

อิทธิพลของแอนไอโซทรอปิกที่มีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่น ด้วยการทดสอบการขยายรู

Influence of plastically anisotropic on formability in sheet metal using hole expansion test

ธราทิป ชัยมงคล^{1*} มนตรี เรืองประดับ¹ และ ทนงศักดิ์ บุญญาณ²

Taratip Chaimongkon^{1*}, Montri Ruangpradap¹ and Tanongsak Bunyan²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของพฤติกรรมแอนไอโซทรอปิกของวัสดุที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนการขยายรู (hole expansion ratio: HER) ของโลหะแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น เกรด SPCC เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 และอะลูมิเนียม เกรด AA1100 ความหนา 1.20 มิลลิเมตร โดยการทดสอบการขยายรู (hole expansion test) ตามมาตรฐาน ISO-16630 มีพื้นที่ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร แบบปลายตัดและแบบกรวย 60 องศา ใช้ร่วมกับด้ายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 52.70 มิลลิเมตร และมีแผ่นขึ้นงานทดสอบขนาด 150×150 มิลลิเมตร เจาะรูตรงกลางขนาด 10 มิลลิเมตร หลังจากการทดสอบขึ้นรูปขึ้นงานจนปริแตกวัดขนาดรูเจาะของขึ้นงานทดสอบที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นค่าอัตราส่วนการขยายรูที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนการขยายรูบนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48 และวัดค่าความเครียดหลักและรอง (major and minor strains) ในทิศทางของขึ้นรูปทดสอบตามแนวการรีด ทแยงแนวรีดและขวางแนวรีดตามลำดับ (rolling, diagonal and transverse rolling) เพื่อหาค่าอัตราส่วนการขยายรูแบบแอนไอโซทรอปิกและพฤติกรรมความเป็นแอนไอโซทรอปิกของวัสดุบนแผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ผลการวิจัยพบว่า การทดสอบการขยายรูด้วยพื้นที่แบบปลายตัดและแบบกรวย 60 องศา ที่ 0, 45 และ 90 องศา กับทิศทางแนวรีด วัสดุ SPCC มีค่าอัตราส่วนการขยายรู เท่ากับ 112.72, 100.56, 115.96, 150.24, 141.16 และ 152.92 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ วัสดุ SUS304 มีค่าอัตราส่วนการขยายรู เท่ากับ 30.04, 44.48, 32.36, 38.76, 51.48 และ 39.12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และวัสดุ AA1100 มีค่าอัตราส่วนการขยายรูเท่ากับ 15.68, 20.78, 20.22, 20.65, 22.48 และ 23.65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

คำสำคัญ: การทดสอบการขยายรู อัตราส่วนการขยายรู แอนไอโซทรอปิก

Abstract

This research aimed to study the effect of anisotropic behavior of materials on the hole expansion ratio (HER) in cold rolled carbon steel sheets, grade SPCC, stainless steel, grade SUS304, and aluminum, grade AA1100 with thickness of 1.20mm. The hole expansion test is considered according to the ISO-16630 standard with both dimension cylindrical flat punch and conical punch at 60 degrees with a 50mm and diameter die of 52.70mm. Square sheets 150×150mm were pierced within 10mm at the center hole. After the test workpiece was formed until it cracked, the changed hole size of the test piece was measured to be the hole expansion ratio obtained from the experiment compared with the hole expansion ratio based on Hill's 48 anisotropic yield criterion. The major and minor strains in the direction of the test piece were measured as diagonal and transverse rolling along the rolling direction, respectively, in order to determine the anisotropic hole expansion ratio and the anisotropic behavior of the material on the forming limit diagrams. As a result, hole expansion tests were conducted using a flat punch and a conical punch at 60 degrees and coupled anisotropic three-direction (i.e., 0°, 45° and 90°) relative to the rolling direction. The hole expansion

¹ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

¹ Faculty of Industrial Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author. E-mail: Taratip_cha@nstru.ac.th

ratios of SPCC material were 112.72, 100.56, 115.96, 150.24, 141.16 and 152.92%, respectively. The hole expansion ratios of SUS304 material were 30.04, 44.48, 32.36, 38.76, 51.48 and 39.12%, respectively. The hole expansion ratios of AA1100 material were 15.68, 20.78, 20.22, 20.65, 22.48 and 23.65%, respectively.

Keywords: hole expansion test, hole expansion ratio, anisotropic

บทนำ

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากโลหะแผ่นมีจำนวนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่มาใช้ในการพัฒนากระบวนการผลิตไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และอุตสาหกรรมเครื่องมือเครื่องใช้ในครัวเรือน เป็นต้น การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยแม่พิมพ์เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ด้วยโลหะแผ่นกันอย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามยังคงพบปัญหามากมายเกี่ยวกับกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยแม่พิมพ์ การดึงขึ้นรูปชิ้นงานที่ขอบ (flange drawing) เป็นอีกหนึ่งกระบวนการผลิตที่มักพบปัญหาจากการฉีกขาดบริเวณขอบรูปในระหว่างการขึ้นรูปซึ่งจะทำให้ชิ้นงานไม่ได้ตามขนาดที่ออกแบบไว้ การทดสอบการขยายรู (hole expansion test) เพื่อหาค่าอัตราส่วนการขยายรู (hole expansion ratio: HER) จึงเหมาะสำหรับประเมินความสามารถในการขึ้นรูปขยายรู (hole flangeability) เพราะจากสภาพความเค้นและความเครียดในการทดสอบนี้มีสภาพคล้ายคลึงกัน ซึ่งมีปัจจัยอยู่หลายประการที่ส่งผลต่อค่าอัตราส่วนของการขยายรู อาทิเช่น โครงสร้างและสมบัติทางกลของวัสดุ รูปร่างของพื้นที่และกรรมวิธีการเจาะรู (Paul, 2020a) จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสภาพแอนไอโซทรอปิกของวัสดุ (Chinara et al., 2021; Park et al., 2023; Abedini et al., 2024) มีผลกระทบต่ออัตราส่วนการขยายรูของโลหะแผ่น ทั้งรูปแบบการทดลองและการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Kuwabara et al., 2011; Iizuka et al., 2014) ในทำนองเดียวกันสภาพแอนไอโซทรอปิกของวัสดุ (Kacem et al., 2015; Soussi & Krichen, 2019) ยังมีผลต่อความแม่นยำของการขึ้นรูปขอบ (flange forming) อีกด้วย ซึ่งเมื่อกล่าวถึงสภาพแอนไอโซทรอปิกของวัสดุก็คือสมบัติทางกลของวัสดุที่มีการยืดหรือขยายตัวไม่เท่ากันในทุกทิศทางเมื่อมีแรงมากระทำเมื่อนำวัสดุดังกล่าวไปทำการขึ้นรูปการยืดตัวในแต่ละทิศทางจึงไม่เท่ากันโดยทั่วไปแล้วความสามารถในการขึ้นรูปด้วยการกดจะขึ้นอยู่กับสมบัติทางกลของวัสดุ เช่น ความเค้นคราก (yield strength) ความเค้นสูงสุด (ultimate tensile strength) และค่าสัดส่วนความเครียดพลาสติก (r-value) ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาได้มีการตีพิมพ์บทความหลายฉบับเกี่ยวกับผลกระทบของแอนไอโซทรอปิกต่อความสามารถในการขยายรู (Kuwabara et al., 2011; Korkolis et al., 2016; Kuwabara et al., 2017) และได้มีการนำเสนอเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกหลายประเภท (Hill, 1948; Barlat et al., 2003; Yoshida et al., 2013) ที่สามารถใช้งานได้จริงสำหรับการจำลองการขึ้นรูปด้วยการกด

ในงานนี้จึงได้ทำการทดสอบการขยายรูของโลหะแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น เกรด SPCC เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 และอะลูมิเนียม เกรด AA1100 ความหนา 1.20 มิลลิเมตร ปัจจัยที่เลือกวัสดุดังกล่าวเนื่องมาจากเป็นวัสดุโครงสร้างพื้นฐานที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องมือเครื่องใช้ในครัวเรือน อีกทั้งวัสดุทั้ง 3 ประเภทมีค่าสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิกที่แตกต่างกันคือ วัสดุ SPCC จะมีค่าสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิกที่แตกต่างกันมากที่สุด วัสดุ SUS304 จะมีค่าสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิกที่แตกต่างกันพอสมควร ส่วนวัสดุ AA1100 จะมีค่าสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิกที่ใกล้เคียงกันมาก โดยการทดสอบใช้กับพื้นที่สองชนิด ได้แก่ พื้นที่กรวย 60 องศา และพื้นที่ปลายเรียบ ทำการเจาะแผ่นขึ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ด้วยกระบวนการตัดเจาะรู (piercing) หลังจากนั้นได้ทำการขึ้นรูปด้วยการจำลองเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บนพื้นฐานเกณฑ์การครากของ Hill's-48 ควบคู่กับการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง และการนำพฤติกรรมแอนไอโซทรอปิกของวัสดุที่มีค่าสมบัติพลาสติกในแต่ละทิศทางที่ต่างกันมาช่วยในการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนของการขยายรูในทิศทางแนวรีดที่ 0, 45 และ 90 องศา จะช่วยให้

สามารถทราบค่าอัตราส่วนของการขยายรูที่แม่นยำตามมา อันเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการดึงขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขอบรู เพื่อประเมินความสามารถในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นก่อนขึ้นรูป ผลการวิจัยที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการขึ้นรูปที่มีการเจาะรูมาก่อนได้และยังสามารถเป็นฐานข้อมูลของวัสดุทั้ง 3 ชนิดสำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปชิ้นงานที่มีการเจาะรูมาก่อนในอนาคตได้

วิธีการศึกษา

1. การทดสอบการขยายรู

การทดสอบการขยายรูเป็นการดึงขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเจาะรูตรงกลางมาก่อน หลังจากนั้นจับยึดขอบให้แน่นโดยรอบ ใช้พื้นที่ขึ้นรูปผ่านดาวยะหว่างการทดสอบรูเจาะจะมีการขยายตัวออกจนปริแตก รอยร้าวที่ปรากฏขึ้นที่ขอบของรูเจาะหลังการขยายตัวใช้วัดสภาพเปลี่ยนรูปได้ของโลหะแผ่น ในรูปผลลัพธ์เปอร์เซ็นต์การขยายรู (percent hole expansion ratio: %HER) คำนวณได้ ดังสมการ (1) (Park et al., 2023)

$$HER\% = \frac{d_f - d_0}{d_0} \times 100 \quad (1)$$

ซึ่ง d_0 เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะเริ่มต้นและ d_f เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะหลังการเปลี่ยนรูปในงานวิจัยนี้ d_f จะใช้เป็นตัวเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะที่เกิดรอยแตกร้าวแต่ละทิศทางตามแนวรัศมี ซึ่งได้ดำเนินการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์สำหรับการทดสอบการขยายรูตามมาตรฐาน ISO 16630:2017 ใช้พื้นที่กรวย 60 องศา และพื้นที่ปลายเรียบ รายละเอียดชุดแม่พิมพ์ทดสอบความสามารถการขึ้นรูปขยายรู ดัง (Figure 1)

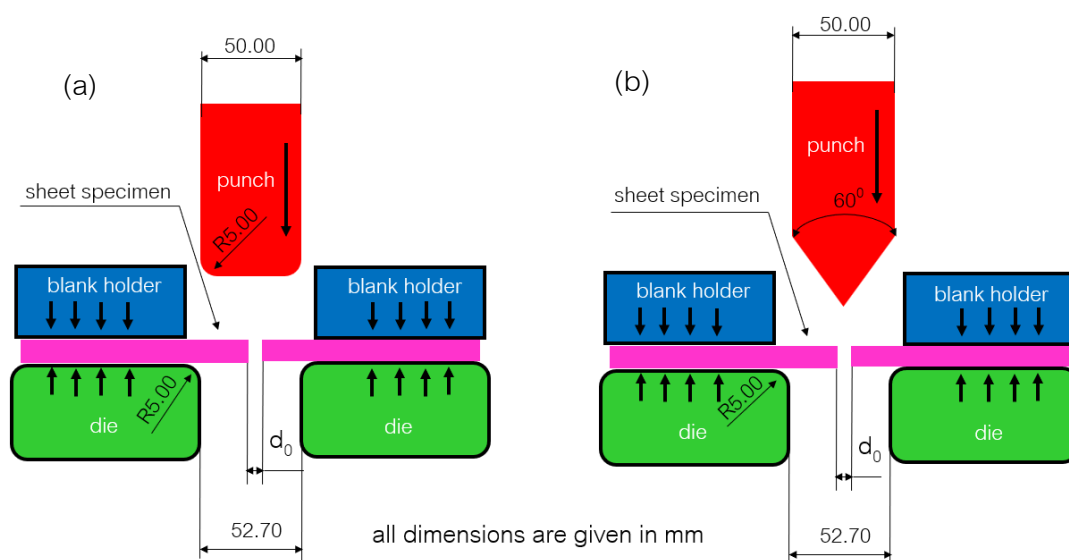


Figure 1 Schematic representation of hole expansion test setup (a) flat punch and (b) conical punch.

แผ่นชิ้นงานทดสอบวัสดุเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น เกรด SPCC เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 และอะลูมิเนียม เกรด AA1100 ทั้ง 3 วัสดุมีความหนา 1.20 มิลลิเมตร ขนาดความกว้าง 150 มิลลิเมตร และความยาว

150 มิลลิเมตร ดัง (Figure 2a) ทำการเจาะรูด้วยแม่พิมพ์ตัด (piercing) ใช้ 펀ช์เจาะรูขนาด 10 มิลลิเมตร บริเวณกึ่งกลาง ชิ้นงานตาม (Figure 2b) หลังจากนั้นทำการติดตั้งแม่พิมพ์ทดสอบการขยายรูบนเครื่องเพรสไฮดรอลิก ขนาด 80 ตัน ดัง (Figure 3a) ชิ้นงานทดสอบอยู่ภายใต้การกดของแผ่นแบลงก์ไฮดรอลิกด้วยแรงคงที่ พันช์เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ทำการขึ้นรูปจนขอบของรูนั้นเกิดการปริแตกและหยุดเครื่องทดสอบ

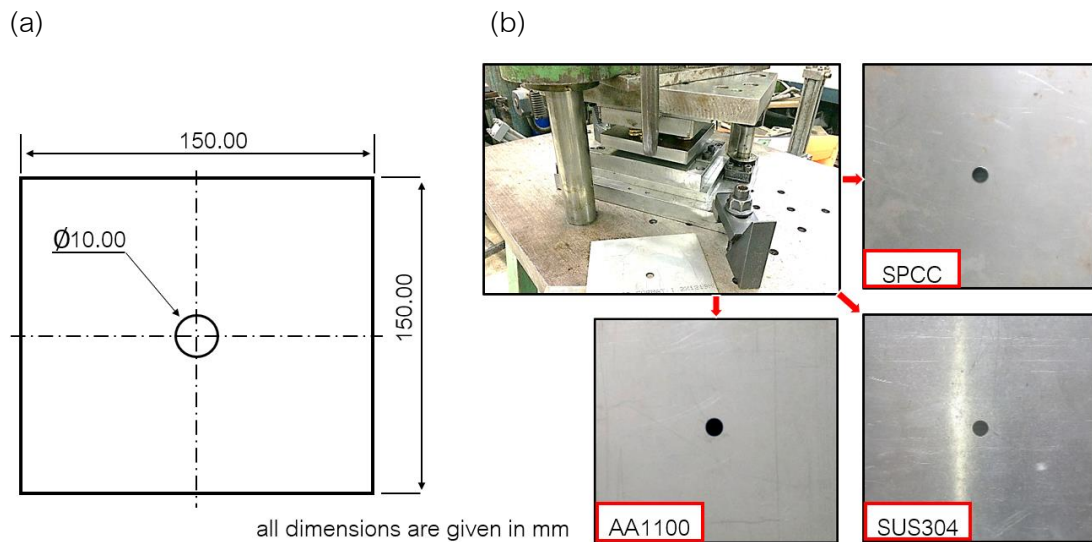


Figure 2 (a) Detailed specimen size for hole expansion test, and (b) Working piece after piercing process.

การทดลองโดยทำการทดสอบซ้ำ 5 ครั้ง หลังจากนั้นวัดความค่าความเปลี่ยนแปลงบริเวณขอบรูจำนวน 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ตามแนวรีด ทแยงแนวรีด และขวางแนวรีด ตามองศากระทำมุมกับแนวรีด ดัง (Figure 3b) ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปแบบ ค่าความเปลี่ยนแปลงขอบรูในแต่ละทิศทางแนวการรีดที่ไม่เท่ากันซึ่งบ่งบอกได้ว่าสภาพความเป็นแอนไอโซทรอปิกภายในวัสดุจะมีผลต่อการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การขยายรูของทั้งสามวัสดุ

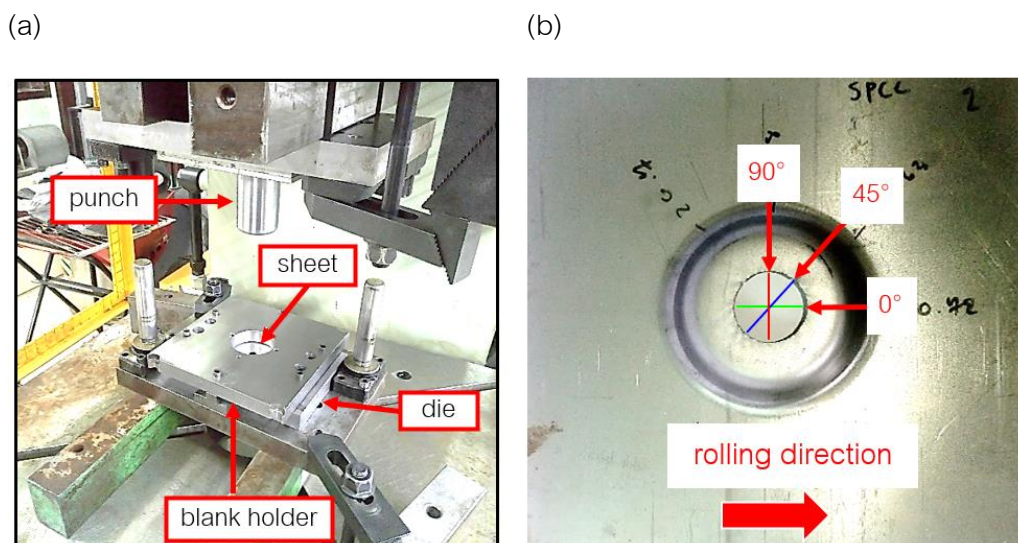


Figure 3 (a) experimental setup of hole expansion test, and (b) measurement crack position after the hole expansion test.

2. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การที่จะทำให้แบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีการประมวลผลที่ถูกต้องได้นั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ที่นำเข้าไปประมวลและคำนวณผล การกำหนดขอบเขตให้กับแบบจำลองตรงกับสภาพการทดสอบขึ้นรูปชิ้นงานจริง ซึ่งสมบัติของโลหะแผ่นบางเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญมากในแบบจำลองที่กำหนดความสามารถในการเปลี่ยนรูปวัสดุพฤติกรรมทางกลขณะเกิดการเปลี่ยนรูป ดังนั้นค่าสมบัติทางกลของวัสดุที่ถูกต้องจะส่งผลให้รูปร่างชิ้นงานที่ได้ พฤติกรรมทางกลและการเปลี่ยนรูปของโลหะจากการจำลองสภาวะการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกับการขึ้นรูปจริง ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบการขยายรูได้สร้างแบบจำลองที่สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำในการทำนายผลเป็นแบบจำลองเกณฑ์การครากวัสดุของ Hill (1948) ดังนั้นจึงทำการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุโลหะแผ่นเพื่อหาค่าตัวแปรสภาพแอนไอโซทรอปิกที่ใช้ในการทำวิจัยนี้ได้กำหนดวัสดุเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น เกรด SPCC เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 และอะลูมิเนียม เกรด AA1100 ทั้ง 3 วัสดุมีความหนา 1.20 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บนพื้นฐานเกณฑ์การครากของ Hill's 48 โดยการทดสอบการดึง (tensile test) ใช้ขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8 ทำการทดสอบชิ้นงานตามแนวทิศทางการรีด (0 องศา) ทแยงมุมแนวทิศทางการรีด (45 องศา) ตามขวางแนวทิศทางการรีด (90 องศา) ใช้ค่าตัวแปรจากสมการที่ทำให้แข็งด้วยความเครียดของ Swift Hardening Law ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการดึงจะแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์สมบัติทางกลของโลหะแผ่น ดัง (Table 1)

Table 1 Mechanical properties of SPCC, SUS 304 and AA1100 obtained from uniaxial tension tests.

mechanical properties	SPCC	SUS304	AA1100
yield strength (MPa)	218	334	93
ultimate tensile strength (MPa)	322	667	116
total elongation (%)	48%	50%	10%
strength coefficient (K) (MPa)	416	758	210
strain hardening exponent (n)	0.170	0.163	0.024
R_0	1.765	0.823	0.424
R_{45}	1.304	1.108	0.438
R_{90}	2.198	0.883	0.454

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบการขยายรู เพื่อจำลองพฤติกรรมการขึ้นรูปของวัสดุที่ใช้ทดสอบซึ่งมีส่วนประกอบคือ พันธ์ ดาย แผ่นแบลงก์ไฮลเดอร์และแผ่นขึ้นงานทดสอบ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ สร้างโมเดลจำลองทั้งหมดเป็นพื้นผิว (surface) มีขนาด $\frac{1}{4}$ ส่วนของขนาดตามแบบ หลังจากนั้นทำการส่งไฟล์ข้อมูลเป็นนามสกุล *.IGES ไปสร้างเอลิเมนต์ (element) ด้วยโปรแกรม hyper mesh โดยขึ้นงานทดสอบ (blank sheet) มีชนิดเอลิเมนต์เป็นแบบ plate/shell ในการทดแทนโลหะแผ่นที่เกิดการเสียรูป องค์ประกอบของเอลิเมนต์เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ถูกสร้างขึ้นจากการรวมกันของเอลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยมด้านเท่าจำนวน 4 โหนดเข้าด้วยกัน และการอินทิเกรตเป็นแบบลดรูป ตามสมการของ Belytschko et al., (1983) มีจำนวนจุดอินทิเกรตตามแนวความหนา 5 จุด มีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 5,600 เอลิเมนต์ จากนั้นกำหนดเอลิเมนต์ทั้งหมดให้อยู่บนพื้นฐานความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดจริงในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรและความไม่เท่ากันทุกทิศทางด้วยเกณฑ์การครากของ Hill'48 ทั้งสามวัสดุที่แตกต่างกันตาม

พฤติกรรมของวัสดุ ดังสมการ (2) เกณฑ์การเปลี่ยนรูปพลาสติกแอนไอโซทรอปิกของ Hill's 48 เป็นผลมาจากสมการกำลังสอง ซึ่งถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย การทำนายพฤติกรรมของ Hill's 48 ในระนาบความเค้นนั้น มีความน่าเชื่อถือ สำหรับกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ดังสมการ (2) (Hill, 1948) ต่อไปนี้

$$\varphi(\sigma) = \bar{\sigma}_H^2 = F\sigma_{yy}^2 + G\sigma_{xx}^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2N\sigma_{xy}^2 \quad (2)$$

ค่า F, G, H และ N เป็นค่าสัมประสิทธิ์สภาพแอนไอโซทรอปิกของวัสดุ ดัง (Table 2) ตัวแปรที่จำเป็น ได้แก่ ค่า r ของวัสดุ 0, 45 และ 90 องศา จากทิศทางแนวรีดของวัสดุได้จากการทดสอบการดึงสามารถหาได้ ดังสมการ (3) (Yu et al., 2016) ต่อไปนี้

$$F = \frac{r_0}{r_{90}(1+r_0)}, G = \frac{1}{(1+r_0)}, H = \frac{r_0}{(1+r_0)}, N = \frac{(r_0 + r_{90})(2r_{45} + 1)}{2r_{90}(1+r_0)} \quad (3)$$

การเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของเกณฑ์การครากใช้หลักการความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเครียดและอัตราส่วนความเค้นระหว่างการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของวัสดุ ซึ่งจากสมการดังกล่าวข้างต้นสามารถใช้หาอัตราส่วนความเค้น (stress ratio; α) จากความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนความเครียด (strain ratio; ρ) และสัมประสิทธิ์สภาพแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48 ดังสมการ (4) (Chaimongkon et al., 2021) และสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรอัตราส่วนความเค้น (stress ratio parameter; ξ) ผ่านความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลกับความเค้นหลักสูงสุดสำหรับเกณฑ์การครากของ Hill's 48 ได้ ดังสมการ (5) (Chaimongkon et al., 2021)

$$\alpha = \frac{(G+H)\rho + H}{H\rho + (F+H)}, \rho = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (4)$$

$$\xi = \frac{\bar{\sigma}_H}{\sigma_1} = [(G+H) + (F+H)\alpha^2 - 2H\alpha]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

โดยที่	ρ	คือ อัตราส่วนความเครียด
	α	คือ อัตราส่วนความเค้น
	$\bar{\sigma}_H$	คือ ความเค้นประสิทธิผล สำหรับเกณฑ์การครากของ Hill's 48
	σ_1	คือ ความเค้นหลักสูงสุด
	ξ	คือ ตัวแปรอัตราส่วนความเค้น

Table 2 Determined anisotropic coefficients of the Hill'48 model (r-value based) for the investigated SPCC, SUS 304 and AA1100.

material	F	G	H	N
SPCC	0.3127	0.3617	0.6383	1.1764
SUS 304	0.5311	0.5485	0.4515	1.7042
AA1100	0.6878	0.7022	0.2978	1.2739

พันธกรวย 60 องศา พันซ์ปลายเรียบ ดาย และแผ่นกดขึ้นงาน (binder force) ใช้ชนิดเอลิเมนต์เป็นแบบ Plate/Shell แบบสี่เหลี่ยมด้านเท่าจำนวน 4 โหนดเข้าด้วยกันมีจำนวนทั้งหมด 2,185, 2,452, 2,250 และ 1,900 เอลิเมนต์ตามลำดับ ถูกกำหนดให้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body) สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างคู่วัดสัมผัส เหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC มีค่า 0.125 เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 มีค่า 0.133 และอะลูมิเนียม AA1100 มีค่า 0.20 ใช้แรงแผ่นกดขึ้นงาน 200 กิโลนิวตัน พันซ์เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที รูปแบบการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (nonlinear FEM commercial code with RADIOSS script) ผ่านโปรแกรม Hyper Form 2019 โดยจะทำการจำลองการขึ้นรูปในสภาพเดียวกับการทดลองและวัดความเปลี่ยนแปลงบริเวณรูที่ขยายตัวทั้งสามวัสดุ

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

1. การทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปขยายรู

การทดสอบการขยายรูเพื่อประเมินความสามารถในการขึ้นรูปขยายรูของแผ่นขึ้นงานทดสอบทั้ง 3 วัสดุ โดยการจับยึดแผ่นขึ้นงานทดสอบที่เจาะรูตรงกลางไว้ให้แน่นโดยรอบ ทำการทดสอบด้วยสภาวะการลากขึ้นรูปในลักษณะเดียวกันระหว่างการทดสอบ เมื่อพันธเคลื่อนที่ขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบอย่างต่อเนื่อง รูของขึ้นงานทดสอบจะเกิดการขยายตัวในแนวเส้นรอบวง โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของรูจะขยายตัวออกสูงสุดจนกระทั่งขอบของรูมีรอยแตก ตาม (Figure 4a) ขึ้นงานการทดสอบจากพันธกรวย 60 องศา เหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC มีค่าอัตราส่วนการขยายรูอยู่ที่ 153.48 เปอร์เซ็นต์ มีรอยแตกรั่วอยู่ที่ประมาณ 225 องศา จากทิศทางแนวการรีด เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ค่าอัตราส่วนการขยายรูอยู่ที่ 39.55 เปอร์เซ็นต์ มีรอยแตกรั่วอยู่ที่ทิศทางแนวการรีด และอะลูมิเนียม เกรด AA1100 ค่าอัตราส่วนการขยายรูอยู่ที่ 29 เปอร์เซ็นต์ มีรอยแตกรั่วอยู่ที่ประมาณ 270 องศา จากทิศทางแนวการรีด ซึ่งเมื่อพิจารณาจากการทดสอบสมบัติทางกลของแผ่นขึ้นงานทดสอบจะเห็นได้ว่าเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 มีค่าสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิก (r-value) น้อยที่สุดในทิศทางที่เกิดความเสียหายแสดงให้เห็นว่าบริเวณนั้นมีอัตราการยืดตัวได้น้อยที่สุดและเมื่อมีแรงกระทำอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดรอยแตกรั่ว สำหรับอะลูมิเนียม เกรด AA1100 มีค่าสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิกมากที่สุดในทิศทางที่เกิดความเสียหายแสดงให้เห็นว่าบริเวณนั้นมีอัตราการยืดตัวได้ดีมากทำให้เกิดรอยแตกรั่วและ (Figure 4b) ขึ้นงานหลังการทดสอบด้วยพันธปลายเรียบ เหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC มีค่าอัตราส่วนการขยายรูอยู่ที่ 114.25 เปอร์เซ็นต์ มีรอยแตกรั่วอยู่ที่ประมาณ 45 องศา จากทิศทางแนวการรีด เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ค่าอัตราส่วนการขยายรูอยู่ที่ 38.35 เปอร์เซ็นต์ มีรอยแตกรั่วอยู่ที่ประมาณ 180 องศา จากทิศทางแนวการรีดและอะลูมิเนียม เกรด AA1100 ค่าอัตราส่วนการขยายรูอยู่ที่ 20.27 เปอร์เซ็นต์ มีรอยแตกรั่วอยู่ที่ประมาณ 0 และ 180 องศา จากทิศทางแนวการรีดจากผลการทดลองดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ (Paul, 2020b) ที่ระบุว่ารูปร่างของพันธมีผลต่อค่าอัตราส่วนการขยายรูและพันธกรวย 60 องศา ทำให้การยืดตัวของรูจะขยายได้ดีกว่าพันธปลายเรียบและยังทำให้ค่าอัตราส่วนการขยายรูด้วยพันธกรวย 60 องศา มากกว่าพันธปลายเรียบด้วย ซึ่งจากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิกของวัสดุขึ้นงานทดสอบจะเห็นได้ว่าวัสดุทั้ง 3 ชนิด เกิดความเสียหายในทิศทางที่มีค่าสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิกของวัสดุน้อยที่สุดเนื่องจากรูปร่างของพันธปลายเรียบทำให้เกิดการยืดตัวได้ดีในขณะที่ทำการขึ้นรูปทิศทางที่ยืดตัวได้น้อยจึงมีความเสียหายเกิดขึ้น ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวค่อนข้างที่จะตรงกับผลการวิจัยของ (Yu et al., 2016) ที่กล่าวไว้ว่าตำแหน่งที่แตกรั่วได้ง่ายที่สุดคือทิศทางที่มีค่า r ต่ำที่สุด

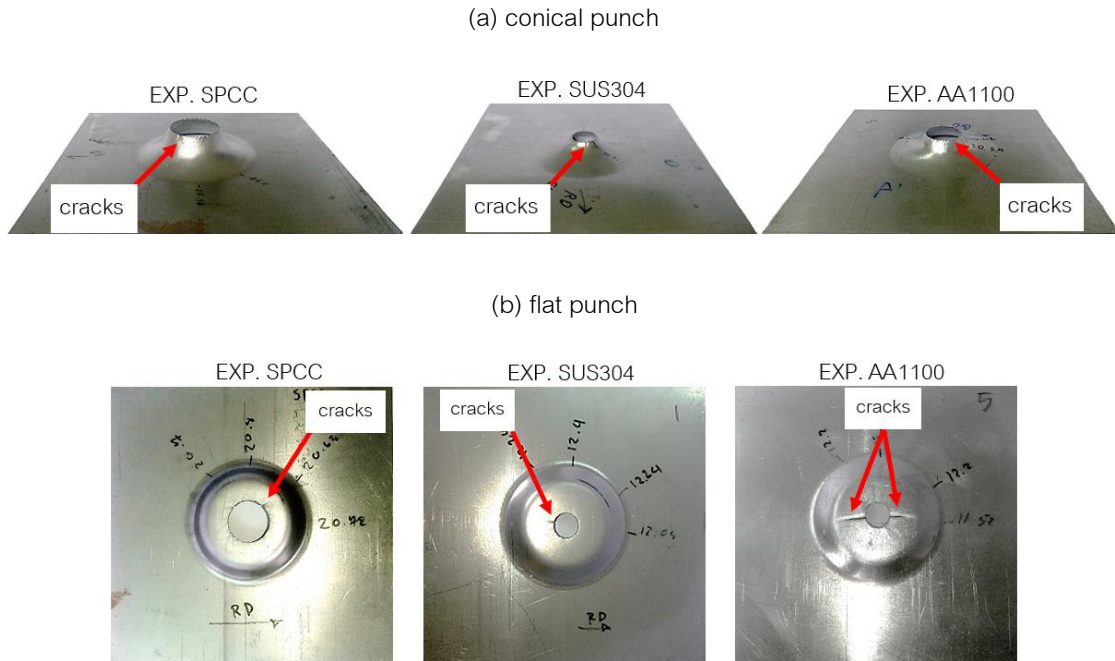


Figure 4 Deformed workpiece (a) conical punch at 60 degrees and (b) flat punch.

จากการจำลองการทดสอบการขยายรูทั้งสองพันธ์ ดัง (Figure 5a) พันธ์กรวย 60 องศา พบว่าบริเวณปีกชิ้นงานทดสอบเสียรูปน้อยที่สุดเป็นสีน้ำเงินเข้มและบริเวณขอบของรูเกิดการแตกสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนเป็นสีส้มถึงสีแดง ถ้านำผลจาก (Figure 5a) ไปเปรียบเทียบกับ (Figure 5b) พันธ์ปลายเรียบ สังเกตเห็นว่าบริเวณความแตกต่างของผนังชิ้นงานที่สัมผัสกับรัศมีปากตายและผนังตายสังเกตเห็นว่าเป็นบริเวณที่เกิดการยึดตัวของโลหะแผ่น สามารถมองเห็นเป็นสีฟ้าปานกลางถึงเป็นสีน้ำเงินอ่อน ส่งผลทำให้ขอบของรูขยายตัวออกได้น้อยและเกิดการแตกบริเวณขอบรูจนมองเห็นเป็นสีแดง เหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC มีค่าความเครียดหลักบริเวณที่เกิดความเสียหายของพันธ์กรวย 60 องศา อยู่ที่ประมาณ 1.046 และมีค่าความเครียดหลักบริเวณที่เกิดความเสียหายของพันธ์ปลายเรียบอยู่ที่ 0.806 เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 มีค่าความเครียดหลักบริเวณที่เกิดความเสียหายของพันธ์กรวย 60 องศา อยู่ที่ 0.438 และมีค่าความเครียดหลักบริเวณที่เกิดความเสียหายของพันธ์ปลายเรียบอยู่ที่ 0.376 และอะลูมิเนียม เกรด AA1100 มีค่าความเครียดหลักบริเวณที่เกิดความเสียหายของพันธ์กรวย 60 องศา อยู่ที่ 0.295 และมีค่าความเครียดหลักบริเวณที่เกิดความเสียหายของพันธ์ปลายเรียบอยู่ที่ 0.214 ซึ่งจากการสังเกตจะเห็นว่าบริเวณที่เกิดความเสียหายของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC จะอยู่บริเวณสีแดงต่างจากเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 และอะลูมิเนียม เกรด AA1100 บริเวณที่เกิดความเสียหายจะเป็นสีส้ม แสดงให้เห็นว่าเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC เป็นวัสดุที่มีการยึดตัวได้ดีและจะเกิดความเสียหายบริเวณที่มีความเครียดสูงมาก ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 และอะลูมิเนียม เกรด AA1100 จะเป็นวัสดุที่มีการยึดตัวได้ปานกลางและน้อยตามลำดับและบริเวณที่เกิดความเสียหายจะความเครียดสูงไม่มาก

การเปรียบเทียบผลการทดลองการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์วัสดุทั้ง 3 ชนิดกับการทดสอบด้วยพันธ์กรวย 60 องศา และพันธ์ปลายเรียบ ดัง (Figure 6) พบว่าจากการทดสอบการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยพันธ์กรวย 60 องศา เหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 และอะลูมิเนียมมีค่าความผิดพลาด (error) อยู่ที่ประมาณ 2.51, 3.79 และ 2.41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากการทดสอบการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยพันธ์ปลายเรียบ เหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 และอะลูมิเนียมมีค่าความผิดพลาด อยู่ที่ประมาณ 3.57, 4.61 และ 4.53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

และเป็นไปตามผลการทดลองของ (Park et al., 2023) คือมีผลการจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บนเกณฑ์การครากวัสดุของ Hill (1948) สูงกว่าผลการทดลองขึ้นงานจริงเล็กน้อย และดูเหมือนว่าผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์การทดสอบการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยพันธ์กรวย 60 องศา ค่อนข้างจะมีความแม่นยำเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์การทดสอบการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยพันธ์ปลายเรียบ

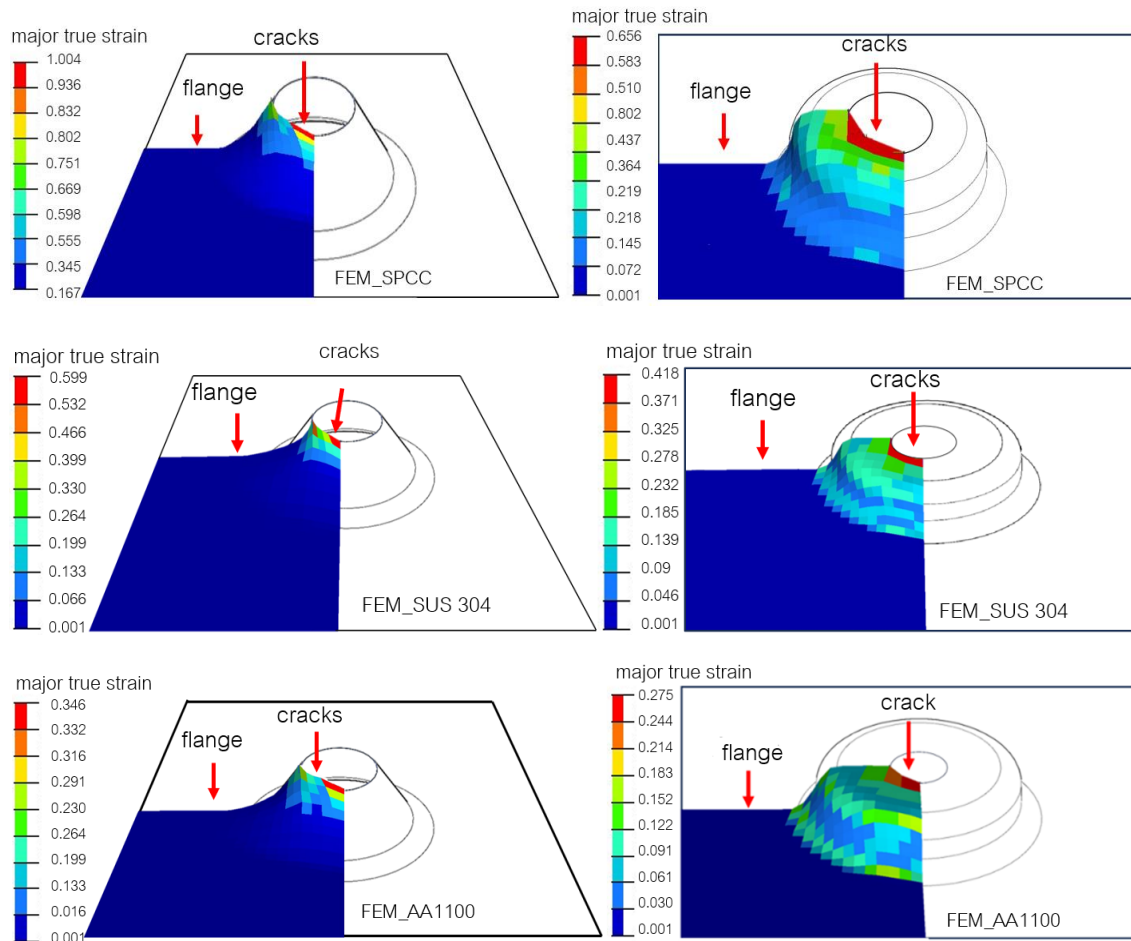


Figure 5 Measured major strain distributions on the deformed samples from the hole expansion test (a) conical punch at 60 degrees and (b) flat punch.

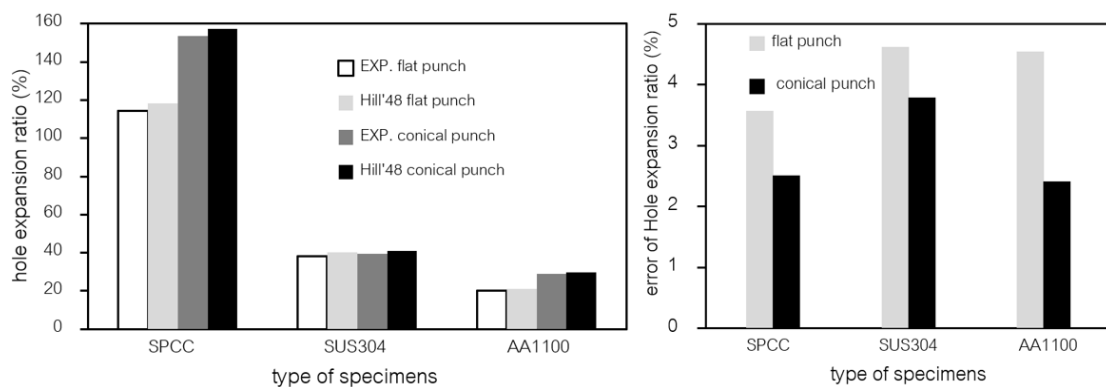


Figure 6 Comparisons of hole expansion ratio by experimentally determinations and FE simulations.

2. อิทธิพลของสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิก

ค่าสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิก (r-value) คืออัตราส่วนระหว่างความเครียดจริงในแนวความกว้างกับความเครียดจริงในแนวความหนาของการทดสอบการดึงแกนเดียวในช่วงพลาสติก โดยมักจะทำการทดสอบค่า r จาก 3 แนวแกน คือ 0, 45 และ 90 องศา กับทิศทางแนวรีด หากวัสดุที่นำมาใช้มีสมบัติความเป็นไอโซทรอปิก (isotropic) นั้นแสดงว่าความสามารถของโลหะแผ่นในการขึ้นรูปมีความเท่ากันทุกทิศทางโดยไม่ขึ้นอยู่กับการทิศทางของแนวรีด ในทางตรงกันข้ามหากวัสดุที่นำมาใช้มีความสามารถของโลหะแผ่นในการขึ้นรูปขึ้นอยู่กับการทิศทางแนวรีดหรือสมบัติทางกลเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางแนวรีด นั้นแสดงว่าวัสดุที่นำมาใช้นั้นมีสมบัติความเป็นแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) ยิ่งค่า r สูงขึ้น การเสียรูปภายในระนาบแผ่นจะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าในทิศทางความหนา กล่าวอีกนัยหนึ่ง ยิ่งค่า r สูงขึ้น การเสียรูปในทิศทางความหนาก็จะยิ่งเกิดขึ้นได้ยากขึ้น ดังนั้น ค่า r ที่สูงขึ้นจึงทำให้ค่า HER สูงขึ้นด้วยสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ (Yu et al., 2016) เพื่อศึกษาผลกระทบแบบแอนไอโซทรอปิกของวัสดุในการประเมินความสามารถการขึ้นรูปของวัสดุด้วยวิธีการทดสอบการขยายรู วัสดุโดยทั่วไปจะมีความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นอยู่กับการทิศทางแนวรีดหรือสมบัติทางกลเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางแนวรีดที่มักจะเกิดขึ้น ในกระบวนการรีดขึ้นรูปเย็น นั้นแสดงว่าวัสดุที่นำมาใช้นั้นมีสมบัติความเป็นแอนไอโซทรอปิก การศึกษาอิทธิพลของสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิกที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนการขยายรูของแต่ละทิศทางแนวการรีดของวัสดุโดยจะทำการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยแม่พิมพ์ชุดทดสอบการขยายรูจนขึ้นงานปริแตกหลังจากนั้นวัดค่าความเปลี่ยนแปลงไปของรูเจาะขึ้นงานแต่ละทิศทางแนวการรีดของวัสดุเพื่อประเมินความสามารถในการขึ้นรูป ผลการทดลองของแต่ละวัสดุ ดัง (Figure 7) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการขยายรูกับทิศทางแนวการรีดของวัสดุทดสอบ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิกมีผลต่อค่าความสูงต่ำของค่าอัตราส่วนการขยายรู และเมื่อเปรียบเทียบกับค่า r ของแต่ละทิศทางจะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์สอดคล้องกัน ยิ่งค่า r สูงจะทำให้ค่าอัตราส่วนการขยายรูสูงขึ้นตามด้วย ซึ่งนอกจากค่า r ที่มีผลต่ออัตราส่วนการขยายรู รูปร่างของพันธียังมีผลต่อค่าอัตราส่วนการขยายรูด้วย เนื่องจากพันธิแบบกรวย 60 องศา ทำให้การขยายตัวในการขึ้นรูปได้ดีกว่าพันธิปลายเรียบทำให้ผลของค่าอัตราส่วนการขยายรูของแต่ละทิศทางแนวการรีดของพันธิแบบกรวย 60 องศา มีค่าอัตราส่วนการขยายรูสูงกว่าพันธิปลายเรียบ ดัง (Figure 7)

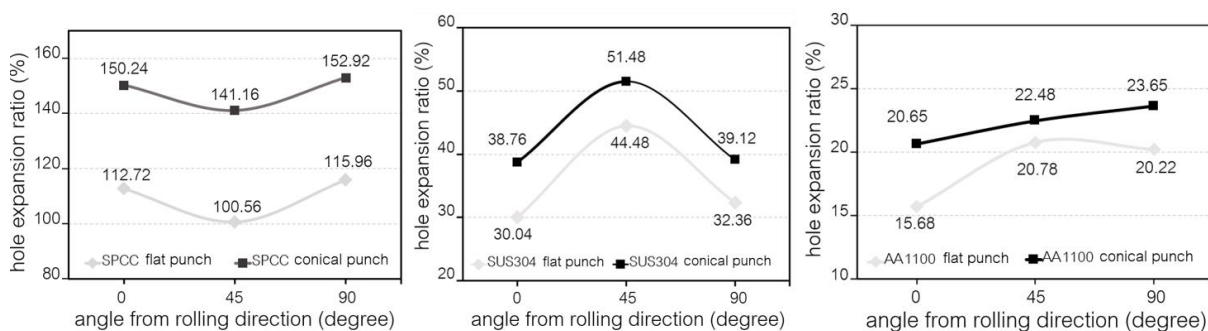


Figure 7 Hole expansion ratio at hole edge dependence based on r-value for different three directions of sheet metal of hole expansion test (scale 1:100, unit: %).

จาก (Figure 7) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการขยายรูกับทิศทางแนวการรีด จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิกหรือค่า r ของวัสดุขึ้นงานทดสอบจาก (Table 1) ในแต่ละทิศทางแนวการรีดมีผลต่อค่าอัตราส่วนการขยายรู ซึ่งจากการทดสอบการขยายรูด้วยพันธิกรวย 60 องศา และพันธิปลายเรียบจะมีผลการทดสอบแตกต่างกันที่ระดับความสูงต่ำของค่าอัตราส่วนการขยายรูแต่ผลการทดลองจะสอดคล้องกันหรือเป็นไปในลักษณะเดียวกัน ซึ่งตรงกับผลการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการขยายรูกับรูปทรงของพันธิแบบต่าง ๆ ของ (Pathak et al., 2016) ที่แสดงให้เห็นว่าการทดสอบการขยายรูด้วย

พังก์กรวย 60 องศา มีค่าอัตราส่วนการขยายรูสูงกว่าการทดสอบการขยายรูด้วยพังก์แบบปลายเรียบ สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC มีค่า r ของวัสดุที่ 0, 45 และ 90 องศา กับทิศทางแนวรีด เท่ากับ 1.765, 1.304 และ 2.198 ตามลำดับ และมีค่าอัตราส่วนการขยายรูของวัสดุที่ 0, 45 และ 90 องศา กับทิศทางแนวรีดจากการทดสอบการขยายรูด้วยพังก์กรวย 60 องศา เท่ากับ 150.24, 141.16 และ 152.92 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากการทดสอบการขยายรูด้วยพังก์ปลายเรียบ เท่ากับ 112.72, 100.56 และ 115.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 มีค่า r ของวัสดุที่ 0, 45 และ 90 องศา กับทิศทางแนวรีด เท่ากับ 0.823, 1.108 และ 0.883 ตามลำดับ และมีค่าอัตราส่วนการขยายรูของวัสดุที่ 0, 45 และ 90 องศา กับทิศทางแนวรีดจากการทดสอบการขยายรูด้วยพังก์กรวย 60 องศา เท่ากับ 38.76, 51.48 และ 39.12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากการทดสอบการขยายรูด้วยพังก์ปลายเรียบ เท่ากับ 30.04, 44.48 และ 32.36 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อะลูมิเนียมเกรด AA1100 มีค่า r ของวัสดุที่ 0, 45 และ 90 องศา กับทิศทางแนวรีด เท่ากับ 0.424, 0.438 และ 0.454 ตามลำดับ และมีค่าอัตราส่วนการขยายรูของวัสดุที่ 0, 45 และ 90 องศา กับทิศทางแนวรีดจากการทดสอบการขยายรูด้วยพังก์กรวย 60 องศา เท่ากับ 20.65, 22.48 และ 23.65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากการทดสอบการขยายรูด้วยพังก์ปลายเรียบ เท่ากับ 15.68, 20.78 และ 20.22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองทั้ง 3 วัสดุจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิกของวัสดุมีผลต่อความสูงต่ำของค่าอัตราส่วนการขยายรู แต่เนื่องจากอะลูมิเนียม เกรด AA1100 ที่มีค่า r ค่อนข้างใกล้เคียงกันมาก ผลการทดสอบการขยายรูด้วยพังก์ปลายเรียบกับชิ้นงานทดสอบทิศทางขวางแนวรีดที่มีค่า r มากที่สุด ผลของค่าอัตราส่วนการขยายรูจึงไม่ได้มากที่สุดตามค่า r

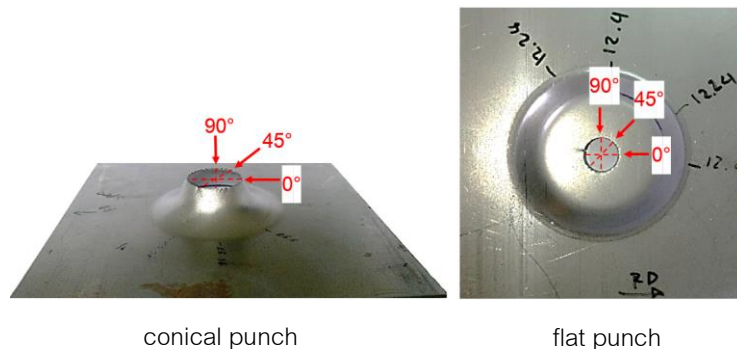


Figure 8 Three-position measurement of different directions failing sheet metal samples from the hole expansion test.

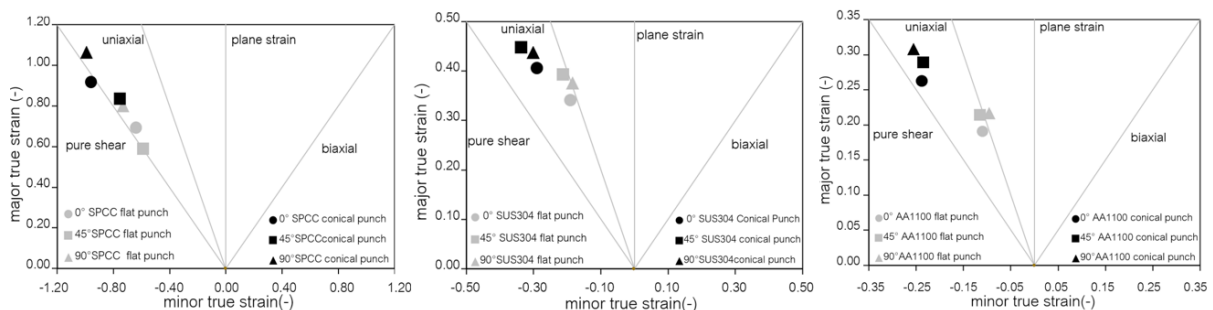


Figure 9 Strains point in the element near the hole edge in three directions of sheet metal at the experimental fracture states in the hole expansion test.

ความเครียดที่เกิดขึ้นบนแผ่นชิ้นงานทดสอบเกิดจากการขยายตัวของแผ่นชิ้นงานทดสอบจังหวะที่เกิดการปริแตก การขยายตัวของชิ้นงานเกิดขึ้นในแนวเส้นรอบวงทำให้ความเครียดหลักเกิดการขยายหรือยืดตัว ส่วนความเครียดรองเกิดการหดตัวในขณะการดึงขึ้นรูปทำให้ความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณที่เกิดความเสียหายอยู่ในโซนความเครียดการดึงแกนเดียว และอยู่ในโซนความเครียดการเฉือน ดังแสดงผลในงานวิจัยของ (Paul, 2020a) ซึ่งจาก (Figure 9) จะเป็นผลจากการวัดค่าความเครียดบนแผ่นชิ้นงานทดสอบบริเวณขอบรูปในทิศทางของชิ้นทดสอบตามแนวการรีด ทแยงแนวรีดและขวางแนวรีด บริเวณที่วัดความเครียดบนชิ้นงาน ดัง (Figure 8) หลังจากการทดสอบการขยายรูปชิ้นงานเกิดความเสียหาย ผลการวัดค่าความเครียดบนแผ่นชิ้นงานทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิกหรือค่า r ของวัสดุชิ้นงานทดสอบจาก (Table 1) ในแต่ละทิศทางแนวการรีดมีผลต่อค่าความเครียดหลักและความเครียดรองที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานและผลการวัดค่าความเครียดยังมีลักษณะเดียวกันกับผลของค่าอัตราส่วนการขยายรูปคือ การทดสอบการขยายรูปด้วยพันธักรวย 60 องศา และพันธัปลายเรียบ จะมีผลการทดสอบแตกต่างกันที่ระดับความสูงต่ำของค่าความเครียดหลักและความเครียดรอง ซึ่งตรงตามการสรุปผลการทดลองของ (Paul, 2020b) แต่ผลการทดลองจะสอดคล้องกันหรือเป็นไปในลักษณะเดียวกันจาก (Table 1) จะเห็นได้ว่าเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC จะมีค่า r ที่แตกต่างกันมาก ทำให้ผลของค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานในแต่ละทิศทางแนวการรีดมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจะเห็นได้ว่าทิศทางขวางแนวการรีดจะมีค่า r มากสุดทำให้ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานมีค่าสูงที่สุด และทิศทางแนวการรีดจะมีค่า r น้อยกว่าทิศทางขวางแนวการรีดทำให้ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานมีค่าน้อยกว่าทิศทางขวางแนวการรีดรองลงมา ส่วนทิศทางทแยงแนวรีดจะมีค่า r น้อยสุดทำให้ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานมีค่าน้อยที่สุดด้วย เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 จะมีค่า r ที่แตกต่างกันพอสมควรทำให้ผลของค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานในแต่ละทิศทางแนวการรีดมีความแตกต่างกันอยู่พอสมควร โดยทิศทางทแยงแนวรีดจะมีค่า r สูงที่สุดทำให้ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานมีค่าสูงที่สุด และทิศทางขวางแนวการรีดจะมีค่า r น้อยกว่าทิศทางทแยงแนวการรีดทำให้ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานมีค่าน้อยกว่าทิศทางขวางแนวการรีดรองลงมา ส่วนทิศทางแนวรีดจะมีค่า r น้อยสุดทำให้ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานมีค่าน้อยที่สุดด้วย ส่วน อะลูมิเนียม เกรด AA1100 จะมีค่า r ค่อนข้างใกล้เคียงกันมาก การทดสอบการขยายรูปด้วยพันธักรวย 60° ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน ยังคงมีค่าความสูงเรียงตามทิศทางของค่า r คือ ทิศทางขวางแนวการรีด ทิศทางทแยงแนวการรีด และทิศทางแนวการรีด แต่สำหรับการทดสอบการขยายรูปด้วยพันธัปลายเรียบ ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน ทิศทางขวางแนวการรีดและทิศทางทแยงแนวการรีดจะเกาะกลุ่มกันโดยมีค่าความเครียดทิศทางทแยงแนวการรีดสูงกว่าทิศทางขวางแนวการรีดเล็กน้อย ส่วนทิศทางแนวการรีดจะค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานน้อยที่สุด ดังแสดงในผลการวิจัยของ (Park et al., 2021) ที่แสดงผลความแตกต่างของความเครียดบนชิ้นงานทดสอบแต่ละทิศทางแนวการรีด

สรุป

ผลการทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปขยายรูปตามมาตรฐาน ISO 16630:2017 ด้วยพันธักรวย 60 องศา และพันธัปลายเรียบของโลหะแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น เกรด SPCC เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 และอะลูมิเนียม เกรด AA1100 ความหนา 1.20 มิลลิเมตร สามารถสรุปผลลัพธ์การวิจัยได้ดังนี้

1. ค่าสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิกของวัสดุหรือค่า r จะมีผลต่อค่าความสูงต่ำของอัตราส่วนการขยายรูปและค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน ยิ่งค่า r มากจะทำให้อัตราส่วนการขยายรูปและค่าความเครียดสูงขึ้นตามและค่าสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิกของวัสดุยังมีผลต่อทิศทางการเกิดความเสียหายของชิ้นงานอีกด้วย คือ ความเสียหายของชิ้นงานทดสอบจะเกิดตามทิศทางที่มีค่าสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิกของวัสดุน้อยที่สุด

2. ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์การทดสอบการขยายด้วยเกณฑ์การครากของ Hill'48 สามารถประเมินพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุได้อย่างแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบชิ้นงานจริง จากการทดสอบการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยพังก์กรวย 60 องศา เหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 และอะลูมิเนียมมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ประมาณ 2.51, 3.79 และ 2.41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากการทดสอบการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยพังก์ปลายเรียบ เหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 และอะลูมิเนียมมีค่าความผิดพลาด อยู่ที่ประมาณ 3.57, 4.61 และ 4.53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งจากค่าความผิดพลาดดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แทนการขึ้นรูปชิ้นงานจริงได้เพื่อลดค่าใช้จ่ายของแม่พิมพ์และวัสดุในการทดลอง

3. การทดสอบการขยายรูด้วยพังก์กรวย 60 องศา มีความสามารถในการขึ้นรูปดีกว่าพังก์ปลายเรียบทั้งการแสดงผลในรูปของอัตราส่วนการขยายรู ความเครียดหลักและความเครียดรอง เพราะการทดสอบการขยายรูด้วยพังก์กรวย 60 องศา จะมีสภาวะความเครียดการดึงทำให้ขึ้นทดสอบสามารถยึดตัวได้ดี ส่วนการทดสอบการขยายรูด้วยพังก์ปลายเรียบจะมีสภาวะความเครียดในระนาบด้วย

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมแม่พิมพ์และเครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในการสนับสนุนเครื่องมือสำหรับการทดสอบและโปรแกรม Finite element ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักของชิ้นงาน

เอกสารอ้างอิง

- Abedini, A., Narayanan, A., & Butcher, C. (2024). On the flat punch hole expansion test of sheet metals: Mechanics of deformation and evaluation of anisotropic plasticity models. *Mechanics of Materials*, 191, 104931. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2024.104931>
- Barlat, F., Brem, J. C., Yoon, J. W., Chung, K., Dick, R. E., Lege, D. J., Pourboghrat, F., Choi, S. H., & Chu, E. (2003). Plane stress yield function for aluminum alloy sheets—part 1: Theory. *International Journal of Plasticity*, 19(9), 1297-1319. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(02\)00019-0](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(02)00019-0)
- Belytschko, T., & Tsay, C. S. (1983). A stabilization procedure for the quadrilateral plate element with one-point quadrature. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 19(3), 405-419. <https://doi.org/10.1002/nme.1620190308>
- Chaimongkon, T., Panich, S., & Uthaisangsuk, V. (2021). Anisotropic fracture forming limit curve and its applications for sheet metal forming with complex strain paths of aluminum sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(11), 3553-3577. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07357-z>
- Chinara, M., Paul, S. K., Chatterjee, S., & Mukherjee, S. (2021). Effect of planar anisotropy on the hole expansion ratio of cold-rolled DP 590 steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 75, 535-543. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02444-x>
- Hill, R. (1948). A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical and Physical Sciences*, 193(1033), 281-297. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045>

- Kacem, A., Krichen, A., & Manach, P. Y. (2015). Finite element analysis of hole-flanging process with various anisotropy assumptions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80, 11-19. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6980-y>
- Korkolis, Y. P., Brownell, B., Coppieters, S., & Tian, H. (2016). Modeling of hole-expansion of AA6022-T4 aluminum sheets with anisotropic non-quadratic yield functions. *Journal of Physics: Conference Series*, 734, 032083. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/734/3/032083>
- Kuwabara, T., Hashimoto, K., Iizuka, E., & Yoon, J. W. (2011). Effect of anisotropic yield functions on the accuracy of hole expansion simulations. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(3), 475-481. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.346>
- Kuwabara, T., Mori, T., Asano, M., Hakoyama, T., & Barlat, F. (2017). Material modeling of 6016-O and 6016-T4 aluminum alloy sheets and application to hole expansion forming simulation. *International Journal of Plasticity*, 93, 164-186. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2016.10.002>
- Iizuka, E., Hashimoto, K., & Kuwabara, T. (2014). Effects of anisotropic yield functions on the accuracy of forming simulations of hole expansion. *Procedia Engineering*, 81, 2433-2438. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.346>
- Park, H. S., Barlat, F., & Lee, S. Y. (2023). Comparison of anisotropic yield functions and calibrations for accurate thickness prediction in hole expansion test. *Journal of Materials Processing Technology*, 319, 118070. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118070>
- Park, S., Jung, J., Cho, W., Jeong, B. S., Na, H., Kim, S. I., Lee, M. G., & Han, H. N. (2021). Predictive dual-scale finite element simulation for hole expansion failure of ferrite-bainite steel. *International Journal of Plasticity*, 136, 102900. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2020.102900>
- Pathak, N., Butcher, C., & Worswick, M. (2016). Assessment of the critical parameters influencing the edge stretchability of advanced high-strength steel sheet. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(11), 4919-4932. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2316-9>
- Paul, S. K. (2020a). A critical review on hole expansion ratio. *Materialia*, 9, 100566. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100566>
- Paul, S. K. (2020b). Effect of punch geometry on hole expansion ratio. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 234(3), 671-676. <https://doi.org/10.1177/0954405419863222>
- Soussi, H., & Krichen, A. (2019). Plastic anisotropy effect on forming kinematics of the hole-flanging process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101, 733-746. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2974-x>
- Yoshida, F., Hamasaki, H., & Uemori, T. (2013). A user-friendly 3D yield function to describe anisotropy of steel sheets. *International Journal of Plasticity*, 45, 119-139. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2013.01.010>
- Yu, X., Chen, J., & Chen, J. (2016). Interaction effect of cracks and anisotropic influence on degradation of edge stretchability in hole-expansion of advanced high strength steel. *International Journal of Mechanical Sciences*, 105, 348-359. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.11.026>