



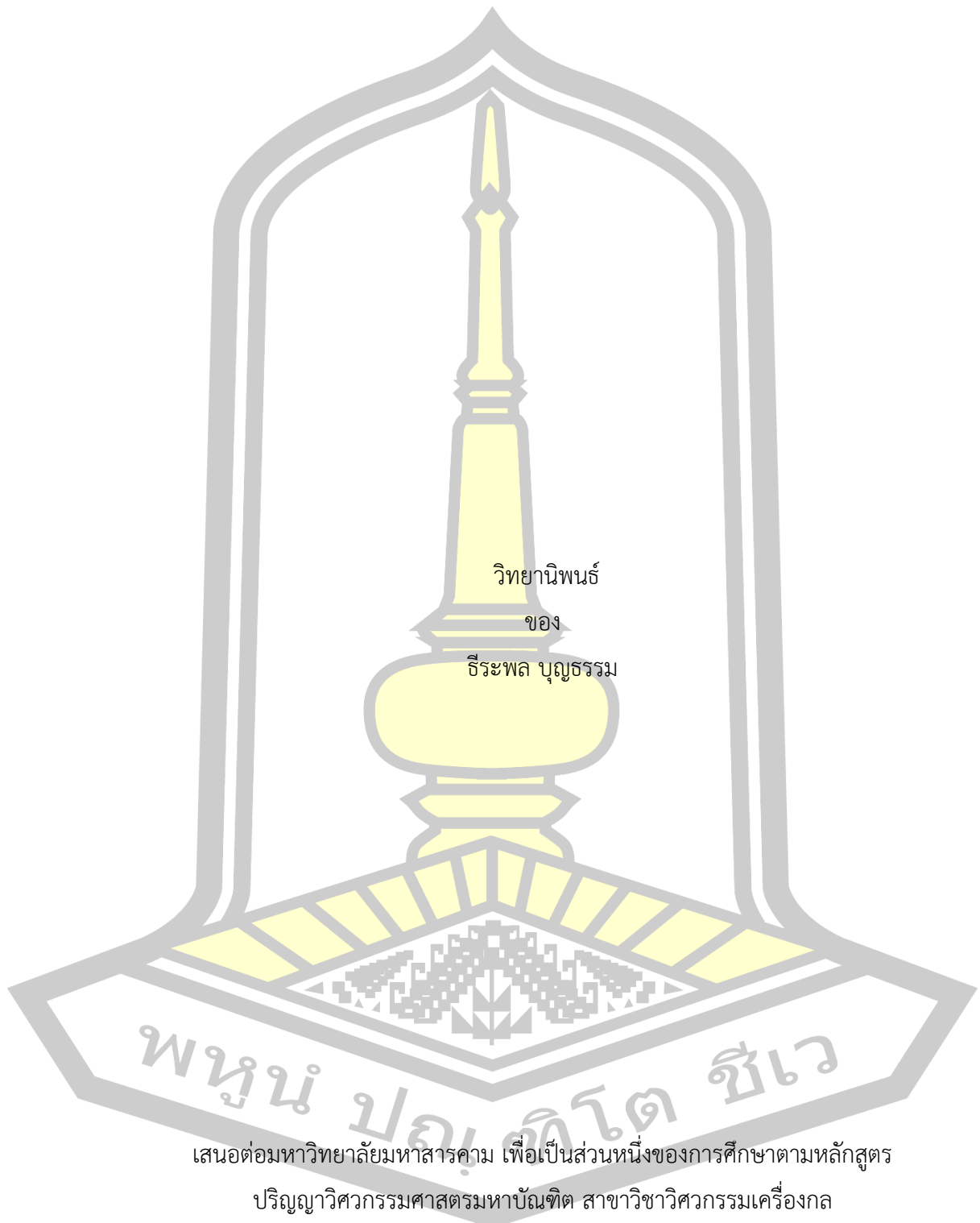
อิทธิพลของแรงดันกลับต่อการยุบตัวของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น

วิทยานิพนธ์
ของ
ธีระพล บุญธรรม

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
พฤษภาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

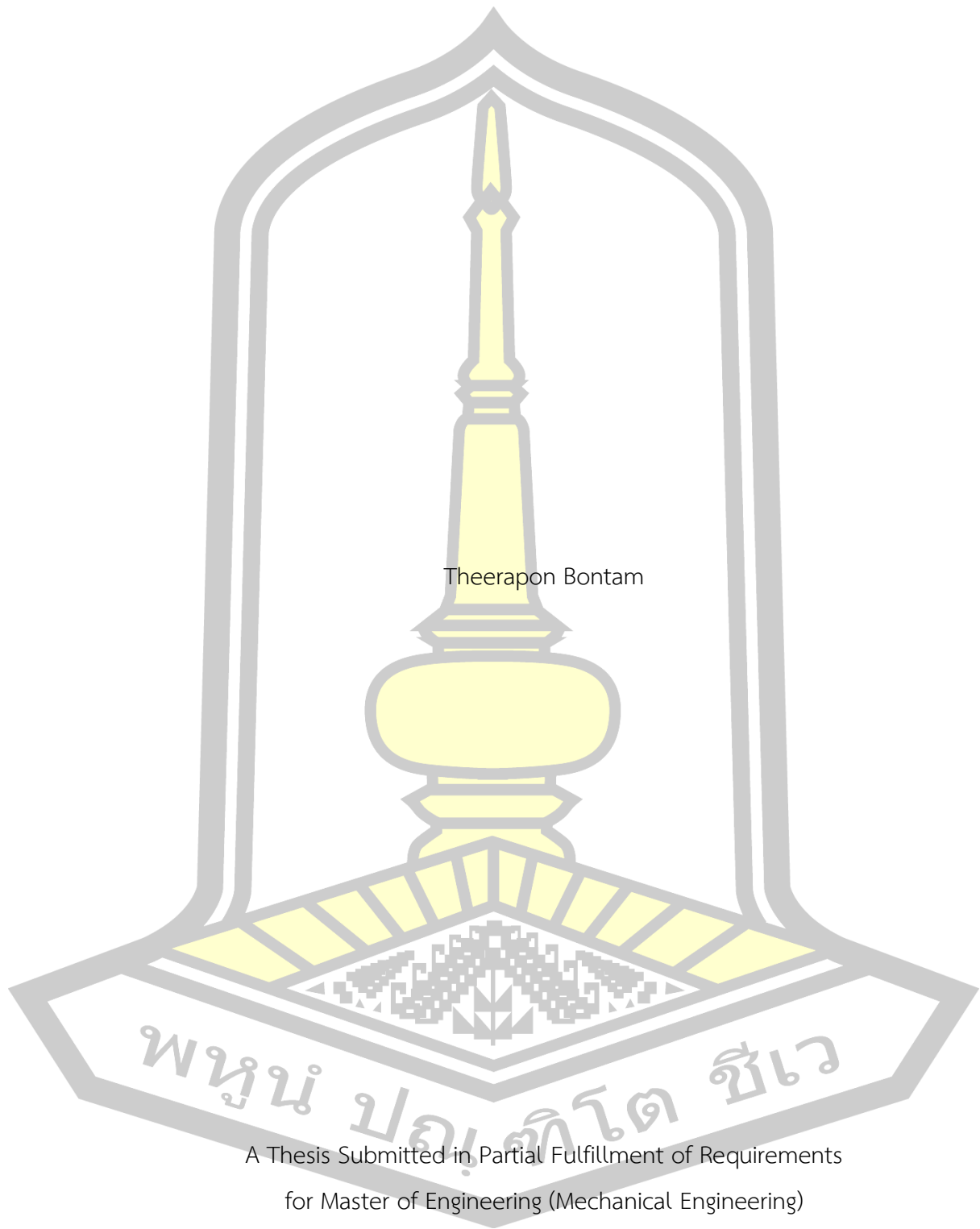
อิทธิพลของแรงดันกลับต่อการยุบตัวของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น



พฤษภาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Effect of Counter Force on Workpiece Shrinkage in Sheet Metal Extrusion Process



Theerapon Bontam

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Mechanical Engineering)

May 2023

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายธีระพล บุญธรรม แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ดร. ฉัตรแก้ว สุริยะภา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. บพิตร บุปผาโชติ)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ธีรพัฒน์ ชมภูคำ)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. อรุมา ลาสนนท์)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

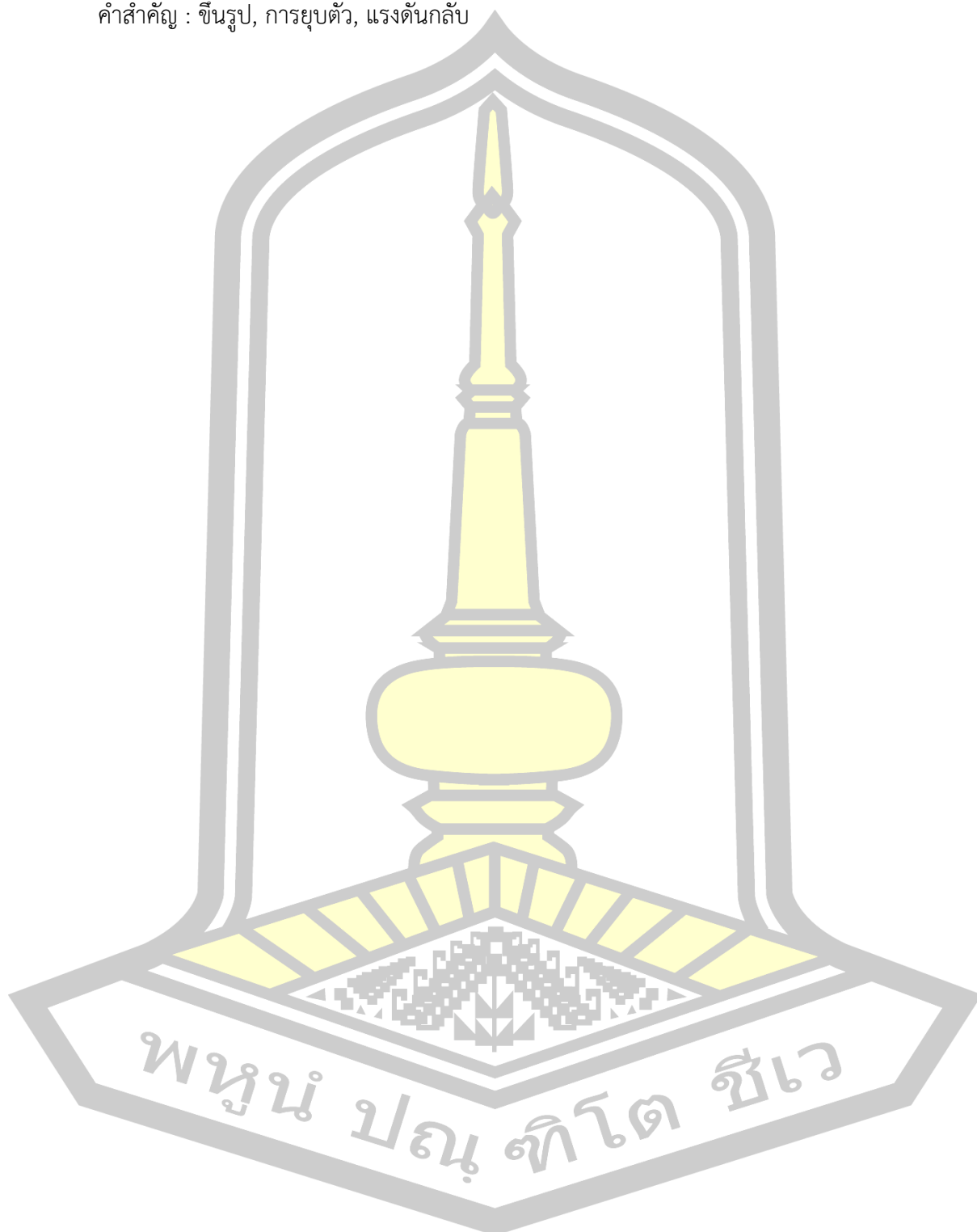
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	อิทธิพลของแรงดันกลับต่อการยุบตัวของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น		
ผู้วิจัย	ธีระพล บุญธรรม		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. บพิตร บุปผาโชติ		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาอิทธิพลของแรงดันกลับต่อคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น 2) เพื่อประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยวิเคราะห์ในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น ผลการวิจัยพบว่า อิทธิพลของแรงดันกลับต่อการยุบตัวของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น ด้วยกระบวนการไฟน์เบลนก์ แรงดันกลับจะมีผลกระทบโดยปรากฏชัดเจนที่มีต่อความเค้นในชิ้นงาน เนื่อวัสดุบริเวณขอบรัศมีของคมตัดจะถูกดันเลื่อนแหวกออกจากกัน ซึ่งส่งผลให้การกระจายตัวของความเค้นไฮโดรสแตติกของเนื่อวัสดุงานในแนวแถบการเฉือนมีค่าการกระจายตัวสูง และเคลื่อนไหลตัวเข้าสู่แผ่นงานได้ง่ายขึ้น การไหลตัวของเนื่อวัสดุในชิ้นงานเนื่อวัสดุจึงเคลื่อนไหลตัวเข้าสู่เนื่อวัสดุงานที่ถูกบังคับขอบเขตจากแรงดันที่มีแรงดันมาก ความเครียดในชิ้นงานสำหรับแรงดันที่มีแรงดันน้อยจะมีผลต่อการกระจายความเครียดในชิ้นงาน สามารถเคลื่อนตัวแทรกเข้าไปในเนื่อวัสดุงานได้สะดวกขึ้น และการยุบตัวในส่วนท้ายของการอัด เมื่อแรงดันที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปลายโค้งลดลง ขณะเดียวกันมีผลทำให้หลุมยุบส่วนท้ายการอัดลดลง โดยเกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหลส่งผลทำให้ปรากฏหลุมชัดเจน เมื่อกำหนดแรงดัน 20 KN พบว่า เกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหลส่งผลทำให้ปรากฏเริ่มมีหลุมยุบส่วนท้ายการอัดโค้งมนเกิดขึ้นกับวัสดุงานเพิ่มมากขึ้น และเมื่อกำหนดแรงดัน 60 KN พบว่า เกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหลมากขึ้นส่งผลทำให้ปรากฏเริ่มมีหลุมยุบส่วนท้ายการอัดเกิดขึ้นกับวัสดุงานเพียงเล็กน้อย โดยถ้ามีแรงต้านมากขึ้นจะเกิดการยุบตัว หรือเกิดหลุมยุบส่วนท้ายการอัดที่เกิดขึ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นลดน้อยลง เพราะว่า แรงต้านของแรงดันสัมผัสกับเนื่อวัสดุมากขึ้น ทำให้ยุบตัวเคลื่อนตัวตามทิศทางของแรงต้านเกิดการยึดตัวแต่นั่นออกด้านข้างเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะทำให้การสร้างความเค้นอัดบริเวณรอบหลุมอัดลดลง และเกิดตายโรลดั้งนั้นหลักการ และการใช้วัสดุในการจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าผลการทดลอง และการจำลองให้ผลในทิศทางเดียวกัน จึงเชื่อได้ว่าผลการจำลองจะสามารถอธิบายพฤติกรรมกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นได้เทียบเคียง และแม่นยำตรงกับความป็นจริง

คำสำคัญ : ขึ้นรูป, การยุบตัว, แรงดันกลับ



TITLE	Effect of Counter Force on Workpiece Shrinkage in Sheet Metal Extrusion Process		
AUTHOR	Theerapon Bontam		
ADVISORS	Associate Professor Bopit Bubphachot , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Mechanical Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2023

ABSTRACT

The objectives of this research were 1) to study the effect of back pressure on work piece quality in the compression process sheet metal forming 2) to apply the finite element method to help analyze the sheet metal forming process. The results showed that influence of back pressure on work piece collapse in sheet metal compression process fine plank process back pressure has a noticeable effect on the stress in the work piece. The material at the edge radius of the cutting edge is pushed apart. Which results in the dispersion of the hydrostatic stress the building material in the shear belt has a high dispersion value and flows more easily in to the sheet. The flow of the material work piece, the material therefore flows in to the work material that is forced to the boundary from the high pressure. The stress in the work piece for low pressure will affect the stress distribution. In work piece can move the insert in to the work material more conveniently and collapse at the end of compression when the pressure at increased resulting in a decrease in the end of the curve at the same time. It has the effect of reducing the compression hole at the end. With resistance moves to flow, resulting in a clear hole. When setting pressure 20 KN, it is found that there is resist the movement of the flow, resulting in the appearance of a sinkhole at the end of the movement. Rounded compression occurs with more work materials. And when determining the pressure 60 KN found that there is resistance to movement. At a result, there appears to be a sinkhole at the end of the compression with only a small amount of the work material. If there is more resistance, it will collapse. Or sink holes compression footer generated on

sheet metal presses is reduced. Because the pressure resistance is more in contact with the material, causing it to collapse and move in the director of the resistance force, resulting in a slight seizure at the beginning, which will reduce the compressive stress around the pit. And born and die rolls so the principle and the use of materials in simulate sheet metal compression process by finite element method. Found that the experimental results and the simulation results in same direction therefore, it is believed that the simulation results will be able to explain the behavior of the sheet metal compression process comparable and accurately to the reality.

Keyword : Forming, Collapsing, Back pressure



กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ ในครั้งนี้ประสบความสำเร็จลงตามวัตถุประสงค์ด้วยดี ขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ คือ รองศาสตราจารย์ ดร. บพิธ บุปผโชติ ที่ให้ทั้งความรู้อันเป็นประโยชน์ อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งคำแนะนำ และ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นความรู้จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จ ตามวัตถุประสงค์ด้วยดี

ธีระพล บุญธรรม



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ภูมิหลัง.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ปรีทัศน์เอกสารข้อมูล.....	5
2.1 กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะ.....	5
2.1.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอัดขึ้นรูป (Fundamental extrusion).....	6
2.1.2 การอัดขึ้นรูปขึ้นงานแบบกระแทก (Impact Extrusion).....	9
2.1.3 การอัดขึ้นรูปขึ้นงานแบบเส้นยาว (Rod extrusion).....	11
2.2 กระบวนการไฟน์แบลงค์.....	13
2.2.1 การแบลงค์แบบธรรมดา และการไฟน์แบลงค์.....	14
2.2.2 ลำดับขั้นตอนของการไฟน์แบลงค์.....	16
2.2.3 ความสำเร็จของผิวดัดเนียน.....	19

2.2.4 ขอบโค้งตายโรล.....	19
2.2.5 โครงสร้างของแม่พิมพ์ไฟน์เบลนด์.....	20
2.2.6 ชนิดแม่พิมพ์ไฟน์เบลนด์.....	21
2.2.7 โครงสร้าง และข้อกำหนดของเครื่องเพรสไฟน์เบลนด์.....	24
2.2.8 การคำนวณแรงที่เกี่ยวข้องในกระบวนการไฟน์เบลนด์.....	27
2.2.9 การหล่อลื่น.....	28
2.2.10 การทำเครื่องหมาย การกึ่งเจาะ และการปั๊มเหรียญ (Coining).....	29
2.3 ระเบียบวิธีไฟน์ดอลิเมนต์.....	31
2.3.1 การแบ่งโครงสร้าง และการแบ่งส่วนอลิเมนต์.....	33
2.3.2 สมการไฟน์ดอลิเมนต์.....	35
2.3.3 สมการเกณฑ์ความเสียหาย (Fracture criterion equation).....	38
2.4 การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ.....	39
2.4.1 เส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้นปกติกับความเครียดที่เกิดขึ้นในเชิงเส้นตรง.....	40
2.4.2 เส้นโค้งการไหล.....	40
2.4.3 การสร้างเส้นโค้งการไหลของโลหะ.....	45
2.4.4 ความเสียดทานคูลอมบ์ (Culomb Friction).....	47
2.5 ทบทวนวรรณกรรม.....	52
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	57
3.1 การศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	57
3.2 การศึกษา และทดสอบสมบัติของวัสดุ.....	59
3.2.1 การทดสอบสมบัติของวัสดุ.....	60
3.2.2 การสร้างเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด.....	60
3.2.3 การกำหนดค่าวิกฤตของการแตกหักของวัสดุ.....	62
3.3 การออกแบบ และสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นในกระบวนการไฟน์เบลนด์.....	63

3.4 การทดลองยืนยันผล	65
3.4.1 การเตรียมก่อนการประมวลผล.....	65
3.4.2 การประมวลผล.....	67
3.4.3 การแสดงผลหลังกระบวนการประมวลผล.....	68
3.5 การจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	68
3.6 การอธิบายผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อคุณภาพงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น.....	69
3.7 การสรุปผลการวิจัย.....	69
บทที่ 4 ผลการวิจัย และการอภิปราย	70
4.1 ผลกระทบที่มีต่อการยุบตัวโลหะแผ่น	70
4.2 ผลกระทบที่มีต่อขนาดความยาวแท่งอัด.....	77
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	79
5.1 สรุปผล.....	79
5.2 อภิปรายผล	80
5.3 ข้อเสนอแนะ	84
บรรณานุกรม.....	85
ภาคผนวก.....	89
ภาคผนวก ก ตารางผลการทดลอง.....	90
ภาคผนวก ข เครื่องมือและอุปกรณ์.....	101
ประวัติผู้เขียน.....	103

พูน ปณ ภิโต ชีเว

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 รายละเอียดของการออกแบบ และสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นสำหรับการทดลอง....	64
ตาราง 2 เงื่อนไขการจำลองสำหรับเปรียบเทียบกับ การทดลอง	66
ตาราง 3 การกำหนดสมบัติของวัสดุในแบบจำลอง	68
ตาราง 4 รายละเอียดของการออกแบบ และสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นสำหรับการทดลอง....	91
ตาราง 5 เงื่อนไขการจำลองสำหรับเปรียบเทียบกับ การทดลอง	91
ตาราง 6 การกำหนดสมบัติของวัสดุในแบบจำลอง	92



สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 แสดงการยู่บตัวขึ้นงานทดสอบแรงเสียดทานด้วยแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะ	2
ภาพประกอบ 2 แสดงการอัดขึ้นรูปโลหะก่อน	6
ภาพประกอบ 3 แสดงหลักการอัดขึ้นรูปแบบไหลตาม	7
ภาพประกอบ 4 แสดงหลักการอัดขึ้นรูปแบบไหลย้อน	7
ภาพประกอบ 5 แสดงหลักการอัดขึ้นรูปแบบผสม	8
ภาพประกอบ 6 แสดงตัวอย่างแบบจำลองวิเคราะห์การอัดขึ้นรูปโลหะด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	8
ภาพประกอบ 7 แสดงลักษณะสร้างของชุดแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแบบกระแทกไหลตาม	9
ภาพประกอบ 8 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ผลิตจากการอัดขึ้นรูปแบบกระแทกไหลตาม	10
ภาพประกอบ 9 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ผลิตจากการอัดขึ้นรูปแบบกระแทกไหลย้อน	10
ภาพประกอบ 10 แสดงลักษณะสร้างของชุดแม่พิมพ์การอัดขึ้นรูปแบบกระแทกไหลทวน	11
ภาพประกอบ 11 แสดงหลักการการอัดขึ้นรูปแบบไหลตาม และไหลย้อน	12
ภาพประกอบ 12 แสดงการเพิ่ม หรือ การลดความเสียดทานบริเวณปากแม่พิมพ์	13
ภาพประกอบ 13 ชิ้นส่วนที่ได้จากการแปลงค์แบบธรรมดา และไฟน์แปลงค์	14
ภาพประกอบ 14 กระบวนการแปลงค์แบบธรรมดา	15
ภาพประกอบ 15 การไฟน์แปลงค์	15
ภาพประกอบ 16 ลำดับขั้นตอนการทำงานของกระบวนการไฟน์แปลงค์	16
ภาพประกอบ 17 การออกแบบรูปทรงสำหรับแผ่นวงแหวนตัววี	17
ภาพประกอบ 18 ขนาด และตำแหน่งติดตั้งวงแหวนรูปตัววีกรณีความหนาชิ้นงานไม่เกิน 4.5 mm	18
ภาพประกอบ 19 ขนาด และตำแหน่งติดตั้งวงแหวนรูปตัววีกรณีความหนาชิ้นงานเกิน 4.5 mm	18
ภาพประกอบ 20 ผิวสำเร็จของชิ้นส่วนจากการไฟน์แปลงค์คุณภาพผิวสำเร็จ Ra 0.45 μm	19
ภาพประกอบ 21 ผิวสำเร็จของชิ้นส่วนจากการไฟน์แปลงค์คุณภาพผิวสำเร็จ Ra 0.1 μm	19

ภาพประกอบ 22	ขอบโค้งตายโรลบนชิ้นงานไฟน์แบลงค์	20
ภาพประกอบ 23	ภาพตัดของแม่พิมพ์ไฟน์แบลงค์แบบพื้นซ์เลื่อน	21
ภาพประกอบ 24	แม่พิมพ์ไฟน์แบลงค์แบบพื้นซ์เลื่อน	22
ภาพประกอบ 25	พื้นซ์เลื่อนอยู่ภายในปลอกวงแหวน	22
ภาพประกอบ 26	การทำงานของแม่พิมพ์ไฟน์แบลงค์แบบพื้นซ์เลื่อน	23
ภาพประกอบ 27	แม่พิมพ์ไฟน์แบลงค์ที่ใช้พื้นซ์ยึดตายตัว	24
ภาพประกอบ 28	ภาพตัดเครื่องเพรสไฟน์แบลงค์ที่ขับเคลื่อนด้วยข้อต่อคู่	25
ภาพประกอบ 29	ไดอะแกรมอัตราความเร็วแรมของเครื่องเพรสไฟน์แบลงค์ระบบข้อต่อคู่	25
ภาพประกอบ 30	ภาพตัดเครื่องไฮดรอลิกส์เพรสไฟน์แบลงค์	26
ภาพประกอบ 31	ภาพตัดผ่านชุดควบคุมเครื่องไฮดรอลิกเพรสไฟน์แบลงค์	26
ภาพประกอบ 32	คำตัวประกอบแก้ไข	27
ภาพประกอบ 33	การออกแบบแม่พิมพ์เพื่อกักสารหล่อลื่นบริเวณการตัดขณะทำการไฟน์แบลงค์ ..	29
ภาพประกอบ 34	การปั๊มเหรียญบนแผ่นชิ้นงานสำหรับหยอดเหรียญโทรศัพท์	29
ภาพประกอบ 35	ภาพขยายขนาดของการเคมีเพียซ มาตราส่วน 150 : 1	30
ภาพประกอบ 36	การเคมีเพียซที่มีส่วนยื่น	30
ภาพประกอบ 37	การปั๊มเหรียญที่ยังทำไม่ได้	31
ภาพประกอบ 38	การปั๊มเหรียญเพื่อทำการเคมีเพียซ และอาจกัดส่วนยื่น	31
ภาพประกอบ 39	เอลิเมนต์แบบมิติเดียว	33
ภาพประกอบ 40	เอลิเมนต์แบบสองมิติ	34
ภาพประกอบ 41	เอลิเมนต์แบบสามมิติ	34
ภาพประกอบ 42	รูปร่างแสดงรอยแตกตามทฤษฎีต่าง ๆ	38
ภาพประกอบ 43	กราฟความสัมพันธ์ความเค้นที่เกิดขึ้นตามปกติกับความเครียดในเชิงเส้นตรง	40
ภาพประกอบ 44	กราฟความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดจริง	41
ภาพประกอบ 45	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดวัสดุที่เปราะ	42

ภาพประกอบ 46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดวัสดุที่เหนียว.....	42
ภาพประกอบ 47 กราฟเปรียบเทียบความเค้นปกติความเครียดปกติกับความเค้นความเครียดจริง..	44
ภาพประกอบ 48 ขนาดของชั้นทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน.....	48
ภาพประกอบ 49 วงแหวนก่อนการทดสอบ.....	49
ภาพประกอบ 50 การเปลี่ยนรูปเนื่องจากความเสียดทานสูง	49
ภาพประกอบ 51 การเปลี่ยนรูปเนื่องจากความเสียดทานต่ำ	49
ภาพประกอบ 52 กราฟการปรับเทียบความเสียดทาน μ	51
ภาพประกอบ 53 กราฟการปรับเทียบความเสียดทาน m.....	51
ภาพประกอบ 54 เงื่อนไขการทดลอง	52
ภาพประกอบ 55 การวิเคราะห์แบบจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น	53
ภาพประกอบ 56 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	54
ภาพประกอบ 57 อุณหภูมิที่มีผลกระทบต่อกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น.....	55
ภาพประกอบ 58 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	58
ภาพประกอบ 59 กราฟเปรียบเทียบเส้นกราฟความเค้นวิศวกรรม และความเค้นจริง	61
ภาพประกอบ 60 กราฟการกำหนดสมการเสียรูปร่างแบบพลาสติก	61
ภาพประกอบ 61 แม่พิมพ์ไฟเบอร์แบบคงที่ที่ใช้ขึ้นชิ้นเลื่อน	63
ภาพประกอบ 62 แสดงแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นที่สร้างสำหรับการทดลอง.....	64
ภาพประกอบ 63 การลบเอลิเมนต์เมื่อค่าคำนวณวิกฤติเกินค่าคงตัวของวัสดุ	67
ภาพประกอบ 64 การเคลื่อนไหลตัวในแบบจำลองที่พื้นที่เริ่มเคลื่อนเข้าหาเนื้อวัสดุงาน	93
ภาพประกอบ 65 แสดงการเกิดความเค้นในแบบจำลองที่พื้นที่เริ่มเคลื่อนเข้าหาเนื้อวัสดุงาน	94
ภาพประกอบ 66 แสดงการเคลื่อนไหลตัวในแบบจำลองที่พื้นที่เคลื่อนแทรกเข้าสูงสุดในเนื้อวัสดุงาน	95
ภาพประกอบ 67 แสดงการเกิดความเค้นในแบบจำลองที่พื้นที่เคลื่อนแทรกเข้าสูงสุดในเนื้อวัสดุงาน	96

ภาพประกอบ 68 แสดงขนาดความยาวของอัดขึ้นรูปที่ได้จากการจำลองการทำงาน ในสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ.....	97
ภาพประกอบ 69 แสดงขนาดความยาวของอัดขึ้นรูปในสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ.....	98
ภาพประกอบ 70 แสดงแรงดัน (Counter Punch) ที่มีผลต่อการกระจายความเครียดในชิ้นงาน....	99
ภาพประกอบ 71 แสดงกราฟขนาดการยุบตัวในสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ.....	100
ภาพประกอบ 72 แสดงกราฟขนาดแรงอัดขึ้นรูปในสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ	100
ภาพประกอบ 73 แสดงแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นทดสอบติดตั้งบนเครื่องกดไฮดรอลิกส์	102
ภาพประกอบ 74 แสดงการยุบตัวชิ้นงานทดสอบแรงเสียดทานด้วยแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะ	102



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากโลหะแผ่นได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย โรงงานอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นงานให้ได้คุณภาพ มีความเที่ยงตรงตามแบบที่ต้องการ และต้องการปริมาณชิ้นงานในการผลิตมากขึ้น จึงมีการใช้แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเข้ามาช่วยในการผลิต เนื่องจากการบำรุงรักษาง่าย ใช้เวลาในการติดตั้งถอดประกอบน้อยต้นทุนต่ำ ขึ้นรูปชิ้นงานได้ในการผลิตสูง และมีคุณภาพสูงขึ้น สำหรับการผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมในปัจจุบัน เช่น อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยการผลิตชิ้นส่วนจากโลหะ (Bubphachot, 2009; Sutasn et al., 2008; สุทัศน์ทิพย์ปรัมาศ และคณะ, 2550)

เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสมตามสมบัติทางกลตามต้องการ สมบัติของโลหะที่ปราศจากข้อบกพร่อง และได้รูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะเป็นกระบวนการหนึ่งที่ยิยมใช้ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ โดยมีหลักการพื้นฐานของกระบวนการคือ พื้นที่หน้าตัดของแท่งโลหะจะถูกกด หรือ ถูกเปลี่ยนโดยใช้แรงกดให้แท่งโลหะไหลผ่านแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างแน่นอน กระบวนการอัดขึ้นรูปสามารถทำได้ทั้งอุณหภูมิปกติของวัสดุ คือ การดันขึ้นรูปเย็น (Cold extrusion) หรือ ทำให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้น (Hot extrusion) ตามสภาวะที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูป โลหะส่วนใหญ่สามารถอัดขึ้นรูปได้หลายวิธี ตามความเหมาะสม ซึ่งโลหะทั่วไปที่สามารถดันขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิปกติ คือ ตะกั่ว อลูมิเนียม และทองแดง การอัดขึ้นรูปในสภาพเย็นของโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Cold extrusion of non-ferrous components) สามารถทำได้ง่ายเพราะใช้แรงในการขึ้นรูป หรือ ทำให้โลหะเปลี่ยนรูปร่างน้อยกว่าโลหะกลุ่มเหล็ก (Sutasn et al., 2007)

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โลหะแผ่นบางลักษณะสามารถสร้างผิวชิ้นงานให้สูงขึ้นเฉพาะบางส่วนได้ในขั้นตอนเดียว สำหรับการประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรง และน้ำหนักเบา โดยอาศัยกระบวนการทางแม่พิมพ์ที่ออกแบบให้พื้นผิวมีขนาดโตกว่าตายในลักษณะ Negative Clearance) (Fan and Li, 2009; Hirota et al., 2009) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกระบวนการกดดันไหลขึ้นรูป (Bulk extrusion process) สำหรับโลหะก้อน ดังนั้นจึงเรียกระบวนการกดดันไหลขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet metal extrusion) (Chen, Tang, Lee, et al., 1999; Zheng et al., 2005; Zhuang et al., 2008)



ภาพประกอบ 1 แสดงการยู่บตัวชิ้นงานทดสอบแรงเสียดทานด้วยแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะ

การวิเคราะห์การไหลตัวของวัสดุในกระบวนการตัดละเอียดผลการจำลองทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ให้ผลการจำลองสอดคล้องกับการทดลอง (Sutasn et al., 2007) การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะได้มีนักวิจัย และเสนอบทความที่สามารถยืนยันความแม่นยำตรงของการจำลองกระบวนการระบายวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับ การทดลองจริงมากมาย สำหรับการศึกษาพัฒนากระบวนการเพื่อผลิตชิ้นส่วนโดยออกแบบรูปร่างเครื่องมือ และการประยุกต์ในรูปแบบต่าง ๆ ดังเช่น การวิเคราะห์หาแรงในการไฟน์แบลล็กโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พบว่าค่าแรงตัดจากการจำลองสูงกว่าการทดลองประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์ (สุรวิทย์ ยะนิล และคณะ, 2546) และการศึกษาผลกระทบของรัศมีเครื่องมือที่มีต่อคุณภาพชิ้นงานกดดันไหลขึ้นรูปโลหะแผ่นสำหรับกระบวนการไฟน์แบลล็ก ที่มีการทวนสอบผลความแม่นยำตรงของสมการตัวแทนสมบัติวัสดุจากการทดสอบการดึง (Suriyapha et al., 2010) เป็นต้น ซึ่งโดยภาพรวมผลการศึกษาของบทความทางวิจัยส่วนใหญ่ให้ผลที่สอดคล้องกัน และเป็นการวิจัยที่ผสมผสานกันระหว่างกระบวนการไฟน์แบลล็ก และการกดดันไหลขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยม และสะดวกต่อการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ ทำนาย ประมวลผล สามารถลดต้นทุนจากการลองผิดลองถูก (Trials and Errors) และยังสามารถวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมในการออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด (Optimum Process Design) พร้อมกันนี้ยังสามารถวิเคราะห์หาเหตุผลย้อนหลัง (Backward Tracing Method) เช่นการทำนายลักษณะของชิ้นงานเริ่มต้น และทำนายคุณสมบัติของวัสดุเริ่มต้น (พนม สุหา, 2556) เพื่อให้ทราบถึงผลิตภัณฑ์ชิ้นงานที่

อาจเกิดความเสียหาย เป็นการลดปริมาณของเสียที่อาจเกิดขึ้น เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย และระยะเวลาในการทดลอง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาถึงอิทธิพลของแรงดันกลับต่อการยุบตัวของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีการศึกษาอิทธิพลของแรงดันกลับต่อการยุบตัวของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น เนื่องจากแรงดันกลับที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานได้ อีกทั้งโดยอาศัยการวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการศึกษา อันนำไปสู่การเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อยืนยันความแม่นยำในการวิเคราะห์ผล และข้อมูลจากการศึกษายังเป็นฐานข้อมูลในการพัฒนาอุตสาหกรรมอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของแรงดันกลับต่อคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น

1.2.2 เพื่อประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยวิเคราะห์ในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

1.3.1 ตัวแปรต้นที่ต้องการศึกษาได้แก่

1.3.1.1 แรงดันกลับ (Counter Punch) คือ 20 KN, 40 KN และ 60 KN

1.3.2 ตัวแปรตามที่น่าสนใจศึกษาได้แก่

1.3.2.1 ความเค้น ความเครียด และการไหลตัวของวัสดุ

1.3.2.2 การยุบตัวในส่วนท้ายของการอัด

1.3.3 ตัวแปรควบคุม

1.3.3.1 วัสดุที่ทำการศึกษา คือ วัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน AISI 1045 ขนาดความหนา 5 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm

1.3.3.2 ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E517-00

1.3.3.3 วัสดุชิ้นงานกดตันไหลขึ้นรูปมีรูปร่างเป็นวงกลมสมมาตรรอบแกน

1.3.3.4 ระยะการกดลึกของพื้นที่ไม่เกิน 80 เปอร์เซ็นต์ ของความหนาวัสดุชิ้นงาน

1.3.3.5 ความเร็วในการขึ้นรูป 0.1 mm/s

1.3.3.6 เส้นผ่าศูนย์กลางพื้นที่ 12.70 mm

1.3.3.7 เส้นผ่าศูนย์กลางตาย 10.00 mm

1.3.3.8 แบลงค์โฮลเดอร์ (Blank holder) แบบยึดอยู่กับที่

1.3.3.9 จำลองกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป

1.3.3.10 ชุดข้อมูลการทดลองกดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการไฟไนต์

แบบจำลอง และใช้ซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป MSC.Marc Version 2011 ได้รับความอนุเคราะห์จาก สถาบันเหล็ก และเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 งานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลเบื้องต้น และกรอบแนวคิดในการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบปฏิบัติการในกรรมวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4.2 สามารถพัฒนาปรับปรุงแก้ไขคุณภาพชิ้นงาน โดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัยเป็นแนวทางในการพิจารณา และเลือกใช้ขนาดแรงต่อการกดขึ้นรูปโลหะแผ่นได้อย่างเหมาะสม

1.4.3 เป็นฐานข้อมูลเพื่อการพัฒนาในการวิเคราะห์ และทำนายผลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อเทียบกับการทดลองจริง

1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

พูน ปณ จิต ชีเว

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

การดำเนินงานวิจัยเรื่อง การศึกษาอิทธิพลของแรงดันกลับต่อการยุบตัวของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น ในเบื้องต้นของผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ผู้วิจัยได้เข้าใจหลักทฤษฎี และการประยุกต์ใช้สำหรับงานวิจัย ที่ประกอบด้วยหลักการขึ้นรูปงานเย็นที่เป็นพื้นฐานของงานวิจัยการขึ้นรูปโลหะ การศึกษาทำความเข้าใจกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะในกระบวนการละเอียด หรือ กระบวนการไฟน์แบลนค์ การวิเคราะห์แบบจำลองทางวิศวกรรมสำหรับการพยากรณ์ และการอธิบายพฤติกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการที่สามารถลดค่าใช้จ่ายในการทดลองผิดพลาด (Trial and error) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งได้จัดเรียงเป็นลำดับ ได้แก่ กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะ (Metal extrusion) กระบวนการไฟน์แบลนค์ (Fineblanking process) ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ (Mechanical properties Test) และทบทวนวรรณกรรม (Literature review)

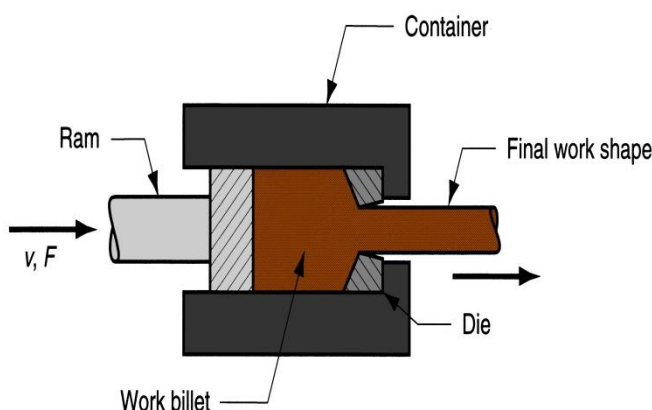
2.1 กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะ

การกดอัดขึ้นรูปโลหะ (Metal extrusion) ปกติเป็นกระบวนการขึ้นรูปก้อนโลหะ โดยการทำให้เนื้อวัสดุมีการไหลตัวด้วยความดันสูง การขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องปกติจะเรียกว่า การอัดขึ้นรูปงานเย็น (Cold extrusion) ซึ่งชิ้นงานสำเร็จจะมีขนาดเที่ยงตรงค่อนข้างสูงแต่ต้องใช้แรงสำหรับการขึ้นรูปสูงด้วย ดังนั้นจึงมีการอัดขึ้นรูปงานร้อนด้วยการเพิ่มอุณหภูมิแก่วัสดุชิ้นงานจนถึงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก มีผลให้ความเที่ยงตรงของขนาดรูปร่างลดลง และผิวชิ้นงานหยาบจากการเกิดสะเก็ดเผาไหม้ ซึ่งอาจต้องมีกระบวนการตกแต่งผิวเพิ่มเติมในที่สุด

เมื่อวัสดุถูกขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปแล้วจะมีความเครียดค้างตกค้าง (Residual strain Hardening) ซึ่งเป็นการเพิ่มสมบัติทางกลที่ดี และเป็นประโยชน์โดยสามารถนำวัสดุที่มีราคาต้นทุนต่ำมาผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปให้มีคุณสมบัติทางกลสูงขึ้น ซึ่งวัสดุบางประเภทไม่สามารถเพิ่มสมบัติทางกลโดยวิธีอื่นได้ยกเว้นการทำให้เกิดความเค้นตกค้างในเนื้อวัสดุ ตัวอย่างเช่นอลูมิเนียม และทองแดง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปจะมีผิวสวย และมีความเที่ยงตรงสูง

2.1.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอัดขึ้นรูป (Fundamental extrusion)

การอัดขึ้นรูป (Extrusion) เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะโดยใช้ความเค้นแรงอัดทำให้โลหะเกิดการไหลตัว จาก Tresca's Yield Criteria กล่าวถึงการเปลี่ยนรูปของโลหะเริ่มต้นเมื่อโลหะเกิดความแตกต่างระหว่าง Maximum และ Minimum Principle Stress ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) ซึ่งจะ ทำให้โลหะไหลตัวออกผ่านปากตาย (Bearing) ดังนั้นกรรมวิธีการอัดขึ้นรูปจึงสามารถสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างเป็นแท่งยาวหน้าตัดตัน ท่อ เส้นลวด หรือ มีรูปร่างหน้าตัดตามต้องการ กระบวนการอัดขึ้นรูปสามารถจำแนกประเภทออกตามลักษณะการไหลตัวของวัสดุกับทิศทางการเคลื่อนที่ของแกนอัดของแผ่นกดพินช์ (Punch) หรือ แรม (Ram) สามารถแยกได้เป็นการอัดขึ้นรูปแบบไหลตาม การอัดขึ้นรูปแบบไหลย้อน และการอัดขึ้นรูปแบบผสม

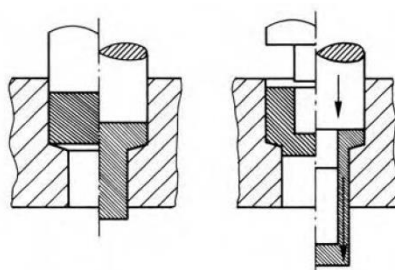


ภาพประกอบ 2 แสดงการอัดขึ้นรูปโลหะก่อน

(ที่มา : ฉัตรแก้ว สุริยะภา และคณะ, 2554)

2.1.1.1 การการอัดขึ้นรูปแบบไหลตาม (Forward extrusion or direct extrusion)

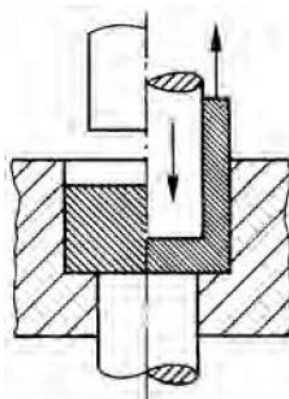
การอัดขึ้นรูปแบบไหลตามมีการเคลื่อนตัวของพินช์ และการไหลตัวของเนื้อวัสดุในทิศทางเดียวกัน ซึ่งวัสดุจะถูกกดด้วยแรงดันสูงให้ไหลตัวไปในทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของพินช์ รูปร่างภายนอกของชิ้นงานจะเป็นไปตามรูปร่างภายในของแม่พิมพ์บริเวณทางออก ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นท่อนตัน กลวง หรือ มีหน้าตัดรูปทรงต่าง ๆ เช่น ท่อโลหะ แท่งโลหะ หรือ งานเส้น อลูมิเนียมรูปทรงต่าง ๆ การกดตันไหลในยุคแรกเป็นวิธีการขึ้นรูปโลหะที่พัฒนามาจากการทำท่อระบบก๊าซ และน้ำ แต่ปัญหา คือ วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ต้องมีความแข็งแรง ทนอุณหภูมิสูง และความดันสูง และใช้งานกันมาจนกระทั่งศตวรรษที่ 20 สำหรับในปัจจุบันสามารถทำการอัดขึ้นรูปโลหะ และโลหะผสมอื่น เช่น อะลูมิเนียม ทองแดง ตะกั่ว ดีบุก สังกะสี ได้



ภาพประกอบ 3 แสดงหลักการอัดขึ้นรูปแบบไหลตาม
(ที่มา : Anne, 2006)

2.1.1.2 การอัดขึ้นรูปแบบไหลย้อน (Backward extrusion or Indirect extrusion)

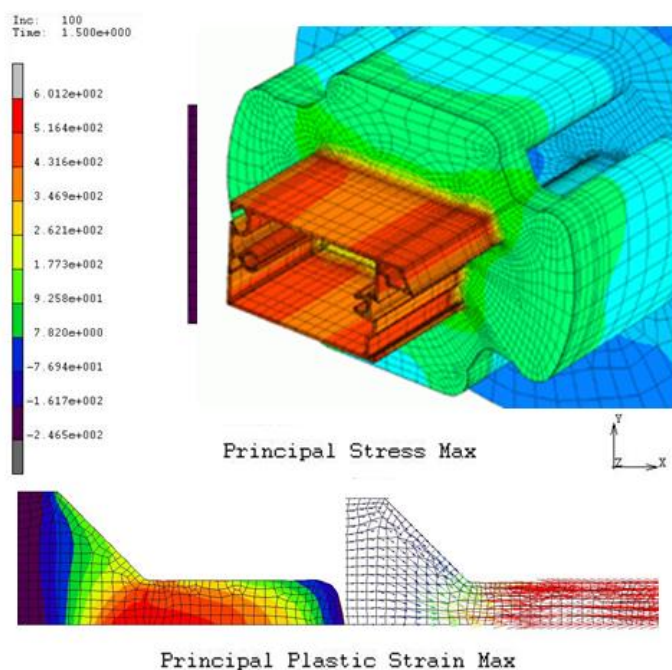
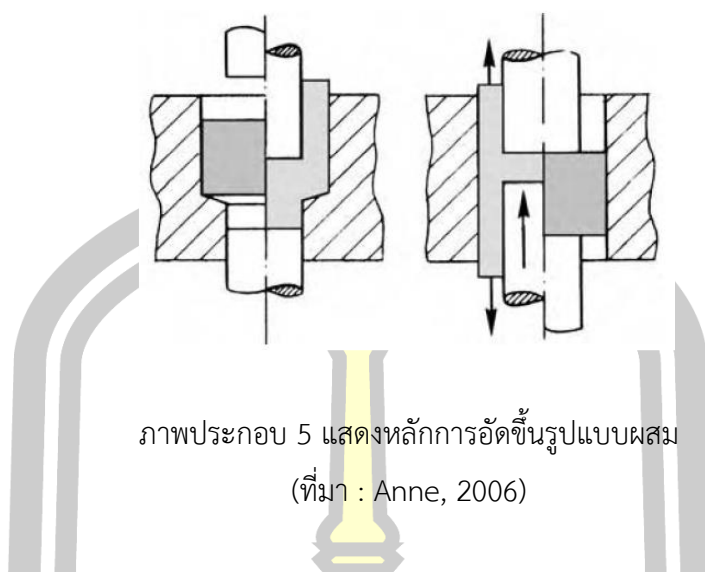
การอัดขึ้นรูปแบบไหลย้อนมีทิศทางการไหลตัวของวัสดุสวนกับการเคลื่อนที่ของพินซ์ โดยวัสดุจะถูกแรงกดของพินซ์ให้ไหลตัวในช่องว่างที่มีลักษณะคล้ายวงแหวนระหว่างพินซ์กับแม่พิมพ์สวนทิศทางการเคลื่อนที่ของพินซ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นท่อกลวงคล้ายกับหลอดยาสูบ หรือ กระป๋องน้ำอัดลม



ภาพประกอบ 4 แสดงหลักการอัดขึ้นรูปแบบไหลย้อน
(ที่มา : Anne, 2006)

2.1.1.3 การอัดขึ้นรูปแบบผสม (Combine extrusion)

การอัดขึ้นรูปแบบผสมมีการเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุส่วนหนึ่งในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนตัวของพินซ์ และเนื้อวัสดุอีกส่วนหนึ่งจะไหลตัวสวนทางกับการเคลื่อนตัวของพินซ์ ซึ่งเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะตันผสมกลวงเช่นอุปกรณ์กลไก หรือ ข้อต่อเพลลา



ภาพประกอบ 6 แสดงตัวอย่างแบบจำลองวิเคราะห์การอัดขึ้นรูปโลหะด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
(ที่มา : ฉัตรแก้ว สุริยะภา และคณะ, 2554)

กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถรับแรงดันสูงได้ ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์จะต้องมีความแข็งแรงสูง และทนต่อการสึกหลอได้ดี โดยแม่พิมพ์จะมีความเรียบผิวที่ดี และผ่านกระบวนการชุบแข็ง ดังนั้นการอัดขึ้นรูปโลหะจึงมีต้นทุนสูง ประกอบกับการผลิตในอดีตของกระบวนการต้องใช้การลองผิดลองถูก ใช้ประสบการณ์ และความชำนาญสูงเฉพาะทางในการ

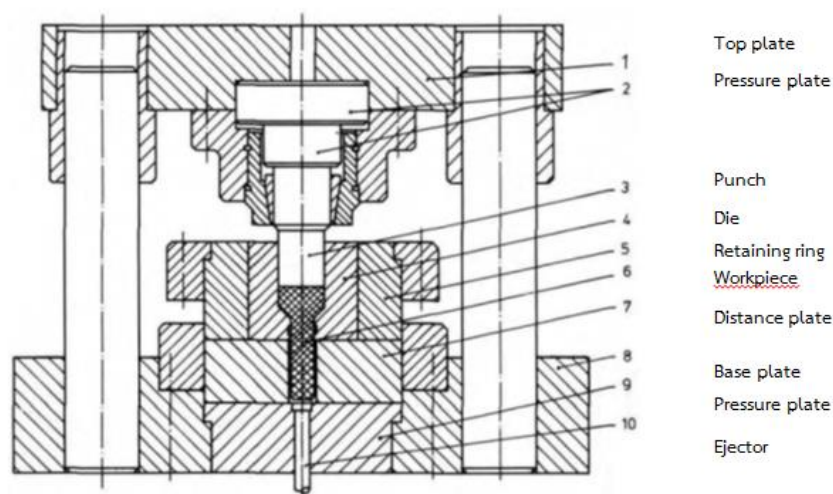
ออกแบบ ทำให้การผลิตมีต้นทุนสูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงได้มีวิเคราะห์แบบจำลองการอัดขึ้นรูปโลหะ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) มาใช้เพื่อศึกษา และทำนายผลการเปลี่ยนรูปของโลหะที่ใกล้เคียงความเป็นจริง แล้วแสดงผลเป็นตัวเลข หรือ รูปภาพ ซึ่งเป็นการประหยัด และลดค่าใช้จ่ายได้มากเหมาะสม เป็นประโยชน์ในการช่วยออกแบบผลิตภัณฑ์ และพัฒนากระบวนการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพทันต่อสภาวะการแข่งขันที่สูงในปัจจุบัน

2.1.2 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานแบบกระแทก (Impact Extrusion)

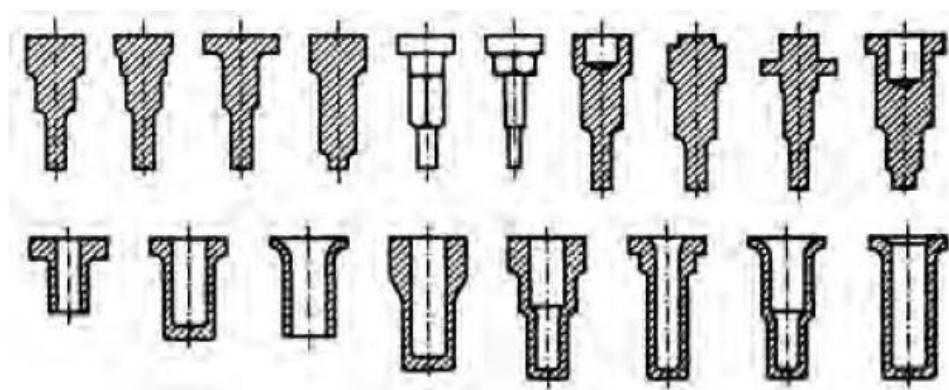
การอัดขึ้นรูปชิ้นงานแบบกระแทกที่มีความหนาแน่นให้เป็นรูปร่างหน้าตัดกลม หรือ เหลี่ยม ให้มีลักษณะทรงตัน หรือ กลวง ซึ่งเนื้อโลหะจะถูกกระแทกด้วยแรงดันที่สูงมากกว่าจุดไหลตัวของวัสดุ บังคับให้เนื้อวัสดุไหลตัวผ่านช่องระหว่างตัวแท่งกดพื้นที่กับตายงานกดตันไหลขึ้นรูปขึ้นงานแบบกระแทกเหมาะสำหรับการผลิตแทนการลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) ที่ต้องทำการขึ้นรูปซ้ำ (Redrawing) หลาย ๆ รอบ

2.1.2.1 การอัดขึ้นรูปแบบกระแทกไหลตาม

เนื้อโลหะในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบกระแทกไหลตาม จะถูกบังคับให้ไหลในทิศทางเดียวกับทิศทางของแรงกระทำ และการเคลื่อนที่ของเครื่องมือ สำหรับชิ้นงานอัดขึ้นรูปแบบกระแทกไหลตามรูปทรงกลวงไม่นิยมใช้กันรอก (Counter Punch) เพราะอาจทำให้รูปร่างของชิ้นงานเสียหาย แต่ถ้าใช้กันรอกเป็นอุปกรณ์ช่วยปลดชิ้นงานจะทำให้วิธีการนี้เหมาะกับชิ้นงานทรงกลวงมากขึ้น



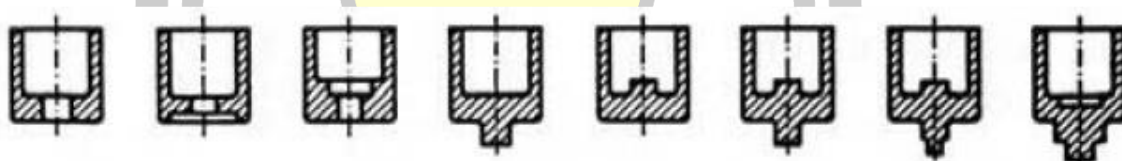
ภาพประกอบ 7 แสดงลักษณะสร้างของชุดแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแบบกระแทกไหลตาม
(ที่มา : Anne, 2006)



ภาพประกอบ 8 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ผลิตจากการอัดขึ้นรูปแบบกระแทกไหลตาม
(ที่มา : Anne, 2006)

2.1.2.2 การอัดขึ้นรูปแบบกระแทกไหลย้อน

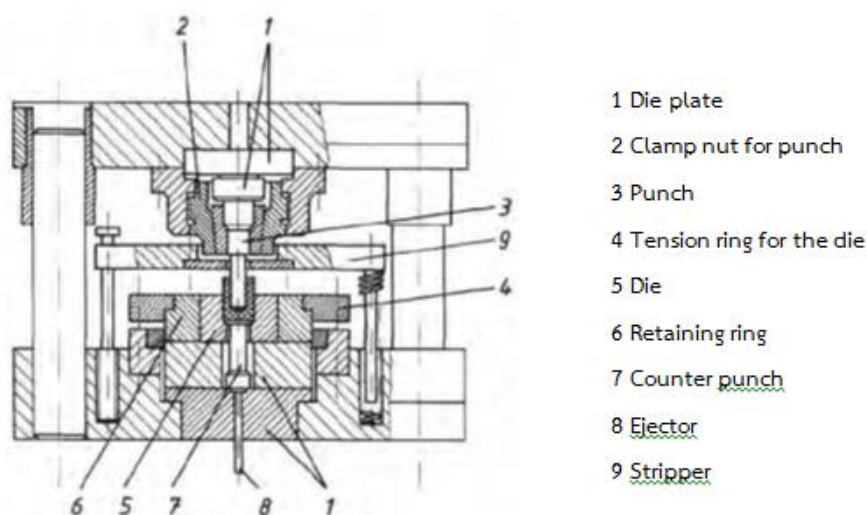
การอัดขึ้นรูปแบบกระแทกไหลย้อน เป็นการดันเนื้อวัสดุให้มีทิศทางการไหลสวนทางกับการเคลื่อนที่ของแกนพินช์ (Punch) ซึ่งกระบวนการนี้เหมาะเป็นพิเศษสำหรับการผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะคล้ายหลอดที่มีความบาง และยาว อาจผลิตชิ้นงานได้ยาวถึง 6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเช่น ตะกั่ว ดีบุก สังกะสี ทองแดง ทองเหลือง และอลูมิเนียม เป็นต้น



ภาพประกอบ 9 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ผลิตจากการอัดขึ้นรูปแบบกระแทกไหลย้อน
(ที่มา : Anne, 2006)

ดังนั้น เครื่องมือที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปต้องมีความแข็งแรงสูง สามารถทนกับการรับแรงกด หรือ แรงกระแทกในการขึ้นรูปโลหะได้ ผิวของเครื่องมือทั้งตัวพินช์ และตาย ต้องมีความละเอียดเรียบ เพราะมีผลต่อการเกิดความเสียดทาน (Friction) หรือ แรงต้านการไหลตัวของโลหะ และจะทำให้ต้องใช้แรงในการขึ้นรูปสูงขึ้นตามไปด้วย ผิวหน้าของตัวพินช์ไม่ควรเป็นลักษณะที่เรียบตรง แต่ควรมีลักษณะที่โค้งมน เรียว หรือ เอียง เพื่อให้ช่วยต่อการไหลตัวของเนื้อวัสดุ และลำตัวของพินช์ควรมีระยะหลบเล็กน้อยให้มีขนาดโตตามกำหนดเฉพาะในส่วนปลาย ส่วนขนาดของตายควร

มีการออกแบบ และสร้างให้มีความหนาประมาณ 1.5-2 เท่าของความหนาชิ้นงานเริ่มต้น ซึ่งโดยปกติแล้วขนาดของชิ้นงานเริ่มต้นจะเล็กกว่าขนาดของตายเล็กน้อยเท่านั้น



ภาพประกอบ 10 แสดงลักษณะสร้างของชุดแม่พิมพ์การอัดขึ้นรูปแบบกระแทกไหลทวน
(ที่มา : Anne, 2006)

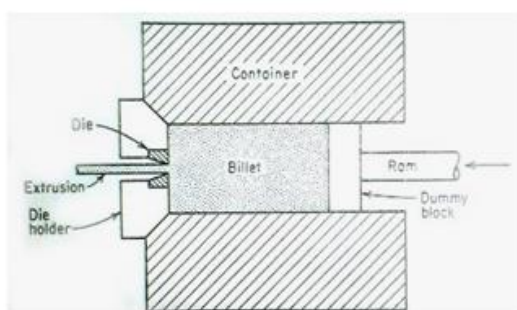
2.1.3 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานแบบเส้นยาว (Rod extrusion)

กระบวนการอัดขึ้นรูปมีความสำคัญมากต่อการสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะท่อนยาว แท่งตัน ท่อผนังหนา หรือ ชิ้นงานผนังบางรูปทรงหน้าตัดต่าง ๆ ซึ่งยากแก่การผลิตในกระบวนการผลิตประเภทอื่น วัสดุที่นิยมใช้มีโลหะ พลาสติก ไม้ และวัสดุเชิงประกอบ ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกดตันไหลขึ้นรูปจะมีสมบัติทางกลสูงกว่าวัสดุเริ่มต้น โดยเนื้อวัสดุจะมีความเครียดแข็งตึงซึ่งเป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางกลที่ดี และเป็นประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ สามารถนำวัสดุที่มีราคาต้นทุนต่ำมาผ่านกระบวนการกดตันไหลขึ้นรูปให้มีคุณสมบัติทางกลสูงขึ้น และราคาเพิ่มขึ้น ซึ่งวัสดุบางประเภทไม่สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกล โดยวิธีอื่นได้ยกเว้นการทำให้เกิดความเค้นตึงในเนื้อวัสดุ อย่างเช่น อลูมิเนียม และทองแดง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการกดตันไหลขึ้นรูปจะมีผิวสวย และมีความเที่ยงตรงสูง

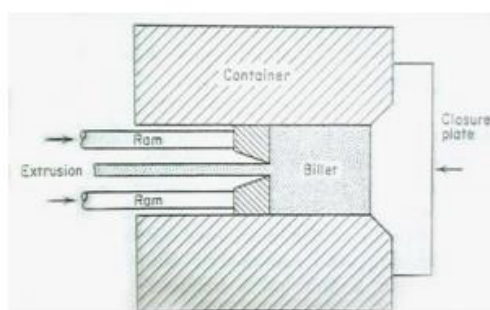
เนื่องจากกระบวนการอัดขึ้นรูปต้องใช้แรงในการขึ้นรูปที่สูง โดยส่วนมากจะทำลักษณะการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะที่วัสดุมีความต้านทานการขึ้นรูปต่ำ แต่ก็พบว่ามีการใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นสำหรับการขึ้นรูปโลหะอย่างแพร่หลายทางอุตสาหกรรม โดยเฉพาะกับวัสดุที่มีความสามารถในการอัดขึ้นรูปไม่ดีเพราะสามารถช่วยลดการแตกของผิว (Cracking) ในแท่งโลหะได้

เพราะว่ามีความดันที่เกิดในขบวนการนี้สูงมากที่บริเวณผนังห้องอัด (Container) และที่ตัวแม่พิมพ์ สำหรับข้อดีอีกอย่างหนึ่งคือ ขนาดที่ได้มีความถูกต้องมากกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน (Hot extrusion) ดังนั้นกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น (Cold extrusion) จึงนิยมใช้กับ stainless steel, nickel-based alloys, high-temperature materials

การอัดขึ้นรูปขึ้นงานแบบเส้นยาว แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่การอัดขึ้นรูปแบบไหลตาม (Forward extrusion or direct extrusion) และการอัดขึ้นรูปแบบไหลย้อน (Backward extrusion or indirect extrusion)



ก) Direct extrusion



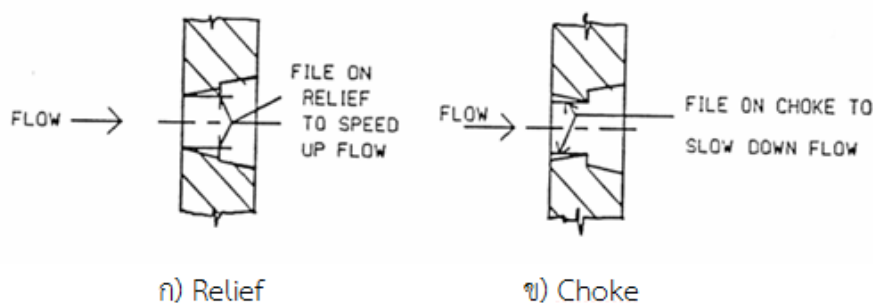
ข) Indirect extrusion

ภาพประกอบ 11 แสดงหลักการการอัดขึ้นรูปแบบไหลตาม และไหลย้อน
(ที่มา : ฉัตรแก้ว สุริยะภา และคณะ, 2554)

เครื่องจักรที่ใช้ในอุตสาหกรรมการอัดขึ้นรูปส่วนใหญ่เป็นเครื่องไฮดรอลิกส์เพรส สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ แบบแนวนอน และแบบแนวตั้งตามทิศทางของก้านกด (Ram) ซึ่งเครื่องเพรสแนวตั้งจะมีขนาดเครื่องอยู่ที่ 3 – 20 MN (300-2000 tons) ข้อดีของเครื่องเพรสแบบนี้ คือ การตั้งแนวศูนย์ (Alignment) ระหว่างก้านกดกับชุดแม่พิมพ์จะทำได้โดยง่าย มีอัตราการผลิตสูง ต้องการพื้นที่วางเครื่องน้อยกว่าเครื่องเพรสแนวนอน และชิ้นงานที่ได้มีความสม่ำเสมอในการสัมผัสกับแม่พิมพ์ แต่สำหรับเครื่องเพรสแบบแนวนอนนั้นจะไม่สม่ำเสมอเพราะว่าบริเวณแท่งชิ้นงานด้านล่างจะสัมผัสกับห้องอัด (Container) แต่สำหรับด้านบนไม่ได้สัมผัส จึงทำให้การกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน และจะส่งผลอย่างมากกับงานขึ้นรูปท่อผนังบางจึงนิยมใช้เครื่องเพรสแบบแนวตั้ง และเครื่องเพรสแนวนอนมีขนาดใหญ่ประมาณ 15 – 50 MN (1500 – 5000 tons) สำหรับการกดตันไหลขึ้นรูปโลหะแท่งตัน

ความเร็วของก้านกด (Ram) มีความสำคัญในการอัดขึ้นรูป เพราะงานที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงจะมีปัญหาเรื่องการถ่ายเทความร้อนระหว่างแม่พิมพ์กับชิ้นงาน ดังนั้นการขึ้นรูปโลหะที่อุณหภูมิสูงจึงต้องการความเร็วในการขึ้นรูปสูง เช่น $0.4 - 0.6 \text{ m.s}^{-1}$ กับการกดตันไหลขึ้นรูปชิ้นงานที่หลอมเหลวยาก (refractory metals) ซึ่งความเร็วขนาดนี้ต้องใช้ hydraulic accumulator system ช่วย แต่สำหรับโลหะชนิดอื่นเช่นอลูมิเนียม หรือ ทองแดงผสม อาจใช้ความเร็วของก้านกดที่น้อยกว่านี้ และเครื่องที่ใช้จะเป็นแบบ direct pump system ก็เพียงพอ

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปต้องเป็นวัสดุประเภทที่มีความแข็งแรงสูง และสามารถป้องกัน thermal shock และ oxidation ได้ดี แม่พิมพ์ที่ใช้มีสองลักษณะคือ แม่พิมพ์ผิวหน้าเรียบ (Flat-faced die) และแม่พิมพ์ผิวหน้าเอียง (Conical die) สำหรับในการอัดขึ้นรูปแล้วชิ้นงานออกมาเอียง หรือ บิดไปเมื่อผ่านออกจากปากแม่พิมพ์ โดยสาเหตุเกิดจากการที่ผิวของวัสดุมีความเสียดทานเกิดขึ้นมาก ทำให้ผิวของวัสดุไหลช้ากว่าแกนกลาง และเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Radial Effect สามารถแก้ไขโดยการทำ Choke และ Relief ที่บริเวณปากแม่พิมพ์เพื่อเพิ่มหรือลดความเสียดทานบริเวณปากแม่พิมพ์เพื่อปรับ ความเร็วในการไหลตัวของแต่ละจุดบนรูปร่างชิ้นงานให้เท่ากัน

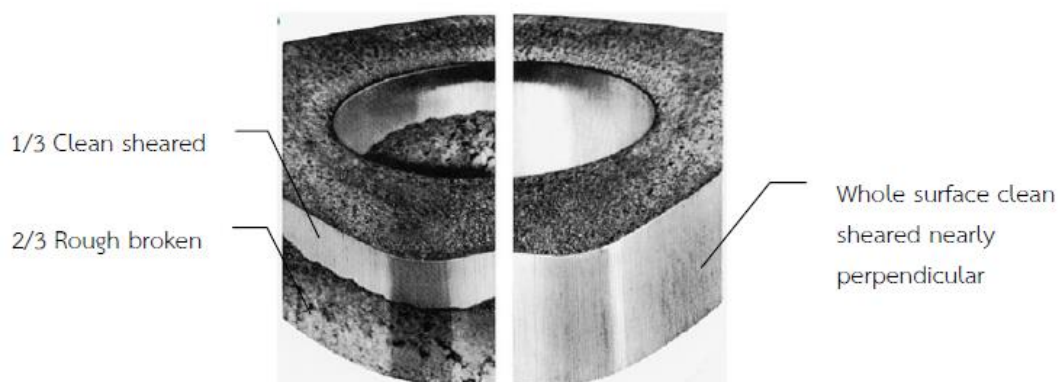


ภาพประกอบ 12 แสดงการเพิ่ม หรือ การลดความเสียดทานบริเวณปากแม่พิมพ์

2.2 กระบวนการไฟน์แบลงค์

ชิ้นส่วนอุตสาหกรรมที่ผลิตโดยกระบวนการตัดด้วยแม่พิมพ์ หรือ แบลงค์แบบธรรมดา (Blanking) จะแสดงให้เห็นผิวรอยตัดที่แตกต่างกันคือ ส่วนหนึ่งเป็นผิวที่เกิดจากการตัดเฉือนที่เรียบ และส่วนที่เหลือเป็นผิวหยาบจากการแตก ซึ่งสภาพการตัดที่ดีที่สุดที่ได้จากการแบลงค์แบบธรรมดาก็คือ ผิวรอยตัดหนึ่งในสามเป็นผิวดัดเฉือนที่เรียบเป็นมันเงา และส่วนที่เหลือสองในสามเป็นผิวที่ค่อนข้างหยาบ ผิวรอยตัดทั้งหมดซึ่งไม่ตั้งฉากกับผิวหลักของชิ้นส่วน และรูเจาะ (Piercing) ก็ไม่ขนาบ

กันอย่างแท้จริง เมื่อต้องการใช้ผิวตัดเฉือนในการทำงานก็มักต้องนำเอาชิ้นส่วนนี้ไปผ่านกรรมวิธีอื่นต่อไปอีก ขั้นตอนทั่วไปที่มักนิยมใช้ในการตกแต่งผิวให้สำเร็จเช่น การกัด (Milling) การเจียรระไน (Grinding) การตัดแต่งขอบ (Shaving) การคว้าน (Reaming) และการคว้านโดยใช้เครื่องแทง (Broaching) ในกรณีของการผลิตชิ้นส่วนที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง มักจำเป็นที่จะต้องนำเอาชิ้นส่วนที่ได้จากการแบลงค์แบบธรรมดาไปผ่านการทำงานอีก 2 ขั้นตอน หรือ มากกว่านี้ เพื่อให้ได้ความเที่ยงตรง หรือ ผิวสำเร็จตามที่ต้องการ

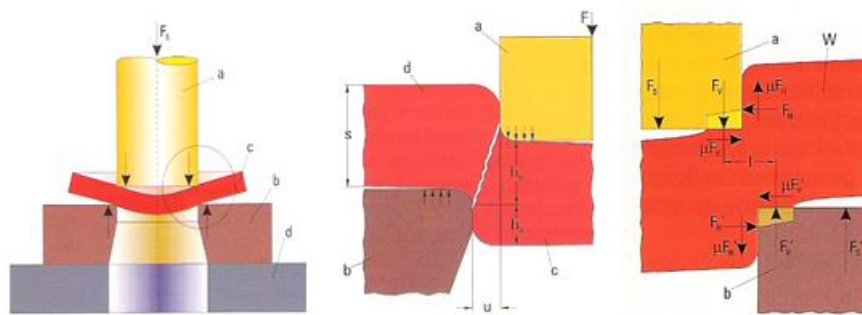


ภาพประกอบ 13 ชิ้นส่วนที่ได้จากการแบลงค์แบบธรรมดา และไฟน์แบลงค์
(ที่มา : Hambli, 2001)

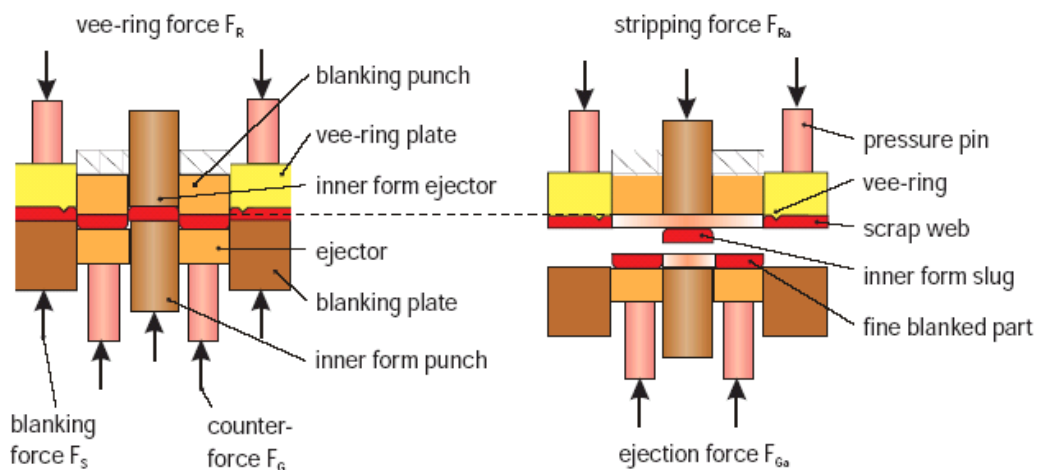
กระบวนการตัดละเอียด หรือ ไฟน์แบลงค์ (Fine blanking) สามารถที่จะตัดชิ้นส่วนให้มีผิวตัดเฉือนที่เรียบ ได้ทั้งผิวด้านนอก และด้านในรอยตัดเกือบตั้งฉากกับผิววัตถุดิบ และรูเจาะขนานกัน ดูภาพประกอบ 13 การที่ผิวตัดเฉือนจะมีคุณภาพผิวดี มีขนาดภายนอก และภายในที่เที่ยงตรง ซึ่งไม่อาจทำได้โดยการแบลงค์แบบธรรมดา และขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัตถุดิบที่ใช้

2.2.1 การแบลงค์แบบธรรมดา และการไฟน์แบลงค์

การแบลงค์แบบธรรมดามีการเปลี่ยนรูปเกิดขึ้นที่แผ่นงานในตอนเริ่มต้นของกระบวนการ เมื่อพื้นที่เคลื่อนที่จะกดแผ่นงานบนแผ่นดายเข้ากับช่องเปิด และดันให้แผ่นงานขาดหลุดออก น้ำมัน และอากาศที่อยู่ระหว่างพื้นที่กับผิวแผ่นงานมีส่วนทำให้เกิดการเสียรูปที่แผ่นงานได้ ซึ่งจะเห็นได้ชัดมากบนวัสดุชิ้นงานที่บาง และอ่อน



ภาพประกอบ 14 กระบวนการแปลงค์แบบธรรมดา
(ที่มา : Schuler, 1998)

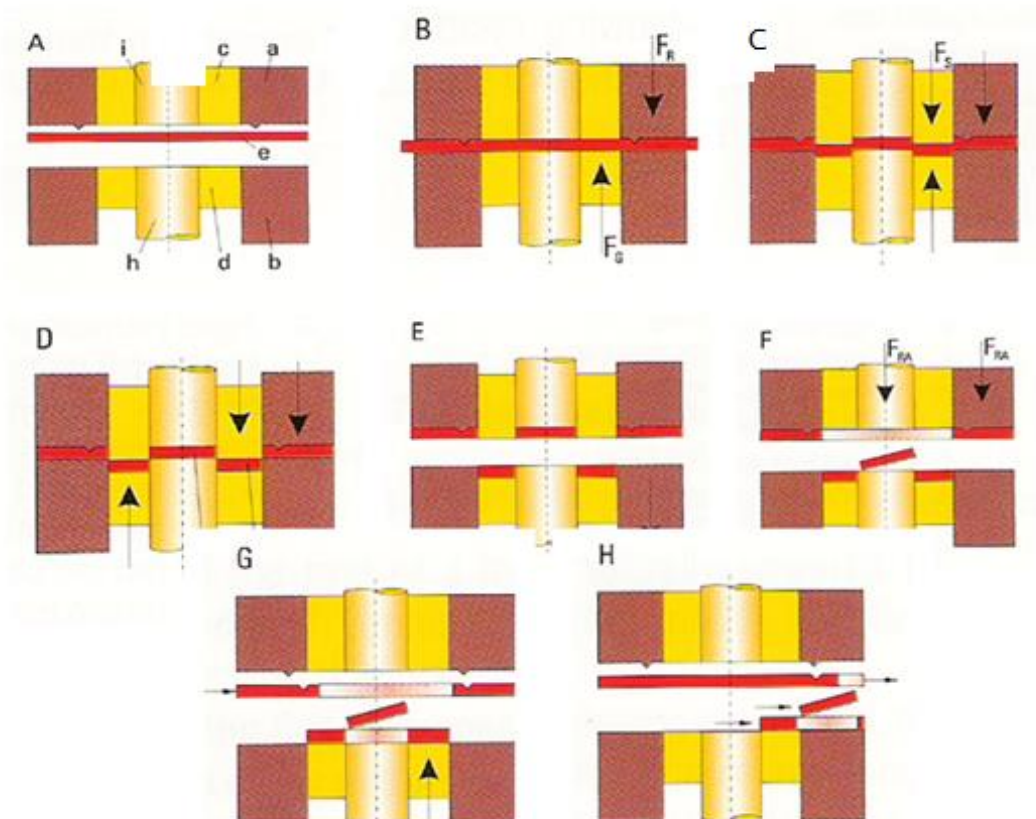


ภาพประกอบ 15 การไฟน์แปลงค์
(ที่มา : Schuler, 1998)

เนื่องจากมีแรงกระทำ 3 แรงที่ไม่ขึ้นต่อกันในกระบวนการไฟน์แปลงค์ นั่นคือ แรงตัดพินช์ (Blanking Punch) แรงกดของแผ่นวงแหวนรูปตัววี (Vee-ring plate) และแรงต้านการเคลื่อนที่ของพินช์ (Counter Punch) ซึ่งวงแหวนรูปตัววีเป็นชิ้นส่วนที่มีลักษณะพิเศษที่สำคัญสำหรับแม่พิมพ์ไฟน์แปลงค์ทำหน้าที่กำหนดบังคับตำแหน่ง และจับยึดวัสดุชิ้นงานไว้อย่างแน่นหนาใกล้กับขอบตัด ดังนั้นจึงช่วยป้องกันไม่ให้อัตราการเคลื่อนที่ของชิ้นงานไหลตัวออกไปในระหว่างการตัดด้วยเครื่องกดไฟน์แปลงค์ ดังนั้นชิ้นงานจะไม่เสียรูป ได้ผิวรอยตัดที่เรียบ และตั้งฉากกับผิวของชิ้นงาน

2.2.2 ลำดับขั้นตอนของการไฟน์แบลงค์

เพื่อให้เข้าใจขั้นตอนการไฟน์แบลงค์ได้ดียิ่งขึ้น ให้พิจารณาลำดับขั้นตอนของกระบวนการไฟน์แบลงค์ ดังแสดงในรูปที่ 16



ภาพประกอบ 16 ลำดับขั้นตอนการทำงานของกระบวนการไฟน์แบลงค์

(ที่มา : Schuler, 1998)

ตำแหน่ง A แรม (Ram) อยู่ที่ตำแหน่งจุดศูนย์ตายล่างแม่พิมพ์เปิด และวัสดุเลื่อนเข้าไปในแม่พิมพ์

ตำแหน่ง B แม่พิมพ์ส่วนล่างเลื่อนขึ้น

ตำแหน่ง C แม่พิมพ์ปิดสนิทโดยสมบูรณ์ แผ่นกดชิ้นงาน (Pressure Plate) จับชิ้นงานให้ติดกับแผ่นตายด้วย วี-ริง อีเจกเตอร์ (Vee-ring ejector) กดวัสดุแน่นกับผิวหน้า พื้นซ์เริ่มต้นการตัดเฉือน ในระหว่างการตัดเฉือนแม่พิมพ์ส่วนล่างจะอยู่กับที่ วี-ริง และแรงกดสวนทางยังคงมีค่าคงที่

ตำแหน่ง D พันธ์ตัวใหญ่กดขึ้นส่วนลงในแผ่นตาย และเพียชพันธ์เจาะรู ทำให้เกิดเศษ เพียชเข้าไปในรูปทรงภายในพันธ์ตัวใหญ่ ขณะนี้แรมอยู่ที่จุดศูนย์ตายบน พันธ์ตัวใหญ่พร้อมทั้งเพียชพันธ์ไม่ได้ผ่านเข้าไปในแผ่นตาย และช่องเปิด ของรูปทรงภายในเหมือนกับการแบลงค์แบบธรรมดาทั้งนี้เพราะเคลีย แร่นระหว่างพันธ์กับตายแคบมาก

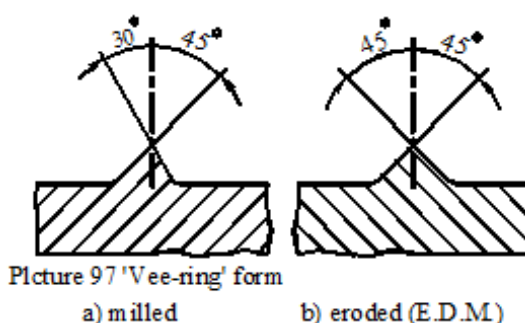
ตำแหน่ง E แม่พิมพ์เปิด แร่งกดจาก วี-ริง เกิดขึ้นอีกครั้ง และปลดวัตถุติดออกจากพันธ์ ตัวใหญ่

ตำแหน่ง F วัตถุติดหลุดออกจากพันธ์ตัวใหญ่ และในเวลาเดียวกันเศษเพียชจากรูปทรง ภายใน ก็จะถูกดันออกมาจากพันธ์ด้วย

ตำแหน่ง G เริ่มป้อนวัสดุใหม่ มีแรงดันที่โอเจกเตอร์ ซึ่งจะดันขึ้นส่วนออกจากแม่พิมพ์

ตำแหน่ง H เป่าขึ้นส่วนออกไป หรือ เอาออกโดยกลไก ออกจากแม่พิมพ์

แผ่นวงแหวนรูปตัววี (Vee-ring plate) เป็นอุปกรณ์ของแม่พิมพ์ไฟน์แบลงค์ที่ทำให้มี ความแตกต่างจากแม่พิมพ์แบลงค์แบบธรรมดา ซึ่งมีลักษณะแนวสันนูนขึ้นมาจากไกด์เพลต (Guide plate) รอบขอบตัดของขึ้นส่วน



Picture 97 'Vee-ring' form

a) milled

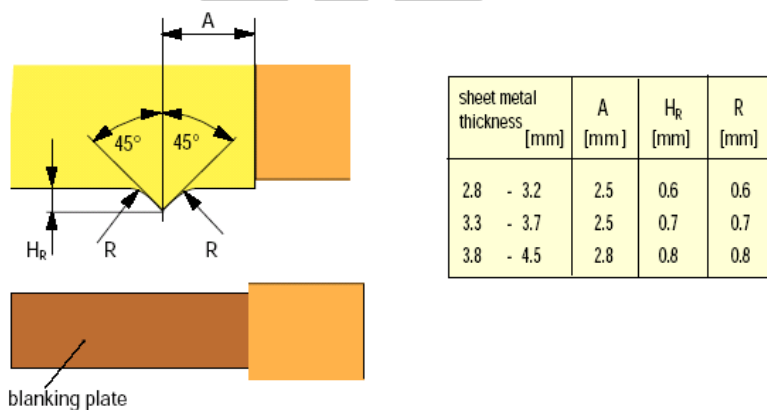
b) eroded (E.D.M)

ภาพประกอบ 17 การออกแบบรูปทรงสำหรับแผ่นวงแหวนตัววี

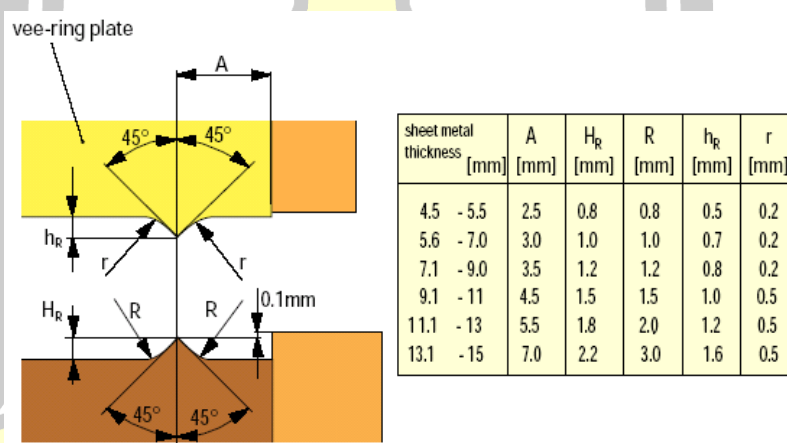
a) แผ่นวงแหวนรูปตัววีที่ได้จากการกัด และมีมุม 30° อยู่ในด้านเข้าหาเส้นรอบรูปของ ขึ้นส่วน

b) แผ่นวงแหวนรูปตัววีที่ได้จากอีดีเอ็ม การตัดมุมที่ต่างกันบนอิเล็กทรอนิกส์ทำได้ยากจึงมีมุม เท่ากัน มีหน้าที่หลักต่อการสร้างความเค้นอัดให้กับชิ้นงานบริเวณรอยเฉือน ทำให้การเคลื่อนไหลตัวของ เนื้อวัสดุงานมีขนาดของความเค้นลดลง ส่งผลให้เนื้อวัสดุชิ้นงานเคลื่อนไหลตามระนาบการตัด

(Cutting Plane) ช่วยรั้งเนื้อวัสดุชิ้นงานที่จะเคลื่อนที่ในแนวราบ (Horizontal Moving Resistance) และทำให้ชุดแม่พิมพ์ทำงานได้คงที่มากขึ้น



ภาพประกอบ 18 ขนาด และตำแหน่งติดตั้งวงแหวนรูปตัววีกรณีความหนาชิ้นงานไม่เกิน 4.5 mm
(ที่มา : Schuler, 1998)

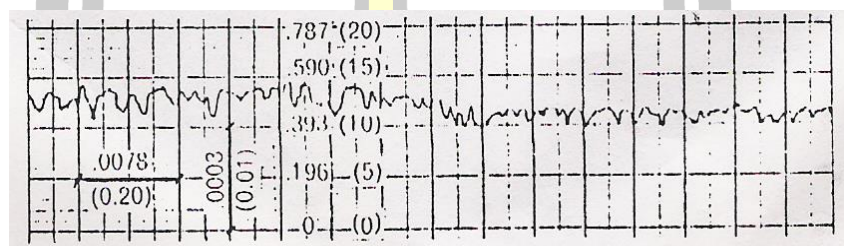


ภาพประกอบ 19 ขนาด และตำแหน่งติดตั้งวงแหวนรูปตัววีกรณีความหนาชิ้นงานเกิน 4.5 mm
(ที่มา : Schuler, 1998)

ตำแหน่งของวงแหวนรูปตัววีอาจอยู่บนผิวของแผ่นจับยึดชิ้นงาน และบนผิวของดาย หรือ อย่างใดอย่างหนึ่ง โดยขนาดระยะห่างของวงแหวนรูปตัววีขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นชิ้นงานที่จะทำการตัดด้วยกรรมวิธีโฟมแบลงค์ โดยปกติวงแหวนรูปตัววีจะยาวต่อเนื่องเป็นเส้นรอบวงของชิ้นงาน แต่ในบางกรณีก็อาจจะไม่ต่อเนื่องกันก็ได้

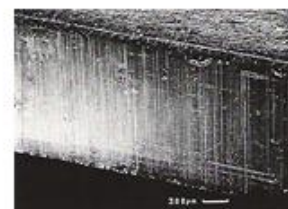
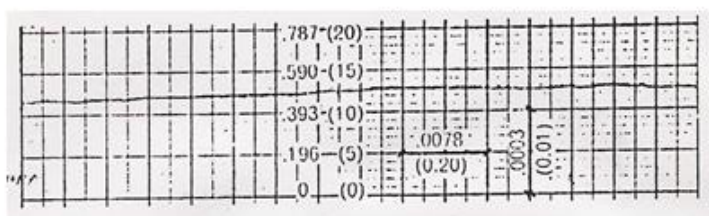
2.2.3 ผิวสำเร็จของผิวตัดเฉือน

ผิวสำเร็จของพันธ์ และตาย มีความสำคัญต่อคุณภาพผิวสำเร็จของชิ้นงานอย่างมาก ส่วนชนิดของวัสดุที่นำมาใช้มีผลเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าใช้วัสดุที่ไม่เหมาะสมเช่น มีสนิมที่ผิวจะมีผลทำให้คุณภาพของผิวตัดเฉือนรอบรูปขึ้นส่วนลดลง คุณภาพผิวของชิ้นงานจากการไฟน์แบลลงค์อยู่ระหว่าง Ra 0.3 μm ถึง Ra 1.5 μm ถ้าใช้แม่พิมพ์ใหม่ก็จะได้ค่าที่ดีกว่านี้ แต่ถ้าแม่พิมพ์ใช้ผลิตชิ้นส่วนมามากแล้วก็จะมีส่วนทำให้คุณภาพผิวสำเร็จลดลงบ้าง



ภาพประกอบ 20 ผิวสำเร็จของชิ้นส่วนจากการไฟน์แบลลงค์คุณภาพผิวสำเร็จ Ra 0.45 μm

กรณีใช้ทั้งสแตนคาร์ไบด์เป็นวัสดุในการทำคมตัด อาจใช้ตัดชิ้นส่วนที่มีความหนาถึง 3 mm โดยมีคุณภาพผิวสำเร็จ Ra 0.1 μm ถึง Ra 0.2 μm วัสดุงานเป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.2% ถึง 0.7% และมีค่าความแข็งแรงการดึง (Tensile strength) อยู่ระหว่าง 400 ถึง 500 N/mm² จะได้ผิวสำเร็จที่มีคุณภาพดีที่สุด



ภาพประกอบ 21 ผิวสำเร็จของชิ้นส่วนจากการไฟน์แบลลงค์คุณภาพผิวสำเร็จ Ra 0.1 μm

2.2.4 ขอบโค้งตายโรล

ชิ้นงานไฟน์แบลลงค์จะเกิดการเสียรูปแบบขอบโค้งที่บริเวณชิ้นส่วนด้านตาย ซึ่งการเสียรูปนี้เรียกว่า ตายโรล (Die roll) แต่ก็เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้

Die-roll



ภาพประกอบ 22 ขอบโค้งตายโรลบนชิ้นงานไฟน์แบลนค์

ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของขอบโค้งตายโรล คือ รูปทรงขนาดเหลี่ยมมุมของชิ้นส่วนที่มีมากจะทำให้ขอบโค้งตายโรลลดลง แผ่นงานที่มีความหนามากจะมีผลให้เกิดขอบโค้งตายโรลมากขึ้น และมักจะปรากฏขอบโค้งตายโรลมากบนวัสดุอ่อน ซึ่งสามารถลดขนาดขอบโค้งตายโรลด้วยการเพิ่มวงแหวนรูปตัววีที่แผ่นตาย หรือ การเพิ่มแรงด้านการเคลื่อนพิ้นซ์

2.2.5 โครงสร้างของแม่พิมพ์ไฟน์แบลนค์

การออกแบบ และโครงสร้างของแม่พิมพ์ไฟน์แบลนค์ มีลักษณะการทำงานที่ซับซ้อนสามารถเปรียบเทียบได้ดีที่สุดกับแม่พิมพ์แบบผสม (Compound die) แต่มีความแข็งแรงมากกว่าความแตกต่างที่สำคัญระหว่างแม่พิมพ์ไฟน์แบลนค์กับแม่พิมพ์ธรรมดา ได้แก่

2.2.5.1 ไม่ต้องใช้สปริงที่ใช้สำหรับการปลดวัสดุ และดันชิ้นส่วนที่ตัดแล้วออกไป แรงเหล่านี้จะเกิดจากสลักที่ได้รับแรงมาจากไฮดรอลิกส์ในเครื่องเพรส

2.2.5.2 ช่องว่างระหว่างพินซ์กับตาย (Clearance) มีขนาดประมาณ 1% ของความหนาแผ่นงาน

2.2.5.3 เนื่องจากมีเคลือบแรนซ์ที่เคลือบจึงต้องการตัวนำ และตัวกำหนดศูนย์ของพินซ์กับแผ่นตายที่มีความแม่นยำมาก

2.2.5.4 ตัดปาดผิวแผ่นกตงาน (Blank holder) ให้เกิดเป็นวงแหวนรูปตัววีตามเส้นรอบรูปด้านนอกของชิ้นส่วน และกดให้ฝังลงบนผิวแผ่นงานด้วยแรงกดจากอุปกรณ์ไฮดรอลิกส์ เพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นงานเคลื่อนไห้ออกจากพินซ์หลัก และเป็นการป้องกันการแตกที่เกิดขึ้นบนผิวตัดเฉือนของชิ้นส่วน

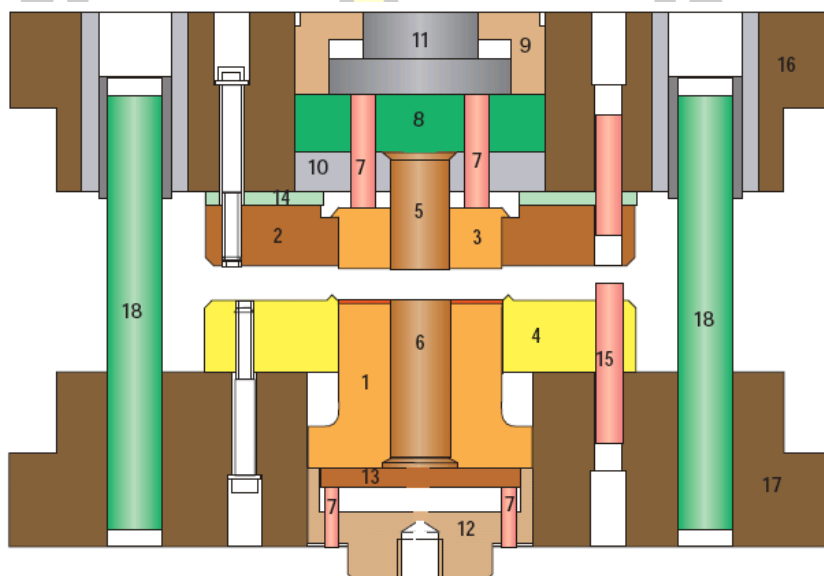
2.2.5.5 พินซ์หลักทำหน้าที่เป็นแผ่นตายสำหรับรูปทรงภายในด้วย ในขณะที่เศษที่ถูกเจาะด้านในไม่ได้ผ่านพินซ์หลัก แต่จะโดนดันออกไปทางด้านบนด้วยอุปกรณ์ดันปลด (Ejector) ที่ส่งแรงดันมาจากระบบไฮดรอลิกส์ในเครื่องเพรสหลังจากที่ตัดเสร็จแล้ว

2.2.5.6 พินซ์ของรูปร่างด้านในจะไม่วิ่งผ่านตลอดความยาวของพินซ์ตัวใหญ่ จึงทำให้พินซ์ของรูปร่างด้านในมีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งอาจผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปทรงภายในซับซ้อน และอยู่ใกล้กันได้ในการทำงานเพียงครั้งเดียว

2.2.6 ชนิดแม่พิมพ์ไฟน์แบลงค์

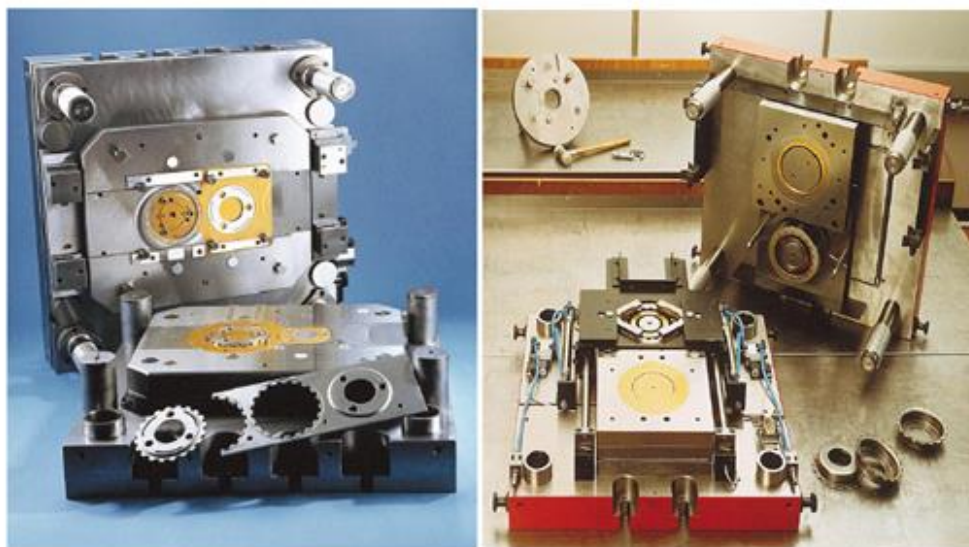
2.2.6.1 แม่พิมพ์ไฟน์แบลงค์แบบพินซ์เลื่อน

เพื่อให้สามารถผลิตชิ้นส่วนไฟน์แบลงค์ได้โดยมีอุปสรรคน้อยที่สุด จำเป็นต้องให้ศูนย์ของพินซ์กับแผ่นตายอยู่ตรงกัน ศูนย์ของพินซ์หลักจะตรงได้ถ้ามีการกำหนดตำแหน่ง และมีตัวบังคับอย่างถูกต้อง แม่พิมพ์ไฟน์แบลงค์แบบใช้พินซ์เลื่อนจะยึดแผ่นตาย และไกด์เพลต (Guide Plate) ติดกับฐานของชุดแม่พิมพ์ ส่วนพินซ์จะเลื่อนผ่านรูคว้านที่อยู่ในชุดแม่พิมพ์ และไกด์เพลตด้านล่าง ระยะการเคลื่อนที่ของพินซ์มักเท่ากับความหนาของวัสดุ จึงเหมาะกับการผลิตชิ้นส่วนขนาดเล็ก และขนาดกลาง

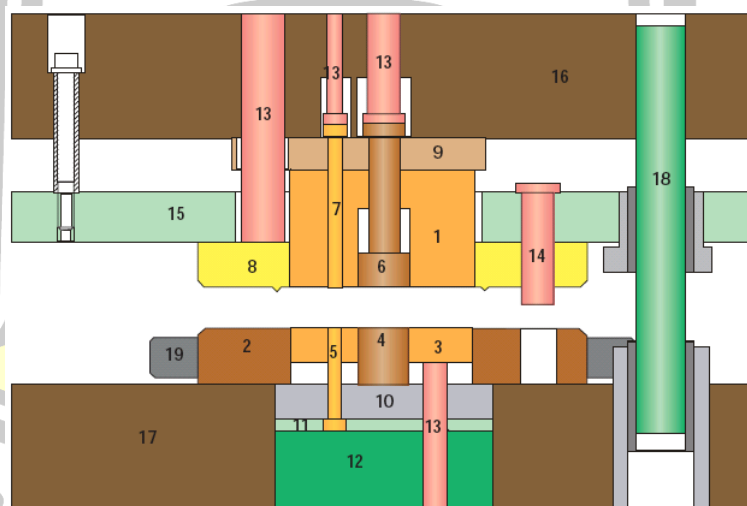


ภาพประกอบ 23 ภาพตัดของแม่พิมพ์ไฟน์แบลงค์แบบพินซ์เลื่อน
(ที่มา : Schuler, 1998)

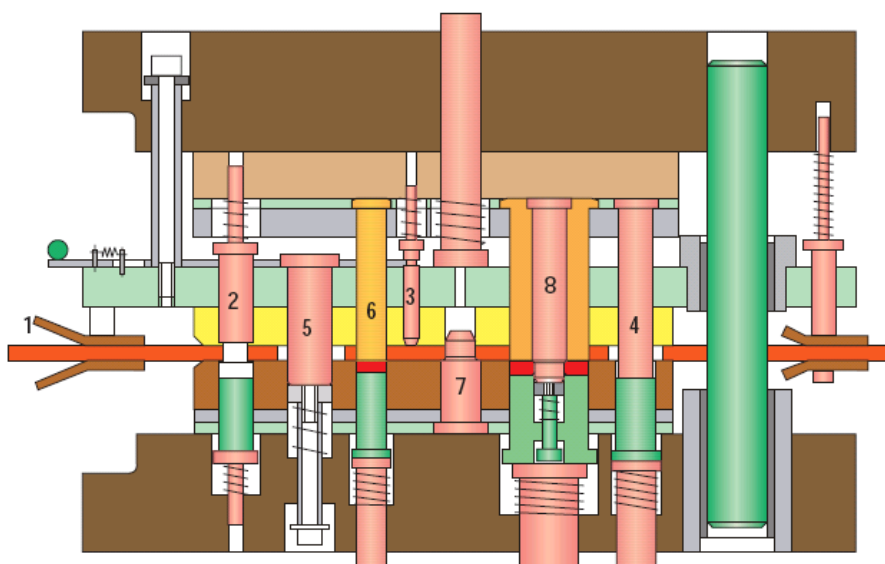
พหุบัน ปณ สิโต ชีเว



ภาพประกอบ 24 แม่พิมพ์ไฟน์แบลงค์แบบฟันซ์เลื่อน
(ที่มา : Schuler, 1998)



ภาพประกอบ 25 ฟันซ์เลื่อนอยู่ภายในปลอกวงแหวน
(ที่มา : Schuler, 1998)

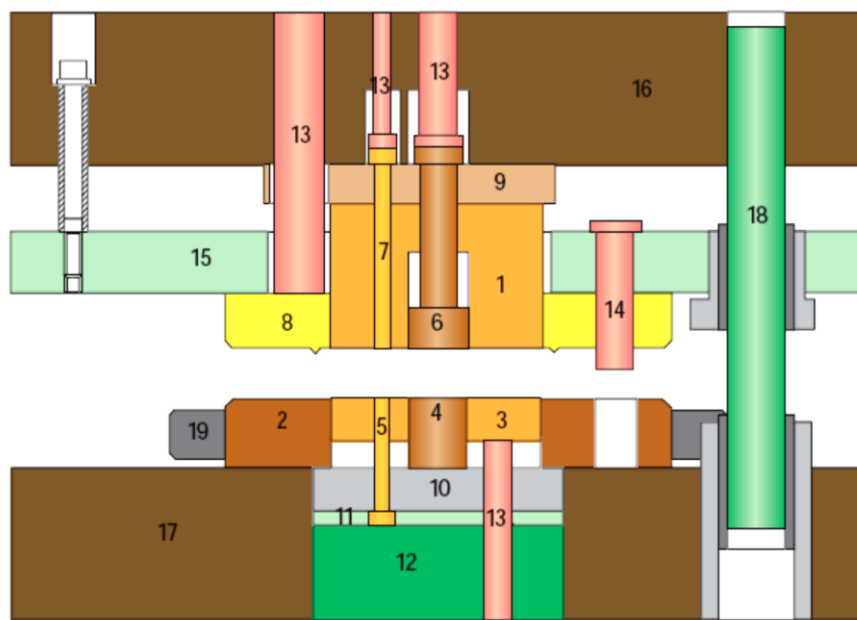


ภาพประกอบ 26 การทำงานแม่พิมพ์ไฟน์เบลนค์แบบพินซ์เลื่อน
(ที่มา : Schuler, 1998)

2.2.6.2 แม่พิมพ์ไฟน์เบลนค์แบบพินซ์อยู่กับที่

แม่พิมพ์ไฟน์เบลนค์แบบพินซ์อยู่กับที่ได้ออกแบบให้พินซ์ยึดติดกับชุดแม่พิมพ์ และใช้สลักล็อกการเคลื่อนที่ไว้ (Dowel pin) สำหรับแผ่นบังคับ (Guide plate) จะช่วยทำหน้าที่เป็นแผ่นกดที่มีวงแหวนรูปตัววีติดอยู่ ด้วยเหตุนี้แผ่นบังคับจึงต้องยึดอย่างแน่นหนา และเลื่อนโดยอาศัยสลักนำ (Guide post) ซึ่งแม่พิมพ์ไฟน์เบลนค์แบบพินซ์อยู่กับที่ลักษณะนี้เหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ ยาว แคบ ชิ้นส่วนที่ไม่สมมาตร ซึ่งมีโอกาสเกิดแรงดันด้านข้างในขณะตัดเฉือน ชิ้นงานที่ส่วนหนา และต้องการแม่พิมพ์ที่แข็งแรงเป็นพิเศษ

พูน ปณ จิต ชีเว



ภาพประกอบ 27 แม่พิมพ์ไฟน์แบลนค์ที่ใช้พื้นที่ตายตัว

(ที่มา : Schuler, 1998)

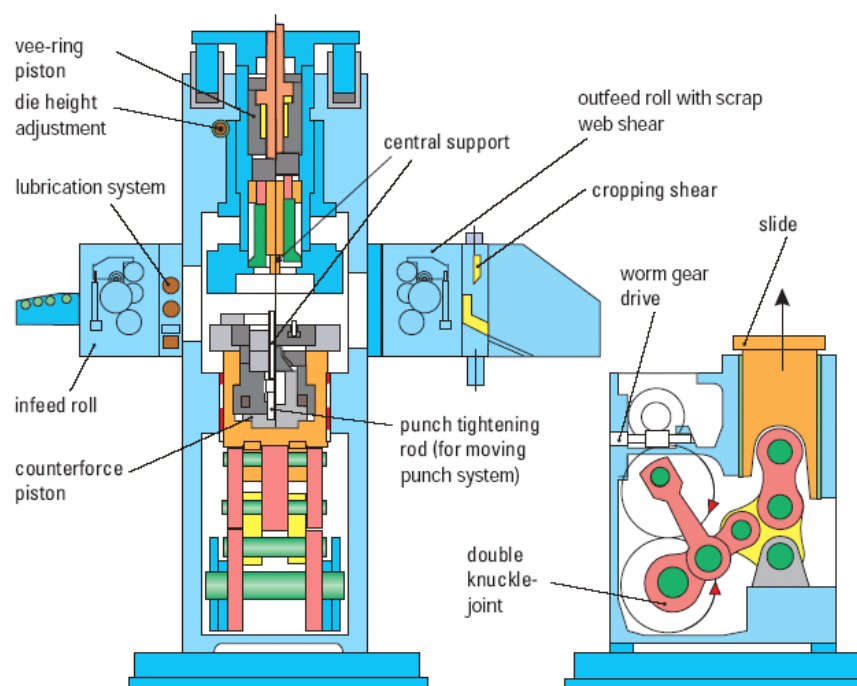
2.2.7 โครงสร้าง และข้อกำหนดของเครื่องเพรสไฟน์แบลนค์

เครื่องเพรสไฟน์แบลนค์มีการทำงานด้วยการส่งแรงในการทำงานได้ดังนี้ คือ แรงกดตัดแรงกดวงแหวนรูปตัววี และแรงต้านการเคลื่อนที่ของพื้นที่ โดยพื้นฐานแล้วเครื่องเพรสไฟน์แบลนค์มีอยู่ 2 แบบใหญ่ ๆ คือ

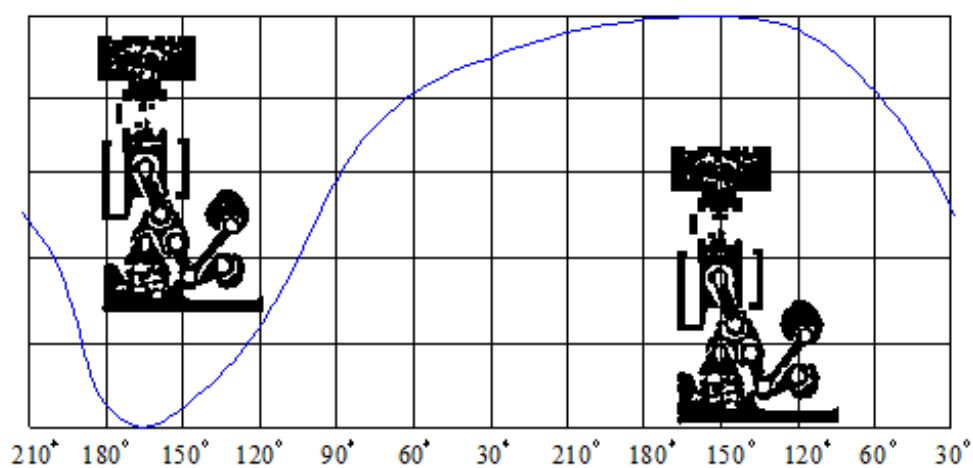
2.2.7.1 เครื่องเพรสกลไกข้อต่อคู่ (Double toggle press) สำหรับงานที่ต้องการแรงตัดเฉือนน้อย ซึ่งอยู่ในช่วง 250 kN ถึง 2500 kN

2.2.7.2 เครื่องเพรสไฮดรอลิกส์สำหรับการไฟน์แบลนค์ (Hydraulics fine blank) สำหรับงานที่ต้องการแรงตัดเฉือนมาก ซึ่งอยู่ในช่วง 2500 kN ถึง 25000 kN

พหุ ประสิทธิภาพ

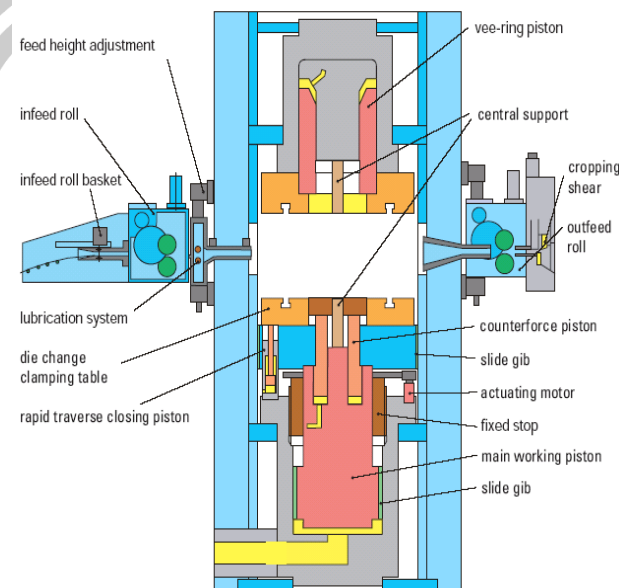


ภาพประกอบ 28 ภาพตัดเครื่องเพรสไฟน์แบลงค์ที่ขับเคลื่อนด้วยข้อต่อคู่
(ที่มา : Schuler, 1998)

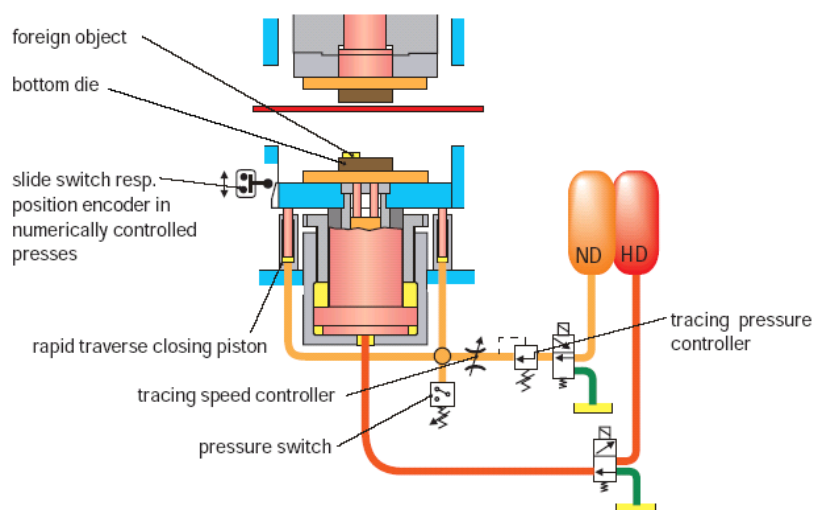


ภาพประกอบ 29 ไดอะแกรมอัตราความเร็วแรมของเครื่องเพรสไฟน์แบลงค์ระบบข้อต่อคู่
(ที่มา : Schuler, 1998)

กรณีที่ต้องการแรงตัดน้อยจะใช้ระบบกลไกที่มีการบำรุงรักษาได้ง่าย (Feintool-Osterwalder Press) เพื่อให้เกิด Soft Shear Action สำหรับขั้นตอนของการไฟน์แบลนค์ใช้เครื่องเพรสระบบข้อต่อคู่ เมื่อต้องการแรงตัดมากระบบกลไกข้อต่อคู่จะต้องสร้างขึ้นอย่างแข็งแรงมาก ดังนั้นระบบที่ทำงานด้วย ไฮดรอลิกส์จึงประหยัดมากกว่า



ภาพประกอบ 30 ภาพตัดเครื่องไฮดรอลิกส์เพรสไฟน์แบลนค์
(ที่มา : Schuler, 1998)



ภาพประกอบ 31 ภาพตัดผ่านชุดควบคุมเครื่องไฮดรอลิกส์เพรสไฟน์แบลนค์
(ที่มา : Schuler, 1998)

2.2.8 การคำนวณแรงที่เกี่ยวข้องในกระบวนการไฟนแบลงค์

ปฏิกิริยาของแรงกระทำที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฟนแบลงค์มีอิทธิพลต่อคุณภาพของชิ้นงาน เมื่อแม่พิมพ์เริ่มทำงานจะมีเพียงแรงจากวงแหวนรูปตัววีจะกดเข้าไปในเนื้อของชิ้นงาน และแผ่นด้านการเคลื่อนพินซ์จะดันด้านการตัดเฉือนเมื่อหน้าสัมผัสของพินซ์สัมผัสกับชิ้นงาน ดังนั้นก่อนที่จะเริ่มตัดชิ้นงานด้วยแรงตัด ชิ้นงานจะถูกยึดไว้เรียบร้อยแล้วทั้งด้านใน และด้านนอกขอบคมตัด ซึ่งแรงทั้งสามสามารถหาได้ดังนี้

2.2.8.1 การคำนวณแรงตัดเฉือน (Shear Force) ซึ่งจะเหมือนกับกรรมวิธีตัดเฉือนอย่างง่ายด้วยสมการ 2.1

$$F_s = l \cdot t \cdot \sigma_s \quad (2.1)$$

แต่ค่าของ $\sigma_s = \sigma_u \times f_1$

เมื่อ F_s = แรงตัดเฉือน (Shear Force; N)

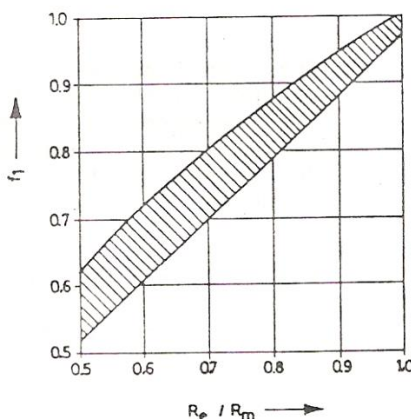
l = ความยาวเส้นรอบรูปชิ้นงาน (mm)

t = ความหนาวัสดุ (mm)

σ_s = ความเค้นเฉือน (N/mm²)

σ_u = ความเค้นแรงดึงสูงสุด (N/mm²)

f_1 = อัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นที่จุดครากต่อค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด
0.6-0.9



ภาพประกอบ 32 ค่าตัวประกอบแก้ไข

2.2.8.2 การคำนวณแรงวงแหวนรูปตัววี (Vee-ring Force)

$$F_R = l_R \cdot h \cdot \sigma_U \cdot f_2 \quad (2.2)$$

เมื่อ F_R = แรงกดแหวนจิก (N)
 l_R = เส้นรอบรูปแหวนจิก (mm)
 h = ความสูงแหวนจิก (mm)
 σ_U = ความเค้นแรงดึงสูงสุด (N/mm²)
 f_2 = ค่าตัวประกอบได้จากการทดลอง =

2.2.8.3 การคำนวณแรงดันด้านการเคลื่อนที่ (Counter punch Force)

$$F_G = A_s \cdot q_G \quad (2.3)$$

เมื่อ F_G = แรงด้านการตัดเฉือน (N)
 A_s = พื้นที่โปรไฟล์ของชิ้นงาน (mm²)
 q_G = สัมประสิทธิ์แรงดันด้านการตัดเฉือนงานไฟนแบลลังก์ ~ 2-7 N/mm²

2.2.8.4 การคำนวณหาค่าแรงตัดทั้งหมดที่ใช้ในการขึ้นรูป (Total Force)

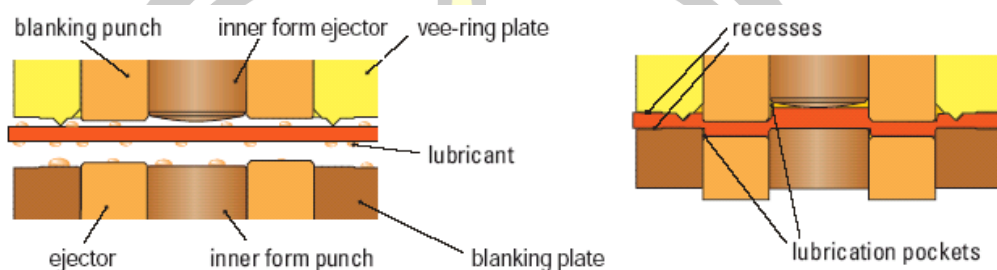
$$F_T = F_s + F_R + F_G \quad (2.4)$$

เมื่อ F_s = แรงตัดเฉือน (N)
 F_R = แรงกดแหวนจิก (N)
 F_G = แรงดันด้านการตัดเฉือน (N)

2.2.9 การหล่อลื่น

กระบวนการไฟนแบลลังก์จำเป็นต้องมีการหล่อลื่นที่แม่พิมพ์ และชิ้นงาน หากไม่มีการใช้สารหล่อลื่นจะเกิดการเชื่อมเย็นระหว่างเศษชิ้นงานกับพื้นที่ส่งผลให้ตายสีก หรือ ทื่อได้ ทั้งนี้เนื่องจากกรรมวิธีนี้มีความแม่นยำสูง และขนาดของช่องว่างระหว่างพื้นที่กับตายที่แคบ การหล่อลื่นอาจทำ

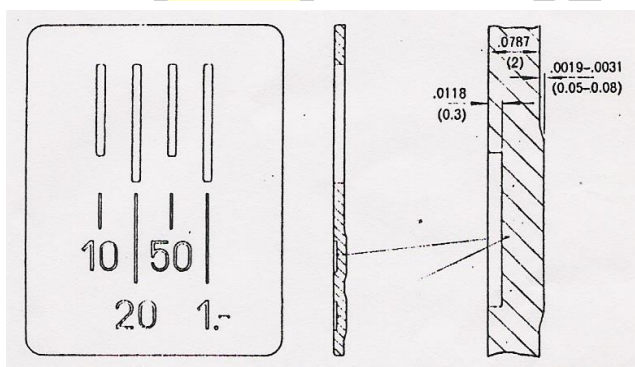
ด้วยการทา หรือ ฉีดให้กับชิ้นงานก็ได้ แต่ต้องให้มีสารหล่อลื่นติดทั้งบน และล่างชิ้นงาน ดังนั้นการออกแบบแม่พิมพ์จึงจำเป็นต้องมีการลบมุม (Chamfer) ที่รอบรูปร่างของแผ่นด้านการเคลื่อนพื้นซ์ และแผ่นกดชิ้นงานที่มีวงแหวนรูปตัววี เพื่อไว้สำหรับกักเก็บน้ำมันที่กระจายตัวในขณะที่แม่พิมพ์ทำงาน



ภาพประกอบ 33 การออกแบบแม่พิมพ์เพื่อกักสารหล่อลื่นบริเวณการตัดขณะทำการไฟน์แบลงค์
(ที่มา : Schuler, 1998)

2.2.10 การทำเครื่องหมาย การกึ่งเจาะ และการปั๊มเหรียญ (Coining)

การทำเครื่องหมาย และตัวอักษรค่อนข้างลึก (Marking) สามารถทำได้ในแม่พิมพ์ไฟน์แบลงค์ โดยไม่ทำให้ชิ้นส่วนมีต้นทุนเพิ่มขึ้น สิ่งที่ต้องสังเกตในกรณีนี้คือด้านที่ต้องการทำเครื่องหมายควรอยู่ทางด้านตาย ซึ่งอาจทำให้เกิดรอยได้โดยใช้อุปกรณ์ดันปลด (Ejector)



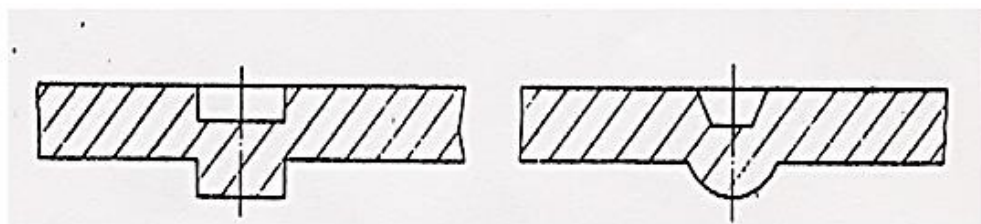
ภาพประกอบ 34 การปั๊มเหรียญบนแผ่นชิ้นงานสำหรับหยอดเหรียญโทรศัพท์

การกึ่งเจาะ (Semi piercing) เป็นการกดเจาะเพียงครึ่งเดียวบนชิ้นส่วนไฟน์แบลนค์ ซึ่งจะ
ไม่เกิดรอยแตกขึ้นที่บริเวณตัดเฉือนเหมือนกับในการแบลนค์แบบธรรมดา



ภาพประกอบ 35 ภาพขยายขนาดของการเซมิเพียซ มาตรฐาน 150 : 1

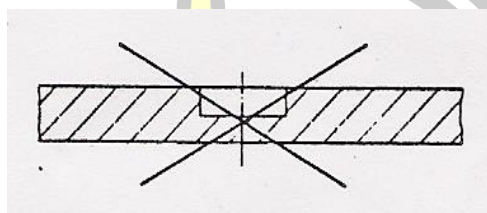
โครงสร้างของวัสดุเกิดการเคลื่อนไหลตัวในทิศทางต่าง ๆ ซึ่งการขึ้นรูปเย็นจะช่วยทำให้
ความต้านแรงของวัสดุในบริเวณการตัดเฉือนเพิ่มขึ้น ซึ่งชิ้นงานแบลนค์แบบธรรมดาจะไม่มีลักษณะ
โครงสร้างดังกล่าวนี้ เพราะเมื่อพันธเคลื่อนที่เข้าไปในวัตถุใดหนึ่งในสามของความหนาทำให้
โครงสร้างที่เหลือของวัสดุขาดออกจากกัน ซึ่งโดยปกติแล้วจะเป็นการสะดวกที่สุดที่จะทำการเซมิ
เพียซให้มีรูปทรงด้านใน และด้านนอกเหมือนกัน ในทางปฏิบัติแล้วก็อาจมีรูปทรงแตกต่างกัน ในกรณี
เช่นนี้ปริมาตรของรูปทรงด้านนอกอย่างน้อยที่สุดต้องเท่ากับปริมาตรของรูปทรงด้านใน ห้ามมิให้
ปริมาตรของรูปทรงด้านนอกน้อยกว่ารูปทรงด้านในเพื่อให้วัสดุไหลเข้าไปแทนที่ได้ง่าย



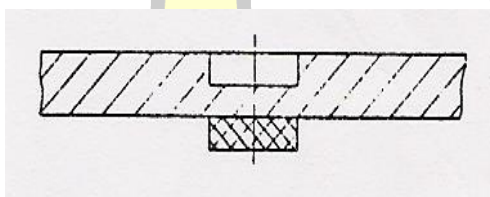
ก. รูปทรงด้านนอก และ ด้านในเหมือนกัน ข. รูปทรงด้านนอก และ ด้านในต่างกัน

ภาพประกอบ 36 การเซมิเพียซที่มีส่วนยื่น

การเชื่อมเป็ชที่มีส่วนยื่นสามารถผลิตได้โดยการทำงานเพียง หนึ่งจังหวะการทำงานของ เครื่องเพรสโดยแม่พิมพ์แบบผสม โดยการเสริมพ่นซีไว้ที่ด้านตายของแม่พิมพ์ ถ้าการเชื่อมเป็ชมีส่วน ยื่นทางด้านตายของชิ้นส่วนจะต้องผ่านขั้นตอนเชื่อมเป็ชก่อน จึงทำการไฟน์แบลงค์เป็นขั้นตอน สุดท้ายในแม่พิมพ์โพเรสซีฟ



ภาพประกอบ 37 การปั๊มเหรียญที่ยังทำไม่ได้



ภาพประกอบ 38 การปั๊มเหรียญเพื่อทำการเชื่อมเป็ช และอาจกัดส่วนยื่น

2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะที่ได้รับการพัฒนา และเป็นที่ยอมรับ มีอยู่หลายวิธี เช่น วิธี Slab Method , Slip-Line Field Method , Viscoplasticity Method , Upper and Lower Bound Techniques , Hill's General Method และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เนื่องจากการพัฒนานำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ จึงทำให้ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่ยอมรับใช้กันมาก และสะดวกในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ อย่าง กว้างขวาง ซึ่งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้มีการเริ่มต้น โดยในปี ค.ศ.1940 ได้มีการเริ่มนำแนวคิดทางไฟไนต์ เอลิเมนต์มาใช้วิเคราะห์ปัญหาความเค้นในมิติเดียวเช่น ความเค้นในท่อนโลหะ และคาน แต่ในช่วงนั้น ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย ต่อมาในปี ค.ศ.1954 เครื่องคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนา ให้มี ประสิทธิภาพสูงขึ้น การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงได้รับความนิยมมากขึ้น วิธีไฟ ไนต์เอลิเมนต์ได้รับความสนใจมากขึ้น และได้พัฒนาใช้หลักการต่าง ๆ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มี

การเปลี่ยนรูปของวัสดุอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่นเชิงเส้นได้ โดยมีความเครียดและการกระจัดมาก ปัจจุบันวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง และประยุกต์ในการวิเคราะห์ปัญหาทางโครงสร้าง ความดัน การไหลตัวของของไหล การนำความร้อน การเปลี่ยนรูปของโลหะ การสั่นสะเทือน สนามแม่เหล็ก และปฏิกิริยาอนุภาคทางเคมี เป็นต้น

การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการจำลองการขึ้นรูปโลหะเป็นที่นิยมมาก เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายน้อย สะดวกรวดเร็ว และสามารถบอกสถานะที่เกิดขึ้นงานขณะทำการเปลี่ยนรูปได้ ซึ่งในการทดลองไม่สามารถทำได้ หรือ ถ้าทำได้จะมีความยุ่งยากใช้เวลามาก และต้องการค่าใช้จ่ายในการทำสูง ทำให้มีผู้วิจัยเลือกทำการจำลองการทำงานด้วยกรรมวิธีนี้นี้กันมากในปัจจุบัน แต่เนื่องจากการจำลองการทำงานที่ทำให้ผลที่ได้จึงเป็นการทำนายปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้น ความเที่ยงตรง และถูกต้องของผลที่ได้จะขึ้นอยู่กับผู้ใช้ ถ้าสามารถกำหนดสถานะการทำงานให้เหมือนจริง กำหนดคุณสมบัติของวัสดุได้ถูกต้อง ตลอดจนเลือกทฤษฎี และเกณฑ์การวิเคราะห์ความเสียหาย (Fracture Criterion) ได้ถูกต้องก็จะทำให้ผลที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีเรื่องของความผิดพลาด ที่อาจเกิดจากการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ในกรณีที่ใช้ซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์

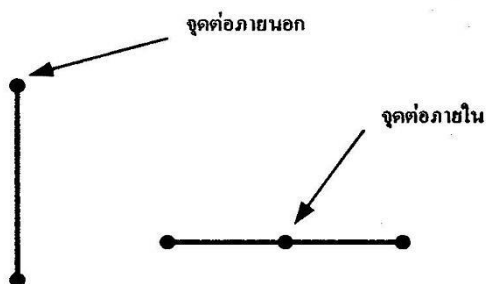
หลักการทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือ การแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อย ๆ เรียกว่าไฟไนต์เอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัด ซึ่งนำมาแทนเอลิเมนต์และเป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง ในแต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมโยงกันด้วยจุดต่อ และเส้นขอบ หรือ ผิวรอบเอลิเมนต์ที่สัมผัสกัน โดยอาศัยการกำหนดคุณสมบัติทางกลที่ถูกต้องให้กับวัสดุ ที่ใช้ทำโครงสร้าง หรือ ชิ้นงาน เราสามารถหาการกระจัด ความเค้น และความเครียดที่เกิดขึ้นที่จุดต่อต่าง ๆ ของเอลิเมนต์ที่ประกอบกันเป็นโครงสร้าง หรือ ชิ้นงาน เป็นหลักวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ สามารถประยุกต์ใช้ได้กับปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง ไม่ว่าวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์จะอยู่ในสภาพยืดหยุ่น หรือ สภาพพลาสติก การวิเคราะห์โครงสร้างจำลองของปัญหา จะประกอบจากชิ้นส่วนเล็ก ๆ ตามรูปทรงชิ้นงานเรียกว่าเอลิเมนต์ รูปร่างของเอลิเมนต์ถูกกำหนดด้วยจุดต่อตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไป โดยทั่วไปการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อย ๆ อย่างต่อเนื่อง ตามรูปร่างลักษณะแท้จริงของชิ้นงาน การวิเคราะห์จะนำค่าของแต่ละเอลิเมนต์มารวมกันเป็นผลเฉลยของทั้งระบบผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อ ของแต่ละเอลิเมนต์ จากนั้นจึงหาการกระจัด และความเค้นของแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์ ที่เป็นโครงสร้างของระบบได้ การแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อย ๆ จากนั้นนำฟังก์ชันการกระจัด มาแทนลักษณะรูปร่างของเอลิเมนต์ ซึ่งต้องเป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง โดยแต่ละเอลิเมนต์โยงกันด้วยจุดต่อ และอาศัยความสัมพันธ์ความเค้น ความเครียด และการกระจัด ในการหาผลเฉลยของปัญหา ณ จุดต่อต่าง ๆ ของเอลิเมนต์

2.3.1 การแบ่งโครงสร้าง และการแบ่งส่วนเอลิเมนต์

การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ต้องแบ่งชิ้นงานออกเป็น ส่วนเล็ก ๆ และการเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ ต้องเหมาะสมกับรูปร่างลักษณะของงาน โดยเอลิเมนต์ แบ่งเป็น 3 ชนิด ตามมิติคือ เอลิเมนต์สำหรับปัญหามิติเดียว สองมิติ และสามมิติ การเลือกใช้ชนิด ของเอลิเมนต์จะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของชิ้นงาน โดยการแบ่งชิ้นงานออกเป็น ส่วนเล็ก ๆ จะต้องเหมาะสมกับบริเวณที่เป็นส่วนเว้า ส่วนโค้ง หรือ มีรู ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของ เอลิเมนต์ ได้สาม ประเภทตามมิติคือ

2.3.1.1 เอลิเมนต์แบบมิติเดียว

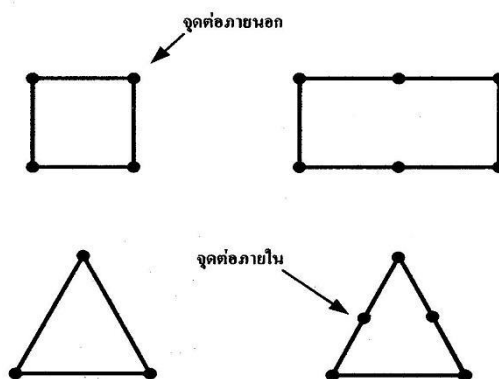
เอลิเมนต์ชนิดนี้จะใช้ปัญหามิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน ชิ้นส่วนที่รับแรงบิด หรือ การโก่งของคาน เป็นต้น ในแต่ละเอลิเมนต์จะประกอบด้วยจุดต่อภายนอก หรือ อาจมีจุดต่อภายในร่วมก็ได้ เพื่อให้การวิเคราะห์ผลเฉลยมีความแม่นยำมากขึ้น



ภาพประกอบ 39 เอลิเมนต์แบบมิติเดียว

2.3.1.2 เอลิเมนต์แบบสองมิติ

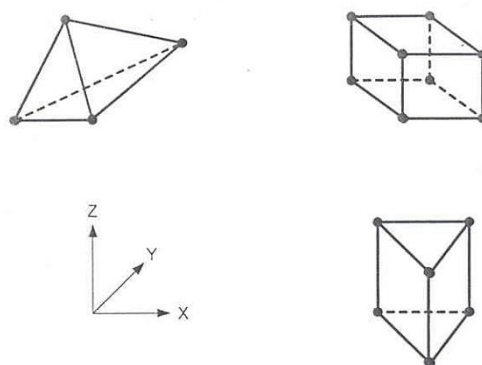
เอลิเมนต์ชนิดนี้เหมาะสำหรับวิเคราะห์ปัญหาในระบบสองมิติ และนิยมใช้ สำหรับวิเคราะห์ปัญหาความเค้นระนาบ หรือ ความเครียดระนาบ ซึ่งเอลิเมนต์จะเป็นรูปสามเหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมที่ประกอบ ด้วยด้านที่เป็นเส้นตรงและประกอบด้วยจุดต่อภายใน หรือ จุดต่อภายนอกพร้อม ด้วย



ภาพประกอบ 40 เอลิเมนต์แบบสองมิติ

2.3.1.3 เอลิเมนต์แบบสามมิติ

เอลิเมนต์สามมิติจะใช้วิเคราะห์ปัญหาสามมิติทั่วไป ที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ทั้งสามแนวแกน รูปทรงของเอลิเมนต์จะมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมปริซึมรูปกรวยสามเหลี่ยม หรือ ปริซึม เป็นต้น



ภาพประกอบ 41 เอลิเมนต์แบบสามมิติ

การแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ต้องคำนึงถึงจำนวนเอลิเมนต์ และจำนวนจุดต่อที่ใช้ การแบ่งเอลิเมนต์สำหรับแทนรูปร่างชิ้นงานเดิมนั้น รูปร่างที่ได้ต้องใกล้เคียงกับของจริงมากที่สุด เช่น บริเวณที่มีส่วนโค้ง ส่วนเว้า เป็นต้น ส่วนบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากนัก อาจแทนส่วนนั้นด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ถ้าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วยเอลิเมนต์จำนวนมากเกินความจำเป็น จะทำให้เสียทั้งเวลา และค่าใช้จ่ายในการคำนวณ ส่วนการเลือก

ชนิดของเอลิเมนต์ ต้องคำนึงถึงรูปร่างของการเปลี่ยนรูป และความเหมาะสมกับปัญหาที่ทำการวิเคราะห์ แบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ที่เชื่อมโยกัน ด้วยจุดต่อซึ่งการแบ่งเอลิเมนต์สองมิติ หรือ สามมิติ สามารถแบ่งเป็นรูปสามเหลี่ยม หรือ สี่เหลี่ยมก็ได้ มีหลักในการปฏิบัติทั่วไป คือ ควรหลีกเลี่ยงการใช้เอลิเมนต์ที่มีรูปร่างผิดปกติไม่สมมาตร เช่น เอลิเมนต์ที่มีรูปเป็นสามเหลี่ยมมุมป้านมาก หรือ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีด้านยาวมากเกินไป โดยใช้รูปร่างของเอลิเมนต์ที่เป็นสามเหลี่ยม หรือ สี่เหลี่ยมด้านเท่า หรือ มีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว เข้าใกล้จำนวนเต็ม 1 มากที่สุด และควรใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กเป็นจำนวนมากในบริเวณที่เป็นจุดวิกฤต หรือ มีการเปลี่ยนรูปมากที่คาดว่าจะมีความเค้นหนาแน่น และใช้เอลิเมนต์ขนาดใหญ่ ในบริเวณที่ไม่ใช่จุดวิกฤต

2.3.2 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถหาได้หลายวิธีดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เช่น วิธีแปรผัน วิธีโดยตรง และวิธีอื่น ๆ เป็นต้น ในปัญหาความเค้นระนาบของโลหะแผ่นบาง จะใช้หลักของงานสมมุติสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะต้องสร้างฟังก์ชันขึ้น แล้วทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน และสทิกเพเนสมทริกซ์ของเอลิเมนต์ สมการที่แทนแบบจำลองของวัสดุแบบแข็งเกร็ง – พลาสติก อธิบายว่า เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำที่พื้นผิว (S) และกำหนดให้แรงกระทำที่พื้นผิววัสดุเป็น (F_i) ดังนั้นแรงที่กระทำภายนอกบนพื้นผิววัสดุสามารถเขียนได้ดังนี้

$$F_i = \sigma_{ij} n_j \quad (2.5)$$

เมื่อ F_i คือ แรงภายนอก

σ_{ij} คือ ความเค้นที่เกิดขึ้น

n_j คือ ทิศทางที่แรงมากระทำกับวัสดุ

งานที่เกิดขึ้นจากแรงภายนอก จะเริ่มเมื่อมีแรงมากระทำที่พื้นผิวของวัสดุ เกิดการเปลี่ยนรูปเกิดขึ้น หรือ มีการกระจัดเกิดขึ้น ถ้าวัสดุอยู่ในสภาวะสมดุลแรงภายนอกจะต้องเท่ากับแรงภายใน ซึ่งแรงต่อหน่วยเวลาที่กระทำบนพื้นผิว คือ

$$\int_s F_i w_j dS \quad (2.6)$$

เมื่อ w_j คือ ความเร็วที่กระทำบนพื้นผิววัสดุ เมื่อแทนลงในสมการที่จะได้

$$\int_s \sigma_{ij} n_j w_j dS \quad (2.7)$$

และเมื่อแปลงสมการเชิงพื้นผิว (dS) ให้เป็นสมการเชิงปริมาตร (dV) ทำให้สมการ มีค่าเท่ากับ

$$\int_v \sigma_{ij} \frac{\partial w_j}{\partial x_j} dV \quad (2.8)$$

เนื่องจากแรงที่กระทำภายนอกย่อมเท่ากับพลังงานความเครียดที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปภายในเนื้อวัสดุ

$$U = W \quad (2.9)$$

เมื่อ U คือ พลังงานความเครียดภายใน

W คือ พลังงานศักย์ที่เกิดขึ้นจากแรงภายนอก

เมื่อรวมพลังงานความเครียดภายใน และพลังงานศักย์จากภายนอก ดังนั้นพลังงานศักย์รวมคือ

$$\pi = U + W \quad (2.10)$$

และเมื่อไปแทนสมการจะได้พลังงานศักย์รวมคือ

$$\int_v \sigma_{ij} \frac{\partial w_j}{\partial x_j} dV = \int_s F_i w_j dS \quad (2.11)$$

เนื่องจาก $\frac{\partial w_j}{\partial x_j}$ เป็นความเร็วที่กระทำบนพื้นผิววัสดุต่อแนวการเคลื่อนที่ ดังนั้นสมการอัตรางานสมมุติในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใหม่คือ

$$\int_v \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dV = \int_s F_i w_j dS \quad (2.12)$$

เมื่อแยกเทอมของความเค้นออก เป็นความเค้นเฉลี่ย หรือ ความเค้นไฮโดรสแตติก และความเครียดเบี่ยงเบนตั้งสมการ

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \delta_{ij} \sigma_m \quad (2.13)$$

ซึ่งสามารถเขียนขึ้นใหม่ได้ดังนี้

$$\int_V (\sigma'_{ij} + \delta_{ij} \sigma_m) \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV - \int_S F_i \delta w_j dS = 0 \quad (2.14)$$

เมื่อจัดรูปสมการเพื่อพิจารณาความเค้นเฉลี่ย และความเค้นเบี่ยงเบนจะได้

$$\int_V \sigma'_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_V \sigma_m \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_S F_i \delta w_j dS = 0 \quad (2.15)$$

เมื่อกำหนดให้ความเค้นเบี่ยงเบน มีค่าเท่ากับ ความเค้นประสิทธิผล ซึ่งเป็นพฤติกรรมในช่วงพลาสติก $\sigma'_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} = \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon}$ ดังนั้น จึงสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + \int_V \sigma_m \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_S F_i \delta w_j dS = 0 \quad (2.16)$$

เมื่อนำส่วนของการยืดหยุ่นออกจากสมการ โดยกำหนดให้อัตราความเครียดเชิงปริมาตร เท่ากับศูนย์ ($\dot{\epsilon}_v = 0$) ดังนั้น

$$\int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + \int_V \sigma_m \delta \dot{\epsilon}_v dV + \int_V \delta \sigma_m \dot{\epsilon}_v dV - \int_S F_i \delta w_j dS = 0 \quad (2.17)$$

จากสมการ $\mathbf{Y}' = \frac{d\mathbf{y}}{d\epsilon^p}$ ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานไฟไนต์เอลิเมนต์ และกำหนดให้ความเค้นเฉลี่ย มีค่าเท่ากับตัวคูณลากรางเจียน λ ทำให้สามารถจัดรูปใหม่ได้ คือ

$$\delta \pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + \int_V \lambda \dot{\epsilon}_v dV - \int_S F_i \delta w_j dS = 0 \quad (2.18)$$

ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อีกวิธีหนึ่ง

2.3.3 สมการเกณฑ์ความเสียหาย (Fracture criterion equation)

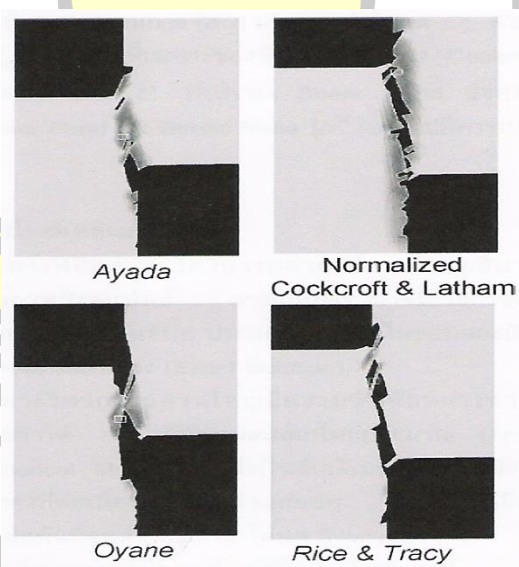
การนำเอาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะ ต้องพิจารณาถึงความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในชิ้นส่วนของการขึ้นรูปโลหะ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุได้ แต่ต้องกำหนดเกณฑ์ความเสียหายที่เหมาะสม เกณฑ์ความเสียหายของวัสดุที่มีผู้คิดค้นขึ้นมา มีอยู่หลายเกณฑ์ด้วยกัน และแต่ละเกณฑ์ความเสียหายก็ทำให้การเริ่มแตกร้าว และการขยายตัวของรอยร้าวของวัสดุไปคนละแบบไม่เหมือนกัน ทำให้รูปร่างของผิวรอยแตกก็ต่างกันด้วย

$$\text{Ayada criterion} \quad C_{\text{Ayada}} = \int_0^{\epsilon} \frac{\sigma_m}{\sigma_v} \cdot d\epsilon_v \quad (2.19)$$

$$\text{Cockcroft \& Latham criterion} \quad C_{\text{NormC\&L}} = \int_0^{\epsilon} \frac{\sigma_1}{\sigma_v} \cdot d\epsilon_v \quad (2.20)$$

$$\text{Rice \& Tracy criterion} \quad C_{\text{Rice\&Tracy}} = \int_0^{\epsilon} \exp\left(\frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_v}\right) \cdot d\epsilon_v \quad (2.21)$$

$$\text{Oyane criterion} \quad C_{\text{Oyane}} = \int_0^{\epsilon} \left(1 + A \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_v}\right) \cdot d\epsilon_v \quad (2.22)$$



ภาพประกอบ 42 รูปร่างแสดงรอยแตกตามทฤษฎีต่าง ๆ

(ที่มา : ฉัตรแก้ว , 2554)

การวิเคราะห์กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ต้องพิจารณาถึงความเสียหาย หรือ แตกหักของวัสดุงานด้วย ซึ่งความเสียหายดังกล่าวสามารถแสดงผลได้ด้วยการกำหนดเกณฑ์ความเสียหาย (Fracture Criterion) ที่เหมาะสม สำหรับเกณฑ์ของความเสียหายที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ Oyane criterion เนื่องจากรายงานการวิจัยด้านการขึ้นรูปโลหะ โค้งงอมากมักอ้างอิงถึงความสามารถทำนายความเสียหายของวัสดุในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะได้อย่างแม่นยำ ดังแสดงตาม สมการที่ (2.23)

$$\int_0^{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma^*}{\sigma} d\bar{\epsilon} = C \quad (2.23)$$

โดยที่ $\bar{\sigma}$ คือ ค่าความเค้นสมมูล (Equivalent Stress) $\bar{\epsilon}$ คือ ความเครียดสมมูล และ ϵ_f คือความเครียดสมมูลขณะเกิดความเสียหาย โดยค่าที่ได้จากการอินทิเกรตตามสมการที่ (2.23) มากกว่าค่าวิกฤต C ซึ่งเป็นค่าคงที่เฉพาะของวัสดุ แสดงว่าจะเกิดความเสียหายกับวัสดุชิ้นงานขึ้น การกำหนดค่า C สามารถทำได้สองวิธี คือ เปรียบเทียบตำแหน่งที่เริ่มเกิดความเสียหาย (Crack Initiation) ของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปจริงกับตำแหน่งที่เกิดขึ้นในการจำลองการทำงาน และอีกวิธีคือทำการทดสอบการดึง หรือ การอัดวัสดุแล้วจึงคำนวณหาค่า C จากสมการที่ (2.23) (แสนสดพานิช, 2546; Lee, Chan and Cheng, 1997, Chatkaew, et al, 2015)

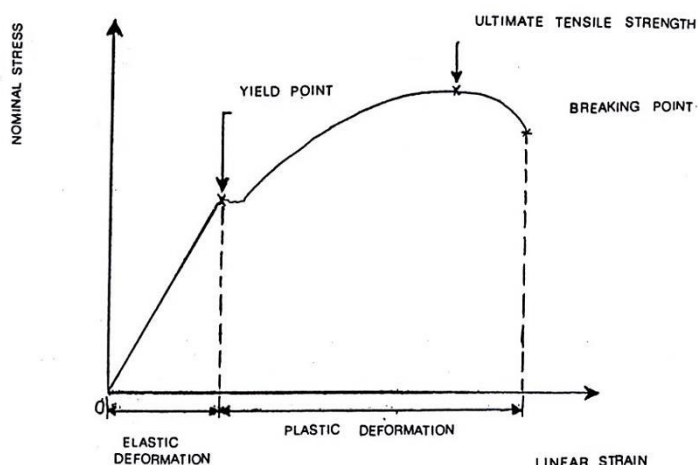
2.4 การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ

เพื่อให้ได้ค่าสมบัติดังกล่าวที่ถูกต้อง จึงต้องทดสอบหาสมบัติทางกลซึ่ง Lange และ Rowe ได้กล่าวถึงกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปโลหะเป็นการขึ้นรูปโลหะแบบก้อน (Bulk Forming) สมบัติทางกลของวัสดุจึงมีปัจจัยที่สำคัญสัมพันธ์กับรูปแบบการไหลตัวของโลหะ ความยากง่ายของการขึ้นรูป และการเลือกขนาดของเครื่องจักรที่ใช้ขึ้นรูปโลหะ เป็นต้น ซึ่งโลหะที่มีความสามารถในการไหลตัวต่ำจะต้องใช้แรงในการขึ้นรูปของเครื่องจักรสูงกว่าโลหะที่มีความสามารถในการไหลตัวสูงในกระบวนการขึ้นรูปโลหะทุกรูปแบบ ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปจะเกิดแรงมากระทำต่อชิ้นงาน ทำให้เกิดความเค้น ซึ่งมีอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงการยืดหยุ่นตัว และช่วงการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของโลหะ ดังนั้นในการคำนวณหาแรงที่จะทำให้ชิ้นงานเปลี่ยนรูปร่างไปตามที่ต้องการ ก็จะต้องมีการคำนวณหาความเครียดที่เกิดขึ้นจริง (True Strain) ณ ตำแหน่งที่ต้องเปลี่ยนรูปร่างชิ้นงาน เพื่อไปหาความเค้นที่เกิดขึ้นจริง (True Stress) แล้วจึงสามารถไปคำนวณหาแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปได้ ซึ่งเพื่อความสะดวกในการปฏิบัติงานจึงต้องมีการสร้างกราฟ ความเค้น และความเครียดที่เกิดขึ้นจริง (True Stress-True

Strain Curve) และ Nominal Stress-Linear Strain Curve ของวัสดุชนิดนั้น ๆ ขึ้นมาภายใต้เงื่อนไขของการขึ้นรูปที่ต้องการมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 เส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้นปกติกับความเครียดที่เกิดขึ้นในเชิงเส้นตรง

เมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระทำที่ระดับต่าง ๆ จะเกิดความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่เกิดขึ้นตามปกติกับความเครียดที่เกิดขึ้นในเชิงเส้นตรง (Nominal Stress-Linear Strain Curve) สามารถนำมาใช้งานได้อย่างถูกต้องภายในช่วงการยืดหยุ่นตัว (Elastic Deformation) ของชิ้นงาน

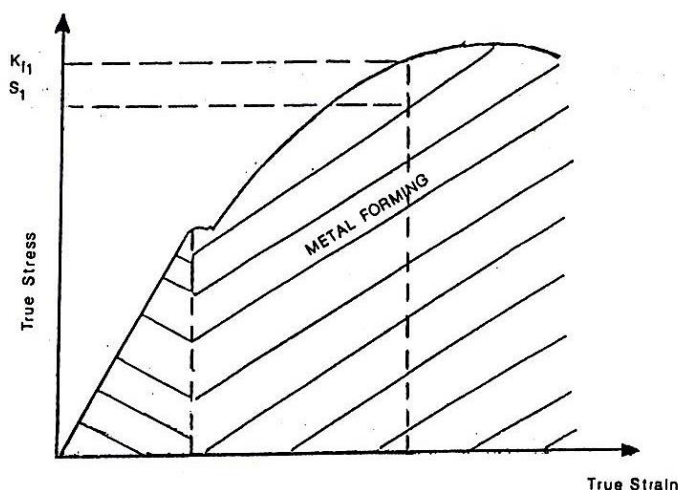


ภาพประกอบ 43 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นที่เกิดขึ้นตามปกติกับความเครียดในเชิงเส้นตรง

2.4.2 เส้นโค้งการไหล

ความเค้นที่เกิดขึ้นจริงกับความเครียดที่เกิดขึ้นจริง เมื่อได้รับแรงกระทำที่ระดับต่าง ๆ โดยกราฟได้ถูกนำมาใช้ในงานขึ้นรูปโลหะได้อย่างถูกต้องในช่วงการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของโลหะชิ้นงาน

พหุณ ปณ สิโต ชีเว



ภาพประกอบ 44 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดจริง

วัสดุเมื่อได้รับแรงดึงจะเกิดพฤติกรรมที่แตกต่างกันตามช่วงความเครียด ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในการดึงจึงประกอบไปด้วย

2.4.2.1 พิกัดความเป็นสัดส่วน (Proportional Limit) หมายถึง ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุยอมรับได้ โดยความเค้นจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับ ความเครียดตามกฎของฮุก (Hook's Law) กราฟในช่วงนี้จะเป็นเส้นตรง และตอนปลายของกราฟ ช่วงนี้จะต่อกับเส้นโค้งซึ่งมีค่าความชันค่าหนึ่งที่จุดต่อนี้ เรียกว่า ชิดจำกัดของการแปรผัน

2.4.2.2 พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit) หมายถึง พฤติกรรมของวัสดุได้รับความเค้น ซึ่งอยู่ในช่วงของการคืนรูป ไม่เกิดการเปลี่ยนรูอย่างถาวร คือ เมื่อปล่อยแรงดึงวัสดุจะกลับคือสู่สภาพเดิม แสดงว่าขีดจำกัดของความยืดหยุ่น คือ ค่าความเค้นสูงสุดที่โลหะสามารถทนได้ โดยไม่เกิดการเสียรูปอย่างถาวร หรือ ขนาดของความเค้นต่ำสุดที่วัสดุเริ่มเสียรูปอย่างถาวรได้

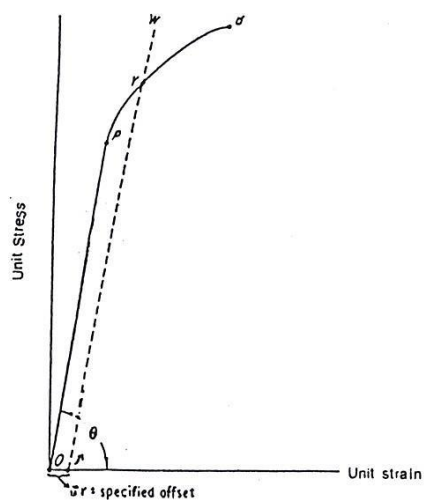
2.4.2.3 จุดคราก (Yield Point) จากการทดสอบแรงดึงนั้น ถ้าเพิ่มแรงดึงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงค่าความเค้นค่าหนึ่งซึ่งโลหะสามารถเสียรูปร่างไปได้เอง โดยไม่ต้องเพิ่มแรงมากระทำ และความเค้นไม่เพิ่มเลยจุดแสดงระดับความเค้นนี้ เรียกว่า จุดครากของวัสดุเป็นจุดสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ในการออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล เพราะเป็นจุดที่บอกให้ทราบว่าวัสดุ หรือ ชิ้นส่วนจะเกิดการฉีกขาด หรือ เกิดความเสียหายถ้าได้รับความเค้นมากกว่าจุดนี้

2.4.2.4 ความเค้นคราก (Yield Stress) หมายถึง ค่าความเค้นที่จุดคราก และค่าความเค้นนี้ จะทำให้วัสดุมีการเปลี่ยนรูอย่างถาวร ไม่มีจุดที่แน่นอนที่แสดงให้เห็นถึงจุดที่ Elastic Strain สิ้นสุด และจุดที่ Plastic Strain เริ่มต้นสำหรับการออกแบบของวิศวกรอเมริกัน ซึ่งในกรณีวัสดุ เพราะได้กำหนดให้ร้อยละ 0.2 ของ Plastic Strain ที่เกิดขึ้นใน Stress-Strain Curve และในกรณีนี้

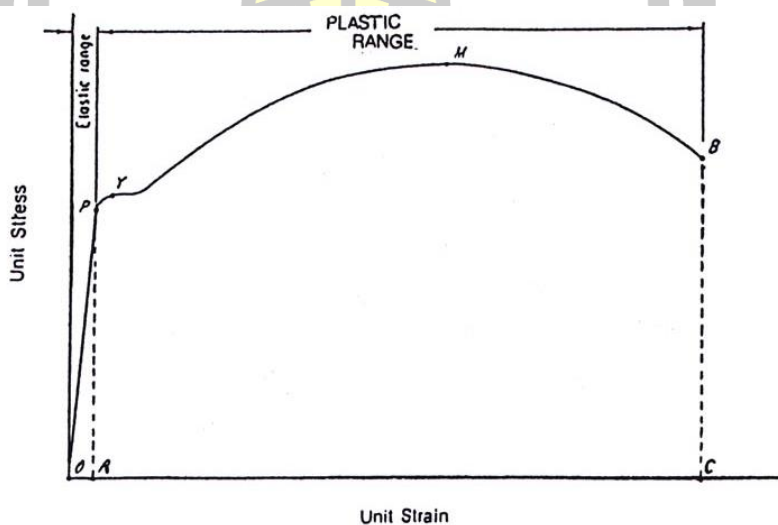
เป็นวัสดุเหนียวกราฟของ Flow Curve ดังที่แสดงในภาพประกอบ 44 จะแสดงจุดความเค้นครากได้ชัดเจน

$$\sigma_{0.2\%} = \frac{F_{0.2}}{S_0} \quad (2.24)$$

เมื่อกำหนดให้ $\sigma_{0.2\%}$ คือ ความเค้นครากตัวที่ 0.2 %
 $F_{0.2}$ คือ แรงดึงครากตัวที่ 0.2 % Strain
 S_0 คือ พื้นที่หน้าตัดก่อนทดสอบ



ภาพประกอบ 45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดวัสดุที่เปราะ



ภาพประกอบ 46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดวัสดุที่เหนียว

2.4.2.5 ความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุที่สามารถทนได้ก่อนเกิดการแตกหัก สำหรับวัสดุเหนียวค่าความแข็งแรงสูงสุด จะอยู่ที่จุดสูงสุดบนกราฟความสัมพันธ์นี้ และสำหรับวัสดุเปราะค่าความแข็งแรงสูงสุด จะเป็นค่าเดียวกับค่าความแข็งแรงแตกหัก

$$\sigma_{tu} = \frac{F_{t \max}}{S_0} \quad (2.25)$$

เมื่อกำหนดให้

σ_{tu} คือ ความเค้นอัดสูงสุด

$F_{t \max}$ คือ แรงดึงสูงสุด

2.4.2.6 เปอร์เซ็นต์การยืด (Percent Elongation) เปอร์เซ็นต์การยืด คือ ปริมาณความยืดที่เกิดจากการดึงชิ้นงานเป็นค่าที่ใช้บอกถึงความอ่อนเหนียว (Ductile) ของโลหะค่าการยืดตัว (Elongation) สามารถหาได้

$$\epsilon_t = \left(\frac{l_1 - l_0}{l_0} \right) \times 100 \quad (2.26)$$

เมื่อกำหนดให้ ϵ_t คือ อัตราการยืดตัว

l_0 คือ ความสูงก่อนการดึง

l_1 คือ ความสูงหลังการดึง

2.4.2.7 การลดลงของพื้นที่ (Percent Reduction of Area) เป็นค่าที่หาได้จากการเอาพื้นที่หน้าตัดเดิมลบด้วยพื้นที่หน้าตัดสุดท้าย แล้วหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเดิม แล้วทำเป็นเปอร์เซ็นต์

$$Z_{tB} = \left(\frac{A_0 - A_{tB}}{A_0} \right) \times 100 \quad (2.27)$$

เมื่อกำหนดให้ Z_{tB} คือ อัตราการลดลงของพื้นที่หลังจากขึ้นทดสอบแตกหัก

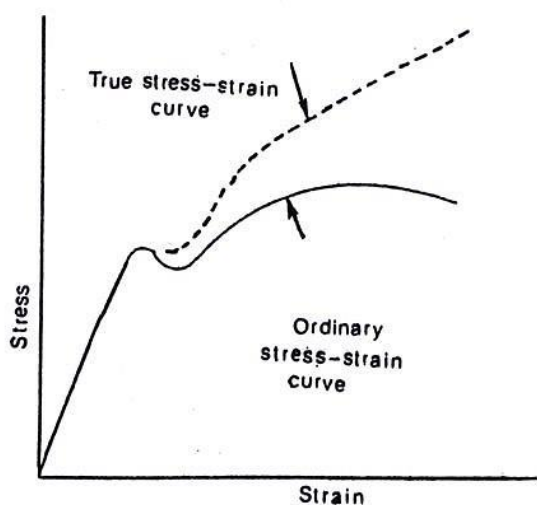
เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ก่อนทดสอบ

A_{tB} คือ พื้นที่หลังการดึงทดสอบ

A_0 คือ พื้นที่ก่อนการดึงทดสอบ

2.4.2.8 โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) หรือ โมดูลัสของยัง (Young's Modulus or Modulus of Elasticity) จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด พิจารณาส່วนที่เป็นเส้นตรงของกราฟความชัน ในส่วนนี้ซึ่งมีค่าเท่ากับความเค้นส่วนความเครียด ซึ่งเป็นค่าคงที่เรียกค่านี้ว่า ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรง (Stiffness) ซึ่งเป็นค่าความต้านทานของวัสดุต่อการเกิดการเสียรูปร่างแบบคืนตัว

2.4.2.9 ความเค้น และความเครียดจริง (True Stress-True Strain) เป็นความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นจริง ขณะทำการดึงทดสอบ โดยพิจารณาจากพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งค่าความเค้นจริงที่ได้จะมีค่าสูงกว่าความเค้นปกติ



ภาพประกอบ 47 กราฟเปรียบเทียบความเค้นปกติความเครียดปกติกับความเค้นความเครียดจริง

$$\text{True Stress } k_f = \frac{F_i}{A_i} = S(1+e) \quad (2.28)$$

$$\text{True Strain } \phi = \ln\left(\frac{l_i}{l_0}\right) = \ln(1+e) \quad (2.29)$$

สำหรับค่าความเค้นความเครียดจริงของวัสดุโลหะชนิดใดชนิดหนึ่ง จะมีความสัมพันธ์กันดัง

สมการ

$$K_f = C\phi^n \quad (2.30)$$

เมื่อกำหนดให้ C คือ ค่าคงที่ของวัสดุเรียกว่า Strength Coefficient
 n คือ strain hardening exponent

2.4.2.10 ความเค้น และความเครียดวิศวกรรม (Engineering Stress-Engineering Strain Curve) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้น ที่เกิดขึ้นตามปกติกับความเครียดในเชิงเส้นตรง เมื่อได้รับแรงกระทำแก่ชิ้นงานในระดับต่าง ๆ โดยเส้นกราฟนี้สามารถนำมาใช้งานได้อย่างถูกต้อง ภายใต้ช่วงการยืดหยุ่นตัวของโลหะชิ้นงานนั้น

$$\text{Nominal Stress } S = \frac{F_i}{A_0} \quad (2.31)$$

$$\text{Linear Strain } e = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.32)$$

2.4.3 การสร้างเส้นโค้งการไหลของโลหะ

การสร้างเส้นโค้งการไหล (Flow curve) ของโลหะมีวิธีการสร้างอยู่ 3 วิธี ดังนี้

2.4.3.1 การทดสอบแบบดึง (Tension Test) การทดสอบแบบนี้จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟ True Stress-True strain ในช่วงการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร จะอยู่สูงกว่าเส้นกราฟ Nominal Stress-Linear Strain การทดสอบแบบนี้นิยมใช้กับกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะ ที่มีความเค้นดึงเกิดขึ้นอย่างเดียวนั้น การทดสอบแบบดึงเป็นการหาสมบัติทางกลอีกประเภทหนึ่ง ที่ต้องทำการทดสอบอยู่เสมอ เพื่อนำผลไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โดยการดึงชิ้นงานออกจากกัน และบันทึกหน่วยวัดแรง ตลอดเวลาจนกว่าชิ้นงานจะขาดออกจากกัน ส่วนความเครียดนั้นสามารถหาได้จากความยาวเกจ (Gauge Length) ที่เปลี่ยนไปอยู่ตลอดเวลาเทียบกับความยาวเกจเดิม โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ก็จะได้ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นตลอดเวลา จนกว่างานจะขาดออกจากกัน ซึ่งในการวัดการยืดตัวจะใช้ลิเนียร์สเกลเป็นตัววัดค่าการยืดตัวของชิ้นงาน ที่พิจารณาจะต้องมีการเตรียมให้เหมาะสม เพื่อหาค่าแรงดึงที่ใช้ในการทดสอบ จะทำให้สามารถทราบถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงาน ที่ทำการทดสอบให้ได้ค่าใกล้เคียงค่าจริง ด้วยการสร้างเส้นโค้งความเค้นความเครียด

การสร้างเส้นโค้งความเค้นความเครียดปกติ (Nominal Stress- Linear Strain Curve) โดยนำผลที่ได้มาคำนวณ และแทนค่าที่วัดได้ในสมการ

$$\text{True Stress } \sigma_f = \frac{F_i}{A_i} = S(1 + e) \quad (2.33)$$

$$\text{True Strain } \phi = \ln\left(\frac{l_i}{l_0}\right) = \ln(1 + e) \quad (2.34)$$

การสร้างเส้นโค้งความเค้นความเครียดจริง (True Stress-True Strain Curve) โดยนำผลที่ได้มาคำนวณ และสร้างบนกราฟเดียวกันกับการสร้างเส้นโค้งความเค้นความเครียดปกติ Nominal Stress-Linear Strain Curve โดยแทนค่าที่วัดได้ในสมการ Power-law และจาก Flow curve $K\phi^n$ ($y=ax+b$) $n = a$, $\log C = b$ นอกจากการเปลี่ยนรูปทรง ที่มักทำให้ความต้านแรง และความแข็งเพิ่มขึ้นแล้ว การทำให้แข็งด้วยความเครียด (Work Hardening หรือ Strain Hardening) เป็นการเพิ่มความแข็งแรงจากการแปรรูปเย็น ผลที่ตามมาคือ คุณสมบัติยืดดึง (Ductility) ลดลง และความต้านทานแรงครากเปลี่ยนแปลงไป สมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลกับความเครียดประสิทธิผลที่เรียกว่ากฎยกกำลัง (Power Law)

$$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n = \gamma \quad (2.35)$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (Strength Coefficient)

n คือ เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening Exponent)

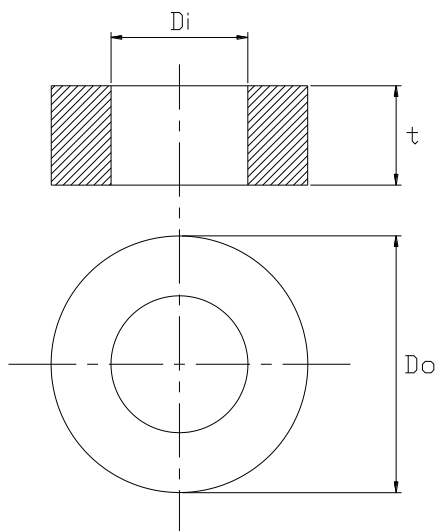
2.4.3.2 การทดสอบแบบกดอัด (Compression Test) เป็นการทดสอบโดยการกดหรือ อัดชิ้นงาน ซึ่งการทดสอบแบบนี้จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟ True Stress-True Strain ในช่วงการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร จะอยู่ต่ำกว่าเส้นกราฟ Nominal Stress-Linear Strain Curve การทดสอบแบบนี้นิยมใช้กับกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะที่มีความเค้นอัดเกิดขึ้นอย่างเดียว

2.4.3.3 การทดสอบแบบบิด (Torsion Test) เป็นการทดสอบ โดยการจับชิ้นงานบิด หรือ ให้แรงเฉือนแก่ชิ้นงาน การทดสอบแบบนี้นิยมใช้กับการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะ ที่มีความเค้นเฉือนเกิดขึ้นอย่างเดียว

2.4.4 ความเสียดทานคูลอมบ์ (Culomb Friction)

การศึกษาความเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์กับชิ้นงานที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน อาศัยเทคนิคที่เรียกว่า Ring Compression Test เป็นการศึกษาความเสียดทานภายใต้ช่วงการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของวัสดุ โดยใช้แม่พิมพ์แผ่นเรียบจำนวน 2 แผ่น กดชิ้นงานให้ความสูงลดลงประมาณร้อยละ 50 จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นงานขยายออกเป็นสัดส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก เหมือนกับลักษณะที่เกิดในการอัดทรงกระบอกตัน อัตราการขยายของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน จะค่อย ๆ ลดลง เมื่อขนาดของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งเกิดการหลุดตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน จากนั้นคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดขนาดของความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นงาน และนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับตารางมาตรฐาน จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวแม่พิมพ์ออกมา วิธีการนี้เป็นวิธีการทดสอบที่ง่าย ไม่ต้องใช้อุปกรณ์การวัดแรง และเครื่องมือที่ซับซ้อน การทดสอบมีใช้กันอย่างกว้างขวางโดยไม่จำกัดขอบเขตของความเร็วในการขึ้นรูป อุณหภูมิ และสารหล่อลื่น เพียงแต่เรานำสภาวะในการทำงานจริงมาจำลองกับการทดสอบก็ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในสภาวะนั้น

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์ และชิ้นงานทุกขั้นตอนในการขึ้นรูปโลหะมีผลต่อความเค้น ความดัน รูปแบบการไหลตัว อุณหภูมิ และแรงขึ้นรูป ดังนั้นวิธีที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ในการขึ้นรูปจะนิยมใช้วิธีการทดสอบแรงอัดขึ้นทดสอบรูปวงแหวน ซึ่งพัฒนาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินหาค่าความเค้น ในการไหลตัวของวัสดุ และเพื่อประเมินหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน โดยการทดลองจะต้องอยู่บนสมมติฐานที่ว่า การเปลี่ยนรูปของวัสดุจะต้องเป็นแบบสม่ำเสมอ และมีความเสียดทานที่คงที่ตลอดการขึ้นรูป หลักการที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อหาค่าความเสียดทานในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรของชิ้นทดสอบ คือ การหาขนาดความสูง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบที่เปลี่ยนไป เมื่อนำชิ้นทดสอบรูปวงแหวนมากดบนแม่พิมพ์แผ่นราบที่มีค่าความแข็ง ชนิดของวัสดุชิ้นทดสอบ และค่าความละเอียดผิวควรเหมือนแม่พิมพ์จริง เพื่อให้ได้อัตราส่วนของความสูงลดลงประมาณร้อยละ 50 โดยมีขนาดของวงแหวนในอัตราส่วน $D_0 : D_1 : t$ เท่ากับ $6 : 3 : 2$ ขณะทำการขึ้นรูปการกดขึ้นทดสอบ ทิศทางของแรงกด จะอยู่ในแนวตั้งฉากกับผิวชิ้นทดสอบ ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการไหลตัวในทิศทางขนานกับผิวแม่พิมพ์ ถ้าเราสังเกตที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นทดสอบ ที่อาจจะเพิ่มขึ้น หรือ ลดลง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวชิ้นทดสอบกับผิวแม่พิมพ์ โดยการเปลี่ยนรูปของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นทดสอบมีอยู่ 3 ลักษณะคือ



ภาพประกอบ 48 ขนาดของชิ้นทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย

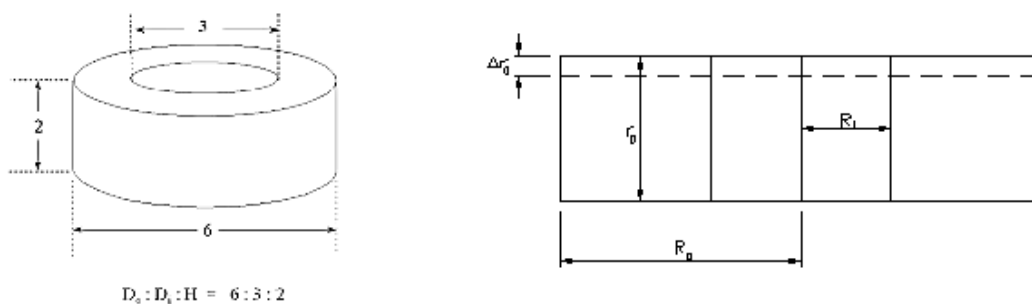
(ที่มา : ฉัตรแก้ว , 2554)

กรณีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่าเดิม แสดงว่าความเสียหายเท่ากับ 0 ซึ่งจะเกิดเมื่อมีการไหลตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของวงแหวนที่เป็นสัดส่วนต่อกัน แต่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของวงแหวนมีขนาดเท่าเดิม

กรณีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเพิ่มขึ้น แสดงว่าความเสียหายมีค่าน้อย เมื่อวงแหวนเกิดการไหลตัวตามแรงเฉือนที่เกิดขึ้น แต่ความเสียหายที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย จึงไม่เกิดการหดตัวกลับของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น

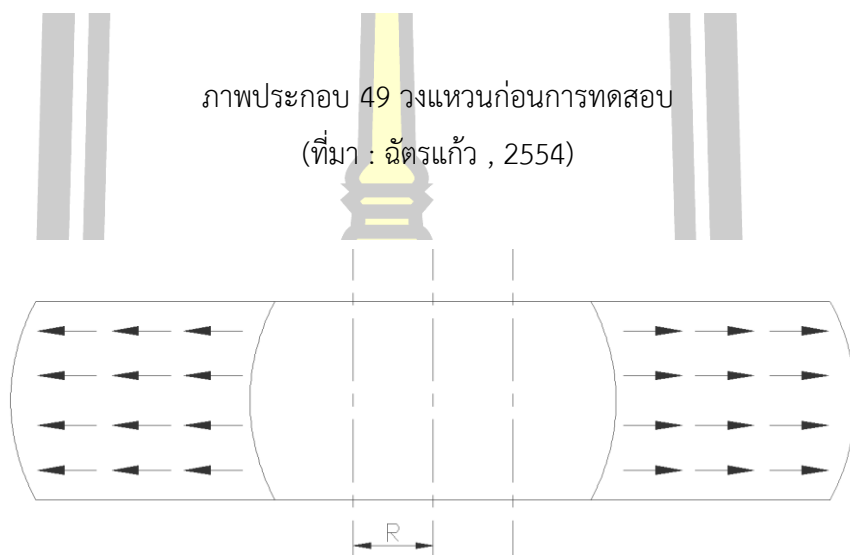
กรณีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในลดลง แสดงว่าความเสียหายมีค่ามาก เมื่อวงแหวนเกิดการไหลตัวตามแรงเฉือนที่เกิดขึ้น อัตราการขยายตัวของวงแหวนจะเริ่มลดลง เนื่องจากความเสียหายที่มีมากพอที่จะทำให้เกิดการหดตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นทดสอบ ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจึงมีค่าลดลง

พูน ปณ ศิโต ชีเว



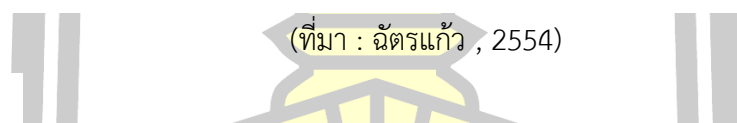
$$D_o:D_i:H = 6:3:2$$

ภาพประกอบ 49 วงแหวนก่อนการทดสอบ
(ที่มา : ฉัตรแก้ว , 2554)



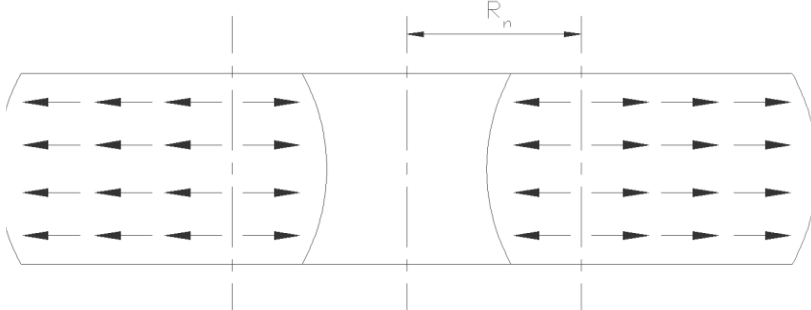
ภาพประกอบ 50 การเปลี่ยนรูปเนื่องจากความเสียดทานสูง

(ที่มา : ฉัตรแก้ว , 2554)



ภาพประกอบ 51 การเปลี่ยนรูปเนื่องจากความเสียดทานต่ำ

(ที่มา : ฉัตรแก้ว , 2554)



ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนผิวด้านบน และด้านล่างของแผ่นวงกลมแบนราบ สามารถอธิบายได้โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายคูลอมบ์ ดังนี้

$$\mu = \frac{\tau_i}{\rho} \quad (2.36)$$

เมื่อกำหนดให้ τ_i = ความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัส
 ρ = ความเค้นตั้งฉากที่ผิวสัมผัส

วิธีการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย จากการทดสอบแรงอัดขึ้นทดสอบรูปวงแหวน (Ring Compression Test) ระหว่างขึ้นงานกับแม่พิมพ์ โดยอาศัยกฎของคูลอมบ์ตามทฤษฎีของ เมลล์ และค็อกคร็อบ (Male and Cockcroft) สามารถหาได้ตามขั้นตอนดังนี้

2.4.4.1 การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน
 การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขึ้นทดสอบสามารถหาได้ดังนี้

$$\% \text{Reduction in Internal Diameter} = \frac{d_0 - d_1}{d_0} \times 100 \quad (2.37)$$

เมื่อ d_0 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในก่อนกด
 d_1 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในหลังกดทดสอบ

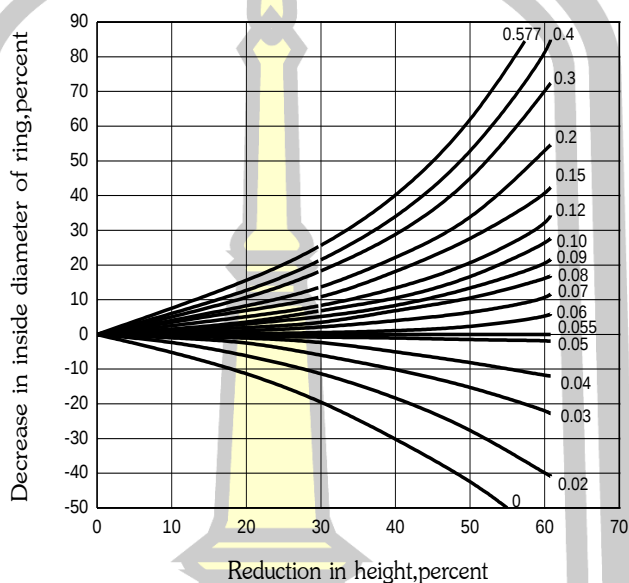
2.4.4.2 การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความสูง

$$\% \text{Reduction in Height} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \times 100 \quad (2.38)$$

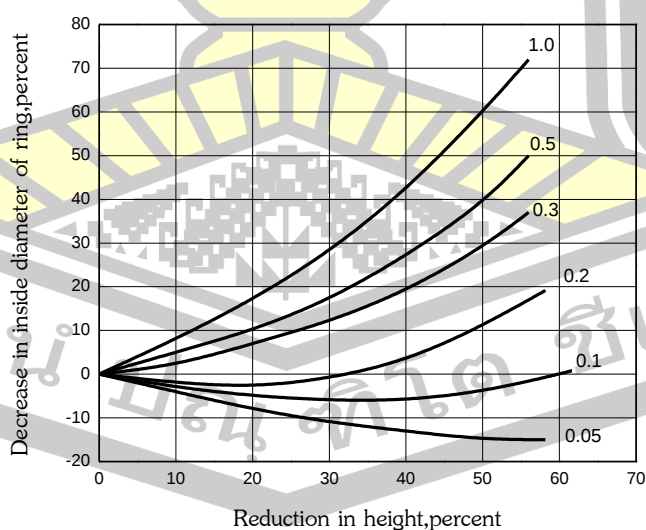
เมื่อ h_0 = ขนาดความสูงของขึ้นทดสอบก่อนกด
 h_1 = ขนาดความสูงของขึ้นทดสอบหลังกด

2.4.4.3 การอ่านค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจากกราฟเปรียบเทียบ

นำค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน และค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความสูงของชิ้นทดสอบไปอ่านค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจากกราฟของเมลล์และค็อกคร็อฟ (Male and Cockcroft)



ภาพประกอบ 52 กราฟการเปรียบเทียบความเสียหาย μ

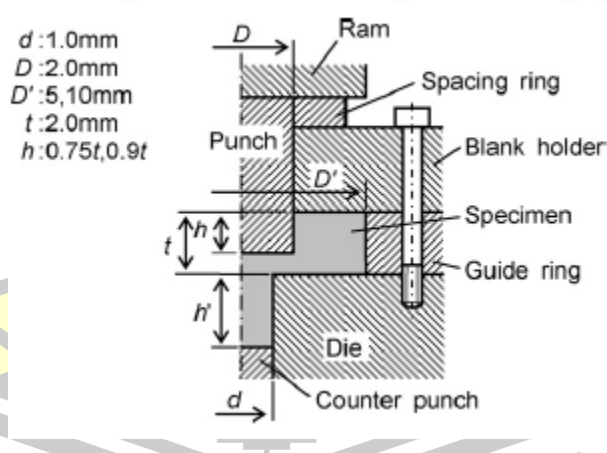


ภาพประกอบ 53 กราฟการเปรียบเทียบความเสียหาย m

2.5 ทบทวนวรรณกรรม

การเคลื่อนตัวของตัวพิมพ์ซึ่งกดลงบนผิวด้านหนึ่งของโลหะแผ่นเป็นเหตุให้วัสดุเกิดการไหลตัวผ่านออกทางปากของแม่พิมพ์ โดยอาศัยกระบวนการทางแม่พิมพ์ที่ออกแบบให้พื้นที่สัมผัสขนาดที่โตกว่าขนาดของรูตายในลักษณะของช่องว่างระหว่างเครื่องมือมีค่าเป็นลบ หรือ Negative Clearance (Fan and Li, 2009; Hirota et al., 2009) ลักษณะการขึ้นรูปโลหะนี้เป็นกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งผู้ทำการศึกษากระบวนการไฟน์แบลงก์ต่างทราบกันดีถึงคุณภาพของชิ้นงานที่มีผิวเรียบตรงไม่เกิดรอยแตก ดังนั้นรูปแบบงานวิจัยจะใช้วิธีจำลอง และเปรียบเทียบการทดลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นสำหรับกระบวนการไฟน์แบลงก์ เป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรรูปร่างชิ้นงานเริ่มต้นรัศมีพิมพ์-ตาย และสารหล่อลื่นที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น ในเบื้องต้นผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการวิจัยดังนี้

Hirota (2007) ทำการศึกษาการสร้างแท่งบิลเลทขนาดเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. สำหรับงานทาบขึ้นรูปขนาดเล็กด้วยการอัดขึ้นรูปจากแผ่นโลหะอลูมิเนียมมีความหนา 2 มม. อัตราส่วนการขึ้นรูป 2 เท่า ซึ่งความยาวของแท่งบิลเลทขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการออกแบบของแม่พิมพ์ และขนาดอัตราส่วนการขึ้นรูป และการกลัดตัวของพิมพ์



ภาพประกอบ 54 เงื่อนไขการทดลอง

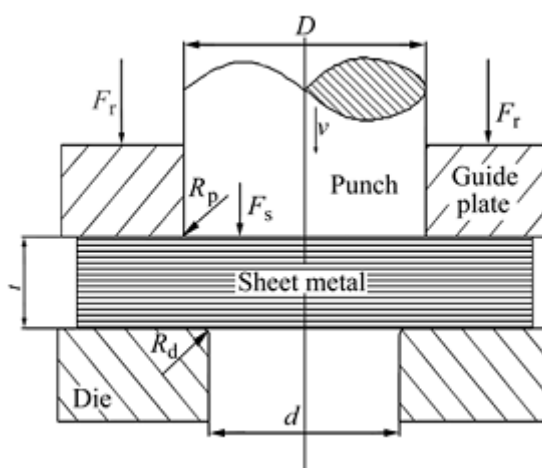
สรุปได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบมีผลต่อความยาวของบิลเลทสำหรับกรณีที่กำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนไหลตัวออกด้านข้าง และสามารถอธิบายรูปแบบการเคลื่อนไหลตัวของเนื้อวัสดุด้วยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง และสำหรับ

บางกรณีมีการเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงที่ส่วนท้ายของชิ้นงาน สามารถหลีกเลี่ยงได้ด้วยการทดลองกดพื้นที่ลึกช่วงไม่เกิน 70% ของความหนาชิ้นงานตามเงื่อนไขที่ค้นพบจากการจำลอง

ชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นมักใช้สำหรับระบบจับยึดอุปกรณ์ในชิ้นส่วนยานยนต์ เช่น Daimler-Chrysler, BMW และ Audi ที่ต้องการความแข็งแรงเฉพาะส่วน ซึ่งปัจจุบันได้นำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมหนัก และชิ้นส่วนอื่น ๆ ด้วย

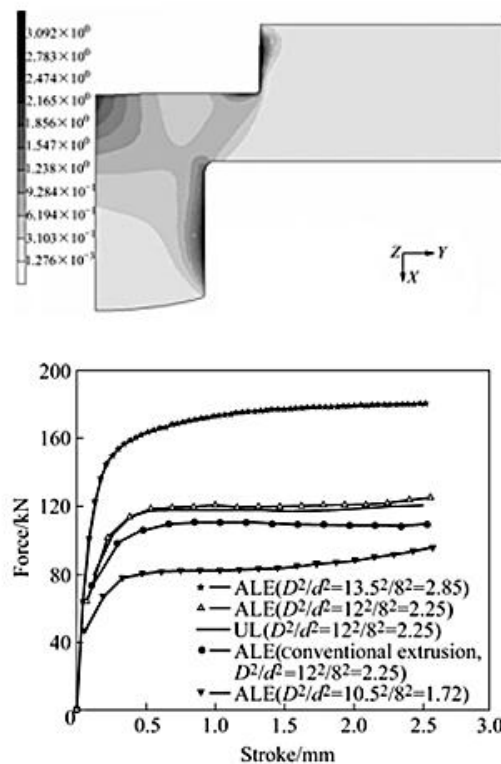
Zheng et al. (2006) กล่าวถึงกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น เป็นกระบวนการกดเนื้อวัสดุโลหะแผ่นผ่านพื้นที่ เพื่อดันให้เนื้อวัสดุไหลตัวออกที่ปากแม่พิมพ์ตาย ซึ่งเป็นกระบวนการที่ผสมผสานระหว่างการอัดขึ้นรูป (Extrusion) และการกดจมลึกเข้าเนื้อชิ้นงาน (Penetration) สามารถพบเห็นชิ้นงานลักษณะดังกล่าวได้เช่นการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีการเตรียมรูเจาะสำหรับงานแม่พิมพ์โลหะแบบต่อเนื่อง (Progressive die) ด้วยการผสมผสานกระบวนการระหว่าง fine blanking process และ extrusion process ซึ่งแสดงพฤติกรรมการไหลตัวของเนื้อวัสดุในกระบวนการด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Zhuang et al. (2008) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการจำลองการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยการประยุกต์ทฤษฎีของ fine-blanking, forming และ stamping สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนแบบหลายกระบวนการ



ภาพประกอบ 55 การวิเคราะห์แบบจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น

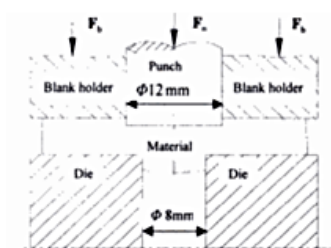
ซึ่งทั่วไปแล้ววิธี Updated Lagrangian มักใช้สำหรับแบบจำลองที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างขนาดใหญ่ และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเมช (Mesh) จึงมีผลต่อความแม่นยำของผลการคำนวณ



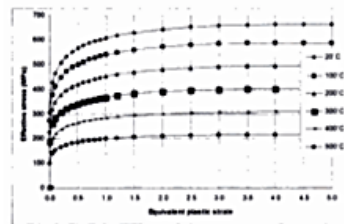
ภาพประกอบ 56 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ดังนั้นจึงใช้วิธี Arbitrary Lagrangian-Eulerian เพื่อหลีกเลี่ยงข้อบกพร่องของการผิดเพี้ยนรูปร่างของเมช (Mesh) ปรับปรุงความแม่นยำของการคำนวณ และใช้ MSC.Marc/Mentat เป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ ซึ่งพบว่าให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับวิธี Updated Lagrangian และมีข้อจำกัดสำหรับการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นที่แตกต่างจากงานอัดขึ้นรูปแบบธรรมดา นอกจากนี้เส้นกราฟแรงต่อระยะชักแล้ว (force-stroke curve) ยังพบการหดตัวของแม่พิมพ์ (shrinkage cavity) เป็นปกติสำหรับงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วย

Chen et al. (2001) ได้ทำการศึกษาการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าขณะที่วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรจะยังส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิให้สูงขึ้นไปตามการกระจายของงานในการขึ้นรูปที่เกิดขึ้น ซึ่งอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปนี้จึงเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุเปราะ (Forming limit of ductile material) ด้วยการวิเคราะห์การเสียรูปร่างแบบ elasto-plastic ให้แสดงผลทางความร้อน ขอบเขตการกระจายของพลังงานที่เกิดจากการพาของความร้อน ดังแสดงในภาพประกอบ 58



ก) รูปแบบจำลองกระบวนการ



ข) เปรียบเทียบความเค้นประสิทธิผลกับสมดุลความเครียด

ภาพประกอบ 57 อุณหภูมิที่มีผลกระทบต่อกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น

Reddy et al. (1996) กล่าวถึงสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะ สามารถหาได้จากวิธีพื้นฐาน 2 วิธี คือ วิธีแรง หรือ วิธียืดหยุ่น และวิธีการกระจัด หรือ วิธีสปีทเนส วิธีแรกสามารถหาแรงภายใน และแรงปฏิกิริยาได้ โดยอาศัยสมการสมดุลของแรงตามเงื่อนไขการกระจัด ส่วนวิธีที่สองสามารถหาการกระจัดที่สมมติขึ้น โดยมีเงื่อนไขของความต่อเนื่องของเอลิเมนต์ที่แต่ละจุดต่อ หรือ ที่บริเวณขอบสัมผัสกันก่อน และหลังโหลดกระทำ ซึ่งมีความต่อเนื่องกัน ดังนั้นสมการสมดุลจะเขียนอยู่ในเทอมของการกระจัดของแต่ละจุดต่อ และค่าของการกระจัดสามารถหาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรง และการกระจัดที่วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะนิยมใช้วิธีที่สองมากกว่า ทั้งนี้เพราะสามารถหาสมการสมดุล และผลเฉลยได้สะดวกกว่า รวมทั้งโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปทางการค้าที่ใช้ในการวิเคราะห์นิยมใช้วิธีการกระจัด

Zhao et al. (2008) กล่าวถึงอุตสาหกรรมยานยนต์ที่กำลังมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วในประเทศจีนส่งผลกระทบต่อราคาน้ำมัน และวัตถุดิบอย่างมาก และทำให้ธุรกิจอุตสาหกรรมอีกประเภทหนึ่งได้รับความนิยมมากขึ้นคือ การทุบขึ้นรูปเย็น (Cold forging) ซึ่งหลายหน่วยงานได้ทำการวิจัย และพัฒนาทั้งรูปร่างขนาด ให้มีความพิเศษ และได้เปรียบคู่แข่งทางการตลาด และประเทศจีนสามารถสร้างชิ้นส่วนงานทุบขึ้นรูปที่มีความเที่ยงตรงของขนาดส่งออกได้ถึง 100,000 ชิ้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นชิ้นส่วนยานยนต์ ในปี 2550 เทคโนโลยีการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ (numerical simulation technology) จะเริ่มเข้ามามีบทบาทในประเทศจีนมากขึ้น ในส่วนของงานวิจัยในมหาวิทยาลัยก็มุ่งประเด็นไปที่ simulation algorithm และ microstructure analysis

Zhao et al. (2008) กล่าวว่า การแตกหักแบบเหนียวมีผลต่อความแม่นยำของผลการจำลองกระบวนการไฟน์แบลนค์ สามารถทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยการดึง การอัด และการบิด ซึ่งการออกแบบงานไฟน์แบลนค์ที่มีการกำหนดเกณฑ์การแตกหัก และวัดค่าความเครียดทั้งสามแกน และการเสียหายแบบเหนียว ซึ่งพบว่าเกณฑ์การแตกหักทั้งห้าชนิดให้ผลเพียงพอต่อการทดสอบทั้งหมด และสามารถปรับปรุงเกณฑ์การแตกหักให้นำไปใช้กับการเปลี่ยนแปลงปริมาตร และ

รูปร่างได้ ซึ่งการทดสอบการดึงสามารถแสดงลักษณะของวัสดุสำหรับกระบวนการไฟน์แบลงค์ได้ง่าย และให้ผลการพยากรณ์ที่ดีสอดคล้องกับการทดลอง

Chatkaew et al (2015) กล่าวว่า การเคลื่อนตัวของตัวพื้นที่ซึ่งกดลงบนผิวด้านหนึ่งของโลหะแผ่นเป็นเหตุให้วัสดุเกิดการไหลตัวผ่านช่องทางปากของแม่พิมพ์ ลักษณะการขึ้นรูปโลหะนี้เป็นกระบวนการกดดันไหลขึ้นรูปโลหะแผ่น การวิจัยนี้เน้นศึกษาอิทธิพลอัตราส่วนการขึ้นรูปที่มีต่อคุณภาพของงานกดดันไหลขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้กำหนดชิ้นงานเริ่มต้นในแบบจำลองเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางตามมาตรฐาน JIS. S45C มีขนาดความหนา 5 มม. ภายใต้การขึ้นรูปด้วยอัตราส่วนของการขึ้นรูป 5 ขนาดคือ 1, 2.25, 4, 6.25 และ 9 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาย 10 มม. และขนาดรัศมีแม่พิมพ์ 0.2 มม. ผลลัพธ์จากการจำลองแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอัตราส่วนการขึ้นรูปที่มีต่อคุณภาพชิ้นงาน กล่าวคืออัตราส่วนการขึ้นรูปมีผลต่อขนาดของดายโรล การหดตัวที่ส่วนท้ายของแท่งชิ้นงานค่อนข้างมากอันนำไปสู่การเกิดความบกพร่องของชิ้นงานในที่สุด อีกทั้งผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยหลีกเลี่ยงการผลิตชิ้นงานที่มีจุดบกพร่องได้ด้วยการเลือกขนาด และรูปร่างที่เหมาะสมในการออกแบบแม่พิมพ์จากผลการจำลอง



วิธีดำเนินการวิจัย

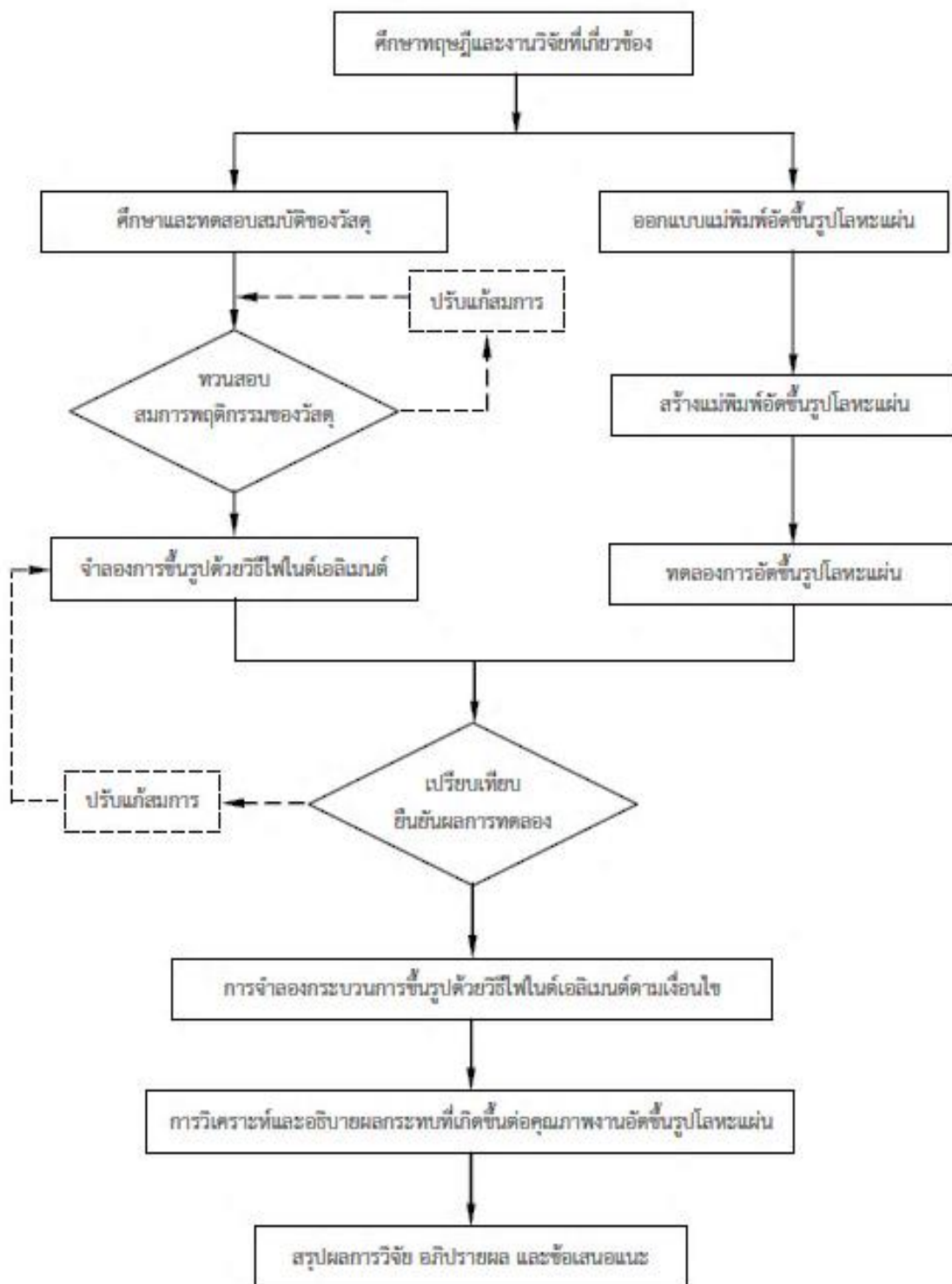
การศึกษาอิทธิพลของแรงดันกลับต่อการยุบตัวของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยอาศัยการจำลองกระบวนการด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุภายใต้ปัจจัยกระบวนการที่กำหนด ซึ่งนำไปสู่การอธิบายผลที่มีต่อตัวแปรด้านคุณภาพชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น และยืนยันผลการจำลองด้วยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองอัดขึ้นรูปชิ้นงานจริง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การออกแบบแม่พิมพ์ การควบคุมกระบวนการผลิต และลดความเสี่ยงในการทดลองผลิตได้ โดยขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัยได้แก่การศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การทดสอบสมบัติของวัสดุสำหรับกำหนดสมการพฤติกรรมวัสดุ การออกแบบ และสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นในกระบวนการโฟมแบลงค์ การทดลองยืนยันผล การจำลองกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตามเงื่อนไขการทดลอง การวิเคราะห์ และอธิบายผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อคุณภาพงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น และการสรุปผลการวิจัย

3.1 การศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยจำเป็นต้องศึกษาค้นคว้าทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทาง และจุดอ้างอิงของการศึกษาอิทธิพลของแรงดันกลับต่อการยุบตัวของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยทำการค้นคว้าจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น หนังสือตำรา เอกสารวิชาการ และสารสนเทศต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยสรุปแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

3.1.1 ศึกษากระบวนการขึ้นรูปโลหะ ที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องสัมพันธ์กันทั้งด้านการออกแบบการสร้างแม่พิมพ์ เครื่องมือเครื่องจักรสำหรับการขึ้นรูปในกระบวนการโฟมแบลงค์

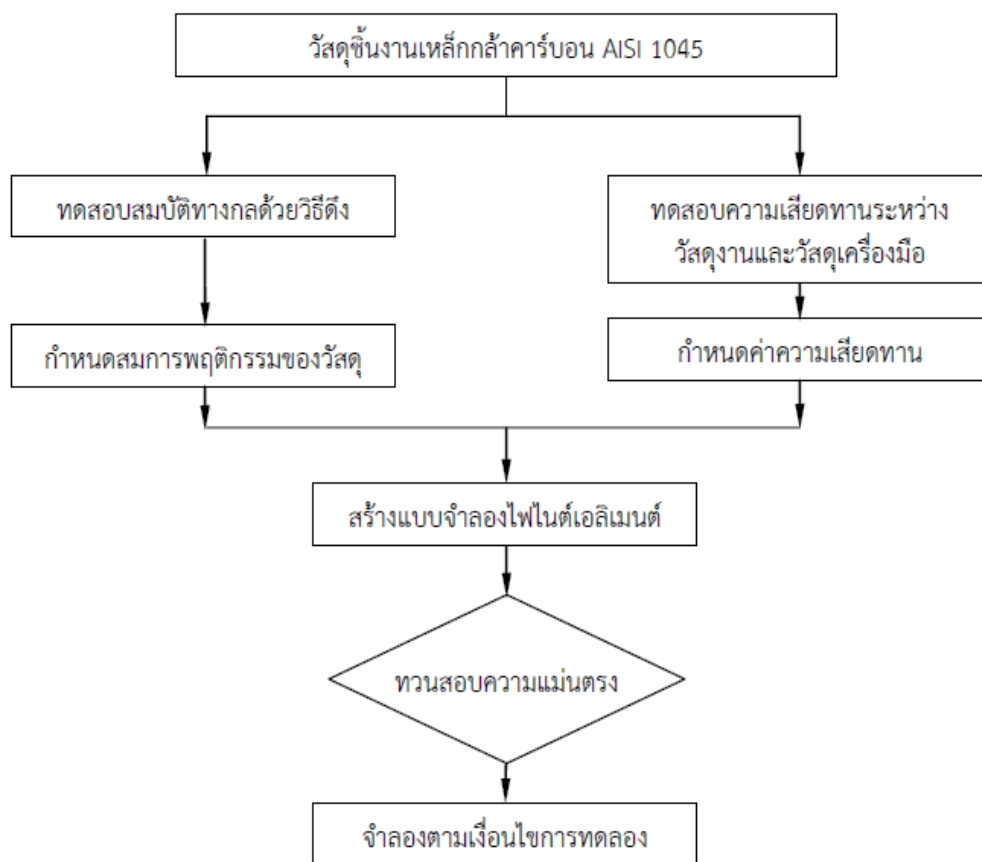
3.1.2 ศึกษาการจำลองกระบวนการขึ้นรูปโลหะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเนื้อหาที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยหลักการจำลอง และวิเคราะห์ผลไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการแทนสมบัติของวัสดุ และความเสียดทานระหว่างเครื่องมือกับวัสดุงาน เป็นต้น



ภาพประกอบ 58 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2 การศึกษา และทดสอบสมบัติของวัสดุ

การศึกษาอิทธิพลของแรงดันกลับต่อการยุบตัวของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น ผู้วิจัยอาศัยการอธิบายพฤติกรรมในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องทราบสมบัติเชิงกลที่สำคัญของวัสดุชิ้นงาน คือ ค่าความเค้นไหลของวัสดุ ค่าเกณฑ์การแตกหักของวัสดุ และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างวัสดุเครื่องมือกับวัสดุงาน โดยออกแบบการศึกษา และทดสอบสมบัติของวัสดุดังแสดงตามภาพประกอบ 59 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติของวัสดุ และการทวนสอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพประกอบ 59 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติของวัสดุ และการทวนสอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.1 การทดสอบสมบัติของวัสดุ

การศึกษาพฤติกรรม และการเปลี่ยนแปลงของวัสดุขณะจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะแสดงผลด้วยการคำนวณสมการพฤติกรรมของวัสดุภายใต้การรับแรงกระทำ สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางตามมาตรฐาน AISI 1045 ซึ่งมีสมบัติที่แข็งแรงสามารถชุบแข็งได้ดี มีราคาไม่สูง และนิยมนำมาใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนอุตสาหกรรม การกำหนดสมการพฤติกรรมของวัสดุเมื่อทำการทดสอบความต้านทานการดึง (Tension test) เป็นวิธีการทดสอบที่สะดวกรวดเร็ว และเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางสำหรับการวิจัยด้านการขึ้นรูปโลหะ โดยพฤติกรรมดังกล่าวจะแสดงด้วยเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง และความเครียดจริง (True stress – True strain curve หรือ Effective stress – Effective strain curve) สามารถคำนวณได้มาจากการทดสอบการต้านแรงดึงของวัสดุ

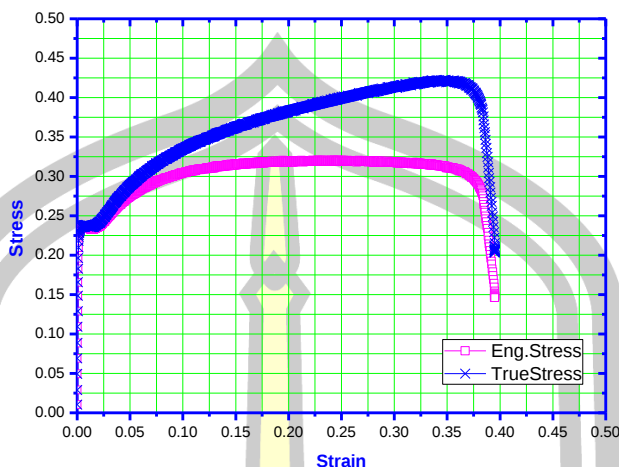
การทดสอบความต้านทานการดึงของวัสดุจำนวน 20 ชิ้นทดลอง แล้วเฉลี่ยออกผลการทดลองที่มีข้อบกพร่องซึ่งอาจเกิดจากการลื่นไถลของอุปกรณ์การจับยึดชิ้นงานทดสอบ และ นำผลการทดสอบที่สมบูรณ์มาวิเคราะห์การเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยระยะยัด และแรงดึงสูงสุดของข้อมูลทางสถิติ เพื่อเลือกผลการทดสอบที่สมบูรณ์ไปสร้างสมการพฤติกรรมต่อไป

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยแผนภูมิควบคุมจึงเลือกผลการทดสอบที่ให้ค่าการยัดตัว และแรงดึงสูงสุดที่อยู่ในช่วงควบคุม ใช้เป็นข้อมูลวิเคราะห์สมการแสดงพฤติกรรมของวัสดุสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป

3.2.2 การสร้างเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด

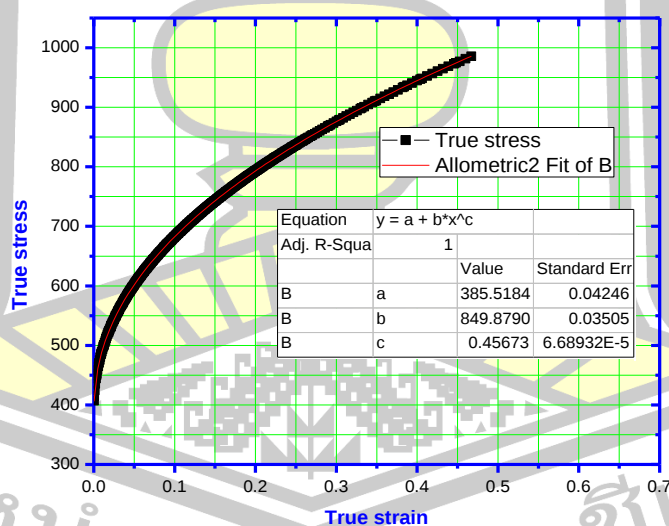
เมื่อพิจารณาเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด พบว่าค่าความเค้นจริงดังกล่าวจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นกระทั่งขาด ซึ่งเป็นผลมาจากความเครียดที่เกิดกับเนื้อวัสดุที่เรียกว่าความเครียดแข็ง (Strain Hardening) ดังแสดงตามภาพประกอบ 60 เปรียบเทียบเส้นกราฟความเค้นวิศวกรรม และความเค้นจริง

พหุบัน ปณุ สกิต ชีเว



ภาพประกอบ 59 กราฟเปรียบเทียบเส้นกราฟความเค้นวิศวกรรม และความเค้นจริง

พฤติกรรมการเสียรูปร่างถาวรของวัสดุ หรือ การเสียรูปแบบพลาสติก มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ และขนาดของการยืดตัวที่ไม่เป็นเส้นตรง จึงต้องคำนวณสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปสมการไม่เชิงเส้น (Nonlinear Equation)



ภาพประกอบ 60 กราฟการกำหนดสมการเสียรูปร่างแบบพลาสติก

ดังนั้น ตัวแปรของสมการยก $\sigma = K\varepsilon^n + C$ หรือ $\sigma = a + b\varepsilon^c$ ที่วิเคราะห์จากการเปลี่ยนรูปร่างถาวรของวัสดุแบบพลาสติกด้วยเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง และความเครียดจริงของวัสดุมีค่าคงที่ a เท่ากับ 385.5184 ค่าคงที่ b เท่ากับ 849.8790 และค่าคงที่ c

เท่ากับ 0.45673 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานของนักวิจัยที่ผ่านมา (ฉัตรแก้ว , 2554) จึงเชื่อได้ว่า จะสามารถพยากรณ์ผลลัพธ์ของการจำลองได้แม่นยำ

3.2.3 การกำหนดค่าวิกฤตของการแตกหักของวัสดุ

การวิเคราะห์กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ต้องพิจารณาถึงความเสียหาย หรือ แตกหักของวัสดุงานด้วย ซึ่งความเสียหายดังกล่าวสามารถแสดงผลได้ด้วยการกำหนดเกณฑ์ความเสียหาย (Fracture Criterion) ที่เหมาะสม สำหรับเกณฑ์ของความเสียหายที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ Oyane Criterion เนื่องจากรายงานการวิจัยด้านการขึ้นรูปโลหะ มักอ้างอิงถึงความสามารถทำนายความเสียหายของวัสดุในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะได้อย่างแม่นยำ (Gouveia, Rodrigues and Martins, 1996; Komori, 2003; Xue-Min, 2009) ดังแสดงตาม สมการที่ (3-1)

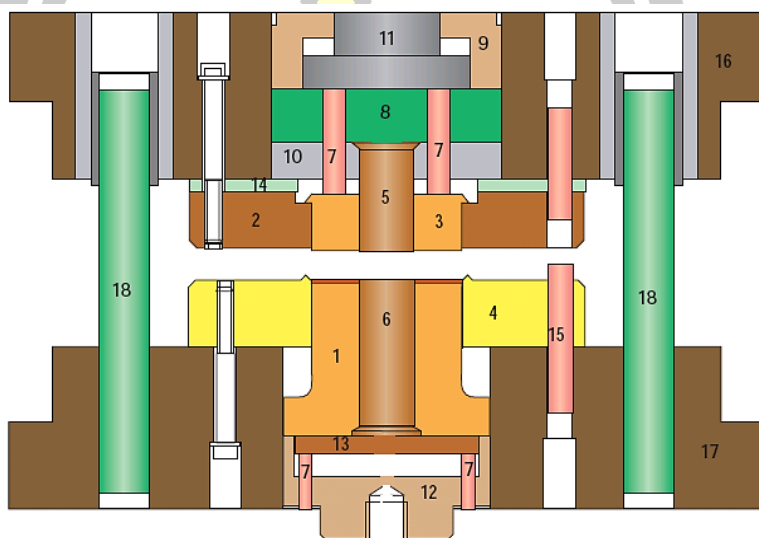
$$C = \int_0^{\varepsilon_f} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\alpha \bar{\sigma}} \right) d\varepsilon \quad (3-1)$$

โดยที่ $\bar{\sigma}$ คือ ค่าความเค้นสมมูล (Equivalent Stress) ε คือความเครียดสมมูล และ ε_f คือความเครียดสมมูลขณะเกิดความเสียหาย โดยค่าที่ได้จากการอินทิเกรตตามสมการที่ (3-1) มากกว่าค่าวิกฤต C ซึ่งเป็นค่าคงที่เฉพาะของวัสดุ แสดงว่าจะเกิดความเสียหายกับวัสดุชิ้นงานขึ้น การกำหนดค่า C สามารถทำได้สองวิธี คือเปรียบเทียบตำแหน่งที่เริ่มเกิดความเสียหาย (Crack Initiation) ของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปจริงกับตำแหน่งที่เกิดขึ้นในการจำลองการทำงาน และอีกวิธีคือทำการทดสอบการดึง หรือ การอัดวัสดุแล้วจึงคำนวณหาค่า C จากสมการที่ (3-1) (แสนสดพานิช, 2546; Lee, Chan, and Cheng, 1997)

งานวิจัยนี้หาค่า C โดยวิธีเปรียบเทียบตำแหน่งที่เริ่มเกิดความเสียหายของชิ้นงาน ในการทดสอบการดึงกับตำแหน่งที่เกิดขึ้นในการจำลองการดึง เพื่อประหยัดทรัพยากร และค่าใช้จ่ายในการทดลองสำหรับศึกษาพฤติกรรม และปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปจริง สำหรับเหล็กกล้าที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีค่า $C = 0.157 \text{ MPa}$ และค่าคงตัว $\alpha = 1$ (ฉัตรแก้ว , 2554)

3.3 การออกแบบ และสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นในกระบวนการไฟน์แบลลงค์

แม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นมีการออกแบบให้สามารถกดชิ้นงานเริ่มต้น หรือ แผ่นงานเปล่า (Blank holder) และสามารถด้านการเคลื่อนพินช์ (Counter punch) ด้วยระบบการทำงานแบบ 3 จังหวะการทำงาน



ภาพประกอบ 61 แม่พิมพ์ไฟน์แบลลงค์ที่ใช้พินช์เลื่อน
(ที่มา : Schuler, 1998)

กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะส่วนใหญ่นิยมใช้ผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมขนาดเล็กสำหรับงานอิเล็กทรอนิกส์ และชิ้นส่วนประกอบของงานเครื่องกล (Hirota, 2007) ดังนั้นการออกแบบ และสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นสำหรับการทดลองเพื่อยืนยันผล จึงกำหนดให้มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก สะดวกต่อการวัดขนาดด้วยเครื่องมือพื้นฐาน สามารถผลิตขึ้นส่วนได้ง่าย และไม่อาศัยเครื่องมือพิเศษในการประกอบ ดังแสดงตาม ภาพประกอบ 63 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นที่สร้างสำหรับการทดลอง

พูน บณ สิโต ชีเว



ภาพประกอบ 62 แสดงแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นที่สร้างสำหรับการทดลอง

ตาราง 1 รายละเอียดของการออกแบบ และสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นสำหรับการทดลอง

รายการกำหนด	รายละเอียด
วัสดุชิ้นงานสำหรับทดลองยืนยันผล	เหล็กกล้าตามมาตรฐาน AISI 1045 ความหนา 5 mm
วัสดุแม่พิมพ์	เหล็กกล้าเครื่องมือรอบสูงตามมาตรฐาน AISI M4
ขนาดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้น (Blank size)	$\varnothing B = 50$ mm เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของพunch
เส้นผ่านศูนย์กลางพunch	$\varnothing p = 12.70$ mm
เส้นผ่านศูนย์กลางตาย	$\varnothing d = 10.00$ mm
รัศมีขอบคมตัดแม่พิมพ์	$R_p, R_d = 0.20$ mm
สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	ยึดกับที่ (Fixed)
แรงดันพunch (Counter Punch)	20 KN, 40 KN และ 60 KN

การออกแบบ และสร้างแม่พิมพ์สำหรับการเปรียบเทียบยืนยันผล ระหว่างผลการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง และผลการจำลองกระบวนการด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้กำหนดรายละเอียดของการออกแบบ และสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นสำหรับทดลอง ดังแสดงตามตาราง 1 รายละเอียดการแบบงานชุดแม่พิมพ์ จัดแสดงไว้ใน ภาคผนวก ข เครื่องมือ และอุปกรณ์

3.4 การทดลองยืนยันผล

การทดลองยืนยันผลเป็นเปรียบเทียบระหว่างผลทดลองอัดขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์หาความผิดพลาดของการกำหนดสมการพฤติกรรมของวัสดุในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ การทดลองยืนยันผลได้นำชุดแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น ดังรายละเอียดที่กล่าวมาแล้วใน 3.3 การออกแบบ และสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นในกระบวนการไฟน์แบลงค์ ซึ่งได้ออกแบบ และชุดแม่พิมพ์ให้ตรงตามขอบเขตเงื่อนไขกำหนด และทดลองอัดขึ้นรูปชิ้นงาน จากนั้นสุ่มหยิบตัวอย่างชิ้นงานมาทำการวัดค่า นำค่าที่วัดได้มาคำนวณหาจำนวนตัวอย่าง ที่ค่าความเชื่อมั่น 95% และนำชิ้นงานสุ่มตามจำนวนที่คำนวณได้มาวัดค่าหาขนาดตามคุณภาพที่ศึกษาเปรียบเทียบกับขนาดที่วัดจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นจึงทำการทดลองซ้ำเพื่อหาปัจจัยแวดล้อมที่อาจทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นภายในขั้นตอนการทดลอง เพื่อให้แน่ใจว่าการทดลองไม่เกิดปัจจัยย่อยเข้ามาแทรกแซงผลการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ ดังนี้

3.4.1 การเตรียมก่อนการประมวลผล

การเตรียมก่อนการประมวลผล (Pre-Processing) เป็นขั้นตอนแรกสำหรับการจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยการออกแบบ และกำหนดเงื่อนไขขอบของแบบจำลอง ประกอบด้วยรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน ดังนี้

3.4.1.1 การกำหนดรูปแบบการจำลอง

การกำหนดรูปแบบการจำลองเป็นขั้นตอนการกำหนดลักษณะของปัญหา ซึ่งมีอยู่ 2 ประเภท คือ การกำหนดแบบจำลองชนิดอุณหภูมิคงที่ (Isothermal) และชนิดอุณหภูมิไม่คงที่ (Non-Isothermal) ในงานวิจัยนี้กำหนดแบบจำลอง ชนิดอุณหภูมิคงที่ (Isothermal)

3.4.1.2 การกำหนดลักษณะของปัญหา

การกำหนดลักษณะของปัญหา (Object Geometry) โดยรูปทรงที่มีอยู่ 2 ชนิด คือ แบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric) หรือ แบบจำลองแบบความเครียดในระนาบ (Plane Strain) ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองเป็นแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric)

3.4.1.3 การควบคุมหลัก

การควบคุมหลัก (Main Controls) เป็นขั้นตอนควบคุมช่วงเวลา การจำลอง และแบ่งการคำนวณแบบจำลองนั้นออกเป็นช่วงสั้น ๆ (Step) โดยสามารถควบคุมด้วยเวลา หรือ ระยะเคลื่อนที่ และกำหนดจำนวนช่วงการคำนวณ (Number of simulation Steps)

3.4.1.3 การสร้างแบบจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น

แผ่นงานเริ่มต้น และแท่งขึ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นในแบบจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีรูปร่างภาคตัดวงกลมที่สมมาตร จึงสามารถลดเวลา และทรัพยากรในการประมวลผลด้วยการวิเคราะห์ปัญหาแบบ 2 มิติ ชนิดสมมาตรรอบแกน (2D-Axisymmetric) การกำหนดสมบัติของวัสดุในของแบบจำลองให้เครื่องมือในแบบจำลองที่ประกอบด้วยพินช์ (Punch) ดาย (Die) แผ่นกดขึ้นงาน (Blank holder) แผ่นต้านการเคลื่อนพินช์ (Counter punch) และวงแหวนบังคับตำแหน่ง (Guide ring) เป็นวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid body) กำหนดให้วัสดุแผ่นงาน (Blank material) มีสมบัติแบบยืดหยุ่น-พลาสติก (Elastic-Plastic) ใช้สมการควบคุมเกณฑ์การแตกหัก (Fracture criterion equation) ของ Oyane และสมการการเสียรูปร่างแบบพลาสติก ดังแสดงรายละเอียดตาม ตาราง 2 ค่ากำหนดสมบัติของวัสดุในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ตาราง 2 เงื่อนไขการจำลองสำหรับเปรียบเทียบกับทดลอง

รายการแบบจำลอง	การกำหนดแบบจำลอง
แบบจำลอง	ชิ้นงาน : elastic-plastic (5 mm thickness) ชุดแม่พิมพ์ : rigid
สมการการเสียรูปร่างแบบพลาสติก	$\bar{\sigma} = 850\bar{\epsilon}^{0.478} + 385$
สมการเกณฑ์การแตกหัก	Oyane (constant α 1, Critical fracture value C 0.157)
การสัมผัสระหว่างอุปกรณ์กับวัสดุงาน	สัมผัสด้วยความเสียดทาน (Friction contact) $\mu=0.12$
แรงดันกดแบลงค์โฮลเดอร์ (F_{BH})	ยึดกับที่ (Fixed)
แรงต้านพินช์ (Counter Punch)	20 KN, 40 KN และ 60 KN
ขนาดดาย ($\varnothing d$)	10 mm
ขนาดพินช์ ($\varnothing p$)	12.7 mm
ขนาดแผ่นขึ้นงานเริ่มต้น(Blank size)	$\varnothing B = 50$ mm
รัศมีขอบคมแม่พิมพ์พินช์-ดาย	$r_p, r_d = 0.20$ mm

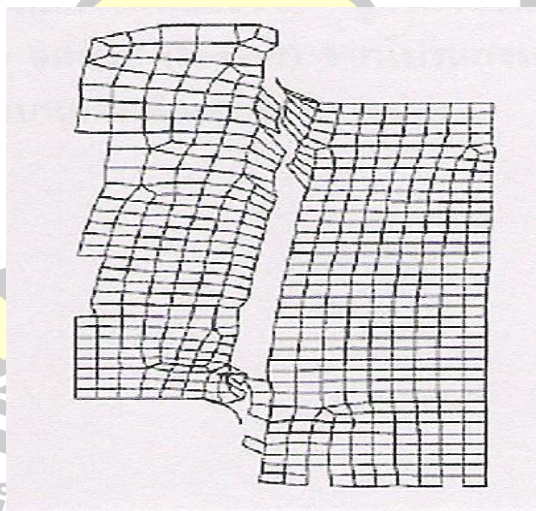
เอลิเมนต์ที่เลือกใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองชิ้นงานเหล็กกล้ามาตรฐาน AISI 1045 เป็นเอลิเมนต์ชนิดสี่เหลี่ยมสี่โหนด และจำนวนเอลิเมนต์ที่แบ่งจำนวน 10000 เอลิเมนต์ และกำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของพื้นผิวให้มีทิศทางการเคลื่อนที่ลงในแนวแกน Y ด้วยความเร็วคงที่ 10 mm/s

3.4.1.4 การกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุ

การกำหนดคู่สัมผัส คือการกำหนดคู่สัมผัส และความเสียดทานระหว่างวัตถุให้มีการสัมผัสระหว่างวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าตามมาตรฐาน AISI 1045 และวัสดุแม่พิมพ์เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง AISI M4 ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ทดสอบ 0.12 และค่าพิกัดระยะสัมผัส 0.0001 mm

3.4.2 การประมวลผล

การประมวลผล (Analysis) ด้วยการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข ซึ่งจะทำให้การสร้างเอลิเมนต์ขึ้นมาใหม่โดยอัตโนมัติ (Automatic Adaptive Remeshing) เมื่อเอลิเมนต์เดิมมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปมาก (Large Deformation) หรือ แสดงผลการแตกหัก หรือ ฉีกขาดของวัสดุด้วยวิธี ลบเอลิเมนต์ (Elements Deletion) ดังภาพประกอบ 64 การลบเอลิเมนต์เมื่อค่าคำนวณวิกฤติเกินค่าคงตัวของวัสดุ (Feintool AG Lyss, 2005)



ภาพประกอบ 63 การลบเอลิเมนต์เมื่อค่าคำนวณวิกฤติเกินค่าคงตัวของวัสดุ

(ที่มา : ฉัตรแก้ว สุริยะภา และคณะ, 2554)

3.4.3 การแสดงผลหลังกระบวนการประมวลผล

การแสดงผลหลังกระบวนการประมวลผล (Post-Processing) หลังจากการประมวลผลของกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นเสร็จสิ้นแล้ว ผลที่ได้จากการประมวลผลจะแสดงในรูปของข้อมูลเชิงตัวเลข ภาพกราฟฟิค และกราฟความสัมพันธ์ เช่น กราฟความสัมพันธ์ของแรงต่อเวลา หรือ แรงต่อระยะการเคลื่อนที่ ภาพกราฟฟิคของความเค้น และความเครียด เป็นต้น

3.5 การจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การศึกษาอิทธิพลของขนาดชิ้นงานเริ่มต้น รัศมีขอบคมตัดของแม่พิมพ์ และสารหล่อลื่นที่มีผลส่งผลกระทบต่อคุณภาพชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการไพน์แบลงค์ โดยศึกษาวิเคราะห์การเคลื่อนไหลตัวของเนื้อวัสดุที่มีต่อการกระจายความเค้น ความเครียด และความเค้นไฮโดรสแตติกบริเวณโดยรอบชิ้นงาน ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้การจำลองกระบวนการด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอธิบายพฤติกรรมซึ่งอาจเป็นปัจจัยกระทบที่มีต่อคุณภาพชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยกำหนดรายละเอียดของแบบจำลองตาม ตาราง 3

ตาราง 3 การกำหนดสมบัติของวัสดุในแบบจำลอง

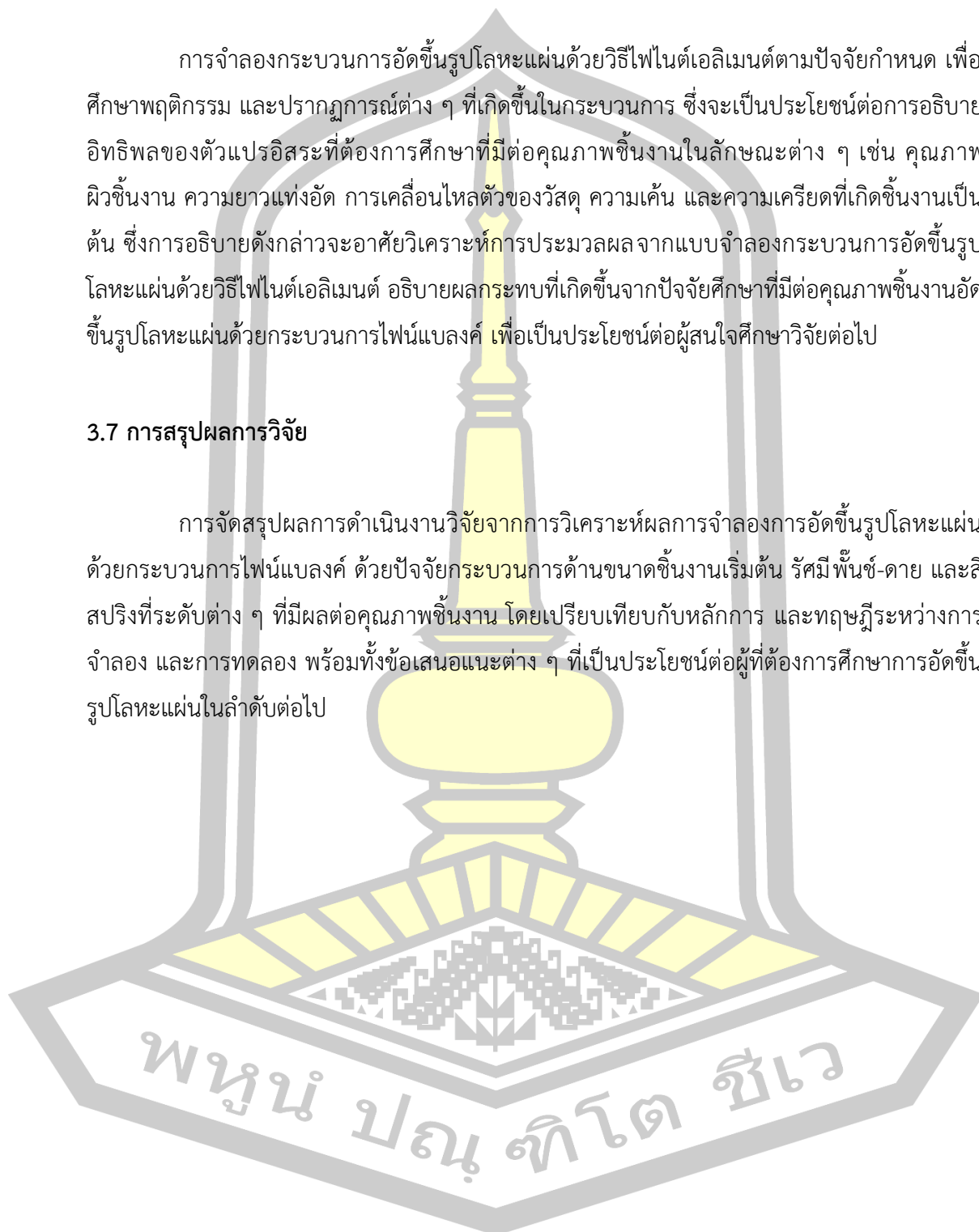
สมบัติทางกลของชิ้นงาน	เหล็กกล้าตามมาตรฐาน AISI 1045 ขนาดความหนา 5 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile stress) 520 MPa ความสามารถในการยืดตัว (Elongation) 28%
ชนิดของการวิเคราะห์	สมมาตรรอบแกน (Axisymmetry)
สมการเกณฑ์แตกหักของวัสดุ	Oyane (constant α 1, Critical fracture value C 0.157)
สมการเส้นโค้งการไหลตัว (Power Law)	$\bar{\sigma} = 850\bar{\epsilon}^{0.478} + 385$ MPa
สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	0.12
เส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่	12.70 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางตาย	10.00 mm
รัศมีขอบคมตัดแม่พิมพ์	$R_p, R_d = 0.05$ mm
แรงกดแผ่นงานเริ่มต้น (Blank holder force)	ยึดกับที่ (Fixed)
แรงต้านการเคลื่อนพื้นที่ (Counter punch force)	20 KN, 40 KN และ 60 KN

3.6 การอธิบายผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อคุณภาพงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น

การจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตามปัจจัยกำหนด เพื่อศึกษาพฤติกรรม และปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการอธิบายอิทธิพลของตัวแปรอิสระที่ต้องการศึกษาที่มีต่อคุณภาพชิ้นงานในลักษณะต่าง ๆ เช่น คุณภาพผิวชิ้นงาน ความยาวแท่งอัด การเคลื่อนไหลตัวของวัสดุ ความเค้น และความเครียดที่เกิดขึ้นงานเป็นต้น ซึ่งการอธิบายดังกล่าวจะอาศัยวิเคราะห์การประมวลผลจากแบบจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อธิบายผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยศึกษาที่มีต่อคุณภาพชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการไฟน์แบลนค์ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจศึกษาวิจัยต่อไป

3.7 การสรุปผลการวิจัย

การจัดสรุปผลการดำเนินงานวิจัยจากการวิเคราะห์ผลการจำลองการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการไฟน์แบลนค์ ด้วยปัจจัยกระบวนการด้านขนาดชิ้นงานเริ่มต้น รัศมีพินช์-ตาย และสปีดรีดที่ระดับต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงาน โดยเปรียบเทียบกับหลักการ และทฤษฎีระหว่างการทำลอง และการทดลอง พร้อมทั้งข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการศึกษาการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นในลำดับต่อไป



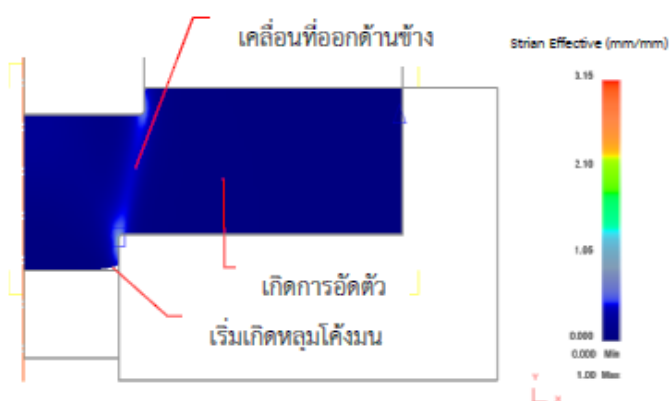
ผลการวิจัย และการอภิปราย

การวิเคราะห์การศึกษาอิทธิพลของแรงดันกลับต่อการยุบตัวของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการไฟน์แบลนก์ จะสามารถทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการเกิดจุดบกพร่อง สำหรับใช้เป็นแนวทางในการลดปัญหาจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น ชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นได้ด้วยวิธีไฟน์ดอลิเมนต์ ซึ่งการทดลองยืนยันผลด้วยเครื่องมืออุปกรณ์ และวัสดุทดลองดังกล่าวนี้ ให้ผลลัพธ์ในทิศทางเดียวกัน ดังผลงานของนักวิจัยที่ผ่านมา (ฉัตรแก้ว , 2554) และได้ผลการวิเคราะห์ด้านต่าง ๆ ได้แก่ ผลกระทบที่มีต่อแรงอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น และผลกระทบที่มีต่อขนาดความยาวแท่งอัด

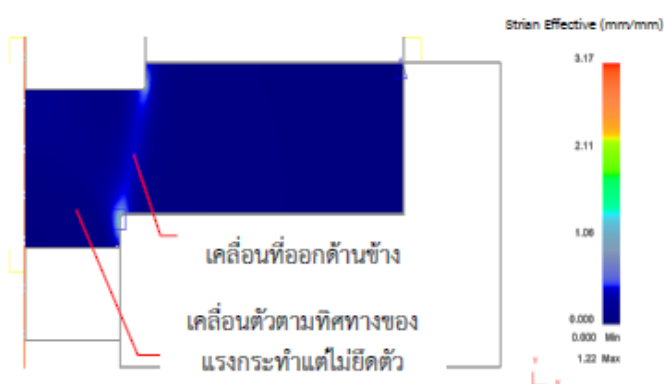
4.1 ผลกระทบที่มีต่อการยุบตัวโลหะแผ่น

ขณะที่เนื้อวัสดุงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นเคลื่อนไหลตัวผ่านปากรูแม่พิมพ์ เกิดการสัมผัสระหว่างวัสดุงานกับวัสดุแม่พิมพ์ และเกิดพฤติกรรมการณ์ต้านทานการเคลื่อนที่ของวัสดุจากการสัมผัสระหว่างผิว หรือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction coefficient) ซึ่งผลการทดสอบความเสียดทานระหว่างวัสดุชิ้นงาน และวัสดุแม่พิมพ์ ด้วยการใช้สปริงดันกลับในแม่พิมพ์ด้วยสปริง พบว่าการสัมผัสระหว่างวัสดุเครื่องมือตามมาตรฐาน AISI M4 และวัสดุงานเหล็กกล้า AISI 1045 ซึ่งความเสียดทานดังกล่าวมีอิทธิพลมากต่อแรงอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น กล่าวคือกระบวนการอัดขึ้นรูปที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูง จะมีผลให้การเคลื่อนไหลตัวของเนื้อวัสดุงานเป็นไปได้ช้า เกิดความเค้นจากการสัมผัสที่สูงขึ้นบริเวณที่สัมผัสกับผิว และใช้แรงอัดขึ้นรูปสูงขึ้นเนื่องจากพฤติกรรมการณ์ต้านทานการเคลื่อนที่ของวัสดุ เมื่อกำหนดแรงดัน (Counter Punch) ที่ระดับต่างกัน พบว่าเกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหลส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อวัสดุงาน จะเกิดการยุบตัว หรือเกิดหลุมยุบส่วนท้ายการอัดที่เกิดขึ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น ดังภาพประกอบ 65 - 68

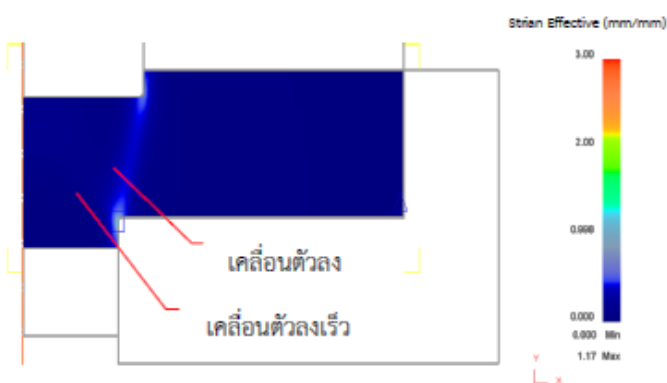
พูน ปณ สิโต ชีเว



ก) ลักษณะการไหลเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ Counter Punch 20000



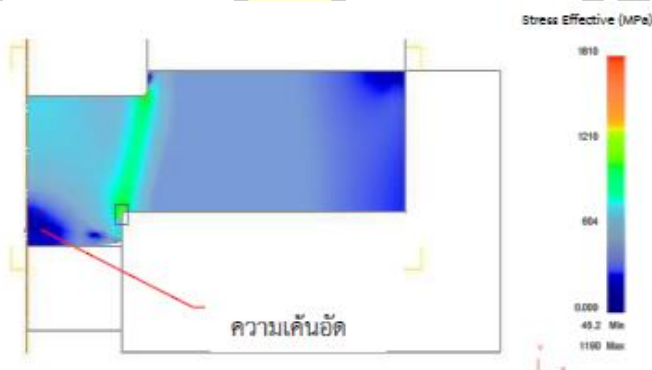
ข) ลักษณะการไหลเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ Counter Punch 40000



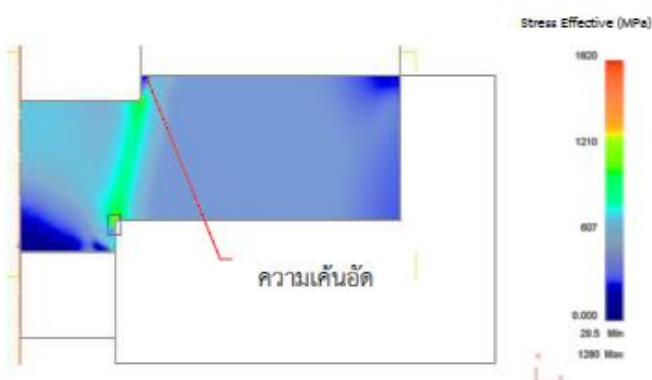
ค) ลักษณะการไหลเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ Counter Punch 60000

ภาพประกอบ 65 การเคลื่อนไหลตัวในแบบจำลองที่พินช์เริ่มเคลื่อนเข้าหาเนื้อวัสดุงาน

เมื่อพิจารณาตามภาพประกอบ 65 การเคลื่อนไหลตัวในแบบจำลองที่พื้นผิวเริ่มเคลื่อนเข้าหาเนื้อวัสดุงาน พบว่าเมื่อพื้นผิวเริ่มเคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อวัสดุงาน และเริ่มแทรกตัวไปในเนื้อของวัสดุงานทำให้เนื้อวัสดุงานเกิดการไหลตัวไปในทิศทางที่เคลื่อนที่ของพื้นผิว สังเกตเห็นว่าพื้นผิวไหลผ่านปากกรวยของตาย จนเริ่มเกิดเป็นส่วนนูนปรากฏบนผิวของวัสดุงานในด้านฝั่งตรงข้ามกัน และบางส่วนของเนื้อวัสดุงานที่ไหลเข้าปากกรวยของตายไม่ได้ เนื่องจากการบังคับทิศทางการไหลของการออกแบบรูปร่างของพื้นผิวทำให้เกิดการรักษาสอดคล้องปริมาตรวัสดุ โดยเกิดมีการเคลื่อนตัวไหลออกด้านข้างเล็กน้อย เมื่อกำหนดแรงดัน (Counter Punch) 20000 N พบว่า เกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหล ส่งผลทำให้ปรากฏเริ่มมีหลุมโค้งมนเกิดขึ้นออกด้านข้างชัดเจน และกำหนดแรงดัน (Counter Punch) 40000 N พบว่า เกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหลมากขึ้นส่งผลทำให้ปรากฏเริ่มมีหลุมยุบส่วนท้ายการอัดโค้งมนเกิดขึ้นออกด้านข้างของวัสดุงานเพียงเล็กน้อย โดยถ้ามีแรงดัน Counter Punch น้อย จะเกิดการยุบตัว หรือเกิดหลุมยุบส่วนท้ายการอัดที่เกิดบนชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น เพราะว่า แรงต้านของแรงดัน (Counter Punch) เพียงแต่สัมผัสกับเนื้อวัสดุเล็กน้อย ทำให้ยุบตัวด้านท้ายแล้วดันออกด้านข้าง (Suriyapha et al., 2010)



ก) ลักษณะการเกิดความเค้นขณะที่วัสดุเคลื่อนไหลตัว Counter Punch 20000



ข) ลักษณะการเกิดความเค้นขณะที่วัสดุเคลื่อนไหลตัว Counter Punch 40000

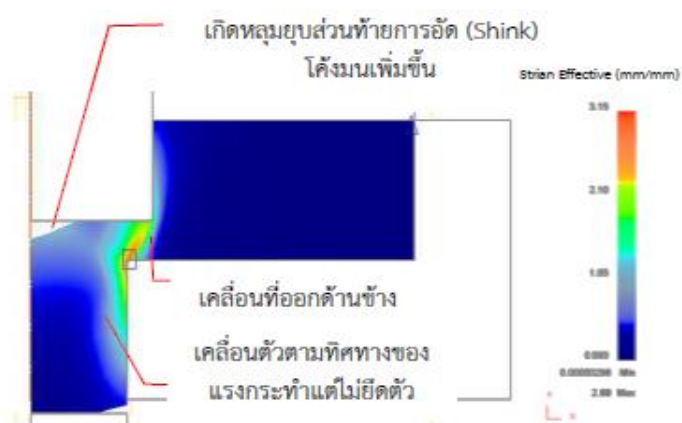


ค) ลักษณะการเกิดความเค้นขณะที่วัสดุเคลื่อนไหลตัว Counter Punch 60000

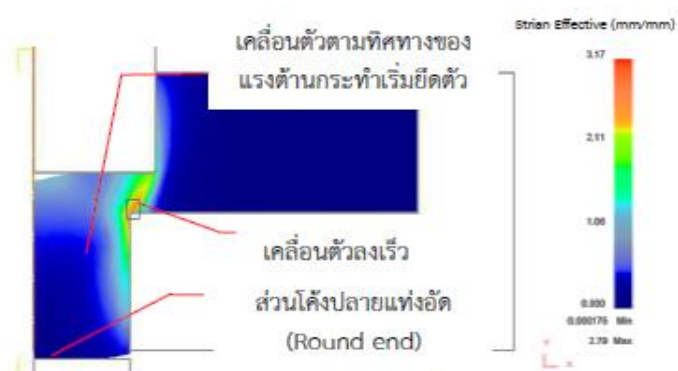
ภาพประกอบ 66 การเกิดความเค้นในแบบจำลองที่พื้นที่เริ่มเคลื่อนเข้าหาเนื้อวัสดุงาน

เมื่อพิจารณาตามภาพประกอบ 66 การเกิดความเค้นในแบบจำลองที่พื้นที่เริ่มเคลื่อนเข้าหาเนื้อวัสดุงาน พบว่าเมื่อพื้นที่เริ่มเคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อวัสดุงานมากขึ้น และกดแทรกตัวไปในเนื้อของวัสดุงานทำให้เนื้อวัสดุงานเกิดการไหลตัวไปในทิศทางการเคลื่อนที่ของพื้นที่ และเริ่มไหลผ่านปากของตาย เนื้อวัสดุงานอีกส่วนหนึ่งเริ่มเคลื่อนตัวไหลออกด้านข้าง เพื่อการรักษาสมดุลปริมาตรวัสดุจึงมีผลทำให้เกิดการขยายตัวของแผ่นงานเริ่มต้นให้มีขนาดโตมากขึ้น โดยเริ่มเกิดความเสียหายระหว่างเครื่องมือกับเนื้อวัสดุงาน ซึ่งส่งผลทำให้การขึ้นรูปโลหะบริเวณของแนวแกนกลาง สามารถเคลื่อนไหลตัวได้ไม่สะดวกมากกว่าบริเวณผิวรอบนอกของวัสดุงานที่สัมผัสกับผิวของตาย และเนื้อโลหะเริ่มการอัดตัวกันแน่นจนเกิดเป็นบริเวณแนวเขตของเนื้อโลหะตาย (Dead metal zone) ที่ปรากฏคล้ายกับมุมเอียงให้กับแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะ (Suriyapha et al., 2010)

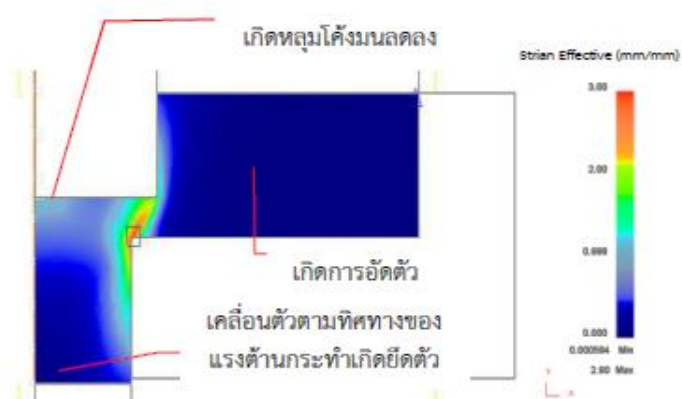
พูน ปณ จิต ชีเว



ก) ลักษณะการไหลเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ Counter Punch 20000



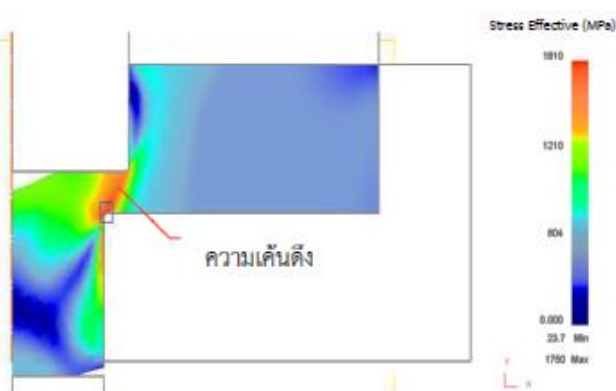
ข) ลักษณะการไหลเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ Counter Punch 40000



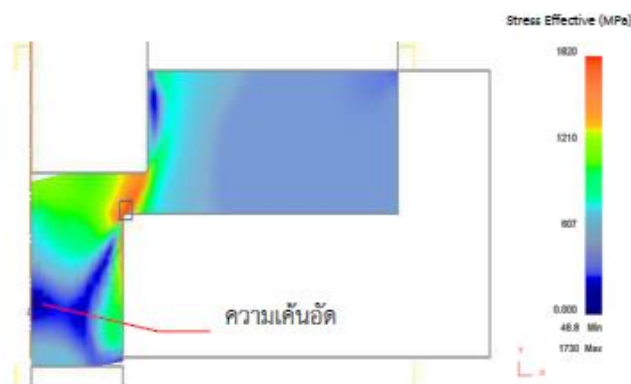
ค) ลักษณะการไหลเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ Counter Punch 60000

ภาพประกอบ 67 การเคลื่อนไหลตัวในแบบจำลองที่พื้นที่เคลื่อนแทรกเข้าสูงสุดในเนื้อวัสดุงาน

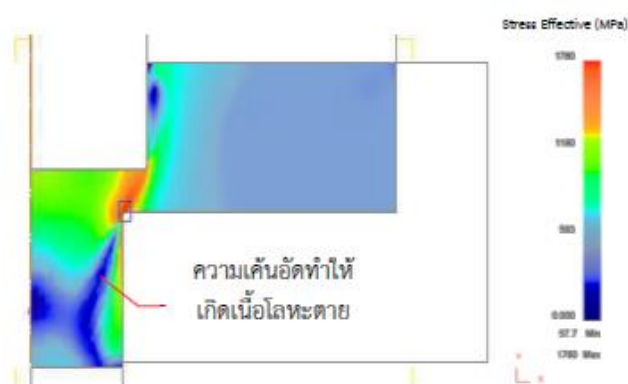
เมื่อพิจารณาตามภาพประกอบ 67 การเคลื่อนไหลตัวในแบบจำลองที่พินช์เคลื่อนแทรกเข้าสู่สูงสุดในเนื้อวัสดุงาน พบว่าเมื่อพินช์เริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่สูงสุดในเนื้อวัสดุงาน และกดแทรกตัวไปในเนื้อของวัสดุงานทำให้เนื้อวัสดุงานเกิดการไหลตัวไปในทิศทางการเคลื่อนที่ของพินช์ สังเกตเห็นว่าพินช์ไหลผ่านปากกรูของตาย จนปรากฏเกิดเป็นส่วนนูนบนผิวของวัสดุงานในด้านฝั่งตรงข้ามกัน และบางส่วนของเนื้อวัสดุงานที่ไหลเข้าปากกรูของตายไม่ได้ เนื่องจากการบังคับทิศทางการไหลของการออกแบบรูปร่างของพินช์ทำให้เกิดการรักษาสอดคล้องปริมาตรวัสดุ โดยเกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหล ส่งผลทำให้ปรากฏหลุมยุบชัดเจน เมื่อกำหนดแรงดัน (Counter Punch) 20000 N พบว่า เกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหลส่งผลทำให้ปรากฏเริ่มมีหลุมยุบส่วนท้ายการอัดโค้งมนเกิดขึ้นออกด้านข้าง และด้านบนของวัสดุงานเพิ่มมากขึ้น และกำหนดแรงดัน (Counter Punch) 60000 N พบว่า เกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหลมากขึ้นส่งผลทำให้ปรากฏเริ่มมีหลุมยุบส่วนท้ายการอัดโค้งมนเกิดขึ้นออกด้านข้าง และด้านบนของวัสดุงานเพียงเล็กน้อย โดยถ้ามีแรงดัน (Counter Punch) มากขึ้น จะเกิดการยุบตัว หรือเกิดหลุมยุบส่วนท้ายการอัดที่เกิดบนชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นน้อยลง เพราะว่า แรงต้านของแรงดัน (Counter Punch) สัมผัสกับเนื้อวัสดุมากขึ้น ทำให้ยุบตัวเคลื่อนตัวตามทิศทางของแรงต้านเกิดการยึดตัว แต่ดันออกด้านข้างเพียงเล็กน้อย (Suriyapha et al., 2010)



ก) ลักษณะการเกิดความเค้นขณะวัสดุเคลื่อนไหลตัว Counter Punch 20000



ข) ลักษณะการเกิดความเค้นขณะที่วัสดุเคลื่อนไหลตัว Counter Punch 40000



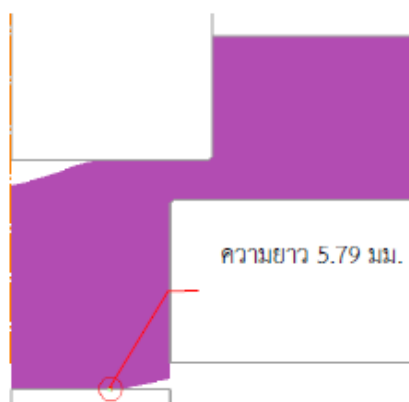
ค) ลักษณะการเกิดความเค้นขณะที่วัสดุเคลื่อนไหลตัว Counter Punch 60000

ภาพประกอบ 68 การเกิดความเค้นในแบบจำลองที่พื้นที่เคลื่อนแทรกเข้าสูงสุดในเนื้อวัสดุงาน

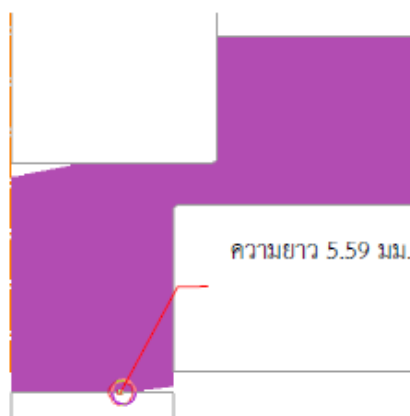
เมื่อพิจารณาตามภาพประกอบ 68 การเกิดความเค้นในแบบจำลองที่พื้นที่เคลื่อนแทรกเข้าสูงสุดในเนื้อวัสดุงาน พบว่าเมื่อพื้นที่เริ่มเคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อวัสดุงานมากขึ้น และกดแทรกตัวสูงสุดไปในเนื้อของวัสดุงานทำให้เนื้อวัสดุงานเกิดการไหลตัวไปในทิศทางการเคลื่อนที่ของพื้นที่ และไหลผ่านปากของตาย เนื้อวัสดุงานอีกส่วนหนึ่งเคลื่อนตัวไหลออกด้านข้าง เพื่อการรักษาสมดุลปริมาตรวัสดุ จึงมีผลทำให้เกิดการขยายตัวของแผ่นงานเริ่มต้นให้มีขนาดโตมากขึ้น โดยเกิดความเสียหายระหว่างเครื่องมือกับเนื้อวัสดุงาน ซึ่งส่งผลทำให้การขึ้นรูปโลหะบริเวณของแนวแกนกลาง สามารถเคลื่อนไหลตัวได้สะดวกมากกว่าบริเวณผิวรอบนอกของวัสดุงานที่สัมผัสกับผิวของตาย และเนื้อโลหะที่มีการอัดตัวกันแน่นจนเกิดเป็นบริเวณแนวเขตของเนื้อโลหะตาย (Dead metal zone) ที่ปรากฏคล้ายกับมูมเอียงให้กับแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะ (Suriyapha et al., 2010)

4.2 ผลกระทบที่มีต่อขนาดความยาวแท่งอัด

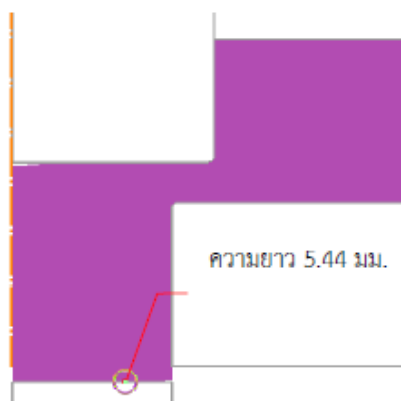
การพิจารณาอิทธิพลของแรงดัน (Counter Punch) ที่มีต่อขนาดความยาวแท่งอัด (Length of extrusion rod) ในเบื้องต้น พบว่ามีแนวโน้มในทิศทางตรงข้ามกัน กล่าวคือ ค่าแรงดัน (Counter Punch) ของชิ้นงานเริ่มต้น ที่มีค่าสูงจะมีผลทำให้แท่งอัดมีความยาวน้อยด้วย ดังภาพประกอบ 69 แสดงขนาดความยาวของอัดขึ้นรูปที่ได้จากการจำลองการทำงานในสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ



ก) ลักษณะขนาดความยาวของอัดขึ้นรูปที่แรงดัน Counter Punch 20000



ข) ลักษณะขนาดความยาวของอัดขึ้นรูปที่แรงดัน Counter Punch 40000



ค) ลักษณะขนาดความยาวของอัดขึ้นรูปที่แรงดัน Counter Punch 60000

ภาพประกอบ 69 แสดงขนาดความยาวของอัดขึ้นรูปที่ได้จากการจำลองการทำงาน
ในสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ

เมื่อวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างขนาดชิ้นงานเริ่มต้น และแรงดัน (Counter Punch) ที่มี
ต่อขนาดความยาวแท่งอัด (Length of extrusion rod) พบว่าขนาดความยาวของแท่งอัดที่มีค่าน้อย
ที่สุด คือ การอัดขึ้นรูปชิ้นงานเริ่มต้นที่มีแรงดัน (Counter Punch) ขนาด 60000 N และสำหรับกรณี
ที่ขนาดความยาวของแท่งอัดที่มีค่ามากที่สุด คือ การอัดขึ้นรูปชิ้นงานเริ่มต้นแรงดัน (Counter
Punch) ขนาด 20000 N



สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การศึกษาอิทธิพลของแรงดันกลับต่อการยุบตัวของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น ด้วยกระบวนการไฟน์เบลงก์ โดยดำเนินการทดลองอัดขึ้นรูปชิ้นงานโลหะแผ่นด้วยชุดแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น พิสูจน์ยืนยันความแม่นยำตรงของสมการแสดงพฤติกรรมของวัสดุ ที่ใช้สำหรับกำหนดคุณสมบัติของวัสดุในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยการเปรียบเทียบผลการวัดขนาดชิ้นงานอัดขึ้นรูประหว่างผลการทดลอง และผลการจำลอง เมื่อพบว่าสมการพฤติกรรมของวัสดุที่กำหนดให้แก่แบบจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแสดงลักษณะรูปร่างของชิ้นงานในทิศทางเดียวกันกับการขึ้นรูปชิ้นงานจริง แสดงความสมบูรณ์ และจุดบกพร่องต่างๆ ได้ใกล้เคียงสอดคล้องกัน จึงนำมาซึ่งการจำลองกระบวนการตามปัจจัยที่ศึกษา ซึ่งสามารถสรุปผลการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

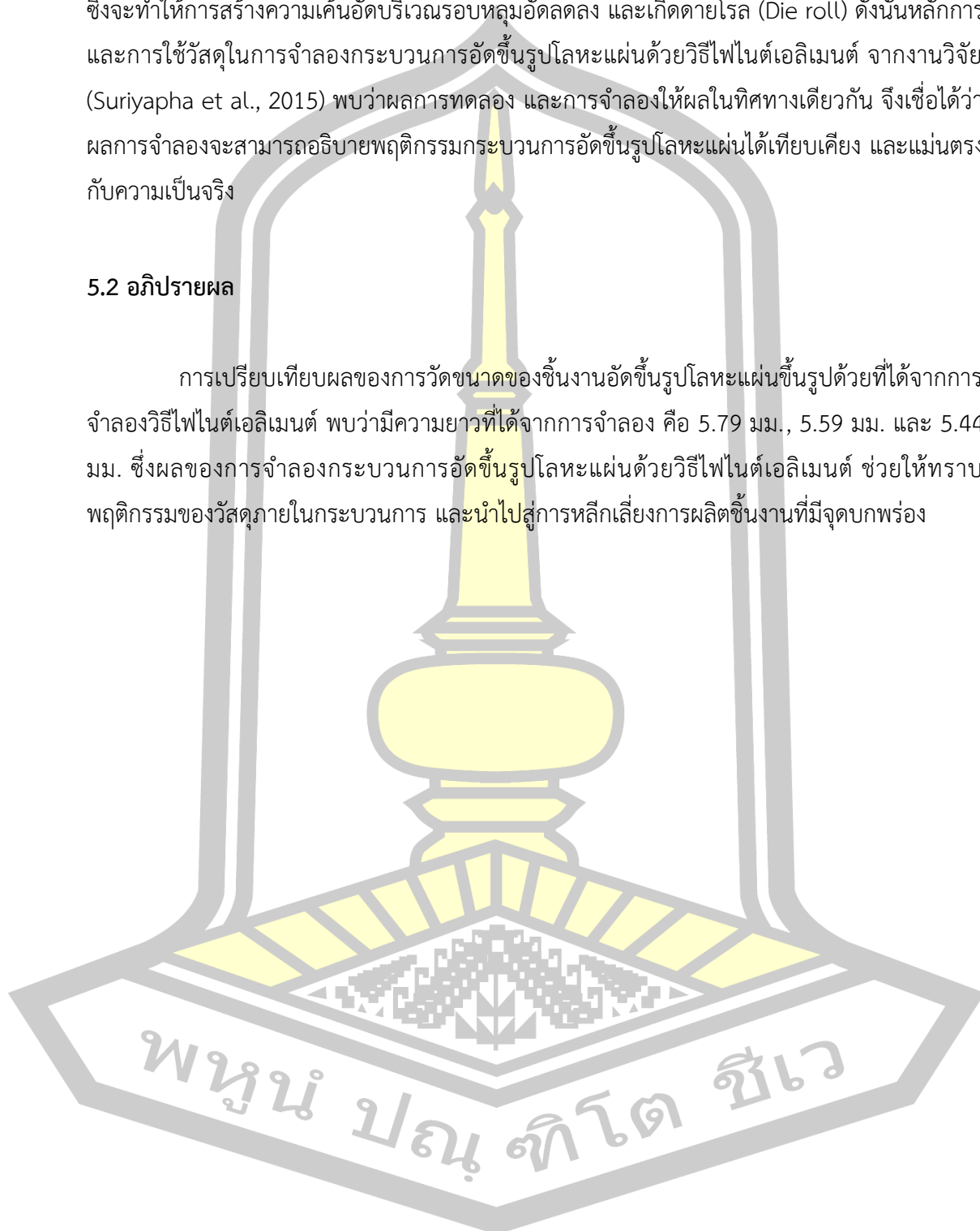
5.1 สรุปผล

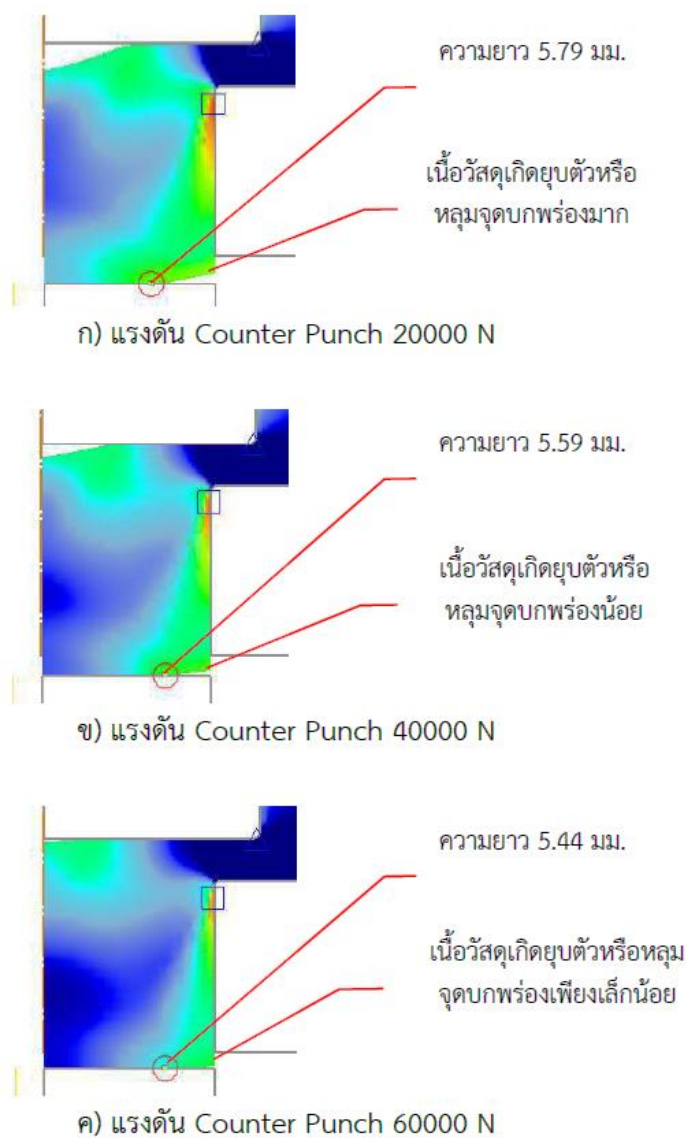
อิทธิพลของแรงดันกลับ (Counter Punch) จะมีผลกระทบโดยปรากฏชัดเจนที่มีต่อ ความเค้นในชิ้นงาน เนื้อวัสดุบริเวณขอบรัศมีของคมตัดจะถูกดันเลื่อนแหวกออกจากกัน ซึ่งส่งผลให้การกระจายตัวของความเค้นไฮโดรสแตติกของเนื้อวัสดุงานในแนวแถบการเฉือนมีค่าการกระจายตัวสูงกว่ารัศมีขอบคมตัดขนาดเล็ก และเคลื่อนไหลตัวเข้าสู่แผ่นงานได้ง่ายขึ้น (สุเทพ, ดลธรรม และโอริส, 2552) การไหลตัวของเนื้อวัสดุในชิ้นงาน เนื้อวัสดุจึงเคลื่อนไหลตัวเข้าสู่เนื้อวัสดุงานที่ถูกบังคับขอบเขตจากแรงดัน (Counter Punch) ที่มีแรงดันมาก ความเครียดในชิ้นงาน สำหรับแรงดัน (Counter Punch) ที่มีแรงดันน้อยจะมีผลต่อการกระจายความเครียดในชิ้นงาน สามารถเคลื่อนตัวแทรกเข้าไปในเนื้อวัสดุงานได้สะดวกขึ้น และการยุบตัวในส่วนท้ายของการอัด โดยเกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหลส่งผลทำให้ปรากฏหลุมยุบชัดเจน เมื่อกำหนดแรงดัน (Counter Punch) 20000 N พบว่า เกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหลส่งผลทำให้ปรากฏเริ่มมีหลุมยุบส่วนท้ายการอัดโค้งมนเกิดขึ้นออกด้านข้าง และด้านบนของวัสดุงานเพิ่มมากขึ้น และกำหนดแรงดัน (Counter Punch) 60000 N พบว่า เกิดมีแรงต้านการเคลื่อนตัวไหลมากขึ้นส่งผลทำให้ปรากฏเริ่มมีหลุมยุบส่วนท้ายการอัดโค้งมนเกิดขึ้นออกด้านข้าง และด้านบนของวัสดุงานเพียงเล็กน้อย โดยถ้ามีแรงดัน (Counter Punch) มากขึ้น จะเกิดการยุบตัว หรือเกิดหลุมยุบส่วนท้ายการอัดที่เกิดบนชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นน้อยลง เพราะว่า แรงต้านของแรงดัน (Counter Punch) สัมผัสกับเนื้อวัสดุมากขึ้น ทำให้ยุบตัวเคลื่อนตัว

ตามทิศทางของแรงต้านเกิดการยืดตัว แต่ดันออกด้านข้างเพียงเล็กน้อย (Suriyapha et al., 2010) ซึ่งจะทำให้การสร้างความเค้นอัดบริเวณรอบหลุมอัดลดลง และเกิดตายโรล (Die roll) ดังนั้นหลักการและการใช้วัสดุในการจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากงานวิจัย (Suriyapha et al., 2015) พบว่าผลการทดลอง และการจำลองให้ผลในทิศทางเดียวกัน จึงเชื่อได้ว่าผลการจำลองจะสามารถอธิบายพฤติกรรมกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นได้เทียบเคียง และแม่นยำตรงกับความเป็นจริง

5.2 อภิปรายผล

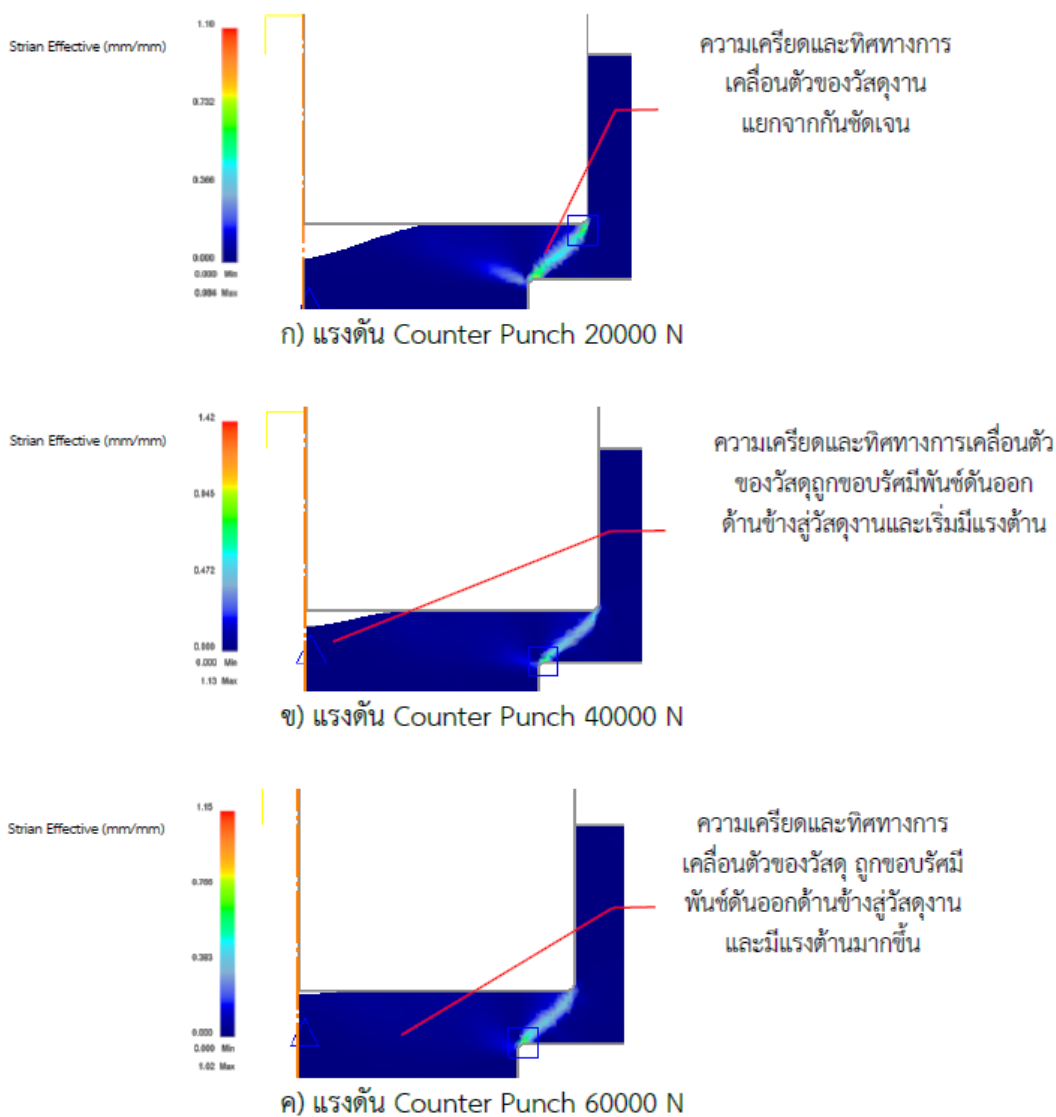
การเปรียบเทียบผลของการวัดขนาดของชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นขึ้นรูปด้วยที่ได้จากการจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีความยาวที่ได้จากการจำลอง คือ 5.79 มม., 5.59 มม. และ 5.44 มม. ซึ่งผลของการจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ช่วยให้ทราบพฤติกรรมของวัสดุภายในกระบวนการ และนำไปสู่การหลีกเลี่ยงการผลิตชิ้นงานที่มีจุดบกพร่อง





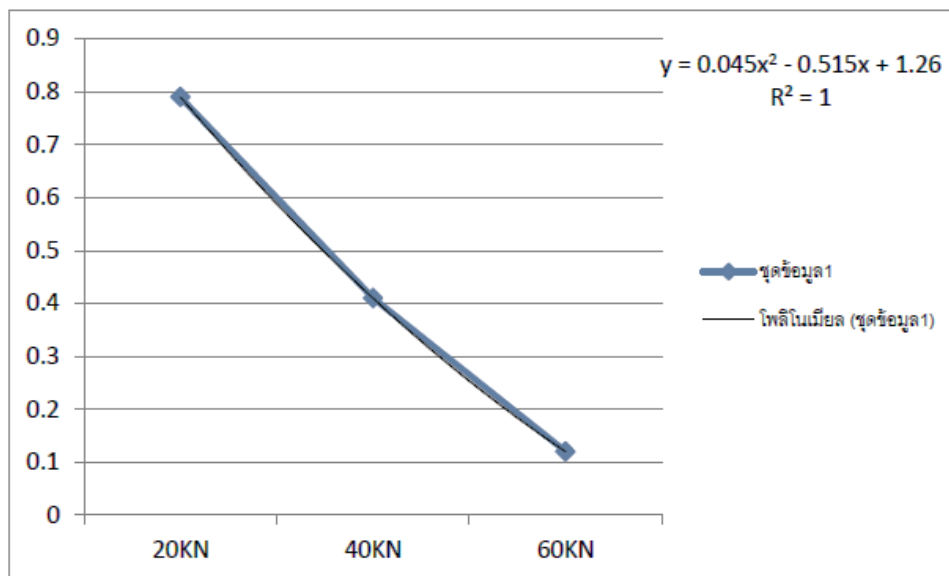
ภาพประกอบ 70 แสดงขนาดความยาวของอัดขึ้นรูปในสถานะเงื่อนไขต่าง ๆ

การศึกษาอิทธิพลของแรงดันกลับต่อการยุบตัว (Shink) ของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการไฟน์แบล็ก พบว่าการอัดตัวกันแน่นของเนื้อวัสดุ หรือขอบเขตบริเวณก้อนโลหะตาย (Dead metal zone) มักจะมีผลต่อการต้านแรงกระทำหรือแรงอัดขึ้นรูปได้ (Avitzur, 1983; Suriyapha et al., 2011) และสำหรับกรณีการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยขนาดของแรงดัน (Counter Punch) ที่มีขนาดมาก จะการเกิดจุดบกพร่องแบบยุบตัวที่ส่วนท้ายของการอัดน้อย และแรงดัน (Counter Punch) ที่มีขนาดน้อย จะการเกิดจุดบกพร่องแบบยุบตัวที่ส่วนท้ายของการอัดมาก ดังแสดงตาม ภาพประกอบ 70 และ 71

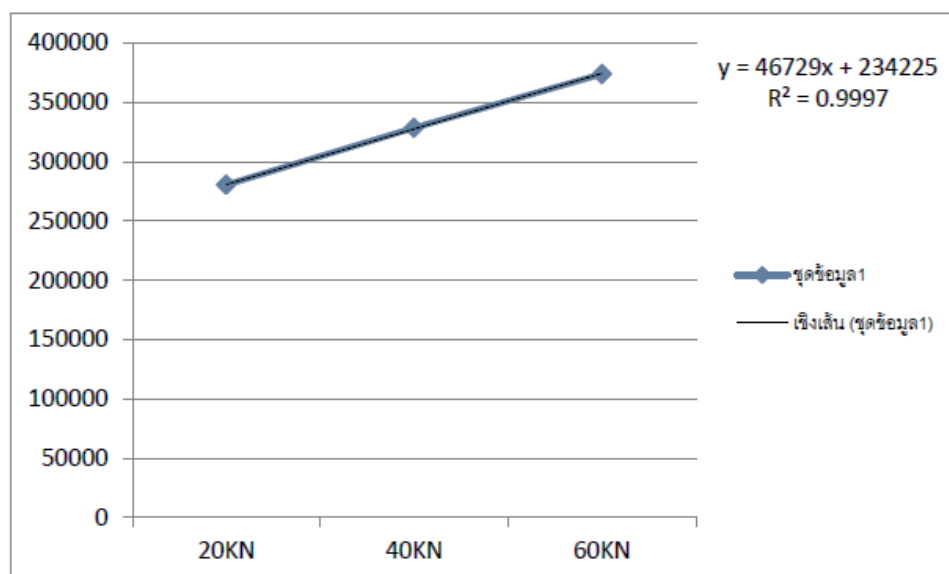


ภาพประกอบ 71 แรงดัน (Counter Punch) ที่มีผลต่อการกระจายความเครียดในชิ้นงาน

เมื่อแรงดัน (Counter Punch) ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปลายโค้งลดลง ขณะเดียวกันมีผลทำให้หลุมยุบส่วนท้ายการอัดลดลง อีกทั้งส่งผลต่อแรงอัดขึ้นรูปอีกด้วย (Suriyapha et al., 2015) เป็นผลดังแสดงในภาพประกอบ 72 และ 73 สามารถช่วยพยากรณ์แรงสำหรับการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นในเบื้องต้นสำหรับวางแผนการผลิต หรือ เลือกขนาดเครื่องจักรได้แม่นยำตรง



ภาพประกอบ 72 แสดงขนาดการยุบตัวในสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ



ภาพประกอบ 73 แสดงขนาดแรงอัดขึ้นรูปในสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ

ดังนั้น เพื่อลดปัญหาการเกิดการยุบตัว หรือหลุมยุบส่วนท้ายการอัดในชิ้นงาน ควรกำหนดปัจจัยขนาดของแรงดัน (Counter Punch) ด้วยการเลือกปัจจัยข้างต้นที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการตามสมการพยากรณ์ที่เสนอแนะ หรือจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อช่วยให้ทราบพฤติกรรมของวัสดุภายในกระบวนการ จะเป็นประโยชน์ต่อการใช้งาน

ได้อย่างกว้างขวางต่อการออกแบบ และพัฒนาผลิตภัณฑ์ การเพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุม กระบวนการผลิต และช่วยลดความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยอิทธิพลที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น สำหรับผู้ที่ศึกษาวิจัยต่อไป ควรพิจารณาเพิ่มเติมในส่วนต่างๆ ดังนี้

5.3.1 ด้านกระบวนการทางแม่พิมพ์ เช่น การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการอัดขึ้นรูป การศึกษาขนาดแรงกดแบบลงคี่ไฮดรอลิก และเคาน์เตอร์พันซ์ที่เหมาะสม การศึกษาเปรียบเทียบชนิดวัสดุ ระดับความเรียบผิว และการสึกหรอของแม่พิมพ์ เป็นต้น

5.3.2 ด้านกระบวนการผลิต และควบคุม เช่น การศึกษาผลกระทบที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น และการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิทำงานแตกต่างกัน ความเร็วในการอัดขึ้นรูประดับต่างๆ เป็นต้น

5.3.3 ด้านกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ เช่น การอัดขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานประเภทอื่น การอัดขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างแบบอื่น และการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่นขนาดเล็กมาก (Micro extrusion) เป็นต้น



บรรณานุกรม

- จุลศิริ ศรีงามผ่อง. (2532). *วิศวกรรมงานแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่นเบื้องต้น*. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ฉัตรแก้ว สุริยะภา, บพิธ บุปผโชติ และสัมพันธ์ ฤทธิเดช. (2554). อิทธิพลของอัตราส่วนการอัดต่อคุณภาพชิ้นงานสำหรับการอัดขึ้นรูปโลหะแผ่น. *การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ครั้งที่ 7*, 42–46.
- ฉัตรแก้ว สุริยะภา, อนุสิทธิ์ อ่ำไพบูลย์ และบุญส่ง ฤทธิตา. (2553, October 13). อัตราส่วนการขึ้นรูปที่มีผลกระทบต่อคุณภาพงานกดดันไหลขึ้นรูปโลหะแผ่น. *การประชุมวิชาการข่วงงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม*.
- ชมรมอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย. (2543). *ความรู้เบื้องต้นแม่พิมพ์ดัดละเอียด*. สมาคมอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย.
- ชาญ ถนัดงาน. (2547). *เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ*. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ณัฐนันท์ มุลสระคู่, พงศ์พันธ์ แก้วดาทิพย์ และวารุณี เปรมานนท์. (2549, October 18). การศึกษาอิทธิพลของความหนืดและปริมาณคลอรีนในน้ำมันหล่อลื่นของกระบวนการดัดท่อทองแดง. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20*.
- ณัฐนันท์ มุลสระคู่, พงศ์พันธ์ แก้วดาทิพย์ และวารุณี เปรมานนท์. (2550). การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของการใช้สารหล่อลื่นอุตสาหกรรมในงานดัดขึ้นรูปท่อทองแดง. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 30(2), 261–276.
- วารุณี เปรมานนท์ และอภินัย สุภาสุทธากุล. (2542). *การศึกษาถึงส่วนประกอบในสารหล่อลื่นที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่น*. <http://www.kmutt.ac.th/rippc/pro524.htm>.
- วารุณี เปรมานนท์ และอภินัย สุภาสุทธากุล. (2553, November 13). *การศึกษาถึงส่วนประกอบในสารหล่อลื่นที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่น*. <http://www.kmutt.ac.th/rippc/pro524.htm>.
- สุทัศน์ ทิพย์ปรีกมาศ, มาฮาฮิโกะ จิน และมาฮาฮิโกะ มูราคาว่า. (2550). การวิเคราะห์การไหลของเนื้อวัสดุของรอยฉีกขาดในงานตัดไฟน์แบลนค์. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 30(2), 293–300.
- สุเทพ เยี่ยมชัยภูมิ, ชาญ ถนัดงาน และศิริศักดิ์ หาญชูวงศ์. (2549). การศึกษาการไฟน์แบลนค์แบบไร้แหวนจิก. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20*.
- สุเทพ เยี่ยมชัยภูมิ, ดลธรรม เอฬกานนท์ และโอริส มณีสาย. (2552). การศึกษามุมปลายพื้นที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานสำหรับกระบวนการดัดละเอียด. *การประชุมวิชาการข่วงงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม*.
- สุรวุฒิ ยะนิล, ชาญ ถนัดงาน และศิริศักดิ์ หาญชูวงศ์. (2546). การวิเคราะห์หาแรงในการ ไฟน์แบลนค์

- โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 13(3), 52–58.
- แสนสด พานิช. (2546). อิทธิพลของมุมเอียงที่มีต่อการตัดขอบอะลูมิเนียมเจือ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- โอริส มณีสาย และพงษ์ศักดิ์ ถึงสุข. (2554). การศึกษาผิวงานตัดในงานเซมิเพียชด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, 7(2), 1–8.
- Anne, K. (2006). *Metal Forming Practise*. Springer-Verlag.
- Avitzur, B. (1983). *Handbook of metal-forming processes*. A Wiley-Inter science.
- Bubphachot, B. (2009). Microstructure Affecting Cutting Quality in Fine Blanking Process. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(4), 665–668.
- Chen, Z. H., Lee, T. C. and Tang, T. Y. (2001). Finite Element Analysis of a Non-Isothermal Sheet Metal Extrusion Process. In M. Ken-ichiro (Ed.), *Simulation of material processing : Theory, Methods and Applications* (pp. 441–448). Toyohashi University of Technology.
- Chen, Z. H., Tang, C. Y., Chan, L. C. and Lee, T. C. (1999). Simulation of the sheet metal extrusion process by the enhanced assumed strain finite element method. *Journal of Materials Processing Technology*, 91(1–3), 250–256.
- Chen, Z. H., Tang, C. Y., Lee, T. C. and Chan, L. C. (1999). A study of strain localization in the fine-blanking process using the large deformation finite element method. *Journal of Materials Processing Technology*, 86, 163–167.
- DeGaspari, J. (2003). Thicker in the press: a sheet extrusion process can add strength where it's needed. *Mechanical Engineering*, 125(10), 55.
- Fan, W. F. and Li, J. H. (2009). An investigation on the damage of AISI-1045 and AISI-1025 steels in fine-blanking with negative clearance. *Materials Science and Engineering: A*, 499, 248–251.
- Ghosh, S. K. (1988). Handbook of metal forming. *Journal of Mechanical Working Technology*, 16(3), 353–356.
- Hambli, R. (2001). Finite element simulation of fine blanking processes using a pressure-dependent damage model. *Journal of Materials Processing Technology*, 116(2–3), 252–264.
- Hirota, K. (2007). Fabrication of micro-billet by sheet extrusion. *Journal of Materials*

Processing Technology, 191(1–3), 283–287.

- Hirota, K., Yanaga, H. and Fukushima, K. (2009). Experimental and Numerical Study on Blanking Process with Negative Clearance. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 3(2), 247–255.
- Reddy, V. N., Dixit, P. M. and Lal, G. K. (1996). Central Bursting and Optimal Die Profile for Axisymmetric Extrusion. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 118(4), 579–584.
- Riedel, H. and Sun, dong-zhi. (1992). Simulation of materials processing: Theory, methods and applications. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes*.
- Schuler, G. (1998). *Metal Forming Handbook*. Springer Berlin.
- Suriyapha, C., Bubphachot, B. and Rittidech S. (2015). Study of Microstructure and Mechanical Properties Effects on Workpiece Quality in Sheet Metal Extrusion Process. *The Scientific World Journal*, 848126, 1–9.
- Suriyapha, C., Ritta, B. and Bubphachot, B. (2011). Material Flow Behaviour on Fine Blanking Process for Sheet Metal Extrusion. *Asian International Journal of Science and Technology in Production and Manufacturing Engineering*, 4(1), 77–80.
- Suriyapha, C., Suthep, Y. and Bubphachot, B. (2010). Die Radius Affecting Sheet Metal Extrusion Quality for Fine Blanking Process. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(2), 476–481.
- Sutasn, T., Masahiko, J., Kanaizuka, T., Yamamoto, K. and Masao, M. (2008). Prediction of Fineblanked surface characteristics using the finite element method (FEM). *Journal of Materials Processing Technology*, 198(1–3), 391–398.
- Sutasn, T., Masahiko, J. and Masao, M. (2007). An investigation of material flow analysis in fineblanking process. *Journal of Materials Processing Technology*, 192–193, 237–242.
- Tschaetsch, H. (2006). *Metal Forming Practise*. Springer.
- Yiemchaiyaphum, S., Masahiko, J. and Thipprakmas, S. (2010a). Effect of Back-Up on Dull Area in Fine Blanking Process. *The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference*, 656–661.
- Yiemchaiyaphum, S., Masahiko, J. and Thipprakmas, S. (2010b). Application of Back-Up

Ring in Fine-Blanking Process. *Key Engineering Materials*, 443, 140–145.

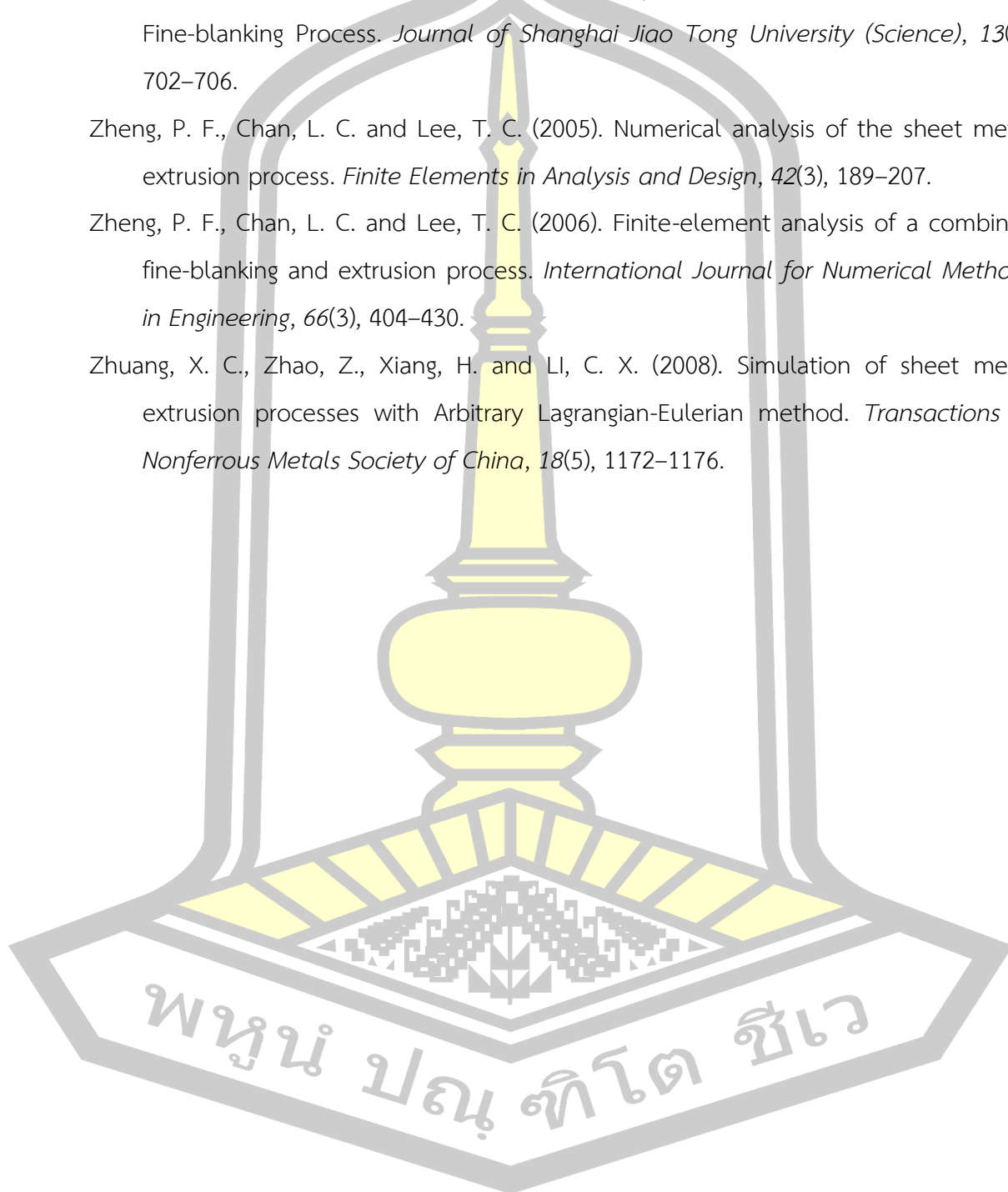
Zhao, Z., Chengliang, H. U. and RUAN, X. (2008). *Chinese Report on Cold Forging*.

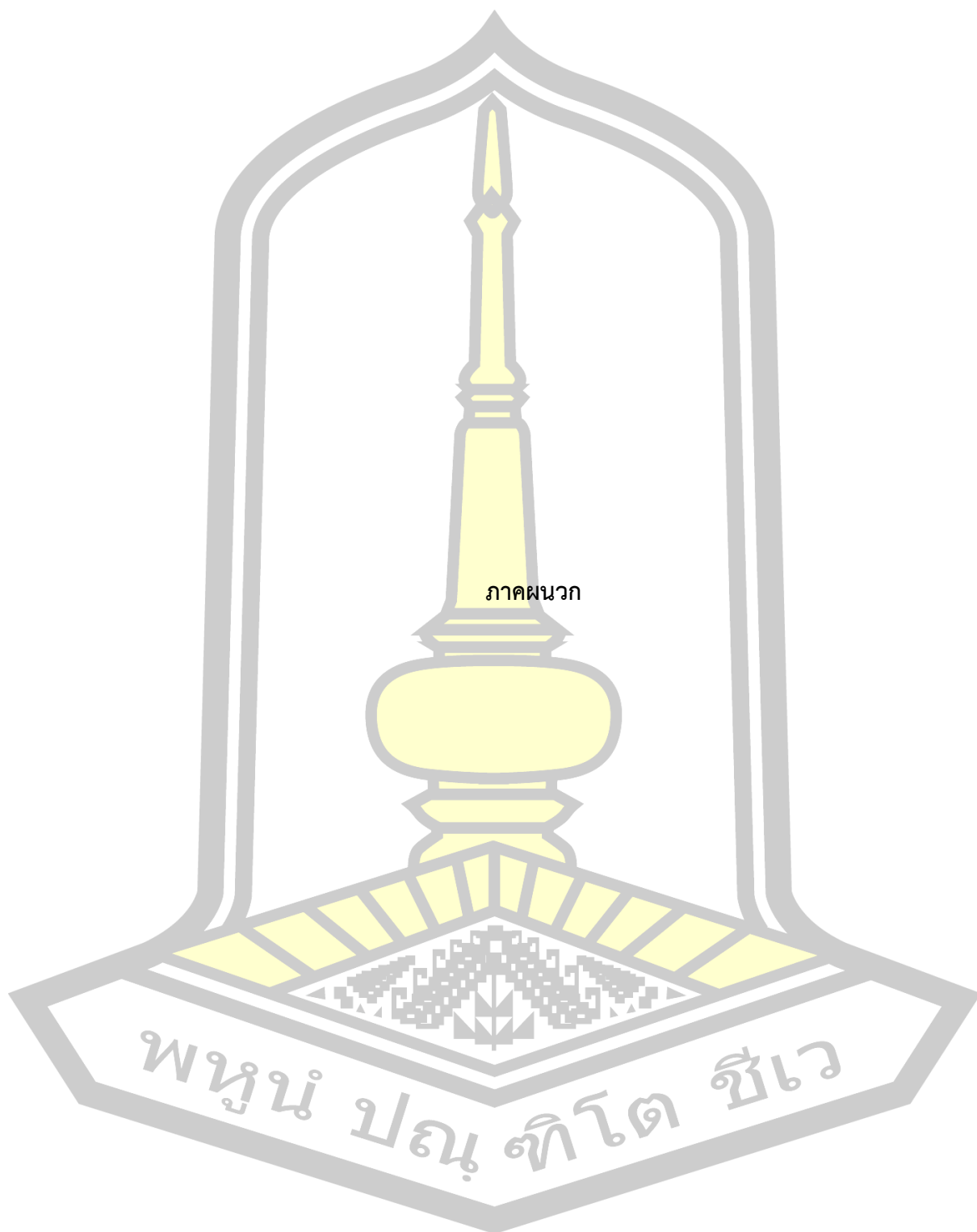
Zhao, Z., Zhuang, X. C. and Xie, X. I. (2008). An Improved Ductile Fracture Criterion for Fine-blanking Process. *Journal of Shanghai Jiao Tong University (Science)*, 13(6), 702–706.

Zheng, P. F., Chan, L. C. and Lee, T. C. (2005). Numerical analysis of the sheet metal extrusion process. *Finite Elements in Analysis and Design*, 42(3), 189–207.

Zheng, P. F., Chan, L. C. and Lee, T. C. (2006). Finite-element analysis of a combined fine-blanking and extrusion process. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 66(3), 404–430.

Zhuang, X. C., Zhao, Z., Xiang, H. and LI, C. X. (2008). Simulation of sheet metal extrusion processes with Arbitrary Lagrangian-Eulerian method. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 18(5), 1172–1176.





ภาคผนวก

พหุบัน ปณฺ ฌิโต ชีเว

ภาคผนวก ก
ตารางผลการทดลอง

พหุบัน ปณ จิโต ชีเว

ตาราง 4 รายละเอียดของการออกแบบ และสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะแผ่นสำหรับการทดลอง

รายการกำหนด	รายละเอียด
วัสดุชิ้นงานสำหรับทดลองยืนยันผล	เหล็กกล้าตามมาตรฐาน AISI 1045 ความหนา 5 mm
วัสดุแม่พิมพ์	เหล็กกล้าเครื่องมือรอบสูงตามมาตรฐาน AISI M4
ขนาดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้น (Blank size)	$\varnothing B = 50$ mm เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของพunch
เส้นผ่านศูนย์กลางพunch	$\varnothing p = 12.70$ mm
เส้นผ่านศูนย์กลางดาย	$\varnothing d = 10.00$ mm
รัศมีขอบคมตัดแม่พิมพ์	$R_p, R_d = 0.20$ mm
สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	ยึดกับที่ (Fixed)
แรงต้านพunch (Counter Punch)	20 KN, 40 KN และ 60 KN

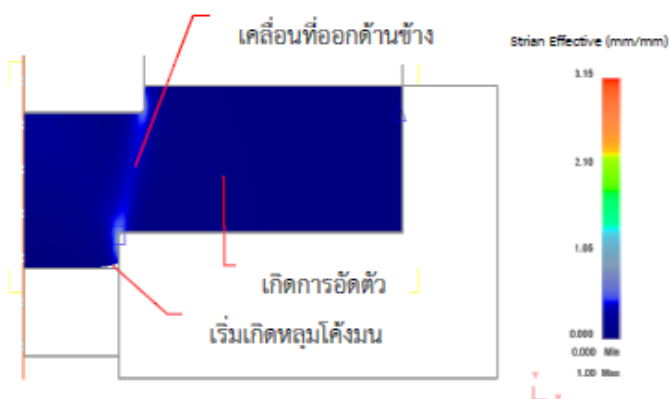
ตาราง 5 เงื่อนไขการจำลองสำหรับเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

รายการแบบจำลอง	การกำหนดแบบจำลอง
แบบจำลอง	ชิ้นงาน : elastic-plastic (5 mm thickness) ชุดแม่พิมพ์ : rigid
สมการการเสียรูปร่างแบบพลาสติก	$\bar{\sigma} = 850\bar{\epsilon}^{0.478} + 385$
สมการเกณฑ์การแตกหัก	Oyane (constant α 1, Critical fracture value C 0.157)
การสัมผัสระหว่างอุปกรณ์กับวัสดุงาน	สัมผัสด้วยความเสียดทาน (Friction contact) $\mu=0.12$
แรงดันกดแปลงคิโลเดอ์ (F_{BH})	ยึดกับที่ (Fixed)
แรงต้านพunch (Counter Punch)	20 KN, 40 KN และ 60 KN
ขนาดดาย ($\varnothing d$)	10 mm
ขนาดพunch ($\varnothing p$)	12.7 mm
ขนาดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้น(Blank size)	$\varnothing B = 50$ mm
รัศมีขอบคมแม่พิมพ์พunch-ดาย	$r_p, r_d = 0.20$ mm

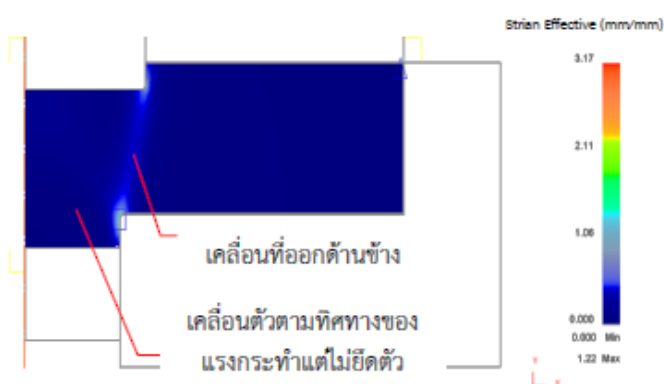
ตาราง 6 การกำหนดสมบัติของวัสดุในแบบจำลอง

สมบัติทางกลของชิ้นงาน	เหล็กกล้าตามมาตรฐาน AISI 1045 ขนาดความหนา 5 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile stress) 520 MPa ความสามารถในการยืดตัว (Elongation) 28%
ชนิดของการวิเคราะห์	สมมาตรรอบแกน (Axisymmetry)
สมการเกณฑ์แตกหักของวัสดุ	Oyane (constant α 1, Critical fracture value C 0.157)
สมการเส้นโค้งการไหลตัว (Power Law)	$\bar{\sigma} = 850\bar{\epsilon}^{0.478} + 385$ MPa
สัมประสิทธิ์ความเสียหาย	0.12
เส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่	12.70 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางตาย	10.00 mm
รัศมีขอบคมตัดแม่พิมพ์	$R_p, R_d = 0.05$ mm
แรงกดแผ่นงานเริ่มต้น (Blank holder force)	ยึดกับที่ (Fixed)
แรงต้านการเคลื่อนพื้นที่ (Counter punch force)	20 KN, 40 KN และ 60 KN

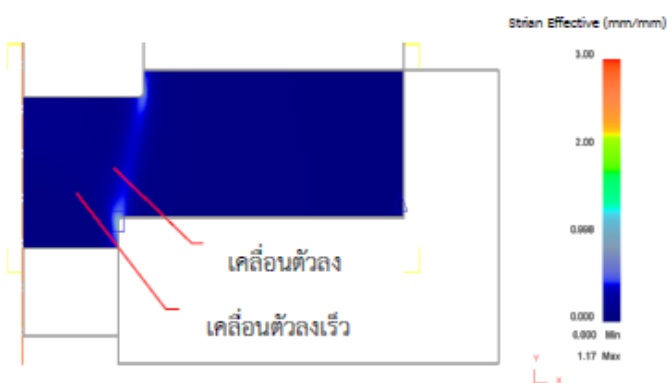




ก) ลักษณะการไหลเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ Counter Punch 20000

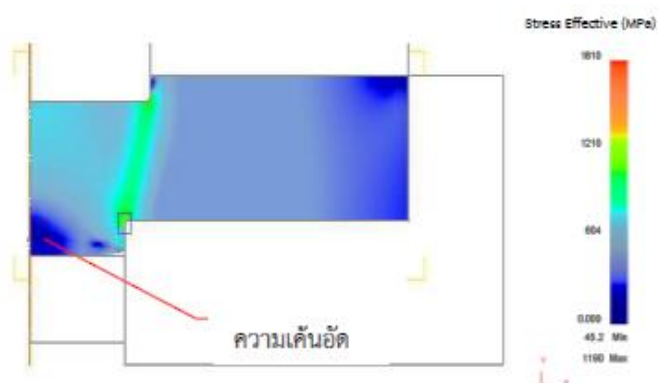


ข) ลักษณะการไหลเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ Counter Punch 40000

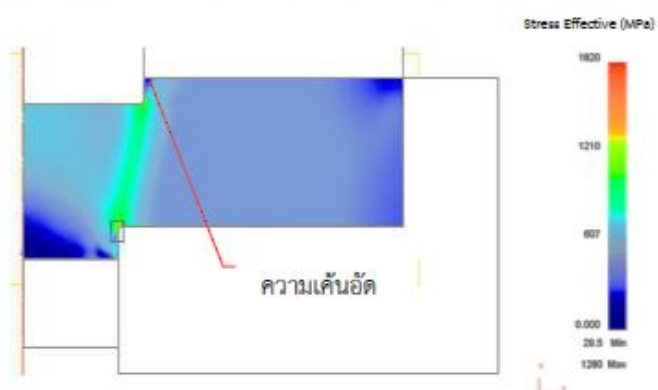


ค) ลักษณะการไหลเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ Counter Punch 60000

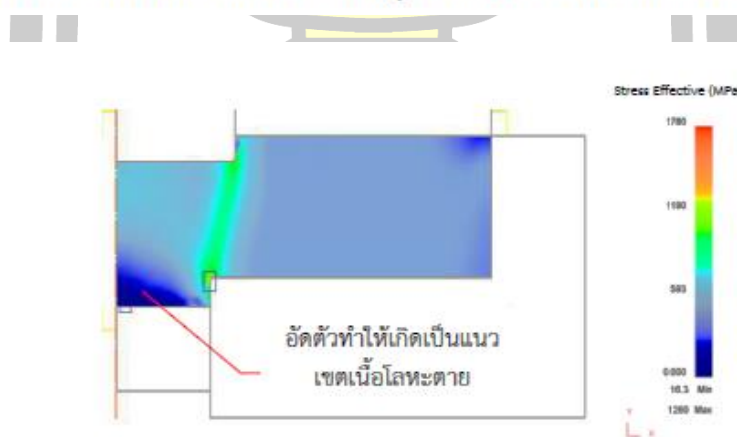
ภาพประกอบ 64 การเคลื่อนไหลตัวในแบบจำลองที่พื้นที่เริ่มเคลื่อนเข้าหาเนื้อวัสดุงาน



ก) ลักษณะการเกิดความเค้นขณะที่วัสดุเคลื่อนไหลตัว Counter Punch 20000

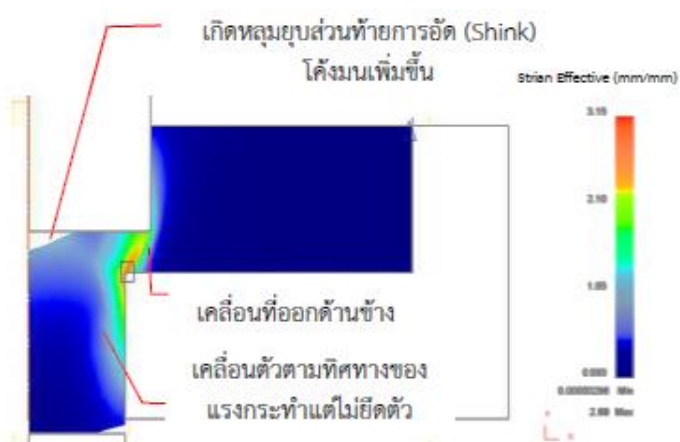


ข) ลักษณะการเกิดความเค้นขณะที่วัสดุเคลื่อนไหลตัว Counter Punch 40000

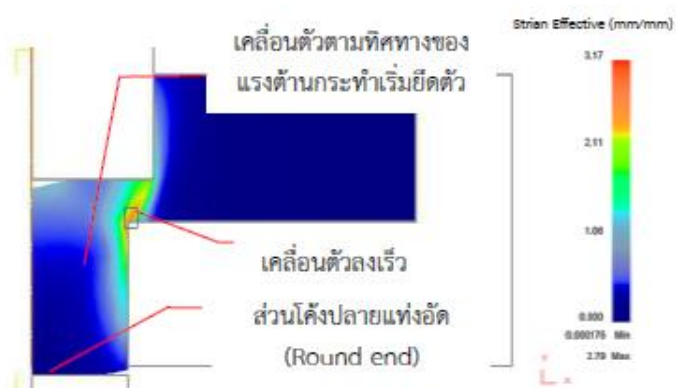


ค) ลักษณะการเกิดความเค้นขณะที่วัสดุเคลื่อนไหลตัว Counter Punch 60000

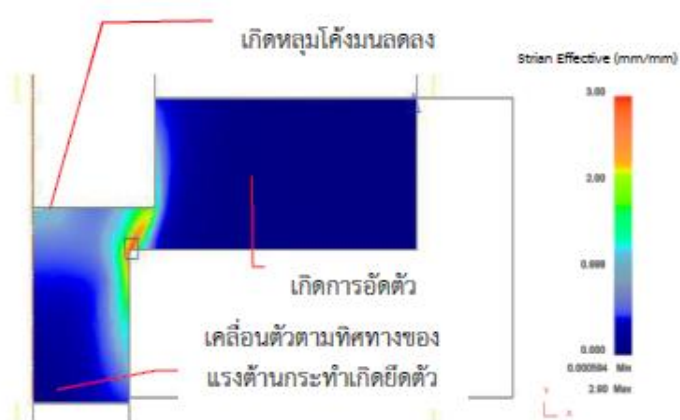
ภาพประกอบ 65 แสดงการเกิดความเค้นในแบบจำลองที่พื้นที่เริ่มเคลื่อนเข้าหาเนื้อวัสดุงาน



ก) ลักษณะการไหลเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ Counter Punch 20000

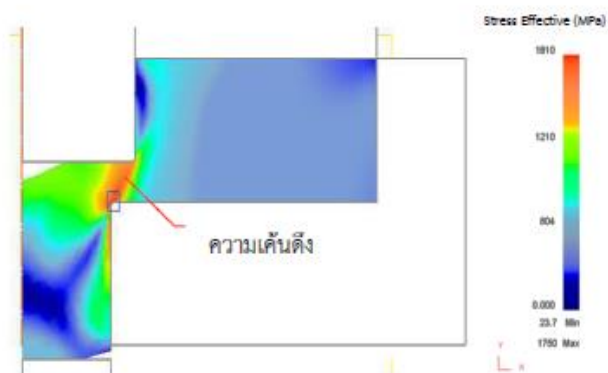


ข) ลักษณะการไหลเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ Counter Punch 40000

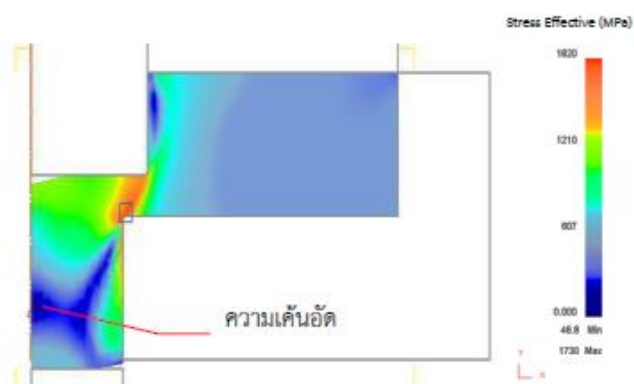


ค) ลักษณะการไหลเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ Counter Punch 60000

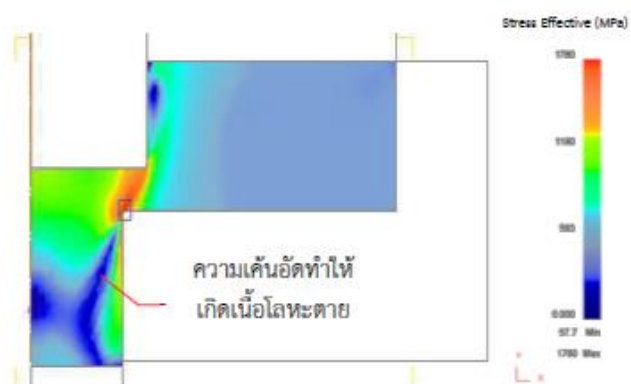
ภาพประกอบ 66 แสดงการเคลื่อนไหลตัวในแบบจำลองที่พื้นที่เคลื่อนแทรกเข้าสูงสุดในเนื้อวัสดุงาน



ก) ลักษณะการเกิดความเค้นขณะที่วัสดุเคลื่อนไหลตัว Counter Punch 20000

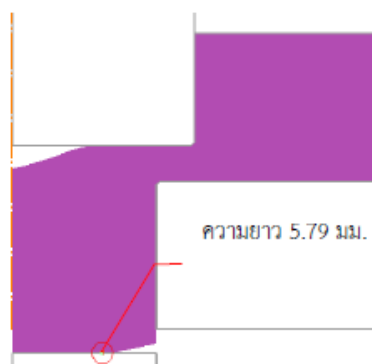


ข) ลักษณะการเกิดความเค้นขณะที่วัสดุเคลื่อนไหลตัว Counter Punch 40000



ค) ลักษณะการเกิดความเค้นขณะที่วัสดุเคลื่อนไหลตัว Counter Punch 60000

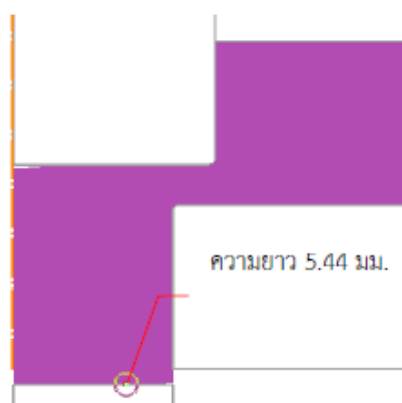
ภาพประกอบ 67 แสดงการเกิดความเค้นในแบบจำลองที่พื้นที่เคลื่อนแทรกเข้าสูงสุดในเนื้อวัสดุงาน



ก) ลักษณะขนาดความยาวของอัดขึ้นรูปที่แรงดัน Counter Punch 20000

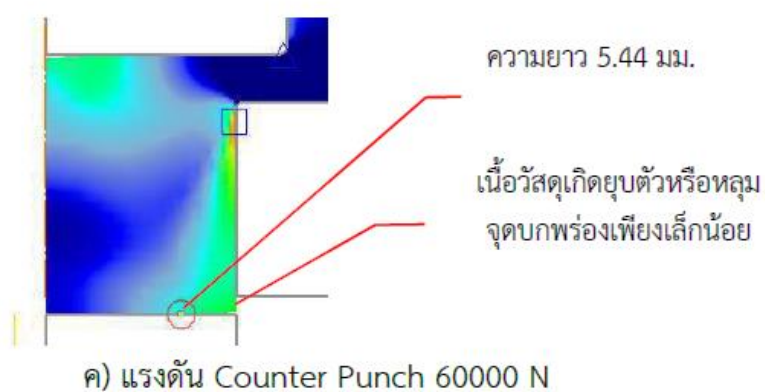
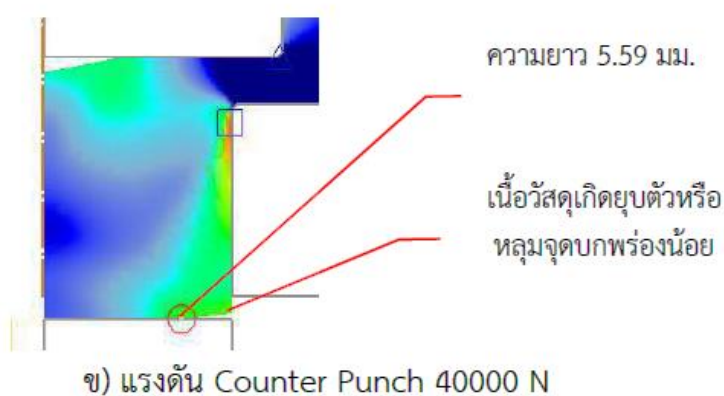
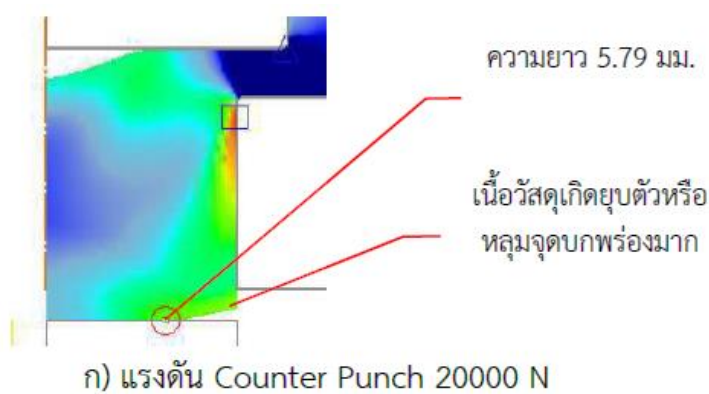


ข) ลักษณะขนาดความยาวของอัดขึ้นรูปที่แรงดัน Counter Punch 40000



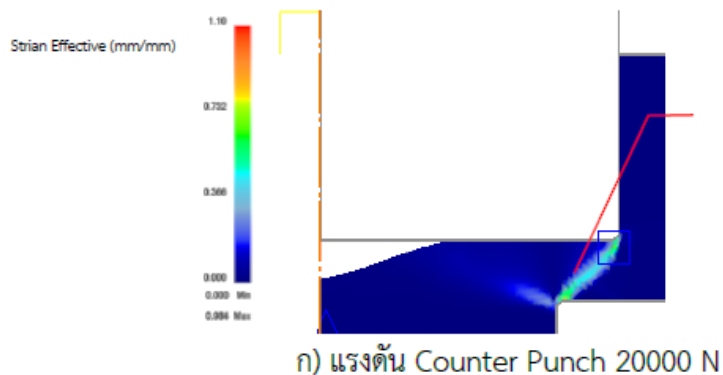
ค) ลักษณะขนาดความยาวของอัดขึ้นรูปที่แรงดัน Counter Punch 60000

ภาพประกอบ 68 แสดงขนาดความยาวของอัดขึ้นรูปที่ได้จากการจำลองการทำงาน
ในสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ

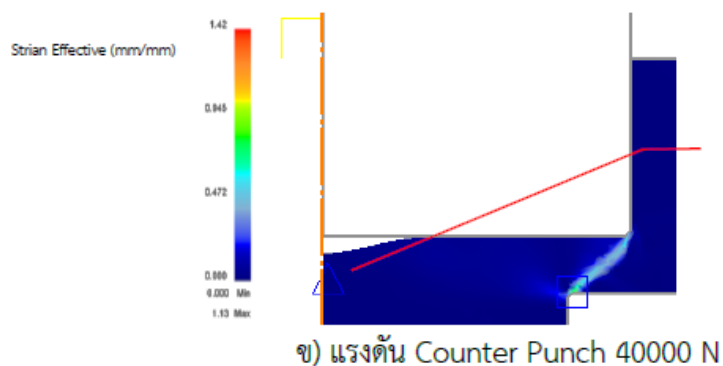


ภาพประกอบ 69 แสดงขนาดความยาวของอัตราขึ้นรูปในสถานะเงื่อนไขต่าง ๆ

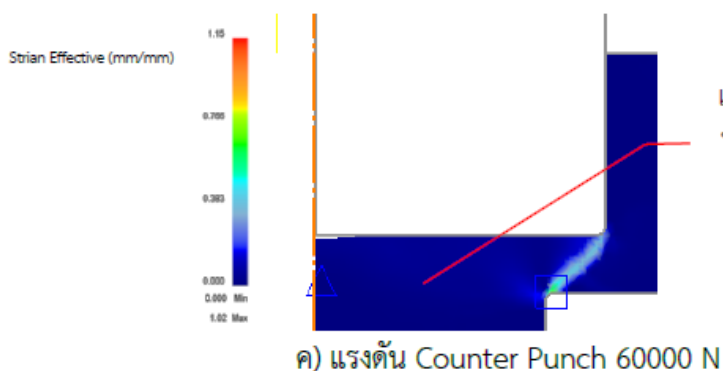
พจนานุกรมศัพท์เทคนิค



ความเครียดและทิศทางการเคลื่อนตัวของวัสดุงานแยกจากกันชัดเจน



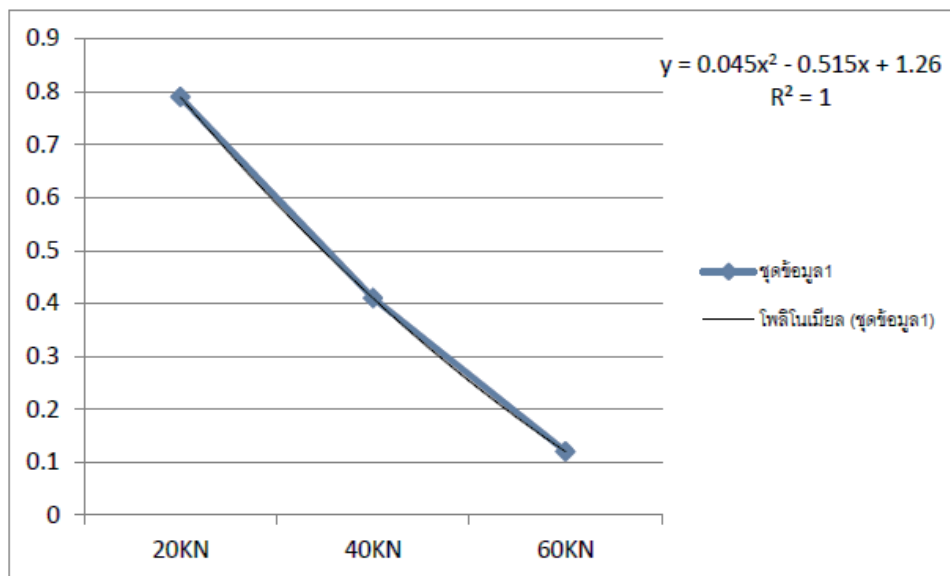
ความเครียดและทิศทางการเคลื่อนตัวของวัสดุถูกขอบรัศมีพื้นชั้นด้านออกด้านข้างสู่วัสดุงานและเริ่มมีแรงต้าน



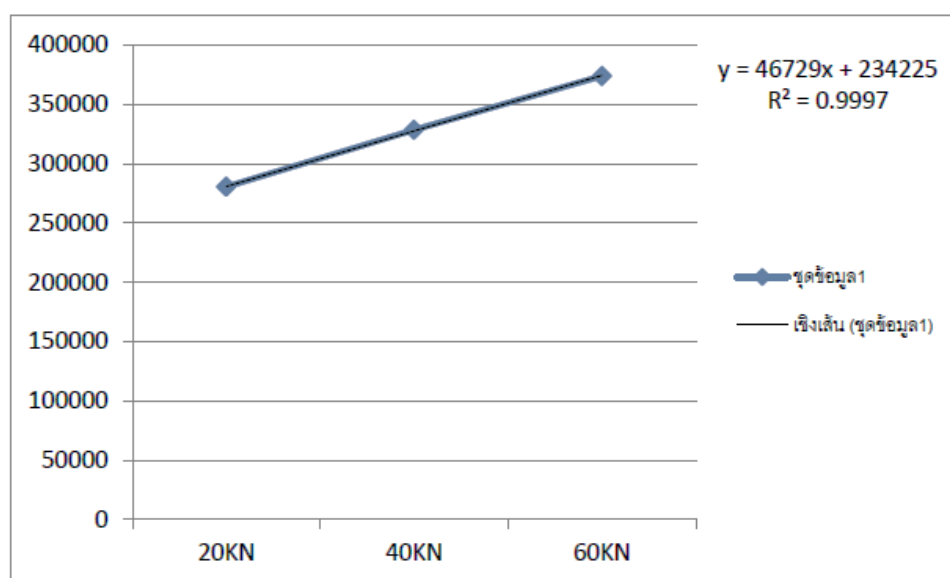
ความเครียดและทิศทางการเคลื่อนตัวของวัสดุ ถูกขอบรัศมีพื้นชั้นด้านออกด้านข้างสู่วัสดุงานและมีแรงต้านมากขึ้น

ภาพประกอบ 70 แสดงแรงดัน (Counter Punch) ที่มีผลต่อการกระจายความเครียดในชิ้นงาน

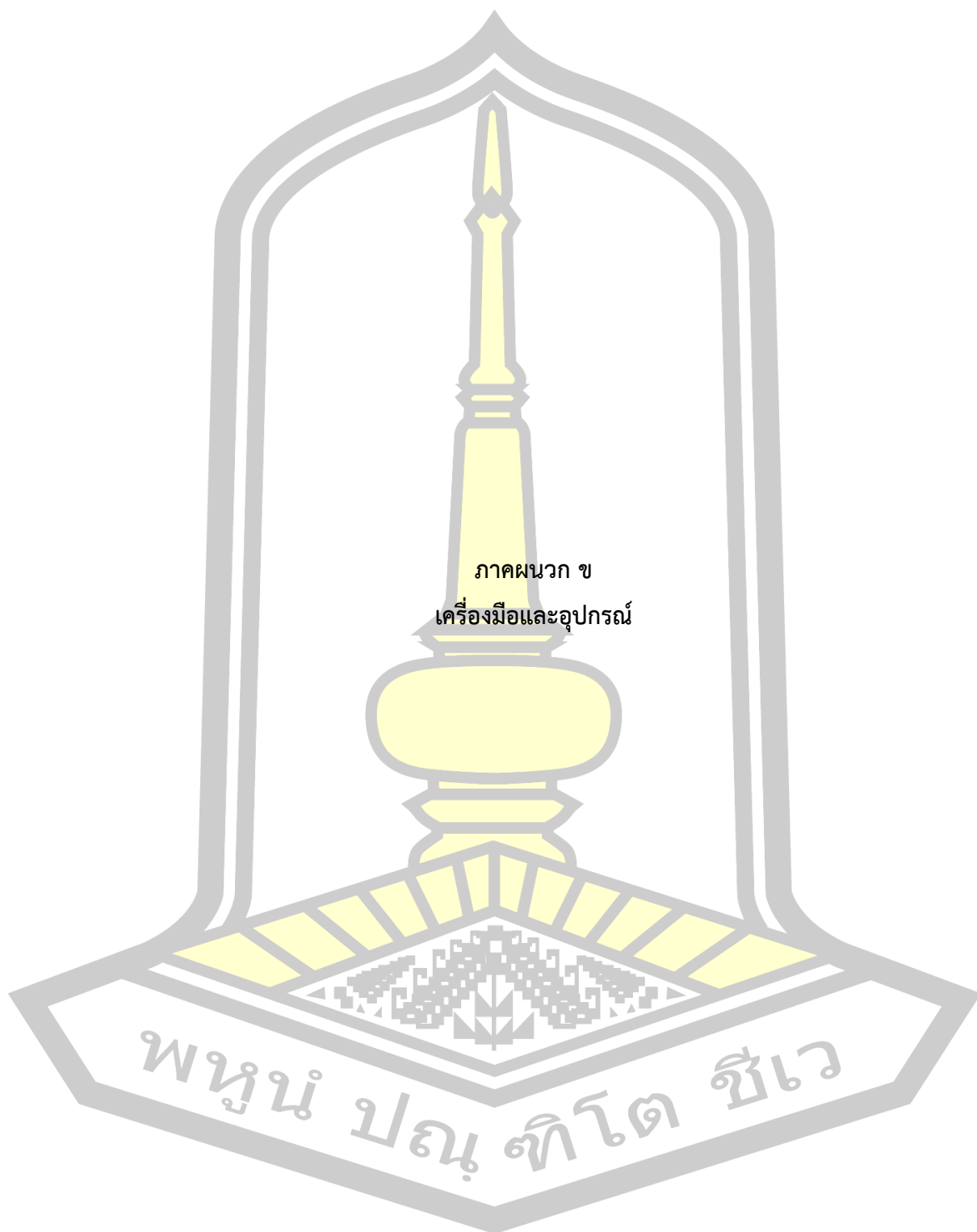
พูน บัญชี โต ข



ภาพประกอบ 71 แสดงกราฟขนาดการยุบตัวในสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ



ภาพประกอบ 72 แสดงกราฟขนาดแรงอัดขั้นรูปในสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายธีระพล บุญธรรม
วันเกิด	วันที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2518
สถานที่เกิด	อำเภอโพธิ์ตาก จังหวัดหนองคาย
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	เลขที่ 44 หมู่ที่ 1 ตำบลโพธิ์ตาก อำเภอโพธิ์ตาก จังหวัดหนองคาย รหัสไปรษณีย์ 43130
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	ครู วิทยฐานะครูชำนาญการพิเศษ
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2536 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) วิทยาลัยเทคนิคหนองคาย จังหวัดหนองคาย พ.ศ. 2538 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) วิทยาลัยเทคนิคหนองคาย จังหวัดหนองคาย พ.ศ. 2540 ประกาศนียบัตรครูเทคนิคชั้นสูง (ปทส.) วิทยาลัยช่างกลปทุมวัน กรุงเทพมหานครฯ พ.ศ. 2547 ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต (ค.บ.) สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน กรุงเทพมหานครฯ พ.ศ. 2546 ปริญญาการศึกษาศาสตรมหาบัณฑิต (กศ.ม.) สาขาวิชาการวิจัย การศึกษา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2566 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พณฺณ ปณฺ ฅักโตะ ฅีเว