



รายงานการวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของรูปทรงชิ้นงานต่อความสัมพันธ์ระหว่าง
การดีดกลับกับความเครียดในกระบวนการดัดโลหะแบบอัด

Influence of Workpiece Shapes on the Relationships between
Springback and Strain in Compression Bending Process

ผศ.ไพฑูรย์ พูลสุขโข หัวหน้าโครงการ
ผศ.สมชาย เอี่ยมเจริญ ผู้ร่วมวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
งบประมาณประจำปี พ.ศ. 2556



รายงานการวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของรูปทรงชิ้นงานต่อความสัมพันธ์ระหว่าง
การติดกลับกับความเครียดในกระบวนการตัดโลหะแบบอัด

ผศ.ไพฑูรย์ พูลสุขโข หัวหน้าโครงการ
ผศ.สมชาย เอี่ยมเจริญ ผู้ร่วมวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
งบประมาณประจำปี พ.ศ. 2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของรูปทรงชิ้นงานต่อความสัมพันธ์ระหว่างการติดกลับกับความเครียดในกระบวนการตัดโลหะแบบอัด โดยศึกษารูปทรงชิ้นงาน 3 รูปแบบ ได้แก่ เหล็กท่อกลอง เหล็กแผ่นเรียบ และ เหล็กเส้น ตามมาตรฐาน DIN ทำการดัดมุม 30, 60 และ 90 องศา โดยวิเคราะห์ค่าการติดตัวกลับ ความเครียดหลัก ความเครียดรอง และความเครียดเทียบเท่า ของชิ้นงาน ผลการทดลองพบว่าชิ้นงานท่อกลองมีค่าการติดตัวกลับน้อยที่สุด และชิ้นงานแผ่นบางเกิดการติดตัวกลับมากที่สุด ส่วนค่าความเครียดเทียบเท่าที่มุม 90 องศา ตรงบริเวณกึ่งกลางส่วนโค้งด้านในและด้านนอก ของการดัดเหล็กท่อกลองมีค่าน้อยสุด เท่ากับ 0.117 และ 0.371 และมากที่สุดได้แก่เหล็กแผ่นเรียบ มีค่า 0.320 และ 0.386 สามารถสรุปผลได้ว่า ความเครียดเทียบเท่าด้านนอกมีค่ามากกว่าด้านใน เนื่องจากการยืดตัว ตามแนวยาวของวัสดุ และองศาในการดัดที่เพิ่มขึ้นค่าความเครียดเทียบเท่าก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น

คำหลัก การติดตัวกลับ, ความเครียดหลัก, ความเครียดรอง, ความเครียดเทียบเท่า



Abstract

This research is to study the Influence of Workpiece Shapes on the Relationships between Springback and Strain in Compression Bending Process by studying 3 types of work piece: pipe steel, flat sheet, and rod according to DIN standard which were bent at the angle of 30, 60, and 90 degree. Springback, major stain, minor stain, and equivalent strain of the work piece were analyzed. The experiment revealed that pipe steel work piece had the lowest springback and the flat sheet workpiece has highest spring back. The equivalent strain at the angle of 90 degree at the middle of the curve part inside and outside the pipe steel was lowest at 0.117 and 0.371 respectively. Flat sheet had the highest value of 0.320 and 0.386. It can be concluded that the equivalent stain outside is higher than inside because the increased elongation along the length of material and increased bending degree caused increased equivalent strain.

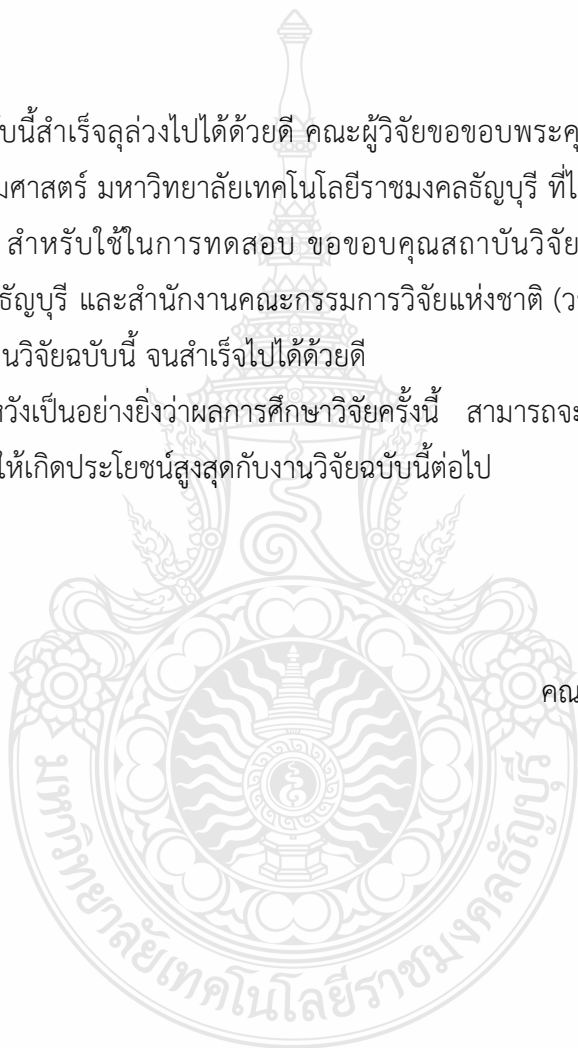
Keywords: Springback, Major strain, Minor strain, Equivalent strain

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาคีชาววิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับใช้ในการทดสอบ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนงบประมาณประจำปี 2556 ในงานวิจัยฉบับนี้ จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้ สามารถจะนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดกับงานวิจัยฉบับนี้ต่อไป

คณะผู้วิจัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การตัดโลหะ	3
2.2 การตีตัวกลับ	13
2.3 ความเค้น – ความเครียด	15
2.4 กริด	16
2.5 การขึ้นรูปแบบเย็น	19
2.6 ทฤษฎีเกี่ยวกับวัสดุ	20
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน	27

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	27
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน	32
3.3 วิธีการทดลองและวัดผล	36
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน	43
4.1 ผลการทดลองการติดตั้งงาน	43
4.2 การวิเคราะห์	75

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	87
5.1 สรุป	87
5.2 ข้อเสนอแนะ	89
บรรณานุกรม	90
ภาคผนวก ก	92
ผลการทดลอง	92
ภาคผนวก ข	112
ใบรับรองผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ	113
ภาคผนวก ค	125
รวมภาพชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการตัด	126
ภาคผนวก ง	141
ผลการทดลองทางสถิติ	142
ภาคผนวก จ	151
การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ (IE Network Conference 2013)	152

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	รูปประกอบนิยามศัพท์ในการดัด	3
2.2	ชุดแม่พิมพ์การดัดท่อแบบ Mandrel Bending	4
2.3	ลักษณะของการดัดท่อแบบ Mandrel Bending	5
2.4	การดัดแบบ Ram or Punch Bending	5
2.5	การดัดแบบ 3-Roll Bending	6
2.6	การดัดแบบ Rotary Draw Bending	6
2.7	การดัดแบบ Compression Bending	7
2.8	ลูกดัด Bend Die	7
2.9	ลิ้มยึด Clamp Die	8
2.10	ลิ้มดัด Pressure Die	8
2.11	Disposable Inserts or Wiper Insert	9
2.12	Square Back Wiper Die	9
2.13	Mandrels	10

2.14	การประกอบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ตัด	10
2.15	ความไม่สม่ำเสมอของหน้าตัดผนังท่อ	11
2.16	การเกิดรอยย่นของท่อ	11
2.17	หน้าตัดของท่อที่เกิดความบิดเบี้ยว	12
2.18	การดีดกลับของเหล็กแผ่น	12
2.19	การแตกของท่อ	13
2.20	การดีดกลับ	14
2.21	แบบกริดที่เปลี่ยนไปจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับโลหะแผ่น	16
2.22	แบบกริดที่เปลี่ยนไปจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับโลหะแผ่น	16
2.23	กริดแบบวงกลมผสมสี่เหลี่ยม	17
2.24	การวัดความเครียดหลัก (e_1) ความเครียดรอง (e_2)	17
2.25	การเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลม	18
3.1	ตลับเมตร	27
3.2	เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์แบบดิจิทัล	27
3.3	Magnetic Protactor	28
3.4	อุปกรณ์บล็อก	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.5	แผ่นกริดแบบผสมวงกลมกับสี่เหลี่ยม	29
3.6	เครื่องปล่อยกระแสไฟฟ้า	29
3.7	สารเคมีที่ใช้กัดกรด	30
3.8	เครื่องตัดแบบอัดใช้ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic) ชุดขับเคลื่อนกำลัง 3 แรงม้า	30
3.9	ชุดแม่พิมพ์	31
3.10	แผ่น Stencil Mylar	31
3.11	ไมโครมิเตอร์	32
3.12	ชิ้นงานรูปทรงท่อกว้าง	33

3.13	ชิ้นงานเส้นกลม	34
3.14	ชิ้นงานแผ่น	34
3.15	ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอะซิโตน	35
3.16	การเทกรดลงบนแผ่นฟิล์มและเหล็ก	35
3.17	การปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านแผ่นฟิล์มเพื่อทำการกัดผิวโลหะ	35
3.18	เหล็กแผ่นที่ผ่านการตีกริด	36
3.19	ตำแหน่งหน้าตัดของเหล็กที่อกลวงบริเวณ A, B และ C	37
3.20	เหล็กที่อกลวงที่ผ่านขั้นตอนการสร้างกริด	41
3.21	การเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลม	42
4.1	ชิ้นงานเหล็กตัดทั้ง 3 ชนิดวัสดุและ 3 รูปทรง	44
4.2	บริเวณส่วนโค้งเหล็กที่อกลวงที่เกิดรอยบุบ	45
4.3	บริเวณส่วนโค้งอลูมิเนียมที่อกลวงที่เกิดรอยบุบ	45
4.4	บริเวณส่วนโค้งทองแดงที่อกลวงที่เกิดรอยบุบ	45
4.5	กราฟแสดงความหนาของผนังเหล็กที่อกลวงด้านนอกกับองศาในการตัด	48
4.6	กราฟแสดงความหนาของผนังเหล็กที่อกลวงด้านในกับองศาในการตัด	49
4.7	กราฟแสดงความหนาของผนังอลูมิเนียมที่อกลวงด้านนอกกับองศาในการตัด	50
4.8	กราฟแสดงความหนาของผนังอลูมิเนียมที่อกลวงด้านในกับองศาในการตัด	51
4.9	กราฟแสดงความหนาของผนังทองแดงที่อกลวงด้านนอกกับองศาในการตัด	52
4.10	กราฟแสดงความหนาของผนังทองแดงที่อกลวงด้านในกับองศาในการตัด	53
4.11	กราฟแสดงความหนาของเหล็กแผ่นกับองศาในการตัด	54
4.12	กราฟแสดงความหนาของอลูมิเนียมแผ่นกับองศาในการตัด	55
4.13	กราฟแสดงความหนาของทองแดงแผ่นกับองศาในการตัด	56
4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่การตีกลับกับองศาในการตัดของเหล็ก	58
4.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่การตีกลับกับองศาในการตัดของอลูมิเนียม	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่การตีกลับกับองศาในการตัดของทองแดง	60
4.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบกับองศาตัดของเหล็กที่อกลวง	70

4.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบกับองค์ตัดของอลูมิเนียม	71
4.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบกับองค์ตัดของทองแดงท่อกลวง	72
4.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบกับองค์ตัดของเหล็กแผ่น	72
4.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบกับองค์ตัดของอลูมิเนียมแผ่น	74
4.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบกับองค์ตัดของทองแดงแผ่น	75
4.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาในการตัดกับความหนาของผนังท่อกลวง	76
4.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาในการตัดกับความหนาผนังท่อกลวงด้าน	76
4.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาในการตัดกับความหนาชิ้นงานแผ่นของวัสดุ	77
4.26	กราฟแสดงอัตราการลดลงของผนังท่อกลวงที่ตำแหน่งต่าง ๆ	78
4.27	กราฟแสดงอัตราการลดลงของผนังท่อกลวงในองศาการตัด	78
4.28	กราฟแสดงอัตราการลดลงของผนังท่อกลวงกับชนิดของวัสดุ	79
4.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ขององศาการตัดกลับกับวัสดุรูปทรงท่อกลวง	80
4.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ขององศาการตัดกลับกับวัสดุรูปทรงเส้นกลม	80
4.31	กราฟแสดงความสัมพันธ์ขององศาการตัดกลับกับวัสดุรูปทรงเส้นกลม	81
4.32	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการติดตัวกลับกับประเภทวัสดุ	82
4.33	กราฟกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการติดตัวกลับกับรูปทรงของชิ้นงาน	82
4.34	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการติดตัวกลับกับองศา	83
4.35	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเครียดเทียบเท่าในวัสดุรูปทรงท่อกลวงกับองค์ตัด	84
4.36	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเครียดเทียบเท่าในวัสดุรูปทรงแผ่นกับองค์ตัด	84
4.37	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบเท่ากับบริเวณส่วนโค้งของชิ้นงาน	85
4.38	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบเท่ากับองศาในการตัด	85
4.39	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบเท่ากับชนิดวัสดุ	86
4.40	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบเท่ากับรูปทรงวัสดุ	86
ค.1	ชิ้นงานเหล็กท่อกลวงผ่านกระบวนการตัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา	126
ค.2	ชิ้นงานเหล็กเส้นกลมผ่านกระบวนการตัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา	126
ค.3	ชิ้นงานเหล็กแผ่นผ่านกระบวนการตัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา	127
ค.4	ชิ้นงานอลูมิเนียมท่อกลวงผ่านกระบวนการตัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา	127
ค.5	ชิ้นงานอลูมิเนียมเส้นกลมผ่านกระบวนการตัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา	128
ค.6	ชิ้นงานอลูมิเนียมแผ่นผ่านกระบวนการตัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา	128

รูปที่		หน้า
ค.7	ชิ้นงานทองแดงท่อกลวงผ่านกระบวนการดัดที่มุม 30 ,60 และ 90 องศา	129
ค.8	ชิ้นงานทองแดงเส้นกลมผ่านกระบวนการดัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา	129
ค.9	ชิ้นงานทองแดงแผ่นผ่านกระบวนการดัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา	130



สารบัญตาราง

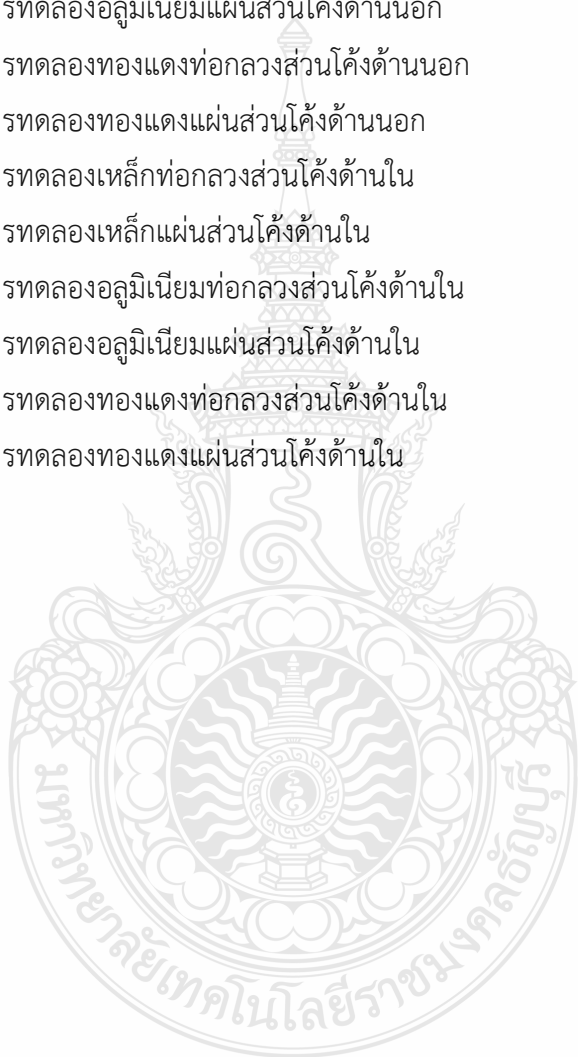
ตารางที่	หน้า	
2.1	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กเกรด DIN St37	20
2.2	คุณสมบัติทางกลของเหล็กเกรด DIN St37	20
2.3	สัญลักษณ์ของอลูมิเนียมผสม	21
2.4	ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน	23
2.5	คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน	23
2.6	ส่วนผสมทางเคมีของทองแดง เกรด UNS C11000	25
2.7	สมบัติทางกลของทองแดง UNS C11000	25
3.1	คุณสมบัติทางกลของเหล็ก เกรด DIN St 37	32
3.2	คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียม เกรด ASTM AA6063	32
3.3	คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียม เกรด UNS C11000	33
3.4	การประเมินข้อบกพร่องทางกายภาพ	37
3.5	การทดสอบความหนาของผนังหน้าตัดส่วนโค้งของชิ้นงานท่อกวาง	38
3.6	การทดสอบความหนาของชิ้นงานแผ่น	38
3.7	องศาการดัดตัวกลับและค่าคงที่การดัดตัวกลับ	39
3.8	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียด	40
3.9	ความเครียดเทียบเท่า	41
4.1	การประเมินข้อบกพร่องทางกายภาพ	46
4.2	ผลการทดสอบความหนาของผนังหน้าตัดส่วนโค้งของชิ้นงานดัดรูปทรงท่อกวาง	46
4.3	ผลการทดสอบความหนาของชิ้นงานแผ่น	48
4.4	องศาการดัดตัวกลับและค่าคงที่การดัดตัวกลับ	57
4.5	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านในของเหล็กท่อกวาง	61
4.6	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของเหล็กท่อกวาง	61
4.7	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านในของอลูมิเนียมท่อกวาง	62
4.8	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของอลูมิเนียมท่อกวาง	62
4.9	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านในของทองแดงท่อกวาง	62
4.10	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของทองแดงท่อกวาง	63
4.11	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านในของเหล็กเส้นกลม	63

4.12	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของเหล็กเส้นกลม	64
4.13	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านในของอลูมิเนียมเส้นกลม	64
4.14	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของอลูมิเนียมเส้นกลม	65
4.15	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านในของทองแดงเส้นกลม	65

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.16	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของทองแดงเส้นกลม	66
4.17	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านในของเหล็กแผ่น	66
4.18	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของเหล็กแผ่น	67
4.19	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านในของอลูมิเนียมแผ่น	67
4.20	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของอลูมิเนียมแผ่น	67
4.21	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านในของทองแดงแผ่น	68
4.22	อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของทองแดงแผ่น	68
4.23	ความเครียดเทียบเท่า	69
ก.1	บันทึกผลการทดสอบความหนาของผนังหน้าตัดส่วนโค้งของชิ้นงานดัดรูปทรง ท่อกวาง ครั้งที่ 1	93
ก.2	บันทึกผลการทดสอบความหนาของผนังหน้าตัดส่วนโค้งของชิ้นงานดัดรูปทรง ท่อกวาง ครั้งที่ 2	94
ก.3	บันทึกผลการทดสอบความหนาของผนังหน้าตัดส่วนโค้งของชิ้นงานดัดรูปทรง ท่อกวาง ครั้งที่ 3	95
ก.4	บันทึกผลการทดสอบความหนาของชิ้นงานดัดรูปทรงแผ่นครั้งที่ 1	96
ก.5	บันทึกผลการทดสอบความหนาของชิ้นงานดัดรูปทรงแผ่นครั้งที่ 2	96
ก.6	บันทึกผลการทดสอบความหนาของชิ้นงานดัดรูปทรงแผ่นครั้งที่ 3	97
ก.7	บันทึกผลการทดลองการตีกลับของชิ้นงานท่อกวางที่ได้รับอิทธิพลจากองศา ในการดัด	97
ก.8	บันทึกผลการทดลองการตีกลับของชิ้นงานเส้นกลมที่ได้รับอิทธิพลจากองศา ในการดัด	98
ก.9	บันทึกผลการทดลองการตีกลับของชิ้นงานแผ่นที่ได้รับอิทธิพลจากองศา ในการดัด	98

ก.10	บันทึกผลการทดลองความเครียดเทียบเท่าส่วนโค้งนอกและในของชิ้นงานท่อกวาง	99
ก.11	บันทึกผลการทดลองความเครียดเทียบเท่าส่วนโค้งนอกและในของชิ้นงานแผ่น	99
ก.12	บันทึกผลการทดลองเหล็กท่อกวางส่วนโค้งด้านนอก	100
ก.13	บันทึกผลการทดลองเหล็กแผ่นส่วนโค้งด้านนอก	101
ก.14	บันทึกผลการทดลองอลูมิเนียมท่อกวางส่วนโค้งด้านนอก	102
ก.15	บันทึกผลการทดลองอลูมิเนียมแผ่นส่วนโค้งด้านนอก	103
ก.16	บันทึกผลการทดลองทองแดงท่อกวางส่วนโค้งด้านนอก	104
ก.17	บันทึกผลการทดลองทองแดงแผ่นส่วนโค้งด้านนอก	105
ก.18	บันทึกผลการทดลองเหล็กท่อกวางส่วนโค้งด้านใน	106
ก.19	บันทึกผลการทดลองเหล็กแผ่นส่วนโค้งด้านใน	107
ก.20	บันทึกผลการทดลองอลูมิเนียมท่อกวางส่วนโค้งด้านใน	108
ก.21	บันทึกผลการทดลองอลูมิเนียมแผ่นส่วนโค้งด้านใน	109
ก.22	บันทึกผลการทดลองทองแดงท่อกวางส่วนโค้งด้านใน	110
ก.23	บันทึกผลการทดลองทองแดงแผ่นส่วนโค้งด้านใน	111



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

α	องศาในการตัด
L_o	ความยาวเริ่มต้น
L_1	ความยาวด้านที่ 1
L_2	ความยาวด้านที่ 2
k_R	ค่าคงที่ของการตีตัวกลับ
α_1	มุมตัดเริ่มต้น (ก่อนการตีตัวกลับ)
α_2	มุมตัดหลังการตีตัวกลับ
e_1	เปอร์เซ็นต์ความเครียดหลัก (Major Strain)
e_2	เปอร์เซ็นต์ความเครียดรอง (Minor Strain)
W	ความกว้าง (Width)
0	จุดเริ่มต้น
f	จุดสุดท้าย
ϵ	ค่าความเครียดเทียบเท่า

ε_1	ค่าความเครียดหลัก
ε_2	ค่าความเครียดรอง
ε_3	ค่าความเครียดที่ความหนา
d_1	ความยาวของลายกิริติที่เปลี่ยนไป
d_0	ความกว้างของลายกิริติที่เปลี่ยนไป
t_0	ความหนาเริ่มต้น
t_2	ความหนาที่เปลี่ยนไป



บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า กระบวนการดัดเป็นการขึ้นรูปประเภทหนึ่งที่มีนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเฟอร์นิเจอร์ เครื่องเรือน ก่อสร้าง และอื่น ๆ แต่งานที่ได้ยังมีข้อบกพร่องให้เห็นอยู่ เช่น การเกิดรอยย่น, รอยบุบ, รอยฉีกขาด และการดัดตัวกลับ เป็นต้น ซึ่งการดัดตัวกลับอาจมีสาเหตุมาจากองศาที่ใช้ในการดัด ชนิดวัสดุ และรูปทรงของชิ้นงานที่มีความแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดที่จะทำการศึกษาประเภทของวัสดุและรูปทรงต่างๆ ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมาทำการทดลอง เพื่อวิเคราะห์สรุปผลและเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาประยุกต์ใช้ในการดัดโลหะ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

งานขึ้นรูปโลหะ (Metal Forming) เป็นกระบวนการผลิตประเภทหนึ่งที่ใช้เปลี่ยนวัสดุประเภทโลหะให้เป็นผลิตภัณฑ์ (Product) ตามรูปร่างที่ต้องการ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนรูปร่างของวัสดุอย่างถาวร (Plastic Deformation) หรือในทางวิชาการจะเรียกกระบวนการนี้ว่า การเปลี่ยนรูปโลหะในช่วงเวลาการเปลี่ยนรูปถาวร (Deformation Process) ซึ่งเป็นการขึ้นรูปขณะที่วัสดุเป็นสถานะของแข็งโดยอาศัยแม่พิมพ์เป็นเครื่องมือเฉพาะในการขึ้นรูป ทำให้ไม่เกิดเศษเสี้ยวของวัสดุ เช่น กระบวนการดัด (Bending Process), กระบวนการลากขึ้นรูป (Deep Drawing), การตีขึ้นรูป (Forging), กระบวนการขึ้นรูปโลหะก้อน (Bulk Metal Forming Process), กระบวนการอัดขึ้นรูป (Extrusion Process), กระบวนการรีด (Rolling Process) เป็นต้น [1] ซึ่งกระบวนการประเภทหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรม คือ กระบวนการดัด (Bending) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเฟอร์นิเจอร์ เครื่องเรือน ก่อสร้าง การดัดท่อ เป็นต้น [2] ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการดัดยังเกิดข้อบกพร่องความเสียหายให้เห็นอยู่ทั่วไป เช่น การเกิดรอยย่น, รอยบุบ, เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานตลอดการดัดไม่สม่ำเสมอ และรอยฉีกขาด เป็นต้น [3] แต่ว่าปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่เกิดกับกระบวนการดัดขึ้นรูปโลหะ คือ โลหะเกิดการดัดตัวกลับหลังจากคลายแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปออกจากงานแล้ว ทำให้ชิ้นงานดัดไม่เป็นไปตามองศาที่ต้องการ จนไม่สามารถนำไปใช้ตามวัตถุประสงค์ได้อย่างถูกต้อง ซึ่งการดัดกลับอาจมีสาเหตุมาจากคุณสมบัติของวัสดุ, องศาที่ใช้ในการดัด, ความหนาของชิ้นงาน, ปริมาณการเสียรูปในช่วงพลาสติก, รูปร่างของแม่พิมพ์, แรงเสียดทาน, พฤติกรรมความเครียดในระหว่างกระบวนการดัด, ความเร็วในการขึ้นรูป และเงื่อนไขอื่น ๆ ที่ใช้ในการดัด เป็นต้น [2]

สำหรับงานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของรูปทรงชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นท่อกลอง เหล็กเส้น และ เหล็กแผ่น ว่ามีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานอย่างไรหลังจากผ่านการตัดแบบ การอัด โดยทำการวิเคราะห์การติดตัวกลับ ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไป และพฤติกรรมการเกิด ความเครียดบริเวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งทำการออกแบบชุดแม่พิมพ์ตัดแบบมัลติฟังก์ชันขึ้นมา พิเศษ เพื่อสามารถทำการศึกษาวิจัยการตัดแบบการอัดได้อย่างถูกต้อง

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาประเภทวัสดุและรูปทรงของชิ้นงานซึ่งมีผลต่อการติดตัวกลับ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างองศาในการตัดและความเครียด
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบและข้อบกพร่องของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในแต่ละองศาการตัดโดยใช้ แม่พิมพ์ตัดแบบอัด (Compressive Bending)
- 1.2.4 เพื่อศึกษาความหนาของผนังหน้าตัดส่วนโค้งของชิ้นงานตัด

1.3 ขอบเขต

- 1.3.1 ทำการทดลองตัดชิ้นงานดังต่อไปนี้
 - 1) เหล็กท่อกลอง เกรด DIN St 37 ความหนาผนังท่อ 0.5 มิลลิเมตร เส้นผ่าน ศูนย์กลาง 15.8 มิลลิเมตร ความยาว 1,000 มิลลิเมตร
 - 2) เหล็กเส้นกลม เกรด DIN St 37 เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาว 1,000 มิลลิเมตร
 - 3) เหล็กแผ่น เกรด DIN St 37 ความกว้าง 25 มิลลิเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร ความ ยาว 1,000 มิลลิเมตร
 - 4) อลูมิเนียมท่อกลอง เกรด ASTM AA6063 ความหนาผนังท่อ 0.5 มิลลิเมตร เส้นผ่าน ศูนย์กลาง 15.8 มิลลิเมตร ความยาว 1,000 มิลลิเมตร
 - 5) อลูมิเนียมเส้นกลม เกรด ASTM AA6063 เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความ ยาว 1,000 มิลลิเมตร
 - 6) อลูมิเนียมแผ่น เกรด ASTM AA6063 ความกว้าง 25 มิลลิเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร ความยาว 1,000 มิลลิเมตร
 - 7) ทองแดงท่อกลอง เกรด UNS C11000 ความหนาผนังท่อ 0.5 มิลลิเมตร เส้นผ่าน ศูนย์กลาง 15.8 มิลลิเมตร ความยาว 1,000 มิลลิเมตร

8) ทองแดงเส้นกลม เกรด UNS C11000 เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาว 1,000 มิลลิเมตร

9) ทองแดงแผ่น เกรด UNS C11000 ความกว้าง 25 มิลลิเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร ความยาว 1,000 มิลลิเมตร

1.3.2 ทำการศึกษาและวิเคราะห์ข้อบกพร่องทางกายภาพ, ความหนาของผนังหน้าตัดส่วนโค้งของชิ้นงานดัด, การดัดตัวกลับและความเครียดของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการดัด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพิ่มพูนความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการดัดกลับ (Springback) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต เฟอร์นิเจอร์ เครื่องเรือน ก่อสร้าง เป็นต้น

1.4.2 เป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในการดัดขึ้นรูปโลหะแบบอัด

1.4.3 สามารถนำไปใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีกระบวนการดัดเข้ามาเกี่ยวข้อง



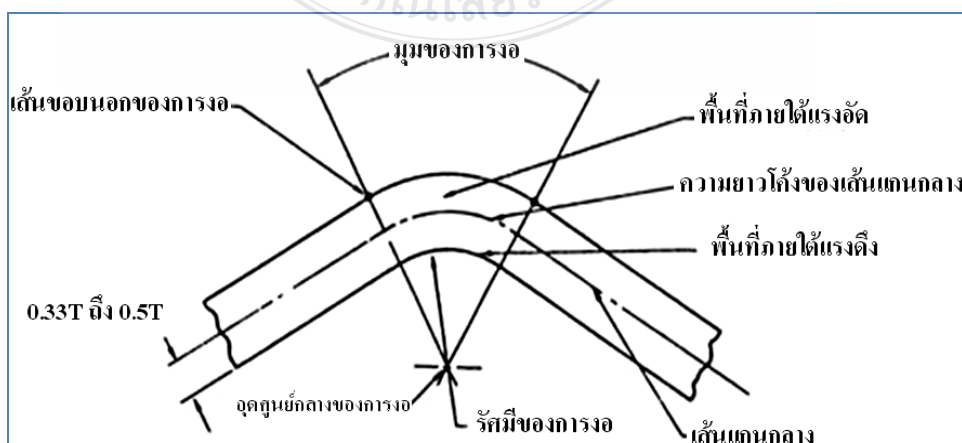
บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การดัดโลหะ (Bending)

การดัดเป็นกรรมวิธีการหนึ่งของการขึ้นรูปโลหะแบบไร้เศษ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมผลิตเฟอร์นิเจอร์ ก่อสร้าง ฯลฯ การดัดส่วนใหญ่ใช้ในงานโลหะแผ่น (Sheet Metal) งานลวด (Wire) งานท่อ (Pipe) และโลหะแท่ง (Rod) การเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของโลหะอยู่ที่บริเวณรัศมีการดัด บริเวณนี้จะเกิดข้อบกพร่องได้ง่ายเช่น การย่น การแตก การบิดเบี้ยวของหน้าตัด โดยรับอิทธิพลจากความเค้นในการดัดความเค้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ความเค้นอัด (Compressive Stress) ความเค้นดึง (Tensile Stress) โดยตามทฤษฎีความเค้นอัดจะเกิดที่ด้านใน ส่วนรัศมีการดัดความเค้นดึงเกิดที่ด้านนอกรัศมีการดัด [2]

นิยามคำศัพท์ที่ใช้ในงานดัดโลหะดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแนวระนาบบนเส้นแกนกลาง (Neutral Plane) เป็นระนาบที่แบ่งบริเวณในการเกิดความเค้นดึงและความเค้นอัด เส้นแกนกลางนี้ยังใช้ประโยชน์ในการหาความยาวเริ่มต้นได้ด้วย เนื่องจากจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวเล็กน้อยหลังจากการดัด ความยาวของเส้นแกนกลางจะเท่ากับความยาวเดิมของชิ้นงาน ส่วนความยาวด้านนอกรัศมีการเพิ่มจะมีความยาวเพิ่มขึ้น และความยาวด้านในรัศมีการดัดจะมีความยาวลดลง นั่นคือความยาวของเส้นแกนกลางจะแสดงถึงความยาวที่แท้จริงของชิ้นงาน ซึ่งขนาดที่แท้จริงของชิ้นงานจะหาได้จากเส้นแกนกลางหลังจากการดัดแล้ว มุมดัด (Bend Angle) คือ องศาที่นับจากโลหะเริ่มต้นถูกดัดเป็นมุมขึ้นไป รัศมีการดัด (Bend Radius) หมายถึงรัศมีการดัดทางด้านใน แต่การดัดในกรณีโลหะแผ่นก็มีข้อจำกัดเกี่ยวกับมุมที่ถูกยกเว้นสำหรับกระบวนการคือ มุม 0 องศา และมุม 360 องศา เพราะถ้าชิ้นงานถูกงอที่มุม 360 องศาจะทำให้กลายเป็นการพับขอบไป [1]



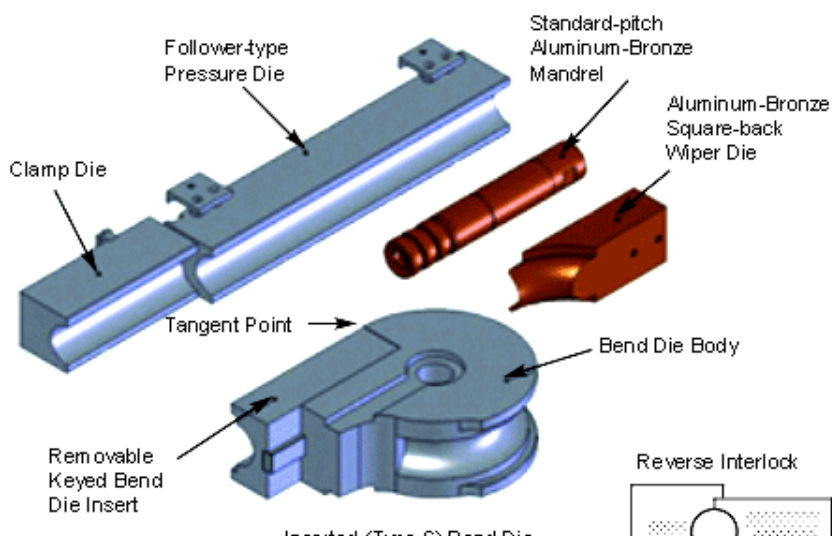
รูปที่ 2.1 รูปประกอบนิยามศัพท์ในการดัด [4]

การดัดท่อโดยทั่วไป รัศมีคัตน้อยสุดจะมีค่าเป็น 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ การดัดท่อสามารถใช้ความร้อนเข้าช่วยได้ เรียกว่า การดัดร้อน (Hot Bending) หรือ ไม่ใช้ความร้อนเข้าช่วยจะเรียกว่า การดัดเย็น (Cold Bending) ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของการดัดท่อเป็น 4 ประเภทหลักๆ และการดัดที่ได้จากการประยุกต์จากการดัดประเภทหลักๆ อีก 1 ประเภท คือการดัดแบบ Compression Bending แต่จะให้ความสำคัญกับการดัดประเภท Compression Bending เป็นพิเศษเนื่องจากโครงการนี้ใช้การดัดประเภทดังกล่าว ซึ่งประเภทของการดัดท่อจะมีดังนี้ [4]

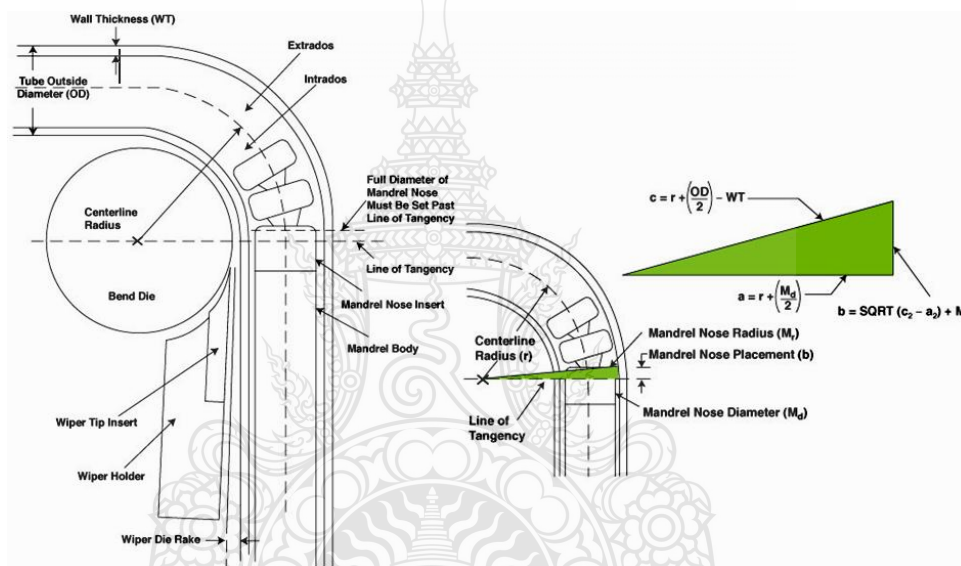
2.1.1 การดัดประเภท Mandrel Bending

เป็นระบบการดัดท่อชนิดหนึ่ง การดัดท่อแบบนี้จะช่วยให้ท่อที่ดัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันโดยตลอด อีกทั้งการดัดแบบนี้ยังช่วยลดข้อจำกัดของการดัดท่อได้ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดัดวิธีอื่นในโรงงานอุตสาหกรรม การดัดแบบ Mandrel Bending นั้นสามารถสร้างส่วนโค้งในการดัดได้มากกว่าการดัดที่ไม่ได้ใช้แรงกด หรือ แรงอัด อีกทั้งยังทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ทำการดัดมีลักษณะที่เป็นวงเต็มตลอดความยาวท่อแม้ว่าจะเป็นส่วนของรัศมีโค้งก็ตาม ซึ่งในอุตสาหกรรมการดัดได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับความสนใจเกี่ยวกับการดัดแบบ Mandrel แต่ชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆของการดัดแบบนี้ยังประยุกต์ใช้ในการดัดได้ไม่มาก [5]

เมื่อศึกษาหลักเข้าไปถึงการดัดโดยวิธี Mandrel Bending จะพบว่าที่พื้นผิวของก้านแม่พิมพ์กับท่อที่ใช้ดัดมีการสัมผัสกันตลอดกระบวนการดัด โดยแม่พิมพ์แบบ Mandrel จะดึงท่อจนกว่าการดัดโค้งจะเสร็จสมบูรณ์ หรือ องศาสุดท้ายของการดัดที่กำหนดไว้ ซึ่งผลลัพธ์ในการดัดแบบนี้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเท่ากันโดยตลอดความยาวรวมถึงส่วนของรัศมีโค้งด้วย ดังนั้นหากต้องการเริ่มดัดท่อ 2 ท่อพร้อมกันไปถึงมุมในการดัด 90 องศา การดัดก็ยังคงผ่านไปตลอดแนวรัศมีของแม่พิมพ์ได้ ซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่ใช้คำนวณเพื่อกำหนดความเหมาะสมของแม่พิมพ์แบบ Mandrel ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3



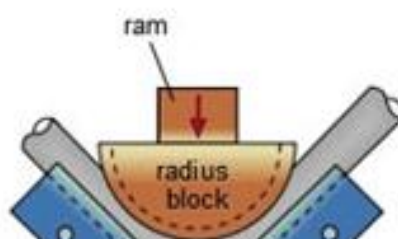
รูปที่ 2.2 ชุดแม่พิมพ์การดัดท่อแบบ Mandrel Bending [6]



รูปที่ 2.3 ลักษณะของการดัดท่อแบบ Mandrel Bending [6]

2.1.2 การดัดประเภท Ram or Push Bending

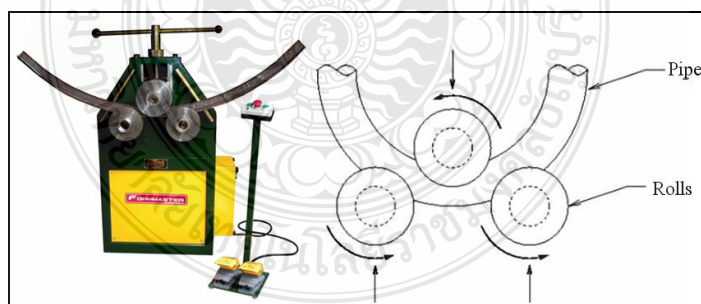
กระบวนการดัดท่อแบบนี้ได้ใช้ระบบไฮดรอลิกส์มาทำให้แม่พิมพ์ตายเคลื่อนที่ลงมา กดลงที่ท่อ ซึ่งท่อจะถูกรองรับด้วยปีกของตาย โดยที่ปีกของตายแยกออกเป็นด้าน และมีลักษณะเป็นโค้งลงตรงศูนย์กลางของการดัดท่อ ซึ่งท่อจะมีการเคลื่อนเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่บริเวณแม่พิมพ์นี้ โดยปีกตายแต่ละด้านจะเป็นตัวช่วยรองรับท่อทั้ง 2 ข้าง ดังรูปที่ 2.4 กระบวนการดัดแบบนี้เหมาะสมอย่างมากต่ออุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตปริมาณมาก และต้องการความรวดเร็วในการผลิต [7]



รูปที่ 2.4 การดัดแบบ Ram or Punch Bending [7]

2.1.3 การดัดประเภท 3-Roll Bending

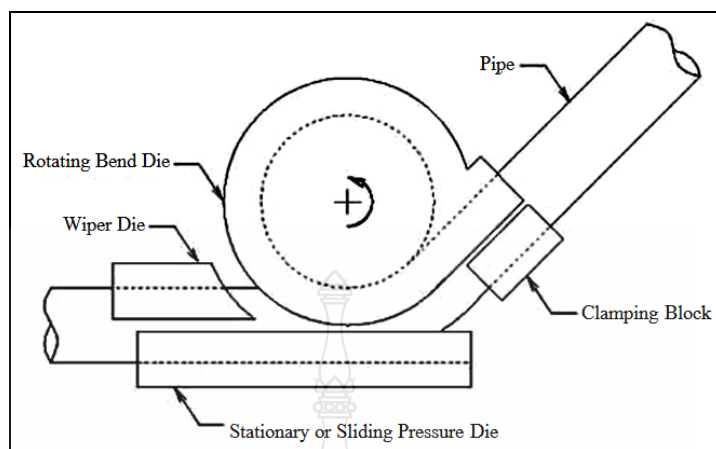
เป็นวิธีการม้วนดัดใช้สำหรับการดัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่หรือรัศมีขนาดใหญ่โดยลูกดัดทั้ง 3 ลูกจะถูกจัดวางในรูปทรงปริมาตรดังรูปที่ 2.5 ลูกดัดทั้ง 2 ลูกจะถูกยึดติดให้อยู่กับที่ วิธีการนี้คล้ายกับวิธีการดัดแบบ Ram Bending แต่การทำงานต้องให้ลูกกลิ้งทั้งสองข้างหมุนก่อนแล้วจึงจะสามารถดัดชิ้นงานได้เรียกว่า Pipe Rolls [8]



รูปที่ 2.5 การดัดแบบ 3-Roll Bending [8]

2.1.4 Rotary Draw Bending

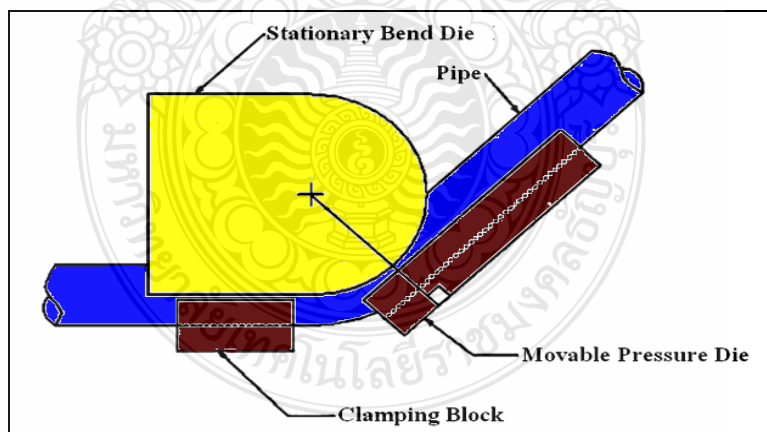
เป็นกระบวนการดัดท่อที่นิยมใช้มากที่สุดเกี่ยวกับการดัดท่อ ซึ่งการดัดแบบนี้จะรักษารูปร่างสำเร็จ และเส้นผ่านศูนย์กลางให้คงที่ ท่อที่ถูกดัดจะถูกลากผ่านลูกกลิ้งที่ติดอยู่กับที่ติดบนดาวยที่ติดแน่นดังรูปที่ 2.6 [8]



รูปที่ 2.6 การดัดแบบ Rotary Draw Bending [8]

2.1.5 การดัดประเภท Compression Bending

เป็นประเภทของการดัดชนิดหนึ่งซึ่งกล่าวไว้ว่าใช้แรงในการอัดตลอดจนเป็นการประยุกต์มาจากการดัดประเภท Rotary Draw Bending การดัดประเภทนี้ชิ้นงานโลหะที่จะหมุนหรือเลื่อนไปรอบๆ โดยลิ้มดัด (Pressure Die) ตามรัศมีการดัดของแม่พิมพ์ดัด (Bend Die) ซึ่งติดอยู่กับที่ [8] ดังรูปที่ 2.7

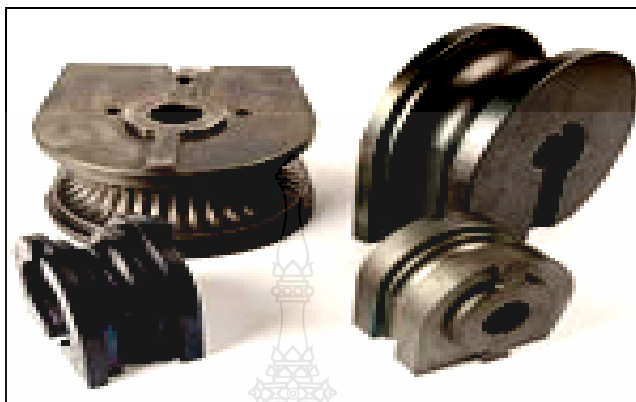


รูปที่ 2.7 การดัดแบบ Compression Bending [8]

2.1.6 ส่วนประกอบทั่วไปของแม่พิมพ์ดัด

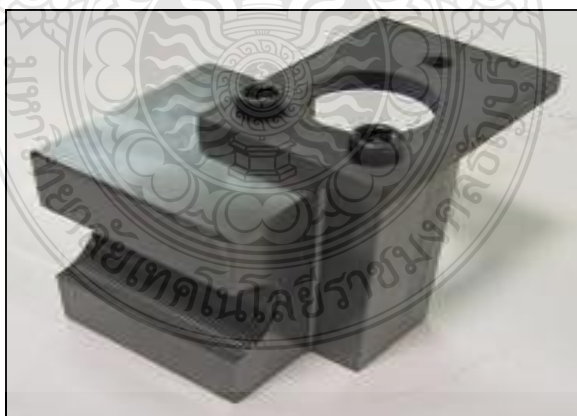
1) ลูกดัด (Bend Die) คือส่วนประกอบที่ใช้ระบุรัศมีการดัด ซึ่งลูกดัด ผลิตจากโลหะผสม (Alloy Steel) และผ่านการชุบผิวแข็งเพื่อปรับปรุงสมบัติตามที่ต้องการ ลูกดัดนั้นมีหลายแบบ

ให้เลือกใช้ตามความเหมาะสม รูปแบบของลูกดัดนั้นขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ดัด ศูนย์กลางของรัศมีการดัด ส่วนผิวภายนอกของการดัดจะกำหนดโดยโครงร่าง รูปร่างภายนอกของแม่พิมพ์ [9] ดังรูปที่ 2.8



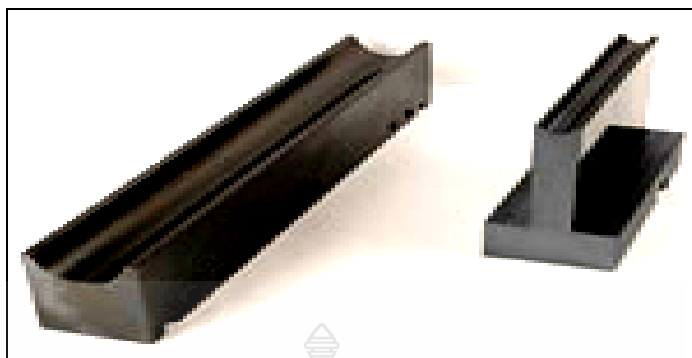
รูปที่ 2.8 ลูกดัด (Bend Die) [9]

2) ลิ้มยึด (Clamp Die) คือเครื่องมือจับยึดชิ้นงานเข้ากับลูกดัด (Bend Die) ให้อยู่กับที่ และ ลิ้มยึด เป็นเครื่องมืออย่างแรกที่ใช้สำหรับจับท่อ จับชิ้นงานโลหะให้ติดแน่นตลอดระยะเวลาที่ทำการดัด ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเราใช้ลิ้มยึดจับยึดไม่ให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ขณะทำการดัด โดยปกติแล้วจะผลิตจากเหล็ก SKD11 หรือ SCM4 ซึ่งเป็นเหล็กผลิตแม่พิมพ์ เป็นต้น [9]



รูปที่ 2.9 ลิ้มยึด (Clamp Die) [9]

3) ลิ้มดัด (Pressure Die) ใช้สำหรับรักษาแรงดัดบนท่อที่มีจุดสัมผัสวงกลม 4 จุด ในขณะที่การดัดนั้นกำลังเกิดขึ้น และทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาสำหรับสร้างส่วนโค้ง ความยาวของ ลิ้มดัดจะแปรผันตรงตามองศา (Degree) ของการดัดท่อ [9] ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลิ้มตัด (Pressure Die) [9]

4) Wiper Die เป็นเครื่องมือที่ใช้กดเข้าไปในร่องของลูกตัด โดยติดใกล้เส้นสัมผัสวงกลม Wiper Die ช่วยแก้ปัญหาการเกิดรอยย่นข้างในรัศมีความโค้งของท่อ Wiper Die ดังรูปที่ 2.11 ผลิตจากวัสดุ อะลูมิเนียม สังกะสี เหล็กเหนียว อะลูมิเนียมบรอนซ์ สแตนเลสสตีล อินโคเนล ไทเทเนียม และเหล็กชุบโครเมียมเพราะช่วยลดแรงเสียดทาน การติดตั้ง Wiper Die นั้นมีความสำคัญต่อรอยตัด และ Wiper Die นิยมใช้กันมากมีดังนี้ [9]

- Disposable Inserts or Inserted Wiper Die คือ Wiper Die ชนิดนี้จะมีพื้นที่การทำงานจำกัดกว่า และรูปร่างสั้นกว่า Square Back Wiper Die โดย Wiper Die ชนิดนี้ประกอบด้วย Steel Holder มีไว้เพื่อกำหนดตำแหน่ง และ Wiper Die ชนิดนี้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูใหญ่กว่าความโตของท่อโลหะเล็กน้อย [9] ดังรูปที่

2.11



รูปที่ 2.11 Disposable Inserts or Wiper Insert [9]

- Square Back Wiper Die คือ Wiper Die ชนิดนี้ผลิตจากวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน ผลิตเป็นชิ้นเดียวกัน โดยปกติ Wiper Die ชนิดนี้จะกว้างกว่าท่อโลหะเล็กน้อย และให้ความแข็งแรงเพียงพอต่อการตัด [9] ดังรูปที่ 2.12

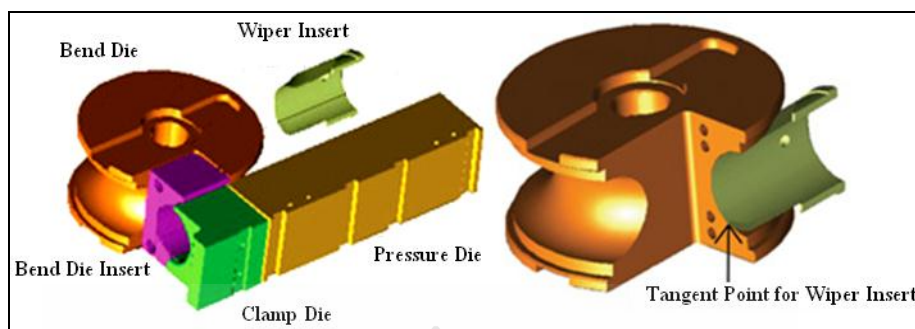


รูปที่ 2.12 Square Back Wiper Die [9]

5) Mandrel โดยปกติผลิตมาจากวัสดุเหมือนกับ Wiper Die ซึ่งผลิตมาจากเหล็กชุบโครเมียม อะลูมิเนียมบรอนซ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะทำการตัด หน้าที่หลักของ Mandrels คือช่วยป้องกันการเกิดรอยย่นในท่อที่ทำการตัด และช่วยให้ท่อที่ทำการตัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันตลอดความยาวท่อ โดยทำการสอด Mandrel เข้าไปในท่อที่ทำการตัด [9] หรือ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 Mandrels [9]

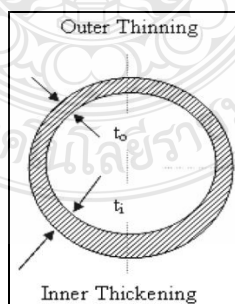


รูปที่ 2.14 การประกอบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ดัด [7]

2.1.7 ข้อผิดพลาดในการดัดท่อ (Defects in Tube Bending) [3]

จากปัญหาของชิ้นงานโลหะที่ผ่านกระบวนการดัดจะพบบริเวณที่เกิดความเสียหายเช่น รอยบุบ รอยฉีกขาด เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานไม่สม่ำเสมอตลอดชิ้นงาน ผนังของท่อโลหะมีความแตกต่างกัน การตีกลับ และการแตก เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษาทฤษฎีการดัดทำให้สามารถตั้งสมมติฐานถึงสาเหตุที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่างๆ ซึ่งรายละเอียดสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) ความแตกต่างของผนัง (Variation in Wall Thickness) ในระหว่างกระบวนการดัด โมเมนต์ของการดัดก่อให้เกิดแรงในแนวแกนบริเวณวงใน (Inner) วงนอก (Outer) ของท่อโลหะ ซึ่งผนังวงในและผนังวงนอกของท่อโลหะนั้นจะตกอยู่ภายใต้ความเค้นอัด (Compressive Stress) และความเค้นดึง (Tensile Stress) ตามลำดับ ผลลัพธ์ที่ได้จากความเค้นข้างต้นนี้จะทำให้หน้าตัดวงนอกเกิดความบางลง (Extrados) และเกิดความหนาขึ้นที่ผนังหน้าตัดวงใน (Intrados) ซึ่งผนังของท่อโลหะที่ได้นี้จะมีความแปรปรวน ความแตกต่างที่ไม่สม่ำเสมอกันดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ความไม่สม่ำเสมอของหน้าตัดผนังท่อ [3]

2) รอยย่น (Wrinkling) ที่พื้นผิววงในของเหล็กท่อโค้ง ผิววงในนั้นจะตกอยู่ภายใต้การควบคุมของความเค้นแรงอัด คือเวลาที่ท่อถูกกระทำให้อ่อนตัวในรัศมีที่คับแน่น มันตกอยู่ภายใต้การ

ควบคุมของความเค้นแรงอัดที่ผนังหน้าตัดวงในหน้าขึ้น (Intrados) ซึ่งนำไปสู่ความไม่แน่นอน หรือ รอยย่นของท่อ ซึ่งรอยย่นเป็นข้อบกพร่องที่เป็นลูกคลื่นที่เกิดขึ้นเป็นทีละระลอกดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การเกิดรอยย่นของท่อ [3]

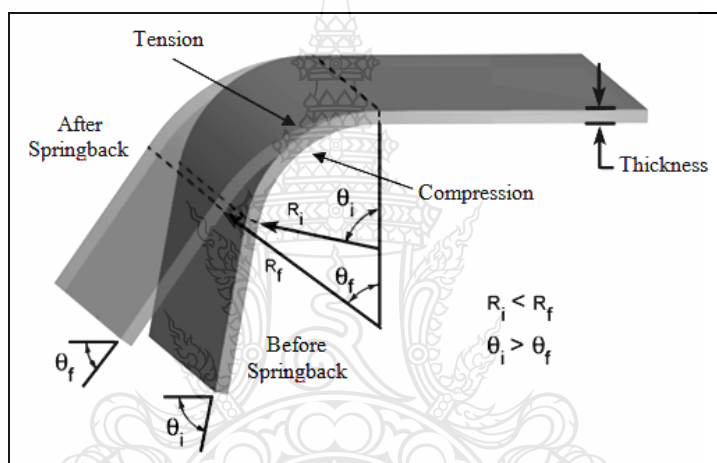
3) หน้าตัดที่เกิดความบิดเบี้ยว (Cross Section Distortion) ตามที่อธิบายข้างต้น ที่ผนังวงนอกของท่อถูกควบคุมโดยความเค้นดึง ในทางตรงกันข้ามผนังวงในของท่อถูกควบคุมด้วยความเค้นอัด จึงมีแนวโน้มที่ปลายท่อจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งไปจากเส้นแกนกลาง ที่ผนังวงนอกของท่อมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนเข้าสู่เส้นแกนกลางทั้งนี้เพื่อเป็นการลดการขยายตัวของความเค้นดึง จากผลที่เกิดขึ้นจึงทำให้หน้าตัดของท่อไม่เป็นวงกลม ก็กลายเป็นรูปวงรีคล้ายไข่แทน ดังรูปที่ 2.17 โดยทั่วๆ ไปที่ปฏิบัติกันในอุตสาหกรรมมักจะใช้ส่วนสนับสนุนเพื่อคอยพยุง หรือ ประคองที่ภายในของท่อ เพื่อป้องกันไม่ให้ยุบตัว หรือ เกิดความบกพร่องที่หน้าตัดท่อ ซึ่งวัสดุที่ใส่เข้าไปภายในท่อนั้นจะเรียกว่า Mandrel



รูปที่ 2.17 หน้าตัดของท่อที่เกิดความบิดเบี้ยว [3]

4) การดีดกลับ (Springback) หลังจากกระบวนการตัดเสร็จสมบูรณ์ และเครื่องมือได้ ถูกลอนออกจากการตัด จะเกิดการดีดกลับของท่อซึ่งเป็นความยืดหยุ่นที่เป็นปกติวิสัยของวัสดุ การ พั่นตัวคืน ดังกล่าว ดีดกลับแบบยืดหยุ่นนี้เรียกว่า (Springback) ในระหว่างกระบวนการตัดความเค้น

ได้มีการเพิ่มขึ้นภายในท่อ และเมื่อเครื่องมือถูกถอนจากการตัดความเค้นภายในก็ไม่หายยังคงอยู่ หลังจากหน้าตัดวงนอกเกิดความบางลง (Extrados) จะถูกควบคุมด้วยความเค้นดิ่งที่ตกค้าง ส่วนความหนาขึ้นที่ผนังหน้าตัดวงใน (Intrados) ถูกควบคุมด้วยความเค้นอัดที่ตกค้าง ความเค้นตกค้างเหล่านี้นำให้เกิด โมเมนต์ภายในการตัด ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการดีดกลับ การดีดกลับตัวยังจะเกิดขึ้นแต่จะหยุดจนกระทั่งโมเมนต์ภายในการตัดเป็นศูนย์ องค์ของการดีดกลับขึ้นอยู่กับมุมในการตัด วัสดุที่ใช้ทำท่อ ขนาดของท่อ Mandrel เครื่องจักร และเครื่องมือต่างๆ ในทางปฏิบัติจริงสามารถคำนวณการดีดกลับได้ ดังรูปที่ 2.18 จะแสดงการดีดกลับของท่อหลังจากการเคลื่อนย้ายเครื่องมือในการตัดออก



รูปที่ 2.18 การดีดกลับของเหล็กแผ่น [3]

5) การแตก หรือการแยกที่แนวรัศมีโค้งนอก (Cracking or Splitting on Outside Bend Radius) ดังรูปที่ 2.23 ข้อบกพร่องแบบนี้สามารถเกิดขึ้นได้หลายสาเหตุ อย่างแรกต้องตรวจสอบ และพยายามพิจารณาว่า ความเสียหายเกิดจากความเค้นดิ่ง (Tensile) ความยืด ความอ่อน (Ductile) หรือเกิดจากความเปราะแตกหักง่าย (Brittle) ความเสียหายที่เกิดจากการอ่อนตัวเกิดขึ้นได้เมื่อวัสดุมีการยืดมากๆ และความหนาที่ลดลงที่ด้านข้างแต่ละด้านของวัสดุจนเกิดการแตก และเส้นขอบของรอยแตกจะมีลักษณะยุ่งเหยิง การเปราะแตกเกิดขึ้นที่โดยไม่มีการยืดของเนื้อวัสดุซึ่งทำให้เส้นขอบของการแตกมีลักษณะเป็นมันเงาค่อนข้างสะอาดไม่ยุ่งเหยิง วัสดุที่มีความแข็ง และความแข็งแรงสูง



รูปที่ 2.19 การแตกของท่อ [3]

2.2 การติดตัวกลับ (Spring Back) [10]

หลังจากทำการตัดตามมุม และรัศมีของแม่พิมพ์ตัดประเภทใดประเภทหนึ่งแล้ว จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของมุม และรัศมีเล็กน้อยหลังจากการพับ เรียกว่า การติดตัวกลับของวัสดุ ดังรูปที่ 20 โดยการติดตัวกลับเกิดจากการคืนตัวในช่วงการเปลี่ยนรูปอย่างไม่ถาวร หรือช่วงการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation) ของวัสดุ ซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณที่ตัด คือความเค้นดึงจะเกิดขึ้นสูงสุดที่ขอบด้านนอกของรัศมีการตัด และลดลงตามแนวความหนาจนเป็นศูนย์ที่เส้นแกนกลางของโลหะแผ่น เช่นเดียวกับความเค้นอัดสูงสุดจะเกิดที่ผิวโค้งด้านในของรัศมีการตัด และลดลงจนเป็นศูนย์ที่เส้นแกนกลาง ในส่วนที่ไกลออกไปจนถึงผิวโค้งนอกสุด และในสุดค่าความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งแรงดึง และแรงอัดจะเกินค่าความแข็งแรงครากทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร แต่เมื่อแม่พิมพ์เปิดออกส่วนที่เป็นแถบการเปลี่ยนรูปแบบไม่ถาวรพยายามคืนตัว แต่ไม่สามารถกระทำได้ทั้งหมดเนื่องจากถูกยึดไว้ด้วยส่วนที่เปลี่ยนรูปถาวรไปแล้วทางด้านนอก ดังนั้นจึงเกิดการคืนตัวได้บางส่วนเพื่อสร้างความสมดุลระหว่างส่วนที่เปลี่ยนรูปถาวร และส่วนที่เป็นเปลี่ยนรูปแบบไม่ถาวร

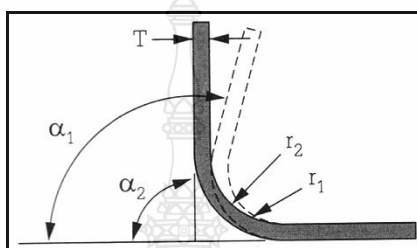
ค่าการติดตัวกลับของวัสดุจะเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งแรงคราก (Yield Strength) ค่าคงที่ของความแข็งแรง (Strain Hard Exponent) รัศมีการตัด และการติดตัวกลับของวัสดุจะลดลงเมื่อค่า Young Modulus และความหนาของวัสดุเพิ่มขึ้น การคาดเดาการติดตัวกลับของวัสดุสามารถประมาณได้จากค่าคงที่ของการติดตัวกลับ (Spring Back ; k_R) ดังสมการที่ 2.1

$$k_R = \alpha_2 / \alpha_1 = (r_1 + 0.5T) / (r_2 + 0.5T) \quad (2.1)$$

เมื่อ

k_R	=	ค่าคงที่ของการติดตัวกลับ
α_1	=	มุมตัดเริ่มต้น (ก่อนการติดตัวกลับ)

- α_2 = มุมดัดหลังการตีตัวกลับ
 r_1 = รัศมีการดัดของแม่พิมพ์
 r_2 = รัศมีการดัดของชิ้นงานหลังการตีตัวกลับ
 T = ความหนาของชิ้นงานดัด



รูปที่ 2.20 การตีตัวกลับ (Spring Back) [10]

การแก้ปัญหการตีตัวกลับ [11]

1) การพับให้มากกว่ามุมที่ต้องการเล็กน้อย (Over Bending) คือ การกำหนดมุมพับในแม่พิมพ์ให้มีขนาดใหญ่กว่ามุมที่ต้องการพับเล็กน้อย เพื่อให้หลังจากการตีตัวกลับแล้วได้มุมพอดีกับความต้องการ วิธีนี้ควบคุมได้ยาก เนื่องจากมีปัจจัยที่มีผลกับค่าการตีตัวกลับที่กล่าวมาข้างต้น โดยเฉพาะปัจจัยจากความหนาแผ่นโลหะที่จะมีค่าพิสัยความคลาดเคลื่อนจากการผลิตอยู่แล้ว ทำให้งานแต่ละชิ้นเกิดการตีตัวกลับที่ไม่เท่ากัน การออกแบบชิ้นงานพับจึงควรมีพิสัยที่ยอมรับได้สำหรับการผลิตด้วย วิธีการนี้จะใช้ได้สะดวกกับแม่พิมพ์ตัววี โดยเปลี่ยนมุมของฟันซ์และตายให้เล็กลง

2) การกดที่ส่วนล่างสุดของมุมที่ต้องการดัด เป็นการใช่วิธีการกดอัดที่บริเวณรัศมีการดัด เพื่อให้เกิดความเค้นอัดสูงในช่วงการเปลี่ยนรูปแบบถาวรในบริเวณที่ถูกกด คือใช้วิธีการกำจัดบริเวณที่เกิดความเค้นต่ำกว่าความเค้นครากของวัสดุ เพื่อไม่ให้เกิดการตีตัวกลับ วิธีการที่จะเพิ่มความเค้นอีกที่บริเวณการพับทำได้โดย วิธีการแรก คือการปรับตั้งรัศมีความโค้งที่ตายให้เกิดการลดความหนาของแผ่นโลหะบริเวณที่พับ (Develop Set) วิธีการที่สองทำปลายของฟันซ์ให้มีลักษณะเป็นสันนูน (Offset Punch) เพื่อให้เกิดการกดอัด และลดความหนาของแผ่นโลหะที่บริเวณรัศมีการดัด

3) การดึงโลหะแผ่นให้ยืดก่อนการดัด เป็นการทำการดึงชิ้นงานให้ยืดตัว เป็นการบังคับให้เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรบนแผ่นโลหะก่อนที่จะทำการขึ้นรูปตามที่ต้องการ

4) การเพิ่มระยะเวลาในการกด หรือกดค้าง คือการใช้เครื่องปั๊มระบบไฮดรอลิกซึ่งมีช่วงระยะเวลาในการกดยาวกว่าเครื่องปั๊มแบบทางกลจะช่วยลดการตีตัวกลับของแผ่นโลหะได้

5) การรีดลดความหนาผนัง เป็นการลดระยะเคลียร์ระหว่างพินซ์ และคายให้น้อยกว่าความหนาของแผ่นโลหะ และเป็นการเพิ่มความเค้นอัดให้เข้าสู่ช่วงการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ลดการเปลี่ยนแปลงรูปในช่วงยืดหยุ่น แต่จะต้องเพิ่มแรงในการดัด ซึ่งจะทำให้เกิดรอบชุดที่ขึ้นงาน และการสึกหรอของแม่พิมพ์ที่สูงด้วย

2.3 ความเค้น – ความเครียด (Stress - Strain) [12]

2.3.1 ความเค้น (Stress) หมายถึง ลักษณะของแรงต้านที่อยู่ภายในของโลหะ ที่มีความพยายามในการต้านแรงภายนอกที่มากระทำต่อวัสดุนั้น ๆ จะหาค่าได้จากแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่าแรงที่กระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านภายใน โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ

1) ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมาตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน

2) ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง

3) ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้อะตอมของวัสดุเคลื่อนที่ออกจากกันจะมีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) ทหารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวางซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน

2.3.2 ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ การเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอะตอมภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

1) การเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก (Elastic Deformation) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวยเนื่องจากผลความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้

2) การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้นโดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม

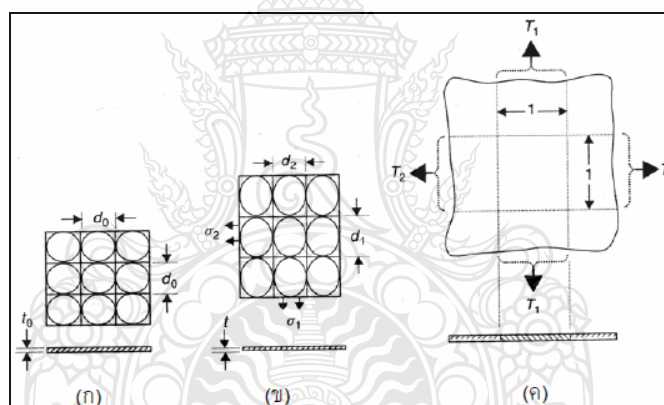
2.4 กริด (Grid) [10]

การคำนวณหาความเครียดตามแบบกริด (Grid Pattern) จะทำการสร้างโดยการกัดกรด และปล่อยกระแสไฟฟ้าที่บริเวณส่วนที่เป็นพื้นผิวหน้าของโลหะเพื่อให้เกิดแถวเรียงต่อกันเป็นพื้นที่ของจุดทดสอบ ซึ่งกริดนั้นต้องมีความถูกต้องแม่นยำก่อนที่จะขึ้นรูปโลหะให้เป็นรูปร่างสุดท้ายโดยใช้แรงขึ้น

รูป ซึ่งกริดที่ใช้สร้างบนชิ้นงานโลหะทั่วไปจะมีรูปแบบ สี่เหลี่ยม วงกลม วงรี และวงกลมผสมกับสี่เหลี่ยม (Combination) และกริดที่เป็นรูปร่างต่างๆ จะเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปหลังจากทำการขึ้นรูปโลหะ [10]

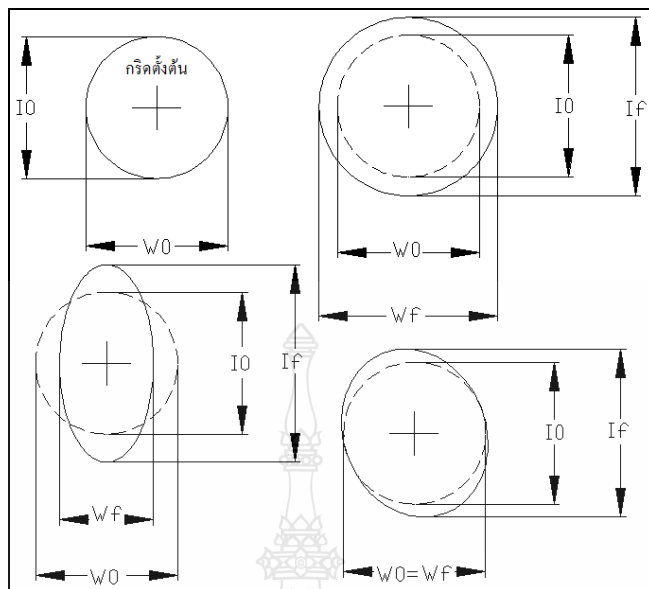
2.4.1 การเปลี่ยนรูปของโลหะในระนาบความเค้น (Deformation of Metal in Plane Stress)

ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane Stress) ของวัสดุซึ่งกำลังประยุกต์ใช้กับทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูป ดังรูปที่ 2.21 ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่มีความหนา t_0 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_0 หรือตารางขนาด d_0 ดังรูปที่ 2.21 (ก) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูป วงกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรีแกนหลัก (Major) คือ d_1 แกนรอง (Minor) คือ d_2 ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางหลักของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูปที่ 2.21 (ข) ส่วนความหนา คือ t ตามที่กรณีแสดงดังรูปที่ 2.21 (ค) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ T_1 และ T_2



รูปที่ 2.21 แบบกริดที่เปลี่ยนไปจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับโลหะแผ่น [10]

การเปลี่ยนรูปร่างไปของกริดอาจมีรูปร่างหลายลักษณะนอกเหนือจากวงรี อาทิเช่น กริดวงกลมใหม่อาจจะใหญ่กว่าวงกลมเดิม หรือเกิดการเยื้องกันระหว่างกริดเดิมกับกริดใหม่โดย กริดจะเปลี่ยนรูปหลังจากการขึ้นรูปโลหะแล้ว ซึ่งสามารถยกตัวอย่างในการเปลี่ยนรูปร่างของกริด ได้ ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แบบกริดที่เปลี่ยนไปจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับโลหะแผ่น [10]

ซึ่งในโครงการนี้จะใช้กริดวงกลมที่มีความกว้าง 2.5 มิลลิเมตร และความยาว 2.5 มิลลิเมตร หรือ เรียกอีกอย่างว่าเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นกริดแบบวงกลมผสมกับสี่เหลี่ยม (Combination) คือมีสี่เหลี่ยมล้อมรอบกริดวงกลมสี่วง ซึ่งรูปร่างของกริด ดังรูปที่ 2.23

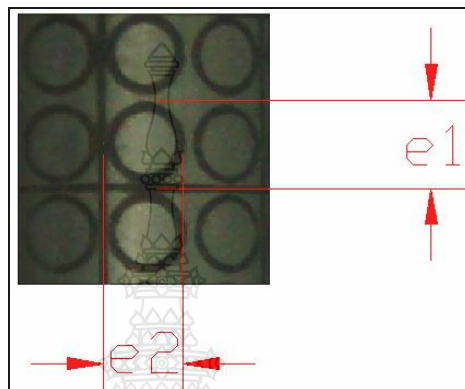


รูปที่ 2.23 กริดแบบวงกลมผสมสี่เหลี่ยม (Combination)

2.4.2 การคำนวณความเครียดหลักที่สัมพันธ์กับความเครียดตรง [13]

การคำนวณหาความเครียดหลัก (Major Strain) แทนด้วยสัญลักษณ์ (e_1) และความเครียดตรง (Minor Strain) แทนด้วยสัญลักษณ์ (e_2) ต้องทำการเลือกบริเวณที่กริดเกิดการ

เปลี่ยนรูป และทำการวัดหาขนาดความกว้าง ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของกริดหลังจากการขึ้นรูป หรือนำขนาดของกริดวงกลมหลังจากการขึ้นรูปมาหักลบออกด้วยขนาดของกริดวงกลมก่อนการขึ้นรูป ก็ได้ ซึ่งสมการความเครียดหลัก และความเครียดรองดังสมการที่ 2.2 และ 2.3 และการวัดขนาดกริด ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การวัดความเครียดหลัก (e_1) ความเครียดรอง (e_2)

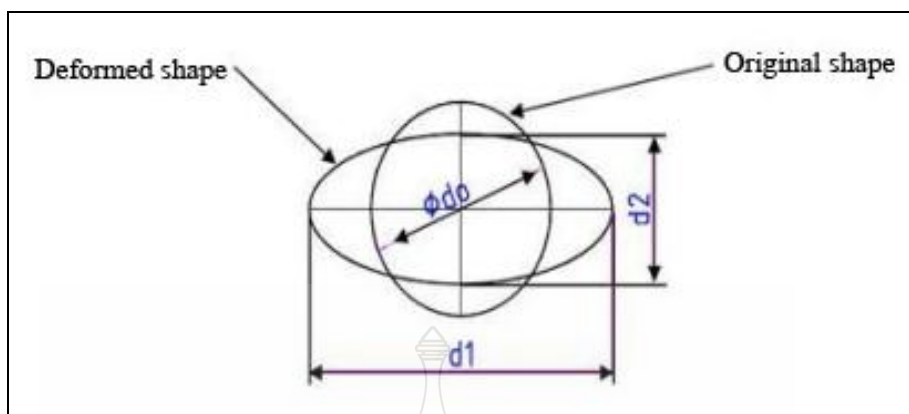
$$\text{ความเครียดหลัก } (e_1) \% = [(L_f - L_0) \times 100] / L_0 \quad (2.2)$$

$$\text{ความเครียดรอง } (e_2) \% = [(W_f - W_0) \times 100] / W_0 \quad (2.3)$$

เมื่อ L = ความยาว (Length)
 W = ความกว้าง (Width)
 0 = จุดเริ่มต้น
 f = จุดสุดท้าย

2.4.3 การคำนวณความเครียดเทียบเท่า

ความเครียดหลักและความเครียดรองที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการเพื่อใช้ในการตรวจสอบกรณีของการเกิดแบบต่างๆ วิเคราะห์ในพื้นที่วิกฤตของชิ้นงานหลังจากทำการขึ้นรูป ดังรูปที่ 2.25 และดังสมการที่ 2.4 - 2.7



รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลม

$$\text{ค่าความเครียดหลัก } (\epsilon_1) = \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (2.4)$$

$$\text{ค่าความเครียดรอง } (\epsilon_2) = \ln \frac{d_2}{d_0} \quad (2.5)$$

$$\text{ค่าความเครียดที่ความหนา } (\epsilon_3) = \ln \frac{t_2}{t_0} \quad (2.6)$$

$$\text{ค่าความเครียดเทียบเท่า } (\epsilon) = \sqrt{\frac{2}{3}(\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2)} \quad (2.7)$$

เมื่อ	d_0	=	ขนาดกริดเริ่มต้น
	d_1	=	ความยาวของกริดที่เปลี่ยนไป
	d_2	=	ความกว้างของกริดที่เปลี่ยนไป
	t_0	=	ความหนาของชิ้นงานเริ่มต้น
	t_2	=	ความหนาของชิ้นงานสุดท้าย

2.5 การขึ้นรูปแบบเย็น(Cold Working) [2]

การขึ้นรูปแบบเย็น (Cold Working) หมายถึง การขึ้นรูปวัสดุโดยใช้แม่พิมพ์ และขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature) และไม่ทำให้เกิดผลึกใหม่ โดยส่วนใหญ่จะเป็นการแปรรูปวัสดุที่อุณหภูมิห้อง (โดยประมาณ 20°C ถึง 25°C) หรือ สูงเล็กน้อยแต่ต้องต่ำกว่าอุณหภูมิของการตกผลึกใหม่ (Recrystallisation Temperature) เพื่อให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic

Deformation) ซึ่งการขึ้นรูปเย็นโลหะจะมีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ปกติ ดังนั้นจะต้องใช้กำลัง แรง ในการขึ้นรูปสูงมากเพื่อให้เกิดความเค้น (Stress) ในโลหะจนถึงจุดอลาสติก (Elastic Limit) หรือ จุดคราก (Yield Point) กรณีถ้าปล่อย หรือ ลดแรงที่กดออกโลหะก็จะคืนเข้ารูปเดิมไม่เกิดการแปรรูป จะเห็นว่าการขึ้นรูปเย็นมีข้อยุ่งยากกว่าการขึ้นรูปร้อนแต่จะมีส่วนดีอยู่ 2 ประการคือ สามารถควบคุม ขนาดของโลหะในช่วงสุดท้ายได้แน่นอน และผิวของโลหะสะอาดและเป็นมันเรียบ แต่ก็มีข้อด้อยที่พบ เห็นได้อย่างชัดเจนคือ เกิดความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) มาก และเกรน (Grain) ของ โลหะเกิดการแตกหักได้ง่าย โดยทั่วไปจะแบ่งประเภทของการเปลี่ยนรูปของโลหะหรือของวัสดุ ออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

2.5.1 การเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก (Plastic Deformation)

การเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติกกล่าวคือ เมื่อวัสดุได้รับความเค้นในระดับต่ำกว่าขีดจำกัด ของความยืดหยุ่น (Elastic Limit) การเสียรูปอย่างถาวร หรือ ความเครียดจะเกิดขึ้นชั่วคราว เมื่อปลดความ เค้น หรือ แรงกระทำออกวัสดุจะกลับคืนรูปเดิม แต่หากวัสดุได้รับความเค้นเลยขีดจำกัดความยืดหยุ่น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะเกิดขึ้นอย่างถาวรเรียกว่า (Plastic Deformation) ซึ่งเมื่อปลดความเค้น หรือ แรงแล้ววัตถุจะไม่กลับคืนรูปเดิม [2]

2.5.2 การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น (Elastic Deformation)

การเปลี่ยนรูปอลาสติก (Elastic Deformation Property) หมายถึง การเปลี่ยนรูปที่ สามารถคืนตัวได้อย่างสมบูรณ์ (Reversible) เมื่อแรงกระทำนั้นถูกปลดออก เช่น เมื่อดึงวัสดุจะยืดตัว ออกจนถึงระยะหนึ่งแล้วก็หยุดเมื่อปลดแรงวัสดุก็จะหดตัวสู่ความยาวเดิม หรือ การจับยึดกันของ พันธะอะตอม (Atomic Bonds) จะไม่หลุดออกจากกันแต่เมื่อปลดแรงออกอะตอมก็จะกลับสู่ตำแหน่ง ที่สมดุล นั่นหมายความว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะมีการยืดหยุ่นกลับได้ ส่วนใหญ่การเปลี่ยน รูปแบบอลาสติกเกิดจากแรงกระทำที่ไม่สูงนัก และการเปลี่ยนรูปดังกล่าวมักจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ขนาดของแรง โดยปกติเรามักจะถือว่าการ เปลี่ยนรูปในช่วงอลาสติกนี้จะเกิดขึ้นโดยทันทีเมื่อมีแรง กระทำ แต่ที่จริงแล้วการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะเป็นเมื่อถูกแรงกระทำ หรือ การคืนรูปเมื่อหยุดแรง กระทำล้วนต้องใช้ระยะเวลาหนึ่งเสมอ ในโลหะส่วนมากจะเวลานี้จะสั้นมากจนวัดไม่ได้แต่ในวัสดุ บางชนิด เช่น ยาง ส่วนที่เปลี่ยนช้าๆ คือขึ้นกับเวลา (Time Dependent) นี้อาจมีมากพอจนวัดได้ คุณสมบัติการเปลี่ยนรูปโดยขึ้นกับเวลานี้ เรียกว่า การเปลี่ยนรูปที่ขึ้นกับเวลา (Anelasticity) แต่ก็ยังเป็น ส่วนหนึ่งของการเปลี่ยนรูปแบบอลาสติก เพราะจะคืนตัวโดยสมบูรณ์ได้ในที่สุด [2]

จากที่กล่าวข้างต้นการขึ้นรูปแบบเย็นเป็นกระบวนการขึ้นรูปเพื่อให้วัสดุ หรือ โลหะเกิดการ เปลี่ยน แปลงรูปร่างชนิดถาวรในที่อุณหภูมิต่ำทั้งนี้โดยไม่ทำให้เกิดผลึกใหม่ขึ้น การขึ้นรูปแบบเย็น หลักๆ จะประกอบไปด้วย การดัดงอ (Bending) การรีดเย็น (Cold Rolling) การอัดรีด (Extruding) การบีบงอ (Squeezing) การรีดขึ้นรูป (Shear Spinning) ฯลฯ [14]

2.6 ทฤษฎีเกี่ยวกับวัสดุ

วัสดุทุกชนิดที่ยึดตัวได้จะสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้โดยการดัดงอ สำหรับเหล็กโครงสร้างที่ไม่มีส่วนผสม ความยึดตัวจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมคาร์บอน ความยึดตัวจะยิ่งสูงขึ้นเมื่อส่วนผสมของคาร์บอนน้อยลง เหล็กที่มีส่วนผสมคาร์บอนสูงจะมีความยึดตัวน้อย และมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้วยการดัดงอสูง โลหะที่ไม่ใช่เหล็กและโลหะผสมของโลหะเหล่านี้ เช่น ทองแดง (Cu) ทองเหลือง (Ms) อะลูมิเนียม (Al) ตะกั่ว (Pb) ดีบุก (Sn) สังกะสี (Zn) นิกเกิล (Ni) สามารถดัดงอได้อย่างดีในอุณหภูมิปกติ โลหะเหล่านี้มีสภาพที่อ่อนมีความยึดตัวสูง และสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อย่างดี [17]

2.6.1 เหล็ก เกรด ASTM DIN St37

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) บางครั้งเรียกว่า เหล็กเหนียว มีคุณสมบัติอ่อน ยึดตัวได้ดี บิดงอได้ดี ทนแรงกระแทกได้ดี ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 2.1 และคุณสมบัติทางกล ดังตารางที่ 2.2 เหล็กกล้าชนิดนี้สามารถแบ่งได้ตามลักษณะการใช้งานเป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้คือ เหล็กที่นำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องผ่านกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติโดยใช้ความร้อนจะใช้อักษรนำหน้าว่า St และตามด้วยตัวเลขซึ่งบอกถึงความสามารถที่จะทนแรงดึงได้สูงสุดของเหล็กชนิดนี้มีหน่วยเป็น กก./มม² อย่างที่สองคือ เหล็กที่ต้องผ่านกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติโดยใช้ความร้อนก่อนที่จะใช้งาน เหล็กชนิดนี้จะนำหน้าด้วยอักษร C และตามด้วยตัวเลขที่แสดงปริมาณเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอน (จะต้องหารด้วย 100 เสมอ)

ดังนั้นเหล็ก St 37 หมายถึงเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่สามารถทนแรงดึงได้สูงสุด 37 กก./มม²

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กเกรด DIN St 37

C	Fe	Mn (max)	P (max)	S (max)	Si
0.10 - 0.30	98	0.9	0.04	0.05	0.28

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเกรด DIN St 37

Material	Elastic modulus (MN/ m ²)	Tensile strength (MN/m ²)	Yield strength (MN/m ²)	Shear strength (MN/m ²)	Modulus of rigidity (MN/m ²)

St 37	210,000	370	240	140	80,000
-------	---------	-----	-----	-----	--------

2.6.2 อลูมิเนียม เกรด ASTM AA6063 [15]

อลูมิเนียมเป็นโลหะที่สำคัญ ได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) ทั้งนี้เพราะอลูมิเนียมมีคุณสมบัติที่เด่นหลายประการ คือ อลูมิเนียมมีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา และมีกำลังวัสดุต่อน้ำหนักสูงจึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้ไม้สอย ตลอดจนชิ้นส่วนบางอย่าง ในเครื่องบิน จรวด ชีปนาอูท และอุปกรณ์ในรถยนต์ เพื่อลดน้ำหนักของรถให้น้อยลง จะได้ประหยัดเชื้อเพลิง มีความเหนียวมาก สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่ายโดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ หลอมหลอมง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง เป็นโลหะที่ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย สามารถใช้ทำภาชนะหุงต้มและห่อหุ้มรับอาหารได้ซึ่งอลูมิเนียมนั้นแบ่งออกเป็นกลุ่ม ๆ 8 กลุ่ม ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งมีสัญลักษณ์บ่งบอกประเภทแตกต่างกันออกไป

ตารางที่ 2.3 สัญลักษณ์ของอลูมิเนียมผสม แบ่งออกเป็น 8 กลุ่ม [15]

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอลูมิเนียม
1XXX	อลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ ไม่น้อยกว่า 99.00%
2XXX	ทองแดง (Copper, Cu)
3XXX	แมงกานีส (Manganese, Mn)
4XXX	ซิลิกอน (Silicon, Si)
5XXX	แมกนีเซียม (Magnesium, Mg)
6XXX	แมกนีเซียมกับซิลิกอน (Magnesium, Mg and Silicon, Si)
7XXX	สังกะสี (Zinc, Zn)
8XXX	ธาตุอื่นๆ (Other Element)

1) อลูมิเนียมบริสุทธิ์ในทางการค้า (Commercially Pure Aluminium) 1XXX

อลูมิเนียมบริสุทธิ์ในทางการค้า คือ อลูมิเนียมที่มีปริมาณอลูมิเนียมต่ำสุด 99.3% ถึง 99.7% อลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์มากๆ เหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน เช่น ตัวนำไฟฟ้า และแผ่นสะท้อนแสง เป็นต้น ส่วนอลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์น้อย จะเพิ่มธาตุหลัก และทองแดงเข้าไปเพื่อที่จะใช้ผลิตอลูมิเนียม หมายเลข 1100 ซึ่งเป็นมาตรฐาน (Standard) ของอลูมิเนียมผสมในทางการค้า จะทำให้มีความยืดหยุ่น ความอ่อน และคุณสมบัติการเชื่อมดีมาก อลูมิเนียมบริสุทธิ์ทางการค้าจะถูกนำไปใช้งานทางด้านเครื่องตกแต่ง เพราะมีความต้านทานการกัดกร่อนดีมาก

2) อลูมิเนียมผสมทองแดง (Aluminium Copper Alloys) 2XXX

ทองแดง จัดเป็นโลหะที่มีระบบผลึกเป็น FCC (Face Centered Cubic) เหมือนกับ อลูมิเนียม จึงสามารถละลายในอลูมิเนียมได้ดี ทำให้คุณสมบัติทางกล ของอลูมิเนียมเปลี่ยนแปลงไป และทองแดงเป็นธาตุหนึ่งที่มีความสำคัญ อลูมิเนียมผสมทองแดงส่วนมากอยู่ในรูปสารละลาย ของแข็ง และเหมาะกับการจัดการ เรื่องการปฏิบัติการทางความร้อน (Heat Treatment) สามารถทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยเปลี่ยนแปลงการตกผลึกของสารละลายของแข็ง พบว่า ทองแดงละลาย ใน อลูมิเนียมได้สูงสุด 5.65% ที่อุณหภูมิ 548°C และ ปริมาณทองแดงจะละลาย ในอลูมิเนียมได้น้อยลงที่ อุณหภูมิต่ำกว่า 548°C และ จะเหลือ ประมาณ 0.5% ที่อุณหภูมิ 200°C ที่ส่วนผสมของ ทองแดง 4% จะนิยมใช้การทำเองจึง เพื่อปรับปรุง คุณสมบัติทางกล ซึ่งเมื่อเย็นตัวลงมา จะมี โครงสร้างเป็น $Al+CuAl_2$ และ ระบบผลึกเป็น BCC (Body Centered Cubic)

3) อลูมิเนียมผสมแมงกานีส (Aluminium Manganese Alloys) 3XXX

แมงกานีส เป็นโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ Cubic โดยมีอุณหภูมิ หลอมละลายที่ 1245°C การเพิ่มธาตุแมงกานีส ประมาณ 1.2% ในอลูมิเนียม (0.6%Fe และ 0.2%Si) เป็นอลูมิเนียมผสม ที่มีความแข็งแรงพอสมควร โดยไม่มีการอบชุบให้ความร้อน แมงกานีสเพิ่มความแข็งแรง ให้ อลูมิเนียม โดยอยู่ใน รูปสารละลายของแข็ง และ มีการกระจาย อย่างทั่วถึง อนุภาคเล็กจะเพิ่มขึ้น โดยการเติมแมกนีเซียม 1 % หรือมากกว่า จะได้ความแข็งแรง และ ความสามารถในการใช้งานตามที่ต้องการ

4) อลูมิเนียมผสมซิลิกอน (Aluminium Silicon Alloys) 4XXX

มีอุณหภูมิหลอมละลายอยู่ที่ 571°C โดยมีส่วนผสมทางเคมีดังนี้ ซิลิกอน (Si) 11-13.5, ทองแดง (Cu) 0.5-1.3, สังกะสี (Zn) 0.25, เหล็ก (Fe) 1, แมกนีเซียม (Mg) 0.8-1.3, นิกเกิล (Ni) 0.5-1.3 และอื่นๆ 0.05 ซึ่งการนำไปใช้งานนั้นมักจะนำไปทำพวกลูกสูบและอุปกรณ์ที่ต้องการ คุณสมบัติในการทนความร้อนสูง

5) อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (Aluminium Magnesium Alloys) 5XXX

แมกนีเซียม เป็นโลหะที่มีโครงสร้างผลึก Hexagonal และ มีอุณหภูมิหลอมละลายใกล้เคียงกับอลูมิเนียม คือ ที่อุณหภูมิ 560°C จึงทำให้การละลาย ของแมกนีเซียม ในอลูมิเนียมได้ไม่มาก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำละลายได้ประมาณ 3% ที่อุณหภูมิห้อง และละลาย ได้สูงสุดที่ 15.35% ที่อุณหภูมิ 451°C ดังในแผนภาพสมดุล จะพบว่าจะเกิด ปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิ 450°C ที่ 34.5% แมกนีเซียม ปฏิกิริยายูเทคติกนี้ จะให้โครงสร้างอลูมิเนียม และ โครงสร้าง β ซึ่งเป็น สารประกอบเชิงโลหะ มีสูตรทางเคมีว่า Mg_2Al_3 มีคุณสมบัติแข็งแรงและเปราะ

6) อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน (Aluminium Magnesium Silicon Alloys)

6XXX

การผสมแมกนีเซียม (0.6-1.2%) และ ซิลิกอน (0.4-1.3%) ในอลูมิเนียม ซึ่งเป็นการจัดอยู่ในกลุ่ม 6XXX อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน ที่ผ่านการขึ้นรูปมาก่อน ทำให้สามารถทำการเอจจิ้ง เพื่อเพิ่มความแข็ง และความแข็งแรง ในอลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน สาเหตุที่นิยมทำการเอจจิ้ง เพราะว่า แมกนีเซียมและซิลิกอนเป็นธาตุ ในจำนวนธาตุทั่วไปในปัจจุบัน ที่สามารถรวมตัวกัน ในรูปแบบของ สารประกอบเชิงโลหะ Mg_2Si ซึ่งสารประกอบเชิงโลหะ Mg_2Si นี้เป็นสภาพกึ่งเสถียร (Metastable) อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน บางหมายเลข อาจมีการเพิ่มโครเมียม เพื่อช่วยทำให้เพิ่ม ความแข็งแรง และ ควบคุมขนาดของเกรน หรือ อาจจะมีการเพิ่มทองแดง เข้าไปในบางหมายเลข เพื่อเพิ่มความแข็งแรงเหมือนกัน แต่จะทำให้ ความต้านทาน การกัดกร่อนลดลง พบว่า อลูมิเนียมยอมให้สารประกอบเชิงโลหะ Mg_2Si ละลายสูงสุดที่ 1.85% ที่อุณหภูมิ $595^{\circ}C$ และให้ปฏิกิริยายูเทคติกที่ส่วนผสม Mg_2Si 13% แต่เมื่อ อุณหภูมิลดต่ำลงมาจาก $595^{\circ}C$ จะปรากฏการละลายของ Mg_2Si ในอลูมิเนียมต่ำลงจนเหลือ 0.2% ที่อุณหภูมิ $200^{\circ}C$

7) อลูมิเนียมผสมสังกะสี (Aluminium Zinc Alloys) 7XXX

จากแผนภาพสมดุลอลูมิเนียมสังกะสี เราจะพบว่า สังกะสี (Zn) มีอุณหภูมิการหลอมละลายต่ำกว่า อลูมิเนียม (Al) คือ อุณหภูมิที่ $419.5^{\circ}C$ นอกจากนี้แล้ว สังกะสียังมีโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal ซึ่งแตกต่างจากอลูมิเนียม การผสมสังกะสี 4-8% และแมกนีเซียม 1-3% ในอลูมิเนียม ใช้ในการผลิตอลูมิเนียมผสม ที่แปรรูปเย็น สามารถปฏิบัติการ ทางความร้อนได้ ในกลุ่ม 7XXX อลูมิเนียมผสมบางกลุ่ม ถูกพัฒนาคุณสมบัติ ความแข็งแรงสูงสุด ของพื้นฐาน อลูมิเนียมผสมสังกะสี และแมกนีเซียม ทั้งสองธาตุ มีความสามารถในการละลาย ในสภาวะสารละลายของแข็งสูง นอกจากนี้ การเพิ่มทองแดง 1-2% ลงในกลุ่ม 7XXX ทำให้มีคุณสมบัติ ด้านความแข็งแรง ของอลูมิเนียมผสมสังกะสี และผสมแมกนีเซียมสูงขึ้น จะนิยมนำไปใช้งาน ทางด้านการอากาศยาน ที่มีความต้องการ ความแข็งแรงสูง

ซึ่งโครงการนี้ศึกษาอลูมิเนียม เกรด ASTM AA6063 ซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมี ดังตารางที่ 2.4 และมีคุณสมบัติทางกล ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน ASTM AA6063 [16]

Mg	Mn	Fe	Si	Cu	Ti	Zn	Cr
0.4-0.9	≤ 0.01	≤ 0.35	0.2-0.6	≤ 0.10	≤ 0.10	≤ 0.10	≤ 0.10

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน ASTM AA6063 [16]

Temper	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
O	70-80	90	48	-
T1	68.9	152	90	20
T4	68.9	172	90	22
T5	68.9	186	145	12
T6	68.9	241	214	9

2.6.3 ทองแดง เกรด UNS C11000

ทองแดงเป็นโลหะที่ใช้ประโยชน์และมีความสำคัญในด้านอุตสาหกรรมเป็นที่สองรองจากเหล็ก เนื่องจากเป็นวัสดุที่เป็นตัวนำความร้อนที่ดี จึงใช้ทำอุปกรณ์เครื่องถ่ายเทความร้อน เช่น ทำเครื่องควบแน่น (condenser) หอกลั่น นอกจากนี้ ทองแดงมีสภาพต้านทาน (resistivity) ต่ำเป็นที่สองรองจากเงิน จึงเป็นสื่อไฟฟ้าอย่างดี ปริมาณทองแดงจำนวนมากกว่าครึ่งหนึ่งที่ผลิตได้ในโลกใช้ในกิจการอุตสาหกรรมไฟฟ้า เช่น ทำสายไฟฟ้า ลวดที่ใช้ในกิจการไฟฟ้าและใช้เป็นตัวนำความร้อน ทองแดงเป็นโลหะที่ทนต่อการสึกกร่อนตามธรรมชาติได้ดีมาก เกรดทองแดงถูกแบ่งเป็น 6 กลุ่มใหญ่คือ

1) ทองแดง เป็นทองแดงบริสุทธิ์ที่ใช้ในการค้าเป็นหลัก เพราะมีน้ำหนักรวม และอ่อน อีกทั้งยังมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ไม่ถึง 0.7% เกรดของทองแดงบริสุทธิ์ที่ระบุโดย UNS คือ C10100 ถึง C13000 โดยเกรดทองแดงที่เบานี้ประกอบด้วยธาตุอัลลอยด์เพียงเล็กน้อยที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของทองแดงอย่างใดอย่างหนึ่ง

2) Electrolytic tough pitch copper C11000 ทำมาจากทองแดงขี้ลอบ ซึ่งทองแดงได้ผ่านการปรับแต่งให้มีสภาพการนำไฟฟ้า และ C11000 เป็นเกรดทองแดงที่ใช้ในการนำไฟฟ้าโดยทั่วไป เพราะมีสภาพการนำไฟฟ้าสูง มากกว่า 100% IACS และมีปริมาณออกซิเจนเท่ากับ C12500 แต่มีส่วนประกอบซัลเฟอร์ที่แตกต่างกัน โดย C11000 มีความไม่บริสุทธิ์ของโลหะอยู่ทั้งหมด 50 ppm รวมทั้งซัลเฟอร์

3) เกรดทองแดงแบบไม่ผสมออกซิเจน C10100 และ C10200 ผลิตขึ้นโดยการหลอมเหนียวนำกระแสไฟฟ้า ด้วยขี้ลอบภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน และผลิตโดยกระบวนการป้องกันและลดอากาศ และทำให้มีไฮโดรเจนต่ำ

4) ทองแดง-นิกเกิล อัลลอยด์ (copper-nickels, cupro-nickels) คือเกรดทองแดงที่ประกอบด้วยนิกเกิล 1.5-45% เป็นธาตุหลัก ตามที่ Unified Numbering System (UNS) กำหนด ทองแดง-นิกเกิล อัลลอยด์ระบุด้วยหมายเลขจาก UNS C70000 ถึง UNS C73499 อัลลอยด์กลุ่มนี้ใช้ในการผลิตเหรียญ, อุปกรณ์ที่ใช้ในน้ำทะเล, เครื่องระเหย (evaporators), ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger tubes), ระบบไฮดรอลิกในยานยนต์ (automotive hydraulic) และ ระบบหล่อเย็น (cooling systems)

5) นิกเกิล - เงิน ไม่ได้มีส่วนประกอบของเงินและอาจจะเป็นทองเหลืองที่เพิ่มนิกเกิลเข้าไป โดยที่นิกเกิลถูกเพิ่มเข้าไปในปริมาณมากแต่ในความเป็นจริงแล้วอยู่ระหว่าง 9 ถึง 30% ขึ้นอยู่กับงานที่ใช้ และปริมาณทองแดงมีแนวโน้มที่จะเท่าเดิมคือประมาณ 60-65% แต่สังกะสีจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิล ปริมาณนิกเกิลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เปลี่ยนเป็นสีขาว เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน และลดความอ่อน

6) นิกเกิล - เงิน ถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานที่ใช้โลหะนอกกลุ่มหลัก เนื่องจากคุณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน, สี และคุณภาพในการขึ้นรูปเย็น วัสดุที่ทำมาจาก นิกเกิล เงิน เช่นหม้อน้ำรถยนต์, ลูกปืนของปากกา, คีย์ของเครื่องดนตรี, ตัวถังของทรานซิสเตอร์ (transistor casings), electrical contacts, architectural ironmongery, มิด และอื่นๆ ตามที่ UNS กำหนดขึ้น นิกเกิล เงิน ระบุด้วยหมายเลขจาก C73500 ถึง C79999

คุณสมบัติที่ทำให้ทองแดงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานได้หลากหลายประเภท เช่น ความแข็งแรง, สภาพตัวนำ, การต้านทานการกัดกร่อน, การแปรรูป และความอ่อน ซึ่งโครงการนี้ศึกษาทองแดง เกรด UNS C11000 ซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมี ดังตารางที่ 2.6 และมีคุณสมบัติทางกล ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 ส่วนผสมทางเคมีของทองแดง เกรด UNS C11000

Copper	Oxygen
99.9	0.04

ตารางที่ 2.7 สมบัติทางกลของทองแดง เกรด UNS C11000

Material	Condition	Elastic modulus	Tensile strength	Yield strength	Elongation (%)
----------	-----------	-----------------	------------------	----------------	----------------

		(GPa)	(MPa)	(MPa)	
C11000	Cold Work	115	345	310	6

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีการดัด และหลักการทำงานของเครื่องดัดที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นแนวคิดในการออกแบบเครื่องดัดเหล็กของงานวิจัยนี้ ซึ่งได้มีผู้ทำการศึกษา และวิจัยรวมทั้งพัฒนาสร้างเครื่องดัดเหล็กซึ่งสามารถยกมาเป็นตัวอย่างได้ดังต่อไปนี้

J D Squared Inc [17] ได้ทำการออกแบบเครื่องดัดเหล็กโดยระบบไฮดรอลิกส์ทำการหมุน Die ให้เคลื่อนที่ดัดท่อไปตามรัศมีส่วนโค้งของลูกดัด (Bend Die) โดยขีดความสามารถในการดัดคือ ดัดเหล็กท่อได้เป็นมุมสูงสุด 360 องศา โดยขณะทำการดัดลูกดัดจะยึดแน่นติดอยู่ดับที่ไม่เคลื่อนตาม Die เนื่องจากถูกยึดแน่นให้ติดกับตัวเสาตั้งเครื่องดัดเหล็ก และยึดท่อเหล็กให้ติดแน่นกับ Backing Block ด้วย H – Plate ซึ่งเป็นแผ่นสลิเลียม และด้วย U – Stap ซึ่งมีลักษณะเป็นโลหะแผ่นที่มีรูปร่างเป็นตัวยู นอกจากนี้มี Pointter เพื่อเป็นอุปกรณ์บ่งบอกองศาในการดัดที่ติดตั้งอยู่บนแผ่นบอกองศาในการดัด

Bill Smith [18] ทำการศึกษาการดัดเหล็กท่อสลิเลียมโดยใช้แม่พิมพ์ดัดแบบ Rotary Draw Bending , Compression Bending , Roll Bending โดยเครื่องดัดที่ได้ใช้ในการทดลองดัดคือเครื่องดัดที่ถูกควบคุมด้วยตัวเลข (Numerical Control ; CNC) ในขณะทำการดัดชิ้นงานท่อเหล็กจะอยู่กึ่งกลางระหว่างลูกดัด และลิมดัด อีกทั้งชิ้นงานถูกจับให้อยู่นิ่งกับที่ด้วย Clamp Block และมี Mandrel สอดเข้าไปในท่อ ซึ่งในการทดลองดัดเหล็กท่อสลิเลียมพบว่ามีรอยแตกอยู่ที่บริเวณส่วนโค้งของเหล็กท่อ

ROHIT AGARWAL [19] ทำการศึกษาการดัดท่อโดยใช้แรงดันโดยใช้แม่พิมพ์แบบ Rotaty Draw Bending พบว่าชิ้นงานที่ทำการดัดเกิดข้อบกพร่องคือ หนึ่งรอยย่น (Wrinkling) ที่พื้นผิววงในของเหล็กท่อโค้ง โดยผิววงในนั้นจะตกอยู่ภายใต้การควบคุมของความเค้นแรงอัด สองหน้าตัดที่เกิดความบิดเบี้ยว (Cross Section Distortion) ตามที่อธิบายข้างต้น ที่ผนังวงนอกของท่อถูกควบคุมโดยความเค้นดึง ในทางตรงกันข้ามผนังวงในของท่อถูกควบคุมด้วยความเค้นอัด จึงมีแนวโน้มที่ปลายท่อจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งไปจากเส้นแกนกลาง ที่ผนังวงนอกของท่อมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนเข้าสู่เส้นแกนกลาง สามความแตกต่างของผนัง (Variation in Wall Thickness) ในระหว่างกระบวนการดัด โมเมนต์ของการดัดก่อให้เกิดแรงในแนวแกนบริเวณวงใน (Inner) วงนอก (Outer) ของท่อโลหะ ซึ่งวงใน วงนอกของท่อโลหะนั้นจะตกอยู่ภายใต้ความเค้นอัด (Compressive Stress) และความเค้นดึง

(Tensile Stress) ตามลำดับ ผลลัพธ์ที่ได้จากความเค้นข้างต้นนี้จะทำให้หน้าตัดวงนอก เกิดความบางลง (Extrados)

M.KOC [20] ทำการศึกษาการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบรอยร่นที่เกิดจากการดัดท่อแบบ Rotary Draw Bending โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ชื่อ ABAQUS ซึ่งชิ้นงานดัดท่อถูกตัดโดยเครื่องตัดที่ใช้ระบบตัวเลขควบคุม (Numerical Control ; CNC) ซึ่งในระหว่างการดัดหน้าตัดวงนอกของท่อจะเกิดความบางลง (Extrados) จนทำให้เกิดความเสียหาย จึงใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองความเสียหายโดยกำหนดให้วัสดุท่อเป็น Mild Steel (MS264-35) ซึ่งมาตรฐานของการทดสอบแรงดึงอ้างอิงกับมาตรฐาน (ASTM-E8) มีความโตวงนอกเท่ากับ 85.7 มิลลิเมตร ส่วนวงในเท่ากับ 80.7 มิลลิเมตร มีความยาว 1,000 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลองชิ้นงานจริงพบว่า ที่หน้าตัดของท่อบริเวณที่ถูกดัด (C-Section) ของการจำลองมีความหนาสูงสุด และต่ำสุดเท่ากับ 2.95 และ 2.40 มิลลิเมตรตามลำดับ ส่วนผลของความหนาจากการทดลองจริงเท่ากับ 2.98 และ 2.37 ตามลำดับ ดังนั้นผลสรุปทางตัวเลขที่ได้จากการจำลองจึงเป็นที่ยอมรับได้

Y. Zhang, D. Redekop [21] ทำการจำลองเอลิเมนต์ผนังบางของแรงดันดัดในกระบวนการดัดท่อโดยใช้โปรแกรม LS-DYNA โดยการดัดดัดเหมาะกับการดัดท่อขนาดเล็กในงานวิจัยได้กำหนดให้รัศมีในการดัดเท่ากับ 70 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้เป็นอลูมิเนียมผสม (AA6063) ซึ่งการวิเคราะห์เป็นแบบไม่เชิงเส้น (Non Linear) โดยกำหนดเงื่อนไขแรงกระทำที่บริเวณ Plunger เป็นแบบ Axial Load ผลที่ได้คือค่าความเค้น Von Mises Stress ในแต่ละบริเวณของท่อ โดยผลการวิเคราะห์โดยสังเขปคือ บริเวณของท่อที่เป็นส่วนโค้งความหนาของผนังท่อในส่วน Extrados เท่ากับ 1.11 และ Intrados เท่ากับ 1.63 มิลลิเมตร และบริเวณท่อก่อนบริเวณดัดโค้งมีความหนาของผนังท่อในส่วน Extrados เท่ากับ 1.44 และ Intrados เท่ากับ 1.58 มิลลิเมตร ส่วนบริเวณท่อก่อนบริเวณดัดโค้งมีความหนาของผนังท่อในส่วน Extrados เท่ากับ 1.20 และ Intrados เท่ากับ 1.26 มิลลิเมตร โดยบริเวณส่วนโค้งนั้นมีความหนาของผนังส่วน Extrados น้อยที่สุด และเป็นบริเวณที่เกิดความเค้น Von Mises Stress สูงสุดบริเวณ Extrados เท่ากับ 0.14 GPa และ Intrados เท่ากับ 0.17 GPa

K Mahanty [22] ทำการจำลองการดัดแบบ Rotary Draw Bending ของท่อโดยใช้โปรแกรม ANSYS/LS-Dyna ทำการดัดเป็นมุม 90 องศา และความโตของท่อเท่ากับ 69.8 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุอะลูมิเนียม (Al 6061-T4) และกำหนดความเร็วดัดเชิงมุมของลิ้มดัด (Bend Die) เท่ากับ velocity of 2 mm/ms ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งทำให้ชิ้นงานเสียหายบริเวณส่วนโค้งด้านนอกคือเกิดการบวมของผนังท่อ และส่วนโค้งด้านในเกิดรอยร่นขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 ตลับเมตร

ตลับเมตรจะถูกใช้วัดขนาดความยาวของชิ้นงานโดยแสดงได้ทั้งขนาดหน่วยนิ้วและหน่วยมิลลิเมตรใช้ในงานวัดที่ไม่ต้องการความละเอียดมากซึ่งตลับเมตรที่ใช้จะยาว 3.6 เมตร (3.6M / 12FT) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตลับเมตร

3.1.2 เวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิตอล

เวอร์เนียดิจิตอลจะถูกใช้วัดขนาดความหนาแน่นเหล็กท่อกว้าง โดยแสดงขนาดได้ การวัดความหนาจะใช้ปาก



รูปที่ 3.2 เวอร์เนียคาลิปเปอร์แบบดิจิทัล

3.1.3 Magnetic

Magnetic

ค่าองศาของชิ้นงานหลัง
อ่านค่าได้ง่ายขึ้น ดังรูปที่



Protactor

Protactor ใช้สำหรับวัด
การตัด เพื่อให้สามารถ
3.3

รูปที่ 3.3 Magnetic Protactor

3.1.4 อุปกรณ์บล็อกและแผ่นกริด

อุปกรณ์สำหรับตีกริดโดยประกอบไปด้วยบล็อกใช้สำหรับบล็อกแผ่นฟิล์มพลาสติกที่เป็นลายกริด โดยแผ่นกริดเป็นลายเป็นวงกลมในช่องสี่เหลี่ยม โดยมีช่องละ 4 วงหรือเรียกว่าแผ่น กริดแบบผสมวงกลมกับสี่เหลี่ยม (Combination) โดยกริดวงกลมแต่ละวงจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.4 และ 3.5

รูปที่ 3.4 อุปกรณ์บล็อก



รูปที่ 3.5 แผ่
วงกลมกับ

นกริตแบบผสม
สี่เหลี่ยม
(Combination)

3.1.5 เครื่องปล่อยกระแสไฟฟ้าและสารเคมีที่ใช้กัดกรด

เครื่องปล่อยกระแสไฟฟ้า และสารเคมีที่ใช้กัดกรดที่ใช้สำหรับกัดลายบนผิวของชิ้นงาน ก่อนนำไปผ่านกระบวนการตัดเพื่อทำความสะอาดผิวโลหะ และตู้ไฟสำหรับใช้ชื้อดไฟฟ้าผ่านฟิล์มกริด เพื่อให้กรดกัดลงไปเป็นลวดลายที่พื้นผิวของชิ้นงาน โดยมีทั้งกระแสสลับ และกระแสตรง ดังรูปที่ 3.6 และ 3.7



รูปที่ 3.6 เครื่องปล่อยกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.7 สารเคมีที่ใช้กัดกรด

3.1.6 เครื่องตัดแบบอัดใช้ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic) ชุดขับเคลื่อนกำลัง 3 แรงม้า

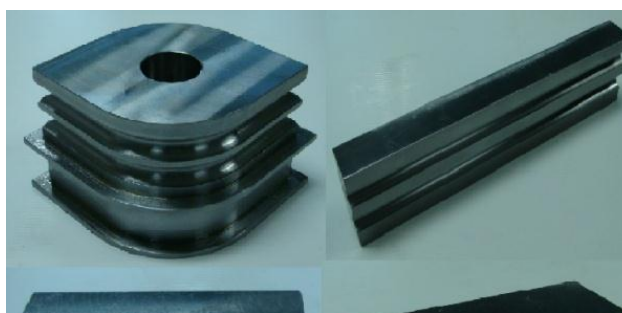
เครื่องตัดแบบอัดใช้ระบบไฮดรอลิกควบคุมกำลัง 3 แรงม้าที่ขับเคลื่อนด้วยระบบ ไฮดรอลิกโดยใช้เฟืองสะพานขบกับเฟืองตรงเพื่อให้แขนไฮดรอลิกเคลื่อนที่นำพาลิมตัดให้เคลื่อนที่ตัดขึ้นงาน โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับงานนี้เท่ากับ 3 HP และอัตราการไหลของปั๊มจะกำหนดอัตราการไหลที่ความเร็ว 1,200 rpm มอเตอร์ไฟฟ้าโดยทั่วไปจะหมุน 1,450 rpm เพราะฉะนั้นอัตราการไหลของปั๊ม 1 GPM ที่มีความเร็วรอบเท่ากับ 1,200 rpm เมื่อทำการใช้งานให้หมุนด้วยความเร็วเท่ากับ 1,450 rpm และกระบอกสูบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องตัดแบบอัดใช้ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic) ชุดขับเคลื่อนกำลัง 3 แรงม้า

3.1.7 ชุดแม่พิมพ์

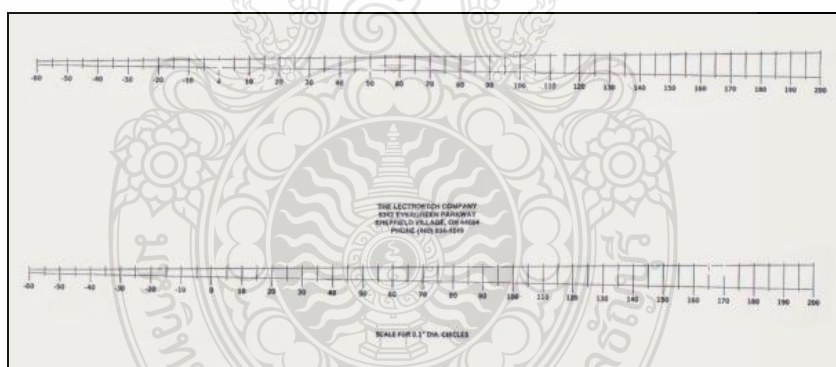
ชุดแม่พิมพ์ตัดประกอบไปด้วยลูกตัดแบบมัลติฟังก์ชันที่สามารถตัดชิ้นงานได้ทั้ง 3 ชนิด เป็นมุมสูงสุดเท่ากับ 90 องศา ส่วนลิมตัดจะทำการออกแบบ 3 รูปแบบ คือ ออกแบบสำหรับเหล็กท่อ กลวง 15.8 มิลลิเมตร เหล็กเส้นกลมผิวเรียบ 12 มิลลิเมตร และเหล็กแผ่นกว้าง 25 มิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร โดยออกแบบรางสำหรับวางท่อให้มีรัศมี 7.9 และ 6 มิลลิเมตร ลิมตัดเหล็กแผ่นรองกว้าง 25 มิลลิเมตร โดยที่วัสดุในการออกแบบคือ เหล็ก SKD11 และ SCM4 ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ชุดแม่พิมพ์

3.1.8 Stencil Mylar

แผ่น Stencil Mylar ใช้สำหรับวัดขนาดของลายกริดที่เปลี่ยนรูปร่างหลังจากการตัดชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผ่น Stencil Mylar

3.1.9 ไมโครมิเตอร์ (Micrometer)

ไมโครมิเตอร์ใช้สำหรับวัดความหนาของผนังชิ้นงานที่กลวง ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ไมโครมิเตอร์

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ดังตารางที่ 3.1 – 3.3

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกลของเหล็ก เกรด DIN St 37

Cross Section Area (mm^2)	Load at 0.2 % offset yield strength (N)	Maximum tensile load (kN)	0.2% offset yield strength (N/mm^2)	Tensile strength (N/mm^2)	Reduction of area (%)	Elongation (%)
28.56	10,304	15.82	360.77	553.92	49.16	30.00

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียม เกรด ASTM AA6063

Cross Section Area (mm^2)	Load at 0.2 % offset yield strength (N)	Maximum tensile load (kN)	0.2% offset yield strength (N/mm^2)	Tensile strength (N/mm^2)	Reduction of area (%)	Elongation (%)

27.71	4,431	5.290	159.90	190.91	71.89	18.67
-------	-------	-------	--------	--------	-------	-------

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียม เกรด UNS C11000

Cross Section Area (mm ²)	Load at 0.2 % offset yield strength (N)	Maximum tensile load (kN)	0.2% offset yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Reduction of area (%)	Elongation (%)
28.65	8,337	8.645	290.98	301.75	54.38	27.73

3.2.2 การเตรียมชิ้นงาน

1) การเตรียมชิ้นงานท่อกลวง

ตัดชิ้นงานท่อกลวงซึ่งประกอบด้วยวัสดุ 3 ประเภท คือ เหล็ก (St 37) อลูมิเนียม (AA6063) และทองแดง (C11000) ขนาด 5 หุน หรือ 15.8 มิลลิเมตรให้ได้ความยาว 1 เมตร ด้วยเครื่องตัดเหล็กจากนั้นทำการลบคมด้วยการใช้ตะไบเหล็ก เมื่อเสร็จแล้วใช้น้ำมันทาที่บริเวณพื้นผิวเพื่อป้องกันสนิมของเหล็ก ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ชิ้นงานรูปทรงท่อกลวง

2) การเตรียมชิ้นงานเส้นกลม

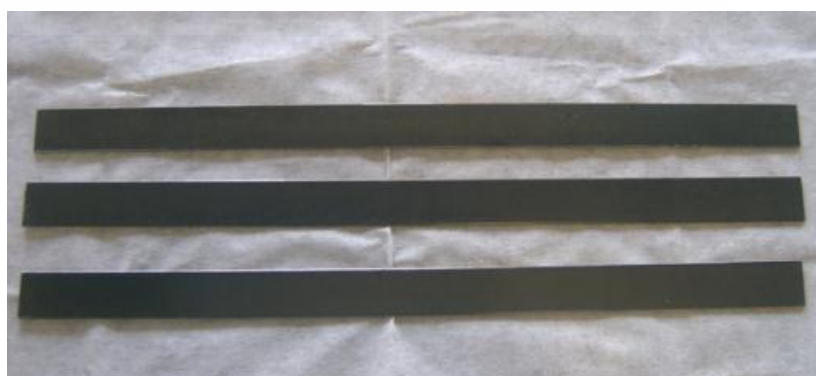
ตัดชิ้นงานเส้นกลมซึ่งประกอบด้วยวัสดุ 3 ชนิดคือ เหล็ก (St 37) อลูมิเนียม (AA 6063) และทองแดง (C11000) ขนาด 12 มิลลิเมตรให้ได้ความยาว 1 เมตร ด้วยเครื่องตัดเหล็ก จากนั้นทำการลบคมด้วยการใช้ตะไบเหล็ก เมื่อเสร็จแล้วใช้น้ำมันทาที่บริเวณพื้นผิวเพื่อป้องกันสนิมของเหล็ก ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ชิ้นงานเส้นกลม

3) การเตรียมชิ้นงานแผ่น

ตัดชิ้นงานแผ่นซึ่งประกอบด้วยวัสดุ 3 ชนิดคือ เหล็ก (St 37) อลูมิเนียม (AA6063) และทองแดง (C11000) ขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตร ให้ได้ความยาว 1 เมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดเหล็ก จากนั้นทำการลบคมด้วยการใช้ตะไบเหล็ก เมื่อเสร็จแล้วใช้น้ำมันทาที่บริเวณพื้นผิวเพื่อป้องกันสนิมของเหล็ก ดังรูปที่ 3.14

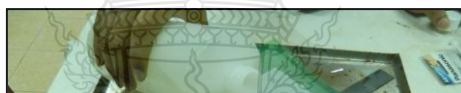


รูปที่ 3.14 ชิ้นงานแผ่น

3.2.2 การตีกริดชิ้นงาน (ตัวอย่างการตีกริดลงบนเหล็กแผ่น)

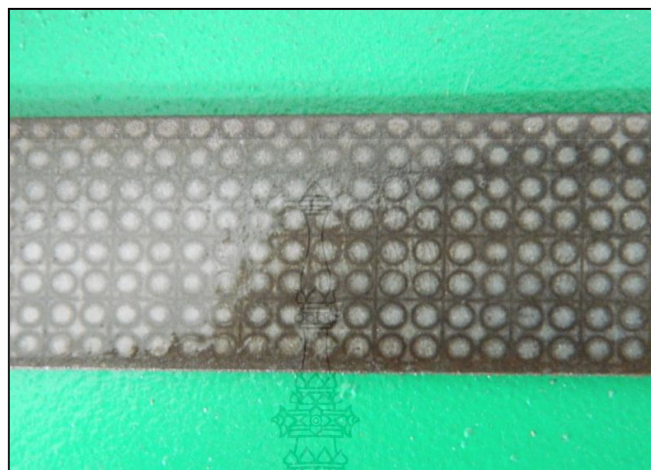
- 1) ทำความสะอาดผิวงานด้วยอะซิโตน (Acetone) ก่อนการนำไปกัดลายกริด ดังรูปที่

3.15



- 2) ทำการตีกริดลงบนเหล็กแผ่นด้วยลูกกลิ้งเพื่อให้เกิดรอยประทับลงบนเหล็กแผ่น จากนั้นทำการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านลูกกลิ้งเพื่อให้กระแสไฟฟ้าทำการกัดลายกริดบนชิ้นงานโลหะโดยผ่านกรด ดังรูปที่ 3.16 และ 3.17

รูปที่ 3.16 การ
แผ่นฟิล์มและ



เทกรดลงบน
เหล็ก

รูปที่ 3.17 การปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านแผ่นฟิล์มเพื่อทำการกัดผิวโลหะ

3) หลังจากทำการกัดกรดและปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปที่ชิ้นงานเป็นที่เรียบร้อยแล้วจะได้เหล็กแผ่นที่มีลายกริ
ซึ่งจะเกิดลวดลายกริ
ชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.18



ดวางกลมบนผิวชิ้นงาน
ดตลอดพื้นผิวของ

รูปที่ 3.18 เหล็กแผ่นที่ผ่านการตีกริด

3.2.3 การขึ้นรูปตัด

นำชิ้นงานไปทดลองทำการตัดขึ้นรูปด้วยเครื่องตัดแบบอัตโนมัติใช้ระบบไฮดรอลิกควบคุมกำลัง 3 แรงม้า

3.3 วิธีการทดลอง / วิธีการวัดผล

3.3.1 การทดสอบทางกายภาพ

การประเมินคุณภาพชิ้นงานเบื้องต้นที่ผ่านกระบวนการตัด โดยพิจารณาด้วยสายตาซึ่งมีความละเอียดน้อยกว่าการประเมินด้วยรูปแบบอื่น แต่ให้ความสะดวกและรวดเร็วกว่า เช่น ชิ้นงานเกิดรอยแตก รอยย่น รอยบุบ ฯลฯ ซึ่งมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

- 1) ทำการตัดเหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดงท่อกว้างที่มุม 30, 60 และ 90 องศา
- 2) ทำการตัดเหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดงเส้นกลมที่มุม 30, 60, และ 90 องศา
- 3) ทำการตัดเหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดงแผ่นที่มุม 30, 60, และ 90 องศา
- 4) ทำการตรวจสอบลักษณะภายนอก ข้อบกพร่องของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านกระบวนการตัด เพื่อหาข้อบกพร่องที่ผิวของชิ้นงาน
- 5) บันทึกผลการทดลองโดยทำสัญลักษณ์เครื่องหมายถูกลงในตารางการประเมินข้อบกพร่องทางกายภาพ ดังตารางที่ 3.4

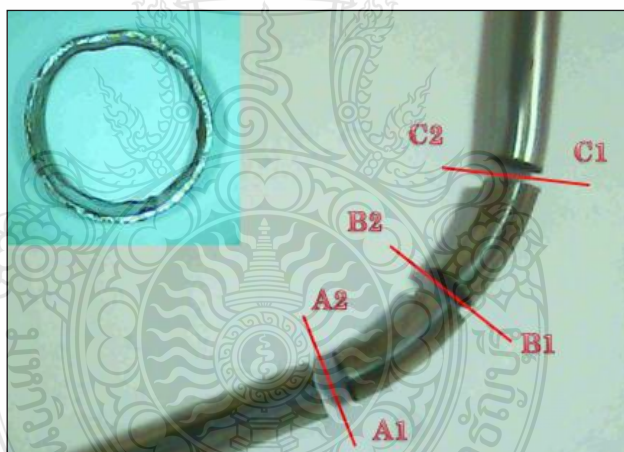
ตารางที่ 3.4 การประเมินข้อบกพร่องทางกายภาพ

ประเภทข้อบกพร่อง	เหล็ก						อลูมิเนียม						ทองแดง					
	ท่อกลวง		เส้นกลม		แผ่น		ท่อกลวง		เส้นกลม		แผ่น		ท่อกลวง		เส้นกลม		แผ่น	
	เกิด	ไม่เกิด	เกิด	ไม่เกิด	เกิด	ไม่เกิด	เกิด	ไม่เกิด	เกิด	ไม่เกิด	เกิด	ไม่เกิด	เกิด	ไม่เกิด	เกิด	ไม่เกิด	เกิด	ไม่เกิด
1. รอยแตก และฉีกขาด	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2. การดัดกลับ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3. การเกิดรอยย่น	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4. การเกิดรอยบุบ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3.3.2 ผลการทดสอบความหนาของผนังหน้าตัดส่วนโค้งของชิ้นงานท่อกลวง

การทดสอบความหนาของผนังท่อเป็นการทดสอบเพื่อวัดค่าความแตกต่างของผนังในแต่ละบริเวณส่วนโค้ง สามารถแสดงผลการทดสอบชิ้นงานในแต่ละองศา ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) ตัดชิ้นงานท่อกลวงและแผ่นโดยใช้องศาในการตัด 30, 60 และ 90 องศา
- 2) ผ่าชิ้นงานท่อกลวงในแต่ละองศาตัดให้เห็นหน้าตัดบริเวณส่วนโค้งมุม 45 องศา และผ่าขอบของท่อทั้ง 2 ข้าง ดังรูปที่ 3.18 และ 3.19



รูปที่ 3.19 ตำแหน่งหน้าตัดของเหล็กท่อกลวงบริเวณ A, B และ C

- 3) ทำการขีดผนังและพื้นผิวชิ้นงานท่อกลวงบริเวณที่ทำการผ่าด้วยกระดาษทรายให้เนียนเรียบ เนื่องจากจะต้องทำการวัดขนาดความหนาของผนัง ถ้าหากบริเวณผนังท่อ หรือ หน้าตัดท่อมีเศษโลหะหลงเหลืออยู่จะทำให้ผลลัพธ์จากการวัดคลาดเคลื่อนมาก

- 4) ทำการวัดความหนาของผนังเหล็กท่อกลวงทั้งหมด 3 บริเวณ (A, B, C) และวัดบริเวณละ 2 จุด คือ บริเวณส่วนโค้งนอก ส่วนโค้งใน ด้วยไมโครมิเตอร์ และความหนาชิ้นงานแผ่นทั้งหมด 3 บริเวณ (Thickness 1, Thickness 2, Thickness 3)

5) บันทึกผลการทดลองความหนาของผนังเหล็กชิ้นงานที่อกลวงทั้งหมด 3 บริเวณ และจุดที่ทำการวัดความหนาของผนังที่ 6 จุด (A1, A2, B1, B2, C1, C2) และความหนาชิ้นงานแผ่นลงในตาราง ดังตารางที่ 3.5 และ 3.6

ตารางที่ 3.5 การทดสอบความหนาของผนังหน้าตัดส่วนโค้งของชิ้นงานที่อกลวง

ประเภทชิ้นงาน	ตำแหน่ง	องศาในการตัด		
		30	60	90
เหล็กที่อกลวง	Wall Thickness (A1)	-	-	-
	Wall Thickness (A2)	-	-	-
	Wall Thickness (B1)	-	-	-
	Wall Thickness (B2)	-	-	-
	Wall Thickness (C1)	-	-	-
	Wall Thickness (C2)	-	-	-
อลูมิเนียมที่อกลวง	Wall Thickness (A1)	-	-	-
	Wall Thickness (A2)	-	-	-
	Wall Thickness (B1)	-	-	-
	Wall Thickness (B2)	-	-	-
	Wall Thickness (C1)	-	-	-
	Wall Thickness (C2)	-	-	-

ตารางที่ 3.6 การทดสอบความหนาของผนังหน้าตัดส่วนโค้งของชิ้นงานที่อกลวง (ต่อ)

ประเภทชิ้นงาน	ตำแหน่ง	องศาในการตัด		
		30	60	90
ทองแดงที่อกลวง	Wall Thickness (A1)	-	-	-
	Wall Thickness (A2)	-	-	-
	Wall Thickness (B1)	-	-	-
	Wall Thickness (B2)	-	-	-
	Wall Thickness (C1)	-	-	-

	Wall Thickness (C2)	-	-	-
--	---------------------	---	---	---

ตารางที่ 3.7 การทดสอบความหนาของชิ้นงานแผ่น

ประเภทชิ้นงาน	ตำแหน่ง	ความหนาชิ้นงานแผ่น (มิลลิเมตร)		
		30°	60°	90°
เหล็กแผ่น	Thickness 1	-	-	-
	Thickness 2	-	-	-
	Thickness 3	-	-	-
อลูมิเนียมแผ่น	Thickness 1	-	-	-
	Thickness 2	-	-	-
	Thickness 3	-	-	-
ทองแดงแผ่น	Thickness 1	-	-	-
	Thickness 2	-	-	-
	Thickness 3	-	-	-

3.3.3 ทดสอบการติดกลับของชิ้นงานที่ได้รับอิทธิพลจากองศาในการตัด

การทดสอบนี้เป็นการทดลองการติดกลับของชิ้นงานวัสดุ 3 ชนิด เพื่อเปรียบเทียบองศาในการตัด ที่มีอิทธิพลต่อการติดตัวกลับของชิ้นงาน มีวิธีการทดสอบมีดังนี้

- 1) ทำการตัดเหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดงท่อกว้างที่มุม 30, 60 และ 90 องศา
- 2) ทำการตัดเหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดงเส้นกลมที่มุม 30, 60 และ 90 องศา
- 3) ทำการตัดเหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดงแผ่นที่มุม 30, 60 และ 90 องศา
- 4) ทำการวัดองศาหลังการตัดของวัสดุทั้ง 3 ชนิดโดยใช้ Magnetic Protacter
- 5) คำนวณหาค่าคงที่การติดกลับ (K) ของวัสดุทั้ง 3 ชนิด
- 6) ทำการบันทึกผลองศาหลังการตัด และค่าคงที่การติดกลับของวัสดุลงในตารางการ

ทดสอบติดกลับของชิ้นงานที่ได้รับอิทธิพลจากองศาในการตัด ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 องค์การดัดตัวกลับและค่าคงที่การดัดตัวกลับ

ชนิดวัสดุ	รูปทรงชิ้นงาน	ตัวแปร	องศาในการดัด (Bending Angle)		
เหล็ก	ท่อกลวง	α_1	-	-	-
		α_2	-	-	-
		K(T)	-	-	-
		% (Springback)	-	-	-
	เส้นกลม	α_1	-	-	-
		α_2	-	-	-
		K(R)	-	-	-
		% (Springback)	-	-	-
	แผ่น	α_1	-	-	-
		α_2	-	-	-
		K(S)	-	-	-
		% (Springback)	-	-	-
อลูมิเนียม	ท่อกลวง	α_1	-	-	-
		α_2	-	-	-
		K(T)	-	-	-
		% (Springback)	-	-	-
	เส้นกลม	α_1	-	-	-
		α_2	-	-	-

		K(R)	-	-	-
		% (Springback)	-	-	-
	แผ่น	α_1	-	-	-
		α_2	-	-	-
		K(S)	-	-	-
		% (Springback)	-	-	-

ตารางที่ 3.8 องศาการดัดตัวกลับและค่าคงที่การดัดตัวกลับ (ต่อ)

ชนิดวัสดุ	รูปทรงชิ้นงาน	ตัวแปร	องศาในการดัด(Bending Angle)		
ทองแดง	ท่อกลวง	α_1	-	-	-
		α_2	-	-	-
		K(T)	-	-	-
		% (Springback)	-	-	-
	เส้นกลม	α_1	-	-	-
		α_2	-	-	-
		K(R)	-	-	-
		% (Springback)	-	-	-
	แผ่น	α_1	-	-	-
		α_2	-	-	-
		K(S)	-	-	-
		% (Springback)	-	-	-

3.3.4 การวัดค่าความเครียดของชิ้นงาน

ตัวอย่างการคำนวณความเครียดส่วนโค้งของเหล็กท่อกลวง จากการสร้างกริดแบบผสมสี่เหลี่ยม และวงกลม (Combination) บนพื้นผิวชิ้นงาน โดยใช้กริดขนาดมาตรฐานวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.21 พบว่าหลังจากชิ้นงานผ่านกระบวนการตัดรูปร่างของ กริดจะเปลี่ยนไป ซึ่งค่าที่เปลี่ยนไปสามารถวัดค่าได้ด้วยแผ่น Stencil Mylar หรือ สามารถนำไปคำนวณค่าความเครียดหลักและความเครียดรอง ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2 แล้วทำการบันทึกผลลงในตาราง ดังตารางที่ 3.9



(3.1)

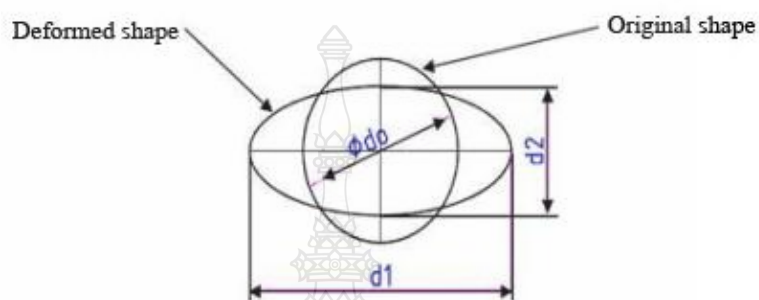
$$\text{ความเครียดรอง (e}_2\text{) \%} = [(W_f - W_0) \times 100] / W_0$$

(3.2)

ตารางที่ 3.9 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียด (ตัวอย่าง อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดโค้งนอกท่อเหล็ก)

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-

จากค่าความเครียดหลัก, ความเครียดรอง และค่าความหนาของชิ้นงานหลังการตัด สามารถนำมาคำนวณหาค่าความเครียดเทียบเท่า (Equivalent Strain) ของชิ้นงานตัด ดังรูปที่ 3.21 และสมการ 3.3 – 3.6 แล้วบันทึกผลลงในตาราง ดังตารางที่ 3.9



รูปที่ 3.21 การเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลม

$$\text{ค่าความเครียดหลัก } (\epsilon_1) = \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (3.3)$$

$$\text{ค่าความเครียดรอง } (\epsilon_2) = \ln \frac{d_2}{d_0} \quad (3.4)$$

$$\text{ค่าความเครียดที่ความหนา } (\epsilon_3) = \ln \frac{t_2}{t_0} \quad (3.5)$$

$$\text{ค่าความเครียดเทียบเท่า } (\epsilon) = \sqrt{\frac{2}{3}(\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2)} \quad (3.6)$$

เมื่อ	d_0	=	ขนาดกริดเริ่มต้น
	d_1	=	ความยาวของกริดที่เปลี่ยนไป
	d_2	=	ความกว้างของกริดที่เปลี่ยนไป
	t_0	=	ความหนาของชิ้นงานเริ่มต้น
	t_2	=	ความหนาของชิ้นงานสุดท้าย

ตารางที่ 3.10 ความเครียดเทียบเท่า

วัสดุ	รูปทรง	ส่วนโค้ง	ความเครียดเทียบเท่า		
			30°	60°	90°
เหล็ก	ท่อกลอง	ด้านนอก	-	-	-
		ด้านใน	-	-	-
	แผ่น	ด้านนอก	-	-	-
		ด้านใน	-	-	-
อลูมิเนียม	ท่อกลอง	ด้านนอก	-	-	-
		ด้านใน	-	-	-
	แผ่น	ด้านนอก	-	-	-
		ด้านใน	-	-	-
ทองแดง	ท่อกลอง	ด้านนอก	-	-	-
		ด้านใน	-	-	-
	แผ่น	ด้านนอก	-	-	-
		ด้านใน	-	-	-

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์

จากการทดลองและวิเคราะห์ผลเป็นการนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการทดลองตามตัวแปรที่กำหนดนำมาแสดง โดยผลการทดลองแบ่งออกเป็นลักษณะต่าง ๆ เช่น การประเมินข้อบกพร่องทางกายภาพ การติดตัวกลับ ความเครียด และความหนาของผนังหน้าตัดชิ้นงาน

4.1 ผลการทดลองการตัดชิ้นงาน

4.1.1 ผลการทดสอบทางกายภาพ

การประเมินคุณภาพชิ้นงานเบื้องต้นที่ผ่านกระบวนการตัด โดยพิจารณาด้วยสายตาซึ่งให้ความสะดวกและรวดเร็ว เช่น ชิ้นงานเกิดรอยแตก รอยย่น รอยบุบ ฯลฯ ซึ่งผลการทดสอบ ดังรูปที่

4.1



รูปที่ 4.1 ชิ้นงานเหล็กตัดทั้ง 3 ชนิดวัสดุและ 3 รูปทรง



รูปที่ 4.2 บริเวณส่วนโค้งเหล็กท่อกกลางที่เกิดรอยบุบ



รูปที่ 4.3 บริเวณส่วนโค้งอลูมิเนียมท่อกกลางที่เกิดรอยบุบ



รูปที่ 4.4 บริเวณส่วนโค้งทองแดงท่อกลวงที่เกิดรอยบุบ

จากรูปที่ 4.2 - 4.4 พบว่าจากการตัดชิ้นงานหลัก, อลูมิเนียม และทองแดงแต่ละประเภทที่มีรูปทรงเป็นท่อกลวง เส้นกลม และแผ่นที่ผ่านกระบวนการตัดที่อุณหภูมิห้องไม่เกิดการฉีกขาด และรอยย่นบริเวณส่วนโค้งของชิ้นงานในทุกองศาการตัด แต่เกิดรอยบุบกับชิ้นงาน**บริเวณส่วนโค้ง**ของชิ้นงานรูปทรงท่อกลวงทุกประเภทวัสดุ ลายกริดที่สร้างไว้บนพื้นผิวของชิ้นงานจะเปลี่ยนรูปร่างเป็นวงรี นอกจากนี้ชิ้นงานหลัก อลูมิเนียม และทองแดง ทุกรูปทรงเมื่อผ่านกระบวนการตัด จะเกิดการบิดตัวกลับในทุกองศาของการตัด ซึ่งทำให้ไม่ได้ชิ้นงานตามองศาที่ต้องการ โดยเฉพาะรูปทรงแผ่นจะเกิดการบิดตัวกลับมากกว่ารูปทรงอื่น และชิ้นงานประเภทเหล็กจะเกิดการบิดกลับมากกว่าชิ้นงานที่เป็นวัสดุประเภทอื่น ส่วนชิ้นงานที่เกิดการบิดตัวกลับน้อยที่สุดคือชิ้นงานรูปทรงท่อกลวงและชิ้นงานประเภทอลูมิเนียม ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การประเมินข้อบกพร่องทางกายภาพ

ประเภทข้อบกพร่อง	เหล็ก						อลูมิเนียม						ทองแดง					
	ท่อกลวง		เส้นกลม		แผ่น		ท่อกลวง		เส้นกลม		แผ่น		ท่อกลวง		เส้นกลม		แผ่น	
	เกิด	ไม่เกิด	เกิด	ไม่เกิด	เกิด	ไม่เกิด	เกิด	ไม่เกิด	เกิด	ไม่เกิด	เกิด	ไม่เกิด	เกิด	ไม่เกิด	เกิด	ไม่เกิด	เกิด	ไม่เกิด
1. รอยแตก และฉีกขาด		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓
2. การบิดกลับ	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	
3. การเกิดรอยย่น		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓
4. การเกิดรอยบุบ	✓			✓		✓	✓			✓		✓	✓			✓		✓

4.1.2 ผลการทดสอบความหนาของผนังหน้าตัดส่วนโค้งของชิ้นงานท่อกลวง

การทดสอบความหนาของผนังท่อกว่เป็นการทดสอบเพื่อวัดค่าความแตกต่างของผนังในแต่ละบริเวณส่วนโค้ง สามารถแสดงผลการทดสอบชิ้นงานในแต่ละองศา ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความหนาของผนังหน้าตัดส่วนโค้งของชิ้นงานตัดรูปทรงท่อกลวง

ประเภทชิ้นงาน	ตำแหน่ง	องศาในการตัด		
		30	60	90
เหล็กท่อกวาง	Wall Thickness (A1)	0.41	0.40	0.38
	Wall Thickness (A2)	0.41	0.42	0.44
	Wall Thickness (B1)	0.39	0.38	0.37
	Wall Thickness (B2)	0.43	0.44	0.46
	Wall Thickness (C1)	0.40	0.39	0.38
	Wall Thickness (C2)	0.40	0.41	0.43

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความหนาของผนังหน้าตัดส่วนโค้งของชิ้นงานดัดรูปทรงท่อกวาง
(ต่อ)

ประเภทชิ้นงาน	ตำแหน่ง	องศาในการตัด		
		30	60	90
อลูมิเนียมท่อกวาง	Wall Thickness (A1)	0.41	0.39	0.38
	Wall Thickness (A2)	0.42	0.43	0.44
	Wall Thickness (B1)	0.40	0.38	0.36
	Wall Thickness (B2)	0.43	0.44	0.46
	Wall Thickness (C1)	0.42	0.39	0.38
	Wall Thickness (C2)	0.42	0.43	0.45
ทองแดงท่อกวาง	Wall Thickness (A1)	0.48	0.47	0.46
	Wall Thickness (A2)	0.48	0.49	0.50
	Wall Thickness (B1)	0.46	0.45	0.44
	Wall Thickness (B2)	0.49	0.50	0.51

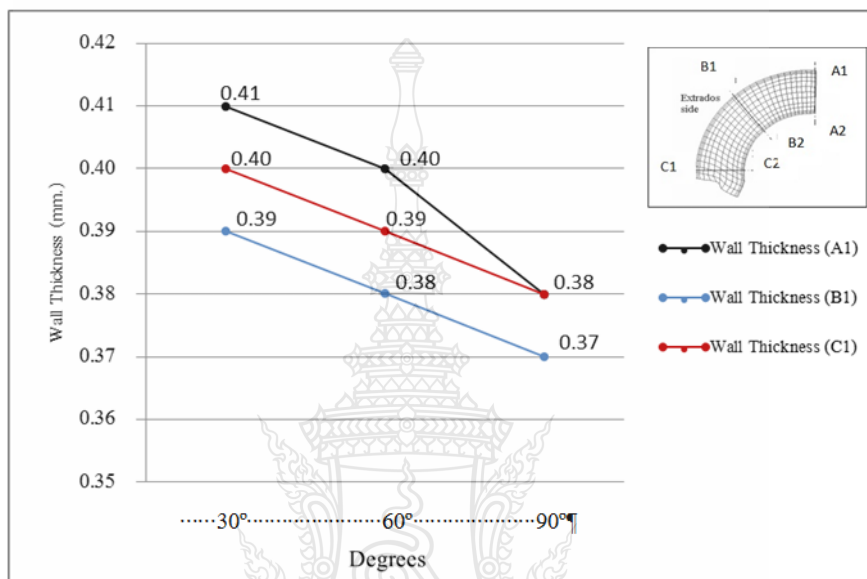
	Wall Thickness (C1)	0.48	0.47	0.46
	Wall Thickness (C2)	0.48	0.49	0.50

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบความหนาของผนังชิ้นงานเหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดงรูปทรงท่อกว้างในกระบวนการตัด ตำแหน่งของส่วนโค้ง 3 จุด แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าในทุกชนิดวัสดุที่บริเวณส่วนโค้งด้านนอก (A1,B1,C1) ของชิ้นงานที่รูปทรงท่อกว้างจะมีความบางมากกว่าผนังส่วนโค้งด้านใน (A2,B2,C2) โดยสามารถบ่งชี้ได้อีกว่าตำแหน่ง B1 ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางส่วนโค้งด้านนอกจะมีความหนาน้อยที่สุด คือ มีความบางของผนังท่อกว้างจะบางมากที่สุด

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความหนาของชิ้นงานแผ่น

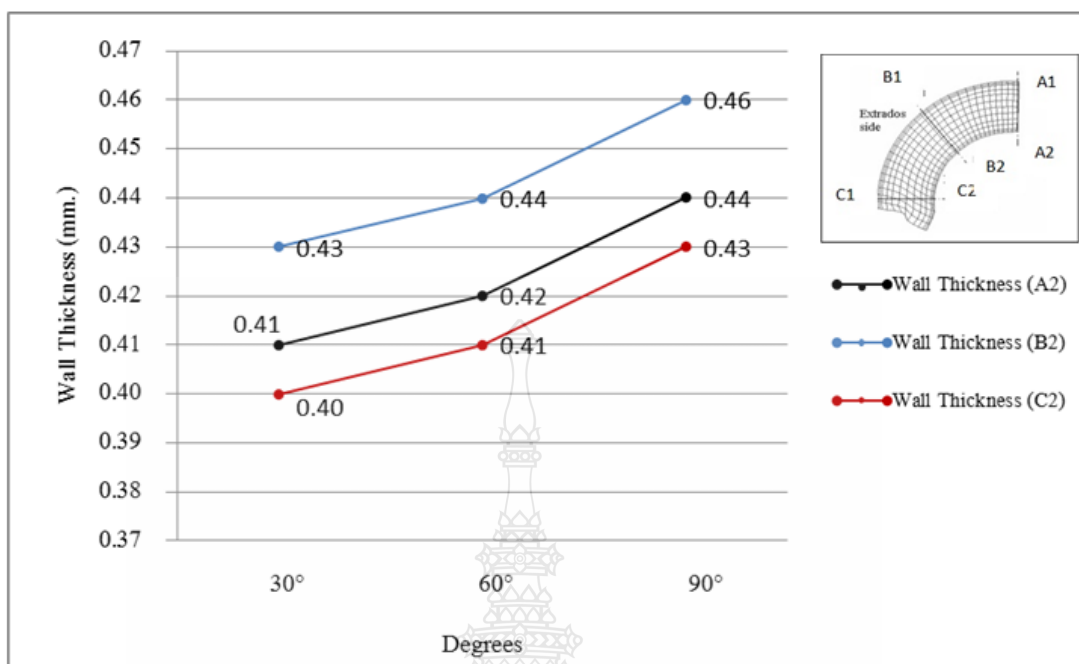
ประเภทชิ้นงาน	ตำแหน่ง	ความหนาชิ้นงานแผ่น (มิลลิเมตร)		
		30°	60°	90°
เหล็กแผ่น	Thickness 1	1.48	1.39	1.37
	Thickness 2	1.47	1.36	1.35
	Thickness 3	1.48	1.39	1.37
อลูมิเนียมแผ่น	Thickness 1	1.36	1.35	1.34
	Thickness 2	1.35	1.34	1.33
	Thickness 3	1.36	1.35	1.34
ทองแดงแผ่น	Thickness 1	2.00	1.99	1.97
	Thickness 2	1.98	1.97	1.95
	Thickness 3	2.00	1.99	1.97

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบความหนาของชิ้นงานเหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดง รูปทรงแผ่น ที่ 3 ตำแหน่ง แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ในทุกชนิดวัสดุที่กึ่งกลางส่วนโค้ง (Thickness 2) จะมีความหนาของชิ้นงานน้อยที่สุด



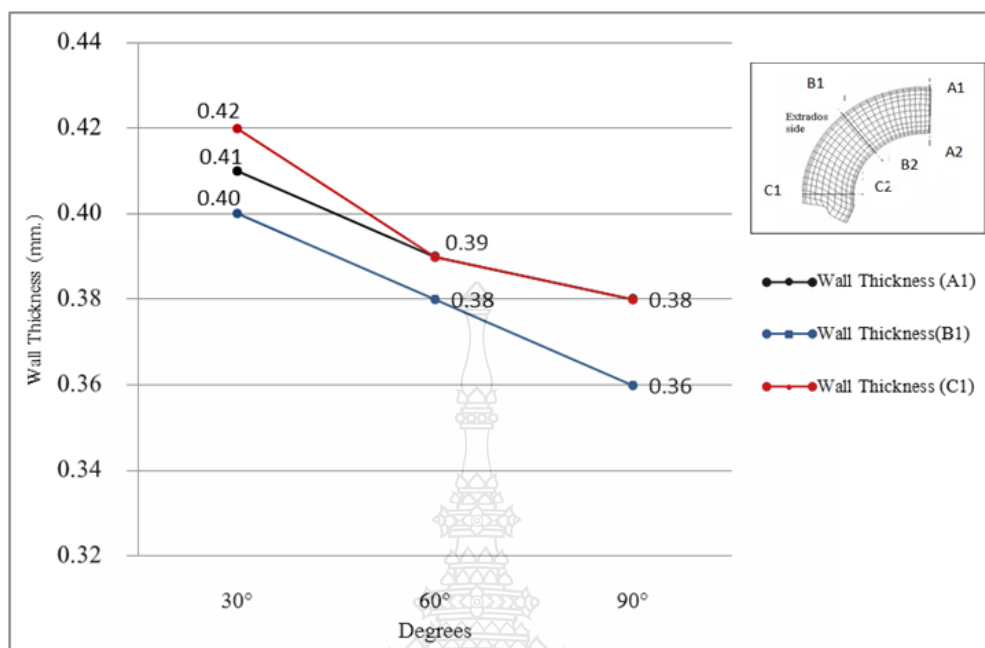
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความหนาของผนังเหล็กที่อกลวงด้านนอกกับองศาในการตัด

จากรูปที่ 4.5 เป็นกราฟแสดงความหนาของผนังเหล็กที่อกลวงด้านนอกเปรียบเทียบกับองศาในการตัด โดยพิจารณาจากส่วนโค้งด้านนอกและกำหนดจุด 3 จุดคือจุด A1, B1 และ C1 พบว่าการตัดในทุกองศานั้นบริเวณส่วนโค้งด้านนอกมีความหนาลดลงหลังจากการตัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา ค่าผลการทดลองหลังการตัด คือ ที่จุด A1 มีความหนาของผนังเหล็กที่อกลวง 0.41 , 0.40 และ 0.38 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่จุด B1 มีความหนาของผนังเหล็กที่อกลวง 0.39 , 0.38 และ 0.37 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่จุด C1 มีความหนาของผนังเหล็กที่อกลวง 0.40 , 0.39 และ 0.38 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณารูปที่ได้จากการทดลองนี้พบว่าจุด B1 ซึ่งทำการตัดที่มุม 90 องศา นั้นผนังของเหล็กที่อกลวงด้านนอกมีความบางที่สุดโดยมีค่าความหนาอยู่ที่ 0.37 มิลลิเมตร



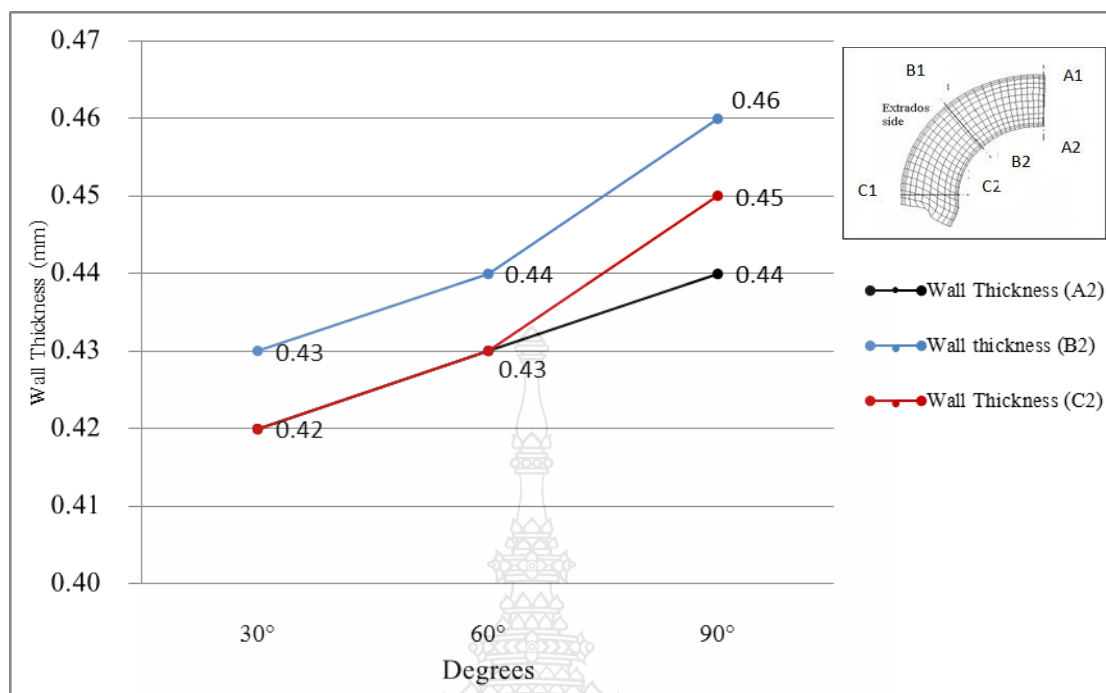
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความหนาของผนังเหล็กท่อกวางด้านในกับองศาในการตัด

จากรูปที่ 4.6 เป็นกราฟแสดงความหนาของผนังเหล็กท่อกวางด้านในเปรียบเทียบกับองศาในการตัด โดยพิจารณาจากส่วนโค้งด้านในและกำหนดจุด 3 จุดคือจุด A2, B2 และ C2 พบว่าการตัดในทุกองศานั้นบริเวณส่วนโค้งด้านในมีความหนาของการตัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา ค่าผลการทดลองหลังการตัด คือ ที่จุด A2 มีความหนาของผนังเหล็กท่อกวาง 0.41 , 0.42 และ 0.44 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่จุด B2 มีความหนาของผนังเหล็กท่อกวาง 0.43 , 0.44 และ 0.46 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่จุด C2 มีความหนาของผนังเหล็กท่อกวาง 0.40 , 0.41 และ 0.43 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณากราฟที่ได้จากการทดลองนี้พบว่าจุด B2 ซึ่งทำการตัดที่มุม 90 องศา นั้นผนังของเหล็กท่อกวางด้านในมีความหนาที่สุดโดยมีค่าความหนาอยู่ที่ 0.46 มิลลิเมตร



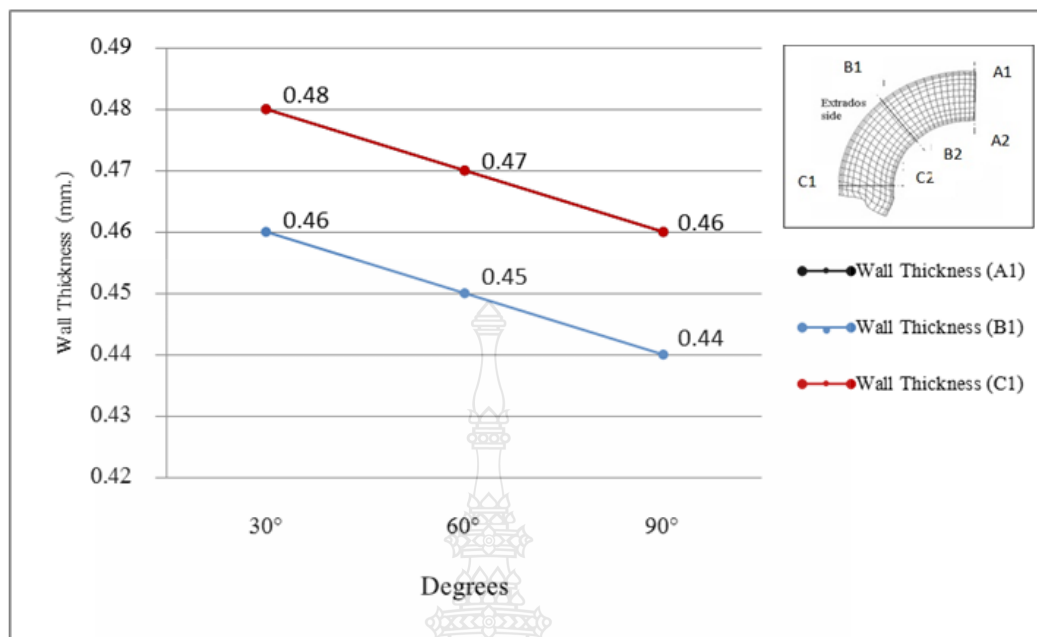
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความหนาของผนังอลูมิเนียมที่อกลวงด้านนอกกับองศาในการตัด

จากรูปที่ 4.7 เป็นกราฟแสดงความหนาของผนังอลูมิเนียมที่อกลวงด้านนอกเปรียบเทียบกับองศาในการตัด โดยพิจารณาจากส่วนโค้งด้านนอกและกำหนดจุด 3 จุดคือจุด A1, B1 และ C1 พบว่าการตัดในทุกองศานั้นบริเวณส่วนโค้งด้านนอกมีความหนาลดลงหลังจากการตัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา ค่าผลการทดลองหลังการตัด คือ ที่จุด A1 มีความหนาของผนังเหล็กที่อกลวง 0.41 , 0.39 และ 0.38 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่จุด B1 มีความหนาของผนังเหล็กที่อกลวง 0.40 , 0.38 และ 0.36 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่จุด C1 มีความหนาของผนังเหล็กที่อกลวง 0.42 , 0.39 และ 0.38 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณากราฟที่ได้จากการทดลองนี้พบว่าจุด B1 ซึ่งทำการตัดที่มุม 90 องศา นั้นผนังของเหล็กที่อกลวงด้านนอกมีความบางที่สุดโดยมีค่าความหนาอยู่ที่ 0.36 มิลลิเมตร



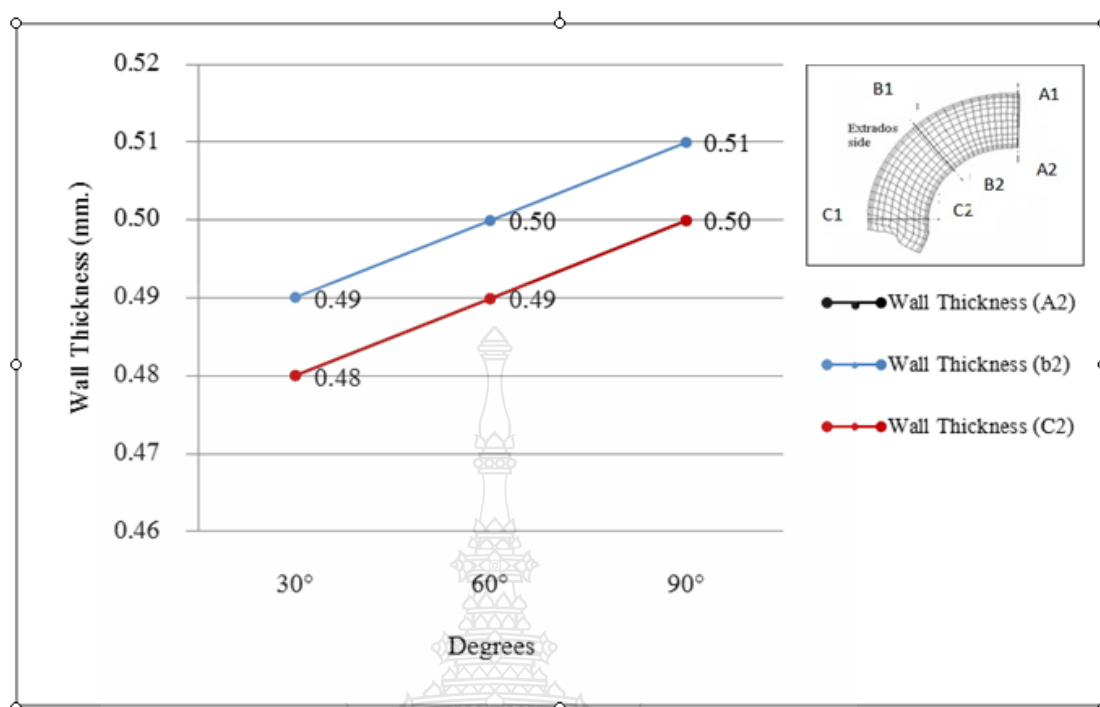
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความหนาของผนังอลูมิเนียมท่อกวางด้านในกับองศาในการตัด

จากรูปที่ 4.8 เป็นกราฟแสดงความหนาของผนังอลูมิเนียมท่อกวางด้านในเปรียบเทียบกับองศาในการตัด โดยพิจารณาจากส่วนโค้งด้านในและกำหนดจุด 3 จุดคือจุด A2, B2 และ C2 พบว่าการตัดในทุกองศานั้นบริเวณส่วนโค้งด้านในมีความหนาของการตัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา ค่าผลการทดลองหลังการตัด คือ ที่จุด A2 มีความหนาของผนังอลูมิเนียมท่อกวาง 0.42 , 0.43 และ 0.44 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่จุด B2 มีความหนาของผนังอลูมิเนียมท่อกวาง 0.43 , 0.44 และ 0.46 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่จุด C2 มีความหนาของผนังอลูมิเนียมท่อกวาง 0.42 , 0.43 และ 0.45 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณารูปที่ได้จากการทดลองนี้พบว่าจุด B2 ซึ่งทำการตัดที่มุม 90 องศา นั้นผนังของอลูมิเนียมท่อกวางด้านในมีความหนาที่สุดโดยมีค่าความหนาอยู่ที่ 0.46 มิลลิเมตร



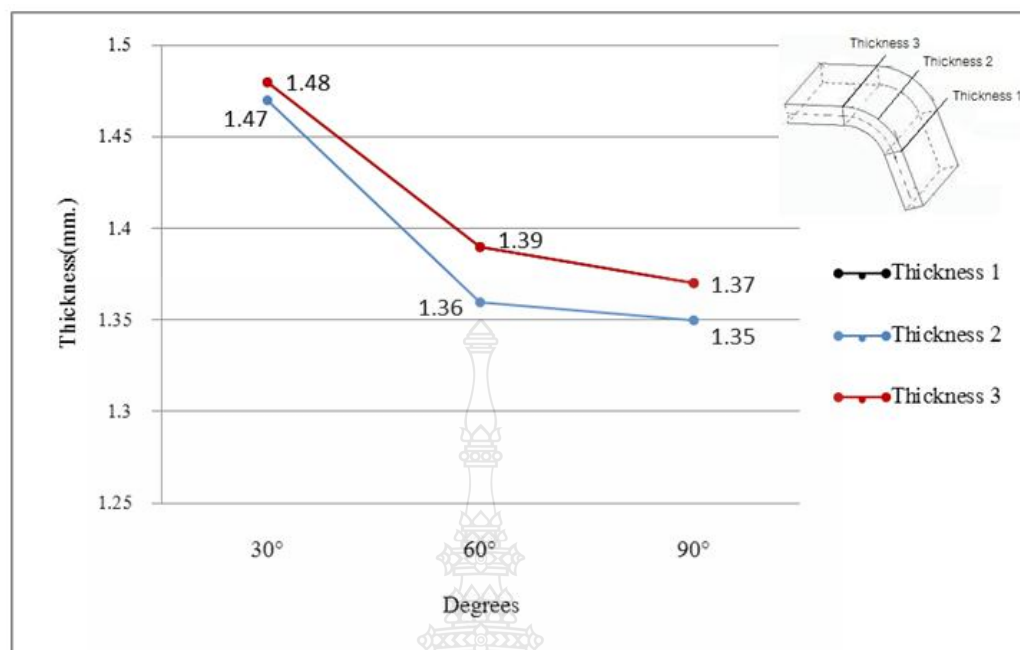
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความหนาของผนังทองแดงที่อกลวงด้านนอกกับองศาในการตัด

จากรูปที่ 4.9 เป็นกราฟแสดงความหนาของผนังทองแดงที่อกลวงด้านนอกเปรียบเทียบกับองศาในการตัด โดยพิจารณาจากส่วนโค้งด้านนอกและกำหนดจุด 3 จุดคือจุด A1, B1 และ C1 พบว่าการตัดในทุกองศานี้บริเวณส่วนโค้งด้านนอกมีความหนาลดลงหลังจากการตัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา ค่าผลการทดลองหลังการตัด คือ ที่จุด A1 มีความหนาของผนังทองแดงที่อกลวง 0.48 , 0.47 และ 0.46 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่จุด B1 มีความหนาของผนังเหล็กที่อกลวง 0.46 , 0.45 และ 0.44 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่จุด C1 มีความหนาของผนังเหล็กที่อกลวง 0.48 , 0.47 และ 0.46 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณากราฟที่ได้จากการทดลองนี้พบว่าจุด B1 ซึ่งทำการตัดที่มุม 90 องศา นั้นผนังของเหล็กที่อกลวงด้านนอกมีความบางที่สุดโดยมีค่าความหนาอยู่ที่ 0.44 มิลลิเมตร



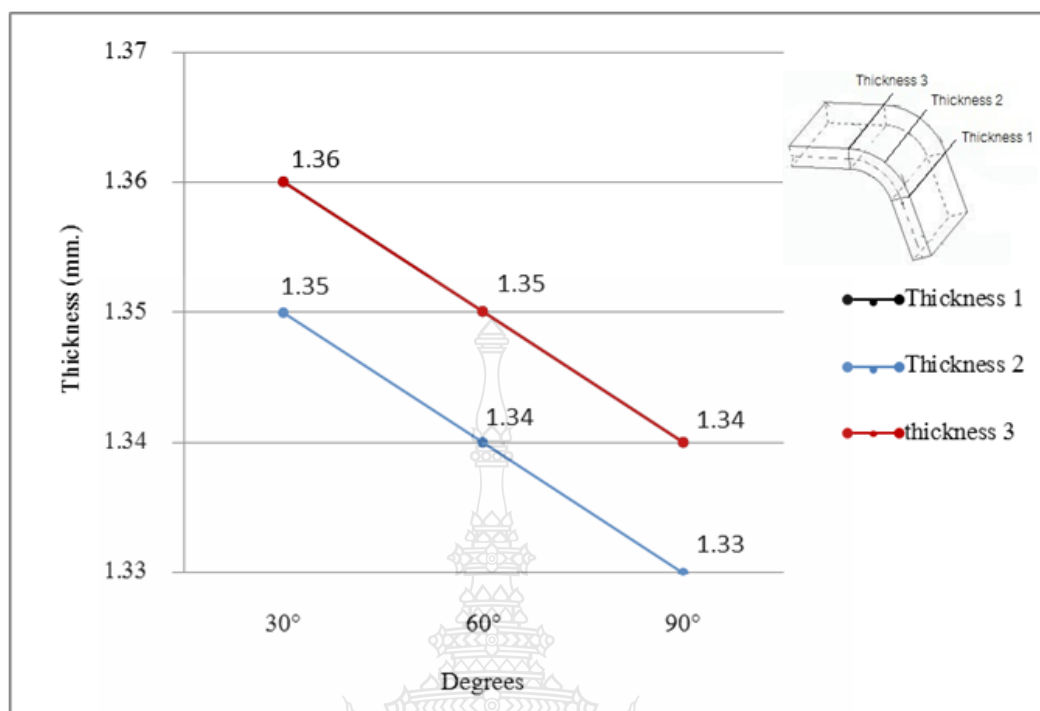
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความหนาของผนังทองแดงที่อกลวงด้านในกับองศาในการตัด

จากรูปที่ 4.10 เป็นกราฟแสดงความหนาของผนังทองแดงที่อกลวงด้านในเปรียบเทียบกับองศาในการตัด โดยพิจารณาจากส่วนโค้งด้านในและกำหนดจุด 3 จุดคือจุด A2, B2 และ C2 พบว่าการตัดในทุกองศานั้นบริเวณส่วนโค้งด้านในมีความหนาของการตัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา ค่าผลการทดลองหลังการตัด คือ ที่จุด A2 มีความหนาของผนังทองแดงที่อกลวง 0.48 , 0.49 และ 0.50 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่จุด B2 มีความหนาของผนังทองแดงที่อกลวง 0.49 , 0.50 และ 0.51 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่จุด C2 มีความหนาของผนังทองแดงที่อกลวง 0.48 , 0.49 และ 0.50 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณารูปที่ได้จากการทดลองนี้พบว่าจุด B2 ซึ่งทำการตัดที่มุม 90 องศา นั้นผนังของทองแดงที่อกลวงด้านในมีความหนาที่สุดโดยมีค่าความหนาอยู่ที่ 0.51 มิลลิเมตร



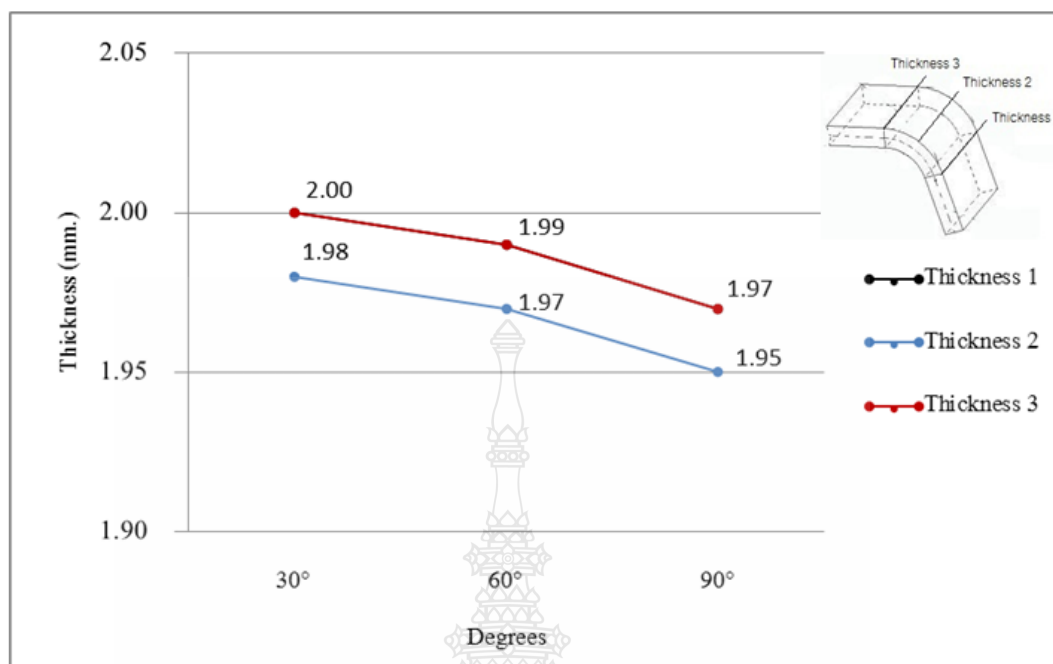
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความหนาของเหล็กแผ่นกับองศาในการดัด

จากรูปที่ 4.11 เป็นกราฟแสดงความหนาของเหล็กแผ่นเปรียบเทียบกับองศาในการดัดพบว่า เหล็กแผ่นความหนา 2 มิลลิเมตร เมื่อผ่านกระบวนการดัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศาแล้ว ตำแหน่งที่ 1 มีความหนาเท่ากับ 1.48, 1.39 และ 1.37 มิลลิเมตร ตามลำดับ ตำแหน่งที่ 2 มีความหนา 1.47, 1.36 และ 1.35 ตามลำดับ ตำแหน่งที่ 3 มีความหนา 1.48, 1.39 และ 1.37 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณากราฟที่ได้จากการทดลองสามารถระบุได้ว่า ตำแหน่งที่ 2 ในการดัดที่ 90 องศาจะมีความหนาของเหล็กแผ่นน้อยที่สุด เท่ากับ 1.35 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความหนาของอลูมิเนียมแผ่นกับองศาในการตัด

จากรูปที่ 4.12 เป็นกราฟแสดงความหนาของอลูมิเนียมแผ่นเปรียบเทียบกับองศาในการตัดพบว่า อลูมิเนียมแผ่นความหนา 2 มิลลิเมตร เมื่อผ่านกระบวนการตัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศาแล้ว ตำแหน่งที่ 1 มีความหนาเท่ากับ 1.36, 1.35 และ 1.34 มิลลิเมตร ตามลำดับ ตำแหน่งที่ 2 มีความหนา 1.35, 1.34 และ 1.33 ตามลำดับ ตำแหน่งที่ 3 มีความหนา 1.36, 1.35 และ 1.34 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณากราฟที่ได้จากการทดลองสามารถระบุได้ว่า ตำแหน่งที่ 2 ในการตัดที่ 90 องศาจะมีความหนาของอลูมิเนียมแผ่นน้อยที่สุด เท่ากับ 1.33 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความหนาของทองแดงแผ่นกับองศาในการดัด

จากรูปที่ 4.13 เป็นกราฟแสดงความหนาของทองแดงแผ่นเปรียบเทียบกับองศาในการดัดพบว่า ทองแดงแผ่นความหนา 2 มิลลิเมตร เมื่อผ่านกระบวนการดัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศาแล้ว ตำแหน่งที่ 1 มีความหนาเท่ากับ 2.00, 1.99 และ 1.97 มิลลิเมตร ตามลำดับ ตำแหน่งที่ 2 มีความหนา 1.98, 1.97 และ 1.95 ตามลำดับ ตำแหน่งที่ 3 มีความหนา 2.00, 1.99 และ 1.97 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณากราฟที่ได้จากการทดลองสามารถระบุได้ว่า ตำแหน่งที่ 2 ในการดัดที่ 90 องศาจะมีความหนาของอลูมิเนียมแผ่นน้อยที่สุดเท่ากับ 1.95 มิลลิเมตร

4.1.3 ผลการทดลองการดัดตัวกลับ

การทดสอบนี้เป็นการทดลองการดัดตัวกลับของชิ้นงานเหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดง 3 รูปทรง คือ ท่อกลม, เส้นกลม และแผ่น เพื่อเปรียบเทียบกับองศาในการดัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา การศึกษาทดลององศาในการดัดกลับและคำนวณค่าคงที่ของการดัดตัวกลับ(K) โดยใช้กราฟในการแสดงผลซึ่งใช้ข้อมูลจากตารางที่ 4.3 เป็นตารางการดัดตัวกลับของเหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดง 3 รูปทรง คือ ท่อกลม, เส้นกลม และแผ่น เพื่อคำนวณหาค่าคงที่การดัดตัวกลับ (K)

ตารางที่ 4.4 องค์การดัดตัวกลับและค่าคงที่การดัดตัวกลับ

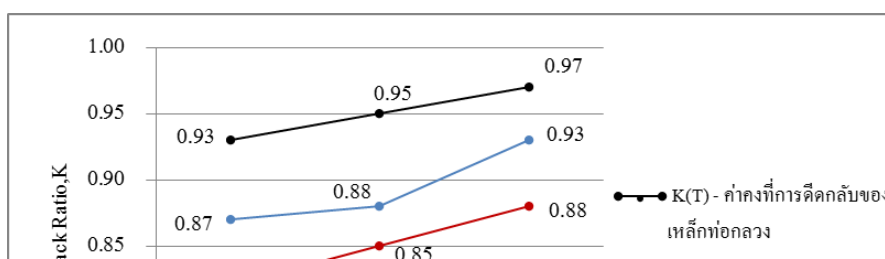
ชนิดวัสดุ	รูปทรงชิ้นงาน	ตัวแปร	องศาในการดัด (Bending Angle)		
เหล็ก	ท่อกกลาง	α_1	30	60	90
		α_2	28	57	87
		K(T)	0.93	0.95	0.97
		% (Springback)	6.67	5.00	3.33
	เส้นกลม	α_1	30	60	90
		α_2	26	53	84
		K(R)	0.87	0.88	0.93
		% (Springback)	13.33	11.67	6.67
	แผ่น	α_1	30	60	90
		α_2	24.5	51	79
		K(S)	0.82	0.85	0.88
		% (Springback)	18.33	15.00	12.22
อลูมิเนียม	ท่อกกลาง	α_1	30	60	90
		α_2	29	58	88
		K(T)	0.97	0.98	0.99
		% (Springback)	3.33	3.33	2.22
	เส้นกลม	α_1	30	60	90
		α_2	27.5	57	86
		K(R)	0.92	0.95	0.96
		% (Springback)	8.33	5.00	4.44

		α_1	30	60	90
		α_2	27	56	85
	แผ่น	K(S)	0.90	0.93	0.94
		% (Springback)	10.00	6.67	5.56

ตารางที่ 4.4 องศาการดัดตัวกลับและค่าคงที่การดัดตัวกลับ (ต่อ)

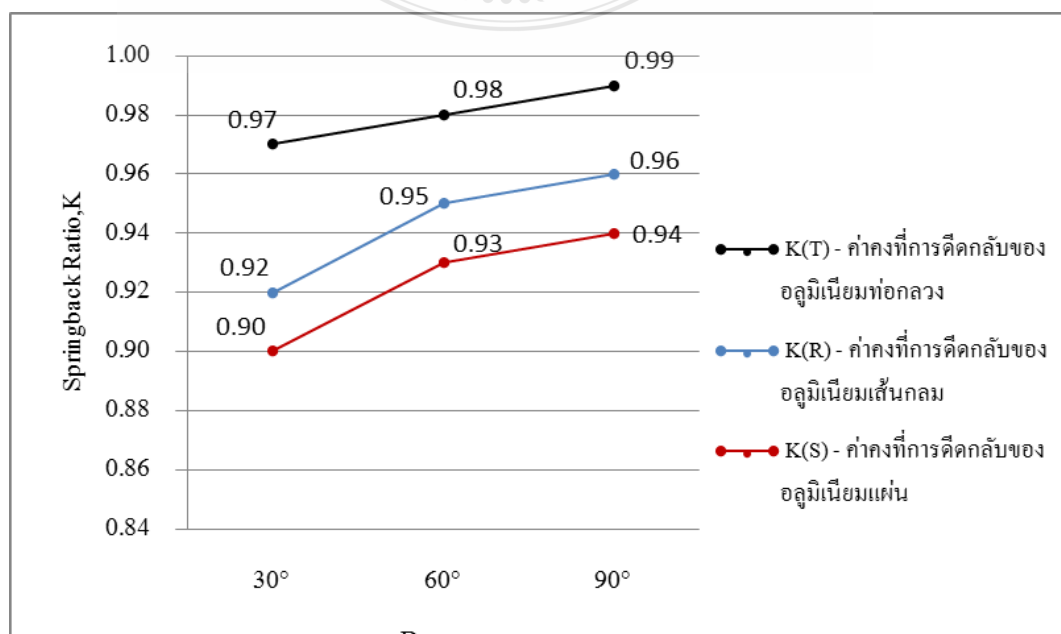
ชนิดวัสดุ	รูปทรงชิ้นงาน	ตัวแปร	องศาในการดัด		
ทองแดง	ท่อกลวง	α_1	30	60	90
		α_2	29	58	88
		K(T)	0.96	0.97	0.98
		% (Springback)	3.33	3.33	2.22
	เส้นกลม	α_1	30	60	90
		α_2	27	56	85
		K(R)	0.90	0.93	0.94
		% (Springback)	10.00	6.67	5.56
	แผ่น	α_1	30	60	90
		α_2	26	54	81.5
		K(S)	0.87	0.90	0.91
		% (Springback)	13.33	10.00	9.44

จากตารางที่ 4.4 สามารถอธิบายได้ว่าค่าคงที่การดัดกลับได้มาจากอัตราส่วนระหว่างองศาหลังจากการดัดตัวกลับกับองศาก่อนการดัด ซึ่งการที่ค่าคงที่การดัดกลับ (K) มีผลลัพธ์จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 1 นั้นหมายความว่าไม่เกิดการดัดกลับ และยิ่งค่าคงที่เข้าใกล้ 1 การดัดกลับก็จะน้อยลงเท่านั้น



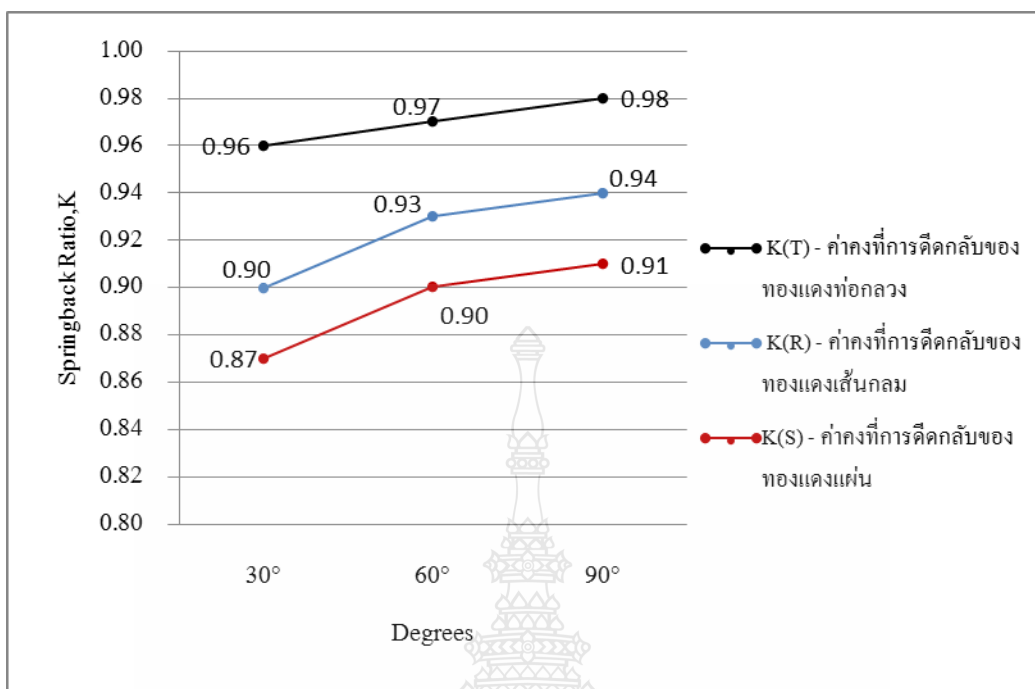
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่การดีดกลับกับองศาในการตัดของเหล็ก

จากรูปที่ 4.14 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่การดีดกลับเปรียบเทียบกับองศาในการตัดของเหล็กที่ 30, 60 และ 90 องศา การตัดเหล็กท่อกว้างจะได้ค่าคงที่การดีดกลับเท่ากับ 0.93, 0.95 และ 0.97 ตามลำดับ การตัดเหล็กเส้นกลมจะได้ค่าคงที่การดีดกลับเท่ากับ 0.87, 0.88 และ 0.93 ตามลำดับ การตัดเหล็กแผ่นจะได้ค่าคงที่การดีดกลับเท่ากับ 0.82, 0.85 และ 0.88 ตามลำดับ พบว่าเมื่อองศาในการตัดเพิ่มขึ้น ค่าคงที่การดีดกลับ (K) จะมีแนวโน้มสูงขึ้น นั่นแสดงให้เห็นว่าการดีดกลับของชิ้นงาน (Springback) จะลดลง จากกราฟเป็นการตัดเหล็กทั้ง 3 รูปทรง คือ ท่อกว้าง เส้นกลม และแผ่น ซึ่งการตัดที่ 30 องศา มีค่าคงที่การดีดกลับเท่ากับ 0.93, 0.87 และ 0.82 ตามลำดับ การตัดที่ 60 องศา มีค่าคงที่การดีดกลับเท่ากับ 0.95, 0.88 และ 0.85 ตามลำดับ การตัดที่ 90 องศา มีค่าคงที่การดีดกลับเท่ากับ 0.97, 0.93 และ 0.88 ตามลำดับ ซึ่งเหล็กท่อกว้างมีค่าคงที่การดีดกลับ (K) สูงที่สุด รองลงมาเป็นเหล็กเส้นกลม และสุดท้ายคือเหล็กแผ่น



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่การดีดกลับกับองศาในการดัดของอลูมิเนียม

จากรูปที่ 4.15 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่การดีดกลับเปรียบเทียบกับองศาในการดัดของอลูมิเนียมที่ 30, 60 และ 90 องศา การดัดอลูมิเนียมท่อกว้างจะได้ค่าคงที่การดีดกลับเท่ากับ 0.97, 0.98 และ 0.99 ตามลำดับ การดัดอลูมิเนียมเส้นกลมจะได้ค่าคงที่การดีดกลับเท่ากับ 0.92, 0.95 และ 0.96 ตามลำดับ การดัดอลูมิเนียมแผ่นจะได้ค่าคงที่การดีดกลับเท่ากับ 0.90, 0.93 และ 0.94 ตามลำดับ พบว่าเมื่อองศาในการดัดเพิ่มขึ้น ค่าคงที่การดีดกลับ (K) จะมีแนวโน้มสูงขึ้น นั่นแสดงให้เห็นว่าการดีดกลับของชิ้นงาน (Springback) จะลดลง จากกราฟเป็นการดัดอลูมิเนียมทั้ง 3 รูปทรง คือ ท่อกว้าง เส้นกลม และแผ่น ซึ่งการดัดที่ 30 องศา มีค่าคงที่การดีดกลับเท่ากับ 0.97, 0.92 และ 0.90 ตามลำดับ การดัดที่ 60 องศา มีค่าคงที่การดีดกลับเท่ากับ 0.98, 0.95 และ 0.93 ตามลำดับ การดัดที่ 90 องศา มีค่าคงที่การดีดกลับเท่ากับ 0.98, 0.96 และ 0.94 ตามลำดับ ซึ่งอลูมิเนียมท่อกว้างมีค่าคงที่การดีดกลับ (K) สูงที่สุด รองลงมาเป็นอลูมิเนียมเส้นกลม และสุดท้ายคืออลูมิเนียมแผ่น



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่การดีดกลับกับองศาในการดัดของทองแดง

จากรูปที่ 4.16 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่การดีดกลับเปรียบเทียบกับองศาในการดัดของทองแดงที่ 30, 60 และ 90 องศา การดัดทองแดงท่อกลวงจะได้ค่าคงที่การดีดกลับเท่ากับ 0.96, 0.97 และ 0.98 ตามลำดับ การดัดทองแดงเส้นกลมจะได้ค่าคงที่การดีดกลับเท่ากับ 0.90, 0.93 และ 0.94 ตามลำดับ การดัดทองแดงแผ่นจะได้ค่าคงที่การดีดกลับเท่ากับ 0.87, 0.90 และ 0.91 ตามลำดับ พบว่าเมื่อองศาในการดัดเพิ่มขึ้น ค่าคงที่การดีดกลับ (K) จะมีแนวโน้มสูงขึ้น นั่นแสดงให้เห็นว่าการดีดกลับของชิ้นงาน (Springback) จะลดลง จากกราฟเป็นการดัดทองแดงทั้ง 3 รูปทรง คือ ท่อกลวง เส้นกลม และแผ่น ซึ่งการดัดที่ 30 องศา มีค่าคงที่การดีดกลับเท่ากับ 0.96, 0.90 และ 0.87 ตามลำดับ การดัดที่ 60 องศา มีค่าคงที่การดีดกลับเท่ากับ 0.97, 0.93 และ 0.90 ตามลำดับ การดัดที่ 90 องศา มีค่าคงที่การดีดกลับเท่ากับ 0.98, 0.94 และ 0.91 ตามลำดับ ซึ่งทองแดงท่อกลวงมีค่าคงที่การดีดกลับ (K) สูงที่สุด รองลงมาเป็นทองแดงเส้นกลม และสุดท้ายคือทองแดงแผ่น

4.1.4 ผลการทดสอบความเครียด

การทดสอบนี้จะวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความเครียดหลัก, ความเครียดรอง เพื่อศึกษาเปอร์เซ็นต์การเกิดความเครียด และวิเคราะห์ความเครียดเทียบเท่าที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าความเครียดหลัก, ความเครียดรอง และความหนาสุดท้ายของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการดัด

ตารางที่ 4.5 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านในของเหล็กท่อกวาง

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	2.5	2.500	2.5	2.375	0	-5
60	2.5	2.500	2.5	2.375	0	-5
90	2.5	2.625	2.5	2.250	5	-10

ตารางที่ 4.6 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของเหล็กท่อกวาง

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	2.5	2.625	2.5	2.000	5	-20
60	2.5	2.750	2.5	2.000	10	-20
90	2.5	3.000	2.5	1.875	20	-25

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 แสดงเปอร์เซ็นต์ความเครียดในกระบวนการดัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา แสดงให้เห็นว่าอัตราความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของเหล็กท่อกวางมากกว่าบริเวณส่วนโค้งด้านใน ทำให้พบว่าองศาในการดัดนั้นมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราความเครียด ซึ่งอัตราความเครียดหลักสูงสุดเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ อยู่บริเวณส่วนโค้งด้านนอกเหล็กท่อกวาง และอัตราความเครียดหลักต่ำสุดเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่บริเวณส่วนโค้งด้านในเหล็กท่อกวาง

ตารางที่ 4.7 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านในของอลูมิเนียมท่อกลวง

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	2.5	2.500	2.5	2.375	0	-5
60	2.5	2.750	2.5	2.375	10	-5
90	2.5	2.875	2.5	2.375	15	-5

ตารางที่ 4.8 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของอลูมิเนียมท่อกลวง

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	2.5	3.000	2.5	2.000	20	-20
60	2.5	3.000	2.5	2.000	20	-20
90	2.5	3.000	2.5	1.875	20	-25

จากตารางที่ 4.7 และ 4.8 แสดงเปอร์เซ็นต์ความเครียดในกระบวนการดัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา แสดงให้เห็นว่าอัตราความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของอลูมิเนียมท่อกลวงมากกว่าบริเวณส่วนโค้งด้านใน ทำให้พบว่าองศาในการดัดนั้นมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราความเครียด ซึ่งอัตราความเครียดหลักสูงสุดเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ อยู่บริเวณส่วนโค้งด้านนอกของอลูมิเนียมท่อกลวง และอัตราความเครียดหลักต่ำสุดเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่บริเวณส่วนโค้งด้านในของอลูมิเนียมท่อกลวง

ตารางที่ 4.9 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านในของทองแดงท่อกลวง

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	2.5	2.625	2.5	2.500	5	0

60	2.5	2.625	2.5	2.375	5	-5
90	2.5	2.625	2.5	2.375	5	-5

ตารางที่ 4.10 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของทองแดงท่อกกลาง

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	2.5	2.875	2.5	2.375	15	-5
60	2.5	2.875	2.5	2.250	15	-10
90	2.5	3.125	2.5	2.250	25	-10

จากตารางที่ 4.9 และ 4.10 แสดงเปอร์เซ็นต์ความเครียดในกระบวนการดัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา แสดงให้เห็นว่าอัตราความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของทองแดงท่อกกลางมากกว่าบริเวณส่วนโค้งด้านใน ทำให้พบว่าองศาในการดัดนั้นมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราความเครียด ซึ่งอัตราความเครียดหลักสูงสุดเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ อยู่บริเวณส่วนโค้งด้านนอกทองแดงท่อกกลาง และอัตราความเครียดหลักต่ำสุดเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่บริเวณส่วนโค้งด้านในทองแดงท่อกกลาง

ตารางที่ 4.11 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านในของเหล็กเส้นกลม

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	2.5	2.500	2.5	2.500	0	0
60	2.5	2.625	2.5	2.375	5	-5
90	2.5	2.750	2.5	2.250	10	-10

ตารางที่ 4.12 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของเหล็กเส้นกลม

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	2.5	2.625	2.5	2.375	5	-5
60	2.5	2.625	2.5	2.250	5	-10
90	2.5	2.750	2.5	2.125	10	-15

จากตารางที่ 4.11 และ 4.12 แสดงเปอร์เซ็นต์ความเครียดในกระบวนการดัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา แสดงให้เห็นว่าอัตราความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของเหล็กเส้นกลมมากกว่าบริเวณส่วนโค้งด้านใน ทำให้พบว่าองศาในการดัดนั้นมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราความเครียด ซึ่งอัตราความเครียดหลักสูงสุดเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ อยู่บริเวณส่วนโค้งด้านนอกเหล็กเส้นกลม และอัตราความเครียดหลักต่ำสุดเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่บริเวณส่วนโค้งด้านในเหล็กเส้นกลม

ตารางที่ 4.13 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านในของอลูมิเนียมเส้นกลม

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	2.5	2.625	2.5	2.375	5	-5
60	2.5	2.625	2.5	2.250	5	0
90	2.5	2.750	2.5	2.250	10	-10

ตารางที่ 4.14 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของอลูมิเนียมเส้นกลม

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	2.5	2.625	2.5	2.500	5	0
60	2.5	2.750	2.5	2.500	10	0
90	2.5	2.875	2.5	2.375	15	-5

จากตารางที่ 4.13 และ 4.14 แสดงเปอร์เซ็นต์ความเครียดในกระบวนการดัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา แสดงให้เห็นว่าอัตราความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของอลูมิเนียมเส้นกลม มากกว่าบริเวณส่วนโค้งด้านใน ทำให้พบว่าองศาในการดัดนั้นมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราความเครียด ซึ่งอัตราความเครียดหลักสูงสุดเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ อยู่บริเวณส่วนโค้งด้านนอก อลูมิเนียมเส้นกลม และอัตราความเครียดหลักต่ำสุดเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่บริเวณส่วนโค้งด้านใน อลูมิเนียมเส้นกลม

ตารางที่ 4.15 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านในของทองแดงเส้นกลม

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	2.5	2.625	2.5	2.375	5	-5

60	2.5	2.750	2.5	2.375	10	-5
90	2.5	2.875	2.5	2.125	15	-15

ตารางที่ 4.16 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของทองแดงเส้นกลม

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	2.5	2.625	2.5	2.375	5	-5
60	2.5	2.750	2.5	2.375	10	-5
90	2.5	2.875	2.5	2.125	15	-15

จากตารางที่ 4.15 และ 4.16 แสดงเปอร์เซ็นต์ความเครียดในกระบวนการดัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา แสดงให้เห็นว่าอัตราความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของทองแดงเส้นกลมมากกว่าบริเวณส่วนโค้งด้านใน ทำให้พบว่าองศาในการดัดนั้นมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราความเครียด ซึ่งอัตราความเครียดหลักสูงสุดเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ อยู่บริเวณส่วนโค้งด้านนอกทองแดงเส้นกลม และอัตราความเครียดหลักต่ำสุดเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่บริเวณส่วนโค้งด้านในทองแดงเส้นกลม

ตารางที่ 4.17 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านในของเหล็กแผ่น

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	2.5	2.500	2.5	2.375	0	-5
60	2.5	2.625	2.5	2.250	5	-10
90	2.5	2.750	2.5	2.125	10	-15

ตารางที่ 4.18 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของเหล็กแผ่น

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	2.5	2.500	2.5	2.375	0	-5
60	2.5	2.625	2.5	2.375	5	-5
90	2.5	2.875	2.5	2.375	15	-5

จากตารางที่ 4.17 และ 4.18 แสดงเปอร์เซ็นต์ความเครียดในกระบวนการดัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา แสดงให้เห็นว่าอัตราความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของเหล็กแผ่นมากกว่าบริเวณส่วนโค้งด้านใน ทำให้พบว่าองศาในการดัดนั้นมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราความเครียด ซึ่งอัตราความเครียดหลักสูงสุดเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ อยู่บริเวณส่วนโค้งด้านนอกเหล็กแผ่น และอัตราความเครียดหลักต่ำสุดเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่บริเวณส่วนโค้งด้านในเหล็กแผ่น

ตารางที่ 4.19 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านในของอลูมิเนียมแผ่น

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	2.5	2.500	2.5	2.375	0	-5
60	2.5	2.625	2.5	2.375	5	-5
90	2.5	2.875	2.5	2.375	15	-5

ตารางที่ 4.20 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของอลูมิเนียมแผ่น

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	2.5	2.625	2.5	2.500	5	0
60	2.5	2.750	2.5	2.375	10	-5
90	2.5	2.875	2.5	2.250	15	-10

จากตารางที่ 4.19 และ 4.20 แสดงเปอร์เซ็นต์ความเครียดในกระบวนการดัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา แสดงให้เห็นว่าอัตราความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของอลูมิเนียมแผ่นมากกว่าบริเวณส่วนโค้งด้านใน ทำให้พบว่าองศาในการดัดนั้นมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราความเครียด ซึ่งอัตราความเครียดหลักสูงสุดเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ อยู่บริเวณส่วนโค้งด้านนอกของอลูมิเนียมแผ่น และอัตราความเครียดหลักต่ำสุดเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่บริเวณส่วนโค้งด้านในของอลูมิเนียมแผ่น

ตารางที่ 4.21 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านในของทองแดงแผ่น

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	2.5	2.500	2.5	2.500	0	0

60	2.5	2.625	2.5	2.375	5	-5
90	2.5	2.625	2.5	2.375	5	-5

ตารางที่ 4.22 อัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของทองแดงแผ่น

องศา	ความยาว เริ่มต้น (l_0)	ความยาว สุดท้าย (l_f)	ความกว้าง เริ่มต้น (W_0)	ความกว้าง สุดท้าย (W_f)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด หลัก	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด รอง
30	2.5	2.625	2.5	2.000	5	-20
60	2.5	2.750	2.5	2.000	10	-20
90	2.5	3.000	2.5	1.875	20	-25

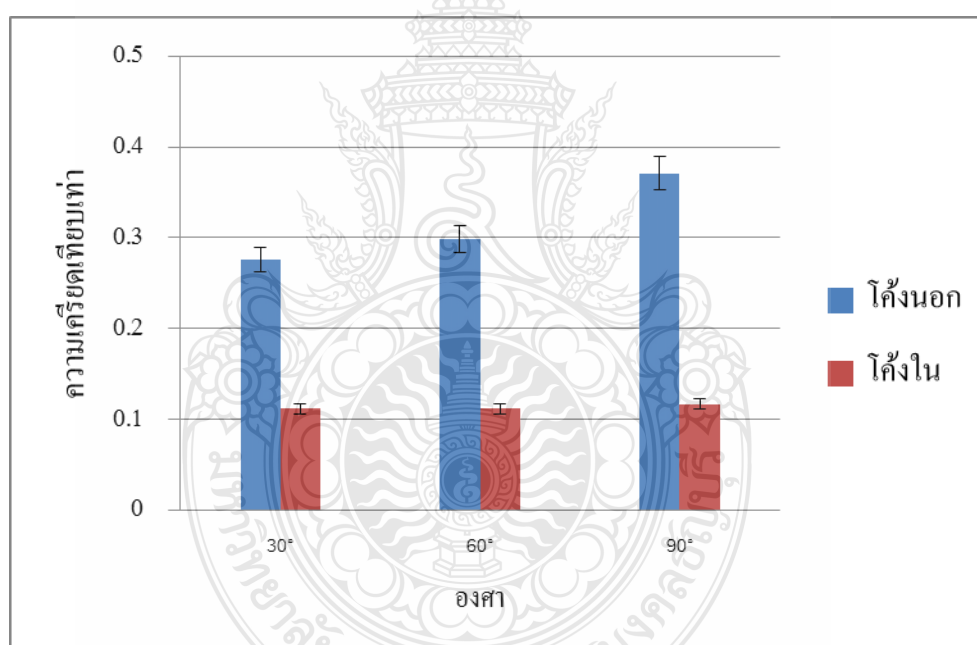
จากตารางที่ 4.21 และ 4.22 แสดงเปอร์เซ็นต์ความเครียดในกระบวนการดัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา แสดงให้เห็นว่าอัตราความเครียดบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของทองแดงแผ่นมากกว่าบริเวณส่วนโค้งด้านใน ทำให้พบว่าองศาในการดัดนั้นมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราความเครียด ซึ่งอัตราความเครียดหลักสูงสุดเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ อยู่บริเวณส่วนโค้งด้านนอกของทองแดงแผ่น และอัตราความเครียดหลักต่ำสุดเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่บริเวณส่วนโค้งด้านในของทองแดงแผ่น

จากค่าความเครียดหลัก, ความเครียดรอง และค่าความหนาของชิ้นงานหลังการดัด สามารถนำมาคำนวณหาความเครียดเทียบเท่า (Equivalent Strain) ของชิ้นงานดัด ดังตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 ความเครียดเทียบเท่า

วัสดุ	รูปทรง	ส่วนโค้ง	ความเครียดเทียบเท่า		
			30°	60°	90°
เหล็ก	ท่อกว้าง	ด้านนอก	0.276	0.299	0.371
		ด้านใน	0.112	0.112	0.117
	แผ่น	ด้านนอก	0.255	0.331	0.350

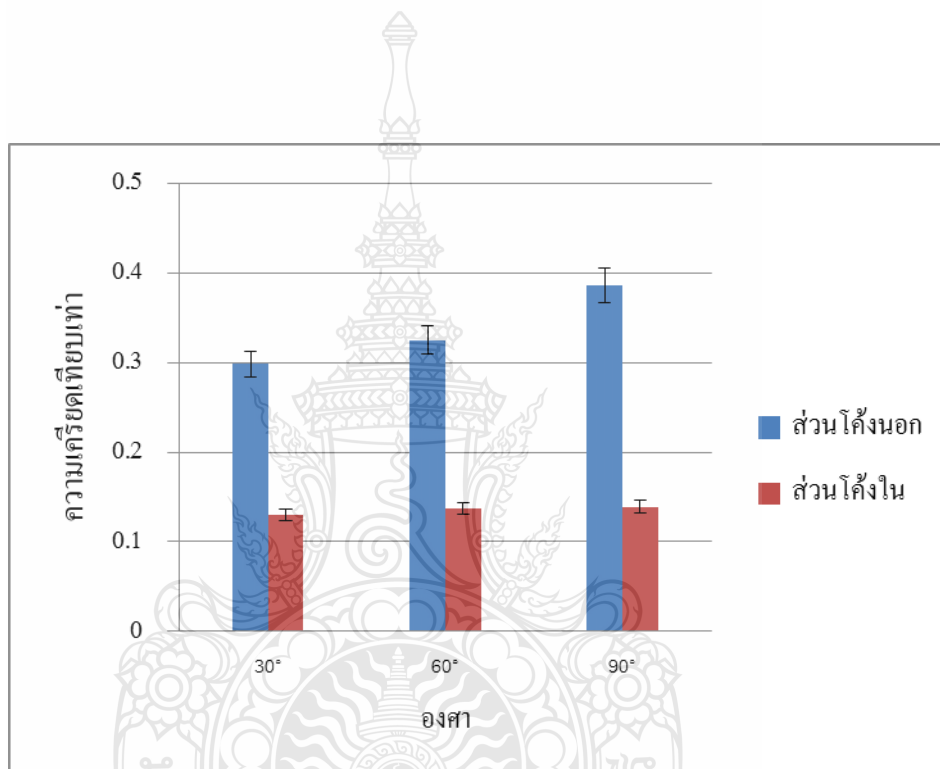
		ด้านใน	0.255	0.318	0.320
อลูมิเนียม	ท่อกกลาง	ด้านนอก	0.298	0.325	0.386
		ด้านใน	0.130	0.137	0.139
	แผ่น	ด้านนอก	0.319	0.327	0.358
		ด้านใน	0.301	0.327	0.342
ทองแดง	ท่อกกลาง	ด้านนอก	0.139	0.152	0.219
		ด้านใน	0.040	0.058	0.096
	แผ่น	ด้านนอก	0.187	0.198	0.281
		ด้านใน	0.000	0.058	0.071



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบกับองศาตัดของเหล็กท่อกกลาง

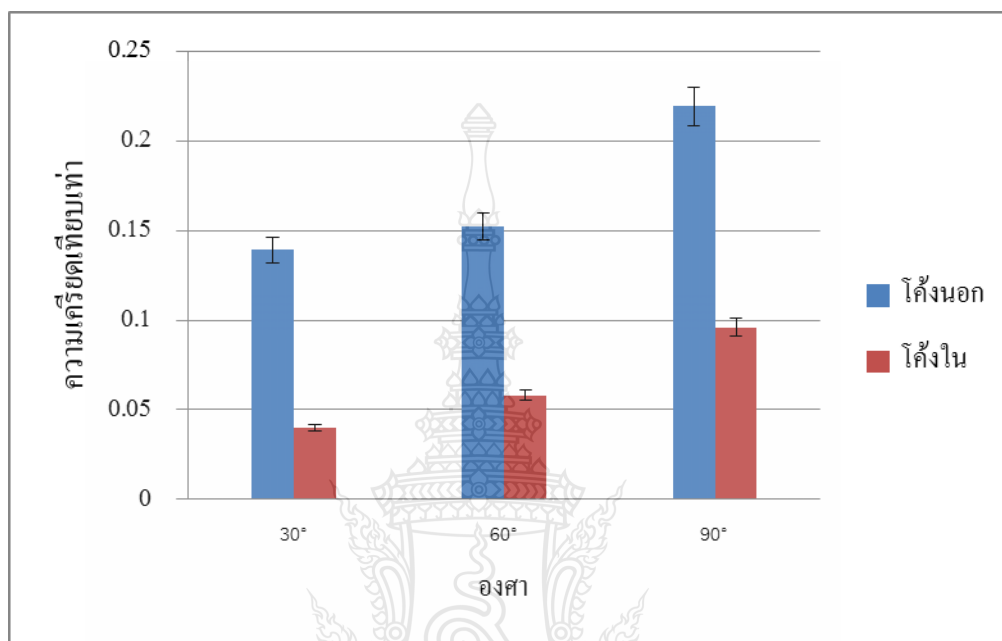
จากรูปที่ 4.17 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบกับองศาตัดซึ่งได้จากการคำนวณค่าความเครียดหลัก, ความเครียดรอง และความหนาสุดท้ายของชิ้นงานเปรียบเทียบกับองศาในการตัด เมื่อพิจารณาส่วนโค้งด้านในซึ่งมีค่าความเครียดเทียบกับองศาตัดเหล็กท่อกกลางที่มุม 30 ,60 และ 90 องศาเท่ากับ 0.112 , 0.112 และ 0.117 เมื่อพิจารณาส่วนโค้งด้านนอก ซึ่งมีค่าความเครียดเทียบกับองศาตัดเท่ากับ 0.276 , 0.299 และ 0.371 สามารถระบุได้ว่าองศาในการตัดชิ้นงาน

แปรผันตรงกับค่าความเครียดเทียบเท่า คือ เมื่อองศาในการดัดเพิ่มขึ้นค่าความเครียดเทียบเท่าก็จะเพิ่มขึ้น และค่าความเครียดเทียบเท่าบริเวณส่วนโค้งนอกจะมีค่ามากกว่าส่วนโค้งใน



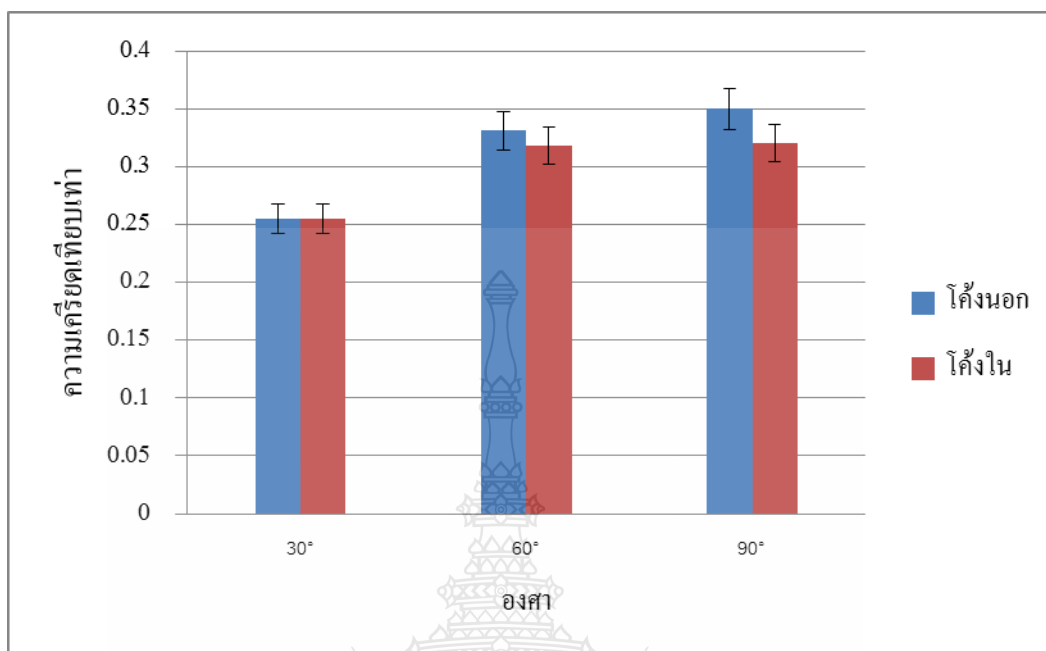
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบเท่ากับองศาตัดของอลูมิเนียมท่อกดง

จากรูปที่ 4.18 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบเท่าซึ่งได้จากการคำนวณค่าความเครียดหลัก, ความเครียดรอง และความหนาสุดท้ายของชิ้นงานเปรียบเทียบกับองศาในการดัด เมื่อพิจารณาส่วนโค้งด้านในซึ่งมีค่าความเครียดเทียบเท่าจากการทดลองดัดอลูมิเนียมท่อกดงที่มุม 30 ,60 และ 90 องศาเท่ากับ 0.130 , 0.137 และ 0.139 เมื่อพิจารณาส่วนโค้งด้านนอกซึ่งมีค่าความเครียดเทียบเท่า เท่ากับ 0.298 , 0.325 และ 0.386 สามารถระบุได้ว่าองศาในการดัดชิ้นงานแปรผันตรงกับค่าความเครียดเทียบเท่า คือ เมื่อองศาในการดัดเพิ่มขึ้นค่าความเครียดเทียบเท่าก็จะเพิ่มขึ้น และค่าความเครียดเทียบเท่าบริเวณส่วนโค้งนอกจะมีค่ามากกว่าส่วนโค้งใน



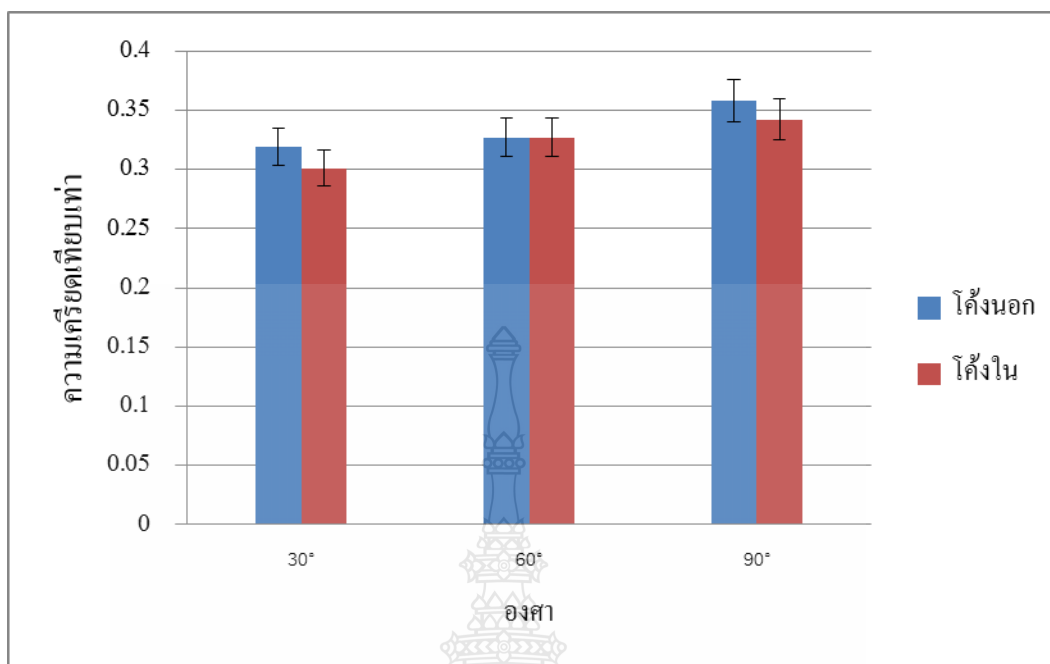
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบเท่ากับองศาตัดของทองแดงท่อกกลาง

จากรูปที่ 4.19 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบเท่าซึ่งได้จากการคำนวณค่าความเครียดหลัก, ความเครียดรอง และความหนาสุดท้ายของชิ้นงานเปรียบเทียบกับองศาในการตัด เมื่อพิจารณาส่วนโค้งด้านในซึ่งมีค่าความเครียดเทียบเท่าจากการทดลองตัดทองแดงท่อกกลางที่มุม 30 ,60 และ 90 องศาเท่ากับ 0.040 , 0.058 และ 0.096 เมื่อพิจารณาส่วนโค้งด้านนอกซึ่งมีค่าความเครียดเทียบเท่า เท่ากับ 0.139 , 0.152 และ 0.219 สามารถระบุได้ว่าองศาในการตัดชิ้นงานแปรผันตรงกับค่าความเครียดเทียบเท่า คือ เมื่อองศาในการตัดเพิ่มขึ้นค่าความเครียดเทียบเท่าก็จะเพิ่มขึ้น และค่าความเครียดเทียบเท่าบริเวณส่วนโค้งนอกจะมีค่ามากกว่าส่วนโค้งใน



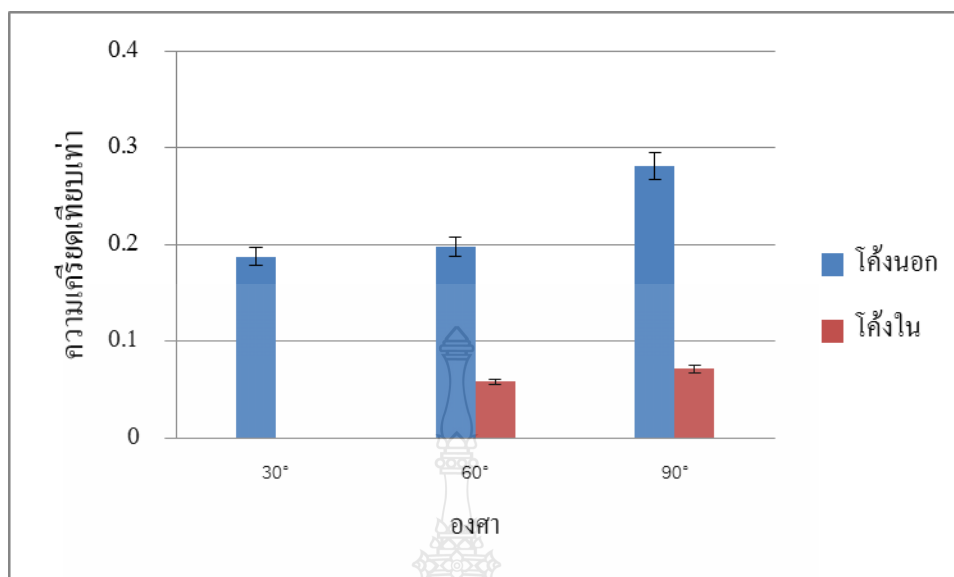
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบเท่ากับองศาตัดของเหล็กแผ่น

จากรูปที่ 4.20 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบเท่าซึ่งได้จากการคำนวณค่าความเครียดหลัก, ความเครียดรอง และความหนาสุดท้ายของชิ้นงานเปรียบเทียบกับองศาในการตัด เมื่อพิจารณาส่วนโค้งด้านในซึ่งมีค่าความเครียดเทียบเท่าจากการทดลองตัดเหล็กแผ่นที่มุม 30 ,60 และ 90 องศาเท่ากับ 0.255 , 0.331 และ 0.350 เมื่อพิจารณาส่วนโค้งด้านนอกซึ่งมีค่าความเครียดเทียบเท่า เท่ากับ 0.255 , 0.318 และ 0.320 สามารถระบุได้ว่าองศาในการตัดชิ้นงานแปรผันตรงกับค่าความเครียดเทียบเท่า คือ เมื่อองศาในการตัดเพิ่มขึ้นค่าความเครียดเทียบเท่าก็จะเพิ่มขึ้น และค่าความเครียดเทียบเท่าบริเวณส่วนโค้งนอกจะมีค่ามากกว่าส่วนโค้งใน



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบกับองศาตัดของอลูมิเนียมแผ่น

จากรูปที่ 4.21 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบกับองศาตัดซึ่งได้จากการคำนวณค่าความเครียดหลัก, ความเครียดรอง และความหนาสุดท้ายของชิ้นงานเปรียบเทียบกับองศาในการตัด เมื่อพิจารณาส่วนโค้งด้านในซึ่งมีค่าความเครียดเทียบกับองศาตัดของอลูมิเนียมแผ่นที่มุม 30 ,60 และ 90 องศาเท่ากับ 0.319 , 0.327 และ 0.342 เมื่อพิจารณาส่วนโค้งด้านนอกซึ่งมีค่าความเครียดเทียบกับองศาตัดเท่ากับ 0.301 , 0.327 และ 0.358 สามารถระบุได้ว่าองศาในการตัดชิ้นงานแปรผันตรงกับค่าความเครียดเทียบกับองศาตัด คือ เมื่อองศาในการตัดเพิ่มขึ้นค่าความเครียดเทียบกับองศาตัดก็เพิ่มขึ้น และค่าความเครียดเทียบกับองศาตัดบริเวณส่วนโค้งนอกจะมีค่ามากกว่าส่วนโค้งใน



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบกับองศาตัดของทองแดงแผ่น

จากรูปที่ 4.21 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบกับซึ่งได้จากการคำนวณค่าความเครียดหลัก, ความเครียดรอง และความหนาสุดท้ายของชิ้นงานเปรียบเทียบกับองศาในการตัด เมื่อพิจารณาส่วนโค้งด้านในซึ่งมีค่าความเครียดเทียบกับจากการทดลองตัดทองแดงแผ่นที่มุม 30 ,60 และ 90 องศาเท่ากับ 0.000 , 0.058 และ 0.071 เมื่อพิจารณาส่วนโค้งด้านนอกซึ่งมีค่าความเครียดเทียบกับ เท่ากับ 0.187 , 0.198 และ 0.281 สามารถระบุได้ว่าองศาในการตัดชิ้นงานแปรผันตรงกับค่าความเครียดเทียบกับ คือ เมื่อองศาในการตัดเพิ่มขึ้นค่าความเครียดเทียบกับก็จะเพิ่มขึ้น และค่าความเครียดเทียบกับบริเวณส่วนโค้งนอกจะมีค่ามากกว่าส่วนโค้งใน

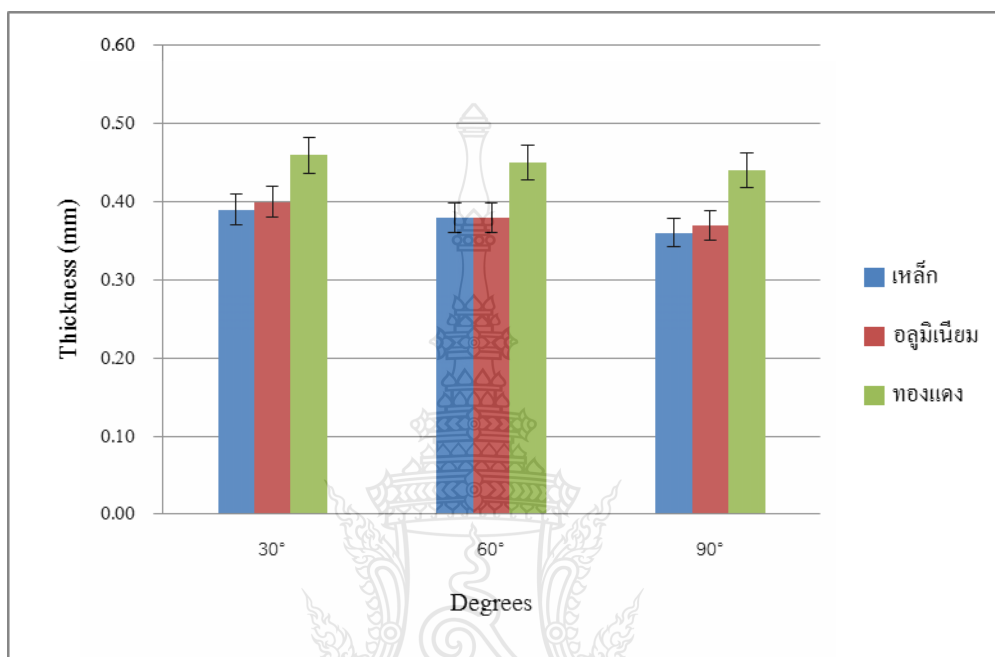
4.2 การวิเคราะห์

4.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความหนาของผนังหน้าตัดส่วนโค้งของชิ้นงานท่อกลวง

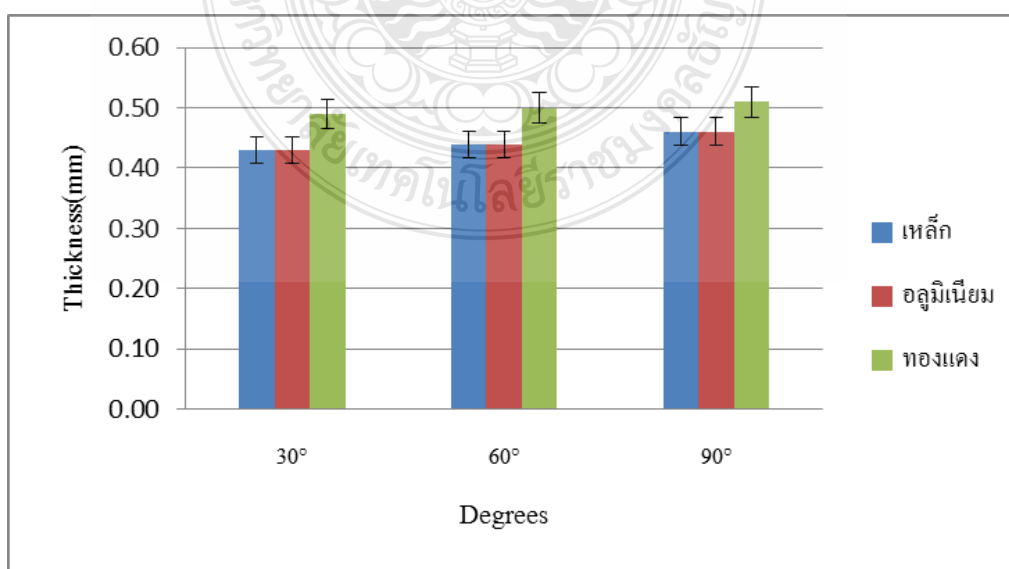
1) การวิเคราะห์จากการทดลอง

จากการทดลองตัดชิ้นงานเหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดงรูปทรงท่อกลวงที่มุม 30, 60 และ 90 องศา สามารถระบุได้ว่า บริเวณส่วนโค้งด้านนอก (A1, B1, C1) จะมีความหนาน้อยกว่าผนังส่วนโค้งด้านใน (A2, B2, C2) ในทุกองศาการตัด เมื่อวิเคราะห์แล้วเนื่องจากบริเวณส่วนโค้งด้านนอกของท่อกลวงได้รับผลกระทบจากความเค้นแรงดึง และบริเวณส่วนโค้งด้านในของท่อกลวงเกิดความเค้นแรงอัด [17] ซึ่งในตำแหน่ง B1 จะมีความหนาผนังน้อยที่สุดที่มุม 90 องศาและตำแหน่ง B2 จะมีความหนาของผนังมากที่สุดที่มุม 90 องศา โดยมีผลเหมือนกันในทุกชนิดวัสดุทั้งเหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดง

จากการทดลองตัดชิ้นงานเหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดงแผ่น ที่มุม 30, 60 และ 90 องศา จะเห็นได้ว่า บริเวณกึ่งกลางส่วนโค้งจะมีความหนาน้อยกว่าบริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้าย ส่วนโค้งของการตัด โดยมีความหนาเท่ากับ 1.35, 1.33 และ 1.95 ตามลำดับ

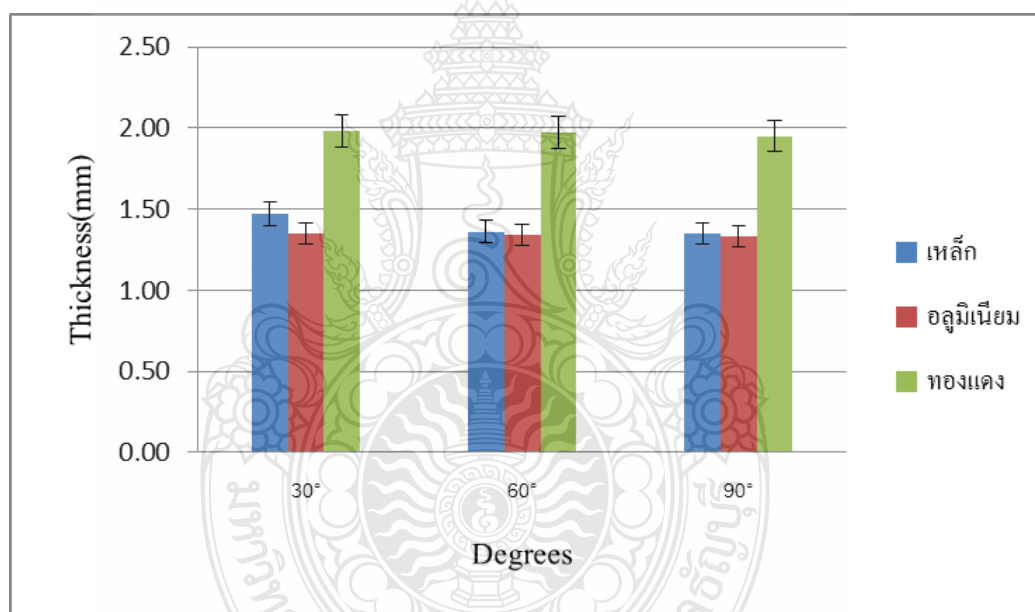


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาในการตัดกับความหนาของผนังท่อลงด้านนอกของวัสดุชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาในการตัดกับความหนาผนังท่อกลวงด้าน
ในของวัสดุชนิดต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ขององศาในการตัดกับความหนาผนังท่อกลวงของวัสดุชนิดต่าง ๆ เมื่อพิจารณาในแต่ละองศาการตัดพบว่า เหล็กจะมีค่าความหนาผนังท่อกลวงน้อยที่สุด รองลงมา คือ อลูมิเนียม และสุดท้ายคือ ทองแดง ซึ่งมีความหนาของผนังท่อกลวงมากที่สุด



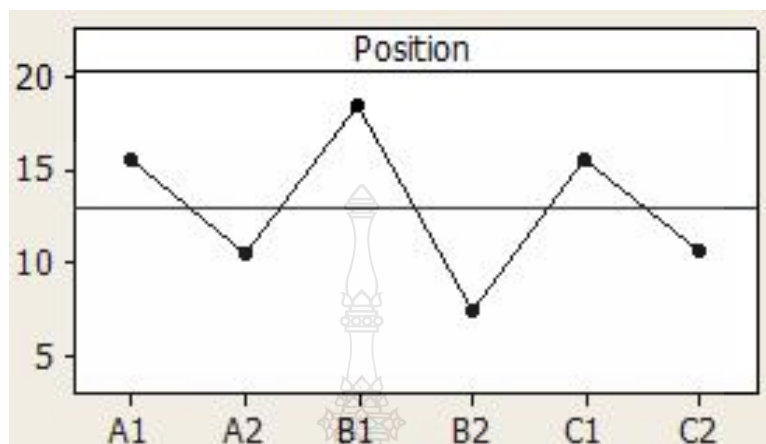
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาในการตัดกับความหนาชิ้นงานแผ่นของวัสดุ

จากรูปที่ 4.25 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ขององศาในการตัดกับความหนาชิ้นงานแผ่นของวัสดุชนิดต่าง ๆ เมื่อพิจารณาในแต่ละองศาการตัดพบว่า อลูมิเนียมจะมีค่าความหนาน้อยที่สุด รองลงมา คือ เหล็ก และสุดท้ายคือ ทองแดง ซึ่งมีความหนามากที่สุด

2) การวิเคราะห์จากค่าทางสถิติ

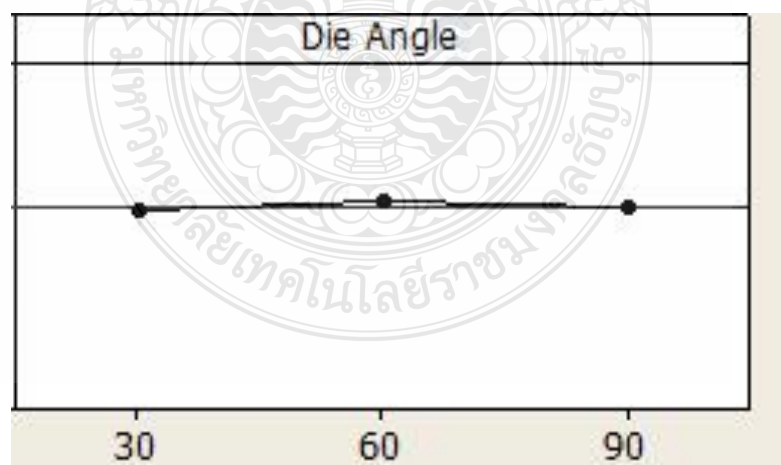
จากการวิเคราะห์ผลด้วยค่าทางสถิติ เมื่อตัวแปรที่ตรวจจับ (P) คือ ตำแหน่งส่วนโค้งนอกและใน, ชนิดวัสดุ และองศาในการตัด ที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งส่วนโค้งและชนิดวัสดุ พบว่า $P < \alpha$ ดังนั้นตำแหน่งส่วนโค้งและชนิดวัสดุมีผลต่ออัตราการ

ลดลงของผนังท่อกลวง แต่เมื่อพิจารณาองศาในการตัด พบว่า $P > \alpha$ ดังนั้นองศาในการตัดไม่มีผลต่ออัตราการลดลงของผนังท่อกลวง ดังรูปที่ 4.26 – 4.28



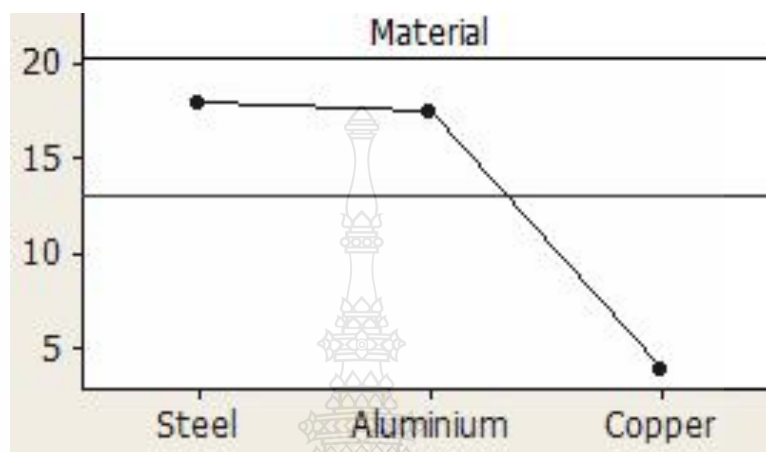
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงอัตราการลดลงของผนังท่อกลวงที่ตำแหน่งต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.26 เป็นกราฟแสดงอัตราการความหนาของผนังท่อกลวงที่ลดลงในการตัดเหล็กท่อกลวง, อลูมิเนียมท่อกลวง และทองแดงท่อกลวง จะเห็นได้ว่า ที่บริเวณส่วนโค้งด้านนอก (A1, B1, C1) มีอัตราความหนาส่วนโค้งลดลงมากกว่าส่วนโค้งด้านใน (A2, B2, C2) ซึ่งจะมีค่าอัตราความหนาผนังท่อลดลงมากที่สุดที่ตำแหน่ง B1 และมีอัตราความหนาผนังท่อลดลงน้อยที่สุดที่ตำแหน่ง B2



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงอัตราการลดลงของผนังท่อกลวงในองศาการตัด

จากรูปที่ 4.27 เป็นกราฟแสดงอัตราความหนาของผนังท่อกลวงที่ลดลงในการตัดเหล็กท่อกลวง, อลูมิเนียมท่อกลวง และทองแดงท่อกลวง ที่มีม 30, 60 และ 90 องศา จะเห็นได้ว่าองศาในการตัดไม่มีผลต่ออัตราความหนาของผนังท่อกลวงที่ลดลง



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงอัตราการลดลงของผนังท่อกลวงกับชนิดของวัสดุ

จากรูปที่ 4.28 เป็นกราฟแสดงอัตราความหนาของผนังท่อกลวงที่ลดลงในการตัดเหล็กท่อกลวง, อลูมิเนียมท่อกลวง และทองแดงท่อกลวง ที่มีม 30, 60 และ 90 องศา จะเห็นได้ว่าเหล็กมีอัตราความหนาของผนังท่อกลวงที่ลดลงมากที่สุด รองลงมาคือ อลูมิเนียม และทองแดงมีอัตราความหนาของผนังท่อกลวงที่ลดลงน้อยที่สุด

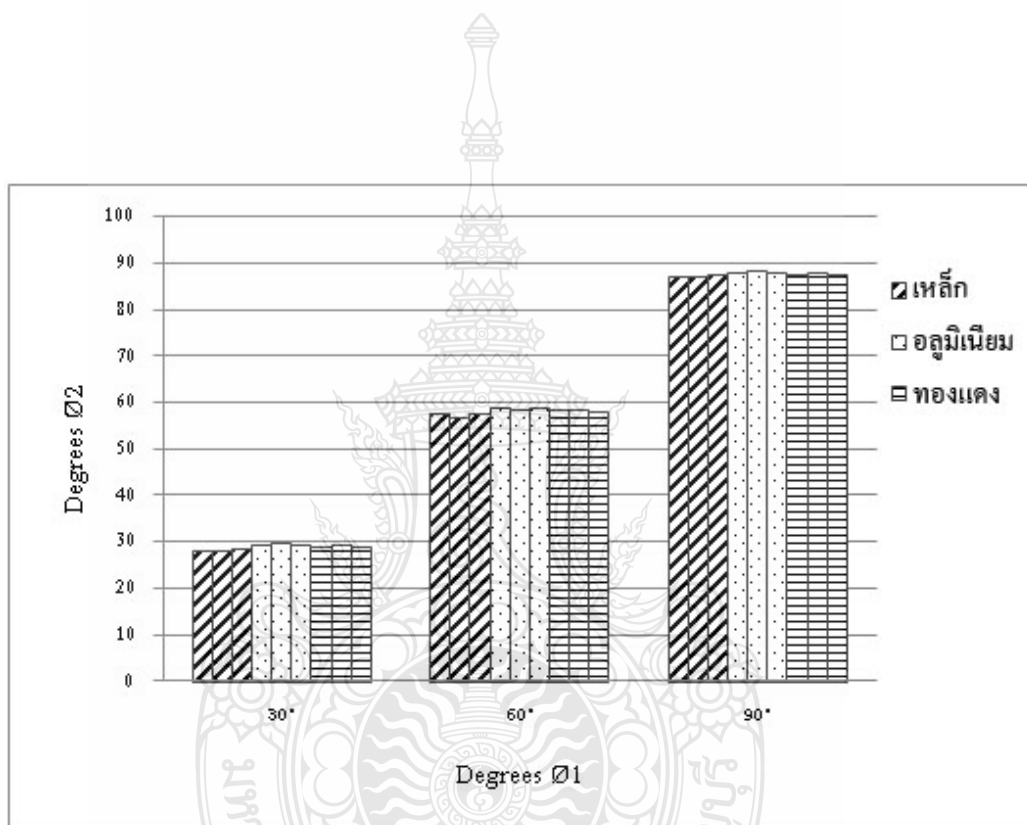
เมื่อเปรียบเทียบการวิเคราะห์ผลจากค่าการทดลองและค่าทางสถิติ พบว่า ผนังส่วนโค้งด้านนอก (A1, B1, C1) มีความหนาน้อยกว่าผนังด้านใน (A2, B2, C2) มีความสัมพันธ์กัน แต่ผลขององศาไม่สัมพันธ์กันซึ่งเป็น Type II Error อาจมีสาเหตุมาจากความหนาของวัสดุตั้งต้นที่มีความหนาไม่เท่ากันตลอดทั้งชิ้นงาน

4.2.2 ผลการวิเคราะห์การติดตัวกลับ

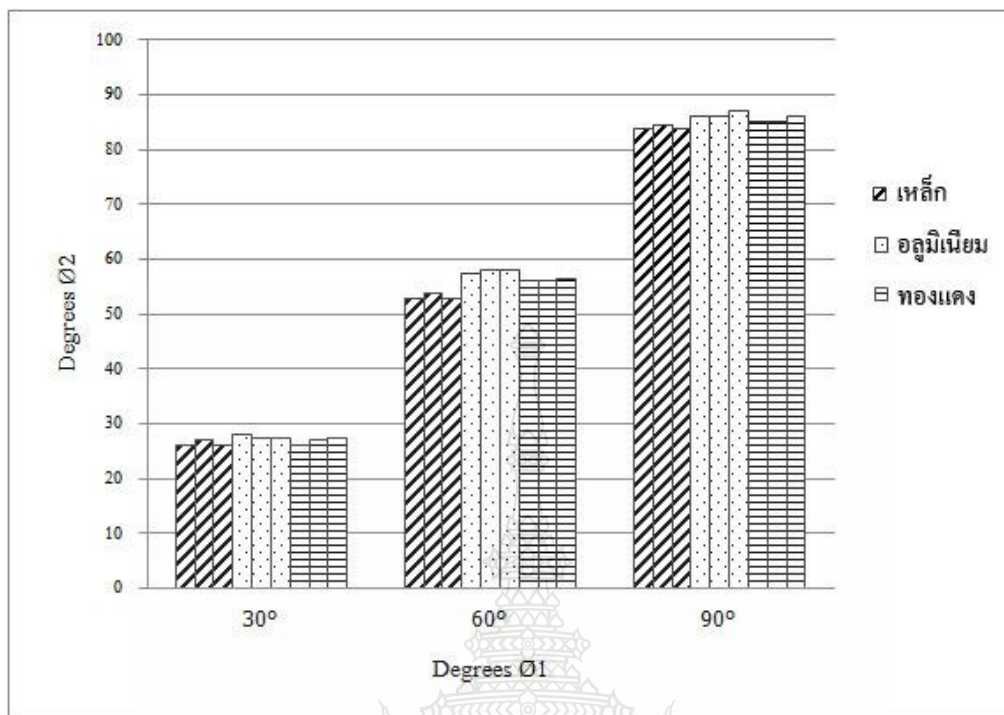
1) การวิเคราะห์จากการทดลอง

จากการทดลองตัดชิ้นงานเหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดงรูปทรงท่อกลวง, เส้นกลม และแผ่น ที่มีม 30, 60 และ 90 องศา เมื่อเปรียบเทียบองศาในการตัดกับค่าคงที่การติดกลับ (K) ของวัสดุแต่ละรูปทรง พบว่าค่าคงที่การติดกลับมีแนวโน้มสูงขึ้น นั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อองศาในการตัดเพิ่มชิ้นงานการติดกลับของชิ้นงานจะลดลง นอกจากนี้ชิ้นงานท่อกลวงมีค่าคงที่การติดกลับสูงที่สุด รองลงมาคือชิ้นงานเส้นกลม และสุดท้ายคือชิ้นงานแผ่นซึ่งมีค่าการติดกลับต่ำที่สุด ซึ่งผลการทดลองเป็นไปในทางเดียวกันทุกชนิดวัสดุ เมื่อวิเคราะห์แล้วจะได้ว่า ชิ้นงานรูปทรงท่อกลวงเกิดการติดกลับหลังจากปลด

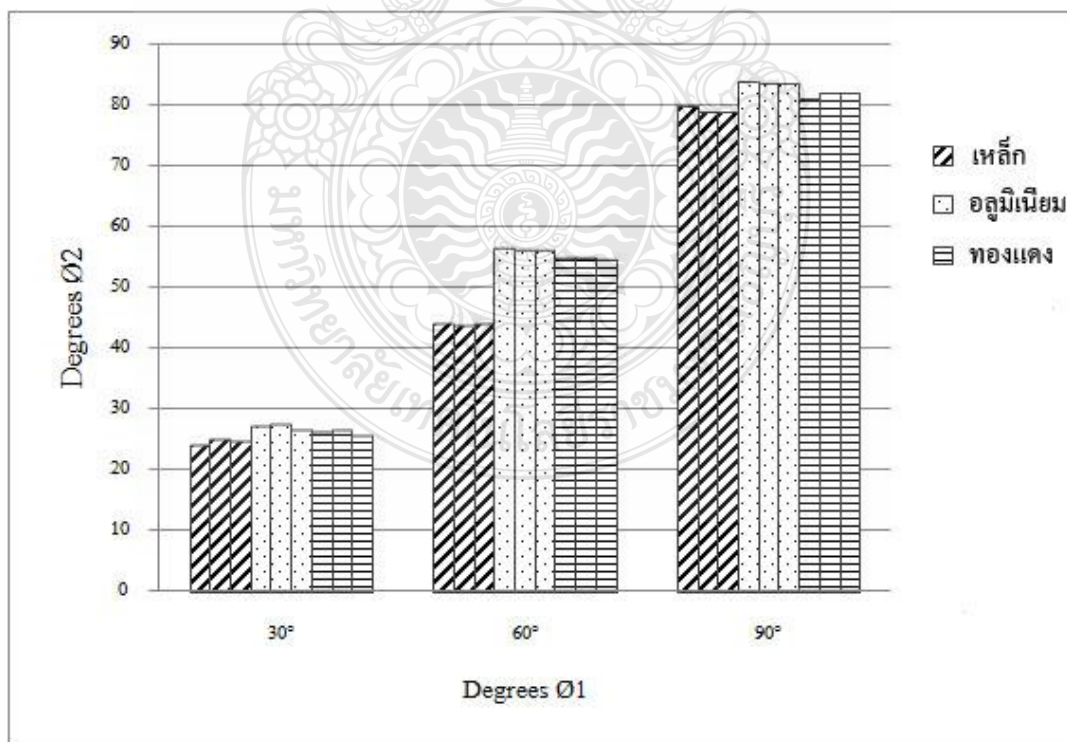
แม่พิมพ์น้อยที่สุด รองลงมาคือชิ้นงานเส้นกลม และสุดท้ายคือ ชิ้นงานแผ่นซึ่งเกิดการดีดกลับมากที่สุด ดังรูปที่ 4.29 – 4.31



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ขององศาการดีดกลับกับวัสดุรูปทรงท่อกวาง



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ขององศาการติดกลับกับวัสดุรูปทรงเส้นกลม

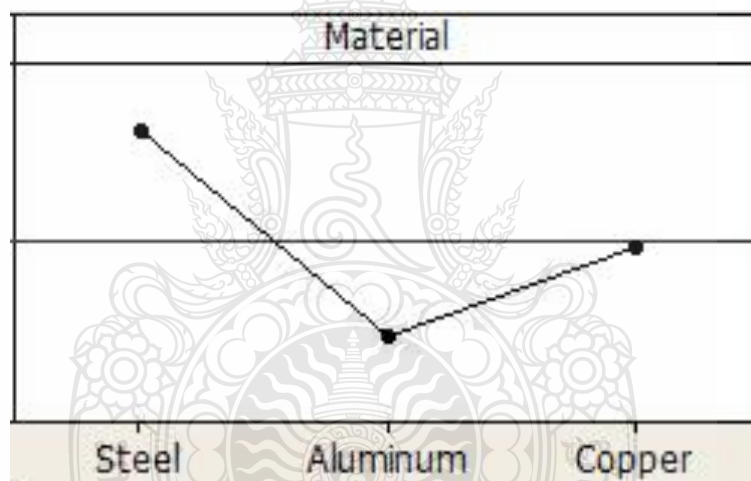


รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ขององศาการติดกลับกับวัสดุรูปทรงเส้นกลม

จากรูปที่ 4.29, 4.30 และ 4.31 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของการติดตัวกลับกับวัสดุชนิด เหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดงในรูปทรงต่าง ๆ เมื่อพิจารณาในแต่ละองศาการตัดพบว่า อลูมิเนียมมี องศาหลังการปลดแม่พิมพ์มากที่สุด รองลงมาคือ ทองแดง และสุดท้าย คือ เหล็กซึ่งมีองศา หลังการปลดแม่พิมพ์น้อยที่สุด สามารถวิเคราะห์ได้ว่าในทุกรูปทรงของชิ้นงาน เหล็กมีการติดตัว กลับมากที่สุด รองลงมา คือ ทองแดง และสุดท้าย คือ อลูมิเนียมซึ่งมีการติดกลับน้อยที่สุด ซึ่งเป็นผล มาจากคุณสมบัติทางกลของวัสดุ [18]

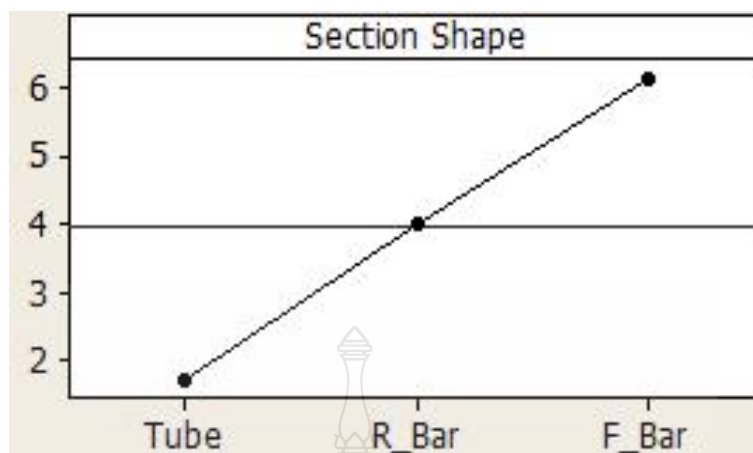
2) การวิเคราะห์จากค่าทางสถิติ

จากการวิเคราะห์ผลด้วยค่าทางสถิติ เมื่อตัวแปรที่ตรวจจับ (P) คือ ประเภ่ววัสดุ, รูปทรงวัสดุ และองศาในการตัด ที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 พบว่า $P < \alpha$ ดังนั้นประเภ่ว วัสดุ, รูปทรงวัสดุ และองศาในการตัด มีผลต่อการติดกลับ ดังรูปที่ 4.29 – 4.31



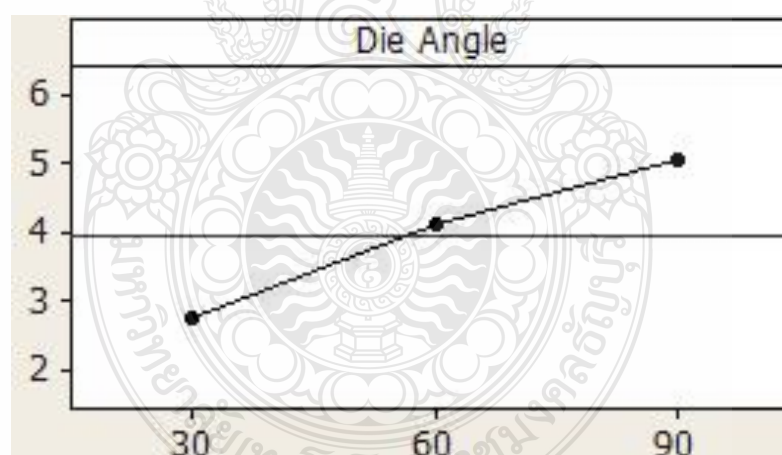
รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการติดตัวกลับกับประเภ่ววัสดุ

จากรูปที่ 4.32 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการติดตัวกลับกับประเภ่ววัสดุ จะเห็นได้ ว่า เหล็กติดตัวกลับมากที่สุด รองลงมาคือ ทองแดง และอลูมิเนียมติดตัวกลับน้อยที่สุด



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการติดตัวกลับกับรูปทรงของชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.33 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการติดกลับกับรูปทรงของชิ้นงาน จะเห็นว่าชิ้นงานท่อกลวงมีการติดตัวกลับน้อยที่สุด รองลงมา คือ เส้นกลม และแผ่นมีการติดตัวกลับมากที่สุด



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการติดตัวกลับกับองศา

จากรูปที่ 4.34 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการติดกลับกับองศาในการตัด จะเห็นว่า การตัดชิ้นงานที่มุม 30 องศา จะเกิดการติดตัวกลับน้อยที่สุด รองลงมาคือมุม 60 องศา และการที่มุม 90 องศา จะเกิดการติดตัวกลับมากที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบการวิเคราะห์ค่าจากการทดลองกับค่าทางสถิติพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างการติดตัวกลับกับชนิดวัสดุ และความสัมพันธ์ระหว่างการติดตัวกลับกับรูปทรงวัสดุมีความสัมพันธ์กัน

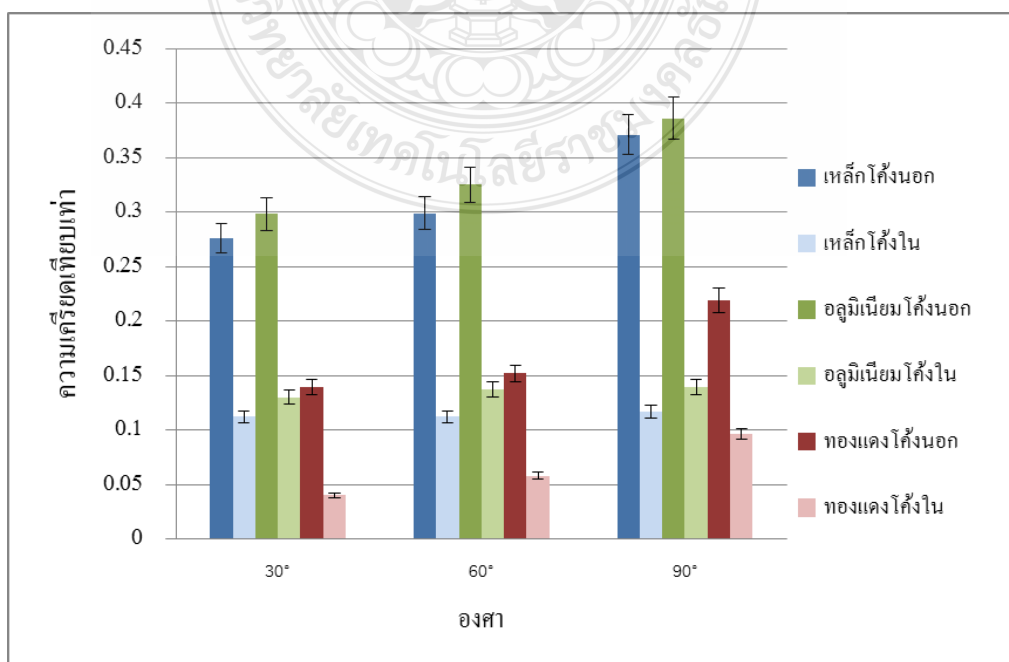
แต่ความสัมพันธ์ระหว่างการติดตัวกลับกับองศาในการตัดไม้สัมพันธ์กัน ซึ่งเป็น Type II Error อาจมีสาเหตุมาจากการตั้งมุมที่เครื่องตัดไม้แม่นยำเนื่องจากเครื่องตัดที่ใช้เป็นระบบไฮดรอลิก

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ความเครียด

1) การวิเคราะห์จากการทดลอง

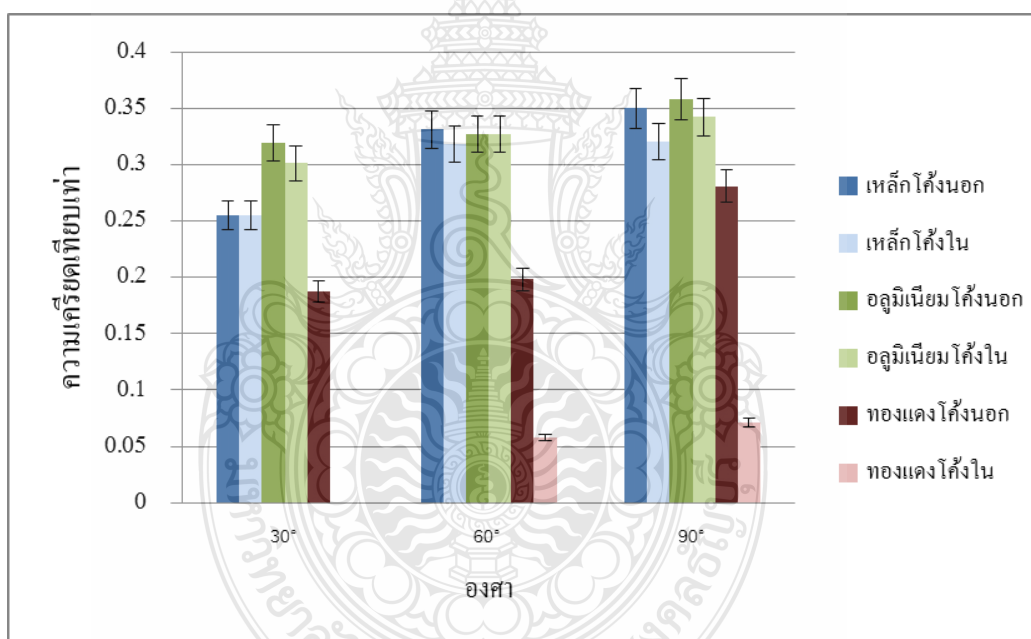
จากการทดลองตัดชิ้นงานเหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดงรูปทรงท่อกว้าง, เส้นกลม และแผ่น ที่มุม 30, 60 และ 90 องศา พบว่าอัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดที่บริเวณส่วนโค้งด้านนอกมีค่ามากกว่าบริเวณส่วนโค้งด้านในและจะมีอัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักสูงสุดที่มุม 90 องศา เนื่องจากมีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลายกริดตามยาวมากที่สุด

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความเครียดเทียบกับองศาในการตัดของทุกชิ้นงานพบว่า ในทุกชนิดวัสดุและรูปทรงค่าความเครียดเทียบเท่าจะเพิ่มขึ้นตามองศาในการตัด และค่าความเครียดเทียบเท่าบริเวณส่วนโค้งด้านนอกมีค่ามากกว่าบริเวณส่วนโค้งด้านใน เนื่องจากบริเวณส่วนโค้งด้านนอกมีการยึดตัวของวัสดุมากกว่าบริเวณส่วนโค้งด้านใน [18]



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบเท่าในวัสดุรูปทรงทอกลวงกับองศาตัด

จากรูปที่ 4.35 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบเท่าในวัสดุรูปทรงทอกลวงกับองศาในการตัด เมื่อพิจารณาในแต่ละองศาการตัดพบว่า อลูมิเนียมมีความเครียดเทียบเท่ามากที่สุด รองลงมา คือ เหล็ก และสุดท้าย คือ ทองแดง ซึ่งมีค่าความเครียดเทียบเท่าต่ำที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติทางกลของวัสดุ[18]



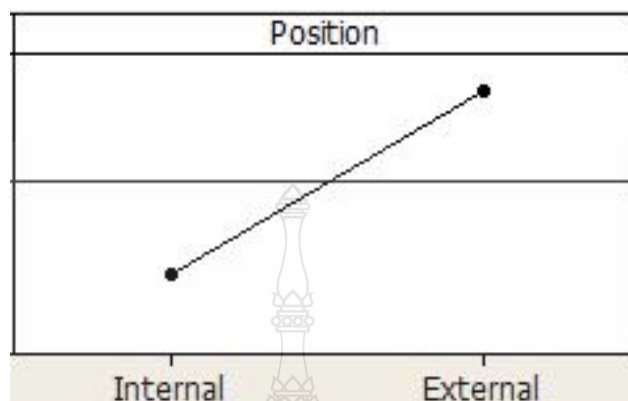
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบเท่าในวัสดุรูปทรงแผ่นกับองศาตัด

จากรูปที่ 4.36 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบเท่าในวัสดุรูปทรงแผ่นกับองศาในการตัด เมื่อพิจารณาในแต่ละองศาการตัดพบว่า อลูมิเนียมมีความเครียดเทียบเท่ามากที่สุด รองลงมา คือ เหล็ก และสุดท้าย คือ ทองแดง ซึ่งมีค่าความเครียดเทียบเท่าต่ำที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติทางกลของวัสดุ[18]

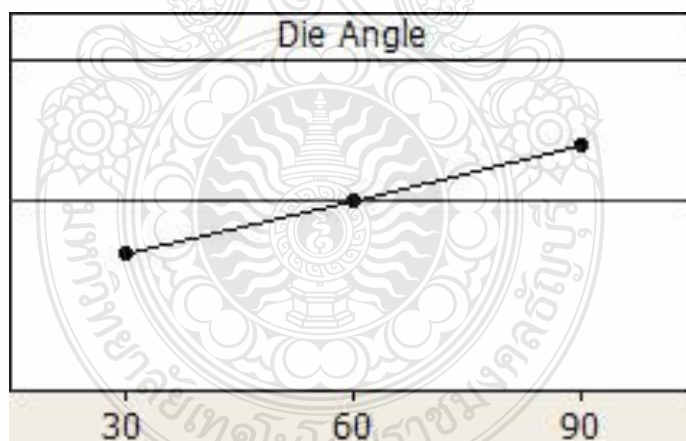
2) การวิเคราะห์จากค่าทางสถิติ

จากการวิเคราะห์ผลด้วยค่าทางสถิติ เมื่อตัวแปรที่ตรวจับ (P) คือ ประเภทวัสดุ, รูปทรงวัสดุ, องศาในการตัด และตำแหน่งส่วนโค้งนอกและใน ที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05

พบว่า $P < \alpha$ ดังนั้นประเภทวัสดุ, รูปทรงวัสดุ, องศาในการตัด และตำแหน่งส่วนโค้งนอกและในมีผลต่อค่าความเครียด ดังรูปที่ 4.37 – 4.40

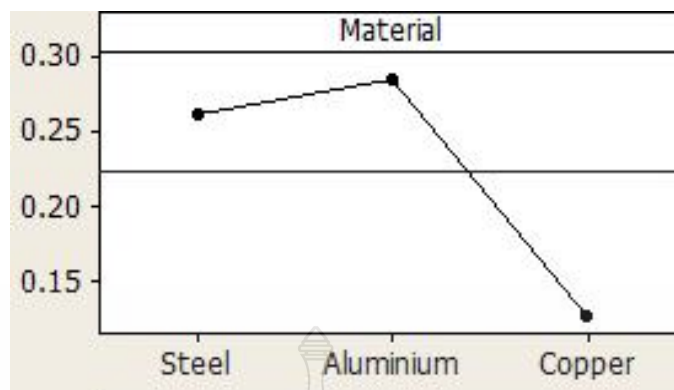


รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบกับบริเวณส่วนโค้งของชิ้นงาน
 จากรูปที่ 4.37 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบกับบริเวณส่วนโค้งของชิ้นงาน จะเห็นได้ว่า บริเวณส่วนโค้งด้านนอกมีความเครียดเทียบเท่ามากกว่าบริเวณส่วนโค้งด้านใน



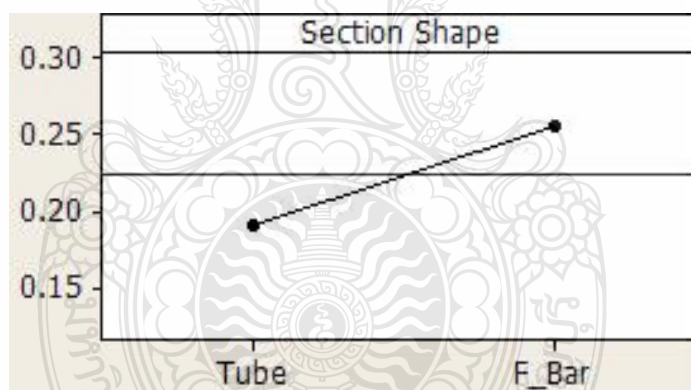
รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบกับองศาในการตัด

จากรูปที่ 4.38 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบกับองศาในการตัดพบว่า ความเครียดเทียบเท่าแปรผันตรงกับองศาในการตัด คือ เมื่อองศาในการตัดเพิ่มขึ้น ค่าความเครียดเทียบเท่าก็จะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบกับชนิดวัสดุ

จากรูปที่ 4.39 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบกับชนิดวัสดุ พบว่า อลูมิเนียมมีค่าความเครียดเทียบเท่ามากที่สุด รองลงมา คือ เหล็ก และสุดท้ายคือ ทองแดง มีค่าความเครียดเทียบเท่าน้อยที่สุด



รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบกับรูปทรงวัสดุ

จากรูปที่ 4.40 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบกับรูปทรงวัสดุ พบว่า เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วชิ้นงานแผ่นมีค่าความเครียดเทียบเท่ามากกว่าชิ้นงานท่อกลวง

เมื่อเปรียบเทียบการวิเคราะห์ค่าจากการทดลองกับค่าทางสถิติพบว่า ผลความเครียดเทียบเท่ามีความสัมพันธ์กัน

บทที่ 5

สรุปการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองและการวิเคราะห์ผล สามารถทำการสรุปผลการทดลองและวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองจริงที่ได้จากการตัดชิ้นงานที่มุม 30, 60 และ 90 องศา ซึ่งมีดังนี้ การประเมินข้อบกพร่องทางกายภาพด้วยสายตา, การทดสอบความหนาของผนังหน้าตัดส่วนโค้งของชิ้นงานท่อกว้าง, การทดสอบการติดกลับของชิ้นงานที่ได้รับอิทธิพลจากองศาในการตัด และการวิเคราะห์ความเครียด

5.1 สรุปการทดลอง

จากผลการทดลองตัดชิ้นงานวัสดุ 3 ชนิด คือ เหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดง ที่มี 3 รูปทรง คือ ท่อกว้าง, เส้นกลม และแผ่น ซึ่งทำการตัดชิ้นงานที่มุม 30, 60 และ 90 องศา สามารถกล่าวสรุปได้โดยย่อดังนี้

5.1.1 สรุปผลการประเมินข้อบกพร่องทางกายภาพ

1) เหล็ก

เหล็กท่อกว้าง, เส้นกลม และแผ่นทุกชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการตัดจะไม่เกิดรอยแตก, ฉีกขาด และรอยย่น แต่จะเกิดรอยบุบที่บริเวณส่วนโค้งของชิ้นงานท่อกว้าง และเหล็กทุกรูปทรงจะเกิดการติดกลับเมื่อปลดแม่พิมพ์ออก โดยเหล็กท่อกว้างจะเกิดการติดกลับน้อยที่สุด รองลงมาเป็นเหล็กเส้นกลม และเหล็กแผ่นจะเกิดการติดกลับมากที่สุด นอกจากนี้ความหนาของผนังเหล็กท่อกว้างในแต่ละหน้าตัดทั้ง 3 บริเวณ ที่ส่วนโค้ง A, B และ C ของชิ้นงานจะไม่เท่ากัน

2) อลูมิเนียม

อลูมิเนียมท่อกว้าง, เส้นกลม และแผ่นทุกชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการตัดจะไม่เกิดรอยแตก, ฉีกขาด และรอยย่น แต่จะเกิดรอยบุบที่บริเวณส่วนโค้งของชิ้นงานท่อกว้าง และอลูมิเนียมทุกรูปทรงจะเกิดการติดกลับเมื่อปลดแม่พิมพ์ออก โดยอลูมิเนียมท่อกว้างจะเกิดการติดกลับน้อยที่สุด รองลงมาเป็นอลูมิเนียมเส้นกลม และอลูมิเนียมแผ่นจะเกิดการติดกลับมากที่สุด นอกจากนี้ความหนาของผนังอลูมิเนียมท่อกว้างในแต่ละหน้าตัดทั้ง 3 บริเวณ ที่ส่วนโค้ง A, B และ C ของชิ้นงานจะไม่เท่ากัน

3) ทองแดง

ทองแดงท่อกว้าง, เส้นกลม และแผ่นทุกชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการตัดจะไม่เกิดรอยแตก, ฉีกขาด และรอยย่น แต่จะเกิดรอยบุบที่บริเวณส่วนโค้งของชิ้นงานท่อกว้าง และทองแดงทุก

รูปทรงจะเกิดการดีดกลับเมื่อปลดแม่พิมพ์ออก โดยทองแดงท่อกกลางจะเกิดการดีดกลับน้อยที่สุด รองลงมาเป็นทองแดงเส้นกลม และทองแดงแผ่นจะเกิดการดีดกลับมากที่สุด นอกจากนี้ความหนาของผนังทองแดงท่อกกลางในแต่ละหน้าตัดทั้ง 3 บริเวณ ที่ส่วนโค้ง A, B และ C ของชิ้นงานจะไม่เท่ากัน

5.1.2 สรุปผลการทดสอบความหนาของผนังหน้าตัดส่วนโค้งของชิ้นงานท่อกกลาง

เมื่อทำการตรวจสอบชิ้นงานท่อกกลางทุกชนิดวัสดุทั้งเหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดงที่ทำการตัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา และการวัดค่าความหนาบบริเวณส่วนโค้งด้านนอกชิ้นงานท่อกกลาง 3 จุด คือ A1, B1 และ C1 พบว่าชิ้นงานท่อกกลางที่ผ่านกระบวนการตัดในแต่ละองศานั้น ผนังด้านนอกของชิ้นงานจะมีความบางลงตามองศาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากส่วนโค้งนอกถูกควบคุมโดยความเค้นแรงดึงและจุดกึ่งกลางของส่วนโค้งด้านนอกนั้นจะเป็นจุดที่บางที่สุด คือ จุด B1 และจะมีความบางที่สุดที่มุม 90 องศา โดยที่จุด B1 ของ เหล็กท่อกกลางมีค่าเท่ากับ 0.37 มิลลิเมตร อลูมิเนียมท่อกกลางมีค่าเท่ากับ 0.36 มิลลิเมตร ทองแดงท่อกกลางมีค่าเท่ากับ 0.44 มิลลิเมตร ที่จุด B2 ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของส่วนโค้งด้านในชิ้นงานจะมีความหนามากที่สุดเมื่อทำการตัดที่มุม 90 องศา โดยที่จุด B2 ของ ผนังเหล็กท่อกกลางมีค่าเท่ากับ 0.46 มิลลิเมตร อลูมิเนียมท่อกกลางมีค่าเท่ากับ 0.46 มิลลิเมตร ทองแดงท่อกกลางมีค่าเท่ากับ 0.51 มิลลิเมตรที่บริเวณส่วนโค้งด้านในของชิ้นงานท่อกกลาง พบว่าชิ้นงานท่อกกลางที่ผ่านกระบวนการตัดในแต่ละองศานั้น ผนังด้านในของชิ้นงานจะมีความหนามากกว่าท่อกกลางด้านนอกเนื่องจากส่วนโค้งด้านในถูกควบคุมโดยความเค้นแรงอัดและที่จุดกึ่งกลางส่วนโค้งด้านในจะมีความหนามากที่สุด จากผลการทดลองที่ได้สรุปมานั้นทำให้ทราบว่า เมื่อองศาในการตัดเพิ่มมากขึ้นความหนาของผนังด้านนอกจะลดลงและความหนาของผนังด้านในจะเพิ่มขึ้นตามองศาในการตัดซึ่งสอดคล้องกันทั้งเหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดง และเมื่อเปรียบเทียบชนิดวัสดุแล้วพบว่าเหล็กมีอัตราการลดลงของผนังท่อกกลางมากที่สุด รองลงมา คือ อลูมิเนียม และสุดท้ายทองแดงมีอัตราการลดลงของผนังท่อกกลางน้อยที่สุด

5.1.3 สรุปผลการทดสอบและวิเคราะห์การดีดกลับ

เมื่อทำการตรวจสอบและวิเคราะห์การดีดกลับของทุกชิ้นงาน พบว่าค่าคงที่การดีดกลับของชิ้นงาน (K) จะเพิ่มขึ้นตามองศาในการตัด คือ เมื่อองศาในการตัดเพิ่มมากขึ้น การดีดกลับของชิ้นงานจะลดลง และเมื่อเปรียบเทียบรูปทรงวัสดุทั้งท่อกกลาง, เส้นกลม และแผ่น พบว่าชิ้นงานท่อกกลางจะมีเปอร์เซ็นต์การดีดกลับน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานอีก 2 ประเภท เนื่องจากมีค่าคงที่การดีดกลับมากที่สุด และค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในกระบวนการดัดน้อยที่สุด โดยที่ชิ้นงานแผ่นจะมีเปอร์เซ็นต์การดีดตัวกลับสูงที่สุด เนื่องจากมีความเค้นตกค้างมากที่สุด และเมื่อทำการเปรียบเทียบชนิดวัสดุแต่ละชนิด คือ เหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดงในรูปทรงเดียวกัน พบว่า เหล็กจะ

เกิดการติดกลับมากที่สุด รองลงมาคือทองแดง และอลูมิเนียมจะเกิดการติดกลับน้อยที่สุด ซึ่งเป็นการติดตัวกลับแปรผันตรงกับผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

5.1.4 สรุปผลการวิเคราะห์ความเครียด

จากการวัดค่าความเครียดหลัก, ความเครียดรอง ที่เกิดขึ้นกระบวนการตัดชิ้นงานวัสดุ เหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดง ที่มี 3 รูปทรง คือ ท่อกลม, เส้นกลม และแผ่น โดยคำนวณหาความเครียดเทียบเท่า ในแต่ละมุมของชิ้นงาน คือ มุม 30, 60 และ 90 องศา โดยที่มุม 90 องศา ส่วนโค้งด้านในและด้านนอกจะมีค่าสูงที่สุดดังนี้ เหล็กท่อกลมมีค่าเท่ากับ 0.117, 0.371 อลูมิเนียมท่อกลมมีค่าเท่ากับ 0.139, 0.386 ทองแดงท่อกลมมีค่าเท่ากับ 0.096, 0.219 เหล็กแผ่นมีค่าเท่ากับ 0.320, 0.350 อลูมิเนียมแผ่นมีค่าเท่ากับ 0.342, 0.358 ทองแดงแผ่นมีค่าเท่ากับ 0.071, 0.281 พบว่าความเครียดเทียบเท่าบริเวณส่วนโค้งด้านนอกมีค่ามากกว่าส่วนโค้งด้านในเนื่องจากส่วนโค้งนอกควบคุมด้วยความเครียดแรงดึงและส่วนโค้งในควบคุมด้วยความเครียดแรงอัด นอกจากนี้ความเครียดเทียบเท่าจะเพิ่มขึ้นเมื่อองศาในการตัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าความยาวที่เปลี่ยนที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการเปลี่ยนรูปต่อความยาวเริ่มต้นก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งก็คือค่าความเครียดหลักเพิ่มขึ้นตามองศาในการตัด วัสดุที่มีความเครียดมากที่สุด คือ อลูมิเนียม, เหล็ก และทองแดง ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบรูปทรงวัสดุแล้วพบว่า ชิ้นงานแผ่นมีค่าความเครียดมากกว่าชิ้นงานท่อกลม

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การวัดค่าของลายกริดที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างไปโดยอ่านค่าจากแผ่น Stencil Mylar อาจเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น เนื่องจากชิ้นงานเป็นส่วนโค้งและอ่านค่าด้วยสายตา จึงควรใช้กล้องที่สามารถถ่ายบริเวณชิ้นงานที่เป็นส่วนโค้งได้และนำไปวัดด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

5.2.2 เนื่องจากเครื่องดัดแบบอัตโนมัติใช้ระบบไฮดรอลิกต้องตั้งมุมที่ต้องการดัดบนเครื่อง ดังนั้นควรวัดค่ามุมและตั้งให้ถูกต้อง

5.2.3 ในการทดลองชิ้นงานแต่ละตัวแปรควรมีการเตรียมชิ้นงานให้เหมือนกันทุกขั้นตอน เพื่อไม่ให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนและได้ผลการทดลองที่ถูกต้อง

5.2.4 เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติ ควรมีการเก็บตัวอย่างมากขึ้นเพราะค่าความผิดพลาด (Error) ที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าที่ยอมรับได้

บรรณานุกรม

- [1] Vukota Boljanovic. 2004. SHEET METAL FORMING PROCESS AND DIE DESIGN.
New York : Industrial Press Inc.
- [2] ศิริชัย ต่อสกุล. 2554. พื้นฐานเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน)
- [3] Rohit Agawal. 2004. "Tube Bending With Axial Pull and Internal Pressure."
Master of
Science Thesis, Mechanical Engineering Texas A&M University.
- [4] Bob Want. 2007. Avoiding Common Bending Problems with Common Sense.
[Online] Available :
http://advancedtubular.com/wiki/index.php?title=Bob_want#Editorial_on_TPJ
- [5] Alex And Ria. 2011. Bending and Forming. [Online] Available :
<http://www.hydro.com/en/Subsites/NorthAmerica/Products-and-services/Fabrication-services/Bending-and-forming/>
- [6] William Q. 2010. Tingley III is general manager of Bend Tooling Inc. [Online]
Available : <http://www.spoke.com/people/bill-tingley-3e1429c09e597c10039aa916>
- [7] Pines Technology. 2009. Reverse Interlocking Draw Bend Tools. [Online]
Available :
http://www.pinestech.com/news_reverse_interlock_draw.htm
- [8] George R Winton. 2009. Tube Bending Methods. [Online] Available :
http://www.copper.org/applications/cuni/app_syscomp.html
- [9] 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>
- [10] อัครายุทธ พิศิษฐวานิช. 2554. "การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการดัดตัวกลับกับความเค้นในกระบวนการดัดโลหะแบบ Compression โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์." วิทยานิพนธ์ - มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

มงคลธัญบุรี.

- [11] กอบบุญ หล่อทองคำ. 2549. ทฤษฎีการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยการดัดงอ. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/TEN437/main/elearning/lessen/04/main.htm>
- [12] เรืองศักดิ์ ภูธรธราช, และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์. 2554. “อิทธิพลขนาดและรูปร่างตัวกวนการเชื่อมแรงเสียดทานแบบกวนต่อสมบัติทางกลรอยต่ออลูมิเนียม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304.” ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [13] คมสันต์ งามขำ. 2553. “ขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนไนต์ SUS304 จากการเปลี่ยนความหนา.” สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- [14] วันชัย ชัยชมชื่น. 2525. งานขึ้นรูปแปรรูปโลหะ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [15] แม้น อมรสิทธิ์. 2543. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : แมคกรอ – ฮิล
- [16] คู่มือการเลือกใช้วัสดุ. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด
- [17] J D Square Inc. , 2244 Eddie Williams Rd. Johnson City, Copyright 2009.
- [18] By Bill Smith and Mark King, Contributing Writers , May 16, 2002
- [19] ROHIT AGARWAL, Tube Bending with Axial Pull and Internal pressure, Master of Science, Texas A& M University, 2004.
- [20] M.KOC , WRINKLING DETECTION IN TUBE BENDING SIMULATIONS . Department of Mechanical Engineering Virginia Commonwealth University Richmond, Virginia.
- [21] Y. Zhang, D. Redekop , Shell element simulation of the push method of tube bending. Department of Mechanical Engineering, University of Ottawa , Ottawa, K1N 6N5, Canada
- [22] Dilip K Mahanty , Simulating Rotary Draw Bending , Engineering Services Group, Tata Consultancy Services .

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง



ตารางที่ ก.1 บันทึกผลการทดสอบความหนาของผนังหน้าต่างค้ำส่วน โถ้งของชิ้นงานค้ำรูปทรง
ท่อกวาง ครั้งที่ 1

ประเภทชิ้นงาน	ตำแหน่ง	องศาในการตัด		
		30	60	90
เหล็กท่อกวาง	Wall Thickness (A1)	0.40	0.40	0.38
	Wall Thickness (A2)	0.42	0.41	0.44
	Wall Thickness (B1)	0.39	0.38	0.37
	Wall Thickness (B2)	0.43	0.44	0.45
	Wall Thickness (C1)	0.39	0.39	0.38
	Wall Thickness (C2)	0.41	0.40	0.43
อลูมิเนียมท่อกวาง	Wall Thickness (A1)	0.41	0.40	0.37
	Wall Thickness (A2)	0.42	0.42	0.45
	Wall Thickness (B1)	0.39	0.39	0.37
	Wall Thickness (B2)	0.43	0.44	0.45
	Wall Thickness (C1)	0.41	0.39	0.38
	Wall Thickness (C2)	0.43	0.44	0.46
ทองแดงท่อกวาง	Wall Thickness (A1)	0.46	0.48	0.47
	Wall Thickness (A2)	0.47	0.49	0.49
	Wall Thickness (B1)	0.45	0.48	0.45
	Wall Thickness (B2)	0.49	0.50	0.52
	Wall Thickness (C1)	0.48	0.48	0.46
	Wall Thickness (C2)	0.49	0.49	0.50

ตารางที่ ก.2 บันทึกผลการทดสอบความหนาของผนังหน้าตัดส่วนโค้งของชิ้นงานค้ำรูปทรง
ท่อกวาง ครั้งที่ 2

ประเภทชิ้นงาน	ตำแหน่ง	องศาในการตัด		
		30	60	90
เหล็กท่อกวาง	Wall Thickness (A1)	0.42	0.40	0.37
	Wall Thickness (A2)	0.41	0.43	0.45
	Wall Thickness (B1)	0.39	0.37	0.37
	Wall Thickness (B2)	0.43	0.45	0.47
	Wall Thickness (C1)	0.41	0.40	0.37
	Wall Thickness (C2)	0.39	0.42	0.43
อลูมิเนียมท่อกวาง	Wall Thickness (A1)	0.40	0.38	0.39
	Wall Thickness (A2)	0.42	0.43	0.44
	Wall Thickness (B1)	0.40	0.37	0.35
	Wall Thickness (B2)	0.42	0.45	0.46
	Wall Thickness (C1)	0.42	0.40	0.38
	Wall Thickness (C2)	0.42	0.43	0.45
ทองแดงท่อกวาง	Wall Thickness (A1)	0.48	0.48	0.45
	Wall Thickness (A2)	0.48	0.48	0.51
	Wall Thickness (B1)	0.46	0.46	0.46
	Wall Thickness (B2)	0.50	0.49	0.50
	Wall Thickness (C1)	0.47	0.47	0.47
	Wall Thickness (C2)	0.47	0.48	0.49

ตารางที่ ก.3 บันทึกผลการทดสอบความหนาของผนังหน้าต่างคั่นส่วนโค้งของชิ้นงานคักรูปทรง
ท่อกวาง ครั้งที่ 3

ประเภทชิ้นงาน	ตำแหน่ง	องศาในการตัด		
		30	60	90
เหล็กท่อกวาง	Wall Thickness (A1)	0.41	0.40	0.39
	Wall Thickness (A2)	0.40	0.42	0.43
	Wall Thickness (B1)	0.39	0.39	0.37
	Wall Thickness (B2)	0.43	0.43	0.46
	Wall Thickness (C1)	0.40	0.38	0.39
	Wall Thickness (C2)	0.40	0.41	0.43
อลูมิเนียมท่อกวาง	Wall Thickness (A1)	0.42	0.39	0.38
	Wall Thickness (A2)	0.42	0.44	0.43
	Wall Thickness (B1)	0.41	0.38	0.36
	Wall Thickness (B2)	0.44	0.43	0.47
	Wall Thickness (C1)	0.43	0.38	0.38
	Wall Thickness (C2)	0.41	0.42	0.44
ทองแดงท่อกวาง	Wall Thickness (A1)	0.47	0.48	0.46
	Wall Thickness (A2)	0.49	0.50	0.50
	Wall Thickness (B1)	0.47	0.47	0.44
	Wall Thickness (B2)	0.48	0.51	0.51
	Wall Thickness (C1)	0.49	0.47	0.46
	Wall Thickness (C2)	0.48	0.50	0.51

ตารางที่ ก.4 บันทึกผลการทดสอบความหนาของชิ้นงานคัทรูปทรงแผ่นครั้งที่ 1

ประเภทชิ้นงาน	ตำแหน่ง	ความหนาชิ้นงานแผ่น (มิลลิเมตร)		
		30°	60°	90°
เหล็กแผ่น	Thickness 1	1.48	1.42	1.36
	Thickness 2	1.49	1.35	1.34
	Thickness 3	1.48	1.42	1.36
อลูมิเนียมแผ่น	Thickness 1	1.36	1.36	1.34
	Thickness 2	1.35	1.33	1.32
	Thickness 3	1.36	1.36	1.34
ทองแดงแผ่น	Thickness 1	2.00	1.99	1.97
	Thickness 2	1.99	1.98	1.94
	Thickness 3	2.00	1.99	1.97

ตารางที่ ก.5 บันทึกผลการทดสอบความหนาของชิ้นงานคัทรูปทรงแผ่นครั้งที่ 2

ประเภทชิ้นงาน	ตำแหน่ง	ความหนาชิ้นงานแผ่น (มิลลิเมตร)		
		30°	60°	90°
เหล็กแผ่น	Thickness 1	1.47	1.39	1.35
	Thickness 2	1.45	1.36	1.35
	Thickness 3	1.47	1.39	1.35
อลูมิเนียมแผ่น	Thickness 1	1.36	1.35	1.33
	Thickness 2	1.36	1.34	1.34
	Thickness 3	1.36	1.35	1.33
ทองแดงแผ่น	Thickness 1	2.00	2.00	1.96
	Thickness 2	1.98	1.96	1.96
	Thickness 3	2.00	2.00	1.96

ตารางที่ ก.6 บันทึกผลการทดสอบความหนาของชิ้นงานคักรูปทรงแผ่นครั้งที่ 3

ประเภทชิ้นงาน	ตำแหน่ง	ความหนาชิ้นงานแผ่น (มิลลิเมตร)		
		30°	60°	90°
เหล็กแผ่น	Thickness 1	1.49	1.36	1.34
	Thickness 2	1.47	1.37	1.36
	Thickness 3	1.49	1.36	1.34
อลูมิเนียมแผ่น	Thickness 1	1.36	1.36	1.35
	Thickness 2	1.34	1.35	1.33
	Thickness 3	1.36	1.36	1.35
ทองแดงแผ่น	Thickness 1	2.00	1.98	1.98
	Thickness 2	1.97	1.97	1.95
	Thickness 3	2.00	1.98	1.98

ตารางที่ ก.7 บันทึกผลการทดลองการดีดกลับของชิ้นงานที่อกลวงที่ได้รับอิทธิพลจากองศาในการคักรูป

มุม(องศา)	เหล็ก (St 37)			อลูมิเนียม (AA6063)			ทองแดง (C11000)		
	ครั้งที่ทดลอง			ครั้งที่ทดลอง			ครั้งที่ทดลอง		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
30	28.0	28.0	28.0	29.0	29.0	29.0	29.0	28.0	30.0
60	57.0	57.5	56.5	58.0	58.0	58.0	57.5	58.5	58.0
90	88.0	86.0	88.0	87.0	89.0	88.0	87.5	88.0	88.5

ตารางที่ ก.8 บันทึกผลการทดลองการติดกลับของชิ้นงานเส้นกลมที่ได้รับอิทธิพลจากองศาในการดัด

มุม(องศา)	เหล็ก (St 37)			อลูมิเนียม (AA6063)			ทองแดง (C11000)		
	ครั้งที่ทดลอง			ครั้งที่ทดลอง			ครั้งที่ทดลอง		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
30	26.0	25.5	26.5	27.0	28.0	27.5	25.0	27.0	29.0
60	52.0	54.0	53.0	57.5	57.5	57.5	56.0	55.0	57.0
90	83.5	84.5	84.0	87.5	86.0	84.5	85.5	85.5	85.5

ตารางที่ ก.9 บันทึกผลการทดลองการติดกลับของชิ้นงานแผ่นที่ได้รับอิทธิพลจากองศาในการดัด

มุม (องศา)	เหล็ก (st 37)			อลูมิเนียม (AA6063)			ทองแดง (C11000)		
	ครั้งที่ทดลอง			ครั้งที่ทดลอง			ครั้งที่ทดลอง		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
30	24.0	24.5	25.0	27.0	27.0	27.5	25.0	26.0	27.0
60	51.0	50.0	52.0	56.0	56.0	56.0	54.0	54.0	54.0
90	78.5	79.0	79.5	85.0	84.0	86.0	81.0	80.0	82.0

ตารางที่ ก.10 บันทึกผลการทดลองความเครียดเทียบเท่าส่วนโค้งนอกและในของชิ้นงานท่อกลวง

ตำแหน่ง	มุม (องศา)	ชนิดวัสดุ								
		เหล็ก			อลูมิเนียม			ทองแดง		
		ครั้งที่ทดลอง			ครั้งที่ทดลอง			ครั้งที่ทดลอง		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
โค้งนอก	30	0.276	0.273	0.284	0.298	0.298	0.298	0.139	0.139	0.139
	60	0.299	0.300	0.299	0.325	0.323	0.328	0.152	0.159	0.145
	90	0.371	0.371	0.371	0.386	0.400	0.400	0.219	0.219	0.219
โค้งใน	30	0.112	0.112	0.112	0.130	0.130	0.130	0.040	0.040	0.040
	60	0.112	0.110	0.115	0.137	0.141	0.137	0.058	0.060	0.055
	90	0.117	0.117	0.120	0.139	0.145	0.135	0.096	0.101	0.090

ตารางที่ ก.11 บันทึกผลการทดลองความเครียดเทียบเท่าส่วนโค้งนอกและในของชิ้นงานแผ่น

ตำแหน่ง	มุม (องศา)	ชนิดวัสดุ								
		เหล็ก			อลูมิเนียม			ทองแดง		
		ครั้งที่ทดลอง			ครั้งที่ทดลอง			ครั้งที่ทดลอง		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
ด้านนอก	30	0.255	0.255	0.255	0.301	0.288	0.296	0.187	0.185	0.190
	60	0.318	0.320	0.318	0.327	0.331	0.323	0.198	0.199	0.198
	90	0.320	0.318	0.323	0.358	0.368	0.360	0.281	0.281	0.281
ด้านใน	30	0.255	0.260	0.250	0.319	0.339	0.318	0.000	0.000	0.000
	60	0.331	0.318	0.346	0.327	0.315	0.32	0.058	0.055	0.058
	90	0.350	0.350	0.350	0.342	0.342	0.342	0.071	0.071	0.071



ตารางที่ ก.12 บันทึกผลการทดลองเหล็กท่อกลวงส่วนโค้งด้านนอก

บันทึกข้อมูลเหล็กท่อกลวง ครั้งที่ 1										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.625	0.049	2.5	2.000	-0.223	0.5	0.39	-0.248	0.276
60	2.5	2.750	0.095	2.5	2.000	-0.223	0.5	0.38	-0.274	0.299
90	2.5	3.000	0.182	2.5	1.875	-0.288	0.5	0.37	-0.301	0.371
บันทึกข้อมูลเหล็กท่อกลวง ครั้งที่ 2										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.625	0.049	2.5	2.000	-0.223	0.5	0.39	-0.248	0.273
60	2.5	2.625	0.049	2.5	1.875	-0.288	0.5	0.38	-0.274	0.300
90	2.5	3.000	0.182	2.5	1.875	-0.288	0.5	0.37	-0.301	0.371
บันทึกข้อมูลเหล็กท่อกลวง ครั้งที่ 3										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.750	0.095	2.5	2.000	-0.223	0.5	0.39	-0.248	0.279
60	2.5	2.750	0.095	2.5	2.000	-0.223	0.5	0.38	-0.274	0.299
90	2.5	3.000	0.182	2.5	1.875	-0.288	0.5	0.37	-0.301	0.371

ตารางที่ ก.13 บันทึกผลการทดลองเหล็กแผ่นส่วนโค้งด้านนอก

บันทึกข้อมูลเหล็กแผ่น ครั้งที่ 1										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.500	0.000	2.5	2.375	-0.051	2	1.47	-0.308	0.255
60	2.5	2.625	0.049	2.5	2.375	-0.051	2	1.36	-0.386	0.318
90	2.5	2.875	0.140	2.5	2.375	-0.051	2	1.36	-0.386	0.320
บันทึกข้อมูลเหล็กแผ่น ครั้งที่ 2										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.5	0.000	2.5	2.375	-0.051	2	1.47	-0.308	0.255
60	2.5	2.625	0.049	2.5	2.375	-0.051	2	1.36	-0.386	0.320
90	2.5	2.625	0.049	2.5	2.250	-0.105	2	1.36	-0.386	0.318
บันทึกข้อมูลเหล็กแผ่น ครั้งที่ 3										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.500	0.000	2.5	2.375	-0.051	2	1.47	-0.308	0.255
60	2.5	2.500	0.000	2.5	2.375	-0.051	2	1.36	-0.386	0.318
90	2.5	2.625	0.049	2.5	2.375	-0.051	2	1.36	-0.386	0.323

ตารางที่ ก.14 บันทึกผลการทดลองอูมิเนียมที่อกลวงส่วนโค้งด้านนอก

บันทึกข้อมูลอูมิเนียมที่อกลวง ครั้งที่ 1										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	3.000	0.182	2.5	2.000	-0.223	0.5	0.4	-0.223	0.298
60	2.5	3.000	0.182	2.5	2.000	-0.223	0.5	0.38	-0.274	0.325
90	2.5	3.000	0.182	2.5	1.875	-0.288	0.5	0.36	-0.329	0.386
บันทึกข้อมูลอูมิเนียมที่อกลวง ครั้งที่ 2										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	3	0.182	2.5	2.000	-0.223	0.5	0.4	-0.223	0.298
60	2.5	3	0.182	2.5	2.000	-0.223	0.5	0.38	-0.274	0.323
90	2.5	3.125	0.223	2.5	1.875	-0.288	0.5	0.36	-0.329	0.384
บันทึกข้อมูลอูมิเนียมที่อกลวง ครั้งที่ 3										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	3.000	0.182	2.5	2.000	-0.223	0.5	0.4	-0.223	0.298
60	2.5	3.125	0.223	2.5	1.875	-0.288	0.5	0.38	-0.274	0.328
90	2.5	3.125	0.223	2.5	1.875	-0.288	0.5	0.36	-0.329	0.388

ตารางที่ ก.15 บันทึกผลการทดลองอูมิเนียมแผ่นส่วนโค้งด้านนอก

บันทึกข้อมูลอูมิเนียมแผ่น ครั้งที่ 1										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดตรง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.625	0.049	2.5	2.500	0.000	2	1.41	-0.350	0.298
60	2.5	2.750	0.095	2.5	2.375	-0.051	2	1.36	-0.386	0.327
90	2.5	2.875	0.140	2.5	2.250	-0.105	2	1.32	-0.416	0.358
บันทึกข้อมูลอูมิเนียมแผ่น ครั้งที่ 2										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดตรง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.625	0.049	2.5	2.500	0.000	2	1.41	-0.350	0.299
60	2.5	2.625	0.049	2.5	2.500	0.000	2	1.36	-0.386	0.331
90	2.5	2.875	0.140	2.5	2.250	-0.105	2	1.32	-0.416	0.368
บันทึกข้อมูลอูมิเนียมแผ่น ครั้งที่ 3										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดตรง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.750	0.095	2.5	2.500	0.000	2	1.41	-0.350	0.306
60	2.5	2.750	0.095	2.5	2.375	-0.051	2	1.36	-0.386	0.323
90	2.5	2.875	0.140	2.5	2.375	-0.051	2	1.32	-0.416	0.350

ตารางที่ ก.16 บันทึกผลการทดลองทองแดงท่อกลวงส่วน โค้งด้านนอก

บันทึกข้อมูลทองแดงท่อกลวง ครั้งที่ 1										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดตรง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.875	0.140	2.5	2.375	-0.051	0.5	0.46	-0.083	0.139
60	2.5	2.875	0.140	2.5	2.250	-0.105	0.5	0.47	-0.062	0.152
90	2.5	3.125	0.223	2.5	2.250	-0.105	0.5	0.45	-0.105	0.219
บันทึกข้อมูลทองแดงท่อกลวง ครั้งที่ 2										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดตรง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.875	0.140	2.5	2.375	-0.051	0.5	0.46	-0.083	0.139
60	2.5	3	0.182	2.5	2.375	-0.051	0.5	0.47	-0.062	0.159
90	2.5	3.125	0.223	2.5	2.250	-0.105	0.5	0.45	-0.105	0.219
บันทึกข้อมูลทองแดงท่อกลวง ครั้งที่ 3										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดตรง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.875	0.140	2.5	2.375	-0.051	0.5	0.46	-0.083	0.139
60	2.5	2.875	0.140	2.5	2.250	-0.105	0.5	0.47	-0.062	0.145
90	2.5	3.125	0.223	2.5	2.250	-0.105	0.5	0.45	-0.105	0.219

ตารางที่ ก.17 บันทึกผลการทดลองทองแดงแผ่นส่วนโค้งด้านนอก

บันทึกข้อมูลทองแดงแผ่น ครั้งที่ 1										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.625	0.049	2.5	2.000	-0.223	2	2	0.000	0.187
60	2.5	2.750	0.095	2.5	2.000	-0.223	2	2	0.000	0.198
90	2.5	3.000	0.182	2.5	1.875	-0.288	2	1.9	-0.051	0.281
บันทึกข้อมูลทองแดงแผ่น ครั้งที่ 2										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.625	0.049	2.5	2.000	-0.223	2	2	0.000	0.185
60	2.5	3	0.182	2.5	1.875	-0.288	2	2	0.000	0.199
90	2.5	3.000	0.182	2.5	1.875	-0.288	2	1.9	-0.051	0.281
บันทึกข้อมูลทองแดงแผ่น ครั้งที่ 3										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.750	0.095	2.5	2.000	-0.223	2	2	0.000	0.190
60	2.5	2.750	0.095	2.5	2.000	-0.223	2	2	0.000	0.198
90	2.5	3.000	0.182	2.5	1.875	-0.288	2	1.9	-0.051	0.281

ตารางที่ ก.18 บันทึกผลการทดลองเหล็กท่อกลวงส่วนโค้งด้านใน

บันทึกข้อมูลเหล็กท่อกลวง ครั้งที่ 1										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.500	0.000	2.5	2.375	-0.0513	0.5	0.44	-0.128	0.112
60	2.5	2.500	0.000	2.5	2.375	-0.0513	0.5	0.44	-0.128	0.112
90	2.5	2.625	0.049	2.5	2.250	-0.1054	0.5	0.46	-0.083	0.117
บันทึกข้อมูลเหล็กท่อกลวง ครั้งที่ 2										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.5	0.000	2.5	2.375	-0.0513	0.5	0.44	-0.128	0.112
60	2.5	2.625	0.049	2.5	2.250	-0.1054	0.5	0.44	-0.128	0.110
90	2.5	2.625	0.049	2.5	2.250	-0.1054	0.5	0.46	-0.083	0.117
บันทึกข้อมูลเหล็กท่อกลวง ครั้งที่ 3										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.500	0.000	2.5	2.375	-0.0513	0.5	0.44	-0.128	0.112
60	2.5	2.500	0.000	2.5	2.375	-0.0513	0.5	0.44	-0.128	0.115
90	2.5	2.625	0.049	2.5	2.375	-0.0513	0.5	0.46	-0.083	0.120

ตารางที่ ก.19 บันทึกผลการทดลองเหล็กแผ่นส่วนโค้งด้านใน

บันทึกข้อมูลเหล็กแผ่น ครั้งที่ 1										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.500	0.000	2.5	2.375	-0.051	2	1.47	-0.308	0.255
60	2.5	2.675	0.068	2.5	2.250	-0.105	2	1.36	-0.386	0.331
90	2.5	2.750	0.095	2.5	2.125	-0.163	2	1.36	-0.386	0.350
บันทึกข้อมูลเหล็กแผ่น ครั้งที่ 2										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.5	0.000	2.5	2.375	-0.051	2	1.47	-0.308	0.260
60	2.5	2.5	0.000	2.5	2.375	-0.051	2	1.36	-0.386	0.318
90	2.5	2.750	0.095	2.5	2.125	-0.163	2	1.36	-0.386	0.350
บันทึกข้อมูลเหล็กแผ่น ครั้งที่ 3										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.675	0.068	2.5	2.375	-0.051	2	1.47	-0.308	0.250
60	2.5	2.675	0.068	2.5	2.125	-0.163	2	1.36	-0.386	0.346
90	2.5	2.750	0.095	2.5	2.125	-0.163	2	1.36	-0.386	0.350

ตารางที่ ก.20 บันทึกผลการทดลองอูมิเนียมที่อกลวงส่วนโค้งด้านใน

บันทึกข้อมูลอูมิเนียมที่อกลวง ครั้งที่ 1										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.500	0.000	2.5	2.375	-0.051	0.5	0.43	-0.151	0.130
60	2.5	2.750	0.095	2.5	2.375	-0.051	0.5	0.44	-0.128	0.137
90	2.5	2.875	0.140	2.5	2.375	-0.051	0.5	0.46	-0.083	0.139
บันทึกข้อมูลอูมิเนียมที่อกลวง ครั้งที่ 2										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.5	0.000	2.5	2.375	-0.051	0.5	0.43	-0.151	0.130
60	2.5	2.875	0.140	2.5	2.375	-0.051	0.5	0.44	-0.128	0.141
90	2.5	2.875	0.140	2.5	2.250	-0.105	0.5	0.46	-0.083	0.145
บันทึกข้อมูลอูมิเนียมที่อกลวง ครั้งที่ 3										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.500	0.000	2.5	2.375	-0.051	0.5	0.43	-0.151	0.130
60	2.5	2.750	0.095	2.5	2.375	-0.051	0.5	0.44	-0.128	0.137
90	2.5	2.750	0.095	2.5	2.250	-0.105	0.5	0.46	-0.083	0.135

ตารางที่ ก.21 บันทึกผลการทดลองอูมิเนียมแผ่นส่วน โค้งด้านใน

บันทึกข้อมูลอูมิเนียมแผ่น ครั้งที่ 1										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.250	-0.105	2.5	2.875	0.140	2	1.41	-0.350	0.319
60	2.5	2.375	-0.051	2.5	2.750	0.095	2	1.36	-0.386	0.327
90	2.5	2.500	0.000	2.5	2.625	0.049	2	1.32	-0.416	0.342
บันทึกข้อมูลอูมิเนียมแผ่น ครั้งที่ 2										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.25	-0.105	2.5	2.875	0.140	2	1.41	-0.350	0.319
60	2.5	2.5	0.000	2.5	2.875	0.140	2	1.36	-0.386	0.335
90	2.5	2.500	0.000	2.5	2.625	0.049	2	1.32	-0.416	0.342
บันทึกข้อมูลอูมิเนียมแผ่น ครั้งที่ 3										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.375	-0.051	2.5	2.875	0.140	2	1.41	-0.350	0.318
60	2.5	2.375	-0.051	2.5	2.625	0.049	2	1.36	-0.386	0.320
90	2.5	2.500	0.000	2.5	2.625	0.049	2	1.32	-0.416	0.342

ตารางที่ ก.22 บันทึกผลการทดลองทองแดงท่อกลวงส่วน โค้งด้านใน

บันทึกข้อมูลทองแดงท่อกลวง ครั้งที่ 1										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.625	0.049	2.5	2.500	0.000	0.5	0.5	0.000	0.040
60	2.5	2.625	0.049	2.5	2.375	-0.051	0.5	0.5	0.000	0.058
90	2.5	2.625	0.049	2.5	2.250	-0.105	0.5	0.51	0.020	0.096
บันทึกข้อมูลทองแดงท่อกลวง ครั้งที่ 2										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.625	0.049	2.5	2.500	0.000	0.5	0.5	0.000	0.040
60	2.5	2.625	0.049	2.5	2.500	0.000	0.5	0.5	0.000	0.060
90	2.5	2.750	0.095	2.5	2.250	-0.105	0.5	0.51	0.020	0.101
บันทึกข้อมูลทองแดงท่อกลวง ครั้งที่ 3										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.625	0.049	2.5	2.500	0.000	0.5	0.5	0.000	0.040
60	2.5	2.625	0.049	2.5	2.500	0.000	0.5	0.5	0.000	0.055
90	2.5	2.750	0.095	2.5	2.375	-0.051	0.5	0.51	0.020	0.090

ตารางที่ ก.23 บันทึกผลการทดลองทองแดงแผ่นส่วนโค้งด้านใน

บันทึกข้อมูลทองแดงแผ่น ครั้งที่ 1										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.500	0.000	2.5	2.500	0.000	2	2	0.000	0.000
60	2.5	2.625	0.049	2.5	2.375	-0.051	2	2	0.000	0.058
90	2.5	2.625	0.049	2.5	2.375	-0.051	2	1.9	-0.051	0.071
บันทึกข้อมูลทองแดงแผ่น ครั้งที่ 2										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.5	0.000	2.5	2.500	0.000	2	2	0.000	0.000
60	2.5	2.5	0.000	2.5	2.500	0.000	2	2	0.000	0.056
90	2.5	2.625	0.049	2.5	2.375	-0.051	2	1.9	-0.051	0.071
บันทึกข้อมูลทองแดงแผ่น ครั้งที่ 3										
มุม	ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	ค่าความเครียดหลัก	ความกว้างเริ่มต้น	ความกว้างสุดท้าย	ค่าความเครียดรอง	ความหนาเริ่มต้น	ความหนาสุดท้าย	ค่าความเครียดที่ความหนา	ค่าความเครียดเทียบเท่า
(องศา)	(l_0)	(l_f)		(W_0)	(W_f)					
30	2.5	2.500	0.000	2.5	2.500	0.000	2	2	0.000	0.000
60	2.5	2.625	0.049	2.5	2.375	-0.051	2	2	0.000	0.058
90	2.5	2.625	0.049	2.5	2.375	-0.051	2	1.9	-0.051	0.071

ภาคผนวก ข
ใบรับรองผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ





MATERIAL PROPERTIES ANALYSIS AND DEVELOPMENT CENTRE (MPAD)

Request No. : MDL 0582/55

Date : 25 April 2012

Date of request : 18 April 2012

Page : 1 of 3

REPORT ON ANALYSIS / TESTING

For

Rajamangala University of Technology Thanyaburi
39 Moo1, Rangsit-Nakhonnayok Road, Klong hok, Thanyaburi, Pathumthani 12110

Testing/analysis/investigation of : 1. Steel round, 2. Aluminium round, 3. Copper round, 4. Steel plate,
5. Aluminium plate, and 6. Copper plate

Method of testing/analysis/investigation : Tensile test according to ASTM E 8M-04

Result of testing/analysis/investigation :-

The test results are attached.

Tested/analysed/investigated by

1. *Chamin Suwanch*
2.
3.
4.

Approved by

Ch. Chalorn Bhamonsut
(Ms. Chalorn Bhamonsut)
Director of
Material Property Development Laboratory

Examined by

S. Nalinthorn
(Ms. Nalinthorn Suwaporndharuwach)

This report contains 3 pages.

FS-MPAD-GEN-510-1-01/02/48

Remark : The above results are valid exclusively for tested/analysed samples as mentioned in this report. Publication of the results on testing and analysis is prohibited unless written permission is obtained from the governor of TISTR.

Thailand Institute of Scientific and Technological Research

35 Mu 3, Technopolis, Khlong 5, Khlong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand

Tel. (66) 0 2577 9000 Fax 0 2577 9009

E-mail : tistr@tistr.or.th Website : www.tistr.or.th



TISTR

MATERIAL PROPERTIES ANALYSIS AND DEVELOPMENT CENTRE (MPAD)
MATERIAL PROPERTY DEVELOPMENT LABORATORY (MDL)

Request No. : MDL 0582/55

Date : 25 April 2012

REPORT

Customer : Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Page : 2 of 3

Rajamangala University of Technology Thanyaburi has commissioned the Material Properties Analysis and Development Centre, Thailand Institute of Scientific and Technological Research (MPAD/TISTR) to carry out tensile test of the 1. Steel round, 2. Aluminium round, 3. Copper round, 4. Steel plate, 5. Aluminium plate, and 6. Copper plate.

The specimens for tensile test were prepared by MPAD. The results are as follows :

Test date : 24 April 2012

Test temperature : 26 °C

Testing machine : Electromechanical Universal Testing Machine SCHENCK RSA 250

The results of tensile test of 1. Steel round, 2. Aluminium round, and 3. Copper round

Specimen	Steel round	Aluminium round	Copper round
Diameter (mm)	6.03	5.94	6.04
Cross sectional area (mm ²)	28.56	27.71	28.65
Load at 0.2% offset yield strength (N)	10,304	4,431	8,337
Maximum tensile load (kN)	15.82	5.290	8.645
0.2% offset yield strength (N/mm ²)	360.77	159.90	290.98
Tensile strength (N/mm ²)	553.92	190.91	301.75
Reduction of area (%)	49.16	71.89	54.38
Elongation (%)	30.00	8.67	27.73
Location of fracture	In the length	In the length	In the length

FS-MPAD-MDL 510-1-01/02/48

Thailand Institute of Scientific and Technological Research

35 Mu 3, Technopolis, Khlong 5, Khlong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand

Tel. (66) 0 2577 9000 Fax 0 2577 9009

E-mail : tistr@tistr.or.th Website : www.tistr.or.th





**MATERIAL PROPERTIES ANALYSIS AND DEVELOPMENT CENTRE (MPAD)
MATERIAL PROPERTY DEVELOPMENT LABORATORY (MDL)**

Request No. : MDL 0582/55

Date : 25 April 2012

REPORT

Customer : Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Page : 3 of 3

Test date : 24 April 2012

Test temperature : 26 °C

Testing machine : Electromechanical Universal Testing Machine SCHENCK RSA 250

The results of tensile test of 4. Steel plate, 5. Aluminium plate, and 6. Copper plate

Specimen	Steel plate	Aluminium plate	Copper plate
Thickness (mm)	1.877	1.870	2.009
Width (mm)	12.45	12.43	12.44
Cross sectional area (mm ²)	23.37	23.24	24.99
Load at 0.2% offset yield stress (N)	7,618	3,442	4,577
Maximum tensile load (kN)	9.560	4.226	6.298
0.2% Offset yield stress (N/mm ²)	325.96	148.10	183.16
Tensile strength (N/mm ²)	409.07	181.84	252.02
Elongation (%)	34.32	10.08	36.32
Location of fracture	In the length	In the length	In the length

FS-MPAD-MDL-510-1-01/02/48



Method: Fe-10
 Comment: low alloy steel
 Sample Name: No.1
 Request No.: MDL 0524/55

Element concentration

4/5/2012 11:16:25 AM

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0783	0.0302	0.280	0.0072	0.0063	0.0434	0.0033	0.0276
2	0.0796	0.0310	0.282	0.0071	0.0065	0.0433	0.0029	0.0275
3	0.0789	0.0310	0.281	0.0071	0.0062	0.0434	0.0026	0.0275
< x > (3)	0.0790	0.0307	0.281	0.0071	0.0063	0.0434	0.0030	0.0275
sd	0.00066	0.00047	0.0011	0.00006	0.00013	0.00008	0.00035	0.00011
rsd	0.8	1.5	0.4	0.8	2.1	0.2	12.0	0.4

	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0552	0.0046	0.0363	0.00028	0.0010	0.0011	0.0025	0.0010
2	0.0556	0.0042	0.0369	0.00041	0.0011	0.00097	0.0016	0.00098
3	0.0551	0.0041	0.0367	0.00024	0.0010	0.00093	0.0018	0.00078
< x > (3)	0.0553	0.0043	0.0366	0.00031	0.0010	0.0010	0.0020	0.00092
sd	0.00025	0.00030	0.00034	0.00009	0.00004	0.00011	0.00048	0.00012
rsd	0.4	6.9	0.9	28.8	4.2	11.1	24.5	13.4

	Sn	B	N	Fe				
	%	%	%	%				
1	0.0037	0.00033	0.0040	99.4				
2	0.0037	0.00032	0.0042	99.4				
3	0.0037	0.00030	0.0035	99.4				
< x > (3)	0.0037	0.00031	0.0039	99.4				
sd	0.00001	0.00001	0.00035	0.0047				
rsd	0.2	3.9	9.0	0.0				



Method: Fe-10
 Comment: low alloy steel
 Sample Name: No.2
 Request No.: MDL 0524/55

Element concentration

4/5/2012 11:28:52 AM

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.236	0.207	0.505	0.0220	0.0539	0.0847	0.0093	0.109
2	0.231	0.205	0.504	0.0216	0.0536	0.0842	0.0084	0.110
3	0.233	0.206	0.505	0.0217	0.0533	0.0843	0.0090	0.109
< x > (3)	0.233	0.206	0.505	0.0218	0.0536	0.0844	0.0089	0.109
sd	0.0024	0.0011	0.00043	0.00021	0.00033	0.00027	0.00044	0.00059
rsd	1.0	0.6	0.1	1.0	0.6	0.3	5.0	0.5

	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0030	0.0112	0.315	0.00060	0.0011	0.0013	0.0037	0.0013
2	0.0026	0.0112	0.316	0.00041	0.0011	0.0012	0.0038	0.0012
3	0.0026	0.0112	0.316	0.00049	0.0010	0.0013	0.0040	0.0012
< x > (3)	0.0027	0.0112	0.316	0.00050	0.0011	0.0013	0.0038	0.0012
sd	0.00024	0.00004	0.00052	0.00009	0.00005	0.00005	0.00016	0.00006
rsd	8.6	0.4	0.2	18.6	4.5	4.2	4.1	4.8

	Sn	B	N	Fe				
	%	%	%	%				
1	0.0214	0.00071	0.0075	98.4				
2	0.0213	0.00070	0.0080	98.4				
3	0.0212	0.00073	0.0080	98.4				
< x > (3)	0.0213	0.00071	0.0078	98.4				
sd	0.00007	0.00001	0.00030	0.0024				
rsd	0.3	2.0	3.8	0.0				



Method: Fe-10

4/5/2012 11:10:59 AM

Comment: low alloy steel

Element concentration

Sample Name: No.3

Request No.: MDL 0524/55

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0492	0.0224	0.245	0.0211	0.0063	0.0287	0.0026	0.0207
2	0.0453	0.0235	0.245	0.0196	0.0059	0.0289	0.0024	0.0218
3	0.0456	0.0219	0.244	0.0192	0.0058	0.0290	0.0027	0.0204
< x > (3)	0.0467	0.0226	0.245	0.0200	0.0060	0.0289	0.0026	0.0210
sd	0.0022	0.00086	0.00044	0.0010	0.00026	0.00014	0.00015	0.00076
rsd	4.6	3.8	0.2	5.1	4.3	0.5	5.7	3.6

	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0257	0.0045	0.0172	0.00026	0.00080	0.00081	0.0013	0.00099
2	0.0273	0.0044	0.0166	0.00024	0.00078	0.00072	0.0020	0.00098
3	0.0262	0.0045	0.0162	0.00021	0.00074	0.00066	0.0016	0.00084
< x > (3)	0.0264	0.0045	0.0167	0.00023	0.00077	0.00073	0.0016	0.00094
sd	0.00081	0.00008	0.00049	0.00003	0.00003	0.00007	0.00031	0.00009
rsd	3.1	1.9	2.9	11.0	3.5	10.2	19.1	9.2

	Sn	B	N	Fe				
	%	%	%	%				
1	0.0018	0.0034	0.0040	99.5				
2	0.0019	0.0033	0.0037	99.5				
3	0.0017	0.0032	0.0030	99.5				
< x > (3)	0.0018	0.0033	0.0036	99.5				
sd	0.00007	0.00010	0.00051	0.0064				
rsd	4.1	3.0	14.3	0.0				



Method: AI-10

4/3/2012 11:06:40 AM

Comment: pure / low alloy aluminium Element concentration

Sample Name: No. 4

Request No. :: MDL 0524/55

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.469	0.413	0.0570	0.0739	0.409	0.0189	0.0095	0.187
2	0.472	0.414	0.0566	0.0735	0.408	0.0190	0.0097	0.186
3	0.473	0.418	0.0563	0.0745	0.403	0.0192	0.0096	0.188
< x > (3)	0.471	0.415	0.0567	0.0740	0.407	0.0190	0.0096	0.187
sd	0.0017	0.0029	0.00037	0.00047	0.0032	0.00012	0.00014	0.00090
rsd	0.4	0.7	0.7	0.6	0.8	0.6	1.4	0.5

	Ti	Ag	B	Bi	Ca	P	Pb	V
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0136	0.00008	0.00026	0.00037	0.00054	0.00054	0.0070	0.0080
2	0.0136	0.00008	0.00028	0.00045	0.00054	0.00048	0.0069	0.0080
3	0.0136	0.00008	0.00026	0.00039	0.00054	0.00068	0.0070	0.0080
< x > (3)	0.0136	0.00008	0.00027	0.00041	0.00054	0.00057	0.0070	0.0080
sd	0.00004	0.00000	0.00001	0.00004	0.00000	0.00011	0.00002	0.00003
rsd	0.3	4.6	3.2	10.2	0.1	18.8	0.3	0.4

	Zr	Al						
	%	%						
1	0.0033	98.3						
2	0.0032	98.3						
3	0.0032	98.3						
< x > (3)	0.0032	98.3						
sd	0.00009	0.0019						
rsd	2.9	0.0						



Method: AI-10

4/3/2012 11:14:13 AM

Comment: pure / low alloy aluminium Element concentration

Sample Name: No. 5

Request No. :: MDL 0524/55

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.465	0.176	0.0011	0.0443	0.497	0.0012	0.0043	0.0018
2	0.464	0.176	0.0010	0.0437	0.497	0.0012	0.0042	0.0016
3	0.461	0.173	0.00079	0.0440	0.497	0.0011	0.0041	0.0016
< x > (3)	0.463	0.175	0.00095	0.0440	0.497	0.0012	0.0042	0.0016
sd	0.0022	0.0014	0.00015	0.00029	0.00025	0.00005	0.00007	0.00013
rsd	0.5	0.8	15.6	0.7	0.1	4.3	1.8	8.0

	Ti	Ag	B	Bi	Ca	P	Pb	V
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0105	< 0.00005	0.0011	0.00018	0.00072	0.00067	0.0029	0.0215
2	0.0106	< 0.00005	0.0011	0.00016	0.00080	0.00048	0.0027	0.0214
3	0.0106	< 0.00005	0.0015	0.00024	0.00075	0.00063	0.0025	0.0214
< x > (3)	0.0105	< 0.00005	0.0013	0.00019	0.00076	0.00059	0.0027	0.0214
sd	0.00006	0.00000	0.00026	0.00004	0.00004	0.00010	0.00020	0.00002
rsd	0.6	0.0	20.4	21.4	5.5	17.1	7.3	0.1

	Zr	Al					
	%	%					
1	0.0013	98.8					
2	0.0014	98.8					
3	0.0012	98.8					
< x > (3)	0.0013	98.8					
sd	0.00006	0.0039					
rsd	5.1	0.0					



Method: AI-10

4/3/2012 11:01:28 AM

Comment: pure / low alloy aluminium Element concentration

Sample Name: No. 6

Request No. :: MDL 0524/55

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.453	0.344	0.0475	0.0269	0.615	0.0131	0.0083	0.105
2	0.455	0.347	0.0472	0.0269	0.613	0.0131	0.0082	0.105
3	0.454	0.343	0.0476	0.0269	0.616	0.0132	0.0081	0.103
< x > (3)	0.454	0.345	0.0474	0.0269	0.615	0.0132	0.0082	0.104
sd	0.0012	0.0023	0.00021	0.00004	0.0017	0.00007	0.00009	0.0011
rsd	0.3	0.7	0.4	0.2	0.3	0.5	1.1	1.1

	Ti	Ag	B	Bi	Ca	P	Pb	V
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0224	0.00007	0.00064	0.00021	0.0030	0.00053	0.0069	0.0152
2	0.0228	0.00008	0.00078	0.00017	0.0034	0.00074	0.0073	0.0151
3	0.0226	0.00007	0.00072	0.00043	0.0028	0.00057	0.0069	0.0151
< x > (3)	0.0226	0.00007	0.00071	0.00027	0.0031	0.00061	0.0070	0.0152
sd	0.00021	0.00000	0.00007	0.00014	0.00034	0.00011	0.00022	0.00006
rsd	0.9	3.8	10.1	51.4	11.1	18.3	3.2	0.4

	Zr	Al						
	%	%						
1	0.0012	98.3						
2	0.0012	98.3						
3	0.0012	98.3						
< x > (3)	0.0012	98.3						
sd	0.00002	0.0030						
rsd	1.3	0.0						



Method: Cu-10
Comment: pure Cu

4/10/2012 3:26:12 PM

Element concentration

Sample Name: No.7
Request No.: MDL 0524/55

	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Si
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.00023	< 0.00020	< 0.00010	0.00096	< 0.00005	0.0011	0.00085	0.00047
2	< 0.00005	< 0.00020	< 0.00010	0.0012	< 0.00005	0.00077	0.0011	0.00054
3	< 0.00005	< 0.00020	< 0.00010	0.0012	< 0.00005	0.00069	0.00084	0.00046
< x > (3)	0.00011	< 0.00020	< 0.00010	0.0011	< 0.00005	0.00085	0.00092	0.00049
sd	0.00011	0.00000	0.00000	0.00014	0.00000	0.00021	0.00014	0.00004
rsd	95.1	0.0	0.0	12.7	0.0	24.7	15.0	9.0

	Mg	As	Bi	Ag	Al	S	Zr	B
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.00010	0.00050	< 0.00010	0.00092	< 0.00020	< 0.00010	0.00042	< 0.00010
2	0.00010	0.00053	< 0.00010	0.0010	< 0.00020	< 0.00010	0.00026	< 0.00010
3	< 0.00010	0.00047	< 0.00010	0.0010	< 0.00020	< 0.00010	0.00019	< 0.00010
< x > (3)	0.00010	0.00050	< 0.00010	0.00098	< 0.00020	< 0.00010	0.00029	< 0.00010
sd	0.00000	0.00003	0.00000	0.00005	0.00000	0.00000	0.00012	0.00000
rsd	1.7	5.4	0.0	5.1	0.0	0.0	41.0	0.0

	Ti	O	Cu				
	%	%	%				
1	< 0.00030	0.0609	99.93				
2	< 0.00030	0.0728	99.92				
3	< 0.00030	0.0670	99.93				
< x > (3)	< 0.00030	0.0669	99.93				
sd	0.00000	0.0059	0.01				
rsd	0.0	8.9	0.0				



Method: Cu-10
Comment: pure Cu

4/10/2012 3:14:26 PM

Element concentration

Sample Name: No.8
Request No.: MDL 0524/55

	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Si
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.00017	0.00078	< 0.00010	< 0.00020	< 0.00005	0.00060	0.00093	0.00048
2	0.00013	< 0.00020	< 0.00010	< 0.00020	< 0.00005	0.00062	0.0012	0.00074
3	< 0.00005	< 0.00020	< 0.00010	< 0.00020	< 0.00005	0.00061	0.00089	0.00059
< x > (3)	0.00012	0.00039	< 0.00010	< 0.00020	< 0.00005	0.00061	0.00100	0.00060
sd	0.00006	0.00034	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00015	0.00013
rsd	52.7	85.5	0.0	0.0	0.0	1.8	14.8	21.4

	Mg	As	Bi	Ag	Al	S	Zr	B
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	< 0.00010	0.00033	< 0.00010	< 0.00040	< 0.00020	0.00028	0.00041	< 0.00010
2	0.00010	0.00040	< 0.00010	< 0.00040	< 0.00020	0.00021	0.00027	< 0.00010
3	< 0.00010	0.00035	< 0.00010	< 0.00040	< 0.00020	0.00041	0.00022	< 0.00010
< x > (3)	0.00010	0.00036	< 0.00010	< 0.00040	< 0.00020	0.00030	0.00030	< 0.00010
sd	0.00000	0.00004	0.00000	0.00000	0.00000	0.00010	0.00010	0.00000
rsd	2.3	10.5	0.0	0.0	0.0	34.3	33.4	0.0

	Ti	O	Cu					
	%	%	%					
1	< 0.00030	0.0824	99.91					
2	< 0.00030	0.0844	99.91					
3	< 0.00030	0.0842	99.91					
< x > (3)	< 0.00030	0.0837	99.91					
sd	0.00000	0.0011	0.00					
rsd	0.0	1.3	0.0					



Method: Cu-10
Comment: pure Cu

4/10/2012 3:42:09 PM

Element concentration

Sample Name: No.9
Request No.: MDL 0524/55

	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Si
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0020	0.0014	0.0011	0.0223	< 0.00005	0.0048	0.00072	0.0010
2	0.0019	0.0014	0.00086	0.0227	< 0.00005	0.0047	0.00090	0.00080
3	0.0020	0.0011	0.00067	0.0218	< 0.00005	0.0041	0.00031	0.00071
< x > (3)	0.0020	0.0013	0.00087	0.0223	< 0.00005	0.0045	0.00064	0.00085
sd	0.00009	0.00017	0.00020	0.00049	0.00000	0.00039	0.00030	0.00017
rsd	4.8	13.1	22.5	2.2	0.0	8.6	47.0	19.6

	Mg	As	Bi	Ag	Al	S	Zr	B
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	< 0.00010	0.00035	< 0.00010	0.0011	< 0.00020	0.00032	0.00038	< 0.00010
2	< 0.00010	< 0.00030	< 0.00010	0.0011	< 0.00020	0.00033	0.00039	< 0.00010
3	< 0.00010	< 0.00030	0.00010	0.0012	< 0.00020	< 0.00010	0.00037	< 0.00010
< x > (3)	< 0.00010	0.00032	0.00010	0.0011	< 0.00020	0.00025	0.00038	< 0.00010
sd	0.00000	0.00003	0.00000	0.00006	0.00000	0.00013	0.00001	0.00000
rsd	0.0	8.5	0.5	5.2	0.0	51.9	2.4	0.0

	Ti	O	Cu					
	%	%	%					
1	< 0.00030	0.0634	99.90					
2	< 0.00030	0.0610	99.90					
3	< 0.00030	0.0657	99.90					
< x > (3)	< 0.00030	0.0634	99.90					
sd	0.00000	0.0023	0.00					
rsd	0.0	3.7	0.0					

ภาคผนวก ค
รวมภาพชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการตัด

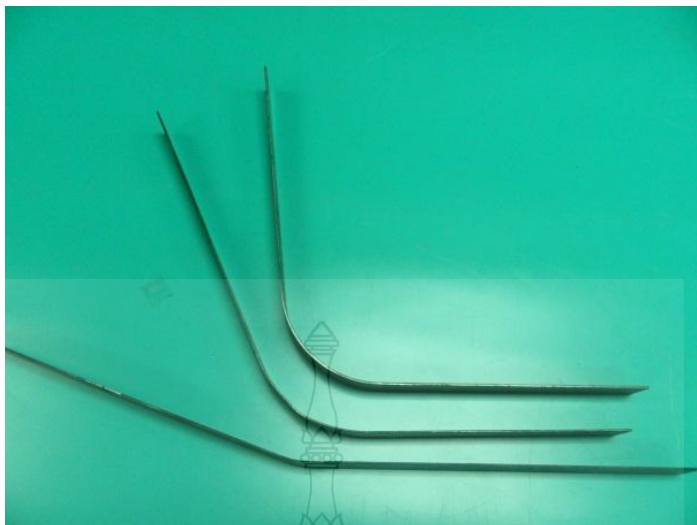




รูปที่ ค.1 ชิ้นงานเหล็กที่อ่กกลงผ่านกระบวนการดัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา



รูปที่ ค.2 ชิ้นงานเหล็กเส้นกลมผ่านกระบวนการดัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา

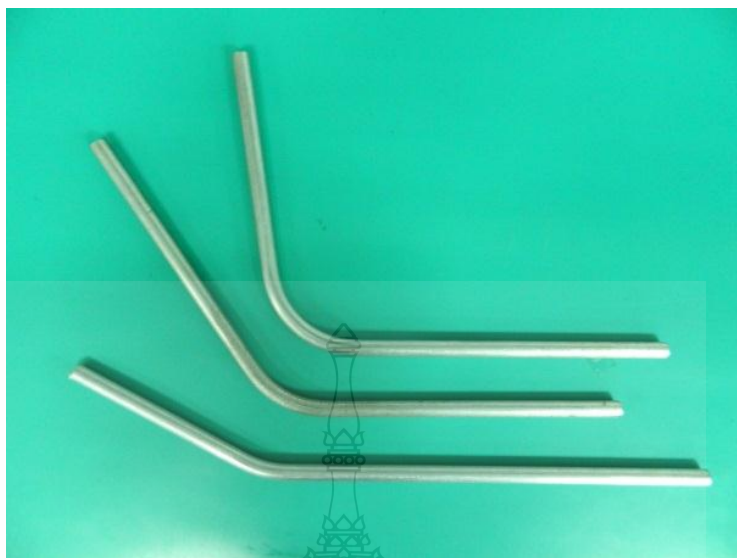


รูปที่ ค.3
แผ่นผ่าน
ที่มุม 30, 60



ชิ้นงานเหล็ก
กระบวนการตัด
และ 90 องศา

รูปที่ ค.4 ชิ้นงานอลูมิเนียมที่อกลวงผ่านกระบวนการตัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา



รูปที่ ค.5
อลูมิเนียมเส้น
กระบวนการ
60 และ 90



ชิ้นงาน
กลมผ่าน
ตัดที่มุม 30,
องศา

รูปที่ ค.6
อลูมิเนียมแผ่น
กระบวนกร
และ 90 องศา

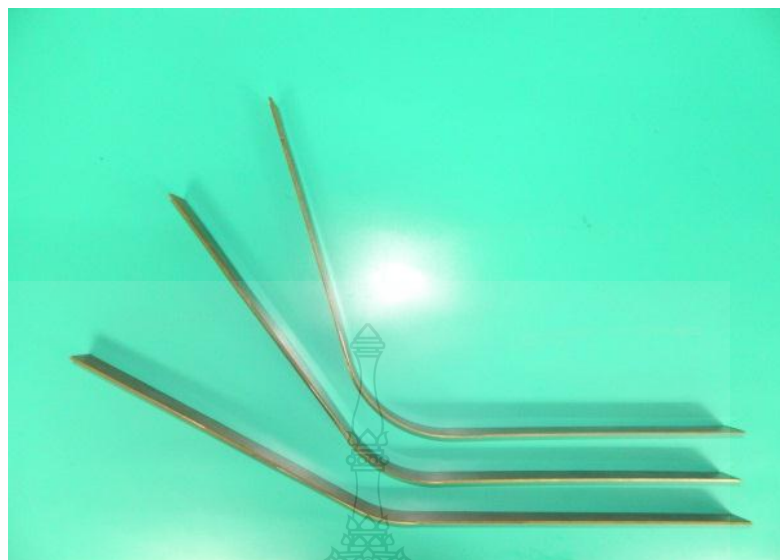


ชิ้นงาน
ผ่าน
ดัดที่มุม 30, 60



รูปที่ ค.7 ชิ้นงานทองแดงที่ออกกลางผ่านกระบวนกรดัดที่มุม 30 ,60 และ90 องศา

รูปที่ ค.8
ทองแดง
ผ่าน



ชิ้นงาน
เส้นกลม

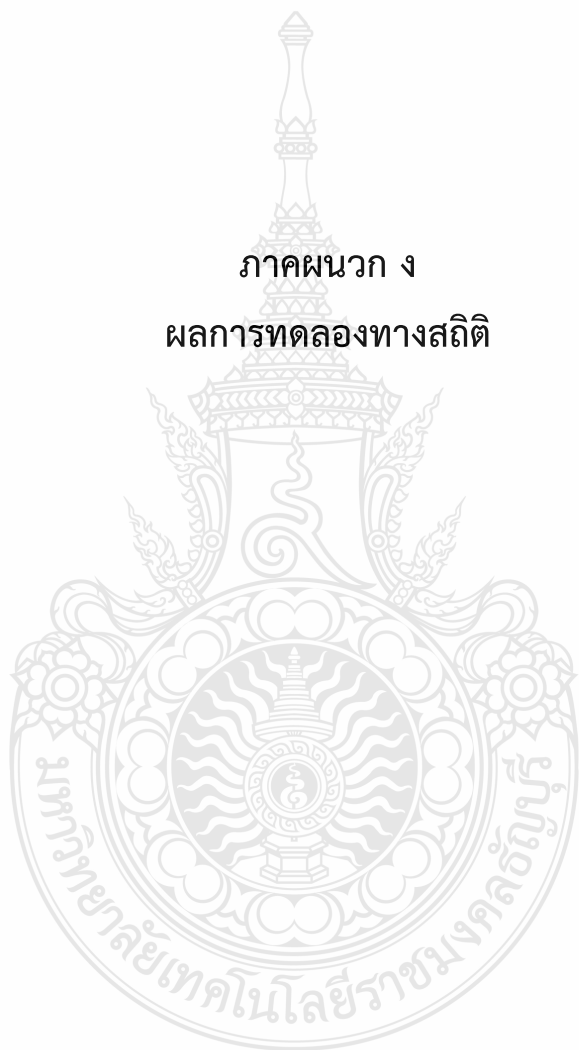
กระบวนการดัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา



รูปที่ ค.9 ชิ้นงานทองแดงแผ่นผ่านกระบวนการดัดที่มุม 30 ,60 และ90 องศา



ภาคผนวก ง
ผลการทดลองทางสถิติ



General Linear Model: % Reduction versus Material, Die Angle, Position

Factor	Type	Levels	Values
Material	fixed	3	Steel, Aluminium, Copper
Die Angle	fixed	3	30, 60, 90
Position	fixed	6	A1, A2, B1, B2, C1, C2

Analysis of Variance for % Reduction in Thickness, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Material	2	6877.83	6877.83	3438.91	934.74	0.000
Die Angle	2	5.38	5.38	2.69	0.73	0.484
Position	5	2298.49	2298.49	459.70	124.95	0.000
Material*Die Angle	4	47.80	47.80	11.95	3.25	0.015
Material*Position	10	271.80	271.80	27.18	7.39	0.000
Die Angle*Position	10	460.69	460.69	46.07	12.52	0.000
Material*Die Angle*Position	20	138.57	138.57	6.93	1.88	0.021
Error	108	397.33	397.33	3.68		
Total	161	10497.90				

S = 1.91808 R-Sq = 96.22% R-Sq(adj) = 94.36%

Unusual observations for % Reduction in Thickness

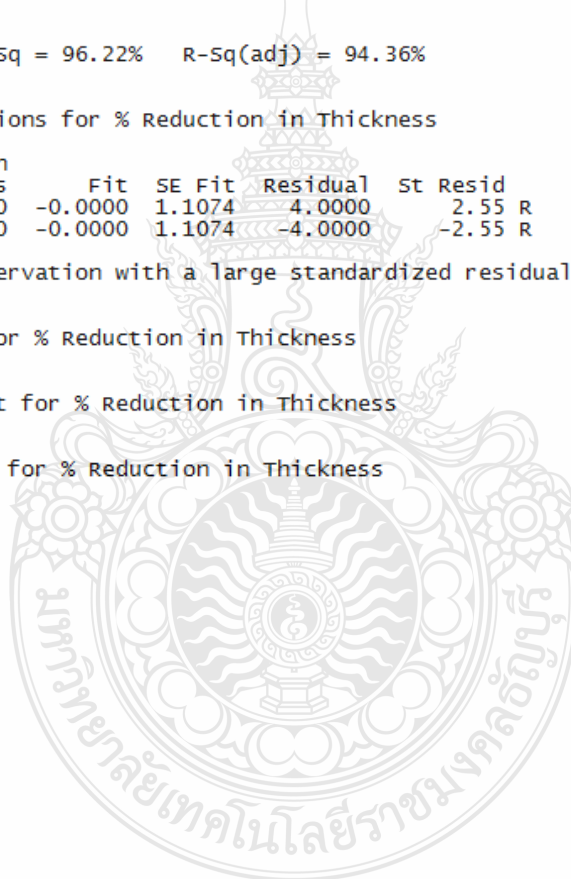
Obs	% Reduction in Thickness	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
52	4.0000	-0.0000	1.1074	4.0000	2.55 R
160	-4.0000	-0.0000	1.1074	-4.0000	-2.55 R

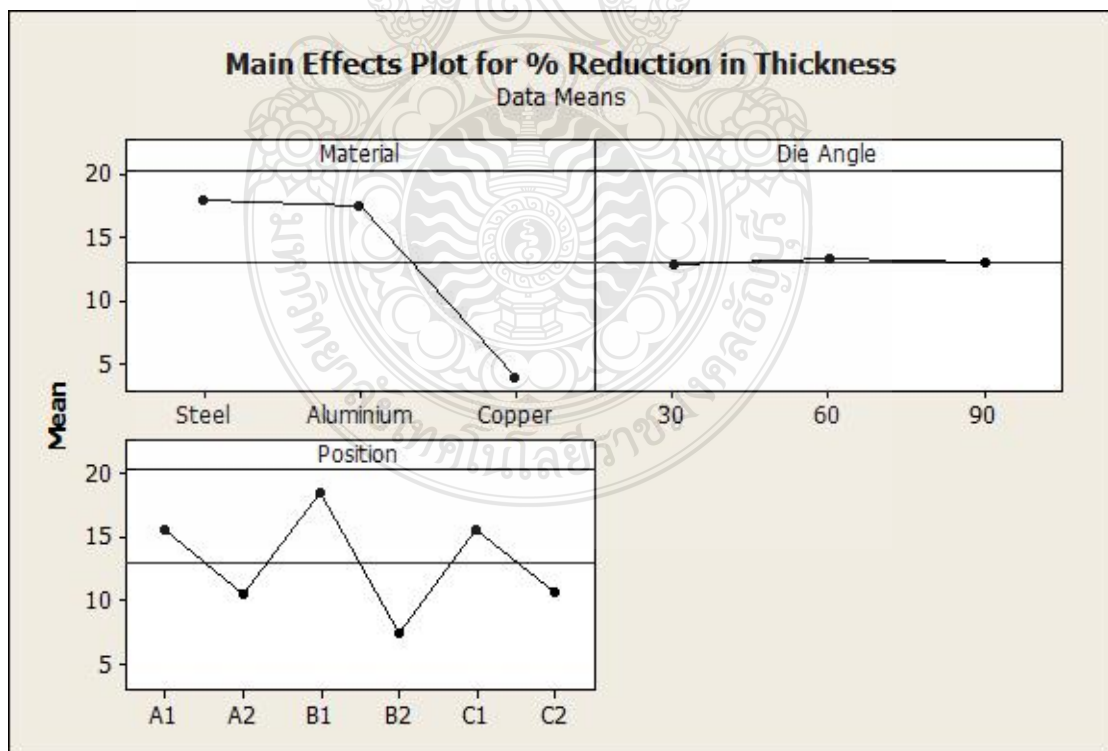
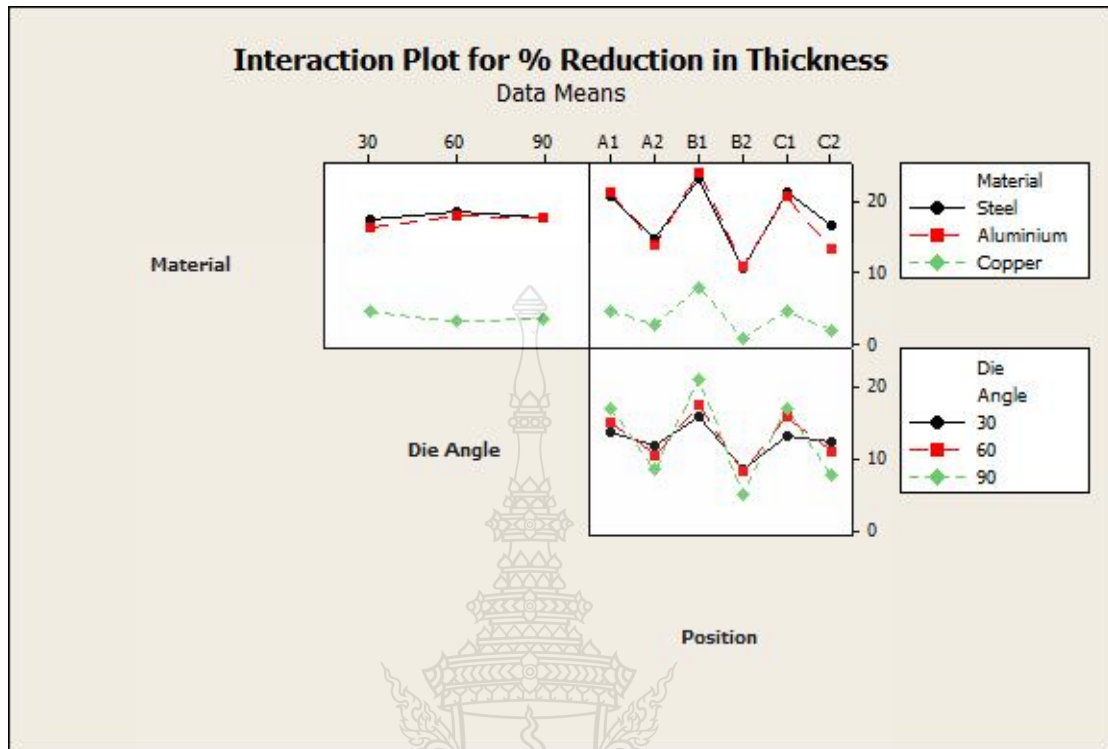
R denotes an observation with a large standardized residual.

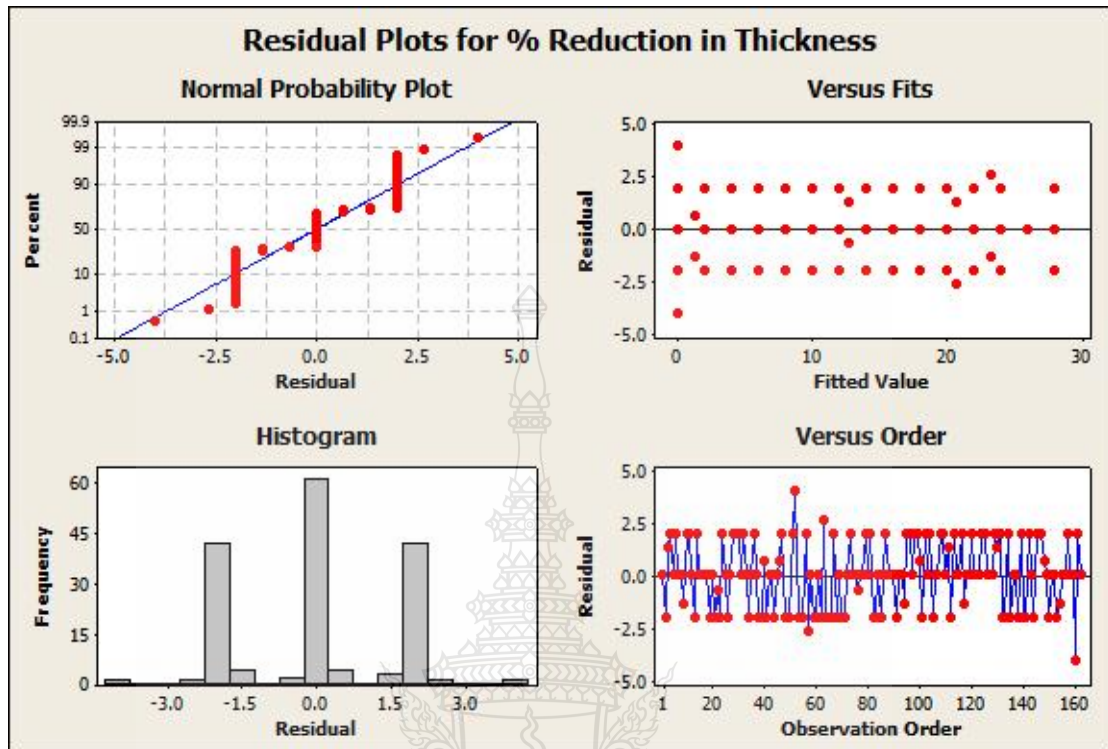
Residual Plots for % Reduction in Thickness

Main Effects Plot for % Reduction in Thickness

Interaction Plot for % Reduction in Thickness







Multilevel Factorial Design

Factors: 3 Replicates: 3
 Base runs: 27 Total runs: 81
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 3, 3, 3

General Linear Model: Spring back versus Die Angle, Material, ...

Factor	Type	Levels	Values
Die Angle	fixed	3	30, 60, 90
Material	fixed	3	Steel, Aluminum, Copper
Section Shape	fixed	3	Tube, R_Bar, F_Bar

Analysis of variance for Spring back, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Die Angle	2	71.006	71.006	35.503	155.45	0.000
Material	2	110.414	110.414	55.207	241.72	0.000
Section Shape	2	264.525	264.525	132.262	579.09	0.000
Die Angle*Material	4	11.179	11.179	2.795	12.24	0.000
Die Angle*Section Shape	4	16.679	16.679	4.170	18.26	0.000
Material*Section Shape	4	23.605	23.605	5.901	25.84	0.000
Die Angle*Material*Section Shape	8	9.358	9.358	1.170	5.12	0.000
Error	54	12.333	12.333	0.228		
Total	80	519.099				

S = 0.477907 R-Sq = 97.62% R-Sq(adj) = 96.48%

Unusual observations for Spring back

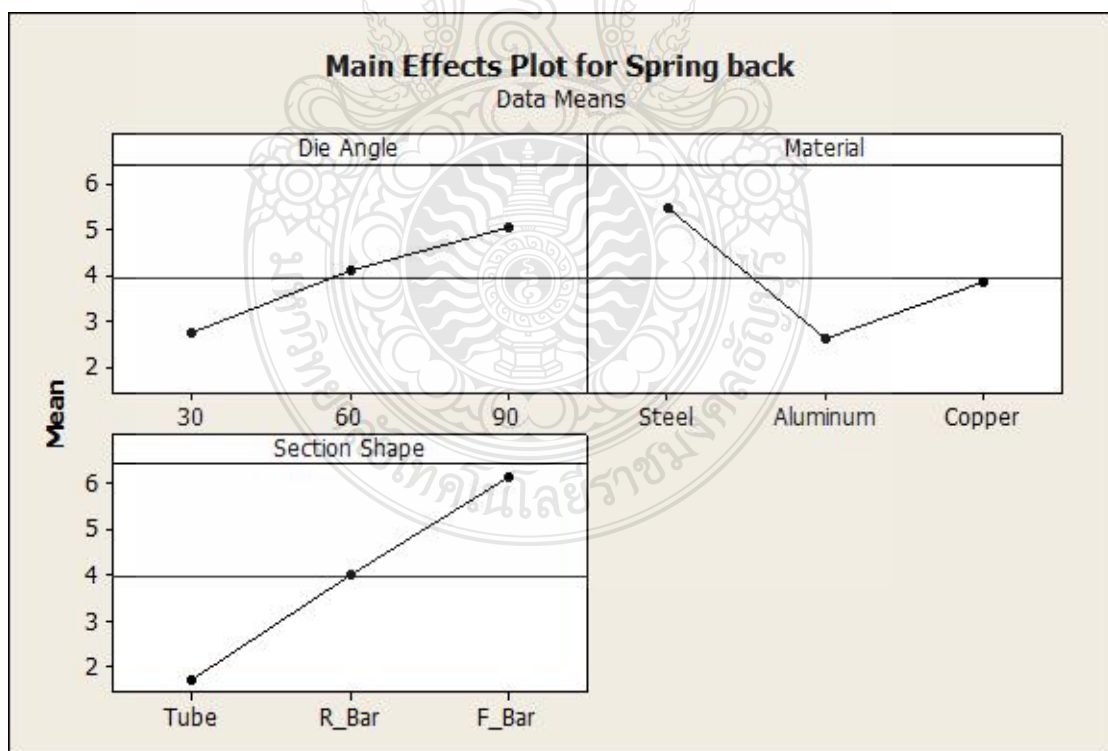
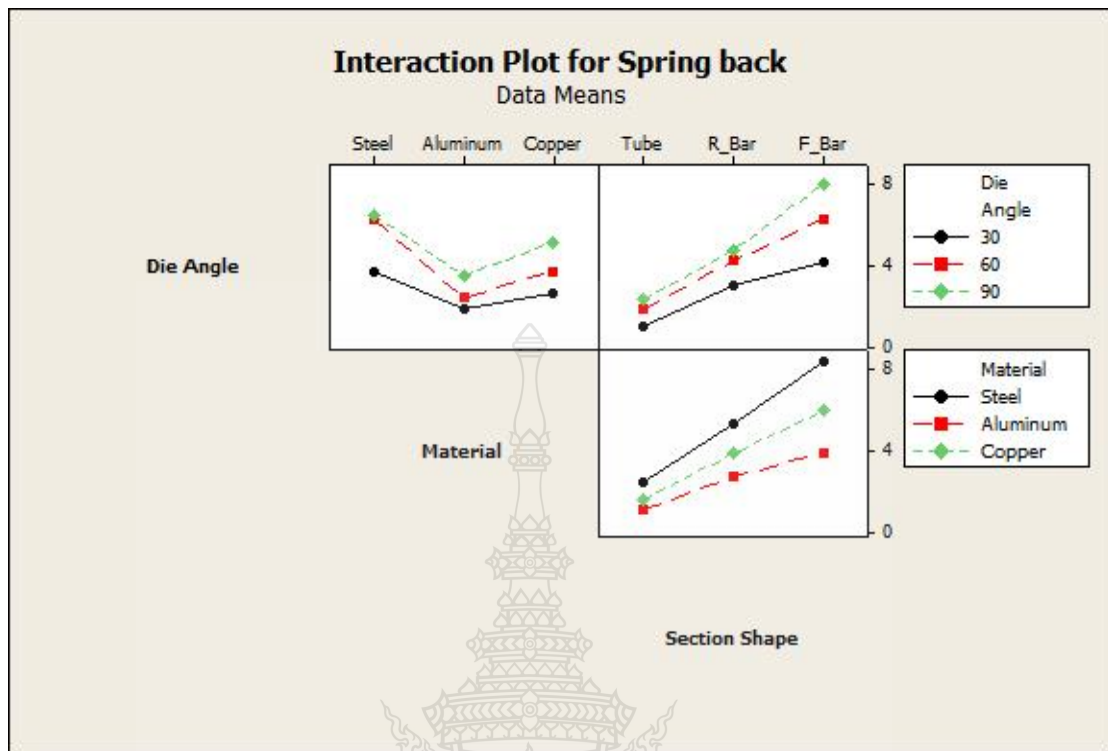
Obs	Spring back	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
8	4.0000	3.1667	0.2759	0.8333	2.14 R
24	6.0000	5.0000	0.2759	1.0000	2.56 R
78	4.0000	5.0000	0.2759	-1.0000	-2.56 R

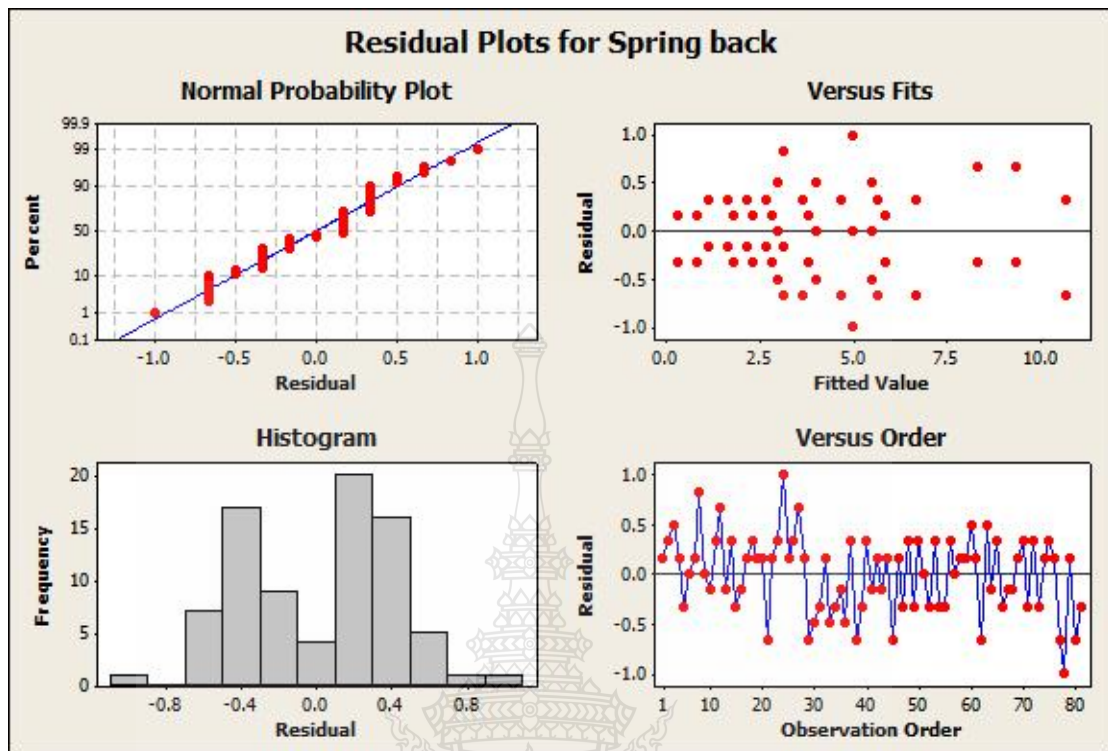
R denotes an observation with a large standardized residual.

Residual Plots for Spring back

Main Effects Plot for Spring back

Interaction Plot for Spring back





Multilevel Factorial Design

Factors: 4 Replicates: 3
 Base runs: 36 Total runs: 108
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 3, 3, 2, 2

General Linear Model: Strain versus Material, Die Angle, ...

Factor	Type	Levels	Values
Material	fixed	3	Steel, Aluminium, Copper
Die Angle	fixed	3	30, 60, 90
Section Shape	fixed	2	Tube, F-Bar
Position	fixed	2	Internal, External

Analysis of Variance for Strain, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
Material	2	0.529347	0.529347	0.264674	1324.66
Die Angle	2	0.069334	0.069334	0.034667	173.50
Section Shape	1	0.115706	0.115706	0.115706	579.09
Position	1	0.362732	0.362732	0.362732	1815.43
Material*Die Angle	4	0.005269	0.005269	0.001317	6.59
Material*Section Shape	2	0.031276	0.031276	0.015638	78.27
Material*Position	2	0.018072	0.018072	0.009036	45.22
Die Angle*Section Shape	2	0.002146	0.002146	0.001073	5.37
Die Angle*Position	2	0.007264	0.007264	0.003632	18.18
Section Shape*Position	1	0.082502	0.082502	0.082502	412.91
Material*Die Angle*Section Shape	4	0.003908	0.003908	0.000977	4.89
Material*Die Angle*Position	4	0.002143	0.002143	0.000536	2.68
Material*Section Shape*Position	2	0.131297	0.131297	0.065649	328.56
Die Angle*Section Shape*Position	2	0.002060	0.002060	0.001030	5.15
Material*Die Angle*Section Shape*Position	4	0.002323	0.002323	0.000581	2.91
Error	72	0.014386	0.014386	0.000200	
Total	107	1.379765			

Source	P
Material	0.000
Die Angle	0.000
Section Shape	0.000
Position	0.000
Material*Die Angle	0.000
Material*Section Shape	0.000
Material*Position	0.000
Die Angle*Section Shape	0.007
Die Angle*Position	0.000
Section Shape*Position	0.000
Material*Die Angle*Section Shape	0.002
Material*Die Angle*Position	0.002
Material*Section Shape*Position	0.000
Die Angle*Section Shape*Position	0.008
Material*Die Angle*Section Shape*Position	0.027
Error	
Total	

S = 0.0141353 R-Sq = 98.96% R-Sq(adj) = 98.45%

Unusual observations for Strain

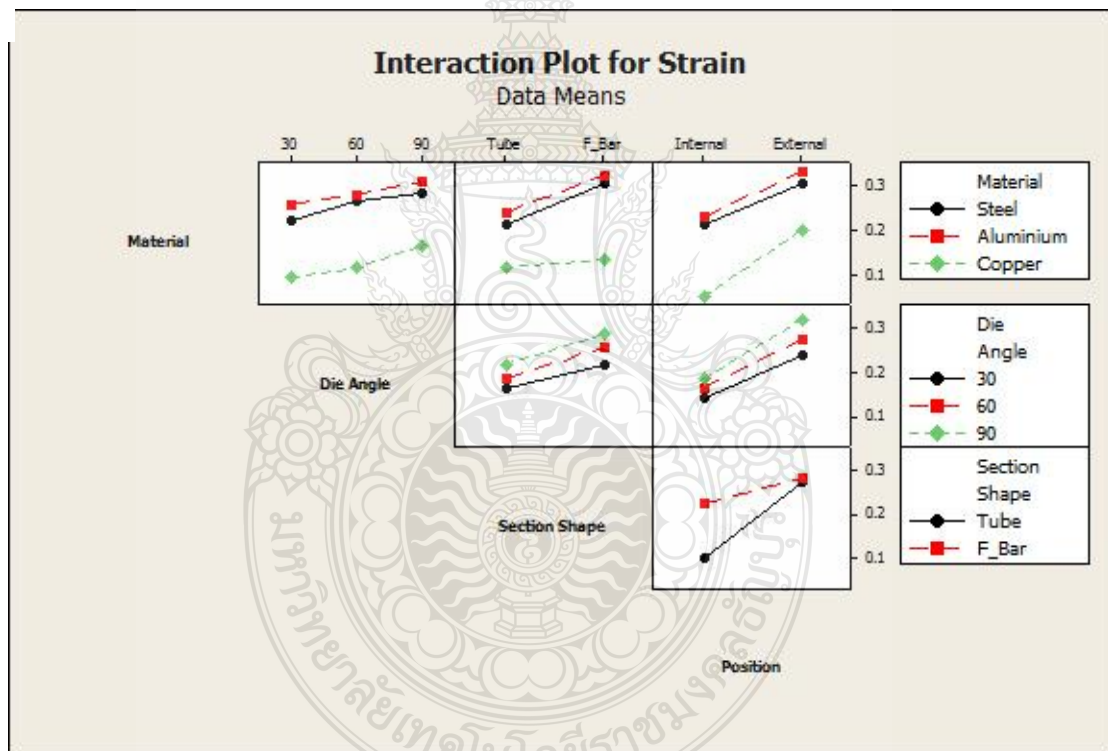
obs	Strain	Fit	SE Fit	Residual	St Resid	
10	0.317000	0.353000	0.008161	-0.036000	-3.12	R
32	0.198000	0.224667	0.008161	-0.026667	-2.31	R
67	0.000000	0.038667	0.008161	-0.038667	-3.35	R
68	0.278000	0.224667	0.008161	0.053333	4.62	R
90	0.372000	0.340667	0.008161	0.031333	2.71	R
104	0.198000	0.224667	0.008161	-0.026667	-2.31	R

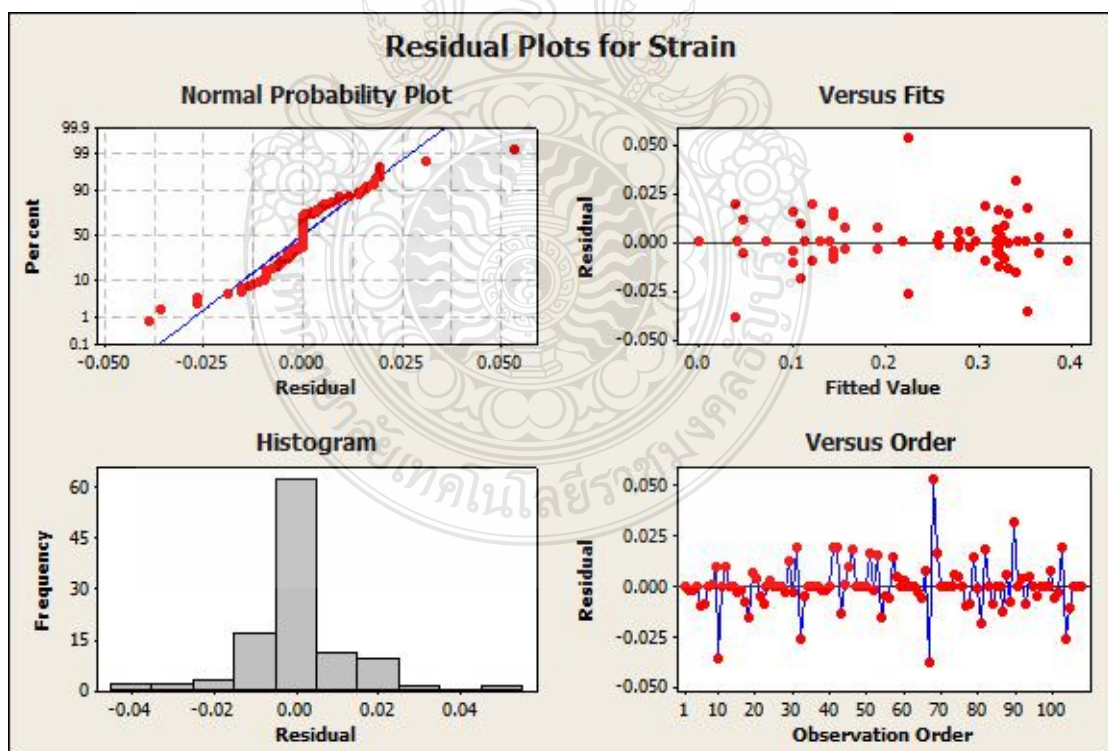
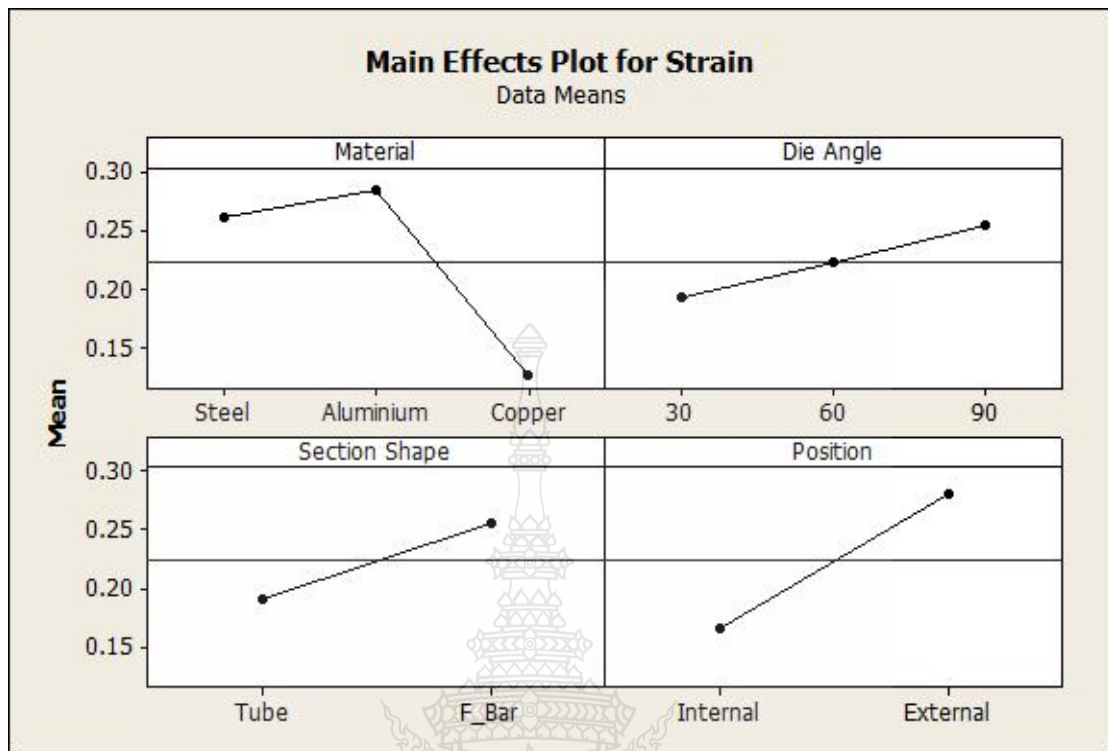
R denotes an observation with a large standardized residual.

Residual Plots for Strain

Main Effects Plot for Strain

Interaction Plot for Strain





ภาคผนวก จ
การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ
IE Network Conference 2013







ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล

ร่วมกับ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยศิลปากร

Proceedings
IE Network Conference 2013
Green Productivity and Innovation

16 - 18 ตุลาคม 2556

โรงแรม เอวัน เดอะ รอยัล กรุ๊ป พัทยา ชลบุรี