



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาวิธีแบบใหม่สำหรับหาเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น
และการนำไปใช้ในการทำนายการเริ่มเกิดรอยย่นในกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แสนสด พานิช

พฤษภาคม / 2563

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาวิธีแบบใหม่สำหรับหาเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นและการนำไปใช้ในการทำนายการเริ่มเกิดรอยย่นในกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก

นักวิจัย

- ผศ.ดร. แสนสด พานิช
- รศ.ดร. วิฑูร อุทัยแสงสุข

สังกัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. และ สกอ. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : MRG6180075

ชื่อโครงการ : การพัฒนาวิธีแบบใหม่สำหรับหาเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นและการนำไปใช้ในการทำนายการเริ่มเกิดรอยย่นในกระบวนการดัดขึ้นรูปลึก

ชื่อนักวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แสนสด พานิช
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

E-mail Address: sansot.p@eng.kmutnb.ac.th

ระยะเวลาโครงการ 2 ปี

บทคัดย่อ

การขึ้นรูปโลหะแผ่นในอุตสาหกรรมการผลิตในปัจจุบัน ได้ให้ความสำคัญกับวัสดุที่มีคุณสมบัติในราคาต่ำ ดังนั้นการประเมินความสามารถในการขึ้นรูปได้ เป็นการตรวจสอบสภาพการขึ้นรูปของโลหะเมื่อได้รับแรง ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปในแม่พิมพ์ ด้วยเครื่องมือตรวจสอบ คือแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ปราศจากข้อบกพร่อง โดยนำมาประยุกต์ใช้กับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองกระบวนการขึ้นรูปเพื่อลดต้นทุนลดค่าใช้จ่ายวัสดุ และลดเวลาการลองผิดลองถูก ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น (Wrinkling Limit Curve, WLC) ของแผ่นอลูมิเนียมผสมเกรด AA5052-O ความหนา 1 มิลลิเมตร ทำการทดสอบการโก่งโยชิตะ (Yoshida Buckling Test) ในแนวรีด (Rolling Direction) และขวางแนวรีด (Transverse Direction) จนเกิดการโก่งบนขึ้นงานโดยโปรแกรม ABAQUS 2017 เพื่อให้สอดคล้องกับการทดสอบจริงโดยการเปรียบเทียบเส้นโค้งแรงกับระยะการดัดขึ้นทดสอบ (Force - Displacement) จากผลการจำลองสามารถประเมินค่าความเครียดหลัก (Major Strain) และความเครียดรอง (Minor Strain) บนพื้นที่บริเวณที่เกิดรอยโก่ง โดยระบุช่วงเวลาการเกิดการโก่งด้วยจุดเบี่ยงเบนของเส้นแนวความเครียด (Strain Path) ที่เกิดจากความเค้นดึงและความเค้นกดที่เกิดขึ้นจากการจำลองการทดสอบการโก่งโยชิตะ นำค่าความเครียดหลักและรองมาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น (WLC) บนพื้นฐานของเกณฑ์ครากแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic Yield Criteria) ของ Hill'48-R (r-based) และ Hill'48-S (stress based) ของทั้ง 2 แนวรีด เพื่อศึกษาอิทธิพลของเกณฑ์การครากที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลกระทบต่อเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น อีกทั้งมีการตรวจสอบจังหวะช่วงเวลาเริ่มเกิดการโก่งบนขึ้นทดสอบ ด้วยเทคนิคอะคูสติกอีมิสชัน (Acoustic Emission Technique, AE) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นได้อย่างชัดเจน เส้นโค้งขีดจำกัดการย่นที่พัฒนาสร้างแล้วถูกตรวจสอบการนำไปประยุกต์ใช้งานได้กับการทดสอบขึ้นรูปขึ้นส่วนจากภาคอุตสาหกรรม

คำสำคัญ : เส้นโค้งขีดจำกัดการย่น การทดสอบการโก่งโยชิตะ การเริ่มต้นการเกิดการย่น
เทคนิคอะคูสติกอีมิสชัน

Executive Summary

การพัฒนาวิธีแบบใหม่สำหรับหาเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นและการนำไปใช้ในการทำนาย การเริ่มเกิดรอยย่นในกระบวนการดัดขึ้นรูปลึก

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นมีความสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ แต่ในปัจจุบันไม่ได้จำกัดเพียงแค่ชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผลิตจากเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (Advanced High Strength Steel) จากนโยบายภาครัฐบาลที่ต้องการส่งเสริมอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอากาศยานในประเทศ และส่งเสริมและผลักดันให้ประเทศเป็นศูนย์กลางการผลิตชิ้นส่วนอากาศยานในภูมิภาค และในขณะนี้มีแนวโน้มการผลิตชิ้นส่วนอากาศยานเพิ่มขึ้นโดยมีผู้ประกอบการรายใหญ่มาลงทุนผลิตชิ้นส่วนอากาศยานภายในประเทศ วัสดุที่ใช้ในการผลิตก็จะเป็นอลูมิเนียมผสม (Aluminum Alloy)เกรดพิเศษที่มีคุณสมบัติที่เบาแต่มีความแข็งแรงสูง สิ่งสำคัญในการควบคุมกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น คือความสามารถควบคุมความบกพร่องในการขึ้นรูปไม่ให้เกิดขึ้นความบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ได้แก่ การเกิดรอยย่น (Wrinkling) การเกิดการคอด (Localized Necking) การเกิดการฉีกขาด (Tearing) และการเกิดการดีดตัวกลับ (Spring-back) การเกิดรอยย่นเป็นข้อบกพร่องที่สำคัญที่สุดที่ต้องควบคุมไม่ให้เกิดขึ้นในการขึ้นรูป และเป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการลดความหนาของแผ่นโลหะ ซึ่งมักพบในกระบวนการดัดขึ้นรูปลึก (Deep drawing Process) นอกจากนี้ อาจทำให้เกิดความเสียหายกับแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะตรงบริเวณที่เกิดรอยย่น อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนได้ออกแบบ การลดน้ำหนักชิ้นส่วน เพื่อประหยัดพลังงาน ลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ดูดซับพลังงานจากแรงภายนอกที่มากระทำ และรวมถึงความปลอดภัย หนึ่งในสาเหตุของการลดความหนา จนทำให้เกิดรอยย่นบนแผ่นโลหะขณะทำการขึ้นรูป ดังนั้นเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ปราศจากข้อบกพร่อง จึงมีการทำนายพฤติกรรมเส้นโค้งขีดจำกัดการเปลี่ยนรูปของการเกิดรอยย่นของวัสดุ เป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบแม่พิมพ์ (Die Design) ด้วยระเบียบวิธีการทดลองจริง และการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เพื่อลดขั้นตอน ลดข้อผิดพลาด ระยะเวลา (Trial and Error) และปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ในงานวิจัยนี้มีการพัฒนาวิธีการใหม่เพื่อพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น (Wrinkling limit curve, WLC) คือพัฒนาวิธีการผสมผสานของการทดลอง และการจำลองการทดลอง เพื่อกำหนดช่วงจังหวะการเริ่มเกิดรอยย่น ในส่วนแรก คือการทดสอบการโก่ง (Yoshida buckling test) การทดสอบความไร้เสถียรภาพ (Instability test) และการทดสอบ Conical Cup test ทดสอบการเกิดรอยย่นบนชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เพื่อเลียนแบบสภาพการเกิดรอยย่นที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจริงในกระบวนการขึ้นรูป และสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการทดสอบจริง โดยวัดค่าความเครียด (Strain) ขณะเกิดการย่นในระหว่างทดสอบ จากการทดสอบจะทำให้ทราบเวลาและระยะขจัด (Displacement) ของการทดสอบในขณะที่เกิดรอยย่น นำเวลาและระยะขจัดมากำหนดในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบในแบบต่างๆ เพื่อใช้เป็นช่วงเวลาในการเก็บค่าความเครียด (Strain) ค่าความเค้น (Stress) ขณะเกิดการย่นจากการจำลองเพื่อยืนยันการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น จากค่าการทดลอง จากแบบจำลองจะทำให้ทราบค่าความเค้นกด (Compressive stress) ซึ่งเป็นค่าที่ระบุการเกิดการย่นได้อย่างแม่นยำ ในส่วนที่สอง คือการจำลองการทดสอบเชิงตัวเลข (Numerical Simulation) ในการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น โดยใช้เกณฑ์พฤติกรรมสมบัติการเปลี่ยนรูปที่ไม่เท่ากันทุกทิศทาง (Anisotropic Plastic Behavior) คือ Hill'48, Yld2000-2d และ Yld2004-18p ที่ยังไม่มีนักวิจัยหรือรายงานวิจัยในวารสารนานาชาติได้ดำเนินการมาก่อน เพื่อการเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการทดลองกับการจำลองการทดสอบเชิงตัวเลขที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในเชิงความแม่นยำ สามารถทราบช่วงจังหวะที่ชิ้นงานเริ่มเกิดสภาวะการย่นเพิ่มความแม่นยำในการทำนายผลพฤติกรรมของเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น

ตามที่ได้อธิบายไปแล้วอย่างมีประสิทธิภาพ และตรวจสอบจากการนำไปประยุกต์ใช้งานได้ของ WLC กับการทดสอบชิ้นงานในห้องปฏิบัติการ และชิ้นส่วนจากภาคอุตสาหกรรมตามลำดับ

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 พัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น สำหรับประเมินความสามารถในการขึ้นรูปได้ของแผ่นอลูมิเนียมผสม ด้วยวิธีผสมผสานการทดลองและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของสมบัติการเปลี่ยนรูปพลาสติกที่ไม่เท่ากันทุกทิศทางที่มีต่อสภาพการย่นของแผ่นอลูมิเนียมผสม
- 2.3 สามารถตรวจพิสูจน์การนำไปประยุกต์ใช้งานได้ของเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นที่พัฒนาแล้วจากการทดสอบชิ้นงานในห้องปฏิบัติการและชิ้นส่วนจากภาคอุตสาหกรรม

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ทดสอบสมบัติวัสดุ

ดำเนินการทดสอบสมบัติทางกลเพื่อหาความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนรูปของวัสดุหลังได้รับแรงกระทำในรูปแบบเส้นโค้งความเค้น-ไหล (Flow Curve) และหาค่าของสมบัติที่ไม่เท่ากันทุกทิศทาง (Anisotropic Plastic Behavior) ในแผ่นอลูมิเนียมผสม เพื่อกำหนดพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปพลาสติกให้กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการจำลองการทดลอง การทดสอบเพื่อหาลักษณะพฤติกรรมของวัสดุและความเค้นความเครียดของแผ่นอลูมิเนียมผสมภายใต้สภาวะการเปลี่ยนรูปพลาสติกในรูปแบบต่างๆ

3.1.1 การทดสอบ Tensile test เพื่อกำหนดค่าความสามารถในการยืดตัวที่ไม่เท่ากันในทุกทิศทุกทางที่บ่งบอกสมบัติการยืดตัว (R-values) ทดสอบตามทิศทางทุกๆ 15 องศา รวมทั้งค่าความเค้นคราก

3.1.2 การทดสอบ Hydraulic bulge test ใช้แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกดันชิ้นงานขึ้นรูปเป็นรูปโดม ดันจนชิ้นงานแตก ซึ่งเป็นสภาวะการดึงสองทิศทาง เพื่อกำหนดค่าความเค้นในสองทิศทาง (σ_b)

3.1.3 การทดสอบ Disk compression test ใช้แรงกด กดชิ้นงานรูปวงกลมเพื่อกำหนดค่าความสามารถในการยืดตัวที่ไม่เท่ากันในทุกทิศทุกทางในสองแกน (r_b)

นำค่าการทดสอบดังกล่าวในข้อ 3.1.1- 3.1.3 มาทำการคำนวณด้วยชุดโปรแกรมคำนวณทางคอมพิวเตอร์ เพื่อกำหนดค่า Anisotropic Parameters ของ Hill'48 Yld2000-2d และ Yld2004-18p เพื่อกำหนดค่าตัวแปรใส่ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่ออธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปพลาสติกแอนไอโซทรอปิกที่มีการเปลี่ยนรูปยืดตัวที่ไม่เท่ากันทุกทิศทาง นับได้ว่าสามารถทำนายพฤติกรรมดังกล่าวได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ และจะนำไปใช้ในหัวข้อที่ 3.3 เพื่อกำหนดให้กับแบบจำลอง

3.2 การทดสอบสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น

แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 รูปแบบ เพื่อทดสอบเลียนแบบสภาพการเกิดรอยย่นนำไปสู่การสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นจากการทดลองและใช้กำหนดค่าจิ้งหะเริ่มเกิดการย่นจากการทดลองที่เวลาและระยะขจัดที่ปรากฏการย่นเพื่อนำไปกำหนดในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ว่าช่วงเวลานี้จะเกิดการย่น สามารถเก็บค่าความเค้น ความเครียด นำไปเทียบกับผลจากการทดลองเพื่อความแม่นยำของผลลัพธ์ และตรวจพิสูจน์สภาพความเค้นกดที่ทำให้เกิดการย่นได้

3.3.1 การทดสอบการโก่ง (Yoshida buckling) ทำการดึงในทิศทางเดียวทำให้เกิดรอยย่นบริเวณกลางชิ้นงานทดสอบ เนื่องจากรัศมีขอบข้าง ชิ้นงานทดสอบมีรัศมีที่แตกต่างกันทำให้เกิดสภาพการย่นได้

3.3.2 การทดสอบความไร้เสถียรภาพ (Instability test) ตัวอย่างชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทำการกดในแนวแกนทำให้เกิดการโก่ง หรือรอยย่นขึ้นบริเวณกลางชิ้นงานทดสอบ

3.3.3 การทดสอบ Conical Cup Test ตัวอย่างการทดสอบคล้ายกับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก แต่แตกต่างกันที่ขนาดของพื้นที่ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า ทำให้มีช่องว่างระหว่างพื้นที่ (Punch) กับตาย (Die) มาก เมื่อพื้นที่กดลงมาถึงทำให้ชิ้นงานเกิดรอยย่นบริเวณข้างผนัง

รูปของชิ้นงานในข้อ 3.3.1-3.3.3 ถูกแสดงเอาไว้ในข้อเสนอโครงการ (Research Proposal)

ในระหว่างการทดสอบของข้อ 3.3.1-3.3.3 ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดในสามมิติ (Optical Strain Measurement System, Aramis) เพื่อตรวจติดตามสภาพความเครียดในสามมิติ และทราบค่าความเครียด (Major and Minor True Strain) ในจังหวะที่เกิดการย่นได้ในเวลาที่เกิดการย่นจริงขณะทำการทดสอบ เพื่อนำไปสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น, WLC จากการทดลอง

3.3 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Modelling)

จากการทดสอบ Tensile Test สามารถนำมาสร้างเส้นโค้งความเค้นไหล (Flow curve) ในรูปแบบข้อมูลดิบกำหนดให้กับแบบจำลอง เส้นโค้งความเค้นไหลแสดงถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic deformation) ของวัสดุเมื่อรับแรงที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูป สามารถอธิบายได้จากกฎการทำให้แข็งด้วยความเครียดโดยใช้สมการของ Swift Hardening Law ซึ่งใช้ในการอธิบายพฤติกรรมความเค้นและความเครียด จากการทดสอบแรงดึงตามทิศทางแนวรีด RD

3.2.1 การสร้างแบบจำลองของการทดสอบการโก่ง (Yoshida Buckling test) การทดสอบความไร้เสถียรภาพ (Instability test) และการทดสอบ Conical Cup Wrinkling test จำลองการทดลอง การเกิดรอยย่นบนชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม โดยกำหนดเส้นโค้งความเค้นไหล และ พฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปไม่เท่ากันทุกทิศทาง ผ่านการเปลี่ยนรูป Anisotropic parameters เพื่อทราบค่าของระยะขีดจำกัดของการทดลอง ค่าความเครียดหลัก และค่าความเครียดรอง (Major and Minor True Strain) ค่าความเค้นกด (Compressive Stress) ที่จังหวะการเริ่มเกิดรอยย่นของบริเวณการเกิดรอยย่น

3.2.2 การจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Simulation) ด้วย Commercial FE Code, ABAQUS 2017, ดำเนินการทำการเปรียบเทียบเชิงความแม่นยำของ Anisotropic Yield Criteria ของ Hill'48, Yld 2000 2d และ Yld 2004-18p ของการจำลองการทดสอบ ที่ผลของการเปลี่ยนรูปไม่เท่ากันทุกทิศทางมีผลต่อความแม่นยำในการทำนายผลและเป็นจุดเด่นที่ไม่เหมือนกับงานวิจัยอื่น ผลการดำเนินการสามารถทำให้ทราบได้ว่า Anisotropic Yield Criteria ชนิดใดที่สามารถทำนายพฤติกรรมของการขึ้นรูปวัสดุอะลูมิเนียมผสมได้อย่างแม่นยำทำให้ได้ข้อสรุปถึงการทดสอบทดลองจำลองด้วยวิธีใดให้ความแม่นยำที่สุด ในรูปแบบ ค่าความเค้นและความเครียดหลักและรอง และ ค่า Compressive Stress.

3.4 วิเคราะห์ผลและเปรียบเทียบผล

3.4.1 เส้นโค้งขีดจำกัดการย่นของวัสดุอะลูมิเนียมผสม ที่ได้จากการทดลอง 3 การทดลอง ในรูปแบบค่าความเครียดหลักและความเครียดรอง 3 เส้นโค้งขีดจำกัดการย่น

3.4.2 เส้นโค้งขีดจำกัดการย่นของวัสดุอะลูมิเนียมผสม ที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลข ของ 3 การทดลอง บนพื้นฐานของการทำนายผลการจำลองผ่าน Anisotropic Yield Criteria เพื่อเพิ่มความแม่นยำ ค่าที่ได้จากการจำลองคือ ค่าความเครียดหลักและความเครียดรอง และค่าความเค้นกด ที่ทำให้เกิดจังหวะเริ่มเกิดการย่นที่สามารถเอาไปช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์ด้วยการจำลอง

3.4.3 เปรียบเทียบผลเชิงความแม่นยำของเส้นโค้งที่ได้จากการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลข ทั้งสามการทดลอง และการจำลอง สร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น จากวิธีการทดลองใดและ Anisotropic Yield Criteria ชนิดใดให้ค่าที่แม่นยำที่สุด เพราะจากการทดลองอาจมีการวัดค่าความเครียดในสามมิติ ที่ในบางตำแหน่งมุมการทดลองและการวัดอาจมีค่าที่คลาดเคลื่อน จึงต้องทำการจำลองซ้ำและตรวจพิสูจน์ค่าผลลัพธ์ต่างๆ ที่พิเศษคือค่าความเค้นกด Compressive Stress ที่ได้จากการจำลองใช้เป็นองค์ประกอบเสริมในการออกแบบแม่พิมพ์

3.4.5 เพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ของภาคอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์และอากาศยานในอนาคต เมื่อต้องการทำนายสภาพการย่นของวัสดุโลหะแผ่นชนิดอื่นหรือเกรดอื่น ความหนาอื่นๆ กับการขึ้นรูปโลหะแผ่นในสภาพแม่พิมพ์อื่นในอนาคต คณะผู้วิจัย จะได้สรุปวิธีการนำเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นไปประยุกต์ใช้อย่างไร กับหน่วยวิจัยและพัฒนา หรือ หน่วยออกแบบแม่พิมพ์ สรุปเป็น Flow Chart อย่างง่าย และเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น WLC จะถูกกำหนดออกมาในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อความสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุโลหะแผ่นชนิดและความหนาอื่นๆ ต่อไป

[illegible]

5. ผลงาน/หัวข้อเรื่องที่คาดว่าจะตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

ชื่อเรื่องที่คาดว่าจะพิมพ์: A hybrid method for determination of wrinkling limit curves and its application to prediction wrinkling initiation in deep drawing process of aluminum alloy sheet.

ชื่อวารสารที่คาดว่าจะตีพิมพ์: Journal of Manufacturing Process (IF = 2.322) or

Journal of Materials Processing Technology (IF = 3.147)

ค่า impact factor: (2.322 , 3.147) ตามลำดับ

หรืออาจจะเป็น

ชื่อเรื่องที่คาดว่าจะพิมพ์: “Influence of anisotropic plastic deformation on wrinkling limit curves of aluminum alloy sheet.”

ชื่อวารสารที่คาดว่าจะตีพิมพ์: Materials and Design (IF = 4.364) or International Journal of Mechanical sciences (IF = 2.884)

ที่เสนอไปนั้นผู้วิจัยจะเลือกอย่างหนึ่งอย่างใดแค่หัวเรื่องเดียวในการการันตีผลงานเพื่อปิดโครงการวิจัยนี้ นั่นคือ 1 International Journal contribution.

หมายเหตุ: 1. หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุนเป็นชื่อแรกและเป็น corresponding author ของบทความ

2. ผลงานตีพิมพ์สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีต้องอยู่ในฐานข้อมูล SCI

(Science Citation Index) ของ Web of Science และมีค่า impact factor

6. งบประมาณโครงการ

ตารางงบประมาณโครงการ

	ปีที่ 1	ปีที่ 2	รวม
1. หมวดค่าตอบแทน			
- ค่าตอบแทนหัวหน้าโครงการ	156,000	156,000	312,000
- ค่าจ้างผู้ช่วยวิจัย	50,000	-	50,000
2. หมวดค่าวัสดุ			
- ค่าวัสดุโลหะแผ่นที่ใช้ทดสอบ	30,000	30,000	60,000
- ค่าสารเคมีเพื่อเตรียมชิ้นงาน	-	14,000	14,000
3. หมวดค่าใช้สอย			
- ค่าเดินทาง เพื่อเข้าร่วมสัมมนาของ สกว.	5,000	-	5,000
- ค่าจัดทำรายงานความก้าวหน้า	4,000	5,000	9,000
- ค่าใช้จ่ายในการนำเสนอผลงานในประเทศ	10,000		10,000
4. หมวดค่าจ้าง			
- ค่าจ้างเตรียมชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการ (Wire cutting และ/หรือ Water jet)	25,000	-	25,000
- ค่าจ้างวิเคราะห์ค่าความเครียดด้วยกล้องในระบบสามมิติแบบต่อเนื่อง (Optical strain measurement system, Aramis)	20,000	10,000	30,000
5. ครุภัณฑ์- เครื่องคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูง	-	50,000	50,000
ค่าจัดสร้างสำหรับชุดทดสอบ Conical cup wrinkling test	-	35,000	35,000
รวมงบประมาณโครงการ	300,000	300,000	600,000

หมายเหตุ: ขออภัยเสียทุกรายการตามที่จ่ายจริง

หมายเหตุคำชี้แจง งบประมาณอย่างละเอียด

โครงการวิจัยนี้ดำเนินการทั้งการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลข (Experiments and Numerical Simulation) เนื่องจากการทดสอบ/ทดลองอยู่สามวิธีการทดสอบ และต้องมีการทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง จึงเป็นสาเหตุที่มาตามข้อต่างๆ

1. จำเป็นต้องจ้างผู้เชี่ยวชาญในการทำการทดสอบและการจำลองเชิงตัวเลขที่มีปริมาณมาก
2. ใช้จำนวนวัสดุโลหะแผ่นอยู่ในปริมาณที่มากเพื่อการทดลองซ้ำและเพื่อการทดลองเสียต้องทดลองใหม่
3. การเตรียมชิ้นทดสอบเพื่อทำการทดลอง ต้องจ้างทำด้วยกระบวนการ Wire cutting หรือ Water Jet เนื่องจากรูปร่างชิ้นทดสอบในโครงการนี้มีรูปทรงที่โค้งเว้า จำเป็นต้องเตรียมชิ้นงานวิธีการที่กล่าวมา
4. ค่าจ้างวิเคราะห์ค่าความเครียดในระหว่างทำการทดสอบในทุกชนิดการทดสอบ มีความจำเป็นเพื่อให้ได้ค่าความเครียดที่เป็นค่าชี้วัดพฤติกรรมการย่นอย่างแท้จริงและเป็นในขณะเวลาที่เกิดการย่น จึงจำเป็นต้องใช้กล้องในระบบสามมิติแบบต่อเนื่อง (Real time) มีความจำเป็นมากต่อการได้ค่าความเครียดขณะทำการทดลอง
5. เนื่องจากโครงการนี้ทำการจำลองการทดสอบเหมือนจริงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) และมีการคำนวณด้วย Yield criteria, Yld2000-2d, Yld2004 ที่มีสมการทางสภาพพลาสติกขนาดใหญ่ และซับซ้อนจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพที่สูงอย่างมากในการคำนวณหาผลเฉลย ในการจำลองด้วย FEM อาทิ ABAQUS 2017, Dynaform 5.9 ซึ่งทางมหาวิทยาลัยมี License รองรับ
7. ค่าจัดสร้างชุดทดสอบ Conical cup wrinkling test เป็นชุดแม่พิมพ์เพื่อการทดสอบหาสภาพการย่นของโลหะแผ่น เป็นหนึ่งในสามวิธีการทดสอบที่จำเป็นเพื่อจำลองสภาพการเกิดรอยย่น โดยทำการจัดสร้างด้วยวิธีการ Machining ชิ้นงานโลหะแผ่นและแท่งวัสดุ ทำการตัดปาดผิววัสดุ โดยทำการซื้อวัสดุมาดำเนินการตามแบบที่กำหนด

สารบัญ	หน้า
สารบัญตาราง	ก
สารบัญภาพ	ข
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 สมบัติทางกลของโลหะ (Mechanical Properties)	5
2.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)	6
2.3 การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ (Hydraulic Bulge Test)	10
2.4 ทฤษฎีในการเปลี่ยนรูปช่วงยืดหยุ่น (Elastic Theory)	12
2.5 ทฤษฎีในการเปลี่ยนรูปถาวรหรือในช่วงพลาสติก (Plasticity Theory)	15
2.6 พื้นฐานการเปลี่ยนรูปโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (General Sheet Processes; Plan Stress)	15
2.7 กระบวนการดึงขึ้นรูป (Deep Drawing)	19
2.8 กระบวนการดึงขึ้นรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า และวงรี	21
2.9 แผนภูมิขีดจำกัดการดึงขึ้นรูป	23
2.10 ความเสียหายของโลหะแผ่นของการเกิดการย่น	25
2.11 การทดสอบการโก่งของโยชิเดะ (Yoshida Buckling Test)	28
2.12 การทำให้แข็งด้วยความเครียด (Hardening Laws)	29
2.13 เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic Yield Criteria)	30
2.14 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	33
2.15 เทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีอะคูสติกอีมิสชัน (Acoustic Emission)	36
2.16 ซอฟต์แวร์แลปวิว (LabVIEW)	38
2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	53
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	53
3.2 การออกแบบ และสร้างชุดจับยึดขึ้นทดสอบโยชิตะ	56
3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ และออกแบบชุดจับ	56
3.4 การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ	59
3.5 วิธีการดำเนินการทดสอบการโก่งโยชิตะ (Yoshida Buckling Test)	64
3.6 การจำลองเชิงตัวเลขจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Simulation)	65
3.7 พัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น (Wrinkling Limit Curves)	66
3.8 ออกแบบการติดตั้งระบบเทคนิคอะคูสติกอิมิสชัน (Acoustic Emission)	68
3.9 การตรวจพิสูจน์การนำไปใช้งานของเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น กับชิ้นงานขึ้นรูปภาดาอาหาร สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องครัว	73
บทที่ 4 ผลการวิจัย	77
4.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	78
4.2 การเปรียบเทียบแบบจำลอง และการทดสอบการโก่งโยชิตะ	80
4.3 ผลการพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น โดยการทดสอบการโก่งโยชิตะ	88
4.4 ผลของสัญญาณอะคูสติกอิมิสชัน	99
4.5 ผลการตรวจพิสูจน์การนำไปใช้งานของเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น กับชิ้นงานขึ้นรูปภาดาอาหาร สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องครัว	108
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	119
5.1 สรุปผลการวิจัย	119
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ	121
5.3 ข้อเสนอแนะ	121
เอกสารอ้างอิง	123

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 การกดในชิ้นงานดึงขึ้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	21
3-1 สมบัติทางกลของวัสดุ AA5052-O หนา 1 มิลลิเมตร	60
3-2 ค่าตัวแปรจากสมการทำให้แข็งด้วยความเครียดของสวิตต์ (Swift Hardening Law)	61
3-3 ค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R และ Hill'48-S	63
3-4 ค่าความเค้นคราก และสัดส่วนความเค้น	64

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 ความเสียหายของแม่พิมพ์ที่เกิดจากชิ้นงานที่เกิดรอยย่น	3
1-2 การเกิดการย่นบนโลหะแผ่นในกระบวนการขึ้นรูป	3
2-1 ลักษณะแรงดึง และแรงกด	6
2-2 ลักษณะแรงเฉือน	6
2-3 ขั้นตอนทดสอบการดึงโลหะแผ่น	7
2-4 แสดงเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด แบบมีจุดคราก (Yield Point)	7
2-5 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก	8
2-6 ลักษณะการวัดและทิศทางการตัดชิ้นงานจากการรีด	10
2-7 แบบร่างแม่พิมพ์เพื่อการคำนวณสำหรับการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ	11
2-8 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ	12
2-9 แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ	15
2-10 ทิศทางหลักในการทดสอบแรงดึง	16
2-11 ทิศทางหลักของความเค้นและความเครียด	17
2-12 การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น	17
2-13 ความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป	18
2-14 พฤติกรรมการไหลของโลหะแผ่นภายใต้กระบวนการดึงขึ้นรูปลึก	19
2-15 การเกิดความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงมีผลให้เกิดการย่น	20
2-16 ชิ้นงานที่เกิดความเสียหาย	20
2-17 รูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงานดึงขึ้นรูปชิ้นงานสี่เหลี่ยมผืนผ้า	21
2-18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการดึงขึ้นรูป	22
2-19 รูปทรงของแผ่นแบล็กซึ่งวิเคราะห์โดยวิธีสลิปไลน์	23
2-20 ลักษณะการรับภาระของชิ้นงาน ซึ่งมีผลต่อความเครียดหลัก และความเครียดรอง	24
2-21 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป	24
2-22 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปการย่น	26
2-23 กระบวนการดึงขึ้นรูปลึกทรงกรวย ที่อาจจะการย่นด้านข้างผนังชิ้นงาน	26
2-24 ตัวอย่างการใช้แรงกดชิ้นงานที่เหมาะสมกับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกทรงกรวย	27
2-25 การเกิดการย่นที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปลึกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า	28
2-26 ความเสียหายจากแรงกดชิ้นงานที่มากเกินไป	28
2-27 การทดสอบการเกิดการโก่งของโยชิเดะ (Yoshida Buckling Test)	29
2-28 ตัวอย่างเส้นโค้งความเค้นไหล จากสมการ Swift Hardening	30
2-29 เปรียบเทียบกรอบการแตกหัก	32
2-30 การแบ่งเอลิเมนต์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Meshing)	34
2-31 หลักการการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-32 แสดงแผนผังกระบวนการผลิตกระป๋องเครื่องดื่มจากแผ่นอลูมิเนียม	39
2-33 การเกิดการย่นบนปีกถ้วยของขึ้นรูป และการทดสอบการขึ้นรูปลึกแบบสี่เหลี่ยม	39
2-34 การเกิดการย่นด้านข้างผนังของทดลองการขึ้นรูปลึกทรงกระบอก และทรงกรวย	40
2-35 การเปรียบเทียบสภาวะความเค้น-ความเครียดในแนวเส้นรอบวง	40
2-36 แผนภาพของเกณฑ์ที่แตกต่างกันของความเครียดหลัก และความเครียดรอง	42
2-37 รูปแบบที่ได้รับการปรับปรุงขึ้นงานทดสอบการโก่งโยชิตะ	43
2-38 การปรับปรุงขึ้นงานทดสอบการโก่งโยชิตะ โดยการตัดปีกด้านข้างออก	43
2-39 การปรับปรุงขึ้นงานทดสอบการโก่งโยชิตะ โดยยังคงมุมด้านข้าง	44
2-40 กระบวนการย่นตามการวิเคราะห์ทางทฤษฎี	45
2-41 กระบวนการอย่างง่ายในการทดสอบการโก่งของขึ้นงานโยชิตะ และถ้วยทรงกรวย	46
2-42 ตัวอย่างการเกิดความเค้นกด ของวัสดุ AA6016 หนา 1 มิลลิเมตร	46
2-43 กระบวนการย่นในการขึ้นรูปลึก	47
2-44 ความเป็นเชิงเส้น และไม่เชิงเส้นของเส้นแนวความเครียดก่อนการเริ่มย่น	47
2-45 ค่าความเครียดที่วัดได้จากพื้นที่มุมโค้งรูปทรงกรวยที่ความลึกกระยะ 40 มิลลิเมตร	48
2-46 ค่าความเครียดที่วัดได้จากพื้นที่มุมโค้งรูปทรงกรวยที่ความลึกกระยะ 45 มิลลิเมตร	48
2-47 AE_{RMS} และ $AE_{Peak-to-Peak}$	51
2-48 ตัวอย่างของค่าสัญญาณแอมพลิจูดสูงสุด (AE_{Max}) และแรงในการตัด	52
2-49 AE_{RMS} และ $AE_{Peak-to-Peak}$	52
3-1 ขั้นตอนการวิจัย	55
3-2 ชุดทดสอบการโก่งโยชิตะ (Yoshida Buckling Test)	56
3-3 ขนาดขึ้นงานทดสอบการโก่งโยชิตะ ในแนวทิศทางตามแนวรีด	57
3-4 ขนาดขึ้นงานทดสอบการโก่งโยชิตะ ในแนวทิศทางขวางแนวรีด	58
3-5 ขึ้นทดสอบแรงดึงในทิศทางแนวการรีด 0 45 และ 90 องศา	60
3-6 เส้นโค้งความเค้น-แรงของวัสดุ AA5052-O หนา 1 มิลลิเมตร ในทิศทาง 0 45 และ 90 องศา	60
3-7 ชุดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดสอบเป่าโป่งด้วยน้ำ	61
3-8 ขึ้นทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ	62
3-9 แบบร่างแม่พิมพ์เพื่อการคำนวณสำหรับการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ	62
3-10 เปรียบเทียบค่าความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ กับการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว	63
3-11 ขึ้นทดสอบการโก่งโยชิตะ (Yoshida Buckling Test)	64
3-12 แบบจำลองการทดสอบการโก่งโยชิตะ	65
3-13 วิธีการการระบุการเริ่มต้นเกิดการย่น	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-14 การกำหนดจุดค่าความเครียดหลัก และความเครียดรอง ในจังหวะเริ่มเกิดรอยย่นของเส้นแนวความเครียด	67
3-15 กระบวนการย่นบนพื้นฐานของความเค้นกด (Compression Stress)	68
3-16 แสดงรูปแบบการติดตั้งเซนเซอร์อะคูสติกอีมิสชัน ในการทดสอบการโก่งโยชิตะ	69
3-17 ชิ้นงานทดสอบการโก่งโยชิตะ เมื่อติดตั้งเซนเซอร์อะคูสติกอีมิสชัน	69
3-18 ชุดอุปกรณ์ทดสอบอะคูสติกอีมิสชัน (Acoustic Emission)	70
3-19 ตัวอย่างหน้าจอโปรแกรม Labview ใช้เก็บค่าสัญญาณอะคูสติกอีมิสชัน	71
3-20 การทดสอบการหักไส้ดินสอบนชิ้นงานตัวอย่าง	71
3-21 ลักษณะของสัญญาณต่างๆ	72
3-22 ขนาดชุดแม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานถาดอาหาร	73
3-23 ก) แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน ข) ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	74
3-24 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงาน ขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และขนาดของชิ้นงานทั้ง 2 แบบ	74
3-25 ขนาดชิ้นทดสอบ (Blank Size) ในแนวรีด และขวางแนวรีด	75
3-26 การวัดขนาดชิ้นงานทดสอบ กับการจำลองการทดสอบของการกดขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า	75
3-27 เครื่องวัดขนาดในระบบเลเซอร์ 3 มิติ (3D Laser Scanner)	76
3-28 เปรียบเทียบชิ้นงานที่วัดขนาดในระบบ 3 มิติและชิ้นส่วนจากภาคอุตสาหกรรม	76
4-1 แผนผังของผลลัพธ์การวิจัย	77
4-2 เส้นโค้งขีดจำกัดการย่นจากการคำนวณ	79
4-3 แผนภาพแสดงเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นของอะลูมิเนียมผสม เกรด AA5052 - O	79
4-4 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชิ้นทดสอบจากการทดลองที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่าง ชิ้นทดสอบ A-M ในทิศทางตามแนวรีด	81
4-5 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชิ้นทดสอบจากการทดลองที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่าง ชิ้นทดสอบ A-O ในทิศทางตามแนวรีด	81
4-6 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชิ้นทดสอบจากการทดลองที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่าง ชิ้นทดสอบ B-M ในทิศทางตามแนวรีด	82
4-7 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชิ้นทดสอบจากการทดลองที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่าง ชิ้นทดสอบ B-O ในทิศทางตามแนวรีด	82
4-8 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชิ้นทดสอบจากการทดลองที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่าง ชิ้นทดสอบ C-M ในทิศทางตามแนวรีด	83
4-9 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชิ้นทดสอบจากการทดลองที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่าง ชิ้นทดสอบ C-O ในทิศทางตามแนวรีด	83

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-10 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชั้นทดสอบจากการทดลอง ที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่าง ชั้นทดสอบ A-M ในทิศทางตามขวางแนวรีด	84
4-11 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชั้นทดสอบจากการทดลอง ที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่าง ชั้นทดสอบ A-O ในทิศทางตามขวางแนวรีด	85
4-12 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชั้นทดสอบจากการทดลอง ที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่าง ชั้นทดสอบ B-M ในทิศทางตามขวางแนวรีด	85
4-13 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชั้นทดสอบจากการทดลอง ที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่าง ชั้นทดสอบ B-O ในทิศทางตามขวางแนวรีด	86
4-14 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชั้นทดสอบจากการทดลอง ที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่าง ชั้นทดสอบ C-M ในทิศทางตามขวางแนวรีด	87
4-15 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชั้นทดสอบจากการทดลอง ที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่าง ชั้นทดสอบ C-O ในทิศทางตามขวางแนวรีด	87
4-16 จุดกำหนดการเกิดของการย่นบนชิ้นงานทดสอบการโค้งโยยัด ในแบบ A และ B	88
4-17 การพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น จากการทดสอบการโค้งโยยัด	89
4-18 เส้นโค้งเส้นขีดจำกัดการย่นจากข้อมูลความเครียดบนพื้นฐาน เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R	90
4-19 เส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ในแนวทิศทางตามแนวรีด บนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R	90
4-20 เส้นโค้งเส้นขีดจำกัดการย่นจากข้อมูลความเครียดบนพื้นฐาน เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-S	91
4-21 เส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ในแนวทิศทางตามแนวรีด บนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-S	91
4-22 การเปรียบเทียบเส้นขีดจำกัดการย่น ในแนวทิศทางตามแนวรีดบนพื้นฐาน จากการคำนวณ เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R และ Hill'48-S	92
4-23 บริเวณที่พิจารณาการเกิดความเค้นกดในทิศทางแนวแกน	93
4-24 ความเค้นกด ของชั้นทดสอบการโค้งโยยัด A-M และ A-O ในแนวทิศทาง ตามแนวรีด บนพื้นฐานการครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R	93
4-25 ความเค้นกด ของชั้นทดสอบการโค้งโยยัด A-M และ A-O ในแนวทิศทาง ตามแนวรีด บนพื้นฐานการครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-S	94
4-26 เส้นโค้งเส้นขีดจำกัดการย่นจากข้อมูลความเครียด บนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R	95
4-27 เส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ในแนวทิศทางขวางแนวรีด บนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R	95

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-28 เส้นโค้งเส้นขีดจำกัดการย่นจากข้อมูลความเครียดบนพื้นฐาน เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-S	96
4-29 เส้นโค้งเส้นขีดจำกัดการย่นในทิศทางขวางแนวรีด ด้วยเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-S	97
4-30 การเปรียบเทียบเส้นขีดจำกัดการย่น ในแนวทิศทางขวางแนวรีดบนพื้นฐาน จากการคำนวณ เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R และHill'48-S	97
4-31 ความเค้นกด ของชั้นทดสอบการโก่งโยชิตะ A-M และ A-O ในแนวทิศทางขวางแนวรีด บนพื้นฐานการครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R	98
4-32 ความเค้นกดของชั้นทดสอบการโก่งโยชิตะ A-M และ A-O ในแนวทิศทางขวางแนวรีด บนพื้นฐานการครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-S	99
4-33 ตัวอย่างสัญญาณการทดสอบการโก่งโยชิตะ บนเครื่องทดสอบแรงดึง	100
4-34 AE_{RMS} ของชั้นงานทดสอบ การโก่งโยชิตะ ในทิศทางแนวรีดที่แตกต่างกัน	101
4-35 AE_{Max} กับแรงการทดสอบการโก่งโยชิตะ ของชั้นงานที่ A-M ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด	102
4-36 AE_{Max} กับแรงการทดสอบการโก่งโยชิตะ ของชั้นงานที่ A-O ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด	102
4-37 AE_{Max} กับแรงการทดสอบการโก่งโยชิตะ ของชั้นงานที่ B-M ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด	103
4-38 AE_{Max} กับแรงการทดสอบการโก่งโยชิตะ ของชั้นงานที่ B-O ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด	103
4-39 AE_{Max} กับแรงการทดสอบการโก่งโยชิตะ ของชั้นงานที่ C-M ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด	103
4-40 AE_{Max} กับแรงการทดสอบการโก่งโยชิตะ ของชั้นงานที่ C-O ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด	104
4-41 AE_{Energy} กับแรงการทดสอบการโก่งโยชิตะ ของชั้นงานที่ A-M และ A-O ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด	105
4-42 AE_{Energy} กับแรงการทดสอบการโก่งโยชิตะ ของชั้นงานที่ B-M และ B-O ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด	105
4-43 AE_{Energy} กับแรงการทดสอบการโก่งโยชิตะ ของชั้นงานที่ C-M และ C-O ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด	105
4-44 เปรียบเทียบการใช้สัญญาณอะคูสติกอีมีสชัน สร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ในทิศทางตามแนวรีด	106
4-45 เปรียบเทียบการใช้สัญญาณอะคูสติกอีมีสชัน สร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ในทิศทางขวางแนวรีด	106

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-46 การเปรียบเทียบระยะเริ่มเกิดการโก่ง ในแนวทิศทางตามแนวรีดบนพื้นฐาน Von Mises และเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R และHill'48-S	107
4-47 การเปรียบเทียบระยะเริ่มเกิดการโก่ง ในแนวทิศทางขวางแนวรีดบนพื้นฐาน Von Mises เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R และHill'48-S	108
4-48 ก) แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน ข) ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	108
4-49 บริเวณการวัดขนาดของรอยย่น บนชิ้นงานถาดอาหารในทิศทางตามแนวรีด	109
4-50 ระยะการกดชิ้นงานถาดอาหาร ในทิศทางตามแนวรีด	110
4-51 บริเวณการเก็บค่าความเครียดที่ระยะ 30 มิลลิเมตร ในทิศทางตามแนวรีด เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R	110
4-52 บริเวณการเก็บค่าความเครียดที่ระยะ 30 มิลลิเมตร ในทิศทางตามแนวรีด เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-S	110
4-53 จุดความเครียดจากการจำลอง ที่ระยะ 30 มิลลิเมตรในทิศทางตามแนวรีด เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ ก) Hill'48-R และ ข) Hill'48-S	111
4-54 จุดความเครียดจากการจำลอง ที่ระยะ 50 มิลลิเมตรในทิศทางตามแนวรีด เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ ก) Hill'48-R และ ข) Hill'48-S	112
4-55 เปรียบเทียบขนาดรอบรูปขึ้นทดสอบในทิศทางตามแนวรีด ก) ชิ้นงานถาดอาหาร เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ ข) Hill'48-R ค) Hill'48-S	113
4-56 เปรียบเทียบขนาดรอบรูปขึ้นงานถาดอาหาร ในทิศทางตามแนวรีด บนพื้นฐาน เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R และHill'48-S	113
4-57 บริเวณการวัดขนาดของรอยย่น บนชิ้นงานถาดอาหาร ในทิศทางขวางแนวรีด	114
4-58 ระยะการกดชิ้นงานถาดอาหาร ในทิศทางขวางแนวรีด	115
4-59 บริเวณการเก็บค่าความเครียดที่ระยะ 32 มิลลิเมตร ในทิศทางขวางแนวรีด เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R	115
4-60 บริเวณการเก็บค่าความเครียดที่ระยะ 32 มิลลิเมตร ในทิศทางขวางแนวรีด เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-S	115
4-61 จุดความเครียดจากการจำลอง ที่ระยะ 32 มิลลิเมตรในทิศทางขวางรีด เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ ก) Hill'48-R และ ข) Hill'48-S	116
4-62 จุดความเครียดจากการจำลอง ที่ระยะ 48 มิลลิเมตรในทิศทางขวางรีด เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ ก) Hill'48-R และ ข) Hill'48-S	117
4-63 เปรียบเทียบขนาดรอบรูปขึ้นทดสอบในทิศทางขวางแนวรีด ก) ชิ้นงานถาดอาหาร เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ ข) Hill'48-R ค) Hill'48-S	118
4-64 เปรียบเทียบขนาดรอบรูปขึ้นงานถาดอาหาร ในทิศทางขวางแนวรีด บนพื้นฐาน เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R และHill'48-S	118
ก-1 สลักเพลลา (Shank) ยึดกับเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test)	128

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ก-2 แหวนยึดสลักเพลลา (Shank)	129
ก-3 ชุดประกอบแผ่นกันลื่น	130
ก-4 แผ่นกันลื่นแบบฟันปลา	131
ก-5 ชุดจับยึดชิ้นงานทดสอบการโค้งโยชิตะ จำนวน 2 ชุด	132
ข-1 สมบัติทางกลของแผ่นอลูมิเนียมผสมเกรด AA5052-O หนา 1 มิลลิเมตร	134
ข-2 สมบัติทางกลของแผ่นอลูมิเนียมผสมเกรด AA5052-O หนา 1 มิลลิเมตร	135
ค-1 สัญญาณของชิ้นทดสอบ A-M ในทิศทางตามแนวรีด	138
ค-2 สัญญาณของชิ้นทดสอบ A-O ในทิศทางตามแนวรีด	138
ค-3 สัญญาณของชิ้นทดสอบ B-M ในทิศทางตามแนวรีด	139
ค-4 สัญญาณของชิ้นทดสอบ B-O ในทิศทางตามแนวรีด	139
ค-5 สัญญาณของชิ้นทดสอบ C-M ในทิศทางตามแนวรีด	140
ค-6 สัญญาณของชิ้นทดสอบ C-O ในทิศทางตามแนวรีด	140
ค-7 สัญญาณของชิ้นทดสอบ A-M ในทิศทางขวางแนวรีด	141
ค-8 สัญญาณของชิ้นทดสอบ A-O ในทิศทางขวางแนวรีด	141
ค-9 สัญญาณของชิ้นทดสอบ B-M ในทิศทางขวางแนวรีด	142
ค-10 สัญญาณของชิ้นทดสอบ B-O ในทิศทางขวางแนวรีด	142
ค-11 สัญญาณของชิ้นทดสอบ C-M ในทิศทางขวางแนวรีด	143
ค-12 สัญญาณของชิ้นทดสอบ C-O ในทิศทางขวางแนวรีด	143
ง-1 ชิ้นทดสอบ A-M ในทิศทางตามแนวรีด	146
ง-2 ชิ้นทดสอบ A-O ในทิศทางตามแนวรีด	146
ง-3 ชิ้นทดสอบ B-M ในทิศทางตามแนวรีด	146
ง-4 ชิ้นทดสอบ B-O ในทิศทางตามแนวรีด	146
ง-5 ชิ้นทดสอบ C-M ในทิศทางตามแนวรีด	147
ง-6 ชิ้นทดสอบ C-O ในทิศทางตามแนวรีด	147
ง-7 ชิ้นทดสอบ A-M ในทิศทางขวางแนวรีด	147
ง-8 ชิ้นทดสอบ A-O ในทิศทางขวางแนวรีด	147
ง-9 ชิ้นทดสอบ B-M ในทิศทางขวางแนวรีด	148
ง-10 ชิ้นทดสอบ B-O ในทิศทางขวางแนวรีด	148
ง-12 ชิ้นทดสอบ C-M ในทิศทางขวางแนวรีด	148
ง-12 ชิ้นทดสอบ C-O ในทิศทางขวางแนวรีด	148
จ-1 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ A-O	150
จ-2 การกำหนดค่า Mass Density	151
จ-3 การกำหนดค่าสภาพความยืดหยุ่น (Elasticity)	151
จ-4 การกำหนดค่าตัวประกอบแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R	152

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
จ-5 การกำหนดค่าตัวประกอบแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-S	152
จ-6 การกำหนดค่าสภาพพลาสติก (Plasticity) จากการทดสอบแรงดึง	154
จ-7 การกำหนดทิศทางการตามแนวรีด	154
จ-8 การกำหนดทิศทางการขวางแนวรีด	155
จ-9 การนำข้อมูลสมบัติทางกลของวัสดุเข้าสู่ชิ้นงานทดสอบ	155
จ-10 การกำหนดขั้นตอน (Step) ของแบบจำลอง	156
จ-11 การกำหนดการจับยึดชิ้นงาน ไม่ให้เคลื่อนที่	156
จ-12 การกำหนดระยะดึงชิ้นงาน	157
จ-13 การกำหนดค่าเอลิเมนต์ชิ้นงานเพื่อความเหมาะสม	157
จ-14 การประมวลผลการคำนวณเชิงตัวเลข	158
จ-15 การกำหนดการเก็บค่า	158
จ-16 บริเวณที่เก็บค่าความเค้น และความเครียด ทั้งด้านบนและด้านล่าง	159
จ-17 กำหนดการเก็บระยะทาง และแรงในการดึง บริเวณด้านบนชิ้นงาน	159
ฉ-1 สร้างชิ้นส่วนการทดสอบ และกำหนดเป็นขนาดหนึ่งส่วนสี่	162
ฉ-2 การกำหนดค่า Mass Density	163
ฉ-3 การกำหนดค่าสภาพความยืดหยุ่น (Elasticity)	163
ฉ-4 การกำหนดค่าตัวประกอบแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R	164
ฉ-5 การกำหนดค่าตัวประกอบแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-S	164
ฉ-6 การกำหนดค่าสภาพพลาสติก (Plasticity) จากการทดสอบแรงดึง	166
ฉ-7 การกำหนดทิศทางการตามแนวรีด	166
ฉ-8 การกำหนดทิศทางการขวางแนวรีด	167
ฉ-9 การนำข้อมูลสมบัติทางกลของวัสดุเข้าสู่ชิ้นงานทดสอบ	167
ฉ-10 การประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ ของชุดทดสอบ	168
ฉ-11 การกำหนดขั้นตอน (Step) ของแบบจำลอง	168
ฉ-12 การกำหนดคู่อุปสรรคตายตัวกับชิ้นงาน	169
ฉ-13 การกำหนดคู่อุปสรรคแรงจับยึดชิ้นงานกับชิ้นงาน	179
ฉ-14 การกำหนดคู่อุปสรรคพันธะสัมผัสกับชิ้นงาน	170
ฉ-15 การกำหนดการแรงจับยึดชิ้นงาน	170
ฉ-16 การกำหนดระยะกดชิ้นงาน และการเคลื่อนที่	171
ฉ-17 การแบ่งเอลิเมนต์ของพันธะ	171
ฉ-18 การแบ่งเอลิเมนต์ของจับยึดชิ้นงาน	172
ฉ-19 การแบ่งเอลิเมนต์ของตาย	172
ฉ-20 การแบ่งเอลิเมนต์ของตาย	172
ฉ-21 การประมวลผลการคำนวณเชิงตัวเลข	173

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีแนวโน้มการลดความหนาของโลหะแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูปที่สูงขึ้น จนทำให้เกิดรอยย่น (Wrinkling) บนแผ่นโลหะ ดังนั้นเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ปราศจากข้อบกพร่อง จึงมีการทำนายพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปของวัสดุเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบแม่พิมพ์ และการเลือกพารามิเตอร์ ของกระบวนการ การเกิดรอยย่น, การฉีกขาด (Fracture) บนแผ่นโลหะ และการดีดตัวกลับ (Springback) ของชิ้นงานเป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปโลหะแผ่น [1, 2] เป็นปัญหาที่เกิดขึ้น ใน การผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมยานยนต์ [3] นอกจากนี้อาจทำให้เกิดความเสียหายกับแม่พิมพ์ในการ ขึ้นรูปโลหะ [4] เนื่องจากแรงกดที่สูงเกิดขึ้นในบริเวณที่มีรอยย่นดังในภาพที่ 1-1 แสดงให้เห็นถึงรอย ย่นที่เกิดขึ้นบริเวณรัศมีการขึ้นรูปขึ้นส่วนหลักกล้าความแข็งแรงสูงเกรด DP780 การออกแบบขึ้นส่วน ในอุตสาหกรรมยานยนต์ และการผลิตขึ้นส่วนเพื่อลดน้ำหนัก ทำให้ประหยัดพลังงานและลดปัญหา สิ่งแวดล้อม รวมไปถึงความปลอดภัยของผู้โดยสาร ที่มีความสามารถดูดซับพลังงานจากการชนมากขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการจึงต้องลดความเสียหายที่เกิดจากรอยย่นบนแผ่นโลหะ การทำนายด้วย ระเบียบวิธีการทดลองจริงหรือการจำลองด้วยตัวเลขเป็นสิ่งสำคัญในการขึ้นรูปโลหะแผ่น เพื่อลด ขั้นตอน ลดข้อผิดพลาด ลดระยะเวลา เพื่อการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นสำคัญ



ภาพที่ 1-1 ความเสียหายของแม่พิมพ์ที่เกิดจากชิ้นงานที่เกิดรอยย่น [5]

การศึกษาหลายรูปเพื่อคาดการณ์การเกิดรูปร่าง และจำนวนของรอยย่น การศึกษาข้อมูล ก่อนข้างกระจัดกระจายเป็นกว้าง สำหรับการเปียงเบนขนาดเล็กในปัจจัยต่างๆ เช่นเดียวกับพฤติกรรม ของความไม่มีเสถียรภาพ [6] วิธีการวิเคราะห์แนวโน้มแบบทั่วไป และผลกระทบของพารามิเตอร์แต่ละ ตัวของการย่น โดยส่วนวิธีการวิเคราะห์ใช้กับปัญหาที่ค่อนข้างง่าย และไม่สามารถใช้ในกระบวนการ ขึ้นรูปโลหะแผ่นทั่วไปได้ ในปัจจุบันการศึกษาก่อนส่วนใหญ่จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งจะให้ข้อมูล โดยละเอียดเกี่ยวกับ พฤติกรรมของการย่นของโลหะแผ่นในปัญหาทางอุตสาหกรรมที่ซับซ้อนการวิเคราะห์ การโก่ง (Buckling) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำได้โดยใช้การวิเคราะห์เป็นสองวิธีที่แตกต่างกัน

ของโครงสร้าง และแบบการเริ่มเกิดการโก่งงอ เนื่องจากวิธีที่แตกต่างกันของโครงสร้างเป็นความไม่สม่ำเสมอของวัสดุหรือข้อบกพร่องทางเรขาคณิต โดยทั่วไปจะวิเคราะห์แบบการเริ่มเกิดการโก่ง (Buckling Initiation) จะมีความแม่นยำมากกว่า

ในงานวิจัยนี้พัฒนาเส้นภาพขีดจำกัดการย่น (Wrinkling Limit curve, WLC) ของแผ่นอลูมิเนียมผสมเกรด AA5052-O ความหนา 1 มิลลิเมตร ทำการทดสอบการโก่งโยชิตะ (Yoshida Buckling) Test ในแนวรีด (Rolling Direction, RD) และขวางแนวรีด (Transverse Direction, TD) จนเกิดรอยโก่งบนชิ้นงานโดยโปรแกรม ABAQUS 2017 เพื่อให้สอดคล้องกับการทดลอง ซึ่งจะประเมินค่าความเครียดหลัก (Major- Strain) และความเครียดรอง (Minor- Strain) บนพื้นที่เกิดรอยย่น จากการเบี่ยงเบนของค่าความเครียด (Bifurcation Strain) รวมถึงพฤติกรรมความเค้นกด (Compression Stress) เมื่อเริ่มการย่นที่เกิดขึ้นจากการจำลอง และการทดสอบที่เกิดขึ้นจากการจำลองการทดสอบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น (WLCs) และการพัฒนาเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบ เพื่อประเมินการทำนายพฤติกรรมการย่น ด้วยผลของเกณฑ์คราก (Anisotropic Yield Criteria) ที่ทำให้การสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นที่มีความแม่นยำ ที่แตกต่างกัน คือ ฟอนไมเซส (Von Mises) , Hill's 48 r -Value (Hill'48-R) และ Hill's 48 Stress- Based (Hill'48-S) ของทั้ง 2 แนวรีด ถูกนำมาศึกษาเพื่ออธิบายลักษณะการเปลี่ยนรูปพลาสติกในแผ่นอลูมิเนียมผสม พิจารณาพฤติกรรมที่ทำให้แข่งด้วยความเครียด, ค่าสัมประสิทธิ์การไม่เท่ากันทุกทิศทาง (Anisotropy Coefficients) ซึ่งมีผลกระทบต่อนเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น อีกทั้งมีการตรวจสอบจังหวะช่วงเวลาเริ่มเกิดการโก่งงอของชิ้นทดสอบการโก่งโยชิตะ ด้วยอะคูสติกอิมิสชัน (Acoustic Emission, AE) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น (WLCs) ได้อย่างชัดเจน เส้นโค้งขีดจำกัดการย่นถูกตรวจสอบการนำไปใช้งานได้กับการทดสอบชิ้นส่วนจากภาคอุตสาหกรรม



ภาพที่ 1-2 การเกิดการย่นบนโลหะแผ่นในกระบวนการขึ้นรูป [5]

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 พัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นด้วยการทดลอง และการจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.2.2 ตรวจพิสูจน์การนำไปใช้งานได้ ของเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นด้วยชิ้นส่วนขึ้นรูปอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบและพัฒนาสร้างชุดทดสอบ เพื่อจำลองพฤติกรรมการเกิดรอยย่นโดยการทดลอง และการจำลองการทดลอง ของการทดสอบการโก่งของชิ้นทดสอบการโก่งโยชิตะ
- 1.3.2 การทดสอบการโก่งของชิ้นทดสอบ การโก่งโยชิตะ และจำลองการทดสอบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) จำลองพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปที่ไม่เท่ากันทุกทิศทางผ่านเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี (Anisotropy Yield Criteria) ของ Hill'48-R และ Hill'48-S
- 1.3.3 ดำเนินการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ เพื่อหาค่าตัวแปรที่ใช้สำหรับเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R และ Hill'48-S
- 1.3.4 พัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการการย่นของแผ่นอลูมิเนียมผสมเกรด AA5052-O ความหนา 1 มิลลิเมตร ในทิศทางแนวรีด และขวางแนวรีด
- 1.3.5 ศึกษาพฤติกรรมแนวรีดที่มีต่อเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ในทิศทางตามแนวรีด และขวางแนวรีด
- 1.3.6 ใช้เทคนิคอะคูสติกอิมิสชัน (Acoustic Emission Technique) ในการระบุจังหวะการเกิดการโก่งของชิ้นทดสอบการโก่งโยชิตะ นำไปสู่การสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น บนพื้นฐานการใช้อะคูสติกอิมิสชัน เปรียบเทียบ
- 1.3.7 ตรวจพิสูจน์การนำไปใช้งานได้ของเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น เพื่อประเมินสภาพการย่นของแผ่นอลูมิเนียมผสมขึ้นรูปอุตสาหกรรม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 มีองค์ความรู้ในการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น เพื่อประเมินความสามารถในการขึ้นรูปได้ของโลหะแผ่นจากการทดลอง และจำลองเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.4.2 สามารถเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในการออกแบบกับกระบวนการขึ้นรูปลึก
- 1.4.3 มีแนวทางในการประยุกต์ใช้งานอะคูสติกอิมิสชัน ในการกำหนดจังหวะการโก่งของชิ้นทดสอบการโก่งโยชิตะ
- 1.4.4 ทราบถึงพฤติกรรมของสมบัติที่ไม่เท่ากันทุกทิศทางของวัสดุ มีผลต่อเส้นขีดจำกัดการเกิดรอยย่น และแสดงถึงพฤติกรรมการย่นที่แตกต่างกัน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องและทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อาทิ สมบัติทางกลของโลหะ การทดสอบสมบัติทางกลของโลหะแผ่น ทฤษฎีในการเปลี่ยนรูปโลหะ พื้นฐานการเปลี่ยนรูปในแนวระนาบ การดัดขึ้นรูปลึก แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ความเสียหายของโลหะแผ่นของการเกิดการย่น เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิก ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เทคนิคอะคูสติกอิมิสซัน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 สมบัติทางกลของโลหะ (Mechanical Properties) [7]

สมบัติที่บ่งถึงลักษณะ ของวัตถุเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ เช่น ความแข็งแรงของวัสดุ ความเหนียว ความล้า และความเปราะ เป็นต้น วิศวกรจะต้องรู้ถึงสมบัติเหล่านี้ในการเลือกกำหนดขนาดของวัสดุในงานก่อสร้าง ให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดในห้องทดลอง การใช้ตารางเพื่อคำนวณหาขนาดของวัสดุในงานก่อสร้าง จะต้องขึ้นอยู่กับการทดสอบ ซึ่งอาจจะไม่ตรงกับสถานการณ์จริงที่เราใช้วัสดุนั้นๆ ฉะนั้นจึงควรระวังเมื่อนำตารางจากห้องทดลองไปใช้กับสภาพจริง เพราะอาจจะมีปัญหาอื่นๆ ที่เป็นตัวแปรก็ได้

2.1.1 ความเครียด (Strain; ϵ)

หมายถึงเมื่อวัตถุถูกกดหรือดึง ความยาวของวัตถุก็จะเปลี่ยนไป ตามมาตราส่วน ระหว่างส่วนที่ยืดออกหรือหดไปหารด้วยความยาวเดิม เมื่อวัตถุถูกแรงภายนอกมากระทำก็จะทำให้เกิดความเครียดขึ้น แสดงว่าอะตอมต่าง ๆ ที่ประกอบขึ้น เป็นชั้นวัตถุนั้นต้องเลื่อนไป จากตำแหน่งที่สมดุลของมัน ถ้าอะตอมทั้งหลายถูกบีบให้ชิดกันหรือห่างออกจากกัน ก็จะเกิดแรงต่อต้าน ขึ้นภายในกับวัตถุนั้น (Internal Forces) ซึ่งพยายามดึงอะตอมให้กลับมาสู่จุดสมดุลตามเดิมของ ความเครียด ดังสมการ

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2-1)$$

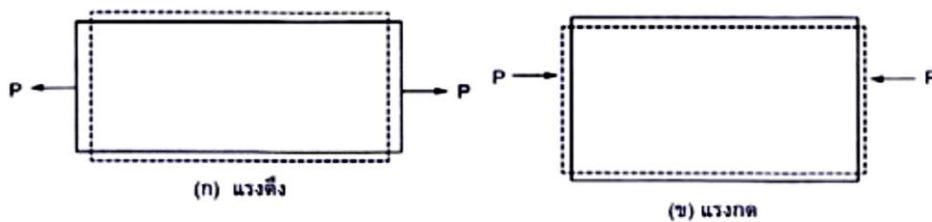
2.1.2 ความเค้น (Stress; σ)

หมายถึงแรงที่กระทำต่อวัตถุ A คือเนื้อที่แรงกระทำซึ่งอาจจะ เป็นเนื้อที่ตั้งฉากกับแรงหรือขนาดกับแรง แล้วแต่ชนิดของความเค้น หน่วยความเค้นเป็นปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว (psi) ซึ่งเป็นหน่วยของอเมริกัน หรือตันต่อตารางนิ้ว (อังกฤษ) หรือหน่วยเมตริกคือ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรปัจจุบันมีหน่วยเป็นนิวตัน/ตารางเมตร ความเค้นมีสูตรคือ

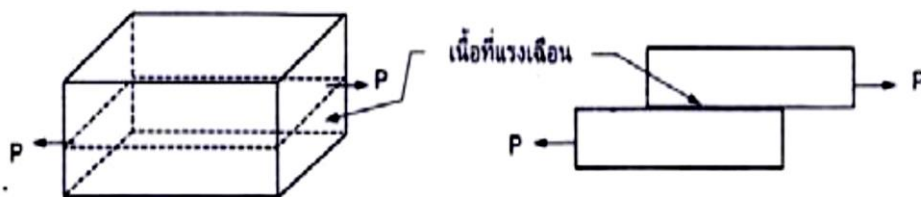
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2-2)$$

ความเค้น แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) คือความเค้นที่พยายามดึงให้เนื้อวัตถุแยก ขาดออกจากกัน ส่วนแรงดึง หรือความเค้นแรงดึง เป็นแรงดึง P ต่อเนื้อที่ A ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของแรง
2. ความเค้นแรงกด (Compression Stress) คือความเค้นที่พยายามกดหรือบีบ วัตถุให้เล็กลง หรือสั้นลง ส่วนความเค้นของแรงกด (Compressive Stress) คิดเป็นแรงกดต่อพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางของแรง
3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) ความเค้นที่เฉือนหรือกดให้วัตถุเลื่อนผ่านกัน คิดเป็นแรงดึงต่อเนื้อที่ซึ่งขนานกับทิศทางของแรง



ภาพที่ 2-1 ลักษณะแรงดึง และแรงกด [7]

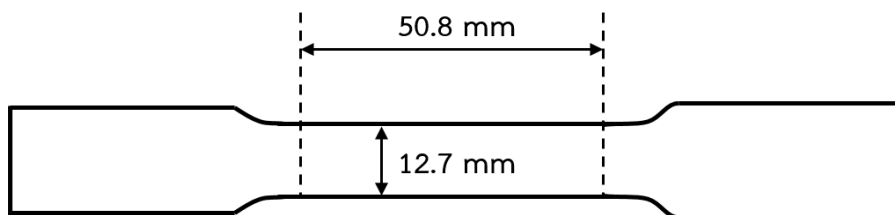


ภาพที่ 2-2 ลักษณะแรงเฉือน [7]

2.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test) [8]

การทดสอบสมบัติของวัสดุเพื่อหาความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นที่ใช้กันมากที่สุด คือ การทดสอบการดึงในแกนเดียวขึ้นทดสอบดังภาพที่ 2-3 มีด้านขนานกันในช่วงความยาวทดสอบ โดยปกติยาว 50.8 mm กว้าง 12.7 mm นำชิ้นทดสอบมาจับที่ปลายทั้ง 2 ข้าง แล้วดึงด้วยเครื่องทดสอบให้ยืดออกในอัตราคงตัวจนกระทั่งขาด ดังที่อธิบายไว้ในมาตรฐาน ASTM E8 "วิธีการทดสอบการดึงวัสดุโลหะ" ในขณะทดสอบวัดแรงด้วยโหลดเซลล์ (Load Cell) และวัดระยะยืดด้วยสเตรนเกจ เอกเทนโซมิเตอร์ (Strain Gage Extensometer)

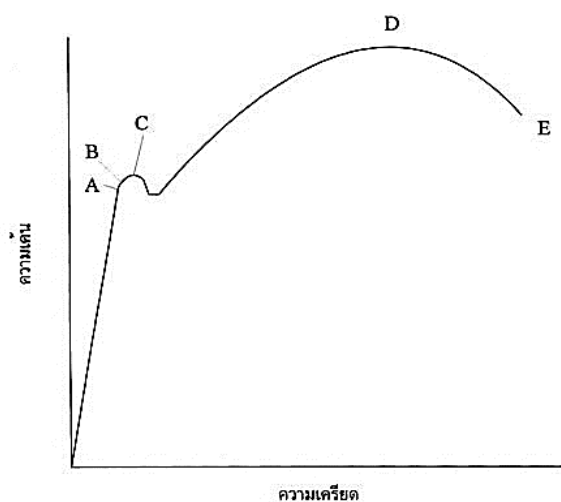
ข้อมูลโหลดกับระยะยืดสามารถนำมาลงจุดได้โดยตรง และมักเปลี่ยนข้อมูลไปเป็นความเค้นวิศวกรรม σ (แรง/ด้วยพื้นที่หน้าตัดเดิม) และความเครียดวิศวกรรม e (ระยะยืด/ความยาวเดิม) หรือความเค้นจริง σ_f (แรง/พื้นที่หน้าตัดขณะนั้น) และความเครียดจริง ϕ (ลอการิทึมธรรมชาติของความยาวใหม่/ความยาวเดิม)



ภาพที่ 2-3 ชิ้นทดสอบการดึงโลหะแผ่น

2.2.1 พฤติกรรมของการทดสอบแรงดึง [9]

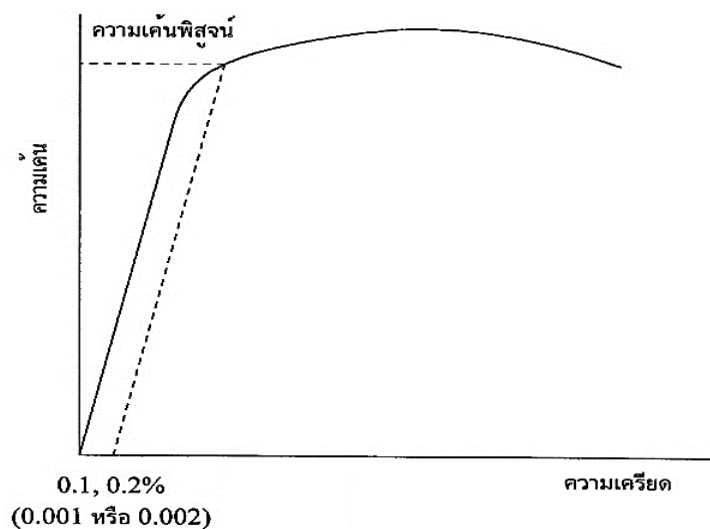
วิธีการทดสอบนั้นเราจะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้าๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพลอตเป็นเส้นโค้งดังภาพที่ 2-4 ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้นๆ มาตรฐานต่างๆของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย



ภาพที่ 2-4 แสดงเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด แบบมีจุดคราก (Yield Point) [9]

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดในภาพที่ 2-4 เราพบว่า เมื่อเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้าๆ ชิ้นทดสอบจะค่อยๆ ยืดออก จนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ในภาพที่ 2-4 ซึ่งในช่วงนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้เราได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุค (Hook's law) ซึ่งกล่าวไว้ว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้ เรียกว่า พิกัดสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิกัดสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอีลาสติก (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

เมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิกัดสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อยๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุดๆ หนึ่ง (จุด B) ในภาพที่ 2-4 เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเสียรูปอย่างถาวร ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พวงเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลง) ที่จุด C ในภาพที่ 2-4 ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่า ของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรม การคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย วัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้ โดยกำหนดความเครียดที่ 0.1 - 0.2 % ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังภาพที่ 2-5 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1% หรือ 0.2% Offset ดังแสดงในภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก [9]

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ในภาพที่ 2-4 ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกได้มากมาย ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ ค่านี้อย่างเป็นดัชนีเปรียบเทียบ

สมบัติของวัสดุได้ด้วยว่า คำว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไปจะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้

จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ ในภาพที่ 2-4 เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไป พื้นที่ภาคหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่ต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว มักจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด

2.2.2 พลาสติกแอนไอโซทรอปิก [10]

สาเหตุที่สำคัญมากที่สุดซึ่งทำให้โลหะมีคุณสมบัติพลาสติกแอนไอโซทรอปิก คือทิศทางการเกรนที่เปลี่ยนไปหรือเนื้อของรูปสลักที่พัฒนาขึ้นในเหล็กกล้าที่เกิดจากการหมุนของแลตทิซในเกรนระหว่างการเปลี่ยนแปลงเนื้อรูปสลัก และทำให้เกิดแอนไอโซทรอปิก

พิจารณาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของชิ้นทดสอบการคือที่เป็นแผ่นแถบตัดออกมาจากแผ่นรีดเมื่อได้รับแรงดึงในแนวแกน ถ้าทิศทางเป็นอุดมคติความหนาไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก การยืดในแนวยาวมีผลทำให้ความกว้างชิ้นทดสอบลดลง พารามิเตอร์ที่มีประโยชน์คืออัตราส่วน R ของความเครียดพลาสติก

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (2-3)$$

โดยที่ r คือ ค่า Plastic Strain Ratio ของวัสดุ
 ϵ_w คือ ความเครียดในทิศทางความกว้างของชิ้นงานทดสอบ
 ϵ_t คือ ความเครียดในทิศทางความหนาของชิ้นงานทดสอบ

$$\epsilon_w = \ln \left(\frac{W_1}{W_0} \right) \quad (2-4)$$

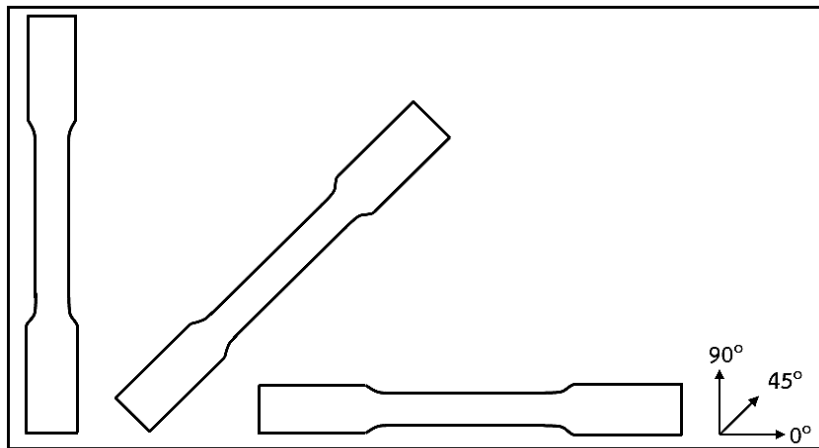
โดยที่ W_1 คือ ความกว้างของชิ้นงานทดสอบหลังดึง
 W_0 คือ ความกว้างของชิ้นงานทดสอบก่อนดึง

$$\epsilon_T = \ln \left(\frac{T_1}{T_0} \right) \quad (2-5)$$

โดยที่ T_1 คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบหลังดึง

T_0 คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบก่อนดึง

การทดสอบทำโดยการตัดชิ้นงานทดสอบตามทิศทางตามแนวรีด (0°) ทิศทางขวางแนวรีด (90°) และ ทิศทางมุมเฉียง (45°) ดังแสดงในภาพที่ 2-6



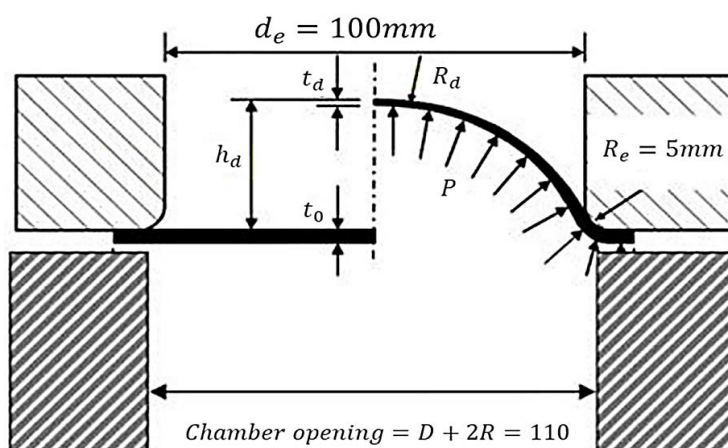
ภาพที่ 2-6 ลักษณะการวัดและทิศทางการตัดชิ้นงานจากการรีด

จากนั้นทำการทดสอบการดึงและวัดความกว้างและความหนาตามสมการที่ 2-4 กับ 2-5 และในแต่ละทิศทางการรีด (องศาการตัดชิ้นงาน) จะได้เป็น r_0 r_{45} และ r_{90} ซึ่งในทิศทางของการรีด มีผลต่อการไหลของวัสดุ และส่งผลต่อการขึ้นรูป

2.3 การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ (Hydraulic Bulge Test) [11]

สำหรับการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำเป็นการทดสอบเพื่อหาสมบัติทางกลของวัสดุที่มีลักษณะเป็นความเค้นแบบสมมาตร โดยนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยทั่วไปสำหรับการทดสอบการดึงภายใต้การดึงแบบแกนเดียว จะพบว่าวัสดุจะเกิดการคอดเมื่อให้แรงดึงถึงค่าความเค้นสูงสุด แต่สำหรับการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำจะสามารถหาค่าได้ค่าความเค้น-ความเครียดในลักษณะสอง ทิศทางซึ่งจะสอดคล้องกับความเป็นจริงมากกว่า ซึ่งการขึ้นรูปหรือการทดสอบในลักษณะนี้จะขึ้นรูปเป็นโดมครึ่งทรงกลมดังแสดงในภาพที่ 2-7 โดยมีสมมติฐานดังนี้

1. ลักษณะโดมที่ได้จากการทดสอบจะเป็นทรงกลมโดยตลอด
2. ในขณะการขึ้นรูปจะไม่เกิดความเค้นดัด และความเค้นในด้านความหนาของวัสดุ จึงสามารถใช้ทฤษฎีแผ่นบาง (Membrane) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์



ภาพที่ 2-7 แบบร่างแม่พิมพ์เพื่อการคำนวณสำหรับการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ [11]

$$\bar{\sigma} = \frac{p}{2} \left(\frac{R_d}{t_d} + 1 \right) \quad (2-6)$$

$$\bar{\varepsilon} = -\varepsilon_t = \ln \left(\frac{t_0}{t_d} \right) \quad (2-7)$$

- โดยที่ $\bar{\sigma}$ คือ ความเค้นประสิทธิผล
 $\bar{\varepsilon}$ คือ ความเครียดประสิทธิผล
 ε_t คือ ความเครียดในด้านความหนา
 t_0 คือ ความหนาเริ่มต้น
 t_d คือ ความหนาน้อยสุด
 R_d คือ รัศมีของทรงกลมที่เกิดขึ้นรูป
 p คือ ความดันที่หาได้จากอุปกรณ์วัดแรงดัน

จากสมการที่ 2-8 และ 2-9 จะสามารถหาค่า R_d และ t_d ได้ตลอดการขึ้นรูปโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ได้ดังนี้

$$R_d = \frac{\left(\frac{d_c}{2} + R_c \right)^2 + h_d^2 - 2R_c h_d}{2h_d} \quad (2-8)$$

$$t_d = t_0 \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{2h_d}{d_c} \right)^2} \right) \quad (2-9)$$

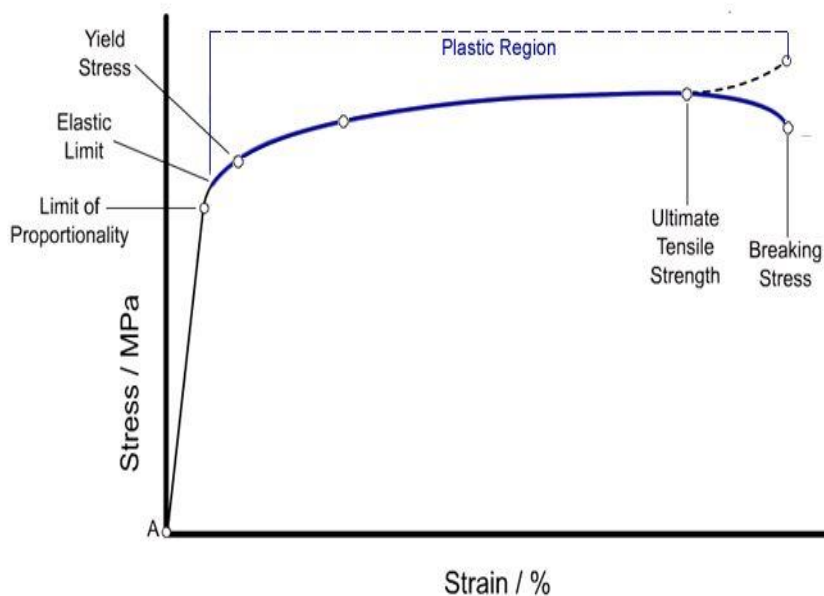
โดยที่ d_c คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของปากแม่พิมพ์

h_d คือ ความสูงของโดมขณะขึ้นรูป

R_C คือ รัศมีความโค้งของปากแม่พิมพ์

2.4 ทฤษฎีในการเปลี่ยนรูปช่วงยืดหยุ่น (Elastic Theory) [10]

เมื่อวัสดุได้รับแรงดึงจะทำให้วัสดุเกิดการยืดตัวซึ่งสามารถแบ่งพฤติกรรมการยืดตัวออกเป็น 2 ส่วน หลักๆ คือ การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นหรือช่วงอีลาสติกและการเปลี่ยนรูปถาวรหรือช่วงพลาสติก ดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ [10]

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริง (True Stress-True Strain Curve) หรือเรียกอีกชื่อว่า (Flow Curve) มีลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linearity) หรือไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linearity) โดยมีความสำคัญในการนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อช่วยให้ทำนายผลได้ถูกต้องแม่นยำในการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะกำหนดให้วัสดุของแบบจำลองมีสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropy) ซึ่งจะแตกต่างจากพฤติกรรมของวัสดุจริงเนื่องจากวัสดุจริงมีการเรียงตัวของผลึกไม่เท่ากัน

ทุกทิศทางทำให้วัสดุมีสมบัติแบบแอนไอโซทรอปี โดยที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงของวัสดุสามารถหาได้จากการทดสอบดึง (Uniaxial Tension Test) หรือการทดสอบกด (Compression Test) ในการทดสอบแรงดึงขึ้นทดสอบชนิดหน้าตัดกลมหรือชนิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะถูกแรงกระทำโดยการดึงหรือกดเพิ่มแรง (F) อย่างช้าๆ และควบคุมความเร็วให้ขึ้นทดสอบเปลี่ยนรูปอย่างสม่ำเสมอตามแนวแกน แล้ววัดค่าแรงและระยะการเปลี่ยนรูปของขึ้นทดสอบ จนกระทั่งขึ้นทดสอบเกิดความเสียหาย ผลการทดสอบที่ได้จะนำไปหาสมบัติเชิงกลของวัสดุขึ้นทดสอบ ซึ่งความเค้นที่เกิดภายในวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-10

$$\sigma = \frac{F_i}{A_0} \quad (2-10)$$

โดยที่ F_i คือ แรงดึงหรือโหลด

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นงานทดสอบ

σ คือ ความเค้นเฉลี่ยหรือความเค้นเชิงวิศวกรรม ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด A_0

สำหรับความเครียดเชิงวิศวกรรม (Engineering Strain) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-11

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_i - L_0}{L_0} \quad (2-11)$$

โดย ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป

L_0 คือ ความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ

L_i คือ ความยาวขณะใดขณะหนึ่ง

ε คือ ความเครียดเฉลี่ย เป็นความเครียดเชิงวิศวกรรม ทิศทางเดียวกับแรง F

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการคำนวณโดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวเดิมของชิ้นทดสอบเรียกว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเชิงวิศวกรรม (Engineering Stress-Strain Curve) ซึ่งในการทดสอบจริง พื้นที่หน้าตัดและความยาวของชิ้นทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจนเกิดการคอดและขาดออกจากกันในที่สุด ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถหาได้โดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละขณะซึ่งเรียกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง (True Stress True Strain Curve) หรือเรียกอีกชื่อว่า (Flow Curve) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร ถ้า $\bar{\sigma}$ เป็นความเค้นจริงและ $\bar{\varepsilon}$ เป็นความเครียดจริง

$$\bar{\sigma} = \frac{F_i}{A_i} = \sigma \left(\frac{A_0}{A_i} \right) \quad (2-12)$$

โดยที่ A_i คือ พื้นที่หน้าตัดใดๆ
 A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น
 σ คือ ความเค้นเฉลี่ย
 F_i คือ แรงดึงที่กระทำบนชิ้นทดสอบ

สำหรับความเครียดจริง $\bar{\varepsilon}$ สามารถหาได้โดยพิจารณาที่ความยาวใดๆ ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหาได้จาก
 การอินทิเกรตความยาว dL_i ใดๆ

$$\varepsilon = \int_{L_0}^{L_i} \frac{dL_i}{L_i} = \ln \frac{L_i}{L_0} \quad (2-13)$$

ในกรณีการขึ้นรูปโลหะมีปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูปเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้น
 จะสมมุติให้ปริมาตรไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังการขึ้นรูปทำให้มีปริมาตรเท่าเดิม

$$A_0 L_0 = A_i L_i \quad (2-14)$$

$$\frac{A_0}{A_i} = \frac{L_i}{L_0} = \frac{L_0}{L_0} = 1 + \varepsilon \quad (2-15)$$

ดังนั้นความเค้นจริงและความเครียดจริงโดยสมมุติฐานให้ปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูปคงที่

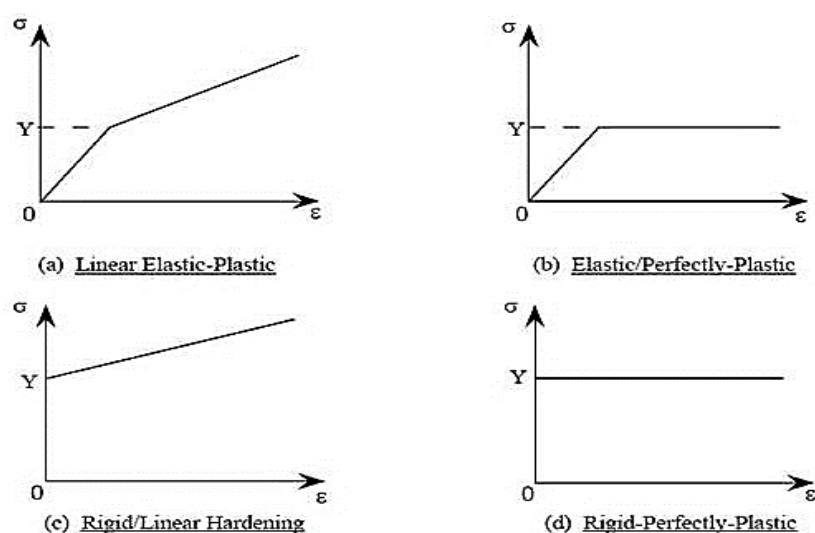
$$\bar{\sigma} = \sigma (1 + \varepsilon) \quad (2-16)$$

$$\bar{\varepsilon} = \ln \frac{A_0}{A_i} = 2 \ln \frac{d_o}{d_i} \quad (2-17)$$

โดยที่ d_i คือ เส้นผ่าศูนย์กลางใดๆ
 d_0 คือ เส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ

2.5 ทฤษฎีในการเปลี่ยนรูปถาวรหรือในช่วงพลาสติก (Plasticity Theory) [11]

ในการขึ้นรูปวัสดุโลหะแผ่นให้มีรูปทรงตามที่ต้องการจะต้องให้แรงกระทำกับวัสดุเพื่อให้วัสดุเปลี่ยนรูปอย่างถาวร จากการทดสอบการดึง สามารถแบ่งพฤติกรรมของวัสดุได้เป็นสองช่วง คือ ช่วงยืดหยุ่นและช่วงเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้อยู่ด้วยกันหลายลักษณะซึ่งสามารถแสดงด้วยแบบจำลอง (Model) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังภาพที่ 2-9



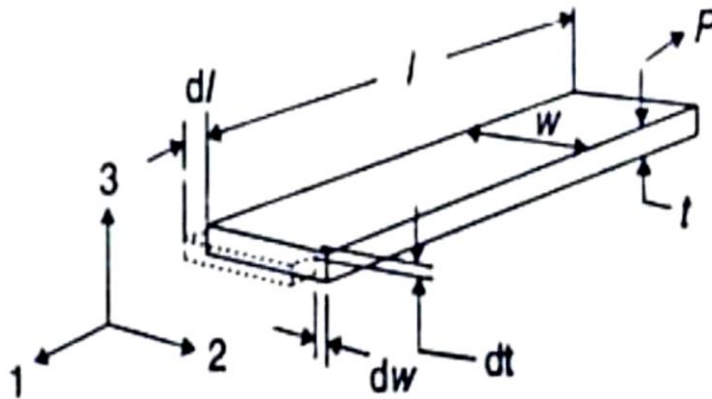
ภาพที่ 2-9 แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ [11]

ในการพิจารณาการเปลี่ยนรูป จะใช้เกณฑ์การคราก (Yield Criterion) เป็นเกณฑ์ที่จะกำหนดการเปลี่ยนรูป จากอีลาสติกไปเป็นพลาสติก และทฤษฎีพื้นฐานที่นิยมใช้ในการทำนายการครากตัวของโลหะแผ่นคือ ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด ทฤษฎีพอนไมเชส (Von Mises Theory) และทฤษฎีของฮิล (Hill Theory) ในส่วนของทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดและทฤษฎีของพอนไมเชส จะมีข้อสมมติฐานว่าวัสดุมีสมบัติทางกลเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropy) ส่วนทฤษฎีของฮิล จะพิจารณาอิทธิพลของโลหะที่ผ่านการรีด (Anisotropy) ในการใช้กฎเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี้ สำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานนี้จะใช้ทฤษฎีการครากของฮิล ทฤษฎีนี้เหมาะสำหรับวัสดุโลหะแผ่นที่มีสมบัติแอนไอโซทรอปิก

2.6 พื้นฐานการเปลี่ยนรูปโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (General Sheet Processes; Plan Stress) [10]

ภาพที่ 2-10 เป็นการทดสอบการดึงเป็นแนวทางการกระบวนการหาระนาบความเค้น (Plane Stress) การทดสอบการดึงแกนเดียว (Uniaxial Tension) คือการแสดงตัวอย่างของการเปลี่ยนรูปแบบระนาบความเค้นการดึงแกนเดียว (Uniaxial Tension) ให้พิจารณาจุดเล็กๆ ในชิ้นทดสอบในการดึงให้เปลี่ยนรูปแกนเดียวหากการทดสอบเริ่มจากการเปลี่ยนรูปที่เล็กน้อยจนถึงสูงสุดเราพิจารณา

พื้นที่หน้าตัดระหว่างเปลี่ยนรูปลักษณะของจุดเล็กๆ (Element) ยังคงตั้งฉากแต่ละทิศทางไม่มีความเคลื่อนที่เกี่ยวกับทิศทางหลัก 1 2 และ 3



ภาพที่ 2-10 ทิศทางหลักในการทดสอบแรงดึง [10]

ในทางตรงกันข้ามในการทดสอบการดึง 2 ความเค้นหลักมีค่าเป็นศูนย์ในลักษณะชิ้นส่วนเล็กๆ ที่เปลี่ยนรูปค่าความเค้น 1 และ 2 ไม่เท่ากับศูนย์ค่าความเค้น 3 คือตั้งฉากกับผิวแท้จริงเกิดจากการสัมผัสระหว่างแผ่นบางกับ Tooling โดยทั่วไปแล้วน้อยกว่าจุด Yield ของวัสดุจะให้ป็นศูนย์ได้ และให้เป็น Plane Stress Deformation

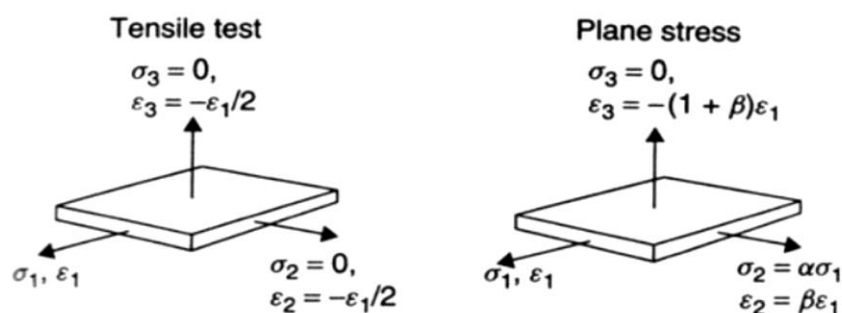
2.6.1 อัตราส่วนความเค้นและความเครียด (Stress and Strain Ratios)

ในความหมายเฉพาะที่กล่าวถึงการเปลี่ยนรูปของจุดเล็กๆ เอลิเมนต์ในแต่ละเทอมของ อัตราส่วนความเครียด (Strain Ratio, β) หรืออัตราส่วนความเค้น (Stress Ratio, α) สำหรับวิธี Proportional ค่าความจริงที่ใกล้เคียงที่สุด ดังภาพที่ 2-11

ในหลักทิศทางดั่งนั้นให้ $\sigma_1 > \sigma_2$ และทิศทางทั้งสามตั้งฉากกับพื้นผิว เมื่อ $\sigma_3 = 0$ ลักษณะการเปลี่ยนรูป

$$\varepsilon_1; \varepsilon_2 = \beta \varepsilon_1; \varepsilon_3 = -1(1 + \beta) \varepsilon_1 \quad (2-18)$$

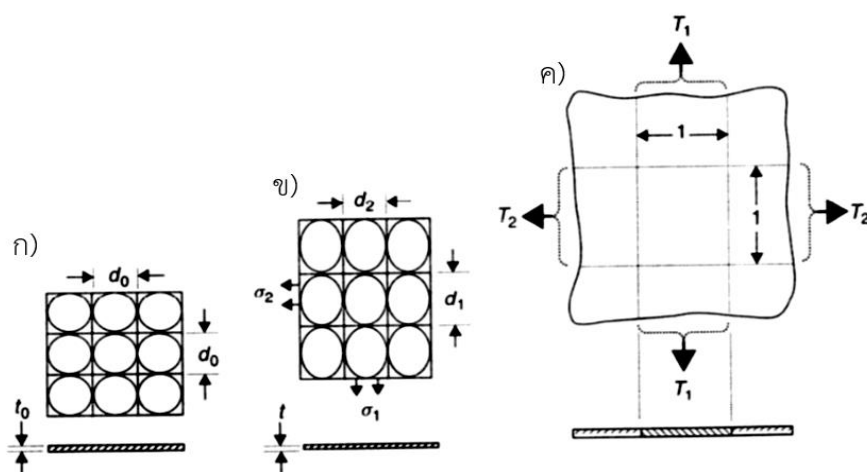
$$\sigma_1; \sigma_2 = \alpha \sigma_1; \sigma_3 = 0 \quad (2-19)$$



ภาพที่ 2-11 ทิศทางหลักของความเค้นและความเครียด [10]

2.6.2 การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of Sheet in Plane Stress)

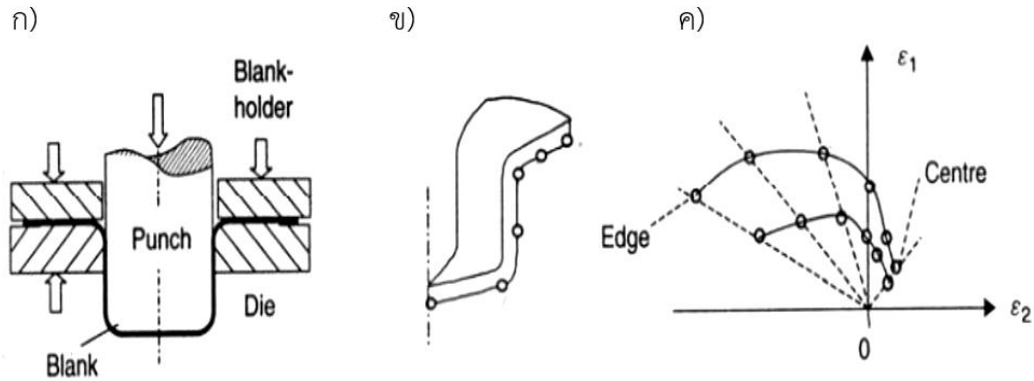
ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปนระนาบความเค้น (Plane Stress) พิจารณา (Work Hardening) ของวัสดุซึ่งเข้ากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูปในภาพที่ 2-12 ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา t_0 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_0 หรือตารางขนาด d_0 ดังภาพที่ 2-12 ก) วงกลมบนโลหะแผ่นขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูป ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปวงกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนของความเครียดหลัก (Major) คือ d_1 แกนแกนของความเครียดรอง (Minor) คือ d_2 ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางหลักของกริดวงกลมจะกลายเป็น สี่เหลี่ยมผืนผ้าดังภาพที่ 2-12 (ข) ส่วนความหนาคือ t ตามที่กรณีดังภาพที่ 2-12 (ค) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ σ_1 และ σ_2



ภาพที่ 2-12 การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น [10]

2.6.3 แผนภาพความเครียด (Strain Diagram)

ความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้น ก) การขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก ข) ขึ้นส่วนย่อยของถ้วยทรงกระบอกแสดงค่าความเครียดที่วัดได้ ค) ผลค่าความเครียดที่ได้จากการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก ดังภาพที่ 2-13 สามารถวัดได้จากกริดวงกลมในภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-13 ความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป [10]

2.6.4 ค่าความเครียดหลัก (Principal Strains)

ความเครียดหลักที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการ

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0}; \varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0}; \varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} \quad (2-20)$$

2.6.5 อัตราส่วนของความเครียด (Strain Ratio)

โดยปกติเส้นแนวความเครียด (Strain Path) ยังคงเป็นสัดส่วนเส้นตรงดังสมการ

$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\ln \left(\frac{d_2}{d_0} \right)}{\ln \left(\frac{d_1}{d_0} \right)} \quad (2-21)$$

2.6.6 ความเครียดหนาและความหนา (Thickness Strain and Thickness)

จากสมการ (2-20) ความเครียดหาได้โดยการวัดความหนาหรือหาได้จากความเครียดหลัก (Major Strain) ความเครียดรอง (Minor Strain) โดยให้พิจารณาอัตราการเปลี่ยนรูปที่ปริมาตร คงที่

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} = -(1 + \beta) \varepsilon_1 = -(1 + \beta) \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (2-22)$$

จากสมการ (2-22) ความหนาโดยทั่วไปคือ

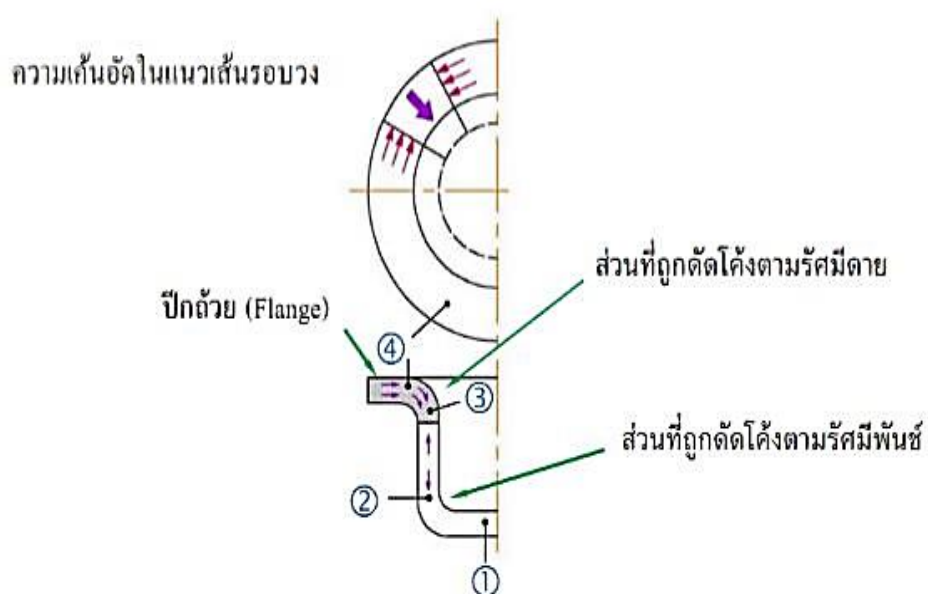
$$t = t_0 \exp(\varepsilon_3) = t_0 \exp[-(1 + \beta) \varepsilon_3] \quad (2-23)$$

หรืออีกแนวทางหนึ่งที่ปริมาตร $td_1d_2 = t_0d_0^2$ ที่ปริมาตรคงที่

$$t = t_0 \frac{d_0^2}{d_1d_2} \quad (2-24)$$

2.7 กระบวนการดึงขึ้นรูป (Deep Drawing) [12]

ขณะที่แผ่นโลหะถูกลากโดยพื้นซ์ มาลงช่องตายนั้น จะแบ่งการไหลออกเป็น 4 ลักษณะหลัก คือ บริเวณกันขึ้นงาน (บริเวณที่ 1) ส่งผลให้เกิดการดัดโค้งของแผ่นโลหะ 2 บริเวณคือ ส่วนโค้งตามรัศมีพื้นซ์ (บริเวณที่ 2) และส่วนโค้งตามรัศมีตาย (บริเวณที่ 3) ขณะที่แผ่นโลหะถูกพื้นซ์กด แผ่นโลหะส่วนที่เป็นผนังถ้วยใน จะทำหน้าที่ในการส่งแรงที่กระทำที่กันขึ้นงานไปยังบริเวณปึกขึ้นงาน (บริเวณที่ 4) ดังภาพที่ 2-14



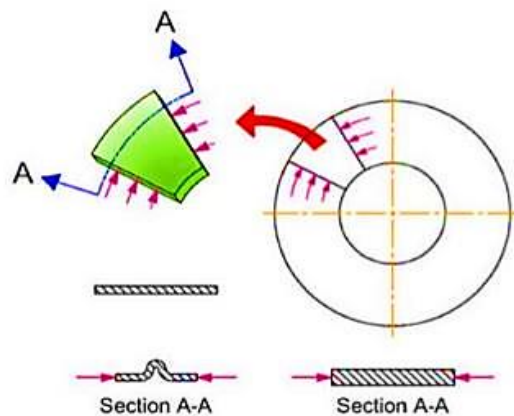
ภาพที่ 2-14 พฤติกรรมการไหลของโลหะแผ่นภายใต้กระบวนการดึงขึ้นรูปลึก [12]

บริเวณที่ 1 ส่วนของกันถ้วยไม่มีการเปลี่ยนรูปเกิดขึ้น พันธ์จะลากเนื้อโลหะส่วนนี้เคลื่อนที่ตามเข้าไปในช่องว่างตาย เป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาต่ำ

บริเวณที่ 2 ส่วนของแผ่นโลหะที่ถูกตัดโค้งตามรัศมีพันธ์และผนังถ้วยในแนวตั้ง และมีการส่งผ่านแรงไปยังกันถ้วย จึงทำให้เกิดความเค้นดิ่งในแนวแกน ส่งผลให้บริเวณนี้เกิดการยืดตัว และเกิดการบางลงของแผ่นโลหะ เป็นบริเวณที่มักเกิดรอยขาด (Tearing)

บริเวณที่ 3 เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรตามรัศมีตาย

บริเวณที่ 4 ส่วนของปีกถ้วย เป็นบริเวณที่เกิดการไหลของเนื้อโลหะมารวมกัน เป็นบริเวณเกิดความเค้นอัด (Compressive Stress) ในแนวเส้นรอบวง (Tangent Line) มักจะพบว่าแผ่นโลหะที่บริเวณนี้จะมีขนาดความหนาเพิ่มมากขึ้น หรือเกิดการย่น (Wrinkling) ดังภาพที่ 2-15 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน (Blank Holder Force : BHF) ถ้าแรงกดยึดแผ่นชิ้นงานเหมาะสมจะช่วยให้การกดเนื้อโลหะไม่ให้เกิดการย่นได้ แต่ถ้าใช้แรงกดยึดแผ่นชิ้นงานที่มากเกินไปจะช่วยลดการเกิดการย่นได้ แต่จะไปส่งผลกับการไหลของเนื้อโลหะไหลได้น้อยในบริเวณที่ 2 ทำให้เกิดการขาดได้



ภาพที่ 2-15 การเกิดความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงมีผลให้เกิดการย่น [12]



ก)



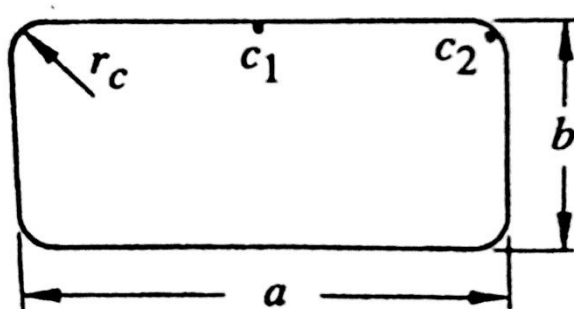
ข)

ภาพที่ 2-16 ชิ้นงานที่เกิดความเสียหาย [12]

จากภาพที่ 2-16 ก) ชิ้นงานที่เกิดความเสียหายจากการย่น (Wrinkling) บริเวณปีกถ้วย ซึ่งเกิดจากแรงกดยึดแผ่น ชิ้นงานที่น้อยเกินไป ข) ชิ้นงานที่เกิดความเสียหายจากรอยขาด (Tearing) บริเวณก้นถ้วย ซึ่งเกิดจากแรงกดยึดแผ่น ชิ้นงานที่มากเกินไป

2.8 กระบวนการดึงขึ้นรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า และวงรี [13]

ชิ้นงานเหล่านี้แตกต่างจากชิ้นงานสมมาตรรอบแกนหมุนเพราะการกระฉากความเค้นรอบขอบ ชิ้นงานไม่เสมอ ดังนั้นในทางทฤษฎีจึงถือว่าต้องใช้ความเค้นกดในแนวเส้นรอบวง กดวัสดุเฉพาะที่มุมเพียงอย่างเดียว ส่วนด้านข้างเกิดเฉพาะการดัดเท่านั้น ตามความจริงแล้วความเค้นกดในแนวเส้นรอบวงไม่ได้กระทำเฉพาะที่มุมเท่านั้น แต่ยังกระทำที่ด้านข้างด้วย ความเค้นนี้มีค่ามากขึ้นเมื่อชิ้นงานสูงมากขึ้น



ภาพที่ 2-17 รูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงานดึงขึ้นรูปชิ้นงานสี่เหลี่ยมผืนผ้า
a) ความยาว b) ความกว้าง c_1 และ c_2 จุดที่วัดการกด r_c รัศมีที่มุม [13]

ผลจากการวัดเปอร์เซ็นต์การกดชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแสดงในตารางที่ 2-1 ความสัมพันธ์ของแรงดึงขึ้นรูปที่ใช้สำหรับการดึงขึ้นรูปชิ้นงานรูปทรงกระบอกสามารถนำมาใช้กับชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้ โดยปรับปรุงเงื่อนไขที่เป็นขีดจำกัด เช่น อัตราส่วนของความยาวด้าน a ต่อรัศมีที่มุม r_c ตามภาพที่ 2-17

ตารางที่ 2-1 การกดในชิ้นงานดึงขึ้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า [13]

b/a	การกดที่บริเวณ		a/r_c	การกดของชิ้นงานรูปทรงกระบอก
	$c_1\%$	$c_2\%$		
0.3	5 ถึง 8	25 ถึง 30	20	32
0.5	15 ถึง 20	33 ถึง 38	10	42
1	25 ถึง 30	45 ถึง 50	3	55

ขีดจำกัดนี้คือ $a/r_c = 89$ สำหรับชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและ $a/r_c = 64$ สำหรับชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ค่าเหล่านี้เป็นเพียงค่าประมาณซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ นอกจากขนาดของรัศมีที่มุม r_c แล้วรัศมีที่กัน r_{dc} ก็มีความสำคัญ เช่นกัน รัศมีทั้งสองมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ เมื่อรัศมีที่กันเล็กลง รัศมีที่มุมมีผลต่อขีดจำกัดอัตราส่วนการดัดขึ้นรูปมากขึ้นดังภาพที่ 2-18 เนื่องจากวัสดุในบริเวณรัศมีที่มุมมีการอัดตัวมาก จึงต้องตัดบริเวณมุมของแบลงก์ให้สั้นลง มิฉะนั้นจะเกิดการขีดตัวขึ้นได้ เพราะมีวัสดุสะสมอยู่ที่มุมมากเกินไปดังภาพที่ 2-19

การนำค่าที่ใช้สำหรับชิ้นงานทรงกระบอกมาใช้กับชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมทำให้เกิดปัญหาเกิดขึ้น เพราะชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมไม่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง d_0 และ d_1 ดังนั้นจึงต้องหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเปรียบเทียบ d_e จากพื้นที่ดังนี้

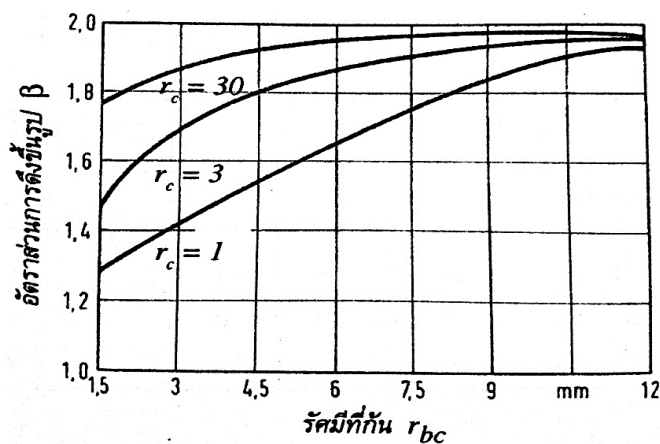
$$d_{e0} = \sqrt{\frac{4}{\pi} A_0} = 1.13\sqrt{A_0} \quad (2-25)$$

$$d_{e1} = 1.13\sqrt{a_0} \quad (2-26)$$

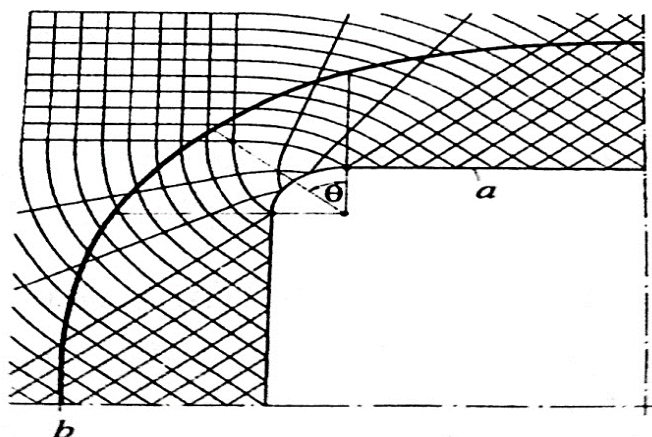
โดยที่ A_0 คือ พื้นที่ของแบลงก์
 a_0 คือ พื้นที่หน้าตัดพื้นที่

ดังนั้น อัตราส่วนการดัดขึ้นรูปคือ

$$\beta = \sqrt{\frac{A_0}{a_0}} \quad (2-27)$$



ภาพที่ 2-18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการดัดขึ้นรูป β ของชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมกับรัศมีที่กัน r_{dc} เมื่อรัศมีที่มุม r_c มีขนาดต่างกัน [13]



ภาพที่ 2-19 รูปทรงของแผ่นแบลงก์ซึ่งวิเคราะห์โดยวิธีสลิปไลน์ a
รูปร่างด้านใน b รูปร่างด้านนอก [13]

เมื่อใช้รูปแบบลักษณะนี้ก็สามารถนำผลของอัตราส่วน $d_{e1} = t_0$ มาใช้ได้ การเพิ่มความหนาของชิ้นงาน น้อยกว่าชิ้นงานรูปทรงกระบอกประมาณ 20% ดังนั้นเคลือบแรนซ์ $u_z = 1.4t_0$ จึงกว้างมากเกินไป

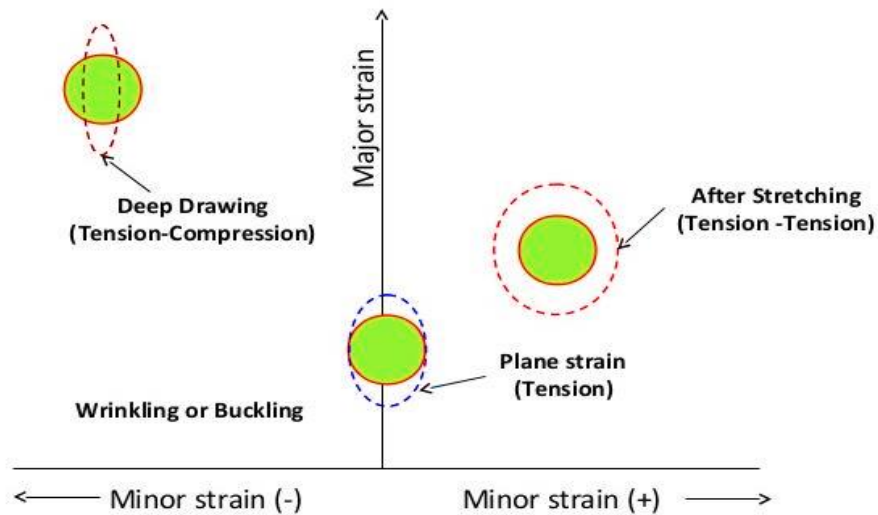
2.9 แผนภูมิขีดจำกัดการดึงขึ้นรูป [13]

ในปัจจุบันนี้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะแผ่น แต่อย่างไรก็ตามความสำเร็จในการใช้งานนั้นต้องมีความรู้และประสบการณ์ทั้งในห้องปฏิบัติการและในโรงงานอย่างเพียงพอ

แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นแผนภาพที่บอกถึงอนุภาคของโลหะแผ่นสามารถขึ้นรูป ก่อนจะเกิดคอขวด (Necking) แผนภาพดังกล่าวได้จากการนำโลหะแผ่นมาทำเป็นสัญลักษณ์เป็นวงกลมเล็ก ๆ ตลอดแผ่น ระหว่างทำการขึ้นรูป วงกลมดังกล่าวมีการเสียรูปเป็นวงรี หลังจากนั้น ทำการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางในแกนหลัก (Major Axis Length; d_1) และแกนรอง (Minor Axis Length; d_2) เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางเดิม (Original Circle; d_0) เพื่อพิจารณาค่าของ ความเครียดหลัก (Principal Strain) ซึ่งสามารถหาได้ในกรณีที่เป็นการดึงจริง (True Strain) ดังนี้

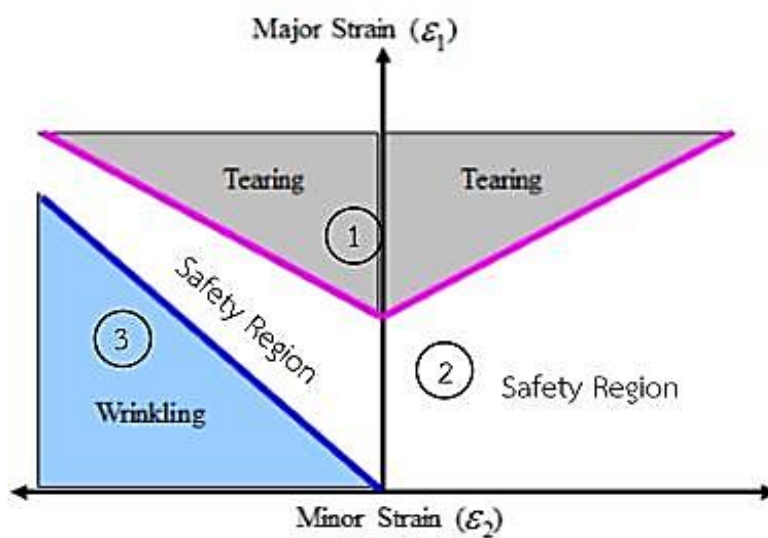
$$\text{ความเครียดหลัก (Major Strain) } \varepsilon_1 = \ln \left(\frac{d_2}{d_0} \right) \quad (2-28)$$

$$\text{ความเครียดรอง (Minor Strain) } \varepsilon_2 = \ln \left(\frac{d_1}{d_0} \right) \quad (2-29)$$



ภาพที่ 2-20 ลักษณะการรับภาระของชิ้นงาน ซึ่งมีผลต่อ ความเครียดหลัก (Major strain) และ ความเครียดรอง (Minor strain) [13]

กรณีที่เป็นความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain) จะเป็น $\varepsilon_1 = \frac{(d_1 - d_0)}{d_0}$ และ $\varepsilon_2 = \frac{(d_2 - d_0)}{d_0}$ โดยค่าความเครียดของวงกลมบริเวณที่เกิดคอคอดจะพิจารณาเป็น บริเวณที่เสียหาย ส่วนความเครียดของวงกลมที่นอกเหนือจากนั้นจะพิจารณาว่าเป็นบริเวณที่ปลอดภัย หลังจากนั้นก็นำค่าความเครียดต่างๆ มาสร้างลงในแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป



ภาพที่ 2-21 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป [14]

จากภาพที่ 2-21 จะเห็นได้ว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปประกอบด้วยสองเส้นหลัก ได้แก่ เส้นสี่ชมพู และ เส้นสีน้ำเงิน ซึ่งสร้างจากทฤษฎี Swift - Hill's criterion ดังนี้
เส้นสี่ชมพูด้านซ้าย สร้างจากทฤษฎี Hill's criterion ด้วยสมการที่ 2-32 โดยที่

$$\rho = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (2-30)$$

$$\varepsilon_1^* = \frac{n}{1+\rho} \quad (2-31)$$

เส้นสี่ชมพูด้านขวา สร้างจากทฤษฎี Swift's Criterion ด้วยสมการที่ 2-28

$$\varepsilon_1^* = \frac{2n(1+\rho+\rho^2)}{(1+\rho)(2\rho^2-\rho+2)} \quad (2-32)$$

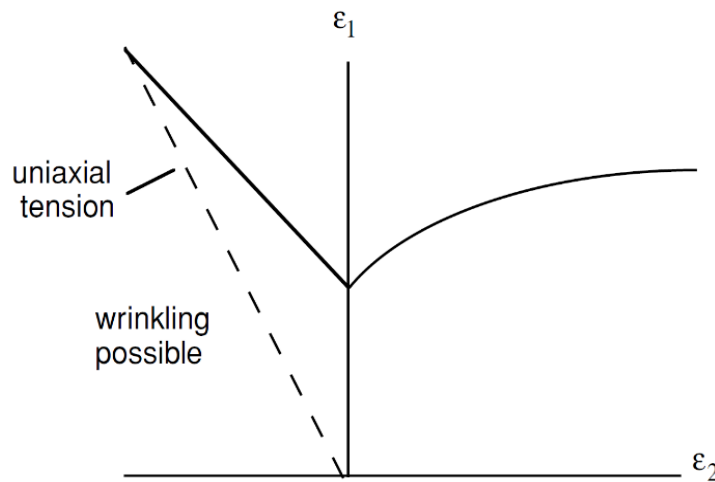
โดยบริเวณสีเทา (หมายเลข 1) คือ บริเวณที่เกิดการฉีกขาด และบริเวณสีขาว (หมายเลข 2) คือ บริเวณที่ขึ้นงานไม่เกิดความเสียหาย เส้นสีน้ำเงินด้านล่างซ้าย สามารถสร้างได้โดยใช้ สมการที่ 2-33

$$\beta = -\frac{(1+R)}{R} \quad (2-33)$$

บริเวณสีฟ้า (หมายเลข 3) คือ บริเวณที่เกิดการย่น ค่า R สัมประสิทธิ์ความไม่เท่ากันในทุกทิศทาง (Normal Anisotropy Coefficient) ได้จากสมการที่ 2-3

2.10 ความเสียหายของโลหะแผ่นของการเกิดการย่น [14]

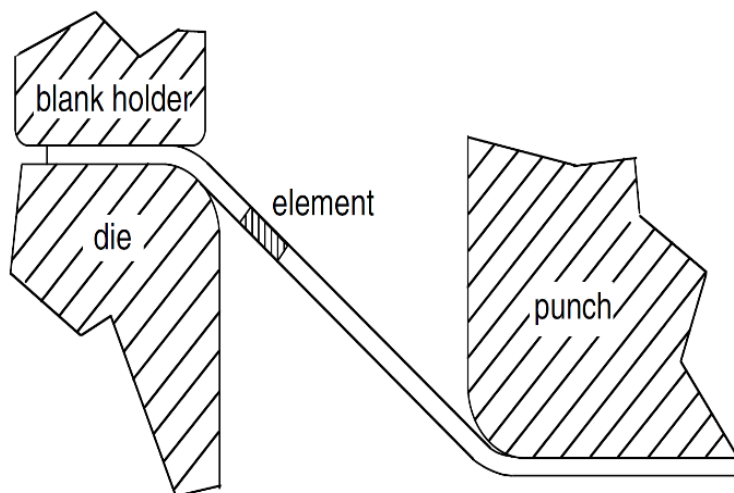
เมื่อโลหะแผ่นส่วนที่ยึดออกเป็นอิสระต่อแม่พิมพ์พอที่จะเกิดช่องว่าง อาจจะทำให้เกิดการย่นบนชิ้นงานสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยให้ความเค้นประสิทธิผล (Effective Strain) ไม่ควรเกินร้อยละ 4 ของการขึ้นรูปทั้งหมดหากสังเกตความเสียหายอย่างง่าย โดยใช้ฝ่ามือลูบลงบนชิ้นงานจะพบว่าเกิดริ้วรอยที่ไม่สม่ำเสมอทั้งหมด



ภาพที่ 2-22 เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปการย่น [14]

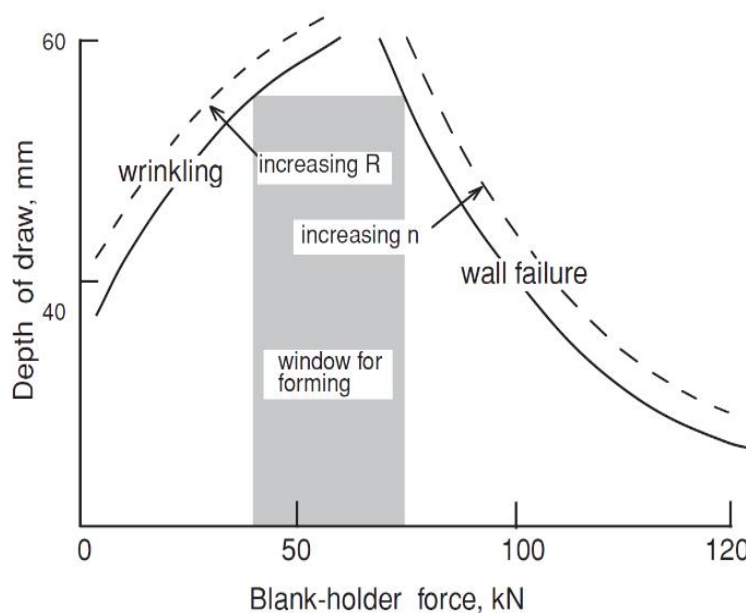
จากภาพที่ 2-22 แสดงเส้นแนวความเครียดในแนวแกนเดียว (Uniaxial Tension) ที่เป็นเส้นประไปทางด้านซ้ายซึ่งความเค้นจะถูกบีบอัด (Compressive Stress) ดังนั้นมีโอกาสการเริ่มการเกิดการย่น

การเกิดการย่นเกิดจากความเค้นในโลหะถูกบีบอัด สำหรับโลหะแผ่นบางจะเกิดความเค้นบีบอัดต่ำกว่า โลหะที่มีความหนามากกว่า การย่นส่วนใหญ่ปัญหาเกิดขึ้นจากการะบวนการดึงขึ้นรูปลึก พิจารณาจากการขึ้นรูปที่มีผนังทรงกรวยในระนาบได้ล่าง แสดงในภาพที่ 2-23 เมื่อพื้นชกตกลงมาถูกชิ้นงาน ชิ้นงานจะถูกดึงลงตามพื้นที่ลงมา ดังนั้นแนวเส้นรอบวงจะหดตัว แต่การดึงยืด (Stretching) ด้านข้างผนังจะลดการหดตัวในแนวเส้นรอบวง แต่ถ้าการดึงยืดน้อยเกินไปจะทำให้เกิดการย่น การแก้ไขสามารถเพิ่มแรงกดของตัวยึดชิ้นงาน (Blank-Holder) ให้เหมาะสม ในกรณีที่มาเกินไปจะทำให้ชิ้นงานขาดหรือเสียหายได้เช่นกัน



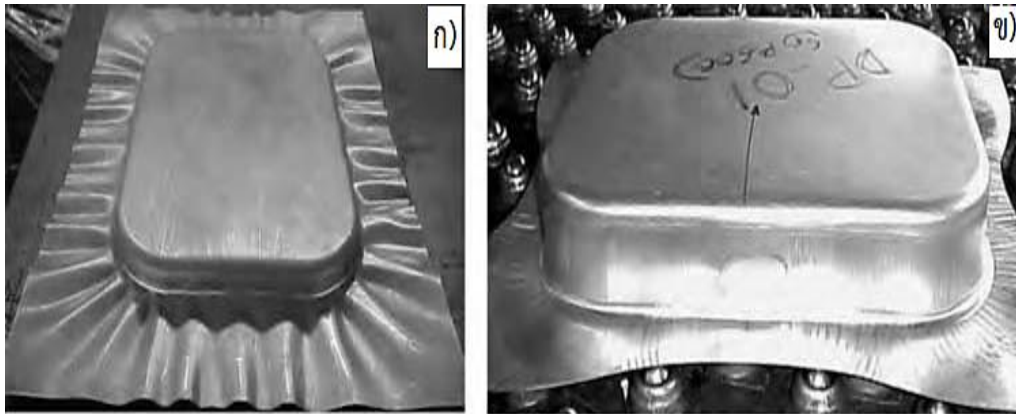
ภาพที่ 2-23 กระบวนการดึงขึ้นรูปลึกทรงกรวย ที่อาจจะการย่นด้านข้างผนังชิ้นงาน [14]

แสดงระดับแรงกดของตัวยึดชิ้นงาน (Blank-Holder) ให้เหมาะสม ในการนำไปใช้งาน เบื้องต้น ลดปัญหาการลองผิดลองถูก ดังภาพที่ 2-24 เนื่องจากการหดตัวในแนวเส้นรอบวงเกิดขึ้น เมื่อวัสดุที่มีค่า R สูง การยืดออกตัวจะมีการหดตัวในระนาบของแผ่นงานมากขึ้น ดังนั้นค่า R ที่เพิ่ม จะขยายไปทางด้านซ้ายของหน้าต่างส่วนค่า n ที่เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถยืดได้มากขึ้นก่อนเกิดความ ล้มเหลว สำหรับวัสดุใดก็ตามที่กำหนดความลึกของการขึ้นรูปที่ต้องการจะมีหน้าต่างของแรงยึด ที่เหมาะสม สำหรับการขึ้นรูปขึ้นสูงจะมีการปรับแรงกดชิ้นงานในขณะการขึ้นรูป ซึ่งในช่วงแรกจะกด แรงที่สม่ำเสมอจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้การขึ้นชิ้นงานได้ดียิ่งขึ้น



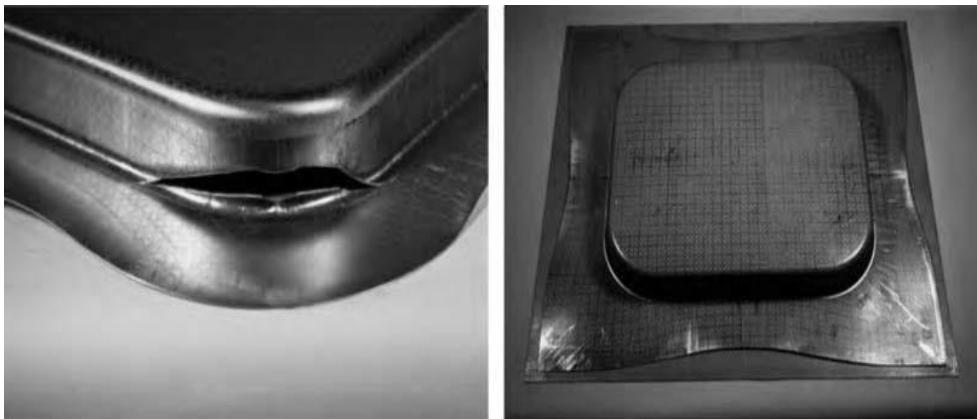
ภาพที่ 2-24 ตัวอย่างการใช้แรงกดชิ้นงานที่เหมาะสมกับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึงทรงกรวย [14]

การยื่นเป็นปรากฏการณ์ของความไร้เสถียรภาพของแรงบีบอัด [15] เมื่อมีการบีบอัดในระนาบ ของแผ่นมากเกินไป ตัวอย่างเช่น ในกระบวนการขึ้นรูปลึง สามารถเริ่มต้นการยื่นบนระนาบของ การกดชิ้นงาน แสดงในภาพที่ 2-25 ก) หรือในผนังด้านชิ้นงานข้างภาพที่ 2-25 ข) แรงกดชิ้นงาน ที่เหมาะสมสามารถลดการเกิดการยื่นเริ่มต้นของการยื่นเป็นปรากฏการณ์เฉพาะที่ขึ้นอยู่กัสมบัติ ของวัสดุ และความหนาของวัสดุภายใต้การบีบอัด สถานะของความเค้น คือการบีบอัดในระนาบ และอีกทิศทางหนึ่งจะเกิดการดึงในระนาบ



ภาพที่ 2-25 การเกิดการยุบที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปสีกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ก) การยุบบนระนาบของการกดชิ้นงาน และ ข)การยุบบนผนังด้านข้างชิ้นงาน [15]

เพื่อหลีกเลี่ยงการยุบควรกำหนดแรงกดชิ้นงานให้เหมาะสม เป็นตัวกำหนดการไหลตัวของชิ้นงาน ซึ่งหากแรงกดชิ้นงาน (Blank-Holder) มากเกินไปจะทำให้ชิ้นงานไม่ไหลตัวลงในแม่พิมพ์ จะเกิดการฉีกขาดบริเวณด้านล่างของชิ้นงาน ตามภาพที่ 2-26

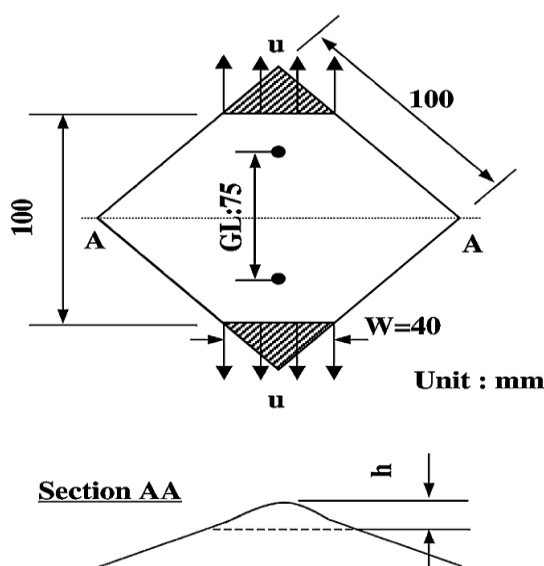


ภาพที่ 2-26 ความเสียหายจากแรงกดชิ้นงานที่มากเกินไป [15]

2.11 การทดสอบการโก่งของโยชิเดะ (Yoshida Buckling Test) [16]

การทดสอบจะใช้ชิ้นทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแผ่นเรียบ หรือรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วจับยึดที่ด้านตรงข้าม และดึงในทิศทางตรงข้ามดังแสดงในภาพที่ 2-27 ขนาดชิ้นงานมาตรฐานคือสี่เหลี่ยมจัตุรัส 100 mm (3.94 in.) และจับยึดด้วยค้ำจับ (Grip) ขนาดความกว้าง 41 mm (1.6 in.) และมีความยาวเกจ 75 mm (2.95 in.) (ชิ้นงานรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วจะมีขนาดแบ่งครึ่งตามแนวเส้นทแยงมุมของชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ชิ้นงานทั้งสองชนิดจะให้ค่าในการทดสอบที่คล้ายกัน แต่ในชิ้นงานแบบสี่เหลี่ยมจะให้ค่าในด้าน ความเค้นสองแนวแกนออกมาด้วย) เมื่อทำการทดสอบแล้ววัดความสูงของการโก่งที่เกิดขึ้นที่ตรงกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ

ความเค้นแบบอิสระเกิดขึ้นในขั้นทดสอบ เป็นสาเหตุให้เกิดการโก่งขึ้นที่จุดศูนย์กลางระหว่างทิศทางของแรงกระทำ ความสูงของการโก่งจะให้ค่าการยืดยประมาณ 2% ที่ใช้เป็นการวัดการย่นมีตัวแปรหลายประการที่บ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของการโก่ง และคุณสมบัติของวัสดุ การทดสอบทั้งสองชนิดทั้งการทดสอบการโก่งของโยชิตะกับการทดสอบการเกิดการย่นด้วยรูปถ้วยทรงกระบอกจะแปรผันตรงกับค่าต้านทานแรงคราก และในทางกลับกันกับค่าตัวแปรในการชุบแข็ง และไม่มีความสัมพันธ์กับการเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุ การทดสอบของโยชิตะจะไม่ประสบผลสำเร็จกับอะลูมิเนียม เพราะขั้นทดสอบมักแตกก่อนการเกิดการย่น



ภาพที่ 2-27 การทดสอบการเกิดการโก่งของโยชิตะ (Yoshida Buckling Test) [16]

การทดสอบของโยชิตะจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชันของกราฟความโก่งเทียบกับกราฟความย่น เป็นการง่ายที่จะกำหนดความสูงขณะที่ทำการย่นไปเพียงบางส่วน และค่าการต้านทานแรงคราก และอัตราส่วนของค่าการต้านทานแรงครากต่อค่าการต้านทานแรงย่นจะเป็นที่ยอมรับ และค่าความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับค่าฉัปล้น (2 %) ค่ายกกำลังความเครียดจากการชุบแข็ง และไม่มีค่าผันแปรอันเนื่องมาจากการย่นแบบไม่มีทิศทาง และความเป็นปกติของการเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุ

2.12 การทำให้แข็งด้วยความเครียด (Hardening Laws) [14]

เมื่อโลหะเปลี่ยนรูปถาวรที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) เรียกว่าโลหะเกิดการแปรรูปเย็น (Cold Worked) นอกจากการเปลี่ยนรูปทรงที่มักทำให้ความต้านแรงและความแข็งเพิ่มขึ้นแล้ว คำว่า การทำให้แข็งด้วยความเครียด (Work Hardening หรือ Strain Hardening) หมายถึง การเพิ่มความแข็งแรงจากการแปรรูปเย็น ทำให้เส้นโค้งความเค้นไหล (Flow Curve) เพิ่มขึ้น ผลที่ติดตามมาก็ คือ สมบัติยืดย (Ductility) ลดลง

โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้สมการทำให้แข็งด้วยความเครียดที่เสนอ โดยสวิตต์ (Swift) อธิบายพฤติกรรมความเค้น และความเครียดการเปลี่ยนรูปของวัสดุในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation) จากจุดเริ่มไหลตัวพลาสติกหรือเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร จนกระทั่งเปลี่ยนรูปถึงจุดความเค้นสูงสุดก่อนแตก ได้เสนอสมการดังต่อไปนี้

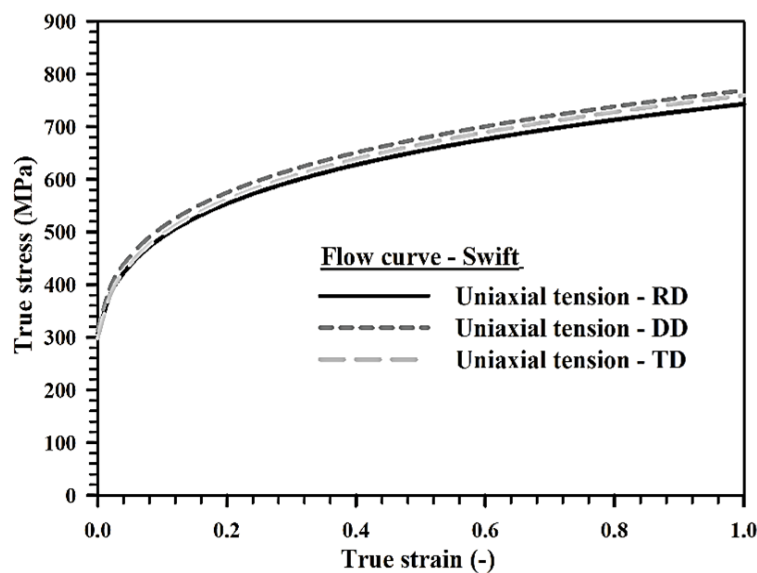
$$\bar{\sigma} = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n \quad (2-34)$$

โดยที่ K คือ สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (Strength Coefficient)

ε_0 คือ ความเครียดในช่วงยืดหยุ่น

ε_p คือ ความเครียดในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร

n คือ เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening Exponent)



ภาพที่ 2-28 ตัวอย่างเส้นโค้งความเค้นไหล จากสมการ Swift Hardening

2.13 เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic Yield Criteria) [17], [18]

ทฤษฎีของฟอนไมเซสหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าทฤษฎีพลังงานแปรรูป (Distortion Theory) ซึ่งฟอนไมเซส ได้เสนอว่าการครากจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานแปรรูปภายในเนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะที่แรงกระทำมีค่าเท่ากับพลังงานแปรรูป จากการทดสอบแรงดึงของวัสดุทดสอบ ซึ่งก็คือค่าความเค้นเบี่ยงเบนอันดับสอง J_2 ซึ่ง $J_2 = k_2$

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] \quad (2-35)$$

ในกรณีของชิ้นทดสอบที่ได้รับแรงดึง $\sigma_1 = \sigma_0, \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_0$

$$J_2 = \frac{1}{6}(\sigma_0^2 + \sigma_0^2) = k \quad (2-36)$$

$$\sigma_0 = \sqrt{3}k \quad (2-37)$$

โดยที่ σ_0 คือ ความเค้นคราก

k คือ ความเค้นเฉือนสูงสุดที่ได้จากการทดสอบดึงวัสดุ

สำหรับวัสดุทดสอบที่ได้รับแรงเฉือนเพียงอย่างเดียว $\tau = \sigma_1 = -\sigma_3, \sigma_2 = 0$
เมื่อแทนลงในสมการที่ 2-36 จะได้สมการการคราก คือ

$$\sigma_1^2 + \sigma_1^2 + 4\sigma_1^2 = 6k \quad (2-38)$$

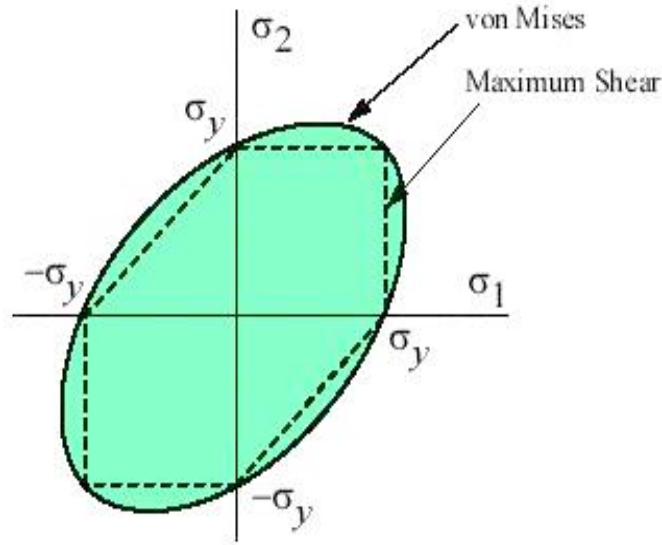
$$\sigma_1 = k \quad (2-39)$$

จากสมการที่ 2-37 และ 2-39 จึงสามารถหาค่า k ได้คือ

$$k = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} = \sigma_1 \quad (2-40)$$

จาก $j_2 = k^2$ สามารถจัดสมการที่ 2-37 และ 2-40 ได้ใหม่คือ

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-41)$$



ภาพที่ 2-29 เปรียบเทียบกรอบการแตกหัก

จะเห็นได้ว่าการครากจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{3}}$ เท่าของความเค้นครากที่ได้จากการดึงวัสดุทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบทฤษฎีทั้งสองโดยพิจารณาจากภาพที่ 2-29 ซึ่งแสดงกรอบการแตกหักของวัสดุพบว่าทฤษฎีของฟอนไมเซส ให้ผลการทำนายการครากใกล้เคียงมากกว่าทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดสำหรับงานขึ้นรูปโลหะแผ่น

2.13.1 The r -Value Based Anisotropic Parameters (Hill' 48-R) [17], [18]

แบบจำลองเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของวัสดุของ Hill's 1948 บนพื้นฐานของ r -Base เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปคือ เกณฑ์การครากของฟอนไมเซส (Von-Mises) แต่เดิมจะใช้สำหรับการแสดงในกรณีที่อยู่ในรูปแบบความเค้น 3 มิติ แต่สามารถที่จะกับกรณีความเค้นระนาบได้

$$\bar{\sigma}^2 = \sigma_{xx}^2 - \frac{2r_0}{1+r_0} \sigma_{xx}\sigma_{yy} + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)} \sigma_{yy}^2 + \frac{r_0r_{90}}{r_{90}(1+r_0)} (2r_{45}+1) \sigma_{xy}^2 \quad (2-42)$$

$$\bar{\sigma}^2 = \sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 - \sigma_{yy}^2 - \frac{2\bar{R}}{\bar{R}+1} \sigma_{xx}\sigma_{yy} + 2 \frac{2\bar{R}+1}{\bar{R}+1} \sigma_{xy}^2 \quad (2-43)$$

$$\bar{R} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2-44)$$

$$r_0 = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w_i}{w_f}\right)}{\ln\left(\frac{t_i}{t_f}\right)} \quad (2-45)$$

โดยที่ w_i คือ ความกว้างเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ

w_f คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบหลังการดึง

t_i คือ ความกว้างเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ

t_f คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบหลังการดึง

$\bar{R}$ คือ ค่าเฉลี่ยพลาสติกแอนไอโซทรอปิก

r_0 คือ อัตราส่วนความเครียดพลาสติก(Plastic Strain Ratio)ในทิศทางทำมุม 0 องศา
มุม 45 องศา และมุม 90 องศาของแนวการรีด r_0, r_{45} และ r_{90}

2.13.2 Yield Stress Based Anisotropic Parameters. (Hill' 48-S) [17], [18]

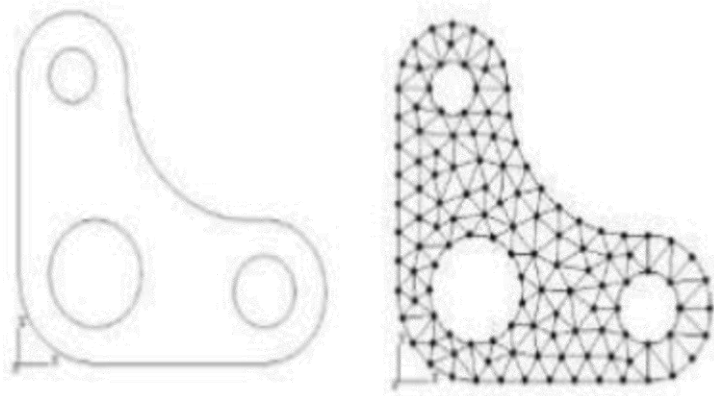
แบบจำลองเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิก ของวัสดุของ Hill's 1948 บนพื้นฐานของ Stress-Base จะถูกคำนวณจากความเค้นของวัสดุในแตกต่างกันสี่ทิศทางตัวอย่างการทดสอบการดึงแกนเดียวที่ 0 องศา ในทิศทางแนวรีด การทดสอบการดึงเดียวแกนที่ 90 องศา จากทิศทางแนวรีด การทดสอบการดึง 2 แกน (Hydraulic Bulge Test) $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_b$ และ $\sigma_{xy} = 0$ และการทดสอบการดึงแกนเดียวที่ 45 องศา จากทิศทางแนวรีด จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$f_{HS}(\sigma) = \left(\frac{1}{\sigma_0}\right)^2 \sigma_{xx}^2 - \left[\left(\frac{1}{\sigma_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sigma_{90}}\right)^2 - \left(\frac{1}{\sigma_b}\right)^2\right] \sigma_{xx}\sigma_{yy} + \left(\frac{1}{\sigma_{90}}\right)^2 \sigma_y^2 + \left[4\left(\frac{1}{\sigma_{45}}\right)^2 - \left(\frac{1}{\sigma_b}\right)^2\right] \tau_{xy}^2 - 1 = 0 \quad (2-46)$$

โดยตัวห้อย“ HS” บ่งชี้ถึงฟังก์ชันของ Hill's 1948 : ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของ Stress-Base

2.14 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [19]

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) มีจุดเด่น คือ มีความสามารถในการจำลองรูปแบบลักษณะของปัญหาได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมาก หลักการของระเบียบวิธีการนี้ในขั้นต้นคือเริ่มจาก แบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อหาที่หลายๆ ชิ้นที่เรียกว่าเอลิเมนต์ ดังในตัวอย่างของแผ่นโลหะแผ่นเดิมนี้ เราสามารถแบ่งเอลิเมนต์ขนาดต่างๆ กันดังภาพที่ 2-30



ภาพที่ 2-30 การแบ่งเอลิเมนต์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Meshing) [19]

ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง โดยปกติแล้วปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกัน รวมทั้งเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสม ค่าของผลเฉลยแม่นยำตรงซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่แท้จริงของปัญหาดังกล่าว จะประกอบด้วยค่าของตัวแปรที่มีขนาดต่างๆ กันและเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งต่างๆ ของรูปร่างของปัญหานั้นหรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าของผลเฉลยแม่นยำจะประกอบด้วยค่าต่างๆ ดังกล่าว ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการคือ ทำการเปลี่ยนค่าแม่นยำทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านี้มาเป็นค่าโดยประมาณที่มี จำนวนนับได้ (Finite) ด้วยการแบ่งรูปร่างหรือลักษณะของปัญหานั้นออกเป็นเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งมีขนาดแตกต่างกัน

วิธีการดังกล่าวนี้บ่งบอกเป็นนัยว่า ผลเฉลยโดยประมาณของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (Satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์กับเงื่อนไขต่างๆ ที่กำหนดมาให้สำหรับปัญหานั้น ซึ่งหมายความว่า หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการเริ่มต้นพิจารณาแต่ละเอลิเมนต์ แล้วทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ โดยสมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่พิจารณาอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้ประกอบเข้าด้วยกัน ก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งความหมายทางกายภาพของการทำเช่นนี้ก็คล้ายกับการนำ ทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมกันเข้า ก่อให้เกิดเป็นรูปลักษณะของปัญหาทั้งหมดจากนั้นจึงทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้หั่นลงในสมการชุดใหญ่นี้แล้วจึงทำการแก้สมการทั้งหมด ก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการตามตำแหน่งต่างๆ ของรูปร่างปัญหานั้น ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 คือการแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์ออกเป็นเอลิเมนต์ ย่อยๆ ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆ กัน เช่น ปัญหาการเสียรูปและความเค้นที่เกิดขึ้นในของแข็งปัญหาการถ่ายเทความร้อนในของแข็งหรือของเหลว หรือปัญหาของการไหลของของเหลว เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการเลือกฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Function) ยกตัวอย่างเช่น แบบสามเหลี่ยมในสองมิติ เอลิเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1 2 และ 3 โดยจุดต่อเหล่านี้เป็นตำแหน่งของตัวไม่รู้ค่า (Nodal Unknowns) ซึ่งคือ ϕ_1, ϕ_2

และ ϕ_3 ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเหล่านี้ อาจแทนขนาดของการเสียหายหากเราแก้ปัญหาของการเสียรูปในของแข็ง หรืออาจแทนค่าของอุณหภูมิหากเราแก้ปัญหาของการถ่ายเทความร้อน หรือ อาจแทนค่าของความเร็วของของเหลวหากเราแก้ปัญหาของการไหล เป็นต้น ลักษณะของการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน และตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ดังนี้

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (2-47)$$

โดยที่ $N_i(x, y), i=1, 2, 3$ แทนฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์สมการที่ (2-47) สามารถเขียนให้เขียนในรูปแบบเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\phi(x, y) = [N_1 N_2 N_3] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \quad (2-48)$$

โดย $[N]$ แทนเมตริกซ์แถวอน (Row Matrix) ของฟังก์ชันการประมาณในเอลิเมนต์ และ $\{\phi\}$ แทนเวกเตอร์เมตริกซ์หรือเมตริกซ์แนวตั้ง (Column Matrix) ที่ประกอบไปด้วยตัวที่

ไม่รู้ค่าที่ จุดต่อของเอลิเมนต์นั้น

ขั้นตอนที่ 3 คือการสร้างสมการเอลิเมนต์ (Element Equations) จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e \quad (2-49)$$

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (2-50)$$

โดยตรรกะนี้ล่าง แสดงถึงเมตริกซ์ต่าง ๆ นั้นเป็นเมตริกซ์ระดับเอลิเมนต์ สำหรับขั้นตอนที่ 3 นี้ อาจถือได้ว่าเป็นหัวใจของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสมการของเอลิเมนต์ดังกล่าว จำเป็นต้องถูกสร้างขึ้นมาให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นๆ ซึ่งต่อไปเราจะพบว่า สมการของเอลิเมนต์นี้สามารถประดิษฐ์ขึ้นได้โดยตรงจากสมการเชิงอนุพันธ์ โดยการประยุกต์ระเบียบวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals) ซึ่งถูกจัดได้ว่าเป็นระเบียบวิธีทั่วไปที่นิยม ใช้ในการประยุกต์กับปัญหาต่างๆ ในปัจจุบัน

ขั้นตอนที่ 4 คือการนำ สมการที่ประดิษฐ์ขึ้นได้จากทุกๆเอลิเมนต์มาประกอบรวมกันเข้า ก่อให้เกิดระบบสมการ (System of Equations) ขนาดใหญ่ขึ้นดังนี้

$$\sum (Element_Equation) \rightarrow [K]_{sys} \{\phi\}_{sys} = \{F\}_{sys} \quad (2-51)$$

โดยตัวห้อย **sys** บอกถึงเมตริกซ์นั้นๆ เป็นเมตริกซ์ของระบบสมการรวม

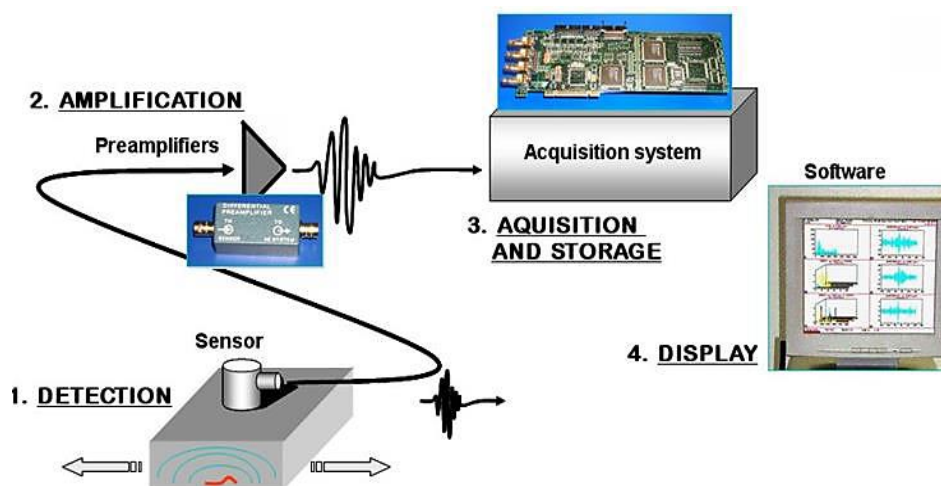
ขั้นตอนที่ 5 จะเป็นการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ลงในระบบ สมการ ที่ 2-47 จากนั้นจึงแก้ระบบสมการนี้เพื่อหา $\{\phi\}_{sys}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ ซึ่งอาจเป็น ค่าของการเคลื่อนตัวเนื่องจากการเสียรูปของของแข็งหรืออาจเป็นค่าของอุณหภูมิ สำหรับปัญหา การถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นค่าความเร็วของของเหลวสำหรับปัญหาของการไหลเป็นต้น

ขั้นตอนสุดท้ายจะทำการคำนวณค่าที่ต่อเนื่องอื่นๆ หลังจากการคำนวณค่าที่จุดต่อจาก ขั้นตอนที่ 5 ออกมาได้ แล้วยกตัวอย่างเช่น หลังจากรู้ค่าการเคลื่อนตัวของของการเสียรูปในของแข็ง ก็ สามารถคำนวณค่าความเค้นความเครียดได้ หรือเมื่อรู้ค่าของอุณหภูมิที่จุดต่อต่างๆก็สามารถ นำไป คำนวณหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ หรือเมื่อรู้ค่าความเร็วของการไหลก็สามารถ นำไป คำนวณหาปริมาตรการไหลทั้งหมดได้ เป็นต้น จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้จะเห็นได้ว่าระเบียบ วิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีที่มีแบบแผนเป็นขั้นตอน โดยมีหัวใจที่สำคัญคือการสร้างสมการ เอลิเมนต์ (ขั้นตอนที่ 3) ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่กำหนดมาให้ในส่วนนั้นๆ ขั้นตอน เป็นการผสมผสานความรู้ต่างๆ เพื่อนำ มาประมาณค่าในช่วงซึ่งเราจะนำมาใช้เพื่อ สร้างฟังก์ชัน การประมาณภายในเอลิเมนต์

2.15 เทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีอะคูสติกอีมิสชัน (Acoustic Emission) [20]

Acoustic Emission ความหมายตรงตามอักษร คือ การให้เสียงออกมานั่นเอง โดยปกติก่อน ที่จะเกิดการแตกหักขั้นสุดท้ายนั้น บริเวณภายในจะมีรอยแตกเล็กๆ เกิดขึ้นจากนั้นก็ขยายตัว เรื่อยๆไปจนเกิดการแตกหัก กล่าวคือ ในขณะที่ของแข็งเกิดการแตกหัก หรือมีการเปลี่ยนรูปแบบ พลาสติก (Plastic Deformation) จะเปลี่ยนพลังงานที่อยู่ในรูปของความเครียดนั้น ส่งออกมา ในรูปของคลื่นอีลาสติก (Elastic Wave หรือคลื่นเสียง) เรียกปรากฏการณ์การส่งคลื่นเสียงแบบนี้ว่า อะคูสติกอีมิสชัน โดยทั่วไปมักจะเป็นคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่หูคนรับฟังไม่ได้โดยตรง

การตรวจสอบคลื่นสัญญาณอีลาสติกที่เกิดขึ้นในเวลาที่ย่อยแตกขยายตัวออกไป การทดสอบ อะคูสติกอีมิสชัน นั้นเป็นการตรวจสอบเสียงที่เกิดขึ้น จากการที่เกิดการขาดเสถียรภาพมีรอยบกพร่อง เกิดขึ้น แล้วขยายตัวออกก่อเกิดเสียงดังกล่าวดังนั้นจึงเป็นการประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบ กระบวนการที่ย่อยแตกหรือการขยายตัวอยู่เท่านั้น กล่าวอีกนัยหนึ่ง การทดสอบแบบไม่ทำลาย แบบอื่นๆ เป็นการตรวจสอบสภาพที่เกิดขึ้นแล้ว ส่วนการทดสอบอะคูสติกอีมิสชัน นั้นเป็นการ ตรวจสอบสภาพ “ปัจจุบัน” เป็นวิธีการแสดงสภาพเวลาจริง (Real Time) ในปัจจุบัน



ภาพที่ 2-31 หลักการการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีอะคูสติกอีมีสชัน [20]

จากภาพที่ 2-31 จะเห็นได้ว่าการตรวจสอบวิธีการ AE นั้นต้องใช้อุปกรณ์หลักในการตรวจสอบ คือ หัวตรวจสอบ (AE Sensor) อุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น (Pre-Amplifier) และอุปกรณ์ประมวลผล (AE-Analyzer)

1. เซนเซอร์ (AE Sensor) อุปกรณ์นี้จะติดเข้ากับผิวหน้าของสิ่งที่จะตรวจสอบ ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก อะคูสติกอีมีสชันที่รับได้เป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปเป็นอุปกรณ์ที่มีความไวสูง มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าในลักษณะเดียวกับอุปกรณ์เซนเซอร์หรือโพรบรับสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบแบบอัลตราโซนิก ส่วนประกอบที่สัมผัสเทือนภายในทำมาจาก PZT (Lead Zirconite Titanite Ceramics) เป็นส่วนใหญ่ ผิวหน้าที่รับแรงดันคลื่นนั้นมีขนาดประมาณ 8-20 มิลลิเมตร การติดเข้ากับสิ่งที่ตรวจสอบอาจใช้วัสดุพวกกาว หรือทาด้วยจาระบี (Grease) แล้วกดโดยวิธีทางกลให้ติดแน่น

2. อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Pre-Amplifier) ไมโครโวลต์ถึงมิลลิโวลต์ จึงต้องทำการขยายระดับแรงดันให้เหมาะสมก่อนจะประมวลผล สัญญาณจะผ่านเข้าเครื่องขยายสัญญาณ ขยายเพิ่มให้มีขนาดแรงดัน $10^3 - 10^5$ เท่า แล้วจึงผ่านเข้าอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณต่าง ๆ ต่อไปเมื่อเกิดรูหรือช่องว่างขนาดเล็ก (Void Coalescence) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของ Crack Initiation สังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟที่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง ทำให้ทราบค่าของแรงดึง ณ จุดที่เริ่มต้นของเกิดรอยแตกในเนื้อวัสดุ

3. ระบบจัดเก็บข้อมูล (Acquisition system) จะเป็นส่วนของการเก็บข้อมูลและนำข้อมูลมาแปลงสัญญาณ กรองสัญญาณ (Filter) สัญญาณช่วงที่ใช้งานได้นั้น โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 10 kHz ถึงระดับหลาย MHz ระบบการวัดอาจมีสัญญาณไฟฟ้ารบกวน หรือสัญญาณทางจักรกลรบกวนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมได้ ดังนั้นจึงต้องใช้อุปกรณ์กรองสัญญาณที่ตัดช่วงความถี่อื่น ๆ ที่ไม่จำเป็นออกไป ก่อนที่จะส่งสัญญาณต่อไปเพื่อแสดงผล โดยในงานวิจัยนี้ใช้ cDAQ 9171 กับ NI9223 และ ซอฟต์แวร์ LabVIEW ช่วยในส่วนของการ Acquisition system เก็บบันทึกสัญญาณ AE ในระหว่างทำการทดลองและวิเคราะห์สัญญาณ

2.16 ซอฟต์แวร์แลปวิว (LabVIEW) [21]

LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench เป็นโปรแกรมที่ใช้ติดต่อสื่อสารกับเครื่องมือต่างๆ ที่อยู่ภายนอกผ่านบอร์ด Data Acquisition ใช้งาน เป็น Monitoring หรือ ใช้ในการควบคุมการวัดค่าต่างๆ เช่น Strain อุณหภูมิ หรือ สัญญาณอื่นๆ โดยมี Sensor รับสัญญาณเข้ามา โดย Output ที่ได้จาก Sensor เหล่านี้จะมีค่าเป็นแรงดันหรือกระแสซึ่ง LabVIEW สามารถอ่านค่าที่ผ่านเข้ามาทาง DAQ Card แล้วบันทึกค่าเป็นไฟล์ข้อมูลได้ ดังนั้นการนำ LabVIEW มาใช้จะต้องพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ และ Application ที่จะใช้ก่อนว่ามี Input เป็นอะไร และต้องการ Output เป็นอะไร จากนั้นจึงทำการเลือก Hardware ให้ตรงตามความต้องการ เนื่องจากการติดต่อสื่อสารระหว่างโปรแกรมกับเครื่องมือต่างๆ ที่อยู่ภายนอกนั้น ผู้ใช้ต้องเขียนโปรแกรมคำสั่ง การทำงานเพื่อเรียกข้อมูลการวัดแล้วนำมา Process ให้เป็น Monitoring หรือ การเขียนคำสั่งเพื่อการ ควบคุมระบบเช่น ให้โปรแกรมสามารถตรวจสอบค่า Strain ที่อ่านได้ว่าถ้ามีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนด แล้วจึงค่อยส่งคำสั่งไปควบคุมให้อุปกรณ์อื่นๆ ทำงานต่อไปได้ เป็นต้น โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ LabVIEW จะเรียกว่า Virtual Instrument หรือเรียกย่อๆว่า VI ซึ่งหมายถึงเครื่องมือวัดเสมือน โปรแกรม LabVIEW มีองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ

1. Front Panel เป็นส่วนตั้งค่าการวัดและอ่านค่าตัวเลขหรือกราฟที่ออกมาจาก Block Diagram จึงทำหน้าที่เสมือนเครื่องมือวัดจริงโดย Input ที่ป้อนเข้าไปจะเป็นตัวควบคุม ส่วน Output ที่ออกมาจะเป็นตัวแสดงผล

2. Block Diagram ทำหน้าที่เสมือนเป็น Sourcecode โดยใช้โปรแกรมภาษากากราฟฟิก องค์ประกอบของ Block Diagram นี้จะแทนโปรแกรม Node เช่น For Loop Casestructure และ ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ เป็นต้น

3. Icon/Connector ภายใน Front Panel จะประกอบด้วย Icon ต่างๆ และมีสายเชื่อมต่อถึงกันในแต่ละ Icon ซึ่งเมื่อเชื่อมต่อกันแล้ว จะสามารถเปลี่ยน Virtual Instrument (VI) นี้ให้เป็น Sub VI หรือ Object ที่นำกลับมาใช้ใน Block Diagram ได้อีก

LabView อาศัยหลักการทำงานของเครื่องมือวัดหรือการวัดควบคุมทำให้ผู้ใช้สามารถออกแบบรูปแบบ โปรแกรมตามที่ต้องการหลักการดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ

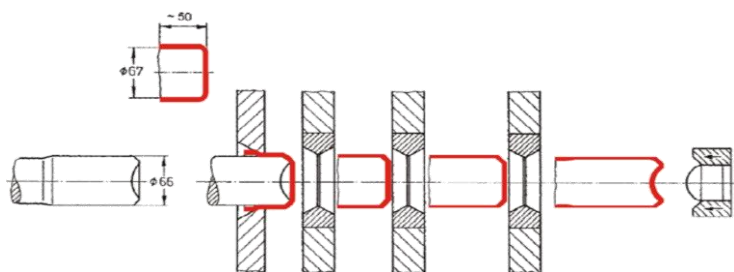
1. Acquisition ซึ่งเป็นส่วนที่รับข้อมูล (Input) จากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าสู่ระบบในที่นี้ คือคอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่เข้าสู่ระบบนี้อาจจะมาจาก การ์ด DAQ (สำหรับสัญญาณทางไฟฟ้า) การ์ด IMAQ (สำหรับข้อมูลประเภทรูป) หรือ GPIB (สำหรับควบคุมเครื่องมือวัด)

2. หลังจากที่ได้รับข้อมูลแล้วอาจจะผ่านฟังก์ชันในการทำ Analysis หรือ วิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจะแสดงผลในรูปที่สื่อความหมายในสิ่งที่ผู้ใช้งานสามารถนำไปแสดงแทนสิ่งที่วัดได้และใช้งานได้

3. Presentation คือ การแสดงผลในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน โดยอาจแสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ เช่น DMM (Digital Multimeter) แสดงผลเฉพาะสัญญาณที่วัดได้โดยไม่จำเป็นต้องรู้ความสัมพันธ์กับเวลา หรือ Oscilloscope แสดงผลของข้อมูลที่สัมพันธ์กับเวลา หรือ Spectrum Analyzer จะแสดงสัญญาณในรูปความถี่หรือการพิมพ์ออกมาเป็นรายงานหรือเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์

2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การปรับปรุงการดำเนินงานเทคโนโลยีการผลิตใหม่ๆที่สามารถลดน้ำหนัก และลดต้นทุนของกระบวนการขึ้นรูป ยกตัวอย่างการป้องกันเครื่องตีอลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการรีด ได้รับการพัฒนาขึ้นโดยลดความบางของผนังลง และเส้นผ่าศูนย์กลางฐานที่ลดลงซึ่งจะเพิ่มความน่าจะเป็นของการเกิดการยุบ [22] ดังแสดงในภาพที่ 2-32 ให้เห็นถึงขั้นตอนการผลิตเครื่องตีจากแผ่นอลูมิเนียม [23]



ภาพที่ 2-32 แสดงแผนผังกระบวนการผลิตเครื่องตีจากแผ่นอลูมิเนียม [23]

การคาดการณ์พฤติกรรมอย่างแม่นยำของการเกิดการยุบเป็นสิ่งสำคัญในการขึ้นรูปโลหะแผ่นเพื่อลดขั้นตอนการทดลอง ลดข้อผิดพลาดที่มีราคาสูง และการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การยุบเป็นชนิดของการโก่งของโลหะแผ่นที่เกิดจากความไร้เสถียรภาพภายใต้แรงกด [24] จากงาน Wang et al. [25] การเกิดการยุบสองประเภทอาจเกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูปลึกของโลหะแผ่น การเกิดการยุบบนปีกขึ้นงาน และการยุบด้านข้างผนังตามทีแสดงในภาพที่ 2-33 และภาพที่ 2-34 ตามลำดับทั้งที่จากการบีบอัดตามแนวเส้นรอบวง และแนวรัศมีดังแสดงในภาพที่ 2-36

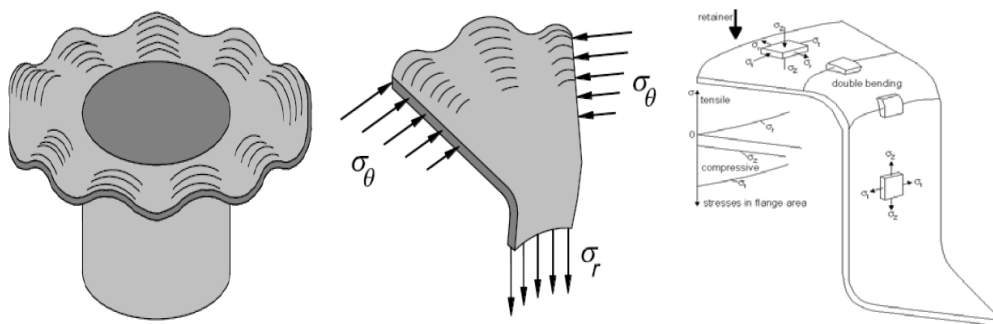


ภาพที่ 2-33 การเกิดการยุบบนปีกถ้วยของขึ้นรูป และการทดสอบการขึ้นรูปลึกแบบสี่เหลี่ยม [25]



ภาพที่ 2-34 การเกิดการย่นด้านข้างผนังของทดลองการขึ้นรูปลึกทรงกระบอก และทรงกรวย [6]

เนื่องจากการย่นด้านข้างผนังเกิดความเค้นกดที่น้อยกว่า จึงทำให้เห็นการย่นค่อนข้างน้อยกว่า เกิดการการย่นบนปีกของชิ้นงาน [25] การเกิดการย่นด้านข้างผนังขึ้นอยู่กับแรงกดแผ่นชิ้นงาน (Blank Holder Force) เป็นการเปลี่ยนความเค้นในแนวเส้นรอบวง ซึ่งเป็นวิธีที่ยากกว่าวิธีที่การทดลองการเกิดการย่นบนปีกถ้วยของขึ้นรูป การลดความหนาของแผ่นโลหะเป็นการเพิ่มโอกาสของการเกิดการย่นเป็นข้อบกพร่องที่พบบ่อยในกระบวนการขึ้นรูปลึก การเริ่มเกิดการย่น รวมถึงการเพิ่มขึ้นของการย่นได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย เช่น สมบัติเชิงกลของแผ่นวัสดุ เป็นพฤติกรรมแบบการเสียรูปไม่เท่ากันทุกทิศทาง ความเค้นในจุดนั้นๆ รูปแบบของเครื่องมือ พื้นผิวหน้าสัมผัสรวมทั้งแรงเสียดทาน และเงื่อนไขขอบเขตของกระบวนการอื่นๆดังแสดงภาพที่ 2-35



ภาพที่ 2-35 การเปรียบเทียบสภาวะความเค้น-ความเครียดในแนวเส้นรอบวง [25]

การย่นเป็นข้อบกพร่องสำคัญประการหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นรวมทั้งการฉีกขาด การติดตัวกลับ และข้อบกพร่องบนพื้นผิวชิ้นงาน เป็นอุปสรรคในกระบวนการขึ้นรูป ประกอบขึ้นส่วน และอาจมีการสึกหรอของเครื่องมือ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ต้องแก้ไข ปัญหาการย่น ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นโลหะมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์, เครื่องใช้ภายในบ้าน และอุตสาหกรรมเครื่องบิน นอกจากนี้ยังมีความต้องการเพิ่มขึ้น และผลิตภัณฑ์มีมูลค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เพื่อลดเวลาในการพัฒนากระบวนการ จำเป็นต้องมีการคาดการณ์ข้อบกพร่อง และการปรับเปลี่ยนการออกแบบในขั้นตอนการออกแบบ

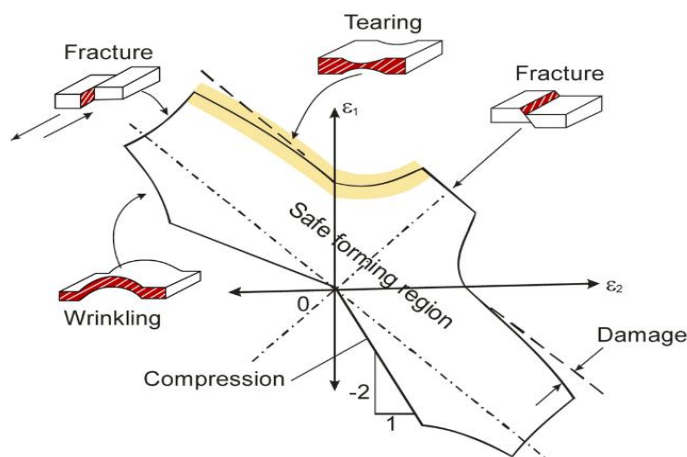
การย่น และเริ่มเกิดการย่นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่นอัตราส่วนความเค้น สมบัติเชิงกลของวัสดุแผ่น เรขาคณิตของชิ้นงาน และสภาวะผิวหน้าสัมผัส ค่อนข้างยากในวิเคราะห์การย่น และเริ่มเกิดการย่นเนื่องจากพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆของผลกระทบมีความซับซ้อนมาก และพฤติกรรมของการย่นข้อมูลกระจายเป็นกว้างในการเบี่ยงเบนของปัจจัยที่เกิดขึ้นในปรากฏการณ์ความรู้เสถียรภาพจึงไม่ได้มีการการศึกษาเกี่ยวกับการย่นโดยพิจารณาจากกรณีของกระบวนการที่กำหนด และเกณฑ์การย่นทั่วไปที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการต่างๆ วิธีการวิเคราะห์เกี่ยวกับการย่นได้ถูกนำมาใช้โดยใช้ทฤษฎีการแบ่งแยกสองวิธีแบบง่ายๆ จะตรวจสอบพฤติกรรมของการย่นของแผ่นวงกลม และศึกษาผลกระทบของแรงกดแผ่นชิ้นงาน เมื่อเริ่มเกิดการย่น และจำนวนย่นจำนวน จากศึกษา Tomita et al. [26] ศึกษาการแยกชิ้นส่วนของแผ่นวงแหวนที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้อง แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นสูงสุดของปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับค่า ξ ในแต่ละขั้นตอนของการวิเคราะห์ขั้นพื้นฐานช่วยเพิ่มความถูกต้องของจุดงอ

การย่นได้การศึกษาโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยขั้นตอนวิธีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัญหาการโก่งที่อธิบายไว้ในแบบที่สองมีประเภทของการวิเคราะห์โดย ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การวิเคราะห์การแบ่งแยก (Bifurcation Analysis) ของโครงสร้าง ที่สมบูรณ์แบบ และการวิเคราะห์การเริ่มเกิดการย่น โดยอาจจะยังไม่เกิดการโก่งการวิเคราะห์การเริ่มเกิดการย่น บางครั้งให้ผลลัพธ์ที่สมเหตุสมผลมากกว่า การวิเคราะห์การแยกย่อยเนื่องจากโครงสร้างมีความไม่สมบูรณ์ตามธรรมชาติ เช่น ความไม่สม่ำเสมอของวัสดุหรือความไม่สม่ำเสมอทางเรขาคณิต ในการศึกษาในปัจจุบันมีการใช้อัลกอริทึมการแบ่งแยกรูปทรง ของโครงสร้างที่สมบูรณ์แบบถูกนำมาใช้ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของการย่น Kim et al. [27] ประเมินปีกของขอบชิ้นงานที่เกิดการย่นในกระบวนการวาดรูปทรงกระบอกโดยใช้อัลกอริทึมการแบ่งแยก การเริ่มเกิดการย่น และการเพิ่มชิ้นการย่นถูกตรวจสอบวิเคราะห์ด้วยค่าต่างๆ ของแรงกดแผ่นชิ้นงาน คำตอบของการวิเคราะห์ที่มีเสถียรภาพสามารถหาได้หากความยาว ขององค์ประกอบปกติที่มีขนาดเล็กได้ นอกจากนี้การเริ่มเกิดการย่นเกิดขึ้นเร็วเมื่อสมมติฐานของสภาพแอนไอโซทรอปี้ในระนาบ เมื่อเทียบกับแอนไอโซทรอปี้ปกติจากการศึกษาของ Agrawal and Reddy [28] แนะนำแบบบนพื้นฐานของพลังงานเพื่อทำนายของแรงกดแผ่นชิ้นงานต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงการย่นปีกชิ้นงานระหว่างกระบวนการขึ้นรูปลึงสมมาตรตามแนวแกน เป็นการคาดการณ์แบบจำลองที่ดีกับผลการทดลองที่เป็นเชิงตัวเลข และการทดลองที่กล่าวมา นอกจากนี้ยังพบว่าโดยการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปี้ก จำนวนของการเกิดการย่นเพิ่มขึ้น และแรงกดแผ่นชิ้นงานต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงการย่นได้

ขีดจำกัดการขึ้นรูปจะเริ่มเกิดการคอคอดในการขึ้นรูปแผ่นโลหะ ขึ้นอยู่กับค่าความเครียดในแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป เนื่องจากขีดจำกัดการย่นไม่ได้อยู่บนพื้นฐานของการเกิดคอคอดบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป การย่นได้รับอิทธิพลจากรูปทรงของเครื่องมือ ในงานวิจัยนี้จะพัฒนาโดยการทดลอง และการจำลองการทดสอบ เส้นโค้งขีดจำกัดการย่นสำหรับโลหะแผ่นของความเครียดโดยใช้การวิเคราะห์การเริ่มต้นการเบี่ยงเบน ผลกระทบของรูปทรงแผ่นส่งผลต่อพฤติกรรมด้วยการตั้งสมมติฐานว่าการเกิดการย่นบริเวณนั้นๆผลของแอนไอโซทรอปี้ ต่อพฤติกรรมของการย่นในกระบวนการขึ้นรูปลึงโดย Anarestani et al. ใช้ทฤษฎีการเบี่ยงเบนที่เพิ่มขึ้นในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ผลการทดลองแสดงบ่งชี้ว่ามีแนวโน้มการโก่งงอเพิ่มเมื่อกำหนดค่า Anisotropic ซึ่งมีบทบาทอย่างมาก Neto et al. [29] พัฒนาพฤติกรรมของการย่นของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นถูกนำมาวิเคราะห์โดยวิธี

ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้การวิเคราะห์แบบไม่เปี่ยงเบน และเปรียบเทียบกับ การทดลอง อิทธิพลของรูปแบบของวัสดุโดยกำหนดการย่นข้างข้างขึ้นงานทดสอบจากเกณฑ์มาตรฐาน 4 ใน Numisheet 2014 แรงของพื้นจะถูกนำมาใช้เพื่อระบุถึงการเริ่มต้นของงานวิจัยของ Shafaat et al. [24] การย่นบริเวณด้านข้างข้างขึ้นงาน ของเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีวิเคราะห์ด้วยแรงของพื้นซ์ โดย สมมติว่าฟังก์ชันการเปี่ยงเบนใหม่พร้อมกับการใช้เกณฑ์ของ Hosford และ Hill-1948 ภายใต้ภาวะ แอนไอโซทรอปี้ ตามปกติการเปรียบเทียบการคาดการณ์การย่นเทียบกับผลการทดลอง นักวิจัยได้ พัฒนาศึกษาการเริ่มเกิดการย่น และเพิ่มขึ้นของการย่นระหว่างการเปลี่ยนรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีการ เปี่ยงเบน และไม่เปี่ยงเบน จากการศึกษาผลลัพธ์ทฤษฎีไม่เกิดการเปี่ยงเบนสามารถทำนายพฤติกรรม ได้ดีกว่า นักวิจัยบางกลุ่มให้ความสำคัญกับการทดลอง และการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการวิเคราะห์เพื่อระบุการย่น และเพิ่มขึ้นของการย่น Schleich et. al. [30] ใช้ตัวอย่างชิ้นงาน ทดสอบที่มีรูปทรงเรขาคณิตที่แตกต่างกันทำการทดลอง และการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อระบุพฤติกรรมการย่น

จากงานวิจัยกล่าวมาศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการย่นโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ และการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการสร้างขีดจำกัดการย่นแสดงดังภาพที่ 2-36

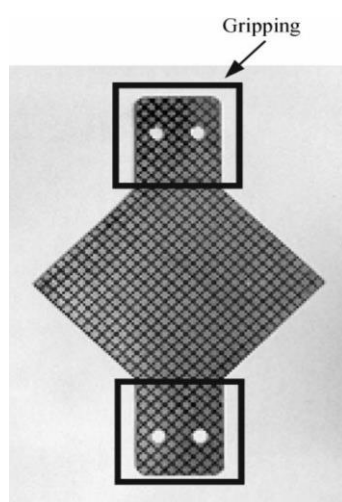


ภาพที่ 2-36 แผนภาพของเกณฑ์ที่แตกต่างกันของความเครียดหลัก และความเครียดรอง [6]

ส่วนใหญ่มีการศึกษาค้นคว้าข้างน้อยในพฤติกรรมการยับยั้งข้อบกพร่องนี้ ในเชิงการทดลอง และเชิงจำลองการทดลองเป็นวิธีที่ผสมผสานมีผลต่อพฤติกรรมพลาสติกแบบการเสียรูปที่ไม่เท่ากันทุก ทิศทาง (Anisotropic) ของสมบัติเชิงกล และวิธีการใหม่ในการระบุการเกิดการย่นในการเปลี่ยนรูป แผ่น นอกจากนี้นักวิจัยหลายคน [30-31,33] ได้พัฒนาเส้นขีดจำกัดการย่นแบบสมบัติเท่ากันทุก ทิศทาง (Isotropic) ให้สอดคล้องกับพฤติกรรม สมบัติเท่ากันทุกทิศทาง และนำไปใช้ในองค์ประกอบ ของ Finite Element

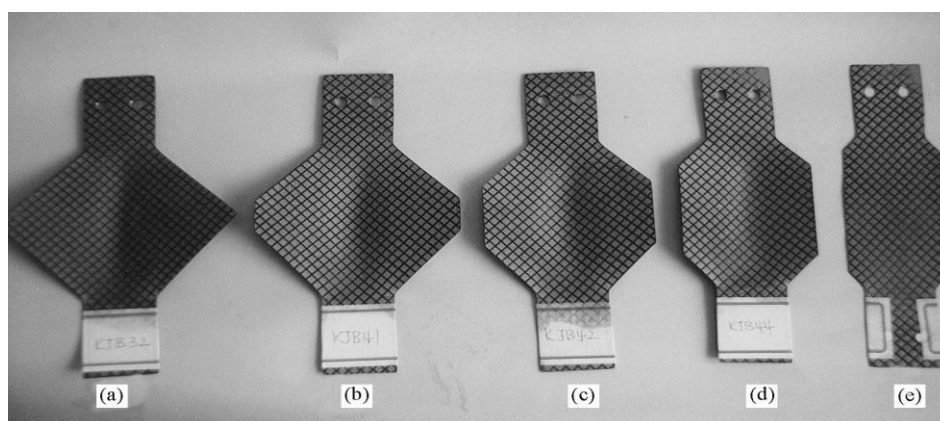
Kim et. al. [16] ได้กล่าวว่า การเกิดการย่นเป็นหนึ่งในข้อบกพร่องที่สำคัญในชิ้นงานบนแผ่น โลหะ และอาจมีบทบาทสำคัญในการสึกหรอของเครื่องมือ การเริ่มต้นการเกิดการย่นที่เพิ่มขึ้นเกิดจาก ปัจจัยหลายอย่าง เช่นอัตราส่วนความเค้นสมบัติเชิงกลของวัสดุแผ่นรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงาน ฯลฯ

เป็นการยากที่จะวิเคราะห์การเริ่มต้น และการเพิ่มขึ้นของการย่นเมื่อคำนึงถึงปัจจัยทั้งหมดเนื่องจากผลกระทบของปัจจัยมีความซับซ้อนมาก และพฤติกรรมการย่นอาจแสดงข้อมูลที่กระจัดกระจายแม้สำหรับปัจจัยเบี่ยงเบนเล็กน้อย ในการศึกษานี้ได้นำเสนอทฤษฎีการแยกไปสองทางสำหรับการวิเคราะห์การจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของการเริ่มต้น และการเพิ่มขึ้นของการย่น การเริ่มต้นย่นพบโดยการตรวจสอบปัจจัยของการเกิดซ้ำของการย่น และพฤติกรรมการย่น ถูกวิเคราะห์โดยการคาดการณ์ขึ้นอยู่กับทฤษฎีการเปลี่ยนรูปที่เพิ่มขึ้น และการสร้างแบบจำลองวัสดุพลาสติกยืดหยุ่นไอโซทรอปิก เพื่อที่จะตรวจสอบผลกระทบของรูปทรงเรขาคณิต และอัตราส่วนความเค้นที่มีต่อการเริ่มต้น และการเพิ่มขึ้นของการย่น ดังนั้นได้ทำการทดสอบการโค้งแบบโยชิตะปรับปรุงใหม่ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ตามภาพที่ 2-37 โดยเริ่มจากการทำรูปทรงเพิ่มพื้นที่การจับยึด ให้สะดวกต่อการทดสอบ

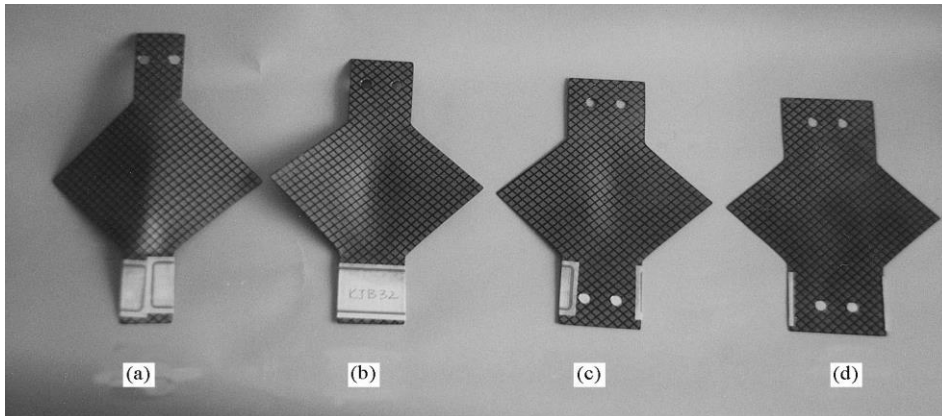


ภาพที่ 2-37 รูปแบบที่ได้รับการปรับปรุงชิ้นงานทดสอบการโค้งโยชิตะ [16]

ในการทดสอบการโค้งของโยชิตะที่ถูกปรับเปลี่ยนขนาดของชิ้นงานมีหลากหลายเพื่อเปลี่ยนอัตราส่วนความเค้น ตามภาพที่ 2-38 และ 2-39



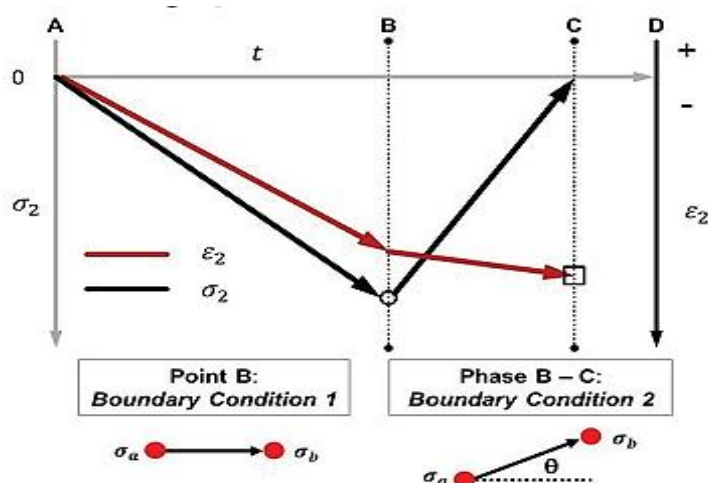
ภาพที่ 2-38 การปรับปรุงชิ้นงานทดสอบการโค้งโยชิตะ โดยการตัดปีกด้านข้างออก [16]



ภาพที่ 2-39 การปรับปรุงชิ้นงานทดสอบการโก่งโย้ชดเช โดยยังคงมุมด้านข้าง [16]

ซึ่งเป็นการพัฒนาการทดสอบทดสอบการโก่งโย้ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น เนื่องจากการทดสอบแบบเดิมตามมาตรฐานนั้นมีข้อจำกัดในเรื่องวัสดุ กล่าวคือไม่ใช่ทุกวัสดุสามารถทดสอบด้วยวิธีเดิมได้ โดยเฉพาะกลุ่มของอลูมิเนียม ซึ่งจะเกิดการฉีกขาดก่อน ที่วัสดุจะเกิดการโก่ง ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาโดยการปรับเปลี่ยนขนาดของชิ้นงานมีหลากหลายเพื่อเปลี่ยนอัตราส่วน โดยพบว่าการที่ยังคงมุมด้านข้าง มีประสิทธิภาพการโก่งได้ดีกว่าการตัดมุมด้านข้างออก ในการทดสอบชิ้นงานจะทดสอบในแนวรีด (RD) เพียงทิศทางเดียว แต่ในวิจัยนี้จะพัฒนาชิ้นงานทดสอบในแนวขวางแนวรีดด้วยเพื่อศึกษาพฤติกรรมในอีกทิศทางหนึ่ง

Han and Liewald [31] ตามการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของการยื่นเกิดจากกระบวนการระหว่างความเค้นอัดและความเครียดงอในระหว่างการก่อตัวให้ยื่นที่สามารถสังเกตเห็นได้ เนื่องจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีอ้างว่าความเค้นอัดในระหว่างการยื่นมีแนวโน้มที่จะมีค่าเป็นบวกถือเป็นจุดเริ่มต้นที่หรือยังคงเป็นศูนย์อยู่ภาพที่ 2-40 Narayanasamy et. al. [32] แสดงในงานวิจัยว่าความเป็นไปได้ของความเค้นที่เกิดการยื่นอาจพบได้ในบริเวณที่เกิดแรงกดและแรงดึง รวมการวิเคราะห์ ซึ่งพื้นที่ความเค้นกดมีความสำคัญในการเกิดการยื่นได้ ความเค้นกดมีความสำคัญที่จะเป็นตัวเริ่มต้นของการยื่น สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่าความเค้นกดเกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป (ในพื้นที่ A-B) ตามภาพที่ 2-40 และมีแนวโน้มที่จะเป็นศูนย์ (ในพื้นที่ C-D)



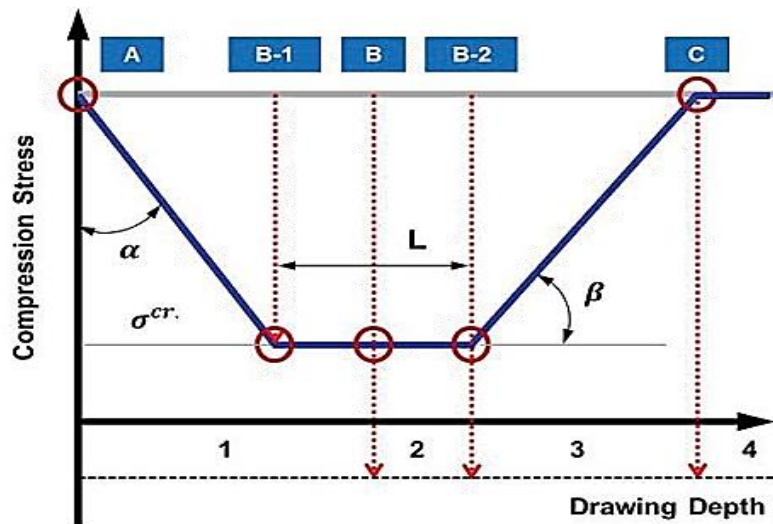
ภาพที่ 2-40 กระบวนการย่นตามการวิเคราะห์ทางทฤษฎี [31]

ตามภาพความเค้นกดจะทำให้ได้ค่าสูงสุดในระหว่างขั้นตอนการย่น (วงกลมในภาพที่ 2-41) เส้นโค้งจากพื้นที่ B ถึง C ความสัมพันธ์ระหว่างการลดการเปลี่ยนแปลงของอัตราความเครียดรอง และการเปลี่ยนแปลงของความเค้นอัดระหว่างขั้นตอนการย่น ที่จุดเวลา C ค่าของความเครียดรองถึงสูงสุด (รูปสี่เหลี่ยมภาพที่ 2-40) เมื่อไม่มีการย่นเพิ่มขึ้นเกิดขึ้นการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดรองยังคงที่ในขณะที่ความเค้นกดมีแนวโน้มที่จะกลายเป็นศูนย์ ในกระบวนการย่นได้มีเกณฑ์การย่นสำหรับการขึ้นรูปลึกในสภาพความเป็นจริงจะเกิดจากความเค้นกดที่มีส่วนทำให้เกิดรูปร่างการย่น และเพื่อให้เข้าใจรูปแบบการย่นได้กำหนดพารามิเตอร์ 4 ตัวตามนี้

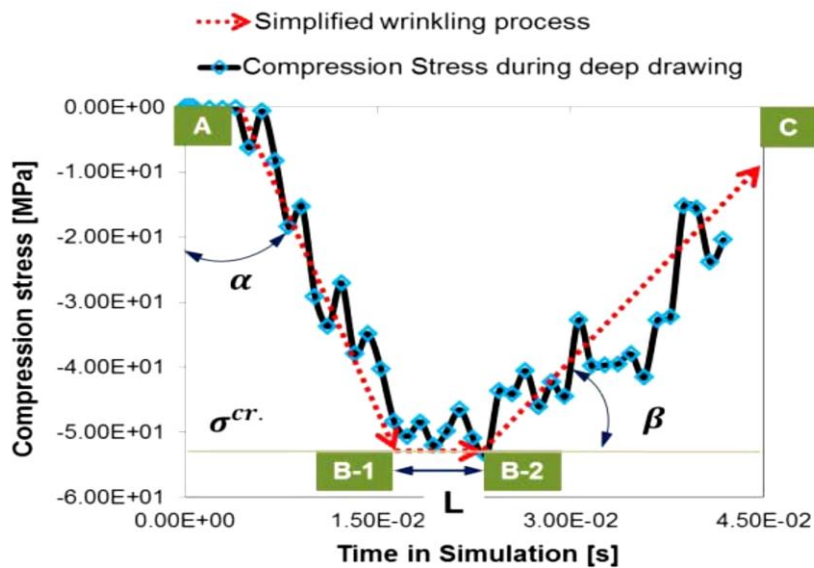
1. α คือ อัตราที่เพิ่มขึ้นของความเค้นกด
2. β คือ อัตราที่เพิ่มขึ้นของการย่น
3. L คือ การเริ่มต้นของการย่น
4. σ^{cr} คือ ระดับความเค้นกด (Hoop Stress)

ด้วยกระบวนการดังกล่าวการย่นจึงสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนโดยใช้ 4 พารามิเตอร์เหล่านี้ ดังแสดงภาพที่ 2-41

1. โชนปลอดภัย (A-B)
2. การเริ่มต้นการย่น (B-B2)
3. การเติบโตของการย่น (B2-C)
4. การย่นที่เกิดขึ้นแล้ว (After C)

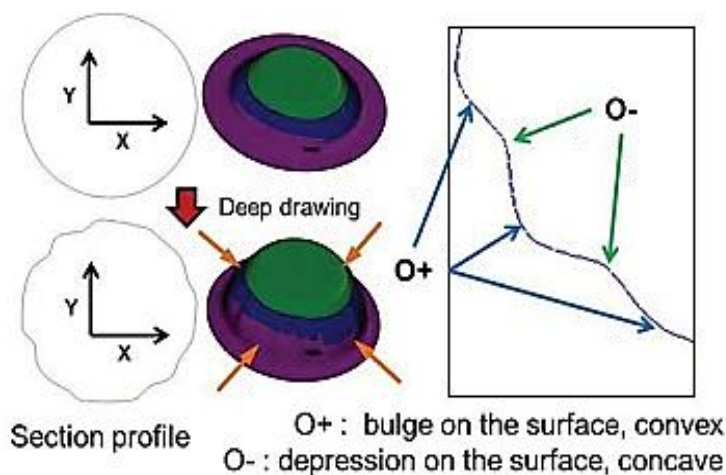


ภาพที่ 2-41 กระบวนการอย่างง่ายในการทดสอบการโก่งของชิ้นงานโยชิตะ และถ้วยทรงกรวย [31]



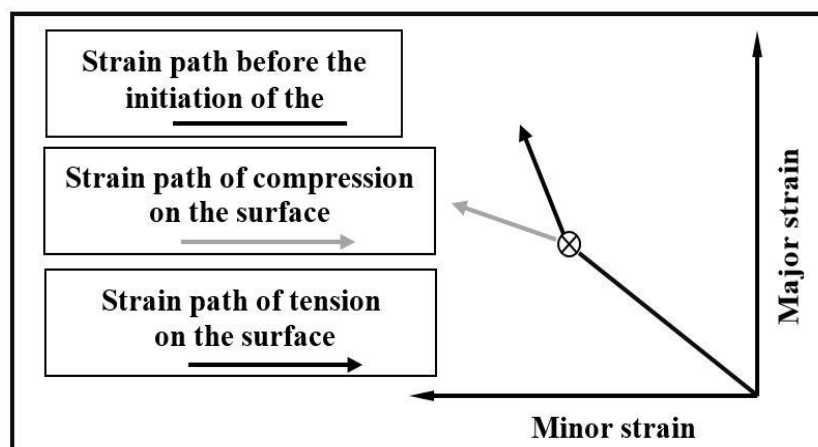
ภาพที่ 2-42 ตัวอย่างการเกิดความเค้นกด ของวัสดุ AA6016 หนา 1 มิลลิเมตร [31]

กระบวนการย่นนั้นเส้นทางความเครียดนั้นมีทั้งเป็นเชิงเส้น และไม่เชิงเส้นตามความลึกของการขึ้นรูปพื้นผิวเกิดขึ้นนั้นจะเป็นรอยป่องและรอยบวม ตามภาพที่ 2-42 ความลึกของการขึ้นรูปเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการเริ่มต้นการย่น



ภาพที่ 2-43 กระบวนการย่นในการขึ้นรูปลึก [31]

การย่นบนพื้นผิวพื้นผิวจากการขึ้นรูปลึกเส้นทางความเครียดเป็นเชิงเส้น เส้นสีดำตามภาพที่ 2-44 ก่อนที่จะเริ่มการย่น หลังจากนั้นเส้นทางความเครียดของรอยย่นบนพื้นผิวมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนเป็นเส้นทางความเครียดในแนว Uniaxial ในขณะเดียวกันเส้นทางความเครียดของรอยย่นบนพื้นผิวมีแนวโน้มที่จะอยู่ในตำแหน่ง Pure Shear

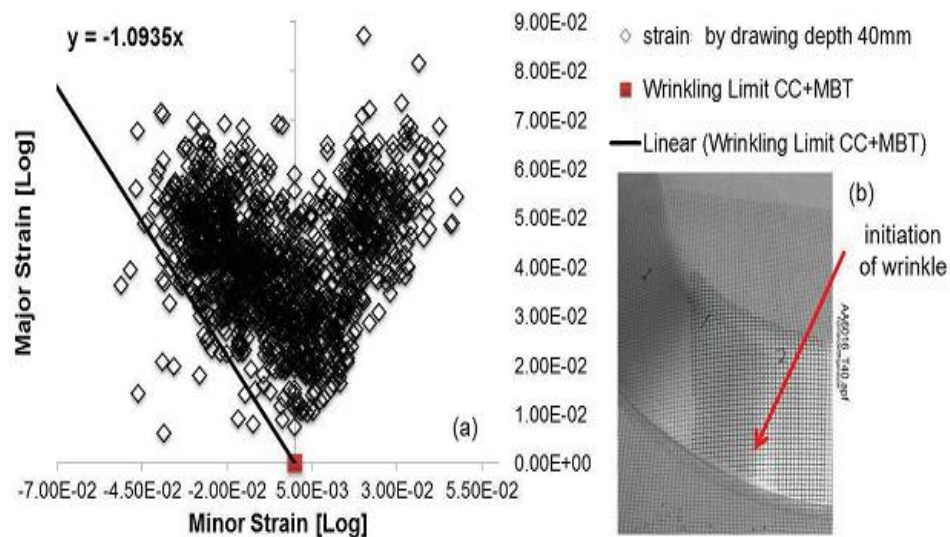


ภาพที่ 2-44 ความเป็นเชิงเส้น และไม่เชิงเส้นของเส้นแนวความเครียดก่อนการเริ่มย่น

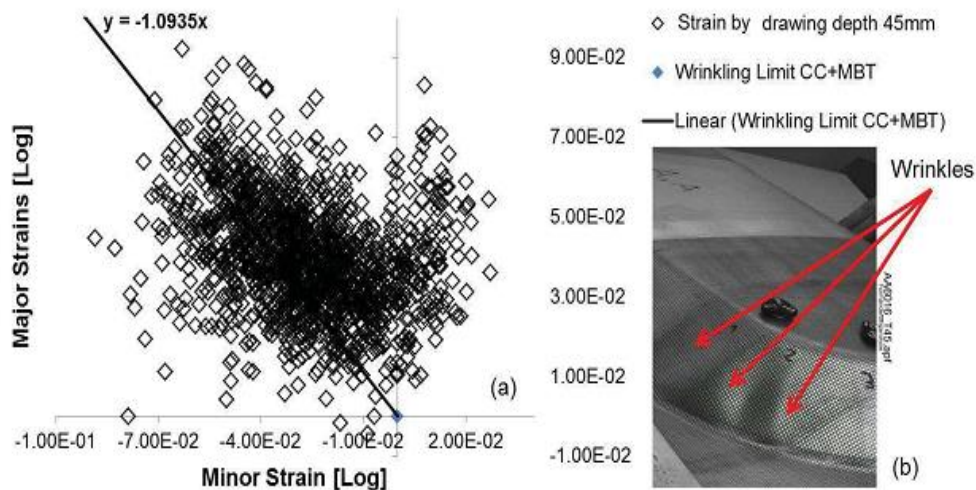
แต่ในวิจัยนี้จะพัฒนานำเกณฑ์การครากแอนโซทรอปิตัวที่ต่างกััน คือ Hill's 48 r -Value (Hill'48-R) และ Hill's 48 Stress- Based (Hill'48-S) เพื่อตรวจพิสูจน์ความแม่นยำ ในการจำลองการทดสอบ

Han and Radonjic [33] เนื่องจากบริเวณการย่นเกิดขึ้นครั้งแรกในบริเวณมุมรอบๆ สภาพบริเวณพื้นที่นี้จะคล้ายกับเงื่อนไขในการทดสอบด้วยรูปกรวย ในการทดลองการขึ้นรูป จุดเริ่มต้นของการย่น ขึ้นรูปที่ระยะการกด 45 มิลลิเมตร ในขณะที่ระยะการกดการขึ้นรูป 40 มิลลิเมตร นั้นยากที่จะ

เห็นการย่นที่บริเวณมุมรอบๆของชิ้นงาน วัดด้วยระบบแสง VIALUX ได้ตรวจพบค่าความเครียดหลัก และค่าความเครียดรองในบริเวณมุมที่ความลึกของการวาดภาพ 40 มิลลิเมตร และ 45 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสดงในภาพที่ 2-45 (a)ค่าความเครียดที่วัดได้จากพื้นที่มุมโค้งรูปทรงกรวยที่ความลึกระยะ 40 มิลลิเมตร (b) ชิ้นงานที่มีการเริ่มต้นของการย่น



ภาพที่ 2-45 ค่าความเครียดที่วัดได้จากพื้นที่มุมโค้งรูปทรงกรวยที่ความลึกระยะ 40 มิลลิเมตร [33]



ภาพที่ 2-46 ค่าความเครียดที่วัดได้จากพื้นที่มุมโค้งรูปทรงกรวยที่ความลึกระยะ 40 มิลลิเมตร [33]

เส้นสีดำผ่านจุดเริ่มต้นในภาพที่ 2-45a และภาพที่ 2-46 (a) ค่าความเครียดที่วัดได้จากพื้นที่มุมโค้งรูปทรงกรวยที่ความลึกระยะ 45 มิลลิเมตร (b) ชิ้นงานที่มีการย่นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นเส้นโค้งขีดจำกัดของการย่น ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบโมดิฟายไซดะ และการทดสอบถ้วยแบบกรวย ความถูกต้องของเส้นโค้งขีดจำกัดนี้สามารถเชื่อถือได้ขอบเขตนั้นอยู่ภายใต้

ด้านซ้ายของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปโดย ความลึกของการขึ้นรูป 40 มิลลิเมตรเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการขึ้นรูปความลึก 45 มิลลิเมตร

อะคูสติกอีมิสชัน (Acoustic Emission; AE)

เทคนิคอะคูสติกอีมิสชันเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย โดยการใช้ศักย์ทางไฟฟ้าในการตรวจจับการแตกร้าวในวัสดุ เป็นคลื่นเสียงยืดหยุ่น (Elastic Wave) ที่เกิดจากการปล่อยพลังงานให้กับวัสดุที่เป็นของแข็ง สามารถตรวจสอบได้ในระหว่างการเกิดขึ้น ณ ช่วงเวลานั้น ๆ (On-Line Monitoring) สามารถตรวจจับความเสียหายได้อย่างรวดเร็ว และเชื่อถือได้ โดยมีช่วงความถี่ที่ 50 kHz ถึง หลาย MHz สัญญาณอะคูสติกอีมิสชันเป็นคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Waves) คลื่นที่มีความถี่สูงกว่าที่มนุษย์จะได้ยิน โดยระบบการวัดคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากพื้นผิวของแข็ง จะถูกแปลงเป็นอนาล็อกดิจิทัล (Analog digital) เพื่อที่จะบันทึกข้อมูล ความเข้มและลักษณะของคลื่นที่ปล่อยออกมานั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ และอัตราความเค้น โดยการตรวจจับรอยแตกร้าวจะมีความสัมพันธ์กับ ความเหนียว (Ductility) ของวัสดุ อะคูสติกอีมิสชันจะมีการปล่อยพลังงานสูงในระหว่างการเกิดการแตกร้าว แอมพลิจูด (Amplitude) ของอะคูสติกอีมิสชันมีความเกี่ยวข้องกับความเร็วที่เกิดการขยายออกของรอยแตกร้าว ซึ่งการตรวจสอบด้วยอะคูสติกอีมิสชัน เป็นเทคนิคที่สามารถใช้ได้กับงานหลายประเภท เช่น การตรวจสอบสภาพเครื่องจักร โครงสร้างความแข็งแรง และการตรวจสอบเครื่องมือ ปัจจุบันเทคนิคการตรวจสอบด้วยอะคูสติกอีมิสชันนี้ ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย Shen and Wang. [34] และ Gallego, et al. [35] ได้ศึกษาวิจัยและนำเสนอการใช้เทคนิคอะคูสติกอีมิสชัน ในการตรวจจับรอยแตกร้าว และการขยายรอยร้าวในระหว่างกระบวนการตัด โดยตรวจสอบสัญญาณที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด พบว่าสามารถใช้สัญญาณที่ได้จากกระบวนการตัดอธิบายการเกิดรอยแตกร้าวได้

Kordatos and Matikas. [36] ได้ทำการทดสอบการล้าตัวของอลูมิเนียมเจือ ขึ้นงานทดสอบเป็นบากรูปตัววี V โดยการนำเทคนิคอะคูสติกอีมิสชัน มาตรวจสอบพฤติกรรมของการแตกร้าวของวัสดุ ทดลองจนเกิดการแตกร้าว จากการทดลองพบว่า ก่อนที่จะเกิดความเสียหายสัญญาณอะคูสติกอีมิสชันได้เพิ่มขึ้น สัญญาณจากอะคูสติกอีมิสชันเป็นเครื่องมือที่จะใช้พิจารณาถึงลักษณะกลไกความเสียหาย และทำนายการเกิดการล้าตัวสูงสุดของชิ้นงานทดสอบ นอกจากนี้ สัญญาณอะคูสติกอีมิสชันบ่งบอกได้ถึง อัตราการขยายของรอยแตกร้าวของวัสดุที่เกิดการล้าตัว ผลจากการเปรียบเทียบวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกอีมิสชัน การขยายของรอยแตกร้าวของอลูมิเนียมเจือมีความสัมพันธ์และสอดคล้องกันกับสัญญาณอะคูสติกอีมิสชัน ที่แสดงออกมา

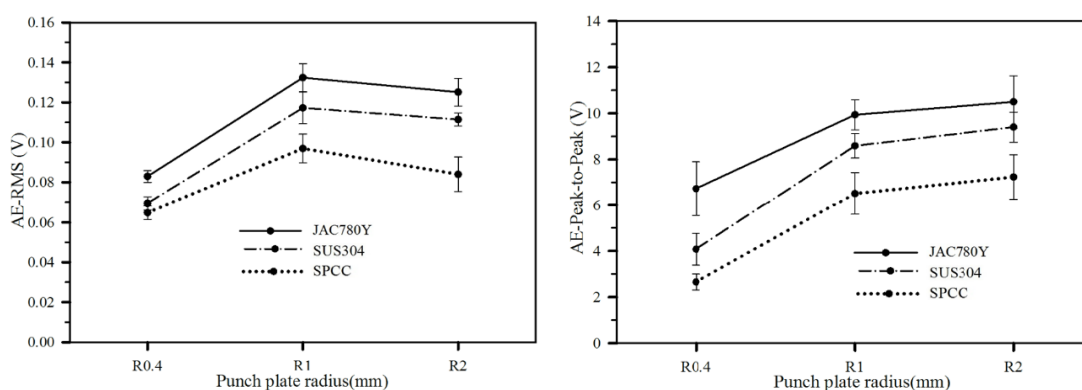
Behrens, et al. [37] ในงานวิจัยนี้ศึกษาตรวจสอบกระบวนการขึ้นรูปลึก ด้วยเทคนิคอะคูสติกอีมิสชัน ในช่วงความถี่ 50-1000 kHz ตรวจสอบด้วยระบบเสียง AMsY-5 (ระบบ Vallen ,เยอรมนี) ตรวจจับและวิเคราะห์ความเสียหายของการขึ้นรูปลึก เช่น รอยแตกร้าวและรอยย่น หรือความเสียหายจากกระบวนการขึ้นรูปลึก เช่น สารหล่อลื่นที่ไม่เพียงพอ ผลของไม่แน่นอนของการย่นในกระบวนการขึ้นรูปลึก โดยในงานวิจัยนี้จะแสดงผลเฉพาะ การเกิดความเสียหายเนื่องจากการแตกร้าวเท่านั้น แต่การตรวจสอบเบื้องต้นก็แสดงให้เห็นว่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปลึกของโลหะแผ่น ก็สามารถตรวจพบได้โดยใช้สัญญาณอะคูสติกอีมิสชัน นอกจากนี้พบว่า การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอะคูสติกอีมิสชัน สามารถสังเกตได้จากแรงที่เปลี่ยนแปลงและเงื่อนไขสารหล่อลื่น

Behrens, et al. [38] ได้ทำการศึกษาวิจัยการเกิดรอยแตกร้าวของชิ้นงานทดสอบและชิ้นงานตัวขับของเฟืองดอกจอก (Bevel Gears) ในการตีขึ้นรูป ของเหล็กกล้าชุบแข็ง เกรด 1.7321(20MoCr4) โดยกระบวนการตีขึ้นรูปเย็น ที่ทำให้วัสดุมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เนื่องจากการทำให้แข็งด้วยความเครียด ผลกระทบจากความเสียหายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปเย็นจะส่งผลให้ชิ้นงานมีคุณภาพที่ลดลง ส่งผลให้เกิดความสูญเสียในเชิงเศรษฐศาสตร์ งานวิจัยนี้จึงได้ใช้การตรวจสอบในระหว่างกระบวนการตีขึ้นรูป โดยใช้เทคนิคอะคูสติกอิมพัลส์ ในการตรวจสอบการทดสอบการตีขึ้นรูป ตรวจสอบผลกระทบจากการแตกร้าวของชิ้นทดสอบโดยการวิเคราะห์ความถี่สัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ ตรวจสอบการแตกร้าวของชิ้นงานและตัวขับของเฟืองดอกจอก (Bevel Gears) ตรวจสอบโดยวิเคราะห์จากสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ ที่ได้จากการทดลอง และสามารถตรวจจับการแตกร้าวจากสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ ได้ดีที่อุณหภูมิห้อง

ต่อมา Behrens, et al. [39] ก็ได้ทำการศึกษาวิจัยการเกิดรอยแตกในงานตีขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิต่างๆ ของอลูมิเนียมเกรด 3 ชนิดได้แก่ AW5083, AW6082 และ AW7075 จากความไม่แน่นอนของกระบวนการตีขึ้นรูปนั้น จะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการตีขึ้นรูป ซึ่งในกระบวนการผลิตควรมีการตรวจสอบความผิดพลาดก่อนทำผลิต งานวิจัยนี้จึงได้ใช้เทคนิคอะคูสติกอิมพัลส์ ในการตรวจสอบความไม่แน่นอนจากสารหล่อลื่น และตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นทดสอบ อลูมิเนียมเกรดต่าง ๆ ผลจากการตรวจสอบความผิดพลาดในกระบวนการตีขึ้นรูปของอลูมิเนียมเกรดทั้ง 3 ชนิดด้วยเทคนิคอะคูสติกอิมพัลส์พบว่า ทดลองตีขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่น และไม่ใช้สารหล่อลื่น การตรวจจับได้ด้วยเทคนิคอะคูสติกอิมพัลส์ นั้นยังไม่มีหลักฐานแสดงให้เห็นได้ชัดเจนถึงความไม่แน่นอนของแรงเสียดทาน โดยจะต้องทำการศึกษาในช่วงความถี่ต่ำและเงื่อนไขต่าง ๆ ของพื้นผิวชิ้นทดสอบ จากการตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นทดสอบ จะทำการทดลองตีขึ้นรูปชิ้นทดสอบ 3 ขั้นตอนแสดงดัง คือ ขั้นตอนหนึ่ง ตีขึ้นชิ้นงาน (Upsetting) ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าชิ้นงาน AW6082 เกิดรอยแตกร้าวมากที่สุด ขั้นตอนที่สองตีขึ้นชิ้นทดสอบให้ได้ปลอก (Collar) พบว่า AW7075 เกิดรอยแตกร้าวมากที่สุด และขั้นตอนที่สาม ตีขึ้นรูปให้ได้รูปทรง (Cross) โดยให้อุณหภูมิกับชิ้นทดสอบ พบว่า AW6082 ไม่สามารถตรวจสอบสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ได้ จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า AW5083 มีความไวต่อผลกระทบจากการไหลแบบพลาสติก (Plastic Flow ;PLC) และระดับของสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ ที่สูงเกิดการแตกร้าวของชิ้นทดสอบ, AW7075 ที่อุณหภูมิ 150 °C สามารถตรวจจับรอยแตกร้าวได้อย่างดีและ AW6082 สามารถตรวจจับได้ที่อุณหภูมิห้องเท่านั้น จะเห็นได้ว่าการตีขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคอะคูสติกอิมพัลส์ ในการตรวจสอบ โดยผลจากการตรวจสอบนั้นจะขึ้นอยู่กับธาตุเจือของวัสดุ นั้น ๆ อุณหภูมิ และความเหนียวของวัสดุ จะส่งผลต่อสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ งานวิจัยนี้จึงชี้ให้เห็นว่า การตีขึ้นรูปเย็นจะได้รับการตรวจสอบด้วยเทคนิคอะคูสติกอิมพัลส์ ได้ดีกว่า การตีขึ้นรูปร้อน การตรวจสอบรอยแตกในกระบวนการตีขึ้นรูป ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดอาจเป็นอุปสรรคในการวิเคราะห์สัญญาณ เนื่องจากการซ้อนทับของเสียงรบกวนที่เกี่ยวข้องในการตีขึ้นรูป โดยจะต้องคำนึงถึงเสียงรบกวนจากเครื่องจักรและสภาพแวดล้อมโดยรอบ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองภายใต้สภาพการทดสอบในอุดมคติ และควบคุมเงื่อนไขต่าง ๆ ในการใช้เทคนิค

อะคูสติกอีมีสชัน ในการตรวจสอบชิ้นงานที่มีรูปร่างมาตรฐานเดียว เนื่องจากในสภาพการทำงานจริง จะมีเงื่อนไขที่ไม่แน่นอนและชิ้นงานมีรูปร่างซับซ้อน

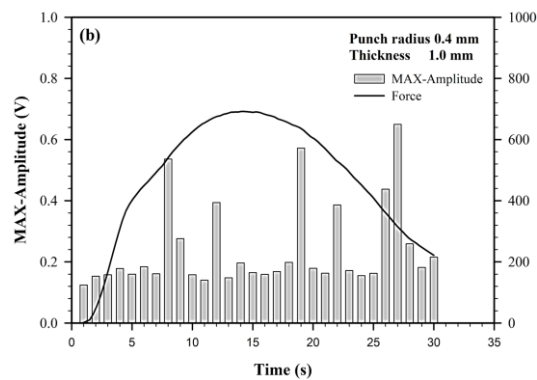
Seemuang, Panich and Slatter. [40] ได้ศึกษาความสามารถในการตัดได้ และตรวจสอบการเกิดรอยร้าวแตกของกระบวนการตัด ด้วยชุดทดสอบการตัดโค้งสามจุด โดยใช้เทคนิคอะคูสติกอีมีสชัน ประเมินผลคุณลักษณะของสัญญาณที่ได้คือ AE maximum amplitude (AE_{Max}), Root mean squared values (AE_{RMS}) และ Peak to peak amplitude ($AE_{Peak\ to\ Peak}$) ดำเนินการทดสอบวัสดุโลหะแผ่นที่แตกต่างกัน 3 ชนิดคือ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง JAC780Y เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 และเหล็กรีดเย็นเกรด SPCC ใช้รัศมีฟันตัดที่ต่างกัน 3 ขนาดคือ รัศมี 0.4, 1 และ 2 มิลลิเมตร พบว่า ชิ้นงานจากวัสดุ JAC780Y มีความสามารถในการตัดน้อยที่สุดกล่าวคือ ดึงอ้อยยาก และง่ายต่อการเกิดรอยแตกร้าว เนื่องจากมีความแข็งแรงสูงกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงาน SUS304 และ SPCC สำหรับอิทธิพลของรัศมีฟันและแรงที่ใช้ในการตัด พบว่า ชิ้นงานที่ถูกตัดด้วยรัศมีที่ใหญ่ (2 มิลลิเมตร) ใช้แรงในการตัดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ตัดด้วยรัศมีขนาดเล็ก โดย AE_{RMS} เป็นสัญญาณคลื่นแบบต่อเนื่อง (AE Continuous) ใช้บ่งบอกถึงการเริ่มต้น และการขยายของรอยแตกร้าวระหว่างการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติกของการทดสอบการตัด และสัญญาณคลื่นแบบช่วง (AE Burst) ใช้ระบุถึงการเกิดรอยแตกร้าวของแผ่นชิ้นงานทดสอบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ความสามารถในการตัดได้จะถูกประเมินจากค่า AE_{RMS} และ $AE_{Peak\ to\ Peak}$ หากมีค่าต่ำ แสดงว่าชิ้นงานมีความสามารถในการดึงอ้อยได้ โดยชิ้นงานที่ทำจากวัสดุ SPCC มีความสามารถในการดึงอ้อยมากที่สุด รองลงมาคือ SUS304 และ JAC780Y ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 2-47



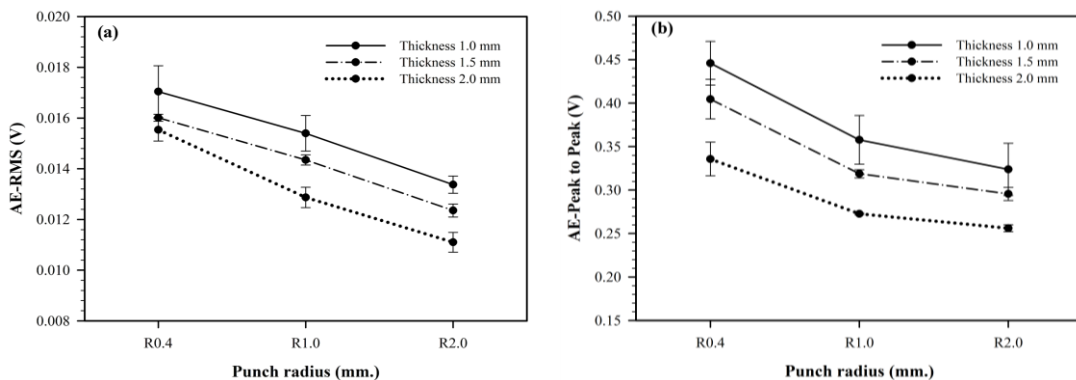
ภาพที่ 2-47 AE_{RMS} และ $AE_{Peak\ to\ Peak}$ [40]

Kalawong, Seemuang and Panich [41] ในงานวิจัยได้ศึกษาอิทธิพลของความหนาที่มีผลต่อความสามารถในการตัดได้ และรวมถึงพฤติกรรมรอยแตกหลังจากการตัด ของแผ่นอลูมิเนียมผสมเกรด AA5052-H32 ด้วยชุดทดสอบการตัดโค้งสามจุด โดยใช้เทคนิคอะคูสติกอีมีสชัน ดำเนินการทดสอบความหนาของวัสดุที่แตกต่างกัน 3 ความหนา คือ 1 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร ใช้รัศมีฟันตัดที่ต่างกัน 3 ขนาดคือ รัศมี 0.4 มิลลิเมตร 1.0 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร ประเมินผลคุณลักษณะของสัญญาณที่ได้คือ AE maximum amplitude (AE_{Max}), Root mean squared values (AE_{RMS}) และ Peak to peak amplitude ($AE_{Peak\ to\ Peak}$) พบว่าความหนาแผ่นที่ 2.0 มิลลิเมตร ใช้แรงดันมากกว่า ส่งผลยากต่อการตัด และวัสดุเกิดรอยแตกง่ายกว่าเมื่อเทียบกับ

ความหนาแน่นที่ 1.5 มิลลิเมตร และ 1.0 มิลลิเมตร การเริ่มต้น และการขยายตัวของรอยแตกในการทดสอบการตัดสามารถระบุได้อย่างแม่นยำโดยพีทเจอร์ของ AE maximum amplitude (AE_{Max}) การเริ่มต้นของรอยแตกเกิดบริเวณใกล้กับจุดการครากตัว (Yielding Point) และรอยแตกอื่น ๆ ถูกพบอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดสิ้นสุด แสดงดังภาพที่ 4-48 โดยทั่วไปใช้สัญญาณคลื่นแบบเป็นช่วง (Burst) เพื่อระบุถึงรอยแตกในการทดสอบ ในขณะที่ค่าสามารถ AE_{RMS} ระบุจากสัญญาณนั้นยังใช้แทนการเริ่มต้นของรอยแตก และการขยายตัวของรอยแตกในระหว่างการทดสอบการตัด พบว่าอิทธิพลของความหนาแน่นแตกต่างกันสามารถอธิบายได้โดยใช้ค่า $AE_{Peak\ to\ Peak}$ และ AE_{RMS} ความหนาแน่นที่มากขึ้นจะทำให้ค่าสัญญาณ AE ต่ำลง เนื่องจากสมบัติความหนาแน่นส่งผลกระทบต่อค่าที่ได้รับสัญญาณที่หน่วง และอิทธิพลของรัศมีพื้นที่ต่อวัสดุที่ตัด ได้รับการประเมินอย่างแม่นยำจากค่า $AE_{Peak\ to\ Peak}$ และ AE_{RMS} แสดงดังภาพที่ 4-49 รัศมีพื้นที่ขนาดเล็กได้รับความเค้นสะสมเป็นบริเวณมากกว่า รัศมีพื้นที่ขนาดใหญ่ จึงทำให้สัญญาณเข้มข้นกว่า สามารถวัดพลังงานความเครียดจากรอยแตกได้อย่างชัดเจนโดย $AE_{Peak\ to\ Peak}$ ความหนาแน่นของแผ่นส่งผลให้พลังงานของรอยแตกช้าลงและค่า $AE_{Peak\ to\ Peak}$ ต่ำลงไปด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 2-48 ตัวอย่างของค่าสัญญาณแอมพลิจูดสูงสุด (AE_{Max}) และแรงในการตัด [41]



ภาพที่ 2-49 AE_{RMS} และ $AE_{Peak\ to\ Peak}$ [41]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมการย่น และพัฒนาเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น (Wrinkling Limit Curve, WLC) ของโลหะแผ่นอลูมิเนียมผสมเกรด AA5052-O ความหนา 1 มิลลิเมตร ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด โดยศึกษาจากการทดสอบการโก่งโยชิตะ (Yoshida Buckling Test) ที่มีโดยศึกษาต่อเนื่องถึงอิทธิพลของสภาพชิ้นงานทดสอบของการโก่งโยชิตะในทิศทางแนวรีด และขวางแนวรีด และรูปร่างชิ้นทดสอบ คือ รัศมี ขนาดชิ้นงานรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วจะมีขนาดแบ่งครึ่งตามแนวเส้นทแยงมุมของชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่แตกต่างกัน แนวรีด (Rolling Direction) และขวางแนวรีด (Transverse Direction) ที่มีผลกระทบกับลักษณะการโก่ง ของชิ้นทดสอบการโก่งโยชิตะ และเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น โดยเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ที่พัฒนาสร้างอยู่บนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี้ ที่ทำให้การสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นที่มีความแม่นยำ ที่แตกต่างกัน คือ Von Mises Hill'48-R และ Hill's 48-S ของทั้ง 2 แนวรีดถูกนำมาศึกษาเพื่ออธิบายลักษณะการเริ่มเกิดการย่นบนแผ่นอลูมิเนียมผสม สมบัติทางกล สภาพการเปลี่ยนรูปที่ไม่เท่ากันทุกทิศทาง ทิศทางการรีดของชิ้นทดสอบการโก่งโยชิตะ ซึ่งมีผลกระทบต่อเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น อีกทั้งมีการตรวจสอบจังหวะช่วงเวลาเริ่มเกิดการโก่ง ของชิ้นทดสอบการโก่งโยชิตะ ด้วยเทคนิคอะคูสติกอิมิสชัน (Acoustic Emission, AE) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น (WLCs) ได้อย่างแม่นยำ และมีประสิทธิภาพ

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัยนี้ จำเป็นที่จะต้องศึกษา เก็บข้อมูลในการวิจัย และดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำข้อมูลที่ได้อามาวิเคราะห์ และสรุปผลลัพธ์ โดยมีการออกแบบการทดลอง องค์ประกอบขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย แสดงดังภาพที่ 3-1 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ศึกษาค้นคว้างานวิจัย และเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง โดยทำการศึกษาวัดชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง การหาค่าสมบัติทางกลของวัสดุ เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R และ Hill'48-S การพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น การใช้เทคนิคอะคูสติกอิมิสชัน (Acoustic Emission; AE) การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS 2017 และเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้
2. ออกแบบ และสร้างชุดจับยึดชิ้นทดสอบการโก่งโยชิตะ รวมไปถึงการเตรียมชิ้นงานที่จะทดสอบโดยกระบวนการตัดด้วยพลังน้ำแรงดันสูง (Water Jet Cutting)

3. ดำเนินการทดลอง

3.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ AA5052-O

3.2 การทดสอบการโก่งโยชิตะ

3.3 การพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นของทั้ง 2 แนวรีด

3.4 การตรวจจับสัญญาณการเริ่มเกิดการโก่ง บนชิ้นทดสอบการโก่งโยชิตะโดยใช้เทคนิค

อะคูสติกอิมิชชัน (Acoustic Emission; AE)

3.5 ตรวจพิสูจน์การนำไปใช้งานได้ของเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ของทั้ง 2 แนวรีด กับแผ่นอะลูมิเนียมผสมขึ้นรูปภาคอาหาร

4. ดำเนินการจำลองการทดสอบการโก่งโยชิตะด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ABAQUS 2017

4.2 วิเคราะห์ผลจากการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบ และผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อตรวจพิสูจน์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยผลค่าแรง และระยะการดัดขึ้นงานของโยชิตะ บนเครื่องทดสอบ

4.4 ทำการเก็บค่าความเครียดหลักและเครียดรองตามผลการจำลองในขณะระยะทางที่ทำให้เกิดการย่นหรือโก่ง โดยระบุได้จากการทดสอบ และจากสัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน

4.5 จากค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองในช่วงเวลาที่เริ่มโก่ง จากผลการจำลองขึ้นทดสอบการโก่งโยชิตะทั้ง 6 แบบ นำมาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น

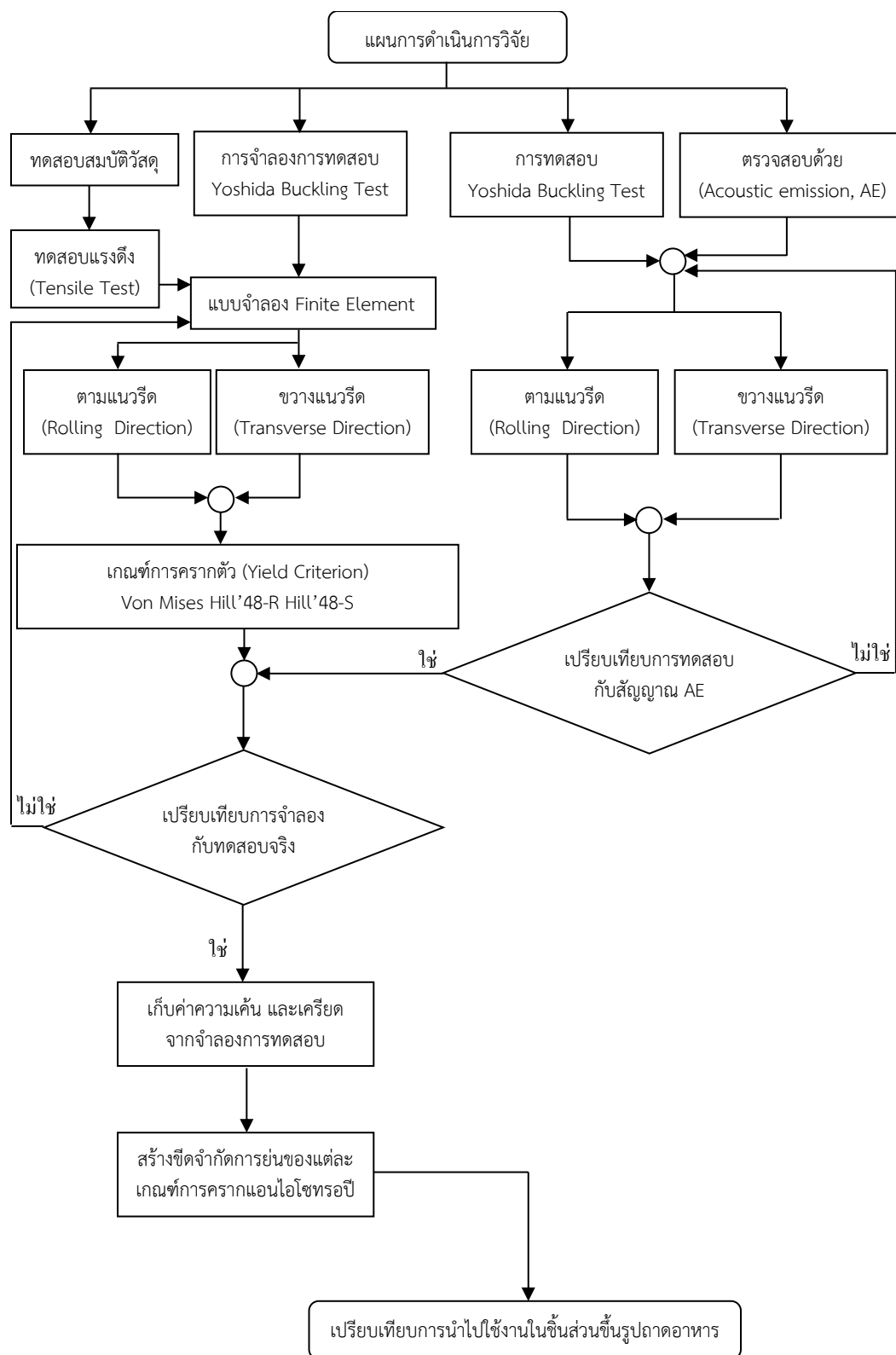
4.6 ตรวจพิสูจน์ผลการเริ่มโก่ง ของแบบจำลองด้วย ช่วงเวลาเริ่มโก่งจากสัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน และเก็บค่าเปรียบเทียบผล

4.7 พัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ของ AA5052-O ตามแนวทิศทางแนวรีด และขวางแนวรีด บนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R และ Hill'48-S

4.8 ตรวจพิสูจน์การนำไปใช้งานได้ของเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ที่พัฒนาแล้ว กับการทำนายพฤติกรรมการณ์การเริ่มย่น หรือโก่งที่ผนังโลหะแผ่นอะลูมิเนียมผสม ขึ้นรูปภาคอาหาร

5. ทำการวิเคราะห์ระดับสัญญาณที่ได้จากอะคูสติกอิมิชชันของทั้ง 2 แนวรีดที่แตกต่างกัน โดยใช้ฟีทเจอร์ (Feature) ของสัญญาณ คือ ระดับค่าสูงสุดของสัญญาณแอมพลิจูด (Max Amplitude) ค่าเฉลี่ย ของ สัญญาณ แอมพลิจูด (Root Mean Square) และ ระดับ ค่าพลังงาน ของสัญญาณ (Burst Energy)

6. วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลลัพธ์



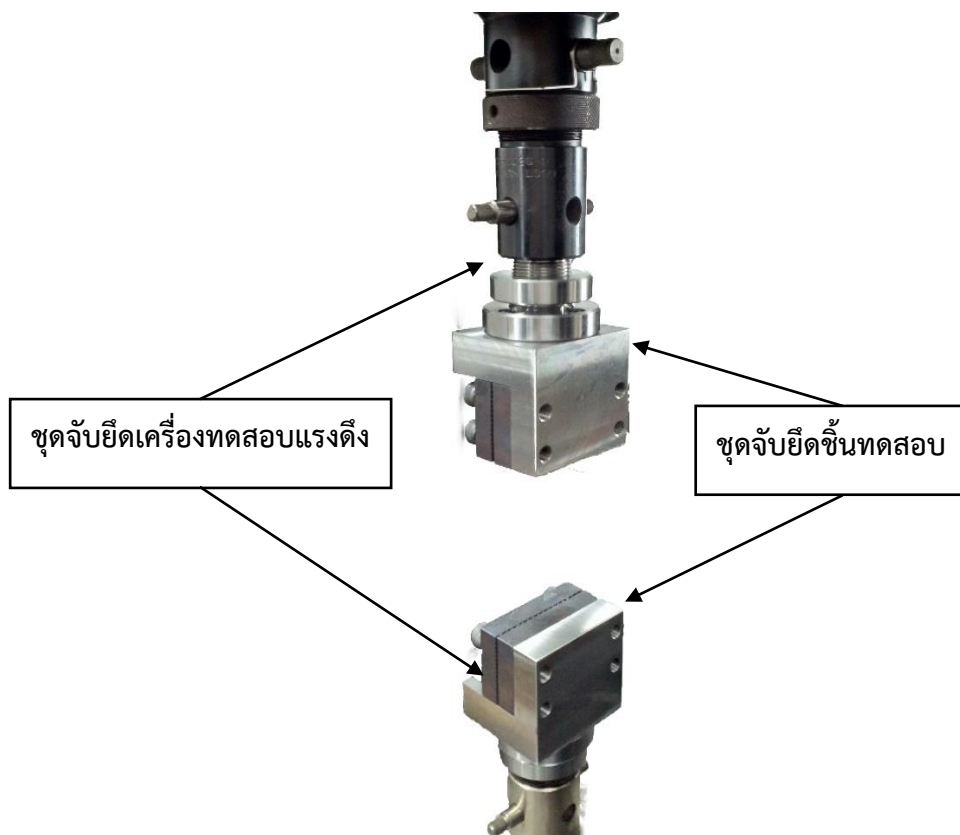
ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการวิจัย

3.2 การออกแบบ และสร้างชุดจับยึดชิ้นทดสอบโยชิตะ

ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการออกแบบและสร้างชุดจับยึดชิ้นงานทดสอบการโก่งโยชิตะ เพื่อใช้ในการจับยึดชิ้นทดสอบแสดงดังภาพที่ 3-2 ประกอบด้วย ชุดจับยึดกับเครื่องทดสอบแรงดึง และชุดจับยึดชิ้นทดสอบ ดำเนินการสร้างชิ้นส่วนให้ได้ตามขนาดที่ออกแบบไว้ แบบชิ้นส่วนต่างๆ แสดงดังภาคผนวก ก

3.2.1 ชุดจับยึดเครื่องทดสอบแรงดึง การออกแบบ และสร้างชุดจับยึดกับเครื่องทดสอบแรงดึง ด้านบน และล่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 70 มิลลิเมตร หนา 15 มิลลิเมตร วงแหวนยึดจับฐาน ด้านบน และล่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 60 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางใน 35 มิลลิเมตร หนา 14 มิลลิเมตร

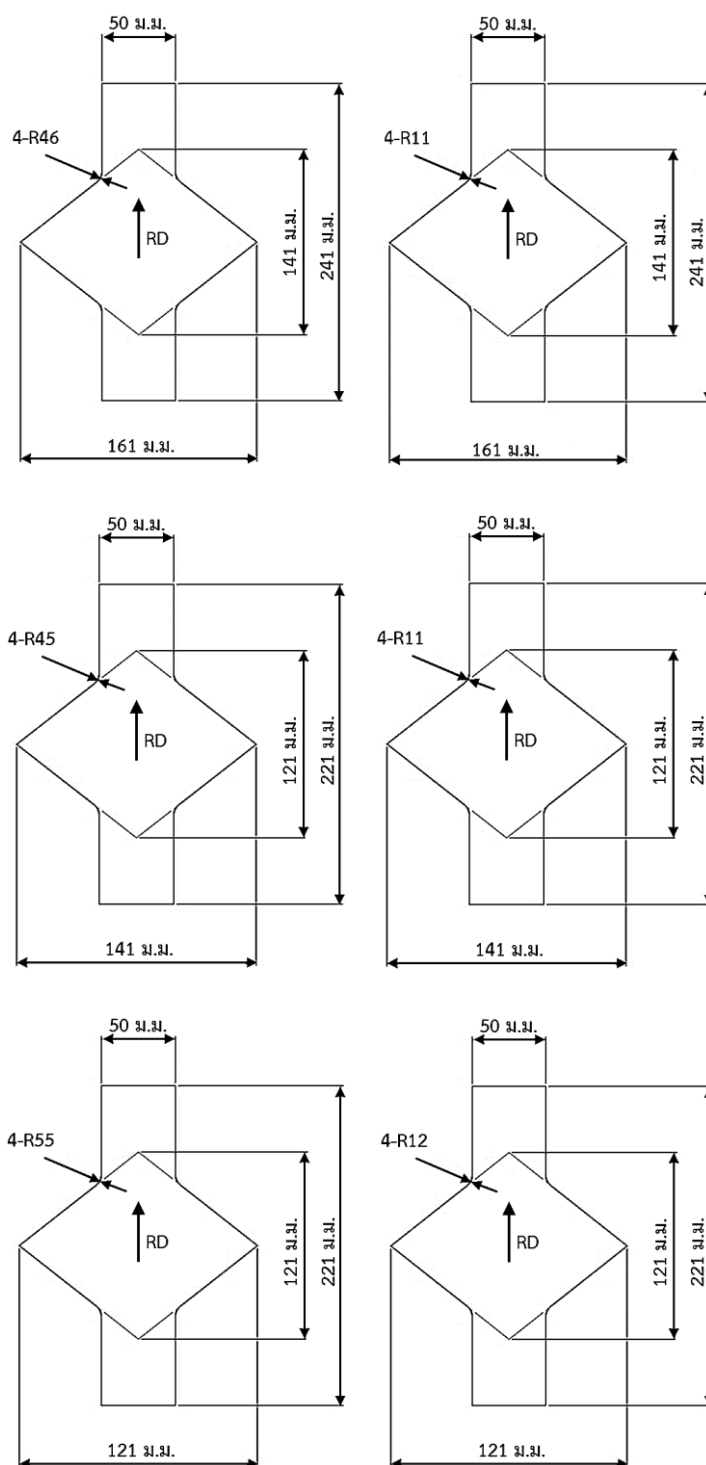
3.2.2 ชุดจับยึดชิ้นทดสอบการออกแบบ และสร้างชุดจับยึดชิ้นทดสอบ ตัวฐานจับแผ่นจับชิ้นงาน ด้านบน และล่าง 70×80 มิลลิเมตร หนา 20 มิลลิเมตร ชุดแผ่นจับชิ้นงาน ด้านบน และล่าง ขนาด 80×50 มิลลิเมตร หนา 15 มิลลิเมตร



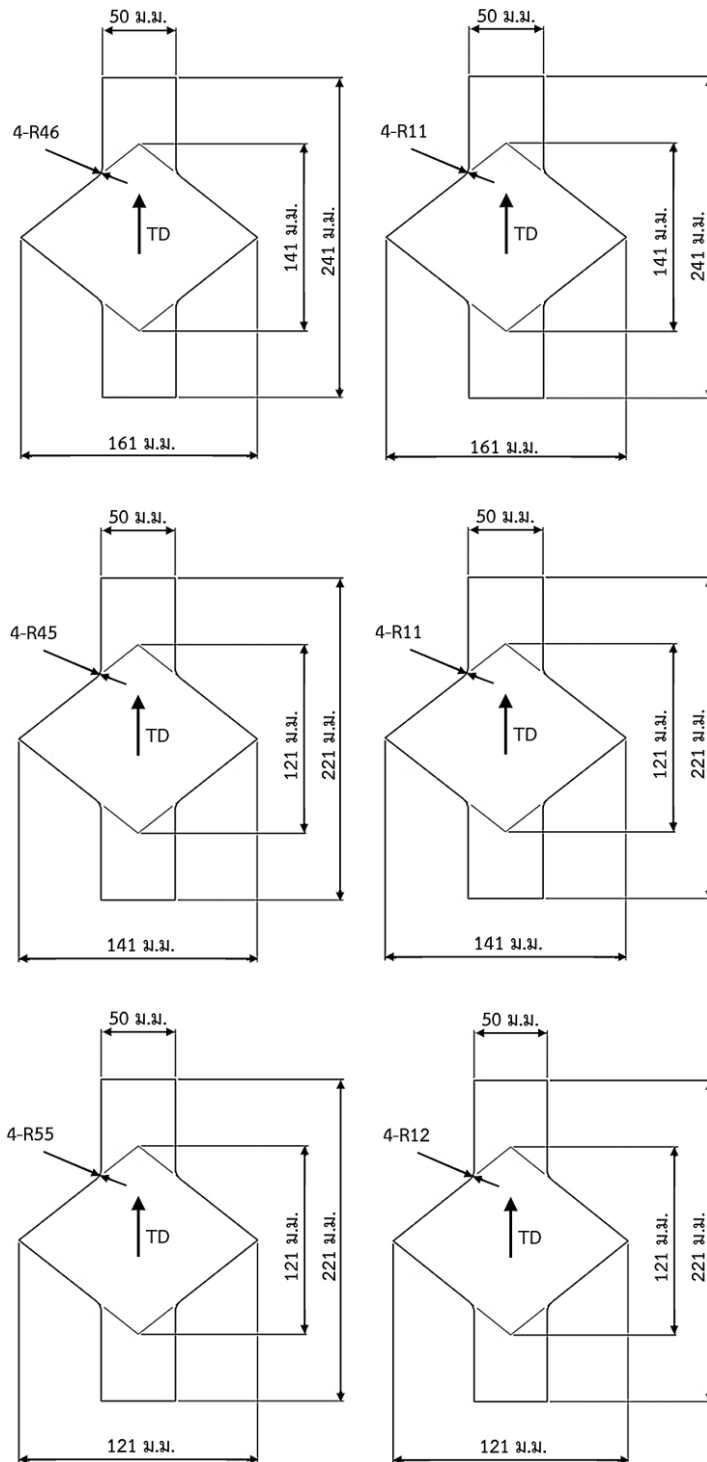
ภาพที่ 3-2 ชุดทดสอบการโก่งโยชิตะ (Yoshida Buckling Test)

3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ และออกแบบชุดจับ

ในการทดสอบการโก่งโยชิตะ ได้มีการเตรียมชิ้นงานทดสอบ โดยใช้ชิ้นทดสอบหนา 1.0 มิลลิเมตร โดยมีรัศมีความโค้ง และสัดส่วนความกว้างต่อความยาวที่แตกต่างกันดังภาพที่ 3-3 และ 3-4 ชื่อชิ้นทดสอบถูกแทนด้วยตัวอักษร A-M A-O B-M B-O C-M และ C-O



ภาพที่ 3-3 ขนาดชิ้นงานทดสอบการโค้งโยยชิตะ ในแนวทิศทางตามแนวรีด



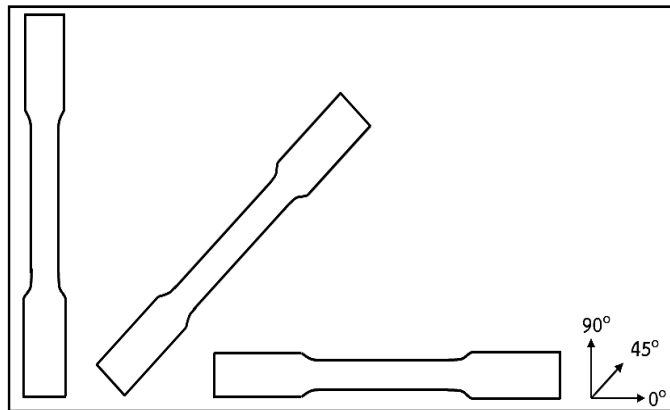
ภาพที่ 3-4 ขนาดชิ้นงานทดสอบการโค้งโยยชิตะ ในแนวทิศทางขวางแนวนีต

3.4 การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ

การที่จะให้แบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นได้อย่างถูกต้องจะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดขอบเขต (Boundary Condition) ให้กับแบบจำลองตรงกับสภาพการทดสอบการโก่งโยชิตะ และกำหนดสมบัติวัสดุซึ่งเป็นสมบัติของโลหะแผ่นบาง ให้ตรงกับวัสดุจริง และคำนวณผ่านโปรแกรม ABAQUS 2017 และคำนวณผลลัพธ์ ซึ่งสมบัติของโลหะแผ่นบางเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญมาก ในแบบจำลองที่กำหนดความสามารถในการเปลี่ยนรูปวัสดุ พฤติกรรมทางกลขณะเกิดการเปลี่ยนรูป ดังนั้น ค่าสมบัติทางกลของวัสดุที่ถูกต้องจะส่งผลให้รูปร่างชิ้นงานที่ได้ พฤติกรรมทางกล และการเปลี่ยนรูปของโลหะ จากการจำลองสภาวะการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกับการขึ้นรูปจริง และการพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น จะสามารถทำนายพฤติกรรมการเริ่มเกิดการย่นได้อย่างแม่นยำมากขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบเพื่อหาค่าตัวแปรสภาพการเปลี่ยนรูป ของการเปลี่ยนรูปสภาพแอนไอโซทรอปิกของแผ่นอลูมิเนียมผสมเกรด AA5052-O ความหนา 1 มิลลิเมตร ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นบนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill' 48-R และ Hill' 48-S ซึ่งมีการทดสอบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.4.1 การทดสอบแรงดึงแกนเดียว (Uniaxial Tensile Test)

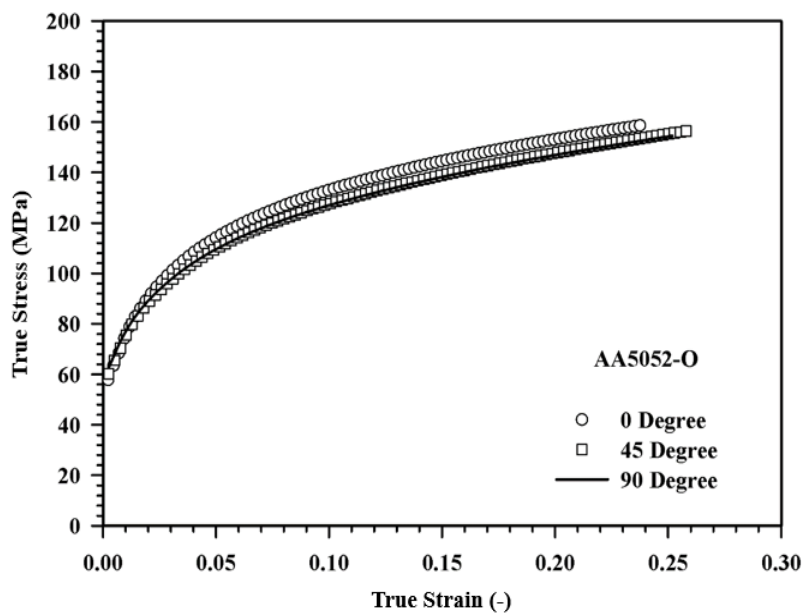
โดยตัดชิ้นงานตามทิศทางการรีด (0 องศา 45 องศา และ 90 องศา) ดังแสดงภาพที่ 3-5 นำไปทำการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุโดยการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ด้วยมาตรฐาน ASTM E8 โดยสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ค่าสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FE-Model) ได้แก่ ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น/มอดูลัสของยัง (Modulus of Elasticity / Young's Modulus) ความเค้นคราก (Yield Strength) ความเค้นสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ค่าสัดส่วนความเครียดพลาสติก (r -Value) แสดงดังตารางที่ 3-2 เส้นโค้งการไหล (Flow Curve) ของวัสดุ ค่าความเค้น และความเครียดวิศวกรรมที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ถูกนำมาสร้างโค้งความเค้น-การไหล ของวัสดุ AA5052-O อยู่บนพื้นฐานความสัมพันธ์ความเค้น และความเครียดจริง ที่แสดงพฤติกรรมการเริ่มต้นการครากตัว การเริ่มเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation) จนกระทั่งการเปลี่ยนรูปถึงค่าแรงดึงสูงสุด (Force Max) แสดงดังภาพที่ 3-6 และข้อมูลของเส้นโค้งความเค้น-การไหลถูกนำมา Fitting ข้อมูล แบบผ่านจุดข้อมูลทุกจุด เพื่ออธิบายสภาพการทำให้แข็งด้วยความเครียดของในแบบ Swift Hardening Law แสดงดังตารางที่ 3-2



ภาพที่ 3-5 ชิ้นทดสอบแรงดึงในทิศทางแนวการรีด 0 45 และ 90 องศา

ตารางที่ 3-1 สมบัติทางกลของวัสดุ AA5052-O หนา 1 มิลลิเมตร

Test Direction	Yield Stress 0.2% (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	% Elongation Total	r-Value
0°	58.763	121.744	31.9	0.957
45°	59.701	117.942	31.6	0.927
90°	62.321	117.453	31.7	1.084



ภาพที่ 3-6 เส้นโค้งความเค้น-ไหลดของวัสดุ AA5052-O หนา 1 มิลลิเมตร
ในทิศทาง 0 45 และ 90 องศา

ตารางที่ 3-2 ค่าตัวแปรจากสมการทำให้แข็งด้วยความเครียดของสวิตต์ (Swift Hardening Law)

ชนิดของวัสดุ	สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (K)	ความเครียดช่วงยืดหยุ่น (ϵ_0)	เลขชี้กำลังการทำให้แข็ง ด้วยความเครียด (n)
AA5052-O	221.985	0.227	0.633

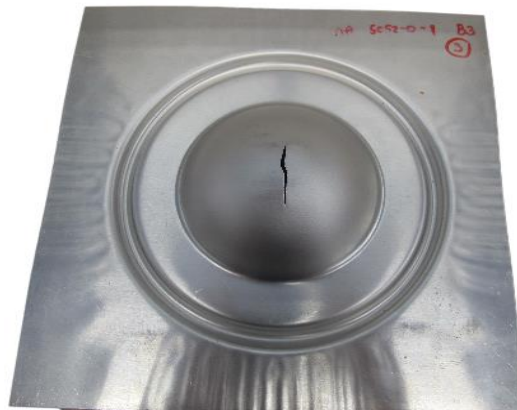
3.4.2 การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ (Hydraulic Bulge Test)

สำหรับการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำเป็นการทดสอบหาสมบัติทางกลของวัสดุ ความเค้นครากในสภาวะแรงดึงสองทิศทาง (σ_b) เพื่อใช้สร้างแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บนพื้นฐานเกณฑ์การ Hill'48-S ที่เป็นการทดสอบขึ้นรูปขึ้นงาน โดยใช้แรงดันน้ำส่งผลให้ขึ้นงานอยู่ภายใต้สภาวะแรงดึงสองทิศทาง (Biaxial) ซึ่งมีสภาวะใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริง และสามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น(Stress) และความเครียด(Strain) ในระดับที่มากกว่าการทดสอบแรงดึงแกนเดียว ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดสอบโดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดสอบการขึ้นรูปแบบเป่าโป่งด้วยเครื่องเพรสไฮดรอลิก (Press Hydraulic Machine) ขนาด 200 ตัน ที่มีเครื่องสร้างแรงดันน้ำ (Pressure Intensifier) ทำหน้าที่สร้างแรงดันให้กับแม่พิมพ์ด้านล่าง (Pressure Chamber) และติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดัน (Sensor Pressure) เพื่อวัดแรงดันน้ำขณะขึ้นรูป และมีเครื่องมือวัดการเปลี่ยนระยะเชิงเส้นตรง (Linear Variable Differential Transducer; LVDT) เพื่อวัดความสูงของโดมขณะขึ้นรูปที่ติดตั้งบริเวณแม่พิมพ์ด้านบน แสดงดังภาพที่ 3-7 ขึ้นทดสอบโลหะแผ่นขนาด 250×250 มิลลิเมตร นำมาขึ้นรูปจนมีลักษณะเป็นรูปโดมครึ่งทรงกลม แสดงดังภาพที่ 3-8 ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

1. ลักษณะโดมของขึ้นงานทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปร่างทรงกลมตลอดขณะขึ้นรูป
2. การหาค่าความเค้นและความเครียดจริงสามารถใช้ทฤษฎีแผ่นบาง (Membrane Theory) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ [42]

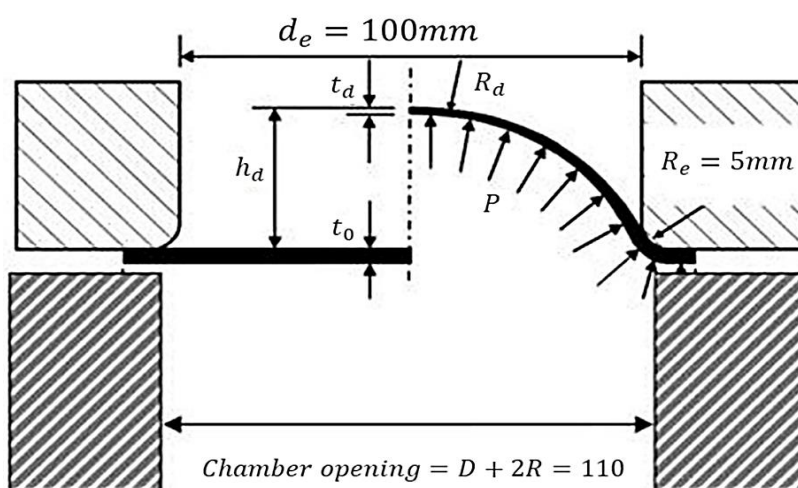


ภาพที่ 3-7 ชุดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดสอบเป่าโป่งด้วยน้ำ



ภาพที่ 3-8 ชิ้นทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

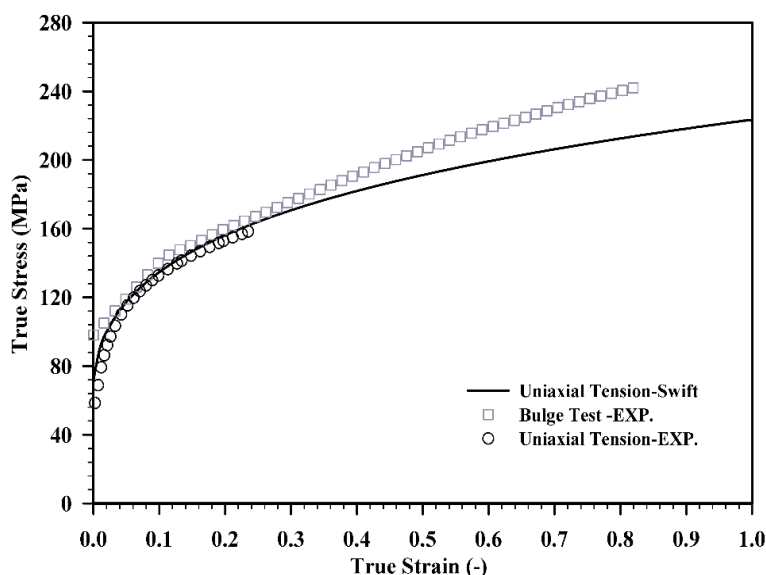
โดยการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำจะใช้ชุดแม่พิมพ์ที่มีขนาดรัศมีของฟิลเลต (Radius the Fillet of the Carty: R_c) เท่ากับ 5 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (Diameter of the Cavity: d_c) เท่ากับ 100 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 3-7 การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำนั้น สามารถหาได้จากสมการที่ (2-6) และสมการที่ (2-7) จะต้องทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ความสูงโดม (h_d) และความหนายอดโดม (t_d) ได้จากสมการที่ (2-9) และสมการที่ (2-8) ในส่วนค่าแรงดันน้ำ (p) รัศมีโดม (R_d) ทำการหาจากเครื่องมือวัดไฮเกจและเครื่องวัดแรงดันน้ำ



ภาพที่ 3-9 แบบร่างแม่พิมพ์เพื่อการคำนวณสำหรับการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ [42]

เมื่อได้กราฟเส้นโค้งการไหลค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำแล้ว ได้ทำการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของการทดสอบแรงดึงแกนเดียว (Tensile Test) ในทิศทางแนวรัศมีกับค่าที่ได้จากการทดสอบแบบเป่า

โป่งด้วยน้ำ จากการทดลองและใช้สมการกฎการทำให้แข็งด้วยความเครียดของสวิตซ์ในการกำหนดเส้นโค้งของวัสดุ AA5052-O หนา 1 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 3-10 ทำให้ทราบว่า การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำสามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเครียดในระดับความเครียดที่สูงกว่า การทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว โดยค่าความเค้นครากในสภาวะแรงดึงสองทิศทาง (σ_b) เท่ากับ 65.473 MPa



ภาพที่ 3-10 เปรียบเทียบค่าความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำกับการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว

3.4.3 ค่าสมบัติทางกลของวัสดุ (Mechanical Properties)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาสร้างเส้นขีดจำกัดการย่น และการสร้างแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill' 48-R และ Hill' 48-S ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปพลาสติกแบบแอนไอโซทรอปิกของวัสดุ โดยค่าสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิก เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิก แสดงดังตารางที่ 3-3 ถูกคำนวณจากค่าตัวแปรที่ใช้ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) คือ ค่าอัตราความเครียด (r -Value) และค่าอัตราความเค้น (Stress-Value) ในทิศทางแนวการรีดที่ 0 45 และ 90 องศา และค่าความเค้นครากในสภาวะแรงดึงสองทิศทาง (σ_b) แสดงดังตารางที่ 3-4 ของวัสดุ AA5052-O หนา 1 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3-3 ค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิกของ Hill' 48-R และ Hill' 48-S

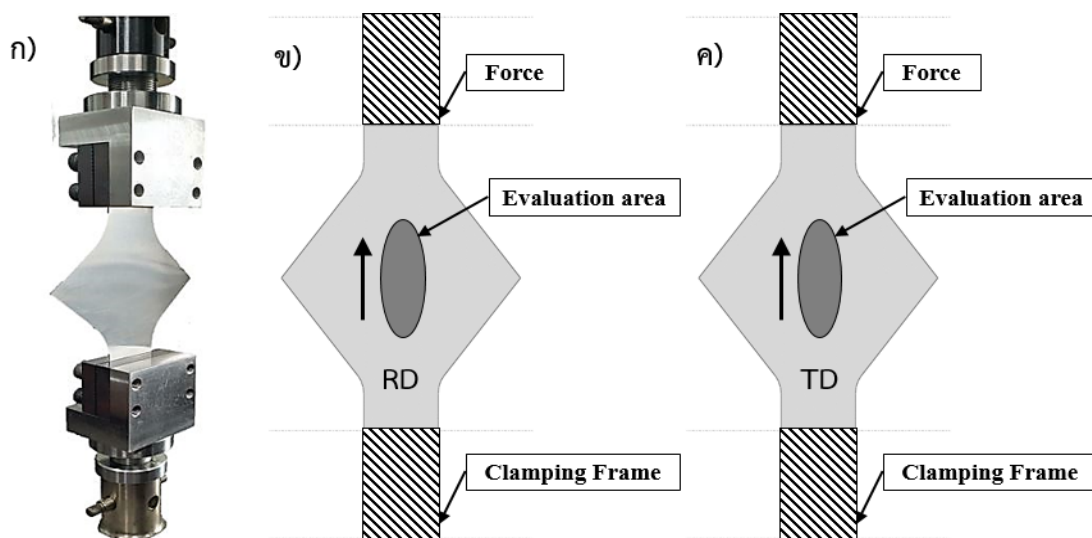
Parameter	H	G	F	N
Hill' 48-R	0.4890	0.5110	0.4511	1.3729
Hill' 48-S	0.5418	0.4582	0.3473	1.5349

ตารางที่ 3-4 ค่าความเค้นคราก และสัดส่วนความเค้น

Test Condition	Yield Stress (σ_i) MPa	Yield Stress Ratio (σ_i/σ_0)
Uniaxial Tension 0°	58.763	1.000
Uniaxial Tension 45°	59.701	1.016
Uniaxial Tension 90°	62.321	1.061
Balanced Biaxial Tension	65.473	1.114

3.5 วิธีการดำเนินการทดสอบการโก่งโยชิตะ (Yoshida Buckling Test)

ในงานวิจัยนี้ดำเนินการพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น โดยการทดสอบการโก่งโยชิตะ (Yoshida Buckling Test) ใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile test by INSTRON: Machine Type 5567, Serial No. P5828) ดำเนินการทดสอบที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในการทดสอบชิ้นงานซึ่งปีกมีรัศมีความโค้ง และความยาวต่อความกว้างที่ต่างกัน ดังแสดงรายละเอียดตามภาพที่ 3-3 และ 3-4 เพื่อตรวจสอบการโก่งของชิ้นทดสอบ ในทิศทางตามแนวรีด (Rolling Direction) และทิศทางขวางแนวรีด (Transverse Direction) ให้ครอบคลุมพฤติกรรมการเกิดการย่นที่จะเกิดขึ้น บริเวณการจับยึดชิ้นทดสอบ (Clamping Area) ทั้งบน ล่าง ขนาดพื้นที่ 50 X 50 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3-11 ก)

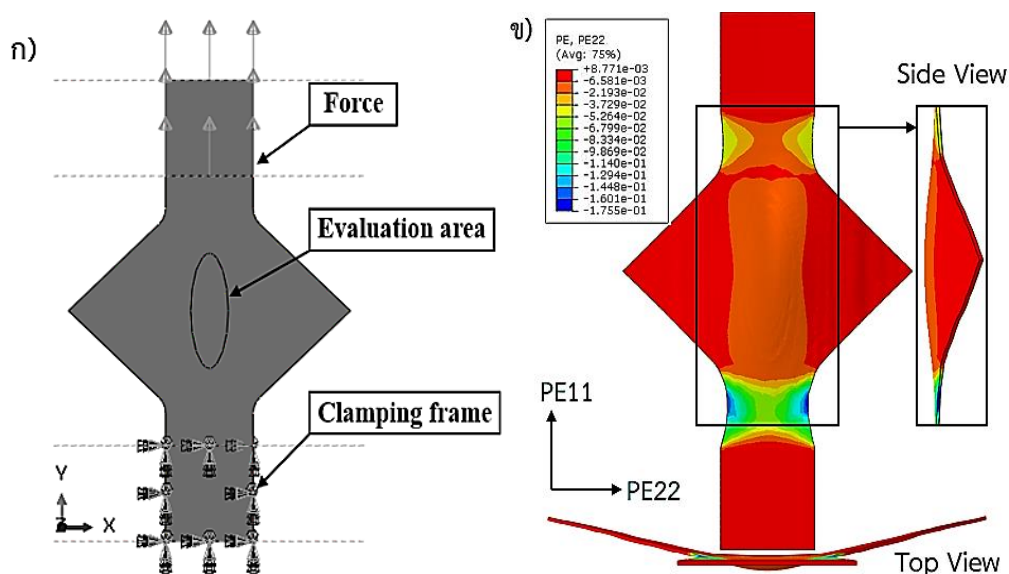


ภาพที่ 3-11 ชิ้นทดสอบการโก่งโยชิตะ (Yoshida Buckling Test) ก) ชุดจับชิ้นทดสอบ
ข) ชิ้นทดสอบในแนวรีด ค) ชิ้นทดสอบขวางแนวรีด

3.6 การจำลองเชิงตัวเลขจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Simulation)

3.6.1 จำลองการทดสอบการโก่งโยชิตะ (Yoshida Buckling Test)

โดยใช้โปรแกรม Abaqus 2017 โดยกำหนดขอบเขตในแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 3-12 ก) ซึ่งได้นำค่าสมบัติทางกลของวัสดุอลูมิเนียม AA5052-O ค่ายังมอดูลัส ข้อมูลเส้นโค้งความไหล ผ่านสมการอธิบายพฤติกรรมทำให้แข็งด้วยความเครียดของ Swift Hardening Law และค่าตัวแปรแสดงสมบัติแอนไอโซทรอปิก ที่ผ่านการคำนวณตามเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิก ของ Hill'48-R และ Hill'48-S มากำหนดในแบบจำลองที่อธิบายพฤติกรรมทำให้แข็งด้วยความเครียด และการเปลี่ยนรูปที่เท่ากันในทุกทิศทางแอนไอโซทรอปิก บนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R และ Hill'48-S มากำหนดลักษณะสภาพสมบัติวัสดุ ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งนำค่าค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์ จากตารางที่ 3-1 3-2 3-3 และ 3-4 นำไปใส่เพื่อให้โปรแกรมวิเคราะห์ผลลัพธ์ของแต่ละเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิก



ภาพที่ 3-12 แบบจำลองการทดสอบการโก่งโยชิตะ (Yoshida Buckling Test)

ก) การกำหนดขอบเขตของการจำลอง ข) ผลลัพธ์ของการจำลอง

3.6.2 การเก็บผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อทำการจำลองการทดสอบสำเร็จ

ทำการเก็บค่าคือ ความเครียดหลัก (Major Strain) ความเครียดรอง (Minor Strain) แรงดึง (Tension Force) และระยะดึง (Displacement) นำไปพล็อตกราฟ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงว่ามีแนวโน้มเป็นอย่างไร ผลใกล้เคียงกันกับผลการทดสอบหรือไม่ โดยเก็บค่าที่ระยะดึง ที่มีการเริ่มเกิดการโก่งบนชิ้นงานทดสอบโยชิตะ เปรียบเทียบการเริ่มเกิดการย่น (Wrinkling Initiation) โดยตรวจสอบการเริ่มการโก่งบนชิ้นงานทดสอบร่วมกับสัญญาณอะคูสติกอีมีสชัน ที่ระบุ/แสดงจังหวะเวลาที่เริ่มเกิดการโก่ง แล้วนำเวลาที่เริ่มการโก่งเทียบกับ การทดลองจริงว่าที่เวลาเดียวกันนั้นได้ระยะดึงเท่าใด จากการทดสอบจริง นำระยะดึงเดียวกันนี้ ไปเก็บค่าจากการจำลอง

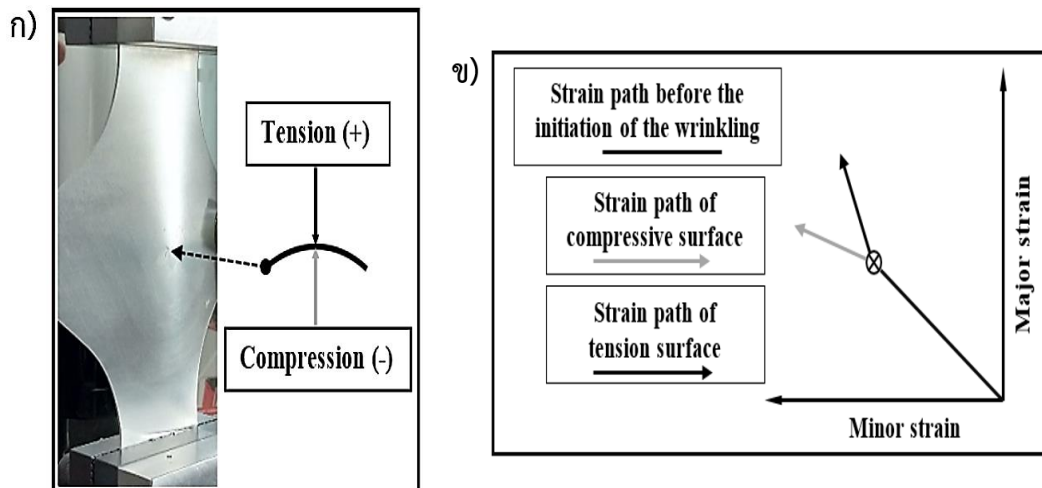
3.7 พัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น (Wrinkling Limit Curves)

ในปัจจุบันนี้การสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น เป็นเครื่องมือที่ใหม่ และช่วยในการออกแบบกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะแผ่น แต่อย่างไรก็ตามความสำเร็จในการใช้งานนั้นต้องมีความรู้ทางทฤษฎีประสบการณ์ทั้งในห้องปฏิบัติการ และในโรงงานสถานประกอบการอย่างเพียงพอ

รูปแบบการโค้งงอของวัสดุจะเปลี่ยนรูปไปต่าง ๆ กันตามลักษณะของแรงที่กระทำ ความสัมพันธ์ระหว่างการโค้งงอของวัสดุในรัศมีต่าง ๆ กับความเค้น เมื่อทดลองหลาย ๆ ครั้งก็สามารถหาการผสมผสานระหว่าง ความเครียดสูงสุด (สอดคล้องกับแกนยาวของรูปร่างชิ้นงาน) กับความเครียดต่ำสุด (ตั้งฉากกับความเครียดสูงสุดและสอดคล้องกับแกนสั้นของรูปร่างชิ้นงาน)

3.7.1 โดยวิธีการการระบุการเริ่มต้นเกิดการย่น

ตามภาพที่ 2-43 กำหนดจากเส้นแนวความเครียดที่เบี่ยงเบน (Bifurcated Strain Paths) ซึ่งก่อตัวเป็นการย่นในการขึ้นรูปโลหะแผ่นเกิดจากส่วนประกอบของความเครียดสองชนิด ในระหว่างการขึ้นรูปปลีกรแรงอัดจะเกิดขึ้นเป็นครั้งแรกในเส้นรอบวงของวัสดุแผ่น จากนั้นเมื่อเกิดการย่น ความเครียดจะเกิดขึ้น วัสดุแผ่นจะไหลลงสู่แม่พิมพ์อย่างต่อเนื่อง ด้วยวิธีนี้การย่นของแผ่นโลหะสามารถอธิบายได้โดยพิจารณาจากเส้นแนวความเครียดของพื้นที่ที่เกี่ยวข้อง โดยทั่วไปเส้นแนวของความเครียดที่ไม่เป็นเชิงเส้นถูกกำหนดสำหรับเขตวิกฤตเมื่อเกิดการย่น และการหัดตัวแบบทันทีปรากฏบนแต่ละพื้นผิวของตัวอย่างที่เกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 3-13 (ก) สิ่งนี้ถูกใช้เพื่อกำหนดช่วงเวลาของการเกิดการย่นหลังจากนั้นการก่อตัวของการย่นพัฒนาต่อไป

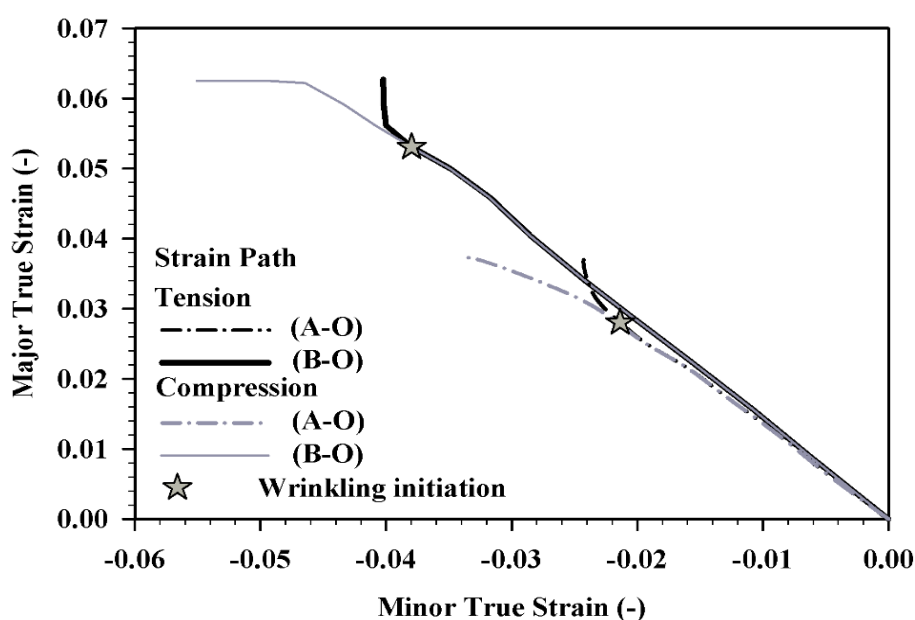


ภาพที่ 3-13 วิธีการการระบุการเริ่มต้นเกิดการย่น ก) การเกิดการการโค้งงอบนชิ้นงานทดสอบของโยชิตะ ในระหว่างการทดสอบและ ข) จุดแยกของเส้นแนวความเครียด

บริเวณการเริ่มเกิดการย่น ในตัวอย่างแสดงให้เห็นเส้นแนวความเครียดเชิงเส้นก่อนที่จะพัฒนาการเป็นการย่นที่เห็นเป็นเส้นตรงสีดำในภาพที่ 3-13 ข) ในช่วงเวลาวิกฤติเส้นแนวความเครียดของพื้นที่ บริเวณชิ้นงานทดสอบที่รับแรงดึง มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นไปสู่สภาวะความเครียดแกนเดียว (Plane Strain) ภายใต้แรงดึง และพื้นผิวอีกด้านที่อยู่ใต้ผิวที่รับแรงดึง มีเส้นแนวความเครียดแกนเดียว ภายใต้แรงดึงมีแนวโน้มลดลงถึงสภาวะภายใต้แรงกด ในช่วงเวลานี้เมื่อเส้นแนวความเครียด

ถูกแยกไปสองทาง เกิดสภาพการย่นความเครียดหลัก (Major Strain) ค่าเป็นบวก ความเครียดรอง (Minor Strain) ค่าเป็นลบ

ตัวอย่างเส้นแนวความเครียดของตัวอย่าง ที่ถูกทำนายไว้โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบการโก่งโยชิตะ ได้รับการระบุการเริ่มต้นเกิดการย่นดังที่เห็นในภาพที่ 3-14 สำหรับเกรด AA5052-O เส้นแนวความเครียดที่คำนวณได้อย่างชัดเจนแสดงให้เห็นถึงการแยกไปสองทาง ซึ่งความเครียดของในแต่ละพื้นผิวตัวอย่างพัฒนาขึ้นในทิศทางของสภาวะเค้นแกนเดียว และลดลงของสภาวะเค้นกด จุดที่เส้นแนวความเครียดเพ่งเบี่ยงเบนจากกันและกันถูกใช้เป็นสถานการณ์เริ่มต้นการย่น



ภาพที่ 3-14 การกำหนดจุดค่าความเครียดหลัก และความเครียดรอง
ในจังหวะเริ่มเกิดรอยย่นของเส้นแนวความเครียด

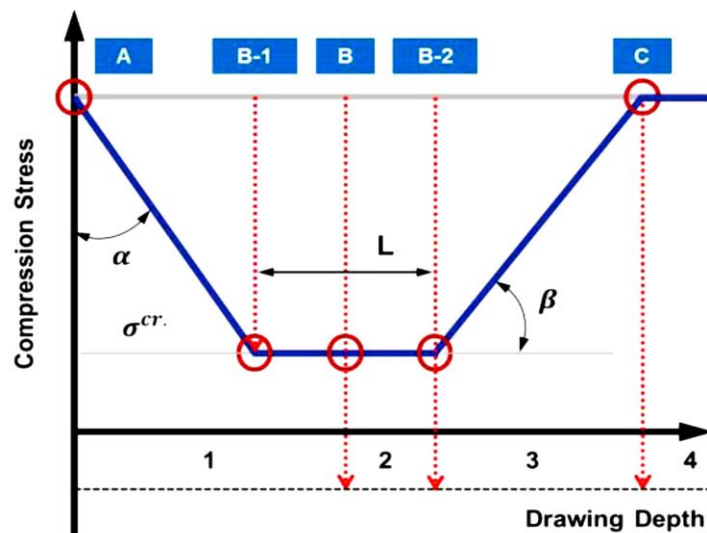
เมื่อนำเอาข้อมูลค่าความเครียดหลัก และรอง ของชิ้นงานทดสอบการโก่งโยชิตะทั้ง 6 แบบ แต่ละจุดมาจากรูปแบบของชิ้นงานที่ต่างกันทั้ง 6 แบบ มาลงเป็นจุด และ Fitting ข้อมูล แบบผ่านจุด ข้อมูลทุกจุด จะได้เป็นเส้นโค้งเรียกว่า เส้นโค้งขีดจำกัดการย่น (Wrinkling Limit Curve; WLC)

3.7.2 ตรวจสอบการเริ่มต้นการย่น จากเส้นแนวความเค้นที่เปี้ยนเบน (Bifurcated Stress Paths)

จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของการย่นขึ้นอยู่กับความเครียดรอง (Minor Strain) ระหว่างการเริ่มเกิดการย่นสามารถทำได้ แต่เนื่องจากการวิเคราะห์อีกหนึ่งทฤษฎี [31] ว่าด้วยความเค้นรอง (Minor Stress) ในระหว่างการเริ่มเกิดย่นมีค่าเป็นบวกจึงถูกพิจารณาว่าอยู่ในรูปพื้นที่บวกภาพที่ 3-15 แสดงให้เห็นว่าสภาวะความเค้นที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่นพบได้ในบริเวณแรงดึง และแรงกด (Tensile-Compression Area) [8] สามารถสรุปได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการย่น [6] เพื่อประเมินการเกิดการย่น และพัฒนาเกณฑ์การย่นในส่วนของการกระบวนการลากขึ้นรูปที่ซับซ้อน ในพฤติกรรมของ

ความเค้นกด (Compression Stress) จะพิจารณาในช่วงการเกิดการย่น กระบวนการเริ่มเกิดการย่นสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนโดยใช้พารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

1. พื้นที่ปลอดภัย (A-B)
2. การเริ่มต้นของการย่น (B-B2)
3. การเพิ่มขึ้นของการย่น (B2-C)
4. การย่นที่เพิ่มขึ้นจนเกิดเป็นริ้วของการย่น (หลัง C)

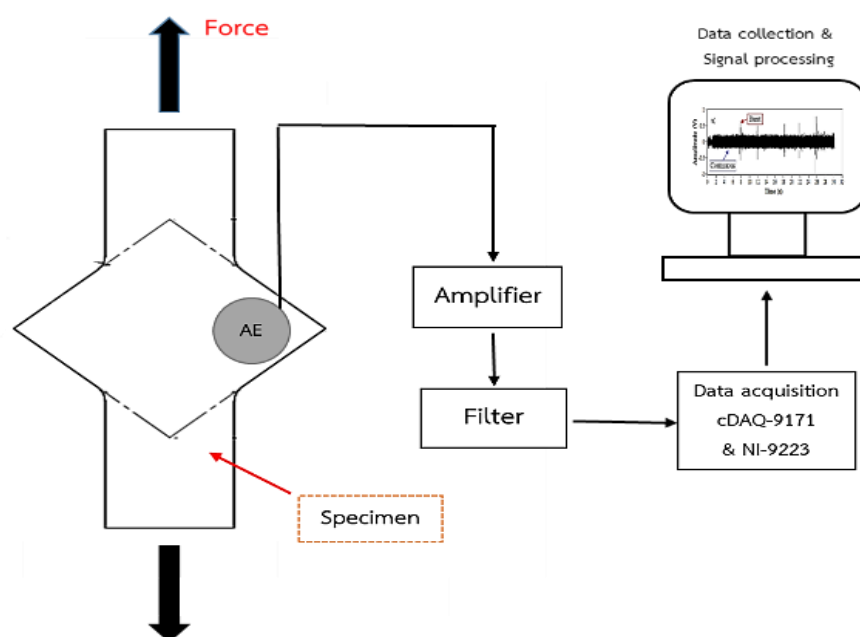


ภาพที่ 3-15 กระบวนการย่นบนพื้นฐานของความเค้นกด (Compression Stress) [31]

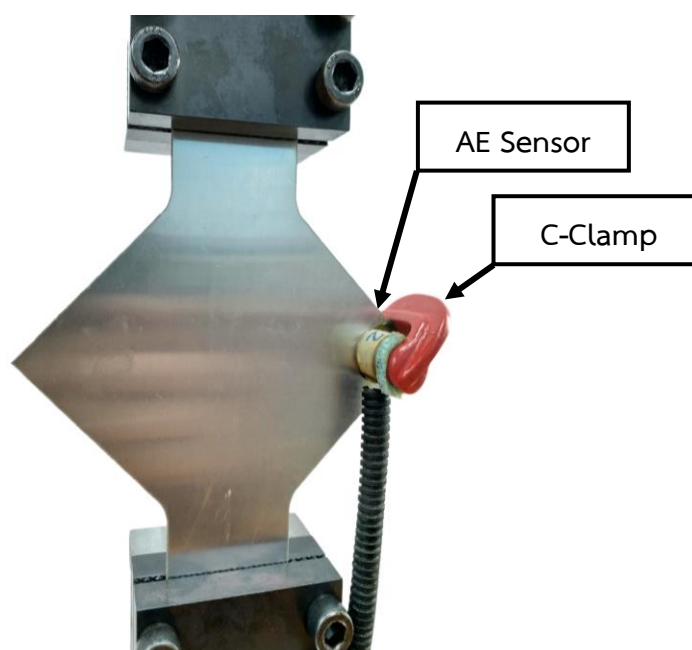
3.8 ออกแบบการติดตั้งระบบเทคนิคอะคูสติกอีมิสชัน (Acoustic Emission)

3.8.1 การติดตั้งเซนเซอร์อะคูสติกอีมิสชัน

มีผลต่อการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกอีมิสชัน โดยบริเวณที่ทำการติดตั้งจะต้องคำนึงถึงตำแหน่งที่ได้รับสัญญาณได้ที่สุดของชิ้นงานทดสอบ และอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้ในการจับยึดเซนเซอร์อะคูสติกอีมิสชัน จะต้องได้รับการพิจารณาด้วยเช่นกัน เนื่องจากจะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับสัญญาณการติดตั้งเซนเซอร์อะคูสติกอีมิสชัน กับชุดทดสอบนี้ ทำการติดตั้งเซนเซอร์อะคูสติกอีมิสชัน บริเวณด้านปีกของชิ้นทดสอบการโก่งโยยิดะ เพื่อตรวจจับสัญญาณของช่วงจังหวะการโก่งตัวในเนื้อวัสดุของชิ้นทดสอบที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทดสอบ แสดงดังภาพที่ 3-16 และภาพที่ 3-17 ก่อนการติดตั้งเซนเซอร์อะคูสติกอีมิสชัน ทาจาระบีบริเวณผิวเซนเซอร์เพื่อเป็นสารช่วยให้สามารถรับสัญญาณอะคูสติกได้ดีขึ้น และลดช่องว่างอากาศระหว่างชิ้นทดสอบกับเซนเซอร์ แล้วทำการกดติดให้แน่นด้วยซีแคลมป์ (C-Clamp) แสดงดังภาพที่ 3-17



ภาพที่ 3-16 แสดงรูปแบบการติดตั้งเซนเซอร์อะคูสติกอีมีสชัน
ในการทดสอบการโก่งโยชิตะ (Yoshida Buckling Test)

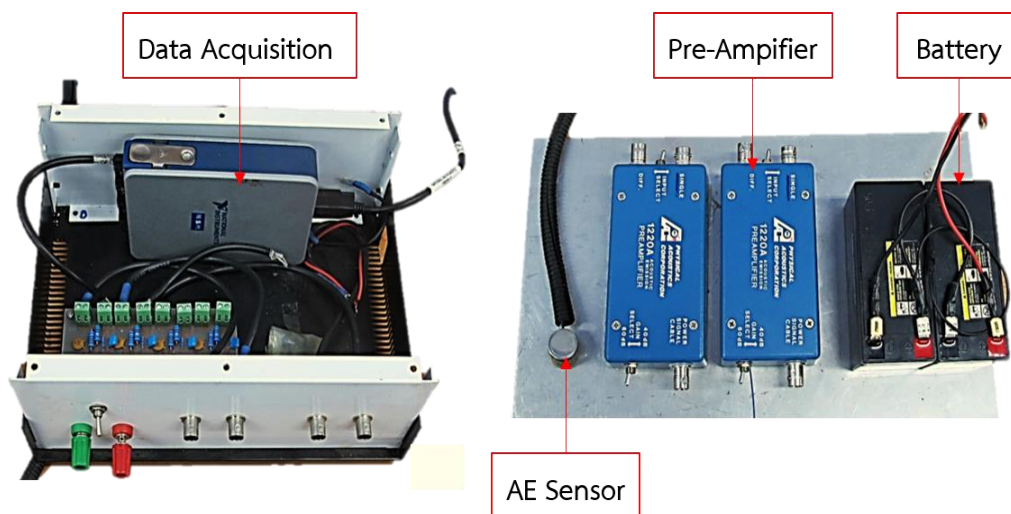


ภาพที่ 3-17 ชิ้นงานทดสอบการโก่งโยชิตะ (Yoshida buckling Test)
เมื่อติดตั้งเซนเซอร์อะคูสติกอีมีสชัน

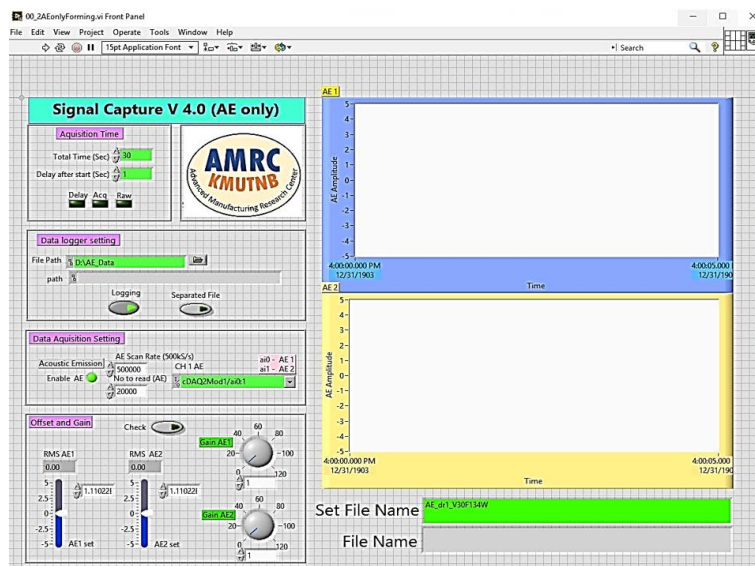
3.8.2 ชุดอุปกรณ์การติดตั้งอะคูสติกอีมิชชัน (Acoustic Emission)

ในงานวิจัยนี้ศึกษาสัญญาณอะคูสติกอีมิชชัน ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการดัดขึ้นงานทดสอบ และการเกิดการโก่งตัวของชิ้นทดสอบ เพื่อศึกษาผลของสัญญาณอะคูสติกอีมิชชัน และตรวจสอบ การเกิดการโก่งตัว ของชิ้นงานในระหว่างการการดัด โดยเซนเซอร์อะคูสติกอีมิชชัน (Sensor AE) จะ ถูกติดตั้งกับชิ้นทดสอบ สัญญาณอะคูสติกอีมิชชัน ที่เกิดขึ้นในระหว่างการดัดจะถูกแปลงเป็นสัญญาณ ทางไฟฟ้า โดยเซนเซอร์อะคูสติกอีมิชชัน แล้วสัญญาณจะผ่านเข้าอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Pre-amplifier) เพื่อขยายระดับแรงดันให้เหมาะสม แล้วจึงผ่านเข้าอุปกรณ์กรองสัญญาณ (Filter) เพื่อตัด สัญญาณช่วงความถี่อื่น ๆ ที่ไม่จำเป็นออก และส่งเข้าสู่ระบบจัดเก็บข้อมูล (Data Acquisition System) และใช้ซอฟต์แวร์แลปวิว (LabVIEW) ชุดทดสอบอะคูสติกอีมิชชัน แสดงดังภาพที่ 3-18 ประกอบไปด้วย

1. เซนเซอร์ (AE Sensor) R15S PAC ตรวจจับเสียงในช่วงความถี่ 50- 400 kHz เป็นช่วงความถี่ที่มนุษย์ไม่สามารถรับรู้ได้ (โดยปกติทั่วไปมนุษย์จะสามารถรับรู้ในช่วงความถี่ 20-120 Hz เท่านั้น)
 2. อุปกรณ์ขยายสัญญาณ ปฐมภูมิ (Pre-Amplifier) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ หรือ แรงดันที่ 60 เดซิเบล
 3. ระบบจัดเก็บข้อมูล (Data Acquisition System) ประกอบด้วย cDAQ 9171 และ NI9223 โดยมี Sampling Rate ในการเก็บของสัญญาณอะคูสติกอีมิชชัน ที่ 500 kS/s
 4. แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ เพื่อจ่ายพลังงานให้กับชุดอุปกรณ์
 5. ซอฟต์แวร์แลปวิว (LabVIEW) ประมวลผลของสัญญาณ
- ดังภาพ ที่ 3-19 แสดงโปรแกรมใช้เก็บวิเคราะห์ และแปลงสัญญาณประมวลผลเป็นค่า AE_{Max} AE_{RMS} และ AE_{Energy} เพื่อศึกษาแนวโน้มและเปรียบเทียบผลคุณลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้น



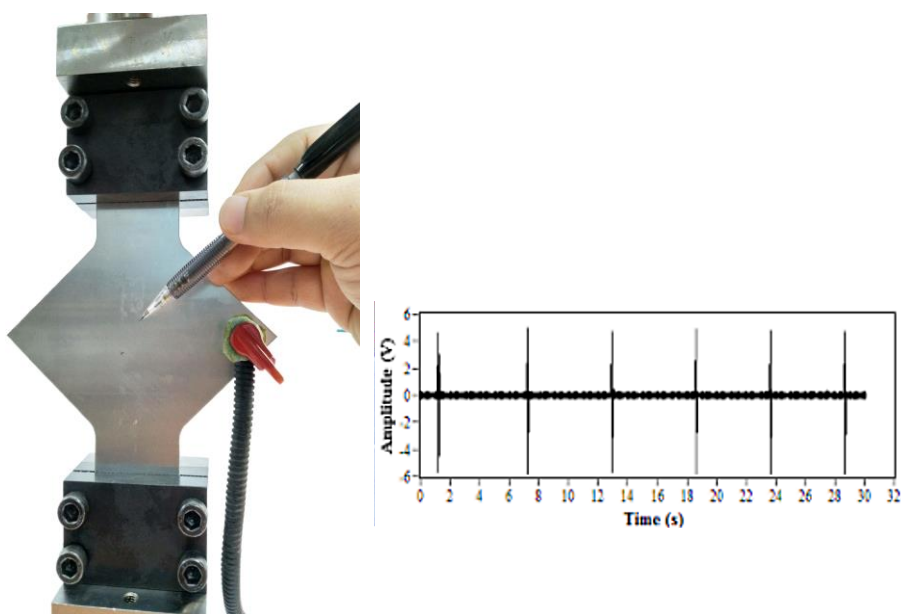
ภาพที่ 3-18 ชุดอุปกรณ์ทดสอบอะคูสติกอีมิชชัน (Acoustic Emission)



ภาพที่ 3-19 ตัวอย่างหน้าจอโปรแกรม Labview ใช้เก็บค่าสัญญาณอะคูสติกอีมีชัน

3.8.3 การตรวจสอบสัญญาณอะคูสติกอีมีชัน

จำเป็นต้องตรวจสอบความสมบูรณ์ในการติดตั้งโดยการกดหักไส้ดินสอ เพื่อตรวจสอบสัญญาณทุกครั้ง ให้สัญญาณอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันทุกชิ้นก่อนเริ่มการทดสอบ จำลองสัญญาณใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณที่ 60 เดซิเบล แสดงดังภาพที่ 3-20 โดยชิ้นงานทดสอบจะถูกดึงด้วยความเร็วคงที่ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที นำผลที่ได้จากการทดสอบและสัญญาณอะคูสติกอีมีชัน ที่เก็บได้มาพล็อตกราฟ เพื่อตรวจสอบว่าสัญญาณที่ส่งมาจากชิ้นทดสอบตรงกับจังหวะที่ชิ้นทดสอบเริ่มเกิดการโก่งหรือไม่ โดยใช้โปรแกรม LabView ในการพล็อตกราฟ



ภาพที่ 3-20 การทดสอบการหักไส้ดินสอบนชิ้นงานตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายอะคูสติกอีมีสชันในระหว่างการทดสอบ ซึ่งได้ทำการตรวจสอบในสองกระบวนการทดสอบ กระบวนการแรก คือทดสอบในทิศทางแนวรีด (Rolling Direction) กระบวนการที่สอง ทดสอบในทิศทางขวางแนวรีด (Transverse Direction) โดยจะศึกษาอิทธิพลของแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีดของวัสดุ ที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูป เพื่อตรวจสอบสัญญาณการโก่งที่เกิดขึ้นในขณะทดสอบการโก่งโยยิดะ ซึ่งได้ทำการทดสอบ ทั้งหมด 6 แบบ ซึ่งมีรัศมีความโค้งของปีก และความยาวที่แตกต่างกัน ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ และประเมินผลลักษณะของสัญญาณต่างๆแสดงดังภาพที่ 3-21

1. AE Maximum Amplitude (AE_{Max}) คือระดับสูงสุดของสัญญาณแอมพลิจูด แสดงถึงความสัมพันธ์กับพลังงานในเนื้อวัสดุที่เกิดขึ้นและถูกปล่อยออกมาสูงสุดในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป

2. Root Mean Squared (AE_{RMS}) คือค่าเฉลี่ยของสัญญาณแอมพลิจูด แสดงถึงความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น การเสียรูปของวัสดุ (Material Deformation)

3. Burst Energy (AE_{Energy}) คือระดับพลังงานของสัญญาณ ในแต่ละช่วงเวลา แสดงถึงความสัมพันธ์กับพลังงานที่ถูกปล่อยออกมาในเนื้อวัสดุที่เกิดขึ้น ระหว่างกระบวนการทดสอบ

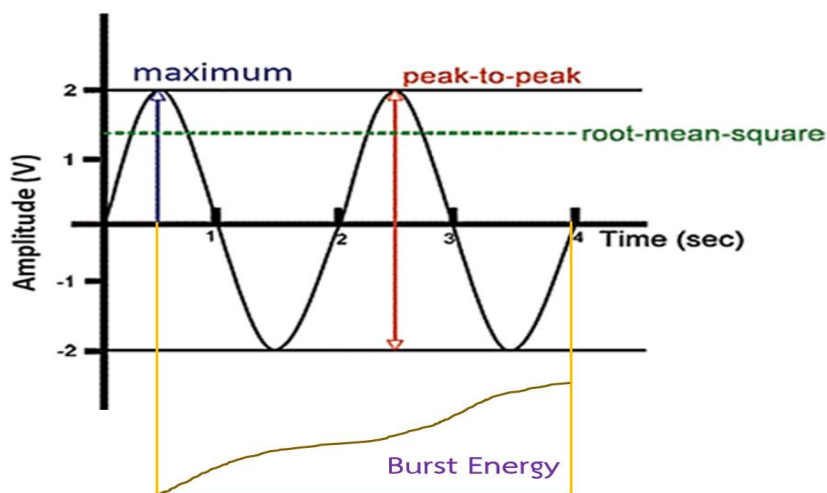
เป็นพลังงานของชิ้นงานที่ปล่อยออกมาระหว่างการเปลี่ยนรูปในรูปของสัญญาณที่ได้รับ ซึ่งพลังงานที่ได้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างขึ้นทดสอบในแต่ละแบบ และมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับค่า AE_{Max} ไปในทิศทางเดียว พลังงานของสัญญาณนั้นเป็นส่วนกำลังสองของสัญญาณ สามารถหาผลลัพธ์ได้จากสมการที่ 3.1

$$E_i = \int_{t_0}^{t_1} V_i(t)^2 dt \quad (3.1)$$

โดยที่ $V(t)$ คือ ค่าสัญญาณที่ได้รับในช่วงเวลานั้น i

t_0 คือ เวลาเริ่มต้นของสัญญาณที่ได้รับ

t_1 คือ เวลาสุดท้ายของสัญญาณที่ได้รับ



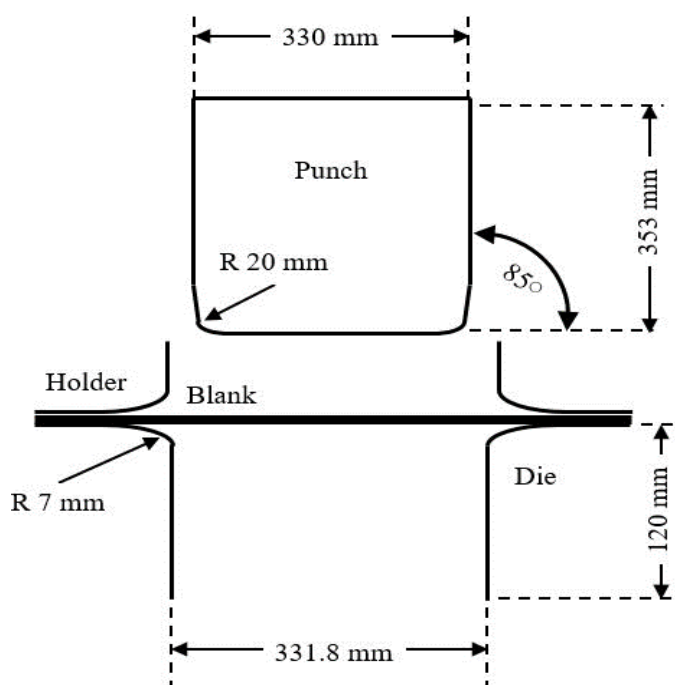
ภาพที่ 3-21 ลักษณะของสัญญาณต่างๆ

ทำการวิเคราะห์ระดับสัญญาณที่ได้จากอะคูสติกอิมิตชัน โดยใช้ฟีทเจอร์ (Feature) ของสัญญาณ คือ ระดับค่าสูงสุดของสัญญาณแอมพลิจูด (Max Amplitude) ค่าเฉลี่ยของสัญญาณแอมพลิจูด (Root Mean Square) และระดับค่าพลังงานของสัญญาณ (Burst Energy) เพื่อศึกษาแนวโน้มและเปรียบเทียบผลคุณลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้น

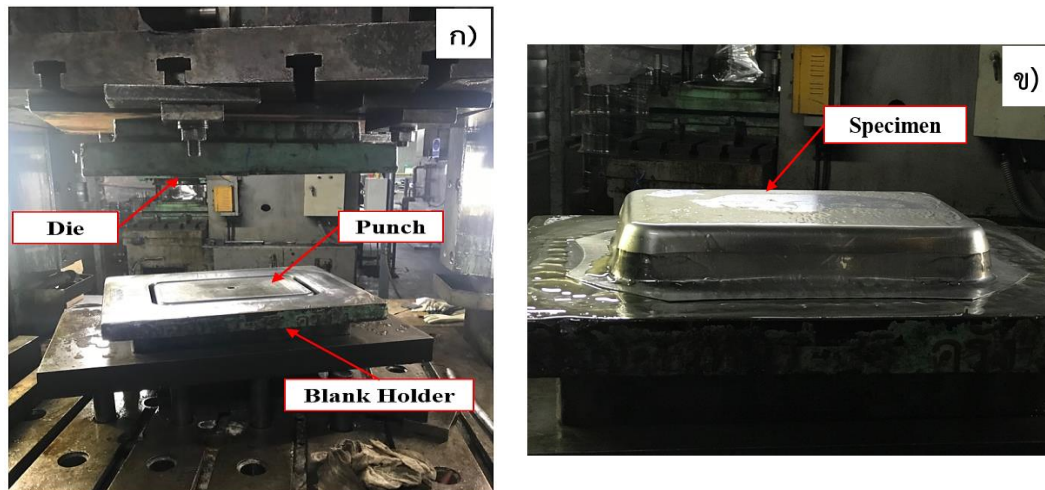
3.9 การตรวจพิสูจน์การนำไปใช้งานของเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น กับชิ้นงานขึ้นรูปภาดาอาหารสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องครัว

3.9.1 การทดสอบการกดขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangulr)

จากภาคอุตสาหกรรมเครื่องครัว โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ไทยสแตนเลสสตีล จำกัด โดยใช้ชิ้นงานผลิตภัณฑ์เป็นภาดาอาหาร (Cookware) ดังภาพที่ 3-23 ด้วยเครื่องไฮดรอลิกเพรส (Hydraulic Pressing Machine, KOJIMA PDH250-160) ขนาด 100 ตัน ก) ชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูป แสดงในภาพที่ 3-23 ข) แรงจับยึดชิ้นงานคงที่ ที่ 7000 นิวตัน ทั้ง 2 แนวรีด และใช้น้ำมันหล่อลื่นเกรด SAE 40 แบบชุดแม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน และพื้นที่ แสดงในภาพที่ 3-22



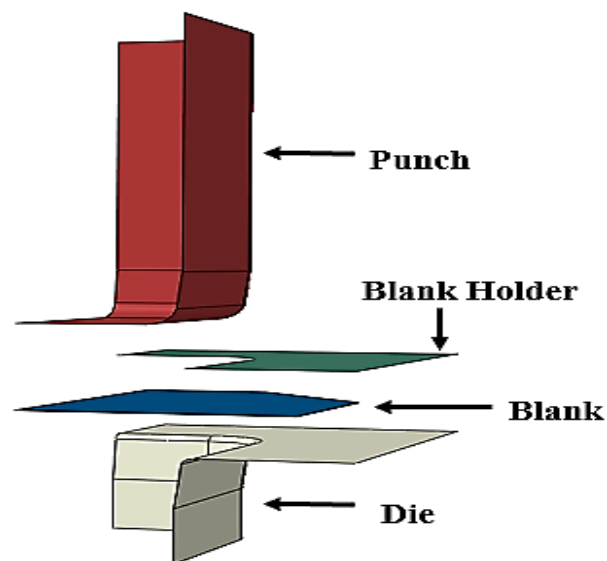
ภาพที่ 3-22 ขนาดชุดแม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานภาดาอาหาร



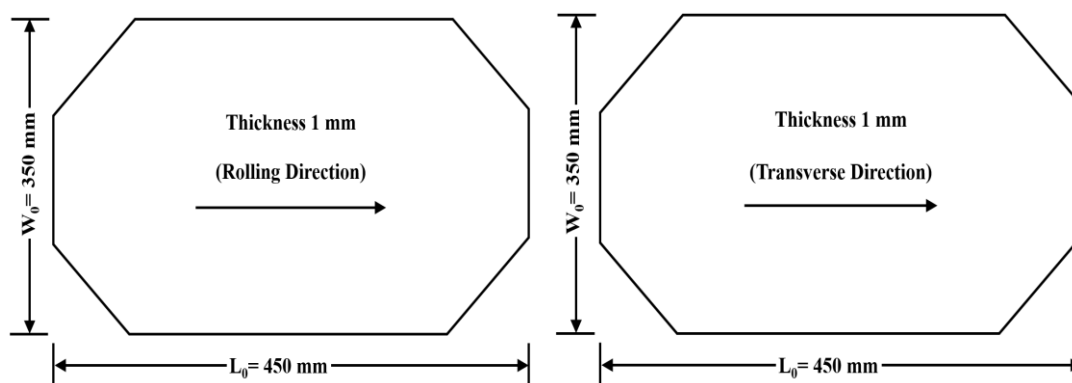
ภาพที่ 3-23 ก) แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน ข) ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

3.9.2 สร้างแบบจำลองการกดขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าจากภาคอุตสาหกรรม

ชิ้นงานทั้ง 2 แบบดังแสดงในภาพที่ 3-24 และทดสอบในแนวนรีด และขวางแนวนรีด ในภาพที่ 3-24 เพื่อตรวจสอบการเกิดการโก่ง หรือการย่น ที่ผนังชิ้นงานขึ้นรูป ขนาดการโก่ง ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรอง ของบริเวณที่เกิดการโก่ง หรือการย่น ที่ผนังถาดอาหาร ในขณะที่เริ่มเกิดขนาดชุดแม่พิมพ์ของการทดสอบชิ้นงานผลิตภัณฑ์เป็นถาดอาหาร (Cookware) แสดงในภาคผนวก ฉ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ABAQUS 2017

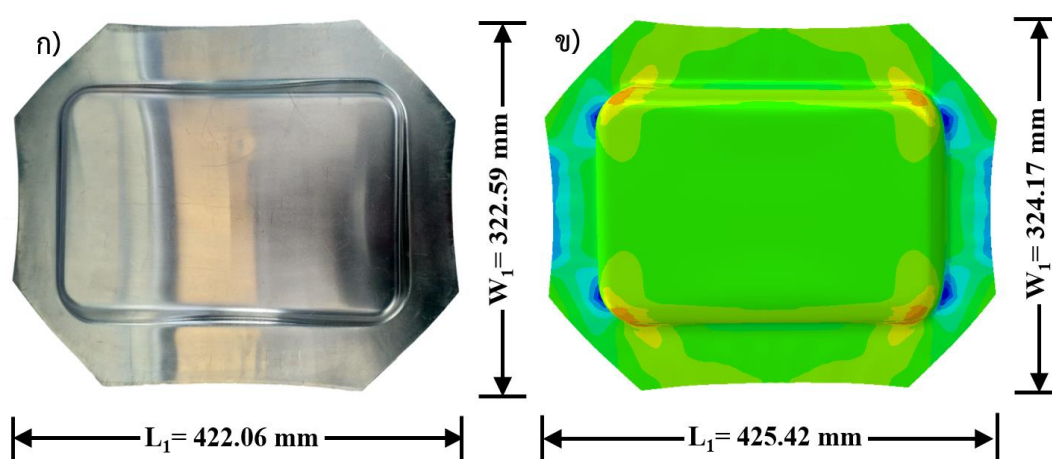


ภาพที่ 3-24 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงาน ขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และขนาดของชิ้นงานทั้ง 2 แบบ



ภาพที่ 3-25 ขนาดชิ้นทดสอบ (Blank Size) ในแนวรีด และขวางแนวรีด

ภาพที่ 3-26 การเปรียบเทียบชิ้นงานทดสอบในภาพที่ 3-26 ก) และการจำลองการทดสอบในภาพที่ 3-26 ข) เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการกดขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangulr) ก่อนดำเนินการเก็บข้อมูล เส้นแนวความเครียด บริเวณผนังชิ้นงาน



ภาพที่ 3-26 การวัดขนาดชิ้นงานทดสอบ กับผลการจำลองการทดสอบของการกดขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

3.9.3 นำค่าสมบัติทางกลของวัสดุอลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม AA5052-O

ข้อมูลเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ค่ายังมอดูลัส ผ่านสมการอธิบายพฤติกรรมทำให้แข็งด้วยความเครียดของ Swift Hardening Law และค่าตัวแปรแสดงสมบัติแอนไอโซทรอปิก ที่ผ่านการคำนวณตามเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R และ Hill'48-S มากำหนดในแบบจำลองที่อธิบายพฤติกรรมทำให้แข็งด้วยความเครียด และการเปลี่ยนรูปที่เท่ากันในทุกทิศทางแอนไอโซทรอปิกบนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R และ Hill'48-S มากำหนดลักษณะสภาพสมบัติวัสดุ ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งนำค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์ จากตารางที่ 3-1 3-2 3-3 และ 3-4 นำไปใส่เพื่อให้โปรแกรมวิเคราะห์ผลลัพธ์ ของแต่ละเกณฑ์การครากแอนไอโซ

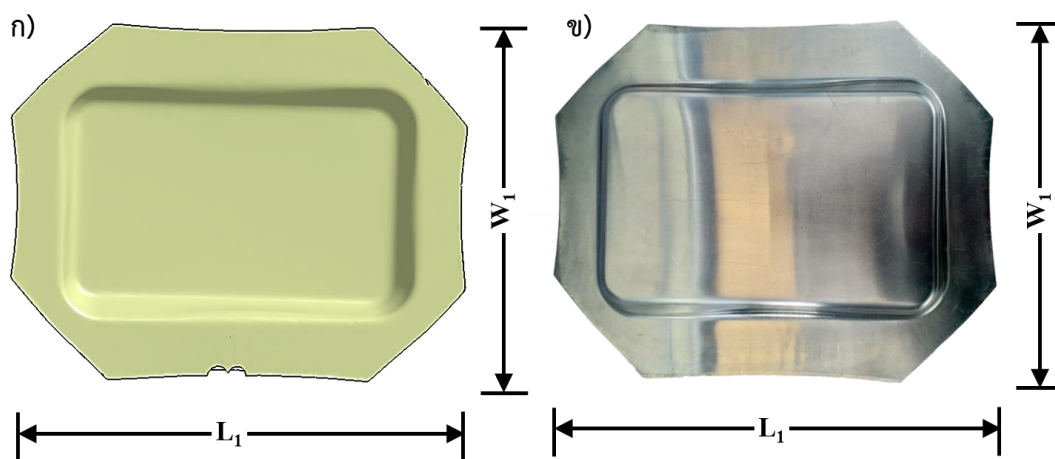
ทอปปิก กำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.75 ถูกนำไปใช้ระหว่างคู่ผิวสัมผัส พันช์ (Punch) และตาย (Die) ถูกกำหนดให้เป็นพื้นผิวแข็งในการวิเคราะห์ ชนิดเอลิเมนต์เป็นชนิด C3D8R

3.8.4 ดำเนินการวัดขนาดของชิ้นส่วนจากภาคอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ถาดอาหาร

ดำเนินการวัดขนาดของทั้ง 2 แบบ และในทิศทางตามแนวรีด และขวางทิศทางแนวรีด โดยใช้เครื่องวัดขนาดในระบบ 3 มิติด้วยเลเซอร์



ภาพที่ 3-27 เครื่องวัดขนาดในระบบเลเซอร์ 3 มิติ (3D Laser Scanner)

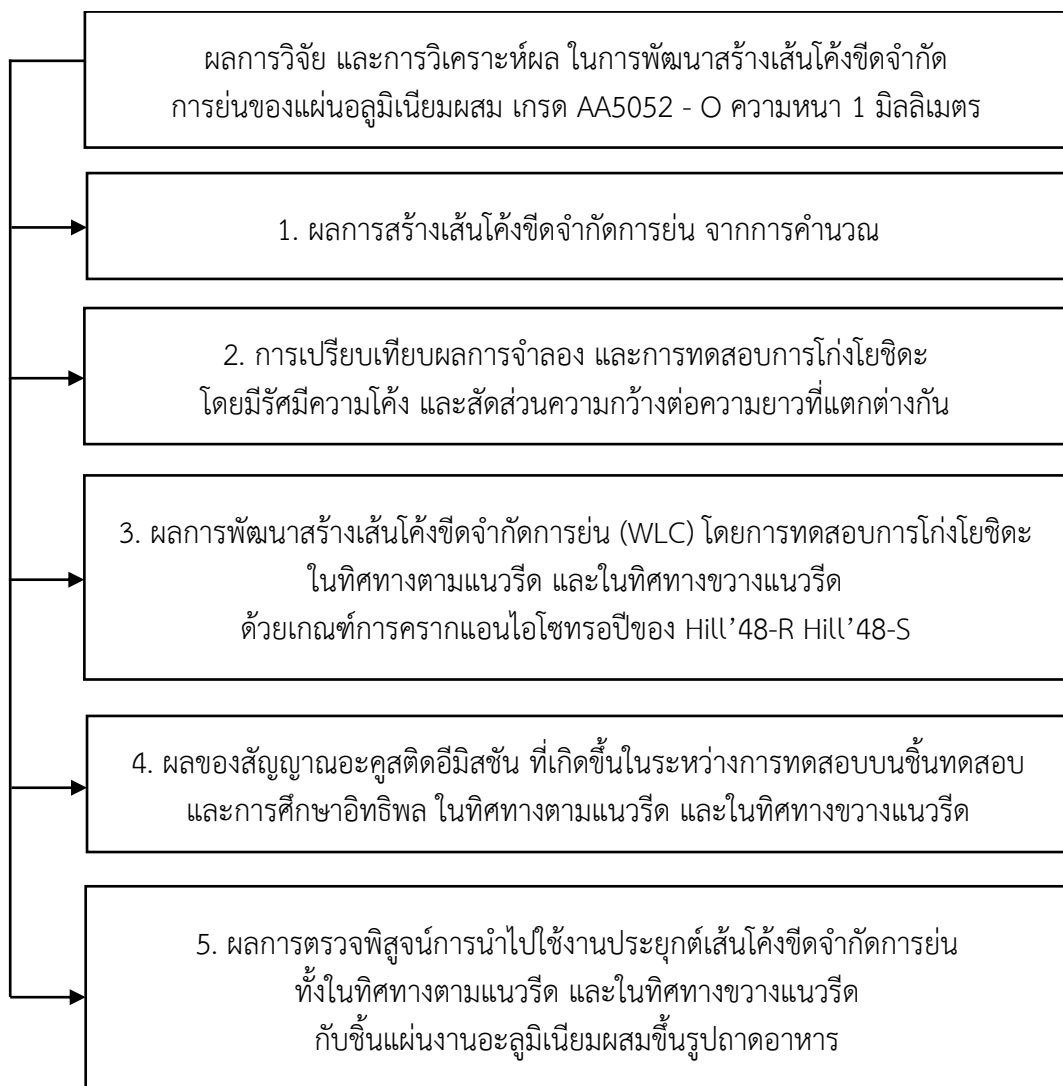


ภาพที่ 3-28 ก.) การเปรียบเทียบชิ้นงานที่วัดขนาดในระบบ 3 มิติ และข.) ชิ้นส่วนจากภาคอุตสาหกรรม

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัย และการวิเคราะห์ผล ในการพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น แผ่นอลูมิเนียมผสม เกรด AA5052 - O ความหนา 1 มิลลิเมตร ตรวจพิสูจน์การนำไปใช้งานได้ ของเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ทั้งในแนวรีด และขวางแนวรีด กับชิ้นส่วนขึ้นรูปภาดาอาหารของผลิตภัณฑ์ เครื่องครัว อีกทั้งตรวจสอบจังหวะช่วงเวลาเริ่มเกิดการโก่งของชิ้นงาน ด้วยเทคนิคอะคูสติอิมิสชัน ในระหว่างการทดสอบ โดยสามารถแบ่งเป็นผลลัพธ์ของงานวิจัย 6 ส่วนหลัก ๆ ดังแสดงในภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 แผนผังของผลลัพธ์การวิจัย

4.1 การสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นจากการคำนวณ [43]

ผลลัพธ์สามารถแสดงถึงข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับกระบวนการสร้างชุดแม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูป เพื่อแก้ปัญหาในกระบวนการผลิต เพื่อแก้ไขชุดแม่พิมพ์ก่อนการขึ้นรูปจริง ลดปัญหาการลองผิดลองถูก (Try Out and Error) และปรับปรุงการทำงาน มีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาคุณภาพชิ้นงาน โดยมีเกณฑ์ความเสียหายที่เป็นมาตรฐาน ที่แสดงถึงขอบเขตความสามารถในการขึ้นรูปได้ ในที่นี้จะแสดงวิธีการคำนวณหาเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ที่แสดงขีดจำกัดในการเริ่มเกิดการย่นบนชิ้นงานขึ้นรูปที่ขีดจำกัดนี้คำนวณได้จากสูตรในสมการที่ 4-1 ผลลัพธ์ค่าความเครียดจริงค่ารอง φ_w (Minor True Strain) ที่ต้องนำไปบอกค่าความเครียดจริงค่ารองที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งเป็นค่าข้อมูลที่อยู่บนเส้นแสดงสัดส่วนความเครียด (Strain Ratio , -0.5) ในที่นี้จะยกตัวอย่างเกณฑ์เส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ที่คาดว่าจะเกิดการย่นบนชิ้นงาน ซึ่งจะใช้เกณฑ์จากสมการที่ 4-1

$$\varphi_w = \max \left[- \left(\varphi^2 \frac{\bar{R}}{1 + \bar{R}} \right), 0 \right] \quad (4-1)$$

โดยที่ φ_w คือ ความเครียดส่วนเพิ่มจากความเครียดจริงค่ารอง บนเส้นแสดงสัดส่วนความเครียด (-0.5)

คือ ความเครียดหลัก (Major Strain) จากความเครียดแรงดึงแกนเดียว

ε_2 คือ ความเครียดรอง (Minor Strain) จากความเครียดแรงดึงแกนเดียว

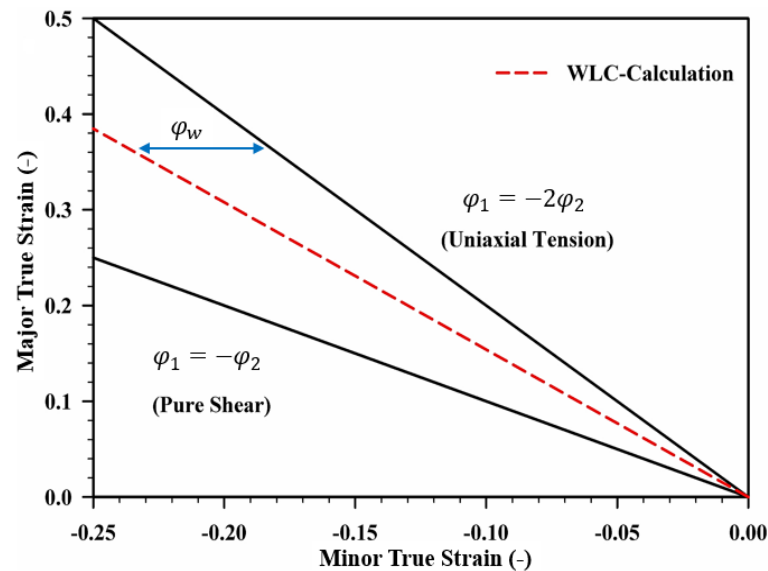
$\bar{R}$ คือ ค่าเฉลี่ยแอนไอโซทรอปีในแนวระนาบ (Average Normal Plastic Anisotropy)

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (4-2)$$

โดยที่ R_0 คือ สัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปี ในระนาบที่ 0 องศา จากแนวรีด

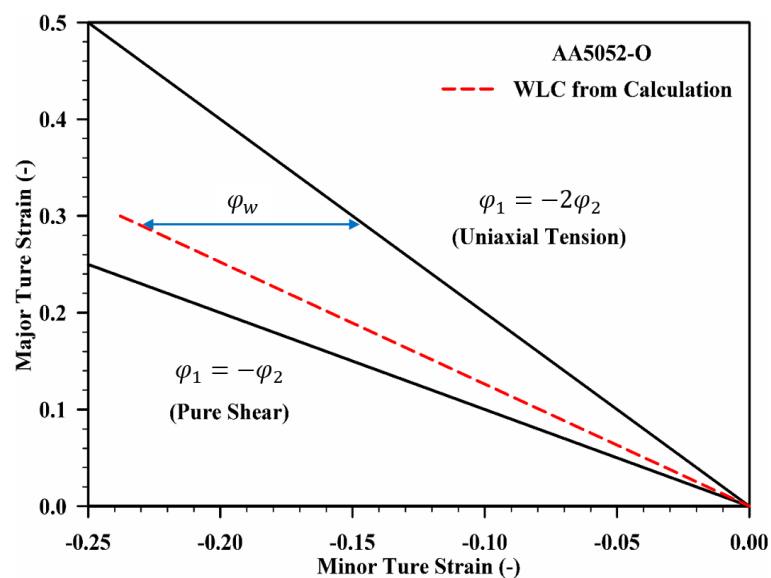
R_{45} คือ สัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปี ในระนาบที่ 45 องศา จากแนวรีด

R_{90} คือ สัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปีในระนาบที่ 90 องศา จากแนวรีด



ภาพที่ 4-2 เส้นโค้งขีดจำกัดการย่นจากการคำนวณ

ค่าความเครียดจริงค่ารอง φ_w ที่ต้องนำไปบวก กับค่าความเครียดจริงค่ารอง φ_2 ที่เป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณข้างต้น เป็นค่าความเครียดที่มาจากข้อมูลของเส้นสัดส่วนความเครียด (-0.5) ในสภาพการดึงแกนเดียวจาก สูตรสมการที่ 4-1 และ 4-2 คำนวณตามค่าตัวแปรที่ต้องการของสูตรสามารถคำนวณหาเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น วัสดุอลูมิเนียมผสม เกรด AA5052 - O ความหนา 1 มิลลิเมตร โดยค่าความเครียดจริง φ_w เป็นตัวแปรส่วนเพิ่มเพื่อเป็นการขยับเส้นขีดจำกัดการย่น ให้ห่างจากสัดส่วนแรงดึงแกนเดียว เป็นเส้นที่แสดงขีดจำกัดการขึ้นรูป ที่ถ้ามีการขึ้นรูปมากกว่าเส้นนี้วัสดุขึ้นรูปเริ่มเกิดการย่น แสดงในภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 แผนภาพแสดงเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นของอะลูมิเนียมผสม เกรด AA5052 - O

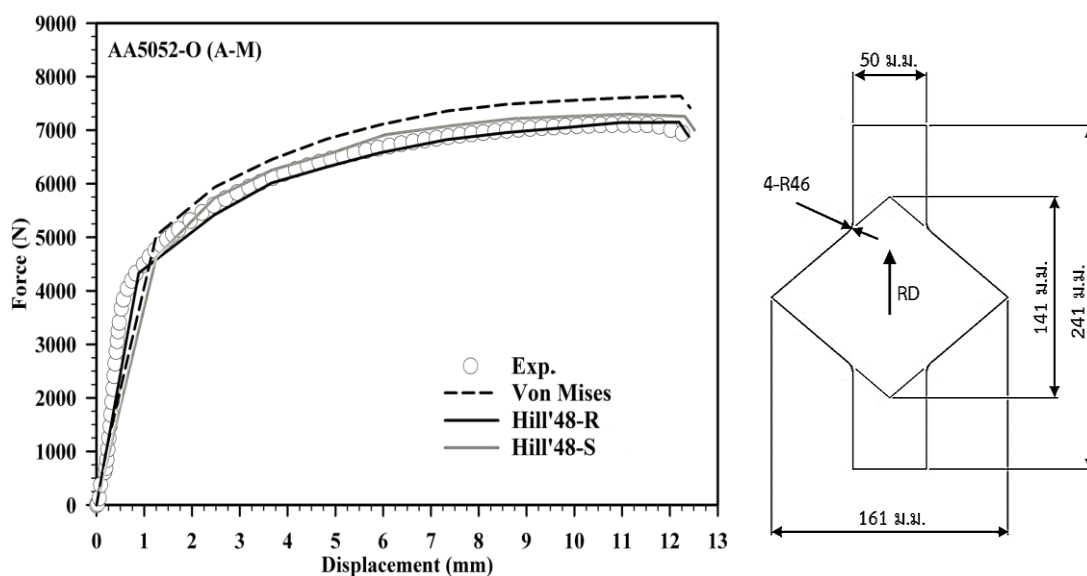
4.2 การเปรียบเทียบแบบจำลอง และการทดสอบการโก่งโยชิตะ

การพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ถูกพัฒนาสร้างจากการทดสอบการโก่งโยชิตะ ทั้งทำการทดลองจริง และจำลองการทดสอบการโก่ง ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ เริ่มต้นด้วยการทำการทดสอบการโก่งโยชิตะ โดยขึ้นการทดสอบมีรัศมีความโค้ง และสัดส่วนความกว้างต่อความยาวที่แตกต่างกัน ตามตารางที่ 3-1 เริ่มจากการนำอะลูมิเนียมผสมแผ่น เกรด AA5052-O ความหนา 1 มิลลิเมตร มาทำการตัดด้วยพลังน้ำแรงดันสูง (Water Jet Cutting) ให้ได้ขนาดตามที่ต้องการทั้งหมด 6 รูปแบบ ในแนวรีด และขวางแนวรีด พฤติกรรมการทำให้แข็งด้วยความเครียดของ Swift Hardening Law และค่าตัวแปรแสดงสมบัติแอนไอโซทรอปิก ที่ผ่านการคำนวณตามเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิก ของ Hill'48-R Hill'48-S มากำหนดในแบบจำลองที่อธิบายพฤติกรรมการทำให้แข็งด้วยความเครียด และการเปลี่ยนรูปที่เท่ากันในทุกทิศทางแอนไอโซทรอปิก บนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิก ของ Hill'48-R และ Hill'48-S มากำหนดลักษณะสภาพสมบัติวัสดุ ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งนำค่าค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์ จากตารางที่ 3-1 3-2 3-3 และ 3-4 นำไปใส่เพื่อให้โปรแกรมวิเคราะห์ผลลัพธ์ ของแต่ละเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิก เก็บค่าแรง (Force) และระยะดิ่งของขึ้นทดสอบ (Displacement) จนกระทั่งเกิดการฉีกขาดเสียหาย เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบ ของชิ้นงานทดสอบ ยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยตรวจสอบด้วยแรง และระยะการดิ่ง ขั้นตอนต่อมาดำเนินการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เงื่อนไขเดียวกับการทดลอง โดยเลือกบริเวณวิกฤติ (Evaluation Area) ตามที่ระบุเอาไว้ในบทที่ 3 เป็นบริเวณที่เส้นค่าความเครียดที่ถูกกำหนดให้เป็นค่าความเครียดในจังหวะเริ่มเกิดการย่น

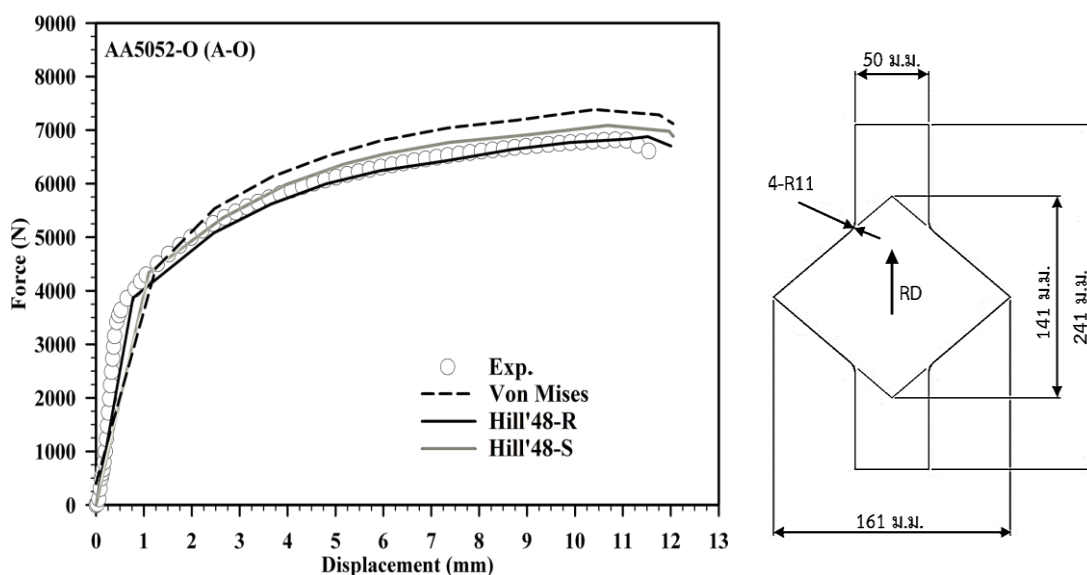
4.2.1 การทดสอบการโก่งโยชิตะ ขึ้นทดสอบในทิศทางตามแนวรีด

เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการย่น และพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น (WLC) ในแนวรีด ศึกษาให้ครอบคลุมเกี่ยวกับการเกิดการย่น หรือโก่งบนชิ้นงานภาคอุตสาหกรรม หรือชิ้นงานในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเส้นแนวรีดจะขนานกับแนวขึ้นทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 4-4 ถึง 4-9 ซึ่งแสดงแผนภาพเส้นโค้งแรง และระยะยืดดิ่งขึ้นทดสอบของการทดสอบการโก่งโยชิตะ เทียบกับการจำลองเชิงตัวเลข ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่แสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปไม่เท่ากันทุกทิศทางของ Hill'48-R กับการเปลี่ยนรูปเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) ของ Von Mises โดยขึ้นทดสอบรูปร่างมีรัศมีที่กว้าง แสดงในภาพที่ 4-4

ภาพที่ 4-4 และ 4-5 เป็นการเปรียบเทียบแรง และระยะการดิ่ง ของการทดสอบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยเกณฑ์การครากไอโซทรอปิกของ Von Mises การเกณฑ์ครากแอนไอโซทรอปิก Hill'48-R และ Hill'48-S เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ก่อนเริ่มการเก็บผลลัพธ์จากไฟไนต์เอลิเมนต์

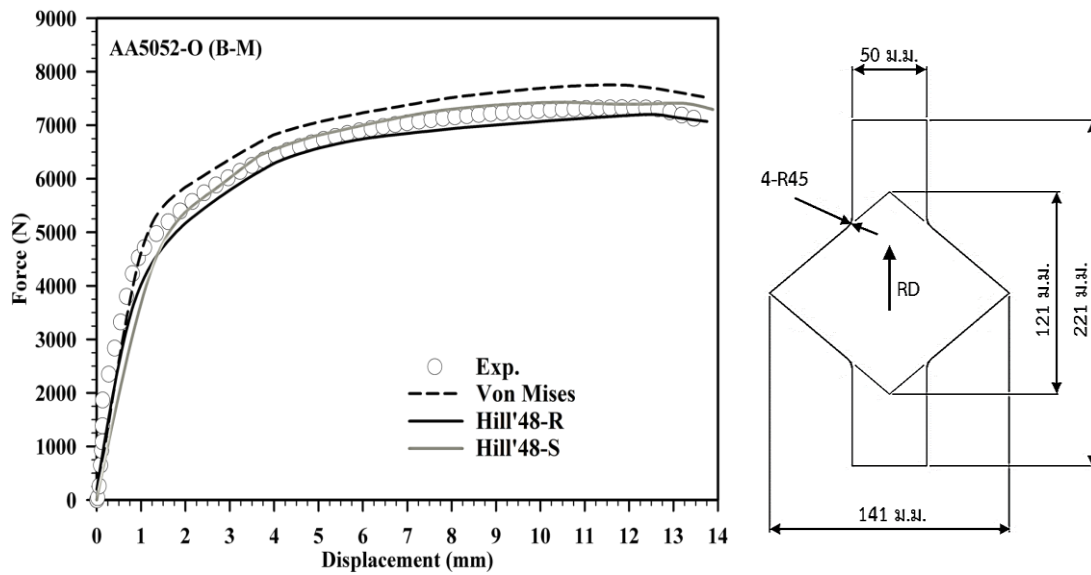


ภาพที่ 4-4 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชิ้นทดสอบจากการทดลอง ที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่าง ชิ้นทดสอบ A-M ในทิศทางตามแนวรีด

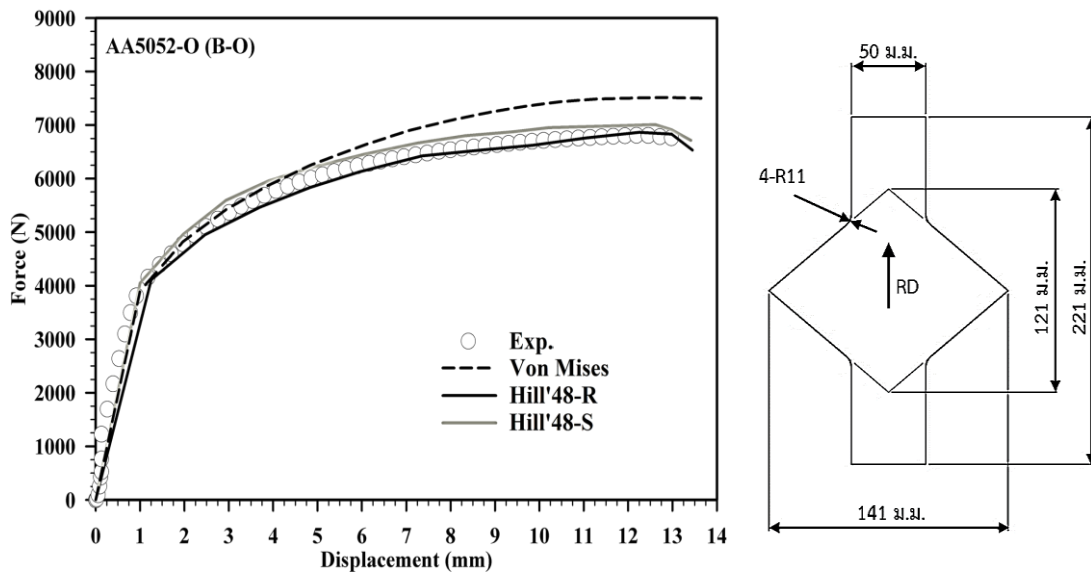


ภาพที่ 4-5 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชิ้นทดสอบจากการทดลอง ที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่าง ชิ้นทดสอบ A-O ในทิศทางตามแนวรีด

ชิ้นงานทดสอบของทุกขนาด จะทดสอบในแนวทิศทางการรีด ซึ่งแนวการรีดจะขนานกับชิ้นทดสอบ และในแนวการดึง เส้นโค้งแรงและระยะการดึงของชิ้นทดสอบการโก่งจากการทดสอบ จะถูกนำมาเปรียบเทียบ กับผลลัพธ์จากจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยเกณฑ์การครากไอโซทรอปีของ Von Mises การเกณฑ์ครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R และ Hill'48-S กับชิ้นทดสอบ เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 4-6 และ 4-7



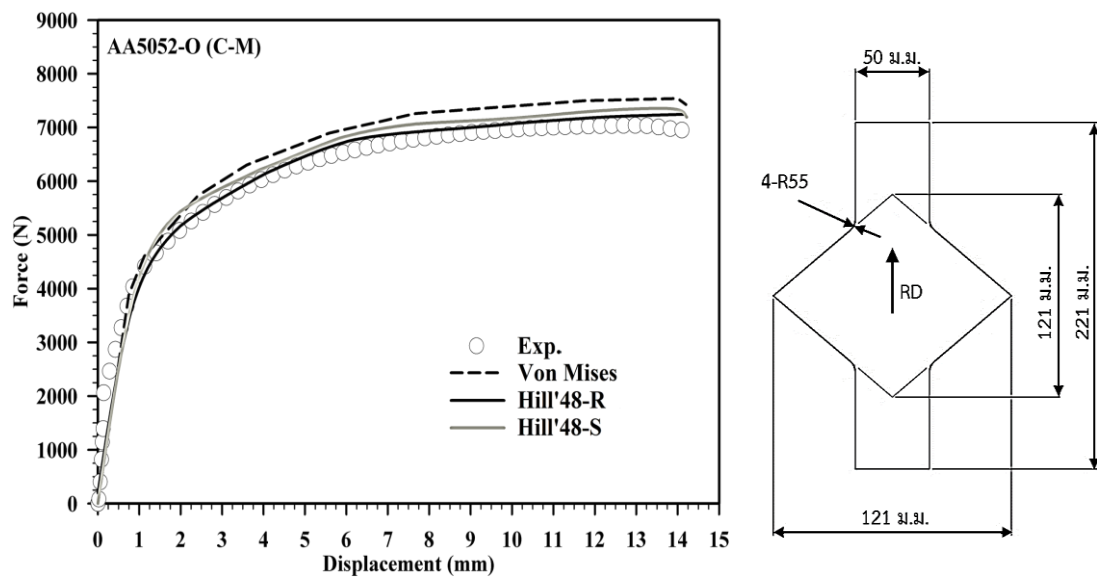
ภาพที่ 4-6 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชิ้นทดสอบจากการทดลอง
ที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่าง ชิ้นทดสอบ B-M ในทิศทางตามแนวรีด



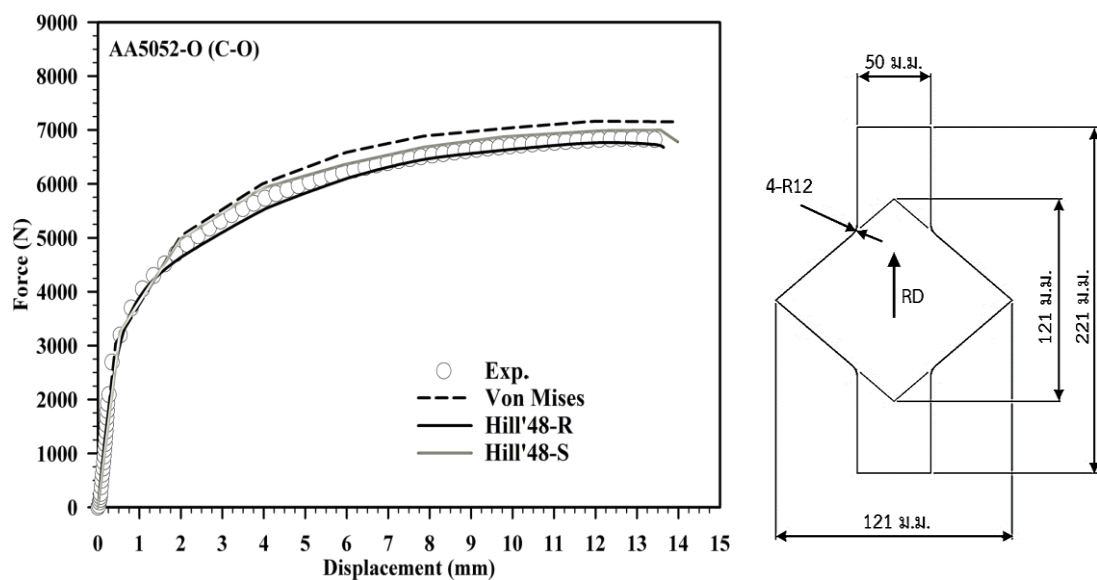
ภาพที่ 4-7 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชิ้นทดสอบจากการทดลอง
ที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่าง ชิ้นทดสอบ B-O ในทิศทางตามแนวรีด

แผนภาพเส้นโค้งแรงกับระยะการดึง ที่ได้จากการทดสอบ และด้วยการจำลองมีทั้งที่สอดคล้องและแตกต่าง คือ แผนภาพเส้นโค้งแรงกับระยะดึง จากการจำลองโดยมีเกณฑ์การครากของ Von Mises มีความแตกต่าง กับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง ในทางตรงกันข้ามเส้นโค้งแรงกับระยะการดึงของการจำลอง ด้วยพฤติกรรมแอนไอโซทรอปี้ ของ Hill'48 มีความสอดคล้องกับ

การทดสอบ โดยเฉพาะ Hill'48-R จะใกล้เคียงกับการทดสอบจริงมากกว่า Hill'48-S แสดงในภาพที่ 4-8 และภาพที่ 4-9



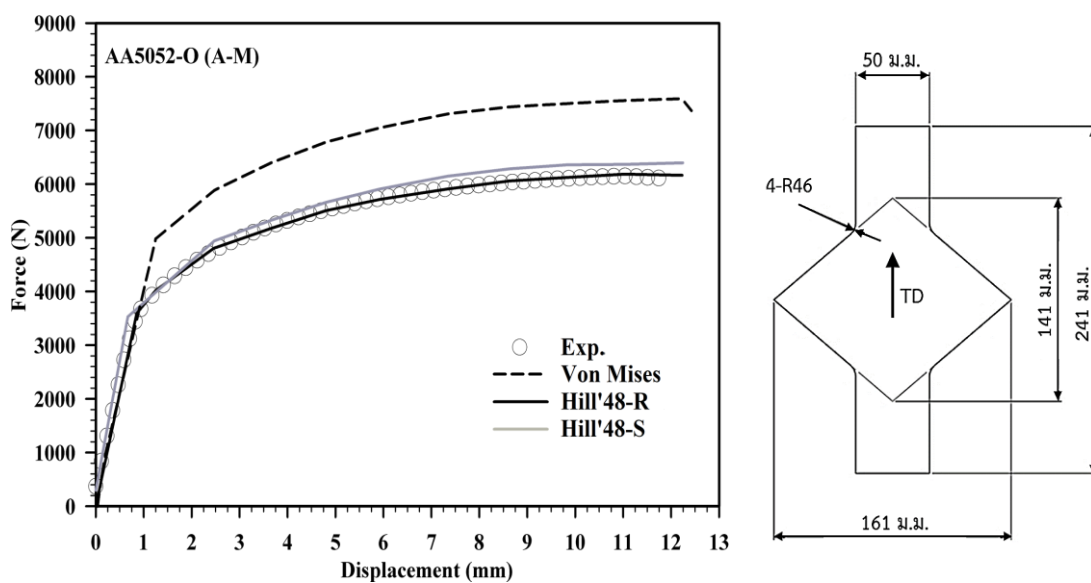
ภาพที่ 4-8 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดิ่งของชิ้นทดสอบจากการทดลอง ที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่างกัน ชิ้นทดสอบ C-M ในทิศทางตามแนวรีด



ภาพที่ 4-9 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดิ่งของชิ้นทดสอบจากการทดลอง ที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่างกัน ชิ้นทดสอบ C-O ในทิศทางตามแนวรีด

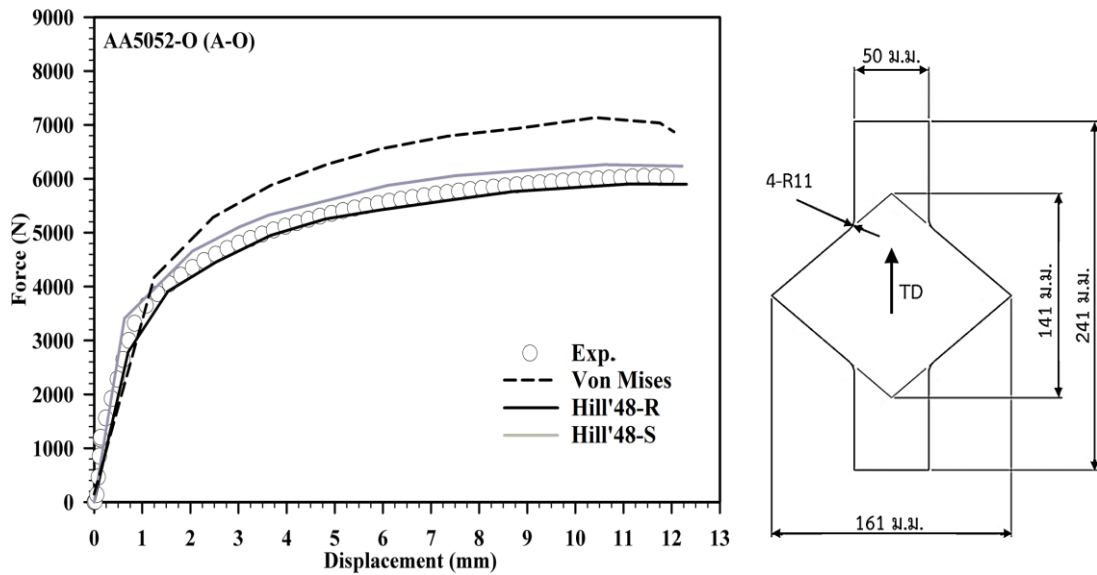
4.2.2 การทดสอบชิ้นงานในทิศทางขวางแนวรีด (Transverse Direction)

การทดสอบการโก่งโยชิตะ ชิ้นทดสอบทิศทางขวางแนวรีด เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการย่นและพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น (WLC) ในแนวรีด ศึกษาให้ครอบคลุมเกี่ยวกับการเกิดการย่นหรือโก่งบนชิ้นงานภาคอุตสาหกรรม ซึ่งเส้นแนวรีดจะขวางกับแนวชิ้นทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 4-10 ถึง 4-15 ซึ่งแสดงแผนภาพเส้นโค้งแรง และระยะยืดดึงชิ้นทดสอบของการทดสอบการโก่งโยชิตะ เทียบกับการจำลองเชิงตัวเลข ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่แสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปไม่เท่ากันทุกทิศทางของ Hill'48-R กับ การเปลี่ยนรูปเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) ของ Von Mises โดยชิ้นทดสอบรูปร่างมีรัศมีที่กว้าง แสดงในภาพที่ 4-10



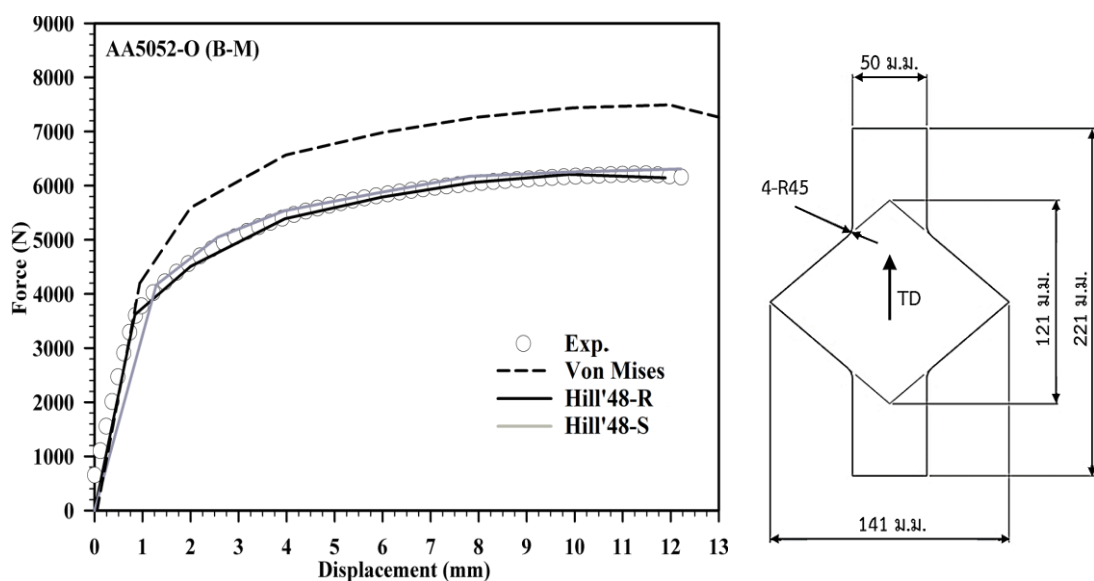
ภาพที่ 4-10 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชิ้นทดสอบจากการทดลอง ที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่าง ชิ้นทดสอบ A-M ในทิศทางตามขวางแนวรีด

ชิ้นงานทดสอบในชุด O ของทุกขนาด จะมีขนาดรัศมีที่เล็กกว่า ชิ้นทดสอบชุด M แต่ขนาดความกว้าง และความยาวยังคงเดิม ตรวจพิสูจน์ช่วงจังหวะการโก่งที่แตกต่างกัน ซึ่งในชุด O จะเกิดพฤติกรรมกรโก่ง เนื่องจากความเข้มข้นของความเค้น (Stress Concentration) ทำให้ความเค้นมุ่งมาที่บริเวณบนกลางชิ้นงานได้ไวกว่า แต่ชิ้นทดสอบรูปร่าง M มีรัศมีส่วนโค้งของชิ้นทดสอบมาก ทำให้ความเข้มข้นของความเค้นน้อยกว่า และความเค้นค่อนข้างกระจายเป็นบริเวณกว้างบนชิ้นงาน เมื่อเกิดการเกิดการโก่งจะการเป็นบริเวณกว้างด้วยเช่นกัน

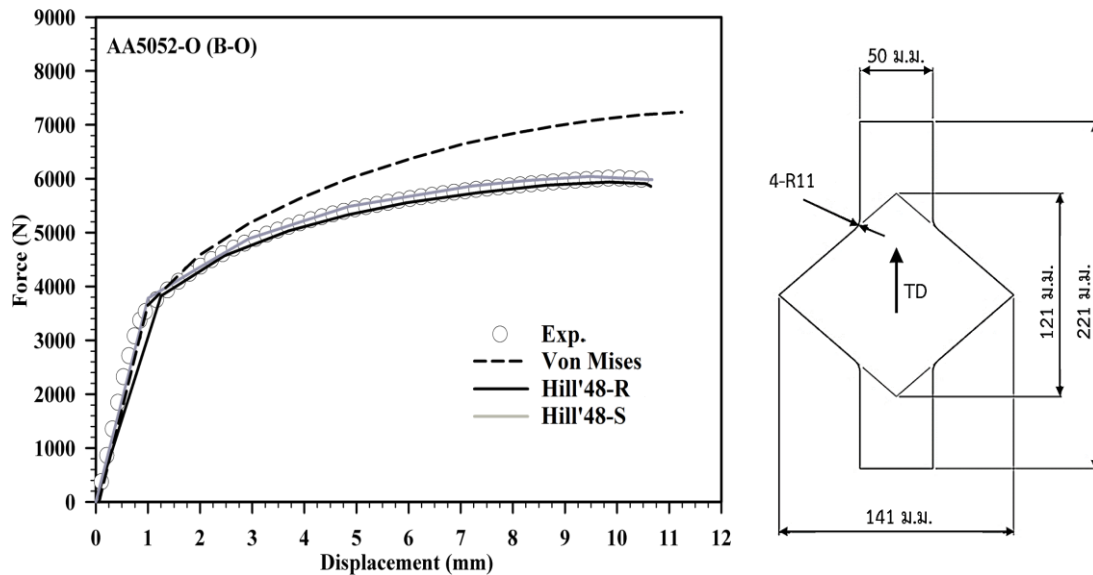


ภาพที่ 4-11 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชิ้นทดสอบจากการทดลอง
ที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่างกัน ชิ้นทดสอบ A-O ในทิศทางตามขวางแนวรีด

เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R จะกำหนดด้วยค่า r -Value เป็นตัวแปรสำคัญในการใช้กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และเป็นเกณฑ์การครากแบบแอนไอโซทรอปี (Anisotropy) ระบุพฤติกรรมสมบัติของวัสดุไม่เท่ากันในทุกทิศทาง ซึ่งใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของวัสดุ ในภาพที่ 4-12 และ 4-13 เป็นการเปรียบเทียบของแรง และระยะการดึง



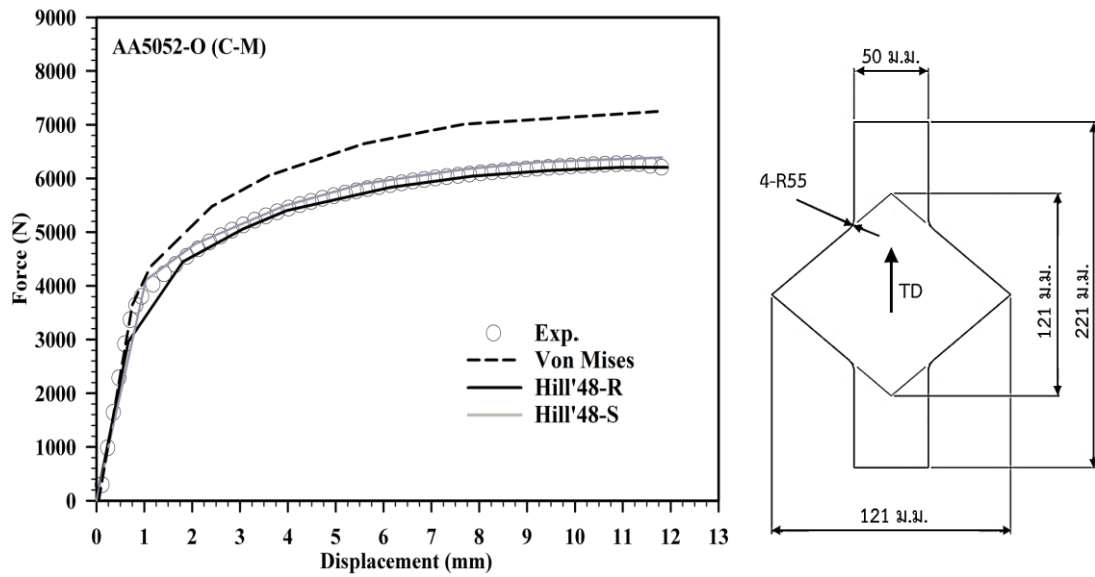
ภาพที่ 4-12 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชิ้นทดสอบจากการทดลอง
ที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่างกัน ชิ้นทดสอบ B-M ในทิศทางตามขวางแนวรีด



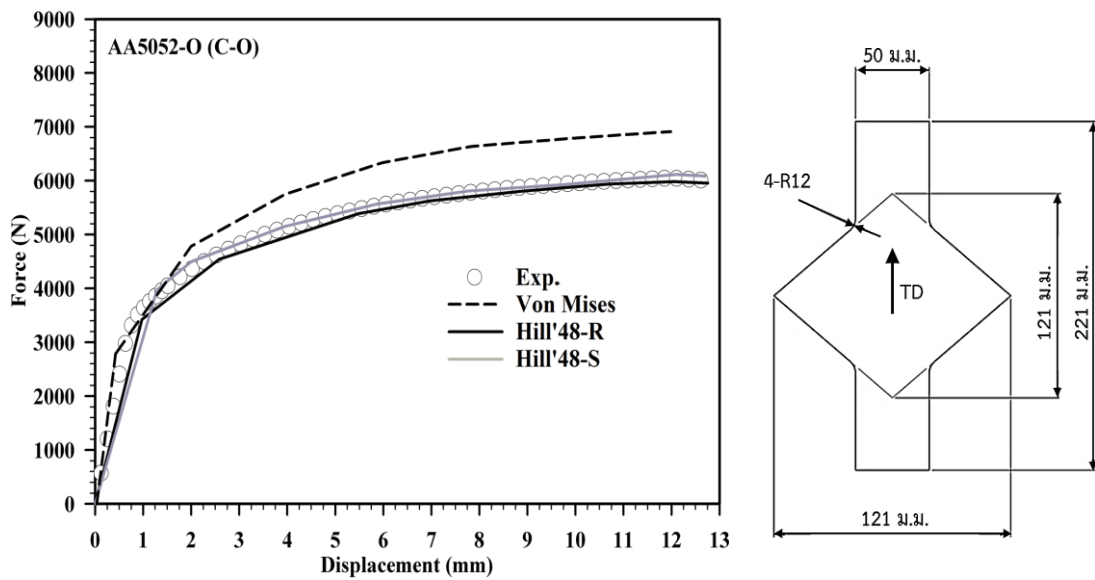
ภาพที่ 4-13 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดิ่งของชิ้นทดสอบจากการทดลอง
ที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่าง ชิ้นทดสอบ B-O ในทิศทางตามขวางแนวรีด

เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิก Hill'48-R ให้ผลการจำลองของเส้นโค้งแรงกับระยะการดิ่งที่สอดคล้องใกล้เคียงกับการทดสอบจริงมากกว่า Hill'48-S แสดงการทำนายพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปที่ไม่เท่ากันทุกทิศทางแบบแอนไอโซทรอปิก บนพื้นฐานการคำนวณค่าตัวแปรแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic Coefficient) โดยใช้ค่า r -Value ของวัสดุในทางกลับกัน Hill'48-S ใช้ค่าความเค้นคราก (Yield Stress) ที่มุม 0 องศา มุม 45 องศาและมุม 90 องศา จากแนวรีด ค่าความเค้นครากดิ่งเท่ากันสองแกน (Biaxial Yield Stress) ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์แอนไอโซทรอปิก สามารถแสดงผลลัพธ์ได้ในภาพที่ 4-10 ถึง 4-15 ซึ่งในการทำนายพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปที่ไม่เท่ากันทุกทิศทาง ค่า r -Value มีผลกระทบต่อการทำนายพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแอนไอโซทรอปิกได้มากกว่า ค่า Yield Stress เพราะผลของการเปลี่ยนรูปขึ้นแรกมากจากค่าความเครียด ซึ่งค่า r -Value มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนรูป หรือความเครียด อันดับต่อมาจึงเป็นแรง หรือความเค้น ดังนั้นถ้าทำนายพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปไม่เท่ากันทุกทิศทาง ค่า r -Value มีผลกระทบโดยตรงต่อความใกล้เคียง ในการทำนายผลพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปมากกว่าค่า Yield Stress

เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิก Hill'48-S จะกำหนดด้วยค่า Stress เป็นตัวแปรสำคัญในการใช้กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และเป็นเกณฑ์การครากแบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropy) ระบุพฤติกรรมสมบัติของวัสดุไม่เท่ากันในทุกทิศทาง ซึ่งใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของวัสดุ ในภาพที่ 4-14 และ 4-15 เป็นการเปรียบเทียบของแรง และระยะการดิ่ง



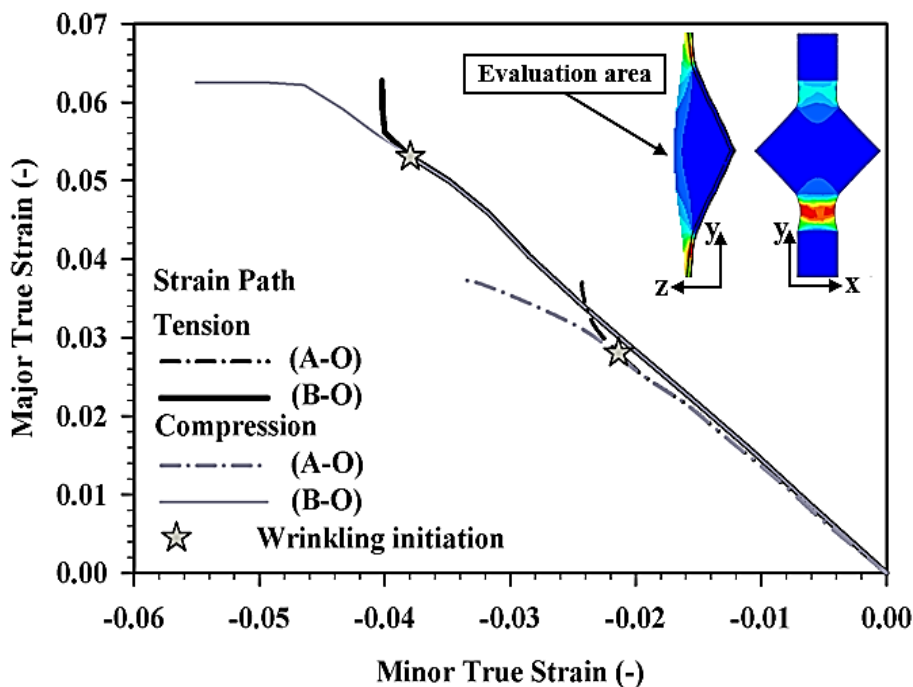
ภาพที่ 4-14 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชิ้นทดสอบจากการทดลอง
ที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่างกัน ชิ้นทดสอบ C-M ในทิศทางตามขวางแนวรีด



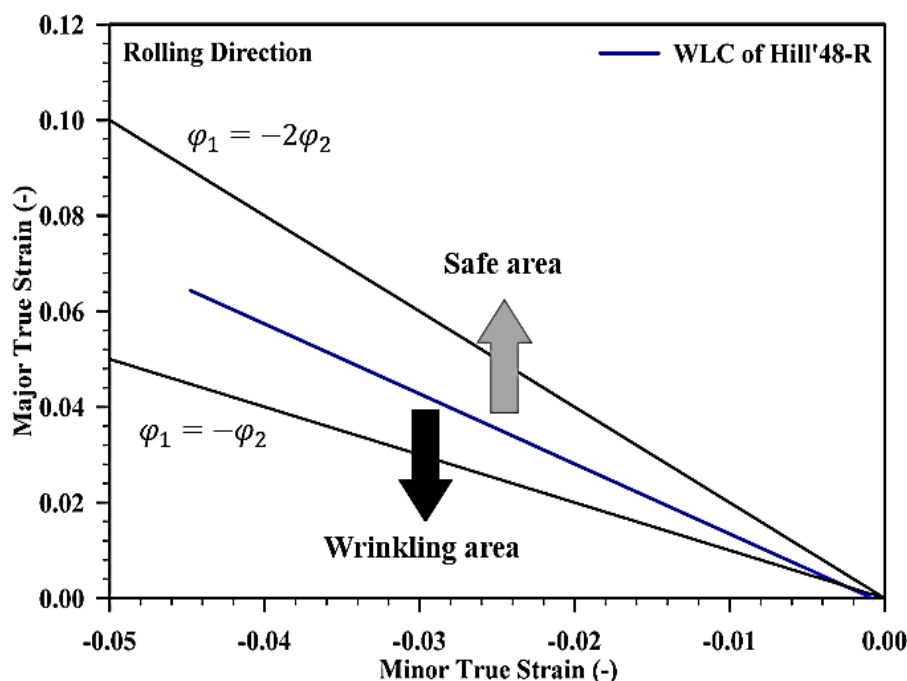
ภาพที่ 4-15 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง กับระยะการดึงของชิ้นทดสอบจากการทดลอง
ที่ใช้เกณฑ์การครากที่แตกต่างกัน ชิ้นทดสอบ C-O ในทิศทางตามขวางแนวรีด

4.3 ผลการพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น โดยการทดสอบการโก่งโยยิตะ

การพัฒนาเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นจากการทดลองการโก่งโยยิตะ แสดงถึงขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุ AA5052-O หนา 1 มิลลิเมตร ที่สามารถขึ้นรูปได้ดี และจุดเริ่มต้นการเริ่มเกิดการย่นโดยการทดสอบการดึงขึ้นงานในขนาดต่าง ๆ ตามแบบทั้ง 6 แบบ ในแนวรีด และขวางแนวรีด ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งต่อ 1 ขนาด นำผลลัพธ์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มาพล็อตร่วมกัน และนำมา Fitting แบบผ่านข้อมูลทุกจุด ด้วยสมการควบคุมแบบเชิงเส้น (linear Fitting) จนได้เส้นขีดจำกัดการย่น (Wrinkling Limit Curve; WLC) ที่บ่งชี้ถึงการเริ่มเกิดพฤติกรรมการย่น ในสภาพเริ่มโก่งของขึ้นงาน ใช้ประเมินสภาพการเริ่มเกิดรอย ดังในภาพที่ 4-16 แสดงบริเวณการเริ่มเกิดการย่นในตัวอย่างแสดงให้เห็นเส้นแนวความเครียดเชิงเส้นก่อนที่จะพัฒนาการเป็นการย่นที่เห็นเป็นเส้นตรงสีดำในภาพที่ 4-16 ในช่วงเวลาวิกฤติเส้นแนวความเครียดของพื้นที่ บริเวณขึ้นงานทดสอบที่รับแรงดึง มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นไปสู่สภาวะความเครียดแกนเดียว (Plane Strain) ภายใต้แรงดึง และพื้นผิวอีกด้านที่อยู่ใต้ผิวที่รับแรงดึง มีเส้นแนวความเครียดแกนเดียว ภายใต้แรงดึงมีแนวโน้มลดลงถึงสภาวะภายใต้แรงกด ในช่วงเวลานี้เมื่อเส้นแนวความเครียดถูกแยกไปสองทาง เกิดสภาพการย่นความเครียดหลัก (Major Strain) ค่าเป็นบวก ความเครียดรอง (Minor Strain) ค่าเป็นลบ และบริเวณการเกิดการย่นหลังขึ้นรูป แต่หากค่าความเครียดที่ได้ใกล้เคียงกับเส้นขีดจำกัดการขึ้นรูป ก็มีความเสี่ยงที่จะเกิดการย่นหลังขึ้นรูป ดังนั้นบริเวณที่ปลอดภัยหรือเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป ค่าความเครียดที่จะต้องอยู่บริเวณที่ต่ำกว่าเส้นขีดจำกัด จากการพิจารณาค่าความเครียดหลัก (Major Strain) และความเครียดรอง (Minor Strain) ที่เกิดขึ้นบนอีลิเมนต์บริเวณตรงกลางขึ้นทดลองระหว่างการเปลี่ยนรูป ดังในภาพที่ 4-17



ภาพที่ 4-16 จุดกำหนดการเกิดของการย่นบนขึ้นงานทดสอบการโก่งโยยิตะ ในแบบ A และ B-

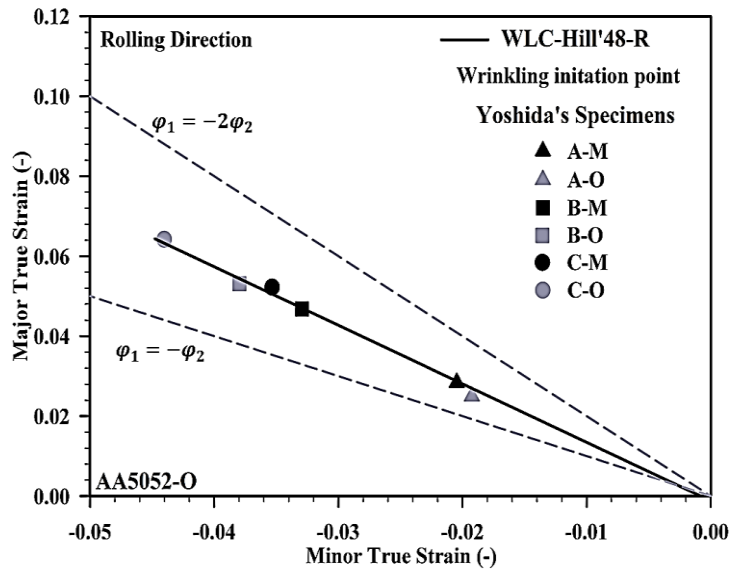


ภาพที่ 4-17 การพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น จากการทดสอบการโก่งโยยชิตะ

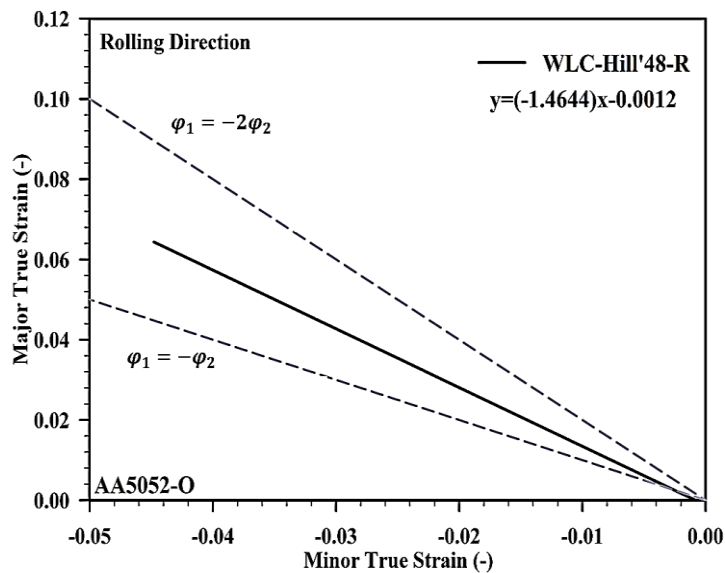
โดยวิธีการการระบุนการเริ่มต้นย่น กำหนดจากเส้นทางความเครียดที่เปียนเบน (Bifurcated Strain Paths) ซึ่งก่อตัวเป็นการย่นในการขึ้นรูปโลหะแผ่นเกิดจากส่วนประกอบของความเครียดสองชนิด ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปลึกแรงอัดจะเกิดขึ้นเป็นครั้งแรกในเส้นรอบวงของวัสดุแผ่น จากนั้นเมื่อเกิดการย่นความเครียดจะเกิดขึ้น วัสดุแผ่นจะไหลลงสู่แม่พิมพ์อย่างต่อเนื่อง ด้วยวิธีนี้การย่นของแผ่นโลหะสามารถอธิบายได้โดยพิจารณาจากเส้นทางความเครียดของพื้นที่ที่เกี่ยวข้อง โดยทั่วไปเส้นทางของความเครียดที่ไม่เป็นเชิงเส้นถูกกำหนดสำหรับเขตวิกฤตเมื่อเกิดการย่น และการหัดตัวแบบทันทีปรากฏบนแต่ละพื้นผิวของตัวอย่างที่เกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4-16 สิ่งนี้ถูกใช้เพื่อกำหนดช่วงเวลาของการเกิดการย่นหลังจากนั้นการก่อตัวของการย่นพัฒนาต่อไป

4.3.1 จุดความเครียด (Strain) โดยใช้เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R

ในแต่ละรูปแบบของขึ้นทดลอง ในทิศทางตามแนวรีด (Rolling Direction) นำค่าความเครียดที่ได้จากการเปลี่ยนรูปบริเวณตรงกลางขึ้นทดลอง จะเป็นบริเวณวิกฤตมีเกิดการโก่ง ผลลัพธ์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผลลัพธ์ค่าความเครียดหลักค่าบวก และค่าความเครียดรองค่าบวก มาพล็อตลง และนำมา Fitting แบบผ่านข้อมูลทุกจุด ด้วยสมการควบคุมแบบเชิงเส้น (linear Fitting) จนได้เส้นขีดจำกัดการย่น (Wrinkling Limit Curve; WLC) ดังแสดงในภาพที่ 4-18 การพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น จากการทดสอบการโก่งโยยชิตะภาพที่ 4-18 การพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น จากการทดสอบการโก่งโยยชิตะของวัสดุ AA5052-O



ภาพที่ 4-18 เส้นโค้งเส้นขีดจำกัดการย่นจากข้อมูลความเครียดบนพื้นฐาน
เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R

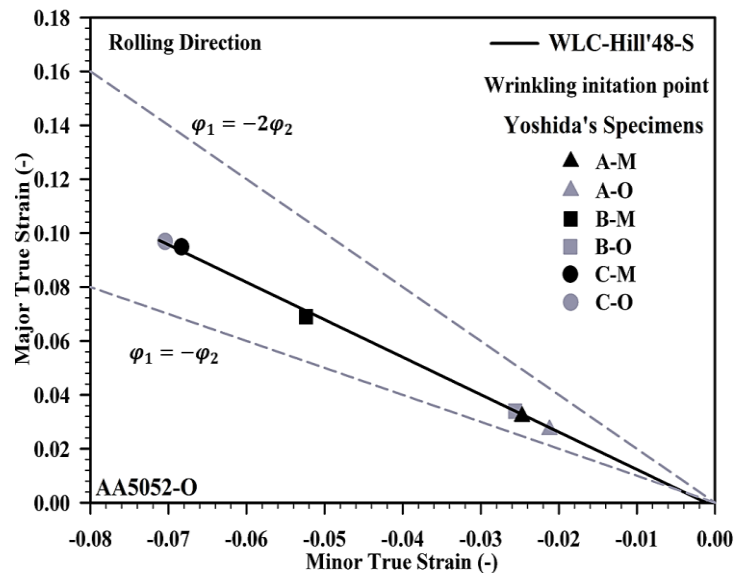


ภาพที่ 4-19 เส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ในแนวทิศทางตามแนวรีด
บนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R

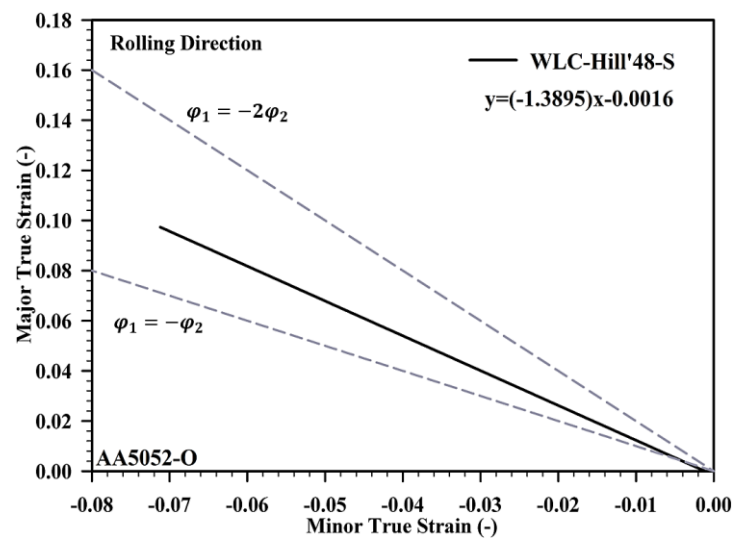
เส้นขีดจำกัดการย่นด้วยเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R ในทิศทางตามแนวรีด ซึ่งทำนายขีดจำกัดการเริ่มการย่น ดังแสดงในภาพที่ 4-18 ถ้าค่าความเครียดที่ได้ต่ำกว่าเส้นที่ค่าความเครียดที่ได้จากการจำลองการขึ้นรูปลึก มีค่าเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นนั้นแสดงว่าเริ่มเกิดการย่นบนชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 4-19

4.3.2 จุดความเครียด (Strain) โดยใช้เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-

ในแต่ละรูปแบบของชั้นทดลอง ในทิศทางตามแนวรีด นำค่าความเครียดที่ได้จากการเปลี่ยนรูปบริเวณตรงกลางชั้นทดลอง ผลลัพธ์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ นำมา Fitting แบบผ่านข้อมูลทุกจุด ด้วยสมการควบคุมแบบเชิงเส้น (linear Fitting) จนได้เส้นขีดจำกัดการย่นแสดงดังภาพที่ 4-20



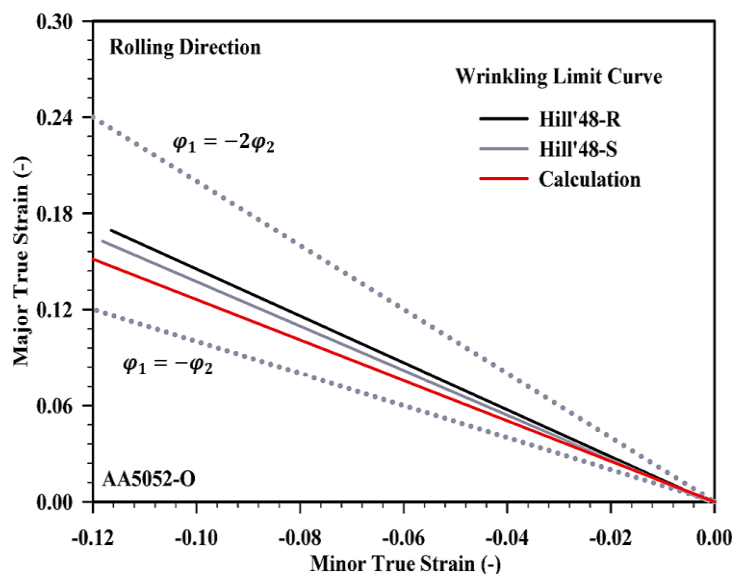
ภาพที่ 4-20 เส้นโค้งเส้นขีดจำกัดการย่นจากข้อมูลความเครียดบนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-S



ภาพที่ 4-21 เส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ในแนวทิศทางตามแนวรีดบนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-S

เส้นขีดจำกัดการย่นด้วยเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R ในทิศทางตามแนวรีด ซึ่งทำนายขีดจำกัดการเริ่มการย่น ดังแสดงในภาพที่ 4-20 ถ้าค่าความเครียดที่ได้ต่ำกว่าเส้นที่ค่าความเครียดที่ได้จากการจำลองการขึ้นรูปลึก มีค่าเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นนั้นแสดงว่าเริ่มเกิดการย่นบนชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 4-21

การเปรียบเทียบเส้นขีดจำกัดการย่นระหว่างเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R และ Hill'48-S ในทิศทางตามแนวรีด ดังแสดงในภาพที่ 4-23 สังเกตได้ว่าเกณฑ์การครากที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อสัดส่วนความเครียด หรือความชันของขีดจำกัดการย่นบนพื้นฐานความเครียด คือเส้นเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R มีค่าเส้นความชันที่สูงกว่า Hill'48-S นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นขีดจำกัดการย่นบนพื้นฐานความเครียดของทั้งสองเกณฑ์แสดงผลของความต่างของรัศมีเป็นไปในทางเดียวกัน

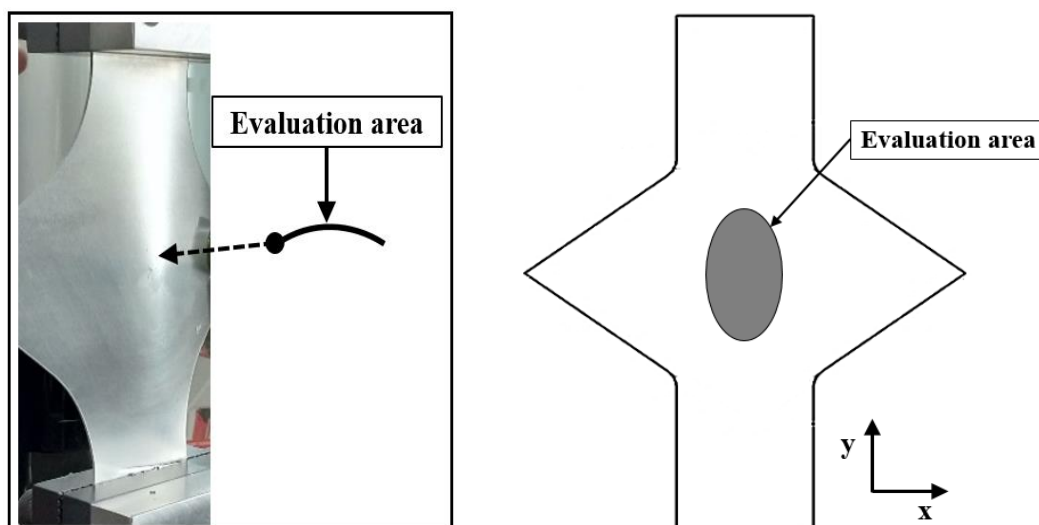


ภาพที่ 4-22 การเปรียบเทียบเส้นขีดจำกัดการย่น ในแนวทิศทางตามแนวรีดบนพื้นฐานจากการคำนวณ เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R และ Hill'48-S

4.3.3 พฤติกรรมของการเกิดการโก่ง ในทิศทางตามแนวรีด เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R

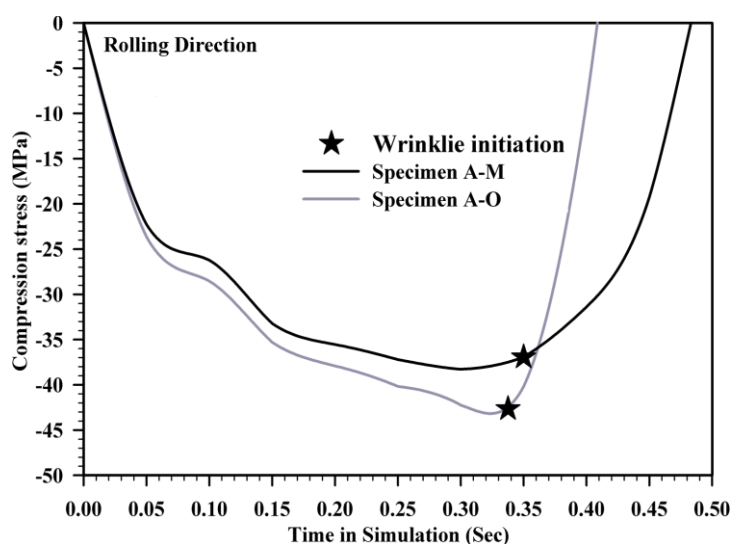
แสดงถึงการเริ่มเกิดการย่น ของวัสดุ AA5052-O หนา 1 มิลลิเมตร โดยการทดสอบการโก่งโยชิตะ โดยการทดสอบการดึงขึ้นทดสอบในขนาดต่าง ๆ ตามแบบทั้ง 6 แบบ บนเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R ในทิศทางตามแนวรีด โดยศึกษาพฤติกรรมเปลี่ยนรูปบนพื้นฐานความเค้น (Stress) หลังเริ่มดึงขึ้นงานทดสอบจนเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปบริเวณตรงกลางขึ้นทดสอบจะเกิดแรงกด (Compression Stress) ในทิศทางแนวนอน (แกน x) ดังแสดงในภาพที่ 4-23 ซึ่งไม่เพียงแต่ความเครียดเท่านั้นที่เปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ขึ้นทดสอบจะเกิดความเค้นกด ที่ค่าติดลบในช่วงแรก และหลังจากนั้นความเค้นจะสูงขึ้นจน คือความเค้นดึงเป็นค่าบวก แสดงให้เห็นถึงช่วงเวลาเกิดเริ่มเกิดการย่น ในช่วงที่เปลี่ยนจากค่าติดลบเป็นค่าบวกของค่าความเค้น ดังแสดงในภาพที่ 4-24 บนชิ้นทดลอง A

ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ช่วยกำหนดพฤติกรรมการโก่งของชิ้นทดสอบได้อีกหนึ่งทางเลือก จากความเค้นกดในทิศทางแนวนอน (แกน x) เปลี่ยนเป็นความเค้นแรงดึง



ภาพที่ 4-23 บริเวณที่พิจารณาการเกิดความเค้นกดในทิศทางแนวแกน

ความเค้นกดในทิศทางแนวนอน (แกน x) ในแนวเส้นรอบวง เปลี่ยนเป็นความเค้นแรงดึงเป็นช่วงระบู่ถึงช่วงจังหวะการเกิดการยุบ จากภาพที่ 4-24 แสดงถึงขั้นตอน A-M และ A-O ซึ่งความเค้นกดของขั้นตอน A-O มีค่าที่สูงกว่า A-M เนื่องจากรัศมีที่เล็กกว่า ส่งผลให้แรงลู่เข้าสู่บริเวณตรงกลางได้เร็วกว่าขั้น A-M และจังหวะการเริ่มเกิดการยุบของขั้น A-O เกิดก่อน A-M ด้วยพฤติกรรมดังกล่าว

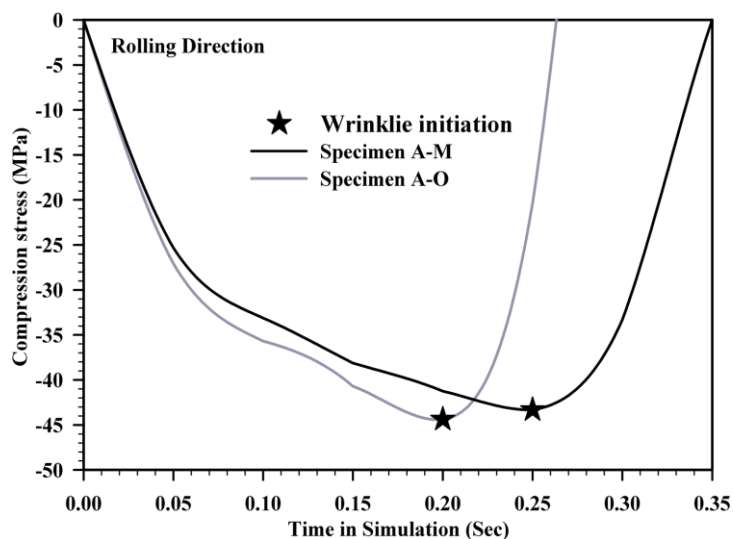


ภาพที่ 4-24 ความเค้นกดในทิศทางแนวนอน ของชิ้นทดสอบการโก่งโยยิตะ A-M และ A-O ในแนวทิศทางตามแนวรีด บนพื้นฐานการครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R

4.3.4 พฤติกรรมของการเกิดการโก่ง ในทิศทางขวางแนวรีด เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-S

พฤติกรรมเปลี่ยนรูปบนพื้นฐานความเค้น (Stress) ในทิศทางแนวนอน หลังเริ่มการเปลี่ยนรูป บริเวณตรงกลางชิ้นทดลองจะเกิดแรงกด จากความเค้นกดเป็นความเค้นแรงดึง

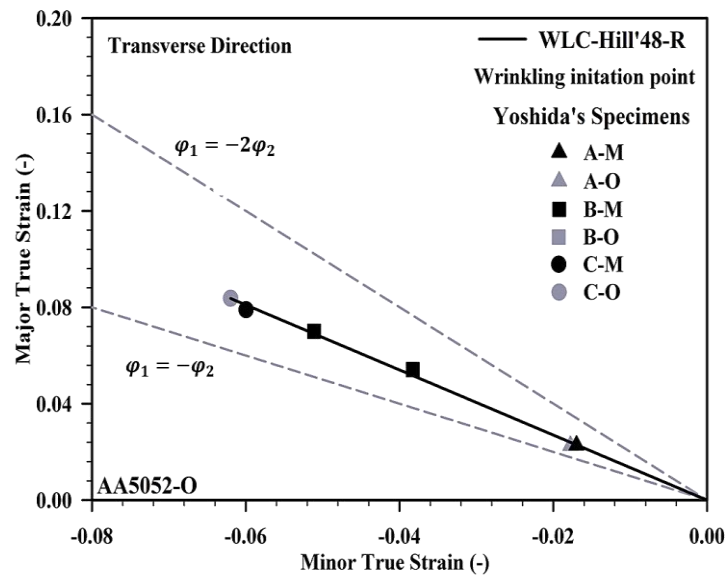
ความเค้นกดในทิศทางแนวนอน (แกน x) เปลี่ยนเป็นความเค้นแรงดึง เป็นช่วงระบุถึงช่วง จังหวะการเกิดการย่น จากภาพที่ 4-25 แสดงถึงชิ้นทดลองที่รัศมีใหญ่ และรัศมีเล็ก ซึ่งความเค้นกดของชิ้นทดลองที่รัศมีเล็กมีค่าที่สูงกว่า รัศมีใหญ่เนื่องจากรัศมีที่เล็กกว่า ส่งผลให้แรงลู่อเข้าสู่บริเวณตรงกลางได้เร็วกว่า และจังหวะการเริ่มเกิดการย่นของชิ้นรัศมีที่เล็กกว่า เกิดก่อนรัศมี ที่ใหญ่ ด้วยพฤติกรรมดังกล่าว และยังมีแนวโน้มคล้ายเกณฑ์ Hill'48-R



ภาพที่ 4-25 ความเค้นกดในทิศทางแนวนอน ของชิ้นทดสอบการโก่งโยชิตะ A-M และ A-O ในแนวทิศทางตามแนวรีด บนพื้นฐานการครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-S

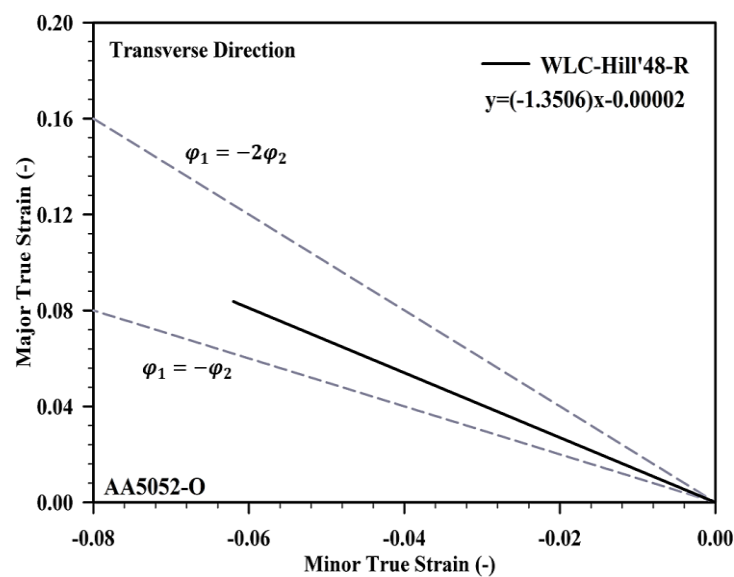
4.3.5 จุดความเครียด (Strain) ในแต่ละรูปแบบของชิ้นทดลอง ตามแนวทิศทางขวางแนวรีด

โดยใช้เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R นำค่าความเครียดที่ได้จากการเปลี่ยนรูป บริเวณตรงกลางชิ้นทดลอง จะเป็นบริเวณวิกฤตมีเกิดการโก่ง ผลลัพธ์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลลัพธ์ค่าความเครียดหลักค่าบวก และค่าความเครียดรองค่าบวก มาพล็อตลง และนำมา Fitting แบบผ่านข้อมูลทุกจุด ด้วยสมการควบคุมแบบเชิงเส้น (linear Fitting) จนได้เส้นขีดจำกัดการย่น (Wrinkling Limit Curve; WLC) ดังแสดงในภาพที่ 4-26



ภาพที่ 4-26 เส้นโค้งเส้นขีดจำกัดการย่นจากข้อมูลความเครียดบนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R

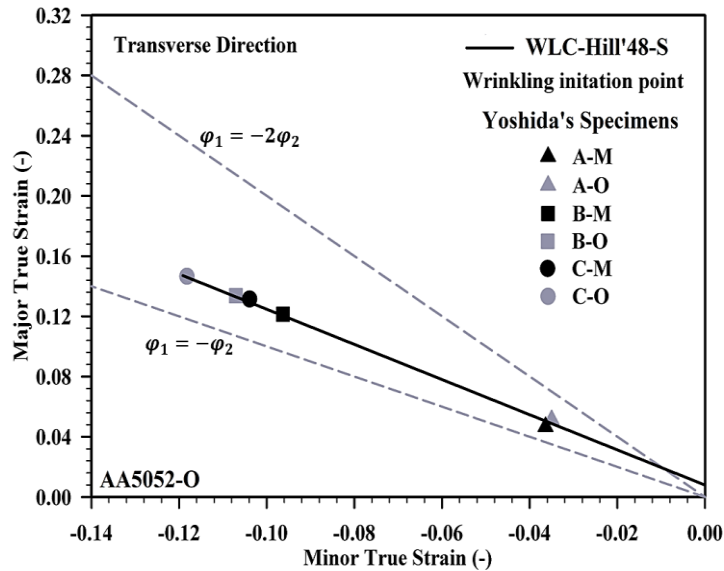
เส้นขีดจำกัดการย่นด้วยเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R ในทิศทางขวางแนวรีดซึ่งทำนายขีดจำกัดการเริ่มการย่น ดังแสดงในภาพที่ 4-25 ถ้าค่าความเครียดที่ได้ต่ำกว่าเส้นที่ค่าความเครียดที่ได้จากการจำลองการขึ้นรูปลึก มีค่าเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นนั้นแสดงว่าเริ่มเกิดการย่นบนชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 4-27



ภาพที่ 4-27 เส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ในแนวทิศทางขวางแนวรีดบนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R

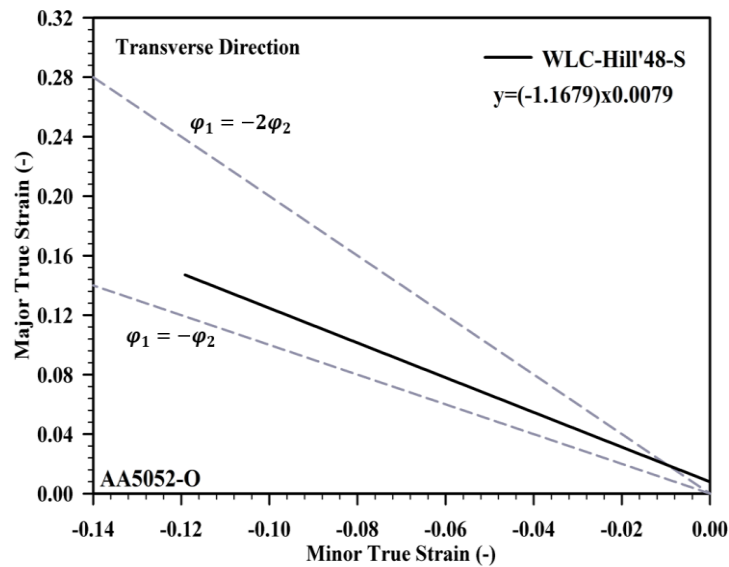
4.3.6 จุดความเครียด (Strain) ในแต่ละรูปแบบของขึ้นทอลง ในแนวทิศทางขวางรีด

โดยใช้เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-S นำค่าความเครียดที่ได้จากการเปลี่ยนรูปบริเวณตรงกลางขึ้นทอลง ผลลัพธ์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ นำมา Fitting แบบผ่านข้อมูลทุกจุด ด้วยสมการควบคุมแบบเชิงเส้น (linear Fitting) จนได้เส้นขีดจำกัดการย่นแสดงดังภาพที่ 4-28

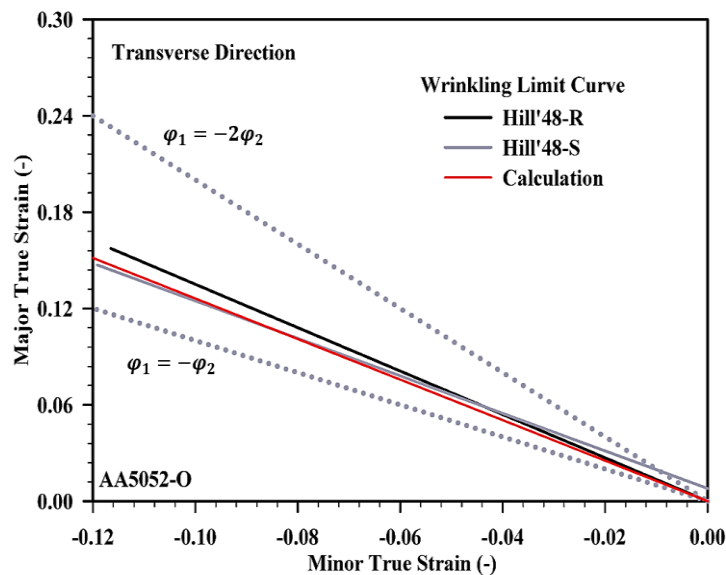


ภาพที่ 4-28 เส้นโค้งเส้นขีดจำกัดการย่นจากข้อมูลความเครียดบนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-S

เส้นขีดจำกัดการย่นด้วยเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R ในทิศทางขวางแนวรีด ซึ่งทำนายขีดจำกัดการเริ่มการย่น ดังแสดงในภาพที่ 4-28 ถ้าค่าความเครียดที่ได้ต่ำกว่าเส้นที่ค่าความเครียดที่ได้จากการจำลองการขึ้นรูปลึก มีค่าเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นนั้นแสดงว่าเริ่มเกิดการย่นบนชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 4-29



ภาพที่ 4-29 เส้นโค้งเส้นขีดจำกัดการย่นในทิศทางขวางแนวรีดด้วยเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-S



ภาพที่ 4-30 การเปรียบเทียบเส้นขีดจำกัดการย่น ในแนวทิศทางขวางแนวรีดบนพื้นฐานจากการคำนวณ เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R และ Hill'48-S

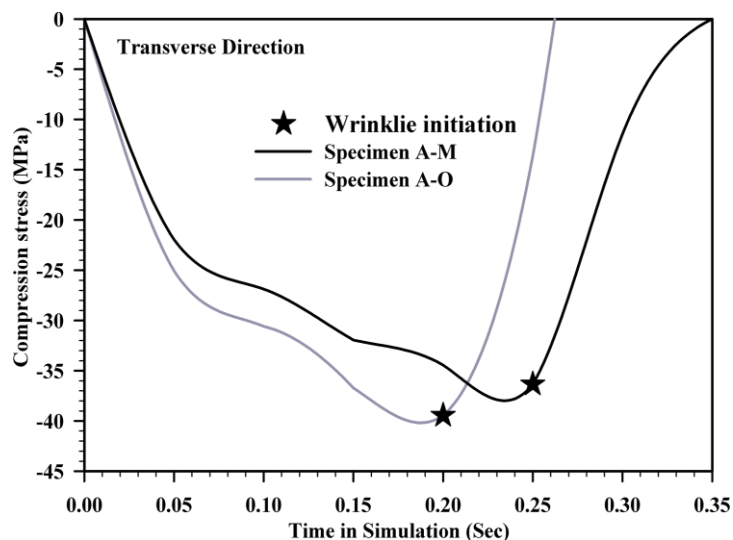
การเปรียบเทียบเส้นขีดจำกัดการย่นระหว่างเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R และ Hill'48-S ในแนวทิศทางขวางแนวรีด ดังแสดงในภาพที่ 4-30 สังเกตได้ว่าเกณฑ์การครากที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อสัดส่วนความเครียด หรือความชันของขีดจำกัดการย่นบนพื้นฐานความเครียด คือเส้นเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R มีค่าเส้นความชันที่สูงกว่า Hill'48-S นอกจากนี้ยัง

พบว่าเส้นขีดจำกัดการย่นบนพื้นฐานความเครียดของทั้งสองเกณฑ์แสดงผลของความต่างของวัสดุเป็นไปในทางเดียวกัน

4.3.7 พฤติกรรมของการเกิดการโก่ง ในทิศทางขวางแนวรีด เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R

แสดงถึงการเริ่มเกิดการย่น ของวัสดุ AA5052-O หนา 1 มิลลิเมตร โดยการทดสอบการโก่งโยชิตะ โดยการทดสอบการดึงขึ้นทดสอบในขนาดต่าง ๆ ตามแบบทั้ง 6 แบบ บนเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R ในแนวทิศทางขวางแนวรีด โดยศึกษาพฤติกรรมเปลี่ยนรูปบนพื้นฐานความเค้น (Stress) หลังเริ่มดึงขึ้นงานทดสอบจนเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปบริเวณตรงกลางขึ้นทดสอบจะเกิดแรงกด (Compression Stress) ในทิศทางแนวนอน (แกน x) ซึ่งไม่เพียงแต่ความเครียดเท่านั้นที่เปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ขึ้นทดสอบจะเกิดความเค้นกด ที่ค่าติดลบในช่วงแรก และหลังจากนั้นความเค้นจะสูงขึ้นจน คือความเค้นดึงเป็นค่าบวก แสดงให้เห็นถึงช่วงเวลาเกิดเริ่มเกิดการย่น ในช่วงที่เปลี่ยนจากค่าติดลบเป็นค่าบวกของค่าความเค้น ดังแสดงในภาพที่ 4-31 บนขึ้นทดสอบ A ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ช่วยกำหนดพฤติกรรมการโก่งของขึ้นทดสอบได้อีกหนึ่งทางเลือก จากความเค้นกด ในทิศทางแนวนอนเปลี่ยนเป็นความเค้นแรงดึง

ความเค้นกดในทิศทางแนวนอน (แกน x) เปลี่ยนเป็นความเค้นแรงดึง เป็นช่วงระบุถึงช่วงจังหวะการเกิดการย่น จากภาพที่ 4-31 แสดงถึงขึ้นทดสอบ A-M และ A-O ซึ่งความเค้นกดของขึ้นทดสอบ A-O มีค่าที่สูงกว่า A-M เนื่องจากวัสดุที่เล็กกว่า ส่งผลให้แรงถูเข้าสู่บริเวณตรงกลางได้เร็วกว่าขึ้น A-M และจังหวะการเริ่มเกิดการย่นของขึ้น A-O เกิดก่อน A-M ด้วยพฤติกรรมดังกล่าว

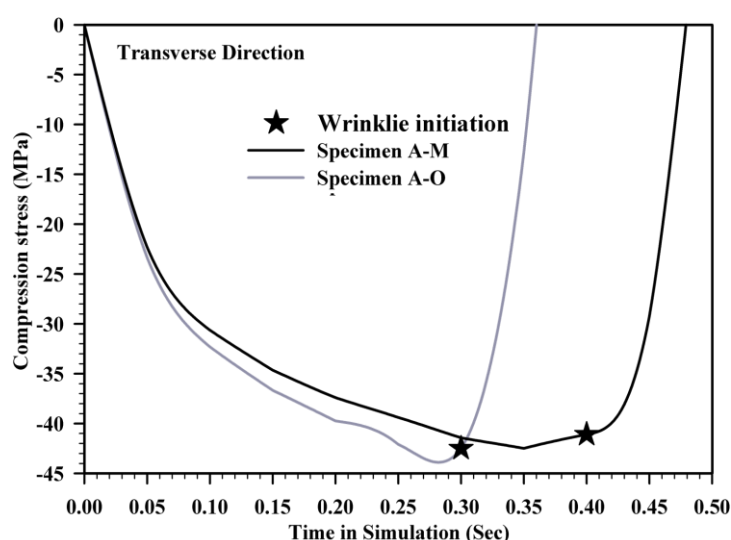


ภาพที่ 4-31 ความเค้นกดในทิศทางแนวนอน ของขึ้นทดสอบการโก่งโยชิตะ A-M และ A-O ในแนวทิศทางขวางแนวรีด บนพื้นฐานการครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R

4.3.8 พฤติกรรมของการเกิดการโก่ง ในทิศทางขวางแนวรีด เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-S

พฤติกรรมเปลี่ยนรูปบนพื้นฐานความเค้น (Stress) ในทิศทางแนวนอน หลังเริ่มการเปลี่ยนรูป บริเวณตรงกลางชิ้นทดลองจะเกิดแรงกด จากความเค้นกดเปลี่ยนเป็นความเค้นแรงดึง

ความเค้นกดในทิศทางแนวนอน เปลี่ยนเป็นความเค้นแรงดึง เป็นช่วงระบู่ถึงช่วงจังหวะการเกิดการย่น จากภาพที่ 4-32 แสดงถึงชิ้นทดลองที่รัศมีใหญ่ และรัศมีเล็ก ซึ่งความเค้นกดของชิ้นทดลองที่รัศมีเล็กมีค่าที่สูงกว่า รัศมีใหญ่เนื่องจากรัศมีที่เล็กกว่า ส่งผลให้แรงลู่เข้าสู่บริเวณตรงกลางได้เร็วกว่า และจังหวะการเริ่มเกิดการย่นของชิ้นรัศมีที่เล็กกว่า เกิดก่อนรัศมีที่ใหญ่ และยังมีแนวโน้มคล้ายเกณฑ์ Hill'48-R



ภาพที่ 4-32 ความเค้นกดในทิศทางแนวนอน ของชิ้นทดสอบการโก่งโยชิตะ A-M และ A-O ในแนวทิศทางขวางแนวรีด บนพื้นฐานการครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-S

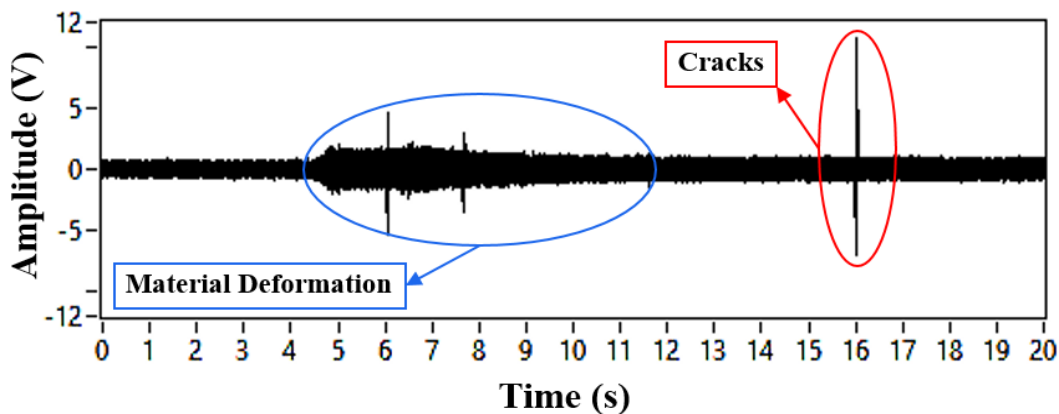
4.4 ผลของสัญญาณอะคูสติคอีมีสชัน

ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายอะคูสติคอีมีสชันในระหว่างการทำทดสอบ ซึ่งได้ทำการตรวจสอบในสองกระบวนการทดสอบ กระบวนการแรก คือทดสอบในทิศทางตามแนวรีดกระบวนการที่สอง ทดสอบในทิศทางขวางแนวรีด โดยจะศึกษาอิทธิพลของแนวรีด ที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปเพื่อตรวจสอบสัญญาณการโก่งที่เกิดขึ้นในขณะทดสอบการโก่งโยชิตะ ซึ่งได้ทำการทดสอบ ทั้งหมด 6 แบบ ซึ่งมีรัศมีความโค้งของปีก และความยาวที่แตกต่างกัน โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งต่อ 1 ขนาดเก็บค่าสัญญาณที่ 0.2 วินาที เป็นเวลา 20 วินาที

โดยคุณลักษณะของสัญญาณต่าง ๆ เหล่านี้ สัญญาณอะคูสติคอีมีสชันประกอบไปด้วย สัญญาณคลื่นแบบต่อเนื่อง (Continuous) เป็นการปลดปล่อยของคลื่นจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงการเสียรูปของวัสดุและสัญญาณคลื่นแบบเป็นช่วง (Burst) มีการปลดปล่อยคลื่นในขณะที่เกิดขึ้นแล้วหยุดการปล่อยทันทีเมื่อไม่มีการขยายตัวเกิดขึ้นหรือความเค้นที่ได้รับลดลง แสดงการเริ่มเกิด และการ

แพร่รอยแตกร้าวของวัสดุ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบแนวโน้ม และตรวจสอบการเริ่มต้นการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานทดสอบ แสดงดังต่อไปนี้

ภาพที่ 4-33 แสดงตัวอย่างสัญญาณอะคูสติกอีมีสชัน ของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งประกอบไปด้วยสัญญาณคลื่นแบบต่อเนื่อง และสัญญาณคลื่นแบบเป็นช่วง โดยตลอดการทดสอบมีสัญญาณรบกวน (Noise) อยู่ประมาณ 0.002 โวลต์ การทดลองเก็บสัญญาณครั้งละ 20 วินาที ในช่วงแรกตามภาพที่ 4-33 จะเห็นได้ว่า มีการกระจายของความสูงแอมพลิจูดอย่างสม่ำเสมอ เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นตลอดการทดสอบ เป็นช่วงที่เครื่องทดสอบเคลื่อนที่ขึ้น โดยไม่เกิดการเปลี่ยนรูปชิ้นงานทดสอบ และในช่วงที่ 2 จะเห็นได้ว่า คลื่นสัญญาณมีแอมพลิจูดที่สูงขึ้นเกิดสัญญาณคลื่นแบบเป็นช่วง เนื่องจากชิ้นงานทดสอบเริ่มถูกดึงขึ้นเรื่อยๆ และสัญญาณคลื่นแบบเป็นช่วงที่เกิดขึ้น บ่งบอกถึงการเปลี่ยนรูปการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค (Dislocation) ในเนื้อวัสดุ หรือเกิดการเลื่อนไถลระหว่างระนาบอะตอม (Slip) ของชิ้นงานทดสอบ ส่งผลให้จึงเกิดการปล่อยพลังงานคลื่นเสียงออกมาจากชิ้นงาน



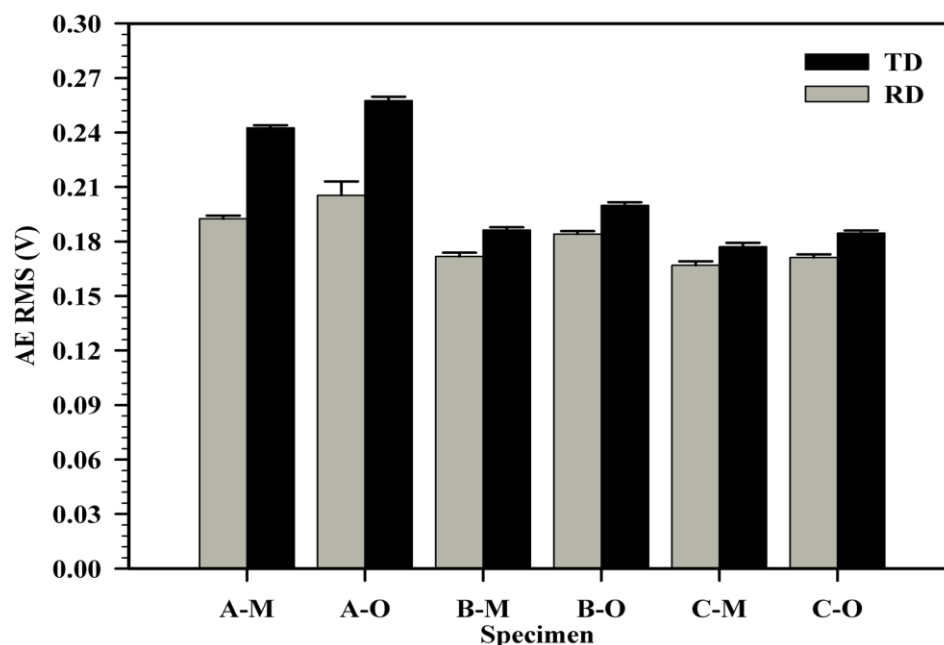
ภาพที่ 4-33 ตัวอย่างสัญญาณการทดสอบการโค้งโยยิตะ บนเครื่องทดสอบแรงดึง

ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ และประเมินผลลักษณะของสัญญาณต่างๆ

1. AE Maximum Amplitude (AE_{Max}) คือค่าระดับสูงสุดของสัญญาณแอมพลิจูด แสดงถึงความสัมพันธ์กับพลังงานในเนื้อวัสดุที่เกิดขึ้นและถูกปล่อยออกมาสูงสุดในระหว่างกระบวนการ
2. Root Mean Squared (AE_{RMS}) คือค่าเฉลี่ยของสัญญาณแอมพลิจูด แสดงถึงความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น การเสียรูปของวัสดุ (Material Deformation)
3. Burst Energy (AE_{Energy}) คือระดับพลังงานของสัญญาณ ในแต่ละช่วงเวลา แสดงถึงความสัมพันธ์กับพลังงานที่ถูกปล่อยออกมาในเนื้อวัสดุที่เกิดขึ้น ระหว่างกระบวนการทดสอบ สามารถหาผลลัพธ์ได้จากสมการที่ 3.1

4.4.1 อิทธิพลของทิศทางแนวรีดกับพีทเจอร์ค่าเฉลี่ยของสัญญาณแอมพลิจูด AE_{RMS}

ในการศึกษานี้ ได้ใช้ผลลักษณะของสัญญาณ AE_{RMS} จากการเก็บสัญญาณอะคูสติกอีมีสชัน ในช่วงเริ่มต้นจนถึงจุดแตกของวัสดุ จากการทดสอบการโค้งโยยิตะ เพื่อการวิเคราะห์ และประเมินผลช่วงเวลาการเปลี่ยนรูป และการเริ่มการโค้งของแต่ละชิ้นงานทดสอบ ทั้ง 6 แบบ ในแนวรีดที่แตกต่างกัน คือ ทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด



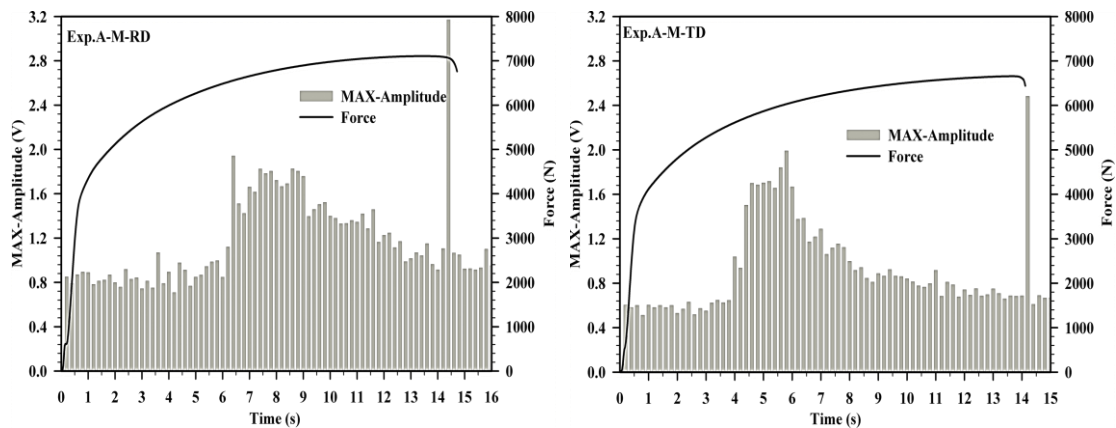
ภาพที่ 4-34 AE_{RMS} ของชิ้นงานทดสอบ การโก่งโยชิตะ ในทิศทางแนวรีดที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 4-34 พบว่า AE_{RMS} ของการทดสอบ การโก่งโยชิตะ ในทิศทางขวางแนวรีด มีค่า AE_{RMS} สูงกว่าชิ้นงานที่ทดสอบในทิศทางตามแนวรีด เนื่องจากการขวางทิศทางแนวรีดเดิม ส่งผลให้เนื้อวัสดุเกิดการเปลี่ยนรูป ถูกดัดยัดในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้สัญญาณที่ได้สูงขึ้น แต่ในทิศทางตามแนวรีดเป็นการเปลี่ยนรูปในทิศทางเดิม สัญญาณที่ได้รับจึงต่ำกว่า มีแนวโน้มที่คล้ายกันกับทุกชิ้นเพราะฉะนั้นแนวรีดของวัสดุมีความสำคัญ และรวมไปถึงชิ้นที่รัศมีเล็ก มีค่า AE_{RMS} สูงกว่าชิ้นงานที่มีรัศมีใหญ่ เนื่องจากชิ้นงานมีรัศมีมีความโค้งที่เล็กกว่าทำให้เกิดความเค้นที่สะสมมากกว่า ส่งผลสัญญาณที่ได้รับเข้มข้นกว่า มีแนวโน้มที่คล้ายกันกับทุกชิ้น

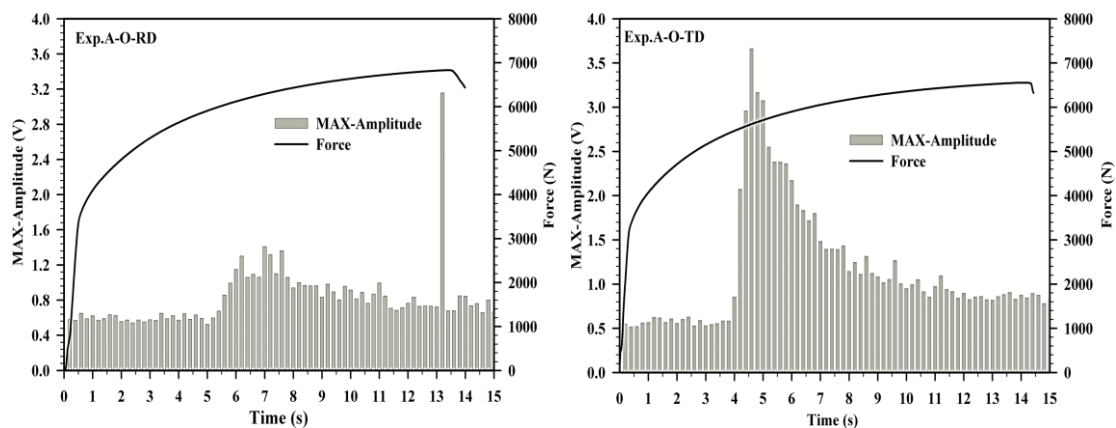
4.4.2 อิทธิพลของทิศทางแนวรีดกับระดับค่าสูงสุดของสัญญาณแอมพลิจูด AE_{Max}

เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง AE_{Max} แอมพลิจูด กับ แรง (Force) ดังแสดงในภาพที่ 4-35 พบว่าในช่วงวินาทีแรก มีค่าแอมพลิจูดที่สม่ำเสมอ โดยตลอดการทดสอบมีสัญญาณรบกวนอยู่ที่ประมาณ 0.002 โวลต์ เป็นช่วงที่เครื่องทดสอบเคลื่อนที่ขึ้น โดยไม่เกิดการเปลี่ยนรูปชิ้นงานทดสอบในช่วงยืดหยุ่น (Elastic Deformation) จะเห็นได้ว่าในช่วงนี้จะไม่มีการเกิดสัญญาณแทรกเข้ามา เนื่องจากความเค้นสะสมบริเวณรัศมีส่วนโค้ง (Stress Concentration) พยายามลู่เข้าบริเวณตรงกลางชิ้นงาน ต่อมาเกิดสัญญาณคลื่นแบบเป็นช่วงแสดงแอมพลิจูดที่สูงขึ้นในครั้งแรก อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น (Elastic Deformation) และพบว่าเกิดระดับแอมพลิจูดที่สูงขึ้นที่สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งของแรง พบว่าเกิดสัญญาณคลื่นแบบเป็นช่วง แสดงแอมพลิจูดที่สูงขึ้นเกิด บ่งบอกถึงการเริ่มการเปลี่ยนรูป (First Deformation) เนื่องจากชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวร บริเวณมุมรัศมีของชิ้นทดสอบ ซึ่งจะเนื่องจากเกิดความเค้นสะสม ในช่วงเวลาวินาทีที่หลังจากนี้เป็นต้นไป เกิดการอัดตัวกันแน่นของการเปลี่ยนตำแหน่งอนุภาคที่บริเวณขอบเกรน ส่งผลให้เกิดความเค้นสูงเกิดการเลื่อนไถลระหว่างระนาบ และเกิดการเคลื่อนที่ของการเปลี่ยน

ตำแหน่งอนุภาค จากการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคจะเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นจึงปล่อยคลื่นอะคูสติกได้มากเช่นกัน และช่วงการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) ขึ้นงานทดสอบเกิดการเสียรูป การไถระหว่างระนาบแลทธิซ (Slip Line) ตามลำดับ หลังจากนั้นเกิดการโค้งอย่างต่อเนื่อง และสุดท้ายขึ้นงานเกิดความเสียหาย (Cracks) บริเวณรัศมีส่วนโค้ง เนื่องจากเกิดความเค้นสะสมสูง และพบว่าในทิศทางขวางแนวรีด มีค่า AE_{Max} สูงกว่าขึ้นงานที่ทดสอบในทิศทางตามแนวรีด เนื่องจากไปเป็นตามข้ออธิบายข้างต้น มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่า AE_{RMS}

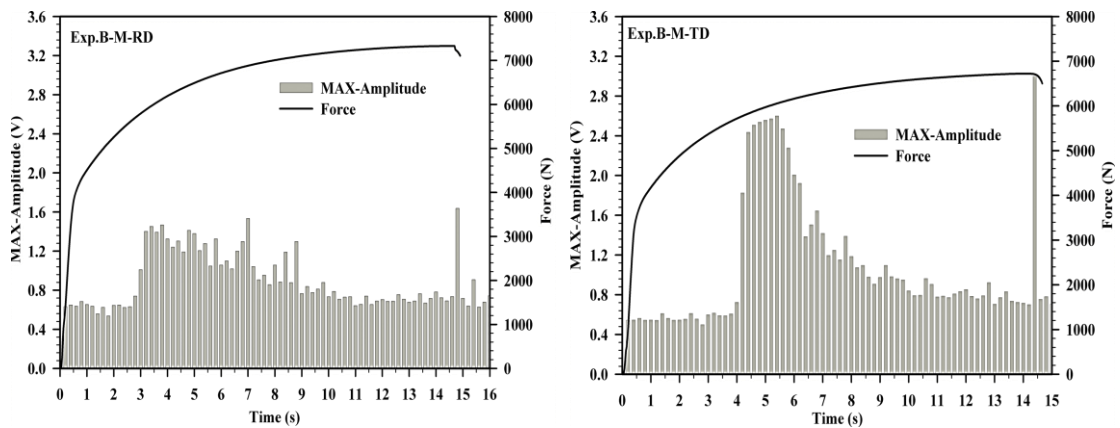


ภาพที่ 4-35 AE_{Max} กับแรงการทดสอบการโค้งโยชิตะ ของขึ้นงานที่ A-M ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด

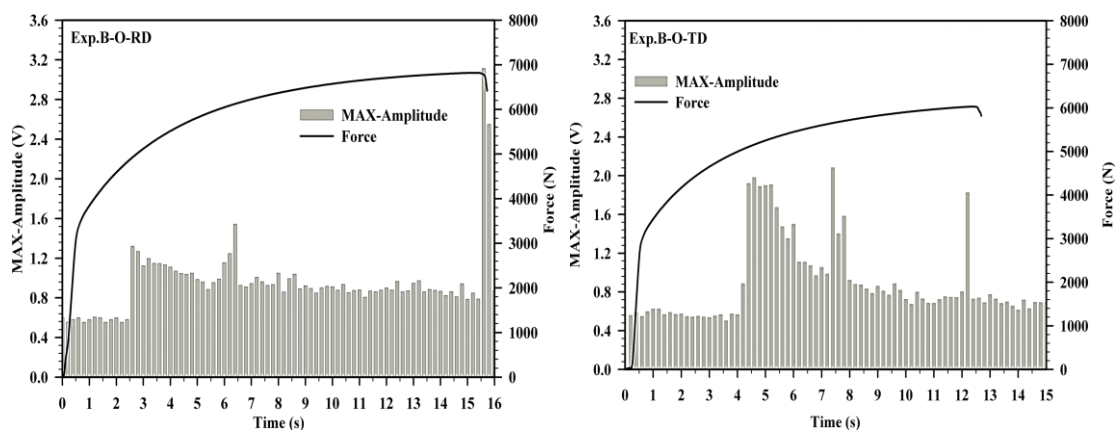


ภาพที่ 4-36 AE_{Max} กับแรงการทดสอบการโค้งโยชิตะ ของขึ้นงานที่ A-O ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด

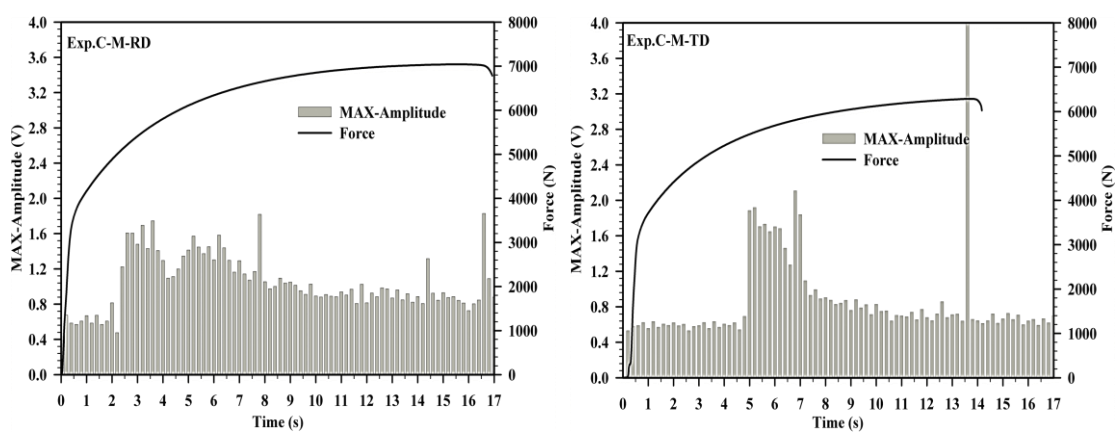
ภาพที่ 4-37 ถึง 4-40 พบว่าเกิดสัญญาณคลื่นแอมพลิจูดที่สูงขึ้น หลังจากเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวร บริเวณมุมรัศมี ของขึ้นทดสอบ ซึ่งจะเนื่องจากเกิดความเค้นสะสม ช่วงจุดครากเกิดสัญญาณการเกิดการโค้งที่ช้ากว่า เนื่องจากผลของสัดส่วนของขึ้นงานที่ B-M และ B-O ที่มากกว่าไปถึงสัดส่วนของขึ้นงานที่ C-M และ C-O ที่น้อย แสดงให้เห็นถึงการโค้งตัวที่ช้าลงของการเริ่มเกิดการโค้ง



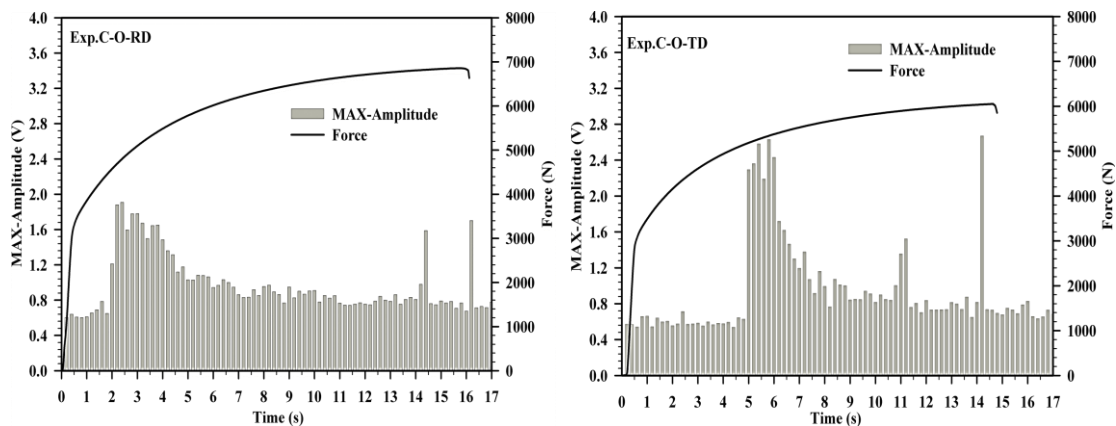
ภาพที่ 4-37 AE_{Max} กับแรงการทดสอบการโก่งโยชิตะ ของชิ้นงานที่ B-M
ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด



ภาพที่ 4-38 AE_{Max} กับแรงการทดสอบการโก่งโยชิตะ ของชิ้นงานที่ B-O
ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด



ภาพที่ 4-39 AE_{Max} กับแรงการทดสอบการโก่งโยชิตะ ของชิ้นงานที่ C-M
ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด

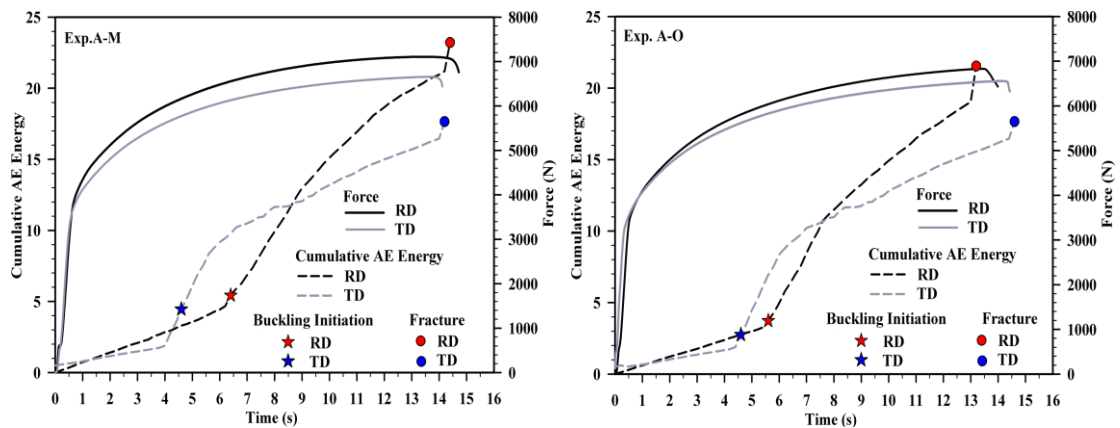


ภาพที่ 4-40 AE_{Max} กับแรงการทดสอบการโก่งโยชิตะ ของชิ้นงานที่ C-O
ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด

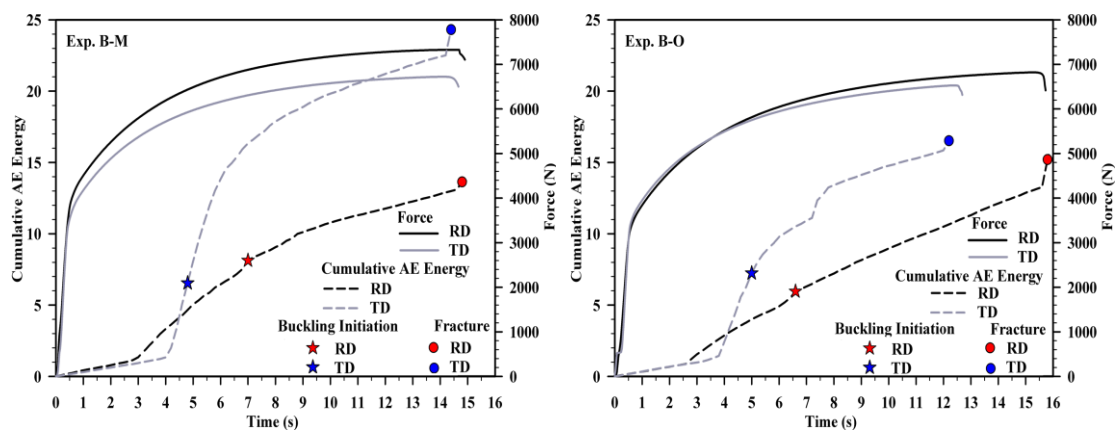
4.4.3 อิทธิพลของทิศทางแนวรีดกับระดับค่าพลังงานของสัญญาณแอมพลิจูด AE_{Energy}

การเปรียบเทียบอิทธิพลของทิศทางแนวรีด กับฟิเจอร์ (Feature) ของสัญญาณระดับค่าพลังงานของสัญญาณแอมพลิจูด (Burst Energy) เป็นพลังงานของชิ้นงานที่ปล่อยออกมาระหว่างการเปลี่ยนรูปในรูปของสัญญาณที่ได้รับ ซึ่งพลังงานที่ได้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างชิ้นทดสอบในแต่ละแบบ และมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับสัญญาณค่า AE_{Max} ไปในทิศทางเดียว ภาพที่ 4-41 เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งของแรง พบว่าเกิดสัญญาณคลื่นแบบเป็นช่วง แสดงพลังงานของสัญญาณแอมพลิจูดที่สูงขึ้นเกิด บ่งบอกถึงการเริ่มการเปลี่ยนรูป (First Deformation) เนื่องจากชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวร บริเวณมุมรัศมีของชิ้นทดสอบ ซึ่งจะเนื่องจากเกิดความเค้นสะสม ในช่วงเวลาวินาทีที่หลังจากนี้เป็นต้นไป และช่วงการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) ชิ้นงานทดสอบเกิดการเสียรูป หลังจากนั้นเกิดการโก่งอย่างต่อเนื่อง และสุดท้ายชิ้นงานเกิดความเสียหาย (Cracks) และพบว่าในทิศทางขวางแนวรีด มีค่า AE_{Energy} สูงกว่าชิ้นงานที่ทดสอบในทิศทางตามแนวรีด รวมถึงหลังจากบริเวณจุดคราก เกิดสัญญาณการเกิดการโก่งที่ช้าลงในชิ้นงาน B-M ถึง C-O เนื่องจากไปเป็นตามทฤษฎีข้างต้น มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่า AE_{RMS} และ AE_{Max}

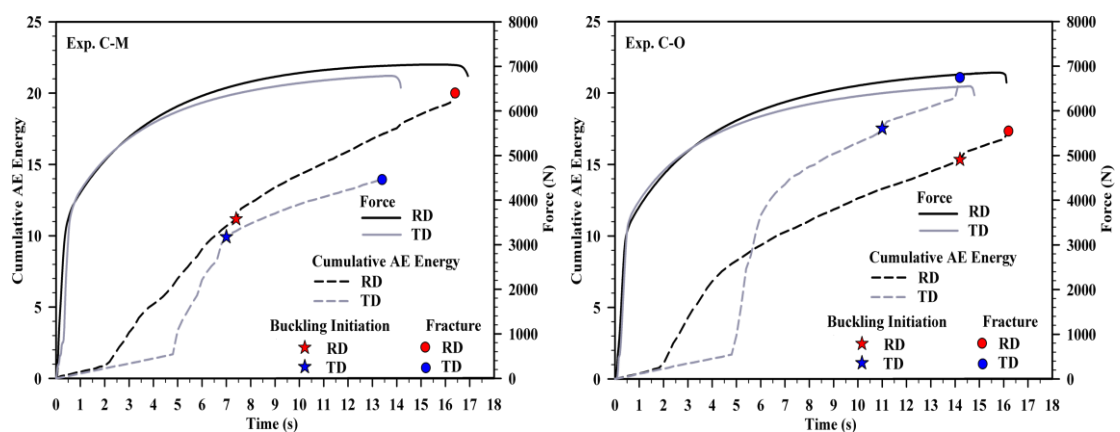
โดยบริเวณที่กำหนดจุดเกิดการโก่งโยชิตะ ระบุจากช่วงจังหวะการเกิดของสัญญาณอะคูสติคอีมีชันกับฟิเจอร์ ค่าสัญญาณ AE_{Max} และค่าสัญญาณ AE_{Energy} ที่มาจากชิ้นงาน ถึงแนวโน้มการเกิด เปรียบเทียบกับการจำลองในระยการดัดเดียวกัน เพื่อเป็นการยืนยันความแม่นยำ ของการช่วงจังหวะการเกิดการโก่ง และบริเวณที่กำหนดจุดที่ชิ้นงานเกิดความเสียหาย จากสัญญาณแบบเป็นช่วง (Burst) ที่แสดงการเริ่มเกิด และการแพร่รอยแตกร้าวของวัสดุ



ภาพที่ 4-41 AE_{Energy} กับแรงการทดสอบการโก่งโยชิตะ ของชิ้นงานที่ A-M และ A-O ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด



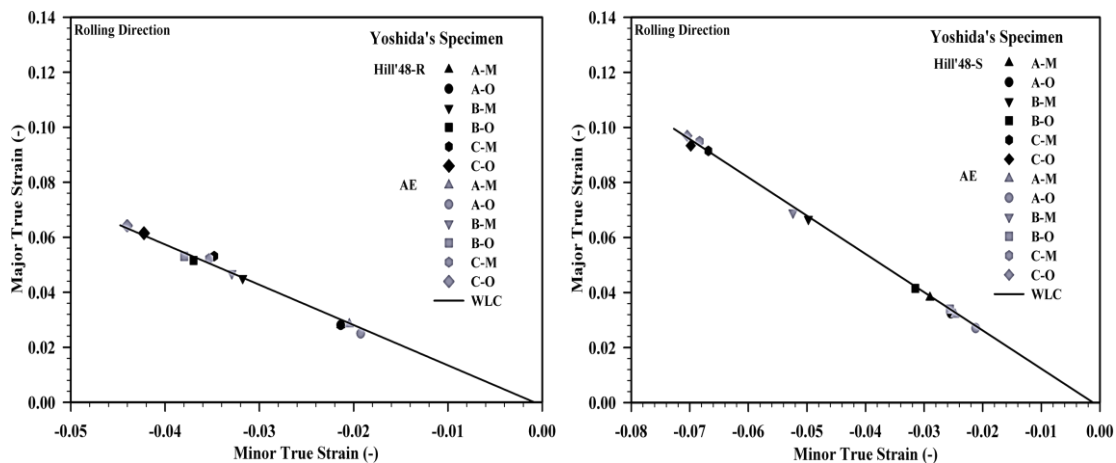
ภาพที่ 4-42 AE_{Energy} กับแรงการทดสอบการโก่งโยชิตะ ของชิ้นงานที่ B-M และ B-O ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด



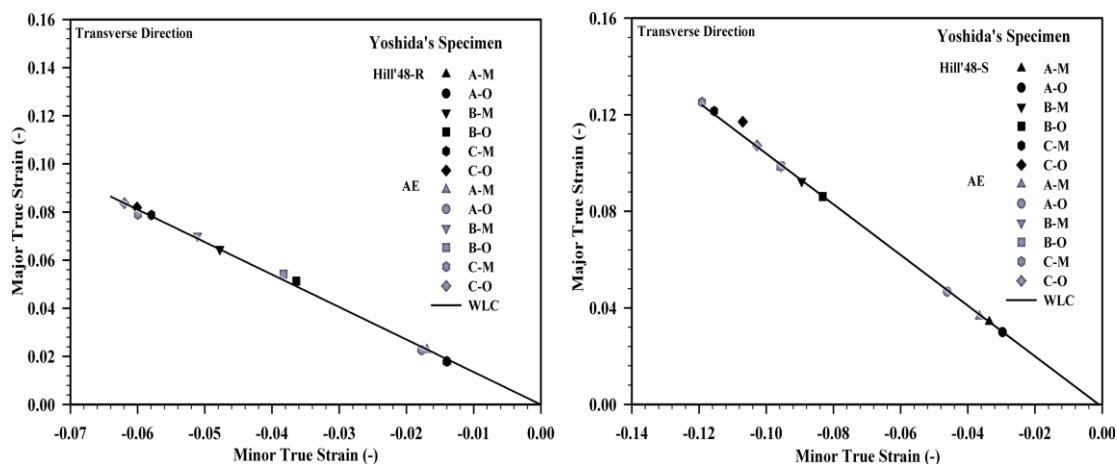
ภาพที่ 4-43 AE_{Energy} กับแรงการทดสอบการโก่งโยชิตะ ของชิ้นงานที่ C-M และ C-O ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด

4.4.4 การใช้สัญญาณอะคูสติกอีมีสชัน เป็นเครื่องมือที่ระบุช่วงเวลาการโค้ง

ระบุจากช่วงจังหวะการเกิดของสัญญาณอะคูสติกอีมีสชันกับพีทเจอร์ ค่าสัญญาณ AE_{Max} และค่าสัญญาณ AE_{Energy} ที่มาจากชิ้นงาน ถึงแนวโน้มการเกิด นำช่วงจังหวะการโค้ง จากสัญญาณอะคูสติกอีมีสชัน เปรียบเทียบกับการจำลองในระยะการดิ่งเดียวกัน ทำการเก็บค่า ความเครียดหลัก ความเครียดรอง ด้วยเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R และ Hill'48-S มาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น เพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับผลของช่วงจังหวะการโค้ง จากสัญญาณอะคูสติกอีมีสชัน ซึ่งมาจากทดลองจริง ดังแสดงในภาพที่ 4-44 และ 4-45



ภาพที่ 4-44 เปรียบเทียบการใช้สัญญาณอะคูสติกอีมีสชัน
สร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ในทิศทางตามแนวรีด

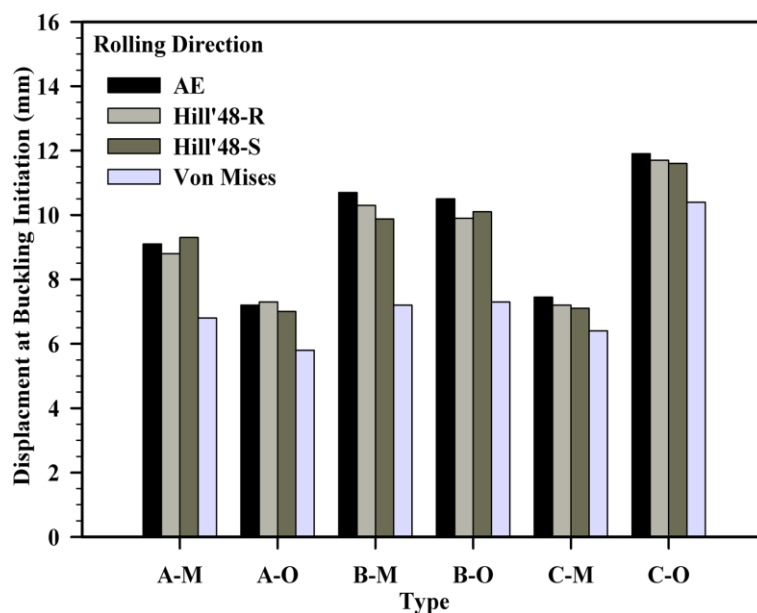


ภาพที่ 4-45 เปรียบเทียบการใช้สัญญาณอะคูสติกอีมีสชัน
สร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ในทิศทางขวางแนวรีด

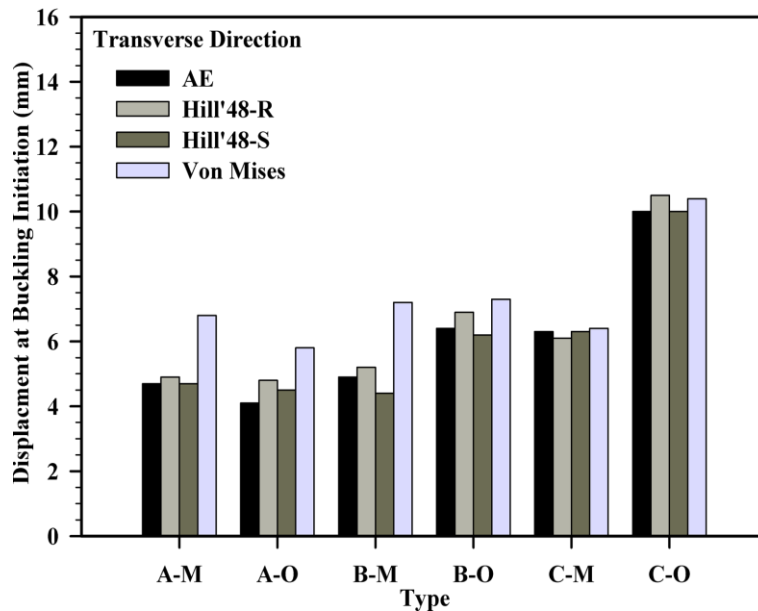
จากภาพที่ 4-44 และ 4-45 พบว่าใช้สัญญาณอะคูสติกอิมิสซ์ชัน สามารถระบุช่วงเวลาการโก่งนํามาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น (WLC) ซึ่งได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับเกณฑ์การครากทั้ง 2 ที่ระบุด้วยวิธีความเครียดที่เกิดจุดเปลี่ยน และผลที่ได้ของ Hill'48-S จะสูงกว่า Hill'48-R เนื่องมาจากเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกที่แตกต่างกัน ถือว่าเป็นเครื่องมือหนึ่งที่สามารถใช้ทดแทนการระบุช่วงเวลาการโก่ง

4.4.5 เปรียบเทียบระยะเริ่มเกิดการโก่ง โดยใช้เทคนิคสัญญาณอะคูสติกอิมิสซ์ชัน

ภาพที่ 4-46 และ 4-47 เปรียบเทียบระยะเริ่มเกิดการโก่ง ของการทดสอบการโก่งโยชิตะ ในทิศทางตามแนวรีด และทิศทางขวางแนวรีด โดยใช้เทคนิคสัญญาณอะคูสติกอิมิสซ์ชัน ร่วมระบุช่วงจังหวะสัญญาณอะคูสติกอิมิสซ์ชันกับพีทเจอร์ ค่าสัญญาณ AE_{Max} และค่าสัญญาณ AE_{Energy} ที่กล่าวข้างต้น ถึงแนวโน้มการเกิด ของแต่ละขั้นตอนการทดสอบ ทั้งหมด 6 รูปแบบ จากนั้นนำช่วงเวลาดังกล่าวมาเทียบกับระยะการดึง จากเครื่องทดสอบแรงดึง เพื่อให้ได้ระยะของการเริ่มเกิดการโก่งจากอะคูสติกอิมิสซ์ชัน ซึ่งจากการเปรียบเทียบระยะเริ่มเกิดการโก่ง บนพื้นฐานเกณฑ์การคราก Von Mises และเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R และ Hill'48-S พบว่าเกณฑ์การคราก Von Mises ได้ผลลัพธ์ที่ค่อนข้างแตกต่างเนื่องจากการเปลี่ยนรูปเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) แต่ในทางกลับกันเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับเทคนิคอะคูสติกอิมิสซ์ชัน ซึ่งได้ผลมาจากการทดสอบจริง กว่าเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-S และทิศทางขวางแนวรีดจะเกิดการโก่งได้ไวกว่าในทิศทางตามแนวรีด ตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



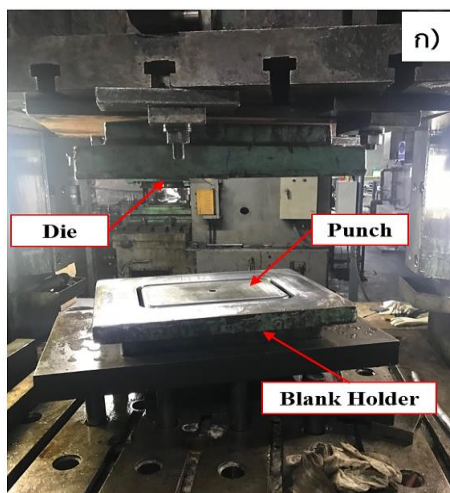
ภาพที่ 4-46 การเปรียบเทียบระยะเริ่มเกิดการโก่ง ในแนวทิศทางตามแนวรีดบนพื้นฐาน Von Mises และเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R และ Hill'48-S



ภาพที่ 4-47 การเปรียบเทียบระยะเริ่มเกิดการโก่ง ในแนวทิศทางขวางแนวรีดบนพื้นฐาน Von Mises เหนือการครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R และ Hill'48-S

4.5 ผลการตรวจพิสูจน์การนำไปใช้งานของเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น กับชิ้นงานขึ้นรูปภาดาอาหารสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องครัว

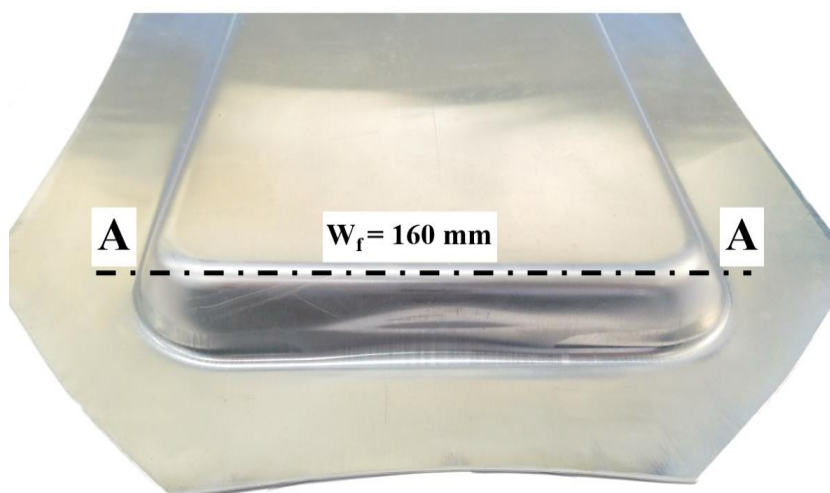
การตรวจพิสูจน์การนำไปใช้งานได้ของเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นบนพื้นฐานความเครียดที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจะดำเนินการเก็บค่าเส้นแนวความเครียดในระยะเดียวกับการทดลองเพื่อตรวจพิสูจน์การใช้งานได้ของเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นจากการทดลองภาดาอาหารจากภาคอุตสาหกรรม ดังภาพที่ 4-48



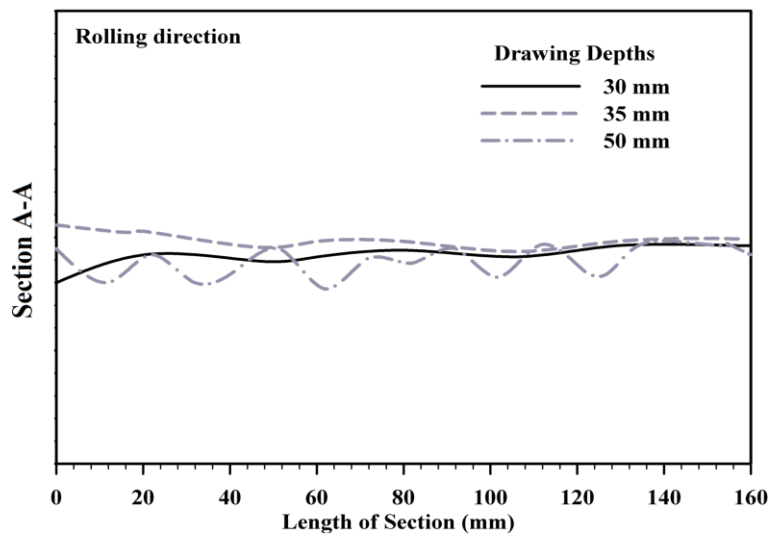
ภาพที่ 4-48 ก)แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน ข)ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

4.5.1 การตรวจพิสูจน์การใช้งานของเส้นโค้งขีดจำกัดการการย่นในทิศทางตามแนวรีด

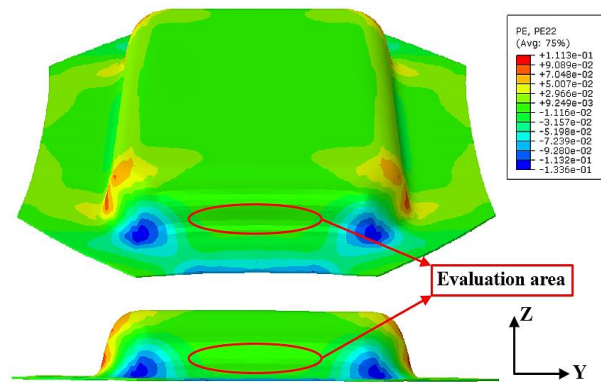
เส้นโค้งขีดจำกัดการการย่น (WLC) ได้ถูกพัฒนาสร้างมาจากการทดลอง การโก่งโยชิตะ ในทิศทางแนวรีด ในรูปแบบสัดส่วนของชิ้นงานขนาดต่าง ๆ การตรวจสอบการนำไปใช้ของเส้นโค้งขีดจำกัดการการย่น เริ่มจากการทดลองถาดอาหารจากภาคอุตสาหกรรม ชิ้นงานทดสอบ 350 X 450 มิลลิเมตร ด้วยชุดพิมพ์แม่พิมพ์จากภาคอุตสาหกรรม เก็บค่าระยะการกดในระยะที่เริ่มเกิดการการย่น บริเวณด้านข้างชิ้นงาน เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ตรวจสอบด้วย ขนาดรอบรูป และระยะการกดชิ้นงาน ขั้นตอนต่อมา ดำเนินการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เงื่อนไขเดียวกับการทดลอง โดยเลือกการเก็บจากจุดความเครียดบริเวณด้านข้างชิ้นงาน จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R และ Hill'48-S ในระยะเดียวกันกับที่ชิ้นงานจากการทดลองจนเกิดการการย่นจากการทดลองพบว่าชิ้นงานกดที่ระยะ 30 มิลลิเมตร มีการการย่นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หลังจากเพิ่มระยะกดที่ 35 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 4-49 ชิ้นงานเกิดการการย่นบริเวณด้านข้าง ซึ่งตรงกับการทำนายด้วยเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R ที่ระบุเส้นเกณฑ์การการย่น แต่ใน ณ เดียวกันเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-S ระบุว่าจะไม่เกิดการการย่น ในระยะการกดที่ 30 มิลลิเมตร ซึ่งจะไม่ตรงกับชิ้นงานภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R สามารถทำนายได้ค่อนข้างใกล้เคียงกว่า ดังภาพที่ 4-53



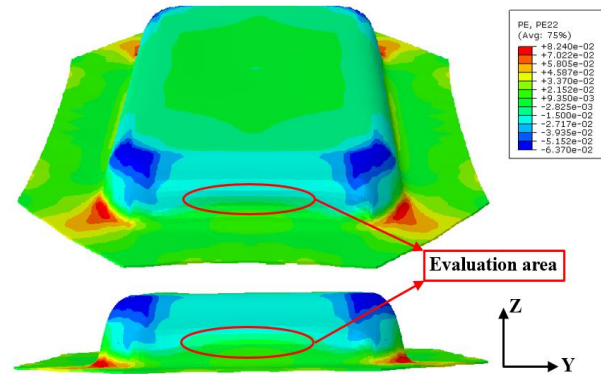
ภาพที่ 4-49 บริเวณการวัดขนาดของรอยย่น บนชิ้นงานถาดอาหาร ในทิศทางตามแนวรีด



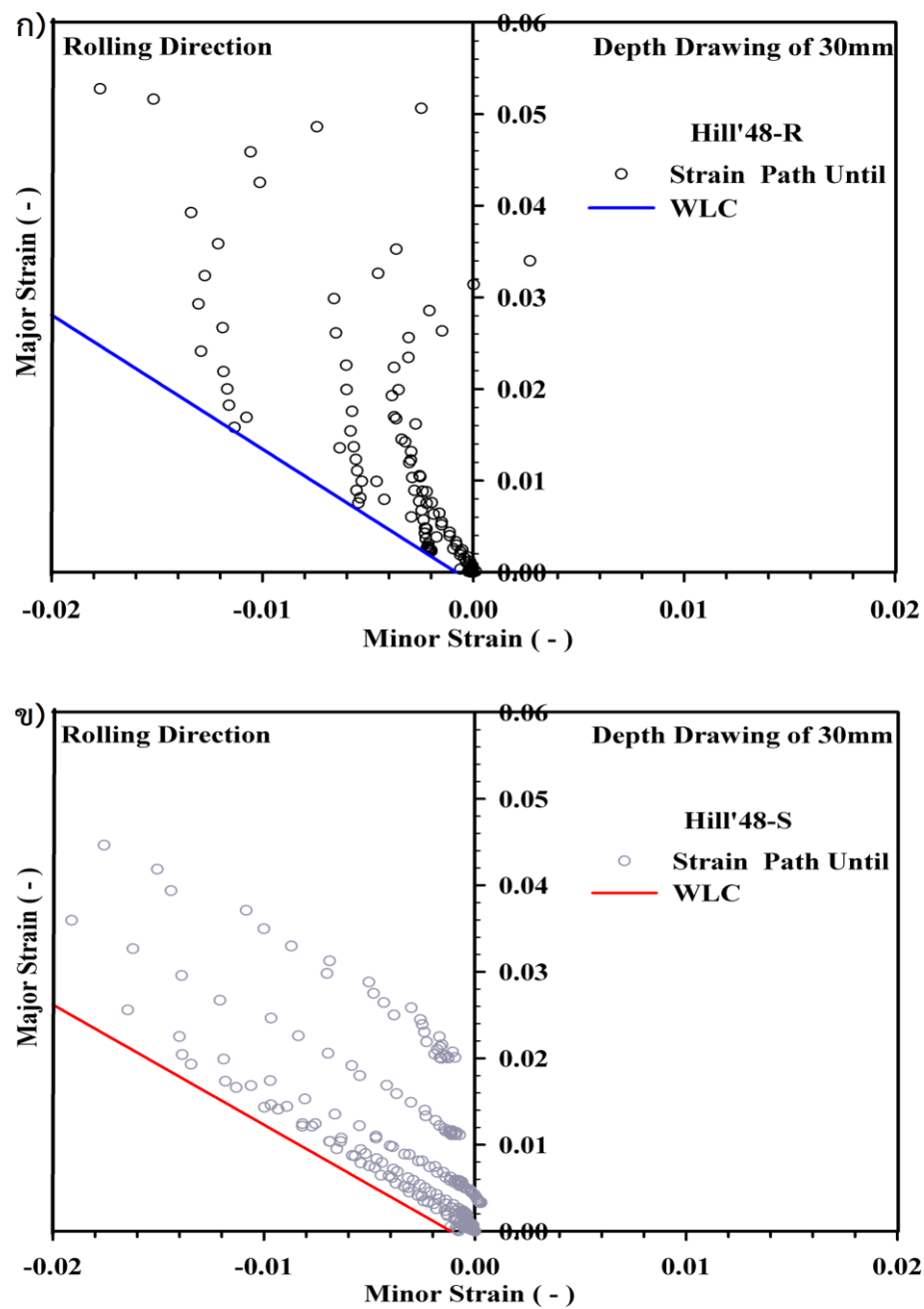
ภาพที่ 4-50 ระยะการกดขึ้นงานถาดอาหาร ในทิศทางตามแนวรีด



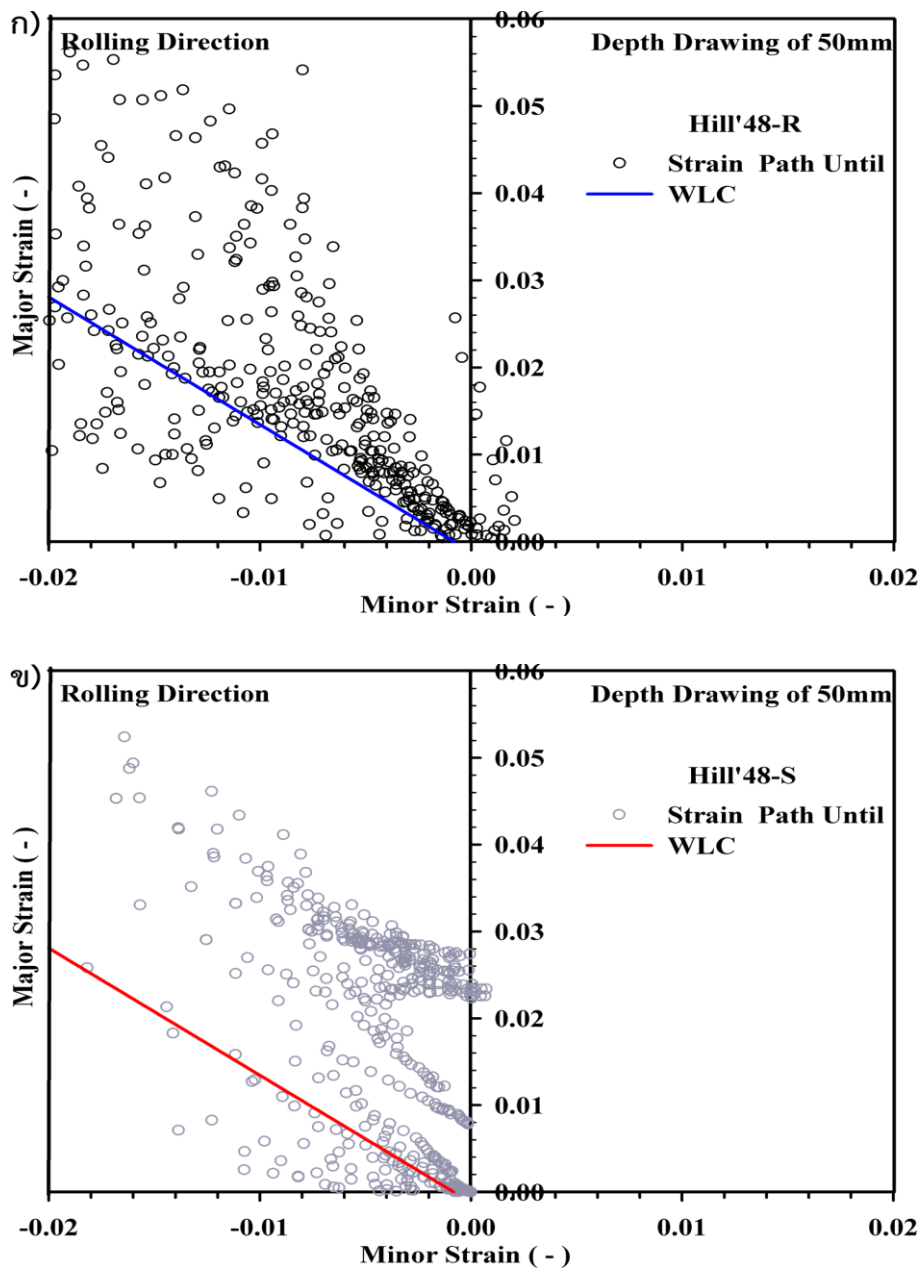
ภาพที่ 4-51 บริเวณการเก็บค่าความเครียดที่ระยะ 30 มิลลิเมตร ในทิศทางแนวรีด
เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R



ภาพที่ 4-52 บริเวณการเก็บค่าความเครียดที่ระยะ 30 มิลลิเมตร ในทิศทางแนวรีด
เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-S

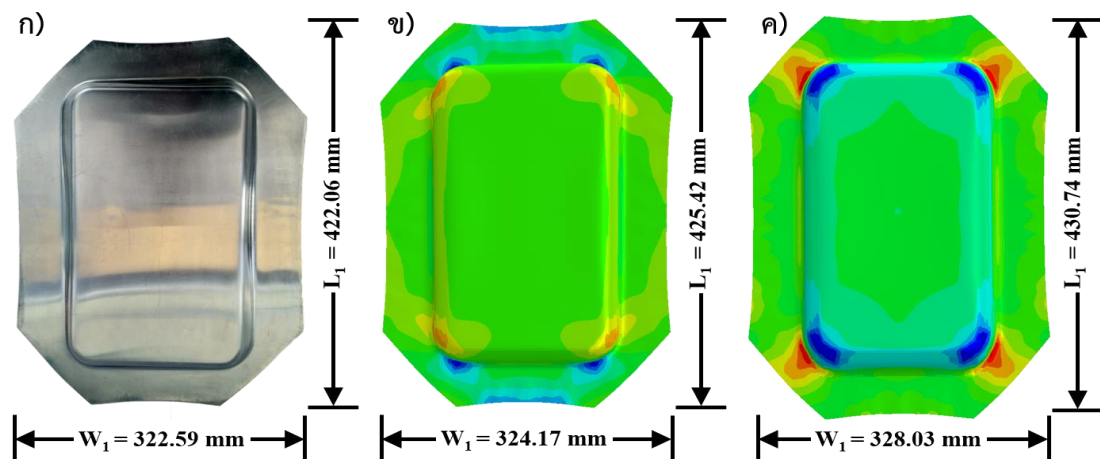


ภาพที่ 4-53 จุดความเครียดจากการจำลอง ที่ระยะ 30 มิลลิเมตรในทิศทางตามแนวรีด
เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ ก) Hill'48-R และ ข) Hill'48-S

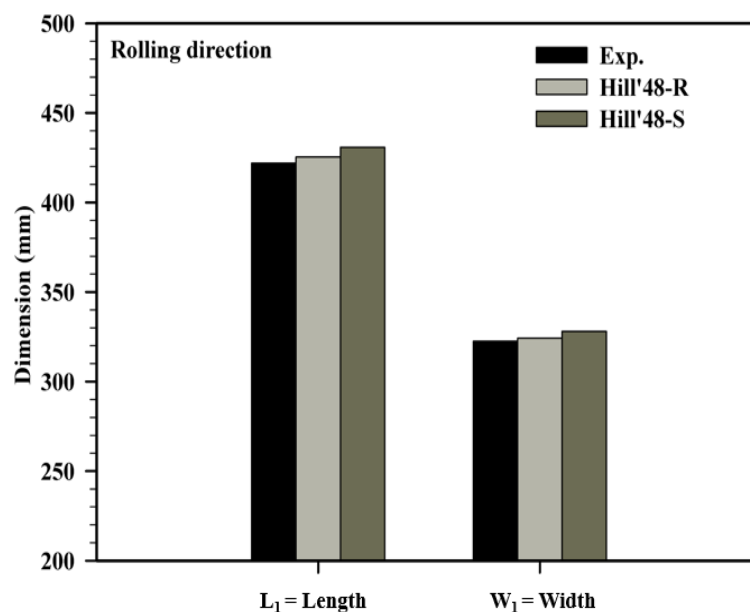


ภาพที่ 4-54 จุดความเครียดจากการจำลอง ที่ระยะ 50 มิลลิเมตรในทิศทางตามแนวรีด
เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ ก) Hill'48-R และ ข) Hill'48-S

จากภาพที่ 4-55 และภาพที่ 4-56 เป็นการเปรียบเทียบขนาดรอบรูปกว้างยาว ชิ้นงานทดสอบ และการจำลองของเกณฑ์การครากที่แตกต่างกัน พบว่าขนาดรอบรูปของเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R ค่อนข้างใกล้เคียงกับชิ้นงานทดสอบ มากกว่าเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-S ซึ่งเป็นการยืนยันความถูกต้อง ในการทำนายผลลัพธ์การพัฒนาเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ในทิศทางตามแนวรีด



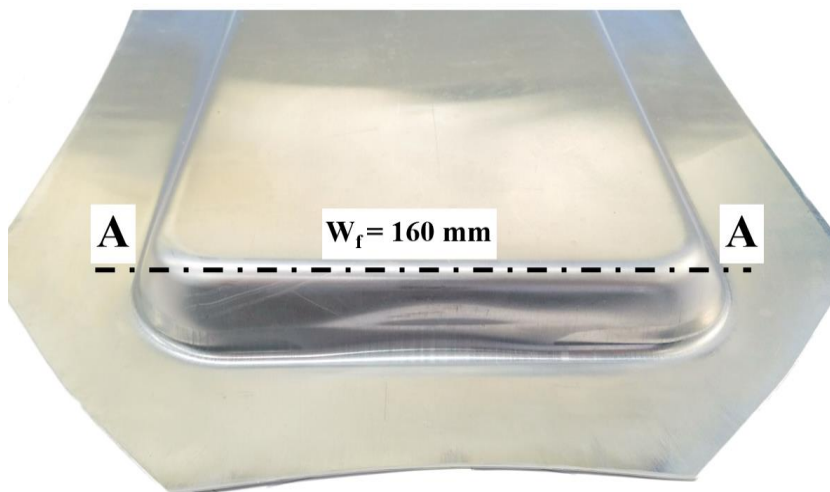
ภาพที่ 4-55 เปรียบเทียบขนาดรอบรูปชิ้นงานทดสอบในทิศทางตามแนวรีด
ก) ชิ้นงานถาดอาหาร เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ ข) Hill'48-R ค) Hill'48-S



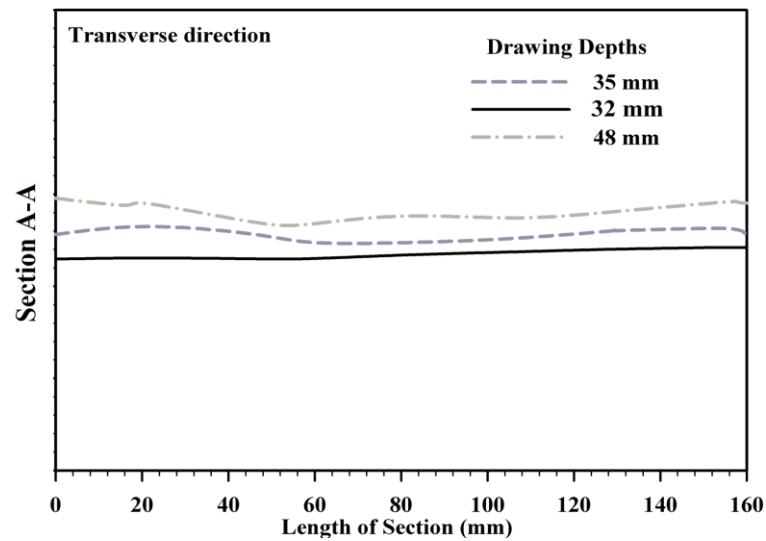
ภาพที่ 4-56 เปรียบเทียบขนาดรอบรูปชิ้นงานถาดอาหาร ในทิศทางตามแนวรีด
บนพื้นฐาน เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R และ Hill'48-S

4.5.2 การตรวจพิสูจน์การใช้งานของเส้นโค้งขีดจำกัดการการย่นในทิศทางขวางแนวนรีด

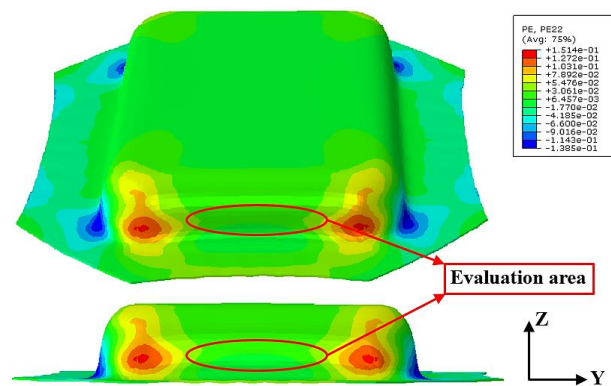
เส้นโค้งขีดจำกัดการการย่น (WLC) ได้ถูกพัฒนาสร้างมาจากการทดลอง การโก่งโยชิตะ ในทิศทางแนวนรีด ในรูปแบบสัดส่วนของชิ้นงานขนาดต่าง ๆ การตรวจสอบการนำไปใช้ของเส้นโค้งขีดจำกัดการการย่น เริ่มจากการทดลองกดอาหารจากภาคอุตสาหกรรม ชิ้นงานทดสอบ 350 X 450 มิลลิเมตร ด้วยชุดพิมพ์แม่พิมพ์จากภาคอุตสาหกรรม เก็บค่าระยะการกดในระยะที่เริ่มเกิดการการย่นบริเวณด้านข้างชิ้นงาน เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ตรวจสอบด้วย ขนาดรอบรูป และระยะการกดชิ้นงาน ขั้นตอนต่อมา ดำเนินการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เงื่อนไขเดียวกับการทดลอง โดยเลือกการเก็บจากจุดความเครียดบริเวณด้านข้างชิ้นงาน จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R และ Hill'48-S ในระยะเดียวกันกับที่ชิ้นงานจากการทดลองจนเกิดการการย่นจากการทดลองพบว่าชิ้นงานกดที่ระยะ 32 มิลลิเมตร มีการการย่นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หลังจากเพิ่มระยะกดที่ 35 มิลลิเมตร และ 48 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 4-57 ชิ้นงานเกิดการการย่นบริเวณด้านข้าง ซึ่งตรงกับการทำนายด้วยเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R ที่ระบุเส้นเกณฑ์การการย่น แต่ใน ขณะเดียวกันเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-S ระบุว่าจะไม่เกิดการการย่น ในระยะการกดที่ 32 มิลลิเมตร ซึ่งจะไม่ตรงกับชิ้นงานภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R สามารถทำนายได้ค่อนข้างใกล้เคียงกว่า ดังภาพที่ 4-61



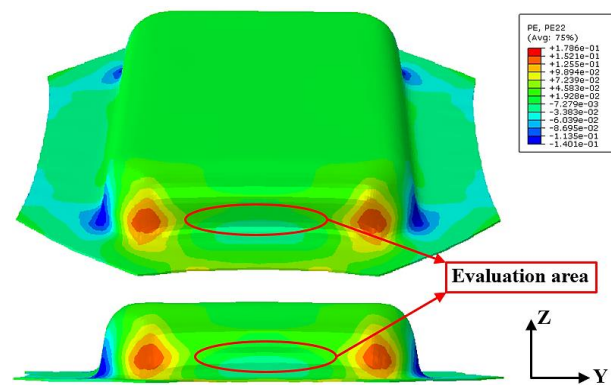
ภาพที่ 4-57 บริเวณการวัดขนาดของรอยย่น บนชิ้นงานกดอาหาร ในทิศทางขวางแนวนรีด



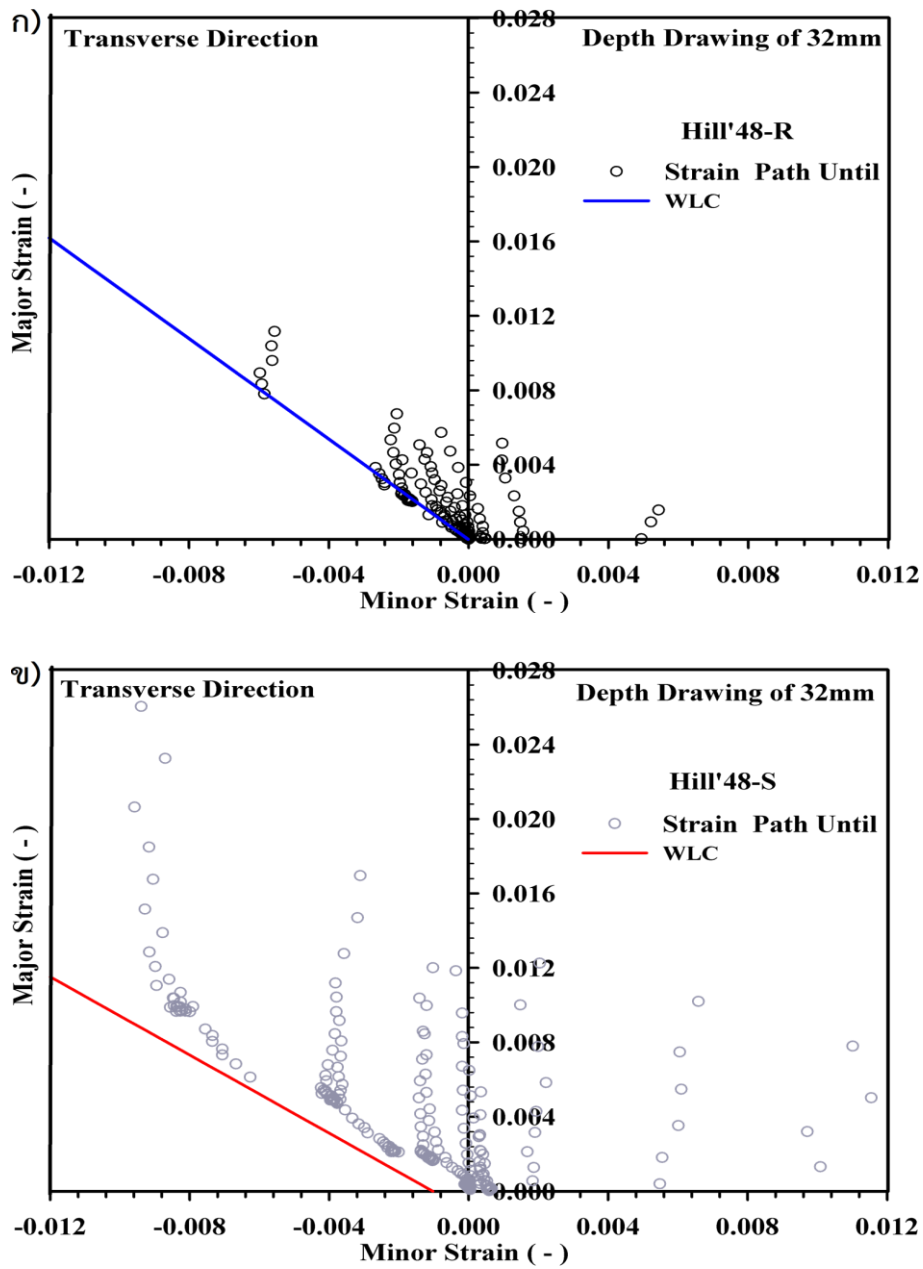
ภาพที่ 4-58 ระยะการกดขึ้นงานถาดอาหาร ในทิศทางขวางแนวรีด



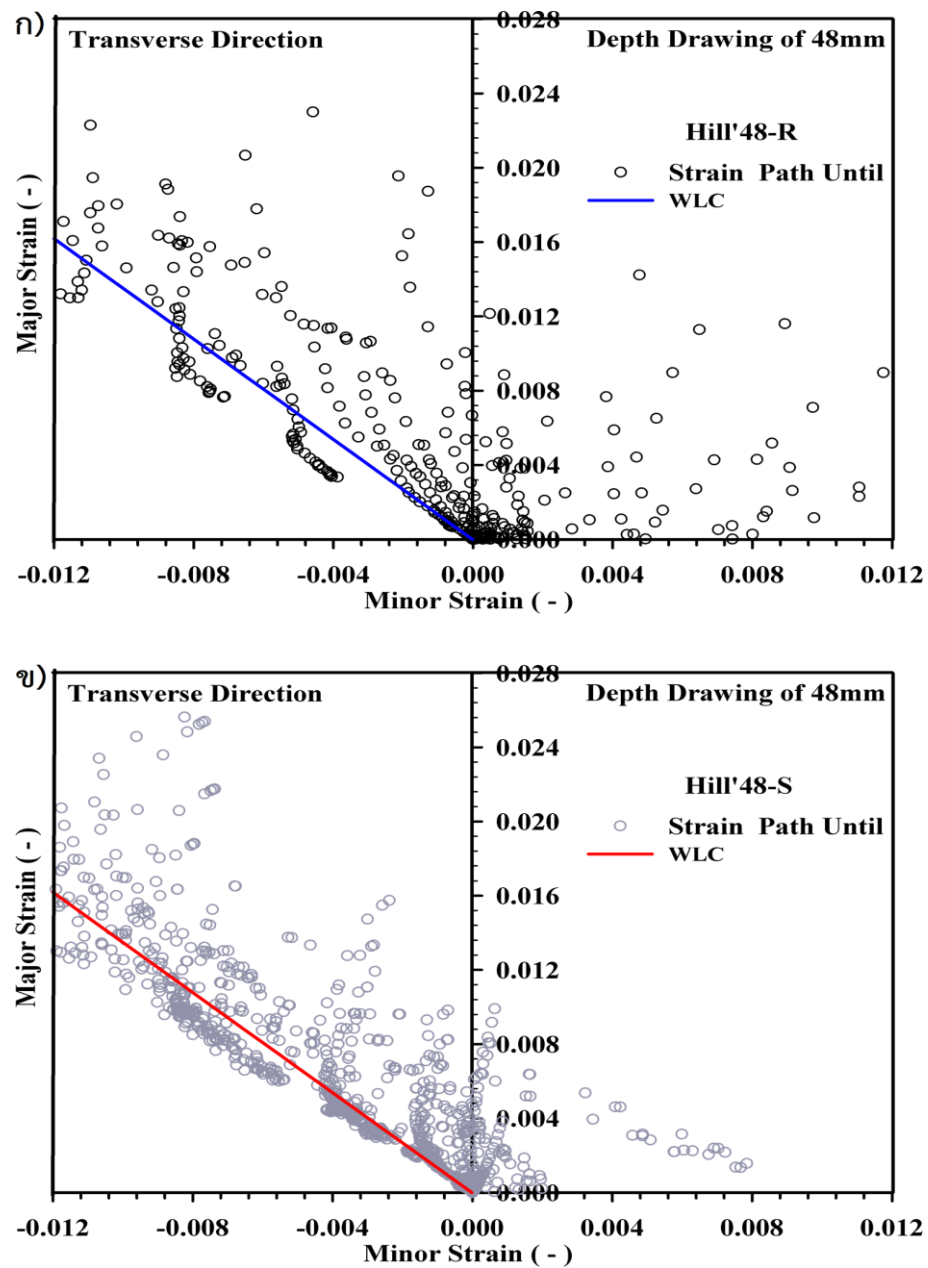
ภาพที่ 4-59 บริเวณการเก็บค่าความเครียดที่ระยะ 32 มิลลิเมตร ในทิศทางขวางแนวรีดเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R



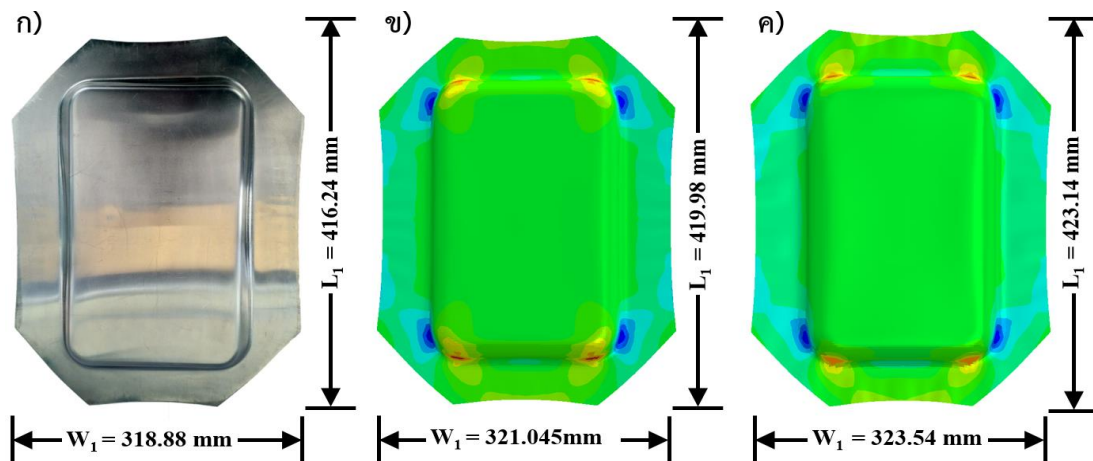
ภาพที่ 4-60 บริเวณการเก็บค่าความเครียดที่ระยะ 32 มิลลิเมตร ในทิศทางขวางแนวรีดเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-S



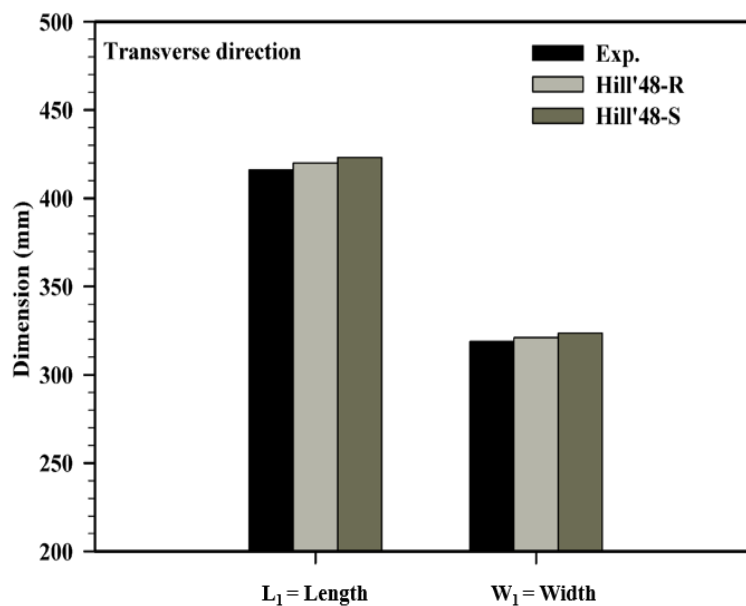
ภาพที่ 4-61 จุดความเครียดจากการจำลอง ที่ระยะ 32 มิลลิเมตรในทิศทางขวางรีด
เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ ก) Hill'48-R และ ข) Hill'48-S



ภาพที่ 4-62 จุดความเครียดจากการจำลอง ที่ระยะ 48 มิลลิเมตรในทิศทางแนวรีด
เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ ก) Hill'48-R และ ข) Hill'48-S



ภาพที่ 4-63 เปรียบเทียบขนาดรอบรูปชิ้นทดสอบในทิศทางขวางแนวนรีด
ก) ชิ้นงานถาดอาหาร เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ ข) Hill'48-R ค) Hill'48-S



ภาพที่ 4-64 เปรียบเทียบขนาดรอบรูปชิ้นงานถาดอาหาร ในทิศทางขวางแนวนรีด
บนพื้นฐาน เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R และ Hill'48-S

จากภาพที่ 4-63 และ 4-64 เป็นการเปรียบเทียบขนาดรอบรูปกว้างยาว ชิ้นงานทดสอบ และการจำลองของเกณฑ์การครากที่แตกต่างกัน พบว่าขนาดรอบรูปของเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-R ค่อนข้างใกล้เคียงกับชิ้นงานทดสอบ มากกว่าเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปี Hill'48-S ซึ่งเป็นการยืนยันความถูกต้อง ในการทำนายผลลัพธ์การพัฒนาเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นในทิศทางขวางแนวนรีด

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น (Wrinkling Limit Curve; WLC) จากการทดสอบการโก่งโยชิตะ (Yoshida Bucking Test) การจำลองทดลอง และตรวจสอบด้วยชิ้นงานภาคอุตสาหกรรม เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินความสามารถในการขึ้นรูปได้ในขีดจำกัดการย่นของแผ่นอลูมิเนียมผสม เกรด AA5052 – O ความหนา 1 มิลลิเมตร โดยที่เปลี่ยนขนาดความกว้างของชิ้นงานที่แตกต่างกันด้วยรัศมีบริเวณปีกของชิ้นทดสอบที่แตกต่างกัน วัดค่าความเครียดของการเริ่มโก่งตัวบนชิ้นงาน นำค่าที่ได้พัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นบนพื้นฐานความเครียดด้วยความสัมพันธ์ความเครียดหลัก (Major Strain) และความเครียดรอง (Minor Strain) เส้นโค้งขีดจำกัดการย่น ถูกพัฒนาสร้าง จากการคำนวณสภาพการเปลี่ยนรูปพลาสติก ร่วมกับกฎการทำให้แข็งด้วยความเครียดของสวิตซ์ ด้วยเกณฑ์การครากของ Hill'48-R และ Hill'48-S โดยใช้ข้อมูลจากเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นที่ได้จากการทดลอง ตรวจสอบพิสูจน์ความสามารถในการประยุกต์ใช้งานเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น เปรียบเทียบผลการจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และตรวจสอบความเสียหายแบบไม่ทำลายด้วยวิธีอะคูสติกอีมีสชันเพื่อนำมาวิเคราะห์สัญญาณ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง และการจำลองการทดลอง

ผลการศึกษาอิทธิพลของทิศทางตามแนวรีด-ทิศทางขวางแนวรีด ขนาดความกว้างของชิ้นงานที่แตกต่างกันด้วยรัศมีบริเวณปีกของชิ้นทดสอบที่แตกต่างกันของแผ่นอลูมิเนียมผสมจากการทดลอง และการจำลองโดยศึกษาจากการทดสอบการโก่งโยชิตะ (Yoshida Bucking Test) ทั้งชิ้นงานที่ผ่านการดัดทดสอบ เปรียบเทียบกับการแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านเกณฑ์การครากของ Hill'48 พบว่าแรง-ระยะทางของชิ้นทดสอบใกล้เคียงกันโดยมีการคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยทั้งทิศทางตามแนวรีด และขวางแนวรีด โดยดำเนินการเนื่องจากต้องการพิสูจน์แบบจำลองว่าถูกต้อง แสดงผลของความต่างของรัศมีโค้งบริเวณปีกที่ขอบชิ้นงานเป็นไปในทางเดียวกัน

1. ชิ้นทดสอบที่มีรัศมีน้อยจะส่งผลต่ออิทธิพลในการโก่งมากกว่า เนื่องจากชิ้นทดสอบขณะดัดรัศมีส่วนโค้งของชิ้นทดสอบจะเกิดความเค้นสะสมตามแนวปีก ในขณะเดียวกันชิ้นทดสอบที่มีรัศมีส่วนโค้งใหญ่จะมีการกระจายตัวของความเค้น และความเครียดเป็นบริเวณกว้าง

2. พบว่าเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R ความใกล้เคียงกว่า Hill'48-S เนื่องจากพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปที่ไม่เท่ากันทุกทิศทาง ค่า r -Value มีผลกระทบต่อการทำนายพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแอนไอโซทรอปิกได้มากกว่า ค่า Yield Stress เพราะผลของการเปลี่ยนรูปขึ้นแรกมากจากค่าความเครียด ซึ่งค่า r -Value มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนรูป หรือความเครียดอันดับต่อมาจึงเป็นแรง หรือความเค้น

3. การดำเนินการทดสอบการโก่งโยชิตะ พบว่าทิศทางตามแนวรีดจะเกิดการโก่งที่ช้ากว่า เนื่องจากความสามารถในการยึดตัวได้ดีในแนวแกน แต่ในทางกลับกันกับทิศทางขวางแนวรีดจะเกิดการโก่งอย่างฉับพลันจากการสะสมความเครียดจากแนวรีด ซึ่งแนวรีดส่งผลสำคัญต่อการเปลี่ยนรูป

4. สัดส่วนชิ้นทดสอบมีผลต่อการเกิดการโก่ง

5.1.2 การพัฒนาเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น

1. การระบุการเกิดเริ่มการย่น โดยใช้วิธีการเบี่ยงเบนของความเครียดได้ผลที่ค่อนข้างแม่นยำ สามารถนำไปพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น และใช้ได้นำไปใช้ตรวจพิสูจน์ด้วยชิ้นงานภาคอุตสาหกรรม

2. ผลการเปรียบเทียบการพัฒนาเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นจากเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปีของ Hill'48-R ความใกล้เคียงกว่า Hill'48-S รวมถึงเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นจากการคำนวณพื้นฐาน เนื่องด้วยพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูป ตามที่อธิบายไว้ในข้างต้น

3. พฤติกรรมของความเค้นกด (Compression Stress) ในทิศทางแนวแกนไม่สามารถระบุการเริ่มเกิดการย่นได้อย่างชัด ซึ่งในบางกรณีการทดสอบไม่พบพฤติกรรมดังกล่าวในบางกรณี จึงดำเนินการสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น จากวิธีการเบี่ยงเบนของเครียดทั้งหมด

5.1.3 การนำไปใช้งานของเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น

1. การตรวจพิสูจน์การนำไปใช้งานของเส้นโค้งที่ได้พัฒนาขึ้นด้วยชิ้นงานภาคอุตสาหกรรม บริเวณด้านข้างผนังชิ้นงาน ที่เกิดการย่นได้ง่าย ในระหว่างการขึ้นรูป ผลจากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เงื่อนไขเดียวกับการทดลอง โดยเลือกกระยะการเก็บบริเวณที่เกิดการย่นของความเครียด และความเค้นจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในระยะเดียวกันกับที่ขึ้นงานจากการทดลอง พบว่าบริเวณความเครียดวังขนานเส้นขีดจำกัดการย่นบนพื้นฐานความเครียด และความเครียดตกลงเมื่อวัสดุเกิดความเสียหายเนื่องจากการย่นแล้ว ผลที่ได้จากการจำลองสอดคล้องกับผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า เส้นโค้งที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริง

5.1.4 อะคูสติคอีมีสชันจากการทดสอบการโก่งโยชิตะ

วิเคราะห์ และประเมินผลลักษณะสัญญาณพีคเจอร์ของ ค่าระดับสูงสุดของสัญญาณแอมพลิจูด (AE Maximum Amplitude, AE_{Max}) ค่าเฉลี่ยของสัญญาณแอมพลิจูด (Root Mean Squared, AE_{RMS}) และระดับพลังงานของสัญญาณ (Burst Energy, AE_{Energy}) พบว่ารูปแบบชิ้นงานของสภาวะสัดส่วนแบบต่าง ๆ จะแสดงค่าลักษณะของสัญญาณที่แตกต่างกัน

1. การดำเนินการทดสอบการโก่งโยชิตะ ในทิศทางขวางแนวรีด มีค่า AE_{RMS} สูงกว่าชิ้นงานที่ทดสอบในทิศทางตามแนวรีด เนื่องจากเป็นการขวางทิศทางแนวรีดเดิม ส่งผลให้เนื้อวัสดุเกิดการเปลี่ยนรูป ถูกดัดยึดในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้สัญญาณที่ได้เข้มข้น แต่ในทิศทางตามแนวรีดเป็นการเปลี่ยนรูปในทิศทางเดิม สัญญาณที่ได้รับจึงต่ำกว่า และมีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่า AE_{Max} และค่า AE_{Energy}

2. เทคนิคอะคูสติคอีมีสชันสามารถตรวจสอบช่วงเวลาพฤติกรรมการโก่ง รวมถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปต่างๆ โดยใช้แนวโน้มจากพีคเจอร์ของ ค่า AE_{RMS} ค่า AE_{Max} และค่า AE_{Energy}

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

5.2.1 การพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น สามารถตรวจพิสูจน์ได้ว่า เส้นโค้งขีดจำกัดการย่นที่พัฒนาขึ้น สามารถประเมินความเสียหายจากการย่นได้อย่างใกล้เคียง ทั้งในทิศทางตามแนวรีด และขวางแนวรีด

5.2.2 สามารถตรวจพิสูจน์การนำไปใช้งานของเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นที่ได้พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับชิ้นงานภาคอุตสาหกรรม ในกระบวนการขึ้นรูปลึก

5.2.3 พัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่น สามารถใช้ประเมินความสามารถประเมินความเสียหายจากการย่นได้ ของโลหะแผ่นอลูมิเนียมผสมเกรด AA5052-O หนา 1 มิลลิเมตร

5.2.4 พฤติกรรมของสมบัติที่ไม่เท่ากันทุกทิศทางของวัสดุ มีผลต่อเส้นขีดจำกัดการเกิดรอยย่น และแสดงถึงพฤติกรรมการย่นที่แตกต่างกัน

5.2.5 สามารถนำเทคนิคอะคูสติกอิมิสชั่น ตรวจสอบวิเคราะห์ประเมินผลลักษณะของสัญญาณต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูป โดยสามารถอธิบายได้ถึงความสัมพันธ์กับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ความเสียหายของโครงสร้างวัสดุที่เกิดขึ้นในระหว่างทดสอบ

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุมีความสำคัญอย่างมาก ในการกำหนดพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ ในการพัฒนาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นจากการคำนวณ และการสร้างแบบจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงควรศึกษา และมีความเข้าใจการคำนวณค่าตัวแปรต่าง ๆ เป็นอย่างดี และทดลองซ้ำเพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียง

5.3.4 เพื่อความใกล้เคียงในการตรวจวัดค่าความเครียดมากยิ่งขึ้นควรใช้ระบบวัดความเครียดแบบ Optical Strain Measurement System 3D, GOM, ARAMIS

5.3.5 ในขั้นตอนการทดลองตรวจสอบด้วยวิธีอะคูสติกอิมิสชั่น ควรจะควบคุมกระบวนการทดลองให้เกิดสัญญาณรบกวนจากปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ให้น้อยที่สุด และมีค่าที่เท่ากันตลอดการทดลอง เพื่อความถูกต้องใกล้เคียงของสัญญาณที่ได้

5.3.6 การศึกษาเพื่อพัฒนาต่อจากงานวิจัยนี้ การพัฒนาเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นบนพื้นฐานความเครียด และความเค้น ด้วยระบบวัดความเครียดแบบ Optical Strain Measurement System 3D, GOM, ARAMIS บนชิ้นงานทดสอบโดยตรงเพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียง

เอกสารอ้างอิง

1. Banabic, D. (2010). Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical Simulation. Berlin : Springer.
2. Pham, C. H., Thuillier, S. and Manach, P. Y. (2014). "Twisting Analysis of Ultra-Thin Metallic Sheets." Journal of Materials Processing Technology. Vol. 214 (1) : 844 - 855.
3. Kim, S. H. (2007). "Improvement of the Surface Quality of an Automotive Member by a modification of the stamping tool." Journal of Materials Processing Technology." Vol. 187 : 387-391.
4. Anarestani, S. S., Morovvati, M. R. and Vaghasloo, Y. A. (2015). "Influence of Anisotropy and Lubrication on Wrinkling of Circular Plates using Bifurcation Theory. " International Journal of Material Forming. Vol. 8 (3) : 439-454.
5. World Auto Steel. (2017). [online]. Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines Version 5.0. [Cited Sep 12, 2018]. Available from : URL : <http://www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel/application-guidelines/>
6. Kim, J. B. and Yang, D. Y. (2003). "Prediction of Wrinkling Initiation in Sheet Metal Forming Processes." Engineering Computations. Vol. 20 (1) : 6-39.
7. พิจิตร บัวระภา. (2555). อิทธิพลของความเค้นและความเครียดตกค้างที่มีผลต่อการเกิดรอยยับในกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
8. ณัฐพล ศิริสว่าง. (2541). การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบวิธีการตรวจสอบความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่น. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
9. สุรสิทธิ์ แก้วพระอินทร์. (2554). คุณสมบัติทางกลของโลหะในโลหะวิทยาเบื้องต้น. กรุงเทพฯ : วีพรีน 1991.
10. Marcinaik, Z. and Duncan, J. L. (1992). The Mechanics of Sheet Metal Forming. London : Edward Arnold.
11. Gutscher, G., et al. (2000). Evaluation of Formability and Determination of Flow Stress Curve of Sheet Metals with Hydraulic Bulge test. Ohio : The Ohio State University.
12. วารุณี เปรมมานนท์ และพงศ์พันธ์ แก้วตาพิทย. (2547). แม่พิมพ์โลหะแผ่น. พิมพ์ครั้งที่ 11 กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

13. ชามู ถนัดงาน. (2547). เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะพื้นฐานและการขึ้นรูปโลหะแผ่น.
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชา
วิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ.
14. Hosford, W. F. and Caddell, R. M. (2011). Metal Forming: Mechanics and Metallurgy. New York : Cambridge University Press.
15. Altan, T. and Tekkaya, A. E. (Eds.). (2012). Sheet Metal Forming: Fundamentals.
Ohio : Asm International.
16. Kim, J. B., Yoon, J. W. and Yang, D. Y. (2000). “Wrinkling Initiation and Growth in
Modified Yoshida Buckling test: Finite Element Analysis and Experimental
Comparison.” International Journal of Mechanical Sciences. Vol. 42 (9)
: 1683-1714.
17. Kim, S. N. (2011) Evaluation of Constitutive Models for Formability of DP and
TRIP Steel Sheets. Department of Ferrous Technology (Materials Mechanics).
Graduate Institute of Ferrous Technology. Pohang University of Science and
Technology.
18. Kim, S. N. and JY, Lee. (2010). Yield Functions and Material Anisotropy Finite
Element Treatment and Verification in Plane Stress. (n.p.) : Graduate Institute
of Ferrous Technology, Materials Mechanics Lab.
19. Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T. (1989). Metal Forming and the Finite-
Element Method (Vol. 4). New York : Oxford University Press on Demand.
20. เสริมสุข บัวเจริญ. (2546). การออกแบบและพัฒนาหัวตรวจสอบอะคูสติคมีมิกซ์.
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
21. กิจไพบูลย์ ชีวพันธุ์ศรี. (2554). LabVIEW ซอฟต์แวร์เพื่อการพัฒนากระบวนการวัดและควบคุม.
กรุงเทพ : ซีเอ็ดยูเคชั่น
22. Dick, R. E. and Yoon, J. W. (2015). “Wrinkling During Cup Drawing with
NUMISHEET2014 benchmark test.” Steel Research International. Vol. 86 (8)
: 915-921.
23. Bleck, W, (2007) Materials Characterization of Steel Student Book. (n.p.) : RWTH
Aachen University.
24. Shafaat, M. A., Abbasi, M. and Ketabchi, M. (2011). “Investigation into Wall
Wrinkling in Deep Drawing Process of Conical Cups.” Journal of Materials
Processing Technology. Vol. 211 (11) : 1783-1795.

25. Wang, C. T., Kinzel, G. and Altan, T. (1994). "Wrinkling Criterion for an Anisotropic Shell with Compound Curvatures in Sheet Forming." International Journal of Mechanical Sciences. Vol. 36 (10) : 945-960.
26. Tomita, Y., Shindo, A. and Fatnassi, A. (1988). "Bounding Approach to the Bifurcation Point of Annular Plates with Nonassociated Flow Law Subjected to Uniform Tension at Their Outer Edges." International Journal of Plasticity. Vol. 4 (3) : 251-263.
27. Kim, J. B., Yoon, J. W. and Yang, D. Y. (2003). "Investigation into the Wrinkling Behaviour of Thin Sheets in the Cylindrical Cup Deep Drawing Process Using Bifurcation Theory." International Journal for Numerical Methods in Engineering. Vol. 56 (12) : 1673-1705.
28. Agrawal, A., Reddy, N. V. and Dixit, P. M. (2007). "Determination of Optimum Process Parameters for Wrinkle Free Products in Deep Drawing Process." Journal of Materials Processing Technology. Vol. 191 (1-3) : 51-54.
29. Neto, D. M., et al. (2017). "Numerical and Experimental Analysis of Wrinkling During the Cup Drawing of an AA5042 Aluminium Alloy." International Journal of Material Forming. Vol. 10 (1) : 125-138.
30. Schleich, R., Albiez, C. and Papaioanu, A. (2009). "Investigation on Simulation of Buckling of Aluminium Sheet Alloys." In Proceeding of The 7TH European LS-DYNA Conference. (n.p.) : In 7TH European LS-DYNA Conference.
31. Schleich, R., Sindel, M. and Liewald, M. (2009). "A New Approach for Determination of the Wrinkling Limit Curve (WLC) in Deep Drawing." In Proceeding of The 8TH Forming Technology Forum Zurich 2015. Switzerland : Advanced Constitutive Models in Sheet Metal Forming; (77-82). International Journal of Material Forming. Vol. 2 (2) : 69 - 74.
32. Narayanasamy, R., Satheesh, J. and Loganathan, C. (2008). "Effect of Mechanical Properties on Wrinkling Limit Diagrams for Aluminum 5086 Alloy Annealed at Different Temperature." Journal of materials science. Vol. 43 (1) 43.
33. Han, F. and Radonjic, R. (2015). "New Approach for Wrinkle Prediction in Deep Drawing Process." In Key Engineering Materials. Vol. 639 : 459-466. Trans Tech Publications Ltd.
34. Wu, Z., Shen, G. and Wang, S. b. (2008). "The Acoustic Emission Monitoring During the Bending Test of Q235 Steel Box Beam." In Proceeding of The 17TH World Conference on Nondestructive Testing (WCNT). Shanghai China : (n.p.), (25-28).

35. Gallego, A., et al. (2010). "Acoustic Emission During Three-Point Bending Test of Corroded Galvanized Steel." In Proceeding of The International Conference of European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE). Vienna Austria : (n.p.), (8-10).
36. Aggelis, D. G., Kordatos, E. Z. and Matikas, T. E. (2011). "Monitoring of Metal Fatigue Damage Using Acoustic Emission and Thermography." Journal of Acoustic Emission. Vol. 29 : 113 - 122.
37. Behrens, B. A., et al. (2011). "Online Monitoring of Deep Drawing Process by Application of Acoustic Emission." In Proceeding of The 10TH International Conference on Technology of Plasticity. Steel Research International Special Edition : Verl. Stahleisen GmbH, Düsseldorf, (385-389).
38. Behrens, B. A., Santangelo, A., and Buse, C. (2013). "Acoustic Emission Technique for Online Monitoring During Cold Forging of Steel Components : A Promising Approach for Online Crack Detection in Metal Forming Processes." Production Engineering. Vol.7 (4) : 423 - 432.
39. Behrens, B. A., et al. (2016). "Potentials of In Situ Monitoring of Aluminum Alloy Forging by Acoustic Emission." Archives of Civil and Mechanical Engineering. Vol. 16 (4) : 724 - 733.
40. Seemuang, N., Panich, S. and Slatter, T. (2017). "Bendability Evaluation of Sheet Metals in Three-point Bending Test by Using Acoustic Emission Features." The Journal of Applied Science. Vol. 16 (2) : 15-22.
41. Kalawong, P., Seemuang, N., and Panich, S. (2018). Influence of Thickness of AA5052-H32 Aluminum Alloy Sheet on Bendability Using Acoustic Emission Features. In 2018 2nd International Conference on Engineering Innovation (ICEI). IEEE : (n.p.), (24-29).
42. Stachowicz, F. (2003). "Biaxial Stress-Strain Relationship of Sheet Metal From Hydraulic Bulging Test." In Proceeding of The 5TH International

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่มที่ เลขที่ และหน้า) หรือผลงานตามที่ได้คาดไว้ในสัญญาโครงการ
 1. Manuscript ได้ถูกเตรียมเพื่อนำพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ Journal of Material Forming SCI/SCIE ชื่อบทความ Development of Wrinkling Limit Curves of Aluminum Alloy Sheet and its Application to Rectangular Cup Deep Drawing Process.
 2. บทความในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ 2 เรื่อง และบทความนั้นถูกตีพิมพ์ใน Key Engineering Material สามารถค้นเจอได้จากฐานข้อมูล SCOPUS
 - 2.1 Determination of Wrinkling Limit Curves of Aluminum Sheet using a Modified Yoshida Buckling Test
 - The 2nd Materials Research Society of Thailand International Conference (MRS-Thailand 2019)
 - 2.2 Wrinkling Prediction of Rectangular Cup Deep Drawing Process for aluminum alloy sheets by using the Modified Yoshida Buckling Test
 - 2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C 2019).

ภาคผนวก

Manuscript to Submitted into International Journal of Material Forming for
considering to publish

Presented by

Asst. Prof. Dr. Sansot Panich

Development of Wrinkling Limit Curves of Aluminum Alloy Sheet and its Application to Rectangular Cup Deep Drawing Process.

C. Yamchoang¹, T. Bunyan¹, V. Uthaisangsuk², S. Panich^{1,*}

¹Department of Production Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Bangsue, Bangkok, 10800, Thailand

²Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi
Bang Mod, Thung Khru, Bangkok, 10140, Thailand

*email: sansot.p@eng.kmutnb.ac.th

Abstract. Wrinkling, tearing and excessive springback are the most critical defects in sheet metal forming processes. Presently, the industries have shown a growing interest in applying lightweight materials. A recent trend is to reduce the thickness of metallic sheets, which will even more increase the likelihood of wrinkle formation in formed parts. To obtain a defect-free component, the prediction of wrinkling is also important for tool design and selection of process parameters. In this study, wrinkle formations of aluminum alloy sheet grade AA5052-O and AA5052-H32 were investigated by means of experimental and numerical approach. The modified Yoshida bucking tests were firstly conducted for both aluminum sheets. Then, FE simulations of the tests were carried out, in which the anisotropic Hill'48 yield criterion and Swift strain hardening law were taken into account. As a result, local principle strains of observed wrinkle areas were gathered and correlated with corresponding compressive stresses for identifying the wrinkling initiation state. Finally, the wrinkling limit curves (WLCs) of examined aluminum grades could be determined and their wrinkling initiation limits were compared.

Keywords: Wrinkling limit curves; Modified Yoshida bucking tests; Aluminum sheets; Wrinkling initiation

Introduction

Several major defects can arise in sheet metal forming processes, such as springback, tearing and wrinkling [1,2]. Recently, thickness reduction of sheet metals employed in various engineering components is aimed so that the possibility of wrinkling occurrence during a forming process is strongly increased. Due to aesthetic and/or functional reasons, wrinkles in finished sheet metal parts is basically undesired. Also, such fold is unacceptable in the automotive outer body panels, where the visual appearance is essential [3]. Furthermore, severe wrinkles may damage or even largely destroy the forming tools and dies due to high contact pressures arising in the areas subjected to the wrinkling [4]. The initiation and development of wrinkles are influenced by many factors such as mechanical behaviour of sheet material including anisotropic properties, current stress state, tooling geometry, contact conditions, friction, and other process boundary conditions [5]. Many studies have been done to predict the occurrence, shape, and number of wrinkles in sheet metal forming. Nevertheless, these studies presented a wide scattering of data and small deviations of each involving factors, as it is common for instability phenomena [6]. Some analytical methods provided an insight of general tendency and effects of individual parameters on the onset of wrinkling [7]. In addition, wrinkling is also investigated by using the finite element method (FEM), which can provide detailed factors concerning the wrinkling behavior of sheet metals in complex industrial problems. For example, the buckling analysis with FEM could be performed using two different approaches, namely, strain bifurcation analysis of strain paths [8] and considering transition from compression to tensile stress [9,10]. In this work, a methodology to obtain wrinkling limit curves (WLC) was introduced for aluminum alloy sheet grade AA5052-O and AA5052-H32. The

experimental modified Yoshida buckling tests were performed and corresponding FE simulations were conducted simultaneously. The Hill'48 anisotropic yield criterion coupled with the Swift hardening law was taken into account to describe anisotropic plastic flow behavior of material. Finally, influences of different materials and sample geometries on wrinkle formation and WLCs were analyzed and concluded.

Material characterization

Firstly, uniaxial tensile tests were carried out on a universal testing machine using the ASTM E8 standard specimen for the aluminum alloy sheets grade AA5052-O and AA5052-H32 with the initial thickness of 1.0 mm. A constant strain rate of 0.001 s^{-1} was applied and maintained during the whole test. The samples prepared along three directions, namely, 0° , 45° and 90° from the rolling direction (RD) were investigated to determine their quasi-static stress-strain curves and r -values. The r -values were calculated by a linear approximation of true strains in width and thickness of specimens measured up to the overall elongation of 14%. The yield strength (YS), ultimate tensile strength (UTS), uniform elongation, total elongation and r -values of materials under each loading direction were obtained, as shown in Table 1 and Table 2. The grade AA5052-H32 showed very strong anisotropic characteristics with regard to the r -values and total elongations. Furthermore, the experimentally determined plastic true stress-strain curves from varying three directions are illustrated in Fig. 1a for both investigated aluminum alloys.

Table 1 Determined mechanical tensile properties of AA5052-O grade.

Direction	Yield Stress (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	r -value
0°	58.46	158.62	31.9	0.6234
45°	60.19	156.37	30.3	0.7286
90°	62.32	154.51	31.6	0.6670

Table 2 Determined mechanical tensile properties of AA5052-H32 grade.

Direction	Yield stress (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)	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

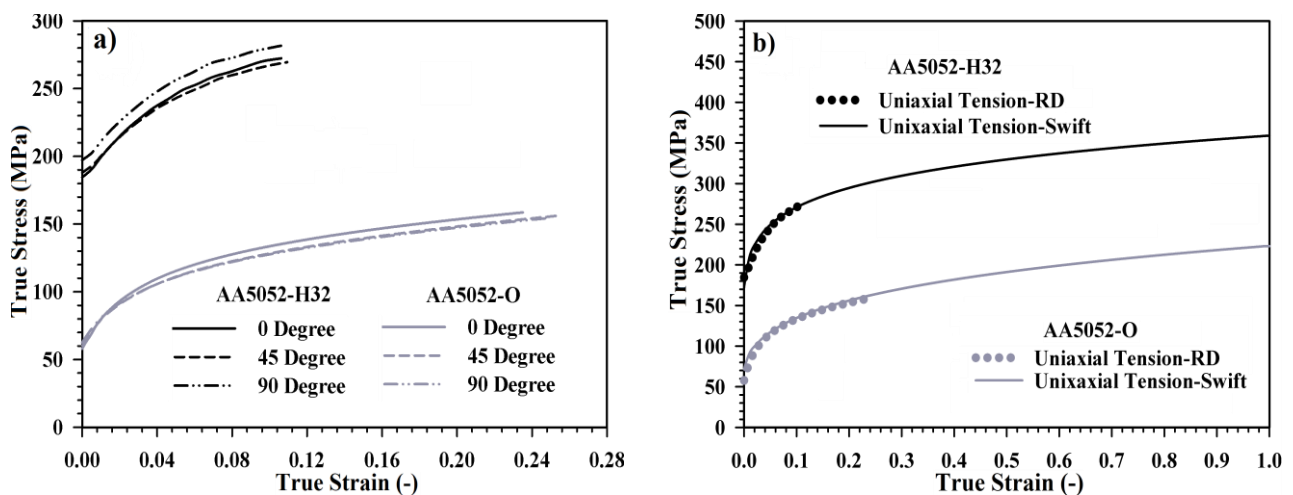


Figure 1 (a) True stress-strain curves of aluminum alloy grade AA5052-O and AA5052-H32 determined by uniaxial tensile tests under different directions and (b) their extrapolations using the Swift hardening law

Material Models

Hill' 48 Yield Criterion. The quadratic anisotropic Hill' 48 yield criterion proposed in [11] was applied in this work for describing the anisotropic plastic deformation of the investigated aluminum alloy sheets. The general expression of the yield potential of Hill's 48 yield function is given in Eq. 1 for plane stress condition, which is a good approximation of sheet metal in forming process.

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

Where F , G , H and N are the anisotropic coefficient parameters. They could be directly gathered from uniaxial yield stress at the rolling direction (RD) and r -values at 0° , 45° , and 90° to RD.

Swift hardening model. Moreover, the Swift hardening law was used to extrapolate the plastic stress-strain curves of investigated aluminum alloys which were obtained from the uniaxial tensile test under RD, as expressed in Eq. (2)

$$\bar{\sigma} = K(\bar{\varepsilon}_0 + \bar{\varepsilon}_p)^n \quad (2)$$

Where $\bar{\sigma}$ and $\bar{\varepsilon}_p$ are the effective plastic true stress and strain, respectively. K , n and ε_0 are the material constants, which were determined from the experimental uniaxial true stress-strain curves by means of a regression method, as illustrated in Fig. 1b.

Modified Yoshida Buckling Tests

Experiment. The modified Yoshida buckling tests were performed on the universal tensile testing machine together with an installed gripper for holding the samples, as depicted in Fig. 2a. Both grip length and width were 50 mm. All sample with different geometries were prepared in parallel to the rolling direction. Tensile tests of these specific specimens were conducted, in which the constant pulling speed of 50 mm/min was set and tension force and displacements were recorded. The samples after tension until occurred failure are shown in Fig. 2b.

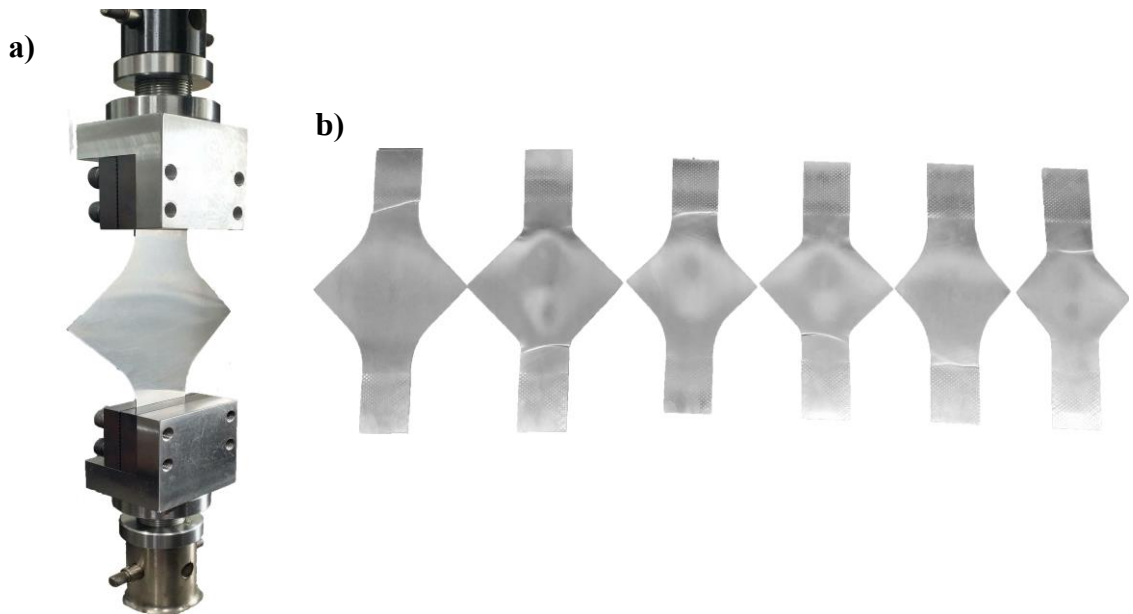
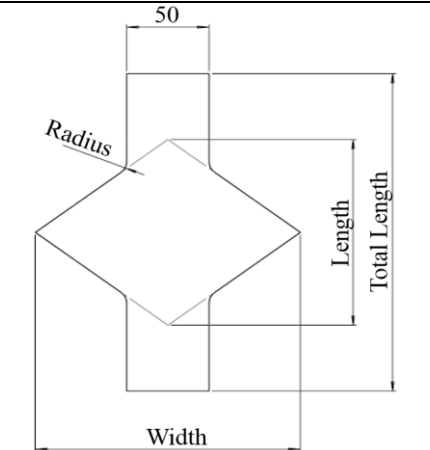


Figure 2 Modified Yoshida buckling tests: (a) used gripper and (b) failed samples after tension test.

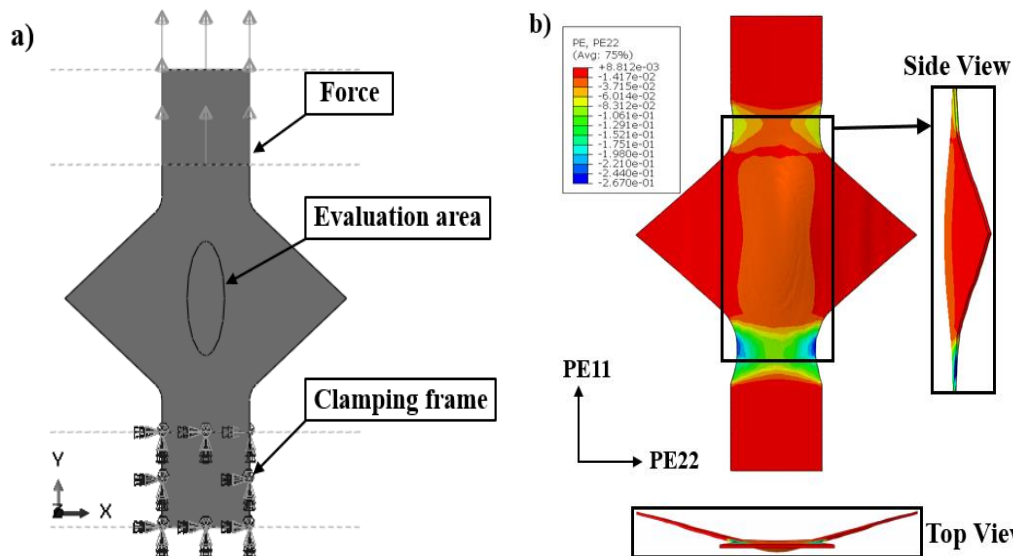
Hereby, six modified sample geometries, as given in Table 3, were applied. Regarding sample designation the first alphabet was referred to the length and width of samples. The samples A and B had width larger than length, whereas the width and length of sample C were equal. The dimensions of specimen A were larger than those of specimens B and C, respectively. Furthermore, the second alphabet represented the radius size at four corners of specimens. The sample with O had small curved radius, while the sample with M had large curved radius. The width, length and edge radius of modified Yoshida samples clearly affected the buckling behaviour of examined material.

Table 3 Dimensions of modified Yoshida buckling test sample used in this work.

Sample	Radius (mm)	Length and Width (mm)	Total Length (mm)
A-O	11	141 and 161	241
A-M	46	141 and 161	241
B-O	11	121 and 141	221
B-M	45	121 and 141	221
C-O	12	121 and 121	221
C-M	55	121 and 121	221



FE Simulation. FE simulations of Yoshida buckling tests were carried out for all six samples in Table 3. The boundary conditions were defined in correspondence with the experimental setup, as illustrated in Fig. 3a. An explicit dynamic formulation was applied to capture geometrical nonlinearities of samples. Elastic-plastic material model and solid element were taken into account. In addition, the Hill'48 anisotropic yield criterion and isotropic Swift hardening law were employed to describe the plastic flow behavior of materials. The materials parameters for grades AA5052-O and AA5052-H32 were obtained from the tensile test results in Table 1, Table 2 and Fig. 1. As a result, the calculated in-plane strains perpendicular to tensile direction of the sample were demonstrated in Fig. 3b. It is seen that the buckle zone in the middle of formed sample exhibited plastic strains in a compressive region.



Figures 3 FE simulations of modified Yoshida buckling test: (a) boundary condition and (b) calculated strain distributions in tensile direction at buckling

It is noted that the results of FE simulations were validated with those of experimental buckling tests, in which the determined force-displacement curves are compared, as illustrated in Fig. 4. Obviously, the predicted and experimental force-displacement curves just showed slight deviations. Therefore, the simulation results could be further used to identify the point of time, when wrinkle initiation took place in the experiments.

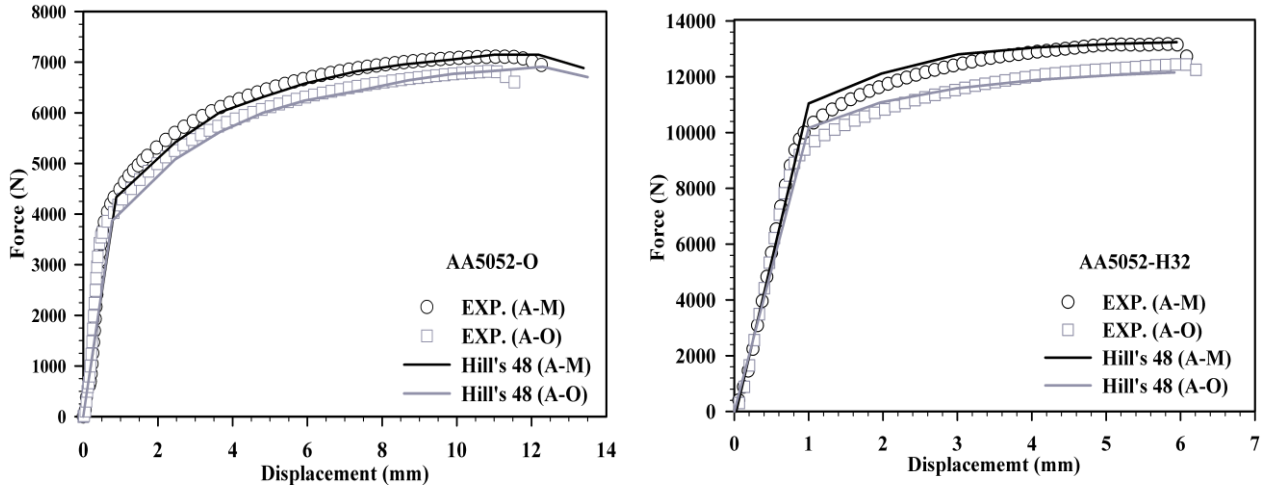


Figure 4 Comparisons of force-displacement curves experimentally determined and predicted by FE simulations using Hill'48 for the investigated aluminum alloys.

Results and Discussion

Identification of wrinkling initiation. A wrinkling formation in sheet metal forming is caused by two kinds of stress components. During a deep drawing process, compressive stresses firstly occur in the circumference of sheet material. Then, at the initiation of wrinkling, tensile stresses develop and sheet material continuously flows downward into the pressing die [5,8]. By this means, wrinkling of sheet metal could be described by considering the strain paths of concerned areas. Generally, a non-linear strain path was determined for the critical zone when wrinkling occurred. By wrinkling, instantaneous buckling and depression appeared on each surfaces of formed samples, as demonstrated in Fig. 5(a). This was used to define the moment of wrinkle initiation, after which the formation of wrinkles further developed.

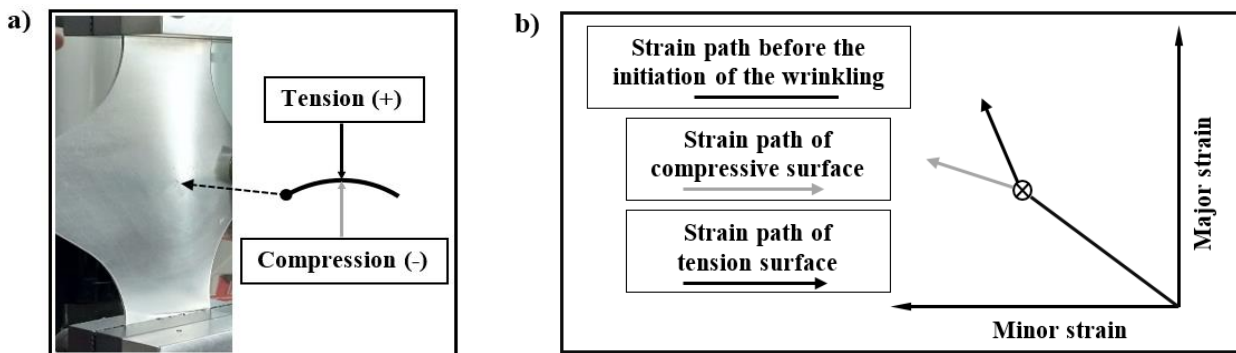


Figure 5 (a) Wrinkling occurrence during yoshida buckling test and (b) bifurcated strain paths by wrinkling initiation

The buckle zone on the sample showed a linear strain path before wrinkling formation, as seen as the black straight line in Fig. 5(b). At the critical moment, the strain path of concerned area on a sample surface tended to increase forward to the uniaxial stress state under tension force. In parallel, the strain path from the another surface of the same area tended downward to deep drawing

state under a compressive force. At this point of time when the strain path was bifurcated, as shown in Fig. 5(b), wrinkling initiation occurred and major and minor strains were then gathered. As an example, strain paths of buckled A-O and B-O samples predicted by FE simulations of Yoshida buckling tests were obtained to identify the wrinkling initiations, as seen in Fig. 6 for grade AA5052-O. The calculated strain paths obviously showed the bifurcations, in which strains on each sample surface developed upward in the direction of uniaxial tension stress state and downward in the compression stress region [6,9-10]. The points, where the strain paths just deviated from each other, were used as the wrinkle initiation state.

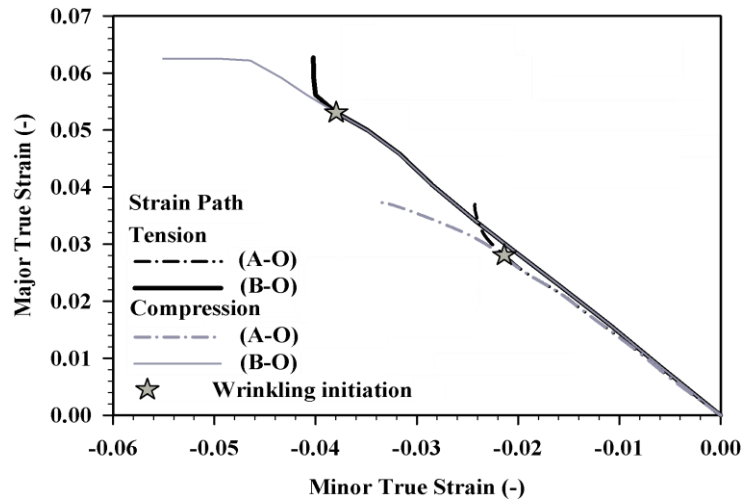


Figure 6 Determination of strain bifurcation in modified Yoshida buckling test of grade AA5052-O

From all modified Yoshida test samples, major and minor true strains determined by FE simulations at the wrinkling initiation states or bifurcation points were taken to construct the WLCs for the both aluminum alloy grades, as illustrated in Fig. 7. A linear regression was applied to fit all obtained wrinkling strain data. It was found that the strain ratios of WLC of grades AA5052-O and AA5052-H32 were about -0.71 and -0.53, respectively. Note that the developed WLCs located between uniaxial tension and pure shear stress state. The samples with symmetric shape (C-O and C-M) provided significantly higher strain levels of wrinkling initiation point. In contrast, other samples with asymmetric shape led to lower wrinkling initiation strains. The effect of edge radius of used samples on the critical strains was indistinct. Furthermore, the grade AA5052-O had the WLC with smaller negative strain ratio than the grade AA5052-H32. It meant that the grade AA5052-H32 should be more prone to wrinkling occurrence in forming process than the grade AA5052-O. This was corresponded to the much lower elongations of grade AA5052-H32. It also led to the greatly low strains of WLCs of grade AA5052-H32.

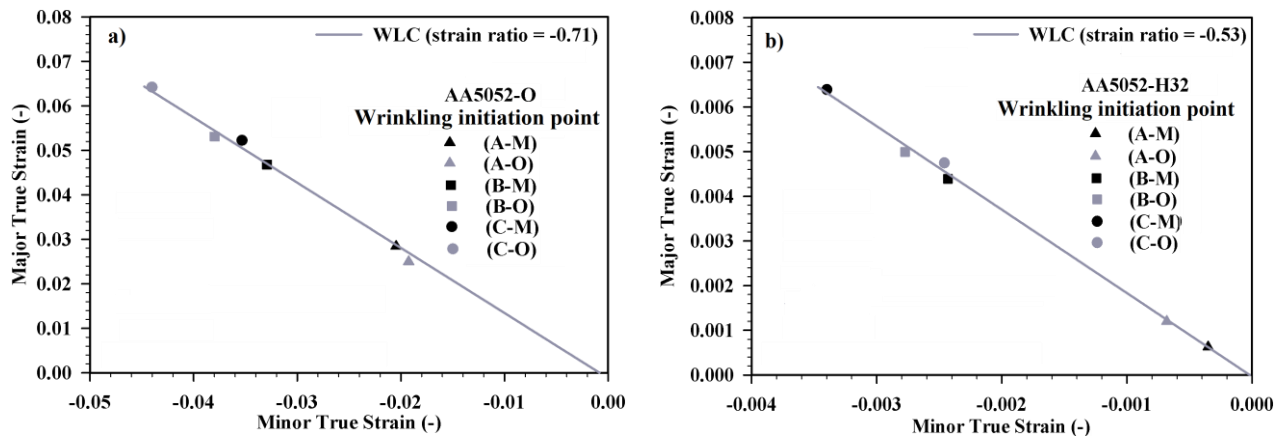


Figure 7 Determined wrinkling limit curves of grades (a) AA5052-O and (b) AA5052-H32.

Transition of compressive stress to tension stress. Basically, area of formed samples, which was subjected to compressive stresses, showed a high risk of wrinkling [8-10]. At the time, when the compressive stresses turned to be tensile stresses, wrinkle initiation occurred. Afterwards, when the wrinkle formation ended, the stresses in that area were no longer changed. Fig. 8a and 8b depict the developments of calculated tension forces and principal stresses perpendicular to the tensile direction from the middle of A-M and A-O samples of grades AA5052-O and AA5052-H32, respectively. It is seen that the minor stresses of grade AA5052-O were compressive at the beginning and continuously increased as tension force increased. Then, they switched to opposite direction, whereby tensile stresses rather increased that implied a wrinkling onset. On the other hand, no transition of compressive to tension stress was observed in the case of grade AA5052-H32. The samples of this grade had quite low elongation and thus were broken before. Therefore, the wrinkling initiation of grade AA5052-H32 could not be verified by this method. Moreover, the sample A-O with smaller edge radius exhibited larger compressive stresses than the sample A-M and thus wrinkle took place here earlier.

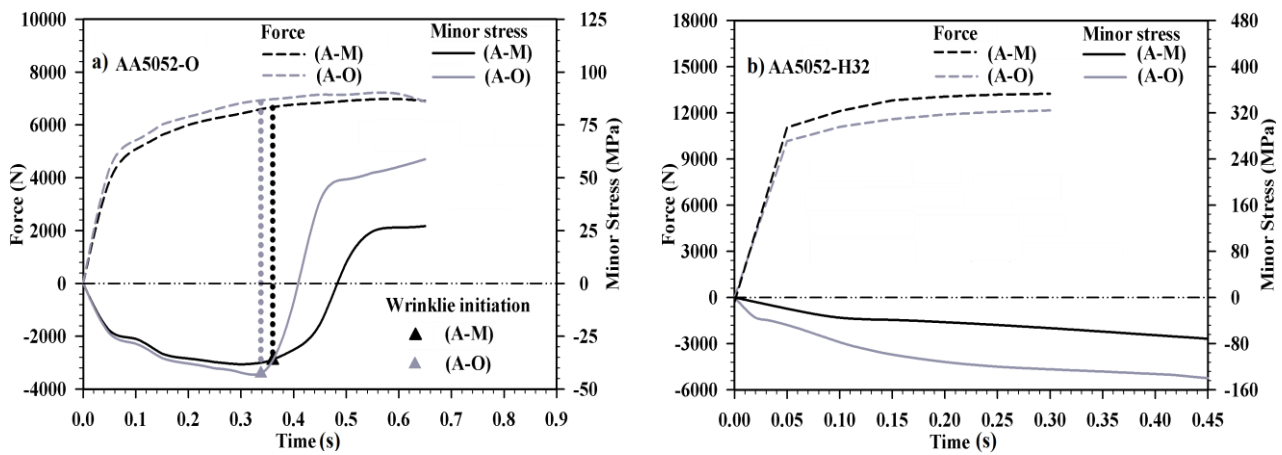


Figure 8 Developments of tension forces and stresses perpendicular to tensile direction calculated by FE simulations for grade (a) AA5052-O and (b) AA5052-H32.

The obtained WLC of investigated aluminum alloy sheet grade AA5052-O is described in details in Fig. 9. The stress state, which located above the WLC, represented the forming zone without risk of wrinkle, whereas wrinkling could occur if the governed stress state was below the WLC. In general, wrinkle tendency is predicted in sheet metal forming for any stress states between uniaxial stress condition (strain ratio = -0.5) and zero major strain. If the stress state was closer to the minor strain axis, emerged wrinkles would become more severe. In this work, the determined WLCs lay between the uniaxial tension and shear stress state or within the area of strain ratio of -0.5 and -1. These WLCs could be used to more accurately predict a wrinkle occurrence of examined alloys. However, the WLCs will be validated with an actual forming part in the future work. Additionally, the grade AA5052-H32, which had quite low formability, was inappropriate for determining the wrinkle appearance by the modified Yoshida buckling test.

Experimental rectangular cup deep drawing test

In order to verify an applicability of the developed WLCs of AA5052-O and AA5052-H32 aluminum sheet with a thickness of 1.0 mm. Experimental rectangular cup deep drawing for cookware manufacturing was performed on a hydraulic pressing machine with capacities 100 tons. The dies and punch test setup are shown in Fig. 3a. In press working, the finished rectangular cup deep drawing sheet are depicted in Fig.3b. The initial rectangular blank size was 350x450 mm², chamfer as 65 mm and punch stroke of 50 mm was designed as displayed in Fig. 3c. All samples were prepared in both RD for examining rectangular cup drawing blank sheet.

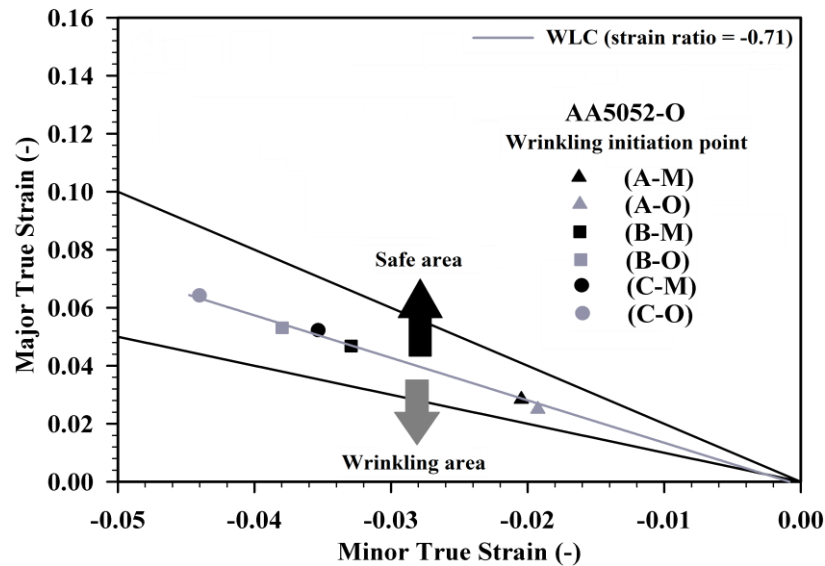


Figure 9 Predicted wrinkling limit curves of grade AA5052-O.

The blank holder force of AA5052-O and AA5052-H32 were constantly controlled as 7kN and 35kN respectively, and lubricant oil grade SAE 40 were used. The deformed Rectangular cup drawing sheets are showed in Fig.3d. For the experimental determination of the wrinkle initiation occurred during the deep drawing process selected parts were geometrically measured by using 3D Scanner in order to avoid some experimental error from manual measurement. The measured rectangular cup sheets are demonstrated in Fig.4a, Fig.4c. in which were used to validate with the simulated results of Rectangular cup drawing sheets as illustrated in Fig. 4b, Fig. 4d.

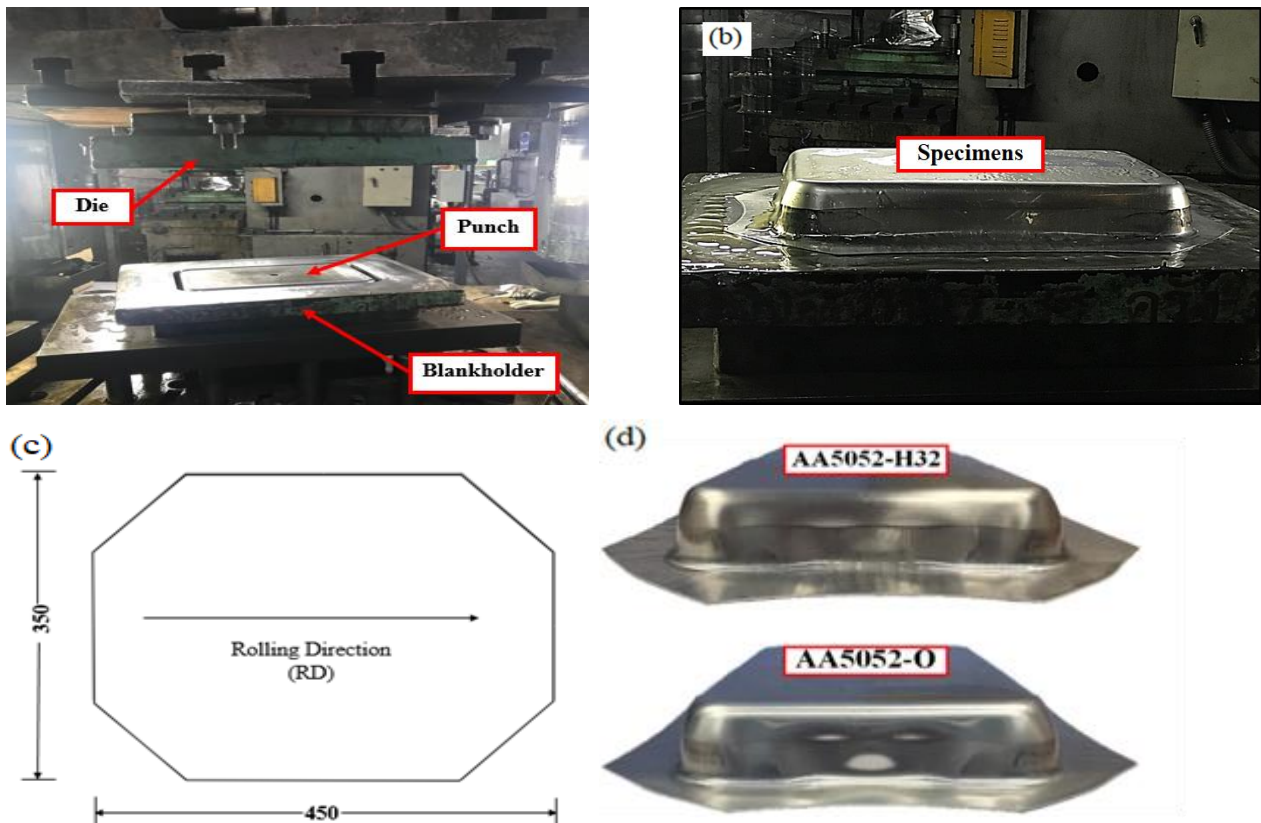


Figure 3. (a) Experimental Set-Up (b) Rectangular Cup Drawing test on hydraulic press machine (c) Dimension blank sheet (d) formed specimen.

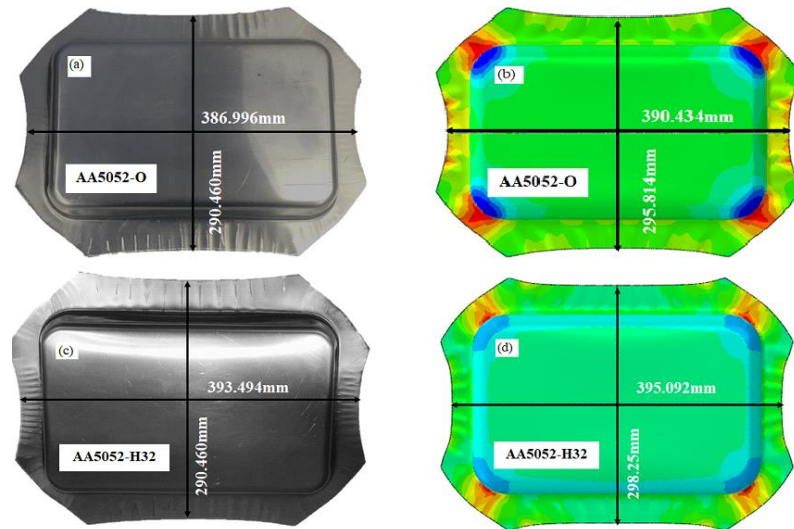


Figure 4 Measured rectangular cup drawing of investigated sheets a, c) experiment b, d) simulation

FE Simulation of rectangular cup drawing test.

FE simulations of the Rectangular cup drawing test were carried out for the investigated aluminum alloy sheets. The boundary conditions corresponding to the experiment set up were defined in the FE model, as shown in Fig. 5a. An implicit formulation of ABAQUS2017 was applied to precisely calculate. Elastic-plastic material model and solid element were taken into account. In addition, the Hill'48 anisotropic yield criterion and isotropic Swift hardening law were employed to describe the plastic flow behavior of materials. The materials parameters for grades AA5052-O and AA5052-H32 were obtained from the calculation of experimental tensile test data as shown the results in Table 3. The Coulomb's friction coefficient of 0.175 was applied for all contact pairs. Punch and dies were defined as a rigid analytical surface. As a result, local strains distribution of the critical side wall areas of formed samples were precisely gathered from the beginning until final drawing depth of the process as illustrated in Fig.5b). In the figure, the minus strains (compressive strain) distributes occurring on the side wall of the formed sheets, its mean wrinkle initiation was formulated. It is noted that the simulated results of FE simulations were validated with those of Rectangular Cup Drawing test, in which the formed parts were carefully measured draw-in profile in vertical and horizontal direction are compared, as illustrated in Fig. 4. Obviously, the predicted and experimental dimension just showed slight deviations. Therefore, the simulation results from FE rectangular cup drawing model could be further used to identify the point of time, when wrinkle initiation took place in the experiments.

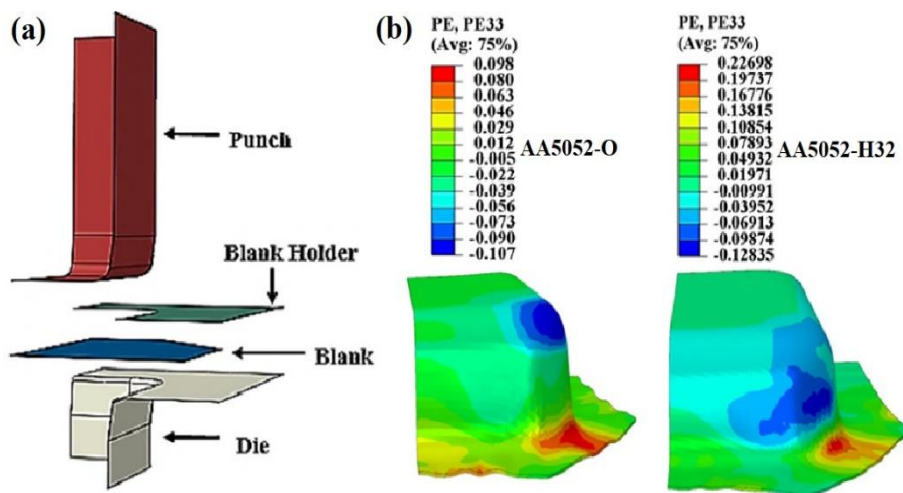
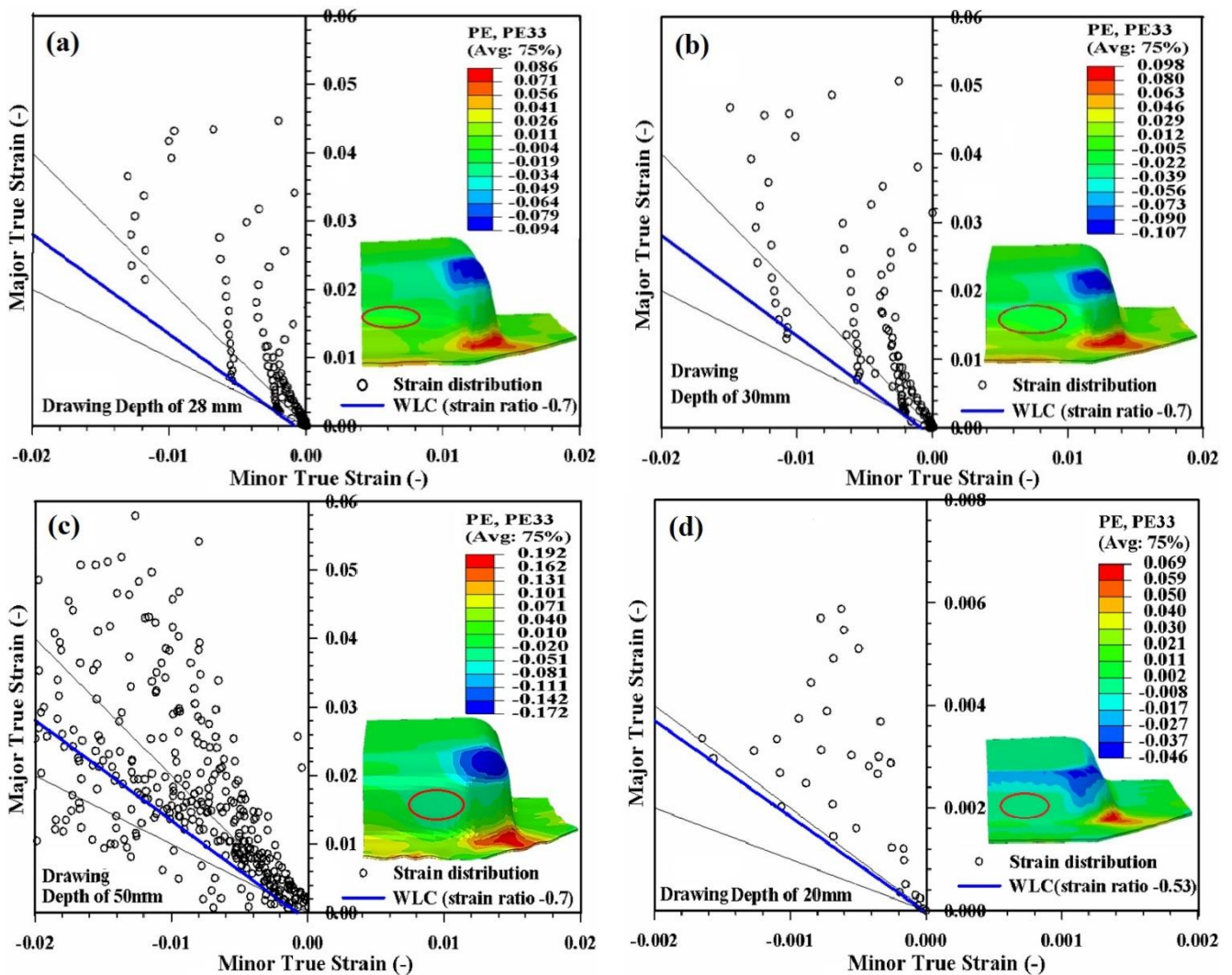


Figure 5 (a) FE Model (b) calculated strain distributions in side wall of of Rectangular Cup drawing

Results and Discussion

Wrinkling initiation on Rectangular Cup Drawing.

From all modified Yoshida test samples[12], major and minor true strains determined by FE simulations at the wrinkling initiation states between compressive stress and tensile stress get to be bifurcation points were taken to construct the WLCs for the both aluminum alloy grades, as illustrated in Fig. 1. An applicability of the developed WLCs were conducted experimentally and numerically simulation of Rectangular cup drawing. Experimentally, the wrinkling occurred in the round side wall area of formed rectangular cup deep drawing sheet at drawing depth of 50 mm. as depicted in Fig.3d. The validated FE model of rectangular cup drawing were simulated and demonstrated the resulted in Fig. 6. The simulated the Major and Minor true strains at drawing depth of 28 mm, 30 mm and 50 mm of AA5052-O, 20 mm, 25 mm and 50 mm of AA5052-H32 were gathered and plotted in coordinate system on WLC diagrams by each aluminum alloy sheets, which are shown in Fig. 6a to Fig 6f. The sampling position at the wrinkling behavior in simulated results of rectangular cup drawing sheet, which is highlighted by red ellipse regarding compressive strain (Minus strain values) on the side wall sheets. It can be interpreted as wrinkling initiation when strain equal minus values. Exceptionally, the Fig.6a. and Fig. 6d shown the simulated forming part without wrinkling occurrence and illustrated positive strain value located on the side wall. Subsequently, the WLCs in a blue linear curves were formability limit of the aluminum sheets in which demonstrated the wrinkling behavior was formation when strain values located underestimation with the blue line curves.



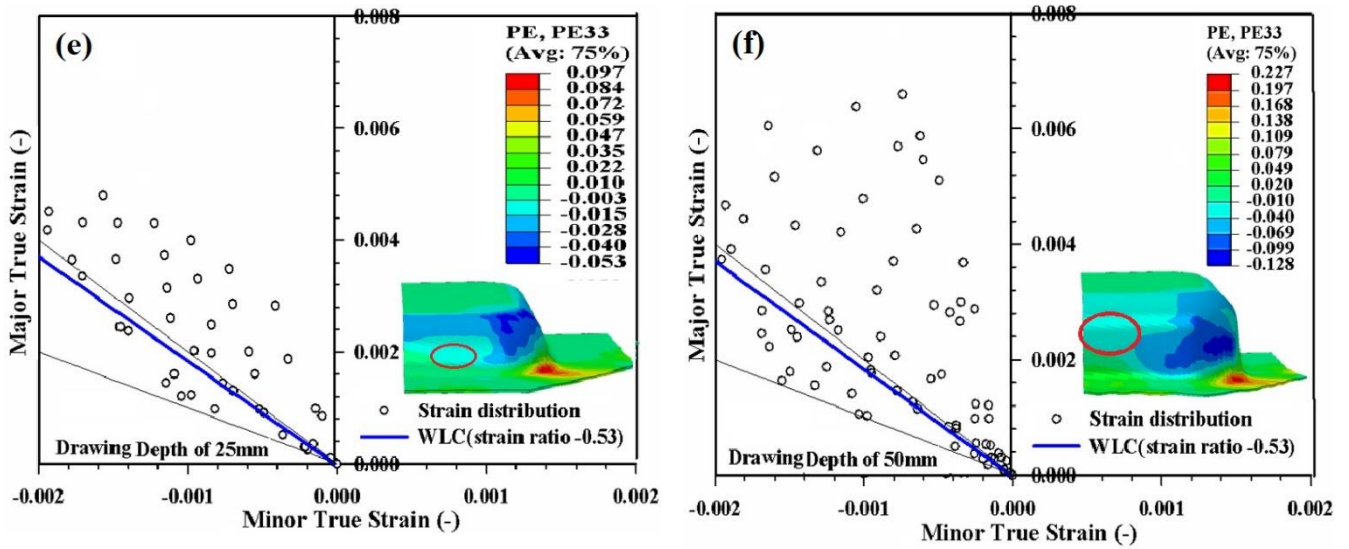


Figure 6 Simulated the Major and Minor true strains on side wall area of rectangular cup drawing sheets with the developed WLCs of AA 5052-O at drawing depths a) 28 mm b) 30 mm c) 50 mm and AA5052-H32 at drawing depths d) 20 mm e) 25 mm f) 50 mm.

The severe wrinkle formation appeared in formed parts at drawing depth of 50 mm. were presented in buckling profile as cross section of side wall panel as illustrated in Fig.7a and Fig 7c for both investigated aluminum alloy and the simulated results were shown in Fig. 6c and Fig. 6f for AA5052-O and AA5052-H32 respectively. In simulation, the wrinkling initiation was shown in Fig 6b and Fig 6e which were experimentally confirmed by buckling profile of deformed parts as depicted in Fig.7b and Fig. 7e. There was slightly the Major and Minor true strain values cross lower the WLCs, it means that the wrinkling slightly occurred in both experiments and simulation at the drawing depth of 30 mm and 25 mm for AA5052-O and AA5052-H32 as demonstrated in Fig. 6 and Fig.7 respectively. Finally, it can be concluded that the WLCs of the investigated aluminum sheets can be applied to evaluate the wrinkling behavior in sheet metal forming process through Finite Element simulation.

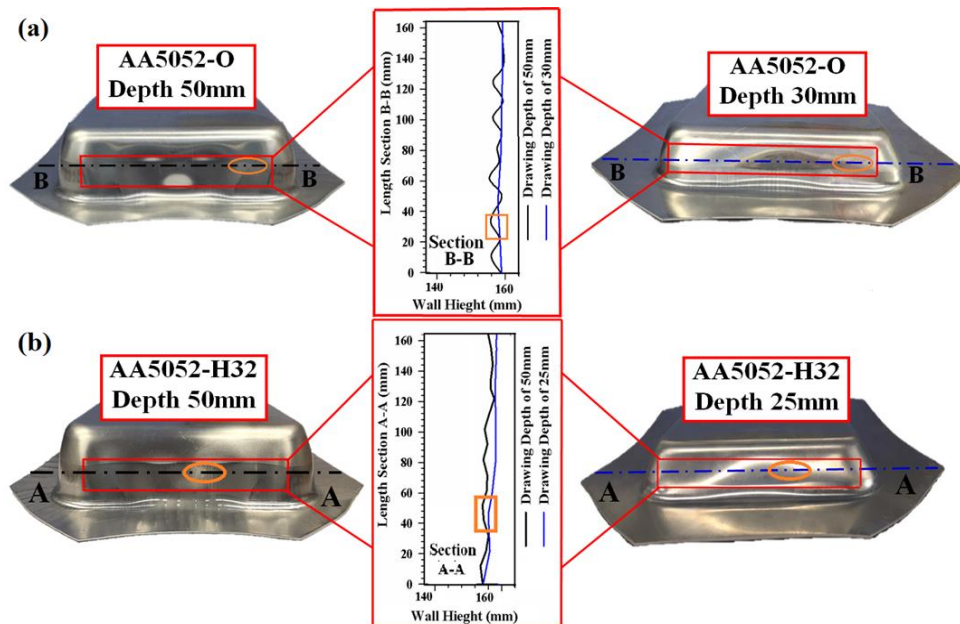


Figure 7. Severe Wrinkle and Wrinkle initiation on side wall along cross section of deformed rectangular deep drawing at various drawing depth of investigated aluminum alloy sheets

Summary

In this work, the developed WLCs of AA5052-O and AA5052-H32 were induced to evaluate the wrinkling behavior of Rectangular cup deep drawing sheets for cookware manufacturing. From the developed WLCs, it was found that the strain ratios (Minor true strain by Major true strain) of WLC of grades AA5052-O and AA5052-H32 were about -0.71 and -0.53, respectively. The WLC of grade AA5052-O located lower than the grade AA5052-H32 demonstrated less tendency to wrinkle formation than the other one. Again, it means that AA5052-O has better formability than the AA5052-H32 and the wrinkling formation will occur with AA 5052-H32 sheet easier than the other one. Simultaneously, the experiments and FE simulations of Rectangular cup deep drawing tests were conducted to evaluate an applicability of the determined WLCs. By the simulations, the anisotropic Hill'48 yield criterion and the Swift hardening law were taken into account for describing anisotropic plastic deformation. The determined WLCs can identified the wrinkling initiation on the simulation and confirmation with the experimental rectangular drawing test. Finally, it can be concluded that the developed WLCs from modified Yoshida buckling tests have repeatability of the buckling behavior on sheet metal forming which is a first behavior of wrinkling formation in sheet metal forming process. The experiments and FE simulations of modified Yoshida buckling tests were conducted to obtain the WLCs of investigated aluminum sheet grade AA5052-O and AA5052-H32. By the simulations, the anisotropic Hill'48 yield criterion coupled with the Swift hardening law were taken into account. The WLCs were determined with regard to the bifurcation of strain path of critical areas on formed samples. Hereby, the compressive stresses turned to tension stresses which described the wrinkling initiation. The WLC of grade AA5052-O with high elongation located below that of grade AA5052-H32 and thus showed less tendency to wrinkle. It was found that the grade AA5052-H32 with low elongation was improper for the modified Yoshida buckling tests in this work. The symmetric samples led to noticeably higher strain levels at wrinkling initiation than other asymmetric samples. In addition, the edge radius of samples had negligible effect on the critical strains. The proposed WLCs will be applied to a conventional cup drawing test in order to verify their accuracy in the future.

Acknowledgement

This research has been funded by the Thailand Research Fund (TRF) under the contract No. MRG6180075. The TRF research funding is highly acknowledged. The authors are very grateful to Thai Stainless Steel Co., Ltd. for supporting the materials. The authors would like to acknowledge KMUTNB for the access to the ABAQUS 2017 software. The authors are very grateful for all other necessary resources of the research provided by the Department of Production Engineering and Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, KMUTNB.

References

- [1] D. Banabic, Sheet Metal Forming Processes Constitutive Modelling and Numerical Simulation, first ed., Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [2] C.H. Pham, S. Thuillier, P.Y. Manach, Twisting analysis of ultra-thin metallic sheets, J. Mater. Proc. Tech. 214 (2014) 844-855.
- [3] S.H. Kim, Improvement of the surface quality of an automotive member by a modification of the stamping tool, J. Mater. Proc. Tech. 187 (2007) 387-391.
- [4] S.S. Anarestani, M.R. Morovvati, Y.A. Vaghasloo, Influence of anisotropy and lubrication on wrinkling of circular plates using bifurcation theory, Int. J. Mater. Forming. 8 (3) (2015) 439-454.
- [5] J.B. Kim, D.Y. Yang, Prediction of wrinkling initiation in sheet metal forming processes, Eng. Comput. 20 (1) (2003) 6-39.
- [6] J.B. Kim, J.W. Yoon, D.Y. Yang, Investigation into the wrinkling behaviour of thin sheets in the cylindrical cup deep drawing process using bifurcation theory, Int. J. Num. Method. Eng. 56 (12) (2003) 1673-1705.

- [7] T.X. Yu, W. Johnson, The buckling of annular plates in relation to the deep-drawing process, *Int. J. Mech. Sci.* 24 (3) (1982) 175-188.
- [8] F. Han, M. Liewald, A new Method to enhance the accuracy of the buckling test using modified Yoshida sample, *Adv. Mater. Res.* 1018. (2014) 199-206.
- [9] F. Han, R. Radonjic, New approach for wrinkle prediction in deep drawing process, *Key Eng. Mater.* 639 (2015) 459-466.
- [10] M. Liewald, F. Han, R. Radonjic, New criterion for prediction of the wrinkle formation in deep drawing process, *Key Eng. Mater.* 651 (2015) 71-76.
- [11] R. Hill, A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, In *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences.* 193 (1948) 281-297.