



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเปรียบเทียบอิทธิพลของวัสดุครอว์บิสในงานลากขึ้นรูปโลหะโดยวิธีการวิเคราะห์  
ไฟไนต์เอลิเมนต์

**A Comparison of the Influence of Drawbead Material in Deep Drawing by Using  
Finite Element Analysis**

ดร.ศิริชัย ต่อสกุล

หัวหน้าโครงการ

ผศ.กฤษณาท ทองศรี

ผู้วิจัยร่วม

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

งบประมาณประจำปี พ.ศ. 2554

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเปรียบเทียบอิทธิพลของวัสดุครอว์ปิสในงานลากขึ้นรูปโลหะโดยวิธีการวิเคราะห์  
ไฟไนต์เอลิเมนต์

**A Comparison of the Influence of Drawbead Material in Deep Drawing by Using  
Finite Element Analysis**

โดย

ดร.ศิริชัย ต่อสกุล

ผศ.กฤษฏา ทองศรี

หัวหน้าโครงการ

ผู้วิจัยร่วม

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

งบประมาณประจำปี พ.ศ. 2554

## ส่วนที่ 1 รายละเอียดโครงการ

- 1. ชื่อโครงการวิจัย**      การเปรียบเทียบอิทธิพลของวัสดุครอว์บิส ในงานลากขึ้นรูปโลหะโดยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์
- (A Comparison of the Influence of Drawbead Material in Deep Drawing by using Finite Element Analysis)

2. หน่วยงานหลักที่รับผิดชอบงานวิจัย และสถานที่ตั้งพร้อมทั้งชื่อหน่วยงาน และลักษณะของการร่วมงานวิจัยกับหน่วยงานอื่น (ถ้ามี)

## หน่วยงานหลักที่รับผิดชอบ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ต.หลวงหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 02-549-3490 โทรสาร 02-549-3442

3. คณะผู้วิจัย บทบาทของนักวิจัยแต่ละคนในการทำวิจัย และสัดส่วนที่ทำการวิจัย (%)

| ลำดับ | ชื่อ-สกุล                                       | บทบาทนักวิจัย                     | สัดส่วนการทำวิจัย |
|-------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| 1     | ดร.ศิริชัย ต่อสกุล<br>Dr.-Ing.Sirichai Torsakul | หัวหน้าโครงการ<br>และผู้วิจัยหลัก | 60%               |
| 2     | ผศ.กุนทล ทองศรี<br>Asst.Prof.Kunthon Thongsri   | ผู้ร่วมวิจัย                      | 40%               |

- #### 4. ประเภทของการวิจัย การวิจัยและพัฒนา

5. สาขาวิชาการและกลุ่มวิชาที่ทำกรวิจัย สาขาวิศวกรรมศาสตร์ และอุตสาหกรรมวิจัย

## ส่วนที่ 2 เนื้อหาโครงการ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของวัสดุครอว์บีด ซึ่งประกอบด้วยครอว์บีดโลหะ ครอว์บีดเสริมยางธรรมชาติ และครอว์บีดเสริมยางสังเคราะห์ ทำการศึกษาการไหลตัวของโลหะแผ่นในกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยกลไกโดยวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำการลากขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานแผ่นเหล็กเกรดเย็น SPCC ความหนา 1.0 มม. ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ผลการทดลองลากขึ้นรูปด้วยกลไกกับครอว์บีดทั้งสามชนิด พบว่าแรงกดชิ้นงานสูงทำให้เกิดความเครียดบนชิ้นงานสูงถึง 0.469 ซึ่งเกิดกับครอว์บีดโลหะ รองลงมาเป็นครอว์บีดยางสังเคราะห์ และครอว์บีดยางธรรมชาติต่ำสุดตามลำดับ ซึ่งผลลัพธ์จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี

**คำสำคัญ:** ครอว์บีด, การลากขึ้นรูป, การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์, ยางธรรมชาติ

## **Abstract**

This research is intended to study the influence of different kinds of draw bead materials, which are metal draw bead, natural rubber draw bead and synthetic rubber draw bead. The study would offer an understanding of sheet metal flow during the process of deep drawing in deep drawing die by finite element-simulation with applying deep drawing cold rolled sheet (SPCC) with 1.0 mm. thickness. The results from the finite element-simulations were compared with the results from the experiments, which are both subjected to deep drawing under the same condition. After examined closely to the three kinds of draw bead, it could be concluded that the blank holder force had been made by metal draw bead created a strain of 0.469. Subsequently, natural rubber draw bead had created lesser and synthetic rubber draw beat had created least. Results obtained by using the finite element-simulation have shown excellent agreement with the results of experiments.

**Keyword (s):** Drawbead, Deep Drawing, Finite element-simulation, Natural Rubber

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับใช้ในการทดสอบ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนงบวิจัย ประมาณประจำปี 2554 ในงานวิจัยฉบับนี้ จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้ สามารถจะนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดกับงานวิจัยฉบับนี้ต่อไป

คณะผู้วิจัย

## สารบัญ

|                                               | หน้า |
|-----------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อ                                      | ก    |
| กิตติกรรมประกาศ                               | ค    |
| สารบัญ                                        | ง    |
| สารบัญตาราง                                   | ฉ    |
| สารบัญรูป                                     | ช    |
| บทที่ 1 บทนำ                                  | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ                    | 1    |
| 1.2 ความมุ่งหมาย                              | 2    |
| 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย                   | 2    |
| 1.4 ขอบเขตของการวิจัย                         | 2    |
| 1.5 ข้อจำกัดของการศึกษา                       | 2    |
| 1.6 ชนิดตัวแปรของการวิจัย                     | 2    |
| 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                 | 3    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง         | 4    |
| 2.1 นิยามศัพท์                                | 4    |
| 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                     | 4    |
| 2.3 ทฤษฎีที่สำคัญ                             | 7    |
| 2.3.1 ทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปลึก        | 7    |
| 2.3.2 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการดึงขึ้นรูป    | 9    |
| 2.3.3 สารหล่อลื่นในงานดึงขึ้นรูปลึก           | 13   |
| 2.3.4 ข้อบกพร่องในระหว่างการขึ้นรูป           | 15   |
| 2.3.5 ชนิดของเหล็กแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูป      | 17   |
| 2.3.6 ดรอปปีด                                 | 18   |
| 2.3.8 การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น | 20   |
| 2.3.9 แผนภาพความเครียด                        | 22   |
| 2.3.10 คุณสมบัติของยาง                        | 23   |
| 2.4 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์               | 26   |
| 2.4.1 บทนำการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์         | 26   |
| 2.4.2 โหนด                                    | 28   |

## สารบัญ(ต่อ)

|                                                                    | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| 2.4.3 เอลิเมนต์                                                    | 29   |
| 2.4.4 การวิเคราะห์แบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น                       | 32   |
| 2.4.5 ประวัติ MSC. Marc Mentat                                     | 34   |
| 2.4.6 โปรแกรม MSC. Marc Mentat                                     | 35   |
| 2.4.7 ระบบโปรแกรม Marc                                             | 37   |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน                                           | 39   |
| 3.1 แผนการดำเนินโครงการ                                            | 39   |
| 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์                                           | 40   |
| 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน                                            | 42   |
| 3.4 การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์                                        | 51   |
| 3.5 วิธีการวัดผลการทดลอง                                           | 54   |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล                                | 59   |
| 4.1 ผลการทดสอบ                                                     | 59   |
| 4.1.1 ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการใช้ดรอว์บิสโลหะ               | 59   |
| 4.1.2 ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการใช้ดรอว์บิสเสริมยางธรรมชาติ   | 60   |
| 4.1.3 ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการใช้ดรอว์บิสเสริมยางสังเคราะห์ | 62   |
| 4.2วิเคราะห์ผลการทดลอง                                             | 63   |
| 4.2.1 วิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง                             | 63   |
| 4.2.2 วิเคราะห์ผลการกระจายความเค้น                                 | 64   |
| 4.2.3 วิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบผลการทดลอง                          | 65   |
| บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ                                          | 66   |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง                                                 | 66   |
| 5.1.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง                                        | 66   |
| 5.1.2 ความเค้น                                                     | 66   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ                                                     | 67   |
| บรรณานุกรม                                                         | 68   |
| ภาคผนวก ก : การคำนวณ                                               | 71   |
| ภาคผนวก ข : ข้อมูลการทดลอง                                         | 77   |
| ภาคผนวก ค : แบบชิ้นส่วนแม่พิมพ์                                    | 81   |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |                                                                                     | หน้า |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1      | ตารางแสดงค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด                                               | 13   |
| 2.2      | สมบัติเชิงกลของแผ่นเหล็กกล้ารีดเย็น                                                 | 14   |
| 2.3      | สารหล่อลื่นที่ใช้กับการดัดขึ้นรูปลึก                                                | 17   |
| 2.4      | เหล็กรีดเย็น (มาตรฐาน JIS) สมบัติทางกล                                              | 18   |
| 2.5      | คุณสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ                                                    | 24   |
| 3.1      | ตารางแผนการดำเนินงาน                                                                | 30   |
| 3.2      | ตารางขึ้นส่วนแม่พิมพ์                                                               | 47   |
| 3.3      | ตารางบันทึกแรงของการขึ้นรูปต่อสัดส่วนของแรงกดในการใช้ดรอร์บีดแต่ละชนิด              | 58   |
| 3.4      | ตารางวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain) ของดรอร์บีดแต่ละชนิด          | 58   |
| ข.1      | ตารางบันทึกแรงของการขึ้นรูปต่อสัดส่วนของแรงกดใช้ดรอร์บีดชนิดโลหะ                    | 84   |
| ข.2      | ตารางบันทึกแรงของการขึ้นรูปต่อสัดส่วนของแรงกดใช้ดรอร์บีดเสริมแรงยางธรรมชาติ         | 84   |
| ข.3      | ตารางบันทึกแรงของการขึ้นรูปต่อสัดส่วนของแรงกดใช้ดรอร์บีดเสริมแรงยางสังเคราะห์       | 84   |
| ข.4      | ตารางวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่าของดรอร์บีดแต่ละชนิด ที่แรงกดขึ้นงาน 30 เปอร์เซนต์ | 85   |
| ข.5      | ตารางวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่าของดรอร์บีดแต่ละชนิด ที่แรงกดขึ้นงาน 50 เปอร์เซนต์ | 86   |
| ข.6      | ตารางวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่าของดรอร์บีดแต่ละชนิด ที่แรงกดขึ้นงาน 70 เปอร์เซนต์ | 87   |

## สารบัญรูป

| รูปที่ |                                                                    | หน้า |
|--------|--------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1    | แม่พิมพ์แบบจังหวะเดียวไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงาน                       | 7    |
| 2.2    | แม่พิมพ์แบบจังหวะเดียวมีแผ่นจับยึดชิ้นงาน                          | 8    |
| 2.3    | แม่พิมพ์แบบสองจังหวะมีตัวสไลด์แผ่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่          | 8    |
| 2.4    | แม่พิมพ์แบบสามจังหวะมีแผ่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่และตัวคายคู่ชั้น  | 9    |
| 2.5    | ค่าแรงกดดันของแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ต้องการในการดึงขึ้นรูปครั้งแรก   | 11   |
| 2.6    | อัตราส่วนการขึ้นรูป                                                | 13   |
| 2.7    | (Round Bead) (ก) แบบเดี่ยว (Single bead) (ข) แบบคู่ (Double bead)  | 19   |
| 2.8    | (Square bead) (ก) แบบเดี่ยว (Single bead) (ข) แบบคู่ (Double bead) | 19   |
| 2.9    | (ก) สามเหลี่ยม (Three angle bead) (ข) แบบไม่ไหลตัว (Lock bead)     | 19   |
| 2.10   | กรณีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริด                                   | 20   |
| 2.11   | การเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลม                                         | 21   |
| 2.12   | ค่าแรงกระทำต่อเอลิเมนต์ (f) ที่ทำให้โหนดมีการเคลื่อนที่ (U)        | 28   |
| 2.13   | ตัวอย่างโหนดในเอลิเมนต์แต่ละมิติ                                   | 29   |
| 2.14   | การใช้ Beam Element ในงานโครงสร้าง                                 | 30   |
| 2.15   | การใช้ Shell Element ในงานที่มีลักษณะเป็นผนัง                      | 30   |
| 2.16   | การใช้งาน Solid Element ในงานที่เป็นปริมาตรตันที่มีความหนา         | 31   |
| 2.17   | ชนิดของเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1 – 3 มิติ                                 | 31   |
| 2.18   | ตัวอย่างโครงสร้างเอลิเมนต์ดั้งเดิม                                 | 32   |
| 2.19   | วงจรการวิเคราะห์ (The Analysis Cycle)                              | 36   |
| 2.20   | ระบบของโปรแกรม Marc                                                | 38   |
| 3.1    | เครื่องปั๊มโลหะขนาด 80 ตัน                                         | 41   |
| 3.2    | แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร                   | 41   |
| 3.3    | เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC automatic machine)                     | 42   |
| 3.4    | ชิ้นงานสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาด 220 x 160 มม.                        | 42   |
| 3.5    | การจับยึด (Fixture) บนเครื่องกัด CNC                               | 43   |
| 3.6    | การจับยึดชิ้นงานบนเครื่องกัด CNC                                   | 43   |
| 3.7    | การเดินกัดชิ้นงาน                                                  | 44   |
| 3.8    | การกัดขึ้นรูป (Profile) ครอว์บีด                                   | 44   |
| 3.9    | การเดินกัดร่อง (Slot) ด้านใน                                       | 45   |
| 3.10   | การเดินกัดปลายโค้งมนของครอว์บีด                                    | 45   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

|                                                                                 | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.11 การเดินกััดกััดยงธรรมชาติและยงสังเคราะห์                                   | 46   |
| 3.12 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ขึ้นรูปลึก                                            | 46   |
| 3.13 การประกอบชุดแม่พิมพ์ตัวบน                                                  | 47   |
| 3.14 การใส่แผ่นเสริมรองขนาด                                                     | 48   |
| 3.15 การสวมชุดแม่พิมพ์ตัวบนกับชุดแม่พิมพ์ตัวล่าง                                | 48   |
| 3.16 การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องปั๊ม                                            | 49   |
| 3.17 การประกอบครอว์ปิดกับแผ่นกดชิ้นงาน                                          | 49   |
| 3.18 การปรับตั้ง (Limit switch) เครื่องปั๊ม                                     | 50   |
| 3.19 แม่พิมพ์พร้อมใช้งาน                                                        | 50   |
| 3.20 แผ่นตัดเปล่าคำนวณโดยการประมาณค่า                                           | 51   |
| 3.21 ครอว์ปิดที่เป็นโลหะเหล็กชนิด S45C                                          | 52   |
| 3.22 ครอว์ปิดที่เสริมยงธรรมชาติ                                                 | 52   |
| 3.23 ครอว์ปิดที่เสริมยงสังเคราะห์                                               | 53   |
| 3.24 แผ่นพลาสติกโพลีเอทรีลีนหนา 0.10 มม.                                        | 53   |
| 3.25 (ก) อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน (ข) อุปกรณ์จับเก็บสัญญาณ                        | 54   |
| 3.26 การติดตั้งอุปกรณ์จับเก็บสัญญาณต่อเข้ากับเครื่องเพรส                        | 55   |
| 3.27 บริเวณจุดที่ตรวจวัดความเครียดบนชิ้นงาน                                     | 55   |
| 3.28 เครื่องวัดความหนาชิ้นงาน                                                   | 56   |
| 3.29 แผ่นพลาสติกโพลีเอทรีลีนหนา 0.10 มม.                                        | 56   |
| 3.30 (ก) อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน (ข) อุปกรณ์จับเก็บสัญญาณ                        | 57   |
| 3.31 การติดตั้งอุปกรณ์จับเก็บสัญญาณต่อเข้ากับเครื่องเพรส                        | 57   |
| 3.32 เครื่องวัดความหนาชิ้นงาน                                                   | 57   |
| 4.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของครอว์บีสโลหะ โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์             | 59   |
| 4.2 การกระจายความเค้นของครอว์บีสโลหะ โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์                 | 60   |
| 4.3 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของครอว์บีสเสริมยงธรรมชาติ โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์  | 61   |
| 4.4 การกระจายความเค้นของครอว์บีสเสริมยงธรรมชาติ โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์      | 61   |
| 4.5 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของครอว์บีสเสริมยงสังเคราะห์โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ | 62   |

สารบัญรูป (ต่อ)

|                                                                               | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.6 การกระจายความเค้นของครอว์ปิดเสริมยางสังเคราะห์ โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ | 63   |
| 4.7 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง                                       | 64   |
| 4.8 การเปรียบเทียบความเค้น                                                    | 64   |
| 4.9 แรงขึ้นรูปและแรงกดขึ้นงานในการใช้ครอว์ปิดแต่ละชนิด ที่แรงกด 50 %          | 65   |
| ก.1 เส้นรอบรูปขึ้นงานหาความยาว $L_t$ (L Total)                                | 72   |
| ก.2 การคำนวณแผ่นตัดเปล่า                                                      | 74   |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันธุรกิจมีการแข่งขันทางการค้าสูงมากในประเทศไทยมีผู้ประกอบการธุรกิจอุตสาหกรรมหลายสาขาได้มีการปรับปรุงคุณภาพการผลิตสินค้าและขยายตัวไปอย่างรวดเร็วมีการแข่งขันทางธุรกิจอุตสาหกรรมเกิดขึ้นตลอดเวลาทั้งทางด้านการตลาด รูปแบบของผลิตภัณฑ์ และเงินทุนผู้ประกอบการอุตสาหกรรมแต่ละแห่งต้องเร่งพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีต่างๆ [1] การขึ้นรูปโลหะมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมยานยนต์ หรืออุตสาหกรรมครัวเรือน การพัฒนากระบวนการขึ้นรูปโลหะจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพื่อลดต้นทุนการผลิต การพัฒนาผลิตภัณฑ์และการเพิ่มคุณภาพของงานให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นสำหรับการลากขึ้นรูปด้วยกลึงเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยใช้แม่พิมพ์ทำการลากขึ้นรูปแผ่นโลหะเข้าไปในแม่พิมพ์ได้ชิ้นงานลักษณะรูปทรงถ้วย การลากขึ้นรูปด้วยเป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยอาศัยแรงดึงและแรงอัด [2] การลากขึ้นรูปด้วยมีดตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปได้แก่ ชนิดของโลหะแผ่น (Material) อัตราการลดรูป (Do/Dp) รัศมีของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch radius) รัศมีของแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die radius) แรงกดโลหะแผ่น (Blank holding force) ความเสียดทาน (Friction) และสารหล่อลื่น (Lubrication) [3]

การลากขึ้นรูปด้วยกลึงยังคงมีข้อจำกัดมากมาย โดยเฉพาะการลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีผนังบาง และมีความลึกมากๆ ถึงแม้มีการควบคุมตัวแปรต่างๆดังได้กล่าวไว้ข้างต้น แต่ก็ประสบปัญหาในการควบคุมการไหลตัวของโลหะแผ่น จึงมีการติดตั้งครอว์บีด (Draw beads) [2] ในแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปด้วยกลึง ซึ่งมีหน้าที่สำหรับควบคุมการไหลตัวของชิ้นงานเข้าสู่แม่พิมพ์ (Draw beads) ควบคุมการไหลของแผ่นโลหะด้วยการดัด (Bending and Unbending) แผ่นโลหะตามรูปทรงของ (Draw beads) ระหว่างการลากขึ้นรูป การใช้ Draw beads ทำให้ต้องเพิ่มแรงในการลากขึ้นรูปชิ้นงานเข้าสู่แม่พิมพ์แต่ (Draw beads) ช่วยลดแรงเหยียบ (Blank holding force) ด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาในปัจจุบัน วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกนำมาช่วยในงานวิศวกรรมมากมาย เช่นเดียวกับในงานเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามามีบทบาทสำคัญในการพัฒนากระบวนการขึ้นรูปโลหะ

ได้มีการวิจัยมากมายที่ทำการศึกษาอิทธิพลของครอว์บีด เช่น (F.Mehmet) ได้วิเคราะห์การไหลตัวของโลหะแผ่นในกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยกลึงโลหะแผ่น และ (M.Ghoo) ได้นำวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการออกแบบครอว์บีด เป็นต้น แต่งานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นเป็นการออกแบบครอว์บีดและทำมาจากวัสดุโลหะทั้งสิ้น ซึ่งผลลัพธ์ส่วนใหญ่แสดงให้เห็นว่าการใช้ครอว์บีดช่วยในการควบคุมการไหลตัวของชิ้นงานนั้น ยังขึ้นอยู่กับวัสดุชิ้นงาน รูปร่างของครอว์บีดเอง ซึ่งงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของครอว์บีดที่ทำมาจากยางธรรมชาติ (ยางแท่ง STR) และยางสังเคราะห์ ที่

ผ่านการเสริมแรงด้วยแผ่นโลหะ เปรียบเทียบกับครอว์บิสโลหะ เพื่อวิเคราะห์การไหลตัว และแรงลากขึ้นรูปของโลหะแผ่นต่างชนิดกันในกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยลิค

## 1.2 ความมุ่งหมาย

- 1.2.1 เพื่อนำกระบวนการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไปประยุกต์ใช้งานแม่พิมพ์
- 1.2.2 เพื่อให้เกิดประโยชน์กับภาคอุตสาหกรรมการผลิตทางด้านการขึ้นรูปโลหะแผ่น

## 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.3.1 เพื่อศึกษาการไหลตัวของโลหะแผ่นในกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยลิคโดยใช้ครอว์บิสด้วยกระบวนการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.3.2 เพื่อนำอิทธิพลของตัวแปรในการลากขึ้นรูปไปใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.3.3 เพื่อนำมาตรฐานชาติมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์
- 1.3.4 เพื่อลดแรงการลากขึ้นรูปโลหะ

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 วัสดุชิ้นงานแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCC ความหนา 1.0 มม. ทำการลากขึ้นรูปด้วยลิครูป
- 1.4.2 ศึกษาอิทธิพลของชนิดครอว์บิส
  - 1.4.2.1 ครอว์บิสที่ทำจากโลหะ
  - 1.4.2.2 ครอว์บิสที่ทำจากยางธรรมชาติ แล้วเสริมแรงด้วยโลหะแผ่น
  - 1.4.2.3 ครอว์บิสที่ทำจากยางสังเคราะห์ แล้วเสริมแรงด้วยโลหะแผ่น
- 1.4.3 ออกแบบชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป ขนาด 350 x 350 x 250 มิลลิเมตร
- 1.4.4 จำลองกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC Marc

## 1.5 ข้อยกจำกัดของการศึกษา

การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความซับซ้อน และยุ่งยาก ดังนั้นในขั้นตอนการเตรียมการจำลอง (Pre-Processor) จำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจระบบการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นอย่างดี

## 1.6 ชนิดตัวแปรของการวิจัย

- ตัวแปรต้น: ชนิดของครอว์บิส
- ตัวแปรตาม: แรงกดขึ้นงาน

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 สามารถใช้ข้อมูลจากการวิจัยเป็นแนวทางในการสนับสนุนในการออกแบบแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปโลหะแผ่น

1.7.2 เข้าใจหลักการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อช่วยในการแก้ปัญหาเชิงวิศวกรรม

1.7.3 สามารถใช้ข้อมูลจากการวิจัย เพื่อพัฒนางานวิจัยด้านการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในงานวิศวกรรมศาสตร์ ต่อไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการสร้างแม่พิมพ์มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องนำเอาความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์มาใช้ในการออกแบบ เพื่อนำพิจารณาลักษณะขนาดแรง น้ำที่การใช้งาน และชิ้นส่วนอื่นๆ ที่ทำขึ้นเอง ก่อนที่จะนำมาวิเคราะห์หาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการขึ้นรูป เพื่อนำมาเปรียบเทียบหาตัวแปรที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูป ที่จะนำไปพัฒนาปรับปรุงแก้ไขแม่พิมพ์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

#### 2.1 นิยามศัพท์ที่สำคัญ

2.1.1 การขึ้นรูปลึก (Deep drawing) คือ การแปรรูป โลหะจากแบบเรียบให้เป็นภาชนะรูปถ้วย (shell) การเปลี่ยนสภาพนี้ทำได้โดยการกดโลหะแผ่นเรียบด้วยพื้นที่เข้าไปในช่องว่างของดาย ซึ่งรูปแบบอาจเป็นรูปทรงกระบอก รูปกล่อ่งที่มีด้านตรงเอียง และเป็นเส้นโค้งเป็นต้น [1]

2.1.2 แรงกดขึ้นงาน (Blank holder force) คือ ขนาดของแรงกดของแผ่นกดขึ้นงาน (Blank holder) ที่พอเหมาะสำหรับป้องกันไม่ให้งานเกิดรอยย่นหรือขึ้นงานเกิดรอยฉีกขาด เช่น ถ้าแรงกดมากเกินไปจะทำให้ขึ้นงานเกิดรอยฉีกขาดหรือถ้าแรงกดน้อยเกินไปจะทำให้ขึ้นงานเกิดรอยย่นได้ [1]

2.1.3 ครอว์บีด (Draw bead) มีหน้าที่ในการควบคุมการไหลตัวของโลหะที่จะเข้าไปในดาย และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่น (Wrinkle) ในขณะที่ขึ้นรูป นอกจากยังช่วยลดแรงกดของเบงค์ไฮดรอลิคตลอดจนทำหน้าที่เหมือนกับ ปรับตัวรีดโลหะให้มีความเครียด (Strain) ลดลง เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะ [2]

2.1.4 ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis: FEA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหาที่หลากหลายในทางวิศวกรรม ซึ่งต้องประกอบด้วยสมการควบคุมระบบ และใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อแก้สมการ [3]

#### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิตติภักดิ์ รัตนจันทร์ เพื่อศึกษาหาความสามารถในการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นของครอว์บีด (Draw bead) ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวต่างกันเช่นรูปร่างและความสูงของครอว์บีด ความเร็วในการดึงขึ้นรูป สภาพการหล่อลื่นและสมบัติของโลหะแผ่น สำหรับในการวิจัยนี้ใช้ครอว์บีดที่มีรูปร่างแบบครึ่งทรงกระบอกกลม (Half-round draw bead) โดยมีตัวแปรที่สนใจคือความสูงของครอว์บีด สภาพการหล่อลื่นและความเร็วในการดึงขึ้นรูป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความ

สูงของครอว์บีคและการหล่อลื่นมีผลกระทบต่อการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นที่จะเข้าสู่ช่องเปิดคายเป็นอย่างมาก เมื่อเพิ่มความสูงครอว์บีคให้สูงขึ้นจะต้องใช้แรงกดแบบลงก์โฮลเดอร์เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่รอยย่นที่เกิดขึ้นจะลดลง ในส่วนของการหล่อลื่นพบว่าเมื่อไม่ใช้สารหล่อลื่นจะไม่สามารถดึงขึ้นรูปได้เพราะจะเกิดการฉีกขาดที่ผนังชิ้นงานก่อน สำหรับความเร็วในการดึงขึ้นรูปในช่วงที่ใช้ในการทดลองพบว่า มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานสำเร็จน้อยมาก [2]

บุญส่ง จงกลณี ได้ศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์ที่จะใช้ในการลากขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีลักษณะไม่สมมาตร เพื่อใช้ในการทดสอบอิทธิพลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูป 4 ตัวแปร รูปร่างแผ่นเปล่า (Blank geometry) ขนาดแรงกดขึ้นงาน (Blank holding force : BHF) ชนิดของสารหล่อลื่น (Lubricant type) และรูปร่างครอว์บีค (Draw bead geometry) ในขั้นตอนการทดสอบจะมีการบันทึกผลแรงกดขึ้นรูปและแรงกดขึ้นงานในขณะที่ขึ้นรูปทุกครั้ง การวัดผลการทดลองจะนำเอาชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วมาตรวจสอบความเสียหายและวัดขนาดของความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆบนชิ้นงานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไป จากการทดลองพบว่า รูปร่างของแผ่นตัดเปล่า และแรงกดขึ้นงานที่เหมาะสมนอกจากจะสามารถลดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแล้วยังสามารถลดระดับความเครียดบนชิ้นงานได้อีกด้วย ขนาดของแรงกดขึ้นงานที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นตัดเปล่าและกลไกของแม่พิมพ์ สารหล่อลื่นจะลดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ผิวสัมผัสของชิ้นงานโดยตรง และการใช้ครอว์บีคที่มีขนาดที่เหมาะสม จะสามารถควบคุมการไหลของแผ่นตัดเปล่าเข้าสู่คายได้ดี จะทำให้สามารถลดขนาดของความเครียดในบริเวณวิกฤติได้ดี อย่างไรก็ตามการใช้ครอว์บีคจะต้องมีการปรับขนาด แผ่นตัดเปล่าให้โตขึ้น เพิ่มแรงกดขึ้นงาน และเลือกใช้สารหล่อลื่นให้เหมาะสม [4]

ทวีภัทร บุรณชิต, ทัศนชัย ผ่องผาย การขึ้นรูปโลหะแผ่นในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์มักจะเกิดปัญหาการเกิดรอยย่น การฉีกขาด และการสปริงตัวกลับ ทั้งนี้กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นมีการกำหนดค่าตัวแปรกระบวนการผลิตต่างๆ ที่สำคัญเช่น แรงกดของตัวประสานหรือแรงจับยึดแบบลงก์ตำแหน่งของครอว์บีค และขนาดรูปร่างของแบบลงก์ เป็นต้นงานวิจัยนี้ได้นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นมาประยุกต์ในการจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะแผ่นของชิ้นส่วนขวางยึดเครื่องยนต์มาเป็นกรณีศึกษา โดยทำการศึกษาถึงอิทธิพลของแรงกดของตัวประสานและตำแหน่งครอว์บีคแบบต่างๆ ต่อการไหลของวัสดุในกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่มีต่อการฉีกขาดและการเกิดรอยย่นซึ่งเป็นเงื่อนไขการออกแบบหลัก แผ่นโลหะที่ใช้ในการศึกษานี้คือ เหล็กกล้า JSC440W ที่มีความหนาเริ่มต้น 1 มม. ความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนนี้ถูกพิจารณาโดยการเปรียบเทียบกับแผนภูมิขีดจำกัดการขึ้นรูป ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่สำคัญทางด้านความไม่เสถียรทางพลาสติกของแต่ละชนิดโลหะแผ่น ผลจากการศึกษาพบว่าครอว์บีคสามารถควบคุมการไหลของวัสดุได้ดีกว่าการใช้แรงกดของตัวประสานเพียงอย่างเดียว การเลือกตำแหน่งครอว์บีคมีความสำคัญ โดยการวางแนวครอว์บีคอย่างสมมาตรนั้นไม่เพียงพอต่อการขึ้นรูปสำหรับ

กรณีศึกษาการใช้ดรอร์บีดแบบ 6 ช่วงตำแหน่ง จะสามารถช่วยในการลดปัญหาทั้งการฉีกขาดและรอยย่นได้ดีในกรณีศึกษา [5]

F. Mehmet [6] ได้วิเคราะห์ลักษณะการไหลตัวของโลหะแผ่นในกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยกลไกการใช้ดรอปิส ว่าเกิดขึ้นในลักษณะใด และส่งต่อการขึ้นรูปมากน้อยเพียงใด พบว่า การนำดรอร์บีดมาใช้สามารถช่วยให้การไหลของโลหะได้ดีขึ้นอย่างชัดเจน

M. Samuel [7] ได้ศึกษาอิทธิพลของรูปทรงดรอร์บิสที่ส่งผลต่อการลากขึ้นรูปด้วยกลไกโลหะแผ่น ได้พบว่ารูปทรงของดรอร์บิสมีอิทธิพลสูงมากกับการไหลตัวของแผ่นโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปทรงที่มีความโค้งมนจะสามารถพาโลหะไหลได้ดีกว่ารูปทรงเหลี่ยม

H. Naceur [8] ได้หาความเหมาะสมในการออกแบบดรอร์บิสในกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยการใช้วิธีการ Inverse Approach (IA) ซึ่งจะทำให้การ Restraining Force ใ้ เพื่อการออกแบบดรอร์บิส

Y. Ghoo [9] ได้นำวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการออกแบบดรอร์บิสรูปทรงกลม ลำดับขึ้น และสี่เหลี่ยม เพื่อวิเคราะห์การไหลตัวและลักษณะความเสียหายที่จะเกิดขึ้นของแผ่นโลหะ

R. Li [10] ได้ศึกษาความเหมาะสมของกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น AA 6111-T4 โดยการใช้ดรอร์บิส ทำการวิเคราะห์ความเครียดที่เกิดขึ้นกับแผ่นโลหะ พบว่าการเพิ่มความสูงตั้งฉากกับแผ่นโลหะจาก 0-5 มม. สามารถเพิ่มการไหลตัวได้ดี ซึ่งได้เปรียบเทียบระหว่างความลึกลับกับแรงกดเหยียบ (Blankholder Force)

Y.Y. Yang [11] ได้ทำการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ แบบ Elasto-Plastic ของกระบวนการ Drawbead drawing โดยทำการออกแบบดรอร์บิสรูปทรงกลม และ สี่เหลี่ยม เพื่อวิเคราะห์แรงกดขึ้นรูป จากอิทธิพลของรูปทรงดรอร์บิส พบว่าการจำลองให้ผลลัพธ์ถูกต้องกับการทดลองอย่างดีเยี่ยม

J.A. Schey [12] ได้ศึกษาอิทธิพลของความเร็วต่อดรอร์บิส โดยทำการจำลอง ด้วยความเร็วช่วง 5 ถึง 240 mm/s ผสมกับน้ำมันพื้นที่ 4.5 ถึง 285 mm<sup>2</sup> เพื่อวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้น และการขึ้นรูป

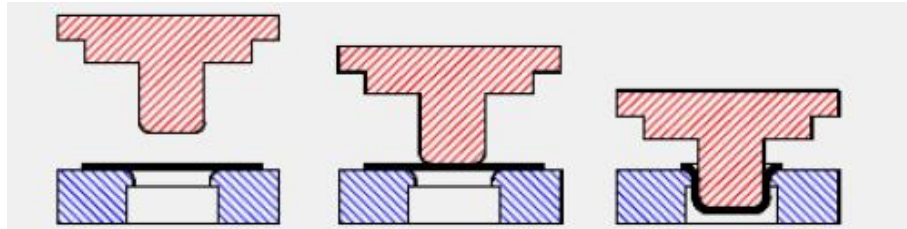
เป็นต้น แต่งานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นเป็นการออกแบบดรอร์บิสและทำมาจากวัสดุโลหะทั้งสิ้น ซึ่งผลลัพธ์ส่วนใหญ่แสดงให้เห็นว่าการใช้ดรอร์บิสช่วยในการควบคุมการไหลตัวของชิ้นงานนั้น ยังขึ้นอยู่กับวัสดุชิ้นงาน รูปร่างของดรอร์บิสเอง ซึ่งงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของดรอร์บิสที่ทำมาจากยางธรรมชาติ (ยางแท่ง STR) และยางสังเคราะห์ ที่ผ่านการเสริมแรงด้วยแผ่นโลหะ เปรียบเทียบกับดรอร์บิสโลหะ เพื่อวิเคราะห์การไหลตัว และแรงลากขึ้นรูปของโลหะแผ่นต่างชนิดกันในกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยกลไก

## 2.3 ทฤษฎีที่สำคัญ

### 2.3.1 ทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปลึก

การขึ้นรูปลึกโดยใช้ แม่พิมพ์ (Die) การดึงขึ้นรูปโดยใช้สื่อแรงดัน (Pressure medium) การดึงขึ้นรูปโดยใช้พลังงานกระตุ้น (Energy activation) การแบ่งแม่พิมพ์ตามโครงสร้างของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปแบ่งออกเป็น 4 แบบ ดังต่อไปนี้

- 1) แม่พิมพ์ที่ไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แม่พิมพ์แบบจังหวะเดียวไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงาน [13]

แม่พิมพ์ที่ไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และปราศจากรอยย่นที่ชิ้นงาน ถ้าความต้านทานการ โค้งตัวของโลหะแผ่นด้านความเค้นแรงกดที่ตั้งฉากกับแนวรัศมีได้สูงพอ สิ่งนี้จะเป็นจริงได้เมื่ออัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นงานต่อความหนา คือ  $d_0$  ต่อ  $s_0$  มีค่า 25 ถึง 40 ค่าน้อยที่สุดเป็นค่าสามารถใช้อัตราส่วนการขึ้นรูป  $\beta$  ค่ามากได้ ดังแสดงในสมการที่ 2.1 [13]

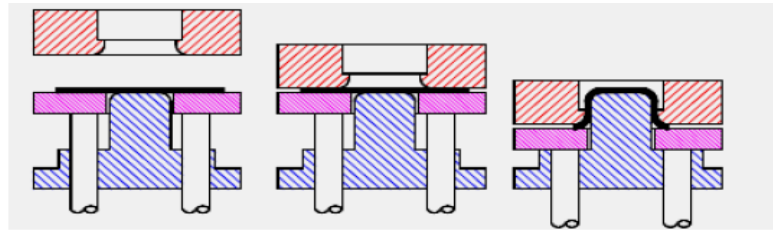
$$\frac{d_0}{s_0} \text{ มีค่าอยู่ระหว่าง 25 ถึง 40} \quad (2.1)$$

$d_0$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นขึ้นงาน (mm)

$s_0$  = ความหนาของชิ้นงาน (mm)

การขึ้นรูปโดยไม่แผ่นจับยึดงานเป็นการใช้เครื่องมือที่มีโครงสร้างแบบง่ายๆ เนื่องจากไม่มี ความเสียดทานที่เกิดจากแผ่นจับยึดงานจึงทำให้แรงในการขึ้นรูปลดลง และขอบเขตของอัตราส่วน  $\beta$  อาจจะเพิ่มขึ้น สิ่งจำเป็นสำหรับการขึ้นรูปของแม่พิมพ์จังหวะเดียวเมื่อใช้แม่พิมพ์ที่ไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ด้ามมีรูปทรงเรขาคณิตลักษณะพิเศษแต่ในการขึ้นรูปที่อัตราส่วนการขึ้นรูป  $\beta$  น้อยสามารถทำได้ดีกว่าก่อนที่ขอบของแผ่นงานจะถูกยกตัวขึ้น

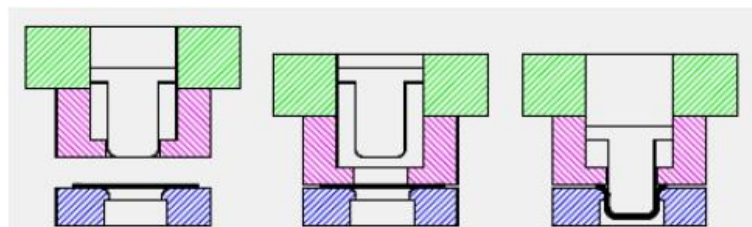
2) แม่พิมพ์จังหวะเดียวมีแผ่นจับยึดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แม่พิมพ์แบบจังหวะเดียวมีแผ่นจับยึดชิ้นงาน [13]

แผ่นจับยึดชิ้นงานจะทำควบคู่กันกับคานยกชิ้นแท่นเครื่องปั๊ม ดังนั้นเมื่อพื้นที่ถูกยึดกับแท่นเครื่องและคานถูกยึดติดกับส่วนป็นตัวสไลด์เครื่องที่ด้านบนของแม่พิมพ์ในตำแหน่งแรงของแผ่นจับยึดชิ้นงานอยู่ในตอนเริ่มต้น ขึ้นรูป แผ่นชิ้นงานและคานสามารถจะไ้เข้าไปในคาน ได้ในตอนเริ่มต้นของการขึ้นรูปแผ่นจับยึดชิ้นงานและคานจะเป็นตัวไปกดแผ่นชิ้นงาน เมื่อสไลด์ส่วนบนเครื่องที่ลงมาคานยกชิ้นจะส่งแรงด้านด้านล่างผ่านสลักนำไปดันที่นำไปดันที่แผ่นจับชิ้นงาน ดังนั้นผลที่เกิดขึ้นแรงในการขึ้นรูปมีแรงต่างกัน คือ แรงกดระหว่างพื้นที่และแผ่นจับยึดชิ้นงาน

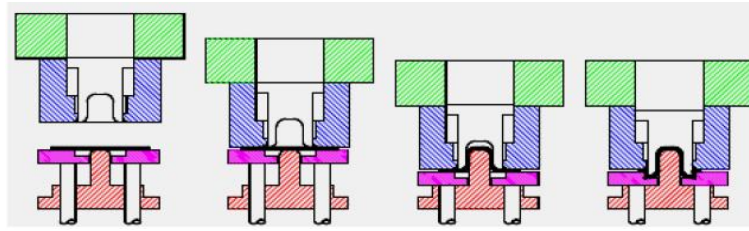
3) แม่พิมพ์สองจังหวะมีตัวสไลด์แผ่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แม่พิมพ์แบบสองจังหวะมีตัวสไลด์แผ่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่ [13]

จากรูปที่ 2.3 แผ่นจับยึดชิ้นงานเป็นส่วนหนึ่งของตัวสไลด์ส่วนเคลื่อนที่ด้านบนทิศทางการทำงานของแผ่นจับยึดชิ้นงานจะไปในทิศทางเดียวกันกับตัวสไลด์พื้นที่ของเครื่องปั๊มคานของแม่พิมพ์จะยึดติดแน่นกับแท่นของเครื่องปั๊ม การไ้แผ่นชิ้นงานลงไปนคานจะกระทำในขณะที่พื้นที่และแผ่นจับยึดชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งบนในขั้นตอนแรกของการขึ้นรูปแผ่นจับยึดชิ้นงานจะกดลงบนแผ่นชิ้นงานและ ในขั้นที่สอง พื้นที่จะเคลื่อนตัวลงมาทำการขึ้นรูปต่อไป

4) แม่พิมพ์สามจังหวะมีแผ่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่และตัวค้ำยัน (Die cushion) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แม่พิมพ์แบบสามจังหวะมีแผ่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่และตัวค้ำยัน [13]

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างแม่พิมพ์สองจังหวะ ที่มีตัวสไลด์แผ่นยึดชิ้นงานเคลื่อนที่กับแม่พิมพ์สามจังหวะที่มีค้ำยันเพิ่มขึ้นมา จากรูปที่ 2.4 เมื่อเราใส่แผ่นชิ้นงานเข้าไปในค้ำยันแล้วพื้นที่และแผ่นจับยึดชิ้นงานรวมทั้งค้ำยันจะอยู่ในตำแหน่งบนของ แม่พิมพ์ ขั้นตอนแรกของการขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานจะถูกกดอยู่ระหว่างแผ่นจับยึดชิ้นงานกับค้ำยันในตำแหน่งนี้แม่พิมพ์ส่วนจะเคลื่อนที่ลงมาและเริ่มต้นการขึ้นรูปด้วยพื้นที่ซึ่งถูกติดตั้งไว้ที่แท่นเครื่องในจังหวะที่สองตัวสไลด์ของเครื่องปั๊มที่อยู่ด้านบนจะเคลื่อนตัวลงมา และทำการขึ้นรูปลึกซึ่งการออกแบบแม่พิมพ์ชนิดนี้จะเป็นการขึ้นรูปแบบดึงขึ้นรูปครั้งแรกและดึงขึ้นรูปกลับทางอยู่ในขั้นตอนเดียวกัน ซึ่งแรงในการดึงขึ้นรูปเป็นผลของแรงที่ต่างกันระหว่างพื้นที่และแผ่นจับยึดชิ้นงาน [10]

### 2.3.2 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการดึงขึ้นรูป

#### 1) แรงในการดึงขึ้นรูป (Punch force)

แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปจะแปรผันไปตามระยะชักของพื้นที่ สามารถจะกำหนดได้ 2 วิธี คือ การกำหนดสมการจากทฤษฎีการไหลตัวของโลหะ หรือใช้สมการที่ได้จากประสบการณ์จากการทดลอง ซึ่งในทางปฏิบัติส่วนใหญ่การออกแบบแม่พิมพ์จะต้องทราบค่าแรงสูงสุดในการดึงขึ้นรูปจากการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับแรงในการดึงขึ้นรูปที่แสดงถึงแรงสูงสุดนั้น จะขึ้นอยู่กับวัสดุของชิ้นงานและอัตราส่วนการขึ้นรูป ซึ่งจะได้ค่าของ  $d_{F,max} \approx 0.07d_0$  การประมาณการหาแรงในการดึงขึ้นรูปสูงสุดที่ดีแสดงในสมการที่ 2.2 โดยแรงสูงสุดสามารถกำหนดจากประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูปของโลหะ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d_m$  ในสมการหมายถึงค่าเฉลี่ยระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางในถึงเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของชิ้นงาน  $d_m = d_1 + s_0$  โดย  $\eta_{dfe}$  มีค่าอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.7 [14] และประยุกต์ใช้กับการขึ้นรูปชิ้นงานรูปทรงไม่สมมาตรดังแสดงในสมการที่ 2.3 [15]

$$F_d = \pi \times d_m \times s_0 \left[ 1.1 \frac{1.3 \times s_u}{\eta_{dfe}} \left[ \ln \frac{d_0}{d_1} - 0.25 \right] \right] \quad (2.2)$$

$$F_d = \frac{s_y + s_u}{2} \times L_t \times s_0 \quad (2.3)$$

- $F_d$  = แรงขึ้นรูป (kN)  
 $d_m$  = ค่าเฉลี่ยระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางในถึงเส้นผ่าศูนย์กลางนอกของชิ้นงาน (mm)  
 $s_0$  = ความหนาของชิ้นงาน (mm)  
 $s_u$  = ความเค้นสูงสุด (N/mm<sup>2</sup>)  
 $\eta_{dfe}$  = ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูปของโลหะ  
 $d_0$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงาน (mm)  
 $d_1$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของพันธ์ (mm)  
 $s_y$  = ความเค้นจุดคราก (N/mm<sup>2</sup>)  
 $L_t$  = ความยาวรอบรูปทั้งหมด (mm)

## 2) แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blankholder pressure)

ขอบปีกของชิ้นงานที่ดึงขึ้นรูปจะได้รับความเค้นแรงกด ซึ่งเกิดในลักษณะตั้งฉากกับแนวรัศมีเป็นสาเหตุของการเกิดรอยร่นเนื่องจากการโก่งตัวของวัสดุ รอยร่นนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้ขณะทำการดึงขึ้นรูป ถ้าพื้นที่สัมผัสของแผ่นจับยึดชิ้นงาน  $P_{BH}$  จะไปกดลงบนแผ่นขอบปีกชิ้นงานขณะทำการดึงขึ้นรูป ถ้าพื้นที่สัมผัสของแผ่นจับยึดชิ้นงาน คือ  $A_{BH}$  ดังนั้นการคำนวณค่าแรงกดที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงานดังแสดงในสมการที่ 2.4 [15]

$$F_{BH} = A_{BH} \times P_{BH} \quad (2.4)$$

- $F_{BH}$  = แรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน (N)  
 $P_{BH}$  = พื้นที่สัมผัสของแผ่นจับยึดชิ้นงาน (N/mm<sup>2</sup>)  
 $A_{BH}$  = แรงกดคั้นที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงานต่ำที่สุด (mm<sup>2</sup>)

แรงกดที่ใช้ในการหลีกเลี่ยงรอยร่นนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุของแผ่นชิ้นงาน โดยจะสัมพันธ์กับความหนาและอัตราส่วนการขึ้นรูปของวัสดุ แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงานสามารถประมาณค่าได้โดยใช้สมการที่ 2.5 ในที่นี้ตัวประกอบค่า C มีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 3 เป็นการคำนวณ

หาค่าแรงกดดังแสดงในสมการที่ 2.4 โดยใช้อัตราส่วนการขึ้นรูป  $\beta = 2.0$  และใช้วัสดุที่มีค่า (Ultimate Tensile Strength)  $s_u = 100, 200, 400$  และ  $600 \text{ N/mm}^2$  ถูกพล็อตขึ้นมาเป็นกราฟโดยสัมพันธ์กันกับค่าความหนาของวัสดุ  $s_0 / d_0$  ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [15]

$$P_{BH} = 10^{-3} \times C \times s_u \left[ (\beta - 1) + \frac{0.005 \times d_0}{s_0} \right] \quad (2.5)$$

$P_{BH}$  = แรงกดดันที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงานค่าที่สุด ( $\text{N/mm}^2$ )

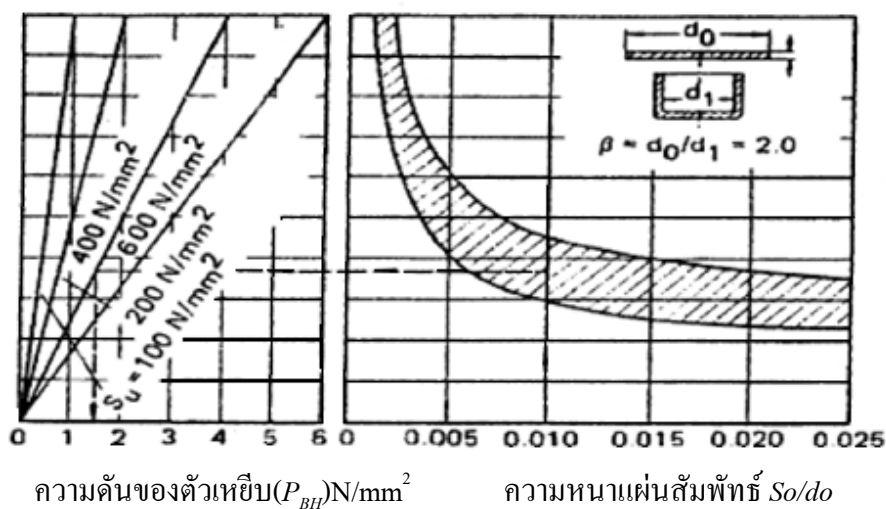
$C$  = ค่าคงที่

$s_u$  = ความเค้นสูงสุด ( $\text{N/mm}^2$ )

$\beta$  = อัตราส่วนการลดรูป

$d_0$  = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของแผ่นขึ้นงาน (mm)

$s_0$  = ความหนาของชิ้นงาน (mm)



รูปที่ 2.5 ค่าแรงกดดันของแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ต้องการในการดึงขึ้นรูปครั้งแรก [15]

### 3) ระยะเพื่อช่องว่างของแม่พิมพ์ (Die Clearance)

ในทางปฏิบัติเพื่อกำหนดระยะเพื่อช่องว่างของแม่พิมพ์มักจะกำหนด โดยรูปสมการที่ได้มาจากการทดลอง สมการเหล่านี้อนุญาตให้ใช้ได้แต่เพียงการดึงขึ้นรูปลึกที่มีชิ้นงานเป็นรูปร่างกลมโดยไม่มีการรีดของเนื้องาน (Ironing) ดังแสดงในสมการที่ 2.6 ถึง 2.9

$$u_D = S_0 + 0.07 \sqrt{10 S_0} \quad \text{สำหรับแผ่นเหล็ก} \quad (2.6)$$

$$u_D = S_0 + 0.02 \sqrt{10 S_0} \quad \text{สำหรับแผ่นอลูมิเนียม} \quad (2.7)$$

$$u_D = S_0 + 0.04 \sqrt{10 S_0} \quad \text{สำหรับโลหะที่ไม่ใช่เหล็กอื่นๆ} \quad (2.8)$$

$$u_D = S_0 + 0.02 \sqrt{10 S_0} \quad \text{สำหรับโลหะผสมอุณหภูมิสูง} \quad (2.9)$$

ถ้าระยะเพื่อช่องว่างของแม่พิมพ์ ( $u_D$ ) มีขนาดใหญ่มาก ชิ้นงานไม่สามารถที่จะขึ้นรูปเป็นขนาดของจริงของทรงกระบอกได้ เนื่องจากขอบบนของรูปถ้วยมีขนาดที่แผ่ขยายออกถ้าระยะเพื่อช่องว่างของแม่พิมพ์มีขนาดเล็กเกินไป การกริดโลหะ (Ironing) ก็จะเกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้ใช้แรงในการดึงขึ้นรูปมากขึ้น และเพิ่มอันตรายจากการแตกของชิ้นงาน ยิ่งกว่านั้นอาจจะมีริ้วรอยเชื่อมเย็น (Cold welding) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างคายกับชิ้นงาน ปัญหาสำคัญในการเล็กระยะเพื่อช่องว่างสำหรับคายที่มีสาเหตุมาจากความแปรผันในความหนาของโลหะแผ่นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อันเนื่องมาจากความสัมพันธ์กับพอกัดความเผื่อของความหนาเป็นอย่างมาก มันอาจจะทำให้บางส่วนแตกได้ในที่เกิดรอยอื่น ๆ ขึ้น เมื่อดึงขึ้นรูปด้วยระยะช่องว่างของคายที่มีขนาดเหมาะสมกับขนาดความหนาของแผ่นงานตามความเป็นจริง ถ้าความหนาของแผ่นงานนั้นเริ่มสูงขึ้นใกล้ขีดจำกัดพิบัติความเผื่อสูงสุด และ ช่องว่างคายที่มีขนาดเล็กเกินไปจะเกิดการรัดตัวของของโลหะขึ้น ซึ่งทำให้ความเป็นไปได้ของการแตกที่ชิ้นงานมีมากขึ้น ถ้าความหนาชิ้นงานมีขนาดใกล้เคียงขีดจำกัดพิบัติความเผื่อต่ำสุด แล้วถ้าระยะช่องว่างคายมีขนาดใหญ่เกินไปรอยเย็นเป็นจิบก็จะก่อตัวขึ้น

การทำชิ้นงานที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม ควรใช้ระยะช่องว่างของคายบริเวณที่มุมมากกว่าบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน เพราะว่าบริเวณมุมจะมีการไหลตัวของ เนื้องานอยู่ในวงจำกัด สำหรับการดึงขึ้นรูปลึกกับความหนาที่ผนังของชิ้นงานที่ต้องการลดขนาด (Ironing) ระยะช่องว่างของคายจะมีขนาดเล็กกว่าความหนาของแผ่นงาน [11]

#### 4) ขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูป

การกำหนดค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปที่เรียกว่า  $\beta_{\max}$  มันเป็นค่าของการดึงขึ้นรูปที่เหมาะสมของวัสดุ และขึ้นกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแผ่นงาน  $d_0$  และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของพื้นที่  $d_1$  ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$\beta_{\max} = \left[ \frac{d_0}{d_1} \right]_{\max} \quad (2.10)$$

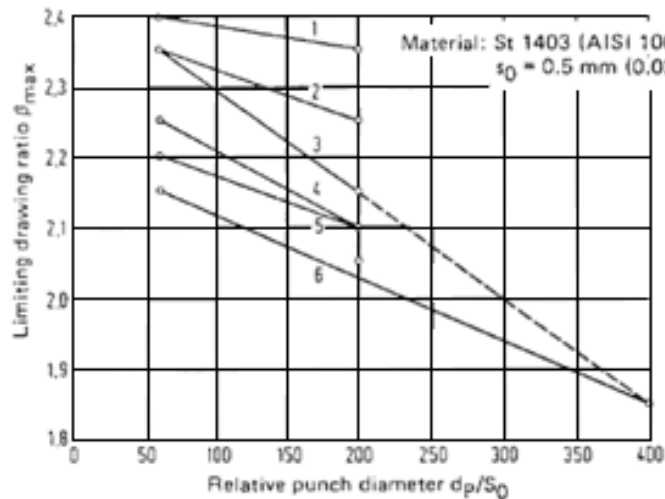
$$\beta_{\max} = \text{ขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปที่เหมาะสมของวัสดุ}$$

$$d_0 = \text{ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแผ่นชิ้นงาน (mm)}$$

$$d_1 = \text{ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของพื้นที่ (mm)}$$

ค่านี้เป็นค่าที่มีผลกระทบตามค่าตัวแปรหลายตัว สิ่งหนึ่งที่เป็นค่าตัวแปรที่สำคัญที่สุดคือ อัตราส่วนความหนากับเส้นผ่าศูนย์กลางแผ่นงานที่มีความสัมพันธ์กับเส้นผ่าศูนย์กลาง

พื้นที่  $d_p/s_0$  โดยปกติค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด  $\beta_{\max}$  จะสูงขึ้นถ้าค่าความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่  $d_p/s_0$  มีค่าต่ำลง ดังนั้นการปฏิบัติงานในระบบของการหล่อขึ้นรูปในการดึงขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด  $\beta_{\max}$  ด้วย ดังนั้นค่าความเสียหายที่ตายและแผ่นจับยึดชิ้นงานจะมีค่าน้อยลง แต่สัมประสิทธิ์ความเสียหายที่พื้นที่มีค่ามากขึ้น จึงสามารถใช้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปที่มีค่ามากได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [11] และตารางที่ 2.1 [4]



รูปที่ 2.6 อัตราส่วนการขึ้นรูป [15]

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด [4]

| Material                             | $\beta_{\max}$ |
|--------------------------------------|----------------|
| Steel sheet , depending on quality   | 1.8 – 2.2      |
| Aluminum , copper , Al Cu Mg sheet   | 2.1            |
| Brass sheet , depending on prestrain | 1.7 – 2.2      |

### 2.3.3 สารหล่อลื่นในงานดึงขึ้นรูปลึก

การเลือกสารหล่อลื่นที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการขึ้นรูป ขึ้นอยู่กับวัสดุที่มาทำชิ้นงาน สภาพผิวของวัสดุ รวมทั้งสภาพผิวของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ด้วย สารหล่อลื่นที่ใช้กันทั่วไปกับงานดึงขึ้นรูปลึก สารที่เป็นตัวผสม ตัวอย่าง เช่น กราไฟต์ ซิงค์ไฟด์ ปูนขาว ซอล์ก ฮาโลเจน และสารประกอบของฟอสฟอรัส หรือเป็นตะกั่วออกไซด์ขาว สารหล่อลื่นที่กล่าวมาถูกใช้ผสมกับน้ำมันเครื่อง เพื่อเป็นส่วนช่วยให้สารเหล่านั้นรวมตัวกันได้เมื่ออยู่ภายใต้แรงกดดันสูง สารหล่อ

ลื่นที่อยู่ในรูปของแข็ง (Solid lubrication) ได้แก่ สารสบู่ (Metal soap) โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ และ กราไฟต์เหลว (Colloidal graphite) ได้ถูกใช้ในงานดิ่งขึ้นรูปอีกด้วย สารดังกล่าวมานี้สามารถที่จะ ปกป้องการสัมผัสโดยตรงระหว่างคายกับแผ่นขึ้นงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุจำพวก ออสเทนไนติก ตัวอย่าง เช่น [X 5 CrNi18 9(AISI 304 SS)] สามารถที่จะใช้กระบวนการดิ่งขึ้นรูปได้โดย ปราศจากรอยขีดข่วน เมื่อแม่พิมพ์ที่ทำมาจากเหล็กแม่พิมพ์ 210 Cr (AISI D3) เพียงแต่ใช้สารสบู่ (Metal soap)หล่อลื่นเท่านั้น ผิวนานสำเร็จจากการตรวจวัดพิสูจน์แล้วว่า อนุภาคองค์ประกอบที่ผิว ของชิ้นงานรูปถ้วยที่ได้ผ่านการดิ่งขึ้นรูปด้วยสารหล่อลื่นแคดเมียมสเตียเรท (Cadmium stearate) ที่ บนแผ่นขึ้นงานชี้ให้เห็นว่าไม่มีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างแผ่นงานกับคาย เมื่อวัสดุที่ใช้กับงาน ดิ่งขึ้นรูปแล้วยังปรากฏว่ามีการขึ้นรูปได้ยากลำบาก เช่น การขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างแบบสี่เหลี่ยม หรือ ขึ้นรูปถ้วยลึก ดังนั้นอาจจำเป็นต้องใช้สารหล่อลื่นช่วย เช่น การเคลือบด้วยฟอสเฟส (Phosphate coating) ในการเพิ่มการหล่อลื่นของตัวมันเองเพื่อจะป้องกันการเกิดลาย (Fretting) ส่วนประกอบของการขึ้นรูปกับชิ้นงานที่มีรัศมีด้านล่างขนาดใหญ่มากนั้นจะต้องการสารหล่อลื่นที่ จะช่วยคงรูปความหนาไว้ มิฉะนั้นมันอาจจะทำให้ชิ้นงานที่จะขึ้นรูปได้ไม่สม่ำเสมอขึ้น ในการดิ่ง ขึ้นรูปแผ่นพอลิที่มาจากพลาสติก (PVC,PTFE) สามารถทำให้สำเร็จในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็น รูปร่างส่วนประกอบแบบง่ายๆ ของวัสดุที่มีความเหนียวแน่น บางครั้งใช้แผ่นงานที่ทำจาก (Stainless-steel) และเคลือบด้วยพลาสติกฟิล์ม ซึ่งอาจจะเป็นการจุ่ม หรือ การสเปรย์ ค่าขีดจำกัด อัตราส่วนการขึ้นรูปที่มีค่ามากสามารถใช้ได้ ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างรัศมีพื้นซ์ กับแผ่นงานมีอัตราสูงขึ้น (จากพื้นซ์ที่มีผิวหยาบ และ พื้นซ์ที่บริเวณนี้ไม่มีสารหล่อลื่น) และแรง เสียดทานระหว่างแผ่นงานกับคายมีอัตราต่ำสุดเท่าที่เป็นไปได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 [15]

ตารางที่ 2.2 สารหล่อลื่นที่ใช้กับการดิ่งขึ้นรูปลึก [15]

| วัสดุและโลหะผสม | ขึ้นรูปเย็น                                                                  | ขึ้นรูปร้อน                                           |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| อลูมิเนียม      | สารละลายสังเคราะห์ MO + FO,E,L ชัสเพนชั่น, Wa ชัสเพนชั่น ,สารละลายของS       | G ชัสเพนชั่น (สารแขวนลอย)                             |
| ทองแดง          | E+FO, MO+FO, S ชัสเพนชั่น, Wa ชัสเพนชั่น, T ชัสเพนชั่นและ สารละลายสังเคราะห์ | ผงสีผสมน้ำมัน (Pigmented pastes) G ชัสเพนชั่น         |
| แมกนีเซียม      | สารละลาย+FC,MO+FC                                                            | G+MoS2, S+Wa, T+G                                     |
| นิกเกิล         | E, MO + EP, CI Wa . CC + S                                                   | G ชัสเพนชั่น MoS2 ชัสเพนชั่น, การเคลือบเรซิน กับ + Sa |

| โลหะทนไฟ                       | แผ่นทองแดง                                                                                   | MoS <sub>2</sub> , G ชั้สเฟนชั้น |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| เหล็กผสมคาร์บอน,<br>โลหะผสมต่ำ | E,S เหลว, Wa , FO + Mo, P, CC +<br>S, MoS <sub>2</sub> หรือ G ในจารบี,<br>สารละลายสังเคราะห์ | G ชั้สเฟนชั้น                    |
| สแตนเลส                        | FO + MO, Wa, P, MO + EP,                                                                     | G ชั้สเฟนชั้น                    |

### 2.3.4 ข้อบกพร่องในระหว่างการขึ้นรูป

การขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet metal forming) ที่มาจากการผลิตโดยวิธีการขึ้นรูปเย็น (Cold forming) ในรูปแบบการปั๊มขึ้นรูป (Stamping) มักจะเกิดความเสียหายแบบการคอคอด (Necking) การฉีกขาด (Tearing) การเกิดรอยย่น (Wrinkling) และเกิดการสปริงตัวกลับ (Spring back) อย่างไรก็ตามวิธีนี้เป็นวิธีที่ทำให้การผลิตชิ้นส่วนเป็นไปอย่างสะดวกและรวดเร็วเมื่อแม่พิมพ์ได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสมจึงมีความจำเป็นที่จะต้องออกแบบกระบวนการปั๊มขึ้นรูปที่ปราศจากความเสียหายจากกรณีดังกล่าว การเกิดรอยย่นและการฉีกขาด จากการปั๊มขึ้นรูปนั้นมักเป็นปัญหาหลักที่ผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรกก่อน จากนั้นจึงพิจารณาผลกระทบจากการเกิดการสปริงตัวกลับ [5]

ปัญหาหลักที่พบในการขึ้นรูปโลหะแผ่นคือการแตก การโก่ง (Buckling) และการย่น การเสียรูป (Shape distortion) โลหะหย่อน (Loose metal) และเนื้อผิวเสีย (Undesirable surface textures) เกิดขึ้นอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างซึ่งจะทำให้ชิ้นงานโลหะแผ่นนั้นใช้ไม่ได้ ผลของปัญหาดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ [4]

#### 1) การแตก (Cracking)

เกิดขึ้นเมื่อแผ่นแบลงก์โลหะได้รับแรงจากการดึงยืดขึ้นรูปหรือแรงเฉือนจากการดรอว์มากเกินไปจนจำกัดความเสียหายของวัสดุ ตามสภาพความเครียดที่พึงจะได้รับ อัตราความเครียดและอุณหภูมิ ในการดึงยืดเริ่มต้นแผ่นโลหะจะบางลงอย่างสม่ำเสมอในพื้นที่ทั่วไป เมื่อไปถึงจุดที่มีการเปลี่ยนรูปมากทำให้เกิดแถบที่บางเฉพาะแห่งที่เรียกว่าการคอคอด ซึ่งสุดท้ายทำให้แผ่นโลหะแตก การเกิดรอยคอคอดโดยทั่วไปถือว่าเป็นความเสียหาย เพราะทำให้เกิดจุดบกพร่องที่มองเห็นได้และทำให้โครงสร้างอ่อนแอ การแตกจากการเฉือนสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่มีการลดความหนามาก่อน ตัวอย่างทั่วไปของการแตกลักษณะนี้ก็คือการตัดซอย (Slitting) การแบลงก์ (Blanking) และการทริม (Trimming) ในการปฏิบัติงานแผ่นโลหะจะถูกเฉือนโดยขอบคมมีดที่ใช้แรงกดในแนวตั้งฉากกับระนาบของแผ่นโลหะจะทำให้มีความเสียหายเกิดขึ้น แต่จะน้อยกว่าความเสียหายจากการดึงยืดขึ้นรูป

## 2) การโก่งและการย่น (Buckling and Wrinkling)

ในการขึ้นรูปด้วยพื้นที่กดอัดบนแผ่นแบลงก์โลหะจะทำให้แผ่นโลหะยืดและดึงผ่านแหวนจับยึดของแผ่นแบลงก์บริเวณขอบอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีขนาดเล็กลงทำให้เกิดความเค้นกดในแนวเส้นรอบวง ถ้าความเค้นนี้มีค่าถึงระดับวิกฤติของวัสดุและความหนาจะทำให้เกิดเป็นคลื่นเล็กน้อยซึ่งเรียกว่าการโก่ง การโก่งอาจจะพัฒนาเป็นคลื่นที่มองเห็นได้ชัดจำนวนมากต่อเนื่องกันเรียกว่ารอยย่น ถ้าแรงจับยึดแผ่นแบลงก์ไม่สูงพอสามารถทำให้เกิดรอยย่นที่ตำแหน่งอื่นๆได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่มีการเปลี่ยนหน้าตัดกระทันหันและบริเวณที่ไม่มีโลหะไหลเข้ามาหรือสัมผัสเพียงด้านเดียวเท่านั้น ถ้ามีรอยย่นมากผิดปกติโลหะอาจพับทบกันสองถึงสามชั้นซึ่งอาจทำให้บริเวณอื่นแตกได้เพราะโลหะไม่สามารถไหลตามปกติได้ ด้วยเหตุนี้การเพิ่มแรงจับยึดแผ่นแบลงก์จึงใช้แก้ปัญหาการแตกได้

## 3) การเสียรูป (Shape distortion)

โลหะจะเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติกด้วยแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป เมื่อเอาแรงภายนอกออกความเค้นยืดหยุ่นภายในมีการคลายตัว บางแห่งที่มีการคลายตัวอย่างสมบูรณ์ก็ทำให้ขนาดของชิ้นงานเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ในบริเวณที่ได้รับการดัด (Bending) มีการกระจายความเค้นยืดหยุ่นตลอดความหนา นั่นคือความเค้นที่ผิวด้านนอกแตกต่างจากความเค้นด้านใน ถ้ารูปทรงของชิ้นงานไม่สามารถบังคับความเค้นเหล่านี้ไว้ได้ การคลายตัวจะทำให้รูปร่างของชิ้นงานเปลี่ยนไปซึ่งเรียกว่าการเสียรูปหรือการดีดกลับ (springback) การดีดกลับสามารถชดเชยสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ให้เหมาะสมกับสมบัติวัสดุ แต่อาจจะยังคงมีปัญหาหากถ้าแผ่นแบลงก์แต่ละแผ่นมีสมบัติของวัสดุหรือกรรมวิธีเปลี่ยนแปลง

## 4) โลหะหย่อน (Loose metal)

เกิดขึ้นในบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนรูปและไม่ต้องการให้เกิดขึ้น เพราะจะมีการเปลี่ยนรูปทรงได้ง่าย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าออยล์คานนิ่ง (Oil canning) ซึ่งอาจมีบางแห่งขรุขระหรือนูนจากปกติ ในการดัดถือเป็นมุมแหลมตั้งแต่ 2 แห่งขึ้นไปอย่างทันทีในทิศทางเดียวกันเช่น การดัดเป็นลอนแหลมๆ มีแนวโน้มที่จะทำให้โลหะระหว่างลอนมีการหย่อนเพราะการดึงโลหะข้ามลอนเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก บางครั้งอาจหลีกเลี่ยงปัญหาได้โดยไม่ให้โลหะสัมผัสรอยนูนทั้ง 2 รอยในเวลาเดียวกันดังนั้นการยืดเกิดขึ้นก่อนสัมผัสรอยที่สอง โลหะหย่อนมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นได้ในบริเวณศูนย์กลางของชิ้นงานขนาดใหญ่ที่ค่อนข้างแบนเรียบหรือมีความโค้งเล็กน้อย การเพิ่มแรงเพื่อควบคุมรอบๆขอบแผ่นแบลงก์ทำให้ปัญหานี้ดีขึ้น

## 5) เนื้อผิวเสีย (Undesirable surface textures)

โลหะแผ่นที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าโลหะมีเกรนหยาบ มักจะทำให้เนื้อผิวโลหะไม่เรียบซึ่งเรียกว่าผิวส้ม (Orange peel) ปกติจะไม่ยอมให้เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานที่มองเห็นได้ในขณะใช้งาน ปัญหาของผิวที่เกิดขึ้นบนโลหะอีกอย่างหนึ่งก็คือการยึดที่จุด

คราก นั่นคือวัสดุยึดตัวออกอีกหลายเปอร์เซ็นต์หลังการครากโดยไม่ต้องเพิ่มแรงกระทำ การเปลี่ยนรูปที่ระดับความเครียดต่ำในโลหะเหล่านี้เกิดขึ้นมากในลักษณะที่เป็นแถบไม่สม่ำเสมอบนผิวโลหะ เรียกว่าเส้นลือเดอร์ (Lueders line) หรือรีวคราก (Stretcher strains) ความบกพร่องนี้จะหายไปเมื่อมีระดับความเครียดปานกลางและสูง อย่างไรก็ตามชิ้นงานเกือบทุกชิ้นมีบางบริเวณที่มีระดับความเครียดต่ำความบกพร่องนี้ไม่สามารถปกปิดด้วยการพ่นสี เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์ที่ผ่านการบ่มอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมเจือบางชนิดเกิดเส้นลือเดอร์อย่างชัดเจน [4]

### 2.3.5 ชนิดของเหล็กแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูป

เหล็กแผ่นรีดเย็นเป็นโลหะที่ใช้มากในการอัดโลหะ เนื่องจากเหล็กแผ่นชนิดนี้จะถูกรีดเป็นแผ่น ๓ อุณหภูมิห้องจึงได้ผิวเรียบและละเอียด นิยมใช้ทำตัวถังส่วนนอกรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องเขียน หรือชิ้นส่วนของเครื่องใช้ที่ต้องการความสวยงาม JIS (Japanese Industrial Standard) ได้กำหนดชนิดของเหล็กแผ่น SPCC เป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุดในงานอัดโลหะ ยกเว้นอัดขึ้นรูปลึกมาก (Sever deep-drawing) ผิวของเหล็กแผ่นเหล่านี้จะแบ่งออกเป็นชนิดด้าน (Dull sheet) ซึ่งรีดจากลูกรีดผิวหยาบ และผิวเรียบ (Bright sheet) ซึ่งรีดจากลูกรีดละเอียด

SPCC เป็นสัญลักษณ์หนึ่งของเกอเหล็ก (Steel grade) ตามมาตรฐาน JIS G3141:1996 (Cold reduced carbon steel sheets and strip) ซึ่งเป็นเหล็กแผ่นรีดเย็น (Commercial quality) ใช้สำหรับงานทั่วไป นอกจากนี้ยังมีเกรดอื่นอีก เช่น SPCD ซึ่งเป็น (Drawing quality) ใช้สำหรับงานขึ้นรูป และ SPCE (Deep draw quality) สำหรับงานขึ้นรูปลึก ดังแสดงในตารางที่ 2.3 [13]

ตารางที่ 2.3 เหล็กรีดเย็น (มาตรฐาน JIS) มาตรฐาน [16]

| ชนิด | ส่วนผสม |    |       |        |        | การใช้งาน        |
|------|---------|----|-------|--------|--------|------------------|
|      | C       | Si | Mn    | P      | S      |                  |
| SPCC | <0.12   | -  | <0.05 | <0.040 | <0.045 | ใช้อัดโลหะทั่วไป |
| SPCD | <0.10   | -  | <0.45 | <0.035 | <0.035 | ใช้อัดขึ้นรูป    |
| SPCE | <0.18   | -  | <0.40 | <0.030 | <0.030 | ใช้อัดขึ้นรูปลึก |

ตารางที่ 2.4 เหล็กรีดเย็น (มาตรฐาน JIS) สมบัติทางกล [16]

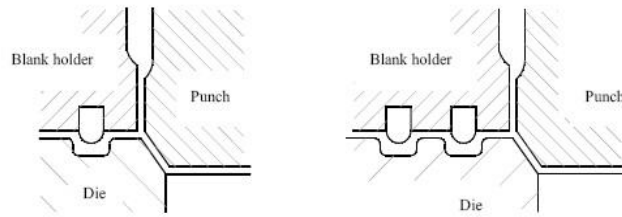
| Symbol<br>of<br>quality | Tensile<br>strength<br>(N/mm2)                       | Elongation %   |                |              |               |                    |                    | Tensile<br>test<br><br>piece |
|-------------------------|------------------------------------------------------|----------------|----------------|--------------|---------------|--------------------|--------------------|------------------------------|
|                         | Discrimination according to nominal<br>thickness(mm) |                |                |              |               |                    |                    |                              |
|                         | 0.25 or<br>over                                      | 0.25 to<br>0.4 | 0.40 to<br>0.6 | 0.60 to<br>1 | 1.0 to<br>1.6 | 1.6 to<br>a<br>2.5 | 2.50<br>or<br>over |                              |
| SPCC                    | 270                                                  | 32             | 34             | 36           | 37            | 36                 | 36                 | No.5,in                      |
| SPCD                    | 270                                                  | 34             | 36             | 38           | 39            | 40                 | 40                 | rolling                      |
| SPCE                    | 270                                                  | 36             | 38             | 40           | 40            | 42                 | 42                 | direction                    |

### 2.3.6 ดรอว์บีด (Draw bead)

การควบคุมแรงกดแบบลงก์ไฮดรอลิกที่ไม่พอเพียง จะทำให้เกิดรอยย่นของโลหะ ซึ่งการย่นนี้จะให้โลหะแผ่นไม่สามารถที่จะไหลตัวได้ ทำให้บริเวณส่วนกันของชิ้นงานถูกพื้นซ์ดันฉีกขาด แต่ถ้าแรงกดของแบบลงก์ไฮดรอลิกมากเกินไป โลหะก็จะไม่สามารถไหลตัวเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะการขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจะทำให้อัตราการไหลของแต่ละจุดไม่เท่ากัน ทำให้แรงที่ใช้ในการกดแต่ละจุดไม่เท่ากันด้วย สำหรับบริเวณที่ต้องการแรงกดมากจะใช้ดรอว์บีดเข้ามาช่วยเพื่อทำให้การไหลตัวของโลหะช้าลง [2]

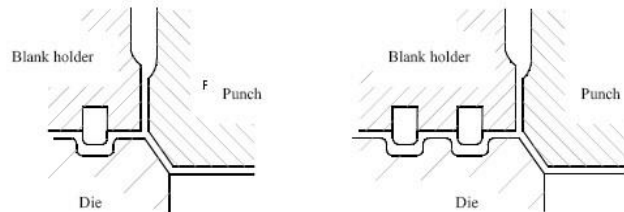
ดรอว์บีดมีหน้าที่ควบคุมการไหลตัวของโลหะที่จะไหลเข้าไปในคाय และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่น (Wrinkle) ในขณะที่ขึ้นรูปนอกจากนี้ยังช่วยลดแรงกดของแบบลงก์ไฮดรอลิกและตัวรีดโลหะให้ความเครียดลดลงเป็นการเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะ การติดตั้งดรอว์บีดสามารถติดตั้งที่ของแบบลงก์ไฮดรอลิกหรือที่คायก็ได้แต่ปกตินิยมติดตั้งอยู่ที่ของแบบลงก์ไฮดรอลิก และร่องบีด (Bead) จะอยู่ที่คाय [1]

1) ปลายโค้งมน (Round Bead) ปลายโค้งมนมีทั้งแบบเดี่ยว (Single bead) ใช้กับการขึ้นรูปโดยทั่วไปที่ต้องการควบคุมอัตราการไหลตัวของโลหะในขณะที่ขึ้นรูป และแบบคู่ (Double bead) ใช้ในกรณีที่ Single bead ไม่สามารถควบคุมการไหลของโลหะได้เพียงพอ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 [1]



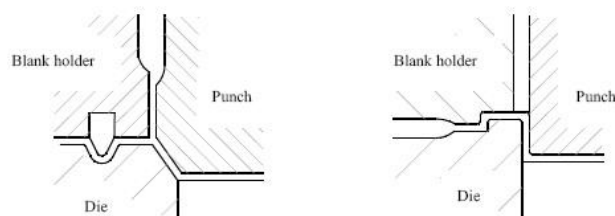
รูปที่ 2.7 (ก) แบบเดี่ยว (Single bead) (ข) แบบคู่ (Double bead) [1]

2) แบบสี่เหลี่ยม (Square bead) สามารถควบคุมการไหลของโลหะได้มากกว่า (Double type) และแบบคู่ (Double bead) ควบคุมอัตราการไหลของโลหะได้ดีกว่า 3 แบบที่กล่าวมา ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 (ก) แบบเดี่ยว (Single bead) (ข) แบบคู่ (Double bead) [1]

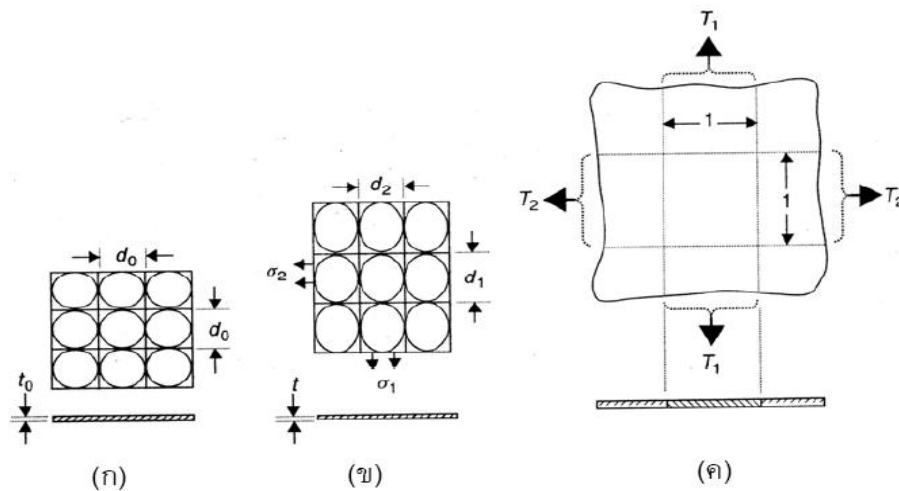
3) แบบสามเหลี่ยม (Three angle bead) จากรูปที่ 2.11 (ก) และแบบไม่ไหลตัว (Lock bead) (ข) ใช้ในการขึ้นรูปที่ไม่ต้องการให้โลหะเกิดการไหลตัวในระหว่างการขึ้นรูปดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 (ก) สามเหลี่ยม (Three angle bead) (ข) แบบไม่ไหลตัว (Lock bead) [1]

### 2.3.7 การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น

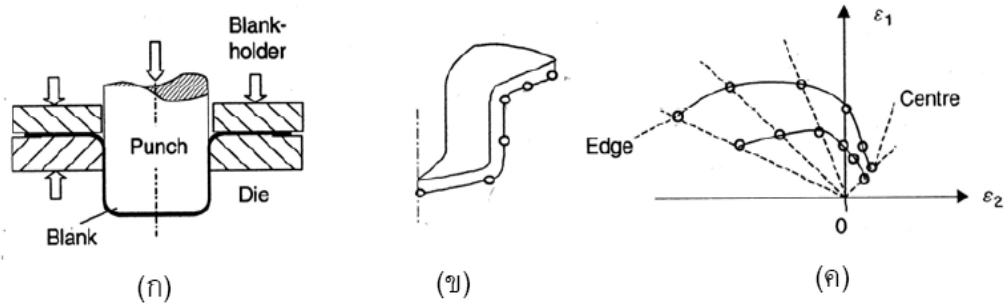
ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane stress) พิจารณา (Work hardening) ของวัสดุ ซึ่งเขากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูป ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา  $t_0$  ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $d_0$  หรือตารางขนาด  $d_0$  (ก) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปวงกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนหลัก (Major) คือ  $d_1$  แกนรอง (Minor) คือ  $d_2$  ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางหลักของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ข) ส่วนความหนา คือ  $t$  ตามที่กรณี (ค) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ  $\sigma_1$  และ  $\sigma_2$  ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กรณีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริด [14]

### 2.3.8 แผนภาพความเครียด (Strain diagram)

ความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้น สามารถวัดได้จากกริดวงกลม แผนภาพความเครียด ตำแหน่งต่างๆ ของถ้วยทรงกระบอก การขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก ขึ้นส่วนย่อยของถ้วยทรงกระบอก แสดงค่าความเครียดที่วัดได้ ผลค่าความเครียดที่ได้จากการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 2.11 [17]



รูปที่ 2.11 แผนภาพความเครียดตำแหน่งต่างๆ ของถ้วยทรงกระบอก [17]

1) ค่าความเครียดหลัก (Principal strains)

ความเครียดหลักที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการ

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} ; \quad \varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} ; \quad \varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} \quad (2.15)$$

$\varepsilon_1$  = ค่าความเครียดหลัก

$\varepsilon_2$  = ค่าความเครียดรอง

$\varepsilon_3$  = ค่าความเครียดที่ความหนา

$d_0$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกริด

$d_1$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกริดเปลี่ยนแปลงในแกนหลัก

$d_2$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกริดเปลี่ยนแปลงในแกนรอง

$t$  = ค่าความหนาชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลง

$t_0$  = ค่าความหนาชิ้นงาน

2) อัตราส่วนของความเครียด (Strain ratio)

โดยปกติเส้นแนวความเครียด (Strain Path) ยังคงเป็นสัดส่วนเส้นตรง

$$\beta = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{\ln \frac{d_2}{d_0}}{\ln \frac{d_1}{d_0}} \quad (2.16)$$

- $\beta$  = อัตราส่วนความเครียด
- $\varepsilon_1$  = ค่าความเครียดหลัก
- $\varepsilon_2$  = ค่าความเครียดรอง
- $d_0$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางกริด
- $d_1$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางกริดเปลี่ยนแปลงในแกนหลัก
- $d_2$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางกริดเปลี่ยนแปลงในแกนรอง

### 3) ความเครียดหนาและความหนา (Thickness strain and Thickness)

จากสมการที่ 2.15 ความเครียดหาได้โดยการวัดความหนาหรือหาได้จากความเครียดหลัก (Major strain) ความเครียดรอง (Minor strain) โดยให้พิจารณาอัตราการเปลี่ยนรูปที่ปริมาตรคงที่ [17]

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} = -(1 + \beta)\varepsilon_1 = -(1 + \beta)\ln \frac{d_1}{d_0} \quad (2.17)$$

- $\beta$  = อัตราส่วนความเครียด
- $\varepsilon_1$  = ค่าความเครียดหลัก
- $\varepsilon_3$  = ค่าความเครียดที่ความหนา
- $t$  = ค่าความหนาชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลง
- $t_0$  = ค่าความหนาชิ้นงาน
- $d_0$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางกริด
- $d_1$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางกริดเปลี่ยนแปลงในแกนหลัก

### 2.3.9 คุณสมบัติของยาง

ยาง (Rubber) เป็นวัสดุพอลิเมอร์ประเภทหนึ่งที่มีความยืดหยุ่น สามารถยืดออก หรือสามารถเปลี่ยนขนาดได้มากเมื่อถูกดึง และกลับสู่สภาพเดิมเมื่อปล่อยแรงดึง ทั้งนี้เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของยางมักจะพันกันไปมาอย่างไม่เป็นระเบียบ เรียกการจัดตัวแบบนี้ว่า อสัณฐาน จากสมบัติพิเศษที่ยืดหยุ่นได้นี้ทำให้บางครั้งเรียกยางว่า “อีลาสโตเมอร์” (Elastomer) เนื้อของยางเป็นพอลิเมอร์ของไอโซพรีน โดยมีไอโซพรีนเชื่อมต่อกันอยู่ตั้งแต่ 1500-15000 หน่วย [18]

### 1) ยางธรรมชาติ (Natural Rubber : NR)

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea Braziliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่น และมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณ 30 % แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำนํายางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) จนกระทั่งได้นํายางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60 % เรียกว่า นํายางข้น (concentrated latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของนํายางข้นให้เก็บไว้ได้นาน นํายางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมถุงมือยางและถุงยางอนามัย เป็นต้น แต่เมื่อนำนํายางสดที่กรีดยได้จากเดิมกรดเพื่อให้อนุภาคนํายางจับตัวกันเป็น ของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็รีดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด (two-roll mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 °C เป็นเวลา 3 วันก็จะได้ยางแผ่นรมควัน

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene กล่าวคือ มี isoprene ( $C_5H_8$ ) โดยที่  $n$  มีค่าตั้งแต่ 15-20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่ อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด มันจึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งแรงมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไป ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) สูง [18]

● คุณสมบัติของยางธรรมชาติ มีความยืดหยุ่นสูง มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการเหนียวติดกัน มีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมากโดยไม่ต้องเติมสารเสริมแรง มีความทนต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง มีความต้านทานต่อการล้าตัวสูง มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก ยางดิบละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เนื่องจากตัวยางดิบไม่มีขั้ว และไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม แต่จะทนต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรือแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังทนต่อการกรด และด่างอ่อน แต่จะไม่ทนต่อการกรดและด่างเข้มข้น ไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ไม่ทนต่อโอโซน การกระเด็นกระดอนสูง อุณหภูมิการใช้งานตั้งแต่ -55 - 70 องศาเซลเซียส แต่หากเก็บไว้นานๆ จะทำให้ยางสูญเสียความยืดหยุ่นลง [19]

● ชนิดของยางธรรมชาติ 8 เกรด คือ ยางแท่งเอสทีอาร์ 5 แอล (STR 5L) ยางแท่ง

เอสทืออาร์ 5 ซีวี 60 (STR 5CV 60) ยางแท่งเอสทืออาร์ 20 (STR 20) ยางแท่ง เอสทืออาร์ 20 ซีวี 60 (STR 20CV 60) ยางskimแท่ง (Skim Block) ยางเครพขาวแท่ง(Pale Crepe) ยางแผ่นฟุ้งแห้ง(ADS) และยางแผ่นรมควันชั้น 3 (RSS No. 3) โดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์ ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 180 องศาเซลเซียส ซึ่งระบบวัลคาไนซ์ที่ศึกษา คือ ระบบกัมมะถันปกติ เชมอีวี และอีวี โดยมี N-tert-butyl-2-benzothiazyl sulphenamide (TBBS) เป็นสารตัวเร่ง จากการคำนวณค่าคงที่อัตราการวัลคาไนซ์และพลังงานการกระตุ้นให้เกิดการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ โดยสมมติว่าปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง พบว่า ค่าพลังงานการกระตุ้นให้เกิดการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเชมอีวี และอีวี มีค่าอยู่ในช่วง 21.18 ถึง 39.24 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งมีแนวโน้มสูงกว่ายางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถันปกติ และจากการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ (ความแข็ง ความทนต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาด) พบว่ายางskim จะมีความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดก่อนบ่มแรงดีกว่ายางธรรมชาติเกรดอื่น ๆ แต่หลังบ่มแรงยางแท่งเอสทืออาร์ 5ซีวี 60 จะมีความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดดีที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2.5 [19]

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ [19]

| Properties                   | STR 20     | RSS No.3   | STR 5L     | STR 5CV60  | Crepe      | STR 20CV60 |
|------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Tensile strength (MPa)       | 18.63±2.24 | 20.64±2.94 | 20.91±1.24 | 20.12±1.02 | 20.85±1.93 | 18.05±1.87 |
| Tensile strength (MPa) aging | 20.19±1.33 | 18.31±3.03 | 19.25±0.97 | 22.65±0.87 | 17.97±1.97 | 20.61±1.39 |
| 300% modulus (MPa)           | 5.24±0.16  | 5.52±0.25  | 5.44±0.22  | 5.51±0.34  | 4.89±0.15  | 5.07±0.17  |
| 300%modulus (MPa) aging      | 6.34±0.15  | 6.64±0.20  | 6.11±0.33  | 6.48±0.21  | 5.87±0.27  | 6.28±0.19  |
| Elongation at break(%)       | 634±50.68  | 663±63.38  | 680±17.24  | 659±1.44   | 705±33.92  | 637±30.75  |
| Elongation at break(%) aging | 594±16.82  | 565±54.11  | 597±16.57  | 646±13.62  | 584±36.32  | 610±14.81  |
| Tear strength (N/mm)         | 53.57±3.66 | 58.97±3.92 | 52.14±8.79 | 52.68±4.45 | 52.76±6.64 | 51.38±4.79 |
| Tear strength (N/mm) aging   | 52.71±2.57 | 52.36±2.53 | 51.45±1.54 | 53.95±3.83 | 50.33±2.03 | 49.93±2.67 |
| Hardness (Shore A)           | 51         | 51         | 52         | 54         | 54         | 63         |

## 2) ยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber : SR)

ในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 ยางธรรมชาติถือว่าเป็นยุทธปัจจัยเกิดการขาดแคลน และเนื่องจากประเทศในแถบยุโรปและอเมริกาไม่มียางธรรมชาติ จึงทำให้มีการคิดค้นผลิตยางเทียมขึ้นมา จากผลผลิตของการกลั่นน้ำมัน ผลการค้นคว้าดังกล่าว จึงได้ยางเทียมขึ้นมา ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ ในปัจจุบันเราใช้น้ำมันปิโตรเลียมในการสังเคราะห์ยางเทียม [15]

การผลิตยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกการผลิตมอนอเมอร์ (Monomer) ซึ่งมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ยางส่วนใหญ่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และการนำมอนอเมอร์หลายๆ มอนอเมอร์มาต่อกันให้ได้เป็นพอลิเมอร์ ซึ่งเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ว่า ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ยางสังเคราะห์แต่ละชนิดจะแตกต่างกันที่ชนิดของมอนอเมอร์ ถ้ายางสังเคราะห์ประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดเดียวมาเรียงต่อกันก็จะเรียกยางสังเคราะห์ที่ได้ว่า โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) แต่ยางสังเคราะห์บางชนิดอาจประกอบด้วยมอนอเมอร์จำนวน 2 ชนิดมาเรียงต่อกัน จะเรียกว่า โคพอลิเมอร์ (Copolymer) [20]

- คุณสมบัติของยางสังเคราะห์ สามารถยืดหยุ่นตัวได้ ทนต่อแรงดึงได้ทนต่อการสึกหรอหรือขีดได้ ทนต่อน้ำมันแร่ และสารละลายอีกหลายชนิด ทนต่อไขมัน ทนความร้อนได้สูงบางชนิดสูงถึง 200°C ทนต่อการรั่วซึมของแก๊สได้ [19]

- ชนิดของยางสังเคราะห์ยางสังเคราะห์ที่ใช้งานกันในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะนำเอายางธรรมชาติมาผสมรวมอยู่ด้วย เพื่อต้องการคุณสมบัติที่ดีบางประการของยางธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้จะใช้ยางสังเคราะห์ชนิด ยางคลอโรพรีน (Chloroprene Rubber : CR) ใช้ในการทดลองทำครอว์บีด ยางคลอโรพรีน (Chloroprene Rubber : CR) มีชื่อทางการค้าว่ายางนีโอพรีน (Neoprene) เป็นยางที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ของโคโรพรีน (Chloroprene monomer) โมเลกุลของยาง CR สามารถจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ยางชนิดนี้จึงสามารถตกผลึกได้เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ดังนั้นยาง CR นอกจากจะมีความทนทานต่อแรงดึงสูง (โดยที่ไม่ใส่สารตัวเติมเสริมแรง) ยังมีความทนทานต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อการขูดสูงอีกด้วย

- การใช้งานยาง CR เกรดที่สามารถตกผลึกได้เล็กน้อยถึงปานกลางจะถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติเชิงกลที่ดี ทนต่อการติดไฟ ทนต่อน้ำมัน สภาพอากาศ และโอโซน ซึ่งผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้งานในลักษณะดังกล่าว ได้แก่ ยางซีล ท่อยางเสริมแรง ยางพันลูกกลิ้ง สายพานลำเลียง ยางกันกระแทก และผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ในงานก่อสร้าง

- ความทนทานต่อแรงดึงและการฉีกขาด (Tensile and tear strength) เนื่องจากยาง CR สามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด (เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ) ดังนั้นยางชนิดนี้จึงมีความ

ทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อการล้าก่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ ที่ไม่สามารถดกผลึกได้ (แต่ยังคงต่ำกว่ายางธรรมชาติ) [20]

## 2.4 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

### 2.4.1 บทนำการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Introduction to Finite Element Analysis)

ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis : FEA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหาที่หลากหลายในทางวิศวกรรม [21] ซึ่งต้องประกอบด้วยสมการควบคุมระบบ และใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อแก้สมการ ในระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมกันด้วยจุดโหนด (Node) ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของปัญหาโดยประมาณต้องนำสมการควบคุมระบบมาสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์บนโดเมน จากนั้นจึงทำการปัญหาดังกล่าวซึ่งจะได้ผลเฉลยของปัญหาที่จุดต่อบนโดเมน ถึงแม้ว่าการพัฒนาระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์แรกเริ่มเดิมทีจะเน้นไปที่การศึกษาความเค้นในโครงสร้างที่ซับซ้อน ตั้งแต่นั้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในสาขาที่เกี่ยวข้องทางกลศาสตร์ เพราะระเบียบการนี้มีความหลากหลาย อีกทั้งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีความยืดหยุ่นได้ ซึ่งทำให้ได้รับความสนใจในสถานศึกษาทางด้านวิศวกรรม และในอุตสาหกรรม [23] นอกจากนี้ที่กล่าวข้างต้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิเคราะห์ได้ดังนี้ ความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้าง (Structural Analysis) ระบบของความร้อน (Thermal System Analysis) การไหล และการไหลที่มีการนำพาความร้อน (Flow Analysis , Flow + Convection Heat Transfer) กระบวนการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน (Thermo mechanical Process Analysis) เช่น การตีขึ้นรูป (Forging) การรีดขึ้นรูป (Rolling) งานฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) ฯลฯ [3]

จากข้างต้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์มีประสิทธิภาพมากก็จริงแต่ทว่า ก็ยังพบข้อเสียของการใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองสถานการณ์เพื่อหาผลลัพธ์ของปัญหา ซึ่งควรระลึกเสมอทุกครั้งที่มีการใช้ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ หรือ ระเบียบการที่มีหลักการคล้ายคลึงกันคือ อิทธิพลของความเค้นที่ให้ความสำคัญของปัญหา ตัวแปรอื่นอีก ดังเช่น สมบัติของวัสดุแต่ละชนิดที่นำมาวิเคราะห์ ลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตของชิ้นงาน และที่สำคัญคือ การป้อนข้อมูลเข้ากระบวนการบางทีผลลัพธ์ของปัญหาอาจผิดพลาดถ้าหากป้อนข้อมูลที่ไม่ถูกต้องเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ซึ่งบางทีอาจถูกมองข้ามจากนักวิเคราะห์ หรือบางครั้งสิ่งที่สำคัญยิ่งคือ หลักการในการสร้างแบบจำลองตามทฤษฎีนั้นจะขึ้นอยู่กับทักษะการฝึกฝนของนักวิเคราะห์ โดยนักวิเคราะห์ต้องรู้จักวิเคราะห์ และประมวลผล ซึ่งจะทำให้การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลองมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นส่งผลให้ผลลัพธ์จากการทดลองมีความเป็นไปได้มาก [23]

ในการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Software) ในการวิเคราะห์โดยปกติทั่วไปจะประกอบด้วย 3 หลักการที่สามารถจัดเรียงลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

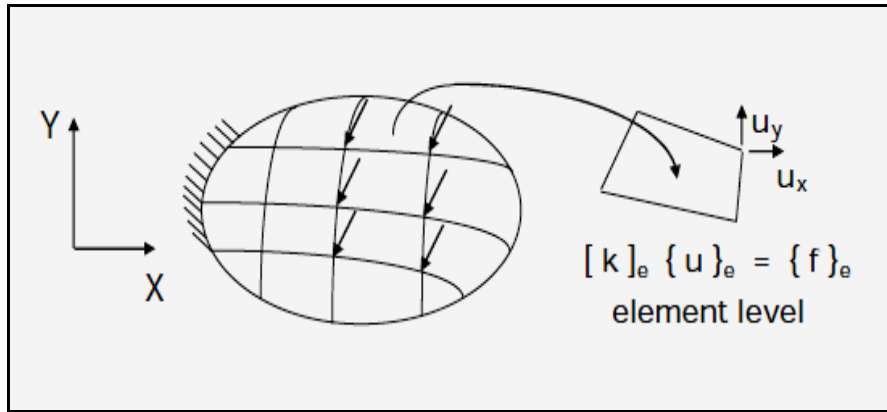
1. ขั้นตอนการเตรียมกระบวนการ (Preprocessing) โดยทั่วไปใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองของส่วนที่จะทำการวิเคราะห์ ซึ่งแบ่งรูปทรงเรขาคณิตออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ โดยที่เอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดโหนด แนนอนที่สุดโหนดนี้จะถูกกำหนดการเคลื่อนที่ และนอกเหนือจากนี้จะต้องทำการกำหนดแรง หรือ ภาระที่มากระทำกับชิ้นงานที่ต้องวิเคราะห์ ในขั้นตอนเตรียมการ การเตรียมแบบจำลองนี้จะต้องใช้เวลาในการเตรียมเป็นจำนวนมาก และนอกจากนี้ขั้นตอนเตรียมการบางกระบวนการสามารถรวมกับขั้นตอนออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบได้ [23]

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis) ข้อมูลต่างๆ เช่นแบบจำลองเอลิเมนต์ เงื่อนไขต่างๆ ฯลฯ ที่ได้ถูกเตรียมการจากขั้นตอนการเตรียมกระบวนการจะถูกนำมาใช้ป้อนเข้าสู่ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ตามหลักการของระเบียบการเอง ที่สร้าง และแก้ไขปัญหาแบบเชิงเส้น (Linear) หรือไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ด้วยสมการทางพีชคณิต โดยไฟไนต์เอลิเมนต์มีสมการรูปทั่วไป ดังแสดงในสมการที่ 2.18

$$\{k\} \{d\} = \{f\} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $K$  = ค่าความแข็ง (Stiffness Matrix)  
 $f$  = ค่าแรงที่มากระทำต่อเอลิเมนต์  
 $d$  = ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (DOF)

เมื่อมีการแทนที่  $d$  และ  $f$  อีกทั้งมีการประยุกต์ใช้แรงภายนอกที่จุดสำคัญ การสร้างสมการเมตริกซ์  $K$  ขึ้นอยู่กับชนิดของปัญหาที่ถูกกระทำ และเกณฑ์ของการวัด หน่วยที่นำมาประกอบเป็นโครงผูกมัดนี้ช่วยให้เข้าใจประเด็น จุดหมายของโครงร่างการวิเคราะห์ความเค้นที่ยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น (Linear Elastic Stress Analyses) บางครั้งในรหัสการประมวลเอลิเมนต์ก็มีมากมาย ซึ่งเอลิเมนต์ที่มีความหลากหลายจะมีความเหมาะสมกับรูปแบบปัญหาแต่ละชนิด หลักเกณฑ์ที่เป็นข้อดีของไฟไนต์เอลิเมนต์คือ ปัญหาหลากหลายประเภทสามารถใช้รหัสการประมวลได้ด้วยรหัสเดียวกัน แต่การระบุชนิดของเอลิเมนต์จากคลังเก็บ หรือ ห้องสมุด (library) [23]

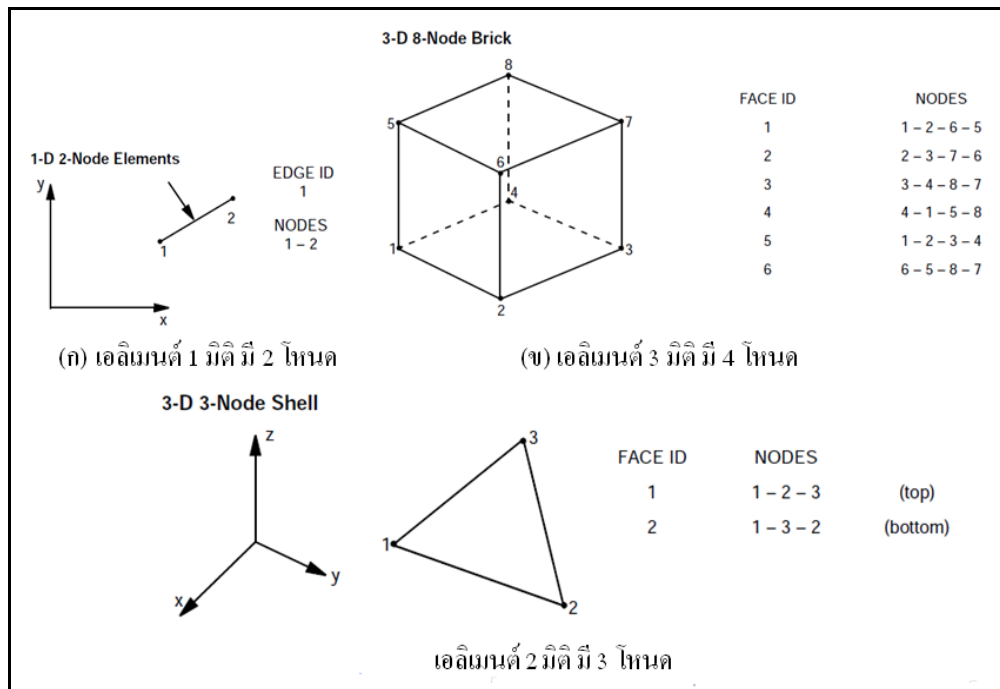


รูปที่ 2.12 ค่าแรงกระทำต่อเอลิเมนต์ (f) ที่ทำให้โหนดมีการเคลื่อนที่ (U) [23]

3. ขั้นตอนการนำเสนอกระบวนการ (Post Processing) ก่อนหน้านี้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ผู้ใช้จะต้องเพ่งเอาใจใส่แถวของตัวเล็กที่ถูกสร้างขึ้นโดยรหัส (Code) การลงรายละเอียดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเค้นลงบนแบบจำลองให้มีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ด้วยวิธีนี้ทำให้พบข้อผิดพลาดได้ง่าย และจุดอันตราย อีกทั้งรหัสที่ทันสมัยจะใช้ภาพกราฟิกแสดงเพื่อให้ง่ายต่อการเห็นผลลัพธ์ ซึ่งรูปแบบของการนำเสนอทางกราฟิกส์จะแสดงเป็นระดับชั้นสีของความเค้นจนเต็มบนแบบจำลอง [24]

#### 2.4.2 โหนด (Node)

โหนดเป็นตัวช่วยเชื่อมต่อโครงสร้างขึ้นเล็กๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) แต่ละเอลิเมนต์ให้ติดกันด้วยจุดของโหนด นอกจากนี้โหนดยังช่วยในการกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ที่มีองศาอิสระ โดยปกติแล้วโหนดจะอยู่ที่มุมของเอลิเมนต์ หรือ จุดของเอลิเมนต์ แล้วกลุ่มของเอลิเมนต์และโหนดจะอยู่ติดกันเป็นกลุ่มที่เรียกว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) จะเป็นตัวแทนของชิ้นงานเพื่อนำไปจำลองเป็นสมการเมทริกซ์ (Matrix) เพื่อนำไปคำนวณที่ซับซ้อนต่อไป [25]

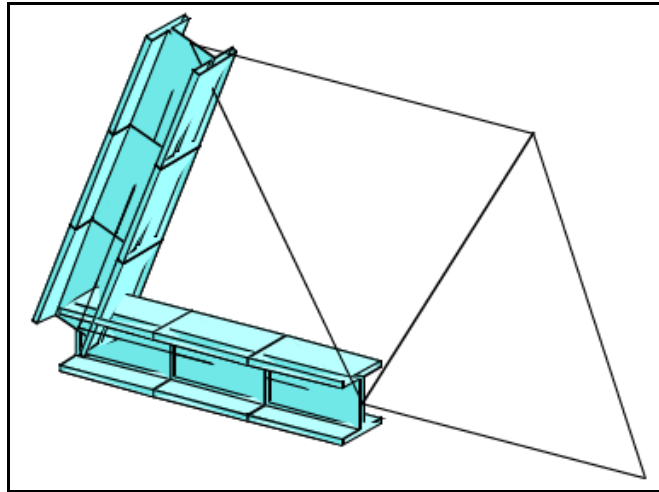


รูปที่ 2.13 ตัวอย่างโหนดในเอลิเมนต์แต่ละมิติ [26]

#### 2.4.3 เอลิเมนต์ (Element)

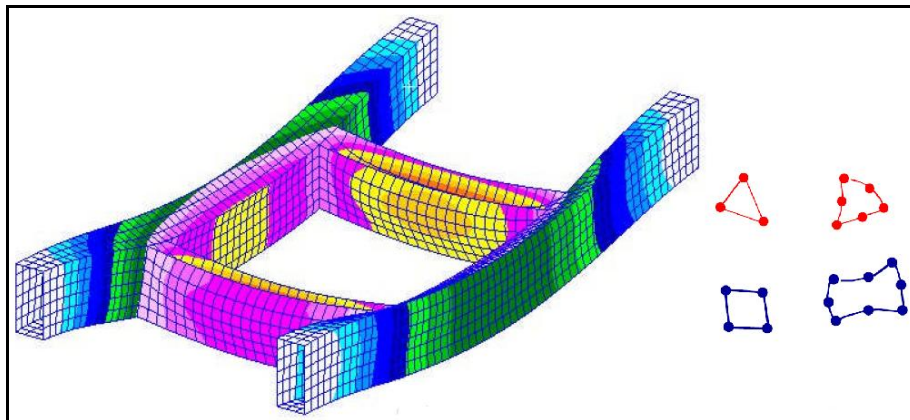
โดยทั่วไปแล้วเอลิเมนต์จะมีมิติอยู่ 1 – 3 มิติ นอกจากนี้ยังมีเอลิเมนต์ชนิดพิเศษที่มีลักษณะ 0 มิติ ดังเช่น lumped springs หรือ กลุ่มของจุด เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าเอลิเมนต์ที่มีลักษณะ 1 มิติ จะเป็นเส้นตรง เส้นโค้ง (Beam Element) มักใช้ในการวิเคราะห์งานลักษณะที่เป็นโครง เอลิเมนต์ 2 มิติ (Shell Element) จะเป็นรูปร่างรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมที่มีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์งานที่เป็นพื้นผิว (Surface) ผนังบาง สดุด้ายแบบ 3 มิติ (Solid Element) โดยปกติส่วนมากรูปทรงเป็นแบบ Tetrahedral, Pentahedral, Hexahedral (Bricks) หรือ เป็นแบบปริซึม (Prisms) สามารถใช้กับงานที่เป็นปริมาตรตัน (Solid) ซึ่งเอลิเมนต์แต่ละมิติจะมีจุดที่สามารถสังเกตได้ง่าย จุดเหล่านี้เรียกว่า จุดโหนด (Nodal Points) หรือ โหนด (Node) ประโยชน์แบบทวิคูณของโหนดคือ เป็นตัวกำหนดรูปร่างทางเรขาคณิตของเอลิเมนต์กับเอลิเมนต์ที่รูปร่างมีองศาเป็นแบบอิสระ โดยปกติโหนดจะตั้งอยู่ที่มุม หรือ จุดปลายของเอลิเมนต์ดังแสดงในรูป มากกว่านั้นในทางกลศาสตร์เอลิเมนต์เหล่านี้จะมีความเฉพาะเจาะจงกับพฤติกรรมของวัสดุสำหรับตัวอย่างเช่น เชิงเส้นยืดหยุ่น (linear elastic) ในวัสดุที่เป็นท่อน (Bar element) [25]

1 เอลิเมนต์ 1 มิติ มีลักษณะเป็นเส้น (Beam Element) เท่านั้นซึ่งมีแต่ความยาว และไม่สามารถมองเห็นพื้นที่หน้าตัดได้ชัดเจน และนอกจากเป็นเส้นแล้วจะไม่มีรูปทรงเรขาคณิตอื่นใดอีก [26]



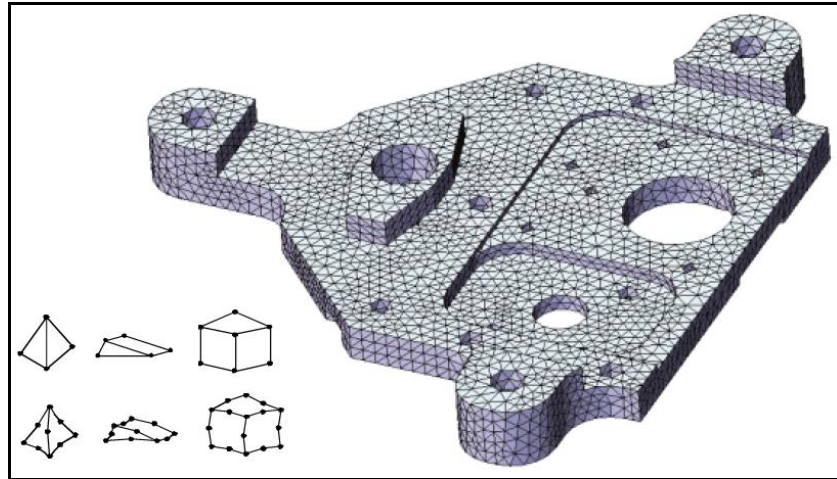
รูปที่ 2.14 การใช้ Beam Element ในงานโครงสร้าง [24]

2. เอลิเมนต์ 2 มิติ (Shell Element) ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม สีเหลี่ยม โดยมี โหนด 3 และ 4 โหนดตามลำดับ แต่โดยพื้นฐานแล้วจะมีขั้นต่ำ 3 โหนด เอลิเมนต์ชนิดนี้จะใช้กับงานที่เป็นพื้นผิว หรือ ผนัง ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น ผนังบาง (Thin shell) และผนังหนา (Thick Shell) [24]

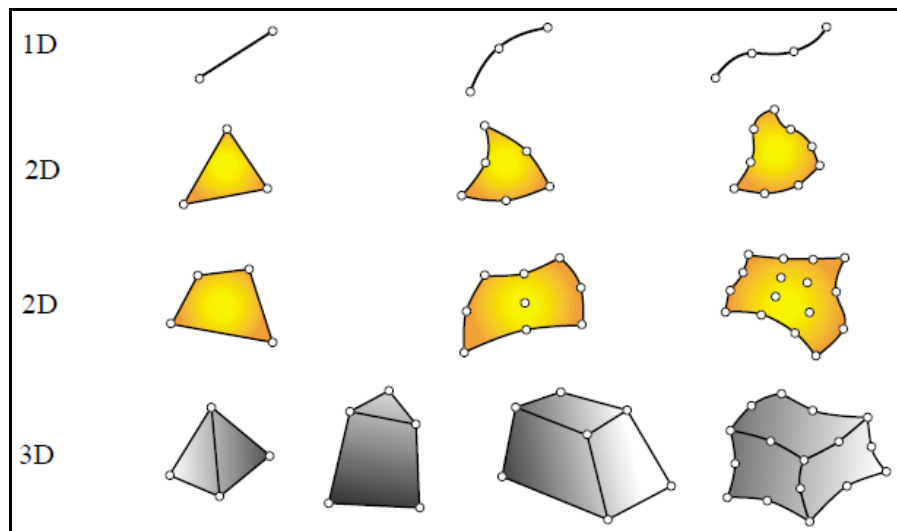


รูปที่ 2.15 การใช้ Shell Element ในงานที่มีลักษณะเป็นผนัง [24]

3. เอลิเมนต์ 3 มิติ (Solid Element) จะมีโครงสร้างเป็น 3 มิติ รูปทรงจะมีความ กว้าง ยาว สูง โดยพื้นฐานของเอลิเมนต์ชนิดนี้จะมีโหนดตั้งแต่ 3 โหนดขึ้นไป เอลิเมนต์แบบนี้จะ เหมาะกับการจำลองโครงสร้างที่มีความหนา (Thick) เมื่อเทียบกับพื้นผิว ซึ่งเหมาะกับงานที่ต้องการ ค่าความถูกต้อง [24]

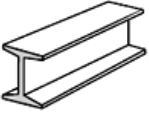
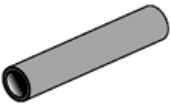
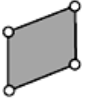


รูปที่ 2.16 การใช้งาน Solid Element ในงานที่เป็นปริมาตรตันที่มีความหนา [27]



รูปที่ 2.17 ชนิดของเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1 – 3 มิติ [25]

การจัดหมวดหมู่แบ่งประเภทของระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ในทางกลศาสตร์โครงสร้าง ความเหนียวแน่น ความหลวมของเอลิเมนต์บนพื้นฐานจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางกายภาพดั้งเดิม ที่ชี้แจงหัวข้อนี้เพราะเป็นส่วนย่อยของระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งทำให้มีความเข้าใจใน เทคนิคการออกแบบจำลองขึ้นสูง ดังเช่น รายละเอียดลำดับขั้น และการวิเคราะห์โดยรวมกับเฉพาะ แห่ง [25]

| องค์ประกอบ<br>โครงสร้างทางกายภาพ                                                  | ชื่อแบบจำลอง<br>ทางพีชคณิต | การทำให้เป็นแบบอย่าง<br>ไฟไนต์เอลิเมนต์                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  | ท่อน                       |   |
|  | ท่อน , กาน                 |   |
|  | ท่อ                        |  |
|  | ผลึก , พังผืด              |  |
|  | แผ่นเลื้อน                 |  |

รูปที่ 2.18 ตัวอย่างโครงสร้างเอลิเมนต์ดั้งเดิม [25]

รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างดั้งเดิมของเอลิเมนต์ (Primitive Structural Element) โดยเอลิเมนต์เหล่านี้จะจำแนกตามโครงสร้างกลศาสตร์โครงสร้างซึ่งเกี่ยวข้องกับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้าง เอลิเมนต์ทั้งหลายเหล่านี้ปกติมาจากกลศาสตร์ของวัสดุ (Mechanics of Materials) ซึ่งทำให้ง่ายต่อการเข้าใจทฤษฎีทางกายภาพของวัสดุมากกว่าทางคณิตศาสตร์ดังตัวอย่างภาพที่ 1.45 เอลิเมนต์มีลักษณะเป็น Bars, Cables, Beams, Shafts, Spars. [25]

สำหรับการแบ่งเอลิเมนต์ในกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ที่เกี่ยวข้องกันด้วยจุดต่อ (Node) โดยการแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์สามารถใช้หลักการดังนี้คือ ควรหลีกเลี่ยงการแบ่งเอลิเมนต์ที่มีรูปร่างผิดปกติ เช่น เอลิเมนต์ที่มีมุมป้านมากๆ หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีด้านยาวมากๆ ที่มี Large aspect ratio เป็นต้น ควรใช้เอลิเมนต์ที่เป็นสี่เหลี่ยมด้านเท่า หรือ อัตราส่วนของความกว้างต่อความยาวเข้าใกล้หนึ่ง ควรใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กๆ ในส่วนที่มีความหนาแน่น และแบ่งเอลิเมนต์ขนาดใหญ่ขึ้นในบริเวณที่ไกลออกไป [25]

#### 2.4.4 การวิเคราะห์แบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น (Linear and Nonlinear Analysis)

ไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีความสามารถในการวิเคราะห์สมการทั้งแบบเชิงเส้น (Linear) และไม่เชิงเส้น (Nonlinear) สำหรับสมการแบบไม่เชิงเส้นจะเหมาะสมสำหรับชิ้นงาน หรือวัสดุที่มีการเสียรูปร่าง (Deformation) ไปแล้ว ดังนั้นจึงมีความยุ่งยากมากกว่า ใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่มากกว่า

ความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น ก็คือ การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น สมการแบบไม่เชิงเส้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าของเวลา เมื่อมีการเสียรูปร่าง สมบัติทางกายภาพจะเปลี่ยนไปทำให้ค่าความแข็ง (Stiffness) เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ส่วนแบบเชิงเส้น เมื่อวัสดุเกิดการเสียรูปร่าง สมบัติทางกายภาพจะไม่เปลี่ยนแปลงไปแต่จะคงที่เสมอซึ่งทำให้ค่าความแข็ง (Stiffness) ไม่เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย [27 , 28]

ดังนั้นก่อนที่จะวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จึงต้องพิจารณาเสียก่อนว่า ชิ้นงานจะวิเคราะห์แบบเชิงเส้น หรือแบบไม่เชิงเส้น ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมเนื่องจากการวิเคราะห์แบบสถิต (Static) และพลศาสตร์ (Dynamic) จะสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งแบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น

ในการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ถ้าแบ่งตามพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะแบ่งได้ออกเป็น 3 รูปแบบดังนี้

1 เรขาคณิตแบบไม่เชิงเส้น (Geometric Nonlinear) ก็จะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปทรงทางเรขาคณิต (Geometry) ประเภท Large Deflection หรือ Large Rotation มักจะเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีความหนืดสูง มี Deflection มากเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือมีความสามารถในการบิดตัวได้มาก คือวัสดุมีการเสียรูป หรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมาก (Large Deformation)จนทำให้ค่าความแข็ง (Stiffness) ของวัสดุ ชิ้นงานสูงขึ้นกว่าเดิมตามเวลาที่ผ่านไป ซึ่งสมการทั่วไปแบบ Geometric Nonlinear มีดังนี้ [27 , 28 , 29]

$$|K| = \int |B|^T |D| |B| dV \quad (2.19)$$

เมื่อ  $K$  = ค่าความแข็ง (Stiffness Matrix)

$B$  = ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกรณี (Small Strain) อย่างเดียว

$D$  = ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (DOF)

2 วัสดุแบบไม่เชิงเส้น (Materials Nonlinear) โดยปกติแล้วในการวิเคราะห์แบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) จะอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าจะมีการคืนรูปอย่างสมบูรณ์เมื่อนำแรงกระทำออกไปแล้ว ค่าอัตราส่วนของความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ที่เรียกว่า Elastic Modulus จะมีค่าคงที่เสมอ แต่ในวัสดุบางประเภทการคืนรูปเมื่อนำแรงออกไป จะเกิดความไม่สมบูรณ์จนเกิดช่วง Plastic Strain มักเกิดจากแรงที่มากระทำมีขนาดเกินกว่าค่าจุด Yield จนทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ซึ่งจะต้องใช้การวิเคราะห์แบบ Nonlinear ซึ่งจะใช้รูปแบบสมการทั่วไปเหมือนกับสมการที่ แตกต่างกันที่  $D$  คือความเคลื่อนที่อิสระของโหนดเอลิเมนต์จะเป็นกรณี (Small Strain) อย่างเดียวเท่านั้น และ  $B$  ไม่เป็นกรณี (Small Strain) ดังสมการที่ [27 , 28 , 29]

$$|K| = \int |B|^T |D| |B| dV \quad (2.20)$$

- เมื่อ
- K = ค่าความแข็ง (Stiffness Matrix)
  - B = ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง
  - D = ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (DOF) กรณี (Small Strain) อย่างเดียว

3 การเปลี่ยนสถานะแบบไม่เชิงเส้น (Changing Status Nonlinear) เกิดจากการเปลี่ยนสถานะจนทำให้สมบัติของวัสดุเปลี่ยนไปดังตัวอย่างการดึงสลักกับการหย่อนสายเคเบิลนานๆ หรือยางที่ต้องสัมผัสกับความร้อน ความเย็นสลับกันจนทำให้สมบัติวัสดุเปลี่ยนแปลงไปคือความสามารถในการรับแรงเปลี่ยนไปตามเวลา ซึ่งจะต้องวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) เท่านั้น [27, 28]

#### 2.4.5 ประวัติ MSC. Marc Mentat (MSC Marc. Mentat Program)

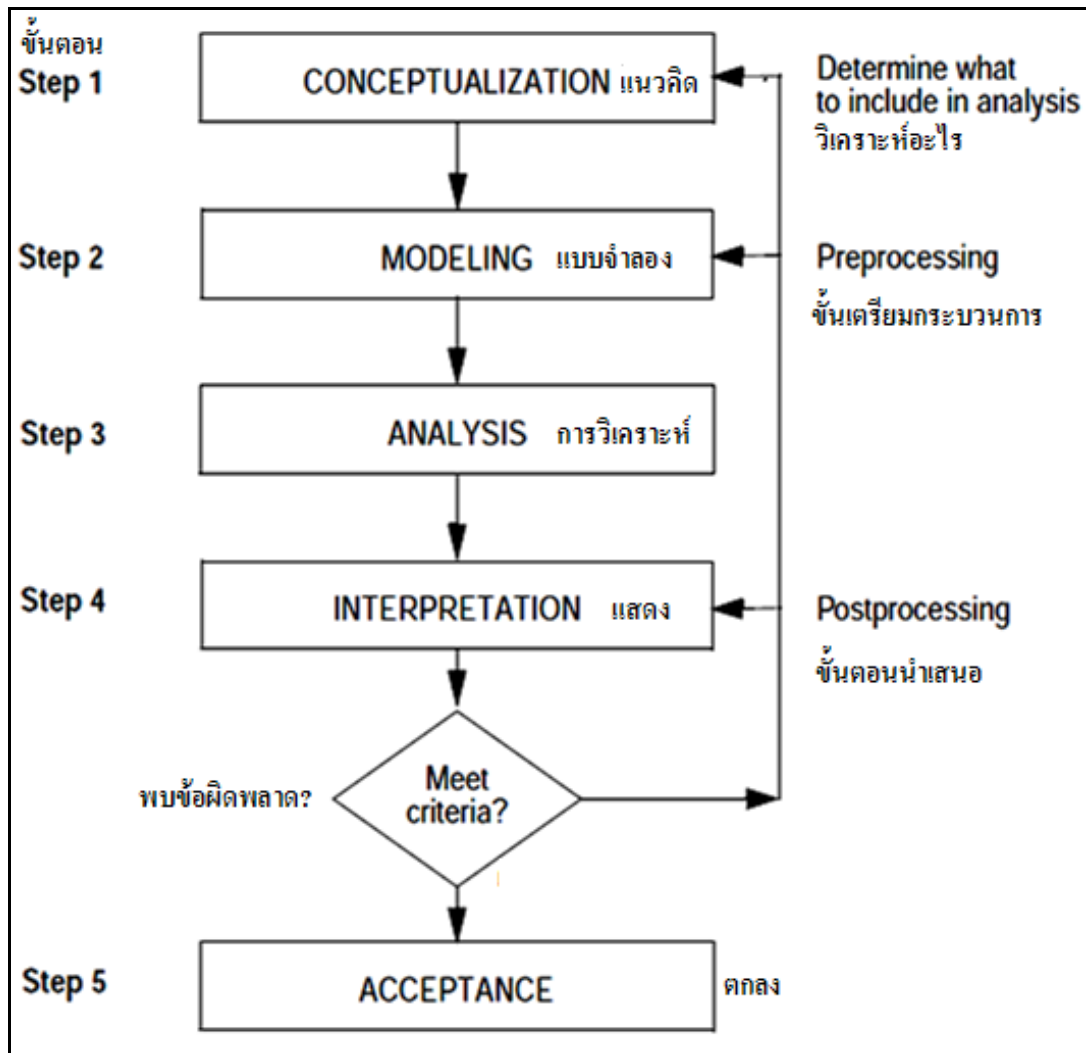
บริษัท Msc Software (MSC Software Corporation) แรกเริ่มเดิมทีชื่อ MacNeal-Schwendler Corporation มีหน้าที่ที่ได้รับคือการจัดหาจัดส่งซอฟต์แวร์ เครื่องมือทางด้านคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์งานทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering , CAE) ที่มีความซับซ้อนตั้งแต่ปี 1963 จวบจนถึงปัจจุบัน ทางบริษัท และโปรแกรมได้พัฒนาการจัดจำหน่ายและสนับสนุนด้านโปรแกรมที่ช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้างที่สมบูรณ์ที่สุดในโลก Nastran เป็นโปรแกรมในเชิงพาณิชย์โปรแกรมแรกที่ใช้วิเคราะห์ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ที่เกิดขึ้นโดย MSC Software Corporation ซึ่งโปรแกรมของทางบริษัทมีดังนี้ Nastran , Patran , Adams , MSC Marc , MSC Marc Mentat , MSC Dytran , MSC MVision , MSC Fatigue , MSC Laminate Modeler , MSC SuperForm , MSC SuperForge ฯลฯ ซึ่งแต่ละโปรแกรมมีลักษณะเด่นดังต่อไปนี้ [24]

- 1 Nastran (implicit)
  - การวิเคราะห์แบบเชิงเส้น (Linear Analysis)
  - การแกว่ง การสั่นสะเทือน (Vibration)
  - ความเป็นเลิศด้านพลศาสตร์ (Classic Dynamic)
  - พื้นฐานการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Basic Nonlinear)
- 2 MSC Marc (Implicit)
  - การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นขั้นสูง (Advanced Nonlinear)
  - การดีดกลับ (Spring back)
  - งานเชื่อม (Welding)

- การขึ้นรูปพลาสติก (plastic Forming)
- 3 MSC Dytran (Explicit)
  - การขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet Metal Forming)
  - ภาชนะพลาสติก (Container)
  - การขึ้นรูป (Forming)
  - การวิเคราะห์ความผิดปกติ (Crash Analysis)
- 4 MSC SuperForm (Implicit)
  - เพื่อวัตถุประสงค์ทั่วไป (General Purpose Bulk)
  - การขึ้นรูป
- 5 MSC SuperForge (Eulerian)
  - การขึ้นรูปแบบ 3 มิติ (3D Forging)
- 6 Adams
  - กลศาสตร์การเคลื่อนไหว (Rigid Body Kinematics)

#### 2.4.6 โปรแกรม MSC. Marc Mentat (MSC. Marc Mentat Program) [26]

กล่าวนำผู้ใช้โปรแกรมกราฟฟิกส์แบบอินเตอร์เฟสที่ช่วยให้คุณสามารถดำเนินการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ตั้งแต่แรกเริ่มกระบวนการจนกระทั่งเสร็จสิ้น ซึ่งสามารถแสดงกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ออกเป็นวงจรดังนี้



รูปที่ 2.19 วงจรการวิเคราะห์ (The Analysis Cycle) [26]

โดยสรุปกระบวนการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Brief Look at the Finite Element Analysis Process) เพื่อเสริมความเข้าใจของโปรแกรมดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงวงจรการวิเคราะห์กระบวนการไฟไนต์เอลิเมนต์ก่อนแนะนำใหู้จักกลไกของโปรแกรม ดังรูปที่ 1.46 แสดงให้เห็นห้าขั้นตอนเกี่ยวกับวงจรของกระบวนการนี้ ในบางครั้งเฉพาะบางกระบวนการเท่านั้นที่ต้องมีการตรวจตราการออกแบบมากกว่า 1 ครั้ง หากผลการทดลองไม่ตรงกับเกณฑ์การออกแบบคุณสมบัตินสามารถย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 1 (Conceptualization) หรือ ขั้นตอนที่ 2 (Modeling) ซึ่งเป็นช่วงระยะที่แก้ไขปรับปรุงกระบวนการ ดังนั้น 5 ขั้นตอนของวงจรการวิเคราะห์นี้ถือเป็นพื้นฐานของงานวิจัยเล่มนี้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิต เนื้อหาหัวข้อนี้ถูกออกแบบมาเพื่อให้ความสนใจไปที่ 2 ขั้นตอนในวงจรการวิเคราะห์คือ ขั้นตอนที่ 2 ช่วงการสร้างแบบจำลอง และขั้นตอนที่ 4 ช่วงของการทดลอง โปรแกรม Marc มีข้อเด่นคือเป็นเครื่องมือที่ใช้พิสูจน์ปัญหาทางวิศวกรรม ขั้นตอนที่ 2

และ 4 ของวงจรการวิเคราะห์แบบจำลอง และผลลัพธ์การตีความ สำหรับปัญหาทางวิศวกรรม นอกจากนี้โปรแกรม Marc ได้รับการเลือกใช้ตามหลักเกณฑ์ทั้ง 2 ข้อดังนี้

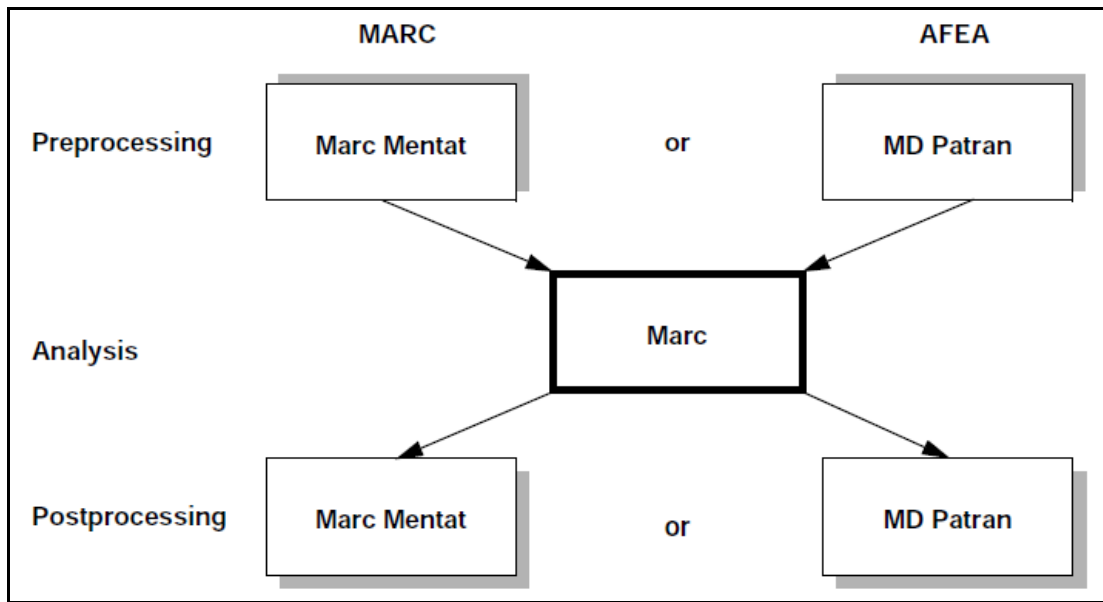
- 1 เพื่อนำหลายวิธีให้คุณในการสร้างแบบจำลองที่มีความยุ่งยาก
- 2 เพื่อแสดงประเภทการวิเคราะห์ที่หลากหลาย และให้คุณคุ้นเคยกับความสามารถต่างๆ ของโปรแกรม โปรแกรมจะดำเนินการไปตามวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ เมื่อป้อนข้อมูลเสร็จจะแสดงผลแบบกราฟฟิกส์ [26]

การกำหนดเทคนิคแต่ละมิติของวัตถุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง และแสดงผลลัพธ์ ดังนั้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์จึงมีการจัดจำแนกเป็นประเภทตามมิติ และในหลายกรณีความซับซ้อนของแบบจำลองจะสอดคล้องกับมิติ จากนั้นคุณสามารถสรุปว่าเมื่อคุณทราบวิธีการแก้ปัญหาแบบ 1 มิติ และ 3 มิติ (One and Three Dimention) อย่างไรก็ตามเอกลักษณ์ที่เป็นคุณสมบัติของวัตถุแบบ 1 มิติ ซึ่งตัวอย่างที่ครอบคลุมรูปแบบของการเชื่อมโยงเครือข่าย (Topology) ดังตัวอย่างเป็นการยากที่จะแสดงเส้นรูปร่างแบบเส้นที่เอลิเมนต์กับชนิดทางเรขาคณิต และการวิเคราะห์ ดังเช่น การถ่ายโอนความร้อน สถิตยศาสตร์ พลศาสตร์ นอกจากนี้เนื้อหาวิชาที่ครอบคลุมเกี่ยวกับวัสดุนี้เป็นพื้นฐานที่มีความสำคัญมาก และง่ายต่อการเข้าถึงเข้าใจต่อผู้ที่ใช้งานเป็นครั้งแรก [26]

#### 2.4.7 ระบบโปรแกรม Marc (The Marc System) [26]

ระบบของโปรแกรม Marc จะมีชุดโปรแกรมอื่นๆ ที่ช่วยสนับสนุนอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมแขนงกลศาสตร์โครงสร้าง การถ่ายเทความร้อน และการวิเคราะห์แม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งระบบของโปรแกรมสามารถแสดงดังภาพที่ 1.47 โดยระบบของโปรแกรมประกอบไปด้วยโปรแกรมต่างๆ ดังนี้

- 1 Marc for Analysis
- 2 Marc Mentat หรือ MD Patran for GUI
- 3 Marc and Marc Mentat or MD Patran
- 4 Analyze your structure (Marc)
- 5 Graphically depict the results (Marc and Marc Mentat or MD Patran)



รูปที่ 2.20 ระบบของโปรแกรม Marc [26]

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินโครงการ ซึ่งนับว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการทำวิจัย เนื่องจากจะต้องรวบรวมทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง มาใช้ในการวางแผนการดำเนินโครงการ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการดำเนินโครงการวิจัย ดังนั้นจึงได้จัดขั้นตอนในการดำเนินโครงการดังต่อไปนี้

- 3.1 แผนการดำเนินงาน
- 3.2 เครื่องมือ
- 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน
- 3.4 วิธีการวัดผล

#### 3.1 แผนการดำเนินงาน

ในการจัดทำโครงการวิจัย การเปรียบเทียบอิทธิพลของวัสดุครอว์บีสในงานลากขึ้นรูปโลหะ โดยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้เริ่มจากการศึกษาข้อมูล รายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ การออกแบบแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปด้วยลึง แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป แรงกดขึ้นงาน ลักษณะของครอว์บีดแต่ละชนิด การออกแบบครอว์บีด ด้วยเครื่องปั๊มโลหะของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่มีขนาด 80 ตัน และสามารถปรับแรงกดขึ้นงานได้ และศึกษาคุณสมบัติของยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ ที่จะนำมาใช้ทำครอว์บีดได้อย่างเหมาะสม และเลือกใช้ได้อย่างถูกต้อง

ซึ่งในที่นี้ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของเวลา เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของโครงการ โดยมีการวางแผนการดำเนินโครงการวิจัย รายละเอียด และขั้นตอนต่างๆ ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ตารางแผนการดำเนินงานโครงการวิจัย

| แผนการดำเนินงาน                                                                                     | เดือน |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
|                                                                                                     | 1     | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1. ทำการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยดรอร์บิส และการวิเคราะห์เอลิเมนต์ (FEM) | →     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
| 2. ออกแบบชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป และชุดดรอร์บิส และการจำลอง FEM                                       |       | → |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
| 3. จัดซื้อวัสดุและอุปกรณ์สำหรับผลิตแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปและชุดดรอร์บิส                                 |       |   |   | → |   |   |   |   |   |    |    |    |
| 4. ผลิตแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปเพื่อทำการทดลอง Experiments                                                |       |   |   |   | → |   |   |   |   |    |    |    |
| 5. วางแผนการทดลอง Experiments                                                                       |       |   |   |   |   | → |   |   |   |    |    |    |
| 6. ทำการทดลอง Experiments ตามตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้                                            |       |   |   |   |   |   | → |   |   |    |    |    |
| 7. จำลองการลากขึ้นรูปด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC Marc                                            |       |   |   |   |   | → |   |   |   |    |    |    |
| 8. เก็บข้อมูลการทดลอง                                                                               |       |   |   |   |   |   | → |   |   |    |    |    |
| 9. เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จาก Experiments กับ Simulations                                       |       |   |   |   |   |   |   |   | → |    |    |    |
| 10. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง                                                                      |       |   |   |   |   |   |   |   |   | →  |    |    |
| 11. เผยแพร่งานวิจัย และส่งรายงานฉบับสมบูรณ์                                                         |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    | →  |    |

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

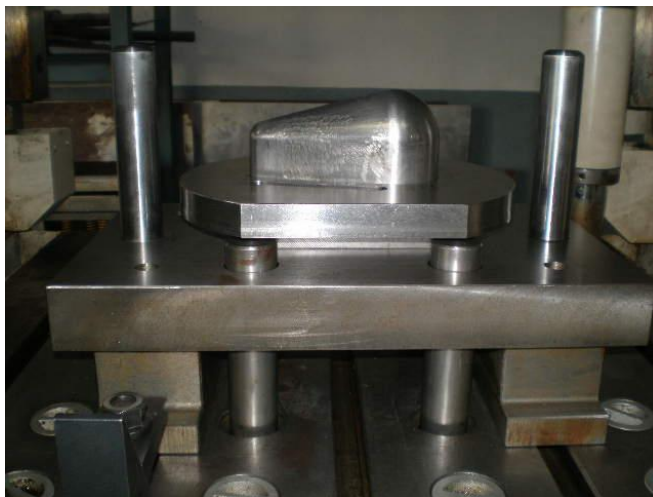
เครื่องมือที่ใช้ในทดสอบโดยใช้เครื่องปั๊มโลหะของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่มีขนาด 80 ตัน แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร และเครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC automatic machine) ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์และดรอร์บิต

3.2.1 เครื่องปั๊มโลหะที่มีขนาด 80 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องปั๊มโลหะขนาด 80 ตัน

3.2.2 แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลิกซ์งานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลิกซ์งานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร

### 3.2.3 เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC automatic machine) ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC automatic machine)

### 3.2.3 โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เลือกใช้โปรแกรม MSC Marc ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในห้องปฏิบัติการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

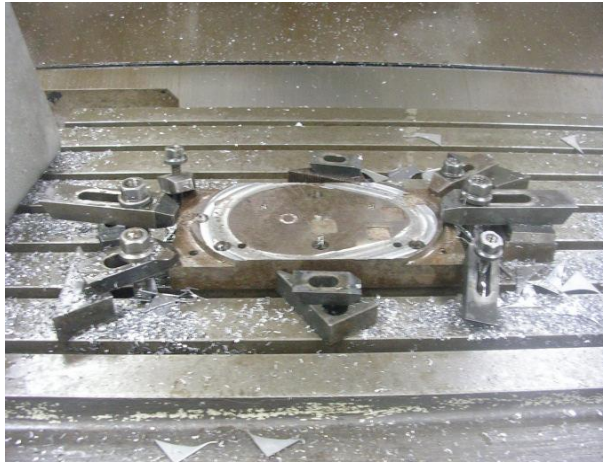
### 3.3.1 การเตรียมแผ่นชิ้นงานทดสอบ

1) ตัดชิ้นงานตามแนวรีดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาด 220 x 160 มม. ด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่น (Power shear) ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาด 220 x 160 มม.

2) เตรียมอุปกรณ์จับยึด (Fixture) และติดตั้งบนเครื่องจักร CNC แล้วยึดให้แน่น ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การจับยึด (Fixture) บนเครื่องกัด CNC

3) วางแผ่นชิ้นงานบน (Fixture) ให้ตรงจุดแล้วยึดให้แน่น ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การจับยึดชิ้นงานบนเครื่องกัด CNC

4) ใช้เครื่องกัด CNC เดินกัดชิ้นงานโดยคำสั่งจากโปรแกรมในระบบควบคุมอัตโนมัติและใช้สารหล่อเย็นตลอดเวลาจนงานเสร็จ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การเดินกัดชิ้นงาน

### 3.3.2 การสร้างครอว์ปีด

- 1) เตรียมชิ้นงานเหล็ก S50C ขนาด 20 x 20 x 115 มม.
- 2) ทำการกัดขึ้นรูป (Profile) รอบนอกครอว์ปีดดังแสดงในรูปที่ 3.8



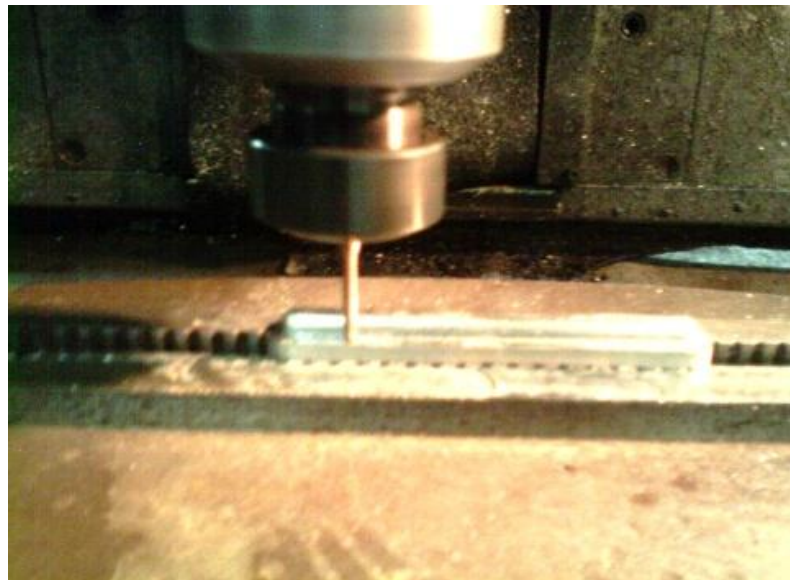
รูปที่ 3.8 การกัดขึ้นรูป (Profile) ครอว์ปีด

3) กัดร่อง (Slot) ด้านในครอว์บีคดังแสดงในรูปที่ 3.9



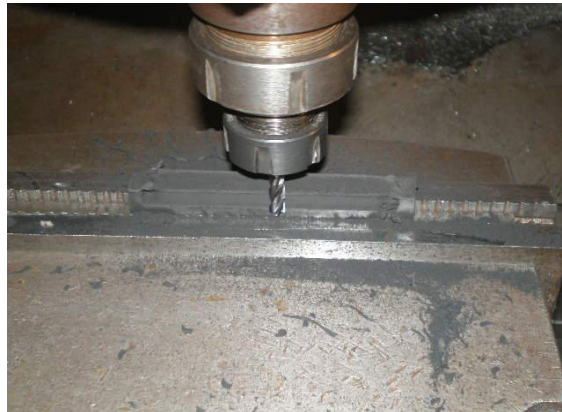
รูปที่ 3.9 การเดินกัดร่อง (Slot) ด้านใน

4) กัดส่วนปลายโค้งมนของครอว์บีคดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การเดินกัดปลายโค้งมนของครอว์บีค

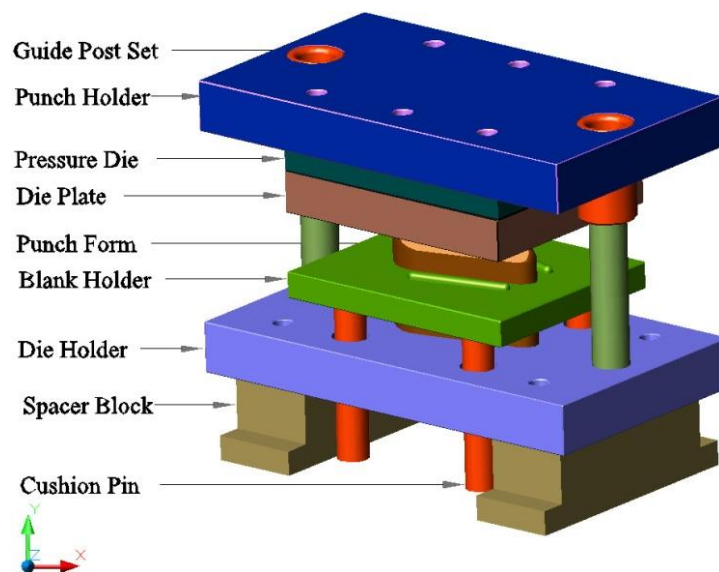
5) กัดยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การเดินกัดกัดยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

3.3.3 การประกอบครอว์บีดในแม่พิมพ์และการติดตั้ง

หลักการทำงานของแม่พิมพ์ชุดตัว (Die holder) ใช้รับยึดกับแท่นป้อนขึ้นลงและยึดแผ่นรองคาย (Pressure die) และแผ่นคาย (Die holder) จะยึดกันเช่นชุดบน (Upper shore) มีชุดนำการป้อน (Guide post) เป็นชุดนำเพื่อความเที่ยงตรงในการป้อนขึ้นลงและชุดล่าง (Lower shore) จะประกอบด้วยพินช์ (Punch) แผ่นกดยึด (Blank holder) มีหน้าที่ในการกดยึดชิ้นงานโดยส่งถ่ายแรงจากคูลชันพิน (Cushion pin) ซึ่งสามารถปรับแรงได้และแผ่นพินช์โฮลเดอร์ (Punch holder) จะจับยึดกับแท่นเครื่องป้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.12

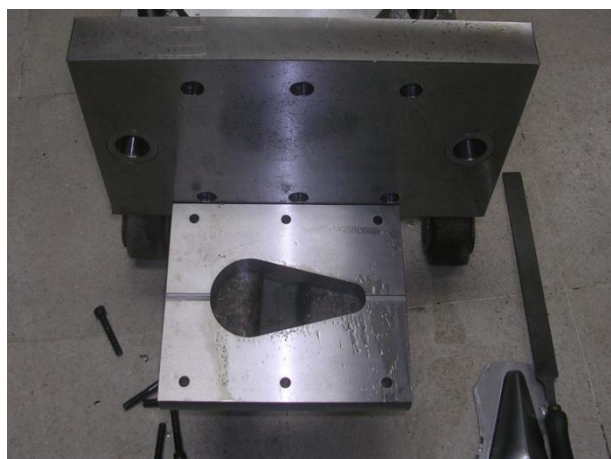


รูปที่ 3.12 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ขึ้นรูปลึก [9]

ตารางที่ 3.2 ตารางชิ้นส่วนแม่พิมพ์

| รายการ       | วัสดุ | ขนาด       | จำนวน/ชิ้น |
|--------------|-------|------------|------------|
| Punch holder | SS41  | 240x420x48 | 1          |
| Pressure die | S50C  | 210x250x25 | 1          |
| Die plate    | SKD11 | 210x250x40 | 1          |
| Punch form   | SKD11 | 80x150x118 | 1          |
| Blank holder | SS41  | 210x250x30 | 1          |
| Die holder   | SS41  | 240x420x48 | 1          |
| Spacer block | SS41  | 240x420x48 | 1          |
| Cushion pin  | SS41  | Ø35x400    | 4          |

- 1) ทำความสะอาดชิ้นส่วนแม่พิมพ์ทั้งหมด
- 2) ประกอบชุดแม่พิมพ์ตัวล่าง โดยการนำพunch (Punch) มายึดติดกับแผ่นล่าง (Die holder) โดยที่ยึดสกรู ทั้ง 3 ตัว ยึดให้แน่น
- 3) นำ (Spacer block) ประกอบเข้ากับชุดแม่พิมพ์ตัวล่างที่ประกอบกับพunchยึดสกรูทั้ง 4 ตัว ให้แน่น
- 4) ประกอบชุดแม่พิมพ์ตัวบน โดยการนำคาน (Die plate) มายึดติดกับบน (Punch holder) โดยยึดสกรูทั้ง 6 ตัว โดยที่ยังไม่ต้องยึดแน่นมากดังแสดงในรูปที่ 3.13



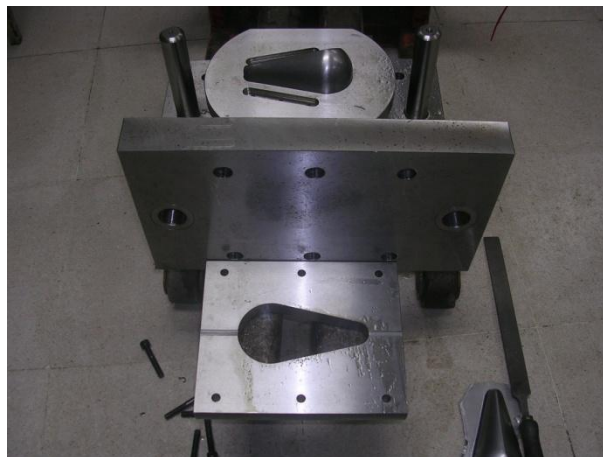
รูปที่ 3.13 การประกอบชุดแม่พิมพ์ตัวบน

5) นำแผ่นรอง ที่มีความหนาขนาด 1 มม. มาไว้บริเวณรอบพื้นที่ (Punch) และนำไม้มารองไว้เพื่อที่จะสวมชุดแม่พิมพ์ตัวบน และชุดแม่พิมพ์ตัวล่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การใส่แผ่นเสริมรองขนาด

6) นำชุดแม่พิมพ์ตัวบนไปสวมกับชุดแม่พิมพ์ตัวล่าง และยึดสกรูของชุดแม่พิมพ์ตัวบนให้แน่น ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การสวมชุดแม่พิมพ์ตัวบนกับชุดแม่พิมพ์ตัวล่าง

7) นำแม่พิมพ์ที่ประกอบเสร็จแล้ว ไปติดตั้งบนเครื่องปั๊ม ใส่ (Cushion pin) เครื่องปั๊ม 4 ตัว ยึดแม่พิมพ์ตัวบนและตัวล่างให้แน่น แล้วยกชุดบนขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องปั๊ม

8) นำแผ่นกดชิ้นงาน (Blank holder) สวมเข้ากับพินซ์ ที่มี (Cushion pin) รองรับอยู่ แล้วนำดรอว์บีคใส่แผ่นกดชิ้นงาน (Blank holder) ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การประกอบดรอว์บีคกับแผ่นกดชิ้นงาน

9) ปรับตั้ง (Limit switch) ตามความลึกของชิ้นงานลากขึ้นรูปดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การปรับตั้ง (Limit switch) เครื่องปั๊ม

10) แม่พิมพ์พร้อมใช้งานติดตั้งบนเครื่องปั๊ม ดังแสดงในรูปที่ 3.19



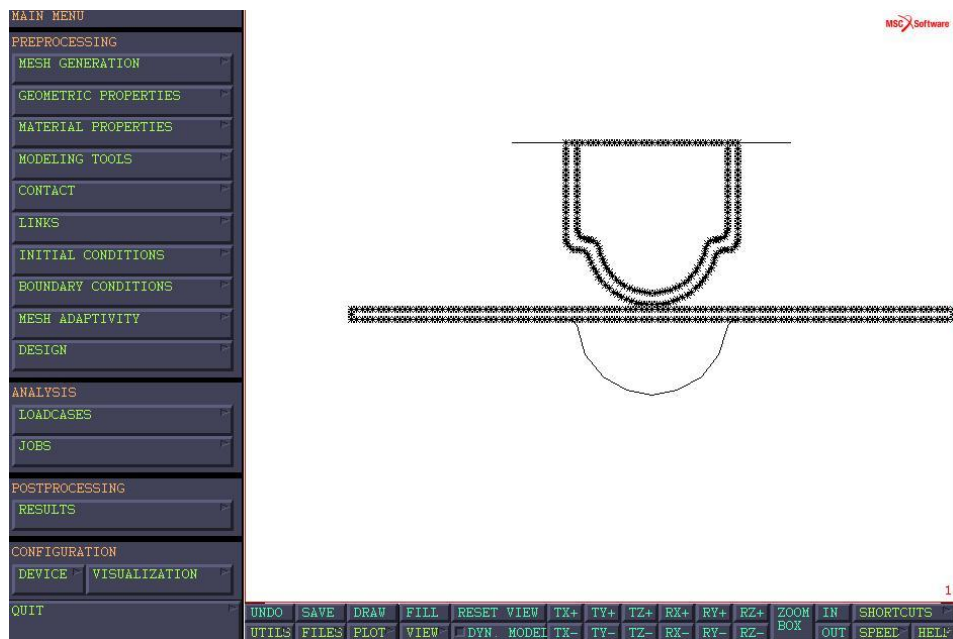
รูปที่ 3.19 แม่พิมพ์พร้อมใช้งาน

### 3.4 การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การออกแบบโมเดลการจำลองนั้นได้เลือกวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ โดยทำการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม MSC. Marc ซึ่งอยู่ในห้องปฏิบัติการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยผลจากการทำการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่า Displacement Stress และ Strain โดยมีขั้นตอนการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ดังต่อไปนี้

#### 1. การสร้างโมเดล (Model)

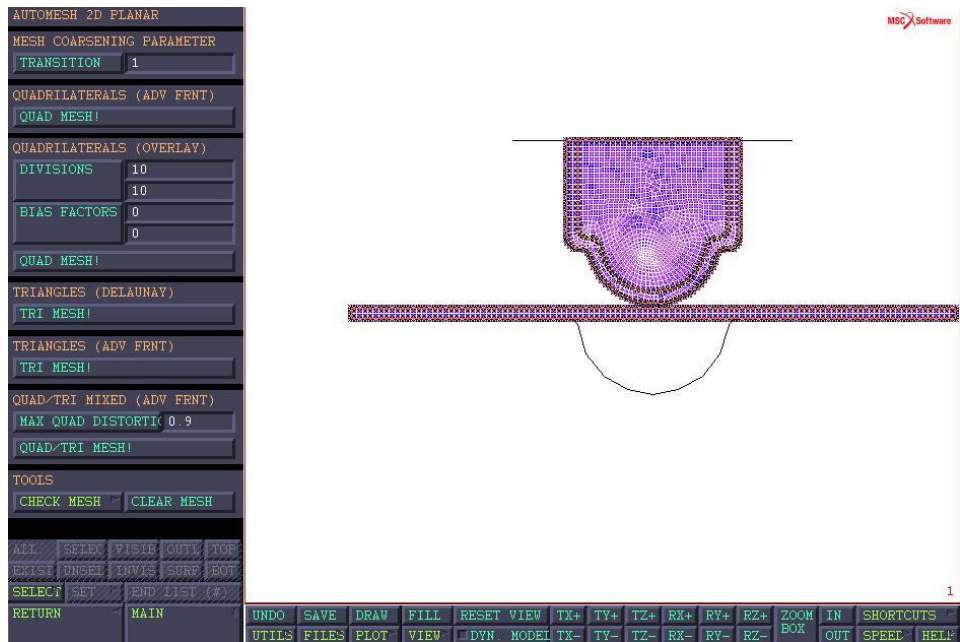
เป็นการสร้างโมเดลรูปแบบ หรือแนวทางการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ขั้นต้น โดยเป็นการสร้างระบบ 2 มิติ (Coordinate) การสร้างชุดแม่พิมพ์ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ คอรัปัส ดาย และ ชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 การสร้างโมเดลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 2. การสร้างเอลิเมนต์ (Meshing)

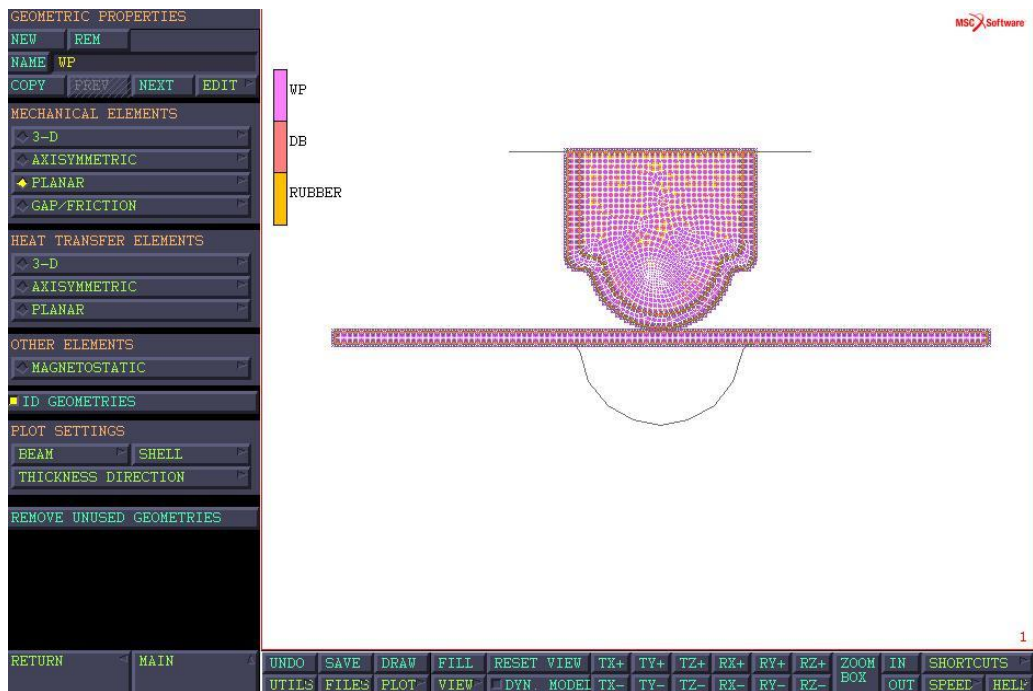
การสร้างเอลิเมนต์เพื่อช่วยในการคำนวณประมวลผลโมเดล โดยแบ่งโมเดลให้เป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 การสร้างเอลิเมนต์

### 3. การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties)

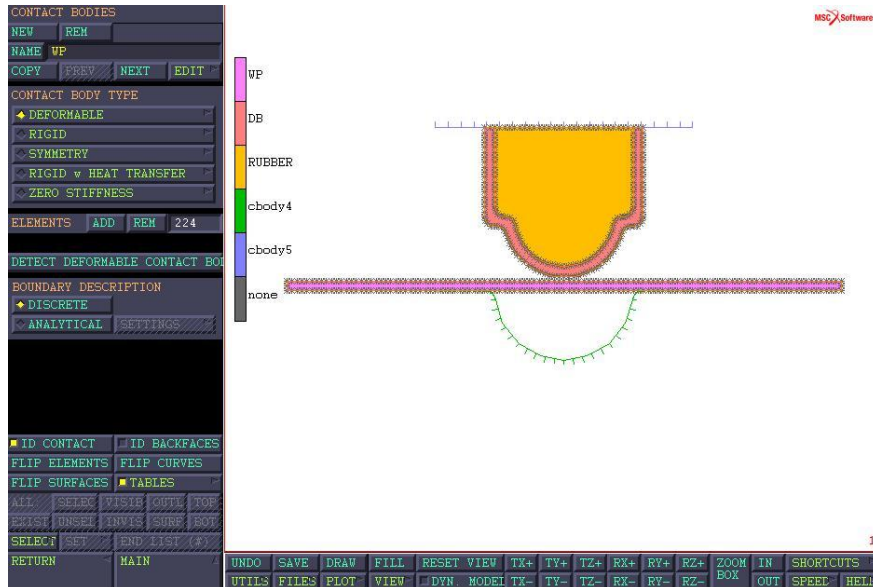
คุณสมบัติของวัสดุจำเป็นต้องกำหนดลงในโมเดลเพื่อทราบว่าโมเดลแม่พิมพ์แต่  
 หนึ่งเป็นวัสดุชนิดใด ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 การกำหนดแรงกระทำ และเงื่อนไขในการจับยึด

#### 4. การสร้างผิวสัมผัส (Contact Bodies)

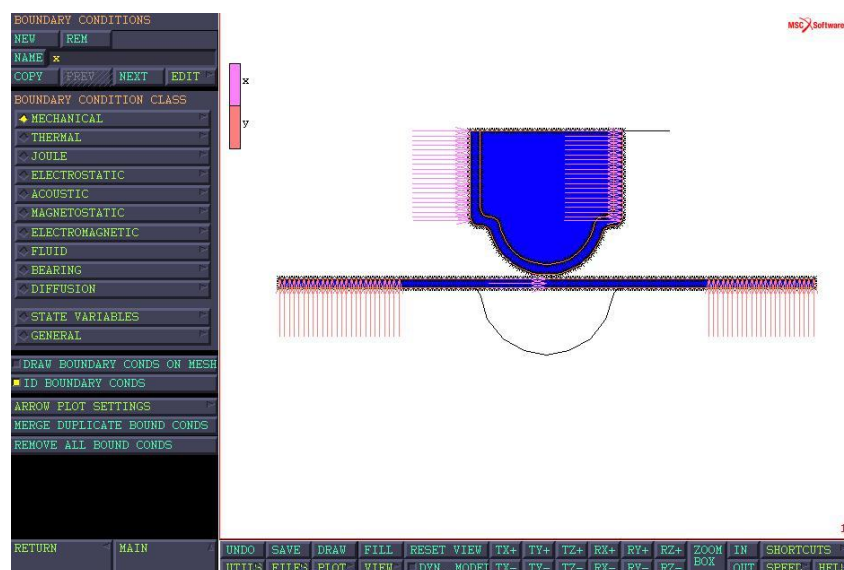
การสร้างผิวสัมผัสระหว่างแม่พิมพ์และชิ้นงานเป็นสิ่งจำเป็นมากในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเฉพาะการขึ้นรูปชิ้นงานแบบเคลื่อนที่ หรือการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 การสร้างผิวสัมผัสแม่พิมพ์

#### 5. การกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Condition)

เป็นขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเป็นการกำหนดสภาวะการกระทำบนแม่พิมพ์ เช่น แรงกระทำ การเกาะยึด เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นของโครงเครื่องดัด

## 6. การประมวลผลและการแสดงผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

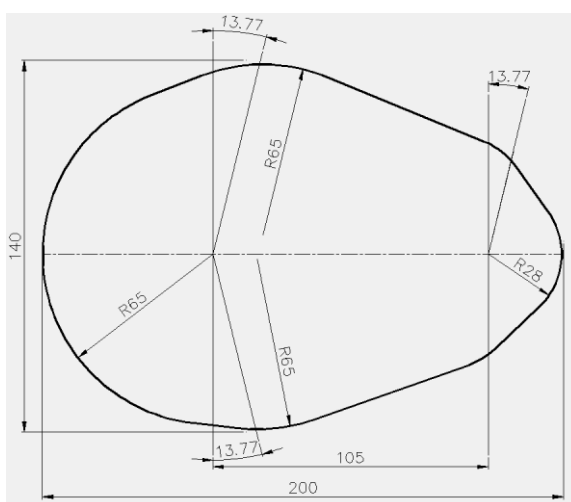
ซึ่งจะทำการประมวลผลออกดังนี้ คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ความเค้น และความเครียด

สำหรับขั้นตอนการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกดำเนินการเช่นเดิม ทั้งการขึ้นรูปด้วยคอร์บิส เเสริมยางธรรมชาติ คอร์บิสเสริมยางสังเคราะห์ และคอร์บิสโลหะ

### 3.5 วิธีการวัดผลการทดลอง

#### 3.5.1 ชิ้นงานจากการคำนวณโดยประมาณค่าตามรูปทรงขึ้นรูปลึก

การตัดแผ่นงานตามแนวรีดมีขนาด 220 x 160 มม. ประมาณค่าโดยการคำนวณจากสมการพื้นฐานขนาดของแผ่นงาน (Blank size) นำมาประยุกต์กับรูปทรงที่ทำการศึกษาจนได้ขนาดและรูปร่าง โดยขยายขนาดของแผ่นตัดเปล่า (Blank size) ออกอีก 10 มม. โดยรอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 แผ่นตัดเปล่าคำนวณโดยการประมาณค่า

#### 3.5.2 แรงกดชิ้นงาน (Blank Holder Force)

จากการคำนวณแรงขึ้นรูปลึกตามสมการที่ (2.3) ได้เท่ากับ 104.84 kN และใช้แรงกดชิ้นงานตามสมการที่ (2.4) ได้เท่ากับ 49.69 kN ทำการศึกษาโดยเทียบเป็นขนาดของแรงกดที่ระดับ 30% , 50% และ 70% ของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปได้ดังนี้

$$\text{จากการคำนวณเทียบได้} = \frac{49.69 \times 100}{104.84} = 47.4\% \text{ เป็นค่าของแรงเริ่มต้น}$$

$$\begin{aligned}\text{แรงกดขึ้นงานที่ 30\%} &= \frac{30 \times 104.84}{100} = 31.45 \text{ kN} \\ \text{แรงกดขึ้นงานที่ 50\%} &= \frac{50 \times 104.84}{100} = 52.42 \text{ kN} \\ \text{แรงกดขึ้นงานที่ 70\%} &= \frac{70 \times 104.84}{100} = 73.39 \text{ kN}\end{aligned}$$

### 3.5.3 ครอว์บีค (Draw bead)

- 1) ครอว์บีคที่ทำจากโลหะทั้งตัว แบบปลายโค้งมน ดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ครอว์บีคที่เป็นโลหะเหล็กชนิด S45C

- 2) ครอว์บีคที่เสริมยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 ครอว์บีคที่เสริมยางธรรมชาติ

- 3) ครอว์บีคที่เสริมยางสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ครอว์ปิดที่เสริมยางสังเคราะห์

#### 3.5.4 สารหล่อลื่น

แผ่นพลาสติกโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene : HDPE) จะมีโครงสร้างเป็นเส้นตรงลักษณะโปร่งแสงหรือขุ่น แข็งและเหนียว ราคาถูก ขึ้นรูปง่าย ทนต่อสารเคมี แก๊สซึมผ่านได้ยาก ที่มีความหนาเท่ากับ 0.10 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 แผ่นพลาสติกโพลิเอทิลีนหนา 0.10 มม.

#### 3.5.5 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล

1) อุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ (Mini data logger) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลพื้นฐานของระบบ (data logger) ประกอบไปด้วย scanner หรือ multiplexer digital-voltmeter และตัวบันทึกข้อมูล ซึ่งรับ Input ที่เป็นระบบ analog จาก sensor แล้วทำการเปลี่ยนข้อมูลเป็นระบบ digital และเก็บข้อมูลไว้ในหน่วยความจำเพื่อนำไปใช้ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.30



(ก)



(ข)

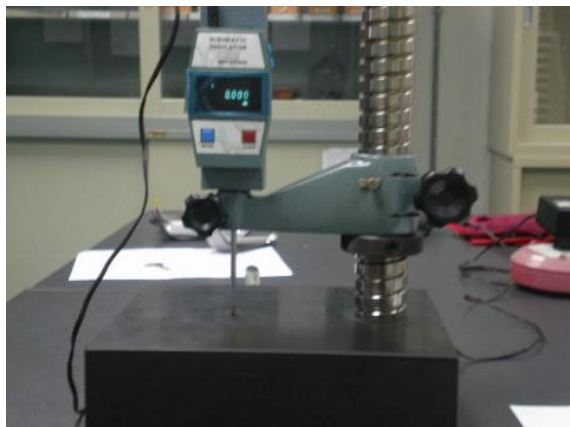
รูปที่ 3.30 (ก) อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน (ข) อุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ

2) การติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมันและอุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณต่อเข้ากับเครื่องเพรส ดังแสดงในรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 การติดตั้งอุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณต่อเข้ากับเครื่องเพรส

3.4.7 อุปกรณ์วัดความหนาชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 เครื่องวัดความหนาชิ้นงาน

### 3.5.8 ตารางบันทึกผลการทดลอง

1) ตารางบันทึกแรงของการลากจูงรูปต่อสัดส่วนของแรงกด ในการใช้ดรอว์ปิดแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางบันทึกแรงของการลากจูงรูปต่อสัดส่วนของแรงกดในการใช้ดรอว์ปิดแต่ละชนิด

| แรงกดขึ้นงานต่อแรงจูงรูป | ชั้นที่ 1 | ชั้นที่ 2 | ชั้นที่ 3 | ชั้นที่ 4 | ชั้นที่ 5 | ค่าเฉลี่ย |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 30 เปอร์เซนต์ (31.45kN)  | X         | X         | X         | X         | X         | X         |
| 50 เปอร์เซนต์ (52.42kN)  | X         | X         | X         | X         | X         | X         |
| 70 เปอร์เซนต์ (73.39kN)  | X         | X         | X         | X         | X         | X         |

2) ตารางวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain) ของดรอว์ปิดแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตารางวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain) ของดรอว์ปิดแต่ละชนิด

| จุดตรวจ | ดรอว์ปิดโลหะ       |                   | ดรอว์ปิดเสริมยางธรรมชาติ |                   | ดรอว์ปิดเสริมยางสังเคราะห์ |                   |
|---------|--------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
|         | ความหนา<br>ชั้นงาน | ค่า<br>ความเครียด | ความหนา<br>ชั้นงาน       | ค่า<br>ความเครียด | ความหนา<br>ชั้นงาน         | ค่า<br>ความเครียด |
| A1      | X                  | X                 | X                        | X                 | X                          | X                 |
| A2      | X                  | X                 | X                        | X                 | X                          | X                 |
| A3      | X                  | X                 | X                        | X                 | X                          | X                 |
| ...     | X                  | X                 | X                        | X                 | X                          | X                 |
| ...     | X                  | X                 | X                        | X                 | X                          | X                 |
| A10     | X                  | X                 | X                        | X                 | X                          | X                 |

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

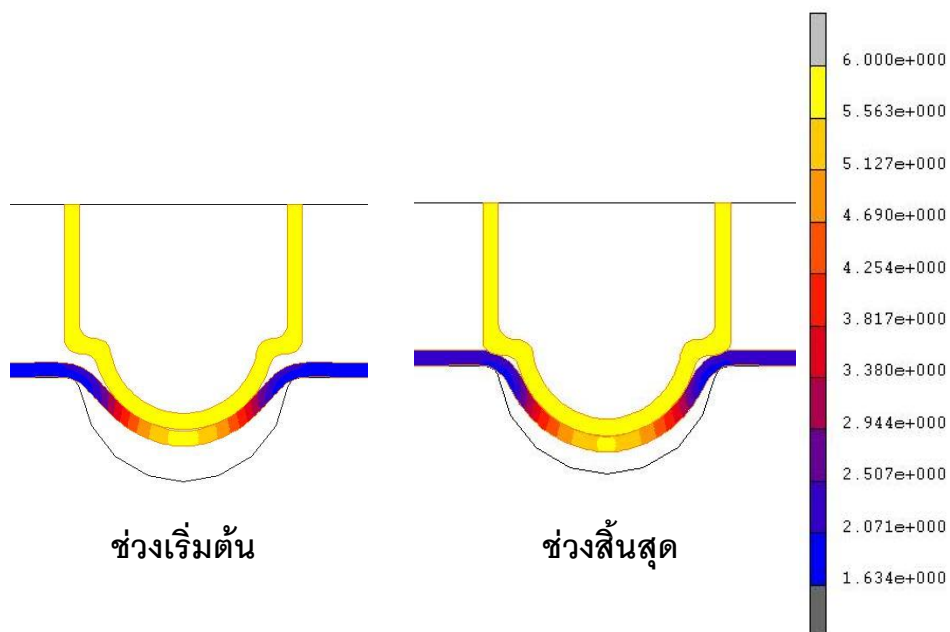
ผลการวิจัยเพื่อศึกษาการไหลตัวของโลหะแผ่นในกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยลูกโดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ วัสดุเกรด JIS : SPCC ที่มีความหนา 1.0 มม. เพื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับ การทดลอง ทั้งนี้ผลการทดลองนี้จะ เป็นแนวทางในการเลือกใช้แรงในการลากขึ้นรูป และแรงกดขึ้นงานได้อย่างเหมาะสม โ

#### 4.1 ผลการทดลอง

โดยผลการทดลองได้ถูกแบ่งออกเป็นดังนี้ คือ ผลการจำลองของครอว์บิสโลหะ ครอว์บิสเสริมยางธรรมชาติ และครอว์บิสเสริมยางสังเคราะห์

##### 4.1.1 ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการใช้ครอว์บิสโลหะ

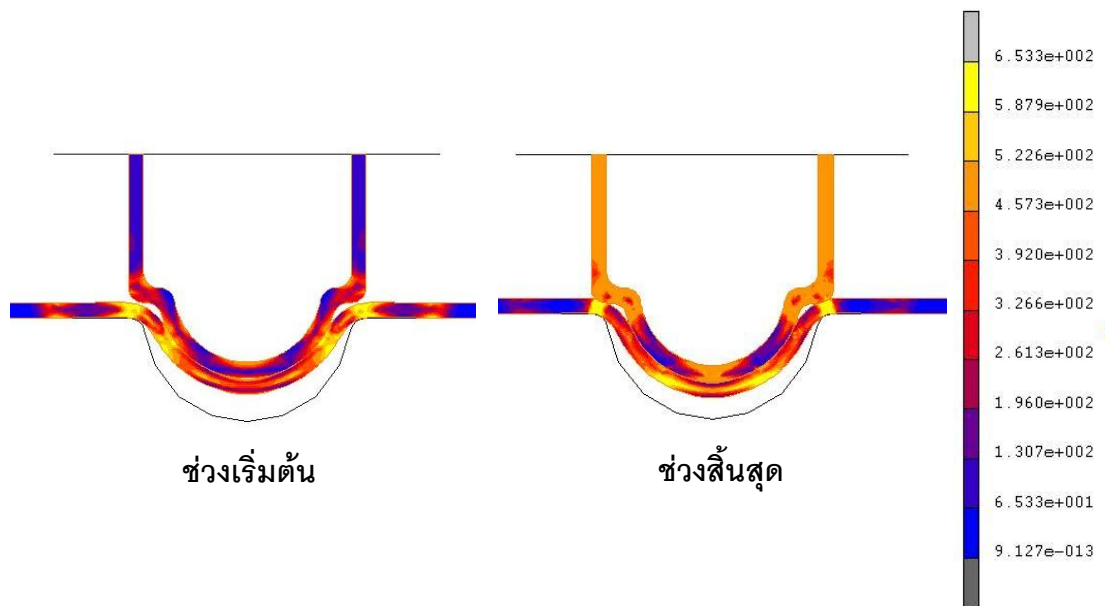
###### 1) ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Displacement)



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของครอว์บิสโลหะ โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากรูปที่ 4.1 ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอร์บิสโลหะ พบว่าเกิดการกระจายของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสม่ำเสมอมาก ซึ่งมีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงสุดเท่ากับ 5.563 มม.

## 2) ผลการจำลองความเค้น (Stress)

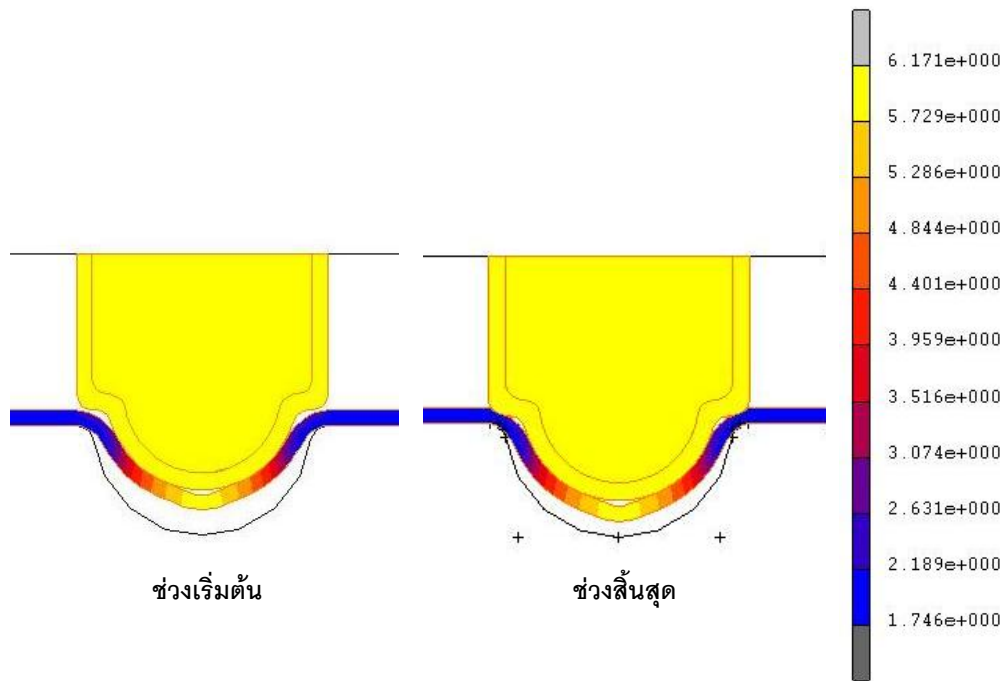


รูปที่ 4.2 การกระจายความเค้นของดรอร์บิสโลหะ โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากรูปที่ 4.2 ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอร์บิสโลหะ พบว่าเกิดความเค้นสองลักษณะ คือ ความเค้นอัด กับความเค้นดึง ซึ่งมีการกระจายของความเค้นตามส่วนโค้งของชิ้นงาน และพบว่าบริเวณส่วนโค้งที่เกิดการยืดตัวสูงสุด เป็นบริเวณที่มีค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ  $5.879 \times 10^2$  MPa

## 4.1.2 ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ดรอร์บิสเสริมยางธรรมชาติ

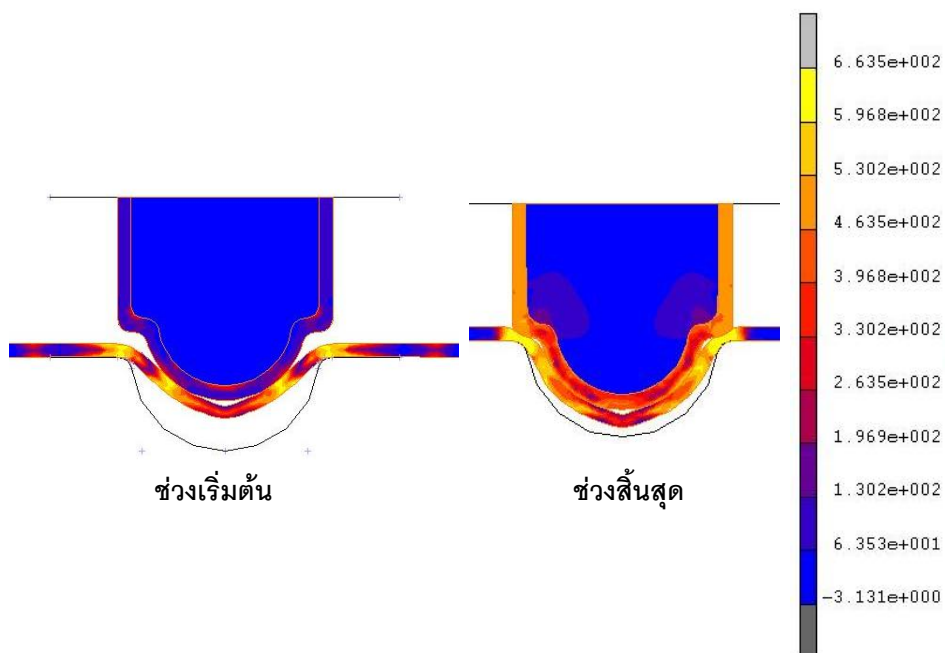
### 1) ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Displacement)



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของครอว์ปีสเสริมยางธรรมชาติ โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากรูปที่ 4.3 ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการลากขึ้นรูปโดยใช้ครอว์ปีสเสริมยางธรรมชาติ พบว่าเกิดการกระจายของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสม่ำเสมอดีมาก และเกิดมากที่สุดบริเวณที่ครอว์ปีสจะกดลงต่ำสุด ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงสุดเท่ากับ 5.729 มม.

## 2) ผลการจำลองความเค้น (Stress)

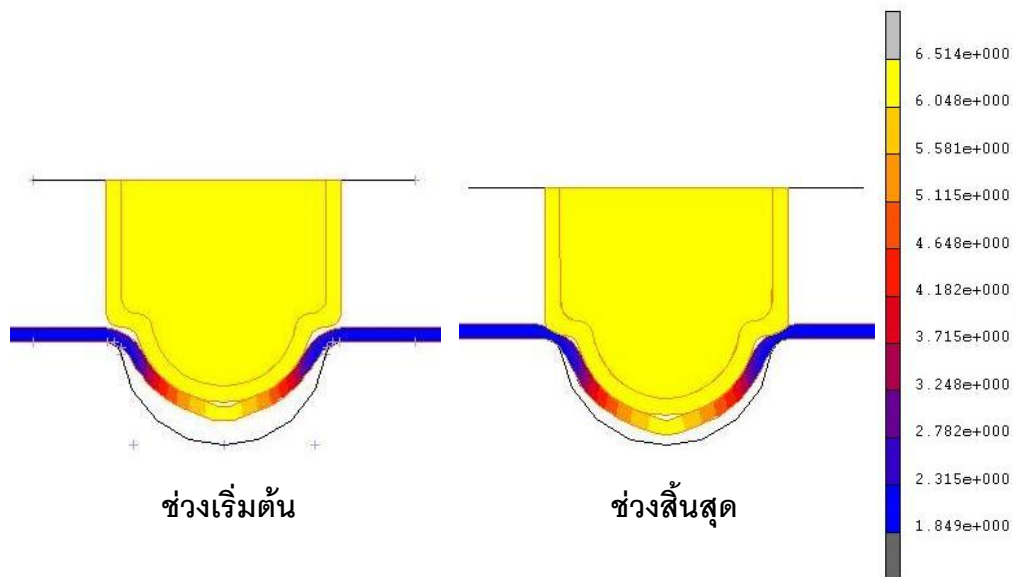


รูปที่ 4.4 การกระจายความเค้นของครอว์ปีดเสริมยางธรรมชาติ โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากรูปที่ 4.4 ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอว์บีสเสริมยางธรรมชาติ พบว่าเกิดความเค้นสองลักษณะ คือ ความเค้นอัด กับความเค้นดึง ซึ่งมีการกระจายของความเค้นตามส่วนโค้งของชิ้นงานตลอดแนวการกดของดรอว์บีส และพบว่าบริเวณส่วนโค้งด้านบนที่เกิดการยืดตัวสูงสุด เป็นบริเวณที่มีค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ  $5.968 \times 10^2$  MPa

#### 4.1.3 ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ดรอว์บีสเสริมยางสังเคราะห์

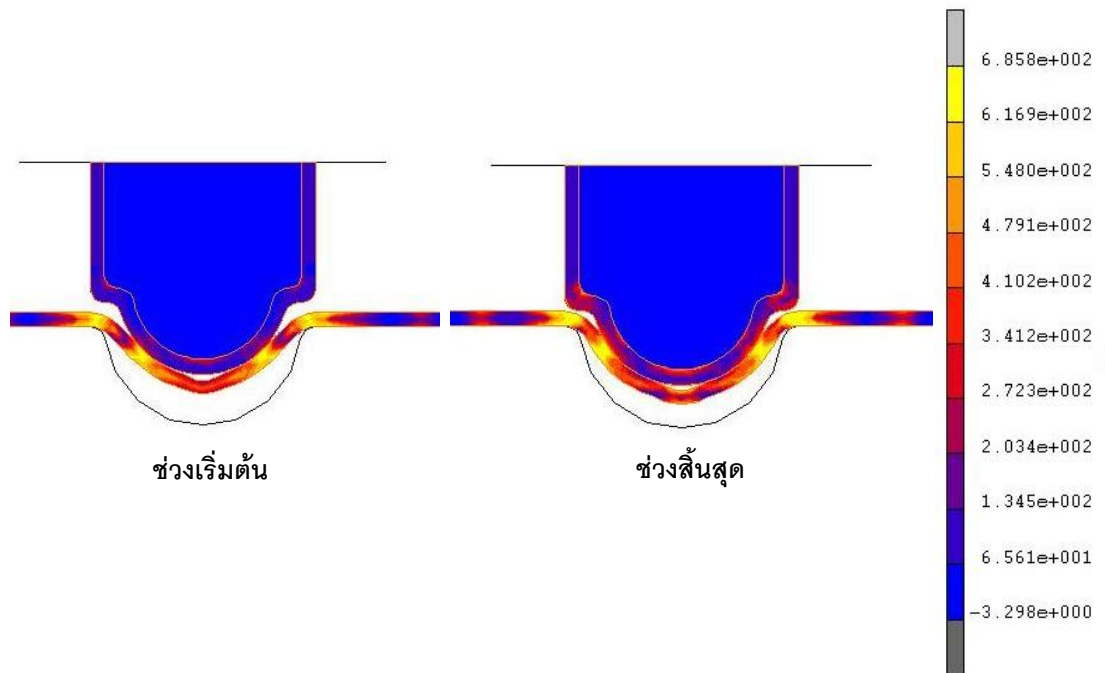
##### 1) ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Displacement)



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดรอว์บีสเสริมยางสังเคราะห์โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากรูปที่ 4.5 ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอว์บีสเสริมยางสังเคราะห์ พบว่าเกิดการกระจายของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสม่ำเสมอดีมาก และเกิดมากที่สุดบริเวณที่ดรอว์บีสกดลงต่ำสุด ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงสุดเท่ากับ 6.048 มม.

## 2) ผลการจำลองความเค้น (Stress)



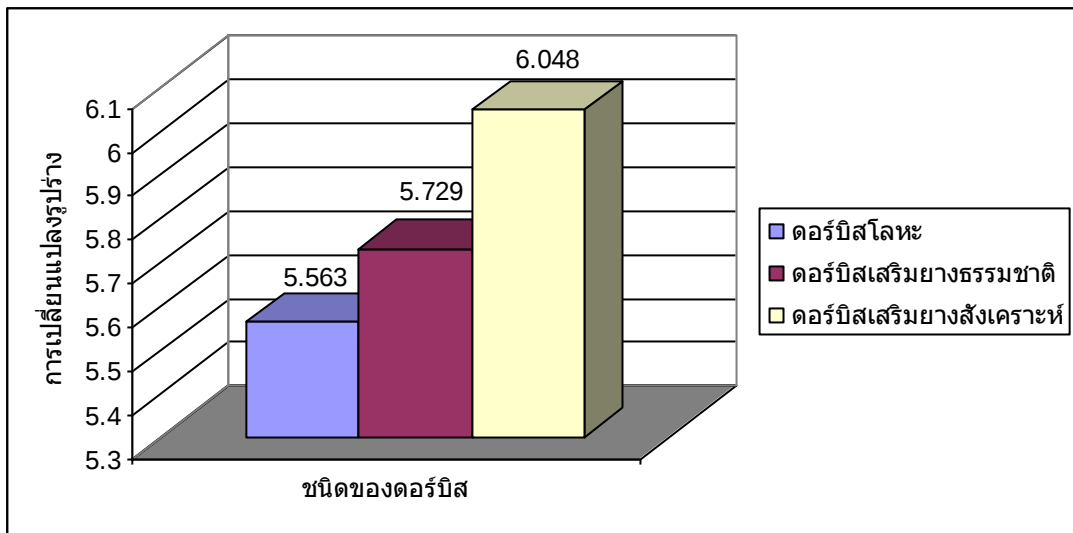
รูปที่ 4.6 การกระจายความเค้นของครอว์บีคเสริมยางสังเคราะห์ โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากรูปที่ 4.6 ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการลากขึ้นรูปโดยใช้ครอว์บีคเสริมยางสังเคราะห์ พบว่าเกิดความเค้นสองลักษณะ คือ ความเค้นอัด กับความเค้นดึง ซึ่งมีการกระจายของความเค้นตามส่วนโค้งของชิ้นงาน แต่ไม่เกิดขึ้นตลอดตามแนวการกดของครอว์บีค และพบว่าบริเวณส่วนโค้งด้านบนที่เกิดการยืดตัวสูงสุด เป็นบริเวณที่มีค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ  $6.169 \times 10^2$  MPa

## 4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

### 4.2.1 วิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

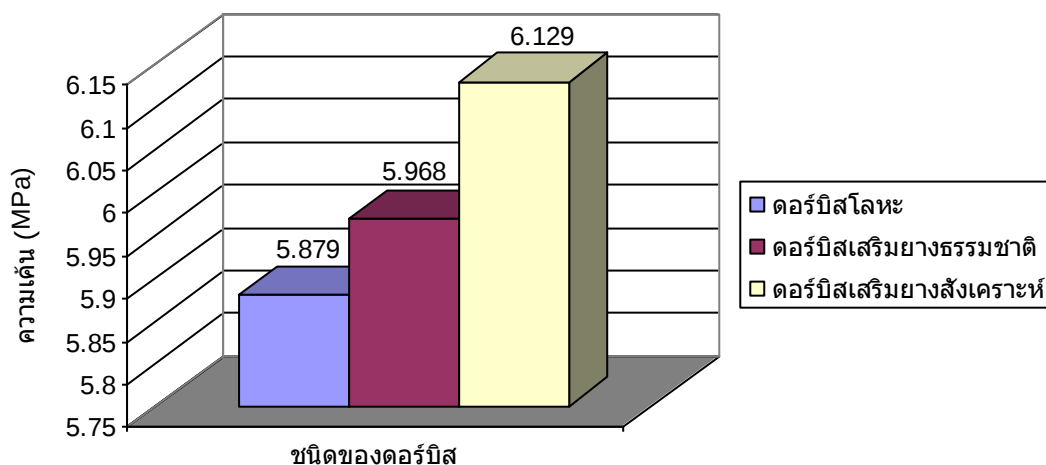
จากรูปที่ 4.7 พบว่าอิทธิพลของการเสริมยางในครอว์บีคส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานอย่างชัดเจน ซึ่งครอว์บีคเสริมยางสังเคราะห์ได้ช่วยในการขึ้นรูปชิ้นงานได้ดีกว่าครอว์บีคโลหะ และครอว์บีคเสริมยางธรรมชาติ นั้นแสดงว่าการยืดตัวของชิ้นงานเกิดขึ้นสูง แต่อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์พบว่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยรวมของชิ้นงานค่อนข้างสม่ำเสมอ และมีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างใกล้เคียงกันของการขึ้นรูปด้วยครอว์บีคทั้งสามชนิด



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

#### 4.2.2 วิเคราะห์ผลการกระจายความเค้น

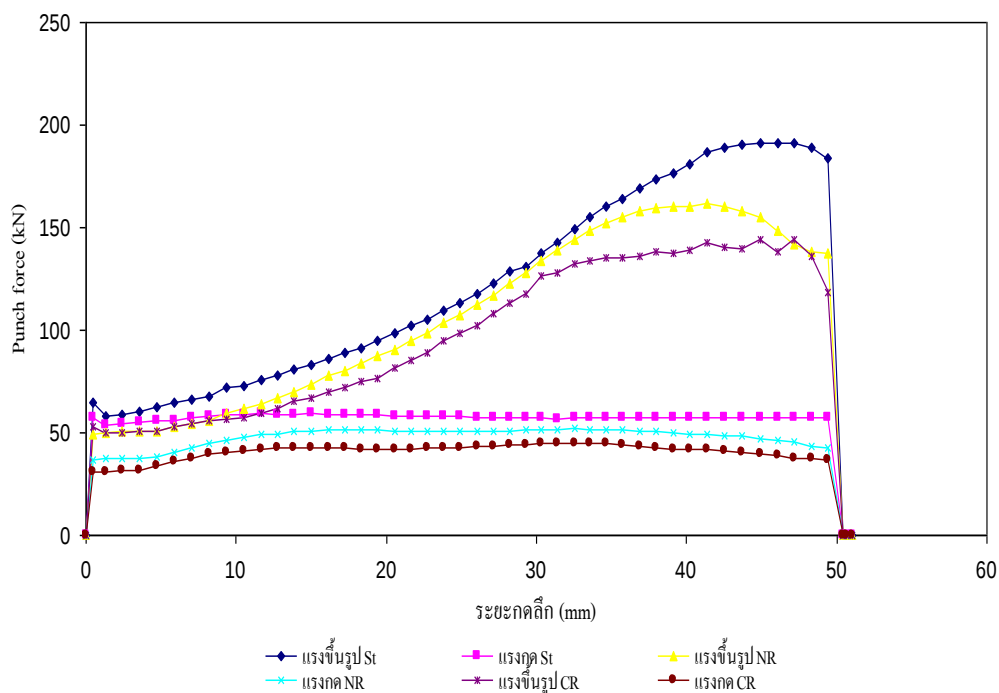
จากรูปที่ 4.8 พบว่าอิทธิพลของการเสริมยางในดอร์บิสส่งผลโดยตรงต่อความเค้นในชิ้นงานอย่างชัดเจน ซึ่งดอร์บิสเสริมยางสังเคราะห์ได้ช่วยในการขึ้นรูปชิ้นงานได้ดีกว่าดอร์บิสโลหะ และดอร์บิสเสริมยางธรรมชาติ นั้นแสดงว่าการยึดตัวของชิ้นงานเกิดขึ้นสูง บริเวณส่วนนี้จึงเกิดความเค้นสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์พบว่าความเค้นโดยรวมบนชิ้นงานเกิดขึ้นบริเวณส่วนโค้งด้านล่าง ซึ่งเกิดความเค้นแรงดึงสูงกว่าความเค้นแรงอัด และมีค่าความเค้นใกล้เคียงกันของการขึ้นรูปด้วยดอร์บิสทั้งสามชนิด



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบความเค้น

#### 4.2.3 วิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบผลการทดลอง

ได้มีการทดลองเปรียบเทียบกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 4.9 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงลากขึ้นรูปและแรงกดขึ้นงานต่อระยะกดลึก ในการใช้ดรอว์บีดแต่ละชนิด จะพบว่าแรงลากขึ้นรูปในการใช้ดรอว์บีดโลหะ (แรงขึ้นรูป St) มีระดับแรงสูงสุด 193 kN เพราะว่าเมื่อแรงกดขึ้นงานเพิ่มขึ้นดรอว์บีดที่เป็นโลหะไม่เกิดการยุบตัวแรงขึ้นรูปจึงเพิ่มสูงขึ้นทำให้เพียงพอสำหรับการขึ้นรูป รองลงมาเป็นการใช้ดรอว์บีดเสริมแรงธรรมชาติ (แรงขึ้นรูป NR) เพราะว่าดรอว์บีดเสริมแรงยางธรรมชาติเกิดการยุบตัวน้อยกว่ายางสังเคราะห์ และดรอว์บีดเสริมแรงยางสังเคราะห์ (แรงขึ้นรูป CR) มีระดับแรงขึ้นรูปต่ำสุดเนื่องจากการยุบตัวมากที่สุด แรงกดขึ้นงานของดรอว์บีดโลหะจะสูงสุด เมื่อเปลี่ยนมาใช้ดรอว์บีดเสริมแรงธรรมชาติ และดรอว์บีดเสริมแรงยางสังเคราะห์ แรงกดขึ้นงานมีระดับลดต่ำลงกว่าการใช้ดรอว์บีดโลหะและแรงขึ้นรูปก็ลดลง ทำให้ลดความเสียหายผิวชิ้นงานที่สัมผัสกับแผ่นกดขึ้นงาน (Blank holder force) กับดาย (Die) ได้ แต่จะทำให้เกิดรอย่นบริเวณขอบปีกชิ้นงาน



รูปที่ 4.9 แรงขึ้นรูปและแรงกดขึ้นงานในการใช้ดรอว์บีดแต่ละชนิด ที่แรงกด 50 %

จากผลการทดลองสอดคล้องกับผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพบว่าคอร์บิสเสริมยางสังเคราะห์ใช้แรงในการขึ้นรูปน้อย ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของชิ้นงานได้ง่าย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างชิ้นงานได้สูงสุด รองลงมาเป็นคอร์บิสเสริมยางธรรมชาติ และคอร์บิสโลหะตามลำดับ

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการไหลตัวของโลหะแผ่นในกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยลูก โดยการประยุกต์ใช้ครอว์ปีดอย่างเสริมแรง ขึ้นรูปชิ้นงานแผ่นเหล็ก SPCC ที่มีความหนา 1.0 มม. รูปทรงไม่สมมาตร เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์การลากขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยใช้ครอว์ปีดแต่ละชนิด สามารถสรุปได้โดยย่อดังนี้

##### 5.1.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

อิทธิพลของการเสริมยางในคอร์บิสต์ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงาน อย่างชัดเจน ซึ่งคอร์บิสต์เสริมยางสังเคราะห์ได้ช่วยในการขึ้นรูปชิ้นงานได้ดีกว่าคอร์บิสต์โลหะ และคอร์บิสต์เสริมยางธรรมชาติ นั้นแสดงว่าการยึดตัวของชิ้นงานเกิดขึ้นสูง แต่อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์พบว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยรวมของชิ้นงานค่อนข้างสม่ำเสมอ และมีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างใกล้เคียงกันของการขึ้นรูปด้วยคอร์บิสต์ทั้งสามชนิด

##### 5.1.2 ความเค้น

อิทธิพลของการเสริมยางในคอร์บิสต์ส่งผลโดยตรงต่อความเค้นในชิ้นงานอย่างชัดเจน ซึ่งคอร์บิสต์เสริมยางสังเคราะห์ได้ช่วยในการขึ้นรูปชิ้นงานได้ดีกว่าคอร์บิสต์โลหะ และคอร์บิสต์เสริมยางธรรมชาติ นั้นแสดงว่าการยึดตัวของชิ้นงานเกิดขึ้นสูง บริเวณส่วนนี้จึงเกิดความเค้นสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์พบว่าความเค้นโดยรวมบนชิ้นงานเกิดขึ้นบริเวณส่วนโค้งด้านล่าง ซึ่งเกิดความเค้นแรงดึงสูงกว่าความเค้นแรงอัด และมีค่าความเค้นใกล้เคียงกันของการขึ้นรูปด้วยคอร์บิสต์ทั้งสามชนิด

การใช้ครอว์ปีดโลหะที่ระดับแรงกดขึ้นงาน มีความเหมาะสมในการลากขึ้นรูปชิ้นงาน รูปทรงไม่สมมาตร แรงที่ใช้ลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีคุณภาพดีอยู่ในระดับที่ไม่สูงมาก ความหนาของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ความเครียดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยตามด้วย จึงเป็นผลการทดลองที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้ และสอดคล้องกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งพบว่าการใช้คอร์บิสต์โลหะทำให้เกิด

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยสุด และเกิดความเค้นต่ำสุด ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายน้อยสุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การวางครอว์ปีดอาจใช้สองแถวหรือวางในตำแหน่งบริเวณขอบที่เป็นรัศมีโค้ง

5.2.2 ขั้นตอนการประกอบแม่พิมพ์และการติดตั้งบนเครื่องเพรสเป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก ควรมีความระมัดระวัง รอบคอบอยู่เสมอ

5.2.3 ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถจำลองแบบสามมิติ เพื่อให้ได้ผลการจำลองที่แม่นยำมากขึ้น

5.2.4 ควรทำการศึกษาลักษณะทางชนิดอื่นๆ เพื่อเป็นข้อมูลงานวิจัยในการพัฒนาต่อไป

## บรรณานุกรม

- [1] ชาญชัย ทรัพย์ากร. 2537. การออกแบบแม่พิมพ์. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [2] กิตติภักดิ์ รัตนจันทร์. 2542. “ผลกระทบจากครอว์ปัดในการขึ้นรูปโลหะแผ่น.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมการผลิต บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [3] Tai Hun Kwon, IN TRODUCTION TO FINITE ELEMENT METHOD. Department of Mechanical Engineering Pohang University of Science and Technology, pp.2.
- [4] บุญส่ง จงกลณี. 2552. “การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรต่อสมบัติการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [5] ทวีภัทร์ นูรณิธิ. 2550. “การออกแบบการขึ้นรูปขึ้นส่วนขวางยึดเครื่องยนต์โดยการวิเคราะห์การฉีกขาดและรอยย่น.” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [6] F. Mehmet, An analysis of sheet drawing characteristics with drawbead elements, Computational Materials Science Vol.41 (3), 2008, Pages 266-274.
- [7] M. Samuel, Influence of drawbead geometry on sheet metal forming, Journal of Materials Processing Technology
- [8] H. Naceur, Y. Q. Guo, J. L. Batoz and C. Knopf-Lenoir, Optimization of drawbead restraining forces and drawbead design in sheet metal forming process, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 43 (10), 2001, Pages 2407-2434.
- [9] B.Y. Ghoo and Y. T. Keum, Expert drawbead models for sectional FEM analysis of sheet metal forming processes, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 105 (1-2), 2000, Pages 7-16
- [10] R.Li, M.L. Bohn, K.J. Weinmann and A. Chandra, A Study of the Optimization of Sheet Metal Drawing with Active Drawing, Journal of Manufacturing Processes, Vol. 2 (4), 2000, Pages 205- 216.
- [11] Y.Y., Yang, Z.H. Jin., R.F., Wang and Y.Z. Wang, 2D elasto-plastic FE simulation of the drawbead drawing process, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 120 (1-3), 2002, Pages 17-20.
- [12] J.A., Schey, Speed effects in drawbead: Simulation, Journal of Materials Processing

- Technology, Vol. 57 (1-2), 1996, Pages 146-154.
- [13] วีรศักดิ์ ทรัพย์เชียร. 2544. น้ำมันหล่อลื่น. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หน้า 1-7.
- [14] ชเนศ เมฆฉาย และคณะ. 2539. “ทฤษฎีการขึ้นรูปลึก.” สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรม  
เครื่องจักรกลและโลหะการ กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [15] B.Y. Ghoo and Y.T. Keum, Expert drawbead models for sectional FEM analysis of sheet  
metal forming processes, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 105 (1-2), 2000,  
Pages 7-16 .
- [16] สวัสดิ์ โสตามุก. 2550. “การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพ  
ขีดจำกัดการขึ้นรูป.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องกล  
บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [17] คมสันต์ งามขำ. 2550. “ขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 จากการ  
เปลี่ยนความหนา” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องกล  
บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [18] <http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/NR.htm>
- [19] <http://www.rubbergreen.co.th/>
- [20] พงษ์ธร แซ่ฮู. 2548. ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุ  
แห่งชาติ (เอ็มเทค).
- [21] R. W. Clough, THE FINITE ELEMENT METHOD. Pittsburgh, PA, September 1960,  
pp 8-9.
- [22] D.A. Anderson, J.C. Tannehill, and R.H. Pletcher, COMPUTATATIONAL FLUID  
MECHANICS AND HEAT TRANSFER. Hemisphere, Washington, DC, 1984
- [23] David Roynance, FINITE ELEMENT ANALYSIS. Department of Materials Science and  
Engineering Massachusetts Institute of Technology Cambridge, February 28, 2001
- [24] MSC.Software Corporation, INTRODUCTION TO MSC. MARC AND MENTAT. 815  
Colorado Boulevard Innsbrucker Ring 15 Los Angeles, 2007.
- [25] T. H. Kwon, FEM MODELLING INTRODUCTION, 2005.
- [26] MSC.Software Corporation, MSC. MARC USER GUIDE VERSION 2008 R1 VOLUME B.  
815 Colorado Boulevard Innsbrucker Ring 15 Los Angeles, March 2008.
- [27] MSC.Software Corporation, MSC. MARC. MENTAT. 815 Colorado Boulevard Innsbrucker  
Ring 15 Los Angeles, 2003
- [28] วิทยา สงวนวรรณ และทีมงานวิชาการ, NX CAE THE FINITE ELEMENT (FEA)  
ANALYSIS, สำนักพิมพ์ เอนจิเนียร์ แอนด์ อคติค พลัส 315/22-23 ถ.สุขาภิบาล 6 ต.บางพลี

ใหญ่ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ 10540

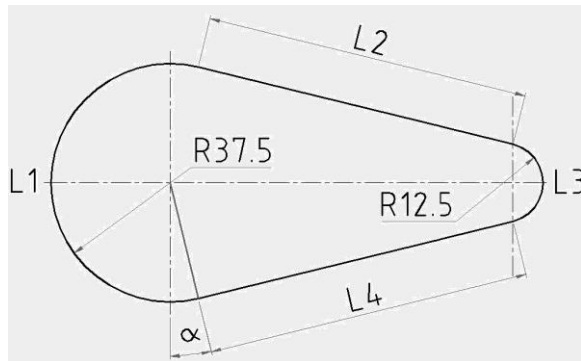
[29] Frank J. Vecchio, Professor, Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Membranes, Department of Civil Engineering, University of Toronto , Ontario Canada.

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

### ก.1 การคำนวณแรงขึ้นรูปลึก

แรงในการขึ้นรูปสามารถหาได้จากสมการที่ 2.3 มีการคำนวณโดยการประมาณค่าดังแสดงวิธีดังนี้ [9]



รูปที่ ก.1 เส้นรอบรูปขึ้นงานหาความยาว Lt (L Total) [9]

เมื่อ L2 กับ L4 เป็นเส้นตรงที่มีขนาดเท่ากันและ L1 กับ L3 เป็นเส้นโค้ง R1 = 37.5 มม. R2 = 12.5 มม. ตามลำดับเพื่อหาค่ามุม  $\alpha$

$$\sin \alpha = \frac{R1 + R2}{105}$$

แทนค่าในสมการ

$$\sin \alpha = \frac{37.5 + 12.5}{105} = \frac{25}{105}$$

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{25}{105} = 13.77 \text{ องศา}$$

$$L2 = L4 = 105 \cos \alpha$$

$$= 105 \cos 13.77$$

$$L2 = L4 = 102 \text{ mm.}$$

หาค่า L1 และ L3 ที่สัมพันธ์ส่วนโค้งของ R1 และ R2

$$L1 = \frac{\pi(180 + 2\alpha)R1}{180}$$

$$L1 = \frac{\pi(180 + 2 \times 13.77) \times 37.5}{180}$$

$$L1 = 135.8 \text{ mm.}$$

$$L1 = \frac{\pi(180 + 2\alpha)R2}{180}$$

$$L3 = \frac{\pi(180 + 2 \times 13.77) \times 12.5}{180}$$

$$L3 = 33.3 \text{ mm.}$$

$$Lt = L1 + L2 + L3 + L4$$

$$Lt = 135.8 + 102 + 102 + 33.3$$

$$Lt = 373.1 \text{ mm.}$$

แทนค่าในสมการที่ 2.00  $Fd = \frac{241 + 321}{2} \times 373.1 \times 1.0$

$$Fd = \frac{104841}{1000} \text{ N หรือ } = 104.84 \text{ kN}$$

## ก.2 แรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน

แรงกดยึดแผ่นชิ้นงานสามารถหาได้จากสมการที่ 2.4 และ 2.5 ดังนี้ [9]

หาค่า  $h = \sqrt{105^2 - (37.5 - 12.5)^2} = 101.98$

mm.

$$Ao = \frac{207.54}{360} \pi (75)^2 + \frac{152.46}{360} \pi (38)^2 + \frac{87 + 48}{2} 101.98 + \frac{81 + 46}{2} 101.98$$

$$Ao = 25468.17 \text{ mm}^2$$

$$Ast = \frac{207.54}{360} \pi (37.5)^2 + \frac{154.46}{360} \pi (12.5)^2 + 2 \left[ \frac{37.5 + 12.5}{2} 101.98 \right]$$

$$Ast = 7853.78 \text{ mm}^2$$

คำนวณค่า  $k, m$  ของวัสดุ SPCC

$$k = \frac{1 + (r_{\max} - r_{\min})}{r_m n_m} 0.49 \times 10^{-3}$$

$$m = 1 + \left[ \frac{d_{fo}}{t_o} - 175 \right] \frac{0.17}{100}$$

ค่าคุณสมบัติของวัสดุ SPCC ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E517-92 [9]

$$r_m = \frac{(r_0 + 2r_{45} + r_{90})}{4}$$

$$r_m = \frac{(0.89 + 2(0.699) + 1.102)}{4}$$

$$r_m = 0.848$$

$$r_{\max} = 1.102$$

$$r_{\min} = 0.699$$

$$n_m = \frac{(n_0 + 2n_{45} + n_{90})}{4}$$

$$n_m = 0.184$$

หาค่า  $n$  ตามมุมใดๆจากสมการที่ 2.15

จากสมการเส้นตรงของข้อมูลคู่ระหว่างแรงกับความเครียด  $F, \varepsilon$

$$k = \left[ \frac{1 + (1.102 - 0.699)}{0.848 \times 0.180} \right] 0.49 \times 10^{-3}$$

$$k = 4.5038 \times 10^{-3}$$

$d_{fo}$ , (The fictitious equivalent punch diameter)

$$d_{fo} = \sqrt{\frac{4A_{st}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(7854)}{\pi}} = 100 \text{ mm}$$

ค่าตัวแปรของวัสดุ  $m$

$$m = 1 + \left[ \frac{100}{1} - 175 \right] \frac{0.17}{100}$$

$$m = 0.87$$

แรงกดที่  $F_{NA}$  แผ่นกดขึ้นงาน (BHF)

$$P_{NA} = (4.5038 \times 10^{-3})(0.87) \times \left( \frac{25468}{7854} - 1 \right) \times 321$$

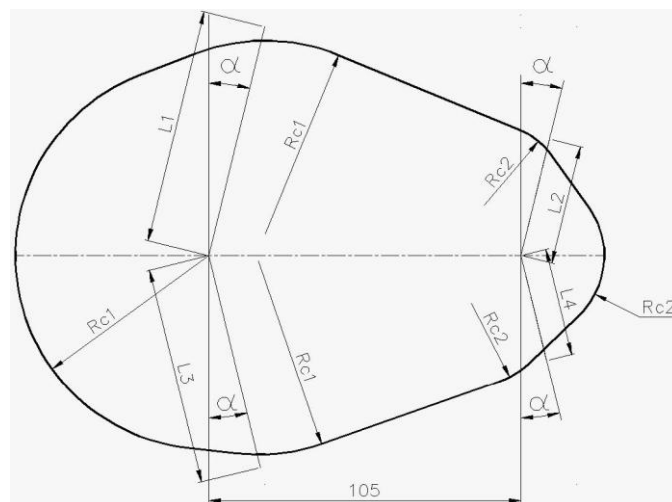
$$P_{NA} = 2.8208 \text{ N/mm}^2$$

$$\therefore \text{ BHF จาก } F_{NA} = P_{NA}(A_o - A_{st})$$

$$F_{NA} = 2.8208(25468 - 7854)$$

$$F_{NA} = 49685.57 \text{ N หรือ } \cong 49.6 \text{ kN}$$

### ก.3 ขนาดของแผ่นขึ้นงาน



รูปที่ ก.2 การคำนวณแผ่นตัดเปล่า [9]

หาค่า รัศมี  $Rc1$  จากสมการ

$$D1 = \sqrt{d^2 + (d + 2a)^2 + 4d(h - 0.43r)}$$

เมื่อกำหนดให้

$$d = 75 \text{ mm.}$$

$$h = 15 \text{ mm.}$$

$$a = 5 \text{ mm.}$$

$$r = 4 \text{ mm.}$$

แทนค่า

$$D1 = \sqrt{75^2 + (75 + 2(5))^2 + 4(75)(15 - 0.43(4))}$$

$$= 129.75 \text{ mm.}$$

$$Rc1 = \frac{D1}{2} = \frac{129.75}{2} = 64.88 \cong 65 \text{ mm.}$$

หาค่า รัศมี  $Rc2$

$$D2 = \sqrt{25^2 + (25 + 2(5))^2 + 4(25)(15 - 0.43(4))}$$

$$= 56.37 \text{ mm.}$$

เมื่อกำหนดให้

$$d = 25 \text{ mm.}$$

$$h = 15 \text{ mm.}$$

$$a = 5 \text{ mm.}$$

$$r = 4 \text{ mm.}$$

$$Rc2 = \frac{D2}{2} = \frac{56.37}{2} = 28.19 \cong 28 \text{ mm.}$$

หาค่าความยาว  $L1$  และ  $L2$

$$L1 = \frac{\pi}{2} R1 + (h - r) + \frac{\pi}{2} r + (a - r)$$

เมื่อกำหนดให้

$$R1 = 37.5 \text{ mm.}$$

$$h = 15 \text{ mm.}$$

$$a = 5 \text{ mm.}$$

$$r = 4 \text{ mm.}$$

แทนค่าตัวแปรในสมการเพื่อหาค่า  $L1$

$$L1 = \frac{\pi}{2} (37.5) + (15 - 4) + \frac{\pi}{2} (4) + (5 - 4)$$

$$L1 = 77.16 \cong 77 \text{ mm.}$$

$$L2 = \frac{\pi}{2} R2 + (h - r) + \frac{\pi}{2} r + (a - r)$$

เมื่อกำหนดให้

$$R2 = 12.5 \text{ mm.}$$

$$h = 15 \text{ mm.}$$

$$a = 5 \text{ mm.}$$

$$r = 4 \text{ mm.}$$

$$L2 = \frac{\pi}{2}(12.5) + (15 - 4) + \frac{\pi}{2}(4) + (5 - 4)$$

$$L2 = 37.91 \cong 38 \text{ mm.}$$

หาค่าความยาว  $L3$  และ  $L4$

$$L3 = 2R1\sin 45 + (h - r) + \frac{\pi}{2}r + (a - r)$$

เมื่อกำหนดให้  $R1 = 37.5 \text{ mm.}$

$$h = 15 \text{ mm.}$$

$$a = 5 \text{ mm.}$$

$$r = 4 \text{ mm.}$$

แทนค่าในสมการหาค่า  $L3$

$$L3 = 2(37.5)\sin 45 + (15 - 4) + \frac{\pi}{2}(4) + (5 - 4)$$

$$L3 = 71.31 \cong 71 \text{ mm.}$$

$$L4 = 2R2\sin 45 + (h - r) + \frac{\pi}{2}r + (a - r)$$

เมื่อกำหนดให้  $R2 = 12.5 \text{ mm.}$

$$h = 15 \text{ mm.}$$

$$a = 5 \text{ mm.}$$

$$r = 4 \text{ mm.}$$

แทนค่าในสมการหาค่า  $L4$

$$L4 = 2(12.5)\sin 45 + (15 - 4) + \frac{\pi}{2}(4) + (5 - 4)$$

$$L4 = 35.95 \cong 36 \text{ mm.}$$

ภาคผนวก ข  
ข้อมูลการทดลอง

### ข.1 แรงลากขึ้นรูปชิ้นงานสูงสุด

ตารางที่ ข.1 ตารางบันทึกแรงของการขึ้นรูปต่อสัดส่วนของแรงกดใช้ครอร์ปิดชนิดโลหะ

| แรงกดชิ้นงานต่อแรงขึ้นรูป | ชั้นที่ 1 | ชั้นที่ 2 | ชั้นที่ 3 | ชั้นที่ 4 | ชั้นที่ 5 | ค่าเฉลี่ย (kN) |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 30 เปอร์เซนต์ (31.45kN)   | 134.2     | 132.76    | 135.9     | 131.62    | 134.84    | 134.06         |
| 50 เปอร์เซนต์ (52.42kN)   | 188.56    | 190.2     | 189.51    | 187.36    | 186.7     | 188.46         |
| 70 เปอร์เซนต์ (73.39kN)   | 157.3     | 160.9     | 162       | 154.6     | 160.58    | 159.07         |

ตารางที่ ข.2 ตารางบันทึกแรงของการขึ้นรูปต่อสัดส่วนของแรงกดใช้ครอร์ปิดเสริมแรงยางธรรมชาติ

| แรงกดชิ้นงานต่อแรงขึ้นรูป | ชั้นที่ 1 | ชั้นที่ 2 | ชั้นที่ 3 | ชั้นที่ 4 | ชั้นที่ 5 | ค่าเฉลี่ย (kN) |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 30 เปอร์เซนต์ (31.45kN)   | 112.86    | 113.1     | 115.38    | 112.54    | 117.37    | 114.25         |
| 50 เปอร์เซนต์ (52.42kN)   | 158.45    | 160.6     | 159.12    | 157.5     | 158.1     | 158.754        |
| 70 เปอร์เซนต์ (73.39kN)   | 194.8     | 197.26    | 195.64    | 200.1     | 192.4     | 196.04         |

ตารางที่ ข.3 ตารางบันทึกแรงของการขึ้นรูปต่อสัดส่วนของแรงกดใช้ครอร์ปิดเสริมแรงยางสังเคราะห์

| แรงกดชิ้นงานต่อแรงขึ้นรูป | ชั้นที่ 1 | ชั้นที่ 2 | ชั้นที่ 3 | ชั้นที่ 4 | ชั้นที่ 5 | ค่าเฉลี่ย (kN) |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 30 เปอร์เซนต์ (31.45kN)   | 129.4     | 127.59    | 124.76    | 128.3     | 125.48    | 127.1          |
| 50 เปอร์เซนต์ (52.42kN)   | 141.25    | 143.1     | 142.68    | 143.97    | 140.9     | 142.38         |
| 70 เปอร์เซนต์ (73.39kN)   | 195.3     | 198.75    | 201.9     | 200.04    | 199.67    | 199.32         |

## ข.2 ความเครียดในแนวความหนาของชิ้นงานในแต่ละจุดตรวจวัด

ตารางที่ ข.4 ตารางวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่าของดรอว์ปัดแต่ละชนิด ที่แรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์

| จุดตรวจ | ดรอว์ปัดโลหะ   |               | ดรอว์ปัดเสริมยางธรรมชาติ |               | ดรอว์ปัดเสริมยางสังเคราะห์ |               |
|---------|----------------|---------------|--------------------------|---------------|----------------------------|---------------|
|         | ความหนาชิ้นงาน | ค่าความเครียด | ความหนาชิ้นงาน           | ค่าความเครียด | ความหนาชิ้นงาน             | ค่าความเครียด |
| A1      | 0.8566         | 0.154         | 0.8706                   | 0.138         | 0.9558                     | 0.045         |
| A2      | 0.8674         | 0.142         | 0.8914                   | 0.114         | 0.9568                     | 0.044         |
| A3      | 0.8446         | 0.168         | 0.8574                   | 0.153         | 0.8396                     | 0.174         |
| A4      | 0.964          | 0.036         | 0.9236                   | 0.079         | 0.9564                     | 0.035         |
| A5      | 0.8336         | 0.182         | 0.8458                   | 0.167         | 0.8418                     | 0.172         |
| A6      | 0.306          | 0.185         | 0.8422                   | 0.171         | 0.8418                     | 0.172         |
| A7      | 0.9796         | 0.023         | 0.9572                   | 0.043         | 0.9386                     | 0.063         |
| A8      | 0.9702         | 0.03          | 0.9328                   | 0.069         | 0.9626                     | 0.038         |
| A9      | 0.984          | 0.016         | 0.9618                   | 0.038         | 0.953                      | 0.048         |
| A10     | 0.9662         | 0.029         | 0.9702                   | 0.03          | 0.905                      | 0.099         |

ตารางที่ ข.5 ตารางวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่าของดรอว์ปัดแต่ละชนิด ที่แรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์

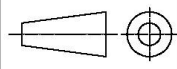
| จุดตรวจ | ดรอว์ปัดโลหะ   |               | ดรอว์ปัดเสริมยางธรรมชาติ |               | ดรอว์ปัดเสริมยางสังเคราะห์ |               |
|---------|----------------|---------------|--------------------------|---------------|----------------------------|---------------|
|         | ความหนาชิ้นงาน | ค่าความเครียด | ความหนาชิ้นงาน           | ค่าความเครียด | ความหนาชิ้นงาน             | ค่าความเครียด |
| A1      | 0.9042         | 0.1           | 0.9658                   | 0.03          | 0.9468                     | 0.054         |
| A2      | 0.8636         | 0.146         | 0.92                     | 0.08          | 0.9198                     | 0.083         |

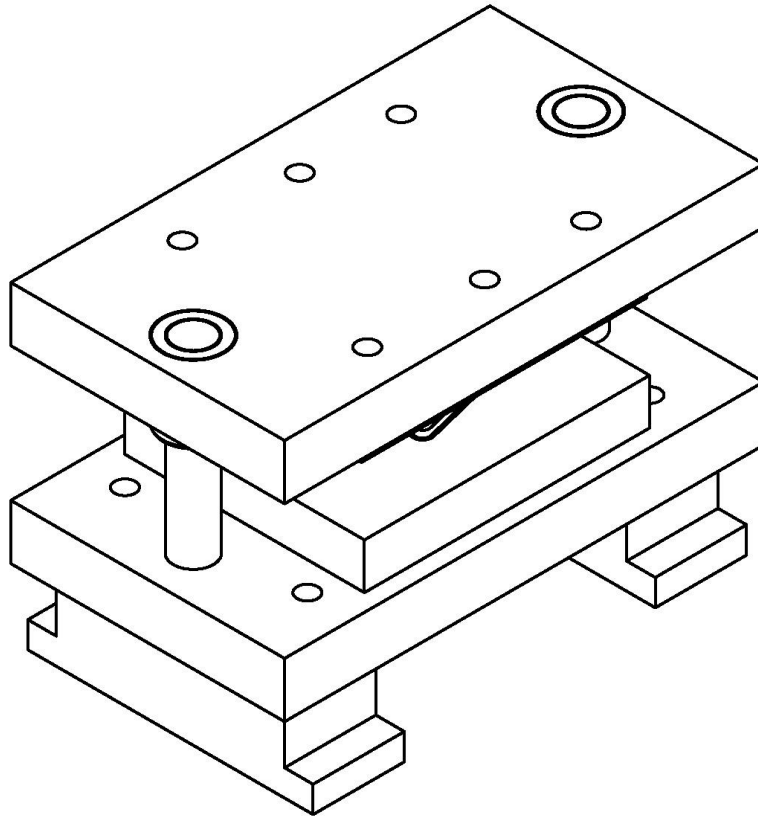
|     |        |       |        |       |        |       |
|-----|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| A3  | 0.82   | 0.198 | 0.8266 | 0.19  | 0.8302 | 0.16  |
| A4  | 0.951  | 0.05  | 0.948  | 0.06  | 0.9404 | 0.061 |
| A5  | 0.798  | 0.225 | 0.822  | 0.196 | 0.8302 | 0.16  |
| A6  | 0.7894 | 0.236 | 0.8155 | 0.175 | 0.8224 | 0.195 |
| A7  | 0.8741 | 0.1   | 0.9108 | 0.093 | 0.9066 | 0.098 |
| A8  | 0.9308 | 0.071 | 0.9486 | 0.052 | 0.9606 | 0.04  |
| A9  | 0.9468 | 0.05  | 0.9496 | 0.054 | 0.9324 | 0.069 |
| A10 | 0.966  | 0.03  | 0.9662 | 0.034 | 0.9604 | 0.04  |

ตารางที่ ข.6 ตารางวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่าของครอร์ปิดแต่ละชนิด ที่แรงกดขึ้นงาน 70 เปอร์เซนต์

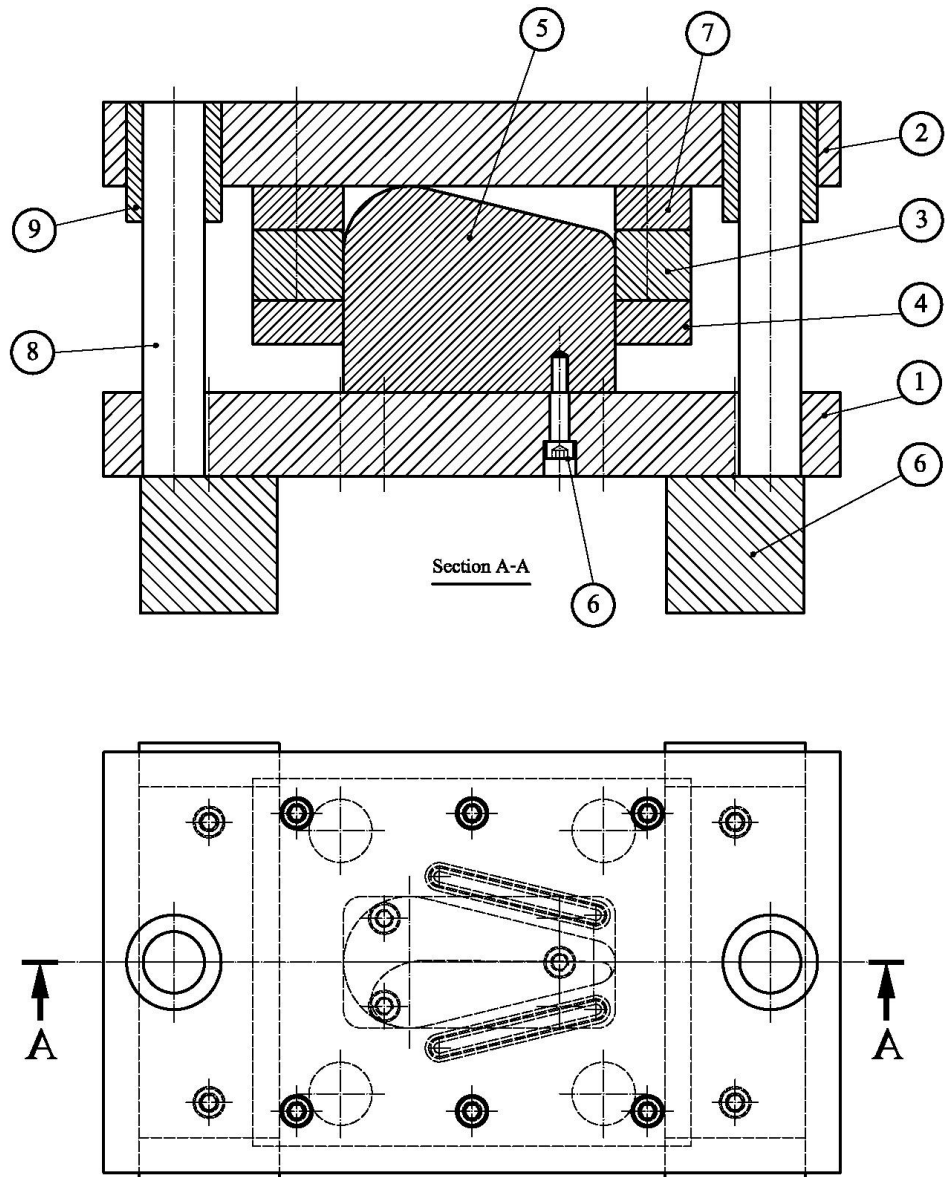
| จุดตรวจ | ครอร์ปิดโลหะ   |               | ครอร์ปิดเสริมยางธรรมชาติ |               | ครอร์ปิดเสริมยางสังเคราะห์ |               |
|---------|----------------|---------------|--------------------------|---------------|----------------------------|---------------|
|         | ความหนาขึ้นงาน | ค่าความเครียด | ความหนาขึ้นงาน           | ค่าความเครียด | ความหนาขึ้นงาน             | ค่าความเครียด |
| A1      | 0.8434         | 0.17          | 0.8452                   | 0.168         | 0.8696                     | 0.139         |
| A2      | 0.762          | 0.271         | 0.8334                   | 0.182         | 0.8624                     | 0.148         |
| A3      | 0.7128         | 0.338         | 0.826                    | 0.191         | 0.8276                     | 0.189         |
| A4      | 0.7958         | 0.228         | 0.9188                   | 0.084         | 0.9084                     | 0.096         |
| A5      | 0.6672         | 0.404         | 0.787                    | 0.239         | 0.7456                     | 0.293         |
| A6      | 0.6252         | 0.469         | 0.732                    | 0.311         | 0.736                      | 0.306         |
| A7      | 0.866          | 0.143         | 0.9622                   | 0.038         | 0.9314                     | 0.071         |
| A8      | 0.879          | 0.128         | 0.9654                   | 0.035         | 0.6516                     | 0.049         |
| A9      | 0.9116         | 0.092         | 0.9778                   | 0.022         | 0.8536                     | 0.158         |
| A10     | 0.9662         | 0.034         | 0.9736                   | 0.026         | 0.95                       | 0.05          |

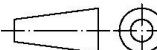
ภาคผนวก ค  
แบบขึ้นส่วนแม่พิมพ์

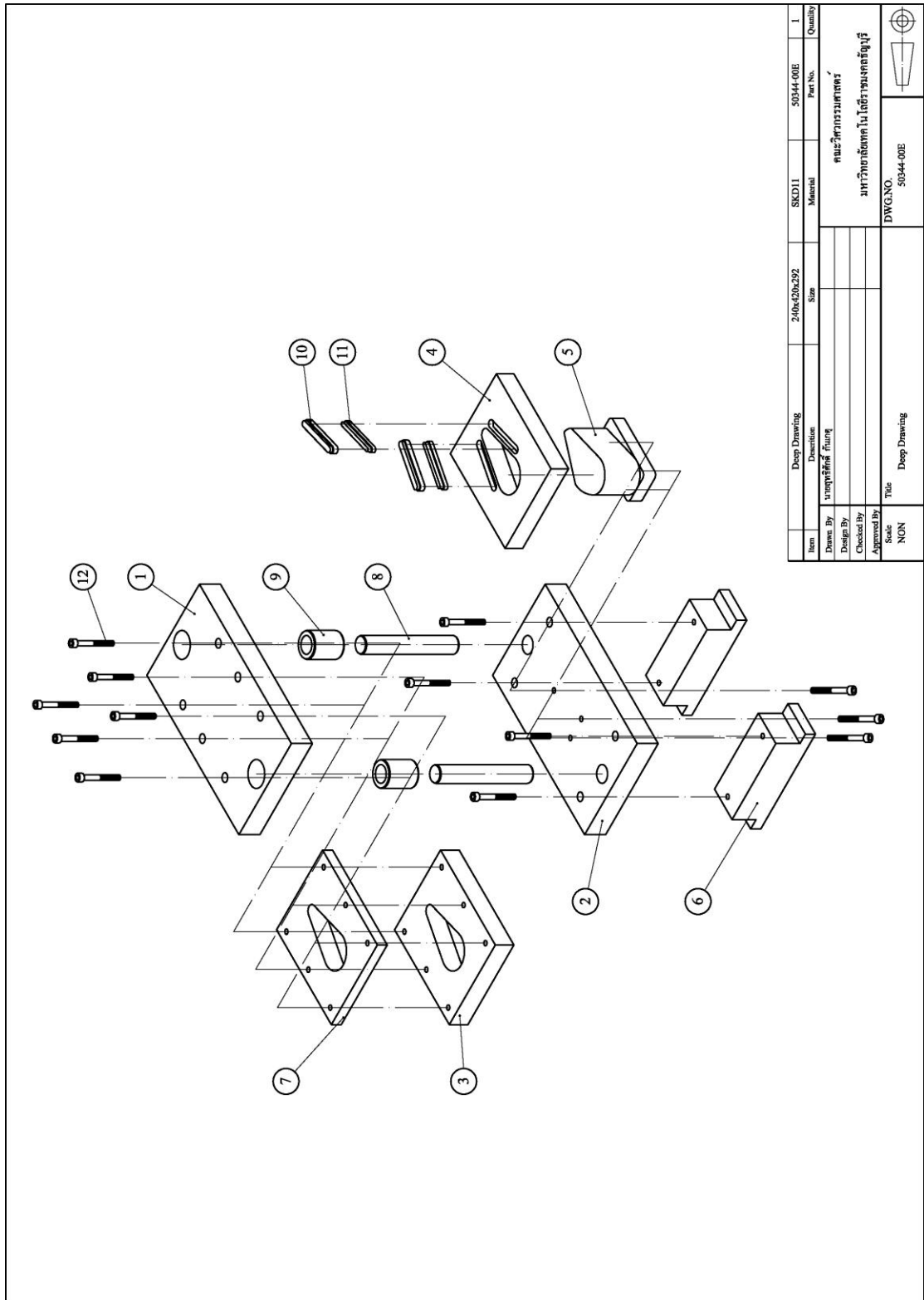
|              |                             |            |                                                         |                                                                                       |       |
|--------------|-----------------------------|------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 12           | Socket Head Hex Screws      | M10x1.5x60 | -                                                       | -                                                                                     | 13    |
| 11           | Drawbead Insert             | 12x104x16  | NBR                                                     | 50344-11                                                                              | 2     |
| 10           | Drawbead                    | 16x108x16  | S50C                                                    | 50344-10                                                                              | 2     |
| 9            | Bush                        | Ø54x68     | SKD11                                                   | 50344-09                                                                              | 2     |
| 8            | Guide                       | Ø35x213.5  | SKD11                                                   | 50344-08                                                                              | 2     |
| 7            | Pressure Die                | 210x250x40 | S50C                                                    | 50344-07                                                                              | 1     |
| 6            | Spacer Block                | 80x250x78  | S50C                                                    | 50344-06                                                                              | 2     |
| 5            | Punch From                  | 80x150x118 | SKD11                                                   | 50344-05                                                                              | 1     |
| 4            | Blank Holder                | 210x250x40 | S50C                                                    | 50344-04                                                                              | 1     |
| 3            | Die Plate                   | 210x250x40 | SKD11                                                   | 50344-03                                                                              | 1     |
| 2            | Punch Holder                | 240x420x48 | SS41                                                    | 50344-02                                                                              | 1     |
| 1            | Die Holder                  | 240x420x48 | SS41                                                    | 50344-01                                                                              | 1     |
| ชั้นที่      | รายการ                      | ขนาดวัสดุ  | วัสดุ                                                   | หมายเลขแบบ                                                                            | จำนวน |
| ผู้เขียน     | นายสุทธิศักดิ์ กันเกตุ      |            | คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |                                                                                       |       |
| ผู้ออกแบบ    |                             |            |                                                         |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ      |                             |            |                                                         |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ ม.ท. |                             |            |                                                         |                                                                                       |       |
| มาตราส่วน    | ชื่อชิ้นงาน<br>Deep Drawing |            | หมายเลขแบบ                                              |  |       |



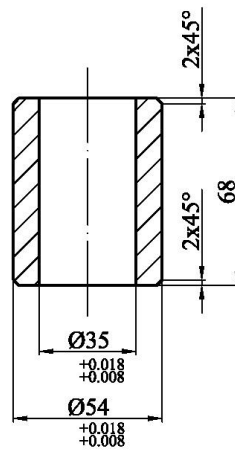
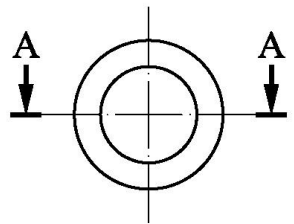
|              |                       |  |             |                                                         |                                                                                       |       |
|--------------|-----------------------|--|-------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
|              | Deep Drawing          |  | 240x420x292 | SKD11                                                   | 50344-00I                                                                             | 1     |
| ชั้นที่      | รายการ                |  | ขนาดวัสดุ   | วัสดุ                                                   | หมายเลขแบบ                                                                            | จำนวน |
| ผู้เขียน     | นายสุทธิศักดิ์ กันเขต |  |             | คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |                                                                                       |       |
| ผู้ออกแบบ    |                       |  |             |                                                         |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ      |                       |  |             |                                                         |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ ม.ร. |                       |  |             |                                                         |                                                                                       |       |
| มาตรฐาน      | ชื่อชิ้นงาน           |  | หมายเลขแบบ  |                                                         |  |       |
| NON          | Deep Drawing          |  | 50344-00I   |                                                         |                                                                                       |       |



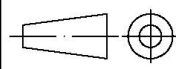
|              |                        |  |             |                                                         |                                                                                       |       |
|--------------|------------------------|--|-------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
|              | Deep drawing           |  | 240x420x292 | SKD11                                                   | 50344-000                                                                             | 1     |
| ชั้นที่      | รายการ                 |  | ขนาดวัสดุ   | วัสดุ                                                   | หมายเลขแบบ                                                                            | จำนวน |
| ผู้เขียน     | นายสุทธิศักดิ์ กันเกตุ |  |             | คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |                                                                                       |       |
| ผู้ออกแบบ    |                        |  |             |                                                         |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ      |                        |  |             |                                                         |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ ม.ร. |                        |  |             |                                                         |                                                                                       |       |
| มาตรฐาน      | ชื่อชิ้นงาน            |  |             | หมายเลขแบบ                                              |  |       |
| NON          | Deep drawing           |  |             | 50344-000                                               |                                                                                       |       |

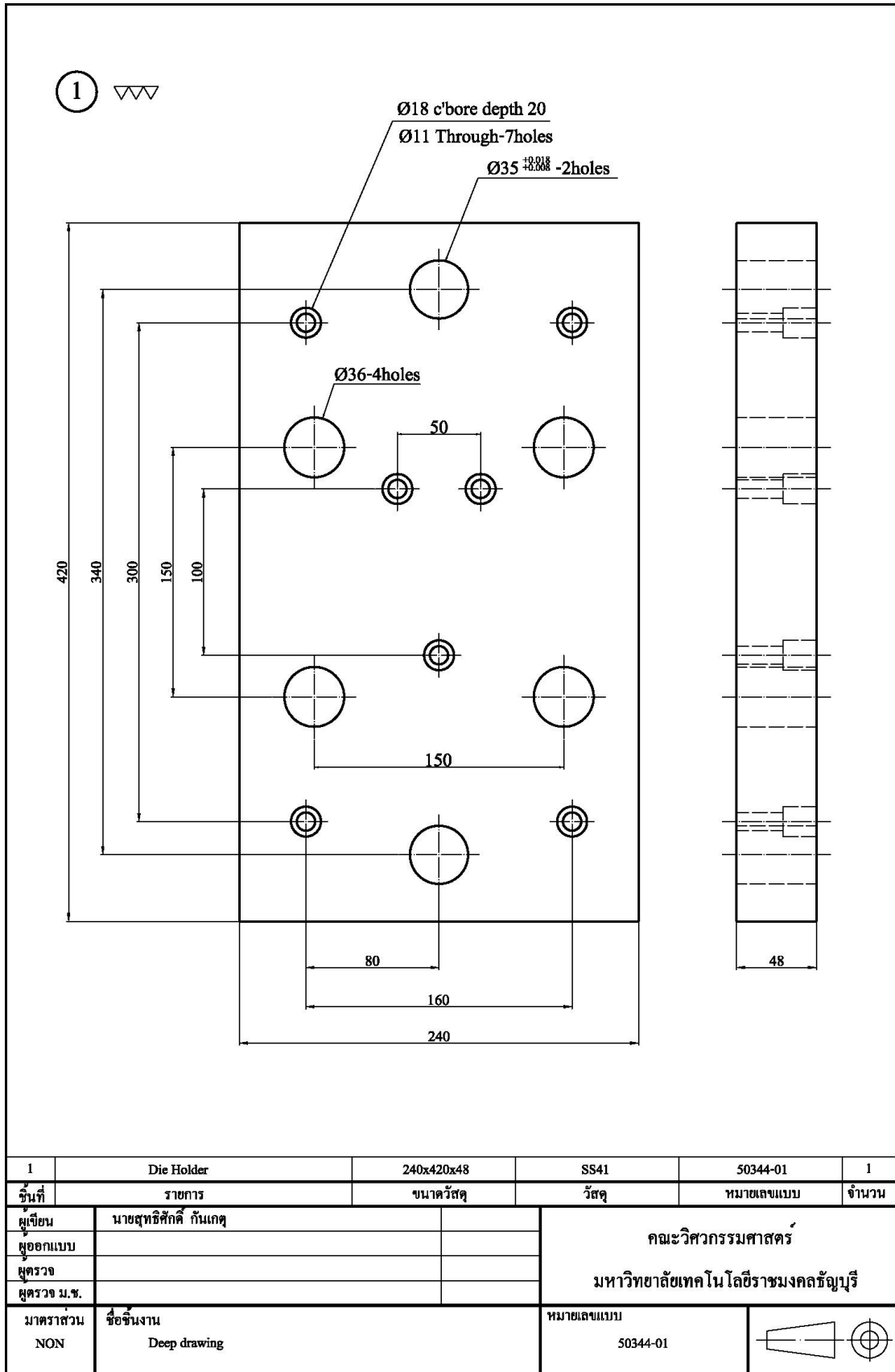


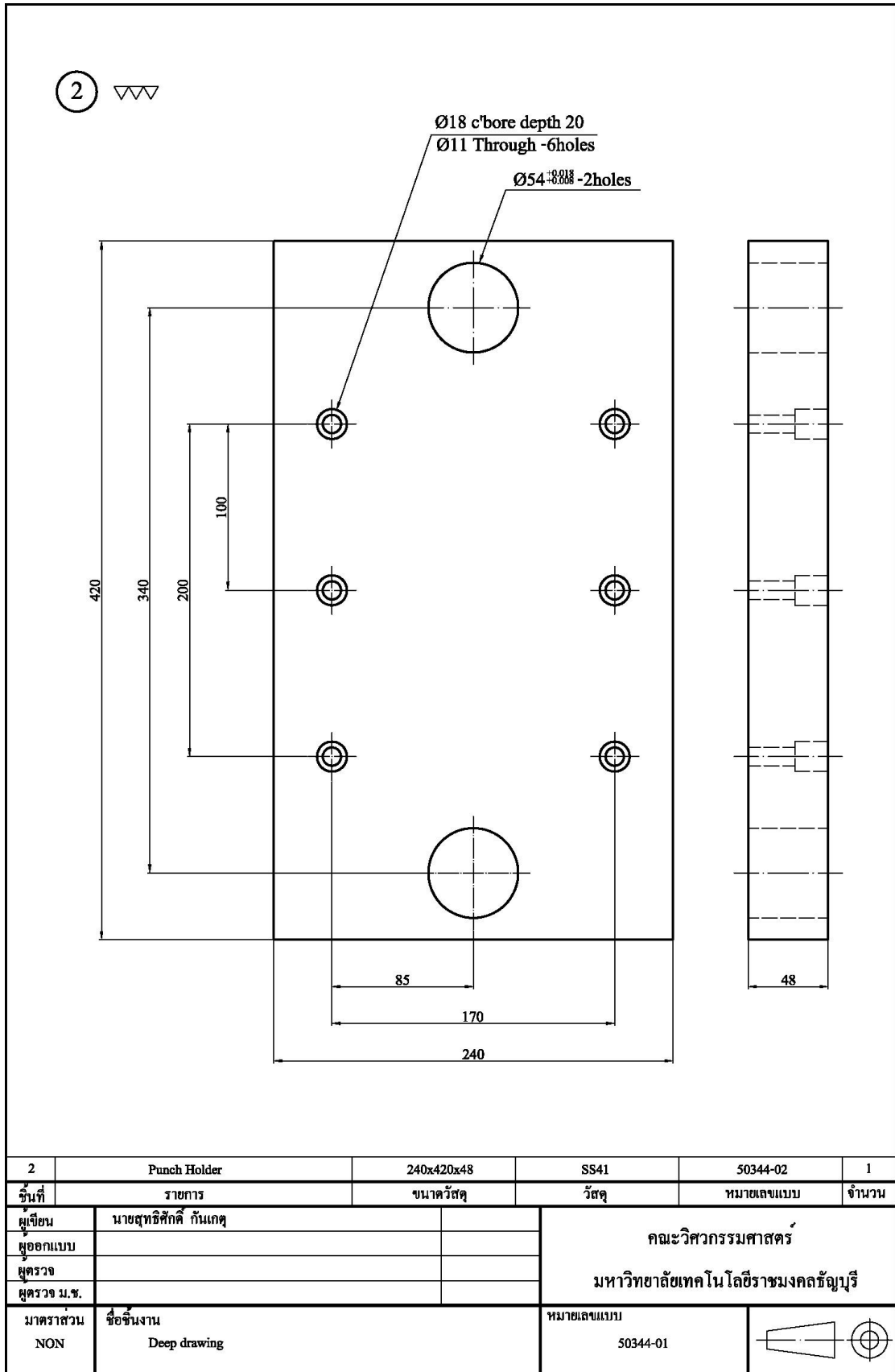
9 



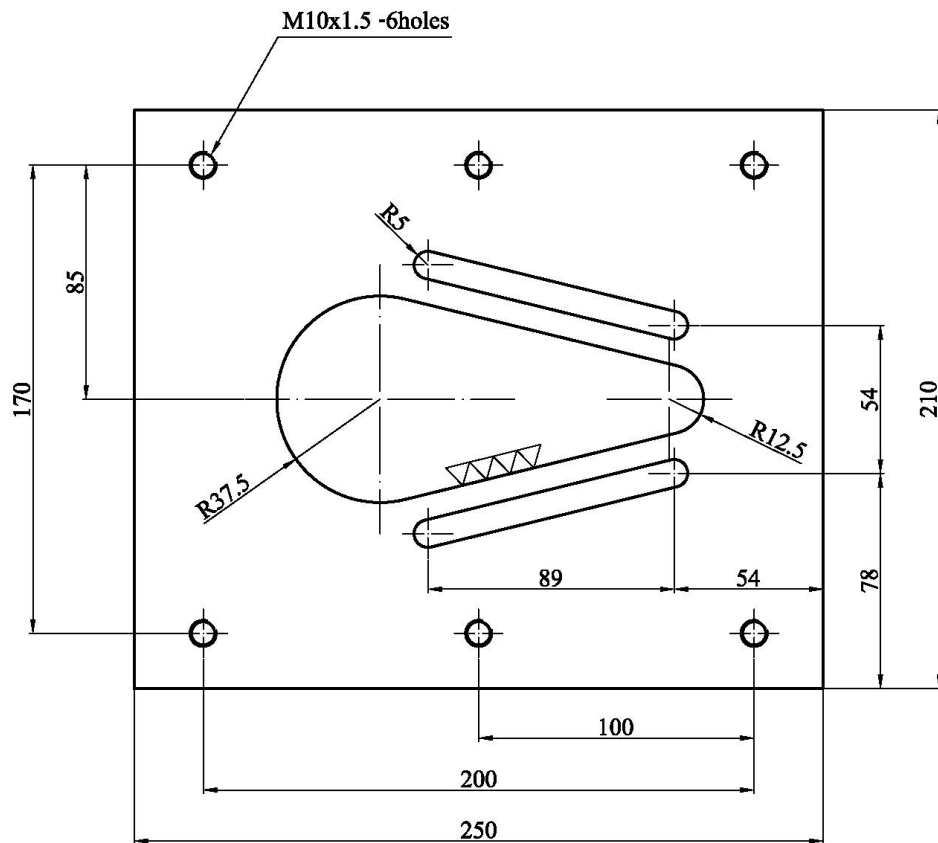
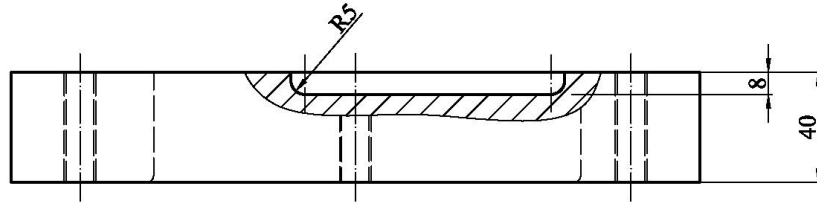
Section A-A

|              |                        |            |                                                         |                                                                                       |       |
|--------------|------------------------|------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 9            | Bush                   | Ø54x68     | S50C                                                    | 50344-09                                                                              | 2     |
| ชั้นที่      | รายการ                 | ขนาดวัสดุ  | วัสดุ                                                   | หมายเลขแบบ                                                                            | จำนวน |
| ผู้เขียน     | นายสุทธิศักดิ์ กันเกตุ |            | คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |                                                                                       |       |
| ผู้ออกแบบ    |                        |            |                                                         |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ      |                        |            |                                                         |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ ม.ร. |                        |            |                                                         |                                                                                       |       |
| มาตรฐาน      | ชื่อชิ้นงาน            | หมายเลขแบบ |                                                         |  |       |
| NON          | Deep drawing           | 50344-09   |                                                         |                                                                                       |       |



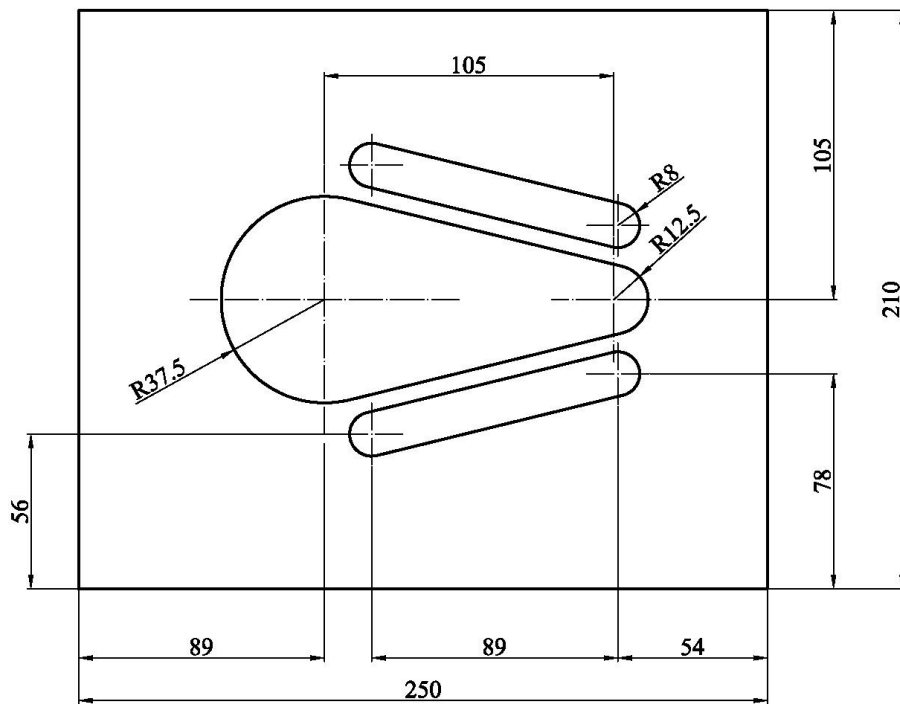
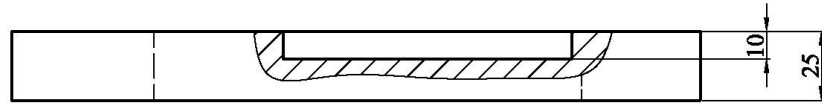


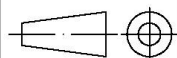
3



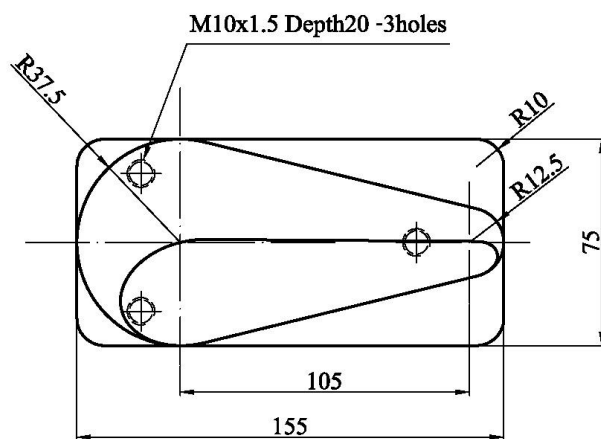
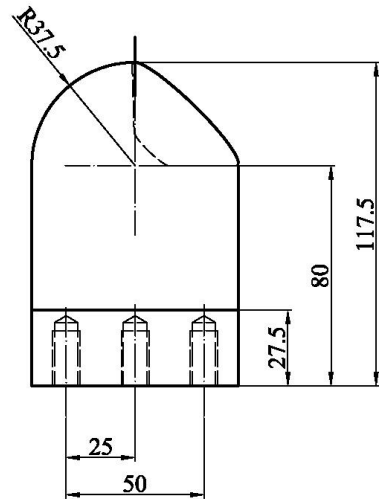
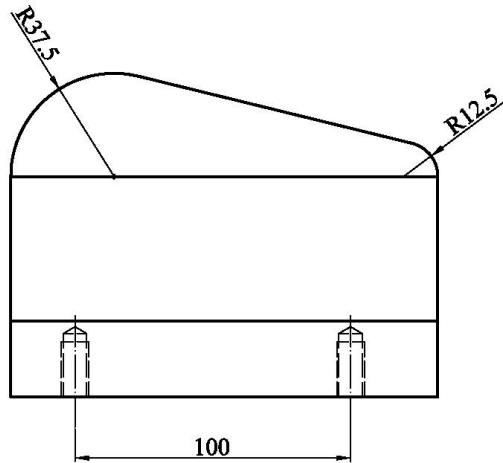
|                |                             |            |                                                         |            |       |
|----------------|-----------------------------|------------|---------------------------------------------------------|------------|-------|
| 3              | Die Plate                   | 210x250x40 | SKD11                                                   | 50344-03   | 1     |
| วันที่         | รายการ                      | ขนาดวัสดุ  | วัสดุ                                                   | หมายเลขแบบ | จำนวน |
| ผู้เขียน       | นายสุทธิศักดิ์ กันเกตุ      |            | คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |            |       |
| ผู้ออกแบบ      |                             |            |                                                         |            |       |
| ผู้ตรวจ        |                             |            |                                                         |            |       |
| ผู้ตรวจ ม.ร.   |                             |            |                                                         |            |       |
| มาตรฐาน<br>NON | ชื่อชิ้นงาน<br>Deep drawing |            | หมายเลขแบบ<br>50344-03                                  |            |       |

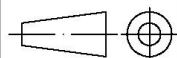
4 



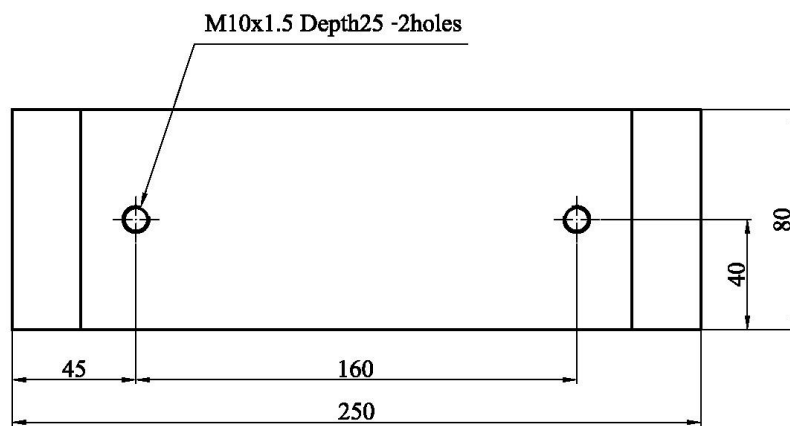
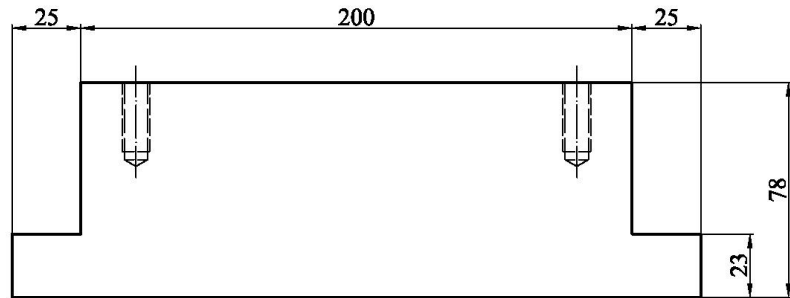
|                |                             |            |                                                         |                                                                                       |       |
|----------------|-----------------------------|------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 4              | Blank Holder                | 210x250x25 | S50C                                                    | 50344-04                                                                              | 1     |
| วันที่         | รายการ                      | ขนาดวัสดุ  | วัสดุ                                                   | หมายเลขแบบ                                                                            | จำนวน |
| ผู้เขียน       | นายสุทธิศักดิ์ กันเกตุ      |            | คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |                                                                                       |       |
| ผู้ออกแบบ      |                             |            |                                                         |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ        |                             |            |                                                         |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ ม.ข.   |                             |            |                                                         |                                                                                       |       |
| มาตรฐาน<br>NON | ชื่อชิ้นงาน<br>Deep drawing |            | หมายเลขแบบ<br>50344-04                                  |  |       |

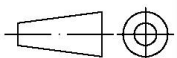
5



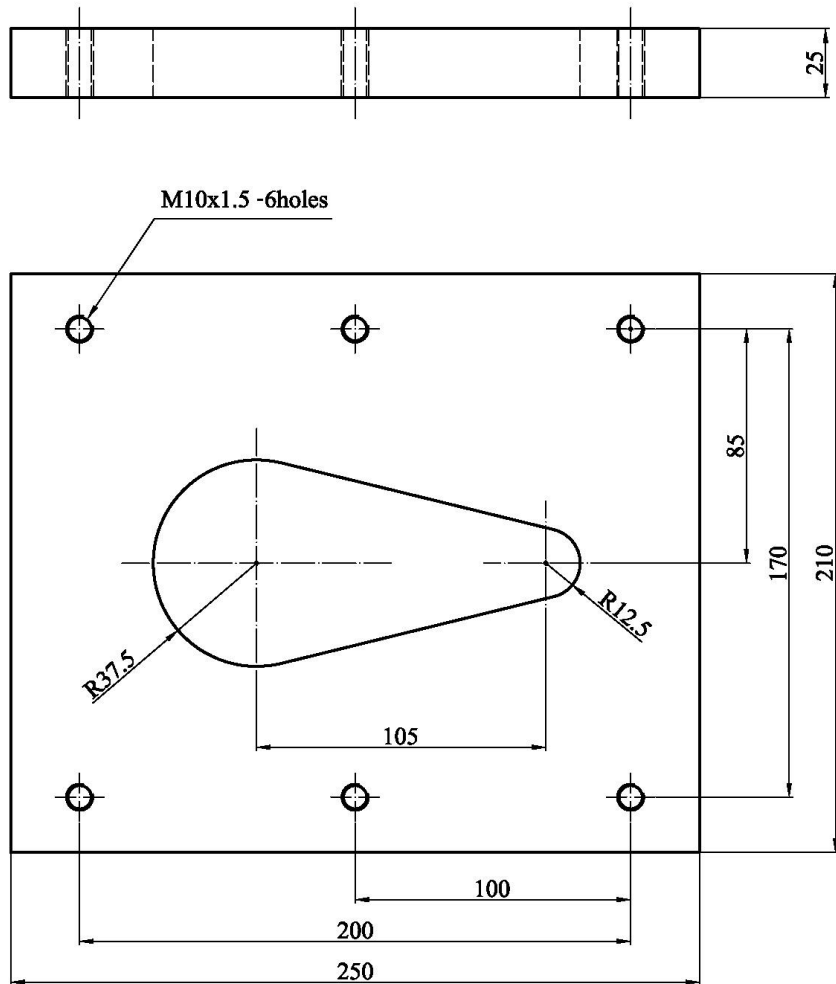
|                |                             |            |                                                         |                                                                                       |       |
|----------------|-----------------------------|------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 5              | Punch From                  | 80x150x118 | SKD11                                                   | 50344-05                                                                              | 1     |
| วันที่         | รายการ                      | ขนาดวัสดุ  | วัสดุ                                                   | หมายเลขแบบ                                                                            | จำนวน |
| ผู้เขียน       | นายสุทธิศักดิ์ กันเกตุ      |            | คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |                                                                                       |       |
| ผู้ออกแบบ      |                             |            |                                                         |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ        |                             |            |                                                         |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ ม.ข.   |                             |            |                                                         |                                                                                       |       |
| มาตรฐาน<br>NON | ชื่อชิ้นงาน<br>Deep drawing |            | หมายเลขแบบ<br>50344-05                                  |  |       |

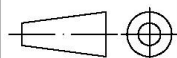
6 



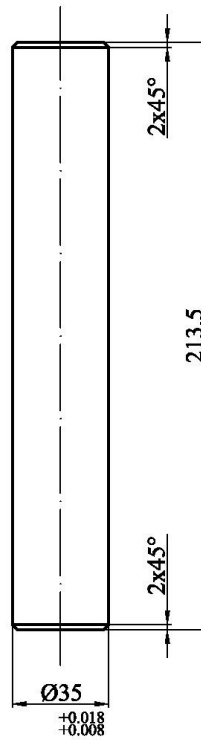
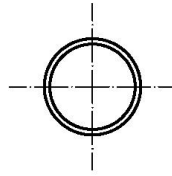
|              |                        |  |           |                                                         |            |                                                                                       |
|--------------|------------------------|--|-----------|---------------------------------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 6            | Spacer Block           |  | 80x250x78 | S50C                                                    | 50344-06   | 2                                                                                     |
| วันที่       | รายการ                 |  | ขนาดวัสดุ | วัสดุ                                                   | หมายเลขแบบ | จำนวน                                                                                 |
| ผู้เขียน     | นายสุทธิศักดิ์ กันเกตุ |  |           | คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |            |                                                                                       |
| ผู้ออกแบบ    |                        |  |           |                                                         |            |                                                                                       |
| ผู้ตรวจ      |                        |  |           |                                                         |            |                                                                                       |
| ผู้ตรวจ ม.ช. |                        |  |           |                                                         |            |                                                                                       |
| มาตรฐาน      | ชื่อชิ้นงาน            |  |           | หมายเลขแบบ                                              |            |  |
| NON          | Deep drawing           |  |           | 50344-06                                                |            |                                                                                       |

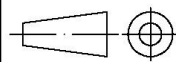
7



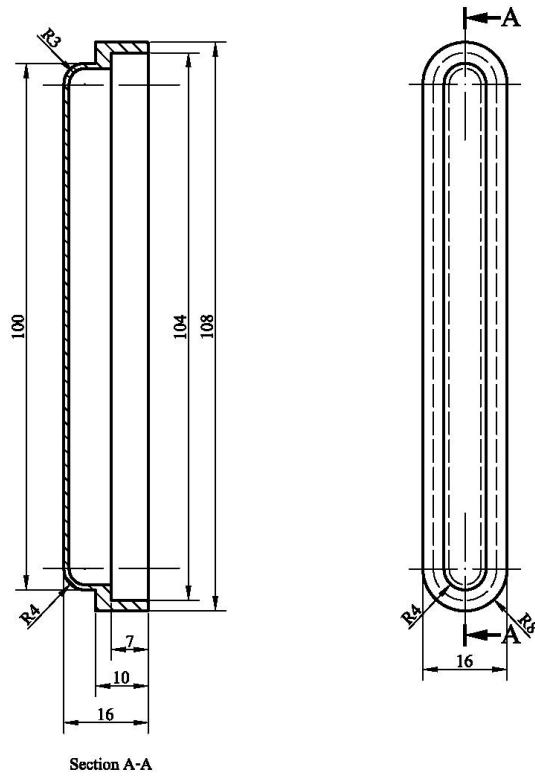
|                |                             |            |                                                         |                                                                                       |       |
|----------------|-----------------------------|------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 7              | Pressure Die                | 210x250x40 | S50C                                                    | 50344-07                                                                              | 1     |
| วันที่         | รายการ                      | ขนาดวัสดุ  | วัสดุ                                                   | หมายเลขแบบ                                                                            | จำนวน |
| ผู้เขียน       | นายสุทธิศักดิ์ กันเกตุ      |            | คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |                                                                                       |       |
| ผู้ออกแบบ      |                             |            |                                                         |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ        |                             |            |                                                         |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ ม.ข.   |                             |            |                                                         |                                                                                       |       |
| มาตรฐาน<br>NON | ชื่อชิ้นงาน<br>Deep drawing |            | หมายเลขแบบ<br>50344-07                                  |  |       |

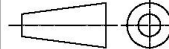
8 



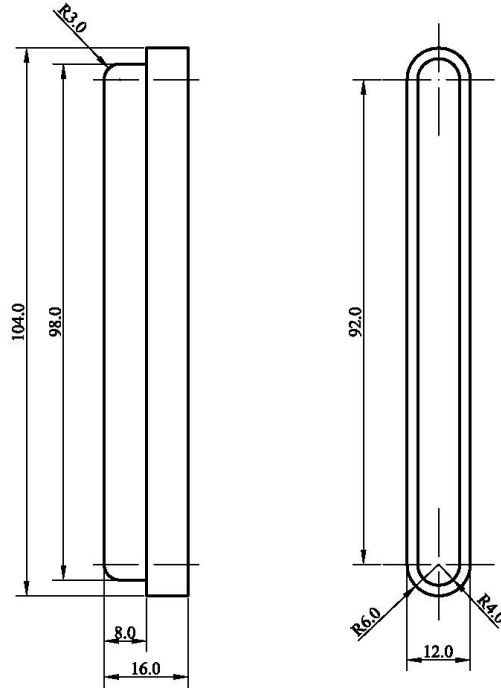
|              |                        |            |                                                         |                                                                                       |       |
|--------------|------------------------|------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 8            | Guide                  | Ø35x213.5  | S50C                                                    | 50344-08                                                                              | 2     |
| ชั้นที่      | รายการ                 | ขนาดวัสดุ  | วัสดุ                                                   | หมายเลขแบบ                                                                            | จำนวน |
| ผู้เขียน     | นายสุทธิศักดิ์ กันเกตุ |            | คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |                                                                                       |       |
| ผู้ออกแบบ    |                        |            |                                                         |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ      |                        |            |                                                         |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ ม.ข. |                        |            |                                                         |                                                                                       |       |
| มาตรฐาน      | ชื่อชิ้นงาน            | หมายเลขแบบ |                                                         |  |       |
| NON          | Deep drawing           | 50344-08   |                                                         |                                                                                       |       |

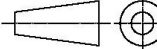
10



|              |                        |            |                                                         |                                                                                       |       |
|--------------|------------------------|------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 10           | Drawbead               | 16x108x16  | S50C                                                    | 50344-10                                                                              | 2     |
| วันที่       | รายการ                 | ขนาดวัสดุ  | วัสดุ                                                   | หมายเลขแบบ                                                                            | จำนวน |
| ผู้เขียน     | นายสุทธิศักดิ์ กันเกตุ |            | คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |                                                                                       |       |
| ผู้ออกแบบ    |                        |            |                                                         |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ      |                        |            |                                                         |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ ม.ช. |                        |            |                                                         |                                                                                       |       |
| มาตรฐาน      | ชื่อชิ้นงาน            | หมายเลขแบบ |                                                         |  |       |
| NON          | Deep Drawing           | 50344-10   |                                                         |                                                                                       |       |

⑪ ~



|              |                        |            |                                                             |                                                                                       |       |
|--------------|------------------------|------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 11           | Drawbead Insert        | 12x104x16  | NBR                                                         | 50344-11                                                                              | 2     |
| ชั้นที่      | รายการ                 | ขนาดวัสดุ  | วัสดุ                                                       | หมายเลขแบบ                                                                            | จำนวน |
| ผู้เขียน     | นายสุทธิศักดิ์ กันเกตุ |            | คณะวิศวกรรมศาสตร์<br><br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |                                                                                       |       |
| ผู้ออกแบบ    |                        |            |                                                             |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ      |                        |            |                                                             |                                                                                       |       |
| ผู้ตรวจ ม.ร. |                        |            |                                                             |                                                                                       |       |
| มาตรฐาน      | ชื่อชิ้นงาน            | หมายเลขแบบ |                                                             |  |       |
| NON          | Deep Drawing           | 50344-11   |                                                             |                                                                                       |       |