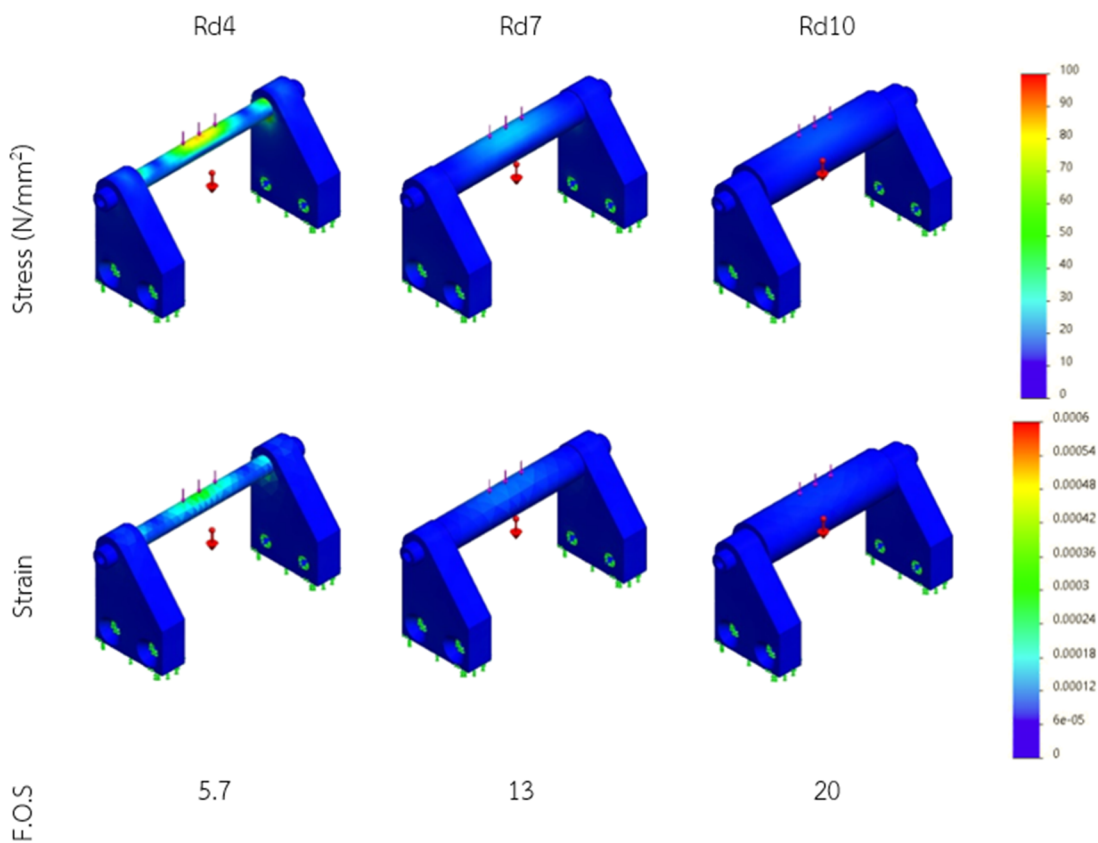


(ข)

ภาพ 10 เงื่อนไขขอบของแบบจำลอง (ก) ชุด Insert punch และ (ข) ชุด Insert die



ภาพ 11 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแข็งแรงของชุด Insert punch



ภาพ 12 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแข็งแรงของชุด Insert die

ผลการวิเคราะห์ตามหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุด Insert punch แสดงในภาพ 11 แบบจำลองได้เปลี่ยนค่ารัศมีของเครื่องมือที่ 4, 7 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าค่าความเค้นที่เกิดจากแรงภายนอกกระทำมีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุเหล็กกล้า AISI1045 โดยที่ค่ารัศมี 4 7 และ 10 มิลลิเมตร ค่าความเค้นสูงสุดที่ 15.97 9.70 และ 7.31 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ความเค้นทั้งหมดที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงการเสียรูปแบบอีลาสติก ปริมาณการเสียรูปแสดงผลโดยใช้ค่าความเครียดพบที่ค่ารัศมี 4 7 และ 10 มิลลิเมตร มีค่าสูงสุดเท่ากับ 5.43×10^{-5} 3.16×10^{-5} และ 2.43×10^{-5} ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยมาก การคำนวณค่าความปลอดภัยทางวิศวกรรมของทุกเงื่อนไขพบว่ามีความมากกว่า 2.5 ซึ่งมากกว่างานออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่วไป ผลรวมการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชุด Insert punch สามารถใช้งานได้ตามภาระที่กำหนดโดยไม่เกิดการเสียรูปแบบถาวร

ภาพ 12 แสดงผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชุด Insert die โดยแบบจำลองมีการปรับเปลี่ยนค่ารัศมีที่ 4 - 10 มิลลิเมตร แรงกระทำที่กึ่งกลางของแม่พิมพ์ในชิ้นงานประกอบพบว่า บริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุดคือบริเวณที่กึ่งกลางเพลและบริเวณที่รองรับ Inset die แบบจำลองที่ใช้ค่ารัศมี 4 มิลลิเมตร ให้ค่าความเค้นสูงสุดที่ 93.70 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ซึ่งยังคงมีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นที่จุดครากของ AISI1045 ค่าความเค้นสัมพันธ์กับค่าความเครียด ที่รัศมีเล็กสุดให้ค่าความเครียดสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.97×10^{-5} การเปรียบเทียบค่าความปลอดภัยทางวิศวกรรมในทุกเงื่อนไขมีความมากกว่า 2.5 ซึ่งยอมรับได้ชุด Insert die มีความแข็งแรงเพียงพอในการใช้งาน

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของชุดแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปพบว่า มีความแข็งแรงและสามารถใช้เป็นอุปกรณ์ดัดขึ้นรูปชิ้นงานได้ ลำดับถัดไปคือการสร้างและผลิตแม่พิมพ์ดัดตามแบบ โครงสร้างและชิ้นส่วนต่าง ๆ ทำมาจากเหล็กกล้า AISI1045 ชิ้นส่วนมาตรฐานถูกนำมาใช้ประกอบ

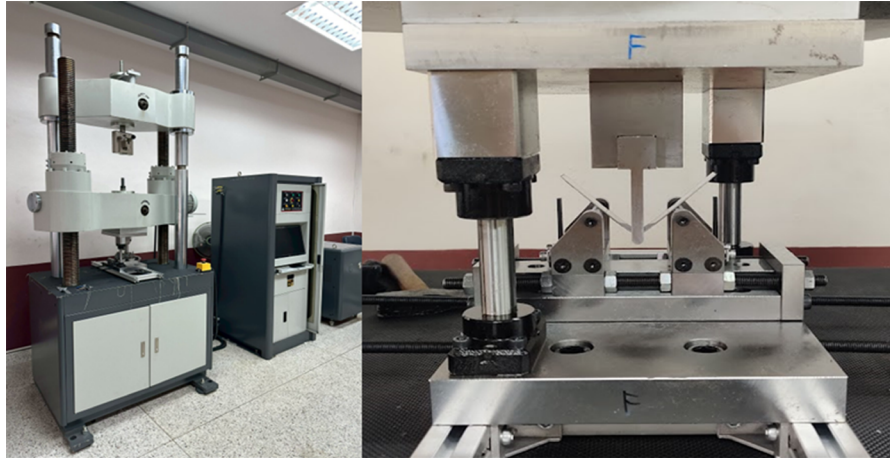
ตัวแม่พิมพ์ ภาพ 13 แสดงการติดตั้งชุดเครื่องมือกับเครื่องทดสอบแรงดึง

ผลการทดสอบการดัดขึ้นรูปชิ้นงานจริง (bending experiments)

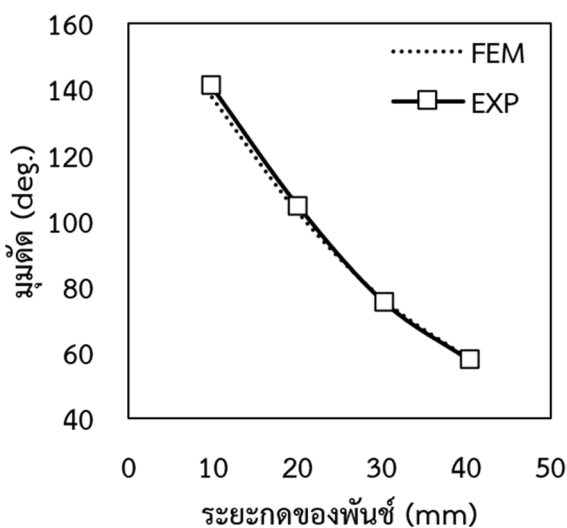
การตรวจสอบเครื่องมือ (tool validation)

การทดสอบดัดขึ้นรูปชิ้นงานเป็นรูปตัววีโดยขนาดของเครื่องมือถูกกำหนดดังแสดงในตาราง 2 การทดลองนี้กำหนดค่ารัศมีของ 펀ช์ ค่ารัศมีของแม่พิมพ์ และค่าความกว้างของช่องแม่พิมพ์เท่ากับ 4 4 และ 60 มิลลิเมตร ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบคือแผ่นอลูมิเนียมชนิด AA1100 ที่มีค่าความหนาแผ่นโลหะเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ทดสอบดัดขึ้นรูปโดยใช้ระยะกดของ 펀ช์ที่ 10 20 30 และ 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ แต่ละเงื่อนไขจะถูกทดลองซ้ำอย่างละ 5 ชิ้น จากนั้นทำการวัดมุมดัดของชิ้นงานตอนอยู่ในแม่พิมพ์ อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่ามุมดัด คือ ไบวดมูมดิจิตอล (digital projector) ที่มีค่าความแม่นยำที่ 0.01 องศา นำมุมที่วัดได้เทียบกับค่ามุมที่ได้จากการจำลองกระบวนการดัดขึ้นรูปโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาพ 14 แสดงค่ามุมดัดของชิ้นงานที่ระยะกดแตกต่างกัน เมื่อระยะกดของ 펀ช์เพิ่มขึ้นจะพบว่า มุมดัดของชิ้นงานจะน้อยลงหรือเป็นมุมแหลมมากขึ้น ผลลัพธ์การดัดขึ้นรูปตัววีเหมือนกับผลการทดลองของจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง Aday (2019) และ Kut et al. (2023) แนวโน้มของผลการทดลองจริงสอดคล้องกับผลลัพธ์จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ค่ามุมดัดที่วัดได้ใกล้เคียงกับค่าการจำลองกระบวนการขึ้นรูป โดยมีค่าความแตกต่างไม่เกิน 3% การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า เครื่องมือดัดขึ้นรูปชิ้นงานที่ออกแบบสามารถทำงานได้จริง เครื่องมือมีความแข็งแรงโดยไม่เกิดการเสียรูปขณะดัดขึ้นรูปชิ้นงานทำให้ผลการทดลองมีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ



ภาพ 13 แม่พิมพ์ตัดรูปตัววีแบบปรับค่าได้



ภาพ 14 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

การศึกษาพฤติกรรมการดีดกลับ (springback behavior investigation)

เครื่องมือที่ถูกพัฒนาถูกนำมาใช้ศึกษาพฤติกรรมการดีดกลับของโลหะแผ่นในกระบวนการตัด เจื่อนไขการทดสอบแสดงในตาราง 3 โลหะแผ่น 2 ชนิดถูกนำมาทดสอบได้แก่อลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI1005 ซึ่งมีค่าความหนาที่ 1 มิลลิเมตร ทำการดัดขึ้นรูปโดยใช้ค่าระยะกดของพินซ์ในช่วง 10-40 มิลลิเมตร มุมดัดของชิ้นงานก่อนและหลังเกิดการดีดกลับถูกวัดค่าและนำมาเปรียบเทียบกัน การทดลองจะทำซ้ำเงื่อนไขละ 5 ชิ้น

ภาพ 15 แสดงการเปรียบเทียบมุมดัดที่เกิดขึ้นของทั้ง 2 วัสดุ ทำการวัดค่ามุมภายหลังการขึ้นรูปเสร็จที่ให้เกิดการดีดกลับแล้ว พบว่า เมื่อเกิดการดีดกลับจะทำให้

มุมดัดของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปโดยมีขนาดของมุมที่เพิ่มขึ้นภายใต้เงื่อนไขการทดสอบเดียวกันนั้นวัสดุอลูมิเนียมแสดงการดีดกลับมากกว่าเหล็กกล้า สาเหตุของการดีดกลับเกิดมาจากการคืนตัวของวัสดุในช่วงอีลาสติก (elastic recovery) ตอนทำการดัดชิ้นงานนั้นการเสียรูปทั้งหมดจะประกอบไปด้วยการเสียรูปแบบอีลาสติกและพลาสติก ผลจากการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงการเสียรูปที่เกิดขึ้นได้ สำหรับปริมาณการเสียรูปที่เกิดขึ้นนั้นถึงแม้เหล็กกล้าจะมีความแข็งแรงมากกว่า แต่อลูมิเนียมมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นน้อยกว่า ซึ่งมีค่าน้อยกว่าของเหล็กกล้าประมาณ 3 เท่า วัสดุที่มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นต่ำจะทำให้มีช่วงการเสียรูปในช่วงอีลาสติกที่กว้างกว่า ทำให้เมื่อเกิดการขึ้นรูปชิ้นงานจะสามารถเกิดการคืนตัวของช่วงอีลาสติกได้มากกว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับผลงานวิจัยอื่น ๆ ที่พบว่า อลูมิเนียมมีการดีดกลับมากกว่าเหล็กกล้า (Aday, 2019)

การชดเชยการดีดกลับ (springback compensation)

ปัญหาการดีดกลับในกระบวนการดัดส่งผลต่อขนาดและรูปร่างที่ไม่ได้คุณภาพในการเอาไปใช้งานต่อ ดังนั้นการชดเชยการดีดกลับจึงได้ถูกศึกษา วิธีการ Overbending ในการดัดชิ้นงานแบบ 3 จุด สามารถทำได้โดยเพิ่มค่าระยะกดของพินซ์ เพื่อเป็นการทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปแบบพลาสติกมากขึ้น ทำให้การดีดกลับเกิดขึ้นน้อยลงหรือเมื่อเกิดการดีดกลับแล้วจะได้ขนาดตามที่ต้องการ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมการดีดกลับกับระยะกดของพินซ์ในภาพ 15 สามารถสร้างเป็นสมการตัวเลขได้แสดงในสมการที่ (3) และ (4) สำหรับอลูมิเนียมและเหล็กกล้าตามลำดับ โดยค่า R-square (R^2) ของทั้ง 2 สมการมีค่าเท่ากับ 0.995 กับ 0.997 สำหรับสมการที่ (3) และ (4)

$$\theta_{AI} = 0.0429x^2 - 4.5271x + 188.51 \quad (3)$$

$$\theta_{SI} = 0.0218x^2 - 3.4295x + 167.71 \quad (4)$$

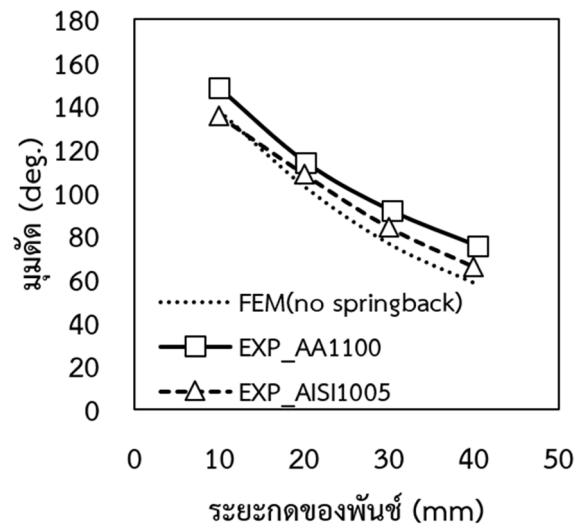
โดยที่ x คือ ระยะกดของพินซ์ที่พิจารณาการตีดกลับ (มิลลิเมตร)

θ_{AI} คือ มุมการตีดกลับของ AA1100 (องศา)

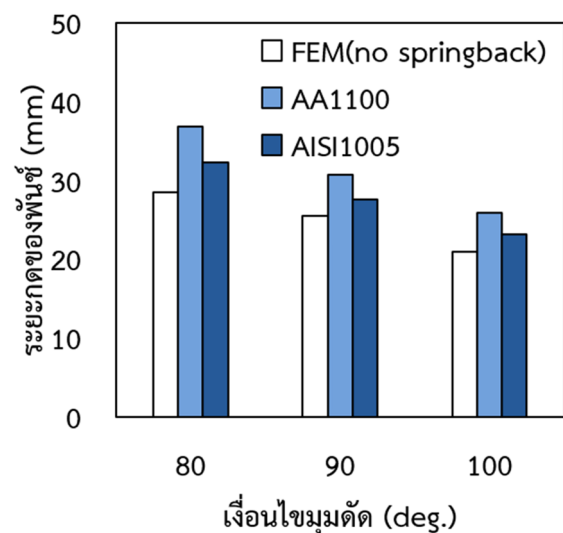
θ_{SI} คือ มุมการตีดกลับของ AISI1005 (องศา)

การทดสอบการชดเชยการตีดกลับในกระบวนการดัดชิ้นงานรูปตัววีโดยใช้เครื่องมือที่ถูกพัฒนา เงื่อนไขการทดสอบแสดงในตาราง 3 จะทดลองดัดชิ้นงานให้ได้มุมดัดที่ 80 90 และ 100 องศา ภาพ 16 แสดงการเปรียบเทียบค่าระยะกดของพินซ์ที่ต้องใช้ โดยได้มาจากการใช้สมการคำนวณค่าระยะกดใหม่ที่พิจารณาพฤติกรรมตีดกลับ การชดเชยการตีดกลับจะต้องใช้ระยะกดที่เพิ่มขึ้น โดยอนุมานนิยมที่มีการตีดกลับมากกว่าจะใช้ระยะกดที่มากกว่าเล็กน้อย

การทดลองซ้ำเงื่อนไขละ 5 ชิ้น ชิ้นงานที่ผ่านการดัดถูกวัดค่ามุมดัดที่เกิดขึ้นภาพหลังการตีดกลับแสดงในภาพ 17 การเปรียบเทียบค่ามุมดัดภายหลังการเสร็จสิ้นการตีดกลับแสดงในภาพ 18 พบว่า ทั้งสองวัสดุที่ใช้ระยะกดของพินซ์ใหม่ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการสามารถชดเชยการตีดกลับได้ ค่ามุมที่ได้ใกล้เคียงกับที่ต้องการ ผลการทดลองพบว่า ค่าความแตกต่างของมุมดัดไม่เกิด 1 องศาในแต่ละเงื่อนไขของการทดลอง เครื่องมือดัดรูปตัววีแบบปรับค่าได้นอกจากใช้ดัดชิ้นงานยังสามารถใช้ศึกษาวิธีการชดเชยการตีดกลับได้เช่นกัน



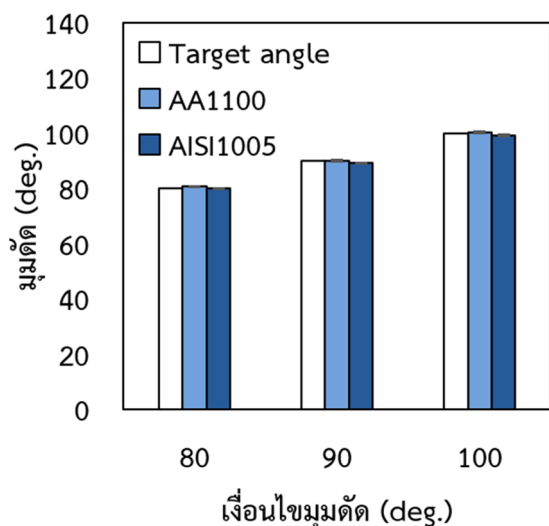
ภาพ 15 พฤติกรรมการตีดกลับภายหลังการดัดชิ้นรูป



ภาพ 16 การชดเชยการตีดกลับแบบ Overbending



ภาพ 17 การวัดค่ามุมดัดภายหลังการขึ้นรูป



ภาพ 18 การเปรียบเทียบมุมดัดภายหลังขดเซกการตีกลับ

สรุปผลการวิจัย

กระบวนการดัดขึ้นงานเป็นรูปตัววีด้วยวิธีการดัดแบบ 3 จุด (3-point bending) นั้นขนาดของเครื่องมือสามารถส่งผลโดยตรงมุมดัดบนขึ้นงานได้ ตัวแปรที่สำคัญได้แก่ค่ารัศมีของพังก์ (Rp) ค่ารัศมีของแม่พิมพ์ (Rd) และค่าความกว้างของแม่พิมพ์ (W) การจำลองกระบวนการดัดขึ้นรูปด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM simulation) ควบคู่กับการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (sensitivity analysis) แสดงให้เห็นว่ามุมดัดจะเล็กลงเมื่อระยะกอดของพังก์และขนาดของพังก์/แม่พิมพ์มีค่ามากขึ้น, ในขณะที่ช่องว่างของแม่พิมพ์น้อยลง แม่พิมพ์ดัดรูปตัววีแบบปรับค่าได้ถูกออกแบบและสร้างเพื่อประโยชน์การรองรับการดัดขึ้นรูปภายใต้เงื่อนไขที่ใช้ขนาดแม่พิมพ์ที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์

ความแข็งแรงตามหลักการทางวิศวกรรมพบว่าชิ้นส่วนของแม่พิมพ์สามารถทำงานได้โดยไม่มีความเสียหายจากการดัด การตรวจสอบการทำงานของแม่พิมพ์ดัดโดยใช้การทดสอบดัดขึ้นรูปขึ้นงานจริงแสดงให้เห็นว่า ค่ามุมดัดจากการวัดมีค่าใกล้เคียงกับค่ามุมดัดจากการจำลองกระบวนการขึ้นรูป ให้ค่าความแตกต่างของมุมดัดน้อยกว่า 3% ในทุกเงื่อนไข เครื่องมือที่พัฒนามีความน่าเชื่อถือและให้ผลการทดลองที่แม่นยำ นอกจากนี้แม่พิมพ์ดัดถูกนำมาใช้ศึกษาพฤติกรรมการตีกลับของโลหะแผ่นอลูมิเนียม AA1100 กับเหล็กกล้า AISI1005 พบว่า อลูมิเนียมที่มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (young's modulus) น้อยกว่าแสดงค่ามุมการตีกลับที่มากกว่าเหล็กกล้า ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการตีกลับกับระยะกอดของพังก์ถูกนำมาสร้างสมการทำนายพฤติกรรมการตีกลับของวัสดุแต่ละชนิด ระยะกอดของพังก์ใหม่ที่พิจารณาการตีกลับถูกคำนวณและทดลองดัดขึ้นงานให้ได้มุม 80, 90 และ 100 องศา พบว่า สามารถขดเซกการตีกลับได้ โดยค่าความแตกต่างของมุมที่เกิดขึ้นไม่เกิน 1 องศา ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง สำหรับวัสดุทั้ง 2 ชนิด แสดงแนวโน้มการลดลงของการตีกลับเหมือนกัน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ รศ.ดร.ยิ่งยศ เอื้ออุฬาร อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและกระบวนการผลิต คณะบัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตรนานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนโปรแกรม DEFORM2D เป็นเครื่องมือสำหรับการทำวิจัย

References

- Aday, A. J. (2019). Analysis of springback behavior in steel and aluminum sheets using FEM. *Annales de Chimie: Science des Materiaux*, 43(2), 95-98. <https://doi.org/10.18280/acsm.430205>
- Alhammadi, A., Rafique, H., Alkaabi, M., & Qudeiri, J. A. (2018). Experimental investigation of springback in air bending process. *Materials Science and Engineering*, 323, 012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/323/1/012021>
- Billur, E., & Altan, T. (2010). *Challenges in forming advanced high strength steels*. Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing (ERC/NSM). <https://bit.ly/4fBLqVL>

- Boonchua, N., & Thanakijkasem, P. (2012). Springback control by applying drawbead in u-channel forming [In Thai]. *The Journal of KMUTNB*, 22(3), 572-581.
<https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/kmutnb-journal/article/view/16163/14677>
- Gupta, T. R. (2017). Effect of tooling parameters on bending force in air bending of CR4 steel. *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 12(3), 375-388.
<https://dx.doi.org/10.37622/IJTAM/12.3.2017.375-388>
- Karabulut, S., Esen, I., & Sahin, E. (2024). Springback prediction performance and experimental analysis in the v-bending process of SCGADUB1180 advanced high strength steel. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 18(2), 441-453. <https://doi.org/10.59038/jjmie/180216>
- Kut, S., Pasowicz, G., & Stachowicz, F. (2023). On the springback and load in three-point air bending of the AW-2024 aluminium alloy sheet with AW-1050A aluminium cladding. *Materials*, 16, 2945.
<https://doi.org/10.3390/ma16082945>
- Lange, K. (1985). *Handbook of metal forming*. McGraw-Hill.
- Nur, R., Suyut, M. A., & Iswar, M. (2023). Press tool for the v-bending process of stainless steel plate: designing and manufacturing. *AIP Conference Proceedings*, 2719, 050001.
<https://doi.org/10.1063/5.0133291>
- Pornputsiri, N. (2017). Effect of process parameters on springback behavior during air bending of aluminum alloy sheet AA6061 [In Thai]. *RMUTP Research Journal Sciences and Technology*, 11(2), 155–166. <https://doi.org/10.14456/jrmutp.2017.30>
- Thipprakmas, S. (2010). Finite element analysis on v-die bending process. In D. Moratal (Ed.), *Finite element analysis* (pp. 407-428). Sciyo. <https://doi.org/10.5772/10220>
- Wang, J., Verma, S., Alexander, R., & Gau, J.T. (2008). Springback control of sheet metal air bending process. *Journal of Manufacturing Processes*, 10(1), 21-27.
<https://doi.org/10.1016/j.manpro.2007.09.001>
- Watcharasresomroeng, B., Khunead, C., Kanjanakarn, P., & Kumjing, S. (2022). V-bending of sheet metal with a polymer die by selective laser sintering technology [In Thai]. *Journal of Manufacturing & Management Technology*, 1(1), 70–77.
<https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jMMT/article/view/248830>
- Zhang, Q., Felder, E., & Bruschi, S. (2009). Evaluation of friction condition in cold forging by using T-shape compression test. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 5720–5729.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.06.002>

