

ขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก
จากการเปลี่ยนความหนา

Forming Limit of Austenitic Grade Stainless Steel in Various Thicknesses

คมสันต์ งามข้า^{1*} วิชิต บัวแก้ว¹ ศุภฤกษ์ ศิริเวทิน² สุวัฒน์ จีระธีรนาถ³

โครงการความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กับ โรงเรียนนายร้อยจุลจอมเกล้า

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

โทร 0-2664-1000 ต่อ 2055 โทรสาร 0-3732-2609 *E-mail: komsan_ngamkum@yahoo.com vichitb@swu.ac.th

²สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ ถนนพิบูลสงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

โทร 0-2913-2500 ต่อ 6437 E-mail: ssv@kmitnb.ac.th

³ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 โทร 0-2564-6500 ต่อ 4717 โทรสาร 0-2564-6332

E-mail: suwatj@mtec.or.th

Komsan Ngamkum^{1*} Vichit Buakaew¹ Suparerk Sirvedin² Suwat Jirathearnat³

¹Srinakarinwirot University and Chulachomklao Royal Military Academy Jointed Graduated Program

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakarinwirot University, Ongkarak

Nakhonnayok 26120, Thailand, Tel: 0-2664-1000 ext, 2055, Fax 03732-2609, *E-mail:komsan_ngamkum

vichitb@swu.ac.th

²King Mongkut's institute of Technology North Bangkok Piboonsongkram Rd., Bangsue Bangkok 10800

Tel.0-2913-2500 ext.6437 E-mail: ssv@kmitnb.ac.th

³National Metal and Materials Technology center 114 Thailand Scien Park, Paholyothin Rd. Klong Luang,

Pathumthani 12120 Thailand Tel.0-2564-6500 ext.4717 E-mail:suwatj@mtec.or.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาผลกระทบจากความหนาของวัสดุขึ้นทดสอบที่มีผลต่อ ขีดจำกัดโดยใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก SUS 304 หนา 0.4 มิลลิเมตร 0.58 มิลลิเมตร และ 0.78 มิลลิเมตร เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จะนำไปใช้วิเคราะห์การขึ้นรูป อย่างล้าทางขณะและด้วยทรงกรวย ขั้นตอนการวิจัยเริ่มจากการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปโดยเหล็กกล้าไร้สนิมมาสร้างกริดกลมเพื่อใช้เป็นขึ้นทดสอบ จากนั้นจึงนำมาดึงขึ้นเป็นรูปด้วยพันธ์ครึ่งทรงกลม แล้วนำผลกวัดค่าความเครียดบนขึ้นทดสอบตรงบริเวณจุดที่ปลอดภัย จุดที่เกิดการคอด และจุดที่เกิดความเสียหายมาลงจุดบนแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด หลัก ϵ_1 , ความเครียดรอง ϵ_2 เพื่อสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปและใช้วิเคราะห์ขีดจำกัดการขึ้นรูปร่างล้าทางขณะและด้วยทรงกรวย ผลการวิจัยพบว่าความหนาของวัสดุขึ้นทดสอบมีผลต่อขีดจำกัดการขึ้นรูป และมีแนวโน้มทำให้ขีดจำกัดการขึ้นรูปสูงขึ้นเมื่อความหนาวัสดุขึ้นงานเพิ่มขึ้น ส่วนผลการขึ้นรูปร่างล้าทางขณะและด้วยทรงกรวยพบว่ามีความเครียดสอดคล้องกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่สร้างขึ้น

Abstract

The aim of this research is to study the thickness effect upon forming limit of sheet metal. Austenitic stainless steel sheet SUS304 with various thicknesses of 0.4 mm, 0.58 mm., And 0.78mm.were Use to construct the forming limit curves (FLC). The FLCs, obtained from the experiment, were used to determine the forming limit of sink and conical cup. The circular marks were formed onto the surface of the stainless steel sheets. After that sheets were formed in to a semi-spherical shape. The strains in vicinity of the safety, necking and damaged location were accurately measured to construct the relationship diagrams of major stain, ϵ_1 and the minor strain ϵ_2 . These diagrams were used to determine the formability of the sink and the conical cup.

The results were found that thickness of stainless steel sheet has an effect on forming; limit, thereby the thicker sheet has higher forming limit than the thinner one. The experimental results agreed well with the FLCs.

Keyword: Forming limit diagram, Forming limit curve, Sink, Conical Cup, Austenitic Grade Stainless Steel.

1. บทนำ

กรรมวิธีการขึ้นรูปอย่างซับซ้อนเช่นในการดึงขึ้นรูปแผ่นโลหะที่มีรูปทรงไม่สม่ำเสมอ และมีขนาดใหญ่ สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ กริดวงกลม(circular grid) ที่ทำเป็นรอยไว้บนผิวของแผ่นโลหะวิธีนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์การกระจาย, ค่าทิศทางของความเครียดบนแผ่นโลหะ กรรมวิธีขึ้นรูปในแต่ละขั้นตอนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้รูปแบบของกริดจึงช่วยให้สามารถปรับปรุงการออกแบบดรอว์บีด (draw bead) การหล่อลื่น หรือลำดับขั้นตอนในกรรมวิธีได้ในขณะทดลองขึ้นรูป(tryout)การวิเคราะห์ การกระจายความเครียดบนชิ้นงานดึงขึ้นรูปช่วยให้สามารถแก้ปัญหาวิกฤตต่างๆ ได้เร็วขึ้นทำให้สามารถใช้เครื่องมือธรรมดาในการผลิตได้โดยไม่มีปัญหามากนัก นอกจากนี้ยังช่วยในการเลือกวัสดุโลหะแผ่นได้อย่างถูกต้อง และยังช่วยในการควบคุมการเปลี่ยนเครื่องมือระหว่างการผลิตจำนวนมาก เนื่องจากการสึกหรอ,การเปลี่ยนการหล่อลื่น, เปลี่ยนคุณภาพโลหะแผ่น, และการปรับตั้งเครื่องเพรสโดยทั่วไปแล้วรูปแบบของกริดเป็นระบบของวงกลม ข้อดีของการใช้กริดวงกลมก็คือในระหว่างการขึ้นรูปกริดวงกลม จะเปลี่ยนไปเป็นรูปวงรี และทั้งสองแสดงทิศทางของความเครียดหลักซึ่งเป็นการจริงเสมอเมื่อทิศทางของความเครียดหลักไม่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการขึ้นรูปถ้าไม่ปฏิบัติตามเงื่อนไขแล้ววงกลม จะเปลี่ยนรูปไปเป็นเส้นโค้งอื่นๆ ถ้ารูปวงรีมีพื้นที่ผิวเท่ากับรูปวงกลมเดิมก็แสดงว่าการขึ้นรูปที่เกิดขึ้นนั้นไม่ทำให้ความหนาแน่นแผ่นวัสดุเปลี่ยนแปลงรูปแบบของกริดยังช่วยในการตัดสินใจว่าแผ่นโลหะมีความเหมาะสมสำหรับารขึ้นรูปภายใต้สภาพความเค้นในสองทิศทางหรือไม่ถ้าวัดความเครียดจากบริเวณวิกฤตของชิ้นงานดึงขึ้นรูป แล้วมาเปรียบเทียบกับความเครียดที่ได้รับจากการทดลองสามารถหาแนวโน้มได้ว่าแผ่นโลหะจะแตกหรือเกิดการคอดหรือไม่ ความเครียดที่เลือกใช้สำหรับเปรียบเทียบหาได้จากขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจนแตกภายใต้สภาพความเค้นในสองทิศทาง[1]

แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(Forming Limit Diagram)

รูปแปดกริดวงกลมจะเปลี่ยนไปต่างๆ กันตามลักษณะของแรงที่กระทำความสัมพันธ์ ระหว่างการบิดเบี้ยวของวงกลมกับชนิดของความเค้นเมื่อทดลองหลายๆ ครั้งก็สามารถหาการผสมผสานระหว่างความเครียดสูงสุด(สอดคล้องกับแกนยาวของรูปวงรี) กับความเครียดต่ำสุด(ตั้งฉากกับความเครียดสูงสุดและสอดคล้องกับแกนสั้นของรูปวงรี) โดยที่ไม่เกิดการคอดหรือรอยร้าว เมื่อนำเอาข้อมูลเหล่านี้มาจัดได้เป็นแผนภาพเรียกว่า แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(Forming limit diagram, FLD)แผนภาพนี้ใช้ได้กับโลหะแผ่นเฉพาะอย่างและแบ่งออกเป็นสองบริเวณคือบริเวณเสียหาย กับบริเวณเริ่มเกิดการคด

ความเครียดที่นำมาลงจุดเป็นค่าวิกฤตนั้นคือ ค่าที่เกือบจะเกิดการร้าวขึ้นแล้วระหว่างบริเวณทั้งสองของ "ดี" กับ "เสียหาย" เป็นบริเวณการเปลี่ยนรูปวิกฤต บริเวณที่อยู่ในขอบเขตนี้แสดงว่าไม่เสถียรภาพ (Instability) แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปได้จากการทดลองให้เกิดบริเวณต่างๆ เหล่านี้ขึ้นวิธีการทดลองหาแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ การทดสอบการดึงขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยพันธึบปลายครึ่งทรงกลมส่วนสภาพความเค้นแบบต่างๆ ก็เปลี่ยนแบบโดยเปลี่ยนแปลงกว้างขึ้นทดสอบ วิธีการทดสอบแบบนี้ทำได้โดยใช้ขึ้นทดสอบรูปวงกลมแล้วตัดด้านข้างออกแล้วนำขึ้นทดสอบไปดึงขึ้นรูปจนมีการร้าวเกิดขึ้น การทดสอบลักษณะนี้ได้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปในช่วงความเครียดดึงสองทิศทาง (การดึงยืดขึ้นรูป)จนมาถึงช่วงความเครียดดึงเท่ากับความเครียดคด (การดึงขึ้นรูป)แผนภาพนี้ใช้ได้กับแผ่นโลหะเฉพาะอย่างเท่านั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกริดวงกลมตำแหน่งของขึ้นทดสอบเทียบกับทิศทางกริดแผ่นโลหะ,การหล่อลื่น,ความหนาแผ่นโลหะ[1]

การใช้งานแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

ข้อได้เปรียบที่สำคัญของการวิเคราะห์ความเครียด โดยวิธีการทดลองอย่างง่ายหรือเชิงทฤษฎีก็คือ การหาบริเวณวิกฤตในชิ้นงานดรอว์เฉพาะอย่างได้จากผลการวิเคราะห์สามารถเปลี่ยนแปลงเครื่องมือขั้นตอนการทำงานได้ตามที่ต้องการโดยไม่ต้องลองผิดลองถูกหลายๆ ครั้งการวิเคราะห์ยังช่วยให้สามารถเลือกแผ่นโลหะที่มีคุณภาพเหมาะสมที่สุดได้เพื่อเลี่ยงการใช้วัสดุที่ดีที่สุดและแพงที่สุดในกรณีของการผลิตเป็นจำนวนมากการร้าวอาจเกิดขึ้นได้ทันทีทันใด ในระหว่างการผลิตดำเนินไปตามปกติการวิเคราะห์ความเครียดในที่นี้หาสาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานเสียหายเช่น

1. เครื่องมือสึกหรอ
2. เปลี่ยนสารหล่อลื่น
3. คุณภาพแผ่นโลหะ
4. การปรับตั้งเครื่องเพรส และ
5. สาเหตุอื่นๆ

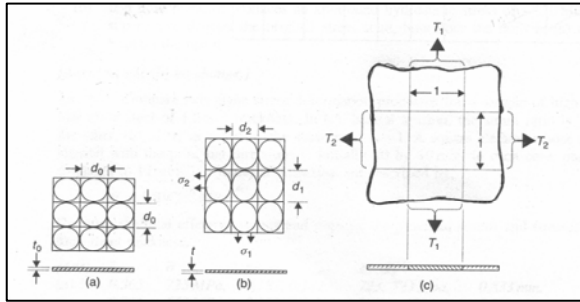
การวิเคราะห์ความเครียดจะนำไปใช้กับปัญหาการผลิตได้เฉพาะเมื่อเงื่อนไขในการทดสอบหาแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นเครื่องมือที่เหมาะสม สำหรับการออกแบบกรรมวิธีขึ้นรูปโลหะแผ่นแต่อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จในการใช้งานนั้นต้องมีทั้งความรู้และประสบการณ์ทั้งในห้องปฏิบัติการและในโรงงานอย่างเพียงพอ [1]

2. ทฤษฎี

2.1การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of Sheet in Plane Stress)

การเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane stress) พิจารณาการเปลี่ยนรูปในรูปที่ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา to ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางdo หรือตารางขนาด do แสดงดังรูป1 (a) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปวงกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรีแกนของ Major คือ d1 แนวแกนของ Minor คือ d2 ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางหลักของกริดวงกลมจะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูป

ที่ 1 (b) ส่วนความหนาคือตามที่เราแสดงดังรูปที่ 1 (b) ความเค้นทำให้เปลี่ยนรูปคือ σ_1 และ σ_2



- (a) ขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูปกริดวงกลมในตารางคงสภาพเดิม
 (b) การเปลี่ยนรูปกริดวงกลมจะเปลี่ยนเป็นรูปวงรีขนาดของแกนหลักคือ d_1 และขนาดแกนรองคือ d_2
 (c) การดึง T หรือแรงส่งผ่านต่อหน่วยความกว้างรูปที่ 1 ลักษณะการเปลี่ยนรูปวงกลมบนแผ่นโลหะ

2.2 การวัดแรงในการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Tension as a measure of force in sheet forming)

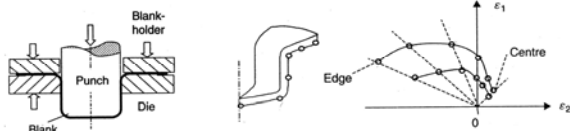
ในกระบวนการขึ้นรูปผลของแรงที่กระทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นบางแรงต่อหน่วยความกว้างของโลหะแผ่นบาง (Sheet) คือความเค้นและความหนา

$$T = \sigma t \quad (1)$$

เมื่อ T คือ ผลจากการดึง หรือผลจากความเค้น เพราะนี่คือผลจากการลดความหนาในการแพร่ความเค้น σ นั่นคือผลที่ได้จากการวัด และในกระบวนการรูปแบบนี้ในเทอมของ tension ไม่ใช่ผลที่เกิดการอัดตัวเสมอไป ถ้าการดึงคือลบนั่นคือ การเกิดแรงอัดนี้ไม่ใช่ปัญหาสำคัญในการเปลี่ยนรูปแบบ (Plane stress) ในความคิดเห็นที่ตรงกับข้อสรุปทิศทางหนึ่งคือความเค้นหลักที่เกิดขึ้นและ Major Tension $T = \sigma t$ ค่าเป็นบวกตลอดในกระบวนการเปลี่ยนรูปโลหะแผ่น

2.3 แผนภาพความเครียด (Strain diagram)

ความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2 (c) สามารถวัดได้จากการวัดแบบรูปที่ 1



- (a) การขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก
 (b) ชิ้นส่วนย่อยของถ้วยทรงกระบอกแสดงค่าความเครียดที่วัดได้
 (c) ผลค่าความเครียดที่ได้จากการขึ้นถ้วย

รูปที่ 2 แผนภาพความเครียดตำแหน่งต่างๆ ของถ้วยทรงกระบอก

2.4 ค่าความเครียดหลัก (Principal Strains)

ความเครียดหลักที่เกิดขึ้นจุดท้ายของกระบวนการ

$$\epsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0}; \quad \epsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0}; \quad \epsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} \quad (2)$$

2.5 สัดส่วนของความเครียด (Strain ratio)

โดยปกติเส้นแนวความเครียด (Strain Path) ยังคงเป็นสัดส่วนเส้นตรง

$$\beta = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \frac{\ln \left(\frac{d_2}{d_0} \right)}{\ln \left(\frac{d_1}{d_0} \right)} \quad (3)$$

2.6 ความเครียดหนาและความหนา (Thickness strain and Thickness)

จากสมการ (2) ความเครียดหาได้โดย การวัดความหนา หรือหาได้จากความเครียดหลัก (Major strain) ความเครียดรอง (Minor strain) โดยให้พิจารณาอัตราการเปลี่ยนรูปที่ปริมาณคงที่

$$\epsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} = -(1 + \beta) \epsilon_1 = (1 + \beta) \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) ความหนาโดยทั่วไปคือ

$$t = t_0 \exp(\epsilon_3) = t_0 \exp[-(1 + \beta) \epsilon_1] \quad (5)$$

หรืออีกแนวทางหนึ่งคือ $t d_1 d_2 = t_0 d_0^2$ ที่ปริมาณคงที่

$$t = t_0 \frac{d_0^2}{d_1 d_2} \quad (6)$$

2.7 สรุปการเปลี่ยนรูปที่จุดต่าง ๆ (Summary of deformation at a point)

จากสมการที่ผ่านมาความเครียดหลักและอัตราส่วนความเครียดสามารถหาได้และในกระบวนการ ความเครียดหลักได้ดังนี้

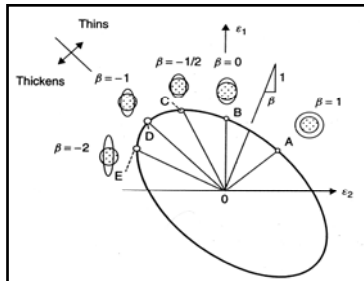
$$\epsilon_1 = \ln \left(\frac{d_1}{d_0} \right); \quad \epsilon_2 = \ln \left(\frac{d_2}{d_0} \right) = \beta \epsilon_1; \quad \epsilon_3 = \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) = -(1 + \beta) \epsilon_1 \quad (7)$$

เมื่อ β คือค่าคงที่

แต่ละจุดที่อยู่ในแผนภาพ รูปที่ 2 ซึ่งให้เห็นจุดสุดท้าย Major Strain และ Minor strain การรวมจุดนี้ทำให้เกิดเป็นเส้นรูปที่ 3 ในการทดสอบซึ่งให้เห็นลักษณะสำคัญของความแตกต่าง (strain path) แผนภาพนี้ไม่ได้บอกถึงกระบวนการแต่ใช้กล่าวถึงความแตกต่างของกระบวนการขึ้นรูปการแสดงวงรีคือขอบเขตผลกระทบจากความเครียด (effective strain) แต่ละจุดของวงรีจะแสดงความเครียดเป็นจุดเล็กๆ ของวัสดุโดยสมมติฐานจริงๆ มีลักษณะเหมือนความเค้นไหล (Flow stress)

2.8 ลักษณะการเปลี่ยนรูป (Mode of deformation)

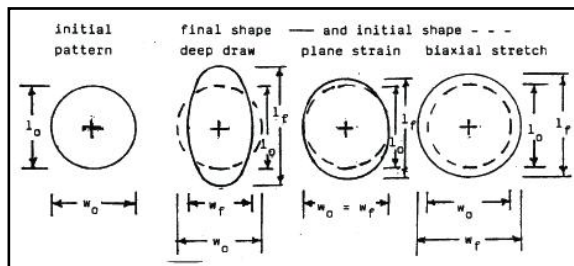
ตามเหมาะสมเรากำหนดให้ทิศทางหลักจนไปถึงความเค้นหลักและความเครียดหลักตั้งนั้นทุกจุดทางซ้ายของเส้นเอียงที่อยู่ทางขวาของรูปที่ 3 ท้ายของเส้นเป็นเส้นแนวความเครียด (Strain path) [4]



รูปที่ 3 แผนภาพความเครียดที่แสดงถึงความแตกต่างของสัดส่วนความเครียดที่สอดคล้องกับการขึ้นรูป

2.9 การวัดค่าความเครียด

วิธีการวัดการเปลี่ยนขนาดบริเวณหลังการเปลี่ยนรูปในแนวแกนหลัก L_o, L_f ในแนวแกนรอง W_o, W_f และนำไปคำนวณตามสมการที่ (8) และสมการที่ (9) เพื่อหาความเครียดหลักและความเครียดตรง [2]



รูปที่ 4 Major Strain กับ Minor Strain จากกริดวงกลม การคำนวณหาความเครียดโดยนำค่าที่ได้จากการวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดบริเวณหลังการขึ้นรูปที่ 4

$$\text{Major strain} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100 = \varepsilon_1 (\%) = y = 0 - 100\% \quad (8)$$

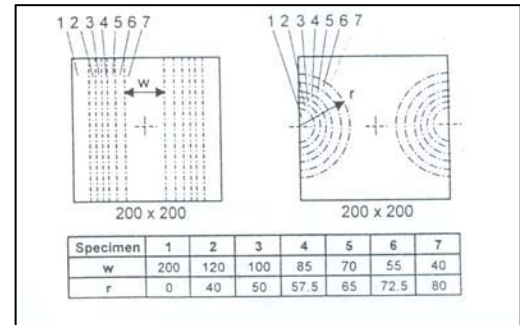
$$\text{Minor strain} = \frac{W_f - W_o}{W_o} \times 100 = \varepsilon_2 (\%) = x = -40 - 60\% \quad (9)$$

3. การดำเนินการวิจัย

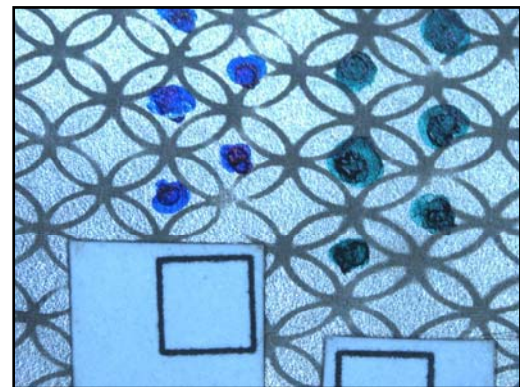
การสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปนั้น ได้นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมาเตรียมเป็นชิ้นทดสอบขนาด กว้าง 200 มิลลิเมตรยาว 200 มิลลิเมตร ตัดขอบด้านข้างทั้งสองข้างเป็นรัศมีโค้ง 40, 50, 57, 5, 65, 72.5 และ 80 มิลลิเมตร และแผ่นเติมสร้างกริดวงกลม [3]

จากนั้นนำชิ้นทดสอบมาดึงขึ้นรูปด้วยพันธ์ครั้งทรงกลมโดยขึ้นทดสอบ มีความหนา 0.04 มิลลิเมตร 0.58 มิลลิเมตร และ 0.78 มิลลิเมตร แล้วนำผลการวัดค่าความเครียดบนชิ้นทดสอบไปคำนวณตามสมการที่ (8) และ (9) โดยเลือกบริเวณจุดที่ปลอดภัย จุดที่เกิด

การคอดและจุดที่เกิดความเสียหายมาพล็อตลงจุดบนแผนภาพความสัมพันธ์ ระหว่างความเครียดหลักกับความเครียดตรง

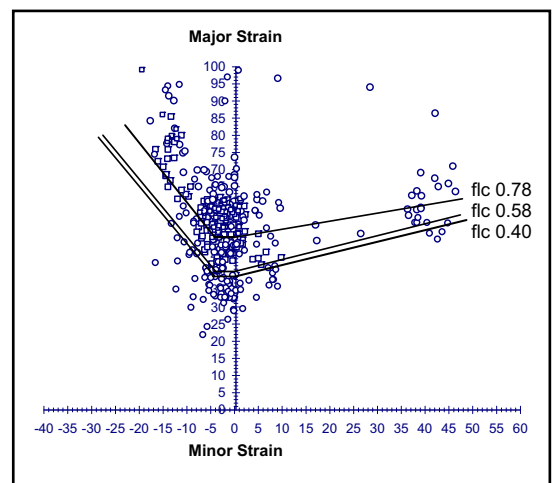


รูปที่ 5 ลักษณะการตัดส่วนโค้งที่รัศมีต่างๆ

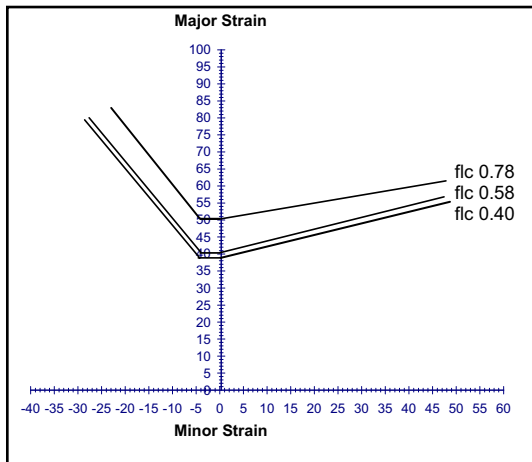


รูปที่ 6 การเลือกกริดจุดเกิดการคอดสี่เหลี่ยมและจุดที่ปลอดภัยสี่เหลี่ยม

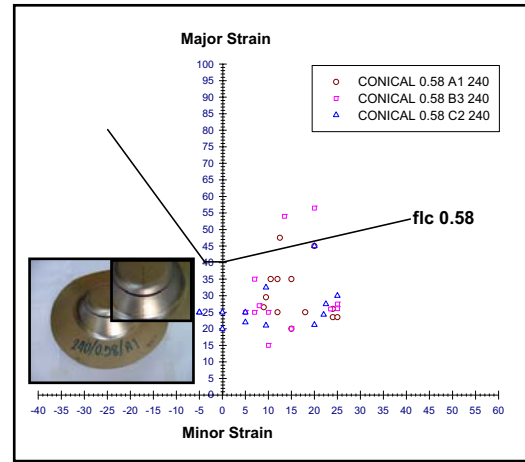
จึงได้เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อใช้วิเคราะห์การขึ้นรูปอย่างล้าช้าขณะที่มีความหนา 0.4 มิลลิเมตร และด้วยทรงกรวยเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นแบบลงค์ 240 มิลลิเมตร มีความหนา 0.4 มิลลิเมตร 0.58 มิลลิเมตร และ 0.78 มิลลิเมตร



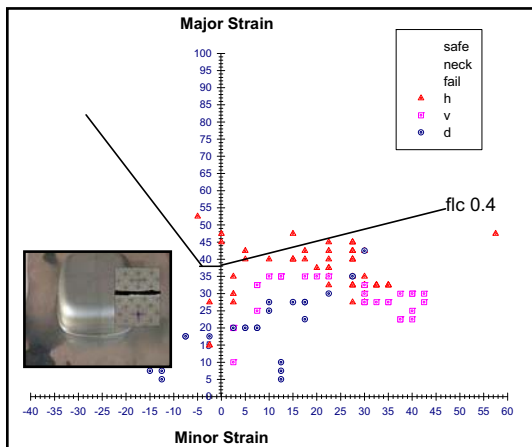
รูปที่ 7 การลากเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปผ่านจุดที่เกิดการคอดและจุดที่ปลอดภัย



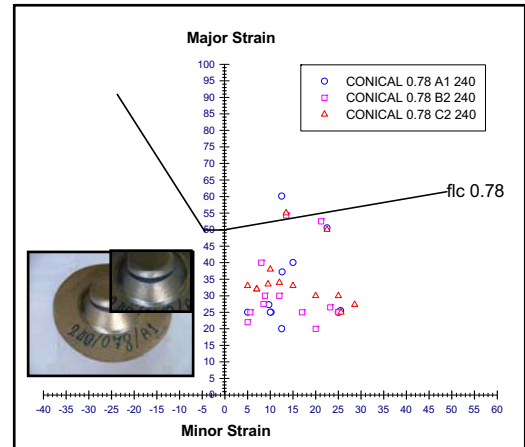
รูปที่ 8 ตำแหน่งของเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม
สูงขึ้นเมื่อขึ้นทดสอบมีความหนาเพิ่มขึ้น



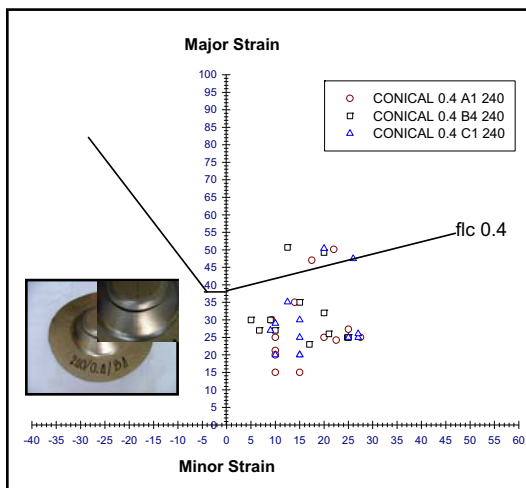
รูปที่ 11 การประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป 0.58 มิลลิเมตร
เทียบกับการขึ้นรูปจากถ้วยทรงกรวยหนา 0.58 มิลลิเมตร



รูปที่ 9 การประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป 0. มิลลิเมตร
เทียบกับการขึ้นรูปจากอ่างขนะหนา 0.4 มิลลิเมตร



รูปที่ 12 การประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป 0.78 มิลลิเมตร
เทียบกับการขึ้นรูปจากถ้วยทรงกรวยหนา 0.78 มิลลิเมตร



รูปที่ 10 การประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป 0.4 มิลลิเมตร
เทียบกับการขึ้นรูปจากถ้วยทรงกรวยหนา 0.4 มิลลิเมตร

5. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพบว่าเมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมมีความหนาเพิ่มขึ้นส่งผลให้เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมสูงขึ้น ภาพที่ 8 ขีดจำกัดการขึ้นรูปต่ำสุดเกิดขึ้นที่ระนาบความเค้น (Plane Strain) ผลการขึ้นรูปอ่างล้างภาชนะ ถ้วยทรงกรวยหนา 0.4 มิลลิเมตร ในภาพที่มีสภาวะความเครียดสอดคล้องกับแผนภาพขีดจำกัดที่สร้างขึ้น และการขึ้นรูปถ้วยทรงกรวยหนา 0.58 มิลลิเมตร และ 0.78 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 240 มิลลิเมตร มีสภาวะความเครียดสอดคล้องกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 9, 10, 11, 12 ตามลำดับโดยสังเกตได้จากจุดที่เสียหายอยู่เหนือเส้นขีดจำกัดการขึ้นรูป ตำแหน่งของจุดที่ปลดภัยอยู่ภายใต้ขีดจำกัดการขึ้นรูป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องเพรสไฮดรอลิกส์ขนาด 80 ตัน ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และขอขอบคุณบริษัท ตราเพชร จำกัด ให้ความอนุเคราะห์วัสดุที่ใช้วิจัยและเครื่องเพรสไฮดรอลิค ที่ใช้ในการขึ้นรูปร่างลึงภาชนะ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ชาญถนัดงาน, 2547. เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ. กรุงเทพมหานคร.
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [2] ASTM, 2002. Standard Test Method for Determining Forming Limit Curve. E2218-02. USA.
- [3] S.Jirathearanat, T. Intarakumthopomchai & W.Limtrakarn.
2004. Finite Element simulation study of hemispherical
Dome Forming Construction of Limit Diagram (FLD) for
Sheet Metal Forming Processwps. Thailand:
National Metal and Materials Technology Center.
- [4] Z.marciniak, J.L.Duncan, SJ.HU, 2002. Mechanics of Sheet
Metal Forming. Znd .Lodon: Butterworth-Heinemann