

## การออกแบบแม่พิมพ์และการวิเคราะห์กระบวนการดึงขึ้นรูปลึก ในการผลิตเสื้อใส่กรองอากาศด้วย CAD/CAE

### Die Design and Deep Drawing Process Analysis of Sheet Metal Filter Housing Production by CAD/CAE

กิตติภูมิ รัตนจันทร์<sup>1</sup> สถาพร ชาทาคม<sup>2</sup>, และ สุรังสี เดชเจริญ<sup>3</sup>

#### บทคัดย่อ

การวิจัยการขึ้นรูปหม้อกรองอากาศชนิดนี้ เป็นการวิเคราะห์ปัญหาการดึงขึ้นรูปลึก (deep drawing) ขึ้นงานจากโลหะแผ่น เป็นชิ้นงานรูปเปลือก (shell) ด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อลดขั้นตอน เวลาและค่าใช้จ่ายในการออกแบบ การผลิต และการทดลองแม่พิมพ์ โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม UNIGRAPHICS และใช้โปรแกรม PAM STAMP เพื่อทำการวิเคราะห์หัตถ์แปรของกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก โดยการปรับค่ารัศมีตาย และแรงกดแผ่นแบลงก์ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เมื่อกำหนดรัศมีขอบพื้น 6 มม. รัศมีบ่าตาย 4 มม. และใช้แรงกดแผ่นแบลงก์ 15 ตัน ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าความเครียดสะสมบริเวณกันหม้อกรองเกิดขึ้นน้อยมากและไม่เกิดการย่นที่ปีกของหม้อกรองหลังจากการขึ้นรูป นอกจากนี้ยังสามารถผันแปรค่าตัวแปรเพื่อพิจารณาผลลัพธ์ หรือคุณภาพชิ้นงานได้อย่างสะดวก และง่ายต่อการวิเคราะห์อีกด้วย

คำสำคัญ : ดึงขึ้นรูปลึก, การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์, CAD, CAE, การขึ้นรูปโลหะแผ่น

#### Abstract

This research is the problem solving and analysis for produce the filter housing from sheet metal to shell product by deep drawing process and using computer program to reduced time and cost in die design, die production and try out of die. These can be done by construct the 2D model using CAD program-UNIGRAPHICS and analyzed using CAE program-PAM STAMP. By this program the parameters the die radius and the blank holder force are adjusted to get the best result. The best result is show by lower strain at the bottom corner radius and lower wrinkle at the flange of the filter housing by die radius 4 mm. punch radius 6 mm. and blank holder force 15 ton. The use of CAD-CAE program is convenient to adjusting another parameter to show the effect of process or the quality of the product.

**Keywords :** Deep drawing, Finite Element Analysis CAD, CAE, Sheet Metal Forming

<sup>1</sup> อาจารย์, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>3</sup> อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

## 1. บทนำ

การดึงขึ้นรูปลึกขึ้นงานโลหะแผ่นเป็นกระบวนการผลิตที่มีความสลับซับซ้อนสูง เนื่องจากการทำงานกับสมบัติทางกลของวัสดุโดยตรง ซึ่งในการออกแบบแม่พิมพ์จะต้องใช้ประสบการณ์ และความชำนาญของผู้ออกแบบเป็นหลัก รวมถึงใช้วิธีการลองผิดลองถูกในการปรับแก้ไขแม่พิมพ์ทำให้ต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายสูง

การวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่ การลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการออกแบบกระบวนการผลิตและแม่พิมพ์ขึ้นรูป โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ การสร้างโมเดลจะใช้โปรแกรม UNIGRAPHICS และใช้โปรแกรม PAM STAMP ในการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ เช่น รัศมีบ่าตาย รัศมีขอบพื้นซ์และแรงกดแผ่นแบล็ก การกำหนดตัวแปรตั้งต้นจะเริ่มจากการคำนวณด้วยทฤษฎีการดึงขึ้นรูป แล้วทำการผันแปรตัวแปรต่างๆ เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแม่พิมพ์เพื่อผลิตจริง

จากผลการวิจัยพบว่าผลการปรับแก้ตัวแปรในการดึงขึ้นรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์สามารถวิเคราะห์ผลได้สอดคล้องกับการคำนวณ และแสดงผลเป็นแบบจำลองซึ่งช่วยอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์และแปรผลให้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นการลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการออกแบบแม่พิมพ์ได้

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การดึงขึ้นรูปลึกเป็นการผลิตชิ้นงานรูปเปลือก จากโลหะแผ่น โดยใช้พันธึงหรือลากโลหะแผ่นให้ไหลเข้าสู่ช่องเปิดตาย โลหะแผ่นจะเกิดความเครียดอัดและความเครียดดึงในแผ่นสูงมาก เพื่อที่จะเปลี่ยนรูปให้เป็นรูปร่างตามต้องการ [1-2]

พฤติกรรมของวัสดุจะกำหนดสมบัติในช่วงยืดหยุ่นเป็นไอโซโทรปิก (isotropic) เนื่องจากคุณสมบัติในช่วงนี้ไม่ส่งผลต่อกระบวนการดึงขึ้นรูป และในช่วงการเสียรูปถาวรเป็นออร์ทอโทรปิก (orthotropic) ตามเกณฑ์ของฮิลล์ (Hill) [3] และแลงฟอร์ด (Lankford) [4] เนื่องจากสมบัติของโลหะแผ่นในช่วงนี้มีสมบัติขึ้นอยู่กับทิศทางการรีด (2 มิติ) ไม่ขึ้นกับความหนาของแผ่นโลหะ ส่วนสมบัติของโลหะแผ่นใช้ตามเกณฑ์ของฮิลล์ [3] ร่วมกับพฤติกรรมความเครียดแข็งของฮอลโลมอน (Hollomon) [4] ซึ่งเมื่อโลหะแผ่นเกิดความเครียดจะทำให้ค่าความแข็งของโลหะแผ่นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลถึงความสามารถในการยืดตัวของโลหะแผ่นซึ่งจะลดลงตามค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น และนำค่าความเป็นแอนไอโซโทรปิก (anisotropic) เพื่อพิจารณาสมบัติทางกลในทิศทางต่างๆ ของแผ่นโลหะที่ส่งผลต่อการยืด-หดตัวของแผ่นโลหะในขณะดึงขึ้นรูป เข้ามาคำนวณร่วมด้วย

สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพของชิ้นงานจะอาศัยเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (forming limit curve / FLC) ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการทดลองสำหรับเหล็กกล้าที่มีความหนาไม่เกิน 5 มม. และมีค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดแข็งไม่เกิน 0.21 ที่เสนอโดย คีเลอร์ (Keeler) [5] และกู๊ดวิน (Goodwin) [6] โดยเส้นโค้งนี้จะแบ่งส่วนของคุณภาพชิ้นงานตามความหนาหลังจากการขึ้นรูปเป็นช่วงปลอดภัย ช่วงผนังเกิดการบางลง ช่วงเสี่ยงต่อการฉีกขาด และช่วงการฉีกขาด

## 3. วิธีการดำเนินการ (Experimental Procedure)

### 3.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับ

#### 3.1.1 กรรมวิธีการขึ้นรูป

- การคำนวณ
- การออกแบบแม่พิมพ์
- ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงาน

#### 3.1.2 การวัดขนาดจุดสำคัญต่างๆ ของชิ้นงาน

#### 3.1.3 ฟังก์ชันและสภาพใช้งานของชิ้นงาน

#### 3.1.4 วัสดุที่ใช้

### 3.2 การสร้างแบบจำลองชิ้นงานและการกำหนดตัวแปร

#### 3.2.1 วัดขนาดชิ้นงาน (ในรูปที่ 1 และ รูปที่ 2)

#### 3.2.2 สร้างแบบจำลอง 3 มิติของชิ้นงานด้วย โปรแกรม UNIGRAPHICS

#### 3.2.3 สร้างโมเดลจากขนาดที่วัดได้

#### 3.2.4 คำนวณหาตัวแปรเริ่มต้นที่เหมาะสม เช่นรัศมีบ่าตาย รัศมีขอบพื้นซ์ และแรงกดแผ่นแบล็ก

#### 3.2.5 ทำการวิเคราะห์ผลเบื้องต้นจากตัวแปรต่างๆที่คำนวณไว้ด้วย โปรแกรม PAM STAMP เพื่อตัดตัวแปรที่ไม่มีผลกระทบหรือมีผลกระทบน้อยออกไป

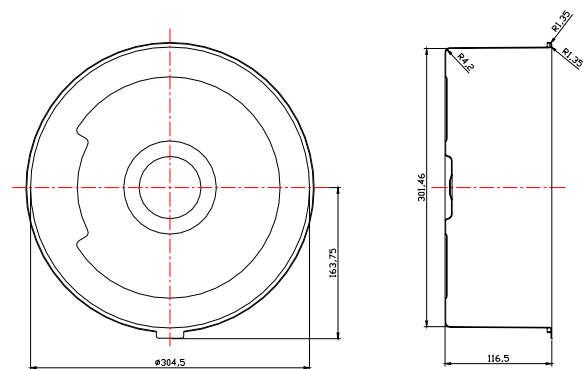
#### 3.2.6 ทำการวิเคราะห์ตัวแปรโดยละเอียดซ้ำอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 1 ชิ้นงานตัวอย่าง

### 3.3 การคำนวณด้วยทฤษฎีการขึ้นรูป

ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ตัวแปรด้วย PAM STAMP จะทำการคำนวณค่าของตัวแปรต่างๆที่เหมาะสมโดยยึดตามหลักทฤษฎีการขึ้นรูป โดยเริ่มจากการหาขนาดแผ่นแบล็ก ใช้วิธีการทางกราฟิกซึ่งสามารถหาขนาดแผ่นแบล็กได้ดังนี้ [1]



รูปที่ 2 แบบชิ้นงานที่ทำการวัด

$$d_{Blank} = \sqrt{d_3^2 + 4d_2(0.57r + h) - 0.56r^2} \quad (1)$$

หาแรงดึงขึ้นรูปสูงสุดจากสมการของ Siebel และ Beisswanger [1]

$$F_{Draw,max} = \pi d_m s_0 \left[ 1.1 \frac{\sigma_{f,m,l}}{\eta_{def}} \left( \ln \frac{d_0}{d_1} - 0.25 \right) \right] \quad (2)$$

สามารถคำนวณหาแรงดึงขึ้นรูปสูงสุดได้เท่ากับ 13 ตัน

คำนวณหาขนาดแรงเหวี่ยงแผ่นแบลงก์จากสมการแรงเหวี่ยงแผ่นแบลงก์ของ Siebel และ Beisswanger [1]

$$F_{BH} = p_{BH} A_{BH} \quad (3)$$

$$\text{โดยที่ } p_{BH} = 10^{-3} c \left[ (\beta - 1)^3 + \frac{0.005d_0}{s_0} \right] S_U$$

สามารถคำนวณหาแรงเหวี่ยงแผ่นแบลงก์ได้เท่ากับ 30 ตัน

คำนวณหาขนาดแรงฉีกขาดของแผ่นแบลงก์จากสมการแรงฉีกขาดของ Siebel และ Beisswanger [1]

$$F_{cr} = \pi d_m s_0 S_U \quad (4)$$

สามารถคำนวณหาแรงฉีกขาดของแผ่นแบลงก์ได้เท่ากับ 21 ตัน

การกำหนดขนาดรัศมีบ่าตาย และรัศมีขอบพันจากความสัมพันธ์ของความหนาแผ่นแบลงก์ดังนี้ [1]

$$r_D = (5 - 10) s_0 = 3.5 - 7 \text{ มม.}$$

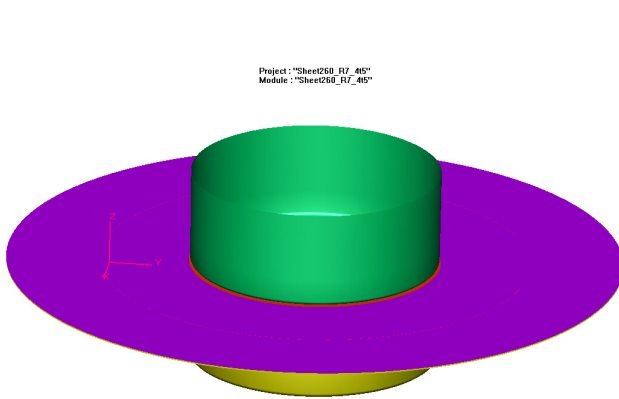
$$r_P = (3 - 5) r_D = 10.5 - 35 \text{ มม.}$$

### 3.4 การวิเคราะห์ตัวแปรด้วย PAM STAMP

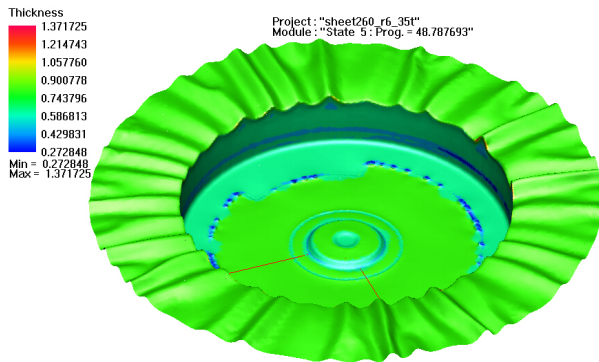
ในการวิเคราะห์ตัวแปรเบื้องต้นได้นำแบบจำลองชิ้นงานจากโปรแกรม UNIGRAPHICS มาใช้โดยเริ่มจากการ Import data เข้าไปในโปรแกรม PAM STAMP ดังแสดงในรูปที่ 3 กำหนดค่ารัศมีบ่าตายตามที่แสดงในตารางที่ 1 โดยเริ่มจากรัศมี 4 มม. รัศมีขอบพัน 6 มม. เนื่องจากเป็นรัศมีของงานที่ต้องการ วัสดุเป็นเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ที่มีค่าสมบัติทางกลดังต่อไปนี้ ค่า Anisotropy เป็นแบบ Orthotropic ที่มี  $r_0=1.09$   $r_{45}=0.79$   $r_{90}=1.29$  ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น  $E = 205 \text{ MPa}$  ค่าสัดส่วนปัวซอง  $\nu = 0.33$  ค่าความหนาแน่นของเหล็ก  $\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$  และค่าดัชนีความเครียดแข็ง  $n=0.232311$  และแรงกดแผ่นแบลงก์เริ่มต้นที่ 4 ตัน ซึ่งผลการวิเคราะห์ครั้งแรกแสดงในตารางที่ 1, รูปที่ 4, รูปที่ 5 และรูปที่ 6

ตารางที่ 1 การปรับตัวแปรเบื้องต้น

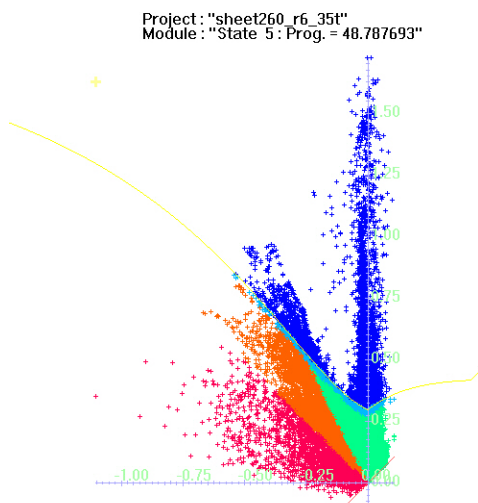
| ครั้งที่ | การปรับตัวแปรในการวิเคราะห์ (ช่วงที่ 1) |                                |                |                 |                                                                          |
|----------|-----------------------------------------|--------------------------------|----------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------|
|          | ตัวแปร                                  |                                |                |                 |                                                                          |
|          | รัศมีบ่าตาย                             | แรงกดแผ่นแบลงก์                | ขนาดแผ่นแบลงก์ | วัสดุแผ่นแบลงก์ | ผลลัพธ์ที่ได้                                                            |
| 1        | R=4 มม.                                 | F <sub>Holder</sub> = 4 tons   | 520            | SPCC            | มีการฉีกขาดที่ก้นชิ้นงาน                                                 |
| 2        | R=6 มม.                                 | F <sub>Holder</sub> = 3.5 tons | 520            | SPCC            | มีการย่นที่ปีกชิ้นงานอย่างรุนแรง                                         |
| 3        | R=6 มม.                                 | F <sub>Holder</sub> = 4 tons   | 520            | SPCC            | มีแนวโน้มที่จะเกิดการย่นที่ปีกชิ้นงาน                                    |
| 4        | R=6 มม.                                 | F <sub>Holder</sub> = 5 tons   | 520            | SPCC            | มีการฉีกขาดที่ก้นชิ้นงาน                                                 |
| 5        | R=8 มม.                                 | F <sub>Holder</sub> = 6 tons   | 520            | SPCC            | มีการเกิดการย่นที่ปีกชิ้นงานรุนแรง                                       |
| 6        | R=8 มม.                                 | F <sub>Holder</sub> = 10 tons  | 520            | SPCC            | มีการเกิดการย่นที่ปีกชิ้นงานรุนแรง                                       |
| 7        | R=8 มม.                                 | F <sub>Holder</sub> = 15 tons  | 520            | SPCC            | มีการเกิดการย่นที่ปีกชิ้นงาน                                             |
| 8        | R=8 มม.                                 | F <sub>Holder</sub> = 20 tons  | 520            | SPCC            | มีการเกิดการย่นที่ปีกชิ้นงาน                                             |
| 9        | R=8 มม.                                 | F <sub>Holder</sub> = 25 tons  | 520            | SPCC            | มีการเกิดการย่นที่ปีกชิ้นงาน และมีแนวโน้มที่จะเกิดการฉีกขาดที่ก้นชิ้นงาน |
| 10       | R=8 มม.                                 | F <sub>Holder</sub> = 30 tons  | 520            | SPCC            | มีแนวโน้มที่จะเกิดการย่นที่ปีกชิ้นงาน และมีการฉีกขาดที่ก้นชิ้นงาน        |



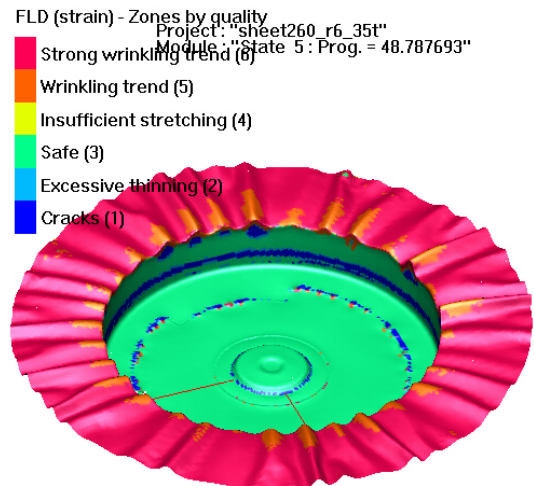
รูปที่ 3 แบบจำลองชิ้นงานและแม่พิมพ์ในโปรแกรม PAM STAMP



รูปที่ 4 ความหนาของชิ้นงานและรอยย่นที่เกิดขึ้น



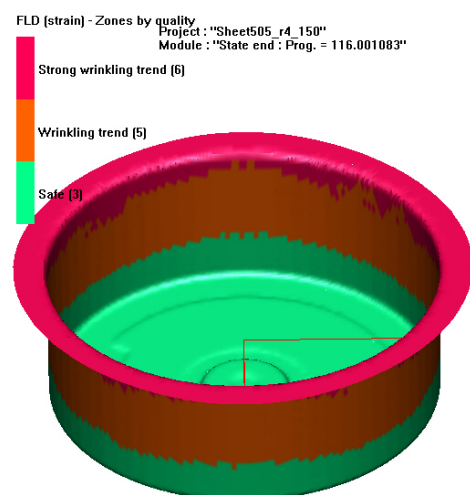
รูปที่ 5 ขีดจำกัดการดึงขึ้นรูป



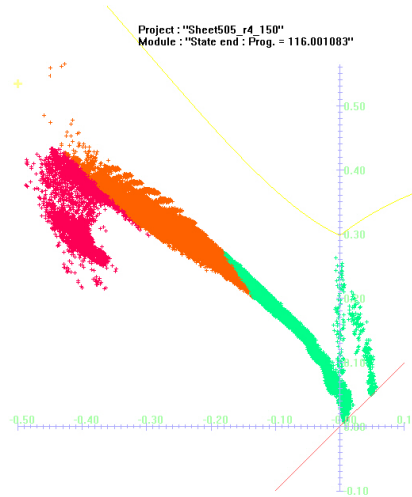
รูปที่ 6 คุณภาพของชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์ตัวแปรเบื้องต้นพบว่ารัศมีบ่าตายที่เหมาะสมเท่ากับ 4 มม. รัศมีขอบพ้นซ์เท่ากับ 6 มม. เนื่องจากในการทดลองปรับแม่พิมพ์จริงจะยอมให้ชิ้นงานขาดมากกว่ายอม เนื่องจากปรับแก้ได้ง่ายกว่าและวัสดุชิ้นงานควรจะเปลี่ยนจาก SPCC เป็น SPCE เนื่องจากมีความสามารถในการยืดตัวได้สูงกว่า

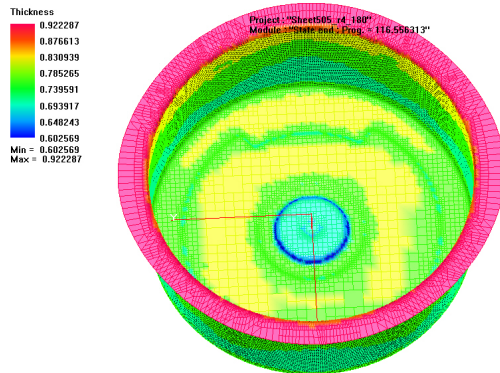
ในการวิเคราะห์ตัวแปรโดยละเอียดจะกำหนดกำหนดค่ารัศมีบ่าตายตามที่แสดงในตารางที่ 2 โดยเริ่มจากรัศมี 4 มม. รัศมีขอบพ้นซ์ 6 มม. วัสดุเป็นเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCE ที่มีค่าสมบัติทางกลดังต่อไปนี้ ค่า anisotropy เป็นแบบ orthotropic ที่มี  $r_{0^\circ}=1.09$   $r_{45^\circ}=0.79$   $r_{90^\circ}=1.29$  ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น  $E = 205 \text{ MPa}$  ค่าสัดส่วนปัวซอง  $\nu = 0.33$  ค่าความหนาแน่นของเหล็ก  $\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$  และค่าดัชนีความเครียดแข็ง  $n=0.266767$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นแบลงก์ 505 มม. และแรงกดแผ่นแบลงก์เริ่มต้นที่ 4 ตัน ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 7, รูปที่ 8 และ รูปที่ 9



รูปที่ 7 ความหนาของชิ้นงานและรอยย่นที่เกิดขึ้น



รูปที่ 8 ซิตจำกัดการดัดขึ้นรูป



รูปที่ 9 คุณภาพของชิ้นงาน

ตารางที่ 2 การปรับตัวแปรอย่างละเอียด

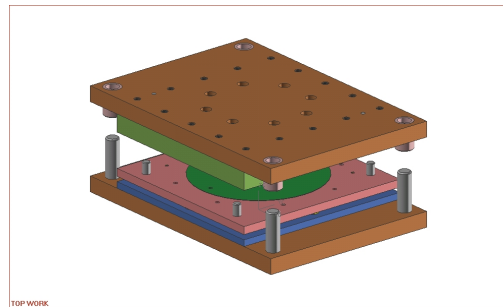
| ครั้งที่ | การปรับตัวแปรในการวิเคราะห์ (ช่วงที่ 2) |                                       |                        |                         |                                                |
|----------|-----------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------------------------|
|          | ตัวแปร                                  |                                       |                        |                         |                                                |
|          | รัศมี<br>ด้าย                           | แรงกด<br>แผ่น<br>แบลงก์               | ขนาด<br>แผ่น<br>แบลงก์ | วัสดุ<br>แผ่น<br>แบลงก์ | ผลลัพธ์ที่ได้                                  |
| 1        | R=4<br>มม.                              | $F_{\text{Holder}} = 10 \text{ tons}$ | 505                    | SPCE                    | มีรอยย่นที่ปีก<br>และที่ผนัง                   |
| 2        | R=4<br>มม.                              | $F_{\text{Holder}} = 15 \text{ tons}$ | 505                    | SPCE                    | มีรอยย่นที่ปีก<br>เล็กน้อย                     |
| 3        | R=4<br>มม.                              | $F_{\text{Holder}} = 18 \text{ tons}$ | 505                    | SPCE                    | มีรอยย่นที่ปีก<br>และมีแนวโน้มน<br>จะฉีกที่ก้น |
| 4        | R=4<br>มม.                              | $F_{\text{Holder}} = 20 \text{ tons}$ | 505                    | SPCE                    | มีรอยย่นที่ปีก<br>และที่ก้นมีการ<br>ฉีกขาด     |

### 3.5 ออกแบบแม่พิมพ์ด้วยโปรแกรม UNIGRAPHICS

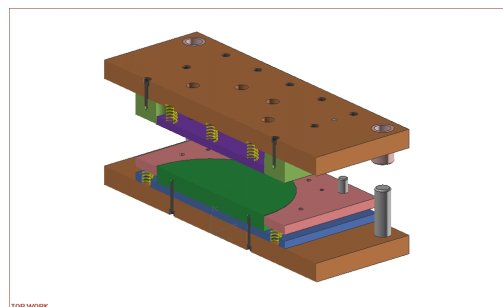
แบ่งกระบวนการขึ้นรูปออกเป็น 3 ส่วนคือ การตัดแผ่น ,การดึงขึ้นรูปลึก, การม้วนขอบและตัดแต่งขอบ

การคำนวณเกี่ยวกับขนาดแม่พิมพ์เบื้องต้น เช่นแรงกดสปริง, ความหนาแผ่นด้าย, ขนาดแผ่นฐานรอง

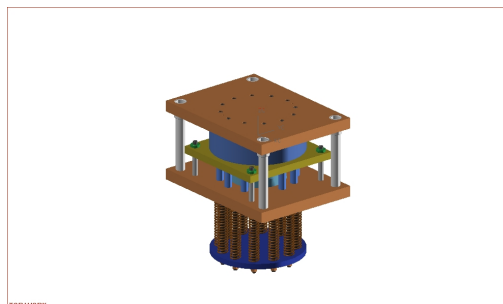
หลังจากทำการวิเคราะห์หัวแปรต่างๆตามขั้นตอนที่ 3.4 แล้วขั้นตอนต่อไปเป็นการออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปโดยจะใช้โปรแกรม UNIGRAPHICS ซึ่งเป็นการทำงานในสามมิติเพื่อช่วยให้การออกแบบทำงานได้สะดวกขึ้นดังแสดงในรูปที่ 10 ถึงรูปที่ 15



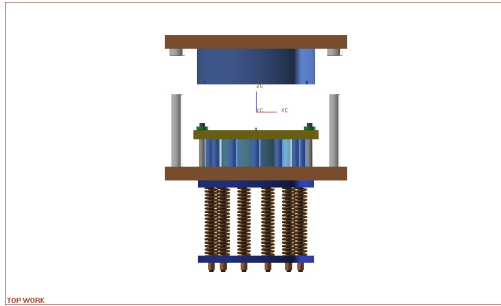
รูปที่ 10 ลักษณะของแม่พิมพ์ตัดแผ่นแบลงก์



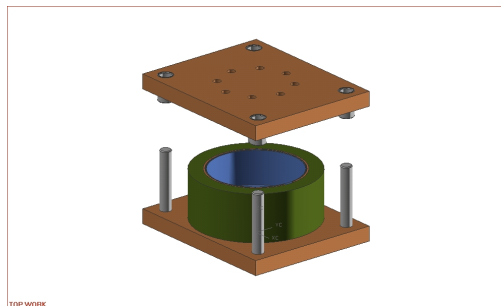
รูปที่ 11 ภาพตัดภายในของแม่พิมพ์ตัดแผ่นแบลงก์



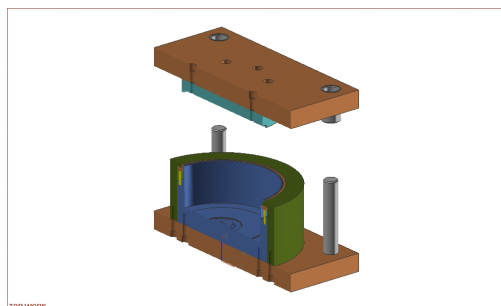
รูปที่ 12 ลักษณะแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูป



รูปที่ 13 ด้านหน้าของแม่พิมพ์ตึงขึ้นรูป



รูปที่ 14 ลักษณะของแม่พิมพ์มันและตัดแต่งขอบ



รูปที่ 15 ภาพตัดของแม่พิมพ์มันและตัดแต่งขอบ

#### 4. ผลการทดลอง

4.1 ขนาดแผ่นแบลงก์ที่เหมาะสมได้จากการคำนวณ มีค่าสอดคล้องกับที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ คือมีขนาด 505 มม. และจากการวิเคราะห์พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นแบลงก์ที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการย่นและฉีกขาดที่ปีกชิ้นงานได้มากกว่าแผ่นแบลงก์ที่มีขนาดเล็ก

4.2 การกำหนดวัสดุขึ้นอยู่กับความลึกในการดึงขึ้นรูป วัสดุที่มีค่าดัชนีความเครียดเชิงสูงเช่น SPCE จะสามารถขึ้นรูปได้ดีกว่าวัสดุที่มีค่าดัชนีความเครียดเชิงต่ำเช่น SPCC

4.3 ขนาดรัศมีด้ายที่เหมาะสมมีขนาด 4 มม. ซึ่งถ้ารัศมีด้ายยิ่งโตยิ่งมีแนวโน้มจะเกิดการย่นได้สูงเนื่องจากแผ่นวัสดุมีการไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้ดีกว่า

4.4 ขนาดแรงกดแผ่นแบลงก์ขึ้นอยู่กับรัศมีด้าย และวัสดุแผ่นแบลงก์ แรงกดที่เหมาะสมในการทดลองมีค่าประมาณ 15 ตัน

#### 5. สรุป (Conclusions)

จากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ผลลัพธ์จากการคำนวณทางทฤษฎีการขึ้นรูป จะสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เช่นขนาดรัศมีด้าย และรัศมีขอบพื้นที่ยกเว้นค่าแรงกดแผ่นแบลงก์ที่ผลการคำนวณจะมีขนาดมากกว่าประมาณ 200%

5.2 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ในการขึ้นรูปสามารถพิจารณาได้จากความหนาของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลง ร่วมกับ แผนภูมิขีดจำกัดการดึงขึ้นรูป (FLD curve, forming limit diagram) ซึ่งแสดงให้เห็นสภาพของชิ้นงานจากการขึ้นรูป บริเวณที่เกิดการบางลงของผนัง บริเวณที่เกิดการย่น ทำให้สามารถปรับแก้ไขแม่พิมพ์ได้ง่าย

5.3 การใช้โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์เข้ามาช่วยในการออกแบบสามารถช่วยลดเวลาในการออกแบบแม่พิมพ์ลงได้ถึง 60-75% เนื่องจากสามารถปรับแก้ตัวแปรต่างๆได้สะดวกและสามารถจำลองผลการขึ้นรูปได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น

5.4 สามารถช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลองสร้างแม่พิมพ์สำหรับการสร้างแม่พิมพ์ตึงขึ้นรูปจะต้องมีการเผื่อค่าใช้จ่ายในการทดลองและปรับแก้แม่พิมพ์ไว้ประมาณ 2-3 เท่าของราคาแม่พิมพ์ และต้องใช้เวลาในการทดลองแม่พิมพ์อย่างน้อย 15-20 วัน

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันยานยนต์ กระทรวงอุตสาหกรรม ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการวิจัยครั้งนี้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Kurt Lange, Handbook of metal forming, McGraw Hill, 1985.
- [2] Hosford, W.F., Caddell, R. M. Metal Forming Mechanics and Metallurgy, Prentice-Hall.,1983.
- [3] R. Hill, The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford Press, 1950.
- [4] คู่มือการใช้งานโปรแกรม PAM STAMP.
- [5] Keeler, S.P., Backofen, W.A., Trans. ASM 56, 1963.
- [6] Goodwin, G. M. La, Metallurgia Italiana, 1968.
- [7] Kobayashi Shiro, Soo-Ik Oh, Taylan Altan Metal Forming and the Finite Element Method, Oxford University Press, Inc. 1989.
- [8] 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.
- [9] Kawka, M., Olejnik, L., Rosochowski, A., Sunaga, H., and Makinouchi, A., Simulation of Wrinkling in Sheet Metal Forming, J. Mat. Proc. Tech. 109, 2001.