

การศึกษาอิทธิพลของสารหล่อลื่นต่อการติดตัวกลับและความเครียดในการดัดขึ้นรูปแบบอัด
Influence of Lubricants on the Relationships between Springback and Strain in Compression
Bending Process

วิเชียร เกื้อนเครือวัลย์¹ มนต์รี น่วมจิตร² ศิริชัย ต่อสกุล³

Vichian Thuankruaval¹ Montree Nuamchit² Sirichai Torsakul³

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารหล่อลื่นต่อการติดตัวกลับและความเครียดในการดัดขึ้นรูปแบบอัด ในการศึกษาที่ใช้เหล็กท่อกววงและเหล็กแผ่นเกรด DIN St37 และเหล็กเส้นกลมเกรด DIN SR 24 โดยใช้องศาตัด คือ 30, 60 และ 90 องศา ซึ่งสารหล่อลื่นที่ใช้ ได้แก่ น้ำมันมะพร้าว, น้ำมันก๊าดสังเคราะห์, น้ำมันสังเคราะห์ และไม่ใช้สารหล่อลื่น ผลการทดลองพบว่าสารหล่อลื่นมีผลต่อความหนา ซึ่งความหนาของผนังส่วนโค้งด้านนอก (A1, B1, C1) มีความหนาน้อยกว่าผนังส่วนโค้งใน (A2, B2, C2) และตำแหน่งที่บางที่สุดคือ B1 และตำแหน่งหนาที่สุดคือ B2 สารหล่อลื่นนั้นไม่มีผลต่อการติดกลับของชิ้นงาน แต่องศาการดัดมีผลต่อชิ้นงานเนื่องจากองศาการดัดเพิ่มขึ้น ค่าการติดกลับของชิ้นงานจะลดลง และชิ้นงานที่มีการติดกลับมากที่สุดคือ เหล็กแผ่น เหล็กเส้นกลม และ เหล็กท่อกววง ตามลำดับ สารหล่อลื่นและองศาการดัดมีผลต่อความเครียดเทียบเท่า ซึ่งเมื่อองศาการดัดยิ่งเพิ่มขึ้น ค่าความเครียดเทียบเท่าก็ยิ่งเพิ่มขึ้น

Abstract

This research has an objective to study the influence of lubricants to the springback and strain in the Compression Bending process. This research uses DIN St37 hollow steel tube and steel plate, and DIN SR 24 round steel bar, by using degree bends at 30, 60, and 90 degrees. The lubricants that were used include coconut oil, semi-synthetic oil, synthetic oil and dry lubricant. Experiment results discovered that lubricants affected thicknesses, in which the thicknesses of curved surfaces on the exterior (A1, B1, C1) were less than the curved surfaces on the interior (A2, B2, C2). The thinnest location was B1 and the thickest location was B2. Lubricants did not have effects to the springback of the work pieces, but the degree bends affected the work piece since increasing the degree bends decreased the springback values of the work pieces. The work piece that had the highest springback was the steel plate, followed by round steel bar, and hollow steel tube, respectively. Moreover, lubricants and degree bends affected the evaluation strain. As the degree bends increase, the evaluation strain will increase as well.

Keywords : Bending, springback, lubricants

E-mail: sirichai.to@en.rmutt.ac.th

^{1,2,3}ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

^{1,2,3}Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

คำนำ

งานขึ้นรูปโลหะ (Metal Forming) เป็นกระบวนการผลิตประเภทหนึ่ง que เปลี่ยนวัสดุประเภทโลหะให้เป็นผลิตภัณฑ์ (Product) ตามรูปร่างที่ต้องการ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนรูปร่างของวัสดุอย่างถาวร (Plastic Deformation) หรือในทางวิชาการจะเรียกกระบวนการนี้ว่า การเปลี่ยนรูปโลหะในช่วงเวลาการเปลี่ยนรูปถาวร (Deformation Process) ซึ่งเป็นการขึ้นรูปขณะที่วัสดุเป็นสถานะของแข็งโดยอาศัยแม่พิมพ์เป็นเครื่องมือเฉพาะในการขึ้นรูป ทำให้ไม่เกิดเศษเสี้ยวของวัสดุ เช่น กระบวนการดัด (Bending Process), กระบวนการลากขึ้นรูป (Deep Drawing), การตีขึ้นรูป (Forging), กระบวนการขึ้นรูปโลหะก้อน (Bulk Metal Forming Process), กระบวนการอัดขึ้นรูป (Extrusion Process), กระบวนการรีด (Rolling Process) เป็นต้น (Vukata, 2004; Altan, 1986; Lang, 1985; Schuler, 1988) ซึ่งกระบวนการประเภทหนึ่งที่นิยมกันมากในอุตสาหกรรม คือ กระบวนการดัด (Bending) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเฟอร์นิเจอร์ เครื่องเรือน ก่อสร้าง การตัดท่อ เป็นต้น (ศิริชัย, 2554) ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการดัดยังเกิดข้อบกพร่องความเสียหายให้เห็นอยู่ทั่วไป เช่น การเกิดรอยย่น, รอยบวม, เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานตลอดการดัดไม่สม่ำเสมอ และรอยฉีกขาด เป็นต้น (Rohit, 2004) แต่ปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่เกิดกับกระบวนการดัดขึ้นรูปโลหะ คือ โลหะเกิดการบิดตัวกลับหลังจากคลายแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปออกจากงานแล้ว ทำให้ชิ้นงานดัดไม่เป็นไปตามองศาที่ต้องการ จนไม่สามารถนำไปใช้ตามวัตถุประสงค์ได้อย่างถูกต้อง ซึ่งการบิดกลับอาจมีสาเหตุมาจากคุณสมบัติของวัสดุ, องศาที่ใช้ในการดัด, ความหนาของชิ้นงาน, ปริมาณการเสียรูปในช่วงพลาสติก, รูปร่างของแม่พิมพ์, แรงเสียดทาน, พฤติกรรมความเครียดในระหว่างกระบวนการดัด, ความเร็วในการขึ้นรูป และเงื่อนไขอื่น ๆ ที่ใช้ในการดัด เป็นต้น (ศิริชัย, 2553)

กระบวนการดัดเป็นกระบวนการที่เกิดความเค้นสูงมากในเนื้อวัสดุ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปเกิดในสถานะที่วัสดุเป็นของแข็งที่มีความแข็งแรงสูง นอกจากนี้การเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเป็นไปอย่างถาวร (Al-Qureshi, 1999) ส่วนมากเปลี่ยนรูปของวัสดุทุกส่วนเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน เช่นเดียวกับกรณีของกระบวนการดัดมักจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตรงบริเวณที่ถูกดัดโดยส่วนโค้งของชิ้นงานที่ได้จากการดัดนั้นจะมากขึ้นอยู่กับรัศมีของตาย (Bend Die) เมื่อพิจารณาในทางทฤษฎีการดัดแล้วจะพบว่าเกิดความเค้นดัดที่บริเวณส่วนโค้งของชิ้นงานนอกจากนี้ในกระบวนการดัดยังมีอีกหลายสาเหตุอีกเช่น พฤติกรรมความเครียดในระหว่างกระบวนการดัดวัสดุ เนื่องจากความเสียหายของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการดัดผู้จัดทำโครงการจึงได้ให้ ความสำคัญของการแก้ไขปัญหโดยทำการทดลองศึกษาอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อการบิดตัวกลับในการดัดขึ้นรูป เพื่อให้ทราบว่าสารหล่อลื่นมีผลต่อการลดการบิดกลับ และศึกษาองศาในการดัดที่แตกต่างกันเพื่อให้ทราบถึงองศาในการบิดกลับ และสามารถนำไปช่วยในการออกแบบผลิตภัณฑ์ในโรงงานอุตสาหกรรมและเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในการดัดขึ้นรูปโลหะแบบอัดเพื่อให้ได้มุมการดัดที่ต้องการตามจุดประสงค์ของการทำงาน

อุปกรณ์และวิธีการ

การบิดตัวกลับของชิ้นงาน (Spring Back)

หลังจากทำการดัดตามมุม และรัศมีของแม่พิมพ์ดัดประเภทใดประเภทหนึ่งแล้ว จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของมุม และรัศมีเล็กน้อยหลังจากการพับ เรียกว่า การบิดตัวกลับของวัสดุ โดยการบิดตัวกลับเกิดจากการคืนตัว

ในช่วงการเปลี่ยนรูปร่างอย่างไม่มีถาวร หรือช่วงการเปลี่ยนรูปร่างแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation) ของวัสดุ (Vukota, 2004)

ค่าการดัดตัวกลับของวัสดุมักจะเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งแรงคราก (Yield Strength) ค่าคงที่ของความแข็งแรง (Strain Hard Exponent) วัสดุมีการดัด และการดัดตัวกลับของวัสดุจะลดลงเมื่อค่า Young Modulus และความหนาของวัสดุเพิ่มขึ้น การคาดเดาการดัดตัวกลับของวัสดุสามารถประมาณได้จากค่าคงที่ของการดัดตัวกลับ (Spring Back ; K(T)) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (1)-(3) (Osman, 2002)

$$K(T) = \frac{a_2}{a_1} \quad (1)$$

$$K(R) = \frac{a_2}{a_1} \quad (2)$$

$$K(S) = \frac{a_2}{a_1} \quad (3)$$

โดยที่

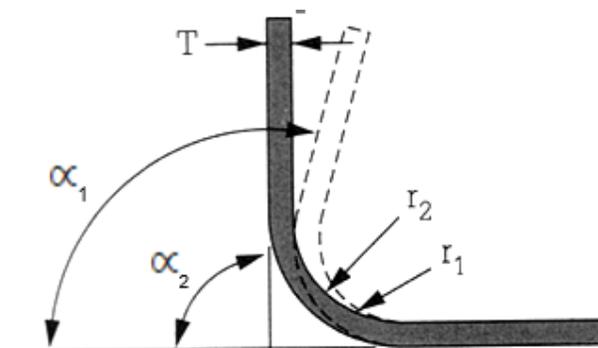
K(T) = ค่าคงที่ของการดัดตัวกลับของเหล็กท่อกลวง

K(R) = ค่าคงที่ของการดัดตัวกลับของเหล็กเส้น

K(S) = ค่าคงที่ของการดัดตัวกลับของเหล็กแผ่น

α_1 = มุมดัดเริ่มต้น (ก่อนการดัดตัวกลับ)

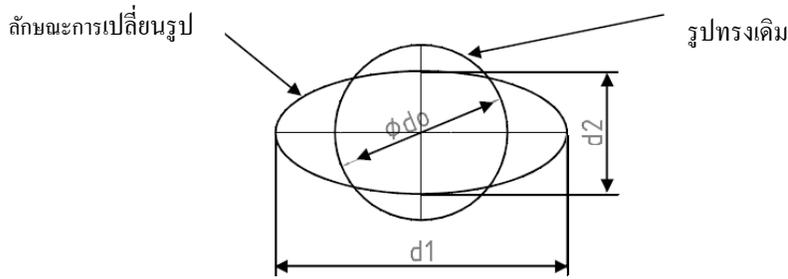
α_2 = มุมดัดหลังการดัดตัวกลับ



รูปที่ 1 การดัดตัวกลับ (Osman, 2002)

การวัดค่าอัตราความเครียด

การเปลี่ยนรูปร่างของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of sheet in plane stress) ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปร่างระนาบความเค้น (Plane stress) พิจารณา (Work hardening) ของวัสดุ ซึ่งเขากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูปร่าง ความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain) ความเครียดหลักและความเครียดรองที่เกิดขึ้นสูงสุดทำของกระบวนการเพื่อใช้ในการตรวจสอบกรณีของการเกิดแบบต่างๆ วิเคราะห์ในพื้นที่วิกฤติของชิ้นงานหลักจากการทำการขึ้นรูป (บุญส่ง, 2552) (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 ลักษณะการเปลี่ยนรูปของกรีดวงกลม (บุญส่ง, 2552)

ค่าความเครียดหลัก

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (4)$$

ค่าความเครียดรอง

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} \quad (5)$$

ค่าความเครียดที่ความหนา

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{t_2}{t_0} \quad (6)$$

ค่าความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain)

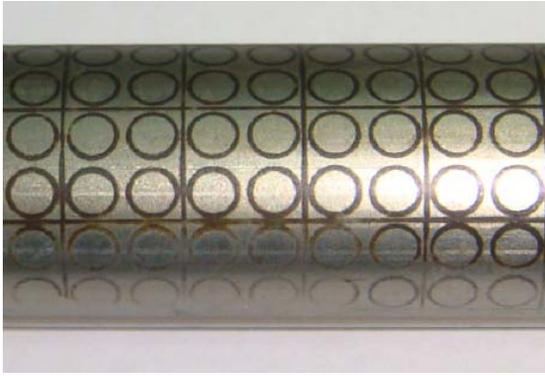
$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)} \quad (7)$$

เมื่อ

- d_1 = การเปลี่ยนรูปกรีดวงกลมขนาดของแกนหลัก(Major)
- d_2 = การเปลี่ยนรูปกรีดวงกลมขนาดของแกนรอง(Minor)
- t_0 = ความหนาของชิ้น
- t_1 = การเปลี่ยนแปลงของความหนาของชิ้นหลังจากการขึ้นรูป

เตรียมชิ้นงานทดสอบ

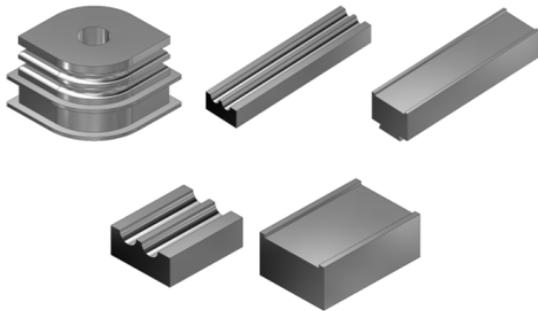
พิมพ์ลายกรีดวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร ด้วยทำการสร้างโดยการกัดกรด และปล่อยกระแสไฟฟ้าที่บริเวณส่วนที่เป็นพื้นผิวหน้าของโลหะเพื่อให้เกิดแถวเรียงต่อกันเป็นพื้นที่ของจุดทดสอบ ซึ่งกรีดนั้นต้องมีความถูกต้องแม่นยำก่อนที่จะขึ้นรูปโลหะให้เป็นรูปร่างสุดท้ายโดยใช้แรงขึ้นรูป ซึ่งกรีดที่ใช้สร้างบนชิ้นงานโลหะทั่วไปจะมีรูปแบบ สีเหลี่ยม วงกลม วงรี และวงกลมผสมกับสี่เหลี่ยม (Combination) และกรีดที่เป็นรูปร่างต่างๆ จะเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปหลังจากทำการขึ้นรูปโลหะ (อักษรยุทธ์, 2553)



รูปที่ 3 การพิมพ์ลายกริดบนชิ้นงานทดสอบ

ออกแบบแม่พิมพ์ตัดทั้ง 3 รูปทรง

ใช้สำหรับตัดชิ้นงานทั้ง 3 รูปทรงประกอบด้วย เหล็กท่อกลม เหล็กแผ่น และเหล็กเส้น



รูปที่ 4 แม่พิมพ์ใช้สำหรับตัด เหล็กท่อ เหล็กแผ่น และ เหล็กเส้นกลม

วิธีการทดลอง

1.ใส่สารหล่อลื่นในแม่พิมพ์ตัดและตัวชิ้นงานขณะทำการตัด ดังต่อไปนี้



(ก)



(ข)



(ค)

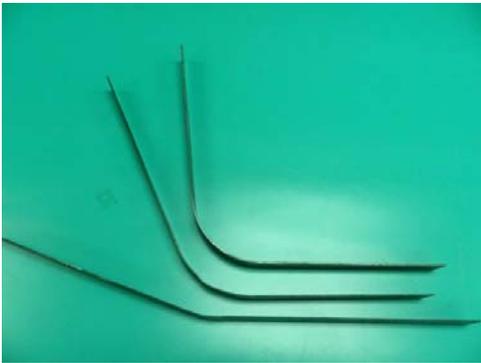
รูปที่ 5 สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง (ก) น้ำมันมะพร้าว (ข) น้ำมันก๊ิงสังเคราะห์ GP9020 (ค) น้ำมันสังเคราะห์

GP906

2. ทำการตัดชิ้นงานที่เป็นเหล็กแผ่นโดยเริ่มทำการตัดที่มุม 30-90 องศาด้วย เครื่องตัดเหล็กมัลติฟังก์ชัน



รูปที่ 6 เครื่องตัดเหล็กมัลติฟังก์ชัน



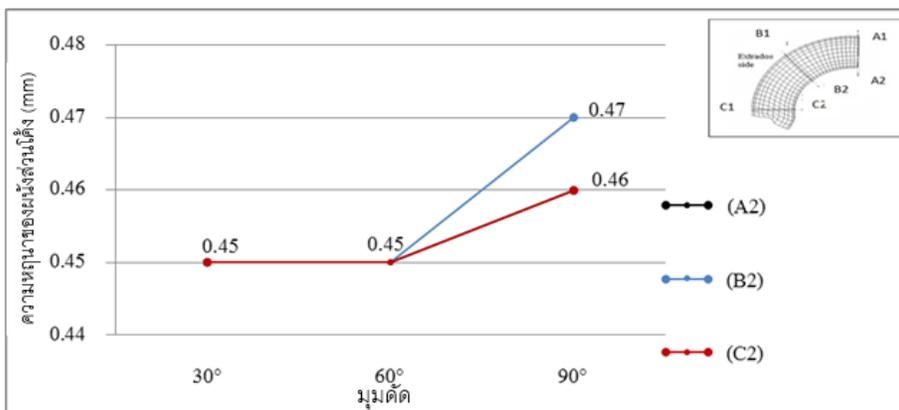
รูปที่ 7 ชิ้นงานที่ได้จากการตัดที่มุม 30, 60 และ 90 องศา

3. เก็บผลการทดลองและการผลัดชิ้นงาน ได้แก่ ความหนา การตีตัวกลับ และความเครียด

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

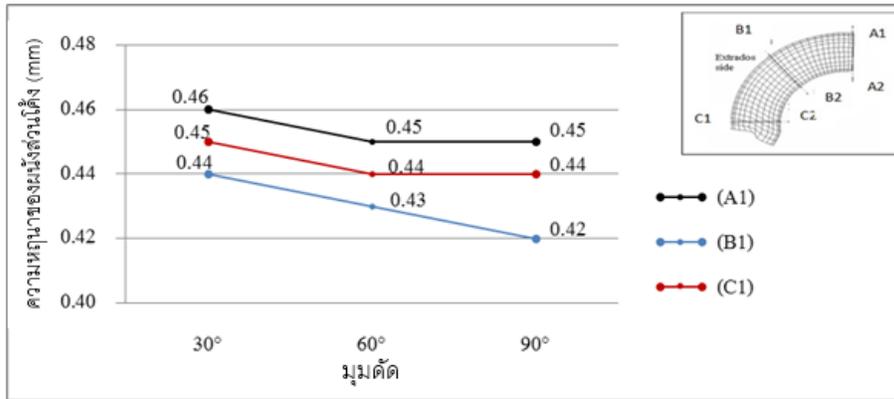
ผลการทดลองความหนาของผนังส่วนโค้งของเหล็กกลวง

การทดลองการตีตัวกลับของเหล็ก 3 รูปทรง กับสารหล่อลื่น 3 ชนิด โดยทำการตัดที่ 30, 60 และ 90 องศา ซึ่งสามารถแสดงผลการวัดค่าความหนาดังนี้



รูปที่ 8 ความหนาของผนังส่วนโค้งใน

ค่าความหนาที่ต่างกันของเหล็กท่อกลวงส่วนโค้งด้านในที่ใช้ น้ำมันมะพร้าวในแต่ละองศาตัด ซึ่งที่องศาในการตัด 90 องศา บริเวณส่วนโค้งใน (A2) เท่ากับ 0.46 มิลลิเมตร และส่วนโค้งใน (B2) เท่ากับ 0.47 มิลลิเมตร และส่วนโค้งใน (C2) เท่ากับ 0.46 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าที่องศาในการตัดเท่ากับ 90 องศา ผนังท่อทั้ง 3 บริเวณจะมีความหนามากที่สุด โดยความหนาสูงสุดที่ส่วนโค้งในบริเวณ (B2) เท่ากับ 0.47 มิลลิเมตร

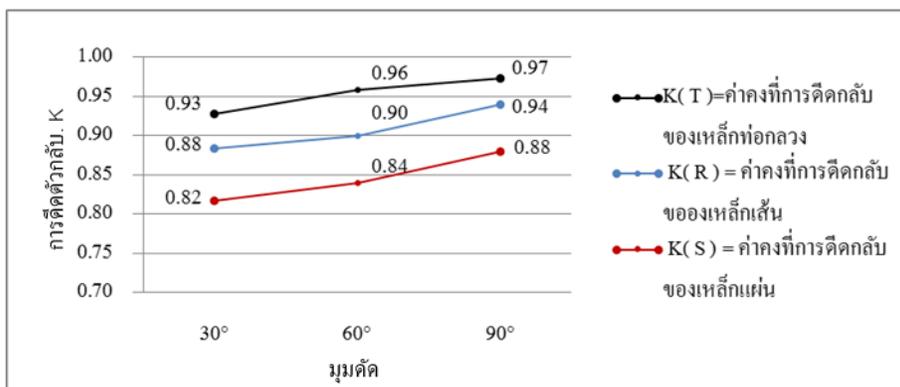


รูปที่ 9 ความหนาของผนังส่วนโค้งนอก

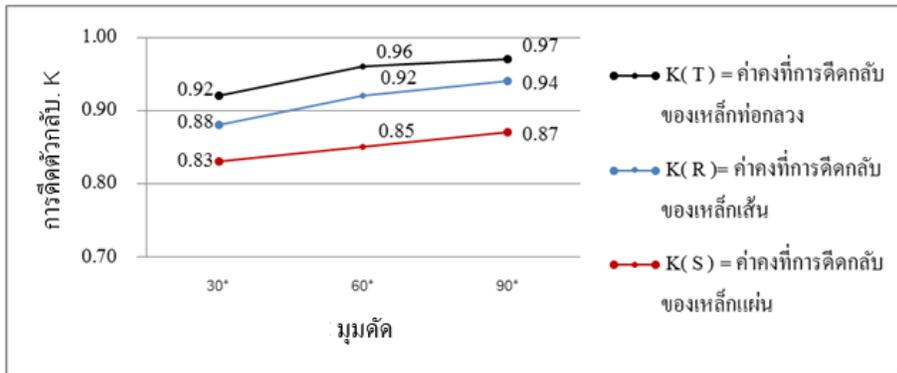
ค่าความหนาที่ต่างกันของเหล็กท่อกลวงส่วนโค้งด้านนอกที่ใช้ น้ำมันก๊าดสังเคราะห์ (GP9020) ในแต่ละองศาตัด ซึ่งที่องศาในการตัด 90 องศา บริเวณส่วนโค้งนอกสุด (A1) เท่ากับ 0.45 มิลลิเมตร และส่วนโค้งนอก (B1) เท่ากับ 0.42 มิลลิเมตร และส่วนโค้งนอก (C1) เท่ากับ 0.44 มิลลิเมตร ที่องศาในการตัด 90 องศาผนังท่อทั้ง 3 บริเวณจะมีความหนาน้อยที่สุด โดยความหนาน้อยสุดที่ส่วนโค้งนอกบริเวณ (B1) เท่ากับ 0.42 มิลลิเมตร

ผลการทดลองการติดตัวกลับ

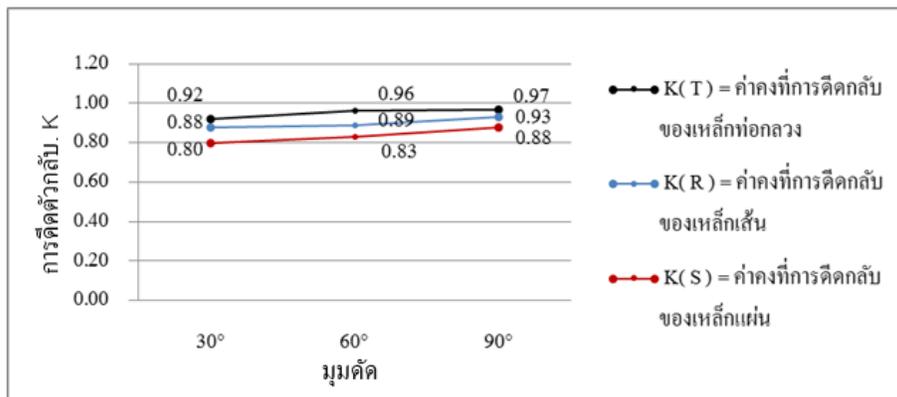
การทดลองการติดตัวกลับของเหล็ก 3 รูปทรง กับสารหล่อลื่น 3 น้ำมัน เพื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ของการติดตัวกลับในการตัดโดยทำการตัดที่ 30, 60 และ 90 องศา ซึ่งสามารถแสดงผลในรูปแบบตารางองศาการติดตัวกลับ, การคำนวณค่าคงที่ของการติดกลับตัว และเปอร์เซ็นต์การติดกลับ ดังนี้



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่การติดกลับกับองศาในการตัดเมื่อใช้น้ำมันมะพร้าว



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่การดีดกลับกับองศาในการตัดเมื่อใช้น้ำมันกึ่งสังเคราะห์

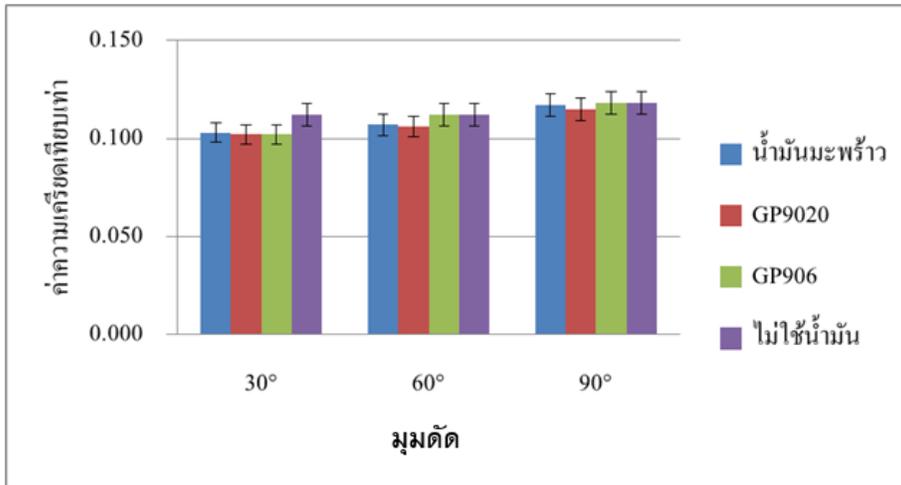


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่การดีดกลับกับองศาในการตัดเมื่อใช้น้ำมันสังเคราะห์

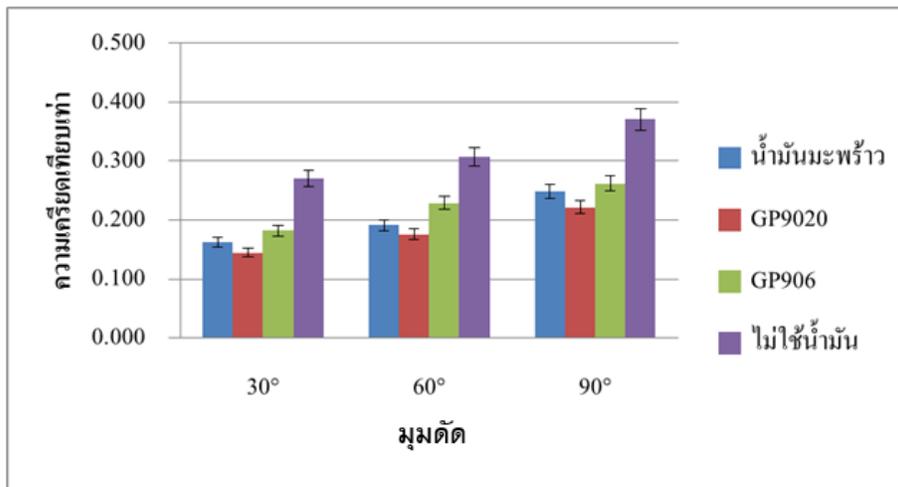
ผลการทดลอง พบว่ารูปทรงของเหล็กและองศาการตัดนั้นมีผลต่อการดีดกลับ เมื่อองศาองศาการตัดเพิ่มขึ้น การดีดกลับ (Spring Back) จะลดลง แต่ค่าคงที่การดีดกลับ (K) จะเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งทางงานวิจัยและทฤษฎีมีการกล่าวถึงว่า ค่าคงที่การดีดกลับ (K) มีค่าเท่ากับ 1 (Osman, 2012) นั้นหมายความว่าไม่เกิดการดีดกลับ และถ้าค่าคงที่ยิ่งเข้าใกล้ 1 การดีดกลับ (Spring Back) จะน้อยลงด้วย เมื่อวิเคราะห์จากค่าคงที่การดีดกลับ สามารถเรียงลำดับการดีดกลับของเหล็กทั้ง 3 รูปทรงจากมากไปน้อยได้ดังนี้ เหล็กแผ่น เหล็กเส้นกลมและเหล็กท่อกลวง

ผลการทดลองค่าความเครียดเทียบเท่า

ค่าความเครียดเทียบเท่า โดยได้มาจากการคำนวณกันของค่าความเครียดหลัก ค่าความเครียดรอง และค่าความเครียดที่ความหนา ดังนี้



รูปที่ 13 ความเครียดเทียบเท่าส่วนโค้งด้านในของเหล็กที่อกलग



รูปที่ 14 ความเครียดเทียบเท่าส่วนโค้งด้านนอกของเหล็กที่อกलग

เมื่อองศาการตัดเพิ่มมากขึ้น ค่าความเครียดเทียบเท่าจะเพิ่มขึ้น โดยที่องศาการตัด 90 องศา จะมีค่าความเครียดสูงสุดกว่าทุกองศา และส่วนโค้งนอกมีค่าความเครียดเทียบเท่ามากกว่าส่วนโค้งใน เนื่องจากการยึดตัวตามแนวยาวของวัสดุ และสารหล่อลื่นมีผลต่อค่าความเครียดเทียบเท่าเห็นได้จากค่าความเครียดเทียบเท่าของสารหล่อลื่นทั้ง 3 ชนิดนั้นมีค่าน้อยกว่าไม่ใช้สารหล่อลื่น

สรุป

สารหล่อลื่นนั้นมีอิทธิพลต่อความหนา เนื่องจากผลการทดลองค่าความหนาที่ใช้สารหล่อลื่นมีค่ามากกว่าไม่ใช้สารหล่อลื่น โดยความหนาของผนังส่วนโค้งของเหล็กด้านนอก (A1, B1, C1) มีความหนาน้อยกว่าผนังส่วนโค้งใน (A2, B2, C2) ซึ่งเป็นผลมาจากส่วนโค้งนอกได้รับผลกระทบจากความเค้นแรงดึงแต่ส่วนโค้งในเกิดความเค้นอัด ตำแหน่งที่บางที่สุดคือบริเวณตรงกลางส่วนโค้งด้านนอก (B1) และตำแหน่งที่หนาที่สุดคือบริเวณตรงกลาง

ส่วนโค้งด้านใน(B2) ยังไรก็ตามเมื่อองศาการดัดเพิ่มขึ้น การตีดกลับ (Spring Back) จะลดลง แต่ค่าคงที่การตีดกลับ (K) จะเพิ่มสูงขึ้น อีกด้วย เมื่อวิเคราะห์จากค่าคงที่การตีดกลับสามารถเรียงลำดับการตีดกลับของเหล็กทั้ง 3 รูปทรงจากมากไปน้อยได้ดังนี้ เหล็กแผ่นเหล็กเส้นกลมและเหล็กท่อกดง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มทร.ธัญบุรี งบประมาณแผ่นดินประจำปี 2557 และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

- บุญส่ง จงกลณี.2552. “การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปลึกขึ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรต่อสมบัติการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- อักษรายุทธ พิธิษฐวานิช. 2553. “การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการตีดตัวกลับกับ ความเค้นในกระบวนการดัดโลหะแบบ Compression โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.”วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- ศิริชัย ต่อสกุล. 2554. พื้นฐานเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีอีดียูเคชั่น จำกัด (มหาชน)
- Al-Qureshi, H.A., 1999. Elastic-plastic analysis of tube bending. International Journal of Machine Tools and Manufacture 39 (1), 87–104.
- Altan T., Oh S.L. and Gegel. H.L. (1986). Metal Forming: Fundamentals and Applications. Ohio: American Society for Metals
- Hines,2011. Tube Bending Guide, United States and Canada, 2710 Swamp Cabbage Court, Fort Myers, FL 33901.
- Lange K. 1985. Metal Forming Handbook. New York : McGraw-Hill.
- M.A. Osman a, M. Shazly ^b, 2012. Springback prediction in V-die bending: modelling and experimentation.
- Rohit Agawal. 2004. “Tube Bending With Axial Pull and Internal Pressure.” Master of Science Thesis, Mechanical Engineering Texas A&M University.
- Schuler GmbH. 1998. Metal Forming Handbook. Berlin: Springer.
- Vukota Boljanovic. 2004. SHEET METAL FORMING PROCESS AND DIE DESIGN. New York : Industrial Press Inc.