

การวิเคราะห์การดีดกลับในการตัดงอรูปตัววีของแผ่นโลหะสแตนเลส
JIS SUS430

AN ANALYSIS OF SPRINGBACK IN V-DIE BENDING OF JIS SUS430 STAINLESS
SHEET

กฤชพล ประภาพันธุ์
KITCHAPOL PRAPAPAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-M-030-059

การวิเคราะห์การดีดกลับในการดัดงอรูปตัววีของแผ่นโลหะสแตนเลส
JIS SUS430

AN ANALYSIS OF SPRINGBACK IN V-DIE BENDING OF JIS SUS430 STAINLESS
SHEET



กฤษฎพล ประภาพันธุ์
KITCHAPOL PRAPAPAN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **139421**
วันเดือนปี..... **๒-3 ๓๓๕ 2558**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-M-030-059

AN ANALYSIS OF SPRINGBACK IN V-DIE BENDING OF JIS SUS430 STAINLESS
SHEET

KITCHAPOL PRAPAPAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015
KMITL-2015-EN-M-030-059

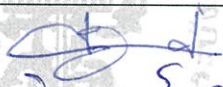



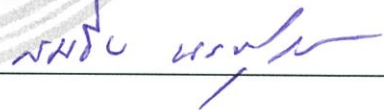
COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์การตีกลับในการดัดงอรูปตัววีของแผ่นโลหะสแตนเลส JIS SUS430
Thesis Title An Analysis of Springback in V-Die Bending of JIS SUS430 Stainless Sheet
นักศึกษา นายฤชพล ประภาพันธุ์
รหัสประจำตัว 53610611
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-030-059

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.บำรุง	พ่วงเกิด	
ดร.จิตราภรณ์	วงศางาม	
ผศ.ดร.ฐิตะพล	หุยนันท์	
ดร.มธุรส	สุชาติวัฒน	
รศ.ดร.สมชัย	นรเศรษฐ์โสภณ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 6 พฤษภาคม พ.ศ. 2558 เวลา 09.30-11.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 6 พฤษภาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์การติดกลับในการดัดงอรูปตัววีของแผ่นโลหะแตนเลส JIS SUS430
นักศึกษา	นายกฤษพล ประภาพันธ์
รหัสประจำตัว	53610611
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ เพื่อศึกษาการติดตัวกลับหลังจากที่เอาภาระออกและเสนอแนวทางในการปรับแก้มุมดัดเพื่อให้ได้ค่ามุมที่ถูกต้อง ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์การติดตัวกลับของแผ่นสแตนเลส JIS SUS430 กับขนาดของ 15x40x1.5 มิลลิเมตร โดยทำการกดดัดอยู่ที่มุม 0, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา กับแนวรีดโดยใช้รัศมีของพื้นซ์ 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร โดยการวิเคราะห์ความเครียดในระนาบเพื่อหาค่าการติดตัวกลับและนำผลที่ได้จากการทดลองนำมาเปรียบเทียบการติดตัวกลับที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์กับผลที่ได้จากการทดลอง ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแผ่นสแตนเลส JIS SUS430 ในทิศทางทำมุมต่างๆ กับแนวรีด รัศมีปลายพื้นซ์ มุมของการดัด ค่ามุมภายหลังการติดตัวกลับ และมุมปรับแก้ไขเพื่อชดเชยค่ามุมติดตัวกลับ

จากการวิจัยพบว่า มุมติดตัวกลับของวัสดุแผ่นสแตนเลส JIS SUS430 มีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของรัศมีปลายพื้นซ์

Thesis Title	An Analysis of Springback in V-Die Bending of JIS SUS430 Stainless Sheet
Student	Mr.Kitchapol Prapapan
Student ID.	53610611
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Somchai Norasethasopon

ABSTRACT

Objectives of this research were study springback after unloaded of V-bending and introduce method of adjusting bended angles in order obtain accurate angle. For this reason, this research has focused on the analysis of springback of stainless sheets JIS SUS430 with the dimensions of 15x40x1.5 mm. The stainless sheets were formed at the angles of 0, 15, 30, 45, 60, 75 and 90 degrees to the rolling direction with radius of punch are 2, 3, 4 and 5 mm. By analyzing the stress in plane to find the springback of stainless sheet was comparisons of the springback between results obtained from mathematics calculation and experiments ones. Variables investigated consisted of the mechanical properties of stainless steel JIS SUS430 in various directions of the angles with rolling line, ended punch radius, the bended angles after the springback, and the adjusted angles to compensate the springback angles.

The results revealed that the springback angle of stainless steel SUS 430 plate increased significantly with an increase in the ended punch radius.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็น ที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอด ประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

กฤษพล ประภาพันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VIII
รายการและคำย่อและสัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ความคาดหวังจากการทดลอง.....	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดในงานวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
บทที่ 3 กระบวนการตัดชิ้นรูป.....	10
3.1 ทฤษฎีการตัดรูปตัววี.....	11
3.2 ความเค้นและความเครียดที่เกิดจากการตัด.....	12
3.3 โมเมนต์ดัดของวัสดุ.....	14
3.4 การติดตัวกลับของชิ้นงาน.....	17
3.5 ความเร็วในการแปรรูป.....	19
3.6 พลาสติกแอนไอโซทรอปิก.....	20
บทที่ 4 การดำเนินการวิจัย.....	26
4.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	26
4.1.1 วัสดุทดลอง.....	26
4.1.2 แม่พิมพ์.....	28
4.1.3 เครื่องไฮดรอลิกเพรส.....	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.4 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	29
4.2 วิธีการทดลอง.....	29
4.3 การคำนวณต่างๆ	32
4.3.1 ความเค้น.....	32
4.3.2 ความเครียด.....	32
4.3.3 จุดคราก.....	32
4.3.4 ความเครียดจริง.....	33
4.3.5 ความเครียดเชิง	33
4.3.6 ความเหนียว	33
4.3.7 การหาค่า K และค่า n	34
บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	36
5.1 ผลของรัศมีปลายพื้นที่ต่อการติดตัวกลับ	37
5.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณทางคณิตศาสตร์.....	38
5.3 ผลการทดสอบแรงดึงและกราฟเปรียบเทียบ Engineering Stress-Strain curves	41
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	46
6.1 สรุปผลการทดลอง	46
6.2 ข้อเสนอแนะ	46
เอกสารอ้างอิง.....	47
ภาคผนวก	49
ภาคผนวก ก. ผลงานที่ได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ.....	50
ภาคผนวก ข. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	53
ภาคผนวก ค. ข้อมูลของงานวิจัยที่ได้รับจากการตัดชิ้นรูปตัววี.....	60
ภาคผนวก ง. ตารางมาตรฐานต่างๆของวัสดุ.....	65
ประวัติผู้เขียน	67

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อการตีตัวกลับ	19
4.1 รายละเอียดของขนาดชิ้นงานทดสอบ	27
4.2 รายละเอียดต่างๆของแม่พิมพ์	28
5.1 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ความหนา 1.5 mm จากการทดสอบทางด้านแรงดึงมาตรฐาน ASTM E8M-92a	36
5.2 ผลการทดสอบแรงดึงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ในทิศทางทำมุม 0 องศา กับแนวรีดความหนา 1.5 mm ที่ความเร็ว 10 mm/min มาตรฐาน ASTM: E517-96a Standard Test Method for Plastic Ratio (r) for Sheet Metal Specimens A	41
5.3 ผลการทดสอบแรงดึงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ในทิศทางทำมุม 15 องศา กับแนวรีดความหนา 1.5 mm ที่ความเร็ว 10 mm/min มาตรฐาน ASTM: E517-96a Standard Test Method for Plastic Ratio (r) for Sheet Metal Specimens A	41
5.4 ผลการทดสอบแรงดึงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ในทิศทางทำมุม 30 องศา กับแนวรีดความหนา 1.5 mm ที่ความเร็ว 10 mm/min มาตรฐาน ASTM: E517-96a Standard Test Method for Plastic Ratio (r) for Sheet Metal Specimens A	42
5.5 ผลการทดสอบแรงดึงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ในทิศทางทำมุม 45 องศา กับแนวรีดความหนา 1.5 mm ที่ความเร็ว 10 mm/min มาตรฐาน ASTM: E517-96a Standard Test Method for Plastic Ratio (r) for Sheet Metal Specimens A	42
5.6 ผลการทดสอบแรงดึงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ในทิศทางทำมุม 60 องศา กับแนวรีดความหนา 1.5 mm ที่ความเร็ว 10 mm/min มาตรฐาน ASTM: E517-96a Standard Test Method for Plastic Ratio (r) for Sheet Metal Specimens A	43
5.7 ผลการทดสอบแรงดึงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ในทิศทางทำมุม 75 องศา กับแนวรีดความหนา 1.5 mm ที่ความเร็ว 10 mm/min มาตรฐาน ASTM: E517-96a Standard Test Method for Plastic Ratio (r) for Sheet Metal Specimens A	43
5.8 ผลการทดสอบแรงดึงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ในทิศทางทำมุม 90 องศา กับแนวรีดความหนา 1.5 mm ที่ความเร็ว 10 mm/min มาตรฐาน ASTM: E517-96a Standard Test Method for Plastic Ratio (r) for Sheet Metal Specimens A	44
5.9 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง	45
ค.1 แสดงผลค่ามุมตีตัวกลับ (องศา) จากการดัดขึ้นรูปตัววี 90 องศาด้วยเครื่องไฮดรอลิคเพรส รัศมีปลายพินซ์ 2 มิลลิเมตร วัสดุโลหะแผ่น JIS SUS430 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ในทิศทางทำมุมต่างๆกับแนวการรีด	60

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.2 แสดงผลค่ามุมดัดตัวกลับ (องศา) จากการดัดขึ้นรูปตัววี 90 องศาด้วยเครื่องไฮดรอลิคเพรส รัศมีปลายพื่นซ์ 3 มิลลิเมตร วัสดุโลหะแผ่น JIS SUS430 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ในทิศทางทงมุมต่างๆกับแนวการรีด	60
ค.3 แสดงผลค่ามุมดัดตัวกลับ (องศา) จากการดัดขึ้นรูปตัววี 90 องศาด้วยเครื่องไฮดรอลิคเพรส รัศมีปลายพื่นซ์ 4 มิลลิเมตร วัสดุโลหะแผ่น JIS SUS430 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ในทิศทางทงมุมต่างๆกับแนวการรีด	61
ค.4 แสดงผลค่ามุมดัดตัวกลับ (องศา) จากการดัดขึ้นรูปตัววี 90 องศาด้วยเครื่องไฮดรอลิคเพรส รัศมีปลายพื่นซ์ 5 มิลลิเมตร วัสดุโลหะแผ่น JIS SUS430 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ในทิศทางทงมุมต่างๆกับแนวการรีด	61
ง.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากการทำการทดสอบส่วนผสมทางเคมีตามมาตรฐานของJIS SUS430 (% โดยน้ำหนัก)	65
ง.2 สมบัติทางกลของโลหะสแตนเลส JIS SUS430.....	66

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบแรงกดพื้นซ์และทิศทางทำมุมกับแนวรีดของชิ้นงาน.....	7
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพื้นซ์ต่ออัตราการตัด(r/t)ในทิศทางทำมุมกับแนวรีด.....	7
2.3 ค่ามุมภายหลังการตัดในทิศทางทำมุมกับแนวรีด.....	8
2.4 การทดสอบการตัดและการเกิดการตีตัวกลับ	8
2.5 สมบัติของวัสดุในทิศทางทำมุมต่างๆกับแนวการรีดต่อการตีตัวกลับวัสดุ AL5052.....	9
2.6 สมบัติของวัสดุในทิศทางทำมุมต่างๆกับแนวการรีดต่อการตีตัวกลับวัสดุ AL1050.....	9
3.1 ระบบพิกัดสำหรับวิเคราะห์การตัด	10
3.2 แรงตัดในแม่พิมพ์รูปตัววี.....	11
3.3 (ก) เส้นแกนกลาง (ข) การกระจายของความเครียดตามความหนาของแผ่นโลหะ	13
3.4 การเปลี่ยนรูปชั้น AB	13
3.5 แสดงการกระจายความเครียดและความเค้นตลอดความหนาแผ่น.....	14
3.6 แสดงการกระจายความเค้นภายใต้โมเมนต์ตัดและหลังการเอ้าการะออกของวัสดุที่แข็งด้วย ความเครียด.....	17
3.7 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของความเค้นในการตัด.....	17
3.8 แรงที่เกิดจากการตีตัวกลับ	18
3.9 การเปลี่ยนแปลงจากการกด	19
3.10 แสดงชิ้นงานทดสอบการดึงที่เป็นแผ่นแถบตัดมาจากแผ่นรีด.....	20
3.11 แนวแกนแอนไอโซทรอปิก.....	24
4.1 รายละเอียดมาตรฐานชิ้นงานทดสอบ	27
4.2 แม่พิมพ์ตัดชิ้นรูปตัววี (V-die bending tools).....	28
4.3 เครื่องไฮดรอลิคเพรส ขนาด 60 ตัน	28
4.4 เครื่องทดสอบแรงดึงแบบ Screw-driven machine ขนาด 10 ตัน.....	29
4.5 ชิ้นงานภายหลังการทดสอบแรงดึง	29
4.6 พื้นซ์ขนาดต่างๆ.....	30
4.7 ชิ้นงานทดสอบจากการตัดด้วยแม่พิมพ์	30
4.8 การทดสอบตัดชิ้นงาน.....	30
4.9 แผนภูมิการทดลอง	34
4.10 การหาจุดครากใน Engineering stress-strain curve โดยวิธี Offset.....	35
5.1 แสดงการเปรียบเทียบผลของรัศมีปลายพื้นซ์ต่อการตีตัวกลับในการตัดรูปตัววี ของวัสดุแผ่นเหล็ก JIS SUS430 หนา 1.5 มิลลิเมตร.....	37

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 ผลการ Fit curve ค่าเฉลี่ยของการตีตัวกลับ วัสดุแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 หนา 1.5 มิลลิเมตร ทิศทางทำมุม 0- 90 องศา กับแนวของการรีดตัดด้วยรัศมีปลายพื่นซ์ ต่างกันด้วยเครื่องไฮดรอลิกเพรส	38
5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าการตีตัวกลับระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง ตัดชิ้นงานโลหะแผ่นเหล็ก JIS SUS430 ที่มีทิศทางตามแนวของการรีด ของความหนา 1.5 มิลลิเมตร มุมตัด 90 องศา รัศมีปลายพื่นซ์ 2 มิลลิเมตร	38
5.4 ผลการเปรียบเทียบค่าการตีตัวกลับระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง ตัดชิ้นงานโลหะแผ่นเหล็ก JIS SUS430 ที่มีทิศทางตามแนวของการรีด ของความหนา 1.5 มิลลิเมตร มุมตัด 90 องศา รัศมีปลายพื่นซ์ 3 มิลลิเมตร	39
5.5 ผลการเปรียบเทียบค่าการตีตัวกลับระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง ตัดชิ้นงานโลหะแผ่นเหล็ก JIS SUS430 ที่มีทิศทางตามแนวของการรีด ของความหนา 1.5 มิลลิเมตร มุมตัด 90 องศา รัศมีปลายพื่นซ์ 4 มิลลิเมตร	39
5.6 ผลการเปรียบเทียบค่าการตีตัวกลับระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง ตัดชิ้นงานโลหะแผ่นเหล็ก JIS SUS430 ที่มีทิศทางตามแนวของการรีด ของความหนา 1.5 มิลลิเมตร มุมตัด 90 องศา รัศมีปลายพื่นซ์ 5 มิลลิเมตร	40
5.7 กราฟเปรียบเทียบ Engineering stress-strain curve จากผลการทดสอบแรงดึงวัสดุ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ในทิศทางทำมุมต่างๆกับแนวของการรีด	45

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์และคำย่อ	ความหมาย	หน่วย
d	ทิศทางทำมุมกับแนวรีด	องศา
E	โมดูลัสยืดหยุ่น	pascal
ε	ความเครียด	-
ε_{po}	ความเครียด offset ที่ 0.2%	-
σ	ความเค้น	$\frac{N}{m^2}$
K	สัมประสิทธิ์ความแข็ง	-
l_0	ความยาวส่วนโค้งที่กึ่งกลาง	m
l_s	ความยาวส่วนโค้ง	m
M	โมเมนต์ดัด	$N.m$
n	Strain hardening component	-
r_1	รัศมีภายในการดัด	mm
r	รัศมีภายนอกการดัด	mm
r_p	รัศมีพินซ์	mm
ΔR	แพลนนาแอนไอโซทรอปิก	-
R	อัตราส่วนความเครียดแอนไอโซทรอปิก	-
R_0	ค่าของ R ในทิศทาง 0 องศา	-
\bar{R}	อัตราส่วนความเครียดแอนไอโซทรอปิกเฉลี่ย	-
R_{45}	ค่าของ R ในทิศทาง 45 องศา	-
R_{90}	ค่าของ R ในทิศทาง 90 องศา	-
t	ความหนาของชิ้นงาน	mm
t_0	ความหนาของชิ้นงานก่อนการทดสอบดึง	mm
t_1	ความหนาของชิ้นงานภายหลังการทดสอบดึง	mm
w	ความกว้างของชิ้นงาน	mm
w_0	ความกว้างของชิ้นงานก่อนการทดสอบดึง	mm
w_1	ความกว้างของชิ้นงานภายหลังการทดสอบดึง	mm
z	ความยาวส่วนโค้ง	mm
Z	แกนโมเมนต์	mm
σ_y	ความเค้นคราก	$\frac{N}{m^2}$
$\Delta\theta$	ความแตกต่างของมุมก่อนและหลังการดัด	องศา
θ	มุมการดัด	องศา

γ	อัตราส่วนปัวซอง	-
α_r	มุมภายหลังการตัด	องศา
α	มุมในการตัด	องศา
L	อัตราส่วนการตีตกลับ	-

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะให้ได้ลักษณะตามที่ต้องการซึ่งเป็นการขึ้นรูปที่ใช้กันอย่างกว้างขวางนั้น เป็นกระบวนการที่เป็นส่วนสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิต เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอากาศยาน อุตสาหกรรมปิโตรเลียม เป็นต้น ดังนั้นการดัดขึ้นรูปแผ่นโลหะจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของวัสดุเพื่อให้ได้รูปทรงที่ต้องการมากที่สุด เนื่องจากคุณสมบัติทางกลของโลหะมีความแตกต่างกันการดัดขึ้นรูปของโลหะแผ่นในทิศทางที่ต่างกันย่อมให้ผลที่ต่างกันอย่าง

ปัญหาที่สำคัญของการดัดขึ้นรูปแผ่นโลหะคือ โลหะแผ่นจะเกิดการบิดตัวกลับ หลังจากที่ยืดตัวออกจากชิ้นงานทำให้รูปทรงของชิ้นงานเปลี่ยนไปและไม่ได้รูปทรงตามที่ต้องการเนื่องจากแรงกดพื้นทำให้เกิดโมเมนต์ดัดที่มีค่าสูงพอ ที่ทำให้ผิวนอกของโลหะอยู่ในสภาพพลาสติกขณะที่บริเวณแกนในยังคงมีสภาพยืดหยุ่น ดังนั้นเมื่อเอาแรงที่กระทำออกส่วนที่ยังมีสภาพยืดหยุ่นก็จะพยายามกลับคืนสู่สภาพเดิม

ในปัจจุบันปัญหาดังกล่าวซึ่งควรแก้ไขด้วยการวิเคราะห์หาความเหมาะสมในการขึ้นรูป และสามารถออกแบบเครื่องมือเพื่อระยะการดัดกลับ เพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ตลอดจนนำไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นในลักษณะเดียวกันได้และยังสามารถทำนายปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้นเพื่อให้สามารถแก้ไขได้ทันอย่างรวดเร็วและเป็นที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงนำการคำนวณทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการคำนวณการดัดกลับในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อวิเคราะห์การดัดกลับของแผ่นสแตนเลส JIS SUS430 ตามแนวทิศทางการรีด และเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางคณิตศาสตร์

1.3 ความคาดหวังจากการทดลอง

ผลการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณน่าจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณได้มาจากสมการทางคณิตศาสตร์

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย

โดยแนวคิดนี้มาจากการทำงานจริงในการดัดขึ้นรูปของอุปกรณ์ในการอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่นการดัดงอของแผ่นโลหะแผ่นเรียบเพื่อให้มีความโค้งที่ใช้สำหรับเชื่อมติดกับท่อ โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องนี้ในวารสารการประชุมทางวัสดุและการผลิตทางวิศวกรรมในการประชุมหลายรายการ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาลักษณะการดัดขึ้นรูปตัววี 90 องศาของแผ่นสแตนเลส JIS SUS430 ขนาด 15x40x1.5 มิลลิเมตร ความกว้างของด้าย 25 มิลลิเมตร ที่รัศมีพื้นที่ 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร

ศึกษาการดัดขึ้นรูปแผ่นวัสดุขึ้นงานในทิศทางทำมุม 0, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา กับแนวทิศทางการรีด

การศึกษาวิจัยนี้ประเมินผลการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยไม่คำนึงถึงผลของแรงเสียดทานและความร้อนในระหว่างกระบวนการดัดขึ้นรูป

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1) ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการดัดขึ้นรูปและการตีกลับจากการดัดขึ้นรูปของแผ่นโลหะ
- 2) ศึกษาแผ่นวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์และข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดัดขึ้นรูปโลหะแผ่น
- 3) ศึกษาและทดลองการดัดงอรูปตัววีโดยใช้เครื่องไฮดรอลิคเพรส
- 4) วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการคำนวณกับสมการทางคณิตศาสตร์
- 5) สรุปผลการวิจัย

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยและการทดลองครั้งนี้ เพื่อวิเคราะห์การติดกลับของแผ่นโลหะสแตนเลส JIS SUS430 ด้วยวิธีการกัดด้วยตัววีร์ร่วมกับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ซึ่งได้ทำการศึกษาบทความและผลการวิจัยที่ผ่านมาเพื่อใช้เป็นพื้นฐานของการศึกษางานวิจัย รวมทั้งใช้เป็นแนวทางเพื่อศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมสำหรับการทดลองหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการติดกลับของแผ่นโลหะสแตนเลส JIS SUS430 ด้วยวิธีการกัดด้วยตัววีร์ และใช้แผ่นสแตนเลสเป็นวัสดุทดสอบที่นำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานของการศึกษางานวิจัย และใช้เป็นแนวทางเพื่อศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมแสดงดังต่อไปนี้

1) บทความของ You-Min Huang และ Dew-Kwei Leu (1998) [5]

ศึกษาเงื่อนไขและตัวแปรกรรมวิธีการดัดขึ้นรูปในตายรูปตัววีร์ของโลหะแผ่นเพื่อทำนายแรงกดดัดและรูปร่างสุดท้ายของการดัด ซึ่งหาการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการดัด คือรัศมีพินซ์ (R_p) รัศมีตาย (R_t) ความกว้างพินซ์ความเร็วพินซ์สัมประสิทธิ์ความเสียหายตัวประกอบของการทำให้แข็งด้วยความเครียดและค่าแอนไอโซทรอปิก โดยเปรียบเทียบผลจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองจริง ผลการวิจัยพบว่า ผลการทดลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกัน โดยแรงกดดัดจากพินซ์จะเพิ่มขึ้น เมื่อมีการหล่อลื่น รัศมีพินซ์ หรือความเร็วพินซ์เพิ่มขึ้น หรือตัวประกอบของการทำให้แข็งด้วยความเครียดลดลง เมื่อรัศมีตายเพิ่มขึ้น แรงกดพินซ์เพิ่มขึ้นในสถานะเริ่มต้นดัด และหลังจากนั้นจะลดลงจนถึงสถานะการดัดสุดท้าย และเมื่อค่าแอนไอโซทรอปิกเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงกดพินซ์ลดลงเล็กน้อย

2) บทความของ K. P. Li, W. D. Carden และ R. H. Wagoner (2002) [6]

ได้ศึกษาวิจัยการวัดการติดกลับ การจำลองการติดกลับ และบทบาทของพลาสติกแอนไอโซทรอปิกที่มีผลต่อการติดกลับ โดยใช้ในการทดสอบแบบกด - ดัดขึ้นรูปของวัสดุเหล็ก DQSK อลูมิเนียม 6022-T4 และเหล็ก HSLA เป็นกรณีศึกษา ซึ่งผลการจำลองการติดกลับให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการทดลองวัดการติดกลับ โดยทำการศึกษารัศมีตาย ($3 < r/t < 17$) เมื่อ r/t คือ รัศมีตายต่อความหนาของแผ่นชิ้นงาน สัมประสิทธิ์ความเสียหาย ($0 < \mu < 0.20$) และการควบคุมแรงดึง ($0 < F_b/F_y < 1.5$) เมื่อ F_b คือ แรงดึงจากด้านหลัง และ F_y คือแรงคราก ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการออกแรงดึงมากๆ จะสามารถลดการติดกลับได้ การติดกลับจะลดลง ถ้ารัศมีเครื่องมือใหญ่ขึ้น ($r/t > 5$) สำหรับเหล็กจะมีผลกระทบเกิดขึ้นที่ค่า r/t (r คือรัศมีการดัด, t คือความหนาของวัสดุทดสอบ) เข้าใกล้ 5 ซึ่งมีแนวโน้มการติดกลับเข้าใกล้ศูนย์ สำหรับค่า r/t เข้าใกล้ 2 ดังนั้น การลดการติดกลับก็ต้องใช้รัศมีของเครื่องมือที่มีค่าน้อยๆ และการจำลองมุมการติดกลับจะขึ้นอยู่กับกฎการทำให้แข็งด้วยความเครียดและพลาสติกแอนไอโซทรอปิก จะทำการเปรียบเทียบกับเกณฑ์การคราก 4 เกณฑ์ คือ

เกณฑ์การครากของฮิลล์ (Hill) เกณฑ์การครากของฟอนมิสเชส (Von Mises) เกณฑ์การครากของบาร์แรท (Barlet) แบบ 3 ตัวแปร และ เกณฑ์การครากของบาร์แรท (Barlet) แบบ 7 ตัวแปร

3) บทความของ Daw-Kwei Leu (1997) [7]

ศึกษาการเกิดการตีดกลับและสภาพการตัดได้ของโลหะแผ่นตามแนวทิศทางแอนไอโซทรอปิกด้วยวิธีการทดลอง ผลการศึกษาวัสดุที่มีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก ทำให้ทราบว่าอัตราส่วนการตีดกลับจะมีค่ามากขึ้น เมื่อค่าแอนไอโซทรอปิก (R-Value) มีค่ามาก หรือค่าตัวประกอบทำให้ให้แข็งแรงด้วยความเครียด (n) น้อย และอัตราส่วนความหนา ($1/2P$) น้อย สามารถสรุปได้ว่า อัตราส่วนความหนาและตัวประกอบของการทำให้แข็งแรงด้วยความเครียดมีผลทำให้เกิดการตีดกลับมากกว่าค่าแอนไอโซทรอปิก

4) บทความของ M. Samuel (2000) [8]

ได้ทดลองและใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำนายการตีดกลับและการโค้งงอในการตัดรูปตัวของวัสดุที่มีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาวิธีการของการทำนายการตีดกลับและการโค้งงอในระนาบ 2 มิติภายใต้ความเครียดในระนาบ การเสียรูปขณะทำการตัดและหลังการตัด นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบของรูปทรงเครื่องมือตัดและแรงกดแบงค์โฮลเตอร์ที่มีผลต่อรูปทรงชิ้นงานหลังจากการตีดกลับ ผลการวิจัยสรุปได้ว่า การตีดกลับในการตัดงอรูปตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยรัศมีพื้นซ์และขึ้นอยู่กับแรงกดแบงค์โฮลเตอร์ การโค้งงอจะลดลงด้วยรัศมีตาย แต่ขึ้นอยู่กับแบงค์โฮลเตอร์อย่างมาก อัตราส่วนการตีดกลับจะเพิ่มขึ้นขณะที่คุณสมบัติแอนไอโซทรอปิกเพิ่มขึ้นหรือขณะที่ค่าตัวประกอบของการทำให้แข็งแรงด้วยความเครียดลดลง

5) บทความของ Li-Ping Lei, Sang-M. Hwang และ Beom-Soo Kang (2001) [9]

ได้ศึกษาวิจัยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์และออกแบบการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม ได้แก่ การตัดอิสระและการกดขึ้นรูป และเปรียบเทียบกับวิธีการทดลองจริง ทำการศึกษาเชิงปริมาณเกี่ยวกับแรงกดพื้นซ์ การไหลตัวของวัสดุ การกระจายความเค้นและการตีดกลับ ผลการวิจัยพบว่า ในกระบวนการตัด การทำนายการตีดกลับโดยการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับการทดลอง เงื่อนไขของความเสียหายและระยะเพื่อมีผลกระทบเล็กน้อยต่อแรงกดพื้นซ์ ความเสียหายส่งผลให้เส้นกราฟของแรงกดพื้นซ์และระยะกดพื้นซ์ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลองจริงมีความแตกต่างกัน ก็เพราะในการวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะใช้เงื่อนไขการสัมผัสอย่างง่ายในการวิเคราะห์ ขณะที่การขึ้นรูปจริงจะมีเงื่อนไขของความเสียหายที่แปรเปลี่ยนไป

6) บทความของ Chuantao Wang, Gary Kinzel และ Taylan Altan (1992) [10]

ได้ศึกษาโมเดลการคำนวณการตัดโลหะแผ่นพบว่าการเกิดการตีดตัวกลับเกิดจากความสัมพันธ์ของ สมบัติของวัสดุ ความหนาของโลหะแผ่น รัศมีในการตัด ขนาดความเค้น

ความเครียดและความยาวของชิ้นงานในการตัดโค้งซึ่งตัวแปรหลังขึ้นอยู่กับชนิดของการตัดและจากการสังเกตพบปัจจัยต่างๆดังนี้

1. ค่ามุมตัดตัวกลับเพิ่มขึ้นตามความเค้นจุดครากของวัสดุหรือความแข็งแรงและสมบัติ Anisotropy ของวัสดุเพราะค่าเหล่านี้ทำให้เกิดการต้านการเปลี่ยนรูปร่างแบบถาวรสูงขึ้น
2. ค่ามุมตัดตัวกลับลดลงตามค่าโมดูลัสยืดหยุ่น
3. ความยาวในช่วงของการตัดมีผลทำให้ค่ามุมตัดตัวกลับสูงกว่าการตัดในช่วงแคบปัจจัยนี้สำหรับวัสดุประเภท Isotropic materials

7) บทความของ Annika Nilsson, Lars Melin และ C. Magnusson (1997) [11]

ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการจำลองการตัดขึ้นรูปตัววีโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทำนายการตีกลับในการตัดขึ้นรูปตัววีโดยเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้กับผลการทดลองจริง ผลการวิจัยพบว่าการจำลองการตัดขึ้นรูปตัววีโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับผลการทดลองจริง และยังพบอีกว่า ความเสียดทานมีผลต่อลักษณะรูปร่างของแผ่นวัสดุน้อยมาก แต่จะมีผลต่อการบางของแผ่นวัสดุในบริเวณที่มีการเสีรูปร่างมากและมีผลต่อการตีกลับน้อยมาก

8) บทความของ F. Pourboghra และ K. A. Stelson (1988) [12]

ได้ศึกษาระยะเวลาช่องว่างที่เกิดขึ้นในทิศทางการเคลื่อนที่ของแผ่นวัสดุที่มีผลต่อความเสียดทานในการตัดโลหะแผ่นบางบริเวณผิวหน้าสัมผัสพื้นที่กับชิ้นงาน ผลการวิจัยพบว่ารูปแบบระยะเวลาช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการตัดขึ้นรูปโลหะแผ่นบางใช้ในการทำนายการเกิดการเปลี่ยนรูปร่างยืดหยุ่นและถาวรของวัสดุในการตัดขึ้นรูป ดังนั้นจากการเกิดช่องว่างทำให้เกิดความเสียดทานที่ตาย และพื้นที่ทำให้การวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปของวัสดุได้ดีขึ้น และอัตราส่วนรัศมีพื้นที่ต่อความหนาชิ้นงานมากขึ้น ทำให้ระยะเวลาช่องว่างพื้นที่กับชิ้นงานลดลง

9) บทความของ M. H. Fu, K. C. Chan, W. B. Lee และ L. K. Chan (1997) [13]

ได้ศึกษาถึงวิธีการควบคุมการตีกลับในการขึ้นรูปเย็นแผ่นวัสดุแคบๆ โดยการต่อแผงวงจรในลักษณะพิเศษที่จะออกแบบการจับยึดการขึ้นรูปเป็นแบบคานยื่น ด้วยการต่อระบบอัตโนมัติกับวงจร เพื่อจะได้ทราบค่าการตีกลับของวัสดุที่แท้จริง ซึ่งวัสดุทดสอบเป็นทองแดงและเหล็กกล้า จะแปรเปลี่ยนตามรัศมีตาย ผลการวิจัยพบว่าการตีกลับเพิ่มขึ้นเมื่อคาร์ซีมีตาย มุมตาย ช่องว่างตายกับพื้นที่ เพิ่มขึ้นและยังพบอีกว่าแอนไอโซทรอปิกของวัสดุเป็นนัยสำคัญ ที่จะบ่งชี้ถึงความแตกต่างของวัสดุในการเกิดพฤติกรรมการตีกลับ

10) บทความของ A. Chandra (1997) [14]

ได้ศึกษาในการกดขึ้นงานจากแรงกระทำของพื้นที่ และการควบคุมการตีกลับของการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีการใช้การผสมผสานระหว่างการตัดกับการดึง ผลการวิจัยพบว่าสามารถควบคุม

การตีกลับของวัสดุได้ด้วยวิธีการควบคุมจากชุด Self-Turning Regulator Algorithm ได้ค่าความแม่นยำมากขึ้นและเป็นวิธีการผสมผสานการตัดกับการดึง ทำให้เรารู้เวลาจริงที่ใช้ในการกดแช่ชิ้นงานเพื่อควบคุมการตีกลับแต่ทั้งนี้ควรมีการศึกษาถึงวิธีอื่นๆ ด้วยเพื่อที่จะได้ทราบค่าที่แท้จริงและแม่นยำมากขึ้น

11) บทความของ L. C. Zhang, และ Z. Lin (1997) [15]

ได้ศึกษากลไกการเปลี่ยนรูปของการดัดขึ้นรูปตัววี โดยพื้นที่เปลี่ยนรูปได้ คู่กับตายแข็งเกร็งและการวิเคราะห์การตีกลับของโลหะแผ่นจากพื้นที่แข็งเกร็งคู่กับตายเปลี่ยนรูปได้ ผลจากการวิจัยปรากฏว่าการขึ้นรูปที่ใช้พื้นที่เปลี่ยนรูปได้ทำให้ลดอัตราส่วนการตีกลับคงที่ได้ขึ้นอยู่กับผิวหน้าพื้นที่ที่กระทำกับชิ้นงาน ตามกลไกการเปลี่ยนรูปของพื้นที่ที่ทำให้เกิดกลไกการเปลี่ยนรูปของวัสดุมีผลทำให้อัตราการตีกลับลดลงและการปรับปรุงผิวสัมผัสพื้นที่แข็งเกร็ง ปรากฏว่าวิธีนี้เป็นทางเลือกในการแก้ปัญหาการตีกลับของวัสดุ สามารถขยายได้สมบูรณ์กว่าการแก้ปัญหาวิธีอื่น ซึ่งไม่ต้องการให้มีการตีกลับเกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยที่สุดที่สามารถทำได้โดยใช้ตายลักษณะยืดหยุ่นเปลี่ยนรูปได้ การเลือกตายให้บังเกิดผลมากที่สุดสามารถอาศัยหลักพื้นฐานจากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย และโมดูลัสยืดหยุ่นของตาย

12) บทความของ S. Sriram, N. Jothi, N. Kumar และ P.Venugopal (1997)

[16]

ได้ศึกษาการดัดรูปตัววี ของวัสดุทองแดงอัดผง โดยแปรเปลี่ยนตามความหนาแน่นการอัดในการดัดอิสระที่รัศมีพื้นที่ และตาย มีทั้งหมด 4 ค่าคือ 2, 5, 10, 15 มิลลิเมตรและศึกษาถึงแรงในการดัดอิสระและการตีกลับหลังการดัด ผลการวิจัยปรากฏว่า แรงในการมีจำนวนมากกว่าสำหรับรัศมีพื้นที่ 2, 5 มิลลิเมตร ดังนั้นความเครียดที่ขอบ ($c/2$ รัศมีพื้นที่) มากกว่า ซึ่งเกณฑ์ของการแข็งขึ้นเนื่องจากความเครียด สามารถทำให้แรงในการดัดเพิ่มขึ้น ส่วนการตีกลับหลังการดัดเป็นนัยสำคัญที่เกิดขึ้นคือรัศมีพื้นที่เล็กๆส่วนรัศมีพื้นที่มากทำให้การตีกลับน้อยลง เมื่อพิจารณาความหนาแน่นเป็นหลัก จากพื้นฐานการดัดทองแดงอัดผง พบว่าความหนาแน่นทางทฤษฎีเป็น 84% กับรัศมีพื้นที่ 5 มิลลิเมตรและจำกัดจำนวนการดัด 60 ครั้ง ปรากฏว่าทำให้ชิ้นส่วนที่ดัดมีเนื้อแท้ในจังหวะปิดซึ่งทำให้ค่าการตีกลับน้อยสุดตลอดความหนาแน่นชิ้นงาน ปัญหาที่เกิดขึ้นคือเมื่อรัศมีพื้นที่เล็กมากๆทำให้เกิดการแตกในการดัด

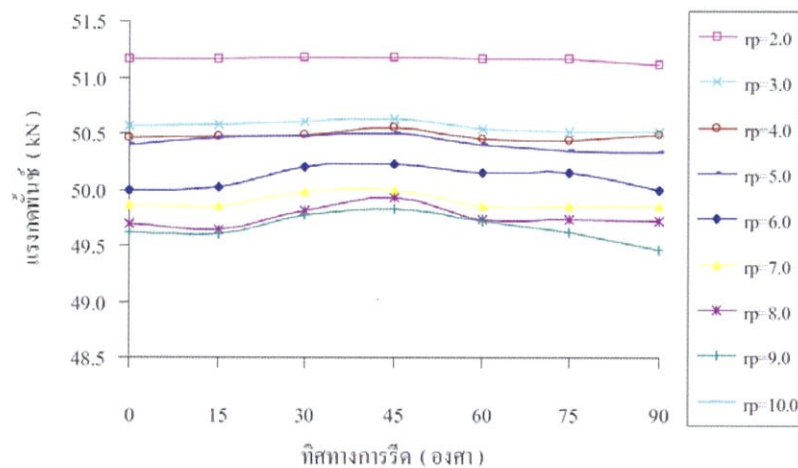
13) การทดลองของ Shigeki Mori, Ken-Ichi Manabe, Hisashi Nishimura และ Kenji Hirose (1997) [17]

ได้ทำการทดลองดัดขึ้นรูปตัววีของโลหะแผ่น AISI 304 และกำหนดให้วัสดุชิ้นงานมีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก โดยทดลองดัดในแนวทิศทางทำมุมกับแนวรีด 0, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าแอนไอโซทรอปิก (R-Value) ที่มีต่อการตีกลับ ค่ามุมการ

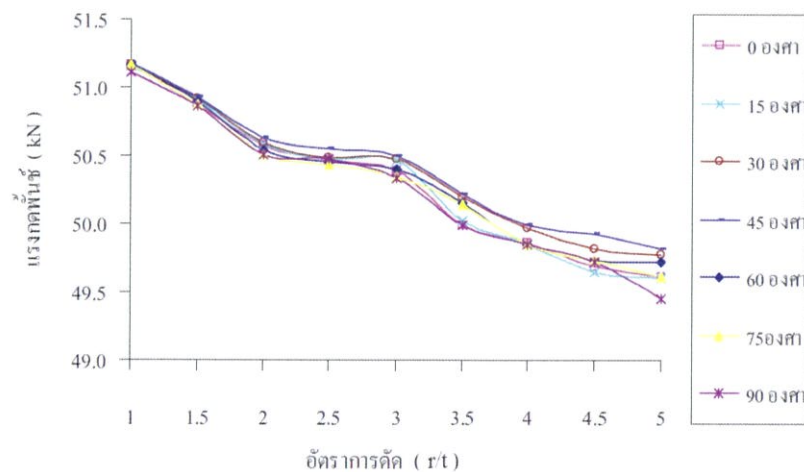
ตีตกกลับและแรงกดพื้นซ์ โดยเปรียบเทียบผลจากการทดลองจริงกับผลทางการคำนวณทางทฤษฎี ผลการวิจัยพบว่า ค่าแอนไอโซทรอปิก (R-Value) มีค่าสูงที่สุดในทิศทางทำมุม 45 องศา กับแนวรีด ซึ่งการตีตกกลับจะสัมพันธ์กับค่า R-Value ถ้าค่า R-Value มากจะทำให้การตีตกกลับมากขึ้นด้วย ค่าการตีตกกลับ (r/t) ของวัสดุมีค่ามากการตีตกกลับก็มากด้วย ส่วนค่าแรงกดพื้นซ์น้อย ค่าของมุมตีตกกลับที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีให้ผลสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง

14) การทดลองของ พิชัย จันท์รมณี (2543) [1]

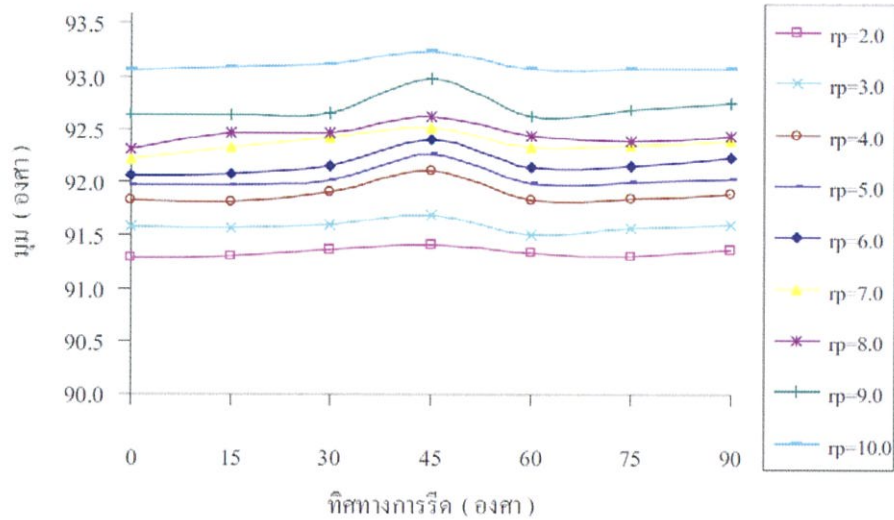
ได้ศึกษาพฤติกรรมการตีตกกลับในการดัดขึ้นรูปตัววีของโลหะแผ่นที่มีคุณสมบัติไอโซทรอปิก โดยทำการศึกษาวัดเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ขนาด $40 \times 80 \times 2$ มิลลิเมตร เปรียบเทียบผลการตีตกกลับในทิศทางทำมุมกับแนวรีดครั้งละ 15 องศา จาก 0-90 องศา ในการทดลองดัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์รูปตัววี 90 องศา ความกว้างปากตาย 50 มิลลิเมตร และเปลี่ยนขนาดรัศมีปลายพื้นซ์ตั้งแต่ 2-10 มิลลิเมตร ได้ผลดังรูปที่ 2.1 ถึงรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบแรงกดพื้นซ์และทิศทางทำมุมกับแนวรีดของชิ้นงาน



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพื้นซ์ต่ออัตราการดัด (r/t) ในทิศทางทำมุมกับแนวรีด

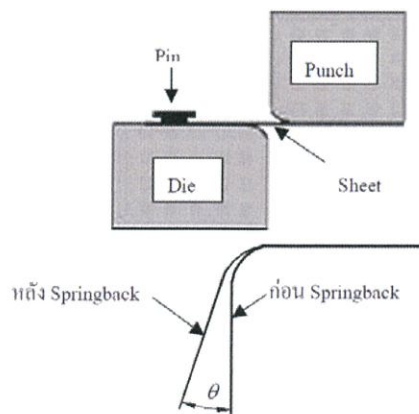


รูปที่ 2.3 ค่ามุมภายหลังการตัดในทิศทางทำมุมกับแนวรีด

จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการตัด (r/t) น้อยจะเกิดการตีกลับน้อยเมื่ออัตราการตัด (r/t) มากจะเกิดการตีกลับมากขึ้นเพราะว่าการตัดวัสดุอัตราการตัด (r/t) น้อยจะใช้แรงในการตัดมากจนทำให้วัสดุเกือบเป็นพลาสติกสมบูรณ์จึงทำให้เกิดการตีกลับน้อยลง ส่วนการตีกลับในแนวทิศทางต่างๆที่ทำมุมกับแนวรีดคิดจากคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก (R-value) ถ้ามีค่ามากการตีตัวกลับจะมากถ้าค่าของแอนไอโซทรอปิก (R-value) ถ้ามีค่าน้อยการตีตัวกลับจะน้อยตามและค่ามุมตีตัวกลับจากผลการทำนายในทางทฤษฎีให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลอง

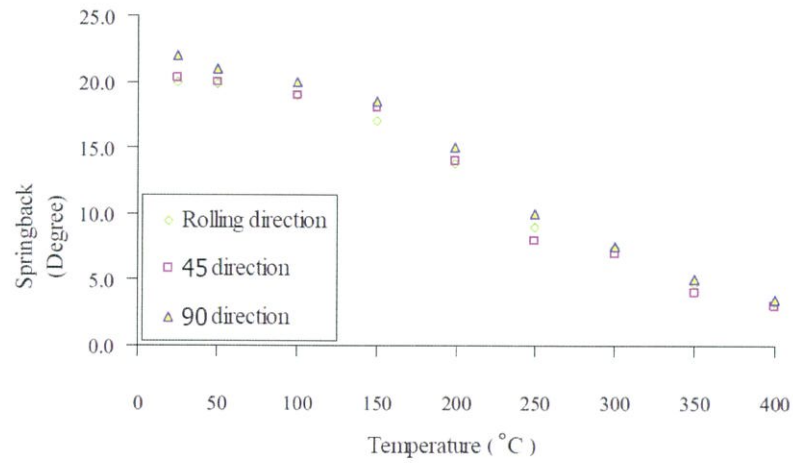
15) การทดลองของ Y. T. Keum และ B. Y. Han (2002) [18]

ได้ศึกษาและทดลองหาค่าการตีตัวกลับของวัสดุอลูมิเนียมอัลลอย AL5052 และ AL1052 โดยศึกษาตัวแปรได้แก่ อุณหภูมิ วัสดุ ทิศทางทำมุมต่างๆของชิ้นงานกับแนวรีดโดยการยึดปลายวัสดุทั้งสองด้านก่อนทำการตัด ดังรูปที่ 2.4 ได้ผลของค่าการตีตัวกลับวัสดุ AL5052 มีค่ามากกว่า AL1050

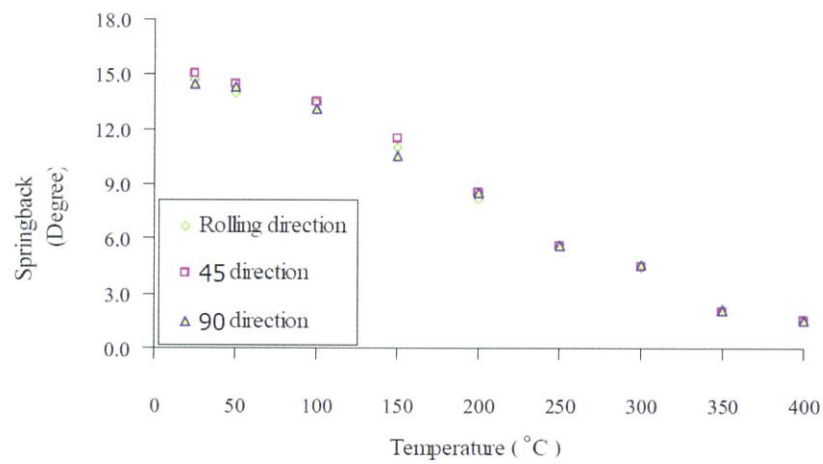


รูปที่ 2.4 การทดสอบการตัดและการเกิดการตีตัวกลับ

และค่าการดีดตัวกลับจะลดลงมากเมื่ออุณหภูมิในการตัดวัสดุสูงเช่นเดียวกันกับทิศทางต่างๆของการรีดวัสดุจะมีผลน้อยลงเมื่ออุณหภูมิในการตัดสูงขึ้นดังรูปที่ 2.5 และ 2.6



รูปที่ 2.5 สมบัติของวัสดุในทิศทางทำมุมต่างๆกับแนวการรีดต่อการดีดตัวกลับวัสดุ AL5052



รูปที่ 2.6 สมบัติของวัสดุในทิศทางทำมุมต่างๆกับแนวการรีดต่อการดีดตัวกลับวัสดุ AL1050

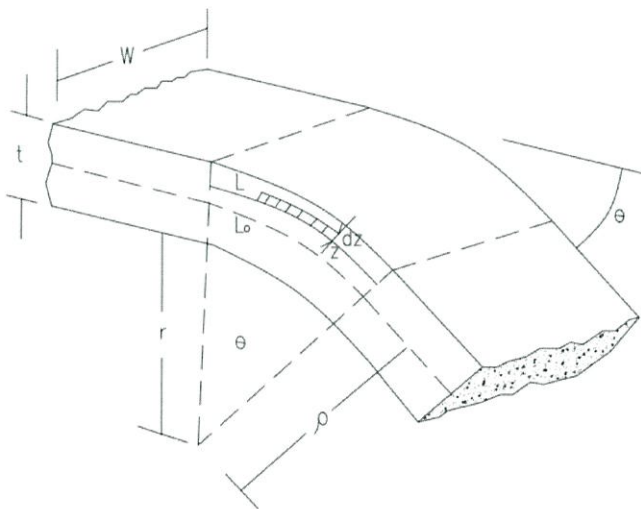
บทที่ 3

กระบวนการดัดขึ้นรูป

การดัดเป็นกรรมวิธีที่ทำให้ชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงเชิงเรขาคณิต โดยชิ้นงานที่ผ่านการดัดมีความโค้งและมุมเกิดขึ้นการดัดทำให้ชิ้นงานที่มีความโค้งอยู่แล้วเปลี่ยนความโค้งไปจากเดิม

การดัดมีสมมติฐานเช่นเดียวกับการขึ้นรูปโดยวิธีการอื่นๆ คือ วัสดุชิ้นงานสามารถเปลี่ยนรูปได้เมื่อรับแรง โลหะจะเริ่มเปลี่ยนรูปอยู่ในช่วงยืดหยุ่นก่อน จากนั้นจึงมีการเปลี่ยนรูปเพิ่มขึ้นในช่วงพลาสติกจนกระทั่งความสามารถในการเปลี่ยนรูปลดลง สุดท้ายจึงเกิดความเสียหายขึ้นเมื่อต้องการลดการแตกหักของชิ้นงานในระหว่างการดัด วัสดุจึงควรมีความยืดหยุ่นในการดัดน้อยเพราะความยืดหยุ่นจะทำให้ชิ้นงานเกิดการตีกลับ (Springback) ภายหลังจากการเอาภาระออก การตีกลับยืดหยุ่นอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเค้นตกค้างภายใน การดัดโค้งชิ้นงานที่บริเวณรัศมีที่ดัดภายนอกเกิดความเครียดดึงมากอาจทำให้เกิดการฉีกขาดและทำให้เกิดความเครียดอัดมากเกินไปจะเกิดรอยบนผิวด้านในของการดัด การประยุกต์ใช้และกลไกพื้นฐานของทฤษฎีการดัดเบื้องต้น โดยคำนึงถึงความเรียบของวัสดุรวมถึงโมเมนต์ดัดบริสุทธิ์ (Pure Bending Moment)

ระบบพิกัดสำหรับการดัดแสดงในรูปที่ 3.1 โดยให้ ρ เป็นรัศมีความโค้ง วัดถึงระนาบกึ่งกลาง และ z คือระยะที่วัดจากระนาบกึ่งกลางถึงเอลิเมนต์



รูปที่ 3.1 ระบบพิกัดสำหรับวิเคราะห์การดัด

ความเครียดทางวิศวกรรมที่ระยะ z สามารถหาได้โดยพิจารณาความยาวส่วนโค้ง L ซึ่งวัดขนานกับแกน X ความยาวส่วนโค้งที่ระนาบกึ่งกลาง $L_0 = r\theta$ เมื่อ θ คือ มุมดัด ความยาวส่วนโค้งที่ระยะ z คือ $L = (r + z)\theta$ ก่อนการดัดความยาวทั้งสองเท่ากัน ดังนั้นความเครียด คือ

$$e_x = \frac{(L-L_0)}{L_0} = \frac{z\theta}{r\theta} = \frac{z}{r} \quad (3.1)$$

ความเครียดจริง คือ

$$e_x = \ln\left(1 + \frac{z}{r}\right) \quad (3.2)$$

ซึ่งการตีกลับ ความเครียดมีค่าน้อยมากประมาณได้ว่า

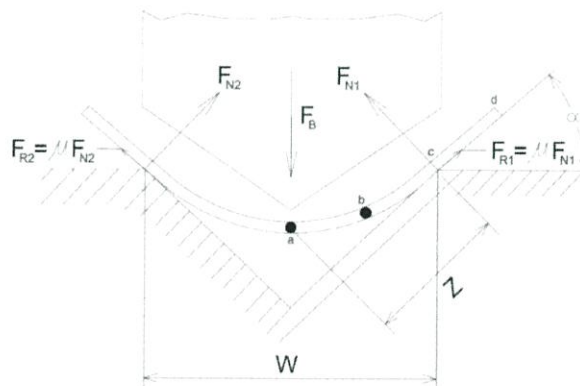
$$e_x \approx \frac{z}{r} \quad (3.3)$$

3.1 ทฤษฎีการตัดรูปตัววี

การตัดแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นช่วงดัดอิสระ ซึ่งเส้นการตัดของวัสดุ เลื่อนอยู่ระหว่างขอบตายและพื้นซ์ และช่วงที่สอง เป็นการกดให้แผ่นวัสดุมีรูปทรงตามผิวหน้าพื้นซ์และตายมากขึ้น แผ่นวัสดุมีการดัดอย่างยืดหยุ่นในตอนต้นและเพิ่มขึ้นเกือบเป็นเส้นตรงกับระยะเลื่อนพื้นซ์จนกระทั่งอัตราส่วนของตีเฟิร์กชั้น (f) ต่อความกว้างตาย (w) ที่กึ่งกลางของแผ่นวัสดุ ทำให้ความเค้นบริเวณผิวชั้นนอกถึงขีดจำกัดความยืดหยุ่นของวัสดุ จากทฤษฎีสถาปัตยกรรมยืดหยุ่น อัตราส่วนนี้ คือ

$$\frac{f}{w} = \frac{1}{6} \frac{Rp^{0.2}}{E} \left(\frac{w}{t}\right) \quad (3.4)$$

เมื่อเลื่อนพื้นซ์ต่ำลงมา บริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปถาวร (รูปที่ 3.1 แสดงโหนดและแรงที่ขอบพร้อมทั้งลักษณะการเปลี่ยนรูป) ขยายจาก a ไป b แผ่นวัสดุในช่วง ab ยังคงอยู่ในช่วงการดัดยืดหยุ่น ส่วนแผ่นวัสดุในช่วงปลาย cd ยังคงตรงเหมือนเดิมและมีการกระดกขึ้น



ab : การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น-พลาสติก

bc : การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น

cd : การกระดกขึ้น

Z : แชนโมเมนต์, α : มุมดัด, p : มุมเสียดทาน

รูปที่ 3.2 แรงดัดในแม่พิมพ์รูปตัววี

แรงกดพื้นชั่วคราวสามารถหาได้จาก

$$F_p = 2F_k(\cos\alpha + \mu\sin\alpha) \quad (3.5)$$

แรงที่ขอบ F_k ขึ้นอยู่กับความต้านทานการตัดของแผ่นวัสดุ ซึ่งไม่ขึ้นกับแรงกดพื้นแต่เป็นแรงปฏิกิริยาของความต้านทานการขึ้นรูป ดังนั้นแรงที่ขอบ คือ

$$F_k = \frac{M_i}{Z} \quad (3.6)$$

เมื่อ M_i คือ โมเมนต์ภายในแผ่นวัสดุ และ Z คือแขนโมเมนต์ ดังนั้น จึงได้ความสัมพันธ์ของแรงกดพื้นชั่วคราวและเป็นฟังก์ชันของระยะเลื่อนพื้น f คือ

$$F_p(f) = \frac{2M_i(f)}{z(f)}(\cos\alpha(f) + \mu\sin\alpha(f)) \quad (3.7)$$

แรงจากการตัดในแม่พิมพ์รูปตัววีเป็นผลมาจากการแปรผันของค่า M_i , Z และ α โดยค่าแต่ละค่ามีความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ดังนี้

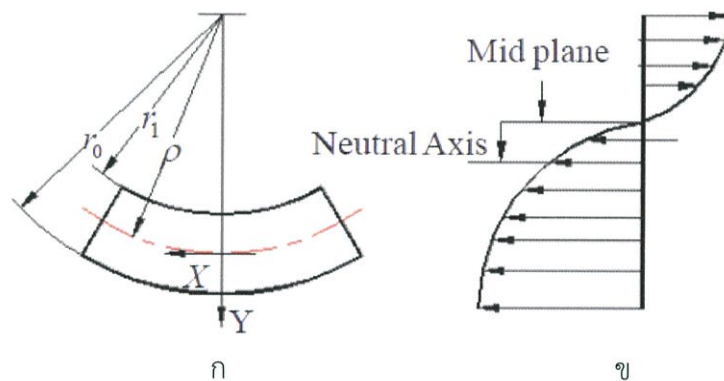
1. โมเมนต์ภายใน M_i เพิ่มขึ้นพร้อมกับระยะเลื่อนพื้น ทั้งนี้เนื่องจากความโค้งเพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงมีผลทำให้แรงเพิ่มขึ้นตลอดช่วงระยะเลื่อนพื้นทั้งหมด
2. ความยาวแขนโมเมนต์ Z เพิ่มขึ้น เนื่องจากการสลิปที่เกิดขึ้นภายหลัง จนกระทั่งแผ่นวัสดุสัมผัสกับตาย หลังจากนั้นความยาวแขนโมเมนต์ลดลงอีกครั้งหนึ่ง การเพิ่มความยาวแขนโมเมนต์จึงลดลงอีกครั้งหนึ่ง การเพิ่มความยาวแขนโมเมนต์ อย่างน้อยก็ทำให้เพิ่มแรงกดพื้นที่มีอัตราการเพิ่มน้อยลง
3. มุมตัด α เพิ่มขึ้นมีผลทำให้แรงลดลง ทันทีที่แผ่นวัสดุสัมผัสกับตาย การเปลี่ยนมุมตัดก็ไม่มีผลกระทบอีกต่อไป

3.2 ความเค้นและความเครียดที่เกิดจากการตัด

ในการงอชิ้นงานนั้นได้เกิดความเค้นดึงขึ้นที่ด้านหนึ่งและอีกด้านหนึ่งนั้นได้เกิดความเค้นอัดขึ้น การกลับตรงข้ามของความเค้นทั้งสองนี้จะต้องเกิดขึ้นตรงบริเวณใกล้ ๆ เส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงาน ความเค้นดึงและความเค้นอัดจะเกิดขึ้นมากที่สุดตรงบริเวณด้านขอบนอกทั้งสองข้างของความหนาของชิ้นงาน และความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งสองนี้จะค่อย ๆ ลดลง ๆ เมื่อระยะห่างเข้ามาใกล้กับเส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงาน ซึ่งที่เส้นแกนกลางของความหนาหรือบริเวณใกล้ ๆ เส้นแกนกลางของความหนาจะมีความเค้นเป็นศูนย์คือไม่เกิดความเค้นขึ้นเลย เส้นที่ไม่มีมีความเค้นและความเครียดเกิดขึ้นเลยเราเรียกว่า เส้นแกนกลาง (neutral axis) ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งแสดงตำแหน่งเส้น

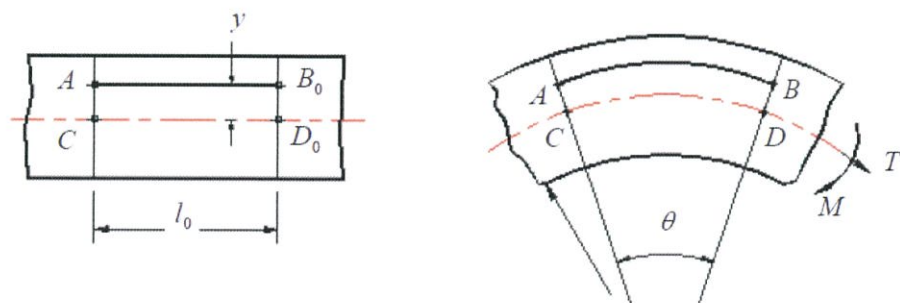
แกนกลางและการกระจายของความเครียดตามความหนาของแผ่นโลหะและการเกิดของเส้นแกนกลางจะแบ่งได้ดังนี้

1. ถ้าความหนาของโลหะแผ่นคงที่ ขณะที่รัศมีของการงอลดลงเส้นแกนกลางจะเลื่อนตัวมาทางด้านที่เกิดการอัดตัว
2. ถ้ารัศมีของการงอคงที่ ขณะที่ความหนาของโลหะแผ่นเพิ่มขึ้น เส้นแกนกลางจะเลื่อนตัวมาทางด้านที่เกิดการอัดตัว
3. ถ้ารัศมีของการงอและความหนาของโลหะแผ่นคงที่ ขณะที่มุมของการงอได้เพิ่มขึ้นเส้นแกนกลางจะเลื่อนตัวทางด้านที่เกิดการอัดตัว
4. ถ้าไม่มีความเค้นเกิดขึ้นบนชิ้นงาน เส้นแกนกลางจะอยู่ตรงกลางของความหนาของชิ้นงาน



รูปที่ 3.3 (ก) เส้นแกนกลาง (ข) การกระจายของความเครียดตามความหนาของแผ่นโลหะ

อย่างไรก็ตามในการงอเส้นแกนกลาง (Neutral Axis) อาจยืดออกโดยชั้นที่ห่างออกไปจากผิวกึ่งกลางมีการเปลี่ยนรูป ดังรูปที่ 3.4 ถ้าพิจารณาชั้นซึ่งมีความยาวเดิม l บนแผ่นราบแล้วเมื่อเกิดการตัดและการดึงยึดพร้อมกันก็อาจมีความยาวใหม่



รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนรูปชั้น AB

$l_0 = \theta(\rho + y)$ เมื่อ ρ คือ รัศมีความโค้งของผิวกึ่งกลาง ถ้าชั้นที่ผิวกึ่งกลางมีความยาวหลังการเปลี่ยนรูปเท่ากับ $l_s = \theta\rho$ แล้ว

$$l = l_s \left[1 + \frac{y}{\rho} \right] \quad (3.8)$$

ความเครียดในแนวแกนของชั้น AB คือ

$$\varepsilon_l = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \left\{ \frac{l_s}{l_0} \left(1 + \frac{y}{\rho} \right) \right\} \quad (3.9)$$

หรือ

$$\varepsilon_l = \ln \frac{l_s}{l_0} + \ln \left(1 + \frac{y}{\rho} \right) \quad (3.10)$$

ถ้าให้ ε_a เป็นความเครียดที่เกิดขึ้นจากการยืดของผิวกึ่งกลางแล้ว

$$\varepsilon_l = \ln \frac{l_s}{l_0} \quad (3.11)$$

และให้ ε_b คือ ความเครียดดัดแล้ว

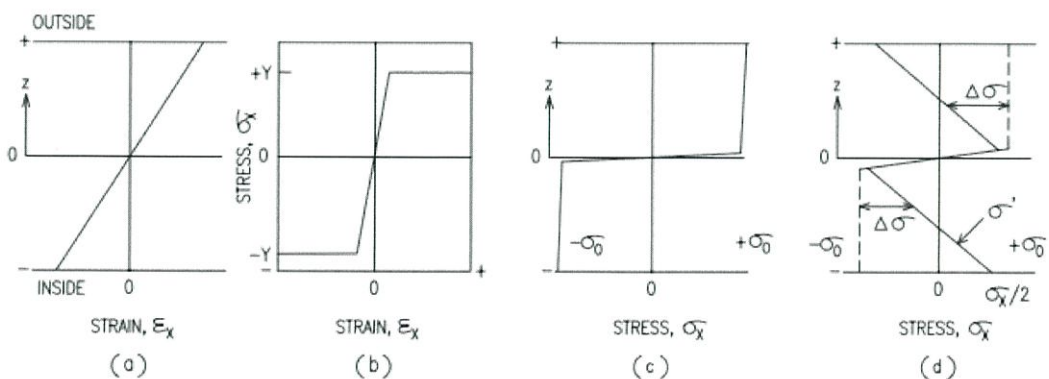
$$\varepsilon_b = \ln \left(1 + \frac{y}{\rho} \right) \quad (3.12)$$

ดังนั้นความเครียดในแนวแกน คือ

$$\varepsilon_l = \varepsilon_a + \varepsilon_b \quad (3.13)$$

3.3 โมเมนต์ดัดของวัสดุ

เมื่อแผ่นวัสดุมี $w \gg t$ ดังนั้นจึงไม่คิดการเปลี่ยนแปลงในแนวกว้าง เพราะฉะนั้นจึงสามารถพิจารณาการดัดเป็นการทำงานแบบความเครียดในระนาบ (Plane Strain) โดย $\varepsilon_y = 0$ และ $\varepsilon_z = -\varepsilon_x$ จากสมการ (3.3) และภาพที่ (3.8) ค่า ε_x แปรผันเชิงเส้นตรงจาก $\frac{-t}{2r}$ ที่ด้านใน ($z = \frac{-t}{2}$) ไปเป็นศูนย์ที่ระนาบกึ่งกลาง ($z = 0$) และเป็น $\frac{+t}{2r}$ ที่ผิวด้านนอก ($z = \frac{t}{2}$) เมื่อทราบความเครียดก็สามารถหาการกระจายความเค้นภายในได้ ถ้าทราบความชันของเส้นโค้งความเค้นกับความเครียด



รูปที่ 3.5 แสดงการกระจายความเครียดและความเค้นตลอดความหนาแผ่น

- (a) ความเครียดดัดแปรผันเชิงเส้นตรงตลอดความหนา
 (b) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสำหรับวัสดุที่ไม่เกิดการทำให้แข็งตัว
 ความเครียด
 (c) การกระจายความเค้นเนื่องจากโมเมนต์ดัด
 (d) ความเค้นเหลือค้างที่เกิดจากการเอาภาระออก

ประการแรก สมมติว่าวัสดุเป็นพลาสติกยืดหยุ่นอย่างอุดมคติ ไม่เกิดการทำให้แข็งด้วยความเครียด ถ้าความเค้นคราก คือ Y ความเค้นไหลแบบความเครียดในระนาบ คือ $\sigma_0 = \sqrt{4/3}Y$ รูปที่ 3.5c แสดงการกระจายความเค้นตลอดความหนาแผ่นภาคตัดทั้งหมดอยู่ภายใต้ความเค้น $\sigma_x = \pm\sigma_0$ ยกเว้น c แกนยืดหยุ่นใกล้ระนาบกึ่งกลาง ซึ่งจะหดตัวเมื่อวัสดุมีการดัดลดลง สำหรับการดัดเกือบทั้งหมดสามารถไม่คิดแกนยืดหยุ่นนี้ได้

การคำนวณโมเมนต์ดัด M ที่ใช้สำหรับการดัด สมมติว่าไม่มีแรงภายนอกสุทธิในทิศทาง X ($\sum F_x = 0$) อย่างไรก็ตามมีแรงภายใน dF_x กระทำบนเอลิเมนต์ของภาคตัด $w dz$ ซึ่งมีค่า $dF_x = \sigma_x w dz$ เอลิเมนต์มีผลต่อโมเมนต์ดัด เมื่อนำแรงนี้คูณกับแขนยาว Z ได้

$$dM = z dF_x = z \sigma_x w dz \quad (3.14)$$

ดังนั้น จึงหาโมเมนต์ดัดรวมได้จาก

$$M = \int_{-t/2}^{+t/2} w \sigma_x z dz = 2 \int_0^{t/2} w \sigma_x z dz \quad (3.15)$$

(เมื่อใช้ลิมิต $+t/2$ ถึง $-t/2$ เครื่องหมายของทั้ง σ_x และ Z เปลี่ยนแปลงที่ระนาบกึ่งกลาง ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงเปลี่ยนลิมิตเป็นสองเท่า จาก 0 ถึง $t/2$ แทน) สำหรับวัสดุพลาสติกในอุดมคติที่ไม่คิดแกนยืดหยุ่น $\sigma_x = \sigma_0$ และ

$$M = 2w\sigma_0 \int_0^{t/2} z dz = w\sigma_0 \frac{t^2}{4} \quad (3.16)$$

โมเมนต์ภายนอกที่เกิดจากเครื่องมือต้องเท่ากับโมเมนต์ต้านทานการดัดภายในของวัสดุชิ้นงาน ดังนั้น สมการ (3.16) จึงใช้ได้กับทั้งสองกรณี เมื่อเอาโมเมนต์ภายนอกออก โมเมนต์ภายในต้องหมดไปด้วย เมื่อวัสดุดีดกลับอย่างยืดหยุ่น การกระจายความเค้นภายในมีผลลัพธ์ทำให้โมเมนต์ดัดเป็นศูนย์ เนื่องจากเอาภาระออก เป็นการเอาออกจากช่วงยืดหยุ่น

$$\Delta\sigma_x = E' \Delta\epsilon_x \quad (3.17)$$

เมื่อเป็นกรณีความเครียดในระนาบ การเปลี่ยนแปลงความเครียดหาได้จาก

$$\Delta\varepsilon = \frac{z}{r} - \frac{z}{r'} \quad (3.18)$$

เมื่อ r' คือ รัศมีความโค้งหลังการตีตกกลับ ซึ่งมีผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัด ΔM

$$\Delta M = 2w \int_0^{\frac{t}{2}} \Delta\sigma_x z dz = 2w \int_0^{\frac{t}{2}} E' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right) z^2 dz$$

เมื่อ

$$\Delta M = \frac{wEt^3}{12} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right) \quad (3.19)$$

เนื่องจาก $M - \Delta M$ หลังจากการตีตกกลับ ดังนั้นเมื่อให้สมการ (3.16) เท่ากับสมการ (3.19) จะได้

$$\frac{wEt^3}{12} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right) = \frac{w\sigma_0 t^2}{4}$$

หรือ

$$\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} = \frac{3\sigma_0}{tE'} \quad (3.20)$$

ความเค้นเหลือค้างที่เกิดขึ้น คือ

$$\begin{aligned} \sigma'_x &= \sigma_x - \Delta\sigma_x \\ &= \sigma_0 - E'\Delta\sigma_x \\ &= \sigma_0 - E'z \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right) \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\sigma'_x = \sigma_0 \left(1 - \frac{3z}{t} \right) \quad (3.21)$$

ซึ่งเมื่อลงจุดได้ดังรูปที่ (3.5 d) สังเกตว่า ที่ผิวด้านนอกซึ่ง $z = \frac{t}{2}$ ความเค้นเหลือค้างเป็นความเค้นกด คือ $\sigma'_x = -\sigma_0/2$ และที่ผิวด้านในซึ่ง $z = -\frac{t}{2}$ เป็นความเค้นดึง คือ $\sigma'_x = +\sigma_0/2$ วัสดุที่แข็งด้วยความเครียดก็วิเคราะห์คล้ายกัน ถ้า $\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon}^n$ แล้ว

$$\sigma_x = K'\varepsilon_x^n = K' \left(\frac{z}{r} \right)^n \quad (3.22)$$

เมื่อ $K' = K \left(\frac{4}{3} \right)^{\frac{(n+1)}{2}}$ แทนค่า σ_x ในสมการที่ (3.15) และวิเคราะห์ต่อไปจะได้

$$M = \left(\frac{2}{2+n} \right) \frac{wK'}{r^n} \left(\frac{t}{2} \right)^{2+n} \quad (3.23)$$

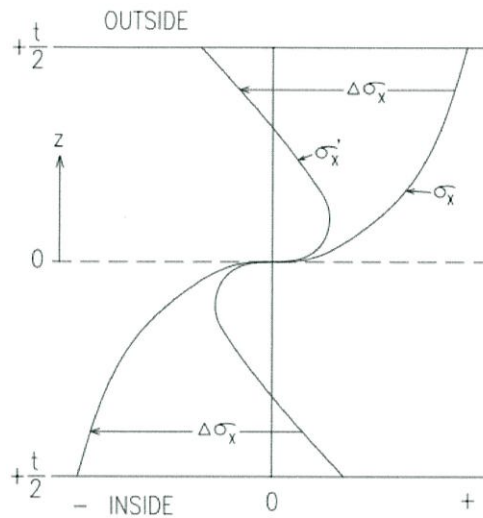
เนื่องจาก ΔM ยังคงอธิบายโดยสมการที่ (3.25) และหลังการตีตกกลับ $M - \Delta M$

$$\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'}\right) = \left(\frac{6}{2+n}\right) \left(\frac{K'}{E'}\right) \left(\frac{t}{2r}\right)^n \left(\frac{1}{t}\right) \quad (3.24)$$

ใช้สมการ (3.17), (3.18) และ (3.24) ได้

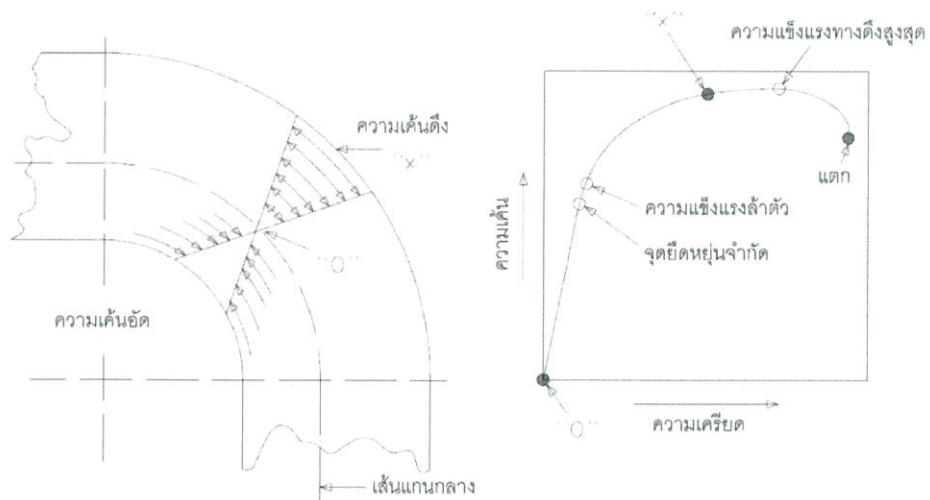
$$\sigma' = K' \left(\frac{z}{r}\right)^n \left[1 - \left(\frac{3}{2+n}\right) \left(\frac{2z}{t}\right)^{1-n}\right] \quad (3.25)$$

การแปรผันของ $\sigma_x, \Delta\sigma_x$ และ σ'_x บนภาคแสดงในรูปที่ (3.6) ขนาดของการตีดกลับทำนายโดยสมการ (3.20) หรือ (3.24) อาจมีค่าสูงมาก



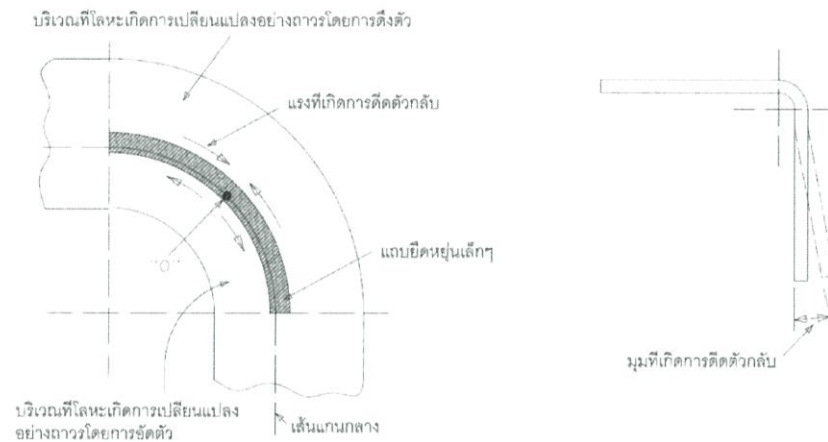
รูปที่ 3.6 แสดงการกระจายความเค้นภายใต้โมเมนต์ดัดและหลังการเอาภาระออกของวัสดุที่แข็งด้วยความเครียด

3.4 การตีดตัวกลับของชิ้นงาน



รูปที่ 3.7 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของความเค้นในการดัด

จากรูปที่ 3.7 เมื่อได้ทำการตัดชิ้นงานแล้วจะมีความเค้นเกิดขึ้นในบริเวณที่ทำการตัดและความเค้นที่เกิดขึ้นนี้จะมีความแตกต่างกันคือไม่เหมือนกันทุกจุดซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดการบิดตัวกลับของชิ้นงาน ความเค้นดึงจะเกิดขึ้นมากที่สุดที่ผิวหน้าด้านนอกของการตัดและจะค่อยๆลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะของชิ้นงานเข้าใกล้ศูนย์กลางของความหนา ซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นนี้จะกลายเป็นศูนย์ที่เส้นแกนกลาง จากรูปที่ 3.7 เป็นการแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นดึงและความเค้นอัดในบริเวณที่มีการงอจากรูปจะเห็นได้ว่าจุด “O” นั้น ความเค้นดึงจะมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งจุดนี้จะอยู่บนเส้นแกนกลาง และค่าความเค้นจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุด x ที่ผิวด้านนอกของชิ้นงานที่จุด x นี้จะมีค่าความเค้นดึงที่มากที่สุด



รูปที่ 3.8 แรงที่เกิดจากการบิดตัวกลับ

จากรูปที่ 3.8 เราจะเห็นได้ว่าบริเวณส่วนที่ใกล้กับเส้นแกนกลางนั้นจะมีความเค้นที่เกิดขึ้นต่ำกว่าจุดยืดหยุ่นจำกัด สำหรับโลหะส่วนนี้นั้นได้ถูกแสดงด้วยแถบเล็กๆ ที่เรียกว่าแถบยืดหยุ่น (elastic band) แถบเล็กๆ นี้จะอยู่ทั้งสองข้างของเส้นแกนกลาง โลหะที่อยู่ห่างไปจากแถบกลางของชิ้นงานจะมีความเค้นเกิดขึ้นมากกว่าจุดความแข็งแรงล้าตัวของชิ้นงานนั้น และที่บริเวณนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงของโลหะอย่างถาวร เมื่อได้ทำการงอของชิ้นงานแล้วและขณะที่ดึงเอาชิ้นงานออกไปนั้น ส่วนที่เป็นแถบยืดหยุ่นเล็กๆ ก็จะพยายามดึงตัวกลับเข้าในตำแหน่งเดิม แต่ก็ไม่สามารถดึงตัวกลับมาได้หมด เพราะว่ามี การต้านทานของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงของโลหะอย่างถาวร ดังนั้นจึงมีการบิดตัวกลับเพียงเล็กน้อยเท่านั้นการที่โลหะดึงตัวกลับอย่างนี้เรียกว่า “Spring back” สาเหตุที่โลหะต้องดึงตัวกลับก็เพราะว่าต้องการให้อยู่ในสภาวะสมดุลเท่านั้นเอง สำหรับส่วนที่เป็นแถบยืดหยุ่นเล็กๆ นั้นจะเป็นตัวทำให้เกิดแรงของการดึงกลับรอบจุด “O” ดังที่แสดงไว้ในรูป ความจริงแล้วในช่วงของการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรของโลหะ (plastic deformation) ก็ยังคงมีส่วนที่เป็นความยืดหยุ่นปนอยู่เล็กน้อยซึ่งส่วนนี้จะไปเพิ่มแรงในการดึงตัวกลับให้มากขึ้น การตัดชิ้นงานในช่วงยืดหยุ่นของวัสดุชิ้นงาน (ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานมีค่าความเค้นจุดคราก) หลังจากตัดชิ้นงานและทำการปล่อยแรง (Unload) ออกจากแผ่นงานแล้วความเค้นที่เกิดขึ้นที่มุมตัดของโลหะบางส่วนยังมีคุณสมบัติอยู่

ในช่วงยืดหยุ่นซึ่งยังเปลี่ยนเป็นพลาสติกไม่หมด จึงพยายามปรับให้เกิดสมดุลของความเค้น เป็นผลทำให้เกิดการติดตัวกลับของชิ้นงาน โดยการติดตัวกลับจะมีค่าน้อยแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับตัวแปรและค่ากำหนดต่างๆดังนี้

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อการติดตัวกลับ

ตัวแปรที่ส่งผลต่อการติดตัวกลับ	การติดตัวกลับ
วัสดุที่มีความแข็งแรงสูง (Higher Material Strength)	มาก
วัสดุบาง (Thinner Material)	มาก
มอดูลัสยืดหยุ่นต่ำ (Lower Young's Modulus)	มาก
ตัดวัสดุที่มุมตัดมากๆ (Larger Die Radius)	มาก
ใช้ช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ในการตัดมาก (Greater Wipe Steel Clearance)	มาก
ความเรียบผิวหรือแรงเสียดทาน (μ)	มาก

โดยทั่วไปแล้วปริมาณของการติดตัวกลับขึ้นอยู่กับเนื้อวัสดุ ความหนา รัศมีการตัด และเงื่อนไขในการคำนวณซึ่งค่าอัตราส่วนการติดตัวกลับ (L) เป็นค่าที่ได้จากการทดลองและวิธีการหาค่าอัตราส่วนการติดตัวกลับคำนวณได้ดังสมการที่ (3.26)

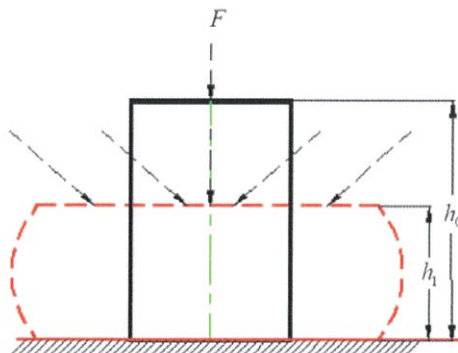
$$K = \frac{\alpha_r}{\alpha} \quad (3.26)$$

ซึ่งค่า K เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง และสามารถหามุมของการติดตัวกลับได้จากสมการ

$$\delta = \alpha - \alpha_r = \left(\frac{1}{K-1}\right) \alpha_r \quad (3.27)$$

3.5 ความเร็วในการแปรรูป

ความเร็วในการแปรรูปสามารถหาได้จากความเร็วเคลื่อนตัวของเครื่องเพรสและความสูงเริ่มต้นชิ้นงานดังแสดงในรูป 3.9



รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงจากการกด

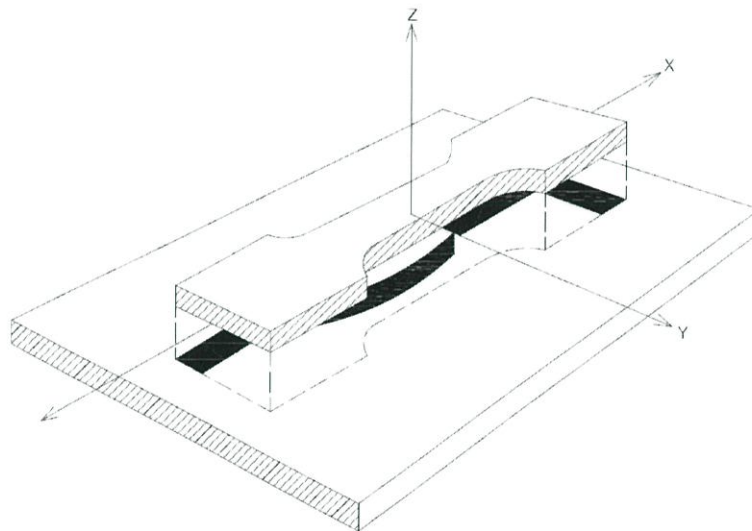
จะได้

$$\varphi = \frac{v}{h_0} \quad (3.27)$$

3.6 พลาสติกแอนไอโซทรอปิก

จากพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานทดสอบการดึงที่เป็นแผ่นแถบ ซึ่งตัดออกมาจากแผ่นรีดเมื่อได้รับแนวตั้งในแนวแกน สามารถเกิดการครากได้ ความต้านทานแรงดึงครากของชิ้นงานทดสอบที่ตัดทำมุม θ กับทิศทางการรีดไม่แปรผันมากนักและอาจได้ผลสรุปอย่างผิดพลาดว่า วัสดุเป็นไอโซทรอปิก ความผิดพลาดอาจเกิดขึ้นได้ถ้าวัดความเครียดในแนวขวาง ซึ่งเป็นผลมาจากการดึง ถ้าทิศทางเป็นอุดมคติ ความหนาไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากการยึดในแนวยาวมีผลทำให้ความกว้างของชิ้นงานทดสอบลดลง พารามิเตอร์ที่มีประโยชน์ คืออัตราส่วน R ของความเครียดพลาสติก ซึ่งค่า R มีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้างต่อแนวหนา

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (3.28)$$



รูปที่ 3.10 แสดงชิ้นงานทดสอบการดึงที่เป็นแผ่นแถบตัดมาจากแผ่นรีด

ดังแสดงในรูปที่ 3.10 เมื่อ w และ t คือทิศทางความกว้างและทิศทางความหนาของชิ้นงานทดสอบการดึง ตามลำดับ ดังนั้น $\varepsilon_w = \ln\left(\frac{w}{w_0}\right)$ และ $\varepsilon_t = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right)$ สำหรับวัสดุไอโซทรอปิก $R = 1$ ถ้าค่า R สูงมากแสดงว่าวัสดุมีค่าความต้านทานสูงมาก ตามความจริงแล้วความเค้นครากมีค่าสูงมาก ถ้าทดสอบการกดในแนวความหนาหรือการทดสอบการดึงสองแกนเท่ากัน ($\sigma_x = \sigma_y$) การทดสอบทั้งสองแบบต้องมีความเครียดในแนวความหนา เพราะไม่มีระบบการสลับไคที่ทำให้ความหนาลดลง ดังนั้นค่า R ที่วัดได้จากการทดสอบการดึงแถบจึงไม่แสดงแอนไอโซทรอปิกในแนวตั้งฉากได้อย่างถูกต้อง

3.6.1 การวัดค่า R

ถึงแม้ว่าค่า R มีนิยามว่าอัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้างต่อแนวหนา แต่ความเครียดในแนวหนา ϵ_t ไม่สามารถวัดได้อย่างแม่นยำบนแผ่นบาง ความเครียดในแนวหนามักหาได้จากการวัดความเครียดในแนวยาวและความเครียดในแนวกว้าง โดยใช้หลักปริมาตรคงตัว $\epsilon_t = -(\epsilon_1 + \epsilon_w)$ เพื่อการวัดที่แม่นยำ

บางครั้งค่า R ไม่แปรผันตามความเครียด ฉะนั้น อัตราส่วนของความเครียดที่เพิ่มขึ้นค่า R คงตัวมีความสำคัญเมื่อใช้ R และโมดูลัสยืดหยุ่น E มักแปรผันคล้ายกันตามเนื้อรูปผลึก แม้ว่าสหสัมพันธ์พื้นฐานไม่แม่นยำตรง แต่ก็มีพื้นฐานสำหรับใช้กับเครื่องมือวัดเชิงอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ซึ่งวัดค่า E ของแผ่นแถบบางด้วย Sonic Velocity และปรับให้อ่านค่า R ได้โดยปกติค่า R มักแปรผันตามทิศทางทดสอบ θ และมักใช้แสดงคุณลักษณะของวัสดุโดยค่า R เฉลี่ยคือ \bar{R} ซึ่ง

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (3.29)$$

ตัวห้อยจะแสดงทิศทางของมุม θ

3.6.2 ทฤษฎีสภาพพลาสติกแอนไอโซทรอปิกของฮิลล์

ฮิลล์ได้เสนอการพิจารณาพลาสติกแอนไอโซทรอปิกโดยไม่คำนึงถึงรูปผลึกเดิม โดยสมมติว่าเป็นวัสดุเอกพันธ์แสดงคุณลักษณะ โดยแกนไอโซทรอปิก 3 แกนซึ่งตั้งฉากกัน คือ แกน x, y และ z ซึ่งใช้คุณสมบัติสมมาตรในแผ่นรีด มักใช้ทิศทาง x, y และ z เป็นทิศทางการรีด ทิศทางขวางการรีด และทิศทางความหนาตามลำดับ ทฤษฎีนี้ยังสมมติว่า ความต้านแรงดึงครากและแรงกดครากในทิศทางที่กำหนด มีค่าเท่ากัน

เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกที่ฮิลล์เสนออยู่ในรูป

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (3.30)$$

เมื่อ F, G, H, L, M และ N คือ ค่าคงตัวซึ่งแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก สังเกตว่า ถ้า $F = G = H$ และ $L = M = N = 3F$ สมการนี้ลดรูปลงเป็นเกณฑ์ของฟอนมิเซล ค่าคงตัว F, G และ H สามารถประเมินได้จากการทดสอบการดึง

พิจารณาการทดสอบในทิศทาง x และให้ x เป็นความเค้นดึงคราก ขณะคราก

$$\begin{aligned} \sigma_x &= X \\ \sigma_y = \sigma_z = \tau_{ij} &= 0 \end{aligned}$$

ดังนั้น สมการ (3.24) กลายเป็น

$$(G + H)X^2 = 1$$

หรือ
$$X^2 = \frac{1}{(G+H)}$$

ในทำนองเดียวกันถ้า Y และ Z คือความเค้นดึงครากในทิศทาง y และ z

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

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

$$Z^2 = \frac{1}{F+G} \quad (3.31)$$

แก้สมการจะได้

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

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

$$2H = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} \quad (3.32)$$

ในกรณีของโลหะแผ่นการวัดค่า Z ทำได้ยาก ค่าคงตัว L , M และ N สามารถหาได้จากการทดสอบการเฉือน กฎการไหลสามารถหาได้โดยใช้สมการ

$$d\varepsilon_{ij} = d\tau \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3.33)$$

เมื่อ $f(\sigma_{ij})$ คือ ฟังก์ชันการคราก (ใช้ได้กับวัสดุแอนไอโซทรอปิกและไอโซทรอปิก) หาอนุพันธ์ของสมการ (2.34) ได้กฎการไหล

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

ในการหากฎการไหลสำหรับความเครียดเฉือน $d\varepsilon_{yz}$, $d\varepsilon_{zx}$ และ $d\varepsilon_{xy}$ ต้องเขียนเกณฑ์การครากสมการ (2-30) ใหม่เพื่อให้พจน์ของความเค้นเฉือนปรากฏในรูป

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

มีฉะนั้นแล้วอนุพันธ์ย่อยจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ใช้ไม่ได้คือ $d\varepsilon_{yz} = 2d L \lambda_{yz}$ และ $d\varepsilon_{zy} = 0$ สังเกตว่าสมการ (3.31) คือ $d\varepsilon_x + d\varepsilon_y + d\varepsilon_z = 0$ แสดงว่าปริมาตรคงตัวพิจารณาการทดสอบการดึงในทิศทาง X อีกครั้งหนึ่ง แทนค่า $\sigma_x = X$, $\sigma_y = \sigma_z = 0$ ในสมการ (3.25) ได้ความเครียดเป็นดังนี้

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

$$\begin{aligned}d\varepsilon_y &= -d\lambda(H)X \\d\varepsilon_z &= -d\lambda(G)X\end{aligned}$$

เนื่องจากอัตราส่วนความเครียดสำหรับการทดสอบการดึงในทิศทาง x มีนิยามว่า

$$R = R_0 = (d\varepsilon_y/d\varepsilon_z)$$

ดังนั้น

$$R = \frac{H}{G} \quad (3.34)$$

ในทำนองเดียวกัน นิยามให้ $P = R_{90}$ คือ อัตราส่วนความเครียดในทิศทาง y โดย $P = d\varepsilon_x/d\varepsilon_z$ เมื่อ $\sigma_y = Y$ และ $\sigma_x = \sigma_z = 0$ จากสมการ (3.31) ได้

$$P = \frac{H}{F} \quad (3.35)$$

จากสมการ (3.32) และ (3.33) สามารถใช้ทำนายค่าความเค้นครากในทิศทาง z โดยการทดสอบการดึงในทิศทาง x และ y แล้ววัดค่า R และ P พร้อมทั้ง X และ Y จากสมการ (3.32) ได้

$$Z^2 = \frac{1}{(F+G)} \text{ และ } X^2 = \frac{1}{(G+H)}$$

ดังนั้น

$$\frac{Z^2}{X^2} = \frac{(G+H)}{(F+G)} = \frac{(1/R)+1}{\frac{1}{R}+1/P}$$

หรือ

$$Z = X\sqrt{P(1+R)/(P+R)}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$Z = Y\sqrt{R(1+P)/(P+R)} \quad (3.36)$$

ถ้า X, Y, Z เป็นความเค้นดึงครากในทิศทางหลักของวัสดุแอนไอโซทรอปิกแล้ว สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ดังนี้

$$\left. \begin{aligned}\frac{1}{X^2} &= G + H, & 2F &= \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} \\ \frac{1}{Y^2} &= H + F, & 2G &= \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} \\ \frac{1}{Z^2} &= F + G, & 2H &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2}\end{aligned}\right\} \quad (3.37)$$

และถ้า R , S , T เป็นความเค้นเฉือนครากซึ่งสัมพันธ์กับแกนหลักแอนไอโซทรอปิก ดังนั้น

$$2L = \frac{1}{R^2} \quad 2M = \frac{1}{S^2} \quad 2N = \frac{1}{T^2} \quad (3.38)$$

จากฟังก์ชันการครากของฮิลล์ข้างต้น สามารถใช้ประโยชน์ในการหาความเค้นประสิทธิผลของเกณฑ์การครากนี้ ซึ่งแทนด้วย $\bar{\sigma}$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเค้นที่กระทำ ถ้าขนาดของ $\bar{\sigma}$ ถึงค่าวิกฤตแล้ว สภาพความเค้นที่กระทำจะทำให้เกิดการคราก ฟังก์ชันการครากแอนไอโซทรอปิกและสภาพความเค้นที่กระทำ สามารถเสนอเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกในรูปแบบทั่วไปดังนี้

$$\bar{\sigma} = \left[a_1(\sigma_y - \sigma_z)^2 + a_2(\sigma_z + \sigma_x)^2 + a_3(\sigma_x + \sigma_y)^2 + 3a_4\tau_{zx}^2 + \frac{3a_5\tau_{yz}^2 + 3a_6\tau_{xy}^2}{\sqrt{2}} \right]^{1/2} \quad (3.39)$$

เมื่อค่าคงตัว $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$a_1 = \frac{1}{YD(2)^2} + \frac{1}{YD(3)^2} - \frac{1}{YD(1)^2} \quad (3.40)$$

$$a_2 = \frac{1}{YD(3)^2} + \frac{1}{YD(1)^2} - \frac{1}{YD(2)^2} \quad (3.41)$$

$$a_3 = \frac{1}{YD(1)^2} + \frac{1}{YD(2)^2} - \frac{1}{YD(3)^2} \quad (3.42)$$

$$a_4 = \frac{2}{YS(3)^2} \quad (3.43)$$

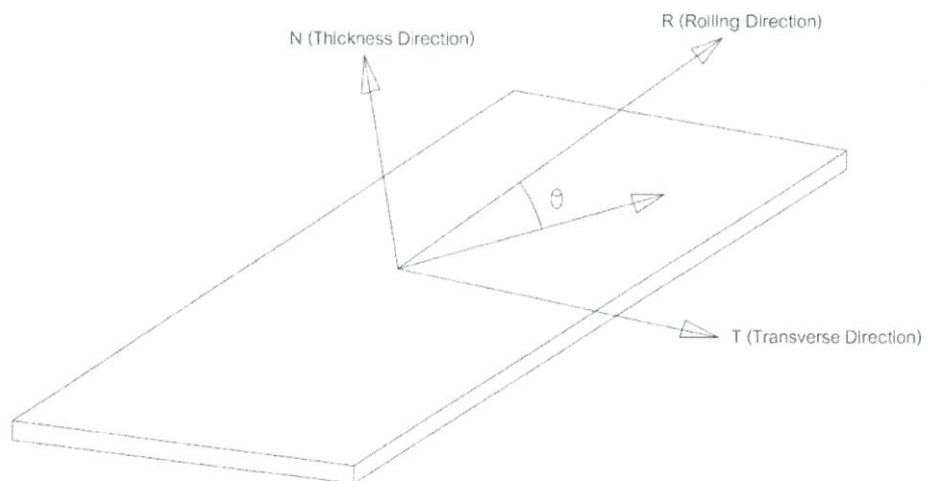
$$a_5 = \frac{2}{YS(2)^2} \quad (3.44)$$

$$a_6 = \frac{2}{YS(1)^2} \quad (3.45)$$

โดยที่ YD คือ สัมประสิทธิ์ความเค้นครากในแนวแกน

YS คือ สัมประสิทธิ์ความเค้นเฉือนคราก

สัมประสิทธิ์สามเค้นครากในแนวแกนและสัมประสิทธิ์ความเค้นเฉือนคราก สามารถหาค่าได้ดังนี้



รูปที่ 3.11 แนวแกนแอนไอโซทรอปิก

จากรูปที่ 3.11 แผ่นชิ้นงานทดสอบการดึง ซึ่งตัดออกมาจากแผ่นรีดในสามทิศทางคือ ทิศทางทำมุม 0, 45 และ 90 องศา กับแนวรีด ในการทดสอบการดึงจะได้ ความเค้นดึงครากคือ σ_0 , σ_{45} และ σ_{90} ตามลำดับ

ความเค้นครากในทิศทางที่สาม (ความหนา) หาจากความสัมพันธ์

$$\sigma_N = \sigma_0 \sqrt{\frac{r_{90}(1+r_0)}{r_0+r_{90}}} = \sigma_{90} \sqrt{\frac{r_0(1+r_{90})}{r_0+r_{90}}} \quad (3.46)$$

โดยที่ r คือค่าแอนไอโซทรอปิกในแนวทิศทางทำมุมกับแนวรีด สัมประสิทธิ์ความเค้นครากในแนวแกนหาได้จาก

$$TD(1) = \frac{\sigma_N}{\sigma_{av}} \quad (3.47)$$

$$TD(2) = \frac{\sigma_{90}}{\sigma_{av}} \quad (3.48)$$

$$TD(3) = \frac{\sigma_N}{\sigma_{av}} \quad (3.49)$$

โดยให้ σ_{av} คือ ความเค้นเฉลี่ยของทุกทิศทาง

ในทำนองเดียวกัน สัมประสิทธิ์ความเค้นเฉือนคราก ซึ่งมีค่า

$$YS(1) = YD(3) \sqrt{\frac{3}{2r_{45}+1}} \quad (3.50)$$

และ $YS(2) = YS(3) = 1.0 \quad (3.51)$

บทที่ 4

การดำเนินการวิจัย

4.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

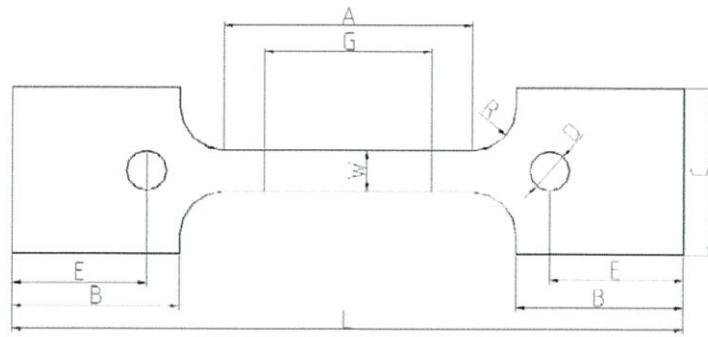
การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อ ศึกษาพฤติกรรมการตีดตัวกลับในการดัดขึ้นรูปตัววีของวัสดุแผ่น เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 หนา 1.5 มิลลิเมตร ที่มีผลทำให้รูปทรงชิ้นงานภายหลังการดัดมีความแม่นยำน้อยลงและไม่เป็นไปตามจุดประสงค์การใช้งาน การศึกษาปัญหาดังกล่าวเพื่อจะได้ทราบถึงพฤติกรรมของวัสดุโลหะแผ่นที่มีการเปลี่ยนรูปตามทิศทางต่างๆที่ทำมุมกับแนวรีด ซึ่งได้กำหนดไว้ครั้งละ 15 องศา จาก 0 องศาถึง 90 องศา และเปรียบเทียบผลการทดลองจากการดัดโดยเครื่องจักรที่แตกต่างกันกับผลการคำนวณทางทฤษฎี การดัดขึ้นรูปดังกล่าวได้เปลี่ยนขนาดรัศมีพื้นที่ใช้ในการดัด 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร

ในการดำเนินการวิจัยเพื่อให้ได้ข้อมูลถูกต้องและสมบูรณ์จึงได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

1. แผ่นวัสดุที่ใช้ในการทดลอง
2. ชุดแม่พิมพ์
3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
4. วิธีทดลอง

4.1.1 วัสดุทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ใช้ศึกษาอิทธิพลของความหนาและมุมดัดต่อการตีดตัวกลับ โดยชิ้นงานทดลองได้จากการตัดด้วยแม่พิมพ์แสดงในภาคผนวก ก เพื่อให้มีขนาดกว้าง 15 มิลลิเมตรและยาว 40 มิลลิเมตร ซึ่งแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic Stainless) ที่สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และในทดลองได้นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร เป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8M-92a ซึ่งมีจำนวนชิ้นงานทดสอบในทิศทางทำมุมกับแนวรีดทิศทางละ 3 ชิ้นรวม 21 ชิ้น ในการทดสอบแรงดึงเพื่อต้องการทราบค่าคุณสมบัติทางกล



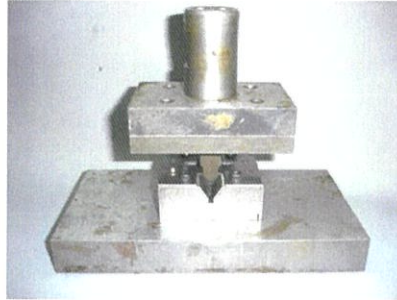
รูปที่ 4.1 รายละเอียดมาตรฐานชิ้นงานทดสอบ

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของขนาดชิ้นงานทดสอบ

รายการ	ขนาด (มิลลิเมตร)
G - ความยาวพิกัด	50.0± 0.1
W - ความกว้าง	12.5± 0.1
R - บัรศมีโค้ง	13.0
L - ความยาว	200.0
A - ความยาวของการลดพื้นที่หน้าตัด	57.0
B - ความยาวส่วนจับยึด	50.0
C - ความกว้างส่วนจับยึด	50.0
D - เส้นผ่านศูนย์กลางรูยึดสลัก	13.0
E - ระยะขอบถึงรูยึดสลัก	40.0

4.1.2 แม่พิมพ์

4.1.2.1 แม่พิมพ์ตัดที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบมาตรฐานสร้างจากวัสดุเหล็กกล้า SKD11 ผ่านการชุบแข็ง สร้างพื้นที่ ดาย และออกแบบให้สามารถถอดเปลี่ยนพื้นที่และดายได้สะดวกเพื่อความรวดเร็วในการทดลอง ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แม่พิมพ์ตัดขึ้นรูปตัววี (V-die bending tools)

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดต่างๆ ของแม่พิมพ์

รัศมีพื้นที่ (มิลลิเมตร) (มิลลิเมตร)	มุมดาย(องศา)	ความกว้างดาย
1.0	90	25
2.0	90	25
3.0	90	25
4.0	90	25
5.0	90	25

4.1.3 เครื่องไฮดรอลิคเพรส

เครื่องไฮดรอลิคเพรสที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 60 ตันสามารถตั้งระยะทางการเคลื่อนที่ด้วยการปรับตำแหน่งแรม (ram) ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.0025 เมตรต่อวินาทีและในตำแหน่งแรมเคลื่อนที่มายังจุดต่ำสุดมีการหน่วงเวลาไว้ 3 วินาทีหลังจากนั้นจะเคลื่อนที่ขึ้นตำแหน่งสูงสุดโดยอัตโนมัติ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เครื่องไฮดรอลิคเพรส ขนาด 60 ตัน

4.1.4 เครื่องทดสอบแรงดึง

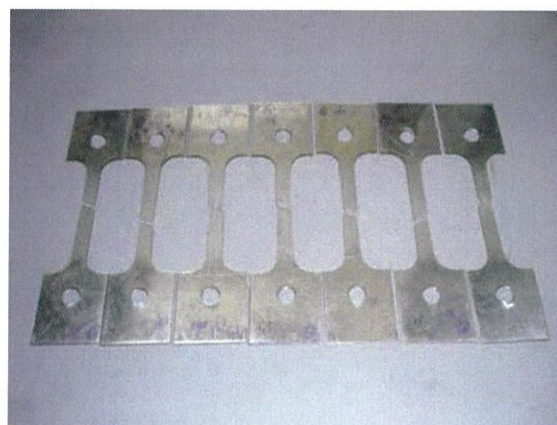
เครื่องทดสอบแรงดึงเป็นแบบ Screw-driven machine ขนาด 10 ตัน เพื่อใช้ทดสอบหาค่าสมบัติทางกลคือ Yield strength, Ultimate strength, Elongation (%EL), Reduction of area (%RA), Strain-hardening (Strength) coefficient (K) และ Strain-hardening exponent (n) และเป็นการทดสอบแรงดึงชิ้นงานทดสอบในทิศทางทำมุมต่างๆกับแนวการรีดความเร็วของหัวจับชิ้นทดสอบ (Crosshead Speed) 10 mm. /min. ซึ่งอยู่ในช่วงตามที่มาตรฐาน ASTM E646-93 ระบุไว้ (5% ถึง 50% ของ Reduce section/min.) ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เครื่องทดสอบแรงดึงแบบ Screw-driven machine ขนาด 10 ตัน

4.2 วิธีการทดลอง

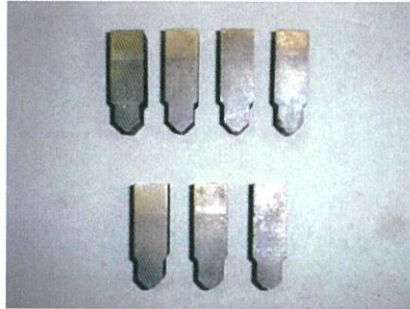
ซึ่งในการศึกษาสมบัติของวัสดุในทิศทางต่างๆได้จากการทดสอบแรงดึงชิ้นงานในทิศทางทำมุมต่างๆกับแนวของการรีดดังรูปที่ 4.5 โดยใช้ความเร็วของหัวจับชิ้นทดสอบ (Crosshead Speed) 10 มิลลิเมตร/นาที ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐาน ASTM E646-93 โดยทดสอบดึงทิศทางละ 3 ชิ้นแล้วนำผลที่ได้มาหาค่าต่างๆของสมบัติวัสดุเชิงกล



รูปที่ 4.5 ชิ้นงานภายหลังการทดสอบแรงดึง

ภายหลังการทดสอบแรงดึงได้ทำการทดลองศึกษาหาค่าการติดตัวกลับวัสดุแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมในทิศทางทำมุมต่างๆกับแนวของการรีดและเปรียบเทียบผลกับการคำนวณทางทฤษฎีตลอดจนผลของ Relaxation behavior โดยมีลำดับขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ในการทดลองโดยให้สามารถเปลี่ยนรัศมีปลายพื้นที่ขนาด 2 ถึง 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.6



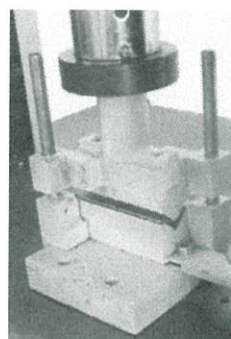
รูปที่ 4.6 พื้นที่ขนาดต่างๆ

2. ตัดชิ้นงานทดสอบขนาดกว้าง 15x40x1.5 มิลลิเมตร ด้วยแม่พิมพ์ตัดเพื่อให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีขนาดที่ถูกต้อง ดังรูปที่ 4.7



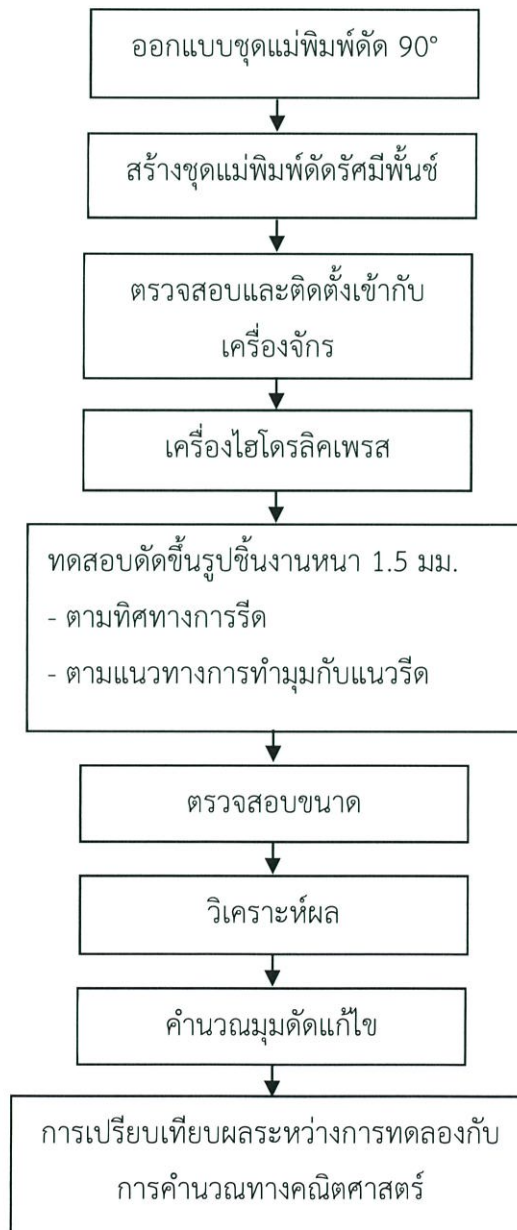
รูปที่ 4.7 ชิ้นงานทดสอบจากการตัดด้วยแม่พิมพ์

3. นำชิ้นงานทดสอบตามแนวรีดและทิศทางทำมุมกับแนวรีดมาทดสอบดัด โดยในแต่ละชุดจะทดสอบจำนวน 5 ชิ้น



รูปที่ 4.8 การทดสอบดัดชิ้นงาน

4. นำชิ้นทดสอบมาทำการตรวจสอบขนาดด้วยเครื่อง Profile Projector เพื่อวัดมุมและรัศมีของชิ้นงาน แล้วบันทึกค่าที่วัดได้
5. วิเคราะห์ผล หาความสัมพันธ์ระหว่างการติดตัวกลับกับรัศมีพื้นซ์จากตัดด้วยเครื่องไฮดรอลิกเพรสในแต่ละชุดการทดสอบ
6. วิเคราะห์ผล เปรียบเทียบการติดตัวกลับของการตัดขึ้นรูปตามแนวรีดและทิศทางการทำมุมกับแนวรีด
7. วิเคราะห์ เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางคณิตศาสตร์
8. คำนวณค่ามุมตัดแก้ไขการติดตัวกลับ
9. นำชิ้นทดสอบของรัศมีพื้นซ์ขนาด 2 มิลลิเมตรถึง 5 มิลลิเมตรในแต่ละชุดมาทำการตรวจสอบขนาดอีกครั้งภายหลังจากระยะเวลา 1 สัปดาห์ด้วยการพล็อตค่าลงในกระดาษ เพื่อวัดมุมชิ้นงานแล้วบันทึกค่าเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการติดตัวกลับ



รูปที่ 4.9 แผนภูมิการทดลอง

4.3 การคำนวณค่าต่างๆ

4.3.1 ความเค้น (Stress, σ)

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

เมื่อ σ = ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็นปาสคาล (Pa, $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$)

P = แรงภายนอกที่มากระทำมีหน่วยเป็น N

A = แรงภายนอกที่มากระทำมีหน่วยเป็น mm^2

แต่ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเป็นแรง (Force, F) มีหน่วยเป็น kgf ดังนั้น

$$P = F (9.81)$$

และ $A = \text{กว้าง} \times \text{ยาว}$ มีหน่วยเป็น mm^2

ดังนั้น $\sigma = \frac{P}{A}$ มีหน่วยเป็น Mpa

4.3.2 ความเครียด (Strain, ϵ)

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.2)$$

เมื่อ ϵ = ความเครียด (Strain)

ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนไป

L_0 = ความยาว Gage Length เท่ากับ 50 mm

แต่ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเป็น Stroke มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) ดังนั้น $\Delta L = \text{Stroke}$ ดังนั้น

$$\epsilon = \frac{\text{Stroke} - 50}{50}$$

4.3.3 จุดคราก (Yield Point)

จากกราฟการทดลองไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจนจึงใช้วิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20% ของความเครียด (Engineering strain) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่

โค้งไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 3.13 การคำนวณหาค่าจุดตัดของเส้นกราฟ (0.2% offset) มีวิธีการดังนี้

4.3.3.1 หาสมการเชิงเส้น (Linear equation) ของเส้นขนานที่ขนานกับกราฟช่วงแรก เช่น $y = 29238x + 28.44$

4.3.3.2 หาสมการลอการิทึม (Logarithm equation) ของเส้นกราฟที่โค้งโดยเลือกกำหนดเป็นระยะสั้นๆ ใกล้บริเวณจุดตัด เช่น $y = 103.97\ln(x) + 786.47$

4.3.3.3 หาค่าตัวแปร x ในสมการทั้งสองสมการจาก Linear equation = Logarithm equation จะได้ $29238x + 28.44 = 103.97\ln(x) + 786.47$ แล้วใช้วิธีทาง Numerical Methods แก้สมการเพื่อหาค่าดังนั้นจะได้ $x = 0.009287$ เพราะฉะนั้นจุดคราก (Yield Point) มีค่าเท่ากับที่ strain = 0.009287

4.3.3.4 ความเค้นจริง (True stress, $\bar{\sigma}$) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$\bar{\sigma} = \sigma(1 + \epsilon) \quad (4-3)$$

เมื่อ $\bar{\sigma}$ = ความเค้นจริง (True stress)

σ = ความเค้น (Engineering stress)

ϵ = ความเครียด (Engineering strain)

4.3.4 ความเครียดจริง (True strain, $\bar{\epsilon}$)

$$\bar{\epsilon} = \ln(1 + \epsilon) \quad (4.4)$$

4.3.5 ความเครียดแข็ง (Strain hardening)

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (4.5)$$

โดยที่ K = Strain- hardening coefficient

n = Strain- hardening exponent

โดยสมการนี้ใช้อธิบายกราฟ True Stress-Strain Curve ในช่วงหลังจากจุดคราก (Yield point) ถึงจุดภาวะสูงสุด (Ultimate tensile strength)

4.3.6 ความเหนียว (Ductility)

ค่าที่ใช้อธิบายจะเป็นเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percentage Elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of Area) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว } 100\% (\%EL) = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (4.6)$$

และ
$$\text{การลดพื้นที่ภาคตัดขวาง } (\%R.A.) = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\% \quad (4.7)$$

เมื่อ L_f = ความยาวของเกจหลังจากดึงจนขาด
 L_0 = ความยาวของเกจเริ่มต้น
 A_0 = พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง
 A_f = พื้นที่หน้าตัดหลังจากดึงขาด

4.3.7 การหาค่า K และ ค่า n

จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแรงดึง มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.3.7.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเป็น แรง (F , Kgf) กับระยะทางที่หัวจับขึ้นทดสอบเคลื่อนที่ไป (Stroke, mm) ซึ่งเราต้องเปลี่ยนเป็นระยะที่ความยาวเกจ (Gage length, L) เปลี่ยนไปซึ่งทำได้โดย

$$L = \frac{\text{Stroke} \times L_f}{\text{Final Stroke}}$$

โดยที่ L = ความยาวเกจเมื่อเกิดความเสียหาย ซึ่งหาได้โดยนำชิ้นงานที่เกิดความเสียหายมาต่อกันแล้ววัดความยาวเกจ final stroke คือ ระยะสุดท้ายที่หัวจับขึ้นทดสอบหยุดเคลื่อนที่

4.3.7.2 ความเค้น (Engineering stress, S) และความเครียด (Engineering strain, e) สามารถหาได้ดังนี้

$$s = \frac{F}{A_0}, e = \frac{L-L_0}{L_0}$$

โดยที่ L_0 = ความยาวเกจเริ่มต้นซึ่งเท่ากับ 50 mm

A_0 = พื้นที่เริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบซึ่งเท่ากับ mm^2

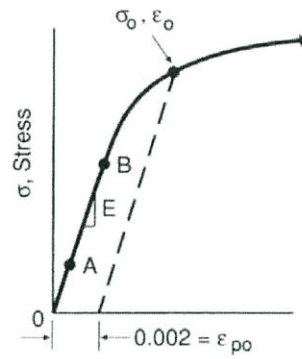
4.3.7.3 ความเค้นจริง (True stress, σ) และความเครียดจริง (True strain, ϵ) สามารถหาได้ดังนี้

$$\sigma = S(e + 1), \epsilon = \ln(e + 1) \quad (4.8)$$

4.3.7.4 จากสมการ Power law

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (4.9)$$

โดยสมการนี้ใช้ได้ในช่วงหลังจากจุดคราก (Yield point) ถึง จุดที่แรง F มีค่าสูงสุดเท่านั้นและการหาจุดครากเราเลือกใช้วิธี Offset และเลือกค่า Offset เท่ากับ 0.2 % (หรือ $\epsilon_{po} = 0.002$) ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การหาจุดครากใน Engineering stress-strain curve โดยวิธี Offset

ใส่ Logarithm ให้กับทั้ง 2 ด้านของสมการ Power law จะได้

$$\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon \quad (4.10)$$

ถ้าให้

$$y = \log \sigma, x = \log \varepsilon, b = \log K$$

จะได้

$$y = nx + b \quad (4.11)$$

จะเห็นว่าเป็นสมการเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ n และตัดแกน y ที่ b โดยวิธี Linear-Regression จะทำให้เราสามารถหาค่า K และ n ได้ดังนี้

$$n = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (4.12)$$

$$b = \frac{\sum y - (n \sum x)}{N} \quad (4.13)$$

$$K = 10^b \quad (4.14)$$

โดยที่ n คือ จำนวนของข้อมูล

บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากการทดสอบหาค่าสมบัติทางกลจากการทดสอบทางด้านแรงดึงมาตรฐาน ASTM E8M-92a และพฤติกรรมการดัดตัวกลับจากการดัดขึ้นรูปตัววีมุม 90 องศา วัสดุโลหะแผ่น JIS SUS430 โดยชิ้นงานทดสอบมีขนาด 15x40x1.5 มิลลิเมตร ทดลองดัดในทิศทางทำมุมต่างๆกับแนวของการรีด ตั้งแต่ 0 ถึง 90 องศาเพิ่มครั้งละ 15 องศาและเปลี่ยนรัศมีปลายพื้นซ์จำนวน 4 ขนาดจาก 2 ถึง 5 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องไฮดรอลิคเพรส และภายหลังการดัดขึ้นรูปทำการวัดมุมด้วยการพล็อตในกระดาษ ซึ่งแสดงผลการทดลองได้นำเสนอตามลำดับดังนี้

ตารางที่ 5.1 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ความหนา 1.5 mm จาก การทดสอบทางด้านแรงดึงมาตรฐาน ASTM E8M-92a

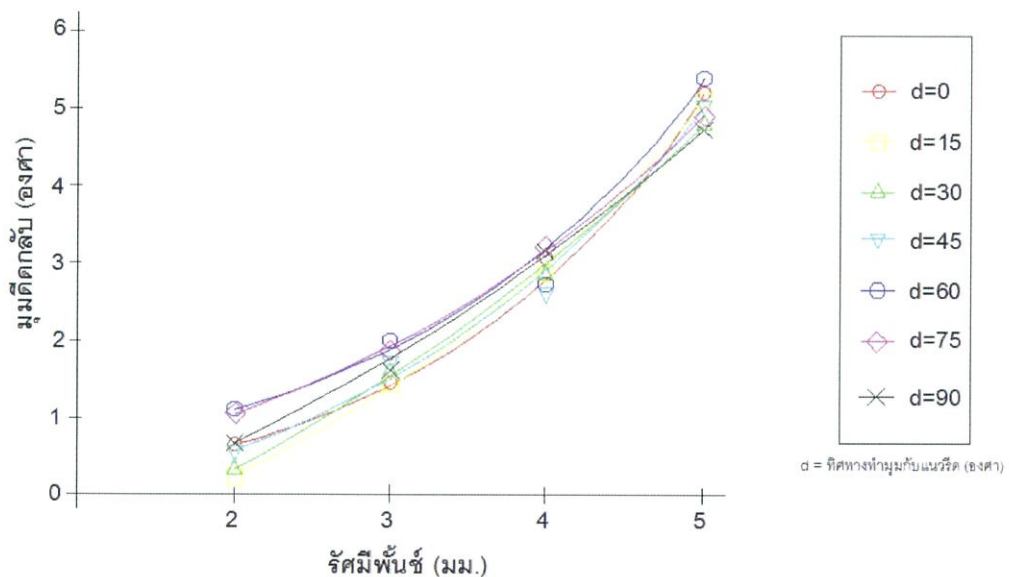
ทิศทาง ทำมุมกับ แนวรีด	Ultimate tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Strain- hardening exponent (n)	Strain- hardening coefficient (K)	Plastic strain ratio (R)	Elongation (%)
0	447.580	315.03	0.308	879.98	0.783	32.400
15	437.674	265.632	0.299	859.85	0.334	30.833
30	443.699	240.857	0.301	889.96	0.452	29.500
45	438.302	299.985	0.303	891.64	0.476	27.400
60	454.835	265.632	0.301	899.06	0.509	27.367
75	458.462	240.857	0.302	910.39	0.517	28.300
90	449.672	240.857	0.287	868.66	0.605	32.000

จากตารางที่ 5.1 พบว่าชิ้นงานทดลองในทิศทางทำมุม 75 องศา มีความแข็งแรง (Ultimate tensile strength) มากที่สุดและในทิศทางทำมุม 0 องศา กับแนวรีดจะสามารถขึ้นรูปได้ดีเนื่องจากมีค่าตัวเลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (n) สูง ค่าตัวเลขยกกำลังของความเครียดแข็งนี้แสดงถึงระดับความเค้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการยืดตัวในช่วงการแปรรูปถาวรที่สม่ำเสมอ (uniform plastic deformation) คือยังไม่เกิดการคอด (necking) ดังนั้นวัสดุที่มีค่าตัวเลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (n) สูง จะสามารถขึ้นรูปได้ดีและความแข็งแรงของวัสดุที่เพิ่มขึ้นระหว่างการแปรรูป ช่วยยับยั้งการแปรรูปเฉพาะบริเวณคอดตัวทำให้ขาดที่ปริมาณการแปรรูปสูง และคาดว่าชิ้นงานในทิศทางทำมุม 0 องศา กับแนวรีดจะมีค่าการดัดตัวกลับมากที่สุดเนื่องจากมีค่า Plastic Anisotropy (R-Value) มากค่า Plastic Anisotropy เป็นค่าแสดงถึงความต้านทานต่อการหดตัวตามความหนาของชิ้นงานดังนั้นวัสดุที่มีค่า

Plastic Anisotropy สูงจะมีการติดตัวกลับมากขึ้นด้วย และชิ้นงานในทิศทางทำมุม 0 องศากับแนวรีดยังมีค่าความเหนียวมากด้วย

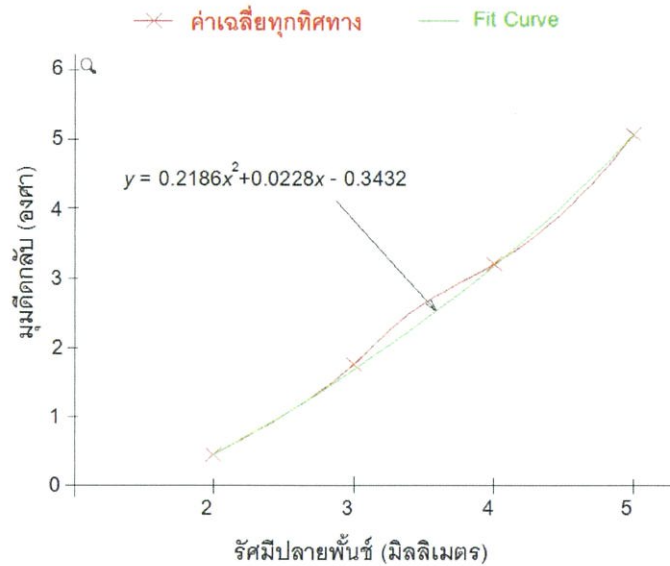
5.1 ผลของรัศมีปลายพื้นที่ต่อการติดตัวกลับ

จากการทดลองตัดชิ้นงานวัสดุโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ความหนา 1.5 mm ด้วยรัศมีปลายพื้นที่แตกต่างกันได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบผลของรัศมีปลายพื้นที่ต่อการติดตัวกลับ ในการตัดรูปตัววีของวัสดุแผ่นเหล็ก JIS SUS430 หนา 1.5 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 5.1 พบว่ารัศมีปลายพื้นที่มีอิทธิพลต่อการติดตัวกลับของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม JIS SUS430 อย่างชัดเจน เพราะในการทดลองตัดด้วยรัศมีปลายพื้นที่ 4 ขนาดคือ 2 mm ถึง 5 mm ขนาด 1.5 mm มีค่าการติดกลับต่ำสุดและจะเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ จนถึงขนาดรัศมีปลายพื้นที่ 5 mm ที่มีค่าสูงสุด คาดว่ารัศมีปลายพื้นที่ 2 mm ทำให้เกิดแถบของการเปลี่ยนรูปแบบถาวรมากกว่า ส่งผลให้แถบยืดหยุ่น (Elastic Band) แสดงอิทธิพลได้น้อยลง ทำให้ค่าการติดตัวกลับน้อยกว่ารัศมีปลายพื้นที่ขนาดอื่น ๆ

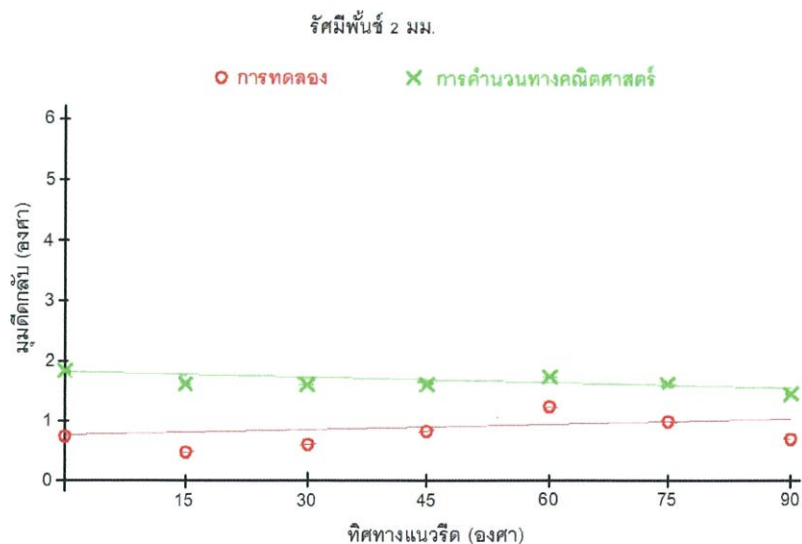


รูปที่ 5.2 ผลการ Fit curve ค่าเฉลี่ยของการตัดตัวกลับ วัสดุแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 หนา 1.5 มิลลิเมตร ทิศทางทำมุม 0-90 องศา กับแนวของการรีด ดัดด้วยรัศมีปลายพั้งซ์ ต่างกันด้วยเครื่องไฮดรอลิคเพรส

จากรูปที่ 5.2 ผลการ fit curve ค่าเฉลี่ยการตัดตัวกลับของชิ้นงานในทุกทิศทางของการรีด ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ได้สมการพหุนาม $y = 0.2168x^2 + 0.0228x - 0.3432$

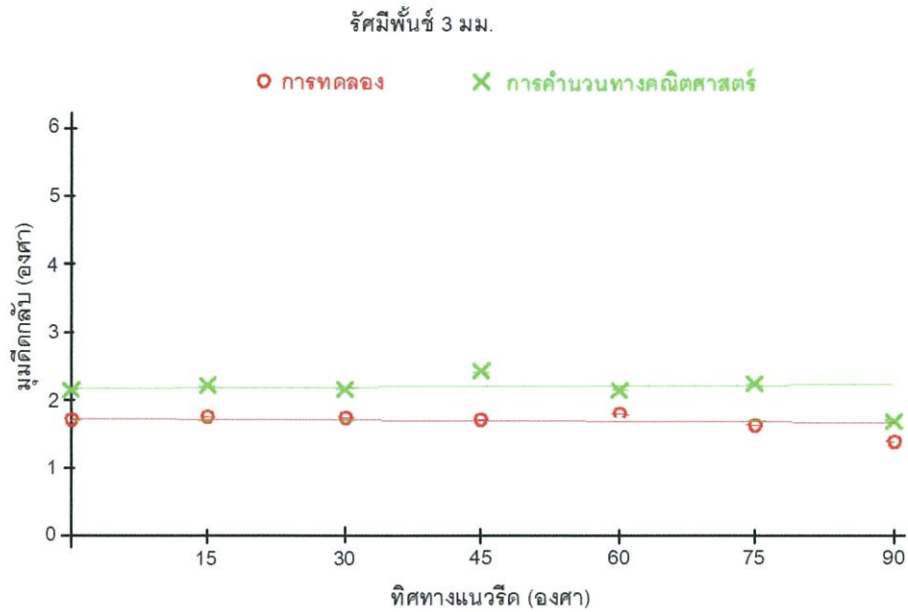
5.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณทางคณิตศาสตร์

จากการทดลองตัดชิ้นงานรูปตัววีวัสดุโลหะแผ่น JIS SUS430 ด้วยเครื่องไฮดรอลิคเพรส ได้ผลการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ดังผลในรูปที่ 5.3 ถึง รูปที่ 5.6



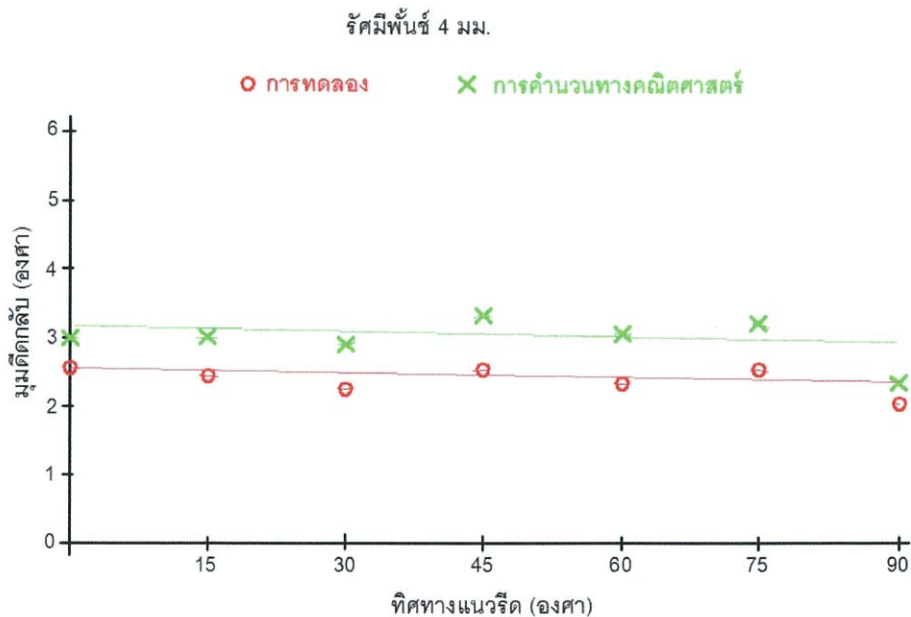
รูปที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าการตัดตัวกลับระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลองตัดชิ้นงานโลหะแผ่นเหล็ก JIS SUS430 ที่มีทิศทางตามแนวของการรีดของความหนา 1.5 มิลลิเมตร มุมตัด 90 องศา รัศมีปลายพั้งซ์ 2 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 5.3 พบว่าการกัดโดยใช้รัศมีพื้นที่ 2 มิลลิเมตร มีการติดตัวกลับจากการทดลองเฉลี่ย 0.63 % และแตกต่างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 0.74 %



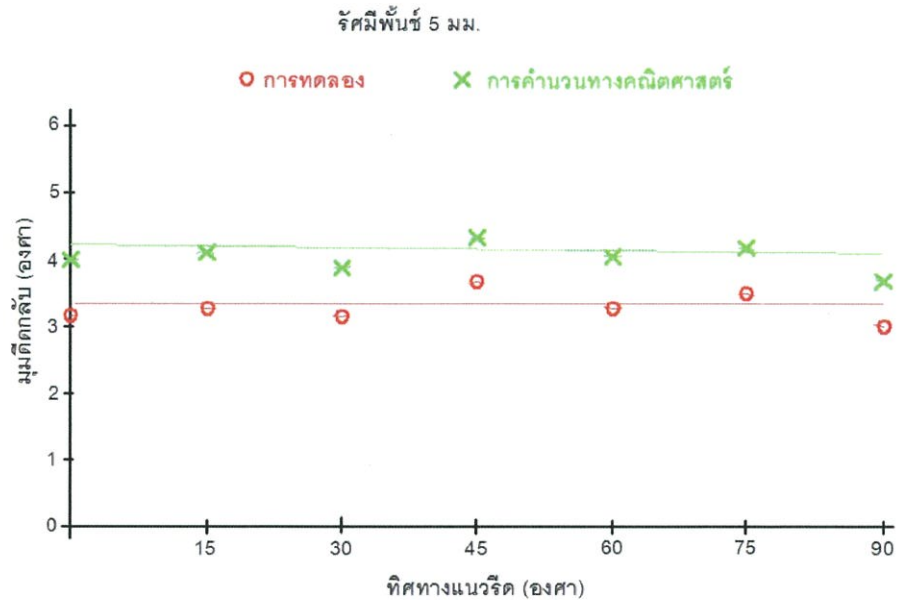
รูปที่ 5.4 ผลการเปรียบเทียบค่าการติดตัวกลับระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลองตัดชิ้นงานโลหะแผ่นเหล็ก JIS SUS430 ที่มีทิศทางการกัดตามแนวของการรีดของความหนา 1.5 มิลลิเมตร มุมตัด 90 องศา รัศมีปลายพื้นที่ 3 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 5.4 พบว่าการกัดโดยใช้รัศมีพื้นที่ 3 มิลลิเมตร มีการติดตัวกลับจากการทดลองเฉลี่ย 1.94 % และแตกต่างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 0.43 %



รูปที่ 5.5 ผลการเปรียบเทียบค่าการติดตัวกลับระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลองตัดชิ้นงานโลหะแผ่นเหล็ก JIS SUS430 ที่มีทิศทางการกัดตามแนวของการรีดความหนา 1.5 มิลลิเมตร มุมตัด 90 องศา รัศมีปลายพื้นที่ 4 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 5.5 พบว่าการกดโดยใช้รัศมีพื้นที่ 4 มิลลิเมตร มีการติดตัวกลับจากการทดลองเฉลี่ย 3.55 % และแตกต่างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 0.61 %



รูปที่ 5.6 ผลการเปรียบเทียบค่าการติดตัวกลับระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลองตัดชิ้นงานโลหะแผ่นเหล็ก JIS SUS430 ที่มีทิศทางตามแนวของการรีดลงความหนา 1.5 มิลลิเมตร มุมตัด 90 องศา รัศมีปลายพื้นที่ 5 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 5.6 พบว่าการกดโดยใช้รัศมีพื้นที่ 5 มิลลิเมตร มีการติดตัวกลับจากการทดลองเฉลี่ย 5.68 % และแตกต่างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 0.59 %

จากรูปที่ 5.3 ถึงรูปที่ 5.6 ผลการทำนายค่าการติดตัวกลับระหว่างการคำนวณทางคณิตศาสตร์ และผลการทดลอง ให้ผลใกล้เคียงกันโดยมีความแตกต่างที่รัศมีพื้นที่ 2 มม. 0.74 %, รัศมีพื้นที่ 3 มม. 0.43 %, รัศมีพื้นที่ 4 มม. 0.61 %, รัศมีพื้นที่ 5 มม. 0.59 %. แบบจำลอง ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลอง (exp) คาดว่าสาเหตุอาจเกิดจากองค์ประกอบของการตัด ซึ่งได้แก่ความถูกต้องในการปรับตั้งระยะตัดระหว่างพื้นที่และตายความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ามุมของบุคคลและเครื่องจักรที่ใช้ในการวิจัยมีสมรรถนะต่างกัน ทำให้แบบจำลองคณิตศาสตร์ ที่ใช้เปรียบเทียบมีความคลาดเคลื่อนกับผลการทดลองจริง

และผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของทิศทางทำมุมต่าง ๆ กับแนวรีด พบว่าค่าการติดตัวกลับของชิ้นงานที่ทำมุมต่าง ๆ กับแนวรีดไม่มีความแตกต่างผลการทดลองของพิชัย จันทรมณี ที่แสดงว่าการติดตัวกลับจะมีค่ามากหรือน้อย ตามค่าแอนไอโซทรอปิก (R-Value) และความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองคาดว่าอาจเกิดจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการกด การกดชิ้นงานในแต่ละครั้งที่มีการปรับตั้งระยะขึ้นลงไม่สม่ำเสมอที่ และอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการวัดมุม

5.3 ผลการทดสอบแรงดึงและกราฟเปรียบเทียบ Engineering Stress-Strain curves

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบแรงดึงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ในทิศทางทำมุม 0 องศา กับแนวรีดความหนา 1.5 mm ที่ความเร็ว 10 mm/min มาตรฐาน ASTM: E517-96a Standard Test Method for Plastic Ratio (r) for Sheet Metal Specimens A.

ทิศทางทำมุมกับแนวรีด (องศา)	ชั้นทดสอบที่ 1				ชั้นทดสอบที่ 2			
	ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)		ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)	
0	t_0	t_1	w_0	w_1	t_0	t_1	w_0	w_1
	1.45	0.9	12.5	9.5	1.45	0.85	12.5	9.1
	1.45	0.85	12.5	9.55	1.45	0.9	12.5	9.1
	1.45	0.9	12.5	9.5	1.45	0.95	12.5	9.1
ค่าเฉลี่ย	1.45	0.88	12.5	9.51	1.45	0.9	12.5	9.1
ทิศทางทำมุมกับแนวรีด (องศา)	ชั้นทดสอบที่ 1							
	ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)					
0	t_0	t_1	w_0	w_1				
	1.45	0.9	12.5	9.1				
	1.45	0.95	12.5	9.1				
	1.45	1	12.5	9.15				
ค่าเฉลี่ย	1.45	0.95	12.5	9.11				

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบแรงดึงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ในทิศทางทำมุม 15 องศา กับแนวรีดความหนา 1.5 mm ที่ความเร็ว 10 mm/min มาตรฐาน ASTM: E517-96a Standard Test Method for Plastic Ratio (r) for Sheet Metal Specimens A.

ทิศทางทำมุมกับแนวรีด (องศา)	ชั้นทดสอบที่ 1				ชั้นทดสอบที่ 2			
	ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)		ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)	
15	t_0	t_1	w_0	w_1	t_0	t_1	w_0	w_1
	1.45	0.85	12.5	9.5	1.45	0.85	12.5	9.5
	1.45	0.9	12.5	9.55	1.45	0.9	12.5	9.6
	1.45	0.9	12.5	9.5	1.45	0.95	12.5	9.7
ค่าเฉลี่ย	1.45	0.88	12.5	9.51	1.45	0.9	12.5	9.6
ทิศทางทำมุมกับแนวรีด (องศา)	ชั้นทดสอบที่ 1							
	ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)					
15	t_0	t_1	w_0	w_1				
	1.45	0.9	12.5	9.7				
	1.45	0.9	12.5	9.7				
	1.45	1	12.5	9.7				
ค่าเฉลี่ย	1.45	0.95	12.5	9.7				

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบแรงดึงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ในทิศทางทำมุม 30 องศา กับแนวรีดความหนา 1.5 mm ที่ความเร็ว 10 mm/min มาตรฐาน ASTM: E517-96a Standard Test Method for Plastic Ratio (r) for Sheet Metal Specimens A.

ทิศทางการทำมุมกับแนวรีด (องศา)	ขั้นตอนทดสอบที่ 1				ขั้นตอนทดสอบที่ 2			
	ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)		ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)	
30	t_0	t_1	w_0	w_1	t_0	t_1	w_0	w_1
	1.45	0.9	12.5	10	1.45	0.85	12.5	10
	1.45	0.9	12.5	9.5	1.45	0.9	12.5	9.85
	1.45	0.9	12.5	10	1.45	0.95	12.5	9.9
ค่าเฉลี่ย	1.45	0.9	12.5	9.75	1.45	0.9	12.5	9.9
ทิศทางการทำมุมกับแนวรีด (องศา)	ขั้นตอนทดสอบที่ 1							
	ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)					
30	t_0	t_1	w_0	w_1				
	1.45	0.95	12.5	10				
	1.45	0.95	12.5	10				
	1.45	0.95	12.5	10				
ค่าเฉลี่ย	1.45	0.95	12.5	10				

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบแรงดึงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ในทิศทางทำมุม 45 องศา กับแนวรีดความหนา 1.5 mm ที่ความเร็ว 10 mm/min มาตรฐาน ASTM: E517-96a Standard Test Method for Plastic Ratio (r) for Sheet Metal Specimens A.

ทิศทางการทำมุมกับแนวรีด (องศา)	ขั้นตอนทดสอบที่ 1				ขั้นตอนทดสอบที่ 2			
	ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)		ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)	
45	t_0	t_1	w_0	w_1	t_0	t_1	w_0	w_1
	1.45	0.95	12.5	10	1.45	0.85	12.5	10
	1.45	1	12.5	10	1.45	0.9	12.5	9.95
	1.45	0.95	12.5	10	1.45	0.95	12.5	10
ค่าเฉลี่ย	1.45	0.96	12.5	10	1.45	0.9	12.5	10
ทิศทางการทำมุมกับแนวรีด (องศา)	ขั้นตอนทดสอบที่ 1							
	ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)					
45	t_0	t_1	w_0	w_1				
	1.45	0.95	12.5	10				
	1.45	1	12.5	10				
	1.45	0.95	12.5	10				
ค่าเฉลี่ย	1.45	0.96	12.5	10				

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบแรงดึงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ในทิศทางทำมุม 60 องศา กับแนวรีดความหนา 1.5 mm ที่ความเร็ว 10 mm/min มาตรฐาน ASTM: E 517-96a Standard Test Method for Plastic Ratio (r) for Sheet Metal Specimens A.

ทิศทางการทำมุมกับแนวรีด (องศา)	ขั้นตอนทดสอบที่ 1				ขั้นตอนทดสอบที่ 2			
	ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)		ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)	
60	t_0	t_1	w_0	w_1	t_0	t_1	w_0	w_1
	1.45	0.85	12.5	9.5	1.45	0.85	12.5	9.75
	1.45	0.9	12.5	9.75	1.45	0.9	12.5	9.65
	1.45	0.9	12.5	9.9	1.45	0.9	12.5	9.7
ค่าเฉลี่ย	1.45	0.88	12.5	9.71	1.45	0.88	12.5	9.7
ทิศทางการทำมุมกับแนวรีด (องศา)	ขั้นตอนทดสอบที่ 1				ขั้นตอนทดสอบที่ 2			
	ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)		ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)	
60	t_0	t_1	w_0	w_1	t_0	t_1	w_0	w_1
	1.45	0.95	12.5	9.55				
	1.45	0.9	12.5	9.6				
	1.45	1	12.5	9.6				
ค่าเฉลี่ย	1.45	0.95	12.5	9.58				

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบแรงดึงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ในทิศทางทำมุม 75 องศา กับแนวรีดความหนา 1.5 mm ที่ความเร็ว 10 mm/min มาตรฐาน ASTM: E 517-96a Standard Test Method for Plastic Ratio (r) for Sheet Metal Specimens A.

ทิศทางการทำมุมกับแนวรีด (องศา)	ขั้นตอนทดสอบที่ 1				ขั้นตอนทดสอบที่ 2			
	ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)		ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)	
75	t_0	t_1	w_0	w_1	t_0	t_1	w_0	w_1
	1.45	0.95	12.5	9.9	1.45	1	12.5	9.85
	1.45	0.9	12.5	9.8	1.45	0.95	12.5	9.9
	1.45	1	12.5	10	1.45	0.9	12.5	9.85
ค่าเฉลี่ย	1.45	0.95	12.5	9.9	1.45	0.95	12.5	9.86
ทิศทางการทำมุมกับแนวรีด (องศา)	ขั้นตอนทดสอบที่ 1				ขั้นตอนทดสอบที่ 2			
	ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)		ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)	
75	t_0	t_1	w_0	w_1	t_0	t_1	w_0	w_1
	1.45	0.9	12.5	9.8				
	1.45	0.95	12.5	9.7				
	1.45	0.95	12.5	9.75				
ค่าเฉลี่ย	1.45	0.93	12.5	9.75				

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบแรงดึงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ในทิศทางทำมุม 90 องศา กับแนวรีดความหนา 1.5 mm ที่ความเร็ว 10 mm/min มาตรฐาน ASTM: E 517-96a Standard Test Method for Plastic Ratio (r) for Sheet Metal Specimens A.

ทิศทางการทำมุมกับแนวรีด (องศา)	ขั้นตอนทดสอบที่ 1				ขั้นตอนทดสอบที่ 2			
	ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)		ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)	
90	t_0	t_1	w_0	w_1	t_0	t_1	w_0	w_1
	1.45	0.9	12.5	8.85	1.45	1.05	12.5	8.85
	1.45	0.9	12.5	8.95	1.45	0.95	12.5	8.75
	1.45	1	12.5	8.95	1.45	0.95	12.5	8.95
ค่าเฉลี่ย	1.45	0.95	12.5	8.91	1.45	0.98	12.5	8.85
ทิศทางการทำมุมกับแนวรีด (องศา)	ขั้นตอนทดสอบที่ 1							
	ความหนา (มม.)		ความกว้าง (มม.)					
90	t_0	t_1	w_0	w_1				
	1.45	1	12.5	8.85				
	1.45	1	12.5	8.75				
	1.45	0.9	12.5	8.85				
ค่าเฉลี่ย	1.45	0.95	12.5	8.81				

เมื่อ

t_0 คือ ความหนาชิ้นงานก่อนทดสอบแรงดึง

t_1 คือ ความหนาชิ้นงานหลังทดสอบแรงดึง

w_0 คือ ความกว้างชิ้นงานก่อนทดสอบแรงดึง

w_1 คือ ความกว้างชิ้นงานหลังทดสอบแรงดึง

จากผลการทดสอบแรงดึงสามารถคำนวณค่า Plastic Strain Ratio (R – value) ได้จากสมการ

$$R = \frac{\ln\left(\frac{w_1}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{t_1}{t_0}\right)} \quad (5.1)$$

และสามารถหาค่า Normal Anisotropy ได้จากสมการ

$$\bar{R} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (5.2)$$

และสามารถหาค่า Planar Anisotropy ได้จากสมการ

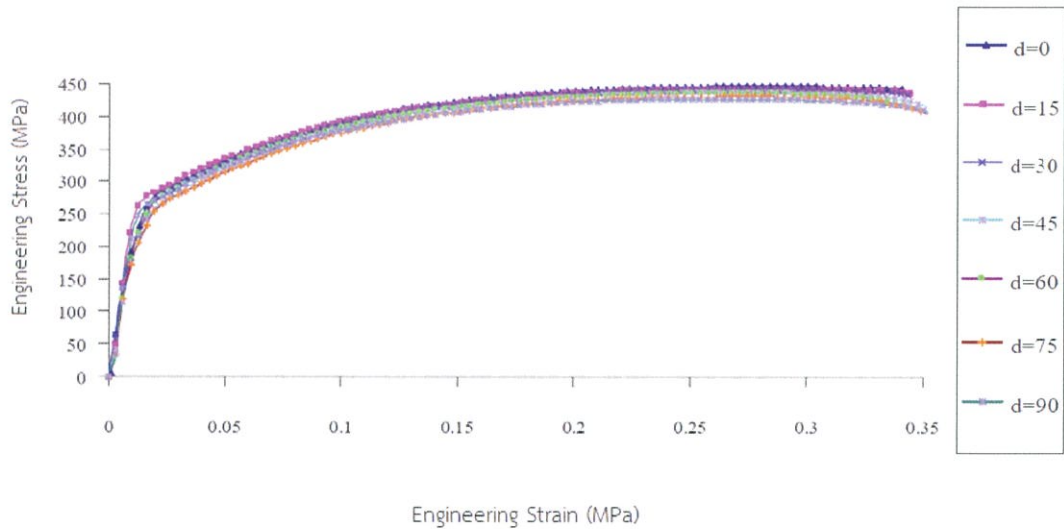
$$\Delta r = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (5.3)$$

ตารางที่ 5.9 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

t (mm)	r_0	r_{45}	r_{90}	\bar{R}	Δr
1.5	0.605	0.476	0.783	0.585	0.218

เมื่อ

t คือ ความหนาชิ้นงานทดสอบแรงดึง



รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบ Engineering stress-strain curve จากผลการทดสอบแรงดึงวัสดุ (d=ทิศทางแนวรีดของวัสดุ)

จากรูปที่ 5.7 พบว่าที่การดัดทำมุม 75 องศา กับแนวรีดมีค่า Ultimate tensile strength มากที่สุดและพบว่าที่การดัดทำมุม 0 องศา กับแนวรีดมีค่า Yield strength มากที่สุดจะทำให้ค่าตัวเลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (n) สูง ดังนั้นจะสามารถขึ้นรูปของวัสดุได้ดี

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการติดตัวกลับของแผ่นเหล็ก JIS SUS430 ขนาดกว้าง 15 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตรหนา 1.5 มิลลิเมตร ด้วยกรรมวิธีการดัดขึ้นงานด้วยแม่พิมพ์รูปตัววี ขนาดของคานามีมุม 90 องศา และเปลี่ยนขนาดของรัศมีพื้นที่ตั้งแต่ 2 ถึง 5 มิลลิเมตร เปรียบเทียบผลการติดตัวกลับในแนวทิศทางทำมุมกับแนวของของการรีด ครั้งละ 15 องศาจาก 0-90 องศาซึ่งสรุปผลการทดลองในข้อ 1-4 และผลของมุมที่ใช้ในการดัด ความหนาของชิ้นงานทดสอบ และการปรับแก้มุมดัดต่อการติดตัวกลับได้สรุปผลการทดลองในข้อ 5 มีรายละเอียดดังนี้

- 1) เมื่อรัศมีปลายพื้นที่ที่ใช้ในการดัดมีขนาดเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการติดตัวกลับเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน
- 2) ไม่สามารถระบุได้ว่าค่าคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก (R-value) ส่งผลชัดเจนต่อค่ามุมติดตัวกลับ
- 3) ผลการคำนวณทางคณิตศาสตร์ และผลการทดลอง ให้ผลใกล้เคียงกัน
- 4) ค่ามุมอ่อนคลายของวัสดุระยะเวลา 1 สัปดาห์ภายหลังเกิดการติดตัวกลับกรณีดัดด้วยเครื่องไฮดรอลิก เพรสมี่ค่ามุมเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.21 องศา
- 5) การแก้ไขปรับแก้มุมดัด 90 องศา ด้วยวิธีการดัดให้มากกว่าที่ต้องการ สามารถทำให้ได้ค่ามุมในการดัดถูกต้องมากขึ้นอย่างชัดเจน

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า มีตัวแปรอื่น ๆ อีกหลายตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการติดตัวกลับในการดัดขึ้นรูปตัววีแผ่นเหล็ก JIS SUS430 แต่มีความชัดเจนมากใน 2 ตัวแปร ที่ส่งผลโดยตรงต่อการติดตัวกลับคือ รัศมีปลายพื้นที่ ทิศทางแนวรีดของวัสดุ และในขั้นตอนของการทดลองได้สังเกตพบว่ามีอีก 1 ตัวแปรที่ส่งผลอย่างมากเช่นกันต่อค่าการติดตัวกลับ คือ ระยะห่างระหว่างพื้นที่กับคานา ซึ่งเป็นตัวแปรที่ควบคุมได้ยาก ดังนั้นเมื่อต้องการนำผลการวิจัยนี้ไปใช้ในการผลิตควรคำนึงถึงระยะห่างระหว่างพื้นที่กับคานาที่ใช้ในการดัดด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] พิชัย จันทรมณี, 2543, “การศึกษาพฤติกรรมการตีกลับในการดัดขึ้นรูปตัววีของโลหะแผ่นที่มีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก”, หน้า 3-65.
- [2] อุดมศักดิ์ ธีบุญลักษณ์. “การศึกษาพฤติกรรมการตีกลับของอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมในการดัดกลมท่อรีียว”. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมการผลิตบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2540.
- [3] ชัยพฤกษ์ ตั้งจิตเพิ่มความดี. “การศึกษาพฤติกรรมการตีกลับในการขึ้นรูปท่อรีียว” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2539.
- [4] Japanese Standard Association, 2001, “Jis Handbook Ferrous Materials & Metallurgy”, pp.46.
- [5] You-Min Huang, and Daw-Kwei Leu. “Effects of Process Variables on V-die Bending Process of Steel Sheet”, *International Journal of Mechanical Science*, Vol.44, 1998, pp.631-650.
- [6] K. P. Li, W. P. Carden, and R. H. Wagoner, “Simulation of Springback.”, *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol.44, 2002, pp.123-148.
- [7] Daw-Kwei Leu, “A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metal”, *Journal of Material Processing Technology*, Vol.66, 1997, pp.9-17.
- [8] M. Samuel, “Experimental and Numerical Prediction of Springback and Side Wall Curl in U-bendings of Anisotropic Sheet Metals”, *Journal of Materials Processing Technology*. Vol.105, 2000, pp.382-393.
- [9] Li-Ping Lei, Sang-M. Hwang and Beom-Soo Kang. “Finite Element Analysis and Design in Stainless Steel Sheet Forming and its Experimental Comparison.”, *Journal of Materials Processing Technology*. Vol.110, 2001, pp.70-77.
- [10] Chuantao Wang, Gary Kinzel and Taylan Altan, “Mathematical modeling of plane strain bending of sheet and plate”, *Journal of Material Processing Technology*”, Vol.39, 1992, pp. 279-304.
- [11] Z.Tan, B.Persson and C.Magnusson, 1992, “An empiric model for controlling springback in V-die bending of sheet metals”, *Journal of Material Processing Technology*, Vol.34, pp. 455-499.
- [12] F. Pourboghra, and K. A. Stelson. “Pressbrake Bending in the Punch-Sheet Contact Region-Part 2: Gap Formation and the Direction of Sheet Motion”, *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol.110, 1988, pp. 131-135.

- [13] M. H. Fu; K.C. Chan; W.B.Lee; and L.K. Chan “*Springback in the Roller Forming of Intergrated Curcuit Leadframes.*” *Journal of Material Processing Technology*, V. 66 1997 pp. 107-111.
- [14] A. Chandra. “*Real - Time Identification and Control of Springback in Sheet Metal Forming*”. *ASME Journal of Engineering for Industry*. V. 109, 1997, pp.265-273.
- [15] L.C. Zhang, and Z. Lin. “*An Analytical Solution Springback of Sheet Metals Stamped by a Rigid Punch and Elastics Die*”. *Journal of Material Processing Technology*. V. 63, 1997, pp. 49-54.
- [16] S. Sriram, N.L.L.N Kumar, and P.Venugopal “*V-Bending Studies on Sintered Copper Powder Metallurgicall Preform Sheet.*”. *Journal of Material Processing Technology*. V. 70, 1997, pp. 134-139.
- [17] Shigeki Mori; Ken-Ichi Manabe; Hisashi Nishimura; Kenji Hirose. “*Experimental Analysis of the Flattening of the Cross-Section the Springback and the Bending Moment of Clad-Tube in Uniform Bending.*” *Journal of Material Processing Technology*. V. 66 , 1997, pp. 207-276.
- [18] Y.T.Keum and B.Y.Han, “*Springback of FCC sheet in warm forming*”, *Journal of Ceramic Processing Research*, Vol.3, 2002, pp. 159-165.


ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ผลงานที่ได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

ABSTRACT

**International Conference
on
MATERIAL SCIENCE
(ICMS-2013)**



Organized by

DEPARTMENT OF PHYSICS
Tripura University (A Central University)
Suryamaninagar-799 022, Tripura, India

Our Sponsors

*Department of Biotechnology, Government of India
Council for Scientific and Industrial Research, Government of India
Board of Research in Nuclear Science, DAE, Government of India.
Defense Research Development Organization, Government of India
Science and Engineering Research Board, DST, Government of India
Ministry of Earth and Environment Science, Government of India
Indian National Science Academy, Government of India*

Abstract No: MP01**Simulation of Polymeric Electrolytes for the Study of Conductivity: A Density Functional Approach**

Mohan L Verma* and B. Keshav Rao

CONDENSED MATTER PHYSICS RESEARCH LABORATORY, DEPARTMENT OF APPLIED PHYSICS
 Shri Shankaracharya Group of Institutions, Junwani, Bhilai (C.G.), India
 E-mail: cmprlssi@yahoo.com

A density functional approach is used for the study of conductivity of polyethylene (PEO) based polymeric systems. Three PEO based polymeric systems are taken for the simulation. The structural calculations are performed by using the density functional theory and computational program SIESTA in which double zeta polarized basis sets are taken. The electronic property analysis of polymer systems is performed by the simulation of density of states/partial density of states. The contributions of electrons in the valence and conduction bands are discussed and finally, the conductivity of polymer systems is analyzed.

Abstract No: TH01**An Analysis of Springback in V-Die Bending of Stainless Sheet by Finite Element Method**

PRAPAPAN Kitchapol, NORASETHASOPON Somchai

Department of Mechanical Engineering
 King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand
 E-mail address: kitchapolp@gmail.com

Purpose: A theoretical model is developed for V-die bending experiments are conduct. Based on comparisons between springback ratios using developed theoretical V-die bending process are suggested. The validity of this formula is verified using finite element simulations as well as comparisons with the result experiments. **Design/methodology/approach:** This study in this problem is springback after unloaded. The stainless sheets are shape as not desired. For this reason, this research has focused on the analysis of springback of stainless sheet JIS SUS430 with the dimensions of 15 x 40 x 1.5 mm. The stainless sheets were formed at the angles of 0, 15, 30, 45, 60, 75 and 90 degrees to the rolling direction. Punch radius of 2, 3, 4 and 5 mm. A plane stress analysis. Regardless of friction and the springback of the experimental result obtained from experiments and simulations by finite element method. This is consistent with experimental result.

Findings: Springback ratios for V-die bending could be finding using the developed formula. For a given limit of the force, springback ratios are affected by sheet thickness, bend radius, and material parameters.

Originally/value: Study of the V-shaped bending up to 90 degrees with a 25 mm die width of JIS SUS430 stainless steel material, size 15 x 40 x 1.5 mm square with a punch 2, 3, 4, and 5 mm.

Bending the sheet material in a direction forming an angle of 0, 15, 30, 45, 60, 75 and 90 degrees to the direction of rolling. Simulation analysis of bending sheet metal forming using finite element and finished in the 2D plane strain in the plane. This analysis of the calculation results of the application of finite element made by comparison with experimental results. The analysis does not consider the effects of friction and heat bending forming process.



INTERNATIONAL CONFERENCE ON
MATERIAL SCIENCE (ICMS-2013)

21 – 23 February, 2013

Organized by :

Department of Physics, Tripura University (A Central University)
 Suryamaninagar-799 022, Tripura, India

Certificate of Participation

Certified that Prof./Dr./Mr./Ms..... **Kitchapal Prappapan** participated /
 presented a paper entitled..... **An. Analysis. of. Springback. in. V-Die. Bending. of. Stainless.**
 Sheet. by. Finite. Element. Method..... in the

International Conference on Material Science (ICMS-2013) organized by Department of Physics, Tripura University
 (A Central University), Suryamaninagar-799 022, Tripura, India, during 21 – 23 February, 2013.

(Prof. Barin Kumar De)
 Chairman
 Local Organizing Committee

(Prof. Sangram Sinha)
 Dean, Faculty of Science
 Tripura University (A Central University)

ภาคผนวก ข.

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

	
ISSN 0125-1724	
LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL	
<h1>วิศวกรรมลาดกระบัง</h1>	
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	
ปีที่ 31	ฉบับที่ 3
กันยายน 2557	
บทความวิชาการ	
1. การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 6061 วรพงศ์ บุญช่วยแทน จักรนรินทร์ ฉัตรทอง	1
2. กรอบงานวิจัย : ผลกระทบของความสูญเสียเนื่องจากความต้องการของงานสูงกว่าความสามารถ ในการทำงานของคนงานก่อสร้าง นาย สุขศิลา วชรภูมิ เบญจโอฬาร	7
บทความวิจัย	
3. การตรวจสอบเชิงตัวเลขของการใช้การไหลอากาศในเครื่องจักรอัดโนมิติเพื่อลดการปนเปื้อนของ อนุภาคสำหรับกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จตุพร ทองศรี อติศร ชาวคม วรณพร สุขสุกาญจน	13
4. โรงอบยางพาราพลังงานความร้อนร่วมแสงอาทิตย์ - เชื้อเพลิงกลีเซอรอลในระดับอุตสาหกรรม อนุสรณ์ ชิตบุญศรี สุรจิตร์ พระเมื่อง วีระศักดิ์ ชอมขุนทด	19
5. การวิเคราะห์เสถียรภาพอัตราขยายป้อนกลับของระบบประมาณค่าความเร็วขับเคลื่อนมอเตอร์ เหนี่ยวนำสองเฟส ณัฐพงศ์ เมืองจันทร์	25
6. การวิเคราะห์การติดกลับในการติดตั้งรูปตัววีของแผ่นโลหะสแตนเลสโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กฤษพล ประภาพันธ์ สมชัย นรเศรษฐ์โคกม	31
7. การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโรงไฟฟ้าพลังงานจากขานอ้อยสำหรับโรงน้ำตาล กษมา ศิริสมบุรณ์ จิตาภา นิ่มนวลพานิช	37
8. การอบแห้งผลหม่อนด้วยเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำ ศิริพันธ์ มุรธาธิญลักษณ์ ปภาวดี แหม่ทอง ทิทยา อังคณากุลชัย	43
9. การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิไวนิลคลอไรด์โฟมโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนื่อวิกฤตเป็นสาร เกิดฟอง วรินทร ศรีสัตยานวทย์ ณัฐพงศ์ เชื้อพล ปิยะวัฒน์ ศุภศรีรุ่งเจริญ สุรัตน์ อารีรัตน์	49
10. การดูดซับสีย้อมโคเร็กซ์บลู 86 โดยโคโคซานและแกลบ ณัฐรัตน์ เรืองรอง มธุรส แฉวทรัพย์ โกวิทย์ ปิยะมิ่งคลา	55

การวิเคราะห์การดีดกลับในการดัดงอรูปตัววีของแผ่นโลหะสแตนเลสโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

An Analysis Of Springback In V-Die Bending Of Stainless Sheet By Finite Element Method

กฤษฎพล ประภาพันธุ์ สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ในปัญหานี้คือการดีดกลับหลังจากที่เอาระงับออก โดยแผ่นสแตนเลสจะมีรูปร่างไม่เป็นตามที่ต้องการ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยจึงได้มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์การดีดกลับของแผ่นสแตนเลส JIS SUS430 ขนาด 15 x 40 x 1.5 มม. โดยทำการกดคัตที่มุม 0, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา กับแนวรีด โดยใช้รัศมีของพUNCH 2, 3, 4 และ 5 มม. โดยการวิเคราะห์ความเครียดในระนาบเพื่อหาค่าการดีดกลับ และนำผลการทดลองที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งขนาดของรัศมีปลายพUNCH จะแปรผันตรงกับค่าการดีดกลับและทิศทางที่มุม 0 องศา กับแนวรีดจะมีค่าการกระแ่งค้ำกลับมากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง

การศึกษานี้วิเคราะห์การขึ้นรูปคัตของแผ่นสแตนเลส โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในระนาบสองมิติ[5] การวิเคราะห์ผลและการคำนวณของจากการประยุกต์ใช้โปรแกรม ABAQUS ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปนี้ โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองและในการวิเคราะห์นี้ไม่ได้พิจารณาผลกระทบของแรงเสียดทานและความร้อนในกระบวนการขึ้นรูปคัต

คำสำคัญ : การดีดกลับ, ทิศทางแนวรีด, ไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This study in this problem is springback after unloaded of V-bending. For this reason, this research has focused on the analysis of springback of stainless sheet JIS SUS430 with the dimensions of 15 x 40 x 1.5 mm. The stainless sheets were formed at the angles of 0, 15, 30, 45, 60, 75 and 90 degrees to the rolling direction by radius of punch are 2, 3, 4 and 5 mm. By analyzing the stress in the plane to find the springback of stainless steel sheet. And the experimental results were compared with the model by finite element method which a size of the punch radius is proportional to the springback and bending at 0 degrees of rolling direction will make the most of springback angle. This consistent with the experimental results.

The study analyzed the bending of stainless steel sheet by finite element method in 2D. Analysis and calculation from the application program ABAQUS. By comparing the experiment results and the analysis does not consider the effects of friction and heat in the bending process.

Keywords : Springback, Rolling Direction, Finite Element.

1. บทนำ

กรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะให้ได้ลักษณะตามที่ต้องการ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เป็นส่วนสำคัญในอุตสาหกรรม การผลิต เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรม ปิโตรเลียม เป็นต้น ดังนั้นการตัดขึ้นรูปแผ่น โลหะจำเป็น ที่จะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของวัสดุเพื่อให้ได้รูปทรง ที่ต้องการมากที่สุด เนื่องจากคุณสมบัติทางกลของโลหะ มีความแตกต่างกันการตัดขึ้นรูปของโลหะแผ่นใน ทิศทางที่แตกต่างกันย่อมให้ผลที่แตกต่างกันด้วย

ปัญหาที่สำคัญของการขึ้นรูปคือ โลหะแผ่นจะเกิดการบิดตัวกลับ หลังจากที่เราทำการขึ้นงานทำให้ รูปทรงของชิ้นงานเปลี่ยนไปและไม่ได้รูปทรงตาม ที่ต้องการ เนื่องจากแรงกดพื้นที่ทำให้เกิดโมเมนต์คดที่มีค่า สูงพอ ที่ทำให้ผิวนอกของโลหะอยู่ในสภาพพลาสติก ขณะที่บริเวณแกนในยังคงมีสภาพยืดหยุ่น ดังนั้น โลหะที่ ยังมีสภาพยืดหยุ่นก็จะพยายามกลับคืนสู่สภาพเดิม

จุดประสงค์ของบทความนี้ ศึกษาเปรียบเทียบค่าการ กระด้างตัวกลับของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 ตามตัวแปรต่างๆคือรัศมีปลายพื้นที่ ความหนาของวัสดุ ทิศทาง ทำมุมกับแนวรีดของวัสดุ มุมคด ของวัสดุและศึกษา เปรียบเทียบผลของมุมคดกลับจากการใช้วิธีคดมุมให้ เพิ่มขึ้น เพื่อสามารถแก้ไขการบิดตัวกลับ รวมถึงการ เปรียบเทียบจากการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการวิเคราะห์การบิดกลับในการขึ้นรูปของโลหะแผ่น

ซึ่งจะศึกษาลักษณะการตัดขึ้นรูปตัววี 90 องศาของ แผ่นสแตนเลส JIS SUS430[2] ขนาด 15x40x1.5 มม. ความกว้างของคด 25 มม. ที่รัศมีพื้นที่ 2, 3, 4 และ 5 มม.

ศึกษาการตัดขึ้นรูปแผ่นวัสดุชิ้นงานในทิศทางทำมุม 0, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา กับแนวทิศทางแนว รีดทิศทางละ 3 ชั้น รวมทั้งหมด 21 ชั้น [6]

การวิเคราะห์เป็นการจำลองโดยใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์และพิจารณา ระยะเวลา 2 มิติ แบบ ความเครียดในระนาบโดยจะนำผลการวิเคราะห์ไฟไนต์ เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยไม่ คำนึงถึงแรงเสียดทานและความร้อนในระหว่าง กระบวนการตัดขึ้นรูป

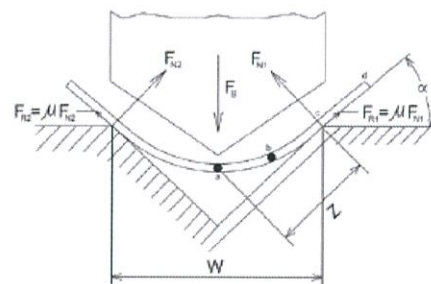
2. ทฤษฎีการตัดขึ้นรูป

การคดเป็นกรรมวิธีที่ทำให้ชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลง รูปทรงเชิงเรขาคณิต โดยชิ้นงานจะมีความโค้งและมุม เกิดขึ้น การคดทำให้ชิ้นงานที่มีความโค้งอยู่แล้วเปลี่ยน ความโค้งไปจากเดิม [3]

การคดแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือช่วงแรกเป็นช่วงคด อิสระ ซึ่งเส้นการคดของวัสดุเลื่อนอยู่ระหว่างขอบคด และพื้นที่ และ ช่วงที่สอง เป็นการกดให้แผ่น วัสดุมี รูปทรงตามผิวหน้าพื้นที่และคด แผ่นจะ วัสดุมีการคด อย่างยืดหยุ่นในตอนต้นและเพิ่มขึ้นเกือบเป็นเส้นตรงกับ ระยะเลื่อนพื้นที่ จนกระทั่งอัตราส่วนของคดเฟิร์กชัน (f) ต่อความกว้างคด (w) ที่กึ่งกลางของแผ่นวัสดุ ทำให้ ความเค้นบริเวณผิวชั้นนอกถึงขีดจำกัดความยืดหยุ่นของ วัสดุ จากทฤษฎีสภาพยืดหยุ่น อัตราส่วนนี้คือ

$$\frac{f}{w} = \frac{1}{6} \frac{R_p}{E} \left(\frac{w}{t} \right) \quad (1)$$

เมื่อเลื่อนพื้นที่ต่ำลงมา บริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปถาวร (รูป ที่ 1 แสดงโหลดและแรงกระทำที่ขอบพร้อมทั้งลักษณะ การเปลี่ยนรูป) [1] ขอบจาก a ไป b แผ่นวัสดุในช่วง bc ยังคงอยู่ในช่วงการคดยืดหยุ่น ส่วนแผ่นวัสดุในช่วง ปลาย cd ยังคงตรงเหมือนเดิมและเริ่มมีการกระดกขึ้น



รูปที่ 1 แรงคดในแผ่นพิมพ์รูปตัววี

ab: การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น-พลาสติก

bc: การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น

cd: ช่วงที่มีการกระดกขึ้น

α : มุมคด, ρ : มุมเสียดทาน z : แกนโมเมนต์ แรงกดพื้นที่ช่วงจะสามารถหาได้จาก

$$F_p = 2F_k(\cos \alpha + \mu \sin \alpha) \quad (2)$$

แรงที่ขอบ F_k ขึ้นอยู่กับความถี่ในการคัดของแผ่นวัสดุ ซึ่งไม่ขึ้นกับแรงกดพื้นที่แต่เป็นแรงปฏิกริยาของทางด้านทานการขึ้นรูป ดังนั้นแรงที่ขอบคือ

$$F_k = \frac{M_l}{z} \quad (3)$$

เมื่อ M_l คือ โมเมนต์ภายในแผ่นวัสดุและ z คือ แกนโมเมนต์ ดังนั้น จึงได้ความสัมพันธ์ของแรงกดพื้นที่ชั่วขณะและเป็นฟังก์ชันของระยะเลื่อนพื้นที่ f คือ

$$F_p(f) = \frac{2M_l(f)}{z(f)}(\cos \alpha(f) + \mu \sin \alpha(f)) \quad (4)$$

แรงจากการคัดในแม่พิมพ์รูปคั้วนี้เป็นผลมาจากการแปรผันของค่า M_l, z และ α โดยแต่ละค่านั้น

ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ดังนี้

1. โมเมนต์ภายใน M_l เพิ่มขึ้นพร้อมกับระยะเลื่อนพื้นที่ ทั้งนี้เนื่องจากความโค้งเพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงมีผลทำให้แรงเพิ่มขึ้นตลอดช่วงระยะเลื่อนพื้นที่ทั้งหมด

2. ความยาวแกนโมเมนต์ z เพิ่มขึ้น เนื่องจากการสลับที่เกิดขึ้นภายหลัง จนกระทั่งแผ่นวัสดุสัมผัสกับคาน หลังจากนั้นความยาวแกนโมเมนต์ลดลงอีกครั้งหนึ่ง การเพิ่มความยาวแกนโมเมนต์จึงลดลงอีกครั้งหนึ่ง การเพิ่มความยาวแกนโมเมนต์ อย่างน้อยก็ทำให้เพิ่มแรงกดพื้นที่ชั่วครู่การเพิ่มน้อยลง

3. มุมคัด α เพิ่มขึ้นมีผลทำให้แรงลดลง ทั้งนี้ที่แผ่นวัสดุสัมผัสกับคาน การเปลี่ยนมุมคัดก็ไม่มีผลกระทบอีกต่อไป

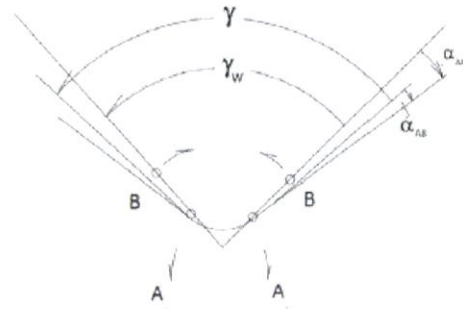
2.1 ค่า Anisotropy ของวัสดุ

ค่า Anisotropy ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่วัสดุมีคุณสมบัติไม่เท่ากันทุกทิศทางซึ่งจะบอกด้วยอัตราความเครียดถาวร (Plastic Strain Ratio, R-value) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึงวัสดุแล้วหาอัตราส่วนของค่า True Strain ซึ่งถ้าได้ค่า R value มากแสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงทางด้านความกว้างมาก ส่วนทางด้านความหนาเปลี่ยนแปลงน้อย ซึ่งหาได้จากสมการ

$$R = \frac{\ln\left(\frac{w_t}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{t_t}{t_0}\right)} \quad (5)$$

เมื่อ R : Plastic Strain Ratio, w_0 : ความกว้างชิ้นงานก่อนทดสอบดึง (มม.), w_t : ความกว้างชิ้นงานหลังทดสอบดึง (มม.), t_0 : ความหนาชิ้นงานก่อนทดสอบดึง (มม.), t_t : ความหนาชิ้นงานหลังทดสอบดึง (มม.)

การติดกลับนอกจากขึ้นอยู่กับวัสดุแล้วยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วน $\frac{t}{r}$ ด้วย พิจารณาการติดกลับ จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่ามีการติดกลับสองอย่างเกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม



α_{AA} มุมติดกลับที่เกิดจากช่วงความยาว AA

α_{AB} มุมติดกลับที่เกิดจากช่วงความยาว AB

Y_w มุมที่คัดได้ Y มุมในแม่พิมพ์คัด

A, B ช่วงความยาว

รูปที่ 2 การติดกลับจากการคัดรูปคั้ว

3. การทดลองการคัดขึ้นรูป

จากการทดสอบหาค่าสมบัติทางกลจากการทดสอบทางด้านแรงดึงมาตรฐาน ASTM E8M-92a และพฤติกรรมการกระเด็งคั้วกลับจากการคัดขึ้นรูปคั้วรีนูน 90 องศา วัสดุโลหะแผ่น AIS SUS 304 โดยชิ้นงานทดสอบมีขนาด $15 \times 40 \times 1.5$ มิลลิเมตร ทดลองคัดในทิศทางทำมุมต่างๆกับแนวของการรีดตั้งแต่ 0 ถึง 90 องศาเพิ่มครั้งละ 15 องศาและเปลี่ยนรัศมีปลายพื้นที่จำนวน 4 ขนาดจาก 2 ถึง 5 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องไฮดรอลิกเพรส และภายหลังการคัดขึ้นรูปทำการวัดมุมด้วยการพล็อตในกระดาษ ซึ่งแสดงผลการทดลองได้น่าสนใจตามลำดับดังนี้

ค่าความ หยาบ ผิว	Ultimate tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Strain hardening exponent (n)	Strain hardening coefficient (k)	Plastic strain ratio (%)	Elongation (%)
0	447.580	315.83	0.308	879.98	0.783	32.400
15	473.674	245.632	0.299	859.85	0.334	30.833
30	443.699	240.857	0.341	889.96	0.452	29.500
45	438.302	289.985	0.343	891.64	0.476	27.400
60	454.835	245.632	0.341	899.06	0.509	27.367
70	458.402	240.857	0.342	910.59	0.517	28.300
90	449.672	240.857	0.287	868.66	0.405	32.000

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430 ความหนา 1.5 มม. จากการทดสอบทางด้านแรงดึงมาตรฐาน ASTM E8M-92a

จากตารางที่ 1 พบว่าชิ้นงานทดลองในทิศทางทำมุม 75 องศา (Ultimate tensile strength) มากที่สุดและในทิศทางทำมุม 0 องศากับแนวรีดจะสามารถขึ้นรูปได้ดี เนื่องจากมีค่าตัวเลข ยกกำลังของความเครียดแข็ง (n) สูง ค่าตัวเลขยกกำลังของความเครียดแข็งนี้แสดงถึงระดับความเค้น ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการยืดตัวในช่วงการแปรรูปถาวรที่สม่ำเสมอ (uniform plastic deformation) คือยังไม่เกิดการคอด (necking) ดังนั้นวัสดุที่มีค่าตัวเลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (n) สูง จะสามารถขึ้นรูปได้ดีและความแข็งแรงของวัสดุที่เพิ่มขึ้นระหว่างการแปรรูป ช่วยยับยั้งการแปรรูปเฉพาะบริเวณคอดตัวทำให้ขนาดที่ปริมาตรแปรรูปสูง และชิ้นงานในทิศทางทำมุม 0 องศากับแนวรีดจะมีค่าการกระเห็งตัวกลับมากที่สุด เนื่องจากมีค่า Plastic Anisotropy (R-Value) มากอีกด้วย

โดยการทดลองการกดพื้นขึ้นในแต่ละครั้งมีความเร็วในการแปรรูปเท่ากับ 0.000294 เมตรต่อวินาที ขนาด 60 ตันและการเคลื่อนที่ด้วยการปรับตำแหน่งแรม (ram) ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.0025 เมตรต่อวินาทีและในตำแหน่งแรมเคลื่อนที่มายังจุดต่ำสุดมีการหน่วงเวลาไว้ 3 วินาทีหลังจากนั้นจะเคลื่อนที่ขึ้นตำแหน่งสูงสุดโดยอัตโนมัติ สำหรับการทดลองวัดมุมการคอดกลับด้วยการพล็อตลงในกระดาษหลังจากการคอดหนึ่งครั้งและวัดอีกครั้งหลังจากนั้นหนึ่งเดือนเพื่อศึกษาความแตกต่างของมุมที่มีการคอดกลับหลังจากเอาแรมออก

4. การวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์[4]

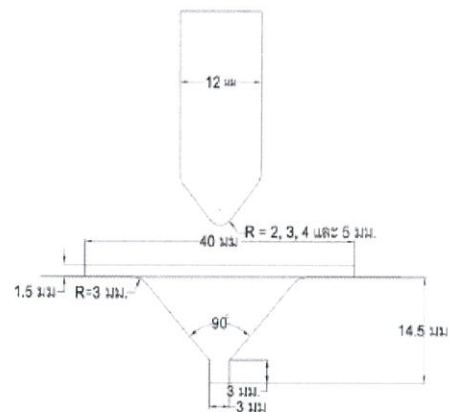
ลำดับขั้นตอนการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ชิ้นงานวัสดุโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 กระบวนการคดขึ้นรูปจําแนกได้เป็น

1. การควบคุมกระบวนการจำลอง

วิเคราะห์ปัญหาในระนาบ 2 มิติ แบบความเครียดในระนาบ และกำหนดคุณสมบัติของวัสดุชิ้นงานเป็นแบบแอนไอโซทรอปิกในระนาบ

2. การสร้างแบบจำลองกระบวนการคดขึ้นรูป

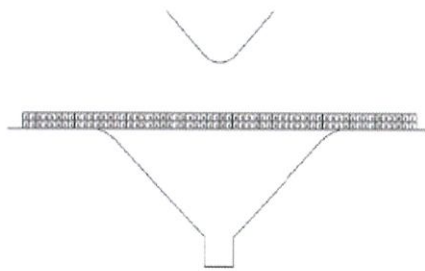
- มุมพื้นและมุมคาย มีขนาด 90 องศา
- รัศมีขอบพื้นมีขนาด คือ 2, 3, 4 และ 5 มม.
- รัศมีขอบคายเท่ากับ 12 มม.
- ความกว้างของคายเท่ากับ 25 มม.
- ขนาดวัสดุชิ้นงาน โดยมีความกว้าง 20 มม. หนา 1.5 มิลลิเมตรและยาว 40 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4 การสร้างแบบจำลองของการคดขึ้นรูป

3. การแบ่งส่วนเอลิเมนต์

การแบ่งส่วนเอลิเมนต์บนแบบจำลองชิ้นงาน มีลักษณะ 2 มิติ ใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมและเนื่องจากบริเวณชิ้นงานที่ถูกพื้นช้กดคดจะเกิดความเค้นหนาแน่นมากและมีการเปลี่ยนรูปมากกว่าส่วนอื่นๆ จึงแบ่งเอลิเมนต์นี้ให้มีความหนาแน่นและละเอียดมากกว่าส่วนอื่นๆ ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การแบ่งส่วนเอลิเมนต์ของแบบจำลองชันงาน

4. การกำหนดเงื่อนไขขอบ

การกำหนดเงื่อนไขขอบให้กับแบบจำลองชันงานนี้จะกำหนดให้โหนดของแกนสมมาตรบนชันงานไม่มีที่เคลื่อนที่ในแนวแกน x แต่สามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน y ได้

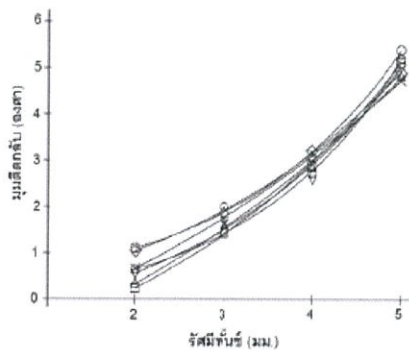


ภาพที่ 6 เงื่อนไขขอบของแบบจำลองชันงาน

5. ผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการทดลองตัดชันงานวัสดุโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 ความหนา 1.5 mm. ด้วยรัศมีปลายพื้นซ์แตกต่างกันได้ผลการทดลองดังรูปที่ 7

○d=0 □d=15 △d=30 ▽d=45 ○d=60 ◇d=75 ×d=90

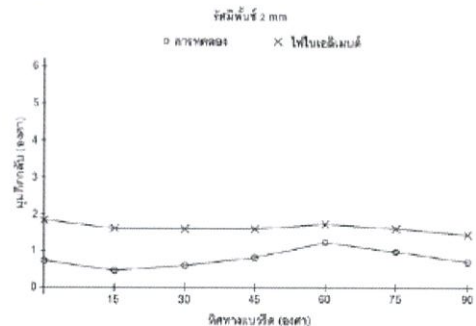


รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบผลของรัศมีปลายพื้นซ์ต่อการกระแ่งตัวกลับ ในการตัดรูปตัววีของวัสดุแผ่นเหล็ก จากรูปที่ 7 พบว่ารัศมีปลายพื้นซ์มีอิทธิพลต่อการคิดตัวกลับของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม JIS SUS430 อย่างชัดเจน

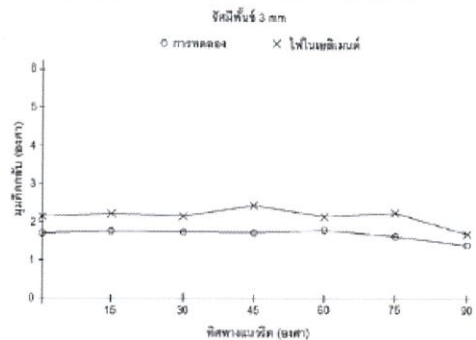
เพราะในการทดลองตัดด้วยรัศมีปลายพื้นซ์ 4 ขนาดคือ 2 mm ถึง 5 mm ขนาด 2mm มีค่าการคิดตัวกลับต่ำสุดและจะเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ จนถึงขนาดรัศมีปลายพื้นซ์ 5 mm.ที่มีค่าสูงสุด โดยรัศมีปลายพื้นซ์ 2 mm ทำให้เกิดแถบของการเปลี่ยนรูปแบบถาวรมากกว่า ส่งผลให้แถบยืดหยุ่นแสดงอิทธิพลได้น้อยลง ทำให้ค่าการคิดตัวกลับน้อยกว่ารัศมีปลายพื้นซ์ขนาดอื่น ๆ

5.1 การเปรียบเทียบผลการใช้แบบจำลองจากไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองตัดชันรูปตัววี

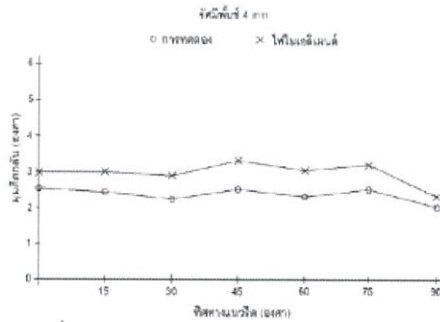
จากการทดลองตัดชันงานรูปตัววีวัสดุโลหะแผ่น JIS SUS 430 ด้วยเครื่องไฮดรอลิกเพรสส์ได้ผลการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ดังผลในรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 11



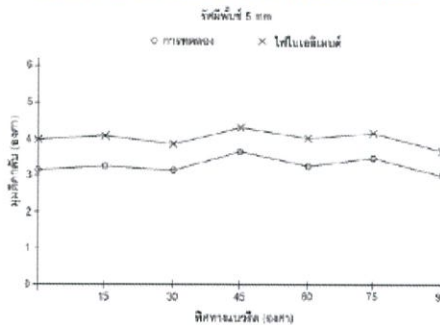
รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบค่าการคิดตัวกลับระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของตัดชันงานที่มีทิศทางตามแนววัดที่รัศมีปลายพื้นซ์ 2 มิลลิเมตร



รูปที่ 9 ผลการเปรียบเทียบค่าการคิดตัวกลับระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของตัดชันงานที่มีทิศทางตามแนววัดที่รัศมีปลายพื้นซ์ 3 มิลลิเมตร



รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบค่าการคิดตัวกลับระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของคัตชันงานที่มีทิศทางตามแนวรัศมีรัศมีปลายพื้นที่ 4 มิลลิเมตร



รูปที่ 11 ผลการเปรียบเทียบค่าการคิดตัวกลับระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของคัตชันงานที่มีทิศทางตามแนวรัศมีรัศมีปลายพื้นที่ 5 มิลลิเมตร

6. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการคิดตัวกลับของแผ่นเหล็ก JIS SUS 430 ขนาดกว้าง 15 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร ด้วยกรรมวิธีการคัตชันงานด้วยแม่พิมพ์รูปตัววีขนาดของคานมีมุม 90 องศา และเปลี่ยนขนาดของรัศมีพื้นที่ตั้งแต่ 2.0 ถึง 5.0 มิลลิเมตร เปรียบเทียบ ผลการคิดตัวกลับในแนวทิศทางทำมุมกับแนวของของารรีด ครั้งละ 15 องศาจาก 0 - 90 องศา ซึ่งสรุปผลการทดลองในข้อ 1-3 และผลของมุมที่ใช้ในการคัต และการปรับแก้มุมคัตต่อการคิดตัวกลับได้สรุปผลการทดลองในข้อ 4 มีรายละเอียดดังนี้

1. เมื่อรัศมีปลายพื้นที่ที่ใช้ในการคัตมีขนาดเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการคิดตัวกลับเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

2. ผลการทำนายค่าการคิดตัวกลับระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลการทดลอง ให้ผลใกล้เคียงกัน โดยมีความแตกต่างที่รัศมีพื้นที่ 2 มม. 0.74%, รัศมีพื้นที่ 3 มม. 0.43%, รัศมีพื้นที่ 4 มม. 0.61%, รัศมีพื้นที่ 5 มม. 0.59%.

3. ค่ามุมอ่อนคลายของวัสดุระยะเวลา 1 สัปดาห์ภายหลังเกิดการกระเห็งตัวกลับ กรณีคัตด้วยเครื่องไฮดรอลิกเพรสมีค่านูนเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.21 องศา

4. การคำนวณหาตัวคูณที่ใช้ในการปรับแก้มุม

ด้วยสมการที่ 6 และ 7

$$K = \frac{\sigma_{90}}{\sigma_e} \quad (6)$$

$$\sigma = K\sigma_{90} \quad (7)$$

σ_{90} = มุมอ้างอิง (90 องศา)

σ_e = มุมคัตตัวกลับหลังจากเอาภาระออก

σ = มุมที่ใช้สำหรับแก้ไข

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. Marcinaik, J.L. Duncan, S.J. Hu, "The Mechanics of Sheet Metal Forming," Vol.2, pp.1-10, 2002.
- [2] Japanese Standard Association, "JIS Handbook Ferrous Materials & Metallurgy I," Vol.1, 2001.
- [3] K. Lange, "Handbook of metal forming, McGraw-Hill Company," 1985.
- [4] A. Nilsson, L. Melin, C. Magnusson, "Finite-Element Simulation of V-Die Bending a Comparison with Experimental Results," Journal of Materials Processing Technology, Vol.65, pp.52-58, 1997.
- [5] T.D.S. Botelho, E. Bayraktar, G. Inglebert, "Comparison of Experimental and Simulation Results of 2D-draw-bend Springback," Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol.18, pp.275-278, 2006.
- [6] D.K. Leu, "A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metal," Journal of Material Processing Technology, Vol.66, pp.9-17, 1997.

ภาคผนวก ค.

ข้อมูลของงานวิจัยที่ได้จากการตัดขึ้นรูปตัววี

ค.1 ผลค่ามุมดีดตัวกลับจากการทดลองตัดด้วยเครื่องไฮดรอลิคเพรส

ตารางที่ ค.1 แสดงผลค่ามุมดีดตัวกลับ (องศา) จากการตัดขึ้นรูปตัววี 90 องศาด้วยเครื่องไฮดรอลิคเพรสรัศมีปลายพื้นที่ 2 มิลลิเมตร วัสดุโลหะแผ่น JIS SUS430 ความหนา 1.5 มิลลิเมตรในทิศทางทำมุมต่างๆกับแนวการรีด

ชั้นที่	ทิศทางทำมุมกับแนวรีด (องศา)						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
1	90.30	90.29	90.12	90.25	91.11	90.06	90.32
2	91.04	90.09	90.52	90.50	90.36	91.13	90.25
3	90.45	90.30	90.30	90.54	91.08	91.05	91.12
4	90.35	90.31	90.15	90.28	91.16	90.09	90.34
5	90.49	90.27	90.36	90.62	91.14	92.01	91.10
ค่าเฉลี่ย	90.53	90.25	90.29	90.44	90.97	90.88	90.63

ตารางที่ ค.2 แสดงผลค่ามุมดีดตัวกลับ (องศา) จากการตัดขึ้นรูปตัววี 90 องศาด้วยเครื่องไฮดรอลิคเพรสรัศมีปลายพื้นที่ 3 มิลลิเมตร วัสดุโลหะแผ่น JIS SUS430 ความหนา 1.5 มิลลิเมตรในทิศทางทำมุมต่างๆกับแนวการรีด

ชั้นที่	ทิศทางทำมุมกับแนวรีด (องศา)						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
1	91.98	91.20	91.51	91.46	92.08	91.50	91.12
2	92.08	92.09	92.15	92.04	92.04	92.00	92.13
3	92.07	91.53	92.01	91.54	91.54	92.04	92.09
4	90.12	92.15	91.33	92.10	92.12	92.07	92.14
5	92.01	91.24	91.42	91.47	92.13	91.53	91.19
ค่าเฉลี่ย	91.65	91.64	91.68	91.72	91.98	91.83	91.73

ตารางที่ ค.3 แสดงผลค่ามุมตีตัวกลับ (องศา) จากการตัดขึ้นรูปตัววี 90 องศาด้วยเครื่องไฮดรอลิค เพรสส์ที่มีปลายพื้นที่ 4 มิลลิเมตร วัสดุโลหะแผ่น JIS SUS430 ความหนา 1.5 มิลลิเมตรในทิศทางทำมุมต่างๆกับแนวการรีด

ชั้นที่	ทิศทางทำมุมกับแนวรีด (องศา)						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
1	93.41	92.56	93.12	92.47	92.45	93.28	93.32
2	93.45	93.32	93.14	93.18	93.32	93.25	93.46
3	93.12	94.09	93.31	93.27	93.33	93.49	93.31
4	93.50	93.39	93.19	93.23	93.37	93.32	93.51
5	93.46	92.61	93.11	92.52	92.50	93.31	93.37
ค่าเฉลี่ย	93.39	93.19	93.17	92.93	92.99	93.33	93.39

ตารางที่ ค.4 แสดงผลค่ามุมตีตัวกลับ (องศา) จากการตัดขึ้นรูปตัววี 90 องศาด้วยเครื่องไฮดรอลิค เพรสส์ที่มีปลายพื้นที่ 5 มิลลิเมตร วัสดุโลหะแผ่น JIS SUS430 ความหนา 1.5 มิลลิเมตรในทิศทางทำมุมต่างๆกับแนวการรีด

ชั้นที่	ทิศทางทำมุมกับแนวรีด (องศา)						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
1	95.35	95.34	95.19	95.20	94.44	94.48	94.45
2	95.40	95.12	95.16	94.99	96.03	95.26	95.21
3	95.10	95.00	94.30	95.01	95.39	95.30	94.28
4	95.49	95.23	95.25	95.10	96.12	95.35	95.31
5	95.19	95.09	94.39	95.09	95.48	95.39	94.35
ค่าเฉลี่ย	95.31	95.16	94.86	95.08	95.49	95.16	94.72

ค.2 การคำนวณหาค่ามุมที่ใช้ในการชดเชยมุมตัดของตายเพื่อดำเนินการติดตัวกลับ

การคำนวณหาค่ามุมที่ใช้ในการปรับแก้มุมของแม่พิมพ์ในการตัดขึ้นรูปตัววี 90 องศาของวัสดุโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด JIS SUS430 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ในแนวทิศทางต่างๆที่ทำมุมกับแนวรีดและรีดมีปลายพื้นซ์ต่างกัน ด้วยสมการที่ ค.1

$$K = \frac{\alpha_r}{\alpha} \quad (\text{ค.1})$$

ในการคำนวณหาค่ามุมที่ใช้ในการปรับแก้มุมของแม่พิมพ์ตัดเพื่อลดการติดตัวกลับจากสมการข้างต้น จะพิจารณาเป็นตัวอย่างกรณีใช้เครื่องไฮดรอลิคเพรสในการตัดการคำนวณหาค่ามุมที่ใช้ในการปรับแก้มุมของแม่พิมพ์ตัดเพื่อลดการติดตัวกลับรีดมีปลายพื้นซ์ 2 มิลลิเมตร

$$\sigma_r = 90.00 \text{ องศา}, \alpha = 90.57$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} K &= 90 / 90.57 \\ &= 0.989 \end{aligned}$$

จะได้ค่าอัตราส่วนการติดตัวกลับจากการทดลองเท่ากับ 0.989

เมื่อต้องการให้การตัดมีค่ามุมภายหลังการตัดเท่ากับ 90 องศาพอดี ให้นำค่าอัตราส่วนการติดตัวกลับจากการทดลองคูณกับมุมที่ต้องการตัด ด้วยสมการที่ ค.1

แทนค่า

$$\alpha_r = K\alpha$$

$$\begin{aligned} \alpha_r &= 0.989 \times 90 \\ &= 89.01 \text{ องศา} \end{aligned}$$

จะได้มุมที่ใช้ในการปรับแก้มุมของแม่พิมพ์ตัดเพื่อลดการติดตัวกลับเท่ากับ 89.01 องศา

การคำนวณหาค่ามุมที่ใช้ในการปรับแก้มุมของแม่พิมพ์ตัดเพื่อลดการติดตัวกลับรีดมีปลายพื้นซ์ 3 มิลลิเมตร

$$\sigma_r = 90.00 \text{ องศา}, \alpha = 91.752$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} K &= 90 / 91.752 \\ &= 0.981 \end{aligned}$$

จะได้ค่าอัตราส่วนการติดตัวกลับจากการทดลองเท่ากับ 0.981

เมื่อต้องการให้การตัดมีค่ามุมภายหลังการตัดเท่ากับ 90 องศาพอดี ให้นำค่าอัตราส่วนการติดตัวกลับจากการทดลองคูณกับมุมที่ต้องการตัด ด้วยสมการที่ ค.1

แทนค่า

$$\alpha_r = K\alpha$$

$$\alpha_r = 0.981 \times 90$$

$$= 88.29 \text{ องศา}$$

จะได้มุมที่ใช้ในการปรับแก้มุมของแม่พิมพ์ตัดเพื่อลดการติดตัวกลับเท่ากับ 88.29 องศา

การคำนวณหาค่ามุมที่ใช้ในการปรับแก้มุมของแม่พิมพ์ตัดเพื่อลดการติดตัวกลับรัศมีปลายฟันซ์ 4 มิลลิเมตร

$$\sigma_r = 90.00 \text{ องศา}, \alpha = 93.2$$

แทนค่า

$$K = 90 / 93.2$$

$$= 0.966$$

จะได้ค่าอัตราส่วนการติดตัวกลับจากการทดลองเท่ากับ 0.966

เมื่อต้องการให้การตัดมีค่ามุมภายหลังการตัดเท่ากับ 90 องศาพอดี ให้นำค่าอัตราส่วนการติดตัวกลับจากการทดลองคูณกับมุมที่ต้องการตัด ด้วยสมการที่ ค.1

แทนค่า

$$\alpha_r = K\alpha$$

$$\alpha_r = 0.966 \times 90$$

$$= 86.94 \text{ องศา}$$

จะได้มุมที่ใช้ในการปรับแก้มุมของแม่พิมพ์ตัดเพื่อลดการติดตัวกลับเท่ากับ 86.94 องศา

การคำนวณหาค่ามุมที่ใช้ในการปรับแก้มุมของแม่พิมพ์ตัดเพื่อลดการติดตัวกลับรัศมีปลายฟันซ์ 5 มิลลิเมตร

$$\sigma_r = 90.00 \text{ องศา}, \alpha = 95.11$$

แทนค่า

$$K = 90 / 95.11$$

$$= 0.946$$

จะได้ค่าอัตราส่วนการติดตัวกลับจากการทดลองเท่ากับ 0.966
เมื่อต้องการให้การตัดมีค่ามุมภายหลังการตัดเท่ากับ 90 องศาพอดี ให้นำค่าอัตราส่วนการติดตัวกลับจากการทดลองคูณกับมุมที่ต้องการตัด ด้วยสมการที่ ค.1

แทนค่า

$$\alpha_r = K\alpha$$

$$\alpha_r = 0.946 \times 90$$

$$= 85.16 \text{ องศา}$$

จะได้มุมที่ใช้ในการปรับแก้มุมของแม่พิมพ์ตัดเพื่อลดการติดตัวกลับเท่ากับ 85.16 องศา

ภาคผนวก ง.

ตารางมาตรฐานต่างๆของวัสดุ

ง.1 ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของแผ่นโลหะสแตนเลส JIS SUS430

ตารางที่ ง.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากการทำการทดสอบส่วนผสมทางเคมีตามมาตรฐานของ JIS SUS430 (% โดยน้ำหนัก)

C	0.07172
Si	0.25011
Mn	0.61918
P	0.02063
S	0.00324
Ni	0.13379
Cr	16.39712
Mo	0.00918
Cu	0.01873
Mg	0.01903
Al	0.01598
Ti	0.00187
Nb	0.01183
V	0.11284
W	0.01529
Pb	0.01663
Sn	0.00181
Zn	0.03638
Bi	0.00387
Co	0.03186
Ca	0.00027
Zr	0.00465

ตาราง ง.2 สมบัติทางกลของโลหะสแตนเลส JIS SUS430

Mechanical property					Hardness value		
Sample state	Rm	Rp0.2	A	Z	HBW	HRB	HV
	MPa	MPa	%	%			
	\geq				\leq		
anneal	450	205	22	50	183	-	-

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายฤทธิพล ประภาพันธ์
วัน เดือน ปีเกิด	15 กันยายน 2529 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	19/146 หมู่บ้านนาวิเฮาส์ ถ.สุขุมวิท ตำบลพลูดาวหลวง อำเภอสามโก้ จ.ชลบุรี 20180 โทรศัพท์ 0-384-316-58
ประวัติการศึกษา	2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาแมคคาทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) ระบบท่อและการวางแปลน 2.) การออกแบบระบบท่อในแบบจำลองและการออกแบบปฏิบัติงานจริง
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2552-2554	ตำแหน่งวิศวกรระบบท่อและเครื่องกลบริษัทไทยนิปปอนสตีลเอ็นจิเนียริ่ง แอนด์คอนสตรัคชั่นคอร์ปอเรชั่น จำกัด
พ.ศ. 2554-2555	ตำแหน่งวิศวกรออกแบบระบบท่อบริษัทซีทีซีโอประเทศไทยจำกัด
ปัจจุบัน จำกัด	ตำแหน่งวิศวกรออกแบบระบบท่อบริษัทซัมซุงเอ็นจิเนียริ่งประเทศไทย