



การพัฒนาวิธีการทดสอบการเป่าโป่งด้วยน้ำเพื่อศึกษาอิทธิพลความไม่เท่ากันของโลหะแผ่นที่ระดับความเครียดสูงของเหล็กแผ่นคาร์บอนต่ำ

อรรถพล พลาศรัย และ ธนสาร อินทรกำจรชัย*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รามิล เกศวรรกุล

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สุธี โอปารฤทธินันท์

ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมน้ำหนักเบา ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ยิ่งยศ เอื้ออุฬาร

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและกระบวนการ สาขาวิศวกรรมวัสดุและกระบวนการ บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 1646 5626 อีเมล: intara99@yahoo.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.12.005

รับเมื่อ 6 สิงหาคม 2561 แก้ไขเมื่อ 2 ตุลาคม 2561 ตอปรับเมื่อ 10 ตุลาคม 2561 เผยแพร่ออนไลน์ 6 ธันวาคม 2561

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

บทคัดย่อ

ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ ส่วนมากโลหะแผ่นจะถูกแรงกระทำภายใต้สภาวะแรงดึงสองทิศทาง (Biaxial) และมีการยืดตัวที่ค่าความเครียดมากกว่า 60% ส่งผลให้ค่าการทดสอบหาสมบัติของโลหะแผ่นที่ได้มาจากผลการทดสอบแรงดึงแกนเดียวที่ให้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงความเครียดที่ต่ำกว่า 30% ไม่สามารถใช้ในการออกแบบและศึกษาพฤติกรรมของการขึ้นรูปวัสดุได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาการทดสอบคุณสมบัติโลหะแผ่นแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ (Hydraulic Bulge Test; HBT) ขึ้นมาทดแทนโดยใช้แรงดันน้ำมาทำการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ถูกขึงตึงให้เป็นรูปโดมครึ่งวงกลมจนกระทั่งขึ้นงานเกิดการฉีกขาด หลังจากนั้นจึงนำค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความสูงของโดมที่เกิดขึ้น มาทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบนี้จะรวมผลของค่าความไม่เท่ากันทุกทิศทางของโลหะแผ่น (Anisotropy) ซึ่งส่งผลให้กราฟที่ได้จะมีค่าความเค้นที่สูงกว่าความเป็นจริง จึงจำเป็นต้องอาศัยการทดสอบแรงดึงแกนเดียวมาทำการหาค่าความไม่เท่ากันทุกทิศทางของโลหะแผ่น แต่ค่าความไม่เท่ากันทุกทิศทางของโลหะแผ่นที่หามาได้นั้น ยังอยู่ในระดับความเครียดที่น้อยกว่าระดับความเครียดที่เกิดขึ้นในการทดสอบ HBT ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ โดยการปรับสัดส่วนของรูปโดมทรงกลมและโดมรูปทรงวงรีในสัดส่วนต่างๆ กัน เพื่อให้สามารถเห็นถึงอิทธิพลของค่าความไม่เท่ากันทุกทิศทางของโลหะแผ่นในระดับความเครียดที่สูงได้ โดยเริ่มจากออกแบบรูปร่างและรูปทรงแล้วทดสอบด้วยการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก่อน แล้วจึงมาทำการสร้างแม่พิมพ์ด้วยเทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็วแบบฟิวส์เดปอสิชันโมเดลลิง (Fuse Deposition Modeling; FDM) โดยใช้วัสดุที่ทำจากพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid; PLA) เนื่องจากการทดสอบคุณสมบัติของโลหะแผ่นใช้การทดสอบเพียงไม่กี่ครั้ง ทำให้เป็นการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทำแม่พิมพ์ ในการทดสอบจริงได้ทดสอบกับโลหะแผ่นคาร์บอนต่ำ SPCC ความหนา 1.0 มิลลิเมตร พบว่าแม่พิมพ์ที่ทำจาก PLA



สามารถขึ้นรูปชิ้นงานในรูปทรงวงรีได้ โดยแม่พิมพ์ไม่เสียหายและยุบตัว นอกจากนั้นจากผลทางสถิติยังพบว่าที่ความสูงโดมเท่ากันที่ 21.48 มิลลิเมตร แรงดันในแนวรัศมีมีค่า 211.76 บาร์ และแรงดันในแนวขวางแนวรัศมีมีค่า 215.23 บาร์ ซึ่งมีความแตกต่างกันที่ 3.47 บาร์ ดังนั้นแม่พิมพ์ที่ออกแบบไว้สามารถแสดงอิทธิพลของค่าความไม่เท่ากันทุกทิศทางของโลหะแผ่นได้

คำสำคัญ: การเป่าโป่งด้วยน้ำ, ค่าความไม่เท่ากันทุกทิศทางของโลหะแผ่น, เทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็ว, โลหะแผ่นคาร์บอนต่ำ SPCC

การอ้างอิงบทความ: อรรถพล พลาศรีย์ รามิล เกศวรกุล ธนसार อินทรกำธรชัย สุธี โอบารุทธินันท์ และ ยิงยศ เอื้ออุฬาร, “การพัฒนาวิธีการทดสอบการเป่าโป่งด้วยน้ำเพื่อศึกษาอิทธิพลความไม่เท่ากันของโลหะแผ่นที่ระดับความเครียดสูงของเหล็กแผ่นคาร์บอนต่ำ,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 29, ฉบับที่ 1, หน้า 58-69, ม.ค.-มี.ค. 2562.



Development of Hydraulic Bulge Test to Study Effect of Anisotropy on Low Carbon Steel Sheet Metal for a High Effective Strain

Atapol Palasay and Thanasan Intarakumthornchai*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Ramil Kesvarakul

Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Sutee Olarnrithinun

Lightweight Engineering Laboratory (LWE), National Metal and Materials Technology Center (MTEC), NSTDA, Pathum Thani, Thailand

Yingyot Aue-u-lan

Department of Mechanical and Process Engineering, Materials and Production Engineering Program, The Sirindhorn International Thai-German Graduate School of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 1646 5626, E-mail: intara99@yahoo.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.12.005

Received 6 August 2018; Revised 2 October 2018; Accepted 10 October 2018; Published online: 6 December 2018

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

Abstract

In sheet hydroforming process, the sheet metal is subjected to a biaxial condition, which has the elongation of more than 60%. As a result, the conventional tensile testing cannot evaluate the forming behavior of materials properly, because the strain value obtained from the tensile test is lower than 30% that is not enough for the actual forming process. A test was performed to simulate the material under biaxial conditions by applying a pressurized fluid through a semi-circular dome test. Pressurized plate will produce two-directional elongation so called the Hydraulic Bulge Test (HBT). However, the test is still under the influence of the anisotropy, resulting in higher flow stress than the actual test. Tensile test for obtaining the anisotropy is required to correct the flow stress, but the strain level is lower than required in the HBT. As a result, the results of simulation are less accurate. The purpose of this research is to develop the molds used in the Hydraulic Bulge Test to determine the influence of the rolling direction of the sheet metal. Using 3D printing technology to produce the molds to reduce costs and to guide the design of sheet hydroforming process using PLA (Polylactic Acid) material. In this test, the SPCC sheet metal was tested at 1.0 mm thickness. Elliptical hydraulic bulge testing die were printed at the aspect ratio of 2.0 with 3D print. The experiment showed that the use of PLA to create the molded metal sheet



can be done by designing the appropriate parameters and shapes. When checking the shape of the 3D Print mold, it was found to be in good condition, no bending or distortion. When examined by statistical process for testing specimens from the variants of similar specimens from metal mold. The SPCC with 1.0 mm thickness test found that, at the same dome height of 21.48 mm, the pressure at 0 degree of the rolling direction, the value was 211.76 bar and in 90 degree of the rolling direction, the value was 215.23 bar, which was different about 3.47 bar. In conclusion, the result of differences in the anisotropy of the material is clearly quite significant and can be used to determine the anisotropy in the future.

Keywords: Hydraulic Bulge Test (HBT), Anisotropy, Rapid Prototype, Low Carbon Steel SPCC

1. บทนำ

ปัจจุบันการผลิตต้องสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วให้ได้ การผลิตที่ละม้าย อาจเกิดความเสียหายต่อการเปลี่ยนแปลงนี้ กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำจึงเริ่มเข้ามามีบทบาทต่อการผลิตยุคปัจจุบัน เนื่องจากว่าการขึ้นรูปโลหะแผ่นมีข้อดีคือสามารถเพิ่มขีดจำกัดในการขึ้นรูปให้กับโลหะแผ่นได้ จึงเหมาะกับการขึ้นรูปงานที่มีความซับซ้อนและโลหะแผ่นที่ขึ้นรูปยากได้ดี นอกจากนั้นชิ้นงานที่ได้ยังมีผิวที่สวยงาม แต่กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำนั้น ไม่สามารถอาศัยประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญอย่างเดียวมาทำการออกแบบได้ จำเป็นต้องอาศัยการจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยเป็นอย่างมาก โดยพฤติกรรมของโลหะแผ่นที่เกิดจากการขึ้นรูปด้วยแรงดันน้ำนั้นจะเกิดสถานะแรงดึงสองทิศทางและมีการยืดของโลหะแผ่นที่มีค่าความเครียดมากกว่า 60% ซึ่งปัจจุบันค่าสมบัติของวัสดุจะได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว ตามมาตรฐานรูปร่างชิ้นงานของ ASTM E8M [1] การหาค่าคุณสมบัติทางพลาสติกซีดีตามมาตรฐาน ASTM E646 [2] และการหาค่าความไม่เท่ากันทุกทิศทุกทางของโลหะแผ่นตามมาตรฐาน ASTM E517 [3] จากมาตรฐานดังกล่าวเหล่านี้เป็นการหาค่าสมบัติของวัสดุจะหาภายใต้ข้อมูลของการยืดตัวของโลหะแผ่นในช่วงค่าความเครียดที่ 15–25% [4] แล้วนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการประมาณเพื่อขยายผลสู่ค่าความยืดที่ระดับความเครียดที่สูงกว่า ซึ่งอาจส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองไม่สอดคล้องกับการทดลองจริงอันเนื่องมาจากข้อมูลของวัสดุที่ไม่เพียงพอ

การทดสอบการเป่าโป่งด้วยน้ำได้ถูกพัฒนาขึ้นมา [4] โดยอาศัยแรงดันน้ำมาทำการดันโลหะแผ่นให้โป่งขึ้นมาเป็นรูปครึ่งทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร จนกระทั่งชิ้นงานฉีกขาด แล้วนำค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความสูงของโดมมาทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด [4], [5] ซึ่งสถานะที่แรงดันน้ำกระทำกับโลหะแผ่นจะทำให้เกิดสถานะแรงดึงสองทิศทางส่งผลให้โลหะแผ่นสามารถยืดตัวที่ค่าความเครียดได้มากกว่า 70% แต่เนื่องจากการขึ้นรูปในสถานะแรงดึงสองทิศทาง

ในกรณีที่โลหะแผ่นมีอิทธิพลของค่าความไม่เท่ากันทุกทิศทุกทางของโลหะแผ่น จะส่งผลให้จุดครากของโลหะแผ่นสูงขึ้น จึงจำเป็นต้องปรับลดลง โดยอาศัยการทดสอบแรงดึงแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM E517 เพื่อหาค่านอร์มอลแอนไอโซโทรปี (Normal Anisotropy) ดังแสดงในสมการที่ (1) [6] แล้วจึงนำไปลดทอนค่าความเค้นลง

$$r_m = \frac{r_{00} + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (1)$$

โดยที่

r_m คือ ค่านอร์มอลแอนไอโซโทรปี

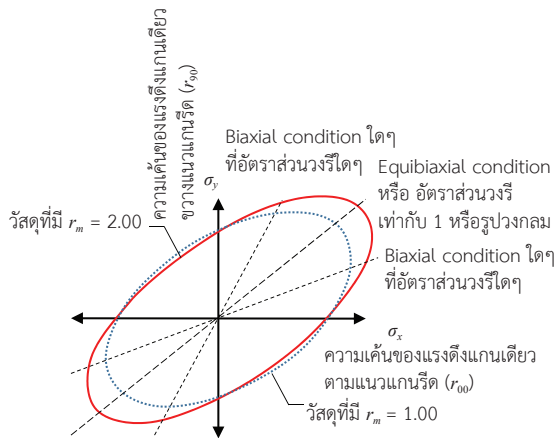
r_{00} คือ ค่าแรงพอร์ด*ในแนวแกนรีด

r_{45} คือ ค่าแรงพอร์ด*ในแนวแกน 45 องศากับแนวรีด

r_{90} คือ ค่าแรงพอร์ด*ในแนวแกนขวางรีด

*ค่าแรงพอร์ด (Rankford) คือ สัดส่วนของค่าความเครียดในแนวขวางกับค่าความเครียดในแนวความหนา

แต่ค่าที่ได้เป็นการทดสอบในระดับความเครียดที่ 20% ซึ่งต่ำกว่าการทดสอบด้วยการเป่าโป่งด้วยน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาการทดสอบการเป่าโป่งด้วยน้ำให้สามารถเห็นถึงอิทธิพลของค่าความไม่เท่ากันทุกทิศทุกทางของโลหะแผ่น โดยการปรับเปลี่ยนรูปร่างของโดมครึ่งทรงกลมเป็นรูปทรงวงรี [4] โดยทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของรูปทรงวงรี โดยกำหนดความยาวของแนวแกนหลัก (Major Axis) ให้คงที่เท่ากับ 100 มิลลิเมตร และปรับเปลี่ยนแนวแกนรอง (Minor Axis) ให้เล็กลง การปรับค่าอัตราส่วนของวงรีนั้น จะเป็นการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานซึ่งเป็นหลักการที่เป็นไปตามผลที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวความเค้น (Yield Surface) [7] แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งผลจากพื้นผิวความเค้นนั้นจะเป็นไปได้ว่า ถ้าเป็นการทดสอบแบบที่มีอัตราส่วนการขึ้นรูปเท่ากับ 1 (เป็นวงกลม) นั้น จะได้ผลของอัตราส่วนความเค้นที่มีค่า $\sigma_x = \sigma_y$ แต่ถ้าการทดสอบเป็นแบบวงรีนั้น อัตราส่วนความเค้นทั้งสองทิศทางจะมีการเปลี่ยนไปตามลำดับ แต่ค่าแอนไอโซโทรปียังมีค่าคงที่ การปรับอัตราส่วนของค่าวงรีเป็นหลายอัตราส่วนนั้นจะทำให้ผลที่ใช้ในการหาค่า r_m มีความแม่นยำขึ้นและเหมาะสมในแต่ละ



รูปที่ 1 พื้นผิวความเค้น (Yield Surface)

วัสดุ ซึ่งอาจจะมีการใช้อัตราส่วนของแม่พิมพ์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการสร้างแม่พิมพ์ที่ทำจากโลหะจะทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่าย ในเบื้องต้นของงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแม่พิมพ์ที่ทำจากเทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็ว แบบฟิวส์เดบิโพซิชั่นโมเดลลิง (Fuse Deposition Modeling; FDM) โดยใช้วัสดุที่ทำจากพีแอลเอ (Polylactic Acid; PLA) ให้สามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้ [8] โดยจำเป็นต้องใช้ค่าเติมเต็ม (Infill) ที่มากกว่า 80% เพื่อป้องกันการยุบตัวของพลาสติกในระหว่างทำการขึ้นรูป การทดสอบจริงได้ทำกับโลหะแผ่นคาร์บอนต่ำ SPCC ความหนา 1.0 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นโลหะแผ่นเกรดที่อุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้

งานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) การพัฒนาการทดสอบหาสมบัติของวัสดุและความไม่เท่ากันของโลหะแผ่น (Anisotropy) โดยใช้วิธีการเป่าไปงด้วยน้ำซึ่งการพัฒนาี้จะมีการออกแบบโดยปรับค่าอัตราส่วนของวงรี ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อให้แสดงผลความแตกต่างของแรงดันในแนวแกนรีและแนวขวางแกนรีให้ได้มากที่สุด อัตราส่วนวงรีที่ให้ผลต่างมากที่สุดจะถูกเลือกนำมาประเมินด้วยการทดสอบจริง และ 2) การประเมินประสิทธิภาพของการสร้างแม่พิมพ์ด้วยเทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็ว แบบฟิวส์เดบิโพซิชั่นโมเดลลิง (Fuse Deposition Modeling; FDM) โดยใช้วัสดุที่ทำจากพีแอลเอ (Polylactic Acid; PLA) เพื่อลดต้นทุนในการทำแม่พิมพ์

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เริ่มจากการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการเป่าไปงด้วยน้ำ ว่ามีปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลกระทบต่อค่าความไม่เท่ากันของโลหะแผ่น โดยพยายามเปลี่ยนสถานะของความเค้นจากสภาวะแรงดึงสองทิศทางไปสู่สภาวะไตๆ โดยการเปลี่ยนรูปร่างของแม่พิมพ์รูปร่างครึ่งทรงกลม ไปเป็นรูปทรงครึ่งวงรีในสัดส่วนต่างๆ

2.1 การตั้งค่าไฟไนต์เอลิเมนต์

สร้างแบบจำลองพื้นผิวของแม่พิมพ์รูปทรงครึ่งวงรี หลังจากนั้นจึงแบ่งแบบจำลองพื้นผิวเป็นเอลิเมนต์ทั้งในส่วน of แม่พิมพ์และโลหะแผ่น โดยที่กำหนดให้เอลิเมนต์ของแม่พิมพ์นั้นเป็นแบบวัตถุแข็งเกร็งไม่มีการเสียรูป ในส่วนของแรงดันได้กำหนดให้มีแรงดันกระทำกับโลหะแผ่นเป็นเส้นตรงโดยกำหนดแรงดันสูงสุดอยู่ที่ 300 บาร์ ที่เวลา 0.4 วินาที และได้กำหนดขนาดเอลิเมนต์เริ่มต้นของโลหะแผ่นให้มีขนาด 1 มิลลิเมตร การจัดตำแหน่งของแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 2 การจำลองการขึ้นรูปในงานวิจัยนี้ได้ใช้การคำนวณแบบพลวัตแบบชัดแจ้ง (Dynamic Explicit) โดยกำหนดตัวแบบคณิตศาสตร์ของวัสดุที่ใช้ทำโลหะแผ่นเป็นแบบ Hill's 1948 Planar Anisotropic Material Model with 3 R [5] ดังสมการที่ (2)

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{r_{90}r_{90}(\sigma_y - \sigma_x)^2 + r_{90}\sigma_x^2 + r_{90}\sigma_y^2 + (2r_{45} + 1)(r_{90} + r_{90})\tau_{xy}^2}{r_{90}(r_{90} + 1)} \quad (2)$$

โดยที่

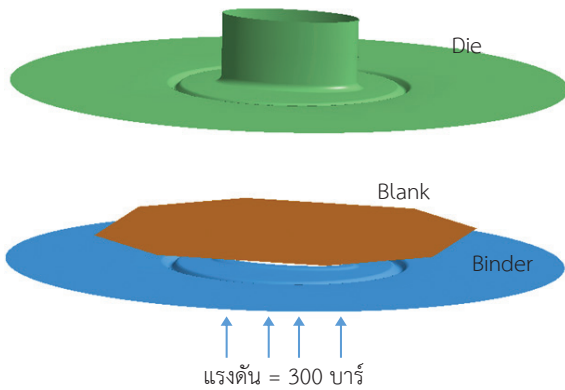
$\bar{\sigma}$ = ความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress)

σ_x = ความเค้นในแกนรี

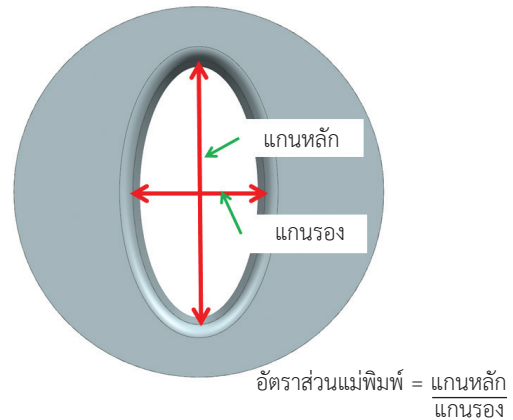
σ_y = ความเค้นในแกนขวางแนวรี

τ_{xy} = ความเค้นเฉือนบนระนาบ

ในการจำลองจะทำการทดสอบสัดส่วนของรูปทรงวงรีในแนวความยาวรอง (Minor Axis) เทียบกับความยาวหลัก (Major Axis) ในหลาย ๆ สัดส่วน โดยทำการทดสอบให้แรงดันกระทำกับแผ่นโลหะจนโลหะแผ่นเสียหาย แล้วศึกษาความแตกต่างของแรงดันที่ใช้กับความสูงของโดมในทิศทางตาม



รูปที่ 2 แบบจำลองแม่พิมพ์รูปทรงครึ่งวงรีสำหรับทดสอบการขึ้นรูป



รูปที่ 3 การกำหนดแกนหลักและแกนรองของแม่พิมพ์

แนวรีด (Rolling Direction) กับขวางแนวรีด (Transverse Direction) ของโลหะแผ่น ว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยอย่างไร

2.2 สมบัติวัสดุ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเหล็กแผ่นคาร์บอนต่ำเกรด SPCC ความหนา 1 มิลลิเมตร ในเบื้องต้นได้นำโลหะแผ่นดังกล่าวไปทำการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง (Strength Coefficient; K) กับค่าความเครียดที่ทำให้แข็งแบบยกกำลัง (Strain Hardening Exponent; n) ตามมาตรฐาน ASTM E646 และค่าความไม่เท่ากัน (Anisotropy) ของโลหะแผ่นทั้ง 3 แนวแกน ตามมาตรฐาน ASTM E517 ค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่นคาร์บอนต่ำ SPCC

คุณสมบัติ	ค่า
Strength Coefficient : K ที่ 0°	484 MPa
Strain Hardening Exponent : n ที่ 0° Anisotropy	0.17
r_{00}	1.10
r_{45}	0.80
r_{90}	1.01

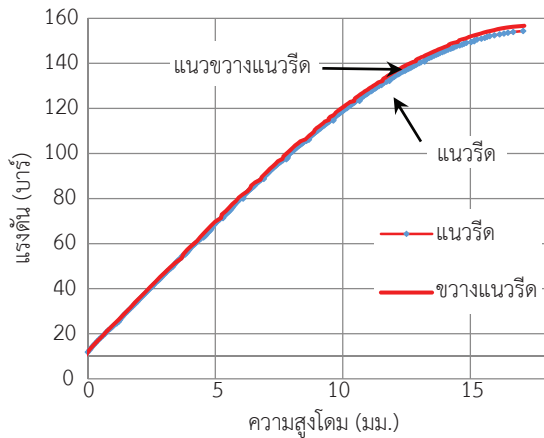
2.3 ผลการออกแบบแม่พิมพ์จากผลการจำลอง

การออกแบบแม่พิมพ์จะศึกษาว่าสัดส่วนของวงรีขนาดเท่าใดที่สามารถแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่าง

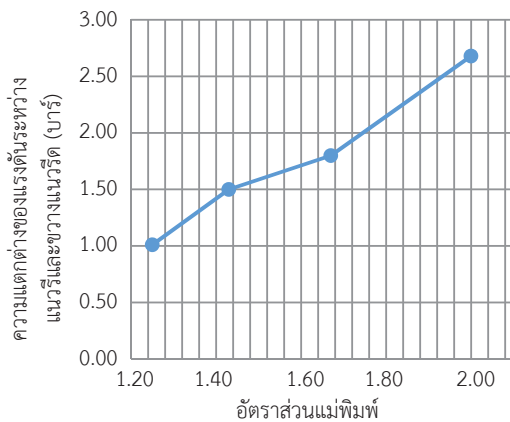
แรงดันของทิศทางแนวรีดของโลหะกับแนวขวางทิศทางแนวรีดได้อย่างชัดเจน ซึ่งการออกแบบแม่พิมพ์ให้มีรูปร่างวงรีนั้น เพื่อให้สามารถกำหนดทิศทางแนวรีดของโลหะแผ่นในการทดสอบได้ด้วยการวางโลหะแผ่นให้ทิศทางของแนวรีดขนานไปตามแกนหลักของแม่พิมพ์ในการทดสอบตามทิศทางแนวรีดและวางขึ้นทดสอบให้แนวรีดมีทิศทางตั้งฉากกับแกนหลักของแม่พิมพ์สำหรับการทดสอบทิศทางขวางแนวรีด ดังแสดงดังรูปที่ 3 เป็นการกำหนดแกนหลักและแกนรองของแม่พิมพ์โดยที่แกนหลักจะมีระยะความยาว 100 มิลลิเมตร จากนั้นจึงลดความยาวในด้านแกนรองลงให้มีขนาด 80, 70, 60 และ 50 มิลลิเมตร เมื่อเทียบอัตราส่วนระหว่างความยาวของแกนหลักและแกนรองแล้ว อัตราส่วนที่ได้คือ 1.25, 1.43, 1.67 และ 2.00 ตามลำดับ

รูปที่ 4 แสดงผลการจำลองการขึ้นรูปของวงรีที่สัดส่วน 2.00 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความสูงโดมในแนวรีด (0 องศา) กับแนวขวางแนวรีด (90 องศา) พบว่าแรงดันของแนวขวางแนวรีดจะสูงกว่าในแนวรีดที่ความสูงโดมเท่ากัน หลังจากนั้นจะทำการทดสอบกับโดมรูปทรงวงรีที่สัดส่วนต่างๆ ดังนี้ 1.25, 1.43, 1.67 และ 2.00 ผลต่างของแรงดันที่ความสูงโดมเท่ากันระหว่างแนวรีดกับแนวขวางแนวรีดของวงรีสัดส่วนต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5

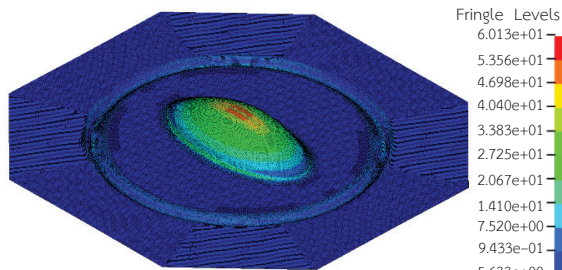
จากรูปที่ 5 พบว่าที่สัดส่วนวงรียิ่งมากก็จะเห็นค่าความแตกต่างที่มากขึ้น แต่ก็ส่งผลให้แรงดันในการขึ้นรูปสูงมาก



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของแรงดันกับความสูงโดม ในการขึ้นรูปตามแนวรีดกับแนววงแหวนรีดของรูปทรงวงรีที่สัดส่วน 2.00 ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

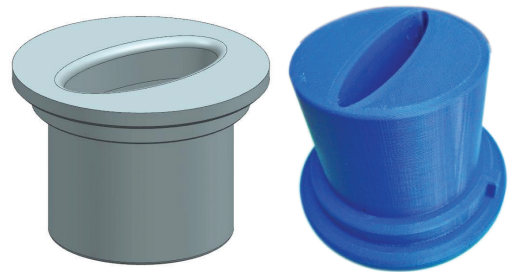
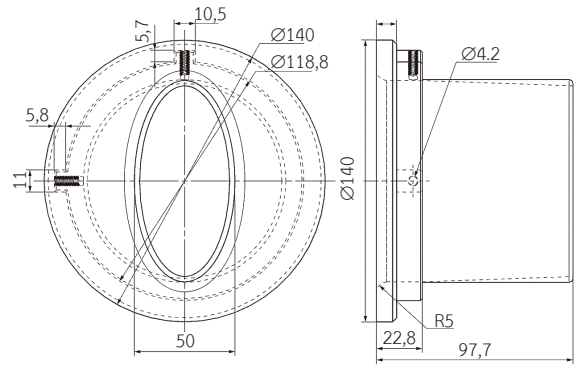


(ก) ความแตกต่างของแรงดันระหว่างแนวรีดกับแนววงแหวนรีดของรูปทรงวงรีที่อัตราส่วนต่างๆ



(ข) ผลการกระจายความบางจากการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วนแม่พิมพ์ 2

รูปที่ 5 ผลความแตกต่างของแรงดันที่ได้จากการจำลอง

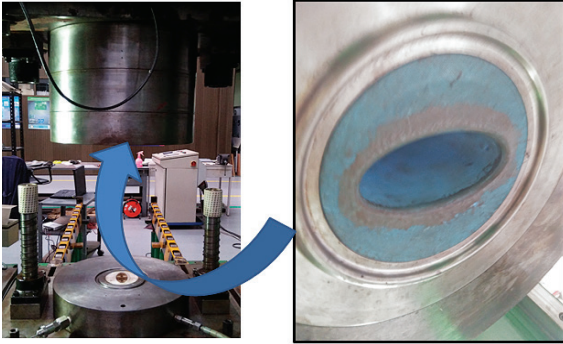


รูปที่ 6 แบบ 2 มิติและ 3 มิติของไส้แบบ (Insert) แม่พิมพ์ เพื่อนำไปขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีสร้างต้นแบบรวดเร็ว (Fuse Deposition Modeling; FDM)

ขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในการทดสอบนี้จะเลือกใช้สัดส่วนรูปทรงของวงรีที่ 2.00 เนื่องจากความแตกต่างของแรงดันระหว่างทิศทางแนวรีดมีค่ามากที่สุด จากสัดส่วนของรูปทรงวงรีที่ได้จะนำไปทำการสร้างเป็นไส้แบบด้วยเทคโนโลยีสร้างต้นแบบรวดเร็วต่อไป

2.4 แบบแม่พิมพ์และการสร้างแม่พิมพ์ด้วยเทคโนโลยีสร้างต้นแบบรวดเร็ว

เมื่อได้สัดส่วนของรูปทรงวงรีแล้ว ต้องมาทำการออกแบบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับไส้แบบ และเพื่อให้สามารถประกอบเข้ากับโครงสร้างแม่พิมพ์โลหะเพื่อใช้ในการขึ้นรูปจริง โดยรูปร่างและขนาด 2 มิติ และ 3 มิติ ของไส้แบบแสดงได้ดังรูปที่ 6 หลังจากได้รูปแบบ 3 มิติ แล้วจึงนำไปทำการผลิตด้วยเทคโนโลยีสร้างต้นแบบรวดเร็ว แบบฟิวส์เดปโซิชันโมเดลลิง หรือ FDM ด้วยพลาสติกที่ทำจาก PLA เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่แพร่หลาย ราคาเครื่องและราคาวัสดุไม่แพง



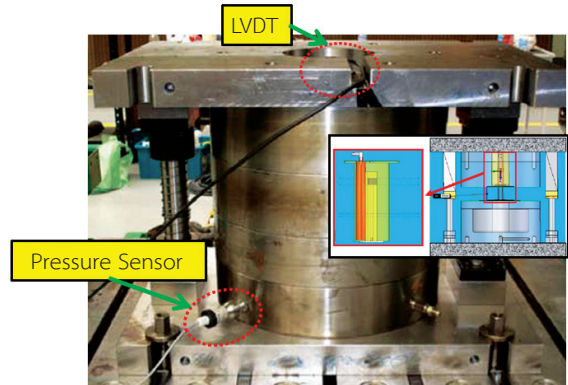
รูปที่ 7 การติดตั้งไส้ในรูปทรงวงรีที่ทำจากพลาสติกกับแม่พิมพ์ เป่าโป่งด้วยน้ำแบบเดิม

โดยทำการสร้างไส้แบบให้มีการเติมเต็ม (In-fill) ที่สูงถึง 80% เพื่อป้องกันการยุบตัวและเสียหายของไส้แบบที่ขึ้นรูปด้วยแรงดันสูง

3. การทดสอบการขึ้นรูปและการวิเคราะห์ผล

3.1 การทดสอบการขึ้นรูป

ไส้แบบที่ทำด้วยเทคโนโลยีสร้างต้นแบบรวดเร็วได้มาประกอบเข้ากับชุดแม่พิมพ์โลหะตามรูปที่ 7 โดยแม่พิมพ์ชุดดังกล่าว ได้ติดตั้งเครื่องวัดแรงดันน้ำ (Pressure Sensor) กับตัววัดความสูงของโลหะแผ่นขณะขึ้นรูปด้วย LVDT (Linear Variable Differential Transformer) แสดงภาพการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดดังรูปที่ 8 ในการทดลองได้ตัดแผ่นทดสอบขนาด 250×250 มิลลิเมตร วางลงบนแม่พิมพ์ชุดล่างจากนั้นประกอบแม่พิมพ์เข้าด้วยกันใช้แรงกดขนาด 160 ตัน เพื่อป้องกันการถลอกสลับระหว่างทำการขึ้นรูปจากนั้นจึงเริ่มปล่อยน้ำเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยอัตราการไหล 10 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/วินาทีที่เป็นอัตราการไหลที่ต่ำที่สุดเท่าที่อุปกรณ์สร้างแรงดันจะทำได้ พร้อมทั้งทำการบันทึกแรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง โดยปล่อยน้ำเข้าไปจนขึ้นทดสอบเกิดการฉีกขาดในการทดสอบได้ทำการทดสอบกับโลหะแผ่นคาร์บอนต่ำเกรด SPCC ความหนา 1 มิลลิเมตร ตามแนวรีดและแนวขวางแนวรีดอย่างละ 3 แผ่น ชิ้นงานที่ได้รับการขึ้นรูปจนแตกแสดงดังรูปที่ 9 พบว่าชิ้นงานทั้งหมดแตกตามแนวยาวที่บ้นยอดโดมที่แรงดันประมาณ 220 บาร์ และที่ความสูงประมาณ 22 มิลลิเมตร

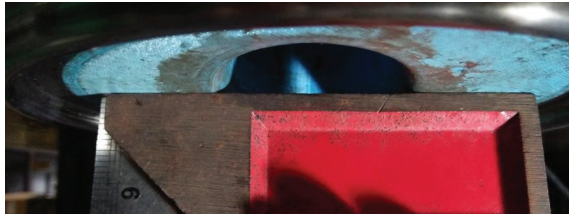


รูปที่ 8 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดแรงดันและความสูงโดม

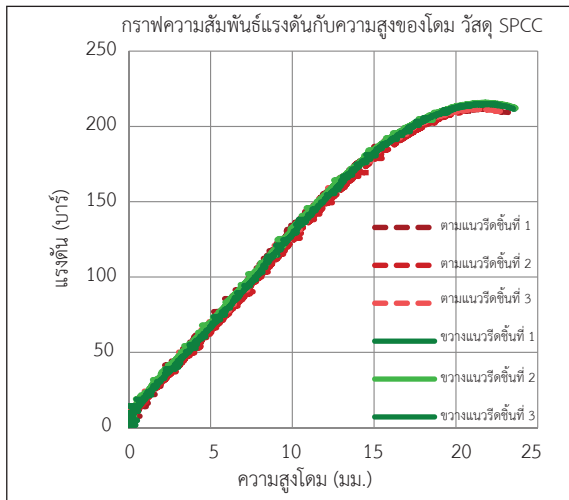


รูปที่ 9 ชิ้นงานรูปทรงวงรีที่ได้จากการขึ้นรูปแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

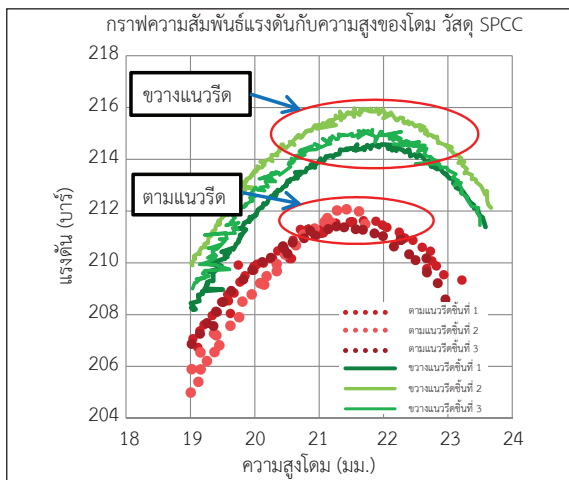
โดยที่ไส้แบบที่ทำจากพลาสติก PLA ไม่มีการยุบตัวที่บริเวณผิวหน้าและไม่มีความเสียหาย ดังรูปที่ 10 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ระนาบไปด้วย และเมื่อพิจารณาถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความสูงของโดมของชิ้นงานทั้ง 6 ชิ้น พบว่าบริเวณยอดกราฟค่าแรงดันสูงสุดของแนวขวางแนวรีดสูงกว่าแนวรีดอยู่เล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 11 เพื่อเพิ่มความมั่นใจว่าแรงดันที่ความสูงเดียวกันมีความแตกต่างกันจริง จึงได้ใช้การทดสอบทางสถิติแบบประชากร 2 กลุ่ม โดยใช้การทดสอบแบบ t-test ดังแสดงผลการทดสอบทางสถิติดังตารางที่ 2



รูปที่ 10 การตรวจการยุบตัวของไส้ในรูปทรงวงรีที่ทำจากพลาสติกหลังทำการขึ้นรูป



(ก) แรงดันกับความสูงโดมทั้ง 6 ชั้น



(ข) จุดยอดของเส้นแรงดันกับความสูงโดมทั้ง 6 ชั้น

รูปที่ 11 ความแตกต่างของแรงดันที่ความสูงโดมเท่ากันของการขึ้นรูปตามแนวแกนและขวางแกนของรูปทรงวงรีที่สัดส่วน 2.0 อย่างละ 3 ชั้น

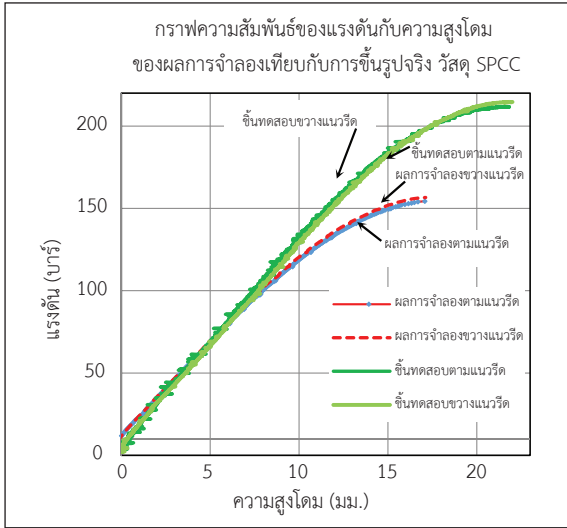
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบประชากร 2 กลุ่ม โดยมีความแตกต่างกัน ค่าความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances	Rolling Direction	Traverse Rolling Direction
Mean	211.761675	215.2332833
Variance	0.1433337	0.49868063
Observations	3	3
Hypothesized Mean Difference	0	
df	3	
t Stat	-7.5044521	
P(T<=t) one-tail	0.0024513	
t Critical one-tail	2.35336343	
P(T<=t) two-tail P value	0.00490259	
t Critical two-tail	3.18244631	
p value < 0.05	=0.05	Reject the hypothesis H0
t Stat < t critical		Reject the hypothesis H0
The pressure between the two directions is different. At the 95% confidence level		

ผลการทดสอบทางสถิติของประชากร 2 กลุ่ม โดยมีความแตกต่างกันของค่าความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่ามีค่า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 นั้นหมายความว่าแรงดันที่ใช้ขึ้นรูปขึ้นงานแนวขวางแนวรีดมีค่าแตกต่างจากแรงดันที่ใช้ขึ้นรูปขึ้นงานตามแนวรีดจริง นั้นแสดงว่าแม่พิมพ์รูปทรงวงรีที่สัดส่วน 2.0 สามารถแสดงผลความแตกต่างของค่าความไม่เท่ากันของวัสดุได้ ซึ่งแสดงได้จากค่าแรงดันสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นที่ต่างกันที่ความสูงโดมเท่ากัน

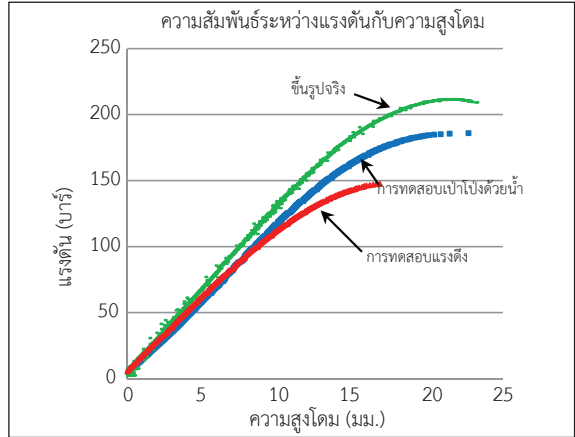
3.2 การวิเคราะห์ผล

ผลที่ได้จากการทดลองขึ้นรูปจริงจะนำไปทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองการขึ้นรูป ดังรูปที่ 13 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงโดมกับแรงดันพบว่าทั้งผลการทดสอบจริงและการจำลองการขึ้นรูปให้ผลเหมือนกันตรงที่ว่าแรงดันที่ใช้ในการขึ้นรูปในแนวขวางแนวรีดมากกว่าในทิศทางแนวรีด โดยผลต่างของผลการขึ้นรูปจริงอยู่ที่ 3.47 บาร์ ในขณะที่ผลต่างของผลการจำลองอยู่ที่ 2.68 บาร์ แต่ที่ต่างกันค่อนข้างมากคือระดับของแรงดันพบว่าผลการขึ้นรูปจริง

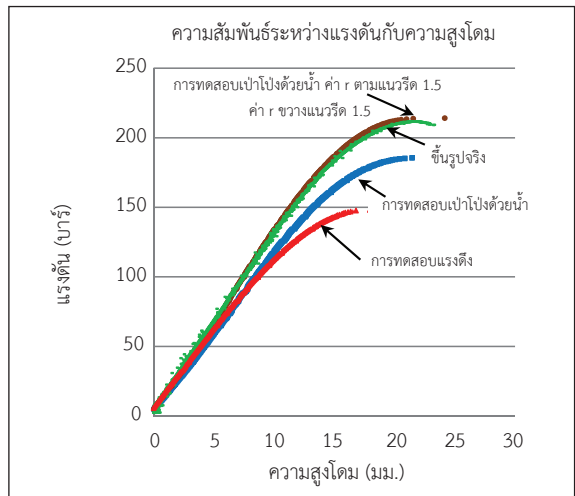


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของแรงดันกับความสูงโดม ของผลการจำลองเทียบกับการขึ้นรูปจริง

ในแนวขวางแนวรีดต้องใช้แรงดันเฉลี่ยสูงถึง 215.23 บาร์ ซึ่งต่างจากผลการจำลองที่ใช้แรงดันสูงสุดที่ 143.71 บาร์ อยู่ที่ 71.52 บาร์ นอกจากนั้นความสูงของโดมที่ขึ้นรูปได้จริงสูงถึง 22 มิลลิเมตร ส่วนผลการจำลองจากรูปที่ 12 มีความสูงของโดมเพียง 17 มิลลิเมตร ซึ่งต่างกันถึง 5 มิลลิเมตร ที่ผลลัพท์มีความแตกต่างกันอันเนื่องมาจากผลการจำลองนำคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบแรงดึงมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งเป็นค่าในช่วงการยืดตัวในระดับความเครียดที่ต่ำ แต่การทดสอบจริงโลหะแผ่นมีการยืดตัวที่ความเครียดในระดับสูงทำให้ผลที่ได้จากการจำลองแตกต่างกับการทดลองขึ้นรูปจริง ทางที่มิวิจัยได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุด้วยการเป่าโป่งด้วยน้ำ (HBT) แบบปกติ เพื่อหาค่า K และ n ในช่วงความเครียดสูง มาใช้ในการจำลอง ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 13 พบว่าผลการจำลองที่ใช้ค่า K และ n จาก HBT ได้ค่าความสูงที่ 22 มิลลิเมตร ซึ่งตรงกับผลการทดสอบจริง เพียงแต่การใช้แรงดันยังคงต่ำกว่าผลการทดสอบจริงถึง 25 บาร์ ซึ่งเป็นผลของค่า Anisotropy ของวัสดุในช่วงความเครียดที่สูง ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องใช้เทคนิคการคิดแบบย้อนกลับ (Inverse Analysis) มาช่วยในการหาค่า r ในเบื้องต้นทางที่มิวิจัยได้ทำการกำหนดค่า r ให้เท่ากันทุกทิศทางที่ 1.5 จะสังเกตว่า



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของแรงดันกับความสูงโดมโดยเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงและการทดสอบเป่าโป่งด้วยน้ำกับการขึ้นรูปจริง



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ของแรงดันกับความสูงโดมโดยเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึง การทดสอบเป่าโป่งด้วยน้ำ และการทดสอบเป่าโป่งด้วยน้ำแบบปรับ r กับการขึ้นรูปจริง

กราฟในรูปที่ 14 กราฟของการจำลองด้วยค่า K และ n จาก HBT และค่า r ที่ 1.5 ได้กราฟที่สอดคล้องกับการทดสอบจริงมากที่สุด

4. สรุป

การทดลองพบว่าในการทดสอบเป่าโป่งด้วยน้ำสำหรับวัสดุ SPCC ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร โดยใช้แม่พิมพ์วงรีที่ผลิตจากวัสดุ PLA ด้วยกระบวนการ 3D Print เพื่อใช้ในการหาความแตกต่างของแรงดันและความสูงโดมที่เกิดขึ้นในทิศทางตามแนวรีดโลหะและขวางทิศทางแนวรีดของโลหะ ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากความไม่เท่ากันทุกทิศทางของวัสดุ ในงานวิจัยนี้สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. อัตราส่วนที่เหมาะสมในการแยกความแตกต่างของแรงดันระหว่างทิศทางตามแนวรีดและทิศทางขวางแนวรีดที่ใช้ในการดันขึ้นรูปวัสดุ SPCC ความหนา 1 มิลลิเมตร คือ อัตราส่วนเท่ากับ 2

2. แม่พิมพ์ที่ผลิตจากวัสดุ PLA ด้วยกระบวนการ 3D Print สามารถนำมาใช้ขึ้นรูปโลหะแผ่น วัสดุ SPCC ที่ความหนา 1 มิลลิเมตรได้

3. ผลการจำลองการขึ้นรูปโดยใช้ค่าสมบัติทางกลของวัสดุที่ได้จากการทดสอบแรงดึงมาเปรียบเทียบกับ การขึ้นรูปจริงของแรงดันและความสูงโดมที่ได้นั้นมีค่าที่ต่ำกว่า การขึ้นรูปจริงถึง 71.52 บาร์ และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ

4. เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยการใช้ค่าสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบเป่าโป่งด้วยน้ำ โดยที่กำหนดค่าความไม่เท่ากันทุกทิศทางของวัสดุจากการทดสอบแรงดึงกับการขึ้นรูปจริง แรงดันที่ได้จากการจำลองมีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบขึ้นรูปจริง แต่สูงกว่าการจำลองที่ใช้สมบัติทางกลที่ได้จากการดึง โดยที่ความสูงของโดมที่ได้จากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบจริงต่างกันเพียง 0.5 มิลลิเมตร

5. จากการทดสอบขึ้นรูปจริง ผลต่างของแรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างทิศทางตามแนวรีดโลหะและขวางแนวรีดถึงแม้ว่าจะแยกออกเป็นกลุ่มอย่างชัดเจนแต่ค่าความแตกต่างของแรงดันยังคงมีความใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากความแตกต่างของค่า Anisotropy ที่มีความแตกต่างกันน้อยมากในตัววัสดุ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยการทดลองปรับค่า Anisotropy ให้มีค่าเท่ากันในแนวทิศทางแนวรีดและขวางแนวรีด เมื่อค่า Anisotropy มีค่าใกล้เคียงกันระหว่างแนวรีด

ค่าแรงดันที่ได้จากการจำลองมีค่าที่ใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริง ดังนั้นค่า Anisotropy จะส่งผลต่อแรงดันที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยตรง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ASTM Standard E646-07: Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n -Values) of Metallic Sheet Material, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
- [2] ASTM Standard E8/E8M-13: Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Material, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- [3] ASTM Standard E517-00: Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
- [4] G. Gutscher, H. Wu, G. Ngaile, and T. Altan, "Determination of flow stress for sheet metal forming using the viscous pressure bulge (VPB) test," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 146, no. 1, pp. 1–7, 2004.
- [5] D. W. A. REES., "Plastic flow in the elliptical bulge test," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 37, no. 4, pp. 373–389, 1995.
- [6] W. F. Hosford, R. M. Caddell, *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*, Second Edition. New Jersey: PRT Prentice Hall, 1993.
- [7] P. Hariharasudhan, "Determination of process parameters for stamping and sheet hydroforming of sheet metal parts using finite element method," Ph.D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, The Ohio State University, Ohio, 2007.
- [8] *FDM tooling for sheet metal forming: Hydroforming and Rubber Pad*, Technical application guide, Stratasys Incorporated, 2015.