

การทดสอบหาสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ เพื่อนำไปใช้กับการจำลองของกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ

ชลากร อุดมรัชชาสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชลิตา อุดมรัชชาสกุล*

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 0954 2951 อีเมล: chalida.u@rmutp.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.04.006

รับเมื่อ 26 ตุลาคม 2561 แก้ไขเมื่อ 27 พฤศจิกายน 2561 ตอรับเมื่อ 24 ธันวาคม 2561 เผยแพร่ออนไลน์ 10 เมษายน 2562

© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางของการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC ความหนา 1 มม. วัตถุประสงค์เพื่อนำผลจำลองการขึ้นรูปด้วยสมบัติจากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำนำไปสู่การนำไปใช้ในการลากขึ้นรูปด้วยน้ำ โดยได้ทำการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จาก 2 การทดสอบ ได้แก่ 1) การทดสอบแรงดึงแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM E8/E8M-09 และ E646-16 มีค่าเท่ากับ 512.29 ค่าเท่ากับ 0.159 และมีค่า r-Lankford ตามมาตรฐาน ASTM E517-00 เท่ากับ 1.29 และ 2) การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ เป็นการทดสอบขึ้นรูปในสถานะแรงดึงสองทิศทาง (Biaxial) โดยได้ทำการพิสูจน์แม่พิมพ์จากงานวิจัยของสุวัฒน์ แล้วพบว่ามีความเหมาะสมการขึ้นรูปเป็นไปตามทฤษฎีแผ่นบาง (Membrane) ทำให้การใช้ข้อมูลทดสอบที่ได้จากแม่พิมพ์นี้มีความน่าเชื่อถือ จากนั้นทำการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำและวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อหาค่าความเค้นและความเครียดประสิทธิผล พบว่ามีค่าระดับความเครียดประมาณ 0.85 แต่การทดสอบแรงดึงแกนเดียวสามารถให้ช่วงความเครียดเพียง 0.3 เท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับการทบทวนวรรณกรรมต่างๆ แต่เมื่อหาความเข้ากันของสมการกฎของก่าลิง พบว่า การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำนี้แสดงอิทธิพลคุณสมบัติความไม่เท่ากันทุกทิศทาง ทำให้ค่าความเค้นมีค่าสูงมาก ต้องทำการลดอิทธิพลค่า r-Lankford ออก แต่เนื่องจากยังไม่สามารถหาค่า r-Lankford จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำได้ จึงต้องใช้ค่า r-Lankford ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวมาทำการลดอิทธิพลค่าดังกล่าวแทนได้ค่า K และ n เท่ากับ 665.04 และ 0.3007 โดยจะนำเอาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้ง 2 การทดสอบ มาจำลองการขึ้นรูปขึ้นงานพาราโบลิกผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปขึ้นงานพาราโบลิกจริง พบว่า ลักษณะขึ้นงานพาราโบลิกที่มีการกระจายความหนาบริเวณผนังขึ้นงานใกล้เคียงสอดคล้องกับการทดสอบขึ้นรูปจริงที่มีค่าประมาณ 0.755 มม. มากที่สุดคือผลจากการจำลองการขึ้นรูปด้วยสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ ที่มีค่าการกระจายความหนาบริเวณผนังขึ้นงานประมาณ 0.759 มม. แต่ผลจำลองการขึ้นรูปที่ได้การทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวนั้นมีค่าการกระจายความหนาบริเวณผนังขึ้นงานประมาณ 0.605 มม. ซึ่งต่างจากผลการทดสอบขึ้นรูปจริง 0.15 มม.

คำสำคัญ: การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ การทดสอบแรงดึงแกนเดียว ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

การอ้างอิงบทความ: ชลากร อุดมรัชชาสกุล และ ชลิตา อุดมรัชชาสกุล, “การทดสอบหาสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ เพื่อนำไปใช้กับการจำลองของกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 29, ฉบับที่ 3, หน้า 355–371, ก.ค.-ก.ย. 2562.

Determination of Mechanical Properties of Low Carbon Steel with Hydraulic Bulge Test for Using in Hydromechanical Deep Drawing Process Simulation

Chalakorn Udomraksasakul

Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand

Chalida Udomraksasakul*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 0954 2951, E-mail: chalida.u@rmutp.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.04.006

Received 26 October 2018; Revised 27 November 2018; Accepted 24 December 2018; Published online: 10 April 2019

© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research has presented an alternative method to obtain the flow stress curve of low carbon steel sheet (SPCC) with thickness 1 mm. The objective is forming simulation result from Hydraulic bulge test to utilize Hydromechanical deep drawing process. By comparison flow stress curves that is obtained from 2 experiments as 1) Uniaxial tensile test is according to the standard of ASTM E8/E8M-09 and E646-16 that has the K value is 512.29, the n value is 0.159 and the r -Lankford value is according to the standard of ASTM E517-00 that is 1.29. And 2) Hydraulic bulge test which is formed under biaxial condition. This research did proof the mold from the research of Suwat that formed under biaxial condition is according to Membrane theory. Therefore, this mold is a reliability to use experiment data. Later, formed Hydraulic bulge test and measure parameters were employed to calculate the effective stress and strain were about 0.85 of strain level. But the Tensile test were only 0.3 of strain level. It is consistent with review other literature. When finding compatible with power law of flow stress curve from Hydraulic bulge test of low carbon steel sheet show the influence of anisotropy. It is high stress values cause that have to reduce the influence of the r -Lankford value. But due to this cannot make to find the r -Lankford value from the Hydraulic bulge test. Moreover, this have to use the r -Lankford value that is obtained from the Tensile test to the reduction of the aforementioned influence instead. This gets the K value and the n value that is equal to 665.04 and 0.3007. However, this brings the parameter values that are obtained from 2 experiments to simulate the forming of the parabolic work piece via Finite element method. These are compare with the forming of the real parabolic work piece. Then, this comparison is found that the parabolic work piece simulation has the distribution of the thickness in side wall of the work piece is conformed to the real forming that is the value approximate 0.755 mm at the most that this is the result of the simulation of forming with the mechanic property from the Hydraulic bulge test. It is the distribution of the thickness in side wall of the work piece simulation approximately at 0.759 mm. But the result of the simulation of forming with the mechanic property from the Tensile test has the distribution of the thickness in side wall of the work piece is approximately at 0.605 mm. This is different from the result of the real forming at 0.15 mm.

Keywords: Hydraulic Bulge Test, Uniaxial Tensile Test, Flow Stress Curve

Please cite this article as: C. Udomraksasakul and C. Udomraksasakul, "Determination of mechanical properties of low carbon steel with hydraulic bulge test for using in hydromechanical deep drawing process simulation," *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 3, pp. 355-371, Jul.-Sep. 2019 (in Thai).

1. บทนำ

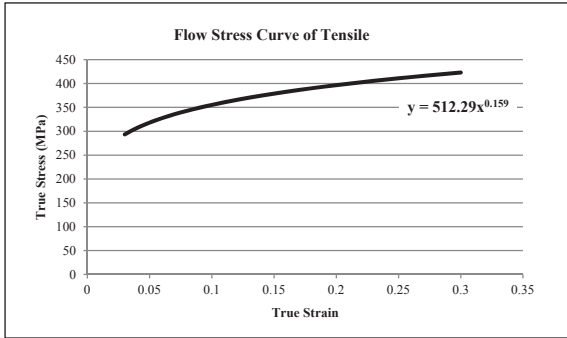
ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Flow Stress Curve) เป็นสมบัติของโลหะแผ่นที่มีความสำคัญต่อการนำมาใช้จำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method; FEM) ซึ่งเป็นโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่นิยมสำหรับผู้ออกแบบในปัจจุบัน เพื่อช่วยให้ผู้ทำการออกแบบสามารถตรวจสอบสถานะการจำลองการขึ้นรูปได้ก่อนสร้างแม่พิมพ์จริง แทนวิธีการเดิมที่ผู้ออกแบบจะต้องทำการออกแบบแม่พิมพ์และสร้างแม่พิมพ์เรียบร้อยแล้ว จึงทำการทดสอบแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น (Tryout) ว่ามีรูปร่างเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ หากรูปร่างไม่เป็นไปตามที่ต้องการจะต้องทำการปรับแก้รูปร่างและขนาดจนกระทั่งชิ้นงานมีรูปร่างตามที่ต้องการ ด้วยเหตุนี้หากค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นค่าที่ถูกต้องจะส่งผลให้การจำลองการขึ้นรูปมีรูปร่างสอดคล้องกันกับการขึ้นรูปจริงด้วยเช่นกัน [1] ซึ่งค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นสมบัติหนึ่งที่แสดงถึงการเสียรูปร่างอย่างถาวรของโลหะแผ่น และวิธีการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดนั้นโดยทั่วไปนิยมทำการหาค่าจากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว (Uniaxial Tensile Test) ตามมาตรฐานสมาคมการทดสอบและวัสดุของอเมริกันรับรอง ฉบับ E8/E8M-09 (American Society for Testing and Materials; ASTM) ที่ได้จัดทำมาตรฐานเป็นที่ยอมรับของทั่วโลก [2] แต่การจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น จะต้องใช้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในช่วงความเครียดที่สูงกว่าช่วงความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว หากนำค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่จะได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวไปใช้ในการจำลองการขึ้นรูป จำเป็นที่จะต้องทำการประมาณค่านอกช่วงความเครียด (Extrapolation) ส่งผลให้การจำลองการขึ้นรูปมีความคลาดเคลื่อนจากการขึ้นรูปจริง โดยการประมาณค่านอกช่วงนิยมหาจากสมการกฏกำลัง (Power Law) ดังนั้นหากทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงความเครียดที่สูงได้ จะช่วยให้การจำลองการขึ้นรูปมีความใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริง ปัจจุบัน

วิธีการหาค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวในช่วงความเครียดที่สูงสามารถหาได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ (Hydraulic Bulge Test; HBT) ซึ่งเป็นการขึ้นรูปโลหะด้วยแรงดันน้ำภายใต้การเกิดสภาวะแรงดึงสองทิศทาง (Biaxial)

2. การทดสอบแรงดึงแกนเดียว

การทดสอบหาสมบัติทางกลที่นิยมใช้และเป็นมาตรฐานสากลรับรอง ค่าใช้จ่ายต่ำและกระบวนการทดสอบไม่ซับซ้อน คือ การทดสอบแรงดึงแกนเดียว โดยการทดสอบนี้เป็นการใช้เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซลแรงดึงแกนเดียว กระทำแรงดึงกับชิ้นงานทดสอบเพียงทิศทางเดียว (Static Load) จนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแล้วทำการวัดระยะยืดของชิ้นงานในการหาการเปลี่ยนแปลงความเครียดในแนวแรงดึง เพื่อหาค่าสมบัติทางกลที่สำคัญของโลหะ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง (Strength Coefficient; K) ค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็ง (Strain Hardening Exponent; n) สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและอ้างอิงการทดสอบจาก [3] โดยการทดสอบเริ่มจากเตรียมชิ้นงานโลหะแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC ขนาดความหนา 1 มม. ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8/E8M-09 และ E646-16 [4] ทำการทดสอบแรงดึงแกนเดียวแนวแกน 0° จำนวน 30 ชิ้น แล้วคำนวณหาค่าความเค้นจริง (True Stress; σ) และความเครียดจริง (True Strain; ϵ) ดังแสดงตัวอย่างการคำนวณความเค้นจริงและความเครียดจริงที่ได้จากการทดสอบ 1 ชิ้นงาน ดังตารางที่ 1 เมื่อได้ค่า K และ n ของทั้ง 30 ชิ้นงาน แล้วจึงทำการเฉลี่ยค่าดังกล่าวพบว่า ค่า K เท่ากับ 512.29 และค่า n เท่ากับ 0.159 และทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังรูปที่ 1

สำหรับการทดสอบถ้าโลหะแผ่นแสดงสมบัติทางกลของวัสดุที่บ่งชี้ข้อผิดพลาดคุณสมบัติความไม่เท่ากันทุกทิศทางของวัสดุ จะต้องหาค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความเครียดช่วงพลาสติก (Normal Anisotropy; r_m) หรือค่า (Lankford Coefficient; r -Lankford) ซึ่งเป็นความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่นขึ้นอยู่กับการบิดทงแนวรีด (Anisotropy) เกิดจากทิศทางและการเรียงตัวของโครงสร้างผลึก ในงานวิจัยที่อ้างอิงนี้ได้



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว

ตารางที่ 1 ข้อมูลค่าจากการคำนวณความเค้นจริงและความเครียดจริงที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว

เวลา (sec)	ความเค้น วิศวกรรม (s)	ความเค้นจริง (σ)	ความเครียด วิศวกรรม (e)	ความเครียด จริง (ε)
0	0	0	0	0
0.0008	0.0100136	0.0100136	9.129E-07	9.129E-07
0.0378	1.3335708	1.3337648	0.0001454	0.0001454
0.0418	2.3695948	2.3699991	0.0001706	0.0001706
0.0448	3.5405158	3.5411869	0.0001895	0.0001895
0.0468	4.5840736	4.5850002	0.0002021	0.0002021
0.0488	5.9673785	5.9686599	0.0002147	0.0002147
0.0508	7.6848508	7.6865978	0.0002273	0.0002272
0.0518	8.5680024	8.5700006	0.0002332	0.0002331
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
72.8228	45.947884	66.115186	0.4389168	0.3638906

ทำการคำนวณหาค่าดังกล่าว โดยเริ่มจากการหาอัตราส่วนความเครียดช่วงพลาสติก (Plastic Strain Ratio; r_0 , r_{45} และ r_{45}) ในแต่ละแนวแกน ได้แก่ 0° , 45° และ 90° กับแนวแกนรีด ซึ่งเป็นการหาอัตราส่วนความเครียดจริงแนวความกว้าง (ϵ_w) กับความเครียดจริงแนวความหนา (ϵ) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM E517-00 [5] โดยทำการทดสอบแรงดึงแกนเดียวแนวแกน 0° , 45° และ 90° กับแนวแกนรีดแนวแกนละ 30 ชิ้น และทำการเฉลี่ยค่าดังกล่าว พบว่า ค่า r_0 , r_{45} และ r_{45} มีค่าเท่ากับ 1.82, 1.23 และ 2.11 ตามลำดับ จากนั้นทำการหาแอนไอโซโทรปีตั้งฉากเฉลี่ยหรือค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความเครียดช่วงพลาสติก พบว่า ค่า r_w

ของโลหะแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC มีค่าเท่ากับ 1.29

3. การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ เป็นอีกวิธีการที่สามารถใช้หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงความเครียดระดับสูงได้ ซึ่งเป็นการทดสอบขึ้นรูปขึ้นงานด้วยแรงดันน้ำแทนการใช้พินซ์ (Punch) กระทำกับวัสดุภายใต้การเกิดสภาวะแรงดึงสองทิศทางจนกระทั่งวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรเป็นรูปโดมครึ่งทรงกลม โดยต้องเป็นไปตามทฤษฎีแผ่นบาง (Membrane Theory) ดังสมการที่ (1)

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = \frac{p}{t} \tag{1}$$

กำหนดให้

- σ_1 คือ ค่าความเค้นหลักแนวแกนหลัก
- σ_2 คือ ค่าความเค้นหลักแนวแกนรอง
- R_1 คือ ค่ารัศมีโดมขณะขึ้นรูปแนวแกนหลัก
- R_2 คือ ค่ารัศมีโดมขณะขึ้นรูปแนวแกนรอง
- p คือ แรงดัน
- t_d คือ ความหนาบริเวณยอดโดม

จากทฤษฎีแผ่นบาง ในขณะที่ทำการขึ้นรูปขึ้นงานต้องรักษารูปร่างความเป็นทรงกลมตลอด รูปร่างจึงจะมีความสมมาตรรอบแกน (Axis-symmetric) นั่นหมายความว่าค่าความเค้นหลักในแนวแกนหลักมีค่าเท่ากับแนวแกนรอง ($\sigma_1 = \sigma_2$) และค่ารัศมีโดมขณะขึ้นรูปแนวแกนหลักจะต้องมีค่าเท่ากับแนวแกนรอง ($R_1 = R_2$) นอกจากนั้นขณะขึ้นรูปจะไม่มีแรงภายนอกเข้ามากระทำกับวัสดุ ทำให้ค่าความเค้นโดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนผิวโดมแนวตั้งฉาก (Average Normal Stress; σ_n) เป็นไปตามสมการที่ (2) และเมื่อนำมาคำนวณพฤติกรรมการไหลช่วงพลาสติกของเทอร์สกาหรือเกณฑ์ความเค้นเฉือนสูงสุด (Tresca's Plastic Flow Criterion) ซึ่งเป็นเกณฑ์การคราก (Yield Criterion) ที่ใช้อธิบายจุดของวัสดุที่เปลี่ยนจากสภาพแบบยืดหยุ่นเป็นสภาพแบบพลาสติกหรือถาวรนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าความเค้นค่าเดียว แต่ต้องอาศัย

ชลากร อุดมรักษาสกุล และ ชลิตา อุดมรักษาสกุล, "การทดสอบหาสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ เพื่อนำไปใช้กับการจำลองของกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ."

ผลรวมค่าความเค้นทุกค่า โดยค่าความเค้นเฉือนดังกล่าวหาได้จากวงกลมของโม่ (Mohr's Circle) [6] โดยนำความเค้นหลักจากทฤษฎีแผ่นบางสมการที่ (1) ลบออกจากความเค้นตั้งฉากจากสมการที่ (2) ทำให้ได้ค่าความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress) ของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำได้ แสดงดังสมการที่ (3) และสามารถเปลี่ยนรูปแบบสมการเป็นสมการที่ (4) ส่วนค่าความเครียดประสิทธิผล (Effective Strain) ที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำทำการหาจากการวัดความเครียดในแนวความหนาที่เกิดขึ้นบนบริเวณยอดโดมของชิ้นงานดังสมการที่ (5) และขณะขึ้นรูปนั้นค่าความเค้นดัด (Bending Stress) ไม่ควรเกิดขึ้นเลย หรือมีค่าน้อยมาก ด้วยเหตุนี้เส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์ควรมีขนาดใหญ่มากเมื่อทำการเทียบกับความหนาของโลหะแผ่น [7] ดังจะกล่าวรายละเอียดของชุดแม่พิมพ์ทดสอบในหัวข้อต่อไป

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(-p + 0) = -\frac{1}{2}p \quad (2)$$

กำหนดให้

σ_n คือ ค่าความเค้นโดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนผิวโดมแนวตั้งฉาก

$$\bar{\sigma} = \sigma_{Max} - \sigma_{Min} = \frac{pR_d}{2t_d} - \frac{-p}{2} \quad (3)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{p}{2} \left(\frac{R_d}{t_d} + 1 \right) \quad (4)$$

กำหนดให้

$\bar{\sigma}$ คือ ค่าความเค้นประสิทธิผล

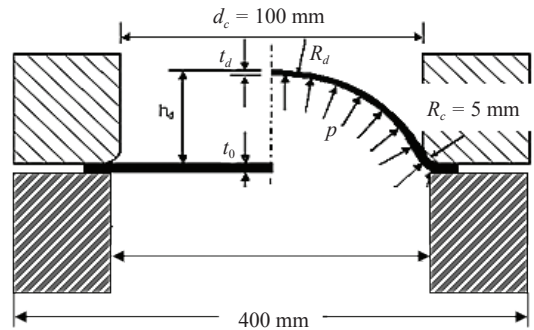
R_d คือ ค่ารัศมีโดมขณะขึ้นรูป

t_d คือ ความหนาของชิ้นงานบริเวณยอดโดม

$$\bar{\varepsilon} = -\varepsilon_t = -\ln \left(\frac{t_d}{t_0} \right) \quad (5)$$

กำหนดให้

$\bar{\varepsilon}$ คือ ค่าความเครียดประสิทธิผล



รูปที่ 2 แบบร่างแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ [9]

ε_t คือ ความเครียดในแนวความหนาที่เกิดขึ้นบนบริเวณยอดโดมของชิ้นงาน

t_0 คือ ความหนาของชิ้นงานเริ่มต้น

3.1 การทดสอบแม่พิมพ์แบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

งานวิจัยนี้ได้นำชุดแม่พิมพ์ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) มาใช้ในการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ โดยการทดสอบแม่พิมพ์นั้นเป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากชุดแม่พิมพ์นี้ว่าเป็นไปตามทฤษฎีแผ่นบาง ตามการศึกษาในงานวิจัยของ [8] ที่ได้ตั้งสมมติฐานและทดสอบด้วยวิธีการทางสถิติ ซึ่งชุดแม่พิมพ์นี้มาจากงานวิจัยของ [9] โดยมีรัศมีของแม่พิมพ์เท่ากับ 5 มม. (Radius the Fillet of the Cavity; R_c) และเส้นผ่านศูนย์กลางแม่พิมพ์เท่ากับ 100 มม. (Diameter of the Cavity; d_c) ดังรูปที่ 2

การทดสอบแม่พิมพ์ว่าเป็นไปตามทฤษฎีแผ่นบางหรือไม่นั้น จากงานวิจัยที่ได้ทำการอ้างอิงนี้ จะถูกตั้งสมมติฐานในวิเคราะห์ดังนี้ คือ

1) ความเค้นตามแนวแกนหลักเท่ากับความเค้นแกนรองตั้งสมมติฐานดังนี้

ก) H_0 : ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางแนวแกนหลัก (d_1) และแนวแกนรอง (d_2) ไม่มีความแตกต่างกัน

H_1 : ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางแนวแกนหลัก (d_1) และแนวแกนรอง (d_2) มีความแตกต่างกัน

ข) H_0 : ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางแนวแกนหลัก (d_1)

และแนวแกนรอง (d_2) ในระดับการวัดที่ 1 และ 2 ไม่มีความแตกต่างกัน

H_1 : ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางแนวแกนหลัก (d_1) และแนวแกนรอง (d_2) ในระดับการวัดที่ 1 และ 2 มีความแตกต่างกัน

2) โดมมีความเป็นทรงกลมสมมาตรรอบแกน

ก) H_0 : ค่าเฉลี่ยรัศมีโดมแนวแกนหลัก (R_1) และแนวแกนรอง (R_2) ไม่มีความแตกต่างกัน

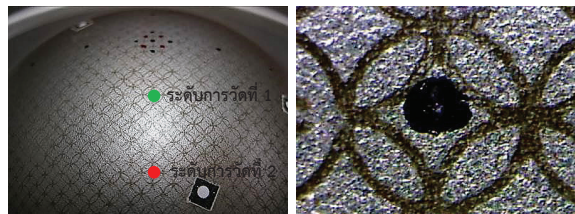
ข) H_1 : ค่าเฉลี่ยรัศมีโดมแนวแกนหลัก (R_1) และแนวแกนรอง (R_2) มีความแตกต่างกัน

โดยการทดสอบเริ่มจากการเตรียมชิ้นงานโลหะแผ่น SPCC ขนาด 250 x 250 มม. ความหนา 1 มม. นำมาสร้างกริดวงกลมลงบนโลหะแผ่นด้วยแผ่นฉลุลาย (Stencils) นำไปขึ้นรูปด้วยด้วยเครื่องเพลสไฮดรอลิก (Press Hydraulic Machine) ขนาด 200 ตัน ที่ทำการติดตั้งเครื่องสร้างแรงดันน้ำ (Pressure Intensifier) และเครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงระยะเชิงเส้นตรง (Linear Variable Differential Transformer; LVDT) แต่เนื่องจากไม่สามารถใช้เครื่องมือใดๆ ทำการติดตั้งในชุดแม่พิมพ์ เพื่อวัดค่าความหนาของชิ้นงานบริเวณยอดโดมและค่ารัศมีโดมขณะขึ้นรูปได้ การทดลองนี้จึงต้องทำการหยุดการขึ้นรูปเป็นช่วงๆ (Break) [10] ที่ความสูงโดมต่างๆ 7 ระดับ ระดับละ 5 ชิ้นงาน ได้แก่ ระดับความสูงที่ 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 มม. ซึ่งความสูง 35 มม. เป็นความสูงที่สุดของโลหะแผ่น SPCC ขนาด 1 มม. ที่ทำการทดลองขึ้นรูปได้ ดังรูปที่ 3 จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบมาทำการกำหนดจุดอ้างอิง เพื่อวัดเส้นผ่านศูนย์กลางแนวแกนหลัก (d_1) และแนวแกนรอง (d_2) แบ่งจุดอ้างอิงเป็น 2 ระดับ ดังนี้ ระดับที่ 1 นับจากกริดวงกลม ณ จุดศูนย์กลางของแผ่นลงไป 4 กริดวงกลม และระดับที่ 2 นับจากกริดวงกลม ณ จุดศูนย์กลางของแผ่นลงไป 8 กริดวงกลม โดยทำการวัดระดับละ 4 จุด แล้วถ่ายภาพจุดอ้างอิงด้วยกล้อง Microscope Dino-Lite รุ่น AM-413ZT และวัดระยะบนระนาบแนวแกนหลักและรองของกริดวงกลมด้วยโปรแกรม Dino Capture 2.0 ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 แล้วจึงบันทึกผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางแนวแกนหลัก (d_1) และแนวแกนรอง (d_2) ดังตารางที่ 2

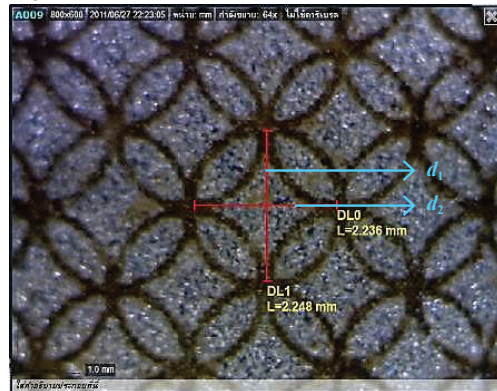
จากตารางที่ 2 ผลการวัดเพื่อการทดสอบสภาวะแรงดึง



รูปที่ 3 ชิ้นงานทดสอบที่ระดับความสูงต่างๆ



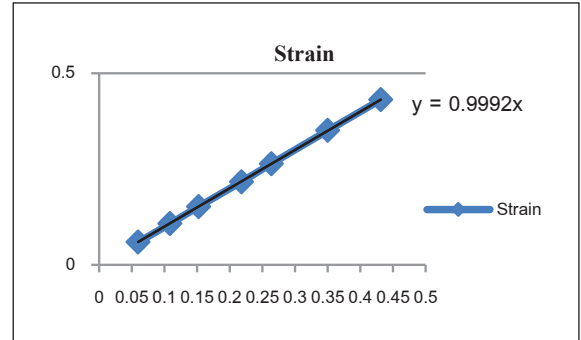
รูปที่ 4 กำหนดจุดอ้างอิงและภาพถ่ายจุดอ้างอิง



รูปที่ 5 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางแนวแกนหลัก (d_1) และแนวแกนรอง (d_2)

สองทิศทาง เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติของปัจจัยการทดลอง สมมติฐานที่ 1 ตามตารางที่ 3 พบว่า สำหรับการทดลองที่ ก) เส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงทั้ง 7 ระดับ มีค่า p -value มากกว่า 0.05 แสดงว่าค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางแนวแกนหลัก (d_1) และแนวแกนรอง (d_2) ไม่มีความแตกต่างกัน สำหรับการทดลองที่ ข) พบว่า ที่ระดับความสูงทั้ง 7 ระดับ ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าน

ศูนย์กลางมีค่า p -value มากกว่า 0.05 แสดงว่า ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวแกนทั้งสองของระดับการวัดที่ 1 และระดับการวัดที่ 2 ไม่มีความแตกต่างกัน แต่ในปัจจุบันของระดับการวัด มีค่า p -value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวแกนหลักและแนวแกนรองของระดับการวัดที่ 1 และระดับการวัดที่ 2 บนชิ้นงานเดียวกัน จะมีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงนำค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางแนวแกนหลักและรองจำนวน 7 ระดับความสูงมาแทนสมการที่ (6) และ (7) เพื่อหาความสัมพันธ์สมการเชิงเส้น (Linear Equation) ดังรูปที่ 6 ตามงานวิจัยของ Chalakov *et al.* [11]



รูปที่ 6 กราฟสมการเชิงเส้น (Linear Equation)

ตารางที่ 2 ผลการวัดเพื่อการทดสอบสภาวะแรงดึงสองทิศทาง

ระดับความสูง	ระดับการวัด	แนวแกน	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)			
ความสูง 5 มม.	ระดับการวัดที่ 1	d_1	2.218	2.218	2.220	2.220
		d_2	2.218	2.220	2.220	2.218
	ระดับการวัดที่ 2	d_1	2.208	2.211	2.208	2.206
		d_2	2.208	2.206	2.206	2.211
ความสูง 10 มม.	ระดับการวัดที่ 1	d_1	2.330	2.332	2.328	2.332
		d_2	2.328	2.332	2.325	2.330
	ระดับการวัดที่ 2	d_1	2.319	2.316	2.321	2.321
		d_2	2.316	2.319	2.319	2.316
ความสูง 15 มม.	ระดับการวัดที่ 1	d_1	2.432	2.435	2.437	2.432
		d_2	2.432	2.437	2.435	2.432
	ระดับการวัดที่ 2	d_1	2.368	2.368	2.368	2.363
		d_2	2.368	2.366	2.368	2.366
ความสูง 20 มม.	ระดับการวัดที่ 1	d_1	2.599	2.596	2.599	2.601
		d_2	2.599	2.599	2.594	2.594
	ระดับการวัดที่ 2	d_1	2.537	2.542	2.537	2.537
		d_2	2.540	2.542	2.537	2.537
ความสูง 25 มม.	ระดับการวัดที่ 1	d_1	2.720	2.720	2.723	2.720
		d_2	2.723	2.723	2.720	2.720
	ระดับการวัดที่ 2	d_1	2.592	2.594	2.592	2.594
		d_2	2.592	2.594	2.587	2.592
ความสูง 30 มม.	ระดับการวัดที่ 1	d_1	2.963	2.970	2.965	2.968
		d_2	2.963	2.968	2.968	2.970
	ระดับการวัดที่ 2	d_1	2.861	2.861	2.858	2.861
		d_2	2.866	2.863	2.858	2.858
ความสูง 35 มม.	ระดับการวัดที่ 1	d_1	3.218	3.215	3.218	3.215
		d_2	3.213	3.218	3.215	3.213
	ระดับการวัดที่ 2	d_1	2.934	2.939	2.939	2.934
		d_2	2.937	2.934	2.939	2.937

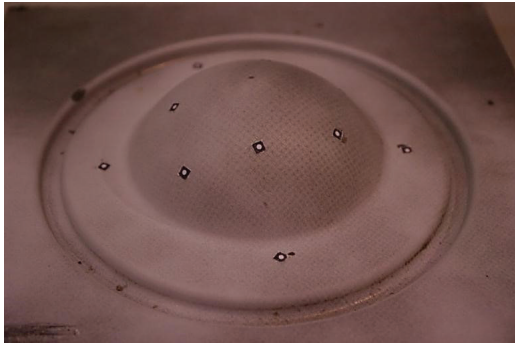
ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการทดสอบสภาวะแรงดึงสองทิศทาง

ระดับความสูง	p -value	
	ปัจจัยการทดลองสมมติฐานที่ 1	
	เส้นผ่านศูนย์กลาง (ก)	เส้นผ่านศูนย์กลาง/ระดับการวัด (ข)
ความสูง 5 มม.	0.589	0.553 / 0.000
ความสูง 10 มม.	0.362	0.154 / 0.000
ความสูง 15 มม.	0.100	0.912 / 0.000
ความสูง 20 มม.	0.252	0.558 / 0.000
ความสูง 25 มม.	0.537	0.621 / 0.000
ความสูง 30 มม.	0.740	0.573 / 0.000
ความสูง 35 มม.	0.277	0.527 / 0.000

$$\varepsilon_1 = \ln \left(\frac{d_1}{d_0} \right) \quad (6)$$

$$\varepsilon_2 = \ln \left(\frac{d_2}{d_0} \right) \quad (7)$$

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าความเครียดแนวแกนหลัก (ε_1) และแนวแกนรอง (ε_2) แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยมากและกราฟเป็นเส้นตรง (Linear) ทำมุม 45° จึงทำการสรุปได้ว่าความเครียดแนวแกนหลัก (ε_1) และแนวแกนรอง (ε_2) ไม่มีความแตกต่างกันมาก ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2$) เนื่องจากสภาวะในการขึ้นรูปอยู่ในสภาวะแรงดึงสองทิศทาง นั้นหมายความว่า ความเค้นแนวแกนหลัก (σ_1) และแนวแกนรอง (σ_2) ไม่มีความแตกต่างกัน

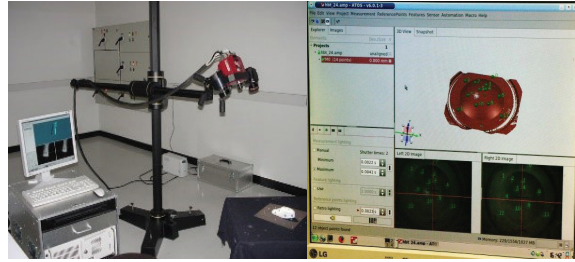


รูปที่ 7 ติดแผ่นสติกเกอร์จุดอ้างอิงและแผ่นสเปรย์ผงแป้ง

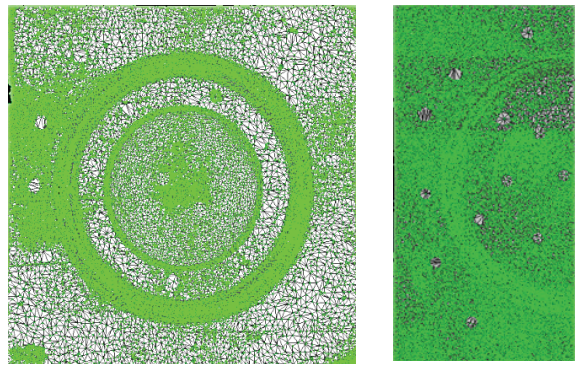
เช่นกัน ($\sigma_1 = \sigma_2$)

ในส่วนสมมติฐานที่ 2 ว่าโดมมีความเป็นทรงกลม สมมาตรรอบแกนตลอดหรือไม่ ทดสอบด้วยการนำชิ้นงาน ทั้งหมด 7 ระดับความสูง มาสแกน 3 มิติ (3D-Scan) เพื่อทำการวัดคาร์ตมิโดมแนวแกนหลัก (R_1) และแนวแกนรอง (R_2) เริ่มจากการติดแผ่นสติกเกอร์จุดอ้างอิงให้มีลักษณะ มองเห็นเป็นรูปสามเหลี่ยมต่อกันบนแผ่นชิ้นงานและแผ่น สเปรย์ผงแป้ง (Spotcheck SKD-S2) สำหรับถ่ายภาพทำ 3D-Scan ดังรูปที่ 7 แล้วทำการสแกนโครงสร้างภายนอกชิ้นงาน ด้วยการยิงแสงให้ตกกระทบผิวแนวแกนตั้งของชิ้นงานและ ถ่ายภาพ ทำให้เกิดขอบของชิ้นงานตามการมองเห็นสติกเกอร์ จุดอ้างอิงที่ติดเป็นรูปสามเหลี่ยมแล้วจึงทำการเปลี่ยนมุม พื้นที่ในการถ่ายจนรอบชิ้นงาน จากนั้นโปรแกรมจะสร้าง ชิ้นงาน 3 มิติ แสดงในรูปแบบกลุ่มพิกัดจุด 3 มิติ (Clouds of Point) ในการเก็บข้อมูลตำแหน่งขอบของวัตถุในพิกัด X, Y, Z เพื่อใช้ประมวลผลผ่านโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ต่อไป ดังรูป ที่ 8 และทำการตัดชิ้นงานจำลอง 3 มิติในแนวนิวรีต ดังรูปที่ 9

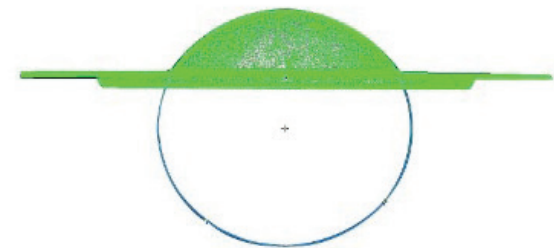
จากนั้นทำการปรับให้กลุ่มพิกัดจุดชิ้นงานอยู่ในระนาบ X, Y, Z เท่ากับ 0, 0, 0 แล้วจึงสร้างวงกลมเสมือนด้วยการใช้ ตำแหน่งอ้างอิงในการกำหนดเส้นโค้งพิกัด เพื่อทำการวัดคาร์ตมิ โดมแนวแกนหลัก (R_1) และแนวแกนรอง (R_2) ทั้ง 35 ชิ้นงาน ดังรูปที่ 10 และตารางที่ 4 แล้วจึงทำการวิเคราะห์ทางสถิติ ตามสมมติฐานที่ 2 ที่ได้ตั้งไว้ข้างต้นว่า โดมขณะขึ้นรูปมีความ เป็นทรงกลมสมมาตรรอบแกนหรือไม่ จากการทดสอบพบว่า ค่าเฉลี่ยคาร์ตมิโดมแนวแกนหลัก (R_1) และแนวแกนรอง (R_2)



รูปที่ 8 เครื่อง 3D-Scan และโครงสร้างชิ้นงาน 3 มิติรูปแบบ กลุ่มพิกัดจุด



รูปที่ 9 ภาพชิ้นงานสแกน 3 มิติแบบเต็มชิ้นงานและแบบ ตัดครึ่งในแนวนิวรีต



รูปที่ 10 การกำหนดเส้นโค้งพิกัด เพื่อทำการวัดคาร์ตมิโดม

ทั้ง 7 ระดับความสูง ไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจากผลการ วิเคราะห์ทางสถิติมีค่า p -value มากกว่า 0.05 ทั้ง 7 ระดับ ความสูง ดังตารางที่ 5 จึงสามารถทำการสรุปได้ว่า แมงพิมพ์ [9] ที่ทำการออกแบบไว้สามารถใช้ในการทดสอบแบบเป่าโป่ง ด้วยน้ำขณะทำการขึ้นรูปชิ้นงานมีรูปร่างเป็นทรงกลมตลอด และอยู่ภายใต้การเกิดสภาวะแรงดึงสองทิศทาง ซึ่งเป็นไป ตามทฤษฎีแผ่นบาง ดังนั้นแมงพิมพ์นี้จึงมีความน่าเชื่อถือที่จะนำ

ตารางที่ 4 ผลการวัดเพื่อการทดสอบการรักษารูปร่างทรงกลมสมมาตร

ระดับความสูง	ระดับการวัด	แนวแกน	ขนาดรัศมีโดม (มม.)				
			d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
ความสูง 5 มม.	การวัดที่ 1	d_1	295.271	295.082	295.250	295.155	295.300
		d_2	295.272	295.217	295.407	295.381	295.140
	การวัดที่ 2	d_1	295.345	295.507	295.205	295.555	295.397
		d_2	295.246	295.302	295.144	295.431	295.172
ความสูง 10 มม.	การวัดที่ 1	d_1	152.377	152.388	152.389	152.395	152.395
		d_2	152.390	152.421	152.372	152.380	152.363
	การวัดที่ 2	d_1	152.328	152.378	152.500	152.360	152.316
		d_2	152.360	152.299	152.272	152.338	152.318
ความสูง 15 มม.	การวัดที่ 1	d_1	97.734	97.894	97.587	97.525	97.438
		d_2	97.714	97.583	97.079	97.660	97.902
	การวัดที่ 2	d_1	97.577	97.342	97.394	97.220	97.490
		d_2	98.035	97.631	97.740	97.324	96.980
ความสูง 20 มม.	การวัดที่ 1	d_1	77.309	77.381	77.201	77.214	77.672
		d_2	77.316	77.426	77.134	77.102	77.293
	การวัดที่ 2	d_1	77.293	76.802	78.191	77.145	77.151
		d_2	77.041	77.646	77.023	77.075	76.615
ความสูง 25 มม.	การวัดที่ 1	d_1	65.607	65.139	66.133	65.455	65.653
		d_2	65.643	65.866	65.677	65.730	65.598
	การวัดที่ 2	d_1	65.632	65.831	65.970	65.177	65.641
		d_2	65.980	65.576	65.728	65.211	65.665
ความสูง 30 มม.	การวัดที่ 1	d_1	58.449	58.794	58.290	58.581	58.408
		d_2	58.015	58.613	58.639	58.536	58.516
	การวัดที่ 2	d_1	58.595	58.717	58.320	58.797	59.071
		d_2	58.756	58.342	58.599	58.792	58.583
ความสูง 35 มม.	การวัดที่ 1	d_1	54.785	54.711	54.844	54.866	54.830
		d_2	54.617	54.996	54.625	54.766	54.781
	การวัดที่ 2	d_1	54.687	54.936	54.655	54.953	55.022
		d_2	54.544	54.740	54.405	54.600	54.629



รูปที่ 11 ชิ้นงานที่ถูกตัดด้วยเครื่องตัดโลหะพลาสมา

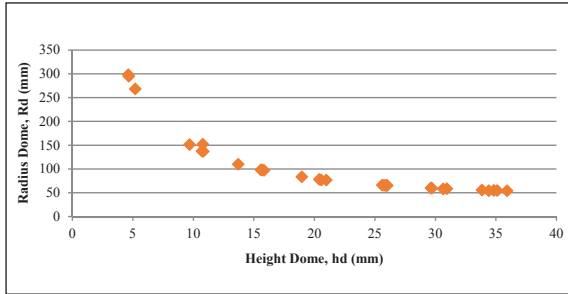
มาใช้ในการทดสอบ เพื่อทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังจะกล่าวในลำดับต่อไป

3.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของการทดสอบ

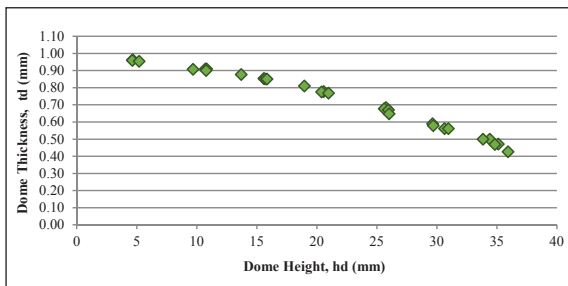
เมื่อทำการทดสอบแม่พิมพ์ว่า ขณะขึ้นรูปมีสถานะการขึ้นรูปเป็นไปตามทฤษฎีแผ่นบางแล้ว ในงานวิจัยของชลิตา [12] ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ จำนวน 35 ชิ้นงาน ทั้งหมด 7 ระดับความสูง ที่ได้กล่าวในข้างต้น ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่ารัศมีโดม (Dome Radius; R_d) ทำการวัดรัศมีโดมแนวแกนหลักด้วยการสแกน 3 มิติ ผ่านการวัดโดยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ และวัดค่าความสูงโดม (Dome Height; h_d) ด้วยไฮเกจ (Height Gauge) ค่าความหนาเริ่มต้นของโลหะแผ่น (Initial Thickness Sheet; t_0) เท่ากับ 1 มม. และค่าความหนาบริเวณยอดโดม (Dome Thickness Sheet; t_d) ทำการวัดและขีดเส้นจากจุดกึ่งกลางบริเวณยอดโดมลงมา 2 ซม. สำหรับตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัดโลหะพลาสมา (Plasma Arc Cutting) ดังรูปที่ 11 แล้วจึงทำการวัดความหนาบริเวณยอดโดมด้วยไมโครมิเตอร์ (Micrometer) สำหรับค่าแรงดัน (Pressure; p) หาได้จากการนำค่าความสูงโดมที่วัดด้วยไฮเกจมาเทียบกับผลของค่าความสูง LVDT ที่ได้ทำการติดตั้งกับแม่พิมพ์ เพื่อทำการเทียบหาค่าแรงดันใดๆ ขณะทำการขึ้นรูปที่ความสูงขณะนั้น เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ครบเรียบร้อยแล้วหลังจากนั้นจึงทำการคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังจะแสดงในหัวข้อลำดับต่อไป

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการทดสอบการรักษารูปร่างทรงกลมสมมาตร

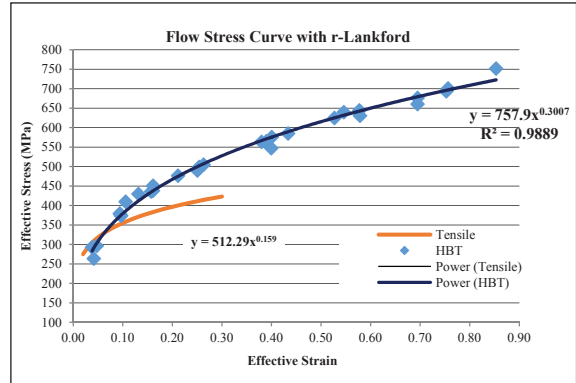
ระดับความสูง	p-value
	ปัจจัยการทดลองสมมติฐานที่ 2
ความสูง 5 มม.	0.151
ความสูง 10 มม.	0.064
ความสูง 15 มม.	0.263
ความสูง 20 มม.	0.485
ความสูง 25 มม.	0.941
ความสูง 30 มม.	0.094
ความสูง 35 มม.	0.378



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงโดมกับรัศมีโดม



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงโดมกับความหนาบริเวณยอดโดม



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำที่มีอิทธิพลค่า r-Lankford

ทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ ดังรูปที่ 14 เพื่อหาค่า K และค่า n ซึ่งหาค่า K มีค่ามาก บ่งชี้ได้ว่าจะต้องใช้แรงในการขึ้นรูปมากและค่า n บ่งชี้ความสามารถในการขึ้นรูป

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \tag{8}$$

4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำกับการทดสอบแรงดึงแกนเดียว

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำแล้ว ทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความสูงโดมกับรัศมีโดม ดังรูปที่ 12 พบว่า หากความสูงโดมมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้รัศมีโดมมีขนาดเล็กลง และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงโดมกับความหนาบริเวณยอดโดม ดังรูปที่ 13 พบว่า ความสูงของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาบริเวณยอดโดมลดลง จากนั้นจึงทำการหาค่าความเค้นประสิทธิภาพและความเครียดประสิทธิภาพ ตามสมการที่ (4) และ (5) ที่ได้กล่าวมาข้างต้นแสดงดังตารางที่ 6 [12] จากนั้นนำค่าความเค้นประสิทธิภาพและความเครียดประสิทธิภาพทำให้อยู่ในรูปของสมการ Power Law [10] ดังสมการที่ (8) และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการ

กำหนดให้

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง

n คือ ค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็ง

จากรูปที่ 14 เมื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำกับการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวนั้น ค่า K , n ที่ได้จากการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวนั้นน้อยกว่าค่า K , n ที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ เพราะว่าการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว ใช้แรงในการขึ้นรูปน้อยกว่าการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ โดยค่า K , n ที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำเท่ากับ 757.90, 0.3007 และมีค่าระดับความเครียดประมาณ 0.85 ในส่วนของค่า K , n ที่ได้จากการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว มีค่าเท่ากับ 512.29, 0.159 และมีค่าระดับความเครียดประมาณ 0.30 นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำในงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าค่าความเค้นของการทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 6 ผลของค่าเฉลี่ยจากการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และค่าความเค้นและความเครียด

ลำดับ ชิ้นงาน	Part No.	ความสูง ประมาณการ	ค่าเฉลี่ยจากการวัด				ค่าการทดสอบ HBT ที่มี อิทธิพลค่า r-Lankford		ค่าการทดสอบ HBT ที่ไม่มี อิทธิพลค่า r-Lankford	
			ความสูง บริเวณ ยอดโดม	รัศมีโดม	ความหนา บริเวณ ยอดโดม	แรงดัน	ความเครียด	ความเค้น	ความเครียด	ความเค้น
1	21	5 มม.	4.66	295.330	0.963	1.710	0.042	264.129	0.042	231.768
2	15	5 มม.	4.63	298.441	0.959	1.885	0.038	293.011	0.038	257.111
3	30	5 มม.	5.20	268.535	0.954	2.102	0.047	296.918	0.047	260.540
4	8	10 มม.	9.68	151.674	0.908	4.453	0.097	374.186	0.097	328.341
5	33	10 มม.	10.71	137.977	0.910	4.950	0.095	377.919	0.095	331.616
6	35	10 มม.	10.82	137.445	0.910	4.999	0.094	379.974	0.094	333.420
7	25	10 มม.	10.78	152.347	0.900	4.812	0.106	409.908	0.106	359.686
8	6	15 มม.	13.70	110.227	0.877	6.789	0.132	430.169	0.132	377.465
9	13	15 มม.	15.59	98.558	0.854	7.499	0.157	436.281	0.157	382.828
10	24	15 มม.	15.68	98.045	0.852	7.545	0.161	438.169	0.161	384.485
11	17	15 มม.	15.84	97.473	0.851	7.812	0.161	451.174	0.161	395.896
12	22	20 มม.	18.96	83.721	0.810	9.131	0.211	476.725	0.211	418.317
13	26	20 มม.	20.57	77.198	0.778	9.785	0.251	490.179	0.251	430.122
14	34	20 มม.	20.40	78.708	0.776	9.746	0.254	499.435	0.254	438.244
15	10	20 มม.	20.98	77.127	0.769	9.969	0.263	505.055	0.263	443.176
16	18	25 มม.	20.93	65.843	0.671	11.042	0.399	547.499	0.399	480.419
17	23	25 มม.	25.76	66.126	0.684	11.535	0.380	563.507	0.380	494.466
18	28	25 มม.	25.61	66.436	0.677	11.410	0.390	565.306	0.390	496.045
19	9	25 มม.	25.96	65.641	0.670	11.644	0.400	576.191	0.400	505.596
20	12	25 มม.	26.01	65.806	0.648	11.420	0.434	585.387	0.434	513.666
21	5	30 มม.	29.63	60.480	0.590	12.088	0.527	625.164	0.527	548.569
22	19	30 มม.	30.64	58.657	0.561	11.949	0.579	631.125	0.579	553.799
23	1	30 มม.	29.70	60.189	0.579	12.199	0.546	639.966	0.546	561.557
24	14	30 มม.	30.95	58.936	0.561	12.167	0.577	644.706	0.577	565.717
25	16	35 มม.	34.41	54.717	0.499	11.949	0.695	660.729	0.695	579.776
26	3	35 มม.	33.84	56.201	0.499	11.917	0.695	676.754	0.695	593.838
27	32	35 มม.	35.11	55.141	0.471	11.746	0.753	693.410	0.753	608.453
28	31	35 มม.	34.83	55.382	0.469	11.923	0.756	700.889	0.756	615.016
29	20	35 มม.	35.92	54.581	0.426	11.647	0.853	751.946	0.853	659.817

หมายเหตุ ชิ้นงานที่ 4, 2, 7, 11, 27 และ 29 ภาพสแกน 3 มิติเกิดการซ้อนทับ ไม่สามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้ และเกิดปัญหาทางเทคนิค ไม่สามารถทำการหาค่าแรงดันได้

แกนเดียว นั้นแสดงให้เห็นว่า เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC ขนาด 1.0 มม. ที่ใช้ในการทดสอบนี้แสดงอิทธิพลคุณสมบัติความไม่เท่ากันทุกทิศทางหรือความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่นขึ้นอยู่กับการขึ้นรูป ซึ่งมักเกิดขึ้นในกระบวนการรีดขึ้นรูปเย็น ด้วยเหตุนี้จึงต้องทำการหาค่า r หรือค่า r -Lankford แต่เนื่องจากยังไม่สามารถทำการหาค่า r จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำได้ในขณะทดลองงานวิจัยนี้ จึงจำเป็นต้องใช้ค่า r ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวแทน ด้วยการหาค่าอัตราส่วนความเครียดช่วงพลาสติกในแนวแกน 0° , 45° และ 90° กับแนวแกนรีด แล้วหาค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความเครียดช่วงพลาสติกเพื่อนำค่า r_m มาทำการปรับรูปแบบใหม่เพื่อใช้ในการลดอิทธิพลค่า r -Lankford ออกจากค่าความเค้นจริงที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ เรียกว่าค่าความเค้นจริง ดังสมการที่ (9) เพื่อนำไปหาความเข้ากันด้วยสมการกฎยกกำลังของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด [14]

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{r_m + 1}} \sigma_{\text{biaxial}} \quad (9)$$

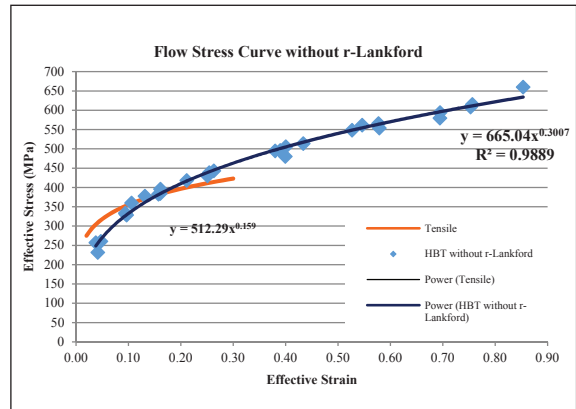
กำหนดให้

$\bar{\sigma}$ คือ ความเค้นจริงที่ได้จากการปรับลดอิทธิพลค่า r ออกแล้ว

σ_{biaxial} คือ ความเค้นจริงที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

จากการหาค่า r_m ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว มีค่าเท่ากับ 1.29 นำมาคำนวณหาค่าความเค้นจริงที่ได้จากการปรับลดอิทธิพลค่า r -Lankford ออกแล้ว ดังตารางที่ 6 มีค่า K, n เท่ากับ 665.04 และ 0.3007 ซึ่งความชันของกราฟใกล้เคียงกับกราฟการทดสอบแรงดึงแกนเดียว ดังรูปที่ 15

หากไม่ทำการลดอิทธิพลค่า r -Lankford ออกจากค่าความเค้นจริงที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ เมื่อนำค่าสมบัติ K, n ไปจำลองสภาวะการขึ้นรูปแล้วเปรียบเทียบกับ การขึ้นรูปขึ้นงานจริง จะพบว่าผลลัพธ์คลาดเคลื่อนจากการขึ้นรูปขึ้นงานจริงมาก



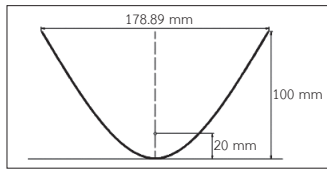
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำที่ปราศจากอิทธิพลค่า r -Lankford

4.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองการลากขึ้นรูปด้วยน้ำ

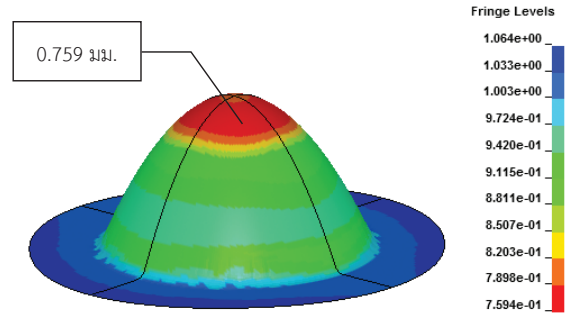
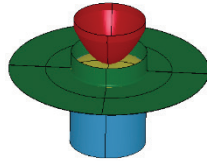
เมื่อได้สมบัติค่า K, n ที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำและที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวแล้ว จึงทำการจำลองการลากขึ้นรูปด้วยน้ำจากสมบัติค่า K, n ทั้ง 2 ชุดข้อมูล และนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบ โดยอ้างอิงจากงานของ [14] ที่ทำการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ แล้วนำค่าสมบัติที่ได้มาทำการจำลองการลากขึ้นรูป ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดลองนี้ ดังจะกล่าวไว้ในหัวข้อถัดมา

4.2.1 การจำลองด้วยสมบัติที่ได้จากการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว

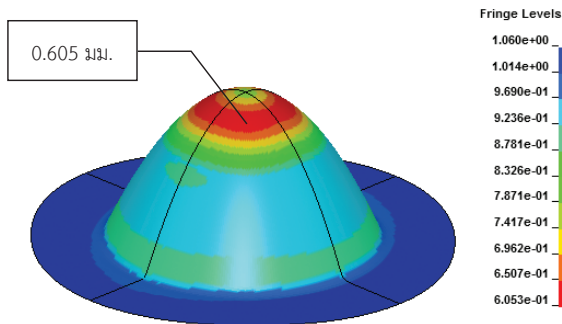
การจำลองการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำเป็นรูปขึ้นงานพาราโบลิก (Hydromechanical Deep Drawing) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงแบบร่างรูปขึ้นงานและแบบร่างชุดแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 16 [15] ทำการประมวลผลการคำนวณแบบพลวัตด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงลักษณะปัญหาของขึ้นงานจากการจำลองโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ K, n, r_0, r_{45} และ r_{90} ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวผลพบว่า ความหนาน้อยที่สุดของขึ้นงานเท่ากับ 0.605 มม. และมีเปอร์เซ็นต์ความบางของผนังขึ้นงานลดลงมากที่สุด 39.448% แสดงดังรูปที่ 17



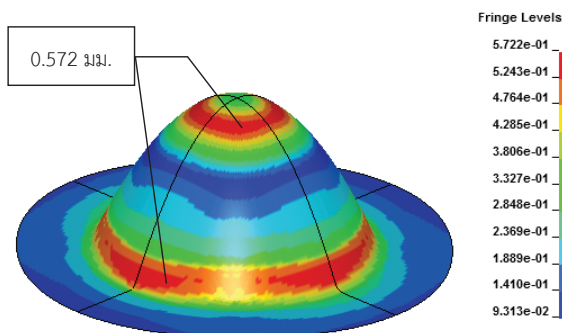
รูปที่ 16 แบบร่างชิ้นงานและชุดแม่พิมพ์พาราโบลิก [15]



รูปที่ 19 ความหนาของชิ้นงานที่ได้ค่าจาก HBT



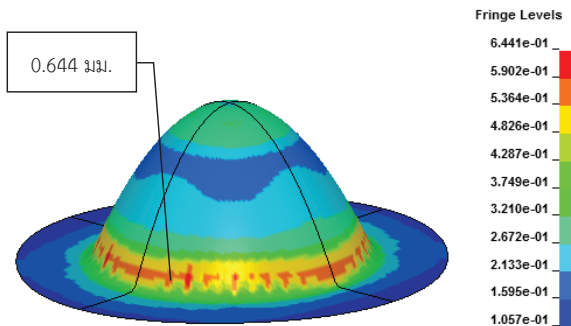
รูปที่ 17 ความหนาของชิ้นงานที่ได้ค่าจากแรงดึงแกนเดียว



รูปที่ 18 ค่าความเครียดช่วงพลาสติกมากที่สุดที่ได้ค่าจากแรงดึงแกนเดียว

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาค่าความเครียดช่วงพลาสติกมากที่สุด (Effective Plastic Strain) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.572 ดังรูปที่ 18 โดยในส่วนของรูปร่างชิ้นงานพาราโบลิกนั้น ค่าความสามารถในการขึ้นรูปที่ใช้ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวพบว่า สามารถขึ้นรูปได้โดยชิ้นงานไม่ขาด แต่มีรอยยับย่นในส่วนขอบบนใกล้บริเวณรัศมีของแม่พิมพ์

4.2.2 การจำลองด้วยสมบัติที่ได้จากการทดสอบแบบ



รูปที่ 20 ค่าความเครียดช่วงพลาสติกที่ได้ค่าจาก HBT

เป่าโป่งด้วยน้ำ

ทำการจำลองการลากขึ้นรูปด้วยสมบัติค่า K , n , r_0 , r_{45} และ r_{90} ที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ แล้วทำการประมวลผลการคำนวณแบบพลวัตด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ผลพบว่า ความหนาที่น้อยที่สุดของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 0.759 มม. และมีเปอร์เซ็นต์ความบางของผนังชิ้นงานลดลงมากที่สุด 24.080% ดังรูปที่ 19

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาค่าความเครียดช่วงพลาสติกมากที่สุด ของชิ้นงานจำลองด้วยสมบัติที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ พบว่า มีค่าเท่ากับ 0.644 แสดงดังรูปที่ 20 โดยรูปที่แสดงในส่วนของชิ้นงานพาราโบลิกนั้น แสดงค่าความสามารถในการขึ้นรูปที่ใช้ค่าจากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำพบว่า สามารถขึ้นรูปได้โดยชิ้นงานไม่ขาด เช่นเดียวกับกับชิ้นงานจำลองด้วยสมบัติที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว และมีรอยยับย่นในส่วนขอบบนใกล้บริเวณรัศมีของแม่พิมพ์เช่นกัน



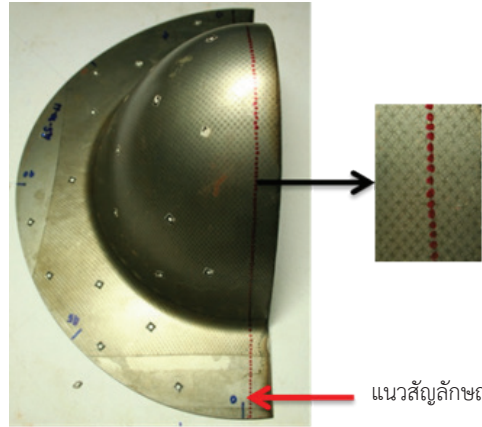
รูปที่ 21 ชุดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปจริง [16]



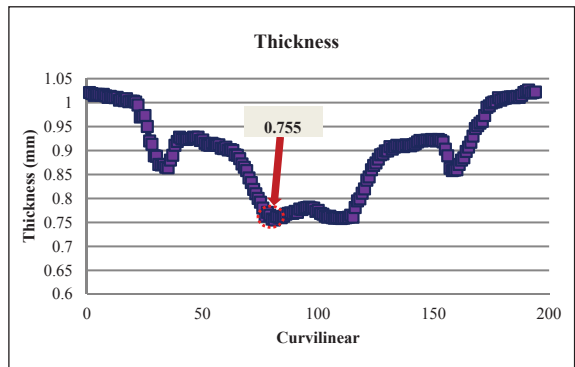
รูปที่ 22 ชิ้นงานพาราโบลิก

4.3 ทดสอบการขึ้นรูปชิ้นงานพาราโบลิกจริง

เมื่อทำการจำลองการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำเป็นรูปชิ้นงานพาราโบลิกด้วยสมบัติที่ได้จากการทดสอบแรงดึง แกนเดียวและการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำแล้ว จะต้องทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของผลลัพธ์การจำลอง ด้วยการทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับชิ้นงานลากขึ้นรูปพาราโบลิกจริงว่า ผลลัพธ์จากการจำลองด้วยค่าสมบัติจากการทดสอบใดที่มีการกระจายความหนาบริเวณผนังชิ้นงานใกล้เคียงสอดคล้องกันกับการทดสอบขึ้นรูปจริงมากที่สุด โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ K , n , r_0 , r_{45} และ r_{90} ที่ได้จากการทดสอบในกระบวนการข้างต้น การขึ้นรูปจริงใช้กระบวนการลากขึ้นรูปขึ้นรูปทรงพาราโบลิกด้วยน้ำแทนกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบลากขึ้นรูป (Deep Drawing) ซึ่งเป็นกระบวนการดั้งเดิมที่มีความซับซ้อนและขึ้นรูปยากนั้น เพื่อแก้ไขปัญหาการขึ้นรูปที่มักเกิดการฉีกขาดและยับย่นบริเวณผนังชิ้นงานโลหะแผ่น แสดงชุดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปจริง [16] และชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปร่างพาราโบลิก ดังรูปที่ 21 และรูปที่ 22 ซึ่งการทดสอบขึ้นรูปจริงได้อ้างอิงงานวิจัย [17]



รูปที่ 23 ตัดชิ้นงานเพื่อวัดความหนาแนวแกน 0°

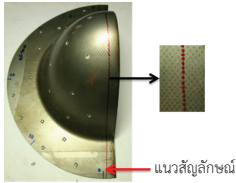
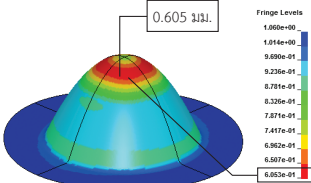
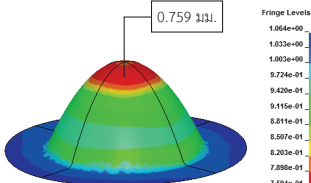
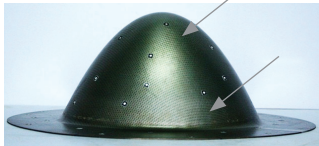
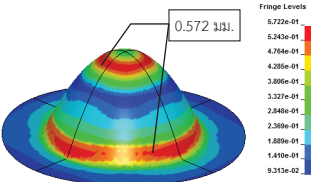
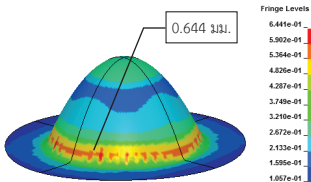


รูปที่ 24 การกระจายความหนาบริเวณผนังชิ้นงานพาราโบลิกแนวแกน 0° [17]

เมื่อขึ้นรูปชิ้นงานพาราโบลิกเรียบร้อยแล้ว จึงทำการวัดและทำสัญลักษณ์แนวแกน 0° ลากผ่านบริเวณยอดโดม จากนั้นจึงทำการตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัดโลหะพลาสมา เพื่อวัดการกระจายตัวความหนาในบริเวณดังกล่าวด้วยไมโครมิเตอร์ ดังรูปที่ 23 พบว่า ความหนาที่น้อยที่สุดของผนังชิ้นงานขึ้นรูปจริง มีค่าเท่ากับ 0.755 มม. ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าบริเวณยอดโดม แสดงว่าบริเวณนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนามากสุดอย่างชัดเจน แสดงดังรูปที่ 24 นอกจากนั้นผลลัพธ์ที่ได้ยังสอดคล้องกับการจำลองด้วยสมบัติที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ ที่มีค่าความหนาน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.759 มม. อีกด้วย ดังตารางสรุปผลในตารางที่ 7

ชลากร อุดมรักษาสกุล และ ชลิตา อุดมรักษาสกุล, “การทดสอบหาสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ เพื่อนำไปใช้กับการจำลองของกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ.”

ตารางที่ 7 สรุปการเปรียบเทียบระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองขึ้นรูปด้วยสมบัติใดๆ

	การลากขึ้นรูปพาราโบลิกจริง	การจำลองด้วยสมบัติจาก การทดสอบแรงดึงแกนเดียว	การจำลองด้วยสมบัติจาก การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ
1. ค่าความหนาของ ชิ้นงานน้อยที่สุด	0.755 มม.	0.605 มม.	0.759 มม.
2. ตำแหน่งความหนา น้อยที่สุด			
3. ลักษณะการขาด ของชิ้นงาน	ไม่ขาด	ไม่ขาด	ไม่ขาด
4. ความเครียดช่วง พลาสติกมากที่สุด	-	0.572	0.644
5. ตำแหน่งความ เครียดช่วงพลาสติก มากที่สุด			

5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC ความหนา 1 มม. ในช่วงระดับความเครียดที่สูงกว่าการทดสอบที่เป็นมาตรฐานสากล เพื่อใช้ในการจำลองการขึ้นรูปให้มีความสอดคล้องใกล้เคียงกับการขึ้นรูปชิ้นงานจริงมากที่สุด โดยได้ทำการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จาก 2 การทดสอบ ได้แก่ 1) การทดสอบแรงดึงแกนเดียว ซึ่งเป็นวิธีการมาตรฐานสากลตาม ASTM E8/E8M-09 และ E646-16 พบว่ามีค่า K เท่ากับ 512.29 และค่า n เท่ากับ 0.159 และค่า r-Lankford เท่ากับ 1.29 ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงความเครียดในแนวความกว้างต่อความเครียดในแนวความหนาในแต่ละแนวแกนตามมาตรฐาน ASTM E517-00 และ 2) การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

ใช้แรงดันน้ำแทนพินซ์ ทำให้เกิดสถานะแรงดึงสองทิศทางตามทฤษฎีแผ่นบาง โดยสามารถแบ่งการสรุปออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ คือ ส่วนที่ 1 ทำการพิสูจน์แม่พิมพ์แบบเป่าโป่งด้วยน้ำที่ทำการออกแบบไว้ในงานวิจัยของ [9] และทำการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำพบว่า ทั้งแม่พิมพ์และการทดสอบดังกล่าวเป็นไปตามทฤษฎีแผ่นบาง แต่ในการทดสอบของวัสดุนี้มีอิทธิพลค่า r-Lankford จึงต้องทำการลดค่าอิทธิพลดังกล่าว แต่เนื่องจากยังไม่สามารถหาค่า r-Lankford จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำได้ จึงต้องใช้ค่า r-Lankford ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวแทน โดยได้ค่า K , n ที่ได้ทำการลดอิทธิพลค่า r-Lankford ออกจากค่าความเค้นจริงมีค่าเท่ากับ 665.04 และ 0.3007 ในส่วนที่ 2 จะพบที่สามารถนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ มาทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่มีความต่อเนื่องได้ ถึงแม้การทดสอบแบบเป่าโป่ง

ด้วยน้ำนี้ จะต้องทำการหยุดการขึ้นรูปตามระดับความสูง โดมต่างๆ เพื่อหาค่าแรงดันคาร์คิมิโดม และความหนาบริเวณ ยอดโดมใดๆ การทดสอบด้วยข้อจำกัดนี้ก็ยังสามารถนำค่า พารามิเตอร์มาใช้ในการหาค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวที่ไม่ จำเป็นต้องการทำการประมาณค่านอกช่วง (Extrapolation) เหมือนกับการทดสอบแรงดึงแกนเดียว เพื่อนำไปใช้ในการ จำลองลากขึ้นรูปด้วยน้ำได้และในส่วนที่ 3 ผลการเปรียบเทียบ ความหนาของผนังชิ้นงานที่น้อยที่สุดระหว่างแบบจำลองด้วย สมบัติที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวกับแบบจำลอง ด้วยสมบัติที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำนั้นมีความ แตกต่างกัน แล้วเมื่อทำการเปรียบเทียบกับความหนาของ ผนังชิ้นงานที่น้อยที่สุดของชิ้นงานลากขึ้นรูปพาราโบลิกจริง พบว่า สมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ สามารถให้ผลจำลองการขึ้นรูปใกล้เคียงกับการทดสอบจริง มากกว่าแบบจำลองด้วยสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบ แรงดึงแกนเดียว แสดงดังตารางที่ 7

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและ วัสดุแห่งชาติที่สนับสนุนให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือ เครื่องจักร อุปกรณ์และสถานที่ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรม อุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่กรุณาอนุเคราะห์ให้ใช้ โปรแกรม LS-Dyna ในการวิเคราะห์ผลการจำลอง และขอ ขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้ การสนับสนุนการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] T. Intarakumthornchai, S. Sawassalung, T. Phuengyaem, and S. Jirathearant, "Determination of plasticity properties of SPCC steel sheet with hydraulic bulge test and the effect of deviation in 6 sigma," in *Proceedings The 2010 National Conference of Industrial Engineering for Honor His Majesty the King*

Bhumibol Adulyadej's 84th Anniversary, The Engineering Institute of Thailand Under H.M. The King's Patronage, 2010, pp. 1-6 (in Thai).

[2] ASTM International, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials: E8/E8M-11, 2010.

[3] K. Wiratchakul, "The reliability analysis of parabolic part quality from uncertainty of sheet metal properties," M.S. thesis, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2011 (in Thai).

[4] ASTM International, Standard Test Methods for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-Values) of Metallic Sheet Materials: E646-16, 2017.

[5] ASTM International, Standard Test Methods for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal: E517-00, 2010.

[6] C. Thanadngan, *Metals Forming Technology*, Bangkok: KMUTNB Textbook Publishing Center, 2004 (in Thai).

[7] G. Gutscher "Evaluation of formability and determination of flow stress curve of sheet metals with hydraulic bulge test," Degree of Diploma Engineering, The Institute for Metal Forming Technology, The University of Stuttgart in collaboration with the Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, The Ohio State University, Columbus, Ohio State, 2000.

[8] C. Udomraksasakul, "Correction assessment of flow stress curve from hydraulic bulge test," M.S. thesis, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2011 (in Thai).

[9] S. Jirathearant, "Research and development,"



- MTEC, Klonglung, Pathumthani, Annual Report, 2009 (in Thai).
- [10] M. Koc, E. Billur, and Ö. N. Cora, "An experimental study on the comparative assessment of hydraulic bulge test analysis methods," *Material and Design*, vol.32, no. 1, pp. 272–281, 2011.
- [11] C. Udomraksasakul, T. Intarakumthornchai, and S. Jirathearanat, "A study of strain condition on deformed part in hydraulic bulge test," in *Proceedings OR-NET, National Operation Research Network Conference*, 2011, pp. 376–382 (in Thai).
- [12] C. Boonjaeng, "Evaluation of flow stress curve from hydraulic bulge test," M.S. thesis, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2012 (in Thai).
- [13] G. Gutscher, H. Wu, G. Ngaile, and T. Altan, "Determination of formability and flow stress curve for sheet metals using the viscous pressure bulging (VPB) test." *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 146, no. 1, pp. 1–7, 2004.
- [14] T. Intarakumthornchai, "An experiment study on the assessment of hydraulic bulge test," STRI of KMUTNB, Bang Sue, Bangkok, July. 2011 (in Thai).
- [15] T. Intarakumthornchai, "Strategies for blank holder force and pressure design through FEA simulation in sheet hydroforming," Ph.D. dissertation, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2009.
- [16] T. Intarakumthornchai and S. Jirathearanat, "Sheet hydroforming technology for automotive part cluster," in *Proceedings CIOD, the 2nd Conference of Industrial Operation Development*, 2011, pp. 1–8 (in Thai).
- [17] S. Suriyan, "Investigation of parabolic part forming with hydromechanical deep drawing process," M.S. thesis, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2011 (in Thai).