การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การศึกษาพฤติกรรมและการชดเชยการดีดตัวกลับของการดัดท่อ B88 และ 904L

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

พิทยาภรณ์ โกมาร[1], สมชัย นรเศรษฐ์โศภน[2]

[1,2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
E-mail: gomarn_p@hotmail.com, โทรศัพท์: 085 501 6222, โทรสาร: 027 372 549

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมและการชดเชยการดีดตัวกลับของการดัดท่อเกรด B88 และ 904L โดยในการดัดได้มีตัวแปรที่กำหนดคือ องศามุมดัด และรัศมีดัด โดยที่ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.52 มิลลิเมตร หนา 0.9 มิลลิเมตร จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานทั้งสองชนิดมีการดีดตัวกลับ ภายหลังการดัดชิ้นงานพบว่าชิ้นงานที่มีค่าความเค้นดึงสูงสุดสูงกว่าจะเกิดการดีดตัวกลับมากกว่า การดีดตัวกลับของชิ้นงานมีค่ามากขึ้นเมื่อรัศมีที่ใช้ในการดัดมีค่ามากขึ้น การดัดชิ้นงานที่มีองศาการดัดที่มากกว่าจะได้องศาตรงตามความต้องการมากขึ้น ผลของการศึกษาสามารถเป็นแนวทางการชดเชยการดีดตัวกลับของการดัดท่อชนิดอื่นๆได้

คำหลัก: การดัดขึ้นรูป / การดีดตัวกลับ / 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

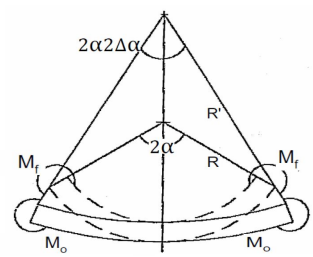
การดัดท่อที่ไม่ได้รูปร่างตามต้องการ เนื่องจากเกิดการดีดกลับภายหลังจากการดัด เป็นอีกหนึ่งปัญหาของอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนประกอบต่างๆ ทั้งทางด้าน เครื่องจักร และเครื่องยนต์ ปัจจุบันทางโรงงานได้พัฒนาโดยการนำเครื่องซีเอ็นซี (CNC Machine) มาใช้แทนแรงงานคน แต่ก็ยังประสบปัญหาเกี่ยวกับการเผื่อการดีดกลับของท่อ จากปัญหาที่เกิดขึ้นจึงเป็นแนวคิดที่จะทำการวิจัย เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดีดตัวกลับของวัสดุ 2 ชนิด คือ ท่อทองแดงไร้ตะเข็บ (Seamless Copper Water Tube; ASTM B88) และ ท่อสเตนเลสไร้ตะเข็บ เกรด 904L (Seamless Stainless Steels Grade 904L; ASTM B677) ซึ่งมีค่าทางกายภาพที่แตกต่างกัน โดยทางปฏิบัติ และการคำนวณทางทฤษฎี และทำการชดเชยการดีดตัวกลับของวัสดุ

ตัวแปร

r , r_o , r_i	รัศมีท่อ
x , y , z	พิกัดอ้างอิง
k	ค่าคงที่
n	ค่าคงที่
e_i , e_o	ระยะจากจุดศูนย์กลางรัศมีดัดถึงแกนอ้างอิงของคานโค้ง
a , b , c , p	ระยะจากจุดศูนย์กลางรัศมีดัดถึงหน้าตัดใดๆของคานโค้ง
B_1 , B_2	ค่าคงที่
E	โมดูลัสยืดหยุ่น
I_z	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดท่อ
M , M_o	โมเมนต์ดัด
R_o , R_i	รัศมีดัด
R'	รัศมีดีดกลับ
K	ค่าดีดกลับ (Springback)
S_{yi} , S_{yo}	ค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นตามความเครียดที่จุดสมดุล
σ_{max}	ความเค้นที่จุดคราก
σ_r	ความเค้นตามแนวรัศมี
σ_θ	ความเค้นแนวตั้งฉากกับแนวรัศมี
ε_o , ε_i	ความเครียดที่จุดสมดุล
α	ครึ่งหนึ่งขององศาการดัด
$\Delta\alpha$	ความแตกต่างของครึ่งมุมการงอที่เกิดจากการดีดกลับ

2. ทฤษฎี

การขึ้นรูปโลหะด้วยการดัดขึ้นรูป เมื่อให้โหลดกับวัสดุ วัสดุจะเกิดการงอตัวความเค้นจะเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ หลังจากวัสดุไม่ได้รับโหลด วัสดุจะเกิดการงอตัวเกิดขึ้น แต่มุมที่เกิดขึ้นไม่เท่ากับมุมที่เกิดจากการรับโหลด เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะวัสดุเกิดการดีดตัวกลับ จากรูปที่ 1 แสดงรูปร่างระหว่างวัสดุที่รับโหลดกับวัสดุที่ไม่มีโหลด



รูปที่ 1 แสดงปรากฏการณ์การเกิด Springback

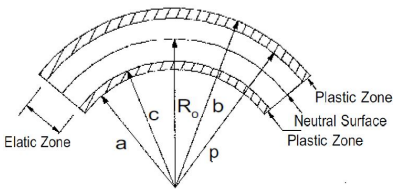
จากการสันนิษฐาน วัสดุเป็นวัสดุไอโซทรอปิกและยังคงรักษาความเป็นระนาบ ตลอดกระบวนการ เริ่มจากการดัดเริ่มแรกเป็นท่อตรง จึงพิจารณาให้ท่อเป็นช่วงการดัดแบบคานตรง ช่วงนี้จะเป็นช่วงอีลาสติก จะได้สมการคำนวนรัศมีเริ่มต้นเป็น

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

โดยที่

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

การดัดท่อช่วงต่อจากการดัดคานตรง เป็นการดัดโดยการเพิ่มโมเมนต์ดัดขึ้นไปจนทำให้วัสดุเกิดการยืดหดจนเกินจุดยืดหยุ่น และที่หน้าตัดของคานจะมีสภาพเป็นพลาสติกและอีลาสติกผสมกันดังภาพที่ 2

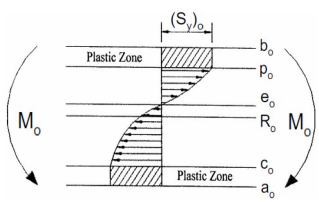


รูปที่ 2 ช่วงพลาสติกและอีลาสติกผสมกันในคานโค้ง

โดยที่บริเวณด้านนอกสุดจะเลยช่วงที่วัสดุครากไปแล้ว ส่วนบริเวณด้านในจะยังคงสภาพความยืดหยุ่นอยู่ ดังนั้นจึงการแบ่งโมเมนต์ดัดออกเป็นสองส่วน โมเมนต์ดัดช่วงอีลาสติกและโมเมนต์ดัดช่วงพลาสติก การดัดช่วงนี้เราถือว่าท่อมีลักษณะเป็นคานโค้ง จะพิจารณาความเค้นได้สองทิศทาง คือความเค้นตามแนวรัศมีความโค้ง (σ_r) และความเค้นตั้งฉากกับรัศมีความโค้ง (σ_θ)

การกระจายตัวของความเค้นตั้งฉากกับหน้าตัด (σ_θ) ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดคานโค้งในขณะนั้น

ดังนั้น สามารถอธิบายสมการความเค้นได้ตามทฤษฎีคานโค้งดังนี้



รูปที่ 3 การกระจายตัวของความเค้นตามแนว θ

ช่วง $a_o - c_o$ เป็นช่วงพลาสติก (Plastic Zone)

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

ช่วง $c_o - p_o$ เป็นช่วงอีลาสติก (Elastic Zone)

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

$$\sigma_\theta = -B_1\left(\frac{p_o^2}{r^2}+1\right)-B_2\left(1-\frac{p_o}{r}\right)+2k\ln\left(\frac{b_o}{p_o}\right) \qquad (4)$$

เมื่อ $$B_1 = \frac{2k}{\frac{p_o^2}{c_o^2}-1},\ B_2 = 2k\frac{\frac{p_o^2}{c_o^2}+1}{\frac{p_o^2}{c_o^2}-1} \qquad (5)$$

ช่วง $p_o - b_o$ เป็นช่วงพลาสติก (Plastic Zone)

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

จากความต่อเนื่องของ σ_r ที่ $r = c_o$ จะได้ความสัมพันธ์

$$p_o^2 = \left(1-\ln\left(\frac{a_o b_o}{c_o^2}\right)\right) = c_o^2\left(1+\ln\left(\frac{p_o^2}{a_o b_o}\right)\right) \qquad (7)$$

โมเมนต์ดัดในความโค้งนั้น แบ่งออกเป็นสองช่วง คือ กรณีที่ 1 ช่วงพลาสติกทั้งผิวบนและล่างไม่เกินความหนาของหน้าตัดท่อ

$$M = -\int_{R_i-r_o}^{c_i} rS_{yi}\left(\sqrt{r_o^2-(R_i-r)^2}\right)dr$$

$$+\int_{c_i}^{Y_i} r\sigma_\theta\left(\sqrt{r_o^2-(R_i-r)^2}\right)dr$$

$$+\int_{Y_i}^{X_i} r\sigma_\theta\left(\sqrt{r_o^2-(R_i-r)^2}-\sqrt{r_i^2-(R_i-r)^2}\right)dr$$

$$+\int_{p_i}^{R_i+r_o} rS_{yi}\left(\sqrt{r_o^2-(R_i-r)^2}\right)dr$$

$$+\int_{p_i}^{R_i+r_o} rS_{yi}\left(\sqrt{r_o^2-(R_i-r)^2}\right)dr \qquad (8)$$

กรณีที่ 2 ช่วงพลาสติกทั้งผิวบนและล่างเกินความหนาของหน้าตัดท่อ

$$M = -\int_{R_i - r_o}^{Y_i} rS_{yi}\left(\sqrt{r_o^2 - (R_i - r)^2}\right)dr$$

$$-\int_{y_i}^{c_i} rS_{yi}\left(\sqrt{r_o^2 - (R_i - r)^2}\right)dr$$

$$+\int_{c_i}^{p_i} r\sigma_\theta\left(\sqrt{r_o^2 - (R_i - r)^2} - \sqrt{r_i^2 - (R_i - r)^2}\right)dr$$

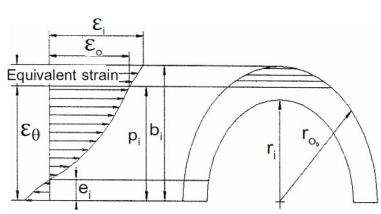
$$+\int_{p_i}^{x_i} rS_{yi}\left(\sqrt{r_o^2 - (R_i - r)^2}\right)dr$$

$$+\int_{x_i}^{R_i + r_o} rS_{yi}\left(\sqrt{r_o^2 - (R_i - r)^2}\right)dr \qquad (9)$$

โดยค่า S_{yi} จะเปลี่ยนแปลงตามแบบจำลองพฤติกรรมความเค้นของวัสดุช่วงพลาสติกตามสมการ

$$S_{yi} = S_{yo}\left(\frac{En}{S_{yo}}\varepsilon_i + n + 1\right)^{\frac{1}{n}} \text{ โดยที่ } \varepsilon_i \geq \frac{S_{yo}}{E} \qquad (10)$$

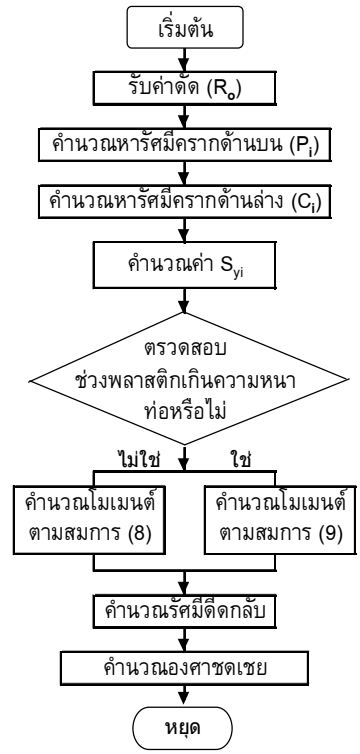
เนื่องจากโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นน้อย ผิวนอกสุดของคานโค้งเริ่มครากเข้าสู่แกนในที่เป็นช่วงอีลาสติกมีค่าน้อยด้วยถือว่า ความเครียดช่วง $b_i - p_i$ และ ช่วง $a_i - c_i$ มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นและค่า σ_r ค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ σ_θ ดังนั้นค่า $\varepsilon_\theta = \varepsilon_i$



รูปที่ 4 ความเครียดช่วงพฤติกรรมแบบเชิงเส้น

จากรูปที่ 4 จะได้

$$\varepsilon_i = \varepsilon_o \frac{(b_i - c_i)}{p_i - e_i} \qquad (11)$$



รูปที่ 5 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรม

จากการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์จะได้รัศมีดีดกลับ

$$R' = \frac{RIE}{(IE - RM)} \qquad (12)$$

จากรูปที่ 1 องศาการดัด 2α และองศาที่ได้หลังจากการดัด $2\alpha 2\Delta\alpha$ แรงที่เกิดขึ้นหลังจากการปล่อยโหลดออกเป็นการเกิดการดีดตัวกลับโดยที่

$$K = \frac{\alpha - \Delta\alpha}{\alpha} = \frac{R}{R'} = 1 - R\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'}\right) \qquad (13)$$

และค่าองศาชดเชยหาได้จากสมการ

$$\alpha_{Compensate} = \left(\left(1 - \frac{R}{R'}\right) \times 2\Delta\alpha\right) + 2\alpha \qquad (14)$$

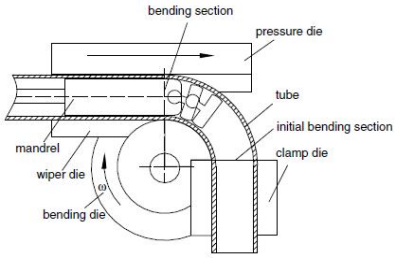
นำสมการที่ได้มาประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาองศาชดเชยการดีดกลับ สามารถลำดับการทำงานของโปรแกรมได้ตามรูปที่ 5

3. วิธีการทดลอง

3.1 การทดลองหาองศาการดีดกลับ

ทำการดัดท่อ โดยเครื่องซีเอ็นซี (CNC 65TSRE) ตามรูปที่ 6 ที่รัศมีดัดต่างๆกัน 3 รัศมีดัดคือ 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร โดยแต่ละรัศมีดัดดัดเป็นมุมต่างๆกันที่ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา ที่แต่ละรัศมีดัดและแต่ละมุมดัดทำการดัดท่อ 3 ครั้ง นำท่อในแต่ละรัศมีดัดและแต่ละมุมดัดต่างๆมาทำการวัดค่าหาองศาหลังการดัด โดยใช้เครื่องวัดองศาโปรแทคเตอร์ (Angle Meter Protractor) ตามรูปที่ 8 นำค่าที่ได้ในแต่ละรัศมีดัดและแต่ละมุมดัดมาหาค่าเฉลี่ย

รูปที่ 6 แสดงเครื่องซีเอ็นซี 65TSRE



รูปที่ 7 แสดงการทำงานของอุปกรณ์การดัด

รูปที่ 8 แสดงเครื่องวัดองศาโปรแทคเตอร์

3.2 การทดสอบหาองศาชดเชยการดีดกลับ

นำค่าองศาดีดกลับจากการทดลองข้างต้นมาเพิ่มในองศาการดัด และนำค่าองศาดีดกลับหลังจากการเพิ่มองศาการดัดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งองศาของวัสดุหลังจากการดัดมีค่าเท่าที่ต้องการ หรือใกล้เคียงมากที่สุด จากนั้นทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง และนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 ผลการตรวดสอบหาส่วนผสมในเนื้อวัสดุ

ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของ 904L

C	0.020	Mn	2.00	Si	1.00
P	0.045	S	0.035	Cr	19.0-23.0
Mo	4.0-5.0	Ni	23.0-28.0	Cu	1.0-2.0

ตารางที่ 2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของ B88

C	-	Mn	-	Si	-
P	0.015 - 0.040	S	-	Cr	-
Mo	-	Ni	-	Cu	99.90

การตรวดสอบส่วนผสมของวัสดุ 904L และ B88 โดยใช้เครื่องคอมพะซิชันเทสท (Composition Test; BΛIRD Spectrovac 1000 MODEL OV4 SERIAL 2054) ในการตรวจสอบจะใช้ก๊าซ ไฮโดรเจนเหลวละลายเนื้อของวัสดุและทำการตรวดวัดและแสดงผลออกทางคอมพิวเตอร์

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

4.2 ผลการทดสอบความแข็งและแรงดึง

ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติเชิงกลของ 904L และ B88

Material	Rockwell B (HRB)	Yield Strength [Mpa]	Elastic Modulus [Gpa]
904L	70-90	299.85	193.05
B88	30-55	172.25	110.32

การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลสเกล B (HRB) ใช้วัดความแข็งของโลหะผสมของทองแดง (Copper

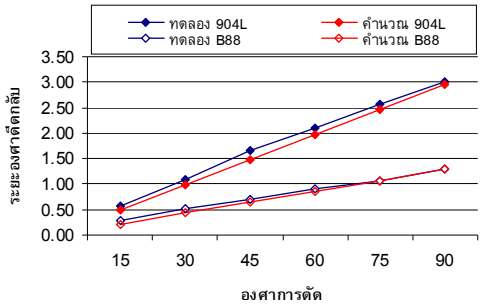
alloys) และโลหะผสมของอะลูมิเนียม (Aluminum alloys) โดยการใช้หัวกดลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง ขนาด 1/16 นิ้ว (1.588 มม.) โดยจะวัดความแข็งจากความลึก ระยะกดที่ถูกหัวกดกดด้วยแรงคงที่

จากการตรวดสอบพบว่าวัสดุ 904L มีค่าความแข็งของวัสดุมากกว่าวัสดุ B88 เนื่องจากวัสดุชนิดที่มีคาร์บอนมากกว่า จะทำให้วัสดุมีความแข็งมากกว่าวัสดุที่มีค่าของคาร์บอนน้อยกว่าตามตารางที่ 3

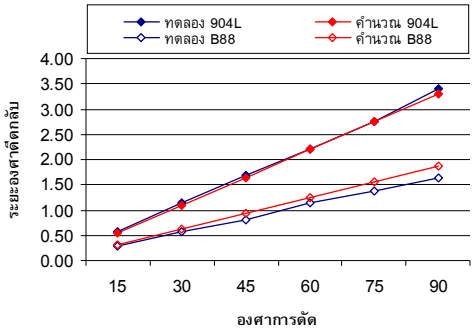
วิธีการทดสอบแรงดึง นำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้าๆแล้วบันทึกค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพล็อตเป็นเส้นโค้ง การทดสอบเป็นการประมาณความแข็งแรงของโลหะทำให้ทราบถึงข้อมูลคุณสมบัติเชิงกล

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

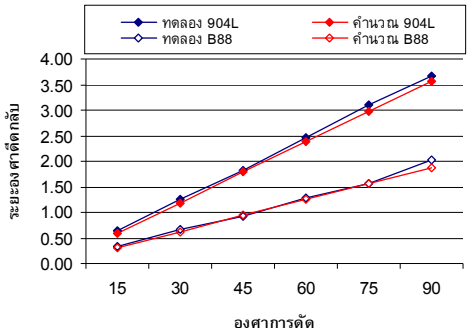
4.3 เปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี



รูปที่ 9 แสดงค่าระยะองศาดีดกลับที่รัศมีดัด 20มม.



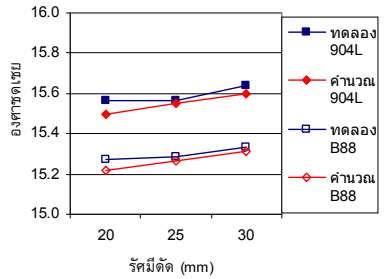
รูปที่ 10 แสดงค่าระยะองศาดีดกลับที่รัศมีดัด 25มม.



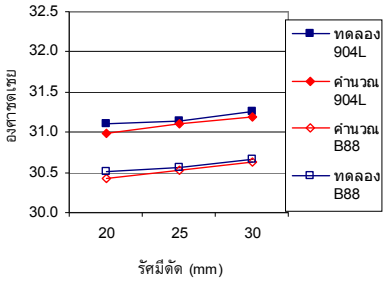
รูปที่ 11 แสดงค่าระยะองศาดีดกลับที่รัศมีดัด 30มม.

จากรูปที่ 9, จากรูปที่ 10 และจากรูปที่ 11 เมื่อทำการทดสอบวัสดุทั้งสองชนิด จึงทำให้ทราบว่าวัสดุแต่ละชนิดมีการดีดกลับที่ไม่เท่ากัน จากสมการที่นำมาวิเคราะห์หาค่าการดีดตัวกลับของวัสดุ สามารถแสดงให้เห็นถึง ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นวัสดุจะยืดตัวออกจนเลยจุดความต้านแรงดึงคราก (Yield Strength) เมื่อถูกดัดหลังจากถูกดัดที่องศามากขึ้นทำให้เลยจุดอีลาสติก (Elastic Zone) ไปอยู่ในช่วงพลาสติก (Plastic Zone) ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบคงรูป การเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปในที่นี้ก็ยังมีความเค้นที่แฝงตัวอยู่ในตัวของชิ้นงาน ความเค้นที่เกิดขึ้นนี้มาจากความหนาของชิ้นงานนั่นเอง สามารถที่จะสังเกตุได้จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าค่าความเค้นที่อยู่ในช่วงอีลาสติก (Elastic Zone) จะอยู่ด้านในไกล้เส้นกึ่งกลางของวัสดุ ส่วนช่วงที่เป็น พลาสติก (Plastic Zone) จะอยู่ในช่วงด้านนอกหรือตรงผิวของวัสดุ ฉะนั้นเมื่อวัสดุไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในช่วงพลาสติก (Plastic Zone) ได้ทั่วทั้งชิ้นทดสอบ การเกิดการดีดตัวกลับเมื่อทำการดัดวัสดุก็สามารถที่จะเกิดขึ้นได้เสมอ จากผลที่ได้ ทั้งทางด้านปฏิบัติและทางทฤษฎี จะเห็นว่าแนวทางของกราฟไปในทิศทางเดียวกัน การดีดตัวกลับทางด้านวัสดุ 904L มากกว่าวัสดุ B88 เนื่องจากวัสดุ 904L มีค่าความเค้นสูงกว่า การดีดตัวกลับของวัสดุทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อรัศมีดัดที่ใช้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าโมเมนต์ที่ใช้ดัดมีค่าน้อยกว่าค่าโมเมนต์ที่ได้จากการดัดจากรัศมีดัดที่น้อยกว่า ส่งผลให้ความเป็นช่วงอิลาสติกในวัสดุมีค่ามากกว่ารัศมีดัดที่

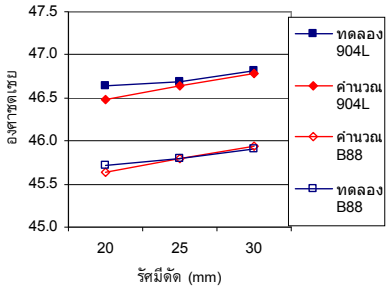
น้อยกว่า เมื่อปลดโมเมนตัดออก ทำให้มีความเครียดตกค้างในช่วงพลาสติกในเนื้อวัสดุน้อยกว่า หรือมีการคืนตัวได้ดีกว่า



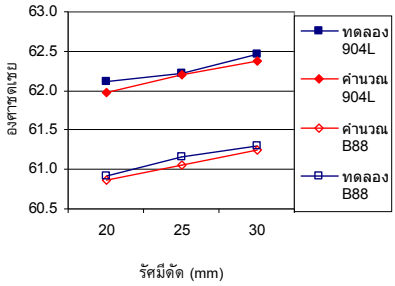
รูปที่ 12 แสดงค่าองศาชดเชยที่มุมดัด 15 องศา



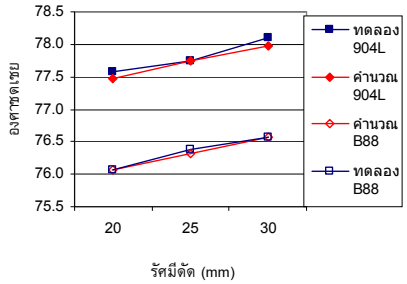
รูปที่ 13 แสดงค่าองศาชดเชยที่มุมดัด 30 องศา



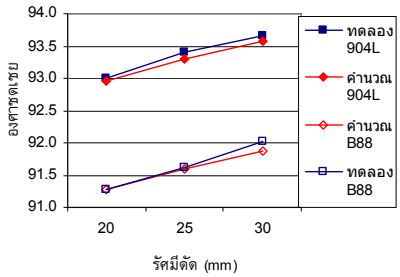
รูปที่ 14 แสดงค่าองศาชดเชยที่มุมดัด 45 องศา



รูปที่ 15 แสดงค่าองศาชดเชยที่มุมดัด 60 องศา



รูปที่ 16 แสดงค่าองศาชดเชยที่มุมดัด 75 องศา



รูปที่ 17 แสดงค่าองศาชดเชยที่มุมดัด 90 องศา

นำค่าที่ได้ไปทดแทนเพื่อชดเชยองศาการดีดกลับที่เกิดขึ้นได้ดังเช่น กราฟที่ได้จากการทดลองข้างต้นจะเห็นว่าค่าการคำนวณที่ได้มีความแตกต่างกับทางปฏิบัติเล็กน้อย แนวทางของกราฟไปในทิศทางเดียวกัน จากการนำค่าการดีดตัวกลับมาชดเชยในวัสดุ 904L และ B88 มีความใกล้เคียงกับในทางปฏิบัติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าความเค้นในเนื้อวัสดุเกิดการดีดตัวกลับและค่าการดีดตัวกลับนั้นคงที่ ทำให้สามารถมาชดเชยและนำมาใช้งานจริง จะเห็นว่าต้องทำการชดเชยทางด้านวัสดุ 904L มากกว่าวัสดุ B88 เนื่องจากวัสดุ 904L มีค่าความเค้นและค่าความแข็งมากกว่าตามรูปที่ 12 ถึงรูปที่ 17

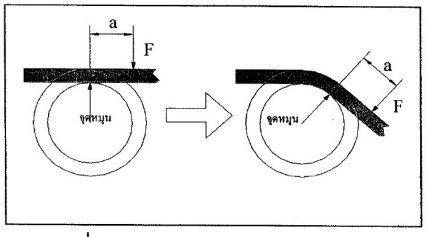
5. สรุป

1. การดีดกลับของวัสดุเกิดจากความเค้นตกค้างที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุ
2. เมื่อดัดวัสดุเลยจุดอีลาสติกถึงช่วงพลาสติก แล้ววัสดุยังสามารถดีดกลับได้
3. วัสดุที่มีค่าความต้านแรงดึงคราก (Yield Strength) และค่าความแข็งต่างกันการเกิดการดีดตัวกลับต่างกัน โดยที่ ความต้านแรงดึงคราก (Yield Strength) และค่า

ความแข็งสูงกว่า การดีดตัวกลับจะสูงกว่าเมื่อเทียบในองศาเดียวกัน

4. การดีดตัวกลับของวัสดุมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อรัศมีที่ใช้ในการดัดมีค่าเพิ่มขึ้น

5. มุมที่ใช้ดัดไม่มีผลต่อรัศมีดีดกลับของวัสดุ เนื่องจากลักษณะการดัด มีผลทำให้โมเมนต์ที่ใช้ดัดที่มุมทุกๆ องศามีค่าเท่ากันตลอดตามรูปที่ 18



รูปที่ 18 แสดงลักษณะการดัดท่อ

6. นำค่าองศาชดเชยการดีดตัวกลับที่ได้ไปเพิ่มในองศาที่ทำการดัดจะได้องศาในการดัดจริง

7. ที่องศามุมดัด 60 และ 75 องศา และรัศมีดัด 25มม. องศาชดเชยการดีดกลับที่ได้จากการคำนวณให้ผลใกล้เคียงกับการดีดกลับที่ได้จากการทดลองมากที่สุดตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงเปอร์เซ็นความแตกต่างระหว่างค่าองศาชดเชยการดีดกลับของวัสดุ 904L และ B88 จากการคำนวนกับทดลอง

องศาการดัด	904L			904L		
	รัศมีดัด (mm)			รัศมีดัด (mm)		
	20	25	30	20	25	30
15	0.48	0.12	0.29	0.39	0.16	0.13
30	0.39	0.12	0.22	0.39	0.12	0.13
45	0.39	0.08	0.06	0.15	0.12	0.13
60	0.24	0.04	0.13	0.15	0.16	0.13
75	0.14	0.04	0.16	0.15	0.08	0.16
90	0.05	0.12	0.10	0.15	0.04	0.16

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณท่านคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณบริษัท ซัพพลาย ไอคอน จำกัด ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

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

[2] 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.

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

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

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

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