



รายงานการวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของรูปทรงดรอปีสในงานลากขึ้นรูปชิ้นงานไม่สมมาตร

โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

A Study of the Effect of Drawbead Shapes in Non-Symmetry Deep
Drawing Process by Using Finite Element-Simulation

นายธีรยุทธ กาญจนแสงทอง

ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2557

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



รายงานการวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของรูปทรงดรอปีสในงานลากชั้นรูปขึ้นงานไม่สมมาตร

โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

A Study of the Effect of Drawbead Shapes in Non-Symmetry Deep
Drawing Process by Using Finite Element-Simulation

นายธีรยุทธ กาญจนแสงทอง

ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2557

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

รายงานการวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของรูปทรงดรอปีสในงานลากขึ้นรูปชิ้นงานไม่สมมาตร

โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

A Study of the Effect of Drawbead Shapes in Non-Symmetry Deep
Drawing Process by Using Finite Element-Simulation

นายธีรยุทธ กาญจนแสงทอง

ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2557

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บทคัดย่อ

ปัญหาการลากขึ้นรูปที่พบมาก คือ เกิดการฉีกขาดและการเกิดรอยย่นสาเหตุเกิดจากแรงกดขึ้นงาน ถ้าแรงกดมากเกินไปอาจทำให้เกิดการฉีกขาดของวัสดุและถ้าแรงกดน้อยเกินไปทำให้เกิดรอยย่นของวัสดุ การควบคุมสภาวะการไหลของโลหะแผ่นในงานขึ้นรูปสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การลดหรือเพิ่มแรงกดขึ้นงานหรือลดแรงเสียดทานระหว่างผิวแม่พิมพ์กับขึ้นงาน แต่วิธีดังกล่าวไม่สามารถควบคุมการไหลของโลหะแผ่นเฉพาะในบริเวณได้ ดังนั้นจึงมีความพยายามหาวิธีการควบคุมสภาวะการไหลของโลหะแผ่นขึ้นโดยอาศัยการขัดขวางการไหลตัวของโลหะด้วยสันเล็ก ๆ ที่เรียกว่า ดรอปปิด

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ดรอปปิดที่มีรูปร่าง หน้าตัดครึ่งวงกลม, หน้าตัดรูปตัววี และ หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ อิทธิพลแรงกดขึ้นงาน 30 ,50 และ 70 เปอร์เซนต์ วัสดุที่ใช้ในการศึกษา เหล็กรีดเย็นเกรด SPCD ที่มีผลกระทบท่อการไหลตัวของโลหะแผ่นที่ไหลเข้าสู่ช่องเปิดตายในการลากขึ้นรูปโดยใช้รูปทรงของดรอปปิดที่แตกต่างกัน แรงกดขึ้นงานที่แตกต่างกันและวัสดุต่างชนิดกันแล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ารูปทรงของดรอปปิด ,แรงกดขึ้นงานและชนิดของวัสดุ มีผลกระทบท่อการไหลตัวของโลหะแผ่นเป็นอันมาก จากการเปรียบเทียบผลการทดลองพบว่า แรงกดขึ้นงาน 50 เปอร์เซนต์ ดรอปปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม สามารถไหลตัวได้ดีทำให้ขึ้นงานไม่เกิดการฉีกขาดและรอยย่นลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่ามีความแตกต่างกันเฉลี่ย 18 เปอร์เซนต์ โดยวัดจากความหนาที่เปลี่ยนไปของวัสดุแต่ละจุด ดังนั้นจึงสรุป ผลการเปลี่ยนรูปร่างสุดท้ายของวัสดุจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับรูปร่างจริง ซึ่งผลการทดลองและวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายและหาแนวทางการแก้ไขรูปทรงของดรอปปิดในการลากขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : ดรอปปิด การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ การขึ้นรูปโลหะแผ่น การย่น

Abstract

The problems commonly found during a Deep Draw Process are the avulsion and wrinkle by the blank holder force. If blank holder force is too much high, it may cause the avulsion of material. On the contrary, the strain of material likely to occur when small blank holder force is applied. To control the flux of steel sheet, a varying (decreasing or increasing) applied force method has been proposed. However, such method is not capable to control the flux in specific area of steel sheet. Thus, the method called as Draw Bead has been suggested, in which the flux of steel is blocked by a small bar.

This research study was aimed at the Haft-Round drawbead, V- Shaped and Trapeziform were used. The studied variables were the influences of blank holder force at 30 percent, 50 percent and 70 percent. The material used was Cold Rolled Steel Sheets grade SPCD which affected to the material flow to opened die. Deep Draw Process was done by using different shapes of draw beads, the blank holder force with different pressures and with the use of different kinds of materials. Then the results were compared to the result of Finite Element - simulation. The findings revealed that the studied parameters, such as shape of Draw Bead, blank holder force and material type, were strongly influent to the material (steel). As revealed by the experimental results, the work piece at the blank holder force of 50 percent, Haft-Round Draw Bead could provide a good condition for flux in the steel sheet. In addition, the experimental results were compared with the simulation results obtained from a Finite Element method. It was found that the difference (of any point of comparison) between experimental and simulation results were 18% (as average). It can be concluded that the Finite Element method can effectively forecast, and can be used as a guideline for shape improvement of draw bead in Deep Draw Process.

Keywords : drawbead, finite element-simulation, forming, wrinkle

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยการศึกษาอิทธิพลของรูปทรงกรอบสีในงานลากขึ้นรูปชิ้นงานไม่สมมาตร โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ สามารถดำเนินการจนสำเร็จได้ด้วยดีก็เพราะได้รับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ จากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยได้รับเงินประมาณอุดหนุนการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน พ.ศ. 2557 จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ในการดำเนินการจัดทำโครงการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และ คุณนรุตม์ชัย พันธมณี จากห้างหุ้นส่วนจำกัด นิวสกาย ชัพพลายส์ แอนด์ เซอร์วิส ที่ให้คำแนะนำในการสร้างและแก้ไขชุดแม่พิมพ์ ซึ่งทางคณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยฉบับนี้จะถูกนำไปเป็นข้อมูลในวงการอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ต่อไปในอนาคต



คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย	3
1.5 คำจำกัดความในการวิจัย	3
1.6 กรอบแนวความคิดในการวิจัย	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะ	6
2.2 กระบวนการพื้นฐานของโลหะแผ่น และระนาบความเค้น	15
2.3 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์	18
2.4 การลากขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร	28
2.5 ดรอปปิด	30
2.6 ชนิดของเหล็กแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูป	35
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
วิธีการดำเนินการวิจัย	38
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	38
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย	47

สารบัญต่อ

	หน้า
ผลการทดลอง	55
4.1 เปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูป	55
4.2 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา	57
4.3 ศึกษาอิทธิพลรูปทรงของดรอปีดในกระบวนการขึ้นรูป	62
สรุปผลการทดลอง	66
5.1 สรุปผลการทดลอง	66
5.2 การอภิปรายผล	66
5.3 ข้อเสนอแนะ	67
บรรณานุกรม	68
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก การคำนวณแรงขึ้นรูป แรงกด ขึ้นงานและขนาดของแผ่นขึ้นงาน	71
ภาคผนวก ข คุณสมบัติทางกลของเหล็ก	77
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลอง	83
ภาคผนวก ง แบบขึ้นส่วนแม่พิมพ์	96

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะการวิเคราะห์ความอิสระของการเคลื่อนที่ของแต่ละชนิด	24
2.2 ขนาดของดรอปีดและตำแหน่งของระยะห่างในการยึดติด	35
2.3 คุณสมบัติทางเคมีของเหล็กรีดเย็น	36
3.1 สมบัติเชิงกลแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCE ความหนา 1.0 มิลลิเมตร	42
3.2 ตารางชิ้นส่วนแม่พิมพ์	51
3.3 ตารางบันทึกแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป	54
3.4 ความเครียดในแนวความหนาของชิ้นงานในแต่ละจุดตรวจวัด	54



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ	6
2.2 แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ	8
2.3 เปรียบเทียบกรอบการแตกหัก	10
2.4 ขึ้นทดสอบตามทิศทางการรีด	13
2.5 ทิศทางหลักในการทดสอบแรงดึง	15
2.6 ทิศทางหลักของความเค้นและความเครียด	16
2.7 (ก) วงกลมบนโลหะแผ่น ขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูป (ข) เมื่อมีการเปลี่ยนรูป กิริตวงกลม จะเปลี่ยนเป็นรูปวงรีขนาดของแกนหลักคือ d_1 และขนาดแกนรอง คือ d_2 (ค) การดึง, T, หรือแรงส่งผ่านต่อหน่วยความกว้าง	16
2.8 (ก) การขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก (ข) ขึ้นส่วนย่อยของถ้วยทรงกระบอก แสดงค่าความเครียดที่วัดได้ (ค) ผลค่าความเครียดที่ได้จากการขึ้นรูปถ้วย ทรงกระบอก	17
2.9 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้ระเบียบวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์	18
2.10 โหนดในเอลิเมนต์แต่ละมิติ	19
2.11 ชนิดของเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1 ถึง 3 มิติ	20
2.12 การใช้เอลิเมนต์ 1 มิติ ในงานโครงสร้าง	21
2.13 การใช้เอลิเมนต์ 2 มิติ ในงานที่มีลักษณะเป็นผนัง	21
2.14 การใช้เอลิเมนต์ 3 มิติ ในงานที่เป็นปริมาตรตันที่มีความหนา	22
2.15 ตัวอย่างโครงสร้างเอลิเมนต์ดั้งเดิม	23
2.16 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ กัน	26
2.17 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อโดยมีตัวไม่รู้ค่า อยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ	27
2.18 ความเสียหายที่เกิดบนชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร	29
2.19 ดรอปิดแบบหน้าตัดกลม (Round Drawbead)	30
2.20 ดรอปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Half-Round Drawbead)	31
2.21 ดรอปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Drawbead)	31
2.22 ดรอปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapeziform Drawbead)	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

2.23	ดรอปีดแบบหน้าตัดรูปตัววี (V-Shaped Drawbead)	32
2.24	ร่องปิดแบบหน้าตัดตามรูปร่างของดรอปีด	33
2.25	ร่องปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม	33
2.26	ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า	33
2.27	ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู	34
2.28	ร่องปิดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม	34
2.29	ตำแหน่งและระยะของดรอปีด	35
3.1	แผนภาพการดำเนินการวิจัยการศึกษาอิทธิพลรูปทรงของดรอปีดในการ ลากขึ้นรูปโลหะ ที่มีรูปทรงไม่สมมาตรโดยการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์	39
3.2	ลักษณะขึ้นทดสอบหาสมบัติเชิงกล	40
3.3	การบันทึกข้อมูลการทดสอบการดึงจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์	40
3.4	แผนภาพความเค้น-ความเครียดวิศวกรรมและ ความเค้น-ความเครียด จริงของเหล็กเกรดเย็น หน้า 1 mm	41
3.5	หาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรงและเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วย ความเครียด ใช้แบบสมการกำลัง (Power function)	42
3.6	กำหนดชื่อของเครื่องมือ	42
3.7	ขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนเครื่องมือและชิ้นงาน	43
3.8	การสร้างผิวสำหรับเครื่องมือและชิ้นงาน	43
3.9	การสร้างผิวสำหรับเครื่องมือและชิ้นงาน	44
3.10	กำหนดชนิดการขึ้นรูป	44
3.11	กำหนดชนิดวัสดุของชิ้นงาน	45
3.12	เครื่องมือและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการขึ้นรูป	45
3.13	การประมวลผลของโปรแกรม Dyna Form 5.6	45
3.14	การกำหนดค่าสมบัติของวัสดุในโปรแกรม Dyna Form 5.6	46
3.15	ค่าความเครียดวิเคราะห์จากโปรแกรม Dyna Form 5.6	46
3.16	ค่าความหนาวิเคราะห์จากโปรแกรม Dyna Form 5.6	47
3.17	เครื่องปั๊มโลหะขนาด 80 ตัน	48
3.18	แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึกลงงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.19 เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC automatic machine)	49
3.20 ชิ้นงานทดลอง	49
3.21 ดรอปิดแบบหน้าครึ่งวงกลม	50
3.22 ดรอปิดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม	50
3.23 ดรอปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า	50
3.24 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ขึ้นรูปลึก	51
3.25 แม่พิมพ์พร้อมใช้งาน	52
3.26 (ก) อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน (ข) อุปกรณ์จับเก็บสัญญาณ	53
3.27 บริเวณจุดที่ตรวจวัดความเครียดบนชิ้นงาน	53
3.28 เครื่องวัดความหนาชิ้นงาน	53
4.1 เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปิดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30 ,50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCD	55
4.2 บริเวณจุดที่ตรวจวัดความหนาบนชิ้นงาน	57
4.3 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิ-เมนต์ในการใช้ดรอปิดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCD	58
4.4 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปิดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCD	59
4.5 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปิดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCD	60
4.6 เปรียบเทียบรูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของ ดรอปิดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE	61
4.7 เปรียบเทียบรูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของ ดรอปิดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE	62

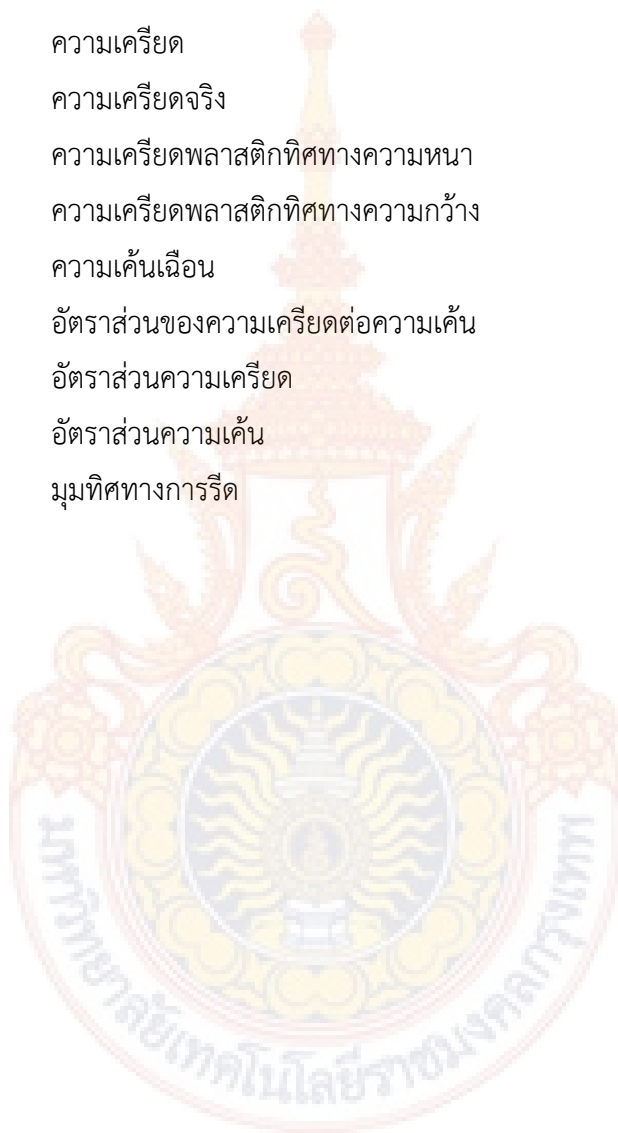
4.8 เปรียบเทียบรูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของดรอปีตแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซนต์ ของเหล็ก SPCE	62
4.9 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป กรณีการใช้ดรอปีตหน้าตัดครึ่งวงกลม ของเหล็ก	63
4.10 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป กรณีการใช้ดรอปีตหน้ารูปตัววี ของเหล็ก SPCD	64
4.11 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป กรณีการใช้ดรอปีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ของเหล็กSPCD	65
4.12 แผนภูมิของร้อยละเอลิเมนต์ในแต่ละชนิดของดรอปีตของเหล็ก SPCD	65



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A_i	พื้นที่หน้าตัดใด ๆ
A_o	พื้นที่หน้าตัดเดิม
E	ยังโมดูลัส
F	ค่าคงตัวแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก
G	ค่าคงตัวแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก
H	ค่าคงตัวแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก
J_2	ลำดับที่สองของความเค้นเบี่ยงเบน
K	สัมประสิทธิ์ความต้านแรง
L	ค่าคงตัวแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก
L_i	ความยาวขณะใดขณะหนึ่ง
L_o	ความยาวเดิม
M	ค่าคงตัวแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก
N	ค่าคงตัวแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก
R	อัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้างต่อแนวหนา
$\bar{R}$	อัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้างต่อแนวหนาเฉลี่ย
d_i	เส้นผ่านศูนย์กลางใด ๆ
d_o	เส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น
n	เลขยกกำลังของความเครียดแข็ง
t	ความหนาของวัสดุ
t_o	ความหนาของวัสดุที่ลดลง
w	ความกว้างของวัสดุ
w_o	ความกว้างของวัสดุที่ลดลง
$\{F\}_e$	เมทริกซ์ของแรงกระทำที่จุดต่อ
$\{F\}_{sys}$	เมทริกซ์รวมของแรงกระทำที่จุดต่อ
$[k]_e$	สทิตเพนสมเมทริกซ์ของเอลิเมนต์
$[K]_{sys}$	สทิตเพนสมเมทริกซ์ของรวมระบบ
$[N]$	เมทริกซ์ฟังก์ชัน

$\{\phi\}$	เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเอลิเมนต์
$\{\phi\}_{sys}$	เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเอลิเมนต์ของระบบ
σ	ความเค้น
$\tilde{\sigma}$	ความเค้นจริง
σ_0	ความเค้นคราก
ε	ความเครียด
$\tilde{\varepsilon}$	ความเครียดจริง
ε_t	ความเครียดพลาสติกทิศทางความหนา
ε_w	ความเครียดพลาสติกทิศทางความกว้าง
τ	ความเค้นเฉือน
$d\lambda$	อัตราส่วนของความเครียดต่อความเค้น
β	อัตราส่วนความเครียด
α	อัตราส่วนความเค้น
θ	มุมทิศทางการรีด



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ใช้กันอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรม จะมีกระบวนการหรือวิธีในการขึ้นรูปหลายวิธีด้วยกัน การดึงขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย บางครั้งในการดึงขึ้นรูปนั้น วัสดุจะถูกจับยึดระหว่างตาย (Die) และแรงกดขึ้นงาน (Blank holder Force) และจะถูกกดขึ้นรูปด้วยพunch (Punch) วัสดุที่ถูกกดจะเปลี่ยนไปตามรูปร่างของพunch ภายใต้สภาวะที่มีผลกระทบต่อการขึ้นรูปต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นความเร็วในการขึ้นรูป คุณสมบัติด้านแอนไอโซทรอปี และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความเสียดทานและแรงกดขึ้นงาน แต่อย่างไรก็ตามแผ่นกดขึ้นงานมิได้มีผิวสัมผัสกันตลอดทั้งวัสดุขึ้นงาน จึงเป็นการยากที่จะควบคุมการขึ้นรูปลึกจากแผ่นกดขึ้นงานได้แต่เพียงอย่างเดียว โดยเฉพาะขึ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรเนื่องจากมีอัตราการไหลตัวของวัสดุที่ไม่เท่ากัน [1] เพื่อให้การไหลตัวของวัสดุดีขึ้น จึงมีการนำเอาดรอปปิดมาช่วยในการทำงาน

ดรอปปิดจะถูกใช้ในการควบคุมการไหลของวัสดุ เพื่อป้องกันมิให้เกิดรอยย่นหรือให้เกิดรอยย่นน้อยที่สุด โดยดรอปปิดจะถูกติดอยู่ที่แผ่นกดขึ้นงาน ขณะที่มีการขึ้นรูปลึกวัสดุจะไหลผ่านดรอปปิดภายในดรอปปิดวัสดุจะเกิดการดัดให้ไหลไปในทิศทางหนึ่งและถูกดัดกลับมาในทิศทางตรงกันข้ามก่อนที่จะไหลดัดกลับไปยังทิศทางเดิมจึงทำให้มีการชะลอการไหลของวัสดุไม่ให้ไหลเร็วเกินไปจนเป็นสาเหตุของการเกิดรอยย่น ก่อนไหลเข้าช่องตาย Meiders, et al [2] ได้ศึกษาการนำดรอปปิดมาใช้ในการขึ้นรูปโลหะโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวแปรที่สำคัญประกอบด้วย แรงในการควบคุมการไหลตัวของโลหะ (Drawbead Restraining Force) การเปลี่ยนแปลงความหนาแบบพลาสติก, และแรงยกดรอปปิด (Drawbead Lift Force) ได้มีการจำลองดรอปปิดแบบสองมิติ และการทดลองจริงค่าความแตกต่างทางคณิตศาสตร์ทั้งสองค่าจะเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความหนาแบบพลาสติกได้ M.Samuel [3] ได้ศึกษาอิทธิพลรูปทรงของดรอปปิดในการขึ้นรูปโลหะ ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองของดรอปปิดเปรียบเทียบรูปทรงของดรอปปิดระหว่างร่องปิดที่เป็นแบบครึ่งวงกลมกับร่องปิดที่เป็นแบบสี่เหลี่ยมและวิเคราะห์ความแตกต่างของการไหลตัวของวัสดุในการใช้ร่องปิดทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกับ การทดลอง บุญส่ง จงกลณี [1] ได้ศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์ที่จะใช้ในการลากขึ้นรูปลึกขึ้นงานที่มีลักษณะไม่สมมาตร เพื่อใช้ในการทดสอบอิทธิพลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูป 4 ตัวแปร รูปร่างแผ่นเปล่า (Blank geometry) ขนาดแรงกดขึ้นงาน (BHF) ชนิดของสารหล่อลื่น (Lubricant type) และรูปร่างดรอปปิด (Drawbead Geometry)

ดรอปิดที่ใช้กันอยู่ทั่ว ๆ ไปในงานอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นมีหลายรูปทรง เช่น ดรอปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapenzifrom Drawbead), ดรอปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Half-Round Drawbead) , ดรอปิดแบบหน้าตัดรูปตัววี (V-Shaped Drawbead) เพื่อเป็นข้อมูลในการนำดรอปิดไปใช้งาน ต้องมีการทำนายประสิทธิภาพของดรอปิด โดยการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบจากดรอปิดในการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยคอมพิวเตอร์[4] ควรเลือกใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) เพื่อให้ได้ผลวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำ แต่อย่างไรก็ตามถ้าต้องการผลวิเคราะห์ที่มีความละเอียดแม่นยำมากขึ้นจะต้องใช้จำนวนการแบ่งชิ้นงาน (Element) เป็นจำนวนมากโดยเฉพาะตรงบริเวณรัศมีดรอปิดมีขนาดเล็ก ทำให้ต้องใช้เวลามากและเครื่องคอมพิวเตอร์ต้องมีประสิทธิภาพสูงยังมีจำนวนชิ้นงานที่มีความละเอียดมากเท่าใด ย่อมหมายถึงว่าต้องใช้เวลาและประสิทธิภาพของเครื่องมากเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ในการวิจัยจึงต้องกำหนดรูปร่างดรอปิดให้มีความเหมาะสมและมีการควบคุมแรงในการกดชิ้นงานให้คงที่ จะมีเฉพาะการเปลี่ยนแปลงการกระจายความเครียด (Strain) และความหนาของชิ้นงานที่เปลี่ยนไป

จากที่ได้กล่าวมาแล้วจึงได้จัดทำโครงการวิจัยขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบจากดรอปิดที่มีผลการควบคุมการไหลของโลหะแผ่น โดยวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เพื่อมุ่งเน้นการประยุกต์รูปร่างของดรอปิด โดยการทดลองทำการเปรียบเทียบดรอปิดแบบหน้าตัดรูปตัววี ดรอปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม และ ดรอปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ที่มีผลต่อการไหลตัวของโลหะในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปทรงไม่สมมาตรโดยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาผลการวิเคราะห์กับผลการทดลองซึ่งจะสามารถช่วยลดเวลาในการทดลองแม่พิมพ์เพื่อการผลิตจริงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปทรงดรอปิดในการลากขึ้นรูปชิ้นงานแบบไม่สมมาตร โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2.2 เพื่อออกแบบการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กระบวนการลากขึ้นรูปชิ้นงานไม่สมมาตร

1.2.3 เพื่อศึกษาวิเคราะห์การไหลตัวของชิ้นงานต่ออิทธิพลรูปทรงดรอปิด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 จำลองการขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCD ความหนา 1.0 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปจริง

1.3.2 สร้างแบบจำลองรูปทรงของดรอปิด ดังนี้

- ดรอปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม
- ดรอปิดแบบหน้าตัดรูปตัววี

- ดรอปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า

1.3.3 เปรียบเทียบแรงกดขึ้นงาน(Blank holder force)ของการจำลองการขึ้นรูปด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับการขึ้นรูปจริง โดยเปรียบเทียบจากเปอร์เซ็นต์ของแรงขึ้นรูปที่แรงกดขึ้นงาน เท่ากับ 30%, 50% และ 70% ของแรงที่ใช้ขึ้นรูปลึงที่เหมาะสมกับชนิดของดรอปิด

1.3.4 ศึกษาอิทธิพลของรูปทรงดรอปิด

- ดรอปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม

- ดรอปิดแบบหน้าตัดรูปตัววี

- ดรอปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า

1.3.5 วิเคราะห์แรงลากขึ้นรูปและวัดความเครียดจากความหนาของขึ้นงาน

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ทดสอบหาสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กเกรด SPCD ความหนา 1.0 มิลลิเมตร

1.4.3 ออกแบบสร้างแม่พิมพ์ สำหรับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม Dyna Form 5.6

1.4.4 ศึกษผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการจำลองการขึ้นรูป

1.4.5 ทดลองขึ้นรูปขึ้นงานตามแบบที่กำหนด

1.4.6 ทำการเก็บข้อมูลได้แก่ ความเครียดแนวความหนา และพฤติกรรมการฉีกขาด ที่ได้จากการทดลองขึ้นรูปขึ้นงานจริง

1.4.7 ศึกษาวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูลผลการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาแนวโน้มและความสอดคล้องของข้อมูล

1.4.8 วิเคราะห์ผลลัพธ์ และสรุปผลการวิเคราะห์การขึ้นรูปขึ้นงาน

1.5 คำจำกัดความในการวิจัย

1.5.1 แรงกดขึ้นงานคือ ขนาดของแรงกดของแผ่นกดขึ้นงาน (Blank holder) ที่พอเหมาะสำหรับป้องกันไม่ให้งานเกิดรอยย่นหรือขึ้นงานเกิดรอยฉีกขาด เช่น ถ้าแรงกดมากเกินไปจะทำให้ขึ้นงานเกิดรอยฉีกขาดหรือถ้าแรงกดน้อยเกินไปจะทำให้ ขึ้นงานเกิดรอยย่นได้ [1]

1.5.2 ดรอปิด มีหน้าที่ในการควบคุมการไหลตัวของโลหะที่จะเข้าไปในดายและช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่น (Wrinkle) ในขณะขึ้นรูป นอกจากยังช่วยลดแรงกดของเบงค์ไฮดรอลิคตลอดจนทำหน้าที่เหมือนกับ ปรับตัวรีดโลหะให้ความเครียด (Strain) ลดลง เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะ[4]

1.6 กรอบแนวความคิดในการวิจัย

กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น เป็นการแปรรูปทรงของแผ่นโลหะแบบราบให้เป็นรูปทรงตามที่ต้องการ โดยปราศจากการแตกหรือการบางเฉียบแห่ง กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น จะถูกทำให้เสียรูปการด้วยเครื่องมือ ซึ่งประกอบด้วย พินช์ ดาย โดยอาศัยแรงกดจากพินช์ทำให้วัสดุเกิดการไหลตัวเป็นไปตามขนาดและรูปทรงของดาย ดังนั้นต้องศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุที่นำมาขึ้นรูป อิทธิพลตัวแปรของรัศมีพินช์และดายที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งได้อธิบายดังนี้

พฤติกรรมของแผ่นโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการลากขึ้นรูปในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดและคุณสมบัติของวัสดุเป็นแบบแอนไอโซทรอปี (Anisotropy)[5] สมบัติเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain-hardening exponent, n – values) และสัมประสิทธิ์ความต้านแรง (Strength coefficient, K) โดยค่า n เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการขึ้นรูป ถ้าค่า n มีค่ามากจะทำให้โลหะแผ่นมีความสามารถในการขึ้นรูปดี และอัตราส่วนความเครียดพลาสติก R (Anisotropy) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในด้านความต้านทานการหดตัวในแนวความหนา จะทำให้ขอบของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปยาวไม่เท่ากันหรือเกิด Earing [6]

การควบคุมแรงกดชิ้นงานที่ไม่พอเพียง จะทำให้เกิดรอยย่นของโลหะ ซึ่งการย่นนี้จะให้โลหะแผ่นไม่สามารถที่จะไหลตัวได้ ทำให้บริเวณส่วนเกินของชิ้นงานถูกพินช์ตันฉีกขาดแต่ถ้าแรงกดชิ้นงานมากเกินไป โลหะก็จะไม่สามารถไหลตัวเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะการขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่สมมาตรจะทำให้อัตราการไหลของโลหะแต่ละจุดไม่เท่ากัน ทำให้แรงที่ใช้ในการกดแต่ละจุดไม่เท่ากันด้วย สำหรับบริเวณที่ต้องการแรงกดมากจะใช้ดรอปปิดเข้ามาช่วยเพื่อทำให้การไหลตัวของโลหะช้าลง [7]

ดรอปปิดมีหน้าที่ควบคุมการไหลตัวของโลหะที่จะไหลเข้าไปในดาย และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่น ในขณะที่ขึ้นรูปนอกจากนั้นยังช่วยลดแรงกดชิ้นงานและตัวรีดโลหะให้ความเครียดลดลงเป็นการเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะ การติดตั้งดรอปปิดสามารถติดตั้งที่แผ่นกดชิ้นงานหรือที่ดายก็ได้แต่ปกตินิยมติดตั้งอยู่ที่แผ่นกดชิ้นงาน และร่องปิด (Bead) จะอยู่ที่ดาย

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 สามารถเลือกใช้แรงที่เหมาะสมในการกดชิ้นงานของแผ่นกด ที่เหมาะสมกับชนิดของดรอปปิด

1.7.2 สามารถเลือกใช้ดรอปปิดได้อย่างเหมาะสม

1.7.3 สามารถนำไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการตัดสินใจที่จะใช้ดรอปปิดมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก

1.7.4 ได้ทราบข้อดีและข้อเสียของรูปทรงดรอปีดที่ใช้ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก



บทที่ 2

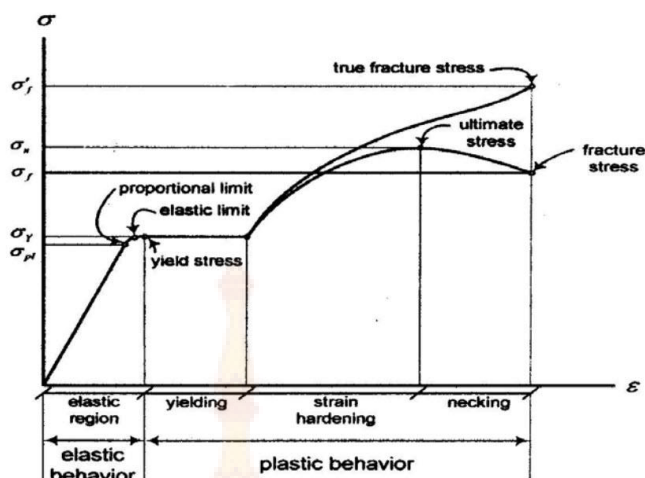
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะ

ทฤษฎีในการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะวัสดุแผ่น (Sheet Metal) พฤติกรรม การเปลี่ยนรูปในช่วงถาวร (Plasticity) และพฤติกรรมเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น (Elasticity) เมื่อวัสดุซึ่งได้รับแรงกระทำจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรที่กระทำออก วัสดุจะคืนตัวเล็กน้อย เมื่อไม่ได้รับแรงกระทำ ในส่วนพฤติกรรมเปลี่ยนรูปถาวรเมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจนวัสดุเลยจุด คราก (Yield Point) ถ้านำแรงที่กระทำออกวัสดุจะไม่กลับคืนตัว วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร คุณสมบัติทางกลที่สำคัญอันหนึ่งซึ่งจะมีผลต่อการขึ้นรูปของวัสดุโลหะแผ่นคือ ค่าความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นและความเครียด (True Stress-Strain Relation) ซึ่งในกรณีที่ใช้กฎยกกำลัง (Power Law) จะต้องหาค่าคุณสมบัติของค่า Strength Coefficient (K) และ Strain Hardening Exponent (n) โดยค่า n เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการขึ้นรูป ถ้าวัดค่า n มีค่ามากจะทำให้ โลหะแผ่นมีความสามารถในการขึ้นรูปดี และค่าคุณสมบัติที่ไม่เท่ากันทุกทิศทางในแนวระนาบ (Planar Anisotropy) ซึ่งค่าที่สำคัญคือค่า R (r -value หรือ Plastic Strain Ratio) หาได้จากสัดส่วน ความเครียดในแนวความกว้างกับความเครียดในแนวความหนา ซึ่งค่า R เป็นค่าที่แสดงถึง ความสามารถในการต้านทานการหดตัวในแนวความหนา เนื่องจากเหล็กแผ่นผ่านการรีดมาทำให้ อนุภาคภายในมีทิศทางตามแนวรีด ส่งผลให้ความสามารถในการยืดหดตัวของเหล็กแผ่นแตกต่างกัน ดังนั้นในการหาค่า R จำเป็นต้องหอย่างน้อย 3 แนว คือค่า R ในทิศตามแนวรีดทิศ 45° กับแนว รีด และทิศทางตั้งฉากกับแนวรีด ถ้าวัดค่า R แตกต่างกันมาก จะทำให้ขอบของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ยาวไม่เท่ากันหรือการเป็นคลื่นที่ขอบชิ้นงาน (Earing) [8]

2.1.1 ทฤษฎีในการเปลี่ยนรูปช่วงยืดหยุ่น (Elastic Theory)

เมื่อวัสดุได้รับแรงดึงจะทำให้วัสดุเกิดการยืดตัวซึ่งสามารถแบ่งพฤติกรรมการยืดตัว ออกเป็น 2 ส่วน หลัก ๆ คือ การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นหรือช่วงอีลาสติกและการเปลี่ยนรูปถาวร หรือช่วงพลาสติก ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ [9]

คุณสมบัติของวัสดุที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งเขียนอยู่ในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริง (True Stress-True Strain Curve) หรือเรียกอีกชื่อว่า (Flow Curve) ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linearity) หรือไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linearity) โดยมีความสำคัญในการนำมาใช้ ในการคำนวณเพื่อช่วยให้ทำนายผลได้ถูกต้องแม่นยำ ในการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะกำหนดให้วัสดุของแบบจำลองมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropy) ซึ่งจะแตกต่างจากพฤติกรรมของวัสดุจริงเนื่องจากวัสดุจริงมีการเรียงตัวของผลึกไม่เท่ากันทุกทิศทางทำให้วัสดุมีคุณสมบัติแบบ Anisotropy โดยที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงของวัสดุสามารถหาได้จากการทดสอบดึง (Uni-Axial Tension Test) หรือการทดสอบกด (Compression Test) ในการทดสอบแรงดึงขึ้นทดสอบชนิดหน้าตัดกลมหรือชนิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะถูกแรงกระทำโดยการดึงหรือกดเพิ่มแรง (F) อย่างช้า ๆ และควบคุมความเร็วให้ขึ้นทดสอบเปลี่ยนรูปอย่างสม่ำเสมอตามแนวแกน แล้ววัดค่าแรงและระยะการเปลี่ยนรูปของชิ้นทดสอบ จนกระทั่งชิ้นทดสอบเกิดความเสียหายหรือขาดออกจากกัน ผลการทดสอบที่ได้จะนำไปหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุชิ้นทดสอบ ซึ่งความเค้นที่เกิดภายในวัสดุสามารถหาได้ โดยนำแรงภายนอก F_i ในแต่ละช่วงของการทดสอบหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน [9]

$$\sigma = \frac{F_i}{A_o} \quad (2.1)$$

โดย F_i คือ แรงดึงหรือโหลด A_0 คือพื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นทดสอบ และ σ คือความเค้นเฉลี่ยหรือความเค้นเชิงวิศวกรรม (Engineering Stress) ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด A_0

สำหรับความเครียดเชิงวิศวกรรม (Engineering Strain) สามารถคำนวณได้จากความยาวที่เปลี่ยนไปหารด้วยความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_i - L_0}{L_0} \quad (2.2)$$

โดย ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป L_0 คือความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ L_i คือความยาวขณะใดขณะหนึ่งและ ε คือความเครียดเฉลี่ย เป็นความเครียดเชิงวิศวกรรม ซึ่งมีทิศทางเดียวกับทิศทางของแรง F ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการคำนวณโดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวเดิมของชิ้นทดสอบเรียกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเชิงวิศวกรรม (Engineering Stress-Strain Curve) ซึ่งในการทดสอบจริง ในขณะที่ยืดความเค้นในชิ้นงานทดสอบเพิ่มเลยความเค้นคราก พื้นที่หน้าตัดและความยาวของชิ้นงานทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจนเกิดคอคอดและขาดออกจากกันในที่สุด ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถหาได้โดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละขณะ ซึ่งเรียกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง (True Stress True Strain Curve) หรือเรียกอีกชื่อว่า (Flow Curve) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร ถ้า $\tilde{\sigma}$ เป็นความเค้นจริงและ $\tilde{\varepsilon}$ เป็นความเครียดจริง

$$\tilde{\sigma} = \frac{F_i}{A_i} = \sigma \left(\frac{A_0}{A_i} \right) \quad (2.3)$$

โดย A_i คือพื้นที่หน้าตัดใด ๆ A_0 คือพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น σ คือความเค้นเฉลี่ย F_i คือแรงดึงที่กระทำบนชิ้นทดสอบ

สำหรับความเครียดจริง $\tilde{\varepsilon}$ สามารถหาได้โดยพิจารณาที่ความยาวใด ๆ ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหาได้จากการ อินทิเกรตความยาว dL_i ใด ๆ

$$\tilde{\varepsilon} = \int_{L_0}^{L_i} \frac{dL_i}{L_i} = \ln \frac{L_i}{L_0} \quad (2.4)$$

ในกรณีการขึ้นรูปโลหะมีปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้น จะสมมติให้ปริมาตรไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังการขึ้นรูปทำให้มีปริมาตรเท่าเดิม

$$A_o L_o = A_i L_i \quad (2.5)$$

$$\frac{A_o}{A_i} = \frac{L_i}{L_o} = \frac{L_o + \Delta L}{L_o} = 1 + \varepsilon \quad (2.6)$$

ดังนั้นความเค้นจริงและความเครียดจริงโดยสมมติฐานให้ปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูปคงที่

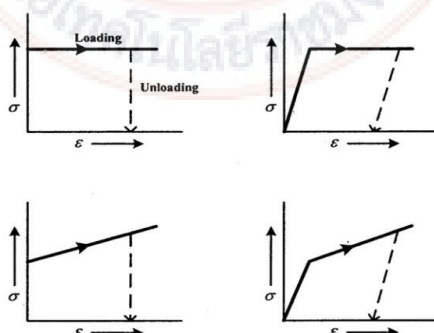
$$\tilde{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2.7)$$

$$\tilde{\varepsilon} = \ln \frac{A_o}{A_i} = 2 \ln \frac{d_o}{d_i} \quad (2.8)$$

โดย d_i คือเส้นผ่าศูนย์กลางใดๆ d_o คือเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ

2.1.2 ทฤษฎีในการเปลี่ยนรูปถาวรหรือในช่วงพลาสติก (Plasticity Theory)

ในการขึ้นรูปวัสดุโลหะแผ่นให้มีรูปทรงตามที่ต้องการจะต้องให้แรงกระทำกับวัสดุเพื่อให้วัสดุเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ผลจากการทดสอบการดึงวัสดุพบว่าพฤติกรรมของวัสดุแบ่งได้เป็นสองช่วงคือ ช่วงยืดหยุ่นและช่วงเปลี่ยนรูปอย่างถาวรหรือช่วงพลาสติกพฤติกรรมเหล่านี้ อยู่ด้วยกันหลายลักษณะซึ่งสามารถแสดงด้วยแบบจำลอง (Model) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ [9]

ในการพิจารณาการเปลี่ยนรูป จะใช้เกณฑ์การคราก (Yield Criterion) เป็นเกณฑ์ที่จะกำหนดการเปลี่ยนรูป จากอิลาสติกไปเป็นพลาสติก และทฤษฎีพื้นฐานที่นิยมใช้ในการทำนายการครากตัวของโลหะแผ่นคือทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (Treska Yield Theory) ทฤษฎีฟอนมิเชส (Von Misses Theory) และทฤษฎีของฮิล (Hill Theory) ในส่วนของทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดและทฤษฎีของฟอนมิเชสจะมีข้อสมมุติฐานว่าวัสดุมีคุณสมบัติทางกลเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropy) ส่วนทฤษฎีของฮิล จะพิจารณาอิทธิพลของโลหะที่ผ่านการรีด (Anisotropy) ในการใช้กฎเกณฑ์การครากสำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานนี้จะใช้ทฤษฎีการครากของฮิล ทฤษฎีนี้เหมาะสำหรับวัสดุโลหะแผ่นที่มีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก [9]

2.1.3 เกณฑ์การคราก (Yield Criteria)

ทฤษฎีของฟอนมิเชสหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าทฤษฎีพลังงานแปรรูป (Distortion Theory) ซึ่งฟอนมิเชส ได้เสนอว่าการครากจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานแปรรูปภายในเนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะที่แรงกระทำมีค่าเท่ากับพลังงานแปรรูป จากการทดสอบแรงดึงของวัสดุทดสอบ ซึ่งก็คือค่าความเค้นเบี่ยงเบนอันดับสอง J_2 ซึ่ง $J_2 = k_2$

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.9)$$

ในกรณีของชิ้นทดสอบที่ได้รับแรงดึง $\sigma_1 = \sigma_o$, $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_o$

$$J_2 = \frac{1}{6}(\sigma_o^2 + \sigma_o^2) = k \quad (2.10)$$

$$\sigma_o = \sqrt{3}k \quad (2.11)$$

เมื่อ σ_o คือความเค้นคราก

k คือความเค้นเฉือนสูงสุดที่ได้จากการทดสอบดึงวัสดุ

สำหรับวัสดุทดสอบที่ได้รับแรงเฉือนเพียงอย่างเดียว $\tau = \sigma_1 = -\sigma_3, \sigma_2 = 0$ เมื่อแทนลงในสมการที่ 2.9 [9] จะได้สมการการครากคือ

$$\sigma_1^2 + \sigma_1^2 + 4\sigma_1^2 = 6k \quad (2.12)$$

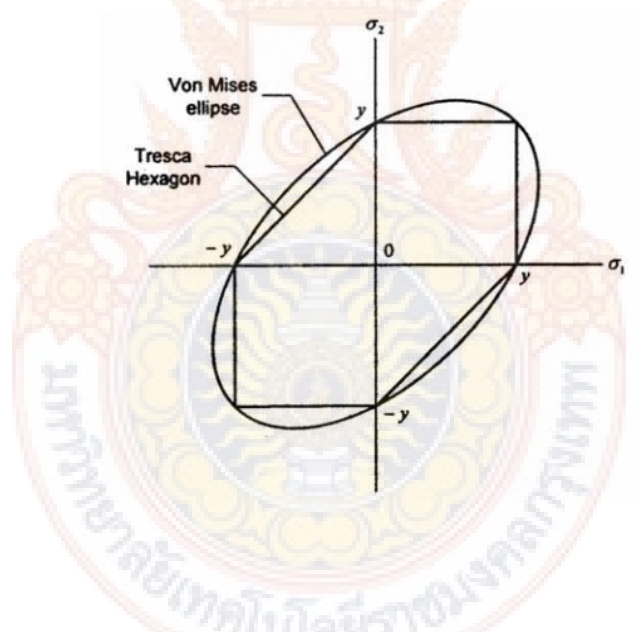
$$\sigma_1 = k \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.11 และ 2.13 จึงสามารถหาค่า k ได้คือ

$$k = \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} = \sigma_1 \quad (2.14)$$

จาก $j_2 = k^2$ สามารถจัดสมการที่ 2.9 และ 2.14 ได้ใหม่คือ

$$\sigma_o = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$



ภาพที่ 2.3 เปรียบเทียบกรอบการแตกหัก [9]

จะเห็นได้ว่าการครากจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{3}}$ เท่าของความเค้นครากที่ได้จากการดึงวัสดุทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบทฤษฎีทั้งสองโดยพิจารณาจากภาพที่ 2.3 ซึ่งแสดงกรอบการแตกหักของวัสดุพบว่าทฤษฎีของฟอนมิเชส ให้ผลการทำนายการครากใกล้เคียงมากกว่าทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดสำหรับงานขึ้นรูปโลหะแผ่น [9]

2.1.4 ทฤษฎีแอนไอโซทรอปีของ Hill 1948

ได้เสนอการพิจารณาพลาสติกแอนไอโซทรอปีโดยไม่คำนึงถึงรูปผลึกเดิม โดยสมมติว่า วัสดุเอกพันธ์แสดงคุณลักษณะโดยแกนไอโซทรอปี 3 แกนตั้งฉากกันคือ x, y และ z ซึ่งคุณสมบัติสมมาตรสองหน้า (ระนาบ $x-y$, $y-z$ และ $z-x$ คือระนาบสมมาตร) ในแผ่นรีดมักใช้ทิศทาง x, y และ z เป็นทิศทางรีด ทิศทางขวางการรีด และทิศทางความหนาตามลำดับ ทฤษฎีนี้ยังสมมติว่า ความต้านแรงดึงครากและแรงกดครากในทิศทางที่กำหนดมีค่าเท่ากันเกณฑ์การคราก แอนไอโซทรอปิกที่เสนออยู่ในรูป [10]

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (2.16)$$

เมื่อ F, G, H, L, M และ N คือค่าคงตัวซึ่งแสดงคุณสมบัติของแอนไอโซทรอปิกสังเกตว่าถ้า $F=G=H$ และ $L=M=N=3F$ สมการนี้ลดรูปลงเป็นเกณฑ์ของฟอนมิเซส ค่าคงตัว F, G และ H สามารถประเมินได้จากการทดสอบการดึง

พิจารณาการทดสอบในทิศทาง x และให้ X เป็นความเค้นดึงคราก ขณะคราก

$$\sigma_x = X$$

$$\sigma_y = \sigma_z = \tau_{ij} = 0$$

ดังนั้น สมการที่ 2.16 เป็น

$$(G+H)X^2 = 1 \quad (2.17)$$

หรือ

$$X^2 = \frac{1}{(G+H)}$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้า Y และ Z คือความเค้นดึงครากในทิศทาง y และ z

$$\begin{aligned}
 X^2 &= \frac{1}{G+H} \\
 Y^2 &= \frac{1}{H+F} \\
 Z^2 &= \frac{1}{F+G}
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

แก้สมการพร้อมกันได้

$$\begin{aligned}
 2F &= \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2} \\
 2G &= \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2} \\
 2H &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2}
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

ในกรณีของโลหะแผ่นวัด Z ได้ยาก ค่าคงตัว L , M และ N สามารถหาได้จากการทดสอบการเฉือน กฎการไหลสามารถหาได้โดยใช้สมการ

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial f(\sigma_{ij})} \tag{2.20}$$

เมื่อ $f(\sigma_{ij})$ คือฟังก์ชันการคราก (ใช้ได้กับวัสดุแอนไอโซทรอปิกและไอโซทรอปิก) หาคำนุพันธ์ของ สมการที่ 2.20 ได้กฎการไหล

$$\begin{aligned}
 d\varepsilon_x &= d\lambda \left[H(\sigma_x - \sigma_y) + G(\sigma_x - \sigma_z) \right], d\varepsilon_{yx} = d\varepsilon_{zy} = d\lambda L \tau_{yz} \\
 d\varepsilon_y &= d\lambda \left[F(\sigma_y - \sigma_z) + H(\sigma_y - \sigma_x) \right], d\varepsilon_{zx} = d\varepsilon_{xz} = d\lambda L \tau_{zx} \\
 d\varepsilon_z &= d\lambda \left[H(\sigma_z - \sigma_y) + G(\sigma_z - \sigma_x) \right], d\varepsilon_{xy} = d\varepsilon_{yx} = d\lambda L \tau_{xy}
 \end{aligned}
 \tag{2.21}$$

ในการหากฎไหลสำหรับความเครียดเฉือน $d\varepsilon_{yz}$, $d\varepsilon_{zx}$ และ $d\varepsilon_{xy}$ ต้องเขียนเกณฑ์การคราก สมการที่ 2.16 ใหม่ เพื่อให้พจน์ของความเค้นเฉือนปรากฏในรูป

$$L(\tau_{yz}^2 + \tau_{zy}^2) + M(\tau_{zx}^2 + \tau_{xz}^2) + N(\tau_{xy}^2 + \tau_{yx}^2)$$

มีฉะนั้นแล้วอนุพันธ์ย่อยจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ใช้ไม่ได้คือ $d\varepsilon_{yz} = 2 \cdot d\lambda L \tau_{yz}$ และ $d\varepsilon_{zy} = 0$ สังเกตว่าสมการที่ 2.21 คือ $d\varepsilon_x + d\varepsilon_y + d\varepsilon_z = 0$ แสดงว่าปริมาตรคงตัวพิจารณาการทดสอบการดึงในทิศทาง x อีกครั้งหนึ่ง แทนค่า $\sigma_x = X$, $\sigma_y = \sigma_z = 0$ ในสมการ 2.21 ได้ ความเครียด

$$\begin{aligned} d\varepsilon_x &= d\lambda(H + G)X \\ d\varepsilon_y &= -d\lambda(H)X \\ d\varepsilon_z &= -d\lambda(G)X \end{aligned} \quad (2.21)$$

เนื่องจากอัตราส่วนความเครียดสำหรับการทดสอบการดึงในทิศทาง x นิยามว่า

$$R = R_0 = \left(\frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_z} \right)$$

ดังนั้น

$$R = \frac{H}{G} \quad (2.22)$$

ในทำนองเดียวกัน นิยามให้ $P = R_{90}$ คืออัตราส่วนความเครียดในทิศทางแกน Y $P = d\varepsilon_x / d\varepsilon_z$ เมื่อ $\sigma_y = Y$ และ $\sigma_x = \sigma_z = 0$ จากสมการที่ 2.21 ได้

$$P = \frac{H}{F} \quad (2.23)$$

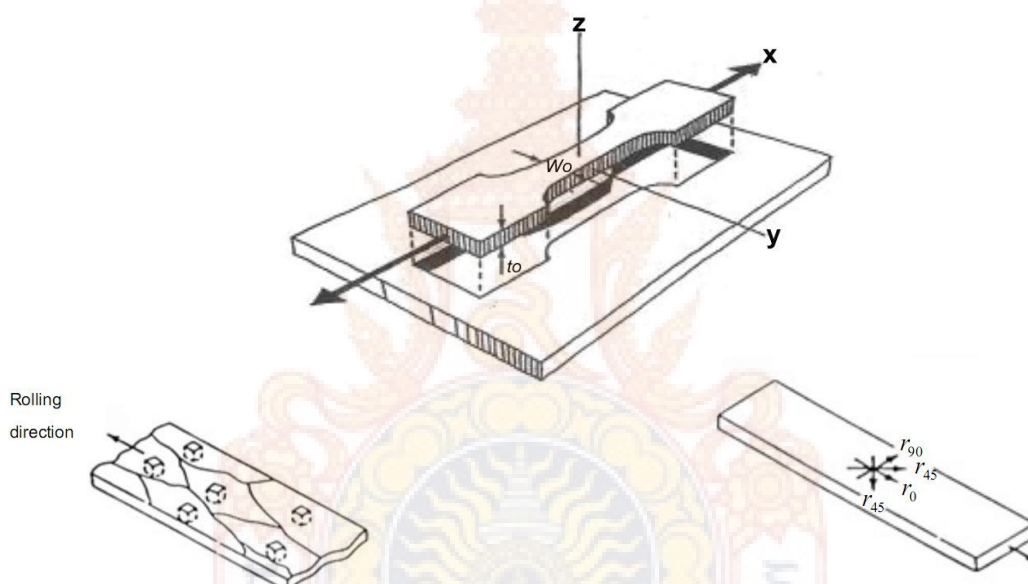
2.1.5 พลาสติกแอนไอโซทรอปี (Plastic Anisotropy)

สาเหตุที่สำคัญมากที่สุดซึ่งทำให้โลหะมีคุณสมบัติพลาสติกแอนไอโซทรอปิกก็คือ ทิศทางของเกรนทิศทางที่เป็นไปหรือเนื้อของรูปผลึกที่พัฒนาขึ้นในเหล็กกล้าที่เกิดจากการหมุนของ แลตทิซในเกรนระหว่างการเปลี่ยนรูป โดยการสลิปหรือการทวิน (Twinning) พฤติกรรมการเปลี่ยนรูป ของชิ้นทดสอบการดึงที่เป็นแผ่นแถบ ตัดออกมาจากแผ่นรีด เมื่อได้รับแรงดึงในแนวแกน สามารถเกิดการครากได้เฉพาะโดยการสลิปในระนาบความต้านแรงดึงครากของชิ้นทดสอบที่ตัดทำมุม θ กับทิศทางการรีดไม่แปรผันกันมากนัก ผลสรุปอย่างผิดพลาดว่าวัสดุเป็นไอโซทรอปิก ความผิดพลาดอาจ

เกิดขึ้นได้ถ้าวัดความตึงเครียดในแนวขวางซึ่งเป็นผลมาจากการดิ่ง ถ้าทิศทางเป็นอุดมคติ ความหนาไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก การยืดในแนวยาวมีผลทำให้ความกว้างขึ้นทดสอบลดลง [10]

พารามิเตอร์ที่มีประโยชน์คืออัตราส่วน R ของความเครียดพลาสติกเมื่อ w และ t คือ ทิศทางความกว้างและความหนาของชิ้นทดสอบการดิ่งตามลำดับ ดังนั้น $\varepsilon_w = \ln(w/w_0)$ และ $\varepsilon_t = \ln(t/t_0)$ สำหรับวัสดุไอโซทรอปิก $R = 1$

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (2.24)$$



ภาพที่ 2.4 ชิ้นทดสอบตามทิศทางการรีด [9]

ภาพที่ 2.4 ในการวัดค่า R ถึงแม้ว่า มีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้าง ε_w ต่อแนวหนาความเครียดในแนวหนา ε_t ไม่สามารถวัดได้อย่างแม่นยำบนแผ่นบาง เพราะฉะนั้น ความเครียดในแนวหนามักหาได้จากการวัดความเครียดในแนวยาวและแนวกว้างโดยใช้ปริมาตรคงตัว $\varepsilon_t = (\varepsilon_l + \varepsilon_w)$ เพื่อการวัดที่แม่นยำ ควรใช้ภาคตัดลดลงให้ค่อนข้างยาวมากเมื่อเทียบกับความกว้าง และภาคตัดทดสอบที่ใช้วัดค่า ε_l และ ε_w ควรอยู่ห่างจากบ่ามาก

บางครั้งค่า R ไม่แปรผันตามความเครียด เพราะฉะนั้น อัตราส่วนของความเครียดที่เพิ่มขึ้น $d\varepsilon_w / d\varepsilon_t = R$ ค่า R คงตัวมีความสำคัญเมื่อใช้ R ประเมินค่าคงตัวในเกณฑ์การครากไอโซทรอปิก

สำหรับเหล็กกล้าค่า R และโมดูลัสยืดหยุ่น E มักแปรผันคล้ายกันตามเนื้อรูปผลึก แม้ว่าสหสัมพันธ์พื้นฐานไม่แน่นอนตรง แต่ก็มีพื้นฐานสำหรับใช้กับเครื่องมือวัดเชิงอุตสาหกรรมขนาดเล็กซึ่งวัดค่า E ของแผ่นแถบบางด้วย Sonic Velocity และปรับให้อ่านค่า R ได้ โดยปกติค่า R มักแปรผันตามทิศทางทดสอบ θ และมักใช้แสดงคุณลักษณะของวัสดุโดยค่า R เฉลี่ยคือ $\bar{R}$

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45^\circ} + R_{90^\circ}}{4} \quad (2.25)$$

2.1.6 ความเครียดแข็ง (Strain Hardening)

ความเครียดแข็งเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีคุณสมบัติเหนียวที่ใช้ในงานขึ้นรูปเย็น เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำผ่านจุดครากตัวทำให้เกิดความเครียดสะสมขึ้นภายในวัสดุ จึงต้องใช้แรงที่มากกว่าเดิมในการทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปร่าง สำหรับการวิเคราะห์วัสดุแบบ อิลาสติก - พลาสติก ได้แสดงพฤติกรรมความเครียดแข็งของวัสดุ ดังนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่น จะเป็นในลักษณะเชิงเส้นการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำจะทำให้เกิดความเครียดเป็นสัดส่วนซึ่งหลักการนี้จะเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's Law) [11]

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.26)$$

เมื่อ σ คือ ค่าความเค้น

E คือ ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นหรือโมดูลัสของยัง

ε คือ ค่าความเครียด

สำหรับคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปในช่วงพลาสติกครั้งนี้เป็นไปตามกฎยกกำลัง (Power Law) [12]

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.27)$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (Strength coefficient)

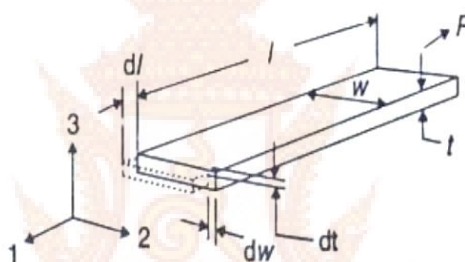
n คือ เลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (Strain - hardening exponent)

สำหรับค่าตัวเลขยกกำลังหรือความเครียดแข็ง n และค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรง K สามารถหาได้โดยทำการใส่ค่า $\log$ เข้าไปในสมการยกกำลังซึ่งทำให้สามารถได้สมการใหม่

$$\log \sigma = n \log \varepsilon + \log K \quad (2.28)$$

2.2 กระบวนการพื้นฐานของโลหะแผ่น และระนาบความเค้น (General Sheet Processes ; Plan stress)

ภาพที่ 2.5 เป็นการทดสอบการดึงเป็นแนวทางการกระบวนการหาระนาบความเค้น (Plane stress) การทดสอบการดึงแกนเดียว (Uniaxial tension) คือการแสดงตัวอย่างของการเปลี่ยนรูปแบบระนาบความเค้น การดึงแกนเดียว (Uniaxial tension) ให้พิจารณาจุดเล็ก ๆ ในชิ้นทดสอบในการดึงให้เปลี่ยนรูปแกนเดียวทำการทดสอบเริ่มจากการเปลี่ยนรูปที่ละน้อยจนถึงสูงสุดเราพิจารณาพื้นที่หน้าตัดระหว่างเปลี่ยนรูปลักษณะของจุดเล็ก ๆ (Element) ยังคงตั้งฉากแต่ละทิศทางไม่มีความเคลื่อนที่เกี่ยวกับทิศทางหลัก 1, 2, 3



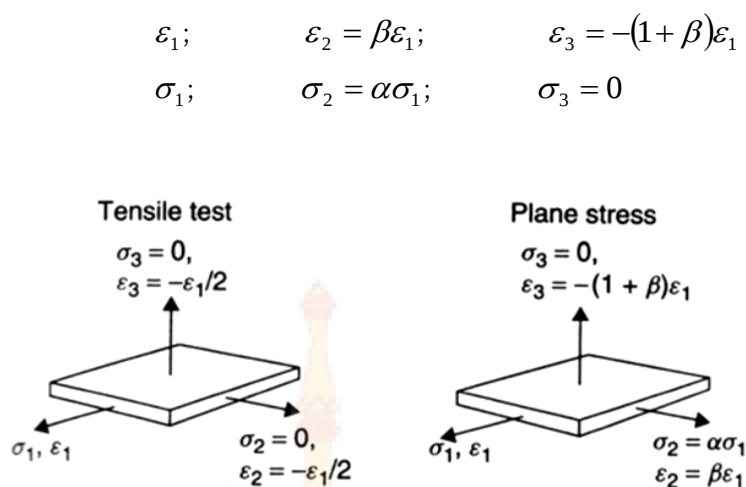
ภาพที่ 2.5 ทิศทางหลักในการทดสอบแรงดึง [9]

ในทางตรงกันข้ามในการทดสอบการดึง 2 ความเค้นหลักมีค่า เป็นศูนย์ในลักษณะชิ้นส่วนเล็ก ๆ ที่เปลี่ยนรูปค่าความเค้น 1 และ 2 ไม่เท่ากับศูนย์ ความเค้น 3 คือตั้งฉากกับผิว แท้จริงเกิดจากการสัมผัสระหว่างแผ่นบางกับ Tooling โดยทั่วไปแล้วน้อยกว่าจุด Yield ของวัสดุ จะให้เป็นศูนย์ได้และให้เป็น Plane stress deformation [9]

2.2.1 อัตราส่วนความเค้นและความเครียด (Stress and strain ratios) [2]

ในความหมายเฉพาะที่กล่าวถึงการเปลี่ยนรูปของจุดเล็ก ๆ Element ในแต่ละเทอมของอัตราส่วนความเครียด (Strain ratio , β) หรืออัตราส่วนความเค้น (Stress ratio , α) สำหรับวิธี Proportional ค่าความจริงที่ใกล้เคียงที่สุด ดังรูปที่ 2.6

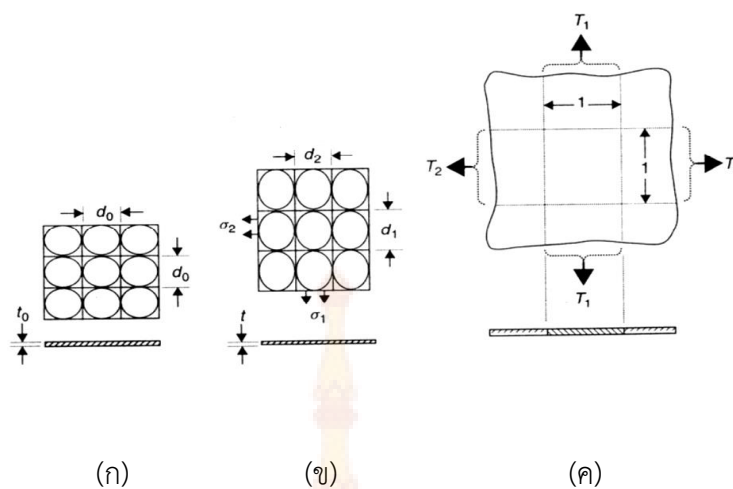
ในหลักทิศทางดั่งนั้นให้ $\sigma_1 > \sigma_2$ และทิศทางทั้งสามตั้งฉากกับพื้นผิว เมื่อ $\sigma_3 = 0$ ลักษณะการเปลี่ยนรูป



ภาพที่ 2.6 ทิศทางหลักของความเค้นและความเครียด [9]

2.2.2 การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of Sheet in Plane Stress)

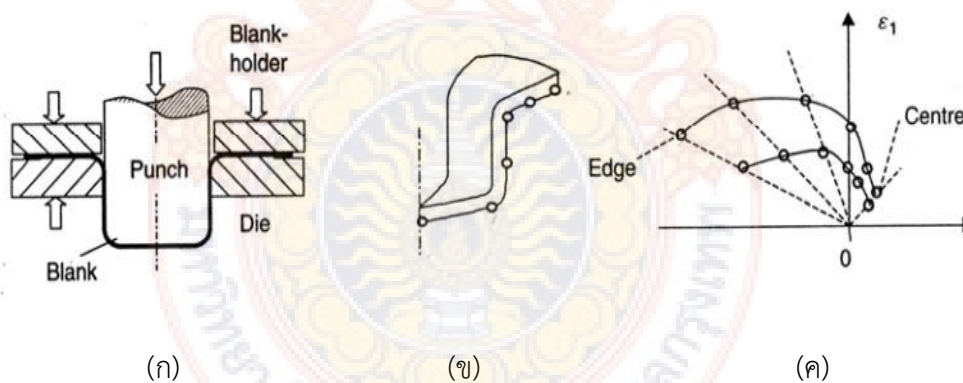
ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane stress) พิจารณา (Work hardening) ของวัสดุ ซึ่งเข้ากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูป ในภาพที่ 2.7 ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา t_0 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_0 หรือตารางขนาด d_0 ดังภาพที่ 2.7 (ก) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปร่างจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนของ Major คือ d_1 แกนของ Minor คือ d_2 ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางหลักของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังภาพที่ 2.7 (ข) ส่วนความหนา คือ t ตามที่กรณี ดังภาพที่ 2.7 (ค) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ σ_1 และ σ_2 [13]



ภาพที่ 2.7 (ก) วงกลมบนโลหะแผ่น ขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูป (ข) เมื่อมีการเปลี่ยนรูปกริดวงกลมจะเปลี่ยนเป็นรูปวงรี ขนาดของแกนหลักคือ d_1 และขนาดแกนรองคือ d_2 (ค) การดึง, T , หรือแรงส่งผ่านต่อหน่วยความกว้าง [13]

2.2.3 แผนภาพความเครียด (Strain diagram)[9]

ความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้น ดังภาพที่ 2.8 สามารถวัดได้จากกริดวงกลมในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.8 (ก) การขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก (ข) ชิ้นส่วนย่อยของถ้วยทรงกระบอกแสดงค่าความเครียดที่วัดได้ (ค) ผลค่าความเครียดที่ได้จากการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก [9]

2.2.4 ค่าความเครียดหลัก (Principal Strains)[9]

ความเครียดหลักที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการ

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} ; \quad \varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} ; \quad \varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} \quad (2.30)$$

2.2.5 อัตราส่วนของความเครียด (Strain ratio) [9]

โดยปกติเส้นแนวความเครียด (Strain Path) ยังคงเป็นสัดส่วนเส้นตรง ดังสมการที่

$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right)}{\ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right)} \quad (2.31)$$

2.2.6 ความเครียดหนาและความหนา (Thickness strain and Thickness) [9]

จากสมการ 2.30 ความเครียดหาได้โดยการวัดความหนาหรือหาได้จากความเครียดหลัก(Major strain) ความเครียดรอง (Minor strain) โดยให้พิจารณาอัตราการเปลี่ยนรูปที่ปริมาตรคงที่

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} = -(1 + \beta)\varepsilon_1 = -(1 + \beta)\ln \frac{d_1}{d_0} \quad (2.32)$$

จากสมการ 2.32 ความหนาโดยทั่วไปคือ

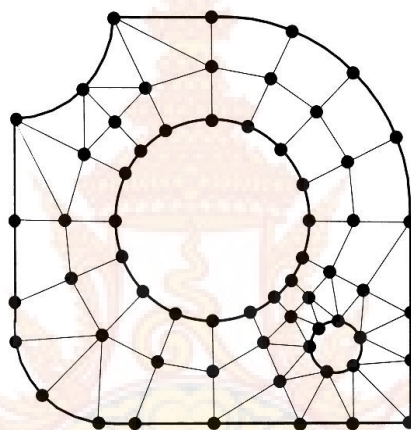
$$t = t_0 \exp(\varepsilon_3) = t_0 \exp[-(1 + \beta)\varepsilon_1] \quad (2.33)$$

หรืออีกแนวทางหนึ่งที่ปริมาตร $td_1d_2 = t_0d_0^2$ ที่ปริมาตรคงที่

$$t = t_0 \frac{d_0^2}{d_1d_2} \quad (2.34)$$

2.3 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นมักประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ผลเฉลยแน่นอนตรง (exact solution) ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาได้จะประกอบด้วยค่าของตัวแปรตามตำแหน่งต่าง ๆ กันบนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ผลเฉลยแน่นอนตรงจะประกอบด้วยค่าต่าง ๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ หลักการก็คือทำการลดค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณในจำนวนที่นับได้ (finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์(elements) ดังภาพที่ 2.12 ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน [14]



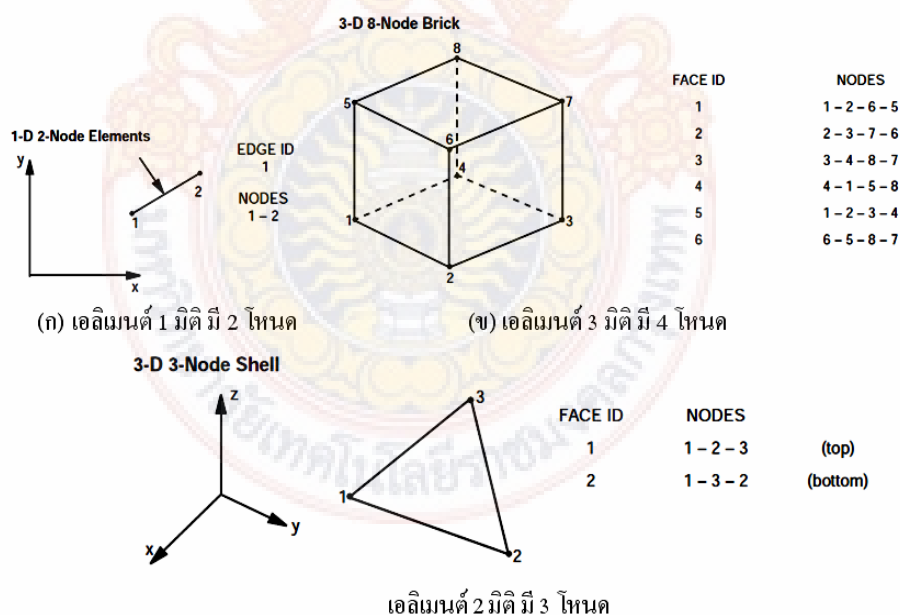
ภาพที่ 2.9 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [14]

ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis : FEA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อให้ได้ผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหาที่หลากหลายในทางวิศวกรรม [15] ซึ่งประกอบด้วยสมการควบคุมระบบ และใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อแก้สมการ ในระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมกันด้วยจุดโหนด (Node) ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของปัญหาโดยประมาณต้องนำสมการควบคุมระบบมาสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์บนโดเมน จากนั้นจึงทำการแก้ปัญหาดังกล่าวซึ่งจะได้ผลเฉลยของปัญหาที่จุดต่อบนโดเมน แม้การพัฒนาระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์แรกเริ่มเดิมทีจะเน้นไปที่การศึกษาความเค้นในโครงสร้างที่ซับซ้อน ตั้งแต่นั้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในสายงานที่เกี่ยวข้องทางกลศาสตร์ เพราะระเบียบการนี้มีความ

หลากหลาย อีกทั้งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีความยืดหยุ่นได้ ซึ่งทำให้ได้รับความสนใจในสถานศึกษาทางด้านวิศวกรรม และในอุตสาหกรรม [16] ที่กล่าวข้างต้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิเคราะห์ได้ดังนี้ ความแข็งแรงของโครงสร้าง (Structural Analysis) ระบบของความร้อน (Thermal System Analysis) การไหล และการไหลที่มีการนำพาความร้อน (Flow Analysis and Flow Convection Heat Transfer) กระบวนการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน (Thermo Mechanical Process Analysis) เช่น การตีขึ้นรูป (Forging) การรีดขึ้นรูป (Rolling) งานฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) ฯลฯ [16]

2.3.1 โหนด (Node)

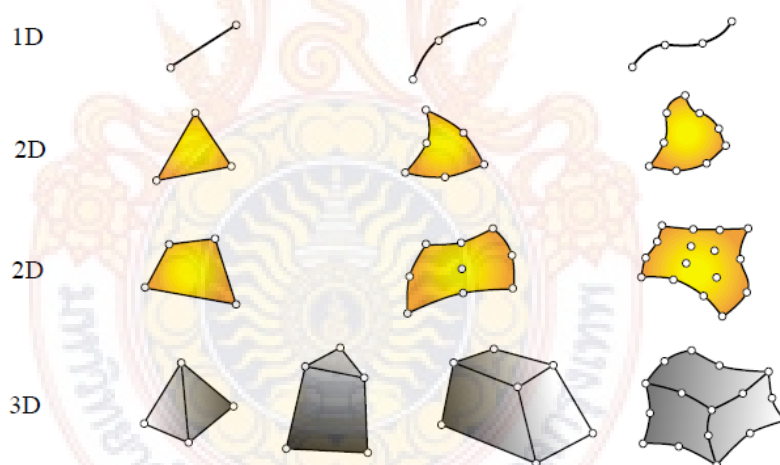
ภาพที่ 2.10 โหนดเป็นตัวช่วยเชื่อมต่อโครงสร้างขึ้นเล็กๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) แต่ละเอลิเมนต์ให้ติดกันด้วยจุดของโหนด นอกจากนี้โหนดยังช่วยในการกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ที่มีองศาอิสระ โดยปกติแล้วโหนดจะอยู่ที่มุมของเอลิเมนต์ หรือ จุดของเอลิเมนต์ แล้วกลุ่มของเอลิเมนต์ และโหนดจะอยู่ติดกันเป็นกลุ่มที่เรียกว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) จะเป็นตัวแทนของชิ้นงานเพื่อนำไปจำลองเป็นสมการเมทริกซ์ (Matrix) เพื่อนำไปคำนวณที่ซับซ้อนต่อไป [17]



ภาพที่ 2.10 โหนดในเอลิเมนต์แต่ละมิติ [18]

2.3.2 เอลิเมนต์ (Element)

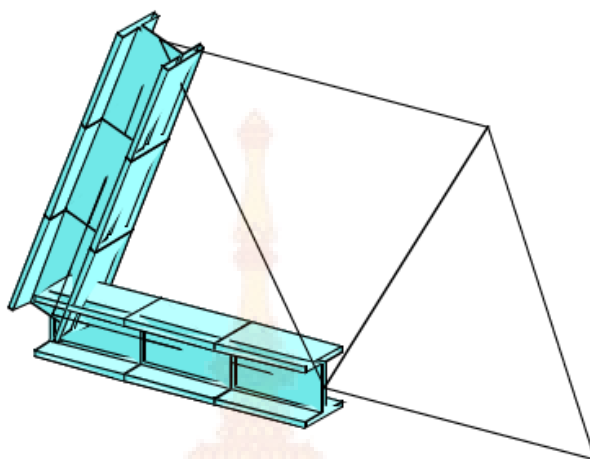
โดยทั่วไปแล้วเอลิเมนต์จะมีมิติอยู่ 1 ถึง 3 มิติ ดังภาพที่ 2.11 นอกจากนี้ยังมีเอลิเมนต์ชนิดพิเศษที่มีลักษณะ 0 มิติ ดังเช่น กลุ่มของจุด (Lumped Springs) เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าเอลิเมนต์ที่มีลักษณะ 1 มิติ จะเป็นเส้นตรง เส้นโค้ง (Beam Element) มักใช้ในการวิเคราะห์งานลักษณะที่เป็นโครง เอลิเมนต์ 2 มิติ (Shell Element) จะเป็นรูปร่างรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมที่มีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์งานที่เป็นพื้นผิว (Surface) ผนังบาง สดท้ายแบบ 3 มิติ (Solid Element) โดยปกติส่วนมากรูปทรงเป็นแบบ Tetrahedral, Pentahedral, Hexahedral (Bricks) หรือ เป็นแบบปริซึม (Prisms) สามารถใช้กับงานที่เป็นปริมาตรตัน (Solid) ซึ่งเอลิเมนต์แต่ละมิติจะมีจุดที่สามารถสังเกตได้ง่าย จุดเหล่านี้เรียกว่า จุดโหนด (Nodal Points) หรือ โหนด (Node) ประโยชน์แบบทวิคูณของโหนดคือ เป็นตัวกำหนดรูปร่างทางเรขาคณิตของเอลิเมนต์กับเอลิเมนต์ที่รูปร่างมีองค์ประกอบเป็นแบบอิสระ โดยปกติโหนดจะตั้งอยู่ที่มุม หรือ จุดปลายของเอลิเมนต์ดังแสดงในรูป มากกว่านั้นในทางกลศาสตร์เอลิเมนต์เหล่านี้จะมีความเฉพาะเจาะจงกับพฤติกรรมของวัสดุสำหรับตัวอย่างเช่น เชิงเส้นยืดหยุ่น (Linear Elastic) ในวัสดุที่เป็นท่อน (Bar Element) [19]



ภาพที่ 2.11 ชนิดของเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1 ถึง 3 มิติ [19]

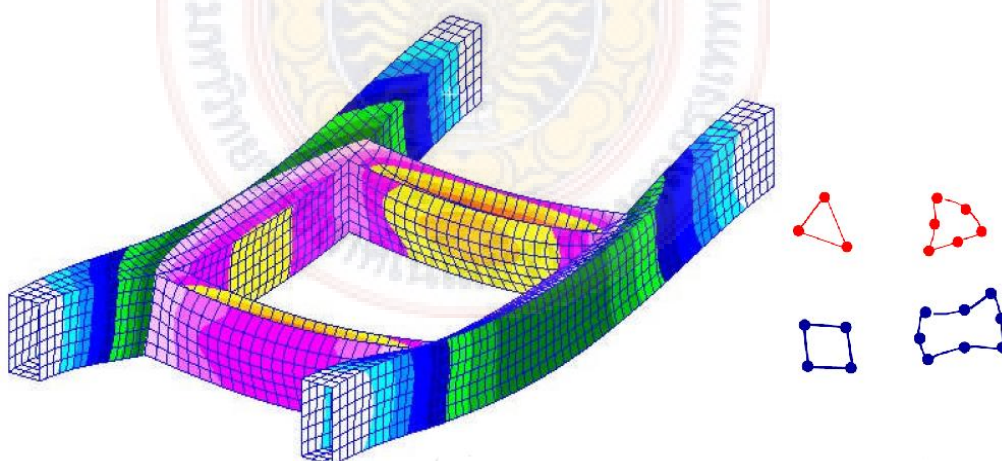
1). เอลิเมนต์ 1 มิติ ดังภาพที่ 2.12 มีลักษณะเป็นเส้น (Beam Element) เท่านั้นซึ่งมีแต่ความยาว และไม่สามารถมองเห็นพื้นที่หน้าตัด หรือพื้นผิวได้อย่างชัดเจน และนอกจากเป็นเส้น

แล้วจะไม่มีรูปทรงเรขาคณิตอื่นได้อีก เป็นแค่เพียงเส้นอาทิ เส้นตรง เส้นโค้งเท่านั้น ซึ่งมักนิยมเรียกว่า บีม (Beam) โดยเอลิเมนต์ต่อกันหลายเอลิเมนต์จะกลายเป็นกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) [20]



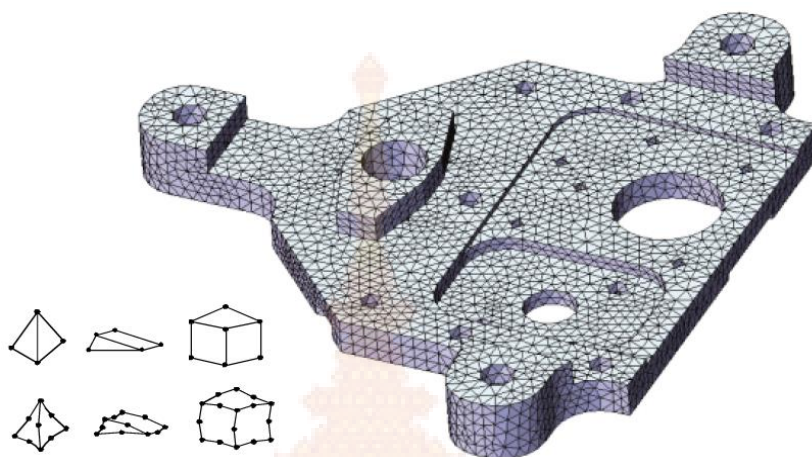
ภาพที่ 2.12 การใช้เอลิเมนต์ 1 มิติ ในงานโครงสร้าง [18]

2). เอลิเมนต์ 2 มิติ (Shell Element) ดังภาพที่ 2.13 ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่เหลี่ยม โดยมีโหนด 3 และ 4 โหนดตามลำดับ แต่โดยพื้นฐานแล้วจะมีขั้นต่ำ 3 โหนด เอลิเมนต์ชนิดนี้จะใช้กับงานที่เป็นพื้นผิว หรือ ผนัง ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น ผนังบาง (Thin Shell) และผนังหนา (Thick Shell) [18]



ภาพที่ 2.13 การใช้เอลิเมนต์ 2 มิติ ในงานที่มีลักษณะเป็นผนัง [18]

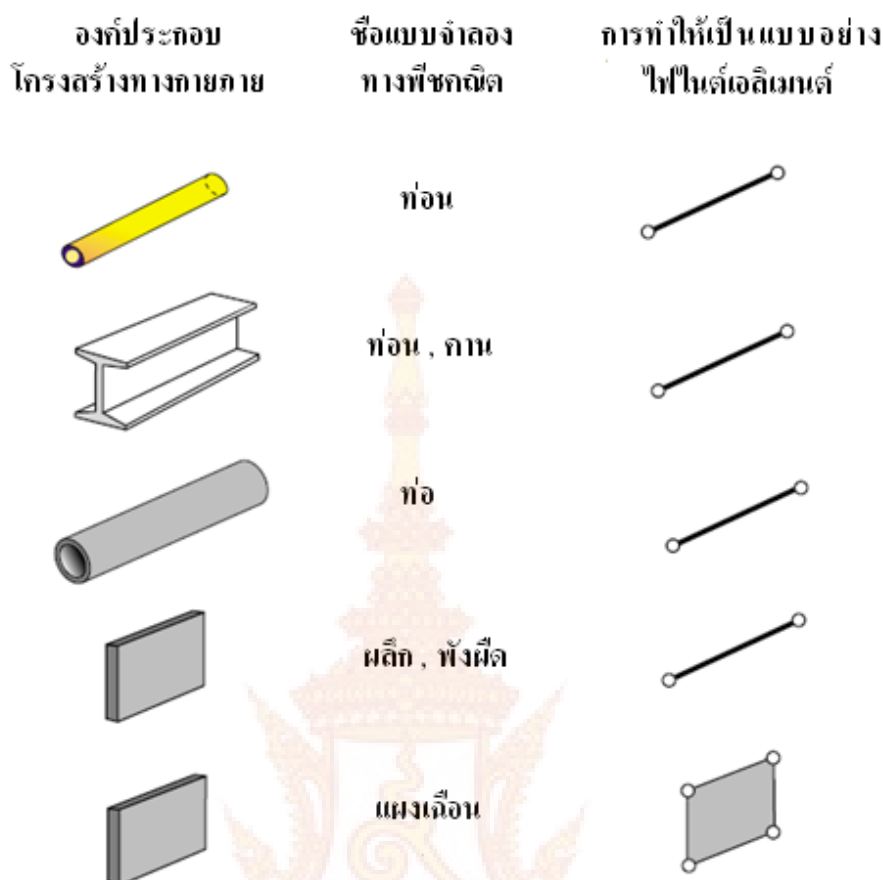
3). เอลิเมนต์ 3 มิติ (Solid Element) ดังภาพที่ 2.14 จะมีโครงสร้างเป็น 3 มิติ รูปทรงจะมีความกว้าง ยาว สูง โดยพื้นฐานของเอลิเมนต์ชนิดนี้จะมีโหนดตั้งแต่ 3 โหนดขึ้นไป เอลิเมนต์แบบนี้จะเหมาะกับกาจำลองโครงสร้างที่มีความหนา (Thick) เมื่อเทียบกับพื้นผิว [20]



ภาพที่ 2.14 การใช้งานเอลิเมนต์ 3 มิติ ในงานที่เป็นปริมาตรตันที่มีความหนา [21]

การจัดหมวดหมู่แบ่งประเภทของระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ในทางกลศาสตร์ โครงสร้าง ความเหนียวแน่น ความหลุมของเอลิเมนต์บนพื้นฐานจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางกายภาพดั้งเดิม ที่ชี้แจงหัวข้อนี้เพราะเป็นส่วนย่อยของระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งทำให้มีความเข้าใจในเทคนิคการออกแบบจำลองขั้นสูง ดังเช่น รายละเอียดลำดับขั้น และการวิเคราะห์โดยรวมกับเฉพาะแห่ง [19] ดังภาพที่ 2.15

ภาพที่ 2.15 แสดงโครงสร้างดั้งเดิมของเอลิเมนต์ (Primitive Structural Element) โดยเอลิเมนต์เหล่านี้จะจำแนกตามโครงสร้างกลศาสตร์โครงสร้างซึ่งเกี่ยวเนื่องกับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้าง เอลิเมนต์ทั้งหลายเหล่านี้ปกติมาจากกลศาสตร์ของวัสดุ (Mechanics of Materials) ซึ่งทำให้ง่ายต่อการเข้าใจ ทฤษฎีทางกายภาพของวัสดุมากกว่าทางคณิตศาสตร์ ดังตัวอย่างภาพที่ 2.15 เอลิเมนต์มีลักษณะเป็น แท่ง (Bars), ก้าน (Cables) และเส้น (Beams) [18]



ภาพที่ 2.15 ตัวอย่างโครงสร้างเอลิเมนต์ดั้งเดิม [19]

สำหรับการแบ่งเอลิเมนต์ในกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ที่เกี่ยวข้องกันด้วยจุดต่อ (Node) โดยการแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์สามารถใช้หลักการดังนี้ คือ ควรหลีกเลี่ยงการแบ่งเอลิเมนต์ที่มีรูปร่างผิดปกติ เช่น เอลิเมนต์ที่มีมุมป้านมากๆ หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีด้านยาวมากๆ เอลิเมนต์ที่มุมแคบมากๆ และมีลักษณะอัตราส่วนกว้าง (Large Aspect Ratio) เป็นต้น ควรเลือกใช้เอลิเมนต์ที่เป็นสี่เหลี่ยมด้านเท่าจะดีมาก หรืออัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความยาวมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง อีกทั้งควรใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กๆ เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ละเอียดในส่วนที่มีความหนาแน่น และแบ่งเอลิเมนต์ขนาดใหญ่ขึ้นในบริเวณที่ไกลออกไป [18]

2.3.3 ความอิสระของการเคลื่อนที่ (Degree of Freedom ; DOF)

ความอิสระของการเคลื่อนที่จะเป็นตัวกำหนดสถานะของเอลิเมนต์ ซึ่งจะทำหน้าที่เรื่องจัดการ การเชื่อมต่อของเอลิเมนต์ ในการเชื่อมต่อของตัวแปรในจุดโหนดการกำหนดค่าอนุพันธ์

ตัวแปรของอิสระการเคลื่อนที่จะมีหลายค่า สำหรับความอิสระของการเคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของลักษณะชนิดของการวิเคราะห์ โดยที่ความอิสระของการเคลื่อนที่จะเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ซึ่งความอิสระของการเคลื่อนที่แต่ละชนิดสรุปได้ดังนี้ [20 , 21] ดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะการวิเคราะห์ความอิสระของการเคลื่อนที่ของแต่ละชนิด [21 , 22]

ขอบข่าย (Discipline)	อิสระการเคลื่อนที่ (DOF)
โครงสร้าง (Structural)	การเคลื่อนที่ (Displacement)
ความร้อน (Thermal)	อุณหภูมิ (Temperature)
ไฟฟ้า (Electrical)	โวลต์ (Voltage)
ของไหล (Fluid)	ความดัน (Pressure)
แม่เหล็ก (Magnetic)	สภาพแม่เหล็ก (Magnetic Potential)

2.3.4 การวิเคราะห์แบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น (Linear and Nonlinear Analysis)

ไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีความสามารถในการวิเคราะห์สมการทั้งแบบเชิงเส้น (Linear) และไม่เชิงเส้น (Nonlinear) สำหรับสมการแบบไม่เชิงเส้นจะเหมาะสมสำหรับชิ้นงาน หรือวัสดุที่มีการเสียรูปร่าง (Deformation) ไปแล้ว ดังนั้นจึงมีความยุ่งยากมากกว่า ใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่มากกว่า ความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น ก็คือ การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น สมการแบบไม่เชิงเส้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าของเวลา เมื่อเกิดการเสียรูปร่าง เปลี่ยนแปลงรูปร่าง อีกทั้งสมบัติทางกายภาพจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปทำให้ค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ส่วนแบบเชิงเส้น เมื่อวัสดุเกิดการเสียรูปร่าง สมบัติทางกายภาพจะไม่เปลี่ยนแปลงไปแต่จะคงที่เสมอซึ่งทำให้ค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) ไม่เปลี่ยนตามไปด้วย [23 , 24]

ดังนั้นก่อนที่จะวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จึงต้องพิจารณาเสียก่อนว่า ชิ้นงานจะวิเคราะห์แบบเชิงเส้น หรือแบบไม่เชิงเส้น ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมเนื่องจากการวิเคราะห์แบบสถิต (Static) และพลศาสตร์ (Dynamic) จะสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งแบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น [25]

ในการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ถ้าแบ่งตามพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะแบ่งได้ออกเป็น 3 รูปแบบดังนี้

1) เรขาคณิตแบบไม่เชิงเส้น (Geometric Nonlinear) คือ มีสาเหตุของการเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปทรงทางเรขาคณิต (Geometry) ประเภทการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมาก (Large Deflection) หรือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการหมุนขนาดใหญ่ (Large Rotation) มักจะเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีความเหนียวสูง และมี Deflection มากเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ หรือมีความสามารถในการบิดตัวได้มาก คือวัสดุมีการเสียรูป หรือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่าง

มาก (Large Deformation) จนทำให้ค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) ของวัสดุ ขึ้นงานสูงขึ้นมากกว่าเดิมตามเวลาที่ผ่านมา ซึ่งสมการทั่วไปแบบเรขาคณิตแบบไม่เชิงเส้น (Geometric Nonlinear) มีดังนี้ [22,26,27]

$$[K] = \int [B]^T [D] [B] dv \quad (2.35)$$

เมื่อ K = เมทริกซ์ความแข็งเกร็ง (Stiffness Matrix)

B = ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Large Strain)

D = ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (DOF)

2) วัสดุแบบไม่เชิงเส้น (Materials Nonlinear) โดยปกติแล้วการวิเคราะห์วัสดุแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) จะอยู่ภายใต้สมมติฐานที่จะเกิดการคืนรูปอย่างสมบูรณ์เมื่อนำแรง หรือภาระกระทำออกไปแล้ว ค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ซึ่งเรียกว่า อีลาสติคโมดูลัส (Elastic Modulus) จะมีค่าคงที่เสมอ แต่สำหรับวัสดุบางประเภทการคืนรูปเมื่อนำแรง หรือ ภาระกระทำออกไป จะเกิดความไม่สมบูรณ์จนเกิดช่วง Plastic Strain มักเกิดจากแรงที่มากระทำกับวัสดุมีขนาดมากเกินกว่าค่าจุดคราก (Yield) จนทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ซึ่งจะต้องใช้การวิเคราะห์แบบวัสดุไม่เชิงเส้น (Materials Nonlinear) ซึ่งในการวิเคราะห์จะใช้รูปแบบสมการโดยทั่วไปเหมือนกับสมการที่ 2.35 แต่แตกต่างกันที่ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (D) จะเป็นกรณี (Small Strain) อย่างเดียวเท่านั้น และความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (B) ไม่เป็นกรณี (Small Strain) [14,22,19]

$$[K] = \int [B]^T [D] [B] dv \quad (2.36)$$

เมื่อ K = เมทริกซ์ความแข็งเกร็ง (Stiffness Matrix)

B = ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

D = ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (DOF) กรณี (Small Strain)

3) การเปลี่ยนสถานะแบบไม่เชิงเส้น (Changing Status Nonlinear) มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงสถานะจนทำให้สมบัติของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ดังตัวอย่าง การดึงสลับกับการหย่อนสายเคเบิลนานๆ หรือ รางที่ต้องสัมผัสกับความร้อน ความเย็นสลับกันจนทำให้สมบัติของวัสดุ

เกิดการเปลี่ยนแปลงไปคือ ความสามารถในการรับแรงของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา หรือสมบัติด้านอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) เท่านั้น [9,28,29]

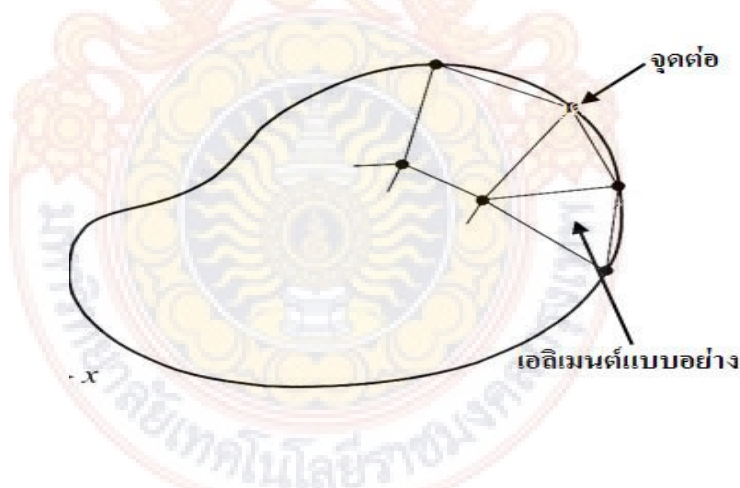
2.3.5 ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Software) ในการวิเคราะห์โดยปกติทั่วไปจะประกอบด้วย 3 หลักการดังนี้ [17,30]

1. การเตรียมกระบวนการ (Pre Processing)
2. การวิเคราะห์ (Analysis)
3. การนำเสนอกระบวนการ (Post Processing)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลัก อธิบายได้ดังนี้ [14]

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่าง ๆ กัน เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง (elasticity problem) ปัญหาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความร้อน (Thermal problem) รวมทั้งปัญหาของการไหล (fluid problem) เป็นต้น ดังภาพที่ 2.16



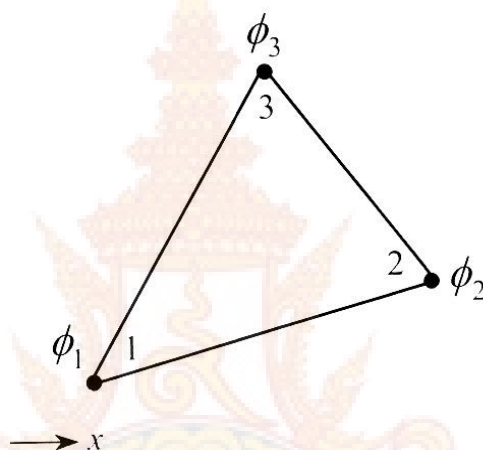
ภาพที่ 2.16 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ กัน [14]

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element interpolation functions) เช่นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม เอลิเมนต์นี้ประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 แสดงดังภาพที่ 2.17 โดยที่จุดต่อเป็นตำแหน่งที่ตั้งของตัวไม่รู้ค่า (nodal unknowns) ซึ่งคือ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ตามลำดับ ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่ออาจเป็นค่าของการเสียรูป (displacement) หากเราวิเคราะห์

ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง หรืออาจเป็นค่าของอุณหภูมิหากเราทำปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นความเร็วของของไหล หากเราวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการไหล เป็นต้น ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นั้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ คือ

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (2.37)$$

โดย $N_i(x, y), i = 1, 2, 3$ แทนฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์



ภาพที่ 2.17 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ [14]

สมการ 2.37 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ คือ

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= [N_1 \ N_2 \ N_3] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \\ &= [N]_{(1 \times 3)} \{\phi\}_{(3 \times 1)} \end{aligned} \quad (2.38)$$

โดย $[N]$ แทนเมทริกซ์ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ และ $\{\phi\}$ แทนเวกเตอร์เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้น

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (element equations) ดังตัวอย่างเช่น สมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่าง ดังภาพที่ 2.20 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e \quad (2.39)$$

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (2.40)$$

ขั้นตอนที่ 3 นี้ ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของการศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการ 2.39 สามารถทำได้โดย วิธีการโดยตรง (direct approach) วิธีการแปรผัน (variation approach) วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals)

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบรวมกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการรวม (system of simultaneous equations) ในรูปแบบดังนี้

$$\sum(\text{element equations}) \Rightarrow [K]_{sys} \{\phi\}_{sys} = \{F\}_{sys} \quad (2.41)$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ลงในระบบสมการรวม 2.41 แล้วจึงแก้ระบบสมการรวมนี้เพื่อหา $\{\phi\}_{sys}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ (nodal unknowns) ซึ่งอาจเป็นค่าของการเคลื่อนตัวตามจุดต่อต่าง ๆ ของโครงสร้าง หรือเป็นค่าของอุณหภูมิที่จุดต่อ หากเป็นปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นค่าของความเร็วของของไหลตามจุดต่อหากเป็นปัญหาเกี่ยวกับการไหล เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่าง ๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถนำมาใช้เพื่อหาค่าอื่น ๆ ที่ต้องการต่อไปได้อีก เช่น เมื่อรู้ค่าการเสียรูป (Displacement) ตามจุดต่อต่าง ๆ ของโครงสร้างก็สามารถนำไปใช้หาค่าความเครียด (strain) และความเค้น (stress) ได้ตามลำดับ หรือเมื่อรู้ค่าอุณหภูมิที่จุดต่อก็สามารถคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ หรือเมื่อรู้ค่าความเร็วของของไหลที่จุดต่อก็สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลได้ เป็นต้น

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้ จะเห็นได้ว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีที่มีระเบียบแบบแผนอย่างเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีหัวใจสำคัญอยู่ที่การสร้างสมการของเอลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 3

2.4 การลากขึ้นรูปลึกขึ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร [31]

ขึ้นงานที่มีลักษณะการไหลตัวของวัสดุไม่สมมาตร เช่น รูปถ้วยสี่เหลี่ยมหรือถ้วยวงรีความเสียหายที่จะเกิดขึ้นบนชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรนี้คือ เกิดรอยย่นที่ปีกถ้วย เกิดรอยฉีกขาดที่มุมพื้นซ์ หรือรอยฉีกขาดที่เกิดจากการไหลตัวไม่เท่ากันบริเวณต่าง ๆ ของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 ความเสียหายที่เกิดบนชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร [31]

ที่บริเวณส่วนปีกของชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยม โดยเฉพาะขอบปีกตรงบริเวณรัศมีมุมโค้งจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการโก่งตัว (Buckle) และเกิดรอยย่นได้มากที่สุดเพราะเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นอัด (Compressive Stress) ในแนวเส้นรอบวงมากและบริเวณรัศมีมุมโค้งก็เกิดความเค้นอัด (Bending Stress) ด้วย ทำให้การไหลตัวช้ากว่าบริเวณขอบเส้นตรงของถ้วย จึงทำให้เนื้อวัสดุเกิดการอัดตัวบริเวณรัศมีมุมโค้งซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการโก่งตัวหรือเกิดรอยย่น ดังนั้นการลากขึ้นรูปจึงจำเป็นต้องใช้แรงในการลากขึ้นรูปที่สูงขึ้น เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งบางครั้งจะทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดที่รัศมีมุมโค้งที่ก้นถ้วย และรัศมีที่ปากของถ้วยสี่เหลี่ยม เพราะบริเวณนี้จะเกิดความเค้นดัดที่สูง และความหนาของชิ้นงานบริเวณนี้ก็จะลดลงด้วยจึงทำให้เกิดการฉีกขาดได้ง่าย

จากผลงานวิจัยของ K.Lange [31] ได้แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการลากขึ้นรูปหรือการเปลี่ยนรูปร่างของแผ่นโลหะขึ้นกับความหนาของวัสดุและอัตราส่วนการขึ้นรูป (กรณีของแผ่นโลหะเปล่าและหน้าตัดพื้นที่ไม่กลม คิดค่าอัตราการลากขึ้นรูปจากการคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมติของวงกลมที่มีพื้นที่เท่ากัน) สำหรับการลากขึ้นรูปที่ใช้อัตราส่วนในการลากขึ้นรูปเท่ากับ 2.0

สำหรับแผ่นโลหะบาง ($D_0 / T \geq 25 - 40$) นั้นจะมีความไวต่อการเกิดรอยยับมาก เพราะมีโมเมนต์ความเฉื่อยในการต้านการโก่งตัวและการเกิดรอยยับต่ำ จึงต้องการแรงกดบนแผ่นจับชิ้นงานที่มากกว่าแผ่นโลหะที่มีความหนามาก สำหรับแผ่นโลหะหนา ($D_0 / T \leq 25$) โดยทั่วไปมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยยับได้ยาก ทำให้สามารถลากขึ้นรูปได้โดยไม่ต้องใช้แผ่นจับชิ้นงาน และวัสดุมีค่า r_m (Normal Anisotropy) ที่ต่ำ จะต้องใช้แรงกดบนแผ่นจับชิ้นงานที่สูง และแรงกดแผ่นจับชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุมีค่า Δr (Planar Anisotropy) สูงขึ้นด้วย

ดังนั้นการแก้ปัญหาการโก่งตัวหรือเกิดรอยยับสามารถแก้ไขได้โดยการใช้รัศมีมุมพื้นซ์และด้ายให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้วัสดุมีการไหลตัวได้ง่ายขึ้น หรือแก้ไขโดยการเลือกใช้สารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติที่ดี เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นโลหะกับผิวของแม่พิมพ์ให้มีการไหลตัวได้ง่ายขึ้น และยังสามารถแก้ไขปัญหการเกิดรอยยับได้โดยการนำตัวครอบปิด (Drawbead) เข้ามาใช้เพื่อช่วยกักการไหลตัวของวัสดุที่บริเวณขอบปึกในแนวเส้นตรงให้มีการไหลตัวที่ช้าลงหรือไหลตัวเท่ากับบริเวณขอบปึกตามรัศมีมุมโค้ง ซึ่งมีการไหลตัวที่ช้าอยู่แล้ว

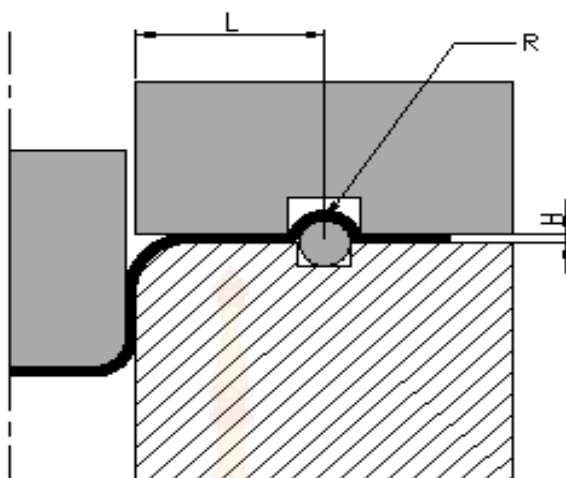
2.5 ดรอพีด (Draw bead) [32]

การควบคุมแรงกดชิ้นงานที่ไม่พอเพียง จะทำให้เกิดรอยยับของโลหะ ซึ่งการยับนี้จะให้โลหะแผ่นไม่สามารถที่จะไหลตัวได้ ทำให้บริเวณส่วนกันของชิ้นงานถูกพันขึ้นจนฉีกขาดแต่ถ้าแรงกดของแผ่นกดชิ้นงานมากเกินไป โลหะก็จะไม่สามารถไหลตัวเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะการขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจะทำให้อัตราการไหลของแต่ละจุดไม่เท่ากัน ทำให้แรงที่ใช้ในการกดแต่ละจุดไม่เท่ากันด้วย สำหรับบริเวณที่ต้องการแรงกดมากจะใช้ดรอพีดเข้ามาช่วยเพื่อทำให้การไหลตัวของโลหะช้าลง [32]

ดรอพีดมีหน้าที่ควบคุมการไหลตัวของโลหะที่จะไหลเข้าไปในด้าย และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยยับ (Wrinkle) ในขณะที่ขึ้นรูปนอกจากนี้ยังช่วยลดแรงกดของแผ่นกดชิ้นงาน และตัวรีดโลหะให้มีความเครียดลดลงเป็นการเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะ การติดตั้งดรอพีดสามารถติดตั้งที่แผ่นกดชิ้นงานหรือที่ด้ายก็ได้ แต่ปกตินิยมติดตั้งอยู่ที่แผ่นกดชิ้นงานและร่องปีด (Bead) จะอยู่ที่ด้าย

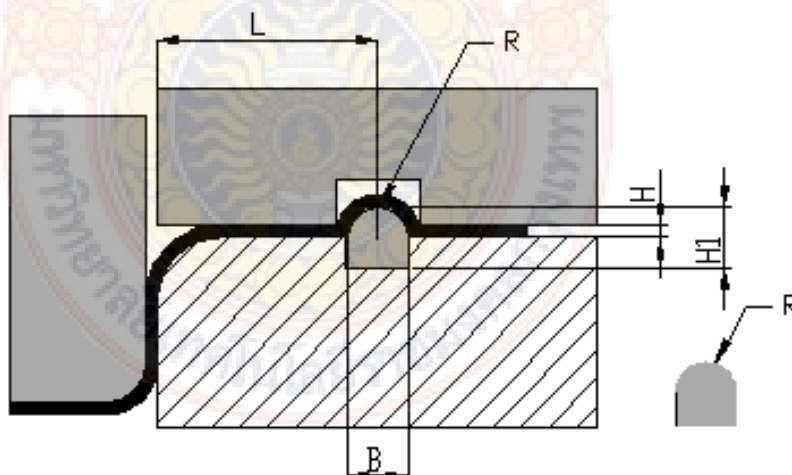
2.5.1 ดรอพีดแบ่งออกได้เป็น 5 ชนิดตามรูปร่างหน้าตัดของดรอพีด ดังต่อไปนี้

1) ดรอพีดแบบหน้าตัดกลม (Round Drawbead) ตัวแปลที่ใช้ในการออกแบบคือรัศมีของดรอพีด (R) ความสูงที่พ้นจากผิวของแผ่นจับชิ้นงานหรือด้าย (H) และระยะห่างจากปากด้าย (L) ดรอพีดประเภทนี้นิยมใช้ในงานวิจัยเพื่อช่วยลดค่าความเสียหาย และร่องรอยที่เกิดจากดรอพีดบนแผ่นโลหะมีน้อย แต่ไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตจริงแสดงดังภาพที่ 2.19



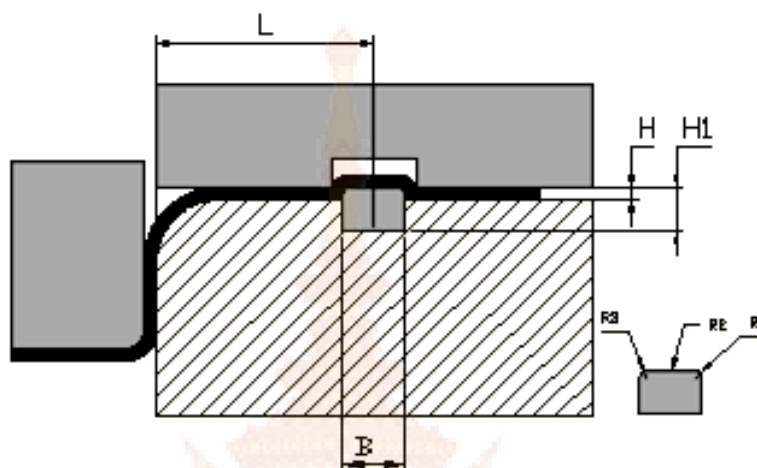
ภาพที่ 2.19 ดรอปปิดแบบหน้าตัดกลม (Round Drawbead)

2) ดรอปปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Half-Round Drawbead) มีตัวแปรในการออกแบบ คือ รัศมีของดรอปปิด (R) ความกว้าง ($B = 2R$) ความสูงที่พ้นจากผิวของแผ่นจับชิ้นงานหรือ ดาย (H) ความสูงของดรอปปิด (H_1) และระยะห่างจากปากดาย (L) ดรอปปิดประเภทนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตจริงแสดงดังภาพที่ 2.20



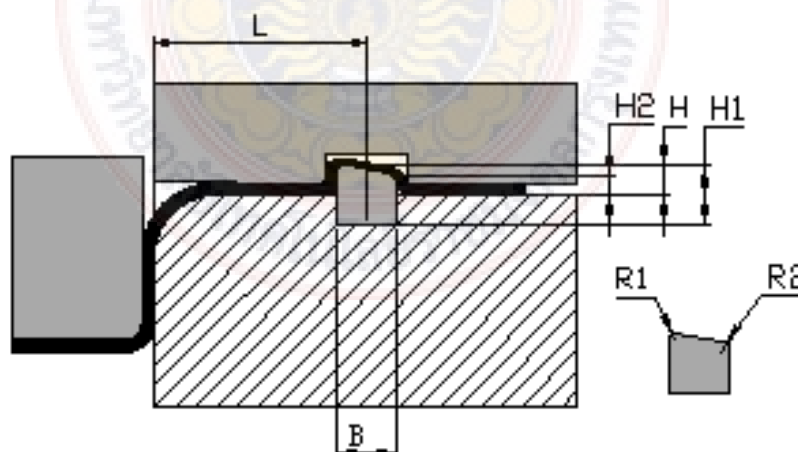
ภาพที่ 2.20 ดรอปปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Half-Round Drawbead)

3) ดรอปปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Drawbead) มีตัวแปลในการออกแบบคือ รัศมี ($R1, R2, R3$) ความกว้าง (B) ความสูง ($H, H1$) และระยะห่างจากปากตาย (L) ดรอปปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่นิยมใช้แสดงดังภาพที่ 2.21



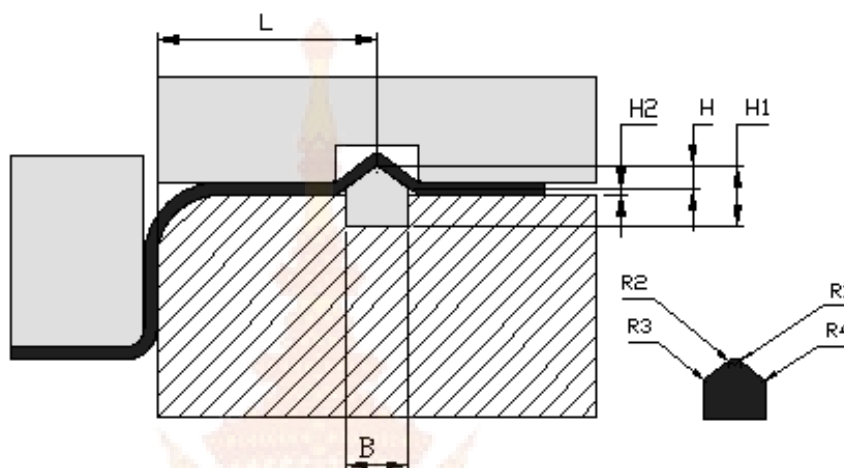
ภาพที่ 2.21 ดรอปปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Drawbead)

4) ดรอปปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapeziform Drawbead) มีตัวแปลในการออกแบบคือ รัศมี ($R1, R2$) ความกว้าง (B) ความสูง ($H, H1, H2$) และระยะห่างจากปากตาย (L) ดรอปปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าแสดงดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 ดรอปปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapeziform Drawbead)

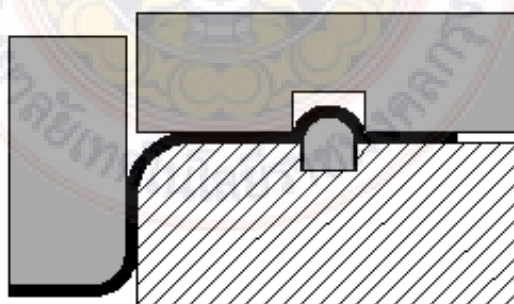
5) ดรอปิดแบบหน้าตัดรูปตัววี (V-Shaped Drawbead) มีตัวแปลในการออกแบบคือ รัศมี ($R1, R2, R3, R4$) ความกว้าง (B) ความสูง ($H, H1, H2$) และระยะห่างจากปากตาย (L) ดรอปิดแบบหน้าตัดรูปตัววี แสดงดังภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 ดรอปิดแบบหน้าตัดรูปตัววี (V-Shaped Drawbead)

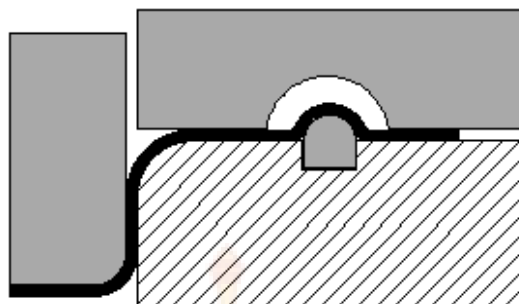
2.5.2 ส่วนของร่องปิด (Grooves) สามารถแบ่งตามรูปร่างหน้าตัดได้ 5 แบบ คือ

1) ร่องปิดแบบหน้าตัดตามรูปร่างของดรอปิด แสดงดังภาพที่ 2.24



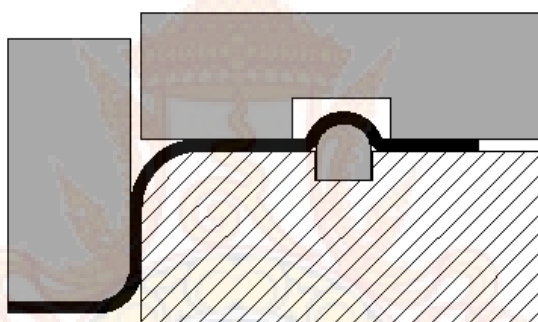
ภาพที่ 2.24 ร่องปิดแบบหน้าตัดตามรูปร่างของดรอปิด

2) ร่องปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม แสดงดังภาพที่ 2.25



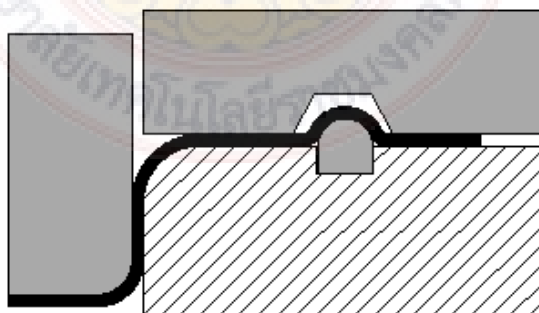
ภาพที่ 2.25 ร่องปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม

- 3) ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า แสดงดังภาพที่ 2.26



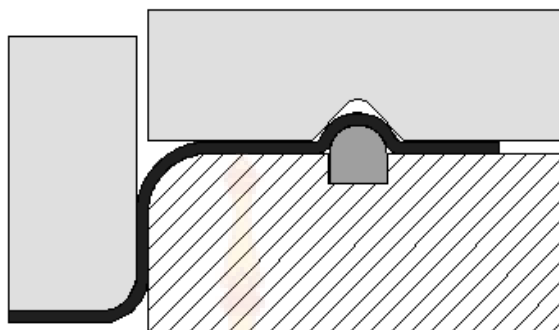
ภาพที่ 2.26 ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

- 4) ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู แสดงดังภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.27 ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู

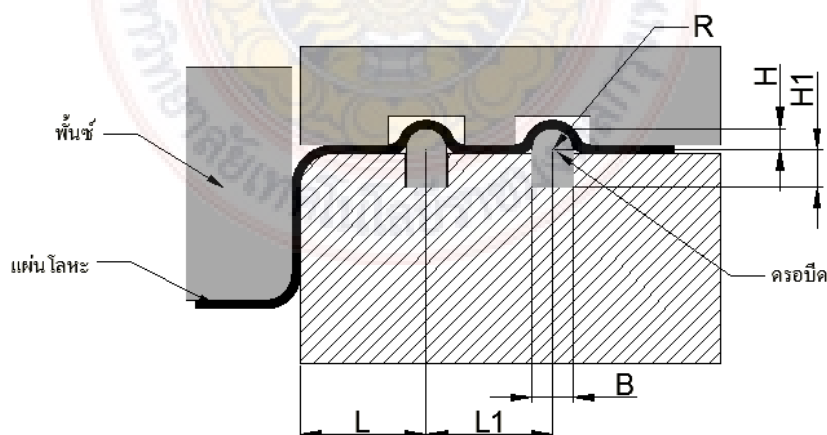
5) ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม แสดงดังภาพที่ 2.28



ภาพที่ 2.28 ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม

2.5.3 ตำแหน่งในการติดตั้งตัวดรอปีด (Drawbead Position) [32]

สามารถติดตั้งตัวดรอปีดเพื่อการใช้งานได้ 2 ตำแหน่ง คือ ติดตั้งไว้บนหน้าด้าย หรือ ติดตั้งไว้บนผิวหน้าของแผ่นจับชิ้นงาน แล้วแต่รูปแบบและความเหมาะสมในการทำงาน โดยต้องคำนึงถึงการตัดขอบด้วย ตำแหน่งของดรอปีดต้องไม่เป็นอุปสรรคกับการทำงานในขั้นตอนอื่น การวางดรอปีดอาจใช้ 1, 2, 3 แถว หรือมากกว่านั้นก็ได้ ขึ้นอยู่กับความลึกของงานที่ขึ้นรูป ความหนา และพื้นที่ในการไหลตัวของแผ่นโลหะ หรือความต้องการในการต้านการไหลตัวของแผ่นโลหะ ตารางที่ 2.2 เป็นการแนะนำขนาด ระยะห่างจากขอบ และสกรูในการจับยึดดรอปีดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลมในตัวแปลต่าง ๆ ในตารางแสดงดังรูปที่ 2.29



ภาพที่ 2.29 ตำแหน่งและระยะของดรอปีด

ตารางที่ 2.2 ขนาดของดรอปีดและตำแหน่งของระยะห่างในการยึดติด

ขนาดแม่พิมพ์	L (mm)	L1 (mm)	B (mm)	R (mm)	H (mm)	H1 (mm)	D (mm)
เล็ก-กลาง	25-32	25-30	14	7	6	5	M6
กลาง-ใหญ่	28-35	28-32	16	8	7	6	M8
ใหญ่มาก	32-38	32-38	20	10	8	7	M10

2.6 ชนิดของเหล็กแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูป

เหล็กแผ่นรีดเย็นเป็นโลหะที่ใช้มากในการอัดโลหะ เนื่องจากเหล็กแผ่นชนิดนี้จะถูกรีดเป็นแผ่น ณ 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 เป็นสัญลักษณ์หนึ่งของเกรดเหล็ก (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 2.2

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางเคมีของเหล็กรีดเย็น (มาตรฐาน JIS)

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

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Meiders, et al.[2] ได้ศึกษาการนำดรอปีดมาใช้ในการขึ้นรูปโลหะ โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวแปรที่สำคัญประกอบด้วย แรงในการควบคุมการไหลตัว

ของโลหะ (Drawbead Restraining Force) การเปลี่ยนแปลงความหนาแบบพลาสติก, และแรงยกดรอปิด (Drawbead Lift Force) ได้มีการจำลองดรอปิดแบบสองมิติ และการทดลองจริงค่าความแตกต่างทางคณิตศาสตร์ทั้งสองค่าจะเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความหนาแบบพลาสติกได้

M.Samuel.[3] ได้ศึกษาอิทธิพลรูปทรงของดรอปิดในการขึ้นรูปโลหะ ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองของดรอปิดเปรียบเทียบกับรูปทรงของดรอปิดระหว่างร่องปิดที่เป็นแบบครึ่งวงกลมกับร่องปิดที่เป็นแบบสี่เหลี่ยมและวิเคราะห์ความแตกต่างของการไหลตัวของวัสดุในการใช้ร่องปิดทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกับผลการทดลอง จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาและความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผิวของร่องปิดแบบสี่เหลี่ยมมีค่าสูงกว่าร่องปิดแบบครึ่งวงกลม

กิตติภฏ รัตนจันทร์ [4] เพื่อศึกษาหาความสามารถในการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นของดรอปิด (Drawbead) ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวต่างกันเช่นรูปร่างและความสูงของดรอปิด ความเร็วในการดึงขึ้นรูป สภาพการหล่อลื่นและสมบัติของโลหะแผ่น สำหรับในการวิจัยนี้ใช้ดรอปิดที่มีรูปร่างแบบครึ่งทรงกระบอกกลม (Half-Round Drawbead) โดยมีตัวแปรที่สนใจคือความสูงของดรอปิด สภาพการหล่อลื่นและความเร็วในการดึงขึ้นรูป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสูงของดรอปิดและการหล่อลื่นมีผลกระทบต่อการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นที่จะเข้าสู่ช่องเปิดตายเป็นอย่างมาก เมื่อเพิ่มความสูงดรอปิดให้สูงขึ้นจะต้องใช้แรงกดขึ้นงานเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่รอยย่นที่เกิดขึ้นจะลดลงในส่วนของการหล่อลื่นพบว่าเมื่อไม่ใช้สารหล่อลื่นจะไม่สามารถดึงขึ้นรูปได้เพราะจะเกิดการฉีกขาดที่ผนังขึ้นงานก่อน สำหรับความเร็วในการดึงขึ้นรูปในช่วงที่ใช้ในการทดลองพบว่าเมื่อลดคุณภาพของขึ้นงานสำเร็จน้อยมาก

บุญส่ง จงกลณี [1] ได้ศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์ที่จะใช้ในการลากขึ้นรูปลึกขึ้นงานที่มีลักษณะไม่สมมาตร เพื่อใช้ในการทดสอบอิทธิพลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูป 4 ตัวแปร รูปร่างแผ่นเปล่า (Blank geometry) ขนาดแรงกดขึ้นงาน (Blank holding force : BHF) ชนิดของสารหล่อลื่น (Lubricant type) และรูปร่างดรอปิด (Drawbead geometry) ในขั้นตอนการทดสอบจะมีการบันทึกผลแรงกดขึ้นรูปและแรงกดขึ้นงานในขณะขึ้นรูปทุกครั้ง การวัดผลการทดลองจะนำเอาขึ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วมาตรวจสอบความเสียหายและวัดขนาดของความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆบนขึ้นงานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไป จากการทดลองพบว่า รูปร่างของแผ่นตัดเปล่า และแรงกดขึ้นงานที่เหมาะสมนอกจากจะสามารถลดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแล้วยังสามารถลดระดับความเครียดบนขึ้นงานได้อีกด้วย ขนาดของแรงกดขึ้นงานที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นตัดเปล่าและกลไกของแม่พิมพ์ สารหล่อลื่นจะลดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ผิวสัมผัสของขึ้นงานโดยตรง และการใช้ดรอปิดที่มีขนาดที่เหมาะสม จะสามารถควบคุมการไหลของแผ่นตัดเปล่า

เข้าสู่ตายได้ดี จะทำให้สามารถลดขนาดของความเครียดในบริเวณวิกฤติได้ดี อย่างไรก็ตามการใช้ดรอปิดจะต้องมีการปรับขนาด แผ่นตัดเปล่าให้โตขึ้น เพิ่มแรงกดขึ้นงาน และเลือกใช้สารหล่อลื่นให้เหมาะสม

ทวีภัทร์ บุรณิทธิ, ทัศนชัย ผ่องผาย [33] การขึ้นรูปโลหะแผ่นในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์มักจะมีปัญหาการเกิดรอยย่น การฉีกขาด และการสปริงตัวกลับ ทั้งนี้กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นมีการกำหนดค่าตัวแปรกระบวนการผลิตต่างๆ ที่สำคัญเช่น แรงกดของตัวประสานหรือแรงจับยึดแบลงค์ตำแหน่งของดรอปิด และขนาดรูปร่างของแบลงค์ เป็นต้นงานวิจัยนี้ได้นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นมาประยุกต์ในการจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะแผ่นของชิ้นส่วนขวางยึดเครื่องยนต์มาเป็นกรณีศึกษา โดยทำการศึกษาถึงอิทธิพลของแรงกดของตัวประสานและตำแหน่งดรอปิดแบบต่างๆ ต่อการไหลของวัสดุในกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่มีต่อการฉีกขาดและการเกิดรอยย่นซึ่งเป็นเงื่อนไขการออกแบบหลัก แผ่นโลหะที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ เหล็กกล้า JSC440W ที่มีความหนาเริ่มต้น 1 มม. ความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนนี้ถูกพิจารณาโดยการเปรียบเทียบกับแผนภูมิขีดจำกัดการขึ้นรูป ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่สำคัญทางด้านความไม่เสถียรทางพลาสติกของแต่ละชนิดโลหะแผ่น ผลจากการศึกษาพบว่าดรอปิดสามารถควบคุมการไหลของวัสดุได้ดีกว่าการใช้แรงกดของตัวประสานเพียงอย่างเดียว การเลือกตำแหน่งดรอปิดมีความสำคัญ โดยการวางแนวดรอปิดอย่างสมมาตรนั้นไม่เพียงพอต่อการขึ้นรูปสำหรับกรณีศึกษานี้การใช้ดรอปิดแบบ 6 ช่วงตำแหน่ง จะสามารถช่วยในการลดปัญหาทั้งการฉีกขาดและรอยย่นได้ดีในกรณีศึกษา

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องถึงผลกระทบของดรอปิดที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นพบว่าดรอปิดมีผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยดรอปิดสามารถควบคุมการไหลตัวของแผ่นโลหะในตำแหน่งที่มีการติดตั้งดรอปิด และสามารถกระจายเนื้อโลหะออกไปก่อนที่จะเกิดการย่น นอกจากนี้ยังพบว่าความสูงของดรอปิด รูปร่างดรอปิด และตำแหน่งในการติดตั้งดรอปิดมีผลต่อการไหลตัวของโลหะแผ่นอีกด้วย จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวจึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาชนิดและรูปร่างของดรอปิด ว่ามีอิทธิพลในการควบคุมการไหลตัวของโลหะ โดยเฉพาะในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างไม่สมมาตร ทำการศึกษารูปร่างของดรอปิด 3 ลักษณะได้แก่ ดรอปิดหน้าตัดรูปตัววี (V-Shaped Drawbead) ดรอปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Half-Round Drawbead) และ ดรอปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapeziform Drawbead) ตัวแปลที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC โดยการเปรียบเทียบผลการทดลองการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาผลการขึ้นรูปมีความสอดคล้องให้ผลลัพธ์ในทิศทางเดียวกัน เพื่อทราบถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่น เพื่อนำไปใช้แก้ปัญหาการออกแบบดรอปิดและเปรียบเทียบผลการจำลองการขึ้นรูปวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

บทที่ 3

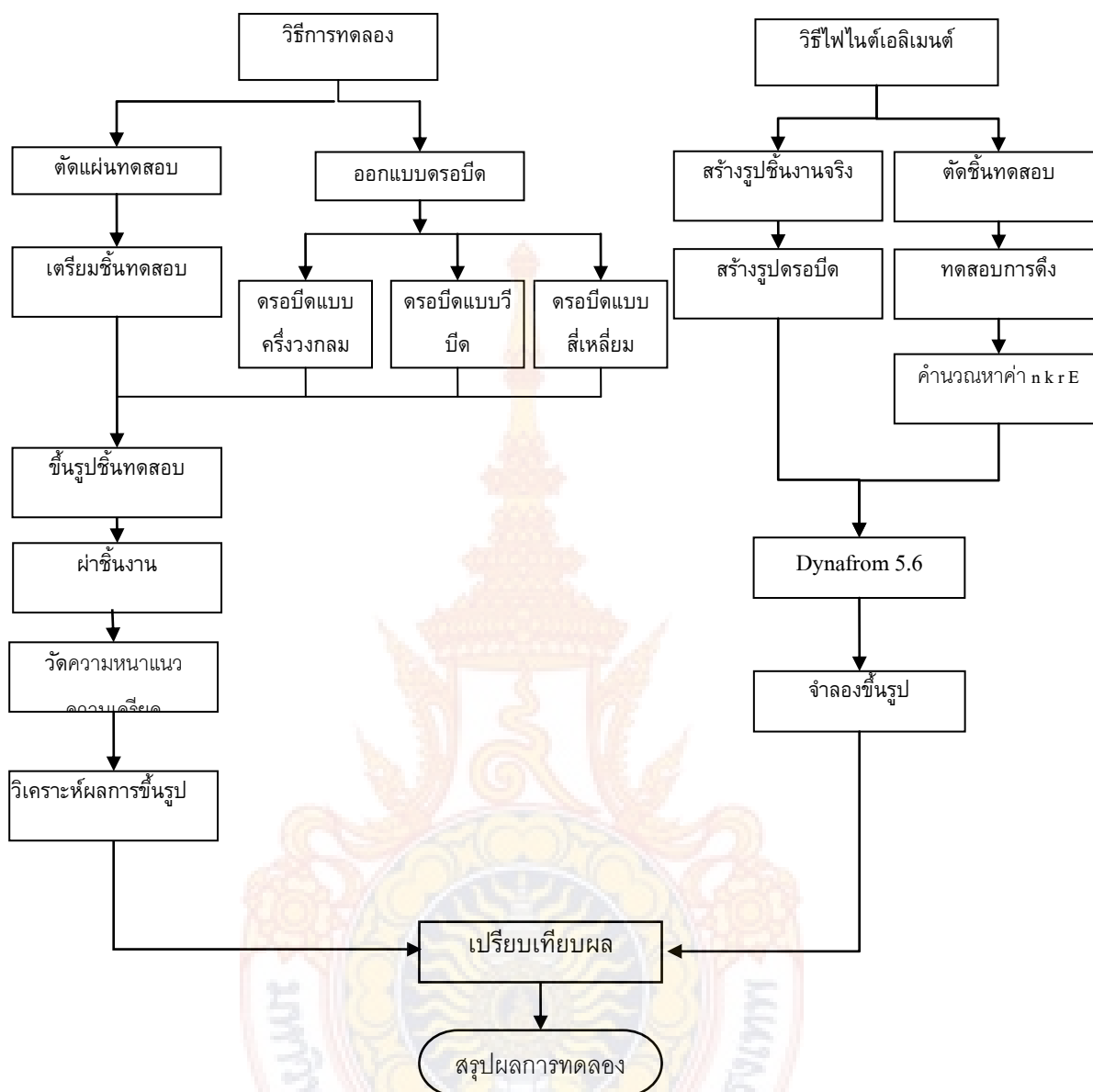
วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการทดลองแบ่งออกเป็นดังนี้ ส่วนแรกคือการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนที่สองคือการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง เพื่อวัดความหนาและบริเวณที่เกิดความเสียหาย นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบและวิเคราะห์เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างการทดลองจริงกับการจำลองขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเมื่อมีแนวโน้มใกล้เคียงกันจึงปรับค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับการออกแบบตรอบีต

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกดำเนินการขึ้นรูปชิ้นงานที่รูปทรงไม่สมมาตรเพื่อนำมาวิเคราะห์ความเครียดที่เปลี่ยนไป ส่วนที่สองเป็นจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลทั้งสองส่วนนำมาเปรียบเทียบกันซึ่งมีแนวทางการดำเนินการดังนี้





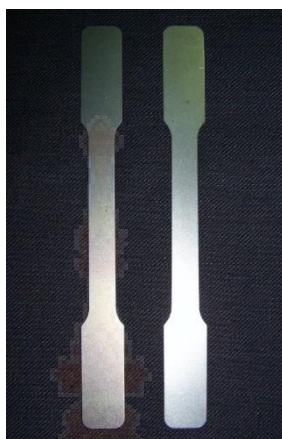
ภาพที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินการวิจัยการศึกษาอิทธิพลรูปทรงของดรอปปิดในการลากขึ้นรูปโลหะที่มีรูปทรงไม่สมมาตรโดยการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

จากแผนภาพการดำเนินการวิจัยทั้งสองส่วนสามารถแสดงรายละเอียดขั้นตอนดังนี้

3.1.1 ทดสอบหาสมบัติอัตราส่วนความเครียดถาวร n, r (Anisotropy) ของแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCD ความหนา 1.0 มิลลิเมตร ตามวิธีการของ ASTM E517 vol.01.03.(1993)

- 1) นำแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCD ความหนา 1.0 มิลลิเมตรมาทำการทดสอบหาค่า r (Anisotropy) ตัดชิ้นทดสอบ (Blanking) ตามแนวทิศทางการรีด (Rolling Direction) จากแผ่นเหล็กรีดเย็น ที่นำมาใช้ในการทดสอบ

2) วัดความกว้าง (W_o) และความหนา (T_o) ของแต่ละชิ้นทดสอบทุกแนวการรีดบันทึกข้อมูล ในช่วงความยืด (Gage length)



ภาพที่ 3.2 ลักษณะชิ้นทดสอบหาสมบัติเชิงกล

3) นำชิ้นทดสอบที่วัดค่าความกว้างและหนา มาทดสอบการดึงตามแนวแกน

4) วัดความกว้าง (W_x) และความหนา (T_x) ของชิ้นทดสอบที่ดึงทดสอบแล้วอุปกรณ์ (Extensometer) จะบันทึกการเปลี่ยนแปลงความยาวและพื้นที่หน้าตัด นำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกมาคำนวณ

Title	Thickness	Width	GaugeLength			
T1	1	12.5	50			
===== Summary for Data Processing =====						
Title	Max_Force	Max_Stress	YP_Stress	Break_Stra	LYP_Stress (N/mm2)	
T1	3730.69	93.27	68.9	74.33	68.29	
Mean	0	0	0	0	0	
===== Raw Data =====						
T1						
Time	Force	Stress	Stroke	Strain	Extensometer	
0	12.29	0.31	1	2	0	
1	-69.62	-1.74	1	2	0	
7	569.23	14.23	1	2	0.01	
7	724.84	18.12	1	2	0.01	
8	1015.6	25.39	1	2	0.02	

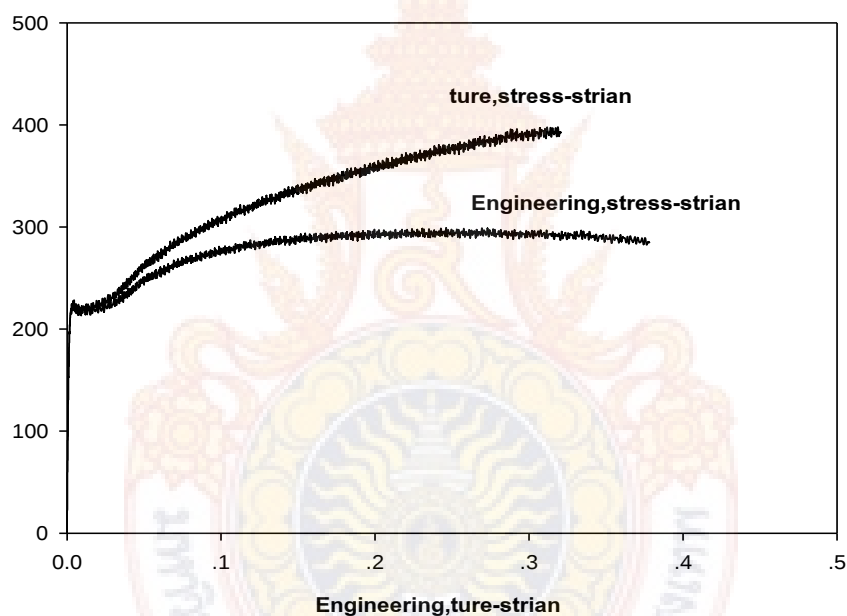
ภาพที่ 3.3 การบันทึกข้อมูลการทดสอบการดึงจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.1.2. ทดสอบหาสมบัติเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain-Hardening Exponent, n -values) และสัมประสิทธิ์ความต้านแรง (Strength Coefficient, K) ของเหล็กแผ่นรีดเย็น ตามวิธีทดสอบ ASTM E 646-91 vol.03.01.(1993)

- 1) วัดความกว้างความหนาของชิ้นทดสอบช่วงระยะยึด (Gage Length)
- 2) จับชิ้นงานทดสอบแรงดึงบันทึกค่าแรงที่กระทำและระยะที่เปลี่ยนแปลงช่วงที่หนึ่ง
- 3) คำนวณหาความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress, S) เท่ากับแรงกระทำช่วงที่หนึ่งต่อขนาดพื้นที่หน้าตัด

- 4) คำนวณหาความเครียดวิศวกรรม (Engineering Strain, ϵ)
- 5) คำนวณหาความเค้นจริง (True Stress) = $S \times (1 + \epsilon)$
- 6) คำนวณหาความเครียดจริง (True Strain) = $\ln(1 + \epsilon)$
- 7) คำนวณหา y หรือ Log True Stress

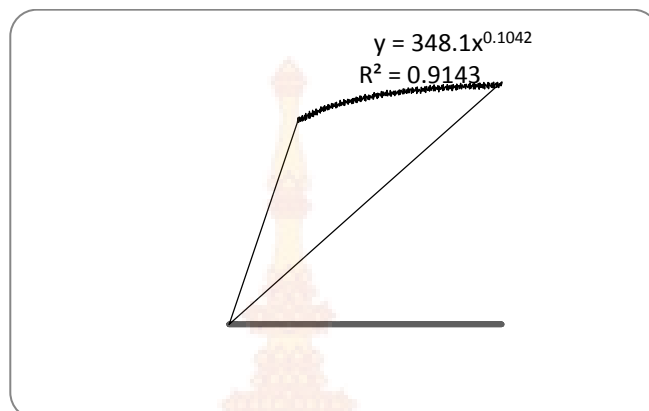
Engineering, true-stress (MPa)



ภาพที่ 3.4 แผนภาพความเค้น-ความเครียดวิศวกรรมและ ความเค้น-ความเครียดจริงของ เหล็กกรีดเย็น หนา 1 มิลลิเมตร

- 8) คำนวณหา x หรือ Log True Stress
- 9) คำนวณหา y^2
- 10) คำนวณหา x^2
- 11) คำนวณหา xy

12) คำนวณค่าจากการบันทึก 2.2-2.11 ทุกเปลี่ยนแปลงระยะยึดในช่วง Gage Length ให้จำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงระยะยึดเป็น N หาผลรวมทั้งหมด $\sum y, \sum x, \sum y^2, \sum x^2, \sum xy$



ภาพที่ 3.5 หาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรงและเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดใช้แบบสมการกำลัง (Power Function)

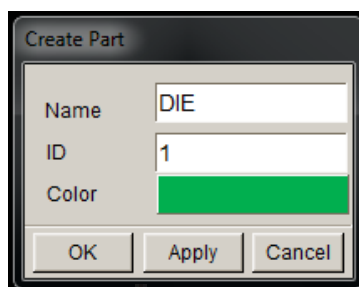
ตารางที่ 3.1 สมบัติเชิงกลแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCD ความหนา 1.0 มิลลิเมตร

ชนิดของวัสดุ	เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด(n)	สัมประสิทธิ์ความต้านแรง(K)	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r)			
			R_0	R_{45}	R_{90}	$\bar{R}$
SPCD	0.14	366	1.301	1.365	1.468	1.378

3.1.3. การจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปของงานวิจัยนี้ ใช้โปรแกรม Dyna Form 5.6 จำลองการขึ้นรูปของเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC , SPCD และ SPCE มีขั้นตอนดังนี้

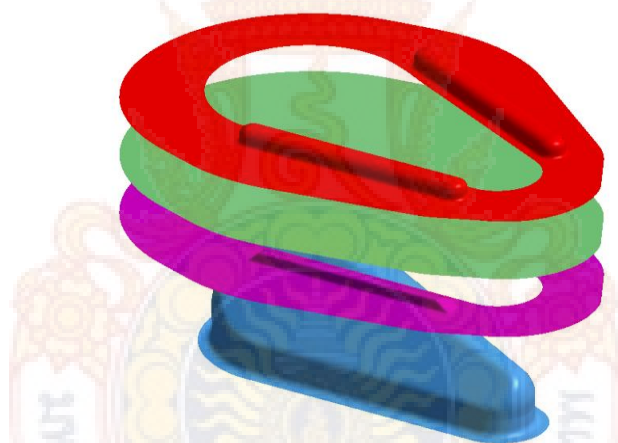
- 1 ก่อนการประมวลผล (Pre – processing)
- 2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis)
- 3 แสดงผลลัพธ์จากการประมวลผล (Post - Processing)

3.1.4 ก่อนการประมวลผล (Pre – processing) มีขั้นตอนดังนี้



ภาพที่ 3.6 กำหนดชื่อของเครื่องมือ

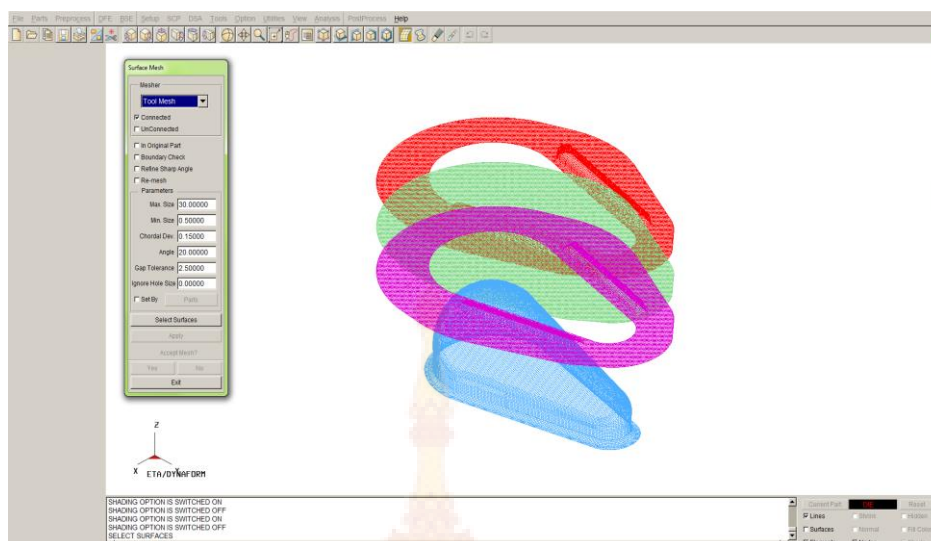
1) ขั้นตอนการกำหนดชื่อของเครื่องมือเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 3.6 จากเมนูบาร์ เลือกเมนู Part โดยเลือกฟังก์ชัน Create กำหนดชื่อ Die , Punch, Bender และ Blank จากนั้นกำหนดสีเพื่อแทนชนิดของเครื่องมือและชิ้นงาน โดยที่มี Drawbead ติดอยู่กับ Bender



ภาพที่ 3.7 ขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนเครื่องมือและชิ้นงาน

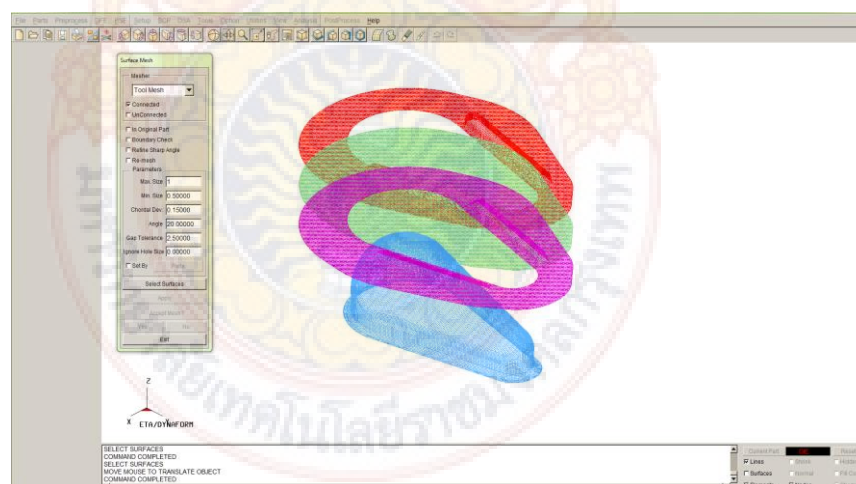
2) การสร้างเครื่องมือและชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.7 สร้างจาก CAD - file โดยใช้โปรแกรม CATIA V5 R20

3) การสร้างผิวสำหรับเครื่องมือและชิ้นงาน เนื่องจากการขึ้นรูปเป็นแบบไม่สมมาตร จึงวิเคราะห์การขึ้นรูปตลอดทั้งชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.8



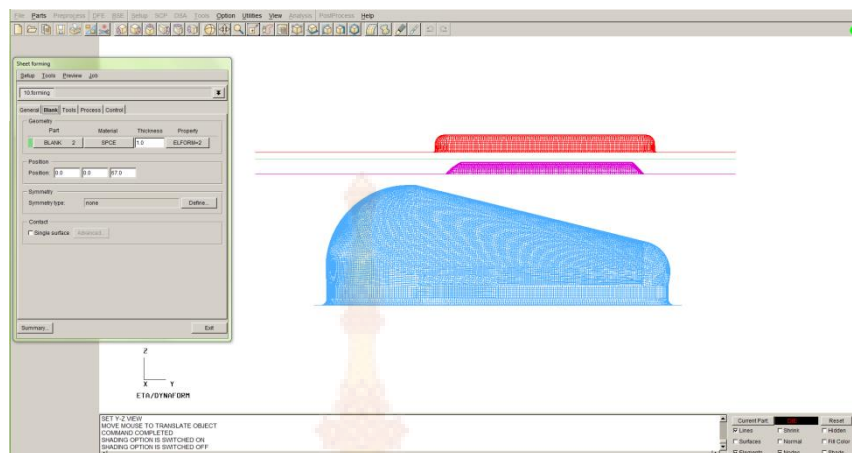
ภาพที่ 3.8 การสร้างผิวสำหรับเครื่องมือและชิ้นงาน

4) กำหนด Part mesh ดังภาพที่ 3.9 จากเมนูบาร์ เลือกเมนู BSE เลือกฟังก์ชัน Preparation คลิกไอคอน Part mesh กำหนดขนาดเอลิเมนต์ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร และคลิกปุ่ม Select Surface



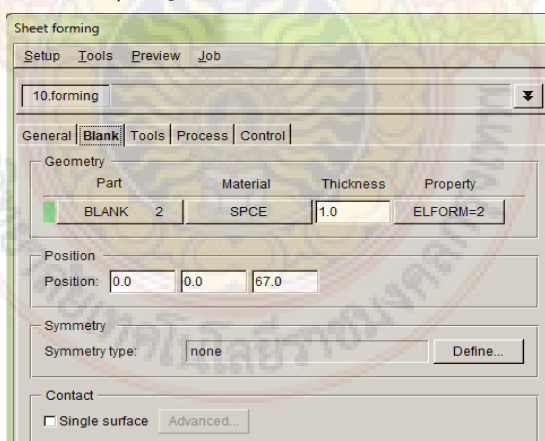
ภาพที่ 3.9 การสร้างพื้นผิวเครื่องมือและชิ้นงาน

3.1.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis) มีขั้นตอนดังนี้



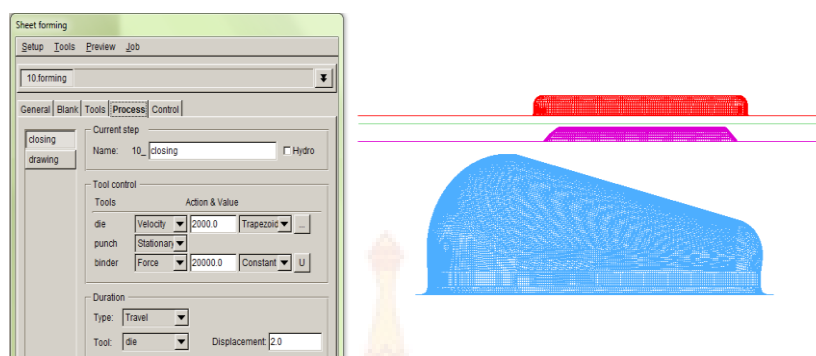
ภาพที่ 3.10 กำหนดชนิดการขึ้นรูป

กำหนดค่าของ Simulation Type เป็นชนิด Sheet Forming ดังภาพที่ 3.10 จากเมนูบาร์ เลือกเมนู Setup เลือกฟังก์ชัน Auto Setup กำหนดความหนาของชิ้นงาน 1 มิลลิเมตร กำหนดชนิดของการขึ้นรูปแบบ Crash form กำหนด Blank surface แบบ Top ซึ่งการกำหนดชนิดการขึ้นรูปขึ้นกับลักษณะของงานที่วิเคราะห์ โดยแบ่งได้ดังนี้ แบบ Single action แบบ Double action แบบ Triple action แบบ Springback

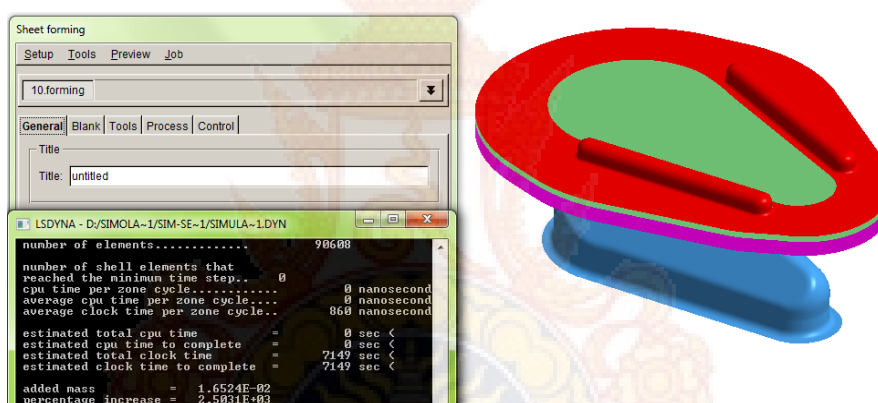


ภาพที่ 3.11 กำหนดชนิดวัสดุของชิ้นงาน

ภาพที่ 3.11 เป็นการกำหนดชนิดของวัสดุ คลิกไอคอน Blank กำหนดวัสดุ คลิกไอคอน Material เลือกเกรดวัสดุเหล็กเกรด SPCE



ภาพที่ 3.12 เครื่องมือและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการขึ้นรูป

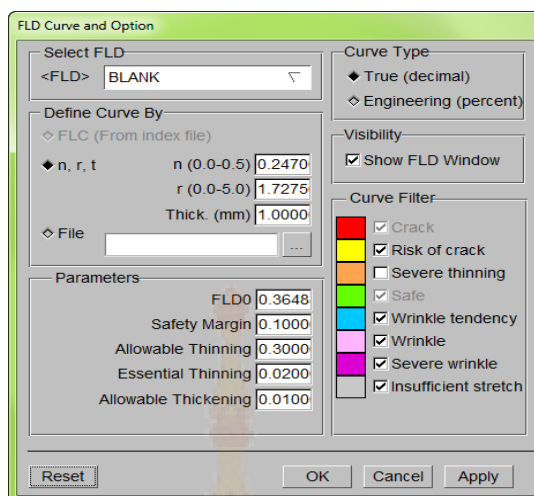


ภาพที่ 3.13 การประมวลผลของโปรแกรม Dyna Form 5.6

ภาพที่ 3.12 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตการขึ้นรูป (Boundary Condition) ประมวลผลการจำลองขึ้นรูปชิ้นงาน (Process) กำหนดระยะเคลื่อนที่ของพื้นที่เท่ากับ 52 มิลลิเมตร ความเร็วของการเคลื่อนที่ Die กับ Bender เท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อวินาที กำหนด Punch ไม่เคลื่อนที่ ภาพที่ 3.13 เป็นการประมวลผล ซึ่งก่อนการประมวลผลต้องตรวจสอบความถูกต้องของการเคลื่อนที่ ให้คลิก Preview ดูการเคลื่อนที่ จากนั้นเลือก Job Submitter

3.1.6 แสดงผลลัพธ์จากการประมวลผล (Post - Processing)

ประมวลผลการจำลองขึ้นรูปชิ้นงาน เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับ Geometry กำหนดค่าสมบัติของวัสดุ กำหนดเครื่องมือ (Tools) จากนั้นจึงจำลองการขึ้นรูปเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง และทำการประมวลผลต่อไป



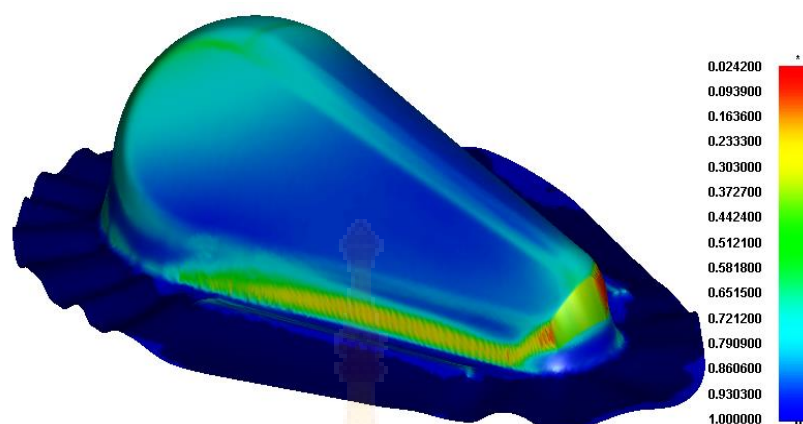
ภาพที่ 3.14 การกำหนดค่าสมบัติของวัสดุในโปรแกรม Dyna Form 5.6

ภาพที่ 3.14 การนำค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด และค่าอัตราส่วนความเครียดพลาสติก จากการทดสอบการดึง เพื่อให้โปรแกรม Dyna Form 5.6 สร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป



ภาพที่ 3.15 ค่าความเครียดวิเคราะห์จากโปรแกรม Dyna Form 5.6

ภาพที่ 3.15 แสดงผลลัพธ์การประมวลผล (Post-process) หลังจากโปรแกรม Dyna Form 5.6 ทำการวิเคราะห์ประมวลผล นำผลลัพธ์จากค่าหนา เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองขึ้นรูปจริง จากรูปภาพบริเวณพื้นที่สีเขียวคือบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นสภาวะยืดตรง สภาวะดิ่งและเส้นปลอดภัยในการขึ้นรูป พื้นที่สีน้ำเงิน คือบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นสภาวะดิ่ง และสภาวะเฉือนอย่างเดียวยรูป ถ้าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณใดมีค่าความเครียดหลังขึ้นรูปตกอยู่ในพื้นที่นี้ แสดงให้เห็นว่าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณนั้นมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยยับหลังขึ้นรูป พื้นที่สีม่วงคือบริเวณที่อยู่ใต้เส้นสภาวะเฉือนอย่างเดียวยรูป ถ้าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณใดมีค่าความเครียดหลังขึ้นรูปตกอยู่ในพื้นที่นี้ แสดงให้เห็นว่าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณนั้นจะเกิดรอยยับหลังขึ้นรูป



ภาพที่ 3.16 ค่าความหนาวิเคราะห้จากโปรแกรม Dyna Form 5.6

ภาพที่ 3.16 แสดงถึงตำแหน่งของความหนาของชิ้นงาน (Thickness) โดยแสดงค่าความหนาตามสีที่ปรากฏบนชิ้นงาน เพื่อเปรียบเทียบกับค่าทดลองชิ้นรูปจริง

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในทดสอบโดยใช้เครื่องปั๊มโลหะของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการที่มีขนาด 80 ตัน แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปสีกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร และเครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC automatic machine) ใช้ในการสร้างดรอป

3.2.1. เครื่องปั๊มโลหะที่มีขนาด 80 ตัน ดังแสดงในภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.17 เครื่องปั๊มโลหะขนาด 80 ตัน

3.2.2. แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร ดังแสดงในภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร

3.2.3. เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC automatic machine) ดังแสดงในภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC automatic machine)

3.2.4. การเตรียมแผ่นขึ้นงานทดสอบ

1) เตรียมชิ้นทดสอบ ดังแสดงภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 ชิ้นงานทดลอง

2) ดรอปีดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Haft-Round Drawbead) ดังแสดงใน

ภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 ดรอปีดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Haft-Round Drawbead)

3) ดรอปีดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม (V-Shaped Drawbead) ดังแสดงในภาพที่ 3.22



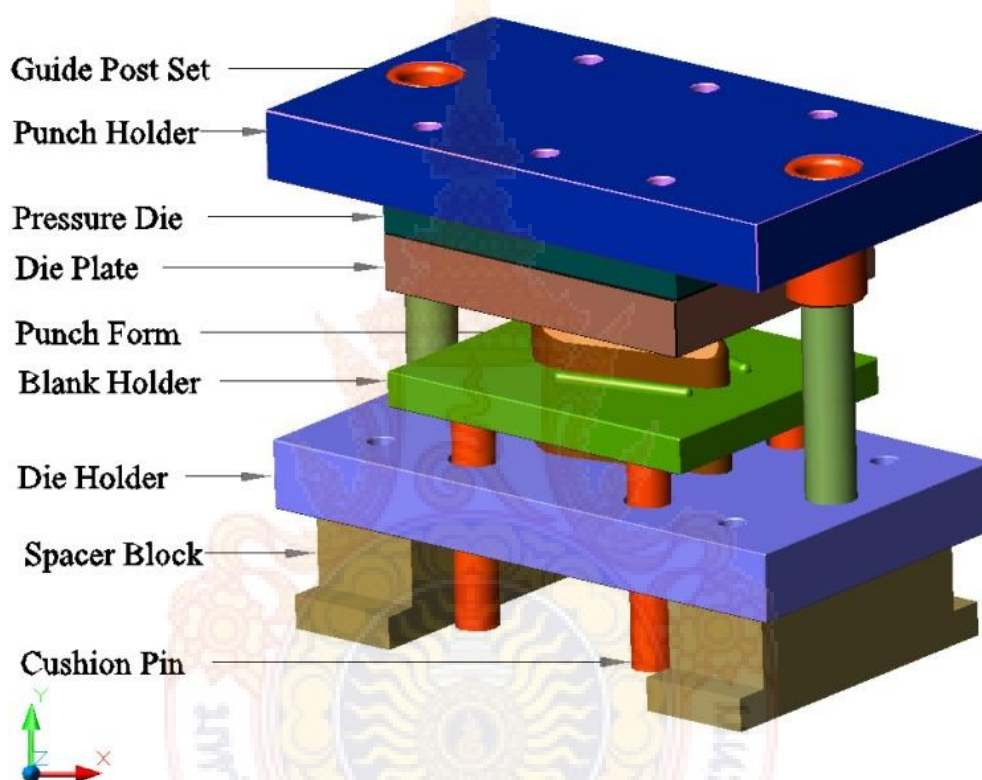
ภาพที่ 3.22 ดรอปีดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม (V-Shaped Drawbead)

4) ดรอปีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapenzifrom Drawbead) ดังภาพที่ 3.23



ภาพที่ 3.23 ดรอปีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapenzifrom Drawbead)

3.2.5. แม่พิมพ์และการติดตั้ง หลักการทำงานของแม่พิมพ์ชุดตัว (Die holder) ใช้รับยึดกับแท่นปั๊มขึ้นลงและยึดแผ่นรองตาย (Pressure die) และแผ่นตาย (Die holder) จะยึดกันเช่นชุดบน (Upper shore) มีชุดนำการปั๊ม (Guide post) เป็นชุดนำเพื่อความเที่ยงตรงในการปั๊มขึ้นลงและชุดล่าง (Lower shore) จะประกอบด้วยพินช์ (Punch) แผ่นกดยึด (Blank holder) มีหน้าที่ในการกดยึดชิ้นงานโดยส่งถ่ายแรงจากคูล์ชชั่นพิน (Cushion pin) ซึ่งสามารถปรับแรงได้และแผ่นพินช์โฮลเดอร์ (Punch holder) จะจับยึดกับแท่นเครื่องปั๊ม ดังแสดงในภาพที่ 3.24



ภาพที่ 3.24 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ขึ้นรูปลึก [1]

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	35x400	4

3.2.6. แม่พิมพ์พร้อมใช้งานติดตั้งบนเครื่องปั๊ม ดังแสดงในภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.25 แม่พิมพ์พร้อมใช้งาน

3.2.7. แรงกดขึ้นงาน (Blank Holder Force) จากการคำนวณแรงขึ้นรูปลึงก์ ทำการศึกษา โดยเทียบเป็นขนาดของแรงกดที่ระดับ 30 % , 50 % และ 70 % ของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปได้ดังนี้

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

$$\text{แรงกดขึ้นงานที่ 30\%} = \frac{30 \times 104.84}{100} = 31.45 \text{ kN}$$

$$\text{แรงกดขึ้นงานที่ 50\%} = \frac{50 \times 104.84}{100} = 52.42 \text{ kN}$$

$$\text{แรงกดขึ้นงานที่ 70\%} = \frac{70 \times 104.84}{100} = 73.38 \text{ kN}$$

3.2.8. สารหล่อลื่น [1] สารหล่อลื่น DRAW 359H ใช้ในงานลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้า ง่ายในการทำความสะดวกหลังจากใช้งาน การนำไปใช้งานจะใช้เฉพาะสารหล่อลื่นโดยตรง หรือผสมกับน้ำมันแร่ก็ได้ โดยใช้ฟองน้ำ แปรง ลูกกลิ้งฉีดพ่น ใช้ในงานลากขึ้นรูปที่ยากสำหรับวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าและเหล็กกล้าไร้สนิมคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ความหนืดที่ 100 องศาฟาเรนไฮต์

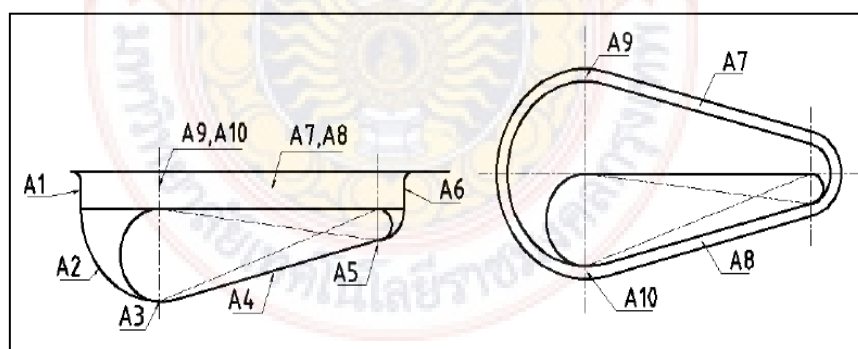
หรือ 38 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1100 ม.ม.2/วินาทีเป็นสีดำ สีนํ้าตาลเหลือง สีอำพันความถ่วงจำเพาะ 1.28

3.2.9. อุปกรณ์บันทึกข้อมูลเป็นอุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ (Mini data logger) เป็นอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล พื้นฐานของระบบ (data logger) ประกอบไปด้วย scanner หรือ multiplexer digital-voltmeter และตัวบันทึกข้อมูล ซึ่งรับ Input ที่เป็นระบบ analog จาก sensor แล้วทำการเปลี่ยนข้อมูลเป็นระบบ digital และเก็บข้อมูลไว้ในหน่วยความจำเพื่อการนำไปใช้ต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 3.26



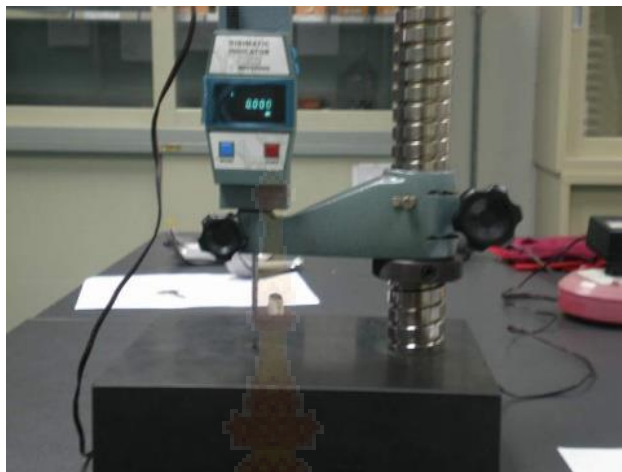
ภาพที่ 3.26 (ก) อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน (ข) อุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ

3.2.10. บริเวณจุดที่ตรวจวัดความเครียดแนวความหนา



ภาพที่ 3.27 บริเวณจุดที่ตรวจวัดความเครียดบนชิ้นงาน [1]

3.2.11. อุปกรณ์วัดความหนาขึ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 3.28



ภาพที่ 3.28 เครื่องวัดความหนาขึ้นงาน

3.2.12. ตารางบันทึกผลการทดลอง เป็นตารางบันทึกแรงของการลากขึ้นรูปต่อสัดส่วนของแรงกด ในการใช้ดรอปปิดแต่ละชนิด

ตารางที่ 3.3 ตารางบันทึกแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป

ครั้งที่	แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปของรูปทรงดรอปปิด (KN)		
	ครึ่งวงกลม	สามเหลี่ยม	สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า
1 แผ่นแบลงค์	X	X	X
2 แผ่นแบลงค์	X	X	X
3 แผ่นแบลงค์	X	X	X
เฉลี่ย	X	X	X

ตารางที่ 3.4 ความเครียดในแนวความหนาของชิ้นงานในแต่ละจุดตรวจวัด

จุดตรวจวัด ความหนา	รูปทรงดรอปีด					
	ครึ่งวงกลม		หน้าตัดสามเหลี่ยม		สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า	
	ความหนา ชิ้นงาน	ค่า ความเครียด	ความหนา ชิ้นงาน	ค่า ความเครียด	ความหนา ชิ้นงาน	ค่า ความเครียด
A1	X	X	X	X	X	X
A2	X	X	X	X	X	X
A3	X	X	X	X	X	X
A4	X	X	X	X	X	X
A5	X	X	X	X	X	X
A6	X	X	X	X	X	X
A7	X	X	X	X	X	X
A8	X	X	X	X	X	X
A9	X	X	X	X	X	X
A10	X	X	X	X	X	X

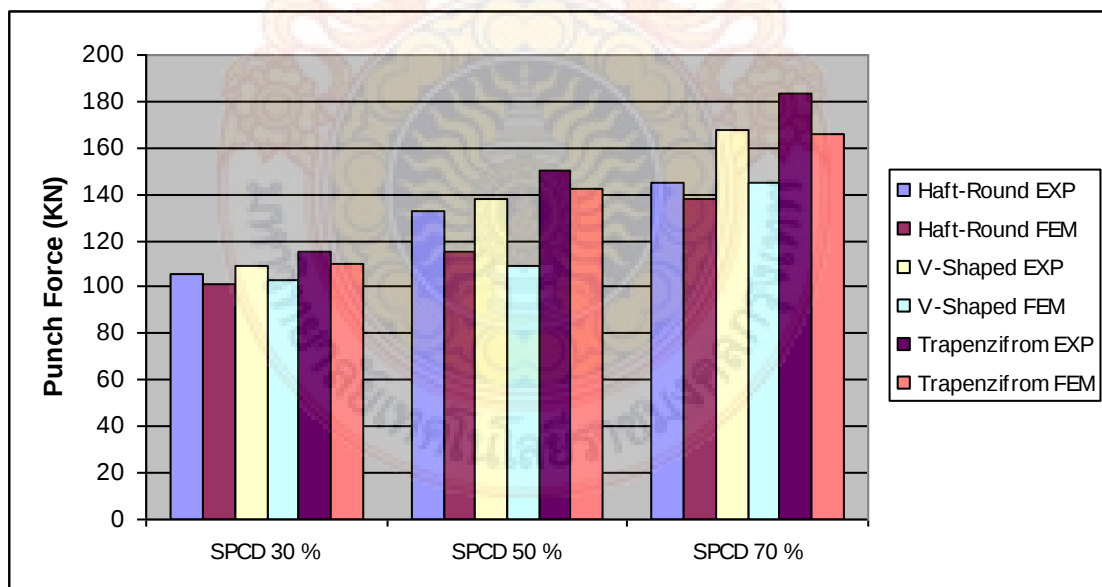
บทที่ 4

ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปทรงดรอปิดที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นรูปทรงไม่สมมาตร โดยการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ และนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานจริง เพื่อนำไปหาค่าความเครียดแนวความหนาของชิ้นงานในแต่ละจุดที่เกิดขึ้น เมื่อทำการจำลองในแต่ละกรณี รูปทรงดรอปิดต่างกันพบว่ามียุทธธรรย่น แรงในการขึ้นรูป และการกระจายตัวของความหนาชิ้นงาน การศึกษาเป็นการเปรียบเทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram :FLD) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่จะเกิดรย่นกับชิ้นงาน ในแต่ละรูปทรงดรอปิด มีผลการวิจัยดังนี้

4.1 เปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูป

เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปิดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30 ,50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCD



ภาพที่ 4.1 เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปิดแต่ละชนิด

ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30 ,50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCD

จากรูปที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรในการใช้ดรอปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม ดรอปิดหน้าตัดรูปตัววี และ ดรอปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ที่แรงกดชิ้นงาน 30 , 50 และ 70 เพอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCD พบว่า

4.1.1 แรงกดชิ้นงาน 30 เพอร์เซ็นต์ ดรอปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม ให้แรงกดสูงสุดที่ 106 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเฉลี่ย 5 เพอร์เซ็นต์ ดรอปิดหน้าตัดรูปตัววี ให้แรงกดสูงสุดที่ 109 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเฉลี่ย 6 เพอร์เซ็นต์ และดรอปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ให้แรงกดสูงสุดที่ 115 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเฉลี่ย 5 เพอร์เซ็นต์

4.1.2 แรงกดชิ้นงาน 50 เพอร์เซ็นต์ ดรอปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม ให้แรงกดสูงสุดที่ 113 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเฉลี่ย 18 เพอร์เซ็นต์ ดรอปิดหน้าตัดรูปตัววี ให้แรงกดสูงสุดที่ 138 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเฉลี่ย 29 เพอร์เซ็นต์ และดรอปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ให้แรงกดสูงสุดที่ 150 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเฉลี่ย 8 เพอร์เซ็นต์

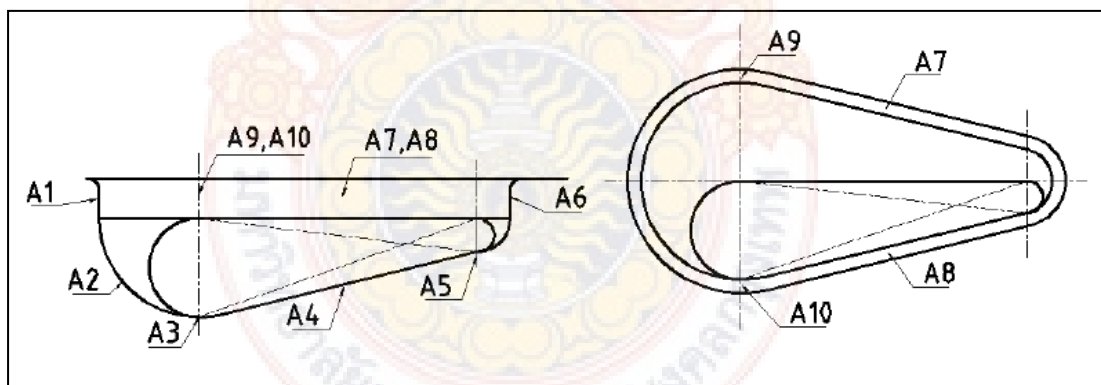
4.1.3 แรงกดชิ้นงาน 70 เพอร์เซ็นต์ ดรอปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม ให้แรงกดสูงสุดที่ 145 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเฉลี่ย 7 เพอร์เซ็นต์ ดรอปิดหน้าตัดรูปตัววี ให้แรงกดสูงสุดที่ 168 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเฉลี่ย 23 เพอร์เซ็นต์ และดรอปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ให้แรงกดสูงสุดที่ 183 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเฉลี่ย 17 เพอร์เซ็นต์

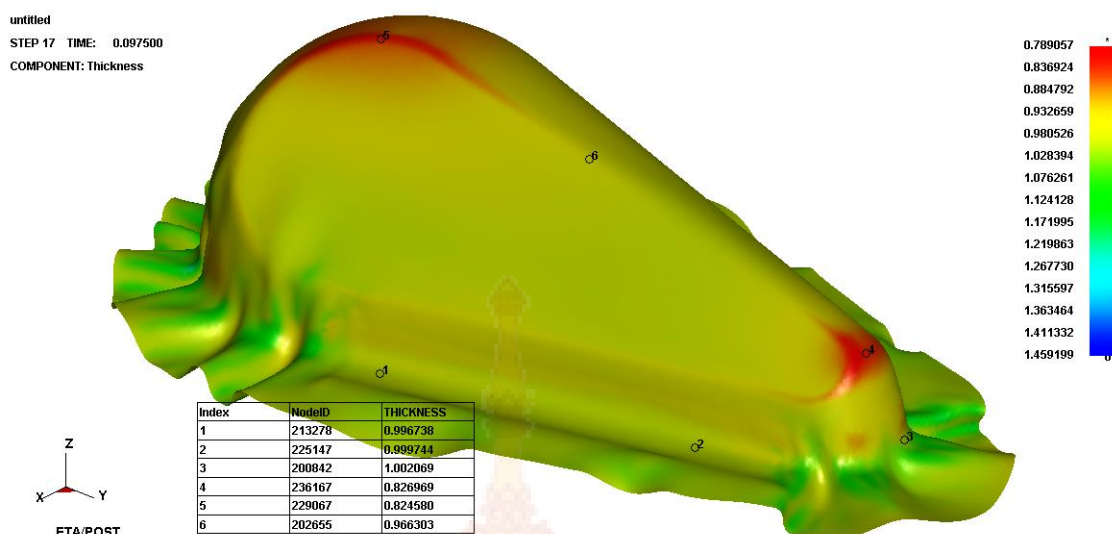
ผลการทดลอง การใช้แรงกดชิ้นงาน 30 เพอร์เซ็นต์ ไม่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปเพราะเมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานเกิดรอยยับขอบปีกและผนังด้านข้างชิ้นงาน ที่แรงกดชิ้นงาน 50 เพอร์เซ็นต์ เหมาะสมกับดรอปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม เพราะใช้แรงในการขึ้นรูปไม่สูงมากและเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาไม่มากทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพมากที่สุด และใช้แรงกดชิ้นงานที่ 70 เพอร์เซ็นต์ แรงกดชิ้นงานสูงทำให้ชิ้นงานไหลตัวได้น้อยจะมีแรงลากขึ้นรูปสูงและทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดของดรอปิดทุกรูปทรง ผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกัน

สรุปกราฟเปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ความลึกในการขึ้นรูป 52 มม. ที่แรงกดขึ้นงาน 30 ,50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ในการใช้ดรอปิตแต่ละชนิด พบว่าแรงลากขึ้นรูปในการใช้ ดรอปิตแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า มีระดับแรงขึ้นรูปสูงสุด เพราะว่าดรอปิตมีหน้าสัมผัสกับโลหะมากที่สุดและรัศมีของดรอปิตมีน้อย ทำให้วัสดุไหลตัวได้น้อยส่งผลให้แรงขึ้นรูปมีค่าสูง รองลงมาเป็นการใช้ดรอปิตหน้าตัดรูปตัววี เพราะรูปทรงของดรอปิตมีลักษณะเรียวและรัศมีน้อยเมื่อมีแรงกดขึ้นงานทำให้วัสดุเกิดการดัดมากเกินไปวัสดุไหลตัวได้น้อย ทำให้ความต้องการในการใช้แรงขึ้นรูปสูง และดรอปิตแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม มีระดับแรงขึ้นรูปต่ำสุดเนื่องจากมีรัศมีมากทำให้ความเสียหายผิวชิ้นงานที่สัมผัสกับแผ่นกั้นงาน กับตาย (Die) มีค่าน้อยทำวัสดุไหลตัวได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับดรอปิตชนิดอื่นทำให้แรงกดที่พื้นซ์มีค่าต่ำสุด

4.2 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา

เปรียบเทียบผลการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปิตแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดขึ้นงาน 30 ,50 และ 70 เปอร์เซ็นต์โดยวัดความเครียดแนวความหนา ของชิ้นงานในแต่ละจุด แสดงบริเวณจุดที่ตรวจวัดความหนาบนชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 4.2

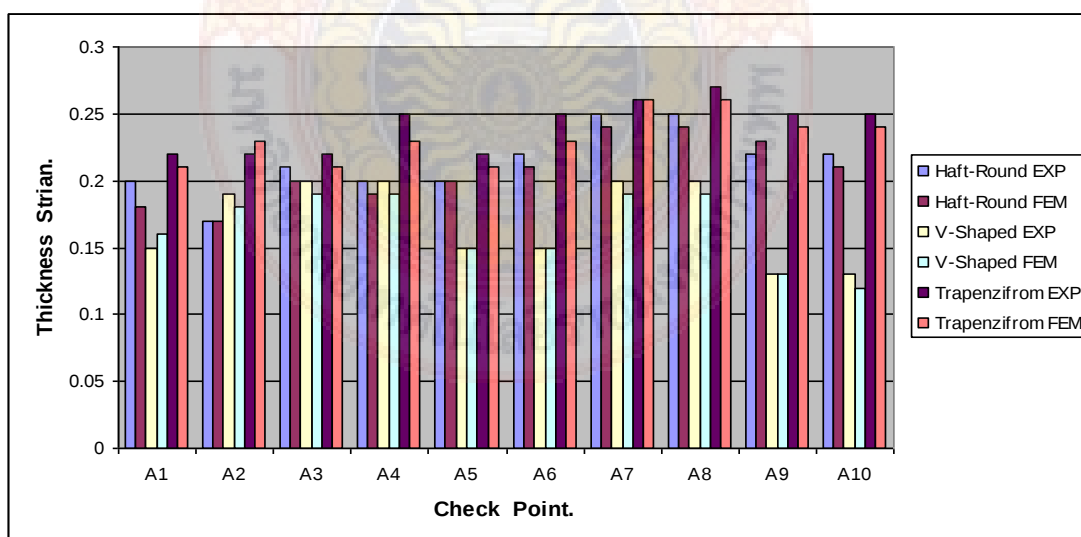




ภาพที่ 4.2 บริเวณจุดที่ตรวจวัดความหนาบนชิ้นงาน [1]

เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30 ,50 และ 70 เปอร์เซ็นต์

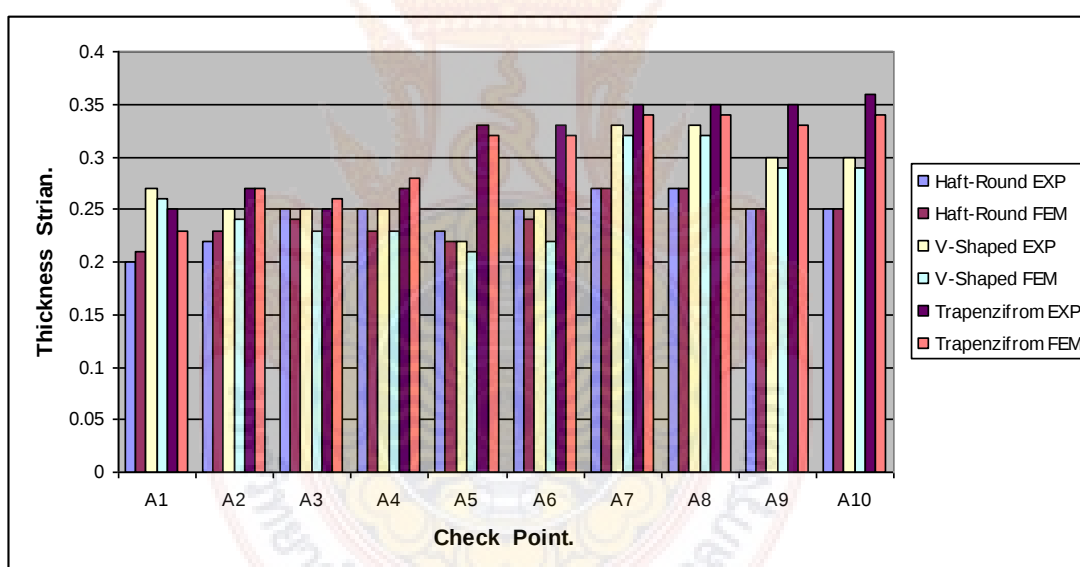
4.2.1 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCD



ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCD

จากการทดลองการขึ้นรูปจะพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อ ความหนาที่ลดลง ระหว่างการขึ้นรูปคือ แรงกดของแผ่นกดขึ้นงานและชนิดดรอปีด จากภาพที่ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนา มีค่าสูงสุดเท่ากับ 27 % ที่จุด A7 และ A8 ของหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ส่วนดรอปีดแบบหน้าตัดรูปตัววีเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุดเท่ากับ 20 % ที่จุด A7 และ A8 และดรอปีดหน้าตัดครึ่งวงกลมเปลี่ยนแปลงความหนาสูงสุดเท่ากับ 25 % ที่แรงกดขึ้นงาน 30 % จากรูปที่ 4.6 กราฟแสดงเปรียบเทียบดรอปีดต่างชนิดกัน จะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนรูปทรงของดรอปีดจากดรอปีดแบบหน้าตัดรูปตัววีและหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า และดรอปีดหน้าตัดครึ่งวงกลม จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการบางลงของความหนาสูงสุดเกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อเปลี่ยนรูปทรงของดรอปีดจากผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าการเปลี่ยนแปลงความหนา มีค่าใกล้เคียงกันทุกตำแหน่ง มีความแตกต่างเฉลี่ย 21 %

4.2.2. เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปีดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดขึ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCD

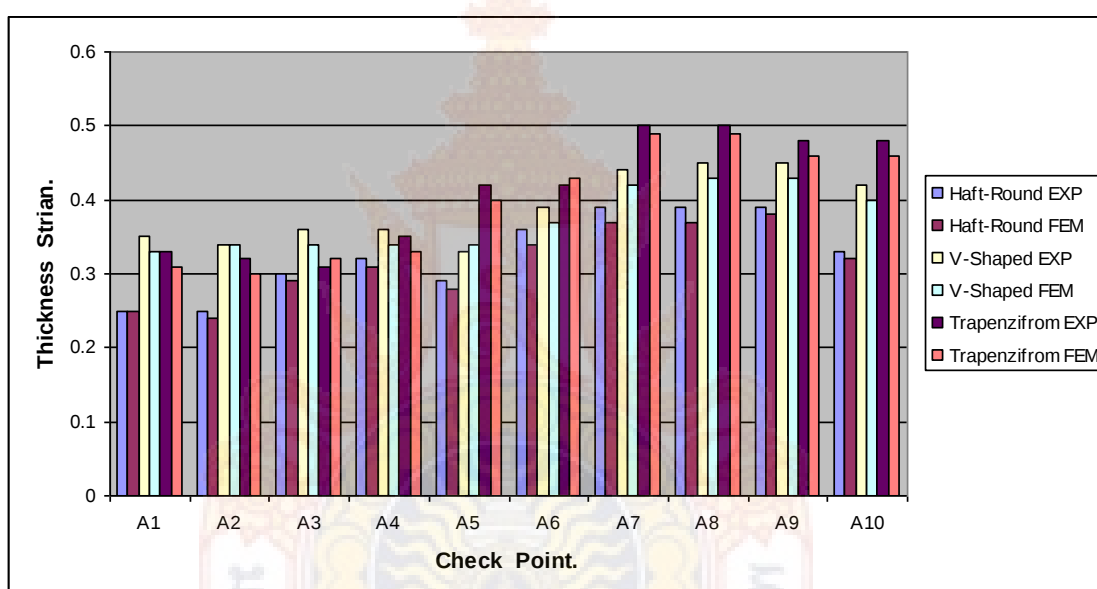


ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปีดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดขึ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCD

จากกราฟผลทดลองการขึ้นรูป ภาพที่ 4.5 พบว่าเมื่อเพิ่มแรงกดขึ้นงานจาก 30 % เป็น 50% ในการขึ้นรูปโดยใช้ดรอปีดที่มีรูปทรงแตกต่างกัน พบว่าความหนา มีค่าแตกต่างกัน โดยที่ดรอปีดรูปทรงหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่ามีการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุดเฉลี่ย 36 % ที่จุด A10 รองลงมาเป็นดรอปีดหน้าตัดรูปตัววี

มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุดเฉลี่ย 33 % ที่จุดวัดความหนาเดียวกัน และดรอปปิดหน้าตัดครึ่งวงกลมเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาต่ำสุดเฉลี่ย 27 % ที่แรงกดขึ้นงาน 50 % พบว่า เมื่อเปลี่ยนรูปทรงของดรอปปิด จากดรอปปิดแบบหน้าตัดรูปตัววีและหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า และดรอปปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการบางลงของความหนาเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนรูปทรงของดรอปปิด จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า การเปลี่ยนแปลงความหนา มีค่าใกล้เคียงกันทุกตำแหน่ง มีความแตกต่างเฉลี่ย 25 %

4.2.3 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปปิดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดขึ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCD



ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปปิดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดขึ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCD

จากกราฟผลทดลองการขึ้นรูป ภาพที่ 4.11 พบว่าเมื่อเพิ่มแรงกดขึ้นงาน 70 % ในการขึ้นรูปโดยใช้ดรอปปิดที่มีรูปทรงแตกต่างกัน พบว่าความเครียดแนวความหนา มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ดรอปปิดรูปทรงหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุดเฉลี่ย 50 % ที่จุด A7, A8 รองลงมาเป็นดรอปปิดหน้าตัดรูปตัววี มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุดเฉลี่ย 45 % ที่จุดวัดความหนาเดียวกัน และดรอปปิดหน้าตัดครึ่งวงกลมเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาต่ำสุดเฉลี่ย 38 % ที่แรงกดขึ้นงาน 50 % จากภาพที่ 4.7 กราฟแสดง

เปรียบเทียบรูปทรงดรอปิด จะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนรูปทรงของดรอปิด จากดรอปิดแบบหน้าตัดรูปตัววีและหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า และดรอปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการบางลงของความหนาเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนรูปทรงของดรอปิด จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า การเปลี่ยนแปลงความหนามีค่าใกล้เคียงกันทุกตำแหน่ง มีความแตกต่างเฉลี่ย 30 %

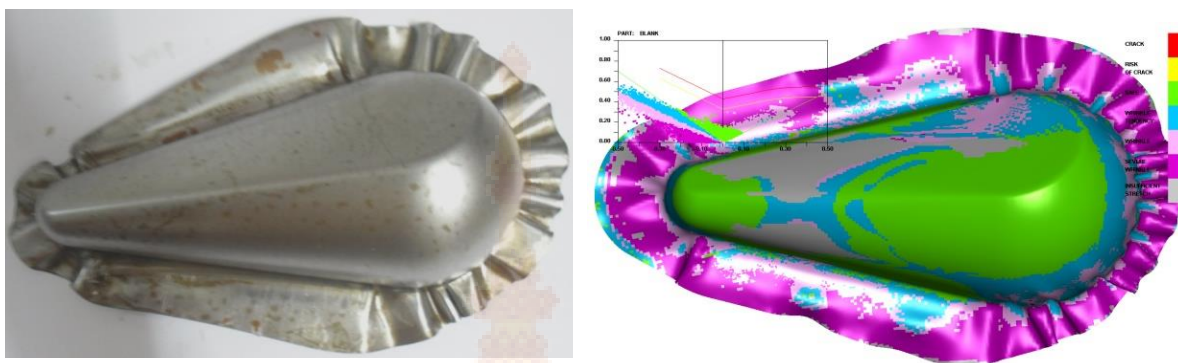
4.2.4 สรุปการเปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูป

1) จากผลการทดลองการขึ้นรูป พบว่าแรงกดขึ้นงาน 30 เปอร์เซนต์ ของดรอปิดทั้ง 3 ชนิด คือ ดรอปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม หน้าตัดสามเหลี่ยม หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า วัสดุไหลตัวได้มากเกินไปเนื่องจากแรงกดขึ้นงานน้อยเกินไปส่งผลให้เกิดรอยยับบริเวณปีกของขึ้นงาน แต่จากซึ่งผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ที่แรงกดขึ้นงาน 30 เปอร์เซนต์ของดรอปิดทั้ง 3 ชนิดวัสดุมีความหนาและตำแหน่งของรอยยับใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริง

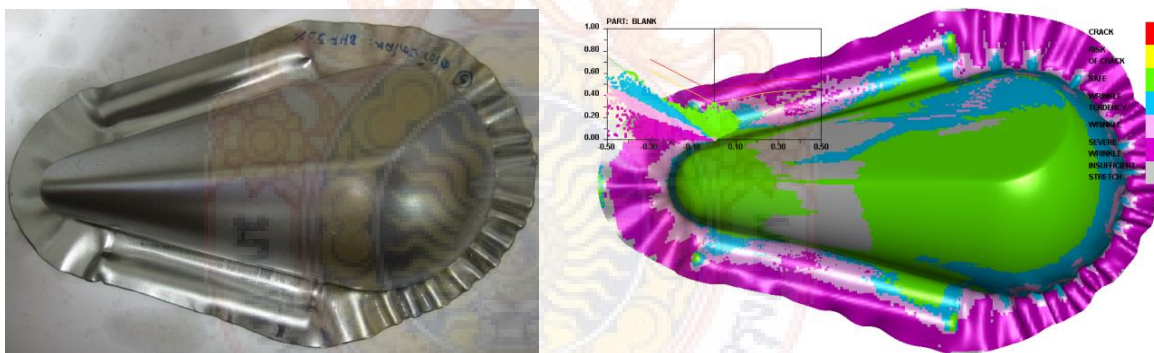
2) คุณภาพขึ้นงานในการใช้ดรอปิดแต่ละชนิดที่แรงกดขึ้นงาน 50 % ขึ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปมีแรงลากขึ้นรูปสูงกว่า 30 % ในการใช้ดรอปิดทั้ง 3 รูปทรงนั้นยังพบว่าขึ้นงานเกิดรอยยับที่ผนังขึ้นงานและขอบปีกขึ้นงานบ้างเล็กน้อย เนื่องจากแรงกดขึ้นงานมีความเหมาะสมกับการขึ้นรูป แต่ที่ระยะลึกสุดของขึ้นงานบริเวณนี้จะมีขนาดความหนาลดลง จะเห็นได้ว่ามีความเครียดเกิดขึ้นสูงและตรงที่ขึ้นงานที่ใช้ดรอปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า จะทำให้ขึ้นงานง่ายต่อการฉีกขาด แต่ในขณะที่ใช้ดรอปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า นั้นพบว่าขึ้นงานเกิดรอยยับที่ขอบปีกขึ้นงาน ความถี่การเกิดรอยยับมากขึ้นกว่าดรอปิดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม และดรอปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม มีการเกิดรอยยับน้อยที่สุด ซึ่งผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ที่แรงกดขึ้นงาน 50 เปอร์เซนต์ ของดรอปิดและวัสดุทั้ง 3 ชนิดวัสดุมีความหนาและตำแหน่งของรอยยับใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริง

3) คุณภาพขึ้นงานในการใช้ดรอปิดแต่รูปทรงที่แรงกดขึ้นงาน 70 เปอร์เซนต์ ขึ้นงานที่ได้จากการขึ้นในการใช้ดรอปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ดรอปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม และดรอปิดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม พบว่าขึ้นงานเกิดการฉีกขาดบริเวณจุด A7,A8,A9,A10 และ บริเวณกันถ้วย เพราะว่าปริมาณแรงกดขึ้นงานที่สูงกดลงที่ดรอปิดทำให้โลหะไม่สามารถไหลเข้าสู่ช่องคายได้ทำให้เกิดความรุนแรงของการเปลี่ยนรูปวัสดุ เกิดความเค้นสูงสุดทำให้ขึ้นงานเกิดความเสียหาย แต่ไม่เกิดรอยยับที่บริเวณขอบปีกของขึ้นงานเนื่องจากแรงกดของขึ้นงานสูงและแรงลากขึ้นรูปมากจึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของขึ้นงานมากที่สุดด้วย ซึ่งผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกัน

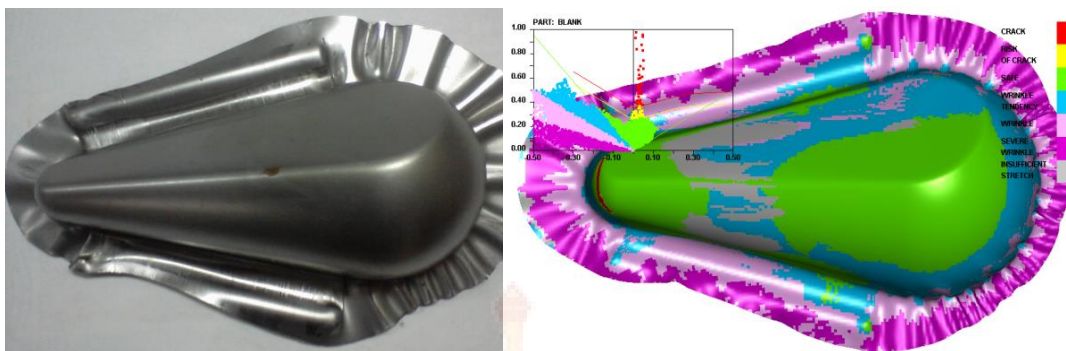
4.2.5 เปรียบเทียบรูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของ
 ดรอปปิดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30,50 และ 70 เพอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCD ดังภาพที่
 4.5 - 4.7



ภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบรูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของ
 ดรอปปิดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30 เพอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCD



ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบรูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของ
 ดรอปปิดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 50 เพอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCD



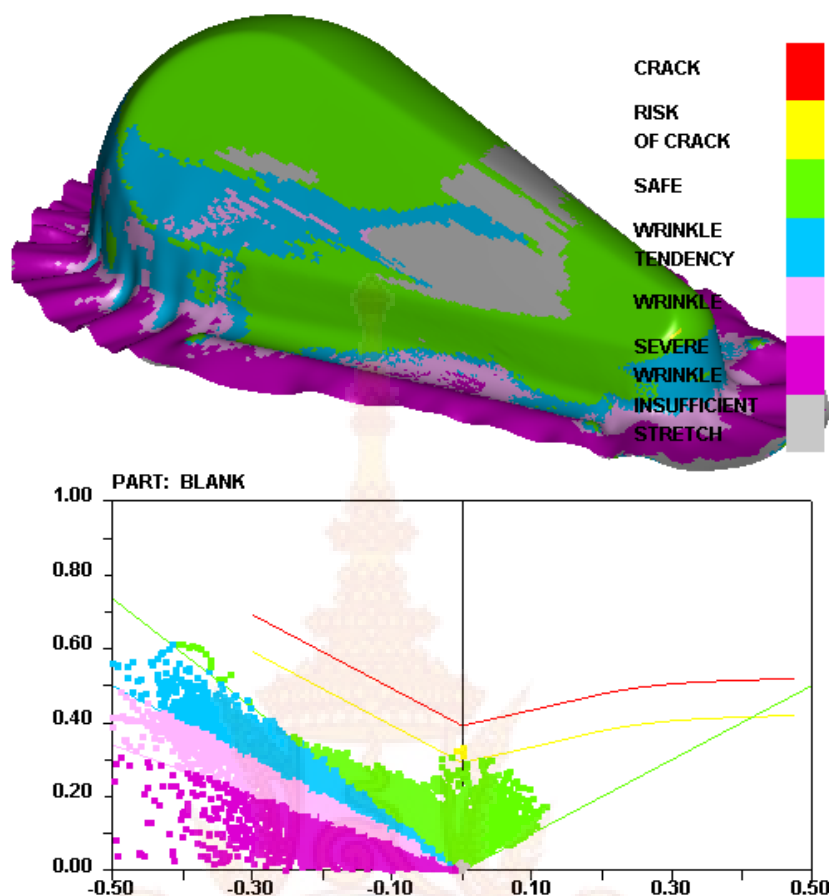
ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบรูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของ
ดรอปปิดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCD

4.3 ศึกษาอิทธิพลรูปทรงของดรอปปิดในกระบวนการขึ้นรูป

หลังจากที่ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับจำลองกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปทรงไม่สมมาตร โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 สรุปได้ว่าการนำดรอปปิดเข้ามาช่วยควบคุมปริมาณวัสดุที่ถูกดึงเข้าไปในแม่พิมพ์ที่มีรูปทรงไม่สมมาตรเพื่อป้องกันการเกิดรอยย่น หรือรอยย่นน้อยที่สุด ในการศึกษาทำได้โดยใช้ ดรอปปิด 3 ชนิด ที่มีรูปทรงต่างกัน ได้แก่ ดรอปปิดหน้าตัดแบบครึ่งวงกลม หน้าตัดรูปตัววีและหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ที่แรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCD ในการเปรียบเทียบผลการขึ้นรูป

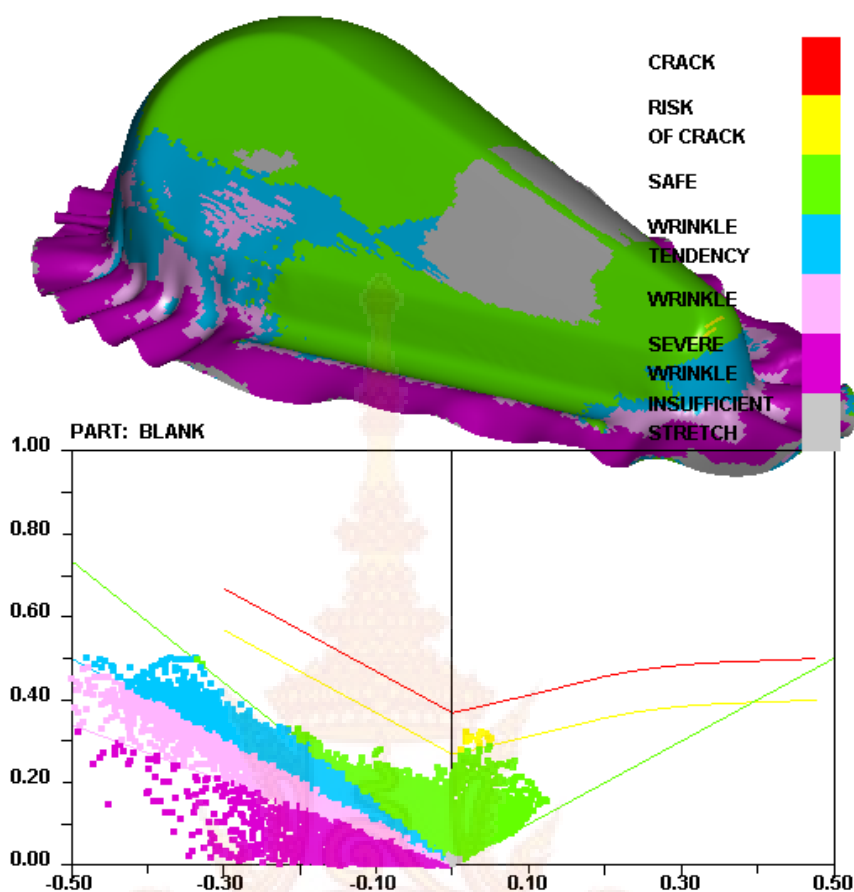
4.3.1 การเปรียบเทียบรอยย่นกับรูปทรงของดรอปปิด

การเปรียบเทียบรอยย่นกับรูปทรงของดรอปปิด แรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCD จากภาพที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบรอยละการเกิดรอยย่นกับรูปทรงของดรอปปิด ซึ่งได้จากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram :FLD) พบว่าเมื่อเปลี่ยนรูปทรงของดรอปปิด ร้อยละของรอยย่นเมื่อเทียบกับจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดนั้นมีค่าเปลี่ยนไป



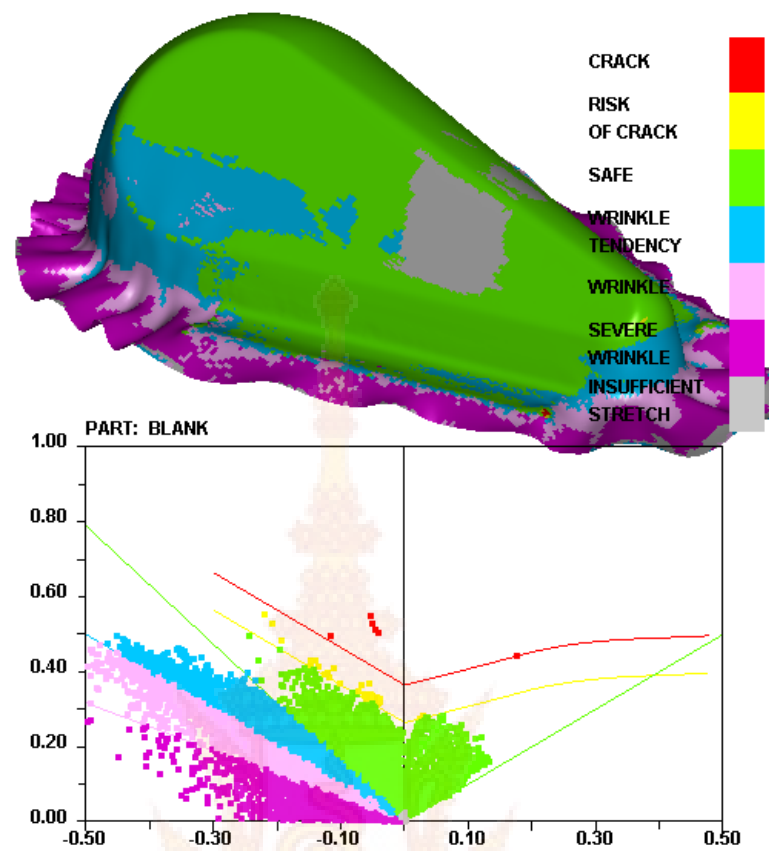
ภาพที่ 4.9 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป กรณีการใช้ดรอปปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม ของเหล็ก SPCD

รูปร่างของดรอปปิดที่ต่างกัน ซึ่งดรอปปิดหน้าตัดแบบครึ่งวงกลม เกิดรอยย่นน้อยที่สุด กล่าวคือเมื่อดรอปปิดสัมผัสกับแผ่นชิ้นงานและมีแรงกดชิ้นงานที่เพียงพอสำหรับการขึ้นรูป เกิดการดรอว์ (Draw) และการดึงยืดขึ้นรูป (Stretching) ที่เพียงพอสำหรับการไหลตัวของวัสดุ เกิดจากปลายโค้งมนของดรอปปิดส่งผลให้ความเค้นอัดรอบแนวแกนลดลง จึงทำให้รอยย่นลดลงดังแสดงในภาพที่ 4.10



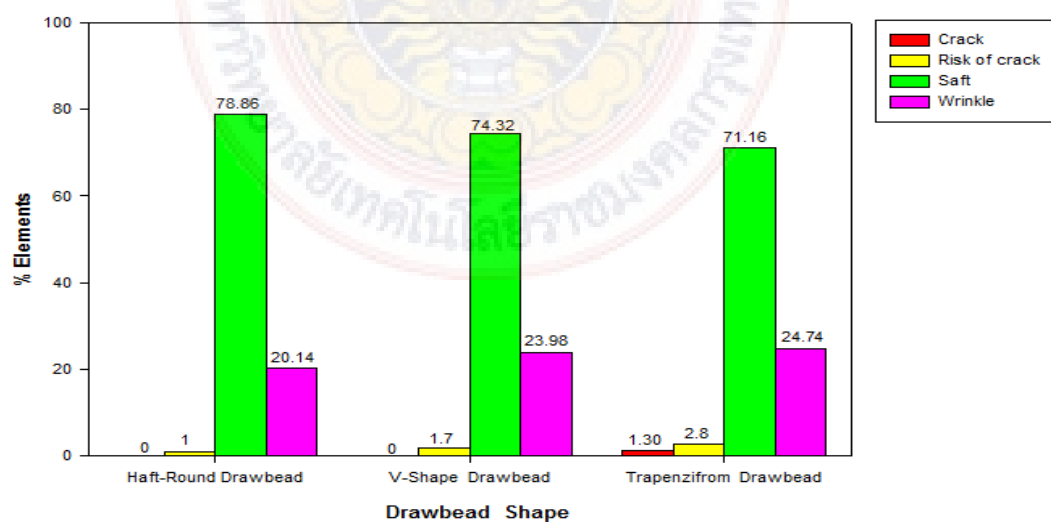
ภาพที่ 4.10 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป กรณีการใช้ดรอปีดหน้ารูปตัววี ของเหล็ก SPCD

ส่วนดรอปีดหน้าตัววีพบว่าเกิดรอยยับมากกว่าดรอปีดหน้าตัวครึ่งวงกลม คือเมื่อมีแรงกดขึ้นงานดรอปีดมีรูปทรงปลายแหลมและรัศมีของดรอปีดน้อยทำให้วัสดุเกิดการดัดมากเกินไปโลหะไหลตัวได้น้อยขึ้นงานเกิดการดึงยืดขึ้นรูปสูง และการดรอปีดลงส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด แต่บริเวณขอบชิ้นงานเกิดความเค้นอัดสูงขึ้นส่งผลให้รอยยับเพิ่มสูงขึ้นภาพที่ 4.11 แสดงแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ใช้ดรอปีดหน้ารูปตัววี และดรอปีดหน้าตัวแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า เกิดรอยยับมากที่สุด ซึ่งแนวโน้มของภาพที่ 4.10 พบว่ารูปทรงของดรอปีดมีอิทธิพลต่อรอยยับที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับทฤษฎี ในหัวข้อที่ 2.5 จากกราฟจะเห็นได้ว่ารูปทรงดรอปีดและแรงกดของแผ่นกดขึ้นงาน นั้นมีผลต่อการเกิดรอยยับ ซึ่งทำให้ปริมาณการดึงยืดขึ้นรูป (Stretching) เพิ่มขึ้น และลดความเค้นกดในแนวเส้นรอบวง (Compressive Stress) ลงได้ จึงทำให้รอยยับลดลง จากผลการทดลองนี้ ยังต้องพิจารณาการเกิดการฉีกขาดด้วย เมื่อเพิ่มแรงกดแผ่นกดขึ้นงาน อาจจะทำให้เกิดการฉีกขาดมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเกิดการดึงยืดขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.11 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป กรณีการใช้ดรอปปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ของเหล็ก

SPCD



ภาพที่ 4.12 แผนภูมิของร้อยละเอลิเมนต์ในแต่ละชนิดของดรอปปิดของเหล็ก SPCD

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการศึกษาอิทธิพลของรูปทรงดรอปีดที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยวิธีการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาผลกระทบในการขึ้นรูปโลหะแผ่นเพื่อประเมินความสามารถในการขึ้นรูปโลหะที่มีรูปทรงไม่สมมาตร เปรียบเทียบการขึ้นรูปขึ้นงานจริงกับการวิเคราะห์จากการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้แรงกดขึ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ 50 เปอร์เซ็นต์ และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของแรงลากขึ้นรูป วัสดุเกรด SPCD สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. แรงกดขึ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ แรงกดไม่เพียงพอสำหรับการขึ้นรูป ทำให้ขึ้นงานเกิดรอยยับบริเวณขอบปีกขึ้นงาน แรงกดขึ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์เป็นแรงที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปโดยใช้ดรอปีดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม ถ้าใช้แรงกดขึ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นงานเกิดการฉีกขาดจะมีความหนาลดลงมากจากผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกัน

2. จากการวิจัยพบว่า รูปทรงของดรอปีดนั้น มีผลต่อ การเกิดรอยยับและ การฉีกขาด โดยวัดเป็นจำนวนเอลิเมนต์ที่เกิดขึ้น พบว่า ดรอปีดหน้าตัดครึ่งวงกลม เกิดรอยยับน้อยที่สุด และ รูปทรงของดรอปีดมีผลต่อการฉีกขาด และรอยยับ ซึ่งเมื่อใช้แรงกดขึ้นงานที่เท่ากัน แรงขึ้นรูปเพิ่มขึ้นตามแรงกดขึ้นงาน และรูปทรงของดรอปีดในส่วนของการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นโลหะนั้น รูปทรงของดรอปีดมีผลต่อการลดลงของการเปลี่ยนแปลงความหนา ซึ่งสามารถทำนายการเกิดการฉีกขาดได้ เมื่อพิจารณา แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram: FLD) จะแสดงถึงเอลิเมนต์ที่เกิดการฉีกขาด และรอยยับ เมื่อเปรียบเทียบรูปทรงของดรอปีดต่างๆ พบว่า ดรอปีดหน้าตัดครึ่งวงกลม เกิดการฉีกขาดและรอยยับน้อยที่สุด

5.2 การอภิปรายผล

จากผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบระหว่างการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าสามารถแสดงถึงพฤติกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่น ที่มีแนวโน้มของผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน ดังนั้นจึงสามารถนำผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จากการจำลองการขึ้นรูป ไปประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบดรอปีดในการขึ้นรูปโลหะแผ่น สำหรับในการใช้ดรอปีดมี

อิทธิพลต่อการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรของเหล็กแผ่นเกรด SPCD โดยเฉพาะการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร การไหลตัวของวัสดุไม่เท่ากันส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนากระจายตัวไม่สม่ำเสมอ จึงได้มีการประยุกต์ใช้ดรอปปิดมาใช้ในการควบคุมการไหลตัวของวัสดุ โดยมีการออกแบบดรอปปิด 3 ลักษณะได้แก่ ดรอปปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม หน้าตัดรูปตัววี และ หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า มาใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานรูปทรงไม่สมมาตรแล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า รูปทรงของดรอปปิดมีผลต่อการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร โดยดรอปปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรกับวัสดุนอกกลุ่มเหล็ก โดยเปรียบเทียบกับไฟไนต์เอลิเมนต์

5.3.2 ศึกษาเปรียบเทียบชนิดของสารหล่อลื่นสำหรับการขึ้นรูปเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

5.3.3 เปรียบเทียบความสูงของดรอปปิดสำหรับการขึ้นรูปกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

5.3.4 ดรอปปิดที่ใช้สำหรับการลากขึ้นรูปควรมีรัศมีมากเพื่อลดแรงเสียดทานของแผ่น แบลงค์ที่จะสัมผัสกับแผ่นเหยียบชิ้นงานและช่องตาย

5.3.5 ศึกษาชนิดของดรอปปิด ความสูงของดรอปปิด และตำแหน่งการติดตั้งดรอปปิดในการขึ้นรูปเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

บรรณานุกรม

- [1] บุญส่ง จงกลณี, ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปลึกขึ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรต่อสมบัติการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC , วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2552.
- [2] Meiders,et al, The implementation of an Equivalent Drawbead model in a finite Element code for sheet model forming. Journal of material processing Technology 1998,234-244
- [3] M.Samuel, Influence of drawbead geometry on sheet metal forming, Faculty of Engineering, Department of Production Engineering and Machine Design, Mansoura University, 2001.pp.94-103.
- [4] กิตติภักดิ์ รัตนจันทร์ , ผลกระทบจากดรอว์บีตในการขึ้นรูปโลหะแผ่น, ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ,2543
- [5] ชัยยศ บุณณะชีพ, การวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์โดย แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป, ภาควิชาวิศวกรรมการผลิตบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระนครเหนือ, 2549.
- [6] ธนसार อินทรกำธร, “5 คำถามกับการจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่น,” ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [7] ชนะชัย วลิตวรางค์กูร และ ชัยวัฒน์ ทองหลี่, การศึกษาตัวแปรในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.
- [8] มาโนช กรอบเงิน, การออกแบบแม่พิมพ์และการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์การลากขึ้นรูปขึ้นงานขอบสันฝาข้างท้ายรถกระบะ, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [9] Kobayashi, S., Oh, S. and Altan, T., **Metal Forming and Finite Element Method**, New York Oxford University, 1989. pp.58-109.

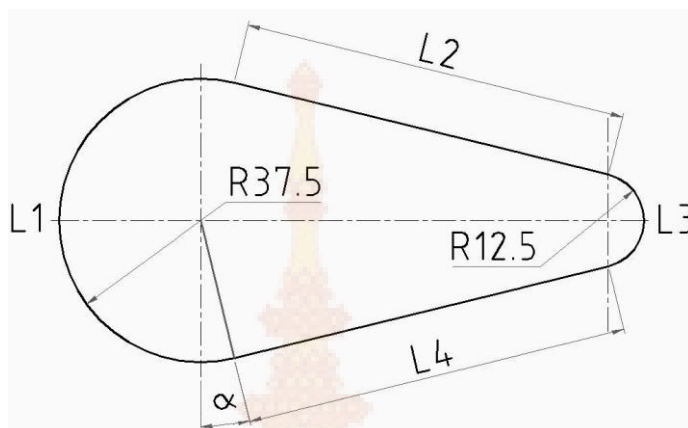
- [10] พนา แซ่มสวัสดิ์, การแก้ปัญหารอยร้าวในงานขึ้นรูปด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2541.
- [11] สุบิน ชันดี, การศึกษาความไวต่อการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์, ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [12] ชาญ ถนัดงาน, “เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะและพื้นฐานการขึ้นรูปโลหะ,” ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2541.
- [13] Manfred Jasner, Meinhard Hecht, Wolfgang Beckmann, Heat Exchangers and Piping Systems from Copper Alloys - Commissioning, Operating and Shutdown, May 2009
- [14] Van Sant Enterprises, Inc. 80 Truman Road Pella, IA 50219 877-VAN-SANT.
- [15] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 4. : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550. หน้า 3-18.
- [16] R. W. Clough, **The Finite Element Method**. Pittsburgh, PA, September 1960, pp. 8-9.
- [17] Tai Hun Kwon, **IN TRODUCTION TO FINITE ELEMENT METHOD**, Department of Mechanical Engineering Pohang University of Science and Technology, pp. 2.
- [18] Daryl L. Logan, **FINITE ELEMENT METHOD Fourth Edition**, University of Wisconsin-Platteville.
- [19] MSC.Software Corporation, “**INTRODUCTION TO MSC. MARC AND MENTAT**,” 815 Colorado Boulevard Innsbrucker Ring 15 Los Angeles, 2007.
- [20] T. H. Kwon, **FEM MODELLING INTRODUCTION**, 2005.
- [21] MSC.Software Corporation, “**MSC. MARC USER GUIDE VERSION 2008 R1 VOLUME B**.” 815 Colorado Boulevard Innsbrucker Ring 15 Los Angeles, March 2008.

- [22] MSC.Software, “**MSC. MARC. MENTAT.**” 815 Colorado Boulevard Innsbrucker Ring 15 Los Angeles, 2003.
- [23] D.A. Anderson, J.C. Tannehill, and R.H. Pletcher, “**COMPUTATATIONAL FLUID MECHANICS AND HEAT TRANSFER,**” Hemisphere, Washington, DC, 1984.
- [24] GK Lal SK Chhouthury, “**FUNDAMENTALS OF MANUFACTURING PROCESSES,**” Alpha Science International Ltd. Harrow, U.K., 2005.
- [25] วิทยา สงวนวรรณ และทีมงานวิชาการ, “**NX CAE THE FINITE ELEMENT (FEA) ANALYSIS,**” : สำนักพิมพ์ เอนจิเนียร์ แอนด์ อคติค พลัส 315/22-23 ถ.สุขาภิบาล 6 ต.บางพลีใหญ่ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ 10540
- [26] รศ.ดร.เดช พุทธเจริญทอง, “**ทฤษฎีพลาสติกซ์ตี และการเปลี่ยนรูปถาวร,**” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, :ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ 431/5 ถ.ประชากรราษฎร์บำเพ็ญ เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร 10320
- [27] Frank J. Vecchio, Professor, **Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Membranes**, Department of Civil Engineering, University of Toronto , Ontario Canada.
- [28] Kurt Lage, Professor, “**HANDBOOK OF METAL FORMING,**” University of Stuttgart.
- [29] Bill Smith and Mark King, Bending Square and Retangular Tubing, May 16, 2002.
- [30] J D Square Inc. 2244 Eddie Williams Rd. Johnson City, Opyright 2009.
- [31] K. Longe , **Handbook of Metal Forming**, Society of manufacturing Engineering , 1985.
- [32] V.A.Zharkov, **Theory and Practice of Deep Drawing**, Mechanical Engineering Publication Limited,London,1995.
- [33] ทวีภัทร์ บุณยธิตี. 2550. “การออกแบบการขึ้นรูปขึ้นส่วนขวางยึดเครื่องยนต์โดยการวิเคราะห์การฉีกขาดและรอยย่น.” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ภาคผนวก ก
การคำนวณแรงขึ้นรูป แรงกดชิ้นงานและขนาดของแผ่นชิ้นงาน

ก.1 การคำนวณแรงขึ้นรูปลึก

แรงในการขึ้นรูปสามารถหาได้จากสมการที่ 2.3 มีการคำนวณโดยการประมาณค่าดังแสดงวิธี
ดังนี้ [9]



ภาพที่ ก.1 เส้นรอบรูปขึ้นงานหาความยาว L_t (L Total) [1]

เมื่อ L_2 กับ L_4 เป็นเส้นตรงที่มีขนาดเท่ากันและ L_1 กับ L_3 เป็นเส้นโค้ง $R_1 = 37.5$ มม. $R_2 = 12.5$ มม. ตามลำดับเพื่อหาค่ามุม α

$$\sin \alpha = \frac{R_1 + R_2}{105}$$

แทนค่าในสมการ

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

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

$$L_2 = L_4 = 105 \cos \alpha$$

$$= 105 \cos 13.77$$

$$L_2 = L_4 = 102 \text{ mm}$$

หาค่า L_1 และ L_3 ที่สัมผัสส่วนโค้งของ R_1 และ R_2

$$L_1 = \frac{\pi(180 + 2\alpha)R_1}{180}$$

$$L_1 = \frac{\pi(180 + 2 \times 13.77) \times 37.5}{180}$$

$$L_1 = 135.8 \text{ mm}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

คำนวณค่า k, m ของวัสดุ SPCD

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

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

ค่าคุณสมบัติของวัสดุ SPCD ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E517-92 [38]

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

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

$$r_m = 0.848$$

$$r_{\max} = 1.102$$

$$r_{\min} = 0.699$$

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

$$n_m = 0.184$$

หาค่า n ตามมุมใดๆจากสมการที่ 2.15

จากสมการเส้นตรงของข้อมูลคู่ระหว่างแรงกับความเครียด F, ε

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

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

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} แผ่นกดชิ้นงาน (BHF)

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

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

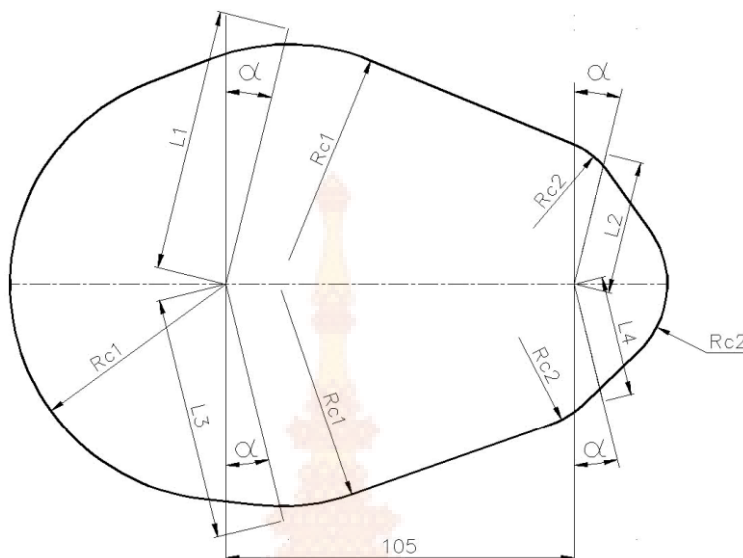
$\therefore$ BHF จาก

$$F_{NA} = P_{NA} (A_o - A_{st})$$

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

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

ก.2 ขนาดของแผ่นขึ้นงาน



ภาพที่ ก.2 การคำนวณแผ่นตัดเปล่า [1]

หาค่า รัศมี $Rc1$ จากสมการ
เมื่อกำหนดให้

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

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

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

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

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

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

$$R1 = 12.5 \text{ mm}$$

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

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

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

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

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

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

$$R1 = 12.5 \text{ mm}$$

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

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

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

แทนค่าในสมการหาค่า

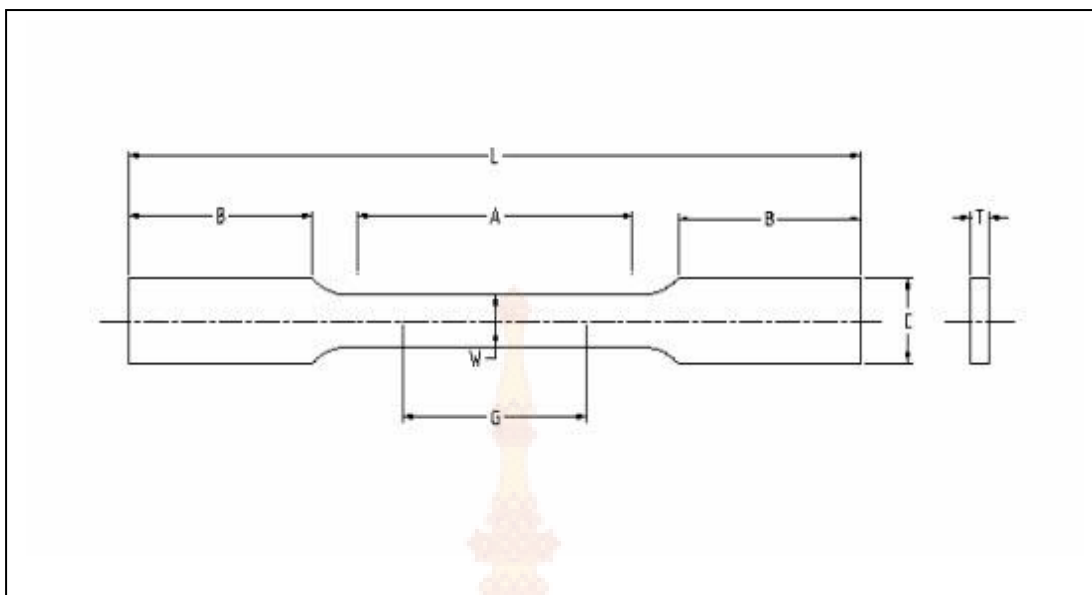
$$L_4$$

$$L_4 = 2(12.5)\sin 45 + (15 - 4) + \frac{\pi}{2}(4) + (5 - 4)$$

$$L_4 = 35.95 \cong 36 \text{ mm}$$



ภาคผนวก ข
คุณสมบัติทางกลของเหล็ก



ภาพที่ ข.1 ชิ้นทดสอบการดึง (Plain-End Specimen)

ชิ้นทดสอบการดึงเพื่อหาค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (n) ของวัสดุโลหะ
 แผ่นตามมาตรฐาน ASTM E 646-91 ดังภาพที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 ขนาดของชิ้นทดสอบการดึง

รายละเอียด	ขนาด	
	นิ้ว	มิลลิเมตร
G ความยาวเกจ	2.000 ± 0.005	50.00 ± 0.01
W ความกว้าง	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25
T ความหนา	ความหนาของชิ้นทดสอบ	
R รัศมีของส่วนโค้ง, น้อยที่สุด	1/2	13
L ความยาวรวม, น้อยที่สุด	8	200
A ความยาวของการลดพื้นที่หน้าตัด, น้อยที่สุด	$2 \frac{1}{4}$	60
B ความยาวของส่วนที่ใช้จับยึด, น้อยที่สุด	2	50
C ความกว้างของส่วนที่ใช้จับยึด	3/4	20

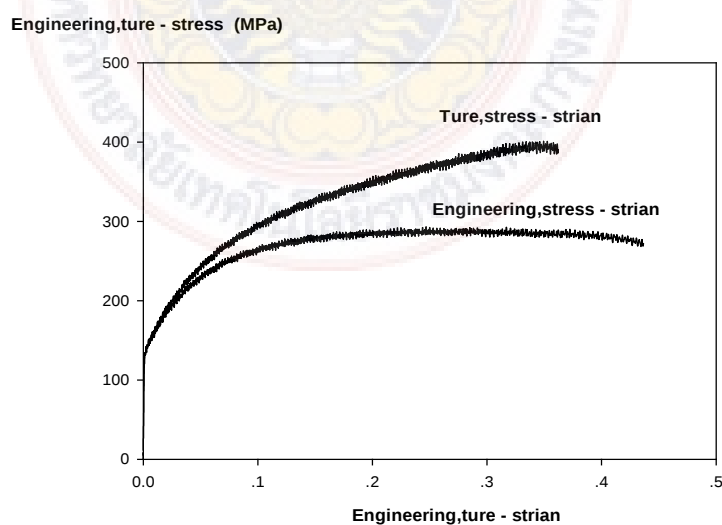
ข.1 ทดสอบหาสมบัติทางกลของเหล็ก SPCD หน้า 1 มิลลิเมตร

1) นำค่าจากการทดสอบการดึง (Tensile test) มาลงจุดสร้างแผนภาพความเค้นจริง (True stress) ความเครียดจริง (True strain)

Title	Thickness	Width	GaugeLength			
T1	1	12.5	50			
===== Summary for Data Processing =====						
Title	Max_Force	Max_Stress	YP_Stress	Break_Stra	LYP_Stress (N/mm2)	
T1	3644.69	91.12	46.38	49.42	45.87	
Mean	0	0	0	0	0	
===== Raw Data =====						
T1						
Time	Force	Stress	Stroke	Strain	Extensometer	
0	4.1	0.1	1	2	0	
0	102.38	2.56	1	2	0	
2	69.62	1.74	1	2	0	
2	147.43	3.69	1	2	0	
3	479.13	11.98	1	2	0.01	
3	888.65	22.22	1	2	0.02	

ภาพที่ ข.1 การบันทึกข้อมูลจากการทดสอบการดึง (Tensile test)

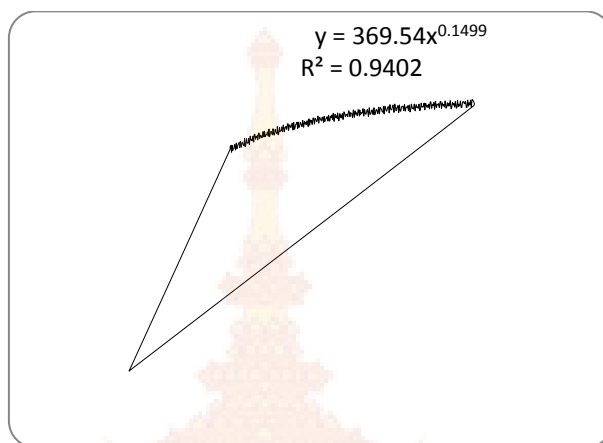
การบันทึกข้อมูลในช่วงความยืด (gage length) 50 mm. เครื่องบันทึกข้อมูลจะสามารถบันทึกได้ประมาณ 30,500 ค่า และคำนวณโดยโปรแกรมสำเร็จรูปไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Microsoft excel) จะได้ค่าความเค้นความเครียดวิศวกรรม



ภาพที่ ข.2 แผนภาพความเค้น-ความเครียดวิศวกรรมและ ความเค้น-ความเครียดจริงของเหล็ก

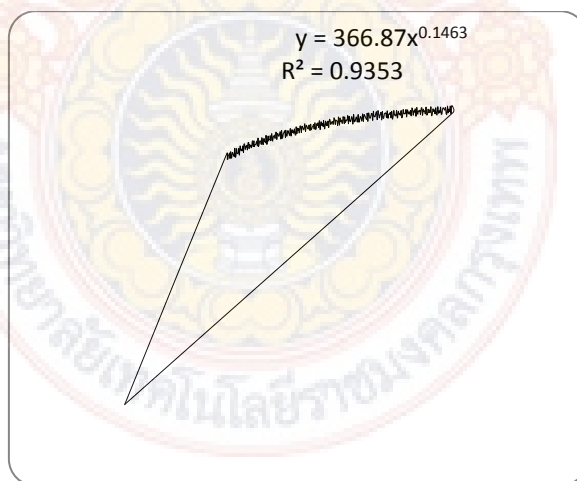
SPCD หน้า 1 มิลลิเมตร

2) จากการลงจุดสร้างแผนภาพ ความเค้นจริง ความเครียดจริง หาค่า K, n จากพฤติกรรมช่วงพลาสติกซีดี (Plasticity) โดยใช้สมการตามแบบ กำลัง (Power function) จำนวนห้าชิ้นทดสอบ



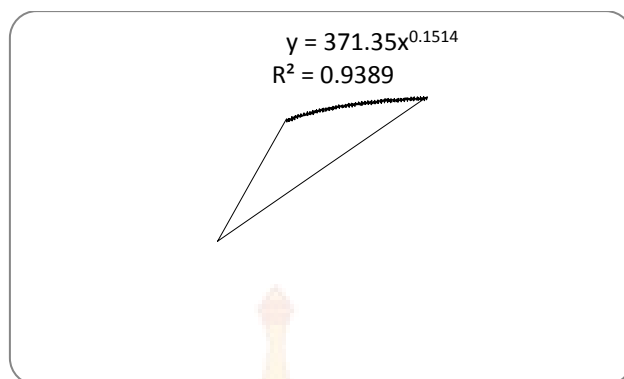
ภาพที่ ข.3 ชิ้นทดสอบชิ้นทดสอบที่ 1 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า

$K = 369.54$ และ ค่า $n = 0.1499$

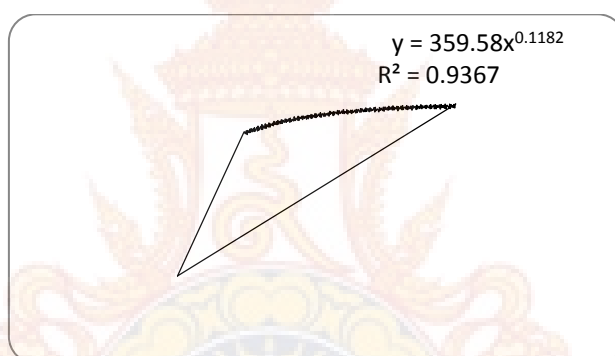


ภาพที่ ข.4 ชิ้นทดสอบชิ้นทดสอบที่ 2 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า

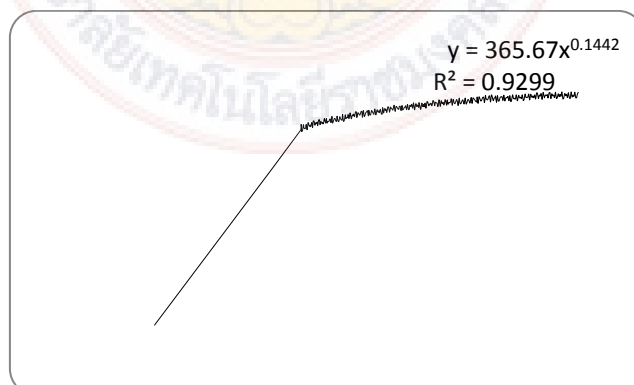
$K = 366.87$ และ ค่า $n = 0.1463$



ภาพที่ ข.5 ชั้นทดสอบชั้นทดสอบที่ 3 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า
 $K = 371.35$ และ ค่า $n = 0.1514$



ภาพที่ ข.6 ชั้นทดสอบชั้นทดสอบที่ 4 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า
 $K = 359.58$ และ ค่า $n = 0.1182$



ภาพที่ ข.7 ขึ้นทดสอบขึ้นทดสอบที่ 5 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า

$$K = 365.67 \text{ และ ค่า } n = 0.1442$$

$$\text{คำนวณหาค่าเฉลี่ย } K \text{ รวม } (369.54+366.87+371.35+359.58+365.67)/5 = 366.6$$

$$\text{คำนวณหาค่าเฉลี่ย } n \text{ รวม } (0.149+0.146+0.151+0.118+0.144) / 5 = 0.141$$

3) หาค่าแอนไอโซทรอปีคของเหล็ก SPCD ตามแนวทิศทางการรีด (Rolling Direction)

หนา 1 มิลลิเมตร ที่ 20 เปอร์เซนต์ของความเครียด จากสมการที่ 2.11

$$r_0 = \frac{\ln(8.16/12.5)}{\ln(0.72/1)} = \frac{\ln(0.652)}{\ln(0.72)} = 1.13$$

$$r_{45} = \frac{\ln(8.44/12.5)}{\ln(0.75/1)} = \frac{\ln(0.675)}{\ln(0.75)} = 1.365$$

$$r_{90} = \frac{\ln(7.25/12.5)}{\ln(0.69/1)} = \frac{\ln(0.98)}{\ln(0.65)} = 1.468$$

ตารางที่ ข.1 คุณสมบัติของเหล็ก SPCD

ชนิดของวัสดุ	เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด(n)	สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (K)	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r)			
			R_0	R_{45}	R_{90}	$\bar{R}$
SPCD	0.14	366	1.13	1.365	1.468	1.378

ภาคผนวก ค
ข้อมูลการทดลอง



ค.1 ตารางบันทึกแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป

ตารางที่ ค.1 ตารางบันทึกผลของการลากขึ้นรูปที่ แรงกดขึ้นงาน 30 ,50,70 เปอร์เซนต์
เหล็ก SPCD เปรียบเทียบกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

วัสดุ/แรงกดขึ้นงาน	แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปของรูปทรงดรอปีด (KN)					
	เครื่องวงกลม		สามเหลี่ยม		สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า	
	EXP	FEM	EXP	FEM	EXP	FEM
1.เหล็ก SPCD แรงกด 30 %	106	101	109	103	132	133
2.เหล็ก SPCD แรงกด 50 %	133	115	138	109	150	142
3.เหล็ก SPCD แรงกด 70 %	145	138	168	145	183	166

ค.2 ความเครียดในแนวความหนาของชิ้นงานในแต่ละจุดตรวจวัด

ตารางที่ ค.2 ตารางวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่าความหนา (Equivalent strain) ของเหล็ก
SPCD ที่ แรงกดขึ้นงาน (Blank Holder Force) 30 เปอร์เซนต์

จุดตรวจวัด ความหนา	เครื่องวงกลม		สามเหลี่ยม		สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า	
	ความเครียดแนวความ หนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_o)$		ความเครียดแนวความ หนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_o)$		ความเครียดแนวความ หนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_o)$	
	EXP	FEM	EXP	FEM	EXP	FEM
A1	0.20	0.18	0.15	0.16	0.22	0.21
A2	0.17	0.17	0.19	0.18	0.22	0.23
A3	0.21	0.20	0.20	0.19	0.22	0.21
A4	0.20	0.19	0.20	0.19	0.25	0.23
A5	0.20	0.20	0.15	0.15	0.22	0.21
A6	0.22	0.21	0.15	0.15	0.25	0.23
A7	0.25	0.24	0.20	0.19	0.26	0.26
A8	0.25	0.24	0.20	0.19	0.27	0.26
A9	0.22	0.23	0.13	0.13	0.25	0.24
A10	0.22	0.21	0.13	0.12	0.25	0.24

ε_t คือ ความเครียดแนวความหนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_o)$

ตารางที่ ค.3 ตารางวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่าความหนา (Equivalent strain) ของเหล็ก SPCD ที่แรงกดขึ้นงาน (Blank Holder Force) 50 เปอร์เซ็นต์

จุดตรวจวัด ความหนา	ครึ่งวงกลม		สามเหลี่ยม		สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า	
	ความเครียดแนวความ หนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_o)$		ความเครียดแนวความ หนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_o)$		ความเครียดแนวความ หนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_o)$	
	EXP	FEM	EXP	FEM	EXP	FEM
A1	0.20	0.21	0.27	0.26	0.25	0.23
A2	0.22	0.23	0.25	0.24	0.27	0.27
A3	0.25	0.24	0.25	0.23	0.25	0.26
A4	0.25	0.23	0.25	0.23	0.27	0.28
A5	0.23	0.22	0.22	0.21	0.33	0.32
A6	0.25	0.24	0.25	0.22	0.33	0.32
A7	0.27	0.27	0.33	0.32	0.35	0.34
A8	0.27	0.27	0.33	0.32	0.35	0.34
A9	0.25	0.25	0.30	0.29	0.35	0.33
A10	0.25	0.25	0.30	0.29	0.36	0.34

ε_t คือ ความเครียดแนวความหนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_o)$

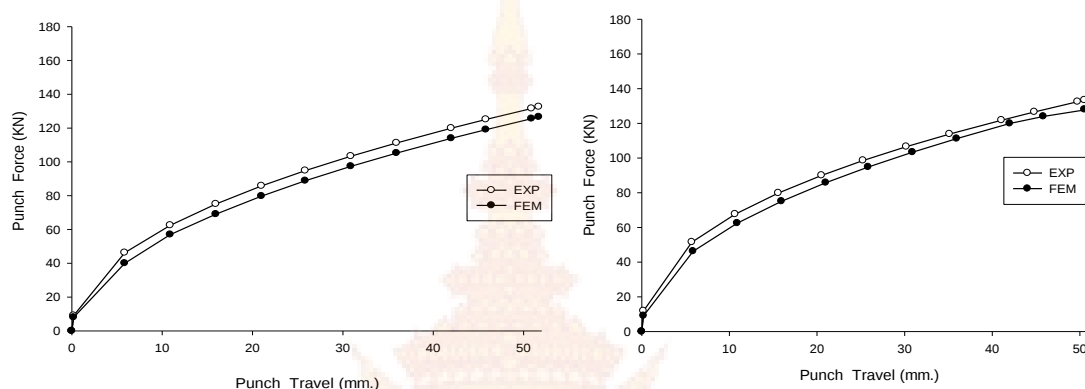
ตารางที่ ค.4 ตารางวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่าความหนา (Equivalent strain) ของเหล็ก SPCD ที่ แรงกดขึ้นงาน (Blank Holder Force) 70 เปอร์เซ็นต์

จุดตรวจวัด ความหนา	ครึ่งวงกลม		สามเหลี่ยม		สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า	
	ความเครียดแนวความหนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_o)$		ความเครียดแนวความหนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_o)$		ความเครียดแนวความหนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_o)$	
	EXP	FEM	EXP	FEM	EXP	FEM
A1	0.25	0.25	0.35	0.33	0.33	0.31
A2	0.25	0.24	0.34	0.34	0.32	0.30
A3	0.30	0.29	0.36	0.34	0.31	0.32
A4	0.32	0.31	0.36	0.34	0.35	0.33
A5	0.29	0.28	0.33	0.34	0.42	0.40
A6	0.36	0.34	0.39	0.37	0.42	0.43
A7	0.39	0.37	0.44	0.42	0.50	0.49
A8	0.39	0.37	0.45	0.43	0.50	0.49
A9	0.39	0.38	0.45	0.43	0.48	0.46
A10	0.33	0.32	0.42	0.40	0.48	0.46

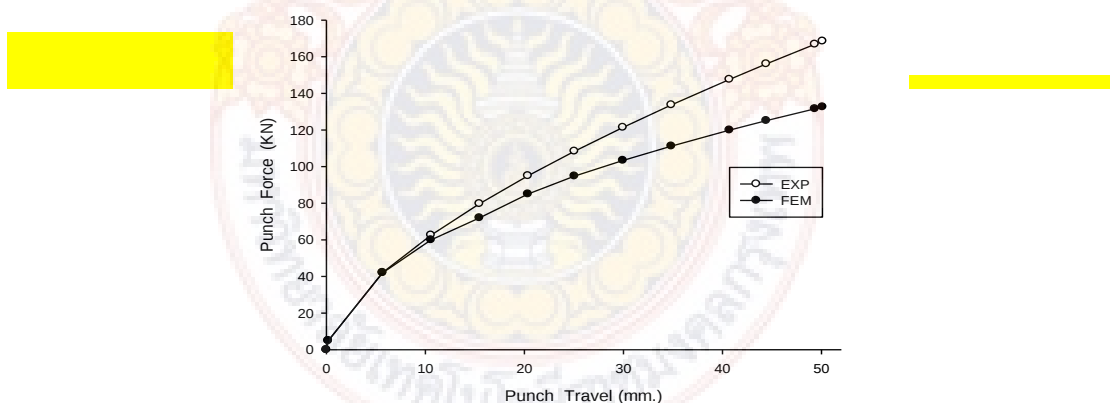
ε_t คือ ความเครียดแนวความหนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_o)$

ค3. เปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูประหว่างการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1) เปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของดรอปปิดแบบครึ่งวงกลม ของเหล็กเกรด SPCD ดังภาพที่ ค4 – ค6 ด้วยแรงกดขึ้นงาน 30 , 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์

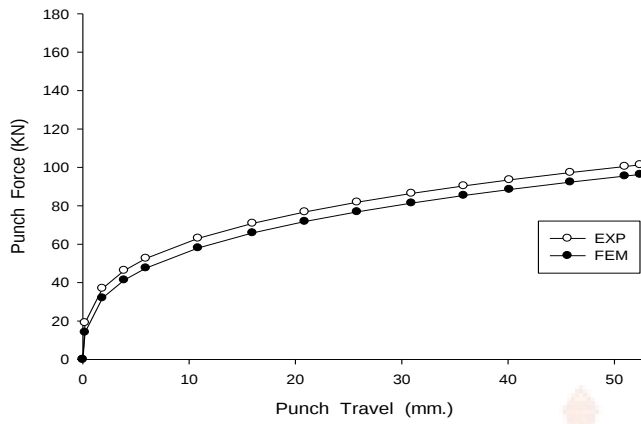


ภาพที่ ค1 Half-Round Drawbead, BHF 30 % ,SPC ภาพที่ ค2 Half-Round Drawbead, BHF 50 % ,SPCD

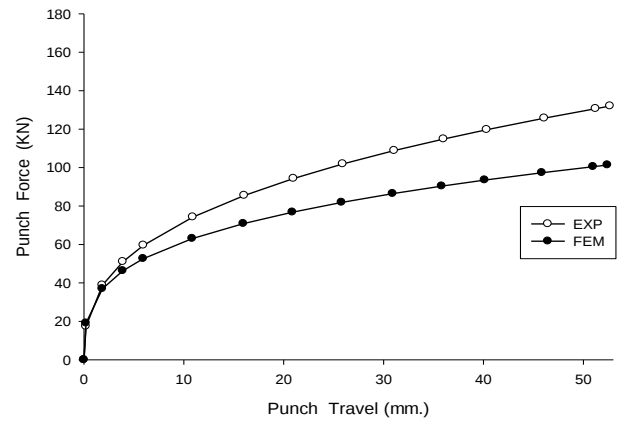


ภาพที่ ค3 Half-Round Drawbead, BHF 70 % ,SPCD

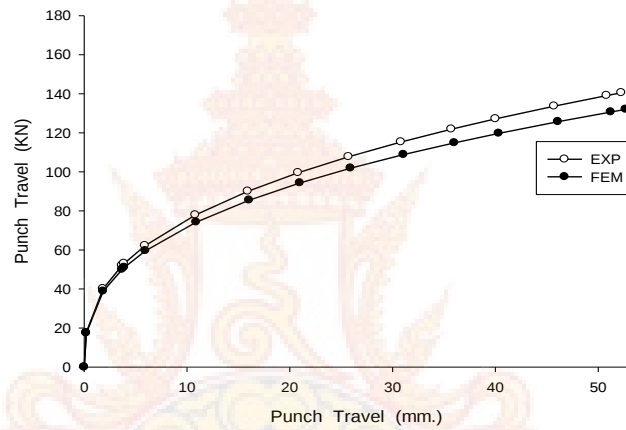
2) เปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของดรอปปิดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม ของเหล็กเกรด SPCD ดังภาพที่ ค13 – ค15 ด้วยแรงกดขึ้นงาน 30 , 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ ค4 V-Shaped Drawbead, BHF 30 % ,SPCD

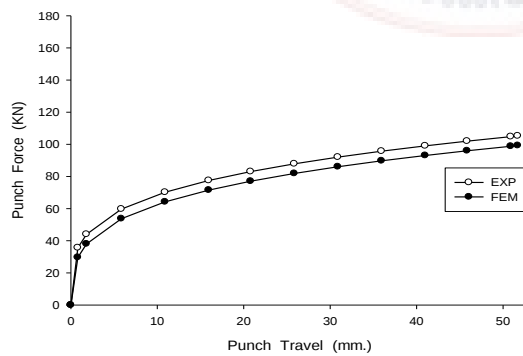


ภาพที่ ค5 V-Shaped Drawbead, BHF 50 % ,SPCD

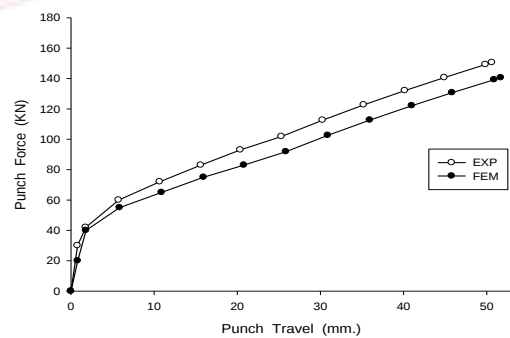


ภาพที่ ค6 V-Shaped Drawbead, BHF 70 % ,SPCD

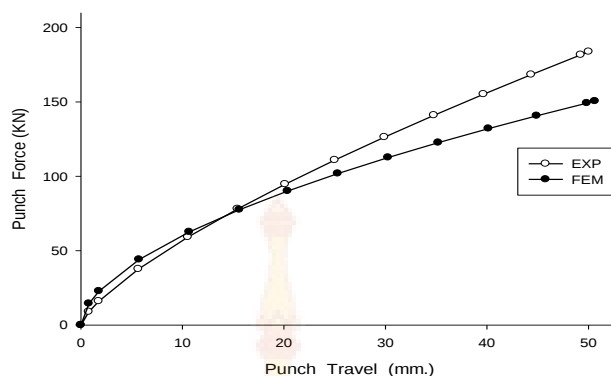
3) เปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของดรอว์บีดแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ของเหล็กเกรด SPCD ดังภาพที่ ค22 – ค24 ด้วยแรงกดขึ้นงาน 30 , 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ ค7 Trapeziform Drawbead, BHF 30 %
SPCD



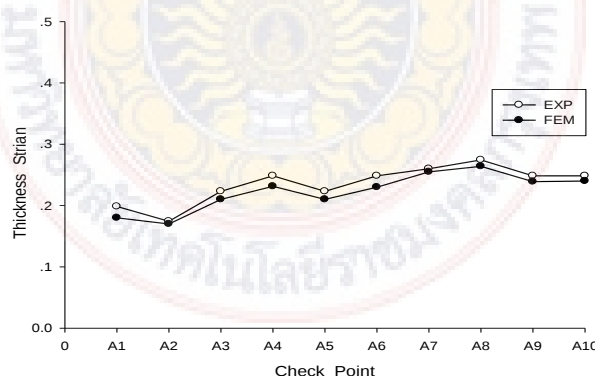
ภาพที่ ค8 Trapeziform Drawbead, BHF 50 %
SPCD



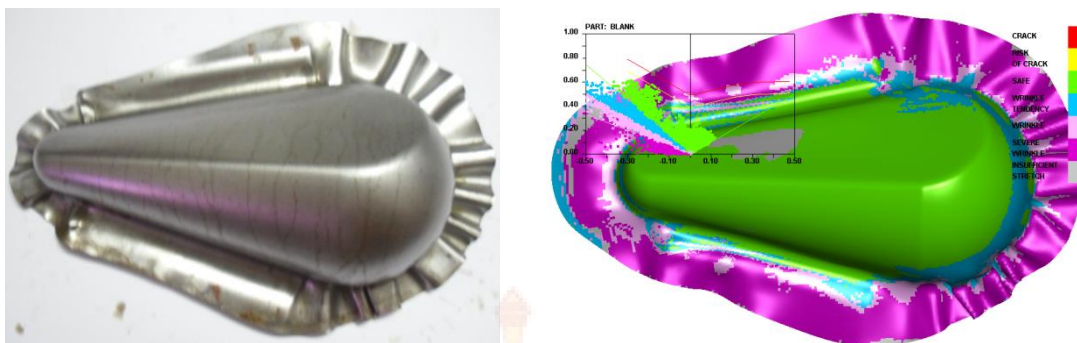
ภาพที่ ค.9 Trapeziform Drawbead, BHF 70 %,SPCD

ค.4 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงานระหว่างการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของดรอปปิดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCD ดังภาพที่ ค.34 – ค.35

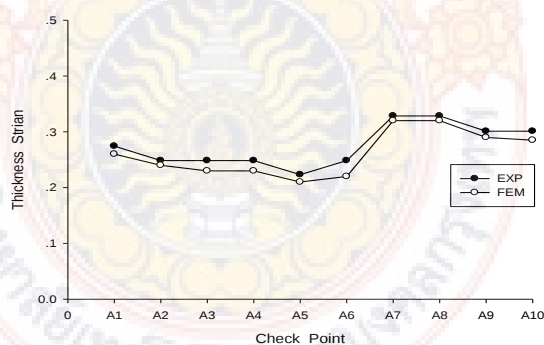


ภาพที่ ค.10 Thickness Strian , Half-Round Drawbead, BHF 30 %,SPCD

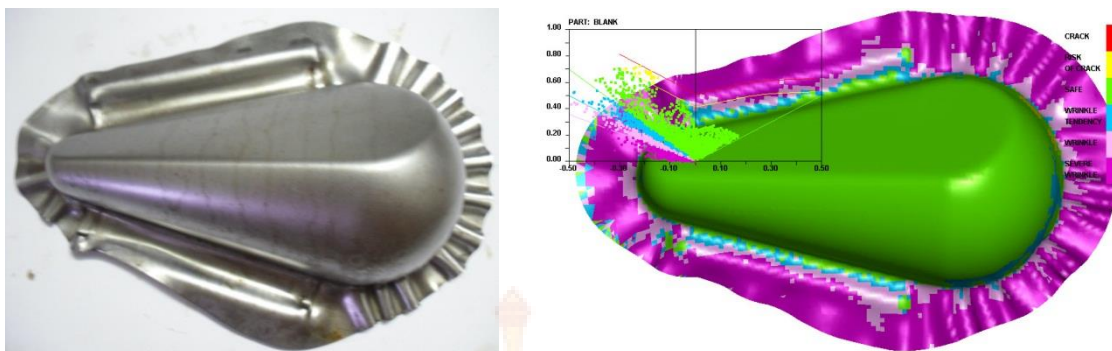


ภาพที่ ค.11 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM , Half-Round Drawbead, BHF 30 % , SPCD

2) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงานระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของดรอปปิดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCD ดังภาพที่ ค.36 – ค.37

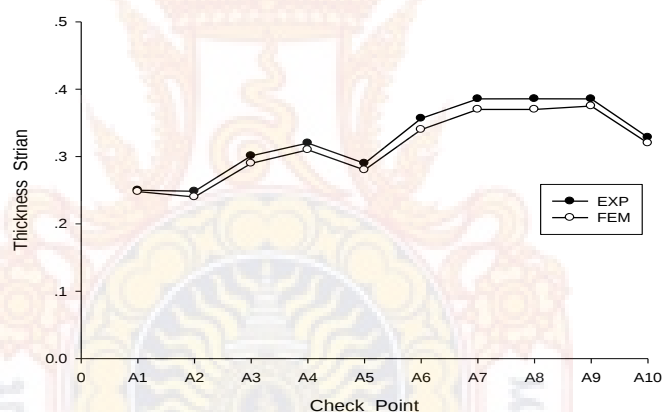


ภาพที่ ค.12 Thickness Strian , Half-Round Drawbead, BHF 50 %,SPCD

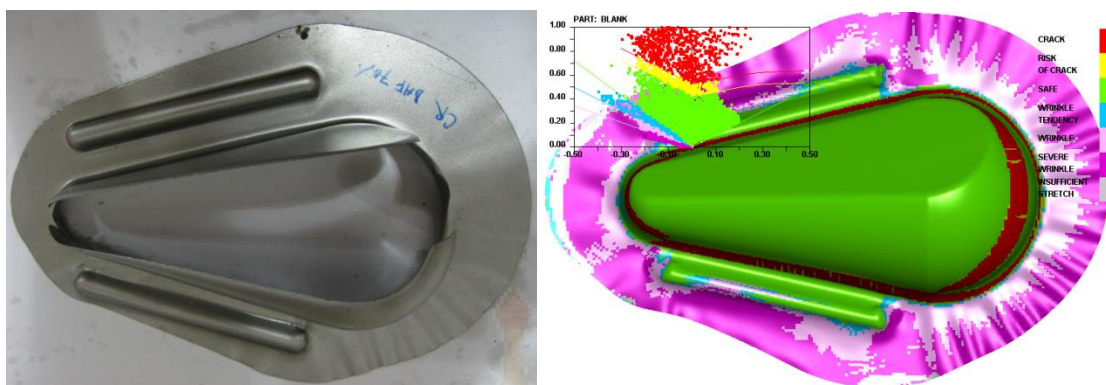


ภาพที่ ค.13 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM , Half-Round Drawbead, BHF 50 % , SPCD

3) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการทดลองจริงของดรอปีดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCD ดังภาพที่ ค.38 – ค.39

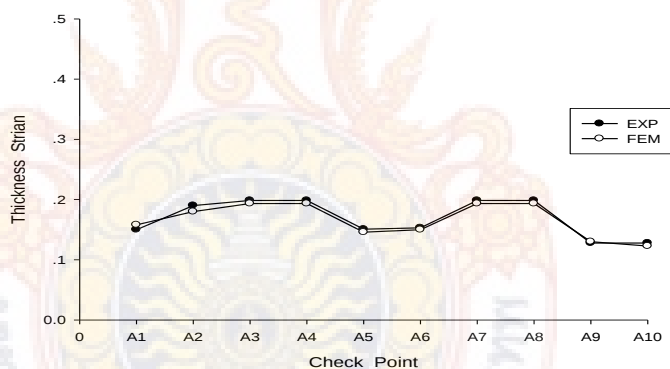


ภาพที่ ค.14 Thickness Strian , Half-Round Drawbead, BHF 70 %,SPCD

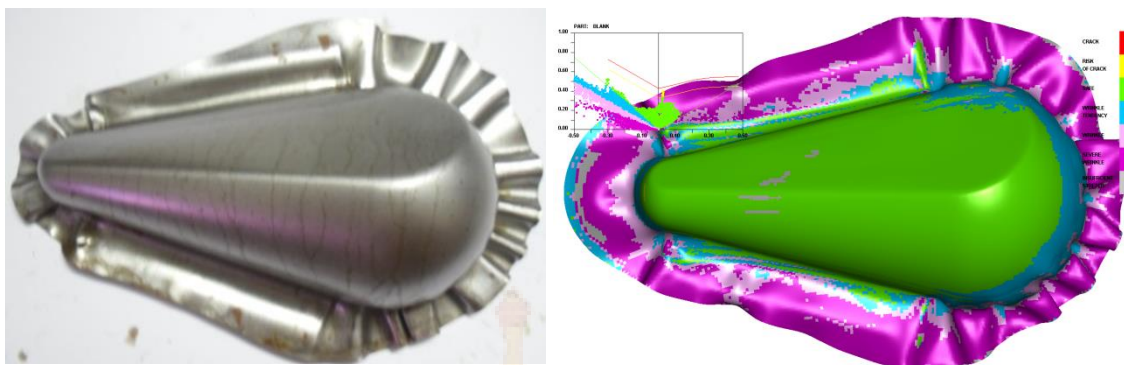


ภาพที่ ค.15 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM , Half-Round Drawbead, BHF 70 % , SPCD

4) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงานระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของดรอปปิดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCD ดังภาพที่ ค.52 – ค.53

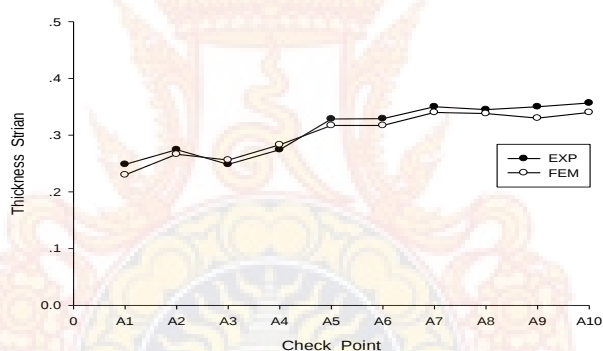


ภาพที่ ค.16 Thickness Strian , V-Shaped Drawbead, BHF 30 % , SPCD



ภาพที่ ค.17 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM , V-Shaped Drawbead , BHF 30 % , SPCD

5) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการทดลองจริงของดรอปีตแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ของ เหล็ก SPCD ดังภาพที่ ค 54 – ค 55

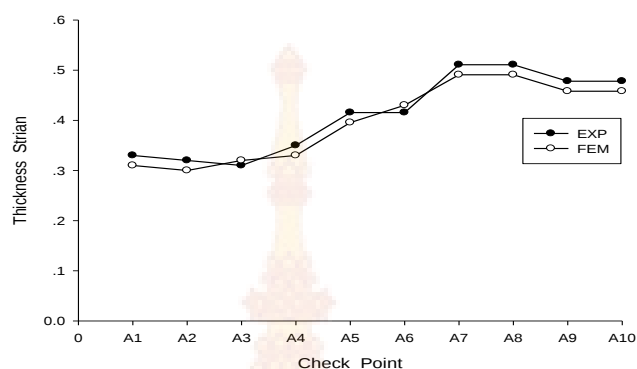


ภาพที่ ค.18 Thickness Strian , V-Shaped Drawbead, BHF 50 % , SPCD

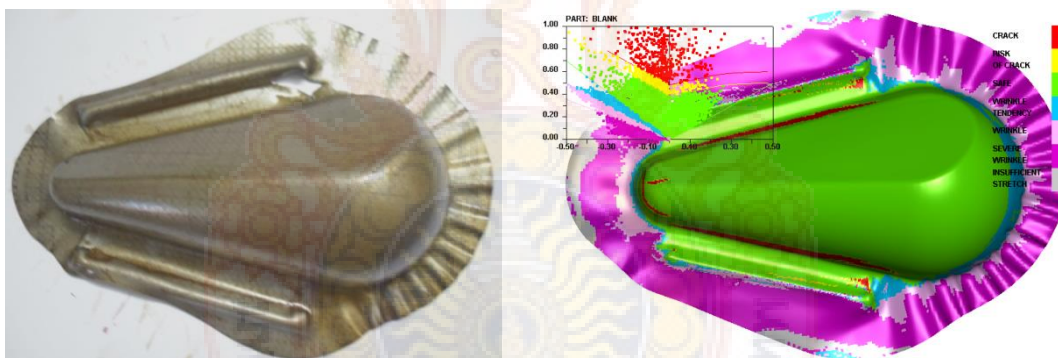


ภาพที่ ค.19 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM , V-Shaped Drawbead, BHF 50 % , SPCD

6) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการทดลองจริงของดรอว์บีดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ของ เหล็ก SPCD ดังภาพที่ ค.56 – ค.57

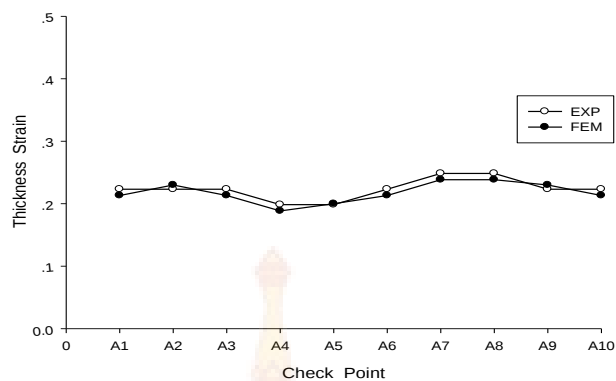


ภาพที่ ค.20 Thickness Strain , V-Shaped Drawbead, BHF 70 % , SPCD

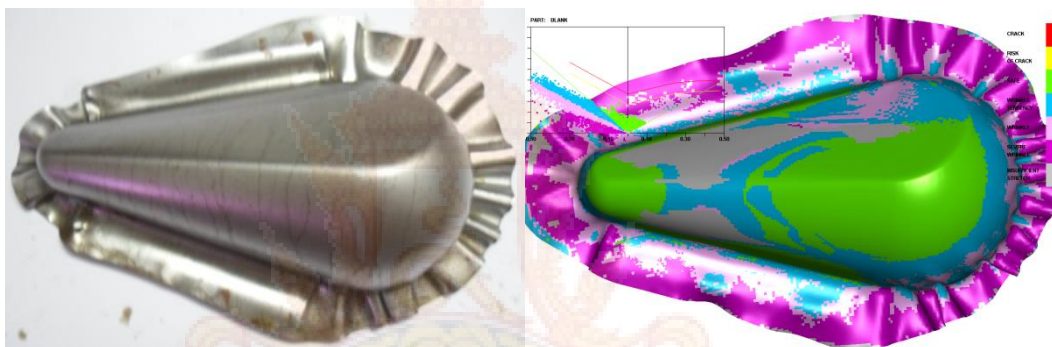


ภาพที่ ค.21 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM , V-Shaped Drawbead, BHF 70 % , SPCD

7) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการทดลองจริงของดรอว์บีดแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ของ เหล็ก SPCD ดังภาพที่ ค.70 – ค.71

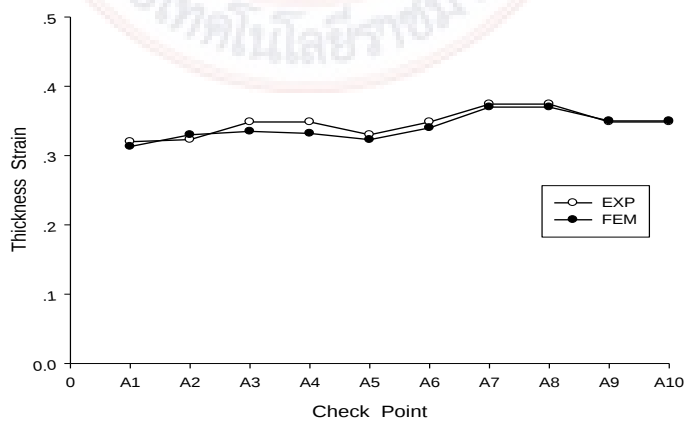


ภาพที่ ค.22 Thickness Strian , Trapenzifrom Drawbead, BHF 30 % , SPCD

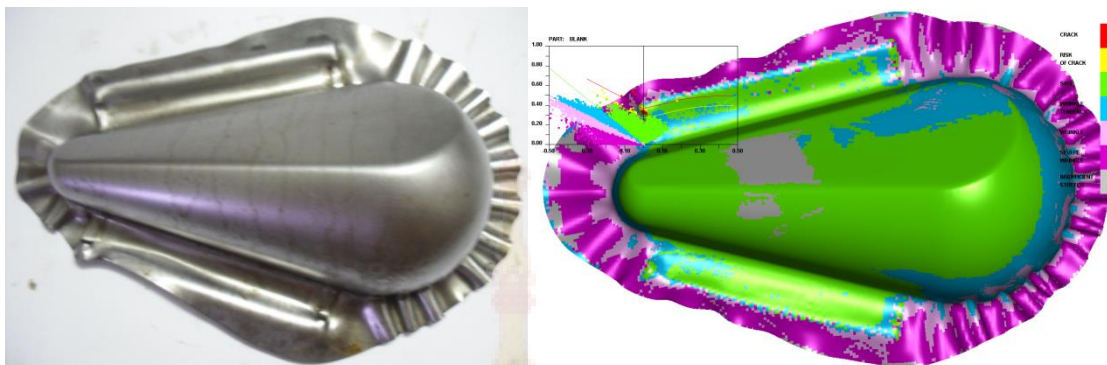


ภาพที่ ค.23 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM , Trapenzifrom Drawbead, BHF 30 % , SPCD

8) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการทดลองจริงของดรอปปีดแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ด้วยแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ของ เหล็ก SPCD ดังภาพที่ ค.72 – ค.73

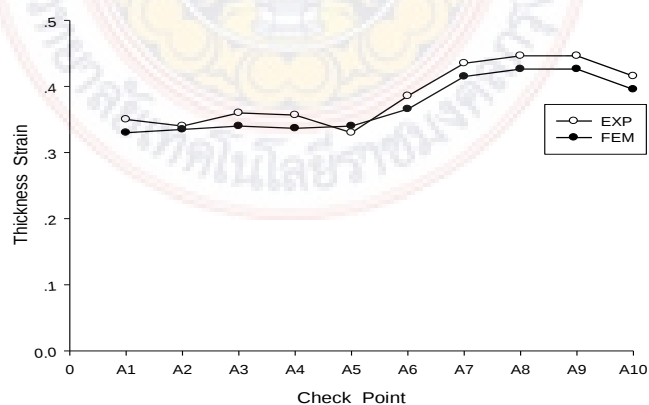


ภาพที่ ค.24 Thickness Strian , Trapenzifrom Drawbead, BHF 50 % , SPCD

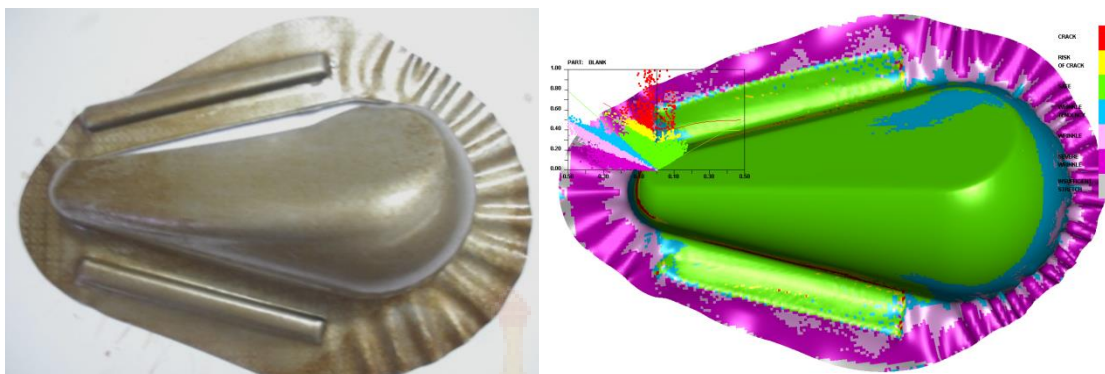


ภาพที่ ค.25 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM , Trapenzifrom Drawbead, BHF 50 % , SPCD

9) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการทดลองจริงของดรอว์บีดแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ด้วยแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ของ เหล็ก SPCD ดังภาพที่ ค.74 – ค.75



ภาพที่ ค.26 Thickness Strian , Trapenzifrom Drawbead, BHF 70 % , SPCD

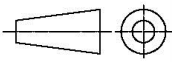


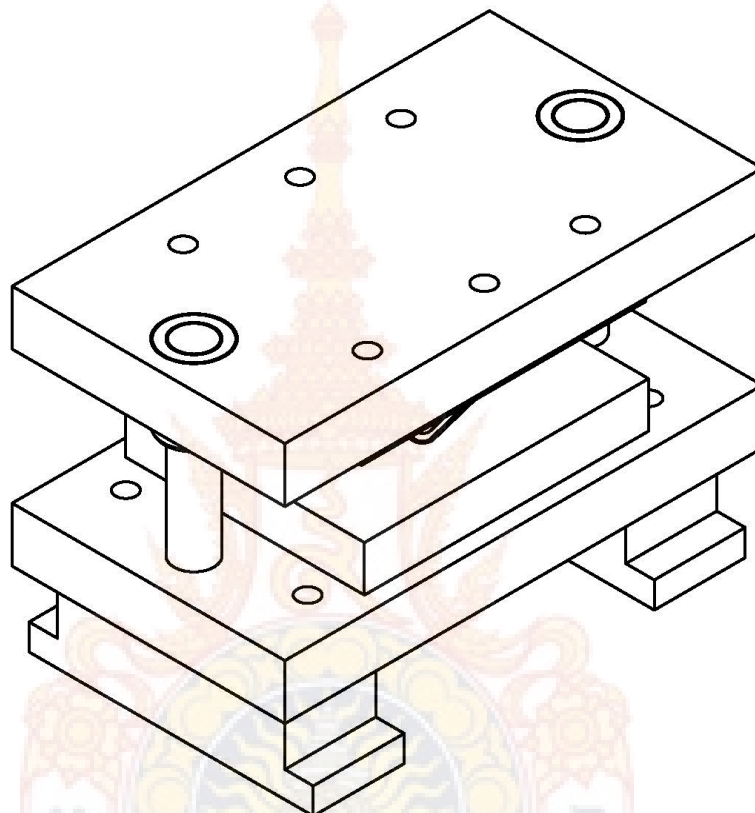
ภาพที่ ค.27 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM , Trapeziform Drawbead, BHF 70 % , SPCD

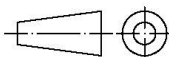


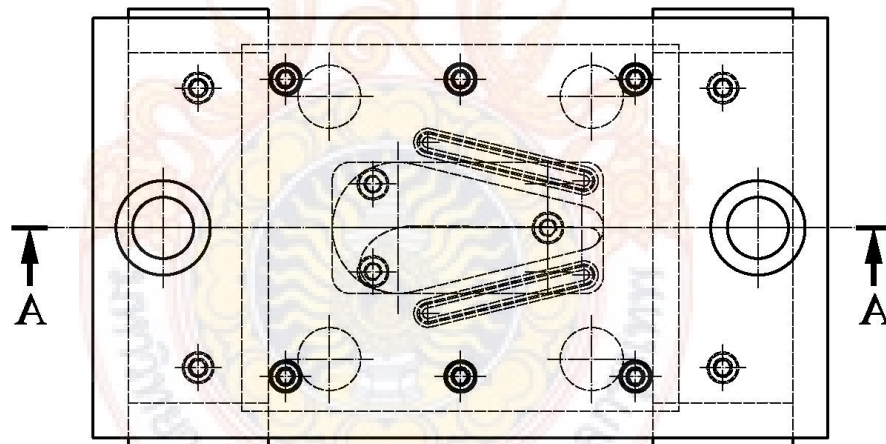
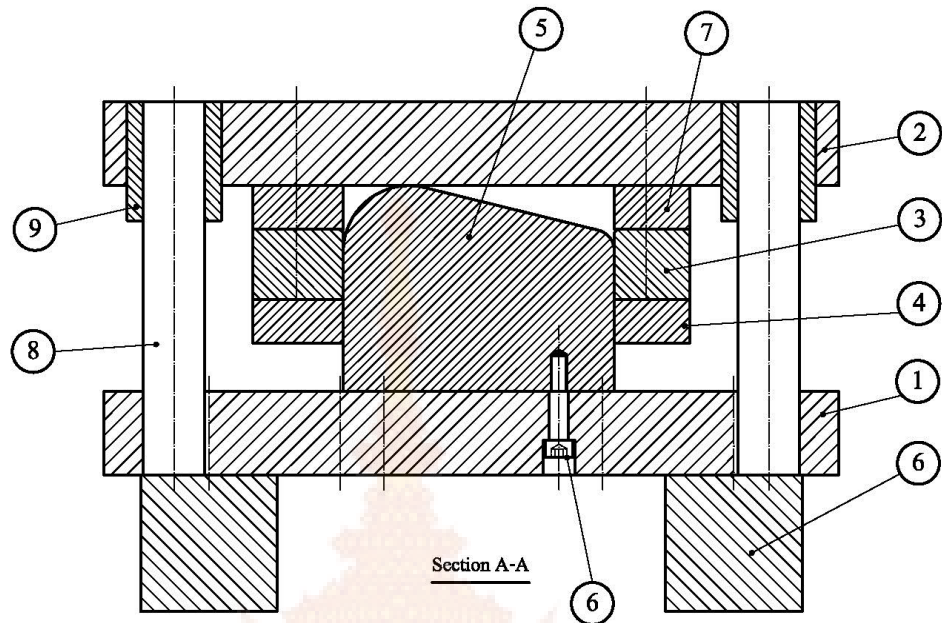


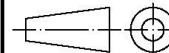


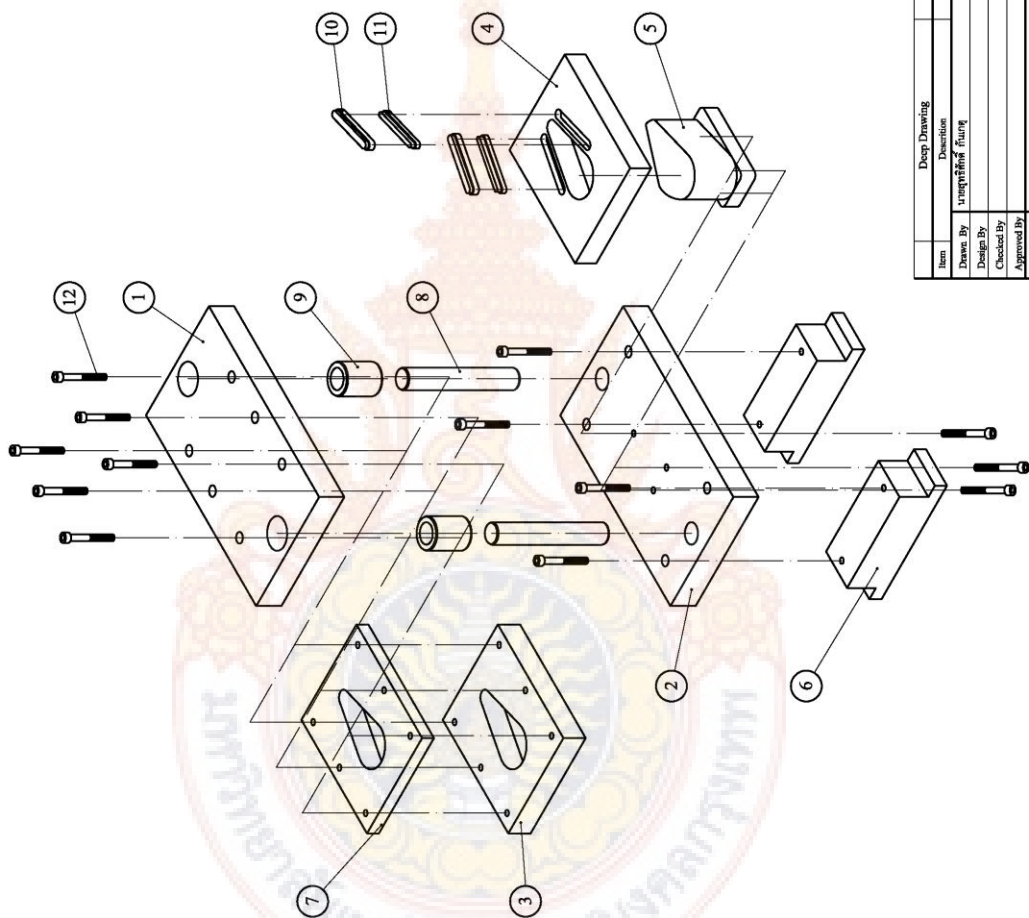
12	Socket Head Hex Screws	M10x1.5x60	-	-	13
11	Drawbead Insert	12x104x16	NBR	50344-11	2
10	Drawbead	16x108x16	S50C	50344-10	2
9	Bush	Ø54x68	SKD11	50344-09	2
8	Guide	Ø35x213.5	SKD11	50344-08	2
7	Pressure Die	210x250x40	S50C	50344-07	1
6	Spacer Block	80x250x78	S50C	50344-06	2
5	Punch From	80x150x118	SKD11	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 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
ผู้ออกแบบ					
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ ม.ช.					
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน Deep Drawing	หมายเลขแบบ			



	Deep Drawing	240x420x292	SKD11	50344-001	1
ชั้นที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นายสุทธิศักดิ์ กันเกตุ		คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
ผู้ออกแบบ					
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ ม.ร.					
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน		หมายเลขแบบ		
NON	Deep Drawing		50344-001		

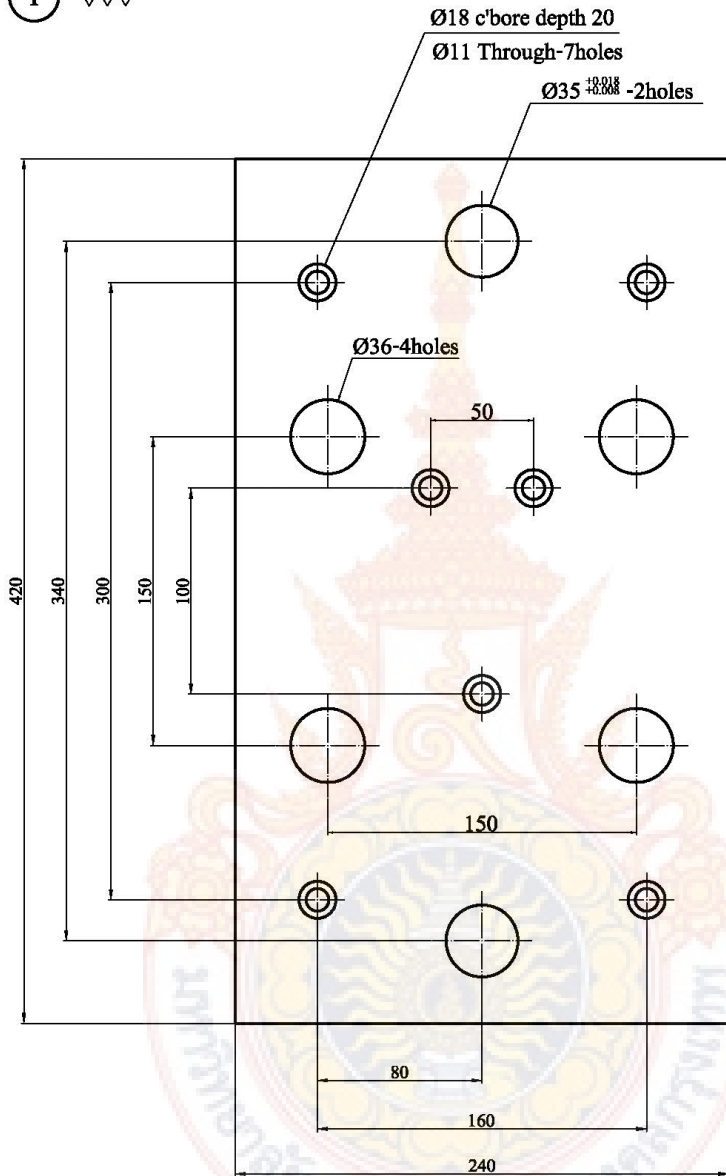


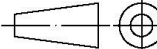
	Deep drawing		240x420x292	SKD11	50344-000	1
ชั้นที่	รายการ		ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นายสุทธิศักดิ์ กันแกตุ			คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
ผู้ออกแบบ						
ผู้ตรวจ						
ผู้ตรวจ ม.ช.						
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน			หมายเลขแบบ		
NON	Deep drawing			50344-000		



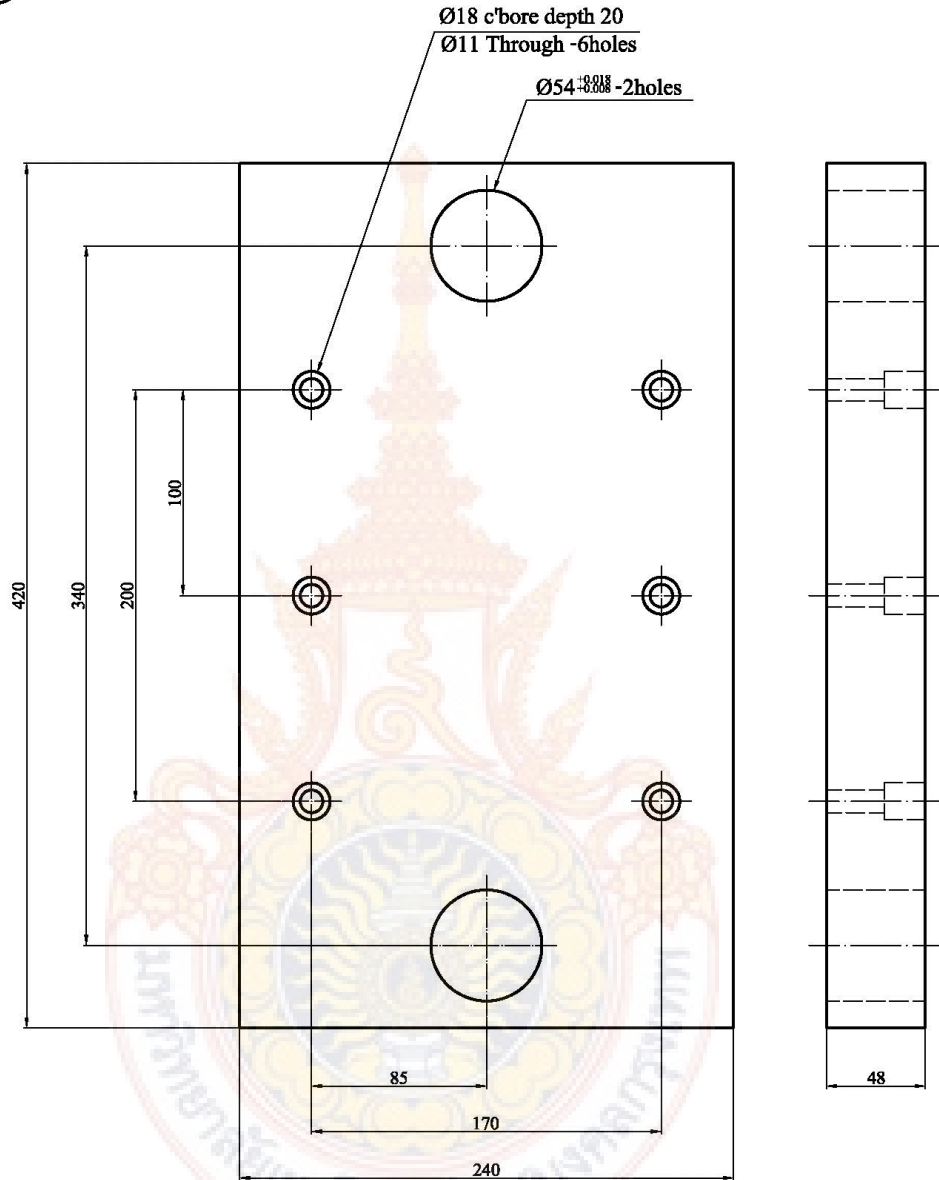
Item	Deep Drawing	246x320x292	SKD11	50344-00E	1	Quantity
Description	เบรคปั๊ม					
Drawn By	นายวิชากร มานะพร					
Design By	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร					
Checked By	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร					
Approved By	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร					
Scale	DWG.NO. 50344-00E					
NON	Deep Drawing					

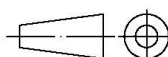
1



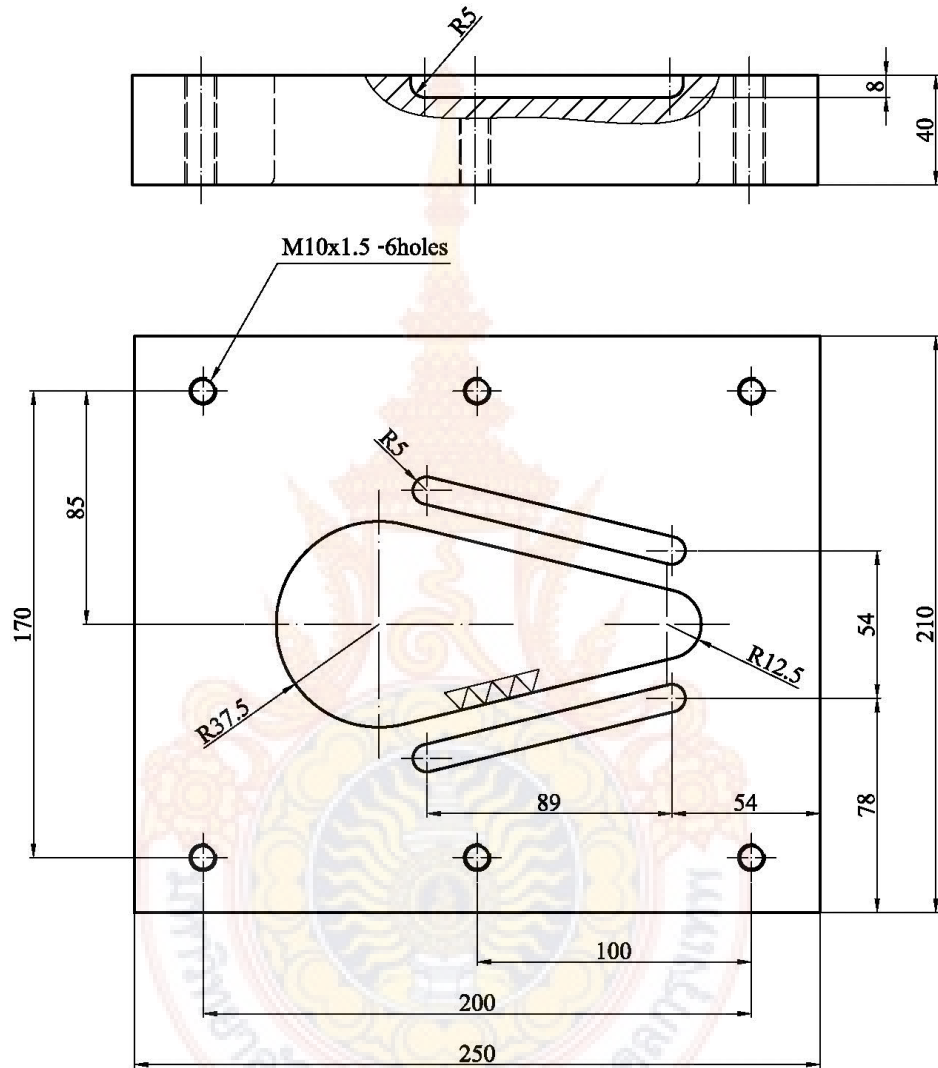
1	Die Holder		240x420x48	SS41	50344-01	1
ชั้นที่	รายการ		ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นายสุทธิศักดิ์ กันแกตุ			คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
ผู้ออกแบบ						
ผู้ตรวจ						
ผู้ตรวจ ม.ช.						
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน			หมายเลขแบบ		
NON	Deep drawing			50344-01		

2



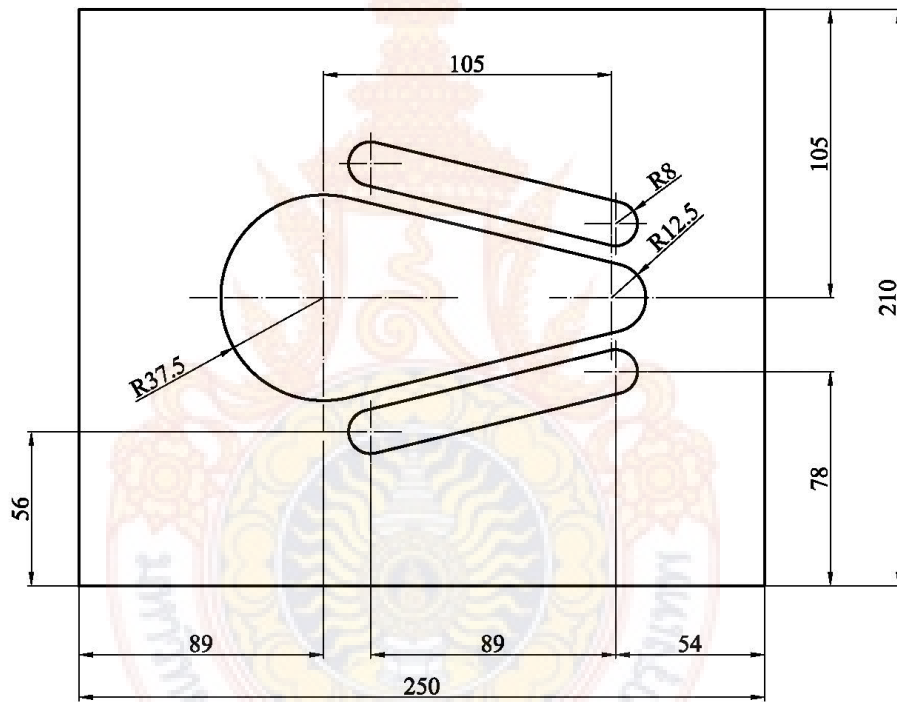
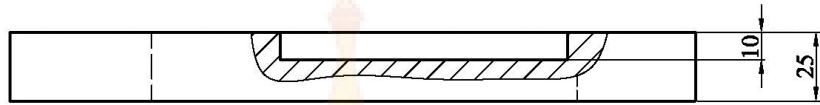
2	Punch Holder		240x420x48	SS41	50344-02	1
วันที่	รายการ		ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นายสุทธิศักดิ์ กันแกตุ			คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
ผู้ออกแบบ						
ผู้ตรวจ						
ผู้ตรวจ ม.ช.						
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน			หมายเลขแบบ		
NON	Deep drawing			50344-01		

3



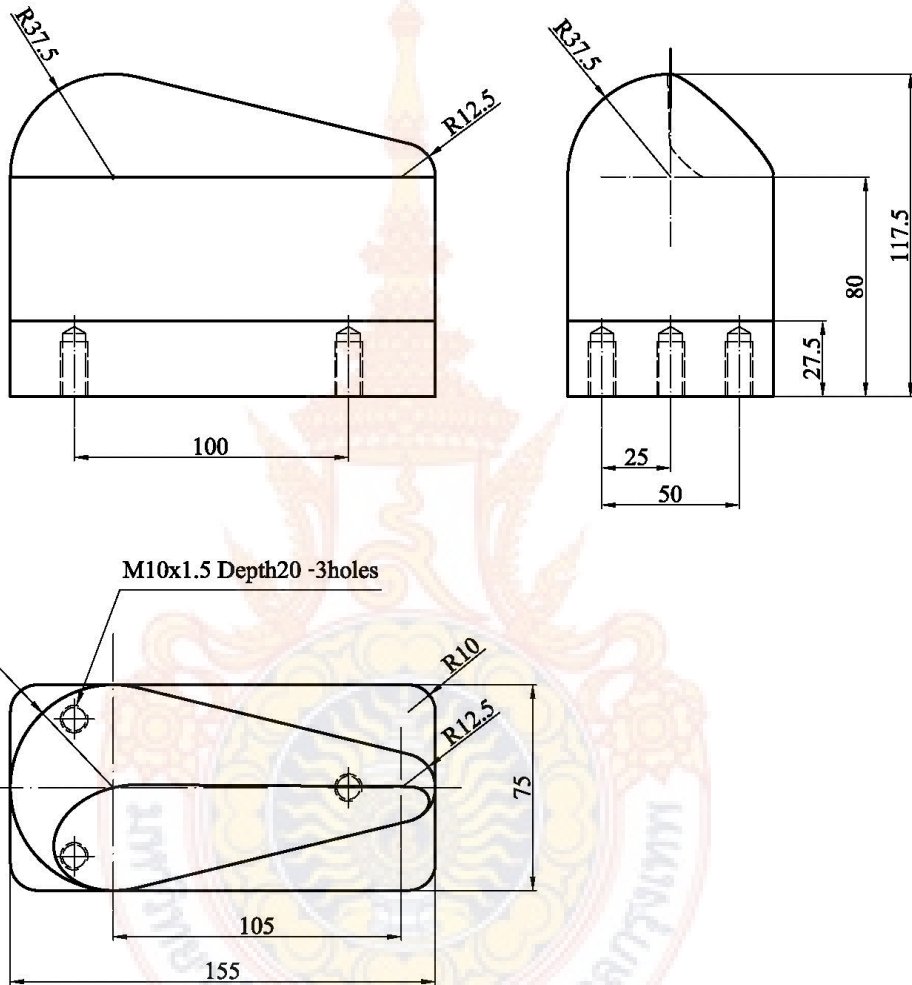
3	Die Plate		210x250x40	SKD11	50344-03	1
วันที่	รายการ		ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นายสุทธิศักดิ์ กันแกตุ			คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
ผู้ออกแบบ						
ผู้ตรวจ						
ผู้ตรวจ ม.ข.						
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน			หมายเลขแบบ		
NON	Deep drawing			50344-03		

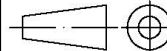
4



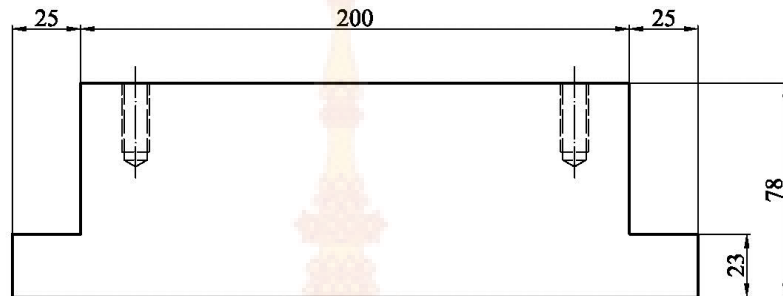
4	Blank Holder		210x250x25	S50C	50344-04	1
ชั้นที่	รายการ		ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นายสุทธิศักดิ์ กันแกตุ			คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
ผู้ออกแบบ						
ผู้ตรวจ						
ผู้ตรวจ ม.ช.						
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน			หมายเลขแบบ		
NON	Deep drawing			50344-04		

5

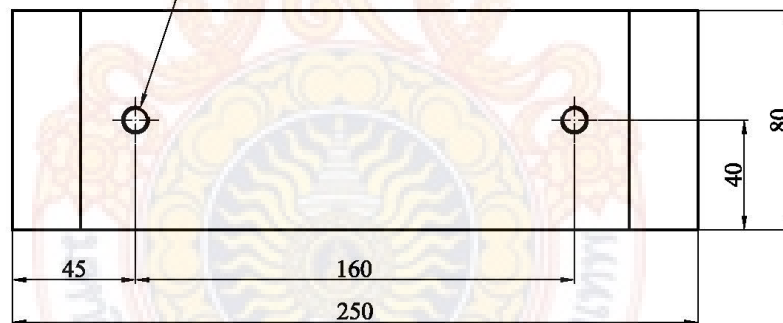


5	Punch From		80x150x118	SKD11	50344-05	1
วันที่	รายการ		ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นายสุทธิศักดิ์ กันแกตุ			คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
ผู้ออกแบบ						
ผู้ตรวจ						
ผู้ตรวจ ม.ช.						
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน			หมายเลขแบบ		
NON	Deep drawing			50344-05		

6 

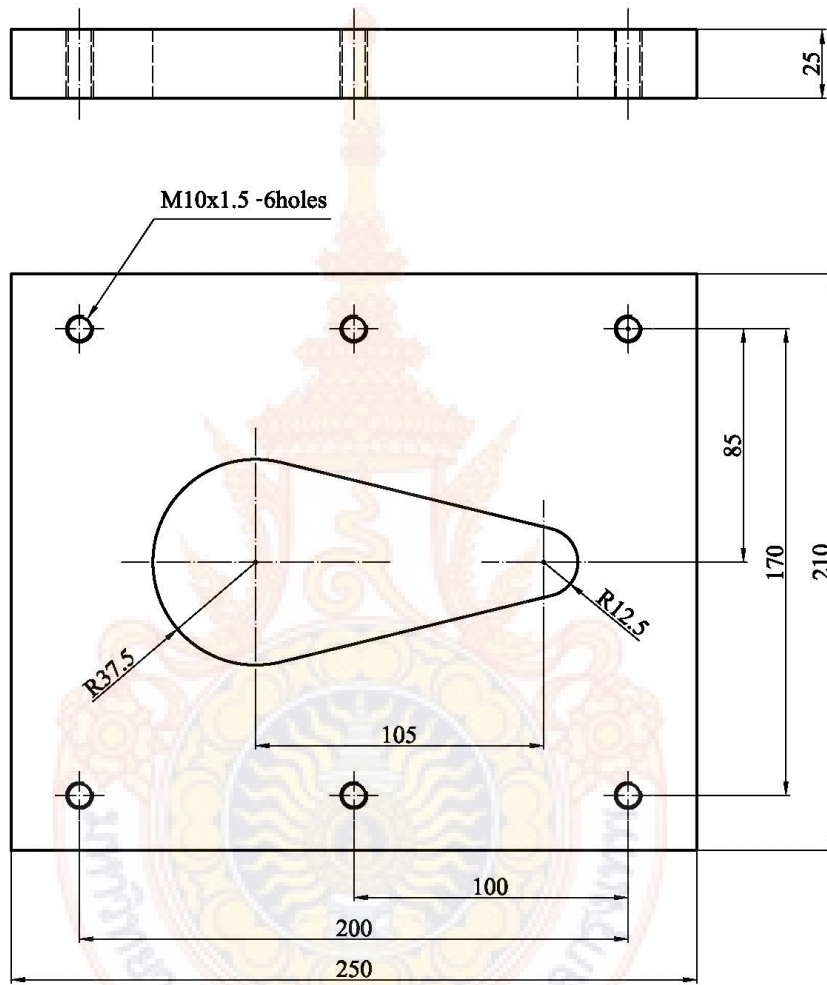


M10x1.5 Depth25 -2holes



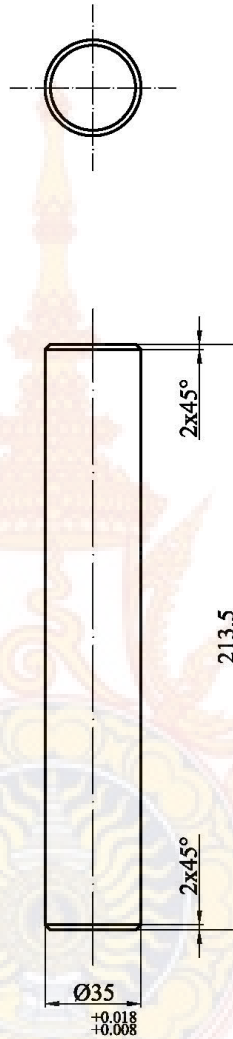
6	Spacer Block		80x250x78	S50C	50344-06	2
ชั้นที่	รายการ		ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นายสุทธิศักดิ์ กันแกตุ			คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
ผู้ออกแบบ						
ผู้ตรวจ						
ผู้ตรวจ ม.ช.						
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน					
NON	Deep drawing			50344-06		

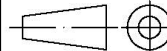
7



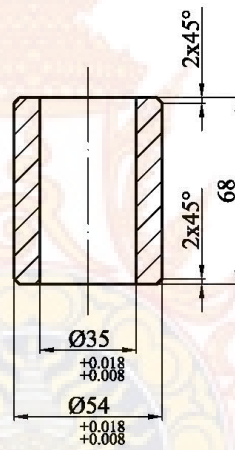
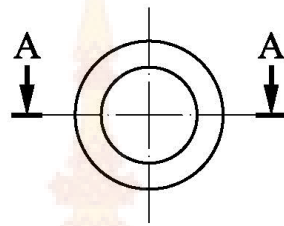
7	Pressure Die	210x250x40	S50C	50344-07	1
ชั้นที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นายสุทธิศักดิ์ กันแกตุ		คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
ผู้ออกแบบ					
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ ม.ช.					
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ			
NON	Deep drawing	50344-07			

8



8	Guide	Ø35x213.5	S50C	50344-08	2
ชั้นที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นายสุทธิศักดิ์ กันแกตุ		คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
ผู้ออกแบบ					
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ ม.ช.					
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ			
NON	Deep drawing	50344-08			

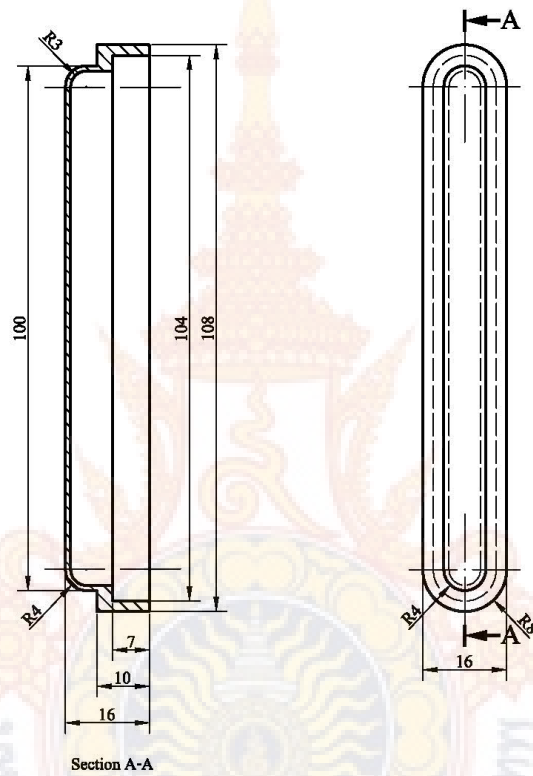
9 

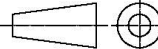


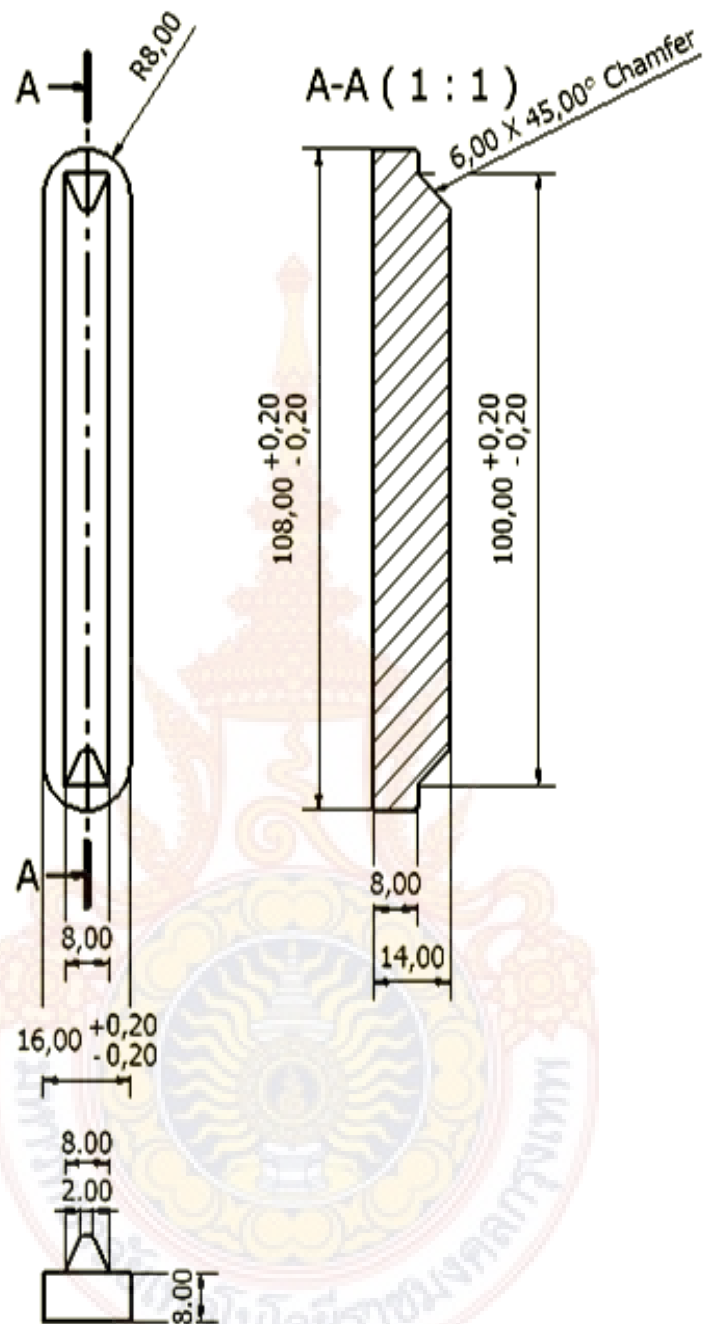
Section A-A

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

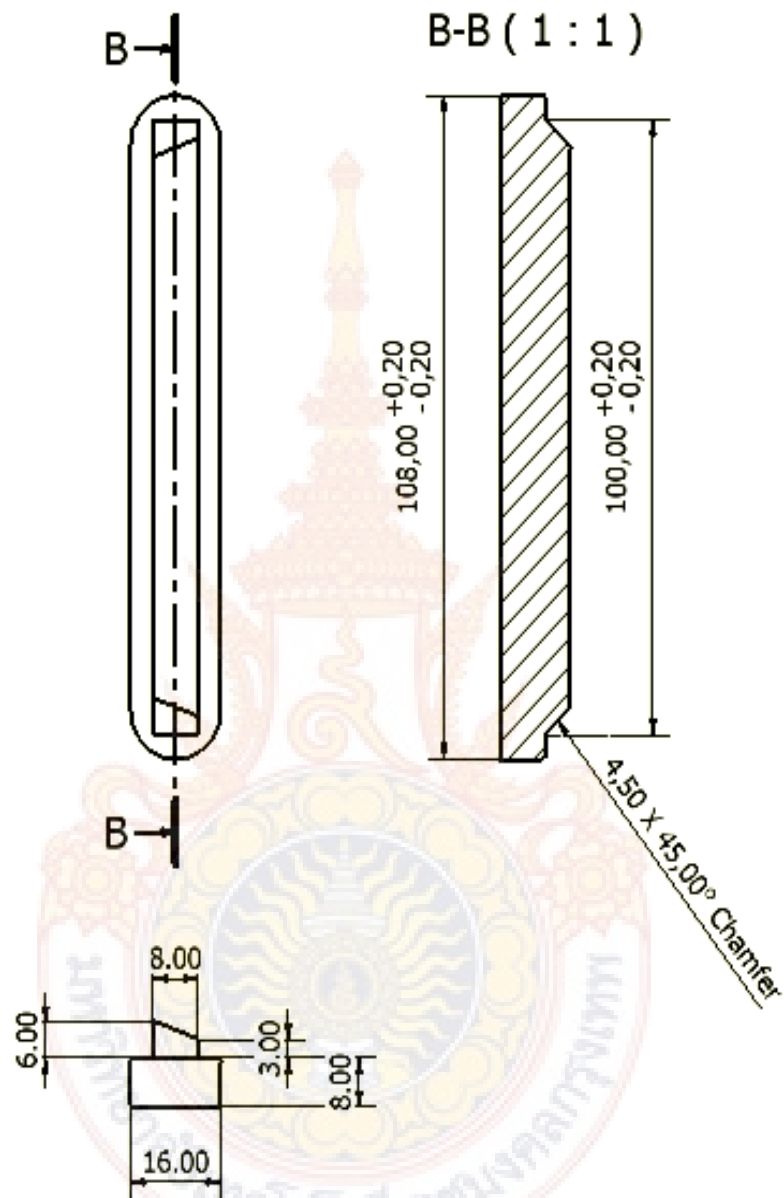
10

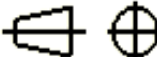


10	Drawbead	16x108x16	S50C	50344-10	2
ชั้นที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นายสุทธิศักดิ์ กันเกตุ		คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
ผู้ออกแบบ					
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ ม.ช.					
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ		50344-10 	
NON	Deep Drawing				



วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
เขียน			คณ.วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
ตรวจสอบ					
ผู้ออกแบบ					
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน		หมายเลขแบบ		
NON	Deep Drawing		50344-11		



วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
แผ่น			คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
หน้า					
ชุดออกแบบ					
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน		หมายเลขแบบ		
NON	Deep Drawing		50344-12		