

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการชดเชยการดีดกลับของการดัดท่อทองแดง B88
และท่อสแตนเลส 904L

A STUDY OF SPRINGBACK COMPENSATION OF B88 COPPER AND 904L
STAINLESS STEEL TUBES BENDING



T123079

พิทยาภรณ์ โกมาร
PITTAYAPORN GOMARN

พ.
พ.ศ. ๒๕๕๕

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 123079
วัน,เดือน,ปี..... 18 ต.ค. 2555

b. ๑๒๓๔๕๖๗๘๙๐
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2555
KMITL-2012-EN-M-030-039

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY OF SPRINGBACK COMPENSATION OF B88 COPPER AND 904L
STAINLESS STEEL TUBES BENDING**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012
KMITL-2012-EN-M-030-039**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการชดเชยการตีกลับของการดัดท่อทองแดง B88 และท่อสแตนเลส 904L
Thesis Title A Study of Springback Compensation of B88 Copper and 904L Stainless Steel Tubes Bending
นักศึกษา นายพิทยาภรณ์ โกมาร
รหัสประจำตัว 52610528
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมชัย นรเศรษฐ์ไศภณ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2012-EN-M-030-039

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์	พิมสาร	
ดร.พรชัย	นิเวศน์รังสรรค์	
รศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	
รศ.ดร.สมชัย	นรเศรษฐ์ไศภณ	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 23 เมษายน พ.ศ. 2555 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A อาคาร 12 ชั้น ห้อง E12-401

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชชีวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 23 เมษายน พ.ศ. 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการชดเชยการติดกลับของการตัดท่อทองแดง B88 และท่อสแตนเลส 904L
นักศึกษา	นายพิทยาภรณ์ โกมาร
รหัสนักศึกษา	52610528
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ ทำการศึกษาพฤติกรรมและการชดเชยการติดตัวกลับของการตัดชิ้นรูปท่อทองแดง B88 และท่อสแตนเลส 904L กระบวนการทดสอบเริ่มจากนำเอาชิ้นงานทดสอบมาตรวจหาคุณสมบัติเชิงกลและสารผสมในเนื้อวัสดุ โดยชิ้นทดสอบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.52 มิลลิเมตร หนา 0.9 มิลลิเมตร ทำการตัดที่มุมองศาและรัศมีตัดต่างๆ ในการทดสอบจะใช้เครื่องตัดท่อซีเอ็นซีควบคุมความเร็วในการตัด จากชิ้นทดสอบที่ได้นำไปวัดหามุมองศาการติดกลับ จากมุมองศาติดกลับที่วัดได้นำไปหามุมองศาชดเชยการติดกลับจากการคำนวณทางทฤษฎีและจากการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าท่อทั้งสองชนิดมีการติดกลับ หลังจากการตัดท่อที่มีความแข็งน้อยกว่าจะมีการติดกลับมากกว่า การติดตัวกลับของท่อเพิ่มขึ้นเมื่อมุมองศาและรัศมีที่ใช้ในการตัดเพิ่มขึ้น โมเมนต์ดัดลดลงเมื่อมุมองศาและรัศมีที่ใช้ในการตัดเพิ่มขึ้น การตัดท่อในองศาที่มากกว่าจะต้องทำตามความต้องการและเมื่อตัดท่อเลยจุดแรงดึงสูงสุดจะทำให้ชิ้นงานขาด ผลของการศึกษาสามารถเป็นแนวทางการชดเชยการติดตัวกลับของการตัดท่อชนิดอื่นๆได้

Thesis Title	A Study of Springback Compensation of B88 Copper and 904L Stainless Steel Tubes Bending
Student	Mr. Pittayaporn Gomarn
Student ID.	52610528
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2012
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Somchai Norasethasophon

ABSTRACT

The present research studied springback behaviors and compensation in bending of B88 copper and 904L Stainless Steel tubes. The testing process commenced from testing the mechanical properties and material mixture analyzing of sample materials. The dimension of workpiece, the workpiece diameter, was 9.52 mm. and 0.9 mm. wall-thickness, with different bending radius and bending angles. The CNC tube bender was used for bending speed controller. After that the springback angles of the workpieces were measured. The springback angles was used for the calculated value and the experiment value of springback compensated angles. It was found that both types of tube had their own springback properties. After the bending process it was found that the more increasingly in springback property occurred in the lower hardness tube. Springback of the tube increases as the bending radius and bending angles increases. The bending moment decreases as the bending radius and bending angles increases. For the larger bending angle, the closely required angle was obtained. But such bending angle exceeded its tensile strength limit, the specimens were broken. The results can be used to compensate the springback value for other types of tube bending.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณธนชาติ เนตรสาริกา ผู้จัดการ แห่ง บริษัท ชีพพลาย ไอคอน จำกัด ที่ให้ความรู้และความอนุเคราะห์อุปกรณ์และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัยจนทำการทดลองได้สำเร็จ

ขอขอบคุณ คุณบรรจง ทิสม รองผู้จัดการ แห่ง บริษัท ชีพพลาย ไอคอน จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาปัญหาต่างๆเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือในการดำเนินการทดลองจนสำเร็จ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณปิยาณี ลิ้มโสภารธรรม ที่เป็นผู้อยู่เบื้องหลังและเป็นกำลังใจให้ จนถึงวันสุดท้ายของการศึกษาและทำวิจัยครั้งนี้ได้สำเร็จ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ตลอดจนครุอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า จนทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พิทยาภรณ์ โกมาร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	1
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	1
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีการดัด (Bending Theory).....	3
2.2 เส้นแกนกลาง (Neutral Axis).....	4
2.3 การไหลตัวของโลหะในการขึ้นรูป (Metal Flow).....	4
2.4 ความเค้น (Stress).....	5
2.4.1 ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress).....	6
2.4.2 ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress).....	6
2.4.3 ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress).....	6
2.5 ความเครียดและการเปลี่ยนรูป (Strain and Deformation).....	7
2.5.1 การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป.....	7
2.5.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป.....	7
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship).....	8
2.6.1 การทดสอบแรงดึง (Tension Test).....	9
2.6.2 ความเหนียว (Ductility).....	11
2.6.3 Modulus of Elasticity or Stiffness.....	12
2.7 ทฤษฎีการบิด.....	13
2.7.1 ข้อสมมติเกี่ยวกับการบิดของเพลลา.....	13
2.7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน ความเค้นเครียดและมุมบิด.....	13
2.7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเค้นเฉือน.....	16
2.7.4 โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้ว.....	17
2.7.5 ความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในเพลลากลมตันและเพลลากลมกลวง.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 การติดตัวกลับของวัสดุ (Springback).....	19
2.9 การชดเชยการติดตัวกลับของวัสดุ (Overcoming Springback).....	21
2.9.1 การตัดให้มากกว่าความต้องการ (Overbending).....	21
2.9.2 การกดกระแทกชิ้นงานตรงบริเวณที่ก่อให้เกิดเป็นรอย (Bottoming or Setting).....	21
2.9.3 การยืดชิ้นงานก่อนงอ (Stretch Bending).....	21
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 ทฤษฎีการคำนวณหาโมเมนต์ดัด.....	24
3.1 ทฤษฎีการคำนวณหาโมเมนต์ดัด.....	24
3.1.1 ทฤษฎีคานตรง.....	24
3.1.2 ทฤษฎีคานโค้ง.....	26
3.1.3 การวิเคราะห์หโมเมนต์ดัดของคาน.....	30
บทที่ 4 การทดลอง.....	31
4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	31
4.1.1 ท่อทองแดงเกรด B88.....	31
4.1.2 ท่อสแตนเลสเกรด 904L.....	32
4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	34
4.2.1 เครื่องตัดท่อ.....	35
4.2.2 ชุดแม่พิมพ์.....	36
4.2.3 เครื่องวัดตวงศา.....	37
4.2.4 เครื่องวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและวัดความหนา.....	38
4.2.5 อุปกรณ์ตัดท่อ.....	38
4.3 แผนการทดลอง.....	39
4.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	40
4.4.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน.....	40
4.4.2 ขั้นตอนการตัดท่อ.....	40
4.4.3 ขั้นตอนการหาองศาตัดกลับ.....	40
4.4.4 ขั้นตอนการหาองศาชดเชยการติดกลับ.....	40
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	41
5.1 ผลการทดลองการติดตัวกลับของท่อ.....	41
5.1.1 องศาการติดตัวกลับของท่อภายหลังการตัด.....	41
5.1.2 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อภายหลังการตัด.....	48
5.1.3 ขนาดความหนาของท่อภายหลังการตัด.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.4 โมเมนต์ตัดจากผลการคำนวณทางทฤษฎี.....	59
5.2 ทฤษฎีการคำนวณหาองศาขดเคียวการติดตัวกลับ.....	62
5.3 ผลการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎีการขดเคียวการติดตัวกลับของท่อ.....	63
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	69
6.1.1 สรุปผลการทดลอง.....	69
6.1.2 ปัญหาที่พบ.....	70
6.1.3 ข้อเสนอแนะ.....	70
เอกสารอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	74
ภาคผนวก ข. การคำนวณหาโมเมนต์ตัด และองศาขดเคียวการติดตัวกลับของท่อทางทฤษฎี.....	84
ภาคผนวก ค. แบบแม่พิมพ์ในการดัดขึ้นรูป.....	86
ภาคผนวก ง. มาตรฐานเครื่องตัดท่อซีเอ็นซี.....	88
ภาคผนวก จ. คุณสมบัติของธาตุต่าง ๆ เมื่อผสมลงไปเหล็ก.....	92
ประวัติผู้เขียน.....	94

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างค่าคงที่ E และ G ของวัสดุชนิดต่างๆ.....	13
4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ 904L ที่ได้จากการทดสอบ.....	33
4.2 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ B88 ที่ได้จากการทดสอบ.....	33
4.3 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ 904L และ B88 ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง.....	33
4.4 แสดงแผนการทดลอง.....	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ของการตัด.....	3
2.2 ตำแหน่งของเส้นแกนกลาง.....	4
2.3 แสดงลักษณะของแรงดึงและแรงกด.....	6
2.4 แสดงลักษณะของแรงเฉือน.....	6
2.5 แสดงลักษณะของความเครียด.....	8
2.6 แสดงภาพความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point).....	9
2.7 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก.....	10
2.8 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก.....	11
2.9 เพลากลมที่มีแรงบิดมากกระทำ.....	14
2.10 อีเลเมนต์ ABCD ที่เกิดการบิดตัว.....	14
2.11 การกระจายตัวของความเค้นเฉือนบนหน้าตัดเพลากลม.....	15
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (T) และความเค้นเฉือน (τ).....	16
2.13 เพลากลมที่มีหน้าตัดกลมกลวง.....	18
2.14 แสดงแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำสุดและสูงสุด.....	19
2.15 การเปลี่ยนรูปแบบของความเค้นในการงอโลหะ.....	20
2.16 แรงที่เกิดจากการกระด้างตัวกลับ.....	20
3.1 คานตรงภายใต้โมเมนต์ดัด.....	24
3.2 ลักษณะการกระจายตัวของความเครียด.....	25
3.3 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของคานภายใต้โมเมนต์ดัด.....	26
3.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงคานโค้งภายใต้โมเมนต์ดัด.....	26
3.5 คานโค้งภายใต้โมเมนต์ดัด.....	28
4.1 แสดงท่อทองแดง B88.....	31
4.2 แสดงท่อสแตนเลส 904L.....	32
4.3 แสดงเครื่อง Portable Spectrometer รุ่น Arcmet-8000.....	33
4.4 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ 904L.....	34
4.5 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ B88.....	34
4.6 แสดงเครื่องตัดซีเอ็นซี รุ่น CNC 65TSRE.....	35
4.7 แสดงลักษณะการใช้เครื่องตัดซีเอ็นซี รุ่น CNC 65TSRE กับโปรแกรม.....	35
4.8 แสดงส่วนประกอบของชุดแม่พิมพ์.....	36
4.9 แสดงลักษณะด้านบนของชุดแม่พิมพ์.....	36
4.10 แสดงลักษณะด้านหน้าของชุดแม่พิมพ์.....	37
4.11 แสดงลักษณะด้านหลังของชุดแม่พิมพ์.....	37
4.12 แสดงเครื่องวัดองศาโปรแทคเตอร์ (Angle Meter Protector-350).....	37
4.13 แสดงแสดงเวอร์เนียแบบดิจิตอล.....	38
4.14 แสดงอุปกรณ์ตัดท่อ (Tube Cutter).....	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 แสดงลักษณะการวัดค่าองศาภายในหลังการตัดท่อ.....	41
5.2 องศาการติดตัวกลับภายในหลังการตัดท่อที่รัศมีตัด 20 มิลลิเมตร ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88.....	42
5.3 องศาการติดตัวกลับภายในหลังการตัดท่อที่รัศมีตัด 20 มิลลิเมตร ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88.....	43
5.4 องศาการติดตัวกลับภายในหลังการตัดท่อที่รัศมีตัด 20 มิลลิเมตร ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88.....	43
5.5 องศาการติดตัวกลับภายในหลังการตัดท่อสแตนเลส 904L ที่รัศมีตัดต่างๆ.....	44
5.6 องศาการติดตัวกลับภายในหลังการตัดท่อทองแดง B88 ที่รัศมีตัดต่างๆ.....	45
5.7 องศาการติดตัวกลับภายในหลังการตัดท่อสแตนเลส 904L ที่องศาตัดต่างๆ.....	46
5.8 องศาการติดตัวกลับภายในหลังการตัดท่อทองแดง B88 ที่องศาตัดต่างๆ.....	47
5.9 แสดงลักษณะของท่อสแตนเลส 904L หลังการตัดขึ้นรูป.....	47
5.10 แสดงลักษณะของท่อทองแดง B88 หลังการตัดขึ้นรูป.....	48
5.11 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในหลังการตัดท่อที่รัศมีตัด 20 มิลลิเมตร ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88.....	49
5.12 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในหลังการตัดท่อที่รัศมีตัด 20 มิลลิเมตร ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88.....	49
5.13 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในหลังการตัดท่อที่รัศมีตัด 20 มิลลิเมตร ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88.....	50
5.14 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.1 ภายในหลังการตัดท่อสแตนเลส 904L ที่มุมองศาตัดต่างๆ.....	50
5.14 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.1 ภายในหลังการตัดท่อทองแดง B88 ที่มุมองศาตัดต่างๆ.....	51
5.16 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.2 ภายในหลังการตัดท่อสแตนเลส 904L ที่มุมองศาตัดต่างๆ.....	52
5.17 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.2 ภายในหลังการตัดท่อทองแดง B88 ที่มุมองศาตัดต่างๆ.....	53
5.18 ความหนาขนาด Point.1, 2, 3 และ 4 ภายในหลังการตัดท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่รัศมีตัด 20 มิลลิเมตร ที่มุมองศาตัดต่างๆ.....	54
5.19 ความหนาขนาด Point.1, 2, 3 และ 4 ภายในหลังการตัดท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่รัศมีตัด 25 มิลลิเมตร ที่มุมองศาตัดต่างๆ.....	55
5.20 ความหนาขนาด Point.1, 2, 3 และ 4 ภายในหลังการตัดท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่รัศมีตัด 30 มิลลิเมตร ที่มุมองศาตัดต่างๆ.....	56
5.21 แสดงลักษณะเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาของท่อสแตนเลส 904L หลังการตัดขึ้นรูป รัศมีตัด 20 มิลลิเมตร ที่องศาตัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา.....	57
5.22 แสดงลักษณะเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาของท่อทองแดง B88 หลังการตัดขึ้นรูป รัศมีตัด 20 มิลลิเมตร ที่องศาตัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา.....	58
5.23 โมเมนต์ตัดภายในหลังการตัดท่อสแตนเลส 904L ที่มุมองศาตัดต่างๆ.....	59
5.24 โมเมนต์ตัดภายในหลังการตัดท่อทองแดง B88 ที่มุมองศาตัดต่างๆ.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.25 โมเมนต์ตัดภายหลังการตัดท่อที่รัศมีตัด 20 มิลลิเมตร ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88.....	60
5.26 โมเมนต์ตัดภายหลังการตัดท่อที่รัศมีตัด 25 มิลลิเมตร ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88.....	60
5.27 โมเมนต์ตัดภายหลังการตัดท่อที่รัศมีตัด 30 มิลลิเมตร ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88.....	61
5.28 แสดงปรากฏการณ์การเกิด Springback.....	62
5.29 องศาขดเขยการตีดตัวกลับภายหลังการตัดท่อที่องศาตัด 15 องศา ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88.....	63
5.30 องศาขดเขยการตีดตัวกลับภายหลังการตัดท่อที่องศาตัด 30 องศา ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88.....	64
5.31 องศาขดเขยการตีดตัวกลับภายหลังการตัดท่อที่องศาตัด 45 องศา ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88.....	65
5.32 องศาขดเขยการตีดตัวกลับภายหลังการตัดท่อที่องศาตัด 60 องศา ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88.....	66
5.33 องศาขดเขยการตีดตัวกลับภายหลังการตัดท่อที่องศาตัด 75 องศา ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88.....	67
5.34 องศาขดเขยการตีดตัวกลับภายหลังการตัดท่อที่องศาตัด 90 องศา ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88.....	68
ค.1 แสดงแบบแม่พิมพ์ในการตัดขึ้นรูป.....	87
ง.1 แสดงมาตรฐานเครื่องตัดท่อซีเอ็นซี.....	89

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์และคำย่อ	ความหมาย
σ	ความเค้น (Stress)
ϵ	ความเครียด (Strain)
P	แรงภายนอกที่มากกระทำ
A	พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ
ΔL	ความยาวที่เปลี่ยนไป
γ	$\tan \theta \approx \theta$ (Radian ในกรณีที่เป็นมุมเล็ก)
a	ระยะที่เคลื่อนที่ไป (Displacement)
h	ระยะห่างระหว่างระนาบ
θ	มุมที่เปลี่ยนไป
L_f	ความยาวของแกนหลังจากดึงจนขาด
L_o	ความยาวของแกนเริ่มต้น
A_o	พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง
A_f	พื้นที่หน้าตัดหลังจากดึงจนขาด
T	แรงบิด
τ	ความเค้นเฉือน
J	โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้ว
r	รัศมีจุดที่ต้องการหาค่าความเค้นเฉือน
G	โมดูลัสของความแข็งแรง (Shear Modulus) หรือ (Modulus of Rigidity)
E	โมดูลัสของอีลาสติค (Modulus of Elasticity) หรือ (Young's Modulus)
M	โมเมนต์ดัด
I	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดท่อ
R	รัศมีที่ใช้ในการดัด
R'	รัศมีตีตัวกลับ
$2\alpha'$	องศาที่ได้หลังจากการดัด
2α	องศาขดเคี้ยวการตีตัวกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนท่อรถยนต์ได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีความสวยงามและมีความแข็งแรง เพื่อการแข่งขันกันทางการตลาด แต่จุดหนึ่งที่ไม่สามารถที่จะลืมไปได้คือ การทำการผลิตที่รวดเร็วและมีคุณภาพ เกิดการเสียหายจากการผลิตน้อย จึงจะทำให้ได้มาซึ่งกำไรจากการผลิต จากการขึ้นรูปโลหะโดยกรรมวิธีที่ไม่ถูกต้อง ไม่มีความรู้ทางกลไกของการขึ้นรูป เป็นผลทำให้เกิดความเสียหายต่อวัสดุเป็นจำนวนมาก การตัดวัสดุไปในทิศทางเดียวกันซ้ำกันหลายๆ ครั้งทำให้วัสดุไม่สวยงาม อีกทั้งความแข็งแรงจะน้อยลงและยังเสียเวลาในการผลิตด้วย

จากเหตุผลข้างต้น จึงเป็นที่มาของการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุที่เกิดจากการตัด จึงจะทำให้รู้ถึงลักษณะและพฤติกรรมการตัดตัวกลับของวัสดุ ซึ่งจะช่วยนำไปสู่การหาวิธีการชดเชยการตัดตัวกลับของวัสดุชนิดต่างๆที่อยู่ในแวดวงอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนท่อรถยนต์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมการตัดตัวกลับของท่อทองแดงเกรด B88 และท่อสแตนเลสเกรด 904L โดยการตัดขึ้นรูป

1.2.2 เพื่อทำการศึกษาการชดเชยการตัดตัวกลับของท่อทองแดงเกรด B88 และท่อสแตนเลสเกรด 904L โดยการตัดขึ้นรูป

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากการตัดขึ้นรูปวัสดุในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนท่อรถยนต์ ไม่ประสบความสำเร็จมากนักเพราะวัสดุที่ทำการตัดขึ้นรูปไม่เป็นไปตามความต้องการ ทั้งนี้เกิดจากการคืนรูปของวัสดุที่พยายามกลับสู่สภาพปกติ

การหาวิธีการตัดขึ้นรูปวัสดุให้ได้ตามองศาที่ต้องการ โดยใช้ค่าองศาในการตัดที่มากกว่าเดิม เพื่อเวลาที่วัสดุมีการคืนตัวแล้ววัสดุจะมาอยู่ตรงตำแหน่งที่ต้องการ

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 สร้างชุดแม่พิมพ์สำหรับตัดท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.52 มิลลิเมตร ตามรูปร่างที่ใช้กับเครื่องตัดท่อ ขนาดรัศมีตัดของแม่พิมพ์ต่างกัน 3 ขนาด คือ 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร

1.4.2 ศึกษาพฤติกรรมและการชดเชยการตัดตัวกลับของท่อทองแดงเกรด B88 และท่อสแตนเลสเกรด 904L ที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.52 มิลลิเมตร หนา 0.9 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองตัดท่อที่รัศมีตัดต่างๆกัน 3 รัศมีตัดคือ 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร โดยแต่ละรัศมีตัดทำการตัดเป็นมุมต่างๆกันที่ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา

1.4.3 ศึกษาและวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของการตัดท่อทองแดงเกรด B88 และท่อสแตนเลสเกรด 904L

1.4.4 ศึกษาและวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และความหนาของท่อทองแดงเกรด B88 และท่อสแตนเลสเกรด 904L ภายหลังจากตัดขึ้นรูป

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ทำการสร้างชุดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.5.3 นำท่อที่ใช้ในการทดลองทั้งสองชนิดมาทำการหาส่วนผสมทางเคมี และทดสอบแรงดึงเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกล

1.5.4 ทำการทดลองหาค่าองศาการบิดตัวกลับของท่อทั้งสองชนิดที่ทุกๆ ๑๕ องศา และองศาตัดจากการตัดขึ้นรูป

1.5.5 นำค่าองศาการบิดตัวกลับของท่อที่ได้มาทำการทดลองหาค่าองศาขดเคี้ยวการบิดตัวกลับ

1.5.6 นำค่าองศาการบิดตัวกลับของท่อที่ได้จากการทดลองมาหาค่าองศาขดเคี้ยวการบิดตัวกลับจากการคำนวณทางทฤษฎี

1.5.7 นำท่อทั้งสองชนิดที่ได้ภายหลังจากการตัดมาตัดครึ่งในบริเวณที่ทำการตัด เพื่อศึกษาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และความหนาของท่อภายหลังจากตัดขึ้นรูป

1.5.8 นำค่าองศาการบิดตัวกลับของท่อทั้งสองชนิดที่ทุกๆ ๑๕ องศา และองศาที่ใช้ในการตัดที่ได้จากการทดลองไปหาค่าโมเมนต์ตัดจากการคำนวณทางทฤษฎี

1.5.9 ทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลค่าองศาขดเคี้ยวการบิดตัวกลับของท่อที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับผลที่ได้จากการทดลอง

1.5.10 สรุปผลการทดลอง

บทที่ 2

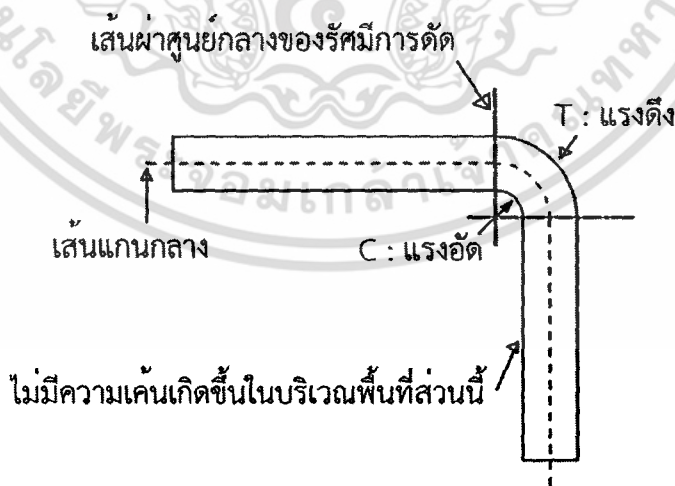
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ขบวนการในการขึ้นรูปโลหะทั้งหมดนั้นนับว่า ขบวนการดัดขึ้นรูป (Bending) เป็นการทำที่ง่ายที่สุดที่ใช้ร่วมกับเครื่องปั๊มโลหะ ซึ่งขบวนการงอขึ้นรูปนี้อาจทดลองได้โดยใช้เครื่องมือง่ายๆ ภายในบ้านก็ทำได้ ขบวนการดัดขึ้นรูปนั้นเป็นขบวนการอันหนึ่งในหลายๆ ขบวนการของการงอขึ้นรูปโดยการดัด ซึ่งขบวนการนี้จะถูกใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษาถึงสภาพของการขึ้นรูปขึ้นงานที่ใช้ในบพนี้ ขบวนการขึ้นรูปโดยการดัดนั้นมีกรรมวิธีที่แตกต่างไปจากขบวนการดัดขึ้นรูป (Butting) และขบวนการลากขึ้นรูป (Drawing) เป็นอย่างมาก

2.1 ทฤษฎีการดัด (Bending Theory)

ในการขึ้นรูปโลหะโดยการดัดขึ้นรูปนั้น เราต้องให้แรงแก่ชิ้นงานทั้งนี้ เพื่อให้ชิ้นงานนั้นเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ซึ่งแรงที่ให้แก่ชิ้นงานนั้นจะต้องไม่ทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานมากกว่าความเค้นดึงสูงสุดของชิ้นงานนั้น และจะต้องไม่น้อยกว่าจุดยืดหยุ่นจำกัดของชิ้นงานนั้น

เมื่อเราให้แรงแก่ชิ้นงานเพื่อทำการดัดจะปรากฏว่าความเค้นของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจะเริ่มจากบางจุดที่ต่ำกว่าความแข็งแรงสูงสุดของโลหะนั้น และความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นจะแผ่กระจายไปยังส่วนต่างๆ ของชิ้นงาน ซึ่งขณะที่แผ่กระจายนั้น ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานก็จะค่อยๆ ลดลงด้วยจนถึงบริเวณที่ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานเป็นศูนย์ ซึ่งลักษณะการเกิดความเค้นบนชิ้นงานแบบนี้ จะทำให้เกิดการบิดงอของชิ้นงานมากกว่าจะเกิดการฉีกขาด สำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของโลหะนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานจะต้องผ่านจุดยืดหยุ่นจำกัดและจุดล้าตัวด้วย

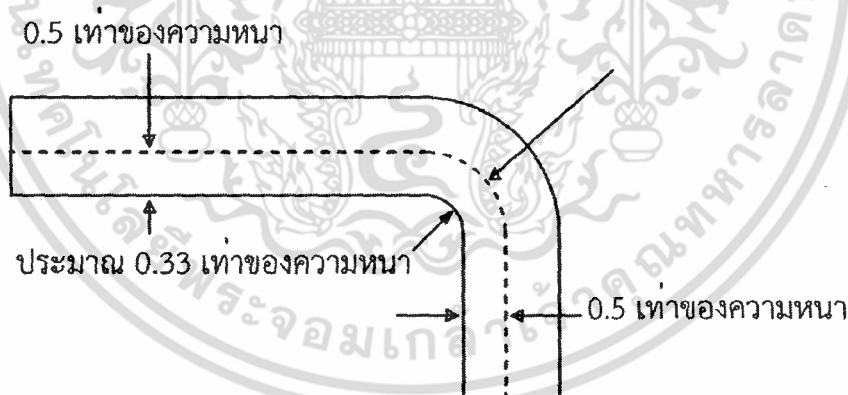


รูปที่ 2.1 ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ของการดัด [2]

การดัด (Bending) นั้นมีลักษณะความแตกต่างของการเกิดความเค้นของโลหะเฉพาะที่เท่านั้น ความเค้นที่เกิดเฉพาะที่นี้จะเกิดขึ้นตรงรัศมีของการงอของชิ้นงานเท่านั้น ส่วนพื้นที่ของชิ้นงานส่วนที่เหลือนั้นจะไม่มี ความเค้นเกิดขึ้นเลย จากรูปที่ 2.1 นั้น เป็นการแสดงถึงพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ได้ผ่านขบวนการดัดมาแล้ว ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานนั้นเราจะสังเกตได้ดังนี้ โลหะที่อยู่ด้านนอกของรัศมีการดัดจะยืดออกแสดงให้เห็นว่ามีความเค้นดึงเกิดขึ้น ส่วนโลหะที่อยู่ด้านในของรัศมีการดัดจะหดตัวเข้า แสดงให้เห็นว่ามีความเค้นอัดเกิดขึ้น ดังนั้นถ้ามีการฉีกขาดปรากฏขึ้นระหว่างการดัดมักจะเกิดขึ้นที่ส่วนนอกของการดัด แต่ถ้ามีรอยย่น (Wrinkle) ปรากฏขึ้นมันจะเกิดขึ้นที่ด้านในของการดัด

2.2 เส้นแกนกลาง (Neutral Axis)

ทั้งนี้เพราะว่าที่ชิ้นงานนั้นได้เกิดความเค้นดึงขึ้นที่ด้านหนึ่งและอีกด้านหนึ่งนั้นได้เกิดความเค้นอัดขึ้น การกลับตรงข้ามของความเค้นทั้งสองนี้จะต้องเกิดขึ้นตรงบริเวณใกล้ๆ เส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงาน ความเค้นดึงและความเค้นอัดจะเกิดขึ้นมากที่สุดตรงบริเวณด้านขอบนอกทั้งสองข้างของความหนาของชิ้นงาน และความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งสองนี้จะค่อยๆ ลดลงๆ เมื่อระยะห่างเข้ามาใกล้กับเส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงาน ซึ่งที่เส้นแกนกลางของความหนาหรือบริเวณใกล้ๆ เส้นแกนกลางของความหนาจะมีความเค้นเป็นศูนย์คือไม่เกิดความเค้นขึ้นเลย เส้นที่ไม่มี ความเค้นเกิดขึ้นเลยเราเรียกว่า “เส้นแกนกลาง” (Neutral Axis)



รูปที่ 2.2 ตำแหน่งของเส้นแกนกลาง [2]

2.3 การไหลตัวของโลหะในการขึ้นรูป (Metal Flow)

เพราะว่าโลหะบริเวณที่เราดัดนั้นได้มีความเค้นเกิดขึ้นซึ่งมันจะทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะ ความเค้นดึงที่ทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะจะไปทำให้ความหนาของชิ้นงานในบริเวณที่ดัดมี

ขนาดลดลง ส่วนความเค้นอัดที่ทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะจะไปเพิ่มขนาดความกว้างของชิ้นงานให้เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะของการไหลตัวของโลหะระหว่างการขึ้นรูปโดยการดัด มีดังต่อไปนี้

1. ถ้าแท่งโลหะได้ถูกนำมาดัดจะทำให้เกิดการบิดงอทางพื้นที่หน้าตัดอย่างมากและจะมีการไหลตัวของโลหะทำให้ความหนาของแท่งโลหะลดลงเล็กน้อย แต่จะไปเพิ่มทางด้านกว้างมากขึ้น
2. ถ้าโลหะแผ่นได้ถูกนำมาดัดจะมีการบิดงอทางพื้นที่หน้าตัดเล็กน้อย แต่ความหนาจะลดลงอย่างมากและไม่มีการเพิ่มตัวขึ้นทางความกว้างเลย

เมื่อเราดัดโลหะแผ่นโอกาสที่จะเกิดการฉีกขาดมีมาก ทั้งนี้เพราะว่าการมีอัตราความกว้างมากต่อความหนาที่น้อย ส่วนรอยย่นจะปรากฏขึ้นเสมอเมื่อเราดัดโลหะแผ่นหรือแท่งโลหะอย่างแรง ทั้งนี้เพราะว่าอัตราความกว้างน้อยต่อความหนามากจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเพิ่มทางด้านการอัดตัวมากขึ้น ขนาดของการไหลตัวของโลหะซึ่งมีความสัมพันธ์กับสิ่งต่างๆ ดังนี้

- เมื่อรัศมีของการดัด (Bend of Radius) ยาวขึ้นจะทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะน้อย
- โลหะที่บางกว่าจะเกิดการไหลตัวของโลหะน้อย
- มุมของการดัด (Degree of Bend) แคบจะทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะน้อย
- ถ้าเป็นการดัดช่วงแคบ (Narrow Bend) จะทำให้มีการไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงดึงมีน้อย แต่การไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงอัดมีมาก
- ถ้าเป็นการดัดช่วงกว้าง (Wide Bend) จะทำให้มีการไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงดึงมีมาก แต่การไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงอัดมีน้อย
- ถ้าเป็นโลหะแข็งจะมีการไหลตัวของโลหะทางด้านแรงดึงตัวมาก และทางด้านนี้ก็มีโอกาสที่จะฉีกขาดได้ง่าย
- ถ้าเป็นโลหะที่อ่อนจะทำให้มีการไหลตัวของโลหะทางด้านแรงอัดตัวมาก และทางด้านนี้ก็มีโอกาสที่จะเกิดรอยย่นได้ง่าย

2.4 ความเค้น (Stress)

ตามความเป็นจริงความเค้นหมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน การหาค่าความเค้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

เมื่อ

σ = ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa, 1 Pa = 1N/m²) หรือ kgf/mm² หรือ psi (lbf/in²)

P = แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf หรือ lbf

A = พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ : m² หรือ mm² หรือ in²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

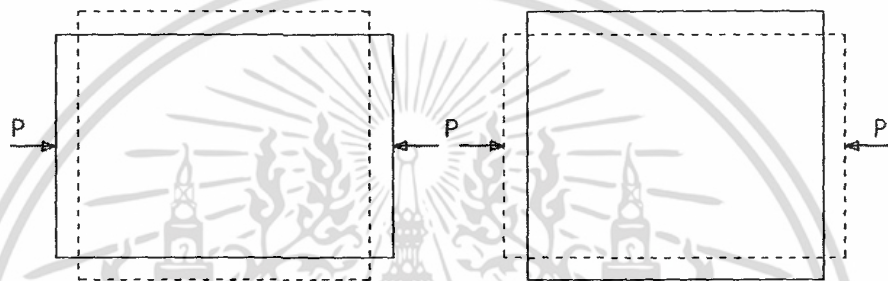
โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ

2.4.1 ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress)

เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 2.3a

2.4.2 ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress)

เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 2.3b



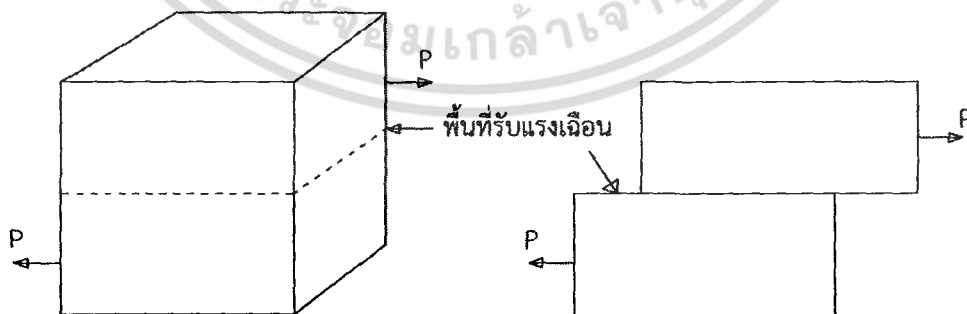
2.3 a) แรงดึง (Tension)

2.3 b) แรงกด (Compression)

รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของแรงดึงและแรงกด [1]

2.4.3 ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress)

เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของแรงเฉือน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ความเครียดและการเปลี่ยนรูป (Strain and Deformation)

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำทำให้เกิดความเค้น การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

2.5.1 การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป

การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พลาสติก ยืด, สปริง ถ้าเราดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

2.5.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป

การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม

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

นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทโพลีเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่าความเครียดกึ่งอิลาสติกจะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม การวัดและคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

แบบเส้นตรง ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ดังรูปที่ 2.5 ค่าของความเครียดจะเท่ากับ ความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม ดังสมการ

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.2)$$

เมื่อ

ϵ = ความเครียดเชิงเส้น

ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนไป ($L - L_0$)

L_0 = ความยาวเดิมของวัสดุที่สนใจ หรือ Gage Length

แบบเฉือน เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน (τ) ดังรูป ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ ดังสมการ

$$\gamma = \frac{a}{h} \quad (2.3)$$

เมื่อ

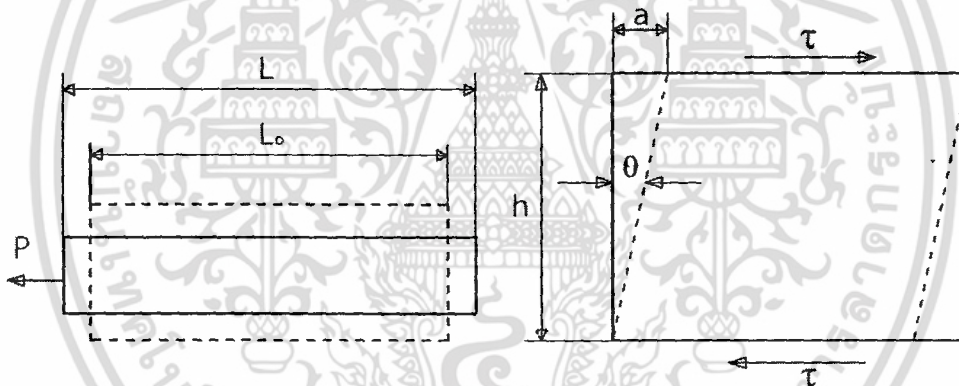
γ = $\tan \theta \approx \theta$ (Radian ในกรณีที่มุมเป็นมุมเล็ก)

a = ระยะที่เคลื่อนที่ไป (Displacement)

h = ระยะห่างระหว่างระนาบ

θ = มุมที่เปลี่ยนไป

จะเห็นว่าค่าของความเครียดทั้งสองแบบไม่มีหน่วย เพราะตัวตั้งและตัวหารมีหน่วยเป็นความยาวอยู่แล้ว



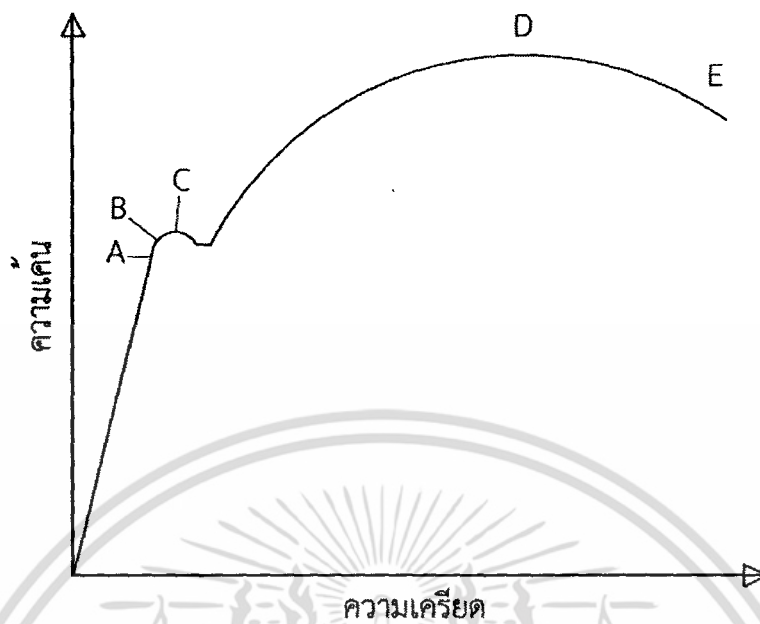
2.5 a) ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) 2.5 b) ความเครียดเฉือน (Shear Strain)

รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของความเครียด [1]

2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพลอตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังรูป 2.6 [1] การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เทนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงภาพความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)

2.6.1 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

วิธีการทดสอบนั้น เราจะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้า ๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพลอตเป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 2.7 ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่าง ๆ กัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้น ๆ มาตรฐานต่าง ๆ ของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย

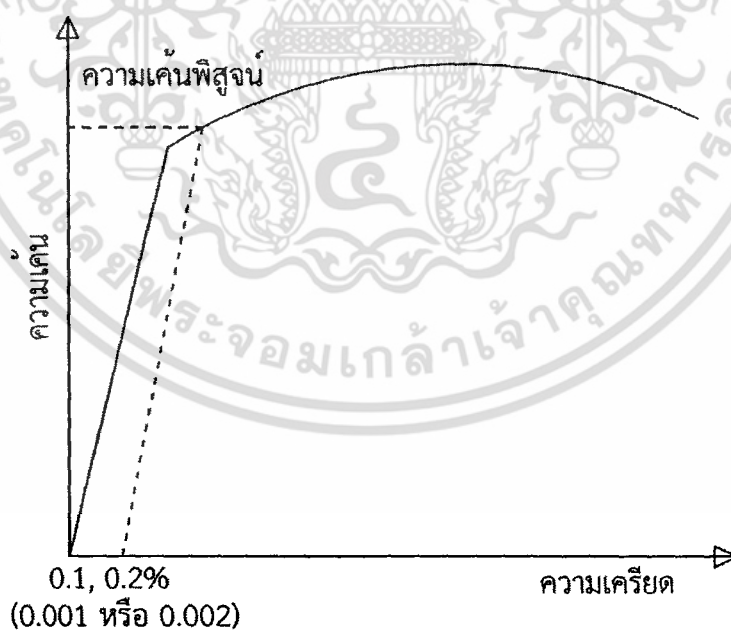
จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด เราพบว่า เมื่อเราเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ชิ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออก จนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้เราได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's Law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้ เรียกว่าพิสัยสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิสัยสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

เมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนถึงพิสัยสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด ๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่าพิสัยยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้

เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรม การคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราคงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย

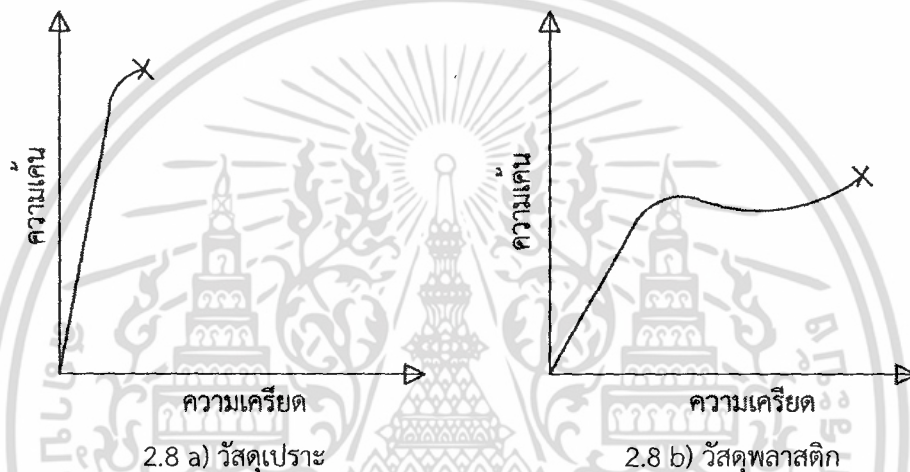
วัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2% Offset ดังแสดงในรูปที่ 2.7

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปร่างพลาสติกได้มาก ๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ ค่านี้ยังใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยว่า ค่าว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไปจะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นั่นเอง



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก [1]

ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่ที่ต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่น ๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว มันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังรูป 2.8 a ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น ดังรูป 2.8 b



รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก [1]

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดนี้ นอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความเค้นสูงสุดและความเค้นประลัยแล้ว ยังจะใช้บอกค่าต่าง ๆ ได้อีกดังนี้ คือ

2.6.2 ความเหนียว (Ductility)

ค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (Percentage Elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of Area) โดยที่

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (\%EI)} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (2.4)$$

เมื่อ

L_f = ความยาวของเกจหลังจากดึงจนขาด

L_0 = ความยาวของเกจเริ่มต้น

$$\text{การลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (\%R.A.)} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100\% \quad (2.5)$$

เมื่อ

A_o = พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง

A_f = พื้นที่หน้าตัดหลังจากดึงขาด

ในทางปฏิบัติเรามักใช้ค่า %EI มากกว่าเพราะสะดวกในการวัด ความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมัน คือถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (%EI สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูป เช่น รีด ตีขึ้นรูป ดึงเป็นลวด ฯลฯ ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ (เปราะ , Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยาก หรือทำไม่ได้ เป็นต้น

2.6.3 Modulus of Elasticity or Stiffness

ภายใต้พิภักัดสัดส่วนซึ่งวัสดุมีพฤติกรรมเป็นอิลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า Modulus of elasticity (E) หรือ Young's Modulus หรือ Stiffness

$$E = \frac{\sigma}{e} = \frac{PL}{A\Delta L} \quad (2.6)$$

มักมีหน่วยเป็น ksi (1 ksi=1000 psi) หรือ kgf/mm² หรือ GPa (สังเกตว่าเป็นหน่วยเดียวกับหน่วยของความเค้น)

ถ้าแรงที่มากระทำเป็นแรงเฉือนเราเรียกค่าคงที่นี้ว่า Shear Modulus หรือ Modulus of Rigidity (G)

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{Ph}{Aa} \quad (2.7)$$

ค่า E และ G ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉลี่ยคงที่ และเป็นตัวบอกความสามารถงรูป (Stiffness, Rigidity) ของวัสดุ นั่นคือ ถ้า E และ G มีค่าสูง วัสดุจะเปลี่ยนรูปร่างอย่างอิลาสติกได้น้อย แต่ถ้า E และ G ต่ำ มันก็จะเปลี่ยนรูปร่างอย่างอิลาสติกได้มาก ค่า E และ G นี้มีประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบวัสดุที่ต้องรับแรงต่าง ๆ ตารางที่ 2.1 จะแสดงตัวอย่างค่า E และ G ของวัสดุต่าง ๆ ไว้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างค่าคงที่ E และ G ของวัสดุชนิดต่าง ๆ [11]

วัสดุ	Modulus of Elasticity 10^6 psi	Shear Modulus 10^6 psi
Aluminium Alloy	10.5	4.0
Copper	16.0	6.0
Steel (Plain Carbon and Low Alloys)	29.0	11.0
Stainless Steel (18.8)	28.0	9.5
Titanium	17.0	6.5
Tungsten	58.0	22.8

2.7 ทฤษฎีการบิด

โมเมนต์ที่กระทำกับเพลลา ซึ่งจะพยายามบิดเพลลาหรือทำให้เพลลาหมุนเรียกว่าโมเมนต์บิด (Twisting Moment, Turing Moment หรือ Torque Moment หรือ Torque)

เมื่อเพลลาหมุนขณะส่งกำลังก็จะเกิดการบิดตัวไปด้วย ลักษณะอันหนึ่งคล้ายแผ่นโลหะกลม บางๆหลายแผ่นติดกัน ขณะที่บิดแผ่นโลหะแผ่นหนึ่งจะบิดไปเล็กน้อยเทียบกับอันถัดไป ทำให้เพลลา มีความเครียดเฉือน (Shear Strain) ซึ่งจะทำให้มีความเค้นเฉือน (Shear Stress)

2.7.1 ข้อสมมติเกี่ยวกับการบิดของเพลลา

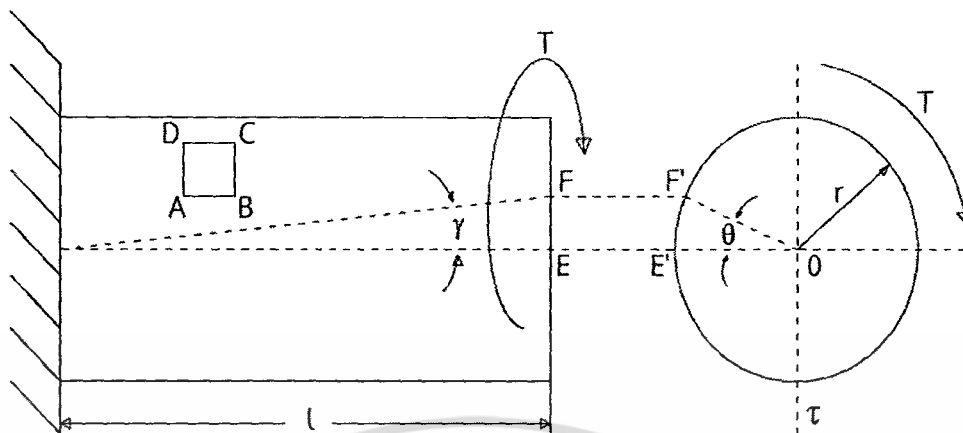
- 2.7.1.1 เพลลาจะต้องตรง และภาคตัดมีความสม่ำเสมอตลอดความยาว
- 2.7.1.2 แรงบิดคงตัวตลอดความยาวของเพลลา
- 2.7.1.3 ภาคตัดซึ่งเป็นระนาบก่อนบิดจะยังเป็นระนาบตรงระหว่างที่เกิดการบิด
- 2.7.1.4 เส้นรัศมีตรงยังคงเป็นเส้นรัศมีที่ตรงระหว่างที่เกิดการบิด
- 2.7.1.5 ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าความเค้นที่จุด Proportional Limit

2.7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนความ ความเค้นเครียดและมุมบิด

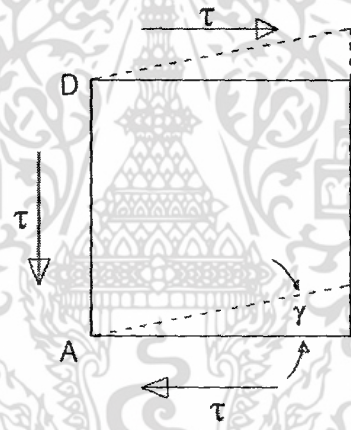
พิจารณาเพลลากลมภาคตัดรัศมี r อยู่ภายใต้แรงบิด T จะบิดไปเช่นดังรูปที่ 2.9 จุด E และ E' จะเคลื่อนที่ไปที่จุด F และ F' ตามลำดับ มุมที่บิดไป E'OF' เรียกว่า มุมบิด θ (Angle of Twist)

เมื่อพิจารณาจุดเล็ก ๆ ในเนื้อวัสดุหนึ่งขยายออกเป็นแท่งสี่เหลี่ยมจัตุรัส ABCD หนา 1 หน่วย จะมีความเค้นเฉือน (τ) เกิดขึ้นที่ผิว AD เมื่อความเค้นเฉือนเกิดขึ้น 1 ตัว จะต้องมียีก 3 ตัว ที่มีค่าเท่ากัน กระทำที่ผิวเหลือทันที จึงจะสมดุลได้ ความเค้นเฉือนแต่ละตัวเรียกว่า Complementary Shear Stress

แสดงดังรูปที่ 2.10 นั่นคือวัสดุ ABCD จะอยู่ภายใต้ความเค้นเฉือนอย่างเดียวเท่านั้นเรียกว่า อยู่ภายใต้ Pure Shear



รูปที่ 2.9 เพลากลมที่มีแรงบิดมากกระทำ [4]



รูปที่ 2.10 อีเลเมนต์ ABCD ที่เกิดการบิดตัว [4]

การคำนวณหาค่าความเค้นเฉือน จะต้องหาค่าความเครียดเฉือน (Shear Strain ; γ) เนื่องจากความเครียดเป็นการเปลี่ยนแปลงขนาด

พิจารณารูปที่ 2.9 ระยะ $EF = lr$ และระยะ $E'F' = r\theta$ มุมบิดจะมีขนาดเล็กมาก ๆ

ดังนั้น

$$EF = E'F' \tag{2.8}$$

และ

$$lr = r\theta \tag{2.9}$$

ความเครียดเฉือน (Shear Strain)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\gamma = \frac{r\theta}{l} \quad (2.10)$$

แต่ความเครียดเฉือน

$$r = \frac{\tau}{G} \quad (2.11)$$

ดังนั้น

$$\frac{\tau}{G} = \frac{r\theta}{l} \quad (2.12)$$

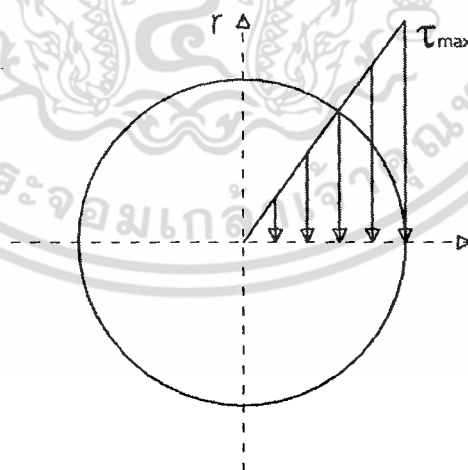
ฉะนั้น

$$\frac{\tau}{r} = \frac{G\theta}{l} \quad (2.13)$$

ถ้าแรงบิดที่ทำให้เพลาก่อเกิดมุมบิด θ คงตัวมุมหนึ่ง ค่า G และ l ก็จะเป็นค่าคงตัว

ดังนั้น $\frac{\tau}{\theta} =$ ค่าคงตัว หรือ $\tau = (\text{ค่าคงที่}) \times r$ นั่นคือความเค้นเฉือนแปรผันโดยตรงกับรัศมี

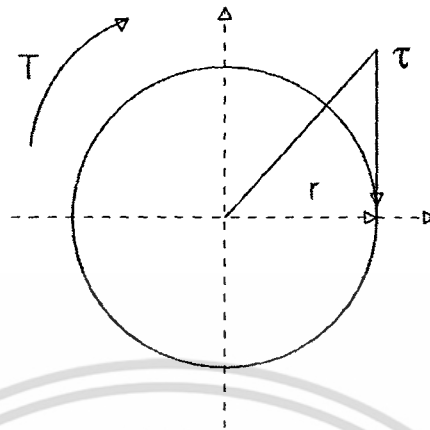
ดังนั้นถ้าเขียนกราฟระหว่าง τ และ r จะได้กราฟเส้นตรงเรียกว่า การกระจายตัวของความเค้นเฉือน (Shear Stress Distribution) ที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดเพลาดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การกระจายตัวของความเค้นเฉือนบนหน้าตัดเพลาดังรูปที่ 2.11 [4]

2.7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเค้นเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (T) และความเค้นเฉือน (τ) [4]

พิจารณาเพลลาที่มีรัศมี r อยู่ภายใต้แรงบิด (T) ส่งผลทำให้เกิดความเค้นเฉือน τ

เมื่อ

T = เพลลาอยู่ภายใต้แรงบิด

a = พื้นที่วงแหวนบนหน้าตัด

r = วงแหวนอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลาง

τ = ความเค้นเฉือนของวงแหวน

จาก (2.13)

$$\tau = \frac{G\theta}{l} r \quad (2.14)$$

แรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนวงแหวน

$$\tau a = \frac{G\theta}{l} r a \quad (2.15)$$

โมเมนต์แรงเฉือนรอบจุดศูนย์กลางบนหน้าตัดเพลลา = แรงเฉือน x รัศมีเพลลา

$$= \frac{G\theta}{l} r a r \quad (2.16)$$

$$= \frac{G\theta}{l} a r^2 \quad (2.17)$$

ถ้าบนพื้นที่หน้าตัดเพลลาประกอบด้วยวงแหวนหลายวงซ้อนกัน ผลรวมของโมเมนต์รอบแกนเพลลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{G\theta}{l} a_1 r_1^2 + \frac{G\theta}{l} a_2 r_2^2 + \frac{G\theta}{l} a_3 r_3^2 + \dots \quad (2.18)$$

$$= \frac{G\theta}{l} \sum ar^2 \quad (2.19)$$

$\sum ar^2$ เรียกว่า โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้ว (Polar Second Moment of Inertial หรือ (Polar Second Moment of Area) แทนด้วยสัญลักษณ์ J

ดังนั้นผลรวมโมเมนต์รอบแกนเพลลา

$$T = \frac{G\theta}{l} J \quad (2.20)$$

$$\frac{T}{J} = \frac{G\theta}{l} \quad (2.21)$$

ดังนั้นเมื่อรวมสมการ (2.13) กับสมการ (2.21) จะได้ว่า

$$\frac{T}{J} = \frac{\tau}{r} = \frac{G\theta}{l} \quad (2.22)$$

เมื่อ

T = แรงบิด (N.m)

J = โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้ว (m⁴)

τ = ความเค้นเฉือน (N/m²)

r = รัศมีจุดที่ต้องการหาค่าความเค้นเฉือน (m)

G = โมดูลัสของความแข็งแรง (Modulus of Rigidity, N/m²)

θ = มุมบิด (rad)

l = ความยาว (m)

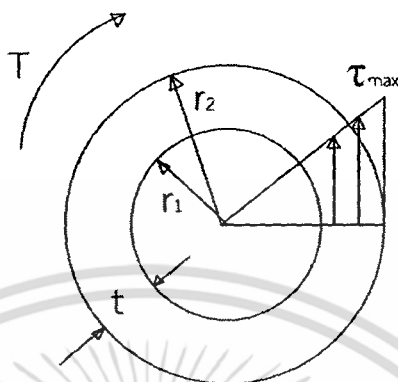
2.7.4 โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้ว

โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้ว (Polar Moment of Inertia) ของเพลลาหน้าตัดกลมตัน ที่มีรัศมี r และเส้นผ่านศูนย์กลาง d คือ

$$J = \frac{\pi}{2} r^4 = \frac{\pi}{32} d^4 \quad (2.23)$$

สำหรับเพลลากลมกลวงที่มีรัศมีภายใน r_1 และรัศมีภายนอก r_2 จะได้ ดังรูปที่ 2.13 สมการโมเมนต์ ความเฉื่อยเชิงขั้วที่ได้คือ

$$J = \frac{\pi}{2}(r_2^4 - r_1^4) = \frac{\pi}{32}(d_2^4 - d_1^4) \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.13 เพลามีหน้าตัดกลมกลวง [4]

2.7.5 ความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในเพลากลมตันและเพลากลมกลวง

เราจะเห็นว่าความเค้นเฉือนจะแปรเปลี่ยนอย่างเป็นเส้นตรงด้วยระยะห่างจากจุดศูนย์กลางเพลามา สมการความเค้นเฉือนสูงสุด

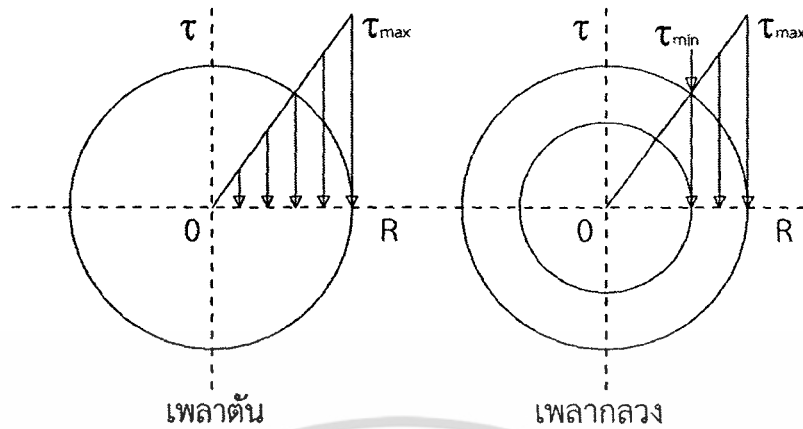
$$\tau_{\max} = \frac{Tr}{J} \quad (2.25)$$

แทนค่า r และ (2.23) ลงในสมการ (2.22) จะได้

$$\tau_{\max} = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (2.26)$$

สมการ (2.26) ใช้กับเพลากลมตันเท่านั้น เพลากลมกลวงจะมีประสิทธิภาพในการต้านทานต่อแรงบิดได้ดีกว่า เพลากลมตัน เราพบว่าความเค้นเฉือนในเพลาดันจะมีค่ามากที่สุดที่ผิวด้านนอกของเพล่า และจะมีค่าน้อย ที่สุดที่จุดกึ่งกลางเพลาดังรูปที่ 2.14 เพลากลมกลวงเนื้อวัสดุส่วนใหญ่จะอยู่ใกล้ผิวรัศมีนอกของหน้าตัด ทั้ง ความเค้นเฉือนและแขนหมุนจะมีค่ามากที่สุด ดังนั้นน้ำหนักของเพล่าสามารถจะลดลงได้ ซึ่งเป็นการ ประหยัดเนื้อวัสดุ จึงเป็นที่นิยม มีใช้กับเพล่าขนาดใหญ่ เพล่าของเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า สำหรับ ความเค้นเฉือนสูงสุดในเพล่ากลมกลวง ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก d_2 และเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน d_1 สมการความเค้นเฉือนสูงสุดจะเป็น

$$\tau_{\max} = \frac{16Td_2}{\pi(d_2^4 - d_1^4)} \quad (2.27)$$

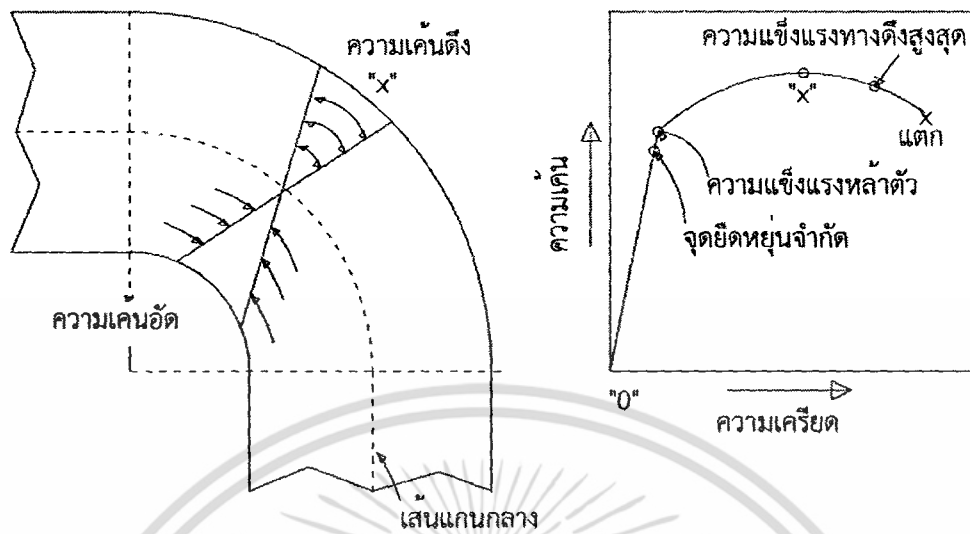


รูปที่ 2.14 แสดงแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำสุดและสูงสุด [4]

2.8 การติดตั้งสปริงกลับของวัสดุ (Springback)

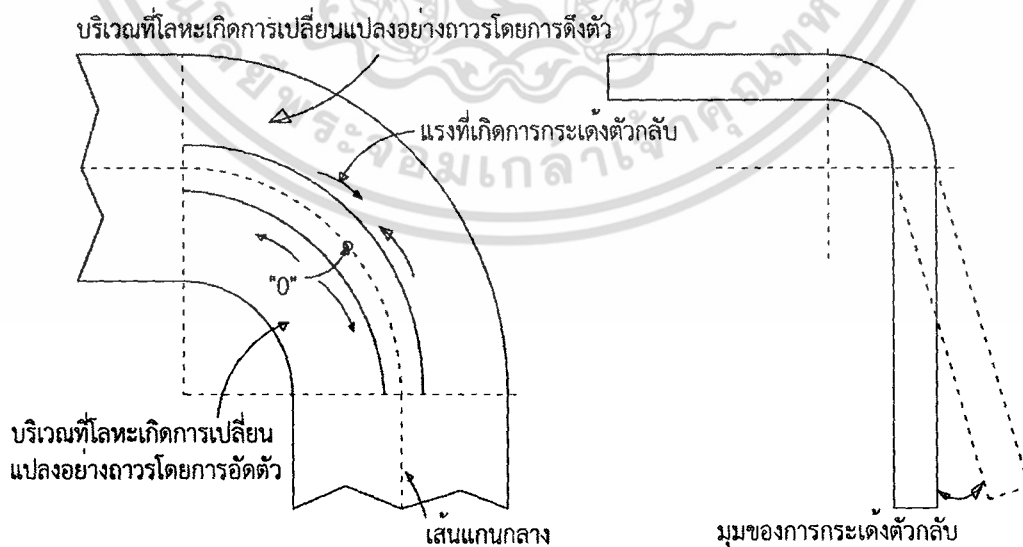
เมื่อได้ทำการงอชิ้นงานแล้วจะมีความเค้นเกิดขึ้นในบริเวณที่ทำการงอ และความเค้นที่เกิดขึ้นนี้มีความแตกต่างกันคือไม่เหมือนกันทุกจุดซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดการกระด้างตัวกลับของชิ้นงาน ความเค้นดึงจะเกิดขึ้นมากที่สุดที่ผิวหน้าด้านนอกของการงอและจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะของชิ้นงานเข้าใกล้เส้นศูนย์กลางของความหนา ซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นนี้จะกลายเป็นศูนย์ที่เส้นแกนกลาง จากรูปที่ 2.15 เป็นการแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นดึงและความเค้นอัดในบริเวณที่มีการงอจากรูปจะเห็นได้ว่าที่จุด 0 นั้น ความเค้นดึงจะมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งจุดนี้จะอยู่บนเส้นแกนกลาง และค่าความเค้นจะเพิ่มขึ้นมากเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุด x ที่ผิวด้านนอกของชิ้นงานที่จุด x นี้จะมีความเค้นดึงเกิดมากที่สุด

จากรูปที่ 2.15 เราจะเห็นได้ว่าบริเวณส่วนที่ใกล้กับเส้นแกนกลางนั้นจะมีความเค้นที่เกิดขึ้นต่ำกว่าจุดยึดหยุ่นจำกัด สำหรับโลหะส่วนนี้นั้นได้ถูกแสดงด้วยแถบเล็กๆ ที่เรียกว่าแถบยึดหยุ่น (Elastic Band) แถบเล็กๆ นี้จะอยู่ทั้งสองข้างของเส้นแกนกลาง โลหะที่อยู่ห่างไปจากแถบกลางของชิ้นงานจะมีความเค้นเกิดขึ้นมากกว่าจุดความแข็งแรงล้าตัวของชิ้นงานนั้น และที่บริเวณนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงของโลหะอย่างถาวร เมื่อได้ทำการงอชิ้นงานแล้วและขณะที่ดึงเอาพันธ่ออกไปนั้น ส่วนที่เป็นแถบยึดหยุ่นเล็กๆ ก็พยายามดึงตัวกลับเข้าอยู่ในตำแหน่งเดิม แต่ก็ไม่สามารถจะดึงตัวกลับคืนได้หมด เพราะมีความต้านทานของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงของโลหะอย่างถาวร ดังนั้นจึงมีการกระด้างกลับเพียงเล็กน้อยเท่านั้นการที่โลหะกระด้างตัวกลับนี้เรียกว่า “ Spring Back” สาเหตุที่โลหะต้องกระด้างกลับก็เพราะว่าต้องการให้อยู่ในสภาวะสมดุลนั่นเอง สำหรับส่วนที่เป็นแถบยึดหยุ่นเล็กๆ นั้นจะเป็นตัวทำให้เกิดแรงของการกระด้างกลับรอบจุด 0 ดังที่แสดงไว้ในรูป ความจริงแล้วในช่วงของการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรของโลหะ (Plastic Deformation) ก็ยังคงมีส่วนที่เป็นความยืดหยุ่นปนอยู่เล็กน้อยซึ่งส่วนนี้จะไปเพิ่มแรงในการกระด้างตัวกลับให้มากขึ้น



รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนรูปแบบของความเค้นในการหล่อโลหะ [5]

สำหรับรูปที่ 2.16 เราใช้เหล็กกล้าผสมคาร์บอนต่ำเป็นตัวอย่างในการทดลอง จากรูปเราจะเห็นได้ว่าเส้นกราฟที่เกิดขึ้นนั้นคล้ายกับเส้นกราฟแสดงการทดสอบความเค้น-ความเครียดทางดึง เมื่อเราทำการงอชิ้นงานด้วยมุมของการงอ 2 องศา จะปรากฏว่าชิ้นงานจะกระด้างตัวกลับเป็นมุม 2 องศาเช่นเดียวกัน คือมันจะเป็นแผ่นโลหะแบนๆ เช่นเดิม แต่เมื่อเราทำการงอชิ้นงานเป็นมุม 20 องศา การเกิดการกระด้างตัวกลับจะเป็นมุมมากกว่า 4 องศา ทั้งนี้เพราะว่าในพื้นที่ที่ทำการงอนั้นได้เกิดช่วงของการอยู่ตัวเกิดขึ้น



รูปที่ 2.16 แรงที่เกิดจากการกระด้างตัวกลับ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 การชดเชยการติดตัวกลับของวัสดุ (Overcoming Springback)

มีอยู่หลายวิธีด้วยกันในการป้องกันการติดตัวกลับของชิ้นงาน [5] ซึ่งมีดังต่อไปนี้

1. การดัดให้มากกว่าความต้องการ (Overbending)
2. การกดกระทะแท่งชิ้นงานตรงบริเวณที่งอให้เป็นรอย (Bottoming or Setting)
3. การยืดชิ้นงานก่อนงอ (Stretch Bending)

2.9.1 การดัดให้มากกว่าความต้องการ (Overbending)

วิธีนี้เป็นการงอโลหะให้มากเกินไปกว่าความต้องการ ซึ่งเมื่อดึงพ้นกลับคืนไปจะทำให้โลหะนั้น กระด้างตัวกลับไปเล็กน้อยและได้มุมที่ต้องการพอดี

2.9.2 การกดกระทะแท่งชิ้นงานตรงบริเวณที่งอให้เป็นรอย (Bottoming or Setting)

วิธีนี้เป็นการใช้พื้นที่กดกระทะแท่งโลหะอย่างแรงที่บริเวณรัศมีที่งอของชิ้นงาน ซึ่ง ณ ที่ตำแหน่งนี้โลหะจะได้รับความเค้นอย่างมาก ซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดการอยู่ตัวของโลหะที่บริเวณนั้น ผ่านจุดความแข็งแรงล้าตัวของโลหะนั้น วิธีการกดกระทะแท่งชิ้นงานตรงบริเวณที่งอให้เป็นรอยควร จะต้องทำรอยนูนขึ้นมาบนพื้นที่ เพื่อใช้ในการกระทะแท่งบริเวณพื้นที่ที่ถูกลง

2.9.3 การยืดชิ้นงานก่อนงอ (Stretch Bending)

วิธีนี้เป็นการยืดชิ้นงานนั้นเกิดความเค้นเลยจุดความแข็งแรงล้าตัวของชิ้นงานนั้น จากนั้นก็ ใช้แรงกดชิ้นงานนั้นลงบนพื้นที่ซึ่งได้ตั้งรับชิ้นงานไว้แล้ว วิธีการนี้จะมีการกระด้างกลับของชิ้นงาน เกิดขึ้นเล็กน้อย และเหมาะสมสำหรับใช้กับการขึ้นรูปงานต้นๆ เช่น กระโปรงครอบหน้าหม้อรถยนต์

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยและการทดลองครั้งนี้ เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมและการชดเชยการติดตัวกลับของการดัดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แล้วได้มีการทดลอง ได้ทำการศึกษาบทความเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานของการศึกษางานวิจัย รวมทั้งใช้เป็นแนวทางเพื่อศึกษาและค้นคว้าเพิ่มเติม

ในปี ค.ศ. 1997 Ampere A. Tseng [7] ได้ทำการศึกษากาหาวิธีการทำนายหาการเกิดการติดตัวกลับ ในชื่อเรื่อง Springback of Sheet Metal Forming ในบทความนี้การขึ้นรูปโลหะในอุตสาหกรรม หลังจากทำการพับหรือการทำให้งอด้วยหลักเกณฑ์ต่างๆทำให้เกิดการติดตัวกลับเกิดขึ้น ผู้ศึกษาจึงทำการหาค่าการติดตัวกลับของชิ้นงานในช่วงที่ทำการพับวัสดุ และหาวิธีการชดเชยสำหรับเครื่องจักรคือ การชดเชยของค่าการขึ้นรูปหรือรูปแบบของแม่พิมพ์เพื่อให้ได้ชิ้นงานตามต้องการ

ดังนั้น ผู้ศึกษาจึงทำการวิจัยเปรียบเทียบการทำนายหรือการวิเคราะห์การเกิดการติดตัวกลับกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เพื่อทำการทดสอบความน่าเชื่อถือของการพัฒนาสูตรการวิเคราะห์ ถ้าความน่าเชื่อถือหรือความแม่นยำเป็นจริง ก็สามารถที่จะกำหนดสูตรการวิเคราะห์ได้ และจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการช่วยในการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉะนั้นประเด็นสำคัญของการวิจัยหลักของผู้ทำการศึกษา คือ การทดลองเกี่ยวกับการติดตัวกลับของวัสดุชนิดแผ่นบางคือ

- 1) พัฒนาหลักสูตรการวิเคราะห์เพื่อทำนายการติดตัวกลับของวัสดุชนิดแผ่นบางภายใต้การดัดงอขึ้นรูป
- 2) เพื่อค้นหาค่าประกอบสำคัญ ในการยึดของวัสดุที่อยู่ภายใต้เงื่อนไข และระบบองค์ประกอบที่สัมพันธ์กับการติดตัวกลับของวัสดุ
- 3) ควบคุมการทดสอบการติดตัวกลับของวัสดุ แลวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง
- 4) ใช้การติดตัวกลับของวัสดุ เพื่อบ่งบอกองค์ประกอบในการยึดที่ทำได้มาจากข้อสอง และเอาไปใส่ในสูตรการวิเคราะห์ที่หามาได้จากข้อหนึ่ง เพื่อทำนายการติดตัวกลับของวัสดุ จากเงื่อนไขในการดัดขึ้นรูป
- 5) เปรียบเทียบข้อมูลจากการวิจัยเพื่อทำนายผลการวิเคราะห์ และหาความสัมพันธ์ระหว่างการวิจัยและข้อมูล
- 6) ประเมินข้อสรุป โดเฉพาะอย่างยิ่งความน่าเชื่อถือหรือความถูกต้องของการทำนายการวิเคราะห์

ในปี ค.ศ. 2001 H. – M. Huang S. – D. Liu^a, S. Jiang^b [8] ในบทความนี้ผู้ศึกษาทำการศึกษเกี่ยวกับการการการติดตัวกลับของวัสดุ ที่ผ่านมากระบวนการพับงอ ในชื่อเรื่อง Stress and Strain Histories of Multiple Bending Unbending Springback Process โดยการทำนายตัวเลขที่เกี่ยวกับการการการติดตัวกลับของวัสดุ เพื่อให้เกิดความแม่นยำในกระบวนการการผลิต โดยการเปรียบเทียบเกี่ยวกับการปฏิบัติ โดยคำนึงถึงความหนาของวัสดุและองศาการโค้งงอของวัสดุ ทดสอบ และคำนึงถึงสารประกอบที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุอีกทั้งความห่างของชุดแม่พิมพ์ในการวิเคราะห์ ซึ่งจากการทดลองพบว่ามุมที่เพิ่มขึ้นของการดัดจะส่งผลต่อค่าการติดตัวกลับของชิ้นงาน และหากช่องว่างระหว่างชิ้นงานและแม่พิมพ์มีค่ามากขึ้นก็จะส่งผลให้ค่าการติดตัวกลับสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน จึงเป็นแนวทางให้ทราบถึงผลที่น่าจะเกิดขึ้นของการดัดได้

ในปี ค.ศ. 2001 H. Livatyali และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการติดตัวกลับ โดยการเลือกตัดปีกแบบตรงมาใช้ในการทดลอง โดยทำการทดลองเพื่อสืบค้นตัวแปรที่มีอิทธิพล เช่น รัศมีมุมตาย รัศมีพินซ์ ช่องว่างระหว่างพินซ์กับตาย แรงแผ่นกดชิ้นงานและวัสดุ และใช้ผลการทดลองบางส่วนมาวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการศึกษาพบว่ารัศมีตาย ช่องว่างระหว่างพินซ์กับตายที่เพิ่มขึ้นทำให้การติดตัวกลับเพิ่มมากขึ้น แรงแผ่นกดที่ชิ้นงานมีค่าน้อยมีผลทำให้การติดตัวกลับเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มแรงกดมากขึ้นทำให้ช่วยลดการติดตัวกลับได้ในช่วงแรกของการเพิ่มแรงเท่านั้น หลังจากนั้นการติดตัวกลับจะมีค่าคงที่ถึงแม้ใช้แรงกดชิ้นงานขึ้นไปอีกก็ตาม การลดรัศมีตาย จาก 2 มิลลิเมตรเป็น 0.5 มิลลิเมตรหรือเท่ากับ 75% สามารถการติดตัวกลับได้ 30% อัตราส่วนช่องว่างของพินซ์และตายกับความหนาที่เพิ่มขึ้น 10% ทำการการติดตัวกลับเพิ่มขึ้น 10% เช่นกัน หลังจากที่ทำการศึกษาและสรุปผลการทดลองจบในปีเดียวกันก็ได้ศึกษาต่อในช่วงที่สอง เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการจำกัดการติดกลับ โดยการออกแบบแม่พิมพ์แบบ Coining และทำการทดลองเปรียบเทียบผลกับการทำนายของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และยังประยุกต์กระบวนการ Coining เพื่อไปปรับปรุงคุณภาพของการพับแบบ Hemming เพื่อที่จะลดการเคลื่อนตัวของโลหะระหว่างการพับ จากการศึกษาพบว่า ผลของการดัดจากโปรแกรม Deform และ Abaqus ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองแต่ต่างจากการคำนวณบ้าง ผลจากการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

แสดงให้เห็นว่าสามารถแก้ไขการติดตัวกลับได้ ในกรณีนี้โปรแกรม Abaqus ให้ผลใกล้เคียงมากกว่าโปรแกรม Deform

ในปี ค.ศ. 2002 [6] ภาสกร เกวี ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการติดตัวกลับของท่อเหล็ก ในชื่อเรื่องการวิเคราะห์การติดตัวกลับของท่อเหล็กในกระบวนการดัดขึ้นรูป โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง การศึกษาพฤติกรรมการติดตัวกลับของท่อเหล็กกระทำที่ค่ารัศมีความโค้งต่างๆกัน และใช้แบบจำลองพฤติกรรมวัสดุแบบ Power Hardening Law โดยนำทฤษฎีคานตรง ทฤษฎีคานโค้งและทฤษฎีการเสียดรูปโลหะของ Tresca มาประยุกต์ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการติดตัวกลับของท่อเหล็กภายใต้โมเมนต์ดัด จากผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีและผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองพบว่า รัศมีติดกลับมีค่ามากขึ้นเมื่อรัศมีที่ใช้ในการดัดมีค่ามากขึ้น

ในการศึกษาเกี่ยวกับการดัดขึ้นรูปที่ผ่านมา สิ่งที่น่าสนใจทั้งหลายได้ทำการทดลองไว้ส่วนมากจะเป็นการศึกษาและทำนายพฤติกรรมการติดตัวกลับของวัสดุจากเงื่อนไขและตัวแปรต่างๆ เช่น รัศมีการดัด รัศมีมุมตาย หรือรัศมีพันซ์ ช่องว่างระหว่างพันซ์กับตาย และแรงในการดัดขึ้นงานและวัสดุ จากงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้นำเสนอนั้น วัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้ในการดัดทดลองเป็นโลหะแผ่น ในส่วนของการวิจัยหากการชดเชยการติดตัวกลับของวัสดุจากการดัดขึ้นรูปนั้น เท่าที่ได้ค้นคว้ามีผู้ทำการศึกษาน้อยมาก และที่ผ่านมายังเป็นเพียงการศึกษาในส่วนของการศึกษาพฤติกรรมการติดตัวกลับเท่านั้น

บทที่ 3

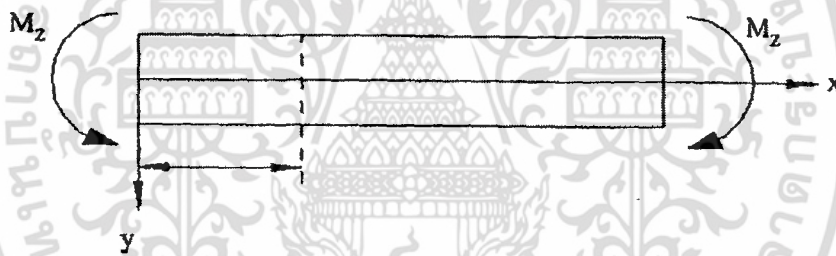
ทฤษฎีการคำนวณหาโมเมนต์ดัด

3.1 ทฤษฎีการคำนวณหาโมเมนต์ดัด

การดัดท่อเริ่มจากการดัดท่อที่นำมาเป็นท่อตรง เราจึงพิจารณาให้ท่อเป็นช่วงการดัดแบบคานตรง เมื่อเพิ่มค่าโมเมนต์ดัดขึ้นจนกระทั่งหน้าตัดของท่อมีการกระจายของความเครียด ดังรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าที่ผิวบนและล่างเกิดค่าความเครียดสูงสุดและต่ำสุด ดังนั้นช่วงนี้จะเป็นการดัดคานในช่วงอีลาสติก

3.1.1 ทฤษฎีคานตรง

การดัดท่อในครั้งแรกจะเป็นการดัดภายใต้โมเมนต์ดัดในช่วงอีลาสติก เราจะถือว่าการกระจายตัวของความเค้นตั้งฉากตลอดทั้งหน้าตัดเป็นแบบเชิงเส้น [12] แปรผันตรงกับ y จะได้สมการเชิงเส้นได้เป็น



รูปที่ 3.1 คานตรงภายใต้โมเมนต์ดัด

$$\sigma_x = \sigma_k y, \quad \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = 0 \quad (3.1a, b)$$

และ $y=0$ ที่ Neutral Surface ซึ่ง $\sigma_x = 0$ Neutral Surface ตัดกับหน้าตัดใด ๆ ของคานเรียกว่า Neutral Axis

จากรูปที่ 3.1 ที่ปลายอิสระทั้งสองข้างและผลรวมโมเมนต์ภายในเท่ากับ M_z จะได้

$$-\int_A \sigma_x dA = 0 \quad (3.2a)$$

$$-\int_A y \sigma_x dA = M_z \quad (3.2b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการ (3.1a, b) แทนในสมการ (3.2a) และ (3.2b) จะได้

$$K \int_A y dA = 0 \quad (3.3a)$$

$$-k \int_A y^2 dA = 0 \quad (3.3b)$$

Integral สมการ (3.3b) จะได้

$$K = -\frac{M_z}{I_z} \quad (3.4)$$

สามารถเขียนในรูปของสมการ σ_x ได้โดยนำสมการ (3.1a) แทนลงในสมการ (3.4) จะได้

$$\sigma = -\frac{M_z}{I_z} Y \quad (3.5)$$

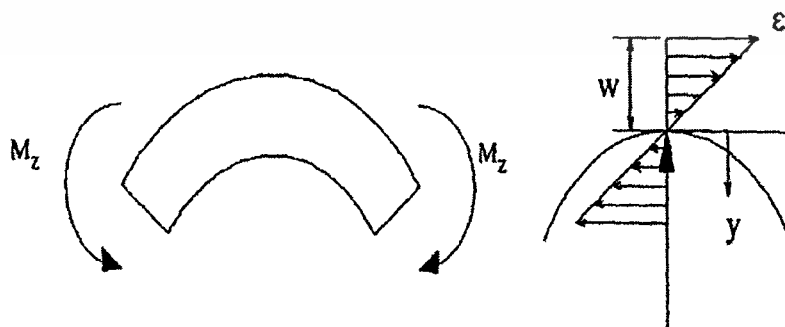
ค่า σ_x สูงสุดเกิดขึ้นตามสมการ (3.5) เมื่อ Y มีค่าสูงสุดสมมติให้เป็นค่า w จะได้

$$\sigma_{max} = -\frac{M_z}{I_z} w \quad (3.6)$$

เมื่อพิจารณาความเครียดที่เกิดจาก M_z และจาก Hooke's Law สามารถเขียนสมการ (3.5) ได้เป็น

$$\varepsilon_x = -\frac{M_z}{EI_z} y \quad (3.7)$$

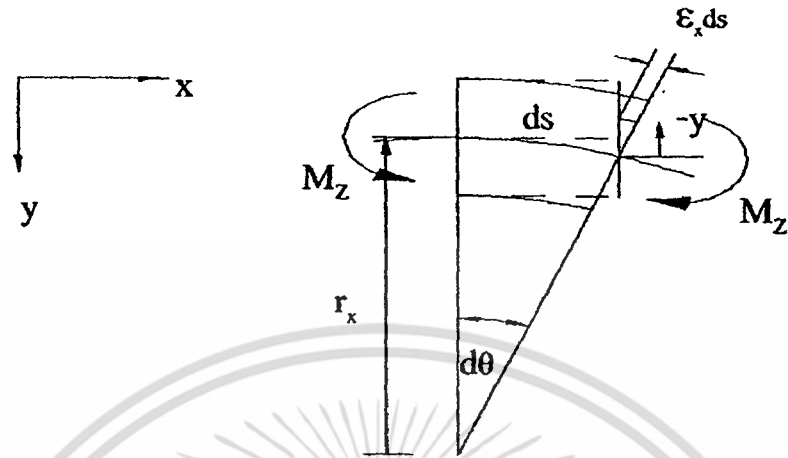
และลักษณะการกระจายตัวของความเครียดเมื่ออยู่ภายใต้โมเมนต์ดัด M_z ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะการกระจายตัวของความเครียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมเห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงส่วนเล็ก ๆ ของคานาภายใต้โมเมนต์ดัดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของคานาภายใต้โมเมนต์ดัด

จากภาพสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ความเครียดและโมเมนต์ดัดได้เป็น

$$d\theta = \frac{d\epsilon_x}{r_x} = -\epsilon_x \frac{ds}{y} \quad (3.8)$$

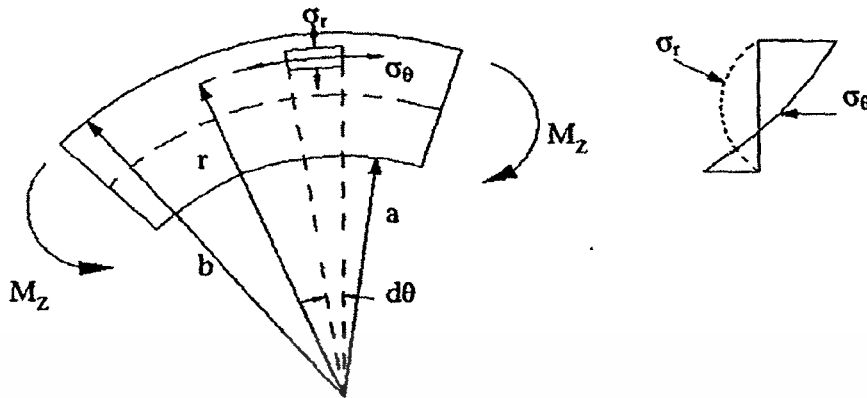
แทนสมการ (3.8) ในสมการ (3.7) จะได้

$$\frac{1}{r_w} = -\epsilon_x \frac{1}{Y} = \frac{-M_z}{EI_z} \quad (3.9)$$

3.1.2 ทฤษฎีคานโค้ง

เมื่อคานตรงถูกคัดจนกระทั่งที่ผิวบนและล่างของคานตรงเริ่มเลยจุดร้าว เราจะพิจารณาว่าคานเป็นโค้งภายใต้โมเมนต์ดัด [13] ซึ่งเมื่อโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นต่อไป ที่ผิวบนและล่างของคานจะเริ่มอยู่ในช่วงพลาสติก ซึ่งเราจะใช้ทฤษฎีช่วงพลาสติกอธิบายพฤติกรรมของคานในช่วงเป็นคานโค้งดังรูปที่ 3.4

การพิจารณาคานโค้งเราจะพิจารณาสองช่วงช่วงแรกคานโค้งอยู่ในช่วงอีลาสติกและช่วงที่สองคานโค้งจะมีส่วนพลาสติกและอีลาสติกรวมกัน ช่วงอีลาสติกเราจะได้สมการความสมดุลโดยคานสมมาตรตามมุม θ เป็น



รูปที่ 3.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงคานโค้งภายใต้โมเมนต์ดัด

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (3.10)$$

และจากสมการ Compatibility จะได้

$$\frac{d^2(\sigma_r + \sigma_\theta)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d(\sigma_r + \sigma_\theta)}{dr} = 0 \quad (3.11)$$

ซึ่งผลเฉลยสามารถเขียนได้เป็น $\sigma_r + \sigma_\theta = C_1 + 2C_2 \ln\left(\frac{b}{r}\right)$ เมื่อนำมาแก้สมการกับสมการ (3.9) จะได้

$$\sigma_r = -B_1 \left(\frac{b^2}{r^2} + 1 \right) + B_2 \ln\left(\frac{b}{r}\right) \quad (3.12)$$

$$\sigma_\theta = -B_1 \left(\frac{b^2}{r^2} + 1 \right) + B_2 \ln\left(\frac{b}{r}\right) \quad (3.13)$$

และ

$$\int_a^b r \sigma_\theta dA = -M_z \quad (3.14)$$

โดยที่

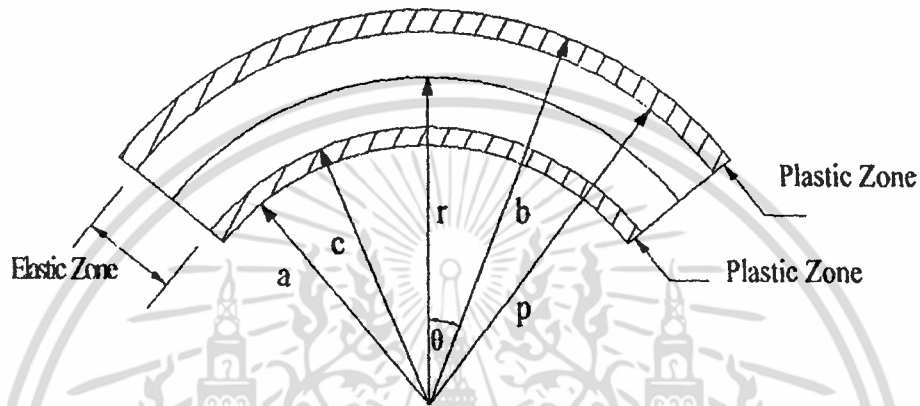
$$B_1 = \frac{4M}{Na^2} \ln\left(\frac{b}{r}\right), B_2 = \frac{4M}{Na^2} \ln\left(\frac{b^2}{r^2} - 1\right) \quad (3.14a, b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$N = \ln\left(\frac{b^2}{r^2} - 1\right) - \frac{b^2}{a^2} \left(\ln \frac{b^2}{a^2}\right)^2 \quad (3.14c)$$

สำหรับคานโค้งภายใต้โมเมนต์ตัดช่วงพลาสติกและอีลาสติกรวมกันตามรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 คานโค้งภายใต้โมเมนต์ตัด

เมื่อผิวบนและล่างของคานโค้งเริ่มเข้าสู่ช่วงพลาสติกพฤติกรรมของท่อจะเริ่มคราก ความเค้นที่เกิดขึ้นในขณะนั้นจะเป็นช่วงเริ่มต้นของพลาสติกเราจะใช้สมการความสมดุลตามสมการ (3.10) และ Tresca Yield Criterion [13] ที่ผิวบนตามรูปที่ 3.5 จะได้เป็น

$$\sigma_r - \sigma_\theta = 2k \quad p \leq r \leq b \quad (3.15)$$

นำสมการ (3.15) แทนลงในสมการ (3.10) แล้วทำการ integrate จะได้

$$\sigma_r = 2k \ln\left(\frac{b}{r}\right) \quad (3.16a)$$

$$p \leq r \leq b$$

$$\sigma_\theta = -2k \left(1 - \ln\left(\frac{b}{r}\right)\right) \quad (3.16b)$$

ที่ผิวล่างตามรูปที่ 3.5 จะได้เป็น

$$\sigma_r - \sigma_\theta = 2k \quad a \leq r \leq c \quad (3.17)$$

นำสมการ (3.17) แทนลงในสมการ (3.10) แล้วทำการ integrate จะได้

$$\sigma_r = 2k \ln\left(\frac{r}{a}\right) \quad (3.18a)$$

$$a \leq r \leq c$$

$$\sigma_\theta = 2k \left(1 + \ln\left(\frac{r}{a}\right)\right) \quad (3.18b)$$

ความเค้นช่วงที่เป็นอีลาสติก $a \leq r \leq p$ จากสมการ (3.10), (3.11) ประกอบกับความเค้นตามแนวรัศมีต่อเนื่องที่ $r = p$ จะได้

$$\sigma_r = -B_1 \left(\frac{b^2}{r^2} - 1\right) + B_2 \ln\left(\frac{b}{r}\right) + 2k \ln\left(\frac{b}{p}\right) \quad (3.19a)$$

$$c \leq r \leq p$$

$$\sigma_\theta = -B_1 \left(\frac{b^2}{r^2} + 1\right) + B_2 \left(1 - \ln\left(\frac{b}{r}\right)\right) + 2k \ln\left(\frac{b}{p}\right) \quad (3.19b)$$

ขณะที่ $r = c$ และ $r = p$ จะเป็นสภาวะจุดครากดังนั้นจะได้

$$B_1 = \frac{2k}{\frac{p^2}{c^2} - 1} \quad (3.20a)$$

$$B_2 = 2k \frac{\frac{p^2}{c^2} + 1}{\frac{p^2}{c^2} - 1} \quad (3.20b)$$

และความเค้นตามแนวรัศมีต่อเนื่องที่ $r = c$ จะได้ความสัมพันธ์

$$p^2 = \left(1 - \ln\left(\frac{ab}{c^2}\right)\right) = c^2 \left(1 + \ln\left(\frac{p^2}{ab}\right)\right) \quad (3.21)$$

3.1.3 การวิเคราะห์โมเมนต์ดัดของคาน

เมื่อท่ออยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดจากภายนอก ภายในเนื้อวัสดุจะต้องเกิดโมเมนต์ต้านขึ้นเท่ากับโมเมนต์ดัดจากภายนอก [14] เมื่อปลดโมเมนต์ภายนอกออกโมเมนต์ต้านภายในเนื้อวัสดุยอมสูญหาย จะทำให้เกิดความเค้นตึงในเนื้อวัสดุซึ่งเราจะได้การเปลี่ยนแปลงความเค้นได้เป็น

$$\Delta\sigma_x = E\Delta\varepsilon_x \quad (3.22)$$

และการเปลี่ยนแปลงความเครียดได้เป็น

$$\Delta\varepsilon_x = \frac{r}{R} - \frac{r}{R'} = r\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'}\right) \quad (3.23)$$

ดังนั้นเราจะได้การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์มีค่าเท่ากับ

$$M = \int_{-r_o}^{r_o} r\Delta\sigma_x dA \quad (3.24)$$

$$M = \int_{-r_o}^{r_o} E\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'}\right)r^2 dA \quad (3.25)$$

$$M = IE\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'}\right) \quad (3.26)$$

เมื่อ

- M = โมเมนต์ดัด
- I = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดท่อ
- E = โมดูลัสของอีลาสติก
- R' = รัศมีดัดกลับ
- R = รัศมีดัดที่ใช้ในการดัด

บทที่ 4

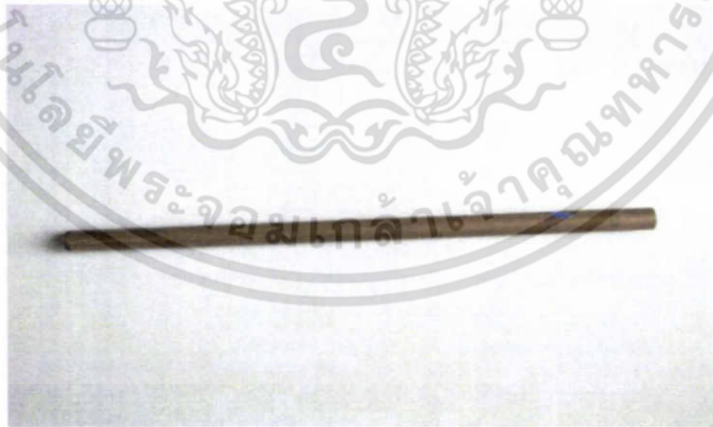
การทดลอง

การศึกษาพฤติกรรมและการชดเชยการติดตัวกลับของการตัดท่อในครั้งนี้ นอกเหนือจากการคำนวณทางทฤษฎีแล้วได้มีการทดลองเปรียบเทียบด้วย เพื่อการเปรียบเทียบของผลของค่าองศาชดเชยการติดตัวกลับของท่อจากการตัดขึ้นรูปที่ได้จากทั้งสองวิธี ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาตั้งแต่วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลอง อุปกรณ์เครื่องมือ เครื่องจักร วิธีและขั้นตอนการทดลอง ซึ่งแบ่งเป็นหัวข้อหลักๆดังนี้

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง
2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
3. แผนการทดลองและตัวแปรในการทดลอง
4. ขั้นตอนและวิธีในการทดลอง

4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

การเลือกวัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้ จะเลือกวัสดุที่มีความแตกต่างทางด้านความแข็งของวัสดุ โดยการเลือกวัสดุที่มีค่าคาร์บอนแตกต่างกัน เพราะค่าคาร์บอนจะบ่งบอกถึงความแข็งของวัสดุ ในการทดลองครั้งนี้เลือกใช้วัสดุ 2 ชนิด คือ ท่อทองแดง และท่อสแตนเลส ดังแสดงตามรูป 4.1 และ 4.2 ซึ่งสมบัติต่างๆของวัสดุที่เลือกใช้มีดังนี้

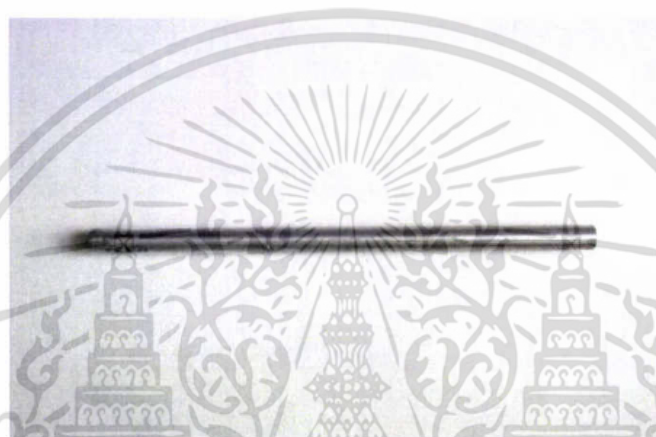


รูปที่ 4.1 แสดงท่อทองแดง B88

4.1.1 ท่อทองแดงเกรด B88

ทองแดงที่ใช้ในการทดลองเป็นท่อทองแดงไร้ตะเข็บ (Seamless Copper Water Tube; ASTM B88) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.52 มิลลิเมตร หนา 0.9 มิลลิเมตร ซึ่งได้มีการนำท่อทองแดง ไปหาส่วนผสมทางเคมีทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Portable Spectrometer รุ่นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Arcmet-8000 ตามที่แสดงในรูปที่ 4.3 และวิเคราะห์ได้ส่วนประกอบทางเคมีโดยน้ำหนักแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ส่วนค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ได้นำไปทดสอบโดยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) รุ่น Shimadzu Model AG-100KNI M2 ใช้แรงดึง 9.90 กิโลนิวตัน ความเร็วที่ใช้ในการดึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที ความยาวเกจ 50 มิลลิเมตร และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบคือ 24.4 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และผลการทดสอบได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดตามที่แสดงในรูปที่ 4.5 จากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ได้ค่าความเค้นที่จุดคราก (Yield Strength) เท่ากับ 172.25 MPa



รูปที่ 4.2 แสดงท่อสแตนเลส 904L

4.1.2 ท่อสแตนเลสเกรด 904L

ท่อสแตนเลสที่ใช้ในการทดลองเป็นท่อสแตนเลสไร้ตะเข็บ เกรด 904L (Seamless Stainless Steels Grade 904L; ASTM B677) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.52 มิลลิเมตร หนา 0.9 มิลลิเมตร ซึ่งได้มีการนำท่อสแตนเลส ไปหาส่วนผสมทางเคมี โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยนิปอน จำกัด ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Portable Spectrometer รุ่น Arcmet-8000 ตามที่แสดงในรูปที่ 4.3 และวิเคราะห์ได้ส่วนประกอบทางเคมีโดยน้ำหนักแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ส่วนค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ได้นำไปทดสอบโดยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) รุ่น Shimadzu Model AG-100KNI M2 ใช้แรงดึง 26.93 กิโลนิวตัน ความเร็วที่ใช้ในการดึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที ความยาวเกจ 50 มิลลิเมตร และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบคือ 24.4 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และผลการทดสอบได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดตามที่แสดงในรูปที่ 4.4 จากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ได้ค่าความเค้นที่จุดคราก (Yield Strength) เท่ากับ 299.85 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงเครื่อง Portable Spectrometer รุ่น Arcmet-8000

ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ 904L ที่ได้จากการทดสอบ (% โดยน้ำหนัก)

ส่วนผสม	C	P	Mo	Mn	S	Ni	Si	Cr	Cu
%	0.020	0.045	4.5	2.00	0.035	26.4	1.00	21.22	1.55

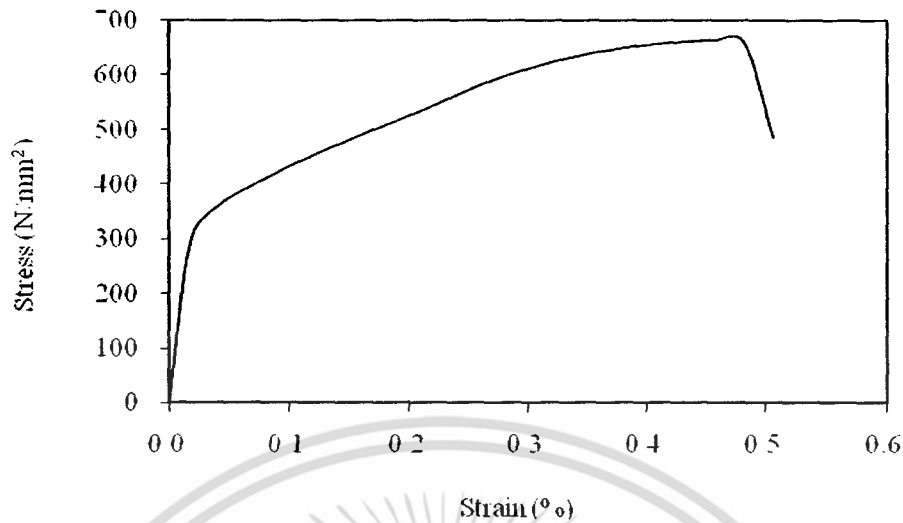
ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ B88 ที่ได้จากการทดสอบ (% โดยน้ำหนัก)

ส่วนผสม	C	P	Mo	Mn	S	Ni	Si	Cr	Cu
%	-	0.040	-	-	-	-	-	-	99.96

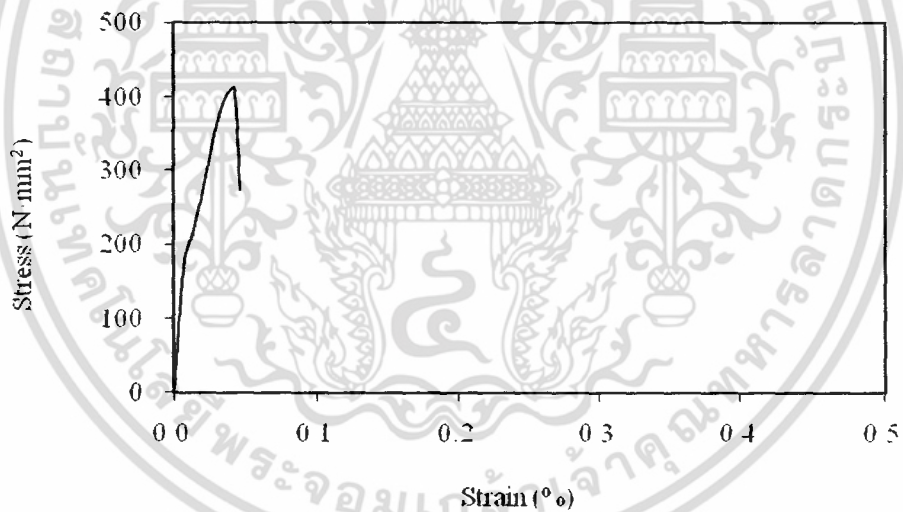
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ 904L และ B88 ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

Material	Hardness Rockwell B (HRB)	Yield Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Poisson Ratio (ν)
904L	82.8	299.85	193.05	0.28
B88	49.2	172.25	110.32	0.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ 904L



รูปที่ 4.5 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ B88

4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการตัดท่อขึ้นรูป ท่อจะถูกดันให้หมุนไปตามรัศมีแม่พิมพ์ (Die) ด้วยแรงดันของแม่พิมพ์ (Punch) ตามองศาที่ต้องการตัด ทำให้ท่อมีรัศมีตัดโค้งตามแม่พิมพ์ที่ใช้ ซึ่งในการตัดท่อต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์หลายชนิด นอกเหนือจากแม่พิมพ์แล้วยังต้องมีเครื่องจักรสำหรับสร้างแรงขับเคลื่อนให้กับแม่พิมพ์ ในงานวิจัยนี้มีการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ดังนี้

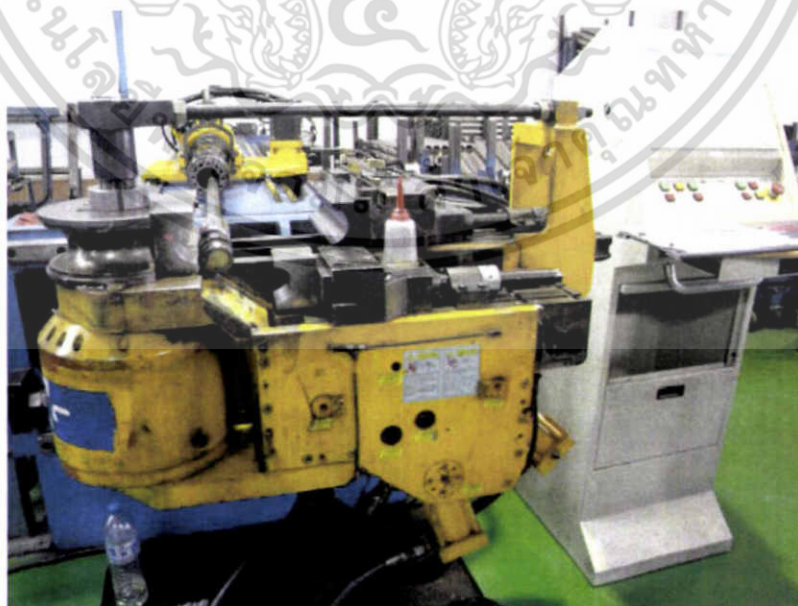
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 เครื่องตัดท่อ

ในการศึกษาพฤติกรรมและการชดเชยการติดตัวกลับของการตัดท่อในครั้งนี้ ได้ใช้เครื่องตัดซีเอ็นซี (CNC Bender) รุ่น 65TSRE ใช้ร่วมกับคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการป้อนค่าต่างๆลงในโปรแกรม แสดงไว้ตามรูปที่ 4.6 และ 4.7 ซึ่งเครื่องซีเอ็นซีนี้อาจตัดท่อได้หลายขนาด ความสามารถในการตัดอยู่ที่ 180 องศา และสามารถปรับเปลี่ยนความเร็วในการตัดได้ด้วย ซึ่งความเร็วในการตัดสูงสุดอยู่ที่ 99 องศาต่อวินาที และสามารถควบคุมการทำงานต่างๆ รวมถึงการประมวลผล และบันทึกผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์ โดยเครื่องทดสอบนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ซีพีพลาย ไอคอน จำกัด



รูปที่ 4.6 แสดงเครื่องตัดซีเอ็นซี รุ่น CNC 65TSRE

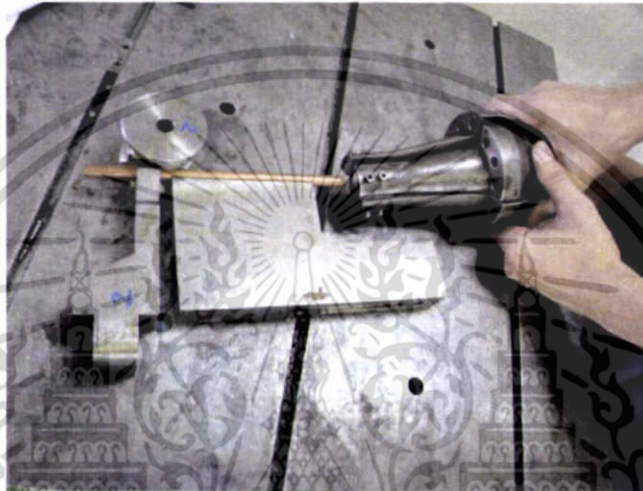


รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะการใช้เครื่องตัดซีเอ็นซี รุ่น CNC 65TSRE กับคอมพิวเตอร์

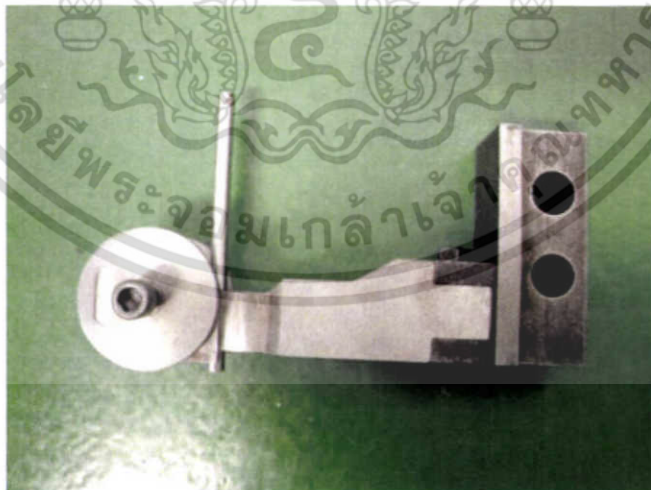
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ชุดแม่พิมพ์

ชุดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองทำขึ้นจากเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้สำหรับทำแม่พิมพ์ในงานขึ้นรูปเย็น ซึ่งภายหลังจากผ่านกระบวนการการตัดกลึงเพื่อให้ได้รูปทรงตามแบบแล้วนำไปผ่านกระบวนการชุบแข็งเพื่อให้วัสดุมีความแข็งแรงและทนต่อการสึกหรอได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งแม่พิมพ์จะถูกติดตั้งตามขนาดของท่อที่ต้องการตัด ลักษณะของชุดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 4.8, 4.9, 4.10 และ 4.11 ชุดแม่พิมพ์ (Die) ที่ใช้ในการทดลองมีรัศมี 3 ขนาด คือ 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร โดยหลักการเลือกนั้นอ้างอิงมาจากการใช้งานจริง



รูปที่ 4.8 แสดงส่วนประกอบของชุดแม่พิมพ์



รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะด้านบนของชุดแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะด้านหน้าของชุดแม่พิมพ์



รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะด้านหลังของชุดแม่พิมพ์

4.2.3 เครื่องวัดองศา

ในการศึกษาพฤติกรรมและการขดเคี้ยวการติดตัวกลับของการดัดท่อในครั้งนี้ ได้ใช้เครื่องวัดองศาโปรแทคเตอร์ รุ่น Angle Meter Protector-350 เพื่อหาองศาจริงหลังจากการดัดแสดงไว้ตามรูปที่ 4.12 ในการวัดจะนำชิ้นงานวางบนอุปกรณ์จับชิ้นงาน ทำการปรับตั้งเครื่องในแนวระนาบของซันทดสอบที่ 0 องศา และวัดที่แนวเอียงของซันทดสอบ แล้วอ่านค่าที่แสดงผลในจอบนตัวเครื่อง โดยเครื่องทดสอบนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ซีพีพลาย ไคคอน จำกัด



รูปที่ 4.12 แสดงเครื่องวัดองศาโปรแทคเตอร์ (Angle Meter Protector-350)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 เครื่องวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและวัดความหนา

ในการศึกษาพฤติกรรมและการชดเชยการติดตัวกลับของการตัดท่อในครั้งนี้ ได้ใช้เวอร์เนียแบบดิจิตอล เพื่อวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และวัดความหนาของท่อ ณ จุดตัดหลังจากการตัดแสดงไว้ตามรูปที่ 4.13 ในการวัดจะนำชิ้นงานวางบนอุปกรณ์จับชิ้นงาน ทำการปรับตั้งเครื่องที่ 0 มิลลิเมตร แล้ววัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และวัดความหนาของชิ้นทดสอบ แล้วอ่านค่าที่แสดงผลในจอบนตัวเครื่อง โดยเครื่องทดสอบนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ซีพีพลาย ไอคอน จำกัด



รูปที่ 4.13 แสดงเวอร์เนียแบบดิจิตอล

4.2.5 อุปกรณ์ตัดท่อ

ในการทดลองนี้ ได้ใช้อุปกรณ์ตัดท่อ (Tube Cutter) ของ Swagelok ซึ่งอุปกรณ์ตัดท่อชนิดนี้ใช้ตัดท่อในอุณหภูมิห้องปกติเพื่อให้คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการทดลองไม่เปลี่ยนแปลงแสดงไว้ตามรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงอุปกรณ์ตัดท่อ (Tube Cutter) ของ Swagelok

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 แผนการทดลอง

ในกระบวนการตัดท่อที่ใช้ในการศึกษาและทดลองนี้ ได้เลือกตัวแปรในกระบวนการตัดท่อ มาทั้งหมด 3 ตัวแปรคือ

1. ชนิดของวัสดุ
2. องศาการตัด
3. รัศมีตัดของแม่พิมพ์ (Die)

ซึ่งตัวแปรที่ทำการเลือกมาข้างต้นนั้น จะทำการเปลี่ยนแปลงให้สถานะที่ใช้ในการทดลองมีสถานะที่แตกต่างกันเพื่อจะสามารถทำการการศึกษาได้ชัดเจนว่า ตัวแปรดังกล่าวที่เลือกมานั้นเมื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎีแล้วได้ผลแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งได้สรุปเป็นตารางแผนการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 แสดงแผนการทดลอง

ชนิดของวัสดุ	องศาการตัด (องศา)	รัศมีตัดของแม่พิมพ์ (Die) (มิลลิเมตร)
904L	15	20
B88	30	25
	45	30
	60	
	75	
	90	

จากตารางแผนการทดลองที่ 4.4 วัสดุที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด คือ B88 และ 904L ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.52 มิลลิเมตร หนา 0.9 มิลลิเมตร โดยทำการตัดที่รัศมีตัดต่างๆกัน 3 รัศมีตัดคือ 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร โดยแต่ละรัศมีตัดและความเร็วตัดทำการตัดเป็นมุมต่างๆกันที่ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา และในการทดลองแต่ละครั้งมีการทดลองซ้ำ 3 ครั้งเพื่อให้ค่าที่ได้มีความแน่นอน สรุปจำนวนครั้งที่ใช้ในการทดลองหาค่าการติดตัวกลับของวัสดุ ที่คิดจำนวนแบบไม่มีการทำซ้ำ 36 ครั้ง

ภายหลังจากการตัดท่อตามแผนการทดลองแล้ว ค่าการติดตัวกลับของวัสดุที่ได้จากการตัดนำมาทดลองหาค่าชดเชยการติดตัวกลับของวัสดุ โดยการเพิ่มองศาการตัดจากค่าการติดตัวกลับของวัสดุ จนกระทั่งองศาของวัสดุหลังจากการตัดมีค่าเท่าที่ต้องการ หลังจากนั้นทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งเพื่อให้ค่าที่ได้มีความแน่นอน สรุปจำนวนครั้งที่ใช้ในการทดลองหาค่าชดเชยการติดตัวกลับของวัสดุ ที่คิดจำนวนแบบไม่มีการทำซ้ำมากกว่า 36 ครั้ง

4.4 ขั้นตอนการทดลอง

เพื่อให้การทดลองเป็นไปตามขั้นตอนและได้ข้อมูลที่ถูกต้องมากขึ้น ในการทดลองแต่ละครั้ง จึงมีการเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองให้มีขนาดเท่ากัน รวมไปถึงสภาวะหรือวิธีที่ใช้ในการทดสอบและวัดค่าแต่ละครั้ง ก็ต้องอยู่ในสภาวะและวิธีเดียวกันด้วย ซึ่งรายละเอียดของขั้นตอนของการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

4.4.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

ท่อเกรด 904L และ B88 ที่จำหน่ายในร้านวัสดุโดยปกติจะมีความยาว 6 เมตร นำมาตัดให้มีความยาว 25 มิลลิเมตร ภายหลังจากการตัดให้เป็นท่อนสั้นแล้วทำการลบคมด้วยกระดาษทราย เพื่อนำไปทำการทดลองต่อไป

4.4.2 ขั้นตอนการตัดท่อ

1. ประกอบชุดแม่พิมพ์ขนาดรัศมีที่ต้องการเข้ากับเครื่องตัดท่อซีเอ็นซี รุ่น 65TSRE แล้วยึดให้แน่น
2. ทำการป้อนค่าต่างๆที่ต้องการตัดลงในโปรแกรมของเครื่องตัดท่อซีเอ็นซี
3. นำชิ้นงานที่ต้องการตัดเข้าตัวจับชิ้นงานของชุดแม่พิมพ์ แล้วล็อกชิ้นงานให้แน่น
4. เปิดสวิทช์เครื่องตัด หลังจากนั้นควบคุมเครื่องทดสอบด้วยคอมพิวเตอร์ โดยการป้อนข้อมูลต่างๆ คือ ความเร็วในการตัด และองศาที่ต้องการตัด ที่จอควบคุมและแสดงผลด้านบน
5. กดปุ่ม Start เพื่อให้เครื่องตัดท่อทำงาน และกดปุ่ม Stop เพื่อให้เครื่องหยุดทำงานหรือทำงานเสร็จแล้ว และนำชิ้นงานที่ทำการตัดเสร็จแล้วออก
6. ทำการเปลี่ยนองศาที่ใช้ในการตัดตามที่กำหนดไว้ และชนิดวัสดุที่ต้องการตัด และทำซ้ำในข้อ 1 ถึง 5
7. ทำการเปลี่ยนแม่พิมพ์ (Die) เพื่อเปลี่ยนขนาดรัศมีในการตัด และทำซ้ำในข้อ 1 ถึง 6

4.4.3 ขั้นตอนการหาองศาการติดตัวกลับ

เมื่อได้ชิ้นงานทดสอบที่ทำการตัดเสร็จแล้ว นำไปวัดหาค่าองศาจริงที่ได้จากการทดสอบ ในการวัดจะนำชิ้นงานวางบนอุปกรณ์จับชิ้นงาน ทำการปรับตั้งเครื่องวัดองศาโปรแทคเตอร์ในแนวระนาบของชิ้นทดสอบที่ 0 องศา และวัดที่แนวเอียงของชิ้นทดสอบ แล้วอ่านค่าที่แสดงผลในจอบนตัวเครื่อง และบันทึกผล

นำชิ้นงานที่ได้หลังจากการตัดไปตัดครั้งที่จุดศูนย์กลางบริเวณที่ทำการตัด เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างภาคหน้าตัดของท่อและความหนา แล้ววัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และวัดความหนาของท่อ แล้วบันทึกผล

4.4.4 ขั้นตอนการหาองศาขาดเขยการติดตัวกลับ

จากการทดลองข้างต้นสามารถนำมาทดลองหาค่าองศาการเกิดการติดตัวกลับของท่อได้ โดยการเพิ่มองศาการตัดจากค่าการติดตัวกลับของท่อ จนกระทั่งองศาของท่อภายหลังจากการตัดมีค่าเท่าที่ต้องการ หลังจากนั้นทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และนำค่าที่ได้มาทำการหาค่าเฉลี่ย

บทที่ 5

ผลการทดลอง

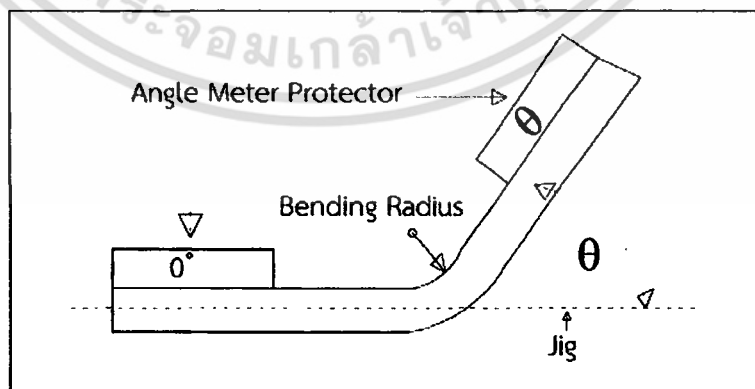
ในการดำเนินงานวิจัยการศึกษาพฤติกรรมและการชดเชยการติดตัวกลับของท่อโดยใช้เครื่องตัดท่อซีเอ็นซีในการตัดท่อขึ้นรูปครั้งนี้ ได้ทำการพิจารณาตามตัวแปรในกระบวนการการตัดท่อขึ้นรูปจำนวน 4 ตัวแปรคือ ชนิดของวัสดุ รัศมีตัด องศาการตัด และค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี และในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ แบ่งการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ทำการทดลองเพื่อการศึกษาพฤติกรรมการติดตัวกลับของท่อ และการศึกษาการชดเชยการติดตัวกลับของท่อ ซึ่งทั้งสองส่วนนี้ได้มีการบันทึกผลการทดลองที่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 ผลการทดลองการติดตัวกลับของท่อ

ผลการทดลองในการดำเนินงานวิจัยการศึกษาพฤติกรรมการติดตัวกลับของท่อในครั้งนี้ได้ทำการบันทึกผล 4 ค่าคือ องศาการติดตัวกลับของท่อภายหลังการตัด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อภายหลังการตัด ขนาดความหนาของท่อภายหลังการตัด และค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1.1 องศาการติดตัวกลับของท่อภายหลังการตัด

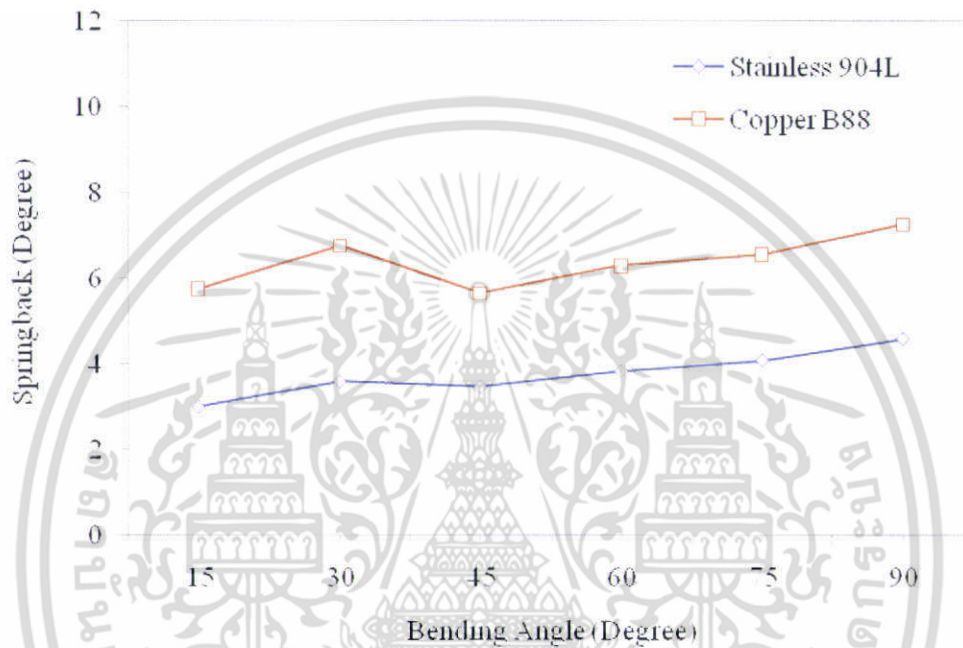
ภายหลังทำการตัดขึ้นรูปชิ้นงานแล้วจะมีความเค้นเกิดขึ้นในบริเวณที่ทำการตัด และความเค้นที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าแตกต่างกันคือไม่เหมือนกันทุกจุดซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดการกระด้างตัวกลับของชิ้นงาน โดยความเค้นเกิดขึ้นในบริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านในสุดของท่อเกิดจากแรงกระทำความเค้นอัด และความเค้นเกิดขึ้นในบริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านนอกสุดของท่อเกิดจากแรงกระทำความเค้นดึง ซึ่งรัศมีที่ใช้ในการตัด และองศาในการตัดทำให้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ทำการตัดแตกต่างกัน เป็นผลทำให้ค่าองศาการติดตัวกลับของชิ้นงานในการทดลองไม่เท่ากัน



รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะการวัดค่าองศาภายหลังการตัดท่อ

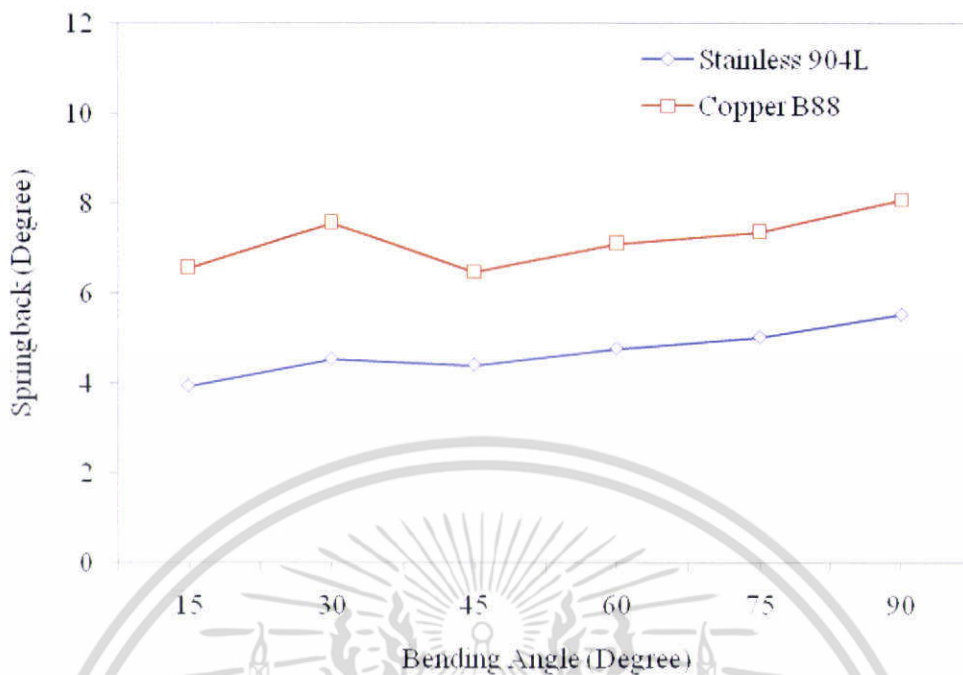
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองการดัดท่อขึ้นรูปนี้ มีการเลือกใช้วัสดุที่มีส่วนผสมคาร์บอน (C) และไม่มีส่วนผสมคาร์บอนเลย ได้แก่ ท่อสแตนเลสเกรด 904L และท่อทองแดง B88 ซึ่งของธาตุแต่ละชนิดเมื่อผสมลงไปในโลหะแสดงในภาคผนวก จ. สำหรับขนาดของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการดัดมีทั้งหมด 3 ขนาด คือ 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร และในการดัดท่อขึ้นรูปที่ขนาดของแม่พิมพ์แต่ละค่านั้นทำการดัดท่อที่องศาตามมุด 6 ค่า คือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา ซึ่งแสดงผลการทดลองที่ได้ดังนี้

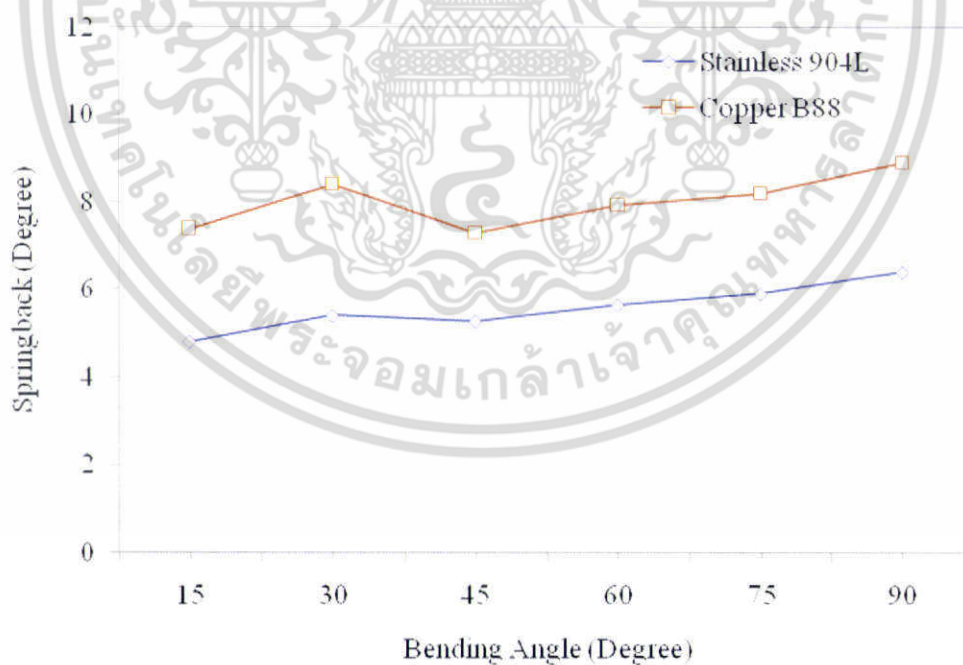


รูปที่ 5.2 องศาการดัดตัวกลับภายหลังการดัดท่อที่รัศมีดัด 20 มิลลิเมตร ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88

จากรูปที่ 5.2, 5.3 และ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาที่ใช้ในการดัดและค่าการดัดตัวกลับภายหลังการดัดท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่รัศมีดัด 20 มิลลิเมตร จากผลการทดลองที่องศาในการดัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา พบว่าท่อสแตนเลส 904L มีค่าการดัดตัวกลับน้อยกว่าท่อทองแดง B88 เนื่องจากท่อทองแดง B88 มีค่าความแข็งน้อยกว่า ทำให้โมเมนต์ดัดที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปน้อยกว่า หรือความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผิวบนและล่างของชิ้นงานน้อยกว่า ทำให้ท่อทองแดง B88 มีช่วงอีลาสติกในชิ้นงานมากกว่า การดัดตัวกลับจึงมากกว่าท่อสแตนเลส 904L เมื่อเทียบในองศาตัด และรัศมีดัดเดียวกัน

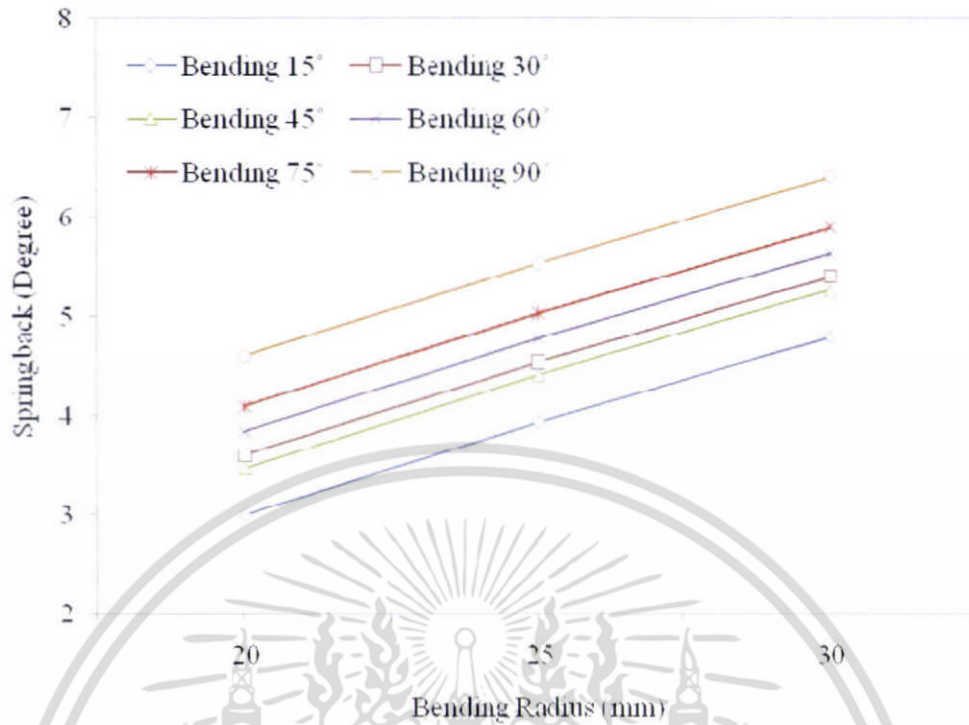


รูปที่ 5.3 องศาการดัดตัวกลับภายหลังการดัดท่อที่รัศมีดัด 25 มิลลิเมตร
ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88



รูปที่ 5.4 องศาการดัดตัวกลับภายหลังการดัดท่อที่รัศมีดัด 30 มิลลิเมตร
ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88

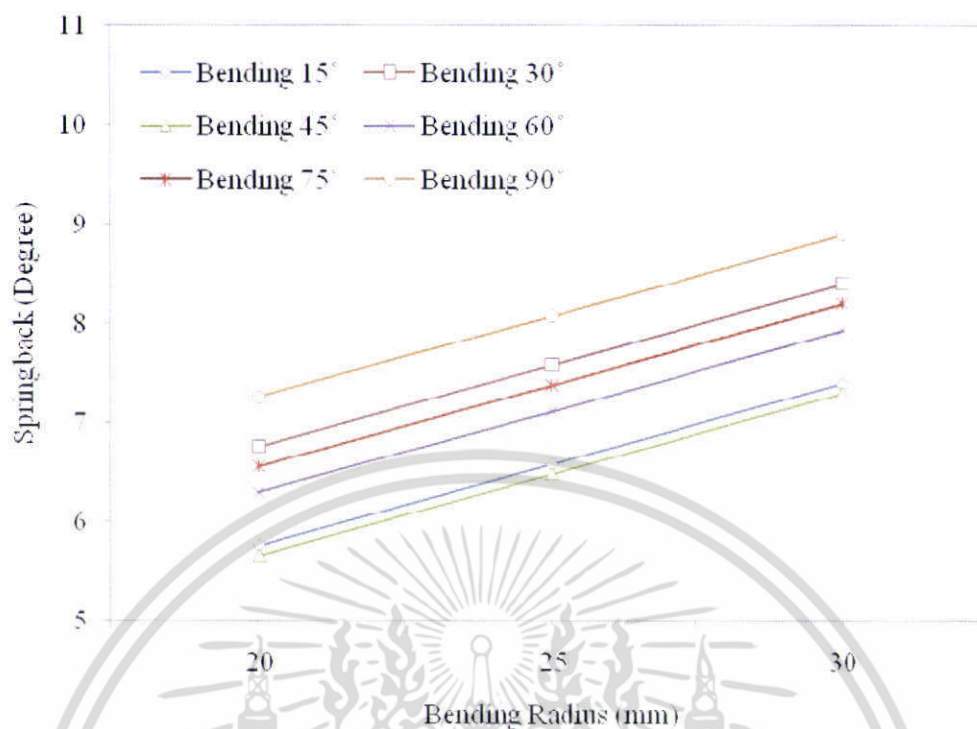
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 องศาการดัดตัวกลับภายหลังการดัดท่อสแตนเลส 904L ที่รัศมีดัดต่างๆ

จากรูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีที่ใช้ในการดัดและค่าการดัดตัวกลับภายหลังการดัดท่อสแตนเลส 904L จากผลการทดลองที่องค์การดัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา พบว่าเมื่อองศาตัดมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการดัดตัวกลับของท่อมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากรวมที่ใช้ในการดัดมีค่าเพิ่มขึ้น โมเมนต์ดัดที่ใช้ในการดัดมีค่าลดลง ความเค้นของชิ้นงานที่เกิดขึ้นที่ผิวบนและผิวล่างจะแผ่กระจายไปยังเส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงานได้น้อยลง กล่าวคือ ชิ้นงานจะมีช่วงอีลาสติกมากกว่าช่วงพลาสติกผสมกัน ในบริเวณที่ทำการดัดขององศาตัดที่เพิ่มขึ้น รัศมีดัด 20 มิลลิเมตร ค่าการดัดตัวกลับของท่ออยู่ที่ 3.00, 3.60, 3.47, 3.84, 4.10 และ 4.60 องศา ตามลำดับที่รัศมีดัด 25 มิลลิเมตร ค่าการดัดตัวกลับของท่ออยู่ที่ 3.94, 4.54, 4.41, 4.78, 5.04 และ 5.54 องศา ตามลำดับที่รัศมีดัด 30 มิลลิเมตร ค่าการดัดตัวกลับของท่ออยู่ที่ 4.80, 5.40, 5.27, 5.64, 5.90 และ 6.40 องศา ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



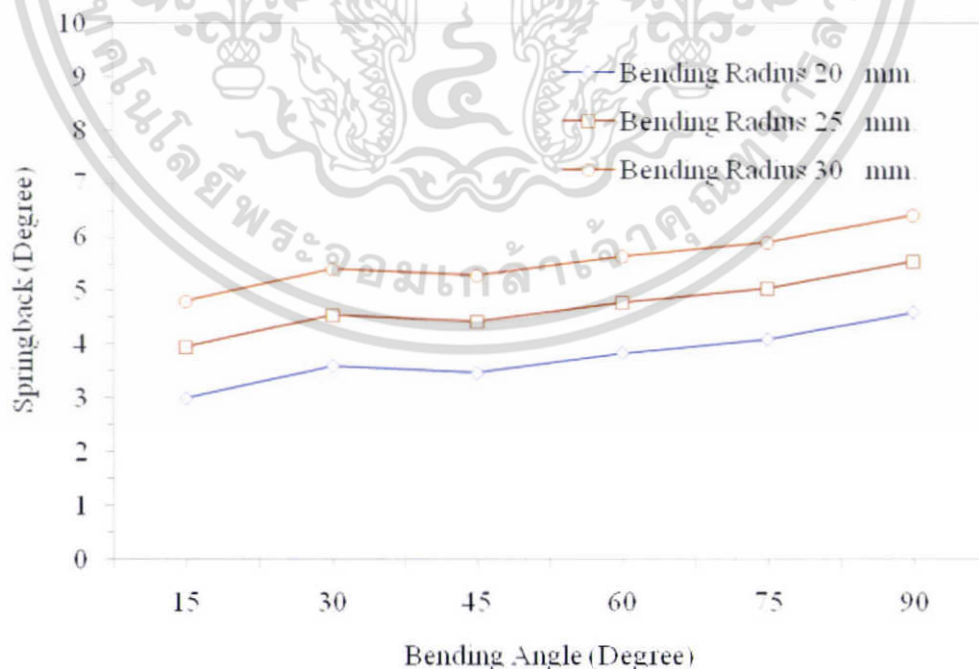
รูปที่ 5.6 องศาการดัดตัวกลับภายหลังการดัดท่อทองแดง B88 ที่รัศมีดัดต่างๆ

จากรูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีที่ใช้ในการดัดและค่าการดัดตัวกลับภายหลังการดัดท่อทองแดง B88 จากผลการทดลองที่องค์การดัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศาพบว่า เมื่อองค์การดัดมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการดัดตัวกลับของท่อมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากรวมที่ใช้ในการดัดมีค่าเพิ่มขึ้น โมเมนต์ดัดที่ใช้ในการดัดมีค่าลดลง ความเค้นของชิ้นงานที่เกิดขึ้นที่ผิวบนและผิวล่างจะแผ่กระจายไปยังเส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงานได้น้อยลง กล่าวคือ ชิ้นงานจะมีช่วงอีลาสติกมากกว่าช่วงพลาสติกผสมกัน ในบริเวณที่ทำการดัดขององค์การดัดที่เพิ่มขึ้น ที่รัศมีดัด 20 มิลลิเมตร ค่าการดัดตัวกลับของท่ออยู่ที่ 5.76, 6.76, 5.66, 6.30, 6.56 และ 7.26 องศา ตามลำดับที่รัศมีดัด 25 มิลลิเมตร ค่าการดัดตัวกลับของท่ออยู่ที่ 6.58, 7.58, 6.48, 7.12, 7.38 และ 8.08 องศา ตามลำดับ ที่รัศมีดัด 30 มิลลิเมตร ค่าการดัดตัวกลับของท่ออยู่ที่ 7.40, 8.40, 7.30, 7.94, 8.20 และ 8.90 องศา ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

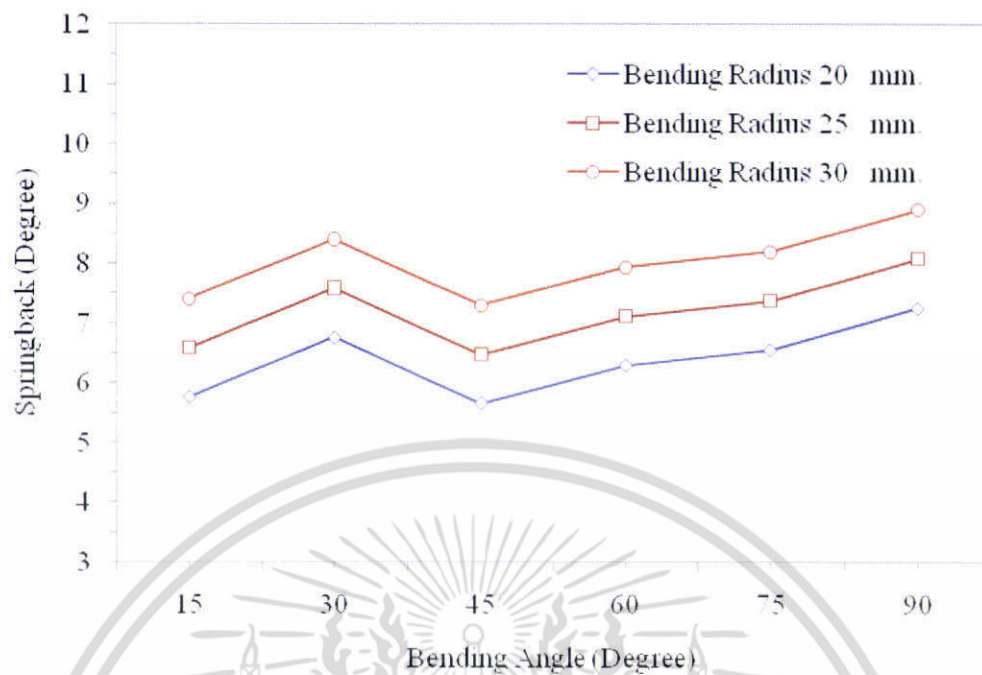
จากรูปที่ 5.7 และ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาที่ใช้ในการดัดและค่าการดัดตัวกลับภายหลังการดัดท่อสแตนเลส 904L จากผลการทดลองที่รัศมีดัด 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อรัศมีที่ใช้ในการดัดมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการดัดตัวกลับของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากรัศมีที่ใช้ในการดัดเพิ่มมากขึ้นทำให้โมเมนต์ดัดที่ใช้ในการดัดชิ้นรูปมีค่าลดลง ส่งผลให้ความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผิวบนและล่างแผ่กระจายไปยังเส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงานน้อยลง ทำให้ชิ้นงานมีช่วงอีลาสติกมากกว่าช่วงพลาสติกผสมกันในบริเวณที่ทำการดัด ที่องศามุมดัด 15 องศา ค่าการดัดตัวกลับของท่ออยู่ที่ 3.00, 3.94, และ 4.80 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่องศามุมดัด 30 องศา ค่าการดัดตัวกลับของท่ออยู่ที่ 3.60, 4.54, และ 5.40 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่องศามุมดัด 45 องศา ค่าการดัดตัวกลับของท่ออยู่ที่ 3.47, 4.41, และ 5.27 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่องศามุมดัด 60 องศา ค่าการดัดตัวกลับของท่ออยู่ที่ 3.84, 4.78, และ 5.64 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่องศามุมดัด 75 องศา ค่าการดัดตัวกลับของท่ออยู่ที่ 4.10, 5.04, และ 5.90 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่องศามุมดัด 90 องศา ค่าการดัดตัวกลับของท่ออยู่ที่ 4.60, 5.54, และ 6.40 มิลลิเมตร ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาที่ใช้ในการดัดและค่าการดัดตัวกลับภายหลังการดัดท่อทองแดง B88 จากผลการทดลองที่รัศมีดัด 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร ที่องศามุมดัด 15 องศา ค่าการดัดตัวกลับของท่ออยู่ที่ 5.76, 6.58, และ 7.40 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่องศามุมดัด 30 องศา ค่าการดัดตัวกลับของท่ออยู่ที่ 6.76, 7.58, และ 8.40 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่องศามุมดัด 45 องศา ค่าการดัดตัวกลับของท่ออยู่ที่ 5.66, 6.48, และ 7.30 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่องศามุมดัด 60 องศา ค่าการดัดตัวกลับของท่ออยู่ที่ 6.30, 7.12, และ 7.94 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่องศามุมดัด 75 องศา ค่าการดัดตัวกลับของท่ออยู่ที่ 6.56, 7.38, และ 8.20 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่องศามุมดัด 90 องศา ค่าการดัดตัวกลับของท่ออยู่ที่ 7.26, 8.08, และ 8.90 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 5.7 องศาการดัดตัวกลับภายหลังการดัดท่อสแตนเลส 904L ที่มุมองศาตัดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 องศาการบิดตัวกลับภายหลังการดัดท่อทองแดง B88 ที่มีมืองศาตัดต่างๆ



รูปที่ 5.9 แสดงลักษณะของท่อท่อสแตนเลส 904L หลังการดัดขึ้นรูป

จากรูปที่ 5.9 และ 5.10 แสดงแสดงลักษณะของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ภายหลังการดัดขึ้นรูป จากผลการทดลองพบว่าท่อทั้งสองชนิดเกิดการบิดตัวกลับในทุกๆรัศมีดัด และองศาที่ใช้ในการดัด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

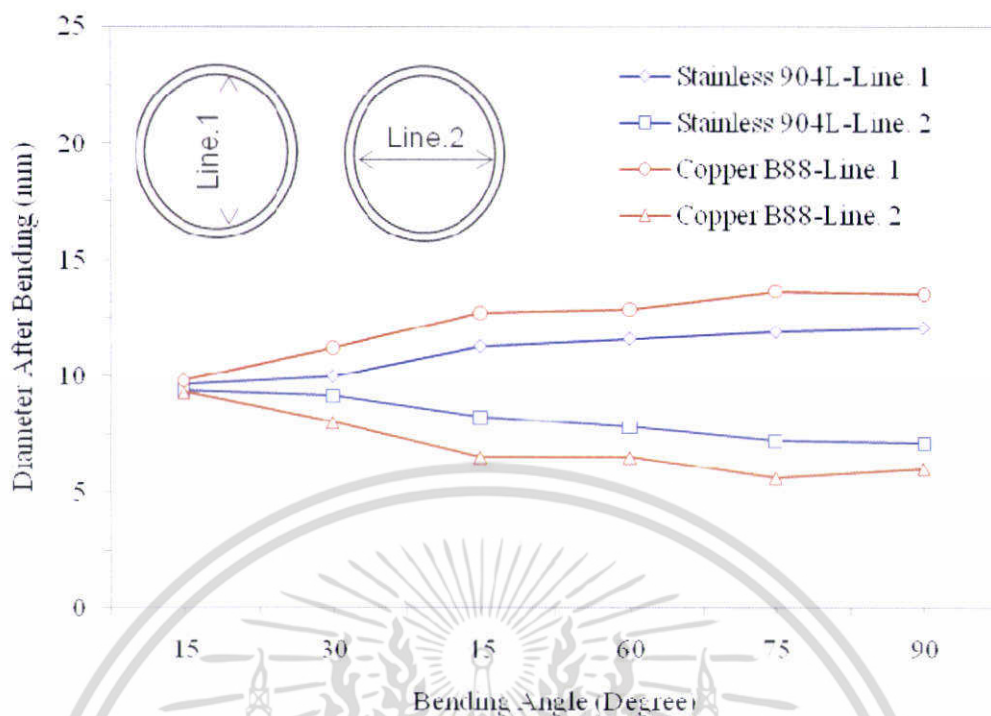


รูปที่ 5.10 แสดงลักษณะของท่อทองแดง B88 หลังการตัดขึ้นรูป

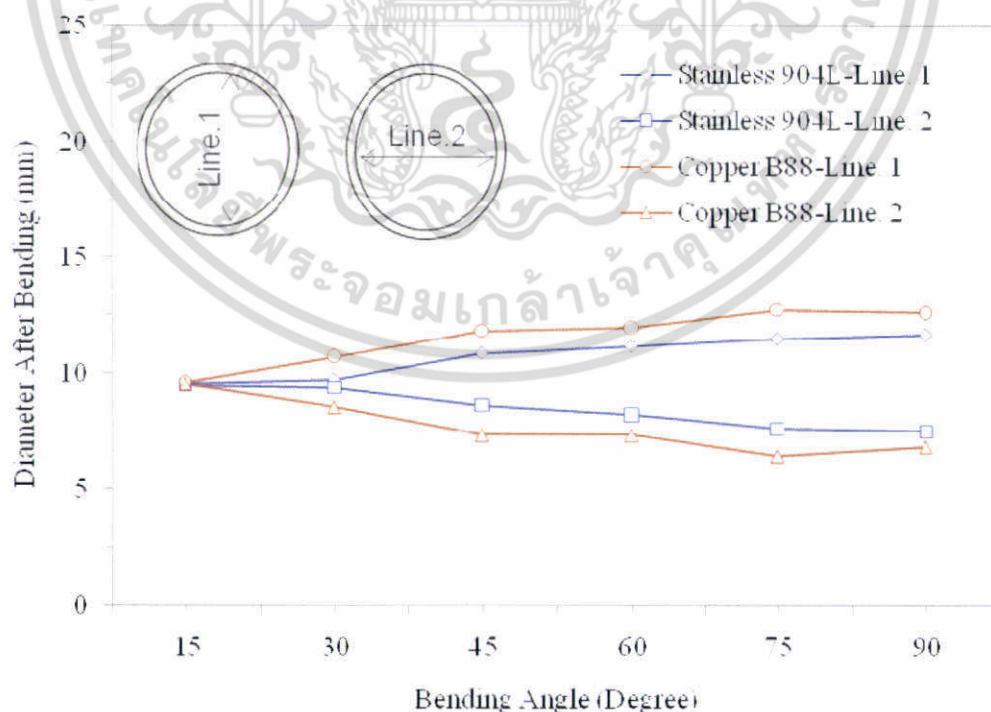
5.1.2 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อภายหลังการตัด

ขณะที่ทำการตัดท่อขึ้นรูป องศามุมตัดและแรงกระทำที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ทำการตัดท่อจะส่งผลทำให้ รูปร่าง และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันตามองศา มุมตัดและแรงกระทำที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยที่ในบริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านในสุดของท่อ เกิดแรงอัด และในบริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านนอกสุดของท่อเกิดแรงดึง เป็นสาเหตุให้ผนัง ทั้งสองข้างโดนบีบทำให้รูปร่าง และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อทั้งสองด้านมีค่าน้อยลง

จากรูปที่ 5.11, 5.12 และ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีที่ใช้ในการตัดและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายหลังการตัดท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่องศาตัดต่างๆ จากผลการทดลองที่องศาในการตัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา พบว่าท่อทั้งสองชนิดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหน้าตัดท่อในจุดที่ทำการตัดไปในทางเดียวกัน โดยที่ท่อทองแดง B88 จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากกว่าท่อสแตนเลส 904L เนื่องจากวัสดุที่มีค่าความแข็งมากกว่าการเสียรูปจะต่ำกว่าวัสดุที่มีค่าความแข็งน้อยกว่าเมื่อเทียบในองศาตัด และรัศมีตัดเดียวกัน ภายหลังจากการตัดท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่ Line.1 ท่อจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้น และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลดลงที่ Line.2 เนื่องจากผนังทั้งสองข้างโดนบีบจากแรงอัดที่บริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านในสุดของท่อ และแรงดึงที่บริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านนอกสุดของท่อ

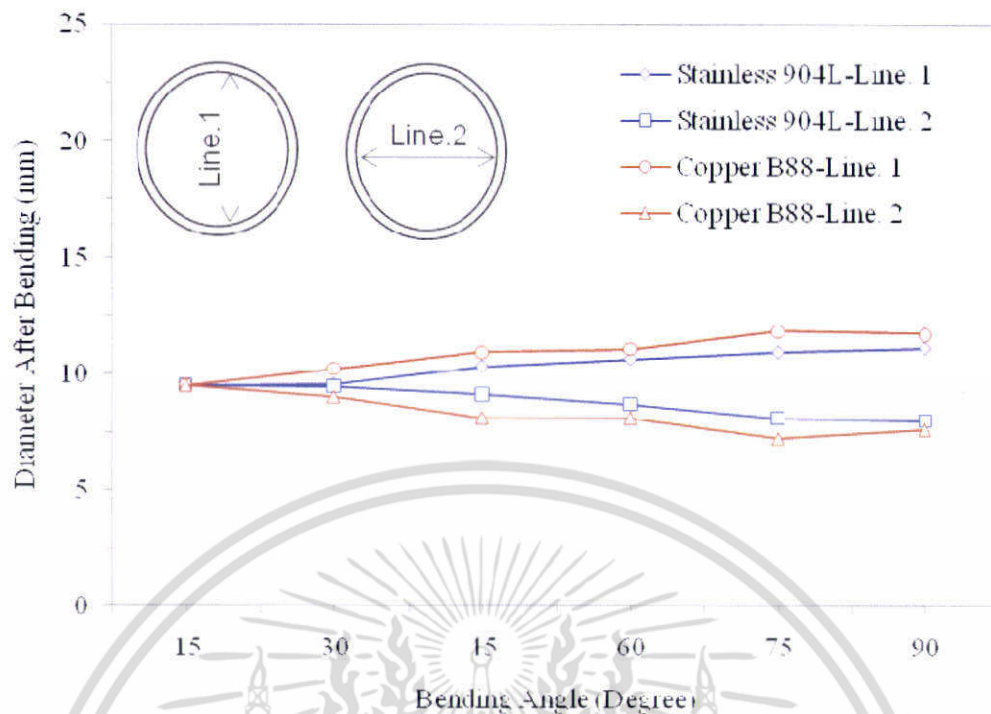


รูปที่ 5.11 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางภายหลังการดัดท่อที่รัศมีดัด 20 มิลลิเมตร ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88

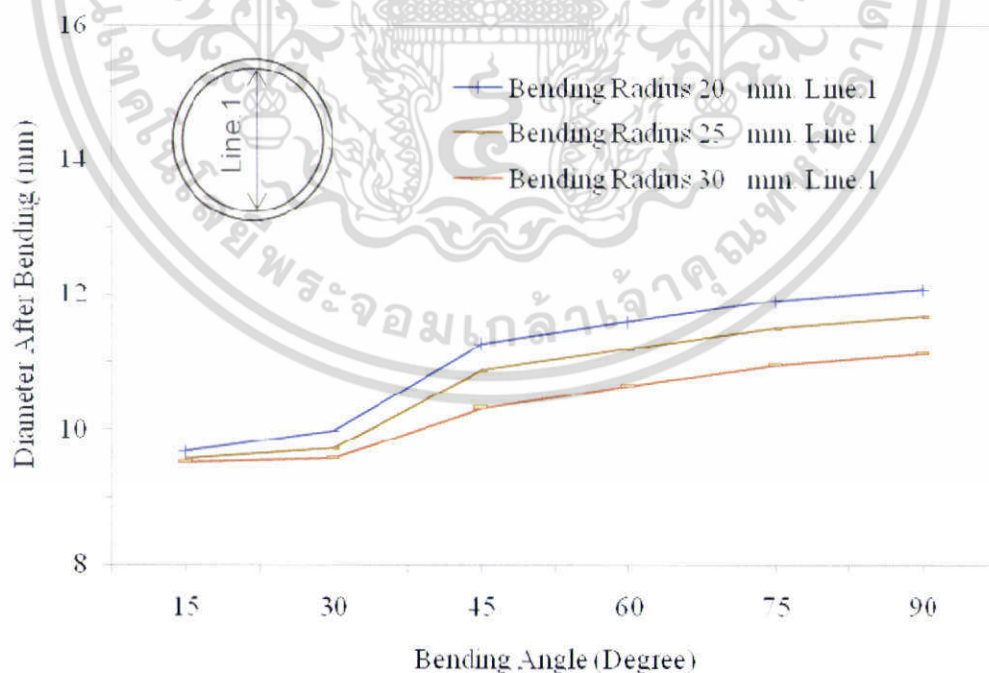


รูปที่ 5.12 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางภายหลังการดัดท่อที่รัศมีดัด 25 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานที่ออกนอกอาณาเขตที่ไปลงนามในหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



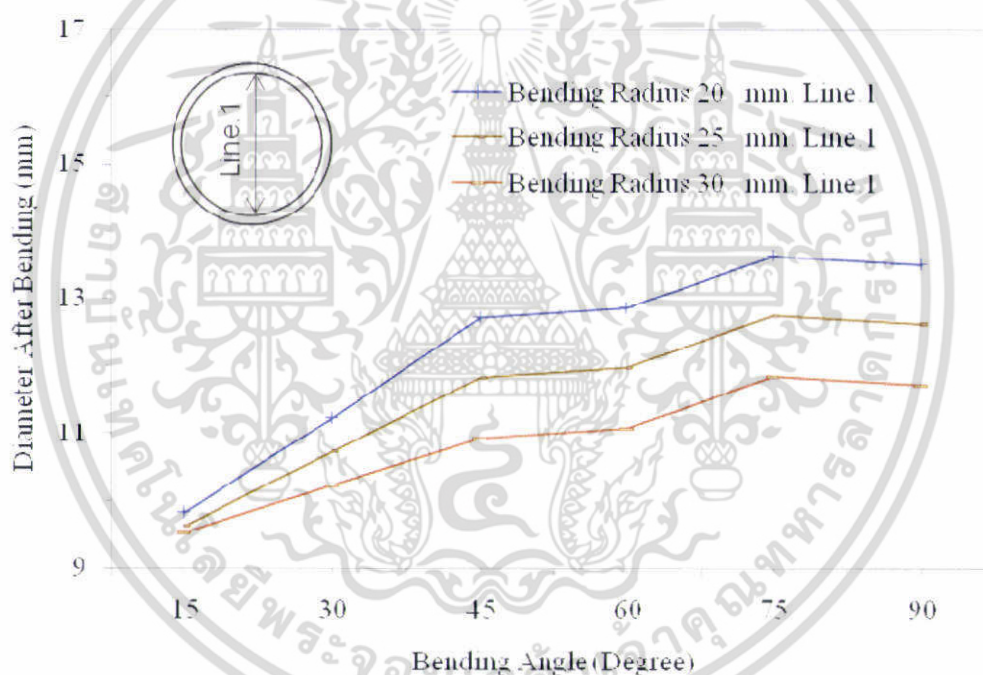
รูปที่ 5.13 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางภายหลังจากการดัดท่อที่รัศมีดัด 30 มิลลิเมตร ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88



รูปที่ 5.14 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลาง Line.1 ภายหลังจากการดัดท่อสแตนเลส 904L ที่มุมองศาตัดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

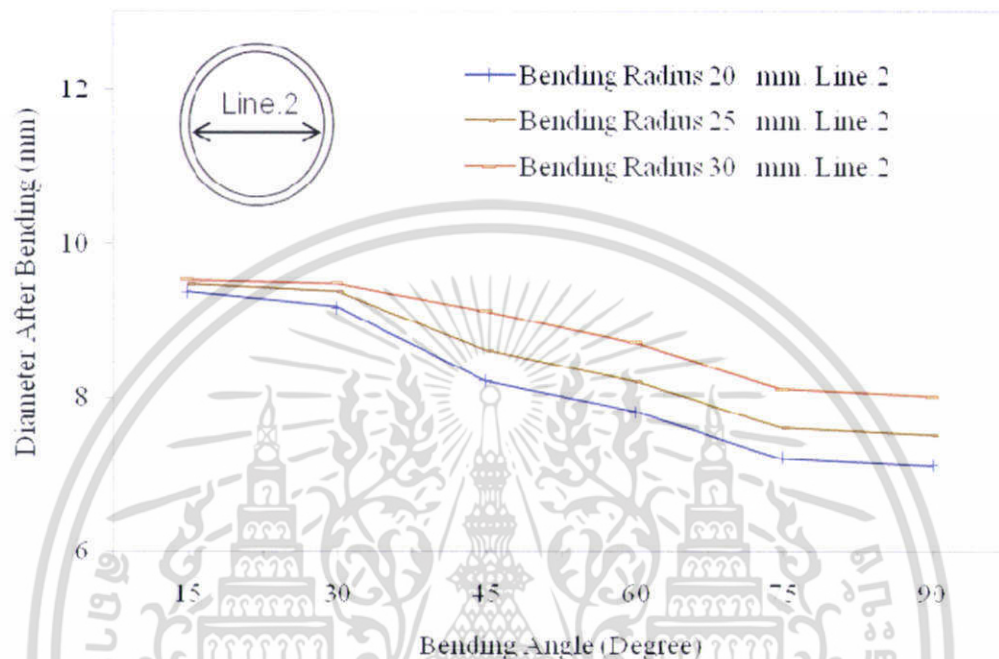
จากรูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาที่ใช้ในการตัดและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.1 ภายหลังจากการตัดท่อสแตนเลส 904L ที่มีมุมองศาตัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา จากผลการทดลองที่รัศมีที่ใช้ในการตัด 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร พบว่าท่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหน้าตัดท่อที่ Line.1 ท่อจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้น เนื่องจากผนังท่อรัศมีโค้งภายในและภายนอกทั้งสองข้างโดนบีบ คือแรงอัดกระทำที่บริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านในสุดของท่อ และแรงดึงกระทำที่บริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านในสุดของท่อ และเมื่อรัศมีที่ใช้ในการตัดมีค่าลดลงจะทำให้ค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.1 ของท่อบีค่าเพิ่มขึ้น รัศมีที่ใช้ในการตัด 20 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.1 อยู่ที่ 9.68, 9.98, 11.27, 11.59, 11.90 และ 12.07 มิลลิเมตร ตามลำดับ รัศมีที่ใช้ในการตัด 25 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.1 อยู่ที่ 9.57, 9.72, 10.87, 11.19, 11.50 และ 11.67 มิลลิเมตร ตามลำดับ รัศมีที่ใช้ในการตัด 30 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.1 อยู่ที่ 9.52, 9.57, 10.32, 10.64, 10.95 และ 11.12 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 5.15 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.1 ภายหลังจากการตัดท่อทองแดง B88 ที่มีมุมองศาตัดต่างๆ

จากรูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาที่ใช้ในการตัดและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.1 ภายหลังจากการตัดท่อทองแดง B88 ที่มีมุมองศาตัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา จากผลการทดลองที่รัศมีที่ใช้ในการตัด 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร พบว่าท่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหน้าตัดท่อที่ Line.1 ท่อจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้น เนื่องจากผนังท่อรัศมีโค้งภายในและภายนอกทั้งสองข้างโดนบีบ คือแรงอัดกระทำที่บริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านในสุดของท่อ และแรงดึงกระทำที่บริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านในสุดของท่อ และเมื่อรัศมีที่ใช้ในการตัดมีค่าลดลงจะทำให้ค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.1 ของท่อบีค่าเพิ่มขึ้น รัศมีที่ใช้ในการตัด 20 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.1 อยู่ที่ 9.82, 11.22, 12.72, 12.87, 13.64 และ 13.52 มิลลิเมตร ตามลำดับ รัศมีที่ใช้ในการตัด 25 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.1 อยู่ที่ 9.82, 11.22, 12.72, 12.87, 13.64 และ 13.52 มิลลิเมตร ตามลำดับ รัศมีที่ใช้ในการตัด 30 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.1 อยู่ที่ 9.82, 11.22, 12.72, 12.87, 13.64 และ 13.52 มิลลิเมตร ตามลำดับ

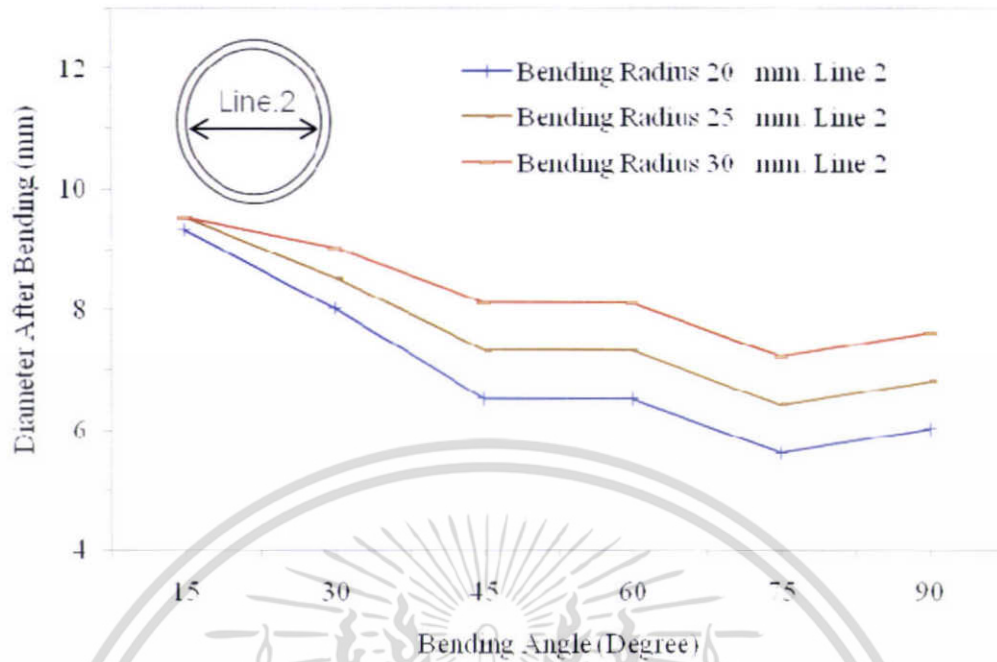
มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่รัศมีที่ใช้ในการดัด 25 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.1 อยู่ที่ 9.62, 10.72, 11.82, 11.97, 12.74 และ 12.62 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่รัศมีที่ใช้ในการดัด 30 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.1 อยู่ที่ 9.52, 10.22, 10.92, 11.07, 11.84 และ 11.72 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 5.16 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.2 ภายหลังจากการดัดท่อสแตนเลส 904L ที่มุมองศาตัดต่างๆ

จากรูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาที่ใช้ในการดัดและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.2 ภายหลังจากการดัดท่อสแตนเลส 904L ที่มุมองศาตัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา จากผลการทดลองที่รัศมีที่ใช้ในการดัด 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร พบว่าท่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหน้าตัดท่อที่ Line.2 ท่อจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลดลง เนื่องจากผนังท่อรัศมีโค้งภายในและภายนอกทั้งสองข้างโดนบีบ คือแรงอัดกระทำที่บริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านในสุดของท่อและแรงดึงกระทำที่บริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านในสุดของท่อ และเมื่อรัศมีที่ใช้ในการดัดมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.2 ของท่อมีค่าเพิ่มขึ้น ที่รัศมีที่ใช้ในการดัด 20 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.2 อยู่ที่ 9.37, 9.17, 8.22, 7.82, 7.22 และ 7.12 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่รัศมีที่ใช้ในการดัด 25 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.2 อยู่ที่ 9.47, 9.37, 8.62, 8.22, 8.62 และ 8.22 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่รัศมีที่ใช้ในการดัด 30 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.2 อยู่ที่ 9.52, 9.47, 9.12, 8.72, 8.12 และ 8.02 มิลลิเมตร ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



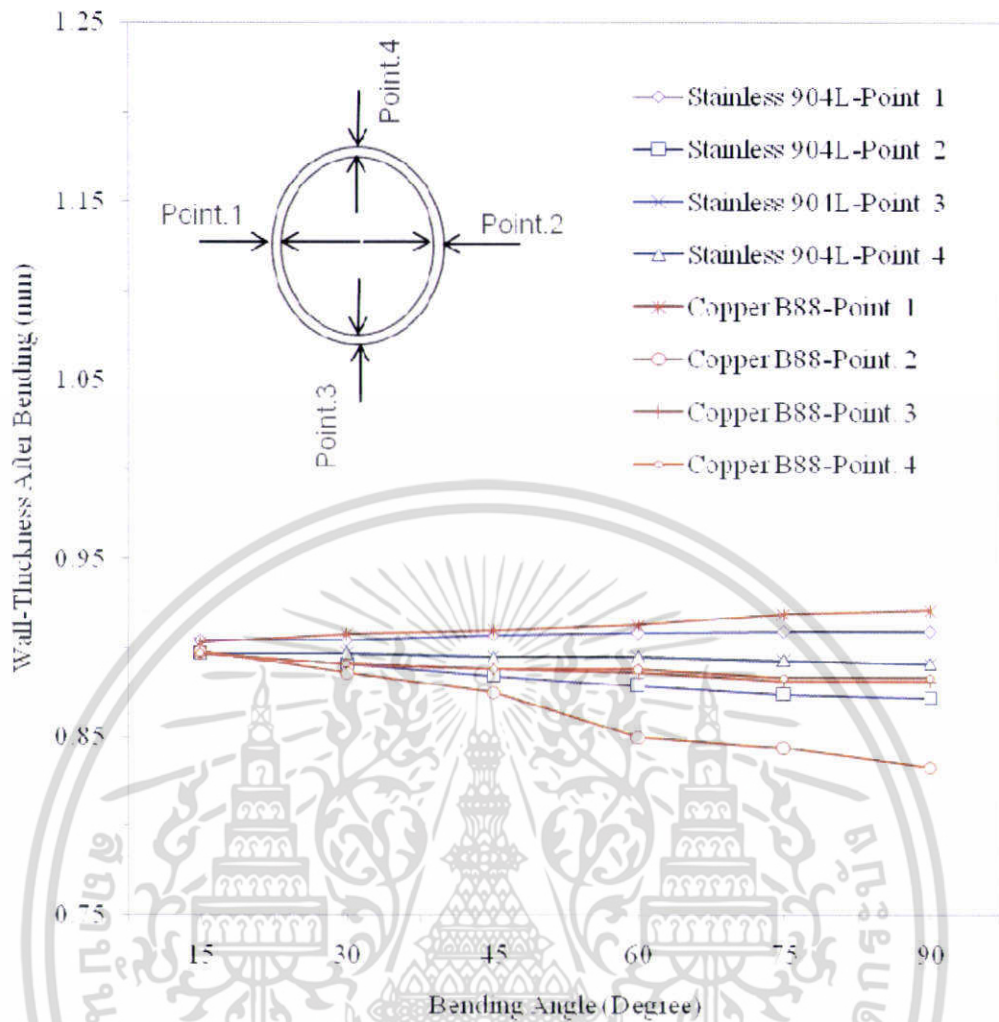
รูปที่ 5.17 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.2 ภายหลังจากตัดท่อทองแดง B88 ที่มุมองศาตัดต่างๆ

จากรูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาที่ใช้ในการตัดและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.2 ภายหลังจากตัดท่อทองแดง B88 ที่มุมองศาตัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา จากผลการทดลองที่รัศมีที่ใช้ในการตัด 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร พบว่าท่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหน้าตัดท่อที่ Line.2 ท่อจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลดลง เนื่องจากผนังท่อรัศมีโค้งภายในและภายนอกทั้งสองข้างโดนบีบ คือแรงอัดกระทำที่บริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านในสุดของท่อ และแรงดึงกระทำที่บริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านในสุดของท่อ และเมื่อรัศมีที่ใช้ในการตัดมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.2 ของท่อมีค่าเพิ่มขึ้น ที่รัศมีที่ใช้ในการตัด 20 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.2 อยู่ที่ 9.32, 8.02, 6.52, 6.52, 5.62 และ 6.02 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่รัศมีที่ใช้ในการตัด 25 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.2 อยู่ที่ 9.52, 8.52, 7.32, 7.31, 6.42 และ 6.82 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่รัศมีที่ใช้ในการตัด 30 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Line.2 อยู่ที่ 9.52, 9.02, 8.12, 8.10, 7.22 และ 7.72 มิลลิเมตร ตามลำดับ

5.1.3 ขนาดความหนาของท่อภายหลังจากการตัด

ขณะที่ทำการตัดท่อขึ้นรูป องศามุมตัดและแรงกระทำที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ทำการตัดท่อจะส่งผลทำให้ ขนาดความหนาของท่อจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันตามองศามุมตัดและแรงกระทำที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยที่องศามุมตัดและแรงกระทำที่เกิดขึ้นทำให้ความหนาในบริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านในสุดของท่อมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และองศามุมตัดและแรงกระทำที่เกิดขึ้นในบริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านนอกสุดของท่อมีค่าลดลงเล็กน้อย

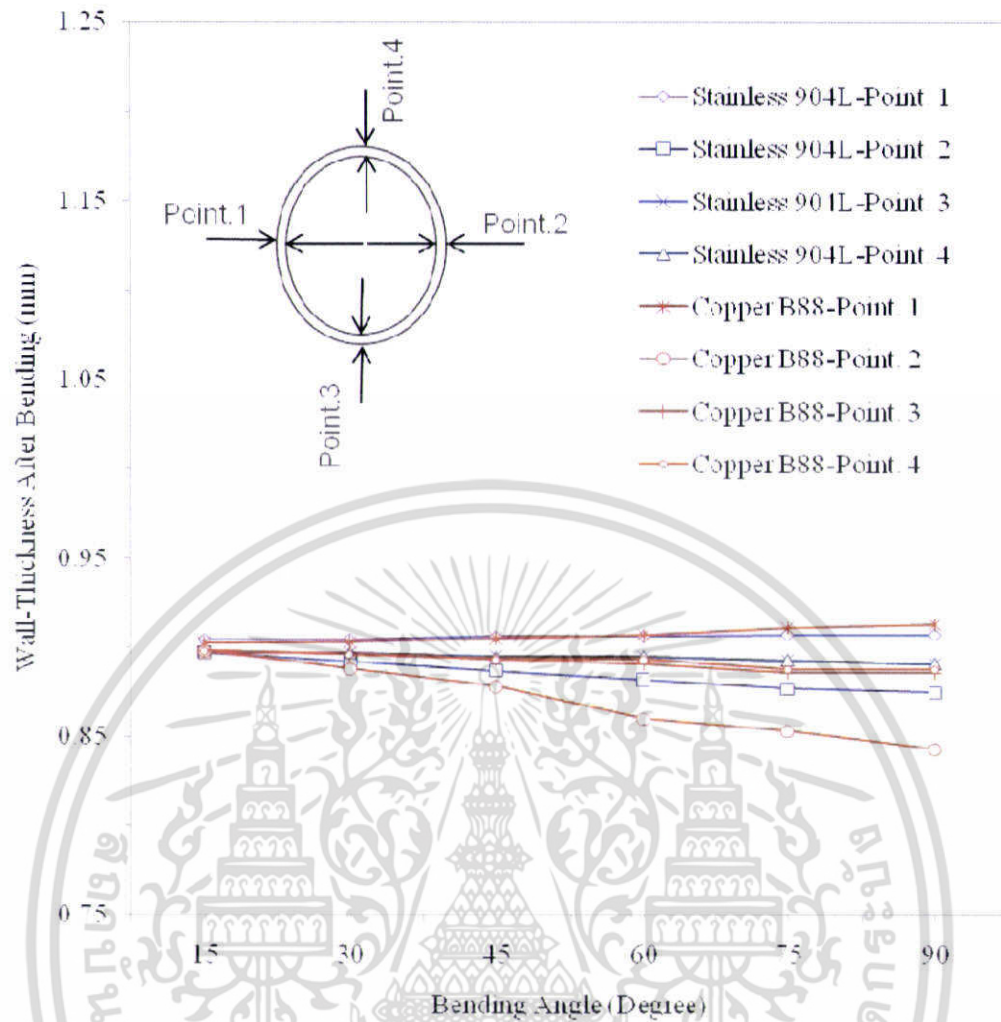
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 ขนาดความหนา Point.1, 2, 3 และ 4 ภายหลังจากการดัดท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่รัศมีดัด 20 มิลลิเมตร ที่มุมองศาตัดต่างๆ

จากรูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีที่ใช้ในการดัดและความหนาของทองแดง B88 และท่อสแตนเลส 904L ที่องศาในการดัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา ภายหลังจากการดัด ขึ้นรูป จากผลการทดลองที่รัศมีดัดที่ 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร พบว่าท่อทั้งสองชนิดมีการเปลี่ยนแปลงความหนาท่อในจุดที่ทำการดัดไปในทางเดียวกัน โดยที่ท่อทองแดง B88 จะมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่าท่อสแตนเลส 904L เนื่องจากวัสดุที่มีค่าความแข็งมากกว่าการเสียรูปจะต่ำกว่าวัสดุที่มีค่าความแข็งน้อยกว่าเมื่อเทียบในองศาตัด และรัศมีดัดเดียวกัน ภายหลังจากการดัดท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่ Point.1 ท่อจะมีขนาดความหนาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากผนังท่อโดนบีบจากแรงอัดที่บริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านในสุดของท่อ ที่ Point.2 ท่อจะมีขนาดความหนาลดลงเล็กน้อย และที่ point.3 และ point.4 มีขนาดความหนาลดลงเล็กน้อยเมื่อองศามุมดัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงดึงที่บริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านนอกสุดของท่อ

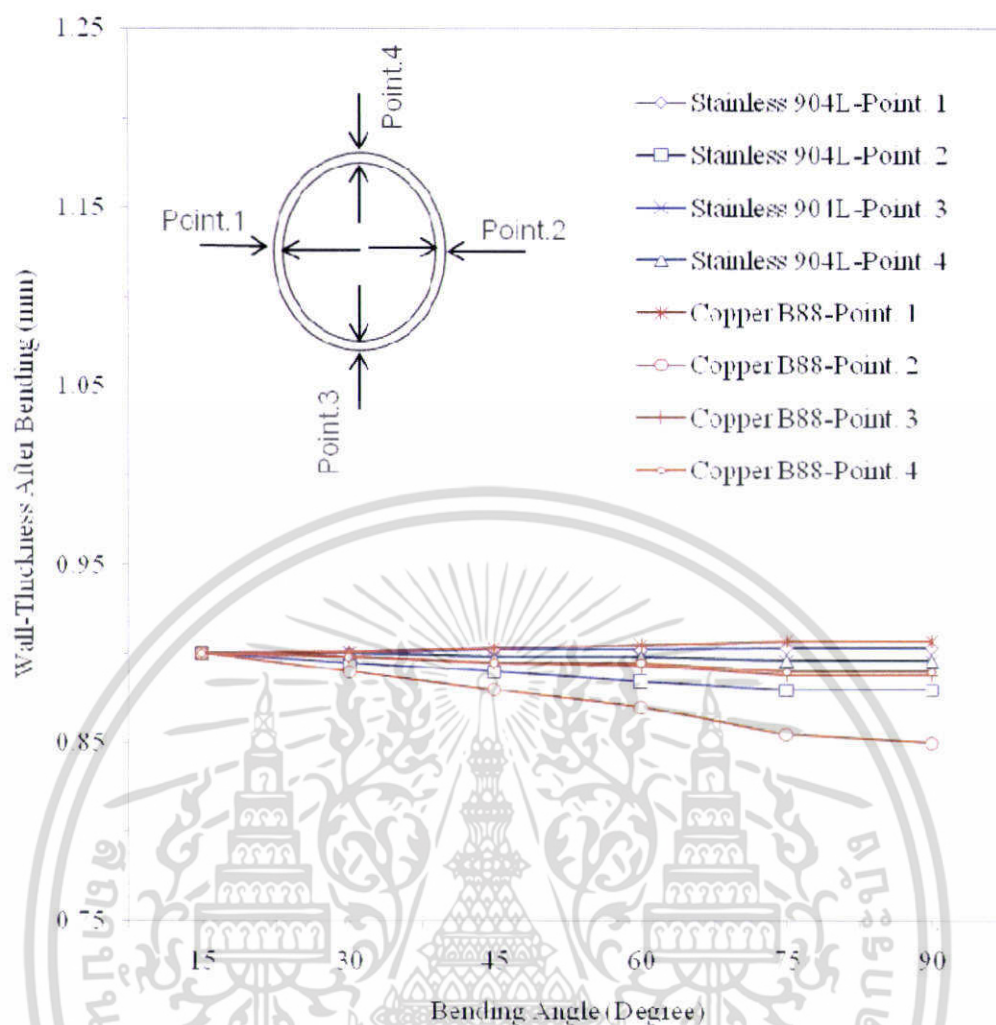
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 ขนาดความหนา Point.1, 2, 3 และ 4 ภายหลังจากการดัดท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่รัศมีดัด 25 มิลลิเมตร ที่มุมองศาตัดต่างๆ

จากรูปที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีที่ใช้ในการดัดและความหนาของทองแดง B88 และท่อสแตนเลส 904L ที่องศาในการดัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา ภายหลังจากการดัด ขึ้นรูป จากผลการทดลองที่รัศมีดัดที่ 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร ท่อทั้งสองชนิดมีการเปลี่ยนแปลงความหนาที่จุดที่ทำการดัดไปในทางเดียวกัน โดยที่ท่อทองแดง B88 จะมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่าท่อสแตนเลส 904L เนื่องจากวัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่าการเสียรูปจะต่ำกว่าวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าเมื่อเทียบในองศาตัด และรัศมีดัดเดียวกัน ภายหลังจากการดัดท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่ Point.1 ท่อจะมีขนาดความหนาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากผนังท่อโดนบีบจากแรงอัดที่บริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านในสุดของท่อ ที่ Point.2 ท่อจะมีขนาดความหนาลดลงเล็กน้อย และที่ point.3 และ point.4 มีขนาดความหนาลดลงเล็กน้อยเมื่อองศามุมดัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงดึงที่บริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านนอกสุดของท่อ

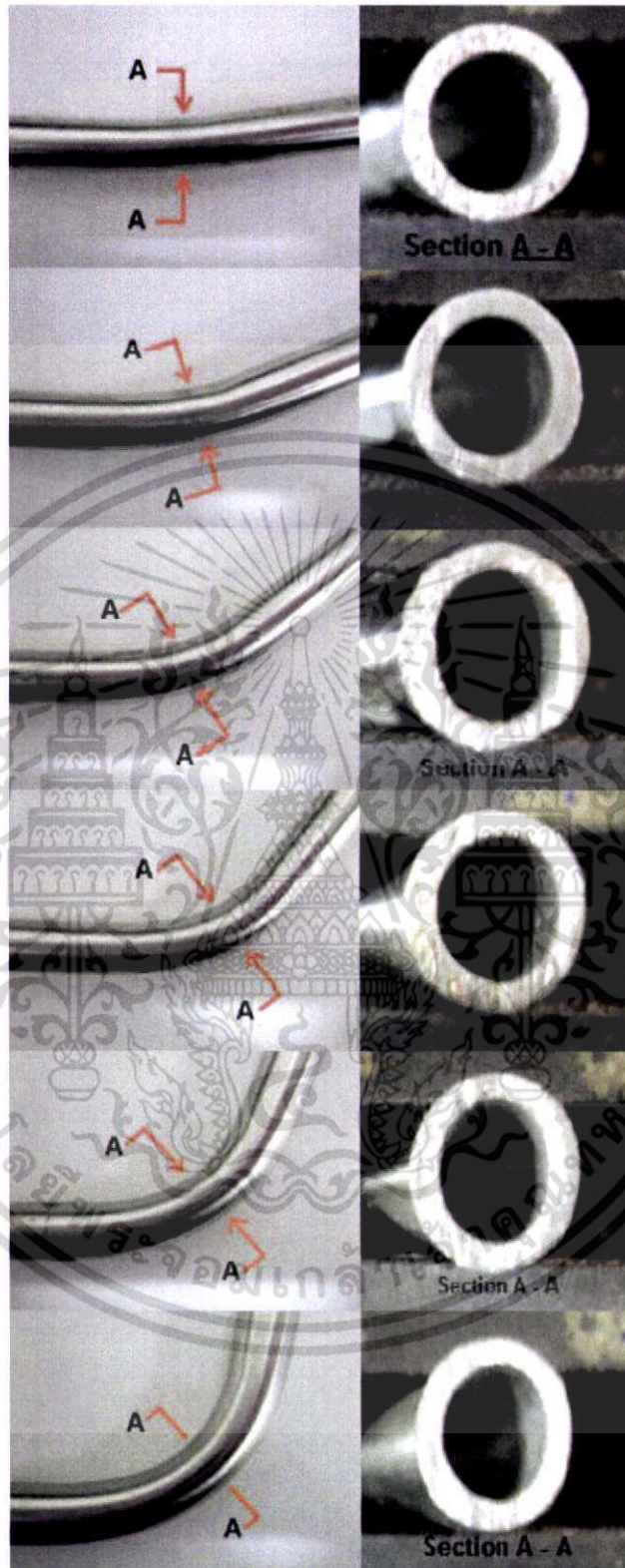
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 ขนาดความหนา Point.1, 2, 3 และ 4 ภายหลังจากการดัดท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่รัศมีดัด 30 มิลลิเมตร ที่มุมองศาตัดต่างๆ

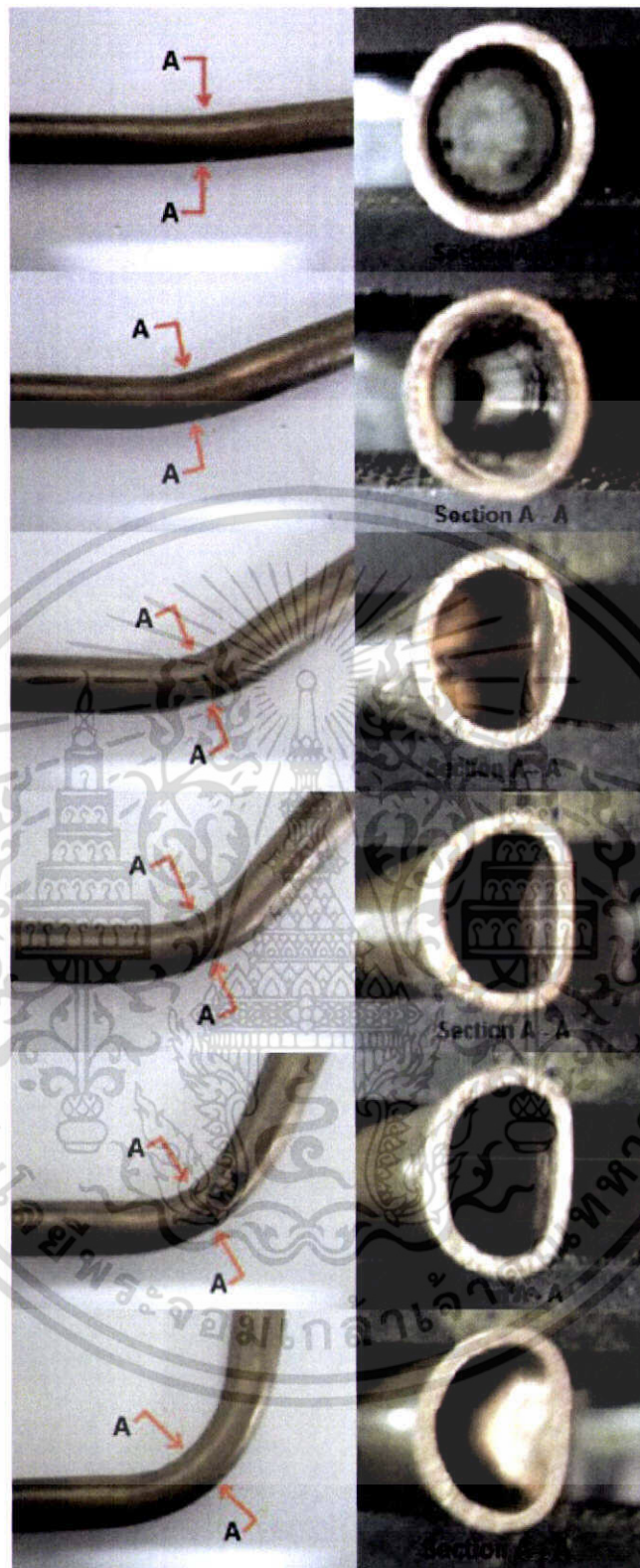
จากรูปที่ 5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีที่ใช้ในการดัดและความหนาของทองแดง B88 และท่อสแตนเลส 904L ที่องศาในการดัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา ภายหลังจากดัดขึ้นรูป จากผลการทดลองที่รัศมีดัดที่ 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร ท่อทั้งสองชนิดมีการเปลี่ยนแปลงความหนาที่จุดที่ทำการดัดไปในทางเดียวกัน โดยที่ท่อทองแดง B88 จะมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่าท่อสแตนเลส 904L เนื่องจากวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงมากกว่าการเสียรูปจะต่ำกว่าวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าเมื่อเทียบในองศาตัด และรัศมีดัดเดียวกัน ภายหลังจากการดัดท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่ Point.1 ท่อจะมีขนาดความหนาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากผนังท่อโดนบีบจากแรงอัดที่บริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านในสุดของท่อ ที่ Point.2 ท่อจะมีขนาดความหนาลดลงเล็กน้อย และที่ point.3 และ point.4 มีขนาดความหนาลดลงเล็กน้อยเมื่อองศามุมดัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงดึงที่บริเวณผิวของขอบนอกรัศมีโค้งด้านนอกสุดของท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 แสดงลักษณะเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาของท่อสแตนเลส 904L หลังการดัดขึ้นรูป ที่รัศมีดัด 20 มิลลิเมตร ที่องศาหมัดดัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

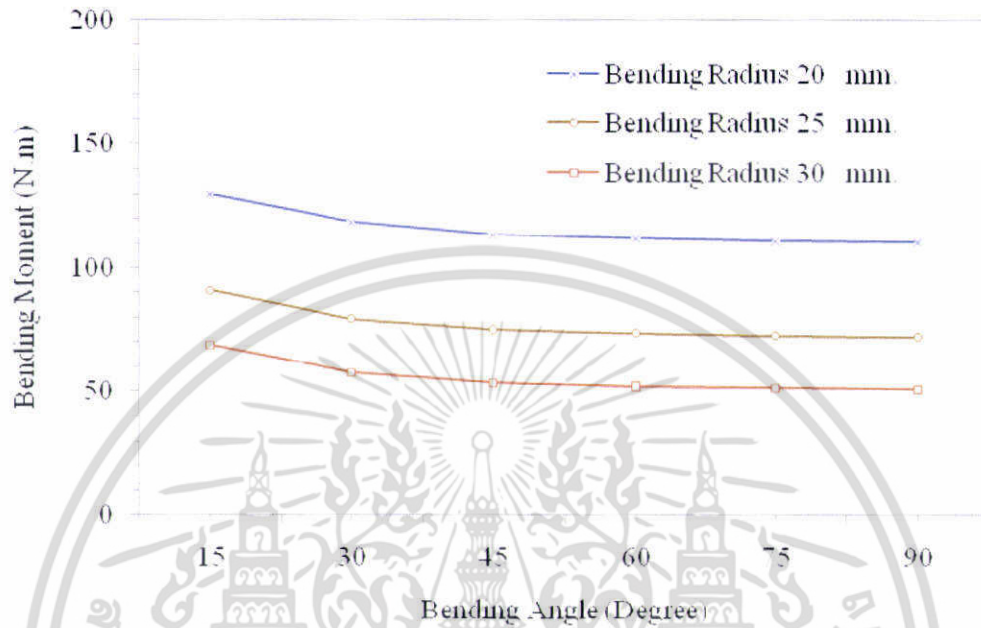


รูปที่ 5.22 แสดงลักษณะเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาของท่อทองแดง B88 หลังการดัดขึ้นรูป ที่รัศมีดัด 20 มิลลิเมตร ที่องศาหมัดดัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา

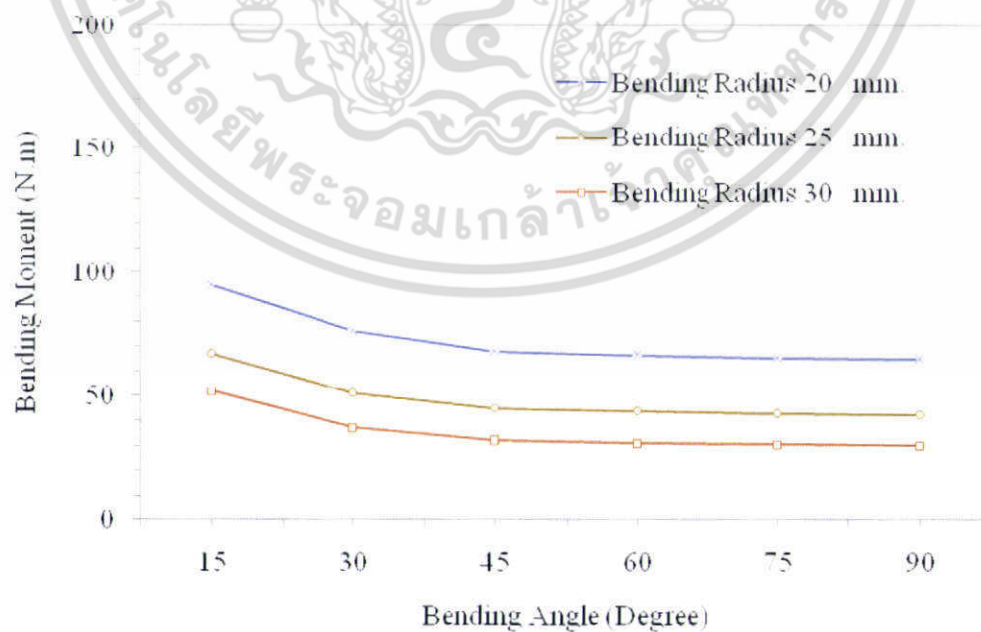
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 โมเมนต์ดัดจากผลการคำนวณทางทฤษฎี

นำค่าการดัดตัวกลับของท่อที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดจากสมการทางทฤษฎีตามที่กล่าวไว้แล้วเบื้องต้น



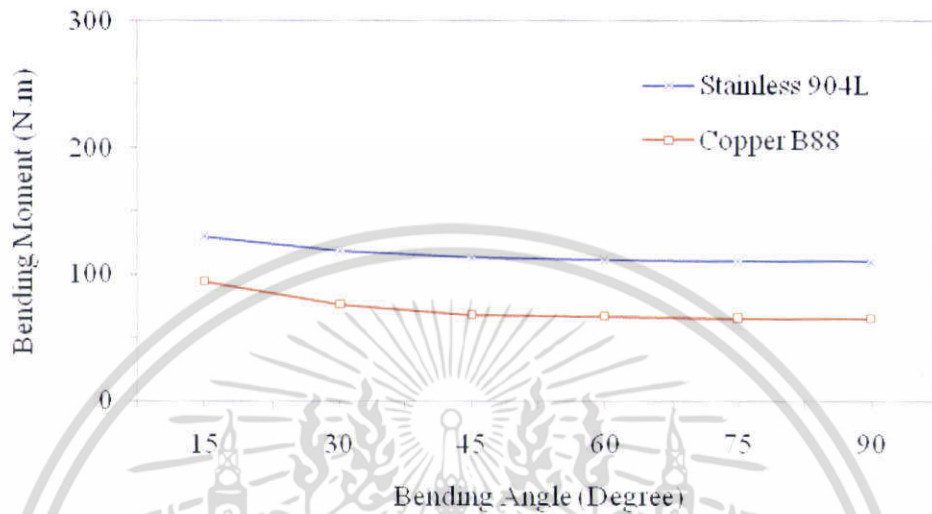
รูปที่ 5.23 โมเมนต์ดัดภายหลังจากการตัดท่อสแตนเลส 904L ที่มีมองศาตัดต่างๆ



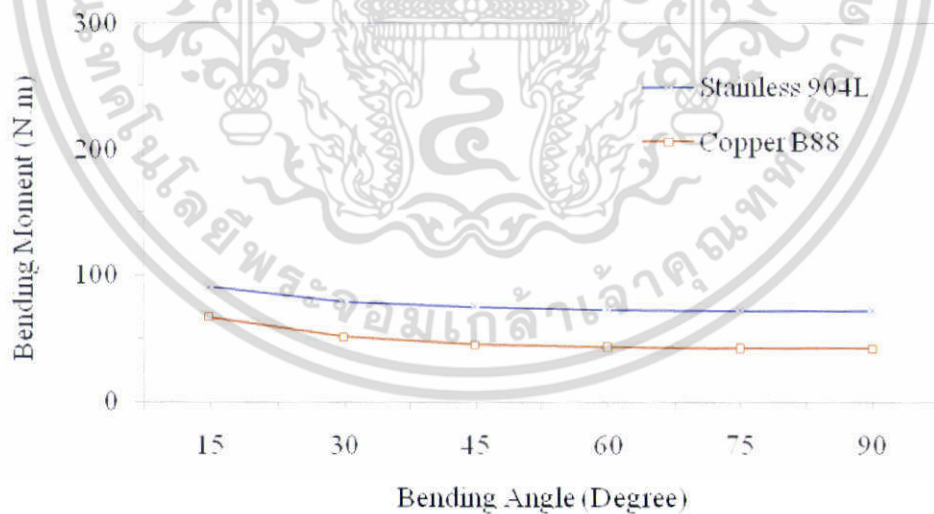
รูปที่ 5.24 โมเมนต์ดัดภายหลังจากการตัดท่อทองแดง B88 ที่มีมองศาตัดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารหลวงวิไลยพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติพระนคร เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ข้อมูลนี้เป็นการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.23 และ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีที่ใช้ในการดัดและค่าโมเมนต์ดัดภายหลังจากดัดท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่มุมองศาในการดัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา จากผลการทดลองที่รัศมีดัด 30, 25 และ 20 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อรัศมีที่ใช้ในการดัดที่มีค่าน้อยลงจะส่งผลให้ค่าโมเมนต์ดัดมีค่ามากขึ้นด้วย



รูปที่ 5.25 โมเมนต์ดัดภายหลังจากดัดท่อที่รัศมีดัด 20 มิลลิเมตร ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88



รูปที่ 5.26 โมเมนต์ดัดภายหลังจากดัดท่อที่รัศมีดัด 25 มิลลิเมตร ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88

จากรูปที่ 5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีที่ใช้ในการดัดและค่าโมเมนต์ดัดภายหลังจากการดัดท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่รัศมีดัด 20 มิลลิเมตร จากผลการทดลองที่องศาในการดัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา พบว่าท่อสแตนเลส 904L มีค่าโมเมนต์ดัดมากกว่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดเปลี่ยนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อทองแดง B88 เนื่องจากวัสดุที่มีความแข็งมากกว่าจะทำให้ค่าความต้านแรงดึงและอัดมากกว่า ส่งผลทำให้โมเมนต์ดัดที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบในองศาดัด และรัศมีดัดเดียวกัน ท่อสแตนเลส 904L ค่าโมเมนต์ดัดอยู่ที่ 129.87, 118.70, 113.46, 111.96, 110.91 และ 110.51 นิวตันเมตร ตามลำดับ และท่อทองแดง B88 ค่าโมเมนต์ดัดอยู่ที่ 94.71, 76.49 68.25, 66.75, 65.54 และ 65.08 นิวตันเมตร ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีที่ใช้ในการดัดและค่าโมเมนต์ดัดภายหลังการดัดท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่รัศมีดัด 20 มิลลิเมตร จากผลการทดลองที่องศาในการดัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา พบว่าท่อสแตนเลส 904L มีค่าโมเมนต์ดัดมากกว่าท่อทองแดง B88 เนื่องจากวัสดุที่มีความแข็งมากกว่าจะทำให้ค่าความต้านแรงดึงและอัดมากกว่า ส่งผลทำให้โมเมนต์ดัดที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบในองศาดัด และรัศมีดัดเดียวกัน ท่อสแตนเลส 904L ค่าโมเมนต์ดัดอยู่ที่ 90.89, 79.50, 75.00, 73.57, 72.62 และ 72.20 นิวตันเมตร ตามลำดับ และท่อทองแดง B88 ค่าโมเมนต์ดัดอยู่ที่ 67.14, 51.28, 45.06, 43.82, 42.88 และ 42.49 นิวตันเมตร ตามลำดับ

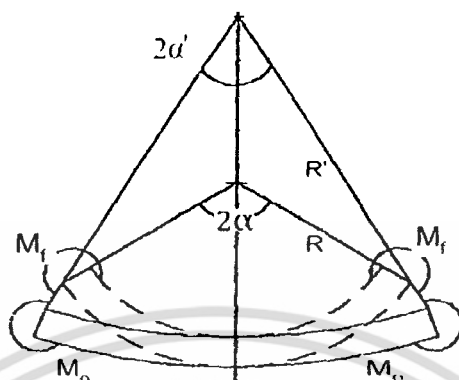


รูปที่ 5.27 โมเมนต์ดัดภายหลังการดัดท่อที่รัศมีดัด 30 มิลลิเมตร ของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88

จากรูปที่ 5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีที่ใช้ในการดัดและค่าโมเมนต์ดัดภายหลังการดัดท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่รัศมีดัด 20 มิลลิเมตร จากผลการทดลองที่องศาในการดัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา พบว่าท่อสแตนเลส 904L มีค่าโมเมนต์ดัดมากกว่าท่อทองแดง B88 เนื่องจากวัสดุที่มีความแข็งมากกว่าจะทำให้ค่าความต้านแรงดึงและอัดมากกว่า ส่งผลทำให้โมเมนต์ดัดที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบในองศาดัด และรัศมีดัดเดียวกัน ท่อสแตนเลส 904L ค่าโมเมนต์ดัดอยู่ที่ 68.78, 57.49, 53.55, 52.23, 51.39 และ 50.99 นิวตันเมตร ตามลำดับ และท่อทองแดง B88 ค่าโมเมนต์ดัดอยู่ที่ 51.92, 37.22, 32.18, 31.12, 30.34 และ 30.00 นิวตันเมตร ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ทฤษฎีการคำนวณหาองศาขดเคียวการตีตัวกลับ



รูปที่ 5.28 แสดงปรากฏการณ์การเกิด Springback

จากรูปที่ 5.28 แสดงรูปร่างระหว่างวัสดุที่รับโหลดกับวัสดุที่ไม่มีโหลด การขึ้นรูปโลหะด้วยการดัดขึ้นรูป เมื่อให้โหลดกับวัสดุ วัสดุจะเกิดการงอตัวความเค้นจะเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ หลังจากวัสดุไม่ได้รับโหลด วัสดุจะเกิดการงอตัวเกิดขึ้น แต่มุมที่เกิดขึ้นไม่เท่ากับมุมที่เกิดจากการรับโหลด เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะวัสดุเกิดการตีตัวกลับโดยที่

$$\frac{2\alpha}{2\alpha'} = (R' - R) \quad (5.1)$$

จาก (5.1) จะได้ค่ารัศมีตีตัวกลับภายหลังการดัดต่อเท่ากับ

$$R' = \frac{2\alpha}{2\alpha'} + R \quad (5.2)$$

จะได้ค่าองศาขดเคียวการตีตัวกลับเท่ากับ

$$2\alpha = 2\alpha' (R' - R) \quad (5.3)$$

เมื่อ

2α = องศาขดเคียวการตีตัวกลับ

$2\alpha'$ = องศาที่ได้หลังจากการดัด

R' = รัศมีตีตัวกลับ

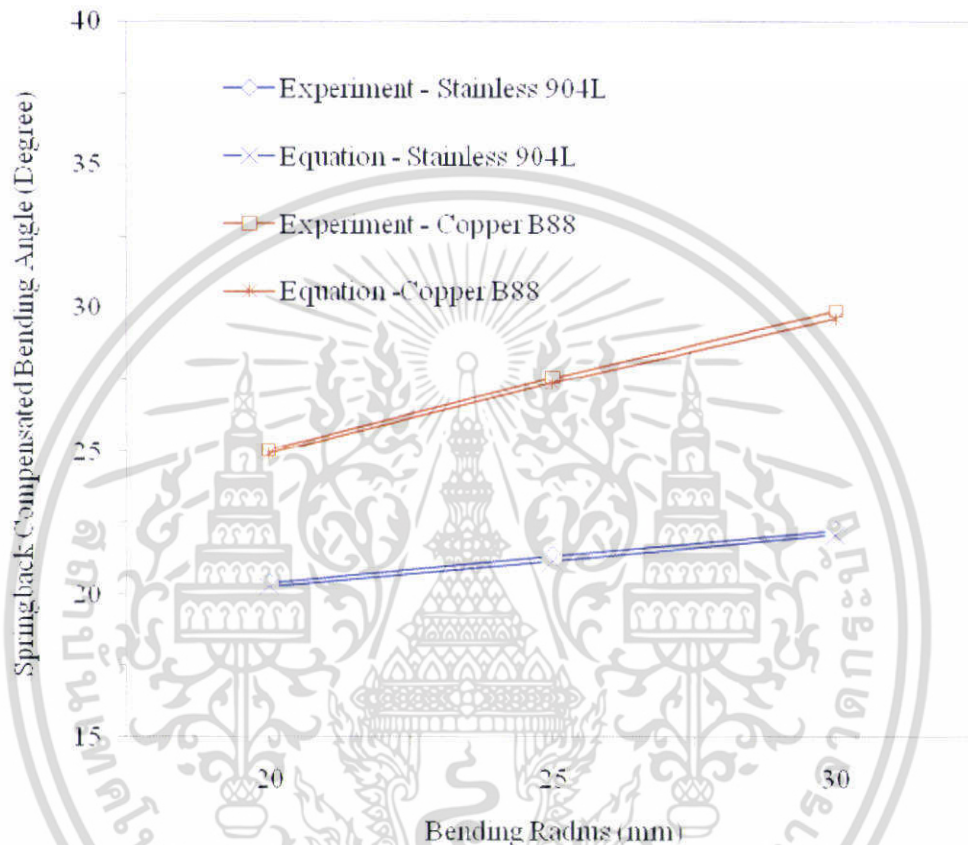
R = รัศมีดัดที่ใช้ในการดัด

แสดงวิธีใช้ทฤษฎีการคำนวณหาองศาขดเคียวการตีตัวกลับในภาคผนวก ข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎีการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อ

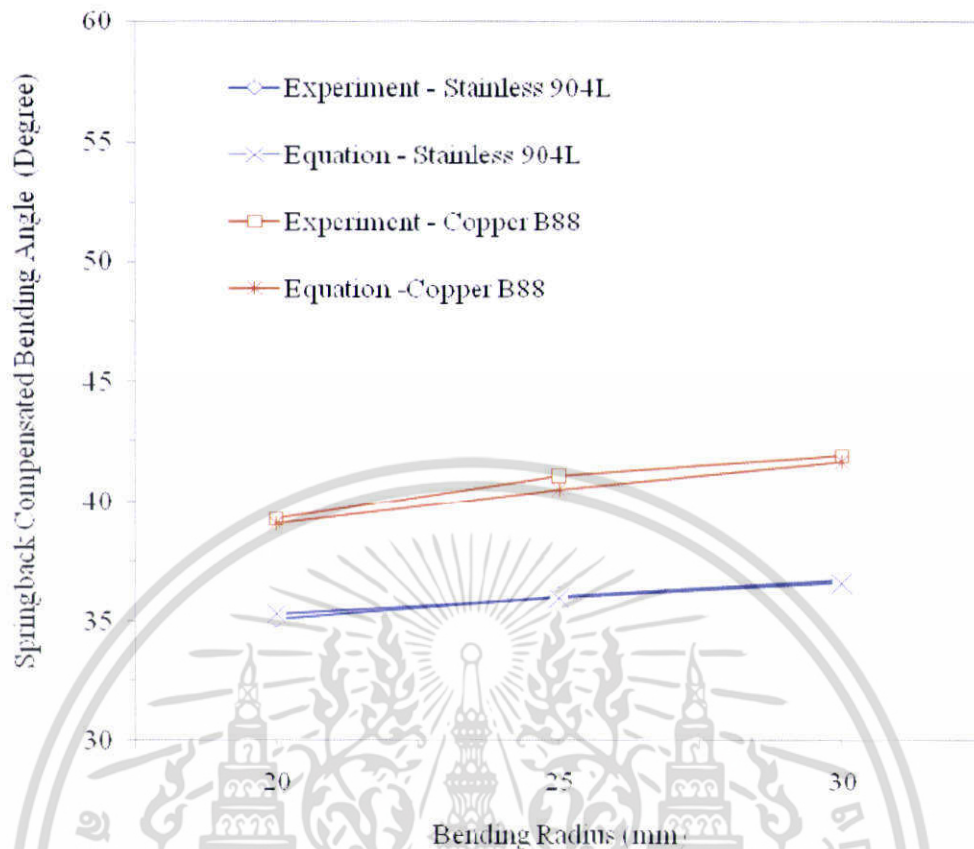
การดัดให้มากกว่าความต้องการวิธีนี้เป็นการดัดท่อให้มากเกินไปจนเกินจำนวนที่ต้องการ ซึ่งเมื่อดึงพันธกลับคืนไปจะทำให้ท่อนั้นกระด้างตัวกลับไปเล็กน้อยและได้มุมที่ต้องการพอดี ค่าองศาชดเชยการดัดตัวกลับภายหลังการดัดท่อจากการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎีแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.29 องศาชดเชยการดัดตัวกลับภายหลังการดัดท่อที่องศาตัด 15 องศาของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88

จากรูปที่ 5.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีที่ใช้ในการดัดและค่าชดเชยชดเชยการดัดตัวกลับของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่องศาตัด 15 องศา จากผลการทดลองที่รัศมีดัด 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร พบว่ารัศมีที่ใช้ในการดัดเพิ่มขึ้นต้องชดเชยค่าองศาการดัดตัวกลับของท่อเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และต้องชดเชยค่าองศาการดัดตัวกลับท่อทองแดง B88 มากกว่าท่อสแตนเลส 904L เนื่องจากท่อทองแดง B88 มีการดัดตัวกลับมากกว่าท่อสแตนเลส 904L ค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อสแตนเลส 904L จากการทดลองอยู่ที่ 20.40, 21.34 และ 22.20 องศาตามลำดับ ค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อสแตนเลส 904L จากการคำนวณทางทฤษฎีอยู่ที่ 20.27, 21.16 และ 22.06 องศาตามลำดับ และค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อทองแดง B88 จากการทดลองอยู่ที่ 25.06, 27.58 และ 29.90 องศาตามลำดับ ค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อทองแดง B88 จากการคำนวณทางทฤษฎีอยู่ที่ 20.27, 21.16 และ 22.06 องศาตามลำดับ

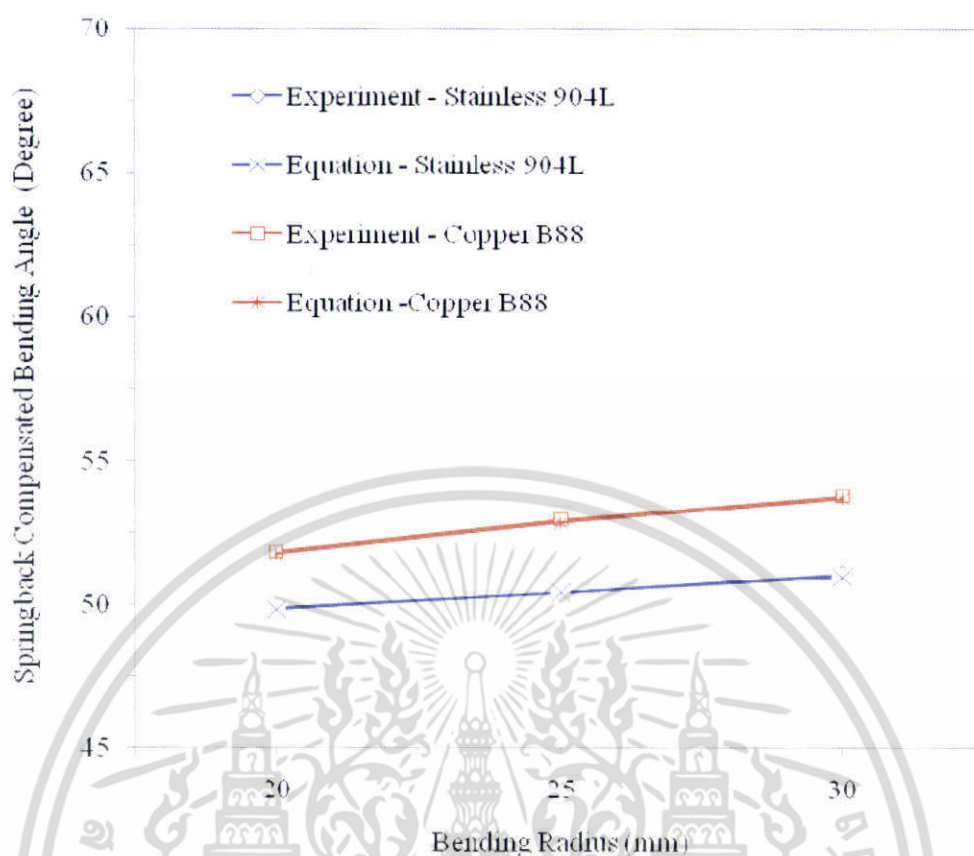
เอกสารนี้เป็นเอกสารหลวงเวสาลีหีบการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้ประชาชนใช้เป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.30 องศาชดเชยการดัดตัวกลับภายหลังการตัดที่องศาตัด 30 องศาของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88

จากรูปที่ 5.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีที่ใช้ในการดัดและค่าองศาชดเชยการดัดตัวกลับของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่องศาตัด 30 องศา จากผลการทดลองที่รัศมีดัด 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร พบว่ารัศมีที่ใช้ในการดัดเพิ่มขึ้นต้องชดเชยค่าองศาการดัดตัวกลับของท่อเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และต้องชดเชยค่าองศาการดัดตัวกลับท่อทองแดง B88 มากกว่าท่อสแตนเลส 904L เนื่องจากท่อทองแดง B88 มีการดัดตัวกลับมากกว่าท่อสแตนเลส 904L และเมื่อนำค่าการดัดตัวกลับไปชดเชยจะได้ค่าองศาการดัดจริง และค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อที่ได้จากการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎีเป็นไปในทางเดียวกัน ค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อสแตนเลส 904L จากการทดลองอยู่ที่ 35.10, 36.04 และ 36.70 องศา ตามลำดับ ค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อสแตนเลส 904L จากการคำนวณทางทฤษฎีอยู่ที่ 35.29, 35.96 และ 36.58 องศา ตามลำดับ และค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อทองแดง B88 จากการทดลองอยู่ที่ 39.26, 41.08 และ 41.90 องศา ตามลำดับ ค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อทองแดง B88 จากการคำนวณทางทฤษฎีอยู่ที่ 39.08, 40.51 และ 41.66 องศา ตามลำดับ

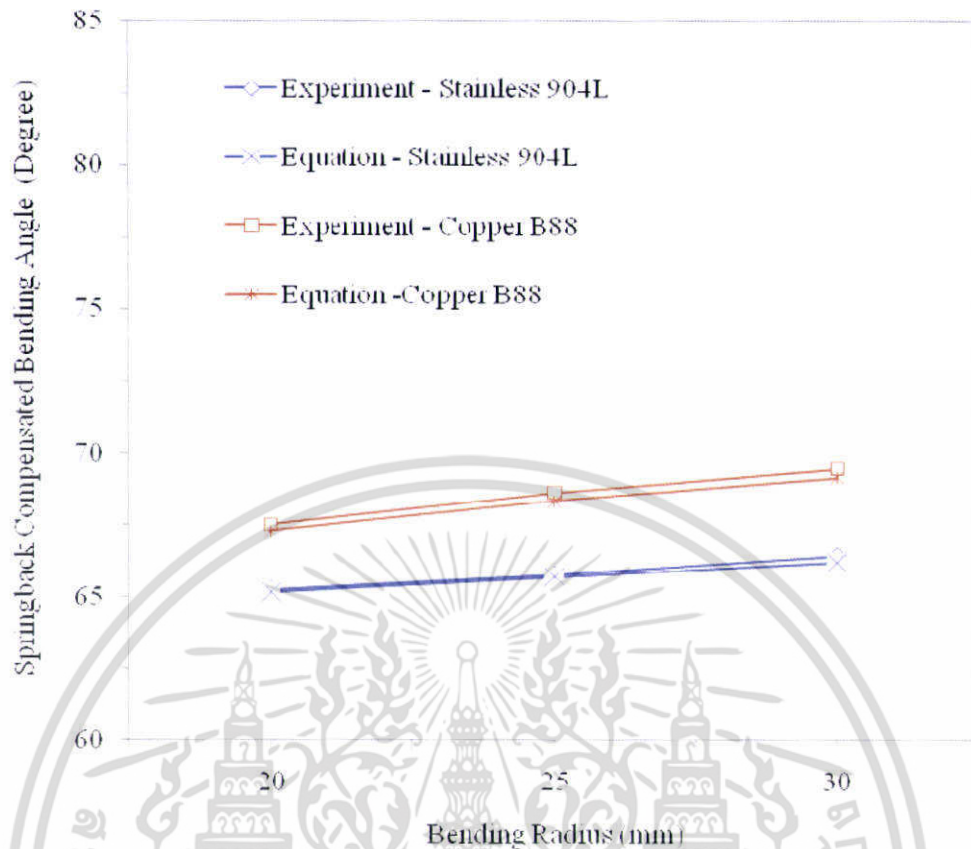
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.31 องศาชดเชยการดัดตัวกลับภายหลังการตัดท่อที่องศาตัด 45 องศาของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88

จากรูปที่ 5.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีที่ใช้ในการตัดและค่าองศาชดเชยการดัดตัวกลับของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่องศาตัด 45 องศา จากผลการทดลองที่รัศมีตัด 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร พบว่ารัศมีที่ใช้ในการตัดเพิ่มขึ้นต้องชดเชยค่าองศาการดัดตัวกลับของท่อเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และต้องชดเชยค่าองศาการดัดตัวกลับท่อทองแดง B88 มากกว่าท่อสแตนเลส 904L เนื่องจากท่อทองแดง B88 มีการดัดตัวกลับมากกว่าท่อสแตนเลส 904L และเมื่อนำค่าการดัดตัวกลับไปชดเชยจะได้ค่าการตัดจริง และค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อที่ได้จากการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎีเป็นไปในทางเดียวกัน ค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อสแตนเลส 904L จากการทดลองอยู่ที่ 49.87, 50.41 และ 51.07 องศา ตามลำดับ ค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อสแตนเลส 904L จากการคำนวณทางทฤษฎีอยู่ที่ 49.84, 50.42 และ 50.97 องศา ตามลำดับ และค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อทองแดง B88 จากการทดลองอยู่ที่ 51.86, 52.98 และ 53.80 องศา ตามลำดับ ค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อทองแดง B88 จากการคำนวณทางทฤษฎีอยู่ที่ 51.75, 52.85 และ 53.71 องศา ตามลำดับ

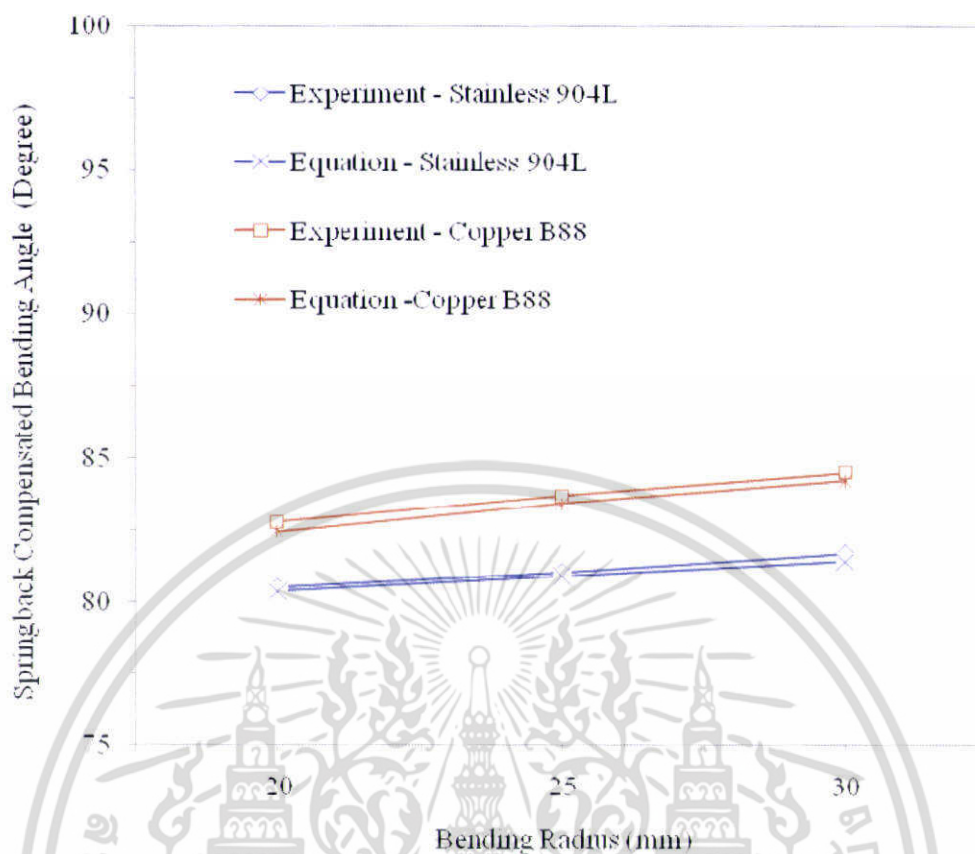
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.32 องศาชดเชยการดัดตัวกลับภายหลังการตัดท่อที่องศาตัด 60 องศาของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88

จากรูปที่ 5.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีที่ใช้ในการดัดและค่าองศาชดเชยการดัดตัวกลับของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่องศาตัด 60 องศา จากผลการทดลองที่รัศมีดัด 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร พบว่ารัศมีที่ใช้ในการดัดเพิ่มขึ้นต้องชดเชยค่าองศาการดัดตัวกลับของท่อเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และต้องชดเชยค่าองศาการดัดตัวกลับท่อทองแดง B88 มากกว่าท่อสแตนเลส 904L เนื่องจากท่อทองแดง B88 มีการดัดตัวกลับมากกว่าท่อสแตนเลส 904L และเมื่อนำค่าค่าการดัดตัวกลับไปชดเชยจะได้ค่าองศาการดัดจริง และค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อที่ได้จากการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎีเป็นไปในทางเดียวกัน ค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อสแตนเลส 904L จากการทดลองอยู่ที่ 65.24, 65.78 และ 66.44 องศา ตามลำดับ ค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อสแตนเลส 904L จากการคำนวณทางทฤษฎีอยู่ที่ 65.15, 65.70 และ 66.22 องศา ตามลำดับ และค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อทองแดง B88 จากการทดลองอยู่ที่ 67.50, 68.62 และ 69.44 องศา ตามลำดับ ค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อทองแดง B88 จากการคำนวณทางทฤษฎีอยู่ที่ 67.30, 68.34 และ 69.15 องศา ตามลำดับ

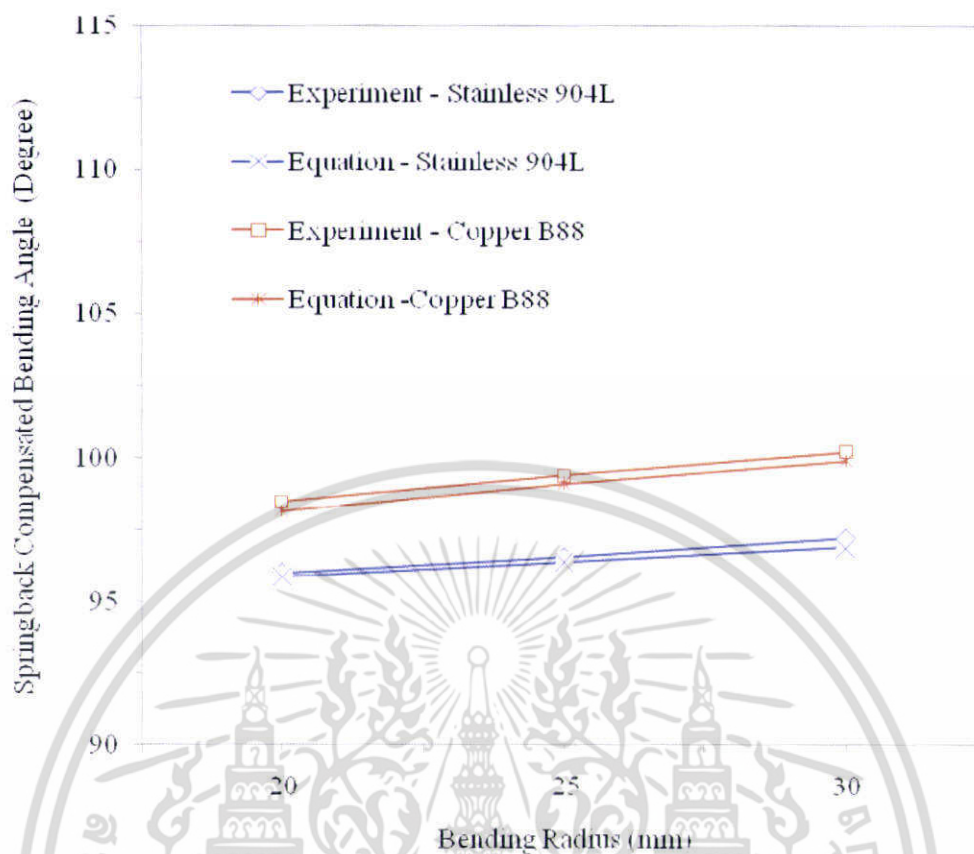
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.33 องศาชดเชยการดัดตัวกลับภายหลังการดัดท่อที่องศาตัด 75 องศาของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88

จากรูปที่ 5.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีที่ใช้ในการดัดและค่าองศาชดเชยการดัดตัวกลับของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่องศาตัด 75 องศา จากผลการทดลองที่รัศมีดัด 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร พบว่ารัศมีที่ใช้ในการดัดเพิ่มขึ้นต้องชดเชยค่าองศาการดัดตัวกลับของท่อเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และต้องชดเชยค่าองศาการดัดตัวกลับท่อทองแดง B88 มากกว่าท่อสแตนเลส 904L เนื่องจากท่อทองแดง B88 มีการดัดตัวกลับมากกว่าท่อสแตนเลส 904L และเมื่อนำค่าค่าการดัดตัวกลับไปชดเชยจะได้ค่าองศาการดัดจริง และค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อที่ได้จากการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎีเป็นไปในทางเดียวกัน ค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อสแตนเลส 904L จากการทดลองอยู่ที่ 80.50, 81.04 และ 81.70 องศา ตามลำดับ ค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อสแตนเลส 904L จากการคำนวณทางทฤษฎีอยู่ที่ 80.36, 80.90 และ 81.40 องศา ตามลำดับ และค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อทองแดง B88 จากการทดลองอยู่ที่ 82.76, 83.68 และ 84.50 องศา ตามลำดับ ค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อทองแดง B88 จากการคำนวณทางทฤษฎีอยู่ที่ 82.44, 83.43 และ 84.21 องศา ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.34 องศาชดเชยการดัดตัวกลับภายหลังการตัดท่อที่องศาตัด 90 องศาของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88

จากรูปที่ 5.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีที่ใช้ในการดัดและค่าองศาชดเชยการดัดตัวกลับของท่อสแตนเลส 904L และท่อทองแดง B88 ที่องศาตัด 90 องศา จากผลการทดลองที่รัศมีดัด 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร พบว่ารัศมีที่ใช้ในการดัดเพิ่มขึ้นต้องชดเชยค่าองศาการดัดตัวกลับของท่อเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และต้องชดเชยค่าองศาการดัดตัวกลับท่อทองแดง B88 มากกว่าท่อสแตนเลส 904L เนื่องจากท่อทองแดง B88 มีการดัดตัวกลับมากกว่าท่อสแตนเลส 904L และเมื่อนำค่าการดัดตัวกลับไปชดเชยจะได้ค่าองศาการตัดจริง และค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อที่ได้จากการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎีเป็นไปในทางเดียวกัน ค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อสแตนเลส 904L จากการทดลองอยู่ที่ 96.00, 96.54 และ 97.20 องศา ตามลำดับ ค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อสแตนเลส 904L จากการคำนวณทางทฤษฎีอยู่ที่ 95.86, 96.39 และ 96.89 องศา ตามลำดับ และค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อทองแดง B88 จากการทดลองอยู่ที่ 98.46, 99.38 และ 100.20 องศา ตามลำดับ ค่าการชดเชยการดัดตัวกลับของท่อทองแดง B88 จากการคำนวณทางทฤษฎีอยู่ที่ 98.15, 99.12 และ 99.88 องศา ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในการดำเนินงานวิจัยการดัดขึ้นรูปท่อในครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมการตีกลับ และการชดเชยการตีกลับของการดัดท่อทองแดง B88 และท่อสแตนเลส 904L ที่รัศมีดัด และมุมองศาตัดต่างๆ จากชิ้นงานที่ได้นำไปวัดหามุมองศาการตีกลับของวัสดุ และหาค่าโมเมนต์ดัดและมุมมองศาชดเชยการตีกลับจากการคำนวณทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองที่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 จากการศึกษาพฤติกรรมทางกลของท่อทองแดง B88 และท่อสแตนเลส 904L ทำให้ทราบว่าค่าของความเค้น (Stress) ของวัสดุทั้งสองชนิดมีค่าไม่เท่ากัน

6.1.2 วัสดุที่มีความแข็งมากกว่าจะมีค่าความเค้น (Stress) สูงกว่า ทั้งนี้มาจากเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของวัสดุไม่เท่ากัน

6.1.3 จากการทดสอบหาระยะการดัดขึ้นรูปของวัสดุทั้งสองชนิด จะเห็นว่าท่อสแตนเลส 904L มีค่าคาร์บอนมากกว่าท่อทองแดง B88 ซึ่งค่าคาร์บอนมีผลต่อความแข็งของวัสดุ

6.1.4 เมื่อทำการทดลองการดัดขึ้นรูปท่อทองแดง B88 และท่อสแตนเลส 904L จะเห็นว่าท่อทั้งสองชนิดเกิดการตีกลับไปในทางเดียวกัน และเกิดการตีกลับในทุกๆ รัศมี และองศาตัด

6.1.5 ความแข็งของวัสดุมีผลต่อการตีกลับ วัสดุที่มีความแข็งน้อยกว่าจะมีการตีกลับมากกว่า เพราะวัสดุจะมีความเป็นช่วงอีลาสติกมากกว่าช่วงพลาสติกที่ผสมกันในบริเวณที่ทำการดัด

6.1.6 รัศมีดัดมีผลต่อการตีกลับ รัศมีดัดที่มากขึ้นจะทำให้การตีกลับมากขึ้น เนื่องจากความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผิวของท่อจะแผ่กระจายไปยังเส้นแกนกลางของความหนาแน่นน้อยลง ทำให้วัสดุมีความเป็นช่วงอีลาสติกมากกว่า หรือมีการคืนตัวได้ดีกว่า

6.1.7 องศาตัดมีผลต่อการตีกลับ องศาตัดที่มากขึ้นจะทำให้การตีกลับมากขึ้น เพราะชั้นทดสอบมีพื้นที่ในบริเวณที่ทำการดัดเพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุมีความเป็นช่วงอีลาสติกมากกว่า

6.1.8 รัศมีดัด และองศาตัดมีผลต่อการเสียรูปของวัสดุ รัศมีดัดเพิ่มขึ้นจะทำให้การเสียรูปของวัสดุลดลง และองศาตัดเพิ่มขึ้นจะทำให้การเสียรูปของวัสดุเพิ่มขึ้น

6.1.9 วัสดุที่มีความแข็งมากกว่า โมเมนต์ดัดจะมีค่ามากกว่า

6.1.10 โมเมนต์ดัดจากการคำนวณทางทฤษฎีเพิ่มขึ้น เมื่อรัศมีที่ใช้ในการดัดมีค่าน้อยลง เนื่องจากระยะห่างจากจุดหมุนที่ตั้งฉากกับแรงมีระยะลดลง

6.1.11 วัสดุที่มีความแข็งมากกว่า การชดเชยมุมองศาการตีกลับมากกว่า

6.1.12 รัศมีดัด และองศาตัดเพิ่มขึ้น การชดเชยมุมองศาการตีกลับเพิ่มขึ้น

6.1.13 จากการทดลอง เมื่อทำการชดเชยมุมองศาการตีกลับของท่อทองแดง B88 เกิน 100 องศา ชั้นทดสอบเกิดความเสียหาย

6.1.14 เมื่อเปรียบเทียบการชดเชยมุมองศาการตีกลับของท่อที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับการชดเชยของศาการตีกลับของท่อที่ได้จากการทดลองที่มุมองศาตัด 45 องศา มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

6.1.15 จากการชดเชยมุมองศาการตีกลับของท่อทั้งสองชนิดที่รัศมีตัดและองศาตัดต่างๆ ทำให้ทราบว่า การชดเชยในทางทฤษฎีน้อยกว่าทางปฏิบัติ

6.1.16 การชดเชยมุมองศาการตีกลับของท่อที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีมีความใกล้เคียงกับการชดเชยมุมองศาการตีกลับของท่อที่ได้จากการทดลอง และเป็นไปในทางเดียวกัน

6.2 ปัญหาที่พบ

6.2.1 เกิดความร้อนขึ้นที่ผิวของท่อในขั้นตอนการตัดเตรียมท่อก่อนทำการทดลองทำให้บริเวณผิวของท่อไหม้ แก้ไขโดยการนำเอาอุปกรณ์การตัดท่อ (Tube Cutting) มาใช้

6.2.2 มีความรู้และความเข้าใจในการใช้เครื่องตัดท่อซีเอ็นซีน้อย แก้ไขโดยการศึกษาวิธีการใช้งานและการทำงานของเครื่องให้รู้และเข้าใจก่อนนำวัสดุไปทำการทดลองจริง

6.2.3 การคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าจากเครื่องมือวัดองศาการตีกลับ แก้ไขโดยการทำแท่นจับยึด (Jig) เพื่อวางชิ้นงาน ซึ่งทำให้การอ่านค่าจากเครื่องมือวัดองศาการตีกลับแม่นยำมากขึ้น

6.3 ข้อเสนอแนะ

6.3.1 ทดสอบและทำการวิเคราะห์การตีกลับและการชดเชยการตีกลับของท่อโดยการตัดชิ้นรูปที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

6.3.2 ทำการทดลองโดยใช้วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือและเงื่อนไขต่างๆตามความต้องการในการใช้งานจริง

6.3.3 ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการตีกลับและการชดเชยการตีกลับของการตัดท่อขึ้นรูปด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์

เอกสารอ้างอิง

- [1] อนินท์ มีมนต์, ขวลิต แสงสวัสดิ์ และ ประกอบ บุญยงค์, “Engineering Materials” ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
- [2] ดำรง ไชยธีรานุวัฒน์ศิริม, “การขึ้นรูปโลหะ,” กรุงเทพมหานคร, ซีเอ็ดยูเคชั่น. หน้า 171-174, พ.ศ. 2537
- [3] ประสิทธิ์ เวียงแก้ว, ฉัตรชัย ลากรังสิรัตน์, “คู่มืองานเหล็ก,” กรุงเทพมหานคร, ซีเอ็ดยูเคชั่น. หน้า 92, พ.ศ. 2554
- [4] คู่มือปฏิบัติการทดลอง, “การทดสอบแรงบิด (Torsion Testing)” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
- [5] เทิดศักดิ์ อยู่ฤทธิ์, “การลดการบิดตัวกลับของโลหะแผ่นในการตัดแบบตัวยู” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 7-16, พ.ศ. 2550
- [6] ภาสกร เก้ว, “การวิเคราะห์การบิดตัวกลับของท่อเหล็กในกระบวนการการตัดขึ้นรูป,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, หน้า 8-13, พ.ศ. 2545
- [7] Ampere, A. Tseng, “Springback of Sheet Metal Forming,” Arizona State University, Tempe: Arizona 85287 USA, 1995
- [8] H.-M. Huang, S.-D. Liu, S.Jiang. “Stress and Strain Histories of Multiple Bending Unbending Springback Proess,” Transactions of the ASME, 384/Vol. 123, Oct 2001.
- [9] Lange, K., “Handbook of Metal Forming,” McGraw-Hill, New York, Part three Chapter 19, 1985.
- [10] Japanese Standard Association, “JIS Handbook,” AIDA PRESS, Tokyo, pp. 55-57, 2004
- [11] Kalpakjian, S., “Manufacturing Processes for Engineering Materials,” 4 th Ed : Assison Wesley, 1997.
- [12] Ansel, C. Ugural, And Saul, K. Fenster, “Advanced strength and Applied elasticit,” 3rd edition, Prentice-Hall, 1995
- [13] Chakrabarty, J., “Theory of Plasticity,” McGraw-Hall, 1987
- [14] Irving, H. Shames, and Francis, M. Cozzarelli, “Elastic and Inelastic stress analysi,” A Simon & Schuster, 1992
- [15] R.J. Gu, H. Yang, M. Zhan, H. Li, H.W. Li, “Research on the springback of thin-walled tube NC bending based on the numerical simulation of the whole process,” Department of Materials Forming and Control Engineering, Northwestern Polytechnical University, Oct 2007.
- [16] Tvergaard, V., and Needleman, A., “On the Buckling of Elastic-Plastic Columns with Asymmetric Cross-Section,” Journal of Mechanical Sci, Vol. 17, pp. 419-424, 1975

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [17] N.E. Hansen, And O. Jannerup, “Modelling of Elastic-Plastic Bending of Beams Using a Roller Bending Machine,” Journal of Engineering for Industry, Vol. 17, pp. 419-424, 1975
- [18] Joseph Edward Shigley, “Mechanical Engineering Design.” First Metric Edition, pp.133-159, 1986



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ME-NETT 24
FOR MECHANICAL ENGIN
2010 THAI SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERING

The 24th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand



20th-22nd October 2010
SUNEE GRAND HOTEL AND CONVENTION CENTER, UBONRATCHATHANI



Hosted by: Department of Mechanical Engineering, Ubon Ratchathani University
Cooperated by: Thai Society of Mechanical Engineering (TSME)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การศึกษาพฤติกรรมและการชดเชยการดัดตัวกลับของการดัดท่อ

B88 และ 904L

A Study of Springback Behavior and Compensation of B88 and 904L

Tubes Bending

พิทยาภรณ์ โกมาร¹, สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ²

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

E-mail: gomarn_p@hotmail.com, โทรศัพท์: 085 501 6222, โทรสาร: 027 372 549

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมและการชดเชยการดัดตัวกลับของการดัดท่อเกรด B88 และ 904L โดยในการดัดได้มีตัวแปรที่กำหนดคือ องศาการดัด และรัศมีการดัด โดยที่ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.52 มิลลิเมตร หนา 0.9 มิลลิเมตร จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานทั้งสองชนิดมีการดัดตัวกลับ ภายหลังการดัดชิ้นงานพบว่าชิ้นงานที่มีค่าความเค้นดึงสูงสุดสูงกว่าจะเกิดการดัดตัวกลับมากกว่า การดัดตัวกลับของชิ้นงานมีค่ามากขึ้นเมื่อรัศมีการดัดมีค่ามากขึ้น การดัดชิ้นงานที่มีองศาการดัดที่มากกว่าจะต้องสอดคล้องตามความต้องการมากขึ้น ผลของการศึกษาสามารถเป็นแนวทางการชดเชยการดัดตัวกลับของการดัดท่อชนิดอื่นๆได้

คำหลัก: การดัดขึ้นรูป / การดัดตัวกลับ / การชดเชย

Abstract

The objective of this research is to study the springback behaviors and compensation in bending of B88 and 904L tubes. Bending parameters such as bending angles and bending radius was studied. The dimension of workpiece, the workpiece diameter, was 9.52 mm. and 0.9 mm. wall-thickness. It was found that both types of workpiece had their own springback properties. After the bending process, it was found that the more increasingly in springback property occurred in the higher strength workpiece. Springback of the workpiece increases as the bending radius increases. For the larger bending angle, the closely required angle was obtained. The results can be used to compensate the springback value for other types of tube bending.

Keywords: Bending / Springback / Compensation

1. บทนำ

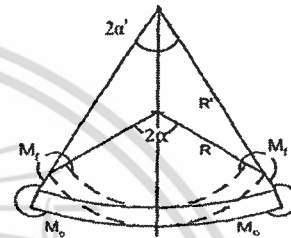
การตัดท่อที่ไม่ได้รูปร่างตามต้องการ เนื่องจากเกิดการติดกลับภายหลังจากการตัด เป็นอีกหนึ่งปัญหาของอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนประกอบต่างๆ ทั้งทางด้าน เครื่องจักร และเครื่องยนต์ ปัจจุบันทางโรงงานได้พัฒนาโดยการนำเครื่องซีเอ็นซี (CNC Machine) มาใช้แทนแรงงานคน แต่ก็ยังประสบปัญหาเกี่ยวกับการเผื่อการติดกลับของท่อ จากปัญหาที่เกิดขึ้นจึงเป็นแนวคิดที่จะทำการวิจัย เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการติดตัวกลับของวัสดุ 2 ชนิด คือ ท่อทองแดงไร้ตะเข็บ (Seamless Copper Water Tube; ASTM B88) และ ท่อสแตนเลสไร้ตะเข็บ เกรด 904L (Seamless Stainless Steels Grade 904L; ASTM B677) ซึ่งมีค่าทางกายภาพที่แตกต่างกัน โดยทางปฏิบัติ และการคำนวณทางทฤษฎี และทำการชดเชยการติดตัวกลับของวัสดุ

ตัวแปร

r, r_o, r_i	รัศมีท่อ
x, y, z	พิกัดอ้างอิง
e_1, e_o	ระยะจากจุดศูนย์กลางรัศมีตัดถึงแกนอ้างอิงของคานโค้ง
a, b, c, p	ระยะจากจุดศูนย์กลางรัศมีตัดถึงหน้าตัดใดๆของคานโค้ง
B_1, B_2	ค่าคงที่
E	โมดูลัสยืดหยุ่น
I_z	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดท่อ
M, M_o	โมเมนต์ตัด
R_o, R_i	รัศมีตัด
R'	รัศมีติดกลับ
σ_{max}	ความเค้นที่จุดคราก
σ_r	ความเค้นตามแนวรัศมี
σ_θ	ความเค้นแนวตั้งฉากกับแนวรัศมี
ϵ_o, ϵ_i	ความเครียดที่จุดสมดุล
R	รัศมีที่ใช้ในการตัด
R'	รัศมีติดกลับ

2. ทฤษฎี

การขึ้นรูปโลหะด้วยการดัดขึ้นรูป เมื่อให้โหลดกับวัสดุ วัสดุจะเกิดการงอตัวความเค้นจะเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ หลังจากวัสดุไม่ได้รับโหลด วัสดุจะเกิดการงอตัวเกิดขึ้น แต่มุมที่เกิดขึ้นไม่เท่ากับมุมที่เกิดจากการรับโหลด เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะวัสดุเกิดการติดตัวกลับจากรูปที่ 1 แสดงรูปร่างระหว่างวัสดุที่รับโหลดกับวัสดุที่ไม่มีโหลด



รูปที่ 1 แสดงปรากฏการณ์การเกิด Springback

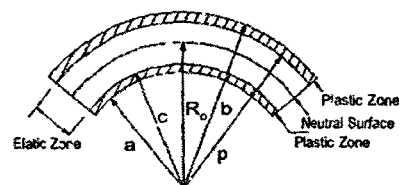
จากการสันนิษฐาน วัสดุเป็นวัสดุไอโซทรอปิกและยังคงรักษาความเป็นระนาบ ตลอดกระบวนการ เริ่มจากการดัดเริ่มแรกเป็นท่อตรง จึงพิจารณาให้ท่อเป็นช่วงการดัดแบบคานตรง ช่วงนี้จะเป็นช่วงอีลาสติก จะได้สมการคำนวณรัศมีเริ่มต้นเป็น

$$R_o = \frac{EI}{M_o} \tag{1}$$

โดยที่

$$M_o = \frac{\sigma_{max} I_z}{R_o} \tag{2}$$

การตัดท่อช่วงต่อจากการตัดคานตรง เป็นการตัดโดยการเพิ่มโมเมนต์ดัดขึ้นไปจนทำให้วัสดุเกิดการยืดหดจนเกินจุดยืดหยุ่น และที่หน้าตัดของคานจะมีสภาพเป็นพลาสติกและอีลาสติกผสมกันดังภาพที่ 2

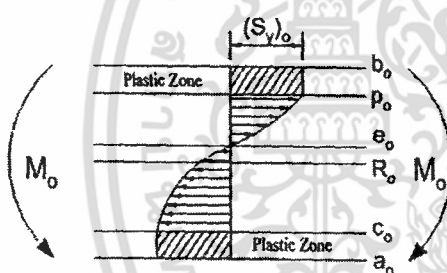


รูปที่ 2 ช่วงพลาสติกและอีลาสติกผสมกันในคานโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่บริเวณด้านนอกสุดจะเลยช่วงที่วัสดุครากไป แล้ว ส่วนบริเวณด้านในจะยังคงสภาพความยืดหยุ่นอยู่ ดังนั้นจึงการแบ่งโมเมนต์ตัดออกเป็นสองส่วน โมเมนต์ตัดช่วงอีลาสติกและโมเมนต์ตัดช่วงพลาสติก การตัดช่วงนี้เราถือว่าท่อมี่ลักษณะเป็นคานโค้ง จะพิจารณาความเค้นได้สองทิศทาง คือความเค้นตามแนวรัศมีความโค้ง (σ_r) และความเค้นตั้งฉากกับรัศมีความโค้ง (σ_θ)

การกระจายตัวของความเค้นตั้งฉากกับหน้าตัด (σ_θ) ทำให้เกิดโมเมนต์ตัดคานโค้งในขณะนั้น ดังนั้น สามารถอธิบายสมการความเค้นได้ตามทฤษฎีคานโค้งดังนี้



รูปที่ 3 การกระจายตัวของความเค้นตามแนว θ

ช่วง $a_0 - c_0$ เป็นช่วงพลาสติก (Plastic Zone)

$$\sigma_r = 2k \ln\left(\frac{r}{a_0}\right), \quad \sigma_\theta = 2k \ln\left(1 + \frac{r}{a_0}\right) \quad (3)$$

ช่วง $c_0 - p_0$ เป็นช่วงอีลาสติก (Elastic Zone)

$$\sigma_r = -B_1 \left(\frac{p_0^2}{r^2} - 1\right) + B_2 \left(\frac{p_0}{r} - 1\right) + 2k \ln\left(\frac{b_0}{p_0}\right),$$

$$\sigma_\theta = -B_1 \left(\frac{p_0^2}{r^2} + 1\right) - B_2 \left(1 - \frac{p_0}{r}\right) + 2k \ln\left(\frac{b_0}{p_0}\right) \quad (4)$$

$$\text{เมื่อ } B_1 = \frac{2k}{\frac{p_0^2}{c_0^2} - 1}, \quad B_2 = 2k \frac{\frac{p_0^2}{c_0^2} + 1}{\frac{p_0^2}{c_0^2} - 1} \quad (5)$$

ช่วง $p_0 - b_0$ เป็นช่วงพลาสติก (Plastic Zone)

$$\sigma_r = 2k \ln\left(\frac{b_0}{r}\right), \quad \sigma_\theta = 2k \left(1 - \ln\left(\frac{b_0}{r}\right)\right) \quad (6)$$

จากความต่อเนื่องของ σ_r ที่ $r = c_0$ จะได้ความสัมพันธ์

$$p_0^2 = \left(1 - \ln\left(\frac{a_0 b_0}{c_0^2}\right)\right) = c_0^2 \left(1 + \ln\left(\frac{p_0^2}{a_0 b_0}\right)\right) \quad (7)$$

เมื่อท่ออยู่ภายใต้โมเมนต์ตัดจากภายนอก ภายในเนื้อวัสดุจะต้องเกิดโมเมนต์ด้านขึ้นเท่ากับโมเมนต์ตัดจากภายนอก เมื่อปลดโมเมนต์ภายนอก โมเมนต์ด้านภายในเนื้อวัสดุ ยอมสูญหาย จะทำให้เกิดความเค้นตกค้างในเนื้อวัสดุซึ่งเราจะได้การเปลี่ยนแปลงความเค้นได้เป็น

$$\Delta \sigma_x = E \Delta \epsilon_x \quad (8)$$

และการเปลี่ยนแปลงความเครียดได้เป็น

$$\Delta \epsilon_x = \frac{r}{R} - \frac{r}{R'} = r \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'}\right) \quad (9)$$

ดังนั้นเราจะได้การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์มีค่า

$$M = \int_{-r_0}^{r_0} r \Delta \sigma_x dA \quad (10)$$

$$M = \int_{-r_0}^{r_0} E \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'}\right) r^2 dA \quad (11)$$

จะได้การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์มีค่าเท่ากับ

$$M = IE \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \right) \quad (12)$$

จากรูปที่ 1 องศาการดัด 2α และองศาที่ได้หลังจากการดัด $2\alpha'$ แรงที่เกิดขึ้นหลังจากการปล่อยไหลตออกเป็นเกิดการดัดตัวกลับโดยที่

$$\frac{2\alpha}{2\alpha'} = (R' - R) \quad (13)$$

จาก (13) จะได้รัศมีดัดกลับมีค่าเท่ากับ

$$R' = \frac{2\alpha}{2\alpha'} + R \quad (14)$$

จะต้ององศาการดัดตัวกลับมีค่าเท่ากับ

$$2\alpha = 2\alpha' (R' - R) \quad (15)$$

เมื่อ

$2\alpha'$ = องศาที่ได้หลังจากการดัด

2α = องศาชดเชยการดัดตัวกลับ

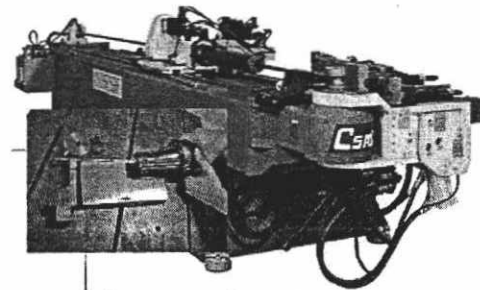
และนำค่าองศาการดัดตัวกลับของท่อที่ได้จากการทดลองมาแทนในสมการ (14) และแทนค่าในสมการ (15) จนกว่าจะได้ค่าองศาชดเชยการดัดตัวกลับ

3. วิธีการทดลอง

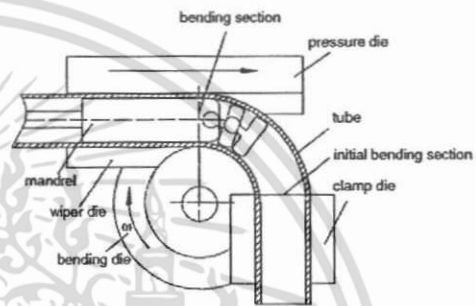
3.1 การทดลองหาองศาการดัดกลับ

ทำการดัดท่อ โดยเครื่องซีเอ็นซี (CNC 65TSRE) ตามรูปที่ 4 ที่รัศมีดัดต่างๆกัน 3 รัศมีดัดคือ 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร โดยแต่ละรัศมีดัดตัดเป็นมุมต่างๆกันที่ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา ที่แต่ละรัศมีดัดและแต่ละมุมตัดทำการดัดท่อ 3 ครั้ง นำท่อในแต่ละรัศมีดัดและแต่ละมุมตัดต่างๆมาทำการวัดค่าหาองศาหลังการดัด โดยใช้เครื่องวัดองศาโปรแทคเตอร์ (Angle Meter Protractor) ตามรูปที่ 6 นำค่าที่ได้ในแต่ละรัศมีดัดและแต่ละมุมตัดมาหาค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 แสดงเครื่องซีเอ็นซี 65TSRE



รูปที่ 5 แสดงการทำงานของอุปกรณ์การดัด



รูปที่ 6 แสดงเครื่องวัดองศาโปรแทคเตอร์

3.2 การทดสอบหาองศาชดเชยการดัดกลับ

นำค่าองศาที่ดัดกลับจากการทดลองข้างต้นมาเพิ่มในองศาการดัด และนำค่าองศาที่ดัดกลับหลังจากการเพิ่มองศาการดัดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งองศาของวัสดุหลังจากการดัดมีค่าเท่าที่ต้องการ หรือใกล้เคียงมากที่สุด จากนั้นทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง และนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 ผลการตรวจสอบหาส่วนผสมในเนื้อวัสดุ

ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของ 904L

C	0.020	Mn	2.00	Si	1.00
P	0.045	S	0.035	Cr	21.220
Mo	4.500	Ni	26.400	Cu	1.550

ตารางที่ 2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของ B88

C	-	Mn	-	Si	-
P	0.040	S	-	Cr	-
Mo	-	Ni	-	Cu	99.96

การตรวจสอบส่วนผสมของวัสดุ 904L และ B88 ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง portable spectrometer รุ่น arcmet-8000

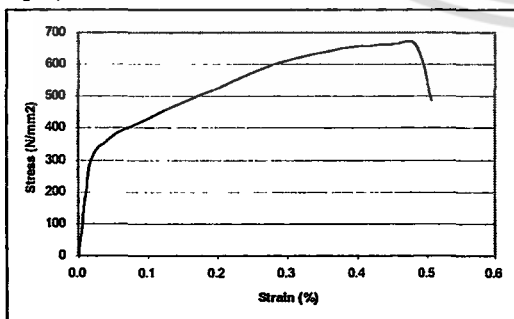
จากตารางที่ 1 และตารางที่ 2 พบว่าสารประกอบแต่ละชนิดในเนื้อวัสดุ 904L และ B88 มีค่าต่างกันมาก แต่มีอยู่หนึ่งตัวซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก คือ ฟอสฟอรัส (Phosphorus) และพบว่าในเนื้อวัสดุ B88 จะไม่มีสารประกอบชนิดอื่นเลยนอกจากทองแดง (Cu) และ ฟอสฟอรัส (P) เนื่องจากวัสดุ B88 เป็นทองแดงบริสุทธิ์

4.2 ผลการทดสอบความแข็งและแรงดึง

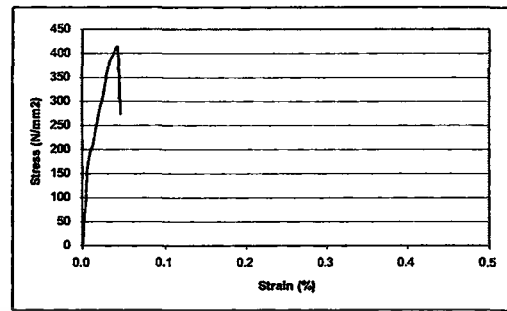
ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติเชิงกลของ 904L และ B88

Material	Yield Strength [MPa]	Elastic Modulus [GPa]	Poisson Ratio (ν)
904L	299.85	193.05	0.28
B88	172.25	110.32	0.33

วิธีการทดสอบแรงดึง นำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้าๆ แล้วบันทึกค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพล็อตเป็นเส้นโค้ง การทดสอบเป็นการประมาณความแข็งแรงของโลหะทำให้ทราบถึงข้อมูลคุณสมบัติเชิงกลตามตารางที่ 3



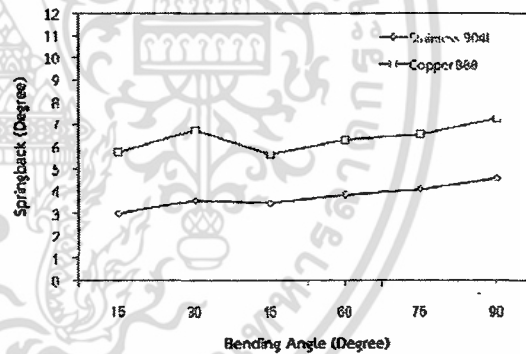
รูปที่ 7 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ 904L



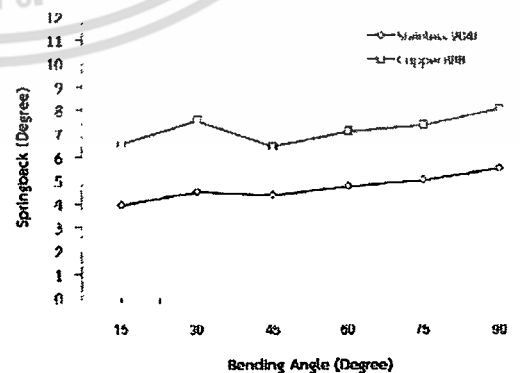
รูปที่ 8 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ B88

จากผลการตรวจสอบวัสดุ แสดงให้เห็นว่าวัสดุทั้งสองชนิดต่างกัน ซึ่งจากตารางที่ 3 จะแสดงให้เห็นว่าวัสดุ 904L มีค่าความต้านแรงดึงคราก (Yield Strength) มากกว่าวัสดุชนิด B88 ซึ่งบ่งบอกได้ว่าวัสดุ 904L มีค่าความแข็งมากกว่าวัสดุ B88

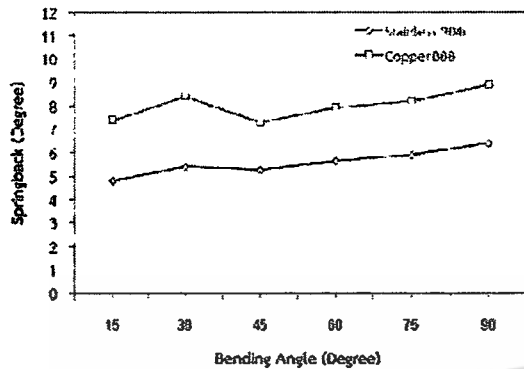
4.3 เปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี



รูปที่ 9 แสดงค่าระยะองศาตีกลับที่รัศมีตัด 20 มม.



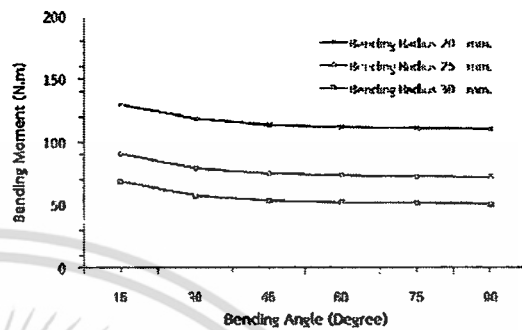
รูปที่ 10 แสดงค่าระยะองศาตีกลับที่รัศมีตัด 25 มม.



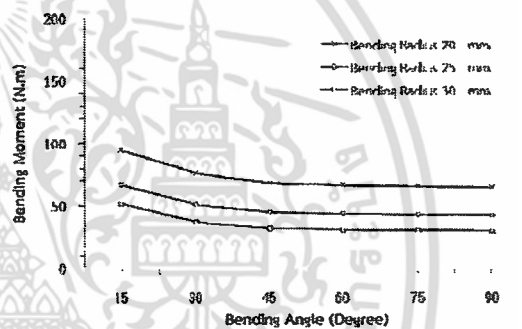
รูปที่ 11 แสดงค่าระยะของสชาติดกลับที่รัศมีดัด 30 มม.

จากรูปที่ 9, จากรูปที่ 10 และจากรูปที่ 11 เมื่อทำการทดสอบวัสดุทั้งสองชนิด จึงทำให้ทราบว่าวัสดุแต่ละชนิดมีการดัดกลับที่ไม่เท่ากัน จากสมการที่นำมาวิเคราะห์หาค่าการดัดตัวกลับของวัสดุ สามารถแสดงให้เห็นถึง ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นวัสดุจะยึดตัวออกจนเลยจุดความต้านแรงดึงคราก (Yield Strength) เมื่อถูกดัดหลังจากถูกดัดที่องศามากขึ้นทำให้เลยจุดอีลาสติก (Elastic Zone) ไปอยู่ในช่วงพลาสติก (Plastic Zone) ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบคงรูป การเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปในที่นี้ก็ยังมีความเค้นที่แฝงตัวอยู่ในตัวของชิ้นงาน ความเค้นที่เกิดขึ้นนี้มาจากความหนาของชิ้นงานนั่นเอง สามารถที่จะสังเกตได้จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าค่าความเค้นที่อยู่ในช่วงอีลาสติก (Elastic Zone) จะอยู่ด้านในใกล้เส้นกึ่งกลางของวัสดุ ส่วนช่วงที่เป็น พลาสติก (Plastic Zone) จะอยู่ในช่วงด้านนอกหรือตรงผิวของวัสดุ ฉะนั้นเมื่อวัสดุไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลง ไปอยู่ในช่วงพลาสติก (Plastic Zone) ได้ทั่วทั้งชิ้นทดสอบ การเกิดการดัดตัวกลับเมื่อทำการดัดวัสดุก็สามารถที่จะเกิดขึ้นได้เสมอจากผลที่ได้ ทั้งทางด้านปฏิบัติและทางทฤษฎี จะเห็นว่าแนวทางของกราฟไปในทิศทางเดียวกัน การดัดตัวกลับทางด้านวัสดุ 904L มากกว่าวัสดุ B88 เนื่องจากวัสดุ 904L มีค่าความเค้นสูงกว่า การดัดตัวกลับของวัสดุทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อรัศมีดัดที่ใช้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าโมเมนต์ที่ใช้ดัดมีค่าน้อยกว่าค่าโมเมนต์ที่ได้จากการดัดจากรัศมีดัดที่น้อยกว่า ส่งผลให้ความเป็นช่วงอีลาสติกในวัสดุมีค่ามากกว่ารัศมีดัดที่

น้อยกว่า เมื่อปลดโมเมนต์ดัดออก ทำให้มีความเครียดตกค้างในช่วงพลาสติกในเนื้อวัสดุน้อยกว่า หรือมีการคืนตัวได้ดีกว่า



รูปที่ 12 แสดงค่าโมเมนต์ดัดของท่อ 904L



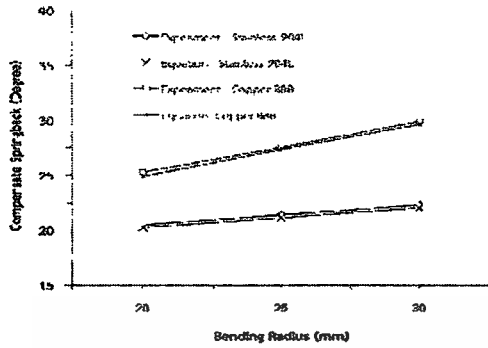
รูปที่ 13 แสดงค่าโมเมนต์ดัดของท่อ B88

ท่อสแตนเลส 904L มีค่าโมเมนต์ดัดมากกว่าท่อทองแดง B88 หรือกล่าวได้ว่า วัสดุที่มีค่าความต้านแรงดึงคราก (Yield Strength) สูงกว่า ค่าโมเมนต์ดัดจะสูงกว่าเมื่อเทียบในองศาตัด และรัศมีดัดเดียวกัน

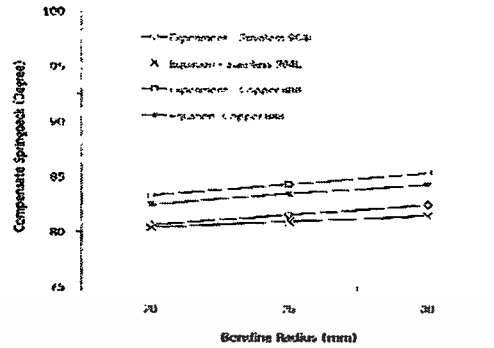
นำค่าที่ได้ไปทดแทนเพื่อหาค่าของสมการการดัดกลับที่เกิดขึ้นได้ดังเช่น กราฟที่ได้จากการทดลองข้างต้น จะเห็นว่าค่าการคำนวณที่ได้มีความแตกต่างกับทางปฏิบัติเล็กน้อย แนวทางของกราฟไปในทิศทางเดียวกัน จากการนำค่าการดัดตัวกลับมาชดเชยในวัสดุ 904L และ B88 มีความใกล้เคียงกับในทางปฏิบัติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าความเค้นในเนื้อวัสดุเกิดการดัดตัวกลับและค่าการดัดตัวกลับนั้นคงที่ ทำให้สามารถมาชดเชยและนำมาใช้งานจริง จะเห็นว่าต้องทำการชดเชยทางด้านวัสดุ 904L มากกว่าวัสดุ B88 เนื่องจากวัสดุ 904L มีค่าความเค้นและค่าความแข็งมากกว่าตามรูปที่ 14 ถึงรูปที่ 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

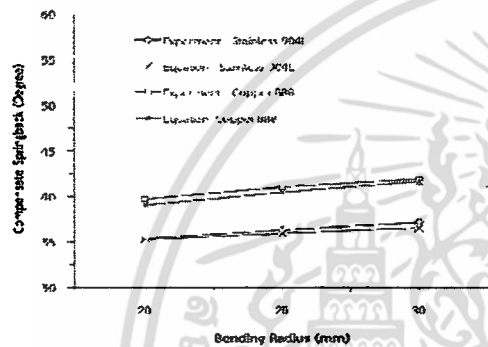
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



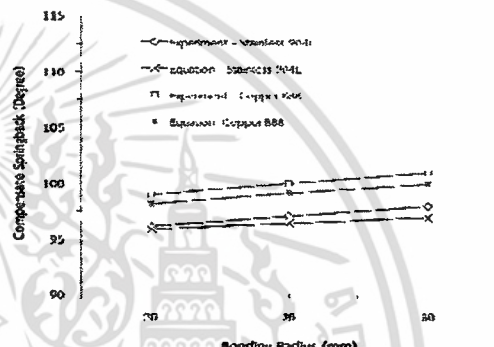
รูปที่ 14 แสดงค่าองศาขดเขยที่มุมตัด 15 องศา



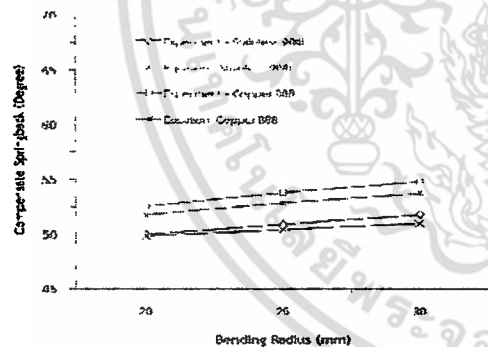
รูปที่ 18 แสดงค่าองศาขดเขยที่มุมตัด 75 องศา



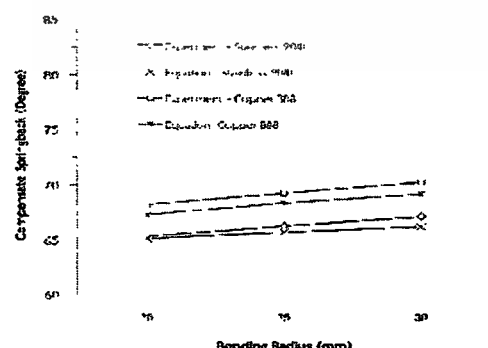
รูปที่ 15 แสดงค่าองศาขดเขยที่มุมตัด 30 องศา



รูปที่ 19 แสดงค่าองศาขดเขยที่มุมตัด 90 องศา



รูปที่ 16 แสดงค่าองศาขดเขยที่มุมตัด 45 องศา



รูปที่ 17 แสดงค่าองศาขดเขยที่มุมตัด 60 องศา

5. สรุป

1. การตีดกลับของวัสดุเกิดจากความเค้นตกค้างที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุ
2. เมื่อตีดวัสดุเลยจุดอีลาสติกถึงช่วงพลาสติก แล้ววัสดุยังสามารถตีดกลับได้
3. วัสดุที่มีค่าความแข็งต่างกันเกิดการตีดตัวกลับต่างกัน โดยที่ ค่าความแข็งสูงกว่า การตีดตัวกลับจะต่ำกว่าเมื่อเทียบในองศาตัด และรัศมีตัดเดียวกัน
4. การตีดตัวกลับของวัสดุมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อรัศมีที่ใช้ในการตัดมีค่าเพิ่มขึ้น
5. โมเมนต์ตัดจากการคำนวณมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีที่ใช้ในการตัดมีค่าลดลง เนื่องจากระยะห่างจากจุดหมุนที่ตั้งฉากกับแรงมีค่าลดลง
6. ค่าโมเมนต์ตัดจากการคำนวณของท่อ 904L มีค่ามากกว่าท่อ B88 เนื่องจากท่อ 904L มีค่าความต้านแรงดึงคราก (Yield Strength) มากกว่าท่อ B88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ค่าองศาขดเคียวการติดตัวกลับที่ได้จากการการคำนวณทางทฤษฎี และการทดลองเป็นไปในทางเดียวกัน

8. นำค่าองศาขดเคียวการติดตัวกลับที่ได้ไปเพิ่มในองศาที่ทำการตัดจะต้องใช้ในการตัดจริง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณท่านคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณบริษัท ชัพพลาย ไอคอน จำกัด ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] อนันท์ มีมนต์, ซวลิต แสงสวัสดิ์ และ ประกอบบุญยงค์, Engineering Materials, ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล

[2] ดำรง ไชยธีรานุวัฒน์ศิริม, "การขึ้นรูปโลหะ," กรุงเทพมหานคร, ซีไอเดียเคชั่น, หน้า 171-174, พ.ศ. 2537

[3] ประสิทธิ์ เวียงแก้ว, ฉัตรชัย ลามรังสิรัตน์, "คู่มืองานเหล็ก," กรุงเทพมหานคร, ซีไอเดียเคชั่น, หน้า 92, พ.ศ. 2554

[4] เกิดศักดิ์ อยู่ฤทธิ, "การลดการติดตัวกลับของโลหะแผ่นในการตัดแบบตัวยู" วิทยานิพนธ์ปริญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 7-16, พ.ศ. 2550

[5] ภาสกร เกวี, "การวิเคราะห์การติดตัวกลับของท่อเหล็กในกระบวนการการดัดขึ้นรูป," วิทยานิพนธ์ปริญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, หน้า 8-13, พ.ศ. 2545

[6] N.E. Hansen, And O. Jannerup, (1975). Modelling of Elastic-Plastic Bending of Beams Using a Roller Bending Machine, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 17, pp. 419-424.

[7] Ansel, C. Ugural, And Saul, K. Fenster, (1995). *Advanced strength and Applied elasticity*, 3rd edition, Prentice-Hall.

[8] Chakrabarty, J., (1987). *Theory of Plasticity*, McGraw-Hall.

[9] Irving, H. Shames, and Francis, M. Cozzarelli, (1992). *Elastic and Inelastic stress analysis*, A Simon & Schuster.

[10] Ampere, A. Tseng, (1995). *Springback of Sheet Metal Forming*, Arizona State University, Tempe: Arizona 85287 USA.

[11] R.J. Gu, H. Yang, M. Zhan, H. Li, H.W. Li, "Research on the springback of thin-walled tube NC bending based on the numerical simulation of the whole process," Department of Materials Forming and Control Engineering, Northwestern Polytechnical University, Oct 2007.

[12] Tvergaard, V., and Needleman, A., "On the Buckling of Elastic-Plastic Columns with Asymmetric Cross-Section," *Journal of Mechanical Sci.*, Vol. 17, pp. 419-424, 1975

[13] Joseph Edward Shigley, "Mechanical Engineering Design." First Metric Edition, pp.133-159, 1986



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาองศาขดเคียวการตีตัวกลับ

แสดงตัวอย่างการคำนวณหาค่าองศาขดเคียวการตีตัวกลับ (2α) ที่รัศมีดัด 30 มิลลิเมตร และองศาหมุนดัด 90 องศา

1. นำค่าองศาที่วัดได้ภายหลังการดัดขึ้นรูปจากการทดลองเท่ากับ 83.60 องศา มาแทนในสมการที่ (5.2) เพื่อหาค่ารัศมีตีตัวกลับ (R')

$$R' = \frac{90}{83.60} + 30$$

$$R' = 31.08 \text{ มิลลิเมตร}$$

2. นำค่ารัศมีตีตัวกลับ (R') ที่ได้จากการคำนวณข้างต้นมาแทนในสมการที่ (5.3) เพื่อหาค่าองศาขดเคียวการตีตัวกลับ (2α)

$$2\alpha = 90(31.08 - 30)$$

$$2\alpha = 96.89 \text{ องศา}$$

ดังนั้นที่รัศมีดัด 30 มิลลิเมตร และองศาหมุนดัด 90 องศา จะได้ค่าองศาขดเคียวการตีตัวกลับเท่ากับ 96.89 องศา และค่าองศาขดเคียวการตีตัวกลับจากการทดลองมีค่าเท่ากับ 97.20 องศา

การคำนวณหาโมเมนต์ดัด

ภายหลังจากการดัดท่อภายใต้โมเมนต์ดัดเมื่อเราปลดภาระโมเมนต์ดัดออก (Unload) โมเมนต์ที่กระทำกับท่อจะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ท่อจะไม่ตีตัวกลับไป ยังตำแหน่งรัศมีดัดเดิม เนื่องจากมีความเครียดตกค้างซึ่งเป็นผลมาจาก ความเครียดพลาสติก และจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตามสมการ (3.28)

$$M = IE \left(\frac{I}{R} - \frac{I}{R'} \right)$$

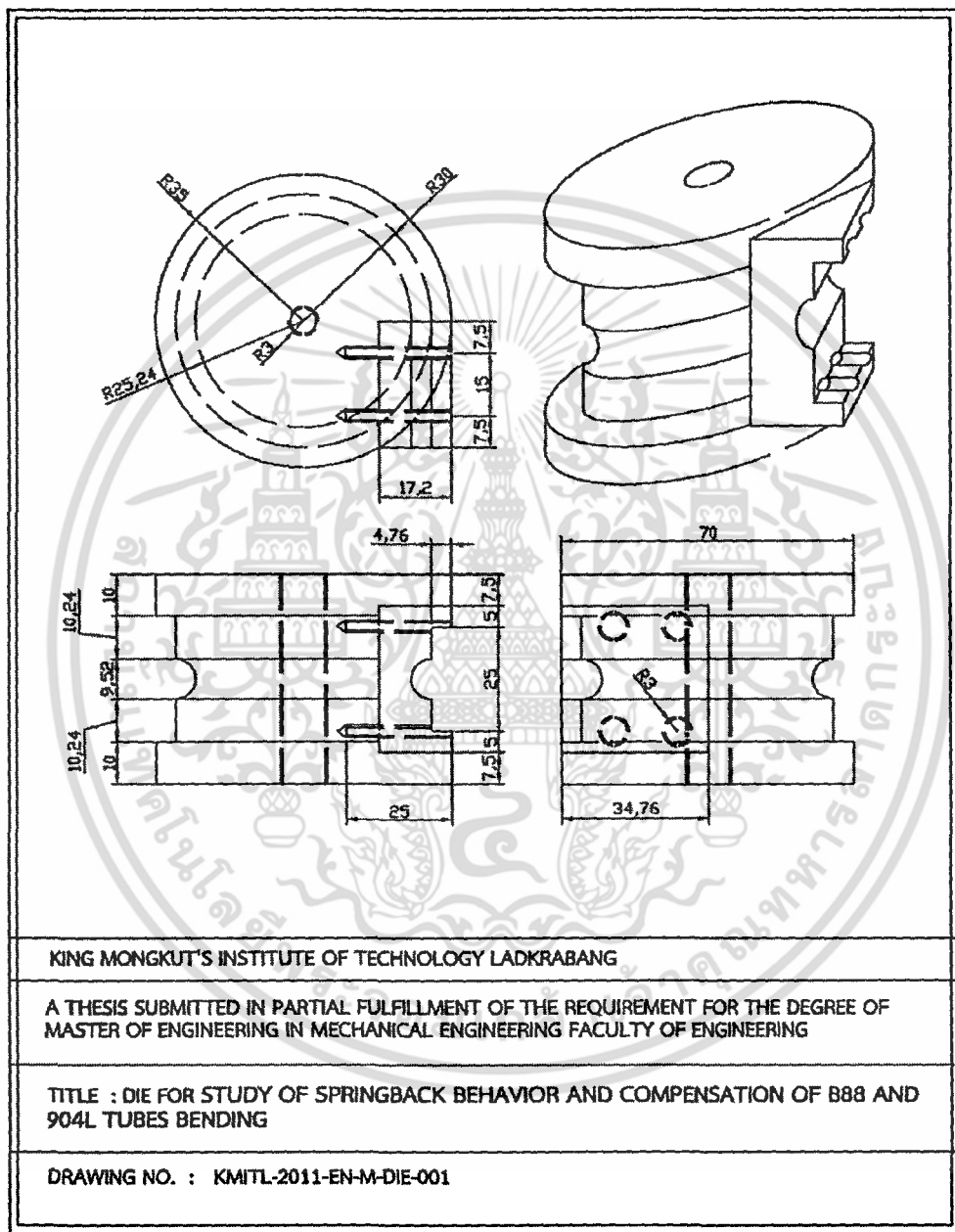
แทนค่า

$$M = (228.72 \times 193050) \times \left(\frac{I}{30} - \frac{I}{31.08} \right)$$

$$M = 50987.60 \text{ นิวตัน-มิลลิเมตร}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.1 แสดงแบบแม่พิมพ์ในการดัดขึ้นรูป

















เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง.

มาตรฐานเครื่องตัดท่อซีเอ็นซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Max capacity OD x WT (mild steel)		65 x 2 mm
Bending radius		35-250 mm
Carriage speed		1360 mm/sec
Rotation speed		270 °/sec
Bending speed		99 °/sec
Tolerance		± 0.01 °
Tools stack		1
Bend		 Electric servo
Carriage		 Electric servo
Rotation		 Electric servo
Standard mandrel working distance		2500 mm
Dimension		5000x1150x1350 mm
Weight		4000 kgs

รูปที่ ง.1 แสดงมาตรฐานเครื่องตัดท่อซีเอ็นซี

Standard features

- Bend-arm (C-axis) by servo motor + exclusive transmission gears
- Clamp die by hydraulic
- Pressure die by hydraulic
- Carriage (Y-axis) by servo motor
- Collet (B-axis) : rotation by servo motor, grip by hydraulic
- Automatic mandrel lubrication
- Anticipated mandrel retraction unit
- Standing pedestal, serves emergency stop and remote control
- Industrial PC assorted with touch screen display, capable of 3D bending simulation, 3D preview and collision prevention
- CE mark

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Tube Fabrication Machinery Ltd.

(t/a TubeMart)

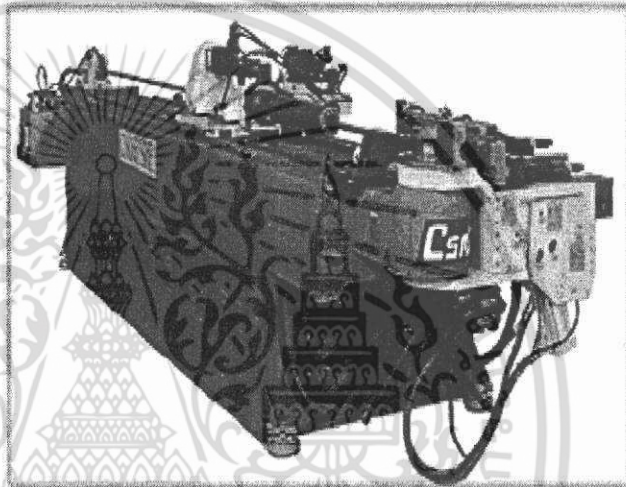
Unit 4, Heron Business Park, Widnes
Cheshire, WA8 0SW

Tel: 0151 424 0763 Fax 0151 424 0781

Email sales@tubefab.co.uk Web: www.tubefab.co.uk

Data Sheet – CNC65 TSRE

CNC 65TSRE is a CNC tube bender for accurate bending of complex metallic tubular components. All three axes are AC Servo motor controlled offering flexibility, accuracy and a high production capability.



TubeMart Tube Bending Machines:

Machine Model CSM CNC65TSRE

Standard features:

Powered Follower Slide

Rise & fall clamping

English language display.

CE Certification, safety mats and surround fencing

Foot Switch operation

MASTER 3 State of the art PC based control with 15" colour touch screen display.

3D Simulation giving a graphic display of the bend component 1,000,000 x 30 bend programs can be stored in memory.

Y Axis (Distance Between Bends), B Axis (Plane of Bend) and C Axis (Bending Axis) are all driven by Electric Servo Motors.

Very Rigid compact bending head ensures a high degree of bending accuracy. (0.01 Degree)

X.Y.Z. (Cartesian coordinates) converted to Y.B.C. (Bend Program) or from Y.B.C. to X.Y.Z.

Metric or Imperial Data input.

Elongation and spring-back compensation correction.

Simultaneous editing of a part while the bending is running production.

Parts counter capability.

Bending program storage and recall.

Tube Fabrication Machinery Ltd. (t/a Tubemart)

VAT REG. 901576829

Co.Reg.No.6225629

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Tube Fabrication Machinery Ltd.

(t/a TubeMart)

Unit 4, Heron Business Park, Widnes

Cheshire, WA8 0SW

Tel: 0151 424 0763 Fax 0151 424 0781

Email sales@tubefab.co.uk Web: www.tubefab.co.uk

Technical Specifications: Model CNC65T5RE			
Bending Capacity / Round Tube / Mild Steel (S=40kgf/mm ²)	65 x 2.0mm	DBB (Feeding) speed	1360 mm/ sec
Bending Capacity / Round Tube / Non-Ferrous S=25kgf/mm ²)	65 x 3.5mm	Accuracy of DBB (Feeding)	±0.01mm
Bending Capacity / Round Tube / Stainless S=60kgf/mm ²)	65 x 1.4mm	POB (Rotation) Speed	270 deg / mm
Bending Capacity / Square Tube / Mild Steel (S=40kgf/mm ²)	50 x 2.0mm	Accuracy of POB (Rotation)	±0.01 degrees
Bending Capacity / Solid Bar / Mild Steel (S=40kgf/mm ²)	30mm	Motor for Hydraulic	5.5 Kw
Max. Bending Radius	35 – 250mm	Total Power	19 Kw
Max. Bending Angle	190 degrees	Max. Pressure	140 kgf / cm ²
Max. Length over Mandrel	2500mm	Hydraulic Tank Capacity	300 Litres
Working Height	1120mm	Machine Length	5000mm
Tooling Centre Line Height	50mm	Machine Width	1350mm
DOB (Bending) Speed	99 deg / sec.	Machine Height	1200mm
Accuracy of DOB (Bending)	±0.01 degrees	Machine Weight	4000 kgs

Tube Fabrication Machinery Ltd. (t/a Tubemart)

VAT REG. 901576829

Co.Reg.No.6225629

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอน (Carbon) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ C

เป็นธาตุที่สำคัญที่สุด จะต้องผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก มีคุณสมบัติทำให้เหล็กแข็งเพิ่มขึ้น หลังจากนำไปอบชุบ (Heat Treatment) โดยรวมตัวกับเนื้อเหล็ก เป็นสารที่เรียกว่า มาร์เทนไซต์ (Martensite) และซีเมนไตต์ (Cementite) นอกจากนั้น คาร์บอนยังสามารถรวมตัวกับเหล็ก และธาตุอื่น ๆ กลายเป็นคาร์ไบด์ (Carbide) ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของเหล็ก อย่างไรก็ตาม คาร์บอนจะลดความยืดหยุ่น (Elasticity) ความสามารถในการตีขึ้นรูป (Forging) และความสามารถในการเชื่อม (Welding) และไม่มีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อน

อลูมิเนียม (Aluminium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Al

เป็นธาตุที่นิยมใช้เป็นตัวไล่แก๊สออกซิเจน และไนโตรเจน (Deoxidizer และ Denitrizer) มากที่สุด ซึ่งผสมอยู่เล็กน้อยในเหล็ก จะมีผลทำให้เนื้อละเอียดขึ้น เมื่อใช้ผสมลงในเหล็กที่จะนำไปผ่านกระบวนการอบชุบแข็ง โดยวิธีไนไตรดิง (Nitriding) ทั้งนี้เนื่องจากอลูมิเนียมสามารถรวมตัวกับไนโตรเจน เป็นสารที่แข็งแรง ใช้ผสมลงในเหล็กทนความร้อนบางชนิด เพื่อให้ต้านทานต่อการตกสะเก็ด (Scale) ได้ดีขึ้น

โบรอน (Boron) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ B

ช่วยเพิ่มความสามารถชุบแข็งแก่เหล็ก ที่ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องจักรทั่วไป จึงทำให้ใจกลางของงานที่ทำด้วยเหล็กชุบผิวแข็ง มีความแข็งสูงขึ้น โบรอนสามารถดูดกลืนนิวตรอนได้สูง จึงนิยมเติมในเหล็กที่ใช้ทำฉากกันอุปกรณ์นิวเคลียร์

เบริลเลียม (Beryllium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Be

สปริงนาฬิกาซึ่งต้องต่อต้านอำนาจแม่เหล็ก และรับแรงแปรอยู่ตลอดเวลา นั้น ทำจากทองแดงผสมเบริลเลียม (Beryllium-Coppers Alloys) โลหะผสมนิกเกิล-เบริลเลียม (Ni-Be Alloys) แข็งมาก ทนการกัดกร่อนได้ดี ใช้ทำเครื่องมือผ่าตัด

แคลเซียม (Calcium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ca

แคลเซียมจะใช้ในลักษณะแคลเซียมซิลิไซด์ (CaSi) เพื่อลดออกซิเดชัน (Deoxidation) นอกจากนั้น แคลเซียม ยังช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดสเกลของวัสดุที่ใช้เป็นตัวนำความร้อน

ซีเรียม (Cerium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ce

เป็นตัวลดออกซิเจนและกำมะถันได้ดี ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้าน Hot Working ของเหล็กกล้า และปรับปรุงความต้านทานการเกิดสเกลของเหล็กทนความร้อน

โคบอลต์ (Cobalt) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Co

ไม่ทำให้เกิดคาร์ไบด์ แต่สามารถป้องกันไม่ให้เหล็กเกิดเนื้อหยาบที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น จึงช่วยปรับปรุงให้เหล็กมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ด้วยเหตุนี้ จึงใช้ผสมในเหล็กขึ้นรูปงานร้อน เหล็กทนความร้อน และเหล็กไฮสปีด ธาตุโคบอลต์เมื่อได้รับรังสีนิวตรอนจะเกิดเป็น โคบอลต์ 60 ซึ่งเป็นสารกัมมันตภาพรังสีอย่างรุนแรง ดังนั้น จึงไม่ควรเติมโคบอลต์ลงในเหล็กที่ใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

โครเมียม (Chromium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cr

ทำให้เหล็กอบชุบได้ง่ายขึ้น เพราะลดอัตราการเย็นตัววิกฤตลงอย่างมาก สามารถชุบในน้ำมันหรืออากาศได้ (Oil or Air Quenching) เพิ่มความแข็งให้เหล็ก แต่ลดความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact) ลง โครเมียมที่ผสมในเหล็กจะรวมตัวกับคาร์บอน เป็นสารประกอบพวกคาร์ไบด์ ซึ่งแข็งแรง ดังนั้น จึงทำให้เหล็กทนทานต่อแรงเสียดสี และบริเวณที่เป็นรอยคมหรือความคมไม่บ่งง่าย ทำให้เหล็กเป็นสนิมได้ยาก เพิ่มความแข็งแรงของเหล็กที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง เพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารต่าง ๆ ได้ดีขึ้น

ทองแดง (Copper) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cu

เพิ่มความแข็งแรง ถ้ามีทองแดงผสมอยู่ในเหล็กแม้เพียงเล็กน้อย เหล็กจะไม่เกิดสนิมเมื่อใช้งานในบรรยากาศ ทองแดงจะไม่มีผลเสียต่อความสามารถในการเชื่อมของเหล็กแต่อย่างไร

แมงกานีส (Manganese) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Mn

ใช้เป็นตัวไล่กำมะถัน (S) ซึ่งเป็นตัวที่ไม่ต้องการในเนื้อเหล็ก จะถูกกำจัดออกในขณะหลอม ทำให้เหล็กอบชุบได้ง่ายขึ้น เนื่องจากเป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical Cooling Rate) ทำให้เหล็กทนทานต่อแรงดึงได้มากขึ้น เพิ่มสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเหล็กเมื่อถูกความร้อน แต่จะลดคุณสมบัติในการเป็นตัวนำไฟฟ้า และความร้อน นอกจากนั้น แมงกานีสยังมีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปหรือเชื่อม เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้น จะทนต่อการเสียดสีได้ดีขึ้นมาก

โมลิบดีนัม (Molybdenum) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Mo

ปกติจะใช้ผสมรวมกับธาตุอื่น ๆ เป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต ทำให้อบชุบง่ายขึ้น ป้องกันการเปราะขณะอบคืนตัว (Temper Brittleness) ทำให้เหล็กมีเนื้อละเอียด เพิ่มความทนทานต่อแรงดึงแก่เหล็กมากขึ้น สามารถรวมตัวกับคาร์บอนเป็นคาร์ไบด์ได้ง่ายมาก ดังนั้น จึงปรับปรุงคุณสมบัติในการตัดโลหะ (Cutting) ของเหล็กไฮสปีดได้ดีขึ้น เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) แก่เหล็ก อย่างไรก็ตาม เหล็กที่มีโมลิบดีนัมสูงจะตีขึ้นรูปยาก

ไนโตรเจน (Nitrogen) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ N

ขณะที่ไนโตรดิง (Nitriding) ไนโตรเจนจะรวมตัวกับธาตุบางชนิดในเหล็ก เกิดเป็นสารประกอบไนไตรด์ ซึ่งทำให้ผิวงานมีความแข็งสูงมาก ด้านทานการสึกหรอได้ดียิ่ง

นิกเกิล (Nickel) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ni

เป็นตัวที่เพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกของเหล็ก ดังนั้น จึงใช้ผสมในเหล็กที่จะนำไปชุบแข็งที่ผิว ใช้ผสมกับโครเมียม ทำให้เหล็กทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ไม่เป็นสนิมง่าย ทนความร้อน

ออกซิเจน (Oxygen) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ O

ออกซิเจนเป็นอันตรายต่อเหล็ก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ชนิด ส่วนผสม รูปร่าง และการกระจายตัวของ สารประกอบที่เกิดจากออกซิเจนนั้น ออกซิเจนทำให้คุณสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความต้านทานแรง กระแทกลดลง (ตามแนวขวาง) และเปราะยิ่งขึ้น

ตะกั่ว (Lead) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Pb

เหล็กฟรีแมชชีนนิ่ง (Free-Machining Steel) มีตะกั่วผสมอยู่ประมาณ 0.20 - 0.50 % โดยตะกั่วจะเป็นอนุภาคละเอียด กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในเนื้อเหล็ก เมื่อนำไปกลึง หรือตัดแต่งด้วยเครื่องมือกลทำให้ชักลึงขาดง่าย จึงทำให้ตัดแต่งได้ง่าย ตะกั่วไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก

ฟอสฟอรัส (Phosphorus) และกำมะถัน (Sulphur) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ P และ S ตามลำดับ

เป็นตัวทำลายคุณสมบัติของเหล็ก แต่มักผสมอยู่ในเนื้อเหล็กโดยไม่ได้ตั้งใจ ต้องพยายามให้มีน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ มักจะเรียกสารเหล่านี้ว่า สารมลทิน (Impurities) เหล็กเกรดสูงจะต้องมีฟอสฟอรัสไม่เกิน 0.03 - 0.05 % ส่วนกำมะถันจะทำให้เหล็กเกิด Red Shortness จึงแตกเปราะง่าย โดยทั่วไปจึงจำกัดปริมาณกำมะถันในเหล็กไม่เกิน 0.025 หรือ 0.03 % ยกเว้น เหล็กฟรีแมชชีนนิ่ง (Free Machining) ที่เติมกำมะถันถึง 0.30 % เพื่อให้เกิดซัลไฟด์ขนาดเล็กกระจายทั่วเนื้อเหล็ก ทำให้ชักลึงขาดง่าย จึงตัดแต่งด้วยเครื่องมือกลได้ง่าย

ซิลิคอน (Silicon) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Si

ซิลิคอนจะปรากฏในเหล็กทุกชนิด เนื่องจากสินแร่เหล็กมักมีซิลิคอนผสมอยู่ด้วยเสมอ ซิลิคอนไม่ใช่โลหะ แต่มีสภาพเหมือนโลหะ ใช้เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิง (Oxidizing) ทำให้เหล็กแข็งแรงและทนทานต่อการเสียดสีได้ดีขึ้น เพิ่มค่าแรงดึงที่จุดคราก (Yield Point) ของเหล็กให้สูงขึ้นมาก ดังนั้น จึงใช้ผสมในการทำเหล็กสปริง (Spring Steels) ช่วยทำให้เหล็กทนทานต่อการตกสะเก็ด (Scale) ที่อุณหภูมิสูงได้ดี จึงใช้ผสมในเหล็กทนความร้อน เหล็กกล้าที่มีซิลิคอนสูงจะมีเกรนหยาบ

ไทเทเนียม (Titanium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ti

ไทเทเนียมเป็นโลหะที่แข็งแรง ทำให้เกิดคาร์ไบด์ได้ดี เป็นธาตุผสมที่สำคัญในเหล็กสแตนเลส เพื่อป้องกันการผุกร่อนตามขอบเกรน นอกจากนั้น ไทเทเนียมยังช่วยทำให้เหล็กมีเกรนละเอียด

วานาเดียม (Vanadium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ V

ทำให้เหล็กทนต่อความร้อนได้ดี เพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็ก โดยไม่ทำให้คุณสมบัติในการเชื่อม และการตีงเสียไป ทำให้เหล็กมีเนื้อละเอียด รวมตัวกับคาร์บอนที่เป็นคาร์ไบด์ได้ง่าย จึงทำให้ทนทานต่อการสึกกร่อน มักจะผสมในเหล็กขึ้นรูปร้อน (Hot Working Steels) และเหล็กไฮสปีด

ทังสแตน (Tungsten) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ W

สามารถรวมตัวกับคาร์บอนเป็น คาร์ไบด์ ที่แข็งแรงมาก จึงทำให้เหล็กที่ผสมทังสแตนมีความแข็งแรงมาก หลังจากผ่านการอบชุบ จึงใช้ทำพวกเครื่องมือคม (Cutting Tools) ต่าง ๆ ทำให้เหล็กเหนียวขึ้น และป้องกันไม่ให้เหล็กเกิดเนื้อหยาบ เนื่องจากการที่เกรนขยายตัว เพิ่มความทนทานต่อการเสียดสีของเหล็ก ดังนั้น จึงนิยมเติมทังสแตนในเหล็กไฮสปีด (Hi-Speed) และเหล็กที่ต้องอบชุบแข็งโดยทั่วไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล ที่อยู่	นายพิทยาภรณ์ โกมาร คอนโดไอดีโอมีกส์ 9/175 ถนนสุขุมวิท 103 ซอยอุดมสุข3 แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพมหานคร 10260
ประวัติการศึกษา	2547 วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต วศ.บ. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2554-ปัจจุบัน	ผู้ควบคุมงานติดตั้งและซ่อมบำรุงแทนผลิตก๊าซและน้ำมันนอกชายฝั่ง บริษัท เซฟรอน ประเทศไทย จำกัด ควบคุมงานติดตั้งและซ่อมบำรุงงานโครงสร้าง งานท่อระบบ และงาน เครื่องกล โครงการแทนผลิตก๊าซและน้ำมันแหล่งปลาทอง ทะเลอ่าวไทย โครงการแทนผลิตก๊าซและน้ำมันแหล่งเบญจมาศ ทะเลอ่าวไทย
พ.ศ.2552-2554	ผู้ควบคุมงานติดตั้งและซ่อมบำรุงแทนผลิตก๊าซและน้ำมันนอกชายฝั่ง บริษัท ไทยนิปปอนสตีลเอ็นจิเนียริง แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด ควบคุมงานติดตั้งและซ่อมบำรุงงานโครงสร้าง งานท่อระบบ งาน เครื่องกล งานอุปกรณ์วัดคุม และงานไฟฟ้า โครงการแทนผลิตก๊าซแหล่งบงกช ทะเลอ่าวไทย โครงการแทนผลิตก๊าซปิโตรนาส ทะเลอันดามัน ประเทศพม่า
พ.ศ.2551-2552	วิศวกรโครงการ บริษัท ไทยวูร์เอ็นจิเนียริง จำกัด ควบคุมงานติดตั้งโครงสร้าง และงานท่อระบบ โรงงานเผาก๊าซเอสซีจี จังหวัดระยอง ประเทศไทย
พ.ศ.2550-2551	วิศวกรโครงการ บริษัท สีนไทยเอ็นจิเนียริง จำกัด ควบคุมงานติดตั้งและซ่อมบำรุงงานโครงสร้าง งานท่อระบบ และงาน เครื่องกล แทนสำรวจและขุดเจาะก๊าซและน้ำมัน ประเทศสิงคโปร์
พ.ศ.2549-2550	วิศวกรรมเครื่องกล บริษัท อินเตอร์ไอเอ็มซี จำกัด ควบคุมงานติดตั้งและซ่อมบำรุงงานโครงสร้าง งานท่อระบบ และงาน เครื่องกล โรงงานกลั่นน้ำมัน ประเทศสิงคโปร์
พ.ศ.2548-2549	วิศวกรรมฝ่ายผลิต บริษัท เอสทีพี แอนด์ ไอ จำกัด (มหาชน) ควบคุมงานผลิตชิ้นส่วนโครงสร้างโรงงานถลุงแร่ จังหวัดระยอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้