

ศึกษาอิทธิพลรูปทรงของดรอปีดในการลากขึ้นรูปโลหะที่มีรูปทรง
ไม่สมมาตรโดยการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

THE STUDY FOR SHAPE INFLUENCES OF THE DRAWBEAD ON
THE NON-SYMMETRICAL DEEP DRAW PROCESS
BY USING FINITE ELEMENT-SIMULATION

สุรียา ประสมทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ศึกษาอิทธิพลรูปทรงของดรอปิดในการลากจูงรูปโลหะที่มีรูปทรง
ไม่สมมาตรโดยการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

สุรียา ประสมทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ศึกษาอิทธิพลรูปทรงของครอปัดในการลากขึ้นรูปโลหะที่มีรูปทรงไม่สมมาตร โดยการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์
ชื่อ - นามสกุล	นายสุริยา ประสมทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.Eng
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

ปัญหาการลากขึ้นรูปที่พบบ่อย คือ เกิดการฉีกขาดและการเกิดรอยย่นสาเหตุเกิดจากแรงกดขึ้นงาน ถ้าแรงกดมากเกินไปอาจทำให้เกิดการฉีกขาดของวัสดุและถ้าแรงกดน้อยเกินไปทำให้เกิดรอยย่นของวัสดุ การควบคุมสภาวะการไหลของโลหะแผ่นในงานขึ้นรูปสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การลดหรือเพิ่มแรงกดขึ้นงานหรือลดแรงเสียดทานระหว่างผิวแม่พิมพ์กับขึ้นงาน แต่วิธีดังกล่าวไม่สามารถควบคุมการไหลของโลหะแผ่นเฉพาะในบริเวณได้ ดังนั้นจึงมีความพยายามหาวิธีการควบคุมสภาวะการไหลของโลหะแผ่นขึ้น โดยอาศัยการขัดขวางการไหลตัวของโลหะด้วยสันเล็กๆ ที่เรียกว่าครอปัด

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ครอปัดที่มีรูปร่าง หน้าตัดครึ่งวงกลม, หน้าตัดรูปตัววี และหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ อิทธิพลแรงกดขึ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ วัสดุที่ใช้ในการศึกษา เหล็กรีดเย็นเกรด SPCC, SP45 และ SP48 ที่มีผลกระทบต่อการไหลตัวของโลหะแผ่นที่ไหลเข้าสู่ช่องเปิดตายในการลากขึ้นรูปโดยใช้รูปทรงของครอปัดที่แตกต่างกัน แรงกดขึ้นงานที่แตกต่างกันและวัสดุต่างชนิดกันแล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ารูปทรงของครอปัด แรงกดขึ้นงานและชนิดของวัสดุ มีผลกระทบต่อการไหลตัวของโลหะแผ่นเป็นอันมาก จากการเปรียบเทียบผลการทดลองพบว่า แรงกดขึ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลม และวัสดุเกรด SP48 โลหะสามารถไหลตัวได้ดีทำให้ขึ้นงานไม่เกิดการฉีกขาดและรอยย่นลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีความแตกต่างกันเฉลี่ย 7.4 เปอร์เซ็นต์ โดยวัดจากความหนาที่เปลี่ยนไปของวัสดุแต่ละจุด ดังนั้นจึงสรุป ผลการเปลี่ยนรูปร่างสุดท้ายของวัสดุจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับรูปร่างจริง ซึ่งผลการทดลองและวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายและหาแนวทางการแก้ไขรูปทรงของครอปัดในการลากขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : ครอปัดไฟไนต์เอลิเมนต์ การขึ้นรูปโลหะแผ่น การย่น

Thesis Title	The Study for shape influences of the Draw Bead on the Non - Symmetrical Deep Draw Process by Using Finite Element-Simulation
Name - Surname	Mr. Suriya Prasomthong
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Sirichai Torsakul, Dr.-Ing.
Academic Year	2012

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 were Cold Rolled Steel Sheets grade SPCC, SPCD and SPCE 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 and SPCE material 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 7.4% (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, forming, wrinkle

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง ดร.กฤษชาติ จุลเพ็ญ กรรมการสอบ และ ดร.วิฑูร อุทัยแสงสุข กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ ในการวิจัยจนประสบความสำเร็จ

ผู้วิจัย ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาหลักที่กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และข้อปรับปรุง อย่างมีคุณค่าอนันต์

ท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อาจารย์ทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุน และแนะนำแนวทางการศึกษา และทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงตามกำหนด

สุริยา ประสมทอง



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 คำจำกัดความในการวิจัย.....	4
1.6 กรอบแนวความคิดในการวิจัย.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะ.....	6
2.2 กระบวนการพื้นฐานของโลหะแผ่น และระนาบความเค้น (General Sheet Processes; Plan Stress).....	18
2.3 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	22
2.4 การลากขึ้นรูปลึกขึ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร.....	33
2.5 ดรอปีด (Draw Bead).....	34
2.6 ชนิดของเหล็กแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูป.....	40
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	43
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินการวิจัย.....	43
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	44

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	53
4 ผลการวิจัย.....	61
4.1 เปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูป.....	61
4.2 สรุปผลการเปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูป.....	66
4.3 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา.....	67
4.4 สรุปการเปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูป.....	77
4.5 ศึกษาอิทธิพลรูปทรงของดรอปีดในกระบวนการขึ้นรูป.....	81
5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	85
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	85
5.2 การอภิปรายผล.....	86
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	86
รายการอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก การคำนวณแรงขึ้นรูป แรงกดชิ้นงานและขนาดของแผ่นขึ้นงาน.....	91
ภาคผนวก ข สมบัติทางกลของเหล็ก.....	98
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลอง.....	111
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	147
ประวัติผู้เขียน.....	162

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะการวิเคราะห์ความอิสระของการเคลื่อนที่ของแต่ละชนิด.....	28
2.2 ขนาดของครอปบิดและตำแหน่งของระยะห่างในการยึดติด.....	39
2.3 คุณสมบัติทางเคมีของเหล็กกรีดยีน (มาตรฐาน JIS).....	40
3.1 สมบัติเชิงกลแผ่นเหล็กกรีดยีน SPCC, และ SPCE ความหนา 1.0 มิลลิเมตร.....	47
3.2 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์.....	57
3.3 บันทึกแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป.....	60
3.4 ความเครียดในแนวความหนาของชิ้นงานในแต่ละจุดตรวจวัด.....	60



สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ.....	7
2.2 แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ.....	10
2.3 เปรียบเทียบกรอบการแตกหัก.....	12
2.4 ชั้นทดสอบตามทิศทางการรีด.....	16
2.5 ทิศทางหลักในการทดสอบแรงดึง.....	18
2.6 ทิศทางหลักของความเค้นและความเครียด.....	19
2.7 การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น.....	20
2.8 แผนภาพความเครียด.....	20
2.9 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	22
2.10 โหนดในเอลิเมนต์แต่ละมิติ.....	23
2.11 ชนิดของเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1 ถึง 3 มิติ.....	24
2.12 การใช้เอลิเมนต์ 1 มิติ ในงาน โครงสร้าง.....	25
2.13 การใช้เอลิเมนต์ 2 มิติ ในงานที่มีลักษณะเป็นผนัง.....	25
2.14 การใช้งานเอลิเมนต์ 3 มิติ ในงานที่เป็นปริมาตรตันที่มีความหนา.....	26
2.15 ตัวอย่างโครงสร้างเอลิเมนต์ดั้งเดิม.....	27
2.16 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ กัน.....	30
2.17 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่ง ที่จุดต่อ.....	31
2.18 ความเสียหายที่เกิดบนชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร.....	33
2.19 ครอปิดแบบหน้าตัดกลม (Round Drawbead).....	35
2.20 ครอปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Half-Round Drawbead).....	35
2.21 ครอปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Drawbead).....	36
2.22 ครอปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapeziform Drawbead).....	36
2.23 ครอปิดแบบหน้าตัดรูปตัววี (V-Shaped Drawbead).....	37
2.24 ร่องปิดแบบหน้าตัดตามรูปร่างของครอปิด.....	37
2.25 ร่องปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม.....	37
2.26 ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.27 ร่องบิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู.....	38
2.28 ร่องบิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม.....	38
2.29 ตำแหน่งและระยะของครอปัด.....	39
3.1 แผนภาพการดำเนินการวิจัยการศึกษาอิทธิพลรูปทรงของครอปัดในการลากขึ้นรูปโลหะที่มีรูปทรงไม่สมมาตรโดยการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์.....	44
3.2 ลักษณะขึ้นทดสอบหาสมบัติเชิงกล.....	45
3.3 การบันทึกข้อมูลการทดสอบการดึงจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	45
3.4 แผนภาพความเค้น-ความเครียดวิศวกรรมและ ความเค้น-ความเครียดจริงของเหล็กเกรดเย็น หนา 1 มิลลิเมตร.....	46
3.5 หาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรงและเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดใช้แบบสมการกำลัง (Power Function).....	47
3.6 กำหนดชื่อของเครื่องมือ.....	47
3.7 ขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนเครื่องมือและชิ้นงาน.....	48
3.8 การสร้างผิวสำหรับเครื่องมือและชิ้นงาน.....	48
3.9 การสร้างพื้นผิวเครื่องมือและชิ้นงาน.....	49
3.10 กำหนดชนิดการขึ้นรูป.....	49
3.11 กำหนดชนิดวัสดุของชิ้นงาน.....	50
3.12 เครื่องมือและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการขึ้นรูป.....	50
3.13 การประมวลผลของโปรแกรม Dyna Form 5.6.....	51
3.14 การกำหนดค่าสมบัติของวัสดุในโปรแกรม Dyna Form 5.6.....	51
3.15 ค่าความเครียดวิเคราะห์จากโปรแกรม Dyna Form 5.6.....	52
3.16 ค่าความหนาวิเคราะห์จากโปรแกรม Dyna Form 5.6.....	52
3.17 เครื่องปั๊มโลหะขนาด 80 ตัน.....	53
3.18 แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปเหล็กขึ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร.....	54
3.19 เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC Automatic Machine).....	54
3.20 ชิ้นงานทดลอง.....	55
3.21 ครอปัดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Haft-Round Drawbead).....	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.22	55
3.23	56
3.24	56
3.25	57
3.26	58
3.27	59
3.28	59
4.1	62
4.2	63
4.3	64
4.4	66
4.5	68
4.6	68
4.7	69
4.8	70
4.9	71
4.10	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

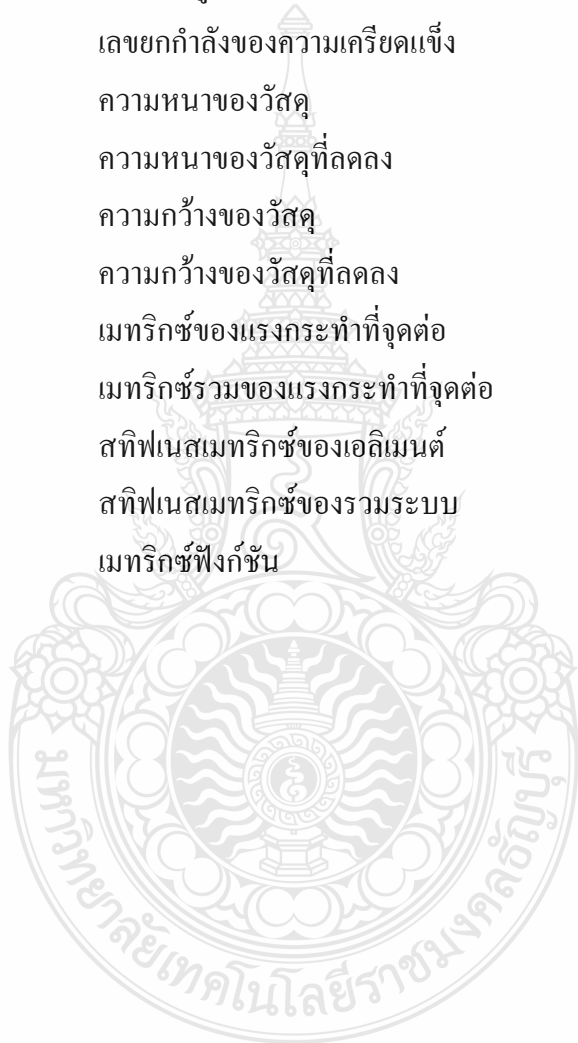
ภาพที่	หน้า
4.11 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปปีดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCD	73
4.12 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปปีดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCE.	74
4.13 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปปีดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCE.	75
4.14 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปปีดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCE.	76
4.15 กราฟเปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาที่แรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE ในการใช้ดรอปปีดหน้าตัดครึ่งวงกลม.....	78
4.16 เปรียบเทียบรูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของดรอปปีดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE.....	79
4.17 เปรียบเทียบรูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของดรอปปีดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE.....	80
4.18 เปรียบเทียบรูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของดรอปปีดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE.....	81
4.19 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปกรณีการใช้ดรอปปีดหน้าตัดครึ่งวงกลมของเหล็ก SPCE.....	82
4.20 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปกรณีการใช้ดรอปปีดหน้ารูปตัววีของเหล็ก SPCE.....	83
4.21 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป กรณีการใช้ดรอปปีดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ของเหล็ก SPCE.....	84
4.22 แผนภูมิของร้อยละเอลิเมนต์ในแต่ละชนิดของดรอปปีดของเหล็ก SPCE.....	84

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\{\phi\}$	เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเอลิเมนต์
$\{\phi\}_{sys}$	เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเอลิเมนต์ของระบบ
σ	ความเค้น
$\tilde{\sigma}$	ความเค้นจริง
σ_o	ความเค้นคราก
ε	ความเครียด
$\tilde{\varepsilon}$	ความเครียดจริง
ε_i	ความเครียดพลาสติกทิศทางความหนา
ε_w	ความเครียดพลาสติกทิศทางความกว้าง
τ	ความเค้นเฉือน
$d\lambda$	อัตราส่วนของความเครียดต่อความเค้น
β	อัตราส่วนความเครียด
α	อัตราส่วนความเค้น
θ	มุมทิศทางการรีด
A_i	พื้นที่หน้าตัดใดๆ
A_o	พื้นที่หน้าตัดเดิม
E	ยัง โมดูลัส
F	ค่าคงตัวแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก
G	ค่าคงตัวแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก
H	ค่าคงตัวแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก
J_2	ลำดับที่สองของความเค้นเบี่ยงเบน
K	สัมประสิทธิ์ความต้านแรง
L	ค่าคงตัวแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก
L_i	ความยาวขณะใดขณะหนึ่ง
L_o	ความยาวเดิม
M	ค่าคงตัวแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก
N	ค่าคงตัวแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

R	อัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้างต่อแนวหนา
\bar{R}	อัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้างต่อแนวหนาเฉลี่ย
d_i	เส้นผ่านศูนย์กลางใดๆ
d_o	เส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น
n	เลขยกกำลังของความเครียดแข็ง
t	ความหนาของวัสดุ
t_o	ความหนาของวัสดุที่ลดลง
w	ความกว้างของวัสดุ
w_o	ความกว้างของวัสดุที่ลดลง
$\{F\}_e$	เมทริกซ์ของแรงกระทำที่จุดต่อ
$\{F\}_{sys}$	เมทริกซ์รวมของแรงกระทำที่จุดต่อ
$[k]_e$	สทiffเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์
$[K]_{sys}$	สทiffเนสเมทริกซ์ของรวมระบบ
$[N]$	เมทริกซ์ฟังก์ชัน



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ใช้กันอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรม จะมีกระบวนการหรือวิธีในการขึ้นรูปหลายวิธีด้วยกัน การดึงขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย บางครั้งในการดึงขึ้นรูปนั้น วัสดุจะถูกจับยึดระหว่างคาย (Die) และแรงกดชิ้นงาน (Blank Holder Force) และจะถูกกดขึ้นรูปด้วย 펀ช์ (Punch) วัสดุที่ถูกกดจะเปลี่ยนไปตามรูปร่างของ 펀ช์ ภายใต้สภาวะที่มีผลกระทบท่อการขึ้นรูปต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นความเร็วในการขึ้นรูป คุณสมบัติด้านแอนไอโซทรอปี และโดยเฉพาะอย่างยิ่งความเสียดทานและแรงกดชิ้นงาน แต่อย่างไรก็ตามแผ่นกดชิ้นงานมิได้มีผิวสัมผัสกันตลอดทั้งวัสดุชิ้นงาน จึงเป็นการยากที่จะควบคุมการขึ้นรูปลึกจากแผ่นกดชิ้นงานได้แต่เพียงอย่างเดียว โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรเนื่องจากมีอัตราการไหลตัวของวัสดุที่ไม่เท่ากัน [1] เพื่อให้การไหลตัวของวัสดุดีขึ้น จึงมีการนำเอาครอปัดมาช่วยในการทำงาน

ครอปัดจะถูกใช้ในการควบคุมการไหลของวัสดุ เพื่อป้องกันมิให้เกิดรอยย่นหรือให้เกิดรอยย่นน้อยที่สุด โดยครอปัดจะถูกติดอยู่ที่แผ่นกดชิ้นงาน ขณะที่มีการขึ้นรูปลึกวัสดุจะไหลผ่านครอปัด ภายในครอปัดวัสดุจะเกิดการตัดให้ไหลไปในทิศทางหนึ่งและถูกคัดกลับมาในทิศทางตรงกันข้ามก่อนที่จะไหลคัดกลับไปยังทิศทางเดิมจึงทำให้มีการชะลอการไหลของวัสดุไม่ให้ไหลเร็วเกินไป อันเป็นสาเหตุของการเกิดรอยย่น ก่อนไหลเข้าช่องคาย Meiders, et al [2] ได้ศึกษาการนำครอปัดมาใช้กับการขึ้นรูปโลหะ โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวแปรที่สำคัญประกอบด้วย แรงในการควบคุมการไหลตัวของโลหะ (Drawbead Restraining Force) การเปลี่ยนแปลงความหนาแบบพลาสติกและแรงยกครอปัด (Drawbead Lift Force) ได้มีการจำลองครอปัดแบบสองมิติ และการทดลองจริงค่าความแตกต่างทางคณิตศาสตร์ทั้งสองค่าจะเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความหนาแบบพลาสติกได้ M.Samuel [3] ได้ศึกษาอิทธิพลรูปทรงของครอปัดในการขึ้นรูปโลหะ ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองของครอปัดเปรียบเทียบรูปทรงของครอปัดระหว่างร่องปิดที่เป็นแบบครึ่งวงกลมกับร่องปิดที่เป็นแบบสี่เหลี่ยมและวิเคราะห์ความแตกต่างของการไหลตัวของวัสดุในการใช้ร่องปิดทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกับ การทดลอง บุญส่ง จงกลณี [1] ได้ศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์ที่จะใช้ในการลากขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีลักษณะไม่สมมาตร เพื่อใช้ในการทดสอบอิทธิพลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูป 4 ตัวแปร

รูปร่างแผ่นเปล่า (Blank Geometry) ขนาดแรงกดชิ้นงาน (BHF) ชนิดของสารหล่อลื่น (Lubricant Type) และรูปร่างครอปีด (Drawbead Geometry)

ครอปีดที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในงานอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นมีหลายรูปทรง เช่น ครอปีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapeziform Drawbead) ครอปีดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Half-Round Drawbead) ครอปีดแบบหน้าตัดรูปตัววี (V-Shaped Drawbead) เพื่อเป็นข้อมูลในการนำครอปีดไปใช้งาน ต้องมีการทำนายประสิทธิภาพของครอปีด โดยการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบจากครอปีดในการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยคอมพิวเตอร์ [4] ควรเลือกใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) เพื่อให้ได้ผลวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำ แต่อย่างไรก็ตามถ้าต้องการผลวิเคราะห์ที่มีความละเอียดแม่นยำมากขึ้นจะต้องใช้จำนวนการแบ่งชิ้นงาน (Element) เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะตรงบริเวณรัศมีครอปีดมีขนาดเล็ก ทำให้ต้องใช้เวลามากและเครื่องคอมพิวเตอร์ต้องมีประสิทธิภาพสูงยังมีจำนวนชิ้นงานที่มีความละเอียดมากเท่าใด ย่อมหมายถึงต้องใช้เวลาและประสิทธิภาพของเครื่องมากเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ในการวิจัยจึงต้องกำหนดรูปร่างครอปีดให้มีความเหมาะสมและมีการควบคุมแรงในการกดชิ้นงานให้คงที่ จะมีเฉพาะการเปลี่ยนแปลงการกระจายความเครียด (Strain) และความหนาของชิ้นงานที่เปลี่ยนไป

จากที่ได้กล่าวมาแล้วจึงได้จัดทำโครงการวิจัยขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบจากครอปีดที่มีผลการควบคุมการไหลของโลหะแผ่น โดยวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เพื่อมุ่งเน้นการประยุกต์รูปร่างของครอปีด โดยการทดลองทำการเปรียบเทียบครอปีดแบบหน้าตัดรูปตัววี ครอปีดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม และ ครอปีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ที่มีผลต่อการไหลตัวของโลหะในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปทรงไม่สมมาตรโดยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาผลการวิเคราะห์กับผลการทดลองซึ่งจะสามารถช่วยลดเวลาในการทดลองแม่พิมพ์เพื่อการผลิตจริงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการประยุกต์รูปทรงของครอปีดที่มีผลต่อการไหลตัวของโลหะแผ่นในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของเหล็กยึดยึดต่อการไหลตัวในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 จำลองการขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานแผ่นเหล็กกรีดเย็น SPCC, SPCD และ SPCE ความหนา 1.0 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปจริง

1.3.2 สร้างแบบจำลองรูปทรงของคอรอปิด ดังนี้

- คอรอปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม
- คอรอปิดแบบหน้าตัดรูปตัววี
- คอรอปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า

1.3.3 เปรียบเทียบแรงกดชิ้นงาน (Blank Holder Force) ของการจำลองการขึ้นรูปด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับการขึ้นรูปจริง โดยเปรียบเทียบจากเปอร์เซ็นต์ของแรงขึ้นรูปที่แรงกดชิ้นงาน เท่ากับ 30%, 50% และ 70% ของแรงที่ใช้ขึ้นรูปลึกลงที่เหมาะสมกับชนิดของคอรอปิด

1.3.4 ศึกษาอิทธิพลของรูปทรงคอรอปิด

- คอรอปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม
- คอรอปิดแบบหน้าตัดรูปตัววี
- คอรอปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า

1.3.5 วิเคราะห์แรงลากขึ้นรูปและวัดความเครียดจากความหนาของชิ้นงาน

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ทดสอบหาสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กกรีดเย็นเกรด SPCC, SPCD และ SPCE ความหนา 1.0 มิลลิเมตร

1.4.3 ออกแบบสร้างแม่พิมพ์ สำหรับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม Dyna Form 5.6

1.4.4 ศึกษาผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการจำลองการขึ้นรูป

1.4.5 ทดลองขึ้นรูปชิ้นงานตามแบบที่กำหนด

1.4.6 ทำการเก็บข้อมูลได้แก่ ความเครียดแนวความหนา และพฤติกรรมการฉีกขาด ที่ได้จากการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง

1.4.7 ศึกษาวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูลผลการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาแนวโน้มและความสอดคล้องของข้อมูล

1.4.8 วิเคราะห์ผลลัพธ์ และสรุปผลการวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงาน

1.5 คำจำกัดความในการวิจัย

1.5.1 แรกกดชิ้นงานคือ ขนาดของแรกกดของแผ่นกดชิ้นงาน (Blank Holder) ที่พอเหมาะสำหรับป้องกันไม่ให้ชิ้นงานเกิดรอยย่นหรือชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาด เช่น ถ้าแรกกดมากเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาดหรือถ้าแรกกดน้อยเกินไปจะทำให้ ชิ้นงานเกิดรอยย่นได้ [1]

1.5.2 ครอบปิด มีหน้าที่ในการควบคุมการไหลตัวของโลหะที่จะเข้าไปในคायและช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่น (Wrinkle) ในขณะที่ขึ้นรูป นอกจากนี้ยังช่วยลดแรงกดของเบงก์ไฮดรอลิคตลอดจนทำหน้าที่เหมือนกับ ปรับตัวรีดโลหะให้ความเครียด (Strain) ลดลง เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะ [4]

1.6 กรอบแนวคิดในการวิจัย

กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น เป็นการเปรียบรูปทรงของแผ่น โลหะแบบราบให้เป็นรูปทรงตามที่ต้องการ โดยปราศจากการแตกหรือการบางเฉพาะแห่ง กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น จะถูกทำให้เสียรูปการด้วยเครื่องมือ ซึ่งประกอบด้วย พืนซ์ คาย โดยอาศัยแรงกดจากพืนซ์ทำให้วัสดุเกิดการไหลตัวเป็นไปตามขนาดและรูปทรงของคาย ดังนั้นต้องศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุที่นำมาขึ้นรูป อิทธิพลตัวแปรของรัศมีพืนซ์และคายที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งได้อธิบายดังนี้

พฤติกรรมของแผ่น โลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการลากขึ้นรูปในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร 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 ทำให้บริเวณส่วนกันของชิ้นงานถูกพืนซ์ฉีกขาดแต่ถ้าแรงกดชิ้นงานมากเกินไป โลหะก็จะไม่สามารถไหลตัวเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะการขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่สมมาตรจะทำให้อัตราการไหลของโลหะแต่ละจุดไม่เท่ากัน ทำให้แรงที่ใช้ในการกดแต่ละจุดไม่เท่ากันด้วย สำหรับบริเวณที่ต้องการแรงกดมากจะใช้ครอบปิดเข้ามาช่วยเพื่อทำให้การไหลตัวของโลหะช้าลง [7]

ครอบปิดมีหน้าที่ควบคุมการไหลตัวของโลหะที่จะไหลเข้าไปในคาย และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยร่น ในขณะที่ขึ้นรูปนอกจากนี้ยังช่วยลดแรงกดชิ้นงานและตัวรีดโลหะให้ความเครียดลดลง เป็นการเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะ การติดตั้งครอบปิดสามารถติดตั้งที่แผ่นกดชิ้นงานหรือที่คายก็ได้แต่ปกตินิยมติดตั้งอยู่ที่แผ่นกดชิ้นงาน และร่องปิด (Bead) จะอยู่ที่คาย

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 สามารถเลือกใช้แรงที่เหมาะสมในการกดชิ้นงานของแผ่นกด ที่เหมาะสมกับชนิดของครอบปิด
- 1.7.2 สามารถเลือกใช้ครอบปิดได้อย่างเหมาะสม
- 1.7.3 สามารถนำไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการตัดสินใจที่จะใช้ครอบปิดมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก
- 1.7.4 ได้ทราบข้อดีและข้อเสียของรูปทรงครอบปิดที่ใช้ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก



บทที่ 2

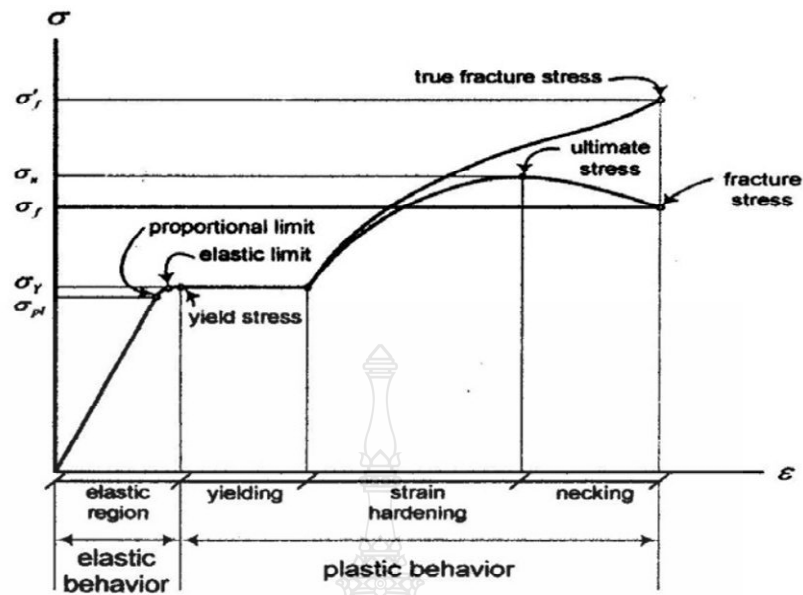
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะ

ทฤษฎีในการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะวัสดุแผ่น (Sheet Metal) พฤติกรรม การเปลี่ยนรูปในช่วงถาวร (Plasticity) และพฤติกรรมเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น (Elasticity) เมื่อวัสดุ ซึ่งได้รับแรงกระทำจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรที่กระทำออก วัสดุจะคืนตัวเล็กน้อย เมื่อไม่ได้รับแรงกระทำ ในส่วนพฤติกรรมเปลี่ยนรูปถาวรเมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจนวัสดุเลยจุดคราก (Yield Point) ถ้านำแรงที่กระทำออกวัสดุจะไม่กลับคืนตัว วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร คุณสมบัติทางกลที่สำคัญอันหนึ่งซึ่งจะมีผลต่อการขึ้นรูปของวัสดุโลหะแผ่นคือ ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (True Stress-Strain Relation) ซึ่งในกรณีที่ใช้กฎยกกำลัง (Power Law) จะต้องหาค่าคุณสมบัติของค่า Strength Coefficient (K) และ Strain Hardening Exponent (n) โดยค่า n เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการขึ้นรูป ถ้าวัดค่า n มีค่ามากจะทำให้โลหะแผ่นมีความสามารถในการขึ้นรูปดี และค่าคุณสมบัติที่ไม่เท่ากันทุกทิศทางในแนวระนาบ (Planar Anisotropy) ซึ่งค่าที่สำคัญคือค่า R (R-Value หรือ Plastic Strain Ratio) หาได้จากสัดส่วนความเครียดในแนวความกว้างกับความเครียดในแนวความหนา ซึ่งค่า R เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในด้านความต้านทานการหดตัวในแนวความหนา เนื่องจากเหล็กแผ่นผ่านการรีดมาทำให้อนุภาคภายในมีทิศทางตามแนวรีด ส่งผลให้ความสามารถในการยืดหดตัวของเหล็กแผ่นแตกต่างกัน ดังนั้นในการหาค่า R จำเป็นต้องหาอย่างน้อย 3 แนว คือค่า R ในทิศตามแนวรีดทิศ 45° กับแนวรีด และทิศทางตั้งฉากกับแนวรีด ถ้าวัดค่า R แตกต่างกันมาก จะทำให้ขอบของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปยาวไม่เท่ากันหรือการเป็นคลื่นที่ขอบชิ้นงาน (Earing) [8]

2.1.1 ทฤษฎีในการเปลี่ยนรูปช่วงยืดหยุ่น (Elastic Theory)

เมื่อวัสดุได้รับแรงดึงจะทำให้วัสดุเกิดการยืดตัวซึ่งสามารถแบ่งพฤติกรรมการยืดตัวออกเป็น 2 ส่วน หลักๆ คือ การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นหรือช่วงอีลาสติกและการเปลี่ยนรูปถาวรหรือช่วงพลาสติก ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ [9]

คุณสมบัติของวัสดุที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งเขียนอยู่ในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริง (True Stress-True Strain Curve) หรือเรียกอีกชื่อว่า (Flow Curve) ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linearity) หรือไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linearity) โดยมีความสำคัญในการนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อช่วยให้ทำนายผลได้ถูกต้องแม่นยำ ในการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะกำหนดให้วัสดุของแบบจำลองมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropy) ซึ่งจะแตกต่างจากพฤติกรรมของวัสดุจริงเนื่องจากวัสดุจริงมีการเรียงตัวของผลึกไม่เท่ากันทุกทิศทางทำให้วัสดุมีคุณสมบัติแบบ Anisotropy โดยที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงของวัสดุสามารถหาได้จากการทดสอบดึง (Uni-Axial Tension Test) หรือการทดสอบกด (Compression Test) ในการทดสอบแรงดึงขึ้นทดสอบชนิดหน้าตัดกลมหรือชนิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะถูกแรงกระทำโดยการดึงหรือกดเพิ่มแรง (F) อย่างช้าๆ และควบคุมความเร็วให้ขึ้นทดสอบเปลี่ยนรูปอย่างสม่ำเสมอตามแนวแกน แล้ววัดค่าแรงและระยะการเปลี่ยนรูปของขึ้นทดสอบ จนกระทั่งขึ้นทดสอบเกิดความเสียหายหรือขาดออกจากกัน ผลการทดสอบที่ได้จะนำไปหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุขึ้นทดสอบ 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 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวเดิมของชิ้นทดสอบเรียกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเชิงวิศวกรรม (Engineering Stress-Strain Curve) ซึ่งในการทดสอบจริง ในขณะที่ระดับความเค้น ในชิ้นงานทดสอบเพิ่มเลขความเค้นคราก พื้นที่หน้าตัดและความยาวของชิ้นงานทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจนเกิดคอคอดและขาดออกจากกันในที่สุด ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถหาได้โดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละขณะ ซึ่งเรียกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง (True Stress True Strain Curve) หรือเรียกอีกชื่อว่า (Flow Curve) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร ถ้า $\bar{\sigma}$ เป็นความเค้นจริงและ $\bar{\varepsilon}$ เป็นความเครียดจริง

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

โดย A_i คือพื้นที่หน้าตัดใดๆ A_0 คือพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น σ คือความเค้นเฉลี่ย F_i คือแรงดึงที่กระทำบนชิ้นทดสอบ

สำหรับความเครียดจริง $\bar{\varepsilon}$ สามารถหาได้โดยพิจารณาที่ความยาวใดๆ ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหาได้จากการ อินทิเกรตความยาว dL_i ใดๆ

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

ในกรณีการขึ้นรูปโลหะมีปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้น จะสมมุติให้ปริมาตรไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังการขึ้นรูปทำให้มีปริมาตรเท่าเดิม

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

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

ดังนั้นความเค้นจริงและความเครียดจริงโดยสมมุติฐานให้ปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูปคงที่

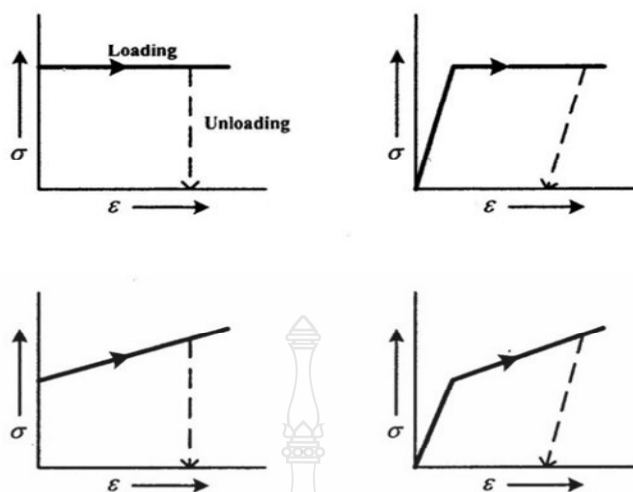
$$\tilde{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2.7)$$

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

โดย d_i คือเส้นผ่าศูนย์กลางใดๆ d_o คือ เส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ

2.1.2 ทฤษฎีในการเปลี่ยนรูปถาวรหรือในช่วงพลาสติก (Plasticity Theory)

ในการขึ้นรูปวัสดุโลหะแผ่นให้มีรูปทรงตามที่ต้องการจะต้องให้แรงกระทำกับวัสดุเพื่อให้วัสดุเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ผลจากการทดสอบการดึงวัสดุพบว่าพฤติกรรมของวัสดุแบ่งได้เป็นสองช่วง คือ ช่วงยืดหยุ่นและช่วงเปลี่ยนรูปอย่างถาวรหรือช่วงพลาสติกพฤติกรรมเหล่านี้ อยู่ด้วยกันหลายลักษณะซึ่งสามารถแสดงด้วยแบบจำลอง (Model) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ [9]

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

2.1.3 เกณฑ์การคราก (Yield Criteria)

ทฤษฎีของฟอนมิสเซสหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าทฤษฎีพลังงานแปรรูป (Distortion Theory) ซึ่งฟอนมิสเซส 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 $\sigma_1 = \sigma_o$, $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_o$

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

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

เมื่อ σ_o คือ ความเค้นคราก

k คือ ความเค้นเฉือนสูงสุดที่ได้จากการทดสอบดึงวัสดุ

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

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

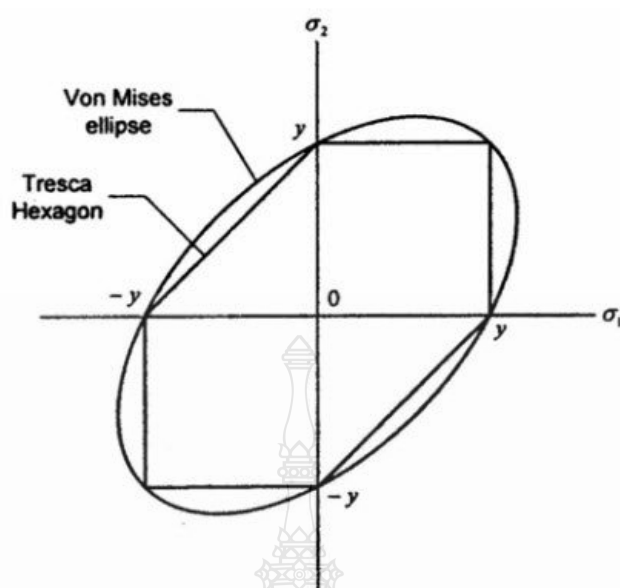
$$\sigma_1 = k \quad (2.13)$$

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

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



ภาพที่ 2.3 เปรียบเทียบกรอบการแตกหัก [9]

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

2.1.4 ทฤษฎีแอนไอโซทรอปีของ Hill 1948

ได้เสนอการพิจารณาพลาสติกแอนไอโซทรอปีโดยไม่คำนึงถึงรูปผลึกเดิม โดยสมมติว่าวัสดุเอกพันธ์แสดงคุณลักษณะโดยแกนไอโซทรอปี 3 แกนตั้งฉากกันคือ x, y และ z ซึ่งคุณสมบัติสมมาตรสองหน้า (ระนาบ $x-y, y-z$ และ $z-x$ คือ ระนาบสมมาตร) ในแผ่นรีดมักใช้ทิศทาง x, y และ z เป็นทิศทางรีด ทิศทางขวางการรีด และทิศทางความหนาตามลำดับ ทฤษฎีนี้ยังสมมติว่า ความต้านแรงดึงครากและแรงกดครากในทิศทางที่กำหนดมีค่าเท่ากันเกณฑ์การคราก แอนไอโซทรอปีกที่เสนออยู่ในรูป [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 คือค่าคงตัวซึ่งแสดงคุณสมบัติของไอโซทรอปิกสังเกตว่าถ้า $F=G=H$ และ $L=M=N=3F$ สมการที่นี้ลดรูปลงเป็นเกณฑ์ของฟอนมิเชส 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

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

$$Y^2 = \frac{1}{H+F}$$

$$Z^2 = \frac{1}{F+G}$$

(2.18)

แก้สมการที่พร้อมกันได้

$$2F = \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2}$$

$$2G = \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2} \quad (2.19)$$

$$2H = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2}$$

ในกรณีของโลหะแผ่นวัด Z ได้ยาก ค่าคงตัว L, M และ N สามารถหาได้จากการทดสอบการเหิน กฎการไหลสามารถหาได้โดยใช้สมการที่

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

เมื่อ $f(\sigma_{ij})$ คือ ฟังก์ชันการคราก (ใช้ได้กับวัสดุแอนไอโซทรอปิกและไอโซทรอปิก) หาอนุพันธ์ของสมการที่ 2.20 ได้กฎการไหล

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

ในการหากฎไหลสำหรับความเครียดเหิน $d\varepsilon_{yz}$, $d\varepsilon_{zx}$ และ $d\varepsilon_{xy}$ ต้องเขียนเกณฑ์การคราก สมการที่ 2.16 ใหม่ เพื่อให้พจน์ของความเค้นเหินปรากฏในรูป

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

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 $\sigma_x = X$, $\sigma_y = \sigma_z = 0$ ในสมการที่ 2.21 ได้ความเครียด

$$\begin{aligned}d\varepsilon_x &= d\lambda(H + G)X \\d\varepsilon_y &= -d\lambda(H)X\end{aligned}\quad (2.22)$$

$$d\varepsilon_z = -d\lambda(G)X$$

เนื่องจากอัตราส่วนความเครียดสำหรับการทดสอบการดึงในทิศทาง x นิยามว่า

ดังนั้น

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

$$R = \frac{H}{G}\quad (2.23)$$

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

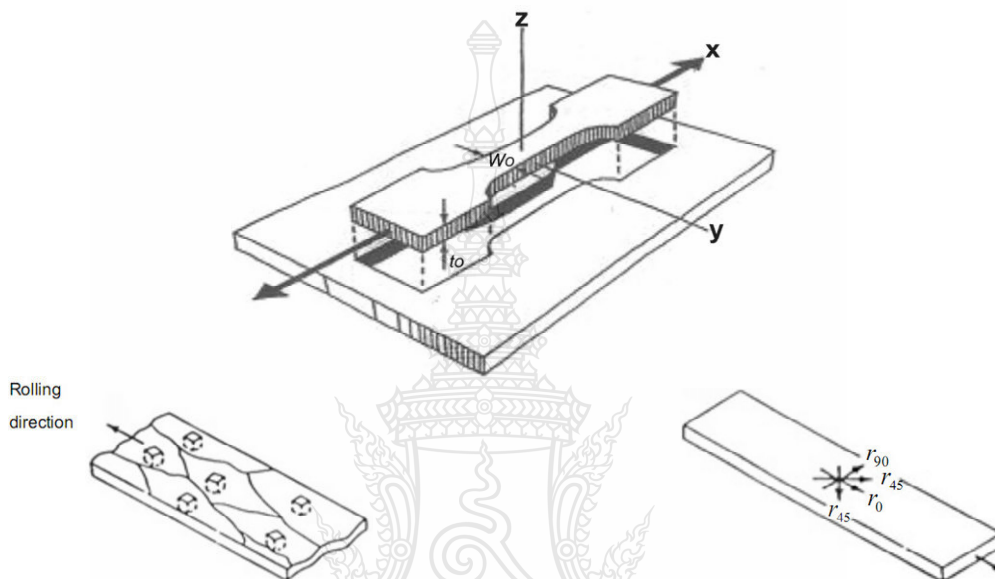
$$P = \frac{H}{F}\quad (2.24)$$

2.1.5 พลาสติกแอนไอโซทรอปี (Plastic Anisotropy)

สาเหตุที่สำคัญมากที่สุดซึ่งทำให้โลหะมีคุณสมบัติพลาสติกแอนไอโซทรอปีก็คือทิศทางของเกรนทิศทางที่เป็นไปหรือเนื้อของรูปผลึกที่พัฒนาขึ้นในเหล็กกล้าที่เกิดจากการหมุนของแลคทิสในเกรนระหว่างการเปลี่ยนรูป โดยการสลีปหรือการทวิน (Twinning) พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของชิ้นทดสอบการดึงที่เป็นแผ่นแถบ ตัดออกมาจากแผ่นรีด เมื่อได้รับแรงดึงในแนวแกน สามารถเกิดการครากได้เฉพาะโดยการสลีปในระนาบความต้านแรงดึงครากของชิ้นทดสอบที่ตัดทำมุม θ กับทิศทางการรีดไม่แปรผันกันมากนัก ผลสรุปอย่างผิดพลาดว่าวัสดุเป็นไอโซทรอปี ความผิดพลาดอาจเกิดขึ้นได้ถ้าวัดความดึงเครียดในแนวขวางซึ่งเป็นผลมาจากการดึง ถ้าทิศทางเป็นอุดมคติ ความหนาไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก การยึดในแนวยาวมีผลทำให้ความกว้างชิ้นทดสอบลดลง [10]

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

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (2.25)$$



ภาพที่ 2.4 ชั้นทดสอบตามทิศทางกรีด [9]

ภาพที่ 2.4 ในการวัดค่า R ถึงแม้ว่า มีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้าง ε_w ต่อแนวหนาความเครียดในแนวหนา ε_t ไม่สามารถวัดได้อย่างแม่นยำบนแผ่นบาง เพราะฉะนั้นความเครียดในแนวหนามักหาได้จากการวัดความเครียดในแนวยาวและแนวกว้างโดยใช้ปริมาตรคงตัว $\varepsilon_t = (\varepsilon_l + \varepsilon_w)$ เพื่อการวัดที่แม่นยำ ควรใช้ภาคตัดลดลงให้ค่อนข้างยาวมากเมื่อเทียบกับความกว้าง และภาคตัดทดสอบที่ใช้วัดค่า ε_t 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 แม้ว่าสหสัมพันธ์พื้นฐานไม่แม่นยำ แต่ก็มีพื้นฐานสำหรับใช้กับเครื่องมือวัดเชิงอุตสาหกรรมขนาดเล็กซึ่งวัดค่า E ของแผ่นแถบบางด้วย Sonic Velocity และปรับให้อ่านค่า R ได้ โดยปกติค่า R มักแปรผันตามทิศทางทดสอบ θ และมักใช้แสดงคุณลักษณะของวัสดุโดยค่า R เฉลี่ยคือ \bar{R}

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45^\circ} + R_{90^\circ}}{4} \quad (2.26)$$

2.1.6 ความเครียดแข็ง (Strain Hardening)

ความเครียดแข็งเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีคุณสมบัติเหนียวที่ใช้ในงานขึ้นรูปเย็น เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำผ่านจุดครากตัวทำให้เกิดความเครียดสะสมขึ้นภายในวัสดุ จึงต้องใช้แรงที่มากกว่าเดิมในการทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปร่าง สำหรับการวิเคราะห์วัสดุแบบ อีลาสติก – พลาสติก ได้แสดงพฤติกรรมความเครียดแข็งของวัสดุ ดังนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่น จะเป็นในลักษณะเชิงเส้นการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำจะทำให้เกิดความเครียดเป็นสัดส่วนซึ่งหลักการนี้ จะเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's Law) [11]

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.27)$$

เมื่อ σ คือ ค่าความเค้น

E คือ ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นหรือ โมดูลัสของยัง

ε คือ ค่าความเครียด

สำหรับคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปในช่วงพลาสติกครั้งนี้ เป็นไปตามกฎยกกำลัง (Power Law) [12]

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.28)$$

โดยที่ K คือ สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (Strength Coefficient)

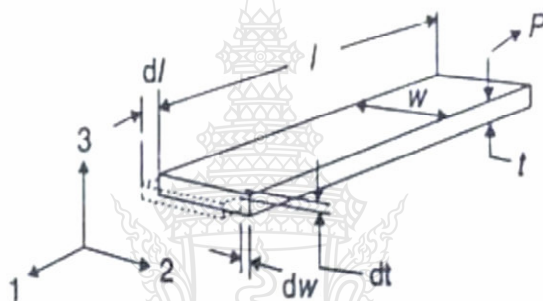
n คือ เลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (Strain - Hardening Exponent)

สำหรับค่าตัวเลขยกกำลังหรือความเครียดแข็ง n และค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรง K สามารถหาได้โดยทำการใส่ค่า \log เข้าไปในสมการที่ยกกำลังซึ่งทำให้สามารถได้สมการที่ใหม่

$$\log \sigma = n \log \varepsilon + \log K \quad (2.29)$$

2.2 กระบวนการพื้นฐานของโลหะแผ่น และระนาบความเค้น (General Sheet Processes; Plan Stress)

ภาพที่ 2.5 เป็นการทดสอบการดึงเป็นแนวทางการหาขนาดความเค้น (Plane Stress) การทดสอบการดึงแกนเดียว (Uniaxial Tension) คือการแสดงตัวอย่างของการเปลี่ยนรูปแบบระนาบความเค้น การดึงแกนเดียว (Uniaxial Tension) ให้พิจารณาจุดเล็กๆ ในชิ้นทดสอบในการดึงให้เปลี่ยนรูปแกนเดียวทำการทดสอบเริ่มจากการเปลี่ยนรูปที่เล็กน้อยจนถึงสูงสุดเราพิจารณาพื้นที่หน้าตัดระหว่างเปลี่ยนรูปลักษณะของจุดเล็กๆ (Element) ยังคงตั้งฉากแต่ละทิศทางไม่มีความเคลื่อนที่เกี่ยวกับทิศทางหลัก 1, 2, 3



ภาพที่ 2.5 ทิศทางหลักในการทดสอบแรงดึง [9]

ในทางตรงกันข้ามในการทดสอบการดึง 2 ความเค้นหลักมีค่าเป็นศูนย์ในลักษณะชิ้นส่วนเล็กๆ ที่เปลี่ยนรูปค่าความเค้น 1 และ 2 ไม่เท่ากับศูนย์ ความเค้น 3 ก็ตั้งฉากกับผิว แท้จริงเกิดจากการสัมผัสระหว่างแผ่นบางกับ Tooling โดยทั่วไปแล้วน้อยกว่าจุด Yield ของวัสดุ จะให้เป็นศูนย์ได้และให้เป็น Plane Stress Deformation [9]

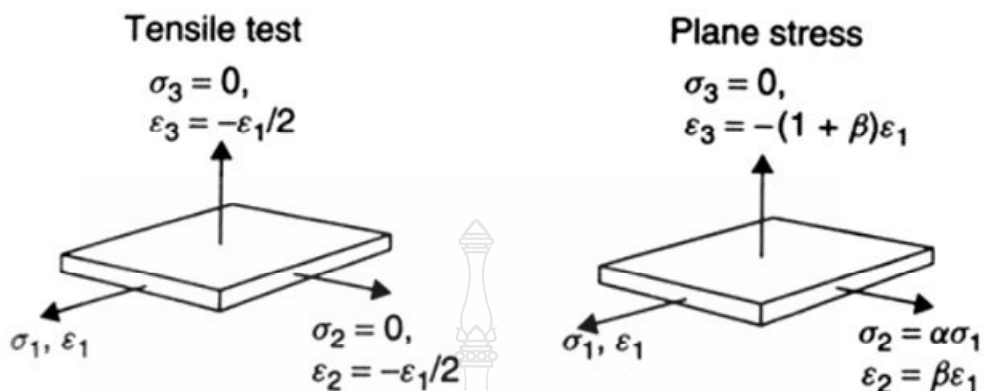
2.2.1 อัตราส่วนความเค้นและความเครียด (Stress And Strain Ratios) [2]

ในความหมายเฉพาะที่กล่าวถึงการเปลี่ยนรูปของจุดเล็กๆ Element ในแต่ละเทอมของอัตราส่วนความเครียด (Strain ratio; β) หรืออัตราส่วนความเค้น (Stress ratio; α) สำหรับวิธี Proportional ค่าความจริงที่ใกล้เคียงที่สุด ดังภาพที่ 2.6

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

$$\varepsilon_1; \varepsilon_2 = \beta \varepsilon_1; \varepsilon_3 = -(1 + \beta) \varepsilon_1$$

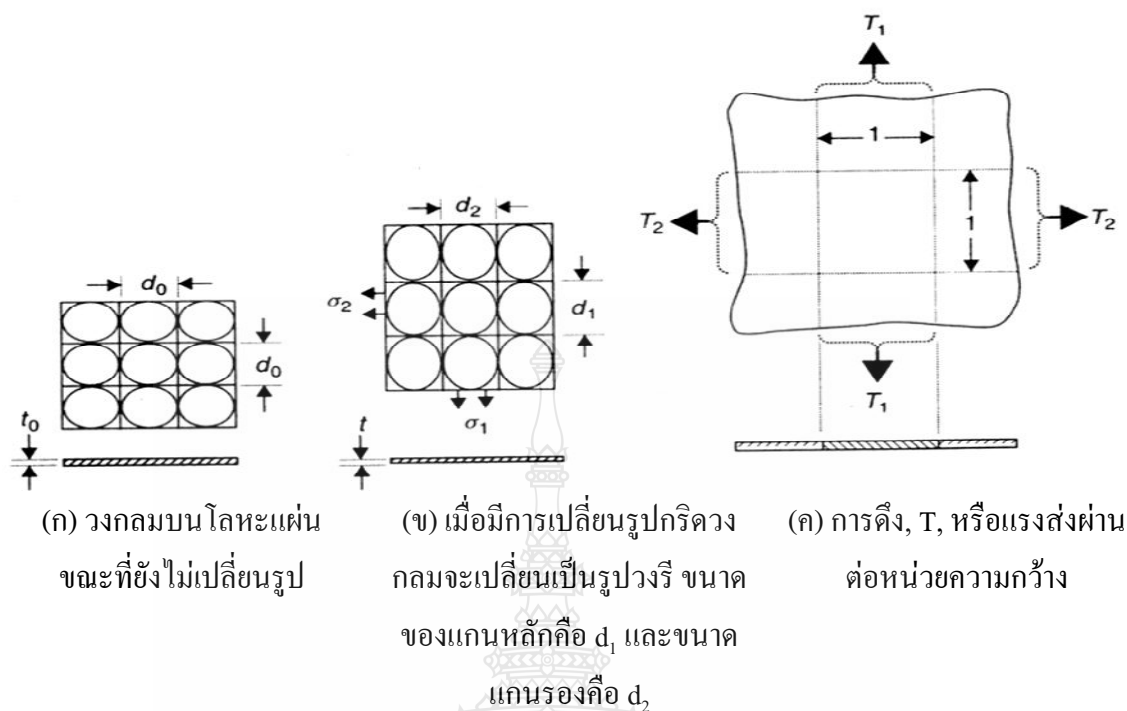
$$\sigma_1; \sigma_2 = \alpha\sigma_1; \sigma_3 = 0$$



ภาพที่ 2.6 ทิศทางหลักของความเค้นและความเครียด [9]

2.2.2 การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of Sheet in Plane Stress)

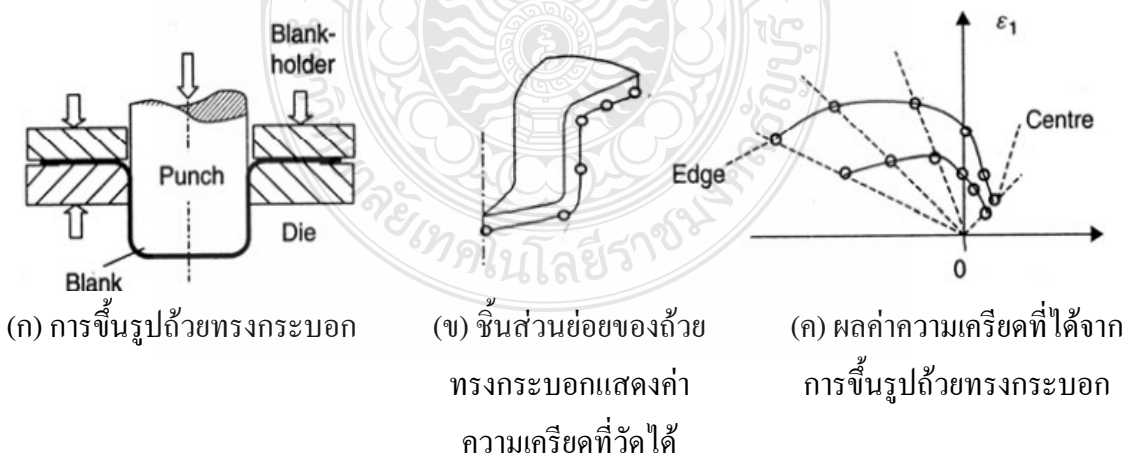
ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane Stress) พิจารณา (Work Hardening) ของวัสดุ ซึ่งเข้ากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูป ในภาพที่ 2.7 ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา t_0 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_0 หรือตารางขนาด d_0 ดังภาพที่ 2.7 (ก) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปวงกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี 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 การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น [13]

2.2.3 แผนภาพความเครียด (Strain Diagram) [9]

ความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้น ดังภาพที่ 2.8 สามารถวัดได้จากกริดวงกลมในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.8 แผนภาพความเครียด [9]

2.2.4 ค่าความเครียดหลัก (Principal Strains)[9]

ความเครียดหลักที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการ

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

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]

จากสมการที่ 2.30 ความเครียดหาได้โดยการวัดความหนาหรือหาได้จากความเครียดหลัก (Major Strain) ความเครียดรอง (Minor Strain) โดยให้พิจารณาว่าการเปลี่ยนรูปที่ปริมาตรคงที่

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

จากสมการที่ 2.32 ความหนาโดยทั่วไปคือ

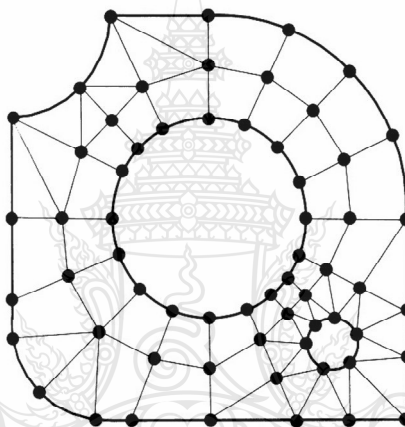
$$t = t_0 \exp(\varepsilon_3) = t_0 \exp[-(1 + \beta)\varepsilon_1] \quad (2.33)$$

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 ปัญหานั้นมักประกอบด้วยสมการที่เชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาได้จะประกอบด้วยค่าของตัวแปรตามตำแหน่งต่างๆ กันบนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ หลักการก็คือทำการลดค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณในจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (Elements) ดังภาพที่ 2.12 ซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน [14]



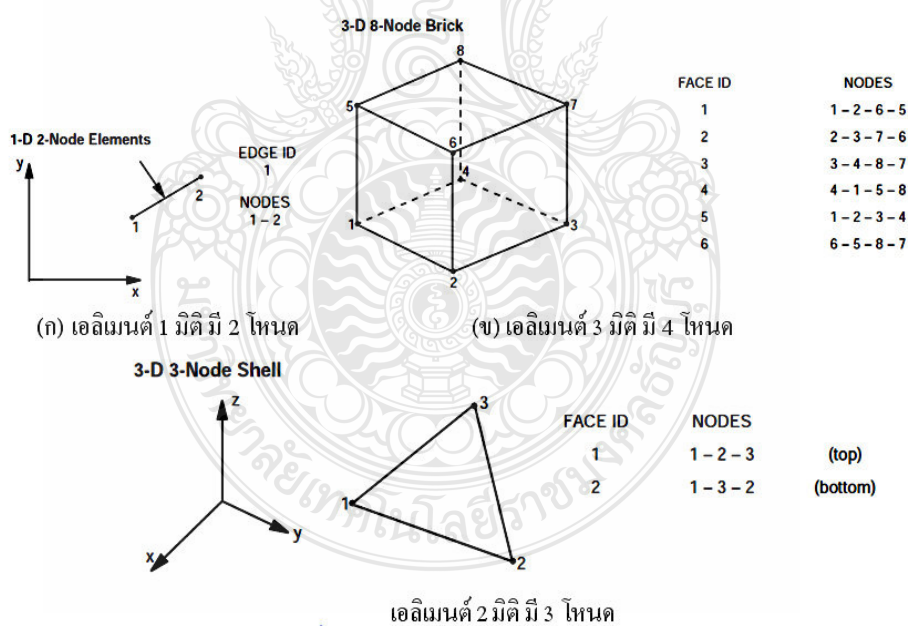
ภาพที่ 2.9 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [14]

ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis: FEA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อให้ได้ผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหาที่หลากหลายในทางวิศวกรรม [15] ซึ่งประกอบด้วยสมการที่ควบคุมระบบ และใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อแก้สมการที่ ในระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมกันด้วยจุดโหนด (Node) ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของปัญหาโดยประมาณต้องนำสมการที่ควบคุมระบบมาสร้างสมการที่ไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์บนโดเมน จากนั้นจึงทำการแก้ปัญหาดังกล่าวซึ่งจะได้ผลเฉลยของปัญหาที่จุดต่อบนโดเมน แม้การพัฒนาระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์แรกเริ่มเดิมทีจะเน้นไปที่การศึกษาความเค้นในโครงสร้างที่ซับซ้อน ตั้งแต่นั้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในสาขาที่เกี่ยวข้องเนื่องทางกลศาสตร์ เพราะระเบียบการนี้มีความหลากหลาย อีกทั้งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีความยืดหยุ่นได้ ซึ่งทำให้ได้รับความสนใจในสถานศึกษา

ทางด้านวิศวกรรม 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)

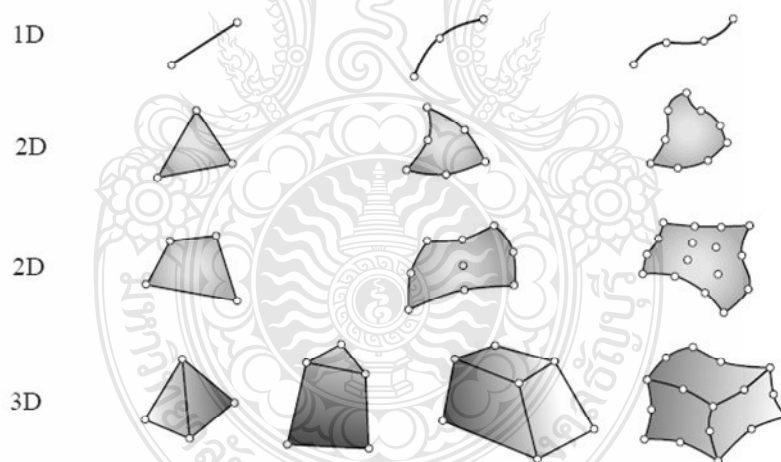
ภาพที่ 2.10 โหนดเป็นตัวช่วยเชื่อมต่อโครงสร้างชิ้นเล็กๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) แต่ละเอลิเมนต์ให้ติดกันด้วยจุดของโหนด นอกจากนี้โหนดยังช่วยในการกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ที่มีองศาอิสระ โดยปกติแล้วโหนดจะอยู่ที่มุมของเอลิเมนต์ หรือ จุดของเอลิเมนต์ แล้วกลุ่มของเอลิเมนต์และโหนดจะอยู่ติดกันเป็นกลุ่มที่เรียกว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) จะเป็นตัวแทนของชิ้นงานเพื่อนำไปจำลองเป็นสมการที่เมทริกซ์ (Matrix) เพื่อนำไปคำนวณที่ซับซ้อนต่อไป [17]



ภาพที่ 2.10 โหนดในเอลิเมนต์แต่ละมิติ [18]

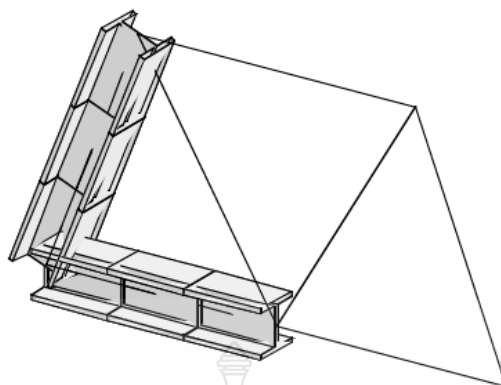
2.3.2 เอลิเมนต์ (Element)

โดยทั่วแล้วเอลิเมนต์จะมีมิติอยู่ 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 สดุดท้ายแบบ 3 มิติ (Solid Element) โดยปกติส่วนมาก รูปทรงเป็นแบบ Tetrahedral, Pentahedral, Hexahedral (Bricks) หรือ เป็นแบบปริซึม (Prisms) สามารถใช้กับงานที่เป็นปริมาตรตัน (Solid) ซึ่งเอลิเมนต์แต่ละมิติจะมีจุดที่สามารถสังเกตได้ง่าย จุดเหล่านี้เรียกว่า จุดโหนด (Nodal Points) หรือ โหนด (Node) ประโยชน์แบบทวิคูณของโหนดคือเป็นตัวกำหนดรูปร่างทางเรขาคณิตของเอลิเมนต์กับเอลิเมนต์ที่รูปร่างมีองศาเป็นแบบอิสระ โดยปกติโหนดจะตั้งอยู่ที่มุม หรือ จุดปลายของเอลิเมนต์ดังแสดงในรูป มากกว่านั้นในทางกลศาสตร์เอลิเมนต์เหล่านี้จะมีความเฉพาะเจาะจงกับพฤติกรรมของวัสดุสำหรับตัวอย่างเช่น เชิงเส้นยืดหยุ่น (Linear Elastic) ในวัสดุที่เป็นท่อน (Bar Element) [19]



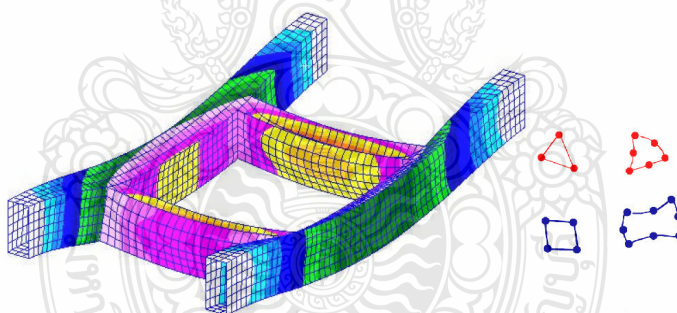
ภาพที่ 2.11 ชนิดของเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1 ถึง 3 มิติ [19]

1) เอลิเมนต์ 1 มิติ ดังภาพที่ 2.12 มีลักษณะเป็นเส้น (Beam Element) เท่านั้นซึ่งมีแต่ความยาว และไม่สามารถมองเห็นพื้นที่หน้าตัด หรือพื้นผิวได้อย่างชัดเจน และนอกจากเป็นเส้นแล้วจะไม่มีรูปทรงเรขาคณิตอื่นใดอีก เป็นแค่เพียงเส้นอาทิ เส้นตรง เส้นโค้งเท่านั้น ซึ่งมักนิยมเรียกว่า บีม (Beam) โดยเอลิเมนต์ต่อกันหลายเอลิเมนต์จะกลายเป็นกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) [20]



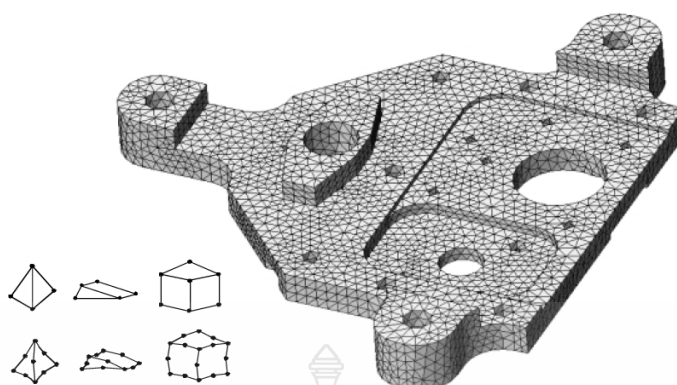
ภาพที่ 2.12 การใช้เอลิเมนต์ 1 มิติ ในงานโครงสร้าง [18]

2) เอลิเมนต์ 2 มิติ (Shell Element) ดังภาพที่ 2.13 ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม 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]



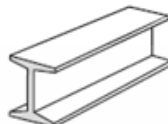



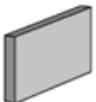

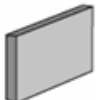
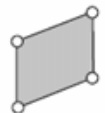
3) เอลิเมนต์ 3 มิติ (Solid Element) ดังภาพที่ 2.14 จะมีโครงสร้างเป็น 3 มิติ รูปทรงจะมีความกว้าง ยาว สูง โดยพื้นฐานของเอลิเมนต์ชนิดนี้จะมีโหนดตั้งแต่ 3 โหนดขึ้นไป เอลิเมนต์แบบนี้จะเหมาะกับกาจำลองโครงสร้างที่มีความหนา (Thick) เมื่อเทียบกับพื้นผิว [20]



ภาพที่ 2.14 การใช้งานเอลิเมนต์ 3 มิติ ในงานที่เป็นปริมาตรตันที่มีความหนา [21]

การจัดหมวดหมู่แบ่งประเภทของระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ในทางกลศาสตร์โครงสร้าง ความเหนียวแน่น ความหลวมของเอลิเมนต์บนพื้นฐานจะเกี่ยวข้องกับ โครงสร้างทางกายภาพดั้งเดิม ที่ชี้แจงหัวข้อนี้เพราะเป็นส่วนย่อยของระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งทำให้มีความเข้าใจในเทคนิคการออกแบบจำลองขึ้นสูง ดังเช่น รายละเอียดลำดับขั้น และการวิเคราะห์โดยรวมกับเฉพาะแห่ง [19] ดังภาพที่ 2.15

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

องค์ประกอบ โครงสร้างทางกายภาพ	ชื่อแบบจำลอง ทางพีชคณิต	การทำให้เป็นแบบอย่าง "ไฟไนต์เอลิเมนต์"
	ท่อน	
	ท่อน , กาน	
	ท่อ	
	ผลึก , พังผืด	
	แผงเล็จน	

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 ในการเชื่อมต่อของตัวแปรในจุดโหนดการกำหนดค่าอนุพันธ์ตัวแปรของอิสระการเคลื่อนที่จะมีหลายค่า 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)

ไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีความสามารถในการวิเคราะห์สมการที่ทั้งแบบเชิงเส้น (Linear) และไม่เชิงเส้น (Nonlinear) สำหรับสมการที่แบบไม่เชิงเส้นจะเหมาะสมสำหรับชิ้นงาน หรือวัสดุที่มีการเสีรูปร่าง (Deformation) ไปแล้ว ดังนั้นจึงมีความยุ่งยากมากกว่า ใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่มากกว่า ความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น ก็คือ การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น สมการที่แบบไม่เชิงเส้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าของเวลา เมื่อเกิดการเสีรูปร่าง เปลี่ยนแปลงรูปร่าง อีกทั้งสมบัติทางกายภาพจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปทำให้ค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ส่วนแบบเชิงเส้น เมื่อวัสดุเกิดการเสีรูปร่าง สมบัติทางกายภาพจะไม่เปลี่ยนแปลงไปแต่จะคงที่เสมอซึ่งทำให้ค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) ไม่เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย [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 คือ วัสดุมีการเสีรูปร่าง หรือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมาก (Large Deformation) จนทำให้ค่าความแข็งแรง (Stiffness) ของวัสดุ ขึ้นงานสูงขึ้นมากกว่าเดิมตามเวลาที่ผ่านไป ซึ่งสมการที่ทั่วไปแบบเรขาคณิตแบบไม่เชิงเส้น (Geometric Nonlinear) มีดังนี้ [22, 26-27]

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

- เมื่อ K คือ เมทริกซ์ความแข็งแรง (Stiffness Matrix)
 B คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Large Strain)
 D คือ ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (DOF)

2) วัสดุแบบไม่เชิงเส้น (Materials Nonlinear) โดยปกติแล้วการวิเคราะห์วัสดุแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) จะอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าจะเกิดการคืนรูปอย่างสมบูรณ์เมื่อนำแรง หรือ ภาระกระทำออกไปแล้ว ค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ซึ่งเรียกว่า อีลาสติคมอดูลัส (Elastic Modulus) จะมีค่าคงที่เสมอ แต่สำหรับวัสดุบางประเภทการคืนรูปเมื่อนำแรง หรือ ภาระกระทำออกไป จะเกิดความไม่สมบูรณ์จนเกิดช่วง Plastic Strain มักเกิดจากแรงที่มากระทำกับวัสดุมีขนาดมากเกินกว่าค่าจุดคราก (Yield) จนทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ซึ่งจะต้องใช้การวิเคราะห์แบบวัสดุไม่เชิงเส้น (Materials Nonlinear) ซึ่งในการวิเคราะห์จะใช้รูปแบบสมการที่โดยทั่วไปเหมือนกับสมการที่ 2.35 แต่แตกต่างกันที่ความเคลื่อนที่อิสระของโหนดเอลิเมนต์ (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 คือ เมทริกซ์ความแข็งแรง (Stiffness Matrix)
 B คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

D คือ ความเคลื่อนที่อิสระของ โหนด เอลิเมนต์ (DOF) กรณี (Small Strain)

3) การเปลี่ยนสถานะแบบไม่เชิงเส้น (Changing Status Nonlinear) มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงสถานะจนทำให้สมบัติของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ดังตัวอย่าง การดึงสลักกับการหย่อนสายเคเบิลนานๆ หรือ รางที่ต้องสัมผัสกับความร้อน ความเย็นสลักกันจนทำให้สมบัติของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปคือ ความสามารถในการรับแรงของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา หรือ ความสมบัติด้านอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 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 การแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆ กัน เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง (Elasticity Problem) ปัญหาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความร้อน (Thermal Problem) รวมทั้งปัญหาของการไหล (Fluid Problem) เป็นต้น ดังภาพที่ 2.16

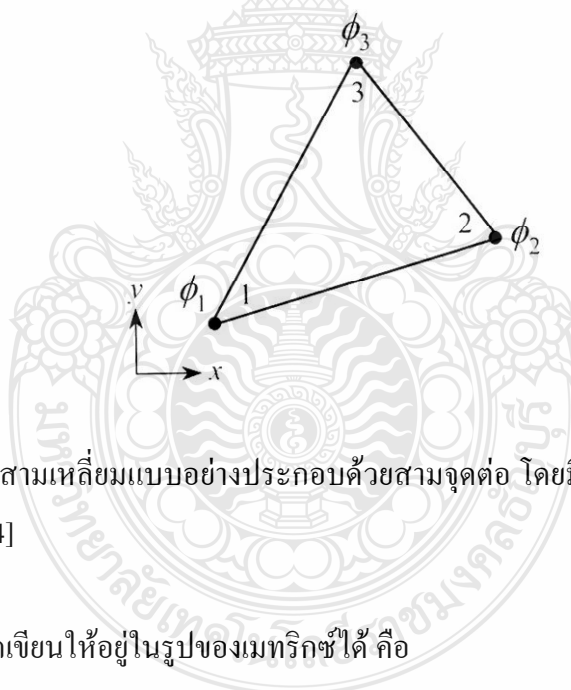


ภาพที่ 2.16 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ กัน [14]

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) หากเราวิเคราะห์ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง 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]

สมการที่ 2.37 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ คือ

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

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

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการที่ของเอลิเมนต์ (Element Equations) ดังตัวอย่างเช่น สมการที่ของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่าง 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 ถือเป็นหัวใจสำคัญของการศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการที่ของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการที่ 2.39 สามารถทำได้โดย วิธีการโดยตรง (Direct Approach) วิธีการแปรผัน (Variation Approach) วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals)

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการที่ของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบรวมกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการที่รวม (System of Simultaneous Equations) ในรูปแบบดังนี้

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

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ลงในระบบสมการที่รวม 2.41 แล้วจึงแก้ระบบสมการที่รวมนี้เพื่อหา $\{\phi\}_{\text{sys}}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ (nodal unknowns) ซึ่งอาจเป็นค่าของการเคลื่อนตัวตามจุดต่อต่างๆ ของโครงสร้าง หรือเป็นค่าของอุณหภูมิที่จุดต่อ หากเป็นปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นค่าของความเร็วของของไหลตามจุดต่อหากเป็นปัญหาเกี่ยวกับการไหล เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถนำมาใช้เพื่อหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการต่อไปได้อีก เช่น เมื่อรู้ค่าการเสยรูป (Displacement) ตามจุดต่อต่างๆ ของโครงสร้างก็สามารถนำไปใช้หาค่าความเครียด (Strain) และความเค้น (Stress) ได้ตามลำดับ หรือเมื่อรู้ค่าอุณหภูมิที่จุดต่อก็

สามารถคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ หรือเมื่อรู้ค่าความเร็วของของไหลที่จุดต่อก็สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลได้ เป็นต้น

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้ จะเห็นได้ว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีที่มีระเบียบแบบแผนอย่างเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีหัวใจสำคัญอยู่ที่การสร้างสมการที่ของเอลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 3

2.4 การลากขึ้นรูปลึกขึ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร [31]

ชิ้นงานที่มีลักษณะการไหลตัวของวัสดุไม่สมมาตร เช่น รูปถ้วยสี่เหลี่ยมหรือถ้วยวงรีความเสียหายที่จะเกิดขึ้นบนชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรนี้คือ เกิดรอยย่นที่ปีกถ้วย เกิดรอยฉีกขาดที่มุมพื้นซ์ หรือรอยฉีกขาดที่เกิดจากการไหลตัวไม่เท่ากันบริเวณต่างๆ ของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 ความเสียหายที่เกิดบนชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร [31]

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

จากผลงานวิจัยของ K.Lange [31] ได้แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการลากขึ้นรูปหรือการเปลี่ยนรูปร่างของแผ่นโลหะขึ้นกับความหนาของวัสดุและอัตราส่วนการขึ้นรูป (กรณีของแผ่นโลหะเปล่าและหน้าตัดพื้นที่ไม่กลม คิดค่าอัตราการลากขึ้นรูปจากการคำนวณขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางสมมติของวงกลมที่มีพื้นที่เท่ากัน) สำหรับการลากขึ้นรูปที่ใช้อัตราส่วนในการลากขึ้นรูปเท่ากับ 2.0 สำหรับแผ่นโลหะบาง ($D_0 / T \geq 25 - 40$) นั้นจะมีความไวต่อการเกิดรอยย่นมาก เพราะมีโมเมนต์ความเฉื่อยในการต้านการโก่งตัวและการเกิดรอยย่นต่ำ จึงต้องการแรงกดบนแผ่นจับขึ้นงานที่มากกว่าแผ่นโลหะที่มีความหนามาก สำหรับแผ่นโลหะหนา ($D_0 / T \leq 25$) โดยทั่วไปมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยย่นได้ยาก ทำให้สามารถลากขึ้นรูปได้โดยไม่ต้องใช้แผ่นจับขึ้นงาน และวัสดุมีค่า r_m (Normal Anisotropy) ที่ต่ำ จะต้องใช้แรงกดบนแผ่นจับขึ้นงานที่สูง และแรงกดแผ่นจับขึ้นงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุมีค่า Δr (Planar Anisotropy) สูงขึ้นด้วย

ดังนั้นการแก้ปัญหาการโก่งตัวหรือเกิดรอยย่นสามารถแก้ไขได้โดยการใช้รัศมีมุมพื้นซ์และคายให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้วัสดุมีการไหลตัวได้ง่ายขึ้น หรือแก้ไขโดยการเลือกใช้สารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติที่ดี เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นโลหะกับผิวของแม่พิมพ์ให้มีการไหลตัวได้ง่ายขึ้น และยังสามารถแก้ไขปัญหาการเกิดรอยย่นได้โดยการนำตัวครอบปิด (Drawbead) เข้ามาใช้เพื่อช่วยกักการไหลตัวของวัสดุที่บริเวณขอบปีกในแนวเส้นตรงให้มีการไหลตัวที่ช้าลงหรือไหลตัวเท่ากับบริเวณขอบปีกตามรัศมีมุมโค้ง ซึ่งมีการไหลตัวที่ช้าอยู่แล้ว

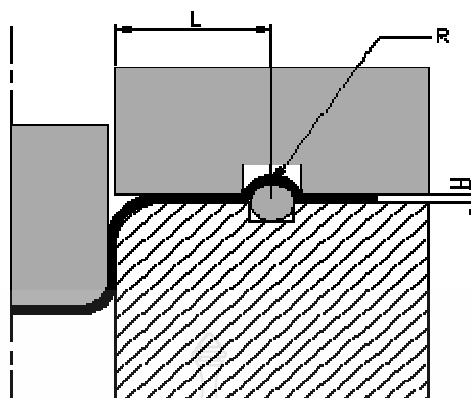
2.5 ครอบปิด (Draw Bead) [32]

การควบคุมแรงกดขึ้นงานที่ไม่พอเพียง จะทำให้เกิดรอยย่นของโลหะ ซึ่งการย่นนี้จะให้โลหะแผ่นไม่สามารถที่จะไหลตัวได้ ทำให้บริเวณส่วนก้นของขึ้นงานถูกพื้นซ์ดันนิกขนาดแต่ถ้าแรงกดของแผ่นกดขึ้นงานมากเกินไป โลหะก็จะไม่สามารถไหลตัวเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะการขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจะทำให้อัตราการไหลของแต่ละจุดไม่เท่ากัน ทำให้แรงที่ใช้ในการกดแต่ละจุดไม่เท่ากันด้วย สำหรับบริเวณที่ต้องการแรงกดมากจะใช้ครอบปิดเข้ามาช่วยเพื่อทำให้การไหลตัวของโลหะช้าลง [32]

ครอบปิดมีหน้าที่ควบคุมการไหลตัวของโลหะที่จะไหลเข้าไปในคาย และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่น (Wrinkle) ในขณะที่ขึ้นรูปนอกจากนี้ยังช่วยลดแรงกดของแผ่นกดขึ้นงาน และตัวรีดโลหะให้ความเครียดลดลงเป็นการเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะ การติดตั้งครอบปิดสามารถติดตั้งที่แผ่นกดขึ้นงานหรือที่คายก็ได้ แต่ปกตินิยมติดตั้งอยู่ที่แผ่นกดขึ้นงานและร่องบีด (Bead) จะอยู่ที่คาย

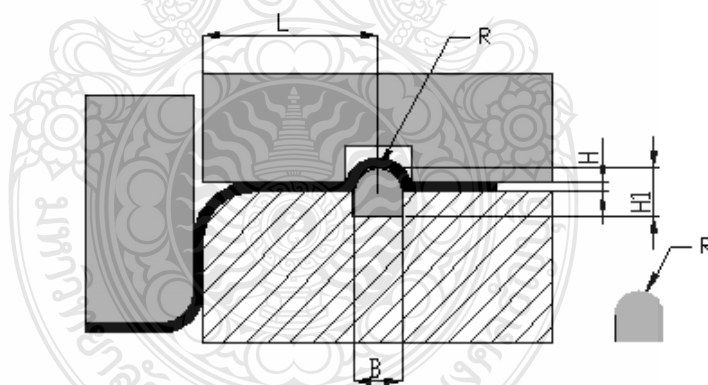
2.5.1 ครอบปิดแบ่งออกได้เป็น 5 ชนิดตามรูปร่างหน้าตัดของครอบปิด ดังต่อไปนี้

1) ครอบปิดแบบหน้าตัดกลม (Round Drawbead) ตัวแปลที่ใช้ในการออกแบบคือ รัศมีของครอบปิด (R) ความสูงที่พ้นจากผิวของแผ่นจับขึ้นงานหรือคาย (H) และระยะห่างจากปากคาย (L) ครอบปิดประเภทนี้นิยมใช้งานวิจัยเพื่อช่วยลดค่าความเสียดทาน และร่องรอยที่เกิดจากครอบปิดบนแผ่นโลหะมีน้อย แต่ไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตจริงแสดงดังภาพที่ 2.19



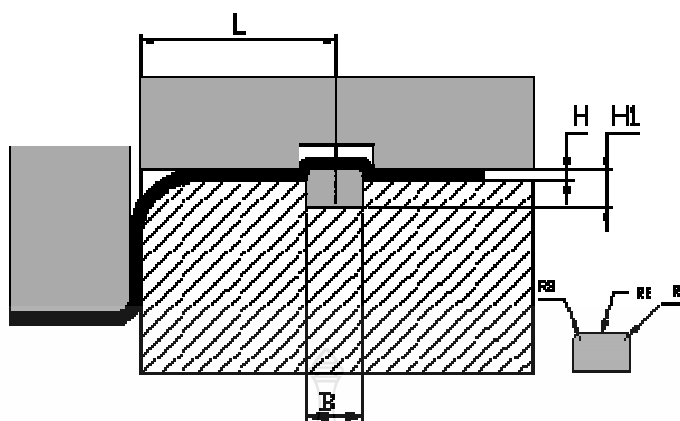
ภาพที่ 2.19 ครอบปิดแบบหน้าตัดกลม (Round Drawbead)

2) ครอบปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Half-Round Drawbead) มีตัวแปรในการออกแบบ คือ รัศมีของครอบปิด (R) ความกว้าง ($B = 2R$) ความสูงที่พ้นจากผิวของแผ่นจับชิ้นงานหรือด้าย (H) ความสูงของครอบปิด ($H1$) และระยะห่างจากปากด้าย (L) ครอบปิดประเภทนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตจริงแสดงดังภาพที่ 2.20



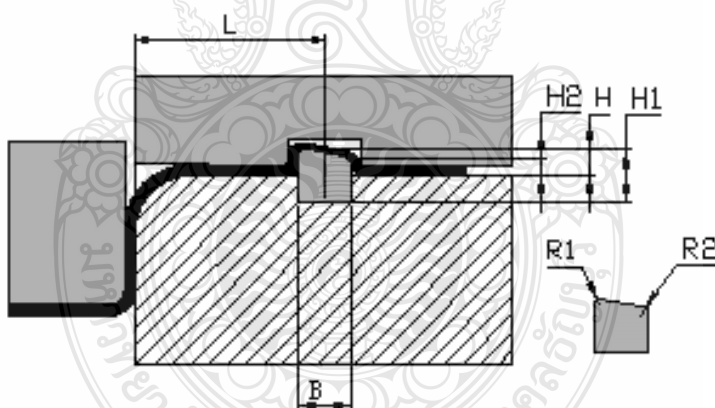
ภาพที่ 2.20 ครอบปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Half-Round Drawbead)

3) ครอบปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Drawbead) มีตัวแปรในการออกแบบ คือ รัศมี ($R1, R2, R3$) ความกว้าง (B) ความสูง ($H, H1$) และระยะห่างจากปากด้าย (L) ครอบปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่นิยมใช้แสดงดังภาพที่ 2.21



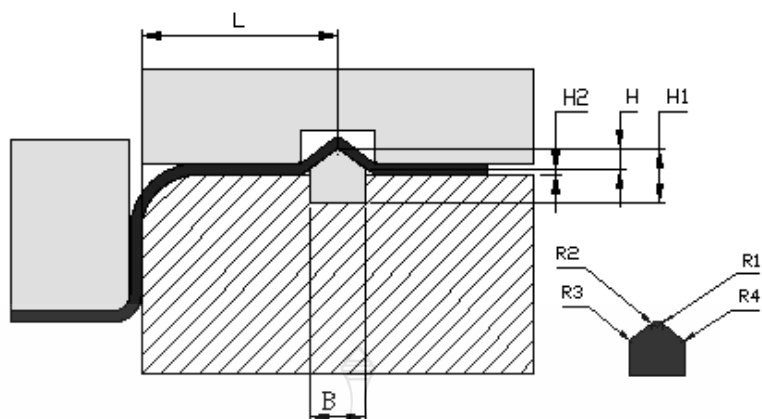
ภาพที่ 2.21 ครอบปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Drawbead)

4) ครอบปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapeziform Drawbead) มีตัวแปรในการออกแบบคือ รัศมี (R_1, R_2) ความกว้าง (B) ความสูง (H, H_1, H_2) และระยะห่างจากปากตาย (L) ครอบปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าแสดงดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 ครอบปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapeziform Drawbead)

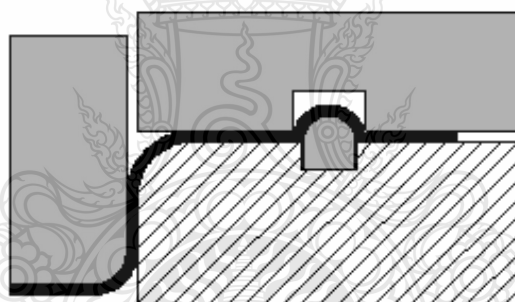
5) ครอบปิดแบบหน้าตัดรูปตัววี (V-Shaped Drawbead) มีตัวแปรในการออกแบบคือ รัศมี (R_1, R_2, R_3, R_4) ความกว้าง (B) ความสูง (H, H_1, H_2) และระยะห่างจากปากตาย (L) ครอบปิดแบบหน้าตัดรูปตัววี แสดงดังภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 ครอบปิดแบบหน้าตัดรูปตัววี (V-Shaped Drawbead)

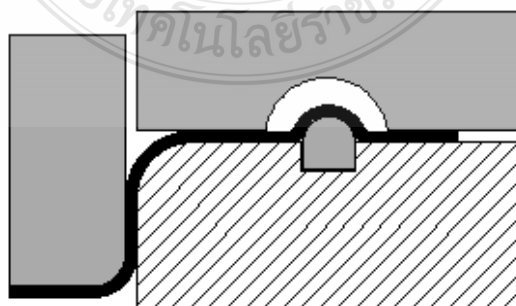
2.5.2 ส่วนของร่องปิด (Grooves) สามารถแบ่งตามรูปร่างหน้าตัดได้ 5 แบบ คือ

- 1) ร่องปิดแบบหน้าตัดตามรูปร่างของครอบปิด แสดงดังภาพที่ 2.24



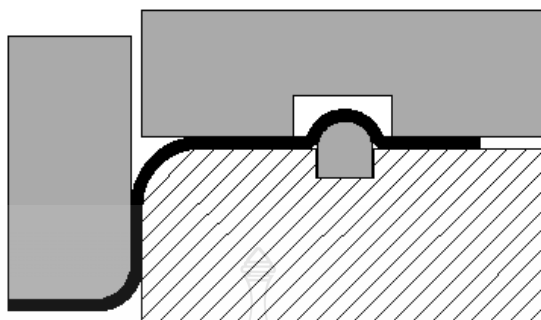
ภาพที่ 2.24 ร่องปิดแบบหน้าตัดตามรูปร่างของครอบปิด

- 2) ร่องปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม แสดงดังภาพที่ 2.25



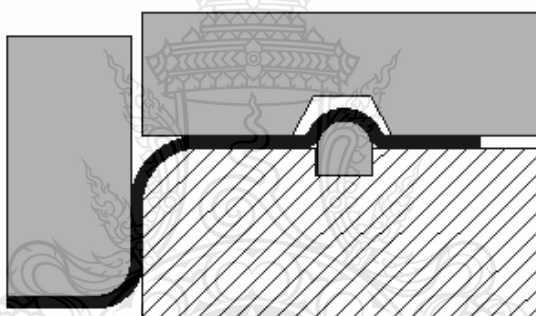
ภาพที่ 2.25 ร่องปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม

3) ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า แสดงดังภาพที่ 2.26



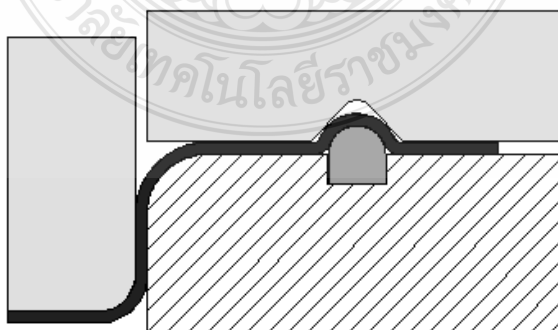
ภาพที่ 2.26 ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

4) ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู แสดงดังภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.27 ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู

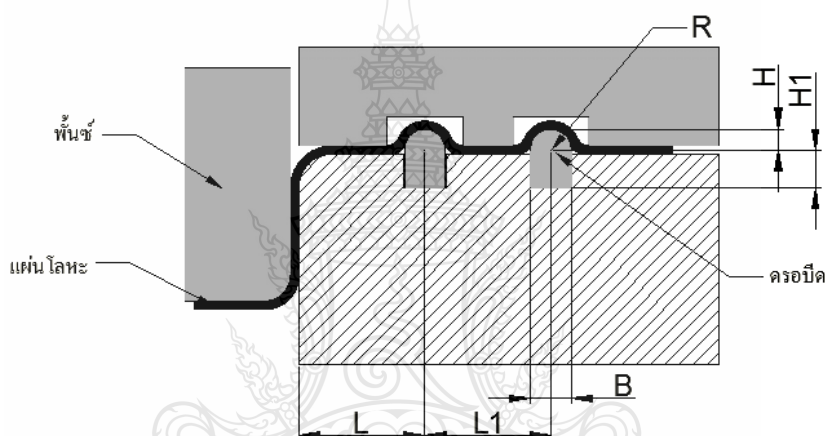
5) ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมสามเหลี่ยม แสดงดังภาพที่ 2.28



ภาพที่ 2.28 ร่องปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมสามเหลี่ยม

2.5.3 ตำแหน่งในการติดตั้งตัวครอปัด (Drawbead Position) [32]

สามารถติดตั้งตัวครอปัดเพื่อการใช้งานได้ 2 ตำแหน่ง คือ ติดตั้งไว้บนหน้าคาย หรือติดตั้งไว้บนผิวหน้าของแผ่นจับขึ้นงาน แล้วแต่รูปแบบและความเหมาะสมในการทำงาน โดยต้องคำนึงถึงการตัดขอบด้วย ตำแหน่งของครอปัดต้องไม่เป็นอุปสรรคกับการทำงานในขั้นตอนอื่น การวางครอปัดอาจใช้ 1, 2, 3 แถว หรือมากกว่านั้นก็ได้ ขึ้นอยู่กับความลึกของงานที่ขึ้นรูป ความหนาและพื้นที่ในการไหลตัวของแผ่นโลหะ หรือความต้องการในการต้านการไหลตัวของแผ่นโลหะ ตารางที่ 2.2 เป็นการแนะนำขนาด ระยะห่างจากขอบ และสกรูในการจับยึดครอปัดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลมในตัวแปลต่างๆ ในตารางแสดงดังภาพที่ 2.29



ภาพที่ 2.29 ตำแหน่งและระยะของครอปัด

ตารางที่ 2.2 ขนาดของครอปัดและตำแหน่งของระยะห่างในการยึดติด

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] ได้ศึกษาการนำครอปัดมาใช้ในการขึ้นรูปโลหะ โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวแปรที่สำคัญประกอบด้วย แรงในการควบคุมการไหลตัวของโลหะ (Drawbead Restraining Force) การเปลี่ยนแปลงความหนาแบบพลาสติก, และแรงยกครอปัด (Drawbead Lift Force) ได้มีการจำลองครอปัดแบบสองมิติ และการทดลองจริงค่าความแตกต่างทางคณิตศาสตร์ทั้งสองค่าจะเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความหนาแบบพลาสติกได้

M.Samuel.[3] ได้ศึกษาอิทธิพลรูปทรงของครอปัดในการขึ้นรูปโลหะ ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองของครอปัดเปรียบเทียบกับรูปทรงของครอปัดระหว่างร่องปิดที่เป็นแบบครึ่งวงกลมกับร่องปิดที่เป็นแบบสี่เหลี่ยมและวิเคราะห์ความแตกต่างของการไหลตัวของวัสดุในการ

ใช้ร่องปิดทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกับ การทดลอง จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงความหนา และความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผิวของร่องปิดแบบสี่เหลี่ยมมีค่าสูงกว่าร่องปิดแบบครึ่งวงกลม

กิตติภักดิ์ รัตนจันทร์ [4] เพื่อศึกษาหาความสามารถในการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นของครอปีด (Drawbead) ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวต่างกัน เช่น รูปร่างและความสูงของครอปีด ความเร็วในการดึงขึ้นรูป สภาพการหล่อลื่นและสมบัติของโลหะแผ่น สำหรับในการวิจัยนี้ใช้ครอปีดที่มีรูปร่างแบบครึ่งทรงกระบอกกลม (Half-Round Drawbead) โดยมีตัวแปรที่สนใจคือความสูงของครอปีด สภาพการหล่อลื่นและความเร็วในการดึงขึ้นรูป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสูงของครอปีดและการหล่อลื่นมีผลกระทบต่อ การควบคุมการไหลของโลหะแผ่นที่จะเข้าสู่ช่องเปิดคายเป็นอย่างมาก เมื่อเพิ่มความสูงครอปีดให้สูงขึ้นจะต้องใช้แรงกดขึ้นงานเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่รอยย่นที่เกิดขึ้นจะลดลง ในส่วนของการหล่อลื่นพบว่าเมื่อไม่ใช้สารหล่อลื่นจะไม่สามารถดึงขึ้นรูปได้เพราะ จะเกิดการฉีกขาดที่ผนังขึ้นงานก่อน สำหรับความเร็วในการดึงขึ้นรูปในช่วงที่ใช้ในการทดลองพบว่า มีผลต่อคุณภาพของขึ้นงานสำเร็จน้อยมาก

บุญส่ง จงกลณี [1] ได้ศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์ที่จะใช้ในการลากขึ้นรูปลึกขึ้นงานที่มีลักษณะไม่สมมาตร เพื่อใช้ในการทดสอบอิทธิพลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูป 4 ตัวแปร รูปร่างแผ่นเปล่า (Blank Geometry) ขนาดแรงกดขึ้นงาน (Blank Holding Force; BHF) ชนิดของสารหล่อลื่น (Lubricant Type) และรูปร่างครอปีด (Drawbead Geometry) ในขั้นตอนการทดสอบจะมีการบันทึกผลแรงกดขึ้นรูปและแรงกดขึ้นงานในขณะขึ้นรูปทุกครั้ง การวัดผลการทดลองจะนำเอาขึ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วมาตรวจสอบความเสียหายและวัดขนาดของความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่าง ๆ บนขึ้นงานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไป จากการทดลองพบว่า รูปร่างของแผ่นตัดเปล่า และแรงกดขึ้นงานที่เหมาะสมนอกจากจะสามารถลดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแล้วยังสามารถลดระดับความเครียดบนขึ้นงานได้อีกด้วย ขนาดของแรงกดขึ้นงานที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นตัดเปล่าและกลไกของแม่พิมพ์ สารหล่อลื่นจะลดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ผิวสัมผัสของขึ้นงานโดยตรง และการใช้ครอปีดที่มีขนาดที่เหมาะสม จะสามารถควบคุมการไหลของแผ่นตัดเปล่าเข้าสู่คายได้ดี จะทำให้สามารถลดขนาดของความเครียดในบริเวณวิกฤติได้ดี อย่างไรก็ตามการใช้ครอปีดจะต้องมีการปรับขนาด แผ่นตัดเปล่าให้โตขึ้น เพิ่มแรงกดขึ้นงาน และเลือกใช้สารหล่อลื่นให้เหมาะสม

ทวีภักดิ์ บูรณธิตติ, ศันชัย ผ่องผาย [33] การขึ้นรูปโลหะแผ่นในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ มักจะเกิดปัญหาการเกิดรอยย่น การฉีกขาด และการสปริงตัวกลับ ทั้งนี้กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นมีการกำหนดค่าตัวแปรกระบวนการผลิตต่างๆ ที่สำคัญเช่น แรงกดของตัวประสานหรือแรงจับยึด

แบบลงตำแหน่งของครอปปิด และขนาดรูปร่างของเบลงค์ เป็นต้นงานวิจัยนี้ได้นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นมาประยุกต์ในการจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะแผ่นของชิ้นส่วนขวางยึดเครื่องยนต์มาเป็นกรณีศึกษา โดยทำการศึกษาถึงอิทธิพลของแรงกดของตัวประสานและตำแหน่งครอปปิดแบบต่างๆ ต่อการไหลของวัสดุในกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่มีต่อการถักขาดและการเกิดรอยร่นซึ่งเป็นเงื่อนไขการออกแบบหลัก แผ่นโลหะที่ใช้ในการศึกษานี้คือ เหล็กกล้า JSC440W ที่มีความหนาเริ่มต้น 1 มม. ความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนนี้ถูกพิจารณาโดยการเปรียบเทียบกับแผนภูมิขีดจำกัดการขึ้นรูป ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่สำคัญทางด้านความไม่เสถียรทางพลาสติกของแต่ละชนิดโลหะแผ่น ผลจากการศึกษาพบว่าครอปปิดสามารถควบคุมการไหลของวัสดุได้ดีกว่าการใช้แรงกดของตัวประสานเพียงอย่างเดียว การเลือกตำแหน่งครอปปิดมีความสำคัญ โดยการวางแนวครอปปิดอย่างสม่ำเสมอไม่เพียงพอต่อการขึ้นรูปสำหรับกรณีศึกษานี้การใช้ครอปปิดแบบ 6 ช่วงตำแหน่ง จะสามารถช่วยในการลดปัญหาทั้งการถักขาดและรอยร่นได้ดีในกรณีศึกษา

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องถึงผลกระทบของครอปปิดที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นพบว่าครอปปิดมีผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยครอปปิดสามารถควบคุมการไหลตัวของแผ่นโลหะในตำแหน่งที่มีการติดตั้งครอปปิด และสามารถกระจายเนื้อโลหะออกไปก่อนที่จะเกิดการร่น นอกจากนี้ยังพบว่าความสูงของครอปปิด รูปทรงครอปปิด และตำแหน่งในการติดตั้งครอปปิดมีผลต่อการไหลตัวของโลหะแผ่นอีกด้วย จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวจึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาชนิดและรูปทรงของครอปปิด ว่ามีอิทธิพลในการควบคุมการไหลตัวของโลหะ โดยเฉพาะในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร ทำการศึกษารูปทรงของครอปปิด 3 ลักษณะได้แก่ ครอปปิดหน้าตัดรูปตัววี (V-Shaped Drawbead) ครอปปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Half-Round Drawbead) และ ครอปปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapeziform Drawbead) ตัวแปลที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC, SPCD และ SPCE โดยการเปรียบเทียบผลการทดลองการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ศึกษาผลการขึ้นรูปมีความสอดคล้องให้ผลลัพธ์ในทิศทางเดียวกัน เพื่อทราบถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น เพื่อนำไปใช้แก้ปัญหาการออกแบบครอปปิดและเปรียบเทียบผลการจำลองการขึ้นรูปวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการทดลองแบ่งออกเป็นดังนี้ ส่วนแรกคือการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนที่สองคือการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง เพื่อวัดความหนาและบริเวณที่เกิดความเสียหาย นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบและวิเคราะห์เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างการทดลองจริงกับการจำลองขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเมื่อมีแนวโน้มใกล้เคียงกันจึงปรับค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับการออกแบบครอปัด ขั้นตอนการวิจัยมีดังนี้

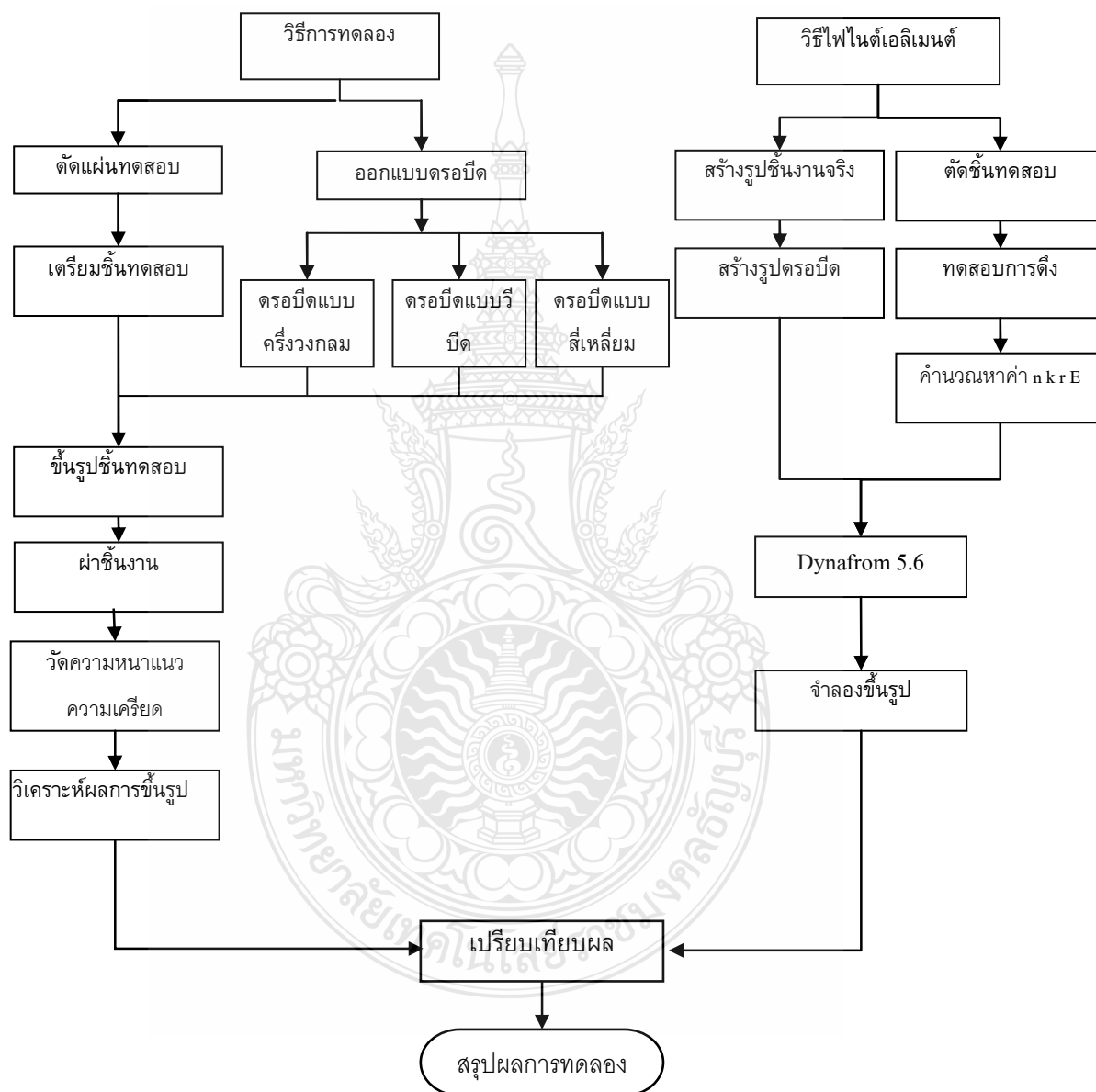
- 1) เครื่องและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินการวิจัย
- 2) ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย
- 3) เปรียบเทียบผลการทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินการวิจัย

- | | |
|--|-----------|
| 1) เครื่องเพรสขึ้นรูปขนาด 80 ตัน | 1 เครื่อง |
| 2) แม่พิมพ์ขึ้นรูปไม่สมมาตร | 1 ชุด |
| 3) เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine, Dynamic Type) | 1 ชุด |
| 4) เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดขึ้นทดสอบ (Extensometer) | 1 ชุด |
| 5) อุปกรณ์วัดแรงกดขณะขึ้นรูป (Load cell) | 1 ชุด |
| 6) อุปกรณ์ส่งแรงดัน(voltage) และรับสัญญาณ (Dater rocker) | 1 ชุด |
| 7) คอมพิวเตอร์และปริ้นเตอร์ | 1 ชุด |
| 8) โปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ Dynafrom 5.6 | 1 โปรแกรม |
| 9) โปรแกรมช่วยในการออกแบบ CATIA V5R20 | 1 โปรแกรม |
| 10) เครื่องกัดสามแนวแกน สำหรับเตรียมขึ้นทดสอบ | 1 เครื่อง |
| 11) สารหล่อลื่นแผ่นพลาสติกโพลีเอทรีลีน PE (Extreme pressure oil) ความหนา 0.1 มม. | |

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกดำเนินการขึ้นรูปชิ้นงานที่รูปทรงไม่สมมาตรเพื่อนำมาวิเคราะห์ความเครียดที่เปลี่ยนไป ส่วนที่สองเป็นจำลองการขึ้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลทั้งสองส่วนนำมาเปรียบเทียบกันซึ่งมีแนวทางการดำเนินการดังนี้



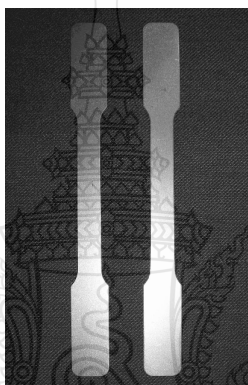
ภาพที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินการวิจัยการศึกษาอิทธิพลรูปทรงของดรอปปิดในการลากขึ้นรูปโลหะที่มีรูปทรงไม่สมมาตรโดยการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

จากแผนภาพการดำเนินการวิจัยทั้งสองส่วนสามารถแสดงรายละเอียดดังมีขั้นตอนดังนี้

1) ทดสอบหาสมบัติอัตราส่วนความเครียดถาวร n , r (Anisotropy) ของแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCC, SPCD และ SPCE ความหนา 1.0 มิลลิเมตร ตามวิธีการของ ASTM E517 vol.01.03.(1993)

1. นำแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCC, SPCD และ SPCE ความหนา 1.0 มิลลิเมตรมาทำการทดสอบหาค่า r (Anisotropy) ดัดขึ้นทดสอบ (Blanking) ตามแนวทิศทางการรีด (Rolling Direction) จากแผ่นเหล็กรีดเย็น ที่นำมาใช้ในการทดสอบ

2. วัดความกว้าง (W_0) และความหนา (T_0) ของแต่ละชิ้นทดสอบทุกแนวการรีดบันทึกข้อมูล ในช่วงความยืด (Gage length)



ภาพที่ 3.2 ลักษณะชิ้นทดสอบหาสมบัติเชิงกล

3. นำชิ้นทดสอบที่วัดค่าความกว้างและหนามาทดสอบการดึงตามแนวแกน

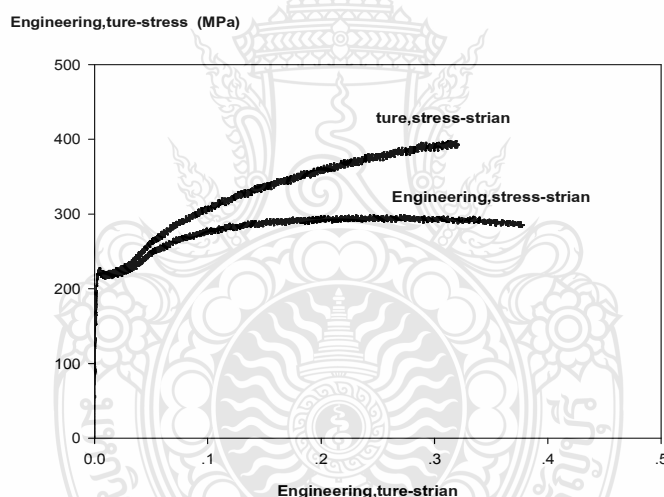
4. วัดความกว้าง (W_x) และความหนา (T_x) ของชิ้นทดสอบที่ดึงทดสอบแล้วอุปกรณ์ (Extensometer) จะบันทึกการเปลี่ยนแปลงความยาวและพื้นที่หน้าตัด นำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกมาคำนวณ

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

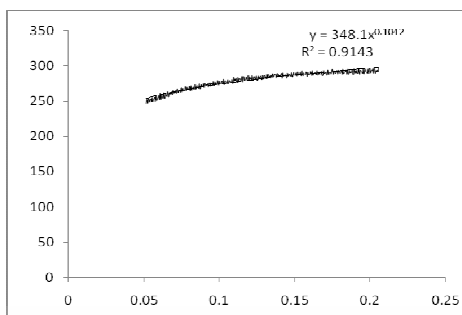
2) ทดสอบหาสมบัติเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain-Hardening Exponent, n -values) และสัมประสิทธิ์ความต้านแรง (Strength Coefficient; K) ของเหล็กแผ่นรีดเย็น ตามวิธีทดสอบ ASTM E 646-91 vol.03.01.(1993)

1. วัดความกว้างความหนาของชิ้นทดสอบช่วงระยะยึด (Gage Length)
2. จับชิ้นงานทดสอบแรงดึงบันทึกค่าแรงที่กระทำและระยะที่เปลี่ยนแปลงช่วงที่หนึ่ง
3. คำนวณหาความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress; S) เท่ากับแรงกระทำช่วงที่หนึ่ง ต่อขนาดพื้นที่หน้าตัด
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



ภาพที่ 3.4 แผนภาพความเค้น-ความเครียดวิศวกรรมและ ความเค้น-ความเครียดจริงของเหล็กรีดเย็น หนา 1 มิลลิเมตร

8. คำนวณหา x หรือ Log True Stress
9. คำนวณหา y^2
10. คำนวณหา x^2
11. คำนวณหา xy
12. คำนวณหาค่าจากการบันทึก 2.2 - 2.11 ทุกเปลี่ยนแปลงระยะยึดในช่วง Gage Length ให้จำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงระยะยึดเป็น N หาผลรวมทั้งหมด $\sum y, \sum x, \sum y^2, \sum x^2, \sum xy$



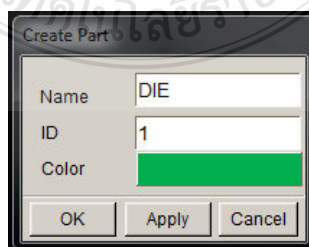
ภาพที่ 3.5 หาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรงและเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดใช้แบบสมการกำลัง (Power Function)

ตารางที่ 3.1 สมบัติเชิงกลแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCC และ SPCE ความหนา 1.0 มิลลิเมตร

ชนิดของวัสดุ	เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (n)	สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (K)	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r)			
			R_0	R_{45}	R_{90}	\bar{R}
SPCC	0.12	357	1.165	1.254	1.355	1.258
SPCD	0.14	366	1.301	1.365	1.468	1.378
SPCE	0.21	316	2.04	1.786	2.258	2.020

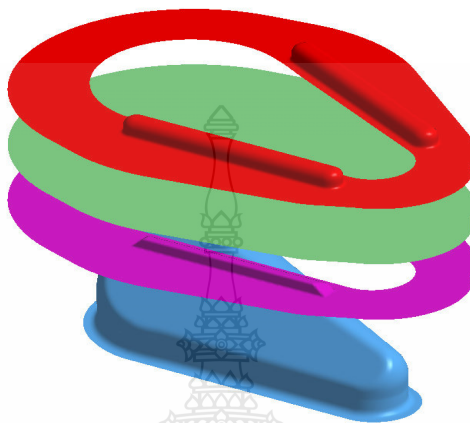
3) การจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปของงานวิจัยนี้ ใช้โปรแกรม Dyna Form 5.6 จำลองการขึ้นรูปของเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC, SPCD และ SPCE มีขั้นตอนดังนี้

1. ก่อนการประมวลผล (Pre - Processing) มีขั้นตอนดังนี้



ภาพที่ 3.6 กำหนดชื่อของเครื่องมือ

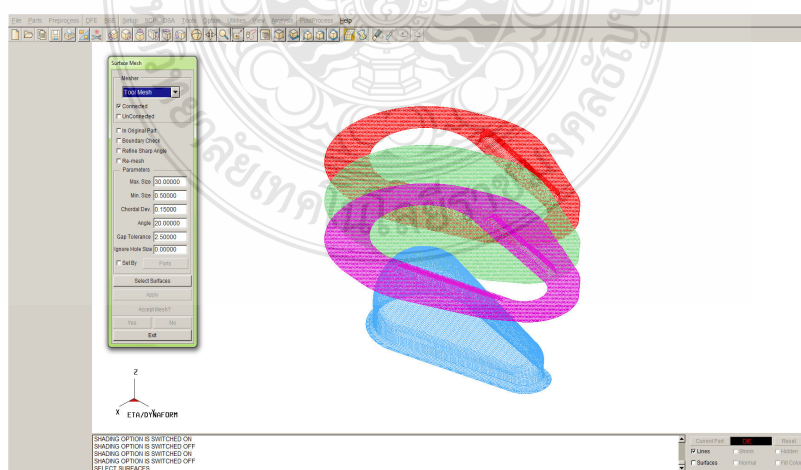
ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดชื่อของเครื่องมือเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 3.6 จากเมนูบาร์ เลือกเมนู Part โดยเลือกฟังก์ชัน Create กำหนดชื่อ Die, Punch, Bender และ Blank จากนั้นกำหนดสีเพื่อแทนชนิดของเครื่องมือและชิ้นงาน โดยที่มี Drawbead ติดอยู่กับ Bender



ภาพที่ 3.7 ขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนเครื่องมือและชิ้นงาน

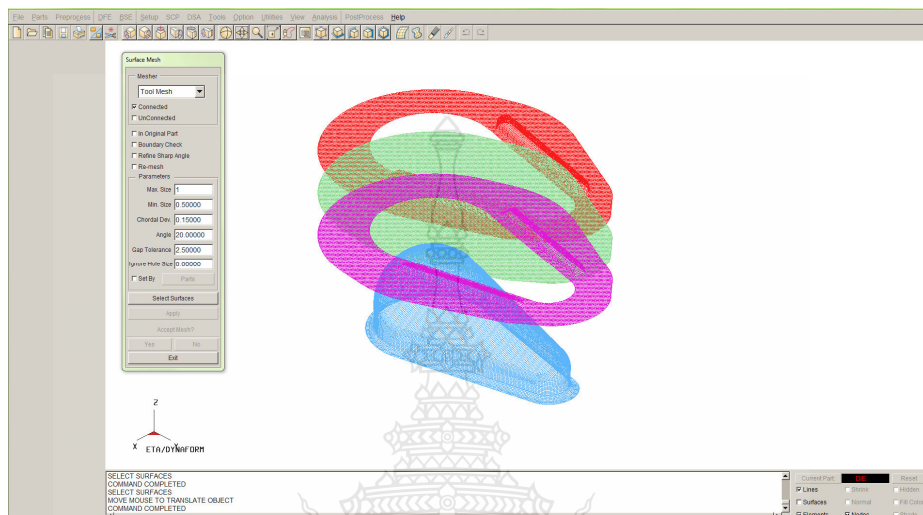
ขั้นตอนที่ 2 การสร้างเครื่องมือและชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.7 สร้างจาก CAD - File โดยใช้โปรแกรม CATIA V5 R20

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างผิวสำหรับเครื่องมือและชิ้นงาน เนื่องจากการขึ้นรูปเป็นแบบไม่สมมาตร จึงวิเคราะห์การขึ้นรูปตลอดทั้งชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.8



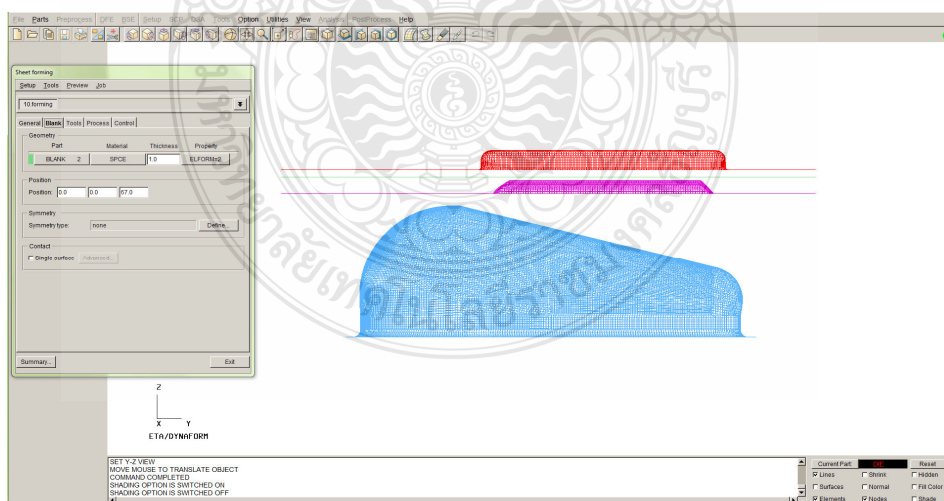
ภาพที่ 3.8 การสร้างผิวสำหรับเครื่องมือและชิ้นงาน

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



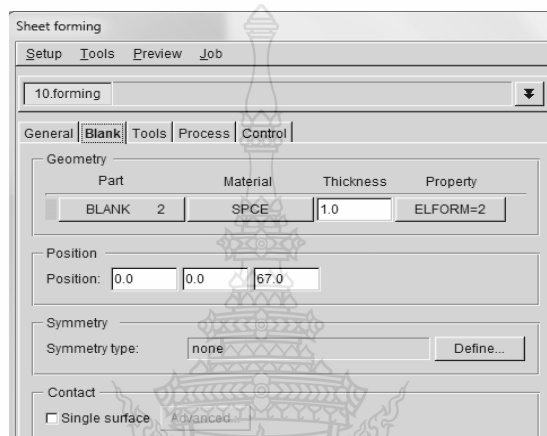
ภาพที่ 3.9 การสร้างพื้นผิวเครื่องมือและชิ้นงาน

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis)



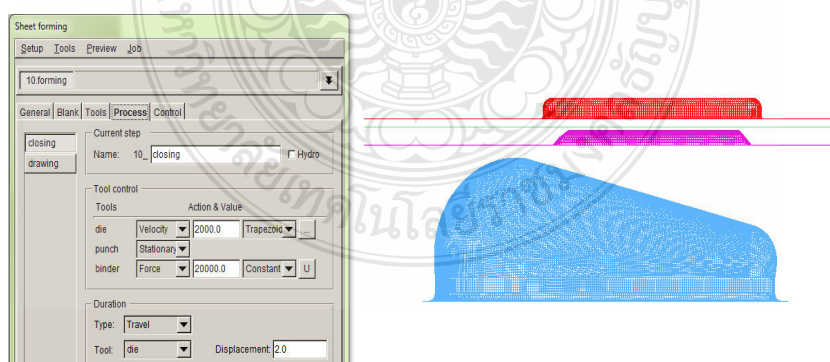
ภาพที่ 3.10 กำหนดชนิดการขึ้นรูป

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

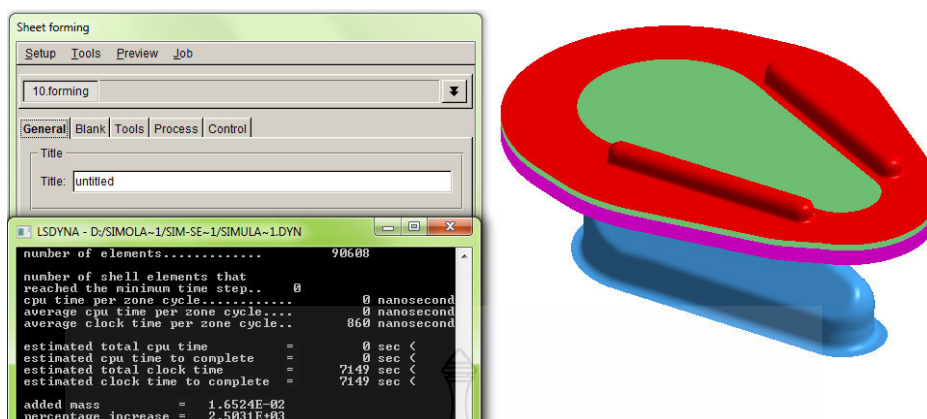


ภาพที่ 3.11 กำหนดชนิดวัสดุของชิ้นงาน

ภาพที่ 3.11 เป็นการกำหนดชนิดของวัสดุคลิกไอคอน Blank กำหนดวัสดุคลิกไอคอน Material เลือกเกรดวัสดุเหล็กเกรด SPCE



ภาพที่ 3.12 เครื่องมือและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการขึ้นรูป

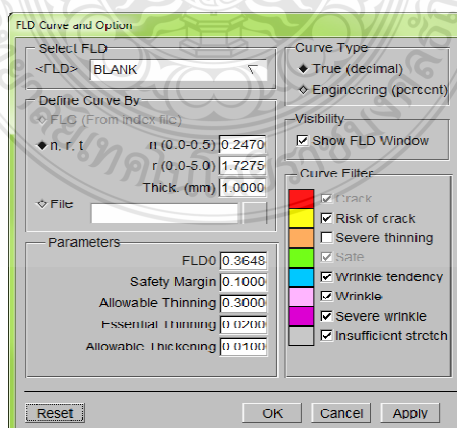


ภาพที่ 3.13 การประมวลผลของโปรแกรม Dyna Form 5.6

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

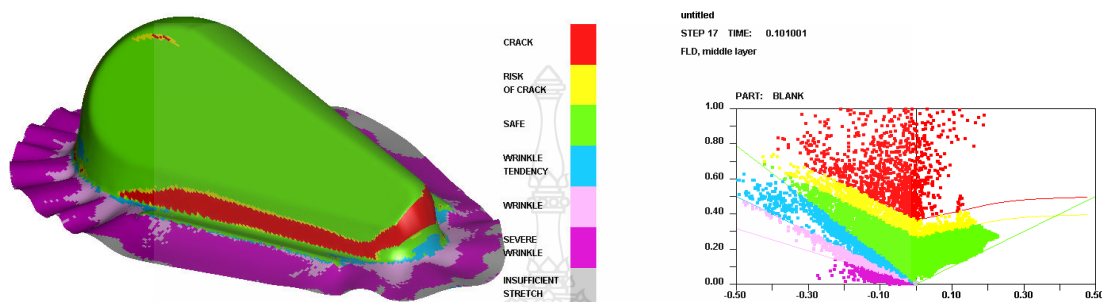
3. แสดงผลลัพธ์จากการประมวลผล (Post - Processing)

ประมวลผลการจำลองขึ้นรูปชิ้นงาน เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับ Geometry กำหนดค่าสมบัติของวัสดุ กำหนดเครื่องมือ (Tools) จากนั้นจึงจำลองการขึ้นรูปเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง และทำการประมวลผลต่อไป



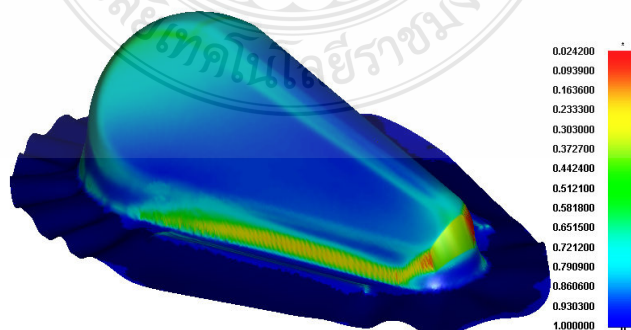
ภาพที่ 3.14 การกำหนดค่าสมบัติของวัสดุในโปรแกรม Dyna Form 5.6

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 เพื่อเปรียบเทียบกับการทดลองขึ้นรูปจริง จากรูปภาพบริเวณพื้นที่สีเขียวคือบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นสภาวะยืดตรง สภาวะดึงและเส้นปลอดภัยในการขึ้นรูป พื้นที่สีน้ำเงิน คือบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นสภาวะดึง และสภาวะเฉือนอย่างเดียวยุโรป ถ้าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณใดมีค่าความเครียดหลังขึ้นรูปตกอยู่ในพื้นที่นี้ แสดงให้เห็นว่าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณนั้นมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยร่นหลังขึ้นรูป พื้นที่สีม่วงคือบริเวณที่อยู่ใต้เส้นสภาวะเฉือนอย่างเดียว ถ้าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณใดมีค่าความเครียดหลังขึ้นรูปตกอยู่ในพื้นที่นี้ แสดงให้เห็นว่าเนื้อโลหะแผ่นบริเวณนั้นจะเกิดรอยร่นหลังขึ้นรูป



ภาพที่ 3.16 ค่าความหนาวิเคราะห์จากโปรแกรม Dyna Form 5.6

ภาพที่ 3.16 แสดงถึงตำแหน่งของความหนาของชิ้นงาน (Thickness) โดยแสดงค่าความหนาตามสีที่ปรากฏบนชิ้นงาน เพื่อเปรียบเทียบกับค่าทดลองชิ้นรูปจริง

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

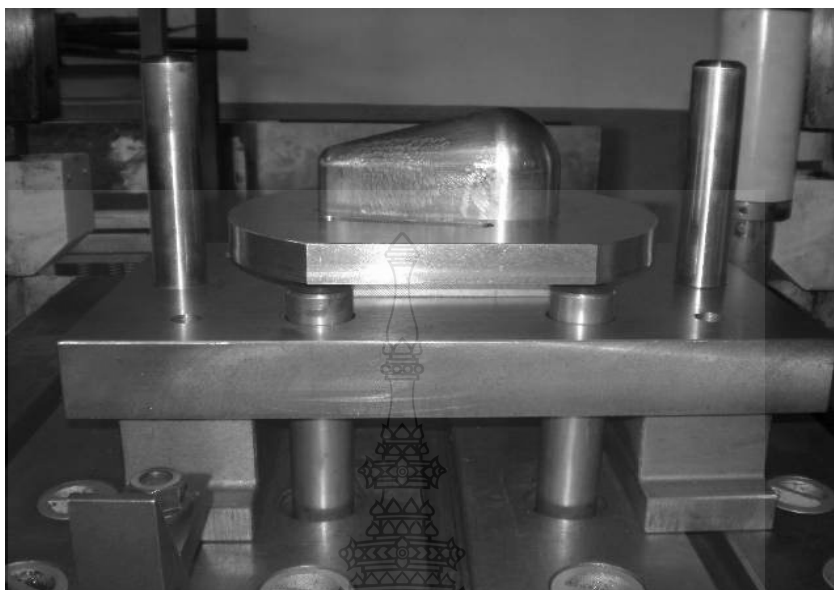
เครื่องมือที่ใช้ในทดสอบโดยใช้เครื่องปั๊มโลหะของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการที่มีขนาด 80 ตัน แม่พิมพ์ลากลึงชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร และเครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC Automatic Machine) ใช้ในการสร้างครอปัด

- 1) เครื่องปั๊มโลหะที่มีขนาด 80 ตัน ดังแสดงในภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.17 เครื่องปั๊มโลหะขนาด 80 ตัน

2) แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลิกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลิกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร

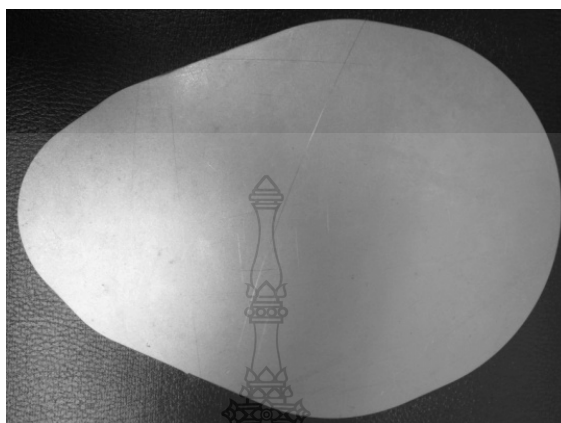
3) เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC Automatic Machine) ดังแสดงในรูปที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC Automatic Machine)

4) การเตรียมแผ่นชิ้นงานทดสอบ

1. เตรียมชิ้นทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.20



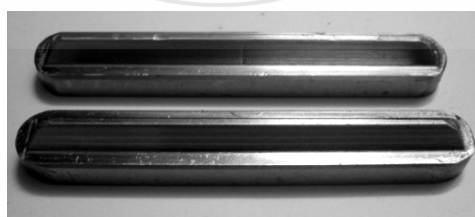
ภาพที่ 3.20 ชิ้นงานทดลอง

2. ครอบปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Haft - Round Drawbead) ดังแสดงในภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 ครอบปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Haft-Round Drawbead)

3. ครอบปิดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม (V-Shaped Drawbead) ดังแสดงในภาพที่ 3.22



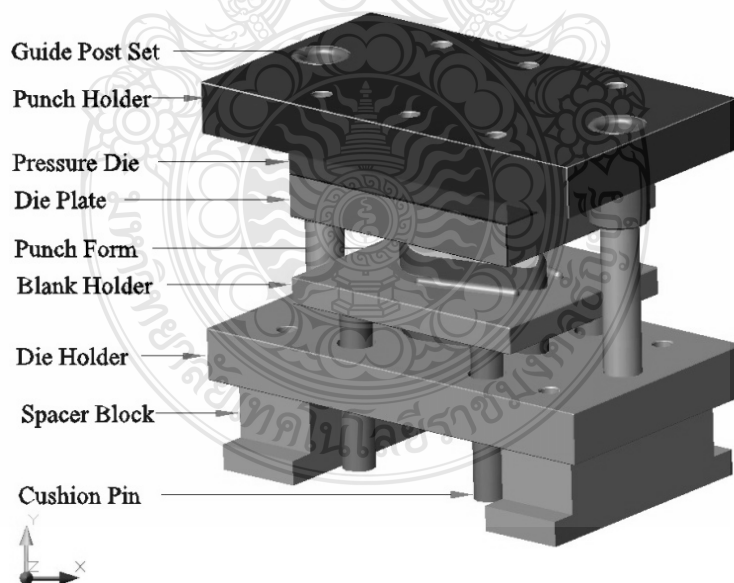
ภาพที่ 3.22 ครอบปิดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม (V-Shaped Drawbead)

4. ครอบปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapeziform Drawbead) ดังภาพที่ 3.23



ภาพที่ 3.23 ครอบปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapeziform Drawbead)

5) แม่พิมพ์และการติดตั้ง หลักการทำงานของแม่พิมพ์ชุดตัว (Die Holder) ใช้รับยึดกับแท่นปั๊มขึ้นลงและยึดแผ่นรองตาย (Pressure Die) และแผ่นตาย (Die Holder) จะยึดกันเช่นชุดบน (Upper Shore) มีชุดนำการปั๊ม (Guide Post) เป็นชุดนำเพื่อความเที่ยงตรง ในการปั๊มขึ้นลงและชุดล่าง (Lower Shore) จะประกอบด้วยพินซ์ (Punch) แผ่นกดยึด (Blank Holder) มีหน้าที่ในการกดยึดชิ้นงาน โดยส่งถ่ายแรงจากคูชันพิน (Cushion Pin) ซึ่งสามารถปรับแรงได้และแผ่นพินซ์โฮลเดอร์ (Punch Holder) จะจับยึดกับแท่นเครื่องปั๊ม ดังแสดงในภาพที่ 3.24

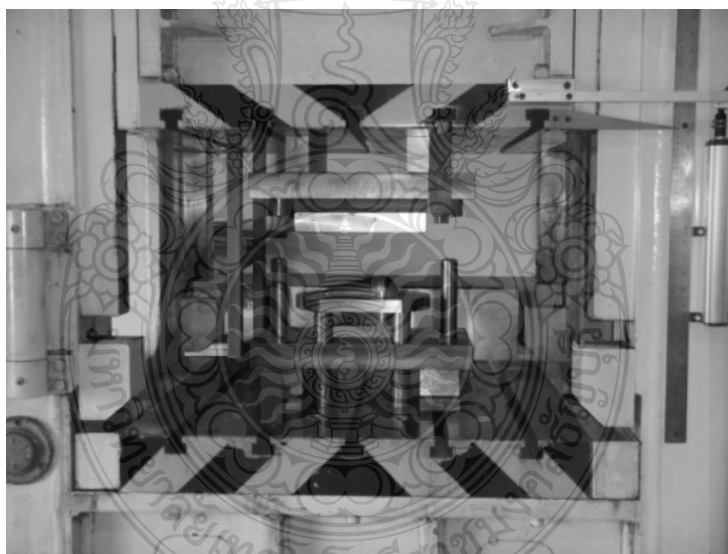


ภาพที่ 3.24 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ขึ้นรูปลึก [1]

ตารางที่ 3.2 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์

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

6) แม่พิมพ์พร้อมใช้งานติดตั้งบนเครื่องปั๊ม ดังแสดงในภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.25 แม่พิมพ์พร้อมใช้งาน

7) แรงกดชิ้นงาน (Blank Holder Force) จากการคำนวณแรงขึ้นรูปลึกลับ ทำการศึกษาโดยเทียบเป็นขนาดของแรงกดที่ระดับ 30 %, 50 % และ 70 % ของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปได้ดังนี้

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

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

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

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

8) สารหล่อลื่น [1] สารหล่อลื่น DRAW 359H ใช้ในงานลากจูงรูปเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าง่ายในการทำความสะดวกหลังจากใช้งาน การนำไปใช้งานจะใช้เฉพาะสารหล่อลื่นโดยตรงหรือผสมกับน้ำมันแร่ก็ได้ โดยใช้ฟองน้ำ แปร่ง ลูกกลิ้งชนิดฟัน ใช้ในงานลากจูงรูปที่ยากสำหรับวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าและเหล็กกล้าไร้สนิมคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ความหนืดที่ 100 องศาฟาเรนไฮต์หรือ 38 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1100 มิลลิเมตร 2/วินาที เป็นสีดำ สีน้ำตาลเหลือง สีอำพันความถ่วงจำเพาะ 1.28

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

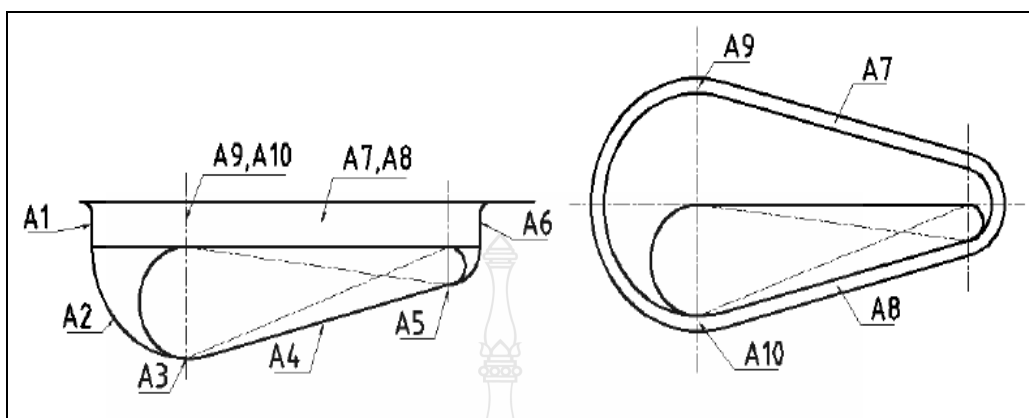


(ก) อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน

(ข) อุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ

ภาพที่ 3.26 อุปกรณ์บันทึกข้อมูลเป็นอุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ

10) บริเวณจุดที่ตรวจวัดความเครียดแนวความหนา



ภาพที่ 3.27 บริเวณจุดที่ตรวจวัดความเครียดบนชิ้นงาน [1]

11) อุปกรณ์วัดความหนาชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 3.28



ภาพที่ 3.28 เครื่องวัดความหนาชิ้นงาน

12) ตารางบันทึกผลการทดลอง เป็นตารางบันทึกแรงของการลากขึ้นรูปต่อสัดส่วนของแรงกด ในการใช้รอปีดแต่ละชนิด

ตารางที่ 3.3 บันทึกแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป

ครั้งที่	แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปของรูปทรงดรอปิด (KN)		
	ครึ่งวงกลม	สามเหลี่ยม	สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า
1 แผ่นแบนโค้ง	X	X	X
2 แผ่นแบนโค้ง	X	X	X
3 แผ่นแบนโค้ง	X	X	X
เฉลี่ย	X	X	X

ตารางที่ 3.4 ความเครียดในแนวความหนาของชิ้นงานในแต่ละจุดตรวจวัด

จุดตรวจวัด	รูปทรงดรอปิด					
	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

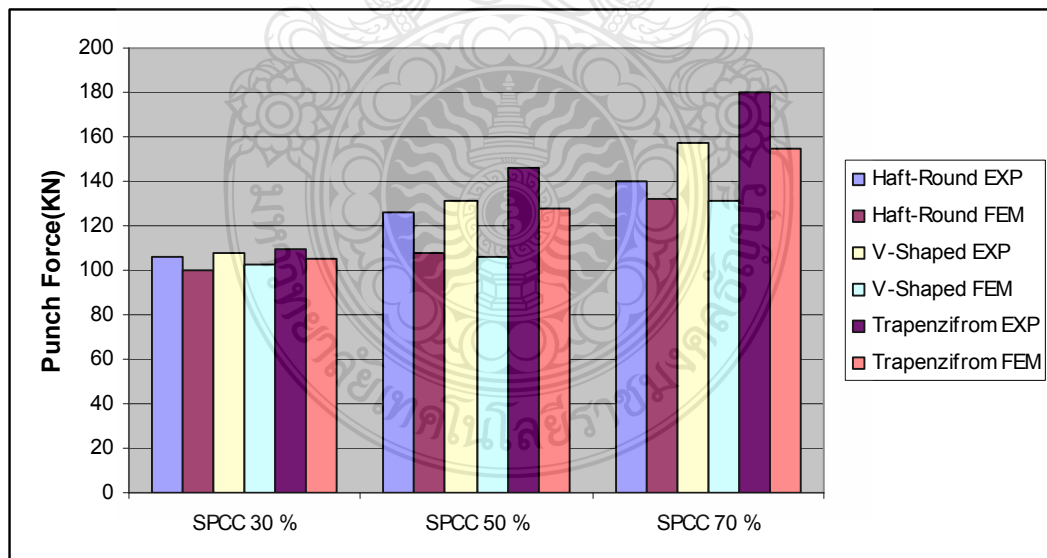
บทที่ 4

ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปทรงครอปัดที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นรูปทรงไม่สมมาตร โดยการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ และนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานจริง เพื่อนำไปหาค่าความเครียดแนวความหนาของชิ้นงานในแต่ละจุดที่เกิดขึ้น เมื่อทำการจำลองในแต่ละกรณี รูปทรงครอปัดต่างกันพบว่า มีผลต่อรอยย่น แรงในการขึ้นรูป และการกระจายตัวของความหนาชิ้นงาน การศึกษาเป็นการเปรียบเทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram; FLD) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่จะเกิดรอยย่นกับชิ้นงาน ในแต่ละรูปทรงครอปัด มีผลการวิจัยดังนี้

4.1 เปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูป

4.1.1 เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ครอปัดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCC



ภาพที่ 4.1 เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ครอปัดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCC

จากภาพที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรโดยเปรียบเทียบแรงขึ้นรูปสูงสุดในการใช้ครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลม หน้าตัดรูปตัววี และ หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ที่แรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCC พบว่า

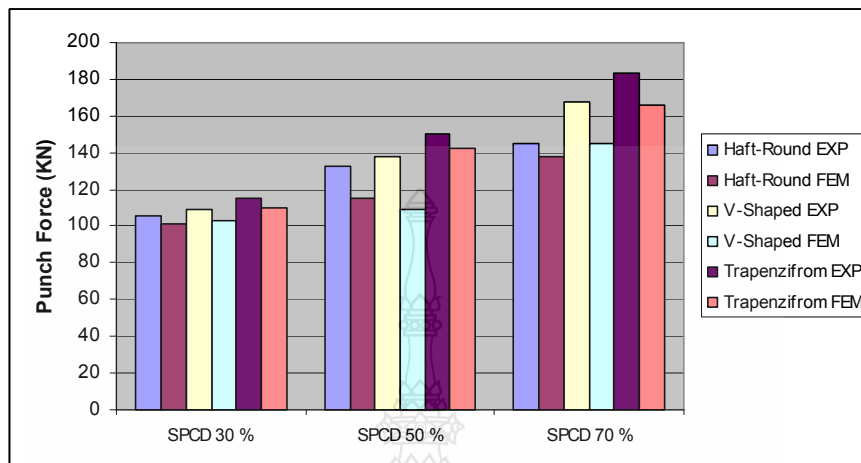
1) แรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลม ให้แรงกดสูงสุดที่ 106 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเพียง 6 เปอร์เซ็นต์ ครอปัดหน้าตัดรูปตัววี ให้แรงกดสูงสุดที่ 108 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเพียง 5 เปอร์เซ็นต์ และครอปัดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ให้แรงกดสูงสุดที่ 110 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเพียง 5 เปอร์เซ็นต์

2) แรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลม ให้แรงกดสูงสุดที่ 126 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเพียง 18 เปอร์เซ็นต์ ครอปัดหน้าตัดรูปตัววี ให้แรงกดสูงสุดที่ 131 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ และครอปัดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ให้แรงกดสูงสุดที่ 146 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเพียง 18 เปอร์เซ็นต์

3) แรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลม ให้แรงกดสูงสุดที่ 140 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเพียง 8 เปอร์เซ็นต์ ครอปัดหน้าตัดรูปตัววี ให้แรงกดสูงสุดที่ 157 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเพียง 26 เปอร์เซ็นต์ และครอปัดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ให้แรงกดสูงสุดที่ 180 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเพียง 25 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรของเหล็ก SPCC ที่แรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ แรงกดชิ้นงานไม่เพียงพอสำหรับการขึ้นรูป ทำให้ชิ้นงานเกิดการยุบบริเวณขอบปีกชิ้นงาน แรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ เป็นแรงกดชิ้นงานที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปโดยใช้ครอปัดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม ถ้าใช้แรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดไม่ว่าจะใช้ครอปัดรูปทรงใดและผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกัน

4.1.2 เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ครอปัดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCD



ภาพที่ 4.2 เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ครอปัดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCD

จากภาพที่ 4.2 เป็นกราฟแสดงแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรในการใช้ครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลม ครอปัดหน้าตัดรูปตัววี และ ครอปัดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ที่แรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCD พบว่า

1) แรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลม ให้แรงกดสูงสุดที่ 106 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเพียง 5 เปอร์เซ็นต์ ครอปัดหน้าตัดรูปตัววี ให้แรงกดสูงสุดที่ 109 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเพียง 6 เปอร์เซ็นต์ และครอปัดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ให้แรงกดสูงสุดที่ 115 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเพียง 5 เปอร์เซ็นต์

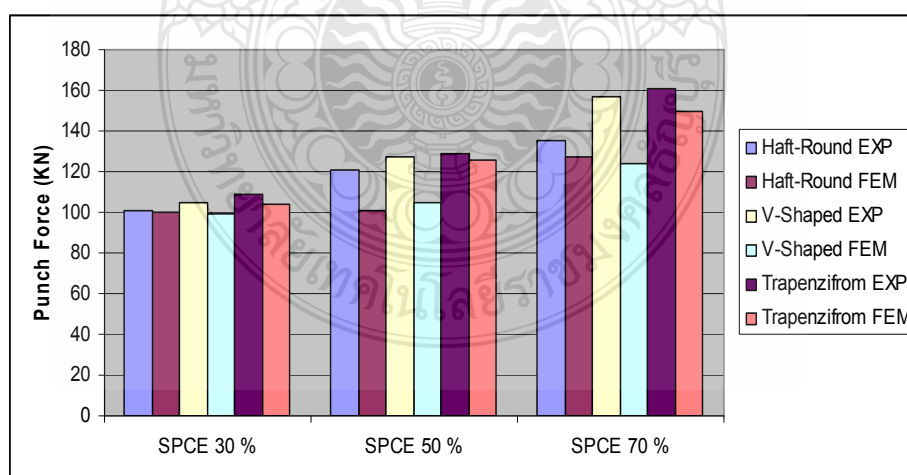
2) แรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลม ให้แรงกดสูงสุดที่ 113 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเพียง 18 เปอร์เซ็นต์ ครอปัดหน้าตัดรูปตัววี ให้แรงกดสูงสุดที่ 138 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเพียง 29 เปอร์เซ็นต์ และครอปัดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ให้แรงกด

สูงสุดที่ 150 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 8 เปอร์เซ็นต์

3) แรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ครอบปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม ให้แรงกดสูงสุดที่ 145 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 7 เปอร์เซ็นต์ ครอบปิดหน้าตัดรูปตัววี ให้แรงกดสูงสุดที่ 168 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 23 เปอร์เซ็นต์ และครอบปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ให้แรงกดสูงสุดที่ 183 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 17 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลอง การใช้แรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ไม่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปเพราะเมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานเกิดรอยย่นขอบปีกและผนังด้านข้างชิ้นงาน ที่แรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ เหมาะสมกับครอบปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม เพราะใช้แรงในการขึ้นรูปไม่สูงมากและเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาไม่มากทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพมากที่สุด และใช้แรงกดชิ้นงานที่ 70 เปอร์เซ็นต์ แรงกดชิ้นงานสูงทำให้ชิ้นงานไหลตัวได้น้อยจะมีแรงลากขึ้นรูปสูงและทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดของครอบปิดทุกรูปทรง ผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกัน

4.1.3 เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ครอบปิดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE



ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ครอบปิดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE

จากภาพที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรในการใช้ ครอบปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม ครอบปิดหน้าตัดรูปตัววี และ ครอบปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ที่แรงกด ชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE พบว่า

1) แรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ครอบปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม ให้แรงกดสูงสุดที่ 101 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 1 เปอร์เซ็นต์ ครอบปิดหน้าตัดรูปตัววี ให้แรงกดสูงสุดที่ 105 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 6 เปอร์เซ็นต์ และครอบปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ให้แรงกด สูงสุดที่ 109 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธี ไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 5 เปอร์เซ็นต์

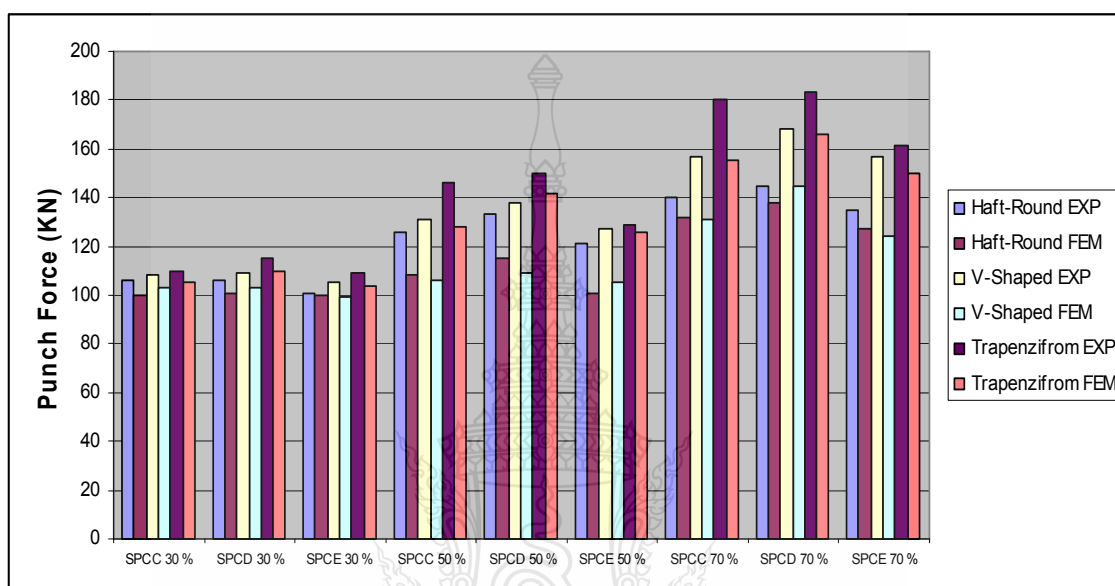
2) แรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ครอบปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม ให้แรงกดสูงสุดที่ 121 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 10 เปอร์เซ็นต์ ครอบปิดหน้าตัดรูปตัววี แรงกดสูงสุดที่ 127 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 12 เปอร์เซ็นต์ และครอบปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ให้แรงกด สูงสุดที่ 129 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธี ไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 3 เปอร์เซ็นต์

3) แรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ครอบปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม ให้แรงกดสูงสุดที่ 135 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 8 เปอร์เซ็นต์ ครอบปิดหน้าตัดรูปตัววี ให้แรงกดสูงสุดที่ 157 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 13 เปอร์เซ็นต์ และครอบปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ให้แรงกด สูงสุดที่ 161 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธี ไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 11 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรของเหล็ก SPCE แรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ แรงกดไม่เพียงพอสำหรับการขึ้นรูป ทำให้ชิ้นงานเกิดการยุบบริเวณขอบปีกชิ้นงาน แรง กดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์เป็นแรงที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปโดยใช้ครอบปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม ถ้าใช้แรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดจะมีความหนาลดลงมากจากผลการจำลอง ด้วยไฟในเอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกัน

4.2 สรุปผลการเปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูป

เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดขึ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCC, SPCD, SPCE เพื่อหาแรงเหยียบที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปขึ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรและนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป



ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดขึ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCC, SPCD, SPCE

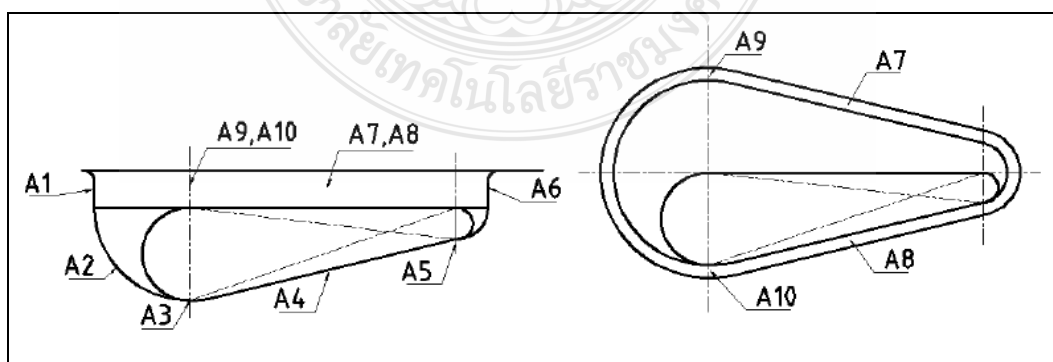
จากภาพที่ 4.4 เป็นกราฟเปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ความลึกในการขึ้นรูป 52 มิลลิเมตร ของเหล็ก SPCC, SPCD และ SPCE ที่แรงกดขึ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ในการใช้ดรอปแต่ละชนิด พบว่าแรงลากขึ้นรูปในการใช้ ดรอปแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า มีระดับแรงขึ้นรูปสูงสุด เพราะว่าดรอปมีหน้าสัมผัสกับโลหะมากที่สุดและรัศมีของดรอปมีน้อย ทำให้วัสดุไหลตัวได้น้อยส่งผลให้แรงขึ้นรูปมีค่าสูง รองลงมาเป็นการใช้ดรอปที่หน้าตัดรูปตัววี เพราะรูปทรงของดรอปมีลักษณะเรียวและรัศมีน้อยเมื่อมีแรงกดขึ้นงานทำให้วัสดุเกิดการคดมากเกินไปวัสดุไหลตัวได้น้อย ทำให้ความต้องการในการใช้แรงขึ้นรูปสูง และดรอปแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม มีระดับแรงขึ้นรูปต่ำสุดเนื่องจากมีรัศมีมากทำให้ความเสียดทานผิวขึ้นงานที่สัมผัสกับแผ่นกขึ้นงาน กับคาย (Die) มีค่าน้อยทำวัสดุไหลตัวได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับดรอปชนิดอื่นทำให้แรงกดที่พื้นซ์มีค่าต่ำสุด

ผลการทดลองการขึ้นรูปวัสดุเหล็ก SPCC, SPCD และ SPCE พบว่าแรงกดขึ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ของดรอปปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม หน้าตัดรูปตัววี และหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า วัสดุสามารถไหลตัวได้มาก เนื่องจากแรงกดขึ้นงานน้อยเกินไปทำให้ขึ้นงานเกิดรอยยับบริเวณปีกของขึ้นงาน แรงกดขึ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ เป็นแรงที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปขึ้นงานเกิดรอยยับลดลง ทำให้มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปขึ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร ส่วนแรงกดขึ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นงานเกิดการฉีกขาดเนื่องจากแรงกดมากเกินไปส่งผลให้วัสดุไม่สามารถไหลตัวได้ แต่จากการทดลองพบว่าแรงในการขึ้นรูปเฉลี่ยของดรอปปิดและวัสดุทั้ง 3 ชนิด และแรงกดขึ้นงานทั้ง 3 ระดับ วัสดุที่ใช้แรงขึ้นรูปสูงสุดคือวัสดุเหล็ก SPCD จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุทั้ง 3 ชนิด พบว่าเหล็ก SPCD มีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรง (K -Strength Coefficient) สูงสุดนั้นก็หมายความว่าความต้องการแรงในการเปลี่ยนรูปเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย [6] จึงส่งผลให้วัสดุเหล็ก SPCD ใช้แรงในการขึ้นรูปสูงสุด รองลงมาเป็นวัสดุเหล็ก SPCC และ SPCE ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ที่แรงกดขึ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ของดรอปปิดและวัสดุทั้ง 3 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริง

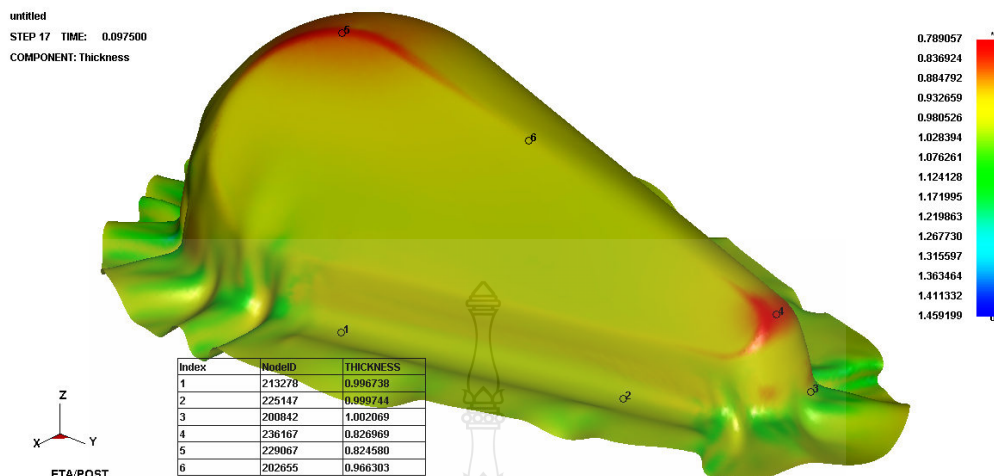
ผลจากการทดลองสรุปได้ว่าเหล็ก SPCE เหมาะสำหรับการขึ้นรูปมากกว่าเหล็ก SPCC และเหล็ก SPCD เนื่องจากเหล็ก SPCE มีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรง (K -Strength Coefficient) น้อยกว่าเหล็กอีกสองชนิด จึงใช้แรงในการขึ้นรูปต่ำกว่า จึงควรเลือกเหล็ก SPCE ในการขึ้นรูปและควรเลือกใช้กับดรอปปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม ที่แรงกดขึ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์

4.3 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา

เปรียบเทียบผลการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปปิดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดขึ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์โดยวัดความเครียดแนวความหนาของขึ้นงานในแต่ละจุดแสดงบริเวณจุดที่ตรวจวัดความหนาบนขึ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 4.5



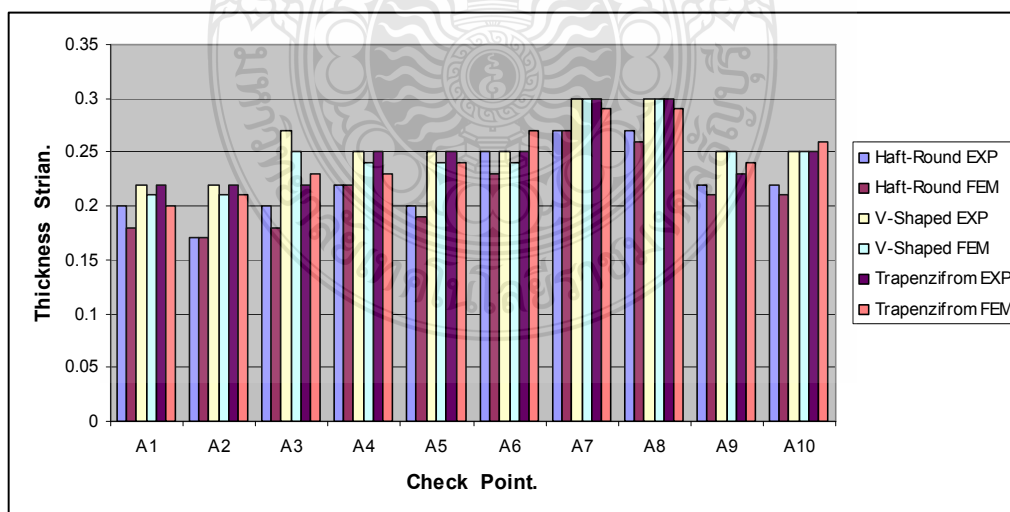
ภาพที่ 4.5 บริเวณจุดที่ตรวจวัดความหนาบนขึ้นงาน [1]



ภาพที่ 4.5 บริเวณจุดที่ตรวจวัดความหนาบนชิ้นงาน [1] (ต่อ)

4.3.1 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCC, SPCD และ SPCE

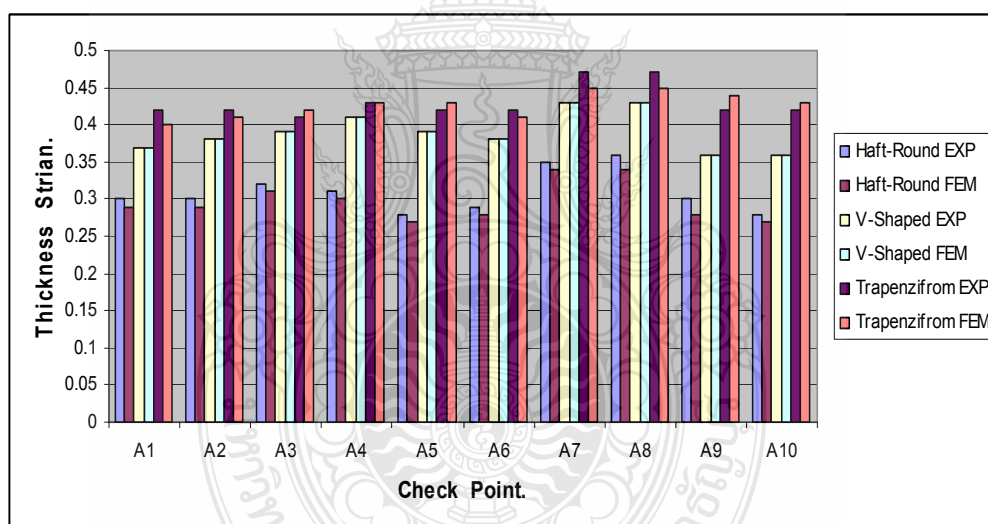
1) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCC



ภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCC

จากการทดลองการขึ้นรูปจะพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อ ความหนาที่ลดลง ระหว่างการขึ้นรูป คือ แรงกดของแผ่นกดขึ้นงานและชนิดครอปัด จากภาพที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนว ความหนา มีค่าสูงสุดเท่ากับ 30 % ที่จุด A7 และ A8 ของครอปัดแบบหน้าตัดรูปตัววีและหน้าตัด สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ส่วนครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลมเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยสุดที่ตำแหน่งเดียวกัน ที่แรงกดขึ้นงาน 30 % จากภาพที่ 4.6 กราฟแสดงเปรียบเทียบครอปัดต่างชนิดกันกัน จะเห็นได้ว่า เมื่อ เปลี่ยนรูปทรงของครอปัด จากครอปัดแบบหน้าตัดรูปตัววีและหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า และครอ ปัดหน้าตัดครึ่งวงกลม จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการบางลงของความหนาสูงสุดเกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อ เปลี่ยนรูปทรงของครอปัด จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า การเปลี่ยนแปลงความหนามีค่าใกล้เคียงกันทุกตำแหน่ง มีความแตกต่างเฉลี่ย 6 %

2) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิ เมนต์ในการใช้ครอปัดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดขึ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCC

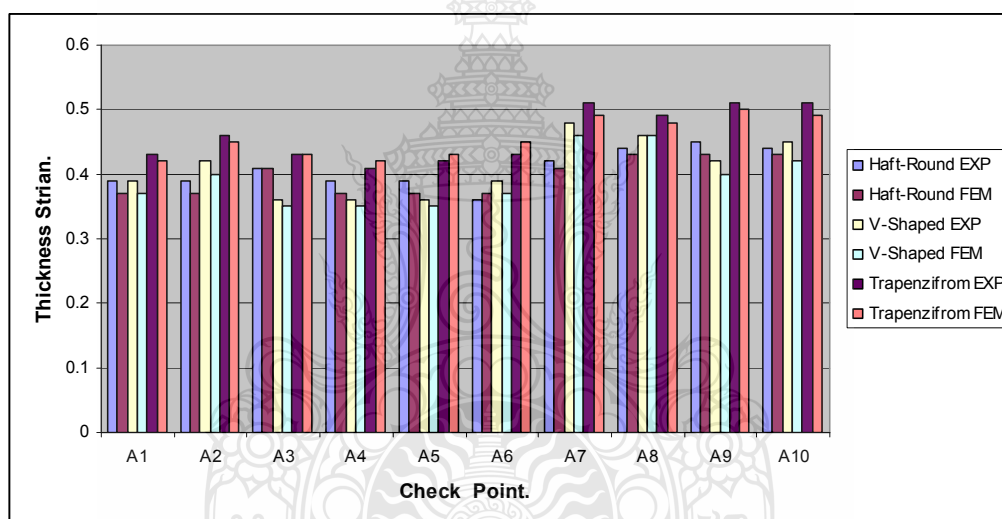


ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิ เมนต์ในการใช้ครอปัดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดขึ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCC

จากกราฟผลทดลองการขึ้นรูป ภาพที่ 4.7 พบว่าเมื่อเพิ่มแรงกดขึ้นงานจาก 30 % เป็น 50% ในการขึ้นรูปโดยใช้ครอปัดที่มีรูปทรงแตกต่างกัน พบว่าความหนามีค่าแตกต่างกัน โดยที่ ครอปัดรูปทรงหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่ามีการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุด เฉลี่ย 47 % ที่จุด A7, A8 รองลงมาเป็นครอปัดหน้าตัดรูปตัววี มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนว

ความหนาสูงสุดเฉลี่ย 43 % ที่จุดวัดความหนาเดียวกัน และครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลมเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาต่ำสุดเฉลี่ย 36 % ที่แรงกดชิ้นงาน 50 % จากภาพที่ 4.7 กราฟแสดงเปรียบเทียบรูปทรงครอปัด จะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนรูปทรงของครอปัด จากครอปัดแบบหน้าตัดรูปตัววีและหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า และครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลม จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการบางลงของความหนาเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนรูปทรงของครอปัด จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า การเปลี่ยนแปลงความหนามีค่าใกล้เคียงกันทุกตำแหน่ง มีความแตกต่างเฉลี่ย 5 %

3) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ครอปัดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCC

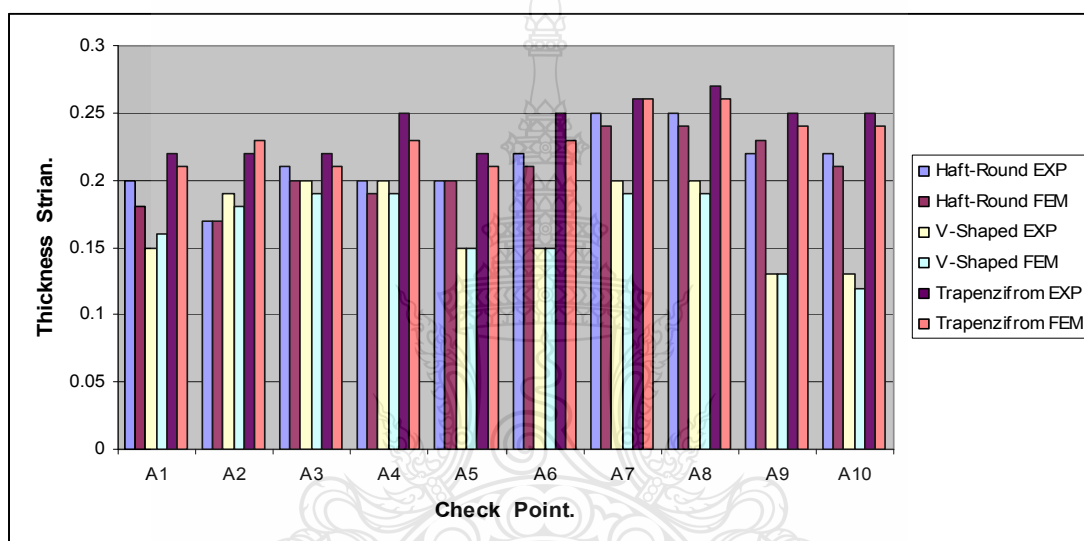


ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ครอปัดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCC

จากกราฟผลทดลองการขึ้นรูป ภาพที่ 4.8 พบว่าเมื่อเพิ่มแรงกดชิ้นงานจาก 50 % เป็น 70% ในการขึ้นรูปโดยการใส่ครอปัดที่มีรูปทรงแตกต่างกัน พบว่าความเครียดแนวความหนามีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ครอปัดรูปทรงหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่ามีการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุดเฉลี่ย 51 % ที่จุด A7, A9 และ A10 รองลงมาเป็นครอปัดหน้าตัดรูปตัววี มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุดเฉลี่ย 46% ที่จุดวัดความหนาเดียวกัน และครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลมเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาต่ำสุดเฉลี่ย 45 % ที่แรงกดชิ้นงาน 50 % จากภาพที่ 4.7 กราฟแสดง

เปรียบเทียบรูปทรงครอปัด จะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนรูปทรงของครอปัด จากครอปัดแบบหน้าตัดรูปตัววีและหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า และครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลม จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการบางลงของความหนาเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนรูปทรงของครอปัด จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า การเปลี่ยนแปลงความหนามีค่าใกล้เคียงกันทุกตำแหน่ง มีความแตกต่างเฉลี่ย 12 %

4) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ครอปัดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCD

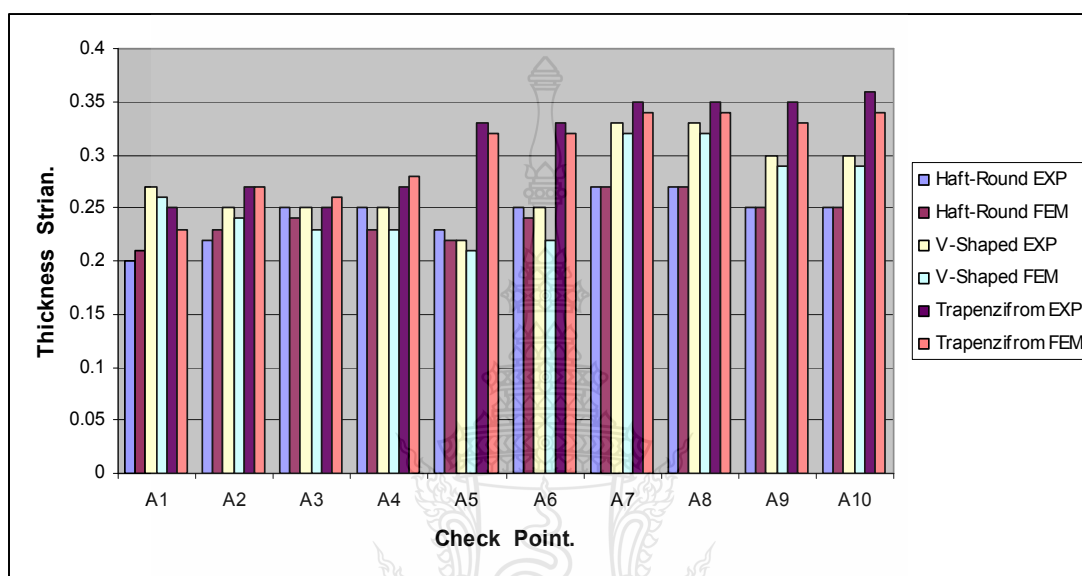


ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ครอปัดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCD

จากการทดลองการขึ้นรูปจะพบว่า ตัวแปรมีผลต่อ ความหนาที่ลดลง ระหว่างการขึ้นรูปคือ แรงกดของแผ่นกดชิ้นงานและชนิดครอปัด จากภาพที่ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนา มีค่าสูงสุดเท่ากับ 27 % ที่จุด A7 และ A8 ของหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ส่วนครอปัดแบบหน้าตัดรูปตัววีเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุดเท่ากับ 20 % ที่จุด A7 และ A8 และครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลมเปลี่ยนแปลงความหนาสูงสุดเท่ากับ 25 % ที่แรงกดชิ้นงาน 30 % จากภาพที่ 4.6 กราฟแสดงเปรียบเทียบครอปัดต่างชนิดกัน จะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนรูปทรงของครอปัด จากครอปัดแบบหน้าตัดรูปตัววีและหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า และครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลม จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการบางลงของความหนาสูงสุดเกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อเปลี่ยนรูปทรงของครอปัด จากผลการ

ทดลองเปรียบเทียบกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า การเปลี่ยนแปลงความหนา มีค่าใกล้เคียงกันทุกตำแหน่ง มีความแตกต่างเฉลี่ย 21 %

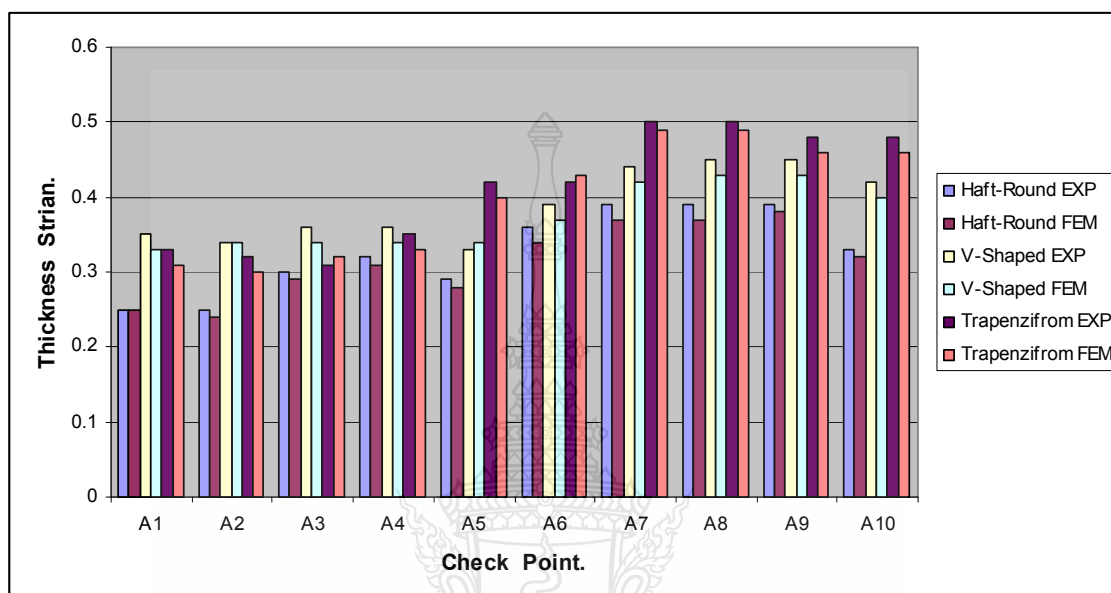
5) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ครอปัดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCD



ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ครอปัดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCD

จากกราฟผลการทดลองการขึ้นรูป ภาพที่ 4.10 พบว่าเมื่อเพิ่มแรงกดชิ้นงานจาก 30 % เป็น 50% ในการขึ้นรูปโดยใช้ครอปัดที่มีรูปทรงแตกต่างกัน พบว่าความหนา มีค่าแตกต่างกัน โดยที่ครอปัดรูปทรงหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุดเฉลี่ย 36 % ที่จุด A10 รองลงมาเป็นครอปัดหน้าตัดรูปตัววี มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุดเฉลี่ย 33 % ที่จุดวัดความหนาเดียวกัน และครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลมเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาต่ำสุดเฉลี่ย 27 % ที่แรงกดชิ้นงาน 50 % จากภาพที่ 4.7 กราฟแสดงเปรียบเทียบรูปทรงครอปัด จะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนรูปทรงของครอปัด จากครอปัดแบบหน้าตัดรูปตัววีและหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า และครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลม จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการบางลงของความหนาเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนรูปทรงของครอปัด จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า การเปลี่ยนแปลงความหนา มีค่าใกล้เคียงกันทุกตำแหน่ง มีความแตกต่างเฉลี่ย 25 %

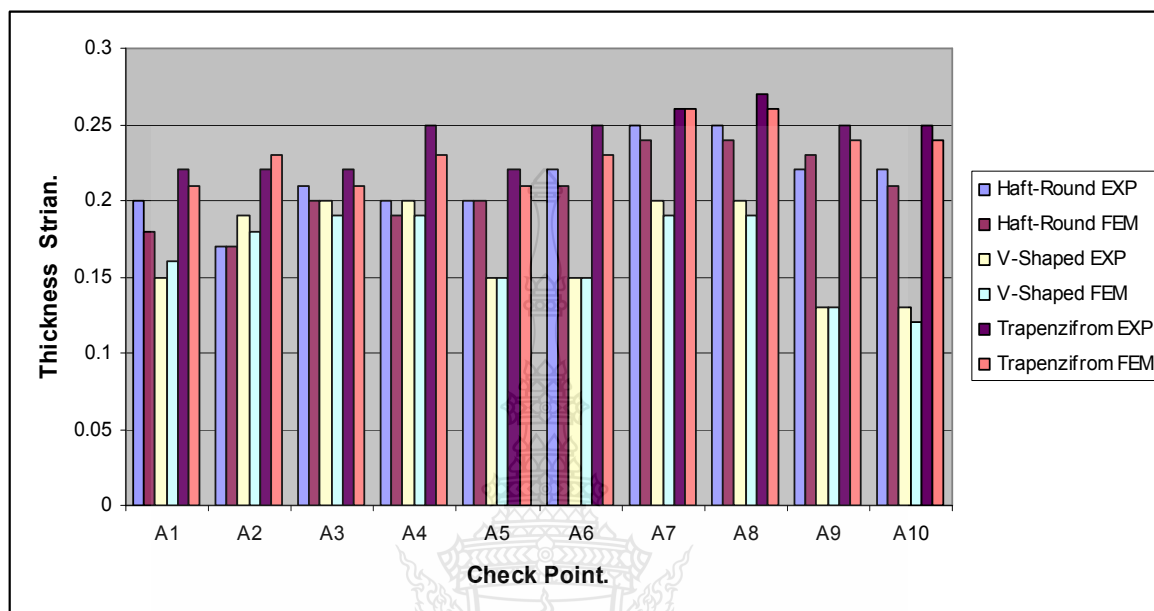
6) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ครอปัดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCD



ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ครอปัดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCD

จากกราฟผลการทดลองการขึ้นรูป ภาพที่ 4.11 พบว่าเมื่อเพิ่มแรงกดชิ้นงาน 70 % ในการขึ้นรูปโดยใช้ครอปัดที่มีรูปทรงแตกต่างกัน พบว่าความเครียดแนวความหนามีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ครอปัดรูปทรงหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่ามีการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุดเฉลี่ย 50 % ที่จุด A7, A8 รองลงมาเป็นครอปัดหน้าตัดรูปตัววี มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุดเฉลี่ย 45% ที่จุดวัดความหนาเดียวกัน และครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลมเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาค่าต่ำสุดเฉลี่ย 38 % ที่แรงกดชิ้นงาน 50 % จากภาพที่ 4.7 กราฟแสดงเปรียบเทียบรูปทรงครอปัด จะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนรูปทรงของครอปัด จากครอปัดแบบหน้าตัดรูปตัววีและหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า และครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลม จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการบางลงของความหนาเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนรูปทรงของครอปัด จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า การเปลี่ยนแปลงความหนามีค่าใกล้เคียงกันทุกตำแหน่ง มีความแตกต่างเฉลี่ย 30 %

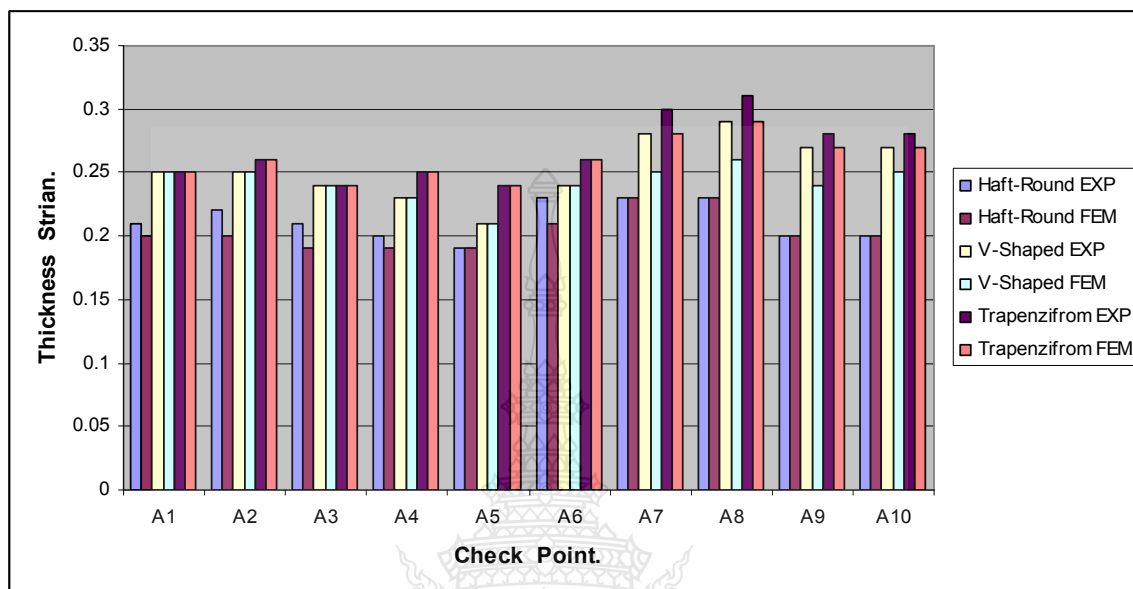
7) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ครอปัดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCE



ภาพที่ 4.12 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ครอปัดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCE

จากกราฟผลทดลองการขึ้นรูป ภาพที่ 4.12 พบว่าเมื่อเพิ่มแรงกดชิ้นงานจาก 30 % ในการขึ้นรูปโดยการใช้ครอปัดที่มีรูปทรงแตกต่างกัน พบว่าความเครียดแนวความหนามีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ครอปัดรูปทรงหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่ามีการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุดเฉลี่ย 27 % ที่จุด A7, A8 รองลงมาเป็นครอปัดหน้าตัดรูปตัววี มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุดเฉลี่ย 25% ที่จุดวัดความหนาเดียวกัน และครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลมเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาค่าต่ำสุดเฉลี่ย 20 % ที่แรงกดชิ้นงาน 30 % จากภาพที่ 4.12 กราฟแสดงเปรียบเทียบรูปทรงครอปัด จะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนรูปทรงของครอปัด จากครอปัดแบบหน้าตัดรูปตัววีและหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า และครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลม จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการบางลงของความหนาเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนรูปทรงของครอปัด จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับ การจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า การเปลี่ยนแปลงความหนามีค่าใกล้เคียงกันทุกตำแหน่ง มีความแตกต่างเฉลี่ย 10.7 %

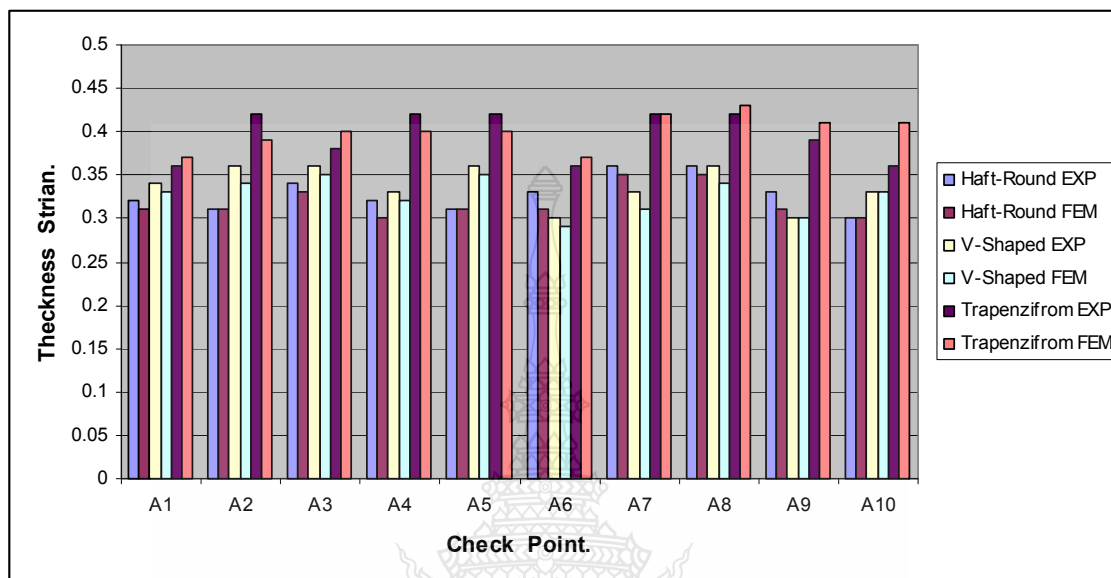
8) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปีดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCE



ภาพที่ 4.13 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปีดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCE

จากกราฟผลทดลองการขึ้นรูป ภาพที่ 4.13 พบว่าเมื่อเพิ่มแรงกดเป็น 50 % ในการขึ้นรูป พบว่าความเครียดแนวความหนามีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ดรอปีดรูปทรงหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่ามีการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุดเฉลี่ย 30 % ที่จุด A7, A8 รองลงมาเป็นดรอปีดหน้าตัดรูปตัววี มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุดเฉลี่ย 27% ที่จุดวัดความหนาเดียวกัน และดรอปีดหน้าตัดครึ่งวงกลมเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาค่าสูงสุดเฉลี่ย 23 % ที่แรงกดชิ้นงาน 50 % จากภาพที่ 4.13 กราฟแสดงเปรียบเทียบรูปทรงดรอปีด จะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนรูปทรงของดรอปีด จากดรอปีดแบบหน้าตัดรูปตัววีและหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า และดรอปีดหน้าตัดครึ่งวงกลม จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการบางลงของความหนาเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนรูปทรงของดรอปีด จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าการเปลี่ยนแปลงความหนามีค่าใกล้เคียงกันทุกตำแหน่ง มีความแตกต่างเฉลี่ย 13 %

9) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปีดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCE



ภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ดรอปีดแต่ละชนิด ที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCE

จากกราฟผลการทดลอง ภาพที่ 4.14 พบว่าเมื่อเพิ่มแรงกดชิ้นงานเป็น 70 % ในการขึ้นรูป พบว่าความเครียดแนวความหนามีค่าเพิ่มสูง โดยที่ดรอปีดรูปทรงหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่ามีการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุดเฉลี่ย 43 % เกือบทุกจุดของชิ้นงาน รองลงมาเป็นดรอปีดหน้าตัดรูปตัววี มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนาสูงสุดเฉลี่ย 37% ที่จุดวัดความหนาเดียวกัน และดรอปีดหน้าตัดครึ่งวงกลมเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาต่ำสุดเฉลี่ย 35 % ที่แรงกดชิ้นงาน 70 % จากภาพที่ 4.14 กราฟแสดงเปรียบเทียบรูปทรงดรอปีด จะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนรูปทรงของดรอปีด จากดรอปีดแบบหน้าตัดรูปตัววีและหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า และดรอปีดหน้าตัดครึ่งวงกลม จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการบางลงของความหนาเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนรูปทรงของดรอปีด จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับ การจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าการเปลี่ยนแปลงความหนามีค่าใกล้เคียงกันทุกตำแหน่ง มีความแตกต่างเฉลี่ย 18 %

4.4 สรุปการเปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาของการขึ้นรูป

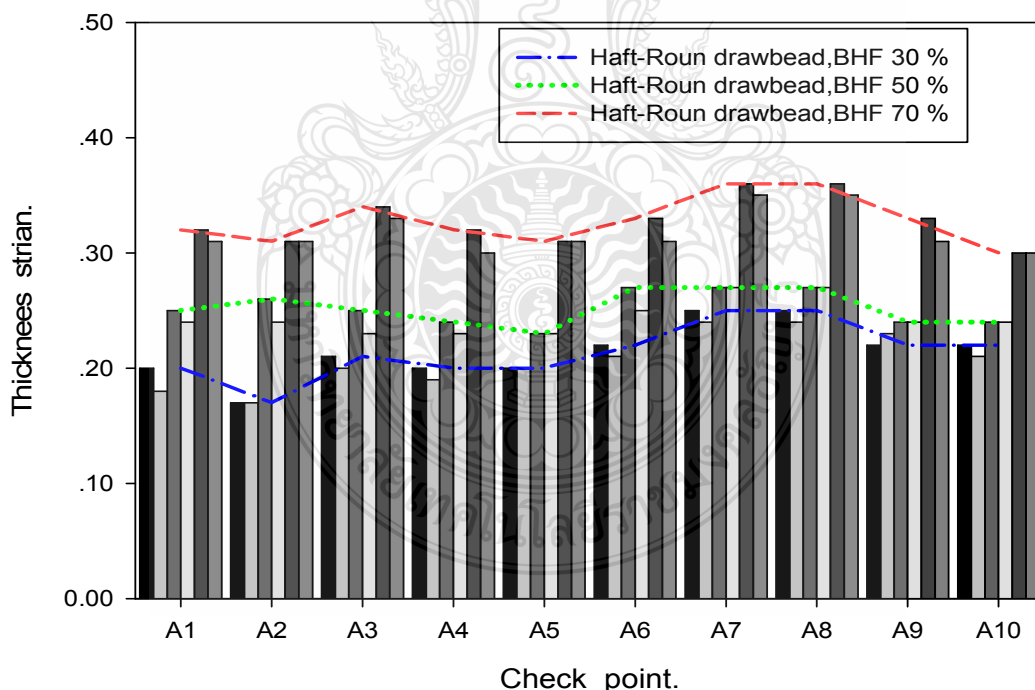
4.4.1 จากผลการทดลองการขึ้นรูปวัสดุเหล็ก SPCC, SPCD และ SPCE พบว่าแรงกดขึ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ของดรอปีดทั้ง 3 ชนิด คือ ดรอปีดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม หน้าตัดสามเหลี่ยม หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า วัสดุไหลตัวได้มากเกินไปเนื่องจากแรงกดขึ้นงานน้อยเกินไปส่งผลให้เกิดรอยยับบริเวณปีกของขึ้นงาน แต่จากการทดลองพบว่าความเครียดเฉลี่ยของการขึ้นรูปด้วยดรอปีดและวัสดุทั้ง 3 ชนิด วัสดุที่เกิดความเครียดสูงสุดคือวัสดุเหล็ก SPCC จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุทั้ง 3 ชนิด พบว่าเหล็ก SPCC มีค่า เลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (n - Strain - Hardening Exponent) และ R (r -Value หรือ Plastic Strain Ratio) น้อยที่สุดนั้นก็หมายความว่าขีดจำกัดในการเปลี่ยนรูปร่างและความสามารถในการต้านทานการหดตัวในแนวความหนา ของวัสดุน้อยตามไปด้วย [6] จึงส่งผลให้วัสดุเหล็ก SPCC มีค่าความเครียดสูงสุด SPCD และ SPCE ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ที่แรงกดขึ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ของดรอปีดและวัสดุทั้ง 3 ชนิดวัสดุมีค่าความหนาและตำแหน่งของรอยยับใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริง

4.4.2 คุณภาพขึ้นงานในการใช้ดรอปีดแต่ละชนิดที่แรงกดขึ้นงาน 50 % ขึ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปมีแรงลากขึ้นรูปสูงกว่า 30 % ในการใช้ดรอปีดทั้ง 3 รูปทรงนั้นยังพบว่าขึ้นงานเกิดรอยยับที่ผนังขึ้นงานและขอบปีกขึ้นงานบ้างเล็กน้อย เนื่องจากแรงกดขึ้นงานมีความเหมาะสมกับการขึ้นรูป แต่ที่ระยะลึกสุดของขึ้นงานบริเวณนี้จะมีขนาดความหนาลดลง จะเห็นได้ว่ามีค่าความเครียดเกิดขึ้นสูงและตรงที่ขึ้นงานที่ใช้ดรอปีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า จะทำให้ขึ้นงานง่ายต่อการฉีกขาด แต่ในขณะที่ใช้ดรอปีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า นั้นพบว่าขึ้นงานเกิดรอยยับที่ขอบปีกขึ้นงาน ความถี่การเกิดรอยยับมากขึ้นกว่าดรอปีดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม และดรอปีดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม มีการเกิดรอยยับน้อยที่สุด จากการทดลองพบว่าความเครียดเฉลี่ยของการขึ้นรูปด้วยดรอปีดและวัสดุทั้ง 3 ชนิด วัสดุที่เกิดความเครียดสูงสุดคือวัสดุเหล็ก SPCC จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุทั้ง 3 ชนิด พบว่าเหล็ก SPCC มีค่า เลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (n) และ R น้อยที่สุดนั้นก็หมายความว่าขีดจำกัดในการเปลี่ยนรูปร่างและความสามารถในการต้านทานการหดตัวในแนวความหนา [6] ของวัสดุน้อยตามไปด้วยจึงส่งผลให้วัสดุเหล็ก SPCC มีค่าความเครียดสูงสุด SPCD และ SPCE ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ที่แรงกดขึ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ของดรอปีดและวัสดุทั้ง 3 ชนิดวัสดุมีค่าความหนาและตำแหน่งของรอยยับใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริง

4.4.3 คุณภาพขึ้นงานในการใช้ดรอปีดแต่รูปทรงที่แรงกดขึ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นงานที่ได้จากการขึ้นในการใช้ดรอปีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ดรอปีดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม และดรอปีดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม พบว่าขึ้นงานเกิดการฉีกขาดบริเวณจุด A7, A8, A9, A10 และ บริเวณก้นถ้วย

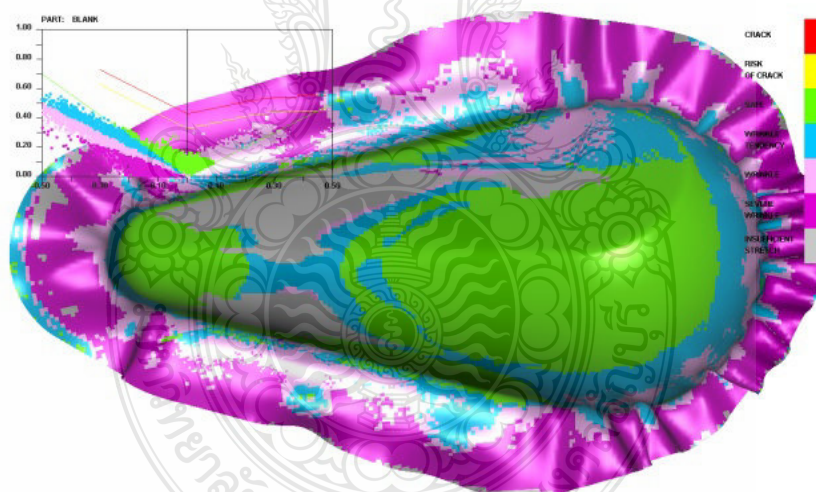
เพราะว่าปริมาณแรงกดขึ้นงานที่สูงกลงที่รอบปิดทำให้โลหะไม่สามารถไหลเข้าสู่ช่องตายได้ ทำให้เกิดความรุนแรงของการเปลี่ยนรูปวัสดุ เกิดความเค้นสูงสุดทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหาย แต่ไม่เกิดรอยย่นที่บริเวณขอบปีกของชิ้นงานเนื่องจากแรงกดของชิ้นงานสูงและแรงลากขึ้นรูปมากจึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานมากที่สุดด้วย ซึ่งผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกัน

จากภาพที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาที่แรงกดขึ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE ในการใช้รอบปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม สรุปได้ว่าเหล็ก SPCE เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปมากกว่าเหล็ก SPCC และ เหล็ก SPCD เนื่องจากเหล็ก SPCE มีค่า เลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (n - Strain - Hardening Exponent) มากกว่าเหล็กอีกสองชนิด และมีการยึดตัวได้ดีกว่า ดังนั้นจึงควรเลือกเหล็ก SPCE ในการขึ้นรูปและควรเลือกใช้กับรอบปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Half-Round Drawbead) ที่แรงกดขึ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ จากภาพที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาที่แรงกดขึ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE ในการใช้รอบปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม ผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกัน

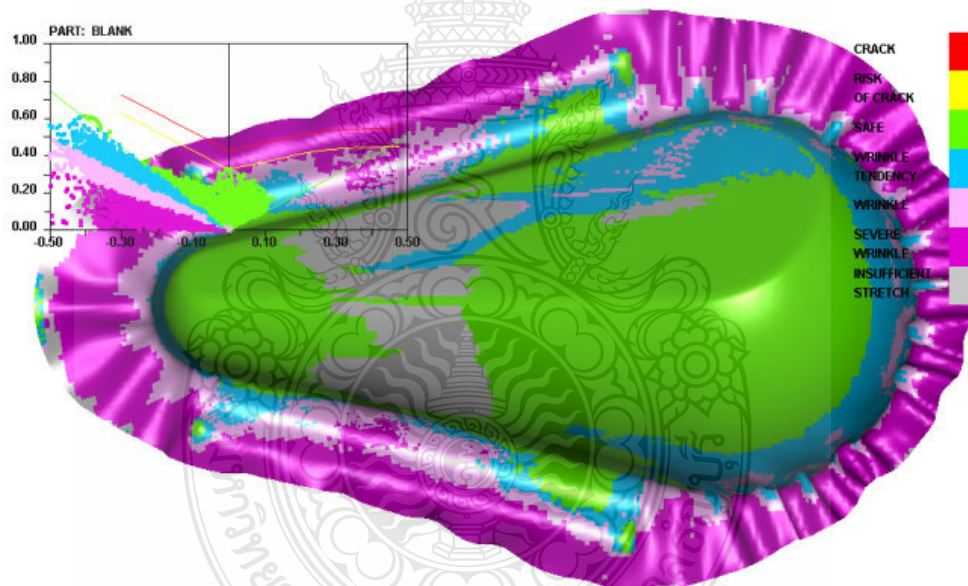


ภาพที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบความเครียดแนวความหนาที่แรงกดขึ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE ในการใช้รอบปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม

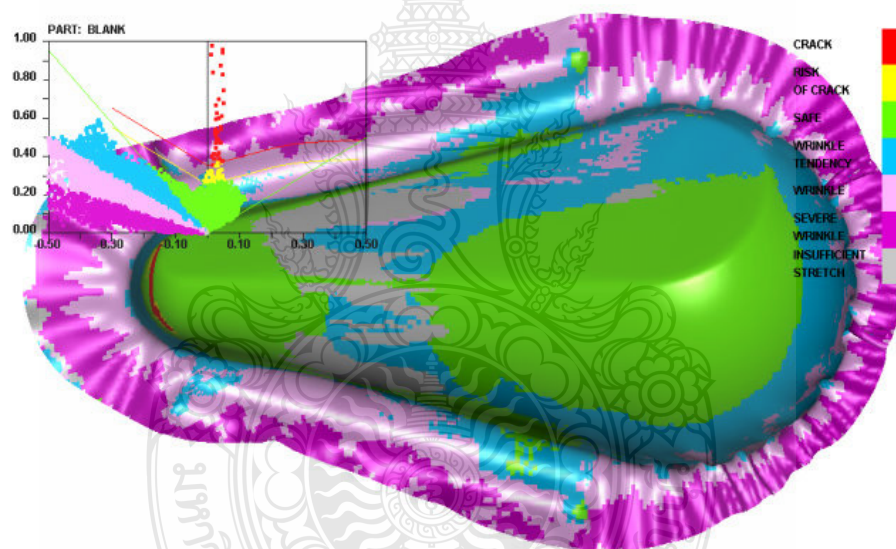
เปรียบเทียบรูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของครอปัดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE ดังภาพที่ 4.16 - 4.18



ภาพที่ 4.16 เปรียบเทียบรูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของครอปัดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE



ภาพที่ 4.17 เปรียบเทียบรูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของ
 ครอบปิดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE



ภาพที่ 4.18 เปรียบเทียบรูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของ
 ครอบปิดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE

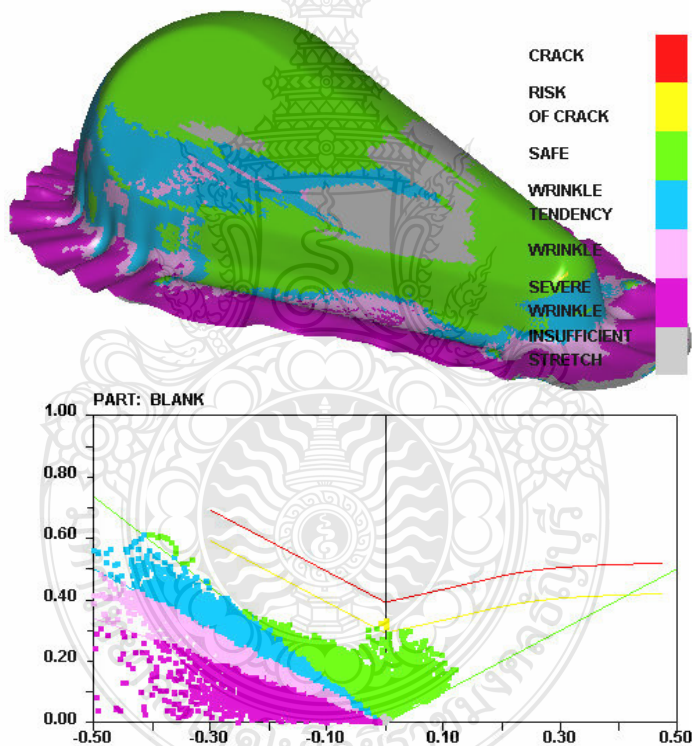
4.5 ศึกษาอิทธิพลรูปทรงของครอบปิดในกระบวนการขึ้นรูป

หลังจากที่ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับจำลองกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มี
 รูปทรงไม่สมมาตร โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 สรุป
 ได้ว่าเหล็ก SPCE เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปมากกว่าเหล็ก SPCC และ เหล็ก SPCD ในการขึ้นรูป ที่
 แรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาการผลกระทบบของครอบปิดเข้ามาช่วยควบคุม

ปริมาณวัสดุที่ถูกดึงเข้าไปในแม่พิมพ์ที่มีรูปทรงไม่สมมาตรเพื่อป้องกันการเกิดรอยย่น หรือรอยย่นน้อยที่สุด ในการศึกษาทำได้โดยใช้ ครอบบีด 3 ชนิด ที่มีรูปทรงต่างกัน ได้แก่ ครอบบีดหน้าตัดแบบครึ่งวงกลม หน้าตัดรูปตัววีและหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ที่แรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE ในการเปรียบเทียบผลการขึ้นรูป

4.5.1 การเปรียบเทียบรอยย่นกับรูปทรงของครอบบีด

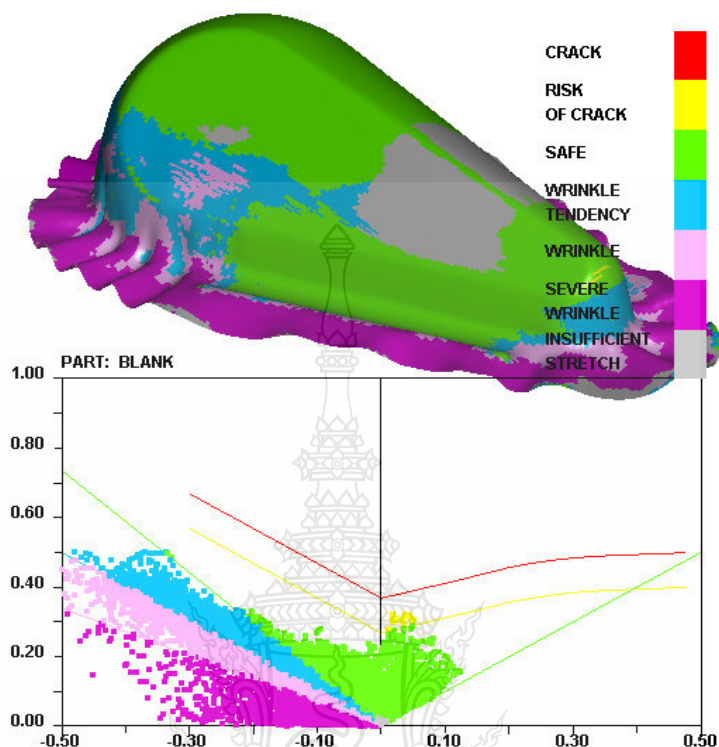
การเปรียบเทียบรอยย่นกับรูปทรงของครอบบีด แรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก SPCE จากภาพ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบรอยย่นและการเกิดรอยย่นกับรูปทรงของครอบบีด ซึ่งได้จากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram; FLD) พบว่าเมื่อเปลี่ยนรูปทรงของครอบบีดรอยย่นของรอยย่นเมื่อเทียบกับจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดนั้นมีค่าเปลี่ยนไป



ภาพที่ 4.19 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปกรณีการใช้ครอบบีดหน้าตัดครึ่งวงกลมของเหล็ก SPCE

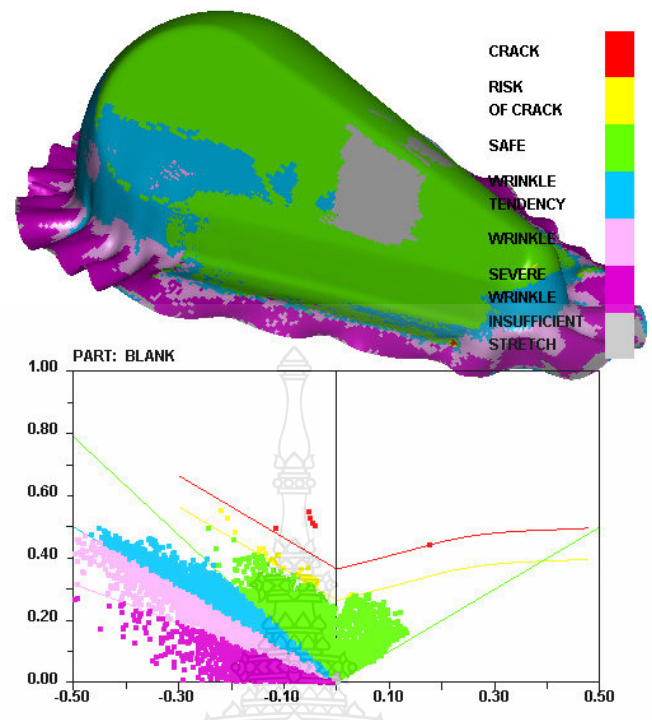
รูปร่างของครอบบีดที่ต่างกัน ซึ่งครอบบีดหน้าตัดแบบครึ่งวงกลม เกิดรอยย่นน้อยที่สุด กล่าวคือเมื่อครอบบีดสัมผัสกับแผ่นขึ้นงานและมีแรงกดชิ้นงานที่เพียงพอสำหรับการขึ้นรูป เกิดการดรอป (Draw) และ การดึงยืดขึ้นรูป (Stretching) ที่เพียงพอสำหรับการไหลตัวของวัสดุ เกิดจากปลาย

โค้งมนของครอปปิดส่งผลให้ความเค้นอัดรอบแนวแกนลดลง จึงทำให้รอยย่นลดลงดังแสดงในภาพที่ 4.19

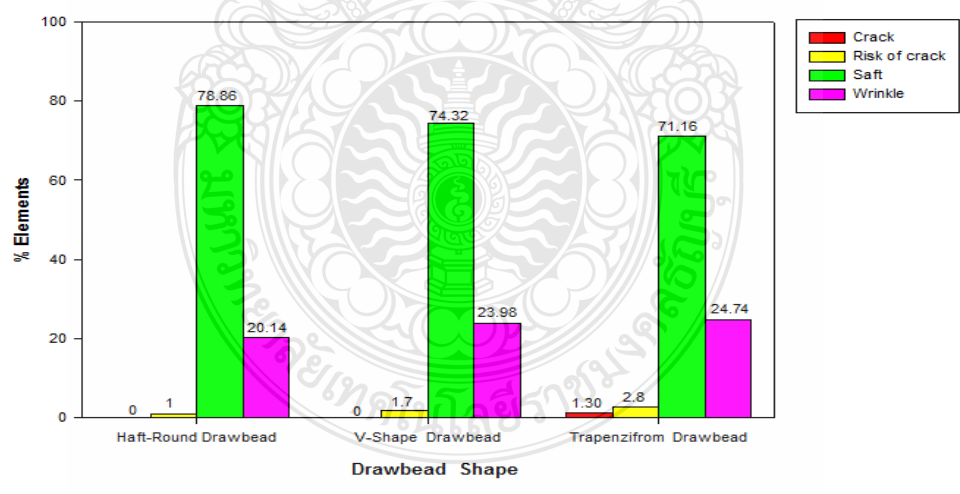


ภาพที่ 4.20 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปกรณีการใช้ครอปปิดหน้ารูปตัววีของเหล็ก SPCE

ส่วนครอปปิดหน้าตัดรูปตัววีพบว่าเกิดรอยย่นมากกว่าครอปปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม คือเมื่อมีแรงกดขึ้นงานครอปปิดมีรูปทรงปลายแหลมและรัศมีของครอปปิดน้อยทำให้วัสดุเกิดการดัดมากเกินไป โลหะไหลตัวได้น้อยขึ้นงานเกิดการดึงยืดขึ้นรูปสูง และการครอว์ลดลงส่งผลให้ขึ้นงานเกิดการฉีกขาด แต่บริเวณขอบขึ้นงานเกิดความเค้นอัดสูงขึ้นส่งผลให้รอยย่นเพิ่มสูงขึ้น ภาพที่ 4.20 แสดงแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ใช้ครอปปิดหน้ารูปตัววี และครอปปิดหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า เกิดรอยย่นมากที่สุด ซึ่งแนวโน้มของภาพที่ 4.20 พบว่ารูปทรงของครอปปิดมีอิทธิพลต่อรอยย่นที่เกิดขึ้น สอดคล้องกับทฤษฎี ในหัวข้อที่ 2.5 จากกราฟจะเห็นได้ว่ารูปทรงครอปปิดและแรงกดของแผ่นกดขึ้นงาน นั้นมีผลต่อการเกิดรอยย่น ซึ่งทำให้ปริมาณการดึงยืดขึ้นรูป (Stretching) เพิ่มขึ้น และลดความเค้นกดในแนวเส้นรอบวง (Compressive Stress) ลงได้ จึงทำให้รอยย่นลดลง จากผลการทดลองนี้ ยังต้องพิจารณาการเกิดการฉีกขาดด้วย เมื่อเพิ่มแรงกดแผ่นกดขึ้นงาน อาจจะทำให้เกิดการฉีกขาดมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเกิดการดึงยืดขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.21 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป กรณีการใช้ครอบิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าของเหล็ก SPCE



ภาพที่ 4.22 แผนภูมิของร้อยละเอลิเมนต์ในแต่ละชนิดของครอบิดของเหล็ก SPCE

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองการอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการศึกษาอิทธิพลของรูปทรงครอปิดที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยวิธีการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาผลกระทบในการขึ้นรูปโลหะแผ่นเพื่อประเมินความสามารถในการขึ้นรูปโลหะที่มีรูปทรงไม่สมมาตร เปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการวิเคราะห์จากการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้แรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ 50 เปอร์เซ็นต์ และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของแรงลากขึ้นรูป วัสดุเกรด SPCC, SPCD และ SPCE สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 แรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ แรงกดไม่เพียงพอสำหรับการขึ้นรูป ทำให้ชิ้นงานเกิดรอยยับบริเวณขอบปีกชิ้นงาน แรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์เป็นแรงที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปโดยใช้ครอปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม ถ้าใช้แรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดจะมีความหนาลดลงมากจากผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกัน

5.1.2 ผลการทดลองสรุปได้ว่าเหล็ก SPCE เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปมากกว่าเหล็ก SPCC และเหล็ก SPCD เนื่องจากเหล็ก SPCE มีค่าเลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (n - Strain - Hardening Exponent) มากกว่าเหล็กอีกสองชนิด และมีการยึดตัวได้ดีกว่า จึงควรเลือกเหล็ก SPCE ในการขึ้นรูปและควรเลือกใช้กับครอปิดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม ที่แรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์

5.1.3 จากการวิจัยพบว่า รูปทรงของครอปิดนั้น มีผลต่อ การเกิดรอยยับและ การฉีกขาด โดยวัดเป็นจำนวนเอลิเมนต์ที่ เกิดขึ้น พบว่า ครอปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม เกิดรอยยับน้อยที่สุด และ รูปทรงของครอปิดมีผลต่อการฉีกขาด และรอยยับ ซึ่งเมื่อใช้แรงกดชิ้นงานที่เท่ากัน แรงขึ้นรูปเพิ่มขึ้นตามแรงกดชิ้นงาน และรูปทรงของครอปิดในส่วนของการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นโลหะนั้น รูปทรงของครอปิดมีผลต่อการลดลงของการเปลี่ยนแปลงความหนา ซึ่งสามารถทำนายการเกิดการฉีกขาดได้ เมื่อพิจารณา แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram; FLD) จะแสดงถึงเอลิเมนต์ที่เกิดการฉีกขาด และรอยยับ เมื่อเปรียบเทียบรูปทรงของครอปิดต่างๆ พบว่า ครอปิดหน้าตัดครึ่งวงกลม เกิดการฉีกขาดและรอยยับน้อยที่สุด

5.2 การอภิปรายผล

จากผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าสามารถแสดงถึงพฤติกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่น ที่มีแนวโน้มของผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน ดังนั้นจึงสามารถนำผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จากการจำลองการขึ้นรูป ไปประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบครอปัดในการขึ้นรูปโลหะแผ่น สำหรับการขึ้นรูปใช้ครอปัดมีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรของเหล็กแผ่นเกรด SPCC, SPCD และ SPCE โดยเฉพาะการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร การไหลตัวของวัสดุไม่เท่ากันส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนากระจายตัวไม่สม่ำเสมอ จึงได้มีการประยุกต์ใช้ครอปัดมาใช้ในการควบคุมการไหลตัวของวัสดุ โดยมีการออกแบบครอปัด 3 ลักษณะได้แก่ ครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลม หน้าตัดรูปตัววี และ หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า มาใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานรูปทรงไม่สมมาตรแล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับ การจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า รูปทรงของครอปัดมีผลต่อการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร โดยครอปัดหน้าตัดครึ่งวงกลม จะสามารถควบคุมการไหลตัวได้ดีสุดกับวัสดุเกรด SPCE ที่แรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับ หน้าตัดรูปตัววีและหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า และการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการขึ้นรูปสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบครอปัดในการขึ้นรูปชิ้นงานไม่สมมาตรได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรกับวัสดุนอกกลุ่มเหล็ก โดยเปรียบเทียบกับไฟไนต์เอลิเมนต์

5.3.2 ศึกษาเปรียบเทียบชนิดของสารหล่อลื่นสำหรับกับการขึ้นรูปเปรียบเทียบกับ การจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

5.3.3 เปรียบเทียบความสูงของครอปัดสำหรับการขึ้นรูปกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

5.3.4 ครอปัดที่ใช้สำหรับการลากขึ้นรูปควรมีรัศมีมากเพื่อลดแรงเสียดทานของแผ่น แบลงก์ที่จะสัมผัสกับแผ่นเหยียบชิ้นงานและช่องตาย

5.3.5 ศึกษาชนิดของครอปัด ความสูงของครอปัด และตำแหน่งการติดตั้งครอปัดในการขึ้นรูปเปรียบเทียบกับ การจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

รายการอ้างอิง

- [1] บุญส่ง จงกลณี, ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร ต่อสมบัติการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ 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. pp. 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, ผลกระทบจากครอว์บีตในการขึ้นรูปโลหะแผ่น, ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2543.
- [5] ชัยยศ บูรณะชีพ, การวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์โดย แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป, ภาควิชาวิศวกรรมการผลิตบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระนครเหนือ, 2549.
- [6] ชนสาร อินทรกำจร, 5 คำถามกับการจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่น, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [7] ชนะชัย วลิตวารังค์กูร์ และ ชัยวัฒน์ ทองหลี่, การศึกษาตัวแปรในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.
- [8] มาโนช กรอบเงิน, การออกแบบแม่พิมพ์และการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์การลากขึ้นรูปชิ้นงานขอบสันผ่าข้างท้ายรถกระบะ, 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, การแก้ปัญหาการย่นในงานขึ้นรูปด้วยที่ทำได้ด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2541.
- [11] สุบิน ชันดี, การศึกษาความไวอัตราการยึดตัวของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์, ปรียญวิทยุวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [12] ชาญ ถนัดงาน, เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะและพื้นฐานการขึ้นรูปโลหะ, ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2541.
- [13] Manfred Jasner, Meinhard Hecht and 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 Production 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, **ทฤษฎีพลาสติกซิติ 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 บูรณธิตี. 2550. “การออกแบบการขึ้นรูปขึ้นส่วนขวางยึดเครื่องยนต์โดยการวิเคราะห์การนี้กขาดและรอยขุ่น,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ภาคผนวก



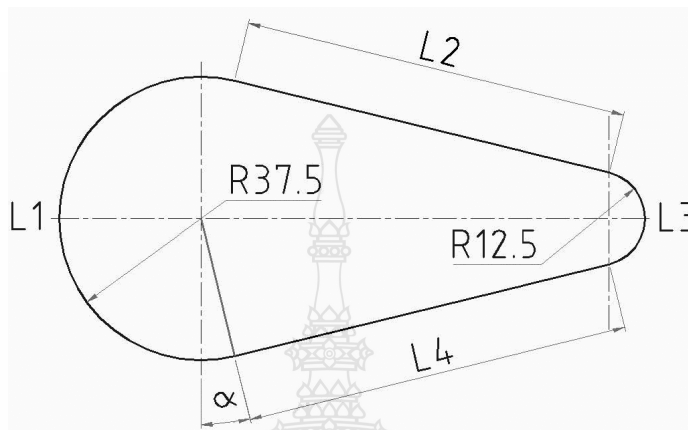
ภาคผนวก ก

การคำนวณแรงขึ้นรูป แรงกดชิ้นงานและขนาดของแผ่นชิ้นงาน



ก.1 การคำนวณแรงขึ้นรูปลึก

แรงในการขึ้นรูปสามารถหาได้จากสมการที่ 2.3 มีการคำนวณโดยการประมาณค่าดังแสดงวิธีดังนี้ [9]



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

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

แทนค่าในสมการ

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

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

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

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

$$= 105 \cos 13.77$$

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

หาค่า $L1$ และ $L3$ ที่สัมผัสส่วนโค้งของ $R1$ และ $R2$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

แทนค่าในสมการที่ 2.00

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

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

ก.2 แรกกดยึดแผ่นชิ้นงาน

แรกกดยึดแผ่นชิ้นงานสามารถหาได้จากสมการที่ 2.4 และ 2.5 ดังนี้ [9]

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

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

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

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

$$A_{st} = 7853.78 \text{ mm}^2$$

คำนวณค่า k, m ของวัสดุ SPCC

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

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

ค่าคุณสมบัติของวัสดุ SPCC ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E517-92 [38]

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

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

$$r_m = 0.848$$

$$r_{\max} = 1.102$$

$$r_{\min} = 0.699$$

$$n_m = \frac{(n_0 + 2n45 + n90)}{4}$$

$$n_m = 0.184$$

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} แผ่นกดขึ้นงาน (BHF)

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

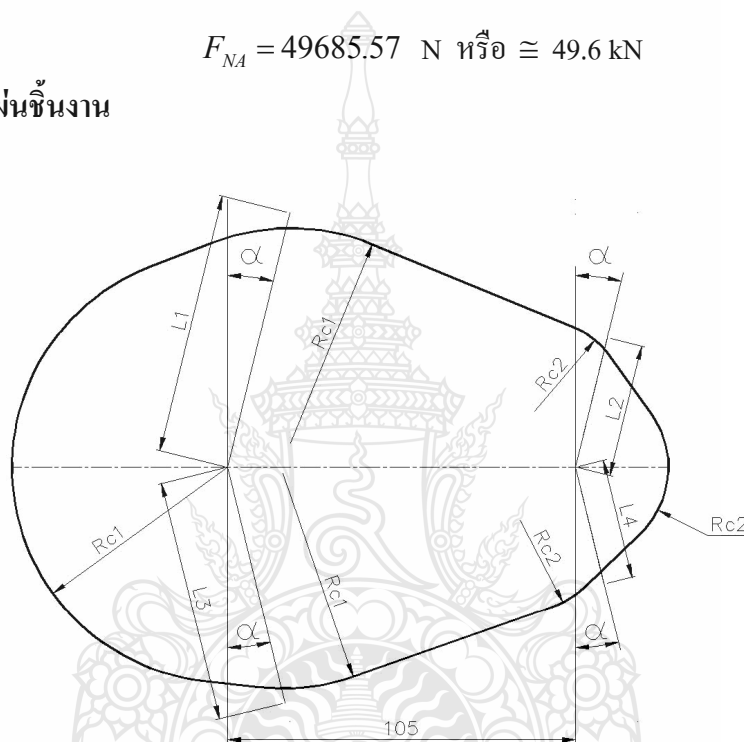
$$P_{NA} = 2.8208 \text{ N/mm}^2$$

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

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

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

ก.3 ขนาดของแผ่นชิ้นงาน



ภาพที่ ก.2 การคำนวณแผ่นตัดเปล่า [1]

หาค่า รัศมี $Rc1$ จากสมการ
$$D1 = \sqrt{d^2 + (d + 2a)^2 + 4d(h - 0.43r)}$$

เมื่อกำหนดให้ $d = 75 \text{ mm}$, $h = 15 \text{ mm}$, $a = 5 \text{ mm}$ และ $r = 4 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } D1 &= \sqrt{75^2 + (75 + 2(5))^2 + 4(75)(15 - 0.43(4))} \\ &= 129.75 \text{ mm} \end{aligned}$$

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

หาค่ารัศมี $Rc2$

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

$$= 56.37 \text{ mm}$$

เมื่อกำหนดให้ $d = 25 \text{ mm}$, $h = 15 \text{ mm}$, $a = 5 \text{ mm}$ และ $r = 4 \text{ mm}$

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

หาค่าความยาว $L1$ และ $L2$

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

เมื่อกำหนดให้ $R1 = 37.5 \text{ mm}$, $h = 15 \text{ mm}$, $a = 5 \text{ mm}$ และ $r = 4 \text{ mm}$

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 $R1 = 12.5 \text{ mm}$, $h = 15 \text{ mm}$, $a = 5 \text{ mm}$ และ $r = 4 \text{ mm}$

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

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

หาค่าความยาว $L3$ และ $L4$

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

เมื่อกำหนดให้ $R1 = 37.5 \text{ mm}$, $h = 15 \text{ mm}$, $a = 5 \text{ mm}$ และ $r = 4 \text{ mm}$

แทนค่าในสมการหาค่า $L3$

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

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

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

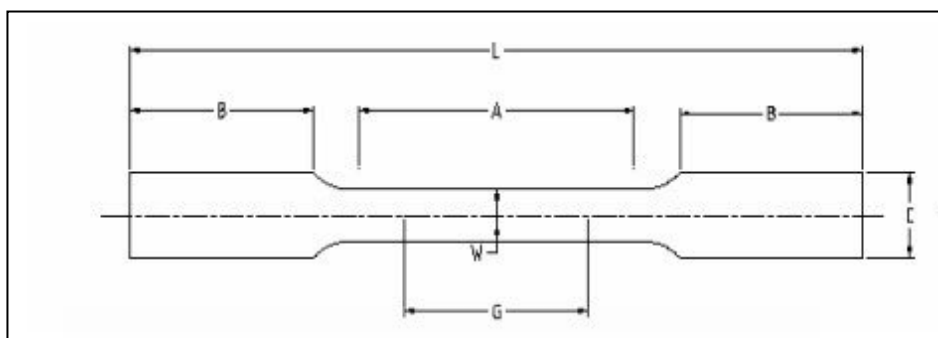
เมื่อกำหนดให้ $R1 = 12.5 \text{ mm}$, $h = 15 \text{ mm}$, $a = 5 \text{ mm}$ และ $r = 4 \text{ mm}$

แทนค่าในสมการหาค่า $L4$

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

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





ภาพที่ ข.1 ชิ้นทดสอบการดึง (Plain-End Specimen)

ชิ้นทดสอบการดึงเพื่อหาค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (n) ของวัสดุโลหะแผ่นตามมาตรฐาน 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

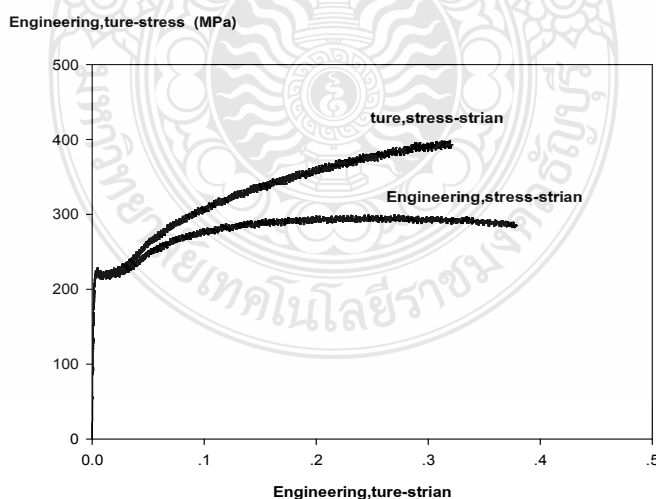
ข.1 ทดสอบหาสมบัติทางกลของเหล็ก SPCC หนา 1 มิลลิเมตร

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	3730.69	93.27	68.9	74.33	68.29	
Mean	0	0	0	0	0	
===== Raw Data =====						
T1	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	

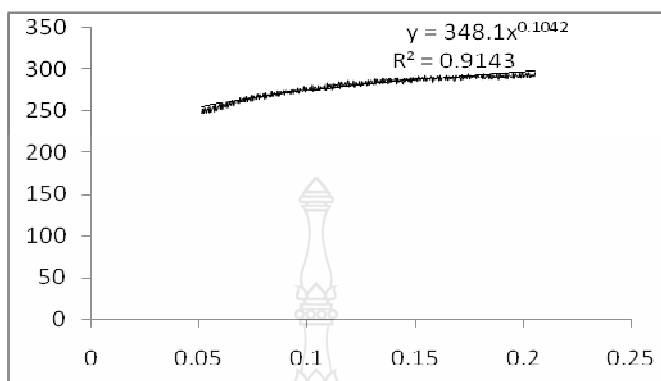
ภาพที่ ข.2 การบันทึกข้อมูลจากการทดสอบการดึง (Tensile test)

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

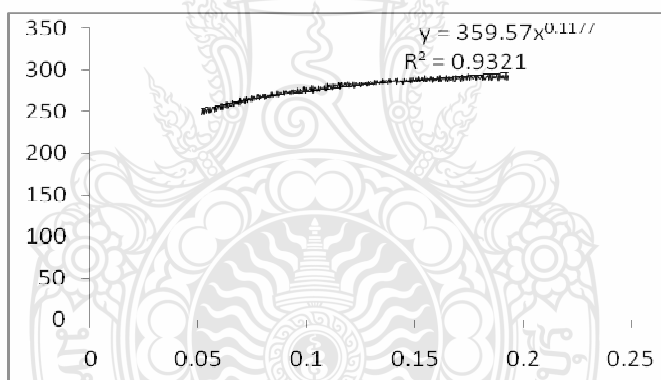


ภาพที่ ข.3 แผนภาพความเค้น-ความเครียดวิศวกรรมและ ความเค้น-ความเครียดจริงของเหล็ก SPCC หนา 1 มิลลิเมตร

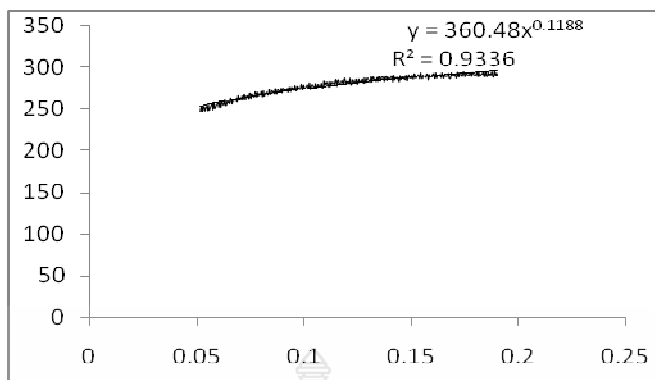
2) จากการลงจุดสร้างแผนภาพ ความเค้นจริง ความเครียดจริง หาค่า K, n จากพฤติกรรมช่วงพลาสติกซีดี (Plasticity) โดยใช้สมการตามแบบ กำลัง (Power function) จำนวนห้าชิ้นทดสอบ



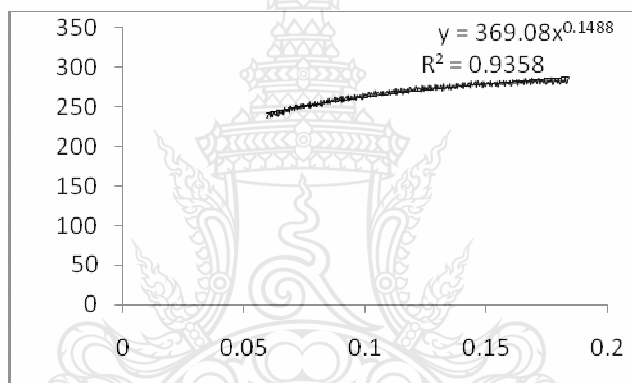
ภาพที่ ข.4 ชิ้นทดสอบชิ้นทดสอบที่ 1 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 348.1$ และ ค่า $n = 0.1042$



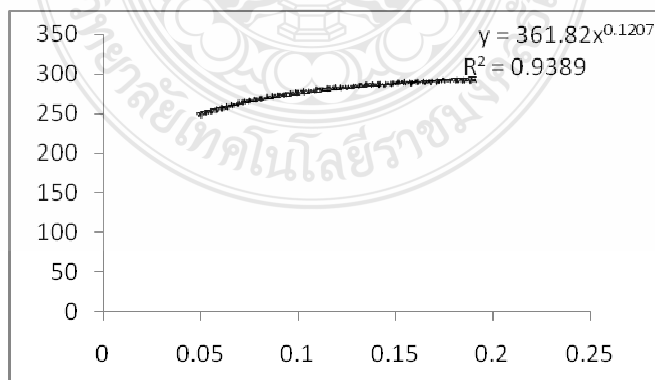
ภาพที่ ข.5 ชิ้นทดสอบชิ้นทดสอบที่ 2 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 359.57$ และ ค่า $n = 0.1177$



ภาพที่ ข.6 ชั้นทดสอบชั้นทดสอบที่ 3 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 360.48$ และ ค่า $n = 0.1188$



ภาพที่ ข.7 ชั้นทดสอบชั้นทดสอบที่ 4 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 369.08$ และ ค่า $n = 0.1488$



ภาพที่ ข.8 ชั้นทดสอบชั้นทดสอบที่ 5 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 361.82$ และ ค่า $n = 0.1207$

คำนวณหาค่าเฉลี่ย K รวม $(348.1+359.57+360.48+359.58+361.82)/5 = 357.91$

คำนวณหาค่าเฉลี่ย n รวม $(0.1042+0.1177+0.1188+0.1182+0.1207)/5 = 0.11592$

3) หาค่าแอนไอโซทรอปีคของเหล็ก SPCC ตามแนวทิศทางการรีด (Rolling Direction) หน้า 1 มิลลิเมตร ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ของความเครียด จากสมการที่ 2.11

$$r_0 = \frac{\ln(8.94/12.5)}{\ln(0.87/1)} = 1.165$$

$$r_{45} = \frac{\ln(10.08/12.5)}{\ln(0.87/1)} = 1.254$$

$$r_{90} = \frac{\ln(9.08/12.5)}{\ln(0.79/1)} = 1.35$$

ตารางที่ ข.2 คุณสมบัติของเหล็ก SPCC

ชนิดของวัสดุ	เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (n)	สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (K)	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r)			
			R_0	R_{45}	R_{90}	\bar{R}
SPCC	0.12	357	1.165	1.254	1.355	1.257

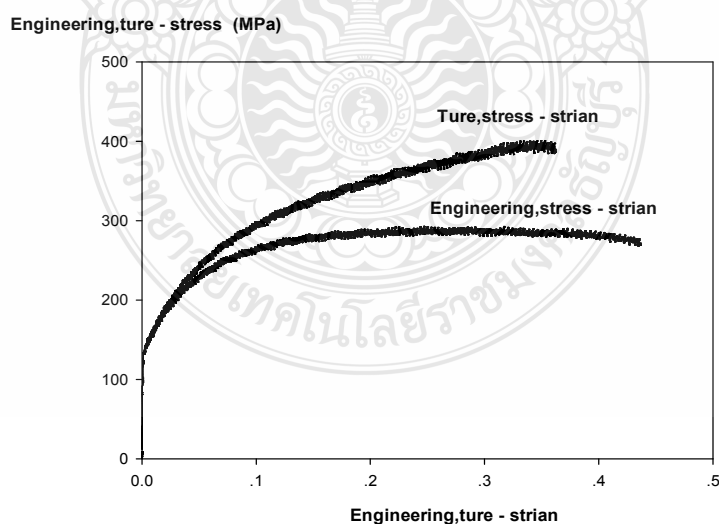
ข.2 ทดสอบหาสมบัติทางกลของเหล็ก SPCD หน้า 1 มิลลิเมตร

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	

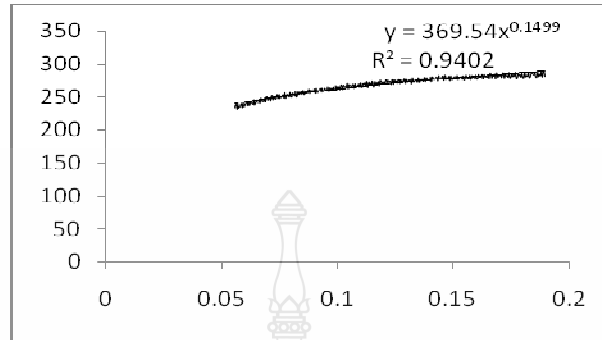
ภาพที่ ข.9 การบันทึกข้อมูลจากการทดสอบการดึง (Tensile test)

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

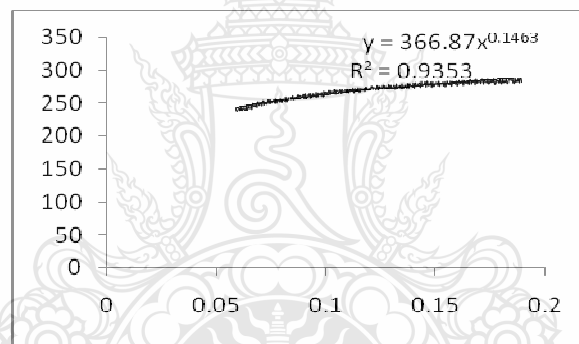


ภาพที่ ข.10 แผนภาพความเค้น-ความเครียดวิศวกรรมและ ความเค้น-ความเครียดจริงของเหล็ก SPCD หน้า 1 มิลลิเมตร

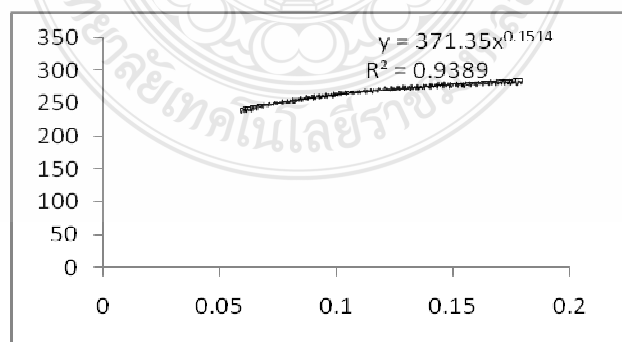
2) จากการลงจุดสร้างแผนภาพ ความเค้นจริง ความเครียดจริง หาค่า K, n จากพฤติกรรมช่วงพลาสติกซีดี (Plasticity) โดยใช้สมการตามแบบ กำลัง (Power function) จำนวนห้าชิ้นทดสอบ



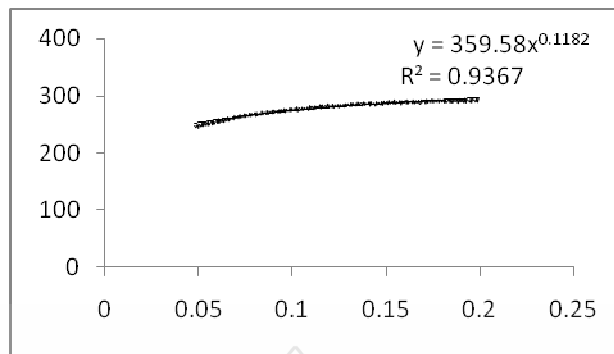
ภาพที่ ข.11 ชิ้นทดสอบชิ้นทดสอบที่ 1 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 369.54$ และ ค่า $n = 0.1499$



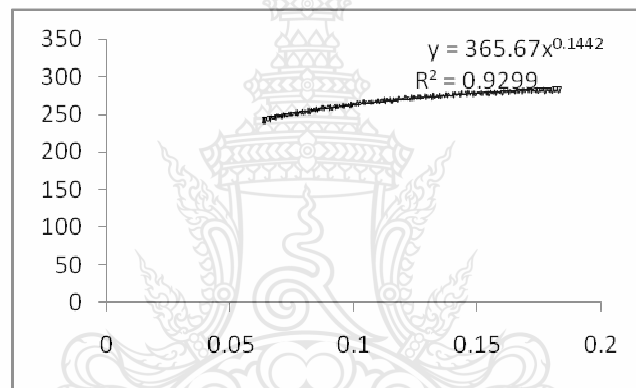
ภาพที่ ข.12 ชิ้นทดสอบชิ้นทดสอบที่ 2 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 366.87$ และ ค่า $n = 0.1463$



ภาพที่ ข.13 ชิ้นทดสอบชิ้นทดสอบที่ 3 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 371.35$ และ ค่า $n = 0.1514$



ภาพที่ ข.14 ชั้นทดสอบชั้นทดสอบที่ 4 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 359.58$ และ ค่า $n = 0.1182$



ภาพที่ ข.15 ชั้นทดสอบชั้นทดสอบที่ 5 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 365.67$ และ ค่า $n = 0.1442$

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

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

3) หาค่าแอนไอโซทรอปิกของเหล็ก SPCD ตามแนวทิศทางการรีด (Rolling Direction) หน้า 1 มิลลิเมตร ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ของความเครียด 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.3 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

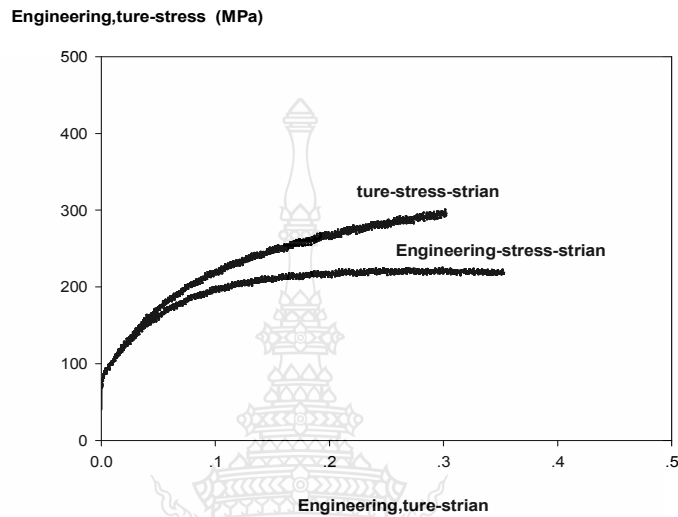
ข.3 ทดสอบหาคสมบัติทางกลของเหล็ก SPCE หน้า 1 มิลลิเมตร

1) นำค่าจากการทดสอบการดึง (Tensile test) มาลงจุดสร้างแผนภาพความคืบจริง (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	2903.46	72.59	30.51	37.22	30.3
Mean	0	0	0	0	0
===== Raw Data =====					
T1					
Time	Force	Stress	Stroke	Strain	Extensometer
1	50	8.23	1	2	0
2	185	10.23	1	2	0
8	479.13	11.98	1	2	0.01
9	737.13	18.43	1	2	0.02

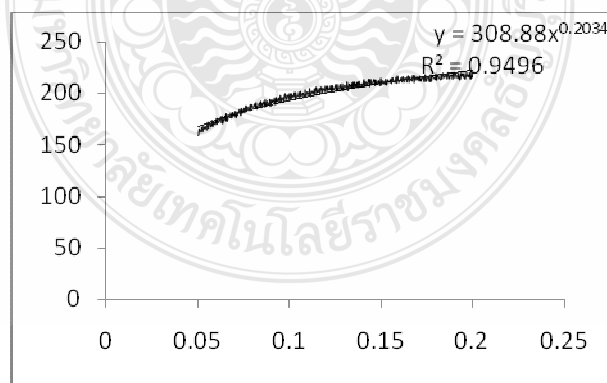
ภาพที่ ข.16 การบันทึกข้อมูลจากการทดสอบการดึง (Tensile test)

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

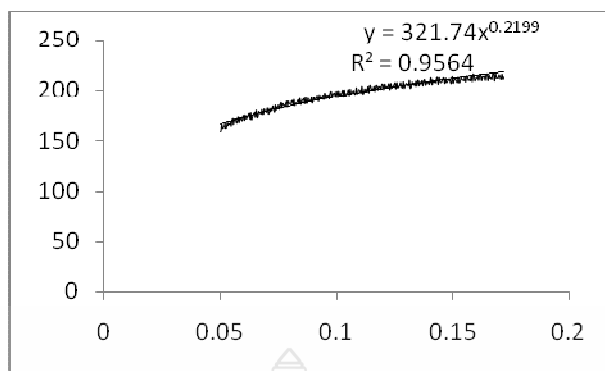


ภาพที่ ข.17 แผนภาพความเค้น-ความเครียดวิศวกรรมและ ความเค้น-ความเครียดจริงของเหล็ก SPCEN หนา 1 มิลลิเมตร

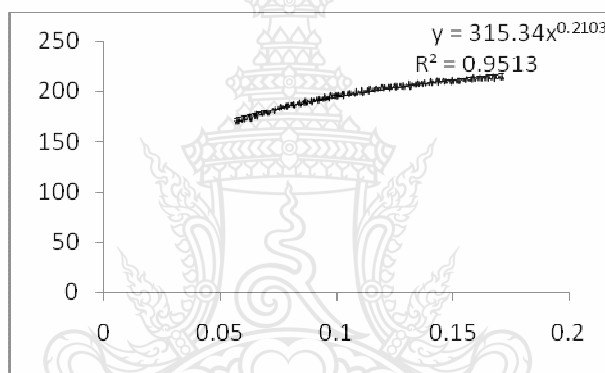
2) จากการลงจุดสร้างแผนภาพ ความเค้นจริง ความเครียดจริง หาค่า K, n จากพฤติกรรมช่วงพลาสติกซี้ด (Plasticity) โดยใช้สมการตามแบบกำลัง (Power function) จำนวนห้าชิ้นทดสอบ



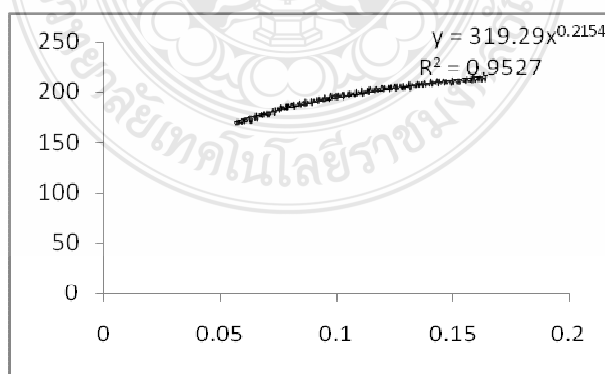
ภาพที่ ข.18 ชิ้นทดสอบชิ้นทดสอบที่ 1 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 308.88$ และ ค่า $n = 0.2034$



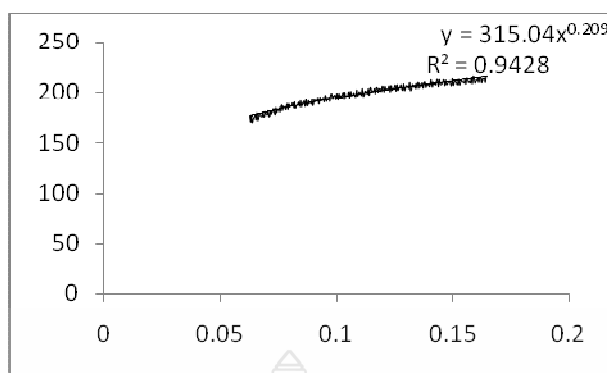
ภาพที่ ข.19 ชั้นทดสอบชั้นทดสอบที่ 2 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 321.74$ และ ค่า $n = 0.2199$



ภาพที่ ข.20 ชั้นทดสอบชั้นทดสอบที่ 3 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 315.34$ และ ค่า $n = 0.2103$



ภาพที่ ข.21 ชั้นทดสอบชั้นทดสอบที่ 4 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 319.29$ และ ค่า $n = 0.2154$



ภาพที่ ข.22 ชั้นทดสอบชั้นทดสอบที่ 5 แทนค่า K, n ตามแบบสมการ $\sigma = K\varepsilon^n$ ได้ค่า $K = 315.04$ และ ค่า $n = 0.2090$

คำนวณหาค่าเฉลี่ย K รวม $(308.88+321.74+315.34+319.29+315.04) / 5 = 316.058$

คำนวณหาค่าเฉลี่ย n รวม $(0.2034+0.2199+0.2103+0.2154+0.2090) / 5 = 0.2116$

3) หาค่าแอนไอโซทรอปิกของเหล็ก SPCE ตามแนวทิศทางการรีด (Rolling Direction) หนา 1 มิลลิเมตร ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ของความเครียด จากสมการที่ 2.11

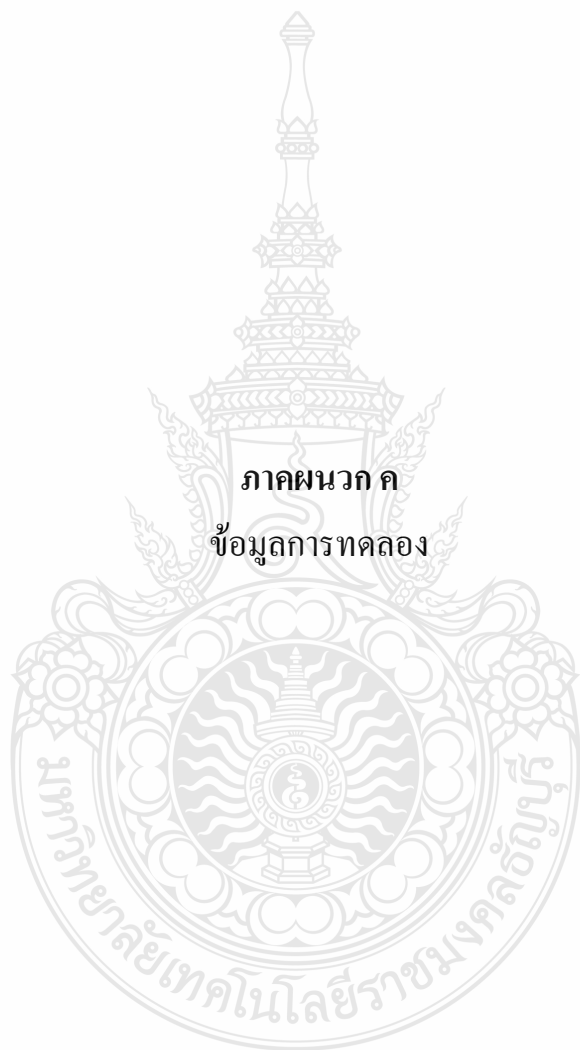
$$r_0 = \frac{\ln(7.53/12.5)}{\ln(0.78/1)} = \frac{\ln(0.6024)}{\ln(0.78)} = 2.04$$

$$r_{45} = \frac{\ln(7.84/12.5)}{\ln(0.77/1)} = \frac{\ln(0.627)}{\ln(0.77)} = 1.786$$

$$r_{90} = \frac{\ln(7.14/12.5)}{\ln(0.78/1)} = \frac{\ln(0.5712)}{\ln(0.78)} = 2.258$$

ตารางที่ ข.4 คุณสมบัติของเหล็ก SPCE

ชนิดของวัสดุ	เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (n)	สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (K)	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r)			
			R_0	R_{45}	R_{90}	\bar{R}
SPCE	0.21	290	2.04	1.786	2.258	2.01



ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดลอง

ค.1 ตารางบันทึกแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป

ตารางที่ ค.1 ผลของการลากขึ้นรูปที่ แรงกดขึ้นงาน 30, 50, 70 เปอร์เซ็นต์เหล็ก SPCC, SPCD, SPCE เปรียบเทียบกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

วัสดุ/แรงกดขึ้นงาน	แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปของรูปทรงกรอปิด (KN)					
	ครึ่งวงกลม		สามเหลี่ยม		สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า	
	EXP	FEM	EXP	FEM	EXP	FEM
1.เหล็ก SPCC แรงกด 30 %	106	100	108	103	110	105
2.เหล็ก SPCD แรงกด 30 %	106	101	109	103	132	133
3.เหล็ก SPCE แรงกด 30 %	101	100	105	99	109	104
4.เหล็ก SPCC แรงกด 50 %	126	108	131	106	146	128
5.เหล็ก SPCD แรงกด 50 %	133	115	138	109	150	142
6.เหล็ก SPCE แรงกด 50 %	121	101	127	105	129	126
7.เหล็ก SPCC แรงกด 70 %	140	132	157	131	180	155
8.เหล็ก SPCD แรงกด 70 %	145	138	168	145	183	166
9.เหล็ก SPCE แรงกด 70 %	135	127	157	124	161	150

ค.2 ความเครียดในแนวความหนาของขึ้นงานในแต่ละจุดตรวจวัด

ตารางที่ ค.2 การวิเคราะห์ความเครียดความเครียดแนวความหนาของเหล็ก SPCC ที่ แรงกดขึ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์

จุดตรวจวัดความหนา	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	0.20	0.18	0.22	0.21	0.22	0.20
A2	0.17	0.17	0.22	0.21	0.22	0.21
A3	0.20	0.18	0.27	0.25	0.22	0.23
A4	0.22	0.22	0.25	0.24	0.25	0.23
A5	0.20	0.19	0.25	0.24	0.25	0.24
A6	0.25	0.23	0.25	0.24	0.25	0.27
A7	0.27	0.27	0.30	0.30	0.30	0.29
A8	0.27	0.26	0.30	0.30	0.30	0.29
A9	0.22	0.21	0.25	0.25	0.23	0.24
A10	0.22	0.21	0.25	0.25	0.25	0.26

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

ตารางที่ ค.3 การวิเคราะห์ความเครียดแนวความหนาของเหล็ก SPCC ที่แรงกดชิ้นงาน 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	0.30	0.29	0.37	0.37	0.42	0.40
A2	0.30	0.29	0.38	0.38	0.42	0.41
A3	0.32	0.31	0.39	0.39	0.41	0.42
A4	0.31	0.30	0.41	0.41	0.43	0.43
A5	0.28	0.27	0.39	0.39	0.42	0.43
A6	0.29	0.28	0.38	0.38	0.42	0.41
A7	0.35	0.34	0.43	0.43	0.47	0.45
A8	0.36	0.34	0.43	0.43	0.47	0.45
A9	0.30	0.28	0.36	0.36	0.42	0.44
A10	0.28	0.27	0.36	0.36	0.42	0.43

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

ตารางที่ ค.4 การวิเคราะห์ความเครียดแนวความหนาของเหล็ก SPCC ที่แรงกดชิ้นงาน 70 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	0.39	0.37	0.39	0.37	0.43	0.42
A2	0.39	0.37	0.42	0.40	0.46	0.45
A3	0.41	0.41	0.36	0.35	0.43	0.43
A4	0.39	0.37	0.36	0.35	0.41	0.42
A5	0.39	0.37	0.36	0.35	0.42	0.43
A6	0.36	0.37	0.39	0.37	0.43	0.45
A7	0.42	0.41	0.48	0.46	0.51	0.49
A8	0.44	0.43	0.46	0.46	0.49	0.48
A9	0.45	0.43	0.42	0.40	0.51	0.50
A10	0.44	0.43	0.45	0.42	0.51	0.49

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

ตารางที่ ค.5 การวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่าความหนา (Equivalent Strain) ของเหล็ก SPCD ที่แรงกดขึ้นงาน (Blank Holder Force) 30 เปอรี่เซ็นต์

จุดตรวจวัดความหนา	ครึ่งวงกลม		สามเหลี่ยม		สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า	
	ความเครียดแนวความหนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_0)$		ความเครียดแนวความหนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_0)$		ความเครียดแนวความหนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_0)$	
	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 $\varepsilon_t = \ln(t/t_0)$

ตารางที่ ค.6 ตารางวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่าความหนา (Equivalent Strain) ของเหล็ก SPCD ที่แรงกดขึ้นงาน (Blank Holder Force) 50 เปอรี่เซ็นต์

จุดตรวจวัดความหนา	ครึ่งวงกลม		สามเหลี่ยม		สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า	
	ความเครียดแนวความหนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_0)$		ความเครียดแนวความหนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_0)$		ความเครียดแนวความหนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_0)$	
	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 $\varepsilon_t = \ln(t/t_0)$

ตารางที่ ค.7 ตารางวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่าความหนา (Equivalent Strain) ของเหล็ก SPCD ที่แรงกดขึ้นงาน (Blank Holder Force) 70 เปอรเซ็นต์

จุดตรวจวัดความหนา	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 $\varepsilon_t = \ln(t/t_o)$

ตารางที่ ค.8 ตารางวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่าความหนา (Equivalent Strain) ของเหล็ก SPCE ที่แรงกดขึ้นงาน (Blank Holder Force) 30 เปอรเซ็นต์

จุดตรวจวัดความหนา	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	0.21	0.20	0.25	0.25	0.25	0.25
A2	0.22	0.20	0.25	0.25	0.26	0.26
A3	0.21	0.19	0.24	0.24	0.24	0.24
A4	0.20	0.19	0.23	0.23	0.25	0.25
A5	0.19	0.19	0.21	0.21	0.24	0.24
A6	0.23	0.21	0.24	0.24	0.26	0.26
A7	0.23	0.23	0.28	0.25	0.30	0.28
A8	0.23	0.23	0.29	0.26	0.31	0.29
A9	0.20	0.20	0.27	0.24	0.28	0.27
A10	0.20	0.20	0.27	0.25	0.28	0.27

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

ตารางที่ ค.9 ตารางวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่าความหนา (Equivalent Strain) ของเหล็ก SPCE ที่แรงกดชิ้นงาน (Blank Holder Force) 50 เปอรเซ็นต์

จุดตรวจวัดความหนา	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	0.28	0.27	0.27	0.26	0.30	0.29
A2	0.28	0.27	0.29	0.29	0.33	0.32
A3	0.29	0.28	0.31	0.30	0.34	0.33
A4	0.30	0.29	0.30	0.31	0.32	0.36
A5	0.29	0.28	0.32	0.31	0.33	0.37
A6	0.30	0.29	0.30	0.31	0.32	0.38
A7	0.32	0.31	0.36	0.35	0.40	0.39
A8	0.32	0.31	0.36	0.35	0.39	0.41
A9	0.30	0.29	0.33	0.32	0.39	0.38
A10	0.30	0.29	0.33	0.32	0.39	0.38

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

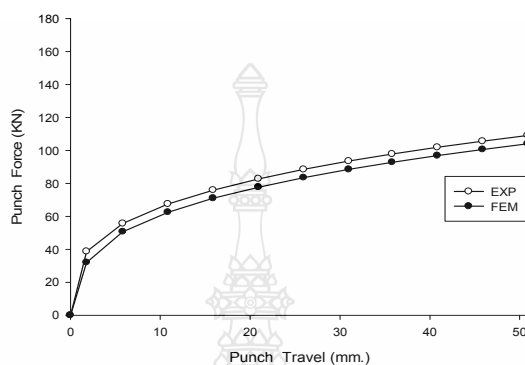
ตารางที่ ค.10 ตารางวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่าความหนา (Equivalent Strain) ของเหล็ก SPCE ที่แรงกดชิ้นงาน (Blank Holder Force) 70 เปอรเซ็นต์

จุดตรวจวัดความหนา	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	0.32	0.31	0.34	0.33	0.36	0.37
A2	0.31	0.31	0.36	0.34	0.42	0.39
A3	0.34	0.33	0.36	0.35	0.38	0.40
A4	0.32	0.30	0.33	0.32	0.42	0.40
A5	0.31	0.31	0.36	0.35	0.42	0.40
A6	0.33	0.31	0.30	0.29	0.36	0.37
A7	0.36	0.35	0.33	0.31	0.42	0.42
A8	0.36	0.35	0.36	0.34	0.42	0.43
A9	0.33	0.31	0.30	0.30	0.39	0.41
A10	0.30	0.30	0.33	0.33	0.36	0.41

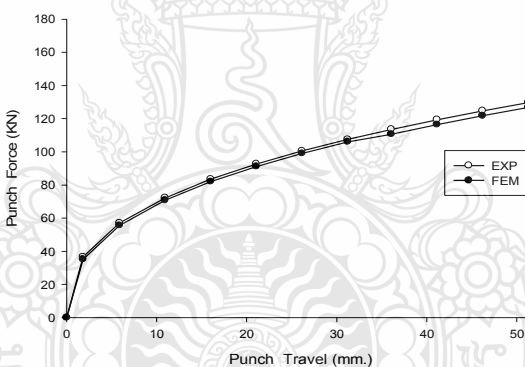
ε_t คือ ความเครียดแนวความหนา $\varepsilon_t = \ln(t/t_o)$

ค.3 เปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูประหว่างการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

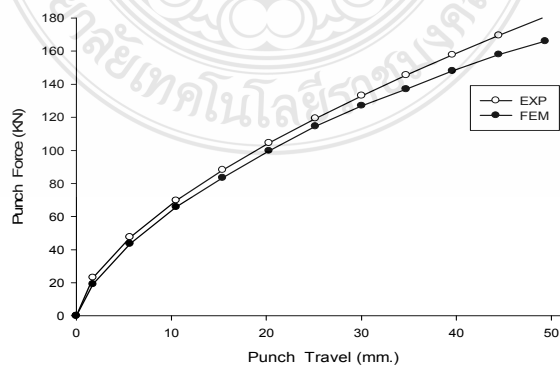
1) เปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของครอปบีคแบบครึ่งวงกลม ของเหล็กเกรด SPCC ดังภาพที่ ค.1 – ค.3 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ ค.1 Half-Round Drawbead, BHF 30 % SPCC

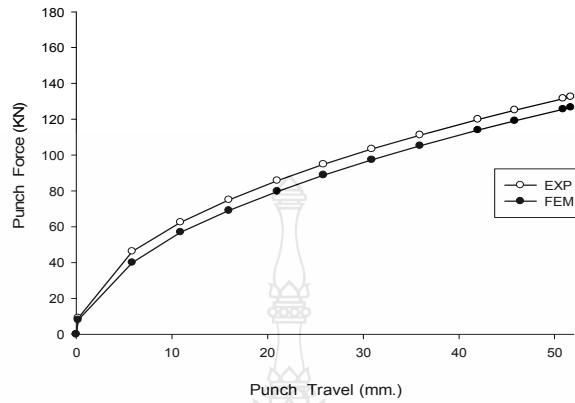


ภาพที่ ค.2 Half-Round Drawbead, BHF 50 % SPCC

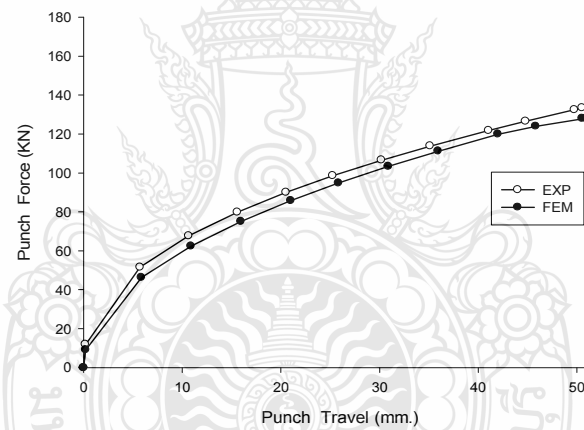


ภาพที่ ค.3 Half-Round Drawbead, BHF 70 %, SPCC

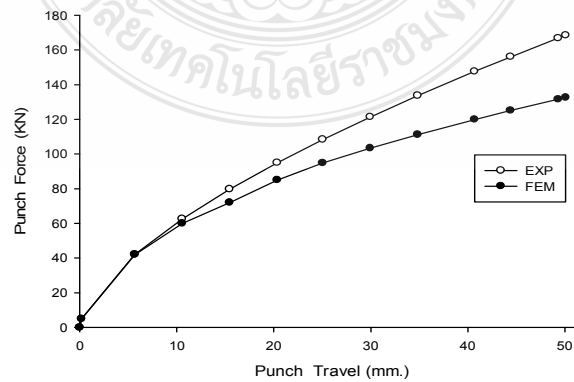
2) เปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของครอปปิดแบบครึ่งวงกลม ของเหล็กเกรด SPCD ดังภาพที่ ค.4 – ค.6 ด้วยแรงกดขึ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ ค.4 Half-Round Drawbead, BHF 30 %, SPCD

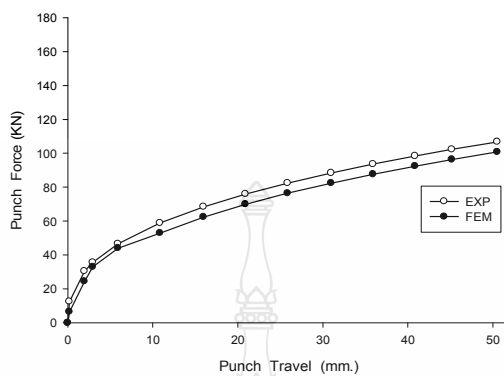


ภาพที่ ค.5 Half-Round Drawbead, BHF 50 %, SPCD

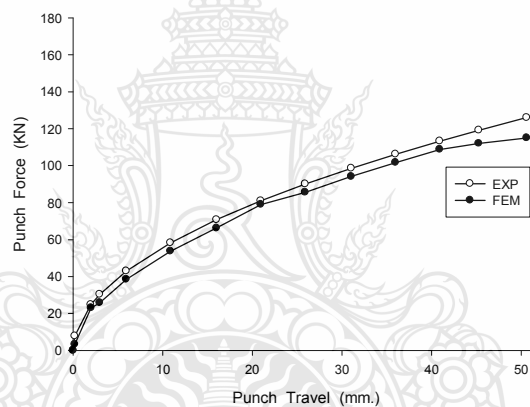


ภาพที่ ค.6 Half-Round Drawbead, BHF 70 %, SPCD

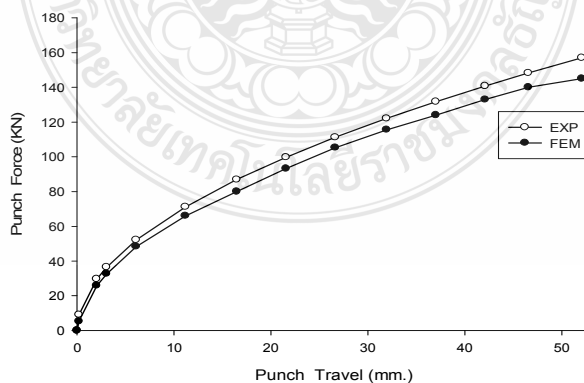
3) เปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของครอว์บีคแบบครึ่งวงกลม ของเหล็กเกรด SPCE ดังภาพที่ ค.7 – ค.9 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ ค.7 Half-Round Drawbead, BHF 30 %, SPCE

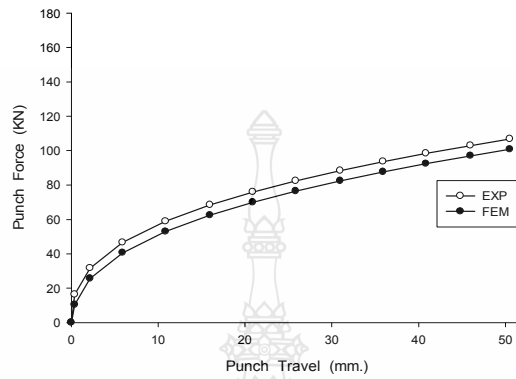


ภาพที่ ค.8 Half-Round Drawbead, BHF 50 %, SPCE

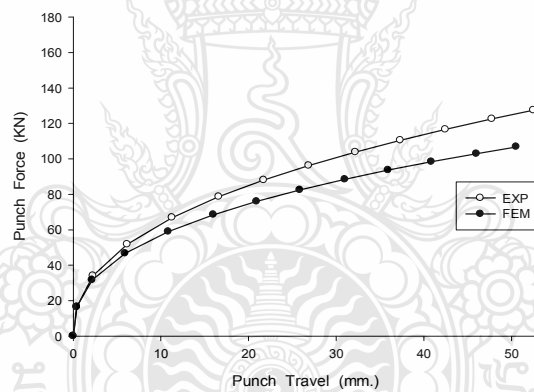


ภาพที่ ค.9 Half-Round Drawbead, BHF 70 %, SPCE

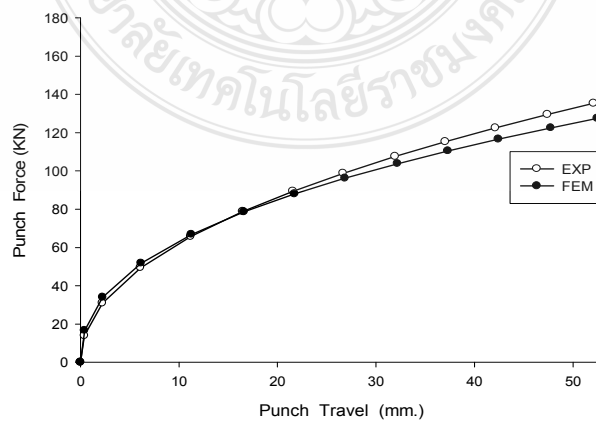
4) เปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของครอปบีคแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม ของเหล็กเกรด SPCC ดังภาพที่ ค.10 – ค.12 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ ค.10 V-Shaped Drawbead, BHF 30 %, SPCC

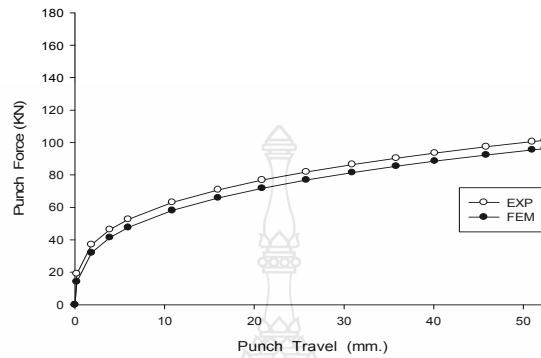


ภาพที่ ค.11 V-Shaped Drawbead, BHF 50 %, SPCC

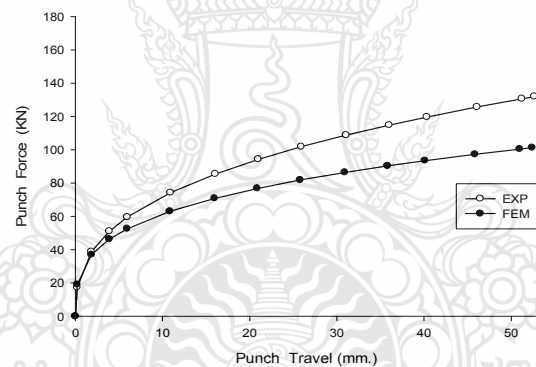


ภาพที่ ค.12 V-Shaped Drawbead, BHF 70 %, SPCC

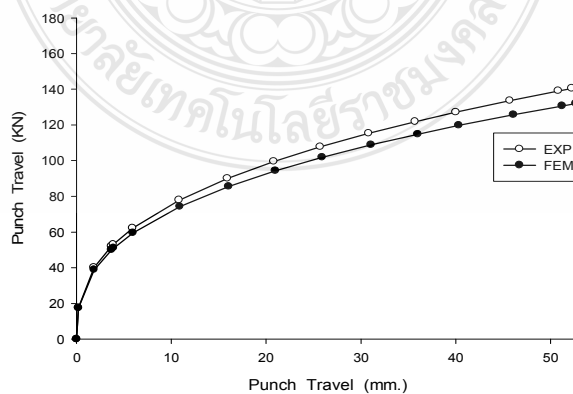
5) เปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของครอปบีคแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม ของเหล็กเกรด SPCD ดังภาพที่ ค.13 – ค.15 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ ค.13 V-Shaped Drawbead, BHF 30 %, SPCD

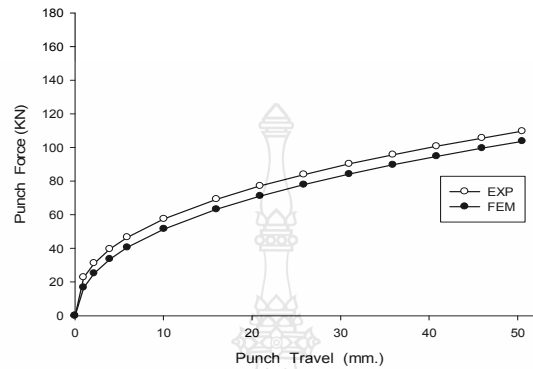


ภาพที่ ค.14 V-Shaped Drawbead, BHF 50 %, SPCD

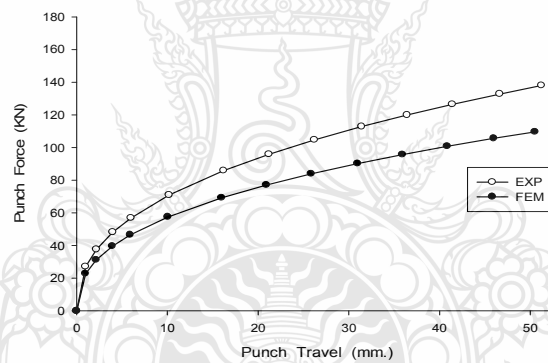


ภาพที่ ค.15 V-Shaped Drawbead, BHF 70 %, SPCD

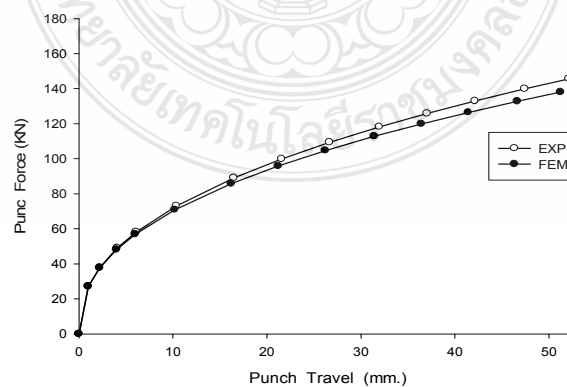
6) เปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของครอปบีคแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม ของเหล็กเกรด SPCE ดังภาพที่ ค.16 – ค.18 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ ค.16 V-Shaped Drawbead, BHF 30 %, SPCE

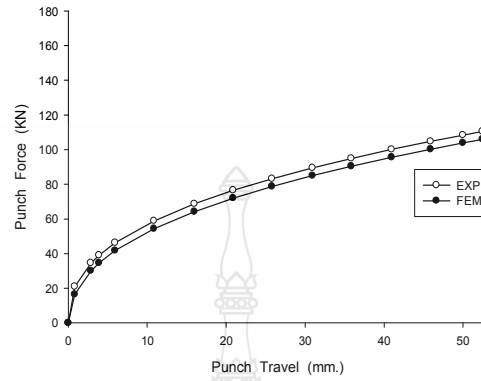


ภาพที่ ค.17 V-Shaped Drawbead, BHF 50 %, SPCE

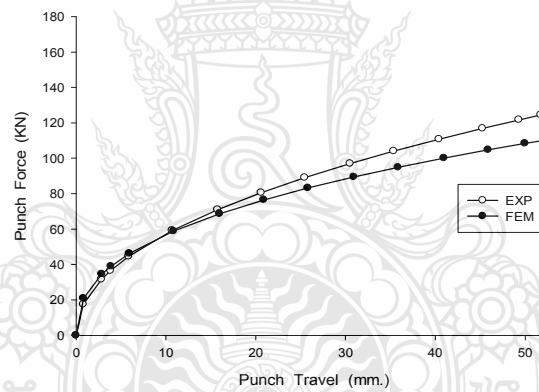


ภาพที่ ค.18 V-Shaped Drawbead, BHF 70 %, SPCE

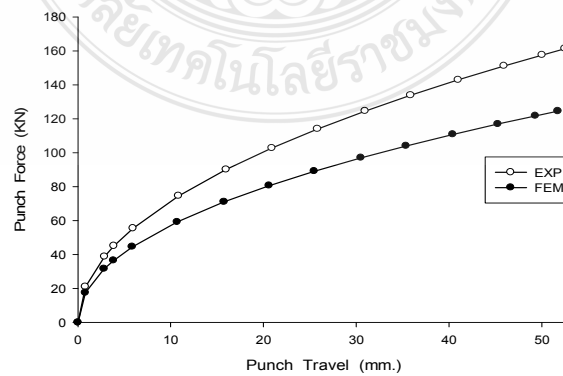
7) เปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของครอปบีคแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ของเหล็กเกรด SPCC ดังภาพที่ ค.19 – ค.21 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ ค.19 Trapenzifrom Drawbead, BHF 30 % SPCC

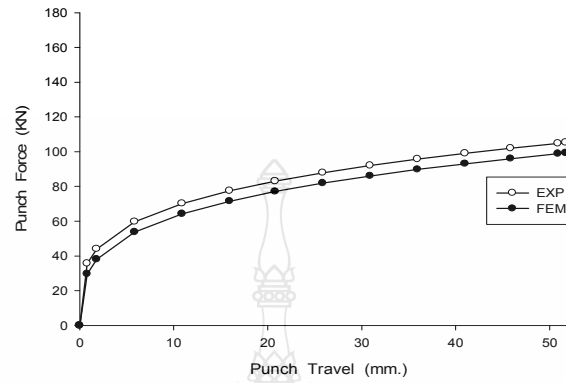


ภาพที่ ค.20 Trapenzifrom Drawbead, BHF 50 % SPCC

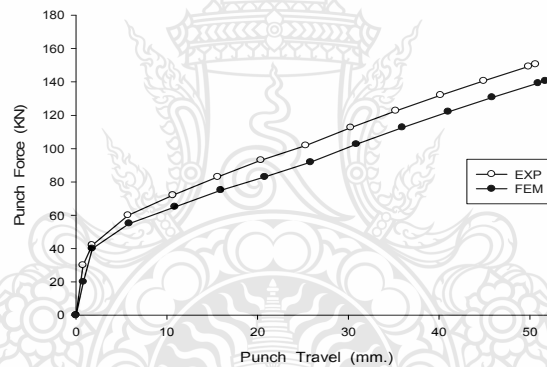


ภาพที่ ค.21 Trapenzifrom Drawbead, BHF 70 %, SPCC

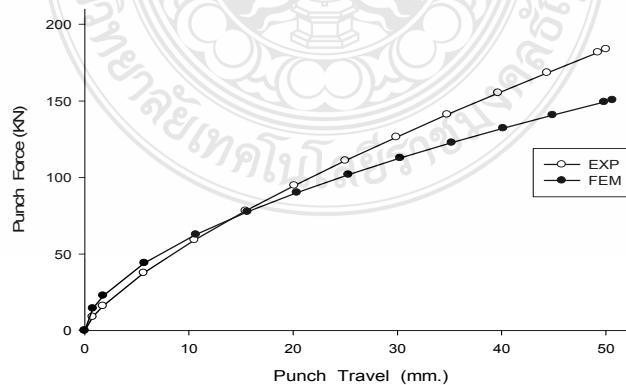
8) เปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของครอว์บีคแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ของเหล็กเกรด SPCD ดังภาพที่ ค.22 – ค.24 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ ค.22 Trapenzifrom Drawbead, BHF 30 % SPCD

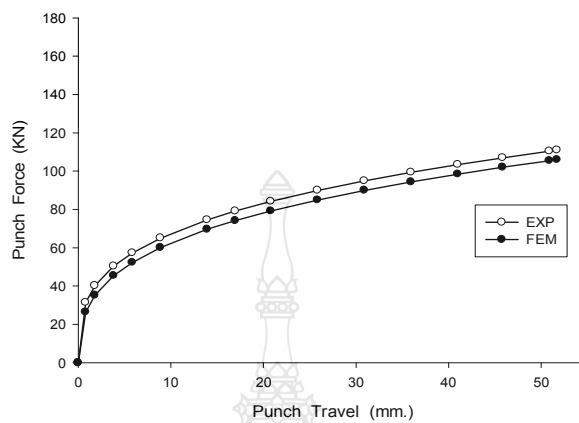


ภาพที่ ค.23 Trapenzifrom Drawbead, BHF 50 % SPCD

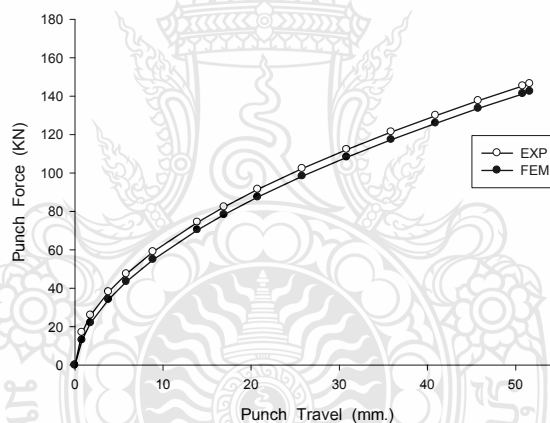


ภาพที่ ค.24 Trapenzifrom Drawbead, BHF 70 %, SPCD

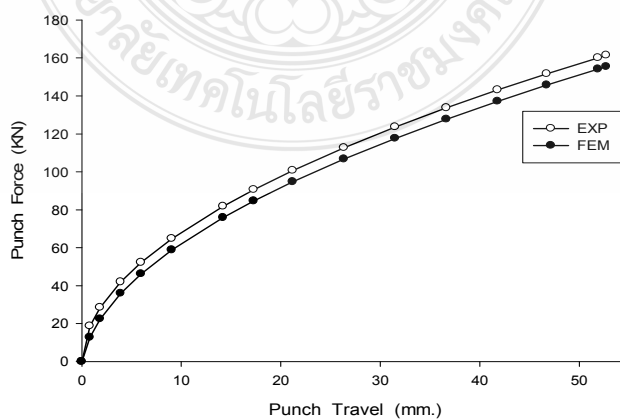
9) เปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของครอปบีคแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ของเหล็กเกรด SPCE ดังภาพที่ ค.25 – ค.24 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ ค.25 Trapenziform Drawbead, BHF 30 % SPCE



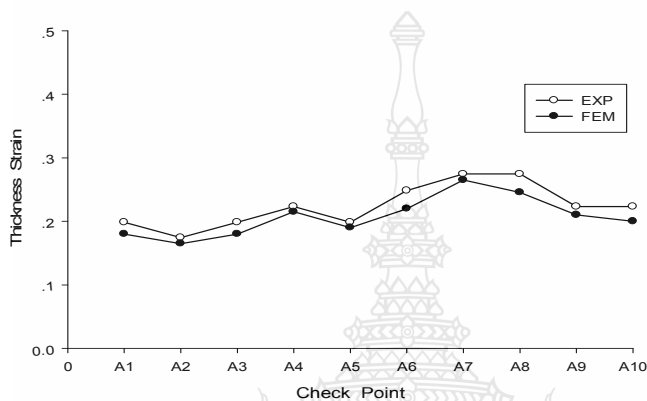
ภาพที่ ค.26 Trapenziform Drawbead, BHF 50 % SPCE



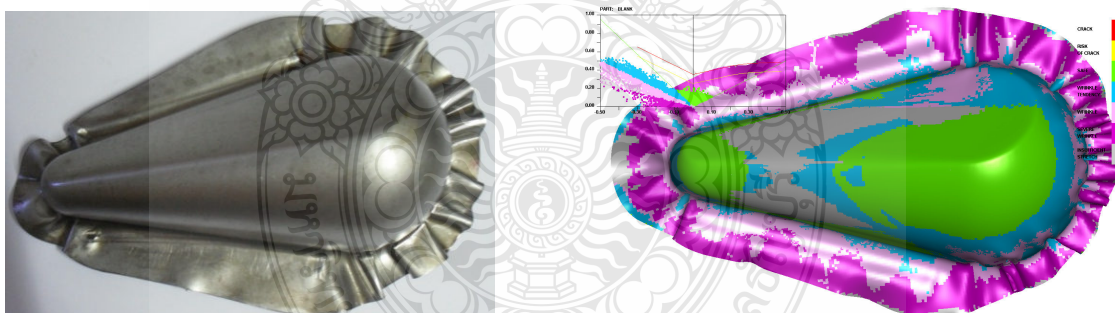
ภาพที่ ค.27 Trapenziform Drawbead, BHF 70 %,SPCE

ค4 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงานระหว่างการขึ้นรูป
จริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
และวิธีการทดลองจริงของครอปัดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCC
ดังภาพที่ ค.28 - ค.29

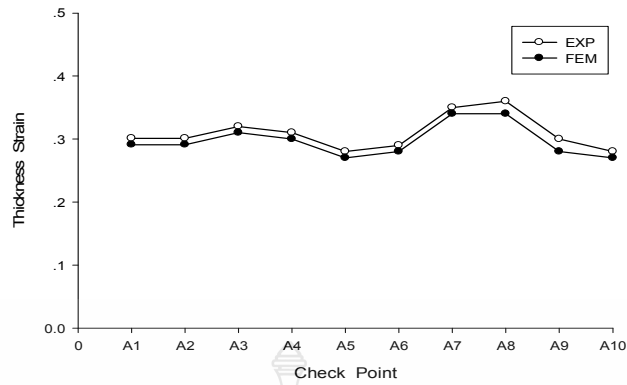


ภาพที่ ค.28 Thickness Strian, Half-Round Drawbead, BHF 30 %,SPCC

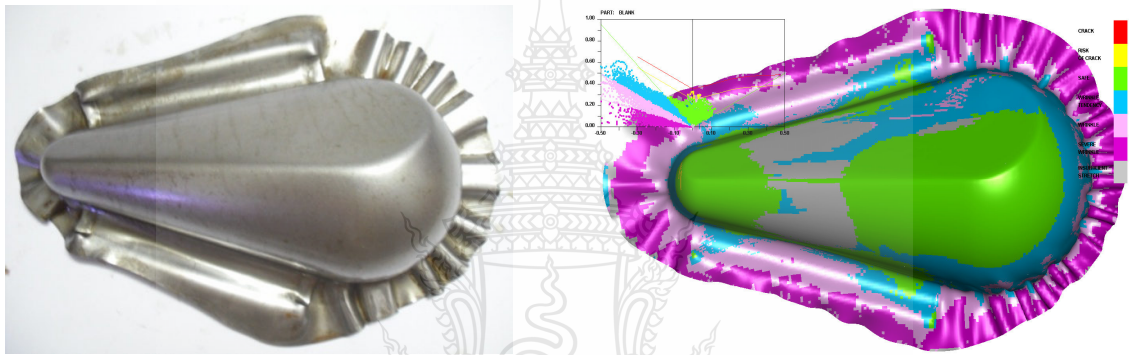


ภาพที่ ค.29 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, Half-Round Drawbead, BHF 30 %, SPCC

2) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
และวิธีการทดลองจริงของครอปัดแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ของ
เหล็ก SPCC ดังภาพที่ ค.30 - ค.31

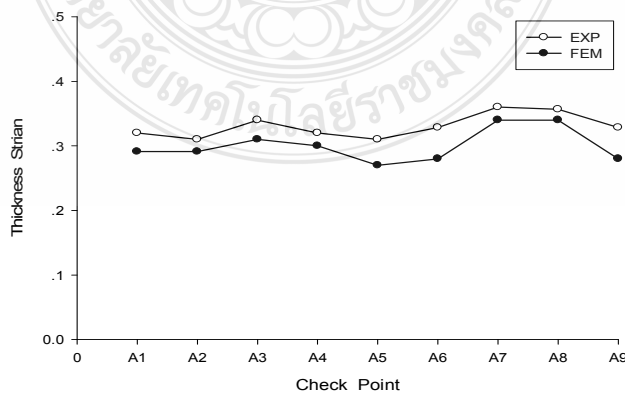


ภาพที่ ค.30 Thickness Strian, Half-Round Drawbead, BHF 50 %,SPCC

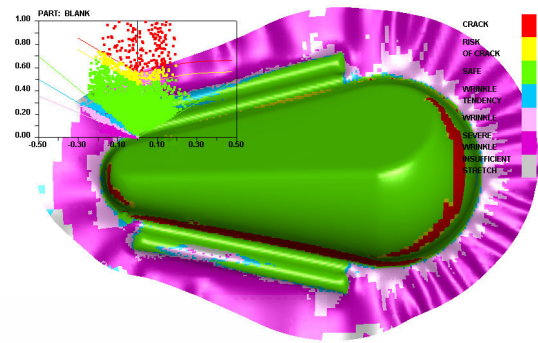


ภาพที่ ค.31 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, Half-Round Drawbead, BHF 50 %, SPCC

3) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการทดลองจริงของครอปัดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCC ดังภาพที่ ค.32 – ค.33

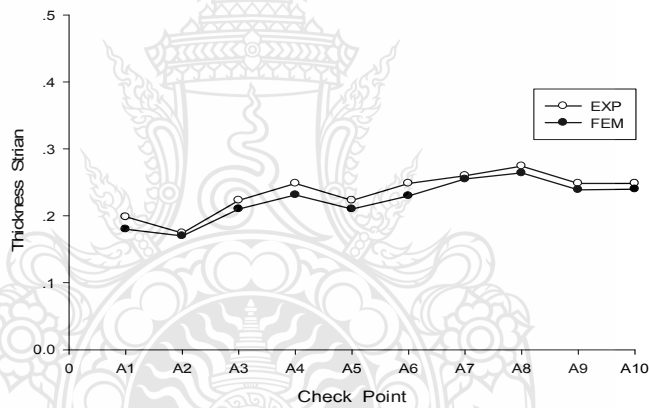


ภาพที่ ค.32 Thickness Strian, Half-Round Drawbead, BHF 70 %, SPCC

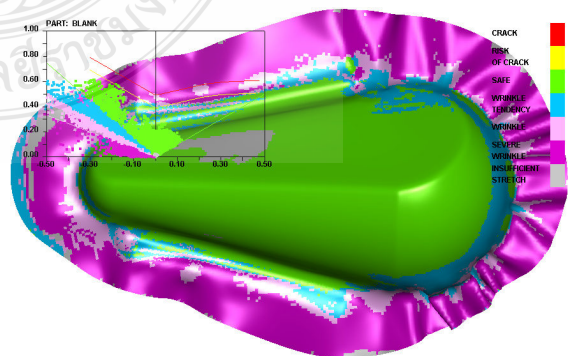


ภาพที่ ค.33 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, Half-Round Drawbead, BHF 70 %, SPCC

4) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการทดลองจริงของครอปิคแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCC ดังภาพที่ ค.34 – ค.35

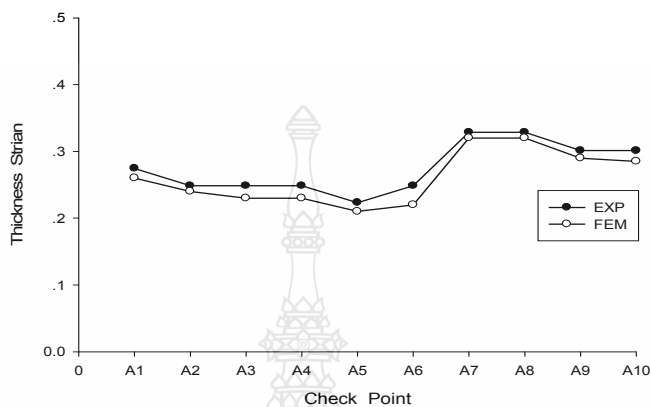


ภาพที่ ค.34 Thickness Strian, Half-Round Drawbead, BHF 30 %,SPCD

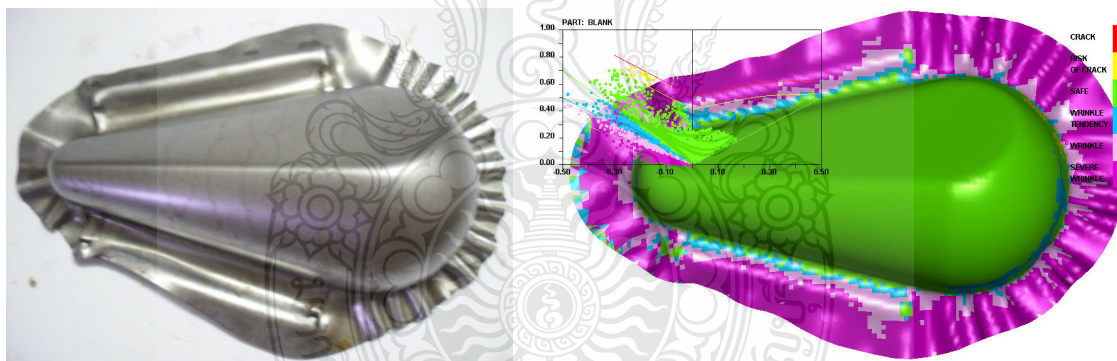


ภาพที่ ค.35 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, Half-Round Drawbead, BHF 30 %, SPCD

5) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงานระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการทดลองจริงของครอปัดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCD ดังภาพที่ ค.36 – ค.37

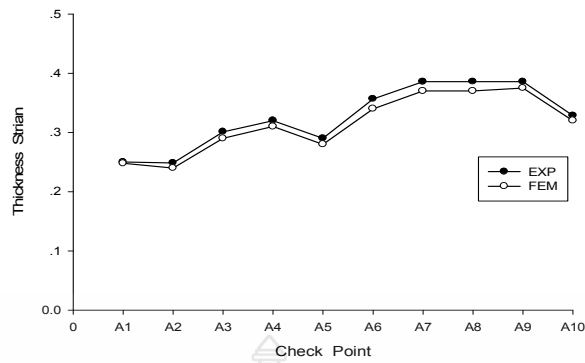


ภาพที่ ค.36 Thickness Strain, Half-Round Drawbead, BHF 50 %,SPCD

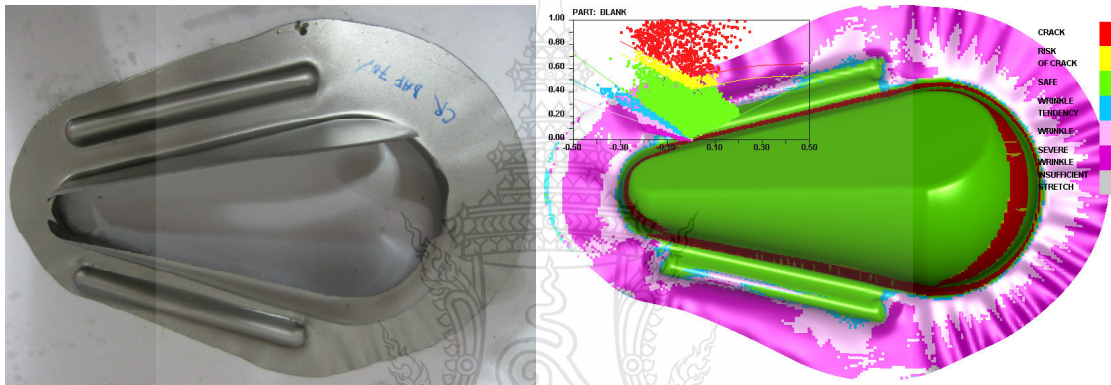


ภาพที่ ค.37 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, Half-Round Drawbead, BHF 50 %, SPCD

6) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการทดลองจริงของครอปัดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCD ดังภาพที่ ค.38 – ค.39

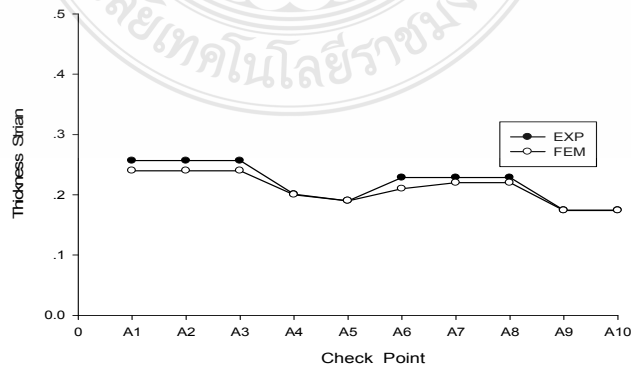


ภาพที่ ค.38 Thickness Strian, Half-Round Drawbead, BHF 70 %, SPCD

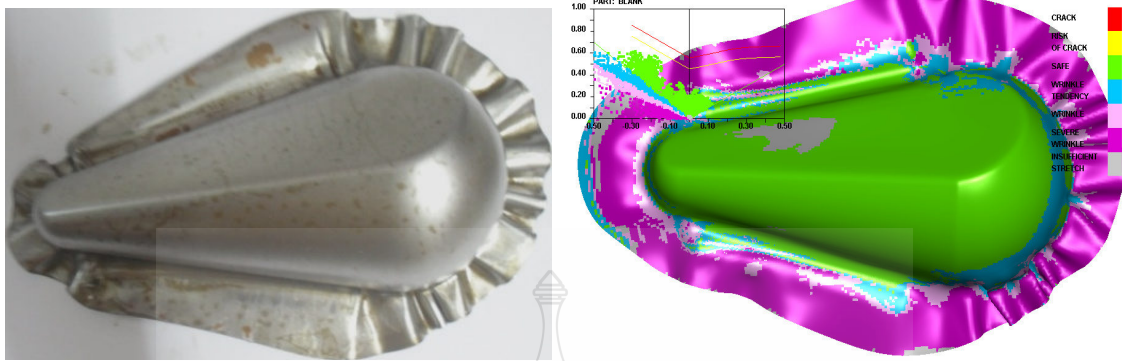


ภาพที่ ค.39 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, Half-Round Drawbead, BHF 70 %, SPCD

7) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการทดลองจริงของครอปิคแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE ดังภาพที่ ค.40 – ค.41

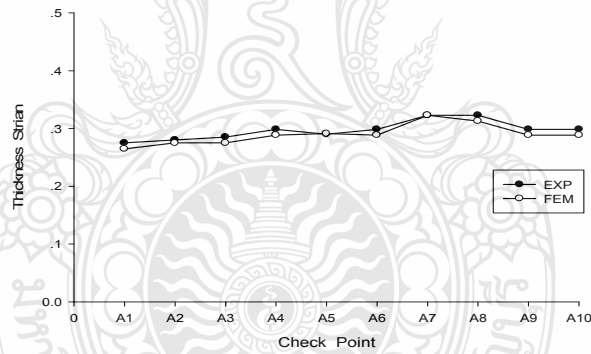


ภาพที่ ค.40 Thickness Strian, Half-Round Drawbead, BHF 30 %,SPCE

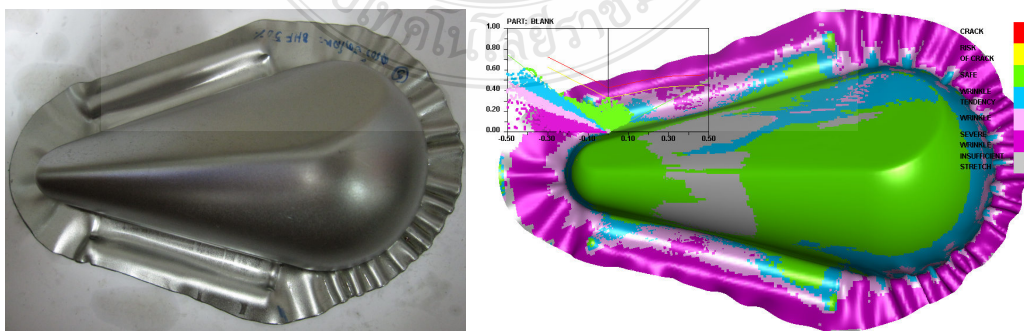


ภาพที่ ค.41 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, Half-Round Drawbead, BHF 30 %, SPCE

8) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการทดลองจริงของครอว์บีคแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE ดังภาพที่ ค.42 – ค.43

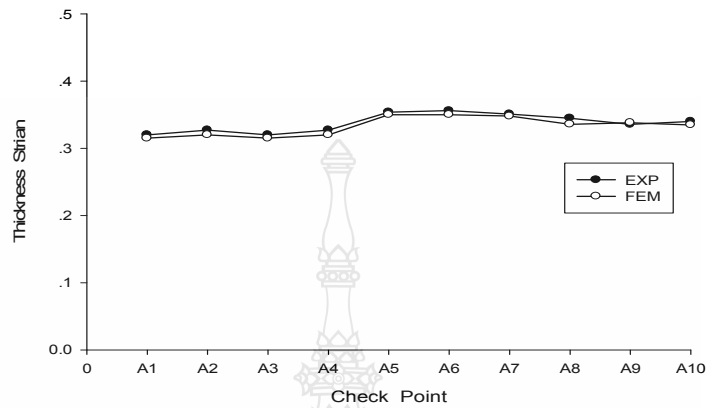


ภาพที่ ค.42 Thickness Strian, Half-Round Drawbead, BHF 50 %, SPCE

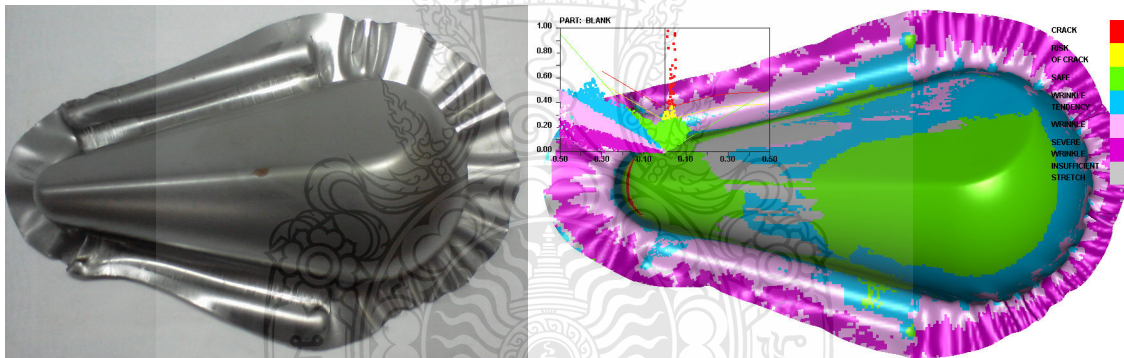


ภาพที่ ค.43 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, Half-Round Drawbead, BHF 50 %, SPCE

9) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการทดลองจริงของครอปัดแบบครึ่งวงกลม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE ดังภาพที่ ค.44 – ค.45

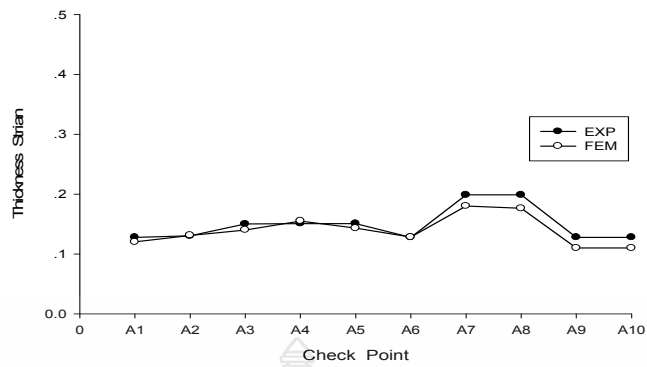


ภาพที่ ค.44 Thickness Strian, Half-Round Drawbead, BHF 70 %,SPCE

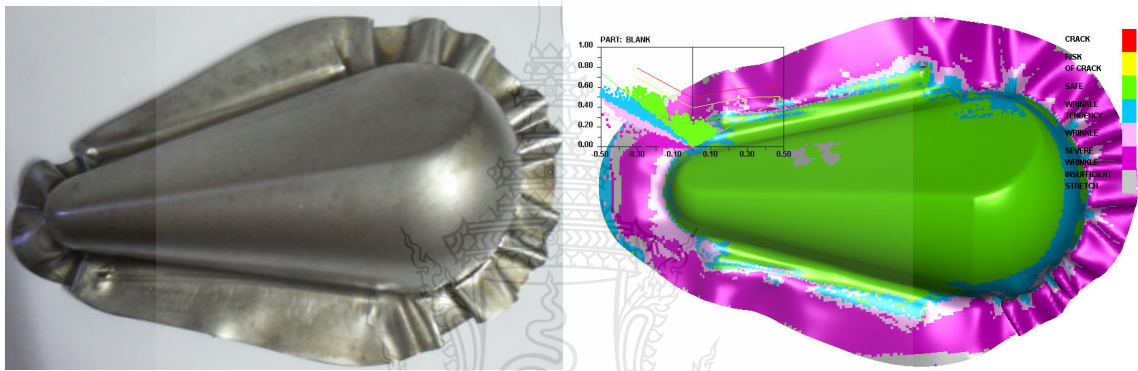


ภาพที่ ค.45 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, Half-Round Drawbead, BHF 70 %, SPCE

10) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของครอปัดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCC ดังภาพที่ ค.46 – ค.47

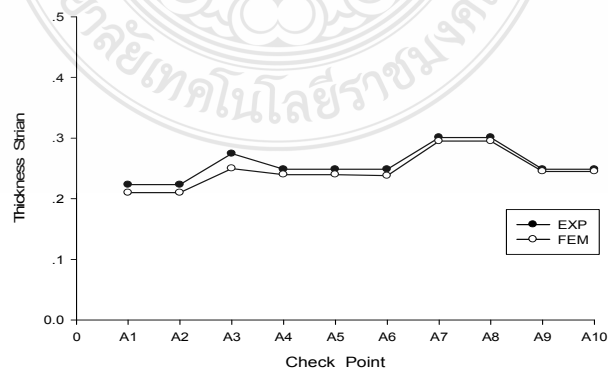


ภาพที่ ค.46 Thickness Strian, V-Shaped Drawbead, BHF 30 %, SPCC

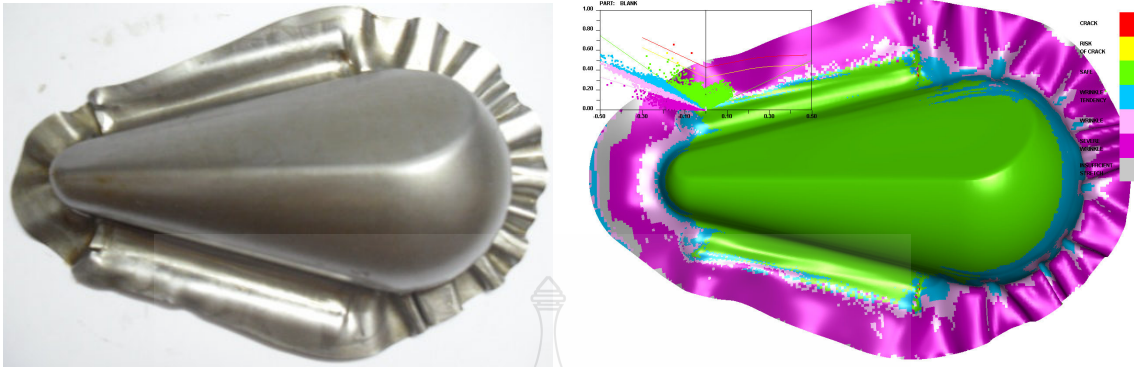


ภาพที่ ค.47 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, V-Shaped Drawbead, BHF 30 %, SPCC

11) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของดรอปปีดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ของเหล็ก SPCC ดังภาพที่ ค.48 – ค.49

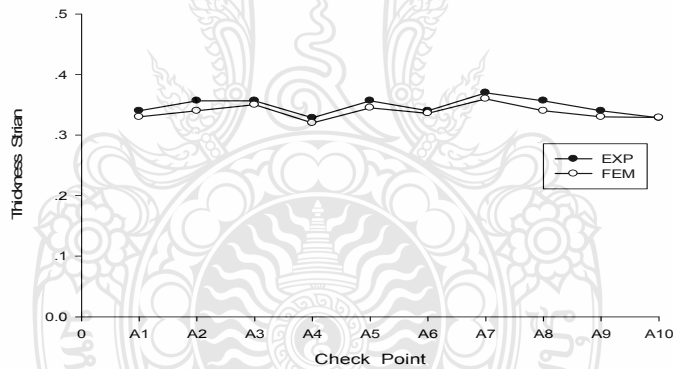


ภาพที่ ค.48 Thickness Strian, V-Shaped Drawbead, BHF 50 %, SPCC

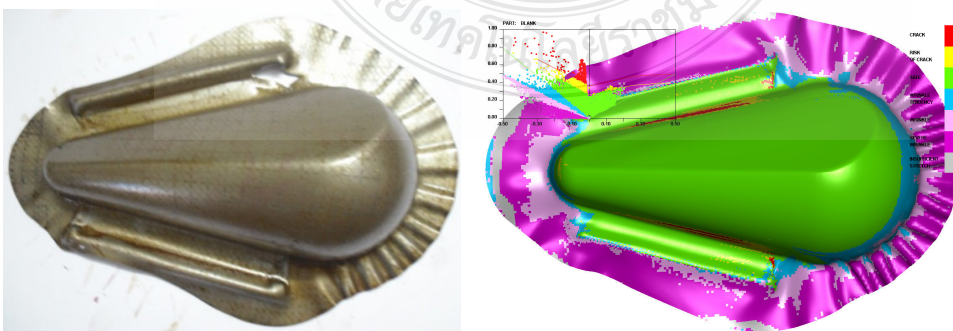


ภาพที่ ค.49 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, V-Shaped Drawbead, BHF 50 %, SPCC

12) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของครอปัดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ของเหล็ก SPCC ดังภาพที่ ค.50 – ค.51

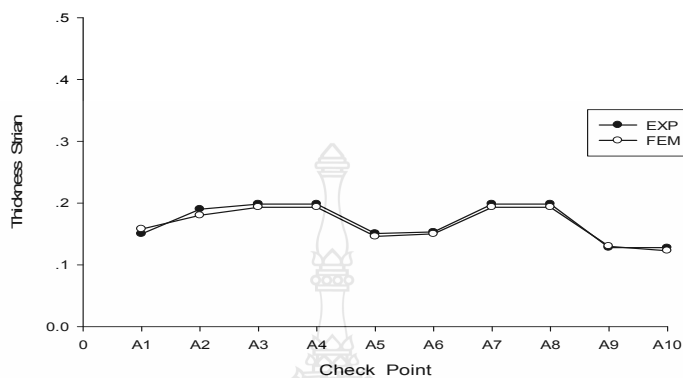


ภาพที่ ค.50 Thickness Strian, V-Shaped Drawbead, BHF 70 %, SPCC

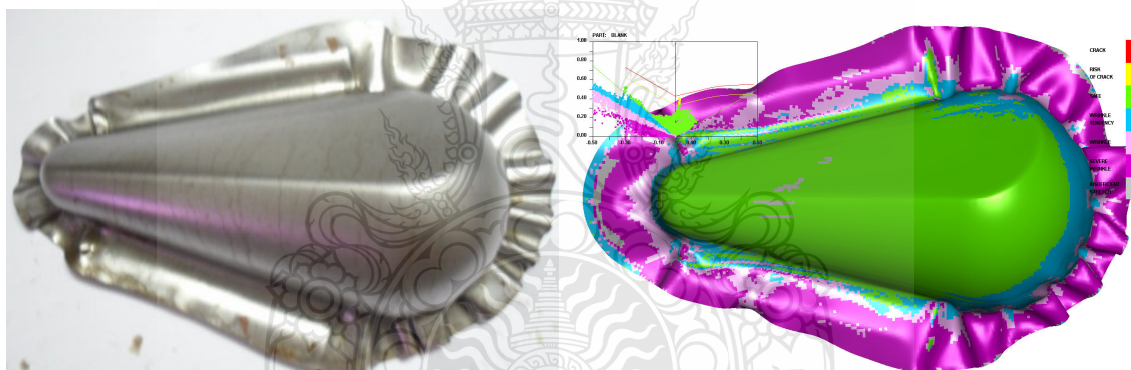


ภาพที่ ค.51 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, V-Shaped Drawbead, BHF 70 %, SPCC

13) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงานระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการทดลองจริงของครอปบีคแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ของ เหล็ก SPCD ดังภาพที่ ค.52 – ค.53

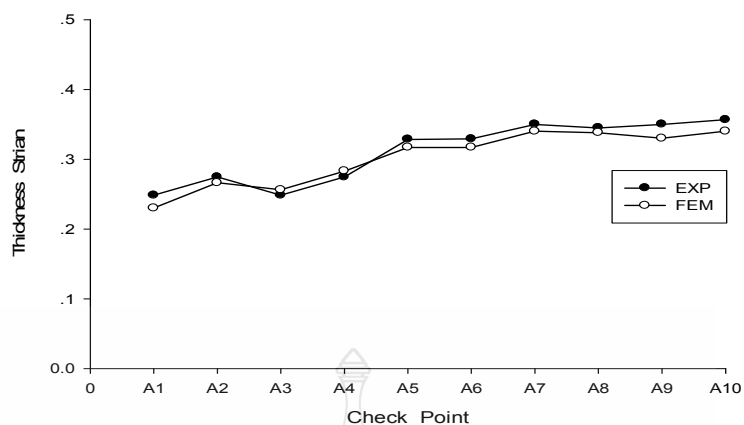


ภาพที่ ค.52 Thickness Strian, V-Shaped Drawbead, BHF 30 %, SPCD

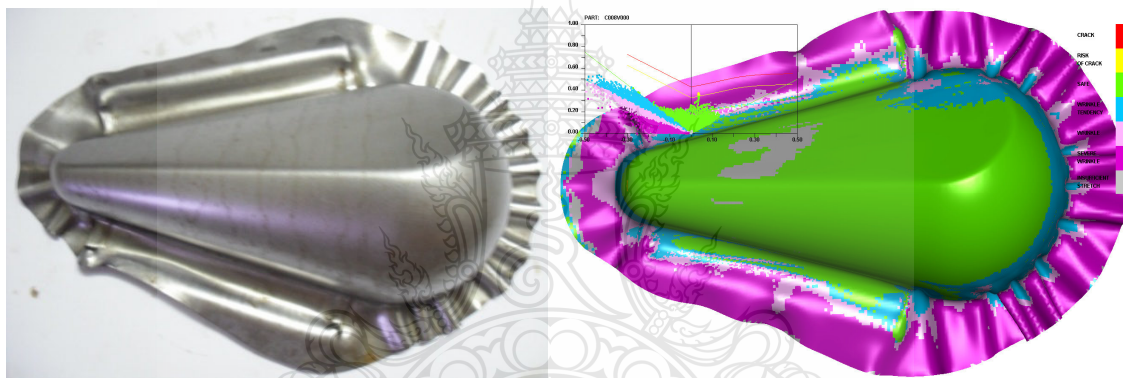


ภาพที่ ค.53 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, V-Shaped Drawbead, BHF 30 %, SPCD

14) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของครอปบีคแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ของ เหล็ก SPCD ดังภาพที่ ค.54 – ค.55

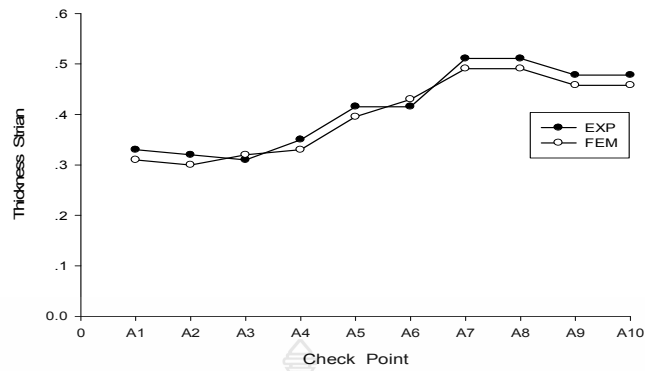


ภาพที่ ค.54 Thickness Strian, V-Shaped Drawbead, BHF 50 %, SPCD

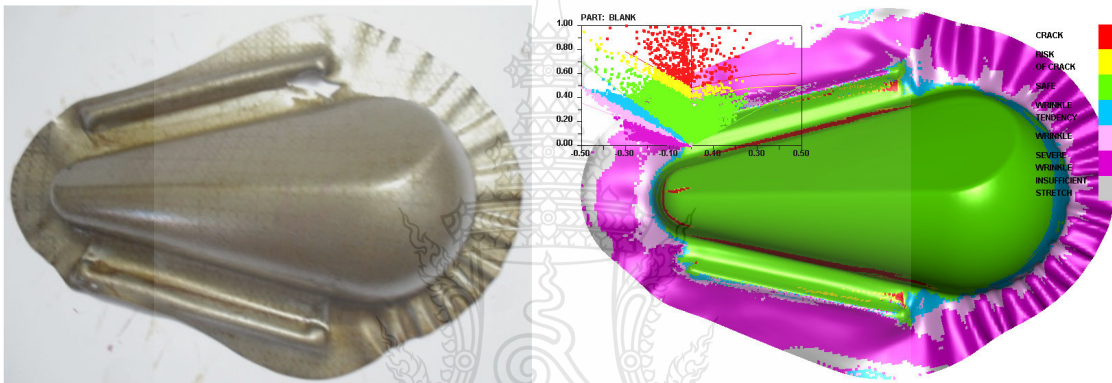


ภาพที่ ค.55 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, V-Shaped Drawbead, BHF 50 %, SPCD

15) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของครอปัดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ของเหล็ก SPCD ดังภาพที่ ค.56 – ค.57

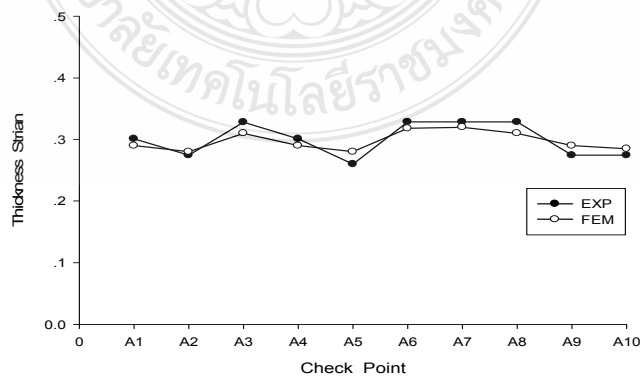


ภาพที่ ค.56 Thickness Strian, V-Shaped Drawbead, BHF 70 %, SPCD

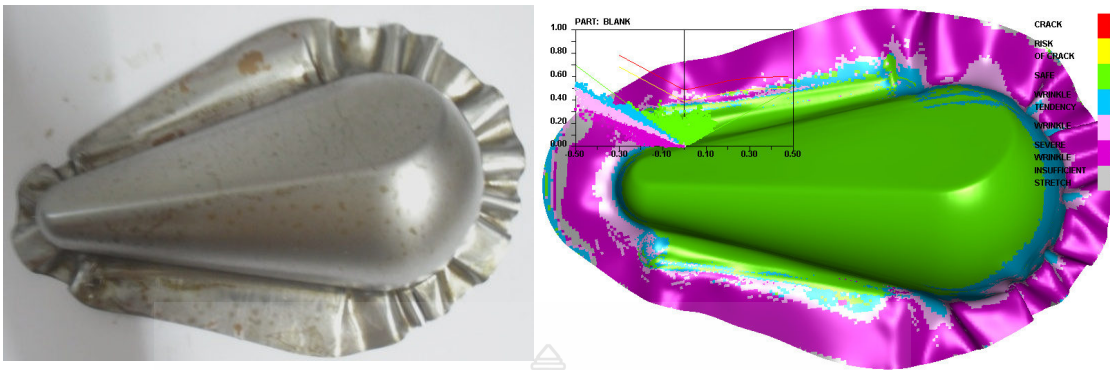


ภาพที่ ค.57 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, V-Shaped Drawbead, BHF 70 %, SPCD

16) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงานระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการทดลองจริงของครอปัดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ของ เหล็ก SPCE ดังภาพที่ ค.58 – ค.59

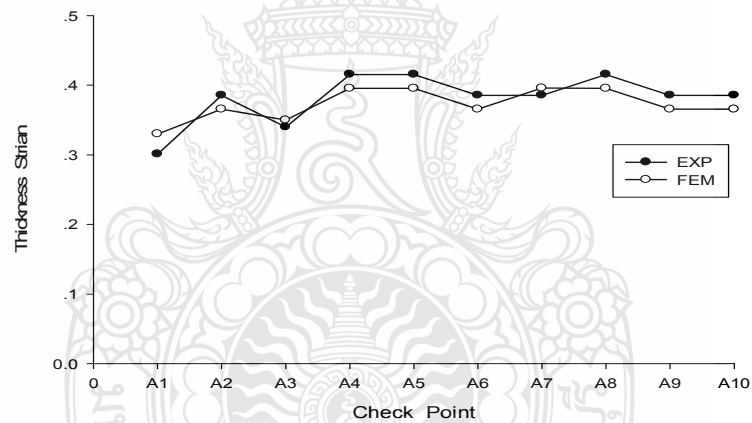


ภาพที่ ค.58 Thickness Strian, V-Shaped Drawbead, BHF 30 %, SPCE

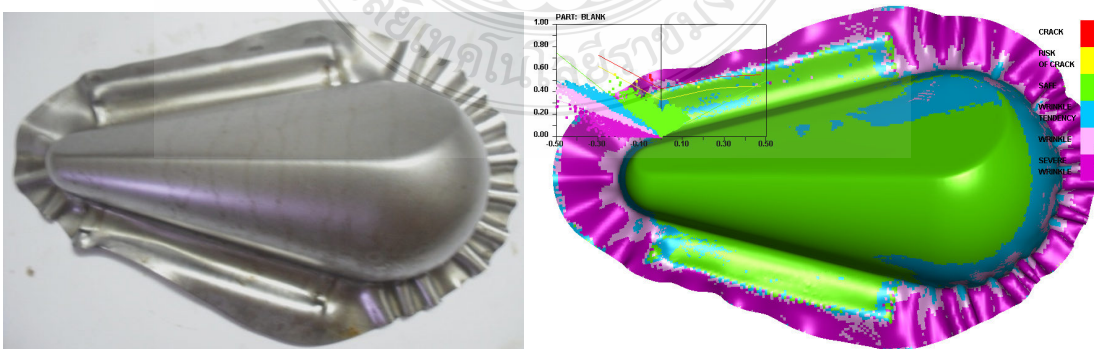


ภาพที่ ค.59 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, V-Shaped Drawbead, BHF 30 %, SPCE

17) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของดรอปปิดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ของเหล็ก SPCE ดังภาพที่ ค.60 – ค.61

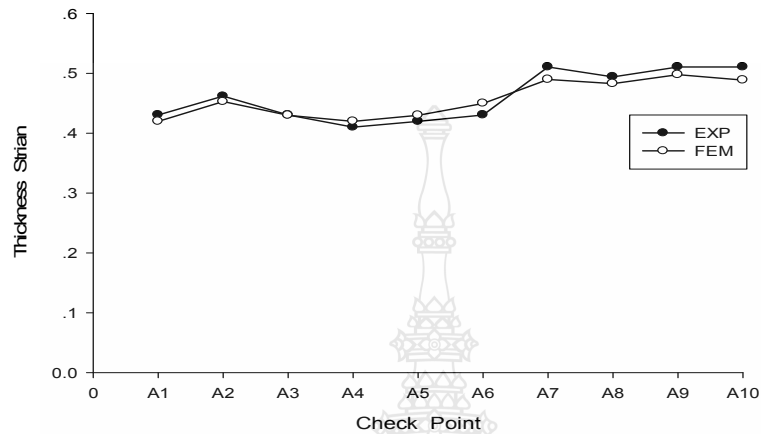


ภาพที่ ค.60 Thickness Strian, V-Shaped Drawbead, BHF 50 %, SPCE

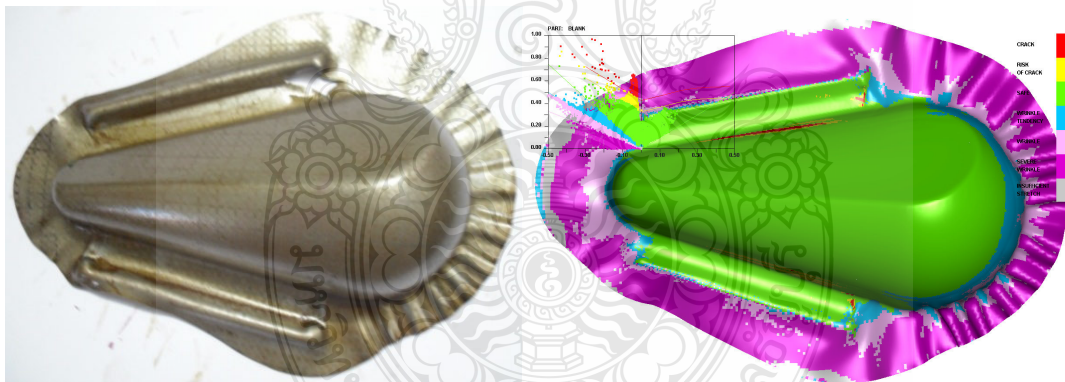


ภาพที่ ค.61 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, V-Shaped Drawbead, BHF 50 %, SPCE

18) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของดรอปปิดแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม ด้วยแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ของเหล็ก SPCE ดังภาพที่ ค.62 – ค.63

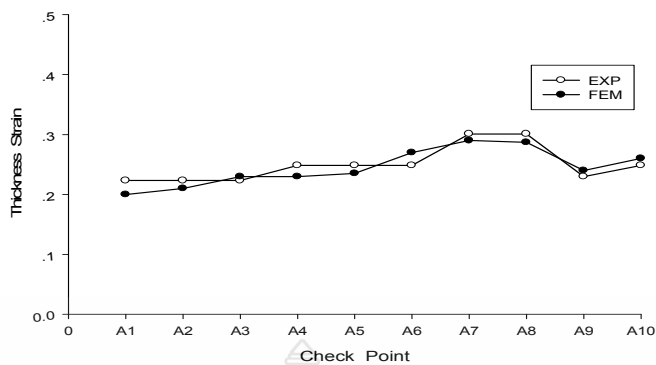


ภาพที่ ค.62 Thickness Strian, V-Shaped Drawbead, BHF 70 %, SPCE

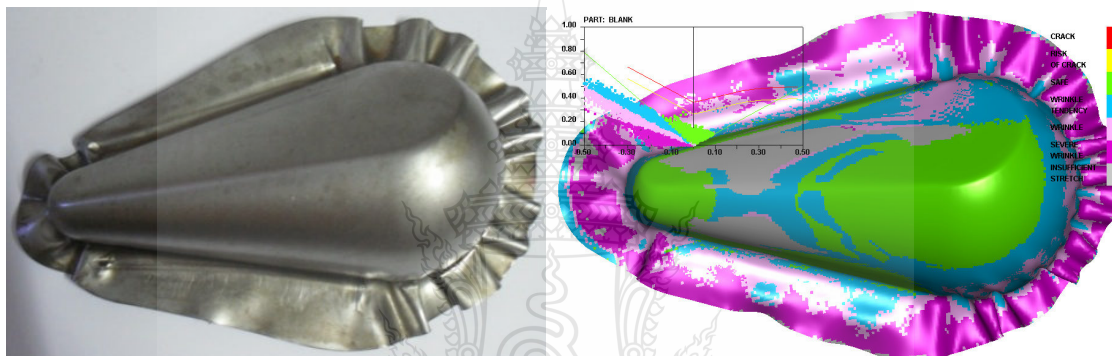


ภาพที่ ค.63 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, V-Shaped Drawbead, BHF 70 %, SPCE

19) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของดรอปปิดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ของเหล็ก SPCC ดังภาพที่ ค.64 – ค.65

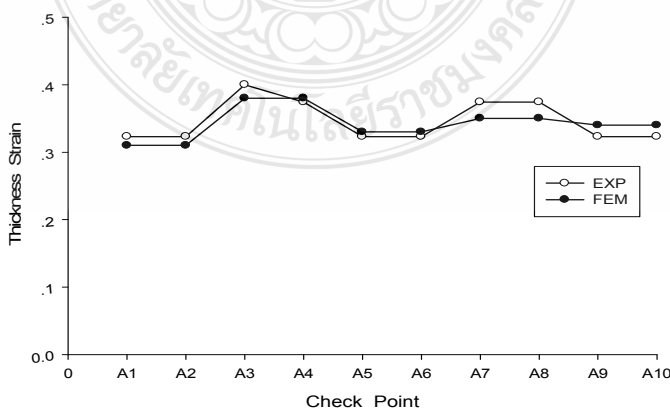


ภาพที่ ค.64 Thickness Strian, Trapenzifrom Drawbead, BHF 30 %, SPCC

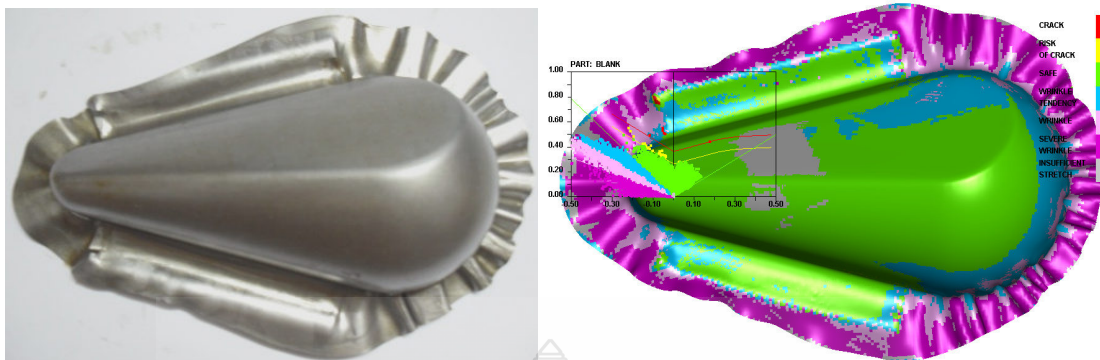


ภาพที่ ค.65 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, Trapenzifrom Drawbead, BHF 30 %, SPCC

20) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของดรอปปิดแบบตีเหล็กยัดด้านไม่เท่า ด้วยแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ของเหล็ก SPCC ดังภาพที่ ค.66 – ค.67

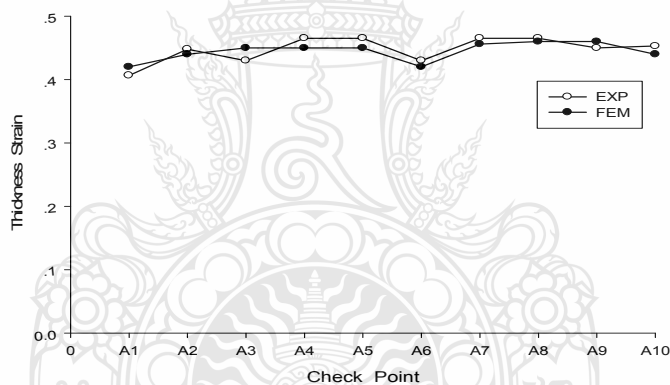


ภาพที่ ค.66 Thickness Strian, Trapenzifrom Drawbead, BHF 50 %, SPCC

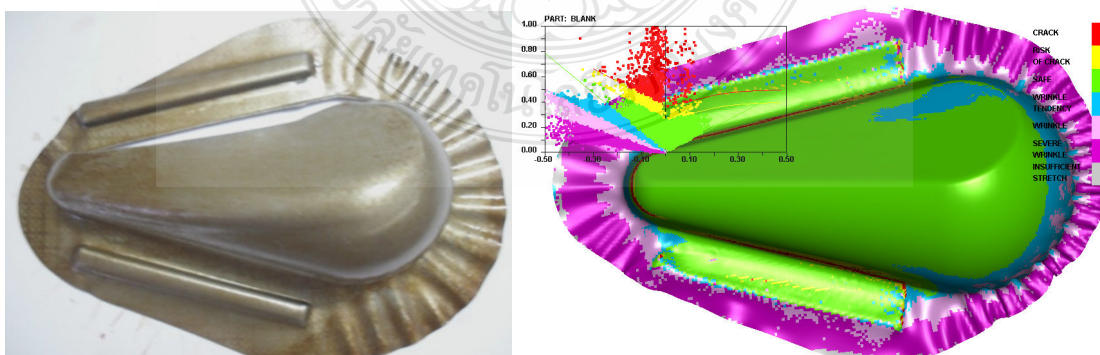


ภาพที่ ค.67 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, Trapenziform Drawbead, BHF 50 %, SPCC

21) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริง ของครอปบีดแบบสี่เหลี่ยมค้านไม้เท้า ด้วยแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ของเหล็ก SPCC ดังภาพที่ ค.68 – ค.69

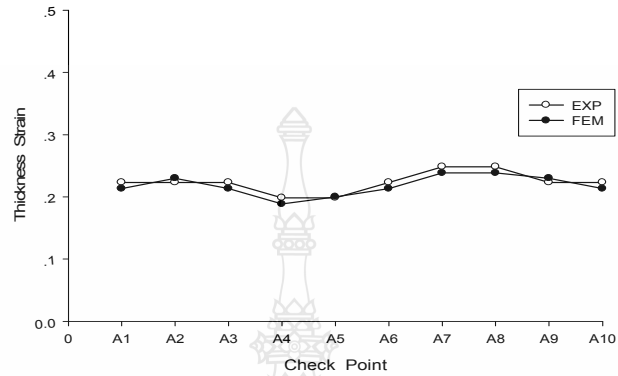


ภาพที่ ค.68 Thickness Strian, Trapenziform Drawbead, BHF 70 %, SPCC

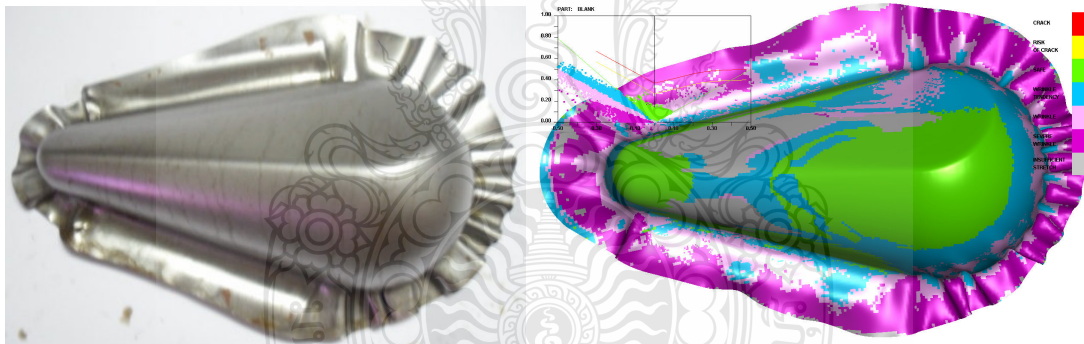


ภาพที่ ค.69 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, Trapenziform Drawbead, BHF 70 %, SPCC

22) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของดรอว์บีคแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ของเหล็ก SPCD ดังภาพที่ ค.70 – ค.71

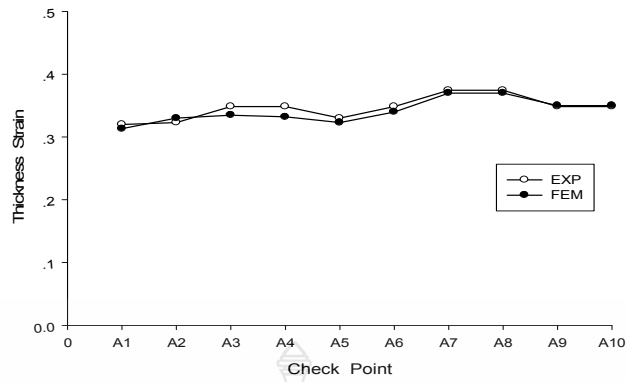


ภาพที่ ค.70 Thickness Strian, Trapenziform Drawbead, BHF 30 %, SPCD

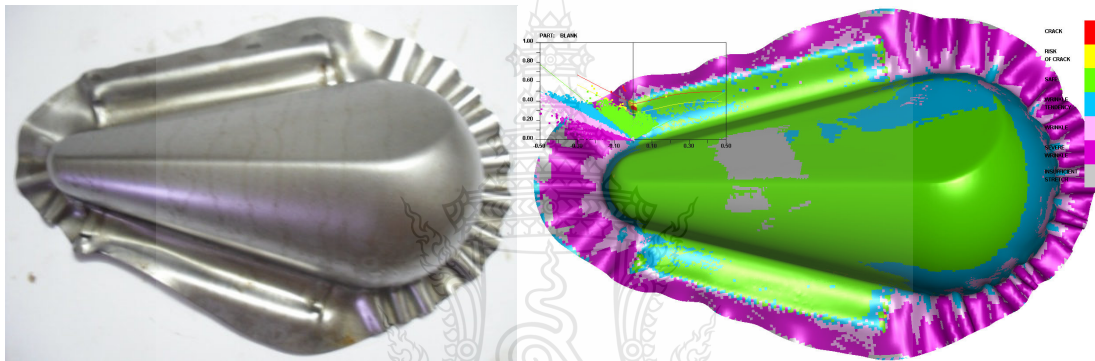


ภาพที่ ค.71 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, Trapenziform Drawbead, BHF 30 %, SPCD

23) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของดรอว์บีคแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ด้วยแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ของเหล็ก SPCD ดังภาพที่ ค.72 – ค.73

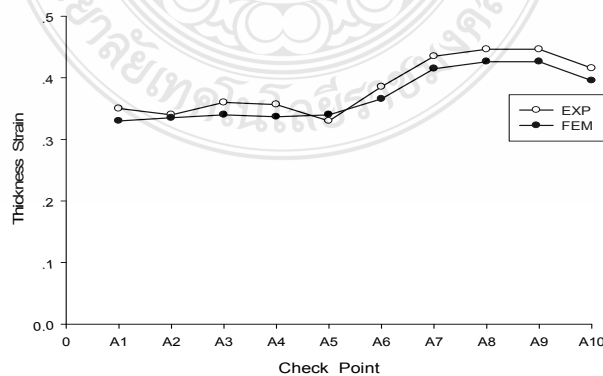


ภาพที่ ค.72 Thickness Strian, Trapenzifrom Drawbead, BHF 50 %, SPCD

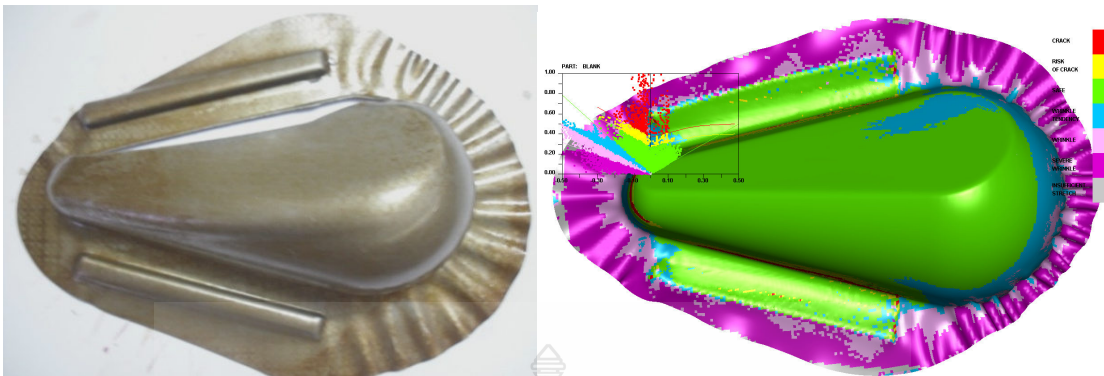


ภาพที่ ค.73 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, Trapenzifrom Drawbead, BHF 50 %, SPCD

24) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของดรอว์บีดแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ด้วยแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ของเหล็ก SPCD ดังภาพที่ ค.74 – ค.75

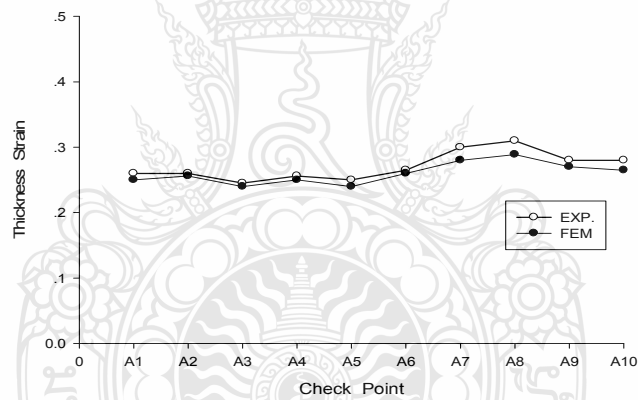


ภาพที่ ค.74 Thickness Strian, Trapenzifrom Drawbead, BHF 70 %, SPCD

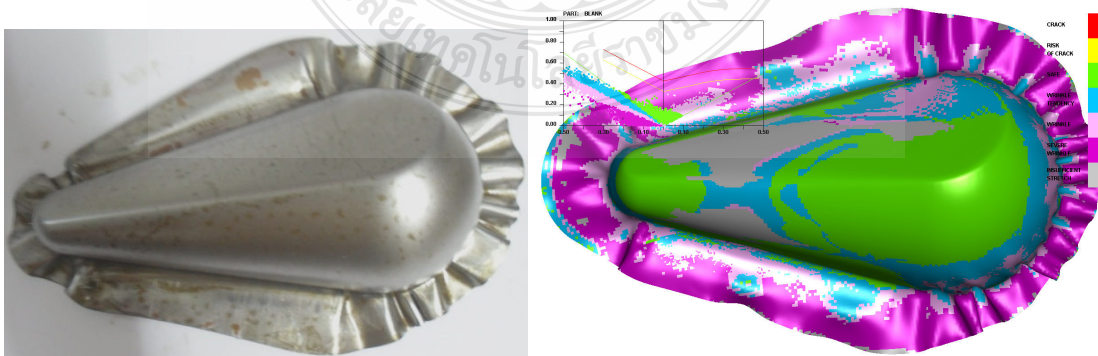


ภาพที่ ค.75 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, Trapenziform Drawbead, BHF 70 %, SPCD

25) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงานระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการทดลองจริงของครอปบีคแบบสี่เหลี่ยมคี่ด้านไม่เท่า ด้วยแรงกดชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ของ เหล็ก SPCE ดังภาพที่ ค.76 – ค.77

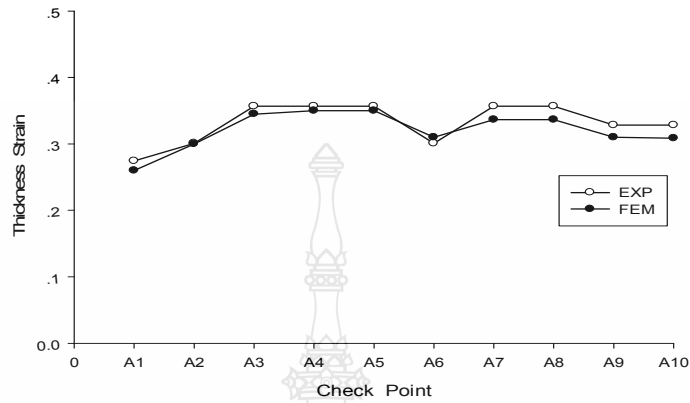


ภาพที่ ค.76 Thickness Strian, Trapenziform Drawbead, BHF 30 %, SPCE

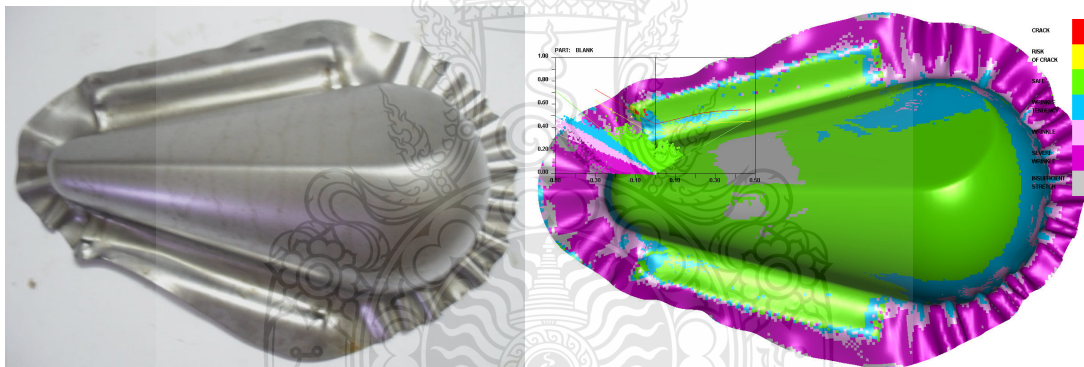


ภาพที่ ค.77 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, Trapenziform Drawbead, BHF 30 %, SPCE

26) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงานระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการทดลองจริงของครอปบีคแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ด้วยแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE ดังภาพที่ ค.78 – ค.79

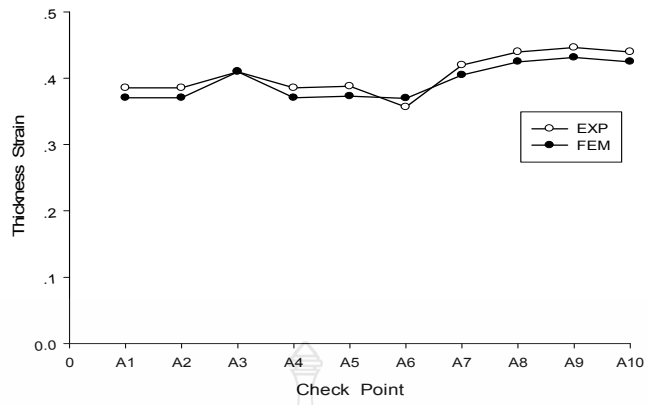


ภาพที่ ค.78 Thickness Strian, Trapenzifrom Drawbead, BHF 50 %, SPCE

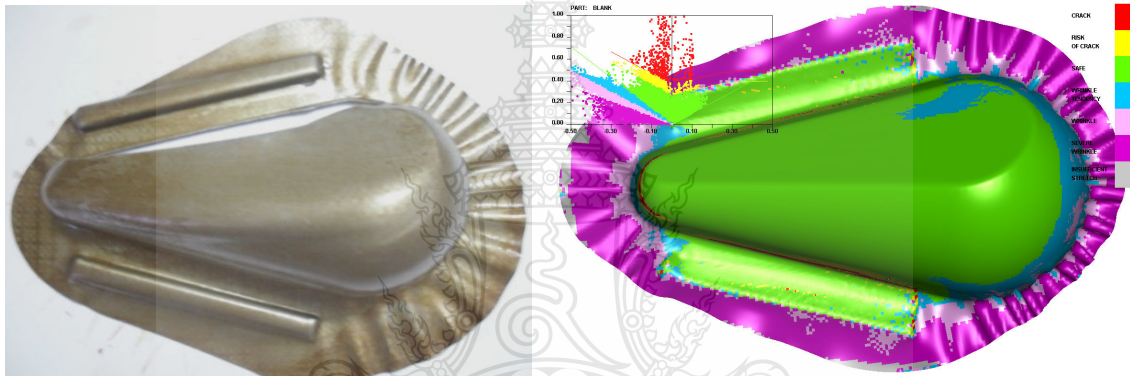


ภาพที่ ค.79 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, Trapenzifrom Drawbead, BHF 50 %, SPCE

27) เปรียบเทียบความเครียดแนวความหนา รูปร่างของชิ้นงาน ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองจริงของครอปบีคแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ด้วยแรงกดชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ของเหล็ก SPCE ดังภาพที่ ค.80 – ค.81

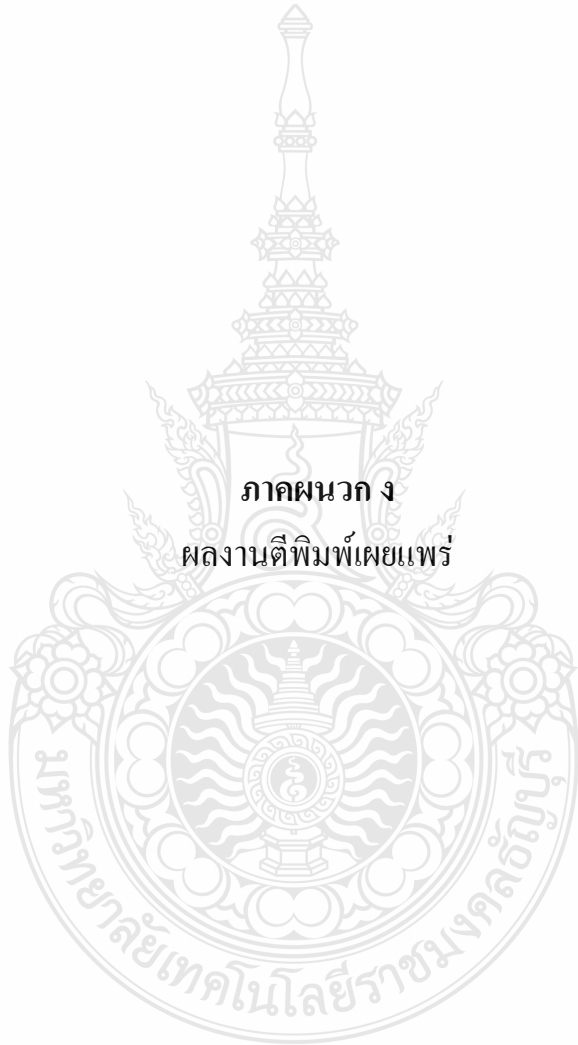


ภาพที่ ๘.๘๐ Thickness Strian, Trapenzifrom Drawbead, BHF 70 %, SPCE



ภาพที่ ๘.๘๑ เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับ FEM, Trapenzifrom Drawbead, BHF 70 %, SPCE

ภาคผนวก ง
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





รวมบทความ
การประชุมวิชาการย้ายงาน
วิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554
IE NETWORK CONFERENCE 2011

20 - 21 ตุลาคม 2554
โรงแรมแอมบาสเตอร์ซิตี จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ
การประชุมข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รศ.ดร.จิตรา รุ่งกิจการพานิช
ผศ.ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย
ผศ.ดร.ประมวล สุธีจาร์วัฒน

รศ.ดร.ปารเมศ ชูติมา
ผศ.ดร.ดาริชา สุธีวงศ์
ผศ.ดร.สมชาย หัวจินดาเนตร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.ปฏิภาณ จัยเจิม
ดร.สุदारัตน์ วงศ์กักรเกียรติ

ดร.ปุ่นณมี สัจจกมล
ดร.สุวิษกรณ์ วิชกุล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง
ดร.ศิริรัตน์ หมื่นวนิชกุล
อ.จันจิรา คงชื่นใจ

ดร.เพ็ญสุตา พันฤทธิ์ดำ
ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.ชานนท์ มูลวรรณ
อ.ประภาพรรณ เกษราพงศ์

ดร.ศักดิ์ชาย รักการ
อ.จักรินทร์ กลั่นเงิน

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รศ.ดร.พรเทพ ขอบฉายเกียรติ
ผศ.ดร.ชาญณรงค์ สายแก้ว
ผศ.ดร.วีรพัฒน์ เศรษฐ์สมบูรณ์
ดร.ปาพจน์ เจริญอภิบาล

รศ.ดร.ศุภชัย ปทุมนากุล
ผศ.ดร.दनัยพงศ์ เชษฐโชติศักดิ์
ดร.ธนา ราชภรณ์ภักดี

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รศ.ดร.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์
ผศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล
ผศ.ดร.สรรฐติชัย ชิวสุทธิศิลป์
ผศ.ดร.อรรถพล สมุทรคุปต์
ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์
ดร.อนิรุท ไชยจาร์วนิช

รศ.ดร.วิมลัน เหล่าศิริถาวร
ผศ.ดร.วัสสนัย วรรณจรรย์ยา
ผศ.ดร.อภิชาติ โสภานแดง
ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์าวงศ์
ดร.วสวัชร นาคเขียว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ.คมสัน จิระภัทรศิลป์
 รศ.ดร.สิทธิชัย แก้วเกื้อกุล
 ผศ.ดร. เจริญชัย โขมพัตราภรณ์
 ผศ.พจมาน เตียวัฒน์รัฐติกาล
 ดร.วิศิษฐ์ศรี วियะรัตน์
 อ.ปรัชญา เพ็ญสุระ

รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์
 รศ.สันติรัฐ นันสะอาก
 ผศ.ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์
 ดร.ช่อแก้ว จตุรานนท์
 ดร.อิศรทัต พึ่งอัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รศ.วันชัย แผลมหลักสกุล

ดร.กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ
 ผศ.ดร. สกนธ์ คล่องบุญจิต
 ดร. อุดม จันทร์จรัสสุข
 ดร.ชุมพล ยวงโย

รศ.ดร. ฤดี มาสุขจันทร์
 ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล
 ดร.พิชญ์วดี กิตติปัญญางาม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผศ.พิชัย จันทรมณี

ผศ.วิชาญ ช่วยพันธ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

ผศ.ณัฐศักดิ์ พรหมศิริ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ดร.นเรศ อินตะวงค์
 ดร.ภาคภูมิ จารุภูมิ

ดร.บรรเจิด แสงจันทร์
 ผศ.มนวิภา อาวิพันธ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

รศ.สุชาติ เย็นวิเศษ
 ผศ.สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์

ผศ.เดช เหมือนขาว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผศ.ดร.พรศิริ จงกล
 ดร.ปภากร สุวานนท์
 อ.นรา สมัดถภาพงศ์

ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย
 ดร.ปวีร์ ศิริรักษ์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.จิรรัตน์ อีระวราพฤกษ์
 ผศ.ดร.วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร
 ผศ.ดร.สวัสดี ภาระราช

รศ.ดร.จิรศิริพงษ์ เจริญภักดิ์
 ผศ.ดร.วรารัตน์ กังสัมฤทธิ์
 ผศ.ดร.เสมอจิตร์ หอมรสสุนธ์

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ผศ.ดร.อุพงษ์ พงษ์เจริญ
 ดร.ขวัญนิธิ คำเมือง
 ดร.ภาณุ บูรณจารุกร
 อ.ศรีสัจจา วิทยศักดิ์

ผศ.ศิษญา สิมารักษ์
 ดร.สมลักษณ์ วรรณฤมล
 อ.ธณิกานต์ ธงชัย

มหาวิทยาลัยปทุมธานี

ดร. ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเร็จ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป
 ผศ.ดร.บพิตร บุปผโชติ
 ดร.นิตา ชัยมูล

ผศ.ดร.สุดสาคร อินธิเดช
 ดร.อรอุมา ลาสุนนท์

มหาวิทยาลัยมหิดล

รศ.ดร.ดวงพรรณ ศฤงคารินทร์
 ดร.จิรพรรณ เลียงโรคาพาธ

ผศ.ดร.วเรศรา วีระวัฒน์
 ผศ.ศุภชัย นาทะพันธ์

มหาวิทยาลัยรังสิต

ผศ.ดร.ธนวรรณ อัครวโพลย์
 ผศ.ลีนี สุขกรมใส
 อ.ศิลปชัย วัฒนเสย
 อ.พรคพงษ์ แก่นณรงค์

ผศ.ดร.เพียงจันทร์ จรุงจิตร
 ดร.พิชญ มั่นสปีติ
 อ.ต่อศักดิ์ อุทัยไขฟ้า
 อ.สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผศ.ดร. กฤษดา พิศลยบุตร
 อ.นุกูล อุบลบาน

ดร.เลิศเลขา ธนะชัยพันธ์
 อ.นันทวรรณ อ่ำเอี่ยม

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รศ.ธนรัตน์ แต้ววัฒนา
 ผศ.ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์
 ดร.สิริเดช ขาดินิยม

ผศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล
 ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ
 ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ผศ.พัฒนาพงศ์ อริยสิทธิ์
อ.จักรพันธ์ กัณหา
อ.ธนิศ ศรีวระรัมย์
อ.วรพจน์ พันธุ์คง

ดร.ธริณี มณีศรี
อ.ชวลิต มณีศรี
อ.พิสุทธิ รัตนแสนวงษ์
อ.สุพัฒตรา เกษราพงศ์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร
ผศ.ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ
ผศ.สุขุม โฆษิตชัยมงคล
ดร.กัญจนา ทองสนิท
ดร.สิทธิชัย แซ่แหล่ม

ผศ.จันทร์เพ็ญ อนุรัตนานนท์
ผศ.วันชัย ลีลากวีวงศ์
ผศ.สุวัฒน์ เณรโต
ดร.ณัฐพล ศิริสว่าง

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รศ.ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล
รศ.สมชาย ชูโณม
ผศ.ดร.เจษฎา วรรมสินธุ์
ผศ.ดร.นภิสพร มีมงคล
ผศ.ดร.รัชชานา สีนธวาลัย
ผศ.ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์
ผศ.เจริญ เจตวิจิตร
ผศ.ยอดดวง พันธุ์นรา

รศ.วนิดา รัตนมณี
ผศ.ดร.กลางเดือน โพชนา
ผศ.ดร.ธเนศ รัตนวิไล
ผศ.ดร.ประภาส เมืองจันทร์บุรี
ผศ.ดร.สุภาพรรณ ไชยประพัทธ์
ผศ.ดร.อรุณ สังข์พงศ์
ผศ.พิเชฐ ตระการชัยศิริ
ผศ.สงวน ตั้งโพธิธรรม

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

อ.จิตลดา ชิมเจริญ
อ.วารลักษณ์ เสถียรรังสฤษฎ์
อ.อรอุมา กอสนาน

อ.นิตการ สมสุข
อ.อัญชลี สุพิทักษ์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผศ.ดร.คณิศร ภูนิคม
ผศ.ดร.นุชสรา เกรียงกรกฎ
ผศ.ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส
ผศ.ดร.สุขอังคณา ลี
ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงศ์

ผศ.ดร.นลิน เพียรทอง
ผศ.ดร.ปรีชา เกรียงกรกฎ
ผศ.ดร.สมบัติ สิ้นธุเชาวน์
ดร.ธารชุตตา พันธุ์นิกุล
ดร.สันต์ โอฬารพิริยะกุล

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ดร.กรกฎ เหมสถาปัตยกรรม

ดร.ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

ผศ.ชัยพฤกษ์ อภาเวท

อ.เจษฎา วงศ์อ่อน

ผศ.ประยูร สุรินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รศ.ดร.ชัยยุทธ ช่างสาร

ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ผศ.ดร.ณฐา คุปต์ชเรีเยร

ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง

ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสอาด

ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ

ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ

ดร.สรพงษ์ ภาสุปรีย์

ผศ.สุรัตน์ ตรัยวนพงศ์

รศ.มานพ ตันตระบัณฑิตย์

ผศ.ดร.จตุรงค์ ลังกาพินธุ์

ผศ.ดร.วารุณี อริยวิริยะนันท์

ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล

ผศ.ชวลิต แสงสวัสดิ์

ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง

ดร.ระพี กาญจนะ

ดร.สุนนมาลย์ เนียมกลาง



สารบัญ (ต่อ)

MPM127	การศึกษาการแยกเส้นใยไฟลีสึกเพื่อนำมาเป็นวัตถุดิบทางสิ่งทอ ศราวุธ ไตสวัสดิ์ อธิระพงษ์ ไชยเฉลิมวงศ์	241
MPM128	การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเศษไหมจากกระบวนการทอผ้าไหมมาปั่นเป็น เส้นด้าย พิศุทธิ์ จันทร์คำ อธิระพงษ์ ไชยเฉลิมวงศ์	242
MPM129	ระบบละอองน้ำสำหรับดับไฟในกระบวนการเผาขนผ้า สุวิทย์ อมรปิตักวิน สมจินต์ อักษรธรรม	243
MPM130	ศึกษากรรมวิธีการเชื่อมประสานด้วยไฟเบอร์เลเซอร์ใน Inconel 617 และ เหล็กแผ่นรีดร้อน จงกล เอี่ยมมี จิระเดช นาคเงินทอง นิรุจน์ นาคสุข	244
MPM131	ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของงานกัดตัวอักษรบนไม้ตาลโตนดด้วย เครื่องกัดควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ จักรนรินทร์ ฉัตรทอง สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์ อธิระพงษ์ ทิพย์อักษร	245
MPM132	High Density Polyethylene Powder as a Binder in Coconut Pulp Particleboard Compared with Urea-Formaldehyde Montip Lawsuriyonta Chuntip Kumnuantip Tawatchai Meekeaw Siriwan Pheansila Suwadee Longsaman	246
MPM133	แผ่นวัสดุก่อสร้างอาคารที่ผลิตจากเส้นใยมะพร้าวผสมผงคอนกรีตกับซีเมนต์ ประยูร สุรินทร์ ชัยพฤกษ์ อาภาเวท เจษฎา วงษ์อ่อน	247
MPM134	ศึกษาอิทธิพลรูปทรงของดรอว์ปีดในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นโดย วิธีการ วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ สุรียา ประสมทอง ศิริชัย ต่อสกุล	248
MPM135	Mechanical Properties of Textile Reinforced LLDPE in Rotational Molding Narongchai O-Charoen Natee Srisawat Hiroyuki Hamada	249



การศึกษาอิทธิพลรูปร่างของดรอว์บีตในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยวิธีการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

Effect Study of Drawbead Shape in Deep Draw Process using Finite Element Method

สุริยา ประสมทอง^{1*} ศิริชัย ต่อสกุล²

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12110

E-mail: Suriya_tea12@hotmail.com*

บทคัดย่อ

ปัญหาการลากขึ้นรูปที่พบบ่อยคือ เกิดการฉีกขาดและการเกิดรอยย่นสาเหตุเกิดจากแรงกดของแบงคโฮลเตอร์ ถ้าแรงกดมากเกินไปอาจทำให้เกิดการฉีกขาดของวัสดุและถ้าแรงกดน้อยเกินไปทำให้เกิดรอยย่นของวัสดุ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีการหาวิธีการควบคุมการไหลตัวของโลหะโดยใช้ดรอว์บีตมาใช้ควบคุมการไหลตัวของวัสดุ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ดรอว์บีตที่มีรูปร่าง แบบครึ่งวงกลม และ ดรอว์บีตแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ รูปร่างของดรอว์บีต, อิทธิพลของแรงกดแบงคโฮลเตอร์ และชนิดของวัสดุ ที่มีผลกระทบต่อควบคุมการไหลของโลหะแผ่นที่ไหลเข้าสู่ช่องเปิดตลับ ในการลากขึ้นรูปโดยใช้รูปร่างของดรอว์บีตที่แตกต่างกันและแรงกดแบงคโฮลเตอร์ที่แตกต่างกันแล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการเปรียบเทียบพบว่าแรงกดขึ้นงานแบงคโฮลเตอร์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ดรอว์บีตแบบครึ่งวงกลม กับดรอว์บีตแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าพบว่าดรอว์บีตแบบครึ่งวงกลม วัสดุสามารถไหลตัวได้ดีกว่าแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า โดยวัดจากความหนาที่เปลี่ยนไปของวัสดุแต่ละจุดที่ทำการวัดซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่าการขึ้นรูปควรเลือกใช้ดรอว์บีตรูปร่างหน้าตัดแบบครึ่งวงกลมที่แรงกดขึ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ผลการเปลี่ยนรูปร่างสุดท้ายของวัสดุจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับรูปร่างจริง ซึ่งผลการทดลองและวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายและหาแนวทางการแก้ไขรูปร่างของดรอว์บีตในการลากขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำหลัก ไฟไนต์เอลิเมนต์/การขึ้นรูปโลหะแผ่น/แม่พิมพ์/การย่น

1. บทนำ

ดรอว์บีตที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในงานอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นมีหลายลักษณะเช่น เป็นแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Angular-bead), ดรอว์บีตแบบครึ่งวงกลม (Round Drawbead) , ซึ่งสิ่งที่มีผลต่อการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นของดรอว์บีต คือ รูปร่างของดรอว์บีต ความเสียดทานระหว่างผิวของดรอว์บีตกับโลหะแผ่น ความเร็วในการดึงขึ้นรูปและคุณสมบัติด้านแอนไอโซทรอปิก (Anisotropy)

จากที่ได้กล่าวมาแล้วนี้จึงได้จัดทำโครงการวิจัยขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบจากดรอว์บีตในการควบคุมการไหลของโลหะแผ่น โดยวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เพื่อมุ่งเน้นการประยุกต์รูปร่างของดรอว์บีต[1] โดยการทดลองทำการเปรียบเทียบดรอว์บีต แบบครึ่งวงกลม (Round bead) และ ดรอว์บีตแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Angular-bead) ที่มีผลต่อการไหลตัวของโลหะในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาผลการวิเคราะห์กับผลการทดลองซึ่งจะสามารถช่วยลดเวลาในการทดลองแม่พิมพ์เพื่อการผลิตจริงต่อไปเกี่ยวข้องกับหลัก SPCE และเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานต่อไป

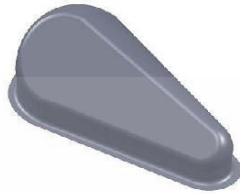
2. ลักษณะของชิ้นงาน

2.1 การออกแบบชิ้นงาน

การออกแบบชิ้นงานซึ่งประกอบไปด้วยการขึ้นรูปหลายรูปแบบทั้งการดึงการดัดการกดอัดขึ้นงานจะมีรัศมีของปลายทั้งสองด้านไม่เท่ากันคือมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 37.5 มม. เส้นศูนย์กลาง 25 มม. [2] จัดวางอยู่ในแนวเดียวกันมีระยะเท่ากับ 105 มม. และเดือนด้านข้างเป็นแนวยาวตลอดหลักการออกแบบชิ้นงานทำการคำนวณแรงในการขึ้นรูปของวัสดุเหล็กเกรด SPCE มีความหนา 1 มม. ในการตรวจสอบความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปโลหะสำหรับชิ้นส่วนที่ออกแบบสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีศักยภาพคือ Finite Element Method (FEM) โดยใช้โปรแกรม Dynaform ในการวิเคราะห์เพื่อช่วยในการตรวจสอบการขึ้น



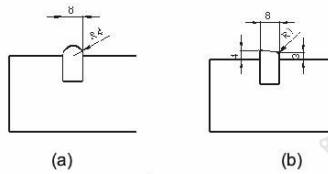
รูปโลหะ ซึ่งในบทความนี้ได้มีการออกแบบชิ้นงานดังแสดงรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะชิ้นงาน

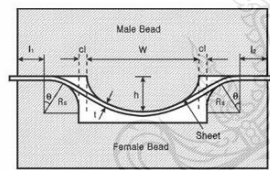
2.2 กำหนดปัจจัยในการทดสอบ

1. ดรอว์บีต



รูปที่ 2 (a) ดรอว์บีตแบบครึ่งวงกลม (Round bead)

(b) ดรอว์บีตแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Angular-bead)



รูปที่ 3 ภาพตัดดรอว์บีตแบบครึ่งวงกลมขณะขึ้นรูป

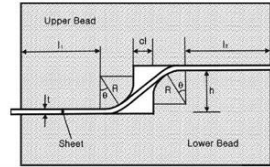
จากรูปที่ 3 สามารถคำนวณแรงในการควบคุมการไหลตัวของวัสดุได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$F_e = \frac{16Ew\delta t^3}{(2R_s + W + 2cl)^3} \quad (1)$$

แต่

$$\delta = \min \left(h, 2(2R+t) \frac{R Y_p}{tE} \right) \quad (2)$$

F_e คือ แรงในการขึ้นรูปโลหะ, δ คือ แรงในการควบคุมการไหลตัวของโลหะ, E ค่านมอดูลัส, Y_p คือ Yield stress, w ความกว้างของแผ่นโลหะ, t คือความหนาของวัสดุ, W ความกว้างของดรอว์บีต, h คือ ความสูงของดรอว์บีต, R คือรัศมีของดรอว์บีต, cl คือ Clearance ระหว่างดรอว์บีตกับวัสดุ



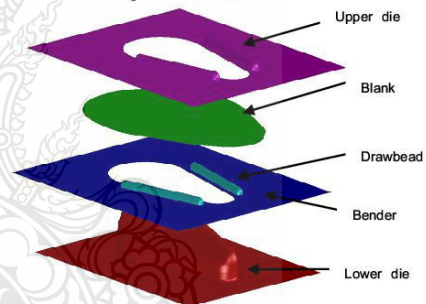
รูปที่ 4 ภาพตัดดรอว์บีตแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า

จากรูปที่ 4 สามารถคำนวณแรงในการควบคุมการไหลตัวของวัสดุได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$F_e = \frac{16Ew\delta t^3}{(4R_s + 2cl)^3} \quad (3)$$

2.3 ลักษณะและตำแหน่งของแม่พิมพ์

CAD ชุดแม่พิมพ์ จากชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 1 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะ โดยที่แม่พิมพ์จะจัดวางแบบการขึ้นรูป 4 ชุด upper die อยู่ด้านบน ถัดมาเป็น Blank size, Drawbead, Binder และ Lower die อยู่ด้านล่าง ตามลำดับ ซึ่งชุด Lower die จะไม่เคลื่อนที่ตลอดการทำงาน ในการทำงานชุด Upper die จะเคลื่อนที่ลงมากับ Binder และ Lower die เพื่อขึ้นรูปตามลำดับ[3]



รูปที่ 4 ชุดแม่พิมพ์

3. คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

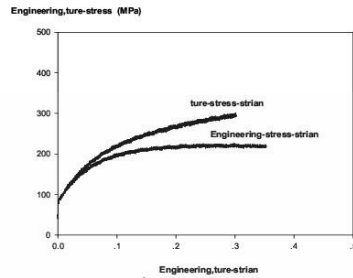
สำหรับวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป คือ เหล็กเกรด SPCE ความหนา 1 มม. แล้วนำมาหาข้อมูลมาตรฐานของ Flow Curve จึงต้องใช้เครื่องทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุโดยวิธีการดึง (uniaxial tensile test) และคำนวณหาค่า True stress และ True strain ออกมา โดยใช้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\sigma = s(1+e) \quad (4)$$

$$\epsilon = \ln(1+e)$$



โดยที่ σ คือ True stress, s คือ Engineering stress, ϵ คือ True strain และ e คือ Engineering strain



รูปที่ 5 Flow Curve ของวัสดุ

ซึ่งข้อมูลจาก Flow curve สามารถแทนด้วยความสัมพันธ์ด้วยกฎยกกำลังดังนี้

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (5)$$

โดยที่ K คือ Strength coefficient และ n คือ Hardening exponent จากการใช้ Regression Analysis จะได้ค่า $K = 319.29$ MPa และ $n = 0.22$ นอกจากนี้ทำการทดสอบค่าอัตราส่วนความเครียดถาวร (R-value หรือ Plastic Strain Ratio, R) โดยกำหนดให้

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (6)$$

โดยที่ ϵ_w คือ Width Strain และ ϵ_t คือ Thickness strain ตารางที่ 1 ตารางแสดงคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

วัสดุ	σ_y (MPa)	K (MPa)	n	r_0	r_{45}	r_{90}
SPCE	290	319	0.215	2.04	1.78	2.258

จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ย r_{av} เพื่อหาค่า Anisotropy ดังต่อไปนี้

$$r_{av} = \frac{r_0 + r_{45} + r_{90}}{4} \quad (7)$$

โดยที่ r_{av} คือ ค่าเฉลี่ยของ R-value ; r_0, r_{45}, r_{90} คือ ค่า R-value ที่วัดได้ตามแนว 0, 45, 90 องศา ตามแนวรีของโลหะแผ่นตามลำดับซึ่งสำหรับวัสดุนี้มีค่า r_{av} เป็น 1.52

4.การดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการ วิจัยชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง เป็นเหล็กกล้ารีดเย็นเกรด SPCE ความหนา 1 มม.โดยสร้างโครงตาข่ายด้วยไฟฟ้า (Electro chemical marking) จึงตัด

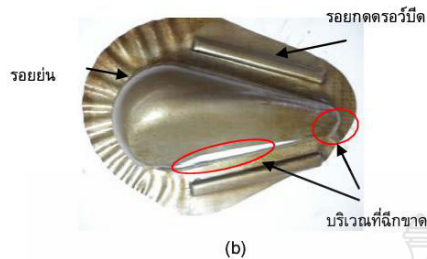
แผ่นเปล่าที่ได้จากการคำนวณโดยประมาณค่าขนาด 220x160x1 มม.ทดลองโดยภายใต้สภาวะต่าง ๆ ที่เหมือนกันได้แก่ ช่องว่าง (Clearance) ระหว่างพื้นที่กับตายสารหล่อลื่น (Lubricant) แรงขึ้นรูป (Drawing force) และกำหนดอัตราส่วนการลากขึ้นรูป (Drawing ratio : β) เท่ากับ 2.0 ทำการลากขึ้นรูปด้วยเครื่องปั๊มไฮดรอลิขนาดแรงดันสูงสุด 80 ตัน จะสามารถทดสอบการขึ้นรูปลึกในชนิดของดรอว์บีด ทั้ง 2 แบบ คือ (1) ดรอว์บีดแบบครึ่งวงกลม (Round-bead) (2) ดรอว์บีดแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Angular-bead) และ แรงกดของแบลงค์โฮลเดอร์ (Blank holder) ที่ 50 เปอร์เซ็น มีค่าเท่ากับ 52.42 KN ซึ่งทดสอบ 5 ชิ้น ในแต่ละเงื่อนไขของการทดลอง แล้วทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของโครงตาข่ายแบบวงกลม (Circles grid pattern) และวัดขนาดความเปลี่ยนแปลงเพื่อหาความเครียดของแต่ละจุดที่กำหนด

5.ผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นว่าความสัมพันธ์ของแรงกดขึ้นงานจากการคำนวณได้เท่ากับ 52.42 kN แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปลึกมีความแตกต่างกันมากเนื่องจากรูปทรงของการขึ้นรูปกับรูปร่างของดรอว์บีดซึ่งการเปลี่ยนรูปบริเวณหน้าตัดพื้นที่ที่ไม่สมมาตรส่งผลทำให้การไหลตัวของแผ่นงานเข้าสู่สายเป็นไปได้อีกมากจะต้องใช้แรงในการขึ้นรูปสูงซึ่งมีแนวโน้มทำให้แผ่นงานเกิดการฉีกขาดตามขอบรัศมีตายและตามจุดวิกฤตต่าง ๆ เป็นไปได้สูงด้วย [2] สาเหตุของความเค้นในแนวแกนการยึดตัวของวัสดุมากกว่าจุดคราก (yields) อย่างไรก็ตามแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปกับแรงกดขึ้นงานจะเป็นไปตามชนิดของดรอว์บีดความแตกต่างของแรงกดขึ้นรูปลึกขึ้นงานจะแปรผันตามแรงกดขึ้นงานเป็นไปตามชนิดของดรอว์บีดแรงที่เกิดขึ้นงานจะเพิ่มสูงขึ้นเป็นแรงขึ้นรูปซึ่งในช่วงที่เกิดการตัดงอ

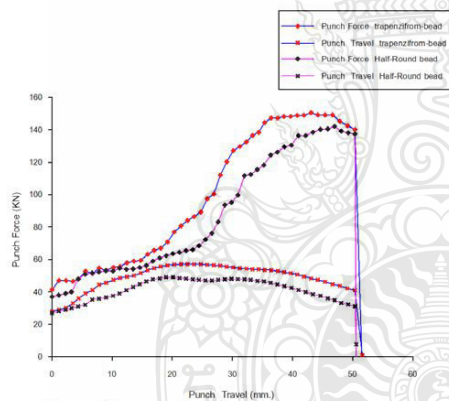


(a)



รูปที่ 5 แรงกดขึ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์
(a) ครอว์บีตแบบครึ่งวงกลม (Round-bead)
(b) ครอว์บีตแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Angular-bead)

จากรูปที่ 6 ความต้องการของแรงกดขึ้นงานของครอว์บีตแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันกล่าวคือ ในการลากขึ้นรูปและแรงกดขึ้นงานต่อระยะกตลิกของขึ้นงานด้วยครอว์บีตแบบครึ่งวงกลม (Round-bead) จะเห็นได้ว่าแรงในการลากขึ้นรูปจะค่อยๆ ปรับเพิ่มสูงขึ้นเพื่อให้เพียงพอสำหรับการขึ้นรูป ต่อระยะความลึกของขึ้นงาน



รูปที่ 6 แรงขึ้นรูปและแรงกดขึ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ของครอว์บีต

แรงลากขึ้นรูปสูงสุด 149.03 kN ที่ระยะความลึก 46.02 mm. โดยที่แรงกดขึ้นงาน (Blank holder force) 50 เปอร์เซ็นต์ ของแรงลากขึ้นรูป แรงกดขึ้นงานมีความราบเรียบ แสดงว่าการไหลตัวของโลหะเป็นไปได้พอสมควร แต่ขึ้นงานที่ได้จะมีรอยย่นส่วนบนของขึ้นงานลักษณะดังรูปที่ 5 (a) แต่ในขณะเดียวกันในการลากขึ้นรูปและแรงกดขึ้นงานต่อระยะกตลิกของขึ้นงานด้วยครอว์บีตแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Angular-bead) จะเห็นได้ว่าแรงใน

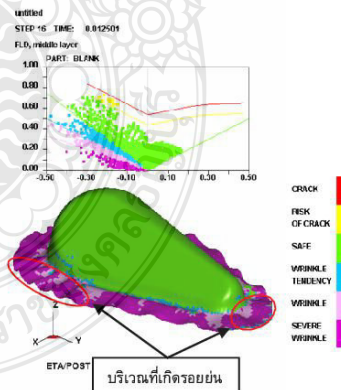
การลากขึ้นรูปจะค่อยๆ ปรับเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ แรงของระยะความลึก 43.08 mm. การลากขึ้นรูปสูงสุดที่ระดับ 150.58 kN อย่างสม่ำเสมอโดยที่แรงกดขึ้นงาน(Blank holder force) อยู่ที่ประมาณ 57 kN แล้วจึงลดลง จากกราฟแสดงให้เห็นว่าการไหลตัวของเนื้อโลหะเข้าสู่ช่อง DIE มีการไหลตัวที่ไม่ดีทำให้เกิดรอยย่นที่ขอบด้านบนและล่างของตัวขึ้นงานและทำให้ขึ้นงานเกิดการฉีกขาดที่ขอบของขึ้นงานดังรูปที่ 5 (b)

6. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการขึ้นรูป

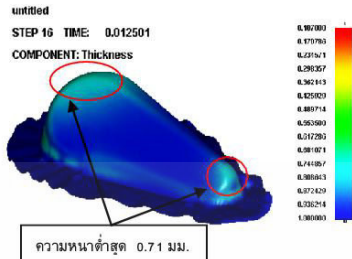
การสร้างแบบจำลองเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองตาข่าย (Mesh Model) เพื่อการแบ่งเอลิเมนต์ (Elements) ของแม่พิมพ์แต่ละชุดและเบลนค์ โดย Mesh ของ Die, Binder, Punch และ Blank ถูกสร้างในโปรแกรม Dynaform [4] ถูกนำมาประมวลผลด้วย Explicit Nonlinear FEM โดยใช้โปรแกรม Dynaform 5.6 เพื่อประเมินความสามารถในการขึ้นรูปในแต่ละแบบได้อย่างสม่ำเสมอ การคำนวณทั้งหมดทำบน PC workstation ที่มีตัวประมวลผล Intel Core i3 2.26 GHz และ RAM ที่ 4 GB โดยใช้เวลาคำนวณแต่ละแบบประมาณ 2 ชั่วโมง

6.1 ครอว์บีตแบบครึ่งวงกลม (Round-bead)

จากรูปที่ 13 จะเห็นว่าขึ้นงานจากการขึ้นรูป มีรอยย่นเกิดขึ้นมากบริเวณปีกด้านบนและด้านปลายทั้ง 2 ด้านซึ่งแสดงเป็นสีม่วงและวงไว้ ขึ้นงานนี้มีความหนาต่ำสุดอยู่ที่ 0.71 มม. โดยเกิดบริเวณจุดบนสุดของขึ้นงาน แสดงในรูปที่ 14



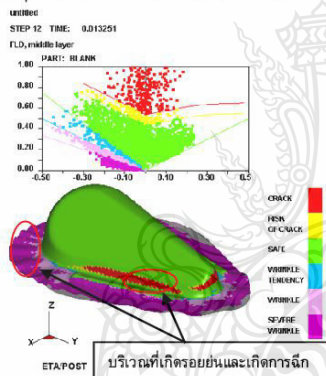
รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์ FLD



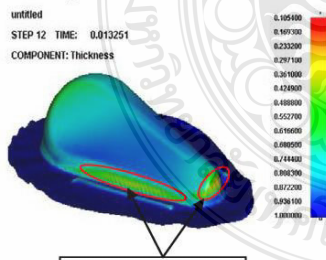
รูปที่ 14 การกระจายความหนา

6.2 ครอบบีตแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Angular-bead)

จากรูปที่ 15 จะเห็นว่าชิ้นงานจากการขึ้นรูป มีรอยย่นเกิดขึ้นบริเวณปีกด้านบนซึ่งแสดงเป็นสีม่วงและวงไว้ และชิ้นงานเกิดการฉีกขาดบริเวณด้านข้างของชิ้นงานและชิ้นงานนี้มีความหนาต่ำสุดอยู่ที่ 0.4 มม. โดยเกิดบริเวณจุดด้านข้างของชิ้นงาน แสดงในรูปที่ 16 สาเหตุเกิดจากหน้าสัมผัสของชิ้นงานกับหน้าสัมผัสของครอบบีตมีมากเกินไปทำให้การไหลตัวของวัสดุเป็นไปได้อย่างทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด



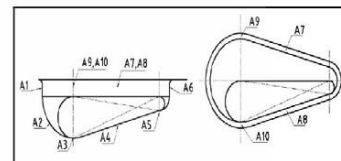
รูปที่ 15 ผลการวิเคราะห์ FLD



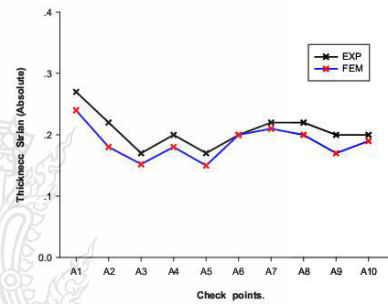
รูปที่ 16 การกระจายความหนา

7. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

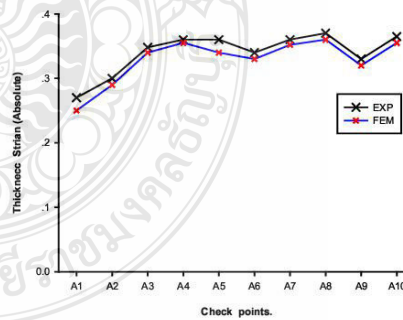
วิเคราะห์ความเครียดแนวความหนา (Thickness strain) ของชิ้นงานในแต่ละจุด ของการใช้ครอบบีตแต่ละชนิดที่ระดับแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์บริเวณจุดที่ตรวจวัดความเครียดบนชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 บริเวณจุดที่ตรวจวัดความเครียดบนชิ้นงาน



รูปที่ 18 กราฟแสดงค่าความเครียดแนวความหนาชิ้นงานในแต่ละจุดที่แรงกดชิ้นงาน 50 % ของครอบบีตแบบครึ่งวงกลมเปรียบเทียบกับ FEM

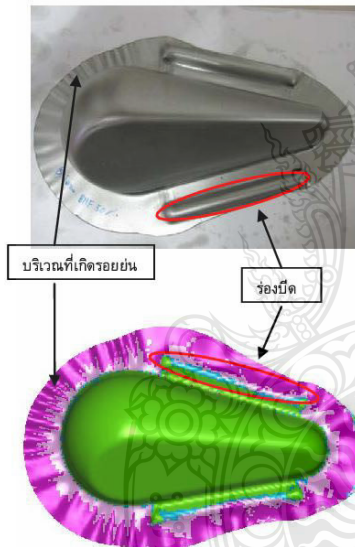


รูปที่ 19 กราฟแสดงค่าความเครียดแนวความหนาชิ้นงานในแต่ละจุด



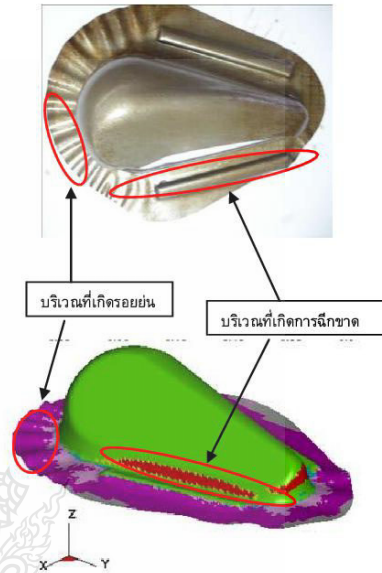
จุดที่แรงกดขึ้นงาน 50 % ของดอร์บิตแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า เปรียบเทียบกับ FEM

จากรูปที่ 18 เป็นกราฟแสดงความเครียด จากความหนาของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลง ในการใช้ดอร์บิตแบบครึ่งวงกลมเปรียบเทียบกับ FEM ที่แรงกดขึ้นงาน (Blank Holder Force) 50 % จะพบว่าระดับความเครียดในแต่ละจุดมีระดับที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าดอร์บิตแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Round-bead) การไหลตัวของโลหะสม่ำเสมอที่สุดแต่ชิ้นงานจะเกิดรอยย่นบริเวณขอบของชิ้นงานอยู่บ้าง ซึ่งมีความแตกต่างกับดอร์บิตแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Angular-bead) มีความรุนแรงความเครียดสูงสุดที่จุด A10 , A8 ดังรูปที่ 19 จึงทำให้ชิ้นงานบริเวณนั้นเกิดการฉีกขาด และผลการทดลองมีความสอดคล้องกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

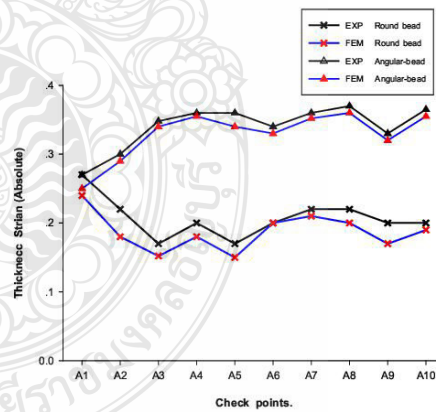


รูปที่ 20 การเปรียบเทียบการขึ้นรูปจริงกับการวิเคราะห์ด้วย FEM ของดอร์บิตแบบครึ่งวงกลม

ในการเปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในแต่ละจุดที่เปรียบเทียบมีความสอดคล้องกันจากรูปที่ 20 และ 21



รูปที่ 21 การเปรียบเทียบการขึ้นรูปจริงกับการวิเคราะห์ด้วย FEM ของดอร์บิตแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า



รูปที่ 21 การเปรียบเทียบการขึ้นรูปจริงกับการวิเคราะห์ด้วย FEM ของดอร์บิตแบบครึ่งวงกลมกับดอร์บิตแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า



จากรูปที่ 21 แรงกดชิ้นงาน (Blank holder force) 50 เปอร์เซ็นต์ ดรอว์บีดรูปทรงแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Round-bead) จะใช้แรงในการลากชิ้นงานที่ระดับ 142.15 kN เมื่อแรงกดชิ้นงานเพิ่มขึ้น แรงในการลากชิ้นรูปจึงเพิ่มสูงตาม ค่าความเครียด (Strain) สูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.27 ชิ้นงานเกิดรอยย่นน้อยลง ใช้ดรอว์บีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม ด้านไม่เท่า (Angular-bead) จะใช้แรงในการลากชิ้นรูป ชิ้นงานที่ระดับ 150.38 kN เมื่อแรงกดชิ้นงานเพิ่มขึ้น แรงในการลากชิ้นรูปจึงเพิ่มสูงตาม ค่าความเครียด (Strain) สูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.36 ชิ้นงานเกิดรอยย่นและเกิดการฉีกขาด

8.สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษารูปทรงของดรอว์บีดผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

8.1 ในการขึ้นรูปดรอว์บีดรูปทรงแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (Round-bead) โลหะสามารถไหลตัวได้ดีกว่าดรอว์บีดแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Angular-bead) ที่แรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์เป็นแรงที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป

8.2 ดรอว์บีดที่มีรูปทรงแตกต่างกันจึงต้องใช้ขนาดของแรงที่แตกต่างกันซึ่งการเปรียบเทียบทั้งสองแบบจะใช้แรงแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งดรอว์บีดรูปทรงแบบหน้าตัดครึ่งวงกลมใช้แรงในการขึ้นรูปต่ำกว่าดรอว์บีดแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า

8.3 การนำเอาริธี FEM มาใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ผลกระทบของดรอว์บีดในกระบวนการลากชิ้นรูปซึ่งผลการทดลองและวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายและหาแนวทางการแก้ไขรูปทรงของดรอว์บีดในการลากชิ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก แผนกวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Y.T.Keum "Expert drabead models for finite element analysis of sheet metal forming processes" Division of Mechanical Engineering ,Hanyang University,1999

- [2] บุญส่ง จงกลณี "การศึกษากิทธิพลของดรอว์บีดในกระบวนการลากชิ้นรูปลักษณะชิ้นงานที่รูปทรงเหมาะสมมาตรฐาน" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี 2552
- [3] พร้อมพันธ์ เกิดสวัสดิ์ "การประยุกต์ใช้การทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ข้อบกพร่องและลดเวลาการปรับตั้งแม่พิมพ์สำหรับงานขึ้นรูปโลหะแผ่น" มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี 2552
- [4] ETA, *Dynaform: User's Manual Version 5.6*, 2010.
- [5] กิตติภักดิ์ รัตนจันทร์ "ผลกระทบจากดรอว์บีดในการขึ้นรูปโลหะแผ่น" มหาวิทยาลัยพระจอมพระนครเหนือ 2542

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสุริยา ประสมทอง
วัน เดือน ปีเกิด	12 มกราคม 2529
ที่อยู่	107 หมู่ 6 ต.หนองสะโน อ.บุณฑริก จ.อุบลราชธานี 34230
การศึกษา	ระดับ ปวส. ช่างกลโรงงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตกาฬสินธุ์ ระดับปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ วิทยาเขตสุพรรณบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี 450 ม.6 ถนนสุพรรณบุรี - ชัยนาท ต.ย่านยาว อ.สามชุก จ. สุพรรณบุรี 72130

