



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2558

การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก  
โลหะแผ่น

Application of Finite Element Method for Deep Drawing Process  
of Sheet Metal

คมสันต์ วงศ์กาฬสินธุ์

ผศ.ว่าที่ รต. วชิรินทร์ เชี่ยวไกร

มหาวิทยาลัยนครพนม/วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2558

มกราคม ปี 2560

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2558

การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก  
โลหะแผ่น

Application of Finite Element Method for Deep Drawing Process  
of Sheet Metal

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. คมสันต์ วงศ์กาฬสินธุ์      วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม
2. ผศ.ว่าที่ รต.วัชรินทร์ เขียวไกร คณะเกษตรและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยนครพนม/วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม

สนับสนุนโดย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

(ความเห็นในรายงานนี้ เป็นของผู้วิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ  
และมหาวิทยาลัยนครพนม ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก  
โลหะแผ่น

(ภาษาอังกฤษ) Application of Finite Element Method for Deep Drawing  
Process of Sheet Metal.

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย ประจำปี 2558 จำนวนเงิน 250,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 กุมภาพันธ์ 2558 ถึง 31 มกราคม 2559

ผู้วิจัย 1. นายคมสันต์ วงศ์กาฬสินธุ์  
2. ผศ.ว่าที่ รต. วชิรินทร์ เชี่ยวไกร

บทคัดย่อ

การพัฒนาภาคอุตสาหกรรมในด้านต่าง ๆ ให้มีความทันสมัยไปพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีในปัจจุบันโดยมุ่งเน้นและส่งเสริมให้มีการนำเทคโนโลยีเข้ามาใช้ในการผลิตเพื่อลดต้นทุนโดยเฉพาะวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดเล็กซึ่งส่วนใหญ่เป็นผู้ผลิตชิ้นงานเพื่อนำไปประกอบเป็นผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนต่าง ๆ ชิ้นงานส่วนใหญ่ได้มาจากกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก ซึ่งงานวิจัยนี้เป็น การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกโลหะแผ่นเพื่อช่วยลด ขั้นตอนในการผลิตลดการลองผิดลองถูกของกระบวนการ โดยนำผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดไปออกแบบแม่พิมพ์และกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการและทำการทดสอบขึ้นรูปจริงแล้วนำมาเปรียบเทียบผล วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปเป็นเหล็กแผ่น SPCC มาตรฐาน JIS G 3141 ชิ้นงานต้นแบบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 71 mm สูง 19 mm และมีความหนา 0.5 mm จากการวิเคราะห์ทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ ขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่าเท่ากับ 95 mm รัศมีตายเท่ากับ 3 mm และแรงในการจับยึดชิ้นงานเท่ากับ 6 kN ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปชิ้นงานนี้ จากข้อมูลที่ได้นำไปออกแบบชุดแม่พิมพ์และทำการ ทดสอบขึ้นรูปจริง ผลที่ได้ชิ้นงานมีลักษณะตรงกับชิ้นงานที่ได้จากการจำลองและชิ้นงานต้นแบบ การ เกิดรอยยับจะเกิดที่ตำแหน่งบริเวณที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจะเห็นว่าการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เข้ามาประยุกต์ใช้ในกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกสามารถช่วยในการการออกแบบชุดแม่พิมพ์ การหา ขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าและการหาแรงในการจับยึดชิ้นงานได้ เป็นการช่วยลดเวลาในการลองผิด ลองถูกและลดค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงาน

คำสำคัญ : การขึ้นรูปโลหะแผ่น, กระบวนการดึงขึ้นรูปลึก, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## ABSTRACT

This research was an application of the finite element method of deep drawing process to reduce the steps in the process. The mold was designed from simulation and analysis of deep drawing process. The material JIC G 3141 SPCC was used for molding. The prototype model diameter was 71 mm, height was 19 mm, and the thickness was 0.5 mm. The analysis of finite element method result the suitable diameter of blank sheet was 95 mm, die radius was 3 mm, and the blank force holder was 6 kN. The mold was designed and forming the real model. The comparison result of the real model, prototype model and simulation model were the same shape though the location of tearing and wrinkle. The finding indicated that the application of the finite element method of deep drawing process aided to design the mold, calculate diameter of blank sheet and blank force holder that reduced time and cost.

Keywords: Sheet metal forming, Deep drawing process, Finite element method.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความร่วมมือจากหลายภาคส่วน  
ที่มวิจัยขอขอบพระคุณผู้บริหารมหาวิทยาลัยนครพนม ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา  
มหาวิทยาลัยนครพนม ในการจัดหาทุนสนับสนุนการวิจัยมาให้แก่บุคลากรภายในมหาวิทยาลัย  
รวมถึงการให้คำแนะนำ ปรึกษา ในการเขียนแบบเสนอหัวข้อโครงการวิจัย กระบวนการทำวิจัย  
การเขียนรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ตลอดจนการปรับปรุง แก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ ขอขอบพระคุณ  
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งผู้วิจัยได้รับทุนอุดหนุน  
การวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2558 ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เชมจิต เสนา  
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ใช้เครื่องมือให้ทดสอบชิ้นงาน

อนึ่ง ที่มวิจัยหวังว่า งานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนากระบวนการผลิตใน  
ภาคอุตสาหกรรมต่อไป

คมสันต์ วงศ์กาฬสินธุ์

วัชรินทร์ เขียวไกร

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	2
1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ของงานวิจัย	3
<b>บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 กระบวนการดึงขึ้นรูปลึก	4
2.2 การศึกษาการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก	14
2.3 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป	20
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	21
2.5 สรุป	22
<b>บทที่ 3 การสร้างแบบจำลองกระบวนการดึงขึ้นรูป</b>	<b>23</b>
3.1 การสร้างชิ้นงานต้นแบบ	23
3.2 การกำหนดขนาดของแม่พิมพ์	24
3.3 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	24
3.4 การกำหนดเอลิเมนต์ของแบบจำลอง	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การกำหนดคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุ	27
3.6 การประมวลผล (Processing) การแสดงผลลัพธ์ (Post-processing)	29
3.7 การหาผลเฉลย	30
3.8 การวิเคราะห์เพื่อหาขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าที่เหมาะสม	31
3.9 การวิเคราะห์รัศมีตายที่เหมาะสม	52
3.10 สรุป	54
<b>บทที่ 4 การสร้างแม่พิมพ์และการทดสอบกระบวนการขึ้นรูป</b>	<b>55</b>
4.1 การออกแบบแม่พิมพ์	55
4.2 การติดตั้งชุดแม่พิมพ์	59
4.3 การทดสอบการขึ้นรูปจริง	60
4.4 สรุป	68
<b>บทที่ 5 การเปรียบเทียบชิ้นงาน สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ</b>	<b>69</b>
5.1 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และ การทดสอบขึ้นรูปจริง	69
5.2 สรุป	72
5.3 อภิปราย	74
5.4 ข้อเสนอแนะ	75
บรรณานุกรม	76
ภาคผนวก	79
ประวัติผู้เขียน	87

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1   ขนาดของแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการดิ่งขึ้นรูปลึก	24
ตารางที่ 3.2   คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ SPCC ตามมาตรฐาน JIS Z 2201	28
ตารางที่ 3.3(ก) ผลเฉลยของขนาดแผ่นขึ้นงานเปล่า 85 มิลลิเมตร	32
ตารางที่ 3.3(ข) ผลเฉลยของขนาดแผ่นขึ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร	38
ตารางที่ 3.3(ค) ผลเฉลยของขนาดแผ่นขึ้นงานเปล่า 105 มิลลิเมตร	44



## สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	ลักษณะก่อนการขึ้นรูปและระหว่างการขึ้นรูป	5
ภาพที่ 2.2	พฤติกรรมและทิศทางการไหลตัวของโลหะแผ่น	6
ภาพที่ 2.3	กลไกที่ทำให้ปึกขึ้นงานหนาขึ้นและเกิดการย่น	7
ภาพที่ 2.4	ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ รัศมีพันซ์ และรัศมีตาย	9
ภาพที่ 2.5	การเกิดรอยย่นของขึ้นงาน	10
ภาพที่ 2.6	การฉีกขาดที่ก้นถ้วยบริเวณเหนือรัศมีพันซ์	11
ภาพที่ 2.7	การฉีกขาดรอบพันซ์	11
ภาพที่ 2.8	การเกิดเอียงของขึ้นงาน	12
ภาพที่ 2.9	รอยชุดลึบบนผนังถ้วย	13
ภาพที่ 2.10	ลักษณะการตัดขึ้นงานเพื่อทดสอบแรงดึงตามทิศทางการรีดโลหะแผ่น	15
ภาพที่ 2.11	กราฟของค่า $R$ ของเกณฑ์การครากเมื่อ $\sigma_z = 0$	19
ภาพที่ 2.12	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป	21
ภาพที่ 2.13	พฤติกรรมการยึดตัวของแผ่นโลหะที่อยู่บนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป	21
ภาพที่ 3.1	ขึ้นงานต้นแบบ	23
ภาพที่ 3.2	ขนาดและรายละเอียดของขึ้นงานต้นแบบ	23
ภาพที่ 3.3	ขึ้นงานต้นแบบ Solid CAD Data เป็น Surface CAD Data	24
ภาพที่ 3.4(ก)	เอลิเมนต์ของตาย	25
ภาพที่ 3.4(ข)	เอลิเมนต์ของแผ่นจับยึดขึ้นงาน	25
ภาพที่ 3.4(ค)	เอลิเมนต์ของพันซ์	26
ภาพที่ 3.5	การเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์เมื่อมีการเสียรูปแบบสี่เหลี่ยม Adaptive Remeshing	26
ภาพที่ 3.6	เอลิเมนต์ของแผ่นขึ้นงานเปล่า	27
ภาพที่ 3.7	Surface CAD Data สร้างเป็นแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแม่พิมพ์	27
ภาพที่ 3.8	Hardening Curve SPCC	28
ภาพที่ 3.9	Source Code Material	29

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.10 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ประกอบด้วยเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปและการแบ่งส่วนต่าง ๆ ของพื้นที่ใต้กราฟ	31
ภาพที่ 3.11(ก) ความหนาของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 2 kN	33
ภาพที่ 3.11(ข) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 2 kN	33
ภาพที่ 3.11(ค) ความหนาของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 3 kN	34
ภาพที่ 3.11(ง) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 3 kN	34
ภาพที่ 3.11(จ) ความหนาของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 4 kN	35
ภาพที่ 3.11(ฉ) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 4 kN	35
ภาพที่ 3.11(ช) ความหนาของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 5 kN	36
ภาพที่ 3.11(ซ) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 5 kN	36
ภาพที่ 3.11(ณ) ความหนาของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 6 kN	37
ภาพที่ 3.11(ญ) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 6 kN	37
ภาพที่ 3.12(ก) ความหนาของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 4 kN	39
ภาพที่ 3.12(ข) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 4 kN	39
ภาพที่ 3.12(ค) ความหนาของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 5 kN	40
ภาพที่ 3.12(ง) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 5 kN	40
ภาพที่ 3.12(จ) ความหนาของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 6 kN	41
ภาพที่ 3.12(ฉ) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 6 kN	41

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.12(ข) ความหนาของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 7 kN	42
ภาพที่ 3.12(ช) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 7 kN	42
ภาพที่ 3.12(ฌ) ความหนาของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 8 kN	43
ภาพที่ 3.12(ญ) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 8 kN	43
ภาพที่ 3.13(ก) ความหนาของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 7 kN	45
ภาพที่ 3.13(ข) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 7 kN	45
ภาพที่ 3.13(ค) ความหนาของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 8 kN	46
ภาพที่ 3.13(ง) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 8 kN	46
ภาพที่ 3.13(จ) ความหนาของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 9 kN	47
ภาพที่ 3.13(ฉ) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 9 kN	47
ภาพที่ 3.13(ช) ความหนาของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 10 kN	48
ภาพที่ 3.13(ซ) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 10 kN	48
ภาพที่ 3.13(ฌ) ความหนาของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 11 kN	49
ภาพที่ 3.13(ญ) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 11 kN	49
ภาพที่ 3.14 บริเวณที่เกิดรอยย่นของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 4 kN	50
ภาพที่ 3.15 บริเวณที่เกิดรอยย่นของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 6 kN	51
ภาพที่ 3.16 บริเวณที่เกิดรอยย่นของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 9 kN	52
ภาพที่ 3.17(ก) การขึ้นรูปที่รัศมีตาย 3 มิลลิเมตร	53
ภาพที่ 3.17(ข) การขึ้นรูปที่รัศมีตาย 4 มิลลิเมตร	53

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.17(ค) การขึ้นรูปที่รัศมีตาย 5 มิลลิเมตร	54
ภาพที่ 4.1 ขั้นตอนการดำเนิน การออกแบบ การสร้างชิ้นส่วนต่าง ๆ การติดตั้งแม่พิมพ์ และการขึ้นรูป	55
ภาพที่ 4.2 เครื่องปั๊มไฮดรอลิกขนาด 10 ตัน	56
ภาพที่ 4.3 ลักษณะการติดตั้งแม่พิมพ์ และโครงสร้างแม่พิมพ์ที่เป็นแบบกลับทาง	56
ภาพที่ 4.4 ชุดแม่พิมพ์ที่ได้จากการออกแบบ	57
ภาพที่ 4.5 การติดตั้งชุดแม่พิมพ์	58
ภาพที่ 4.6 แม่พิมพ์ตาย	58
ภาพที่ 4.7 แม่พิมพ์พันซ์	58
ภาพที่ 4.8 แผ่นจับยึดชิ้นงาน	59
ภาพที่ 4.9 การติดตั้งชุดแม่พิมพ์กับเครื่องปั๊ม	59
ภาพที่ 4.10 วาล์วปรับความดันในการจับยึดชิ้นงานและมาตรวัดความดันของเครื่อง	60
ภาพที่ 4.11(ก) แผ่นชิ้นงานเปล่า 85 มิลลิเมตร แรงจับยึด 2 kN	60
ภาพที่ 4.11(ข) แผ่นชิ้นงานเปล่า 85 มิลลิเมตร แรงจับยึด 3 kN	61
ภาพที่ 4.11(ค) แผ่นชิ้นงานเปล่า 85 มิลลิเมตร แรงจับยึด 4 kN	61
ภาพที่ 4.11(ง) แผ่นชิ้นงานเปล่า 85 มิลลิเมตร แรงจับยึด 5 kN	61
ภาพที่ 4.11(จ) แผ่นชิ้นงานเปล่า 85 มิลลิเมตร แรงจับยึด 6 kN	61
ภาพที่ 4.12 ลักษณะของชิ้นงานที่แผ่นชิ้นงานเปล่าขนาด 85 มิลลิเมตร	62
ภาพที่ 4.13(ก) แผ่นชิ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร แรงจับยึด 4 kN	62
ภาพที่ 4.13(ข) แผ่นชิ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร แรงจับยึด 5 kN	62
ภาพที่ 4.13(ค) แผ่นชิ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร แรงจับยึด 6 kN	63
ภาพที่ 4.13(ง) แผ่นชิ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร แรงจับยึด 7 kN	63
ภาพที่ 4.13(จ) แผ่นชิ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร แรงจับยึด 8 kN	63
ภาพที่ 4.14 ลักษณะของชิ้นงานที่แผ่นชิ้นงานเปล่าขนาด 95 มิลลิเมตร	64
ภาพที่ 4.15(ก) แผ่นชิ้นงานเปล่า 105 มิลลิเมตร แรงจับยึด 7 kN	64
ภาพที่ 4.15(ข) แผ่นชิ้นงานเปล่า 105 มิลลิเมตร แรงจับยึด 8 kN	64

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.15(ค) แผ่นขึ้นงานเปล่า 105 มิลลิเมตร แรงจับยึด 9 kN	65
ภาพที่ 4.15(ง) แผ่นขึ้นงานเปล่า 105 มิลลิเมตร แรงจับยึด 10 kN	65
ภาพที่ 4.15(จ) แผ่นขึ้นงานเปล่า 105 มิลลิเมตร แรงจับยึด 11 kN	65
ภาพที่ 4.16 ลักษณะของขึ้นงานที่แผ่นขึ้นงานเปล่าขนาด 105 มิลลิเมตร	66
ภาพที่ 4.17(ก) ขนาดขึ้นงานต้นแบบ	66
ภาพที่ 4.17(ข) ขึ้นงานที่ขนาดแผ่นขึ้นงานเปล่า 85 มิลลิเมตร แรงจับยึด 4 kN	67
ภาพที่ 4.17(ค) ขึ้นงานที่ขนาดแผ่นขึ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร แรงจับยึด 6 kN	67
ภาพที่ 4.17(ง) ขึ้นงานที่ขนาดแผ่นขึ้นงานเปล่า 105 มิลลิเมตร แรงจับยึด 9 kN	67
ภาพที่ 5.1 การเปรียบเทียบผลการขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานเปล่า 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 4 kN	69
ภาพที่ 5.2 การเปรียบเทียบผลการขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 6 kN	70
ภาพที่ 5.3 การเปรียบเทียบผลการขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานเปล่า 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 9 kN	71
ภาพที่ 5.4 การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก	74
ภาพที่ ก.1 การกำหนดเอลิเมนต์ของแบบจำลองการขึ้นรูป	81
ภาพที่ ก.2 การกำหนดคุณสมบัติของแผ่นขึ้นงานเปล่า	81
ภาพที่ ก.3 การกำหนดเงื่อนไขการขึ้นรูป	82
ภาพที่ ก.4 การแสดงผลการขึ้นรูปและแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป	82
ภาพที่ ข.1 การออกแบบรายละเอียดของแผ่นจับยึดขึ้นงาน	84
ภาพที่ ข.2 การออกแบบรายละเอียดของแม่พิมพ์ตาย	84
ภาพที่ ข.3 การออกแบบรายละเอียดของพินซ์	85
ภาพที่ ข.4 การออกแบบรายละเอียดของแท่นจับยึดตาย	85
ภาพที่ ข.5 การออกแบบรายละเอียดของแท่นจับยึดพินซ์	86
ภาพที่ ข.6 การออกแบบรายละเอียด Cushion และ Stopper	86

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมา หลักการเหตุผล

##### 1. ความเป็นมา

วิสาหกิจขนาดกลางและขนาดเล็กล้วนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของระบบเศรษฐกิจของประเทศในระดับมหภาค โดยมีจำนวนประมาณร้อยละ 99 ของธุรกิจทั้งหมด และบทบาทสำคัญในการเป็นฐานรากการพัฒนาที่ยั่งยืน เป็นกลไกหลักในการฟื้นฟูและเสริมสร้างความก้าวหน้าทางเศรษฐกิจรวมทั้งเป็นกลไกในการแก้ไขปัญหาความยากจน โดยมีตัวชี้วัดที่สำคัญได้แก่ การสร้างมูลค่าเพิ่มเฉลี่ยคิดเป็นประมาณร้อยละ 38.2 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ มีมูลค่าการส่งออกโดยตรงคิดเป็นร้อยละ 30.1 ของมูลค่าการส่งออกรวม และการจ้างงานคิดเป็นร้อยละ 76.0 ของการจ้างงานรวมทั้งหมด (สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม:2552) ซึ่งประเทศไทยมีการพัฒนาภาคอุตสาหกรรมในด้านต่าง ๆ ให้มีความทันสมัยไปพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีในปัจจุบันโดยมุ่งเน้นและส่งเสริมให้มีการนำเทคโนโลยีเข้ามาใช้ในการผลิตเพื่อลดต้นทุน โดยเฉพาะวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดเล็กซึ่งส่วนใหญ่เป็นผู้ผลิตชิ้นงานเพื่อนำไปประกอบเป็นผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนต่าง ๆ ชิ้นงานส่วนใหญ่ได้มาจากระบวนการดึงขึ้นรูปลึก (Deep drawing process) จากโลหะแผ่น โดยชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปถ้วยหรือรูปเปลือกหอย ชิ้นงานเหล่านี้จะถูกส่งต่อไปยังผู้ผลิตรายอื่น ๆ เพื่อสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป เช่น ชิ้นส่วนประกอบต่าง ๆ รถยนต์ อุปกรณ์เครื่องประดับตกแต่งบ้าน เครื่องมือเครื่องจักรกลการเกษตร เป็นต้น

##### 2. หลักการเหตุผล

กระบวนการดึงขึ้นรูปลึกเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ดังนั้นการศึกษาถึงสมบัติทางกล การออกแบบแม่พิมพ์ กระบวนการผลิตชิ้นงานเพื่อให้ได้ชิ้นส่วนที่มีมาตรฐาน มีความแม่นยำสูง จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากเพื่อเป็นการลดต้นทุนและเวลาในการผลิต ข้อบกพร่องของชิ้นงานที่ได้จากการดึงขึ้นรูปในปัจจุบันจะแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะใหญ่ๆ คือ (ธเนศ เมฆาลัยและคณะ: 2539)

- 1) รูปร่างและขนาดไม่ได้ตามต้องการ
- 2) ข้อบกพร่องบนชิ้นงานรวมทั้งบนผิวชิ้นงาน
- 3) คุณสมบัติไม่ตรงกับความต้องการ

การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการขึ้นรูปโลหะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของโลหะที่

เกิดขึ้นในกระบวนการ นำไปสู่การลดข้อบกพร่องของชิ้นงานสามารถลดต้นทุนและเวลาในการผลิต ในงานวิจัยนี้จึงเป็นประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์ถึงกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกของ โลหะแผ่นโดยทำการเปรียบเทียบการใช้คุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่นโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับ การขึ้นรูปจริง เพื่อนำไปสู่การพัฒนาและเป็น แนวทางสำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกของโลหะแผ่นในวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดเล็ต่อไป เป็นการช่วยเศรษฐกิจของชาติได้อีกทางหนึ่ง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการดึงขึ้นรูปลึกโลหะแผ่น โดยมีวัตถุประสงค์เฉพาะ ของงานวิจัยครั้งนี้คือ

1. ศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก
2. ศึกษาและเปรียบเทียบการใช้คุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่นโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
3. ศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อการเกิดรอยย่น (Wrinkle) และการฉีกขาด (Tearing) ในกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. วิเคราะห์ออกแบบแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก
2. สร้างแบบจำลองของกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกโลหะแผ่นด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของกระบวนการ
3. กำหนดคุณสมบัติการเปลี่ยนรูปวัสดุเป็น อีลาสติก-พลาสติก (Elastic-Plastic)
4. ศึกษาอิทธิพลของขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่า (Blank sheet) ที่เหมาะสมที่มีผลต่อการเกิดรอยย่นและการฉีกขาด
5. ศึกษาอิทธิพลของแรงจับยึดชิ้นงานที่เหมาะสมที่มีผลต่อการเกิดรอยย่นและการฉีกขาด

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. สร้างชิ้นงานต้นแบบ และปรับปรุงให้เหมาะสมสำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก
2. ศึกษากรรมวิธีและเงื่อนไขการขึ้นรูปในการผลิต
3. สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของ พันช์ (Punch) ดาย (Die) แผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blank Force Holder) และ แผ่นชิ้นงานเปล่า
4. จำลองการขึ้นรูปโลหะบนเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อพิจารณาการเกิดรอยย่นและการฉีกขาดที่เกิดขึ้นหลังจากการขึ้นรูป

5. สร้างแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก
6. ทดลองขึ้นรูปแผ่นเหล็กและเปรียบเทียบกับผลของวิธีระเหยไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ใช้งานส่วนบุคคล
2. โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้านกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกโดยเฉพาะ
3. เครื่องปั๊มขนาด 10 ตัน
4. แผ่นเหล็กแบบแผ่นเรียบ หนา 0.5 มิลลิเมตร

#### 1.6 ประโยชน์ของงานวิจัย

เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลในการกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการดึงขึ้นรูปโลหะแผ่น เป็นแนวทางในการกำหนดขั้นตอนของกระบวนการการผลิต เพื่อศึกษาถึงกระบวนการผลิตและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ผลิตได้



## บทที่ 2

### วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่เป็นปัญหาสำคัญได้แก่ การเกิดรอยย่น การฉีกขาดบนผิวชิ้นงาน และรูปทรงไม่เป็นไปตามต้องการ ปัญหาเหล่านี้มีปัจจัยมาจากหลายสาเหตุ เช่น คุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่น ลักษณะของชิ้นงานต้นแบบ การกำหนดขนาดของแรงจับยึดชิ้นงานที่ไม่เหมาะสม และการกำหนดเงื่อนไขของแม่พิมพ์ (รัศมีพันซ์และตาย) การจำลองพฤติกรรมการขึ้นรูปโลหะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีประโยชน์อย่างมากในด้านการลดเวลาและค่าใช้จ่ายจากการลองผิดลองถูก ทำให้ทราบถึงลักษณะพฤติกรรมการไหล การเสียรูปและสามารถคาดการณ์ตำแหน่งเสียหายที่น่าจะเกิดขึ้นได้ ในการวิจัยครั้งนี้จะเน้นพิจารณาถึงการเกิดรอยย่น การฉีกขาด และขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าที่เหมาะสม ดังนั้นเพื่อให้บรรลุถึงวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้จำเป็นต้องเข้าใจกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ รายละเอียดของกระบวนการและการวิเคราะห์จะได้อธิบายดังต่อไปนี้

#### 2.1 กระบวนการดึงขึ้นรูปลึก

##### 1. กระบวนการดึงขึ้นรูปลึก

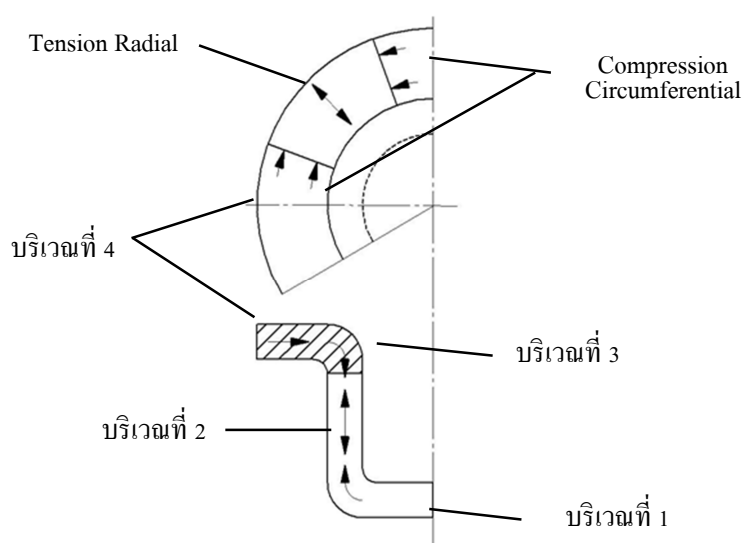
กระบวนการดึงขึ้นรูปลึกเป็นการขึ้นรูปวัสดุโดยเริ่มต้นจากแผ่นโลหะรีดเย็นหรือรีดร้อนทำการตัดให้ได้ขนาดที่เหมาะสม และขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปเพื่อให้ได้รูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ โลหะแผ่นที่นำมาขึ้นรูปมักเป็นกลุ่มของวัสดุเหนียวที่มีความสามารถยืดตัวได้ดี กระบวนการทำงานส่วนใหญ่ทำที่อุณหภูมิห้อง แม่พิมพ์ที่ออกแบบเพื่อขึ้นรูปลึกโลหะแผ่นอาจทำเป็นแม่พิมพ์เดี่ยว แม่พิมพ์ผสม แม่พิมพ์ต่อเนื่อง หรือแม่พิมพ์แบบส่งผ่าน ขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะของชิ้นงาน ขนาดของเครื่องปั๊ม ปริมาณการผลิตหรือองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ส่งผลต่ออัตราการผลิต ขั้นตอนการทำงานจะเริ่มจากใช้แรงกดจากพันซ์ (Punch) กดลงไปยังแผ่นชิ้นงานเปล่า (Blank Sheet) ผ่านตาย (Die) กระบวนการดึงขึ้นรูปลึกมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ตาย พันซ์ และแผ่นจับยึดชิ้นงานขึ้นงาน (Blank Holder) (Marciniak Z, et al.:2002 และ วารุณี เปรมานนท์ :2552)

การขึ้นรูปโลหะโดยอาศัยพื้นฐานของอิทธิพลของความแตกต่างในส่วนของคุณสมบัติทางกล ความเค้นที่มีผลต่อการเสียรูปของโลหะ และกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกนั้นจัดอยู่ในประเภทของการขึ้นรูปโดยการดึงและการอัดโดยสามารถจำแนกกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกได้โดยอาศัยลักษณะของการดึงขึ้นรูปได้ 3 ประเภท คือ (K. Lange:1985)

- 1) Deep drawing using dies
- 2) Deep drawing using a working medium



การเปลี่ยนแปลงของแผ่นชิ้นงานเป็นผลมาจากความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงและความเครียดแรงดึงรัศมีของแผ่นชิ้นงาน เมื่อแผ่นชิ้นงานที่ถูกกดด้วยพันธ์ แรงในการจับยึดชิ้นงาน blankholder จะช่วยป้องกันการเกิดของรอยย่น (Wrinkle) ความเค้นเนื่องจาก blankholder มีขนาดน้อยมากเมื่อเทียบกับความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงและความเครียดแรงดึงรัศมีของแผ่นชิ้นงาน ในระหว่างกระบวนการสามารถพฤติกรรมและทิศทางการไหลตัวของโลหะแผ่นดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 พฤติกรรมและทิศทางการไหลตัวของโลหะแผ่น

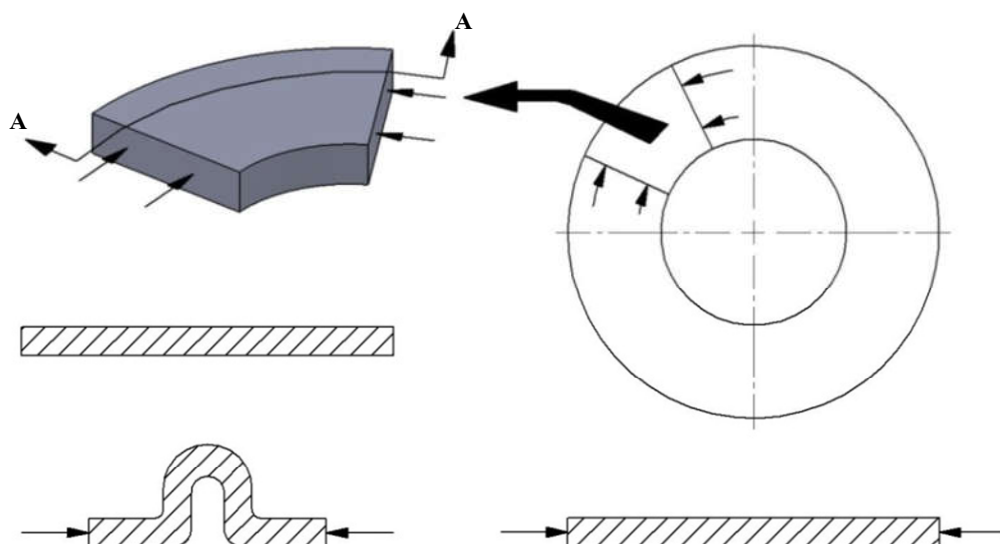
บริเวณที่ 1 แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปเกิดขึ้น พันธุ์จะพาเนื้อโลหะส่วนนี้เคลื่อนที่ตามเข้าไปในช่องว่างตาย มีเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นชิ้นงานบริเวณนี้น้อยมาก

บริเวณที่ 2 ส่วนของแผ่นชิ้นงานที่ถูกตัดโค้งตามรัศมีพันธ์ และผนังถ้วยในแนวตั้งที่ผ่านการเปลี่ยนรูปที่สมบูรณ์มาแล้ว แต่เนื่องจากเป็นส่วนที่ส่งผ่านแรงจากกันถ้วยทำให้เกิดความเค้นดึงในแนวแกนส่งผลให้บริเวณนี้มีโอกาสเกิดการยืดตัวและเกิดการบางลงของแผ่นชิ้นงาน บางกรณีก็เกิดการฉีกขาดขึ้นที่บริเวณนี้

บริเวณที่ 3 เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรในส่วนที่ถูกตัดโค้งตามรัศมีตาย

บริเวณที่ 4 ส่วนของปีกถ้วยเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรมากที่สุด บริเวณนี้เกิดความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงที่เกิดจากปริมาตรของเนื้อโลหะที่มีมากที่ขอบด้านนอกของแผ่นเปล่าพยายามเบียดเพื่อไหลเข้าไปในช่องว่างตายตามแรงดึงจากพันธ์ และเกิดความเค้นดึงในแนวรัศมีที่เกิดจากการดึงของพันธ์ การขยายตัวของวัสดุเนื่องจากการเบียดหรือการอัดตัวของวัสดุเนื่องจากการเบียดหรือการอัดตัวในแนวเส้นรอบวงจะทำให้เกิดการขยายตัวในแนวรัศมีและเกิดการต้านการไหลตัว (แรงเสียดทาน) มักจะพบว่าแผ่นโลหะที่บริเวณนี้จะมีขนาดหนาเพิ่มมากขึ้น หรือเกิดการย่น

เนื่องจากการอัดตัวในแนวเส้นรอบวง ทำให้เกิดการขยายออกใน 2 แนวแกน คือขยายออกตามแนวรัศมีและขยายออกตามแนวความหนาของแผ่นโลหะ ในบางกรณี เช่น โลหะแผ่นบาง เมื่อค่าความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงสูงขึ้น จะเกิดการโก่งตัวแทนที่จะหนาขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.3 กรณีนี้จะพบปัญหาการย่นบนปีกถ้วยร่วมด้วย



ภาพที่ 2.3 กลไกที่ทำให้ปีกชิ้นงานหนาขึ้นและเกิดการย่น

### 2.1.3 การแรงในการจับยึดชิ้นงาน Blank Holder

ขณะที่ทำการดึงขึ้นรูปจะเกิดความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงที่บริเวณปีกของถ้วย การใช้แผ่นจับยึดชิ้นงานกดบนบริเวณนี้จะช่วยลดปัญหาการเกิดรอยย่น ขนาดของแรงกดที่ใช้ต้องมีความเหมาะสมถ้าแรงกดน้อยเกินไปจะทำให้เกิดรอยย่นบนปีกและเกิดความเสียหายกับชิ้นงาน ในทางตรงกันข้ามถ้าแรงกดบนแผ่นจับยึดชิ้นงานมากเกินไปจะทำให้เกิดการฉีกขาดบริเวณผนังถ้วย บริเวณเหนือรัศมีพื้นที่ขึ้นมามีเล็กน้อย

ขนาดของแรงดันในการจับยึดชิ้นงานที่เหมาะสมหาได้จากสมการที่ 2.1

$$P_{BH} = 10^{-3} C \left[ (\beta - 1)^3 + \frac{0.005 d_0}{T} \right] \sigma_u \quad (2.1)$$

โดย  $P_{BH}$  คือ แรงดันในการจับยึดชิ้นงาน ( $\text{N/mm}^2$ )

$\beta$  คือ อัตราส่วนการดึงขึ้นรูป

$d_0$  คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแผ่นโลหะเปล่า ( $\text{mm}$ )

$T$  คือ ความหนาของแผ่นโลหะ ( $\text{mm}$ )

$\sigma_u$  คือ ค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ  
(Ultimate Tensile Strength, N/mm<sup>2</sup>)

$C$  คือ ค่าคงที่ มีค่าระหว่าง 2-3

**อัตราส่วนการดึงขึ้นรูป ( $\beta$ )** ความยาก-ง่ายในการดึงขึ้นรูป สามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วนการดึงขึ้นรูป หาได้จากอัตราส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นโลหะเปล่าต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$\text{Drawing Ratio } (\beta) = \frac{d_0}{d_1} \quad (2.2)$$

โดย  $\beta$  คือ ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการดึงขึ้นรูป (Limiting Drawing Ratio)

$d_0$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นโลหะเปล่า

$d_1$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพันธ์

ดังนั้น แรงในการจับยึดชิ้นงานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

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

โดย  $F_{BH}$  คือ แรงในการจับยึดชิ้นงาน (N)

$A_{BH}$  คือ พื้นที่บริเวณปีกที่แผ่นจับชิ้นงานกดอยู่ (mm<sup>2</sup>)

#### 2.1.6 รัศมีพันธ์และรัศมีตาย

การกำหนดรัศมีตายจะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วยและความหนาของแผ่นโลหะ รัศมีตายที่มีขนาดใหญ่จะช่วยให้แผ่นโลหะไหลตัวง่ายขึ้น ลดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป อย่างไรก็ตาม รัศมีตายที่มีขนาดใหญ่ก็ทำให้สูญเสียพื้นที่ในการจับยึดแผ่นโลหะ และเพิ่มโอกาสในการเกิดรอยยับบนปีกถ้วยดังนั้นจึงต้องออกแบบรัศมีตายให้มีขนาดพอเหมาะ G. Oehler และ Kaiser (1973) แนะนำวิธีการหาค่ารัศมีตายที่เหมาะสม ดังสมการที่ 2.4

$$R_D = 0.035[50 + (d_0 - d_1)]\sqrt{T} \quad (2.4)$$

โดย  $R_D$  คือ รัศมีตาย

$R_P$  คือ รัศมีพันธ์

ขณะที่ Sellin (1931) แนะนำค่ารัศมีตายที่เหมาะสมดังสมการที่ 2.5

$$R_D = (5 - 10) \times T \quad (2.5)$$

ส่วนรัศมีพันซ์  $R_P$  ควรจะใหญ่กว่ารัศมีตายประมาณ 3-5 เท่า ค่ารัศมีพันซ์ต้องไม่เล็กกว่ารัศมีตาย เนื่องจากอาจทำให้เกิดการกดฉีกเนื้อโลหะให้แยกจากกันเหมือนกับแม่พิมพ์ตัดเฉือนได้

### 2.1.5 การระยะช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ (Tool Clearance)

ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ คือช่องว่างที่อยู่ระหว่างพันซ์และตายดั่ง โดยทั่วไปจะมีขนาดกว้างกว่าความหนาเริ่มต้นของโลหะแผ่นเล็กน้อย การออกแบบระยะช่องว่างแม่พิมพ์ที่ใหญ่เกินไปจะทำให้รูปร่างของถ้วยบริเวณปากถ้วยด้านบนขยายออกหลังการขึ้นรูป ไม่เป็นทรงกระบอกที่สมบูรณ์ ในขณะที่การใช้ช่องว่างแม่พิมพ์ที่เล็กเกินไปจะส่งผลให้เกิดการรีดลดความหนาผนังที่บริเวณขอบถ้วยด้านบน และต้องเพิ่มแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป ซึ่งอาจทำให้เกิดการฉีกขาดของชิ้นงานได้ ค่าระยะช่องว่างแม่พิมพ์ ที่เหมาะสมขึ้นกับชนิดของวัสดุชิ้นงาน ดังแสดงในสมการที่ 2.6

$$CL = T + 0.07\sqrt{10T} \quad \text{สำหรับแผ่นเหล็ก} \quad (2.6 \text{ ก})$$

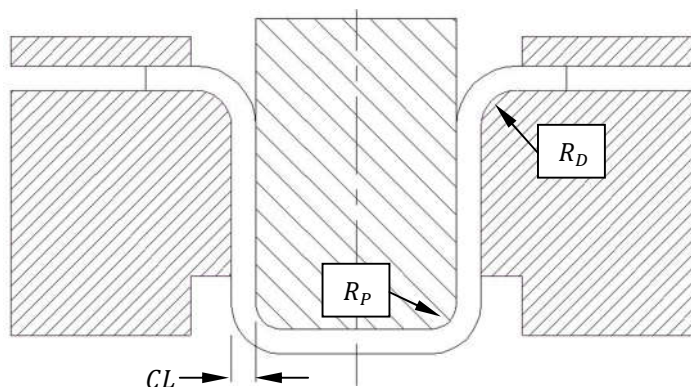
$$CL = T + 0.02\sqrt{10T} \quad \text{สำหรับแผ่นอะลูมิเนียม} \quad (2.6 \text{ ข})$$

$$CL = T + 0.04\sqrt{10T} \quad \text{สำหรับโลหะนอกกลุ่มเหล็ก} \quad (2.6 \text{ ค})$$

$$CL = T + 0.20\sqrt{10T} \quad \text{สำหรับโลหะผสมอุณหภูมิสูง} \quad (2.6 \text{ ง})$$

โดย  $CL$  คือ ระยะช่องว่างแม่พิมพ์

$T$  คือ ความหนาของแผ่นโลหะเปล่า



ภาพที่ 2.4 ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ รัศมีพันซ์ และรัศมีตาย

ค่าระยะช่องว่างที่แนะนำนี้ใช้สำหรับงานรูปถ้วยทรงกระบอกที่มีลักษณะสมมาตร รอบแนวแกน ส่วนงานรูปทรงอื่น ๆ เช่น ถ้วยสี่เหลี่ยม บริเวณที่เป็นมุมรัศมีควรมีระยะช่องว่างระหว่างพันซ์และตายมากกว่าบริเวณที่เป็นแนวตรงเนื่องจากมีปริมาณของเนื้อวัสดุที่จะไหลเข้ามากกว่า

### 2.1.6 ข้อบกพร่องในงานดิ่งขึ้นรูปลึก

ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการเกิดจากการกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการที่ไม่เหมาะสม เช่น แรงในการจับยึดชิ้นงาน และความเร็วของการขึ้นรูป การกำหนดเงื่อนไขของแม่พิมพ์เช่น รัศมีแม่พิมพ์ การหล่อลื่น การขัดผิวแม่พิมพ์ และการติดตั้งดอร์ปิด รายละเอียดของข้อบกพร่องหลัก ๆ มีนี้

#### การเกิดรอยย่นที่ปีกถ้วยหรือผนังถ้วย



ภาพที่ 2.5 การเกิดรอยย่นของชิ้นงาน

จากภาพที่ 2.5 รอยย่นจะเกิดจากความเค้นแรงอัดที่เกิดในแนวเส้นรอบวงที่ปีกถ้วย ในขณะที่เนื้อโลหะบริเวณนั้นถูกดึงให้ไหลตัวลงในดาดและรอยย่นนี้จะไม่สามารรถรีดให้หมดไปได้ เมื่อพินซ์เคลื่อนที่ลงจึงพาเอาแผ่นโลหะที่ย่นนี้ไหลลงไปเป็นส่วนของผนังถ้วย สาเหตุอาจเกิดจาก

1) ค่าอัตราส่วนการดิ่งขึ้นรูป ( $\beta$ ) สูงเกินไป แก้ไขได้โดยการลดขนาดแผ่นโลหะเปล่า (ในกรณีที่แผ่นโลหะเปล่ามีขนาดใหญ่เกินไป) หรือออกแบบขั้นตอนการทำงานใหม่ (ให้เพิ่มขั้นตอนในการดิ่งขึ้นรูปเพื่อลดความรุนแรงในการทำงาน)

2) แรงกดบนแผ่นจับชิ้นงานไม่เพียงพอ แก้ไขได้โดยการเพิ่มแรงกด

3) ผิวหน้าดาดหรือแผ่นจับชิ้นงานไม่ได้ระนาบ แก้ไขได้โดยการปรับระนาบ

4) รัศมีดาดใหญ่เกินไป (พื้นที่ในการจับยึดที่ปีกถ้วยน้อย) แก้ไขโดยการลดรัศมีดาด

### เกิดการฉีกขาดที่ก้นถ้วยบริเวณเหนือรัศมีพันซ์



ภาพที่ 2.6 การฉีกขาดที่ก้นถ้วยบริเวณเหนือรัศมีพันซ์

บริเวณผนังตรงทำหน้าที่ในการส่งผ่านแรงจากพันซ์ไปดึงให้ชิ้นงานบริเวณปากถ้วยเกิดการเปลี่ยนรูปและไหลลงไปในช่วงว่างตาย จึงเกิดความเค้นแรงดึงสูง ถ้าค่าความเค้นแรงดึงที่เกิดขึ้นสูงเกินค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุก็จะทำให้เกิดการฉีกขาดดังแสดงในภาพที่ 2.6 ดังนั้น สาเหตุที่เป็นไปได้และวิธีการแก้ไขดังนี้

- 1) ใช้แรงกดแผ่นจับชิ้นงานสูงเกินไป ให้แก้ไขโดยการเพิ่มแรงกด
- 2) เกิดความเสียหายสูงระหว่างผิวชิ้นงานบริเวณปากถ้วยและผิวหน้าตาย รวมถึงรัศมีตาย และระหว่างผิวชิ้นงานและผิวหน้าแผ่นจับชิ้นงาน แก้ไขได้โดยการปรับผิวหน้าตาย แผ่นจับชิ้นงาน และรัศมีตายให้เรียบ รวมทั้งใช้สารหล่อลื่นที่เหมาะสมเพื่อลดค่าความเสียหาย
- 3) ค่าอัตราส่วนการดึงขึ้นรูป ( $\beta$ ) สูงเกินไป ให้แก้ไขโดยการลดขนาดแผ่นโลหะเปล่า (ในกรณีที่แผ่นโลหะเปล่ามีขนาดใหญ่เกินจำเป็น) หรือออกแบบขั้นตอนการทำงานใหม่ (ให้เพิ่มขั้นตอนในการดึงขึ้นรูปเพื่อลดความรุนแรงในการทำงาน)

### เกิดการตัดขาดรอบพันซ์บริเวณระหว่างรัศมีพันซ์และรัศมีตาย



ภาพที่ 2.7 การฉีกขาดรอบพันซ์

จากรูปที่ 2.7 พันซ์จะไม่ทำหน้าที่ในการพาชิ้นงานให้ไหลลงในปากตายแต่จะทำหน้าที่ในการตัดเฉือนแทน ซึ่งสาเหตุที่เป็นไปได้และวิธีการแก้ไขคือ



- 1) รัศมีพื้นและคายเล็กน้อยเกินไป แก้ไขได้โดยการเพิ่มรัศมีของพื้นและคาย
- 2) ใช้แรงกดแผ่นจับชิ้นงานสูงเกินไป แก้ไขได้โดยการลดแรงกด
- 3) ความเร็วในการทำงานสูงเกินไป แก้ไขได้โดยการปรับตั้งความเร็วให้เหมาะสม

### ผิวเปลือกส้มหรือผิวโลหะไม่มันเงา

ผิวของแผ่นโลหะที่ผ่านการรีดจนมันเงาตอนเป็นแผ่นโลหะเปล่าจะหายไปเมื่อเกิดการยึดตัวภายใต้การดึงขึ้นรูปและเกิดลักษณะของผิวที่ด้านไม่สะท้อนแสงจนกระทั่งเห็นเป็นผิวเปลือกส้ม ส่วนที่เห็นได้ชัดเจนคือบริเวณผนังถ้วยด้านนอกส่วนที่เหนือรัศมีพื้นซึ่งโดยเป็นบริเวณที่เกิดการยึดตัวมากที่สุด ลักษณะที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อความสวยงามของผิวถ้วยทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายและเวลาในขั้นตอนการขัดผิวเพื่อกำจัดผิวเปลือกส้มนี้ออกไป การแก้ไขเพื่อลดปัญหานี้ทำได้โดยใช้วัสดุที่มีขนาดเกรนเล็ก แล้วทำการอบคืนตัวให้มีความแข็งค่อนข้างสูงจะช่วยให้ได้ผิวที่เรียบขึ้นแต่ต้องใช้ความระมัดระวัง เนื่องจากจะทำให้ความสามารถในการไหลตัวของวัสดุลดลง และมีโอกาสเกิดการฉีกขาดได้ง่าย

### เอียร์ริง (Earing)



ภาพที่ 2.8 การเกิดเอียร์ริงของชิ้นงาน

จากภาพที่ 2.8 จะเกิดความไม่สม่ำเสมอของขอบถ้วยเป็นหูขึ้นมา 4 หู หรือที่เรียกว่าเอียร์ริง ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ต้องการ เพราะต้องเพิ่มขั้นตอนในการตัดส่วนนี้ออก ทำให้สิ้นเปลืองวัสดุ รวมถึงความหนาของผนังถ้วยจะไม่เท่ากัน เอียร์ริงเกิดจากสมบัติทางด้านทิศทางของวัสดุ ความสูงของเอียร์ริงจะเพิ่มขึ้นเมื่อโลหะแผ่นมีค่า เพลนนาร์ แอนไอโซโทรปี  $\Delta r$  สูง การคำนวณค่า เพลนนาร์ แอนไอโซโทรปี หาได้จากสมการที่ 2.7

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (2.7)$$

โดย  $\Delta r$  คือ เพลนนาร์ แอนไอโซโทรปี

$r_0, r_{45}, r_{90}$  คือ ค่าอัตราส่วนความเครียดพลาสติกของวัสดุในทิศทาง 0 45 และ 90 องศา ของแนวการรีด ตามลำดับ

วัสดุที่มีค่า  $\Delta r = 0$  จะไม่เกิดเอयरริง และได้ขอบถ้วยที่เสมอเท่ากัน ความสูงที่ไม่สม่ำเสมอจากเอयरริงจะเพิ่มมากขึ้นตามค่า  $\Delta r$  ซึ่งเป็นไปได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ

$\Delta r$  เป็นค่าบวก หมายถึง ด้านที่ต่ำทั้ง 4 ด้านเป็นแนว 45 องศา กับแนวรีด

$\Delta r$  เป็นค่าลบ หมายถึง ด้านที่ต่ำทั้ง 4 ด้านเป็นแนวขนานและตั้งฉากกับแนวรีด

จากที่กล่าวมาข้างต้น การเกิดเอयरริงเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของวัสดุไม่สามารถแก้ไขโดยการปรับพารามิเตอร์ในการออกแบบแม่พิมพ์ได้ ในการแก้ปัญหาทำได้โดยเลือกขอบถ้วยไว้ให้มาก เพื่อตัดส่วนที่เกิดความไม่สม่ำเสมอออกก็จะได้ชิ้นงานที่ได้ตามต้องการ

### รอยขีดถูบนผนังถ้วย (Scratching หรือ Galling)



ภาพที่ 2.9 รอยขีดถูบนผนังถ้วย

จากภาพที่ 2.9 รอยขีดถูบนผนังถ้วยด้านนอกเกิดจากประสิทธิภาพของสารหล่อลื่นที่ลดลง ทำให้เกิดการสัมผัสกันโดยตรงของผิวชิ้นงานและแม่พิมพ์ แรงดันที่สูงขึ้น รวมถึงความร้อนที่เกิดขึ้นขณะที่แผ่นโลหะเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวแม่พิมพ์ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของสารหล่อลื่นลดลง หรือหนีออกจากผิวสัมผัส เมื่ออุณหภูมิบางส่วนของแผ่นโลหะชิ้นงานจะหลุดติดอยู่บนผิวแม่พิมพ์ ซึ่งมีขนาดใหญ่พอที่จะทะลุผ่านชั้นของสารหล่อลื่น และขีดผิวของแผ่นโลหะขึ้นต่อ ๆ ไปให้เป็นรอยได้ ดังนั้นสาเหตุและวิธีการป้องกันปัญหานี้คือ

1) เลือกวัสดุที่ทำแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม คือ เป็นวัสดุที่เกิดการเชื่อมติดกับวัสดุชิ้นงาน ให้แก้ไขโดยการเลือกชนิดของวัสดุให้เหมาะสม หรือใช้วิธีการเคลือบผิวแม่พิมพ์

2) สารหล่อลื่นทำงานได้ไม่สมบูรณ์ ให้แก้ไขโดยเลือกสารหล่อลื่นที่มีองค์ประกอบในการต้านทานแรงดันสูง (Extreme pressure additives) หรือในกรณีที่เกิดความร้อนสูงก็ต้องมี

องค์ประกอบของน้ำอยู่ในสารหล่อลื่นเพื่อช่วยในการระบายความร้อน (ต้องระวังองค์ประกอบในสารหล่อลื่นที่อาจกัดกร่อนวัสดุชิ้นงานด้วย)

## 2.2 การศึกษาการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการดัดขึ้นรูปลึก

การหาค่าความเหมาะสมของการขึ้นรูปให้เป็นรูปถ้วยด้วยกระบวนการดัดขึ้นรูปลึกสำหรับอุตสาหกรรมการบรรจุภัณฑ์ โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการขึ้นรูปของกระบวนการจะกำหนดให้วัสดุเป็น แอนไอโซโทรปิก (Anisotropic) และคุณสมบัติการเปลี่ยนรูปวัสดุในช่วง อีลาสติก-พลาสติก โดยเกณฑ์การครากของฮิลล์ (Hill's criterion) และผลที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ผลที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์เหมาะสมสำหรับการอธิบายกระบวนการดัดขึ้นรูปลึกและการใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram, FLD) สามารถทำนายความเป็นไปได้และหาความเหมาะสมของกระบวนการขึ้นรูป (A. Le Port et al. :2009)

ปัญหาการการฉีกขาดและรอยย่นในงานขึ้นรูปโลหะโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการขึ้นรูปด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้กำหนดแบบจำลองของวัสดุเป็นแบบ Transversely Anisotropic elastic-plastic สำหรับเอลิเมนต์แบบแผ่น โดยใช้เกณฑ์การครากของฮิลล์ (Hill's criterion) โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้คือ โปรแกรม Hyperform V.7 ผลที่ได้สามารถลดขั้นตอนของกระบวนการผลิต และการใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์ใหม่ที่ใช้ขนาดของชิ้นงานเริ่มต้นและตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมาะสม (ไมตรี กลมรัตน์พิกุลธิ์ :2550)

จากการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าในกระบวนการดัดขึ้นรูปด้วยการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์การกำหนดพฤติกรรมของวัสดุจะกำหนดเป็น พลาสติกแอนไอโซโทรปี (Plastic Anisotropy) และใช้ทฤษฎีสภาพพลาสติกของฮิลล์ (Hill) วิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นในกระบวนการดัดขึ้นรูปลึก พฤติกรรมของวัสดุพลาสติกแอนไอโซโทรปี (Plastic Anisotropy) และ ทฤษฎีสภาพพลาสติกของฮิลล์ สามารถอธิบายได้ดังนี้

### 2.2.1 พลาสติกแอนไอโซโทรปี

พลาสติกแอนไอโซโทรปีเป็นพฤติกรรมที่ใช้อธิบายลักษณะการไหลตัวของวัสดุ ขณะทำการขึ้นรูปลึกและความสามารถในการขึ้นรูป ในการหาพฤติกรรมแอนไอโซโทรปีสามารถทำได้โดยการทดสอบแรงดึง (ASTM, 1998) โดยพิจารณาพฤติกรรมในแต่ละทิศทางการรีดของโลหะความสามารถในการปรับแรงและการยืดตัวจะไม่เท่ากันในแต่ละทิศทาง ค่าความสามารถในการยืดตัวหรือหดตัวของแต่ละทิศทางแสดงโดย ค่าอัตราส่วนความเครียดพลาสติก (Plastic Strain Ratio,  $r$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\text{Width Strain}}{\text{Thickness Strain}} \quad (2.8)$$

โดย  $r$  คือ ค่าอัตราส่วนความเครียดพลาสติก (Plastic Strain Ratio) ของวัสดุ

$\varepsilon_w$  คือ ความเครียดในทิศทางความกว้างของชิ้นงานทดสอบ

$$\varepsilon_w = \ln \left( \frac{w_1}{w_0} \right)$$

$w_1$  คือ ความกว้างของชิ้นงานทดสอบหลังดึง

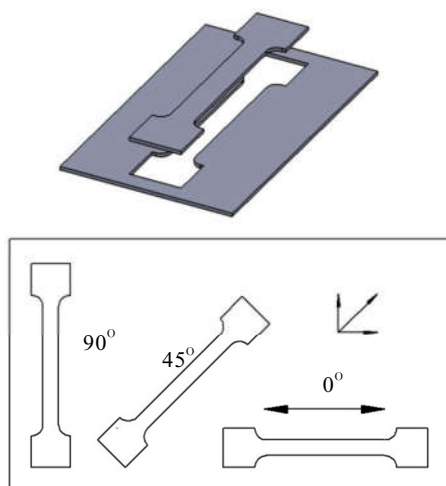
$w_0$  คือ ความกว้างของชิ้นงานทดสอบก่อนดึง

$\varepsilon_t$  คือ ความเครียดในทิศทางความหนาของชิ้นงานทดสอบ

$$\varepsilon_t = \ln \left( \frac{T_1}{T_0} \right)$$

$T_1$  คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบหลังดึง

$T_0$  คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบก่อนดึง



ภาพที่ 2.10 ลักษณะการตัดชิ้นงานเพื่อทดสอบแรงดึงตามทิศทางการรีดโลหะแผ่น

ในหลักการของแอนไอโซโทรปีของวัสดุ คือ คุณสมบัติของวัสดุที่ไม่เท่ากันในทุกทิศทาง ดังนั้นเราจำเป็นต้องหาค่าเฉลี่ยของค่า  $r$  ในแต่ละทิศทาง ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) และ นำค่า  $r$  ในแต่ละทิศทางไปหาค่าเฉลี่ย เพื่อนำไปใช้งาน ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$r_m = \frac{(r_0 + 2r_{45} + r_9) d}{4} \quad (2.9)$$

โดย  $r_m$  คือ Normal Anisotropy

### 2.2.2 ทฤษฎีสภาพพลาสติกของฮิลล์

การพิจารณาพลาสติกแอนไอโซโทรปีโดยไม่คำนึงถึงรูปผลึกเดิม โดยสมมติว่าวัสดุเอกพันธุ์แสดงคุณลักษณะโดยแกนไอโซโทรปี 3 แกนตั้งฉากกันคือ  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ซึ่งคุณสมบัติสมมาตรสองหน้า (ระนาบ  $x$ - $y$ ,  $y$ - $z$  และ  $z$ - $x$  คือระนาบสมมาตร) ในแผ่นรีดมักใช้ทิศทาง  $x$ ,  $y$  และ  $z$  เป็นทิศทางรีด ทิศทางขวางการรีด และทิศทางความหนาตามลำดับ ทฤษฎีนี้ยังสมมติว่า ความต้านแรงดึงคราก

และแรงกดครากในทิศทางที่กำหนดมีค่าเท่ากันเกณฑ์การครากแอนไอโซโทรปิกที่เสนออยู่ในรูป  
สมการที่ 2.10

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (2.10)$$

โดย  $2f(\sigma_{ij})$  คือ ฟังก์ชันการคราก (ใช้กับวัสดุที่เป็นแอนไอโซโทรปิกและไอโซโทรปิก)

$F, G, H, L, M$  และ  $N$  คือ ค่าคงที่ (แสดงคุณลักษณะแอนไอโซโทรปิก)  
และเมื่อกำหนดให้  $F = G = H$  และ  $L = M = N = 3F$  สมการนี้ลดรูปลงเป็นเกณฑ์ของพอนมิเชส ดังนั้นสมการที่ (2.10) เขียนใหม่ได้เป็น

$$F \left[ (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 \right] + 6F(\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{xy}^2) = 1 \quad (2.11)$$

หรือ

$$(\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 6\tau_{yz}^2 + 6\tau_{zx}^2 + 6\tau_{xy}^2 = \frac{1}{F} \quad (2.12)$$

โดย  $F, G$  และ  $H$  สามารถหาได้จากการทดสอบการดึง เมื่อพิจารณาจากการทดสอบการดึง ใน  
แนวแกน  $x$  และ  $X$  เป็นค่าความเค้นดึงคราก โดยกำหนดให้

$$\sigma_x = X$$

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

และในทำนองสมการความเค้นดึงครากในแนวแกน  $y$  และ  $z$  โดย  $Y$  และ  $Z$  เป็นค่าความเค้นดึง  
ครากในทิศทาง  $y$  และ  $z$  ลำดับ ดังนั้นจากสมการที่ (2.10) จะได้ความเค้นดึงครากในแนวแกน  $x, y$   
และ  $z$  เป็นดังนี้

$$X^2 = \frac{1}{(G+H)} \quad (2.13ก)$$

$$Y^2 = \frac{1}{(H+F)} \quad (2.14ข)$$

$$Z^2 = \frac{1}{(F+G)} \quad (2.15ค)$$

จากสมการที่ (15) นำมาเขียนใหม่เพื่อหาค่า  $F, G$  และ  $H$  จะได้

$$2F = \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2} \quad (2.16)$$

$$2G = \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2} \quad (2.17)$$

$$2H = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} \quad (2.18)$$

ในกรณีที่เป็โลหะแผ่นจะไม่สามารถหาค่าของ  $Z$  ได้นั้น นักฎการไหลหรือสมการความสัมพันธ์ช่วงพลาสติกความเค้นและความเครียด ดังแสดงในสมการที่ 2.19 เข้ามาช่วยในการหาค่า  $Z$  โดยที่  $L, M$  และ  $N$  สามารถหาได้จากการทดสอบการเฉือน

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.19)$$

จาก  $\partial f$  ในสมการที่ 2.10 หาสมการอนุพันธ์ของสมการที่ 2.19 ได้กฎการไหล ดังแสดงในสมการที่ 2.20

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_x &= d\lambda [H(\sigma_x - \sigma_y) + G(\sigma_x - \sigma_z)] \\ d\varepsilon_y &= d\lambda [F(\sigma_y - \sigma_z) + H(\sigma_y - \sigma_x)] \\ d\varepsilon_z &= d\lambda [F(\sigma_z - \sigma_y) + G(\sigma_z - \sigma_x)] \\ d\varepsilon_{yz} &= d\varepsilon_{zy} = d\lambda L \tau_{yz} \\ d\varepsilon_{zx} &= d\varepsilon_{xz} = d\lambda L \tau_{zx} \\ d\varepsilon_{xy} &= d\varepsilon_{yx} = d\lambda L \tau_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

ในการหากฎการไหลสำหรับความเครียดเฉือน  $d\varepsilon_x$ ,  $d\varepsilon_y$  และ  $d\varepsilon_z$  ต้องเขียนเกณฑ์การครากของสมการที่ 2.10 ใหม่ เพื่อให้พจน์ของความเค้นเฉือนปรากฏในรูป

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

มีฉะนั้นแล้วอนุพันธ์ย่อยจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ใช้ไม่ได้คือ  $d\varepsilon_{yz} = 2d\lambda L \tau_{xy}$  และ  $d\varepsilon_{zy} = 0$  ฯลฯ สังเกตว่าสมการที่ 2.20 คือ  $d\varepsilon_x + d\varepsilon_y + d\varepsilon_z = 0$  แสดงว่าปริมาตรคงตัวพิจารณา การทดสอบการดึงในทิศทาง  $x$  อีกครั้งหนึ่ง แทนค่า  $\sigma_x = X$  และ  $\sigma_y = \sigma_z = 0$  ในสมการที่ 20

$$d\varepsilon_x = d\lambda(H + G)X \quad (2.21ก)$$

$$d\varepsilon_y = -d\lambda(H)X \quad (2.21ข)$$

$$d\varepsilon_z = -d\lambda(G)X \quad (2.21ค)$$

เนื่องจากอัตราส่วนความเครียดสำหรับการทดสอบการดึงในทิศทาง  $x$  นิยามว่า

$$R = R_0 = \frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_x}$$

โดย  $R_0$  คือ อัตราส่วนความเครียดในทิศ 0 องศาเทียบกับแกน  $x$   
 ดังนั้น จากสมการที่ 2.21 จะได้

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

และในทำนองเดียวกัน นิยามให้  $P = R_{90}$  คืออัตราส่วนความเครียดในทิศทางแกน  $y$   
 นิยามว่า

$$P = R_{90} = \frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_z}$$

เมื่อ  $\sigma_y = Y$  และ  $\sigma_x = \sigma_z = 0$  และจากสมการที่ 2.21 จะได้

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

จากสมการที่ 2.22 และ 2.23 แทนลงในสมการที่ 2.13 จะได้ค่าความเค้นดึงคราก  $Z$  ใน  
 แนวแกน  $Z$  ของโลหะแผ่นดังสมการที่ 2.24

$$Z = X \sqrt{\frac{P(1+R)}{(P+R)}} \quad (2.24ก)$$

$$Z = Y \sqrt{\frac{R(1+P)}{(P+R)}} \quad (2.24ข)$$

สำหรับเงื่อนไขการกระทำของแรงที่ทำในแนวแกน  $x, y$  และ  $z$  เป็นความเค้นหลัก  
 Hill's yield criterion นำมาเขียนให้อยู่ในรูปของ  $R$  และ  $P$  โดยกำหนดให้  $\tau_{yx} = \tau_{zx} = \tau_{xy} = 0$   
 และจากสมการที่ 2.10 และ 2.13 จะได้สมการใหม่เป็น

$$R(\sigma_y - \sigma_z)^2 + P(\sigma_z - \sigma_x)^2 + RP(\sigma_x - \sigma_y)^2 = P(R + 1)X^2 \quad (2.25)$$

และจากกฎการไหลจะได้สมการดังนี้

$$d\varepsilon_x = R(\sigma_x - \sigma_y) + (\sigma_x - \sigma_z) \quad (2.26ก)$$

$$d\varepsilon_y = \frac{R}{P}(\sigma_y - \sigma_z) + R(\sigma_y - \sigma_x) \quad (2.26ข)$$

$$d\varepsilon_z = \frac{R}{P}(\sigma_z - \sigma_y) + R(\sigma_z - \sigma_x) \quad (2.26ค)$$

จากการประยุกต์สมการ ถ้าวัสดุสมมาตรรอบแกน  $Z$  (แอนไอโซทรอปิกบนระนาบ)  
 $R = P = Q$  และ  $F = G, N = 3G, L = M$  สำหรับแรงที่กระทำที่ความเค้นหลักอยู่ในแนวแกน  
 แกน  $z$  นั่นคือ  $\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0$  และให้ความเค้นหลักในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ให้เท่ากับหรืออยู่ในแนว  
 เดียวกัน ดังนั้น  $\tau_{yz} = 0$  เมื่อกำหนดให้  $P = R$  จากสมการที่ 2.25 และ 2.26 ได้สมการเป็นดังนี้

$$(\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + R(\sigma_y - \sigma_z)^2 = (R + 1)X^2 \quad (2.27)$$

และ

$$d\varepsilon_x = (R + 1)\sigma_x - R\sigma_y - \sigma_z \quad (2.28ก)$$

$$d\varepsilon_y = (R + 1)\sigma_y - R\sigma_x - \sigma_z \quad (2.28ข)$$

$$d\varepsilon_z = 2\sigma_z - \sigma_x - \sigma_y \quad (2.28ค)$$

สำหรับกรณีของแรงที่กระทำเป็นแบบความเค้นหลักในระนาบ  $\sigma_z = 0$  ดังนั้นเกณฑ์การครากคือ

$$\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \frac{2R}{(R-1)}\sigma_x\sigma_y = X^2 \quad (2.29)$$

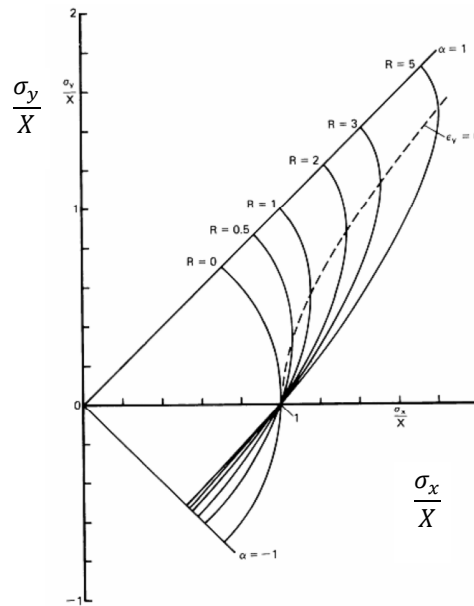
หรือ

$$\frac{\sigma_x^2}{X^2} = \left(1 + \alpha^2 - \frac{2\alpha R}{(R-1)}\right)^{-1} \quad (2.30)$$

โดย  $\alpha$  คือ อัตราส่วนความเค้น

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$$

ถ้านำสมการที่ 2.29 มา Plot เป็นวงรีความยาวแกนหลัก และแกนรองขึ้นอยู่กับ  $R$  ดังนั้นเมื่อ  $R = 1$  จะได้วงรีมาตรฐานของพอนมิสเชส และสำหรับวัสดุไอโซโทรปิก ค่า  $R = 1$  ดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 กราฟของค่า  $R$  ของเกณฑ์การครากเมื่อ  $\sigma_z = 0$

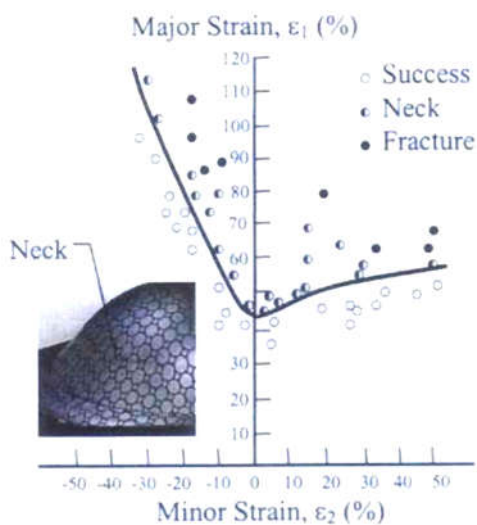


## 2.3 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

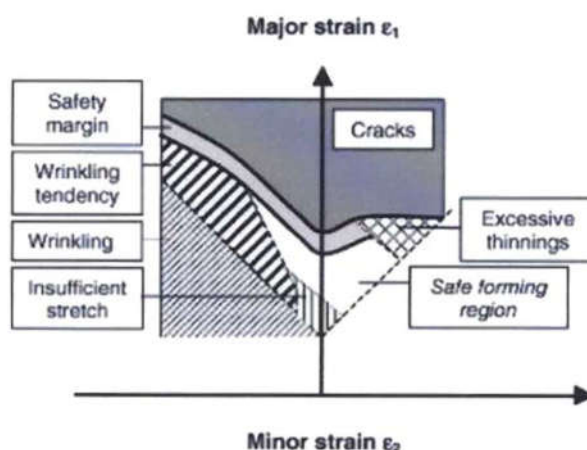
ชาญ ถนัดงาม (2547) กล่าวว่าไว้ในปัจจุบันนี้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบกรรมวิธีขึ้นรูปโลหะแผ่น แต่อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จในการใช้งานนั้น ต้องมีความรู้และประสบการณ์ทั้งในห้องปฏิบัติการและในโรงงานอย่างเพียงพอ

Banabic D. et al (2000) กล่าวว่าไว้ว่า ค่าความเครียดสูงสุดของความเครียดหลัก ( $\epsilon_1$ ) และความเครียดรอง ( $\epsilon_2$ ) สามารถกำหนดโดยการวัดความเครียดที่เกิดการคอดและการแตกบนแผ่นโลหะด้วยการใช้กริดวงกลม การวิจัยทางด้านนี้ Keeler เป็นผู้บุกเบิกก่อนตั้งแต่ปี ค.ศ. 1961 และเผยแพร่ในปี ค.ศ. 1965 โดยการพล็อตความเครียดหลักสูงสุดลงมาถึงความเครียดหลักต่ำสุด ซึ่งหาได้จากกริดวงกลมเปลี่ยนรูปเป็นวงรีที่เกิดการคอดและการแตกหลังการยืดแบบสองแกน (Biaxial stretching,  $\epsilon_1 > 0$ ;  $\epsilon_2 > 0$ ) หลังจากนั้น Goodwin ทำการวิจัยในปี ค.ศ. 1968 โดยการพล็อตเส้นโค้งรอบ ๆ บริเวณการดึงและการกด ( $\epsilon_1 > 0$ ;  $\epsilon_2 < 0$ ) โดยใช้การทดสอบเชิงกลที่แตกต่างกัน ดังนั้นแผนภาพ Keeler และ Goodwin จึงใช้ร่วมกัน และเรียกว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

ชัยยศ บุรณะชีพ (2549) กล่าวว่าความเครียดที่พบในบริเวณที่มีการคอดเฉพาะแห่งสามารถหาได้โดยการทดลองด้วยโหนดที่กระทำในวิธีที่ต่างกัน เทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุดคือการพิมพ์หรือกัดกริดวงกลม ลงบนแผ่นโลหะก่อนนำมาขึ้นรูป วงกลมเหล่านี้บิดเบี้ยวไปเป็นวงรีระหว่างการขึ้นรูป หลังจากนั้นจึงหาความเครียดหลักโดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลางหลักและเส้นผ่านศูนย์กลางรองของวงรี ความเครียดนี้อาจเขียนในรูปของความเครียดจริง หรือความเครียดวิศวกรรม และค่าความเครียดของวงกลมที่มีการคอดทั้งหมดหรือบางส่วนถือว่าเป็น “เสียหาย” ส่วนความเครียดของวงกลมที่ห่างออกไปจากนี้ถือว่าเป็น “ปลอดภัย” เมื่อลงจุดความเครียดเหล่านี้ก็สามารถสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปดังแสดงในภาพที่ 2.12 และพฤติกรรมการยืดตัวของแผ่นโลหะที่อยู่บนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปดังแสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.12 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป



ภาพที่ 2.13 พฤติกรรมการยืดตัวของแผ่นโลหะที่อยู่บนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ชัยยศ บุรณะชีพ (2549) ทำการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการย่นและการขึ้นรูปขึ้นงานจริงกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นจากการขึ้นรูปขึ้นงานโดยใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยขึ้นงานสำหรับการวิจัยนี้เป็นชิ้นส่วนยานยนต์ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หนา 0.6 มิลลิเมตร พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการย่นสำหรับการวิจัยนี้คือ ความเร็วในการขึ้นรูป รัศมีตาย แรงจับยึดขึ้นงาน และช่องว่างระหว่างพunchกับตาย ใช้เครื่องปั๊มขนาด 300 ตัน ในการขึ้นรูปและใช้โปรแกรม HYPERWORK V.7 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี

ไฟไนต์เอลิเมนต์ผลการวิจัยพบว่า พฤติกรรมการย่นของการขึ้นรูปชิ้นงานจริงและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกัน หลังจากวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นจากการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า พฤติกรรมการย่นของชิ้นงานขึ้นรูปขึ้นอยู่กับแรงจับยึดชิ้นงานมากกว่า รัศมีตาย และช่องว่างระหว่างพินซ์และตาย แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นของชิ้นงานขึ้นรูปได้

E. Nakamachi (1996) ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ เพื่อศึกษาและทำนายผลการขึ้นรูปโลหะกับวัสดุโลหะแผ่นความหนา 0.81 มิลลิเมตร ซึ่งวัสดุมีสมบัติทางกลแตกต่างกันในแต่และทิศทางจากการรีด และทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับการขึ้นรูปจริง จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถจำลองและทำนายความเสียหายได้จริง

สถาพร ชาทาคม (2546) ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเข้ามาช่วยในการผลิตชิ้นส่วนแท่นรองเครื่องยนต์ โดยการนำเอาข้อมูลทางด้านการออกแบบซึ่งเป็นลักษณะ 3 มิติ (Surface modeling) นำมาแบ่งเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยม (Quadrilateral elements) และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตต่าง ๆ (Boundary condition) ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ วัสดุที่ใช้คือ JSC 440W-45/45 ความหนา 1.8 มิลลิเมตร และใช้โปรแกรม PAMSTAMP เข้ามาช่วยจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่นจนได้ผลที่ดีที่สุดและนำผลดังกล่าวไปใช้ขึ้นรูปจริง ผลการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้เครื่องเพรสขนาด 100 ตัน กำหนด Die Cushion Stroke 250 มิลลิเมตร ปรากฏว่าชิ้นงานที่ได้มีค่าความเค้นสูงสุดที่ 0.458 บาร์ ความหนาของชิ้นงานอยู่ระหว่าง 1.4 – 2.6 มิลลิเมตร ไม่พบปัญหาการฉีกขาด มีเพียงรอยย่นบางจุดสามารถลดขั้นตอนการขึ้นรูป จาก 2 ขั้นตอน เหลือเพียงขั้นตอนเดียว

## 2.5 สรุป

จากวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตในทางอุตสาหกรรม การแปรรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการดัดขึ้นรูปลึกกันอย่างแพร่หลายและได้มีการพัฒนาทั้งในด้านทฤษฎี วิธีการประยุกต์ใช้ รวมไปถึงการพัฒนาโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปลึกโดยเฉพาะ เพื่อให้ได้มาซึ่งผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใกล้เคียงกับการทำงานจริงมากที่สุดเป็นการลดการลองผิดลองถูกของกระบวนการ

2) จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่าการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถจำลองกระบวนการดัดขึ้นรูปลึกและทำนายความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานได้ใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริง

### บทที่ 3

#### การสร้างแบบจำลองกระบวนการดัดขึ้นรูป

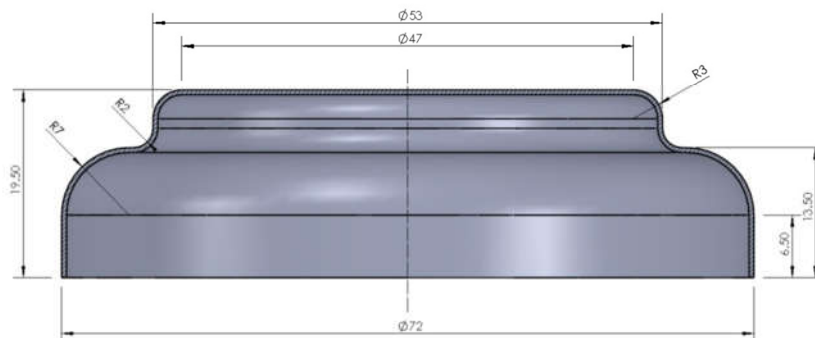
การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในกระบวนการดัดขึ้นรูปนั้นประกอบไปด้วย การสร้างชิ้นงานต้นแบบ การกำหนดขนาดและรายละเอียดของแม่พิมพ์ การกำหนดเอลิเมนต์ของแบบจำลอง การกำหนดคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุ การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต การประมวลผล และการวิเคราะห์ผล รายละเอียดมีดังต่อไปนี้

##### 3.1 การสร้างชิ้นงานต้นแบบ

การขึ้นรูปของฝาครอบเหล็ก วัสดุที่ใช้เป็นเหล็กแผ่น SPCC มาตรฐาน JIS G 3141 ซึ่งเป็นเหล็กทั่วไปที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป ชิ้นงานต้นแบบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 71 มิลลิเมตร สูง 19 มิลลิเมตร และมีความหนา 0.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 การสร้างชิ้นงานต้นแบบจะเริ่มจากสร้างชิ้นงานให้อยู่ในรูปของ Solid CAD Data



ภาพที่ 3.1 ชิ้นงานต้นแบบ



ภาพที่ 3.2 ขนาดและรายละเอียดของชิ้นงานต้นแบบ

### 3.2 การกำหนดขนาดของแม่พิมพ์

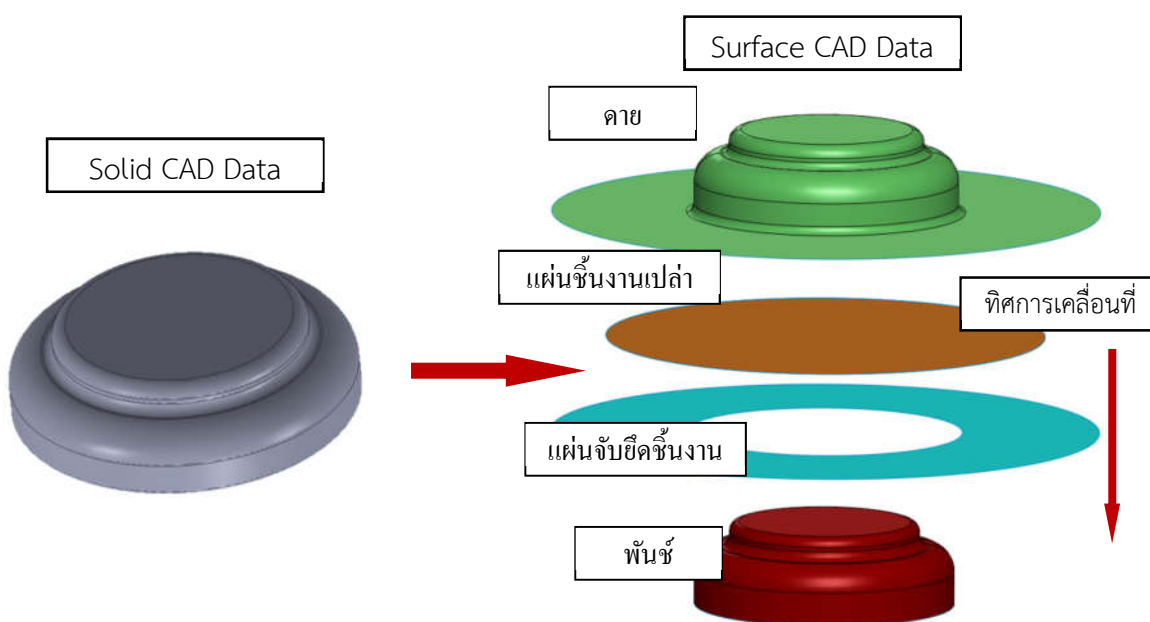
การกำหนดขนาดของแม่พิมพ์ประกอบไปด้วย การกำหนดรัศมีพินช์ รัศมีตาย และช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ จากชิ้นงานต้นแบบขนาดของรัศมีพินช์เป็นขนาดเดียวกัน รัศมีตายและระยะช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ได้จากสมการที่ 2.4 และ 2.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ขนาดของแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก

ขนาดของแม่พิมพ์	ขนาด
รัศมีตาย ( $R_D$ )	2.5 - 5 มิลลิเมตร
ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ (CL)	0.66 มิลลิเมตร

### 3.3 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากชิ้นงานต้นแบบที่อยู่ในรูปของ Solid CAD Data ทำให้เป็น Surface CAD Data ที่ประกอบไปด้วย พินช์ ตาย และแผ่นจับยึดชิ้นงาน กำหนดรัศมีตาย ( $R_D$ ) และ ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ (CL) ตามตารางที่ 3.1 กระบวนการทำงานเป็นแม่พิมพ์แบบกลับทาง (Inverted die) ดังแสดงในภาพที่ 3.3 โดยที่ตายจะอยู่ข้างบนสุดตามด้วยแผ่นชิ้นงานเปล่า และแผ่นจับยึดชิ้นงาน โดยกระบวนการทำงานนี้พินช์ที่อยู่ด้านล่างจะไม่มีเคลื่อนที่ ตายและแผ่นจับยึดชิ้นงานจะเป็นตัวพาแผ่นชิ้นงานเปล่าเคลื่อนผ่านพินช์ทำให้แผ่นชิ้นงานเปล่ามีการเปลี่ยนรูป



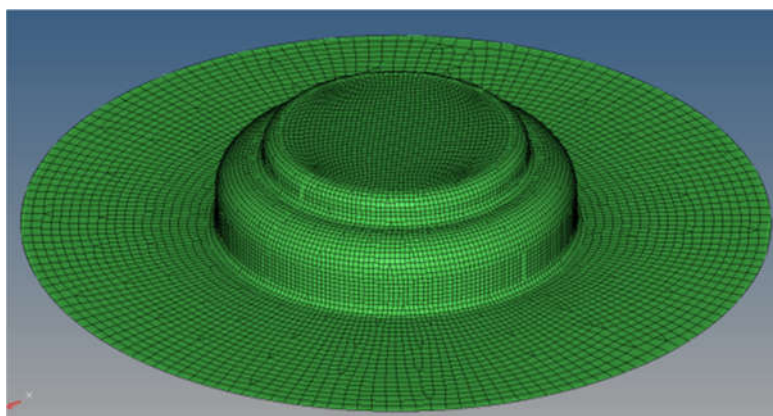
ภาพที่ 3.3 ชิ้นงานต้นแบบ Solid CAD Data เป็น Surface CAD Data

### 3.4 การกำหนดเอลิเมนต์ของแบบจำลอง

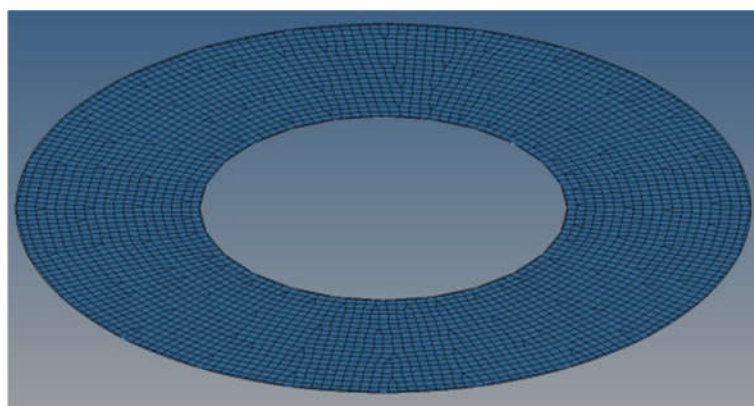
แม่พิมพ์ในรูปของ Surface CAD Data จะถูกกำหนดเอลิเมนต์โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ การกำหนดเอลิเมนต์แม่พิมพ์ และการกำหนดเอลิเมนต์ของแผ่นขึ้นงานเปล่า

#### 3.4.1 การกำหนดเอลิเมนต์แม่พิมพ์

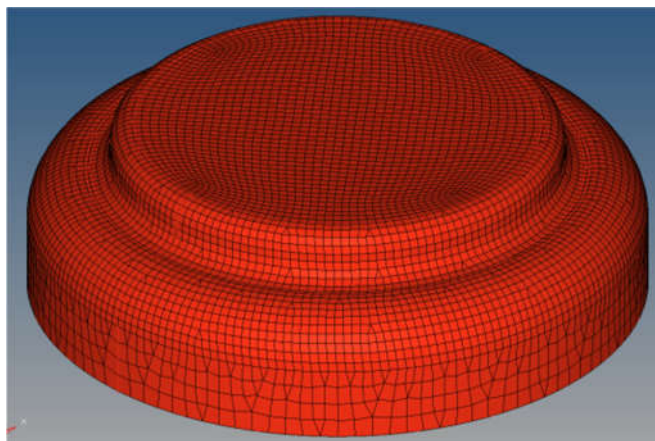
การกำหนดเอลิเมนต์แม่พิมพ์จะต้องสอดคล้องกับโครงสร้างเดิมให้มากที่สุด บริเวณที่เป็นส่วนเว้าส่วนโค้งหรือตรงบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างฉับพลันแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กซึ่งจะให้ผลการวิเคราะห์ได้ถูกต้องแม่นยำ ส่วนบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากนักก็อาจจะแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ถ้าจำนวนเอลิเมนต์มากเกินไปจะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณและอาจทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ถ้าเครื่องคอมพิวเตอร์มีความละเอียดในการคำนวณไม่เพียงพอ (ปราโมทย์ เตชะอำไพ :2550) การกำหนดเอลิเมนต์ของตาย แผ่นจับยึดขึ้นงาน และพินซ์ ได้ดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4(ก) เอลิเมนต์ของตาย



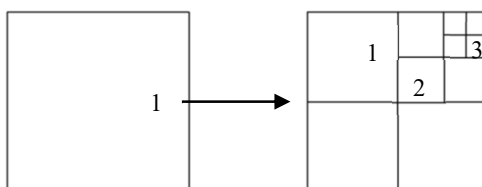
ภาพที่ 3.4(ข) เอลิเมนต์ของแผ่นจับยึดขึ้นงาน



ภาพที่ 3.4(ค) เอลิเมนต์ของพังก์

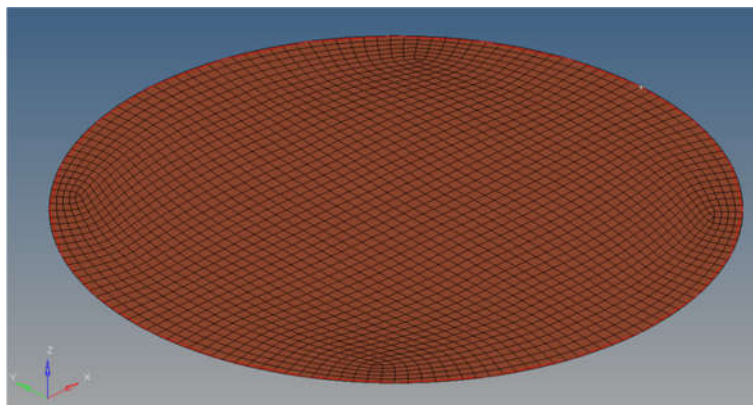
### 3.4.2 การกำหนดเอลิเมนต์ของแผ่นชิ้นงานเปล่า

กำหนดเอลิเมนต์ของแผ่นชิ้นงานเปล่าจะกำหนดด้วยเอลิเมนต์โครงสร้างแบบเปลือก (Shell element) ชนิด Belyschko-Tsay ซึ่งเป็นเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยม กำหนดให้มีจำนวน 5 จุด อินทิเกรตตามแนวความหนา และเป็นเอลิเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ที่ไม่คำนึงถึงผลจากการสปริงตัวกลับ (Spring back) ของแผ่นชิ้นงานเปล่า นอกจากนี้ยังต้องกำหนดให้แผ่นชิ้นงานเปล่ามีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเอลิเมนต์ตามบริเวณที่เสียรูปมาก (Adaptive meshing) การปรับเปลี่ยนขนาดของเอลิเมนต์จะปรับเปลี่ยนได้ 3 ระดับ ดังแสดงในภาพที่ 3.5 และกำหนดให้แผ่นชิ้นงานเปล่าเป็นวัสดุที่เปลี่ยนรูปได้ (Deformable body) จากวิธีดังกล่าวให้ผลการจำลองการขึ้นรูปได้ใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริงมากที่สุด (K.Harihar. :2009 และ ทวีภัทร์ บรูณธิติ :2006)



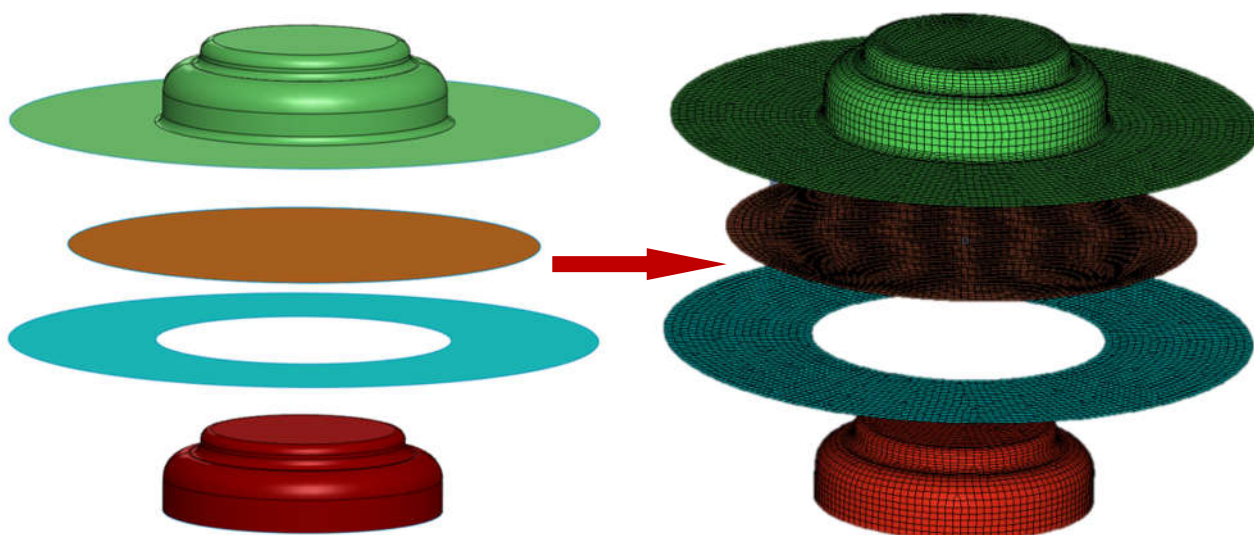
ภาพที่ 3.5 การเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์เมื่อมีการเสียรูปแบบสี่เหลี่ยม Adaptive Remeshing





ภาพที่ 3.6 เอลิเมนต์ของแผ่นขึ้นงานเปล่า

จากแม่พิมพ์ Surface CAD Data สร้างเป็นแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแม่พิมพ์ดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 Surface CAD Data สร้างเป็นแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแม่พิมพ์

### 3.5 การกำหนดคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุ

การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ กำหนดให้ชุดแม่พิมพ์เป็นวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid Body) และแผ่นขึ้นงานเปล่ากำหนดคุณสมบัติของวัสดุเป็น Anisotropic Elastic Plastic ฟังก์ชันการครากใช้ทฤษฎีแอนไอโซโทรปิก ของ Hill และพฤติกรรมของวัสดุ Hardening Curve เพื่อกำหนดค่าความเค้นและความเครียด เป็นไปตามสมการ Power law (สมการที่ 3.1) โดยคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุดังกล่าวเป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์การขึ้นรูปด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (K. Harihara: 2009 และ John O. Hallquist :2006)

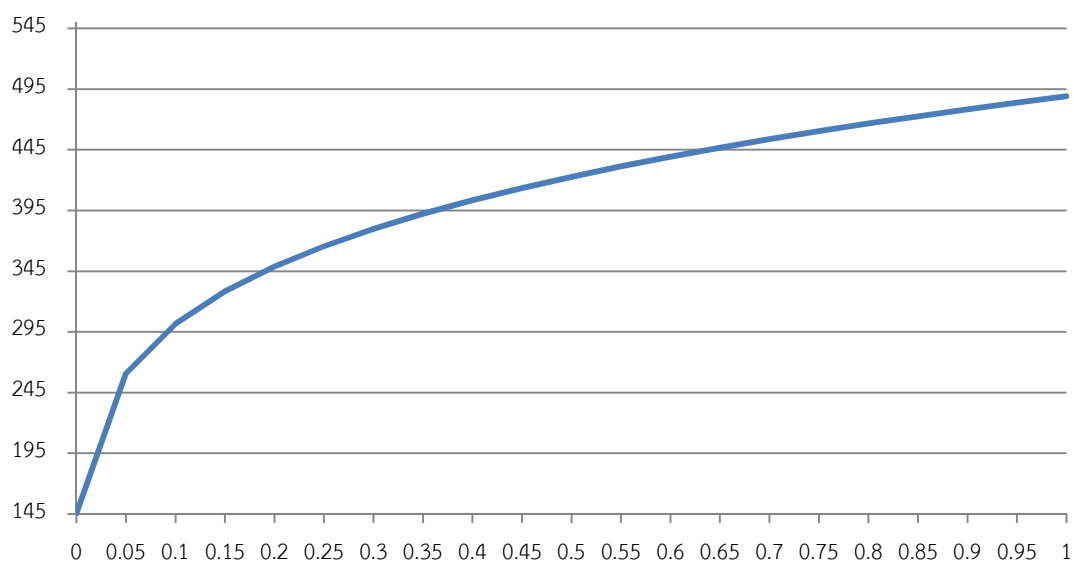
$$\sigma = k(\epsilon)^n \quad (3.1)$$



วัสดุที่ใช้ขึ้นรูปเป็นแผ่นเหล็กคาร์บอนรีดเย็นเกรด SPCC ตามมาตรฐาน JIS G 3141 ความหนา 0.5 มิลลิเมตร และทำการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน JIS Z 2201 ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ SPCC

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ SPCC ตามมาตรฐาน JIS Z 2201

คุณสมบัติเชิงกล	SPCC ตามมาตรฐาน JIS G 3141
Modulus Young (E)	210
Yield Stress (YS) (Mpa.)	145
Poisson's Ratio	0.3
Hardening Exponent (n)	0.21
Hardening Coefficient (k) (GPa.)	489
Anisotropy Coefficients ( $r_0$ , $r_{45}$ , $r_{90}$ )	1.017, 0.981, 1.084
Normal Anisotropy	1.0



ภาพที่ 3.8 Hardening Curve SPCC

จากคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ SPCC สามารถเขียน surce code สำหรับแบบจำลองได้ดังภาพที่ 3.9

```

#RADIOSS STARTER
#####
##
## Radioss Input Deck Generated by HyperMesh Version : 11.0.0.39
## Generated using HyperMesh-Radioss Template Version : 11.0.0.39
## Date: 10-11-2015    Time: 17:56:28
##
#####
/BEGIN
SPCC.rad
51      0
##
##
/UNIT/MASS/1.0
/UNIT/LENGTH/1.0
/UNIT/TIME/1.0
#####
## Material Law No 43 HILL ORTHOTROPIC (Plasticity defined by a user function)
#####
/MAT/HILL_TAB/1
SPCC
7.800000000000000E-09
210000.0      0.3
1.0      1.0      0.0

1
#####
## Functions
#####
##HWCOLOR curves 1 11
/FUNCT/1
crdq_stress_strain
0.0      145.0
0.05      260.670905180573
0.1      301.514955910265
0.15      328.312957646491
0.2      348.758786772127
0.25      365.490641291242
0.3      379.755718732693
0.35      392.250177186036
0.4      403.405167692463
0.45      413.507591435715
0.5      422.758706109546
0.55      431.305527430609
0.6      439.258952628566
0.65      446.704846157277
0.7      453.711145085843
0.75      460.332591975758
0.8      466.613990796203
0.85      472.592509126079
0.9      478.299344968827
0.95      483.760958662593
1.0      489.0
#####
## End Of Radioss Block Deck
#####
/END

```

ภาพที่ 3.9 Source Code Material

### 3.6 การประมวลผล (Processing) การแสดงผลลัพธ์ (Post-processing)

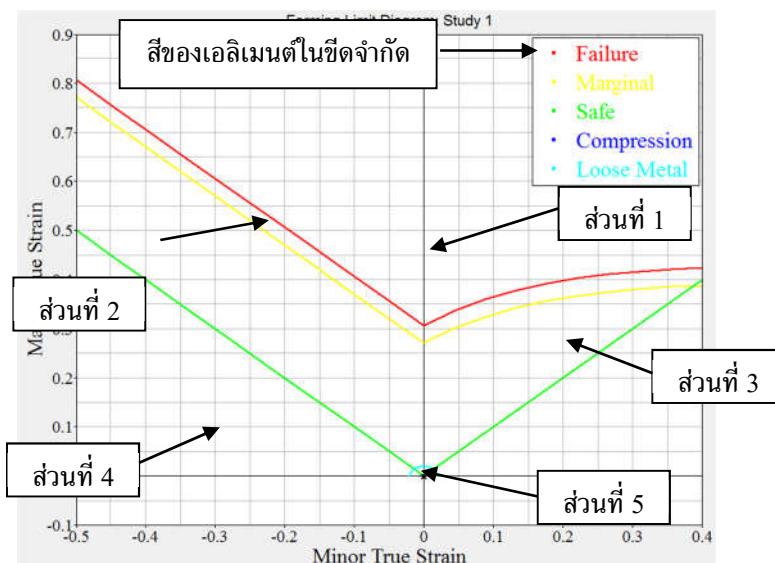
การประมวลผลใช้โปรแกรม HYPERFORM V.11 ก่อนที่จะสั่งโปรแกรมให้ทำการวิเคราะห์ ได้มีการใช้คำสั่ง Adaptive Remeshing ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพราะในขณะที่ย้ายเคลื่อนที่ที่กดแผ่นชิ้นงานให้เข้าไปในพันธจะทำให้เอลิเมนต์ตรงบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปของชิ้นงานที่สูงมีขนาดเล็กลงและเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ให้สูงขึ้น คอมพิวเตอร์ประมวลผลที่มีส่วนประกอบดังนี้

- 1) หน่วยประมวลผล AMD Phenom (tm) 9650 Quad-Cord Processor 2.30 GHz (ในการประมวลผลใช้ 3 CPUs ต่อกรณีการศึกษา)
- 2) หน่วยความจำหลัก 3.25 GB (Ram)
- 3) การ์ดจอที่ใช้ประมวลผลแบบ 3D ATI Radeon HD 3800 Series หน่วยความจำ 512 MB

### 3.7 การหาผลเฉลย

จากการศึกษาของ สวัสดิ์ โสตามุข (2550) ได้ทำการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ของ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02 ตลอดจนประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์การขึ้นรูปขึ้นส่วนรยยนต์และเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการขึ้นรูปขึ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการวิจัยพบว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปโดยวิธีการทดลองเมื่อเทียบกับแผนภาพขีดจำกัดจากการขึ้นรูปที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแตกต่างกัน 12% ณ ความเครียดในระนาบ ผลการขึ้นรูปได้สอดคล้องกับความเสียหายและสามารถในการขึ้นรูปงานจริงกับผลจากการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ คมสันต์ งามขำ (2550) พบว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 ที่เพิ่มความหนาขึ้นงานทดสอบ มีผลทำให้ขีดจำกัดการขึ้นรูปไม่เป็นไปตามสัดส่วนความหนา การเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการขึ้นรูปขึ้นงานจริงให้ผลสอดคล้องกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ดังนั้นในการศึกษานี้ได้ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ประกอบด้วยเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming limit curve; FLC) นำมาเป็นเครื่องมือช่วยในการประเมินสภาพปัญหา การเกิดรอยร่อน การเกิดการคอด และการฉีกขาดที่อาจเกิดขึ้นกับชิ้นงาน เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแกนหลัก (Major strain;  $\epsilon_1$ ) และความเครียดในแกนรอง (Minor strain;  $\epsilon_2$ ) ที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์โดยพารามิเตอร์ในการกำหนดแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปคือ Hardening Exponent ( $n$ ) และ ความหนาของแผ่นขึ้นงาน โดยในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ได้คำนวณจากหลักการของ Keeler และ Goodwin ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



ภาพที่ 3.10 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ประกอบด้วยเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปและการแบ่งส่วนต่าง ๆ ของพื้นที่ได้กราฟ

หลักการประเมินสภาพปัญหาของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปมีดังนี้ ในกราฟจะมีเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจำนวน 4 เส้น ดังแสดงในภาพที่ 3.10 ประกอบไปด้วย เส้นสีแดงคือเส้นโค้งขีดจำกัดการฉีกขาด เส้นสีเหลืองคือเส้นโค้งขีดจำกัดการที่มีแนวโน้มฉีกขาดแต่ยอมรับได้ เส้นสีเขียวคือเส้นโค้งขีดจำกัดที่มีความปลอดภัยในการขึ้นรูปและเส้นสีฟ้าคือเส้นโค้งขีดจำกัดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงาน และแบ่งบริเวณพื้นที่ในกราฟออกเป็น 5 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ 1 เป็นบริเวณที่อยู่ในเส้นและเหนือเส้นโค้งขีดจำกัดสีแดงแสดงว่าตำแหน่งของเอลิเมนต์ในชิ้นงานนั้นมีการฉีกขาดโดยจะแสดงเป็นจุดสีแดง ส่วนที่ 2 เป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นโค้งขีดจำกัดสีแดงและสีเหลืองแสดงตำแหน่งของเอลิเมนต์ในชิ้นงานนั้นมีแนวโน้มฉีกขาดที่ยอมรับได้ โดยจะแสดงเป็นจุดสีเหลือง ส่วนที่ 3 เป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นโค้งขีดจำกัดสีเหลืองและสีเขียวแสดงว่าตำแหน่งของเอลิเมนต์ในชิ้นงานนั้นมีความปลอดภัยในการขึ้นรูป โดยจะแสดงเป็นจุดสีเขียว ส่วนที่ 4 เป็นบริเวณที่อยู่ใต้เส้นโค้งขีดจำกัดสีเขียวแสดงว่าตำแหน่งของเอลิเมนต์ในชิ้นงานนั้นจะเกิดการอัด (Compression) หมายความว่ามีความโน้มเอียงจะเกิดรอยยับโดยจะแสดงเป็นจุดสีน้ำเงิน และส่วนที่ 5 เป็นบริเวณที่อยู่ใต้เส้นที่ฟ้าแสดงว่าตำแหน่งของเอลิเมนต์ในชิ้นงานนั้นไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยจะแสดงเป็นจุดสีฟ้า

### 3.8 การวิเคราะห์เพื่อหาขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าที่เหมาะสม

การเลือกขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่าที่เหมาะสมจะพิจารณาจากชิ้นงานมีการสูญเสียวัสดุน้อยที่สุด โดยเปรียบเทียบจากชิ้นงานต้นแบบ การหาผลเฉลยของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการ

ขึ้นรูปอีกเพื่อเป็นการหาขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่า ขนาดของแรงในการจับยึดชิ้นงาน จะกำหนดเงื่อนไข ดังนี้

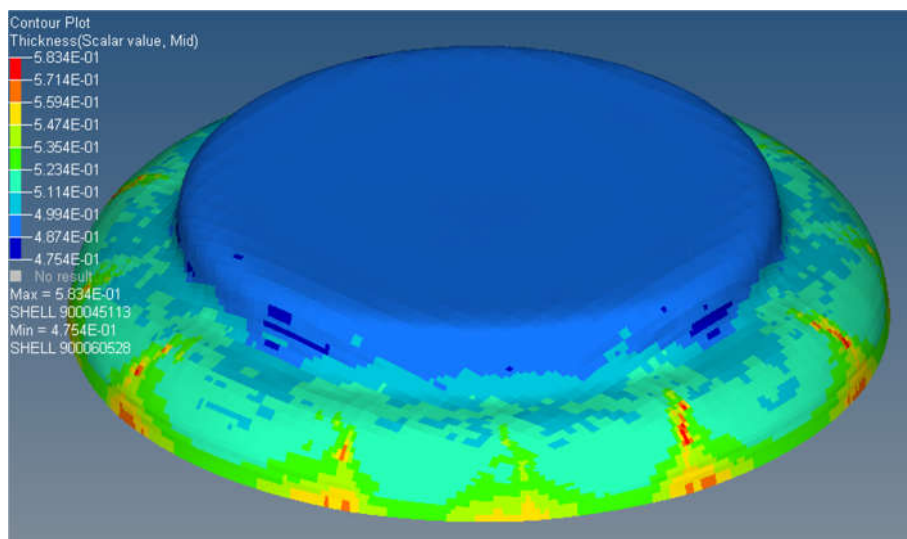
1. ขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่า การกำหนดขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าเริ่มต้นจะใช้ขนาดเท่ากับขนาดของชิ้นงานต้นแบบที่ใช้จริง คือเมื่อคลี่ชิ้นงานต้นแบบจะได้แผ่นชิ้นงานเปล่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 85 มิลลิเมตร และจะเพิ่มขนาดเป็น 95 และ 105 มิลลิเมตร ตามลำดับ

2. ขนาดของแรงจับยึดชิ้นงาน การกำหนดขนาดของแรงจับยึดชิ้นงานเริ่มต้นจะใช้ขนาดที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 3 ซึ่งการคำนวณหาขนาดของแรงจับยึดนั้นจะแปรผันตรงกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงานเปล่า การหาผลเฉลยขนาดของแรงจับยึดจะเริ่มต้นไม่เท่ากันซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่า และขนาดของแรงจับยึดชิ้นงาน ตามตารางที่ 3.3 ผลเฉลยที่ได้ตามเงื่อนไขดังตารางที่ 3.3 แสดงในภาพที่ 3.11-3.13

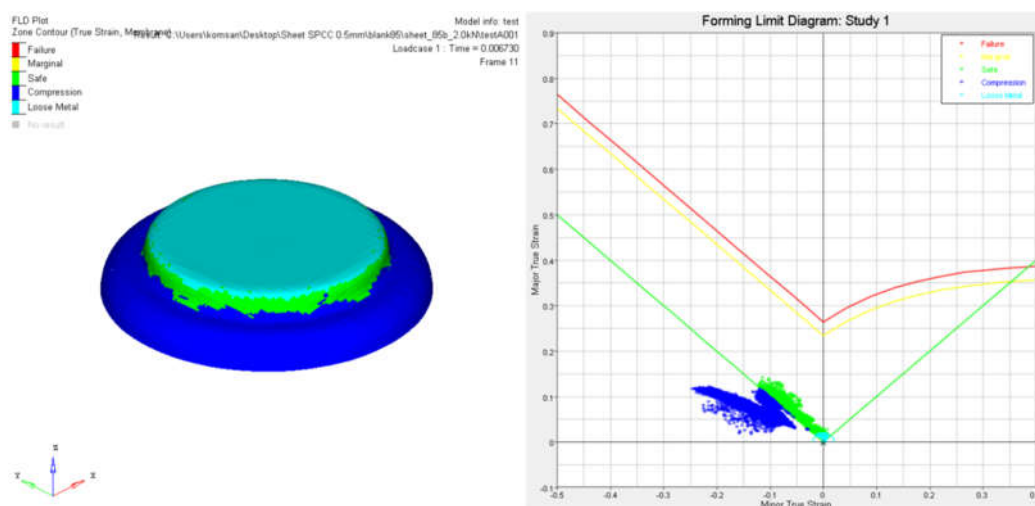
**ตารางที่ 3.3(ก)** ผลเฉลยของขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่า 85 มิลลิเมตร

ขนาดของแผ่น ชิ้นงานเปล่า	แรงจับยึดชิ้นงาน (kN)	ผลลัพธ์ที่ได้
85	2	เกิดรอยย่นที่ผิวและขอบของชิ้นงาน ความหนาสูงสุด 0.5843 mm. ความบางสูงสุด 0.4754 mm
	3	เกิดรอยย่นที่ผิวและขอบของชิ้นงาน ความหนาสูงสุด 0.5838 mm. ความบางสูงสุด 0.4743 mm
	4*	เกิดรอยย่นที่ผิวและขอบของชิ้นงาน ความหนาสูงสุด 0.5786 mm. ความบางสูงสุด 0.4773 mm
	5	เกิดรอยย่นที่ผิวและขอบของชิ้นงาน ความหนาสูงสุด 0.5714 mm. ความบางสูงสุด 0.4780 mm.
	6	เกิดรอยย่นที่ผิวและขอบของชิ้นงาน ความหนาสูงสุด 0.5809 mm. ความบางสูงสุด 0.4749 mm.

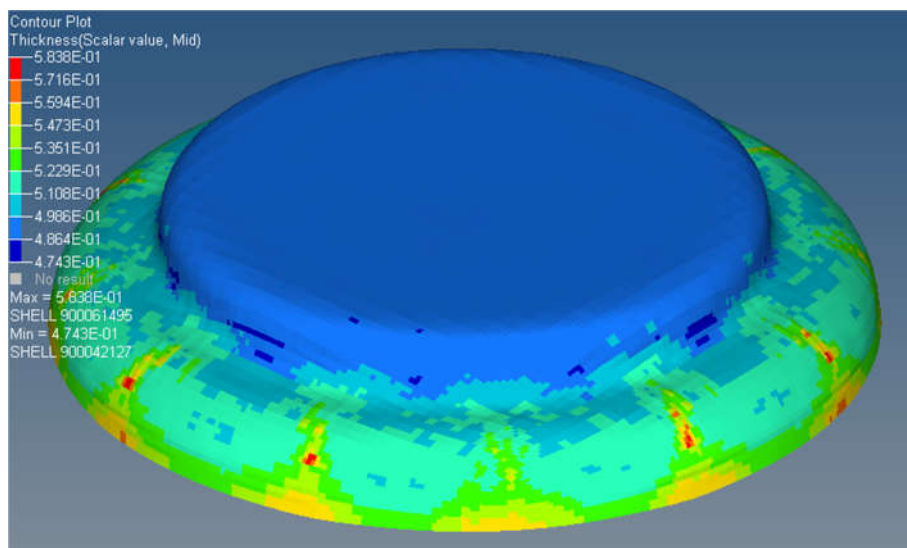
หมายเหตุ \* คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณ



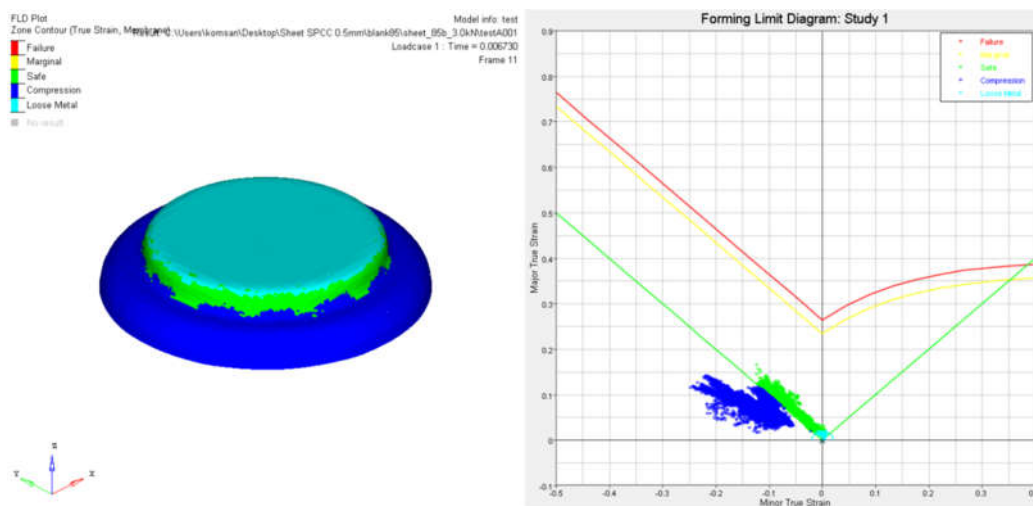
ภาพที่ 3.11(ก) ความหนาของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 2 kN



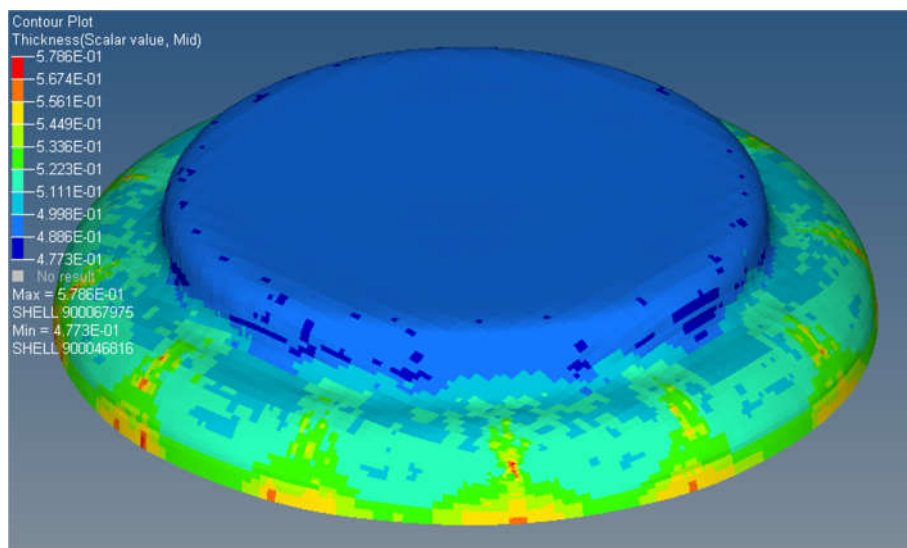
ภาพที่ 3.11(ข) การเกิดรอยยับ การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร  
ที่แรงจับยึด 2 kN



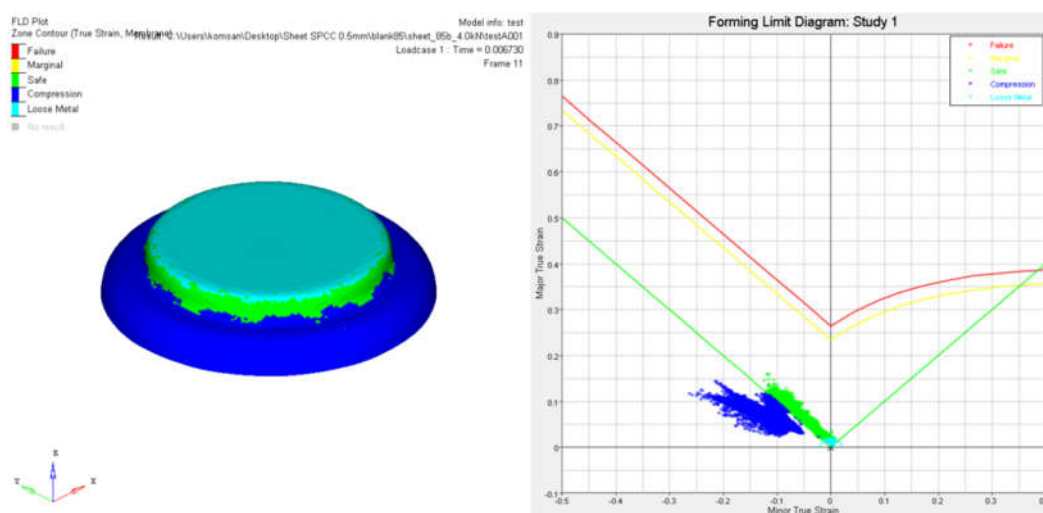
ภาพที่ 3.11(ค) ความหนาของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 3 kN



ภาพที่ 3.11(ง) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร  
ที่แรงจับยึด 3 kN

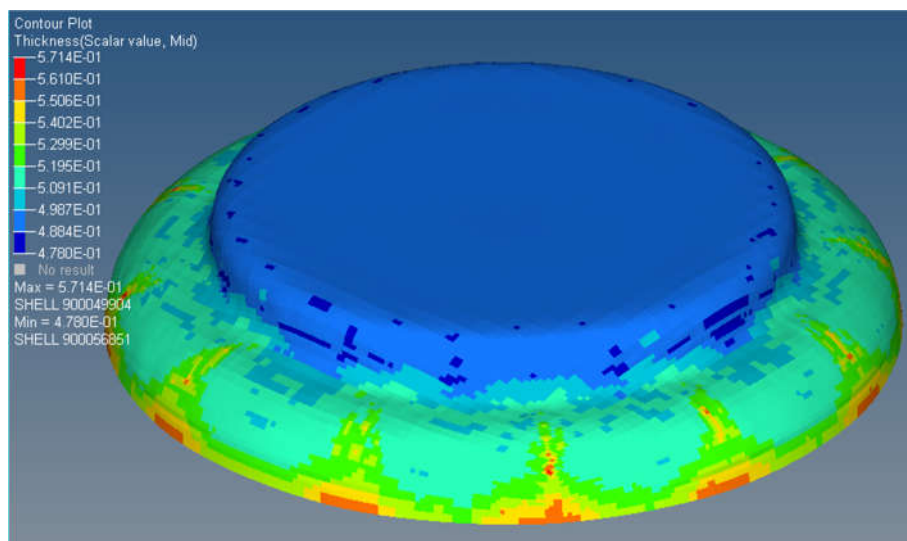


ภาพที่ 3.11(จ) ความหนาของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 4 kN

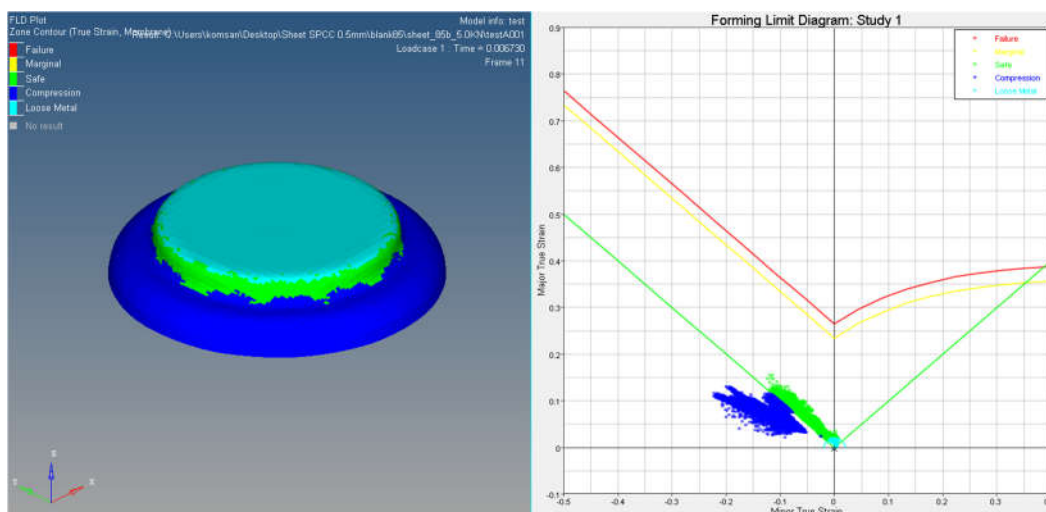


ภาพที่ 3.11(ฉ) การเกิดรอยยับ การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร  
ที่แรงจับยึด 4 kN

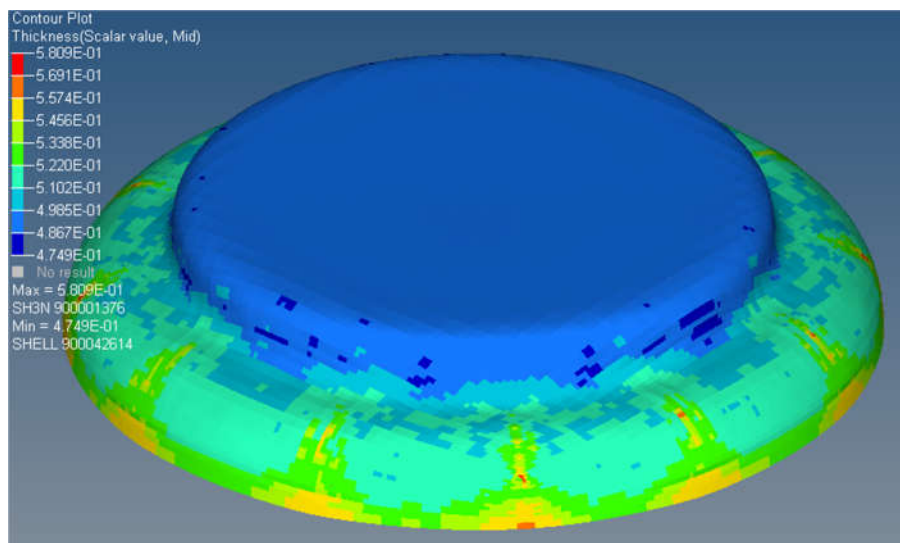




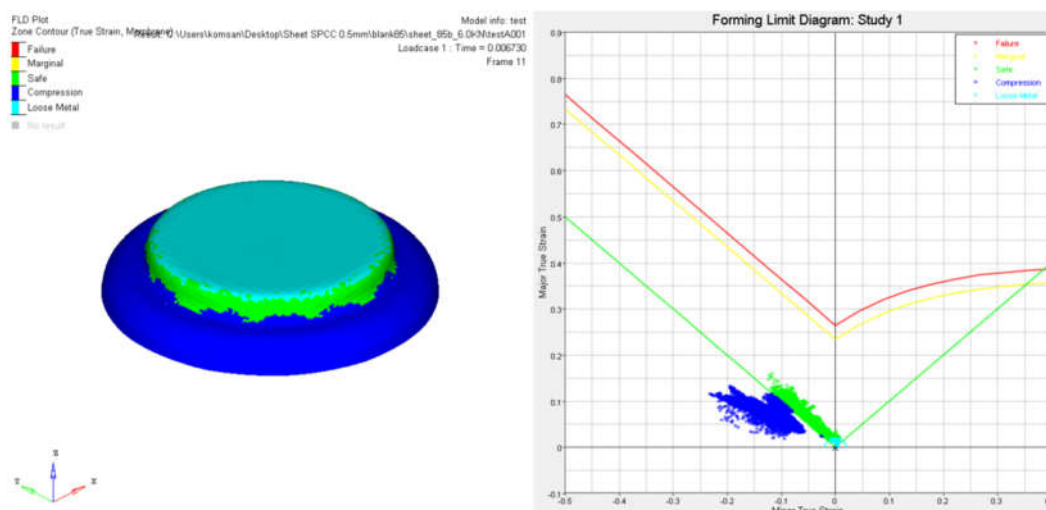
ภาพที่ 3.11(ข) ความหนาของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 5 kN



ภาพที่ 3.11(ซ) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร  
ที่แรงจับยึด 5 kN



ภาพที่ 3.11(ณ) ความหนาของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 6 kN

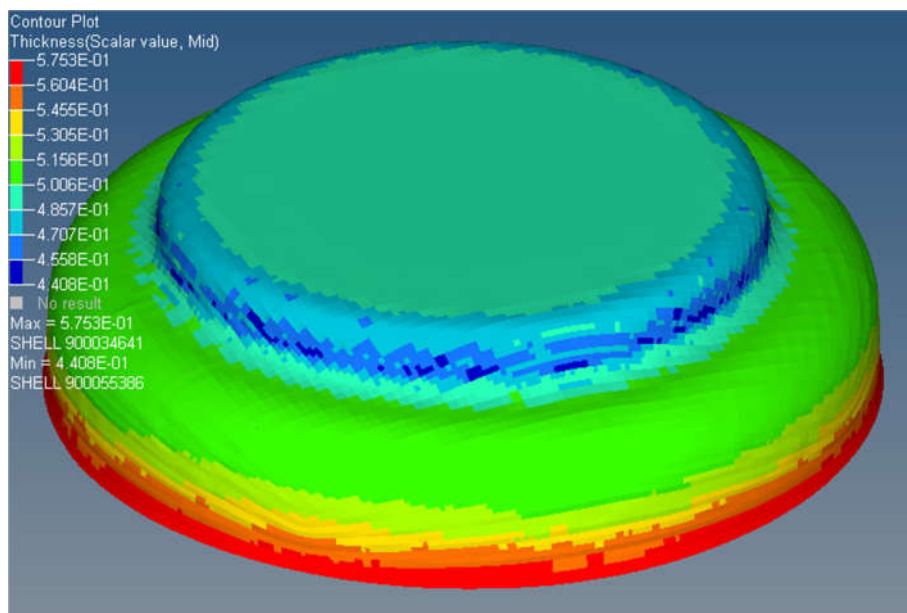


ภาพที่ 3.11(ญ) การเกิดรอยยับ การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร  
ที่แรงจับยึด 6 kN

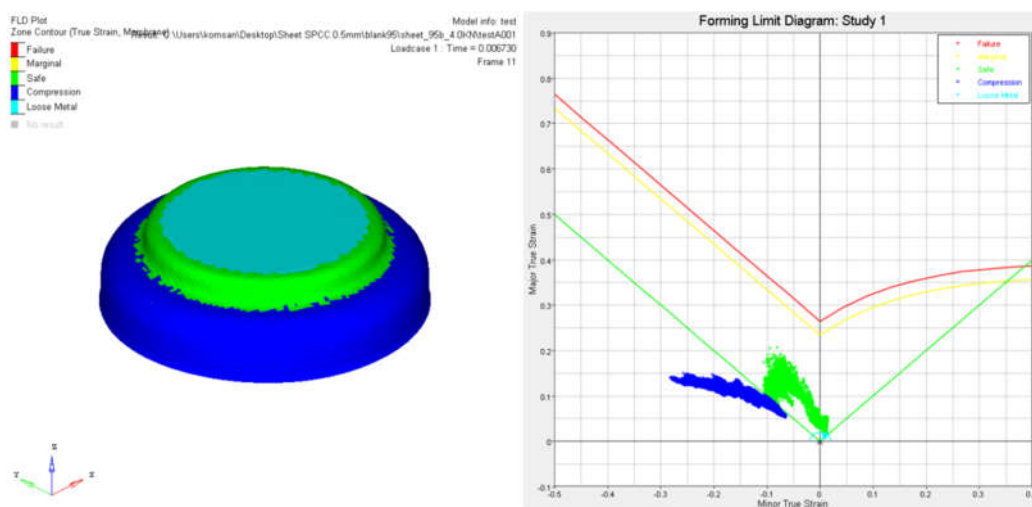
ตารางที่ 3.3(ข) ผลเฉลี่ยของขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร

ขนาดของแผ่น ชิ้นงานเปล่า	แรงจับยึดชิ้นงาน (kN)	ผลลัพธ์ที่ได้
95	4	เกิดรอยย่นที่ผิวและขอบของชิ้นงานนอกบริเวณที่ต้องการ ความหนาสูงสุด 0.5753 mm ความบางสูงสุด 0.4408 mm
	5	เกิดรอยย่นที่ผิวและขอบของชิ้นงานนอกบริเวณที่ต้องการ ความหนาสูงสุด 0.5760 mm ความบางสูงสุด 0.4421 mm
	6*	เกิดรอยย่นที่ผิวและขอบของชิ้นงานนอกบริเวณที่ต้องการ ความหนาสูงสุด 0.5754 mm ความบางสูงสุด 0.4412 mm
	7	เกิดรอยย่นที่ผิวและขอบของชิ้นงานนอกบริเวณที่ต้องการ ความหนาสูงสุด 0.5753 mm ความบางสูงสุด 0.4403 mm
	8	เกิดรอยย่นที่ผิวและขอบของชิ้นงานนอกบริเวณที่ต้องการ ความหนาสูงสุด 0.5755 mm ความบางสูงสุด 0.4410 mm

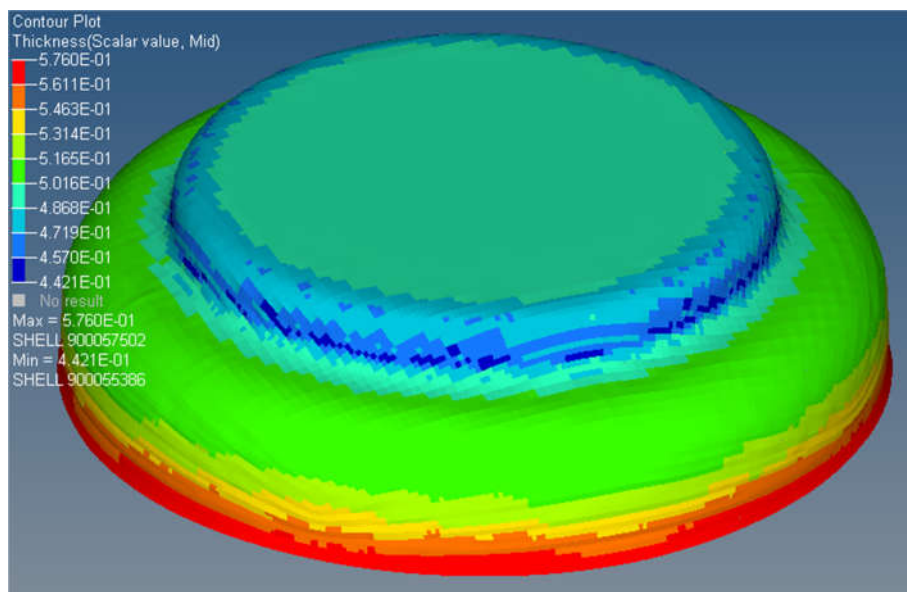
หมายเหตุ \* คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณ



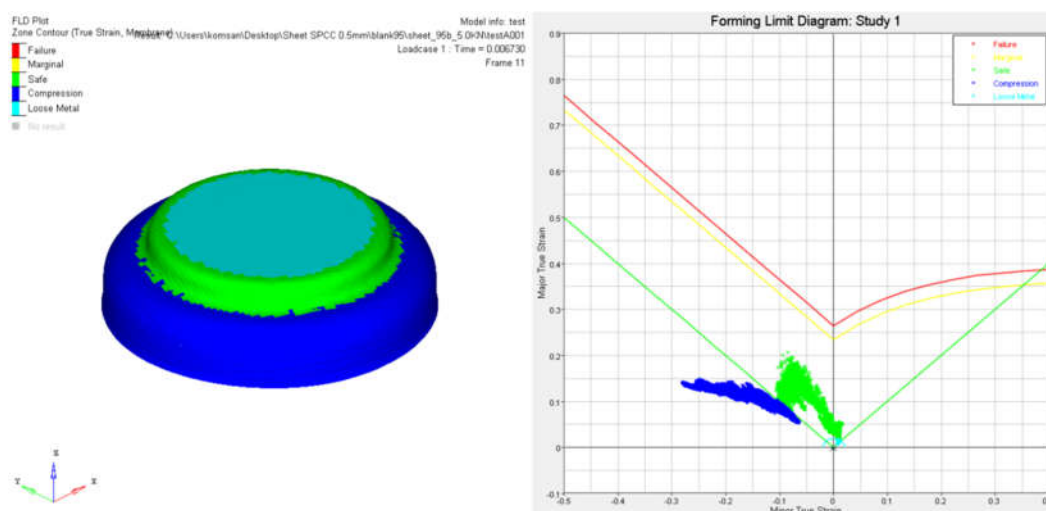
ภาพที่ 3.12(ก) ความหนาของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 4 kN



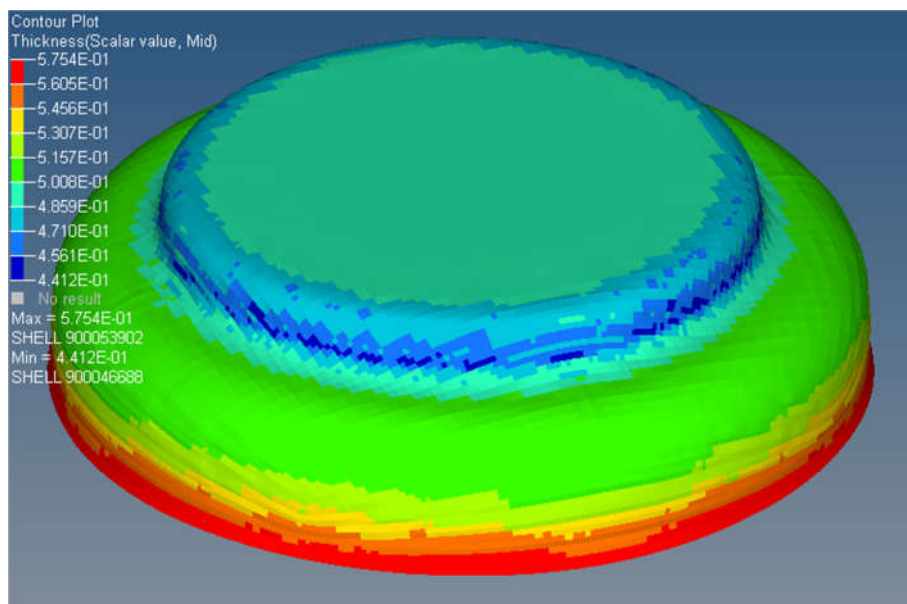
ภาพที่ 3.12(ข) การเกิดรอยยุบ การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร  
ที่แรงจับยึด 4 kN



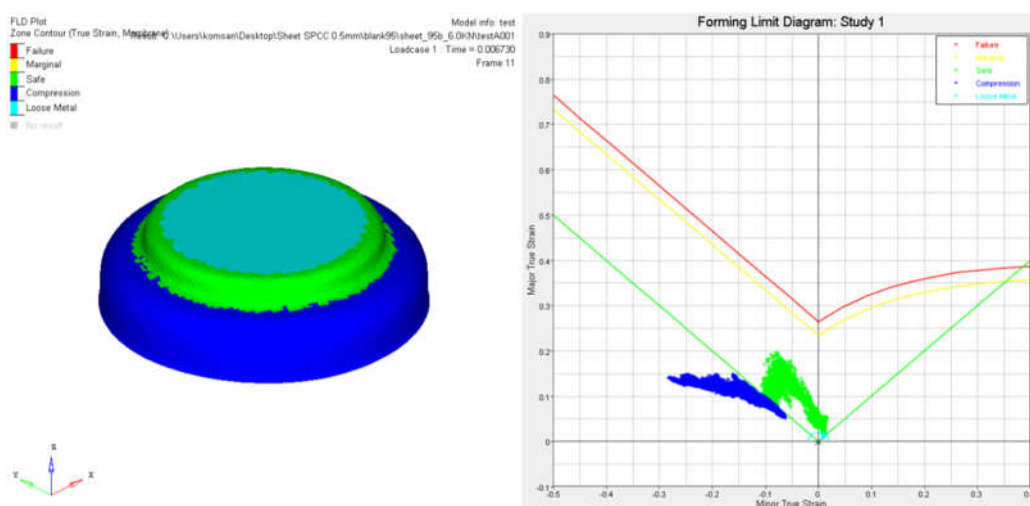
ภาพที่ 3.12(ค) ความหนาของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 5 kN



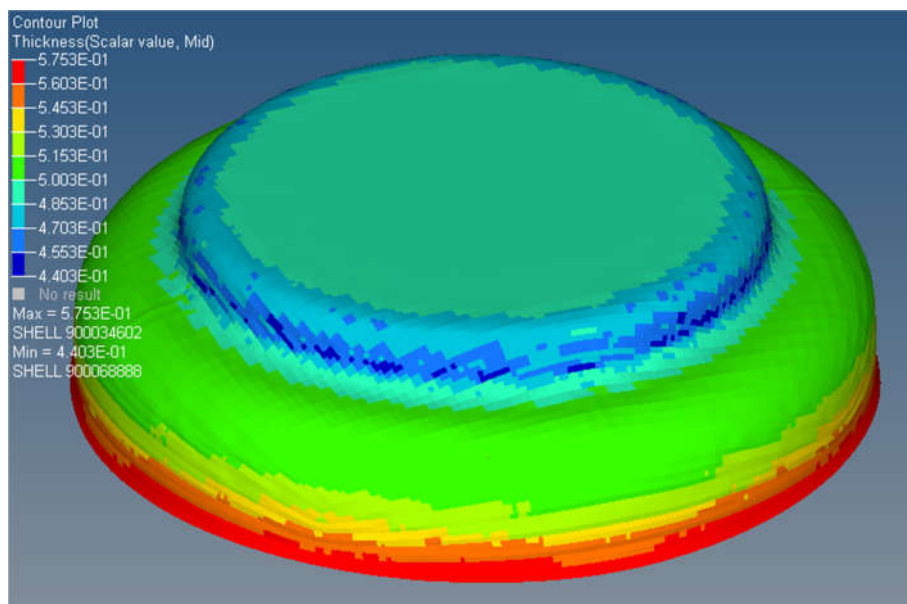
ภาพที่ 3.12(ง) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร  
ที่แรงจับยึด 5 kN



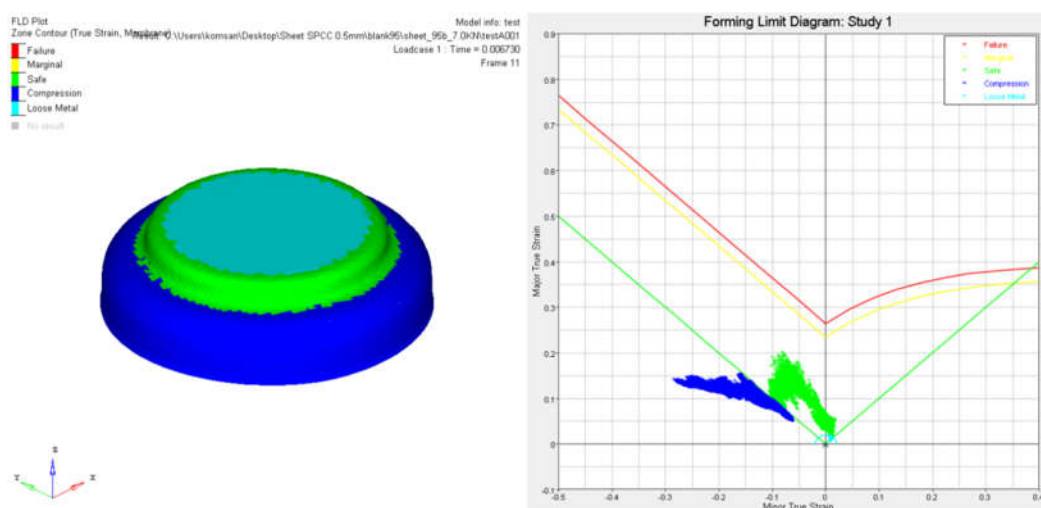
ภาพที่ 3.12(จ) ความหนาของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 6 kN



ภาพที่ 3.12(ฉ) การเกิดรอยยับ การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร  
ที่แรงจับยึด 6 kN

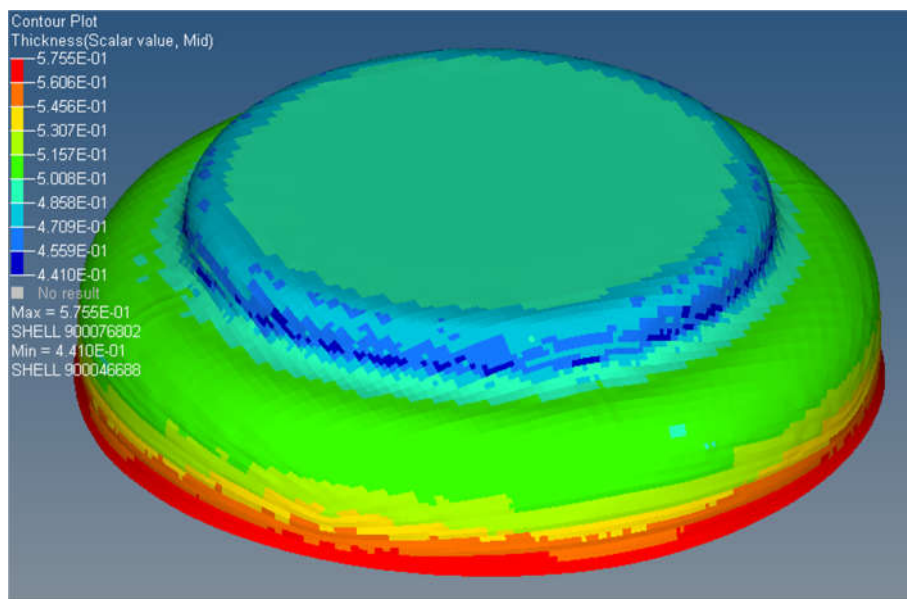


ภาพที่ 3.12(ข) ความหนาของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 7 kN

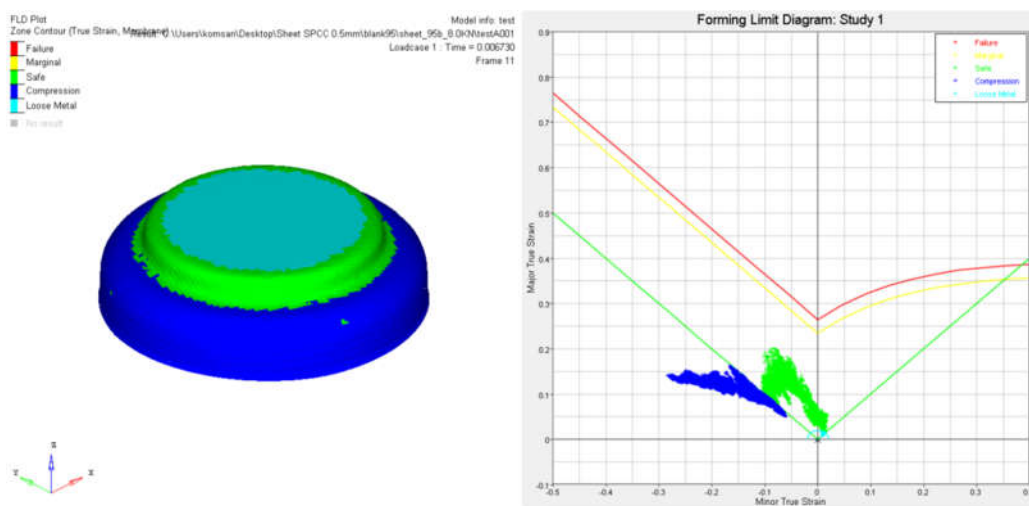


ภาพที่ 3.12(ข) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร  
ที่แรงจับยึด 7 kN





ภาพที่ 3.12(ฉ) ความหนาของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 8 kN



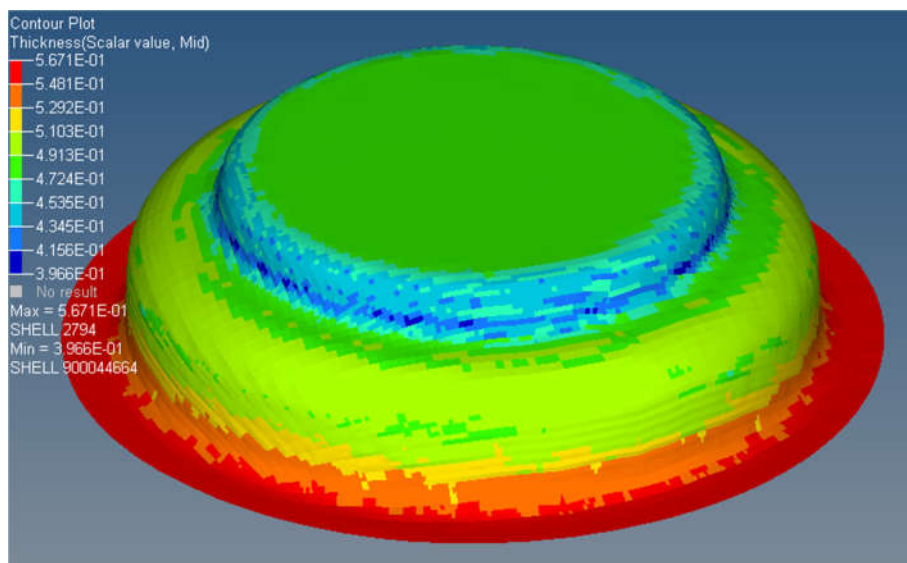
ภาพที่ 3.12(ญ) การเกิดรอยยับ การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 8 kN



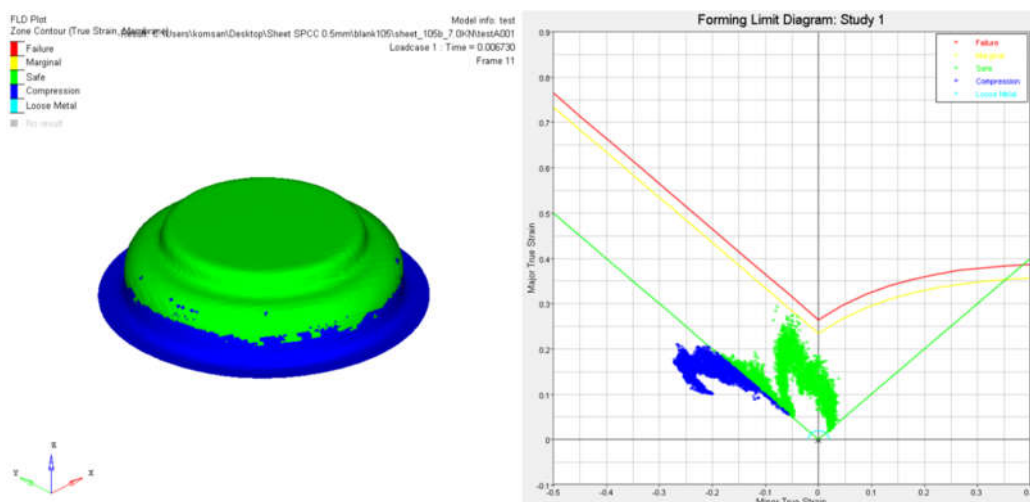
ตารางที่ 3.3(ค) ผลเฉลยของขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่า 105 มิลลิเมตร

ขนาดของแผ่น ชิ้นงานเปล่า	แรงจับยึดชิ้นงาน (kN)	ผลลัพธ์ที่ได้
105	7	เกิดรอยย่นที่ผิวและปีกของชิ้นงานนอกบริเวณที่ต้องการ ความหนาสูงสุด 0.5671 mm ความบางสูงสุด 0.3966 mm
	8	เกิดรอยย่นที่ผิวและปีกของชิ้นงานนอกบริเวณที่ต้องการ เกิด รอยฉีกขาดที่ผิวส่วนบนของชิ้นงาน ความหนาสูงสุด 0.5652 mm ความบางสูงสุด 0.3826 mm
	9*	เกิดรอยย่นที่ผิวและปีกของชิ้นงานนอกบริเวณที่ต้องการ เกิด รอยฉีกขาดที่ผิวส่วนบนของชิ้นงาน ความหนาสูงสุด 0.5674 mm ความบางสูงสุด 0.3820 mm
	10	เกิดรอยย่นที่ผิวและปีกของชิ้นงานนอกบริเวณที่ต้องการ เกิด รอยฉีกขาดที่ผิวส่วนบนของชิ้นงาน ความหนาสูงสุด 0.5642 mm ความบางสูงสุด 0.3804 mm
	11	เกิดรอยย่นที่ผิวและปีกของชิ้นงานนอกบริเวณที่ต้องการ เกิด รอยฉีกขาดที่ผิวส่วนบนของชิ้นงาน ความหนาสูงสุด 0.5660 mm ความบางสูงสุด 0.3820 mm

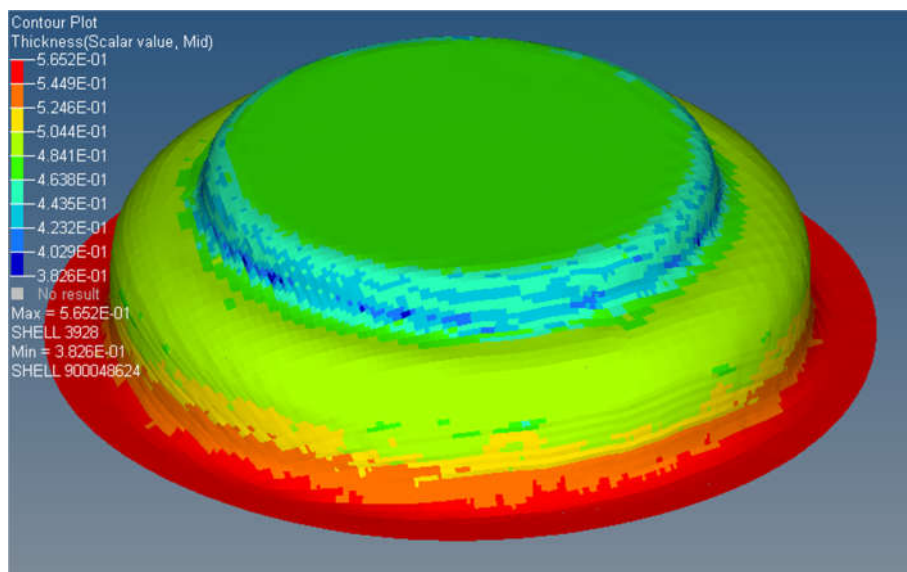
หมายเหตุ \* คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณ



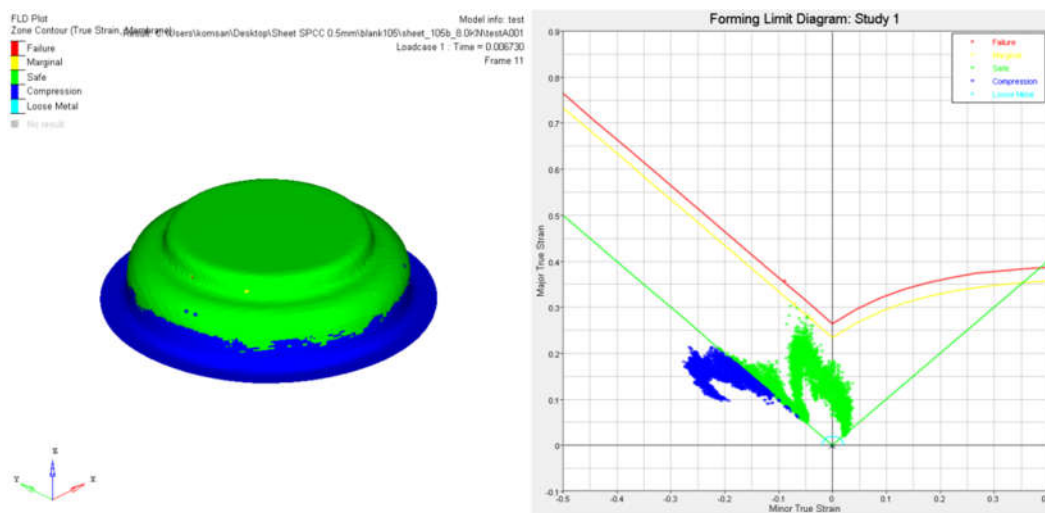
ภาพที่ 3.13(ก) ความหนาของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 7 kN



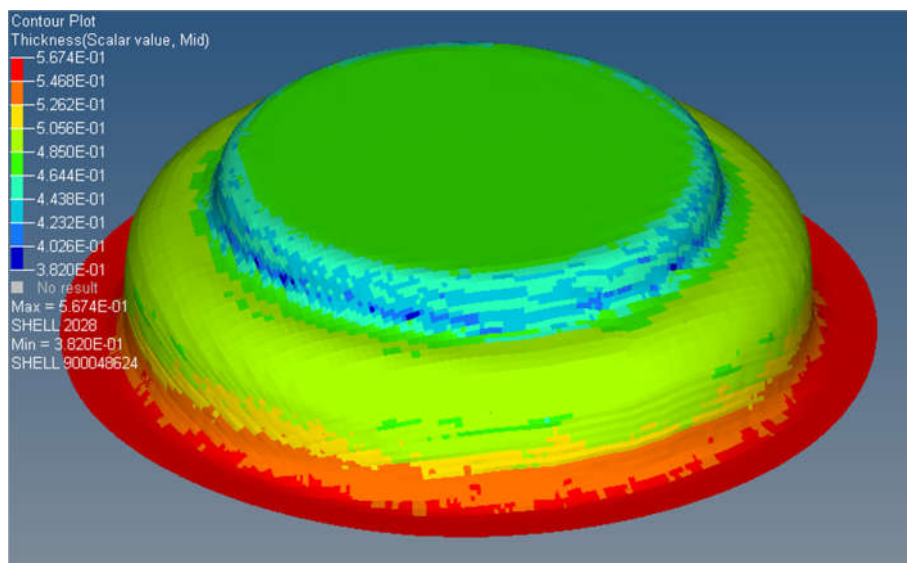
ภาพที่ 3.13(ข) การเกิดรอยยับ การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 7 kN



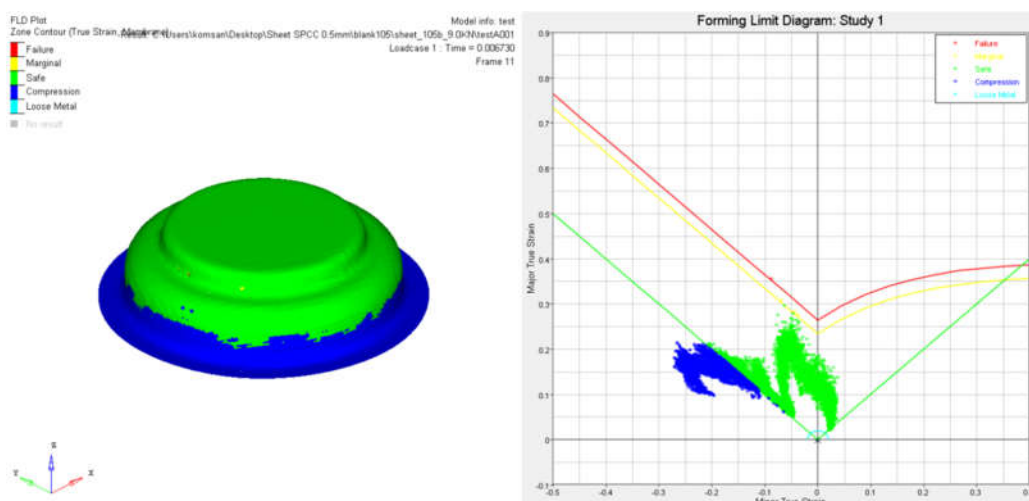
ภาพที่ 3.13(ค) ความหนาของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 8 kN



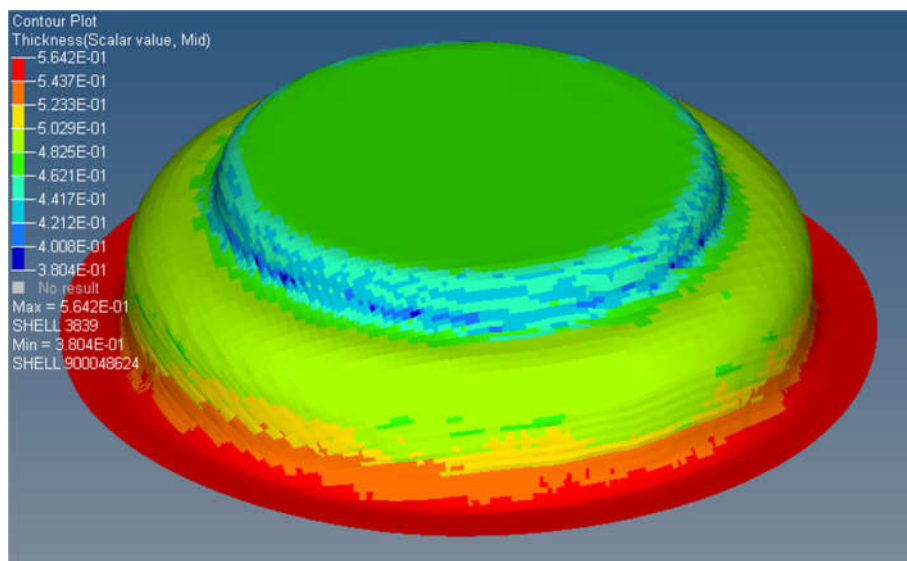
ภาพที่ 3.13(ง) การเกิดรอยยุบ การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร  
ที่แรงจับยึด 8 kN



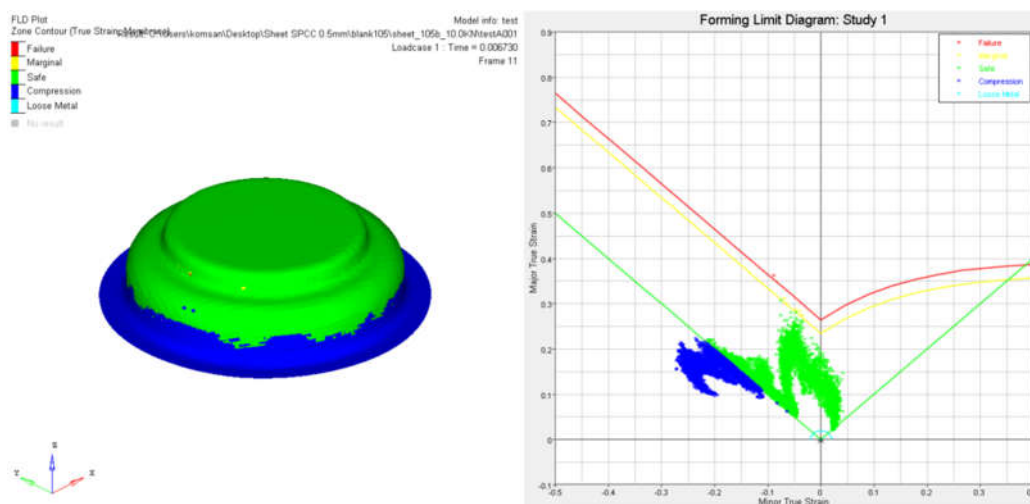
ภาพที่ 3.13(จ) ความหนาของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 9 kN



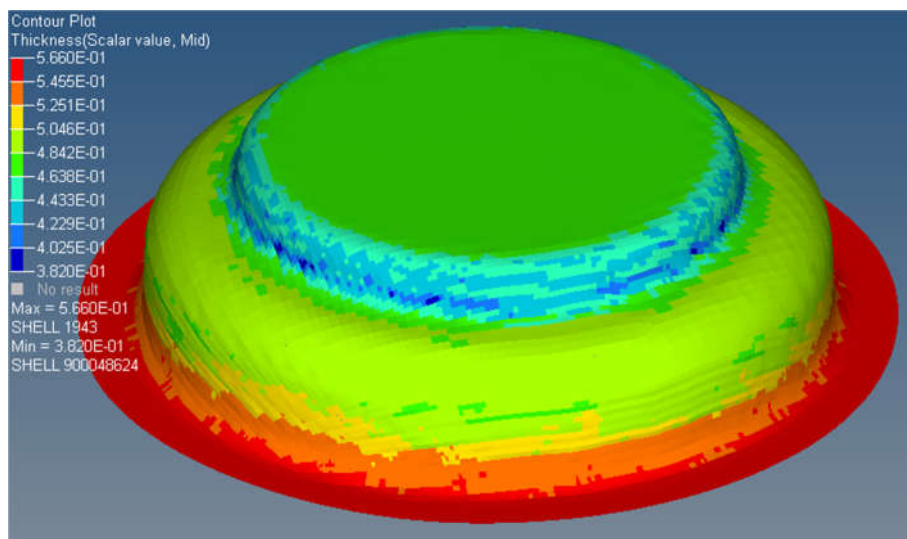
ภาพที่ 3.13(ฉ) การเกิดรอยยุบ การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร  
ที่แรงจับยึด 9 kN



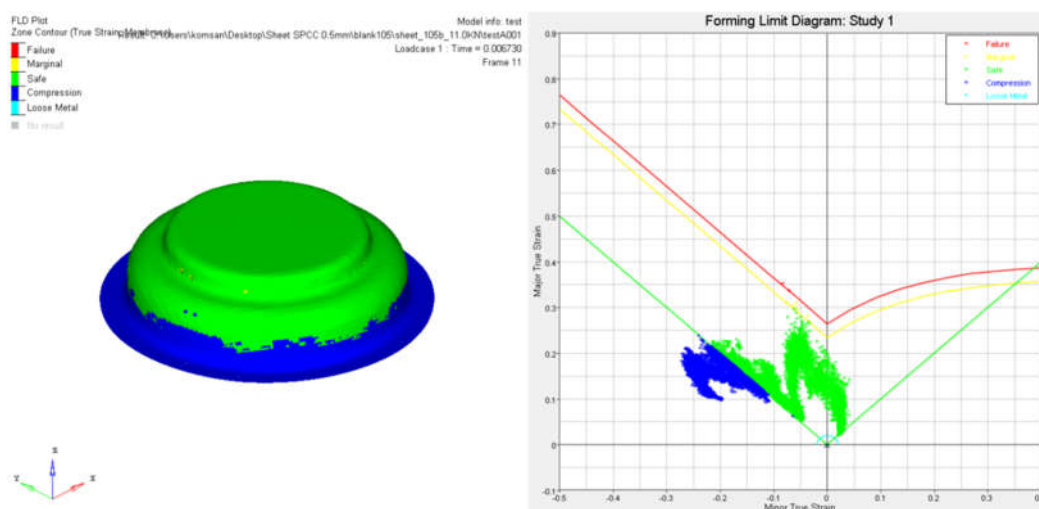
ภาพที่ 3.13(ข) ความหนาของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 10 kN



ภาพที่ 3.13(ข) การเกิดรอยยับ การฉีกขาดและ FLD ของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 10 kN



ภาพที่ 3.13(ณ) ความหนาของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 11 kN



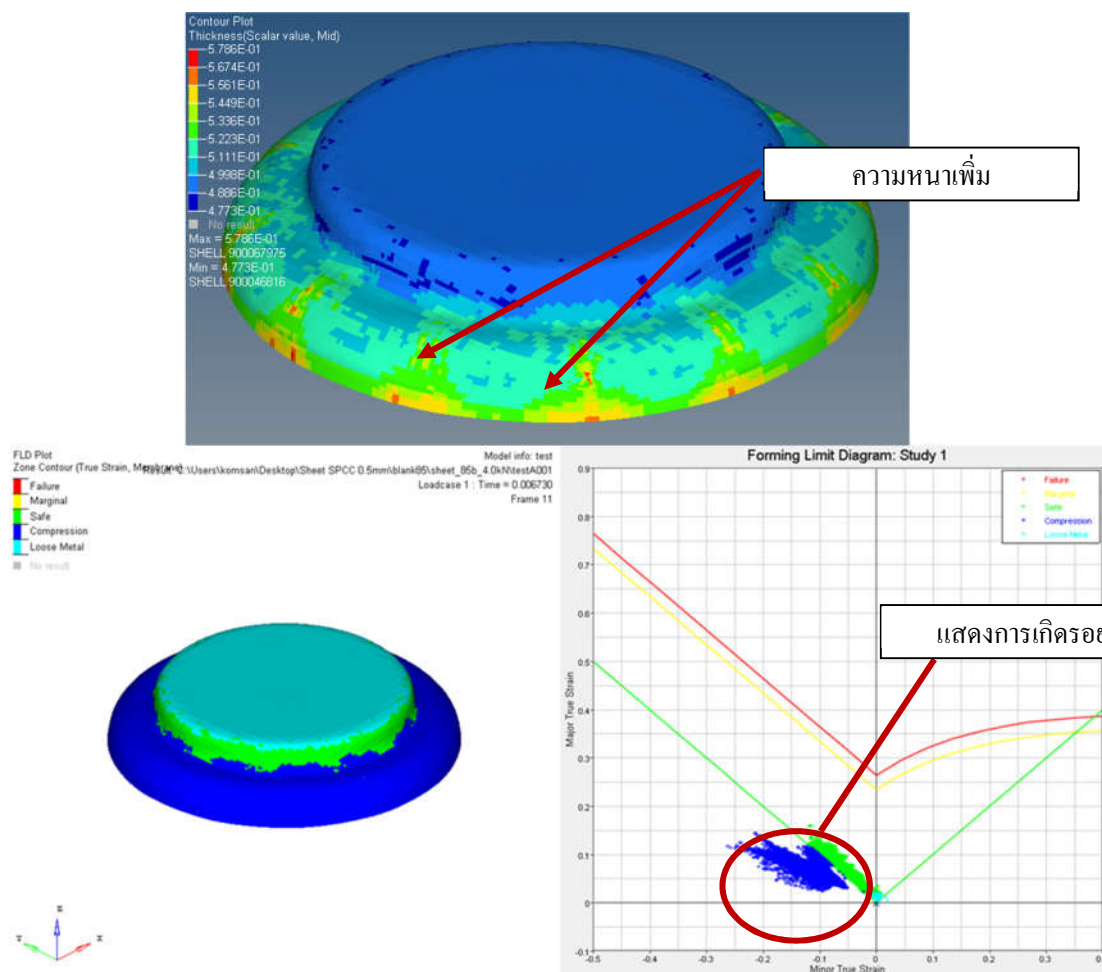
ภาพที่ 3.13(ญ) การเกิดรอยย่น การฉีกขาด และ FLD ของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 11 kN

### ผลการวิเคราะห์เพื่อหาขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าที่เหมาะสม

จากการหาผลเฉลยโดยพิจารณาจากความหนาของชิ้นงานและแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLC) จะผลดังนี้

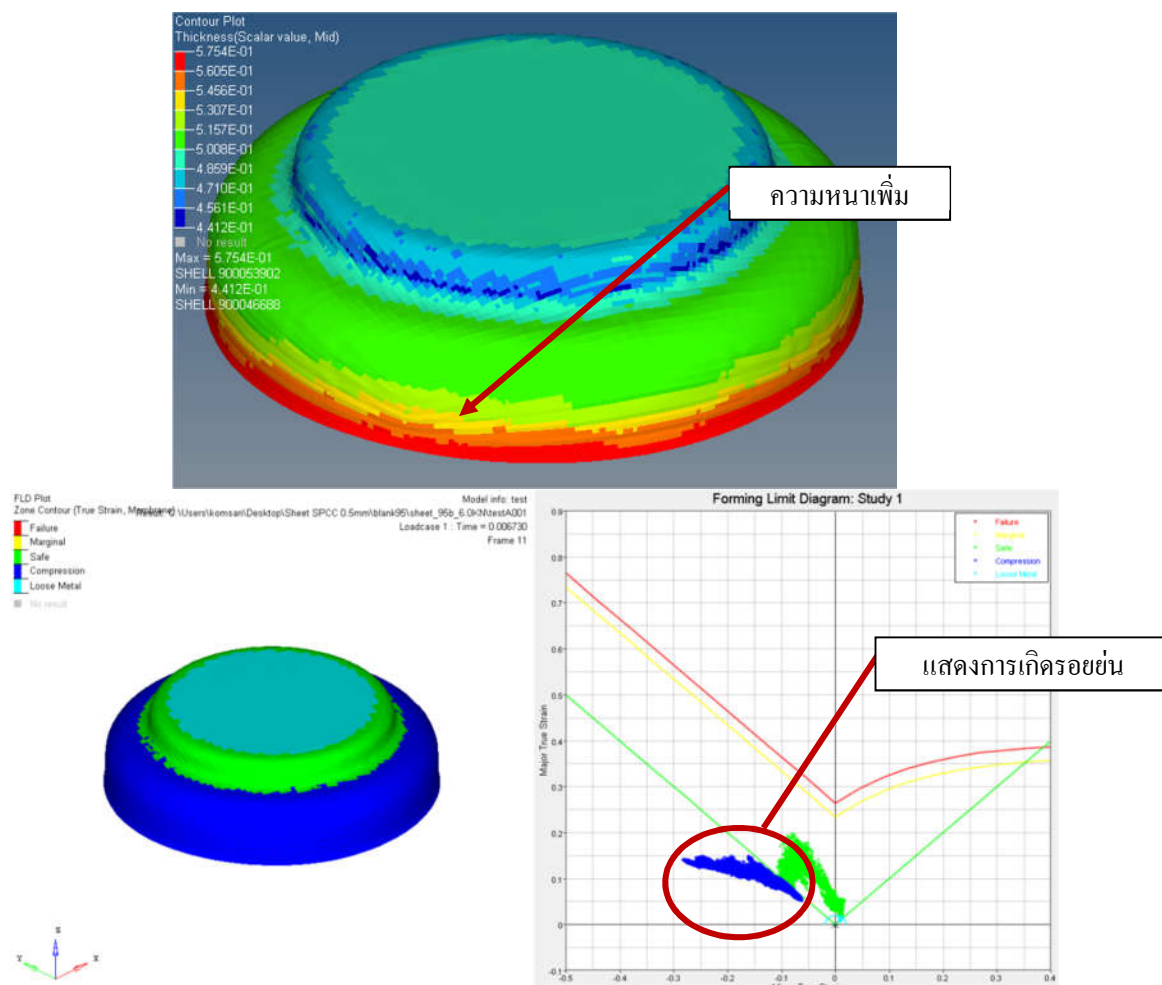
แผ่นชิ้นงานเปล่าขนาด 85 มิลลิเมตร เกิดรอยย่นที่ผิวบริเวณส่วนโค้งแรกของชิ้นงาน และเกิดรอยย่นที่ขอบของชิ้นงานในทุกค่าของแรงจับยึดที่กำหนด ความหนาที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโดยเฉลี่ยของผิวชิ้นงาน เท่ากับ 0.5798 มิลลิเมตร และความบางเฉลี่ยเท่ากับ 0.4759 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.14





ภาพที่ 3.14 บริเวณที่เกิดรอยย่นของชิ้นงาน 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 4 kN

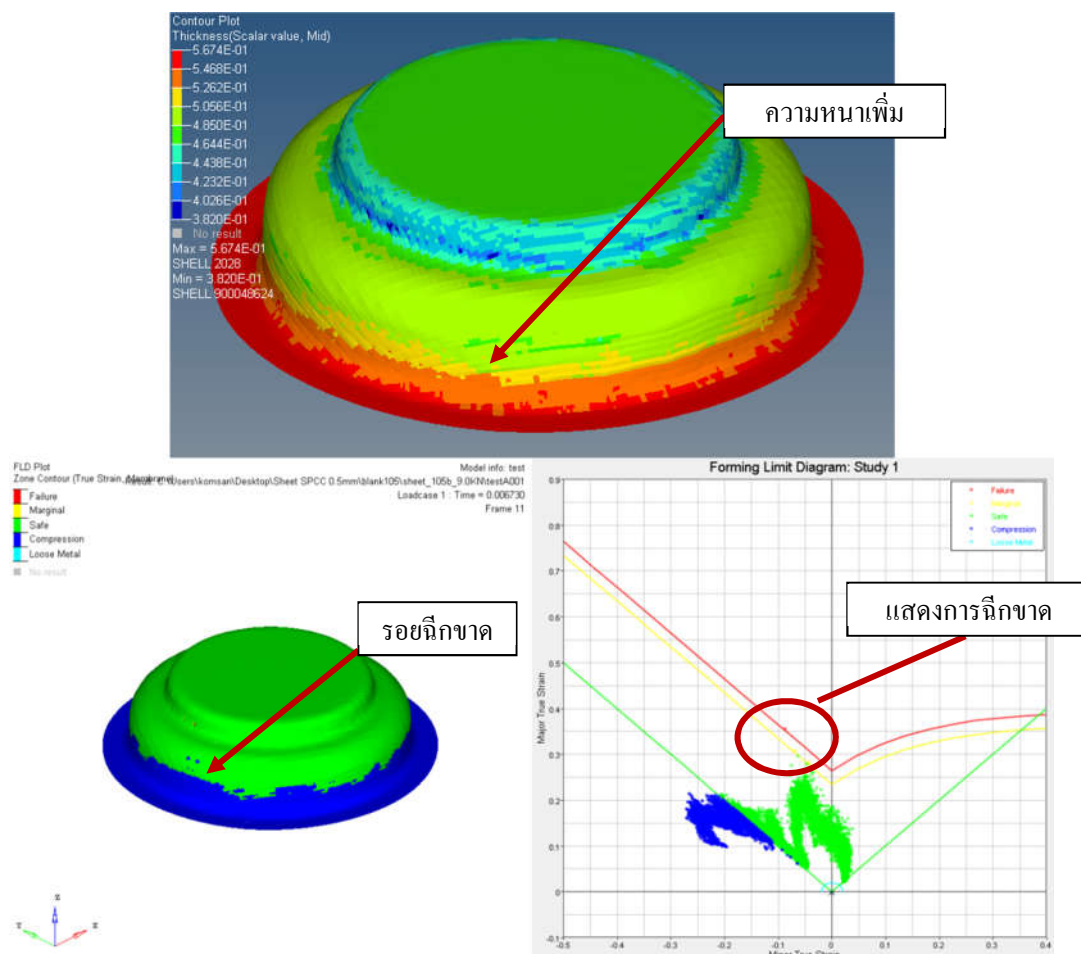
แผ่นชิ้นงานเปล่าขนาด 95 มิลลิเมตร เกิดรอยย่นที่ผิวและขอบของชิ้นงานในบริเวณที่ใกล้กับส่วนโค้งของรัศมีตาย และจะเห็นได้ว่าส่วนโค้งแรกและส่วนบนสุดของชิ้นงานมีความเปลี่ยนแปลงของความหนาน้อยมาก ความหนาของชิ้นงานจะลดลงบริเวณผิวข้างและส่วนโค้งของชิ้นที่สองของชิ้นงาน ความหนาที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโดยเฉลี่ยของผิวชิ้นงาน เท่ากับ 0.5755 มิลลิเมตร และความบางเฉลี่ย เท่ากับ 0.4411 มิลลิเมตรดังแสดงในภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 บริเวณที่เกิดรอยย่นของชิ้นงาน 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 6 kN

แผ่นชิ้นงานเปล่าขนาด 105 มิลลิเมตร เกิดรอยย่นที่ผิวและขอบของชิ้นงานในบริเวณส่วนโค้งของรัศมีตาย ส่วนโค้งแรกและส่วนบนสุดของชิ้นงานมีความเปลี่ยนแปลงของความหนาอย่างมาก ความหนาของชิ้นงานจะลดลงบริเวณผิวข้างชั้นที่สองของชิ้นงานและเกิดฉีกขาดขึ้นในบริเวณนี้ ความหนาที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโดยเฉลี่ยของผิวชิ้นงาน เท่ากับ 0.5659 มิลลิเมตร และความบางเฉลี่ย เท่ากับ 0.3847 มิลลิเมตรดังแสดงในภาพที่ 3.16





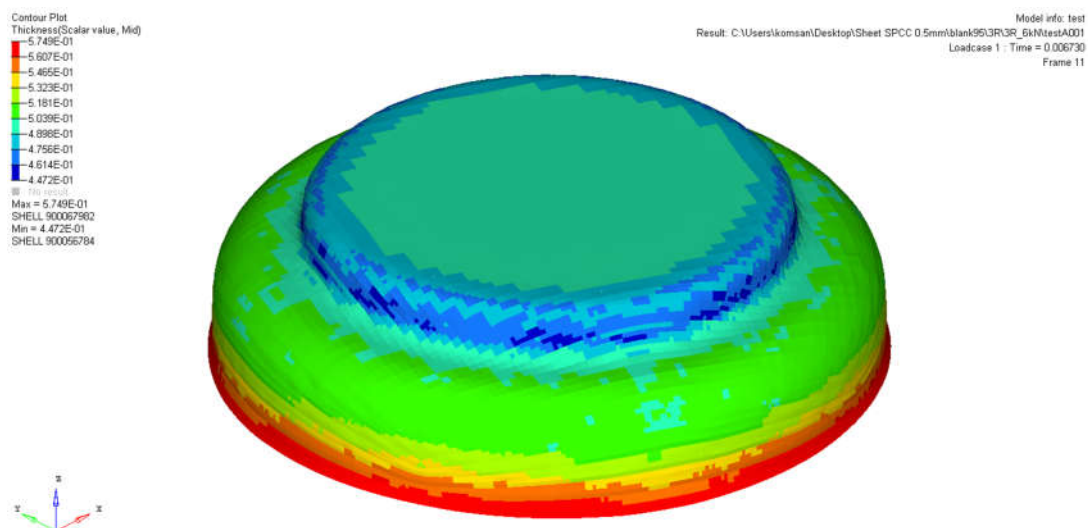
ภาพที่ 3.16 บริเวณที่เกิดรอยย่นของชิ้นงาน 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 9 kN

จากผลการวิเคราะห์ ขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร เป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป เนื่องจากบริเวณที่ผิวของชิ้นงานที่ต้องการไม่เกิดรอยย่นและรอยฉีกขาดในช่วงของแรงจับยึดที่กำหนด และการสั่นเปื้อนวัสดุในการเตรียมแผ่นชิ้นงานเปล่าเมื่อเทียบกับขนาด 105 มิลลิเมตร และในส่วนของขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่า 85 มิลลิเมตร มีการเกิดรอยย่นที่ผิวชิ้นงานในช่วงของแรงจับยึดที่กำหนด ขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่า 105 มิลลิเมตร มีการเกิดการฉีกขาดของชิ้นงานเมื่อมีการเพิ่มขนาดของแรงจับยึด

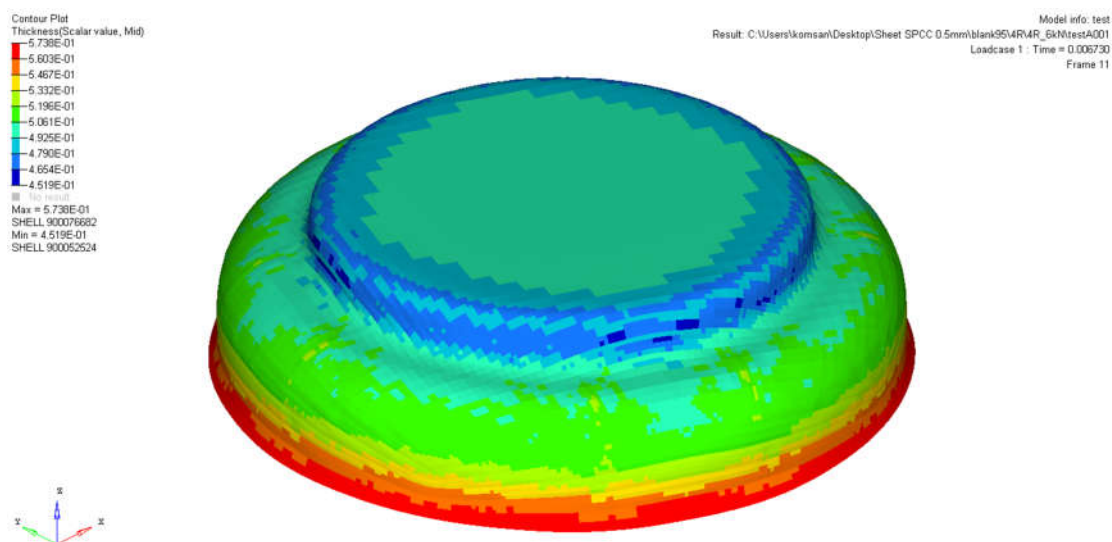
### 3.9 การวิเคราะห์รัศมีด้ายที่เหมาะสม

จากผลการวิเคราะห์หาขนาดที่เหมาะสมของแผ่นชิ้นงานเปล่าโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่าที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 95 มิลลิเมตร นำมาพิจารณาหาขนาดของรัศมีด้ายที่เหมาะสมที่แรงจับยึด 6 kN โดยใช้ขนาดของรัศมีด้ายที่แตกต่างกัน กำหนดให้รัศมีด้ายเท่ากับ 3 4

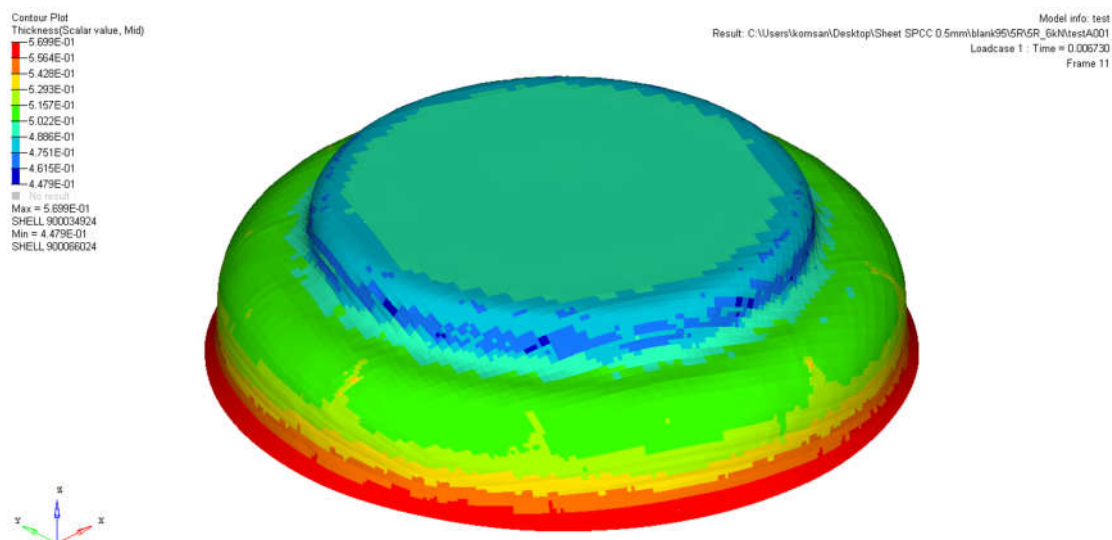
และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับโดยพิจารณาผลของการเกิดรอยย่นและการฉีกขาดของชิ้นงาน ซึ่งผลที่ได้แสดงในภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.17(ก) การขึ้นรูปที่รีดมีดตาย 3 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3.17(ข) การขึ้นรูปที่รีดมีดตาย 4 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3.17(ค) การขึ้นรูปที่รัศมีตาย 5 มิลลิเมตร

จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มรัศมีตายมีผลทำให้ชิ้นงานเกิดรอยย่นที่ผิวและบริเวณใกล้รัศมีตายเพิ่มมากขึ้น

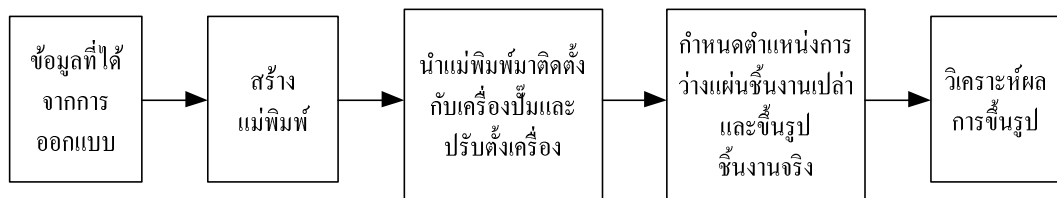
### 3.10 สรุป

จากการจำลองการขึ้นรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำให้สามารถกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปได้อย่างถูกต้อง และยังสามารถทำนายตำแหน่งที่จะเกิดความเสียหายให้กับชิ้นงานได้ ขนาดแผ่นขึ้นงานเปล่าที่เหมาะสมเท่ากับ 95 มิลลิเมตร รัศมีตาย 3 มิลลิเมตร และขนาดของแรงจับยึดชิ้นงานเท่ากับ 6 kN เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูปลึกของชิ้นงานนี้

## บทที่ 4

### การสร้างแม่พิมพ์และการทดสอบกระบวนการดึงขึ้นรูป

จากการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในบทที่ 3 จะได้ค่าของรัศมีตาย และแรงในการจับยึดชิ้นงานที่เหมาะสม จากข้อมูลดังกล่าวนำมาสร้าง Solid Data เพื่อเข้าไปสู่การสร้างแม่พิมพ์ ในบทนี้จะเป็นขั้นตอนของการออกแบบ การติดตั้ง การทดสอบขึ้นรูปจริง รวมไปถึงการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานหลังจากผ่านกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก ขั้นตอนการดำเนินงานของการศึกษาในบทนี้แสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ขั้นตอนการดำเนิน การออกแบบ การสร้างชิ้นส่วนต่าง ๆ การติดตั้งแม่พิมพ์ และการขึ้นรูป

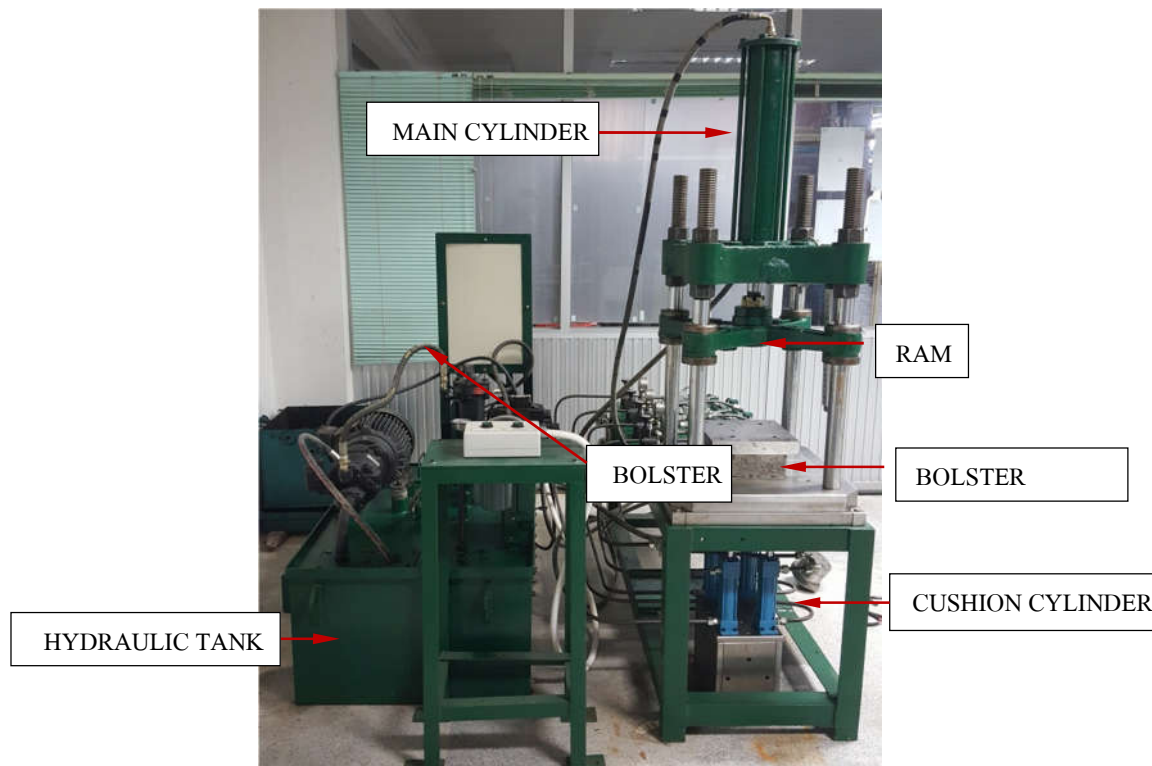
#### 4.1 การออกแบบแม่พิมพ์

ขั้นตอนของการออกแบบแม่พิมพ์เป็นการกำหนดรายละเอียดต่าง ๆ ของชิ้นส่วน การกำหนดรูปร่าง การประกอบ และการติดตั้งแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องปั๊ม รวมไปถึงการกำหนดชนิดของวัสดุที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ ก่อนการออกแบบนั้นต้องทำความเข้าใจของการทำงานของเครื่องปั๊มเพื่อให้การประกอบแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องปั๊มได้อย่างถูกต้อง

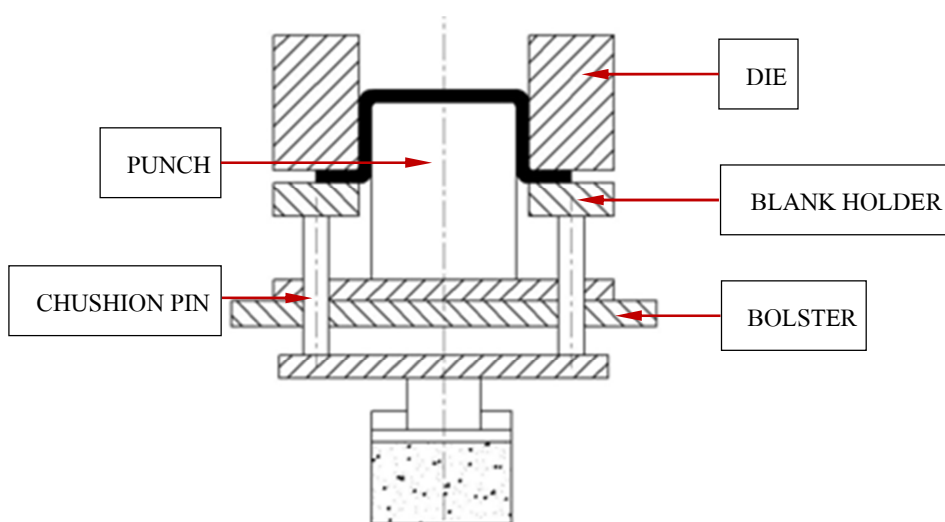
##### 4.1.1 การทำงานของเครื่องปั๊ม (Press Machine)

เครื่องปั๊มที่ใช้เป็นระบบไฮดรอลิกส่งกำลังขนาด 10 ตัน ทำงานแบบจังหวะเดียว (Single press) แบบกลับทาง (Inverted die) ลักษณะของตัวเครื่องมีส่วนประกอบที่สำคัญประกอบไปด้วย กระบอกไฮดรอลิก 2 ชุดคือ อยู่ใต้โบลสเตอร์ของเครื่องปั๊มเรียกว่า คูเซ็น ซิลลินเดอร์ และอีกตัวอยู่ด้านบนของเครื่องเรียกว่า เมน ซิลลินเดอร์ และรายละเอียดส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องได้แสดงดังภาพที่ 4.2 หลักการทำงานของเครื่องปั๊มคือ พันช์จะยึดติดอยู่กับโบลสเตอร์ด้านล่างของเครื่อง และดายจะยึดติดอยู่กับส่วนบนหรือแรมของเครื่อง แรมจะเคลื่อนที่ลงพาดายสวมเข้ากับพันช์เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานส่วนแรงที่ใช้ในการจับยึดชิ้นงานจะถูกกำหนดโดยการตั้งแรงดันด้านผ่านแกนส่งแรงดันจาก คูเซ็น ซิลลินเดอร์ ด้านล่างดังแสดงในภาพที่ 4.3 การทำงานของ คูเซ็น ซิลลินเดอร์ สามารถควบคุมแรงดันให้คงที่และสามารถปรับตั้งได้ แรงที่กระจายบนแผ่นจับยึดชิ้นงานจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง

เริ่มต้น เมื่อแผ่นโลหะถูกดึงเข้าไปในช่องตายบางส่วนก็จะเหลือพื้นที่บริเวณปีกกลดลง ทำให้แรงในการจับยึดน้อยลงด้วย



ภาพที่ 4.2 เครื่องปั๊มไฮดรอลิกขนาด 10 ตัน



ภาพที่ 4.3 ลักษณะการติดตั้งแม่พิมพ์ และโครงสร้างแม่พิมพ์ที่เป็นแบบกลับทาง

#### 4.1.2 การเลือกวัสดุทำแม่พิมพ์

วัสดุทำแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปที่ที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของวัสดุขึ้นงาน ขนาดของขึ้นงาน ความรุนแรงในการดัดขึ้นรูป ปริมาณการผลิต ค่าความคลาดเคลื่อนของขึ้นงานและความเรียบผิวงานที่ต้องการ วัสดุที่ทำแม่พิมพ์ใช้เหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool steel) สำหรับงานเย็น เกรด JIS-SKD11 และทำการชุบแข็ง เหล็กชนิดนี้จัดเป็นเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนและธาตุผสมอื่น ๆ ในปริมาณสูง มีความสามารถในการชุบแข็งสูงเพื่อสร้างคาร์ไบด์ที่ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติด้านทานการสึกหรอ (วารุณี เปรमानนท์ :2552) คุณสมบัติที่สำคัญของเหล็กกล้าเครื่องมือคือมีความสามารถในการชุบแข็ง (Harden ability) มีความเหนียว ทนต่อการเสียดสีและเป็นเกรดที่นิยมใช้กันในการทำแม่พิมพ์

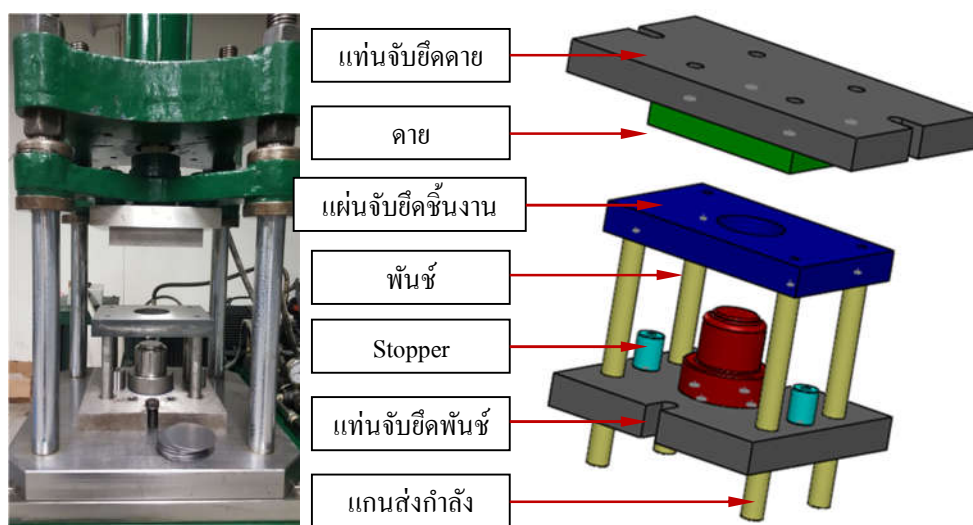
#### 4.1.3 การออกแบบแม่พิมพ์

การออกแบบแม่พิมพ์ต้องคำนึงถึงความแข็งแรงที่มีต่อการเสียรูปของโครงสร้างในขณะทำการขึ้นรูป ง่ายต่อการผลิตและติดตั้ง และที่สำคัญต้องคำนึงถึงวัตถุดิบที่นำมาผลิตต้องมีขายตามท้องตลาด ในการออกแบบนั้นจะทำให้อยู่ในรูปของข้อมูลพื้นผิวการออกแบบ เมื่อทำการออกแบบและตรวจสอบความถูกต้องโดยการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันโดยใช้โปรแกรม SOLIDWORK เพื่อใช้ระยะและตำแหน่งองค์ประกอบของแม่พิมพ์

ชุดแม่พิมพ์ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.4 และ 4.5 ประกอบไปด้วย พันช์ ดาย แผ่นจับยึดขึ้นงาน ชุดจับยึดตายกับแรม ชุดจับยึดพันทับกับโบลสเตอร์ แคนส่งแรงดัน และตัวกำหนดการสิ้นสุดการเคลื่อนที่ของตาย (Stopper) เพื่อป้องกันการชนกันของพันทับและตาย ก่อนติดตั้งเข้ากับเครื่องปั๊ม และภาพที่ 4.6 ถึง 4.8 แสดงลักษณะของชิ้นส่วนหลักของแม่พิมพ์ที่ซึ่งได้แก่ พันทับ ดายและแผ่นจับยึดขึ้นงาน



ภาพที่ 4.4 ชุดแม่พิมพ์ที่ได้จากการออกแบบ



ภาพที่ 4.5 การติดตั้งชุดแม่พิมพ์

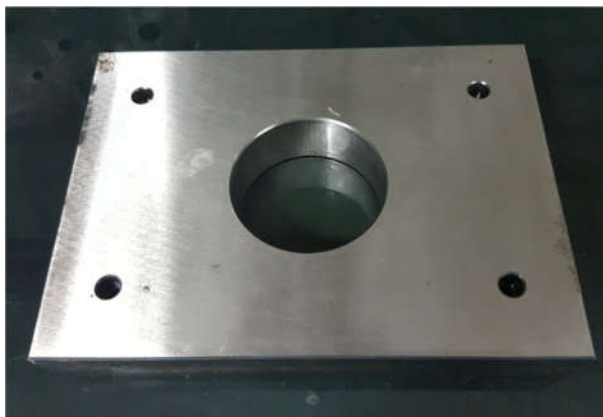


ภาพที่ 4.6 แม่พิมพ์คาย



ภาพที่ 4.7 แม่พิมพ์พินช์





ภาพที่ 4.8 แผ่นจับยึดชิ้นงาน

#### 4.2 การติดตั้งชุดแม่พิมพ์

การติดตั้งแม่พิมพ์นั้นต้องมีความถูกต้องและแม่นยำ ชิ้นส่วนต่าง ๆ ต้องอยู่ในตำแหน่งที่กำหนด และอยู่ในแนวเดียวกันตามที่ได้ออกแบบไว้เพื่อป้องกันการเบียดกันของดายและพินซีในขณะเคลื่อนที่ สวมเข้าหากันระหว่างกระบวนการทำงาน และเพื่อให้ระยะช่องว่างแม่พิมพ์อยู่ในระยะที่ถูกต้องดัง แสดงในภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 การติดตั้งชุดแม่พิมพ์กับเครื่องปั๊ม



### 4.3 การทดสอบการขึ้นรูปจริง

การปรับความดันในการจับยึดชิ้นงานจะปรับด้วยวาล์วดังแสดงในภาพที่ 4.10 ตัวเครื่องจะมีมาตรวัดความดันเพื่อให้ทราบค่าของความดันทำงาน และความดันของเครื่องจะทำงานก็ต่อเมื่อมีการจับยึดชิ้นงานและเริ่มมีการเคลื่อนที่ของด้ายและแผ่นจับยึดชิ้นงาน โดยเครื่องปั๊มที่ใช้เครื่องที่ไม่สามารถปรับความเร็วในการขึ้นรูปได้



ภาพที่ 4.10 วาล์วปรับความดันในการจับยึดชิ้นงานและมาตรวัดความดันของเครื่อง

#### 4.3.1 ผลการทดสอบการขึ้นรูป

##### ผลการทดสอบการขึ้นรูปของแผ่นชิ้นงานเปล่าขนาด 85 มิลลิเมตร

จากการทดสอบการขึ้นรูปของแผ่นชิ้นงานเปล่าขนาด 85 มิลลิเมตร ที่ขนาดแรงจับยึด 2 kN 3 kN 4 kN 5 kN และ 6 kN เมื่อพิจารณาจะเห็นได้ว่าชิ้นงานทุกชิ้นจะมีลักษณะเหมือนกันทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 4.11



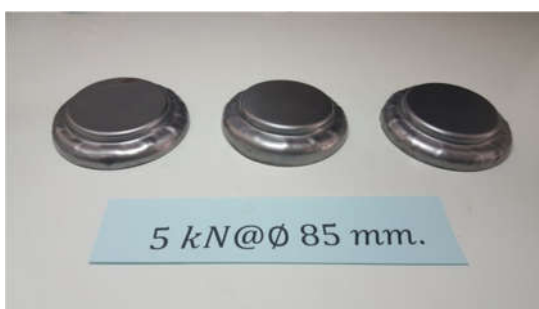
ภาพที่ 4.11(ก) แผ่นชิ้นงานเปล่า 85 มิลลิเมตร แรงจับยึด 2 kN



ภาพที่ 4.11(ข) แผ่นชิ้นงานเปล่า 85 มิลลิเมตร แรงจับยึด 3 kN



ภาพที่ 4.11(ค) แผ่นชิ้นงานเปล่า 85 มิลลิเมตร แรงจับยึด 4 kN



ภาพที่ 4.11(ง) แผ่นชิ้นงานเปล่า 85 มิลลิเมตร แรงจับยึด 5 kN



ภาพที่ 4.11(จ) แผ่นชิ้นงานเปล่า 85 มิลลิเมตร แรงจับยึด 6 kN

และเมื่อพิจารณาลักษณะของชิ้นงานผลที่ได้คือ ผิวชิ้นงานส่วนบนและขอบข้างจะมีผิวเรียบ ส่วนผิวโค้งของชิ้นงานจะมีรอยย่นเกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.12



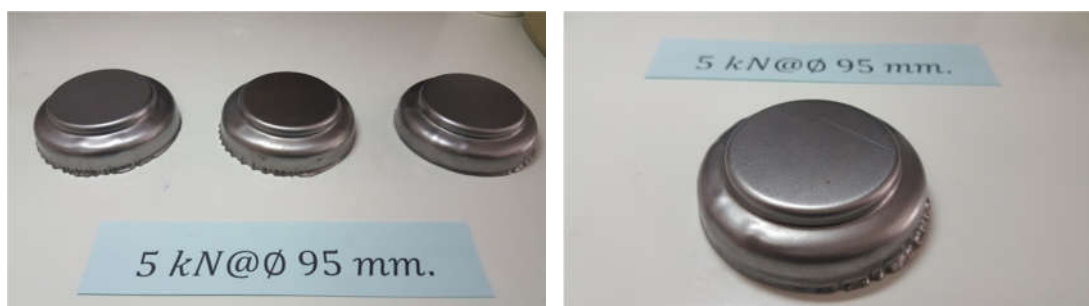
ภาพที่ 4.12 ลักษณะของชิ้นงานที่แผ่นชิ้นงานเปล่าขนาด 85 มิลลิเมตร

#### ผลการทดสอบการขึ้นรูปของแผ่นชิ้นงานเปล่าขนาด 95 มิลลิเมตร

จากการทดสอบการขึ้นรูปของแผ่นชิ้นงานเปล่าขนาด 85 มิลลิเมตร ที่ขนาดแรงจับยึด 4 kN 5 kN 6 kN 7 kN และ 8 kN เมื่อพิจารณาจะเห็นได้ว่าชิ้นงานทุกชิ้นจะมีลักษณะเหมือนกันทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13(ก) แผ่นชิ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร แรงจับยึด 4 kN



ภาพที่ 4.13(ข) แผ่นชิ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร แรงจับยึด 5 kN



ภาพที่ 4.13(ค) แผ่นชิ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร แรงจับยึด 6 kN



ภาพที่ 4.13(ง) แผ่นชิ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร แรงจับยึด 7 kN



ภาพที่ 4.13(จ) แผ่นชิ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร แรงจับยึด 8 kN

และเมื่อพิจารณาลักษณะของชิ้นงานผลที่ได้คือ ผิวชิ้นงานส่วนบน ขอบข้าง และผิวโค้งของชิ้นงานจะมีผิวเรียบ บริเวณที่ขอบชิ้นงานมีรอยย่นเกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 ลักษณะของชิ้นงานที่แผ่นชิ้นงานเปล่าขนาด 95 มิลลิเมตร

#### ผลการทดสอบการขึ้นรูปของแผ่นชิ้นงานเปล่าขนาด 105 มิลลิเมตร

จากการทดสอบการขึ้นรูปของแผ่นชิ้นงานเปล่าขนาด 85 มิลลิเมตร ที่ขนาดแรงจับยึด 7 kN 8 kN 9 kN 10 kN และ 11 kN เมื่อพิจารณาจะเห็นได้ว่าชิ้นงานทุกชิ้นจะมีลักษณะเหมือนกันทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15(ก) แผ่นชิ้นงานเปล่า 105 มิลลิเมตร แรงจับยึด 7 kN



ภาพที่ 4.15(ข) แผ่นชิ้นงานเปล่า 105 มิลลิเมตร แรงจับยึด 8 kN



ภาพที่ 4.15(ค) แผ่นชิ้นงานเปล่า 105 มิลลิเมตร แรงจับยึด 9 kN



ภาพที่ 4.15(ง) แผ่นชิ้นงานเปล่า 105 มิลลิเมตร แรงจับยึด 10 kN



ภาพที่ 4.15(จ) แผ่นชิ้นงานเปล่า 105 มิลลิเมตร แรงจับยึด 11 kN

และเมื่อพิจารณาลักษณะของชิ้นงานผลที่ได้คือ ผิวชิ้นงานส่วนบน ขอบข้าง และผิวโค้งของชิ้นงานจะมีผิวเรียบ บริเวณที่ขอบชิ้นงานมีรอย่นเกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.16





ภาพที่ 4.16 ลักษณะของชิ้นงานที่แผ่นชิ้นงานเปล่าขนาด 105 มิลลิเมตร

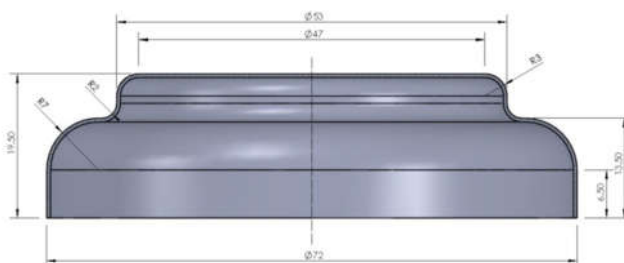
#### การเปรียบเทียบผลการขึ้นรูปที่ขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่า 85, 95 และ 105

จากผลการทดสอบการขึ้นรูปของขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่า 85, 95 และ 105 เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานต้นแบบ ดังแสดงในภาพที่ 4.17 ได้ผลดังนี้

ขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่าขนาด 85 มิลลิเมตร ระยะความสูงของส่วนบนตรงกับชิ้นงานต้นแบบ บริเวณส่วนโค้งเกิดรอยย่นผิวชิ้นงาน นั้นแสดงว่าขนาดชิ้นงานเปล่าขนาด 85 มิลลิเมตรเป็นขนาดที่ไม่เหมาะสมถึงแม้ว่าจะเพิ่มขนาดของแรงจับยึดแล้วก็ตาม

ขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่าขนาด 95 มิลลิเมตร ระยะความสูงของส่วนบนได้ตรงกับชิ้นงานต้นแบบ บริเวณส่วนโค้งมีผิวเรียบ และเกิดรอยย่นบริเวณส่วนโค้งรัศมีพันซ์และปีกเล็กน้อยแต่ไม่ถึงบริเวณผิวชิ้นงานที่ต้องการ

ขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่าขนาด 105 มิลลิเมตร ระยะความสูงของส่วนบนน้อยกว่าชิ้นงานต้นแบบ บริเวณส่วนโค้งมีผิวเรียบและเกิดรอยย่นบริเวณส่วนโค้งรัศมีพันซ์และปีกเล็กน้อยแต่ไม่ถึงบริเวณผิวชิ้นงานที่ต้องการ



ภาพที่ 4.17(ก) ขนาดชิ้นงานต้นแบบ



ความสูงของส่วนบน  
รอยย่นที่ส่วนโค้ง  
ขึ้นงาน

ภาพที่ 4.17(ข) ชิ้นงานที่ขนาดแผ่นขึ้นงานเปล่า 85 มิลลิเมตร แรงจับยึด 4 kN



ความสูงของส่วนบน  
ผิวเรียบที่ส่วนโค้งขึ้นงาน  
จนถึงบริเวณที่ต้องการ  
รอยย่นที่รัศมีตาย

ภาพที่ 4.17(ค) ชิ้นงานที่ขนาดแผ่นขึ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร แรงจับยึด 6 kN



ความสูงของส่วนบนน้อย  
กว่าชิ้นงานต้นแบบ  
ผิวเรียบที่ส่วนโค้ง  
ขึ้นงาน  
รอยย่นที่รัศมีตาย  
และปีก

ภาพที่ 4.17(ง) ชิ้นงานที่ขนาดแผ่นขึ้นงานเปล่า 105 มิลลิเมตร แรงจับยึด 9 kN



#### 4.4 สรุป

ผลจากการทดสอบขึ้นรูปชิ้นงานจริงจะเห็นว่า ขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าและแรงจับยึดชิ้นงานมีผลต่อการขึ้นรูป ขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าที่เหมาะสมจะได้ชิ้นงานตามที่ต้องการถึงแม้ว่าชิ้นงานที่จะเกิดรอยย่น แต่รอยย่นที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดในบริเวณที่ไม่ต้องการ จากการทดสอบขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่าที่เหมาะสมอยู่ที่ 95 มิลลิเมตร ถ้าแผ่นชิ้นงานเปล่าขนาดเล็กหรือมีขนาดเท่ากับชิ้นงานต้นแบบ (85 มิลลิเมตร) การทดสอบขึ้นรูปที่ได้คือชิ้นงานนั้นจะเกิดรอยย่นในบริเวณที่ต้องการซึ่งเกิดจากพื้นที่ในการจับยึดไม่เพียงพอถึงแม้ว่าจะเพิ่มแรงในการจับยึดแต่ก็มีข้อจำกัดของการทำงานของเครื่องปั๊มขึ้นรูป ถ้าแผ่นชิ้นงานเปล่ามีขนาดใหญ่เกินไป (105 มิลลิเมตร) การทดสอบขึ้นรูปที่ได้ลักษณะของชิ้นงานจะไม่ต้องกับความตึงเนื่องจากในขณะที่แผ่นชิ้นงานเปล่าเคลื่อนตัวพื้นที่ในการจับยึดมีมาก

## บทที่ 5

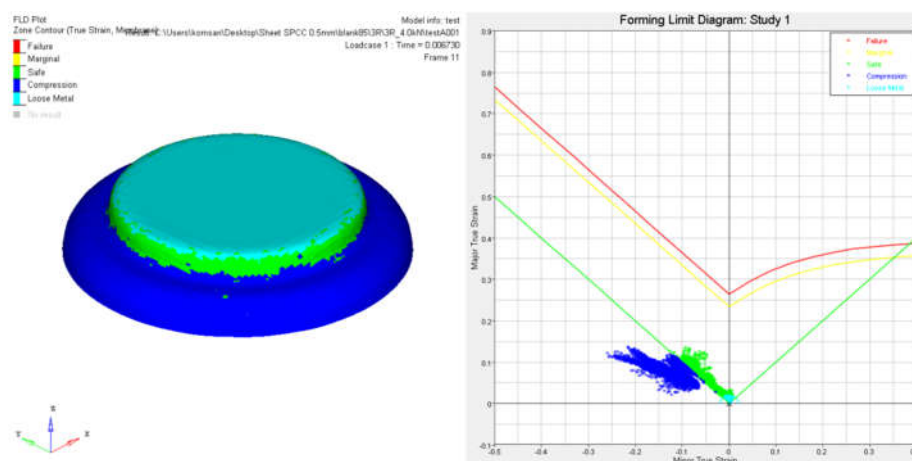
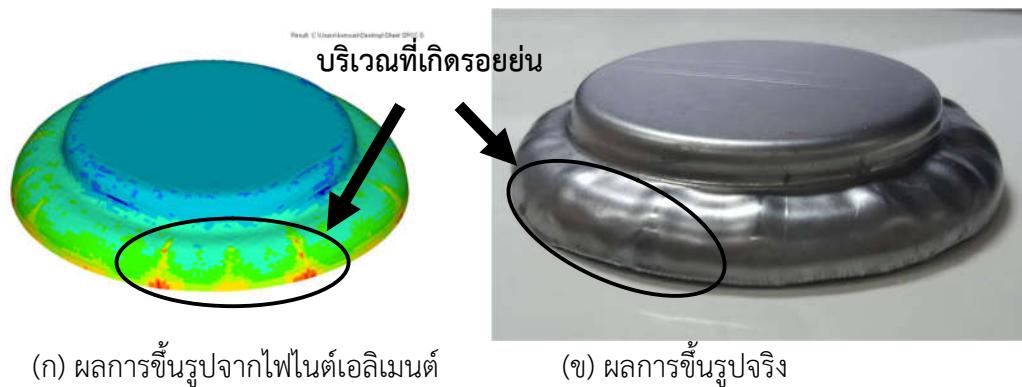
### การเปรียบเทียบชิ้นงาน สรุปลผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบชิ้นรูปจริง

การพิจารณาใน 2 ประเด็นคือ 1) การเปรียบเทียบลักษณะรูปร่างของชิ้นงานทั้งสองโดยใช้ลักษณะรูปร่างของแม่พิมพ์เป็นตัวอ้างอิง 2) พิจารณาดำแหน่งของการเกิดรอยย่นและการฉีกขาด

#### การเปรียบเทียบผลของการขึ้นรูปที่ขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่า 85 มิลลิเมตร

การเปรียบเทียบการเกิดรอยย่นจะพิจารณาจากการเกิดการอัดที่ผิวของชิ้นงานดั่งนั้น จากผลการทดลองในบทที่ 3 ในการจำลองการขึ้นรูปและการขึ้นรูปผลจากการขึ้นรูปจริงในบทที่ 4 แสดงในภาพที่ 5.1

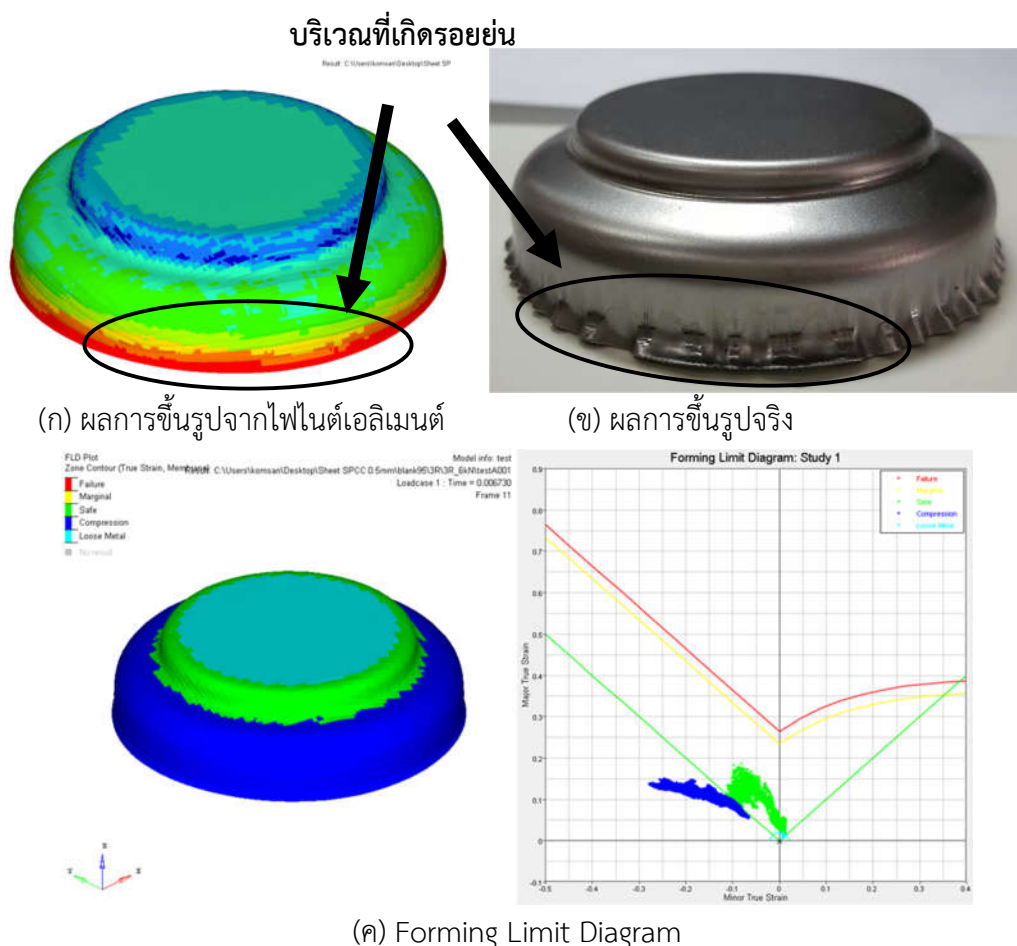


ภาพที่ 5.1 การเปรียบเทียบผลการขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานเปล่า 85 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 4 kN

จากภาพที่ 5.1 เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์และการขึ้นรูปชิ้นงานจริงผล ที่แรงจับยึด 4 kN จากภาพแสดงให้เห็นว่าบริเวณส่วนบนและขอบข้างด้านบนนั้นจะมีผิวที่เรียบซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่เกิดเปลี่ยนแปลงใด ๆ บริเวณที่เกิดรอยย่นอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน โดยจะอยู่ที่บริเวณขอบข้างของชิ้นงาน

#### การเปรียบเทียบผลของการขึ้นรูปที่ขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร

การเปรียบเทียบการเกิดรอยย่นจะพิจารณาจากการเกิดการอัดที่ผิวของชิ้นงานดังนั้น จากผลการทดลองในบทที่ 3 ในการจำลองการขึ้นรูปและการขึ้นรูปผลจากการขึ้นรูปจริงในบทที่ 4 แสดงในภาพที่ 5.2



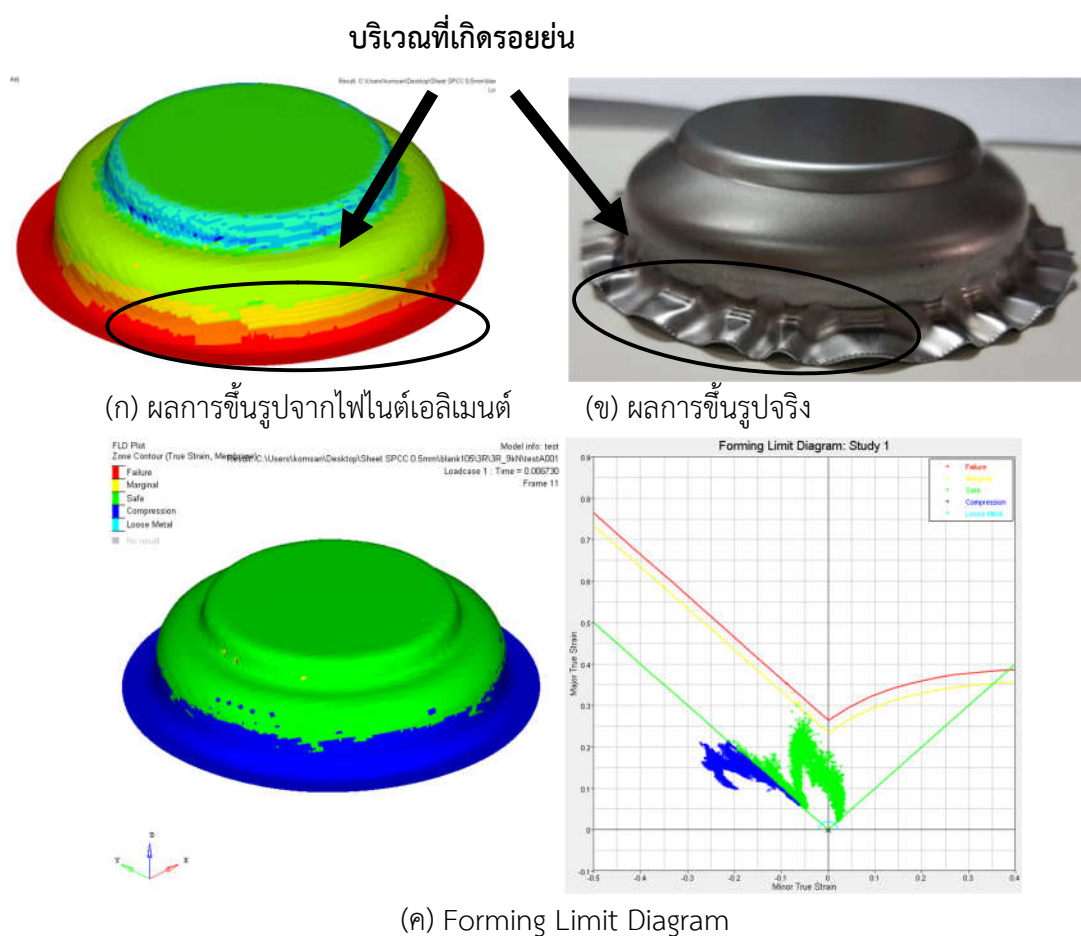
ภาพที่ 5.2 การเปรียบเทียบผลการขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 6 kN

จากภาพที่ 5.2 เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์และการขึ้นรูปชิ้นงานจริงผล ที่แรงจับยึด 6 kN จากภาพแสดงให้เห็นว่าบริเวณส่วนบนและขอบข้างด้านบนนั้นจะมี

ผิวที่เรียบซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่เกิดเปลี่ยนแปลงใด ๆ บริเวณที่เกิดรอยย่นอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน โดยจะอยู่ที่บริเวณขอบข้างของชิ้นงาน

### การเปรียบเทียบผลของการขึ้นรูปที่ขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่า 105 มิลลิเมตร

การเปรียบเทียบการเกิดรอยย่นจะพิจารณาจากการเกิดการอัดที่ผิวของชิ้นงานดั่งนั้น จากผลการทดลองในบทที่ 3 ในการจำลองการขึ้นรูปและการขึ้นรูปผลจากการขึ้นรูปจริงในบทที่ 4 แสดงในภาพที่ 5.3



ภาพที่ 5.3 การเปรียบเทียบผลการขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานเปล่า 105 มิลลิเมตร ที่แรงจับยึด 9 kN

จากภาพที่ 5.3 เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์และจากการขึ้นรูปชิ้นงานจริงผล ที่แรงจับยึด 9 kN จากภาพแสดงให้เห็นว่าบริเวณส่วนบนและขอบข้างด้านบนนั้นจะมีผิวที่เรียบซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่เกิดเปลี่ยนแปลงใด ๆ แต่มีระยะความลึกที่ต่ำกว่าระยะที่ต้องการบริเวณที่เกิดรอยย่นอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันโดยจะอยู่ที่บริเวณขอบข้างของชิ้นงาน

### การหาขนาดแผ่นขึ้นงานเปล่าและการกำหนดรัศมีตาย

จากผลการเปรียบเทียบการจำลองขึ้นรูปโดยไฟไนต์เอลิเมนต์กับการขึ้นรูปจริงทำให้ทราบถึงปัจจัยต่างที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปลึก ซึ่งได้แก่ ขนาดของแผ่นขึ้นงานเปล่า และรัศมีตาย โดยสรุปได้ดังนี้

#### ขนาดของแผ่นขึ้นงานเปล่า

จากการจำลองการขึ้นรูป โดยกำหนดขนาดเริ่มต้นจากขนาดของแผ่นตามการคลี่ขึ้นงาน ออกซึ่งได้เท่ากับ 85 มิลลิเมตร และเพิ่มขนาดเป็น 95 และ 105 มิลลิเมตร ตามลำดับ และทำการจำลองการขึ้นรูปโดยกำหนดให้ขนาดของรัศมีตายเท่ากับค่าที่ได้จากการคำนวณคือมีรัศมีเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ผลจากการจำลองจะได้ว่าขนาดที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปเท่ากับ 95 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่ทำให้ใช้วัสดุน้อยโดยได้ขึ้นงานตามที่ต้องการ

#### การกำหนดรัศมีตาย

เมื่อได้ขนาดของแผ่นขึ้นงานเปล่ามีเหมาะสมนำไปหาขนาดของรัศมีตาย โดยเพิ่มขนาดจาก 3 มิลลิเมตร เป็น 4 และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองได้ว่า เมื่อเพิ่มรัศมีตายขึ้นงาน มีโอกาสที่จะเกิดรอยย่นที่ผิวของขึ้นงานมากขึ้นด้วย จากผลการทดสอบรัศมีตายที่เหมาะสมการขึ้นรูปเท่ากับ 3 มิลลิเมตร

### การหาขนาดแรงจับยึดขึ้นงาน

ในการจำลองการขึ้นรูปโดยไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถกำหนดแรงในการจับยึดขึ้นงานได้ในหลายขนาด ซึ่งในการกำหนดแรงในเบื้องต้นจะใช้แรงที่ได้จากการคำนวณโดยค่าที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นเหล็ก และขนาดของแผ่นขึ้นงานเปล่า จากนั้นทำการเพิ่มและลดแรงในการจับยึดเพื่อหาผลการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุด ในการจำลองการขึ้นรูปและการทดสอบขึ้นรูปจริงแรงในการจับยึดที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 6 kN ที่ขนาดแผ่นขึ้นงานเปล่าเท่ากับ 95 มิลลิเมตร

## 5.2 สรุปผล

### สรุปผลปัจจัยต่าง ๆ ในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก

จากขึ้นงานต้นแบบที่เป็นผาครอบเหล็กที่นำมาเป็นกรณีศึกษาทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบแม่พิมพ์ซึ่งประกอบไปด้วย

- 1) ความหนาของขึ้นงานที่ต้องการจะเป็นตัวกำหนดระยะช่องว่างแม่พิมพ์โดยความหนาเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร จะได้ระยะช่องว่างแม่พิมพ์เท่ากับ 0.66 มิลลิเมตร จากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และทดสอบขึ้นรูปจริงผิวของขึ้นงานจะมีการอัดตัวในขณะเคลื่อนที่เข้าแม่พิมพ์ ซึ่งถ้ากำหนดระยะห่างน้อยเกินไปเมื่อสิ้นกระบวนการขึ้นงานจะติดที่แม่พิมพ์ (ตาย) อาจทำให้เกิดความเสียหายกับแม่พิมพ์ได้ จากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ทำให้ทราบถึงความหนาสูงสุดที่จะเกิดขึ้นโดยความ

หนาสูงสุดที่ได้เท่ากับ 0.5754 มิลลิเมตร และขนาดน้อยกว่าระยะช่องว่างแม่พิมพ์ที่กำหนดทำให้ลดโอกาสที่จะทำให้ชิ้นงานติดแม่พิมพ์หรือทำให้แม่พิมพ์เกิดความเสียหายได้

### **สรุปผลการเปรียบเทียบการใช้คุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่นโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไฟไนต์**

การกำหนดแรงในการจับยึดชิ้นงานที่เหมาะสมมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ซึ่งแรงที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของชิ้นงาน คุณสมบัติทางกลของโลหะ ขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่า อัตราส่วนการดึงขึ้นรูปและความหนาของชิ้นงาน ดังนั้นการจำลองการขึ้นรูปโดยระเบียบไฟไฟไนต์อิเล็กเมนต์โดยกำหนดแรงในการจับยึดชิ้นงานที่ขนาดต่าง ๆ แล้วนำผลมาเปรียบเทียบในการหาแรงในการยึดชิ้นงาน ขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่า และรัศมีตาย ที่เหมาะสมกับชิ้นงานนั้นๆ ซึ่งในการวิจัยในครั้งนี้เมื่อนำผลการจำลองการขึ้นรูปมาพิจารณาจะได้ขนาดของแรงในการจับยึดเท่ากับ 6 kN ที่ขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่า 95 มิลลิเมตร ที่รัศมีตาย 3 มิลลิเมตร และเมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับทดสอบขึ้นรูปจริงมีผลที่ใกล้เคียงกัน

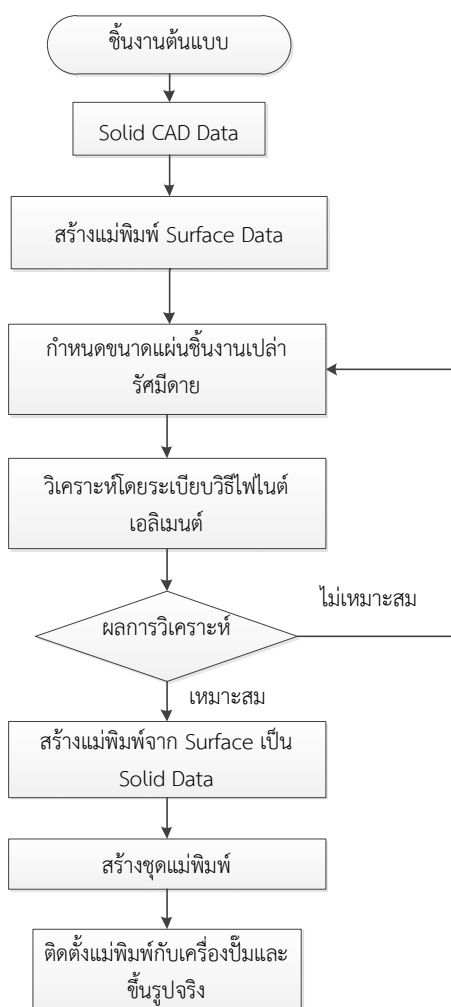
### **สรุปผลอิทธิพลที่มีต่อการเกิดรอยย่น (Wrinkle) และการฉีกขาด (Tearing) ในกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไฟไนต์อิเล็กเมนต์**

จากการจำลองการขึ้นรูปโดยใช้ระเบียบไฟไฟไนต์อิเล็กเมนต์และการทดสอบขึ้นรูปจริงจะเห็นได้ว่าอิทธิพลที่มีผลต่อการเกิดรอยย่น (Wrinkle) และการฉีกขาด (Tearing) คือ

- 1) ขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าถ้ามีขนาดเล็กจนเกินไปผลที่ได้จะทำให้ชิ้นงานเกิดรอยย่น โดยเฉพาะบริเวณใกล้กับรัศมีตายเนื่องจากชิ้นงานไหลเข้าตายเร็วจนเกินไปแต่ถ้ามีขนาดใหญ่จนเกินไปรอยย่นจะเกิดที่ปีกของชิ้นงาน
- 2) แรงจับยึดชิ้นงานต้องมีขนาดที่เหมาะสมถ้าแรงน้อยการเคลื่อนตัวของแผ่นชิ้นงานจะไหลเข้าตายเร็วจนเกินไปทำให้เกิดการอัดตัวของชิ้นงานทำให้เกิดรอยย่นที่ผิวและบริเวณปีกของชิ้นงานหรือมากจนเกินไปจะทำให้การเคลื่อนตัวของชิ้นงานเป็นไปได้อย่างจนทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดซึ่งในการวิจัยในครั้งนี้เกิดการฉีกขาดเฉพาะในการจำลองทางไฟไฟไนต์อิเล็กเมนต์เท่านั้นเนื่องจากในการทดสอบจริงกำลังของเครื่องปั๊มไม่เพียงพอไม่สามารถด้านการเกิดรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานได้จึงไม่พบการฉีกขาดของชิ้นงาน
- 3) รัศมีตายจะกำหนดจากความหนาของชิ้นงานโดยจะได้ขนาดของรัศมีเท่ากับ 2.5 – 5 มิลลิเมตร โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดเป็น 3 ขนาดด้วยกันคือ 3 4 และ 5 มิลลิเมตร จากการจำลองทางไฟไฟไนต์อิเล็กเมนต์พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดของรัศมีตาย ชิ้นงานที่ได้จากการจำลองจะมีโอกาสเกิดรอยย่นที่ผิวและบริเวณรัศมีตายของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้รัศมีตายที่เหมาะสมกับชิ้นงานนี้ที่มีค่าเท่ากับ 3 มิลลิเมตร

### 5.3 อภิปรายผล

การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถหาเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ได้อย่างถูกต้องและยังสามารถทำนายตำแหน่งที่จะเกิดความเสียหายได้ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ E. Nakamachi (1996) และสถาพร ชาทาคม (2546) ที่นำผลที่ดีที่สุดไปใช้ขึ้นรูปจริงและสามารถลดขั้นตอนการผลิตได้ ในส่วนงานวิจัยนี้จะเริ่มจากชิ้นงานต้นแบบ จากนั้นสร้างชิ้นงานในรูปของ Solid Data สร้างแม่พิมพ์โดยกำหนดระยะห่างแม่พิมพ์และรัศมีตายโดยให้อยู่ในรูปของ Surface Data แล้วใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์หาขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่า วิเคราะห์หาขนาดของรัศมีตายและแรงจับยึดชิ้นงานซึ่งขั้นตอนนี้สามารถวิเคราะห์ไปพร้อมกันได้ เมื่อได้เงื่อนไขต่าง ๆ ของกระบวนการแล้วนำข้อมูลเหล่านั้นไปสร้างชุดแม่พิมพ์ ซึ่งขั้นตอนการดำเนินการแสดงในภาพที่ 5.4 ในการสร้างชุดแม่พิมพ์นั้นจะต้องออกแบบและกำหนดรายละเอียดให้เหมาะสมกับเครื่องปั๊มที่จะใช้งานนั้น ๆ



ภาพที่ 5.4 การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการดัดขึ้นรูปล็กโลหะ

#### 5.4 ข้อเสนอแนะ

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูป ลีกลโลหะแผ่น โดยจะนำผลการจำลองการขึ้นรูปและการประมวลทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อเงื่อนไขต่าง ๆ ในการออกแบบแม่พิมพ์ และกระบวนการขึ้นรูป เพื่อลดขั้นตอนการลองผิดลองถูกในการทำงาน แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการขึ้นรูปยังมีเงื่อนไขอื่น ๆ อีกที่ยังไม่ได้กล่าวถึง เช่น ความร้อนของชิ้นงานมีต่อการขึ้นรูป ความเร็วในการขึ้นรูป สารหล่อลื่นที่ใช้ในกระบวนการ และการกำหนด Draw Bead และร่วมไปถึงลักษณะรูปทรงของชิ้นงานที่แตกต่างกัน



## บรรณานุกรม

- คมสันต์ งามข้า.(2550). **ขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา.** สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. กรุงเทพฯ.
- ชลธิ์ ไสยวงศ์. (2004). Cutting tools, Abrasive, Machine tools technology. Metalworking Update. The Engineering Magazine for Manufacturing. November.
- ชัยยศ บุรณะชีพ. (2549). **การวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นโดยแผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป.** วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพฯ. 2549.
- ชาญ ถนัดงาน. (2547). **เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะพื้นฐานและการขึ้นรูปโลหะแผ่น.** ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพฯ.
- เดช พุทธเจริญทอง. (2548). **ทฤษฎีพลาสติกซิตีและการเปลี่ยนรูปถาวร.** กรุงเทพมหานคร. ศูนย์ส่งเสริมกรุงเทพ. 9-93-9-94.
- ทวีภักดิ์ บุรณัติ.(2006). **การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ย้อนกลับในการขึ้นรูปโลหะแผ่น.** The 1<sup>st</sup> Production and Innovation National Conference PRI NC.
- ธเนศ เมฆฉาย, สมพงษ์ อีระคานนท์ และ ชานนท์ สุขตาอยู่. (2539). **ทฤษฎีการดึงขึ้นรูปลึก (Deep Drawing).** สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ. กรุงเทพฯ.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2550). **ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม.** ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วารุณี เปรมานนท์ และพงศ์พันธ์ แก้วดาตพทย์. (2552). **การออกแบบแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก. แม่พิมพ์โลหะแผ่น.** สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ.
- ไมตรี กมลรัตน์พิกุลธิ์. (2550). **การวิเคราะห์ปัญหาการฉีกขาดและรอยย่นในงานขึ้นรูปโลหะโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพฯ.

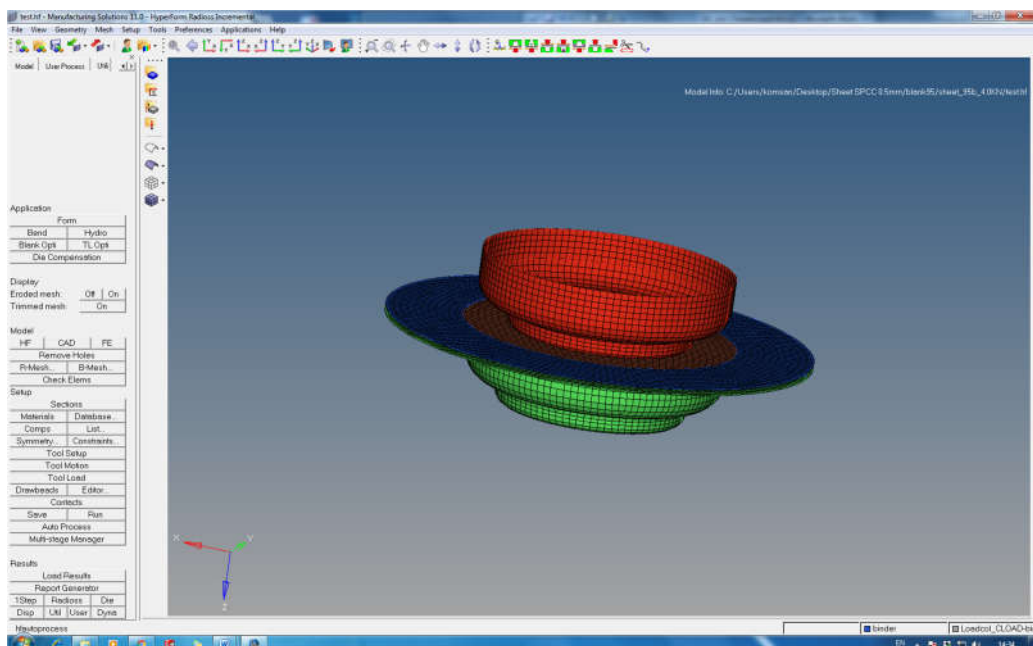
- สถาพร ชาดาคม. (2546) การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การขึ้นรูปแผ่นรองเครื่องยนต์เพื่อ  
แก้ปัญหาการฉีกขาด และรอยย่น. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17. ปราจีนบุรี.
- สวัสดิ์ โสตามุข. (2550). การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพ  
ขีดจำกัดการขึ้นรูป. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย  
ศรีนครินทรวิโรฒ. กรุงเทพฯ.
- A. Le Port, F. Toussaint and R. Arrieux. (2009). **Finite element study and sensitive analysis of the deep-drawing formability of commercially pure titanium.** Int J Mater Form. Springer. 2009. 2:121-129.
- ASTM. (1998). **Standard Test Method for Plastic Strain Ratio  $r$  for Sheet Metal.** American Association State. pp. 487 – 493.
- Banabic D. et al. (2000). **Formability of Metallic Materials.** Germany. Springer. pp. 189-209.
- E. Nakamachi. (1996). **Static-Explicit Elastic Plastic Finite Element Simulation and Virtual Manufacturing of Sheet Metal Forming.** Engineering Computations. Vol. 13. No. 2/3/4. pp. 283-307.
- John O. Hallquist (2006). **LS-DYNA Theory Manual**, March 2006.
- G. Oehler and F. Kaiser. (1973) **Blanking, Punching and Drawing Tool.** 6<sup>th</sup> Edition Berlin/Heidenberg/New York. Springer.
- George E. Dieter. (1988). **Mechanical Metallurgy.** McGraw – Hill Book Company Inc. pp. 322 – 324.
- Goodwin G.M. (1968). **Application of Strain Analysis to Sheet Metal Problems in the Press Shop**, SAE Paper 680093.
- K. Hariharan. C. Balaji. (2009). Material optimization: **A case study using sheet metal-forming analysis.** Journal of Materials Processing Technology 209.pp. 324-331.
- Keeler SP. (1961). **Plastic instability and fracture in sheet stretched over rigid punches.**, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technologo, Boston.
- Kurt Lange. (1985). **Handbook of Metal Forming.** McGraw-Hill Book Company Inc.
- Marciniak Z. **Mechanics of Sheet Metal Forming.** Second edition published by Butterworth-Heinemann 2002.

- R. Padmanabhan. (2007). **Effect of anisotropy on the deep-drawing of mild steel and dual-phase steel tai-welded blanks.** Journal of Materials Processing Technology 184. pp. 288-293.
- W. Sellin. (1931). **Handbook of Drawing Technology.** Berlin. Springer.
- William F. Hosford and Robert M. Caddell. (1993). **Metal Forming: Mechanics and Metallurgy.** Prentice-Hall Inc. New Jersey. pp. 273-277.

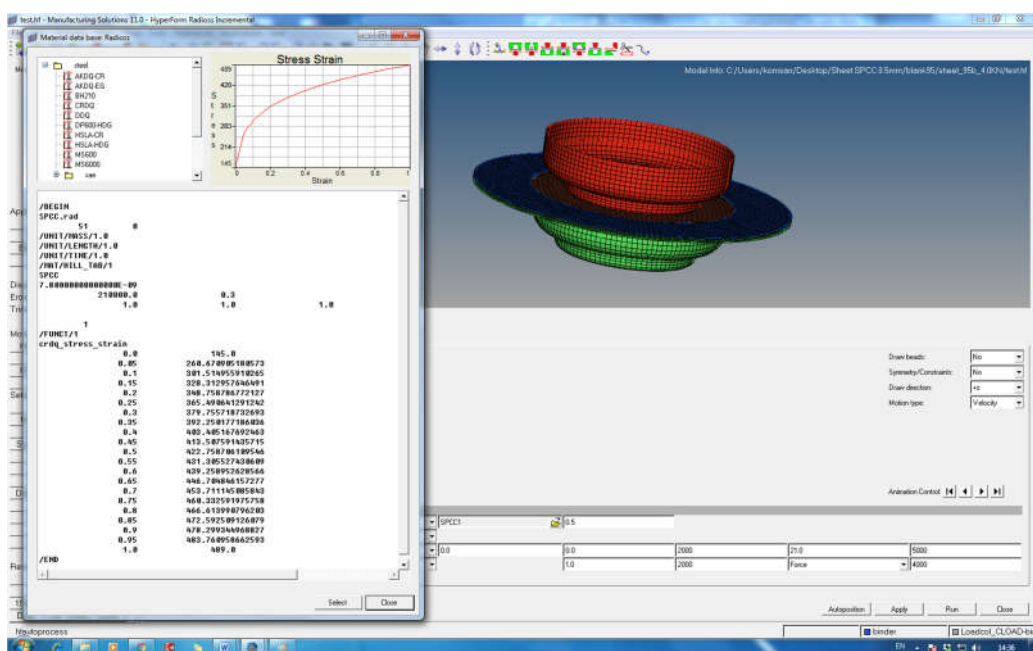
ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

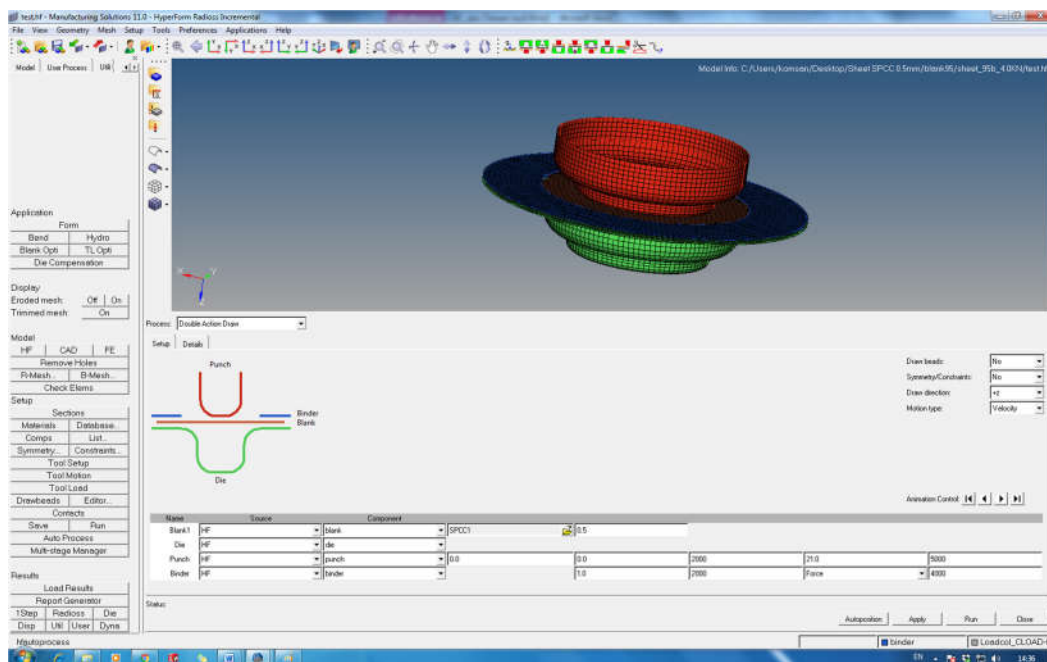
การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์



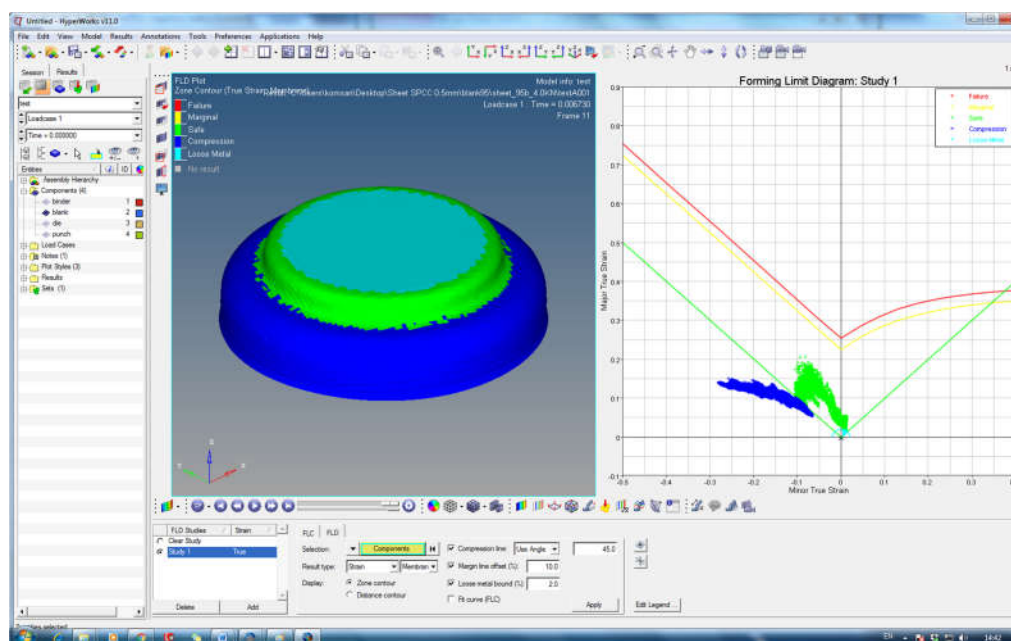
ภาพที่ ก.1 การกำหนดเอลิเมนต์ของแบบจำลองการขึ้นรูป



ภาพที่ ก.2 การกำหนดคุณสมบัติของแผ่นขึ้นงานเปล่า



ภาพที่ ก.3 การกำหนดเงื่อนไขการขึ้นรูป

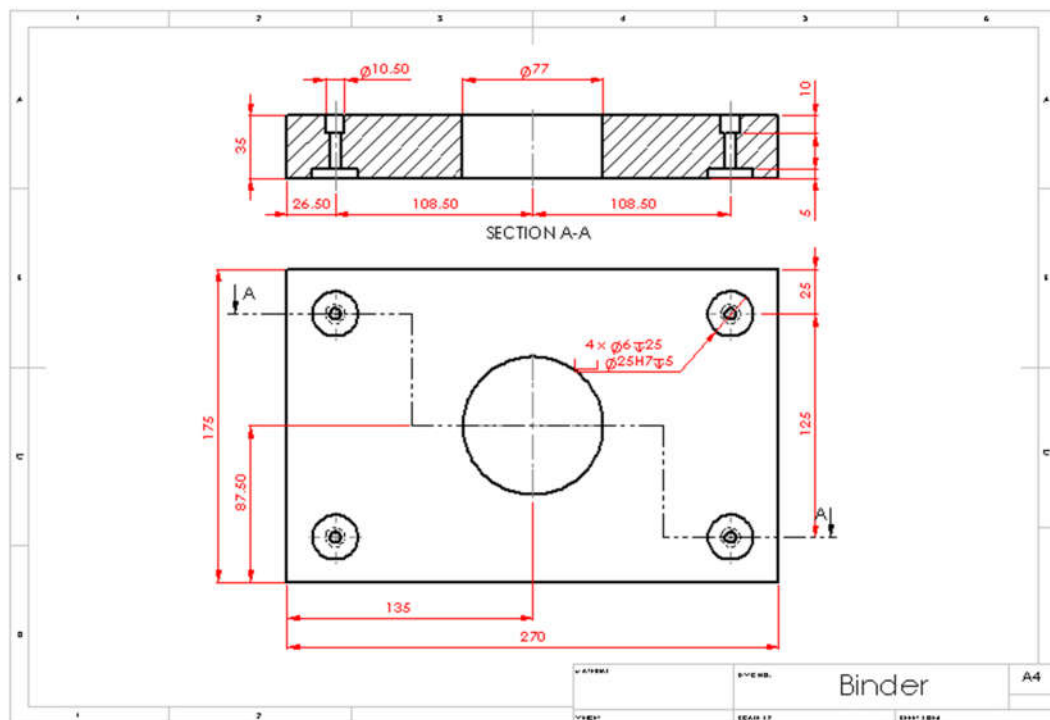


ภาพที่ ก.4 การแสดงผลการขึ้นรูปและแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

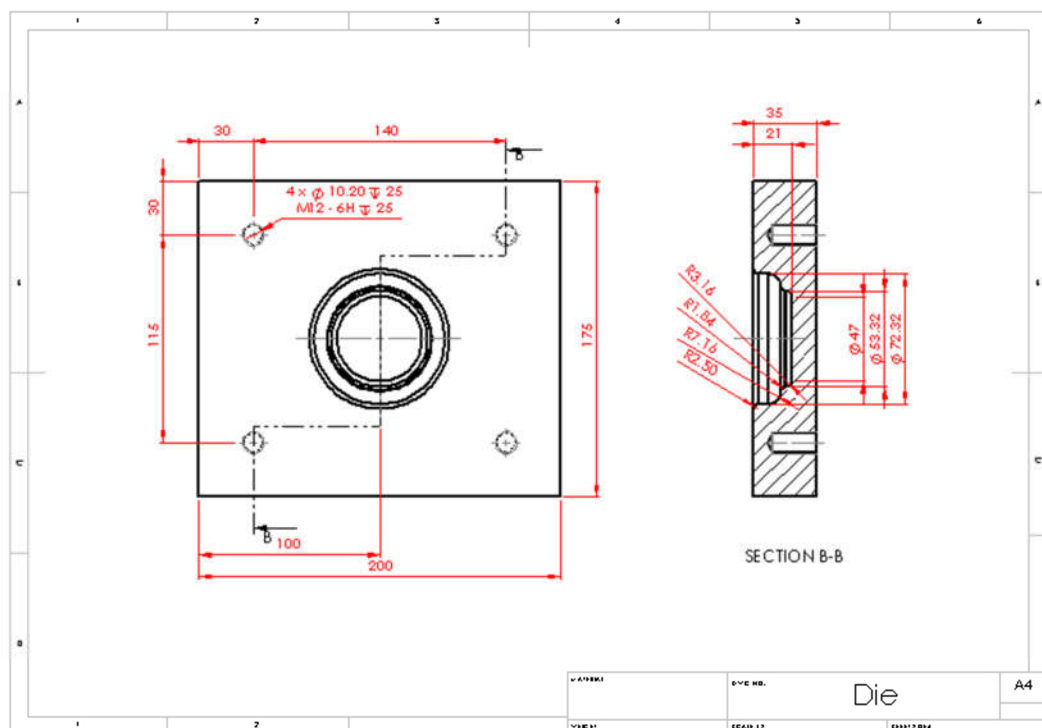
## ภาคผนวก ข

การออกแบบรายละเอียดแม่พิมพ์ของกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก

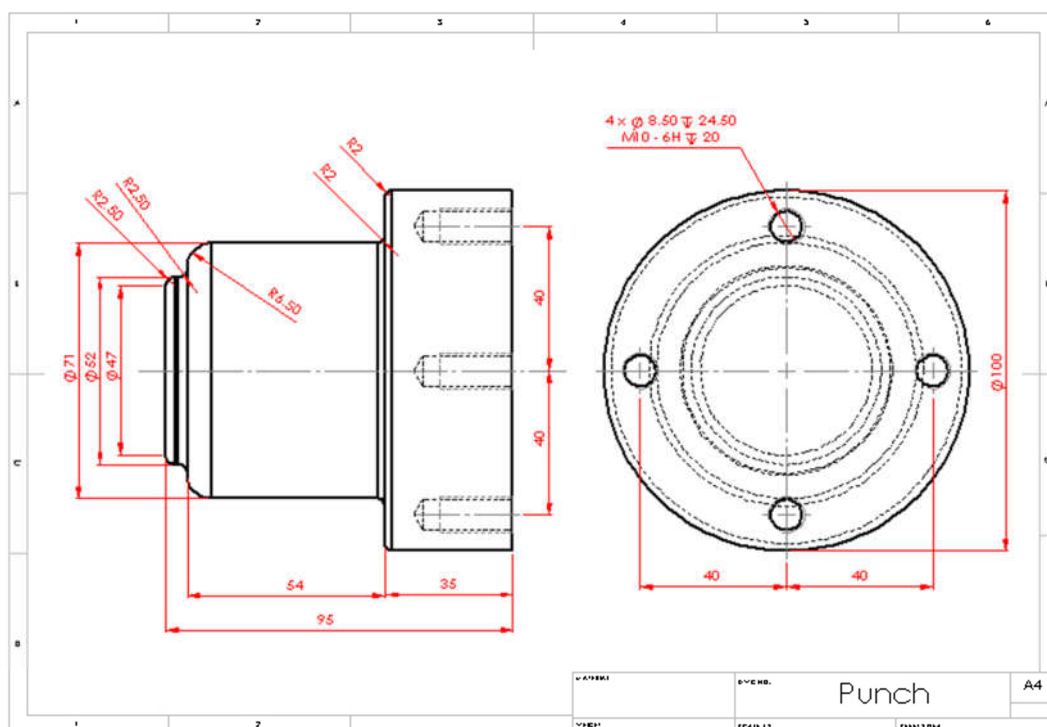




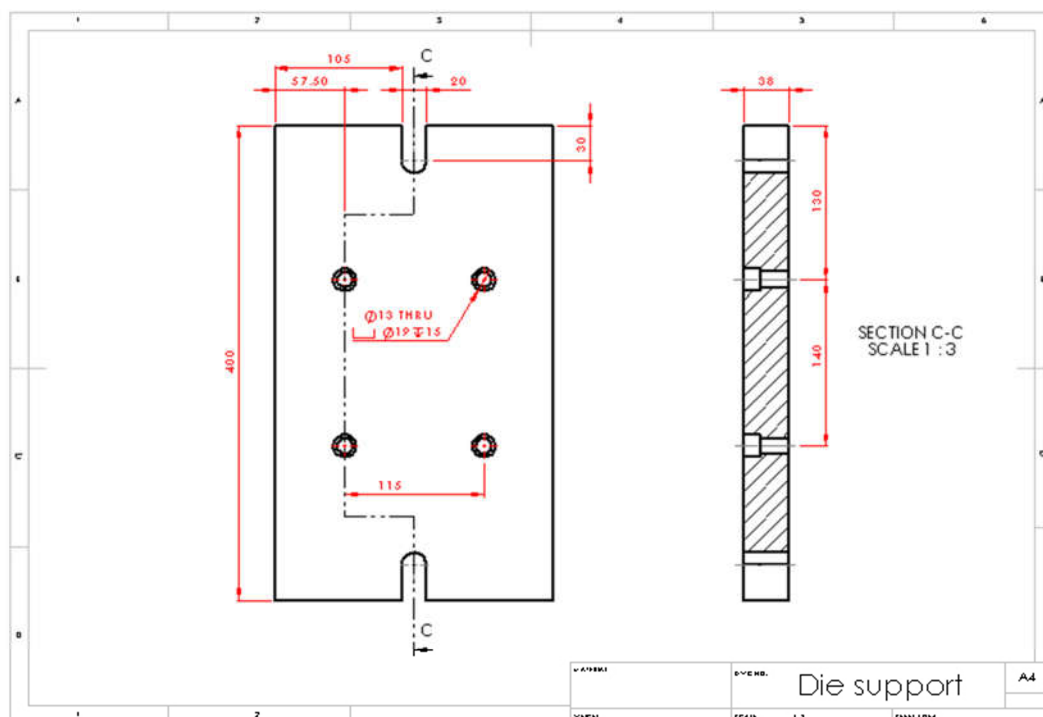
ภาพที่ ข.1 การออกแบบรายละเอียดของแผ่นจับยึดชิ้นงาน



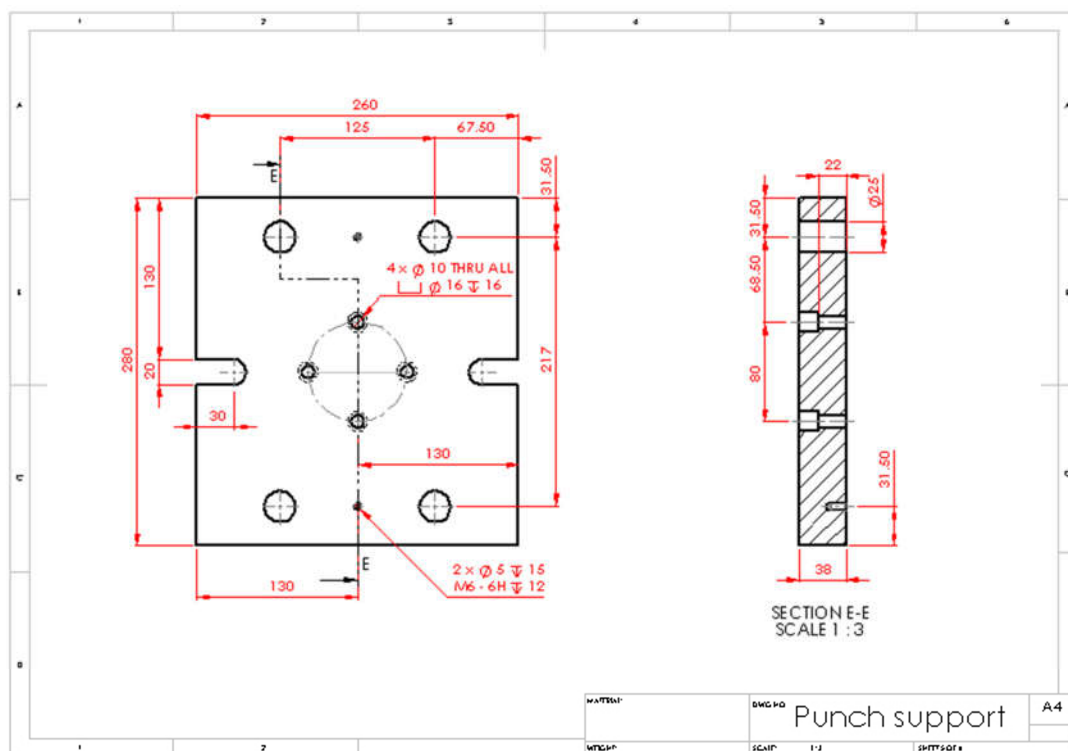
ภาพที่ ข.2 การออกแบบรายละเอียดของแม่พิมพ์ตาย



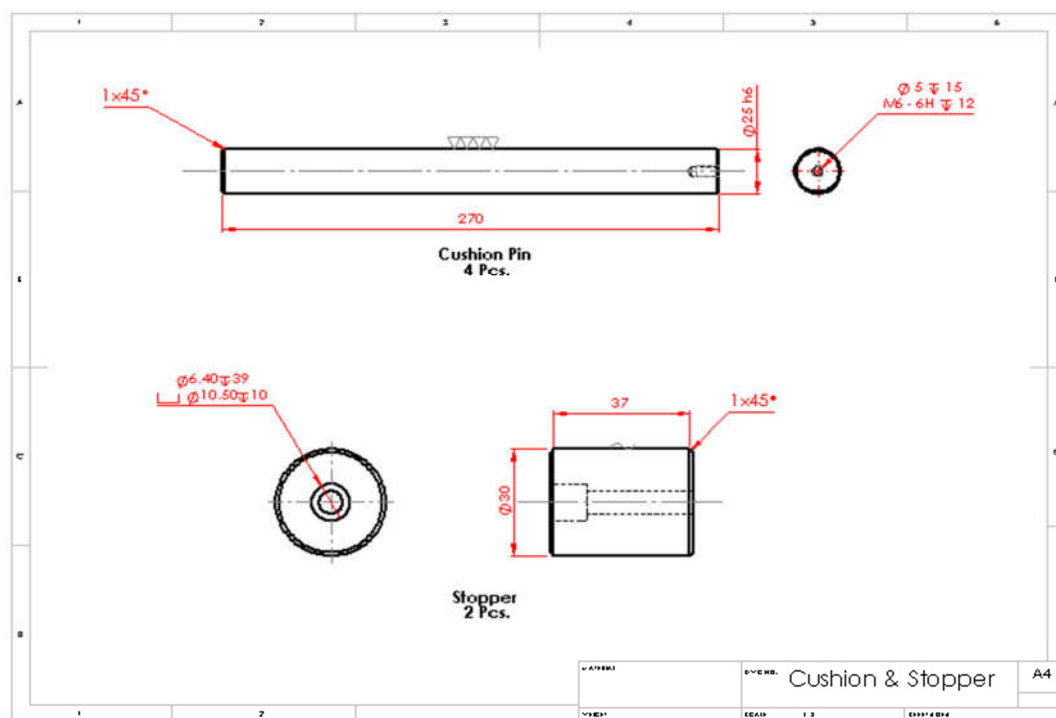
ภาพที่ ข.3 การออกแบบรายละเอียดของพินซ์



ภาพที่ ข.4 การออกแบบรายละเอียดของแท่นจับยึดตาย



ภาพที่ ข.5 การออกแบบรายละเอียดของแท่นจับยึดพินซ์



ภาพที่ ข.6 การออกแบบรายละเอียด Cushion และ Stopper

## ประวัตินักวิจัย

### หัวหน้าโครงการวิจัย

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายคมสันต์ วงศ์พงษ์สินธุ์  
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Komsan Wongkalasin
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3479900163681
- ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์  
เงินเดือน (บาท) 31,320  
เวลาที่ใช้ทำวิจัย (ชั่วโมง : สัปดาห์) 20 ชั่วโมง
- วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม  
เลขที่ 129 หมู่ 7 ถนนศรีสงคราม - ท่าดอกแก้ว ตำบลศรีสงคราม อำเภอศรีสงคราม นครพนม  
48150 โทรศัพท์ 042599649 โทรสาร 042599649  
โทรศัพท์มือถือ 088-5108972 Email : komsan@npu.ac.th
- ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับการศึกษา	อักษรย่อปริญญาและชื่อเต็ม	สาขาวิชา	วิชาเอก	ชื่อสถาบันการศึกษา
2545	ปริญญาตรี	วศ.บ. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	วิศวกรรม เกษตร	เครื่องจักรกล เกษตร	มหาวิทยาลัย ขอนแก่น
2550	ปริญญาโท	วศ.ม. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	วิศวกรรม เครื่องกล	วิศวกรรม เครื่องกล	มหาวิทยาลัย ขอนแก่น

- สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
  - การออกแบบ ติดตั้ง และซ่อมบำรุงเครื่องจักรกลในงานอุตสาหกรรมการผลิต
  - การวางแผนกระบวนการซ่อมบำรุงเครื่องจักรในงานอุตสาหกรรม
  - การออกแบบวัสดุด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
  - การออกแบบเครื่องจักรและเครื่องมือสำหรับอุตสาหกรรมแม่พิมพ์
  - การซ่อมบำรุง และควบคุมระบบการทำงานของเครื่องผลิตไอน้ำ (Boiler)
  - วิศวกรควบคุมและออกแบบงานวิศวกรรมเครื่องกลโดยมีใบอนุญาตจากสภาวิศวกร

ประกอบวิชาชีพ เลขทะเบียน ภค.25869

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัยหัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : ชื่อแผนงานวิจัย

-

หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย

-

ผู้ร่วมวิจัยโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย

- โครงการ “การออกแบบและพัฒนาสร้างเครื่องสูบน้ำบาดาลแบบจุ่ม โดยใช้ระบบส่งกำลังจากเครื่องยนต์อเนกประสงค์ต้นแบบเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์
- การศึกษาการเกิดไบโอแก๊สจากของเสียจากกระเพาะอาหารส่วนหน้าของวัวที่ได้จากโรงฆ่าสัตว์
- ผลของมูลไบโอมิตที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องหันหญ้าอาหารสัตว์แบบไบโอมิตหมูเหวี่ยงแกนนอน

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย)                      ว่าที่ร้อยตรีวัชรินทร์ เขียวไกร  
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ)                      Acting Sub.Lt Vatcharin Keowkari
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน    3400101307552
3. ตำแหน่งปัจจุบัน            ครูชำนาญการ ระดับ 7  
เวลาที่ใช้ทำวิจัย (ชั่วโมง : สัปดาห์)    10 ชั่วโมง
4. คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครพนม  
เลขที่ 103 หมู่ที่ 3 ต.ขามเต่า อ.เมือง จ.นครพนม 48000 โทร 0-4254-3222  
โทรศัพท์มือถือ 081-3807095 Email : [Wat123\\_kob@hotmail.com](mailto:Wat123_kob@hotmail.com)

## 5. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับการศึกษา	อักษรย่อปริญญาและชื่อเต็ม	สาขาวิชา	วิชาเอก	ชื่อสถาบันการศึกษา
2534	ปริญญาตรี	วท.บ. วิทยาศาสตร์บัณฑิต	เกษตรกล วิธาน	เกษตรกล วิธาน	คณะเกษตรศาสตร์ บางพระ
2551	ปริญญาโท	วศ.ม. วิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต	วิศวกรรม เกษตร	วิศวกรรม เครื่องจักรกล เกษตร	มหาวิทยาลัย ขอนแก่น

## 6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

- เครื่องจักรกลเกษตร เกษตรชลประทาน

## 7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัยหัวหน้าโครงการวิจัย หรือร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : ชื่อแผนงานวิจัย

-

หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย

- การทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องอัดฟ่อน
- เครื่องอัดฟางเศรษฐกิจพอเพียง
- ผลของมูลใบมีดที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องหั่นหญ้าอาหารสัตว์แบบใบมีดหมุนเหวี่ยงแกนนอน

ร่วมวิจัยโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย

- การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึงโลหะแผ่น

แบบสรุปผู้บริหาร  
(Executive Summary)

\*\*\*\*\*

1. รายละเอียดเกี่ยวกับโครงการวิจัย / แผนงานวิจัย

1.1 ชื่อเรื่อง

การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกโลหะแผ่น  
Application of Finite Element Method for Deep Drawing Process of Sheet Metal

1.2 ชื่อคณะผู้วิจัย (นาย นาง นางสาว)

1. นายคมสันต์ วงศ์กาฬสินธุ์

หน่วยงานที่สังกัด วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม  
เลขที่ 129 หมู่ 7 ถนนศรีสงคราม – ท่าดอกแก้ว ตำบลศรีสงคราม อำเภอศรีสงคราม นครพนม 48150  
เลขโทรศัพท์ 042599649 โทรสาร 042599649

2. นายวัชรินทร์ เขียวไกร

หน่วยงานที่สังกัด คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครพนม  
เลขที่ 103 หมู่ที่ 3 ต.ขามเฒ่า อ.เมือง จ.นครพนม 48000  
เลขโทรศัพท์ 042543222 โทรสาร 042543222

1.3 งบประมาณและระยะเวลาทำการวิจัย

ได้รับงบประมาณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 งบประมาณที่ได้รับ 250,000 บาท  
ระยะเวลาดำเนินการ ตั้งแต่ กุมภาพันธ์ 2558 ถึง มกราคม 2560

2. สรุปโครงการวิจัย

ในภาคอุตสาหกรรมของประเทศมีการใช้ชิ้นส่วนที่ผลิตจากกระบวนการดึงขึ้นรูปจากโลหะแผ่นโดยชิ้นงานที่ได้จะเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ หรือเป็นเครื่องมือในการทำงาน โดยส่วนใหญ่การผลิตชิ้นส่วนเหล่านี้จะเป็นกลุ่มของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมซึ่งในการผลิตนั้นยังอาศัยการลองผิดลองถูกและปัญหาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกส่วนใหญ่คือการเกิดรอยย่น และการฉีกขาดของชิ้นงาน ปัญหาเรื่องการหาขนาดของแผ่นขึ้นงานเปล่า และการแรงจذبยึดชิ้นงาน ซึ่งงานวิจัยนี้จะเป็นการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกโลหะแผ่น และศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก เปรียบเทียบการใช้คุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่นโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และอิทธิพลที่มีผลต่อการเกิดรอยย่น (Wrinkle) และการฉีกขาด (Tearing) ของ

ชิ้นงาน โดยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำการวิเคราะห์และจำลองการกระบวนกรขึ้นรูปแล้วนำผลนั้นไปออกแบบชุดแม่พิมพ์เพื่อไปทำการทดสอบขึ้นรูปจริง นำผลที่ได้จากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบขึ้นรูปจริงมาเปรียบเทียบ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าที่ได้จากการวิเคราะห์เมื่อนำไปขึ้นรูปจริงได้ผลของชิ้นงานตามที่ต้องการ และสามารถหาแรงในการจับยึดชิ้นงานได้เหมาะสม และผลอีกประการคือการเกิดรอยย่นชิ้นงานนั้นเกิดขึ้นในบริเวณเดียวกันกับชิ้นงานที่ได้จากการจำลองการขึ้นรูป กลุ่มเป้าหมายและประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการคือกลุ่มของวิศวกรที่ประกอบกิจการขึ้นรูปโลหะแผ่นและผู้ที่ต้องการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ซึ่งจะเป็นการช่วยลดเวลา ลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิต และที่สำคัญยังช่วยทำนายความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับชิ้นงานเพื่อหาวิธีปรับแก้ปัญหาต่อไป แต่อย่างไรก็ตาม การที่จะทำให้ผลการวิเคราะห์ได้รวดเร็วขึ้นจำเป็นต้องมีเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพและข้อมูลของวัสดุที่จะใช้ในการขึ้น

### 3. บทคัดย่อภาษาไทยและบทคัดย่อภาษาอังกฤษ (Abstract)

บทคัดย่อ การพัฒนาภาคอุตสาหกรรมในด้านต่าง ๆ ให้มีความทันสมัยไปพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีในปัจจุบันโดยมุ่งเน้นและส่งเสริมให้มีการนำเทคโนโลยีเข้ามาใช้ในการผลิตเพื่อลดต้นทุนโดยเฉพาะ วิศวกรขนาดกลางและขนาดเล็กซึ่งส่วนใหญ่เป็นผู้ผลิตชิ้นงานเพื่อนำไปประกอบเป็นผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนต่าง ๆ ชิ้นงานส่วนใหญ่ได้มาจากกระบวนการดัดขึ้นรูปรีด ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการดัดขึ้นรูปรีดโลหะแผ่นเพื่อช่วยลดขั้นตอนในการผลิตลดการลองผิดลองถูกของกระบวนการ โดยนำผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดไปออกแบบแม่พิมพ์และกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการและทำการทดสอบขึ้นรูปจริงแล้วนำมาเปรียบเทียบผล วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปเป็นเหล็กแผ่น SPCC มาตรฐาน JIS G 3141 ชิ้นงานต้นแบบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 71 mm สูง 19 mm และมีความหนา 0.5 mm จากการวิเคราะห์ทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่าเท่ากับ 95 mm รัศมีตายเท่ากับ 3 mm และแรงในการจับยึดชิ้นงานเท่ากับ 6 kN ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปขึ้นงานนี้ จากข้อมูลที่ได้นำไปออกแบบชุดแม่พิมพ์และทำการทดสอบขึ้นรูปจริง ผลที่ได้ชิ้นงานมีลักษณะตรงกับชิ้นงานที่ได้จากการจำลองและชิ้นงานต้นแบบ การเกิดรอยย่นจะเกิดที่ตำแหน่งบริเวณที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจะเห็นว่าการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาประยุกต์ใช้ในกระบวนการดัดขึ้นรูปรีดสามารถช่วยในการออกแบบชุดแม่พิมพ์ การหาขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าและการหาแรงในการจับยึดชิ้นงานได้ เป็นการช่วยลดเวลาในการลองผิดลองถูกและลดค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงาน

คำสำคัญ : การขึ้นรูปโลหะแผ่น, กระบวนการดัดขึ้นรูปรีด, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



**Abstract** This research was an application of the finite element method of deep drawing process to reduce the steps in the process. The mold was designed from simulation and analysis of deep drawing process. The material JIC G 3141 SPCC was used for molding. The prototype model diameter was 71 mm. height was 19 mm. and the thickness was 0.5 mm. The analysis of finite element method result the suitable diameter of blank sheet was 95 mm. die radius was 3 mm. and the blank force holder was 6 kN. The mold was designed and forming the real model. The comparison result of the real model, prototype model and simulation model were the same shape though the location of tearing and wrinkle. The finding indicated that the application of the finite element method of deep drawing process aided to design the mold, calculate diameter of blank sheet and blank force holder that reduced time and cost.

**Keywords:** Sheet metal forming, Deep drawing process, Finite element method.

## แบบสรุปการวิจัย

\*\*\*\*\*

### 1. รายละเอียดเกี่ยวกับโครงการวิจัย / แผนงานวิจัย

#### 1.1 ชื่อเรื่อง

การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกโลหะแผ่น

Application of Finite Element Method for Deep Drawing Process of Sheet Metal

#### 1.2 ชื่อคณะผู้วิจัย (นาย นาง นางสาว)

##### 1. นายคมสันต์ วงศ์กาฬสินธุ์

หน่วยงานที่สังกัด วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม

เลขที่ 129 หมู่ 7 ถนนศรีสงคราม – ท่าดอกแก้ว ตำบลศรีสงคราม อำเภอศรีสงคราม นครพนม 48150

เลขโทรศัพท์ 042599649 โทรสาร 042599649

##### 2. นายวัชรินทร์ เขียวไกร

หน่วยงานที่สังกัด คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครพนม

เลขที่ 103 หมู่ที่ 3 ต.ขามเฒ่า อ.เมือง จ.นครพนม 48000

เลขโทรศัพท์ 042543222 โทรสาร 042543222

#### 1.3 งบประมาณและระยะเวลาทำการวิจัย

ได้รับงบประมาณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 งบประมาณที่ได้รับ 250,000 บาท

ระยะเวลาทำวิจัย ตั้งแต่ กุมภาพันธ์ 2558 ถึง มกราคม 2560

### 2. ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

วิสาหกิจขนาดกลางและขนาดเล็กล้วนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของระบบเศรษฐกิจของประเทศในระดับมหภาค โดยมีจำนวนประมาณร้อยละ 99 ของธุรกิจทั้งหมด และบทบาทสำคัญในการเป็นฐานรากการพัฒนาที่ยั่งยืน เป็นกลไกหลักในการฟื้นฟูและเสริมสร้างความก้าวหน้าทางเศรษฐกิจรวมทั้งเป็นกลไกในการแก้ไขปัญหาความยากจน โดยมีตัวชี้วัดที่สำคัญได้แก่ การสร้างมูลค่าเพิ่มเฉลี่ยคิดเป็นประมาณร้อยละ 38.2 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ มีมูลค่าการส่งออกโดยตรงคิดเป็นร้อยละ 30.1 ของมูลค่าการส่งออกรวม และการจ้างงานคิดเป็นร้อยละ 76.0 ของการจ้างงานรวมทั้งหมด (สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม:2552) ซึ่งประเทศไทยมีการพัฒนาภาคอุตสาหกรรมในด้านต่าง ๆ ให้มีความทันสมัยไปพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีในปัจจุบันโดยมุ่งเน้นและส่งเสริมให้มีการนำเทคโนโลยีเข้าใช้ในการผลิตเพื่อลดต้นทุนโดยเฉพาะวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดเล็กซึ่งส่วนใหญ่เป็นผู้ผลิตชิ้นงานเพื่อนำไปประกอบเป็นผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนต่าง ๆ ชิ้นงานส่วนใหญ่ได้มาจากการดึงขึ้นรูปลึก (Deep drawing process) จากโลหะแผ่น โดยชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปถ้วยหรือรูปเปลือกหอย ชิ้นงานเหล่านี้จะถูกส่งต่อไปยัง

ผู้ผลิตรายอื่น ๆ เพื่อสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป เช่น ชิ้นส่วนประกอบต่าง ๆ รถยนต์ อุปกรณ์เครื่องประดับ ตกแต่งบ้าน เครื่องมือเครื่องจักรกลการเกษตร เป็นต้น

ในการผลิตชิ้นส่วนจากโลหะแผ่นนั้นกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก (Deep drawing) เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง การศึกษาถึงสมบัติทางกล การออกแบบและกระบวนการผลิตชิ้นส่วนที่ใช้ในอุตสาหกรรมดังกล่าวเพื่อให้ได้ชิ้นส่วนที่มีมาตรฐาน มีความแม่นยำสูง ลดต้นทุนและเวลาในการผลิตลง จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก จากการศึกษาพบว่าข้อบกพร่องของชิ้นงานที่ได้จากการดึงขึ้นรูปในปัจจุบันจะแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะใหญ่ๆ คือ (ธเนศ เมฆาลัยและคณะ, 2539)

- 1) รูปร่างและขนาดไม่ได้ตามต้องการ
- 2) ข้อบกพร่องบนชิ้นงานรวมทั้งบนผิวชิ้นงาน
- 3) คุณสมบัติไม่ตรงกับความต้องการ

ปัจจุบันการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการขึ้นรูปโลหะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการ นำไปสู่การลดข้อบกพร่องของชิ้นงานสามารถลดต้นทุนและเวลาในการผลิต ในงานวิจัยนี้จึงเป็นประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์ถึงกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกของโลหะแผ่นโดยทำการเปรียบเทียบการใช้คุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่นแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์กับคุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่นที่เป็นแบบยืดหยุ่นพลาสติกโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปจริง เพื่อนำไปสู่การพัฒนาและเป็นแนวทางสำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกของโลหะแผ่นในวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมต่อไป เป็นการช่วยเศรษฐกิจของชาติได้อีกทางหนึ่ง

### 3. วัตถุประสงค์การวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการขึ้นรูปลึกโลหะแผ่น โดยมีวัตถุประสงค์เฉพาะของงานวิจัยครั้งนี้คือ

1. ศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก
2. ศึกษาและเปรียบเทียบการใช้คุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่นโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
3. ศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อการเกิดรอยย่น (Wrinkle) และการฉีกขาด (Tearing) ในกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบ

### 4. ระเบียบวิธีการวิจัย (โดยย่อ)

1. วิเคราะห์ออกแบบแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก
2. สร้างแบบจำลองของกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกโลหะแผ่นด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของกระบวนการ
3. กำหนดคุณสมบัติการเปลี่ยนรูปวัสดุเป็น อีลาสติก-พลาสติก (Elastic-Plastic)

4. ศึกษาอิทธิพลของขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่า (Blank sheet) ที่เหมาะสมที่มีผลต่อการเกิดรอยย่นและการฉีกขาด
5. ศึกษาอิทธิพลของแรงจับยึดชิ้นงานที่เหมาะสมที่มีผลต่อการเกิดรอยย่นและการฉีกขาด

## 5. ผลการวิจัย

### 5.1 การหาขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่าและการกำหนดรัศมีตาย

จากผลการเปรียบเทียบการจำลองขึ้นรูปโดยไฟไนต์เอลิเมนต์กับการขึ้นรูปจริงทำให้ทราบถึงปัจจัยต่างที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปลึก ซึ่งได้แก่ ขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่า และรัศมีตาย โดยสรุปได้ดังนี้

#### ขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่า

จากการจำลองการขึ้นรูป โดยกำหนดขนาดเริ่มต้นจากขนาดของแผ่นตามการคลี่ชิ้นงานออกซึ่งได้เท่ากับ 85 มิลลิเมตร และเพิ่มขนาดเป็น 95 และ 105 มิลลิเมตร ตามลำดับ และทำการจำลองการขึ้นรูป โดยกำหนดให้ขนาดของรัศมีตายเท่ากับค่าที่ได้จากการคำนวณคือมีรัศมีเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ผลจากการจำลอง จะได้ว่าขนาดที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปเท่ากับ 95 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่ใช้วัสดุน้อยโดยได้ชิ้นงานตามที่ต้องการ

#### การกำหนดรัศมีตาย

เมื่อได้ขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าที่เหมาะสม นำมาจำลองเพื่อหาขนาดของรัศมีตาย โดยเพิ่มขนาดจาก 3 มิลลิเมตร เป็น 4 และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองได้ว่า เมื่อเพิ่มรัศมีตายชิ้นงานมีโอกาที่จะเกิดรอยย่นที่ผิวของชิ้นงานมากขึ้นด้วย จากผลการทดสอบรัศมีตายที่เหมาะสมการขึ้นรูปเท่ากับ 3 มิลลิเมตร

### 5.2 การหาขนาดแรงจับยึดชิ้นงาน

ในการจำลองการขึ้นรูปโดยไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถกำหนดแรงในการจับยึดชิ้นงานได้ในหลายขนาด ซึ่งในการกำหนดแรงในเบื้องต้นจะใช้แรงที่ได้จากการคำนวณโดยค่าที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นเหล็ก และขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่า จากนั้นทำการเพิ่มและลดแรงในการจับยึด เพื่อหาผลการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุด ในการจำลองการขึ้นรูปและการทดสอบขึ้นรูปจริงแรงในการจับยึดที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 6 kN ที่ขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่าเท่ากับ 95 มิลลิเมตร

## 6. ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย

การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกโลหะแผ่นนั้นทำให้สามารถกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปได้อย่างถูกต้อง และยังสามารถทำนายตำแหน่งที่จะเกิดความเสียหายให้กับชิ้นงานได้ โดยกระบวนการเริ่มจากการพิจารณาชิ้นงานต้นแบบว่าเหมาะสมกับกระบวนการดัดขึ้นรูปลึกหรือไม่ จากนั้นสร้างชิ้นงานให้อยู่ในรูปของ Solid Data สร้างแม่พิมพ์โดยกำหนดระยะห่างระหว่าง

แม่พิมพ์และรัศมีตายซึ่งต้องสร้างให้อยู่ในรูปของ Surface Data กำหนดขนาดของแผ่นขึ้นงานเปล่าแล้วใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์หาขนาดของแผ่นขึ้นงานเปล่าที่เหมาะสม เมื่อหาขนาดของแผ่นขึ้นงานเปล่าที่เหมาะสมได้แล้วจากนั้นทำการวิเคราะห์หาขนาดของรัศมีตายและแรงจับยึดขึ้นงานที่เหมาะสมซึ่งขั้นตอนที่สามารถวิเคราะห์ไปพร้อมกันได้ เมื่อได้เงื่อนไขต่าง ๆ ของกระบวนการแล้วนำข้อมูลเหล่านั้นไปสร้างชุดแม่พิมพ์

## 7. การนำไปใช้ประโยชน์

งานวิจัยนี้เป็นจัดทำขึ้นเพื่อแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม ซึ่งจะช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถลดต้นทุนในการผลิต ลดเวลาในกระบวนการทำงาน หรือใช้เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการออกแบบนวัตกรรมใหม่โดยใช้ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แทนการลองผิดลองถูก หรือการสร้างผลิตภัณฑ์จริงแล้วนำมาประเมินผล ซึ่งกว่าจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ตรงกับความต้องการย่อมทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายมาก ซึ่งทางคณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรม และเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาด้านเศรษฐกิจของประเทศต่อไป