



การพัฒนาวิธีการทดสอบการโก่งของโมดิฟายโยชิตะ
เพื่อสร้างเส้นขีดจำกัดการย่นของวัสดุอะลูมิเนียมผสม
ด้วยวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

DEVELOPMENT OF MODIFIED YOSHIDA BUCKLING TEST TO
WRINKLING LIMIT CURVES ON ALUMINUM ALLOY SHEETS BY
FINITE ELEMENTS METHOD

ทนงศักดิ์ บุญญาณ^{1*}, ธราทิป ชัยมงคล²

Tanongsak Bunyan^{1*}, Taratip Chaimongkol

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน แขวงวังใหม่ กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10330

² วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ แขวงวงศ์สว่าง กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10800

¹Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology, Wangmai, Bangkok, Thailand, 10330

²College of Industrial Technol, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Wong Sawang, Bangkok, Thailand, 10800

*Corresponding author e-mail: tanongsak.b@pit.ac.th

วันที่เข้าระบบ 28 มกราคม 2565

วันที่แก้ไขบทความ 12 เมษายน 2565

วันที่ตอบรับบทความ 14 เมษายน 2565

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวิธีการทดสอบการโก่งตัวของโลหะแผ่นที่จะนำสู่การเสียหายด้วยการย่นโดยใช้วิธีการทดสอบการโก่งของโมดิฟายโยชิตะ วัสดุที่ใช้ทดสอบคือ อะลูมิเนียมผสมเกรด AA5052-H32 ความหนา 1 มิลลิเมตร ในทิศทางตามแนวรีดและขวางแนวรีด ในระหว่างการทดสอบการดึงชิ้นงานทั้งหมดได้ทำการวัดค่าความเครียดบนแผ่นชิ้นงานทดสอบด้วยระบบ Digital Image Correlation (DIC) ควบคู่ไปกับการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R และสมการการทำให้แข็งด้วยความเครียดแบบสวิตช์ เพื่อนำค่าความเครียดที่ได้ระบุตำแหน่งเริ่มเกิดการย่น (Wrinkling initiation) จากทฤษฎีการเบี่ยงเบนของเส้นทางความเครียดและนำจุดเบี่ยงเบนมาสร้างเส้นขีดจำกัดการย่น ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ทิศทางตามแนวรีดที่มีสัดส่วนความเครียดอยู่ที่ -0.5425 ทิศทางขวางแนวรีดมีสัดส่วนความเครียดอยู่ที่ -0.6848 ซึ่งเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R สามารถประเมินความแตกต่างกันของพื้นที่การขึ้นรูปได้ก่อนที่จะเสียหายด้วยการย่นได้อย่างแม่นยำ

คำสำคัญ: โมดิฟายโยชิตะ, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิก

Abstract

This research is a development of buckling test of sheet metal causing wrinkling. This was conducted by using modified Yoshida buckling test. Aluminum alloy, AA5052-H32, with a thickness of 1.0 mm was tested in two directions: rolling direction and transverse direction. During the test process, the strain on the tested sheet was measured by using Digital Image Correlation (DIC) together with Finite Elements Method Model with anisotropic Hill'48 criterion and swift hardening equation. The strain value gained was used to identify wrinkling initiation from the theory of strain path change and the changed area was used to establish wrinkling limit curves. The results were found that in the rolling direction, the strain ratio was at -0.5425, and in the transverse direction, the ratio was at -0.6848. The anisotropic Hill'48 criterion was able to estimate the differences of the forming area before the damage occurred by wrinkling precisely

Keywords: Modified Yoshida buckling test, Finite elements method, Anisotropic yield criterion

1. บทนำ

การขึ้นรูปโลหะแผ่นจากวัสดุน้ำหนักเบาจำพวกอะลูมิเนียมผสม (Aluminum alloy) โดยเฉพาะเกรดพิเศษที่มีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงสูง ได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ในครัวเรือน แต่มีปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นอย่างหลีกเลี่ยงได้ยากคือ ปัญหาการเกิดรอยยับบนชิ้นงาน หลังจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ โดยสาเหตุการย่นดังกล่าวมักเกิดมาจากภาวะภายนอกที่มากระทำ เช่น ความเค้นกด แรงดึงที่ไม่สม่ำเสมอ แรงเฉือนก่อให้เกิดเป็นภาวะภายในคือความเครียด (Strain) ที่ส่งผลให้บริเวณนั้นมีการดัดตัวเสียรูปขึ้นมาเมื่อความเครียดมีความทวีคูณเพิ่มขึ้นมากก็จะทำให้เห็นเป็นรอยยับที่บริเวณผิวชิ้นงานได้อย่างชัดเจน (Banabic, 2010) เพื่อลดปัญหาการเกิดรอยยับจากกรณีที่เกิดขึ้นดังกล่าว Bayraktar *et al.* (2005) ได้ทำการทดสอบการโก่งของโยชิตะ เพื่อประเมินขีดจำกัดการโก่งตัวของโลหะแผ่นก่อนที่จะเสียหายด้วยการย่นได้แต่พบว่าบริเวณวิกฤตของการทดสอบ Yoshida buckling อยู่ในระดับความเครียดต่ำ (0.1% - 0.2%) ซึ่งยังไม่ครอบคลุมสำหรับการประเมินความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุอะลูมิเนียมผสมเกรดพิเศษที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ต่อมา Kim *et al.* (2000) ได้ทำการปรับปรุงขึ้นทดสอบโมดิฟายโยชิตะ โดยเริ่มจากการทำรูปทรงเพิ่มพื้นที่การจับยึด ให้สะดวกต่อการทดสอบใช้สัดส่วนความกว้างและความยาวที่แตกต่างกัน พบว่ามีระดับ

ความเครียดบริเวณวิกฤตเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 0.2% ถึง 0.25% ดังนั้นการทราบขอบเขตขีดจำกัดการย่นบนพื้นฐานการโค้งจึงมีความจำเป็นที่จะนำไปใช้ในการประเมินสภาพการย่นของวัสดุ การสร้างขอบเขตขีดจำกัดการย่นบนพื้นฐานการโค้งถือว่าเป็นทำนายพฤติกรรมเลียนแบบการย่นบริเวณผนัง (Non-flange wrinkling) จากงานวิจัยของ Han *et al.* (2015) ได้สร้างเส้นขีดจำกัดการย่นจากการทดสอบการโค้งของโมดิฟายโพลีเอทิลีนจากชั้นทดสอบที่รูปทรงเรขาคณิตที่แตกต่างกันด้วยวิธีตรวจสอบการเบี่ยงเบนของจุดความเครียด (Basification paths) ด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าบริเวณวิกฤตของชั้นงานทดสอบมีระดับความเครียดที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมการเริ่มเกิดการย่นจนกระทั่งเกิดการย่นแบบสมบูรณ์ โดย Won *et al.* (2019) ได้แสดงถึงเส้นขีดจำกัดการย่นที่มีความสำคัญในการประเมินความสามารถของการขึ้นรูปได้สำหรับโลหะแผ่นกับชั้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้เส้น WLC ของวัสดุ TRIP1180 ทำนายควบคู่ไปกับการจำลองการลากขึ้นรูปในช่วงพลาสติกลักษณะความเสียหายของพื้นผิวชั้นงาน โดยแสดงผลเป็นขอบเขตความปลอดภัยในการขึ้นรูป (Forming area) และขอบเขตการย่นบนพื้นฐานการโค้ง (Wrinkling area) ได้อย่างชัดเจนทำให้ทราบถึงความสามารถของการขึ้นรูปได้ของวัสดุก่อนที่จะเสียหายจากการย่นด้วยวิธีการทำนายโดยไม่ทำให้สิ้นเปลืองวัสดุในการทดลอง การสร้างเส้น WLC ไปใช้งานนั้นเพื่อให้การทำนายความแม่นยำได้มีเทคนิคการตรวจสอบความถูกต้องของเส้น WLC จากการจำลองและการทดลองโดย Du *et al.* (2020) ได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับเกณฑ์การครากของ Hill'48 ในการจำลองการทดสอบการโค้งของโมดิฟายโพลีเอทิลีนของวัสดุสแตนเลส 304 และการทดลอง พบว่าจุดความเครียดที่เบี่ยงเบนจากการจำลองเพื่อสร้างเส้น WLC มีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 2 % เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาการสร้างเส้นขีดจำกัดการย่นในวัสดุอะลูมิเนียมผสมเกรด AA5052-H32 ความหนา 1 มิลลิเมตร ในทิศทางตามแนวรีดและขวางแนวรีด เพื่อให้ครอบคลุมกับการประเมินความเสียหายจากการย่นในการขึ้นรูปวัสดุที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ด้วยการจำลองด้วยเกณฑ์การคราก Hill'48-R และตรวจสอบความเครียดบนแผ่นชั้นงานทดสอบด้วยระบบ Digital Image Correlation (DIC) เพื่อที่จะทราบความสามารถในการขึ้นรูปได้ (Formability) ของวัสดุอะลูมิเนียมผสมเกรด AA5052-H32 ในแต่ละแนวรีดที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการนำวัสดุไปใช้งานในกระบวนการขึ้นรูปให้เหมาะสมก่อนจะเกิดความเสียหายด้วยการย่นบริเวณผนังของชั้นงานจากการขึ้นรูป

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

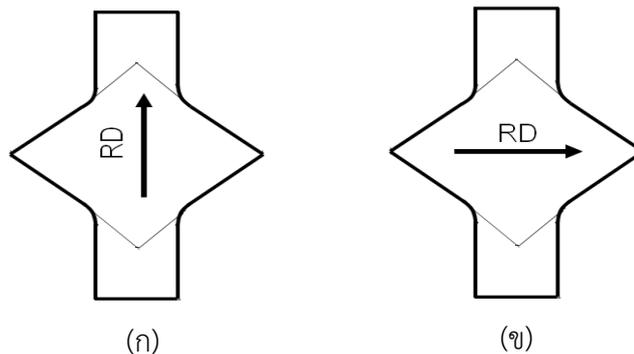
เพื่อพัฒนาสร้างเส้นขีดจำกัดการย่นบนพื้นฐานการโค้งสำหรับประเมินพื้นที่การขึ้นรูปได้ของวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด AA5052-H32 ทิศทางของแนวรีดแตกต่างกัน 2 ทิศทาง ได้แก่ ทิศทางตามแนวรีดและทิศทางขวางแนวรีด

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

สำหรับวิธีการดำเนินการเพื่อพัฒนาสร้างเส้นขีดจำกัดการย่นด้วยการทดสอบการโค้งของโมดิฟายโยซิตะ นั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ การเตรียมชิ้นทดสอบโมดิฟายโยซิตะด้วยทิศทางตามแนวรีดและทิศทางขวางแนวรีด การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R และการทดสอบการโค้งของโมดิฟายโยซิตะในห้องปฏิบัติการ

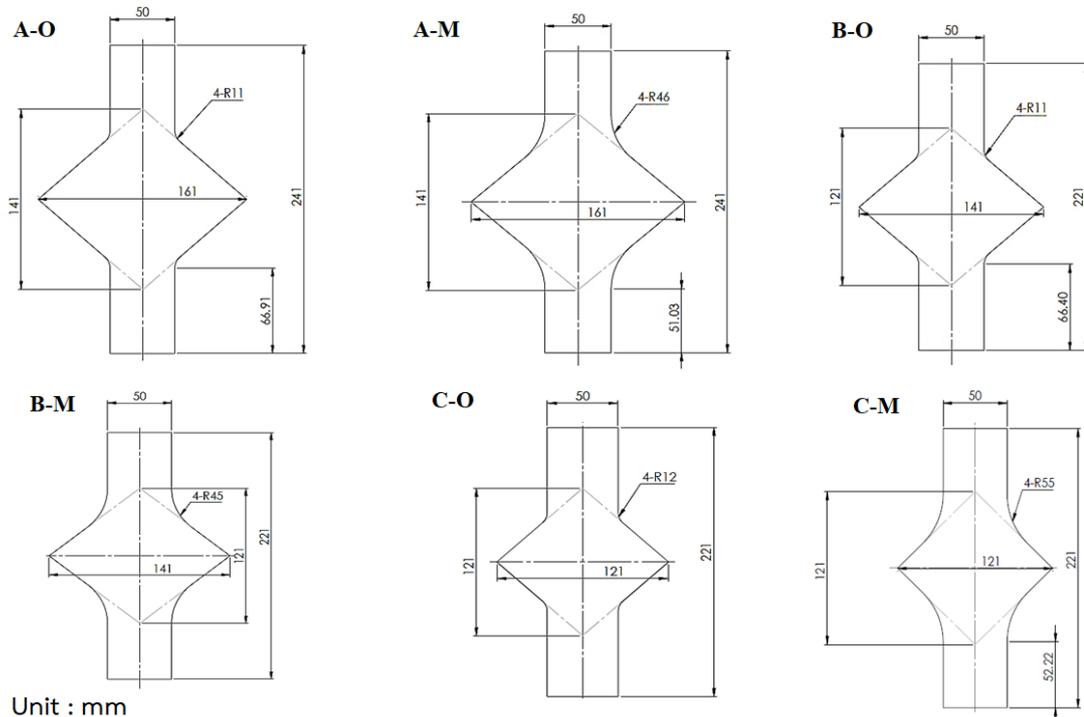
3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ในการทดสอบการโค้งของโมดิฟายโยซิตะ Han *et al.* (2014) ได้มีการเตรียมชิ้นงานทดสอบทั้ง 6 แบบ ในแนวทิศทางการรีดที่ 0 และ 90 องศาตามภาพที่ 1 โดยใช้ชิ้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร โดยมีรัศมีความโค้ง และสัดส่วนความกว้างต่อความยาวที่แตกต่างกัน และ ภาพที่ 2 ชื่อชิ้นทดสอบถูกแทนด้วยตัวอักษร A-O A-M B-O B-M C-O และ C-M โดยจะมีการเตรียมชิ้นงานสำหรับทดลองซ้ำชุดละ 3 ชิ้น และมีขนาดสัดส่วนความกว้างและความยาวที่แตกต่างกัน เพื่อให้เกิดความเครียดบริเวณวิกฤตได้ครอบคลุม



ภาพที่ 1 การตัดขึ้นทดสอบโมดิฟายโยซิตะทั้งสองแนวรีด

(ก) ทิศทางตามแนวรีด (ข) ทิศทางขวางแนวรีด



ภาพที่ 2 ขนาดความกว้าง ความยาว และรัศมีโค้ง ของชิ้นทดสอบโมดิฟายโยชิตะ

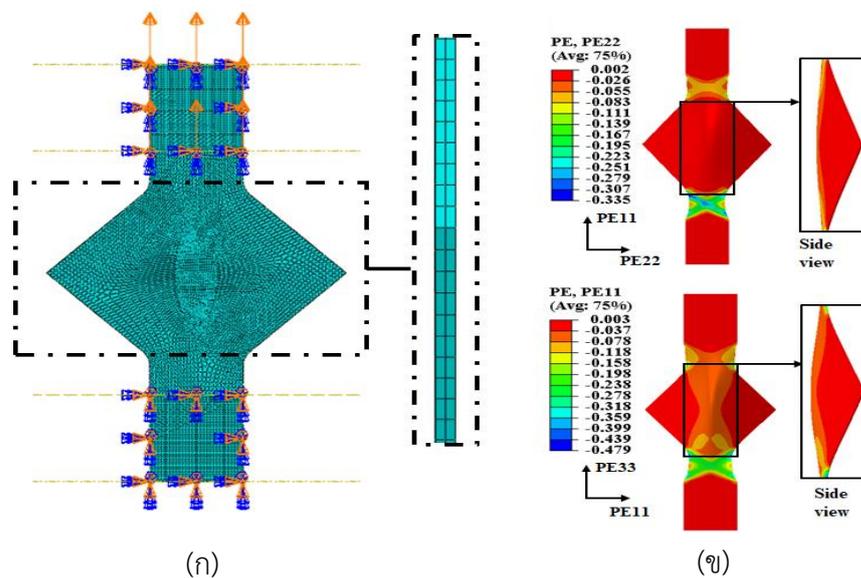
3.2 การจำลองเชิงตัวเลขจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองการทดสอบการโค้งโมดิฟายโยชิตะ

สร้างแบบจำลองพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบเป็นแบบทรงตัน (Solid) หลังจากนั้นจึงแบ่งแบบจำลองทรงตันเป็นเอลิเมนต์ (Solid elements) ทั้งสิ้นใช้ชนิดเอลิเมนต์ C3D8R จำนวน 2 ชั้นผ่านความหนาโดยกำหนดให้เอลิเมนต์ทั้งหมดนั้นมีการเสียรูป (Deformed) และได้กำหนดขนาดเอลิเมนต์ (Element size) บริเวณพื้นที่วิกฤต (Local refinement) ที่ 0.5 mm การจัดตำแหน่งของแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 3 การจำลองการดึงทดสอบในงานวิจัยนี้ได้ใช้การคำนวณแบบพลวัตแบบชัดแจ้ง (Dynamic explicit) โดยกำหนดเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ แบบ Hill's 1948 planar anisotropic material model (Hill, 1948) ดังสมการที่ 1

$$2f(\sigma) = (G+H)\sigma_{xx}^2 + (F+H)\sigma_{yy}^2 - 2H\sigma_{xx}\sigma_{yy} + 2N\sigma_{xy}^2 = 1 \quad (1)$$

เมื่อ F, G, H และ N คือ ค่าคงตัวซึ่งแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก สามารถคำนวณหาได้จากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบการดึงแกนเดียวของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8 โดยนำค่าความเค้นครากของชิ้นทดสอบที่ 0 และ 90 องศา และตัวประกอบแอนไอโซทรอปิก

(r-value) ที่หาได้จากอัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้างต่อความหนาจากชั้นทดสอบ ที่ 0° , 45° และ 90° การจำลองจะทำการทดสอบโดยการดึงชิ้นงานจนเกิดความเสียหายของชิ้นทดสอบโมดิฟาย โยชิตะในทิศทางตามแนวรีดและทิศทางขวางแนวรีด เพื่อศึกษาบริเวณวิกฤตของชิ้นทดสอบโดยการนำเส้นแนวความเครียดที่ได้จากบริเวณวิกฤตมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดหลัก (Major strain) และความเครียดรอง (Minor strain) เพื่อที่จะทราบจุดเบี่ยงเบน (Bisification) ในการระบุว่าเป็นขอบเขตของการเสียหายด้วยการย่นของวัสดุ AA5052-H32 ในสองทิศทางว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยอย่างไร



ภาพที่ 3 แบบจำลองการทดสอบการโค้งงอของโยชิตะ (Yoshida buckling test)

ก) การกำหนดขอบเขตของการจำลอง (ข) ตัวอย่างผลลัพธ์ของการจำลอง

3.2.1 สมบัติวัสดุ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุอะลูมิเนียมผสม เกรด AA5052-H32 ความหนา 1.0 มิลลิเมตร โดยได้นำโลหะแผ่นดังกล่าว ไปทำการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ตามมาตรฐาน ASTM E8 เพื่อที่จะได้ทราบความเค้นจริง (True stress) และความเครียดจริง (True strain) และตัวประกอบแอนไอโซทรอปิก (r-value) ถูกนำมาสร้างโค้งความเค้น-ไหลด ของวัสดุ AA5052-H32 อยู่บนพื้นฐานความสัมพันธ์ความเค้น และความเครียดจริง ที่แสดงพฤติกรรมเริ่มต้นการครากตัว การเริ่มเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic deformation) ตามตารางที่ 1 จากนั้นใช้สมการทำให้แข็งด้วยความเครียดของสวิตต์ (Swift hardening law) ตามสมการที่ 2 เพื่อที่จะใช้ในการประเมินพฤติกรรมของวัสดุในช่วงพลาสติกที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป ค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 2



$$\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \epsilon_p)^n \quad (2)$$

- เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ความต้านแรง
 ϵ_0 คือ ความเครียดในช่วงยืดหยุ่น
 ϵ_p คือ ความเครียดในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร
 n คือ เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของวัสดุ AA5052-H32 ความหนา 1 มิลลิเมตร

Test Direction	Yield Stress 0.2% (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	% Elongation Total	r-Value
0°	191.91	250.89	14.2	0.5058
45°	194.13	246.55	16.6	0.9298
90°	201.53	256.04	13.5	1.2798

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรจากสมการทำให้แข็งด้วยความเครียดของสวิตช์

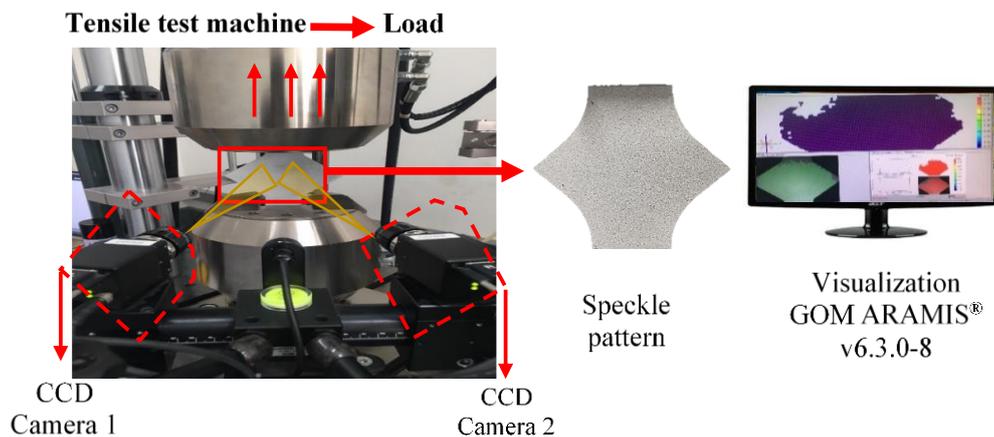
วัสดุ	สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (K)	ความเครียดช่วงยืดหยุ่น (ϵ_0)	เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (n)
AA5052-H32	358.9449	0.0026	0.1236

3.3 การทดสอบการโก่งขึ้นงานโมดิฟายโอยซิเดในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Instron ขนาด 50 kN ควบคุมไปกับการวัดค่าความเครียดบนแผ่นขึ้นงานทดสอบด้วยระบบ DIC เมื่อทำความสะอาดขึ้นงานแล้วทำการพ่นสเปรย์ (Spackle patten) ลงบนผิวขึ้นงานโดยใช้สเปรย์สีขาวด้านชนิดสีที่ใช้ต้องเป็นสีที่ยืดตัว (Plastic dip) ไม่สะท้อนแสงพ่นเป็นสีรองพื้นขึ้นงาน จากนั้นทิ้งไว้ 10-15 นาทีจนสีแห้งแล้วพ่นสเปรย์ทับจนหนาทั่วขึ้นงาน แล้วพักไว้ชั่วครู่จนสีแห้ง แล้วจึงพ่นสีสเปรย์สีดำลงเป็นลวดลายของรอยระยิบระยับพ่นสีสเปรย์ดำควรมีระยะห่างประมาณ 1 ฟุต เมื่อพ่นสเปรย์สีดำแล้วจะพบว่าสีจะกระจายเป็นจุด (Dot) ความถี่ของจุดสีดำต้องตามมาตรฐาน ARAMIS®- 4M, 5M system ระหว่างพ่นสเปรย์ควรระมัดระวังไม่ให้สิ่งแปลกปลอมหรือฝุ่นตกลงไปเพื่อกันสีหลุดลอกออกจากผิว หลังจากนั้นนำขึ้นงานไปจับยึดบนปากจับขึ้นงานโดยปากจับจะมีลายกันลื่นกันขึ้นงานเกิดการสลิประหว่างดึงตามภาพที่ 5 ส่วนการวัดค่า

ความเครียดขึ้นงานทดสอบได้ใช้เครื่องวัดความเครียดด้วยการเคลื่อนที่ ARAMIS® ตั้งระยะกล้องโฟกัส 34 CM ในถ่ายภาพเพื่อไปคำนวณวัดความเครียดบนโปรแกรม ARAMIS®-V6.3.0-8

การตั้งขึ้นงานทดสอบโมดิฟายโยชิตะทั้ง 6 แบบต้องตั้งค่าวินาทีการบันทึกภาพให้สัมพันธ์กับความเร็วดึงทดสอบในงานวิจัยนี้ได้ใช้ความเร็วดึงที่ 50 มิลลิเมตร/นาทีและความถี่ในการถ่ายภาพอยู่ที่ 1 วินาทีต่อ 1 ภาพ ดึงจนขึ้นงานแตกแล้วทำการหยุดเครื่องทดสอบและหยุดการถ่ายภาพจากกล้อง ARAMIS® แล้วบันทึกข้อมูลการทดสอบจากเครื่องทดสอบแรงดึง ได้แก่ แรง (Force) ระยะขจัด (Displacement) เวลา (Time) ในหน่วยที่เป็นวินาที ส่วนกล้อง ARAMIS® ทำการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมแล้วบันทึกข้อมูลในการทดสอบ คือลำดับภาพที่ขึ้นงานเริ่มเสียรูป (Stage) ค่าความเครียดหลักและค่าความเครียดรอง



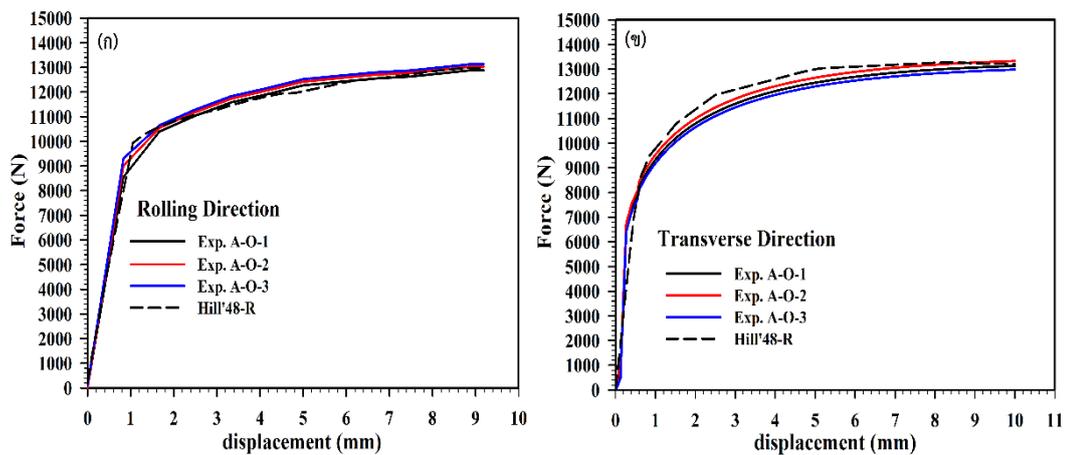
ภาพที่ 4 เครื่องทดสอบแรงดึงและเครื่องวัดความเครียดด้วยการเคลื่อนที่ ARAMIS®

4. ผลการวิจัย

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์

หลังจากการดึงทดสอบขึ้นงานโมดิฟายโยชิตะโดยมีการทดลองซ้ำชุดละ 3 ชิ้น ได้ทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเส้นโค้งแรงและระยะขจัดที่ขึ้นงานนั้นเกิดการเสียรูปกับผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยเกณฑ์การคราก Hill'48-R ของขึ้นงานโมดิฟายโยชิตะทั้งในทิศทางตามแนวรีดและทิศทางขวางแนวรีด ผลการจำลองและการทดลองพบว่าทิศทางขวางแนวรีด นั้นใช้แรงในการดึงขึ้นรูปมากกว่าทิศทางตามแนวรีด อันเนื่องมาจากสมบัติพลาสติก (r-value) นั้นมีค่ามากจึงเกิดการเสียรูปได้ยากกว่า ตามภาพที่ 5 (ก) และ (ข) และเพื่อเพิ่มความมั่นใจว่าแรงดึงขึ้นงานที่ระยะขจัดเดียวกันมีความไม่มีความแตกต่างกันและเป็นที่ยอมรับได้ที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติที่ 95% จึงได้ใช้การทดสอบทางสถิติแบบประชากร 2 กลุ่มโดยใช้การทดสอบแบบ t-test ดังแสดงผลการทดสอบทางสถิติดังตารางที่ 3 เนื่องจากขึ้นงานแต่ละกลุ่มนั้นมี Force-displacement ไม่เหมือนกันและจะมี

ตารางแสดงผลข้อมูลทางสถิติของชิ้นงานแต่ละกลุ่มจำนวนมาก ผู้วิจัยแสดงผลการทดสอบสถิติของชิ้นงานกลุ่ม A-O ในทิศทางตามแนวรีด เมื่อพบว่าไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทั้งการจำลองและการทดลองจึงถือว่าโมเดลมีความถูกต้อง ส่วนชิ้นงานกลุ่มอื่นได้ทำการแสดงผลเป็นจุดความเครียดที่ได้จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ในแผนภาพความเครียดหลักและความเครียดรอง ภาพแสดงพื้นที่บริเวณวิกฤตของชิ้นงานทดสอบจาก DIC เทียบกับผลการจำลอง



ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรงจากการจำลองกับการทดลองของชิ้นงานโมดิฟายโยซิเด ตัวอย่างชิ้นงานกลุ่ม A (ก) ทิศทางตามแนวรีด (ข) ทิศทางขวางแนวรีด

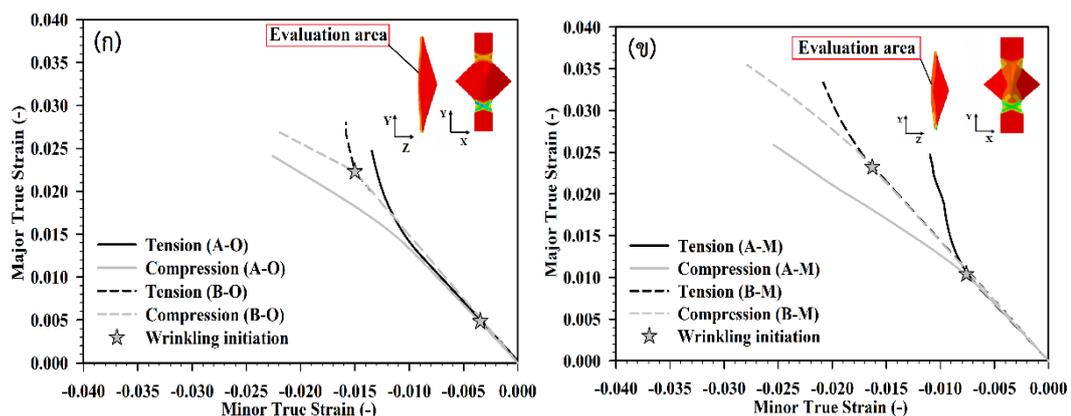
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบประชากร 2 กลุ่มระหว่างแรงดึงขึ้นรูปจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และแรงดึงขึ้นรูปการทดลองโดยไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของตัวอย่างชิ้นงานกลุ่ม A-O ในทิศทางตามแนวรีด

t-Test : Two-Sample Assuming Unequal Variances : Rolling Direction		
	EXP.	SIM
Mean	13012.590	12879.257
Variance	15833.333	10000.000
Observations	3	3
Pearson Correlation	0.397	
Hypothesized Mean Difference	0.000	
df	2.000	
t Stat	1.835	
P(T<=t) one-tail	0.104	
t Critical one-tail	2.920	
P(T<=t) two-tail	0.208	
t Critical two-tail	4.303	
p value > 0.05	0.208	Reject the hypothesis H1
t Stat < t Critical		Reject the hypothesis H1
The Force-displacement between the simulation and experimental is non different. At the 95% confidence level		

ผลการทดสอบทางสถิติของประชากร 2 กลุ่ม โดยมี ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่ามีค่า p-value มีค่ามากกว่า 0.05 และค่า t Stat น้อยกว่า t Critical จึงยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) นั้นหมายความว่า แรงดึงขึ้นงานที่ระยะขจัดเดียวกันทั้งการจำลองและการทดลองตัวอย่างขึ้นงานกลุ่ม A-O พบว่าไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 นั้นแสดงว่าโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบการโค้งของโมติฟายโยซิดะมีความถูกต้อง

4.2 การระบุการเริ่มต้นของการย่นบนพื้นฐานการโค้ง

การพัฒนาเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นจากการทดสอบการโค้งของโมติฟายโยซิดะ แสดงถึงขีดจำกัดการขึ้นรูป ของวัสดุ AA5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร ที่มีพื้นที่การขึ้นรูปได้ (Forming area) ก่อนที่จะเข้าพื้นที่การเสียหายด้วยการย่น (Wrinkling area) ในบริเวณวิกฤติ (Critical area) เส้นแนวความเครียด (Strain path) ในตำแหน่งที่เริ่มโค้งจะพบว่าเส้นแนวความเครียดจะเบี่ยงเบนออกจากกันตามงานวิจัยของ (Han *et al.*, 2014; Han *et al.*, 2015) และ Cheng *et al.* (2006) โดยวิธีการระบุการเริ่มต้นย่น อันเนื่องมาจากความเค้นกดส่งผลให้บริเวณวิกฤติมีผลทำให้เส้นทางความเครียดมีการเบี่ยงเบน ภาพที่ 6 ซึ่งก่อตัวเป็นการเริ่มต้นการย่นในการขึ้นรูปโลหะแผ่นเกิดจากส่วนประกอบของความเครียดสองชนิดได้แก่ พื้นที่ที่มีความเครียดดึง (Tension) และพื้นที่ที่มีความเครียดกด (Compression) ด้วยวิธีนี้สามารถนำมาสร้างเป็นแผนภาพขีดจำกัดการย่นโดยพิจารณาจากเส้นทางความเครียดที่เบี่ยงเบนออกจากกันนั้นเป็นจุดเริ่มต้นการย่น (Wrinkling initiation point)

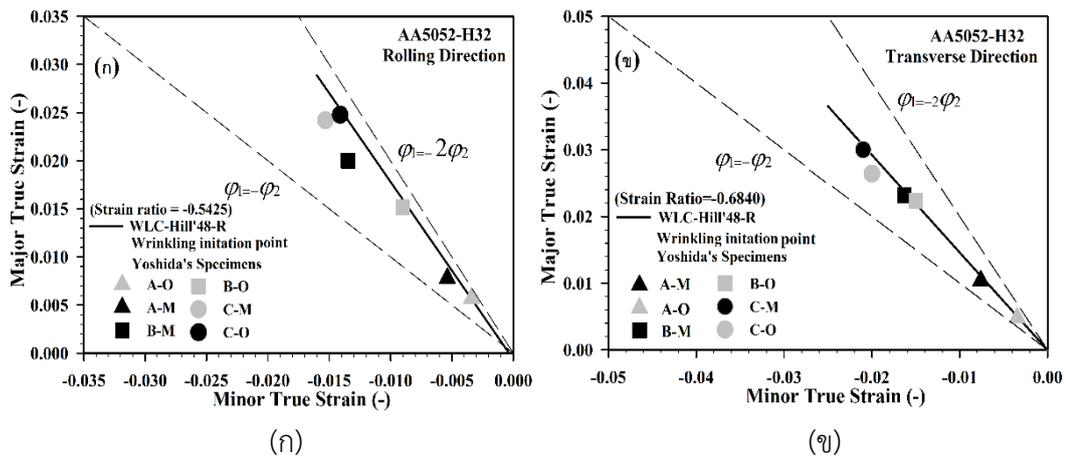


ภาพที่ 6 ตัวอย่างจุดเริ่มต้นการย่นของวัสดุ AA5052-H32 บนพื้นฐานเกณฑ์การคราก

แอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R (ก) ทิศทางตามแนวรีด (ข) ทิศทางขวางแนวรีด

ในสถานะการย่นบริเวณผนัง (Non-flange wrinkling) โดย Li *et al.* (2021) กล่าวว่าขอบเขตการขึ้นรูปอยู่ภายใต้สัดส่วนความเครียด $\phi = -2\phi_2$ คือในสภาวะการดึงแกนเดียว และ

$\phi_1 = -\phi_2$ สภาวะความเครียดเฉือนบริสุทธิ์ ผลจากการจำลองพบว่าชิ้นงานโมดิฟายโยชิเดะทั้ง 6 แบบแสดงผลเป็นจุดเริ่มต้นของการย่นเรียกจุดความเครียด (Strain point) โดยการทดสอบการดึงชิ้นงานในขนาดต่าง ๆ ในทิศทางตามแนวรีด และ ทิศทางขวางแนวรีด ทั้งสองทิศทางนั้นมีจุดที่ความเครียดเป็ยงเบนจากนั้นนำจุดความเครียดมาทำการสร้างสมการเส้นตรงเพื่อที่จะทราบ พื้นที่ที่จะขึ้นรูปได้ และ พื้นที่ที่จะเสียหายด้วยการย่นตามภาพที่ 7

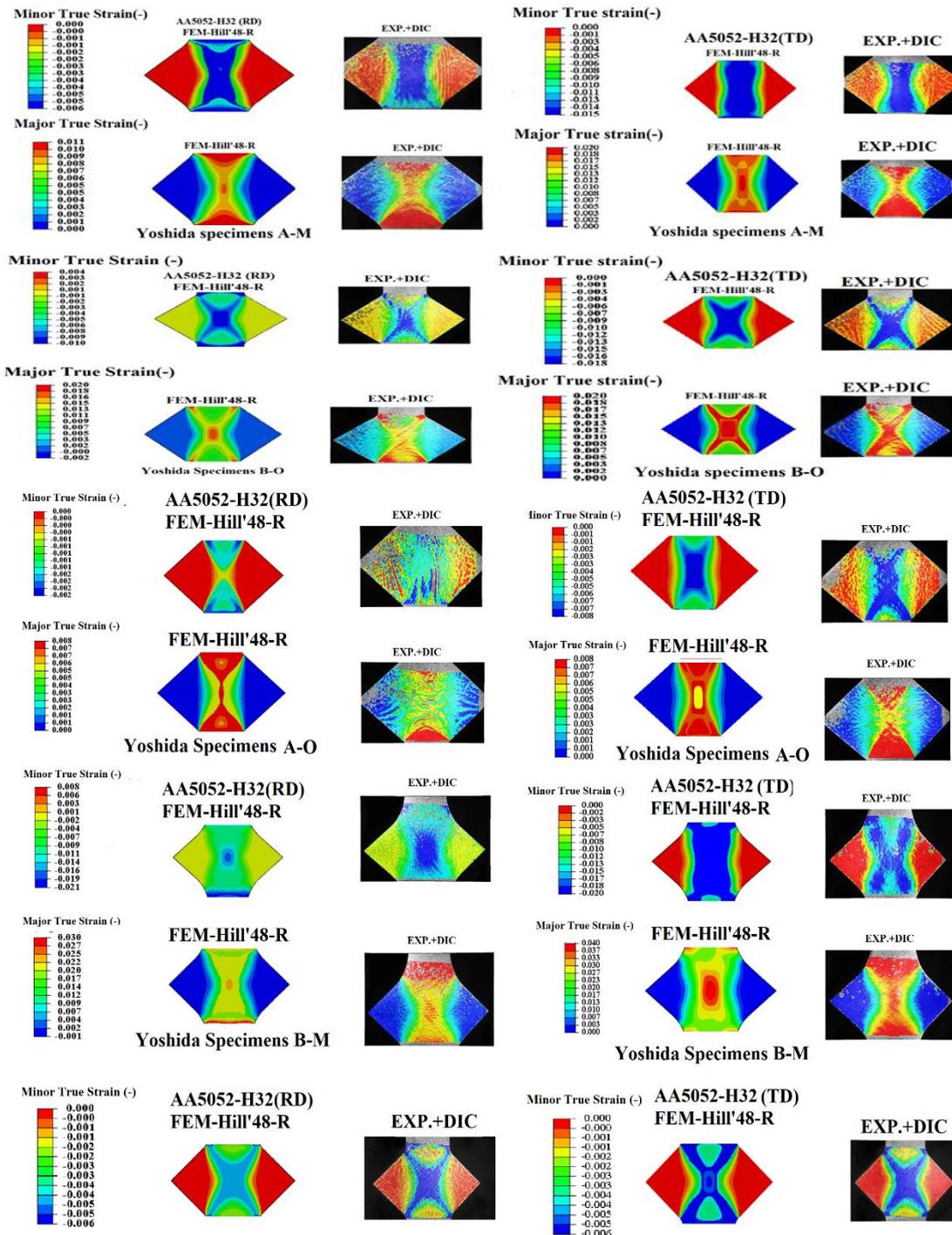


ภาพที่ 7 เส้นขีดจำกัดการย่นของ AA5052-H32 บนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R (ก) ทิศทางตามแนวรีด (ข) ทิศทางขวางแนวรีด

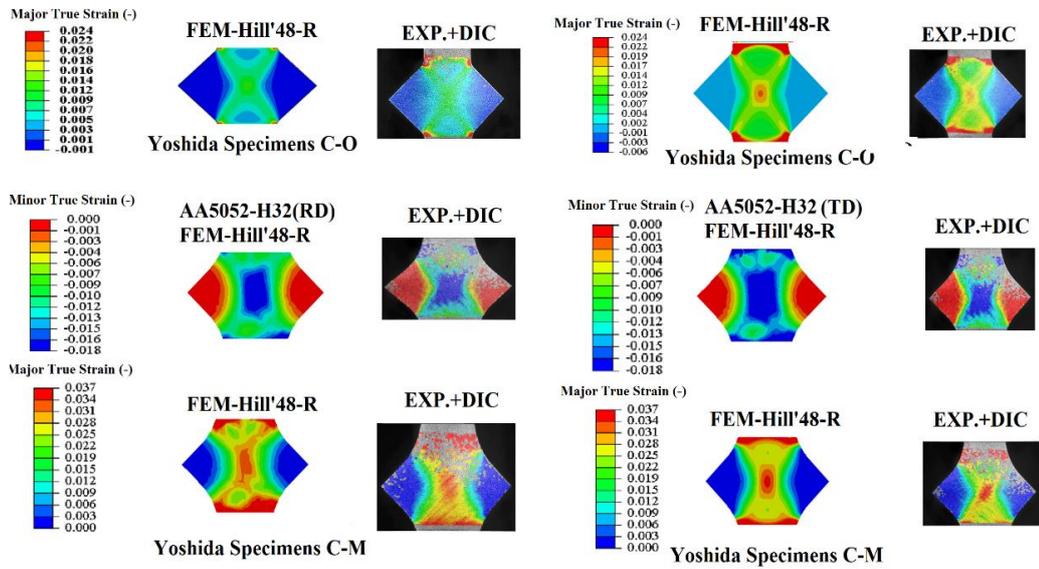
ผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นทดสอบโมดิฟายโยชิเดะ ด้วยเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกแบบ Hill'48-R บนพื้นฐานค่าสมบัติพลาสติกของวัสดุ พบว่าบริเวณวิกฤตของชิ้นงานทดสอบที่แสดงผลการจำลองนั้นมีความสอดคล้องกับการทดลองที่ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DIC นั้นมีบริเวณวิกฤตที่ใกล้เคียงกันตามงานวิจัยของ (Schleich *et al.* 2009; Du *et al.* 2020) ได้ทำการแสดงภาพการเสียรูปในตำแหน่งระยะขจัดเดียวกันโดยอ้างอิงมาจากจุดความเครียดที่ได้จากเส้นแนวความเครียดมีการเป็ยงเบนโดยแสดงผล ภาพที่ 8 แสดงภาพเปรียบเทียบพื้นที่ความเสียหายในลักษณะค่าความเครียดหลักและความเครียดรอง ของชิ้นงานการทดสอบการโก่งของโยชิเดะทั้งหมด

การทำทดลองชิ้นงานซ้ำได้ทำการแสดงจุดความเครียดที่ได้จากพื้นที่ความเสียหายจาก DIC ที่ระยะขจัดเดียวกันกับการจำลอง จากภาพที่ 8 จุดความเครียดทั้ง 6 จุดนั้นบ่งบอกสถานะการเริ่มต้นการย่นจะใช้ในการสร้างเส้น WLC ตามงานวิจัยของ (Du *et al.*, 2021; Han *et al.*, 2015) โดยสมการควบคุมเชิงเส้นซึ่งอยู่บนข้อมูลจุดความเครียดที่บ่งบอกสถานะการเริ่มต้นการย่นบนพื้นฐานความเสียหายด้วยการโก่งทั้งการจำลองและการทดลองการทดสอบการโก่งแบบโยชิเดะทั้ง 6 ขึ้นตาม

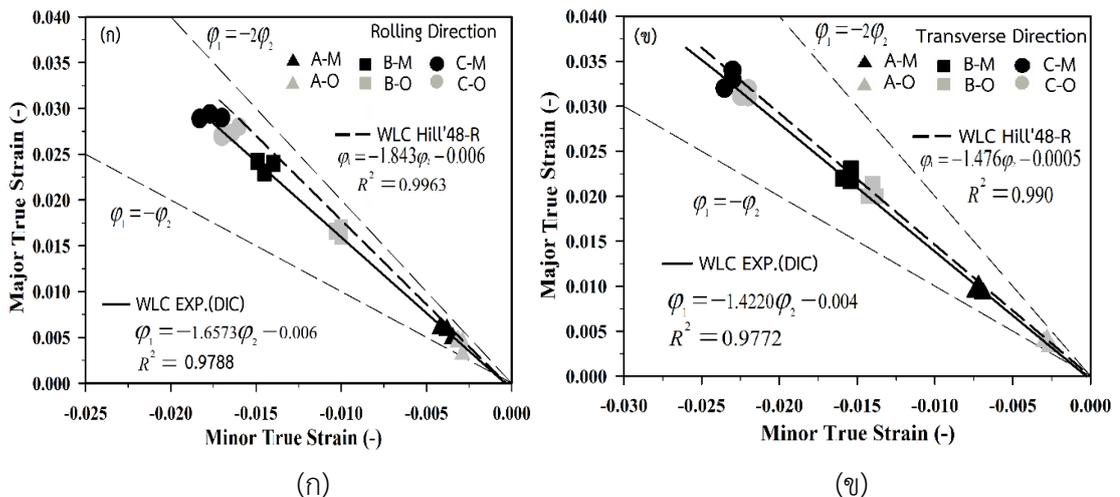
ภาพที่ 9 ที่มีค่าประมาณความคลาดเคลื่อนแนวรีดละ 2 % ซึ่งแสดงในงานวิจัยของ Du *et al.* (2020) และ การสร้างเส้นขีดจำกัดการย่น จากการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 8 ตัวอย่างการตรวจสอบพื้นที่บริเวณวิกฤตของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับการวิเคราะห์ด้วย เทคนิค DIC ของชิ้นทดสอบโมติฟายโยชิตะ



ภาพที่ 8 ตัวอย่างการตรวจสอบพื้นที่บริเวณวิกฤตของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับการวิเคราะห์ด้วย เทคนิค DIC ของชิ้นทดสอบโมติฟายโยซิดะ (ต่อ)



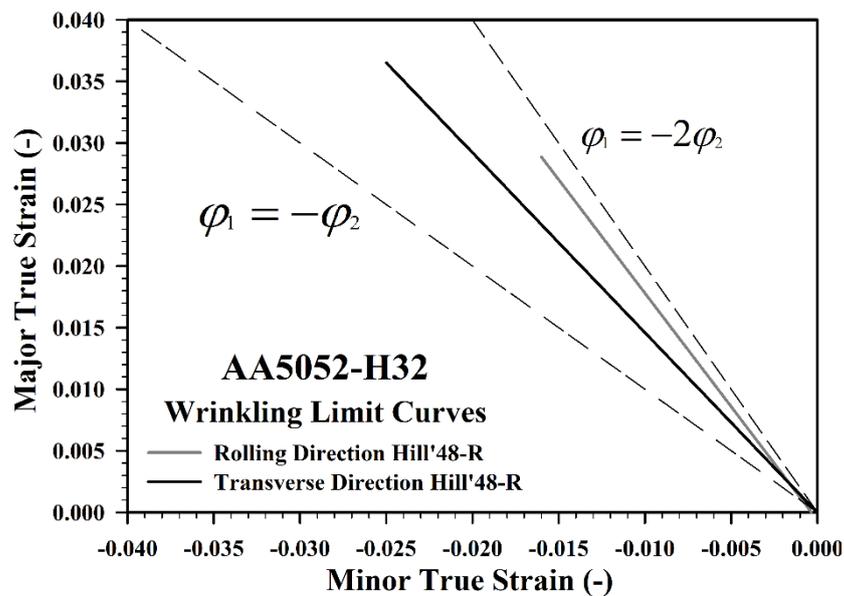
ภาพที่ 9 เส้นขีดจำกัดการย่นของ AA5052-H32 จาก DIC

(ก) ทิศทางตามแนวรีด (ข) ทิศทางขวางแนวรีด

4.3 การวิเคราะห์ผล

เส้นขีดจำกัดการย่นที่ได้จากการจำลองด้วยเกณฑ์การครากของ Hill'48-R ทั้ง 2 ทิศทางการรีด เมื่อถูกตรวจสอบความถูกต้องด้วยเทคนิค DIC แล้วจะนำไปทำการเปรียบเทียบพื้นที่การขึ้นรูปได้ ดังภาพที่ 10 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดหลักและความเครียดรองของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป พบว่าเส้นขีดจำกัดการย่นของวัสดุอะลูมิเนียมผสมสำหรับงานวิจัยนี้ มี

ผลการวิจัยความคล้ายคลึงกับผลการทดลองของ (Narayanasamy *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2021) โดยทำให้ในทิศทางตามแนวรีด มีสัดส่วนความเครียด (Strain ratio) อยู่ที่ -0.5425 และได้สมการควบคุมเชิงเส้นคือ $\phi_1 = -1.843\phi_2 - 0.006$ ซึ่งสังเกตได้ว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกับสถานะการดึงแกนเดียวตามภาพที่ 7(ก) ถ้าในระหว่างการขึ้นรูปการกระจายตัวของความเครียดบริเวณใดๆ ของชิ้นงานเมื่อถูกเปลี่ยนรูปและความเครียดกระจายตัวลงมารวมเส้นขีด WLC นี้จะส่งผลให้บริเวณนั้นมีการเริ่มเสียรูปด้วยการย่นเกิดขึ้น ในทิศทางขวางแนวรีด นั้นมีสัดส่วนความเครียดอยู่ที่ -0.6848 ตามภาพที่ 7(ข) และได้สมการควบคุมเชิงเส้นอยู่ในรูปของความเครียดหลักและความเครียดรอง $\phi_1 = -1.476\phi_2 - 0.0005$ ที่ผลลัพธ์จากสมบัติทางกลของวัสดุมีการแตกต่างกันเนื่องมาจากค่าสมบัติพลาสติก (r-value) ตามตารางที่ 1 นั้นมีค่ามากกว่าจึงส่งผลทำให้เสียรูปได้ยากกว่าและมีพื้นที่การขึ้นรูปได้มากกว่า ทิศทางตามแนวรีดก่อนที่จะเสียหายด้วยการย่น



ภาพที่ 10 เส้นเส้นขีดจำกัดการย่นจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์บนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

เส้นขีดจำกัดการย่นที่ถูกสร้างจากการทดสอบการโก่งของโมติฟายโยชิตะสำหรับวัสดุ AA5052-H32 ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์บนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิก Hill'48-R เพื่อใช้สำหรับประเมินความสามารถในการขึ้นรูปได้ก่อนที่จะเสียหายด้วยการย่นที่เกิดขึ้นบริเวณผนังในทิศทางตามแนวรีดและทิศทางขวางแนวรีดของโลหะแผ่นซึ่งความ

แตกต่างของผลการทดลองดังกล่าวนี้เป็นผลมาจากความไม่เท่ากันทุกทิศทางของวัสดุในงานวิจัยสามารถสรุปผลได้ตามนี้

1. การทดสอบการโค้งงอของโมติฟายโอยซิเตสามารถนำมาสร้างเส้นขีดจำกัดการย่นของวัสดุ AA5052-H32 ความหนา 1 มิลลิเมตรได้

2. ผลของการจำลองด้วยเกณฑ์การครากของ Hill'48-R และสมการการทำให้แข็งด้วยความเครียดของสวิตต์โดยใช้ค่าสมบัติทางกลของวัสดุที่ได้จากการทดสอบการดึง สามารถประเมินพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุได้ใกล้เคียงกับการทดลองดังแสดงในงานวิจัยของ (Du *et al.*, 2020; Du *et al.*, 2021)

3. ความแตกต่างกันของเส้นขีดจำกัดการย่นในทิศทางตามแนวรีดและทิศทางขวางแนวรีดมีความต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากค่า r -value ที่มีความต่างกันมากในตัววัสดุส่งผลให้มีความสามารถในการขึ้นรูปโดยตรงได้ดีกว่า

4. ค่าสัดส่วนความเครียดมากจะทำให้วัสดุขึ้นรูปได้ดีก่อนที่จะเกิดการย่น ซึ่งสอดคล้องกับการเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง ดังแสดงในงานวิจัยภาพที่ 5 ดังนั้นควรจัดวางแนวทิศทางการรีดของวัสดุให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปเพราะฉะนั้นการนำเส้นขีดจำกัดการย่นไปใช้งานดังแสดงในงานวิจัยของ (Won *et al.*, 2019; Han *et al.*, 2015) ควรเลือกใช้เส้นขีดจำกัดการย่นให้ถูกต้องตรงตามทิศทางแนวการรีดของวัสดุที่นำมาใช้ในการขึ้นรูป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้ให้ความสนับสนุนอุปกรณ์การวัดความเครียดด้วยการเคลื่อนที่บนโปรแกรม ARAMIS®-V6.3.0-8 และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้ให้ความสนับสนุนการใช้งานโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS 2017 จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- Banabic, D. (2010). **Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical Simulation**. Springer Heidelberg Dordrecht London New York. Doi: 10.1007/978-3-540-88113-1
- Bayraktar, E., Isac, N., & Arnold G. (2005). Buckling limit diagrams (BLDs) of interstitial free steels (IFS): Comparison of experimental and finite element analysis. **Journal of Materials Processing Technology**, 164, 1487-1494.



- Kim, J.B., Yoon, J.W., & Yang, D. Y. (2000). Wrinkling initiation and growth in modified Yoshida buckling test: finite element analysis and experimental comparison. **International journal of mechanical sciences**, 42(9), 1683-1714.
- Liewald, M., & Han, F. (2015, June). **A new approach for determination of the wrinkling limit curve (WLC) in deep drawing**. In Proceeding of Forming Technology Forum (FTF2015), Zurich (Vol. 29, p. 30).
- Won, C., Kim, H. G., Lee, S., Kim, D., Park, S., & Yoon, J. (2019). Wrinkling prediction for GPa-grade steels in sheet metal forming process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 102(9), 3849-3863.
- Du, B., Xie, J., Li, H., Zhao, C., Zhang, X., & Yuan, X. (2020). Determining factors affecting sheet metal plastic wrinkling in response to nonuniform tension using wrinkling limit diagrams. **Thin-Walled Structures**, 147, 106535.
- Hill, R. (1948). A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. **Mathematical and Physical Sciences**, 193(1033), 281-297.
- Han, F., & Liewald, M. (2014). A new method to enhance the accuracy of the buckling test using modified Yoshida sample. In **Advanced Materials Research**, 1018, 199-206. Doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.199](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.199)
- Schleich, R., Albiez, C., Papaioanu, A. & Liewald, M. (2009). **Investigation on simulation of buckling of aluminium sheet alloys**. In 7th European LS-DYNA Conference.
- Cheng, H.S., Cao, J., & Wang, H.P. (2006, January). **Experimental and numerical analysis of the buckling and post-buckling phenomenon in the Yoshida test**. In International Manufacturing Science and Engineering Conference, 47624, 249-256.
- Narayanasamy, R., & Narayanan, C.S. (2008). Forming, fracture and wrinkling limit diagram for if steel sheets of different thickness. **Materials & Design**, 29(7), 1467-1475.
- Li, H., Sun, H., Liu, H., & Liu, N. (2021). Loading conditions constrained wrinkling behaviors of thin-walled sheet/tube parts during metal forming. **Journal of Materials Processing Technology**, 296, 117199.



Du, B., Li, H., Xie, J., Song, P., Zhao, C., & Dong, G. (2021). Research on the establishment and influence mechanism of critical wrinkling limit diagram (WLD) of plate and shell forming under mold constraints. **Journal of Manufacturing Processes**, 64, 1047-1058.