

การพัฒนากระบวนการขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงขึ้นส่วนยานยนต์โดยแบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์ : กรณีศึกษา BRACKET, FR BUMPER SIDE LH/RH

ภานุพงษ์ สุวรรณจินดา¹ และ สุรศักดิ์ สุรนนท์ชัย²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ปัญหาด้านการขึ้นรูปโลหะแผ่น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์ชื่อ “BRACKET, FR BUMPER SIDE LH/RH” โดยการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยทำนายการลากขึ้นรูปลึกของชิ้นงาน วัสดุที่ใช้ในการวิจัย คือ เหล็กแผ่นความแข็งแรงสูงเกรด SPC270D ความหนา 1.4 มิลลิเมตร โดยมีพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจสอบ ได้แก่ การออกแบบดรรชนีบิด ขนาดของแผ่นเริ่มต้นชิ้นงาน และแรงจับยึดชิ้นงาน และเพื่อเป็นการลดความซับซ้อนของกระบวนการ ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้พันธ์และตายเป็นวัสดุเกร็ง ซึ่งไม่มีการเสียรูปร่าง วัสดุที่ใช้ขึ้นรูปถูกสันนิษฐานว่ามีสมบัติที่ไม่เท่ากันในแต่ละทิศทาง โดยอาศัยกฎการยกกำลังและพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่น-ถาวร รวมไปถึงใช้สมการของ Barlat 3 components yield function ในการทำนายพฤติกรรมการขึ้นรูปของวัสดุ การเสียรูปของชิ้นงานถูกกำหนดโดยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ทำนายโดยสมการของคิลเลอร์ จากผลการจำลองการขึ้นรูปเมื่อใช้แรงจับยึดชิ้นงาน 114 ตัน พร้อมกับปรับการออกแบบดรรชนีบิดให้กับผิวแม่พิมพ์และเพิ่มขนาดแผ่นเริ่มต้นชิ้นงาน สามารถแก้ไขปัญหาการแตกและการย่นของชิ้นงานลงได้อีกกรณีหนึ่งเมื่อใช้ระบบแก๊สสปริงแทนที่ระบบจับยึดชิ้นงานด้วยแรงจากเครื่องจักรโดยตรง ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ของชิ้นงานที่ดีกว่าในแง่ของการย่น

คำสำคัญ : กระบวนการลากขึ้นรูป / ชิ้นส่วนยานยนต์ / โลหะแผ่น / แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ / BRACKET, FR BUMPER SIDE LH / RH

* Corresponding Author : s.bhanupong@gmail.com

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

Development of Forming Processes for High Strength Steel Automotive Parts by Finite Element Simulation : Case Study on BRACKET, FR BUMPER SIDE LH/RH

Bhanupong Suwanchinda^{1*} and Surasak Suranantchai²

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140

Abstract

Finite element method (FEM) has become a useful tool, both for developing and analyzing sheet metal forming processes. In this research, forming of an automotive part named “BRACKET FR BUMPER SIDE LH/RH” was simulated using FEM. The material used was high-strength steel sheet (grade SPC270D) with a thickness of 1.4 mm. The investigated variables were the drawbead design, the sheet metal size, and the blank holder force. In order to simplify the process, the punch and the die were assumed to be rigid by neglecting the small effect of elastic deformation. The steel was assumed to be anisotropic, with elastic-viscoplastic deformation behaviour modeled by a power law function and a 3-components Barlat yield function. The deformation was as per the forming limit diagram (FLD) predicted by the Keeler equation. From the simulation results, the use of a blank holder force of 114 tons, together with an improved drawbead design and increased sheet metal size resulted in the elimination of cracks and wrinkles within the part. In addition, when a gas spring system was used to apply the blank holder force instead of the drawing machine, the quality of the part was further improved.

Keywords : Deep Drawing Processes / Automotive Parts / Sheet Metal / Finite Element Simulation /
BRACKET, FR BUMPER SIDE LH / RH

* Corresponding Author : s.bhanupong@gmail.com

¹ Graduate Student, Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering.

² Associate Professor, Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering.

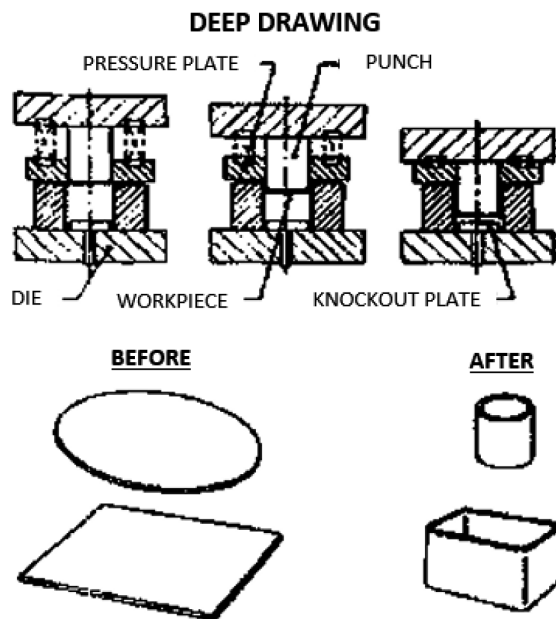
1. บทนำ

กระบวนการลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) เป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น กระบวนการดังกล่าวประกอบด้วย แม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) แม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) และ แผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blank Holder) การลากขึ้นรูปลึกจะเป็นการดึงและการกด โดยพunchจะทำการกดแผ่นเริ่มต้นชิ้นงาน (Blank) เข้าไปในดายซึ่งจะมีแผ่นจับยึดชิ้นงานจับยึดที่ขอบของชิ้นงานคอยควบคุมการไหลของแผ่นชิ้นงานซึ่งปัญหาหลักๆ ที่จะพบได้กับกระบวนการลากขึ้นรูปลึกนี้ ได้แก่ การเกิดรอยแตกและการเกิดรอยย่น (Cracking & Wrinkling) ที่บริเวณชิ้นงาน ในการออกแบบเพื่อพัฒนาการขึ้นรูปชิ้นงานกันชนหน้า (BRACKET, FR BUMPER SIDE LH/RH) จึงได้นำระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการทำแบบจำลองการขึ้นรูป เพื่อช่วยในการปรับแก้ไขแบบแม่พิมพ์ ทาค่าพารามิเตอร์ และขนาดแผ่นเริ่มต้นชิ้นงานในแนวทางเดียวกัน Booranacheep และคณะ [1] ได้ทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมการณ์ระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ อีกทั้งงานวิจัยของ Suranuntchai [2] ได้นำระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการปรับปรุงกระบวนการผลิตชิ้นงานหม้อลมเบรคในกระบวนการขึ้นรูปลึกด้วยโลหะแผ่นเกรด SPCC ความหนา 1.4 มิลลิเมตร และในเวลาต่อมา ในงานวิจัยของ Jurendi และ Gaiani [3] ได้ใช้แบบจำลองวัสดุของ Barlat 1989 มาช่วยในการทำนายการลากขึ้นรูปชิ้นงานส่วนปลายของท่อไอเสียรถจักรยานยนต์

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การลากขึ้นรูป (Deep Drawing) เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะ (Metal Forming) วิธีหนึ่งโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่าแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป (Drawing Die) ในการกดโลหะแผ่นเปล่า (Blank) ซึ่งวางอยู่ระหว่างพunchและดาย ดังรูปที่ 1 เมื่อได้รับแรงกดจากพunchจนเข้าสู่ช่วงที่วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation) โลหะแผ่นในแนวเส้นรอบวงจะได้รับความเค้นอัด (Compressive Stress) ในขณะที่เดียวกันในแนวรัศมีจะเกิดความเค้นดึง (Tensile

Stress) ดึงให้เนื้อโลหะแผ่นไหลเข้าหาปากแม่พิมพ์และถูกทำให้โค้งหรือดัด (Bending) ตามลักษณะของแม่พิมพ์ เมื่อผ่านปากแม่พิมพ์ไปแล้วจะถูกทำให้ตรง (Straightening) ทำให้เกิดผนังรูปถ้วย (Cup Wall) โดยมีช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ไม่น้อยกว่าความหนาของชิ้นงานตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงแม่พิมพ์อย่างง่ายและชิ้นส่วนต่างๆ ในงานลากขึ้นรูป (Deep Drawing) [4]

2.1 การทำให้แข็งด้วยความเครียด [5]

การเปลี่ยนรูปทรงที่ทำให้ความต้านแรงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นหรือการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening) หมายถึงการเพิ่มความแข็งแรงจากการเปลี่ยนรูปเย็นผลที่ตามมาคือสมบัติความเหนียวลดลงและความต้านแรงครากเปลี่ยนไปสมการที่ใช้เป็นไปตามสมการที่ 1

$$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n \quad (1)$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานแรงดึง

n คือ เลขชี้กำลังทำให้แข็งด้วยความเครียด

2.2 แบบจำลองวัสดุของ Barlat 3-parameter (Material 36 in LS-Dyna) [6]

เกณฑ์การครากของ Barlat 3-Parameter ทำได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\phi = a|K_1 + K_2|^m + a|K_1 - K_2|^m + c|2K_2|^m = 2\sigma_y^m \quad (2)$$

เมื่อ ϕ คือ ค่าความแข็งแรงจุดครากและ $K_{i=1,2}$ หาโดยสมการดังนี้

$$K_1 = \frac{\sigma_x + h\sigma_y}{2} \quad (3)$$

$$K_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - h\sigma_y}{2}\right)^2 + P^2 \tau_{xy}^2} \quad (4)$$

พารามิเตอร์ a, c, h, p, m หาได้โดย

$$a = 2 - 2\sqrt{\frac{R_{00}}{1+R_{00}} \cdot \frac{R_{90}}{1+R_{90}}} \quad (5)$$

$$c = 2 - a \quad (6)$$

$$h = \sqrt{\frac{R_{00}}{1+R_{00}} \cdot \frac{1+R_{90}}{R_{90}}} \quad (7)$$

$$g(p) = \frac{2m\sigma_y^m}{\left(\frac{\partial\phi}{\partial\sigma_x} + \frac{\partial\phi}{\partial\sigma_y}\right)\sigma_\phi} - 1 - R_{45} \quad (8)$$

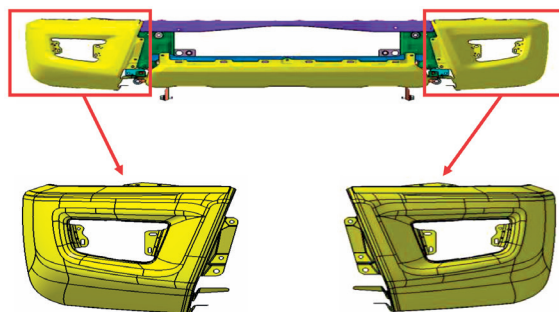
สำหรับค่าแอนไอโซทรอปิกในทิศทางอื่นสามารถหาได้จากสมการที่ 9

$$R_\phi = \frac{2m\sigma_y^m}{\left(\frac{\partial\phi}{\partial\sigma_x} + \frac{\partial\phi}{\partial\sigma_y}\right)\sigma_\phi} - 1 \quad (9)$$

สำหรับวัสดุที่มีโครงสร้างแบบ body centered cubic (BCC) $m=6$

3. ขั้นตอนการทดลอง

1) ศึกษาไฟล์ 3 มิติของชิ้นงานและขั้นตอนการผลิตชิ้นงานโดยงานวิจัยนี้มุ่งไปที่กระบวนการลากขึ้นรูปลึกชิ้นงานซึ่งเป็นกระบวนการเริ่มต้น เนื่องจากการขึ้นรูปในกระบวนการนี้ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปมักจะมีปัญหาการแตกและการย่นของชิ้นงาน ซึ่งรูปไฟล์ 3 มิติของชิ้นงานแสดงไว้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ชิ้นส่วนที่ใช้เป็นกรณีศึกษา (BRACKET, FR BUMPER SIDE LH/RH)

จากรูปที่ 2 แสดงรูปร่างของชิ้นส่วน BRACKET, FR BUMPER SIDE LH/RH ซึ่งกระบวนการทั้งหมดของชิ้นส่วนนี้ประกอบไปด้วย 7 กระบวนการโดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกเท่านั้น ซึ่งเป็นกระบวนการเริ่มต้นของกระบวนการทั้งหมด

2) วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปซึ่งคือ โลหะแผ่นเกรด SPC270D ความหนา 1.4 มิลลิเมตรทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน JIS Z 2241-2011 (ชิ้นงานทดสอบได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3) เพื่อหาสมบัติวัสดุ (Material Properties) และค่าตัวแปรวัสดุ (Material Parameters) ที่จำเป็นต่อสมการ Barlat 3-parameters (MaterialType.36) ซึ่งมีความจำเป็นที่ต้องป้อนเข้าสู่โปรแกรมจำลองการขึ้นรูป

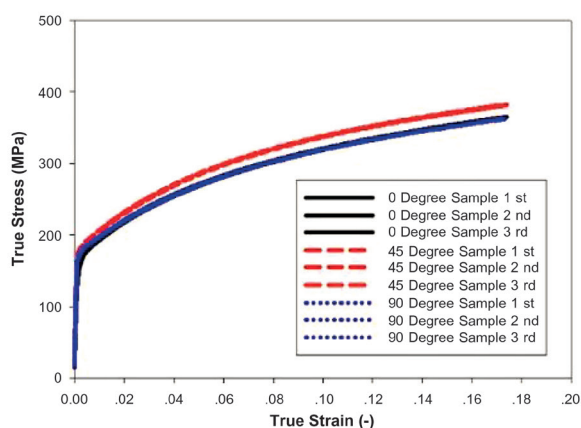


รูปที่ 3 ชิ้นงานทดสอบ SPC270D ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง

a) ทิศทาง 0 องศา b) 45 องศาและ c) 90 องศา กับแนวการรีด

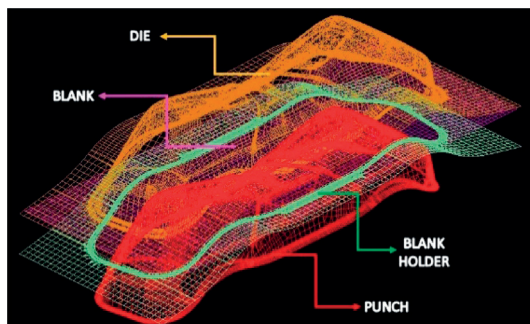
ตารางที่ 1 สมบัติวัสดุของโลหะแผ่นเกรด SPC270D ที่ได้จากการทดสอบการดึง

Direction	E (Young's Modulus) (GPa)	Tensile Strength (MPa)	YS (0.2% Offset) (MPa)	R-Value				K	n
				Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Average		
0 degree	186.2	310.26	173.73	2.19	2.25	2.35	2.26	551.57	0.233
45 degree	195.0	323.17	175.84	1.47	1.44	1.48	1.46	580.06	0.236
90 degree	202.4	307.43	172.68	2.63	2.54	2.62	2.59	549.71	0.237



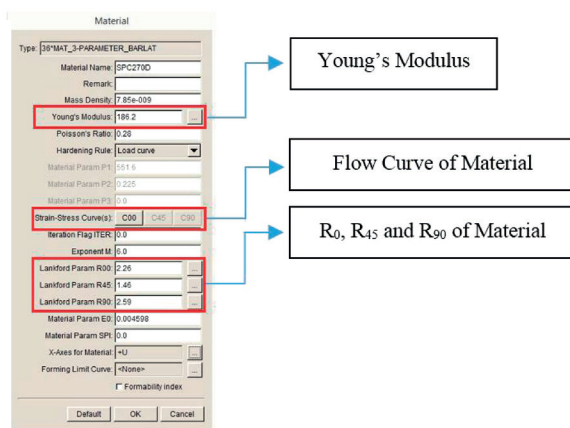
รูปที่ 4 กราฟเส้นโค้งความเค้นจริง-ความเครียดจริงที่ได้จากการทดสอบแรงดึงทั้ง 3 ทิศทางของเหล็กเกรด SPC270D

3) การสร้างแบบจำลองการขึ้นรูป ขอบเขตเงื่อนไขของการสร้างแบบจำลองการขึ้นรูป ในส่วนของพื้นที่และตาย ได้ถูกกำหนดให้เป็นเอลิเมนต์แบบเปลือกบาง ขนาดโครงตาข่ายเป็นแบบปรับตัวได้ระหว่าง 0.5-25 มิลลิเมตร (แสดงแบบจำลองการขึ้นรูปไว้ในรูปที่ 5)



รูปที่ 5 ส่วนประกอบของแบบจำลองการขึ้นรูป

4) การป้อนค่าพารามิเตอร์ภายในโปรแกรม โดยอาศัยแบบจำลองวัสดุของ Barlat 3-Parameter (Material Type.36) ในโปรแกรม Dynaform นั้น ค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการทำนายพฤติกรรมกรรมการขึ้นรูป ที่โปรแกรมต้องการประกอบด้วย ค่ายังมอดูลัส, แผนภูมิการไหลตัวของวัสดุ (Flow Curve) และค่าแอนไอโซทรอปิกของวัสดุของวัสดุทั้ง 3 ทิศทาง ซึ่งได้แสดงหน้าตาการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไว้ดังรูปที่ 6

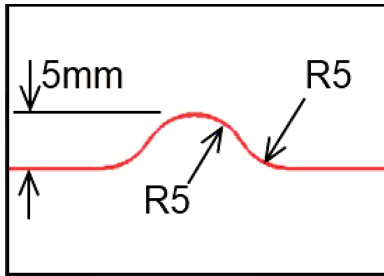


รูปที่ 6 การป้อนค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองวัสดุของ Barlat 3-Parameter

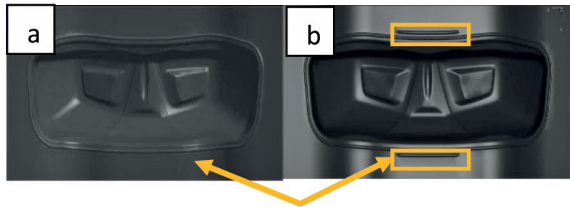
4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลของการออกแบบดอร์บีดให้กับผิวแม่พิมพ์

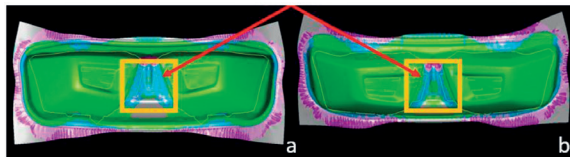
ผลจากการออกแบบดอร์บีดให้กับผิวแม่พิมพ์ เพื่อจำลองการขึ้นรูปชิ้นงาน BRACKER, FR BUMPER SIDE LH/RH ด้วยดอร์บีดแบบครึ่งวงกลม รัศมีดอร์บีด 5 มิลลิเมตร และความสูงของดอร์บีด 5 มิลลิเมตร (ลักษณะดอร์บีดดังรูปที่ 7) โดยการออกแบบดอร์บีดในขั้นต้น คือ การออกแบบดอร์บีดที่รอบแม่พิมพ์ และในเวลาต่อมาได้ปรับปรุงการออกแบบโดยการเพิ่มแถบดอร์บีดเพิ่มเติมให้กับแม่พิมพ์ (ดังรูปที่ 8) ซึ่งผลการจำลองได้แสดงไว้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 7 ลักษณะดรอร์ปิดที่ออกแบบให้กับผิวแม่พิมพ์



รูปที่ 8 a) การออกแบบดรอร์ปิดรอบผิวแม่พิมพ์และ b) การออกแบบดรอร์ปิดเพิ่มเติมที่บริเวณกึ่งกลางผิวแม่พิมพ์

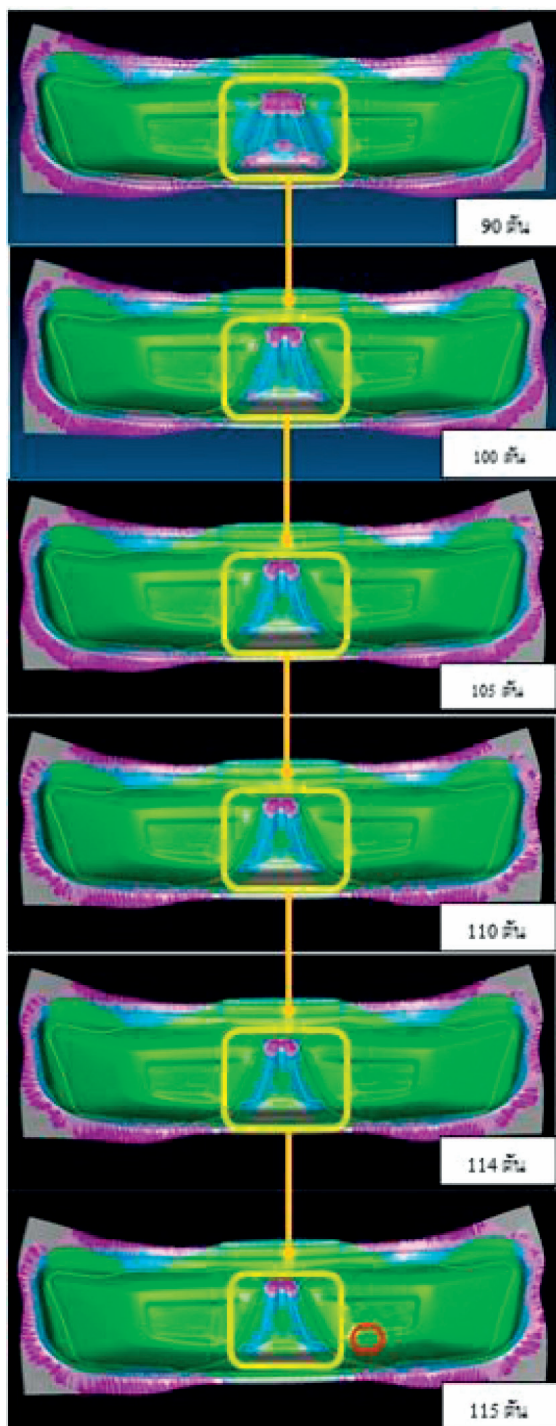


รูปที่ 9 a) ผลการจำลองการขึ้นรูปโดยการออกแบบดรอร์ปิดรอบแม่พิมพ์ และ b) ผลการจำลองการขึ้นรูปโดยการออกแบบดรอร์ปิดเพิ่มเติมที่บริเวณกึ่งกลางของผิวแม่พิมพ์

จากรูปที่ 9 เมื่อทำการใส่ดรอร์ปิดให้กับผิวแม่พิมพ์และทำการจำลองการขึ้นรูปโดยการปรับค่าแรงจับยึดชิ้นงานตั้งแต่ 50 ตันไปจนถึง 120 ตัน พบว่าผลการจำลองการขึ้นรูปให้ผลที่ดีที่สุดแสดงด้วยบริเวณสีเขียวบนชิ้นงานภายในขอบเขตชิ้นงาน เนื่องจากเมื่อทำการใส่ดรอร์ปิดรอบตัวชิ้นงานแล้ว ดรอร์ปิดมีส่วนช่วยในการชะลอการไหลตัวของวัสดุในขณะทำการลากขึ้นรูปชิ้นงาน แต่เมื่อสังเกตที่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงานยังพบบริเวณที่มีแนวโน้มจะเย็น (บริเวณสีฟ้า) กินพื้นที่เข้าไปในขอบเขตชิ้นงานที่ต้องการอยู่ (ขอบเขตชิ้นงานได้แสดงไว้ด้วยเส้นสีเหลือง) จากผลการจำลองด้วยการเพิ่มแถบดรอร์ปิดเพิ่มเติมให้กับผิวแม่พิมพ์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 9 (b) ผลการจำลองแสดงการลดปริมาณลงของบริเวณที่มีแนวโน้มจะเย็นลงได้พอสมควร เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองกับรูปที่ 9 (a) ที่มีการออกแบบดรอร์ปิด รอบแม่พิมพ์เพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงได้ยึดถือการออกแบบดรอร์ปิดรอบตัวพร้อมกับการออกแบบเพิ่มเติมที่บริเวณกึ่งกลางผิวแม่พิมพ์ไปใช้ในการออกแบบจริง

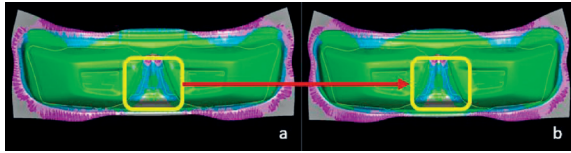
4.2 ผลของการออกแบบการให้แรงจับยึดชิ้นงาน

ในงานวิจัยนี้ได้จำลองการให้แรงด้วยระบบคูลชันจากเครื่องเพรสที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานโดยตรง โดยเริ่มจำลองให้แรงจับยึดชิ้นงานตั้งแต่ 50 ตัน และทำการเพิ่มแรงในการจับยึดชิ้นงานไปที่ละลำดับเพื่อพิจารณาผลของการกำหนดค่าแรงจับยึดชิ้นงาน ซึ่งผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยการกำหนดค่าแรงจับยึดชิ้นงานได้แสดงไว้ดังรูปที่ 10



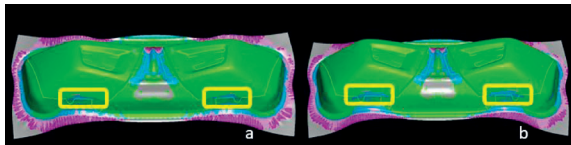
รูปที่ 10 ผลการจำลองการปรับค่าแรงจับยึดชิ้นงาน

จากรูปที่ 10 แสดงผลการปรับค่าแรงจับยึดชิ้นงานโดยได้เริ่มแสดงตั้งแต่ค่าแรง 90 ตัน เป็นต้นไป เนื่องจากว่าชิ้นงานเริ่มสามารถทำการขึ้นรูปได้ดีตั้งแต่ค่าแรง 90 ตันเป็นต้นไป เมื่อพิจารณาผลของการปรับค่าแรงจับยึดชิ้นงาน สามารถสังเกตได้ว่าที่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงานแสดงให้เห็นการลดลงของบริเวณที่มีแนวโน้มจะยุบ (บริเวณสีฟ้า) อย่างต่อเนื่องเมื่อทำการปรับเพิ่มค่าแรงจับยึดชิ้นงานตามลำดับ ดังนั้นการปรับค่าแรงจับยึดชิ้นงานสามารถช่วยลดบริเวณที่ชิ้นงานมีแนวโน้มจะยุบในบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานที่ผู้วิจัยได้ทำสัญลักษณ์กำกับไว้ และบริเวณที่จะยุบ (บริเวณสีชมพู) ลงได้ในบางตำแหน่งของชิ้นงาน แต่เมื่อทำการปรับค่าแรงจับยึดชิ้นงานไปจนถึงค่าแรง 115 ตัน บางบริเวณภายในขอบเขตชิ้นงานที่ต้องการได้เริ่มแสดงผลเป็นสีแดง ในบางจุดของชิ้นงานซึ่งนั่นหมายถึงบริเวณนั้นเกิดการฉีกขาดของชิ้นงาน ดังนั้นจึงได้ยุติการปรับค่าแรงจับยึดชิ้นงานไว้ที่ 114 ตันซึ่งเป็นค่าแรงที่เหมาะสมที่สุด ในเวลาต่อมาทางผู้วิจัยได้ทำการทดลองจำลองใช้ระบบแก๊สสปริงแทนระบบคู่ขึ้นจากเครื่องเพรส โดยอาศัยค่าแรง 90 ตัน ที่ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ดีจากการให้แรงด้วยระบบคู่ขึ้นมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบการให้แรงด้วยแก๊สสปริงโดยข้อมูลมาตรฐานแก๊สสปริงที่ใช้ เป็นของบริษัท Kaller รุ่น TL7500-250 ซึ่งแก๊สสปริง 1 ตัว จะให้แรงเริ่มต้นได้ประมาณ 7.5 ตัน และ แรงสิ้นสุดประมาณ 11.6 ตันซึ่งการทดลองในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองทั้งหมด 3 กรณี คือ 1) จำลองการขึ้นรูปเสมือนใช้แก๊สสปริง 12 ตัว ซึ่งให้แรงเริ่มต้นที่ 90 ตัน แรงสิ้นสุดที่ 139.2 ตัน 2) จำลองการขึ้นรูปเสมือนใช้แก๊สสปริง 13 ตัว ซึ่งให้แรงเริ่มต้นที่ 97.5 ตัน แรงสิ้นสุดที่ 150.8 ตันและกรณี 3) จำลองการขึ้นรูปเสมือนใช้แก๊สสปริง 14 ตัว ซึ่งให้แรงเริ่มต้นที่ 105 ตัน แรงสิ้นสุดที่ 162.4 ตัน ผลการจำลองในแต่ละกรณีเป็นไปดังรูปที่ 11-15



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างการให้แรงจับยึดชิ้นงานด้วย

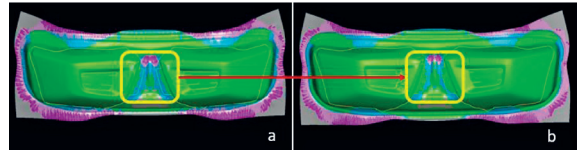
- a) ระบบคู่ชั้นด้วยค่าแรง 114 ตัน
- b) การให้แรงจับยึดชิ้นงานด้วยระบบแก๊สสปริงโดยแรงเริ่มต้นที่ 90 ตัน และแรงสิ้นสุดที่ 139.2 ตัน แก๊สสปริง 12 ตัว (มุมมองด้านหน้าของชิ้นงาน)



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างการให้แรงจับยึดชิ้นงานด้วย

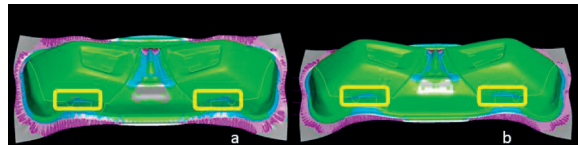
- a) ระบบคู่ชั้นด้วยค่าแรง 114 ตัน
- b) การให้แรงจับยึดชิ้นงานด้วยระบบแก๊สสปริงโดยแรงเริ่มต้นที่ 90 ตัน และแรงสิ้นสุดที่ 139.2 ตัน แก๊สสปริง 12 ตัว (มุมมองด้านล่างของชิ้นงาน)

จากรูปที่ 11 และ 12 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการให้แรงจับยึดชิ้นงานจากคู่ชั้นของเครื่องเพรสด้วยค่าแรง 114 ตันกับการจำลองให้แรงแบบแก๊สสปริงด้วยแรงเริ่มต้น 90 ตัน แรงสิ้นสุด 139.2 ตัน (แก๊สสปริง 12 ตัว) และเมื่อพิจารณาถึงการลดลงของบริเวณสีฟ้าหรือบริเวณที่ชิ้นงานมีแนวโน้มจะยุบภายในขอบเขตชิ้นงาน (ดังที่ผู้วิจัยได้ทำสัญลักษณ์แสดงจุดสังเกตไว้) ก็ไม่ปรากฏการลดปริมาณลงของบริเวณดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบจำลองโดยการเพิ่มค่าแรงเริ่มต้นเป็น 97.5 ตัน และแรงสิ้นสุดที่ 150.8 ตัน (แก๊สสปริง 13 ตัว) เมื่อพิจารณาผลการจำลองพบว่า สามารถลดปริมาณของแถบสีฟ้าหรือบริเวณที่มีแนวโน้มจะยุบลงอย่างเห็นได้ชัดในบริเวณขอบเขตชิ้นงานที่ต้องการเมื่อทำการเปรียบเทียบในตำแหน่งที่ผู้วิจัยทำสัญลักษณ์แสดงไว้ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ในรูปที่ 13



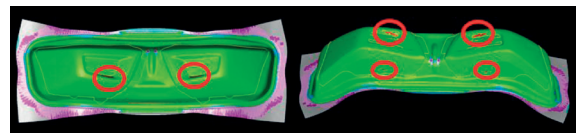
รูปที่ 13 การเปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างการให้แรงจับยึดชิ้นงานด้วย

- a) ระบบคู่ชั้นด้วยค่าแรง 114 ตัน
- b) การให้แรงจับยึดชิ้นงานด้วยระบบแก๊สสปริงโดยแรงเริ่มต้นที่ 97.5 ตัน และแรงสิ้นสุดที่ 150.8 ตัน แก๊สสปริง 13 ตัว (มุมมองด้านหน้าของชิ้นงาน)



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างการให้แรงจับยึดชิ้นงานด้วย

- a) ระบบคู่ชั้นด้วย ค่าแรง 114 ตัน
- b) การให้แรงจับยึดชิ้นงานด้วยระบบแก๊สสปริงโดยแรงเริ่มต้นที่ 97.5 ตัน และแรงสิ้นสุดที่ 150.8 ตัน แก๊สสปริง 13 ตัว (มุมมองด้านล่างของชิ้นงาน)



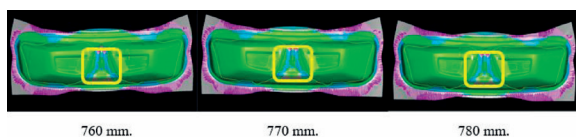
รูปที่ 15 การให้แรงจับยึดชิ้นงานด้วยระบบแก๊สสปริงโดยแรงเริ่มต้นที่ 105 ตัน และแรงสิ้นสุดที่ 162.7 ตัน (แก๊สสปริง 14 ตัว)

ในรูปที่ 14 เป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองในมุมมองด้านล่างของชิ้นงาน ผลการจำลองของทั้งสองระบบในมุมมองนี้มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และในกรณีที่ 3 คือ ทำการจำลองด้วยการเพิ่มแรงเริ่มต้นที่ 105 ตัน แรงสิ้นสุดที่ 162.4 ตัน (หรือเสมือนการติดตั้งแก๊สสปริง 14 ตัว) ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงบริเวณภายในขอบเขตชิ้นงานที่ต้องการมีการฉีกขาดอย่างรุนแรงเกิดขึ้นดังรูปที่ 15 จึงสรุปค่าแรงเริ่มต้นที่ 97.5 และแรงปลาย

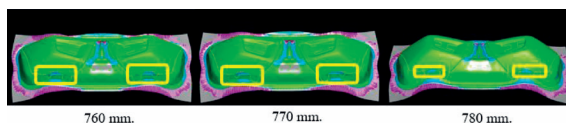
150.8 ตัน นั่นคือการออกแบบด้วยการติดตั้งแก๊สสปริงจำนวน 13 ตัวเป็นการออกแบบการจับยึดชิ้นงานที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากการจับยึดด้วยระบบแก๊สสปริงสามารถเพิ่มแรงจับยึดชิ้นงานแบบแปรผันตรงกับระยะการขึ้นรูปชิ้นงาน ดังนั้นในทุกระยะการขึ้นรูปชิ้นงาน การจับยึดชิ้นงานสามารถเพิ่มแรงในการจับยึดชิ้นงานได้จนกระบวนการลากชิ้นรูปสิ้นสุด ซึ่งต่างจากระบบการจับยึดด้วยระบบตาชั่งจากเครื่องเพรสโดยตรงที่ทำการจับยึดไว้ด้วยค่าแรงที่คงที่ตั้งแต่เริ่มต้นจนจบกระบวนการลากชิ้นรูป และหากมองถึงความสะดวกในการติดตั้งแม่พิมพ์ในการผลิตชิ้นงานจริง ระบบการให้แรงแบบแก๊สสปริงจะสามารถลดระยะเวลาการติดตั้งแม่พิมพ์ (Setup Time) ของการติดตั้งแม่พิมพ์ที่ทำการผลิตในแต่ละรอบการผลิตอีกด้วย

4.3 ผลของการปรับขนาดแผ่นเริ่มต้นชิ้นงาน

การทดลองในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองภายใต้การใช้แรงจับยึดชิ้นงานด้วยระบบแก๊สสปริง จำนวน 13 ตัว ซึ่งคิดเป็นค่าแรงจับยึดชิ้นงานเริ่มต้น 97.5 ตัน และแรงสิ้นสุด 150.8 ตัน โดยที่ผลการจำลองจากหัวข้อก่อนหน้านี้ได้ใช้ขนาดของแผ่นเริ่มต้นชิ้นงาน ความยาว 1,920 มิลลิเมตร และความกว้าง 750 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นข้อกำหนดแรกเริ่มที่ถูกกำหนดมาจากบริษัทที่ทำการวิจัยร่วมด้วย ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการจำลองการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการเพิ่มขนาดความกว้างของแผ่นเริ่มต้นชิ้นงาน เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองว่ามีแนวโน้มที่ดีขึ้นหรือไม่ โดยได้ทำการทดลองเพิ่มขนาดความกว้างของแผ่นเริ่มต้นชิ้นงาน 3 ระดับ คือ ความกว้าง 760, 770 และ 780 มิลลิเมตร ผลการจำลองเป็นไปดังรูปที่ 16-17

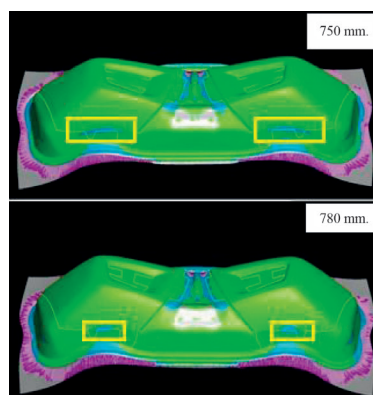


รูปที่ 16 เปรียบเทียบผลการจำลองการปรับความกว้างของแผ่นเริ่มต้นชิ้นงาน 760, 770 และ 780 มิลลิเมตร (มุมมองด้านหน้าของชิ้นงาน)



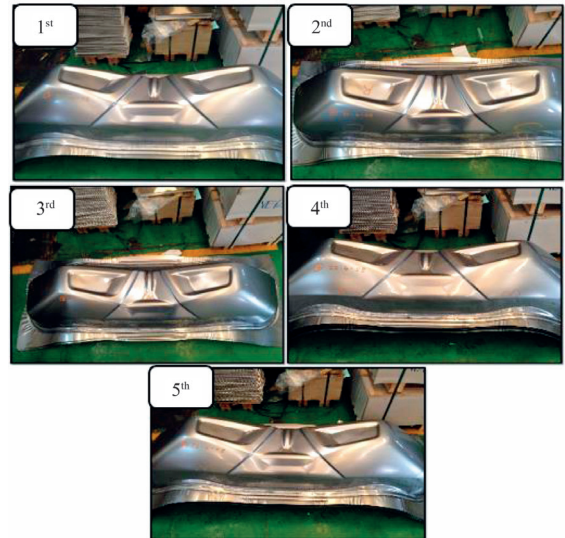
รูปที่ 17 เปรียบเทียบผลการจำลองการปรับความกว้างของแผ่นเริ่มต้นชิ้นงาน 760, 770 และ 780 มิลลิเมตร (มุมมองด้านล่างของชิ้นงาน)

จากรูปที่ 16 เมื่อพิจารณาถึงบริเวณที่มีแนวโน้มจะยื่นตรงกึ่งกลางชิ้นงานที่กินพื้นที่เข้าไปในขอบเขตชิ้นงานเล็กน้อย (มุมมองด้านหน้าของชิ้นงาน) ผลการจำลองการเพิ่มความกว้างของแผ่นเริ่มต้นชิ้นงาน แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขนาดความกว้างของแผ่นเริ่มต้นชิ้นงานทั้ง 3 ขนาดไม่สามารถลดบริเวณแถบสีฟ้าหรือบริเวณที่มีการทำนายว่ามีแนวโน้มจะยื่นลงได้มากกว่าผลการจำลองเดิม แต่หากเมื่อพิจารณาผลการจำลองในมุมมองด้านล่างของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 17 ปรากฏให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าการเพิ่มขนาดความกว้างของแผ่นเริ่มต้นชิ้นงานส่งผลให้บริเวณที่มีแนวโน้มจะยื่นลดลงจากขอบเขตชิ้นงานที่ต้องการ เมื่อพิจารณาในกรอบสี่เหลี่ยมที่ผู้วิจัยทำการแสดงกำกับไว้ และสามารถเปรียบเทียบผลการจำลองของแผ่นเริ่มต้นชิ้นงานที่ขนาดความกว้าง 750 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดแผ่นเริ่มต้นชิ้นงานขนาดแรกที่ถูกกำหนดไว้จากทางบริษัทกับผลการจำลองด้วยขนาดแผ่นเริ่มต้นชิ้นงาน 780 มิลลิเมตร ที่ได้ทำการปรับขนาดแล้ว ผลการจำลองให้ผลที่ดีขึ้น ในเรื่องของการลดบริเวณที่มีแนวโน้มจะยื่นของชิ้นงาน ซึ่งได้แสดงการเปรียบเทียบไว้ดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 เปรียบเทียบผลจำลองการปรับขนาดความกว้างระหว่าง ขนาดความกว้าง 750 และ 780 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองการเพิ่มขนาดความกว้างของแผ่นเริ่มต้นชิ้นงาน ระหว่าง 750 มิลลิเมตรกับ 780 มิลลิเมตร สังเกตได้ว่า การเพิ่มขนาดความกว้างของแผ่นเริ่มต้นชิ้นงานสามารถลดบริเวณที่มีการทำนายว่ามีแนวโน้มจะย่น (บริเวณแถบสีฟ้า) ลงได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์จากผลการจำลองเดิมที่มีขนาดความกว้าง 750 มิลลิเมตร อนึ่งเนื่องมาจากการเพิ่มความกว้างของแผ่นเริ่มต้นชิ้นงานนั้นส่งผลให้การจับยึดชิ้นงานขณะการลากขึ้นรูปนั้นมีพื้นที่การจับยึดที่มากขึ้น เมื่อการจับยึดชิ้นงานมีพื้นที่มากขึ้นจึงส่งผลให้การจับยึดมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เป็นผลให้สามารถลดแนวโน้มที่ชิ้นงานจะย่นลงได้



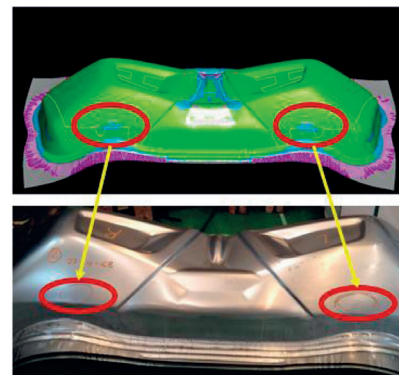
รูปที่ 20 ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปจริงจำนวน 5 ชิ้น

4.4 การทดลองการขึ้นรูปจริงครั้งที่ 1

การทดลองการขึ้นรูปจริงได้ดำเนินการด้วยแม่พิมพ์ที่ผู้วิจัยได้ร่วมทำการออกแบบกระบวนการกับทางบริษัทไทยซัมมิต ออโตพาร์ท อินดัสตรี จำกัด มหาชน ซึ่งแม่พิมพ์ของการขึ้นรูปชิ้นงานได้แสดงไว้ดังรูปที่ 19 ในส่วนของการทดลองขึ้นรูปจริงครั้งที่ 1 (Try-out 1) ได้ทดลองขึ้นรูปจริงจำนวน 5 ชิ้นงาน ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 20 และการเปรียบเทียบผลการขึ้นรูปจริงกับผลการจำลองการขึ้นรูป แสดงไว้ดังรูปที่ 21

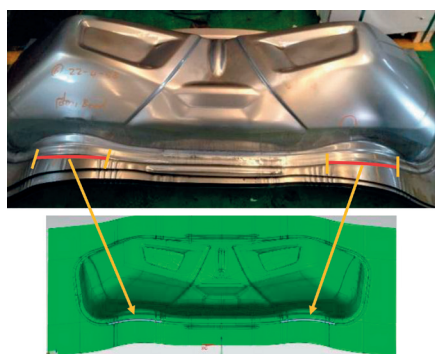


รูปที่ 19 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน

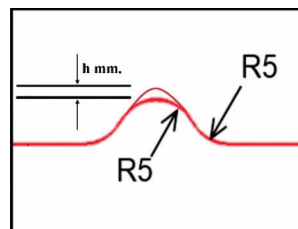


รูปที่ 21 การเปรียบเทียบผลการจำลองการขึ้นรูปกับผลการขึ้นรูปจริงครั้งที่ 1

จากรูปที่ 21 จากการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริงพบว่า เกิดรอยย่นเล็กน้อยกินเนื้อที่เข้าไปในบริเวณขึ้นงานที่ต้องการตรงบริเวณมุมมองด้านล่างของขึ้นงาน (ตำแหน่งที่ผู้วิจัยได้แสดงสัญลักษณ์กำกับไว้) ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลของการจำลองการขึ้นรูปจะเห็นได้ว่า ตำแหน่งนั้นผลการจำลองแสดงแถบสีฟ้า (แปลว่ามีแนวโน้มจะย่น) ซึ่งแถบสีฟ้านี้เป็นแถบสีที่บอกถึงแนวโน้มจะย่น จึงทำให้ผู้วิจัยเลือกทำการขึ้นรูปจริงครั้งที่ 1 มาเปรียบเทียบกับผลก่อน เนื่องจากไม่สามารถให้น้ำหนักได้ว่าชิ้นงานจะย่น 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการเกิดรอยย่นดังกล่าวอาจเนื่องมาจากว่าเนื้อวัสดุ ณ บริเวณนั้นอาจยังมีการไหลตัวเข้าสู่แม่พิมพ์ที่เร็วกว่าบริเวณอื่นจากประสบการณ์ของบริษัทร่วมวิจัยได้เสนอแนวทางในการเชื่อมพอกดรอร์บิตเพื่อเพิ่มความสูงของดรอร์บิต แต่ยังไม่ทราบค่าความสูงที่แน่นอน ดังนั้นผู้วิจัยจึงวางแนวทางการจำลองการขึ้นรูปโดยปรับในส่วนของค่าความสูงของดรอร์บิตเพื่อให้สามารถควบคุมการไหลตัวของเนื้อวัสดุให้ช้าลง ซึ่งขนาดความสูงที่ทำการจำลอง โดยจำลองเพิ่มความสูงทีละ 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งตำแหน่งของดรอร์บิตที่จะทำการปรับปรุงได้แสดงไว้ดังรูปที่ 22 และในส่วนของรูปที่ 23 จะเป็นการแสดงลักษณะการเพิ่มความสูงให้กับดรอร์บิต



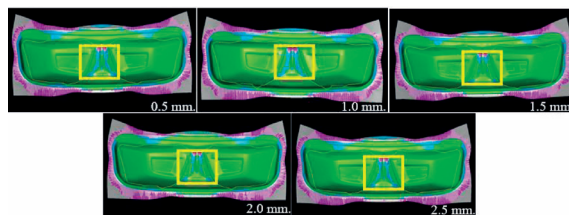
รูปที่ 22 ตำแหน่งดรอร์บิตที่จะดำเนินการจำลองเพิ่มความสูง



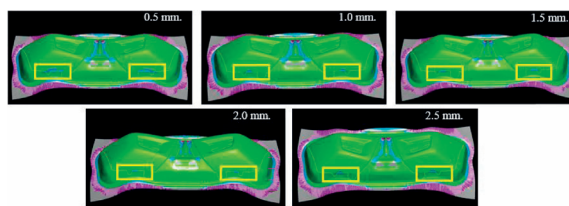
รูปที่ 23 ลักษณะการเพิ่มความสูงให้ดรอร์บิต ณ บริเวณที่ขึ้นงานเกิดการย่น

4.4.1 ผลจำลองการเพิ่มความสูงให้กับดรอร์บิต

ผลการจำลองการเพิ่มความสูงให้กับดรอร์บิตได้ทำการเพิ่มความสูงทั้งหมด 5 ค่าความสูง คือ การเพิ่มความสูงจากเดิมอีก 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 มิลลิเมตร ซึ่งผลการจำลองได้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 24-25



รูปที่ 24 เปรียบเทียบผลการจำลองการเพิ่มความสูงให้กับดรอร์บิต (มุมด้านหน้าของขึ้นงาน)

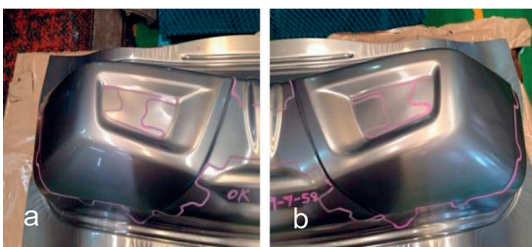


รูปที่ 25 เปรียบเทียบผลการจำลองการเพิ่มความสูงให้กับดรอร์บิต (มุมด้านล่างของขึ้นงาน)

จากรูปที่ 24 ผลการจำลองการเพิ่มความสูงให้กับตรอร์บิต โดยการเพิ่มความสูงตั้งแต่ค่าความสูง 0.5 มิลลิเมตร ถึง 2.5 มิลลิเมตร ในมุมมองด้านหน้าของชิ้นงานแสดงให้เห็นถึงการลดปริมาณของแถบสีฟ้า หรือโซนที่มีแนวโน้มจะเย็นจากการทำนายมากที่สุดที่การเพิ่มระดับความสูงอีก 2 มิลลิเมตร ในมุมมองด้านหน้าชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปจริงครั้งที่ 1 ไม่พบปัญหาการเย็นทางผู้วิจัยจึงให้ความสำคัญกับผลการจำลองการเพิ่มความสูงให้กับตรอร์บิต (มุมด้านล่างของชิ้นงาน) เป็นหลักเนื่องจากชิ้นงานจริงพบการเย็นในบริเวณดังกล่าวและเมื่อทำการพิจารณาในรูปที่ 25 ที่การเพิ่มความสูงของตรอร์บิตที่ 2 มิลลิเมตรเช่นกันผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงการลดปริมาณลงของบริเวณที่มีแนวโน้มจะเย็นในตำแหน่งที่เคยเป็นปัญหาได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงสรุปการเพิ่มค่าความสูงตรอร์บิตที่ 2 มิลลิเมตรในการนำไปใช้ปรับปรุงแม่พิมพ์และดำเนินการขึ้นรูปจริงครั้งที่ 2

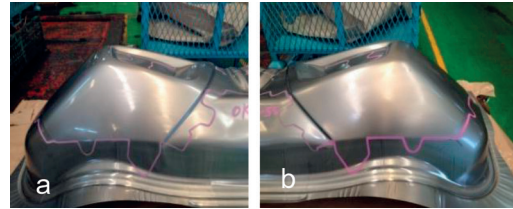
4.5 การทดลองขึ้นรูปจริงครั้งที่ 2

การทดลองขึ้นรูปจริงครั้งที่ 2 ดำเนินการหลังจากได้ทำการปรับปรุงในส่วนของความสูงตรอร์บิตแม่พิมพ์เรียบร้อยแล้ว ผลการทดลองขึ้นรูปจริงแสดงดังรูปที่ 26-29



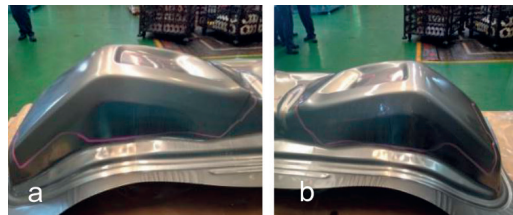
รูปที่ 26 a) ฟังขวาของชิ้นงานในมุมมองด้านหน้า
b) ฟังซ้ายของชิ้นงานในมุมมองด้านหน้า

จากรูปที่ 26 แสดงถึงภาพในมุมมองด้านหน้าทางฟังขวาและซ้ายของชิ้นงาน โดยได้ทำการกำหนดขอบเขตชิ้นงานที่ต้องการไว้ด้วยเส้นสีชมพู



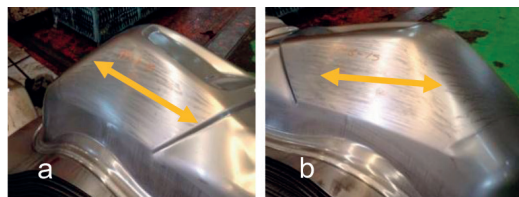
รูปที่ 27 a) ฟังขวาของชิ้นงานในมุมมองด้านล่าง
b) ฟังซ้ายของชิ้นงานในมุมมองด้านล่าง

จากรูปที่ 27 แสดงภาพด้านล่างขวาและด้านล่างซ้ายของชิ้นงานที่ในการทดลองขึ้นรูปจริงครั้งที่ 1 บริเวณนี้เคยเกิดการเย็นเล็กน้อยของชิ้นงาน หลังจากที่ได้ทำการปรับแก้ไขกระบวนการแล้วสามารถลดการเย็นของชิ้นงานที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 28 a) ชิ้นงานฟังซ้ายในมุมมองด้านบนพร้อมเส้นแสดงขอบเขตของชิ้นงาน
b) ชิ้นงานฟังขวาในมุมมองด้านบนพร้อมเส้นแสดงขอบเขตของชิ้นงาน

จากรูปที่ 28 แสดงถึงมุมมองด้านบนซ้ายและด้านบนขวาของชิ้นงาน พร้อมทั้งแสดงถึงขอบเขตชิ้นงานด้วยเส้นสีชมพู ในบริเวณนี้ไม่พบปัญหาการเย็นตั้งแต่การทดลองขึ้นรูปจริงครั้งที่ 1



รูปที่ 29 a) การขีดผิวชิ้นงานเพื่อดูการเย็นของผิวชิ้นงานฟังขวา
b) การขีดผิวชิ้นงานเพื่อดูการเย็นของผิวชิ้นงานฟังซ้าย

จากรูปที่ 29 แสดงถึงการตรวจสอบหารอยย่น โดยการใช้แท่งโลหะมาทำการถูนผิวชิ้นงานเพื่อดูความต่อเนื่องของรอยที่เกิดขึ้นจากการถูนแท่งโลหะกับชิ้นงาน หารอยที่ปรากฏขึ้นเกิดความไม่ต่อเนื่องก็หมายถึงว่าผิวชิ้นงานย่น แต่จากการตรวจสอบไม่พบการย่นของชิ้นงานทั้งสองฝั่งที่เคยเกิดขึ้น

5. สรุปผลการทดลอง

จากการได้ใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยออกแบบและจำลองการขึ้นรูปชิ้นงาน “BRACKET FR, BUMPER SIDE LH/RH” ในการออกแบบดรอร์ปิดในกับผิวแม่พิมพ์ พบว่า การออกแบบดรอร์ปิดมีบทบาทช่วยให้สามารถควบคุมการไหลตัวของโลหะขณะไหลได้ดีกว่าการอาศัยแรงจับยึดชิ้นงานเพียงอย่างเดียว [7] โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบดรอร์ปิดรอบแม่พิมพ์ ด้วยรัศมีดรอร์ปิด 5 มิลลิเมตร ความสูง 5 มิลลิเมตร พร้อมกับออกแบบแนวดรอร์ปิดเพิ่มเติมให้กับบริเวณกึ่งกลางผิวแม่พิมพ์ซึ่งผลที่ได้สามารถช่วยลดแนวโน้มที่ชิ้นงานจะย่นลงได้ และในลำดับต่อมาภายหลังการขึ้นรูปจริงครั้งที่ 1 ชิ้นงานเกิดการย่นบริเวณมุมมองด้านล่างของชิ้นงาน ทางผู้วิจัยได้จำลองเพิ่มความสูงให้กับดรอร์ปิด ณ บริเวณที่ยังมีการย่นของชิ้นงาน พบว่าการเพิ่มความสูงที่ 2 มิลลิเมตรจากความสูงเดิมส่งผลให้เมื่อทำการปรับแก้ไขแม่พิมพ์แล้วทำการขึ้นรูปจริงครั้งที่ 2 สามารถกำจัดรอยย่นบนชิ้นงานได้ 100 เปอร์เซ็นต์ในส่วนของการให้แรงจับยึดชิ้นงาน พบว่าการให้แรงจับยึดชิ้นงานด้วยระบบแก๊สสปริงที่แรงในการจับยึดชิ้นงานแปรผันตรงกับระยะการขึ้นรูปชิ้นงาน ส่งผลให้การจับยึดชิ้นงานดีกว่าการจับยึดชิ้นงานด้วยระบบคู่ชั้นจากเครื่องเพรสโดยตรง ซึ่งแรงในการจับยึดจะคงที่ตลอดกระบวนการขึ้นรูป โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้แก๊สสปริงของบริษัท Kaller รุ่น TL7500-250 จำนวน 13 ตัว ซึ่งให้แรงเริ่มต้น (Pre-load) ประมาณ 97.5 ตัน และแรงสิ้นสุด (End-load) ประมาณ 150.8 ตัน ซึ่งให้ผลการจำลองและการขึ้นรูปจริงที่ดี และส่วนสุดท้ายของงานวิจัยได้ทำการปรับขนาดความกว้างของแผ่นเริ่มต้นชิ้นงาน ซึ่งเดิมแผ่นเริ่มต้นชิ้นงานได้ถูกกำหนดขนาดไว้ที่ ความยาว 1,920 มิลลิเมตร ความกว้าง 750 มิลลิเมตร ซึ่งจาก

ผลการจำลองการเพิ่มความกว้างของแผ่นเริ่มต้นชิ้นงานให้ผลดีที่สุดเมื่อทำการปรับความกว้างที่ 780 มิลลิเมตร และเมื่อทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง ก็ให้ผลลัพธ์ออกมาตามที่ได้ทำการจำลอง

6. กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัท ไทยซัมมิท ออโตพาร์ท อินดัสตรี จำกัด มหาชน ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์การทดลอง สถานที่ทดลอง และข้อมูลต่างๆ ที่สำคัญต่อการดำเนินการวิจัย อีกทั้งทางผู้วิจัยขอขอบพระคุณโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ปริญญาโท ปีงบประมาณ 1/2557 ที่ได้มอบทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

1. Booranacheep, C., Thanadngarn, C. and Buakaew, V., 2007, “Analysis of Wrinkle Behaviors Using Forming Limit Diagrams,” *The 21st Mechanical Engineering Network of Thailand*, Chonburi, Thailand, pp. 1004-1009. (In Thai)
2. Suranuntchai, S., 2008, “Finite Element Analysis of Sheet Metal under Drawing Process for Body Break Booster,” *Thammasat International Journal of Science and Technology*, 13, pp. 48-53.
3. Jurendi, S. and Gaiani, S., 2011, “Deep Drawing Simulation of α -titanium Alloys using LS-Dyna,” *European LS-DYNA Users Conference*, 8 May 2011, Strasbourg, pp. 1-8.
4. Wilson, F.W., Harvey, P.D. and Gump, C.B. Jr., 1965, *Die Design Handbook*, Mc Graw-Hill, New York, pp. 4.1-11.37.
5. Sodamuk, S., Buakeaw, V., Sirivedin, S. and Jirathearnat, S., 2006, “Formability Prediction of Automotive Parts Using Forming Limit Diagrams,” *The 20th Mechanical Engineering Network of Thailand*, Nakhonratchasima, Thailand, pp. 1-8. (In Thai)

6. LS-DYNA, 2007, Keyword User's Manual Version 971 Vol.2 : Material Model, Livermore Software Technology Corporation, California, pp. 466-515.

7. Buranathiti, T. and Phongphai, T., 2007, "Forming Design of Engine Cross Member via Tearing and Wrinkling Analysis," *The Journal of KMITNB*, 17, pp. 52-60. (In Thai)