

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่  
สมมาตรต่อความหนาของผนังชิ้นงาน

A STUDY OF THE INFLUENCE OF A NON-SYMMETRICAL DEEP  
DRAWING PROCESS PARAMETERS ON THE THICKNESS OF  
WORK PIECE'S WALLS

อาคม บุญนาค

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปลิกซิงงานที่มีรูปทรงไม่  
สมมาตรต่อความหนาของผนังชิ้นงาน

อาคม บุญนาค

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปลิกซิงงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร ต่อความหนาของผนังขี้งาน
ชื่อ - นามสกุล	นายอาคม บุญนาค
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

## บทคัดย่อ

กระบวนการขึ้นรูปลิกเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่มีความสำคัญในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ในปัจจุบัน ส่วนใหญ่การลากขึ้นรูปลิกขี้งานที่ไม่สมมาตรกันเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนและต้องอาศัยการควบคุมตัวแปรต่างๆ ในการลากขึ้นรูปให้มีความเหมาะสมจึงจะสามารถผลิตขี้งานออกมาได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลตัวแปรในการลากขึ้นรูปที่มีผลต่อความหนาของผนังขี้งานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปลิกนี้ ใช้การทดลองลากขึ้นรูปขี้งานที่ไม่สมมาตร จากวัสดุเหล็กแผ่น SPCC-SD หนา 1 มิลลิเมตร โดยกำหนดตัวแปรในการทดลอง 3 ตัวแปรคือ รูปร่างแผ่นเปล่า ขนาดของแรงกด และครอว์บีด ในการทดลองแต่ละครั้งทำการบันทึกขนาดของแรงในการขึ้นรูปตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งจบกระบวนการ หลังการขึ้นรูปขี้งานถูกตรวจสอบคุณภาพด้วยสายตาค่อนนำไปผ่า เพื่อวัดขนาดความหนาของผนังบริเวณจุดสนใจที่กำหนดไว้ 10 จุด เพื่อนำข้อมูลทั้งหมดไปทำการวิเคราะห์ผลต่อไป

การทดลองพบว่า รูปร่างของแผ่นตัดเปล่า แรงกดบนขี้งาน และครอว์บีด มีอิทธิพลต่อขนาดความหนาของผนังขี้งาน ซึ่งผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าตัวแปรทั้งสามตัว มีอิทธิพลต่อการไหลของวัสดุเข้าสู่คาน การเลือกใช้แผ่นตัดเปล่าและขนาดของแรงกดแผ่นตัดเปล่าที่เหมาะสม ซึ่งช่วยลดปัญหาการร่อนหรือการฉีกขาดได้ และการใช้ครอว์บีดนั้น ช่วยควบคุมการไหลของวัสดุทำให้มีการกระจายความเค้นบนขี้งานได้ดียิ่งขึ้น และทำให้ความหนาผนังขี้งานมีความแตกต่างกันน้อยลง

**คำสำคัญ:** กระบวนการขึ้นรูปลิก แผ่นตัดเปล่า แรงกดขี้งาน ครอว์บีด

<b>Thesis Title</b>	A Study of The Influence of Non-Symmetrical Deep Drawing Process Parameters on The Thickness of Work Piece's Walls
<b>Name - Surname</b>	Mr.Akom Boonnak
<b>Program</b>	Manufacturing Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Sivakorn Angthong, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2012

## **ABSTRACT**

At present, sheet metal deep drawing process is the most important process. The accomplishment of non-symmetrical shape forming was complicated and required parameter controlling. Therefore, this research aims to study the influence of non-symmetrical deep drawing process parameters upon the thickness of specimen's walls.

An experiment of a non-symmetrical deep drawing process was conducted by using sheet metal graded SPCC-SD which has 1 mm. in thickness. A number of experiments were carried to investigate the three parameters i.e. (1) blank geometry (2) blank holding force and (3) draw bead. A drawing force of experiment was recorded for further analysis. The drawn part was visual examined and recorded if there were any failures. After that, the drawn part was cut and measured wall thickness at the 10 specified points. The recoded data were analyzed to identify the results.

The experimental results showed that the blank geometry, blank holding force and draw bead influenced the work piece's wall thickness. These drawing parameters controlled the material flow into the die. The application of an appropriate blank geometry and blank holding force could reduce any failure in the production process. Moreover, the use of draw bead influenced the level stress distribution in the workpiece and reduced the different of the wall thickness.

**Keywords:** deep drawing metalwork, blank geometry, blank holding force, draw bead

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิวกร อ่างทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ดร. สมศักดิ์ อิทธิโสภณกุล กรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชัย จันทร์มณี ผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์บุญส่ง จงกลณี ที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการทำวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวกให้ใช้เครื่องในการทดลองและให้คำปรึกษาตลอดจนร่วมพิจารณาปัญหาต่างๆระหว่างการทดลองและหลังการทดลอง ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่านที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

อาคม บุญนาค

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ตัวแปรที่ศึกษาของการขึ้นรูปลึก.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 นิยามศัพท์ที่สำคัญ.....	4
2.2 ทฤษฎีที่สำคัญของการขึ้นรูปลึก (Deep Drawing).....	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
3 วิธีการดำเนินงาน.....	36
3.1 แผนการดำเนินการวิจัย.....	36
3.2 วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองการขึ้นรูปลึก.....	37
3.3 การออกแบบดายและพินซ์.....	40
3.4 กำหนดตัวแปรทดสอบ.....	41
3.5 สารหล่อลื่น (Lubricant) ใช้ทดสอบ.....	45
3.6 ครอว์บีคชนิดเดี่ยว (Draw Bead Single).....	45
3.7 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล.....	46

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลและวิเคราะห์การทดสอบ .....	48
4.1 ผลการทดสอบอิทธิพลของรูปร่างแผ่นตัดเปล่า.....	48
4.2 ผลการทดสอบอิทธิพลแรงกดชิ้นงาน .....	55
4.3 ผลการทดสอบอิทธิพลของครอว์บีค.....	71
4.4 การวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปจากโปรแกรมทางสถิติ Minitab .....	73
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	76
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	79
รายการอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก การคำนวณ .....	82
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง.....	90
ภาคผนวก ค การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM.....	98
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ .....	102
ประวัติผู้เขียน .....	112

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่าพิถีพิถันสำหรับงานลากขึ้นรูป.....	17
2.2	สมบัติเชิงกลของแผ่นเหล็กกล้ารีดเย็น.....	20
2.3	เหล็กแผ่นรีดเย็น (มาตรฐาน JIS).....	29
2.4	เหล็กแผ่นรีดเย็น (มาตรฐาน JIS) สมบัติทางกล .....	29
2.5	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่น.....	32
3.1	สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.2	ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุขึ้นงาน (%).....	39
4.1	ปัจจัยที่ใช้ควบคุมการขึ้นรูปขึ้นงานตามชนิดของแผ่นตัดเปล่า.....	48
4.2	ปัจจัยที่ใช้ควบคุมการขึ้นรูปขึ้นงานตามชนิดของแรงกดขึ้นงาน .....	56
4.3	ผลการตรวจสอบขึ้นงานของแผ่นตัดเปล่า สีเหลืองผืนผ้าที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงกด ขึ้นรูปต่างๆ .....	57
4.4	ผลการตรวจสอบขึ้นงานของแผ่นตัดเปล่าสีเหลืองผืนผ้าบวมที่ผ่านการขึ้นรูปด้วย แรงกดขึ้นรูปต่างๆ .....	59
4.5	ผลการตรวจสอบขึ้นงานของแผ่นตัดเปล่าที่ได้จากการคำนวณ โดยการประมาณค่าที่ ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงกดขึ้นรูปต่างๆ.....	61
4.6	สรุปข้อสังเกตขึ้นงานของแผ่นตัดเปล่าสีเหลืองผืนผ้าที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงกดขึ้น รูปต่างๆ .....	64
4.7	สรุปข้อสังเกตขึ้นงานของแผ่นตัดเปล่าสีเหลืองผืนผ้าบวมที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรง กดขึ้นรูปต่างๆ .....	67
4.8	สรุปข้อสังเกตขึ้นงานของแผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณและใช้ดรอว์บีดที่ผ่านการขึ้น รูปด้วยแรงกดขึ้นรูปต่างๆ.....	69
4.9	ปัจจัยที่ใช้ควบคุมการขึ้นรูปขึ้นงานตามชนิดของดรอว์บีด.....	71
4.10	ปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ .....	73



## สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	การแบ่งประเภทกลุ่มของการขึ้นรูป .....	5
2.2	การขึ้นรูปลึกด้วยทรงกระบอก .....	6
2.3	ชิ้นงานขึ้นรูปทรงกระบอกสี่เหลี่ยม .....	6
2.4	ตัวอย่างของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบไม่สมมาตรและพื้นที่เกิดความบกพร่อง.....	7
2.5	ขั้นตอนในกระบวนการขึ้นรูปลึกลอย่างง่าย .....	7
2.6	การตัดงอที่จุดเริ่มต้นของขบวนการ .....	8
2.7	ลักษณะอาการเริ่มต้นของการลากขึ้นรูปโดยการทำให้ตรง .....	9
2.8	แรงที่ใช้เพื่อเอาชนะความเสียดทาน .....	10
2.9	การบีบหรืออัดตัวของโลหะระหว่างการลากขึ้นรูป.....	10
2.10	ลักษณะของแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปลึกล.....	11
2.11	สภาวะความเค้นที่เกิดระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูปลึกล .....	11
2.12	ขั้นตอนสุดท้ายของการลากขึ้นรูป.....	12
2.13	ผลที่เกิดขึ้นจากแรงดึงที่ผนังของถ้วย .....	13
2.14	การยึดขึ้นรูปถ้วยกันโค้ง ณ จุดเริ่มต้นของการลากขึ้นรูป.....	14
2.15	ค่าแรงดันของแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ต้องการในการลากขึ้นรูปครั้งแรก.....	16
2.16	ตัวอย่างการเกิดความเสียหายบนชิ้นงานขึ้นรูปลึกล.....	18
2.17	การกระจายความเครียดสำหรับผลของค่า $n$ ที่แตกต่างกันในบริเวณวิกฤต .....	24
2.18	การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติก.....	26
2.19	ผลการทดสอบกับความกว้างโลหะแผ่นขนาดต่างๆ .....	27
2.20	กราฟของการดึงของวัสดุ.....	27
2.21	แบบชนิดของ Bead ปลายมน โค้ง .....	30
2.22	แบบชนิดของ Bead สี่เหลี่ยม .....	30
2.23	แบบสามเหลี่ยมและแบบไม่ไหลตัว .....	31
3.1	ไดอะแกรมวิธีดำเนินโครงการวิจัย .....	37
3.2	เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test) .....	38
3.3	ชิ้นงานทดสอบส่วนผสมทางเคมี.....	39

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.4	ออกแบบขนาดและรูปร่างของชิ้นงานในรูปทรงไม่สมมาตรซึ่งได้ค่าความเครียดที่แตกต่างกัน..... 41
3.5	แผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้า..... 41
3.6	แผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุม..... 42
3.7	แผ่นตัดเปล่าคำนวณโดยการประมาณค่า..... 43
3.8	การขึ้นรูปชิ้นงานในขณะเกิดการเปลี่ยนรูป..... 43
3.9	ประกอบคายและพันชั้นบนแทนเครื่องปั๊มไฮดรอลิกในการขึ้นรูปชิ้นงาน..... 44
3.10	แผ่นกดชิ้นงานที่ไม่ใช้ครอว์ปิด..... 45
3.11	ครอว์ปิดชนิดส่วนโค้งครึ่งวงกลม (Insert in Blank Holder)..... 45
3.12	อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Mini Data Logger)..... 46
3.13	อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน (Pressure Transducer)..... 46
3.14	จุดที่ใช้ในการตรวจสอบวัดความหนาบนชิ้นงาน..... 47
3.15	อุปกรณ์วัดความหนาผิวชิ้นงาน..... 47
4.1	แผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้า..... 49
4.2	ชิ้นงานสำเร็จจากการขึ้นรูปของแผ่นเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อวิเคราะห์ผล..... 49
4.3	แรงกดขึ้นรูปของแผ่นเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้า..... 50
4.4	แผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมชนิดบากมุม..... 50
4.5	ชิ้นงานสำเร็จจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมชนิดบากมุมเพื่อวิเคราะห์ผล..... 51
4.6	แรงกดขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมชนิดบากมุม..... 51
4.7	แผ่นตัดเปล่าคำนวณโดยการประมาณค่า..... 52
4.8	ชิ้นงานสำเร็จจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าคำนวณโดยการประมาณค่าเพื่อวิเคราะห์ผล..... 53
4.9	แรงกดขึ้นรูปของแผ่นเปล่าคำนวณโดยการประมาณค่า..... 53
4.10	การเปรียบเทียบแรงกดขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าทั้ง 3 ชนิด..... 54
4.11	การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่า ที่แรงกดชิ้นงาน (Blank Holder Force) เท่ากับ 49.69 kN..... 55

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.12 การเปรียบเทียบแรงกดที่ขึ้นงานที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแผ่นตัดเปล่า สี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	56
4.13 การเปรียบเทียบความหนาของผนังขึ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่า.....	58
4.14 การเปรียบเทียบแรงกดที่ขึ้นงานที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแผ่นตัดเปล่า สี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุม .....	59
4.15 การเปรียบเทียบความหนาของผนังขึ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่า.....	60
4.16 การเปรียบเทียบแรงกดที่ขึ้นงานที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแผ่นตัดเปล่า ที่ได้ จากการคำนวณโดยการประมาณค่า.....	61
4.17 การเปรียบเทียบความหนาของผนังขึ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่า ที่ได้จาก การคำนวณโดยการประมาณค่า.....	62
4.18 รูปร่างและตำแหน่งของดอร์วี่บีดที่ใช้ในการทดสอบ .....	63
4.19 การเปรียบเทียบแรงกดที่ขึ้นงานที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแผ่นตัดเปล่า สี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้ดอร์วี่บีดชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม.....	64
4.20 การเปรียบเทียบความหนาของผนังขึ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยม ผืน ผ้าโดยใช้ดอร์วี่บีดชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม. ....	65
4.21 การเปรียบเทียบแรงกดที่ขึ้นงานที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแผ่นตัดเปล่า สี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุม โดยใช้ดอร์วี่บีดชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.0 มม.....	66
4.22 การเปรียบเทียบความหนาของผนังขึ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่า สี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุมโดยใช้ดอร์วี่บีดชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม.....	68
4.23 การเปรียบเทียบแรงกดที่ขึ้นงานที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแผ่นตัดเปล่าจาก การคำนวณและใช้ดอร์วี่บีด .....	69
4.24 การเปรียบเทียบความหนาของผนังขึ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าจากการ คำนวณโดยการประมาณค่าโดยใช้ดอร์วี่บีด .....	70
4.25 อิทธิพลของดอร์วี่บีดที่ปัจจัยทดสอบ แรงกดขึ้นงาน 40% ของแผ่นตัดเปล่าจากการ คำนวณโดยการประมาณค่า .....	71

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.26	อิทธิพลของครอว์บีคที่ปัจจัยทดสอบ ความหนาของผนังชิ้นงานแผ่นตัดเปล่าจากการ คำนวณ โดยการประมาณค่า ..... 72
4.27	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ได้จากโปรแกรม Minitab ..... 73
4.28	ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าเฉลี่ยความหนาของผนังชิ้นงาน ..... 74
4.29	การวิเคราะห์ความแม่นยำของ Interaction Plot ที่มีผลต่อความหนาของผนังชิ้นงาน ..... 74

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$A_{BH}$	พื้นที่สัมผัสของแผ่นจับยึดชิ้นงาน
BHF	แรงกดของแผ่นกดงาน (Blank holder force)
$\beta$	อัตราส่วนการขึ้นรูป
$\beta_n$	อัตราส่วนขึ้นรูปโดยจำนวนครั้ง
C	ค่าคงที่
{d}	ฟังก์ชันการกระจัด (m)
$d_0$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นชิ้นงาน
$d_1$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่
$F_{BH}$	แรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน
$F_d$	แรงขึ้นรูป (N)
{F}	แรงทั้งหมดที่กระทำต่อเอลิเมนต์ (kN)
[K]	สทิตีเฟเนสมเมทริกซ์
$L_t$	ความยาวรอบรูปทั้งหมด (mm)
m	ความไวของอัตราความเครียด
n	เลขชี้กำลังทำให้แข็งของความเครียด
$P_{BH}$	แรงกดคั่นที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงานต่ำที่สุด
r	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก
$\Delta r$	แอนไอโซทรอปีระนาบ
$r_m$	แอนไอโซทรอปีตั้งฉาก
$r_0$	แอนไอโซทรอปีกตามแนวทิศทางการรีด
$r_{45}$	แอนไอโซทรอปีกทำมุม 45 องศา กับแนวทิศทางการรีด
$r_{90}$	แอนไอโซทรอปีกทำมุม 90 องศา กับแนวทิศทางการรีด
$S_0$	ความหนาของวัสดุ (mm)
$S_u$	ความเค้นสูงสุด (N/mm <sup>2</sup> )
$S_y$	ความเค้นจุดคราก (N/mm <sup>2</sup> )

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing Process) เป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญ สำหรับการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่ต้องการขึ้นรูปจากโลหะแผ่นบาง กระบวนการลากขึ้นรูปเป็นกระบวนการผลิตชิ้นงานจากโลหะแผ่นเรียบ (Blank) ที่ถูกแรงกระทำจากแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) กดลงในแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) ที่มีลักษณะเป็นหลุมโพรงลงไป เหมือนกับรูปทรงของชิ้นงานที่ต้องการผลิต โดยที่ความหนาของชิ้นงานไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกให้ได้ชิ้นงานมีคุณภาพดีนั้นต้องอาศัย การควบคุมตัวแปรในกระบวนการผลิตหลายตัวแปรให้มีความเหมาะสมเช่น แรงกดของแผ่นกดงาน (Blank Holding Force: BHF) สารหล่อลื่น (Lubricants) ขนาดและรูปร่างของแผ่นเปล่า (Blank Size) ความเร็วในการขึ้นรูป (Drawing Speed) นอกจากนั้นคุณภาพของชิ้นงานยังขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป เช่น ขนาดและตำแหน่งของดรอว์บีค (Draw Beads) รัศมีของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Radius) รัศมีของแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die Radius) ช่องว่างระหว่างพื้นซ์กับคาย (Clearance) และความเรียบผิวบริเวณที่สัมผัสกับชิ้นงาน (Surfaces Roughness) ทั้งนี้ความยุ่งยากของการเลือกใช้ตัวแปรการผลิตเหล่านี้ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของชิ้นงานเป็นสำคัญ

การขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรกัน (Non-Symmetrical Deep Drawing Process) เป็นกระบวนการที่มีความยุ่งยากซับซ้อนมากกว่าการลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงสมมาตร ทั้งนี้เพราะการลากขึ้นรูปชิ้นงานไม่สมมาตรกัน ก่อให้เกิดการกระจายความเครียด (Strain) บนชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ ซึ่งยากต่อการควบคุม ซึ่งในบริเวณที่มีความเครียดสูงอาจเกิดการฉีกขาด และในบริเวณที่มีความเครียดต่ำเกินไปอาจเกิดการสปริงตัวกลับซึ่งจะทำให้ชิ้นงานเสียรูปทรงได้ ดังนั้นในการลากขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่ไม่สมมาตรกันมีความจำเป็นต้อง ควบคุมให้ขนาดความเครียดบนชิ้นงานให้มีความสมดุลกัน (Balance Strain) ซึ่งจะสามารถกระทำได้โดยการควบคุมการไหลตัวของวัสดุขณะขึ้นรูปเลือกใช้แรงกดแผ่นเปล่า สารหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทาน และใช้ดรอว์บีคในตำแหน่งที่เหมาะสมตามรูปร่างของชิ้นงาน ซึ่งการควบคุมการไหลตัวของวัสดุนี้มีอิทธิพลโดยตรงต่อขนาดความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) และความเครียดบริเวณผนังของชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าการลากขึ้นรูปลึกโลหะแผ่นเป็นกระบวนการผลิตชิ้นงานที่อาศัยการเสียรูปอย่างถาวรของเนื้อวัสดุโดยการใส่ภาระภายนอกกระทำต่อชิ้นงาน จนความเค้นภายในเนื้อวัสดุมีค่าเกินความแข็งแรงคราก (Yield Strength) ซึ่งทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร จนได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างตามความต้องการ

จากการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปลิกซ์งานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร ต่อสมบัติการขึ้นรูป และการศึกษาความสามารถในการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นของดรอร์บีค พบว่าการเกิดปัญหาความไม่สมดุลของความเครียดบนผนังชิ้นงานเป็นปัญหาที่สำคัญในกระบวนการ ลากขึ้นรูปลิกซ์ ดังนั้นผู้ผลิตจำเป็นต้องอาศัยการทดสอบเพื่อหาขนาดของตัวแปรต่างๆ อาทิเช่น แรงกด ขึ้นรูป แรงกดยึดแผ่น ความเร็วในการขึ้นรูป และคุณสมบัติของวัสดุขึ้นรูป รวมทั้งรูปร่างของชุด อุปกรณ์ขึ้นรูปที่เกี่ยวข้อง ในการทดสอบหาค่าที่เหมาะสม โดยอาศัยการทดลองปรับเปลี่ยนค่าของตัวแปรต่างๆ จนได้ชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์ ซึ่งการกระทำดังกล่าวมา ส่งผลให้ผู้ผลิตเกิดความสูญเสียในหลายๆด้าน เช่น เวลา แรงงาน วัสดุคืบ และค่าใช้จ่ายต่างๆที่จะใช้ในการผลิตจริง

จากปัญหาดังกล่าวมาแล้ว โครงการวิจัยนี้มุ่งทำการศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปร ในกระบวนการลากขึ้นรูปลิกซ์ที่มีผลต่อความหนาของผนังชิ้นงานที่มีขนาดไม่สมมาตรกัน โดยการ ทดสอบการขึ้นรูปลิกซ์ชิ้นงานไม่สมมาตร จากวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น SPCC-SD ความหนา 1 มม. โดยมีปัจจัยที่นำมาศึกษาได้แก่ รูปร่างของแผ่นตัดเปล่า แรงกดชิ้นงานและชนิดของดรอร์บีค

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของ แผ่นตัดเปล่า แรงกด และชนิดของดรอร์บีค ต่อความหนาของผนัง ชิ้นงานที่ไม่สมมาตรกัน

1.2.2 เพื่อนำเสนอแนวทางการกำหนดค่าตัวแปรการลากขึ้นรูปขึ้นรูปลิกซ์งานที่ไม่สมมาตรกัน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วัสดุชิ้นงานแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCC-SD ขนาด 4 x 8 ฟุต ความหนา 1.0 มม. ตัดขนาดตาม รูปร่างของแผ่นตัดเปล่า แล้วทำการลากขึ้นรูปลิกซ์ด้วยรูปทรงที่ไม่สมมาตร

1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของการตัดแผ่นเปล่า

- 1) แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 140x200 มม.
- 2) แบบสี่เหลี่ยมชนิดบากมุมทั้งสี่ด้านมุม 45 องศา ตัดขนาดความยาว 35 มม. จากมุม
- 3) แบบทรงตามรูปร่างของการขึ้นรูปซึ่งได้จากการประมาณค่า

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของแรงที่แผ่นกดชิ้นงานเทียบกับความหนาของผนังชิ้นงาน

แรงกดชิ้นงาน ( Blank Holding Force ) ใช้เท่ากับ 20 % , 40 % , 60 % และ 80 % ของแรงที่ใช้เพื่อขึ้นรูปลิกซ์ ( Drawing Force )

#### 1.3.4 ศึกษาอิทธิพลของชนิดของครอว์บีดชนิดเดี่ยว

- 1) ชนิดที่ไม่ใช้ครอว์บีด
- 2) ชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.0 มม.

### 1.4 ตัวแปรที่ศึกษาของการขึ้นรูปลึก

1.4.1 ชนิดของแผ่นตัดเปล่า (Blank Geometry)

1.4.2 แรงกดของแผ่นตัดเปล่า (Blank Holder Force)

1.4.3 ชนิดของครอว์บีด (Draw Bead)

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถทราบหลักการคำนวณขนาดของแผ่นตัดเปล่า (Blank Geometry) โดยการประมาณค่าที่เหมาะสมในงานลากขึ้นรูปลึกแบบนี้

1.5.2 สามารถเลือกใช้แรงที่เหมาะสมในการกดชิ้นงานของแผ่นกด (Blank Holder Force)

1.5.3 สามารถวิเคราะห์จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวในการขึ้นรูปกับเหล็กรีดเย็นเกรด SPCC-SD

1.5.4 สามารถเลือกใช้ชนิดของครอว์บีด (Draw Bead) ได้อย่างเหมาะสม

1.5.5 สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาไปทำการประยุกต์ใช้กับชิ้นงานรูปทรงอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันการขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นมีการใช้กันอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรมเช่น การผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องบิน เครื่องใช้ในครัวเรือน เป็นต้น และกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นก็มีอยู่ด้วยกันหลากหลายวิธีตามความเหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้ แต่ที่นิยมใช้กันเป็นอย่างมากก็คือ การลากขึ้นรูป (Drawing) ซึ่งเป็นการขึ้นรูปขึ้นงานให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการโดยไม่เกิดตะเข็บ โดยจะใช้เครื่องมือการขึ้นรูปที่เรียกว่าแม่พิมพ์ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ พันช์ (Punch) และ คาย (Die) จากนั้นพันช์จะเคลื่อนที่พาโลหะแผ่นไปสัมผัสกับคายนําให้โลหะแผ่นมีรูปร่างตามแม่พิมพ์

#### 2.1 นิยามศัพท์ที่สำคัญ

2.1.1 การขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) คือ การแปรสภาพโลหะจากแผ่นเรียบให้เป็นภาชนะรูปทรงต่างๆ โดยที่ความหนาของโลหะไม่เปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนสภาพนี้ทำได้โดยการกดโลหะแผ่นเรียบด้วยพันช์ให้เข้าไปในช่องว่างของคายนําซึ่งรูปแบบอาจเป็นรูปทรงกระบอก รูปกล่องที่มีด้านตรงเอียง และเป็นเส้นโค้ง เป็นต้น [1]

2.1.2 แรงกดขึ้นงาน (Punch Force) คือ ขนาดของแรงกดของแผ่นกดขึ้นงาน (Blank Holder) ที่พอเหมาะสำหรับป้องกันไม่ให้ชิ้นงานเกิดรอยขุ่น หรือชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาด เช่น ถ้าแรงกดมากเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาด หรือถ้าแรงกดน้อยเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดรอยขุ่นได้ [1]

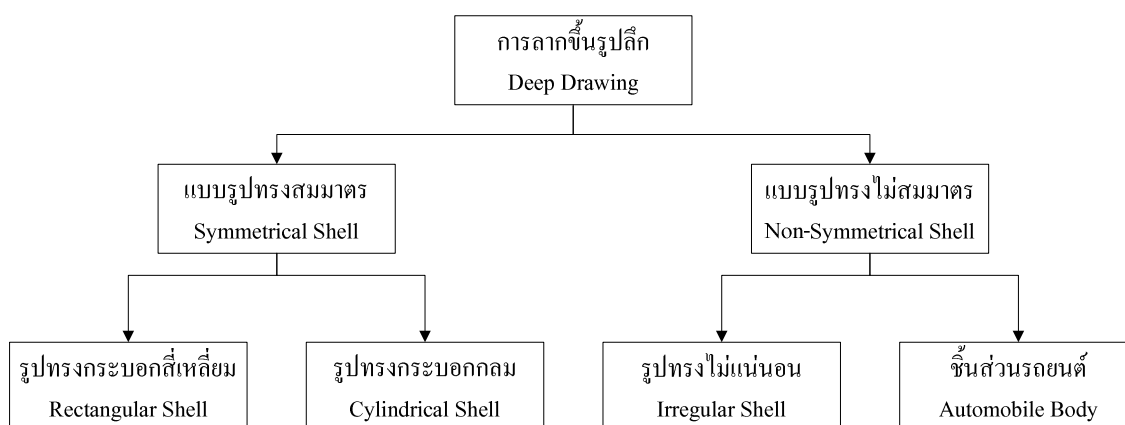
2.1.3 แผ่นตัดเปล่า (Blank Geometry) คือ ขนาดและรูปร่างของแผ่นขึ้นงานก่อนทำการขึ้นรูป ต้องมีการหาขนาดก่อน เพื่อที่จะทราบว่าเมื่อขึ้นรูปเสร็จแล้ว จะได้ขนาดของชิ้นงานที่มีความลึกตามต้องการ [1]

2.1.4 ครอว์บีด (Draw Bead) มีหน้าที่ในการควบคุมการไหลตัวของโลหะที่จะเข้าไปในคายนํา และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยขุ่น (Wrinkle) ในขณะขึ้นรูป นอกจากนี้ยังช่วยลดแรงกดของแบบลงค์ไฮดรอลิกตลอดจนทำหน้าที่เหมือนกับเป็นตัวรีดโลหะให้ความเครียด (Strain) ลดลง เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะ [2]

2.1.5 การหล่อลื่น (Lubrication) การขึ้นรูปจะประสบความสำเร็จหรือไม่ขึ้นอยู่กับการหล่อลื่นด้วยหากเลือกใช้ประเภทของสารหล่อลื่นไม่ถูกต้องแล้ว การขึ้นรูปก็จะไม่สำเร็จผลได้ [3]

## 2.2 ทฤษฎีที่สำคัญของการขึ้นรูปลึก (Deep Drawing)

การขึ้นรูปโลหะ (Metal Forming) เป็นรูปแบบหนึ่งในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม โดยเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานเริ่มต้นให้มีรูปร่างสุดท้ายตามความต้องการ โดยที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมวลและพันธะภายในเนื้อวัสดุซึ่งชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปมักจะมีรูปร่างที่ซับซ้อนกว่ารูปร่างเริ่มต้น และในการขึ้นรูปโลหะนั้นก็ยังแบ่งออกได้หลายประเภทตามลักษณะของการผลิตซึ่งการขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) ก็เป็นส่วนหนึ่งของการขึ้นรูปโลหะด้วย 2 กลุ่มใหญ่ [4] คือ การขึ้นรูปแบบรูปทรงสมมาตร (Symmetrical Shell) และการขึ้นรูปแบบรูปทรงไม่สมมาตร (Non-Symmetrical Shell)



ภาพที่ 2.1 การแบ่งประเภทกลุ่มของการขึ้นรูป [4]

### 1) การขึ้นรูปแบบรูปทรงสมมาตร (Symmetrical Shell)

การขึ้นรูปลึกเป็นกระบวนการหนึ่งในการขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งจะประกอบด้วยคายน (Die) พินช์ (Punch) และแผ่นกดยึดชิ้นงาน (Blank Holder) การขึ้นรูปลึกจะใช้พินช์กดลงบนแผ่นเปล่าแบบราบขณะที่มีแผ่นกดยึดชิ้นงานกดยึดก่อนจะมีการเปลี่ยนรูปถาวร [3] จะไปยังกดแผ่นตัดเปล่าเพื่อควบคุมให้ไหลเข้าไปในคายนหน้าที่ของแผ่นจะกดยึดชิ้นงานก็คือ ป้องกันการย่นที่ขอบชิ้นงาน เพื่อให้ได้ชิ้นงานทรงกระบอกกลมดังภาพที่ 2.2 และการขึ้นรูปชิ้นงานรูปทรงกระบอกสี่เหลี่ยมดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.2 การขึ้นรูปลึงด้วยทรงกระบอก

ในการขึ้นรูปลึงรูปทรงแบบสมมาตรทั้งแบบทรงกระบอกกลมและแบบทรงกระบอกสี่เหลี่ยม นั้น จะเห็นได้ว่าจะสามารถควบคุมในการทำให้เกิดความเครียด (Strain) เพื่อเกิดความสมดุล จะเป็นไปได้ง่าย ด้วยรูปทรงที่ไม่มีมุมหรือความซับซ้อนของชิ้นงาน



ภาพที่ 2.3 ชิ้นงานขึ้นรูปทรงกระบอกสี่เหลี่ยม

## 2) การขึ้นรูปแบบรูปทรงไม่สมมาตร (Non-Symmetrical Shell)

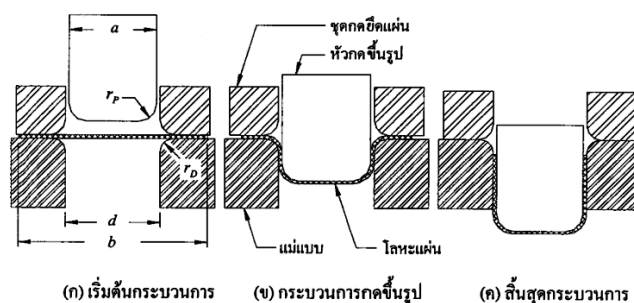
จากการศึกษาในรูปแบบของการลากขึ้นรูปลึง (Deep Drawing) ในรูปทรงต่างๆจึงเป็นแนวทางให้การศึกษาการลากขึ้นรูปลึงรูปทรงแบบไม่สมมาตร (Non-Symmetrical Shell) [4] ซึ่งจะทำให้เกิดจุดบกพร่องตามพื้นที่ที่ได้รับแรงเค้น (Stress) ที่แตกต่างกัน จึงเป็นไปได้ยากในการที่จะทำให้เกิดความสมดุลของความเครียดด้วยสาเหตุของปัจจัยในตัวแปรมีมากเกินไปจึงนำไปสู่การเกิดความเสียหายในชิ้นงานเช่น เกิดการฉีกขาด เกิดรอยย่น เป็นต้น



ภาพที่ 2.4 ตัวอย่างของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบไม่สมมาตรและพื้นที่เกิดความบกพร่อง [8]

### 2.2.1 พื้นฐานการขึ้นรูป

การขึ้นรูปลึกโลหะเป็นกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้หัวกดขึ้นรูปกดลงบนโลหะแผ่นที่ถูกกดจากชุดกดยึดแผ่นให้ไหลเข้าไปในแม่แบบเพื่อให้เกิดชิ้นงานที่มีรูปร่างตามความต้องการซึ่งในทางอุดมคติแล้วโลหะแผ่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแต่ในทางปฏิบัติความหนาก็จะมีความเปลี่ยนแปลงไปบ้างในบางตำแหน่ง ในกระบวนการขึ้นรูปลึกประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก 3 ส่วนคือ หัวกดขึ้นรูป (Punch) แม่แบบ (Die) และชุดกดยึดแผ่น (Blank Holder) ดังแสดงในภาพที่ 2.5



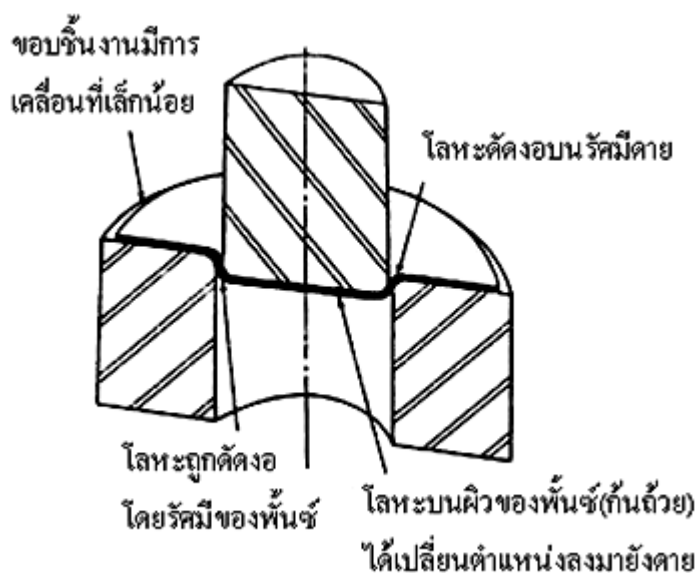
ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนในกระบวนการขึ้นรูปลึกอย่างง่าย [1]

### 2.2.2 ขั้นตอนในกระบวนการขึ้นรูปลึก

จากภาพที่ 2.5 ได้แสดงให้เห็นขบวนการขึ้นรูปลึกอย่างง่ายโดยจะเริ่มจากโลหะแผ่นติดตั้งอยู่บนแม่แบบและถูกจับยึดไว้โดยชุดกดยึดแผ่น หลังจากนั้นหัวกดขึ้นรูปจะเคลื่อนที่เข้าไปในแม่แบบพร้อมกับกดให้โลหะแผ่นให้ไหลตามเข้าไปในแม่แบบด้วย เมื่อหัวกดขึ้นรูปเคลื่อนที่ถึง

ตำแหน่งสุดท้ายก็จะได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างตามความต้องการ ซึ่งขณะที่กระบวนการขึ้นรูปลึกดำเนินไปนั้นจะมีสภาวะที่เกิดขึ้นกับโลหะแผ่นคือ

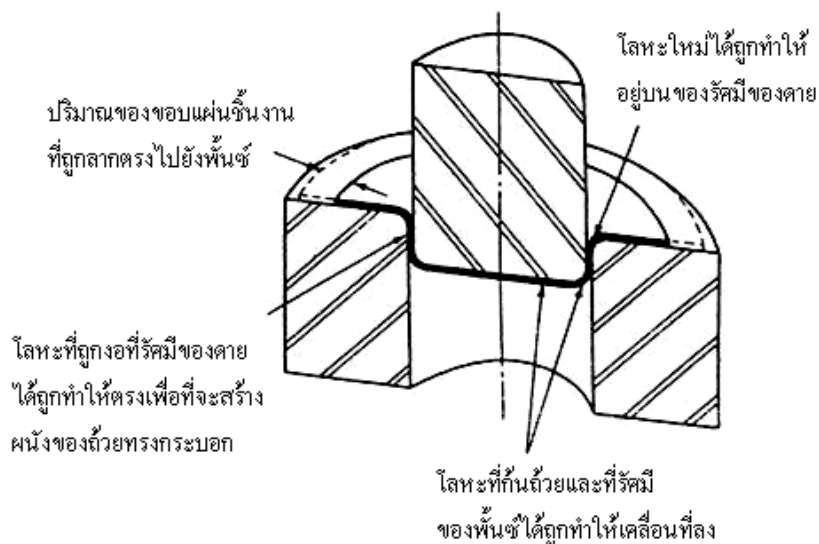
1) การคดงอ (Bending) เมื่อแรงกระทำส่งผ่านให้พื้นผิวเคลื่อนที่ลงในช่องว่างคายเพื่อทำการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น ช่วงแรกโลหะแผ่นจะเริ่มเกิดการคดงอบนรัศมีพื้นผิว ในขณะที่เดียวกันโลหะบริเวณใกล้เคียงก็就会被คดงอบนรัศมีของคายส่วนปลายของพื้นผิวจะพาโลหะแผ่นเคลื่อนที่ลงทำให้เกิดเป็นก้นถ้วย โลหะบริเวณก้นถ้วยจะไม่เกิดการแข็งตัวระหว่างถูกแปรรูปและโลหะบริเวณนี้แทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเปลี่ยนแปลงความหนาดังแสดงในภาพที่ 2.6 ขอบของชิ้นงานจะเคลื่อนที่เข้าหาพื้นผิวเล็กน้อย ในช่วงเริ่มต้นนี้แรงที่ทำให้เกิดการคดงอเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงที่ทำให้เกิดการอัดตัวของโลหะ [1]



ภาพที่ 2.6 การคดงอที่จุดเริ่มต้นของขบวนการ [1]

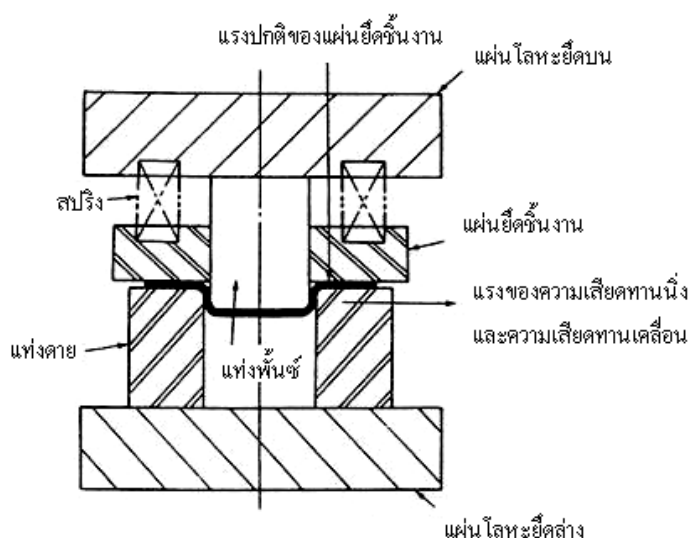
2) การทำให้ตรง (Straightening) การพิจารณาในลำดับต่อไปจะพิจารณาเมื่อพื้นผิวได้เคลื่อนที่ลงมาเล็กน้อยที่ขั้นตอนนี้ก้นถ้วยจะถูกทำให้เคลื่อนที่ลงมาด้วยในขณะที่มีการเคลื่อนที่ลงมาของก้นถ้วยนั้นโลหะก็ยังคงอยู่บนรัศมีของพื้นผิว และได้มีเหตุการณ์ใหม่เกิดขึ้นมาคือโลหะที่ถูกคดงอบนรัศมีคายมาแล้วจะถูกทำให้ตรงอีกครั้ง และโลหะก็จะถูกคดงอบนรัศมีคายอีกครั้งนอกจากนั้นยังมีปรากฏการณ์ที่ผิดปกติเกิดขึ้นระหว่างการลากขึ้นรูปคือ โลหะที่งอบนรัศมีคายมาแล้วและต่อมาจะถูก

ทำให้ตรงจนกลายเป็นผนังของถ้วยทรงกระบอกเพราะโลหะส่วนนี้ได้ถูกทำให้เกิดการแข็งตัวโดยการดัดงอมาแล้วดังนั้นจึงต้องใช้แรงมากขึ้นเพื่อให้โลหะส่วนที่งออยู่นั้นกลับตรงอย่างเดิม [1]



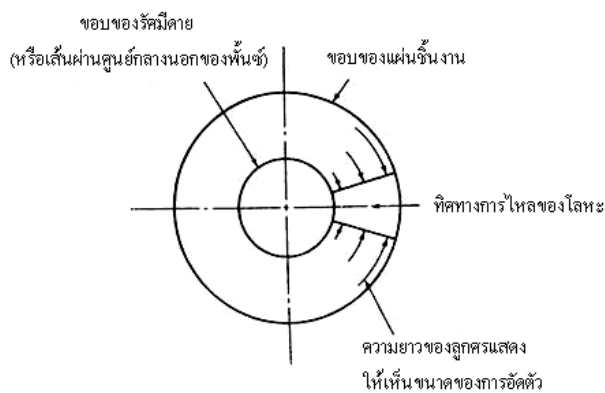
ภาพที่ 2.7 ลักษณะอาการเริ่มต้นของการลากขึ้นรูปโดยการทำให้ตรง [1]

3) ความเสียดทาน (Friction) ที่ขั้นตอนเช่นเดียวกับการทำให้ตรง ขอบของแผ่นชิ้นงานได้ถูกดึงตรงไปยังพื้นซ์เป็นปริมาณค่อนข้างมาก ขบวนการลากขึ้นรูปจึงได้ชื่อจากการกระทำเช่นนี้คือการดึง (Pulling) หรือการลาก (Drawing) โลหะตรงไปยังพื้นซ์ ในขั้นตอนนี้จะมีเงื่อนไขหลายๆ อย่างที่ต้องพิจารณาคือ สิ่งแรกคือความเสียดทานนิ่ง (Static Friction) ที่เกิดระหว่างแผ่นชิ้นงานและผิวหน้าของคายจะต้องถูกเอาชนะ ตามปกติในคายสำหรับการลากขึ้นรูปจะมี แผ่นยึดชิ้นงานหรือแหวนโลหะอยู่รอบๆ ซึ่งยอมทำให้เกิดความเสียดทานระหว่างแผ่นยึดชิ้นงานและ พื้นผิวของแผ่นยึดชิ้นงานด้วยเหมือนกัน แผ่นยึดชิ้นงานคือแผ่น โลหะที่ได้กดชิ้นงาน โดยได้รับกำลังมาจาก สปริง ท่อลม ท่อน้ำมัน หรือจาก แรมของเครื่องปั๊มโลหะ แรงปกติ (Normal Force) ได้ถูกกระทำขึ้นที่แผ่นยึดชิ้นงานบวกกับความสำคัญบางอย่างเพื่อทำให้เกิดแรงของความเสียดทานนิ่ง ดังแสดงในภาพที่ 2.6 เมื่อต้องการให้แผ่นชิ้นงานเคลื่อนที่ลงในคาย จำเป็นต้องใช้แรงดึงให้มากกว่าที่จะเอาชนะความเสียดทานนิ่งที่เกิดขึ้น ในขณะที่เดียวกันยังคงต้องใช้แรงต่อไปเพื่อที่จะเอาชนะแรงเสียดทานเคลื่อน (Dynamic Friction) ด้วยแรงที่ต้องการเอาชนะความเสียดทานเคลื่อนที่นี้จะน้อยกว่าแรงที่ต้องการใช้เพื่อเอาชนะการเกิดความเสียดทานนิ่ง อย่างไรก็ตามแรงที่แผ่นยึดชิ้นงานจะต้องมีขนาดที่ไม่มากเกินไปที่ทำให้โลหะไม่สามารถไหลตัวได้ ตามปกติจะใช้สารหล่อลื่น (Lubricant) เป็นตัวช่วยลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น [1]

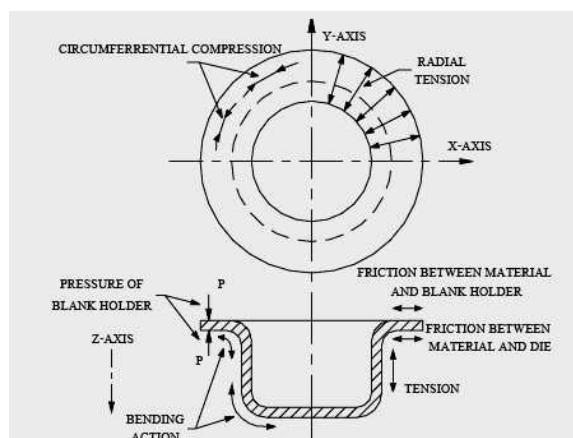


ภาพที่ 2.8 แรงที่ใช้เพื่อเอาชนะความเสียดทาน [1]

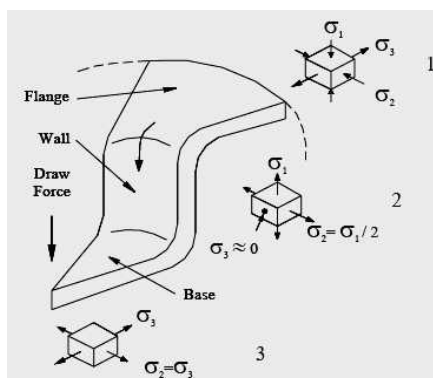
4) การอัด (Compression) เงื่อนไขอย่างหนึ่งที่ใช้ในการดึงขอบของแผ่นชิ้นงานคือ โลหะแผ่นต้องถูกอัด ขณะที่ขอบของแผ่นชิ้นงานได้ถูกทำให้เคลื่อนที่ลงภายในค้ำยัน เส้นรอบวง หรือเส้นรอบรูปของมันก็จะลดขนาดลงเช่นเดียวกัน โลหะส่วนที่อยู่บนขอบของแผ่นชิ้นงานและรัศมีค้ำยันได้ถูกบีบให้เป็นขนาดต่างๆ โลหะที่อยู่ใกล้กับรัศมีของค้ำยันจะถูกบีบน้อยมาก ปริมาณของการบีบจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อโลหะเคลื่อนที่เข้าใกล้กับขอบนอกของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 2.8 โลหะจะถูกบีบอัดเพื่อแสดงว่ามันได้มีการเคลื่อนที่ภายในค้ำยันและมีการไหลตัวบนรัศมีของค้ำยัน การถูกอัดสำหรับโลหะที่บางตามปกติเป็นสาเหตุทำให้เกิดรอยย่นขึ้นระหว่างการลากขึ้นรูป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มแผ่นยึดชิ้นงานเข้าไปที่ค้ำยันเพื่อป้องกันการเกิดรอยย่น สำหรับโลหะที่หนาบางอย่างนั้นสามารถที่จะลากขึ้นรูปได้โดยไม่มีแนวโน้มที่จะเกิดรอยย่น [1]



ภาพที่ 2.9 การบีบหรืออัดตัวของโลหะระหว่างการลากขึ้นรูป [1]



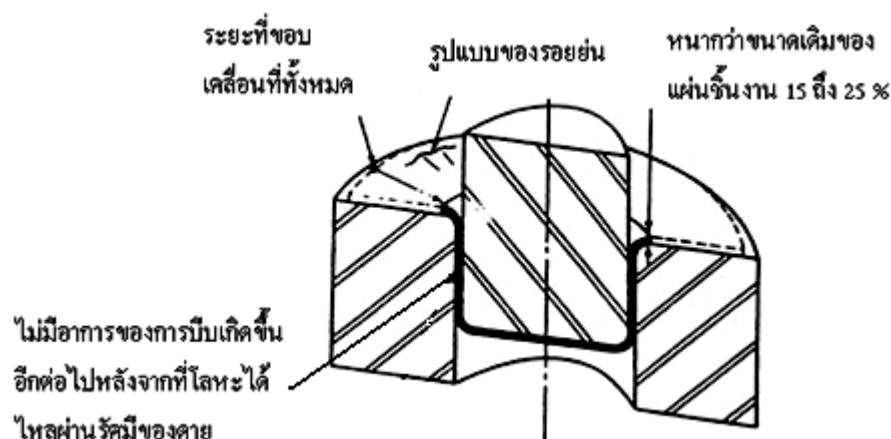
ภาพที่ 2.10 ลักษณะของแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปลึก [3]



ภาพที่ 2.11 สภาวะความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างการลากขึ้นรูปลึก [3]

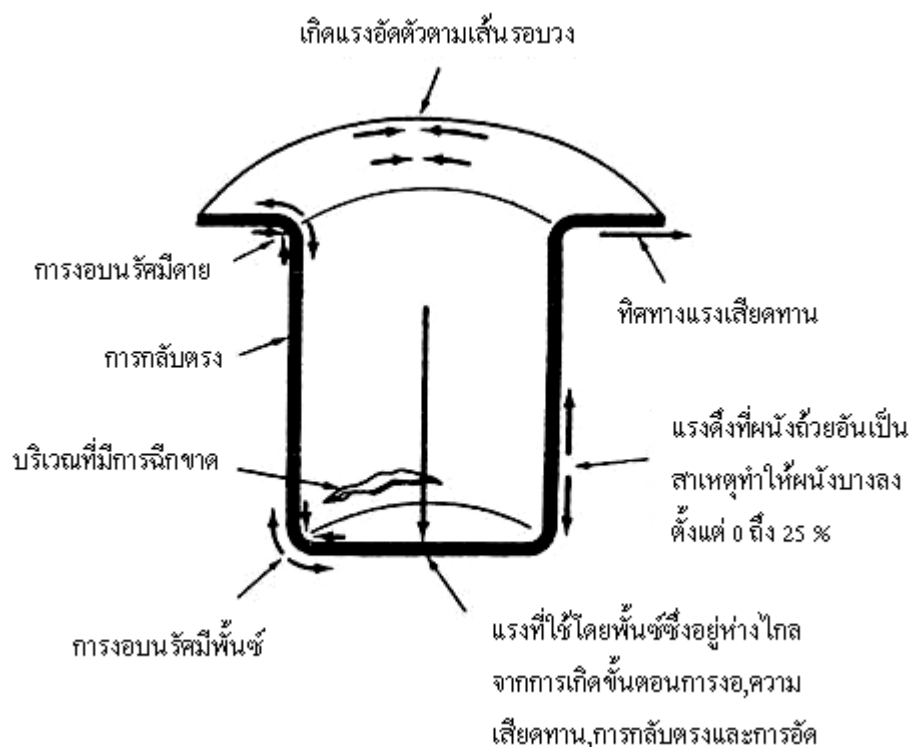
เมื่อมีการเคลื่อนที่ต่อไปของพื้นที่ ผลที่เกิดขึ้นตำแหน่งของการลากขึ้นรูปที่ปีกของถ้วย ขณะที่การบีบได้เกิดมากขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้ปีกและส่วนบนของผนังถ้วย มีความหนามากกว่าความหนาเดิมของแผ่นขึ้นงาน สำหรับขั้นตอนสุดท้ายของการลากขึ้นรูปได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.12 ภาระของการถูกอัดจะหยุดลงหลังจากที่โลหะได้ไหลผ่านรัศมีของคายนไปแล้ว ภายหลังจากการทำให้โลหะตรง โลหะจะถูกทำให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน และจะถูกลากลงไปในคายนได้ง่ายขึ้น วัตถุประสงค์อันแรกของการลากขึ้นรูป คือการที่โลหะถูกอัดตัวเพื่อทำให้ การลากขึ้นรูปด้วยได้ลึกลง โดยไม่มีรอยยับปรากฏขึ้น





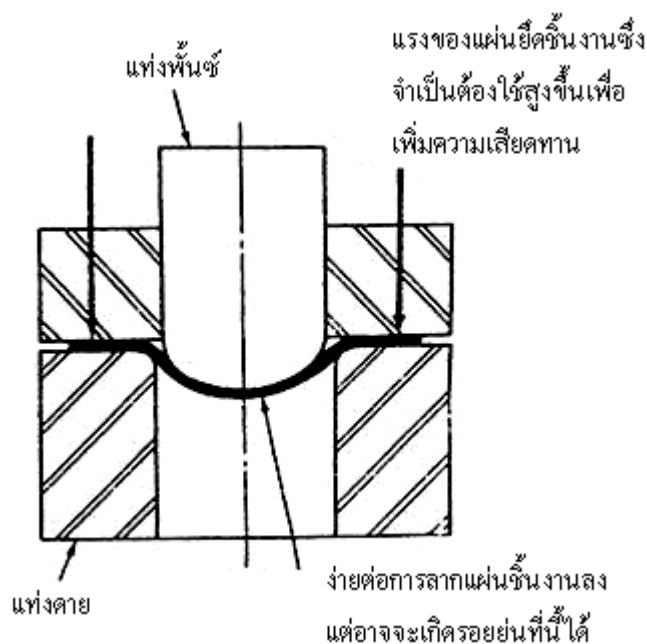
ภาพที่ 2.12 ขั้นตอนสุดท้ายของการลากขึ้นรูป [1]

5) การดึง (Tension) การทำการลากขึ้นรูปทั้งหมดได้ถูกทำโดยการใช้แรงที่พื้นผิวหลักลงบนกันด้วยที่แบน ตำแหน่งของแรงที่พื้นผิวใช้บนแผ่นชิ้นงานเริ่มจะอยู่ห่างไกลจากตำแหน่งที่โลหะเกิด การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเสียดทาน ขณะที่ถ้วยถูกทำให้ลึกลงในตำแหน่งที่กล่าวถึงนี้จะอยู่ห่างมากยิ่งขึ้นตามลำดับ ผนังถ้วยจึงได้ทำหน้าที่ส่งแรงที่พื้นผิวไปยังพื้นที่ถูกงอโดยทำให้ตรง เกิดความเสียดทานและถูกอัด ผลที่เกิดขึ้นก็คือจะเกิดการดึงที่สูงขึ้นที่ผนังของถ้วย ดังแสดงในภาพที่ 2.13 ผนังถ้วยที่อยู่ใกล้กับรัศมีของพื้นผิวจะเกิดความเค้นสูงสุดและจะมีขนาดบางกว่าโลหะเดิมทำให้ มีการฉีกขาดที่อาจจะเกิดขึ้นบ่อยที่บริเวณนี้ ดังนั้นการลากขึ้นรูปจึงเกี่ยวข้องกับการแปรเปลี่ยน ของแรงดึงที่สูง หรือการยืดที่มากขึ้นซึ่งเป็นผลจากการออกแบบคายที่ใช้ ถ้าขอบของแผ่นชิ้นงาน ได้ถูกผลักเขาหาพื้นชดอย (Floating Punch) ในลักษณะแบบ เดียวกันตลอด การดึงจะไม่เกิดขึ้นระหว่างการลากขึ้นรูป ของเหลวที่มีความดันสูงได้ถูกใช้เพื่อผลัก ขอบของแผ่นชิ้นงานเข้าไปในคาย [1]



ภาพที่ 2.13 ผลที่เกิดขึ้นจากแรงดึงที่ผนังของถ้วย [1]

6) การยืดขึ้นรูปถ้วย (Stretch Forming) ขั้นตอนของการลากขึ้นรูปถ้วยอย่างอื่น ๆ ควรที่จะต้องรู้ด้วย เมื่อต้องการจะทำกันถ้วยในลักษณะรูปแบบอื่นๆ นอกเหนือจากกันถ้วยแบบการยืดขึ้นรูปจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง รูปสามัญของกันถ้วยที่นิยมใช้กันก็คือ ถ้วยกันโค้ง ดังแสดงในภาพที่ 2.14 ตำแหน่งเริ่มแรกของการลากขึ้นรูปถ้วยกันโค้งนั้น กันถ้วยโค้งจะต้องถูกขึ้นรูปมาก่อน โดยการยืดโลหะแผ่นเหนือขอบของพื้นที่ ในการยืดขึ้นรูปถ้วยนั้นต้องใช้แรงของแผ่นยืดขึ้นงาน และแรงเสียดทานที่สูงมากขึ้น รูปแบบของการยืดกันถ้วยโค้งจะเสร็จก่อนที่แผ่นขึ้นงานจะถูกดึงลง ถ้าแผ่นขึ้นงานได้ถูกดึงลงในลักษณะอิสระ มวลของรอยยับจะปรากฏขึ้นที่ส่วนโค้งของกันถ้วย แรงที่ใช้จะสูงมากขึ้นอย่างผิดปกติบนแผ่นขึ้นงานจะเป็นสิ่งที่จำกัดความลึกของการลากขึ้นรูปถ้วยแบบนี้ บริเวณของพื้นที่โลหะที่บางที่สุด และมีโอกาสจะฉีกขาดมากที่สุดจะเกิดบริเวณส่วนโค้งของกัน ถ้วย การลากขึ้นรูปขึ้นงานที่มีรูปร่างแปลกอย่างอื่น ๆ นั้นจะเป็นขบวนการที่เกิดขึ้นจากการผสม ระหว่างการทำการยืดขึ้นรูป และการลากขึ้นรูปถ้วย [1]



ภาพที่ 2.14 การยัดชิ้นรูปด้วยก้นโค้ง ณ จุดเริ่มต้นของการลากชิ้นรูป [1]

### 2.2.3 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการขึ้นรูปลึก

1) แรงในการดึงขึ้นรูป (Punch Force) แรงที่ต้องใช้ในการขึ้นรูปจะแปรผันไปตามระยะชักของพินช์ สามารถจะกำหนดได้ 2 วิธี คือ การกำหนดสมการจากทฤษฎีการไหลตัวของโลหะ หรือใช้สมการที่ได้จากประสบการณ์จากการทดลอง ซึ่งในทางปฏิบัติส่วนใหญ่การออกแบบแม่พิมพ์จะต้องทราบค่าแรงสูงสุดในการดึงขึ้นรูป จากการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับแรงในการดึงขึ้นรูป สำหรับการลากชิ้นรูปด้วยทรงกระบอก แรงขึ้นรูปสูงสุดหาได้จากสมการที่ 2.1 และประยุกต์ใช้กับการดึงขึ้นรูปทรงที่ไม่สมมาตร [2] ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$F_d = \pi \times D_m \times S_0 \left[ 1.1 \frac{1.3 \times S_u}{\eta_{def}} \left[ \ln \frac{d_0}{d_1} - 0.25 \right] \right] \quad (2.1)$$

$$F_d = \frac{S_y + S_u}{2} \times L_r \times S_0 \quad (2.2)$$

โดยที่  $F_d$  คือ แรงขึ้นรูป (N)

$D_m$  คือ ค่าเฉลี่ยระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน

- $S_y$  คือ ความเค้นจุดคราก (N/mm<sup>2</sup>)  
 $S_u$  คือ ความเค้นสูงสุด (N/mm<sup>2</sup>)  
 $L_t$  คือ ความยาวรอบรูปทั้งหมด (mm)  
 $S_0$  คือ ความหนาของวัสดุ (mm)

2) แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blank Holding Force: BHF) ปีกของชิ้นงานที่ลากขึ้นรูป จะได้รับความเค้นแรงกด ซึ่งเกิดขึ้นในลักษณะตั้งฉากกับแนวรัศมีเป็นสาเหตุของการเกิดรอยร่น เนื่องจากการโค้งตัวของวัสดุรอยร่นนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยใช้แผ่นจับยึดชิ้นงานกด ซึ่งแรงดันของแผ่นจับยึดชิ้นงาน  $P_{BH}$  จะกดลงบนแผ่นของปีกชิ้นงานขณะทำการลากขึ้นรูป ถ้าพื้นที่สัมผัสของแผ่นจับยึดชิ้นงาน คือ  $A_{BH}$  ดังนั้นการคำนวณแรงกดที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงาน [2] หาได้จากสมการที่ 2.3

$$F_{BH} = A_{BH} \times P_{BH} \quad (2.3)$$

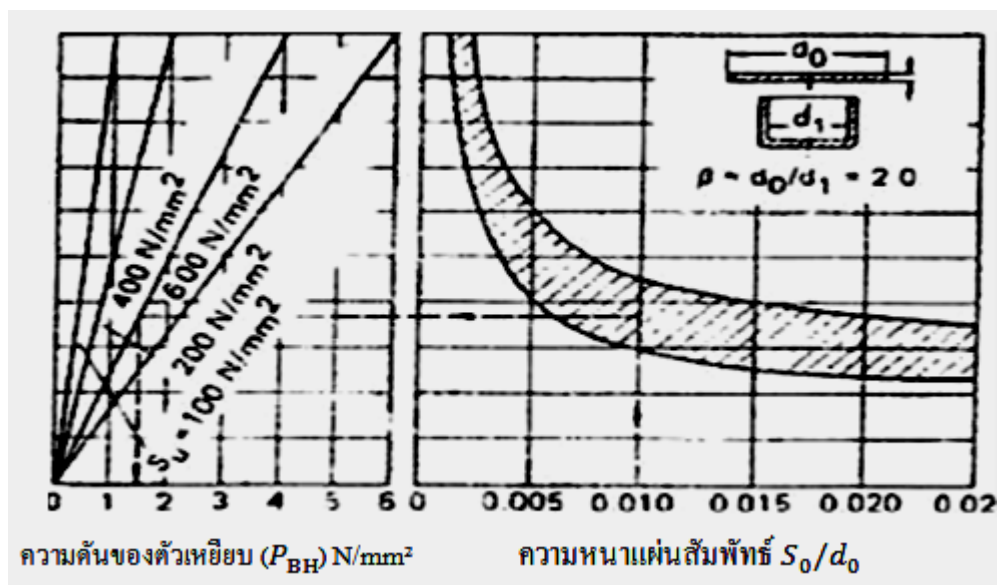
- โดยที่
- $F_{BH}$  คือ แรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน
  - $A_{BH}$  คือ พื้นที่สัมผัสของแผ่นจับยึดชิ้นงาน
  - $P_{BH}$  คือ  $F_{BH}$  แรงกดดันที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงาน

แรงกดที่ใช้ในการหลีกเลี่ยงรอยร่นนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุของแผ่นชิ้นงาน โดยจะสัมพันธ์กับความหนาและอัตราส่วนการขึ้นรูปของวัสดุ แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงานสามารถประมาณค่าได้โดยใช้สมการที่ 2.4 ในที่นี้ตัวประกอบค่า C มีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 3 เป็นการคำนวณหาค่าแรงกด โดยใช้อัตราส่วนการขึ้นรูป  $\beta = 2.0$  และใช้วัสดุที่มีค่าแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)  $S_u$  เท่ากับ 100 200 400 และ 600 N/mm<sup>2</sup> ถูกพล็อตขึ้นมาเป็นกราฟแสดง ดังแสดงในภาพที่ 2.15 โดยสัมพันธ์กับค่าความหนาของวัสดุ  $\frac{S_0}{d_0}$

$$P_{BH} = 10^{-3} \times C \times S_u \left[ (\beta - 1) + \frac{0.005 \times d_0}{S_0} \right] \quad (2.4)$$

- โดยที่
- $P_{BH}$  คือ แรงกดดันที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ต่ำสุด
  - $C$  คือ ค่าคงที่
  - $S_u$  คือ ความต้านแรงดึง

- $\beta$  คือ อัตราส่วนการขึ้นรูป
- $d_0$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นชิ้นงาน
- $d_1$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพันธ
- $S_0$  คือ ความหนาของชิ้นงาน



ภาพที่ 2.15 ค่าแรงดันของแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ต้องการในการลากขึ้นรูปครั้งแรก [2]

3) ระยะเพื่อช่องว่างของแม่พิมพ์ (Die Clearance) ในทางปฏิบัติเพื่อกำหนดระยะเพื่อช่องว่างของแม่พิมพ์มักจะกำหนด โดยรูปสมการที่ได้มาจากการทดลอง สมการเหล่านี้อนุญาตให้ใช้ได้แต่เพียงการดึงขึ้นรูปลึกลึกที่มีชิ้นงานเป็นรูปร่างกลม โดยไม่มีการรีดของเนื้องาน (Ironing)

$$U_D = S_0 + 0.07\sqrt{10 \times S_0} \quad \text{สำหรับแผ่นเหล็ก} \quad (2.5)$$

$$U_D = S_0 + 0.02\sqrt{10 \times S_0} \quad \text{สำหรับอลูมิเนียม} \quad (2.6)$$

$$U_D = S_0 + 0.04\sqrt{10 \times S_0} \quad \text{สำหรับโลหะที่ไม่ใช่เหล็กอื่น} \quad (2.7)$$

$$U_D = S_0 + 0.02\sqrt{10 \times S_0} \quad \text{สำหรับโลหะผสมอลูมิเนียม} \quad (2.8)$$

เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงต้านที่ผิวของแม่พิมพ์ระยะเพื่อช่องว่างของแม่พิมพ์ (Die Clearance) ในแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangle Cup Drawing) ดังนั้นช่องระหว่างพื้นซ์ กับ คาย จะต้องมากกว่าความหนาของโลหะซึ่งส่วนที่มากกว่านี้มีค่าประมาณ 7-20% ของความหนาชิ้นงานตรงส่วนมุมทั้ง 4 ด้านจะต้องมีระยะเพื่อช่องว่าง (Clearance) มากส่วนทางด้านตรงนั้นระยะเพื่อช่องว่างจะมีค่าน้อยโดย [2]

$$C = t \text{ (%ความเผื่อ)} \quad (2.9)$$

$$\text{Die size} = D \text{ work} \quad (2.10)$$

$$\text{Punch size} = D \text{ work} - (2t+2c) \quad (2.11)$$

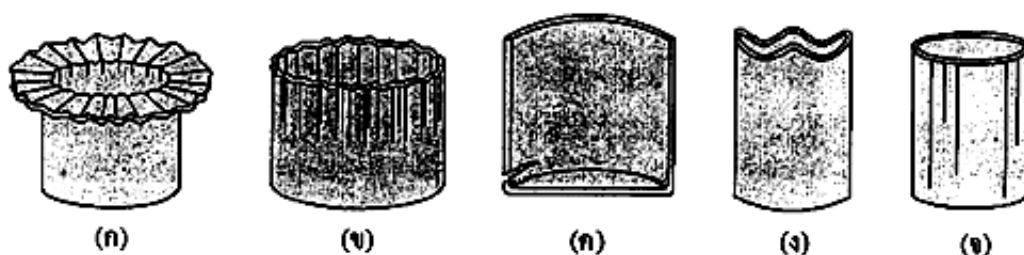
ตารางที่ 2.1 ค่าพิคัดความเผื่อสำหรับงานลากขึ้นรูป [8]

Thickness, 1 (in.)	First Draw (%)	Second Draw (%)
Up to 0.015	7-9	8-10
0.016 - 0.050	8-10	9-12
0.051 - 0.125	10-12	12-14
Over 0.025	12-14	15-20

จะเห็นว่าเมื่อความหนาของแผ่นตัดเปล่า (Blank) เพิ่มขึ้นระยะเพื่อช่องว่างจะเพิ่มขึ้นด้วย และสำหรับการขึ้นรูปครั้งต่อไป ระยะเพื่อช่องว่าง (Clearance) ก็ต้องเพิ่มขึ้นอีก

#### 2.2.4 ปัญหาในการขึ้นรูป

ปัญหาสำคัญประการหนึ่ง ที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปลึกก็คือความไม่สมบูรณ์หรือเกิดความเสียหายบนชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 2.16 เป็นตัวอย่างความเสียหายในชิ้นงานขึ้นรูปลึก คือ รอยย่นที่ปีก รอยย่นที่ผนัง ชิ้นงานฉีกขาด เกิดรอยดิ่ง และผิวเสีย ตามลำดับ ซึ่งปัญหาเหล่านี้้อาจเกิดเพียงกรณีเดียวหรือเกิดรวมกันก็ได้ โดยความเสียหายต่างๆสามารถยกตัวอย่างได้ดังนี้



ภาพที่ 2.16 ตัวอย่างการเกิดความเสียหายบนชิ้นงานขึ้นรูปลึก [3]

1) การเกิดรอยย่น (Wrinkling) ขณะที่โลหะแผ่นถูกกดลึกลงไปในแม่แบบจะพบว่าเส้นรอบรูปของโลหะแผ่นที่บริเวณปีกของชิ้นงานจะลดลงทำให้เกิดความเค้นกดขึ้นในเนื้อวัสดุในกรณีที่โลหะแผ่นมีความหนาไม่เพียงพอความเค้นกดนี้จะมีค่าสูงมาก ทำให้เนื้อวัสดุจะบีบเข้าหากันจนเกิดเป็นรอยย่น การแก้ปัญหาการเกิดรอยย่นสามารถกระทำได้โดยใช้ชุดกดยึดแผ่นออกแรงกดตั้งฉากกับบริเวณปีกของชิ้นงานไว้เพื่อให้โลหะแผ่นแนบติดกับแม่แบบตลอดกระบวนการขึ้นรูปลึก แต่แรงที่ใช้ยึดแผ่นกดนี้จะต้องไม่สูงเกินไปมิฉะนั้นจะทำให้โลหะแผ่นฉีกขาดได้ การแก้ปัญห่อีกวิธีหนึ่งคือการขึ้นรูปซ้ำ (Redrawing) โดยการขึ้นรูปแต่ละครั้งจะค่อยๆ ลดขนาดความกว้างและเพิ่มความลึกของชิ้นงานจนได้รูปร่างชิ้นงานสุดท้ายตามความต้องการ

2) การเกิดรอยคอด (Necking) เมื่อหัวกดขึ้นรูปกดโลหะแผ่นให้ไหลเข้าไปในแม่แบบแล้วโลหะแผ่นในบริเวณส่วนล่างของชิ้นงานจะทำหน้าที่ดึงโลหะแผ่นบริเวณปีกของชิ้นงานให้ไหลตามเข้ามาในแม่แบบด้วย เมื่อพิจารณาผลจากแรงเสียดทานและแรงดึงเพื่อทำให้จะพบว่าโลหะแผ่นในส่วนที่เป็นผนังของชิ้นงานจะได้รับแรงดึงค่อนข้างสูงโดยเฉพาะส่วนที่ต่อจากส่วนโค้งของหัวกดขึ้นรูปเนื้อวัสดุในบริเวณนี้เกิดความเค้นดึงสูงสุดซึ่งจะส่งผลให้ความเครียดทั้งในทิศทางความหนาและความกว้างของแผ่นมีค่ามากขึ้นแต่เนื่องจากชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นกว้าง ความเครียดส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นในทิศทางของความหนาทำให้บริเวณนี้เริ่มมีความหนาลดลง ซึ่งเมื่อสังเกตที่ผิวของชิ้นงานจะพบว่าที่บริเวณดังกล่าวนี้มีลักษณะเป็นรอยคอดเนื่องจากการที่มีความหนาน้อยกว่าในบริเวณอื่น หากการขึ้นรูปลึกยังดำเนินการต่อไปความเครียดในทิศทางความหนาก็จะเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะทำให้ความหนาลดลงเรื่อยๆ จนสุดท้ายเนื้อวัสดุในบริเวณนี้จะขาดออกจากกันเกิดเป็นรอยฉีกขาด (Tearing)

3) การเกิดรอยดิ่ง (Earring) ความเสียหายในกรณีนี้จะสังเกตได้จากชิ้นงานที่ขึ้นรูปเสร็จแล้วที่บริเวณขอบมีชิ้นงานไม่เท่ากัน ความเสียหายในลักษณะนี้มีสาเหตุหลักมาจากวัสดุที่นำมาใช้ขึ้นรูปมีคุณสมบัติเชิงแอนไอโซทรอปีโดยเฉพาะแอนไอโซทรอปีในระนาบ (Planar Anisotropy) นั่นคือโลหะแผ่นมีความสามารถในการขึ้นรูปในที่แตกต่างกันในแต่ละทิศทางจึงทำให้โลหะแผ่นในแต่ละ

ตำแหน่งยึดออกไม่เท่ากัน ดังนั้น โลหะแผ่นที่มีค่าแอนไอโซทรอปีในระนาบสูงจะเกิดรอยดึงได้มากกว่า การป้องกันการเกิดความเสียหายจากสาเหตุนี้ควรเปลี่ยนไปใช้โลหะแผ่นที่มีค่าแอนไอโซทรอปีในระนาบต่ำ นอกจากนี้ความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมโลหะแผ่นก่อนการขึ้นรูป แรงกดยึดแผ่นที่ไม่สม่ำเสมอหรือการติดตั้งชุดอุปกรณ์ผิดพลาดทำให้เกิดระยะเยื้องศูนย์กลางก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดรอยดึงบนชิ้นงานได้เช่นกัน

4) การเกิดผิวเสีย (Surface Fail) ความบกพร่องในกรณีนี้จะเกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน โดยมีรูปแบบของความบกพร่องได้หลายกรณี เช่น เกิดรอยขีด (Scratched) รอยถลอก (Galling) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ผิวสัมผัสต่างๆ ของชุดอุปกรณ์หยาบหรือมีการหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัสไม่เพียงพอ หรือเกิดผิวส้ม (Orange Peel) ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติภายในเนื้อวัสดุเองทำให้ชิ้นงานมีผิวหยาบ

5) การเกิดผิวโป่ง (Bulging) เป็นการเกิดความบกพร่องที่บริเวณผนังของชิ้นงานจะไม่เรียบเสมอกันซึ่งมีสาเหตุมาจากระยะห่าง (Clearance) ระหว่างหัวกดขึ้นรูปและแม่แบบมากเกินไป

2.2.5 สมบัติเชิงกลและความสามารถในการขึ้นรูป (Mechanical Properties and Formability) การเลือกวัสดุเพื่อใช้งานเฉพาะอย่างควรเลือกวัสดุที่มีคุณสมบัติกลางๆ ระหว่างสมบัติที่ต้องการในชิ้นงานกับสมบัติในการขึ้นรูปของวัสดุที่ใช้ วัสดุที่มีความสามารถในการขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานช่วงกว้างๆ ควรมีสมบัติดังนี้

1) ความต้านทานแรงคราก (Yield Strength) ความต้านทานแรงครากของแผ่นเหล็กเป็นตัวชี้วัดความสามารถในการขึ้นรูปและความแข็งแรงหลังการขึ้นรูป พฤติกรรมการครากหลายๆชนิด สังเกตจากแผ่นเหล็ก เมื่อเกิดการยึดที่จุดครากเป็นค่าที่ต่ำที่สุดระหว่างการครากที่ไม่ต่อเนื่อง ในการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนทั่วไป ความต้านทานแรงคราก 240 MPa หรือมากกว่ามีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดการติดกลับที่มากเกินไปและเกิดความเสียหายระหว่างการขึ้นรูป อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุที่มีความต้านทานแรงครากน้อยกว่า 140 MPa อาจจะมีผลกับชิ้นงานได้ ซึ่งมีระดับความแข็งแรงได้เพียงพอ เหล็กแผ่นที่มีความแข็งแรงสูงๆ สามารถปรับปรุงการขึ้นรูปให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นหรือลดลง เพื่อให้มีความสามารถในการขึ้นรูปที่เหมาะสม

2) การยืดรวม (Total Elongation) เป็นการวัดขึ้นทดสอบการดึง โดยวัดความยาวเกจ (Gauge Length) ภายหลังเกิดการแตกหัก การยืดเป็นการคำนวณจากเปอร์เซ็นต์ของความยาวทดสอบเดิม ซึ่งปกติ 50 มม. (อาจจะใช้ความยาวทดสอบ 200 มม. สำหรับโลหะเกรดแข็งแรง) ขึ้นทดสอบโลหะแผ่น โดยปกติจะใช้ทดสอบการดึงช่วงความยาวทดสอบสั้นๆด้านข้างขนานหน้าตัดจะลดลง แต่หน้าตัดจะลดลงเป็นลักษณะเรียวยาวเพียงเล็กน้อยบางครั้งใช้ควบคุมตำแหน่งการเกิดรอยคอดและรอยแตกหัก



ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของแผ่นเหล็กกล้ารีดเย็น [9]

ชนิด	ลักษณะพิเศษ	ความเค้นคราก (MPa)	การยืดตัวใน 50 mm (%)	ความแข็ง (HRB)	$n$	$r_m$	$m$
Commercial	Standard properties	234	35	45	0.18	1.0	0.012
Drawing (Rimmed)	Stretchable	207	42	40	0.22	1.2	0.014
Drawing (Special killed)	Deep drawing	172	42	40	0.22	1.6	0.015
Interstitial free (IF)	Extra deep drawing	152	42	45	0.24	2.0	0.015
Medium strength	Formable	414	25	85	0.20	1.2	....
High strength	Moderately formable	689	10	25 (HRC)	....	....	....

ตัวอย่างค่าการยืดของความยาวทดสอบ 50 มม. ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งเป็นการขึ้นรูปแผ่นเหล็กเกรดธรรมดา โดยทั่วไปการยืดตัวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำปกติจะอยู่ที่ 35 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ในความยาวเกจ (Gauge Length) 50 มม. ค่าที่สูงกว่าแสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีกว่า

3) การยืดสม่ำเสมอ (Uniform Elongation) การยืดรวมของแผ่นขึ้นทดสอบแรงดึงประกอบด้วย 2 ส่วนคือ การยืดสม่ำเสมอ และหลังการยืดสม่ำเสมอสำหรับวัสดุที่เป็นไปตามความสำคัญของกฎกำลัง ( $\sigma = k\varepsilon^n$ ) การยืดสม่ำเสมอวัดในความเครียดจริงเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับเลขชี้กำลัง การทำให้แข็งด้วยความเครียด ( $n$ ) ภายหลังจากการยืดสม่ำเสมอเกิดขึ้นมีผลกระทบกับพฤติกรรมการทำให้แข็งด้วยความเครียดและความไวของอัตราความเครียด ทั้ง 2 ชนิด ของโลหะต่อความเค้นที่เกิดขึ้น เมื่อเกิดการคอดความเครียดและอัตราส่วนความเครียดภายในรอยคอดจะมีค่ามากกว่าบริเวณภายนอก เมื่อการทำให้แข็งด้วยความเครียดมีค่ามากขึ้นวัสดุจะถึงจุดต้านทานแรงได้น้อยลงทำให้พื้นที่หน้าตัดด้านความหนาลดลงซึ่งเป็นต้นเหตุของการเปลี่ยนรูปบริเวณด้านนอกของรอยคอด

4) การยืดที่จุดคราก (Yield Point Elongation) เป็นส่วนหนึ่งของการยืดรวมซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการครากแบบไม่ต่อเนื่องที่ความเค้นคราก ต่อด้วยการก่อรูปของรอยร้าวที่พื้นผิว ซึ่งรู้จักกันว่าเส้นลือเดอร์ หรือ ริวคราก ซึ่งเป็นการแสดงข้อผิดพลาดในวิธีใช้หลายอย่างของโลหะแผ่น การยืดที่จุดครากระหว่างการทดสอบแรงดึงที่ไม่ปรากฏให้เห็น จะแสดงให้เห็นเส้นลือเดอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป

การยืดที่จุดครากส่วนใหญ่จะต้องมีเศษแทรกในธาตุเจือ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคาร์บอนหรือไนโตรเจน ด้วยเหตุนี้เหล็กที่มีสารแทรกต่ำจะไม่แสดงอาการยืดที่จุดคราก สามารถรับได้

โดยการอบคืนตัวรอบๆ แผ่นโลหะขณะทำการกดเว้นเสียแต่ในโตรเจนมีส่วนผสมของธาตุอื่น (ปกติ อลูมิเนียม) เหล็กกล้าจะมีความแข็งขึ้นหลังจากมีการเก็บไว้นานๆ (ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและตัวแปรอื่นๆ ในการเก็บ) เหล็กกล้าที่มีการเปลี่ยนตามอายุสามารถใช้ในการขึ้นรูปได้ดีที่สุด

5) อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (Plastic Strain Ratio) ค่า  $r$  มีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนความเครียดจริงในแนวความกว้าง ( $\epsilon_w$ ) ต่อความเครียดจริงในแนวความหนา ( $\epsilon_t$ ) ของความเครียดช่วงพลาสติกในโลหะแผ่นบริเวณการยืดสม่ำเสมอของการทดสอบการดึง เกี่ยวข้องกับความสามารถของดรอว์ เป็นการวัดความสามารถของวัสดุต่อการต้านทานการลดความหนา (Thinning) ในการดรอว์วัสดุบริเวณริมขอบชิ้นงานจะเกิดการยืดในทิศทางเดียว แนวรัศมี ในทิศทางตั้งฉาก (แนวเส้นรอบวง) ค่า  $r$  สูงแสดงว่าวัสดุมีคุณสมบัติการดรอว์ได้ดี

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(t/t_0)} \quad (2.13)$$

โดยที่  $r$  คือ อัตราส่วนความเครียดพลาสติก

( $\epsilon_w$ ) คือ ความเครียดจริงในแนวความกว้าง

( $\epsilon_t$ ) คือ ความเครียดจริงในแนวความหนา

อัตราส่วนความเครียดพลาสติกเกี่ยวข้องกับการกำหนดทิศทางโครงสร้างผลึกของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งค่าจะเปลี่ยนไปตามทิศทางการทดสอบ (สัมพันธ์กับทิศทางการรีด) ในโลหะที่เป็นแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ค่าเฉลี่ย  $r_m$  (บางครั้งเรียกว่า  $\bar{r}$ ) แทนด้วยแอนไอโซทรอปิกในแนวตั้งฉากของแผ่นเหล็ก ค่า  $r$  ที่เปลี่ยนแปลงค่าไปตามทิศทางของแผ่นวัสดุในการดรอว์ขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก ค่าที่เปลี่ยนแปลงนี้จะทำให้ผนังของถ้วยสูงไม่เท่ากัน เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เราเรียกว่ารอยดิ่ง (Earring) ดังนั้นโดยทั่วไปจึงมักวัดค่า  $r$  เฉลี่ยหรือแอนไอโซทรอปีตั้งฉากเฉลี่ย  $R_m$  (Normal Anisotropy) และแอนไอโซทรอปีระนาบ ค่า  $\Delta r$  (Planar Anisotropy)

สมบัติของ  $r_m$  มีนิยามว่า

$$r_m = \frac{r_0 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2.14)$$

- โดยที่  $r_m$  คือ แอนไอโซทรอปิตั้งฉาก  
 $r_0$  คือ แอนไอโซทรอปิกตามแนวทิศทางการรีด  
 $r_{45}$  คือ แอนไอโซทรอปิกทำมุม 45 องศา กับแนวทิศทางการรีด  
 $r_{90}$  คือ แอนไอโซทรอปิกทำมุม 90 องศา กับแนวทิศทางการรีด

เมื่อตัวห้อยที่อ้างถึงคือมุมระหว่างแกนขึ้นทดสอบการดึงกับทิศทางการรีดแผ่นวัสดุเหล็ก รีดร้อนและรีดเย็นอบคืนตัวอุณหภูมิสูงคือแอนไอโซทรอปิกทั่วไป ( $r_m = 1.0$ ) เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์ (ริมส์ตีล) ปกติมี  $r_m$  เท่ากับ 1.2 แต่อาจจะมีค่าสูงขึ้นแล้วแต่กรณีพิเศษเช่นผลิตภัณฑ์ที่มีเมงกานีส ละซัลเฟอร์ผสมอยู่ต่ำๆ เหล็กกล้าเนื้อแน่น (อลูมิเนียมคิลด์ตีล) จะมีแอนไอโซทรอปิก  $r_m$  เท่ากับ 1.6 หรือค่าอาจจะสูงกว่า (สูงถึง 2.5) ซึ่งได้มาโดยควบคุมส่วนประกอบและขบวนการผลิต ชัดจำกัด ค่าสูงสำหรับเหล็กกล้าเชิงพาณิชย์ประมาณ 3.0 ถึงแม้ว่าค่าใกล้ 3.0 จะได้ใช้นานๆ ครั้ง เหล็กกล้า (Interstitial Free Steel) จะมี  $r_m$  ประมาณ 2.0 ค่า  $r_m$  ใช้ทำนายความสามารถในการครอว์ขึ้นรูปโลหะ

แอนไอโซทรอปี้ในระนาบ ค่า  $\Delta r$  มีนิยามว่า

$$\Delta r = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (2.15)$$

โดยที่  $\Delta r$  คือ แอนไอโซทรอปี้ระนาบ

$r_m$  เป็นค่าที่กำหนดความลึกเฉลี่ย (ความสูงของผนัง) ของการครอว์ลึกที่สุดเท่าที่จะเป็นได้  $\Delta r$  เป็นค่าที่กำหนดขอบเขตของรอยดึง วัสดุที่มีค่า  $r_m$  สูงและค่า  $\Delta r$  ต่ำในขณะเดียวกันทำให้มีความสามารถในการครอว์ที่เหมาะสม

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำรีดร้อนมีค่า  $r_m$  ในช่วง 0.8 ถึง 1.0 เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์รีดเย็น (Cold-Rolled Rimmed Steel) มีค่าในช่วง 1.0 ถึง 1.4 เหล็กกล้าเนื้อแน่นรีดเย็นกำจัดออกซิเจน (Cold-Rolled Aluminium-Killed Steel, Deoxidized) มีค่าในช่วง 1.4 ถึง 2.0 เหล็กกล้า (Interstitial Free Steel) มีค่าในช่วง 1.8 ถึง 2.5 และอะลูมิเนียมเจือมีค่าในช่วง 0.6 ถึง 0.8 ค่า  $r_m$  สูงสุดในทางทฤษฎีสำหรับเหล็กกล้าเฟอร์ไรต์ (Ferritic Steel) คือ 3.0

6) เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening Exponent)  $n$  คือความชันของเส้นโค้งความเค้นจริงและความเครียดจริงเมื่อมีการพล็อตบนค่าลอการิทึมเป็นการกำหนดโดย

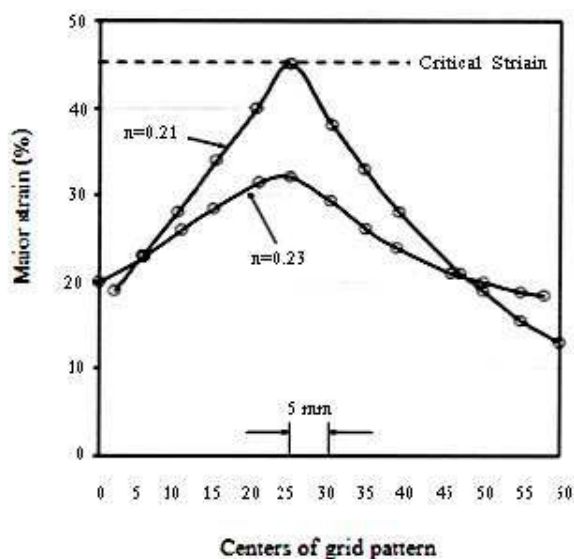
ขึ้นอยู่กับความเค้นไหล (Flow Stress) บริเวณจุดครากบนระดับความเครียด ในวัสดุค่า  $n$  มีค่าสูงความเค้นไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากความเครียด ซึ่งควรระวังการกระจายความเครียดที่เพิ่มขึ้นในบริเวณความเครียดและความเค้นที่ไหลที่ต่ำกว่า ค่า  $n$  ที่สูงจะเป็นตัวชี้ว่ามีความสามารถในการดึงยืดขึ้นรูปได้ดี ส่วนของเส้นโค้งที่อยู่ถัดไปจากเส้นตรงสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีความหมายตามสมมติฐานของสมการ

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (2.16)$$

โดยที่  $K$  คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุ  
 $n$  คือ เลขชี้กำลังทำให้แข็งของความเครียด

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีค่า  $n$  โดยทั่วไปประมาณ 0.22 ใช้สำหรับการขึ้นรูปชิ้นส่วนที่ยุ่งยากซับซ้อน ค่าที่สูงกว่า (ขึ้นไปถึง 0.26) จะระบุถึงความสามารถในการดึงยืดขึ้นรูปได้ดี เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์โดยทั่วไปค่า  $n$  เปรียบเทียบกับเหล็กกล้าเนื้อแน่นมีการรีดที่ดีกว่าหลังการประกันอายุและมีค่าน้อยกว่า บางครั้งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีกระบวนการผลิตไม่เพียงพอสำหรับความสามารถในการขึ้นรูป โดยเฉพาะเกรดรีดร้อนจะมีค่า  $n$  ต่ำ เท่ากับ 0.10 แต่เกรดที่มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดีจะมีค่า  $n$  มากกว่า 0.14

ผลของค่า  $n$  ที่แตกต่างสำหรับการกระจายความเครียดในบริเวณวิกฤตชิ้นงานขึ้นรูปดังแสดงในภาพประกอบ 3 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากแผ่นเหล็กด้วยค่า  $n$  ที่ต่ำ (0.21) อาจเกิดการบางและรอยแตกที่มากเกินไปในบริเวณวิกฤต การขึ้นรูปชิ้นงานที่เหมือนกันทุกประการจากแผ่นที่มีค่า  $n$  สูง (0.23) หลายครั้ง จะเกิดความแข็งขึ้นในพื้นที่วิกฤตถ่ายทอดความเครียดไปยังพื้นที่ที่อยู่ใกล้กันดังนั้นควรหลีกเลี่ยงอาจทำให้เกิดความเสียหายในระหว่างการขึ้นรูป



ภาพที่ 2.17 การกระจายความเครียดสำหรับผลของค่า  $n$  ที่แตกต่างกันในบริเวณวิกฤต [9]

### 2.2.6 การเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation)

การเปลี่ยนรูปถาวร(Plastic Deformation) เป็นพื้นฐานสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบการขึ้นรูปโลหะในอดีตสมการเชิงคณิตศาสตร์ต่างๆ ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของโลหะในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรมักจะเป็นสมการที่ซับซ้อนยากที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาจริงของการขึ้นรูปโลหะ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีหาค่าตอบหรือผลเฉลยของการเปลี่ยนรูปถาวรของโลหะได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น

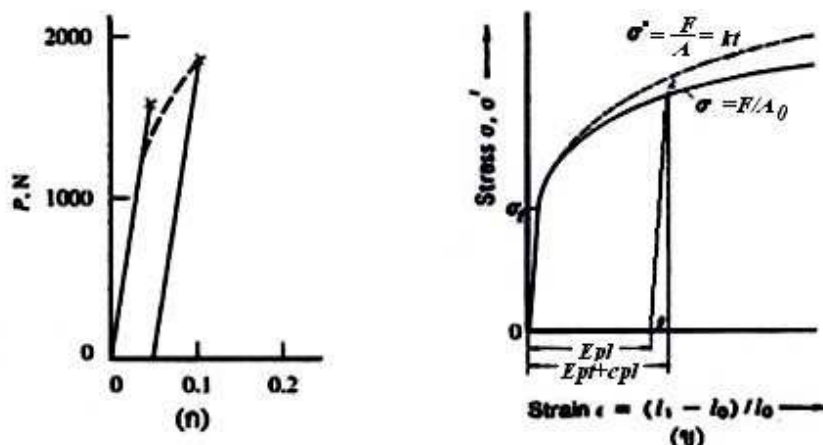
การศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปของโลหะเราจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติเชิงกลของโลหะเหล่านั้นเป็นอย่างดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางกลในช่วงที่เรียกว่า พลาสติก ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบหรือเลือกใช้และการเลือกกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่เหมาะสม ประหยัด มีประสิทธิภาพ มีคุณภาพ และสามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัย ในกระบวนการขึ้นรูปขึ้นงานเราจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการยึดตัวของโลหะที่ใช้ในการขึ้นรูปทั้งนี้เพื่อป้องกันการแตกหักและนิกขาดในขณะการขึ้นรูปซึ่งจะเป็นการประหยัดวัสดุและค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตด้วย จาก การขึ้นรูปขึ้นงานหรือ การเปลี่ยนรูปของโลหะดังกล่าวมักเรียกรวมๆ ว่า การแตกหัก (Failure) ซึ่งอาจจะมีสาเหตุเนื่องจาก ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานอาจมีหลายทิศทาง เนื้อของวัสดุหรือโลหะที่ใช้ทำชิ้นงานอาจจะไม่สม่ำเสมอ หรืออาจมีสิ่งเจือปน หรืออาจมีรอย ร้าวเดิมอยู่แล้ว ลักษณะของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป เช่น แรงกระแทก แรงกระทำซ้ำๆ แรงสลับไป-มา และแรงที่กระทำเป็นช่วง

ระยะเวลายาวนาน เป็นต้น อัตราการยึดตัวของวัสดุและแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงเกินขีดจำกัดของวัสดุ การเสียดทานระหว่างชิ้นงานและเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป และ การไหลตัวของวัสดุถูกจำกัด เป็นต้น

จากสาเหตุต่างๆ เหล่านี้จำเป็นต้องศึกษาวิเคราะห์กระบวนการ วิธีขึ้นรูป และคุณสมบัติทางกลของวัสดุอย่างละเอียด การเปลี่ยนรูป (Deformation) ของโลหะนั้นจะแบ่งออกได้เป็นสองลักษณะคือการเปลี่ยนภาพที่ขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งเราเรียกว่า ครีพ (Creep) และการเปลี่ยนภาพที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งแบ่งออกได้เป็นสองช่วงคือ การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) และการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก (Plastic)

1) การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นและในช่วงพลาสติก ขณะที่วัสดุถูกแรงภายนอกกระทำ วัสดุจะเริ่มยึดตัวทำให้รูปร่างเปลี่ยนไปจากเดิม การเปลี่ยนรูปของวัสดุอาจจะจำแนกออกเป็นสองลักษณะที่กล่าวมาแล้วคือ การเปลี่ยนรูปในลักษณะยืดหยุ่น และการเปลี่ยนรูปในลักษณะถาวรหรือพลาสติก ดังแสดงในภาพที่ 2.12 (ก) ในขณะที่ชิ้นงานถูกแรงกดภายนอก  $P$  กระทำเราสามารถวัดขนาดของแรง  $P$  และการยึดตัวของชิ้นงานแล้วนำไปเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.12 (ข) ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นคือขณะเพิ่มแรง  $P$  วัสดุจะยึดตัวและถ้าลดแรง  $P$  วัสดุจะหดตัวสู่สภาพเดิมทันที ส่วนในรูปเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติกนี้ถ้าเอาแรง  $P$  ออก วัสดุจะไม่คืนสภาพเดิมหรือกล่าวอีกในหนึ่งคือวัสดุเปลี่ยนรูปไปจากเดิมและความเค้นที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าความเค้นครากของวัสดุ ดังนั้นจากรูปจะเห็นว่า การเปลี่ยนรูปของวัสดุจะประกอบด้วยสองส่วน คือ การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นและการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก โดยทั่วไปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงพลาสติกนี้จะไม่เป็นเส้นตรงและขณะที่ความเค้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยความเครียดจะเพิ่มสูงขึ้นมาก [4]

ส่วนพฤติกรรมหรือคุณสมบัติเชิงกลของโลหะในช่วงยืดหยุ่น เช่น ขีดจำกัดส่วน (Proportional Limit) ขีดจำกัดการยืดหยุ่น (Elastic Limit) ความเค้นคราก (Yield Stress) และคุณสมบัติเชิงกลในช่วงพลาสติก เช่น การคราก (Yielding) ความเครียดแข็ง (Strain Hardening) ความเค้นสูงสุด (Ultimate Stress) และความเค้นขาด (Fracture Stress)



ภาพที่ 2.18 การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติก [4]

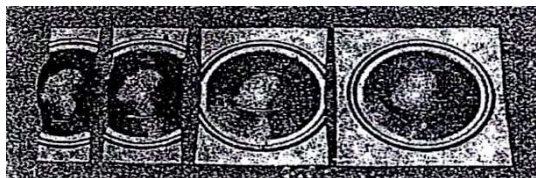
โลหะที่ใช้ในการขึ้นรูปมักจะเป็นโลหะที่สามารถยืดตัวได้มากกว่าก่อนที่จะขาด ซึ่งเราเรียกว่าโลหะเหนียว เช่น เหล็กกล้า ทองแดง อลูมิเนียม เป็นต้น ส่วนโลหะที่ยืดตัวได้น้อยเราจะเรียกว่า โลหะเปราะ เช่น เหล็กกล้าความเค้นสูงที่ใช้ทำตะไบ เหล็กหล่อสีเทา เป็นต้น และความสามารถในการยืดตัวของโลหะมักจะกำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการยืด

2) ครีพ จากที่กล่าวมาแล้วในสถานะอุณหภูมิปกติความเค้นที่ทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปถาวรได้จะต้องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าความเค้นครากของวัสดุนั้น อย่างไรก็ตามวัสดุจะเปลี่ยนรูปถาวรได้โดยที่แรงหรือความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าความเค้นครากของวัสดุและขนาดของแรงที่มีค่าเท่าเดิมตลอดในช่วงเวลานานๆ ภายใต้สถานะของอุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิที่สูงขึ้นแต่ไม่เกินอุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุจากการทดสอบเราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและเวลา ณ ระดับอุณหภูมิต่างๆ โดยทั่วไปจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเปลี่ยนรูป (Creep Rate) จะสูงขึ้นด้วย [4]

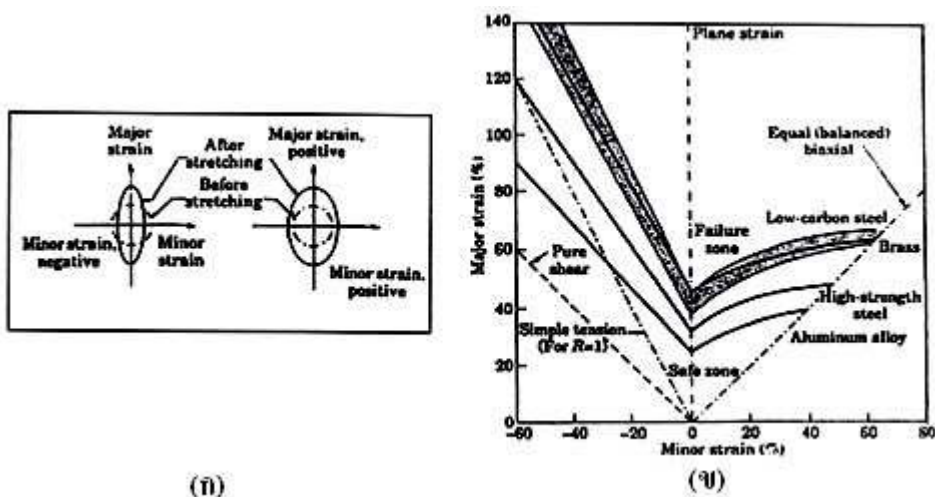
3) กราฟขีดจำกัดในการขึ้นรูป (Forming Limit Diagrams FLD) เป็นการพัฒนาขบวนการตรวจสอบการขึ้นรูปโดยการยืดและการหาค่าความสามารถในการถูกขึ้นรูปของโลหะ โดยทำลาบบนโลหะแผ่นเป็นวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5-5 มม. ด้วยวิธีพิมพ์ลายหรือกัดลายด้วยวิธีทางเคมีแล้วนำแผ่นชิ้นงานไปยืดด้วยพันธซ์จะพบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวงกลมเกิดขึ้นและทำการวัดขนาดของวงกลมตรงกับบริเวณที่เกิดการฉีกขาด [4]

เพื่อที่จะพัฒนาความรู้ทางการยืดตัวในโลหะแผ่นที่ถูกขึ้นรูปจึงทำการทดลองตัดชิ้นทดสอบที่มีความกว้างหลายๆขนาด ดังแสดงในภาพที่ 2.18 เป็นชิ้นงานทดสอบสี่เหลี่ยม (นับจากทางขวามือ) เป็นแบบการยืดสองทิศทางเท่ากัน ในทางตรงกันข้ามชิ้นทดสอบที่หน้าแคบ (อยู่ด้านซ้ายสุด)

เป็นแบบยึดตัวทิศทางเดียว หลังการทดสอบเราสามารถนำข้อมูลไปสร้างเป็นกราฟขีดจำกัดในการขึ้นรูป (Forming Limit Diagrams) ดังแสดงในภาพที่ 2.18 และ 2.19



ภาพที่ 2.19 ผลการทดสอบกับความกว้างโลหะแผ่นขนาดต่างๆ [4]



ภาพที่ 2.20 กราฟของการดึงของวัสดุ [4]

เพื่อที่จะสร้างความสัมพันธ์ความเครียดในแนวแกนหลักและแกนรองถูกวัดจากการเปลี่ยนรูปของวงกลม โดยสังเกตได้ว่ารูปวงกลมจะเปลี่ยนเป็นวงรี แกนหลักของวงรีแทนด้วยทิศทางและขนาดของการยืด โดยจะถือการยืดตัวเป็นค่าบวกในกราฟความสัมพันธ์นี้ ส่วนแกนรองของวงรีแทนด้วยขนาดของการยืดหรือหดในทิศทางขวาง ความเครียดในแกนรองสามารถเป็นได้ทั้งลบและบวก อันเนื่องมาจากการยืดตัวของวัสดุถ้ามีการยืดตัวในทิศทางหลักมากจะทำให้วัสดุเกิดการหดตัวในแนวแกนรอง (Poisson's Effect) จะถือว่าแกนรองมีค่าความเครียดเป็นลบ ในทางตรงกันข้ามถ้าการยืดตัวเกิดขึ้นในทั้งสองแกนจะทำให้วงกลมยืดออกทั้งสองทางจนกลายเป็นวงรีที่มีด้านแกนรองยาวกว่าวงกลมเดิมจะถือว่าแกนรองมีค่าความเครียดเป็นบวก ในการเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ของวงกลมเดิมกับพื้นที่ของวงกลมใหม่บนแผ่นโลหะ ทำให้เราหาความหนาของโลหะแผ่นที่เปลี่ยนไปได้ เนื่องจาก



กฎของทรงปริมาตรโดยสังเกตจากชิ้นงานที่ทำการทดสอบรูปสาม จากข้อมูลที่ตำแหน่งต่างๆ จากชิ้นทดสอบนำไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนหลักและแนวแกนรองจะได้กราฟดังแสดงในภาพที่ 2.19 ในกราฟแสดงขอบเขตของบริเวณการขีดตัวที่ทำให้เกิดการฉีกขาด และบริเวณปลอดภัยในการขึ้นรูป เช่น ที่แกนหลักและแกนรองเป็น 40% จะพบว่าบริเวณที่ไม่ได้เกิดการฉีกขาดของชิ้นทดสอบเลย แต่ในทางกลับกันความเค้นของชิ้นทดสอบอูมูนิเยียมอัลลอยที่แกนหลัก 80% และแกนรอง 40% จะพบว่าอยู่ในบริเวณที่จะทำให้เกิดการฉีกขาดดังตัวอย่าง ในรูปสังเกตในวงกลมจะเกิดการฉีกขาด

กราฟในภาพที่ 2.19 นั้นแสดงถึงเส้น FLD ของวัสดุหลายตัวเส้นที่อยู่เหนือขึ้นไปแสดงถึงเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการขึ้นรูปสูง จากกราฟนี้จะเห็นว่าถ้าเกิดความเครียดเป็นลบต่ำกว่า 20% ลงมาจะมีโอกาสเกิดการฉีกขาดน้อยมาก นั่นก็หมายความว่า การออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปจะพยายามทำให้ความเค้นในแกนรองที่เกิดเป็นลบ โดยออกแบบเครื่องมือพิเศษเพิ่มเติม การเปลี่ยนความหนาของการขึ้นรูปงานทดสอบพบว่าเส้น FLD มีแนวโน้มสูงขึ้นนั่นหมายความว่า การเพิ่มความหนาของโลหะแผ่นจะทำให้การไหลตัวลงแม่พิมพ์ที่มีรัศมีของปากคายเล็กอาจทำให้เกิดการฉีกขาดบริเวณที่ปากคายได้ ความเสียดทานและการหล่อลื่นก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการฉีกขาดของชิ้นงาน ถ้ามีการหล่อลื่นดีความเครียดที่เกิดขึ้นก็จะเกิดอย่างสม่ำเสมอ การเกิดรอยตำหนิต่างๆ บนพื้นผิวและคายก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด

### 2.2.7 ชนิดของเหล็กแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูปลึก

เหล็กแผ่นรีดเย็นเป็น โลหะที่ใช้มากในการอัดโลหะ เนื่องจากเหล็กแผ่นชนิดนี้จะถูกรีดเป็นแผ่น ณ อุณหภูมิห้องจึงได้ผิวเรียบและละเอียดนิยมใช้ทำตัวถังส่วนนอกของรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องเขียน หรือชิ้นส่วนของเครื่องใช้ที่ต้องการความสวยงาม JIS (Japanese Industrial Standard) ได้กำหนดชนิดของเหล็กแผ่น ดังแสดงในตารางที่ 2.4 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 Sheet and Strip) ซึ่งเป็นเหล็กแผ่นรีดเย็น (Commercial Quality) ใช้สำหรับงานทั่วไป นอกจากนี้ยังมีเกรดอื่นอีก เช่น SPCD ซึ่งเป็น (Drawing Quality) ใช้สำหรับงานขึ้นรูป และ SPCE ซึ่งเป็น (Deep Draw Quality) สำหรับงานขึ้นรูปลึก

ตารางที่ 2.3 เหล็กแผ่นรีดเย็น (มาตรฐาน JIS) [6]

ชนิด	ส่วนผสม					การใช้งาน
	C	Si	Mn	P	S	
SPCC	<0.12	-	<0.05	<0.040	<0.045	ใช้ในการอัดโลหะทั่วไป
SPCD	<0.10	-	<0.45	<0.035	<0.035	ใช้อัดขึ้นรูป
SPCE	<0.08	-	<0.40	<0.030	<0.030	ใช้อัดขึ้นรูปลึก

ตารางที่ 2.4 เหล็กแผ่นรีดเย็น (มาตรฐาน JIS) สมบัติทางกล [6]

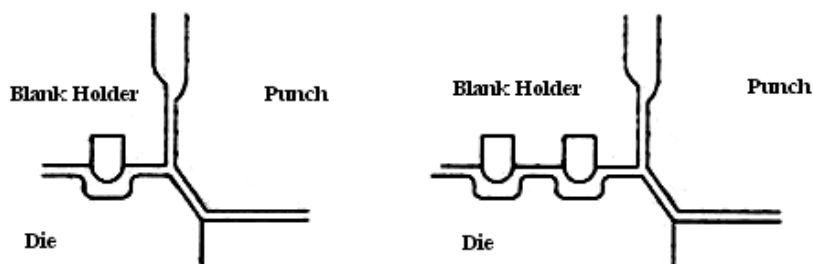
Symbol of Quality	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation %						Tensile Test Piece
	Discrimination According to Nominal Thickness (mm)							
	0.25 or OVER	0.25 to 0.40	0.40 to 0.60	0.60 to 1.00	1.0 to 1.60	1.60 to 2.50	2.50 to over	
SPCC	270	32	34	36	37	36	36	No.5, in Rolling Direction
SPCD	270	34	36	38	39	40	40	
SPCE	270	36	38	40	40	42	42	

### 2.2.8 ครอว์บีด (Draw Bead)

การควบคุมแรงกดแบบลงค์ไฮดรอลิกที่ไม่พอเพียง จะทำให้เกิดการย่นของโลหะ ซึ่งการย่นนี้ จะทำให้แผ่นโลหะไม่สามารถที่จะไหลตัวได้ ทำให้บริเวณส่วนกันของชิ้นงานถูกพันซ์คั่นึกขนาดแต่ ถ้าแรงกดของแบบลงค์ไฮดรอลิกมากเกินไป โลหะก็จะไม่สามารถไหลตัวเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะการ ขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจะทำให้อัตราการไหลของแต่ละจุดไม่เท่ากัน ทำให้แรงที่ใช้ในการกดแต่ละจุด ไม่เท่ากันด้วย สำหรับบริเวณที่ต้องการแรงกดมากจะใช้ครอว์บีดเข้ามาช่วยเพื่อทำให้การไหลตัวของ โลหะช้าลง

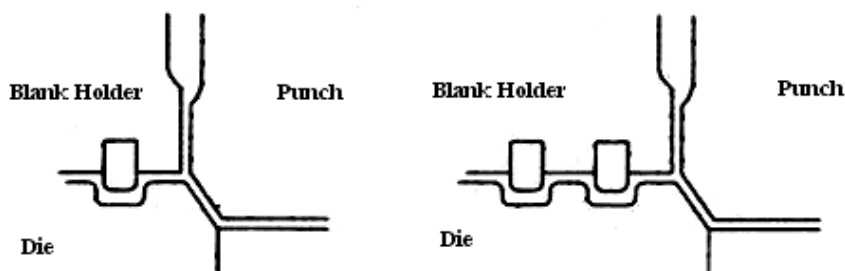
ครอว์บีดมีหน้าที่ในการควบคุมการไหลตัวของโลหะที่จะไหลเข้าไปในคाय และช่วย ป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่น (Wrinkle) ในขณะที่ขึ้นรูปนอกจากนั้นยังช่วยลดแรงกดของแบบลงค์ไฮดรอลิก และเป็นตัวรีดโลหะให้ความเครียดลดลงเป็นการเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปของ โลหะการติดตั้ง ครอว์บีดสามารถติดตั้งที่ของแบบลงค์ไฮดรอลิกและร่องบีด (Bead) จะอยู่ที่คाय [5]

1) ปลายมนโค้ง (Round Bead) ปลายโค้งมนมีทั้งแบบเดี่ยว (Single Bead) ใช้กับการขึ้นรูป โดยทั่วไปที่ต้องการควบคุมอัตราการไหลของโลหะในขณะขึ้นรูป และแบบคู่ (Double Bead) ใช้ในกรณี Single Bead ไม่สามารถควบคุมการไหลของโลหะได้เพียงพอ



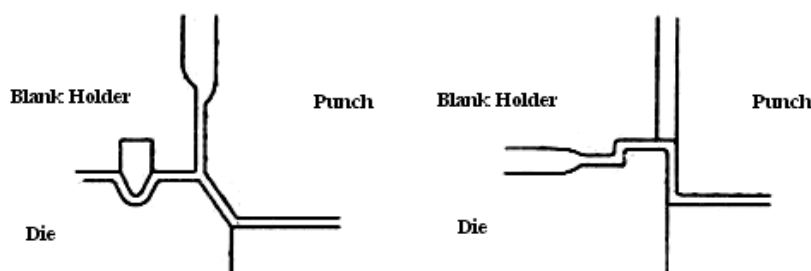
ภาพที่ 2.21 แบบชนิดของ Bead ปลายมนโค้ง [5]

2) แบบสี่เหลี่ยม (Square Bead) สามารถควบคุมอัตราการไหลของโลหะได้มากกว่า Double Type และแบบคู่ (Double Bead) ควบคุมอัตราการไหลของโลหะได้ดีกว่า 3 แบบ ที่กล่าวมา



ภาพที่ 2.22 แบบชนิดของ Bead สี่เหลี่ยม

3) แบบสามเหลี่ยม (Three Angle Bead) จากภาพที่ 2.17 (ก) แบบสามเหลี่ยม (Three Angle Bead) และภาพที่ 2.22 (ข) ใช้ในการขึ้นรูปที่ไม่ต้องการให้โลหะเกิดการไหลตัวในระหว่างการขึ้นรูป



ภาพที่ 2.23 แบบสามเหลี่ยมและแบบไม่ไหลตัว [5]

### 2.2.9 ชนิดของสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมาย ซึ่งถ้าแบ่งตามสถานะจะแบ่งออกได้เป็นสี่ชนิด คือ ก๊าซ ของเหลว สารกึ่งของแข็ง (Semi-Solid) และของแข็ง สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กันมากที่สุดเพราะมีคุณสมบัติหลากหลายเมื่อนำไปใช้งาน และสามารถรับแรงที่กระทำได้มาก ของเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นมีน้ำ สารละลายกับน้ำ (Aqueous Solution) น้ำมันแร่ (Mineral Oil) น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์และน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Oil) [6]

1) น้ำมันแร่ เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในหอกถัน ได้จากการเอาส่วนที่อยู่กันหอกถันภายใต้บรรยากาศผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญที่ถูกควบคุมโดยการกลั่นสุญญากาศก็คือ ความหนืด (Viscosity) จุดวาบไฟ (Flash Point) และ คาร์บอน (Carbon Residual) แยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดใสและชนิดข้นออกมา ที่เหลือเป็นกากก็สามารถนำไปผลิตยางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาถลั่น น้ำมันแร่ที่ได้จากน้ำมันดิบ พวกพาราฟินิก (Paraffinic) มักจะมีไขสูง ต้องผ่านกระบวนการขจัดเอาไขออก น้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นแยกภายใต้สุญญากาศนี้ปกติจะมีคุณภาพที่ไม่ดีพอที่จะนำมาใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่น ต้องผ่านกระบวนการต่างๆเพื่อขจัดเอาสารที่ไม่ต้องการออก เพื่อให้มีความอยู่ตัวเชิงเคมีและเชิงความร้อนดี

2) น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ เนื่องจากน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ที่ได้จากธรรมชาติมักมีความอยู่ตัวทางเคมีต่ำ เกิดเสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะใช้งานจึงต้องผ่านขบวนการการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งราคาก็จะแพงขึ้นมาก จึงหมดความนิยมไป ปัจจุบันมีการใช้น้ำมันพืชหรือสัตว์เป็นน้ำมันพื้นฐานน้อยมาก และใช้เฉพาะในงานหล่อลื่นที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางประการเท่านั้น ส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้เป็นตัวเติมเพิ่มคุณภาพให้น้ำมันหล่อลื่นที่ทำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม เช่น เพื่อเพิ่มความลื่นและความสามารถในการเข้ากับน้ำ เป็นต้น

3) น้ำมันสังเคราะห์ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่ที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบนั้น แม้ว่าจะผ่านกระบวนการมากมายที่ใช้กำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป แต่น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้ ออกมานั้นยังคงเป็นของผสมของสารประกอบหลายตัว ซึ่งถ้ามีก็จะได้ผลผลิตต่ำ เป็นผลให้น้ำมันแรมมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน ดังนั้นได้มีการพัฒนาน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันสังเคราะห์ขึ้นมา น้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันพื้นฐานที่ได้จากกระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งเป็นการรวมตัวของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำให้ได้น้ำมันที่มีความหนืดเพียงพอที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่น ข้อดีของน้ำมันสังเคราะห์เมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ สามารถนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าน้ำมันแร่ คือ ใช้ได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำและสูงกว่าน้ำมันแร่ นอกจากนี้ น้ำมันสังเคราะห์บางประเภทยังให้สมบัติเฉพาะ เช่น ผสมเข้ากับน้ำได้ และไม่ติดไฟ มีการระเหยต่ำ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม น้ำมันสังเคราะห์จะมีข้อได้เปรียบกว่าน้ำมันแร่ เมื่อนำไปใช้งานบางประเภท น้ำมันสังเคราะห์ยังไม่มีสมบัติที่เหมาะสมทุกด้าน จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันสังเคราะห์โดยการใส่สารเพิ่มคุณภาพซึ่งจะช่วยเพิ่มสมบัติทางด้านเคมีและด้านกายภาพ

4) สารหล่อลื่นของแข็ง เป็นสารหล่อลื่นที่มีความสามารถในการรับแรงกดแนวตั้งได้ดี และในขณะเดียวกันต้องมีความสามารถในการเลื่อนไหลไปได้อย่างง่าย ในชั้นผิวเมื่อมีแรงกระทำในแนวราบหรือเมื่อเกิดแรงเฉือน สารหล่อลื่นของแข็งจะอยู่ระหว่างคู่ผิวโลหะที่เคลื่อนที่และจะช่วยปกป้องการเสียดสีระหว่างผิวโลหะทำให้ช่วยลดการสึกหรอและการเสียดสี รวมถึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำด้วย สารหล่อลื่นของแข็งที่ใช้กัน โดยทั่วไปในปัจจุบันคือ กราไฟต์ โมลิบดีนัม ไดซัลไฟด์ และแผ่นพลาสติก

#### ตารางที่ 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่น [6]

สารหล่อลื่น	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
1. แผ่นพลาสติกไฮพอลิเอททีลีนหนา 0.10 มิลลิเมตร	0.112
2. แผ่นพลาสติกไฮพอลิเอททีลีนหนา 0.07 มิลลิเมตร	0.120
3. น้ำมัน TDN 81	0.130
4. น้ำมัน DRAW 359H	0.131
5. น้ำมัน MZA 30	0.133
6. น้ำมัน DRAW 756A	0.182
7. น้ำมันมะพร้าว	0.175

### 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บุญส่ง จงกลณี [2] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปลึกขึ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรต่อสมบัติการขึ้นรูปโดยการใส่เหล็กแผ่น SPCC หนา 1.0 มม. เพื่อศึกษาชนิดของแผ่นตัดเปล่า (Blank Geometry) แรงกดของแผ่นแบดจ์โฮลเดอร์ (Blank Holder Force) สารหล่อลื่น (Lubricant) และชนิดของดรอว์บีด (Draw Bead) ทดสอบตามลำดับ โดยการขึ้นรูปกรีดวงกลมบนแผ่นแบดจ์ทดสอบโดยวิธีกัดกรดด้วยไฟฟ้า ขึ้นรูปบนเครื่องเพรสไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน ด้วยแม่พิมพ์ที่มีรูปทรงไม่สมมาตรภายใต้สภาวะต่างๆ แล้ววัดขนาดการเปลี่ยนรูปของกรีดวงกลมเป็นเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักความเครียดรองจะให้ความเครียดความหนาและทำการเปรียบเทียบ ซึ่งได้จากสมาการความเทียบเท่า

กิตติภฏ รัตนจันทร์ [3] เพื่อศึกษาหาความสามารถในการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นของดรอว์บีด (Draw Bead) ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวต่างกันเช่นรูปร่างและความสูงของดรอว์บีด ความเร็วในการดึงขึ้นรูป สภาพการหล่อลื่นและสมบัติของโลหะแผ่น สำหรับในการวิจัยนี้ใช้ดรอว์บีดที่มีรูปร่างแบบครึ่งทรงกระบอกกลม (Half-Round Draw Bead) โดยมีตัวแปรที่สนใจคือความสูงของดรอว์บีด สภาพการหล่อลื่นและความเร็วในการดึงขึ้นรูป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสูงของดรอว์บีดและการหล่อลื่นมีผลกระทบต่อควบคุมการไหลของโลหะแผ่นที่จะเข้าสู่ช่องเปิดคายเป็นอย่างมาก เมื่อเพิ่มความสูงดรอว์บีดให้สูงขึ้นจะต้องใช้แรงกดแบดจ์โฮลเดอร์เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่รอยยับที่เกิดขึ้นจะลดลง ในส่วนของการหล่อลื่นพบว่าเมื่อไม่ใช้สารหล่อลื่นจะไม่สามารถดึงขึ้นรูปได้เพราะจะเกิดการฉีกขาดที่ผนังชิ้นงานก่อน สำหรับความเร็วในการดึงขึ้นรูปในช่วงที่ใช้ในการทดลองพบว่าไม่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานสำเร็จน้อยมาก

เชษฐ อุทธิยัง [4] ได้ทำการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้สารหล่อลื่นที่มีผลต่อขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปลึกเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI304 พบว่ามีปัจจัยหลายตัวแปรทดสอบที่มีอิทธิพลดังนี้ สารหล่อลื่นชนิดแผ่นพลาสติกพอลิเอทรีลีนหนา 0.07 และ 0.1 มิลลิเมตร ได้ขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปเท่ากับ 2.09 ซึ่งจะได้ค่าที่สูงกว่าการใช้สารหล่อลื่นในกลุ่มน้ำมัน ซึ่งให้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปอยู่ในช่วง 2.0 ถึง 2.03 สารหล่อลื่นชนิดแผ่นพลาสติกพอลิเอทรีลีนที่ให้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปสูง จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปต่ำแต่จะได้อัตราขึ้นงานที่ไม่เรียบ สารหล่อลื่นมีอิทธิพลต่อแรงในการลากขึ้นรูปคือ แรงในการลากขึ้นรูปลึกที่ได้จากการใช้สารหล่อลื่นชนิดแผ่นพลาสติกพอลิเอทรีลีนซึ่งเป็นของแข็งจะใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อยกว่ากรณีที่ใช้สารหล่อลื่นชนิดน้ำมันซึ่งเป็นของเหลว เนื่องจากมีเสถียรภาพต่อแรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงานสูงกว่าน้ำมันจึงทำให้แยกการสัมผัสของแผ่นเปล่า ผิวหน้าคาย และผิวหน้าของแผ่นจับ

ยึดชิ้นงาน จึงไม่เกิดการเกาะติด และมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำส่งผลลงไว้ได้แรงในการลากชิ้นรูปตัว ผิวชิ้นงานสำเร็จที่ได้หลังจากการลากชิ้นรูปลึกจะมีผิวหยาบมากขึ้นเมื่อเทียบกับผิววัสดุชิ้นงานเริ่มต้น เนื่องจากวัสดุชิ้นงานถูกตัดและตัดกลับ ผิวสัมผัสถูกเคลื่อนที่ภายใต้การถูกตัดงอผ่านรัศมีตายและถูกยึดมากขึ้นทำให้ผิวบางส่วนที่ยอดผิวของเนื้อวัสดุมีความลึกมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่กล่าวถึงผิววัสดุชิ้นงานหลังทำการขึ้นรูป นั่นคือ วัสดุชิ้นงานเมื่อทำการขึ้นรูปจะถูกยึดมากขึ้นและมีความลึกที่ผิวมากขึ้น ทำให้ผิวชิ้นงานหลังการลากชิ้นรูปมีผิวหยาบ น้ำมันหล่อลื่นในงานลากชิ้นรูปลึก มีความหนืดปานกลางและมีสารเพิ่มคุณภาพกัมมะถันที่มาก จะสามารถรับแรงกดได้สูง ด้านทานการสึกหรอ ซึ่งจะช่วยให้ป้องกันการสัมผัสของผิวคู่โลหะได้ดีกว่าน้ำมันหล่อลื่นชนิดอื่น ทำให้ได้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากชิ้นรูปสูงขึ้น

ศิวกร อ่างทอง [5] ได้ทำการศึกษาเรื่อง A Critical Analysis of the Non-Symmetrical Deep Drawing Process ทดลองเพื่อหาจุดวิกฤตของการเกิดความเสียหายในกรณีต่างๆ ภายใต้ข้อกำหนดเช่น ขนาดของแผ่นตัดเปล่า (Blank Size) แรงกดยึดชิ้นงาน (Blank Holder Force) สารหล่อลื่น (Lubricant) ชนิดและความสูงของครอว์บีด (Draw Bead) โดยทำการทดลองการขึ้นรูปผลของแรงที่ใช้ขึ้นรูป แรงใช้ในการกดยึด ความเสียดทานสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานตามชนิดของสารหล่อลื่น ใช้ครอว์บีดเพื่อลดการเกิดความเครียด (Strain) ในบางพื้นที่ที่จะเกิดความสมดุลของความเครียด และมีการประยุกต์เพื่อหาค่าของแผ่นตัดเปล่าโดยวิธีประมาณค่ากับรูปทรงของชิ้นงานสำเร็จในรูปทรงต่างๆ

วารุณี เปรมานนท์ และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรัศมีตายในการลากชิ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส ศึกษากระบวนการลากชิ้นรูปลึก (Deep Drawing) โลหะแผ่นของชิ้นงานรูปถ้วยทรงสี่เหลี่ยมตัวแปรที่ทำการศึกษาคือรัศมีตาย ทำการศึกษาอิทธิพลของรัศมีตายที่มีต่อแรงในการขึ้นรูป แรงที่ใช้ในการกดแผ่นยึดชิ้นงาน ความหนาและคุณภาพของชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูป ขนาดงานถ้วยสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการทดลอง คือ กว้าง 100 มม. ยาว 100 มม. ลึก 50 มม. ทำจากเหล็กแผ่นเกรด JIS SPCCEN หนา 0.8 มม. จัดทำการทดลอง 4 ชุด ได้รูปสำเร็จ คือ ปราศจากรอยย่นหรือรอยแตก เมื่อใช้ชุดแม่พิมพ์ที่มีรัศมีตายขนาดใหญ่ พบว่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปลดลงและเมื่อเพิ่มขนาดของแรงแผ่นจับยึดชิ้นงานก็จะทำให้แรงที่ใช้ในการลากชิ้นรูปสูงขึ้น โดยที่แม่พิมพ์แต่ละชุดมีช่วงของการจับยึดชิ้นงานอยู่ระยะหนึ่งที่ทำให้การขึ้นรูปสมบูรณ์ ปราศจากรอยย่นหรือรอยแตก แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงแผ่นจับยึดชิ้นงานด้วยความสัมพันธ์แบบเส้นตรง โดยไม่ขึ้นกับรัศมีตาย ผลของความหนาที่แต่ละส่วนบนถ้วยในการจดบันทึกและเปรียบเทียบผลที่ได้จากแม่พิมพ์แต่ละชุดที่มีรัศมีตายต่างกัน

ชาญศักดิ์ ภัทรพรนันท์ [7] ได้ทำการศึกษาการลากขึ้นรูปกลของสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นเปล่าสี่เหลี่ยมความหนา 0.78 มม. ขนาด 235 X 235 มม. โดยที่รัศมีดายที่ใช้มีขนาด 4, 5, 6, 10, 12, 16, 21, 22, 23, 24 และ 25 มม. รัศมีพื้นที่เท่ากับ 10 มม. และรัศมีมุมโค้งงอที่ 6 มม. ช่องว่างระหว่างพื้นที่กับดายมีค่าเท่ากับ 0.88 มม. ซึ่งผลการทดลองพบว่า ผลที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลองคือที่รัศมีดาย 4 มม. ไม่สามารถที่จะทำการลากขึ้นรูปได้และที่รัศมีดาย 10, 12, 16 มม. สามารถที่จะทำการลากขึ้นรูปได้เมื่อทำการเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปในการทดลองกับแรงที่ได้จากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าผิดพลาดไม่เกิน 3.38 % และความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งต่างๆมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าผิดพลาดไม่เกิน 7.69 % ดังนั้นผลการจำลองจึงมีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะสามารถนำมาวิเคราะห์ผลการทดลองได้



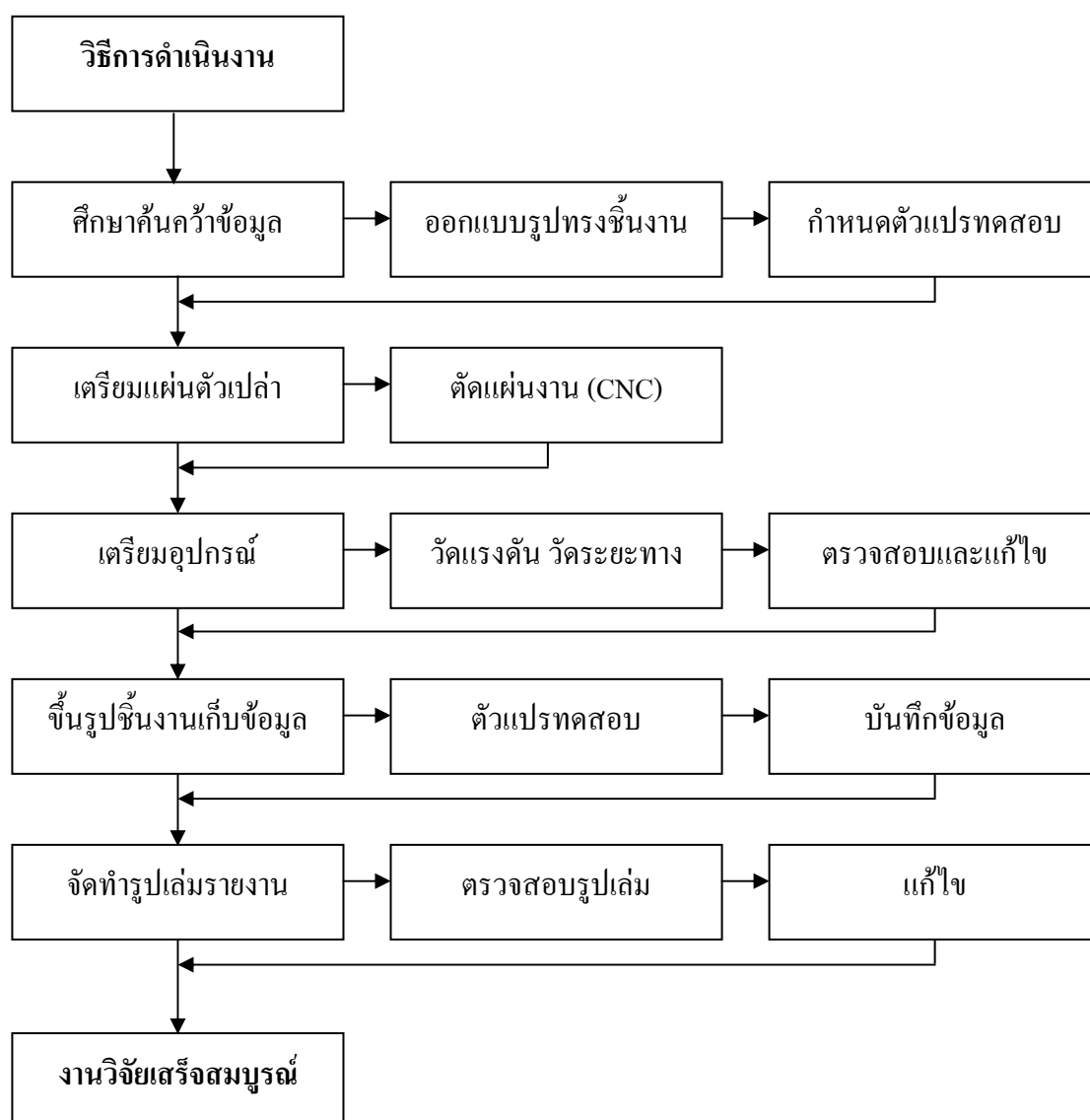
## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงการดำเนินโครงการ ซึ่งนับว่าเป็นบทที่สำคัญในการทำวิทยานิพนธ์ เนื่องจากจะต้องรวบรวมทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง มาใช้ในการวางแผนการดำเนินโครงการเพื่อเป็นตัวกำหนดระยะเวลาในการจัดทำโครงการให้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ ดังนั้นจึงได้จัดขั้นตอนในการดำเนินโครงการดังต่อไปนี้

#### 3.1 แผนการดำเนินการวิจัย

การปฏิบัติการขึ้นรูปในชิ้นส่วนอุตสาหกรรม ผู้ผลิตจะเริ่มต้นจากการกำหนดรูปร่างชิ้นงานที่ต้องการแล้วจึงออกแบบพื้นซ์ คายและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งได้ทำการกำหนดตัวแปรของการทำงานเพื่อให้ชิ้นงานขึ้นรูปมีรูปร่างตามที่ต้องการ จากนั้นจึงทำการทดสอบเพื่อยืนยันว่าการออกแบบรูปร่างชุดอุปกรณ์และค่าตัวแปรของการทำงานนั้นมีค่าถูกต้องและเหมาะสม ได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างสมบูรณ์ไม่มีความเสียหายเกิดขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วการดำเนินการดังกล่าวมักจะไม่สามารถกระทำได้ในครั้งเดียว โดยจะต้องมีการปรับเปลี่ยนบางประการและทดสอบซ้ำหลายๆครั้งจนกว่าจะได้รูปร่างของชุดอุปกรณ์และค่าตัวแปรการขึ้นรูปที่เหมาะสม ซึ่งวิธีการดังกล่าวทำให้เกิดความสูญเสียในหลายๆด้าน อาทิเช่น เวลา แรงงาน และวัตถุดิบ แต่ถ้าหากผู้ผลิตได้มีการวิเคราะห์ว่ารูปร่างของชุดอุปกรณ์และตัวแปรการขึ้นรูปด้วยการจำลองสภาพการขึ้นรูปเพื่อหาค่าที่เหมาะสมเสียก่อนที่ จะนำไปทำการขึ้นรูปก็จะลดความสูญเสียดังกล่าวได้ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเริ่มจากการศึกษาปัญหา และทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้อง จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดสอบหาคณสมบัติทางกลของแผ่นเหล็ก SPCC-SD ที่จะนำมาใช้ในการขึ้นรูปลึง ทำการทดสอบการขึ้นรูปลึงเพื่อทดสอบว่าข้อมูลของรูปร่างต่างๆ และค่าตัวแปรในการขึ้นรูปลึง สำหรับรายละเอียดของแผนการดำเนินโครงการดังนี้



ภาพที่ 3.1 ไคอะแกรมวิธีดำเนินโครงการวิจัย

### 3.2 วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองการขึ้นรูปลึก

วัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตเป็นสิ่งที่กำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้นๆ เพราะฉะนั้นในการเลือกวัสดุ SPCC - SD มาตรฐาน JIS (Japanese Industrial Standard) เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ผ่านกรรมวิธีการผลิตแบบเย็น แล้วนำไปอบคืนตัว (Temper) ซึ่งสัญลักษณ์ S คือชิ้นหรือเกรดเต็มเปอร์มาตรฐาน (Standard Temper Grade) และ D คือ เป็นเหล็กที่ไม่ได้ขัดผิว ซึ่งผิวอาจจะดูหยาบกว่าผิวแบบที่ขัดเงา (Dull Finish) ผิวจะออกดำส่วนมากจะใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์จะนิยมใช้ทั้งภายในประเทศและนอกประเทศ จะต้องมีคุณภาพผ่านตามมาตรฐานของ มอก.2012 (TIS

2012) ซึ่งเทียบได้กับมาตรฐาน ISO 3574 และ JIS 3141 มีสมบัติเป็นเหล็กชนิดที่ใช้ในการขึ้นรูปทั่วไปและการขึ้นรูปลึก (Deep Draw) การกำหนดวัสดุที่ใช้จะต้องครอบคลุมถึง 1) ความหนาของวัสดุ ถ้าเลือกใช้วัสดุบางเกินไป ก็อาจไม่เหมาะสมในการใช้งาน แต่ถ้าใช้วัสดุหนาเกินไป ก็อาจจะทำให้การผลิตยากมากขึ้น 2) ประเภทและชนิดของวัสดุ (ซึ่งพิจารณาการบีบขึ้นรูปได้ลึกมากเพียงใด) การยึดตัวของโลหะวัสดุที่นิยมใช้ในการผลิต ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม และอลูมิเนียม ส่วนทางด้านการผลิตชิ้นส่วน ได้แก่ เหล็กเหนียว และเหล็กชุบสังกะสี ในที่นี้จะใช้วัสดุ JIS : SPCC-SD หนา 1 มม. ในการทดสอบ

### 3.2.1 ผลการหาค่าสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทดสอบ

จากภาพที่ 3.2 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ตามมาตรฐาน ASTM E 517-92 พบว่าค่าแอนไอโซทรอปีของทิศทางการรีด ( $r_{90}$ ) เท่ากับ 2.209 ตามแนวทิศทางการรีด ( $r_0$ ) เท่ากับ 2.545 และทำมุม 45 องศาทิศทางการรีด ( $r_{45}$ ) เท่ากับ 1.508 มีค่ามากไปหาน้อยตามลำดับ ส่วนค่าแอนไอโซทรอปีตั้งฉากเฉลี่ยหรือค่า  $r_m$  (Normal Anisotropy) เท่ากับ 1.9425 ซึ่งค่าต่างๆ ของตัวแปรดังกล่าวนำไปใช้ในการประมาณค่าของแรงกดเพื่อการขึ้นรูปขึ้นงานและทดสอบความเค้นแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 [2]



ภาพที่ 3.2 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test) [2]

### ตารางที่ 3.1 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

เหล็ก SPCC -SD (มม.)	ความเค้นคราก (MPa)	ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (MPa)	ค่า $r_m$	ค่า $r_0$	ค่า $r_{45}$	ค่า $r_{90}$
1.0	241	323	1.9425	2.545	1.508	2.209

### 3.2.2 ผลการทดสอบวัสดุทางเคมี

ด้วยเครื่องทดสอบส่วนผสมทางเคมี (Spectrometer 1000) ณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ตัดแผ่นชิ้นงานขนาด 50x60 มม. ด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่น (Power Shear)
- 2) ทำความสะอาดแล้วขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายให้เรียบดังภาพที่ 3.3
- 3) วางงานที่เครื่องทดสอบบนจุดของหัวสปาร์ก (Electrode) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม.
- 4) แล้วทดสอบซ้ำจำนวน 3 จุด เพื่อหาค่าเฉลี่ย ข้อมูลอยู่ในตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.3 ชิ้นงานทดสอบส่วนผสมทางเคมี

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุชิ้นงาน (%)

ธาตุที่ประกอบ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย
เหล็ก (Fe)	99.4619	99.4805	99.4466	99.4630
คาร์บอน (C)	0.0601	0.0580	0.0638	0.0607
ซิลิกอน (Si)	0.0115	0.0113	0.0122	0.0117
แมงกานีส (Mn)	0.2577	0.2579	0.2629	0.2595
ฟอสฟอรัส (P)	0.0191	0.0187	0.0196	0.0192
กำมะถัน (S)	0.0184	0.0180	0.0197	0.0187
นิกเกิล (Ni)	0.0224	0.0228	0.0238	0.0230

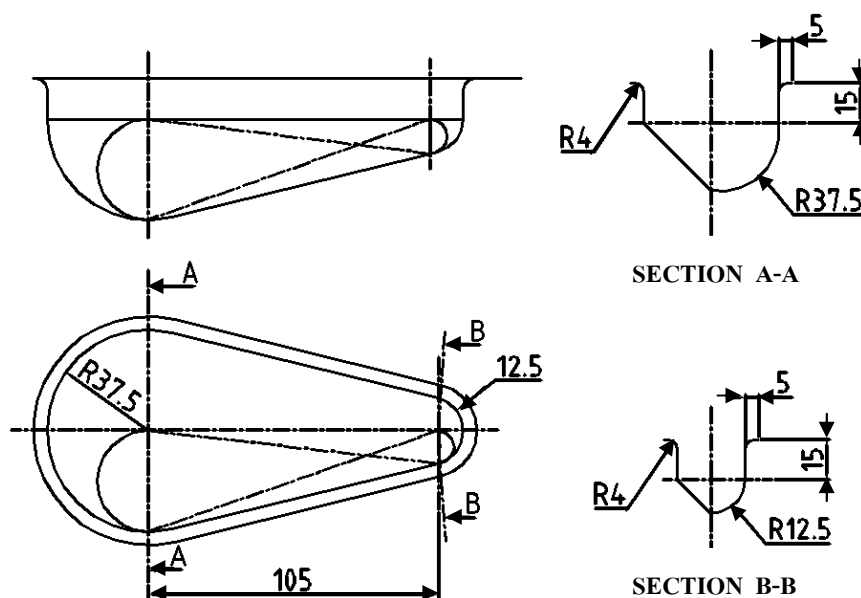
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุชิ้นงาน (%) (ต่อ)

ธาตุที่ประกอบ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย
โครเมียม (Cr)	0.0229	0.0222	0.0231	0.0227
โมลิบดีนัม (Mo)	0.0055	0.0052	0.0059	0.0055
ทองแดง (Cu)	0.0317	0.0331	0.0343	0.0330
วานาเดียม (V)	0.0034	0.0034	0.0037	0.0035
ไทเทเนียม (Ti)	0.0017	0.0018	0.0020	0.0018
อะลูมิเนียม (Al)	0.0541	0.0567	0.0583	0.0564
ทังสเตน (W)	0.0246	0.0057	0.0186	0.0163
โคบอลต์ (Co)	0.0022	0.0023	0.0025	0.0023

จากตารางที่ 3.2 จะได้ค่าเฉลี่ยของส่วนผสมทางเคมี เหล็ก (Fe) คาร์บอน (C) ซิลิกอน (Si) แมงกานีส (Mn) ฟอสฟอรัส (P) กำมะถัน (S) นิกเกิล (Ni) โครเมียม (Cr) โมลิบดีนัม (Mo) ทองแดง (Cu) วานาเดียม (V) ไทเทเนียม (Ti) อะลูมิเนียม (Al) ทังสเตน (W) โคบอลต์ (Co) ซึ่งในการเทียบมาตรฐานจากธาตุหลักได้กำหนด  $C=0.12\text{Max}$   $Mn=0.50\text{Max}$   $P=0.40\text{Max}$   $S=0.45\text{Max}$  เมื่อทดสอบได้ค่า  $C=0.0607$   $S=0.0192$   $Mn=0.2595$   $W=0.0163$   $P=0.0192$   $Al=0.0564$  และ  $Fe=99.4630$  เปอร์เซ็นต์

### 3.3 การออกแบบดายและพUNCH

การออกแบบชิ้นงานและชุดแม่พิมพ์การออกแบบชิ้นงานในรูปทรงไม่สมมาตรซึ่งจะประกอบด้วยกรขึ้นรูปหลายรูปแบบทั้งการตัดงอการดึงการกดอัดชิ้นงานจะมีสปีของปลายทั้งสองด้านที่ไม่เท่ากันคือมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. จัดวางอยู่ในแนวเดียวกันมีระยะเท่ากับ 105 มม. และเดือนด้านข้างเป็นแนวยาวตลอดหลักการออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูป ในภาพที่ 3.3 แสดงการทำงานของแม่พิมพ์ เมื่อวางแผ่นชิ้นงานอยู่บนดาย (Die Block) ก่อนพUNCH (Punch) ลงบนแผ่นงานจะมีแผ่นกดชิ้นงาน (Blank Holder) กดชิ้นงานก่อน โดยอาศัยแรงกดจากคUSHION (Cushion) จากเครื่องปั๊มแรงกดอยู่ในระดับที่เหมาะสมด้วยแรงกดชิ้นงาน (FBH) และแรงกดขึ้นรูปลึก (Fd) ของพUNCH (Punch) กดลงบนแผ่นงานเลื่อนลิคจนได้ความลึกที่ต้องการ



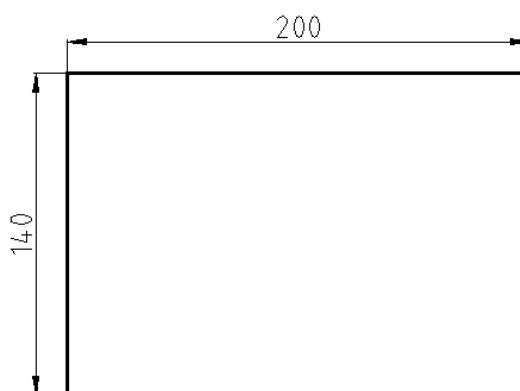
ภาพที่ 3.4 ออกแบบขนาดและรูปร่างของชิ้นงานในรูปทรงไม่สมมาตรซึ่งได้ค่าความเครียดที่แตกต่างกัน

### 3.4 กำหนดตัวแปรทดสอบ

#### 3.4.1 การทดสอบตามชนิดของแผ่นตัดเปล่า (Blank Geometry)

##### 1) ชิ้นงานแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ในการตัดแผ่นงานทดสอบด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่นเรียบตามแนวรีดในกระบวนการผลิตของแผ่นโลหะแบบเย็นตามมาตรฐาน JIS: SPCC - SD

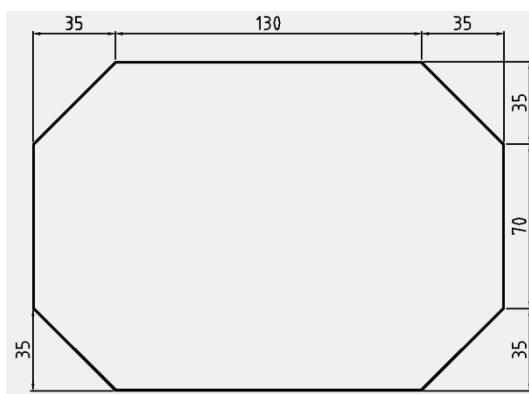


ภาพที่ 3.5 แผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้า

สิ่งสำคัญในการกำหนดขนาดของแผ่นงาน ที่ใช้สำหรับการดึงขึ้นรูปให้ เทียงตรงประการแรก คือ เนื่องจากเหตุผลด้านการประหยัด ดังนั้นสิ่งที่ต้องพิจารณา ได้แก่ การตัดแผ่นชิ้นงานให้เล็กสุดเท่าที่เป็นไปได้ ประการที่สองไม่มีความจำเป็นที่จะใช้แผ่นชิ้นงานขนาดใหญ่ เพราะจะทำให้เป็นการเพิ่มอัตราขึ้นรูป  $\beta$  จะเป็นสาเหตุให้เกิดการฉีกขาดของชิ้นงาน ซึ่งแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่กำหนดคือ 200x140 มม. ดังแสดงในภาพที่ 3.5 มีขนาดเท่ากันของแผ่นตัดเปล่าทั้งสามชนิด

## 2) ชิ้นงานแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุม

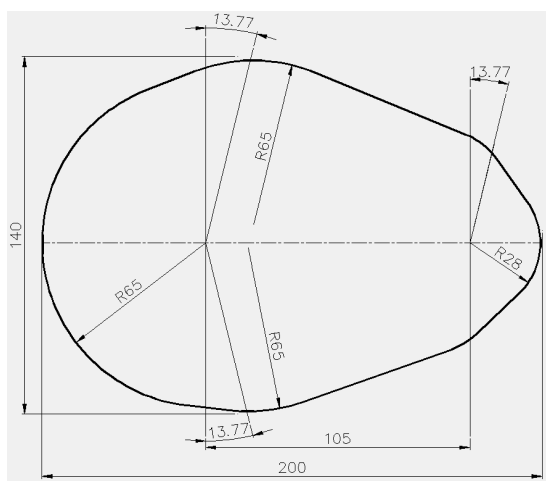
โดยการตัดแผ่นงานเลือกตัดแผ่นงานตามแนวรีดเหมือนกับแผ่นตัดเปล่าแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาด 200x140 มม. ดูจากภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 แผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุม

## 3) ชิ้นงานจากการคำนวณโดยประมาณค่าตามรูปทรงขึ้นรูปลึก

การตัดแผ่นงานตามแนวรีดมีขนาด 200x140 มม. ประมาณค่าโดยการคำนวณจากสมการพื้นฐานของขนาดของแผ่นงาน (Blank Size) นำมาประยุกต์กับรูปทรงที่ทำการศึกษา (ภาคผนวก ก) จนได้ขนาดและรูปร่าง ดังแสดงในภาพที่ 3.7

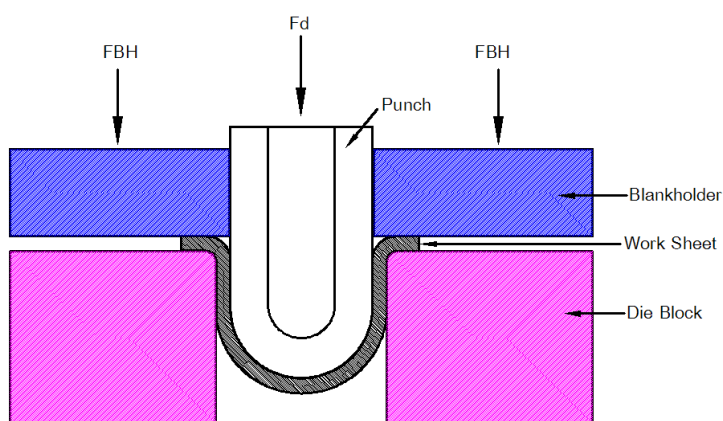


ภาพที่ 3.7 แผ่นตัดเปล่าคำนวณโดยการประมาณค่า

ซึ่งค่าที่ได้นั้นจะต้องนำไปทดสอบว่าได้หรือไม่ตามขนาดที่ต้องการหลังการขึ้นรูป และส่วนมากค่าที่ได้จากการคำนวณจะไม่ใช่ค่าตามความเป็นจริง เป็นเพียงค่าใกล้เคียงเท่านั้น โดยนำค่าที่ได้จากการคำนวณไปเป็นค่าที่กำหนดของชิ้นงานแรกเมื่อเริ่มลองผลิตลองถูกแล้วปรับขนาดต่อไป

#### 3.4.2 แรงกดชิ้นงาน (Blank Holder Force)

ปริมาณความต้องการของแรงกดชิ้นงานจะต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสมกับชนิดของวัสดุนั้นๆ จากภาพที่ 3.8 ในการกดชิ้นงานโดยอาศัยแรงกด (FBH) กดแผ่นชิ้นงาน (Work Sheet) ก่อน แล้วแรงกดขึ้นรูปลึก (Fd) ที่พื้นที่กดผ่านช่องคายทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรจนได้ระลึกตามที่กำหนด



ภาพที่ 3.8 การขึ้นรูปชิ้นงานในขณะที่เกิดการเปลี่ยนรูป



จากการคำนวณแรงใช้เพื่อขึ้นงานตามสมการที่ 2.2 ได้เท่ากับ 104.84 kN และใช้แรงกดขึ้นงานที่ตามสมการที่ 2.3 เท่ากับ 49.69 kN ทำการศึกษาโดยเทียบเป็นขนาดของแรงกดที่ระดับ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปได้ดังนี้

จากการคำนวณเทียบได้  $= \frac{49.69 \times 100}{104.84} = 47.4\%$  เป็นค่าของแรงกดเริ่มต้น (ขึ้นงานที่ไม่ใช้ครอว์บีค)

$$1) \text{ แรงกดขึ้นงานที่ } 20\% = \frac{20 \times 104.84}{100} = 20.96 \text{ kN}$$

$$2) \text{ แรงกดขึ้นงานที่ } 40\% = \frac{40 \times 104.84}{100} = 41.93 \text{ kN}$$

$$3) \text{ แรงกดขึ้นงานที่ } 60\% = \frac{60 \times 104.84}{100} = 62.90 \text{ kN}$$

$$4) \text{ แรงกดขึ้นงานที่ } 80\% = \frac{80 \times 104.84}{100} = 83.87 \text{ kN}$$



ภาพที่ 3.9 ประกอบสายและพื้นชั้นบนแทนเครื่องปั๊มไฮดรอลิกในการขึ้นรูปขึ้นงาน

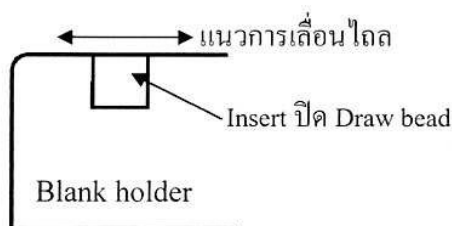
### 3.5 สารหล่อลื่น (Lubricant) ใช้ทดสอบ

แผ่นพลาสติกโพลีเอทิลีน ซึ่งมีโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene: HDPE) จะมีโครงสร้างเป็นเส้นตรงลักษณะโปร่งแสงหรือขุ่น แข็งและเหนียว ราคาถูก ขึ้นรูปง่าย ทนต่อสารเคมี ก๊าซซึมผ่านได้ยาก ที่มีความหนาเท่ากับ 0.10 มม.

### 3.6 ดรอร์บีดชนิดเดี่ยว (Draw Bead Single)

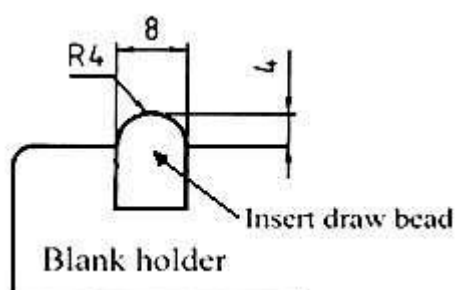
เพื่อควบคุมการไหลตัวของแผ่นขึ้นงานให้เกิดความสม่ำเสมอ ด้วยสาเหตุของรูปทรงขึ้นงานสำเร็จมีรูปทรงที่ไม่สมมาตรจึงทำให้ความต้องการของปริมาณแรงกดขึ้นงานที่แตกต่างกัน จึงต้องมีเครื่องมือที่ใช้ในการบังคับนั้น ได้แก่ ดรอร์บีด (Draw Bead) และขยายขนาดของแผ่นตัดเปล่า (Blank Size) ออกอีก 10 มม. โดยรอบ ซึ่งตัวแปรนี้ได้ทำการทดสอบทั้งสามระดับต่อไปนี้

1) ไม่ใช้ดรอร์บีด อาศัยความเสียดทานบนระนาบแผ่นกดของขึ้นงาน (Blank Holder) และแผ่นตาย (Die) ที่ราบเรียบ ดังแสดงในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 แผ่นกดขึ้นงานที่ไม่ใช้ดรอร์บีด [2]

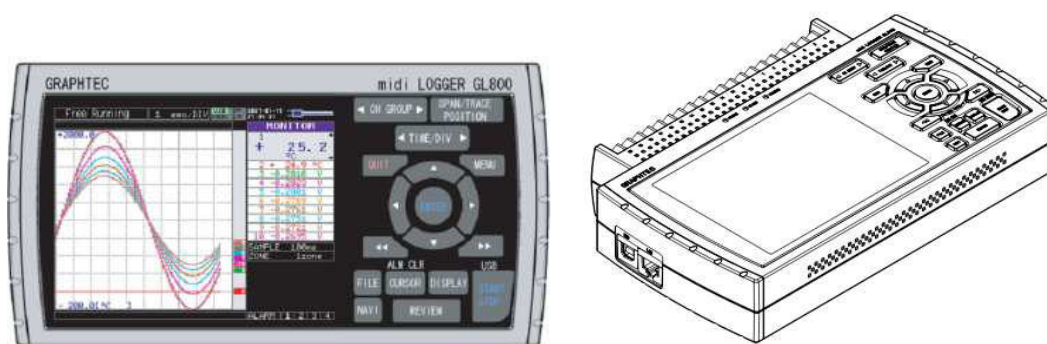
2) ดรอร์บีดชนิดส่วนโค้งครึ่งวงกลม มีความสูง 4 มม. ดังแสดงในภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 ดรอร์บีดชนิดส่วนโค้งครึ่งวงกลม (Insert in Blank Holder) [2]

### 3.7 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล

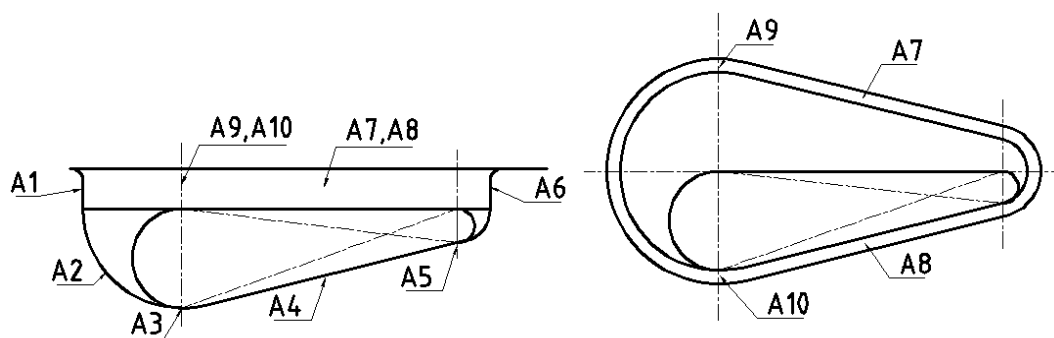
หลังจากเตรียมแผ่นชิ้นงานทดสอบเริ่มในการทดลองเพื่อการเก็บข้อมูลมีขั้นตอนกำหนดตัวแปรของการทดลองอิทธิพลของตัวแปรทั้ง 4 ได้แก่ 1) รูปร่างของแผ่นตัดเปล่า (Blank Geometry) 2) ปริมาณแรงกดชิ้นงาน (Blank Holder Force) 3) ชนิดของสารหล่อลื่น (Lubricant) 4) ชนิดครอว์บีค (Draw Bead) ทำการทดสอบตัวแปรที่ระดับบันทึกความเปลี่ยนแปลงของแรงต่อระยะลึที่ขึ้นรูปวัดแรงด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Mini Data Logger) ดังแสดงในภาพที่ 3.12 โดยผ่านตัววัดแรงดันน้ำมัน (Pressure Transducer) ตัววัดระยะทาง (Liners Guide) ดังแสดงในภาพที่ 3.13 และจุดของการตรวจวัด 10 จุด ดังแสดงในภาพที่ 3.14 ทุกๆ ชั้นที่ทดสอบในแต่ละระดับของอิทธิพลตัวแปรโดยนำชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปของแต่ละตัวแปรมาวัดความหนาของผิวทั้ง 10 จุด ด้วยไมโครมิเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 3.15 แล้วบันทึกผล



ภาพที่ 3.12 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Mini Data Logger)



ภาพที่ 3.13 อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน (Pressure Transducer)



ภาพที่ 3.14 จุดที่ใช้ในการตรวจสอบวัดความหนาบนชิ้นงาน



ภาพที่ 3.15 อุปกรณ์วัดความหนาผิวชิ้นงาน

## บทที่ 4

### ผลและวิเคราะห์การทดสอบ

ในการศึกษาความหนาของผนังชิ้นงานของกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรวัสดุเกรด JIS: SPCC –SD ที่มีความหนา 1 มม. พอที่จะสรุปผลที่ได้ในขั้นตอนการทดลองที่มีหลายตัวแปรในการวิเคราะห์ข้อมูลดังต่อไปนี้

- 1) ผลการทดสอบอิทธิพลของรูปร่างแผ่นตัดเปล่า
- 2) ผลการทดสอบแรงกดที่ชิ้นงาน
- 3) ผลการทดสอบอิทธิพลของครอว์บีด
- 4) การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

#### 4.1 ผลการทดสอบอิทธิพลของรูปร่างแผ่นตัดเปล่า

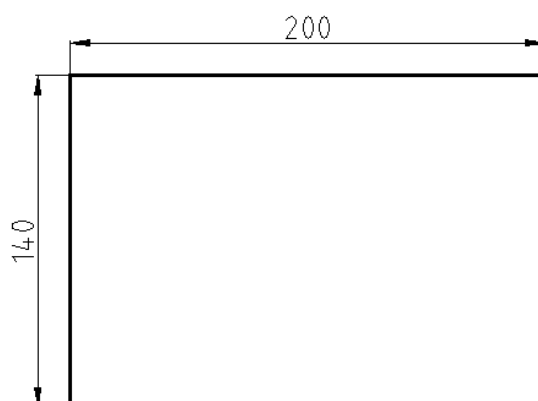
ในการทดสอบของการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร เริ่มจากการเตรียมวัสดุเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC – SD ความหนา 1 มม. ตัดตามขนาดที่กำหนดของแต่ละปัจจัยทดสอบ ดังภาพที่ 4.1, 4.4 และ 4.7 เมื่อได้ชิ้นงานแล้วนำแผ่นเปล่ามาทำความสะอาดก่อนจะวางบนแม่พิมพ์ บนเครื่องปั๊มไฮดรอลิกขนาดแรงดันสูงสุด 80 ตัน ซึ่งประกอบด้วย พันซ์ ดาย และเบลงก์โฮลเดอร์ แล้วนำแผ่นพลาสติก (Polyethylene) ความหนา 1 มม. ตัดขนาด 200 x 140 มม. วางบนแผ่นตัดเปล่าก่อนทำการปั๊มขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งใช้เป็นสารหล่อลื่นในการขึ้นรูป เมื่อตั้งค่าระยะกดลิกของพันซ์และค่าของแรงกดชิ้นงาน แล้วการปั๊มชิ้นงาน โดยแรงกดชิ้นงาน(Blank Holder Force) เท่ากับ 49.69 kN ได้จากการคำนวณภาคผนวก ก (ก.2) แล้วบันทึกและวิเคราะห์ผลทดสอบ

#### ตารางที่ 4.1 ปัจจัยที่ใช้ควบคุมการขึ้นรูปชิ้นงานตามชนิดของแผ่นตัดเปล่า

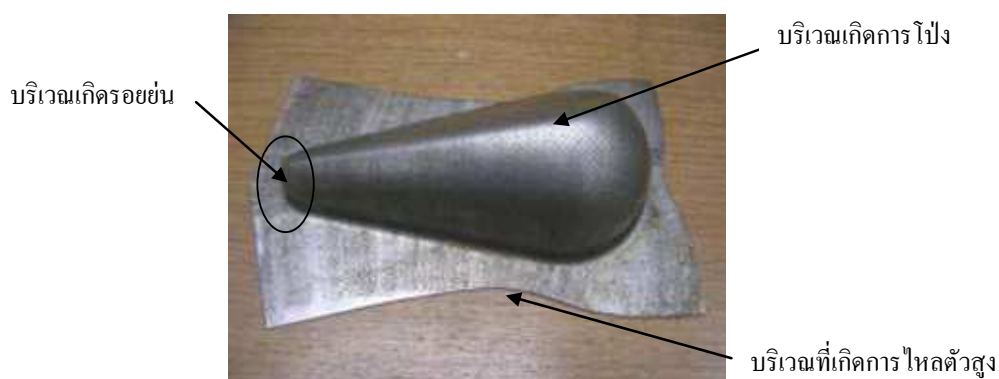
ปัจจัยควบคุม	ปัจจัยทดสอบ
สารหล่อลื่นแผ่นพลาสติกโพลีเอทิลีน	แผ่นตัดเปล่าสีเหลี่ยมผืนผ้า
แรงกดชิ้นงาน (Blank Holder Force) = 49.69 kN	แผ่นตัดเปล่าสีเหลี่ยมชนิดบากมุม
ระยะกดลิกของพันซ์ = 52 มม.	แผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณโดยการประมาณค่า

#### 4.1.1 แผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้า

นำแผ่นวัสดุ SPCC-SD ตัดขนาด 200 x 140 มม. ดังแสดงในภาพที่ 4.1 ชิ้นงานสำเร็จหลังจากการขึ้นรูป ดังภาพแสดงในภาพที่ 4.2

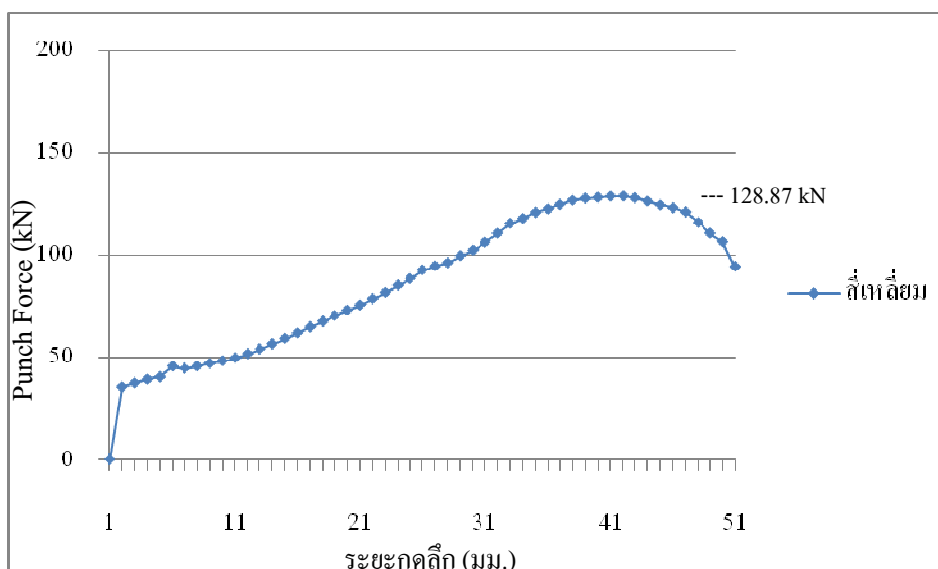


ภาพที่ 4.1 แผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้า



ภาพที่ 4.2 ชิ้นงานสำเร็จจากการขึ้นรูปของแผ่นเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อวิเคราะห์ผล

จากภาพที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าแผ่นรูปร่างของชิ้นงาน (Blank Geometry) มีลักษณะแตกต่างทั้งความสูงและขนาดหน้าตัดของพื้นที่ในการเปลี่ยนรูปบริเวณหน้าตัดพื้นที่ เมื่อการไหลตัวของแผ่นงานไม่สมมาตรกันความสามารถในการไหลตัวเข้าสู่ช่องตาย (Die) ก็จะแตกต่างกัน เมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานจะเห็นได้ว่าชิ้นงานจะมีหน้าตัดต่างกันไปบริเวณที่ไหลตัวของชิ้นงานเกิดการโป่งบริเวณสันของชิ้นงานและมีรอยย่นที่บริเวณปลายแหลมอย่างชัดเจน

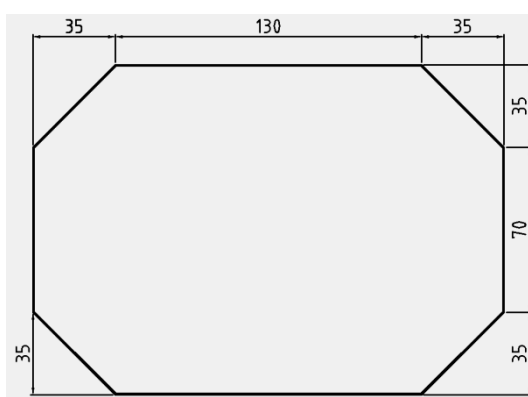


ภาพที่ 4.3 แรงกดขึ้นรูปของแผ่นเปล่าตีเหล็กผสมพื้นผิว

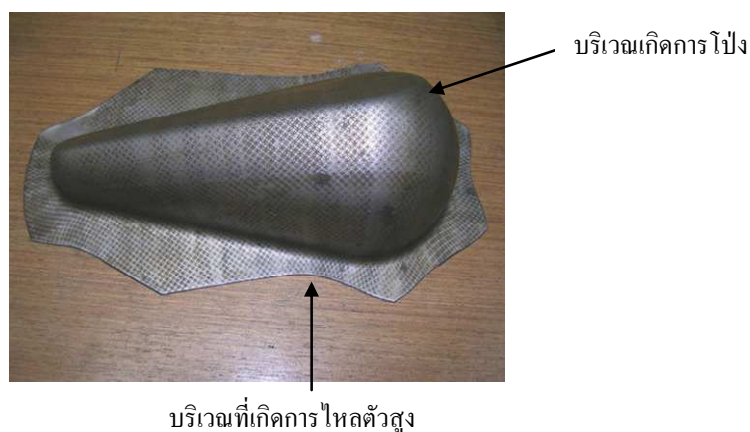
จากกราฟแสดงแรงกดจะเห็นได้ว่าแรงที่ใช้กดขึ้นงานระยะกดลึก 10 มม. 20 มม. 30 มม. 40 มม. 50 มม. และระยะสุดท้ายที่ 52 มม. จะได้แรงขึ้นรูปที่ 47.07 kN, 70.35 kN, 99.65 kN, 127.78 kN, 110.54 kN และ 94.32 kN ตามลำดับ พบว่าแรงขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 128.87 kN ที่ระยะกดลึกประมาณ 43 มม.

#### 4.1.2 แผ่นตัดเปล่าตีเหล็กชนิดบากมุม

นำแผ่นวัสดุ SPCC-SD ตัดแผ่นตัดเปล่าตีเหล็กชนิดบากมุมทั้งสี่ด้านขนาดเท่ากับแผ่นตัดเปล่าตีเหล็กพื้นผิว คือ 200 x 140 มม. และบากมุมทุกด้าน โดยแต่ละด้านมีขนาด 35 มม. ดังภาพที่ 4.4

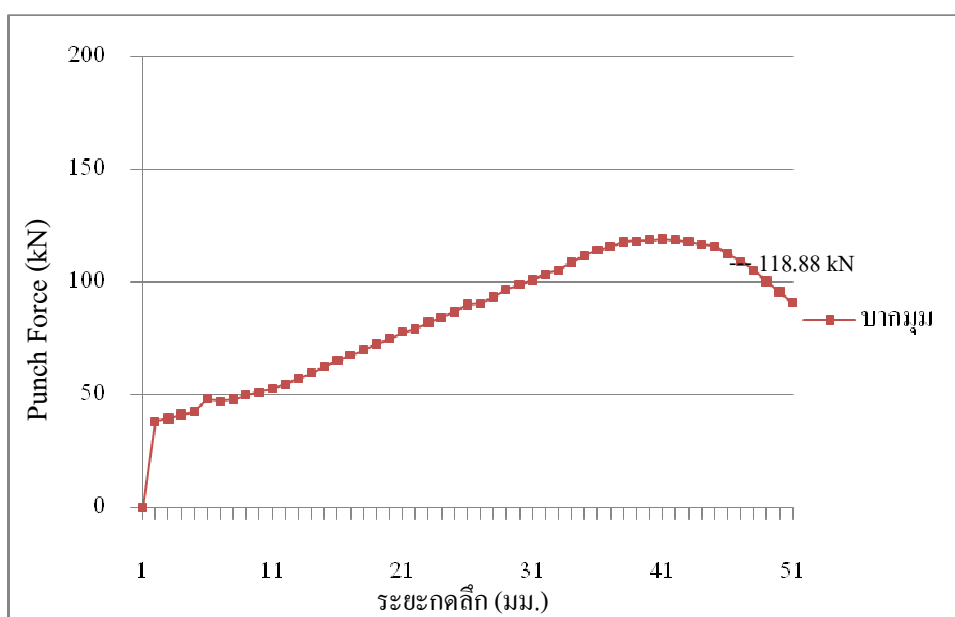


ภาพที่ 4.4 แผ่นตัดเปล่าตีเหล็กชนิดบากมุม



ภาพที่ 4.5 ชิ้นงานสำเร็จจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมชนิดบากมุมเพื่อวิเคราะห์ผล

จากภาพที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่ไหลตัวของชิ้นงานมีลักษณะที่คล้ายกันเนื่องจากการบากมุมของชิ้นงานทำให้การไหลตัวของวัสดุมีมากกว่าชิ้นงานแรกแต่พบว่าชิ้นงานที่ได้พบว่าชิ้นงานสำเร็จมีลักษณะโป่งบริเวณสันของชิ้นงานและพรอย่นขนาดเล็กที่บริเวณปีกชิ้นงานลดลง



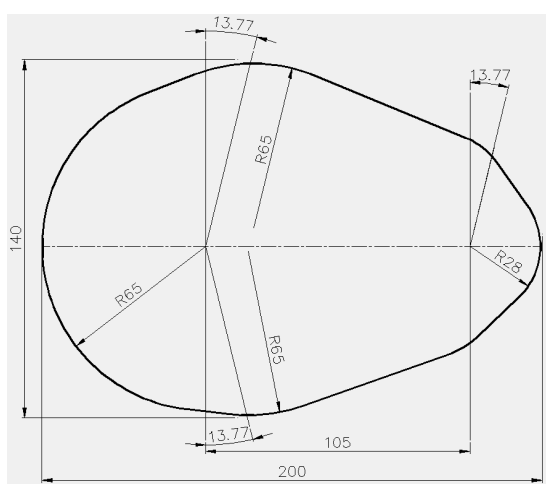
ภาพที่ 4.6 แรงกดขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมชนิดบากมุม



จากกราฟแสดงให้เห็นว่าแรงที่ใช้กดชิ้นงานที่ระยะกดลึก 10 มม. 20 มม. 30 มม. 40 มม. 50 มม. และระยะกดสุดท้ายที่ 52 มม. จะได้แรงขึ้นรูปจริงที่ 49.75kN, 72.20kN, 96.61 kN, 118.12 kN, 100.12 kN และ 90.70 kN ตามลำดับพบว่าแรงขึ้นรูปจริงสูงสุดเท่ากับ 118.88 kN ที่ระยะกดลึกประมาณ 42 มม.

#### 4.1.3 แผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณโดยการประมาณค่า

ทำการสร้างแผ่นตัดเปล่าที่ได้จากการคำนวณโดยการประมาณค่า ซึ่งดูขนาดของแผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณได้จาก (ภาคผนวก ง) เมื่อสร้างเสร็จจะได้แผ่นตัดเปล่าดังแสดงในภาพที่ 4.7

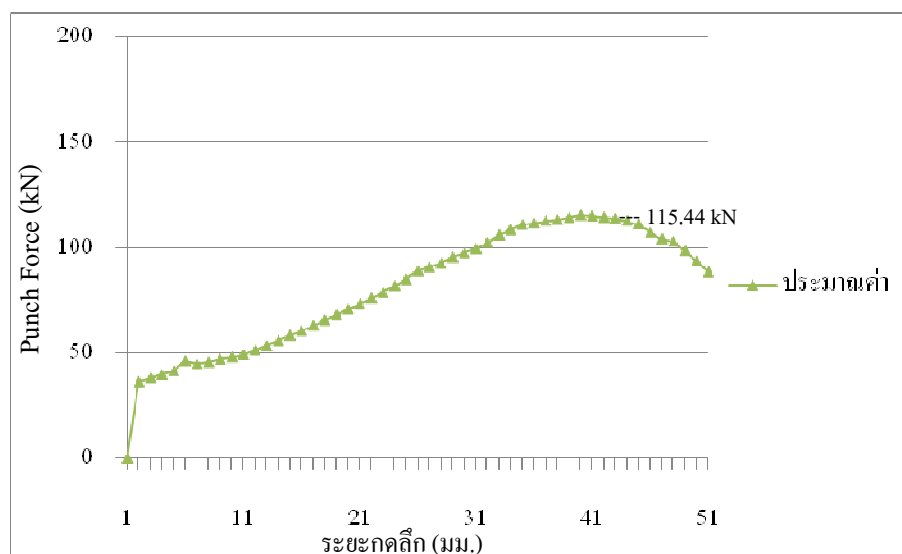


ภาพที่ 4.7 แผ่นตัดเปล่าคำนวณโดยการประมาณค่า

บริเวณเกิดการโป่ง



ภาพที่ 4.8 ชิ้นงานสำเร็จจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าคำนวณโดยการประมาณค่าเพื่อวิเคราะห์ผล

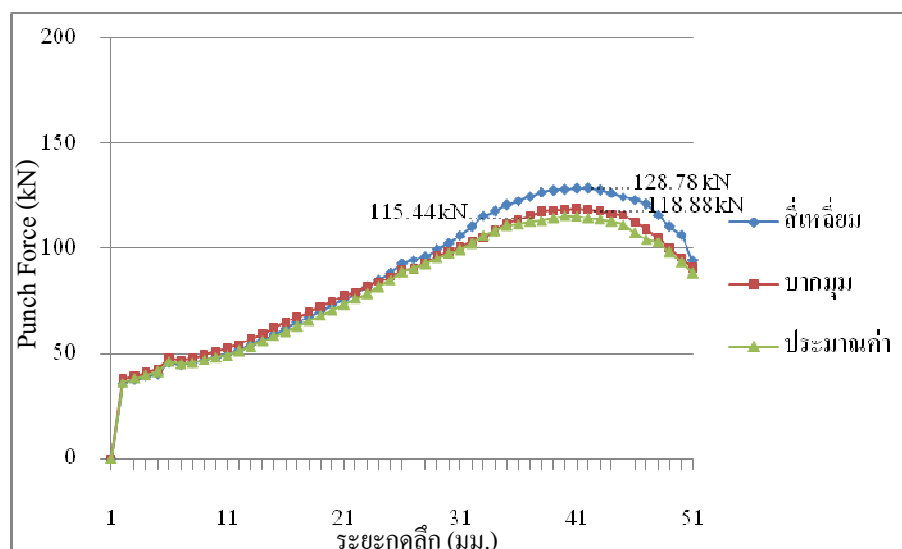


ภาพที่ 4.9 แรงกดขึ้นรูปของแผ่นเปล้าคำนวณโดยการประมาณค่า

จากกราฟแสดงแรงกดจะเห็นได้ว่าแรงที่ใช้กดขึ้นงานระยะกดลึก 10 มม. 20 มม. 30 มม. 40 มม. 50 มม. และระยะสุดท้ายที่ 52 มม. จะได้แรงขึ้นรูปที่ 46.98 kN, 68.01kN, 95.44 kN, 114.35 kN, 98.35 kN และ 88.40 kN ตามลำดับ พบว่าแรงขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 115.44 kN ที่ระยะกดลึกประมาณ 46 มม.

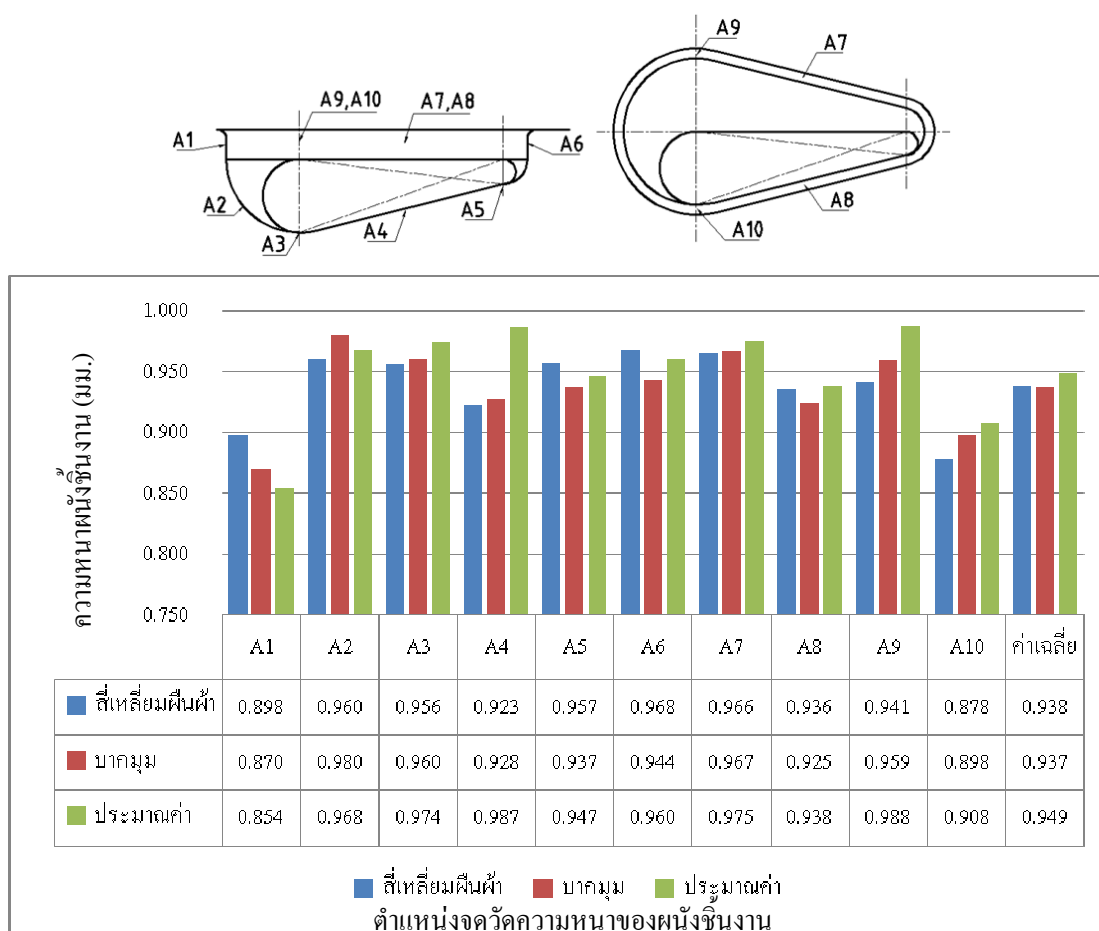
#### 4.1.4 เปรียบเทียบแรงตามชนิดของแผ่นเปล้า 3 ชนิด

ในการทดลองนั้นพบว่า ลักษณะของแผ่นตัดเปล้าที่นำมาใช้นั้นจะได้ผลที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะแผ่นตัดเปล้าที่ได้จากการคำนวณโดยการประมาณค่านั้นพบว่าการไหลตัวของวัสดุเข้าสู่คานอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจะสังเกตจากปริมาณของวัสดุที่เหลืออยู่รอบๆ ปีกของชิ้นงาน ผลการทดสอบยังพบว่าการใช้แผ่นตัดเปล้าแบบคำนวณโดยการประมาณค่าจะสามารถลดการฉีกขาดของชิ้นงานสรุปผลการบันทึกค่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล้า 3 ชนิด แสดงในตารางที่ 4.2 แสดงแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแต่ละชนิดของแผ่นตัดเปล้า



ภาพที่ 4.10 การเปรียบเทียบแรงกดขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าทั้ง 3 ชนิด

จากภาพที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงกดขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าทั้ง 3 ชนิด จะพบว่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานของแผ่นตัดเปล่าทั้ง 3 ชนิด จะสังเกตได้ว่าเมื่อเริ่มให้ค่าแรงกดจะมาทิศทางเดียวกันและเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อถึงระยะกดลึกที่ประมาณ 29 มม. หลังจากนั้นจะได้แรงในการขึ้นรูปที่ต่างกัน ซึ่งจะส่งผลถึงความหนาของผนังชิ้นงาน ตามตำแหน่งวัดความหนาของแต่ละจุดดังแสดงในภาพที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานของแผ่นตัดเปล่าทั้ง 3 ชนิด โดยแผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณโดยการประมาณค่าจะใช้แรงในการขึ้นรูปน้อยสุด (115.44 kN) ซึ่งส่งผลให้ความหนาของผนังชิ้นงานที่จุดวิกฤต A1 มีความหนามากสุด (0.898 มม.) ในขณะที่การขึ้นรูปด้วยแผ่นตัดเปล่าแบบสี่เหลี่ยมจะใช้แรงในการขึ้นรูปมากที่สุด (128.78 kN) เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัดเปล่าแบบอื่นๆ และจากการวัดค่าความหนาของผนังชิ้นงานที่จุด A1 พบว่ามีค่าความหนาน้อยที่สุด (0.854 มม.) ซึ่งผลการเปรียบเทียบความหนาผนังชิ้นงานที่วัดได้ในบริเวณจุดสนใจต่างๆ จะแสดงไว้ในภาพที่ 4.11 Punch Force (kN)



ภาพที่ 4.11 การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่า ที่แรงกดชิ้นงาน (Blank Holder Force) เท่ากับ 49.69 kN

จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของความหนาผนังชิ้นงานจะพบว่าแผ่นตัดเปล่าแบบจากการคำนวณโดยการประมวลค่า มีค่าความแตกต่างของความหนาผนังชิ้นงานน้อยสุด ที่ค่าเฉลี่ย 0.949 มม.

#### 4.2 ผลการทดสอบอิทธิพลแรงกดชิ้นงาน

ในการทดสอบอิทธิพลของแรงกดชิ้นงานต่อการขึ้นรูปปลีค จะทำการทดสอบแรงกดชิ้นงานที่มีขนาดต่างๆ กัน ดังแสดงในตารางที่ 4.2 การทดสอบควบคุมให้ตัวแปรในการขึ้นรูปอื่นๆ เป็นปัจจัยในการควบคุมและให้ขนาดแรงกดแผ่นตัดเปล่าเป็นปัจจัยทดสอบ ที่มีขนาดต่างๆ กันที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแรงกดชิ้นรูปที่คำนวณได้ตามสมการที่ 2.3

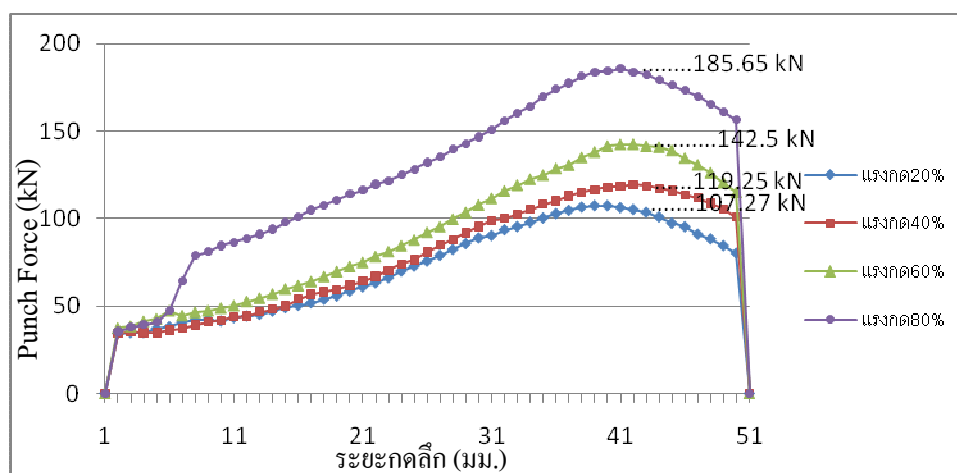
ตารางที่ 4.2 ปัจจัยที่ใช้ควบคุมการขึ้นรูปชิ้นงานตามชนิดของแรงกดชิ้นงาน

ปัจจัยควบคุม	ปัจจัยทดสอบ
สารหล่อลื่นแผ่นพลาสติกโพลีเอทิลีน	20% แรงกดชิ้นงาน เท่ากับ 20.96 kN
แรงกดขึ้นรูป (Punch Force) = 104.49 kN	40% แรงกดชิ้นงาน เท่ากับ 41.93 kN
แผ่นตัดเปล่าสีเหลืองพื้นผ้า	60% แรงกดชิ้นงาน เท่ากับ 62.90 kN
การใช้คอรวิบีค	80% แรงกดชิ้นงาน เท่ากับ 83.87 kN

#### 4.2.1 การทดสอบแรงกดแผ่นตัดเปล่า โดยไม่ใช้คอรวิบีค

##### 1) ใช้แผ่นตัดเปล่าสีเหลืองพื้นผ้า

ผลการวัดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยใช้ขนาดแรงกดแผ่นตัดเปล่าต่างกันที่ 20%, 40%, 60% และ 80% แสดงในภาพที่ 4.12 จากการทดสอบพบว่าเมื่อใช้แรงกดแผ่นตัดเปล่ามาก จะทำให้แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน โดยที่แรงกดขึ้นรูปจะเริ่มยกระดับสูงขึ้นและเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนเมื่อระยะกดชิ้นงานถึงประมาณ 5 มม. และจะยังคงรักษาระดับที่สูงกว่าไปเรื่อยๆ จนกระทั่งจบกระบวนการขึ้นรูป



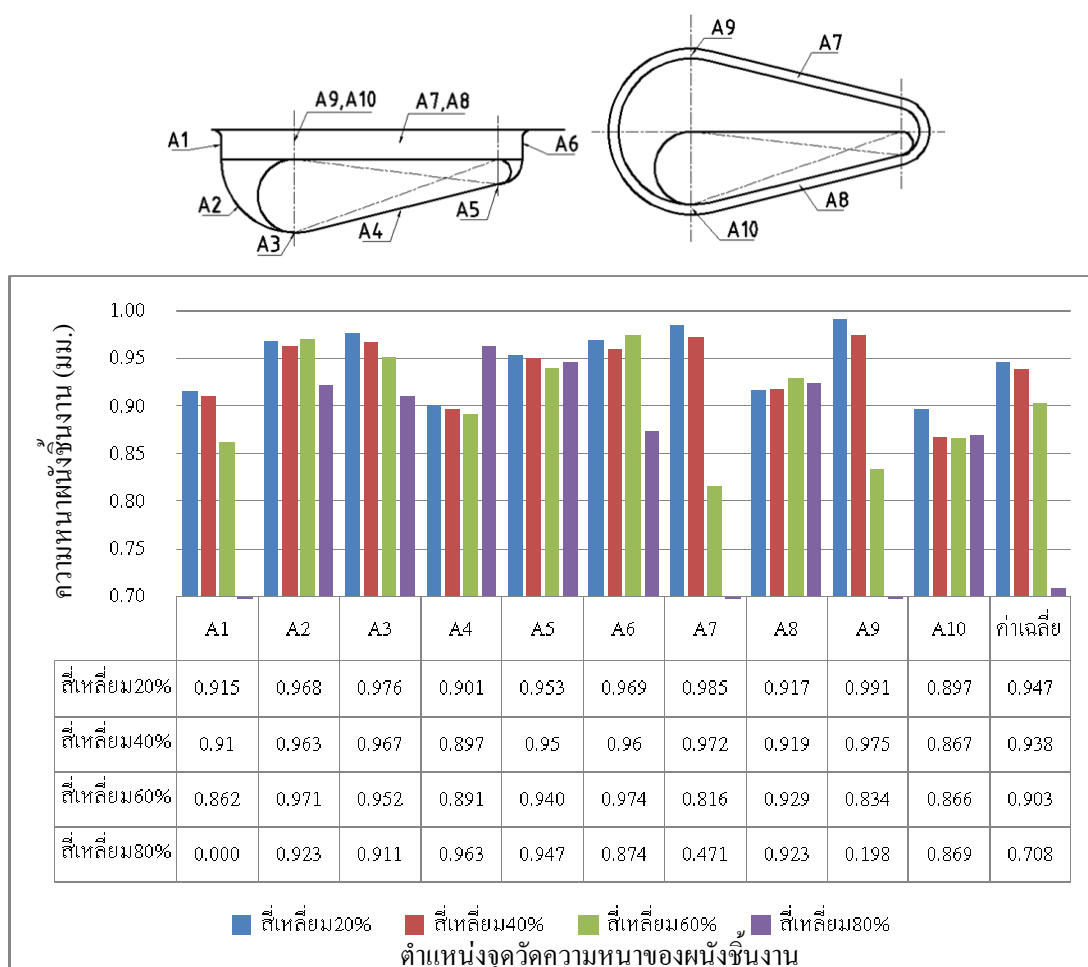
ภาพที่ 4.12 การเปรียบเทียบแรงกดที่ชิ้นงานที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแผ่นตัดเปล่าสีเหลืองพื้นผ้า

ผลจากการตรวจสอบชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูปด้วยสายตา พบว่าการแรงกดที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปขึ้นจากแผ่นตัดเปล่ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า พบว่าแรงกดขนาด 40% (41.93 kN) จะสามารถลากขึ้นรูปชิ้นงาน ได้สมบูรณ์ที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแรงกดขนาดอื่นๆ (ดูตารางที่ 4.3)

**ตารางที่ 4.3** ผลการตรวจสอบชิ้นงานของแผ่นตัดเปล่า สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงกดขึ้นรูปต่างๆ

แรงกดชิ้นงาน	ชิ้นงาน	ปัญหาที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบ
20% (20.96 kN)	ไม่ผ่าน	ชิ้นงานมีรอยย่นบริเวณปีกชิ้นงานอย่างชัดเจน
40% (41.93 kN)	ผ่าน	ชิ้นงานที่ได้มีรอยย่นเล็กน้อย บริเวณปีกชิ้นงาน
60% (62.90 kN)	ผ่าน	ชิ้นงานมีการโป่งของสัน
80% (83.87 kN)	ไม่ผ่าน	ชิ้นงานมีการโป่งตัว A4 และเกิดการฉีกขาดของชิ้นงาน ณ จุด A1, A7, A9

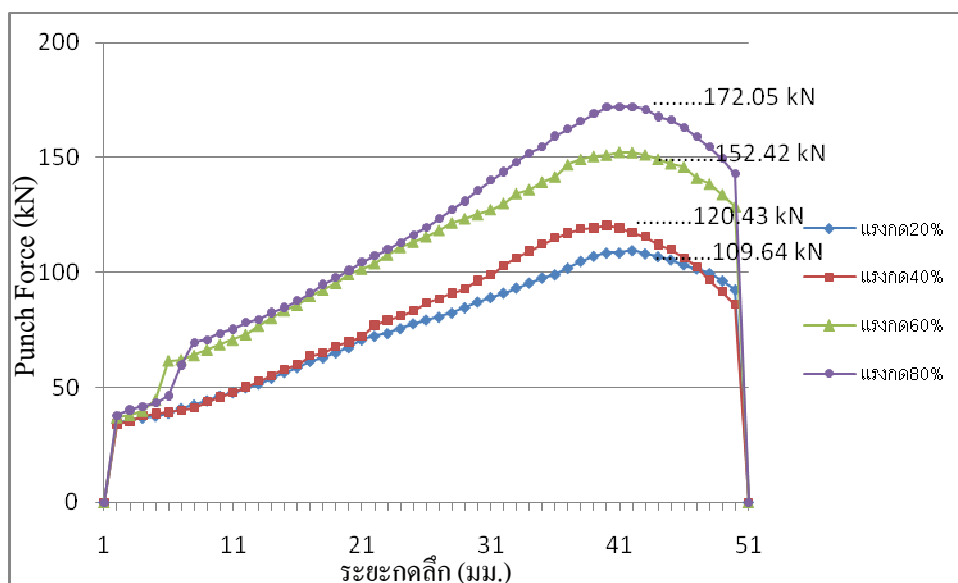
ผลการวัดความหนาผนังชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากแผ่นตัดเปล่าแบบสี่เหลี่ยม โดยใช้แรงกดชิ้นงานขนาดต่างๆ กัน แสดงไว้ในภาพที่ 4.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดแรงกดแผ่นตัดเปล่าชิ้นงานมีอิทธิพลต่อความหนาของชิ้นงาน ซึ่งเมื่อใช้แรงกดชิ้นงานมากขึ้นผนังของชิ้นงานจะบางลง จนเกิดการฉีกขาดเมื่อใช้แรงกด 80% และจากการหาค่าเฉลี่ยความหนาผนังชิ้นงานพบว่า แรงกดชิ้นงานที่ 20% มีความหนาของผนังชิ้นงาน โดยเฉลี่ยมากที่สุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของแรงกดเป็น 40%, 60% และ 80% ความหนาของผนังชิ้นงานจะลดลงขึ้นตามลำดับ จุด A10 ได้ค่าความหนาของผนังชิ้นงานอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งความรุนแรงสูงสุดของชิ้นงานสำเร็จ ณ A10 ซึ่งเป็นพื้นที่ของจุดวิกฤติ และจุด A6 และ A7 มีความหนาของผนังชิ้นงานสูงกว่าตำแหน่งอื่น



ภาพที่ 4.13 การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่า

## 2) ใช้แผ่นตัดเปล่าสีเหลี่ยมผืนผ้าบากมุม

ผลการวัดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานจากแผ่นตัดเปล่ารูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุม โดยใช้นาฬิกาแรงกดแผ่นตัดเปล่าต่างกันที่ 20%, 40%, 60% และ 80% แสดงในภาพที่ 4.14 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบกราฟแรงลากขึ้นรูปชิ้นงานเมื่อใช้แรงกดแผ่นตัดเปล่าขนาดต่างๆ กัน และจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขนาดแรงกดแผ่นตัดเปล่าจะมีอิทธิพลต่อแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป เมื่อใช้แรงกดแผ่นตัดเปล่าสูงขึ้น จะส่งผลทำให้แรงลากขึ้นรูปจะมีขนาดสูงขึ้น



ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบแรงกดที่ขึ้นงานที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแผ่นตัดปล้ำสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุม

ผลจากการตรวจสอบชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูปด้วยสายตา พบว่าการแรงกดที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปจากแผ่นตัดปล้ำรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุม พบว่าแรงกดขนาด 40% (41.93 kN) จะสามารถลากขึ้นรูปชิ้นงานได้สมบูรณ์ที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแรงกดขนาดอื่นๆ (ดูตารางที่ 4.4)

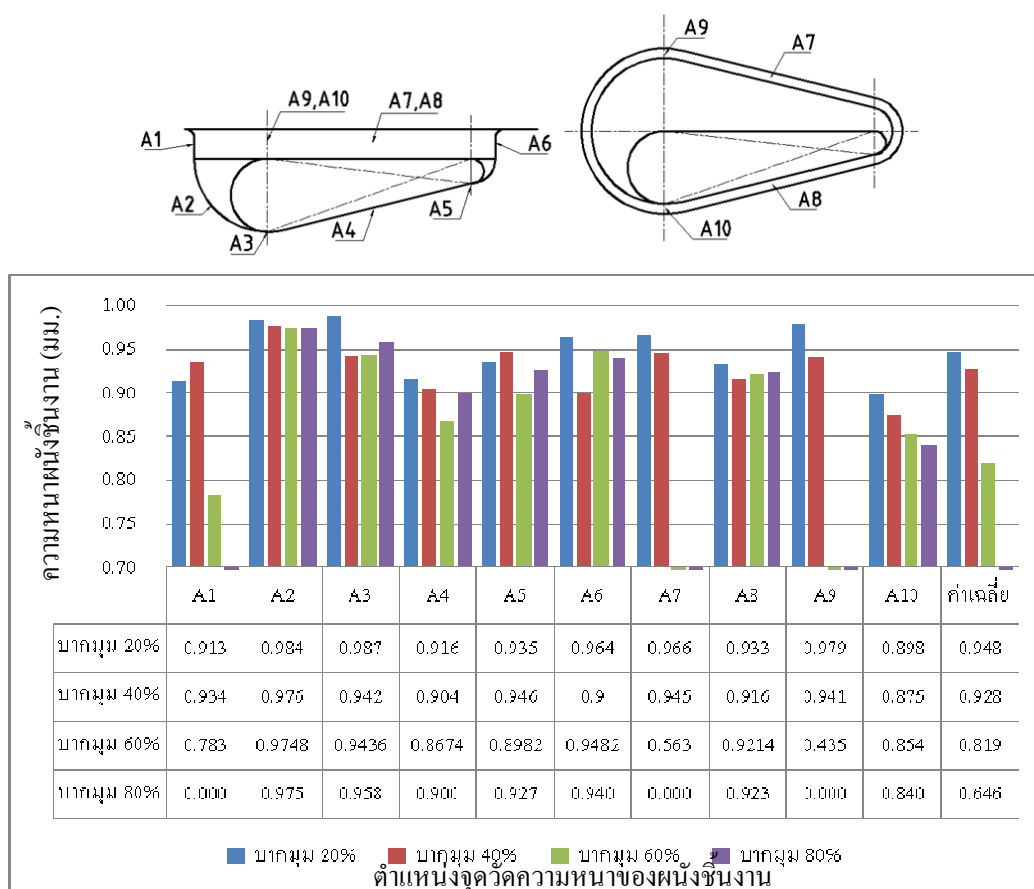
ตารางที่ 4.4 ผลการตรวจสอบชิ้นงานของแผ่นตัดปล้ำสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุมที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงกดขึ้นรูปต่างๆ

แรงกดขึ้นรูป	ชิ้นงาน	ปัญหาที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบ
20% (20.96 kN)	ไม่ผ่าน	ชิ้นงานมีรอยย่นบริเวณปีกชิ้นงานอย่างชัดเจน
40% (41.93 kN)	ผ่าน	ชิ้นงานที่ได้มีรอยย่นเล็กน้อย บริเวณปีกชิ้นงาน
60% (62.90 kN)	ไม่ผ่าน	ชิ้นงานมีการโป่งของสัน ณ จุดวัด A4
80% (83.87 kN)	ไม่ผ่าน	ชิ้นงานมีการโป่งตัว A4 และเกิดการฉีกขาดของชิ้นงาน ณ จุด A1, A7, A9

ผลการวัดความหนาผนังชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากแผ่นตัดปล้ำแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุม โดยใช้แรงกดขึ้นงานขนาดต่างๆ กัน แสดงไว้ในภาพที่ 4.15 ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดความหนาของผนัง



ชิ้นงานจะลดลงเมื่อใช้แรงกดชิ้นงานมากขึ้น จนเกิดการบิดงอเมื่อใช้แรงกด 80% และจากการหาค่าเฉลี่ยความหนาผนังชิ้นงานพบว่า แรงกดชิ้นงานที่ 20% มีความหนาของผนังชิ้นงานโดยเฉลี่ยมากที่สุดและมีรอยยับกับชิ้นงาน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของแรงกดเป็น 40%, 60% และ 80% ความหนาของผนังชิ้นงานจะลดลงตามลำดับ จุด A10 ได้ค่าความหนาของผนังชิ้นงานอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งความรุนแรงสูงสุดของชิ้นงานสำเร็จ ณ A10 ซึ่งเป็นพื้นที่ของจุดวิกฤติ และจุด A6 และ A7 มีความหนาของผนังชิ้นงานสูงกว่าตำแหน่งอื่น

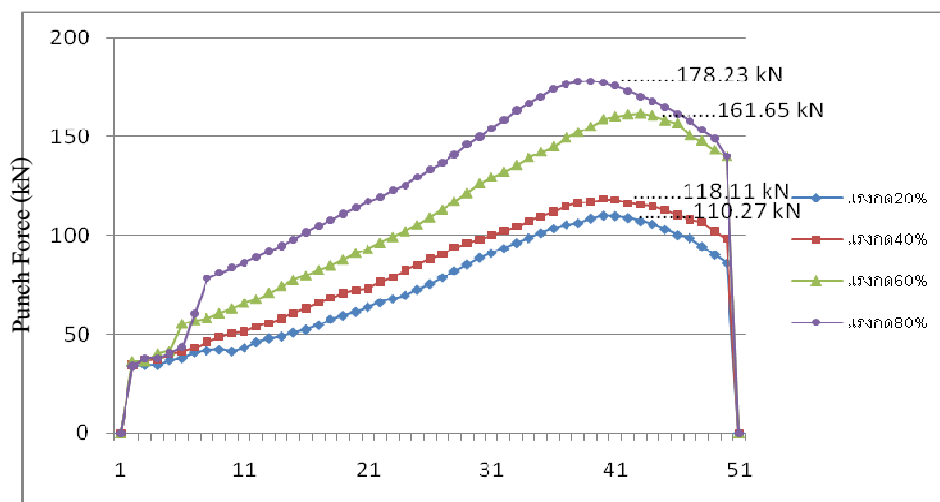


ภาพที่ 4.15 การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่า

### 3) ใช้แผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณ

ผลการวัดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานจากแผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณ โดยใช้ขนาดแรงกดแผ่นตัดเปล่าต่างกันที่ 20%, 40%, 60% และ 80% แสดงในภาพที่ 4.15 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบกราฟแรงลากขึ้นรูปชิ้นงานเมื่อใช้แรงกดแผ่นตัดเปล่าขนาดต่างๆ กัน และจะเห็นได้ว่า

การเพิ่มขนาดแรงกดแผ่นตัดเปล่าจะมีอิทธิพลต่อแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป เมื่อใช้แรงกดแผ่นตัดเปล่าสูงขึ้น จะส่งผลทำให้แรงลากขึ้นรูปจะมีขนาดสูงขึ้น



ระยะกดลึก (มม.)

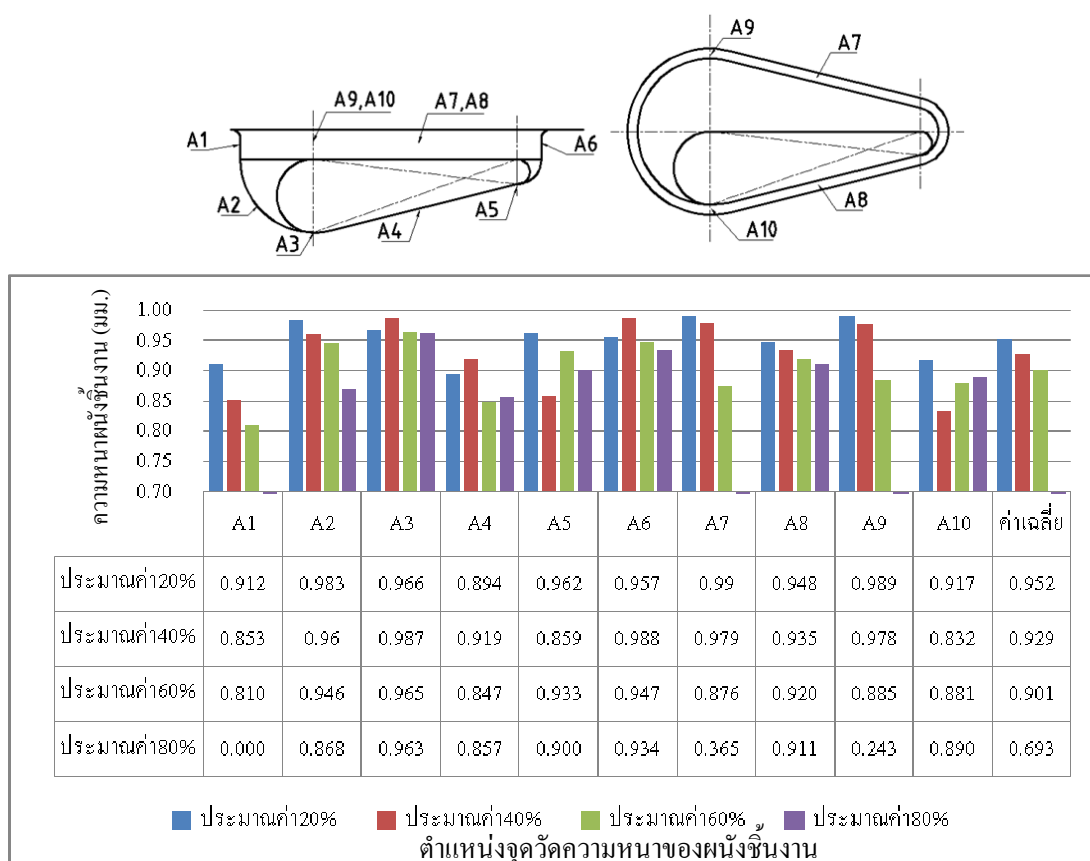
ภาพที่ 4.16 การเปรียบเทียบแรงกดที่ขึ้นงานที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแผ่นตัดเปล่า ที่ได้จากการคำนวณโดยการประมาณค่า

ผลจากการตรวจสอบชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูปด้วยสายตา พบว่าการแรงกดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขึ้นรูปขึ้นจากแผ่นตัดเปล่าแบบที่ได้จากการคำนวณโดยการประมาณค่า เป็นแรงกดขนาด 40% (41.93 kN) ซึ่งจะสามารถใช้กดชิ้นงานและลากขึ้นรูปชิ้นงานได้สมบูรณ์ที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแรงกดขนาดอื่นๆ (ดูตารางที่ 4.5)

ตารางที่ 4.5 ผลการตรวจสอบชิ้นงานของแผ่นตัดเปล่าที่ได้จากการคำนวณ โดยการประมาณค่าที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงกดขึ้นรูปต่างๆ

แรงกดขึ้นรูป	ชิ้นงาน	ปัญหาที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบ
20% (20.96 kN)	ไม่ผ่าน	ชิ้นงานมีรอยย่นบริเวณปีกชิ้นงานอย่างชัดเจน
40% (41.93 kN)	ผ่าน	ชิ้นงานที่ได้มีรอยย่นเล็กน้อย บริเวณปีกชิ้นงาน
60% ( 62.90 kN)	ผ่าน	ชิ้นงานมีการ โป่งของสัน
80% ( 83.87 kN)	ไม่ผ่าน	ชิ้นงานมีการ โป่งของสัน ณ จุดวัด A4 และเกิดการฉีกขาดของชิ้นงาน ณ จุด A1, A7, A9

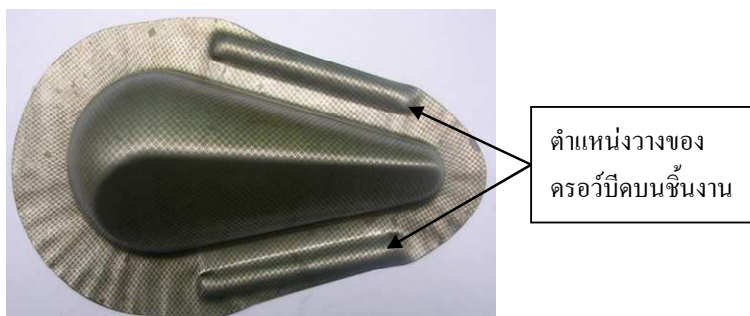
ผลการวัดความหนาผนังชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากแผ่นตัดเปล่าแบบที่ได้จากการคำนวณ โดยการประมาณค่า โดยใช้แรงกดชิ้นงานขนาดต่างๆ กัน แสดงไว้ในภาพที่ 4.17 ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดความหนาของผนังชิ้นงานจะ ลดลงเมื่อใช้แรงกดชิ้นงานมากขึ้น จนเกิดการฉีกขาดเมื่อใช้แรงกด 80% และจากการหาค่าเฉลี่ยความหนาผนังชิ้นงานพบว่า แรงกดชิ้นงานที่ 20% มีความหนาของผนังชิ้นงาน โดยเฉลี่ยมากที่สุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของแรงกดเป็น 40%, 60% และ 80% ความหนาของผนังชิ้นงานจะลดลงไปตามลำดับ จุด A1 ได้ค่าความหนาของผนังชิ้นงานอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งความรุนแรงสูงสุดของชิ้นงานสำเร็จ ณ A1 ซึ่งเป็นพื้นที่ของจุดวิกฤติ และจุด A6 และ A7 มีความหนาของผนังชิ้นงานสูงกว่าตำแหน่งอื่น



ภาพที่ 4.17 การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่า ที่ได้จากการคำนวณ โดยการประมาณค่า

#### 4.2.2 ผลการทดสอบแรงกดแผ่นตัดเปล่า โดยใช้ดอร์วีบีค

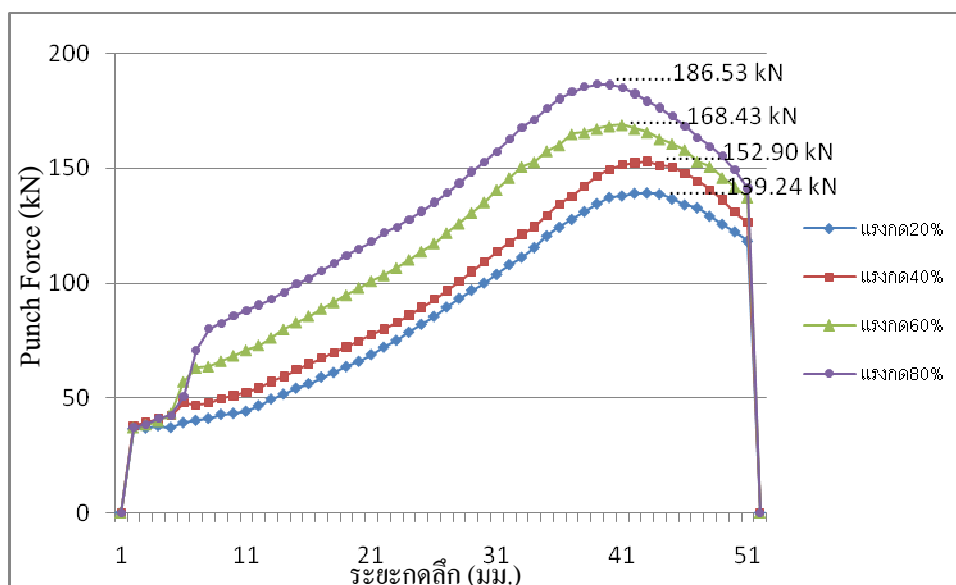
การทดสอบอิทธิพลของแรงกดแผ่นตัดเปล่า ที่มีการใช้ดอร์วีบีคแบบ ครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8.0 มม. วางในตำแหน่งปีกที่เป็นเส้นตรงทั้งสองข้าง (ดูภาพที่ 4.18) เพื่อควบคุมการไหลตัวของวัสดุในขณะขึ้นรูป



ภาพที่ 4.18 รูปร่างและตำแหน่งของดอร์วีบีคที่ใช้ในการทดสอบ

##### 1) ใช้แผ่นตัดเปล่าสีเหลี่ยมผืนผ้า

ผลการวัดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยแผ่นตัดเปล่ารูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ใช้ดอร์วีบีคควบคุมการไหลตัวของวัสดุ โดยทดสอบที่ขนาดแรงกดแผ่นตัดเปล่าต่างๆ กันที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ตามลำดับ จากภาพที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าขนาดของแรงกดแผ่นตัดเปล่ามีอิทธิพลต่อขนาดของแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อแรงกดแผ่นตัดเปล่ามีขนาดสูงขึ้น แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปก็จะต้องมีขนาดสูงขึ้นตามไปด้วย



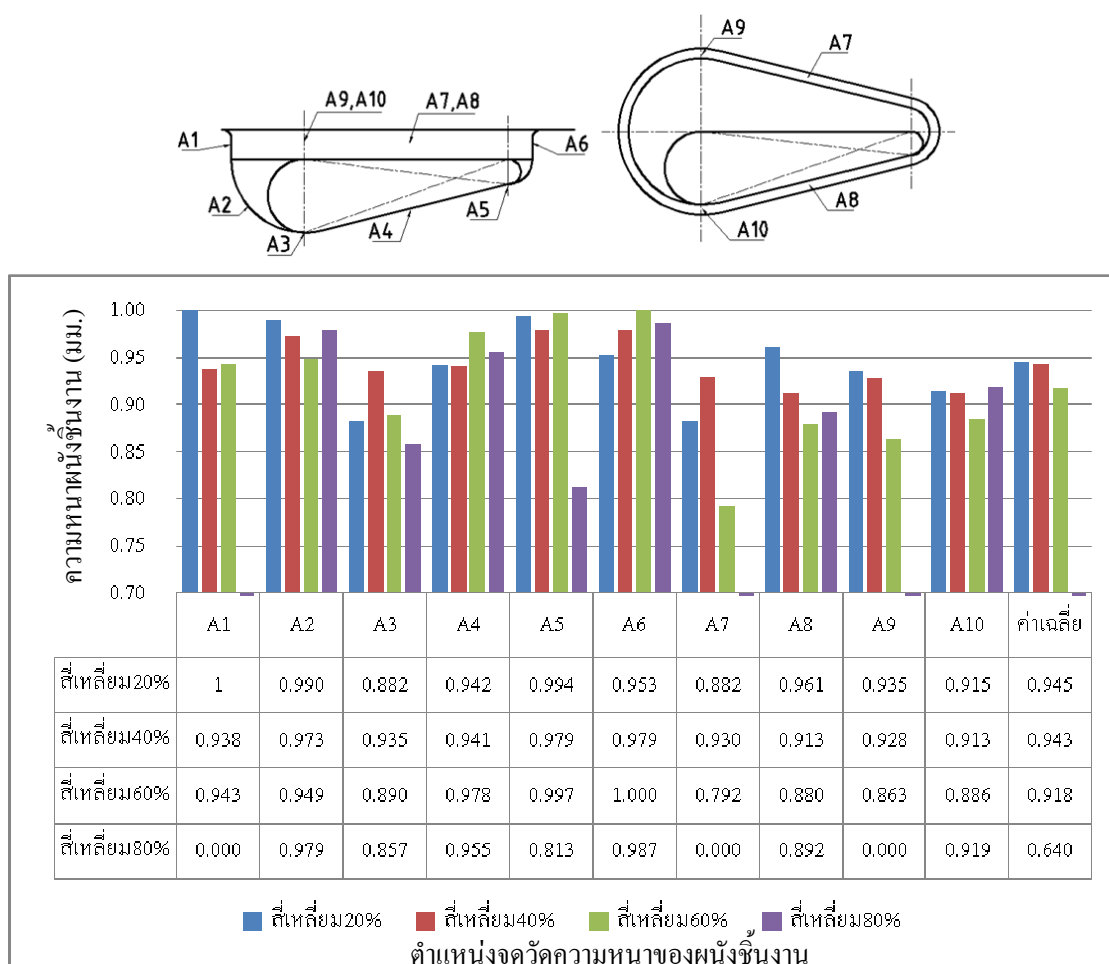
ภาพที่ 4.19 การเปรียบเทียบแรงกดที่ขึ้นงานที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้ครอว์บีดชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม.

ผลจากการตรวจสอบขึ้นงานภายหลังการขึ้นรูปด้วยสายตา พบว่าการแรงกดที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปจากแผ่นตัดเปล่ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการใช้ครอว์บีดควบคุมการไหลตัวของวัสดุ เป็นแรงกดแผ่นตัดเปล่าขนาด 40% (41.93 kN) แรงลากขึ้นขึ้นงานที่ 152.90 kN ซึ่งสามารถใช้ลากขึ้นรูปขึ้นงาน ได้สมบูรณ์ที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแรงกดขนาดอื่นๆ (ดูตารางที่ 4.6)

ตารางที่ 4.6 สรุปข้อสังเกตขึ้นงานของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงกดขึ้นรูปต่างๆ

แรงกดขึ้นรูป	ขึ้นงาน	ปัญหาที่เกิดขึ้นบนขึ้นงานทดสอบ
20% (20.96 kN)	ไม่ผ่าน	ขึ้นงานมีรอยย่นบริเวณปีกขึ้นงานอย่างชัดเจน
40% (41.93 kN)	ผ่าน	ขึ้นงานที่ได้มีรอยย่นเล็กน้อย บริเวณปีกขึ้นงาน การไหลตัวสม่ำเสมอ
60% ( 62.90 kN)	ไม่ผ่าน	ขึ้นงานมีการ โป่งของสัน ณ จุดวัด A3
80% ( 83.87 kN)	ไม่ผ่าน	ขึ้นงานมีการ โป่งตัว A4 และเกิดการฉีกขาด

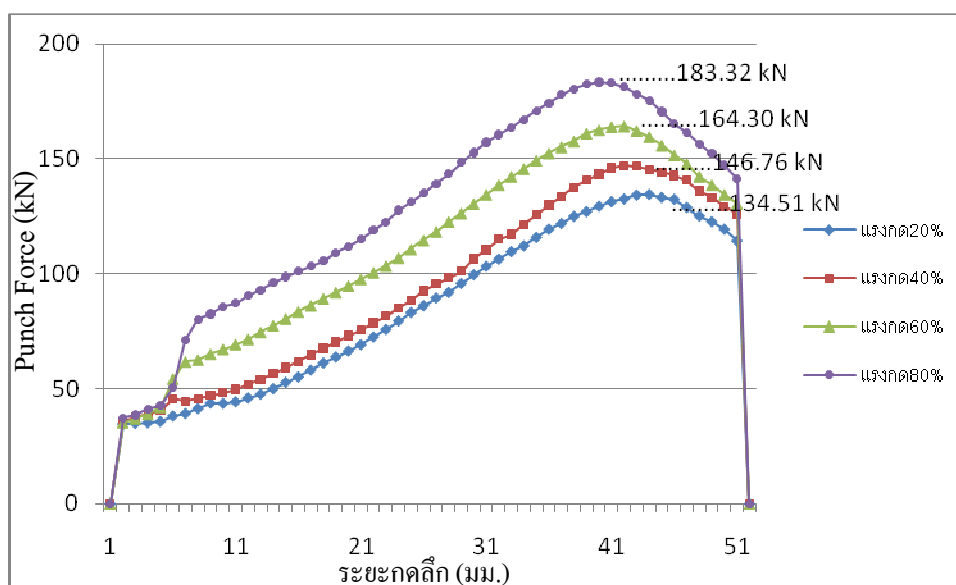
ผลการวัดความหนาผนังชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้ครอว์บีคชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม. โดยใช้แรงกดชิ้นงานขนาดต่างๆ กัน แสดงไว้ในภาพที่ 4.20 ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดความหนาของผนังชิ้นงานจะลดลงเมื่อใช้แรงกดชิ้นงานมากขึ้น จนเกิดการฉีกขาดเมื่อใช้แรงกด 60% ขึ้นไป และจากการหาค่าเฉลี่ยความหนาผนังชิ้นงานพบว่า แรงกดชิ้นงานที่ 20% มีความหนาของผนังชิ้นงานโดยเฉลี่ยมากที่สุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของแรงกดเป็น 40%, 60% และ 80% ความหนาของผนังชิ้นงานจะลดลงขึ้นตามลำดับ จุด A1, A7 และ A9 ได้ค่าความหนาของผนังชิ้นงานอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งความรุนแรงสูงสุดของชิ้นงานสำเร็จ ณ A1, A7, A9 และ A3 ซึ่งเป็นพื้นที่ของจุดวิกฤติ และจุด A2 และ A6 มีความหนาของผนังชิ้นงานสูงกว่าตำแหน่งอื่น



ภาพที่ 4.20 การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้ครอว์บีคชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม.

## 2) ใช้แผ่นตัดปล้่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุม

ผลการวัดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยแผ่นตัดปล้่ารูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุม ที่มีดอร์วีบีดควบคุมการไหลตัวของวัสดุ โดยทดสอบที่ขนาดแรงกดแผ่นตัดปล้่าต่างๆ กันที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ตามลำดับ จากภาพที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าขนาดของแรงกดแผ่นตัดปล้่ามีอิทธิพลต่อขนาดของแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อแรงกดแผ่นตัดปล้่ามีขนาดสูงขึ้น แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปก็จะต้องมีขนาดสูงขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 4.21 การเปรียบเทียบแรงกดที่ขึ้นงานที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแผ่นตัดปล้่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุม โดยใช้ดอร์วีบีดชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.0 มม.

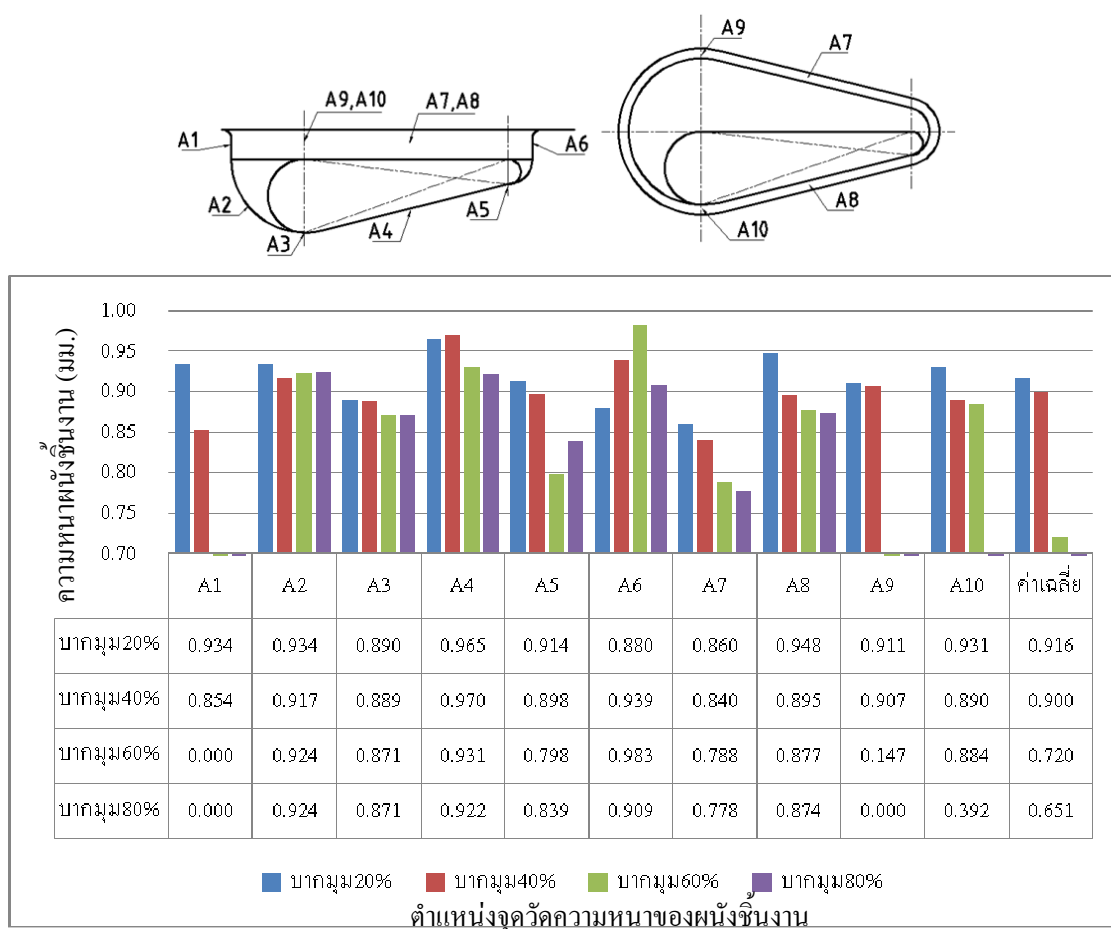
ผลจากการตรวจสอบชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูปด้วยสายตา พบว่าการแรงกดที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปจากแผ่นตัดปล้่ารูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุม ที่มีการใช้ดอร์วีบีดควบคุมการไหลตัวของวัสดุ เป็นแรงกดแผ่นตัดปล้่าขนาด 40% (41.93 kN) ได้ชิ้นงานที่มีจุดบกพร่องของชิ้นงานน้อย ซึ่งสามารถใช้ลากขึ้นรูปชิ้นงานได้สมบูรณ์ที่สุด ที่ 146.76 kN เมื่อเปรียบเทียบกับแรงกดขนาดอื่นๆ (ดูตารางที่ 4.7)

ตารางที่ 4.7 สรุปข้อสังเกตชิ้นงานของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุมที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงกดขึ้นรูปต่างๆ

แรงกดขึ้นรูป	ชิ้นงาน	ปัญหาที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบ
20% (20.96 kN)	ไม่ผ่าน	ชิ้นงานมีรอยย่นบริเวณปีกชิ้นงานอย่างชัดเจน
40% (41.93 kN)	ผ่าน	ชิ้นงานที่ได้มีรอยย่นเล็กน้อย บริเวณปีกชิ้นงาน การไหลตัวสม่ำเสมอ
60% ( 62.90 kN)	ไม่ผ่าน	ชิ้นงานมีการโป่งของสัน ณ จุดวัด A5
80% ( 83.87 kN)	ไม่ผ่าน	ชิ้นงานมีการโป่งของชิ้นงาน ณ จุดวัด A4, A7 และเกิดการร้าวของชิ้นงาน ณ จุด A1, A9 และ A10

ผลการวัดความหนาผนังชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุม โดยใช้ดรอว์บีดชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม. ซึ่งใช้แรงกดชิ้นงานขนาดต่างๆ กัน แสดงไว้ในภาพที่ 4.20 ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดความหนาของผนังชิ้นงานจะ ลดลงเมื่อใช้แรงกดชิ้นงานมากขึ้น จนเกิดการร้าวเมื่อใช้แรงกด 60% ขึ้นไป และจากการหาค่าเฉลี่ยความหนาผนังชิ้นงานพบว่าแรงกดชิ้นงานที่ 20% มีความหนาของผนังชิ้นงานโดยเฉลี่ยมากที่สุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของแรงกดเป็น 40%, 60% และ 80% ความหนาของผนังชิ้นงานจะลดลงขึ้นตามลำดับ จุด A1, A7, A9 และ A10 ได้ค่าความหนาของผนังชิ้นงานอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งความรุนแรงสูงสุดของชิ้นงานสำเร็จ ณ A1, A7, A9, A10 และ A7 ซึ่งเป็นพื้นที่ของจุดวิกฤติ และจุด A2 และ A4 มีความหนาของผนังชิ้นงานสูงกว่าตำแหน่งอื่น

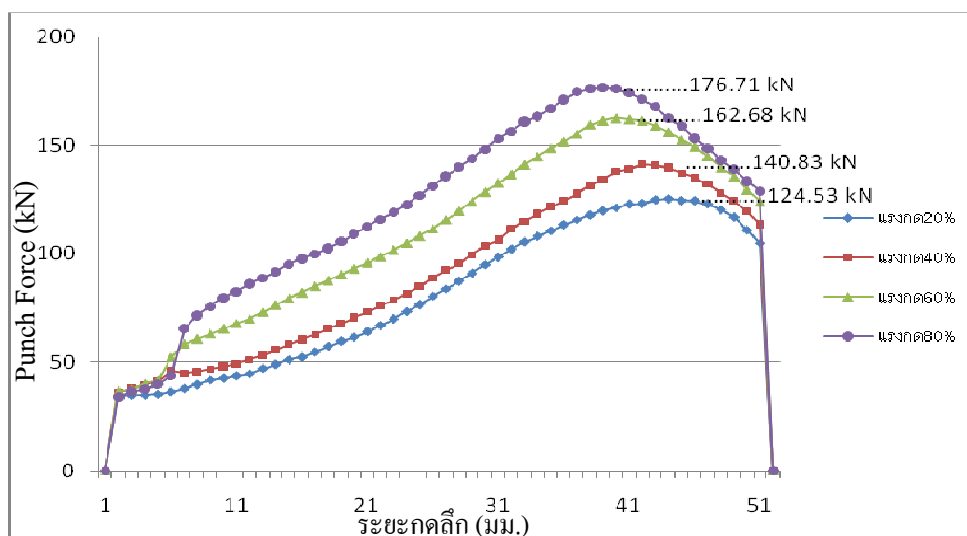




ภาพที่ 4.22 การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้า บากมุม โดยใช้ครอว์บีคชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม.

### 3) ใช้แผ่นตัดเปล่าที่ได้จากการคำนวณ

ผลการวัดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยแผ่นตัดเปล่าที่ได้จากการคำนวณ โดยการประมาณค่า ที่มีครอว์บีคควบคุมการไหลตัวของวัสดุ โดยทดสอบที่ขนาดแรงกดแผ่นตัดเปล่าต่างๆ กันที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ตามลำดับ จากภาพที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าขนาดของแรงกดแผ่นตัดเปล่ามีอิทธิพลต่อขนาดของแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อแรงกดแผ่นตัดเปล่ามีขนาดสูงขึ้น แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปก็จะต้องมีขนาดสูงขึ้นตามไปด้วย



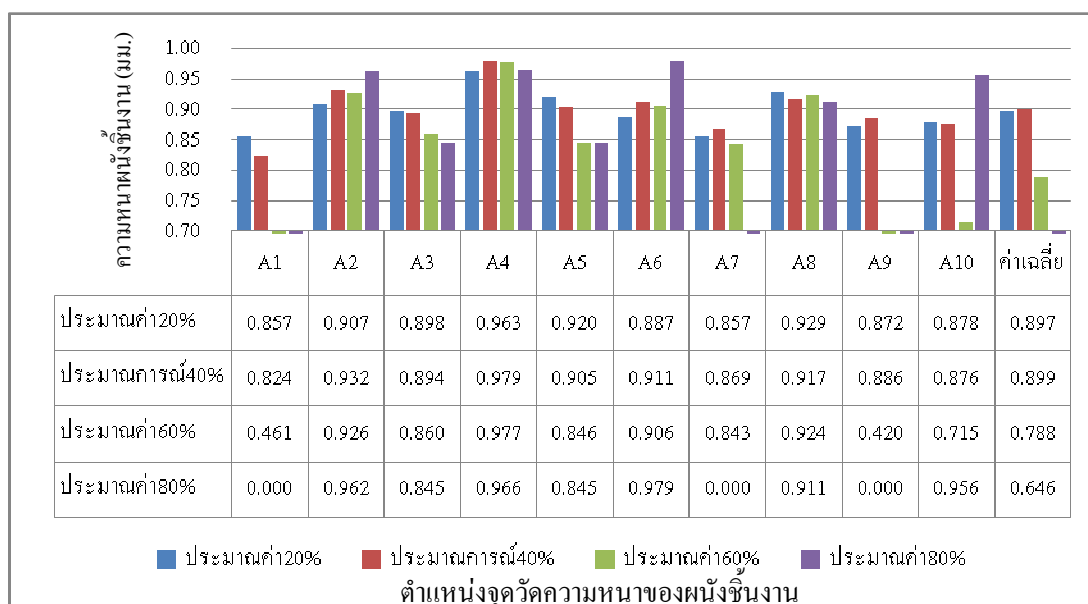
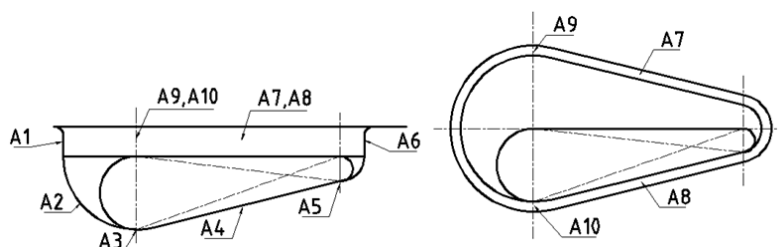
ภาพที่ 4.23 การเปรียบเทียบแรงกดที่ขึ้นงานที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณและใช้ครอว์บีด

ผลจากการตรวจสอบขึ้นงานภายหลังการขึ้นรูปด้วยสายตา พบว่าการแรงกดที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปจากแผ่นตัดเปล่าที่ได้จากการคำนวณ โดยการประมาณค่า ที่มีการใช้ครอว์บีดควบคุมการไหลตัวของวัสดุ เป็นแรงกดแผ่นตัดเปล่าที่มีขนาด 40% (41.93 kN) ได้ขึ้นงานที่พบจุกพร่องน้อย ซึ่งสามารถใช้ลากขึ้นรูปขึ้นงานได้สมบูรณ์ที่สุด ที่ 140.83 kN เมื่อเปรียบเทียบกับแรงกดขนาดอื่นๆ (ดูตารางที่ 4.8)

ตารางที่ 4.8 สรุปข้อสังเกตขึ้นงานของแผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณและใช้ครอว์บีดที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงกดขึ้นรูปต่างๆ

แรงกดขึ้นรูป	ขึ้นงาน	ปัญหาที่เกิดขึ้นบนขึ้นงานทดสอบ
20% (20.96 kN)	ไม่ผ่าน	ขึ้นงานมีรอยย่นบริเวณปีกขึ้นงานอย่างชัดเจน
40% (41.93 kN)	ผ่าน	ขึ้นงานที่ได้มีรอยย่นเล็กน้อย บริเวณปีกขึ้นงาน การไหลตัวสม่ำเสมอ
60% ( 62.90 kN)	ไม่ผ่าน	ขึ้นงานมีการโป่งของสัน และเริ่มมีรอยฉีกขาด
80% ( 83.87 kN)	ไม่ผ่าน	ขึ้นงานมีการโป่งของสัน และเกิดการฉีกขาดของขึ้นงาน ณ จุด A1, A7, A9 และ A10

ผลการวัดความหนาผนังชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากแผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณโดยการประมาณค่า โดยใช้ครอว์บีคชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม. ซึ่งใช้แรงกดชิ้นงานขนาดต่างๆ กัน แสดงไว้ในภาพที่ 4.23 ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดความหนาของผนังชิ้นงานจะ ลดลงเมื่อใช้แรงกดชิ้นงานมากขึ้น จนเกิดการฉีกขาดเมื่อใช้แรงกด 60% ขึ้นไป และจากการหาค่าเฉลี่ยความหนาผนังชิ้นงานพบว่า แรงกดชิ้นงานที่ 20% มีความหนาของผนังชิ้นงานโดยเฉลี่ยมากที่สุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของแรงกดเป็น 40%, 60% และ 80% ความหนาของผนังชิ้นงานจะลดลงขึ้นตามลำดับ จุด A1, A7, A9 และ A10 ได้ค่าความหนาของผนังชิ้นงานอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งความรุนแรงสูงสุดของชิ้นงานสำเร็จ ณ A1, A7, A9 และ A10 ซึ่งเป็นพื้นที่ของจุดวิกฤติ และจุด A2 และ A4 มีความหนาของผนังชิ้นงานสูงกว่าตำแหน่งอื่น



ภาพที่ 4.24 การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณ โดยการประมาณค่าโดยใช้ครอว์บีค

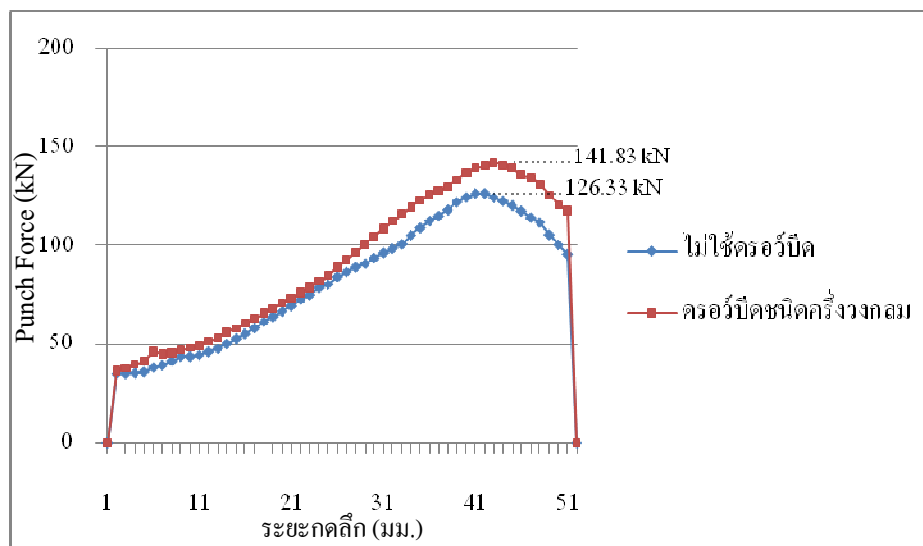
### 4.3 ผลการทดสอบอิทธิพลของดรอว์บีด

ในการทดสอบอิทธิพลของดรอว์บีดจะกำหนดปัจจัยควบคุม และปัจจัยทดสอบ ดังตารางที่ 4.9 ทั้งนี้เพื่อให้สามารถทำการวิเคราะห์หาอิทธิพลของการใช้ดรอว์บีดต่อการขึ้นรูปได้

ตารางที่ 4.9 ปัจจัยที่ใช้ควบคุมการขึ้นรูปชิ้นงานตามชนิดของดรอว์บีด

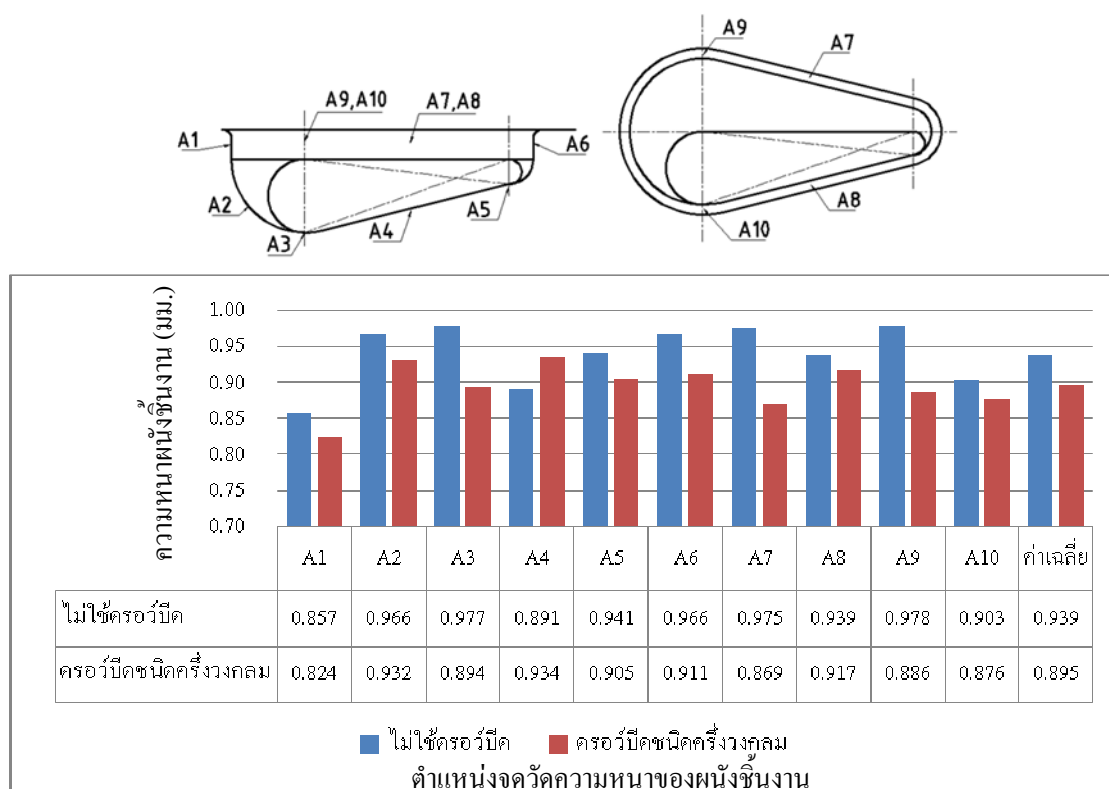
ปัจจัยควบคุม	ปัจจัยทดสอบ
สารหล่อลื่นแผ่นพลาสติกโพลีเอทิลีน	ไม่ใช้ ดรอว์บีด
แรงกดชิ้นงาน เท่ากับ 41.93 kN (40% ของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานจากการคำนวณ)	ใช้ ดรอว์บีด
แผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณโดยการประมาณค่า	
ระยะกดลึกของพินซ์ = 52 มม.	

จากภาพที่ 4.25 กราฟแสดงอิทธิพลของดรอว์บีดที่ปัจจัยทดสอบ แรงกดชิ้นงาน 40% ของแผ่นตัดเปล่าที่ได้จากการคำนวณโดยการประมาณค่า พบว่าแผ่นชิ้นงานที่ใช้ดรอว์บีดชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม. จะใช้แรงในการขึ้นรูปที่ 141.83 kN ซึ่งสูงกว่าแผ่นชิ้นงานที่ไม่มีดรอว์บีด



ภาพที่ 4.25 อิทธิพลของดรอว์บีดที่ปัจจัยทดสอบ แรงกดชิ้นงาน 40% ของแผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณโดยการประมาณค่า

การวัดความหนาจากชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบการขึ้นรูปโดยไม่มีครอว์บีดและใช้ครอว์บีดชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม. ในบริเวณจุดสนใจ จำนวน 10 จุด (A1-A10) พบว่าระดับความหนาของผนังชิ้นงาน บริเวณที่มีการใช้ครอว์บีดควบคุมการไหลของชิ้นงาน มีความหนาน้อยลง ทำให้ความหนาผนังบริเวณควบคุมการไหลมีค่าความหนาใกล้เคียงกับบริเวณอื่นๆ ซึ่งความแตกต่างกันของความหนาผนังน้อยที่ลง แสดงได้ว่าชิ้นงานมีความเครียดที่สม่ำเสมอของผนัง ชิ้นงานดีกว่าการ ไม่มีครอว์บีด



ภาพที่ 4.26 อิทธิพลของครอว์บีดที่ปัจจัยทดสอบ ความหนาของผนังชิ้นงานแผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณ โดยการประมาณค่า

ผลการทดสอบการขึ้นรูปแบบทั้งสองแบบ แสดงให้เห็นว่าจุดวิกฤติที่จุด A1 เป็นจุดที่มีความหนาน้อยสุด แสดงว่ามีการยึดตัวของวัสดุมาก ซึ่งถ้าวิเคราะห์ประกอบแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปจะพบว่า การขึ้นรูปแบบที่ไม่มีครอว์บีด แรงในการขึ้นรูปชิ้นงาน (124.60 kN) จะขนาดน้อยกว่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีครอว์บีด (144.90 kN) ซึ่งจะทำให้ความหนาของผนังขึ้นที่ขึ้นรูปโดยมีครอว์บีด มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยไม่มีครอว์บีด

#### 4.4 การวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปจากโปรแกรมทางสถิติ Minitab

การวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปต่อค่าความหนาเฉลี่ยของผนังชิ้นงาน โดยนำเอาข้อมูลจากการทดสอบไปวิเคราะห์ ทางสถิติ โดยการใช้โปรแกรมทางสถิติ (Minitab 16) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Factorial Design แบบ General Full Factorial Design ที่มีปัจจัย 3 ปัจจัยคือ (1) แผ่นตัดเปล่า (2) แรงกดขึ้นรูป และ (3) ชนิดของดรอว์บีด ซึ่งมีระดับการทดสอบต่างๆ กันดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

แผ่นตัดเปล่า	แรงกดขึ้นรูป	ชนิดของดรอว์บีด
แผ่นตัดเปล่าสีเหลืองพื้นผ้า	20% (20.96 kN)	ชนิดไม่ใช่ดรอว์บีด
แผ่นตัดเปล่าสีเหลืองชนิดบากมุม	40% (41.93 kN)	ชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม.
แผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณโดยการประมาณค่า	60% ( 62.90 kN)	
	80% ( 83.87 kN)	

Residual Plots for A1(ค่าความหนาเฉลี่ย)

General Linear Model: A1 versus แผ่นตัดเปล่า, แรงกด, ดรอว์บีด

Factor	Type	Levels	Values
แผ่นตัดเปล่า	fixed	3	1, 2, 3
แรงกด	fixed	4	20, 40, 60, 80
ดรอว์บีด	fixed	2	1, 2

Analysis of Variance for A1, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
แผ่นตัดเปล่า	2	0.0055669	0.0055669	0.0027835	21.34	0.000
แรงกด	3	0.0083062	0.0083062	0.0027687	21.23	0.000
ดรอว์บีด	1	0.0095678	0.0095678	0.0095678	73.36	0.000
แผ่นตัดเปล่า*แรงกด	6	0.0013833	0.0013833	0.0002306	1.77	0.126
แผ่นตัดเปล่า*ดรอว์บีด	2	0.0041752	0.0041752	0.0020876	16.01	0.000
แรงกด*ดรอว์บีด	3	0.0008289	0.0008289	0.0002763	2.12	0.110
แผ่นตัดเปล่า*แรงกด*ดรอว์บีด	6	0.0067535	0.0067535	0.0011256	8.63	0.000
Error	48	0.0062600	0.0062600	0.0001304		
Total	71	0.0428418				

S = 0.0114200 R-Sq = 85.39% R-Sq(adj) = 78.39%

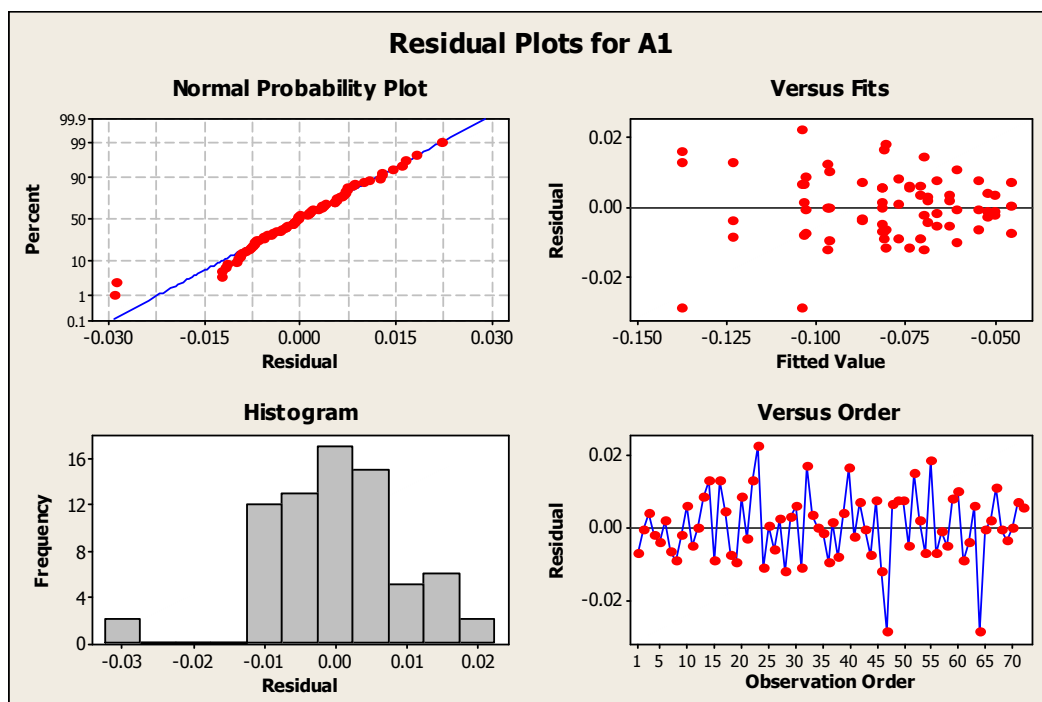
Unusual Observations for A1

Obs	A1	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
23	-0.081900	-0.104137	0.006593	0.022237	2.38 R
47	-0.133111	-0.104137	0.006593	-0.028974	-3.11 R
64	-0.166667	-0.137806	0.006593	-0.028861	-3.10 R

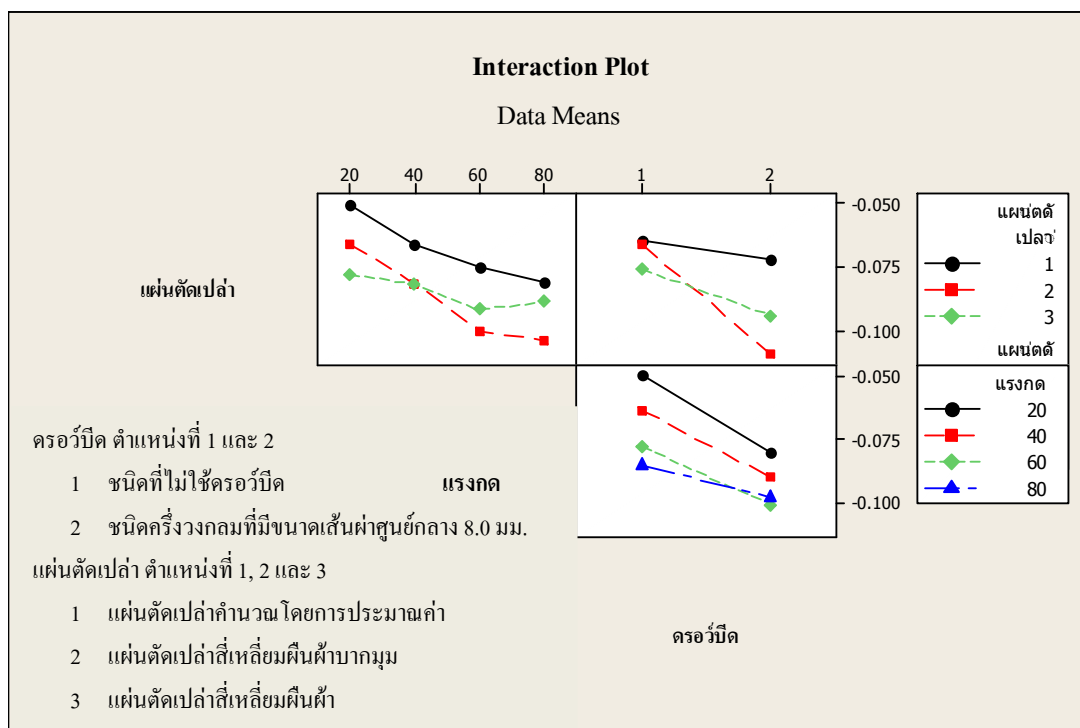
R denotes an observation with a large standardized residual.

Residual Plots for A1

ภาพที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ได้จากโปรแกรม Minitab



ภาพที่ 4.28 ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าเฉลี่ยความหนาของผนังชิ้นงาน



ภาพที่ 4.29 การวิเคราะห์ความแม่นยำของ Interaction Plot ที่มีผลต่อความหนาของผนังชิ้นงาน

จากภาพที่ 4.29 ข้อมูลกราฟที่มีอิทธิพลในการเลือกตัวแปรที่เหมาะสมจากการขึ้นรูปลึกขึ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลตามรูปได้คือ แผ่นตัดเปล่าบางค่ามีผลต่อความหนาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับ 0.05 และอิทธิพลร่วมของแผ่นตัดเปล่ากับแรงกด ไม่มีผลต่อความหนาที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากข้อมูลการกำหนดค่า Factor ที่มีผลต่อความหนา โดยการกำหนดค่า Error เฉลี่ยของกราฟที่เข้าใกล้ 0 (ศูนย์) เป็นค่าความหนามากที่สุด จากกราฟจะสรุปได้ว่า Interaction Plot มี 3 เงื่อนไขที่มีผล คือ แผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณ โดยการประมาณค่า ที่แรงกด 20% โดยเลือกครอว์บีชนิดที่ไม่ใช่ครอว์บีจะได้ความหนาเฉลี่ยที่สูงที่สุด



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปลึงขึ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร ต่อความหนาของผนังขึ้นงาน โดยใช้เหล็กแผ่น SPCC-SD หนา 1.0 มม. ระยะกดลึงของพื้นที่ 52 มม. เพื่อศึกษาอิทธิพลของแผ่นตัดเปล่า (Blank Geometry) แรงกดของแผ่นตัดเปล่า (Blank Holder Force) และครอว์บีด (Draw Bead) ด้วยเครื่องทดสอบการกดขึ้นรูปแบบไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน ด้วยแม่พิมพ์รูปทรงที่ไม่สมมาตร โดยการขึ้นทดสอบการรูปแต่ละครั้งจะใช้ตัวแปรที่มีขนาดต่างๆ กันทำการขึ้นรูปขึ้นงาน โดยจะทำการบันทึกขนาดของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแต่ละครั้งตั้งแต่เริ่มต้นจนจบการทำงาน แล้วนำขึ้นทดสอบมาผ่าออกเพื่อวัดขนาดความหนาของผนังในบริเวณที่เป็นจุดสนใจ หลังจากนั้นจึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ ซึ่งสรุปผลได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 เปรียบเทียบชนิดของแผ่นตัดเปล่า (Blank Geometry) ได้แก่ แผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยม, แผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุม และแผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณ โดยการประมาณค่า ซึ่งขนาดของแผ่นตัดเปล่าทั้ง 3 ชนิด มีผลต่อแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป โดยใช้แรงกดขึ้นงานเท่ากับ 49.69 kN

1) แผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีพื้นที่กดมาก มีความสามารถในการไหลตัวลดลง เมื่อกดขึ้นรูปที่แรงกดที่น้อยจะเกิดการอัดตัว ทำให้วัสดุห่อตัวมีรอยย่นตามปีกโดยรอบขึ้นงาน แรงกดเพื่อขึ้นรูปสูงขึ้นเท่ากับ 128.78 kN

2) แผ่นตัดเปล่าชนิดบากมุมทั้งสี่ด้าน ต่างจากแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าไม่บากมุม สามารถลดครอว์บีดและการห่อตัวตามปีกโดยรอบขึ้นงานได้ดีขึ้น แรงกดเพื่อขึ้นรูปสูงขึ้นที่สุดเท่ากับ 118.88 kN

3) แผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณ โดยการประมาณค่า การไหลตัวเข้าสู่ช่องคายของขึ้นงานมีความราบเรียบและสม่ำเสมอขึ้นงานที่ได้มีความสมบูรณ์ แรงกดเพื่อขึ้นรูปสูงขึ้นที่สุดเท่ากับ 115.44 kN และได้ค่าความหนาของผนังขึ้นงานจากขึ้นรูป เฉลี่ยมากที่สุดเมื่อเทียบกับสองชนิด ซึ่งแสดงถึงการไหลตัวของวัสดุ SPCC – SD ได้ดีที่สุดในการทดลอง ที่แรงกดขึ้นงานเท่ากับ 49.69 kN

5.1.2 เปรียบเทียบชนิดแผ่นตัดเปล่ากับ แรงกดชิ้นงานทดสอบที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแรงที่ใช้ขึ้นรูปลึกชิ้นงาน เมื่อแรงกดชิ้นงานมากจะทำให้แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงขึ้น

1) ที่ขนาดของแรงกดชิ้นงาน 20% แรงใช้ในการกดขึ้นรูปทั้งสามตัวแปร ชิ้นงานสำเร็จจะเกิดรอยยับบริเวณรอบปีกชิ้นงาน ค่าที่ใช้แรงกดต่ำสุดอยู่ที่ระดับ 107.27 kN ของแผ่นตัดเปล่าสีเหลืองผืนผ้า แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาโดยเฉลี่ยของตัวแปรทั้งสามแล้ว พบว่าค่าความหนาของผนังชิ้นงานของแผ่นตัดเปล่าโดยการประมาณค่าได้ค่าความหนามากกว่าตัวแปรอื่น

2) ที่ขนาดของแรงกดชิ้นงาน 40% ชิ้นงานสำเร็จจะเกิดรอยยับบริเวณรอบปีกชิ้นงานน้อยลง แรงที่ใช้ในการกดขึ้นรูปอยู่ที่ระดับ 119.25 kN ของแผ่นตัดเปล่าสีเหลืองผืนผ้า เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาโดยเฉลี่ยของตัวแปรทั้งสามแล้ว พบว่าค่าความหนาของผนังชิ้นงานของแผ่นตัดเปล่าโดยการประมาณค่าได้ค่าความหนามากกว่าตัวแปรอื่น และได้ความสมบูรณ์ของชิ้นงานทดสอบดีที่สุด

3) ที่ขนาดแรงกดชิ้นงาน 60% ชิ้นงานสำเร็จไม่พบรอยยับบริเวณรอบปีกชิ้นงานแรงใช้ในการกดขึ้นรูปอยู่ที่ระดับ 161.65 kN ของแผ่นตัดเปล่าโดยการประมาณค่า แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาโดยเฉลี่ยของตัวแปรทั้งสามแล้ว พบว่าค่าความหนาของผนังชิ้นงานของแผ่นตัดเปล่าสีเหลืองผืนผ้าได้ค่าความหนามากกว่าตัวแปรอื่น

4) ที่ขนาดแรงกดชิ้นงาน 80% ชิ้นงานสำเร็จไม่พบรอยยับบริเวณรอบปีกชิ้นงาน แต่พบว่าการไหลตัวของวัสดุไม่สม่ำเสมอ แรงใช้ในการกดขึ้นรูปอยู่ที่ระดับ 178.23 kN ของแผ่นตัดเปล่าโดยการประมาณค่า แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาโดยเฉลี่ยของตัวแปรทั้งสามแล้ว พบว่าค่าความหนาของผนังชิ้นงานของแผ่นตัดเปล่าสีเหลืองผืนผ้าได้ค่าความหนามากกว่าตัวแปรอื่น ซึ่งแสดงว่าแรงกดชิ้นงานมากเกินไปทำให้เกิดผลเสียหายต่อชิ้นงานในการขึ้นรูป

5.1.3 เปรียบเทียบชนิดครอว์บีด (Draw Bead) ที่มีความสูงจะทำให้ความสามารถของการไหลตัวได้ต่ำ จึงทำการเปรียบเทียบครอว์บีดชนิดเดี่ยว (Single Draw Bead) ชนิดที่ไม่ใช้ครอว์บีด ครอว์บีดชนิดวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม. สูงเท่ากับ 4.0 มม. แรงกดชิ้นงานทดสอบที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแรงที่ใช้ขึ้นรูปลึก

1) ชนิดที่ไม่ใช้ครอว์บีด จะใช้ค่าเดียวกันกับการเปรียบเทียบชนิดแผ่นตัดเปล่ากับ แรงกดชิ้นงาน (Blank Holder Force) แรงกดชิ้นงานทดสอบที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแรงที่ใช้ขึ้นรูปลึกชิ้นงานในการตัดสินใจในเลือกใช้เปอร์เซ็นต์ของแรงกดชิ้นงานที่เหมาะสม

2) ชนิดครอว์ปีดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม. สูงเท่ากับ 4.0 มม. แรงกดขึ้นงานทดสอบที่ 20%, 40%, 60% และ 80% ของแรงที่ใช้ขึ้นรูปลิกขึ้นงาน ในการทดสอบตามชนิดของแผ่นเปล่าพบว่า

3) ที่ขนาดของแรงกดขึ้นงาน 20% แรงใช้ในการกดขึ้นรูปทั้งสามตัวแปร ค่าที่ใช้แรงกดต่ำสุดอยู่ที่ระดับ 124.53 kN ของแผ่นตัดเปล่าโดยการประมาณค่า แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาโดยเฉลี่ยของตัวแปรทั้งสามแล้ว พบว่าค่าความหนาของผนังขึ้นงานของแผ่นตัดเปล่าสีเหลืองผืนผ้า ได้ค่าความหนามากกว่าตัวแปรอื่น ขึ้นงานสำเร็จจะเกิดรอยยับบริเวณรอบปีก

4) ที่ขนาดของแรงกดขึ้นงาน 40% ขึ้นงานสำเร็จจะเกิดรอยยับบริเวณรอบปีกขึ้นงานน้อยลง แรงใช้ในการกดขึ้นรูปอยู่ที่ระดับ 140.83 kN ของแผ่นตัดเปล่าโดยการประมาณค่า เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาโดยเฉลี่ยของตัวแปรทั้งสามแล้ว พบว่าค่าความหนาของผนังขึ้นงานของแผ่นตัดเปล่าสีเหลืองผืนผ้าได้ค่าความหนามากกว่าตัวแปรอื่น

5) ที่ขนาดแรงกดขึ้นงาน 60% ขึ้นงานสำเร็จไม่พบรอยยับบริเวณรอบปีกขึ้นงานแรงใช้ในการกดขึ้นรูปอยู่ที่ระดับ 162.68 kN ของแผ่นตัดเปล่าโดยการประมาณค่า แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาโดยเฉลี่ยของตัวแปรทั้งสามแล้ว พบว่าค่าความหนาของผนังขึ้นงานของแผ่นตัดเปล่าสีเหลืองผืนผ้าได้ค่าความหนามากกว่าตัวแปรอื่นของวัสดุในการทดลอง

6) ที่ขนาดแรงกดขึ้นงาน 80% ขึ้นงานสำเร็จไม่พบรอยยับบริเวณรอบปีกขึ้นงาน แต่พบว่าการไหลตัวของวัสดุไม่สม่ำเสมอ แรงใช้ในการกดขึ้นรูปอยู่ที่ระดับ 176.71 kN ของแผ่นตัดเปล่าโดยการประมาณค่า แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาโดยเฉลี่ยของตัวแปรทั้งสามแล้ว พบว่าค่าความหนาของผนังขึ้นงานของแผ่นตัดเปล่าสีเหลืองผืนผ้าได้ค่าความหนามากกว่าตัวแปรอื่น

สรุปการทดลองการขึ้นรูปขึ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร ต่อความหนาของผนังขึ้นงาน ในการทดลองใช้วัสดุเหล็กกรีดเย็น SPCC-SD ขนาดความหนา 1 มม. ที่ระยะการขึ้นรูปลิกสูงสุด 52 มม. ของแผ่นตัดเปล่า Blank Geometry (แผ่นตัดเปล่าสีเหลืองผืนผ้า, แผ่นตัดเปล่าสีเหลืองผืนผ้าบากมุมและแผ่นตัดเปล่าโดยการประมาณค่า) โดยแรงกดขึ้นงานที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 40- 60% ของแรงกดขึ้นงานในการขึ้นรูปลิก จะทำให้ได้ขึ้นงานมีความสมบูรณ์มีความหนาของผนังขึ้นงานที่ใกล้เคียงกัน การไหลตัวของวัสดุสามารถไหลตัวได้ดีและพบจุดบกพร่องของขึ้นงานสำเร็จน้อย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

### 5.2.1 ข้อเสนอแนะทั่วไป

- 1) ควรมีการกำหนดความเร็วที่ใช้ในการขึ้นรูปลิกซ์ในงานให้มีค่าความละเอียดมากขึ้น
- 2) ควรทำการทดลองชนิดของครอว์บีคที่มีค่าความสูงที่แตกต่างกันเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการใช้งาน

### 5.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

- 1) ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปเปรียบเทียบวัสดุหลายชนิดเช่น SPCC, SPCD, SPCE และรวมถึงโลหะนอกกลุ่มเหล็ก
- 2) ศึกษาสมบัติการขึ้นรูปลิกซ์กับชิ้นงานรูปทรงอื่นๆ และงานประเภทอื่นๆ
- 3) ศึกษาสมบัติการขึ้นรูปลิกซ์กับตัวแปรชนิดอื่นๆ เช่น ความเร็วในการขึ้นรูป, อุณหภูมิที่ใช้ในขณะที่ขึ้นรูป และทิศทางในการรีดของวัสดุที่นำมาใช้
- 4) ศึกษาสมบัติการขึ้นรูปลิกซ์ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์อื่นๆ

## รายการอ้างอิง

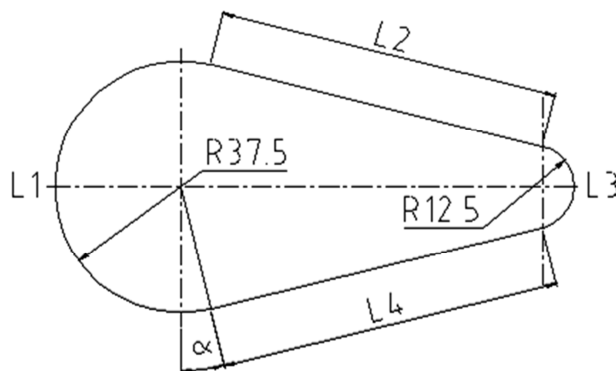
- [1] จุลศิริ ศรีงามผ่อง, วิศวกรรมงานแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่นเบื้องต้น. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2537.
- [2] บุญส่ง จงกลนี้, เรื่องการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปลึกชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรต่อสมบัติการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2552.
- [3] อติสร ประสิทธิ์ศักดิ์. เรื่องการทำนายการเสียหายแบบอ่อนหนืดในการขึ้นรูปลึกแผ่นอลูมิเนียมรูปถ้วยทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส. วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [4] Sivakorn Angthong, "Submitted as partial fulfillment for the degree of master of Engineering in Advanced Manufacturing Technology," **A Critical Analysis of the Non-Symmetrical Deep Drawing Process**, 1994. pp. 14-71.
- [5] เอกชัย คล้ายจินดา, เรื่องการศึกษาความสามารถในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น ในกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2547.
- [6] ชาญชัย ทรัพย์ากร, การออกแบบแม่พิมพ์. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2540.
- [7] ทรงพล สุรวัฒนาประเสริฐ, เรื่องการศึกษาวิธีการทดลองการลากขึ้นรูปด้วยกลม, วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544.
- [8] เชษฐ อุทธิยัง, การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้สารหล่อลื่น, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546.
- [9] เดช พุทธเจริญทอง. 2541. การวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [10] การวิเคราะห์การลากขึ้นรูปถ้วย (Online) Available : [http : //eu.lib.kmutt.ac.th /elearning /Courseware /TEN437/ main /e-learning /lessen /07 /main.htm](http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/TEN437/main/e-learning/lessen/07/main.htm).
- [11] V. Laemlaksakul. 2008. **Innovative Design of Laminated Bamboo Furniture Using Finite Element Method**, (Online) Available : <http://www.naun.org/journals/mcs/mcs-98.pdf>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
การคำนวณ

### ก.1 การคำนวณแรงขึ้นรูปลึก

แรงในการขึ้นรูปสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1 มีการคำนวณโดยการประมาณค่าดังแสดงวิธีดังนี้



ภาพที่ ก.1 เส้นขอบรูปของชิ้นงานหาความยาว  $L_t$  (L Total)

เมื่อ  $L_2$  กับ  $L_4$  เป็นเส้นตรงที่มีขนาดเท่ากันและ  $L_1$  กับ  $L_3$  เป็นเส้นโค้ง  $R_1 = 37.5$  มิลลิเมตร

$R_2 = 12.5$  มิลลิเมตร ตามลำดับเพื่อหามุม  $\alpha$

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

แทนค่าในสมการ

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

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

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

$$= 105 \cos 13.77$$

$$L_2 = L_4 = 102 \text{ มม.}$$



หาค่า  $L_1$  และ  $L_3$  ที่สัมผัสส่วนโค้งของ R1 และ R2

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

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

$$L_1 = 135.8$$

$$L_3 = \frac{\pi(180 + 2\alpha)R_2}{180}$$

$$L_3 = \frac{\pi(180 + (2 \times 13.77)) \times 12.5}{180}$$

$$L_3 = 33.3 \text{ มม.}$$

$$L_t = L_1 + L_2 + L_3 + L_4$$

$$L_t = 135.8 + 102 + 102 + 33.3$$

$$L_t = 373.1 \text{ มม.}$$

แทนค่าในสมการที่ 2.2

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

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

## ก.2 แรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน

แรงกดยึดแผ่นชิ้นงานสามารถหาได้จากสมการที่ 2.2 และ 2.3 ดังนี้ [4]

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

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

$$A_o = 25468.17 \text{ มม}^2 \text{ หรือ } \cong 25468 \text{ มม}^2$$

$$A_{st} = \frac{207.54}{360} \pi (37.5)^2 + \frac{152.46}{360} \pi (12.5)^2 + 2 \left[ \frac{37.5+12.5}{2} \times 101.98 \right]$$

$$A_{st} = 7853.78 \text{ มม}^2 \text{ หรือ } \cong 7854 \text{ มม}^2.$$

จากสมการเส้นตรงของข้อมูลคู่ระหว่างแรงกับความเครียด  $F, \varepsilon$

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

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

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

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

ค่าตัวแปรของวัสดุ  $m$

$$m = 1 + \left[ \frac{100}{1} - 175 \right] \times \frac{0.17}{100} = 0.87$$

แรงกดที่  $F_{NA}$  แผ่นกดชิ้นงาน (BHF)

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

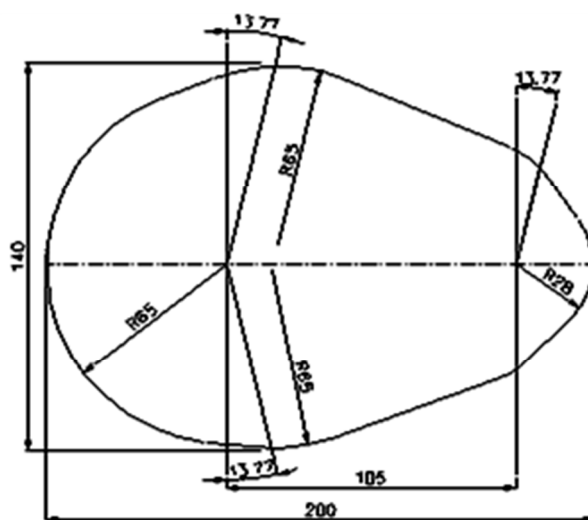
$$P_{NA} = 2.8208 \text{ N/mm}^2$$

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

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

$$F_{NA} = 49685.57 \text{ N หรือ } \cong 49.69 \text{ kN}$$

ก.3 ขนาดของแผ่นชิ้นงาน



ภาพที่ ก.2 การคำนวณแผ่นตัดเปล่า

หาค่ารัศมี RC 1 จากสมการ [5]

$$D_1 = \sqrt{d^2 + (d + 2a) + 4d(h - 0.43r)}$$

เมื่อกำหนดค่าให้

$$D = 75 \text{ มม.}$$

$$H = 15 \text{ มม.}$$

$$A = 5 \text{ มม.}$$

$$R = 4 \text{ มม.}$$

แทนค่า

$$D_1 = \sqrt{75^2 + (75 + 2(5))^2 + 4(75)(15 - 0.43(4))} = 129.75$$

$$RC1 = \frac{D_1}{2} = \frac{129.5}{2} = 64.88 \cong 65 \text{ มม.}$$

หาค่ารัศมี Rc2 จากสมการ[5]

$$D_2 = \sqrt{25^2 + (25 + 2(5))^2 + 4(25)(15 - 0.43(4))} = 56.37 \text{ มม.}$$

เมื่อกำหนดค่าให้

$$D = 25 \text{ มม.}$$

$$H = 15 \text{ มม.}$$

$$A = 5 \text{ มม.}$$

$$R = 4 \text{ มม.}$$

$$RC_2 = \frac{D_2}{2} = \frac{56.37}{2} = 28.19 \cong 28 \text{ มม.}$$

หาค่าความยาว  $L_1$  และ  $L_2$

$$L_1 = \frac{\pi}{2} R_1 + (h-r) + \frac{\pi}{2} r + (a-r)$$

เมื่อกำหนดให้

$$R_1 = 37.5 \text{ มม.}$$

$$H = 15 \text{ มม.}$$

$$A = 5 \text{ มม.}$$

$$R = 4 \text{ มม.}$$

แทนค่าในตัวแปรสมการเพื่อหาค่า  $L_1$

$$L_1 = \frac{\pi}{2}(37.5) + (15-4) + \frac{\pi}{2}(4) + (5-4)$$

$$L_1 = 77.16 \cong 77 \text{ มม.}$$

หาค่า  $L_2$  ดังสมการ

$$L_2 = \frac{\pi}{2} R_2 + (h-r) + \frac{\pi}{2} r + (a-r)$$

เมื่อกำหนดให้

$$R_1 = 12.5 \text{ มม.}$$

$$H = 15 \text{ มม.}$$

$$A = 5 \text{ มม.}$$

$$R = 4 \text{ มม.}$$

แทนค่าในตัวแปรสมการเพื่อหาค่า  $L_2$

$$L_2 = \frac{\pi}{2}(12.5) + (15-4) + \frac{\pi}{2}(4) + (5-4)$$

$$L_2 = 37.91 \cong 38 \text{ มม.}$$

หาค่าความยาว  $L_3$  และ  $L_4$

$$L_3 = 2R_1 \sin 45 + (h-r) + \frac{\pi}{2}r + (a-r)$$

เมื่อกำหนดให้

$$R_1 = 37.5 \text{ มม.}$$

$$H = 15 \text{ มม.}$$

$$A = 5 \text{ มม.}$$

$$R = 4 \text{ มม.}$$

แทนค่าในสมการเพื่อหาค่า  $L_3$

$$L_3 = 2(37.5) \sin 45 + (15-4) + \frac{\pi}{2}(4) + (5-4)$$

$$L_3 = 71.31 \cong 71 \text{ มม.}$$

หาค่า  $L_4$  ดังสมการ

$$L_4 = 2R_2 \sin 45 + (h-r) + \frac{\pi}{2}r + (a-r)$$

เมื่อกำหนดให้

$$R_2 = 12.5 \text{ มม.}$$

$$H = 15 \text{ มม.}$$

$$A = 5 \text{ มม.}$$

$$R = 4 \text{ มม.}$$

แทนค่าในสมการเพื่อหาค่า  $L_4$

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

$$L_4 = 35.95 \cong 36 \text{ มม.}$$

ภาคผนวก ข  
ข้อมูลการทดลอง

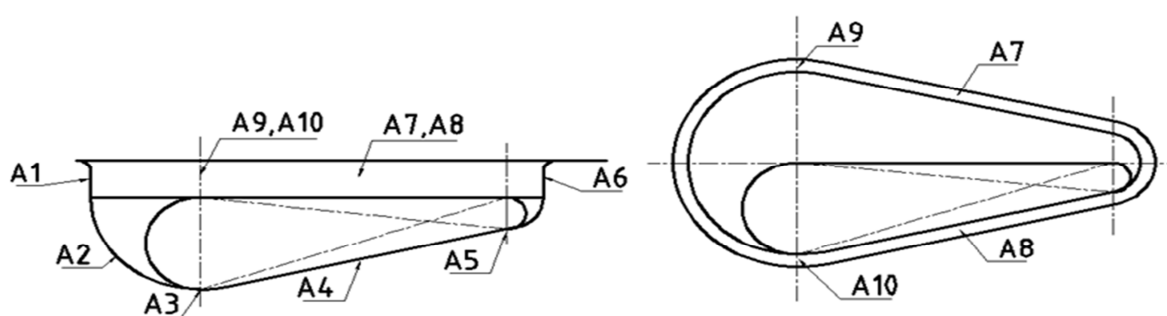
### ข.1 แรงสูงสุดใช้เพื่อขึ้นรูป

ตารางที่ ข.1 แรงของการขึ้นรูปต่อชนิดของแผ่นตัดเปล่า (Blank Geometry)

ชนิดของแผ่นตัดเปล่า	ชั้นที่1	ชั้นที่2	ชั้นที่3	ชั้นที่4	ชั้นที่5	เฉลี่ย (kN)
(ก) แผ่นเปล่าสี่เหลี่ยมไม่บากมุม	128.76	128.86	130.53	125.61	129.96	128.87
(ข) แผ่นเปล่าสี่เหลี่ยมบากมุม 45°	117.71	119.46	119.16	119.24	118.53	118.88
(ค) แผ่นงานตามการประมาณค่า	112.95	116.98	115.28	119.13	113.13	115.44

ตารางที่ ข.2 ความหนาของผนังจากการขึ้นรูปชิ้นงาน ชนิดของแผ่นตัดเปล่า (Blank Geometry)

จุดตรวจ	ความหนาผิว (สี่เหลี่ยม)	ความหนาผิว (สี่เหลี่ยมบากมุม)	ความหนาผิว (ประมาณค่า)
A1	0.898	0.870	0.854
A2	0.960	0.968	0.968
A3	0.951	0.960	0.974
A4	0.923	0.928	0.987
A5	0.957	0.937	0.947
A6	0.968	0.944	0.960
A7	0.966	0.967	0.945
A8	0.936	0.925	0.938
A9	0.947	0.950	0.988
A10	0.878	0.898	0.908



ภาพที่ ข.1 จุดตรวจความหนาของผนังจากการขึ้นรูปชิ้นงานชนิดของแผ่นตัดเปล่า

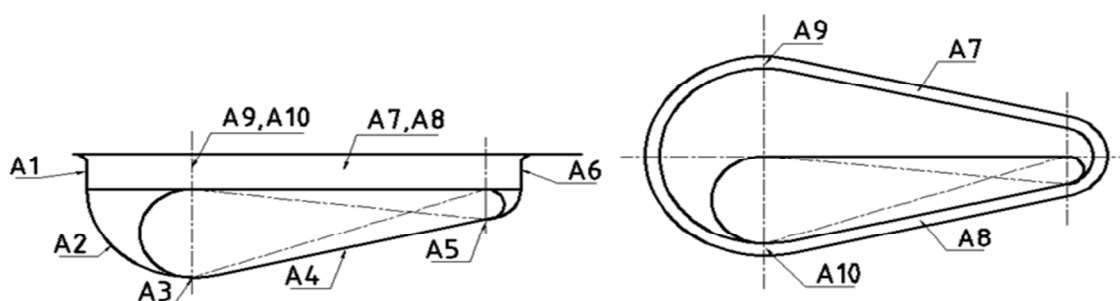


ตารางที่ ข.3 แรงของการขึ้นรูปต่อสัดส่วนของแผ่นปลาสีเหลี่ยม

แรงกดขึ้นงานต่อแรงขึ้นรูป	ชั้นที่1	ชั้นที่2	ชั้นที่3	ชั้นที่4	ชั้นที่5	เฉลี่ย (kN)
20 เปอร์เซนต์	106.8	104.8	106.9	108.4	109.6	107.3
40 เปอร์เซนต์	117.8	119.1	119.8	119.2	120.1	119.2
60 เปอร์เซนต์	140.1	141.3	142.0	149.1	140.0	142.5
80 เปอร์เซนต์	187.7	192.9	167.2	197.2	183.7	185.7

ตารางที่ ข.4 ความหนาของผนังจากการขึ้นรูปขึ้นงาน ชนิดของแผ่นตัดปลาสีเหลี่ยม

จุดตรวจ	ความหนาผิว (20 % ของแรงขึ้น รูป)	ความหนาผิว (40 %ของแรงขึ้น รูป)	ความหนาผิว (60 %ของแรงขึ้น รูป)	ความหนาผิว (80 %ของแรงขึ้น รูป)
A1	0.915	0.91	0.862	0.000
A2	0.968	0.963	0.971	0.923
A3	0.976	0.967	0.952	0.911
A4	0.901	0.897	0.891	0.963
A5	0.953	0.95	0.940	0.947
A6	0.969	0.96	0.974	0.874
A7	0.985	0.972	0.816	0.471
A8	0.917	0.919	0.929	0.923
A9	0.991	0.975	0.834	0.198
A10	0.897	0.867	0.866	0.869



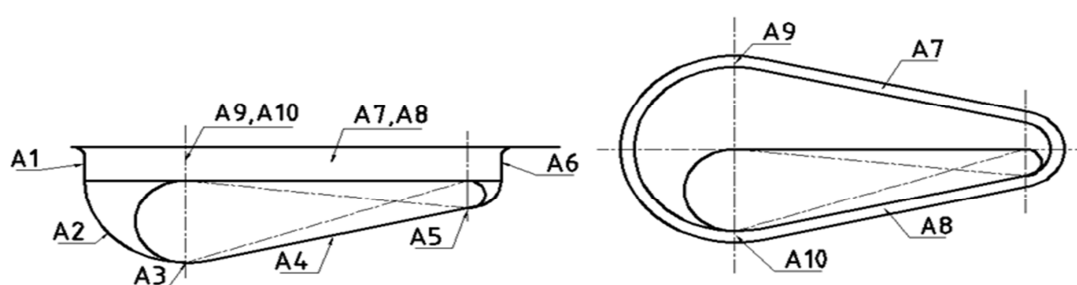
ภาพที่ ข.2 จุดตรวจความหนาของผนังจากการขึ้นรูปขึ้นงาน ชนิดของแผ่นตัดปลาสีเหลี่ยม

ตารางที่ ข.5 แรงของการขึ้นรูปต่อสัดส่วนของแผ่นเปล้าสี่เหลี่ยมบากมุม

แรงกดขึ้นงานต่อแรงขึ้นรูป	ชั้นที่1	ชั้นที่2	ชั้นที่3	ชั้นที่4	ชั้นที่5	เฉลี่ย (kN)
20 เปอร์เซนต์	111.5	107.5	109.1	111.7	108.2	109.6
40 เปอร์เซนต์	120.4	125.9	120.5	119.4	115.8	120.4
60 เปอร์เซนต์	151.7	150.6	154.3	154.9	150.7	152.4
80 เปอร์เซนต์	173.4	173.8	172.6	170.7	170.9	172.2

ตารางที่ ข.6 ความหนาของผนังจากการขึ้นรูปขึ้นงาน ชนิดของแผ่นตัดเปล้าสี่เหลี่ยมบากมุม

จุดตรวจ	ความหนาผิว (20 %ของแรงขึ้นรูป)	ความหนาผิว (40 %ของแรงขึ้นรูป)	ความหนาผิว (60 %ของแรงขึ้นรูป)	ความหนาผิว (80 %ของแรงขึ้นรูป)
A1	0.913	0.934	0.783	0.000
A2	0.984	0.976	0.9748	0.975
A3	0.987	0.942	0.9436	0.958
A4	0.916	0.904	0.8674	0.900
A5	0.935	0.946	0.8982	0.927
A6	0.964	0.9	0.9482	0.940
A7	0.966	0.945	0.563	0.000
A8	0.933	0.916	0.9214	0.923
A9	0.979	0.941	0.435	0.000
A10	0.898	0.875	0.854	0.840



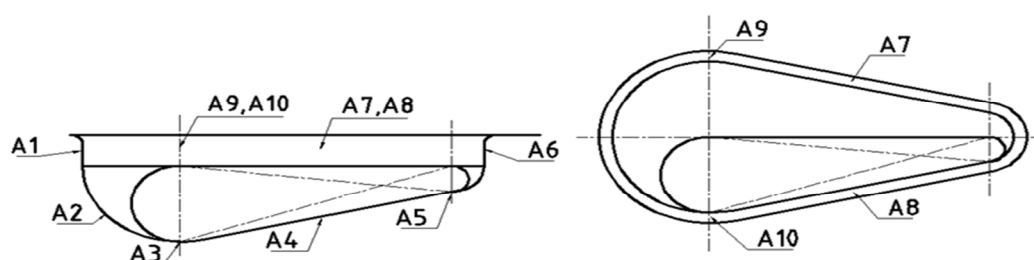
ภาพที่ ข.3 จุดตรวจความหนาของผนังจากการขึ้นรูปขึ้นงาน ชนิดของแผ่นตัดเปล้าสี่เหลี่ยมบากมุม

ตารางที่ ข.7 แรงของการขึ้นรูปต่อสัดส่วนของแผ่นเปล่าตามการประมาณค่า

แรงกดขึ้นงานต่อแรงขึ้นรูป	ชั้นที่1	ชั้นที่2	ชั้นที่3	ชั้นที่4	ชั้นที่5	เฉลี่ย (kN)
20 เปอร์เซนต์	107.5	108.5	106.1	107.7	107.2	107.4
40 เปอร์เซนต์	119.9	117.8	118.7	117.4	116.1	118.4
60 เปอร์เซนต์	159.6	160.6	164.9	160.2	161.7	161.6
80 เปอร์เซนต์	173.4	179.7	175.8	178.2	179.9	178.2

ตารางที่ ข.8 ความหนาของผนังจากการขึ้นรูปขึ้นงาน ชนิดของแผ่นตัดเปล่าตามการประมาณค่า

จุดตรวจ	ความหนาผิว (20 %ของแรงขึ้นรูป)	ความหนาผิว (40 %ของแรงขึ้นรูป)	ความหนาผิว (60 %ของแรงขึ้นรูป)	ความหนาผิว (80 %ของแรงขึ้นรูป)
A1	0.912	0.853	0.810	0.000
A2	0.983	0.96	0.946	0.868
A3	0.966	0.987	0.965	0.963
A4	0.894	0.919	0.847	0.857
A5	0.962	0.859	0.933	0.900
A6	0.957	0.988	0.947	0.934
A7	0.99	0.979	0.876	0.365
A8	0.948	0.935	0.920	0.911
A9	0.989	0.978	0.885	0.243
A10	0.917	0.832	0.881	0.890



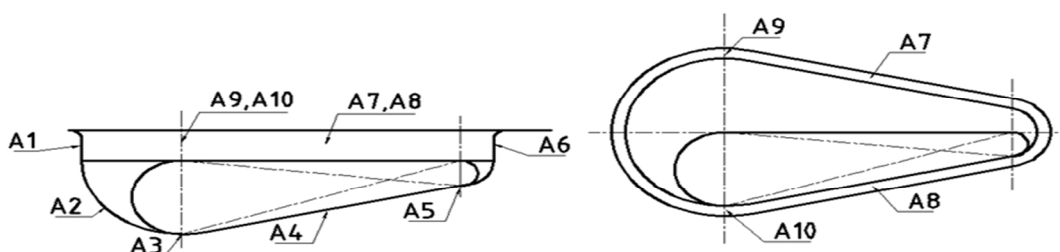
ภาพที่ ข.4 จุดตรวจความหนาของผนังจากการขึ้นรูปขึ้นงานชนิดของแผ่นตัดเปล่าตามการประมาณค่า

ตารางที่ ข.9 แรงของการขึ้นรูปของดรอว์บีดชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 มม. ต่อ  
สัดส่วนของแผ่นเปล้าสี่เหลี่ยม

แรงกดชิ้นงานต่อแรงขึ้นรูป	ชั้นที่1	ชั้นที่2	ชั้นที่3	ชั้นที่4	ชั้นที่5	เฉลี่ย (kN)
20 เปอร์เซนต์	141.20	134.93	144.63	136.43	138.98	139.24
40 เปอร์เซนต์	150.43	153.25	154.24	154.68	151.28	152.90
60 เปอร์เซนต์	169.60	169.65	168.07	167.58	169.26	168.98
80 เปอร์เซนต์	182.18	195.42	184.11	187.21	186.17	186.53

ตารางที่ ข.10 ความหนาของผนังจากการขึ้นรูปชิ้นงาน ชนิดของแผ่นตัดเปล้าสี่เหลี่ยม

จุดตรวจ	ความหนาผิว (20 %ของแรงขึ้นรูป)	ความหนาผิว (40 %ของแรงขึ้นรูป)	ความหนาผิว (60 %ของแรงขึ้นรูป)	ความหนาผิว (80 %ของแรงขึ้นรูป)
A1	1	0.938	0.943	0.000
A2	0.990	0.973	0.949	0.979
A3	0.882	0.935	0.890	0.857
A4	0.942	0.941	0.978	0.955
A5	0.994	0.979	0.998	0.813
A6	0.953	0.979	1.000	0.987
A7	0.882	0.930	0.792	0.000
A8	0.961	0.913	0.880	0.892
A9	0.935	0.928	0.863	0.000
A10	0.915	0.913	0.886	0.919



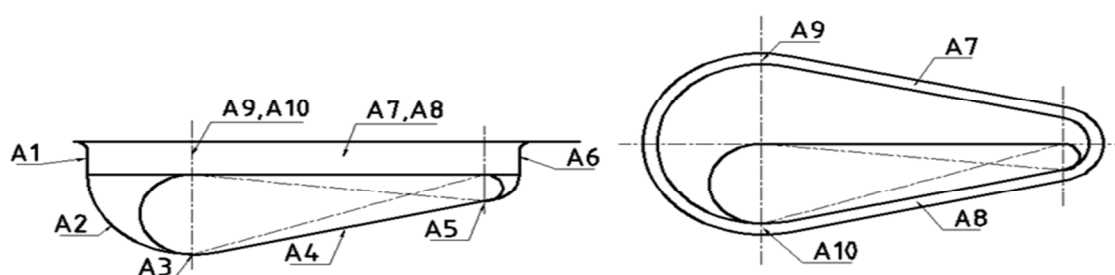
ภาพที่ ข.5 จุดตรวจความหนาของผนังจากการขึ้นรูปชิ้นงาน ชนิดของแผ่นตัดเปล้าสี่เหลี่ยม

ตารางที่ ข.11 แรงของการขึ้นรูปของดรอว์บีคชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 มม.ต่อ  
สัดส่วนของแผ่นเปล่าสี่เหลี่ยมบากมุม

แรงกดชิ้นงานต่อแรงขึ้นรูป	ชั้นที่1	ชั้นที่2	ชั้นที่3	ชั้นที่4	ชั้นที่5	เฉลี่ย (kN)
20 เปอร์เซนต์	140.51	146.68	144.45	148.63	146.38	145.33
40 เปอร์เซนต์	161.42	163.80	164.48	164.75	163.55	163.60
60 เปอร์เซนต์	168.80	168.67	168.07	168.68	170.68	168.98
80 เปอร์เซนต์	184.50	187.45	183.64	188.18	188.88	186.53

ตารางที่ ข.12 ความหนาของผนังจากการขึ้นรูปชิ้นงาน ชนิดของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมบากมุม

จุดตรวจ	ความหนาผิว (20 %ของแรงขึ้นรูป)	ความหนาผิว (40 %ของแรงขึ้นรูป)	ความหนาผิว (60 %ของแรงขึ้นรูป)	ความหนาผิว (80 %ของแรงขึ้นรูป)
A1	0.934	0.854	0.000	0.000
A2	0.934	0.917	0.924	0.924
A3	0.890	0.889	0.871	0.871
A4	0.965	0.970	0.931	0.922
A5	0.914	0.898	0.798	0.839
A6	0.880	0.939	0.983	0.909
A7	0.860	0.840	0.788	0.778
A8	0.948	0.895	0.877	0.874
A9	0.911	0.907	0.147	0.000
A10	0.931	0.890	0.884	0.392



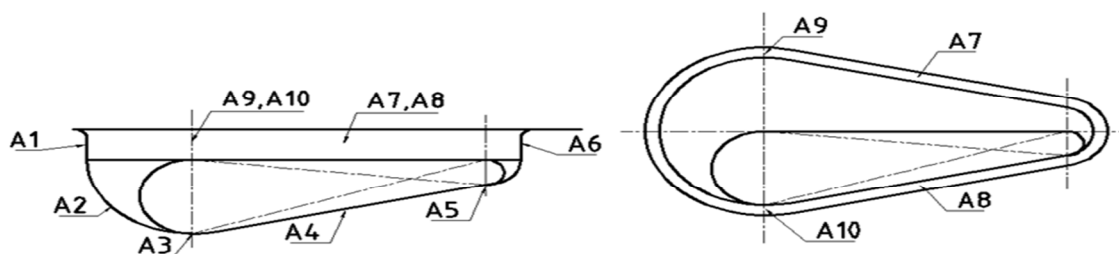
ภาพที่ ข.6 จุดตรวจความหนาของผนังจากการขึ้นรูปชิ้นงาน ชนิดของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมบากมุม

ตารางที่ ข.13 แรงของการขึ้นรูปของดรอว์ปิดชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 มม. ต่อ  
สัดส่วนของแผ่นเปล่าตามการประมาณค่า

แรงกดชิ้นงานต่อแรงขึ้นรูป	ชั้นที่1	ชั้นที่2	ชั้นที่3	ชั้นที่4	ชั้นที่5	เฉลี่ย (kN)
20 เปอร์เซ็นต์	134.61	136.35	132.47	133.84	136.28	134.51
40 เปอร์เซ็นต์	145.67	147.74	145.79	149.80	145.90	146.98
60 เปอร์เซ็นต์	166.05	164.78	164.56	163.39	163.07	164.37
80 เปอร์เซ็นต์	183.11	184.21	188.01	182.31	182.12	183.32

ตารางที่ ข.14 ความหนาของผนังจากการขึ้นรูปชิ้นงาน ชนิดของแผ่นตัดเปล่าตามการประมาณค่า

จุดตรวจ	ความหนาผิว (20 %ของแรงขึ้นรูป)	ความหนาผิว (40 %ของแรงขึ้นรูป)	ความหนาผิว (60 %ของแรงขึ้นรูป)	ความหนาผิว (80 %ของแรงขึ้นรูป)
A1	0.857	0.824	0.461	0.000
A2	0.907	0.932	0.926	0.962
A3	0.898	0.894	0.860	0.845
A4	0.963	0.979	0.977	0.966
A5	0.920	0.905	0.846	0.845
A6	0.887	0.911	0.906	0.979
A7	0.857	0.869	0.843	0.000
A8	0.929	0.917	0.924	0.911
A9	0.872	0.886	0.420	0.000
A10	0.878	0.876	0.715	0.956



ภาพที่ ข.7 จุดตรวจความหนาของผนังจากการขึ้นรูปชิ้นงาน ชนิดของแผ่นตัดเปล่าตามการประมาณ  
ค่า

**ภาคผนวก ค**

การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM

### ค.1 การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E517-92

การทดสอบแรงดึงเป็นวิธีที่นิยมใช้หาความสัมพันธ์ระหว่าง Engineering Stress-Strain Curve และสามารถนำมาคำนวณหา True Stress-Strain Curve เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุในการทดสอบมีเงื่อนไขในการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E517-92 และ ASTM E646-91 คือ

- 1) การเปลี่ยนรูปต้องเป็นไปอย่างช้าๆ โดยมีอัตราความเครียดประมาณ 1 มม. ต่อนาที
- 2) อุณหภูมิขณะทำการทดสอบอยู่ที่ 20-25 องศาเซลเซียส

#### ค.1.1 ค่าคุณสมบัติของวัสดุ SPCC – SD ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E517-92

ทดสอบชิ้นงานที่ 0 องศา

จากสมการที่ 2.18

$$r_0 = \frac{\ln(25.10/21.90)}{\ln((21.90 \times 60.50)/(25.10 \times 50))}$$

$$r_0 = \frac{\ln 1.146}{\ln 1.055} = 2.545$$

ทดสอบชิ้นงานที่ 45 องศา

$$r_{45} = \frac{\ln(25.10/22.62)}{\ln((22.62 \times 59.42)/(25.10 \times 50))}$$

$$r_{45} = \frac{\ln 1.109}{\ln 1.071} = 1.508$$

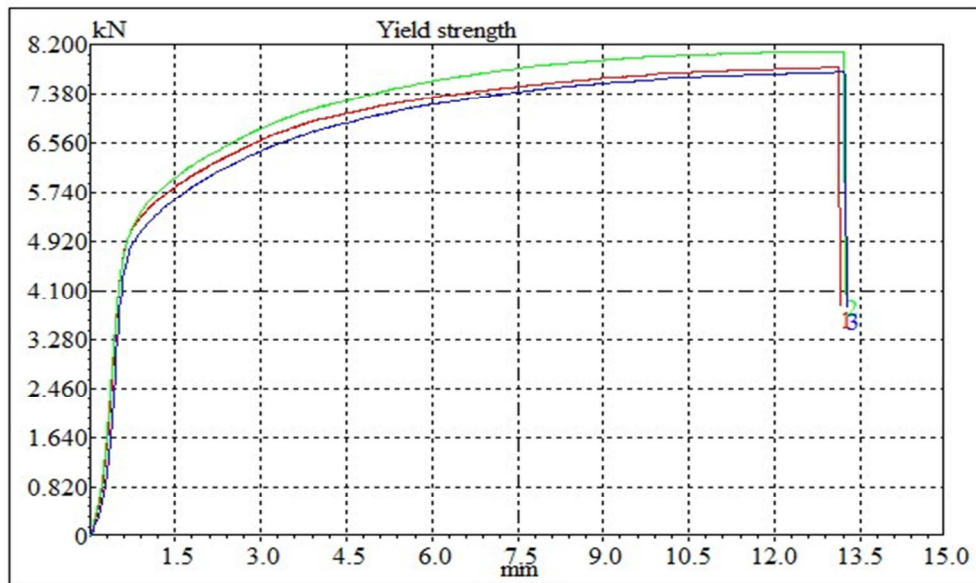
ทดสอบชิ้นงานที่ 90 องศา

$$r_{90} = \frac{\ln(25.10/22.10)}{\ln((22.10 \times 60.16)/(25.10 \times 50))}$$

$$r_{90} = \frac{\ln 1.135}{\ln 1.059} = 2.209$$







ภาพที่ ค.1 เส้นโค้งการไหลตัวของวัสดุ SPCC-SD

ภาคผนวก ง  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



Department of Alternative  
Energy Development and Efficiency  
**MINISTRY OF ENERGY**

กำหนดการและบทความ



การประชุมสัมมนาวิชาการ  
พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5  
The 5th Thailand Renewable Energy For Community Conference

**TREC-5**

18 - 20 ธันวาคม 2555



จัดโดย สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน(แห่งประเทศไทย)  
ณ สถาบันพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย  
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

**adiCET**

WELCOME TO TREC-5




การประชุมสัมมนาวิชาการ  
**พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย**  
The 5<sup>th</sup> Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-5)  
18-20 December 2555

ครั้งที่ 5

หน้าแรก	การลงทะเบียน	กำหนดการสำคัญ	สถานที่จัดงาน
<b>เมนู</b>			
Call For Papers			
ความเป็นมา			
สารจากประธาน			
คณะกรรมการ			
กำหนดการสำคัญ			
โปรแกรมการประชุม			
การลงทะเบียน			
การลงทะเบียน			
Social Program			
สถานที่จัดงาน			
สถานที่พักและการเดินทาง			
ผู้สนับสนุน			
ติดต่อเรา			

**คณะกรรมการทรงคุณวุฒิ**

1. ดร. วัฒนพงษ์ ภิรักษ์วิเชียร	
2. ศ.ดร.ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	
3. ศ.ดร.มงคลศักดิ์ ภิรมดีโร	
4. ศ.ดร.จงจิตร ภิไธยธาดา	
5. Prof. Dr. Joseph KHEDARI	
6. ดร.ดร.ปาณชิต สอนธนาพิทักษ์	
7. ผศ.ดร.สมชัย ภิไธยโรจน์	
8. ผศ.ดร.สมภพ คุ้มฉลาด	
9. คุณอำนวย ทองสีกัด	
10. ผศ.ดร.เชื่องเดช วงศ์หล้า	

**คณะกรรมการดำเนินงาน**

ดร. วีรชัย โรจนรินทร์	ประธาน
ดร. ศิษณุภูมิ มณีโรจน์	รองประธาน
ดร. กฤษณะเชนเม ภูมิกิตติพันธ์	กรรมการ
ผศ.ดร. ดอกงิ้ว ภิระชาชาติ	กรรมการ
ดร. สุนทรภัสธ เอี่ยมกลาง	กรรมการ
ดร. วรจิตต์ เศรษฐพรรค	กรรมการและเลขานุการ

**คณะกรรมการฝ่ายมหาดไทย**

ดร. ณัฐธิดา สันตวานนท์	ประธาน
ดร. กฤษณะเชนเม ภูมิกิตติพันธ์	รองประธาน
ดร. วีรชัย วงศ์บุญโย	กรรมการ
ดร. อำนวยอนันต์ อนุรักษ์	กรรมการ
ดร. ประพัทธ์ อนุรักษ์	กรรมการ
ดร. วรวิภา ออมทรัพย์	กรรมการ
นางสาวสิริพรรณ สีหะรินทร์	กรรมการและเลขานุการ

**คณะกรรมการฝ่ายจัดการภายในและการลงทะเบียน**

ดร. วัฒนพงษ์ ภิรักษ์วิเชียร	ประธาน
ดร. วีรชัย โรจนรินทร์	รองประธาน
ดร. ศิษณุภูมิ มณีโรจน์	กรรมการ
ดร. สุนทรภัสธ เอี่ยมกลาง	กรรมการและเลขานุการ

**คณะกรรมการฝ่ายสถานที่และยานพาหนะ**

ดร. วีรชัย ชาญเมืองใจ	ประธาน
นายสุวิจิตร ศรีแก้ว	รองประธาน
นายกฤษณะ ศรีบุญ	กรรมการ
นางปณิตา สิมสุจิต	กรรมการ
นายอานนท์ สัตถ์เม่ง	กรรมการและเลขานุการ

**คณะกรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์**

ดร. วรจิตต์ เศรษฐพรรค	ประธาน
ดร. บุญเรือง ป่องกลาง	รองประธาน
ดร. สุนทรภัสธ เอี่ยมกลาง	กรรมการ
อ. เจนจิรา เข็มยงค์	กรรมการ
นายภาณุพงษ์ อินต๊ะวงศ์	กรรมการและเลขานุการ

**คณะกรรมการฝ่ายพิธีการและการต้อนรับ**

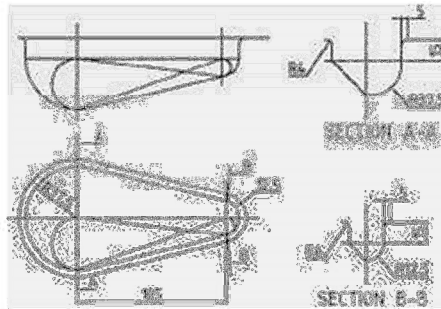
ดร. วรจิตต์ เศรษฐพรรค	ประธาน
อ. เจนจิรา เข็มยงค์	รองประธาน
ดร. บุญเรือง ป่องกลาง	กรรมการ
ดร. ณัฐธิดา สันตวานนท์	กรรมการ
ดร. วีรชัย ชาญเมืองใจ	กรรมการ
นางปณิตา สิมสุจิต	กรรมการและเลขานุการ

Copyright © 2010 | Powered By ARIT cmu

## สารบัญ

บทความ	หน้า	
<b>กลุ่ม 5 วัสดุศาสตร์เพื่อการพัฒนาพลังงานและการอนุรักษ์ (ME) (ต่อ)</b>		
ME007	การศึกษาอิทธิพลของแรงกดในกระบวนการขึ้นรูปลิ้นขึ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร ต่อความหนาผิวจากการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC-SD <i>อาคม บุญนาค บุญส่ง จงกลณี ศิวกร อ่างทอง</i>	396
ME008	การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบสมุนไพรระบบพลังงานความร้อนร่วมด้วยกระบวนการ แบบมีส่วนร่วม <i>สาร์ลีย์ กระจง รัชดา คำจริง</i>	402
ME009	การบริหารจัดการเศษวัสดุเหลือใช้ของกลุ่มอาชีพ การเพาะเห็ด ต่าบลงยางคก อำเภอห้างฉัตร จังหวัดลำปางด้วยเทคโนโลยีกระบวนการทางความร้อนในแปรรูปชีวมวล <i>รวิภา ยงประยูร ธานินทร์ คูพูลทรัพย์</i>	411
ME010	การออกแบบระบบควบคุม อัตราการไหลของก๊าซ ไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนที่ส่งผลต่อ การเกิดกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ขนาด 1 ชั้นเซลล์ โดยใช้ระบบควบคุมแบบพีซีล่องจิก <i>อดิสร ถมยา รวิภา ยงประยูร วราคม วงศ์ชัย</i>	419
ME011	การพัฒนารถไฟฟ้าต้นแบบ <i>รัฐพร เงินมีศรี ฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์วงษ์ คงฤทธิ แม้นศิริ ณัฐวุฒิ ชาวสะอาด</i>	427
<b>กลุ่ม 6 สิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชน (CE)</b>		
CE001	ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ลดโลกร้อนของผู้บริโภคในเขตเทศบาลนคร พิษณุโลก <i>บุษรารัตน์ พันธุ์รินทร์ ประพิศารีย์ ธนารักษ์ จารุวรรณ แดงบุปผา</i>	432
CE002	การวิเคราะห์สภาพแวดล้อมและศักยภาพชุมชนต้นแบบพลังงานทดแทน <i>วุฒิศาสตร์ โชคแก้ว อนุสรณ์ แสงประจักษ์ ปรีชา ศรีประภาคาร ณัฐธิดา สมพงษ์</i>	436
CE003	เครื่องผลิตน้ำกลั่นแบบผสมผสานสองพลังงาน <i>สุทธินันท์ ต้นโพธิ์ รุ่งเพชร ก่องนอก รุ่งเรือง ว่างไธสง</i>	442

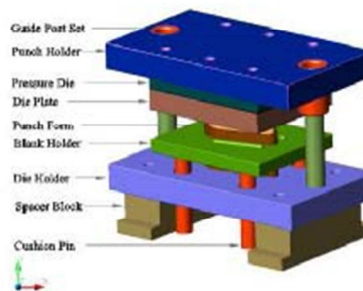




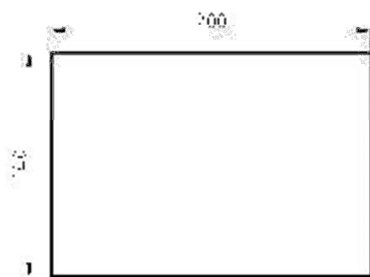
รูปที่ 1 ขนาดและรูปทรงของชิ้นงาน [2]

2. วิธีการทดสอบ

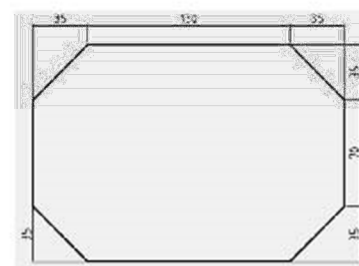
2.1 จุดแม่พิมพ์ที่รูปที่ 1 จะใช้รูปที่ 2 หลักการทำงานของแม่พิมพ์ แผ่นตายโด้ (Die holder) ใช้จับยึดติดกับแท่นเดินของเครื่อง และยึดแผ่นรองท้าย (Pressure die) และแผ่นตาย (Die) ตามลำดับ จะยึดกับช่องรองรับ (Upper shoe) มีชุดนำการป้อน (Guide post) เป็นชุดนำเพื่อควบคุมที่บ่งชี้ในการป้อนชิ้นลง และชุดล่าง (Lower shoe) จะประกอบด้วยพินซ์ (Punch) แผ่นกดยึด (Blank holder) มีหน้าที่ในการกดยึดชิ้นงานโดยดึงถ่ายแรงจาก Cushion pin ซึ่งสามารถปรับแรงได้และแผ่นหนีไฮดรอลิก (Punch holder) จะจับยึดกับแท่นเครื่องป้อน มีแผ่นรองแม่พิมพ์ (Spacer block) [2]



รูปที่ 2 หลักการทำงานของแม่พิมพ์ [2]



รูปที่ 3 แผ่นตัดแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 4 แผ่นตัดแผ่นสี่เหลี่ยมทั้งสี่ด้านมุม 45 องศา





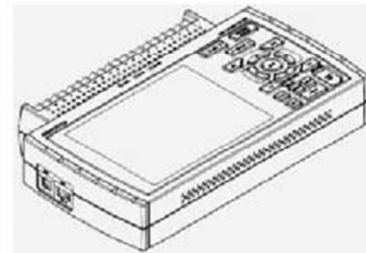
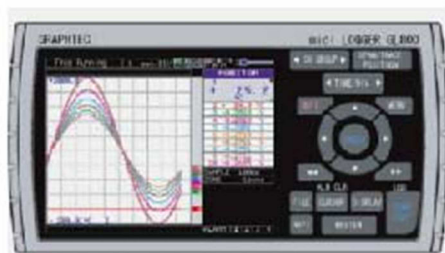
รูปที่ 5 แม่พิมพ์บนเครื่องปัมไฮดรอลิก

2.2 กำหนดปัจจัยทดสอบ ได้ทำการทดสอบที่ 4 ระดับดังนี้

1. แรงกดขึ้นตามในการขึ้นรูปที่ 20 เปอร์เซ็นต์ ของแรงการขึ้นรูปคือ 20.28 KN
  2. แรงกดขึ้นตามในการขึ้นรูปที่ 40 เปอร์เซ็นต์ ของแรงการขึ้นรูปคือ 41.24 KN
  3. แรงกดขึ้นตามในการขึ้นรูปที่ 60 เปอร์เซ็นต์ ของแรงการขึ้นรูปคือ 62.21 KN
  4. แรงกดขึ้นตามในการขึ้นรูปที่ 80 เปอร์เซ็นต์ ของแรงการขึ้นรูปคือ 83.17 KN
- โดยใช้สารหล่อลื่นชนิดแผ่นพลาสติกโพลีเอทิลีน ( polyethylene : PE ) ชนิดแข็ง

3. เครื่องมือและอุปกรณ์

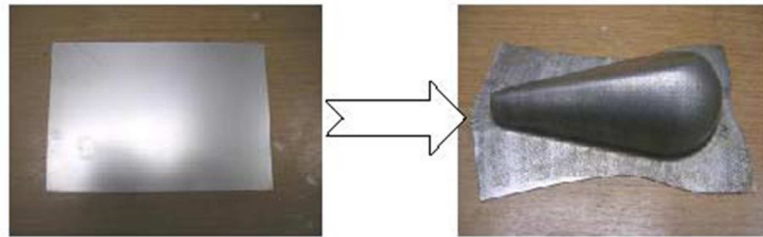
- 1.) ชิ้นงานแผ่นเหล็กชนิดเหล็ก SPCG –80 ขนาด 200x140x1 มม. (จ.รูปที่ 3-4)
- 2.) จุดแม่พิมพ์ขึ้นรูปสี่เหลี่ยม (รูปที่ 2)
- 3.) เครื่องปัมไฮดรอลิกขนาดแรงดันสูงสุด 80 ตัน (จ.รูปที่ 5)
- 4.) อุปกรณ์วัดแรงโคจรการเข้าด้วยไฟฟ้า Electronic mechanical transducer
- 5.) อุปกรณ์ตรวจสอบวัดแรงและบันทึกข้อมูล 6. Data mini logger รุ่น GL200-UM-801 (รูปที่ 6)
- 7.) Micrometer digital Mitutoyo 0-25 มม. ความละเอียด 0.001 มม. 8.) เครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer)



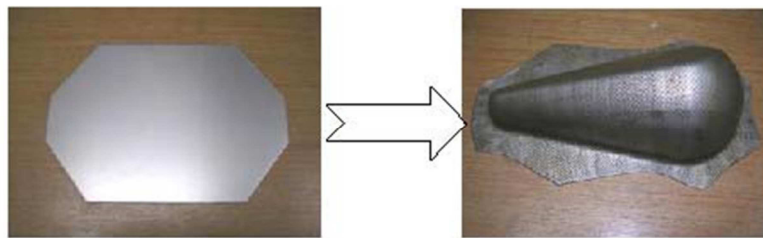
รูปที่ 6 อุปกรณ์ขยาย (Mini data logger) [9]

4. ขั้นตอนการทดลอง

1. จัดหาวัสดุ SPCC-SD
2. ตัดชิ้นงานทดสอบ
3. ตีกริหด้วยไฟฟ้า (Electro Chemical Marking)
4. ติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องปั๊ม ในรูปที่ 8
5. ทดสอบความแรงกดของเบดจ์โฮลเดอร์ (Blank Holder) ที่เหมาะสม
6. บันทึกข้อมูลขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) ชิ้นงานในแรงที่ใช้เพื่อขึ้นรูปลึกชิ้นงาน ดังรูปที่ 7-9
7. ตัดค่าชิ้นงานหลังการขึ้นรูปเพื่อวัดขนาดความหนาของแต่ละจุดกำหนดและบันทึกผล

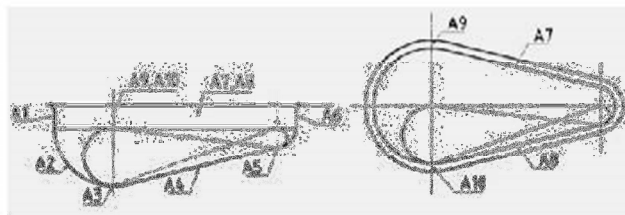


รูปที่ 7 แผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าหลังขึ้นรูปลึก



รูปที่ 8 แผ่นตัดเปล่ารูปวงกลมทั้งสี่ด้านมุม 45 องศา หลังขึ้นรูปลึก

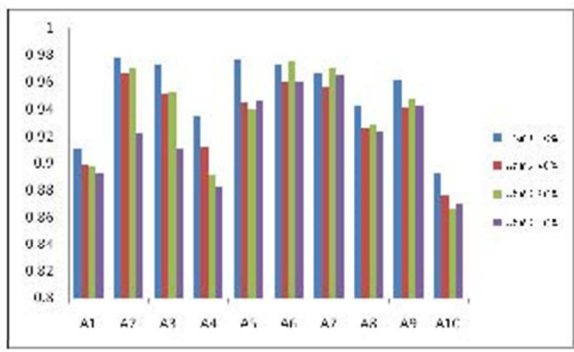
บริเวณจุดที่ตรวจสอบการวัดความหนาของผิวชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูป ตามแนวแกนหลักและแกนรองของกริด 10 จุดบนชิ้นงาน ดังรูปที่ 10 นำผลที่ได้จากการวัดค่าความหนาของแต่ละจุด โดยกาวติดผ้าครึ่งตามแนวแกนหลักของชิ้นงาน ทดสอบแล้วทำการวัดความหนาของแต่ละจุดที่ตรวจสอบ เสร็จแล้วจึงนำค่าที่ได้มาทำการวิเคราะห์ผล



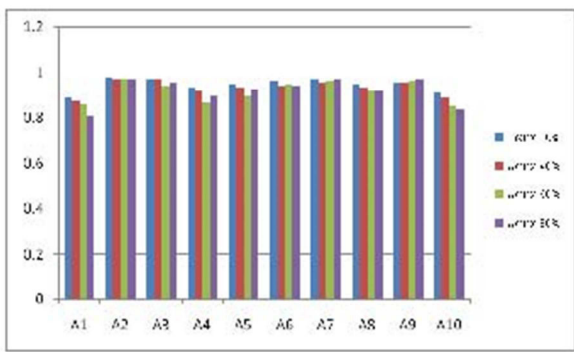
รูปที่ 9 บริเวณจุดที่ตรวจสอบ [3]

5. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

จากการทดลองป้อนข้อมูลขึ้นงานที่มีรูปทรงแบบไม่สมมาตร จะเห็นได้ว่าแรงในการขึ้นรูปและอัตราความเร็วในการกดอัดนั้นจะมีผลต่อรูปทรงและการไหลตัวของแผ่นขึ้นงาน โดยที่ขึ้นงานจะรับความเค้นและการกดอัดกับตัวถังอย่างรุนแรงโดยมีแนวโน้มเกิดการเสียหายสูง บริเวณที่ง่ายต่อการฉีดขาดจะเป็นจุดที่ A1 และ A10 จากการยึดตัวของวัสดุขึ้นงานจะมีความหนาลดลง แต่ถ้าปรับอัตราความเร็วในการกดอัดให้ช้าลงจะพบได้ว่าจะเกิดรอยยับบริเวณนี้กับข้างของ ขึ้นงาน ดังรูปค่าความหนาขึ้นงานและค่าแรงในการขึ้นรูป



รูปที่ 10 ค่าความหนาขึ้นงานสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 11 ค่าความหนาขึ้นงานหกมุมทั้งสี่ด้านมุม 45 องศา

6. วิเคราะห์และสรุปผล

การเลือกรูปทรงของแผ่นตัดเปล่าในการขึ้นรูปจะมีผลต่อความเครียดในขึ้นงานและความหนาของขึ้นงานหลังการขึ้นรูป แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปก็ขึ้นกับต้องสอดคล้องกับอัตราความเร็วของการขึ้นรูปอีกด้วย สังเกตผลการวิจัยพบว่า ในบริเวณจุด A1 และ A10 รูปที่ 10 ค่าความหนาขึ้นงานสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มแรงในการขึ้นรูปความหนาของขึ้นงานจะลดลง โดยความหนาที่ได้จะไม่มีความสม่ำเสมอทำให้เกิดจุดวิกฤติในขึ้นงาน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## เอกสารอ้างอิง

[1] เศรษฐ อุทธิภัย วารณี เปรมมานนท์ พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์ กุศล พรวิมลเนต 2546. การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ของกระบวนการสามขั้นแบบไดมอนด์ของเส้นลวดเหล็กวงรีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มม. โดยการใช้สารเคลือบผิวแบบไดมอนด์. ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 15-28

[2] บุญตั้ง สิงห์สี. สิวภท อังทอง. 2551. การศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบผิวในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างไม่สมมาตรเพื่อสมบัตการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC.

[3] Sivakorn Angthong. 1994. : A Critical Analysis of the Non-Symmetrical Deep Drawing Process : Submitted as partial fulfillment for the degree of master of Engineering in Advanced Manufacturing Technology. 46 : 64-71.

[4] Dornville และ E. Edwards. 1979. 1983. Techniques of Powdering Sheet Metal Forming. John Wiley & Sons, New Jersey.

[5] K. H. Johnson. 1988. Deformation of Metals Under High Pressure. Cambridge University Press, Cambridge.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายอาคม บุญนาค
วัน เดือน ปีเกิด	26 ตุลาคม 2523
ที่อยู่	39 หมู่ 1 ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2549
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ. 2545 – 2546	ตำแหน่งพนักงานฝ่ายผลิต บริษัท ไทยพลาสติกโปรดักส์ จำกัด
พ.ศ. 2547 – 2550	ตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย โครงการออกแบบและสร้างกล้องจุลทรรศน์ ROTAR 1 โครงการออกแบบและสร้างกล้องจุลทรรศน์ ROTAR 2 โครงการออกแบบและสร้างหอสำหรับกล้องจุลทรรศน์ ROTAR 1 โครงการออกแบบและสร้างหอสำหรับกล้องจุลทรรศน์ ROTAR 2
พ.ศ. 2550 – ปัจจุบัน	ตำแหน่งพนักงานมหาวิทยาลัยฯ สังกัดกองกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี