

การลดการดีดตัวกลับของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S335 ในกระบวนการ

ตัดรูปตัวยู

SPRING BACK REDUCTION OF HIGH STRENGTH STEEL S355

IN U-BENDING PROCESS

สมคิด แสนอุบล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การลดการติดตัวกลับของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 ในกระบวนการ

ตัดรูปตัวยู

สมคิด แสนอุบล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การลดการบิดตัวกลับของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 ในกระบวนการ  
ดัดรูปตัวยู

Spring Back Reduction of High Strength Steel S355  
in the U-bending Process

ชื่อ - นามสกุล

นายสมคิด แสนอุบล

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

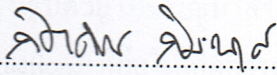
อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr-Ing.

ปีการศึกษา

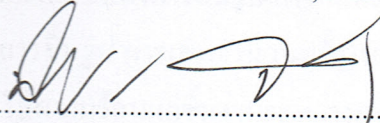
2559

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



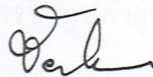
ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)



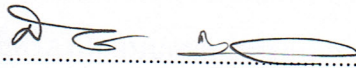
กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทร์มณี, Ph.D.)



กรรมการ

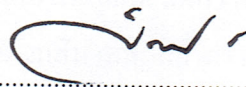
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปรานีตพลกรัง, D.Eng.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทฉบับนี้



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 20 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดการติดตัวกลับของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 ในกระบวนการตัดรูปตัวยู
ชื่อ-นามสกุล	นายสมคิด แสนอุบล
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2559

## บทคัดย่อ

การติดตัวกลับของชิ้นงานหลังขึ้นรูปตัวยู เป็นปัญหาสำคัญ กระบวนการบีบขึ้นรูปตัวยูที่มีหลักการทำงานแบบหนึ่งจังหวะ (Single action) ที่ก่อให้เกิดความเค้นดึง และความเค้นอัดตกค้างในเนื้อวัสดุสูงและส่งผล ทำให้ชิ้นงานมีการติดตัวกลับหลังการขึ้นรูป การแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้อาจทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การปรับความเร็วในการขึ้นรูป การเพิ่มจำนวนครั้งในการขึ้นรูป การลดความแข็งแรงของชิ้นงานก่อนการขึ้นรูป และการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานระหว่างการขึ้นรูป เป็นต้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ใช้ความเร็วในการขึ้นรูป และการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานระหว่างการขึ้นรูป เพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปตัวยูวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 โดยมีเงื่อนไขในการทดลองได้แก่ ความเร็วในการตัด แบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือความเร็วที่ 10, 20, 30 เมตรต่อนาที และการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานได้แบ่งออกเป็น 4 ระดับเช่นกัน คือ 25, 60, 80, 100 องศาเซลเซียส วัสดุที่ใช้ในการทดลองมีขนาดความกว้าง 40 มิลลิเมตร ความยาว 200 มิลลิเมตร และความหนา 5 มิลลิเมตร ทำการทดลองโดยใช้เครื่องบีบแบบแมคคาทรอนิกส์ขนาด 110 ตัน

ผลการทดลองพบว่าความเร็ว และการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานในการตัดขึ้นรูปมีผลต่อค่าการติดตัวกลับอย่างมีนัยสำคัญ ความเร็วที่ทำให้ค่าการติดตัวกลับลดลงมากที่สุดคือ 10 เมตรต่อนาที มีค่าการติดตัวกลับ 2.44 องศา และการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่ 80-100 องศาเซลเซียส ทำให้การติดตัวกลับของชิ้นงานลดลงเกือบเท่ากับศูนย์ การลดความเร็วในการตัดขึ้นรูป และการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานระหว่างการตัดขึ้นรูปช่วยลดการติดตัวกลับและลดความเครียดของชิ้นงานที่มีความแข็งแรงสูง

**คำสำคัญ :** กระบวนการตัดขึ้นรูป การติดตัวกลับ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

**Thesis Title** Spring Back Reduction of High Strength Steel S355  
in the U-bending Process

**Name – Surname** Mr. Somkid Saenubol

**Program** Manufacturing Engineering

**Thesis Advisor** Assistant Professor Sirichai Torsakul , Dr.-Ing.

**Academic Year** 2016

## ABSTRACT

Spring back of workpiece after u-shape forming process is one of the problems that should be addressed especially when the u-shape forming process relies mainly on single action principle. This process creates strain and stress residue that makes workpiece spring back after the forming process. There are many ways to solve this problem such as a) reduce forming process speed, b) increase repetition in the forming process, c) reduce hardness of workpiece before the forming process and d) apply heat to workpiece during forming process.

The purpose of this study was to efficiently increase the speed in the shape forming process and to introduce the application of heat to workpiece during the forming process. This was done in order to find out the right variable essential for the forming process of steel particularly in high strength steel such as S355. The protocol of the test was based on the speed in bending which was divided into 3 levels – 10, 20, and 30 m/sec. The application of heat to the workpiece was divided into 4 levels – 25, 60, 80 and 100°C. The material used in this test was 40mm in width and 200mm in length with 5mm in thickness of steel. Test was done by using 110 tons mechatronics pump.

The result revealed that speed and heat volume used during bending process affected spring back action critically. The speed that reduced the most spring back action was at 10 meter/sec with spring back value at 2.44 in angle. The heat temperature at 80-100 °C reduced the spring back action to almost zero. In general, reducing speed and providing heat temperature during the bending process helped reduce the spring back action and stress of workpiece that has high strength steel.

**Keywords:** Bending process spring back reaction, High Strength Steel

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ ประธานหลักสูตรวิศวกรรมการผลิต ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง กรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทน์มณี กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาคอุตสาหกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและเจ้าหน้าที่ ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ ในการวิจัยจนประสบความสำเร็จ

ผู้วิจัย ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาหลักที่กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และข้อปรับปรุง อย่างมีคุณค่าอนันต์

ทำนุนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อาจารย์ทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุน และแนะนำแนวทางการศึกษา และทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงตามกำหนด

นาย สมคิด แสนอุบล



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	12
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	13
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	13
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	14
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 เหล็กกล้า.....	15
2.2 ทฤษฎีการขึ้นรูปงานโลหะแผ่นโดยการตัดพับ.....	17
2.3 ทฤษฎีการคืดตัวกลับ.....	30
2.4 การตีกริดและวิเคราะห์กริดวงกลม.....	36
2.5 ทฤษฎีการทดสอบคุณสมบัติทางกล.....	40
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	48
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	51
3.1 ขั้นตอนดำเนินงาน.....	51



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	52
3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	54
3.4 การเตรียมแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นส่วนรูปตัวยู.....	59
3.5 การคำนวณแรงในการตัดขึ้นรูป.....	60
3.6 การทดลอง.....	61
3.7 การบันทึกการทดลอง.....	63
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	66
4.1 ผลการทดลอง.....	66
4.1.1 การตัดตัวกลับหลังการตัดขึ้นรูป.....	66
4.1.2 ความเครียดของชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูปที่ความเร็วต่างกัน.....	68
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	71
4.2.1 การวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่มีผลต่อการตัดตัวกลับ.....	71
4.2.2 การวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่มีผลต่อความเครียด.....	73
4.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	74
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	76
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
บรรณานุกรม.....	78
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง.....	83
ภาคผนวก ข การทดสอบทางสถิติ.....	86
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	89
ประวัติผู้เขียน.....	100



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมี.....	15
ตารางที่ 2.2 ค่าที่เหมาะสมต่อการใช้ของแต่ละวัสดุ P (MPa) .....	34
ตารางที่ 3.1 การแบ่งชนิดของลวดทั้งสแตนเลสและส่วนผสมของลวดทั้งสแตนเลสต่างกัน .....	63
ตารางที่ 3.2 ตารางบันทึกผลการวัดการคิดตัวกลับของชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูปด้วยที่อุณหภูมิ ชิ้นงานต่างกัน.....	64
ตารางที่ 3.3 ตารางบันทึกผลการวัดขนาดวงกลมกริดของชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูปด้วย ที่ความเร็วต่างกัน.....	65
ตารางที่ 3.4 ตารางบันทึกผลการวัดการคิดตัวกลับของชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูปด้วยที่อุณหภูมิ ชิ้นงานต่างกัน.....	65
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดการคิดตัวกลับของชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูปด้วยที่ความเร็วต่างกัน.....	66
ตารางที่ 4.2 ค่าความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูปด้วย.....	69



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แรงที่เกิดขึ้นระหว่างการพับขึ้นรูป.....	18
รูปที่ 2.2 ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ของการพับ.....	19
รูปที่ 2.3 ตำแหน่งของเส้นแกนกลาง .....	21
รูปที่ 2.4 การไหลของโลหะและการบิดพับ .....	22
รูปที่ 2.5 ประกอบนิยามศัพท์ในการตัด .....	24
รูปที่ 2.6 ลักษณะของการตัดทอแบบ Mandrel Bending.....	25
รูปที่ 2.7 การตัดแบบ Ram Bending.....	26
รูปที่ 2.8 การตัดแบบ 3-Roll Bending.....	27
รูปที่ 2.9 การตัดแบบ Rotary Draw Bending .....	27
รูปที่ 2.10 การตัดแบบ Compression Bending.....	28
รูปที่ 2.11 ตัวอย่าง ของการตัดรูปตัวยู ในงาน โลหะแผ่น .....	28
รูปที่ 2.12 ภาพประกอบแผนผังของคำศัพท์ที่ใช้ในกระบวนการตัด.....	29
รูปที่ 2.13 a) การตัดรูปตัวยูแบบเปิด    b) การตัดรูปตัวยูแบบมีตัวกระทุ้งออก .....	30
รูปที่ 2.14 การติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการพับ .....	31
รูปที่ 2.15 การเคลื่อน ไหวของโลหะระหว่างการพับขึ้นรูป.....	32
รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนรูปแบบของความเค้นในการพับ โลหะ .....	33
รูปที่ 2.17 แรงที่เกิดจากการติดตัวกลับ .....	34
รูปที่ 2.18 วิธีการพับให้มากกว่าความต้องการ .....	35
รูปที่ 2.19 การป้องกันการเกิดการติดกลับ .....	36
รูปที่ 2.20 Patterns of circle grid.....	37
รูปที่ 2.21 ขั้นตอนการตีกริด ( Electrochemical marking ) .....	37
รูปที่ 2.22 ลักษณะตารางวงกลมกริดบน โลหะแผ่น .....	38
รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลม .....	39
รูปที่ 2.24 การทดสอบการดึง.....	41
รูปที่ 2.25 แรงดึง (Tensile) .....	42
รูปที่ 2.26 แรงกด (Compression).....	42

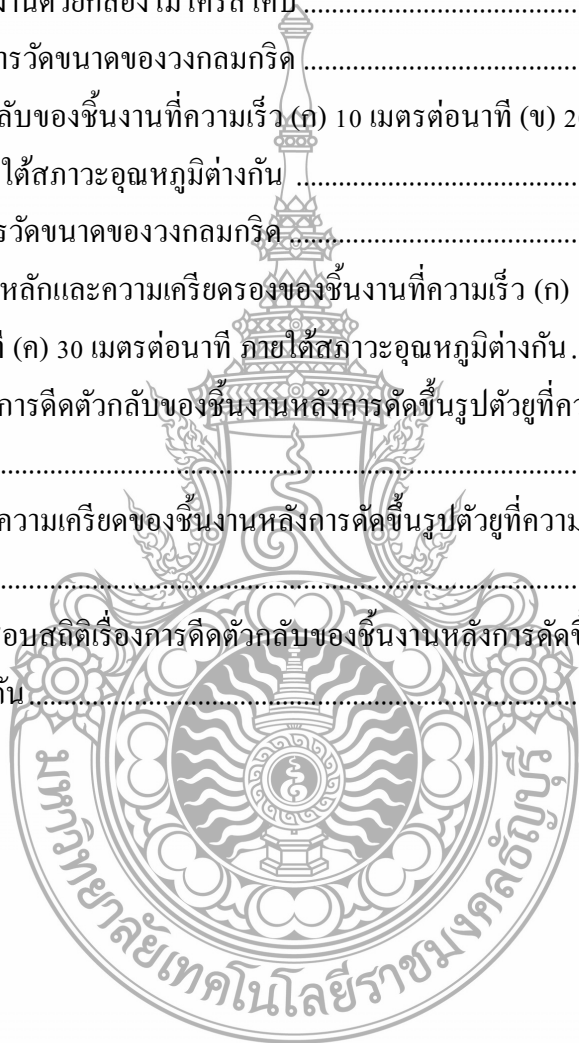
## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.27 แรงเฉือน (Shear).....	43
รูปที่ 2.28 ความเค้นความเครียดของการดึงวัสดุ.....	43
รูปที่ 2.29 ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain).....	45
รูปที่ 2.30 ความเครียดเฉือน (Shear Strain).....	45
รูปที่ 2.31 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) ....	46
รูปที่ 2.32 สภาวะความเค้นที่เกิดขึ้นจากการพับ.....	47
รูปที่ 2.33 รูปแบบการทดสอบสำหรับงานพับขึ้นรูปโลหะแผ่น.....	48
รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงาน.....	52
รูปที่ 3.2 เครื่องปั๊มไฮดรอลิกขนาด 110ตัน.....	53
รูปที่ 3.3 เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์.....	53
รูปที่ 3.4 กล้องไมโครสโคป (Microscope).....	54
รูปที่ 3.5 การคาริเบทกล้องไมโครสโคป.....	54
รูปที่ 3.6 แผ่นขึ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....	55
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์บล็อก.....	55
รูปที่ 3.8 แผ่นกริดแบบผสมวงกลมกับสี่เหลี่ยม (Combination).....	56
รูปที่ 3.9 เครื่องปล่อยกระแสไฟฟ้า.....	56
รูปที่ 3.10 สารเคมีที่ใช้กัดกรด.....	57
รูปที่ 3.11 ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอะซิโตน.....	57
รูปที่ 3.12 การเทกรดลงบนแผ่นฟิล์มและเหล็ก.....	58
รูปที่ 3.13 การปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านแผ่นฟิล์มเพื่อทำการกัดผิวโลหะ.....	58
รูปที่ 3.14 เหล็กแผ่นที่ผ่านการตีกริด.....	59
รูปที่ 3.15 ส่วนประกอบแม่พิมพ์ตัดขึ้นรูปตัวยู.....	59
รูปที่ 3.16 แม่พิมพ์ตัดขึ้นรูปตัวยู.....	60
รูปที่ 3.17 การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องปั๊ม.....	61
รูปที่ 3.18 การตัดขึ้นรูปตัวยูขึ้นงาน.....	62
รูปที่ 3.19 การให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน.....	62

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.20	ชิ้นงานหลังการตัดชิ้นรูปด้วย.....	62
รูปที่ 3.21	การวัดชิ้นงานด้วยกล้องไมโครสโคป.....	63
รูปที่ 3.22	ตำแหน่งการวัดขนาดของวงกลมกริด.....	64
รูปที่ 4.1	การขีดตัวกลับของชิ้นงานที่ความเร็ว (ก) 10 เมตรต่อนาที (ข) 20 เมตรต่อนาที (ค) 30 เมตรต่อนาที ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่างกัน.....	67
รูปที่ 4.2	ตำแหน่งการวัดขนาดของวงกลมกริด.....	69
รูปที่ 4.3	ความเครียดหลักและความเคี้ยวตรงของชิ้นงานที่ความเร็ว (ก) 10 เมตรต่อนาที (ข) 20 เมตรต่อนาที (ค) 30 เมตรต่อนาที ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่างกัน.....	70
รูปที่ 4.4	แสดงกราฟการขีดตัวกลับของชิ้นงานหลังการตัดชิ้นรูปด้วยที่ความเร็ว และสภาวะอุณหภูมิแตกต่างกัน.....	72
รูปที่ 4.5	แสดงกราฟความเครียดของชิ้นงานหลังการตัดชิ้นรูปด้วยที่ความเร็ว และสภาวะอุณหภูมิแตกต่างกัน.....	73
รูปที่ 4.6	ผลการทดสอบสถิติเรื่องการขีดตัวกลับของชิ้นงานหลังการตัดชิ้นรูปด้วยที่สภาวะอุณหภูมิชิ้นงานต่างกัน.....	75



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การติดตัวกลับของชิ้นงานหลังขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นเป็นปัญหาหลักที่พบบ่อยเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะในกระบวนการตัดขึ้นรูป เนื่องจากในช่วงการเปลี่ยนรูปชั่วคราว หรือช่วงการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation) วัสดุจะเกิดความเค้นดึงสูงสุดที่ขอบด้านนอกของรัศมีการตัด และเกิดความเค้นอัดสูงสุดที่ผิวโค้งด้านในของรัศมีการตัด และแรงจากการตัดขึ้นรูปจะเกินค่าความแข็งแรงของ จุดครากทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร แต่เมื่อแม่พิมพ์เปิดออกยังคงมีส่วนที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบไม่ถาวร ทำให้พยายามคืนตัว แต่ไม่สามารถกระทำได้ทั้งหมด เนื่องจากถูกยึดไว้ด้วย ส่วนที่เปลี่ยนรูปถาวรไปแล้วทางด้านนอก ดังนั้นจึงเกิดการคืนตัวได้บางส่วนหรือการติดตัวกลับ (Spring Back) นั้นเอง ซึ่งการการติดตัวกลับนี้จะเกิดได้มากกับวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง

ได้มีการศึกษาและพัฒนามากมายเพื่อแก้ปัญหาการติดตัวกลับของชิ้นงาน จากการศึกษาของ ณัฐกร และคณะ [1] ศึกษาพฤติกรรมการติดกลับของเหล็กกล้าความต้านแรงสูงพิเศษโดยกระบวนการตัดด้วยแม่พิมพ์รูปตัวยู พบว่าวัสดุที่มีค่าความต้านแรงจุดครากสูง จะส่งผลให้การติดตัวกลับสูงขึ้นด้วย M.K. Choi, & H. Hub [2] ได้ทำการทดลองตัดขึ้นรูปชิ้นงานที่ความเร็วพินซ์ 0.7 – 70 เมตรต่อวินาที พบว่าความเร็วพินซ์ ต่ำสุดช่วยลดค่าการติดตัวกลับมากที่สุดเนื่องจากว่าความเร็วที่ช้าช่วยให้การกระจายตัวของความเครียดที่อยู่ในเนื้อเหล็กกระจายตัวได้ดี J. Lee, et al [3] ได้ทำการศึกษาโดยให้อุณหภูมิที่แม่พิมพ์ พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อชิ้นงานที่จะช่วยลดการเกิดการติดตัวกลับที่ชิ้นงานและช่วยลดความเครียดตกค้างในเนื้อเหล็ก L. Wei และคณะ[4] ได้ทดลองตัดขึ้นรูปตัววีวัสดุแมกนีเซียมอัลลอยด์โดยใช้ความเร็วของพินซ์ที่ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที กับสภาวะอุณหภูมิชิ้นงานที่ 50 - 300 องศาเซลเซียส ซึ่งผลปรากฏว่าความเร็วที่ 200 - 250 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ค่าการติดตัวกลับของแมกนีเซียมอัลลอยด์ลดลงอยู่จนยอมรับได้

งานวิจัยนี้จึงมุ่งหาวิธีที่จะแก้ไขปัญหาการติดตัวกลับหลังจากกระบวนการตัดรูปตัวยู (U-bending) ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 โดยเลือกใช้ตัวแปร ความเร็วในการตัดขึ้นรูป และการตัดขึ้นรูปภายใต้สภาวะความร้อนไม่เกิน 100 องศาเซลเซียสเพราะเป็นตัวแปรที่เหมาะสมต่อการนำไปปรับปรุงในกระบวนการผลิตต่อไป เพื่อแก้ปัญหาการติดตัวกลับของชิ้นงาน หลังการตัดขึ้นรูปแบบตัวยู (U-bending) ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 เพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ซึ่งลูกค้าต้องการชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงตามแบบที่กำหนดเท่านั้น

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการดัดตัวกลับของ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 ในการขึ้นรูปขึ้นส่วนตัวยู U-bending

1.2.2 เพื่อศึกษาหาค่าการดัดตัวกลับที่เหมาะสมของ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 ในการขึ้นรูป ขึ้นส่วนส่วนตัวยู U-bending ที่สัมพันธ์กับความเครียด

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 วัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบคือแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 ขนาดกว้าง 40 mm ความยาว 200 mm ความหนาที่ 5 mm ซึ่งเป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิต ชิ้นส่วนที่มีความแข็งแรงสูง

1.3.2 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นแม่พิมพ์ดัดตัวยู (U-Bending Die) ขนาด กว้าง 250 x ยาว 300 x สูง 320 มม.

1.3.3 เครื่องที่ใช้ในการทดลอง เครื่องเพรส (Mechanic Press) 110 ตัน Amino Japan ขนาดของโต๊ะ (Table) 2000 x 3000 มม.

1.3.4 อ่างอิงมุม 90° ที่ทำแม่พิมพ์จาก Cad original คงที่มุมในการขึ้นรูป

1.3.5 ความเร็วในการขึ้นรูป 3 ระดับ คือ

1.3.5.1 ความเร็วที่ 10 เมตรต่อนาที

1.3.5.2 ความเร็วที่ 20 เมตรต่อนาที

1.3.5.3 ความเร็วที่ 30 เมตรต่อนาที

1.3.6 อุณหภูมิในการขึ้นรูป 3 ระดับ คือ

1.3.6.1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

1.3.6.2 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

1.3.6.3 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อลดการติดตัวกลับของชิ้นงานทำให้ได้งานชิ้นงานที่มีคุณภาพ ช่วยลดต้นทุนในการผลิต เนื่องจากสามารถลดของเสียได้

1.4.2 สามารถ เผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับชาติ นานาชาติ หรือตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ นานาชาติได้

1.4.3 เพิ่มขีดความสามารถ ในการผลิตชิ้นส่วนรูปตัวยูที่มีความเที่ยงตรงแม่นยำสูง ที่ผลิตจากผู้ประกอบการในประเทศ

1.4.4 ถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับ บริษัท แอดวานซ์ ออโต้พาร์ท ทูลส์ แอนด์คายส์ จำกัด เพื่อผลิตชิ้นส่วนรูปตัวยู ที่ใช้แผ่น เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 ให้มีคุณภาพ ตรงตามความต้องการของลูกค้าที่กำหนดไว้ในแบบชิ้นส่วน (Drawing part)





## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โครงการนี้จะศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีต่างๆ ดังนี้ เช่น ทฤษฎีการตัด ทฤษฎีการคิดตัวกลับ ทฤษฎีของเหล็ก และทฤษฎีสารหล่อลื่น เป็นต้น ซึ่งทฤษฎีต่างๆ ที่กล่าวมานั้นจะใช้เป็นแนวทางในการศึกษาเรื่องต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงาน โครงการนี้

#### 2.1 เหล็กกล้า [5]

เป็นโลหะที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งในปัจจุบัน เหล็กกล้ามีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.1-1.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่ทำให้เหล็กกล้ามีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เหล็กกล้าถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างมาก นอกจากปริมาณของธาตุคาร์บอนแล้ว ยังมีการผสมธาตุต่าง ๆ ในเนื้อเหล็กกล้าอีกด้วย เช่น โครเมียม นิกเกิล ทังสแตน วาเนเดียม โมลิบดีนัม เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กกล้าให้ดีขึ้น เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเฉพาะอย่าง เช่น ทนต่ออุณหภูมิได้สูง ทนต่อการเสียดสี ทนต่อการกัดกร่อน มีความแข็งแรงสูงขึ้น เหล็กกล้าแบ่งออกได้ 3 ประเภท คือ

2.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) เป็นเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอนเป็นหลัก อาจจะมีธาตุอื่นผสมอยู่ได้บ้างเล็กน้อย เช่น ซิลิกอน แมงกานีส กำมะถัน ฟอสฟอรัส เหล็กกล้าคาร์บอนแบ่งออกได้หลายชนิดตามปริมาณของธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก จะทำให้มีคุณสมบัติแตกต่างกัน และนำไปใช้งานในลักษณะต่างกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ จัดได้ว่าเป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่ในเนื้อเหล็กน้อยที่สุด คือ มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.10-0.30% โดยน้ำหนักกำหนดตามมาตรฐานอเมริกัน คือ AISI 1010-1030 กำหนดมาตรฐานเยอรมัน คือ S37 เนื่องจากมีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่น้อย ทำให้มีความแข็งแรงต่ำไม่สามารถนำไปทำการชุบแข็งได้เหมาะสำหรับนำไปใช้งานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมากนัก เช่น นำไปรีดเป็นแผ่น ทำถังบรรจุของเหลว นำไปทำเป็นเหล็กเส้นใช้ในงานก่อสร้าง

2.1.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้นมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ คือมีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.31-0.55% โดยน้ำหนัก กำหนดตามมาตรฐานอเมริกัน คือ AISI 1031-1055 กำหนดตามมาตรฐานเยอรมัน คือ St 50 สามารถนำไปปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน โดยการนำไปชุบแข็ง (Hardening) คือนำชิ้นงานไปเผาให้ร้อนเพื่อให้เหล็กเปลี่ยนโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) ซึ่งการจะใช้อุณหภูมิสูงขนาดไหน

ขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่จากนั้นทำให้เย็นตัวลงโดยเร็ว เหล็กจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็น มาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งเหล็กจะมีความแข็งเพิ่มขึ้น เหล็กกล้าชนิดนี้นำไปใช้ผลิตชิ้นส่วนของ เครื่องจักรกลที่ต้องการความแข็งแรง เช่น เพลาส่งกำลัง เฟืองในเครื่องจักรต่าง ๆ

2.1.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel) เป็นเหล็กกล้าที่ปริมาณธาตุคาร์บอนผสม อยู่ในเนื้อสูงสุด คือมีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.56–1.5% โดยน้ำหนัก กำหนดมาตรฐานอเมริกัน คือ AISI 1056–1090 กำหนดมาตรฐานเยอรมัน คือ St170 เป็นเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูง นำไปผลิต เครื่องมือคมตัดต่างๆ เช่น มีดคิ่ง ดอกสว่าน ดอกคว้านละเอียด ดอกทำเกลียว ใบเลื่อย ตะไบ ซึ่ง เครื่องมือคมตัดต่าง ๆ เหล่านี้ จะนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูป ตามขนาด และรูปร่าง แล้วนำชิ้นงาน ไปปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน โดยการนำไปชุบแข็ง (Hardening) ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรง สูงมาก แต่เมื่อได้รับแรงกระแทกจะเปราะหักได้ง่าย

#### 2.1.4 มาตรฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง S355

เหล็ก เกรด S355 เป็นเหล็กตามเหล็กมาตรฐาน ยุโรป S355 EN 10025 : 2004 มาตรฐาน เหล็กแผ่น ,เหล็กโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงสูง แผ่นเหล็ก โครงสร้าง S355 เป็น เหล็กความแข็งแรงสูง ตามมาตรฐานยุโรป เหล็กโครงสร้าง ครอบคลุม ชิ้นส่วน ภายใน EN 10025 - 2004 มาตรฐาน ด้วย อัตราส่วนผสม ขึ้นต่ำ 50,000 KSI ก็ ตรงตามความต้องการ ในทางเคมีและ คุณสมบัติทางกายภาพ เทียบเท่า มาตรฐาน ASTM A572 / 709

##### 2.1.4.1 การนำมาใช้งาน

- 1) นิยมมาใช้ในการผลิต โครงสร้างที่ต้องการ ความแข็งแรงสูง
- 2) โรงงานเหล็กกล้า โครงสร้าง ส่วนประกอบ ของสะพาน ชิ้นส่วน เครื่องกลจักรกล โครงสร้างที่ต้องการ การป้องกันการกัดกร่อนสูง
- 3) โรงไฟฟ้า, สะพานเหล็ก
- 4) อุตสาหกรรม การทำเหมืองแร่ และอุปกรณ์ , ที่มีการเคลื่อนไหว
- 5) อุปกรณ์ยึดจับ
- 6) ชิ้นส่วนของที่สัมผัสกับอากาศที่สูง

##### 2.1.4.2 ส่วนผสมทางเคมี (Chemical Composition) ของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง S355

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมี (Chemical Composition)

เหล็กกล้า S355	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%N	%Cu
wt%)	0.24	1.6	0.35	0.35	0.55	0.12	0.55

### 2.1.4.3 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง S355 (Mechanical Properties)

ค่าความแข็งแรงได้สูงสุด (Yield Strength) 355 MPa ค่าทนต่อแรงดึงได้สูงสุด (Tensile Strength) 470-630 MPa ค่าการยืดตัว (Elongation) 22 %

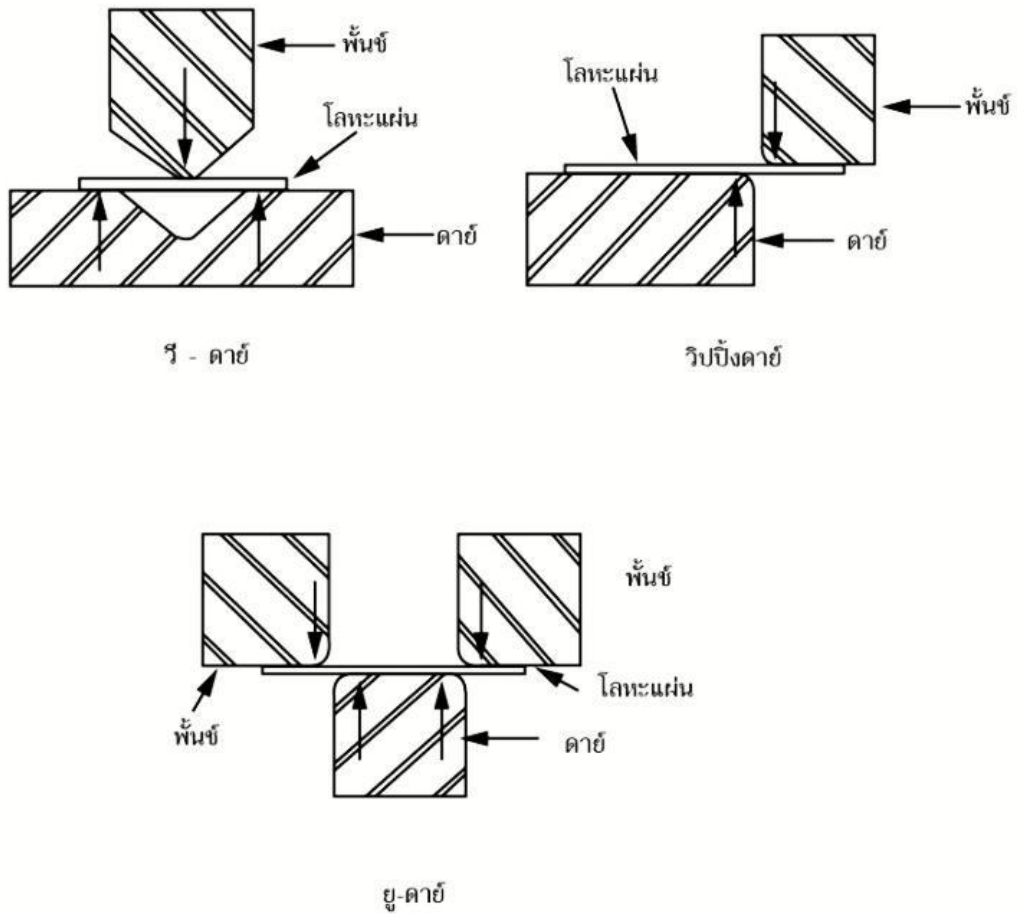
## 2.2 ทฤษฎีการขึ้นรูปงานโลหะแผ่นโดยการดัดพับ

กระบวนการพับขึ้นรูป (Bending) เป็นกระบวนการที่ง่ายที่สุดที่ใช้ทำงานร่วมกับเครื่องปั๊มโลหะ ซึ่งกระบวนการพับขึ้นรูปนี้อาจทดลองได้โดยใช้เครื่องมือง่ายๆทำก็ได้ กระบวนการพับขึ้นรูปนั้น เป็นกระบวนการอันหนึ่งในหลายๆกระบวนการขึ้นรูปโดยการดัดพับ ซึ่งกระบวนการนี้จะถูกใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษาถึงสภาพของการขึ้นรูปชิ้นงานที่ใช้ในบทนี้ กระบวนการขึ้นรูปโดยการดัดพับนั้น มีกรรมวิธีที่แตกต่างไปจากกระบวนการตัดขึ้นรูป (Cutting) และกระบวนการลากขึ้นรูป (Drawing) เป็นอย่างมาก

ในการขึ้นรูปโลหะโดยการพับขึ้นรูปนั้นเราต้องให้แรงแก่ชิ้นงาน ทั้งนี้เพื่อให้ชิ้นงานนั้นเปลี่ยนรูปร่างพับอย่างถาวร ซึ่งแรงที่ให้แก่ชิ้นงานนั้นจะต้องไม่ทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานมากกว่าความเค้นดึงสูงสุดของชิ้นงานนั้น และจะต้องไม่น้อยกว่าจุดยึดหยุ่นจำกัดของชิ้นงานนั้น

เมื่อเราให้แรงแก่ชิ้นงานเพื่อทำการพับ จะปรากฏว่าความเค้นของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจะเริ่มจากบางจุดที่ต่ำกว่าความแข็งแรงสูงสุดของโลหะนั้น และความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นจะแผ่กระจายไปยังส่วนต่างๆของชิ้นงาน ซึ่งขณะที่แผ่กระจายนั้น ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานก็จะค่อยๆลดลงด้วยจนถึงบริเวณที่ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานเป็นศูนย์ ซึ่งลักษณะการเกิดความเค้นบนชิ้นงานแบบนี้จะทำให้เกิดการบิดพับของชิ้นงานมากกว่าจะเกิดการบิดขาดสำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างพับอย่างถาวรของโลหะนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานจะต้องผ่านจุดยึดหยุ่นจำกัดและจุดล้าตัวด้วย

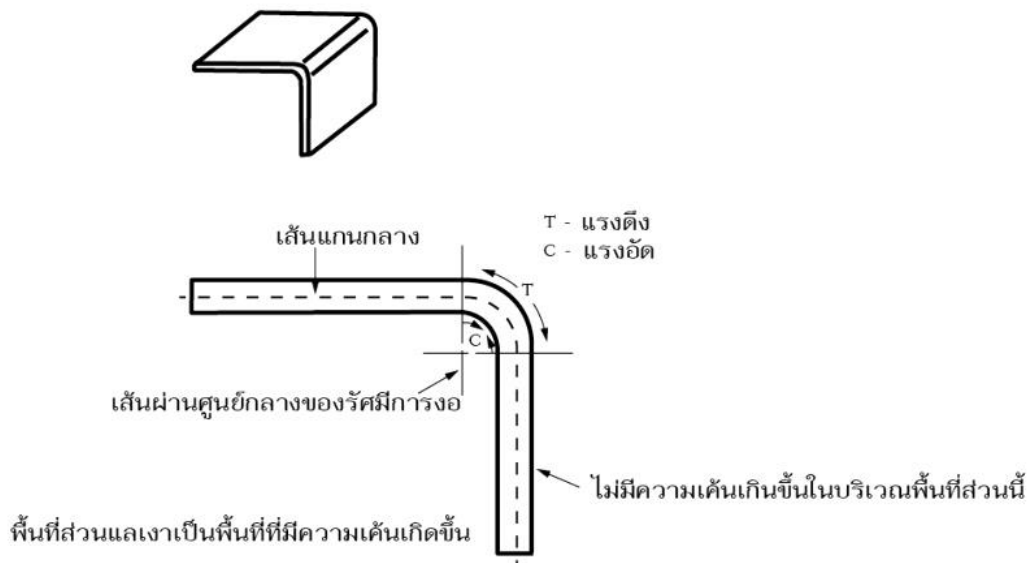
จากรูปที่ 2.1 นั้นเป็นการแสดงถึงการเกิดแรงที่ใช้ในการพับบนตายชนิดต่างๆกันสำหรับวิ-ตาย (V-Die) นั้นเราจะพบว่ามีการแผ่กระจายของแรงเกิดขึ้นมากที่สุดส่วนยู-ตาย (U-Die) และวิ-ปิ้ง-ตาย (Wiping-Die) นั้นนิยมใช้ในการผลิตชิ้นงานมากและยู-ตายตั้มมักจะนิยมเรียกว่า ชาเนลตาย (Channel Die) การแผ่กระจายของแรงเมื่อที่ใช้บนตายสำหรับกระบวนการดัดขึ้นรูปนั้นจะมีขนาดของการแผ่กระจายของแรงเท่ากับขนาดของช่องว่างระหว่างคมตัดของแม่พิมพ์ที่ได้ตั้งเอาไว้ตามปกติ จะมีค่าประมาณ 10% ของความหนาของชิ้นงานสำหรับการแผ่กระจายของแรงที่ใช้ในการพับนั้นจะมีขนาดของการแผ่กระจายบนชิ้นงานมากกว่าแรงเฉือนซึ่งขนาดของการแผ่กระจายบนชิ้นงานในการพับนั้นจะมีขนาดเท่ากับความหนาของชิ้นงานบวกกับรัศมีของพื้นซ์และรัศมีตาย



รูปที่ 2.1 แรงที่เกิดขึ้นระหว่างการพUNCHรูป [6]

### 2.2.1 การพUNCH (Bending)

การพUNCH (Bending) นั้นมีลักษณะความแตกต่างของการเกิดความเค้นของโลหะ เฉพาะที่เท่านั้นความเค้นที่เกิดเฉพาะที่นี้จะเกิดขึ้นตรงรัศมีของการพUNCHของชิ้นงานเท่านั้นส่วนพื้นที่ ของชิ้นงานส่วนที่เหลือนั้นจะไม่มี ความเค้นเกิดขึ้นเลย แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ของการพับ

เป็นการแสดงถึงพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ได้ผ่านกระบวนการพับมาแล้วความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานนั้นเราจะสังเกตได้ดังนี้ โลหะที่อยู่ด้านนอกของรัศมีการพับจะยืดออกแสดงให้เห็นว่ามีความเค้นดึงเกิดขึ้น ส่วนโลหะที่อยู่ด้านในของรัศมีการพับจะหดตัวเข้า แสดงให้เห็นว่ามีความเค้นอัดเกิดขึ้น ดังนั้น ถ้ามีการฉีกขาดปรากฏขึ้นระหว่างการพับ มันจะเกิดขึ้นที่ส่วนนอกของการพับ แต่ถ้ามีรอยขุ่น (Wrinkle) ปรากฏขึ้น มันจะเกิดขึ้นที่ด้านในของการพับ

### 2.2.2 เส้นแกนกลาง (Neutral Axis)

ทั้งนี้เพราะว่าที่ชิ้นงานนั้น ได้เกิดความเค้นดึงขึ้นที่ด้านหนึ่งและอีกด้านหนึ่งนั้นได้เกิดความเค้นอัดขึ้น การกลับตรงข้ามของความเค้นทั้งสองนี้จะต้องเกิดขึ้นตรงบริเวณใกล้ๆเส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงาน ความเค้นดึงและความเค้นอัดจะเกิดขึ้นมากที่สุดตรงบริเวณด้านขอบนอกทั้งสองข้างของความหนาชิ้นงาน และความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งสองนี้จะค่อยๆลดลงๆเมื่อระยะห่างเข้ามาใกล้กับเส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงาน ซึ่งที่เส้นแกนกลางของความหนาหรือบริเวณใกล้ๆเส้นแกนกลางของความหนาจะมีความเค้นเป็นศูนย์ คือ ไม่เกิดความเค้นขึ้นเลย เส้นที่ไม่มีความเค้นเกิดขึ้นเลย เราเรียกว่า “เส้นแกนกลาง” (Neutral Axis)

ก่อนที่จะมีการพับชิ้นงานนั้น ขนาดความยาวที่แท้จริงของชิ้นงานได้ถูกกำหนดไว้แน่นอนแล้ว ดังนั้นความยาวของเส้นแกนกลางที่เกิดจากการพับชิ้นงานนั้น จะเท่ากับความยาวเดิมของชิ้นงาน ส่วนความยาวด้านนอกรัศมีการพับจะมีความยาวเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันความยาวด้าน

ในรัศมีการพับจะมีความยาวลดลงกว่าความยาวเดิม ซึ่งจะเห็นได้ว่าความยาวของเส้นแกนกลางจะได้ถูกแสดงถึงความยาวที่แท้จริงของชิ้นงาน ดังนั้นในการที่จะขึ้นรูปชิ้นงานเป็นรูปอะไรนั้น จึงมีปัญหาคืออยู่ที่ว่า เราจะหาขนาดที่เหมาะสมของชิ้นงานเพื่อมาทำการพับได้อย่างไร ซึ่งขนาดที่แท้จริงของชิ้นงานก่อนที่จะนำมาพับนั้น ก็หาได้จากเส้นแกนกลางของชิ้นงานหลังจากพับแล้วนั่นเอง

เมื่อเราทำการพับชิ้นงานครั้งแรก เส้นแกนกลางจะเกิดขึ้นใกล้กับเส้นแบ่งครึ่งความหนาของชิ้นงาน แต่เมื่อทำการพับต่อไป เส้นแกนกลางจะเลื่อนเข้ามาทางด้านในหรือด้านที่เกิดการอัดตัว (Compression) ซึ่งมักจะเป็นอย่างนี้เสมอ ยิ่งถ้าเป็นการพับชิ้นงานที่มีความหนาหลายๆด้วยแล้ว สำหรับการวัดระยะของเส้นแกนกลางนั้น จะวัดจากผิวด้านในของรัศมีการพับ หรือด้านที่เกิดการอัดตัวออกไปหาเส้นแกนกลาง การพับชิ้นงานบางๆจะมีพื้นที่ในการพับ (Bend Area) น้อย ซึ่งเมื่อทำการพับแล้ว พื้นที่ผิวด้านนอกรัศมีการพับจะให้ขนาดที่ไม่ถูกต้อง ดังนั้นในการออกแบบแม่พิมพ์ เราจะต้องระวังในเรื่องนี้ด้วย

เมื่อทำการพับโลหะแผ่น ระยะของเส้นแกนกลางจะอยู่ห่างจากด้านที่เกิดการอัดตัวเป็นระยะประมาณ  $4/10$  เท่าของความหนาของชิ้นงาน สำหรับตำแหน่งต่างๆของเส้นแกนกลางได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 ซึ่งค่าที่แสดงนี้เป็นค่าประมาณที่ใกล้เคียงเท่านั้น

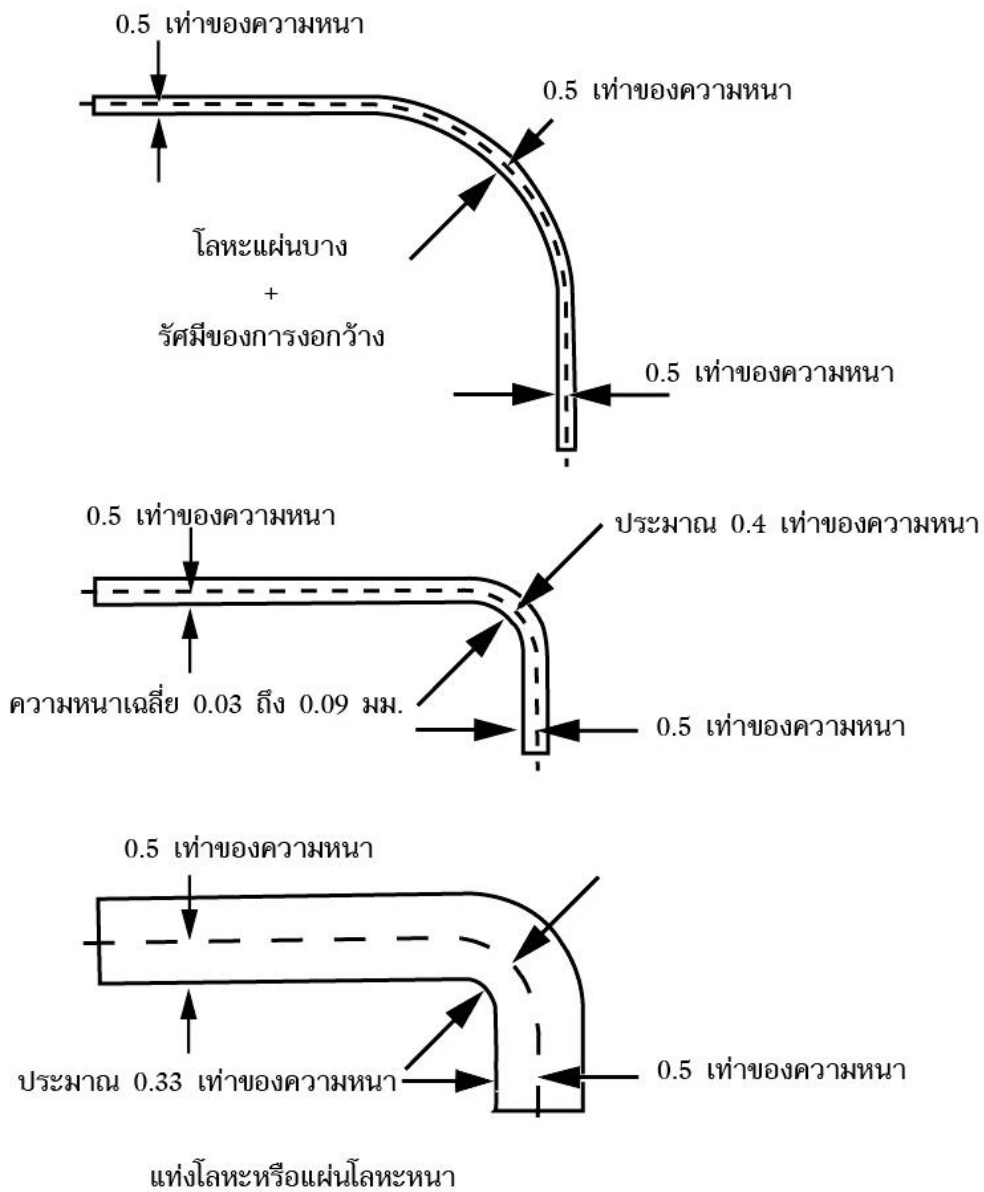
ลักษณะการเกิดของเส้นแกนกลาง มีดังต่อไปนี้

2.2.21 ถ้าความหนาของโลหะแผ่นคงที่ ขณะที่รัศมีการพับลดลง เส้นแกนกลางจะเลื่อนตัวมาทางด้านที่เกิดการอัดตัว

2.2.22 ถ้ารัศมีการพับคงที่ ขณะที่ความหนาของโลหะแผ่นเพิ่มขึ้น เส้นแกนกลางจะเลื่อนตัวมาทางด้านที่เกิดการอัดตัว

2.2.23 ถ้ารัศมีการพับและความหนาของโลหะแผ่นคงที่ ขณะที่มุมของการพับได้เพิ่มขึ้น เส้นแกนกลางจะเลื่อนตัวมาทางด้านที่เกิดการอัดตัว

2.2.24 ถ้าไม่มีความเค้นบนชิ้นงาน เส้นแกนกลางจะอยู่ตรงกลางของความหนาของชิ้นงาน



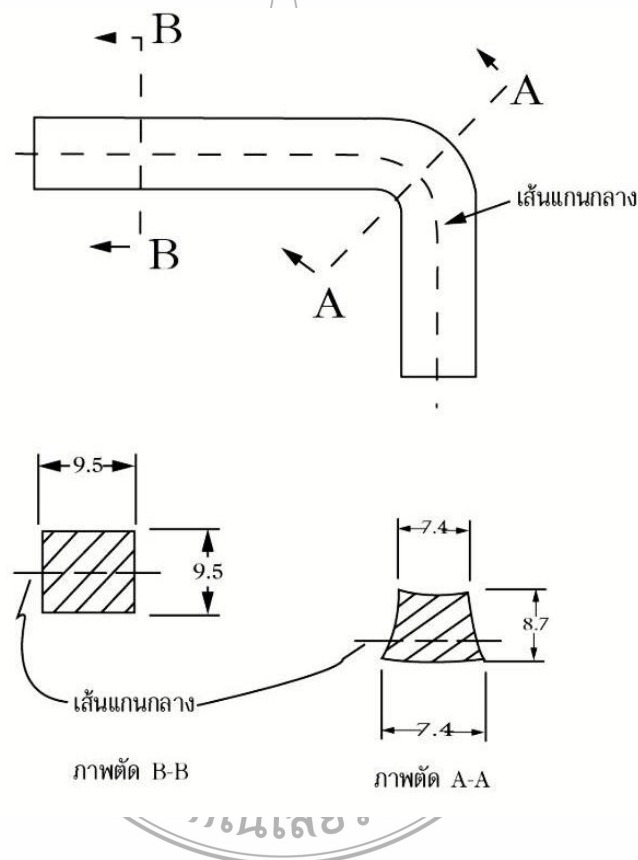
รูปที่ 2.3 ตำแหน่งของเส้นแกนกลาง [7]

### 2.2.3 การไหลตัวของโลหะในการขึ้นรูป (Metal Flow)

เพราะว่าโลหะบริเวณที่เราพับนั้นได้มีความเค้นเกิดขึ้นซึ่งมันจะทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะความเค้นดึงที่ทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะจะไปทำให้ความหนาของชิ้นงานในบริเวณที่พับมีขนาดลดลง ส่วนความเค้นอัดที่ทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะจะไปเพิ่มขนาดความกว้างของชิ้นงานให้เพิ่มขึ้นซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 จากรูปเป็นการแสดงถึงการบิดพับของแท่งโลหะเมื่อได้รับการพับ



เมื่อเราพับแท่งโลหะจะทำให้เกิดการบิดพับทางพื้นที่หน้าตัดอย่างมากแต่ถ้าเป็นการพับโลหะแผ่นการเกิดการบิดพับนี้เกือบจะไม่มีเลยจากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อแท่งโลหะได้ถูกพับความเค้นอัดจะทำให้ความกว้างของชิ้นงานบริเวณที่ทำการพับเพิ่มขึ้น 3.2 มม. ซึ่งการไหลตัวของโลหะเราจะเห็นได้ชัดก็ต่อเมื่อความหนาและความกว้างของชิ้นงานเกือบจะเท่ากันแต่ในโลหะแผ่นนั้นจะไม่ใช่ไปดังที่กล่าวไว้ทั้งนี้เพราะว่าความกว้างมากกว่าความหนาของชิ้นงานหลายเท่าความกว้างที่มากกว่านี้จะต้านทานการเพิ่มตัวของโลหะที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงอัดเมื่อมันไม่สามารถจะเพิ่มทางด้านการอัดตัวได้ความเค้นอัดก็จะไปทำเพิ่มทางด้านการดึงตัวซึ่งพับอยู่ตรงกันข้ามกันซึ่งการที่มันเพิ่มทางด้านการดึงตัวนี้จะทำให้ความหนาของชิ้นงานเกือบจะไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.4 การไหลของโลหะและการบิดพับ [7]

ลักษณะของการไหลตัวของโลหะระหว่างการขึ้นรูปโดยการตัดพับมีดังต่อไปนี้

2.2.3.1 ถ้าแท่งโลหะได้ถูกนำมาพับจะทำให้เกิดการบิดพับทางพื้นที่หน้าตัดอย่างมากและจะมีการไหลตัวของโลหะทำให้ความหนาของแท่งโลหะลดลงเล็กน้อยแต่จะเพิ่มทางด้านความกว้างมากขึ้น

2.2.3.2 ถ้าโลหะแผ่นได้ถูกนำมาพับจะมีการบิดพับทางพื้นที่หน้าตัดเล็กน้อยแต่ความหนาจะลดลงอย่างมากและไม่มีการเพิ่มตัวขึ้นทางความกว้างเลย เมื่อเราพับโลหะแผ่น โอกาสที่จะเกิดการฉีกขาดมีมากทั้งนี้เพราะการมีอัตราความกว้างมากต่อความหนาที่น้อยส่วนรอยย่นจะปรากฏขึ้นเสมอเมื่อเราพับโลหะแผ่นหรือแท่งโลหะอย่างแรงทั้งนี้เพราะว่าอัตราความกว้างน้อยต่อความหนามากจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเพิ่มทางด้าน การอัดตัวมากขึ้น

ขนาดของการไหลตัวของโลหะซึ่งมีความสัมพันธ์กับสิ่งต่างๆคือ

1) เมื่อรัศมีของการพับ (Bend of Radius) ยาวขึ้นจะทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะน้อย

2) โลหะที่บางกว่าจะเกิดการไหลตัวของโลหะน้อย

3) มุมของการพับ (Degree of Bend) แคบจะทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะน้อย

4) ถ้าเป็นการพับช่วงแคบ (Narrow Bend) จะทำให้มีการไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงดึงมีน้อยแต่การไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงอัดมีมาก

5) ถ้าเป็นการพับช่วงกว้าง (Wide Bend) จะทำให้มีการไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงดึงมีมากแต่การไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงอัดมีน้อย

6) ถ้าเป็นโลหะแข็งจะมีการไหลตัวของโลหะทางด้าน การดึงตัวมากและทางด้านนี้ก็มีโอกาสที่จะฉีกขาดได้ง่าย

7) ถ้าเป็นโลหะที่อ่อนจะทำให้มีการไหลตัวของโลหะทางด้าน การอัดตัวมากและทางด้านนี้ก็มีโอกาสที่จะเกิดรอยย่นได้ง่าย

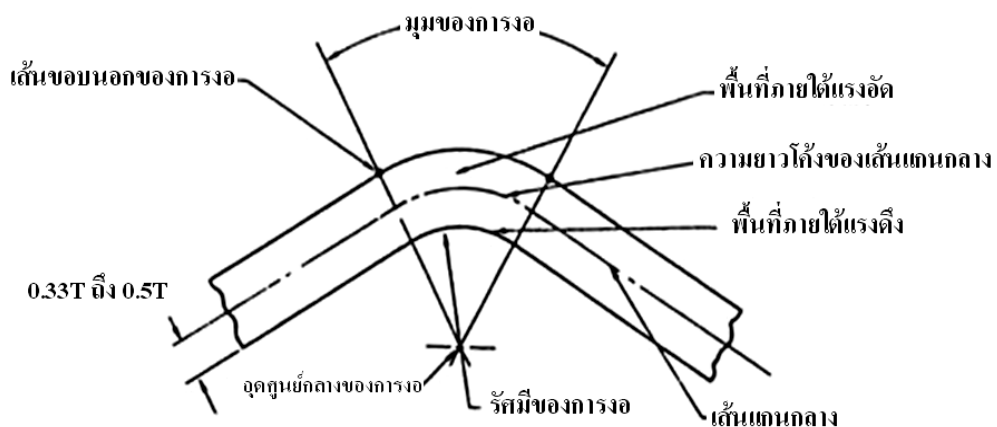
#### 2.2.4 การเคลื่อนไหวของโลหะระหว่างการขึ้นรูป (Metal Movement)

ระหว่างการทำการพับชิ้นงานนั้นพื้นที่ส่วนหนึ่งของแผ่นชิ้นงาน (Blank) ได้ถูกยึดเอาไว้ด้วยแผ่นโลหะที่เราเรียกว่า "แผ่นกดชิ้นงาน" พื้นที่ส่วนที่เหลือของชิ้นงานจะเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงย่อมาแล้วแต่รูปร่างตามที่เรต้องการชิ้นงานจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ขึ้นหรือลงด้วยพื้นที่ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างเข้าไปในคายการที่ชิ้นงานเคลื่อนไหว (Movement) ผ่านช่องว่างนี้เรียกว่า "การเหวี่ยงตัวของชิ้นงาน" (Swinging) และลักษณะของการเกิดอาการเช่นนี้เราจะพบเสมอในการพับชิ้นงานในคายเท่านั้นซึ่งลักษณะการเคลื่อนไหวตัวของโลหะนั้นมันจะไม่ปรากฏในกระบวนการกดขึ้นรูป (Embossing) ยืดขึ้นรูป (Stretching) และลากขึ้นรูป (Drawing) จากรูปที่ 2.5 นั้นเป็นการแสดงถึงตำแหน่งของการเคลื่อนที่ในคายชนิดต่างๆกันเมื่อเราสามารถที่จะรู้ถึงการเคลื่อนของโลหะแต่ละ

ขั้นตอนได้ก็สามารถที่จะออกแบบคานเพื่อใช้ในการขึ้นรูปโดยการตัดพับชิ้นงานได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์ [7]

การตัดเป็นกรรมวิธีการหนึ่งของการขึ้นรูปโลหะแบบไร้เศษ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมผลิตเฟอร์นิเจอร์ ก่อสร้าง ฯลฯ [6] การตัดส่วนใหญ่ใช้ในงานโลหะแผ่น (Sheet Metal) งานลวด (Wire) งานท่อ (Pipe) และ โลหะแท่ง (Rod) การเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของโลหะอยู่ที่บริเวณรัศมีการตัด บริเวณนี้จะเกิดข้อบกพร่องได้ง่ายเช่น การย่น การแตก การบิดเบี้ยวของหน้าตัด โดยรับอิทธิพลจากความเค้นในกระบวนการตัด ความเค้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ความเค้นอัด (Compressive Stress) ความเค้นดึง (Tensile Stress) โดยตามทฤษฎีความเค้นอัดจะเกิดที่ด้านใน ส่วนรัศมีการตัด ความเค้นดึงเกิดที่ด้านนอกรัศมีการตัด

นิยามคำศัพท์ที่ใช้ในงานตัดโลหะดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งแนวระนาบบนเส้นแกนกลาง (Neutral Plane) เป็นระนาบที่แบ่งบริเวณในการเกิดความเค้นดึงและความเค้นอัด เส้นแกนกลางนี้ยังใช้ประโยชน์ในการหาความยาวเริ่มต้นได้ด้วย เนื่องจากจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวเล็กน้อยหลังจากการตัด ความยาวของเส้นแกนกลางจะเท่ากับความยาวเดิมของชิ้นงาน ส่วนความยาวด้านนอกรัศมีการเพิ่มจะมีความยาวเพิ่มขึ้น และความยาวด้านในรัศมีการตัดจะมีความยาวลดลง นั่นคือความยาวของเส้นแกนกลางจะแสดงถึงความยาวที่แท้จริงของชิ้นงาน ซึ่งขนาดที่แท้จริงของชิ้นงานจะหาได้จากเส้นแกนกลางหลังจากการตัดแล้ว มุมตัด (Bend Angle) คือ องศาที่นับจากโลหะเริ่มต้นถูกตัดเป็นมุมขึ้น ไปรัศมีการตัด (Bend Radius) หมายถึงรัศมีการตัดทางด้านใน แต่การตัดในกรณีโลหะแผ่นก็มีข้อจำกัดเกี่ยวกับมุมที่ถูกยกเว้นสำหรับกระบวนการคือ มุม 0 องศา และมุม 360 องศา เพราะถ้าชิ้นงานถูกงอที่มุม 360 องศาจะทำให้กลายเป็นการพับขอบไป [8]

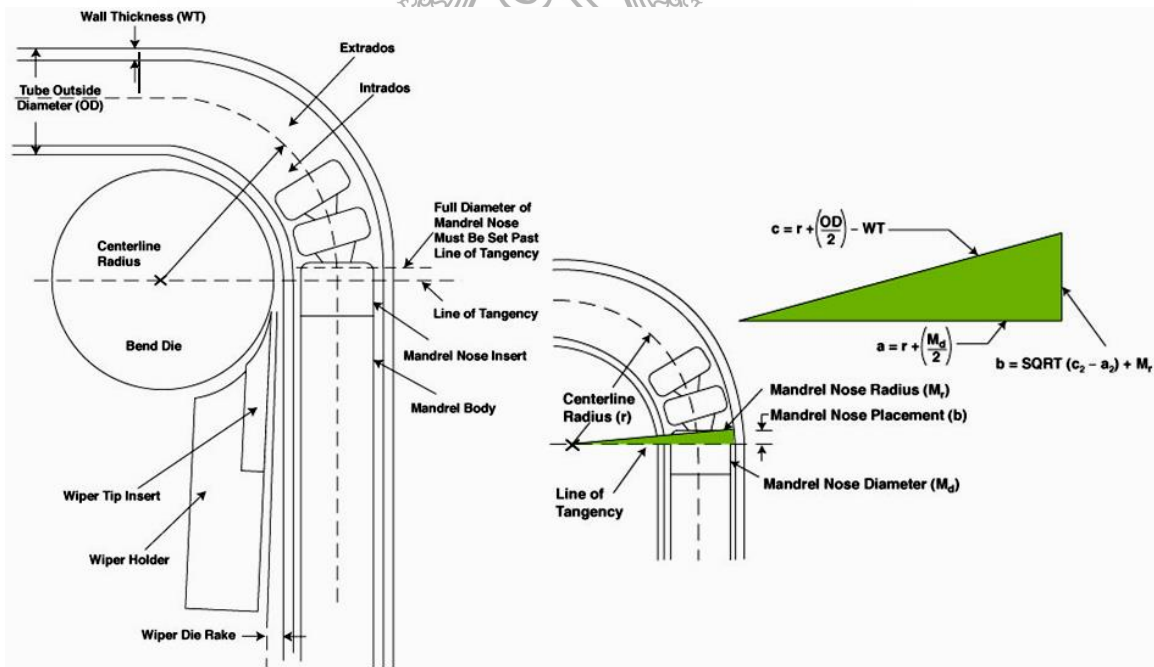


รูปที่ 2.5 ประกอบนิยามศัพท์ในการตัด [9]

การตัดท่อโดยทั่วไป รัศมีคดน้อยสุดจะมีค่าเป็น 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ การตัดท่อสามารถใช้ความร้อนเข้าช่วยได้ เรียกว่า การคดร้อน (Hot Bending) หรือ ไม่ใช้ความร้อนเข้าช่วยจะเรียกว่า การคดเย็น (Cold Bending) ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของการคดท่อเป็น 4 ประเภทหลักๆ และการคดที่ได้จากการประยุกต์จากการคดประเภทหลักๆ อีก 1 ประเภท คือการคดแบบ (Compression Bending) ซึ่งประเภทของการคดท่อจะมีดังนี้ [10]

### 2.2.5 การคดประเภท (Mandrel Bending)

เป็นระบบการคดท่อชนิดหนึ่ง การคดท่อแบบนี้จะช่วยให้ท่อที่คดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน โดยตลอด อีกทั้งการคดแบบนี้ยังช่วยลดข้อจำกัดของการคดท่อได้ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการคดวิธีอื่นในโรงงานอุตสาหกรรม การคดแบบ (Mandrel Bending) นั้นสามารถสร้างส่วนโค้งในการคดได้มากกว่าการคดที่ไม่ได้ใช้แรงกด หรือ แรงอัด อีกทั้งยังทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ทำการคดมีลักษณะที่เป็นวงเต็มตลอดความยาวท่อแม้ว่าจะเป็นส่วนของรัศมีโค้งก็ตาม ซึ่งในอุตสาหกรรมการคดได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับความเสียหายของการคดแบบ (Mandrel) แต่ชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆของการคดแบบนี้ยังประยุกต์ใช้ในการคดได้ไม่มาก [10] แสดงดังรูปที่ 2.6

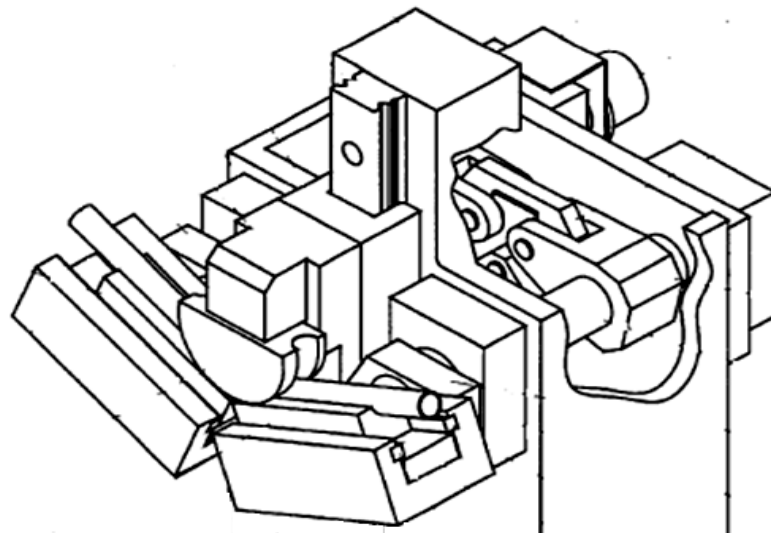


รูปที่ 2.6 ลักษณะของการคดท่อแบบ (Mandrel Bending) [11]

ความแตกต่างของการดัดแบบ (Mandrel Bending) กับการดัดโดยทั่วไปคือ การดัดแบบนี้ช่วยในการไหลตัวของวัสดุแบบอัดแน่นของการดัดท่อเพิ่มขึ้น 25 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ท่อที่ดัดมีเส้นผ่านศูนย์กลางเหมือนกันตลอดความยาว แต่การดัดแบบอื่นจะทำให้ท่อที่ดัดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะส่วนโค้งจะมีรอยดัด และเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อดีกว่าส่วนอื่น

#### 2.2.6 การดัดประเภท (Ram or Push Bending)

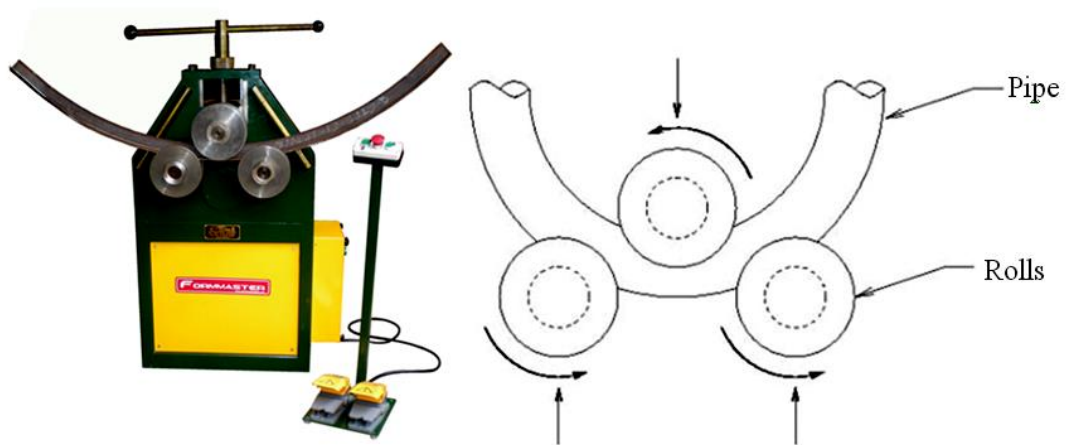
กระบวนการดัดท่อแบบนี้ได้ใช้ระบบไฮดรอลิกส์มาทำให้แม่พิมพ์คายส์เคลื่อนที่ลงมากด ลงที่ท่อ ซึ่งท่อจะถูกรองรับด้วยปีกของคายส์ โดยที่ปีกของคายส์ แยกออกเป็นด้าน และมีลักษณะเป็นโค้งตรงศูนย์กลางของการดัดท่อ ซึ่งท่อจะมีการเคลื่อนเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่บริเวณแม่พิมพ์นี้ โดยปีกคายส์แต่ละด้านจะเป็นตัวช่วยรองรับท่อทั้ง 2 ข้าง ดังรูปที่ 2.7 กระบวนการดัดแบบนี้เหมาะสมอย่างมากต่ออุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตปริมาณมาก และต้องการความรวดเร็วในการผลิต [12]



รูปที่ 2.7 การดัดแบบ (Ram Bending) [12]

#### 2.2.7 การดัดประเภท (3-Roll Bending)

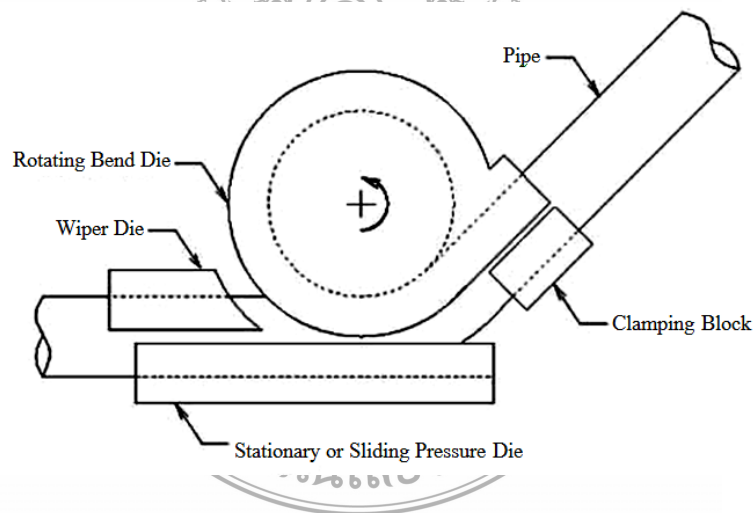
เป็นวิธีการม้วนดัดใช้สำหรับการดัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ หรือ รัศมีขนาดใหญ่ โดยลูกดัดทั้ง 3 ลูกจะถูกจัดวางในรูปแบบทรงพีระมิดดังรูปที่ 2.8 ลูกดัดทั้ง 2 ลูกจะถูกยึดติดให้อยู่กับที่ วิธีการนี้คล้ายกับวิธีการดัดแบบ (Ram Bending) แต่การทำงานต้องให้ลูกกลิ้งทั้งสองข้างหมุนก่อนแล้วจึงจะสามารถดัดชิ้นงานได้เรียกว่า (Pipe Rolls) [13]



รูปที่ 2.8 การดัดแบบ (3-Roll Bending) [13]

### 2.2.8 การดัดแบบหมุน (Rotary Draw Bending)

เป็นกระบวนการดัดท่อที่นิยมใช้มากที่สุดเกี่ยวกับการดัดท่อ ซึ่งการดัดแบบนี้จะรักษาชิ้นงานสำเร็จ และเส้นผ่านศูนย์กลางให้คงที่ ท่อที่ถูกดัดจะถูกลากผ่านลูกกลิ้งที่ติดอยู่กับที่ดัดบนคานาที่ติดแน่น แสดงดังรูปที่ 2.9 [10]

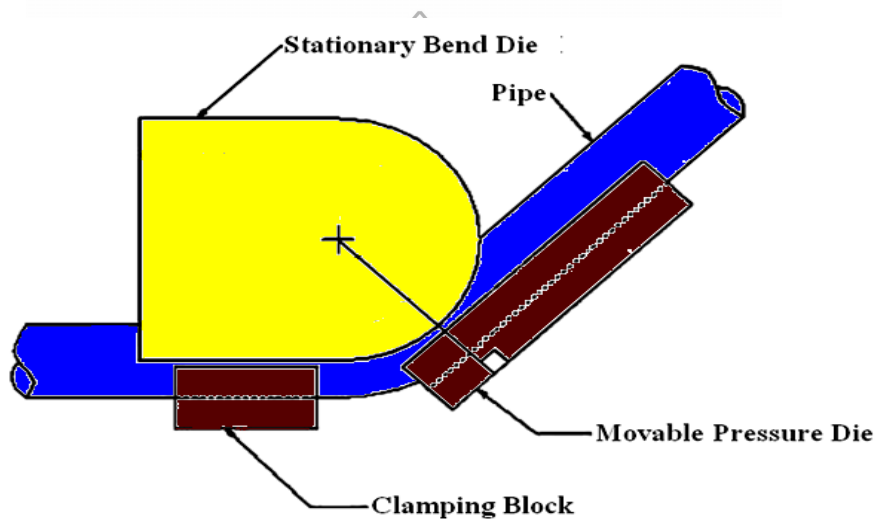


รูปที่ 2.9 การดัดแบบ (Rotary Draw Bending) [10]

วิธีการดัดแบบหมุน ( Rotary Draw Bending) เหมาะสำหรับการดัดงานเหล็กสำหรับดัดรางน้ำ รางทราย อุปกรณ์เครื่องยนต์ ลูกกรอก เครื่องเรือน เฟอร์นิเจอร์ และชิ้นงานดัดประเภทอื่นๆ อีกมากมาย ซึ่งอุปกรณ์จะเคลื่อนที่ไปขณะทำการดัดด้วย

## 2.2.9 การดัดประเภทอัด (Compression Bending)

เป็นประเภทของการดัดชนิดหนึ่งซึ่งกล่าวไว้ว่าใช้แรงในการอัดตลอดจนเป็นการประยุกต์มาจากการดัดประเภทหมุน (Rotary Draw Bending) การดัดประเภทนี้ขึ้นงานโลหะที่จะหมุน หรือเลื่อนไปรอบๆ โดยลิ้มอัดดัด (Pressure Die) ตามรัศมีการดัดของแม่พิมพ์ดัด (Bend Die) ซึ่งติดอยู่กับที่ [14]



รูปที่ 2.10 การดัดแบบอัด (Compression Bending) [14]

## 2.3 การดัดรูปตัวยู (U-Bending) [15]

เป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการขึ้นรูปโลหะแผ่น ,รูปตัวยู (U) รูปที่ 2.11 การดัดจะมีแรงที่สม่ำเสมอที่เท่ากันทั้งแผ่น กระบวนการดัดรูปตัวยู ได้รับความนิยมนเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมยานยนต์, อุตสาหกรรมอากาศยาน และอุตสาหกรรมเครื่องจักร ชิ้นส่วนต่างๆ ที่ใช้โลหะแผ่น ตัวอย่างโดยทั่วไปของการดัดแผ่นโลหะ

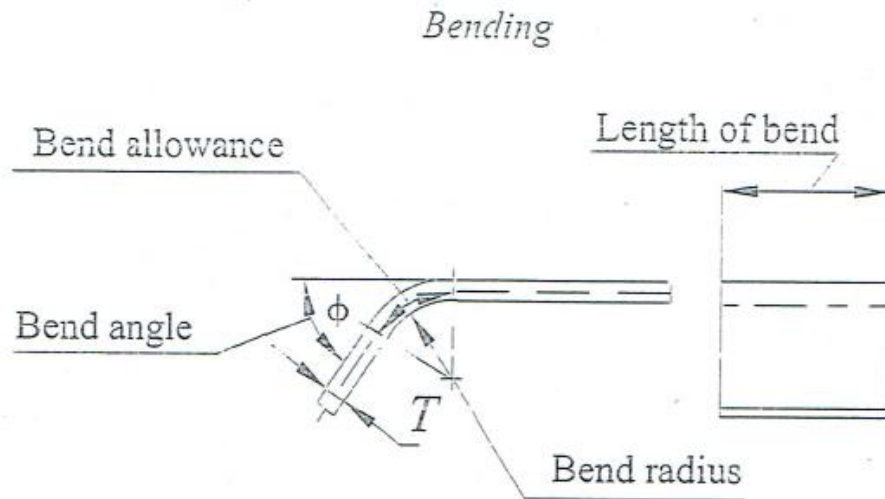


รูปที่ 2.11 ตัวอย่าง ของการดัดรูปตัวยู ในงานโลหะแผ่น



### 2.3.1 หลักการทำงาน ของการคัต

ค่าศัพท์ที่ใช้ในกระบวนคัต สามารถอธิบายจากรูปที่ 2.12 ได้ดังต่อไปนี้  
รัศมีในการคัต ความยาวคัต (บริเวณที่ทำการคัต) , มุมในการคัต , เส้นแกนกลางของการคัต

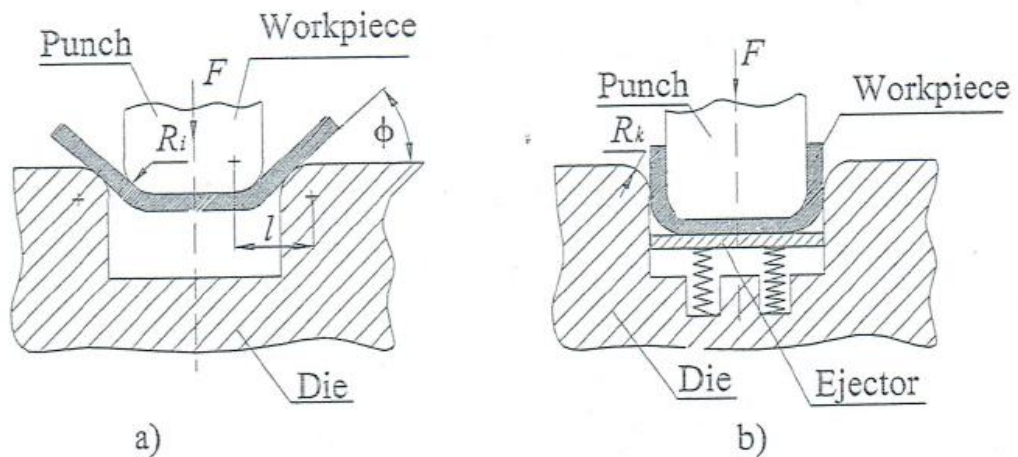


รูปที่ 2.12 ภาพประกอบแผนผังของค่าศัพท์ที่ใช้ในกระบวนคัต

ดังนั้นเส้นแนวการคัตปรกติแล้ว จะขึ้นอยู่กับความกว้างของชิ้นส่วนด้วย ซึ่งผิวด้านนอกของชิ้นส่วนจะได้รับแรงดึงที่สูง และที่ผิวด้านใน จะได้รับแรงอัดที่สูงเช่นกัน และจะมีความเครียดเกิดขึ้นมาในเนื้อของวัสดุ แต่ทั้งนั้น แรงทั้งสองชนิดคือ แรงดึง กับแรงอัด

### 2.3.2 แรงที่ใช้ในการคัต ( Bending Force )

แรงในการคัตสามารถกำหนดได้จากผิวด้านนอกจะได้รับแรงในการดึง ส่วนผิวด้านในจะได้รับแรงการอัดแต่ทั้งสองแรงจะมีค่าที่เท่ากันจนจบขบวนการ ของกระบวนคัต ดังนั้นแรงคัตจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากเพื่อที่จะพยายาม เปลี่ยนรูปวัสดุจากช่วงที่ยืดหยุ่น เป็นการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ถ้าแม่พิมพ์ที่ทำการคัตมีตัวปลดชิ้นงานออก รูปที่ 2.13 ควรใช้แรงดันเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 30 เปอร์เซนต์เพื่อให้ได้แรงคัตรวมของแม่พิมพ์คัตที่ถูกต้องของแรงชนิดกรุปตัวยูคือ



รูปที่ 2.13 a) การตัดรูปด้วยแบบเปิด b) การตัดรูปด้วยแบบมีตัวกระทุ้งออก

การคำนวณแรงที่ใช้ในการตัดรูปด้วย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$F = P \cdot A \quad (2.1)$$

เมื่อ  $P$  = แรงดันด้านทานเฉพะของวัสดุ (ตามตาราง ที่ 2.2)  
 $A$  = พื้นที่ของผิวด้านล่าง

ตารางที่ 2.2 ค่าที่เหมาะสมต่อการใช้ของแต่ละวัสดุ P (MPa)

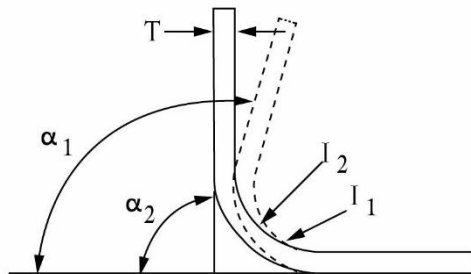
ความหนาของ วัสดุ (มม. )	วัสดุ			
	อลูมิเนียม	ทองแดง	เหล็กคาร์บอนต่ำ (0.1- 0.2)%C	เหล็กกล้า (0.25- 0.35) %C
< 3 มม.	29.4-39.2	58.8-78.4	78.4-98.0	98.0-117.6
3-10 มม.	49.0-58.8	59.8-78.4	98.0-117.6	117.6-147.1

## 2.4 ทฤษฎีการตีตัวกลับ

### 2.4.1 การตีตัวกลับของชิ้นงาน (Spring Back)

หลังจากทำการพับตามมุมและรัศมีของแม่พิมพ์พับประเภทใดประเภทหนึ่งแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของมุมและรัศมีเล็กน้อยหลังจากการพับ เรียกว่า การตีตัวกลับ (Spring Back)

ของวัสดุ แสดงในรูปที่ 2.14 การดัดตัวกลับเกิดจากการคืนตัวในช่วงเปลี่ยนรูปอย่างไม่ถาวร หรือช่วงการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation) ของวัสดุ



$\alpha_1$  = มุมพับเริ่มต้น

$\alpha_2$  = มุมพับหลังการดัดตัวกลับ

$I_1$  = รัศมีการพับของแม่พิมพ์

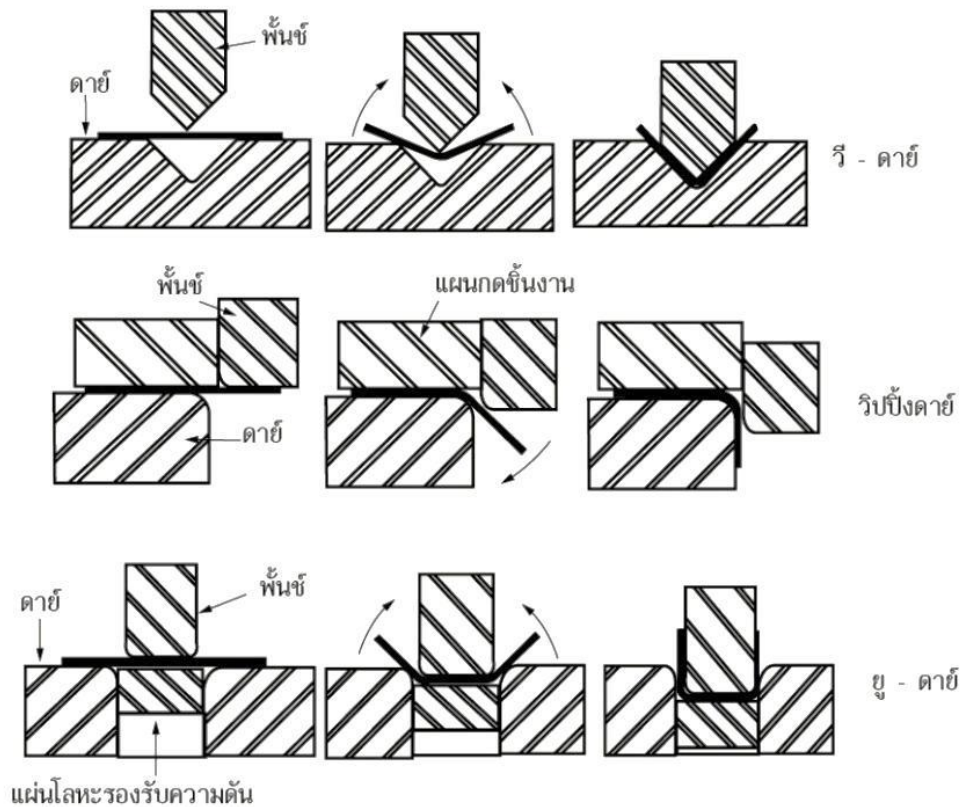
$I_2$  = รัศมีการพับของชิ้นงานหลังการดัดตัวกลับ

รูปที่ 2.14 การดัดตัวกลับของชิ้นงานหลังการพับ [16]

เมื่อทำการพับชิ้นงาน จะมีความเค้นเกิดขึ้นในบริเวณที่ทำการพับพับและความเค้นที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าแตกต่างกันคือไม่เหมือนกันทุกจุดซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดการดัดตัวกลับของชิ้นงาน

นอกจากนี้ยังสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการดัดตัวกลับ Spring Back Factor ค่า K ตามสมการที่ 2.2 กับอัตราส่วนของแม่พิมพ์ต่อความหนาแผ่นดัด (t) โดยสมการค่าการดัดตัวกลับในชิ้นงานโดยโลหะแผ่น คือ

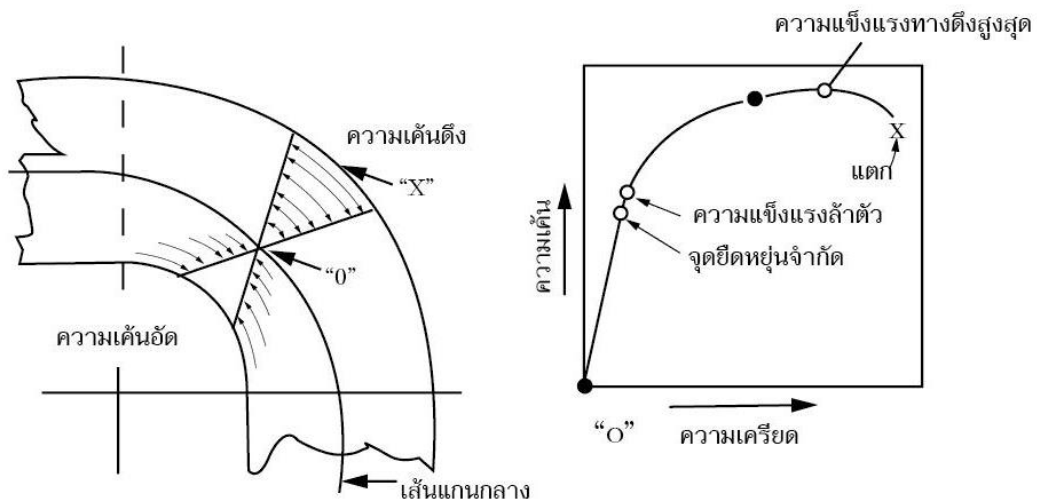
$$k_R = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{I_2 + t/2}{I_1 + t/2} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.15 การเคลื่อนไหวยของโลหะระหว่างการพับขึ้นรูป [16], [17]

ความเค้นดึงจะเกิดขึ้นมากที่สุดที่ผิวหน้าด้านนอกของการพับและจะค่อยๆลดลงเรื่อยๆเมื่อระยะของชิ้นงานเข้าใกล้เส้นศูนย์กลางของความหนาซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นนี้จะกลายเป็นศูนย์ที่เส้นแกนกลางจากรูปที่ 2.15 เป็นการแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นดึงและความเค้นอัดในบริเวณที่มีการพับพับจากรูปจะเห็นได้ว่าที่จุด 0 นั้นความเค้นดึงจะมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งจุดนี้จะอยู่บนเส้นแกนกลางและค่าความเค้นจะมากขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งถึงจุด x ที่ผิวด้านนอกของชิ้นงานที่จุด x นี้จะมีค่าความเค้นดึงเกิดมากที่สุดในการวิเคราะห์หาความเค้นที่เกิดขึ้นในการพับพับขึ้นงานเราจะใช้กราฟแสดงความเค้นความเครียดเป็นตัวแสดงซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าเป็นการออกแบบงานที่ดีแล้วความเค้นดึงที่เกิดขึ้นที่จุด x จะต้องมีค่าต่ำกว่าความแข็งแรงทางดึงสูงสุดของชิ้นงานนั้นถ้ามีค่ามากกว่าความแข็งแรงทางดึงสูงสุดชิ้นงานจะเกิดการฉีกขาดขึ้นได้ระหว่างที่มีการพับเราจะเห็นได้ว่าตรงบริเวณส่วนที่ใกล้กับเส้นแกนกลางนั้นจะมีความเค้นที่เกิดขึ้นต่ำกว่าจุดยึดหยุ่นจำกัดสำหรับโลหะส่วนนี้นั้นได้ถูกแสดงด้วยแถบเล็กๆที่เรียกว่าแถบยึดหยุ่น (Elastic Band) แถบเล็กๆนี้จะอยู่ทั้งสองข้าง

ของเส้นแกนกลางโลหะที่อยู่ห่างไปจากแถบกลางของชิ้นงานจะมีความเค้นเกิดขึ้นมากกว่าจุดความแข็งแรงลำตัวของชิ้นงานนั้น และบริเวณนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงของโลหะอย่างถาวร เมื่อได้ทำการพับชิ้นงานแล้วและขณะที่ดึงเอาพันธ้ออกไปนั้น ส่วนที่เป็นแถบยึดหยุ่นเล็กๆก็จะพยายามดึงตัวกลับเข้าอยู่ในตำแหน่งเดิม แต่ก็ไม่สามารถจะดึงตัวกลับคืนได้หมด เพราะมีความต้านทานของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงของโลหะอย่างถาวร ดังนั้นจึงมีการติดกลับเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การที่โลหะดึงตัวกลับนี้เรียกว่า “Spring Back” สาเหตุที่โลหะต้องติดกลับก็เพราะว่าต้องการให้อยู่ในสภาวะสมดุลนั่นเอง สำหรับส่วนที่เป็นแถบยึดหยุ่นเล็กๆนั้น จะเป็นตัวทำให้เกิดแรงของการติดกลับรอบจุด 0 ดังที่แสดงไว้ในรูป ความจริงแล้วในช่วงของการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรของโลหะ (Plastic Deformation) ก็ยังคงมีส่วนที่เป็นความยืดหยุ่นปนอยู่เล็กน้อย ซึ่งส่วนนี้จะไปเพิ่มแรงในการติดตัวกลับให้มากขึ้น



รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนรูปแบบของความเค้นในการพับโลหะ [17]

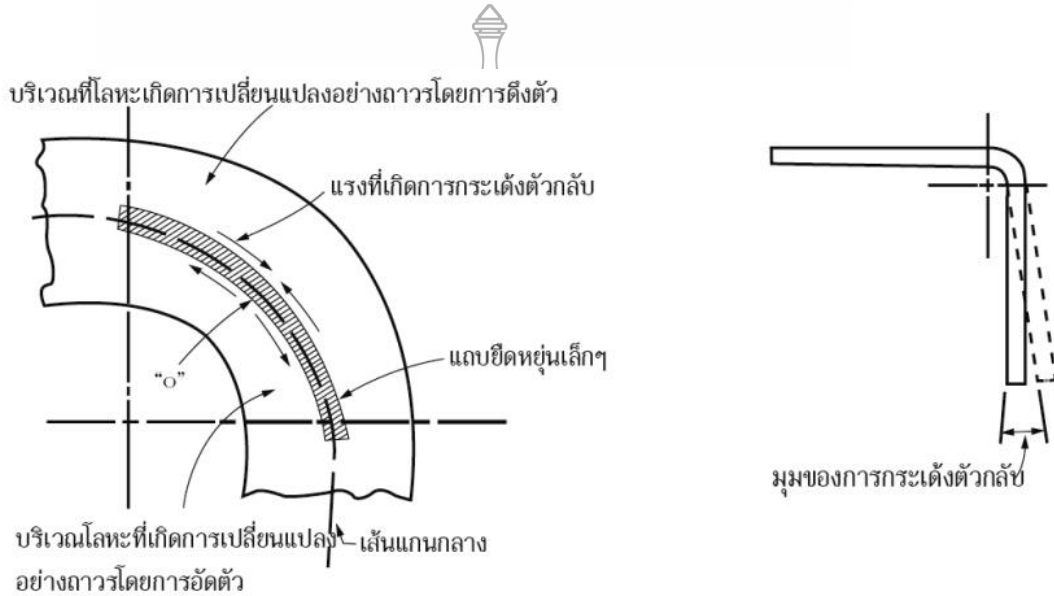
#### 2.4.2 ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเกิดการติดตัวกลับ มีดังนี้

2.4.2.1 โลหะที่แข็งจะมีมุมของการติดตัวกลับ (Degree of Spring Back) มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากโลหะแข็งมีจุดยึดหยุ่นจำกัดสูงกว่า ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดแถบยึดหยุ่นเล็กๆนั้นใหญ่กว่า

2.4.2.2 ถ้ารัศมีของการพับเล็กกว่าจะลดการเกิดการติดตัวกลับ โดยการสร้างช่วงการอยู่ตัวของโลหะให้ใหญ่กว่า แต่จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการฉีกขาดได้ง่าย เนื่องจากมีความเค้นเกิดขึ้นทางผิวด้านนอกของการพับมากกว่า

2.4.2.3 เมื่อโลหะได้ถูกพับด้วยมุมที่มากกว่ามุมที่ต้องการพับ จะมีผลทำให้ช่วงของการอยู่ตัวของโลหะนั้นขยายใหญ่เข้า และจะเป็นการลดการติดตัวกลับของชิ้นงานให้น้อยลงไปในแต่ละมุมของการพับ แต่อย่างไรก็ตามผลรวมของการติดตัวกลับของชิ้นงานก็ยังเพิ่มขึ้นอยู่นั่นเอง

2.4.2.4 โลหะที่หนากว่าจะมีการเกิดการติดตัวกลับน้อย ทั้งนี้เพราะว่าช่วงของการอยู่ตัวของโลหะมีมาก ซึ่งในการพิจารณาการเปรียบเทียบนั้น รัศมีของคายจะต้องไม่เปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะใช้โลหะหนาหรือบางทดลองก็ตาม



รูปที่ 2.17 แรงที่เกิดจากการติดตัวกลับ

จากรูปที่ 2.17 แสดงถึงความสัมพันธ์ของการกระด้างตัวกลับของชิ้นงานกับมุมของการพับของโลหะชนิดต่างๆ

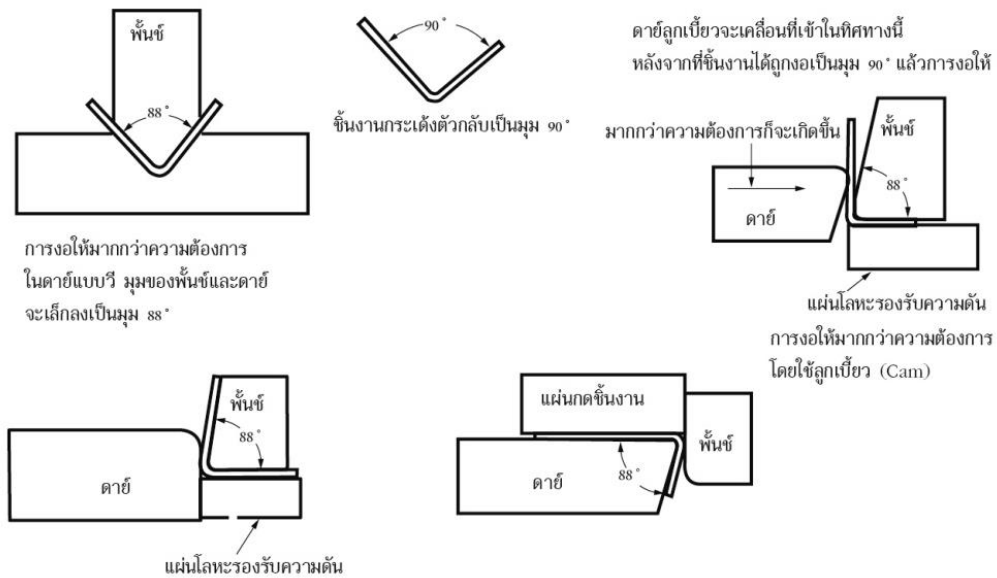
### 2.4.3 วิธีป้องกันการเกิดการติดตัวกลับ (Overcoming Spring Back)

มีอยู่หลายวิธีด้วยกันในการป้องกันการเกิดการติดตัวกลับ ซึ่งมีดังต่อไปนี้

#### 2.4.3.1 การพับให้มากกว่าความต้องการ (Over Bending)

วิธีนี้เป็นการพับโลหะให้มากเกินไปกว่าจำนวนที่ต้องการ ซึ่งเมื่อดึงพันธกลับคืนไปจะทำให้โลหะนั้นติดตัวกลับไปเล็กน้อยและได้มุมที่ต้องการพอดี การทำการพับให้มากกว่าความต้องการนี้ อาจจะทำได้โดยการทำคายเป็นลักษณะลูกเบี้ยว (Cam) โดยการลดช่องว่างระหว่างพันธและคายให้น้อยลง และโดยการทำมุมที่พันธหรือคายให้น้อยลง สำหรับกรณีของวิ-คายจะต้องทำมุมที่พันธและคายให้น้อยลงเท่านั้น เมื่อเราลดขนาดช่องว่างให้น้อยลงกว่าความหนาของชิ้นงาน จะทำให้

ชิ้นงานนั้นเกิดการขัดสีกับผนังของ 펀ช์และดาย ทำให้เกิดลักษณะของการเป็นมันเงาปรากฏขึ้น วิธีการพับให้มากกว่าความต้องการได้ แสดงไว้รูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 วิธีการพับให้มากกว่าความต้องการ

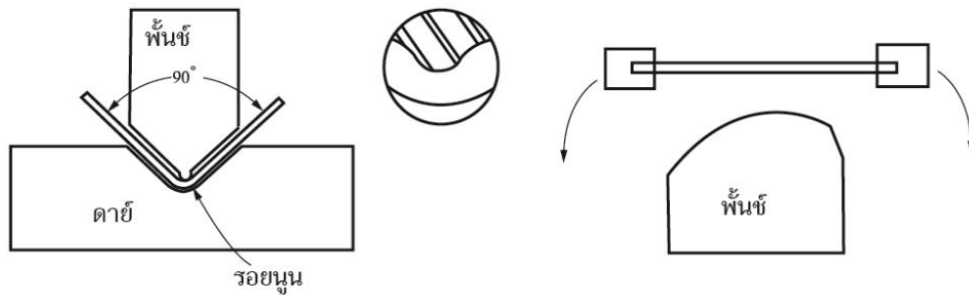
#### 2.4.3.2 การกดกระแทกชิ้นงานตรงบริเวณที่พับให้เป็นรอย (Bottoming or Setting)

วิธีนี้เป็นการใช้ 펀ช์กดกระแทกโลหะอย่างแรงที่บริเวณรัศมีที่พับของชิ้นงาน ซึ่ง ณ ที่ตำแหน่งนี้ โลหะจะได้รับความเค้นกดยิ่งมาก ซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดการอยู่ตัวของโลหะที่บริเวณนั้นผ่านจุดความแข็งแรงล้าตัวของโลหะนั้น วิธีการกดกระแทกชิ้นงานตรงบริเวณที่พับให้เป็นรอยควรจะต้องทำรอยนูนขึ้นมาบน 펀ช์ เพื่อใช้ในการกระแทกบริเวณพื้นที่ที่ถูกพับ สำหรับในวิปิงคายหรือยู-คายนั้น จะใช้แผ่นโลหะรองรับชิ้นงานอยู่ข้างล่าง และแผ่นโลหะนี้จะต้องติดอยู่กับ Shoe หรือแผ่นโลหะประกบหลัง (Backing Plate) การที่ต้องใช้แผ่นโลหะรองรับชิ้นงานอยู่ข้างล่าง เพื่อที่จะทำให้ 펀ช์ ได้กดกระแทกชิ้นงานให้พับซึ่งมันจะไม่เกิดประโยชน์อะไรเลย ถ้าเราใช้ 펀ช์กดกระแทกชิ้นงานตรงพื้นที่ส่วนที่แบน เพราะว่าตรงพื้นที่ส่วนนั้นจะไม่มี ความเค้นเกิดขึ้นและ จะไม่มีการติดตัวกลับเกิดขึ้นด้วย ดังนั้นเราจึงต้องทำรอยนูนขึ้นมาบน 펀ช์ เพื่อใช้กระแทกชิ้นงานตรงบริเวณพื้นที่ที่พับ ซึ่งจะเป็นการช่วยลดการเกิดการติดกลับของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 2.19 วิธีการกดกระแทกชิ้นงานตรงบริเวณ ที่พับให้เป็นรอยนี้ ถ้าใช้กับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีพื้นที่ของการ



กระแทกตรงบริเวณส่วนที่ต้องการพับมาก ก็จำเป็นต้องใช้ขนาดของเครื่องปั๊ม โลหะสูงตามไปด้วย ซึ่งการป้องกันการเกิดการตีกลับมี 2 วิธี ดังนี้

- 1) การกดกระแทกชิ้นงานตรงบริเวณที่พับให้เป็นรอย
- 2) การยึดชิ้นงานก่อนพับ



รูปที่ 2.19 การป้องกันการเกิดการตีกลับ

วิธีนี้เป็นกรยึดชิ้นงานให้ชิ้นงานนั้นเกิดความเค้นเลยจุดความแข็งแรงกล้าตัวของชิ้นงานนั้น จากนั้นก็ใช้แรงกดชิ้นงานนั้นลงบนพunchซึ่งได้ตั้งรับชิ้นงานไว้แล้ว วิธีการนี้จะมี การตีกลับของชิ้นงานเกิดขึ้นเล็กน้อย และเหมาะสำหรับใช้กับการขึ้นรูปงานดัดๆ เช่น กระโปรง ครอบหน้าหม้อรถยนต์

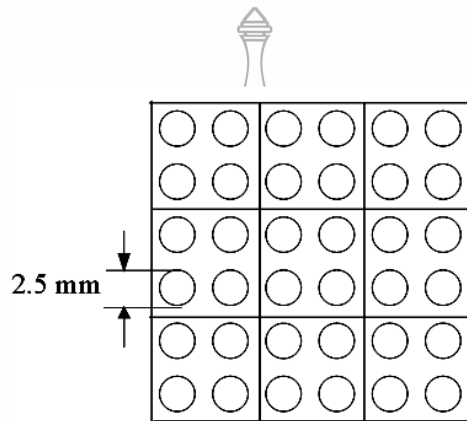
ถ้าเราใช้แรงในการขึ้นรูปชิ้นงานมากเกินไป จะทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานผ่านเลยถึงจุดความแข็งแรงทางดึงสูงสุดของชิ้นงาน โอกาสที่ชิ้นงานจะฉีกขาดก็มีมาก วิธีการป้องกันการเกิดการตีกลับแบบนี้นิยมใช้กันมากสำหรับงานที่มีกำลังการผลิตต่ำ (Low Production) เพราะว่าวิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ดาบซึ่งเป็นการประหยัด [17]

## 2.5 การตีกริดและวิเคราะห์กริดวงกลม

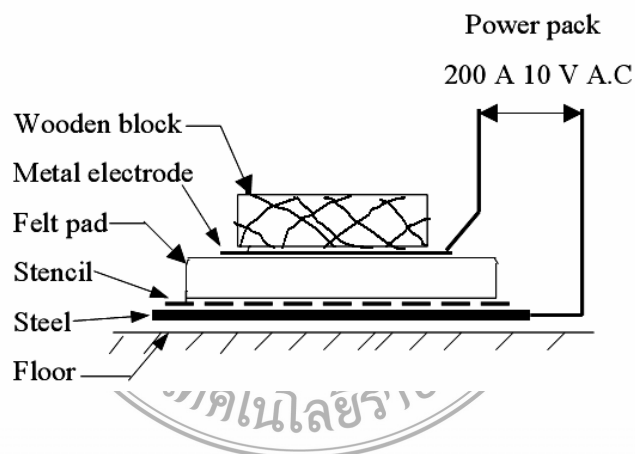
### 2.5.1 การตีกริดด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrochemical)

อาศัยตะแกรง (Stencil) เพื่อให้มันง่ายและใช้แรงดันของไฟฟ้าทำให้เกิดเป็นรูปแบบของแผ่นชิ้นงานที่วางเปล่า มีผ้าขนสัตว์ (Felt pad) วางทับลูกกลิ้งหรือแผ่นทับ (Wooden black) เติ่น ซ้ำๆ ชุ่มกับสารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่วางอยู่ทับทางด้านบนของความว่างแผ่น Stencil และขั้วไฟฟ้าใช้กับแผ่นเหล็ก (Metal electrode) สารเข้าร่วมขั้วไฟฟ้าของ

แผ่นเหล็กกับอิลเลคโตรดสามารถปรับ กระแสและแรงดันปรับจาก 15 ถึง 200 แอมแปร์ ขึ้นอยู่กับขนาดของตะแกรง (Stencil) และความหนาแน่นเส้นบรรทัด หลังจากให้ทำผ่านสั้วกับขั้วไฟฟ้าเดินซ้ำๆ จนสิ้นสุดแผ่น ของแผ่นงานสารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าจะทำให้เคลื่อนผ่านตะแกรง (Stencil) และเข้ามาติดต่อบนแผ่นเหล็กของชิ้นงานการตีกริดโดยใช้กรดให้กัดกร่อน (Electrochemically) ผ่านถูกผ้าสักราดที่ต้องเป็นตัวกลางผ่านสารละลายไปยังแผ่นโลหะ ดังแสดงรูปที่ 2.20 และ 2.21



รูปที่ 2.20 Patterns of circle grid [18]



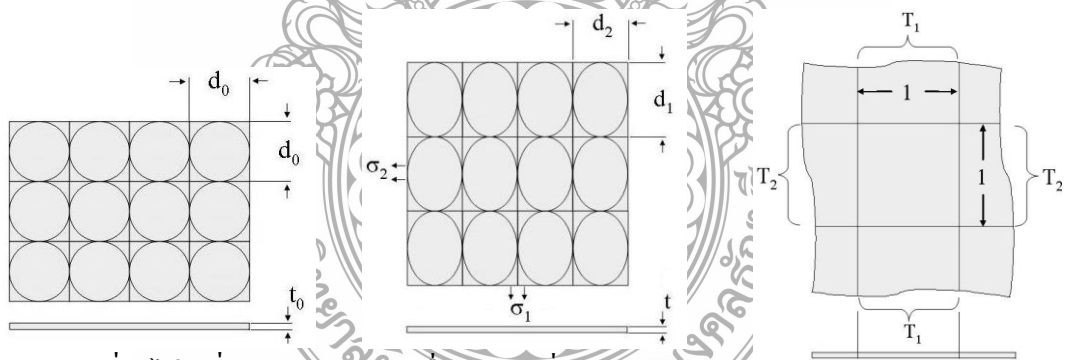
รูปที่ 2.21 ขั้นตอนการตีกริด ( Electrochemical marking ) [18]

สารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเหมาะสมของสารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าควรจะเป็นซึ่งถูกใช้เป็นตัวนำโลหะ โดยเฉพาะสารละลายเป็นด่างของสารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้า จะมีส่วนผสมของสารละลายดังนี้

โพแทสเซียมโครไมต์	:	80	กรัม
โซเดียมคลอไรด์	:	90	กรัม
กรดไนตริก	:	100	กรัม
กรดเกลือ	:	100	กรัม
น้ำ	:	4.5	ลิตร

### 2.5.2 การวิเคราะห์กริดวงกลม (Analysis of circle grid )

การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of sheet in plane stress) ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane stress) พิจารณา (Work hardening) ของวัสดุ ซึ่งเขากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ลักษณะที่ังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา  $t_0$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d_0$  หรือตารางขนาด  $d_0$  ดังแสดงในรูปที่ 2.23 (a) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปวงกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนหลัก (Major) คือ  $d_1$  แกนรอง (Minor) คือ  $d_2$  ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (b) ส่วนความหนา คือ  $t$  ตามที่กรณีดังแสดงในรูปที่ 2.21 (c) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ  $\sigma_1$  และ  $\sigma_2$  [19]



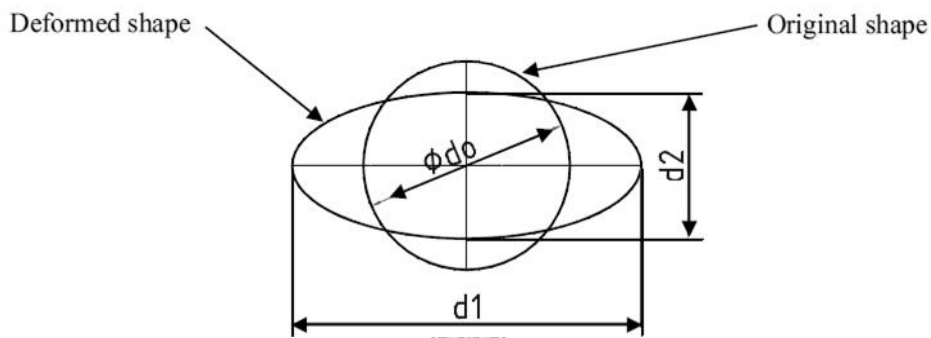
(ก) ขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูปกริดวงกลม

(ข) เมื่อมีการเปลี่ยนรูปกริดวงกลมจะเปลี่ยนเป็นรูปวงรี ขนาดของแกนหลักคือ  $d_1$  และขนาดแกนรอง คือ  $d_2$

(ค) การดึง, T, หรือแรงส่งผ่านต่อหน่วยความกว้าง

รูปที่ 2.22 ลักษณะตารางวงกลมกริดบนโลหะแผ่น [18]

2.5.3 ความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain) ความเครียดหลักและความเครียดรองที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการเพื่อใช้ในการตรวจสอบกรณีของการเกิดแบบต่างๆ วิเคราะห์ในพื้นที่วิกฤติของชิ้นงานหลักจากทำการขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลม [18]

#### 2.5.4 การคำนวณเปอร์เซ็นต์การบิดตัวกลับ

การคำนวณเปอร์เซ็นต์การบิดกลับของเหล็กทั้ง 3 รูปทรงเพื่อเปรียบเทียบค่าการบิดกลับเมื่อใช้น้ำมันหล่อลื่นและไม่ใช้น้ำมันหล่อลื่นซึ่งมีวิธีการคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\text{มุมที่ต้องการ} - \text{มุมที่วัดได้}}{\text{มุมที่ต้องการ}} \times 100 \quad (2.2)$$

#### 2.5.5 การคำนวณค่าความเครียดเทียบเท่า

การคำนวณค่าความเครียดส่วนโค้งของเหล็กท่อกลวง และเหล็กแผ่น จากการสร้างกริดวงกลม บนพื้นผิวเหล็กท่อกลวง โดยใช้กริดขนาดมาตรฐานวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร จะพบว่าหลังจากเหล็กท่อกลวงผ่านกระบวนการดัดรูปร่างของกริดจะเปลี่ยนไป ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาความเครียดหลัก ( $\epsilon_1$ ) และความเครียดรอง ( $\epsilon_2$ ) เพื่อหาความเครียดเทียบเท่าซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.3-2.6

$$\text{ความเครียดหลัก } (\epsilon_1) = \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (2.3)$$

$$\text{ความเครียดตรง } (\varepsilon_2) = \ln \frac{d_2}{d_0} \quad (2.4)$$

$$\text{ความเครียดที่ความหนา} (\varepsilon_3) = \ln \frac{t_2}{t_0} \quad (2.5)$$

$$\text{ความเครียดเทียบเท่า} = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2} \quad (2.6)$$

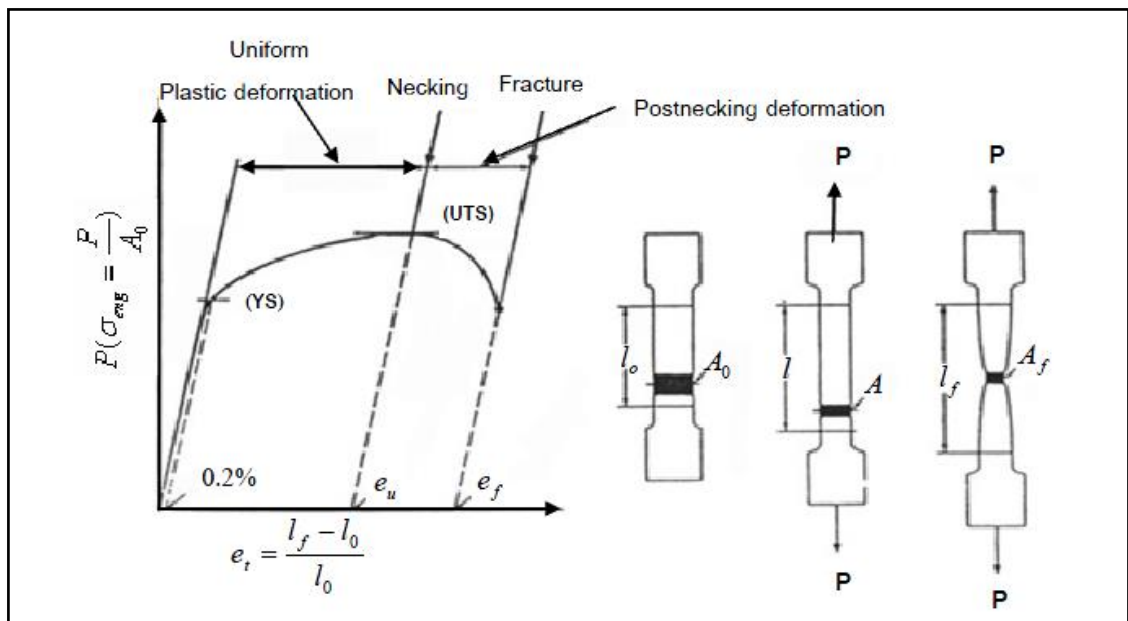
เมื่อ	$d_0$	คือ	ความยาวเริ่มต้น
	$d_1$	คือ	ความกว้างเริ่มต้น
	$d_2$	คือ	ความกว้างสุดท้าย
	$t_0$	คือ	ความหนาเริ่มต้น
	$t_1$	คือ	ความหนาสุดท้าย

## 2.6 ทฤษฎีการทดสอบสมบัติทางกล

สมบัติที่เห็นได้ชัดเจนที่สุดของผลิตภัณฑ์คือความสามารถในการรับแรง (Loads) การกระทำของแรงมีหลายประเภทเช่นแรงใช้งาน (Service Load) แรงสถิต (Static Load) เป็นต้น การทดสอบการดึง (Tension Test)

วิธีการหาสมบัติวัสดุที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือการทดสอบการดึง (Tension Test หรือ Tensile Test) ตามรูปที่ 2.24 ให้ผลการทดสอบเป็นที่ยอมรับได้ทั่วไปจึงต้องทำการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนดเช่น ASTM Standard E8 หรือมาตรฐานอื่นซึ่งเป็นที่ยอมรับโดยสากล เส้นโค้งความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Curve)

ในระหว่างการทดสอบการดึงทั้ง โหลดและความยืด (Elongation) เปลี่ยนแปลงไปอย่างต่อเนื่องจึงต้องวัดการเปลี่ยนแปลงของโหลดและความยืดจากนั้นจึงนำมาเขียนแผนภาพแรงกับการกระจัด (Force-Displacement Diagram) ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ก) ซึ่งเป็นรูปแบบของโลหะเหนียวเช่น เหล็กกล้าที่ทดสอบในอุณหภูมิปกติ [20]



(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

- (ก) ความเค้นกับการกระจัดที่หาได้จากการทดสอบวัสดุเหนียว
- (ข) ชั้นทดสอบหน้าตัดขวางเดิม
- (ค) เปลี่ยนรูปอย่างพลาสติก-สม่ำเสมอในช่วงความยาวทดสอบและ
- (ง) การคอดและขาด

## รูปที่ 2.24 การทดสอบการดึง [21]

### 2.6.1 ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain)

ความเค้น (Stress) หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติและความยากในการวัดหาค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสอดคล้องกับแรงต้านทานภายใน การหาค่าความเค้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้คือ

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.7)$$

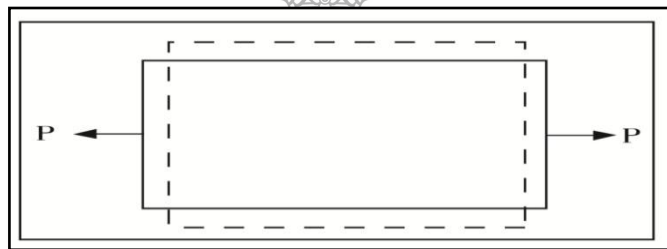
เมื่อ  $\sigma$  = ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa, 1 Pa = 1N/m<sup>2</sup>) หรือ kgf/mm<sup>2</sup>

P = แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf

A = พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ: m<sup>2</sup> หรือ mm<sup>2</sup>

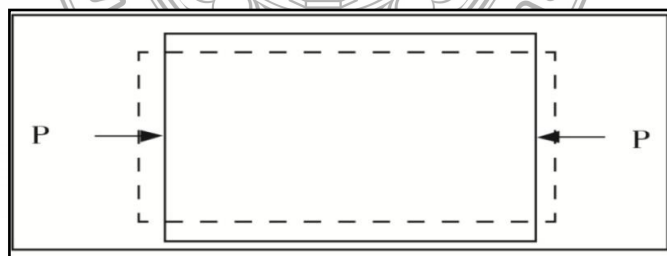
โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำโดยในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อม ๆ กัน

2.6.1.1 ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 2.25



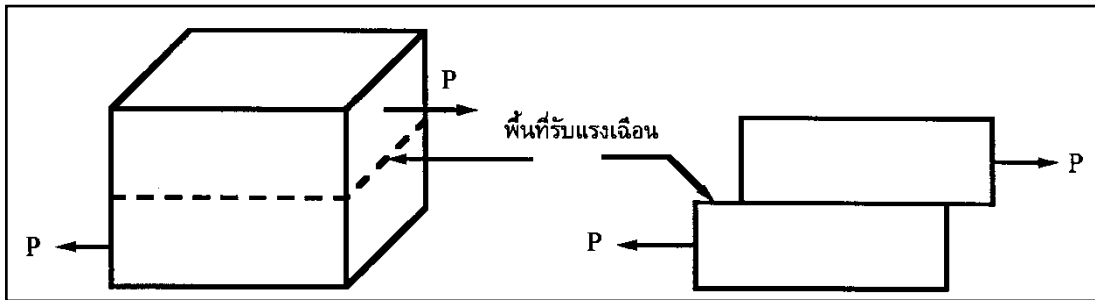
รูปที่ 2.25 แรงดึง (Tensile)

2.6.1.2 ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.26 แรงกด (Compression)

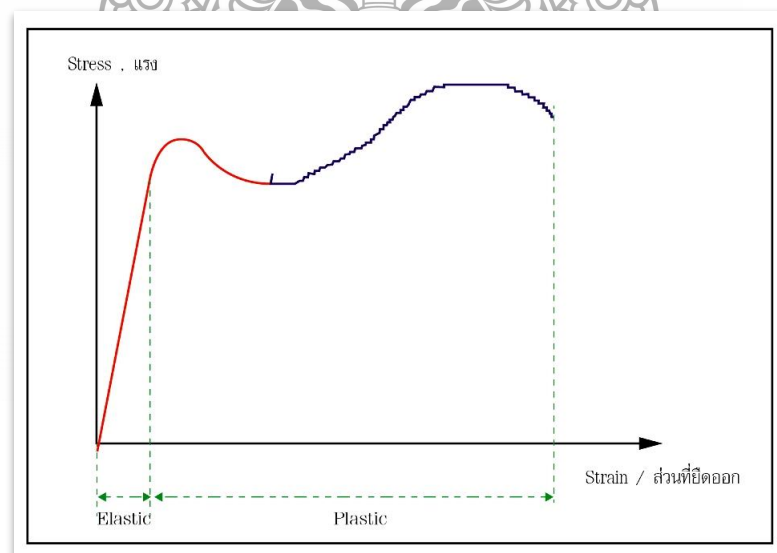
2.6.1.3 ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังรูปที่ 2.27 มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง  $A$  ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน [22]



รูปที่ 2.27 แรงเฉือน (Shear)

### 2.6.2 ความเครียด (Strain)

ความเครียด คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุดังรูปที่ 2.28 ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ [22]



รูปที่ 2.28 ความเค้นความเครียดของการดึงวัสดุ



2.6.2.1 การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พลาสติกยืด, สปริง ถ้าเราดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

2.6.2.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม

วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำ หรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินพิกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation)

นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทโพลีเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่าความเครียดกึ่งอิลาสติกจะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม

การคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

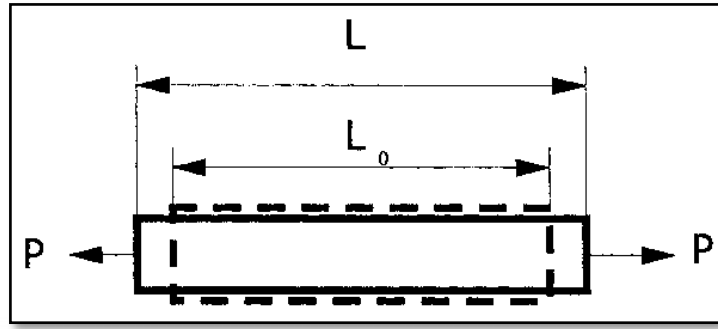
1) แบบเส้นตรงความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) ดังรูปที่ 2.29 จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ดังรูปที่ 2.29 ค่าของความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม ดังสมการ

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $e$  = ความเครียดเชิงเส้น

$\Delta L$  = ความยาวที่เปลี่ยนไป ( $L - L_0$ )

$L_0$  = ความยาวเดิมของวัสดุที่สนใจ หรือ Gage Length

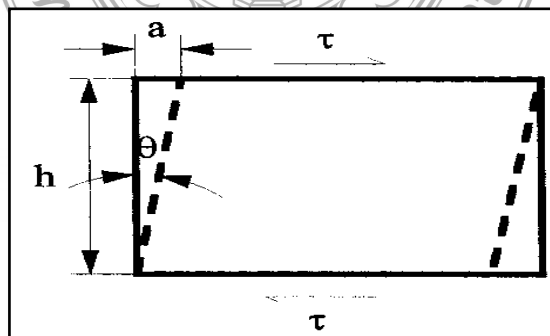


รูปที่ 2.29 ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain)

2) แบบเฉือนเรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน ( $\tau$ ) ดังรูปที่ 2.30 ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ ดังสมการ

$$\gamma = \frac{a}{h} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\gamma$  =  $\tan \theta \approx \theta$  (Radian ในกรณีที่มุมเล็ก)  
 $a$  = ระยะที่เคลื่อนที่ไป (Displacement)  
 $h$  = ระยะห่างระหว่างระนาบ  
 $\theta$  = มุมที่เปลี่ยนไป

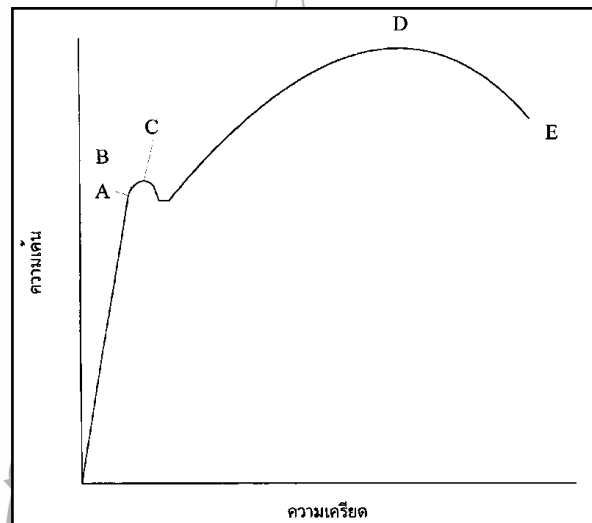


รูปที่ 2.30 ความเครียดเฉือน (Shear Strain)

จะเห็นได้ว่าค่าของความเครียดทั้งสองแบบไม่มีหน่วย เพราะตัวตั้งและตัวหารมีหน่วยเป็นความยาวอยู่แล้ว

### 2.6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี่จะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพลอตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังรูปที่ 2.31 นอกจากนี้จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะเหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility)



รูปที่ 2.31 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) [20]

### 2.6.4 กระบวนการเปลี่ยนรูปของวัสดุ (Deformation of material)

กลไกในกระบวนการเปลี่ยนรูปส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Permanent Deformation) ซึ่งมักจะเกิดจากการที่วัสดุได้รับแรงมากกระทำจนเกิดการเปลี่ยนแปลงชนิดรุนแรงถึงแม้ว่าเราจะเอาแรงนั้นออกแล้วก็ตามมันก็ไม่สามารถจะกลับคืนสู่ในสภาพเดิมได้

2.6.4.1 สลิว (Slip Deformation) คือ การเลื่อนตัว หรือการเลื่อนผ่านกันระหว่างผลึกในแนวข้อพับอะตอม (Atom) ในระนาบ (Planes) ของผลึก โดยเป็นการเคลื่อนย้ายชนิดแบบถาวร โดยที่ถึงแม้ว่าจะไม่มี ความเค้นใดๆ แต่ผลึกนั้นก็ไม่สามารถเคลื่อนกลับมาให้อยู่ในสภาพดั้งเดิมได้อีก

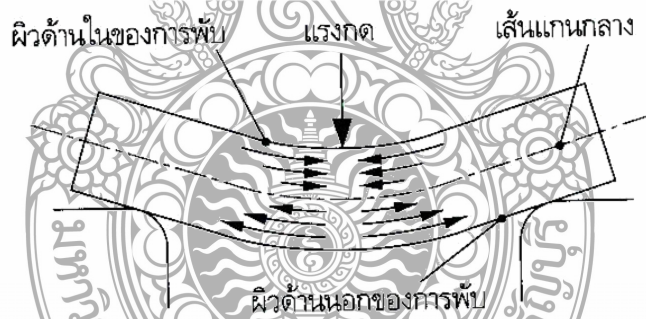
2.6.4.2 ทวินนึ่ง (Twinning Deformation) หมายถึงกระบวนการเปลี่ยนรูปร่างซึ่งมาจากระยะหรือแนวของผลึกเกิดการถูกเฉือน ให้แบ่งแยกออกเป็น 2 ส่วนที่มีลักษณะคล้ายกันหรือเหมือนกันโดยที่ ทิศทางในการหักเหจะเป็นไปทั้งระนาบเลขที่เดียว

2.6.4.3 ดิสโลเคชัน (Dislocation) คือกระบวนการที่เกิดการคลาดเคลื่อนของวัสดุเมื่อเกิดมีแรงหรือได้รับแรงมาจากภายนอกเข้ามากระทำจนกระทั่งอะตอมเกิดการเลื่อนตัวขึ้นนั่นเอง [20]

### 2.6.5 การทดสอบสำหรับการพับ (Bending Tests)

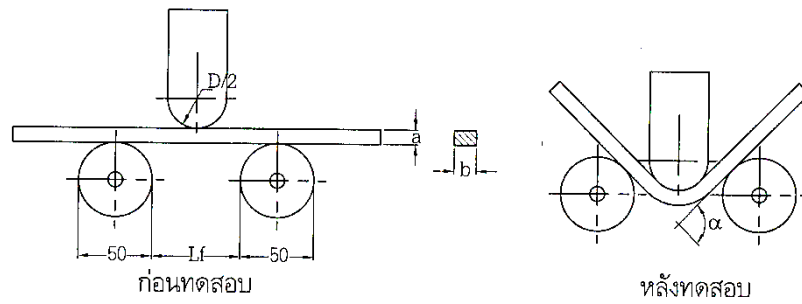
การพับแผ่นโลหะ (Bending) เป็นกระบวนการขึ้นรูปพื้นฐานที่ใช้ทั่วไปในการขึ้นรูปโลหะแผ่น การเปลี่ยนรูปร่างเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณที่อยู่ในขอบเขตของรัศมีการพับ โดยลักษณะความเค้นที่เกิดขึ้นเป็นความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) ที่ด้านนอก และความเค้นอัด (Compressive Stress) ที่ด้านในของรัศมีการพับดังแสดงในรูปที่ 2.32

การทดสอบพับโลหะทำเพื่อวัตถุประสงค์หลัก 2 ข้อ คือ (1) เพื่อให้ทราบค่าความสามารถของวัสดุที่จะรองรับการพับโดยไม่เกิดความเสียหาย ซึ่งนิยามโดย ค่ามุมการพับที่สูงสุด และรัศมีการพับที่ต่ำที่สุด (2) เพื่อบันทึกพฤติกรรมกรรมการคืนตัวกลับของวัสดุ (Spring Back)

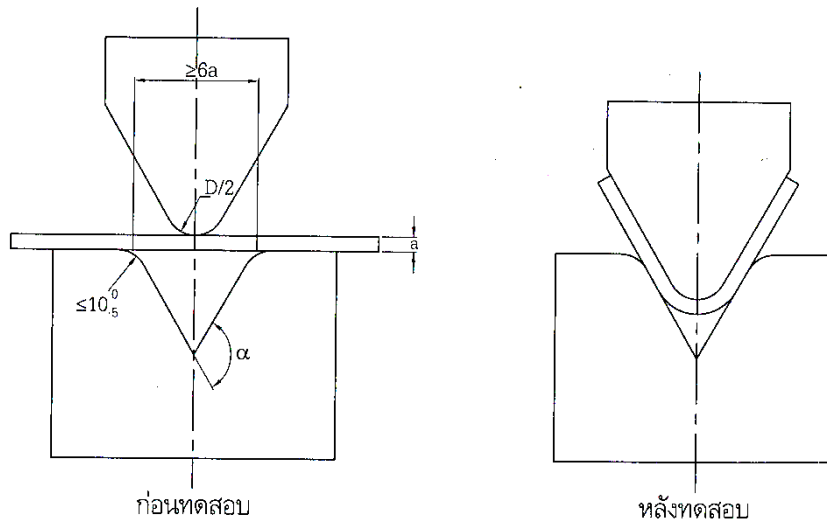


รูปที่ 2.32 สภาวะความเค้นที่เกิดขึ้นจากการพับ [16]

การทดสอบการพับ (Bend Test) การทดสอบความสามารถในการพับของโลหะแผ่น ใช้ชุดแม่พิมพ์ดังรูปที่ 2.33 กำหนดให้รัศมีการพับ ( $D/2$ ) ต่างๆกัน กดพื้นซ์ลงบนแผ่นโลหะเพื่อพับจนได้มุมของการพับ  $\alpha$  ตามที่กำหนด หลังจากการพับให้ตรวจสอบด้วยสายตา กรณีเกิดรอยแตกจะพบที่ผิวด้านนอกของรอยพับเนื่องจากความเค้นแรงดึงสูง จนทำให้เกิดความเครียดเกินขนาด ก็บันทึกมุมพับและรัศมีการพับที่ทำให้เกิดการฉีกขาดของแผ่นโลหะ กำหนดเป็นค่าความสามารถในการพับ การทดสอบนี้ยังสามารถใช้เพื่อสังเกตพฤติกรรมกรรมการคืนตัวกลับของวัสดุได้ด้วย [23]



(ก) ทดสอบการพัวขึ้นรูปด้วยลูกรีดและฟันซ์



(ข) ทดสอบการพัวขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์รูปตัววี

รูปที่ 2.33 รูปแบบการทดสอบสำหรับงานพัวขึ้นรูปโลหะแผ่น [16], [24]

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทอดศักดิ์ อยู่ฤทธิ [25] ได้ทำการศึกษาการลดการติดตัวกลับของโลหะแผ่นในการตัดแบบตัวยู โดยได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบแม่พิมพ์ตัดขึ้นรูปตัวยู ซึ่งได้ใช้แม่พิมพ์ที่มีช่องว่างระหว่างฟันซ์และตาย 2 ค่า คือ 0.9 เท่า และ 1 เท่าของความหนา มีค่าเท่ากับ 1.08 และ 1.2 มิลลิเมตรโดยช่องว่างระหว่างฟันซ์ตายที่น้อยกว่าความหนาชิ้นงาน จะช่วยลดการติดตัวกลับได้ ในการวิเคราะห์การตัดขึ้นรูปใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงพาณิชย์ DEFORM\_2D ช่วยวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณมุมตัดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปและ ชิ้นงานที่ใช้ทดลองเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนเคลือบสังกะสีเกรด SECC สุดท้ายพบว่าชิ้นงานที่ตัดตามแนวรีดและขวางแนวรีดให้ปริมาณการติดตัวกลับไม่ต่างกัน สาเหตุที่มีการลดความหนาชิ้นงานช่วยลดการติดตัวกลับได้เนื่องจากการรีดลดความหนาผนัง

ชิ้นงานทำให้ความเค้นในผนังมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อชิ้นงานบริเวณที่มีสภาพยืดหยุ่นจึงลดน้อยลงการบิดตัวกลับจึงลดลง

นายภาควงษ์ ตรีณาวงษ์ นายศรชัย สายกระสุน และนายสมเกียรติ สภาพโชติ 2552 ปรินญาณิพนธ์ฉบับนี้เป็นการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ตัดโลหะแผ่น ขนาด 200x160x150 มิลลิเมตร โดยใช้แรงในการตัดขนาด 5 ตัน ทำการตัดเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ความหนา 1 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาแรงที่ใช้ในการตัด คุณภาพผิวขอบชิ้นงานและสึกหรอของคมตัด ด้วยการสร้างแผ่นฟิล์มของสารหล่อลื่น 3 ชนิด คือสารหล่อลื่นชนิดสังเคราะห์ สารหล่อลื่นชนิดกึ่งสังเคราะห์ และสารหล่อลื่นชนิดน้ำมัน เพื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สารหล่อลื่น ซึ่งในการทดสอบใช้เครื่องปั๊มระบบกลไก (Mechanical Press) ขนาด 16 ตัน และใช้ความเร็วในการตัด 120 ครั้งต่อนาที ในการทดสอบ [26]

ภาสพิรุพท์ ศรีสำเรียง [27] ได้ทำการศึกษาว่าอิทธิพลของเคลียร์แรนซ์ที่มีผลต่อการบิดตัวกลับในการตัดพับริปูเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพบว่าแรงที่ใช้ในการตัดพับริปูจะเพิ่มขึ้นในวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงและค่าเคลียร์แรนซ์น้อย และยังพบอีกว่าวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงจะเกิดการบิดตัวกลับของชิ้นงานหลังการตัดพับริปูได้นอกจากนี้เคลียร์แรนซ์ซึ่งมีอิทธิพลต่อคุณภาพของรูปทรงชิ้นงาน การชดเชยเคลียร์แรนซ์อาจช่วยลดการบิดตัวกลับของชิ้นงานได้ แต่ต้องใช้แรงในการขึ้นรูปสูงกว่าแต่มีผลทำให้แม่พิมพ์สึกหรอมากตามไปด้วย เหล็กที่มีความแข็งแรงสูง จะเกิดการบิดตัวกลับของชิ้นงานมากกว่าเหล็กที่มีค่าต้านทานแรงดึงต่ำกว่า เคลียร์แรนซ์น้อยสามารถลดการบิดตัวกลับของชิ้นงานหลังการตัดพับริปูได้ถ้ามีค่าน้อยเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดหุบเข้า

ไพสิน ใจเที่ยง, และ ดิลก ศรีประไพ [28] ได้ทำการศึกษาการบิดตัวกลับของเหล็กกล้าแผ่นความแข็งแรงสูงพิเศษ หลังการขึ้นรูปแบบอุ่นและร้อน The Study Springback of Advanced High Strength Steel Sheet after Warm and Hot Forming Phaisin Jaitiang<sup>1</sup> and Dilok Sriprapai<sup>1</sup>

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษเป็นเหล็กกล้าที่ถูกพัฒนาให้มีความสามารถในการรับแรงดึงและแรงกระแทกสูงเพื่อใช้สำหรับผลิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีน้ำหนักเบา แต่มีความแข็งแรงสูง อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงของวัสดุที่สูงขึ้นนี้ส่งผลให้การขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องมีขีดจำกัด เนื่องจากความสามารถในการขึ้นรูป ของวัสดุกลุ่มนี้ต่ำ ทำให้ชิ้นงานที่ได้หลังจากการขึ้นรูปเกิดปัญหาการบิดขาดและการบิดตัวกลับของชิ้นงานสูง ดังนั้นการนำกระบวนการปั๊มขึ้นรูปแบบอุ่นและแบบร้อนเข้ามาช่วยลดปริมาณการบิดตัวกลับของชิ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ โดยในขั้นตอนการทดลอง จะทำการทดสอบ ปั๊มขึ้นรูปเหล็กกล้าแผ่นความแข็งแรงสูงพิเศษ เกรด SPFC 980Y อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป คือ อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และนำชิ้นงานที่ได้หลังจากการปั๊มขึ้น

รูปมาทำการตรวจสอบปริมาณการติดตัวกลับของชิ้นงาน จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ทำการขึ้นรูปชิ้นงานสูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณการติดตัวกลับของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงจากงานวิจัยพบว่าเมื่ออุณหภูมิ ที่ใช้ในการขึ้นรูปเหล็กกล้าแผ่น เกรด SPFC 980 Y สูงขึ้นปริมาณการติดตัวกลับของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง โดยที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ปริมาณการติดตัวกลับของชิ้นงานลดลงจนมีค่าน้อยมากเกือบจะเท่ากับศูนย์ แต่ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นพบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปมีแนวโน้มลดลง โดยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งจะลดลงมากที่สุด ประมาณ 19.65 เปอร์เซ็นต์และจากการตรวจสอบปริมาณออกไซด์ที่เกิดบนผิวของชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูป พบว่าปริมาณออกไซด์ เริ่มปรากฏชัดที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขึ้นไป

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่าตัวแปรที่ช่วยทำให้การติดตัวกลับลดลงคืออุณหภูมิ, ความเร็ว, ช่องว่าง (Clearance) ที่ระหว่างพินซ์กับคานส์ เหมาะสม ส่วนสารหล่อลื่นไม่มีผลต่อการช่วยลดการติดตัวกลับของชิ้นงานที่เป็น โลหะแผ่น แต่สารหล่อลื่นสามารถช่วยในการขึ้นรูปให้ไหลตัวง่ายเท่านั้น ดังในงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้อ้างอิงตัวแปรจากงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นอ้างอิงที่จะมาช่วยแก้ไขปัญหาในการติดตัวกลับ (Spring back ) ของ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 โดยใช้ความเร็วมาเป็นตัวแปร และ อุณหภูมิเข้ามาช่วยในการแก้ไขปัญหาคือการติดตัวกลับ (Spring back )



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

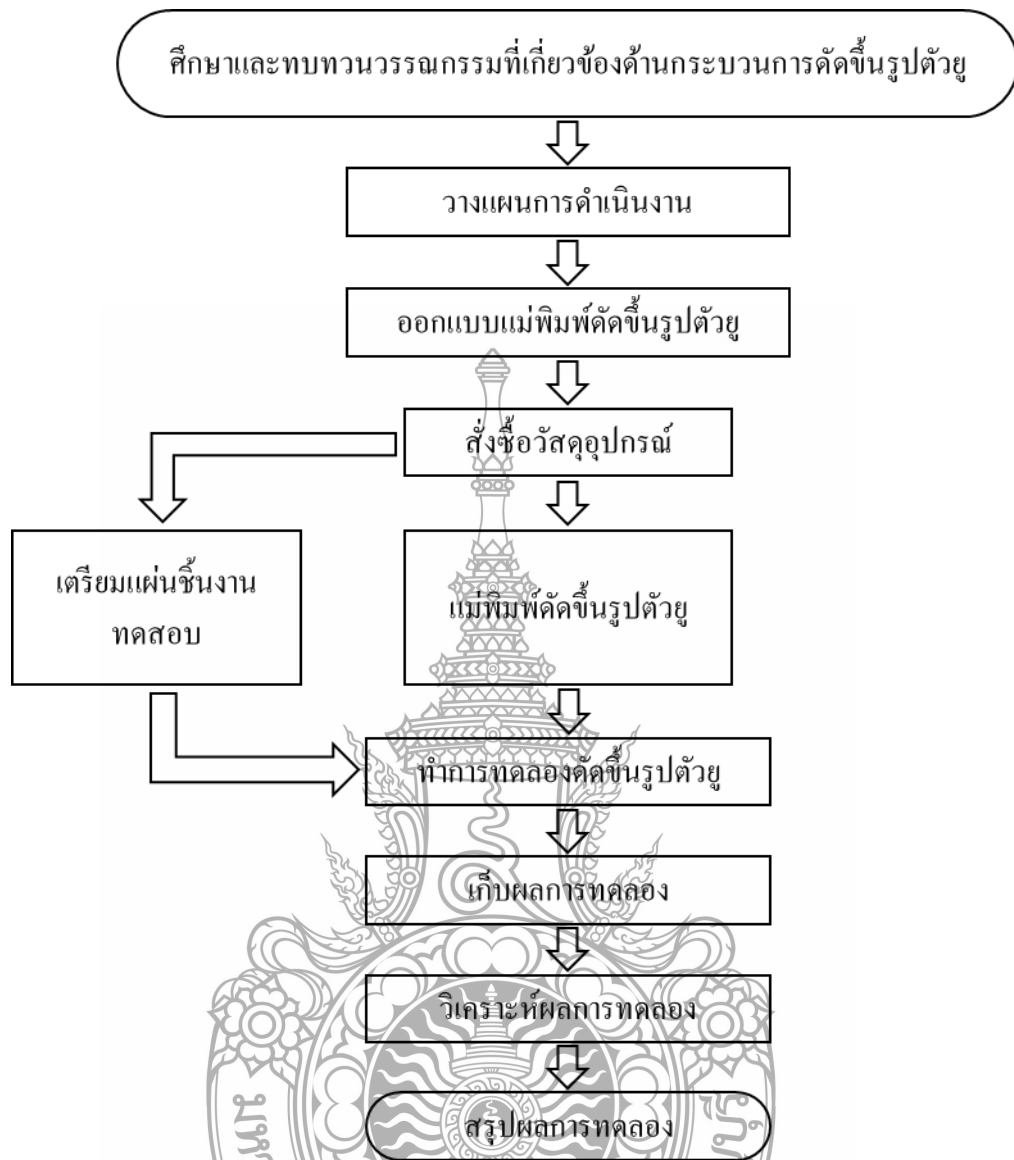
ในการศึกษาวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นให้ความสำคัญไปที่เรื่องการวิเคราะห์การติดกลับและความเครียด โดยใช้หลักการในการศึกษาวิเคราะห์ไปที่ชิ้นงานที่ผ่านการตัดขึ้นรูปด้วย ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการทดลองคือเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 ที่มีการทดลอง ภายใต้ตัวแปร ความเร็วในการตัด และการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน ซึ่งความเร็วในการตัด แบ่งออกเป็น 3 ระดับด้วยกัน คือความเร็วที่ 10, 20, 30 เมตรต่อนาที ในส่วนของการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน ได้แบ่งออกเป็น 4 ระดับเช่นกัน คือ 25, 60, 80, 100 องศาเซลเซียส ซึ่งมีวิธีการและขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินการวิจัยแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานไว้อย่างชัดเจน เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการดำเนินงาน และเป็นการทำงานอย่างเป็นขั้นตอนอย่างมีระเบียบวิธีที่ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 3.1







รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงาน

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1 เครื่องปั๊มไฮดรอลิก

เพื่อใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานให้มีรูปทรงตามแม่พิมพ์ที่ออกแบบ โดยเครื่องปั๊มไฮดรอลิกที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 110 ตัน ดังรูปที่ 3.2 :ซึ่งเป็นเครื่องรุ่น Amino นำเข้าจากประเทศญี่ปุ่น ที่สามารถปรับความเร็วในการขึ้นรูปได้



รูปที่ 3.2 เครื่องปั๊มไฮดรอลิกขนาด 110ตัน

### 3.2.2 เวอร์เนียคาลิปเปอร์

ใช้เครื่องมือวัดเวอร์เนียคาลิปเปอร์สำหรับวัดขนาด (Dimension) ของวัสดุชิ้นงาน ซึ่งเหมาะสำหรับใช้วัดขนาดของวัสดุ ชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก ได้ทั้งความกว้าง ยาว ลึก สามารถวัดขนาด ได้ทั้งหน่วยมิลลิเมตรหน่วยเซนติเมตรและหน่วยนิ้ว โดยงานวิจัยเล่มนี้ใช้ความละเอียดของเวอร์เนียคาลิปเปอร์เท่ากับ 0.02 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.3



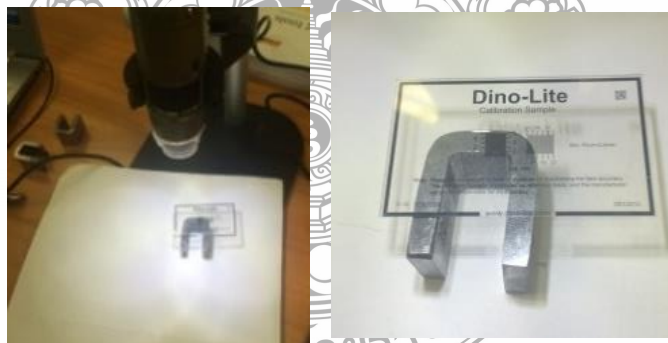
รูปที่ 3.3 เวอร์เนียคาลิปเปอร์

### 3.2.3 กล้องมาโครสโคป (Macroscopic)

กล้องมาโครสโคป (Macroscopic) ดังรูปที่ 3.4 นำมาใช้ในการวัดมุมของชิ้นงานทดลอง เพื่อวัดมุมองศาการคิดตัวกลับ สำหรับการตรวจสอบมุมที่แตกต่างไปจากมุม 90 องศาซึ่งเป็นมุมของชิ้นงานที่ต้องการและนำมาเปรียบเทียบว่าค่าการคิดตัวกลับของชิ้นงานซึ่งกล้องชนิดนี้สามารถปรับซูมได้ 200 เท่าการใช้งานต้องนำไปเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ และจะต้องทำการปรับขนาดสเกลก่อนนำไปวัดมุมองศาของชิ้นงานทดลองที่ผ่านการตัดขึ้นรูปตัวยูมาแล้วดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 กล้องมาโครสโคป (Microscope)



รูปที่ 3.5 การปรับค่าระยะวัดมาโครสโคป

### 3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

โดยการนำวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 ที่มี ขนาดความกว้าง 40 มิลลิเมตร ความยาว 200 มิลลิเมตร และความหนา 5 มิลลิเมตรดังรูปที่ 3.6 ถูกทำการสร้างรอยกริดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง

เท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร บนผิวชิ้นงานเพื่อวัดการยึดตัวของวงกลม กริดหลังการตัดขึ้นรูปซึ่งการสร้างลา  
ยกริดมีอุปกรณ์และขั้นตอนดังต่อไปนี้



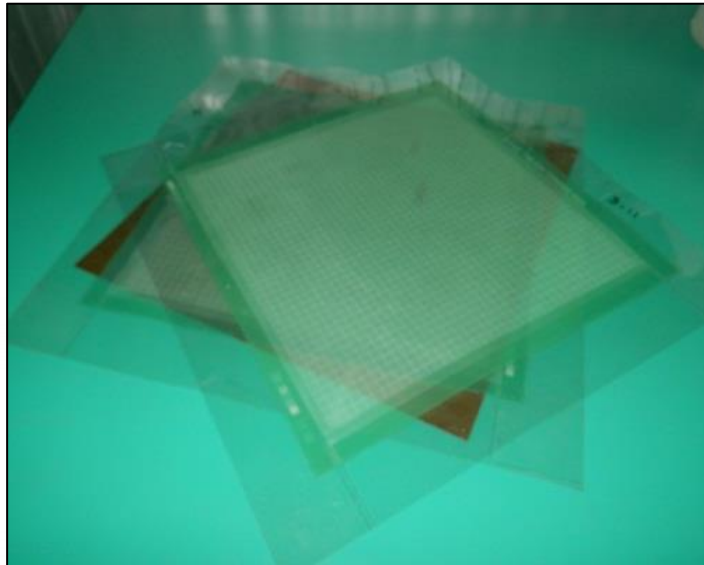
รูปที่ 3.6 แผ่นชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

### 3.3.1 อุปกรณ์บล็อกและแผ่นกริด

อุปกรณ์สำหรับตีกริด โดยประกอบไปด้วยบล็อกใช้สำหรับบล็อกแผ่นฟิล์มพลาสติกที่  
เป็นลายกริด โดยแผ่นกริดเป็นลายเป็นวงกลมในช่องสี่เหลี่ยม โดยมีช่องละ 4 วงหรือเรียกว่าแผ่น กริด  
แบบผสมวงกลมกับสี่เหลี่ยม (Combination) โดยกริดวงกลมแต่ละวงจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  
เท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.7 และ 3.8



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์บล็อก



รูปที่ 3.8 แผ่นกริดแบบผสมวงกลมกับสี่เหลี่ยม (Combination)

### 3.3.2 เครื่องปล่อยกระแสไฟฟ้าและสารเคมีที่ใช้กัดกรด

เครื่องปล่อยกระแสไฟฟ้า และสารเคมีที่ใช้กัดกรดที่ใช้สำหรับกัดลายบนผิวของชิ้นงานก่อนนำไปผ่านกระบวนการตัดเพื่อทำความสะอาดผิวโลหะ และตู้ไฟสำหรับใช้ช้อตไฟฟ้าผ่านฟิล์มกริดเพื่อให้กรดกัดลงไปเป็นลวดลายที่พื้นผิวของชิ้นงาน โดยมีทั้งกระแสสลับ และกระแสตรง ดังรูปที่ 3.9 และ 3.10



รูปที่ 3.9 เครื่องปล่อยกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.10 สารเคมีที่ใช้กัดกรด

### 3.3.3 การสร้างรอยกริด

โคนทำความสะอาดผิวงานด้วยอะซีโตน (Acetone) ก่อนการนำไปกัดลายกริด จากนั้นทำการกัดกรดโดยเทน้ำยกัดกรดลงไปบนแผ่นฟิล์มที่เป็นลายกริดแล้ววางทับลงบนเหล็กแผ่น จากนั้นทำการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านลูกกลิ้งเพื่อให้กระแสไฟฟ้าทำการกัดลายกริดบนชิ้นงานโลหะ โดยผ่านกรด ดังรูปที่ 3.11- 3.13 หลังจากทำการกัดกรดและปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปชิ้นงานเป็นที่เรียบร้อยแล้วจะได้เหล็กแผ่นที่มีลายกริดวงกลมบนผิวชิ้นงาน ซึ่งจะเกิดลวดลายกริดตลอดพื้นผิวของชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.11 ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอะซีโตน

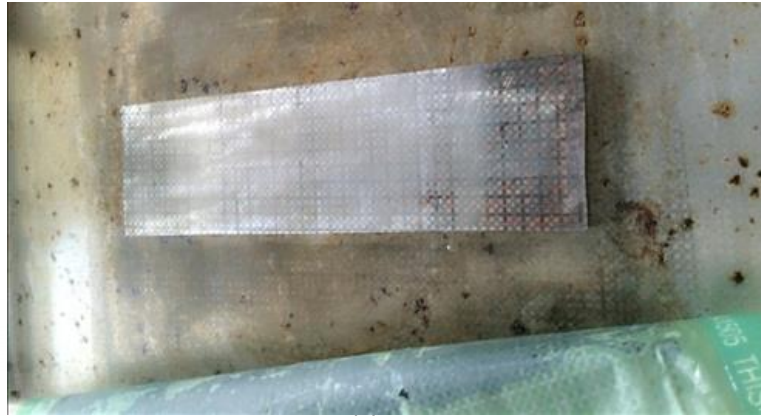




รูปที่ 3.12 การเทกรดลงบนแผ่นฟิล์มและเหล็ก



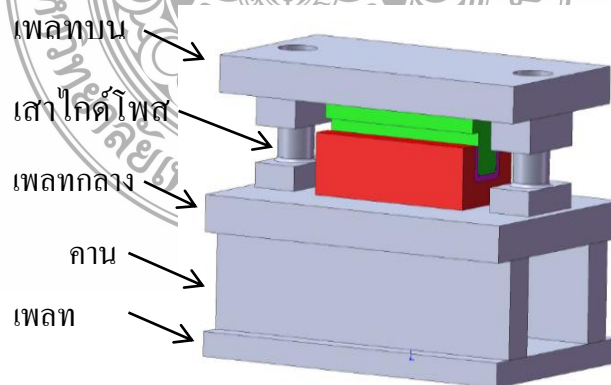
รูปที่ 3.13 การปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านแผ่นฟิล์มเพื่อทำการกัดผิวโลหะ



รูปที่ 3.14 เหล็กแผ่นที่ผ่านการตีกริด

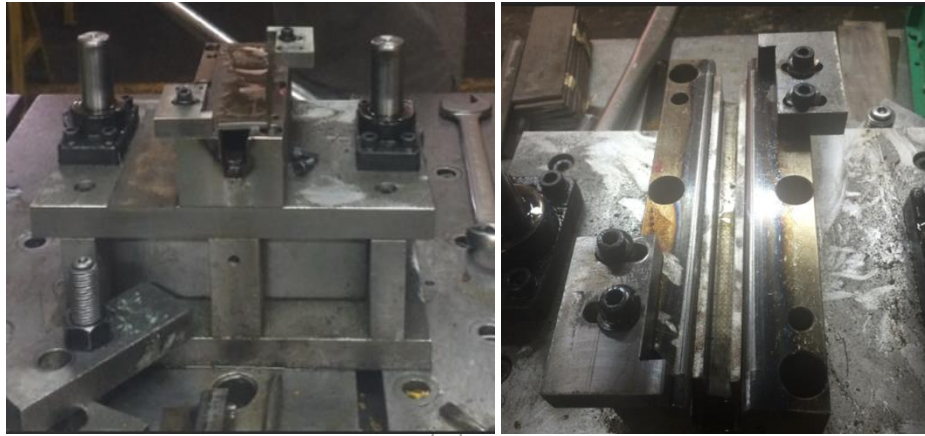
### 3.4 การเตรียมแม่พิมพ์ปั๊มชิ้นส่วนรูปตัวยู

แม่พิมพ์ตัดชิ้นรูปตัวยูที่ใช้ในการทดลองแสดงส่วนประกอบดังรูปที่ 3.15 ประกอบด้วย คาน, ฟันซ์, เพลทบนและเพลทล่าง การประกอบแม่พิมพ์เป็นการประกอบแบบสวมพอดีในชิ้นส่วนที่ต้องประกบกันและมีการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนไกด์ โพลสและไกด์บูช อุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบแม่พิมพ์เลือกใช้เป็นชิ้นส่วนมาตรฐาน วัสดุที่ใช้ผลิตแม่พิมพ์ตัดชิ้นรูปตัวยู ชิ้นส่วนเพลททั้ง 2 ได้แก่ แผ่นเพลทบน, แผ่นเพลท ล่างและ ชุดแม่พิมพ์ชุดบน (Punch) และแม่พิมพ์ชุดล่าง(Die) ผลิตจากเหล็กกล้าเครื่องมือ S50C, แม่พิมพ์ชุดล่าง(Die) และแม่พิมพ์ชุดบน (Punch) ผลิตจากเหล็กกล้า SKD11 และผ่านกรรมวิธีชุบแข็งทั้งชิ้น (Full hardening) จนมีค่าความแข็ง 58 -60 HRC ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 ส่วนประกอบแม่พิมพ์ตัดชิ้นรูปตัวยู





รูปที่ 3.16 แม่พิมพ์ตัดขึ้นรูปตัวยู

### 3.5 การคำนวณแรงในการตัดขึ้นรูป

จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการคำนวณแรงที่ใช้ในการตัดขึ้น เพื่อให้สามารถเลือกใช้เครื่องปั๊มขึ้นรูปได้อย่างเหมาะสม

จากสมการที่ 2.0000

$$F = P \times A$$

เมื่อ  $P$  = แรงดันด้านทานเฉพาะของวัสดุ

$A$  = พื้นที่หน้าตัดด้านบนของคาน

แทนค่า

$$P = 140 \text{ MPa}$$

$$A = 200 \times 22 \text{ mm}$$

$$\therefore F = (140 \text{ MPa}) \times (200 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}) = 616 \text{ kN}$$

$$\therefore \frac{F}{g} = 69.241 \text{ ton}$$

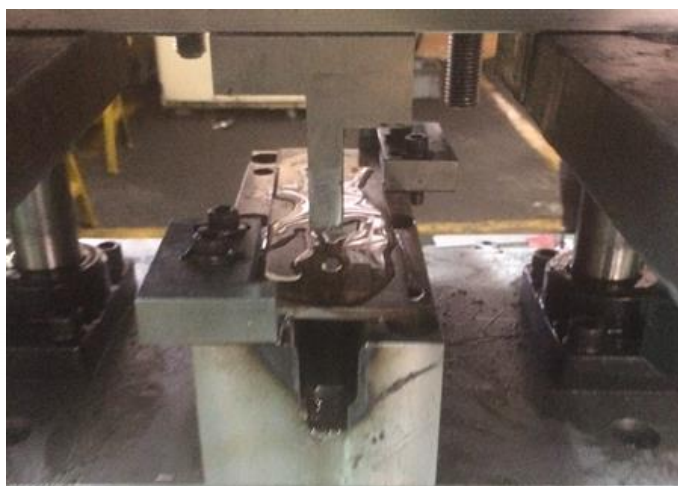
ดังนั้นแรงที่ใช้ในการตัดรูปตัวยูต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 69 ตัน

### 3.6 การทดลอง

ในส่วนของการทดลอง โดยเริ่มจากการติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องปั๊มขึ้นรูปแมคคานิค 110 ตัน ดังรูปที่ 3.17 จากนั้นนำแผ่นชิ้นงานที่เตรียมไว้มาทำการทดลองตัดขึ้นรูปตามตัวแปรที่กำหนดดังรูปที่ 3.18 ซึ่งการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกัน ส่วนแรกเป็นการทดสอบที่ความเร็วในการปั๊มขึ้นรูปต่างกัน เพื่อให้ได้ความเร็วที่ดีที่สุด โดยการปรับความเร็วที่ตัวเครื่องได้โดยตรงดังรูปที่ 3.17 ส่วนที่สองเป็นการทดลองภายใต้อุณหภูมิที่ต่างกัน โดยใช้ความเร็วที่ดีที่สุดจากการทดลองในส่วนแรก โดยการทดลองในส่วนที่สองนี้จะให้ความร้อนแก่ชิ้นงานด้วย ฮีตเตอร์ 1500 วัตต์ ดังรูปที่ 3.19 โดยเพื่ออุณหภูมิจากการเย็นตัวในอากาศ 15 องศาเซลเซียส ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.17 การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องปั๊ม



รูปที่ 3.18 การตัดขึ้นรูปตัวยูชิ้นงาน



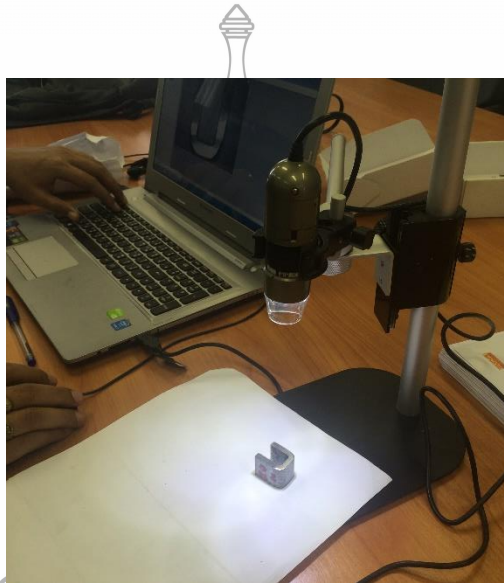
รูปที่ 3.19 การให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน



รูปที่ 3.20 ชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูปตัวยู

### 3.7 การบันทึกผลการทดลอง

การทดลองภายใต้ความเร็ว และสภาวะอุณหภูมิขีงชันงานในการตัดชันรูปที่ต่งกันนั้นสามารถประเมินคุณภาพชันงานเบื้องต้น โดยพิจารณาด้วยสายตาซึ่งมีความละเอียดน้อยกว่าการประเมินด้วยรูปแบบอื่น และเมื่อชันงานมีรูปที่สมบูรณ์ จากนั้นจึงนำชันงานมาตัดเพื่อนำไปวัดการติดตัวกลับด้วยกล้องไมโครสโคป ดังรูปที่ 3.21 ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะบันทึกดังตารางที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.21 การวัดชันงานด้วยกล้องไมโครสโคป

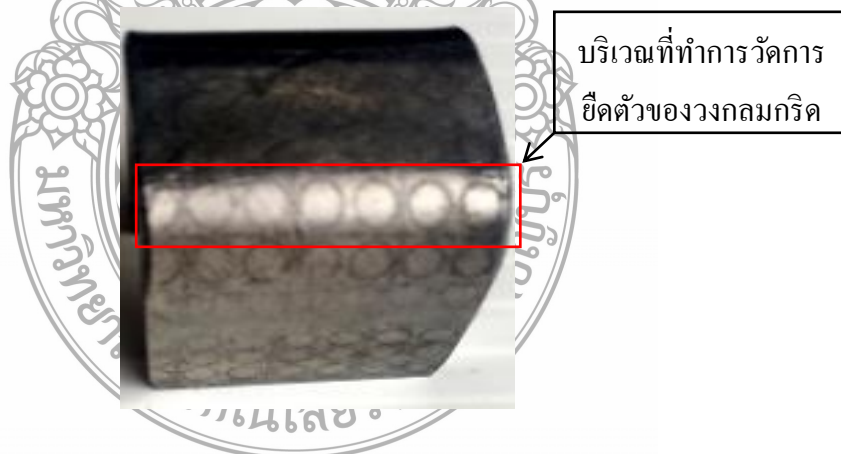
ตารางที่ 3.1 ตารางบันทึกผลการวัดการติดตัวกลับของชันงานหลังการตัดชันรูปด้วยที่ความเร็วต่างกัน

ความเร็ว (เมตร/นาทึ)	ชันที่ (องศา)					เฉลี่ย (องศา)
	1	2	3	4	5	
10	X	X	X	X	X	X
20	X	X	X	X	X	X
30	X	X	X	X	X	X

ตารางที่ 3.2 ตารางบันทึกผลการวัดการยึดตัวของชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูปตัวอยู่ที่อุณหภูมิชิ้นงานต่างกัน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ชั้นที่ (องศา)					เฉลี่ย (องศา)
	1	2	3	4	5	
25	X	X	X	X	X	X
60	X	X	X	X	X	X
80	X	X	X	X	X	X
100	X	X	X	X	X	X

จากนั้นนำชิ้นงานมาวัดการยึดตัวของวงกลมกริด ที่บริเวณผิวส่วนโค้งด้านนอกของชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.22 เพื่อคำนวณค่าความเครียดหลัก และค่าความเครียดรอง ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะบันทึกดังตารางที่ 3.3 และ 3.4



รูปที่ 3.22 ตำแหน่งการวัดขนาดของวงกลมกริด

ตารางที่ 3.3 ตารางบันทึกผลการวัดขนาดวงกลมกริดของชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูปด้วยที่ความเร็วต่างกัน

ความเร็ว (เมตร/นาที)	ชั้นที่ (มิลลิเมตร)			เฉลี่ย (มิลลิเมตร)	
	1	2	3		
10	แกนหลัก	X	X	X	X
	แกนรอง	X	X	X	X
20	แกนหลัก	X	X	X	X
	แกนรอง	X	X	X	X
30	แกนหลัก	X	X	X	X
	แกนรอง	X	X	X	X

ตารางที่ 3.4 ค่าความเครียดหลักและความเคี้ยวของชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูปด้วยที่อุณหภูมิชิ้นงานต่างกัน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ชั้นที่ (มิลลิเมตร)			เฉลี่ย (มิลลิเมตร)	
	1	2	3		
25	แกนหลัก	X	X	X	X
	แกนรอง	X	X	X	X
60	แกนหลัก	X	X	X	X
	แกนรอง	X	X	X	X
80	แกนหลัก	X	X	X	X
	แกนรอง	X	X	X	X
100	แกนหลัก	X	X	X	X
	แกนรอง	X	X	X	X

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

จากผลการทดลองตัดขึ้นรูปตัววัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 ภายใต้ตัวแปรที่กำหนดได้แก่ ความเร็วในการตัด และการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน ซึ่งความเร็วในการตัด แบ่งออกเป็น 3 ระดับด้วยกัน คือความเร็วที่ 10, 20, 30 เมตรต่อนาที ในส่วนของการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน ได้แบ่งออกเป็น 4 ระดับเช่นกัน คือ อุณหภูมิห้อง, 60, 80, 100 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ การตัดตัวกลับของชิ้นงาน และความเครียดที่ชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูป เพื่อหาตัวแปรที่ดีที่สุด ซึ่งการอภิปรายและการวิเคราะห์ผลมีดังนี้

#### 4.1 ผลการทดลอง

##### 4.1.1 การตัดตัวกลับหลังการตัดขึ้นรูป

จากการวัดองศาการตัดตัวกลับของชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูป พบว่าผลการทดลองตัดขึ้นรูปตัววัสดุที่ความเร็ว และอุณหภูมิแตกต่างกัน มีผลต่อการตัดตัวกลับ ดังตารางที่ 4.1

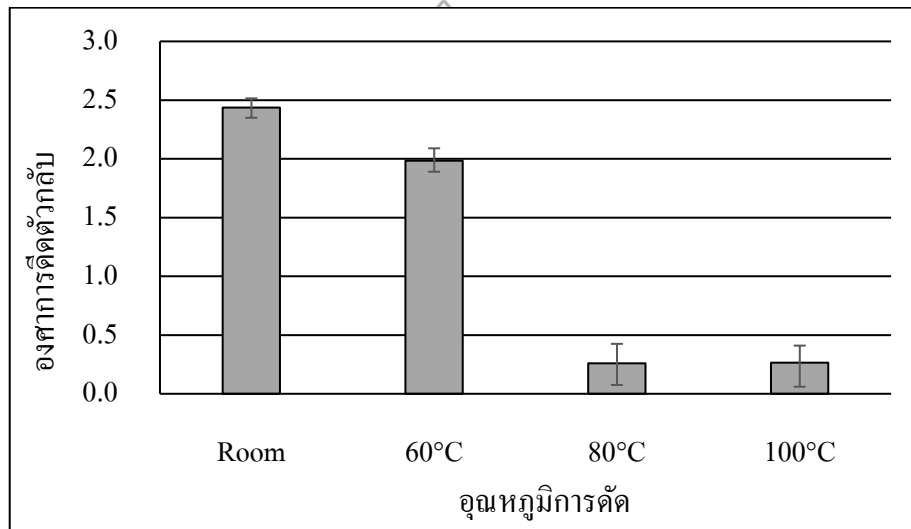
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดการตัดตัวกลับของชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูปตัววัสดุที่ความเร็วต่างกัน

ความเร็ว	อุณหภูมิ			
	Room	60°C	80°C	100°C
10 เมตร/นาที	2.44	1.98	0.26	0.27
20 เมตร/นาที	4.36	4.06	3.20	3.06
30 เมตร/นาที	6.05	5.29	3.96	3.98

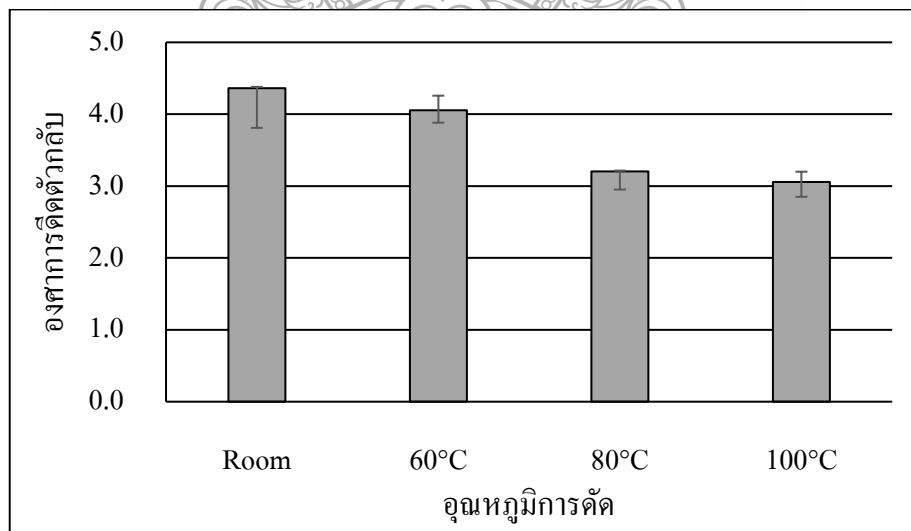
จากผลการทดลองตัดขึ้นรูปตัววัสดุ S355 พบว่าที่ความเร็ว 10 เมตรต่อนาที ชิ้นงานมีค่าการตัดตัวกลับสูงสุดที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.44 องศา และมีค่าตัดตัวกลับต่ำสุด ที่สภาวะอุณหภูมิในการตัด 80 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.26 องศา ขณะที่ความเร็ว 20 เมตรต่อนาที ชิ้นงานมีค่าการตัดตัวกลับสูงสุดที่สภาวะอุณหภูมิห้องเช่นกัน ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.36 องศา และมีค่าตัดตัวกลับต่ำสุด ที่สภาวะอุณหภูมิในการตัด 100 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.06



องศา ในส่วนของความเร็ว 30 เมตรต่อนาที ซึ่งงานมีค่าการติดตัวกลับสูงสุดที่สภาวะอุณหภูมิห้อง เช่นเดียวกันกับทั้งสองความเร็ว มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.05 องศา และมีค่าติดตัวกลับต่ำสุดที่สภาวะ อุณหภูมิในการตัด 80 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.96 องศา จากผลการทดลองเมื่อนำมาสร้าง เป็นกราฟ ดังรูปที่ 4.1 เพื่อเปรียบเทียบการติดตัวกลับที่สภาวะอุณหภูมิตัดขึ้นรูปต่างกัน สามารถแสดง ความแตกต่างและแนวโน้มได้อย่างชัดเจน



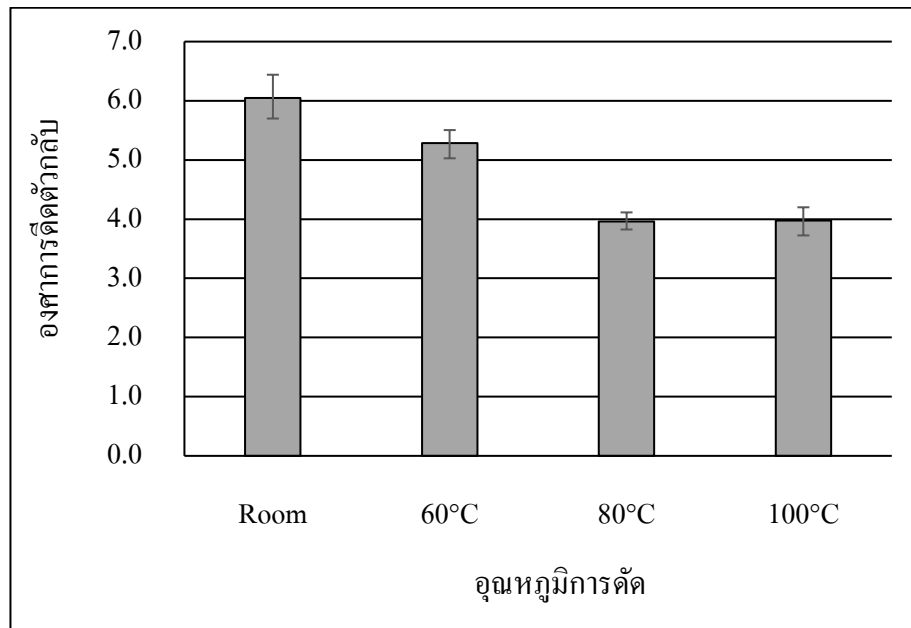
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 การติดตัวกลับของชิ้นงานที่ความเร็ว (ก) 10 เมตรต่อนาที (ข) 20 เมตรต่อนาที (ค) 30 เมตร ต่อนาที ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่างกัน





(ค)

รูปที่ 4.1 การติดตัวกลับของชิ้นงานที่ความเร็ว (ก) 10 เมตรต่อนาที (ข) 20 เมตรต่อนาที (ค) 30 เมตรต่อนาที ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่างกัน (ต่อ)

จากผลการเปรียบเทียบการติดตัวกลับหลังการตัดขึ้นรูป พบว่าสภาวะอุณหภูมิการตัดมีผลต่อการลดลงของค่าการติดตัวกลับ การเพิ่มอุณหภูมิในการตัดส่งผลให้ค่าการติดตัวกลับมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม พบว่าที่อุณหภูมิในการตัด 80 และ 100 องศาเซลเซียส ค่าการติดตัวกลับมีค่าไม่แตกต่างกัน

#### 4.1.2 ความเครียดของชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูปที่ความเร็วต่างกัน

การวัดความเครียดของชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูปด้วย เป็นการวัดการยืดและหดตัวของวงกลมกริดในแนวแกนหลักและแกนรอง บริเวณผิวส่วนโค้งด้านนอกของชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูปดังรูปที่ 4.2 จากนั้นนำมาคำนวณค่าความเครียดหลัก และค่าความเครียดรอง ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

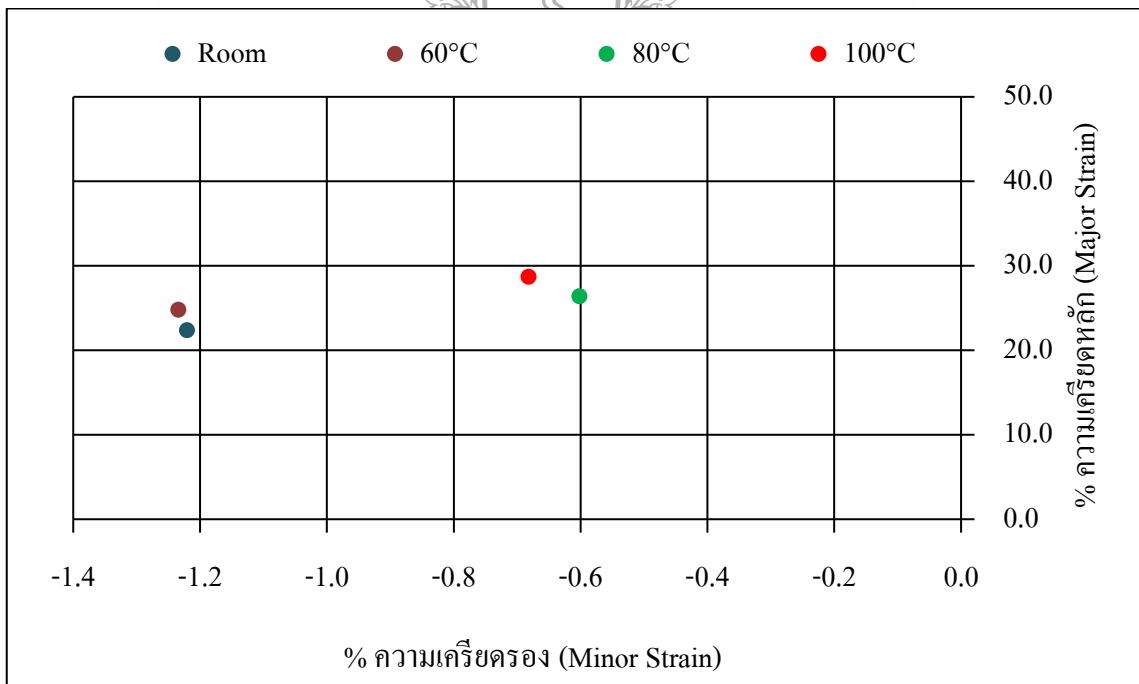
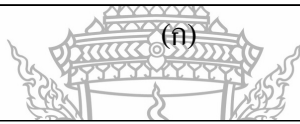
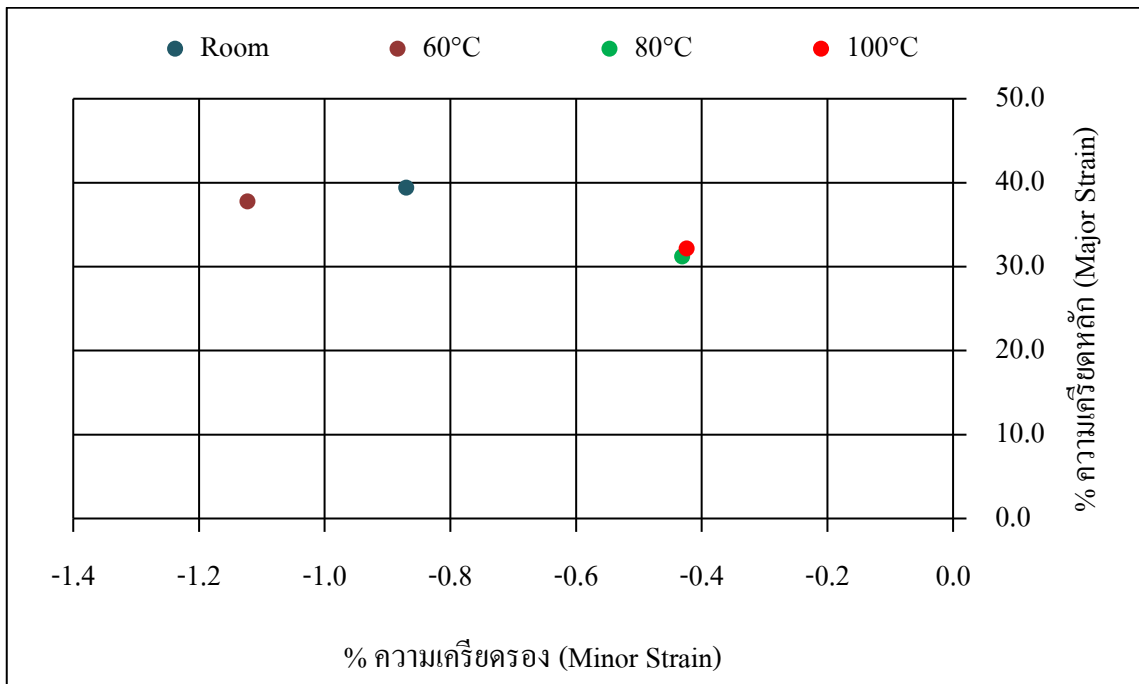


รูปที่ 4.2 ตำแหน่งการวัดขนาดของวงกลมกริด

ตารางที่ 4.2 ค่าความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานหลังการคั่วขึ้นรูปตัวยู

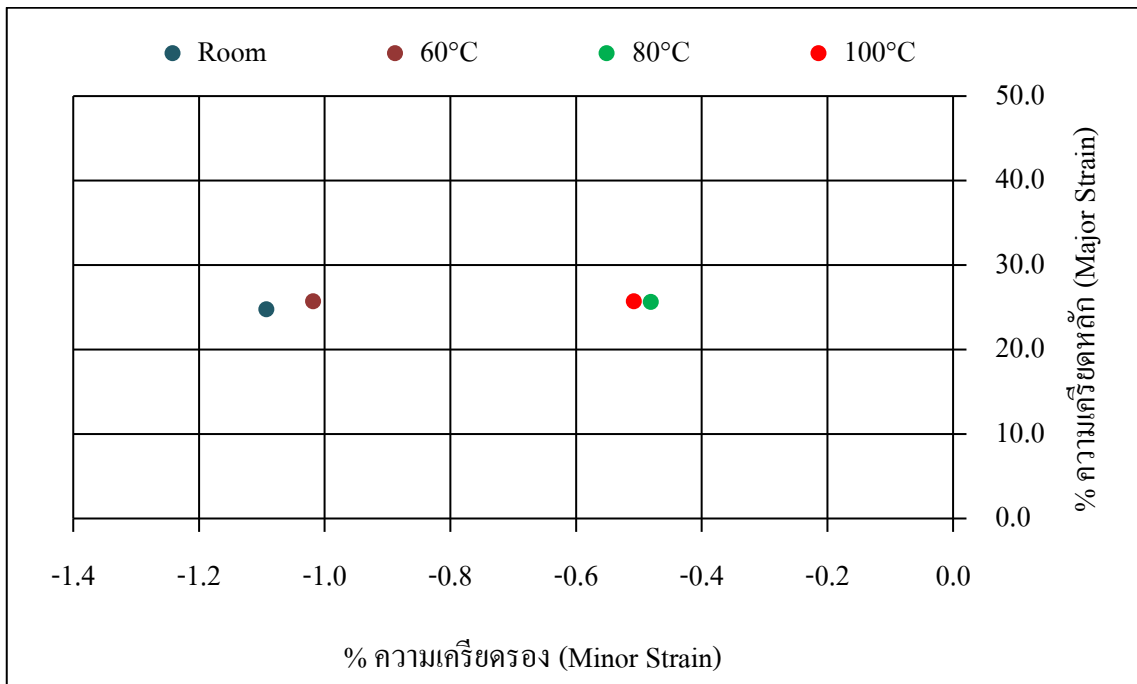
ความเร็ว		อุณหภูมิ			
		Room	60°C	80°C	100°C
10	ความเครียดหลัก	39.40	37.79	31.22	32.16
	เมตริก/นาทิก	ความเครียดรอง	-0.87	-1.12	-0.43
20	ความเครียดหลัก	22.40	24.83	26.40	28.70
	เมตริก/นาทิก	ความเครียดรอง	-1.22	-1.23	-0.60
30	ความเครียดหลัก	24.76	25.70	25.65	25.73
	เมตริก/นาทิก	ความเครียดรอง	-1.09	-1.02	-0.48

จากการทดลองคั่วขึ้นรูปตัวยู พบว่าวงกลมกริดเกิดการยืดตัวและหดตัวที่บริเวณส่วนโค้งของมุมคั่ว พบว่าการขึ้นรูปที่ความเร็วทั้ง 3 ระดับ ให้ค่าความเครียดที่แตกต่างกัน ซึ่งการขึ้นรูปที่ความเร็ว 10 เมตรต่อนาที วงกลมกริดมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เมื่อเทียบกับความเร็วที่ 20 และ 30 เมตรต่อนาที โดยชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปที่ความเร็ว 10 เมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 39.40 และค่าความเครียดรองเท่ากับ -0.87.เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 37.79 และค่าความเครียดรองเท่ากับ -1.12 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 31.22 และค่าความเครียดรองเท่ากับ -0.43 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 32.16 และค่าความเครียดรองเท่ากับ -0.42 เปอร์เซ็นต์



(ข)

รูปที่ 4.3 ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ความเร็ว (ก) 10 เมตรต่อวินาที (ข) 20 เมตรต่อวินาที (ค) 30 เมตรต่อวินาที ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่างกัน



(ค)

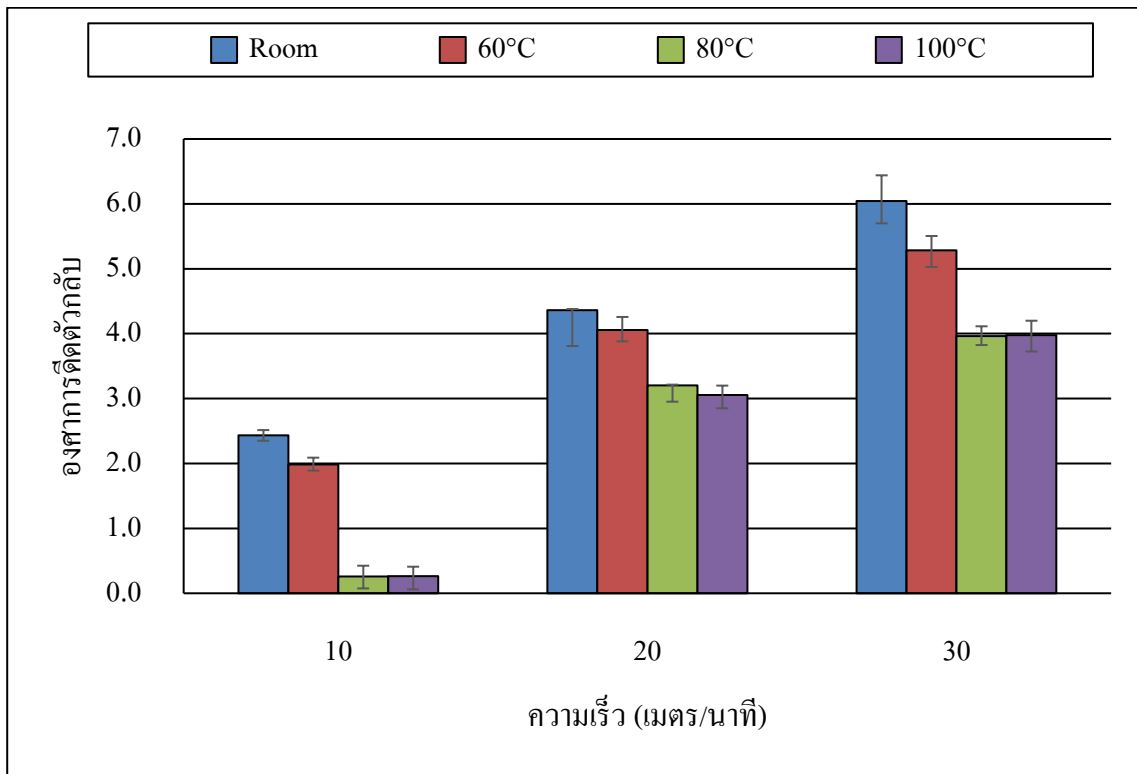
**รูปที่ 4.3** ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ความเร็ว (ก) 10 เมตรต่อนาที (ข) 20 เมตรต่อนาที (ค) 30 เมตรต่อนาที ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่างกัน (ต่อ)

จากรูปที่ 4.3 ที่แสดงกราฟความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ผ่านการตัดขึ้นรูปที่ความเร็วทั้ง 3 ระดับ พบว่าวงกลมกริดของชิ้นงานหลังการตัดมีการเปลี่ยนแปลงในแนวแกนรองสูงที่สภาวะอุณหภูมิขึ้นรูปต่ำ ในขณะที่การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส วงกลมกริดมีการเปลี่ยนแปลงในแนวแกนรองลดลง กล่าวคือ ชิ้นงานที่ผ่านการตัดขึ้นรูปที่สภาวะอุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส มีค่าความเครียดรองลดลงเมื่อเทียบกับการตัดขึ้นรูปที่สภาวะอุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

## 4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 4.2.1 การวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่มีผลต่อการติดตัวกลับ

จากผลการทดลองการติดตัวกลับของวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 ที่ผ่านการตัดขึ้นรูปด้วยภายใต้ตัวแปรที่กำหนดได้แก่ ความเร็วในการตัด และสภาวะอุณหภูมิชิ้นงานในการตัด ซึ่งผลที่ได้นำมาทำการวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่มีผลต่อการติดตัวกลับ ดังนี้



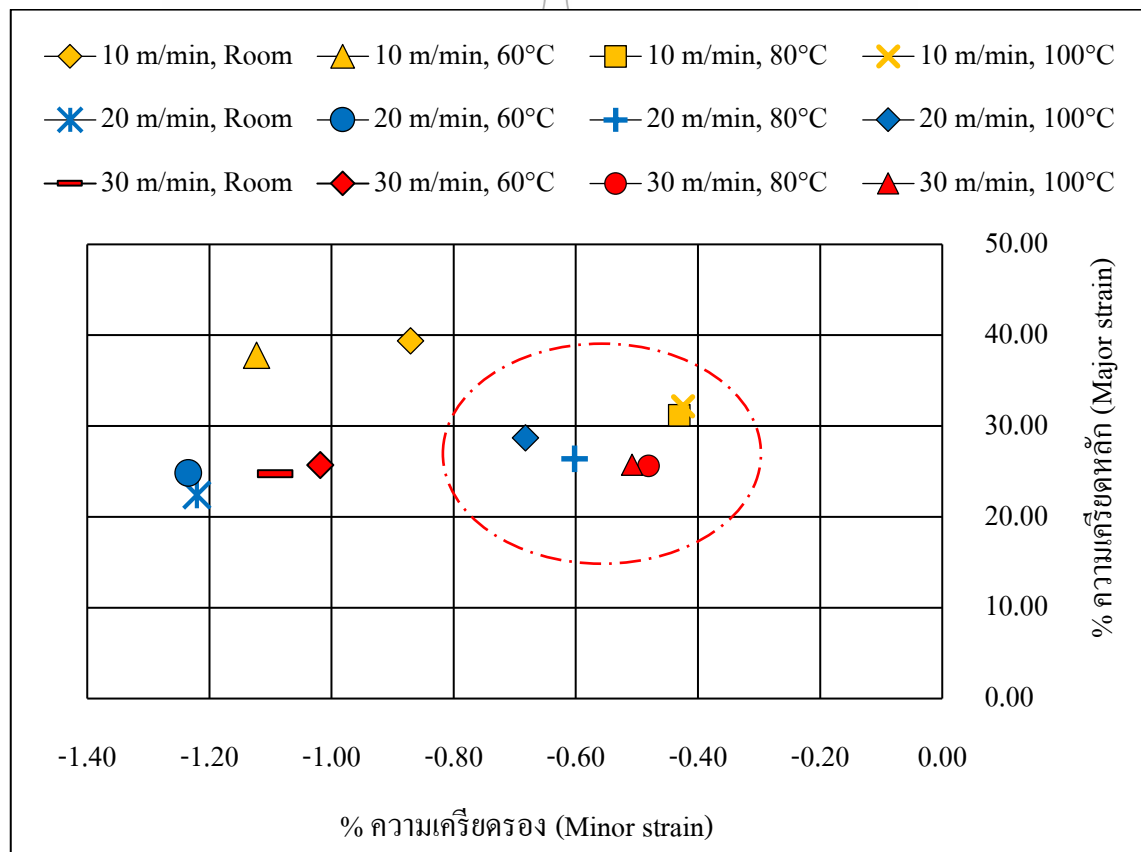
รูปที่ 4.4 แสดงกราฟการบิดตัวกลับของชิ้นงานหลังการดัดขึ้นรูปตัวยูที่ความเร็ว และสภาวะอุณหภูมิแตกต่างกัน

จากผลการทดลองการบิดตัวกลับของชิ้นงานหลังการดัดขึ้นรูปตัวยูที่ความเร็วต่างกัน เมื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ พบว่าการเพิ่มความเร็วในการดัดขึ้นรูปส่งผลให้ค่าการบิดตัวกลับเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เนื่องจากความเร็วในการดัดขึ้นรูปส่งผลให้การเปลี่ยนรูปแบบชั่วคราว (Elastic Deformation) ในเนื้อวัสดุเพิ่มมากขึ้น จากกรณีที่มีความเค้นและความเครียดตกค้างในเนื้อชิ้นงานที่ยังหลงเหลืออยู่ ทำให้เกิดแรงต้านในเนื้อชิ้นงาน ทั้งนี้ความเร็วในการขึ้นรูปที่ช้าช่วยให้ภายในเนื้อชิ้นงานมีเวลากระจายความเครียด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษา M.K. Choi, & H. Huh. ที่ทำการทดลองดัดรูปตัวยูที่ความเร็วพันซ์ 0.07 – 70 เมตรต่อวินาที [6] ฉะนั้นการดัดขึ้นรูปที่ความเร็วต่ำจึงเป็นอีกแนวทางของการแก้ไขปัญหาและช่วยลดกระบวนการเกิดการบิดตัวกลับในกระบวนการดัดขึ้นรูปตัวยูได้ และจากการทดลองที่ความเร็ว 3 ระดับ ความเร็วในการดัดขึ้นรูปที่ 10 เมตรต่อนาที ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าการบิดตัวกลับต่ำที่สุด และจากความเร็วดังกล่าวเมื่อนำมาทดลองภายใต้สภาวะอุณหภูมิชิ้นงานต่างกัน พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ค่าการบิดตัวกลับลดลง การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานมีส่วนที่ช่วยลดความเครียดที่ตกค้างภายในเนื้อเหล็ก [29] เพราะกระบวนการดัด

ขึ้นรูปตัวยูจะเกิดความเค้นอัดที่รัศมีด้านในและผนังของชิ้นงานส่วนด้านนอกก็จะมีความเค้นดึงและความเค้นที่ตกค้างหลงเหลืออยู่ ซึ่งอุณหภูมิที่ให้ค่าการติดตัวกลับต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 80-100 องศาเซลเซียส

#### 4.2.2 การวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่มีผลต่อความเครียด

จากผลการทดลองความเครียดหลัก และความเครียดรองของวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 ที่ผ่านการตัดขึ้นรูปตัวยูภายใต้ตัวแปรที่กำหนดได้แก่ ความเร็วในการตัด และสถานะอุณหภูมิชิ้นงานในการตัด ซึ่งผลที่ได้นำมาทำการวิเคราะห์ผลของตัวแปร ดังนี้



รูปที่ 4.5 แสดงกราฟความเครียดของชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูปตัวยูที่ความเร็ว และสถานะอุณหภูมิตัดต่างกัน

จากรูปที่ 4.5 ที่แสดงกราฟความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ผ่านการตัดขึ้นรูปที่ความเร็วทั้ง 3 ระดับ และอุณหภูมิในการตัด 4 ระดับ พบว่าที่ความเร็วในการตัดขึ้นรูป 10

เมตรต่อนาที ส่งผลให้การยึดตัวในแนวแกนหลักที่บริเวณส่วน โกงด้านนอกสูง ดังจะเห็นได้จากเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักที่มีค่าสูง ฉะนั้นความเร็วในการขึ้นรูปส่งผลต่อความเครียดหลักของชิ้นงานอย่างเห็นได้ชัด จากผลการติดตัวกลับของชิ้นงานที่ความเร็ว 10 เมตรต่อนาที มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการยึดตัวของผิวโกงด้านนอกที่มีการยึดตัวสูง ทำให้ค่าความเครียดหลักสูงขึ้นไปด้วย อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลต่อความเครียดของชิ้นงาน การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานช่วยให้ความเครียดลดลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 80 -100 องศาเซลเซียส ชิ้นงานมีค่าความเครียดรองต่ำ

### 4.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

จากการทดสอบที่การตัดขึ้นรูปด้วยที่ความเร็ว 3 ระดับ คือความเร็วที่ 10, 20, 30 เมตรต่อ นาที และสภาวะอุณหภูมิชิ้นงาน 4 ระดับ คือ อุณหภูมิห้อง, 60, 80, 100 องศาเซลเซียส พบว่าผลการทดลอง การติดตัวกลับของชิ้นงานมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งสำหรับการทดสอบทางสถิติ โดยการกำหนดสมมติฐานดังนี้

$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$  (ผลของการติดตัวกลับมีค่าไม่แตกต่างกันภายใต้การทดลองตามตัวแปรที่กำหนด)

$H_1 : \mu_i \neq \mu_j$  (ผลของการติดตัวกลับมีค่าแตกต่างกันภายใต้การทดลองตามตัวแปรที่กำหนด)

เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติ การติดตัวกลับหลังการตัดขึ้นรูปด้วยที่ความเร็วและสภาวะอุณหภูมิชิ้นงานแตกต่างกัน ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two – Way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลการวิเคราะห์พบว่าค่า P-Value ทั้งสองปัจจัยมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ -level) ดังรูปที่ 4.6 ดังนั้นความเร็วและสภาวะอุณหภูมิชิ้นงานในการตัดขึ้นรูปด้วยส่งผลให้การติดตัวกลับของชิ้นงานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (P-Value 0.00 < 0.05)

Two-way ANOVA: SP-B versus Speed, Tem					
Source	DF	SS	MS	F	P
Speed	2	133.731	66.8654	1859.08	0.000
Tem	3	39.067	13.0224	362.07	0.000
Interaction	6	2.313	0.3854	10.72	0.000
Error	48	1.726	0.0360		
Total	59	176.837			

S = 0.1896    R-Sq = 99.02%    R-Sq(adj) = 98.80%

**Residual Plots for SP-B**

รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบสถิติเรื่องการติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการค้ำขึ้นรูปตัวยูที่สภาวะอุณหภูมิ  
ชิ้นงานต่างกัน





## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองตัดขึ้นรูปตัวยูวีวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 ภายใต้ตัวแปรที่กำหนด ได้แก่ ความเร็วในการตัด และการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน เพื่อศึกษาเกี่ยวกับการความเร็วในการตัดขึ้นรูป และการตัดขึ้นรูปภายใต้สภาวะความร้อนไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส เพื่อลดการติดตัวกลับหลังการตัดขึ้นรูปของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และหาตัวแปรที่ดีที่สุดสำหรับการตัดขึ้นรูปตัวยูวี

การทดลองที่ความเร็วในการตัด 10, 20, 30 เมตรต่อนาที แสดงให้เห็นว่าความเร็วมีผลต่อการติดตัวกลับ และความเครียดของชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูป การเพิ่มความเร็วในการตัดขึ้นรูปส่งผลให้ค่าการติดตัวกลับเพิ่มสูงขึ้น และความเร็วที่ส่งผลให้ค่าการติดตัวกลับน้อยที่สุดคือ 10 เมตรต่อนาที แต่อย่างไรก็ตามที่ความเร็วดังกล่าว ส่งผลให้ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของชิ้นงานมีค่าสูง เนื่องจากมีการยึดตัวในแนวแกนหลักที่บริเวณส่วนโค้งด้านนอกสูง

ในส่วนของการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่แบ่งออกเป็น 4 ระดับ คือ อุณหภูมิห้อง, 60, 80, 100 องศาเซลเซียส มีผลต่อการติดตัวกลับ และความเครียดของชิ้นงานเช่นเดียวกันกับความเร็วในการตัด การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่ 60 องศาเซลเซียส มีผลต่อการช่วยลดการติดตัวกลับในกระบวนการตัดรูปตัวยูวี แต่ยังคงถือว่าไม่มากนัก ส่วนอุณหภูมิที่ช่วยให้การเกิดการติดตัวกลับน้อยลงมากที่สุด และมีค่าการติดตัวกลับเกือบเท่ากับศูนย์อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส

การทดสอบทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าความเร็วในการตัดมีผลต่อการติดตัวกลับของชิ้นงานในการตัดขึ้นรูปตัวยูวีอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 และเช่นเดียวกันกับการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่มีผลต่อการติดตัวกลับของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

จากการทดลองกับตัวแปรทั้งหมดที่กำหนดมาสามารถสรุปว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ช่วยลดการเกิดการติดตัวกลับในกระบวนการตัดขึ้นรูปตัวยูวีคือความเร็วที่ 10 เมตรต่อนาที และอุณหภูมิชิ้นงานที่ชิ้นงานที่ 80-100 องศาเซลเซียส

#### 5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

5.2.1 ควรมีการศึกษาวัสดุผสม หรือวัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่านี้ เนื่องจากจะมีการติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการตัด

5.2.2 การลดความเร็วในการตัดขึ้นรูปอาจทำให้กำลังการผลิตน้อยลง

5.2.3 การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นควรมีการพิจารณาก่อนการนำไปใช้ในกระบวนการ



## บรรณานุกรม

- [1] ญัฐกร แซ่เอี้ยว และคณะ, “การศึกษาพฤติกรรมการดีดกลับของแผ่นเหล็กกล้าความต้านแรงสูงพิเศษ”,การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26, 24 - 27 ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย
- [2] M.K. Choi, & H. Huh, “Effect of punch speed on amount of springback in U-bending process of auto-body steel sheets” Procedia Engineering, Vol.81, 2014, pp.963 – 968.
- [3] J.Lee ,K.Lee ,D.Kim ,H.Choi, B.Kim, “Spring-back and spring-go behaviors in bending of thick plates of high-strength steel at elevated temperature” Computational Materials Science, Vol.100, 2015 pp.76-79.
- [4] L. Wei, L.H –sheng, X.Z.-Wen, L. Gang, BAO. Jun, “Effect of tool temperature and punch speed on hot stamping of ultra high strength steel” Transaction of nonferrous metals society of china, Vol. 22 , 2012, pp.534-541
- [5] มนต์ สติรจินดา. 2540. วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก สหภาพวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หน้า 65-68
- [6] จุลศิริ ศรีงามพ่อง. วิศวกรรมงานแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่นเบือ 1 งตัน. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: งานเอกสารและการพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541. หน้า 5-18.
- [7] ชานนท์ สุขตาอยู่ “และคณะ”, แม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่น. กรุงเทพฯ: สมาคมอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย, 2547. หน้า 49-80.
- [8] ศิริชัย ต่อสกุล. 2554. พื้นฐานเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่นจำกัด (มหาชน)
- [9] William Q. 2010. Tingley III is general manager of Bend Tooling Inc. [Online] Available : <http://www.spoke.com/people/bill-tingley-3e1429c09e597c10039aa916>
- [10] Pines Technology. 2009. Reverse Interlocking Draw Bend Tools. [Online] Available : [http://www.pinestech.com/news\\_reverse\\_interlock\\_draw.htm](http://www.pinestech.com/news_reverse_interlock_draw.htm)

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] George R Winton, 2009. Tube Bending Methods. [Online] Available : [http://www.copper.org/applications/cuni/app\\_syscomp.html](http://www.copper.org/applications/cuni/app_syscomp.html)
- [12] Yu Li Liu, 2011. Effect of Geometry Parameters on Cross-Sectional Distortion of Thin-Walled Rectangular Tube in Rotary-Draw Bending Process. [Online] Available : <http://www.scientific.net/AMR.189-193.2784>
- [13] คงฤทธิ น่วมเจริญ. 2547. “การออกแบบและสร้างเครื่องตัดด้วยระบบไฮดรอลิกส์.” ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [14] กอบบุญ หล่อทองคำ. 2549. **ทฤษฎีการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยการดัดงอ**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : [http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/TEN437/main/elearning\\_lesson/04/main.htm](http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/TEN437/main/elearning_lesson/04/main.htm)
- [15] V. Boljanovic. **Sheet Metal Forming Processes and Die Design**. MADISON AVENUE, NEW YORK 2004
- [16] วารุณี เปรมานนท์ และ พงศ์พันธ์ แก้วดาทิพย์, **แม่พิมพ์โลหะแผ่น**. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2555. หน้า 107-139.
- [17] ธเนศ เมฆฉาย, ชานนท์ สุขดาอยู่ และสมพงษ์ ธีระกานนท์, **พื้นฐานการออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะ**, สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 25 พฤษภาคม 2539, 2539. หน้า 4.1-4.31.
- [18] Naderi, M., Ketabchi, M. , Abbasi, M. and Bleak, W., 2011, Semi hot Stamping as an Improved Process of Hot Stamping, *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 27, pp. 369-376 วิชาดี เมืองพาน, ชาญ ถนัดงาน และ ศิริศักดิ์ หาญชูวงศ์. 2547. การศึกษาพฤติกรรมการตีกลับในการดัดขึ้นรูปตัววีของโลหะแผ่นที่มีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิกโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.
- [19] Yanagimoto, J. and Oyamada, K. , 2005, Springback of High-Strength Steel after Hot and WarmSheet Formings, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 54, pp. 213-216.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] ชงชัย บุรีพันธ์, อิทธิพลของสภาวะการตัดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 ด้วยเลเซอร์ที่มีผลต่อความหยาบผิว, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [21] Y.E. Ling a , H.P. Lee b , \* and B.T. Check b , (Abstract of “Finite element analysis of springback in L-bending of sheet metal ”, Journal of Materials Processing Technology (Electronic) Vol.168, 2005. pp. 296 – 302), Available : [http:// www.elsevier.com / locate/ jmatprotec](http://www.elsevier.com/locate/jmatprotec) (30 June 2013).
- [22] [1.12] TOYO INK (THAILAND) CO., LTD. , “ แนะนำการใช้งาน S-25 และ 696 ED-PG”, **Technical Information** , TC13/580, 2556 .
- [23] กระทรวงอุตสาหกรรม, **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีการทดสอบสีวาร์นิชและวัสดุที่เกี่ยวข้อง**, มอก.285 เล่มที่ 19-2525. พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม, 2541. หน้า 1-2.
- [24] วารุณี เปรมานนท์ และอรจิรา เดียวานิชย์, **วัสดุแม่พิมพ์และชิ้นงาน**. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2554. หน้า 213-260.
- [25] เทอดศักดิ์ อยู่ฤทธิ, วารุณี เปรมานนท์, พงศ์พันธ์ แก้วดาทิพย์, สุทัศน์ ทิพย์ปรีภมาศ และคมกริช ละวรรณวงษ์, 2550, “การลดการบิดตัวกลับของโลหะแผ่นในการตัดแบบตัวยู”, การประชุมวิชาการข่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2550, 24-26 ตุลาคม, โรงแรมรอยัลภูเก็ต ซิตี้, จ.ภูเก็ต.
- [26] นายภาคภูมิ ตรีณาวงษ์ นายสรชัย สายกระสุน และนายสมเกียรติ สภาพโชติ. 2552. “การลดการสึกหรอของแม่พิมพ์โลหะด้วยการสร้างแผ่นฟิล์ม.” ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [27] ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเร้ง “และคณะ”, “อิทธิพลของเคลือบเรซิ่นที่Kมีผลต่อการบิดตัวกลับในการตัดงอรูปยูเหล็กกล้าความแข็งแรง”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 21, 17-19 ตุลาคม 2550, ชลบุรี, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [28] ไพสิน ใจเที่ยง, และ คิลก ศรีประไพ. **The Study Springback of Advanced High Strength Steel Sheet after Warm and Hot Forming**. [Online]. Available : [http://kukr.lib.ku.ac.th/db/BKN/search\\_detail/result/13121](http://kukr.lib.ku.ac.th/db/BKN/search_detail/result/13121)
- [29] L. Wang , G. Huang, H. Zhang , Y. Wang, L. Yina, “Evolution of springback and neutral layer of AZ31B magnesium alloy V-bending under warm forming conditions” *Journal of material processing technology*, Vol. 213, 2013, pp. 844-850



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง





ตารางที่ ก.1 ผลการวัดค่าการดีดตัวของชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูปด้วยที่ความเร็ว และสภาวะ

อุณหภูมิคัดต่างกัน

ตัวแปร		ชั้นที่					เฉลี่ย
ความเร็ว	อุณหภูมิ	1	2	3	4	5	
10 เมตร/นาที	Room	2.505	2.395	2.350	2.515	2.415	2.436
	60°C	1.985	2.035	1.890	2.090	1.920	1.984
	80°C	0.310	0.425	0.075	0.165	0.325	0.260
	100°C	0.120	0.060	0.350	0.410	0.390	0.266
20 เมตร/นาที	Room	4.315	4.380	4.690	3.810	4.605	4.360
	60°C	3.921	4.258	3.882	4.241	3.981	4.057
	80°C	3.282	3.258	3.314	3.215	2.952	3.204
	100°C	2.851	3.114	3.200	3.138	2.980	3.057
30 เมตร/นาที	Room	5.785	5.700	6.200	6.440	6.100	6.045
	60°C	5.505	5.100	5.028	5.371	5.424	5.286
	80°C	3.825	3.910	4.020	3.940	4.114	3.962
	100°C	4.098	4.200	3.725	3.892	3.971	3.977

ความเร็ว	ตัวแปร		ชั้นที่			เฉลี่ย	ความเครียด (%)	
	อุณหภูมิ	แนวแกนวัด	1	2	3			
10 เมตร/นาที่	Room	Major	3.644	3.734	3.745	3.707	39.398	
		Minor	2.475	2.482	2.478	2.478	-0.870	
	60°C	Major	3.641	3.654	3.650	3.648	37.789	
		Minor	2.458	2.476	2.483	2.472	-1.123	
	80°C	Major	3.393	3.418	3.437	3.416	31.216	
		Minor	2.492	2.490	2.486	2.489	-0.431	
	100°C	Major	3.440	3.448	3.458	3.448	32.162	
		Minor	2.492	2.490	2.486	2.489	-0.424	
	20 เมตร/นาที่	Room	Major	3.111	3.169	3.104	3.128	22.405
			Minor	2.470	2.475	2.464	2.470	-1.221
		60°C	Major	3.215	3.198	3.201	3.205	24.832
			Minor	2.475	2.471	2.462	2.469	-1.234
80°C		Major	3.292	3.322	3.152	3.255	26.400	
		Minor	2.476	2.492	2.487	2.485	-0.602	
100°C		Major	3.482	3.357	3.154	3.331	28.698	
		Minor	2.485	2.487	2.477	2.483	-0.682	
30 เมตร/นาที่		Room	Major	3.198	3.211	3.199	3.202	24.762
			Minor	2.475	2.469	2.474	2.473	-1.093
		60°C	Major	3.212	3.200	3.286	3.233	25.702
			Minor	2.466	2.478	2.480	2.475	-1.019
	80°C	Major	3.161	3.247	3.285	3.231	25.650	
		Minor	2.478	2.495	2.491	2.488	-0.481	
	100°C	Major	3.109	3.298	3.294	3.234	25.733	
		Minor	2.494	2.482	2.486	2.487	-0.508	



ภาคผนวก ข

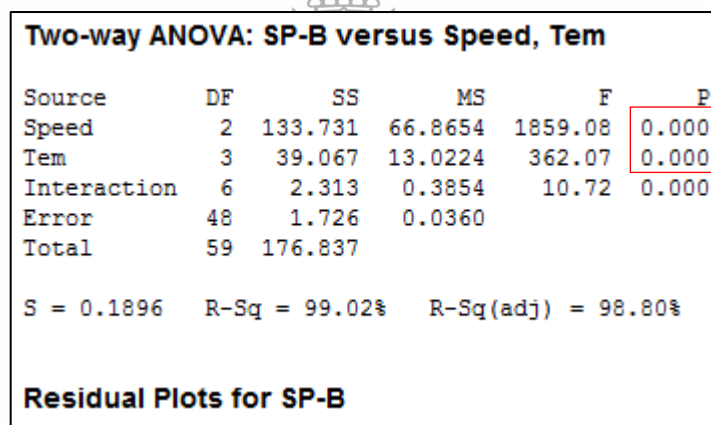
การทดสอบทางสถิติ

## ข.1 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดลองตัดขึ้นรูปตัววัสดุ S355 ภายใต้ปัจจัยความเร็ว 3 ระดับ และสภาวะอุณหภูมิชิ้นงาน 4 ระดับ พบว่าผลการทดลอง การตัดตัวกลับของชิ้นงานมีค่าแตกต่างกันตามตัวแปรที่กำหนด ดังนั้นในการวิเคราะห์ทางสถิติจึงใช้ การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two – Way ANOVA) ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยตั้งสมมติฐานการทดสอบดังนี้

$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_a$  (ผลของการตัดตัวกลับมีค่าไม่แตกต่างกันภายใต้การทดลองตามตัวแปรที่กำหนด)

$H_1 : \mu_i \neq \mu_j$  (ผลของการตัดตัวกลับมีค่าแตกต่างกันภายใต้การทดลองตามตัวแปรที่กำหนด)



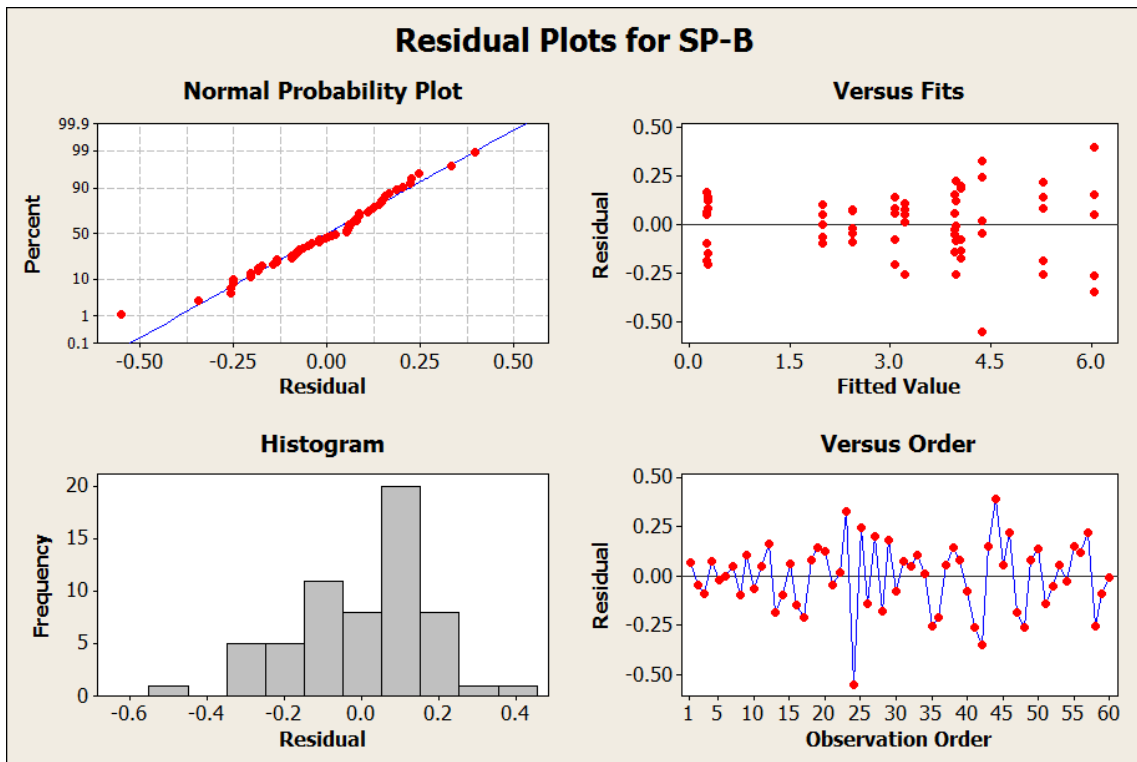
Source	DF	SS	MS	F	P
Speed	2	133.731	66.8654	1859.08	0.000
Tem	3	39.067	13.0224	362.07	0.000
Interaction	6	2.313	0.3854	10.72	0.000
Error	48	1.726	0.0360		
Total	59	176.837			

S = 0.1896    R-Sq = 99.02%    R-Sq(adj) = 98.80%

**Residual Plots for SP-B**

รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบสถิติเรื่องการตัดตัวกลับของชิ้นงานหลังการตัดขึ้นรูปตัววัสดุที่สภาวะอุณหภูมิชิ้นงานต่างกัน

ผลการวิเคราะห์พบว่าค่า P-Value ของทั้งปัจจัยมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$  -level) ดังนั้นจึงปฏิเสธ สมมติฐานหลัก นั่นคือปัจจัยความเร็วและสภาวะอุณหภูมิชิ้นงานในการตัดขึ้นรูปตัววัสดุส่งผลให้การตัดตัวกลับของชิ้นงานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (P-Value 0.00 < 0.05) ในทางสถิติ



รูปที่ ข.2 กราฟ residual plots

- Normal probability plot- บนกราฟเรียงตัวเป็นเส้นตรงแสดงว่าค่าเศษเหลือมีการกระจายแบบปกติ
- Residuals versus the fitted values- ลักษณะกราฟมีการกระจายแบบสุ่มสม่ำเสมอรอบเส้นศูนย์ แต่มีบางจุดของข้อมูลที่ไม่สม่ำเสมอ
- Histogram of the residuals – มีจุดโค้งของข้อมูลหลายจุด มีข้อมูลผิดปกติหรือการกระจายตัวที่ไม่ปกติ ทำให้ฮิสโตแกรมไม่สมมาตร
- Residuals versus order- ลักษณะกราฟมีการกระจายตัวและไม่แสดงแนวโน้มหรือรูปแบบใดๆ ของข้อมูล

ภาคผนวก ก  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่







# การประชุมวิชาการราชมณฑลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ MTC2016

Rajamangala Manufacturing & Management of Technology Conference

**การประชุมวิชาการราชมณฑลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ**

**Rajamangala Manufacturing & Management of Technology Conference**

**Manufacturing Technology toward Industry 4.0**

**28 - 29 July 2016, Phranakhon Si Ayutthaya**

## **Conference Topics**

**Production and Operation Management**

**Manufacturing Engineering**

**Operations Research**

**Materials Science and Applications**

**Supply chain & Logistics**

**Other Related fields**



TECH GROUP



### ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ศาสตราจารย์ ดร.สัมพันธ์ ฤทธิเดช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.กัณวรัช พลูประาษฎ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี เปรมานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.บพิศ บุปผโชติ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุศล พร้อมมูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัมปนาท ศิริเวทิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สรนาถ ไรภู	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โรจนโรวรรณ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทรมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชาญ ช่วยพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเรือง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ วรรณศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พันธุ์เดช นนท์แสงโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนุรักษ์ศักดิ์ พรพุดศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นทีชัย ผัสดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เชษฐ ฤทธิยัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จตุพร ใจดำรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูไฮติ สนิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พัชระ กัญจนกาญจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จักรินทร์ น่วมทิม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ





ผู้ช่วยศาสตราจารย์ร่ำฟ้า เจริญยศ

ดร.รัชนี ฮาโตะ

ดร.อนินท์ มีมนต์

ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ

ดร.สมพงษ์ พิริยานต์

ดร.จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร

ดร.ฤทธิชัย เกาเนียม

ดร.คมพันธ์ ชมสมุทร

ดร.คมกริช ละวรรณวงษ์

KMITG2016

การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ  
28-29 กรกฎาคม 2559 พระนครศรีอยุธยา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์



## สารบัญ

บทความรับเชิญ	หน้า
การประยุกต์ใช้ PCD ในแม่พิมพ์ตัด Nobuhiro Koga Nippon Institute of Technology, JAPAN	1
เทคโนโลยีการผลิตและการจัดการเพื่อรองรับอุตสาหกรรม 4.0 ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเร็จ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	10

บทความวิจัย Manufacturing Engineering	หน้า
MFE01 Role of Clamping force upon Springback Behavior of High Strength Steel Sheet คมกริช ละววรรณงษ์	16
MFE02 การศึกษาเวลาการขัดผิวชิ้นส่วนแม่พิมพ์พลาสติกให้เป็นแบบกระจกด้วยกรรมวิธีกัดโลหะด้วยไฟฟ้า พัชระ กัญจนกาญจน์ สัญญา คำจริง และชูศักดิ์ ภูเมือง	21
MFE03 ศึกษาอิทธิพลความร้อนที่มีผลต่อการหดตัวของอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อม MIG จักรินทร์ น่วมทิม และนรินทร์ แก่นหยวก	28
MFE04 การศึกษาการขึ้นรูปทรงถ้วยของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS 304 ชูไธติ สนิ ยงยุทธ ตุลยกุล จุฬาลักษณ์ โรจนานุกุล ชัยมงคล ชูเชิด และณัฐพงศ์ อมรการ	33
MFE05 การลดการติดตัวกลับของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 ในกระบวนการตัดรูปด้วย สมคิด แสนอุบล ศิริชัย ต้อสกุล และกฤติธรณ์ นามสง่า	39
MFE06 สภาวะที่เหมาะสมในการกลึงอะลูมิเนียมหล่อแข็งของแข็ง 6061 โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตบสองและการสึกหรอของเม็ดมีด สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ ชาตรี หอมเขียว วรธนพร ชิววุฒิพงศ์ และจุฬาลักษณ์ โรจนานุกุล	45
MFE07 การวิเคราะห์เทคนิคการเพิ่มคุณภาพชิ้นงาน ด้วยวิธีประยุกต์ใช้แหวนจิกในงานแม่พิมพ์ตัดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ณัฐศักดิ์ พรพูนศิริ และคมกริช ละววรรณงษ์	55
MFE08 การประยุกต์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์หาระยะช่องว่างคมตัดที่เหมาะสม ในการตัดชิ้นงานที่มีค่าความหนาต่างกัน ณัฐศักดิ์ พรพูนศิริ พงศกร หลีตระกูล และคมกริช ละววรรณงษ์	63
MFE09 การจำลองและการวิเคราะห์การไหลของน้ำพลาสติกในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน สายรัดห้ามเลือด พิทักษ์พงษ์ บุญประสม	71



### 1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าการตัดตัวกลับของชิ้นงานหลังขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นเป็นปัญหาหลักที่พบกันเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะในกระบวนการตัดขึ้นรูป เนื่องจากในช่วงการเปลี่ยนรูปร่างไม่ถาวร หรือช่วงการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation) วัสดุจะเกิดความเค้นดึงสูงสุดที่ขอบด้านนอกของรัศมีการตัด และเกิดความเค้นอัดสูงสุดที่ผิวโค้งด้านในของรัศมีการตัด และแรงจากการตัดขึ้นรูปจะเกินค่าความแข็งแรงครากทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวร แต่เมื่อแม่พิมพ์เปิดออกยังคงมีส่วนที่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างไม่ถาวร ทำให้พยายามคืนตัวแต่ไม่สามารถกระทำได้ทั้งหมด เนื่องจากถูกยึดไว้ด้วยส่วนที่เปลี่ยนรูปร่างไปแล้วทางด้านนอก ดังนั้นจึงเกิดการคืนตัวได้บางส่วนหรือการตัดตัวกลับนั่นเอง ซึ่งการการตัดตัวกลับนี้จะเกิดได้มากกับวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง ได้มีการศึกษาและพัฒนามากมายเพื่อแก้ปัญหาการตัดตัวกลับของชิ้นงาน จากการศึกษาของ ณัฐกร และคณะ [1] ที่ศึกษาพฤติกรรมการตัดกลับของเหล็กกล้าความต้านแรงสูงพิเศษโดยกระบวนการตัดด้วยแม่พิมพ์คู่ด้วยวัสดุพบว่าวัสดุที่มีค่าความต้านแรงครากสูงจะส่งผลให้การตัดตัวกลับสูงขึ้นด้วย J. Lee, et al [2] ได้ทำการศึกษาโดยให้อุณหภูมิที่แม่พิมพ์ พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อชิ้นงานที่จะช่วยลดการเกิดการตัดตัวกลับที่ชิ้นงานและช่วยลดความเครียดตกค้างในเนื้อเหล็ก M.K. Choi, & H. Huh [3] ได้ทำการศึกษาโดยใช้ความเร็วของฟันที่แตกต่างในการตัดขึ้นรูปและเหล็กคนละชนิดพบว่าความเร็วที่ต่ำส่งผลให้ชิ้นงานมีอัตราความเครียดที่ลดลงจึงทำให้ชิ้นงานเกิดการตัดตัวกลับลดลง

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาเกี่ยวกับการความเร็วในการตัดขึ้นรูป และการตัดขึ้นรูปภายใต้สภาวะความร้อนไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส เพื่อลดการตัดตัวกลับหลังการตัดขึ้นรูปของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

### 2. สมมติฐานในการทดลอง

การตัดตัวกลับของชิ้นงานหลังขึ้นรูปด้วย เป็นอีกปัญหาที่สำคัญ โดยเฉพาะกระบวนการป้อนขึ้นรูปด้วยวิธีหลักการทำงานแบบหนึ่งจังหวะ (Single action) ซึ่งจะทำให้ความเค้นดึง และความเค้นอัดตกค้างในเนื้อวัสดุสูงทำให้ชิ้นงานมีการตัดตัวกลับหลังการขึ้นรูป ซึ่งการ

แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้อาจทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การปรับความเร็วในการขึ้นรูป การเพิ่มจำนวนครั้งในการขึ้นรูป การลดความแข็งแรงของชิ้นงานก่อนการขึ้นรูป และการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานระหว่างการขึ้นรูป และในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการปรับความเร็วในการขึ้นรูป และการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานระหว่างการขึ้นรูป เพื่อศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปด้วยวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 โดยมีเงื่อนไขในการทดลองดังตารางที่ 1 วัสดุ S355 จัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ซึ่งผลการทดสอบส่วนผสมทางเคมีแสดงดังตารางที่ 2

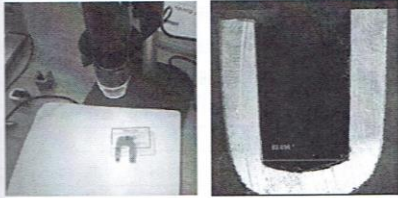
ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลอง

รายการ	เงื่อนไข
เครื่องมือขึ้นรูป	110 ตัน ชนิด แมคคาทรอนิกส์ (Amada)
วัสดุ	S355 ขนาด 25x150x หนา 5 mm
ความเร็วขึ้นรูป	10, 20, และ 30 เมตร/นาที
ความร้อน	อุณหภูมิห้อง, 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส

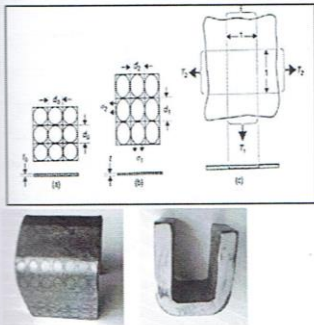
ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมี

Fe%	C%	Mn%	P%	S%	Si%	Cu%	N%
95.8	0.25	1.6	0.35	0.35	0.55	0.55	0.55

ชิ้นงานหลังการทดลองตัดขึ้นรูปตามตัวแปรที่กำหนดจะถูกนำมาวัดองศาการตัดตัวกลับด้วยกล้อง Microscope ที่ประกอบด้วยกล้องฟิวเตอร์ ดังรูปที่ 1 และวัดความเครียดจากการยืดตัวของชิ้นงานบริเวณรัศมีการตัด โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ห่วงกลมกริดจากการเปลี่ยนรูปร่างของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of sheet in plane stress) โดยใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูปร่าง ดังรูปที่ 2 ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปร่างที่ความหนา  $t_0$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d_0$  หรือตารางขนาด  $d_0$  ดังแสดงในรูปที่ 2 (a) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปร่างจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนหลัก (Major) คือ  $d_1$  แกนรอง (Minor) คือ  $d_2$  ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังแสดงในรูปที่ 2 (b) ส่วนความหนา คือ  $t$  ตามที่กรณีแสดงในรูปที่ 2 (c) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปร่างคือ  $\sigma_1$  และ  $\sigma_2$



รูปที่ 1 การวัดองศาการบิดตัวกลับด้วยกล้อง Microscope



รูปที่ 2 การเปลี่ยนรูปร่างของวงกลมกริด [4]

การเปลี่ยนรูปร่างของวงกลมกริดบนผิวชิ้นงานสามารถนำมาคำนวณความเครียดหลักและความเครียดรองได้ ดังสมการที่ 1 และ 2 [4]

ค่าความเครียดหลัก (Major strain)

$$\epsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (1)$$

ค่าความเครียดรอง (Minor strain)

$$\epsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} \quad (2)$$

### 3. ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

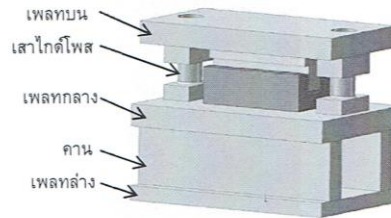
#### 3.1 การออกแบบแม่พิมพ์

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองดัดรูปตัวยู แสดงดังรูปที่

3 ประกอบด้วย ดาย, ฟันซ์, เฟลทบนและเฟลทล่าง การ

ประกอบแม่พิมพ์เป็นการประกอบแบบสวมพอดีในชิ้นส่วนที่ต้องประกอบกันและมีการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนโกดท์โพลและโกดท์บูช อุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบแม่พิมพ์เลือกใช้เป็นชิ้นส่วนมาตรฐาน ในการวางชิ้นงานและนำออกจากแม่พิมพ์โดยง่าย

วัสดุที่ใช้ผลิตแม่พิมพ์ดัดรูปตัวยู ชิ้นส่วนเฟลททั้ง 2 ได้แก่ แผ่นเฟลทบน, แผ่นเฟลทล่างและ ชุดPunch และชุด Die ผลิตจากเหล็กกล้าเครื่องมือ S50C, Die&Punch ผลิตจากเหล็กกล้า SKD11 และผ่านการรมวิธีชุบแข็งทั้งชิ้น (Full hardening) จนมีค่าความแข็ง 58 -60 HRC



รูปที่ 3...ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ดัดรูปตัวยู

#### 3.2 การเตรียมชิ้นงาน

ก่อนการทดลองดัดรูปตัวยูชิ้นงานขนาด 25 x 150 มิลลิเมตร ถูกนำมาสร้างลายวงกลมกริดบนผิวชิ้นงานโดยใช้ไฟฟ้าและน้ำยาอิเล็กโทรไลต์เป็นตัวสร้างลายวงกลมกริด ขนาด 2.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ชิ้นงานหลังสร้างวงกลมกริด

#### 3.3 การทดลอง

ในส่วนของการทดลองโดยเริ่มจากการติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องปั๊มขึ้นรูปแมคคานิค 110 ตัน ดังรูปที่ 5 ซึ่งการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกัน ส่วนแรก





การลดการดัดตัวกลับของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 ในกระบวนการ  
ดัดรูปตัวยู  
Reduction of the Springback of High strength Steel S355  
in U-bending process

สมคิด แสนอุบล<sup>1\*</sup> ศิริชัย ท่อสกุล<sup>2</sup> กฤติชนัน นามสง่า<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
E-mail: somkid\_sanubol@hotmail.com\*

Somkid Sanubol<sup>1\*</sup>, Sirichai Torsakul<sup>2</sup>, Kittitorn Namsanga<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology  
Thanyaburi, Phatumthani 12110  
E-mail: somkid\_sanubol@hotmail.com\*

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการลดการดัดตัวกลับหลังการดัดรูปตัวยูของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง S355 หนา 5 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองที่ความเร็วในการดัดขึ้นรูปที่ 10, 20 และ 30 เมตรต่อนาที และการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานระหว่างการดัดขึ้นรูปที่ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าความเร็ว และการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานในการดัดขึ้นรูปมีผลต่อค่าการดัดตัวกลับอย่างมีนัยสำคัญ ความเร็วที่ทำให้การดัดตัวกลับลดลงมากที่สุดคือ 10 เมตรต่อนาที มีค่าการดัดตัวกลับ 2.44 องศา และการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่ 80-100 องศาเซลเซียส ทำให้การดัดตัวกลับของชิ้นงานลดลงเกือบเท่ากับศูนย์ การลดความเร็วในการดัดขึ้นรูป และการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานระหว่างการดัดขึ้นรูปช่วยลดการดัดตัวกลับและลดความเครียดของชิ้นงานที่มีความแข็งแรงสูง

คำหลัก กระบวนการดัดขึ้นรูป, การดัดตัวกลับ, เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

**Abstract**

The purpose of this analysis is to study the reduction in springback action after U-bending of high strength steel grade S355 into U-bending. The test speed in bending die was at 60, 80, and 100 meter/minute with heat temperature at 60, 80, and 100 C during bending process. The test revealed that speed and heat volume used during bending process affected springback action critically. The speed that reduced the most springback action is at 10 meter/min with springback value at 2.44 degree. Heat temperature at 80-100 C reduced the springback action to almost 0. Reducing speed and providing heat temperature during bending helped reduce the springback action and stress of workpiece that has high strength.

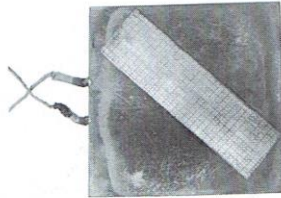
**Keywords:** Bending process, Springback, High strength steel



เป็นการทดสอบที่ความเร็วในการป้อนขึ้นรูปต่างกัน เพื่อให้ได้ความเร็วที่ดีที่สุด ส่วนที่สองเป็นการทดลองภายใต้อุณหภูมิที่ต่างกันโดยใช้ความเร็วที่ดีที่สุดจากการทดลองในส่วนแรก โดยการทดลองในส่วนที่สองนี้จะให้ความร้อนแก่ชิ้นงานด้วย ฮีตเตอร์ 1500 วัตต์ ดังรูปที่ 6 โดยเมื่ออุณหภูมิจากการเย็นตัวในอากาศ 15 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5 การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องปั๊ม

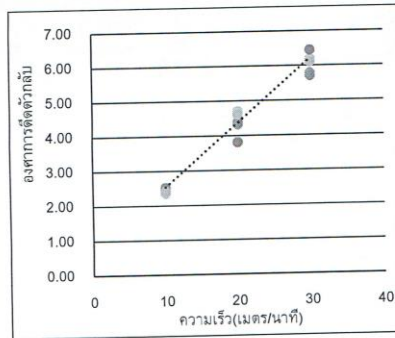


รูปที่ 6 การให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน

#### 4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

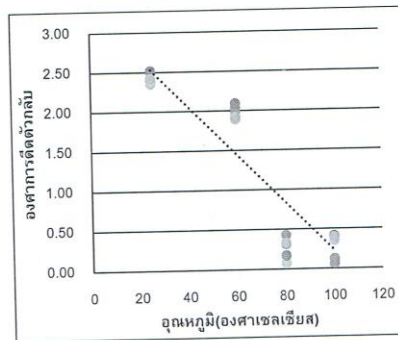
จากการทดลองตัดรูปด้วยชิ้นงานที่ความเร็วในการตัด 3 ระดับนั้น พบว่าความเร็วในการตัดมีผลต่อการติดตัวกลับของชิ้นงาน ดังรูปที่ 7 ที่ความเร็วสูงสุด 30 เมตร/นาที ชิ้นงานมีค่าการติดตัวกลับสูงสุด ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.05 องศา ค่าการติดตัวกลับลดลงเมื่อความเร็วในการขึ้นรูปเท่ากับ 20 เมตร/นาที โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.36 องศา และที่ความเร็วในการขึ้นรูป 10 เมตร/นาที

ชิ้นงานมีค่าการติดตัวกลับต่ำสุด เท่ากับ 2.44 องศา ความเร็วในการตัดสูงซึ่งส่งผลให้การเปลี่ยนรูปแบบชั่วคราว (Elastic Deformation) ในเนื้อวัสดุเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 7 การติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการตัดรูปด้วยความเร็วต่างกัน

จากการทดลองที่ความเร็วที่ต่างกันพบว่าความเร็วที่ส่งผลให้เกิดการติดตัวกลับของชิ้นงานน้อยที่สุดคือ 10 เมตร/นาที และจากการทดลองตัดรูปด้วยภายใต้อุณหภูมิที่ต่างกันที่ความเร็ว 10 เมตร/นาที พบว่าการติดตัวกลับลดลงเมื่อมีการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน ดังรูปที่ 8 ซึ่งการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 80 และ 100 องศาเซลเซียส การติดตัวกลับของชิ้นงานลดลงเกือบจะเท่ากับศูนย์



รูปที่ 8 การติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการตัดรูปด้วยที่สภาวะ



เมื่อทำการตัดรูปด้วยวิธีระเหิดความ (ANOVA) ที่ระ ความเร็วแตกต่างกันอย่าง หรือ P-Value (0.00 < 0.05) รูปด้วยภายใต้ อุณหภูมิที่แตกต่างกันมีนัยสำคัญที่ 10

One-way ANOVA:

Source	DF	SS
Speed	2	35.88
Error	12	3.16
Total	14	39.05

F = 0.9238 R-Sq =

Level	N	Mean
10	5	2.0260
20	5	4.9600
30	5	5.7450

pooled StDev = 0.

รูปที่ 9 ผลการท

One-way ANOVA: SI

Source	DF	SS
TEMPERATURE	3	11
Error	16	0
Total	19	11

F = 0.2263 R-Sq =

Level	N	Mean
80	5	2.2260
100	5	1.8840
120	5	0.2040

pooled StDev = 0.2

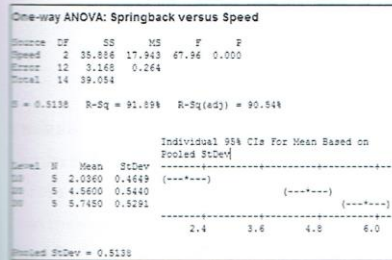
รูปที่ 10 ผลการ ท

จากการ นอกของการ Strain) และค:

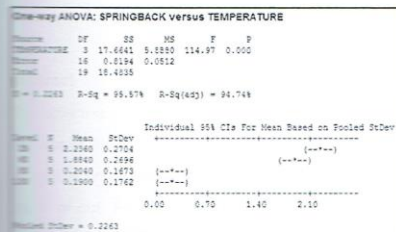


อุณหภูมิต่างกัน

เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติ การติดตัวกลับหลังการตัดรูปด้วยที่ความเร็วแตกต่างกัน ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One - Way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าการตัดรูปด้วยความเร็วแตกต่างกันส่งผลให้การติดตัวกลับของชิ้นงานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ดังรูปที่ 9 ค่า P หรือ P-Value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (P-Value  $0.00 < 0.05$ ) เช่นเดียวกับการติดตัวกลับหลังการตัดรูปด้วยภายใต้อุณหภูมิแตกต่างกัน ผลทางสถิติพบว่าทำให้ความร้อนแก่ชิ้นงานส่งผลให้การติดตัวกลับแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (P-Value  $0.00 < 0.05$ ) ดังรูปที่ 10



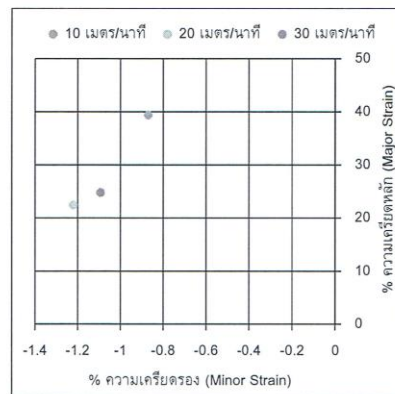
รูปที่ 9 ผลการทดสอบสถิติเรื่องการติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการตัดรูปด้วยที่ความเร็วต่างกัน



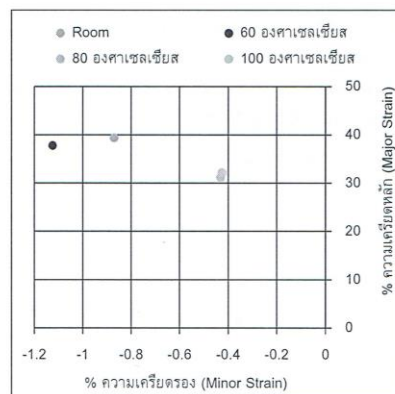
รูปที่ 10 ผลการทดสอบสถิติเรื่องการติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการตัดรูปด้วยที่สภาวะอุณหภูมิต่างกัน

จากการวัดการยึดตัวของวงกลมกิริบริเวนครีมีผลของการตัด พบว่าค่าความเครียดหลัก (Major Strain) และความเครียดรอง (Minor Strain) มีค่าแตกต่างกัน

กัน ดังรูปที่ 11 การตัดรูปด้วยที่ความเร็ว 20 เมตร/นาที มีความเครียดหลักต่ำสุดเท่ากับ 22.40 และมีความเครียดรองเท่ากับ -1.22 ขณะที่การใช้ความเร็ว 10 เมตร/นาที มีความเครียดหลักสูงสุด 39.39 และมีความเครียดรองเท่ากับ -0.87 อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 80 -100 องศา ช่วยให้ความเครียดลดลง ดังรูปที่ 12



รูปที่ 11 ความเครียดของชิ้นงานหลังการตัดรูปด้วยที่ความเร็วต่างกัน



รูปที่ 12 ความเครียดของชิ้นงานหลังการตัดรูปด้วยที่สภาวะอุณหภูมิต่างกัน



## 5. สรุป

จากการทดลองใช้ความเร็วในการตัดรูปด้วย 3 ระดับนั้น พบว่าการลดความเร็วในการตัดรูปด้วยช่วยให้การตัดตัวกลับหลังการตัดลดลง โดยความเร็วที่ทำให้ค่าการตัดตัวกลับลดลงมากที่สุดคือ 10 เมตรต่อนาที อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส เป็นอีกวิธีที่ช่วยลดการตัดตัวกลับของชิ้นงาน และยังช่วยลดความเครียดของชิ้นงานที่มีความแข็งแรงสูง

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ขอบุคคลภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐกร แซ่เฮี้ยว และคณะ, "การศึกษาพฤติกรรมการตัดกลับของแผ่นเหล็กกล้าความต้านแรงสูงพิเศษ", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26, 24 - 27 ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย
- [2] J.Lee ,K.Lee ,D.Kim ,H.Choi, B.Kim, "Spring-back and spring-go behaviors in bending of thick plates of high-strength steel at elevated temperature" Computational Materials Science, Vol.100, 2015 pp.76-79.
- [3] M.K. Choi, & H. Huh, "Effect of punch speed on amount of springback in U-bending process of auto-body steel sheets" Procedia Engineering, Vol.81, 2014, pp.963 – 968.
- [4] Z. Marciniak, J.L. Duncan, S.J. Hu, "Mechanics of Sheet Metal Forming" Butterworth-Heinemann, 2002. PP 30-44