

การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การขึ้นรูปแท่นรองเครื่องยนต์  
เพื่อแก้ปัญหาการฉีกขาดและรอยย่น  
Splitting and Wrinkling Suppression of Engine-Supporter Stamping  
Using Finite Element Analysis

สถาพร ชาดาคม

สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องมือ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
1518 ถ.พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800  
โทร 0-29132500 ต่อ 6428 โทรสาร 0-25873921 E-mail: sck@kmitnb.ac.th

Sathaporn Chatakorn

Section of Tool Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok  
1518 Pibulsongkram Rd, Bangsue Bangkok 10800 Thailand  
Tel: 0-29132500 Ext. 6428 Fax: 0-25873921 E-mail: sck@kmitnb.ac.th

#### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่ใช้วิธี การขึ้นรูปด้วยโลหะ ต้องการความแม่นยำและความเที่ยงตรงสูง รวมทั้งต้องการลดขั้นตอนในการผลิตให้เหลือน้อยที่สุด ปัญหาที่พบบ่อยสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะแผ่นคือ รอยย่น และการฉีกขาด

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเข้ามาช่วยในการผลิตชิ้นส่วนแท่นรองเครื่องยนต์ โดยการนำเอาข้อมูลทางด้านกรอกแบบซึ่งเป็นลักษณะ 3 มิติ (Surface Modeling) นำมาแบ่งเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยม (Quadrilateral elements) และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตต่าง ๆ (Boundary condition) ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ วัสดุที่ใช้คือ JSC 440W-45/45 ความหนา 1.8 มม. และใช้โปรแกรม PAM-STAMP เข้ามาช่วยจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Deep Drawing) จนได้ผลที่ดีที่สุด และนำผลดังกล่าวไปใช้ขึ้นรูปจริง

ผลการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้เครื่องเพรสขนาด 100 ตัน กำหนด Die Cushion Stroke 250 มม. ปรากฏว่าชิ้นงานที่ได้มีค่าความเค้น สูงสุด (Membrane Hill stress) ที่ 0.458 Pa ความหนาของชิ้นงานอยู่ระหว่าง 1.4 – 2.6 มม. ไม่พบปัญหาการฉีกขาด มีเพียงรอยย่นบางจุดสามารถลดขั้นตอนการขึ้นรูป จาก 2 ขั้นตอน เหลือเพียงขั้นตอนเดียว

#### Abstract

Metal forming in automobile industry is needed high accuracy and shortest manufacturing process. The problems found oftently in metal forming are wrinkling and splitting.

The research is used finite element method to determine parameters in engine-supporter stamping process. The material used in this research is JSC 440W-45/45 steel with the thickness of 1.8 mm. Stamping simulation was performed using PAM-STAMP commercial package to find the optimum parameters for stamping process.

The experiment was performed using 100 ton-pressing machine with die cushion stroke of 250 mm. The maximum of membrane hill stress found in the part was 0.458 Pa The thickness of engine supporter is varying between 1.4-1.6 mm There was no splitting found from this experiment, only some wrinkles were found in some certain areas. The results were found that forming step can be reduced from 2 steps to one step.

#### 1. บทนำ

รายงานดัชนีอุตสาหกรรมไตรมาสแรกของปี 2545 มีการปรับตัวเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 153.8 เมื่อเทียบกับไตรมาสแรกปี 2544 คือ 145.6 โดยสินค้าในอุตสาหกรรมหลัก 6 กลุ่ม ที่ทำการสำรวจ พบว่า อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นกลุ่มนำในการปรับตัวสูงขึ้น (แหล่งข้อมูล: ธนาคารแห่งประเทศไทย) ประเทศไทยมีทรัพยากรที่เอื้ออำนวยต่อการประกอบอุตสาหกรรม และมีแรงงานที่มีคุณภาพ มีเทคโนโลยีที่สามารถรองรับการผลิตและการพัฒนา อย่างมีประสิทธิภาพ

บริษัทรถยนต์ในต่างประเทศ ได้ให้ความสนใจเข้ามาตั้งโรงงานเพื่อใช้เป็นฐานในการผลิต และประกอบรถยนต์เพื่อใช้ในประเทศและ

เพื่อส่งออก ปัญหาหนึ่งที่พบในโรงงานผลิตชิ้นส่วนโลหะแผ่นในประเทศไทย ก็คือ การขาดความรู้และความมั่นใจในการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะแผ่น ที่มีรูปทรงซับซ้อน จึงทำให้ต้องมีการนำเข้าแม่พิมพ์ (Die) จากต่างประเทศแทน ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายดังกล่าวสูงขึ้น

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมรถยนต์ ที่เกี่ยวกับงานด้านการขึ้นรูปโลหะ ต้องการความแม่นยำ ความเที่ยงตรงของชิ้นส่วนสูง รวมทั้งต้องการลดขั้นตอนในการผลิตน้อยที่สุดนั้น สามารถนำเอาคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Metal Forming Simulation) ด้วยการใช่วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เพื่อศึกษาขีดจำกัดในการขึ้นรูปของโลหะแผ่น ศึกษาปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในการผลิตจริง หาเงื่อนไข (Forming Conditions) ที่เหมาะสมในการขึ้นรูป ข้อมูลที่ได้จากการจำลองการขึ้นรูปนี้สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบแม่พิมพ์ และกำหนดขั้นตอนในการขึ้นรูปที่เหมาะสมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในการผลิต เพื่อหาสาเหตุความผิดพลาดได้เช่นกัน ทำให้สามารถลดจำนวนชิ้นงานเสีย ที่เกิดขึ้นจากการทดลองขึ้นรูปแบบลองผิดลองถูก (Trials and Errors) เพื่อหาเงื่อนไขในการขึ้นรูปได้เป็นจำนวนมาก จะเห็นได้ชัดว่า การจำลองการขึ้นรูปด้วยคอมพิวเตอร์ทำให้สามารถลดระยะเวลา และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของบริษัทฯ ลง สามารถเพิ่มศักยภาพในการผลิต ตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถแข่งขันในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ในตลาดโลกได้

## 2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ความเสียหายที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปโลหะแผ่น ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นจากการคอด (Necking) การแตกฉีก (Rupture or Splitting) รอยย่น (Wrinkling) และการดีดกลับของชิ้นงานที่มากเกินไป (Excessive Spring back) จะเห็นได้ชัดว่า อุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ในปัจจุบันนี้ ส่วนใหญ่จะนำเข้าแผ่นเหล็กบางๆ ที่มีความแข็งแรงสูงมาใช้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ซึ่งมีโอกาสจะทำให้เกิดรอยตำหนิ (Defect) จากการผลิตได้ง่าย ดังเช่น รอยย่น, รอยพับ (Folding) เป็นต้น วิธีการที่สะดวกที่สุด ในการนำมาใช้ทำนายจุดบกพร่องก่อนการขึ้นรูปจริง ก็คือ การนำเอาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้จำลองการขึ้นรูปในคอมพิวเตอร์ ซึ่งในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้ จำเป็นต้องใช้พื้นฐานความรู้เกี่ยวกับกลศาสตร์ของโลหะ และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ถ้าหากว่าขาดพื้นฐานความรู้และประสบการณ์ที่ดีอย่างใดอย่างหนึ่งไป อาจจะทำให้ผลคำตอบที่ได้จากการคำนวณคลาดเคลื่อนไป หรืออาจจะเอามาใช้งานอะไรไม่ได้ หากขาดความเข้าใจถึงความละเอียดซับซ้อนของปัญหา ดังเช่น โมเดลขาดเสถียรภาพระหว่างการคำนวณ (Instability) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ในการวิเคราะห์ที่ไม่ถูกต้อง เป็นต้น

Kawka et al. [1] ได้เปรียบเทียบผลการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Implicit และ Explicit ในการศึกษารอยย่นที่เกิดจากการดึงขึ้นรูปโลหะแผ่น (Deep Drawing) ของชิ้นงานรูปถ้วยที่มีลักษณะเป็น

กรวย ผลการเปรียบเทียบพบว่าวิธีแบบ Explicit จะให้ผลใกล้เคียงกับรอยย่นที่เกิดจากการขึ้นรูปจริงมากกว่าวิธีแบบ Implicit

Kim et al. [2] ได้นำเอาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยปรับปรุงแก้ไขแม่พิมพ์ เพื่อแก้ปัญหาการฉีกขาดของชิ้นส่วนประตูดยนต์ โดยนำเอาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาจำลองการขึ้นรูป ด้วยการทดลองปรับรัศมีของ Die และความลึกในการขึ้นรูปจนได้ขนาดที่เหมาะสม นอกจากนี้ Kim et al. ยังนำเอาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์ความต้านทานการยุบตัว (Dent Resistance) ของประตูดยนต์ และการดีดกลับของประตูดยนต์ หลังการขึ้นรูป

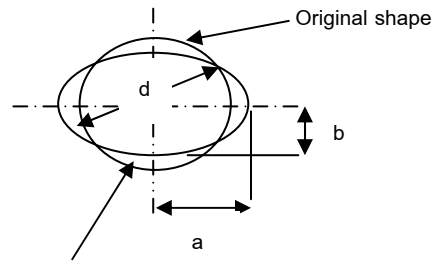
Kurt Lange [3] ในหัวข้อเรื่องการขึ้นรูปชิ้นงานที่เป็นชิ้นส่วนยานยนต์ (Drawing of Automotive Body Parts and Other Irregular Components) เนื่องจากลักษณะชิ้นงานเป็นแบบ Complicated Model ควรต้องศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวของโลหะ เพื่อนำไปพิจารณาตัว Punch และ Die ได้วิธีหนึ่ง จึงได้สร้าง Circular Grid บนชิ้นงานเพื่อพิจารณา Principle strain (ดังแสดงในรูปที่ 1) ในการนำไปเป็นตัวกำหนด Forming-Limit Diagram (FLD) เพื่อเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ชิ้นงาน

ซึ่ง Principle Strain หาได้จากสูตร

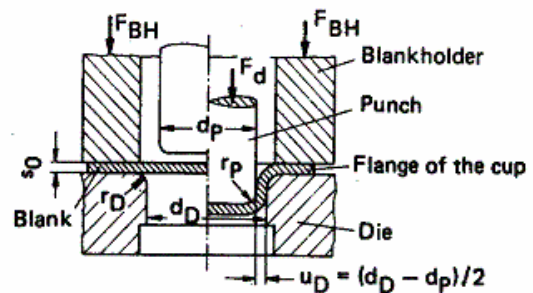
$$\bar{\varphi} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_1\varphi_2 + \varphi_2^2} \quad (1)$$

เมื่อ 
$$\varphi_1 = \ln \frac{2a}{d} \quad (2)$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{2b}{d} \quad (3)$$



รูปที่ 1 แสดง Grid Pattern แบบวงกลม



รูปที่ 2 แสดง Deep-drawing สำหรับ First draw

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง [4]

Material name	Tensile strength (Mpa)	Yield point (Mpa)	Poisson's Ratio	Anisotropy coefficients		
				$\gamma_0$	$\gamma_{45}$	$\gamma_{90}$
JSC440W-45/45	0.44	0.235	0.27	0.98	0.989	0.858

ในส่วนของ Blank sheet ที่รับความเค้น จะเป็นความเค้นแบบ Compressive stress บ้างก็ส่วนหนึ่งที่สามารถช่วยแก้ปัญหารอยย่นได้ คือการใช้ Blank holder ดังแสดงในรูปที่ 2 กดลงบน Blank sheet ซึ่งในการคำนวณหา Blank holder pressure นั้น สามารถใช้แทนแรงดัน ด้วย  $\rho_{BH}$  ส่วนพื้นที่ในการรับแรง ใช้แทนด้วย  $A_{BH}$  และสามารถคำนวณหาแรงที่กระทำที่ Blank holder ได้จาก

$$F_{BH} = A_{BH} \rho_{BH} \quad (4)$$

การคำนวณหา Hardening curve เพื่อกำหนด Stress & Strain เพื่อใช้เป็นตัวอ้างอิงในการเทียบผลการวิเคราะห์นั้น โปรแกรม PAM-STAMP™ ได้ใช้วิธีของ "Swift-Krupkowsky" และ "Power Law" ซึ่งสามารถหาได้จาก Krupkowsky Hardening

$$\sigma(\varepsilon) = k(\varepsilon + \varepsilon_0)^n \quad (5)$$

เมื่อ  $\varepsilon$  = Effective plastic strain,  $k$  = Hardening coefficient  
 $\varepsilon_0$  = Offset strain,  $n$  = Hardening exponent  
 และ Power Law สามารถหาได้จาก

$$\sigma(\varepsilon) = a + b\varepsilon_p^n \quad (6)$$

เมื่อ  $\varepsilon_p$  = Effective plastic strain,  $a$  = Initial yield stress  
 $b$  = Multiplier,  $n$  = Hardening exponent

### 3. ขั้นตอนในการทดลอง

1. ตรวจสอบ CAD data ซึ่งเป็น Surface Modeling ที่ส่งมาจากบริษัทและทำการปรับปรุงคุณภาพของพื้นผิว (Surface) ให้เหมาะสมเพื่อเตรียมสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดล (FEM)
2. ศึกษากรรมวิธีและเงื่อนไขการขึ้นรูปในการผลิตปัจจุบัน
3. สร้างไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดลของ Punch, Die, Holder และ Blank Sheet
4. ทดสอบการรับภาระของแผ่นเหล็กที่ใช้ผลิตชิ้นส่วน เพื่อนำมาใช้สร้าง Forming Limit Diagram (FLD)[5,6] และกำหนดค่าตัวแปรของ Lankford [7] และ Hill [8]
5. จำลองการขึ้นรูปโลหะบนเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยกำหนด Die Clearance ให้มีขนาดเท่ากับความหนาของแผ่น Blank เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความ

หนาของชิ้นงานและรอยย่นที่อาจเกิดขึ้นหลังจากขึ้นรูปแล้ว รวมทั้งพิจารณาบริเวณวิกฤติที่อาจทำให้เกิดการฉีกขาดเนื่องจากมีความเครียดหลัก (Major Strain) และความเครียดรอง (Minor Strain) สูงสุด

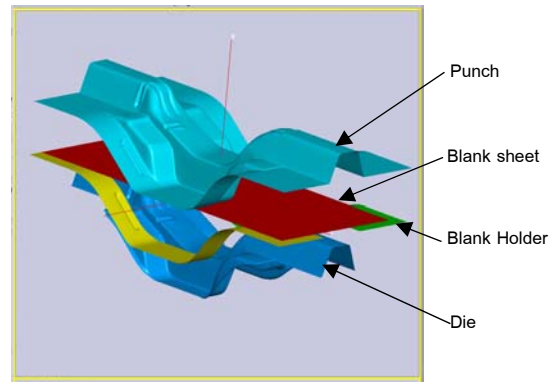
6. ทดลองขึ้นรูปจริงโดยวิธีพิมพ์วงกลมลงในแผ่น Blank ก่อนนำไปทำการขึ้นรูป เพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### 3.1 การจำลองการขึ้นรูปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

PART NAME : C/MBR,DA/DB LWR  
 PART No : 65131-SELA-T000-50  
 MATERIAL : JSC 440W-45/45, t = 1.8 mm  
 PRESS DIRECTION : - Z

กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

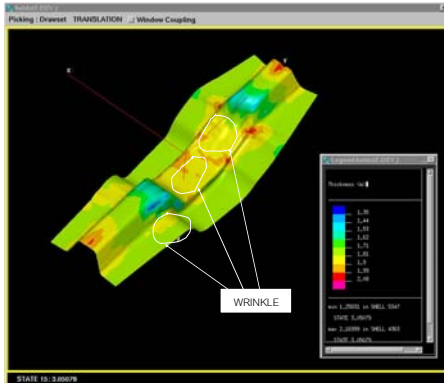
- Blank sheet
- Punch



รูปที่ 3 แสดงการเตรียม CAD Data เพื่อทำการทดลอง

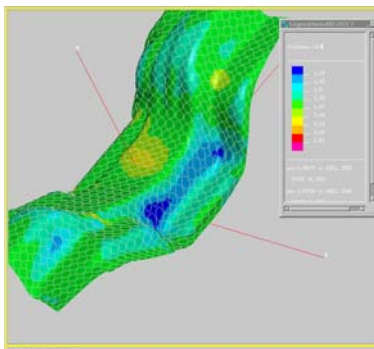
### 3.2 ผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยโปรแกรม

จากรูปที่ 3 เมื่อได้รับข้อมูลจากการเขียนแบบชิ้นงาน 3 มิติแล้ว ต้องทำการปรับผิวชิ้นงาน (Surface) ก่อน และกำหนด Tool ที่ใช้ประกอบในการขึ้นรูปได้แก่ Punch, Die, Blank sheet และ Blank holder ต่อจากนั้นนำไปกำหนดเอลิเมนต์ และ Boundary Condition ตัวอย่างอื่น ๆ เช่น คุณสมบัติของวัสดุ และการทำงานของเครื่อง เป็นต้น



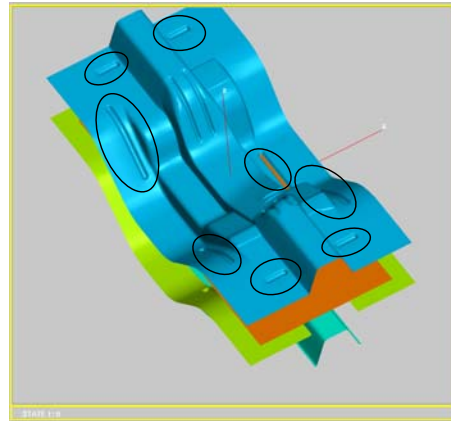
รูปที่ 4 ผลที่ได้จากการจำลองการขึ้นรูป

หลังจากโปรแกรมคำนวณแล้ว จะได้ผลการจำลอง (Simulated) การขึ้นรูปชิ้นงาน ในรูปที่ 4 พบว่ามีบริเวณที่เป็นรอยย่น (Wrinkle) อยู่ 3 จุด ความหนาสูงสุดซึ่งเกิดจากเนื้อวัสดุมากองมากที่จุดนี้จากการวิเคราะห์ คือ 1.9 มม. และจุดที่บางที่สุดอยู่ที่บริเวณสันโค้งแนวกลางของชิ้นงาน ซึ่งเกิดจากการเนื้อวัสดุถูกกดและยืดออกคือ 1.35 มม. ในขณะที่ชิ้นงานมีความหนา 1.8 มม.



รูปที่ 5 แสดงการยืดตัวของ Blank Sheet พร้อม Circular Grid

จากรูปที่ 5 เป็นการแสดงกริดแบบวงกลม (Circular Grid) ที่กำหนดลงบนชิ้นงานเพื่อดูลักษณะการยืดตัว (Strain) โดยได้ทำการตีกริดแบบวงกลมบนชิ้นงานจริง เทียบกับการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ เมื่อพิจารณาจากรูปทรงของวงกลม บริเวณที่ทำให้ทรงกลมถูกดึงไปบ้างเล็กน้อย แต่ไม่ถึงกับเสียรูปทรง ซึ่งจะอยู่ที่บริเวณทางด้านข้าง โดยเป็นจุดบางที่สุดของชิ้นงาน คือ 1.44 มม. และที่บริเวณกลางชิ้นงานมีความหนามากที่สุด เนื่องจากเนื้อของโลหะมากองที่บริเวณนี้ เพราะโดนบีบให้เลื้อนออกมาก่อน มีความหนาที่จุดนี้ 2.24 มม. กริดแบบวงกลมจะถูกอัด แต่ก็ไม่เสียรูปทรง ค่า Membrane Hill Stress สูงสุดอยู่ที่ 0.583 Pa ซึ่งเมื่อเทียบกับคุณสมบัติของวัสดุ ในตารางที่ 1 ค่า Tensile stress ยังอยู่ในพิสัย



รูปที่ 6 แสดงตำแหน่งที่ใส่ Draw-bead

หลังจากนั้นทำการแก้ไขชิ้นงานใหม่เพื่อแก้ปัญหารอยย่นที่เนื้อวัสดุไหลมารวมกันมาก หรือเกิดการไหลได้ง่าย ทำให้เกิดรอยย่น โดยการใส่ Draw-bead เพิ่มเข้าไป จากการจำลองด้วยโปรแกรมและปรับเพิ่ม Draw-bead ให้มีความเหมาะสมมากที่สุด ต้องใช้ Draw-bead ทั้งหมดจำนวน 8 จุด ดังแสดงในรูปที่ 6

### 3.3 ผลการขึ้นรูปจริงด้วยเครื่องเพรส

จากการทดลองด้วยโปรแกรม Pam-Stamp จนได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดแล้วนำเงื่อนไขดังกล่าวไปขึ้นรูปจริงบนเครื่องเพรส ขนาด 100 ตัน ใช้ Blank sheet ขนาด 360x730 มม. Die Cushion Stroke 250 มม. ตั้งค่า Cushion ที่ 65 และ 45 ตามลำดับ เงื่อนไขอื่น ๆ ปรับตาม Boundary condition ผลที่ได้ชิ้นงานจะเกิดรอยย่นที่บริเวณตรงกลางชิ้นงาน และที่บริเวณทางด้านข้างเนื้อโลหะถูกดึงไปบ้าง แต่บริเวณอื่น ๆ ของชิ้นงานค่อนข้างสมบูรณ์ไม่พบรอยย่น หรือการฉีกขาด ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป

### 4. สรุปผลการทดลอง

การนำเอาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เข้ามาช่วยในการจำลองการขึ้นรูปแท่นรองเครื่องยนต์ ด้วยการใช่วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบแม่พิมพ์โลหะ และกำหนดขั้นตอน

ในการขึ้นรูปได้เป็นอย่างดี ซึ่งเดิมเป็นการขึ้นรูปแบบ 2 ชั้นตอน และหลังจากใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการขึ้นรูปแล้ว สามารถลดขั้นตอนการทำงานเหลือเพียงขั้นตอนเดียว และสามารถกำหนดตำแหน่ง Draw-bead เพิ่มเข้าไป เพื่อบังคับการไหลตัวของเนื้อโลหะได้ตรงกับงานจริง ส่วนความหนาของชิ้นงานตามข้อกำหนดของคุณสมบัติของวัสดุในการใช้งานของบริษัทฯ ไม่ควรมีน้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ของความหนาถึงจะใช้งานได้ คือต้องมากกว่า 1.26 มม. ซึ่งผลของการวิเคราะห์นั้นอยู่ระหว่าง 1.4 - 2.6 มม. ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานจริงแล้ว ถือว่าใช้งานได้โดยสอดคล้องกับการขึ้นรูปจริงด้วย และรอยย่นที่เกิดขึ้นลดเหลือเพียง 2 จุด เท่านั้น

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันยานยนต์ที่ให้ทุนอุดหนุนในการวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณ บริษัท ซัมมิทโอโตบอดี้ ออนดัสตรี จำกัด ที่ให้ความร่วมมือในการให้ข้อมูล ใช้เครื่องมือทดสอบชิ้นงาน ร่วมประชุมในการปรับแก้แม่พิมพ์ และสร้างแม่พิมพ์ขึ้นมาใหม่ เพื่อใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณ คุณเกษม ศิลสังวรณ บริษัทไทเทคดาต้าวิชั่นส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้คำแนะนำ ใช้อุปกรณ์ ตลอดจน ใช้เครื่องมือในการทดสอบ โปรแกรมการวิเคราะห์ และอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานขอข้อมูลจากตัวแทนต่างประเทศให้เป็นอย่างดี

## เอกสารอ้างอิง

1. Kawka, M., Olejnik, L., Rosochowski, A., Sunaga, H., and Makinouchi, A. Simulation of Wrinkling in Sheet Metal Forming, *J. Mat. Proc. Tech.* 109 (2001) 283-289.
2. Sung-Tae, K., Chun-Dal, P., and Jang-Hee, L. Application of CAE in Designing Press Die for Automotive Body, *PUCA'98* (1998) 441-447.
3. Kurt Lange, Handbook of Metal forming, R. R. Donnelley & Sons Company, 1975.
4. JIS G 3135, Sheets with Improved Formability for Automobile Structural Users, (1986) 216-230.
5. Keeler, S.P., Backofen, W.A., *Trans. ASM* 56(1963) 25.
6. Goodwin, G. M. *La Metallurgia Italiana* (1968) 767.
7. Hosford, W.F., Caddell, R. M. Metal Forming Mechanics and Metallurgy, *Prentice-Hall.*, 1983.
8. R. Hill, The Mathematical Theory of Plasticity, *Oxford Press*, 1950.