

การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการบัลจ์ด้วยไฮดรอลิก Design and Construction of Hydraulic Bulge Test Apparatus.

ธราทิป ชัยมงคล^{1*}, ชายุ ถนัดงาน², วิชิต บัวแก้ว³, ยงยุทธ เนียมทรัพย์⁴ และ กัมปนาท ศิริเวทิน⁵

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

³ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ จ.นครนายก 26120

⁴บริษัท สามมิตรมอเตอร์ส์แมนูแฟกเจอร์ จำกัด (มหาชน) จ.สมุทรสาคร 74130

⁵บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

*ติดต่อ: g-ghostclub@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์: +668-7381-8250

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบสมบัติทางกลของโลหะแผ่นโดยการบัลจ์ด้วยไฮดรอลิก ลักษณะเครื่องทดสอบเป็นทรงกระบอกมีแผ่น Upper Flange สำหรับยึดชิ้นงานทดสอบและมีฝาครอบกันน้ำมันไฮดรอลิกรั่ว เครื่องทดสอบทำจากวัสดุ S45C ขนาด Ø250 x 195 mm ตั้งอยู่บนโต๊ะ ใช้กับชิ้นงานทดสอบขนาด Ø250 mm หนาไม่เกิน 1.2 mm ที่ขึ้นบีดแล้ว หลักการทำงานของเครื่องทดสอบคือ ใช้ความดันน้ำมันจากปั๊มไฮดรอลิกแบบมือโยกไปดันชิ้นงานทดสอบจนกระทั่งแตกระหว่างการทดสอบจะวัดความดันโดยใช้เกจวัดความดันและวัดความสูงโดมโดยใช้ไดอัลเกจ ซึ่งเครื่องทดสอบสามารถหาสมบัติทางกลของโลหะแผ่นภายใต้สภาวะแรงดึงสองทิศทางด้วยการพล็อตกราฟความเค้น-ความเครียดจริง

ผลการวิจัยพบว่า เครื่องทดสอบการบัลจ์ด้วยไฮดรอลิกให้ความดันแบบสมมาตรกับชิ้นงานทดสอบและสามารถใช้ทดสอบหาสมบัติทางกลของโลหะแผ่นก่อนการขึ้นรูปภายใต้สภาวะแรงดึงสองทิศทางโดยผลลัพธ์จากการทดสอบนำไปพล็อตกราฟความเค้น-ความเครียดจริงสำหรับโลหะแผ่นที่จะนำไปทำการขึ้นรูป

คำหลัก: เครื่องทดสอบการบัลจ์ด้วยไฮดรอลิก, เครื่องทดสอบแรงดึงสองทิศทางสำหรับโลหะแผ่น, แผนภาพความเค้น-ความเครียดจริงสำหรับโลหะแผ่นก่อนนำไปขึ้นรูป, สมบัติทางกลของโลหะแผ่น

Abstract

The objective of this research is to design and construct the apparatus for testing the mechanical properties of sheet metal by using of hydraulic bulge test. The apparatus consisted of cylinder with the upper flange for holding the specimen and preventing oil leakage. The cylinder made from S45C steel, which had the dimension equal to Ø250x195 mm, and it was located on the table. The specimens were circular sheet, Ø250 mm, and its thickness was not thicker than 1.2 mm. The hydraulic hand-pump was used to create the hydraulic pressure. The pressure and the height of dome were recorded during the test. The apparatus used in this process was able to test the mechanical properties of sheet metal under the biaxial tensile test.

The result showed that the apparatus, hydraulic bulge tester, could be used to test the mechanical properties of sheet metal before it was formed under the biaxial tensile test. Furthermore, this

result was used to plot the true stress-strain diagram described the mechanical properties of sheet method.

Keywords: Hydraulic bulge tester, Biaxial tensile test, True stress-strain diagram, Mechanical properties of sheet metal.

1. บทนำ

การทดสอบการดึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ต่อกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น การทดสอบการดึงที่นิยมทดสอบในปัจจุบันเป็นการทดสอบชิ้นงานที่อยู่ในสภาวะแรงดึงแกนเดียวค่าที่ได้จากการทดสอบมีความแม่นยำไม่เกิน 0.3 ของความเครียด ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ขึ้นรูปชิ้นงานจริง ธนสาร และคณะ [4]* ได้สร้างแม่พิมพ์สำหรับการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ ลักษณะแม่พิมพ์เป็นทรงกระบอกขนาด $\varnothing 400$ mm ประกอบติดตั้งอยู่กับเครื่องเพรสไฮดรอลิกขนาด 200 ตัน ใช้ความดันจากเครื่องสร้างแรงดันน้ำขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบ วัดค่าความสูงโดมโดยใช้เครื่องวัดการเปลี่ยนระยะเชิงเส้นตรง ส่วนค่าความดันวัดจาก Pressure Sensor ที่ติดตั้งบนแม่พิมพ์ การทดสอบจะอยู่ในสภาวะแรงดึงสองทิศทางค่าความเค้น-ความเครียดที่ได้จึงใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริง การทดสอบชิ้นงานในสภาวะแรงดึงสองทิศทางจึงถูกนิยมนำมาทำการทดสอบหาสมบัติทางกลของโลหะแผ่นมากขึ้น

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้สร้างเครื่องทดสอบการบัลจ์ด้วยไฮดรอลิกขึ้น ลักษณะเครื่องทดสอบเป็นทรงกระบอก ขนาด $\varnothing 250 \times 195$ mm ใช้กับชิ้นงานทดสอบขนาด $\varnothing 250$ mm หนาไม่เกิน 1.2 mm เครื่องทดสอบใช้ความดันน้ำมันจากปั๊มไฮดรอลิกแบบมือโยก ตลอดการขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบจะวัดความดันโดยใช้เกจวัดความดันและวัดความสูงโดมโดยใช้ไดอัลเกจ ซึ่งเครื่องทดสอบสามารถหาสมบัติทางกลของโลหะแผ่นภายใต้สภาวะแรงดึงสองทิศทางด้วยการพล็อตกราฟความเค้น-ความเครียดจริงได้

1.1 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบสมบัติทางกลของโลหะแผ่นโดยการบัลจ์ด้วยไฮดรอลิก

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.2.1 ชิ้นงานทดสอบคือโลหะแผ่น SGCD ขนาด $\varnothing 250$ mm ความหนา 1 mm
- 1.2.2 เครื่องทดสอบทำด้วยเหล็ก S45C ขนาด $\varnothing 250$ mm สูง 195 mm
- 1.2.3 น้ำมันไฮดรอลิก เบอร์ 68
- 1.2.4 ความดันเครื่องทดสอบไม่เกิน 25 MPa
- 1.2.5 ความดันกด Upper Flange 10 MPa
- 1.2.6 เส้นผ่านศูนย์กลางภายในกระบอกมีขนาด 110 mm
- 1.2.7 เส้นผ่านศูนย์กลางปาก Upper Flange (d_c) มีขนาด 100 mm
- 1.2.8 รัศมีปาก Upper Flange (R_c) มีขนาด 5 mm

2. การดำเนินการวิจัย

การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการบัลจ์ด้วยไฮดรอลิก มีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย ดังนี้

2.1 การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการบัลจ์ด้วยไฮดรอลิก

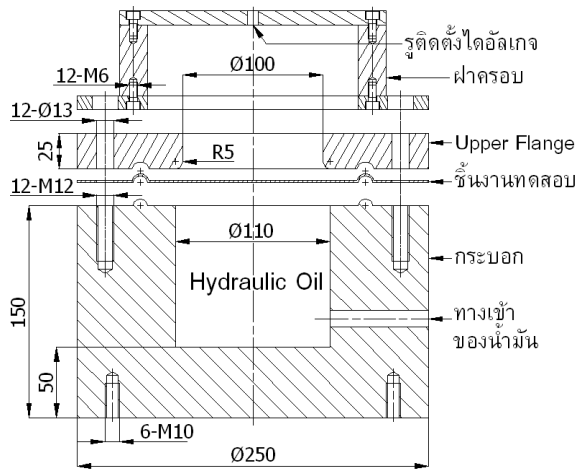
2.1.1 การออกแบบเครื่องทดสอบ

การออกแบบเครื่องทดสอบมีส่วนประกอบหลักและหน้าที่การทำงาน 3 ส่วนด้วยกัน คือ

1. กระบอก ทำจากวัสดุ S45C เป็นทรงกระบอกกลวงสำหรับกักเก็บน้ำมันพร้อมกับการเพิ่มความดันน้ำมันที่ส่งมาจากปั๊มไฮดรอลิกแบบมือโยก มีปิดและเกลียว M12 เพื่อยึดแผ่นขึ้นงานทดสอบดังแสดงในรูปที่ 1

โดยความดันสูงสุดที่กระทำกับกระบอกเท่ากับ 100 MPa และให้ Factor of Safety = 4 ดังนั้นขนาดของกระบอกสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้ * [5]

$$P = 2\tau_{\sigma_y} \ln \frac{b}{a} \quad (1)$$



รูปที่ 1 แสดงขนาดการออกแบบเครื่องทดสอบ

2. Upper Flange ทำจากวัสดุ S45C มีลักษณะเป็นทรงกระบอก สร้างปัดและเจาะรูโดยรอบไว้สำหรับยึดแผ่นชั้นงานทดสอบเข้ากับกระบอกและเจาะรูตรงกลางพร้อมสร้างรัศมีที่ขอบเพื่อขึ้นรูปชั้นงานทดสอบดังแสดงในรูปที่ 1

3. ฟลักซ์บอม ทำจากวัสดุ S400 เป็นทรงกระบอกมีฝาปิด สำหรับติดตั้งไดอัลเกจและเจาะรูโดยรอบประกอบกับสกรู M12 เพื่อกันการรั่วของน้ำมันไฮดรอลิกดังแสดงในรูปที่ 1

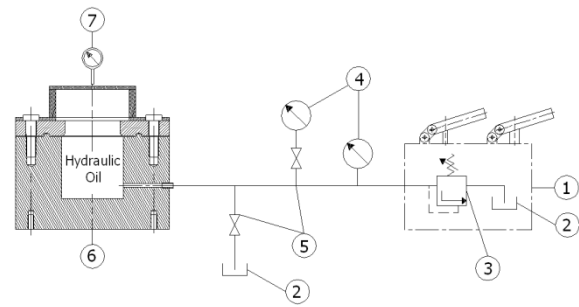
ซึ่งขนาดของสกรูสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้ * [6]

$$\sigma_{td} = \frac{F}{A_s} \quad (2)$$

2.1.2 การออกแบบวงจรไฮดรอลิก

การออกแบบวงจรไฮดรอลิกได้พิจารณาลักษณะเงื่อนไขของงาน คำนึงถึงการประหยัด ความสะดวกสบาย ความปลอดภัยในการใช้งานและความถูกต้องตามหลักการทำงานของเครื่องทดสอบการบัลจ์ด้วยไฮดรอลิก จากการออกแบบเครื่องทดสอบดังรูปที่ 1 สามารถคำนวณหาชุดสร้างความดันที่นำมาใช้กับเครื่องทดสอบโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

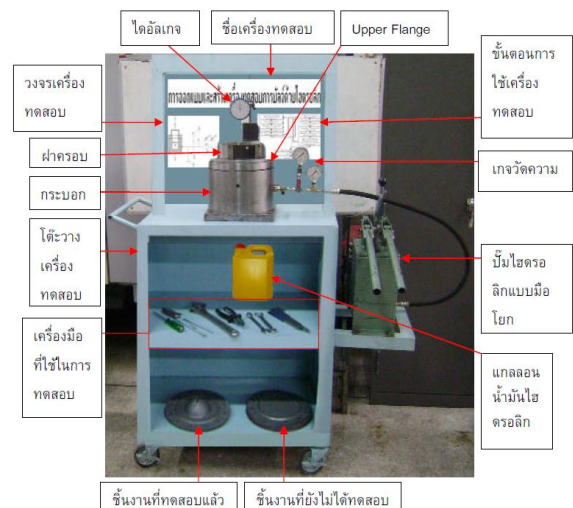
$$P = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (3)$$



รูปที่ 2 แสดงการออกแบบวงจรไฮดรอลิก

- 1 คือ ชุดต้นกำลังไฮดรอลิก
- 2 คือ ถังน้ำมันไฮดรอลิก
- 3 คือ วาล์วควบคุมความดันน้ำมัน
- 4 คือ เกจวัดความดัน
- 5 คือ วาล์วปิด - เปิด
- 6 คือ เครื่องทดสอบ
- 7 คือ ไดอัลเกจ

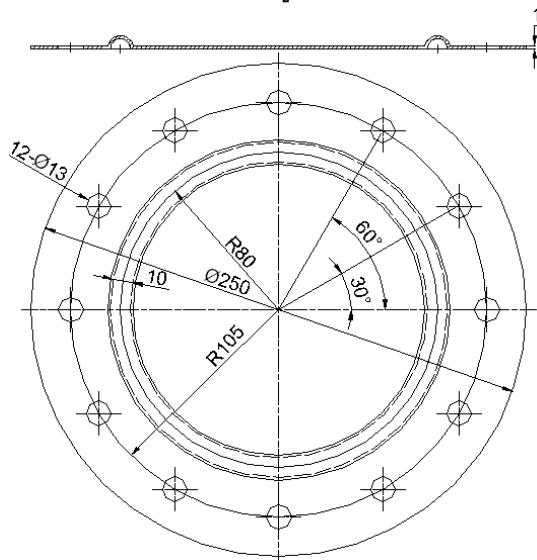
รูปที่ 2 แสดงวงจรไฮดรอลิกสำหรับเครื่องทดสอบการบัลจ์ด้วยไฮดรอลิก และรูปที่ 3 แสดงเครื่องทดสอบการบัลจ์ด้วยไฮดรอลิกที่ออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้



รูปที่ 3 แสดงเครื่องทดสอบการบัลจ์ด้วยไฮดรอลิกที่ออกแบบและสร้างขึ้น

2.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

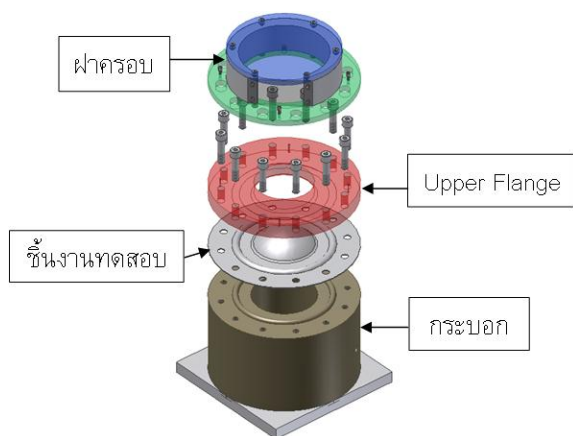
ชิ้นงานทดสอบสำหรับการทดสอบเพื่อหาสมบัติทางกลของโลหะแผ่นก่อนการขึ้นรูปภายใต้สภาวะแรงดึงสองทิศทางด้วยเครื่องทดสอบการบดด้วยไฮดรอลิก มีขนาดดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงขนาดชิ้นงานทดสอบ

การเตรียมชิ้นงานทดสอบสำหรับการทดสอบการบดการบดด้วยไฮดรอลิก นำโลหะแผ่นขนาด 250 x 250 mm ความหนาไม่เกิน 1.2 mm ขึ้นบดตัดให้ได้ขนาด Ø250 mm เจาะรู Ø13 mm จำนวน 12 รู เพื่อจับยึดในการทดสอบ

2.3 การทดสอบการบดด้วยไฮดรอลิก



รูปที่ 5 แสดงการประกอบชิ้นงานทดสอบกับเครื่องทดสอบการบดด้วยไฮดรอลิก

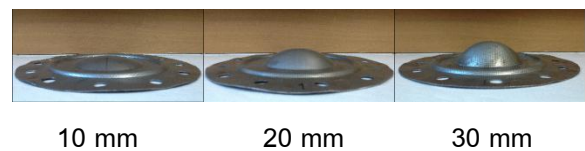
รูปที่ 5 แสดงการประกอบชิ้นงานทดสอบกับเครื่องทดสอบการบดด้วยไฮดรอลิก สำหรับการวิจัยนี้การทดสอบการบดด้วยไฮดรอลิกมีรูปแบบการทดสอบ 2 แบบ คือ

1. การทดสอบขึ้นรูปไม่ให้เห็นงานปริแตก เพื่อหาสภาพทดสอบได้ของเครื่องทดสอบการบดด้วยไฮดรอลิก โดยการวัดค่าความสมมาตรบนแผ่นชิ้นงานทดสอบหลังการทดสอบ
2. การทดสอบขึ้นรูปให้เห็นงานปริแตก เพื่อหาสมบัติทางกลของแผ่นชิ้นงานทดสอบ

2.4 การหาสภาพทดสอบได้โดยการวัดค่าความสมมาตรชิ้นงานทดสอบ

การตรวจสอบความสมมาตรชิ้นงานทดสอบ โดยเครื่องวัด 3 แกน (CMM) มีรูปแบบการวัดค่าดังนี้

1. ชิ้นรูปชิ้นงานทดสอบสำหรับการวัดค่าความสมมาตรบนแผ่นชิ้นงานทดสอบได้กำหนดความสูงไว้ 3 ระดับ คือ 10, 20 และ 30 mm อย่างละ 2 แผ่นตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6



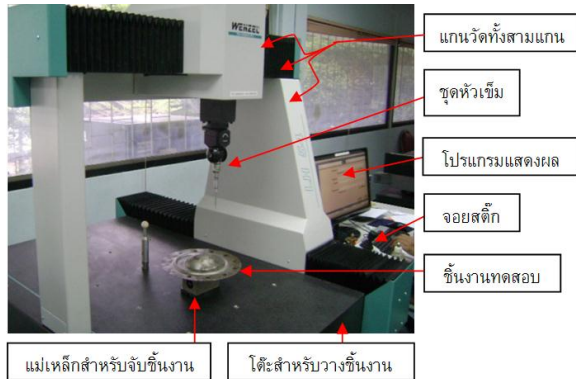
รูปที่ 6 ขนาดความสูงของชิ้นงานแต่ละระดับ

2. วางชิ้นงานทดสอบบนแม่เหล็กจับชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 7 นำเข็มแตะที่ผิวชิ้นงานระหว่างโดมกับบีดรอบโดม 5 จุดเพื่อสร้างระนาบใหม่ขึ้นมาหนึ่งระนาบ โดยจะเฉลี่ยความสูงจากผิวชิ้นงานที่แตะหลังจากสร้างระนาบใหม่ขึ้นมาเสร็จกำหนดระนาบนั้นเป็นค่าแกน Z = 0

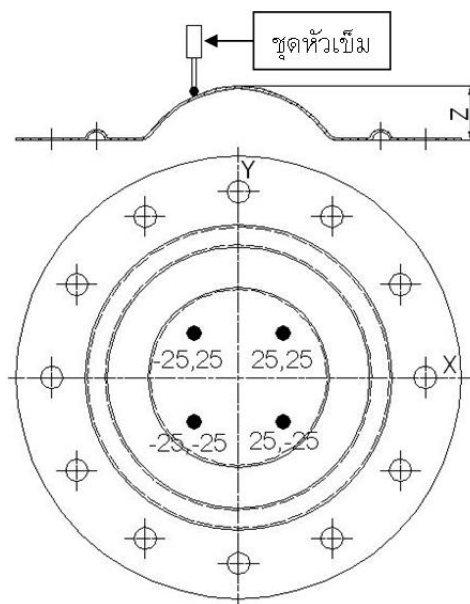
3. หาศูนย์กลางของโดมโดยยกแกน Z 2 mm แตะรอบโดม 4 จุด ซึ่งจะได้ศูนย์กลางโดมดังแสดงในรูปที่ 8

4. ยกแกน Z เหนือความสูงชิ้นงานที่จะวัดค่า 10 mm กำหนดจุดที่จะวัดค่า 4 จุด คือ 25, 25 -25, 25 -25, -25 และ 25, -25 ดังแสดงในรูปที่ 8

5. เดินแกน Z ไปแตะแต่ละจุด แต่ละจุดหนึ่งแล้ว
ยกไปแตะอีกจุดหนึ่งจนครบทั้ง 4 จุด หลังจากแตะ
ครบทั้ง 4 จุดจะอ่านค่าแกน Z แต่ละจุดว่าเท่ากัน
หรือไม่ ถ้าความสูงแกน Z เท่ากับ แสดงว่าชิ้นงาน
ทดสอบสมมาตร



รูปที่ 7 แสดงการวางชิ้นงานบนเครื่องวัด 3 แกน



รูปที่ 8 แสดงตำแหน่งจุดพิกัด (25,25), (-25,25),
(-25,-25) และ (25,-25) บนแผ่นชิ้นงานทดสอบ

2.5 การหาสมบัติทางกลชิ้นงานทดสอบ

การหาสมบัติทางกลชิ้นงานทดสอบจะทดสอบ
ชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการบดด้วยไฮ
ดรอลิกจนกระทั่งชิ้นงานทดสอบแตกภายใต้สภาวะ
แรงดึงสองทิศทาง ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. วางชิ้นงานทดสอบบนกระบอกปิดด้วยแผ่น
Upper Flange แล้วขันยึดด้วยสกรู M12 จำนวน 12
ตัว ด้วยประแจทอร์ก

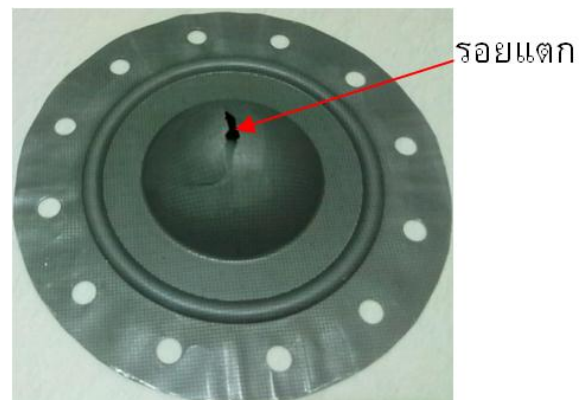
2. ไล่อากาศออกจากน้ำมันโดยการเปิดวาล์วและ
อัดความดันจากปั๊มไฮดรอลิกแบบมือโยกเสร็จแล้ว
ปิดวาล์วให้สนิท

3. วางฝาครอบขันยึดด้วยสกรูต่อด้วยวางไดอัล
เกจและเซตเข็มไดอัลเกจให้เข็มอยู่ตำแหน่ง 0 เพื่อ
ง่ายต่อการบันทึกค่า

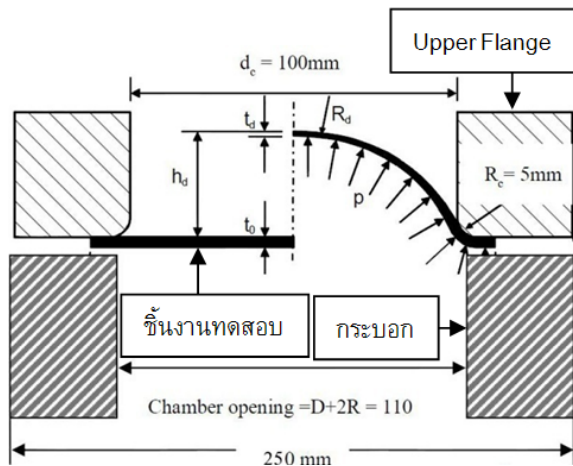
4. ตรวจสอบเช็คเกจวัดความดันจะต้องอยู่ที่ตำแหน่ง
0 ทั้งสองตัว

5. อัดน้ำมันจากปั๊มไฮดรอลิกแบบมือโยก เพื่อ
สร้างความดันขึ้นรูปชิ้นงานระหว่างการอัดความดัน
แต่ละครั้งจะเก็บค่าความดันและค่าความสูงโดมด้วย
ไดอัลเกจตลอดการขึ้นรูปจนชิ้นงานปริแตก ดังแสดง
ในรูปที่ 9

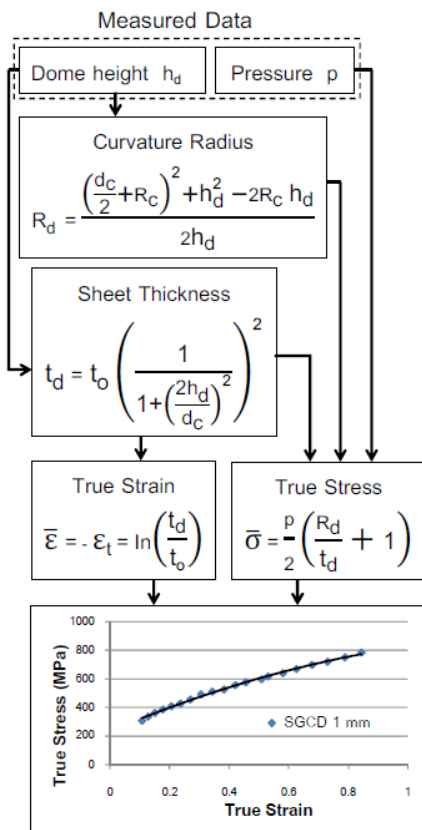
6. หลังจากชิ้นงานปริแตกจะนำค่าความดันและ
ความสูงโดมมาคำนวณค่าตามรูปที่ 10 เพื่อที่จะสร้าง
กราฟความเค้น-ความเครียดสำหรับโลหะแผ่น ดังรูป
ที่ 11



รูปที่ 9 แสดงชิ้นงานทดสอบแตกหลังการทดสอบ
ชิ้นงาน



รูปที่ 10 แบบสำหรับการทดสอบการบัลจ์ด้วยไฮดรอลิกเพื่อสร้างกราฟความเค้น-ความเครียดจริง



รูปที่ 11 ขั้นตอนการสร้างกราฟความเค้น-ความเครียดจริงสำหรับโลหะแผ่น [1]*

จากรูปที่ 11 ขั้นตอนการสร้างกราฟความเค้น-ความเครียดจริงสำหรับโลหะแผ่น กราฟที่ได้มาจากค่าความดันและความสูงโดม แต่ละครั้งที่ขึ้นรูปขึ้นงานโดยการให้ความดันจากปั๊มไฮดรอลิกแบบมือ

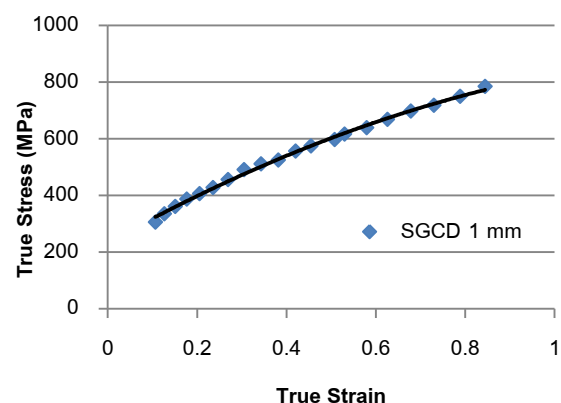
โยกแล้วนำค่าความดันและความสูงโดมแทนในสมการ ซึ่งจะแสดงกราฟความเค้น-ความเครียดจริงขึ้นงานทดสอบแต่ละจุดตลอดการขึ้นรูปจนกว่าขึ้นงานจะปริแตก ดังแสดงในรูปที่ 12

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการวัดค่าความสมมาตรเพื่อสภาพทดสอบได้ของเครื่องทดสอบการบัลจ์ด้วยไฮดรอลิก

จากตารางที่ 1 แสดงผลการวัดค่าความสมมาตรที่ระดับความสูง 10 mm 20 mm และ 30 mm ที่ตำแหน่งจุดพิกัด (25,25), (-25,25), (-25,-25) และ (25,-25) พบว่าเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน (Tolerance) ที่แต่ละความสูงมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 0.03 - 0.06 mm ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าขึ้นงานทดสอบที่ได้จากการทดสอบมีความสมมาตรสอดคล้องกันหรือไม่แตกต่างกัน นั่นคือเครื่องทดสอบการบัลจ์ด้วยไฮดรอลิกมีสภาพทดสอบได้

3.2 แผนภาพความเค้น-ความเครียดจริงที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 12 กราฟความเค้น-ความเครียดจริงขึ้นงานทดสอบโลหะแผ่น SGCD ความหนา 1 mm

ตารางที่ 1 ผลการวัดค่าความสมมาตรชิ้นงานทดสอบ เพื่อหาสภาพทดสอบได้ของเครื่องทดสอบที่ออกแบบและสร้างขึ้น

ความสูง ชิ้นงาน		ชิ้นงาน									
		ชิ้นงานที่ 1					ชิ้นงานที่ 2				
		ตำแหน่งจุดพิกัด				Tolerance	ตำแหน่งจุดพิกัด				Tolerance
		25,25	-25,25	-25,-25	25,-25		25,25	-25,25	-25,-25	25,-25	
10 mm	ความสูงแกน Z(mm)	5.86	5.84	5.87	5.89	5.8 ^{+0.09} _{+0.04}	5.78	5.70	5.76	5.77	5.7 ^{+0.08} ₊₀
20 mm		11.87	11.86	11.85	11.86	11.8 ^{+0.07} _{+0.05}	11.97	11.93	11.93	11.96	11.9 ^{+0.07} _{+0.03}
30 mm		18.25	18.24	18.24	18.27	18.2 ^{+0.07} _{+0.04}	18.17	18.17	18.21	18.23	18.2 ^{+0.03} _{-0.03}

จากรูปที่ 12 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดจริงที่ได้จากการทดสอบโลหะแผ่น SGCD ความหนา 1 mm ด้วยการดึงขึ้นรูปในสภาวะแรงดึงสองทิศทาง ค่าความเค้น-ความเครียดที่ได้เริ่มจากจุดคราก (306 MPa และ 0.1) ถึงจุดแตกหัก (784 MPa และ 0.84) และมีค่าความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นชิ้นงานทดสอบเท่ากับ 698 MPa การทดสอบดังกล่าวเป็นการทดสอบการดึงยึดขึ้นรูปดังนั้นจะแสดงผลโดยใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรเท่านั้น และมีพฤติกรรมแอนไอโซทรอปิกของวัสดุหรืออิทธิพลของค่า r เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

4. สรุป

เครื่องทดสอบการบดอัดด้วยไฮดรอลิกที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีขนาด Ø250 x 195 mm ใช้กับชิ้นงานทดสอบขนาด Ø250 mm หนาไม่เกิน 1.2 mm ซึ่งเครื่องทดสอบจะสร้างความดันได้ไม่เกิน 25 MPa จากการทดสอบชิ้นงานพบว่า เครื่องทดสอบมีสภาพการทดสอบได้ ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานที่ได้จากการวัดค่าความสมมาตรที่ระดับความสูง 10,20 และ 30 mm มีความสมมาตรกัน เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 0.03-0.06 mm และสามารถใช้ทดสอบหาสมบัติทางกลของโลหะแผ่นก่อนการขึ้นรูปภายใต้สภาวะแรงดึงสองทิศทางได้โดยผลลัพธ์จากการทดสอบนำไปพล็อตกราฟความเค้นและความเครียดจริงสำหรับโลหะแผ่นที่จะนำไปทำการขึ้นรูปหลังจากได้กราฟความเค้น-ความเครียดจริงของแผ่น

ชิ้นงานทดสอบแล้วช่วยให้สามารถเลือกวัสดุชิ้นงานได้อย่างเหมาะสมทั้งด้านการผลิตและการใช้งาน เลือกเครื่องจักรและเครื่องมือได้อย่างไม่ติดขัด พร้อมทั้งประเมินแรงและงานที่ต้องใช้ในการขึ้นรูปได้อย่างถูกต้อง

5. คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

- a : รัศมีภายในของกระบอก
- A₁ : พื้นที่รับความดันในกระบอก
- A_S : พื้นที่รับความเค้น
- b : รัศมีภายนอกของกระบอก
- d_c : เส้นผ่านศูนย์กลางปาก Upper Flange
- F : แรงจากการใช้งาน
- F₁ : แรงที่เกิดจากความดันภายในกระบอก
- h_d : ความสูงของโดมขณะขึ้นรูป
- P : ความดัน
- R_c : รัศมีปาก Upper Flange
- R_d : รัศมีของทรงกลมที่เกิดขึ้นขณะขึ้นรูป
- t_d : ความหนาบนยอดโดม
- t₀ : ความหนาเริ่มต้น
- $\bar{\epsilon}$: ความเครียดจริง
- ϵ_t : ความเครียดในแนวความหนา
- $\bar{\sigma}$: ความเค้นจริง
- σ_{td} : ค่าความเค้นใช้งาน
- σ_y : ความเค้นดึงของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ
- τ : ความเค้นเฉือน
- τ_{σ_y} : ความเค้นเฉือนแบบ von Mises material

6. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนบางส่วนจาก ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์สำหรับ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมแม่พิมพ์และเครื่องมือ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความ อนุเคราะห์หลักในการทำเครื่องทดสอบบางส่วน เครื่องเพรส และอุปกรณ์ทดสอบอื่นๆ

7. เอกสารอ้างอิง

7.1 บทความจากวารสาร (Journal)

- [1]* Gerhard Gutscher, Hsien-Chih Wu, Gracious Ngaile, Taylan Altan, "Determination of flow stress for sheet metal forming using the viscous pressure bulge (VPB) test", Journal of Materials Processing Technology. 146 (2004) 1–7
- [2] A. Nasser, A. Yadav, P. Pathak, T. Altan Determination of the flow stress of five AHSS sheet materials (DP 600, DP 780, DP 780-CR, DP 780-HY and TRIP 780) using the uniaxial tensile and the biaxial Viscous Pressure Bulge (VPB) tests Journal of Materials Processing Technology. 210 (2010) 429–436
- [3] G. Montaya, M. Francois, M. Tourneix, B. Guelorget, C. Vial-Edwards, I. Lira Strain and strain rate measurement during the bulge test by electronic speckle pattern interferometry Journal of Materials Processing Technology 184 (2007) 428–435
- [4]* ธนสาร อินทรกำธรชัย, สุวลี สวัสดิ์สลุ, ทศนีย์ ฟุ้งแย้ม, สุวัฒน์ จีระธีรนาถ, การหาคุณสมบัติช่วง พลาสติกของโลหะแผ่นเกรด SPCC ด้วยการทดสอบ แบบเป่าโป่งด้วยน้ำ และอิทธิพลการเบี่ยงเบนในช่วง

6 ชิกมา, การประชุมวิชาการวิศวกรรมอุตสาหการ แห่งชาติ, 2010.

7.2 หนังสือ

- [1] ชาญ ถนัดงาน และคณะ (2538), คู่มือการ ออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ขนาดเล็ก. กรุงเทพฯ มหา นคร: มูลนิธิเพื่อสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรม เครื่องจักรกลและโลหะการ
- [2] ชาญ ถนัดงาน (2543), เทคโนโลยีการขึ้นรูป โลหะ. (เอกสารประกอบการสอนวิชา เทคโนโลยีการ ขึ้นรูปโลหะ.) กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [3] บรรเลง ศรีนิล ,ประเสริฐ ก๊วยสมบุญ. ตาราง โลหะ. : สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ, 2529.
- [4] William F. Hosford and Robert M. Caddell. Metal Forming Mechanical and Metallurgy. Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1993.
- *[5] Boresi, A. P., & Schmidt, R. J. Advanced Mechanics of Materials (Sixth Edition). New York: John Wiley & Sons, INC. (2003).
- *[6] ศ.ดร.วริทธิ์ อึ้งภากรณ์ และ รศ.ชาญ ถนัดงาน. การออกแบบเครื่องจักรกล1. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ด ยูเคชั่น จำกัด(มหาชน),2544