

# ใบรับรองวิทยานิพนธ์

# บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นโดยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป โดย นายชัยยศ บูรณะชีพ

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิด สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

\_คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงษ์)

21 พฤษภาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานีพนธ์

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ชาญ ถนัดงาน)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชิด บัวแก้ว)

Norman news

\_\_\_ุกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กอบสิน ทวีสิน)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สุทัศน์ ทิพย์ปรักมาศ)

การวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นโดยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

นายชัยยศ บูรณะชีพ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2549 ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สื่อ	:	นายชัยยศ บูรณะชีพ
ชื่อวิทยานิพนธ์	:	การวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นโดยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป
สาขาวิชา	:	วิศวกรรมการผลิต
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	:	รองศาสตราจารย์ชาญ ถนัดงาน
		ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชิต บัวแก้ว
ปีการศึกษา	:	2549

#### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการย่นและการขึ้นรูป ชิ้นงานจริงกับระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ และวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นจากการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ โดยชิ้นงานสำหรับการวิจัย นี้คือ Door Part ซึ่งเป็นชิ้นส่วนยานยนต์ ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หนา 0.6 mm. พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการย่นสำหรับการวิจัยนี้คือ ความเร็วในการขึ้นรูป รัศมีดาย แรงกดของ แบลงก์โฮลเดอร์ และช่องว่างระหว่างพันช์กับดาย ใช้เครื่องเพรสขนาด 300 Tons ในการขึ้นรูป และใช้โปรแกรม Hyper Work v.7.0 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

และเชเบรแกรม Hyper Work v.7.0 สาหรบการวเคราะหดวยระเบยบวธเพเนตเอลเมนต ผลการวิจัยพบว่า พฤติกรรมการย่นของการขึ้นรูปชิ้นงานจริงและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิ เมนต์มีความสอดคล้องกัน หลังจากวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นจากการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้ แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า พฤติกรรมการย่นของ ชิ้นงานขึ้นรูปขึ้นอยู่กับ แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์มากกว่า รัศมีดาย และช่องว่างระหว่างพันช์ และดาย แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นของ ชิ้นงานขึ้นรูปได้

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 80 หน้า)

คำสำคัญ : การขึ้นรูปโลหะแผ่น, แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป, ไฟไนต์เอลิเมนต์, พฤติกรรม การย่น, เหล็กกล้าไร้สนิม

Name	:	Mr.Chaiyos Booranacheep
Thesis Title	:	Analysis of Wrinkle Behaviors Using Forming Limit Diagrams
Major Field	:	Production Engineering
		King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisors	:	Associate Professor Charn Thanadngarn
		Assistant Professor Vichit Buakaew
Academic Year	:	2006

#### Abstract

This thesis compares the wrinkle behavior of a car door part in forming process and finite element simulation. The analysis of the wrinkle part behavior is by using Forming Limit Diagram. The car door part is made of AISI 304 stainless steel with thickness of 0.6 mm . The parameter effecting the wrinkle are velocity of forming process, die radius, blank holder force and clearance between punch and die. Forming Process uses a press machine with force of 300 tons and the simulation is done using Hyper Work v.7.0

The results show that the wrinkle behavior in forming process agree with finite element simulation. According to results using Forming Limit Diagram in finite element simulation we found that the wrinkle behavior depends on blank holder force rather than die radius and clearance between punch and die. The Forming Limit Diagram can be used to analyze the problem of wrinkle part in forming process

(Total 80 pages)

Keywords : Sheet metal forming, Forming Limit Diagrams, Finite Element Method, Wrinkle behaviors, Stainless steel

Advisor

#### กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ชาญ ถนัดงาน ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชิต บัวแก้ว ที่ให้ข้อเสนอแนะอบรมสั่ง สอนและให้ข้อคิดความรู้ต่างๆในการปรับปรุงแก้ไขงานวิจัยอย่างมีคุณค่าอนันต์ แก่ผู้วิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณอรรถพล รวยดี (ประธานบริหาร) คุณจตุรงค์ รวยดี(ผู้จัดการ) บริษัท ทองปิ่นทูลส์แอนดาย จำกัด ที่เอื้อเฟื้ออนุเคราะห์สถานที่ในการขึ้นรูป ขอกราบ ขอบพระคุณ ดร.สุวัฒน์ จีรเธียรนาถ ศูนย์วิจัยเอ็มเท็คที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือด้าน การตีกริดวงกลม

ท้ายสุดนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ส่งแรงใจและบรรดาคนในครอบครัวที่เป็น ห่วงเป็นใยด้วยดีเสมอมาทุกท่าน

ชัยยศ บูรณะชีพ

# สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย				
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ				
กิตติกรรมประกาศ				
สารบัญต	าราง		ช	
สารบัญภ	าพ		ሻ	
คำอธิบาย	ເສັญລັງ	กษณ์และคำย่อ	ฏ	
บทที่ 1	ทที่ 1 บทนำ			
	1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1	
	1.2	วัตถุประสงค์	2	
	1.3	ขอบเขตของการวิจัย	2	
	1.4	วิธีการดำเนินการวิจัย	2	
	1.5	ประโยชน์ของการวิจัย	3	
บทที่ 2	ทฤษ	ฏึและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4	
	2.1	หลักการขึ้นรูปโลหะเบื้องต้น	4	
	2.2	การขึ้นรูปโลหะแผ่น	4	
	2.3	เกณฑ์การคราก	6	
	2.4	พลาสติกแอนไอโซทรอปี	7	
	2.5	ทฤษฎีสภาพแอนไอโซทรอปีของ Hill1948	9	
	2.6	การทำให้แข็งด้วยความเครียด	11	
	2.7	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป	12	
	2.8	พฤติกรรมการย่นของวัสดุ	13	
	2.9	หลักการในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์	15	
	2.10	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17	
บทที่ 3	วิธีกา	เรดำเนินการวิจ <b>ั</b> ย	20	
	3.1	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	20	
	3.2	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	21	
	3.3	การขึ้นรูปชิ้นงานจริง	22	
	3.4	การจำลองการขึ้นรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	26	
	3.5	การจำลองการตัดขอบโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	33	

# สารบัญ(ต่อ)

				หน้า
บทที่	4	ผลกา	ารวิจัย	34
		4.1	เปรียบเทียบพฤติกรรมการย่นและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับระเบียบ	
			วิธีไฟในต์เอลิเมนต์	34
		4.2	วิเคราะห์พฤติกรรมการย่นจากการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้แผนภาพ	42
			ขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์	
บทที่	5	สรุป ย	วภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	59
		5.1	สรุป	59
		5.2	อภิปรายผล	60
		5.3	ข้อเสนอแนะ	60
เอกสา	ารอ้	้างอิง		61
ภาคผ	นว	กก		63
ภาคผ	ภาคผนวก ข		67	
ประวัติผู้วิจัย			80	

### สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3-1	แสดงสมบัติของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304	29
4-1	แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาของชิ้นงานจากการทดลองจริงกับการ	36
	วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	
4-2	พารามิเตอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการย่นในการขึ้นรูป	42
4-3	พารามิเตอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการย่นในการขึ้นรูปของชิ้นงานที่ตัดขอบแล้ว	52

# สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	การแบ่งประเภทกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะออกเป็นกลุ่ม	4
2-2	การขึ้นรูปโลหะแผ่น	5
2-3	แสดงโลไซการครากของวัสดุ	7
2-4	แสดงชิ้นทดสอบการดึงที่เป็นแผ่นแถบตัดมาจากแผ่นค่า <i>R</i>	
	มีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้างต่อแนวหนา	8
2-5	แสดงแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป	12
2-6	แสดงพฤติกรรมการยืดตัวของแผ่นโลหะที่อยู่บนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป	13
2-7	แสดงความเครียดบนเอลิเมนต์ของกริดวงกลม	13
2-8	แสดงความเครียดรอง	14
2-9	แสดงการขึ้นรูปแบบดายเปิด	15
2-10	แสดงขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยการกด	15
3-1	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	21
3-2	แสดงลักษณะกริดที่สร้างบนชิ้นงาน	22
3-3	แสดงลักษณะของเครื่องเพรส	23
3-4	แสดงลักษณะชิ้นงานภายหลังขึ้นรูป	23
3-5	แสดงลักษณะของกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้วัดการยึดตัวของกริดบนชิ้นงาน	24
3-6	แสดงลักษณะของโปรแกรม Motic Images Plus 2.0 ที่ใช้วัด	
	กริดบนชิ้นงาน	24
3-7	แสดงตำแหน่งต่างๆบนซิ้นงานเพื่อวัดค่าความหนา	25
3-8	แสดงการวัดค่าความหนาโดยเครื่องวัด CMM	25
3-9	แสดงตำแหน่งการย่นของชิ้นงาน	26
3-10	แสดงลักษณะหน้าจอของโปรแกรม Hyper work v.7.0	26
3-11	แสดงการ Import file ลงในโปรแกรม	28
3-12	แสดงการกำหนดขนาดเอลิเมนต์	28
3-13	แสดงลักษณะของแผ่นชิ้นงานเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมขนาด 5 mm	28
3-14	แสดง Tooling สีขาวคือดาย สีเหลืองคือแบลงก์โฮลเดอร์ สีชมพูคือพันช์	30
3-15	แสดงการกำหนดเคลื่อนที่ของ Tooling	30
3-16	แสดงการประมวลผลของโปรแกรม	31
3-17	แสดงค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงโดยโปรแกรม	32
3-18	แสดงการยุ่นวิเคราะห์จากโปรแกรม	32

	,		
ภาพ	ที	٩	าน้า
3	3-19	ชิ้นงานที่ผ่านการตัดขอบแล้ว	33
3	3-20	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปชิ้นงานที่ตัดขอบแล้ว	33
4	1-1	เปรียบเทียบการย่นของชิ้นงานจากการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบ	
		วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยความเร็วในการขึ้นรูป186 mm/s แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์	
		40,000N รัศดาย2.3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์กับดาย 0.7 mm ดรอว์บีดและ	
		พันช์ตามแบบของโรงงาน	35
4	1-2	แสดงตำแหน่งที่วัดความหนาของชิ้นงานจากการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วย	J
		ระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์	36
4	1-3	แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความหนาของชิ้นงานจากการทดลองจริงกับ	
		การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	37
Z	1-4	แสดงบริเวณที่วัดค่าความเครียดหลักและความเครียดรอง	37
Z	1-5	แสดงค่าความเครียดของชิ้นงานจากการทดลองจริงบนแผนภาพขีดจำกัดการ	
		ขึ้นรูปจริง	38
۷	1-6	- แสดงค่าความเครียดของชิ้นงานจากการจำลองด้วยโปรแกรมบนแผนภาพ	
		ขีดจำกัดการขึ้นรูปจากโปรแกรม	38
۷	1-7	- แสดงภาพขยายของภาพที่ 4-5 การกระจายค่าความเครียดจากการทดลองจริง	39
4	1-8	แสดงภาพขยายของภาพที่ 4-6 การกระจายค่าความเครียดจากการจำลองด้วย	
		ระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์	39
۷	1-9	เปรียบเทียบ Major Strain ของการทดลองจริงกับระเบียบวิธี	
		ไฟไนต์เอลิเมนต	41
۷	1-10	เปรียบเทียบ Minor Strain ของการทดลองจริงกับระเบียบวิธี	
		ไฟไนต์เอลิเมนต์	41
۷	1-11	แสดงการย่นจากการจำลองชิ้นงานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยแรงกด	
		แบลงก์โฮลเดอร์ 15,000N รัศมีดาย3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดาย0.7mm	43
4	1-12	แสดงการย่นจากการจำลองชิ้นงานด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์โดยแรงกด	
		แบลงก์โฮลเดอร์45,000Nรัศมีดาย 2 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดาย0.7mm	44
4	I-13	แสดงบริเวณที่เกิดการย่น	45
4	1-14	แสดงจุดวิกฤตของการขึ้นรูปที่มีความหนาลดลง	45
4	1-15	แสดงจุดวิกฤตของการขึ้นรูปที่มีความหนาลดลงเมื่อมีการปรับแรงกดแบลงก์โฮล	1
		เดอร์และรัศมีดายโดยค่าช่องว่างระหว่างพันช์และดายคงที่เท่ากับ 0.7 mm	46

ภาพที่		หน้า
4-16	แสดงจุดวิกฤตของการขึ้นรูปที่มีความหนาลดลงเมื่อมีการปรับแรงกดแบลงก์โฮล	
	เดอร์และรัศมีดายโดยค่าช่องว่างระหว่างพันช์และดายคงที่เท่ากับ 0.84 mm	46
4-17	ขยายภาพที่ 4-15 ค่าความเครียดและทิศทางของจุดวิกฤตของการขึ้นรูป	
	ที่มีความหนาลดลงเมื่อมีการปรับแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์และรัศมีดายโดย	
	ค่าช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7 mm	47
4-18	ขยายภาพที่ 4-16 ค่าความเครียดและทิศทางของจุดวิกฤตของการขึ้นรูป	
	ที่มีความหนาลดลงเมื่อมีการปรับแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์และรัศมีดายโดย	
	ค่าช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm	48
4-19	แสดงบริเวณที่เกิดรอยย่นเมื่อมีการปรับแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์และรัศมีดาย	
	โดย ค่าช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7 mm	49
4-20	แสดงบริเวณที่เกิดรอยย่นเมื่อมีการปรับแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์และรัศมีดาย	
	โดย ค่าช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm	49
4-21	ขยายภาพที่ 4-19 แสดงค่าความเครียดและทิศทางของบริเวณที่เกิดรอยย่นเมื่อ	
	ปรับแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์และรัศมีดายโดยค่าช่องว่างระหว่างพันช์กับดายเท่า	
	กับ 0.7 mm	50
4-22	ขยายภาพที่ 4-20 แสดงค่าความเครียดและทิศทางของบริเวณที่เกิดรอยย่นเมื่อ	
	ปรับแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์และรัศมีดายโดยค่าช่องว่างระหว่างพันช์กับดายเท่า	
	กับ 0.84 mm	51
4-23	แสดงภาพชิ้นงานที่ตัดขอบแล้วพารามิเตอร์ที่ใช้คือแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์	
	35,000Nรัศมีดาย2 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดาย0.7mm	53
4-24	แสดงภาพชิ้นงานที่ตัดขอบแล้ว พารามิเตอร์ที่ใช้คือแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์	
	45,000Nรัศมีดาย2.0 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดาย0.7mm	54
4-25	แสดงภาพชิ้นงานที่ตัดขอบแล้ว พารามิเตอร์ที่ใช้คือแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์	
	45,000Nรัศมีดาย2 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดาย0.84mm	55
4-26	แสดงภาพชิ้นงานที่ตัดขอบแล้ว พารามิเตอร์ที่ใช้คือแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์	
	45,000Nรัศมีดาย2.3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดาย0.7mm	56
4-27	แสดงภาพชิ้นงานที่ตัดขอบแล้ว พารามิเตอร์ที่ใช้คือแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์	
	45,000Nรัศมีดาย3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดาย0.7mm	57
4-28	แสดงภาพชิ้นงานที่ตัดขอบแล้ว พารามิเตอร์ที่ใช้คือแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์	
	45,000Nรัศมีดาย3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดาย0.84mm	58

ภาพที่		หน้า
ก <b>-1</b>	แผ่นกรองกัด (Stencils)	64
ก-2	น้ำยากรดกัด LNC-2 Electrolyte	65
ก-3	อุปกรณ์สร้างกระแสไฟฟ้า Lectroecth power unit	65
ก-4	ภาพแสดงผ้าสักหลาดกับลูกกลิ้ง	66
ก-5	ภาพแสดงแผ่นชิ้นงานที่กัดกริดแล้ว	66
ข-1	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 15,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	2.0 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7mm	68
ข-2	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 25,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	2.0 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7mm	68
ข-3	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 35,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	2.0 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7mm	69
ข-4	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 45,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	2.0 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7mm	69
ข-5	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 15,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	2.3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7 mm	70
ข-6	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 25,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	2.3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7 mm	70
ข-7	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 35,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	2.3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7 mm	71
ป-8	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 45,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	2.3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7 mm	71
ข-9	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 15,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	3.0 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7 mm	72
ข-10	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 25,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	3.0 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7 mm	72
ข-11	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 35,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	3.0 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7 mm	73
ข-12	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 45,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	3.0 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7 mm	73

ภาพที่		หน้า
ข-13	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 15,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	2.0 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm	74
ข-14	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 25,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	2.3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm	74
ข-15	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 35,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	2.3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm	74
ข-16	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 45,000 N รัศมีดายเท่ากับ2	.3
	mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm	74
ข-17	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 15,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	2.3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm	75
ข-18	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 25,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	2.3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm	75
ข-19	แสดงรอยย่นบนซิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 35,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	2.3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm	76
ข-20	แสดงรอยย่นบนซิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 45,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	2.3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm	76
ข-21	แสดงรอยย่นบนซิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 15,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	3.0 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm	77
ข-22	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 25,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	3.0 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm	77
ข-23	แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 35,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	3.0 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm	78
ข-24	แสดงรอยย่นบนซิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 45,000 N รัศมีดายเท่ากับ	
	3 0 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0 84 mm	78

# คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

F <sub>BH</sub>	:	แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์
F , $G$ , $H$ , $L$ , $M$ และ $N$	:	ค่าคงตัวซึ่งแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก
Κ	:	สัมประสิทธ์ความต้านแรง
R	:	อัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้างต่อแนวหนา
$\overline{R}$	:	อัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้างต่อแนวหนาเฉลี่ย
$d_{\scriptscriptstyle D}$	:	เส้นผ่านศูนย์กลางดาย
$f(\sigma_{ij})$	:	ฟังก์ชั่นการคราก
n	:	เลขซี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด
r <sub>D</sub>	:	รัศมีดาย
$\sigma_{\scriptscriptstyle m}$	:	ความเค้นตั้งฉากเฉลี่ย
${\cal E}_t$	:	ความเครียดพลาสติกทิศทางความหนา
${\cal E}_{_W}$	:	ความเครียดพลาสติกทิศทางความกว้าง
$\left\{F ight\}$	:	เวกเตอร์ของแรงภายนอกรวม
[K]	:	สทิฟเนสเมทริกซ์รวม
$\left\{ U ight\}$	:	เวกเตอร์การกระจัดรวม
$\{f\}$	:	เวกเตอร์ของแรงภายนอก
$\begin{bmatrix} k \end{bmatrix}$	:	สทิฟเนสเมทริกซ์
$\{u\}$	:	เวกเตอร์การกระจัดของแต่ละจุดต่อ

# บทที่ 1 บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นมีความสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมการผลิต โดยเฉพาะ อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่น เช่น ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ของรูปร่างชิ้นงาน และวัสดุชิ้นงานในช่วงเปลี่ยนรูปถาวร (Plasticity) ค่าความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานกับเครื่องมือ (Sliding Friction Contact Phenomena) เป็นตัน ความรู้เรื่องกลไกของการเปลี่ยนรูปของโลหะและผลกระทบของ ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีความสำคัญทำให้สามารถออกแบบกระบวนการขึ้นรูปโลหะได้ดีขึ้น และ ช่วยลดการลองผิดลองถูก และช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย

การดึงขึ้นรูปลึก (Deep drawing) เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะที่สำคัญอย่างหนึ่ง ใน กระบวนการขึ้นรูปส่วนประกอบคือ พันช์ (Punch) ดาย (Die) และ แบลงก์โฮลเดอร์ (Blank holder) การดึงขึ้นรูปลึกเป็นการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยการดึงและการกด โดยที่พันช์เคลื่อนที่กด แผ่นชิ้นงานเข้าไปในดาย เกิดความเค้นกดในแนวเส้นรอบวง และความเค้นดึงในแนวรัศมี โดย มีแบลงก์โฮลเดอร์กดที่ขอบ (Flange) ของชิ้นงานเพื่อควบคุมการไหลของเนื้อโลหะ (Material flow) โดยทั่วไปความเสียหายที่เกิดขึ้นในกรรมวิธีการดึงขึ้นรูปลึกคือ การเกิดรอยย่น และการ ฉึกขาด (Wrinkling and Tearing)

ในการแก้รอยย่นของชิ้นงาน Door Part ทำจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 เกิดรอย ย่นด้านหลังของชิ้นงานในขั้นตอนการดอรว์ มีผลทำให้ขั้นตอนการ Trim ชิ้นงานทำได้ยาก ทาง โรงงานได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อลดรอยย่นแต่ใช้เวลานาน และเสียเวลาในการ ลองผิดลองถูก การจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยใช้ระเบียบวิธีไฟ ในต์เอลิเมนต์ (FEM) สามารถลดการลองผิดลองถูก และการขึ้นรูปที่มีความซับซ้อนของการขึ้น รูปได้ด้วยเหตุนี้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความจำเป็นมากในการวิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะแผ่น

แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram) คือ แผนภาพแสดงพฤติกรรม ของการขึ้นรูปโลหะ ในวิทยานิพนธ์นี้ จะวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม โดยใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์

#### 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการย่นและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับระเบียบวิธีไฟ ในต์เอลิเมนต์

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นจากการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้แผนภาพขีดจำกัด การขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ชิ้นงานที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ Door Part ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ขนาด ความหนา 0.6 mm.

1.3.2 สมมติให้สมบัติของวัสดุแบบ Planar Anisotropy และ Hill 1948 Yield Criterion

- 1.3.3 การวิเคราะห์ในการวิจัยนี้เป็นแบบ Elastic-Plastic Flow
- 1.3.4 โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับการวิจัยนี้คือโปรแกรม Hyper Work v. 7.0
- 1.3.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิจัย คือ
  - 1.3.5.1 ความเร็วในการขึ้นรูปเท่ากับ 186 mm/s
  - 1.3.5.2 รัศมีดายเท่ากับ 2, 2.3 และ 3 mm
  - 1.3.5.3 แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 15,000, 25,000, 35,000 และ45,000 N
  - 1.3.5.4 ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.70 และ 0.84 mm

1.3.6 งานวิจัยนี้ ขนาดรูปทรงของดรอว์บิด และรัศมีพันช์ เป็นขนาดตามแบบแม่พิมพ์ ของโรงงาน

1.3.7 งานวิจัยนี้ แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการทดลอง เป็นแผนภาพขีดจำกัด การขึ้นรูปที่มีอยู่แล้ว

#### 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.4.1 สร้างรูปกริด บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

1.4.2 ขึ้นรูปเพื่อวัดค่าพฤติกรรมการยึดตัวของกริดบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อ คำนวณหาค่าความเครียดหลักและความเครียดรอง ดูพฤติกรรมการย่นบนชิ้นงาน และการขึ้น รูปชิ้นงานจริง

1.4.3 จำลองการขึ้นรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์โดยใช้พารามิเตอร์เดียวกัน กับการทดลองจริงและดูพฤติกรรมการย่นและการขึ้นรูป

1.4.4 เปรียบเทียบพฤติกรรมการย่นและการขึ้นรูประหว่างการจำลองการขึ้นรูปโดย ระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์กับการทดลองจริง 1.4.5 ปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์และดูพฤติกรรมการย่นที่ เปลี่ยนไป

1.4.6 สรุปผลการทดลอง

### 1.5 ประโยชน์ของการวิจัย

1.5.1 สามารถนำข้อมูลไปทำการออกแบบแม่พิมพ์ ให้มีความถูกต้อง และมีความ แม่นยำในการขึ้นรูป

1.5.2 สามารถประยุกต์ระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ในการจำลองการขึ้นรูปโลหะ

# บทที่ 2 ทฤษฏีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

# 2.1 หลักการขึ้นรูปโลหะเบื้องต้น

[4] การขึ้นรูปโลหะทั่วไปแล้วนั้น จะใช้ความเค้นประสิทธิผล (Effective Stresses) ที่ทำ ให้เกิดการขึ้นรูปโลหะ สำหรับสภาพของความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณของการขึ้นรูปนั้นไม่ สามารถอธิบายได้ง่ายนัก ทั้งนี้เพราะความเค้นขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงาน สภาพความเค้น หลายอย่างเกิดขึ้นพร้อมกัน หรืออาจจะเปลี่ยนแปลงไปได้ในระหว่างการทำงาน ดังนั้นจึงใช้ ความเค้นที่ปรากฏชัดเจนเป็นเกณฑ์ในการแบ่งประเภทของการขึ้นรูปโลหะ ซึ่งสามารถแบ่ง ออกได้เป็น 5 กลุ่ม ดังภาพที่ 2-1



**ภาพที่ 2-1** การแบ่งประเภทกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะออกเป็นกลุ่ม

# 2.2 การขึ้นรูปโลหะแผ่น

การขึ้นรูปโลหะแผ่น คือ กรรมวิธีการเปลี่ยนรูปทรงของแผ่นโลหะแบบราบ ให้เป็นรูปทรง ตามที่ต้องการ โดยปราศจากการแตกหรือการบางเฉพาะแห่งกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น แผ่น โลหะจะถูกทำให้เสียรูปอย่างถาวรด้วยเครื่องมือที่มีความแข็งเกร็ง ซึ่งประกอบด้วย พันช์ ดาย แบลงก์โฮลเดอร์ โดยที่แบลงก์โฮลเดอร์จะทำหน้าที่กดยึดแผ่นโลหะให้ยึดติดกับดาย นอกจากนั้นยังทำหน้าที่ควบคุมการไหลของแผ่นโลหะที่จะไหลเข้าสู่โพรงแบบ



**ภาพที่ 2-2** การขึ้นรูปโลหะแผ่น

ข้อบกพร่องของการขึ้นโลหะแผ่นที่พบมากได้แก่รอยย่น (Wrinkling) ซึ่งมักจะเกิดใน บริเวณที่มีค่าความเค้นอัดตัวสูงๆ การเกิดการแตกร้าว (Fracture) มักจะเกิดขึ้นที่บริเวณที่มี ความหนาเป็นคอคอด และเกิดการดีดกลับ (Spring Back) หลังจากการถอนพันช์กับดายออก จากกันโดยแผ่นโลหะที่มีการเสียรูปไม่สามารถคงรูปร่างเดิมที่ต้องการไว้ได้

การขึ้นรูปโลหะแผ่นให้ได้ชิ้นงานออกมามีคุณภาพขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลายตัว เช่น รูปร่างแม่พิมพ์ รัศมีดาย แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็นต้น สิ่ง ที่ควรระวังก็คือรูปทรงเรขาคณิตของดาย ความเค้นที่เกิดจากการดัดรอบขอบดายต้องมีค่าไม่ มากโดยปกติรัศมีขอบดายมีค่า 5 -10 เท่าของความหนา ในกรณีที่ทราบเส้นผ่านศูนย์กลางดาย d<sub>D</sub> ก็หา r<sub>D</sub>ได้ดังสมการ2-1

$$r_D = 0.05[50 + (d_O - d_D)]\sqrt{t}$$
(2-1)

 $d_{_D}$ หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางดาย (mm)  $r_{_D}$  หมายถึง รัศมีดาย (mm) [6] สมการสำหรับคำนวณหาความดันแบลงก์โฮลเดอร์ P<sub>BH</sub> ดังนี้

$$P_{BH} = 0.0025 \left[ \left(\beta - 1\right)^2 + \frac{0.0005d}{t} \right] R_m$$
(2-2)

และแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์  $F_{\scriptscriptstyle BH}$ 

$$F_{BH} = P_{BH} X A_{BH}$$
(2-3)

การป้องกันไม่ให้แม่พิมพ์รูดที่ชิ้นงานที่มีความหนาเพิ่มขึ้นจากเดิมทำได้โดยใช้เคลียแร็นซ์ *u<sub>z</sub> ระ*หว่างพันช์กับดายให้มากกว่าความหนาของแผ่นแบลงก์ โดยมากมักเลือกใช้

$$u_z = 1.4t$$
 (2-4)

การนำค่าที่ใช้สำหรับชิ้นงานทรงกระบอกมาใช้กับชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมทำให้มีปัญหาเกิดขึ้น เพราะชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมไม่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง d<sub>0</sub>และ d<sub>1</sub> ดังนั้นจึงต้องหาขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางเปรียบเทียบ d<sub>2</sub> จากพื้นที่ดังนี้คือ

$$d_{e0} = 1.13\sqrt{A_0}$$
 (2-5)

$$d_{e1} = 1.13\sqrt{a_0}$$
 (2-6)

เมื่อ A<sub>0</sub> คือพื้นที่ของแบลงก์ เมื่อ a<sub>0</sub> คือพื้นที่หน้าตัดพันช์

$$\beta = \sqrt{\frac{A_0}{a_0}} \tag{2-7}$$

#### 2.3 เกณฑ์การคราก

เกณฑ์การคราก (Yield Criteria) เป็นสมการเชิงคณิตศาสตร์ของสภาพความเค้นที่ทำให้ เริ่มเกิดการคราก หรือเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร รูปแบบโดยทั่วไปของเกณฑ์การคราก คือ

$$f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx})$$
 = ค่าคงตัว,  $C$  (2-8)

หรือในพจน์ของความเค้นหลัก

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = C \tag{2-9}$$

สำหรับโลหะเหนียวส่วนมากเป็นไอโซโทรปิก (Isotropic) สามารถใช้สมมติฐานต่อไปนี้ เพราะผ่านการตรวจสอบมาแล้วในหลายกรณีคือ

2.3.1 ไม่มี *ผลของเบาซิงเงอร์ (Bauschinger Effect)* ดังนั้นความต้านแรงครากในการ ดึงและการกดมีค่าเท่ากัน

2.3.2 ปริมาตรคงตัว ดังนั้นอัตราส่วนของปัวซองในสภาพพลาสติกคือ 0.5

2.3.3 ขนาดของความเค้นตั้งฉากเฉลี่ยคือ

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \tag{2-10}$$

แม้ว่าจะใช้สมมติฐานเหล่านี้เป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์ เมื่อไม่เป็นไปตามสมมติฐานต้อง ใช้เกณฑ์อย่างอื่นที่แตกต่างไป

ในมุมมองของสมมติฐาน 1 และ 3 ที่กล่าวข้างต้น เกณฑ์การครากข้างต้นเมื่อนำมาลงจุด (Plot) ในสภาพความเค้นหลัก 3 มิติ ต้องได้ผิวของรูปเหลี่ยมที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่เปลี่ยนแปลงผิว ที่ได้นี้เรียกว่า *ผิวการคราก (Yield Surface)* เมื่อให้ความเค้นหลักค่าหนึ่งคงที่ ซึ่งสมมูลกับการ ใช้ระนาบตัดผ่านผิวการคราก ได้การลงจุดใน 2 มิติที่เรียกว่า โลกัสการคราก (Yield Locus) ดัง ภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 แสดงโลไซการครากของวัสดุ

#### 2.4 พลาสติกแอนไอโซทรอปี

[6] สาเหตุที่สำคัญมากที่สุดซึ่งทำให้โลหะมีคุณสมบัติพลาสติกแอนไอโซทรอปิกก็คือ ทิศทางของเกรนทิศทางที่เป็นไปหรือเนื้อของรูปผลึกที่พัฒนาขึ้นในเหล็กล้วนเกิดจากการหมุน ของแลคทิซในเกรนระหว่างการเปลี่ยนรูป โดยการสลิปหรือการทวิน (Twining) พฤติกรรมการ เปลี่ยนรูปของชิ้นทดสอบการดึงที่เป็นแผ่นแถบ ตัดออกมาจากแผ่นรีด เมื่อได้รับแรงดึงใน แนวแกน สามารถเกิดการครากได้เฉพาะโดยการสลิปในระนาบความต้านแรงดึงครากของชิ้น ทดสอบที่ตัดทำมุม θ กับทิศทางการรีดไม่แปรผันกันมากนัก ผลสรุปอย่างผิดพลาดว่าวัสดุเป็น ไอโซทรอปิก ความผิดพลาดอาจเกิดขึ้นได้ถ้าวัดความตึงเครียดในแนวขวางซึ่งเป็นผลมากจาก การดึง ถ้าทิศทางเป็นอุดมคติ ความหน้าไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก การยึดใน แนวยาวมีผลทำให้ความกว้างชิ้นทดสอบลดลง

พารามิเตอร์ที่มีประโยชน์คืออัตราส่วน R ของความเครียดพลาสติกเมื่อ w และ t คือ ทิศทางความกว้างและความหนาของชิ้นทดสอบการดึงตามลำดับ ดังนั้น  $\mathcal{E}_w = \ln(w/w_0)$  และ  $\mathcal{E}_t = \ln(t/t_0)$  สำหรับวัสดุไอโซทรอปิก R = 1

ε.,

8

$$R = \frac{\sigma_w}{\varepsilon t} = \frac{-y}{\varepsilon_z}$$
(2-11)

# **ภาพที่ 2-4** แสดงชิ้นทดสอบการดึงที่เป็นแผ่นแถบตัดมาจากแผ่น ค่า *R* มีนิยามว่าเป็น อัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้างต่อแนวหนา

ในการวัดค่า *R* ถึงแม้ว่า มีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้างต่อแนวหนา ความเครียดในแนวหนา  $\varepsilon_i$  ไม่สามารถวัดได้อย่างแม่นยำบนแผ่นบาง เพราะฉะนั้น ความเครียดในแนวหนามักหาได้จากการวัดความเครียดในแนวยาวและแนวกว้างโดยใช้ ปริมาตรคงตัว  $\varepsilon_i = -(\varepsilon_i + \varepsilon_w)$ เพื่อการวัดที่แม่นยำ ควรใช้ภาคตัดลดลงให้ค่อนข้างยาวมาก เมื่อเทียบกับความกว้าง และภาคตัดทดสอบที่ใช้วัดค่า  $\varepsilon_i$  และ  $\varepsilon_w$  ควรอยู่ห่างจากบ่ามาก บางครั้งค่า *R* ไม่แปรผันตามความเครียด เพราะฉะนั้น อัตราส่วนของความเครียดที่เพิ่ม ขึ้น  $d\varepsilon_w/d\varepsilon_t = R$  ค่า *R* คงตัวมีความสำคัญเมื่อใช้ *R* ประเมินค่าคงตัวในเกณฑ์การครากไอ โซทรอปิก ดังที่จะกล่าวต่อไปในหัวข้อนี้

สำหรับเหล็กกล้าค่า *R* และโมดูลัสยืดหยุ่น*E* มักแปรผันคล้ายกันตามเนื้อรูปผลึก แม้ว่า สหสัมพันธ์พื้นฐานไม่แม่นตรง แต่ก็มีพื้นฐานสำหรับใช้กับเครื่องมือวัดเชิงอุตสาหกรรมขนาด เล็กซึ่งวัดค่า *E* ของแผ่นแถบบางด้วย Sonic Velocity และปรับให้อ่านค่า *R* ได้ โดยปกติค่า *R* มักแปรผันตามทิศทางทดสอบ *θ* และมักใช้แสดงคุณลักษณะของวัสดุโดยค่า *R* เฉลี่ยคือ *R* ซึ่ง

$$\overline{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \tag{2-12}$$

#### 2.5 ทฤษฏิสภาพแอนไอโซทรอปีกของ Hill1948

[6] ได้เสนอการพิจารณาพลาสติกแอนไอโซทรอปีโดยไม่คำนึงถึงรูปผลึกเดิม โดยสมมติ ว่าวัสดุเอกพันธุ์แสดงคุณลักษณะโดยแกนไอโซทรอปี 3 แกนตั้งฉากกันคือ x, y และ z ซึ่ง คุณสมบัติสมมาตรสองหน (ระนาบ x-y, y-z และ z-x คือระนาบสมมาตร) ในแผ่นรีดมักใช้ ทิศทาง x, y และ z เป็นทิศทางรีด ทิศทางขวางการรีด และทิศทางความหนาตามลำดับ ทฤษฏี นี้ยังสมมติว่า ความต้านแรงดึงครากและแรงกดครากในทิศทางที่กำหนดมีค่าเท่ากันเกณฑ์การ ครากแอนไอโซทรอปิกที่เสนออยู่ในรูป

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{y} - \sigma_{z})^{2} + G(\sigma_{z} - \sigma_{x})^{2} + H(\sigma_{x} - \sigma_{y})^{2} + 2L\tau_{yz}^{2} + 2M\tau_{zx}^{2} + 2N\tau_{xy}^{2} = 1$$
(2-13)

เมื่อ F, G, H, L, M และ N คือค่าคงตัวซึ่งแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก สังเกตว่าถ้า F = G = H และ L = M = N = 3F สมการนี้ลดรูปลงเป็นเกณฑ์ของฟอนมิเซส ค่าคงตัว F, G และ H สามารถประเมินได้จากการทดสอบการดึง

พิจารณาการทดสอบในทิศทาง x และให้ X เป็นความเค้นดึงคราก ขณะคราก

 $\sigma_{_{x}}=X$  $\sigma_{_{y}}=\sigma_{_{z}}= au_{_{ij}}=0$ ดังนั้น สมการที่ (2-13) เป็น

$$(G+H)X^2 = 1 \tag{2-14}$$

หรือ

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

ในทำนองเดียวกัน ถ้า Y และ Z คือความเค้นดึงครากในทิศทาง y และ z

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

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

$$Z^{2} = \frac{1}{F+G}$$
(2-15)

แก้สมการพร้อมกันได้

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

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

$$2H = \frac{1}{X^{2}} + \frac{1}{Y^{2}} + \frac{1}{Z^{2}}$$
(2-16)

ในกรณีของโลหะแผ่นวัด Z ได้ยาก ค่าคงตัว L, M และ N สามารถหาได้จากการ ทดสอบการเฉือน กฏการไหลสามารถหาได้โดยใช้สมการ

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial f(\sigma_{ij})}$$
(2-17)

เมื่อ  $f(\sigma_{ij})$  คือฟังก์ชั่นการคราก (ใช้ได้กับวัสดุแอนไอโซทรอปิกและไอโซทรอปิก) หา อนุพันธ์ของสมการที่ (2.17) ได้กฏการไหล

$$d\varepsilon_{x} = d\lambda [H(\sigma_{x} - \sigma_{y}) + G(\sigma_{x} - \sigma_{z})], \ d\varepsilon_{yz} = d\varepsilon_{zy} = d\lambda L\tau_{yz}$$
  

$$d\varepsilon_{y} = d\lambda [F(\sigma_{y} - \sigma_{z}) + H(\sigma_{y} - \sigma_{x})], \ d\varepsilon_{zx} = d\varepsilon_{xz} = d\lambda L\tau_{zx}$$
  

$$d\varepsilon_{z} = d\lambda [H(\sigma_{z} - \sigma_{y}) + G(\sigma_{z} - \sigma_{x})], \ d\varepsilon_{xy} = d\varepsilon_{yx} = d\lambda L\tau_{xy}$$
  
(2-18)

ในการหากฏการไหลสำหรับความเครียดเฉือน  $d\varepsilon_{_{yz}}$ ,  $d\varepsilon_{_{zx}}$  และ  $d\varepsilon_{_{xy}}$  ต้องเขียนเกณฑ์ การคราก สมการที่ (2-13) ใหม่ เพื่อให้พจน์ของความเค้นเฉือนปรากฏในรูป

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

มิฉะนั้นแล้วอนุพันธ์ย่อยจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ใช้ไม่ได้คือ  $d\varepsilon_{yz} = 2 \cdot d\lambda L \tau_{yz}$  และ  $d\varepsilon_{zy} = 0$  ฯลฯ สังเกตว่าสมการที่ (2.18) คือ  $d\varepsilon_x + d\varepsilon_y + d\varepsilon_z = 0$  แสดงว่าปริมาตรคงตัว พิจารณาการทดสอบการดึงในทิศทาง x อีกครั้งหนึ่ง แทนค่า $\sigma_x = X$ ,  $\sigma_y = \sigma_z = 0$ ในสมการ (2-18) ได้ความเครียด

$$d\varepsilon_{x} = d\lambda(H+G)X$$

$$d\varepsilon_{y} = -d\lambda(H)X$$

$$d\varepsilon_{z} = -d\lambda(G)X$$
(2-19)

เนื่องจากอัตราส่วนความเครียดสำหรับการทดสอบการดึงในทิศทาง x นิยามว่า

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

ดังนั้น

$$R = \frac{H}{G}$$
(2-20)

ในทำนองเดียวกัน นิยามให้  $P=R_{_{90}}$  คืออัตราส่วนความเครียดในทิศทางแกน Y  $P=d\varepsilon_x/d\varepsilon_z$ เมื่อ  $\sigma_y=Y$  และ  $\sigma_x=\sigma_z=0$  จากสมการที่ (2.18) ได้

$$P = \frac{H}{F} \tag{2-21}$$

#### 2.6 การทำให้แข็งด้วยความเครียด

[4] การเปลี่ยนรูปทรงที่ทำให้ความต้านแรงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น หรือ การทำให้แข็ง ด้วยความเครียด (Strain Hardening) หมายถึงการเพิ่มความแข็งแรงจากการเปลี่ยนรูปเย็น ผล ที่ตามมาคือ สมบัติความเหนียวลดลง และความต้านแรงครากเปลี่ยนไป สมการที่ใช้แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดประสิทธิผลที่เรียกว่ากฎยกกำลัง (Power Law) อยู่ในรูป

$$\overline{\sigma} = K\overline{\varepsilon}^n \tag{2-22}$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธ์ความต้านแรง (Strength Coefficient)

ก คือ เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening Exponent)

#### 2.7 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming limit diagram: FLD)

ความเครียดที่พบในบริเวณที่มีการคอดเฉพาะแห่งสามารถหาได้โดยการทดลองด้วย โหลดที่กระทำในวิถีต่างกัน. เทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุดคือการพิมพ์หรือกัดกริดวง กลม ลงบนแผ่นโลหะก่อนนำมาขึ้นรูป วงกลมเหล่านี้บิดเบี้ยวไปเป็นวงรีระหว่างการขึ้นรูปหลัง จากนั้นจึงหาความเครียดหลักโดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลางหลัก และเส้นผ่านศูนย์กลางรอง ของ วงรีความเครียดนี้อาจเขียนในรูปของความเครียดจริง หรือความเครียดวิศวกรรม และค่า ความเครียดของวงกลมที่มีการคอดทั้งหมดหรือบางส่วนถือว่า "เสียหาย" ส่วนความเครียดของ วงกลมที่ห่างออกไปจากนี้ถือว่า "ปลอดภัย" เมื่อลงจุดความเครียดเหล่านี้ก็สามารถสร้าง แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (forming limit diagram, FLD) ดังภาพที่ 2-5



**ภาพที่ 2-5** แสดงแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป







**ภาพที่ 2-7** แสดงความเครียดบนเอลิเมนต์ของกริดวงกลม

#### 2.8 พฤติกรรรมการย่นของวัสดุ

การย่นจะเกิดขึ้นเมื่อมีความเค้นรองในการขึ้นรูปด้วยการกดขึ้นรูป การย่นของพื่นที่ ด้านหน้า แสดงในภาพที่ 2-8 สามารถแก้ไขได้โดยการใช้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ อย่างไรก็ตาม การย่นอาจจะเกิดขึ้นในบริเวณจุดสัมผัสกับตัวพันช์ (ภาพที่ 2-9) แสดงการขึ้นรูปโลหะแผ่นรูป ถ้วย ความเค้นกดที่เกิดขึ้นในแนวเส้นรอบวงอาจจะสูงในการขึ้นรูปแบบดายเปิดจากตำแหน่ง จุด C เนื้อวัสดุจะไหลตัวลงมาอยู่ระหว่างพันช์กับดาย ส่วนใหญ่จะแก้ไขโดยการเพิ่มแรงกด แบลงก์โฮลเดอร์ ตรงตำแหน่ง B ซึ่งจะเพิ่มความเค้นแนวรัศมี และความเครียด รัศมีของ ชิ้นงานที่ถูกดึงขยายจะช่วยลดความเค้นกดในแนวเส้นรอบวง การยืดของชิ้นงานที่ต้องการ ขึ้นอยู่กับค่า R ของวัสดุ ซึ่งเป็นอัตราส่วนความเครียดด้านกว้างต่อด้านหนาจากการทดสอบแรง ดึง รัศมีทำให้ชิ้นงานยืดน้อยที่สุด ต้องการค่า R สูงเพื่อช่วยลดความเสี่ยงต่อการฉีกขาด ค่า R สำหรับเหล็กแผ่นที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปจะมีค่ามากกว่า 1 และสำหรับอลูมิเนียมจะมีค่าน้อย กว่า 1 ดังนั้นปัญหาการย่นมักจะเกิดขึ้นมากในวัสดุอะลูมิเนียม
 ด้วแปรที่มีผลต่อการย่น คือค่าโมดูลัสการยืดหยุ่น และความหนาของแผ่นโลหะ ดังนั้นขีดจำกัดของการย่น เป็นลักษณะ ไม่ตายตัวแสดงดังภาพที่ 2-10 พื้นที่ใต้กราฟแสดงค่า R ที่เพิ่มขึ้นที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปถ้วย แต่การวิเคราะห์ตามแผนภาพนี้ไม่ได้อธิบายค่า R ที่สูงว่าเหมาะสมกับการขึ้นรูปแบบตื้น ตัวอย่างเช่น โครงของรถยนต์, การใช้ประโยชน์จากแผนภาพนี้ ทำให้ทราบถึงความต้านทาน การย่นที่เพิ่มขึ้น



**ภาพที่ 2-8** แสดงความเครียดรอง



**ภาพที่ 2- 9** แสดงการขึ้นรูปแบบดายเปิด



**ภาพที่ 2- 10** แสดงขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยการกด

#### 2.9 หลักการในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

[3] ศึกษาการไหลตัวโลหะจะนิยมใช้วิธีอัพเพอร์เบาน์ด แต่ในปัจจุบันมักนิยมใช้วิธีไฟในต์ เอลิเมนต์มากขึ้นทั้งนี้เพราะสามารถจะวิเคราะห์ปัญหาสองและสามมิติที่ซับซ้อนได้สะดวกกว่า วิธีอัพเพอร์เบาน์ดอย่างไรก็ตามพื้นฐานที่สำคัญของการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปด้วยวิธีไฟในต์เอ ลิเมนต์นั้นก็มาจากสมการต่าง ๆ ของวิธีอัพเพอร์เบาน์ดและลักษณะของการวิเคราะห์ปัญหา ด้วยวิธีไฟในต์เอลิเมนต์มักจะไม่พิจารณาความเครียด ในช่วงยืดหยุ่น คือจะพิจารณาเฉพาะ ความเครียดในช่วงพลาสติกโดยจะสมมุติให้วัสดุมีพฤติกรรมแบบแข็งเกร็ง – พลาสติกสมบูรณ์ (R-PP) หรือแบบแข็งเกร็ง – วิสโคพลาสติก (Rigidviscoplastic, R-VP) และเรียกการวิเคราะห์ ในลักษณะนี้ว่า flow formulation 2.9.1 การวิเคราะห์ปัญหาการเปลี่ยนรูปโลหะด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบ่งได้ 6 ขั้นตอนคือ

2.9.1.1 การแบ่งชิ้นงานจริงออกเป็นชิ้นงานย่อยหรือออกเป็นเอลิเมนต์ การ แบ่งชิ้นงานจริงออกเป็นเอลิเมนต์ ให้สอดคล้องกับรูปร่างลักษณะของปัญหาซึ่งอาจจะเลือกใช้ ขนาดและชนิดเอลิเมนต์ใดนั้นจะขึ้นอยู่กับดุลย์พินิจของผู้วิเคราะห์ หลักสำคัญก็คือการจัดและ การเลือกใช้ขนาดและชนิดของเอลิเมนต์จะต้องสนองต่อพฤติกรรมที่แท้จริง หรือใกล้เคียงกับ พฤติกรรมจริงของปัญหานั้น ๆ อย่างไรก็ตามมักนิยมแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม มากกว่าสามเหลี่ยม

2.9.1.2 การเลือกแบบจำลองการกระจัด (Displacement model) โดยทั่วไปมัก เลือกแบบจำลองการกระจัดในลักษณะฟังก์ชันหรือสมการพอลินอเมียลเพราะสามารถจะเลือก จำนวนเทอมของพอลินอเมียลให้สอดคล้องกับลักษณะการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานได้ดีกว่า

2.9.1.3 การหาสทิฟเนสของเอลิเมนต์อาจหาได้หล<sup>้</sup>ายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันมาก ก็คือวิธีที่ใช้หลักการแปรเปลี่ยน (Variation principle) หลักการการสมดุลของแรงและหลักการ ของพลังงานศักย์ต่ำสุดผลที่ได้รับจากวิธีดังกล่าว ก็คือสมการความสัมพันธ์ระหว่างสทิฟเนสแรง ภายนอกและการกระจัดซึ่งเขียนในรูปของเมตริกซ์ ดังนั้นสมการสมดุลของแรงในแต่ละเอลิ เมนต์คือ

$$[k]{u} = \{f\}$$
(2-23)

[k] คือ เป็นสทิฟเนสเมทริกซ์

- *{u}* คือ เป็นเวกเตอร์การกระจัดของแต่ละจุดต่อ
- $\{f\}$  คือ เป็นเวกเตอร์ของแรงภายนอก

สทิฟเนสเมทริกซ์ของแต่ละเอลิเมนต์ จะขึ้นอยู่กับฟังก์ขันการกระจัด ชนิดของเอลิเมนต์ คุณสมบัติของวัสดุ และลักษณะของปัญหาเช่นปัญหาคาน, ปัญหาเพลา, ปัญหาถังความดัน ฯลฯ

2.9.1.4 การประกอบเอลิเมนต์เข้าด้วยกันเป็นระบบรวมเนื่องจากซิ้นงานจะ ประกอบด้วยเอลิเมนต์ต่างๆ รวมกันเป็นระบบเดียว ถ้าให้ [K] เป็นสทิฟเนสเมทริกซ์รวม เป็น เวกเตอร์ของแรงภายนอกรวม และ เป็นเวกเตอร์การกระจัดรวม ดังนั้นสมการสมดุลของระบบ รวมคือ

$$[K]{U} = {F}$$
(2-24)

เนื่องจาก [K]เป็นเมทริกซ์สมมาตร จึงไม่สามารถจะแก้สมการที่ 2-24 ได้โดยตรง จึง จำเป็นต้องระบุเงื่อนไขขอบเพื่อขจัดหรือปรับเมทริกซ์[K] ให้เป็นเมทริกซ์ที่ไม่สมมาตร

2.9.1.5 การหาผลเฉลยหรือการหาการกระจัดโดยใช้หลักการทั่ว ๆไปของเมท ริกซ์ เราสามารถจะหาการกระจัดรวมของระบบได้คือ

$$\{U\} = [K]^{-1}\{F\}$$
 (2-25)

แต่ถ้าสมการที่ เป็นสมการที่ไม่ใช่เชิงเส้น อาจจะต้องใช้วิธีการหรือเทคนิคอื่นช่วยเพื่อหา การกระจัดรวมดังกล่าว

2.9.1.6 การหาความเค้นและความเครียดของแต่ละเอลิเมนต์จากขั้นตอนที่ 5 เราสามารถจะแทนค่าการกระจัดรวมลงในสมการสมดุลของแต่ละเอลิเมตนต์ เพื่อหาการกระจัด ของแต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งนำไปสู่การหาความเครียดและความเค้นที่จุดต่อต่าง ๆ ได้ตามต้องการ ทั้งนี้ความเครียดของแต่ละเอลิเมนต์หาได้จาก

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\} \tag{2-26}$$

และ

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} = [D][B]\{u\}$$
(2-27)

#### 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิตติภัฏ [1] ได้ศึกษาการควบคุมการไหลของแผ่นโลหะด้วยการใช้ดรอว์บีดที่มีรูปร่าง แบบครึ่งทรงกระบอกกลม ผลการทดลองแสดงให้ทราบว่าความสูงของดรอว์บีด และการหล่อลื่น มีผลกระทบต่อการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นที่จะเข้าสู่ช่องเปิดดาย เป็นอันมาก เมื่อเพิ่ม ความสูงดรอว์บีดให้สูงขึ้นจะต้องใช้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่รอยย่นที่ เกิดขึ้นจะลดลง ในส่วนของการหล่อลื่นพบว่า เมื่อไม่ใช้สารหล่อลื่นจะไม่สามารถดึงขึ้นรูปได้ เพราะจะเกิดการฉีกขาดที่ผนังชิ้นงานก่อน และสำหรับความเร็วในการดึงขึ้นรูปในช่วงที่ใช้ใน การทดลองพบว่ามีผลต่อคุณภาพของ ชิ้นงานสำเร็จน้อยมาก

คมสันต์ [2] ได้ศึกษาหาแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปโดยทดลอง เหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนในต์ JIS SUS304 สร้างได้ตามมาตราฐาน ASTM E 2218-02 และความหนาซิ้น ทดสอบเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ขีดจำกัดการขึ้นรูปสูงขึ้นไม่เป็นไปตามสัดส่วนความหนา สามารถ ประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปอ่างล้าง ภาชนะและถ้วยทรงกรวยได้ พนา [6] ได้ศึกษาการขึ้นรูปถ้วยเหล็กกล้าไร้สนิม จากความหนาของชิ้นงานที่แตกต่าง กันทำให้ ผิวสัมผัสระหว่างแบลงก์โฮล์เดอร์กับผิวสัมผัสขอบชิ้นงานไม่เป็นระนาบเดียวกันจึงเกิด ช่องว่างและเป็นรอยย่นฉะนั้นจะต้องหา สัดส่วนมุมเอียงที่ผิวหน้าของแบลงก์โฮลเดอร์ให้ เปลี่ยนแปลงไปตามระนาบของการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานที่บริเวณขอบที่เกิดจาก ความเค้นกดในแนวเส้นรอบวง ให้พอดีเพื่อลดช่องว่างและทำให้ไม่เกิดรอยย่น ผลการวิจัย พบว่ามุมเอียงที่ผิวหน้าของแบลงก์โฮล์เดอร์ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปถ้วยที่ทำด้วยเหล็กกล้า ไร้สนิมที่อัตราส่วนการดรอว์ 1.99 โดยใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น อยู่ที่ 39 ลิปดา 31.94 พิลิปดา โดยใช้แรงในการดีปดรอว์สูงสุด 215.95 kN และเกิดแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ประมาณ 61.30 kN

สวัสดิ์ [7] ได้ศึกษาเรื่องการทำนายความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ด้วย แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ผลการวิจัยพบว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปโดยวิธีการทดลอง สร้างได้ตามมาตราฐาน ASTM E 2218-02 เมื่อเทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จาก ไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแตกต่าง 12% ณ ความเครียดในระนาบ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อ วิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานจริงได้ ทำนายผลการขึ้นรูปได้สอดคล้องกับความเสียหาย

สามารถ [8] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในการจำลองวิเคราะห์ไฟในต์เอลิเมนต์ให้ สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงการขึ้นรูปชิ้นงานจริง ในการขึ้นรูปถาดอะลูมิเนียม AL 1100 หนา 1.0 mm.โดยใช้โปรแกรมอ็อปทริสจากผลการทดลองทั้งสองแนวทางได้ผลใก้ลเคียงกันมากมี ความเห็นให้การจำลองผลแทนการทดลองขึ้นรูปจริง จึงทำให้เกิดผลดีทางธุรกิจและลดต้นทุน การผลิต

H. Takuda et,al. [12] ได้ศึกษาขีดจำกัดการขึ้นรูป เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ด้วยการอุ่นชิ้นงาน (Warm deep Drawing) โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปถาวรและอุณหภูมิที่ช่วยในการขึ้นรูป ด้วย Rigid – plastic combination และวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์การนำความร้อนผลจากการจำลองและการทดลองพบว่าปัจจัยของความร้อนที่ อุ่นชิ้นงานทำให้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ดีที่อุณหภูมิ 120C° ด้วยอัตราการดึงประมาณ 2.7 และที่อุณหภูมิห้องใช้อัตราการดึงประมาณ 2

Hsu and Shien . [15] ศึกษาทฤษฎีการดัด (Bending) ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น เช่นการ Punch การ Stretching และการขึ้นรูปลึก ด้วยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบ Elestic-Plastic โดยใช้วัสดุแบบ Anisotropic ตามกฎการไหลของ Hill ผลทางคณิตศาสตร์ ได้มาจากการจำลองผลการดีดกลับ (Spring Back) หลังจากการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยความหนา ของแผ่นบางที่เปลี่ยนแปลงไปตามสมการ Lagrangian ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวนจาก ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงและผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Meinders et, al . [16] ได้ศึกษาการนำดรอบีดมาใช้กับการขึ้นรูปโลหะ โดยการสร้าง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวที่สำคัญประกอบด้วย แรงจำกัดดรอว์ บิด (Drawbead Restraining Force) การเปลี่ยนแปลงความหนาแบบพลาสติก, และแรงยก ดรอว์บิด (Drawbead Lift Force) ซึ่งได้มาจากการจำลองดรอว์บิดแบบสองมิติ และการทดลอง จริง ค่าความแตกต่างทางคณิตศาสตร์ทั้งสองค่าจะเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการอธิบายการ เปลี่ยนแปลความหนาแบบพลาสติก

สรุป งานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยรวมจะศึกษาถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะ แผ่นและการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมและโปรแกรมไฟไนต์เอลิ เมนต์เข้ามามีส่วนช่วยในการวิเคราะห์เพื่อลดตันทุนและเวลาในระบบอุตสาหกรรมได้

# บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นโดยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป มี วัตถุประสงค์ เพื่อเปรียบเทียบการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ และ วิเคราะห์พฤติกรรมการย่นจากการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยระเบียบ วิธีไฟในต์เอลิเมนต์ มีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยสามารถแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ

- 1. การขึ้นรูปชิ้นงานจริง
- การจำล<sup>้</sup>องการขึ้นรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1.	โปรแ	กรม hyperwork v.7.0	1	โปรแกรม		
2.	โปรแ	1	โปรแกรม			
3.	คอมเ	1	เครื่อง			
4.	ปริ้นเ	ปริ้นเตอร์				
5.	กล้อง	เถ่ายภาพ	1	กล้อง		
6.	เครื่อ	งเพรสขึ้นรูปขนาด 300 ตัน	1	เครื่อง		
7.	แม่พิ	1	แม่พิมพ์			
8.	อุปกรณ์ที่ใช้สร้างกริด					
	8.1	อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า	1	เครื่อง		
	8.2	ลูกกลิ้งรีด	1	อัน		
	8.3	น้ำยาอิเล็กโทรไลต์	1	ขวด		
	8.4	น้ำยาทำความสะอาดชิ้นงาน	1	ขวด		
	8.5	ผ้าซับน้ำยาอิเล็กโทรไลต์	1	แผ่น		
	8.6	แผ่นกริดวงกลม	1	แผ่น		
	8.7	กล้องถ่ายภาพไมโครสโครป	1	กล้อง		



**ภาพที่ 3-1** ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

# 3.3 การขึ้นรูปชิ้นงานจริง

การดำเนินการวิจัยการขึ้นรูปชิ้นงานจริงมีขั้นตอนรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 การสร้างกริดบนแผ่นชิ้นงาน

สร้างกริดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 mm บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304เพื่อวัด ความเครียดหลักและความเครียดรอง ขนาดของแผ่นชิ้นงานที่ใช้ กว้าง 109 mm, ยาว 144 mm, หนา 0.6 mm โดยวิธี Electrochemical Etching บนแผ่นชิ้นงาน ภาพที่ 3-2 แสดง ลักษณะกริดที่สร้างบนชิ้นงาน



ภาพที่ 3-2 แสดงลักษณะกริดที่สร้างบนชิ้นงาน
## 3.3.2 ขึ้นรูปชิ้นงานจริง

นำแผ่นชิ้นงานที่มีกริดไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องเพรสขนาด 300 Tons แรงกดแบลงก์โฮล เดอร์เท่ากับ 40,000 N ความเร็วพันช์ เท่ากับ 186 mm/s รัศมีดาย 2.3 mm และใช้ดรอว์บีด 4 แนว ภาพที่ 3-3 แสดงลักษณะของเครื่องเพรส และภาพที่ 3-4 แสดงลักษณะชิ้นงานภายหลัง ขึ้นรูป



ภาพที่ 3-3 แสดงลักษณะของเครื่องเพรส



**ภาพที่ 3-4** แสดงลักษณะชิ้นงานภายหลังขึ้นรูป

## 3.3.3 การวัดการยึดตัวของกริดบนแผ่นชิ้นงาน

การวัดการยึดตัวของกริดบนแผ่นชิ้นงาน วัดได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องชิ้นงานและ ถ่ายภาพ นำภาพไปวัดการยืดของกริดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Motic Images Plus 2.0 จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าความเครียดหลัก และค่าความเครียดรอง เพื่อพลอตลงในแผนภาพ ขีดจำกัดการขึ้นรูป ภาพที่3-5 แสดงลักษณะของกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้วัดการยืดตัวของกริดบน ชิ้นงานและภาพที่ 3-6 แสดงลักษณะของโปรแกรม Motic Images Plus 2.0 ที่ใช้วัดกริดบน ชิ้นงาน



ภาพที่ 3-5 แสดงลักษณะของกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้วัดการยืดตัวของกริดบนชิ้นงาน



ภาพที่ 3-6 แสดงลักษณะของโปรแกรม Motic Images Plus 2.0 ที่ใช้วัดกริดบนชิ้นงาน

### 3.3.4 การวัดความหนาของชิ้นงาน

วัดความหนาของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปด้วยเครื่องวัดCMM ในตำแหน่งที่เกิดเสียรูปมาก บริเวณขอบกันถ้วยโดยให้ตัดผ่าชิ้นงานผ่านบริเวณที่เกิดการเสียรูปมาก ๆและทำการเก็บบันทึก เพื่อวิเคราะห์ต่อไปและนำไปเปรียบเทียบกับการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภาพที่ 3-7 แสดงตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงานเพื่อวัดค่าความหนา และภาพที่ 3-8 แสดงการวัดค่าความ หนาโดยเครื่องวัด CMM



**ภาพที่ 3-7** แสดงตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงานเพื่อวัดค่าความหนา



ภาพที่ 3-8 แสดงการวัดค่าความหนาโดยเครื่องวัด CMM

3.3.5 ตรวจการย่นของชิ้นงาน

ตรวจพื้นที่บริเวณที่เกิดการย่นของชิ้นงานจริงเพื่อนำไปเปรียบเทียบการจำลองด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ภาพที่ 3-9 แสดงตำแหน่งการย่นของชิ้นงาน



**ภาพที่ 3-9** แสดงตำแหน่งการย่นของชิ้นงาน

## **3.4** การจำลองการขึ้นรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ใช้โปรแกรม Hyper work v.7.0 ดังภาพที่ 3-10 ซึ่งเป็นซอฟแวร์ที่สามารถวิเคราะห์การขึ้นรูป และจำลองการสร้าง Tooling ของ กระบวนการขึ้นรูปลึกได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผล



ภาพที่ 3-10 แสดงลักษณะหน้าจอของโปรแกรม Hyper work v.7.0

โดยทั่วไปแล้วหลักการทำงานหรือขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน

1. ก่อนการประมวลผล (Pre-processing)

2. การประมวลผล (Processing)

3. แสดงผลลัพธ์จากการประมวลผล (Post-processing)

การจำลองกระบวนการขึ้นรูปลึกของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ขนาดความหนา 0.6 mm โดยใช้โปรแกรมไฟในต์เอลิเมนต์ (Hyper Work v.7.0) มีขั้นตอนดังนี้

3.4.1 ก่อนการประมวลผล (Pre-processing) เป็นขั้นตอนแรกของการจำลองการขึ้นรูป โลหะ จะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

3.4.1.1 การสร้างแบบจำลอง

ในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการขึ้นรูปลึกของงานวิจัยนี้ สามารถสร้างได้จาก โปรแกรมออกแบบอื่นๆ แล้ว Import File โดยเลือกใช้นามสกุลแบบ IGES จากนั้นสร้างเอลิ เมนต์บนชิ้นงาน ในการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ จะกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ โดยกำหนดขนาดของเอลิเมนต์จาก ขนาดใหญ่ คือ 10 mm แล้วลดขนาดของเอลิเมนต์ให้เล็กลง เพราะว่าถ้าขนาดของเอลิเมนต์มีขนาดเล็กเกินไป จะทำให้เอลิเมนต์บนแบบจำลองมาก เวลาใน การคำนวณหาคำตอบใช้เวลานานมาก แต่ถ้าเอลิเมนต์บนแบบจำลองมีขนาดใหญ่ การ คำนวณหาผลลัพธ์อาจจะไม่ถูกต้อง ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าความหนาชิ้นงานจากการทดลองจริง เปรียบเทียบค่าความหนาจากที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ค่าของความหนาที่ เปรียบเทียบอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ กำหนดขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม ในวิจัยนี้ใช้ เอลิเมนต์ ขนาด 5 mm จำนวนเอลิเมนต์หลังทำการขึ้นรูปแล้วมีจำนวนประมาณ 6000 เอลิเมนต์และเอลิ เมนต์เป็นแบบสี่เหลี่ยมดังภาพที่ 3-13 เมื่อกำหนดเอลิเมนต์บนแบบจำลองแล้ว ให้ทำการ ตรวจสอบเอลิเมนต์ของชิ้นงานที่ Import เข้ามาว่ามีข้อบกพร่องหรือไม่ ถ้ามีให้ทำการแก้ไขก่อน



ภาพที่ 3-11 แสดงการ Import file ลงในโปรแกรม

Mesh			comp	Punch	loadcol: 🛛 Loadcol
create mesh	surfs	8			vis opts
C mesh params	reset		<b>A</b>	interactive	inesh.
C cleanup	reset meshing parameters to:				remesh
C proj to edge	elem size =	5.0_			reject
	▲ 🕞 mixed	📕 link edge densities			
			identify and	select:	
	elements	to current comp	🌲 👘 uni	neshed surfs	return

**ภาพที่ 3-12** แสดงการกำหนดขนาดเอลิเมนต์



**ภาพที่3-13** แสดงลักษณะของแผ่นชิ้นงานเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมขนาด5 mm

### 3.4.1.2 การสร้างและกำหนดสมบัติของแผ่นวัสดุ

เมื่อกำหนดขนาดของเอลิเมนต์บนชิ้นงานที่ Import เข้ามาแล้วขั้นตอนต่อมาตั้งชื่อชิ้นงาน (Blank Sheet) และกำหนดความหนาของแบบจำลองแผ่นชิ้นงาน ขั้นตอนต่อไปคือกำหนด สมบัติของแผ่นวัสดุชิ้นงานก่อน ในโปรแกรม Hyper work v.7.0 มีเมนูให้เลือกใช้สมการ Yield Function ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สมการของ Hill 1948 และสมบัติของวัสดุเป็นแบบแอนไอโซ โทปิก (Anisotropic Material) เนื่องจากการจำลองการขึ้นรูปลึกเป็นพฤติกรรมการเปลี่ยนรูป ถาวร โดยพิจารณาการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening) หมายถึงการเพิ่มความ แข็งโดยการขึ้นรูปเย็นของวัสดุ ในแบบจำลองนี้เลือก  $\overline{\sigma} = K\overline{\varepsilon}$ "ผลที่ตามมาคือสมบัติการ ด้านทานแรงครากเปลี่ยนแปลงไป

		ч				
ความหนา	เลขชี้กำลัง	สัมประสิทธิ์				
เหล็กกล้าไร้	การทำให้	ความต้าน	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก ( <i>r</i> )			)
สนิม AISI	แข็งด้วย	แรง (K)				
304	ความเครียด		$r_0$	$r_{45}$	$r_{90}$	$\overline{r}$
	(n)					
0.58 mm	0.4232	1582.0	0.976	1.487	0.839	1.197

ตารางที่ 3-1 แสดงสมบัติของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304[2]

### 3.4.1.3 การสร้างและการกำหนด Tooling

ในการสร้าง Tooling ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Hyper form v.7.0) สามารถสร้างจาก IGES ที่ Import เข้ามาและ ทำการกำหนดชื่อของ Tooling แต่ละตัว ดังภาพที่ 3-14 สีขาวคือ ดาย สีเหลืองคือแบลงก์โฮลเดอร์ สีชมพูคือพันช์



### ภาพที่ 3-14 แสดง Toolingสีขาวคือดาย สีเหลืองคือแบลงก์โฮลเดอร์ สีชมพูคือพันช์

3.4.1.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) และขั้นตอนการ ทำงานของ Tooling

การทำงานในโปรแกรมต้องทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และจัดเรียงขั้นตอนการ ทำงานก่อน โดยกำหนดให้แบลงก์โฮลเดอร์ เป็นตัวกดที่บริเวณขอบของแผ่นชิ้นงานด้วยแรง คงที่ กำหนดแรงที่ใช้ในการวิจัยดังนี้15,000N 25,000N 35,000N 45,000N ต่อมาให้ดาย เคลื่อนที่ลงมากดแผ่นชิ้นงาน ไปหาพันช์ ด้วยความเร็วคงที่186 mm/s ตามแนวแกน Z แสดง ดังภาพที่ 3-15

Specify the tool moti	on		comp: 🔲 Punch	loadcol: 🖸 Loadcol
e motion	moving tool	die		setup
C history	max velocity	- 186.000		update
	total travel	30.871	setup option:	remove
	starting time	0.000	🔽 termination	
	rising time	0.002	🔽 load curve	
	falling time	2.000e-03	✓ prcrb_rigid	edit
	direction	Z axis		return

**ภาพที่ 3-15** แสดงการกำหนดเคลื่อนที่ของ Tooling

3.4.2 การประมวลผล (Processing)

เมื่อกำหนดค่า พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแบบจำลองแล้ว ในขั้นตอนนี้ให้โปรแกรมมา ประมวลผลเพื่อหาผลลัพธ์ ซึ่งในโปรแกรมไฟในต์เอลิเมนต์ (Hyper work v.7.0) จะมีคำสั่ง กำหนดให้ Adaptive Meshing ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะว่าในขณะที่ดายเคลื่อนที่กด ชิ้นงานให้เข้าไปในพันซ์ ทำให้เอลิเมนต์บนชิ้นงานมีขนาดเล็กลง และการประมวลผลดังกล่าว แสดงไว้ใน ภาพที่ 3-16

3 C: Documents and Settings VAII Users \Start Menu\Programs \Altair HyperWork	ks 7.0 Altair Hy 💶 🗗 🗙				-	- 6 -
The LS-DYNA time step size should not exceed 8.176E-86 to avoid contact instabilities. If the step size is higger then scale the prenalty of the offending surface.	-				1Step	I Incr
8 t 0.00001.00 dt 0.001.00 fluch i/o buffers					Application	6
initialization completed					Form	Multi
Shun alda lanaufaan H					Trim	Coarse
# nodes on + segment side = 511 max dist = 5.96652E+00 min = # nodes on - segment side = 8 max dist =-1.00000E+10 min =	dist = 7.93808E-02 dist = 1.00000E+10				Sprbk	Grev
Master zide interface 8 6 8 nodez on + zeyment zide - 8 nax dist1.00000E+10 min 4 9 nodez on - zeyment zide - 2305 nax dist = 4.77533E+00 min 4	dist = 1.888888E+18 dist = 4.99997E-82				Model HF 0	AD   FE
ilave side interface # 5 ≣ nodes on + segment side = 43 max dist = 7.87995E+88 min # # nodes on - segment side = 8 max dist1.88888E+18 min #	dist = 4.19208E-01 dist = 1.00000E+10				Geom R-Mesh	Cleanup Mesh
Taster side interface # 5 ≣ nodes on + segment side = 115 max dist = 4.79805E+08 min ( ≇ nodes on - segment side = R max dist =-1.808080E+18 min (	dist = 5.88801E-02 dist = 1.88808E+18				Setup Set	ctions
Slave side interface # 4		<u>\</u>			Mat	terials
nodes on * segment side = 506 max dist = 2.63111E+00 min + i nodes on - segment side = 0 max dist =-1.00000E+10 min +	dist = 5.00347E-02 dist = 1.00000E+10	<u>a</u>			Comps	List_
Masten side intenface # 4		100 A 10			Symmetr	y Plane
<pre># nodes on + segment side = 2000 max dist = 3.057231+00 min +</pre>	dist = 4.999991-82	and the second s			Too	Build
- House on - segment side - O max dist - A. Bobber 10 min t	1214 - 21000002-20	Time and a second	Contraction of the local division of the loc		Tool	Motion
added mass = 0.000000 for minimum dt physical mass = 1.6650E-04		A			Draw	r Load /beads
ratio = 0.00082+00					Cor	ntacts
dt of cycle 1 is controlled by shell element	88	and the second s			Save	Run
time					Results Load	Results
sliding interface energy 8.888881.08					Dis	p Util
eroded kinetic energy		00000	E Dunch In	adcot Di pado	ol DrothDab	User
croded internal energy		tool build	adunced 10	C Mesh	z n	
total energy / initial energy. 1.00000E+00 energy ratio w/o croded energy. 1.00000E+00		tool motion	control cards	C Die	14	1 1 8
global x velocity		tool loads	run analysis	C 1Step	0 1	V 6 8
global z velocity 0.00000E+00		drawbeads	loed result	@ Incr		b view
number of shell elements that		contects		C Util	options	card
reached the minimum time step 8 cpu time per zone cycle		penetration	6		global	help
average cpu time per zone cycle 8 nanoseconds average clock time per zone cycle 5705 nanoseconds	-	i Manadatati i Ka			disp	HE VIN
🚮 Start 🔰 🕄 📢 👔 👘 🗑 united - Park 👘 here Polder (2)		CilDocuments and Se		EN (		<b>IK</b> 2215

**ภาพที่ 3-16** แสดงการประมวลผลของโปรแกรม

3.4.3 แสดงผลลัพธ์การประมวลผล (Post-processing)

ในขั้นตอนเป็นการตรวจสอบผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ในโปรแกรม จะพิจารณาผลของ รอยย่น และความหนาที่เปลี่ยนไป บนชิ้นงานเพื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองจริง แสดงดังภาพ ที่ 3-17 และภาพที่ 3-18



**ภาพที่ 3-17** แสดงค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงโดยโปรแกรม

จากภาพแสดงรูปชิ้นงานที่ความหนาแต่ละบริเวณต่างกันโดยดูจากแถบเทียบความหนา ด้านบนซ้ายของภาพสีน้ำเงินแสดงบริเวณที่บางที่สุดไล่สีไปจนถึงสีแดงเป็นสีที่แสดงบริเวณที่ หนาที่สุด



**ภาพที่ 3-18** แสดงการย่นวิเคราะห์จากโปรแกรม

จากภาพด้านขวาสีน้ำเงินแสดงถึงรอยย่น สีเขียวแสดงส่วนที่ปลอดภัย เส้นสีแดงเป็นเส้น ขีดจำกัดการขึ้นรูป FLC หากค่าความเครียดอยู่เหนือเส้นชิ้นงานจะแตกและเส้นสีเขียวเป็นเส้น แบ่งขอบเขตการย่นหากความเครียดอยู่ใต้เส้นแสดงว่าชิ้นงานจะย่นส่วนภาพด้านซ้ายแสดง บริเวณที่เกิดรอยย่นบนชิ้นงานและบริเวณปลอดภัย

### 3.5 การจำลองการตัดขอบโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

หลังจากได้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วขั้นตอนต่อไปตัดขอบส่วนที่ไม่ต้องการออกเพื่อให้เหลือแต่ ขอบเขตของชิ้นงานจริง แสดงภาพด้านบนและด้านข้างชิ้นงานที่ผ่านการตัดขอบแล้วดังภาพที่ 3-19และภาพที่ 3-20











**ภาพที่3-19** ชิ้นงานที่ผ่านการตัดขอบแล้ว



**ภาพที่3-20** แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปชิ้นงานที่ผ่านการตัดขอบแล้ว

# บทที่ 4 ผลการวิจัย

ผลการวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นโดยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ผู้วิจัย แบ่งผลการวิจัยในการวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นของชิ้นงาน Door Part ของกระบวนการขึ้น รูป ออกเป็น 2 ส่วนคือ

 เปรียบเทียบพฤติกรรมการย่นและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิ เมนต์

 วิเคราะห์พฤติกรรมการย่นจากการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์

4.1 เปรียบเทียบพฤติกรรมการย่นและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิ เมนต์

4.1.1 เปรียบเทียบการย่นของชิ้นงานจากการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากภาพที่ 4-1 พบว่าบริเวณการย่นอยู่ที่บริเวณมุมทั้งสี่ด้านของชิ้นงานจากการทดลอง จริงสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการจำลองด้วยโปรแกรมดัง ภาพด้านบนและด้านข้าง

### จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

#### จากการทดลองจริง





ก) ภาพด้านบน



ข) ภาพด้านข้าง

**ภาพที่ 4-1** เปรียบเทียบการย่นของชิ้นงานจากการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์สีเขียวเป็นส่วนที่ปลอดภัยสีน้ำเงินเป็นบริเวณที่เกิดการย่นโดย ความเร็วในการขึ้นรูป 186 mm/s แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 40,000N รัศดาย2.3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์กับดาย 0.7 mm ดรอว์บีดและพันช์ตามแบบของโรงงาน 4.1.2 เปรียบเทียบความหนาของชิ้นงานจากการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



- **ภาพที่ 4-2** แสดงตำแหน่งที่วัดความหนาของชิ้นงานจากการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- **ตารางที่ 4-1** แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาของชิ้นงานจากการทดลองจริงกับการ วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ ณ ตำแหน่งต่างๆ

	ความหนา (mm)			
ຕົວແທນໄທ		จากการวิเคราะห์		
AI 109 N 1992	จากการทดลองจริง	ด้วยระเบียบวิธีไฟ	ผลต่าง (%)	
		ในต์เอลิเมนต์		
1	0.520 mm	0.539 mm	3.65%	
2	0.557 mm	0.545 mm	-2.15%	
3	0.445 mm	0.465 mm	4.49%	
4	0.510 mm	0.482 mm	-5.49%	

จากตารางที่ 4-1 ภาพที่ 4-2 และภาพที่ 4-3 พบว่าค่าความหนาเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง การทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ตำแหน่งที่ 4 มีค่าความหนา แตกต่างกันมากที่สุด 5.49% ค่าความหนาที่แตกต่างกันน้อยที่สุดที่ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความหนา แตกต่าง 2.15% และค่าความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 3.95%



**ภาพที่ 4-3** แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความหนาของชิ้นงานจากการทดลองจริงกับการ วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์

4.1.3 เปรียบเทียบ Major Strain และ Minor Strain ของชิ้นงานจากการทดลองจริงกับ การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์

ภาพด้านบนจากการทดลองจริง

ภาพด้านบนจากการวิเคราะห์ด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 4-4 แสดงบริเวณที่วัดค่าความเครียดหลักและความเครียดรอง



**ภาพที่ 4-5** แสดงค่าความเครียดของชิ้นงานจากการทดลองจริงบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป จริง



**ภาพที่ 4-6** แสดงค่าความเครียดของชิ้นงานจากการจำลองด้วยโปรแกรมบนแผนภาพขีดจำกัด การขึ้นรูปจากโปรแกรม



**ภาพที่ 4-7** แสดงภาพขยายของภาพที่ 4-5 การกระจายค่าความเครียดจากการทดลองจริง



## **ภาพที่ 4-8** แสดงภาพขยายของภาพที่ 4-6 การกระจายค่าความเครียดจากการจำลองด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากภาพที่ 4-7และ 4-8พบว่าจากการทดลองจริงเปรียบเทียบกับการจำลองด้วย ระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์มีค่าmajor strainสูงสุด 25%และ 27%ตามลำดับ ค่า major strain ต่ำสุดมีค่า 14%และ10% ค่าminor strain สูงสุด 8%และ8% ค่าminor strainต่ำสุด -4%และ-3% จากภาพที่ 4-5ถึง ภาพที่ 4-8พบว่าผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ค่า Major Strain และ Minor Strain โดยกำหนดตำแหน่ง 15ตำแหน่งดังภาพที่ 4-4 มาพลอตลงบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้น รูปที่ได้จากการทดลองจริงและของระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ ค่าที่ได้สอดคล้องกันดัง ภาพที่ 4-5 แสดงค่าความเครียดของชิ้นงานจริงบน Forming limit Diagram จากการทดลองจริงและ ภาพที่ 4-6 แสดงค่าความเครียดของชิ้นงานจริงบน Forming limit Diagram จากระเบียบวิธีไฟ ในต์เอลิเมนต์

เมื่อนำผลลัพธ์แต่ละจุดของค่าความเครียดจริงหลัก และค่าความเครียดจริงรองในภาพที่ 4-7 และภาพที่ 4-8 มาพลอตลงในแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปพบว่าค่าความเครียดจริงหลัก และ ค่าความเครียดจริงรอง มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แสดงว่าการกระจายค่าความเครียดบน แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ของทั้งสองการทดลองใกล้เคียงกันและสามารถนำการวิเคราะห์ ด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ ไปประยุกต์ในการวิเคราะห์การขึ้นรูป แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 เมื่อมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้

จากผลของการเปรียบเทียบค่า True Strain ค่าความแตกต่างมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่า ผลของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันและสามารถนำ การวิเคราะห์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไปประยุกต์ในการหาค่าการปรับพารามิเตอร์อื่นๆได้ ดังต่อไปนี้

- 1. ปรับรัศมีดายเท่ากับ 2, 2.3 และ 3 mm
- 2. แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 15,000, 25,000, 35,000 และ 45,000 N
- 3. ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.70 และ 0.84 mm



ี ภาพที่ 4-9 เปรียบเทียบ Major Strain ของการทดลองจริงกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 4-10 เปรียบเทียบ Minor Strain ของการทดลองจริงกับระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ จากภาพที่ 4-9 และ 4-10 พบว่าค่าMajor Strainและ Minor Strain ของการทดลองจริง เมื่อเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์แล้วมีความสอดคล้องกันค่า Minor Strain ของ การทดลองจริงและระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ช่วงตำแหน่ง1-5 เป็นช่วงที่ค่า Minor Strain มีค่า เป็นลบ หลังจากตำแหน่งที่ 6 จะมีค่าเป็นบวกทั้งการทดลองจริงและระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ ส่วน Major Strain มีค่าเป็นบวกตรอดทุกตำแหน่งทั้งการทดลองจริงและระเบียบวิธีไฟในต์เอลิ เมนต์ ตำแหน่งที่ 8 เป็นตำแหน่งที่สูงที่สุดเช่นเดียวกัน และหลังตำแหน่งที่ 8 ค่า Major Strain ลดลงมาสอดคล้องกัน

## 4.2 วิเคราะห์พฤติกรรมการย่นจากการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้น รูปด้วยระเบียบวิธีไฟไหต์เอลิเมนต์

4.2.1 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นจากการขึ้นรูปชิ้นงานของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม การวิเคราะห์โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อลดรอยย่นบริเวณผิวด้านหลังของชิ้นงาน ตารางที่ 4-2 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการย่นในการขึ้นรูป

ครั้งที่	พารามิเตอร์				
	แรงกดแบลงก์โฮล	รัศมีดาย (mm)	ช่องว่างระหว่างพันช์	(%) รอยย่นทั้งหมด	
	เดอร์ (N)		และดาย (mm)	ของแผ่นแบลงค์หลัง	
				การขึ้นรูป	
1	15,000	2.0	0.7	40.33	
2	15,000	2.3	0.7	40.47	
3	15,000	3.0	0.7	41.11	
4	15,000	2.0	0.84	40.03	
5	15,000	2.3	0.84	40.41	
6	15,000	3.0	0.84	41.82	
7	25,000	2.0	0.7	32.57	
8	25,000	2.3	0.7	32.22	
9	25,000	3.0	0.7	31.56	
10	25,000	2.0	0.84	32.25	
11	25,000	2.3	0.84	30.85	
12	25,000	3.0	0.84	32.11	
13	35,000	2.0	0.7	26.54	
14	35,000	2.3	0.7	27.72	
15	35,000	3.0	0.7	27.73	
16	35,000	2.0	0.84	27.72	
17	35,000	2.3	0.84	26.62	
18	35,000	3.0	0.84	27.95	
19	45,000	2.0	0.7	23.59	
20	45,000	2.3	0.7	23.92	
21	45,000	3.0	0.7	24.66	
22	45,000	2.0	0.84	23.87	
23	45,000	2.3	0.84	23.92	

### ตารางที่ 4-2 (ต่อ)

ครั้งที่	พารามิเตอร์				
	แรงกดแบลงก์โฮล เดอร์ (N)	รัศมีดาย (mm)	ช่องว่างระหว่างพันช์ และดาย (mm)	(%) รอยย่นทั้งหมด ของแผ่นแบลงค์หลัง การขึ้นรูป	
24	45,000	3.0	0.84	24.82	

หมายเหตุ (%) รอยย่นทั้งหมดของแผ่นแบลงค์= <u>พื้นที่รอยย่นทั้งหมดของแผ่นแบลงค์</u> X 100 % หลังการขึ้นรูป พื้นที่ที่ไม่ย่นทั้งหมดของแผ่นแบลงค์



ก) ภาพด้านบน



ข) ภาพด้านข้าง

ค) แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

**ภาพที่ 4-11** แสดงการย่นจากการจำลองชิ้นงานด้วยระเบี<sup>้</sup>ยบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์โดยแรงกด แบลงก์โฮลเดอร์15,000Nรัศมีดาย3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดาย0.7mm จากภาพที่ 4-11 ภาพบนพบว่าชิ้นงานมีการย่นมากบริเวณขอบของชิ้นงาน สีน้ำเงิน แสดงการย่นสีเขียวแสดงส่วนที่ปลอดภัยจากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสีน้ำเงินซึ่งเป็นส่วนที่ แสดงการย่นมีการกระจายตัวกว้างมากภายใต้เส้นแบ่งขอบเขตการย่นเส้นสีเขียวและภาพ ด้านล่างแสดงภาพด้านข้างที่เกิดการย่นโดยดูจากสีน้ำเงินซึ่งเป็นสีที่แสดงการย่น



ก) ภาพด้านบน

ข) ภาพด้านข้าง



ค) แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

**ภาพที่ 4-12** แสดงการย่นจากการจำลองชิ้นงานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยแรงกด แบลงก์โฮลเดอร์45,000Nรัศมีดาย 2 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดาย0.7mm จากภาพที่4-12 พบว่าชิ้นงานมีการย่นน้อยลง

จากการวิเคราะห์โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ พบว่ารอยย่นที่เกิดขึ้น ลดลงเมื่อปรับ ค่าแรงกดของแบลงก์โฮลเดอร์เพิ่มขึ้นถึง 45,000N แต่จะทำให้ชิ้นงานบางลงเฉพาะแห่งและมี แนวโน้มที่จะแตก ค่าเปอร์เซนรอยย่นที่น้อยที่สุดของแบลงค์อยู่ที่ 23.59% แสดงดังภาพที่ 4-12 สีน้ำเงินแสดงการย่นสีเขียวแสดงส่วนที่ปลอดภัยจากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสีน้ำเงินจะมี การกระจายตัวน้อยลงเมื่อเพิ่มแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 4.2.2 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นและความหนาจากการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้ แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์



**ภาพที่ 4-13** แสดงบริเวณที่เกิดการย่น



**ภาพที่ 4-14** แสดงจุดวิกฤตของการขึ้นรูปที่มีความหนาลดลง

ภาพที่ 4-13 และภาพที่ 4-14 แสดงบริเวณที่เกิดการย่นและจุดวิกฤตของการขึ้นรูปที่มี ความหนาลดลงที่ใช้ในการศึกษาแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป



ภาพที่ 4-15 แสดงจุดวิกฤตของการขึ้นรูปที่มีความหนาลดลงเมื่อมีการปรับแรงกดแบลงก์ โฮลเดอร์และรัศมีดายโดยค่าช่องว่างระหว่างพันช์และดายคงที่เท่ากับ 0.7 mm (15,000N d2 หมายความว่าแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 15,000นิวตัน รัศมีดาย 2 มิลลิเมตร)



**ภาพที่ 4-16** แสดงจุดวิกฤตของการขึ้นรูปที่มีความหนาลดลงเมื่อมีการปรับแรงกดแบลงก์ โฮลเดอร์และรัศมีดายโดยค่าช่องว่างระหว่างพันช์และดายคงที่เท่ากับ 0.84 mm



**ภาพที่ 4-17** ขยายภาพที่ 4-15 ค่าความเครียดและทิศทางของจุดวิกฤตของการขึ้นรูปที่มี ความหนาลดลงเมื่อมีการปรับแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์และรัศมีดายโดยค่าช่อง ว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7 mm

พิจารณาที่รัศมีดาย 2 mm เมื่อให้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 15,000N และ 25,000N ตามลำดับพบว่า ค่า Major Strain มีค่าเพิ่มขึ้นส่วนค่า Minor Strain มีค่าลดลงเล็กน้อย และเมื่อ เพิ่มแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์เป็น 35,000N และ 45,000N ตามลำดับพบว่าทั้งค่า Major Strain และ Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้นต่อเนื่องตามลำดับ

พิจารณาที่รัศมีดาย 2.3 mm เมื่อให้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 15,000N, 25,000N, 35,000N และ 45,000N ตามลำดับ พบว่าค่า Major Strain และ Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้นอย่าง ต่อเนื่องตามลำดับ

พิจารณาที่รัศมีดาย 3 mm เมื่อให้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 15,000N และ 25,000N ตามลำดับพบว่า ค่า Major Strain มีค่าเพิ่มขึ้นส่วนค่า Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อ ให้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 35,000N พบว่า ค่า Major Strain มีค่าเพิ่มขึ้นส่วนค่า Minor Strain มีค่าลดลง และเมื่อให้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์45,000N พบว่าค่าค่า Major Strain มีค่าเพิ่มขึ้น เล็กน้อย ส่วนค่า Minor Strain สูงขึ้น

จากภาพ4-17 พบว่าแนวโน้มส่วนใหญ่เมื่อเพิ่มแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ตำแหน่งที่1,2,3,4 ดายรัศมี 2 mm ตำแหน่ง ก,ข,ค,ง ดายรัศมี 2.3 mm และตำแหน่ง A,B,C,D ดายรัศมี 3 mm พลอตในแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปมีแนวโน้มสูงขึ้นไปทางด้านขวาของแผนภาพและเมื่อ เทียบแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ที่เท่ากันพบว่าค่ารัศมีดาย 2 mm มีค่า Major Strain สูงกว่าค่าอื่น



**ภาพที่ 4-18** ขยายภาพที่ 4-16 ค่าความเครียดและทิศทางของจุดวิกฤตของการขึ้นรูปที่มี ความหนาลดลงเมื่อมีการปรับแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์และรัศมีดายโดยค่าช่อง ว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm

พิจารณาที่รัศมีดาย 2 mm เมื่อให้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 15,000N, 25,000N, 35,000N และ 45,000N ตามลำดับ พบว่าค่า Major Strain และ Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตามลำดับ

พิจารณาที่รัศมีดาย 2.3 mm เมื่อให้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 15,000N, 25,000N, พบว่า ค่า Major Strain และ Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้นและแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์35,000N ค่า Major Strain มีค่าลดลง Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้นและ45,000N Major Strain และ Minor Strainมีค่า เพิ่มขึ้น

พิจารณาที่รัศมีดาย 3 mm เมื่อให้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 15,000N, 25,000N, 35,000N พบว่าค่า Major Strain และ Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้นและแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 45,000N ค่า Major Strain มีค่าเพิ่มขึ้นและค่า Minor Strain มีค่าลดลง

จากภาพ4-18 พบว่าแนวโน้มส่วนใหญ่เมื่อเพิ่มแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ตำแหน่งที่1,2,3,4 ดายรัศมี 2 mm ตำแหน่ง ก,ข,ค,ง ดายรัศมี 2.3 mm และตำแหน่ง A,B,C,D ดายรัศมี 3 mm พลอตในแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปมีแนวโน้มสูงขึ้นไปทางด้านขวาของแผนภาพและเมื่อ เทียบแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ที่เท่ากันพบว่าค่ารัศมีดาย 2 mm มีค่า Major Strain สูงกว่าค่าอื่น



**ภาพที่ 4-19** แสดงบริเวณที่เกิดรอยย่นเมื่อมีการปรับแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์และรัศมีดายโดย ค่าช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7 mm



**ภาพที่ 4-20** แสดงบริเวณที่เกิดรอยย่นเมื่อมีการปรับแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์และรัศมีดายโดย ค่าช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm



**ภาพที่ 4-21** ขยายภาพที่ 4-19 แสดงค่าความเครียดและทิศทางของบริเวณที่เกิดรอยย่นเมื่อ ปรับแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์และรัศมีดายโดยค่าช่องว่างระหว่างพันช์กับดายเท่ากับ 0.7 mm

พิจารณาที่รัศมีดาย 2 mm เมื่อให้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 15,000N, 25,000N ค่าMajor Strain และ Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มแรงถึง 35,000Nและ45,000N ค่า Major Strain มีค่าลดลง Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้น

พิจารณาที่รัศมีดาย 2.3 mm เมื่อให้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 15,000N, 25,000N,และ 35,000N พบว่าค่า Major Strain และ Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้น และแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 45,000N Major Strain มีค่าลดลง Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้น

พิจารณาที่รัศมีดาย 3 mm เมื่อให้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 15,000N, 25,000N, 35,000N พบว่าค่า Major Strain และ Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้น และให้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 45,000N ค่า Major Strain มีค่าลดลง Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้น

จากภาพ4-21 พบว่าแนวโน้มส่วนใหญ่เมื่อเพิ่มแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ตำแหน่งที่1,2,3,4 ดายรัศมี 2 mm ตำแหน่ง ก,ข,ค,ง ดายรัศมี 2.3 mm และตำแหน่ง A,B,C,D ดายรัศมี 3 mm พลอตในแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปมีแนวโน้มสูงขึ้นและลดลงไปทางด้านขวาของแผนภาพ และที่แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 15,000N ค่าความเครียดที่พลอตในแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปมี ค่าต่ำกว่าเส้นแบ่งขอบเขตการย่นเส้นสีเขียวและเมื่อเพิ่มแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์พบว่าค่า ความเครียดอยู่ในบริเวณที่ปลอดภัย



**ภาพที่ 4-22** ขยายภาพที่ 4-20 แสดงค่าความเครียดและทิศทางของบริเวณที่เกิดรอยย่นเมื่อ ปรับแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์และรัศมีดายโดยค่าช่องว่างระหว่างพันช์กับดายเท่ากับ 0.84 mm

พิจารณาที่รัศมีดาย 2 mm เมื่อให้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 15,000N, 25,000N ค่าMajor Strain และ Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มแรงถึง 35,000Nและ45,000N ค่า Major Strain มีค่าลดลง Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้น

พิจารณาที่รัศมีดาย 2.3 mm เมื่อให้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 15,000N, 25,000N พบว่าค่า Major Strain และ Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้น และ 35,000N พบว่าค่า Major Strain มีค่าลดลง และ Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้น และแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 45,000N Major Strain และ Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้น

พิจารณาที่รัศมีดาย 3 mm เมื่อให้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 15,000N, 25,000N, 35,000N พบว่าค่า Major Strain และ Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้น และให้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 45,000N ค่า Major Strain มีค่าลดลง Minor Strain มีค่าเพิ่มขึ้น

จากภาพ 4-22 พบว่าแนวโน้มส่วนใหญ่เมื่อเพิ่มแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ตำแหน่งที่1,2,3,4 ดายรัศมี 2 mm ตำแหน่ง ก,ข,ค,ง ดายรัศมี 2.3 mm และตำแหน่ง A,B,C,D ดายรัศมี 3 mm พลอตในแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปมีแนวโน้มสูงขึ้นและลดลงไปทางด้านขวาของแผนภาพ และที่แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 15,000N ค่าความเครียดที่พลอตในแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปมี ค่าต่ำกว่าเส้นแบ่งขอบเขตการย่นเส้นสีเขียวและเมื่อเพิ่มแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์พบว่าค่า ความเครียดอยู่ในบริเวณที่ปลอดภัย จากการวิเคราะห์พบว่าจุดวิกฤตของการขึ้นรูปคือบริเวณที่มีความหนาลดลงมากที่สุดคือ จุดที่บริเวณกันชิ้นงาน เมื่อเอาค่าความเครียดบริเวณดังกล่าวมาพลอตลงบนแผนภาพขีดจำกัด การขึ้นรูปดังภาพที่ 4-15 พบว่าเมื่อแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์เพิ่มขึ้น บริเวณที่มีความหนาลดลง และค่าความเครียดที่มีความหนาลดลงเป็นค่าวิกฤต เกิดขึ้นใกล้บริเวณความเสียหายมากขึ้น หรือเรียกว่า บริเวณเริ่มเกิดการคอด เมื่อปรับค่าช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm ค่าวิกฤตที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ดังภาพที่ 4-16

จากผลลัพธ์ของบริเวณที่เกิดรอยย่นเมื่อปรับค่าแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ ดังภาพที่ 4-19 พบว่าเมื่อปรับค่าแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ มีผลให้บริเวณที่เกิดรอยย่นมีค่าลดลง และเมื่อปรับ แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 45,000 N และ ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7 mm บริเวณที่เกิดรอยย่นหมดไป และเมื่อปรับค่า ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm ผล ของบริเวณที่เกิดรอยย่นมีค่าต่างกัน เล็กน้อย ดังภาพที่ 4-20

จากการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลกับการขึ้นรูปของงานวิจัยนี้พบว่า แรงกดแบลก์ โฮลเดอร์มีผลมากในการทำให้รอยย่นลดลง และผลของรัศมีดายและช่องว่างระหว่างพันช์และ ดาย มีผลกับรอยย่นเล็กน้อย และความหนาบริเวณจุดวิกฤตจะลดลงเมื่อปรับค่าแรงกดแบลงก์ โฮลเดอร์มาก

4.2.3 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นจากการขึ้นรูปชิ้นงานหลังจากตัดขอบ
ตารางที่ 4-3 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการย่นในการขึ้นรูปของชิ้นงานที่ตัดขอบแล้ว

ครั้งที่	พารามิเตอร์					
	แรงกดแบลงก์โฮล	รัศมีดาย (mm)	ช่องว่างระหว่างพันช์	(%) รอยย่นทั้งหมด		
	เดอร์ (N)		และดาย (mm)	ของชิ้นงาน		
1	35,000	2.0	0.7	11.03		
2	45,000	2.0	0.7	6.81		
3	45,000	2.0	0.84	9.51		
4	45,000	2.3	0.7	9.22		
5	45,000	3.0	0.7	9.85		
6	45,000	3.0	0.84	9.70		

จากตารางที่ 4-3 วิเคราะห์โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ พบว่ารอยย่นที่เกิดขึ้น ลด น้อยที่สุดเมื่อปรับค่าแรงกดของแบลงก์โฮลเดอร์เพิ่มขึ้นถึง 45,000N รัศมีดาย 2.0 mm ช่องว่าง ระหว่างพันช์และดาย 0.7 mm ค่าเปอร์เซนการย่นที่น้อยที่สุดอยู่ที่ 6.81%









ค) แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

**ภาพที่4-23** แสดงภาพชิ้นงานที่ตัดขอบแล้ว พารามิเตอร์ที่ใช้คือแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 35,000Nรัศมีดาย 2 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดาย 0.7mm

จากภาพที่ 4-23 ภาพด้านบน ก) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงานสีน้ำเงินแสดงถึงบริเวณที่ เกิดรอยย่นของชิ้นงานตรงบริเวณขอบของชิ้นงานส่วนสีเขียวแสดงถึงบริเวณที่ปลอดภัยส่วน ภาพด้านขวา ข) เป็นภาพด้านข้างของชิ้นงานและภาพด้านล่าง ค) แสดงแผนภาพขีดจำกัดการ ขึ้นรูปสีเขียวแสดงบริเวณที่ปลอดภัยส่วนสีน้ำเงินแสดงบริเวณที่เกิดการย่นเส้นสีเขียวเป็นเส้น แบ่งขอบเขตการย่นจาก การวิเคราะห์พบว่ารอยย่นของชิ้นงานเหลือ 11.03%





**ภาพที่4-24** แสดงภาพชิ้นงานที่ตัดขอบแล้วพารามิเตอร์ที่ใช้คือแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 45,000Nรัศมีดาย 2 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดาย 0.7mm

จากภาพที่ 4-24 ภาพด้านบน ก) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงานสีน้ำเงินแสดงถึงบริเวณที่ เกิดรอยย่นของชิ้นงานตรงบริเวณขอบของชิ้นงานส่วนสีเขียวแสดงถึงบริเวณที่ปลอดภัยส่วน ภาพด้านขวา ข) เป็นภาพด้านข้างของชิ้นงานและภาพด้านล่าง ค) แสดงแผนภาพขีดจำกัดการ ขึ้นรูปสีเขียวแสดงบริเวณที่ปลอดภัยส่วนสีน้ำเงินแสดงบริเวณที่เกิดการย่นเส้นสีเขียวเป็นเส้น แบ่งขอบเขตการย่นจาก การวิเคราะห์พบว่ารอยย่นของชิ้นงานเหลือ 6.81%



ก) ภาพด้านบน





ค) แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

## **ภาพที่4-25** แสดงภาพชิ้นงานที่ตัดขอบแล้ว พารามิเตอร์ที่ใช้คือแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 45,000Nรัศมีดาย2 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดาย0.84mm

จากภาพที่ 4-25 ภาพด้านบน ก) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงานสีน้ำเงินแสดงถึงบริเวณที่ เกิดรอยย่นของชิ้นงานตรงบริเวณขอบของชิ้นงานส่วนสีเขียวแสดงถึงบริเวณที่ปลอดภัยส่วน ภาพด้านขวา ข) เป็นภาพด้านข้างของชิ้นงานและภาพด้านล่าง ค) แสดงแผนภาพขีดจำกัดการ ขึ้นรูปสีเขียวแสดงบริเวณที่ปลอดภัยส่วนสีน้ำเงินแสดงบริเวณที่เกิดการย่นเส้นสีเขียวเป็นเส้น แบ่งขอบเขตการย่นจาก การวิเคราะห์พบว่ารอยย่นของชิ้นงานเหลือ 9.51%







ข) ภาพด้านข้าง

ค) แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

ภาพที่4-26 แสดงภาพชิ้นงานที่ตัดขอบแล้ว พารามิเตอร์ที่ใช้คือแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 45,000Nรัศมีดาย2.3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดาย0.7mm

จากภาพที่ 4-26 ภาพด้านบน ก) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงานสีน้ำเงินแสดงถึงบริเวณที่ เกิดรอยย่นของชิ้นงานตรงบริเวณขอบของชิ้นงานส่วนสีเขียวแสดงถึงบริเวณที่ปลอดภัยส่วน ภาพด้านขวา ข) เป็นภาพด้านข้างของชิ้นงานและภาพด้านล่าง ค) แสดงแผนภาพขีดจำกัดการ ขึ้นรูปสีเขียวแสดงบริเวณที่ปลอดภัยส่วนสีน้ำเงินแสดงบริเวณที่เกิดการย่นเส้นสีเขียวเป็นเส้น แบ่งขอบเขตการย่นจาก การวิเคราะห์พบว่ารอยย่นของชิ้นงานเหลือ 9.22%





ก) ภาพด้านบน



ค) แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

**ภาพที่4-27** แสดงภาพชิ้นงานที่ตัดขอบแล้ว พารามิเตอร์ที่ใช้คือแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 45,000Nรัศมีดาย 3 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดาย 0.7mm

จากภาพที่ 4-27 ภาพด้านบน ก) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงานสีน้ำเงินแสดงถึงบริเวณที่ เกิดรอยย่นของชิ้นงานตรงบริเวณขอบของชิ้นงานส่วนสีเขียวแสดงถึงบริเวณที่ปลอดภัยส่วน ภาพด้านขวา ข) เป็นภาพด้านข้างของชิ้นงานและภาพด้านล่าง ค) แสดงแผนภาพขีดจำกัดการ ขึ้นรูปสีเขียวแสดงบริเวณที่ปลอดภัยส่วนสีน้ำเงินแสดงบริเวณที่เกิดการย่นเส้นสีเขียวเป็นเส้น แบ่งขอบเขตการย่นจาก การวิเคราะห์พบว่ารอยย่นของชิ้นงานเหลือ 9.85%









ค) แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป



จากภาพที่ 4-28 ภาพด้านบน ก) แสดงภาพด้านบนของชิ้นงานสีน้ำเงินแสดงถึงบริเวณที่ เกิดรอยย่นของชิ้นงานตรงบริเวณขอบของชิ้นงานส่วนสีเขียวแสดงถึงบริเวณที่ปลอดภัยส่วน ภาพด้านขวา ข) เป็นภาพด้านข้างของชิ้นงานและภาพด้านล่าง ค) แสดงแผนภาพขีดจำกัดการ ขึ้นรูปสีเขียวแสดงบริเวณที่ปลอดภัยส่วนสีน้ำเงินแสดงบริเวณที่เกิดการย่นเส้นสีเขียวเป็นเส้น แบ่งขอบเขตการย่นจาก การวิเคราะห์พบว่ารอยย่นของชิ้นงานเหลือ 9.70%
# บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการย่นและการขึ้นรูป ชิ้นงานจริงกับระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ และวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นจากการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ โดยชิ้นงานสำหรับการวิจัย นี้คือ Door Part ซึ่งเป็นชิ้นส่วนยานยนต์ ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หนา 0.6 mm. พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการย่นสำหรับการวิจัยนี้คือ ความเร็วในการขึ้นรูป รัศมีดาย แรงกดของ แบลงก์โฮลเดอร์ และช่องว่างระหว่างพันช์กับดาย ใช้เครื่องเพรสขนาด 300 Tons ในการขึ้นรูป และใช้โปรแกรม Hyper Work v.7.0 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

5.1 สรุป

5.1.1 เปรียบเทียบพฤติกรรมการย่นและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิ เมนต์

5.1.1.1 เปรียบเทียบพฤติกรรมการย่นและการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับระเบียบวิธีไฟ ในต์เอลิเมนต์พบว่าพบว่ามีพฤติกรรมการย่นสอดคล้องกัน

5.1.1.2 การวิเคราะห์หาค่า True Strain บนชิ้นงานกระจายอยู่บนขีดจำกัดการ ขึ้นรูป เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นำมา เปรียบเทียบกับการทดลองจริง มีการกระจายตัวใกล้เคียงกัน

5.1.1.3 การวิเคราะห์หาค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ นำมาเปรียบเทียบกับการทดลองจริง บริเวณที่วัด ความหนา 4 จุด มีค่าใกล้เคียงกัน มีเปอร์เซนต์เฉลี่ยแตกต่างกัน 3.95%

5.1.2 วิเคราะห์พฤติกรรมการย่นจากการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้น รูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

5.1.2.1 เกิดรอยย่นมากที่สุดแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 15,000 N

5.1.2.2 เกิดรอยย่นน้อยที่สุดที่แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์ 45,000 N รัศมีดาย 2 mm ค่าช่องว่างระหว่างพันช์และดาย 0.7 mm รอยย่นของแผ่นแบลงค์เหลือ 23.59 % หลังจากตัด ขอบแล้วเหลือ 6.81%

5.1.2.3 การปรับค่ารัศมีดาย และช่องว่างระหว่างพันช์และดาย มีผลกับรอยย่น เล็กน้อย

#### 5.2 อภิปรายผล

จากผลการวิเคราะห์รอยย่นด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบผลกับการทดลอง จริง พบว่าผลลัพธ์ที่ได้ พฤติกรรมการยืดตัวของกริดวงกลมบนชิ้นงานตำแหน่งที่กำหนดไว้ ทั้งหมด 15 ตำแหน่ง มีแนวโน้มสอดคล้องกัน และการวิเคราะห์หาค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ นำมาเปรียบเทียบกับ การทดลองจริง บริเวณที่วัดความหนา 4 จุด มีค่าใกล้เคียงกัน มีเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยแตกต่างกัน 3.95% ซึ่งยอมรับได้ในการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้ในการจำลองการ ขึ้นรูป และปรับพารามิเตอร์ต่างๆ

บริเวณที่บางที่สุดเป็นบริเวณกันถ้วยสาเหตเพราะเป็นจุดที่มีการขึ้นรูปลึกมากที่สุดเนื้อ วัสดุเกินการไหลตัวเป็นจุดแรก

เมื่อเพิ่มแรงกดแบลงก์โฮลเดอร์พบว่ารอยย่นลดน้อยลงเพราะแผ่นจับยึดชิ้นงานโดยรอบ เกิดแรงกดเกิดความเค้นสูงจึงทำให้วัสดุไหลช้าทำให้รอยย่นลดน้อยลง

#### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ข้อเสนอแนะทั่วไป

5.3.1.1 การจำลองการขึ้นรูปด้วยไฟในต์เอลิเมนต์ ให้มีความถูกต้องผู้ใช้ควรมี ความรู้เรื่องกระบวนการขึ้นรูปโลหะ สภาพการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุ จึงสามารถใช้โปรแกรม ได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

5.3.1.2 ผลลัพธ์จากการจำลองการขึ้นรูปโลหะ ด้วยไฟในต์เอลิเมนต์จะมีความ แม่นยำยิ่งขึ้น ผู้ใช้ต้องเข้าใจลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมอย่างดี ความรู้เกี่ยวกับ ทฤษฎีของไฟในต์เอลิเมนต์ การกำหนดขนาดเอลิเมนต์ และความเหมาะสมของโปรแกรมใน กระบวนการขึ้นรูปต่างๆ

5.3.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัย

5.3.2.1 ควรมีการศึกษาค่าความเสียดทานที่นำมาใช้ในโปรแกรม

5.3.2.2 ควรมีการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

## เอกสารอ้างอิง

- กิตติภัฏ รัตนจันทร์. <u>ผลกระทบจากดรอว์บีดในการขึ้นรูปโลหะแผ่น</u>. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าพระนครเหนือ, 2542.
- คมสันต์ งามขำ. <u>ขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติกSUS 304จากการ</u> <u>เปลี่ยนความหนา</u>.ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2549.
- เดช พุทธเจริญทอง. <u>ทฤษฎีพลาสติชิตีและการเปลี่ยนรูปถาวร</u>. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์ส่งเสริมกรุงเทพ, 2548. 9-93-9-94
- ชาญ ถนัดงาน. <u>เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะพื้นฐานและการขึ้นรูปโลหะแผ่น</u>. ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ 2547.
- 5. ชาญ ถนัดงาน. <u>เอกสารประกอบการสอน วิชา Metal Forming Theory</u>. ภาควิชาวิศวกรรม การผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ,2549.
- พนา แช่มสวัสดิ์. <u>การแก้ปัญหารอยย่นในงานขึ้นรูปถ้วยที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม</u>
  วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2541.
- สวัสดิ์ โสดามุข. <u>การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพ</u> <u>ขีดจำกัดการขึ้นรูป</u>. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2549.
- สามารถ แช่มคำ. <u>การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปถาดอลูมิเนียมโดยใช้การ</u> <u>วิเคราะห์ไฟในต์เอลิเมนต์</u>. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรม เครื่องมือและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546.
- 9. Antonio, F. A. "Proposing a better forming limit diagram prediction comparative Study" <u>Journal of Materials Processing Technology</u>, 141 (2003) 101-108.

- B. Logue. "Side-wall thickness in draw die forming" <u>Journal of Materials Processing</u> Technology. 182 (2007) :191-194.
- Haroldo, B. Campos. "Theorical and experimental determination of the forminglimit diagram for the AISI 304 stainless steel" <u>Journal of Materials Processing</u> <u>Technology</u>. 179 (2006) : 56–60.
- H. Takuda, et al. "Finite element Analysis of the Formability of an austenitic stainless sheet in warm deep drawing" <u>Journal of Materials Processing</u> Technology. 162 (2003): 143-144.
- 13. Mitsutoshi, Kuroda. "Forming limit diagrams for anisotropic metal sheets with different yield criteria" <u>International Journal of Solids and Structures</u>. 37 (2000) : 5037-5059.
- 14. P. A. Friedman. "Effects of plastic anisotropy and yield criteria prediction of forming limit curves International" <u>Journal of Mechanical Sciences</u>. 42 (2000) : 29-48.
- T. C. Hsu and I. R. Shien. "Finite Element Modeling of Sheet Foming Process with Bending Effects."Journal of Materials Processing Technology. 63, (1997) 733-737.
- 16. T. Meinders, et al. "The Implementation of an Equivalent Drawbead Model in a Finite Element Code for Sheet MetalForming."<u>Journal of Materials Processing</u> <u>Technology</u>.65,(1998) 234-244.
- Z. Tourki. "The kinetic of induced martensitic formation and its effect on forming limit curves in the AISI 304 stainless steel" <u>Journal of Materials Processing</u> <u>Technology</u>. 166 (2005) : 330–336.

ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการสร้างกริดวงกลมบนแผ่นชิ้นงาน

### ขั้นตอนการสร้างกริดวงกลมบนแผ่นชิ้นงาน

- 1. ใช้น้ำยาล้างทำความสะอาดชิ้นทดสอบเพื่อกำจัดคราบน้ำมันคราบสกปรก
- 2. นำชิ้นทดสอบมาวางบนแผ่นรองที่ต่อพ่วงกับขั้วลบอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า
- 3. นำแผ่นกรองกรดกัด(Stencils)มาวางทับซ้อนชิ้นงาน
- นำผ้าสักหลาดมาชุบน้ำยากรดกัดสูตร LNC-2 Electrolyte สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมAISI
  304วางทับแผ่นกรองกัด
- 5. เปิดสวิตช์อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าให้จ่ายขั้วบวกต่อกับลูกกลิ้ง(Lectroetch Roller Marker)และนำ ลูกกลิ้ง กลิ้งทับจนทั่วแผ่นจึงได้กริดวงกลมตามขนาดของแผ่นกรองกรด



**ภาพที่ ก-1** แผ่นกรองกัด (Stencils)



ภาพที่ ก-2 น้ำยากรดกัด LNC-2 Electrolyte



**ภาพที่ ก-3** อุปกรณ์สร้างกระแสไฟฟ้า Lectroecth power unit



**ภาพที่ ก-4** ภาพแสดงผ้าสักหลาดกับลูกกลิ้ง



**ภาพที่ ก-5** ภาพแสดงแผ่นชิ้นงานที่กัดกริดแล้ว

ภาคผนวก ข

แสดงรอยย่นบนชิ้นงาน และแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป



**ภาพที่ ข-1** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 15,000 N รัศมีดายเท่ากับ 2.0 mm ช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7mm



**ภาพที่ ข-2** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 25,000 N รัศมีดายเท่ากับ 2.0 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7mm



**ภาพที่ ข-3** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 35,000 N รัศมีดายเท่ากับ 2.0 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7mm



**ภาพที่ ข-4** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 45,000 N รัศมีดายเท่ากับ 2.0 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7 mm



**ภาพที่ ข-5** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 15,000 N รัศมีดายเท่ากับ 2.3 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84mm



**ภาพที่ ข-6** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 25,000 N รัศมีดายเท่ากับ 2.3 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7mm



**ภาพที่ ข-7** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 35,000 N รัศมีดายเท่ากับ 2.3 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7mm



**ภาพที่ ข-8** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 45,000 N รัศมีดายเท่ากับ 2.3 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7mm



**ภาพที่ ข-9** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 15,000 N รัศมีดายเท่ากับ 3.0 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7mm



**ภาพที่ ข-10** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 25,000 N รัศมีดายเท่ากับ 3.0 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7 mm



**ภาพที่ ข-11** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 35,000 N รัศมีดายเท่ากับ 3.0 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7 mm



**ภาพที่ ข-12** แสดงนบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 45,000 N รัศมีดายเท่ากับ 3.0 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.7 mm



**ภาพที่ ข-13** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 15,000 N รัศมีดายเท่ากับ 2.0 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84mm



**ภาพที่ ข-14** สดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 25,000 N รัศมีดายเท่ากับ 2.0 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84mm



**ภาพที่ ข-15** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 35,000 N รัศมีดายเท่ากับ 2.0 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84mm



**ภาพที่ ข-16** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 45,000 N รัศมีดายเท่ากับ 2.0 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm



**ภาพที่ ข-17** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 15,000 N รัศมีดายเท่ากับ 2.3 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm



**ภาพที่ ข-18** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 25,000 N รัศมีดายเท่ากับ 2.3 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84mm



**ภาพที่ ข-19** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 35,000 N รัศมีดายเท่ากับ 2.3 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84mm



**ภาพที่ ข-20** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 45,000 N รัศมีดายเท่ากับ 2.3 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84mm



**ภาพที่ ข-21** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 15,000 N รัศมีดายเท่ากับ 3.0 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84mm



**ภาพที่ ข-22** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 25,000 N รัศมีดายเท่ากับ 3.0 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm



**ภาพที่ ข-23** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 35,000 N รัศมีดายเท่ากับ 3.0 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm



**ภาพที่ ข-24** แสดงรอยย่นบนชิ้นงานแรงแบลงก์โฮลเดอร์เท่ากับ 45,000 N รัศมีดายเท่ากับ 3.0 mm และช่องว่างระหว่างพันช์และดายเท่ากับ 0.84 mm

### ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	:	นายชัยยศ บูรณะชีพ
ชื่อวิทยานิพนธ์	:	การวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นโดยใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป
สาขาวิชา	:	วิศวกรรมการผลิต

```
ประวัติ
```

ปัจจุบันอาศัยอยู่ที่ บ้านเลขที่ 2 หมู่11 ตำบลบ้านเลน อำเภอบางปะอิน จังหวัด พระนครศรีอยุธยา เป็นบุตรของ นายชูพล บูรณะชีพ และนางอุบล บูรณะชีพ ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษา ระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนวัดชุมพลนิกายาราม ้สำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมตอนต้นจากโรงเรียน" ราชานุเคราะห์๑" ้สำเร็จการศึกษา ระดับประกาศนี้ยบัตรวิชาชีพวิทยาลัยเทคนิคพระนครศรีอยุธยา ้สำเร็จการศึกษา ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างกลโรงงาน(MM) วิทยาลัย เทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ้สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต(PDT) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประวัติการทำงาน ปัจจุบันทำงานที่ บริษัท ที จี เอส โซซิเอท 2/1 หมู่11 ตำบล บ้านเลน อำเภอบางปะอิน ้จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 2545-2549 เบอร์โทรติดต่อ (035) 261-003 , (035) 261-501 สถานที่ติดต่อ ้บ้านเลขที่ 2 หมู่11 ตำบลบ้านเลน อำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13160 เบอร์โทรติดต่อ (035) 261501 ,081-855-2979 , 087-992-3720