อิทธิพลของแมนเดรลเหลวต่อการลดพื้นที่หน้าตัด ความเค้นดึง และความหนาในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อทองแดง

Influence of Fluid Mandrel on Area Reduction, Drawing Stresses and Thickness in Copper Tube Drawing

ทัพพ์ศมน ดุสิตโสภิตวงศ์ สมชัย นรเศรษฐ์โศภน

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาอิทธิพลของแมนเดรลเหลวที่ส่งผลกระทบต่อการลดลงของพื้นที่หน้าตัด ความหนา และความเค้นดึงของท่อในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อทองแดง ได้ทำการทดลองโดยใช้ท่อทองแดงตามมาตรฐาน JIS C12200 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของท่อ 15.88 มิลลิเมตร และ 1.12 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยของเหลวที่บรรจุไว้ภายในท่อทองแดงเพื่อทำหน้าที่เป็นแมนเดรล คือ น้ำสะอาด และ น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 จนเต็ม จากนั้นทำการดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ที่มีขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์เท่ากับ 15 องศา เพื่อลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลงร้อยละ 20, 35 และ50 โดยศึกษาที่อัตราเร็วในการดึงขึ้นรูปเท่ากับ 5 และ 30 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าชนิดของแมนเดรลเหลวส่งผลต่อการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัด ความหนาของท่อและความเค้นดึง และยังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของแมนเดรลเหลวและอัตราเร็วที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปด้วย

คำสำคัญ : การดึงขึ้นรูปท่อ, ท่อทองแดง, แมนเดรลเหลว, การลดพื้นที่หน้าตัด, ความเค้นดึง

Abstract

The objective of this research is to study the effect of the fluid mandrel on the reduction of area, drawing stress and thickness in copper tube drawing process. The standard copper tube JIS C12200 with 15.88 mm diameter and 1.12 mm wall thickness is choosen for this experimental investigation. Two types of fluid mandrel, water and lubrication oil (SAE20W40) were contained in the copper tube. The copper tube is drawn through the die ($\alpha = 15°$) by using the area reduction of 20, 35 and 50% with the drawing speeds at 5 and 30 mm/min. The results shown the influence of the fluid mandrel on the reduction of area, the tube thickness and the drawing stress and also depend on the density of fluid and the drawing speed.

Keywords : Tube drawing, Copper tube, Fluid mandrel, Reduction of area, Drawing stress

1.บทนำ [1,2,4]

การดึงขึ้นรูป เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่นิยมในงานอุตสาหกรรมการผลิตท่อในปัจจุบัน โดยการนำท่อมาดึงลดขนาดทั้งด้านในและด้านนอก โดยดึงผ่านแม่พิมพ์เพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้ เป็นการดึงขึ้นรูปแบบเย็นที่อาศัยแรงในการดึงขึ้นรูปสูง และวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด รูปร่างแบบถาวรที่อุณหภูมิห้อง แต่ชิ้นงานที่ได้จะมีความแข็งแรงสูง สามารถควบคุมขนาดสุดท้ายได้แน่นอน และผิวของวัสดุที่ได้มีความสวยงาม

การพัฒนากระบวนการผลิตเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิต ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนในการดำเนินงานลดต่ำลง ใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานน้อยลง ให้ผลผลิตสูงขึ้น ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสูงขึ้น การปรับปรุงตัวแปรต่างๆในกระบวนการผลิตเป็นอีกวิธีหนึ่งของการพัฒนากระบวนการผลิต การปรับปรุงตัวแปรต่างๆในกระบวนการผลิตท่อที่สำคัญ เช่น ขนาดแม่พิมพ์ ชนิดของสารหล่อลื่น ชนิดของแมนเดรล ให้มีความเหมาะสม เพื่อให้ได้ชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตรงตามความต้องการในการใช้งาน

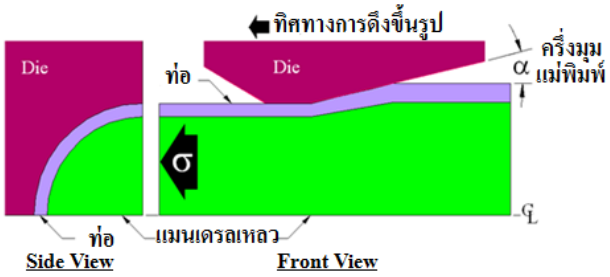
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด ว่าส่งผลกระทบอย่างไรต่อความหนาของท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งภายในและภายนอก รวมไปถึงความเค้นดึงที่เกิดขึ้นขณะทำการดึงขึ้นรูป อีกทั้งยังมีของเหลวที่ใช้เป็นแมนเดรลมาพิจารณาร่วมด้วย โดยศึกษาว่าตัวแปรเหล่านี้ จะส่งผลกระทบต่อวัสดุที่ใช้ทำท่ออย่างไรบ้าง

2. การดึงขึ้นรูป (Tube Drawing Process) [2,3]

การดึงขึ้นรูป เป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมที่เก่าแก่วิธีหนึ่ง โดยเป็นการทำให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อ ลวด หรือเหล็กท่อนกลม ลดขนาดลงตามที่ต้องการ ซึ่งตัวกำหนดขนาดของวัสดุในขณะดึงขึ้นรูป คือ แม่พิมพ์ (Die) ที่ทำจากซีเมนต์คาร์ไบด์หรือเพชร อุตสาหกรรม เพราะจะทำให้แม่พิมพ์มีอายุการใช้งานที่นาน และทนต่อการสึกหรอสูง โดยปกติแล้วการดึงขึ้นรูปนิยมทำที่อุณหภูมิห้องและทำการดึงซ้ำๆ ในบางกรณีได้มีการให้ความร้อนหรืออบอ่อนแก่ชิ้นงานที่ต้องดึงซ้ำ เพื่อลดความเครียดแข็งที่เกิดขึ้นในชิ้นงานก่อนการดึงครั้งต่อไป

การดึงขึ้นรูปแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดหลัก คือ 1. การดึงขึ้นรูปแบบไม่มีแมนเดรลหรือแกน เรียกว่า การขึ้นรูปแบบซิ้งกิ้ง (Tube Sinking) โดยหลังจากดึงผ่านแม่พิมพ์จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลง ในขณะที่ความหนาและความยาวของท่อจะเพิ่มขึ้น จะขึ้นอยู่กับความเค้นดึง ลักษณะของแม่พิมพ์ และแรงเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์กับชิ้นงาน วิธีนี้จะทำให้ผิวภายในและภายนอกชิ้นงานมีความขรุขระ ลักษณะชิ้นงานที่ได้มีขนาดไม่คงที่ตลอดทั้งชิ้นงาน 2. การดึงขึ้นรูปแบบมีแกน (Plug Drawing or Mandrel Drawing) การขึ้นรูปแบบนี้เป็นการขึ้นรูปที่เหมาะสำหรับการขึ้นรูปท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดกลางไปจนถึงขนาดใหญ่ นิยมใช้ในการผลิตท่อผนังบาง ซึ่งแกนจะอยู่ภายในท่อและจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยอาศัยแรงเสียดทานไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางที่ใช้ดึง โดยวิธีนี้ ผิวชิ้นงานทั้งภายในและภายนอกมีความเรียบกว่าแบบซิ้งกิ้ง

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การขึ้นรูปท่อแบบมีแกนเหลว (Fluid Mandrel) คือ การดึงวัสดุผ่านแม่พิมพ์โดยอาศัยแรงดึงในการดึงวัสดุที่บริเวณปลายของท่อที่สอดผ่านแม่พิมพ์ออกมา โดยใช้ของเหลวเป็นแกนกลางในการดึงขึ้นรูป แม่พิมพ์จะทำหน้าที่ควบคุมขนาดและผิวภายนอกท่อ ส่วนขนาดและผิวภายในท่อจะถูกกำหนดด้วยแกนเหลว แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การดึงขึ้นรูปท่อโดยใช้แมนเดรลเหลว

3. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้งานวิจัย

ชิ้นทดสอบที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของการลดลงของพื้นที่หน้าตัด ต่อความหนาของท่อ และความเค้นดึง ในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อโดยใช้แมนเดรลเหลวในงานวิจัยนี้ คือ ท่อทองแดงขนาด 15.88 ม.ม. หนา 1.12 ม.ม. โดยดึงผ่านแม่พิมพ์ 3 ขนาด ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ดังต่อไปนี้

3.1 ท่อทองแดง ตามมาตรฐาน JIS C12200 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 15.88 ม.ม. ความหนา 1.12 ม.ม.ความยาวท่อก่อนดึง 10 ซ.ม. ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลดังตารางที่ 1

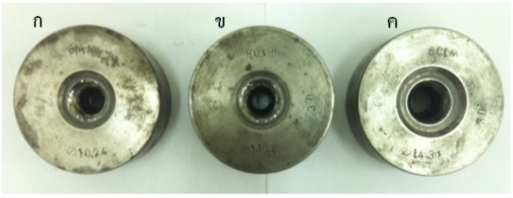
ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชิงกลของท่อทองแดงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป

Young's modulus, E (MPa)	117,000
Yield stress, σ_Y (MPa)	120
Poisson's ratio, ν	0.31
Die half-angle, α (Degree)	15

3.2 เครื่องทดสอบแรงดึง Universal Testing Machine Testometric Model รุ่น M500-100 kN (UTM) ขนาดแรง 100 กิโลนิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 2

3.3 แม่พิมพ์ (Die) ในการทดลอง เลือกใช้แม่พิมพ์ที่มีขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ (α) เท่ากับ 15 องศา โดยมีอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 35 และ 50% ดังแสดงในรูปที่ 3

รูปที่ 2 เครื่องทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3 ชุดแม่พิมพ์ขนาดครึ่งมุม 15 องศา ที่ขนาดการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ ก) 20% ข) 35% ค) 50%

3.4 แมนเดรลเหลว แมนเดรลที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป โดยค่าความหนาแน่นของของเหลวที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังตารางที่ 2 ในปริมาณการใช้ 18 มิลลิลิตร ต่อการทดลองในแต่ละครั้ง

ตารางที่ 2 ค่าความหนาแน่นของแมนเดรลเหลวที่อุณหภูมิห้องที่ใช้ในการทดลอง

แมนเดรลเหลว	**ความหนาแน่น (kg/m^3)**
น้ำสะอาด	1000*
น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40	896*

*www.engineeringtoolbox.com

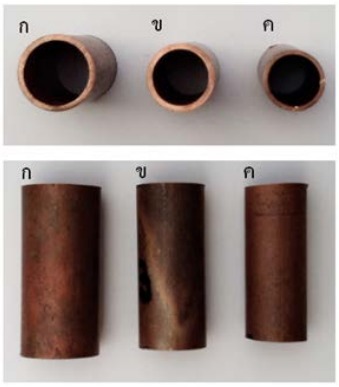
4. ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองจะทำการดึงลดขนาดท่อทองแดงผ่านแม่พิมพ์ที่มีขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ 15 องศาให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดลดลง 20, 35 และ 50% ภายในท่อบรรจุน้ำสะอาดและน้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W40 เพื่อใช้เป็นแมนเดรลเหลว โดยศึกษาที่อัตราเร็วในการดึงขึ้นรูป 5 และ 30

ม.ม./นาที แล้วบันทึกค่าแรงดึงโดยใช้หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

5. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

หลังจากทำการดึงขึ้นรูปท่อทองแดง รูปร่างของท่อทองแดงที่ได้หลังดึง พบว่า ขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานลดลงตามขนาดของแม่พิมพ์ที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 4



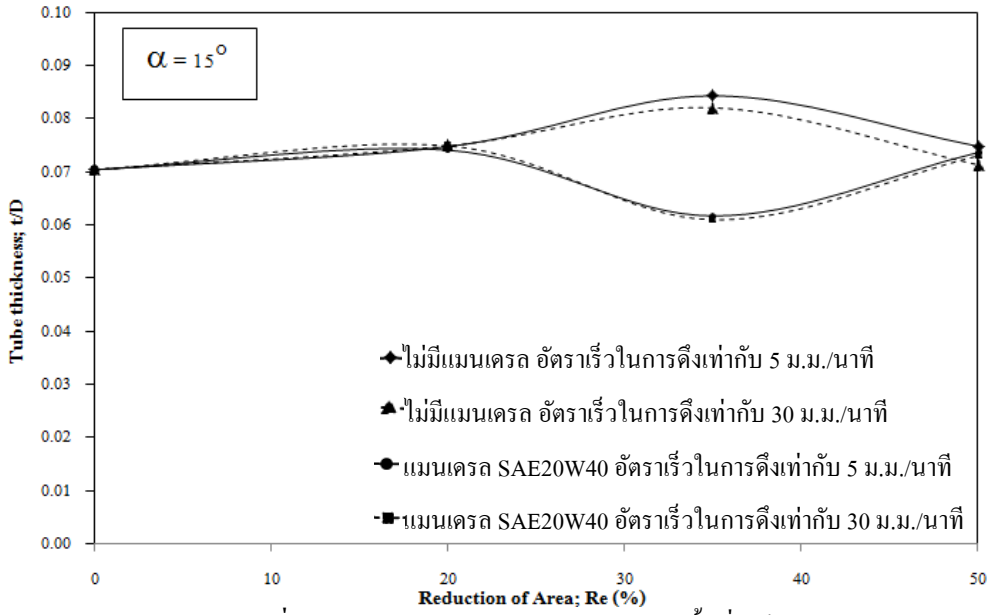
รูปที่ 4 ท่อทองแดงหลังดึงที่อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัด ก) 20% ข) 35% และ ค) 50%

5.1 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อการลดพื้นที่หน้าตัด (Tube thickness vs Reduction of area)

ในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อนั้น ถ้าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (Tube thickness; t/D) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ท่อที่ผ่านการดึงขึ้นรูปลดพื้นที่หน้าตัดลงหลายๆครั้ง มีโอกาสตีบตันได้ [5] ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้งค่าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเริ่มต้นหรือท่อที่ใช้เป็นชิ้นทดสอบนั้น มีค่าเท่ากับ 0.07 จากการศึกษาโดยการทดลองพบว่าอัตราส่วนความหนาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหลังดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ที่มีครึ่งมุมแม่พิมพ์เท่ากับ 15 องศา ที่อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 35 และ 50 % เป็นดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์ของท่อของชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล จะมีค่าสูงขึ้นที่ช่วงการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดระหว่าง 20% – 35% และมีแนวโน้มที่จะลดลงหลังจากช่วง 35% เป็นต้นไป

ในทางตรงกันข้าม ชิ้นงานที่ภายในมีแมนเดรลเหลว คือ น้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 พบว่าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยในช่วงการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดระหว่าง 0%-20% หลังจากนั้นจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนในช่วงการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดระหว่าง 20%-35% และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหลังจากช่วง 35% เป็นต้นไป

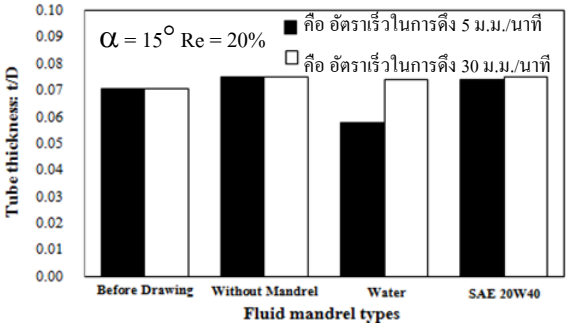
ดังนั้น ช่วงการลดพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสม ที่ส่งผลต่อความหนาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออย่างชัดเจนที่สุด คือ ที่ 20-35% ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการพิจารณากำหนดค่าการดึงลดพื้นที่หน้าตัดเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป



รูปที่ 5 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อการลดพื้นที่หน้าตัด

5.2 อัตราส่วนความหนาของท่อต่อชนิดของแมนเดรลเหลว (Tube thickness vs Fluid mandrel types)

หลังจากทำการดึงขึ้นรูปท่อ โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหลังผ่านการดึงขึ้นรูปที่เป็นผลมาจากชนิดของแมนเดรลเหลว ได้ผลการทดลองดังกราฟในรูปที่ 6 พบว่าอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล จะให้ค่าที่สูงกว่าชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลว สำหรับอัตราเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ 5 ม.ม./นาที



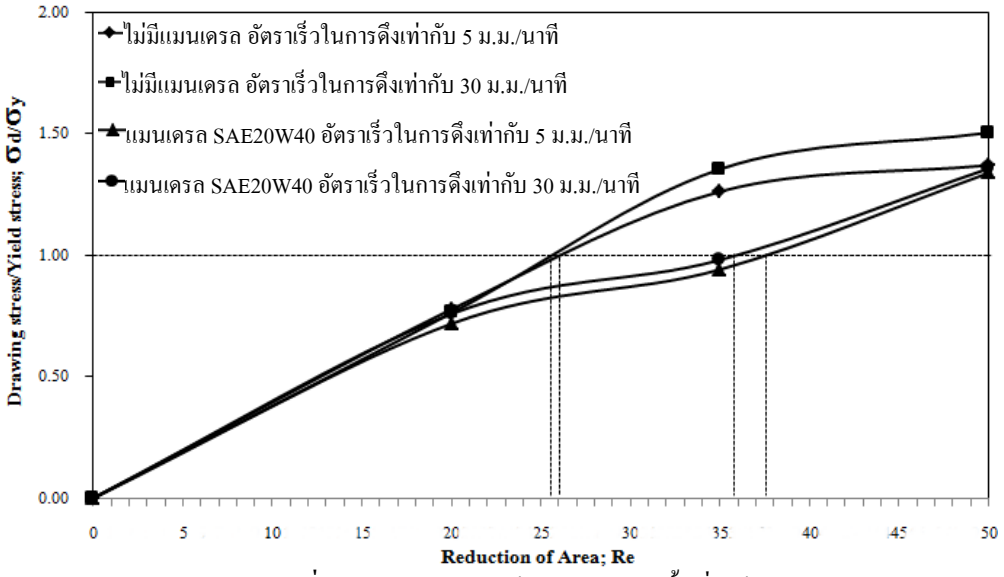
รูปที่ 6 อัตราส่วนความหนาท่อต่อชนิดของแมนเดรล

ในส่วนของชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลว คือ น้ำสะอาดซึ่งมีค่าความหนาแน่นสูงกว่า มีแนวโน้มช่วยลดอัตราส่วนความหนาของท่อได้ดีกว่าชิ้นงานที่มีน้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 เป็นแมนเดรลเหลว

5.3 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อการลดพื้นที่หน้าตัด (Drawing stress vs Reduction of area)

ในขณะทำการดึงขึ้นรูปท่อโดยอาศัยแรงกระทำจากภายนอกมากระทำกับชิ้นงาน จะทำให้ชิ้นงานที่ดึงพ้นแม่พิมพ์ออกมาแล้ว เกิดความเค้นภายในที่เรียกว่า ความเค้นดึง ซึ่งแรงนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปทางโครงสร้างของชิ้นงาน จึงได้ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างความเค้นดึงและความเค้นจุดคราก (Yield Stress) ซึ่งค่าอัตราส่วนนี้ต้องมีค่าไม่เกิน 1.0 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่ทำให้เมื่อขึ้นรูปแล้ว ได้ขนาดท่อที่แม่นยำตรงตามขนาดแม่พิมพ์ที่ใช้ และท่อจะไม่เกิดรอยแตกหรือขาดก่อนสิ้นสุดกระบวนการ โดยได้ศึกษาอัตราส่วนความเค้นที่เป็นผลมาจากการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20, 35 และ 50% ได้ผลการทดลองดังกราฟในรูปที่ 7 สังเกตตามแนวเส้นประ พบว่าอัตราส่วนความเค้นดึงของชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล ในการดึงขึ้นรูปที่อัตราเร็วทั้ง 5 และ 30 ม.ม./นาที จะมีค่าเท่ากับ 1.0 ที่ค่าการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 25.75% และ 26.25% ตามลำดับ

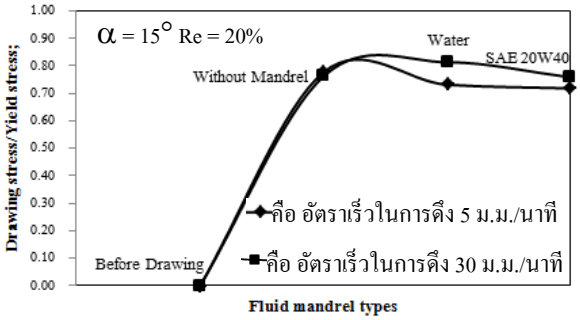
ในทางเดียวกัน สำหรับอัตราส่วนความเค้นของชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลว คือ SAE20W40 ในการดึงขึ้นรูปที่อัตราเร็ว 5 และ 30 ม.ม./นาที จะมีค่าเข้าใกล้1.0 ที่ค่าการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 36.5% และ 37.8% ตามลำดับ



รูปที่ 7 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อการลดพื้นที่หน้าตัด

5.4 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อชนิดของแมนเดรลเหลว (Drawing stress vs Fluid mandrel types)

ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนความเค้นที่เป็นผลมาจากชนิดของแมนเดรลเหลวในงานวิจัยครั้งนี้ด้วย และได้ผลการทดลองดังกราฟในรูปที่ 8



รูปที่ 8 อัตราส่วนความเค้นดึงต่อชนิดของแมนเดรลเหลว

เมื่อทำการดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ที่มีครึ่งมุมแม่พิมพ์เท่ากับ 15 องศา ที่อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20% พบว่า อัตราส่วนความเค้นดึงของชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล จะให้ค่าที่สูงกว่าชิ้นงานที่ภายในมีแมนเดรลเหลว และสำหรับชิ้นงานที่มีแมนเดรลเหลว คือ น้ำสะอาด จะให้ค่าอัตราส่วนความเค้นดึงของชิ้นงานสูงกว่าชิ้นงานที่มีน้ำมันเครื่องเกรด SAE20W40 เป็นแมนเดรลเหลว และยังพบว่าอัตราเร็วในการดึงขึ้นรูปท่อ ส่งผลต่ออัตราส่วนความเค้นดึงด้วย นั่นคือ ยิ่งอัตราเร็วในการดึงขึ้นรูปสูง แรงกระทำระหว่างภายในและภายนอกจะมีค่ามาก วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปเร็วขึ้น ส่งผลให้ความเค้นดึงสูงขึ้น ซึ่งส่งผลในทิศทางตรงกันข้ามกับชิ้นงานที่มีอัตราเร็วในการดึงขึ้นรูปต่ำ

6. สรุปผลการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการดึงขึ้นรูปท่อแบบไม่ใช้แมนเดรลกับแบบใช้แมนเดรลเหลว จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การดึงขึ้นรูปท่อโดยใช้แมนเดรลเหลวนั้น ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญให้สามารถเพิ่มค่าการดึงลดพื้นที่หน้าตัดในกระบวนการดึงขึ้นรูปท่อให้สูงขึ้นได้ พบว่า

1. แมนเดรลเหลวส่งผลต่ออัตราส่วนความความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อได้ดีกว่าชิ้นงานที่ไม่มีแมนเดรล ทั้งในการดึงขึ้นรูปที่ 5 และ 30 ม.ม./นาที
2. ช่วงการลดพื้นที่หน้าตัดที่ 20-50% เป็นช่วงที่แมนเดรลเหลวส่งผลต่ออัตราความเค้นดึงอย่างชัดเจน ได้ขนาดท่อที่แม่นยำตรงตามขนาดแม่พิมพ์ที่ใช้ สำหรับกรณีไม่มีแมนเดรล การดึงขึ้นรูปที่อัตราเร็วทั้ง 5 และ 30 ม.ม./นาที การลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ไม่ควรเกิน 25.75% และ 26.25% ตามลำดับ และสำหรับกรณีที่ใช้แมนเดรลเหลวเป็นSAE20W40 ดึงขึ้นรูปที่อัตราเร็ว 5 และ 30 ม.ม./นาที ค่าการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในกระบวนการผลิตไม่ควรเกิน 36.5% และ 37.8% ตามลำดับ
3. ความหนาแน่นของแมนเดรลเหลว ส่งผลต่อความเค้นดึงยิ่งค่าความหนาแน่นมาก อัตราส่วนความเค้นดึงที่เกิดขึ้นจะมีค่ามาก

7. เอกสารอ้างอิง

[1] William F.Hosford and Robert M. Caddell, “Metal Forming Mechanics and Metallurgy,” PTR Inc, 1993.

[2] S.Kalpakjian and R.Schmid, “Manufacturing Process for Engineering Materials,” Pearson Inc, 2003.

[3] T.Altan, S.OH and H.Gegel, “Metal Forming Fundamentals and Applications,” American Society for Metals, Metal Park, OH 44073, 1983.

[4] K.Yoshida, Y.Onitsuka and S.Yamashita, “Fabrication of High Quality Fine Medical Tubes by Fluid Mandrel Drawing,” Journal of Solid Mechanicals and Materials Engineering, Vol.3, pp.1348-1355, 2009.

[5] T.Tangsri, S.Norasethasopon and K.Yoshida, “Fabrication of small size inner spiral ribbed copper tube by fluid mandrel drawing,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.70, pp 1923-1930, 2014.