

ผลกระทบของอุณหภูมิการอบอ่อนหลังกระบวนการที่ส่งผลต่อพฤติกรรมแอนไอโซทรอปิกและความสามารถในการลากขึ้นรูปของโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

The Effect of Process Annealing Temperature on The Evaluation of Anisotropy and Deep Drawability of Stainless Steel Sheet SUS304

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ^{1*}, เฉลิมพล คล้ายนิล¹, พงศกร หลีตระกูล¹, จินกมล ลุยจันทร์¹ และ ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร้ง²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล

²คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

Natthasak Pornputsiri^{1*}, Chalernpol Klaynil¹, Pongsakorn Leetrakul¹, Jinkamol Lujjan¹ and Bhadpiroon Watcharasresomroeng²

¹Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

²Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

*Corresponding author Email: Natthasak.por@rmutr.ac.th

(Received: June 4, 2025 / Revised: June 19, 2025 / Accepted: June 21, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการอบอ่อนหลังกระบวนการที่ส่งผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปในแต่ละทิศทางของการรีดหรือค่าแอนไอโซทรอปิกของวัสดุโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม จุดประสงค์ของการวิจัยนี้คือศึกษาโดยการออกแบบการทดลอง เพื่อประกอบการประเมินผลพฤติกรรมการขึ้นรูปลึกและความสามารถในการลากขึ้นรูปของโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 ซึ่งถูกนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่างๆ อย่างแพร่หลาย เพื่อพัฒนาแนวทางในการทำนายเชิงเปรียบเทียบผลกระทบของอุณหภูมิการอบอ่อน จากสมบัติทางกล ความกว้างของปีกถ้วย และการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาผนังถ้วย โดยทำการอบอ่อนขึ้นทดสอบ ที่ระดับอุณหภูมิ 200 °C 400 °C และ 600 °C ภายในเตาอบไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 5 นาที ที่จำนวนตัวอย่างเงื่อนไขละ 30 ชิ้น จากนั้นนำขึ้นทดสอบไปทำการทดสอบแรงดึงและทดสอบการลากขึ้นรูปด้วยทรงระบอบบนเครื่องทดสอบการขึ้นรูปของอิริคสัน โดยกำหนดค่าอัตราการลากขึ้นรูปตามมาตรฐานที่ 1.8 ผลการทดลองพบว่า ค่าความแตกต่างของของความกว้างปีกถ้วยและค่าความหนาของผนังถ้วยจะแปรผกผันกับอุณหภูมิการอบอ่อน ทั้งนี้การขึ้นรูปตามแนวการรีดจะส่งผลให้ค่าความหนาผนังถ้วยลดลงมากที่สุด ส่วนปีกถ้วยจะมีความกว้างมากที่สุด ในขณะที่การขึ้นรูปในทิศทางขวางแนวรีดค่าความหนาผนังจะลดลงน้อยที่สุดส่วนปีกถ้วยจะมีความกว้างน้อยที่สุด ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวมีความสอดคล้องกับสมบัติทางกลของวัสดุที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

คำสำคัญ: อุณหภูมิการอบอ่อน, สมบัติทางกล, ความสามารถในการลากขึ้นรูป, แอนไอโซทรอปิก, เหล็กกล้าไร้สนิม

Abstract

This research aims to investigate the effect of process annealing temperature on the formability in different rolling directions, specifically focusing on the anisotropic behavior of stainless-steel sheet. The objective of the study is to design and conduct experiments to evaluate the deep drawing behavior and drawability of SUS304 stainless steel sheets, which are widely used in various industrial products. The goal is to develop a comparative predictive approach for analyzing the influence of annealing temperature based on mechanical properties, flange width, and wall thickness variation of drawn cups. The specimens were

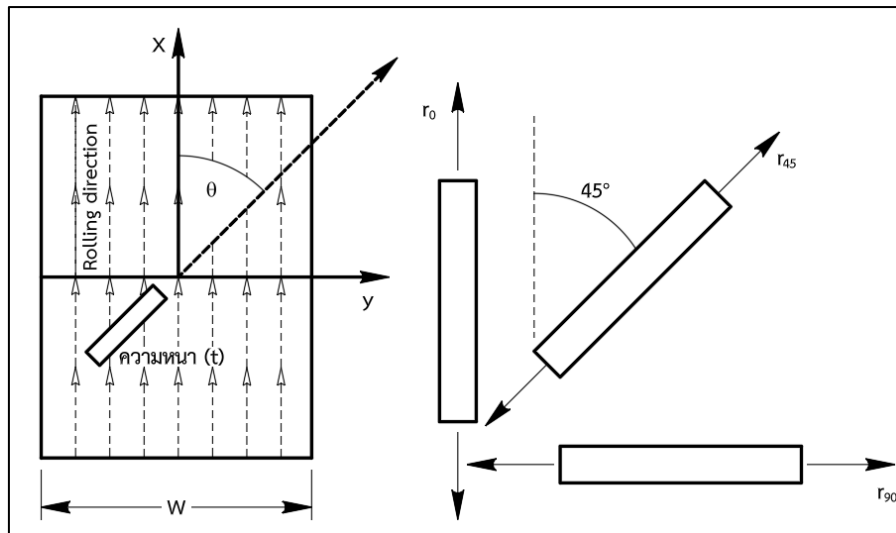
annealed at three temperature levels: 200 °C, 400 °C, and 600 °C in an electric furnace for 5 minutes, with 30 specimens per condition. Tensile tests and cylindrical cup drawing tests were then conducted using an Erichsen forming test machine, with the drawing ratio set at the standard value of 1.8. The experimental results showed that the difference in flange width and wall thickness of the cups varied inversely with the annealing temperature. Forming along the rolling direction resulted in the greatest reduction in wall thickness but the widest flange, whereas forming in the transverse direction led to the smallest reduction in wall thickness and the narrowest flange. These forming behaviors correspond well with the mechanical properties obtained from the tensile tests.

Keywords: Annealing temperature, Mechanical properties, Formability, Anisotropic, Stainless steel

1. บทนำ

เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel) ถูกนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนต่างๆ อย่างหลากหลาย ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เครื่องใช้ในครัวเรือน อุตสาหกรรมอาหาร เฟอร์นิเจอร์ และเครื่องมือทางการแพทย์ เป็นต้น [1] สมบัติที่โดดเด่นของเหล็กกล้าไร้สนิมคือ ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีและต้านทานการเกิดออกไซด์หรือไม่เป็นสนิม [2] อีกทั้งโลหะแผ่นกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานมากที่สุด ซึ่งเหล็กกล้าดังกล่าวมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC (Face-Centered Cubic) ทั้งนี้เหล็กกล้ากลุ่มนี้ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยกระบวนการทางความร้อน แต่สามารถทำให้แข็งแรงขึ้นภายหลังการขึ้นรูปเย็นหรือเรียกว่าความเครียดแข็ง (Work hardening) ซึ่งหลังจากผ่านกระบวนการอบอ่อนจะมีสมบัติที่ไม่ดูดติดแม่เหล็ก (Non-magnetic) [3] ทั้งนี้การผลิตชิ้นส่วนจากโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมทำได้จากกรรมวิธีการผลิตที่หลากหลาย เช่น การปั๊มตัด (Stamping) การปั๊มขึ้นรูป (Forming) และการลากขึ้นรูป (Deep drawing) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ล้วนต้องการความแม่นยำและความเที่ยงตรงสูงเพื่อให้ได้ชิ้นงานสำเร็จที่มีคุณภาพตามความต้องการ

นอกจากนี้สมบัติที่แตกต่างจากผลกระทบของกระบวนการผลิต โดยเฉพาะการรีดขึ้นรูปของโลหะแผ่น เรียกความแตกต่างที่ขึ้นอยู่กับทิศทางการรีดซึ่งความแตกต่างนี้เรียกว่าแอนไอโซทรอปิก (Anisotropy) [4] ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวจะส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่น [5] กล่าวคือสาเหตุที่สำคัญมากที่สุดซึ่งทำให้โลหะมีคุณสมบัติการเปลี่ยนรูปแบบแอนไอโซทรอปิกก็คือทิศทางของเกรนจากผลกระทบของการรีดขึ้นรูปในกระบวนการผลิตหรือเนื้อของรูปผลึกที่พัฒนาขึ้นในเหล็กล้วนเกิดจากการหมุนของแลคทิสในเกรนระหว่างการเปลี่ยนรูป โดยการสลิป (Slip) หรือการทวิน (Twinning) [6] พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของขึ้นทดสอบการดึงของแถบวัสดุซึ่งถูกตัดมาจากแผ่นจากการรีดขึ้นรูป เมื่อได้รับแรงดึงในแนวแกนสามารถเกิดการครากได้โดยการสลิปในแนวระนาบ และการต้านแรงดึงครากของวัสดุจะมีความแตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับทิศทางการรีดขึ้นรูปของโลหะแผ่น [7] องค์ประกอบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ของวัสดุ คือ สมบัติด้านความสามารถในการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุประเภทโลหะหลายผลึก ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างผลึกและการจัดเรียงตัวของเกรนจากกระบวนการผลิต ในกรณีของวัสดุหลายผลึก แอนไอโซทรอปิกเชิงโครงสร้างจะมีความเด่นชัดมากกว่า เมื่อการจัดทิศทางของผลึก (เกรน) อยู่ในทิศทางเดียวกับแรงกระทำเพื่อการเปลี่ยนรูปถาวร การตรวจสอบสมบัติความเป็นแอนไอโซทรอปิกของวัสดุสามารถทำได้ด้วยวิธีการทดสอบแรงดึงแล้วหาอัตราส่วนของความเครียดแนวกว้างกับความเครียดแนวความหนาดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วิธีการตัดเตรียมชิ้นทดสอบเพื่อตรวจสอบความเป็นแอนไอโซทรอปิกของวัสดุโลหะแผ่น

คุณสมบัติด้านความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) คือ การขึ้นรูปขึ้นงานได้สำเร็จโดยไม่เกิดความเสียหายและมีขนาดที่ถูกต้องเที่ยงตรง [8] ทั้งนี้ปัญหาคrucialในการลากขึ้นรูปลึกขึ้นส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม คือความแตกต่างของความกว้างปีกถ้วยหรือความสูงขอบถ้วยเพราะจะส่งผลกระทบต่อการประกอบขึ้นส่วนและคุณภาพผลิตภัณฑ์สำเร็จ [9] ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการขึ้นรูป มีหลายประการ เช่น สมบัติทางกลของโลหะแผ่น ลักษณะรูปร่างของเครื่องมือและขนาดความหนาของวัสดุเป็นต้น [10] ทั้งนี้การขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงหรือการนำวัสดุประเภทเหล็กกล้าไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป ซึ่งจะทำให้วัสดุสามารถขึ้นรูปได้ง่ายและแตกร้าเสียหายได้ยากขึ้น [11-12] การอบอ่อนภายหลังกระบวนการ (Process annealing) หรือกระบวนการอบอ่อนภายใต้อุณหภูมิวิกฤติ (Sub-critical annealing) เป็นกระบวนการอบให้ความร้อนแก่เหล็กกล้าภายใต้อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ จึงไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสภายในโครงสร้างจุลภาค [13] ซึ่งเป็นวิธีการที่ถูกใช้เพื่อการปรับปรุงสมบัติของวัสดุประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (ไม่เกิน 0.25%) ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็นหรือใช้ในการปรับปรุงค่าความเหนียวของเหล็กกล้าคาร์บอนสูงและโลหะผสม ซึ่งจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านความสามารถในการตัดเฉือน การกลึงขึ้นรูป หรือกระบวนการขึ้นรูปของวัสดุทำได้ง่ายยิ่งขึ้น ทั้งนี้จากการศึกษาและสืบค้นงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่พบว่า มีงานวิจัยซึ่งได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิการอบอ่อนหลังกระบวนการที่ส่งผลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปและพฤติกรรมความเป็นแอนไอโซทรอปิกของโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมแต่อย่างใด

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการอบอ่อนหลังกระบวนการที่ส่งผลต่อพฤติกรรมความเป็นแอนไอโซทรอปิกและความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาและควบคุมกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นอย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยวิธีการทดสอบการลากขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกกลมบนเครื่องทดสอบของอริคสัน ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมให้เหมาะสมก่อนนำมาขึ้นรูปขึ้นงานให้ได้คุณภาพตามที่กำหนด หลีกเลี่ยงความเสียหายหรือข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการขึ้นรูปและเพื่อนำไปใช้ประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นต่อไป

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุการทดลอง

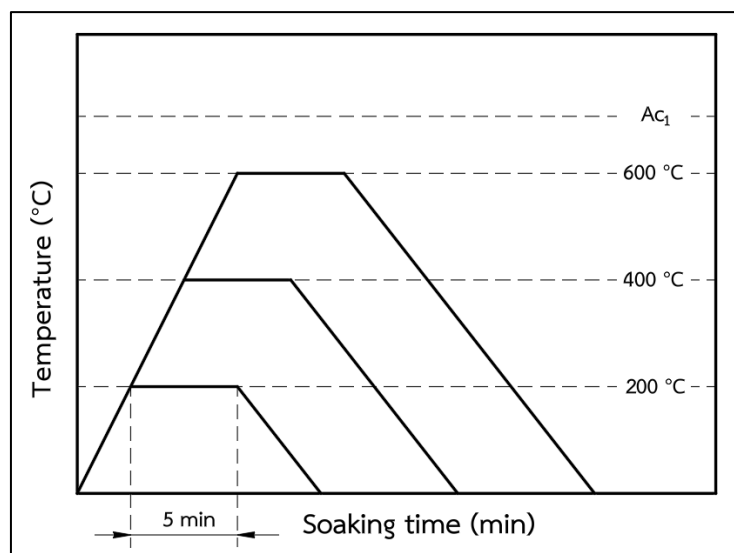
งานวิจัยนี้ทำการทดลองกับโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 ขนาดความหนา 1.2 มิลลิเมตร เบื้องต้นก่อนการอบอ่อนจะนำโลหะแผ่นไปทำการตรวจสอบความต้านทานแรงดึงในทิศทางการรีดต่างๆ คือ ตามแนวการรีด (0°) เฉียงแนวการรีด (45°) และขวางแนวการรีด (90°) โดยผลการทดสอบแรงดึงแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลในแต่ละทิศทางการรีดของโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304

Rolling direction	Yield Stress (N/mm ²)	Ultimate Tensile Strength (N/mm ²)	Total Elongation (%)
0°	241.967	721.477	65.834
45°	241.233	695.141	69.351
90°	251.575	726.387	63.167
เฉลี่ย	244.925	714.335	66.117

2.2 กระบวนการอบอ่อน

ชิ้นทดสอบโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจะถูกอบให้ความร้อนภายในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 200°C , 400°C และ 600°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heat rate) ที่ $20^\circ\text{C}/\text{min}$ ที่ระดับอุณหภูมิละ 30 ชิ้น และแช่ชิ้นทดสอบไว้ในเตา (Soaking time) เป็นระยะเวลา 5 นาที โดยอุณหภูมิของชิ้นทดสอบภายในเตาอบจะถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไว้ไม่เกิน $\pm 2.0^\circ\text{C}$ จากนั้นชิ้นทดสอบจะถูกทำให้เย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง ซึ่งแผนภาพของการอบอ่อนภายหลังกระบวนการของการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพความร้อนและระยะเวลาการอบอ่อน

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test) ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนถูกเตรียมตามมาตรฐาน ASTM E8M [12] และนำไปทดสอบสมบัติทางกลโดยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) ขนาด 50 kN. รุ่น AGS-X ยี่ห้อ SHIMADZU ดังรูปที่ 3 กำหนดความเร็วในการดึงทดสอบที่ 10 มิลลิเมตร/นาที โดยรายละเอียดผลการทดสอบจะ

ประกอบไปด้วย ค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield stress; YS) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength; UTS) และอัตราการยืดตัวรวม (Total elongation; TE) ของชิ้นทดสอบ

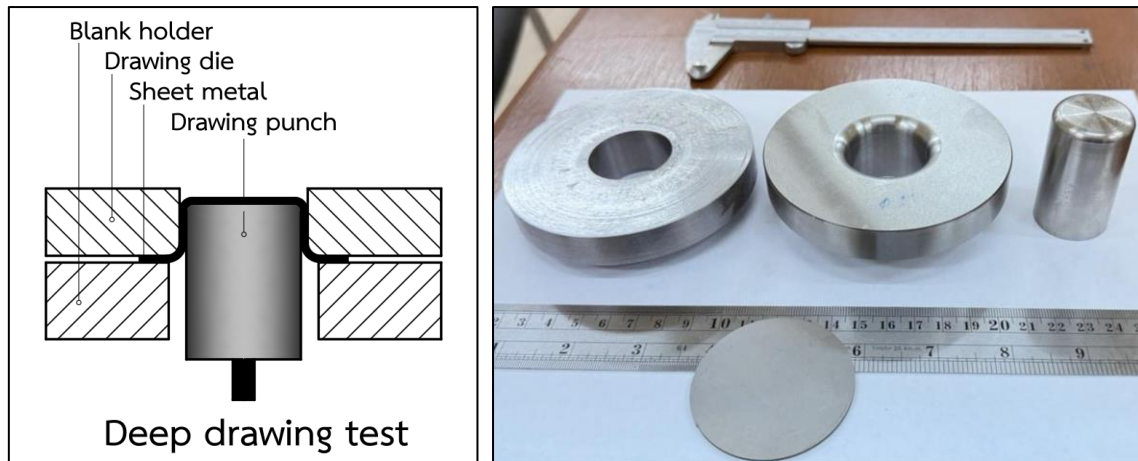


รูปที่ 3 เครื่องทดสอบแรงดึงเพื่อตรวจสอบสมบัติทางกล

2.3.2 ทดสอบความสามารถในการลากขึ้นรูป (Deep drawing ability) ตรวจสอบความสามารถในการลากขึ้นรูปด้วยวิธีการการลากขึ้นรูปลึกด้วยทรงกระบอกกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องทดสอบของอิริคสัน ยี่ห้อ SIEMENS รุ่น SAMATIC HMI Modell 134 ดังรูปที่ 4 โดยกำหนดค่าความเร็วในการลากขึ้นรูปที่ 10 มิลลิเมตร/นาที และกำหนดแรงกดแผ่นชิ้นงาน (Blank holder force) ที่ 3.0 กิโลนิวตัน ส่วนองค์ประกอบของชุดทดสอบการลากขึ้นรูปลึกแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 เครื่องทดสอบการขึ้นรูปของอิริคสัน



รูปที่ 5 องค์ประกอบของชุดทดสอบการลากขึ้นรูปลึก

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

โลหะแผ่นที่ผ่านการอบอ่อนหลังกระบวนการภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันจะถูกนำไปตรวจสอบและวิเคราะห์ผลการทดลองตามวัตถุประสงค์ ซึ่งประกอบไปด้วย สมบัติทางกลโดยการทดสอบแรงดึง (Tensile test) แรงลากขึ้นรูป (Drawing force) ความกว้างปิ๊กถ้วยทั้ง 3 แนวรีด และความหนาส่วนผนังถ้วยที่ได้จากการลากขึ้นรูปด้วยเครื่องทดสอบของอิริคสัน (Erichsen cupping test) โดยรายละเอียดของผลการทดลองประกอบไปด้วย

3.1 สมบัติทางกล (Mechanical properties)

ชิ้นทดสอบโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งผ่านการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8M ด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ หลังจากนำชิ้นทดสอบไปผ่านกระบวนการอบอ่อนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ เป็นระยะเวลา 5 นาที ซึ่งผลการทดสอบแรงดึงภายหลังการอบอ่อนจะแสดงดังตารางที่ 2

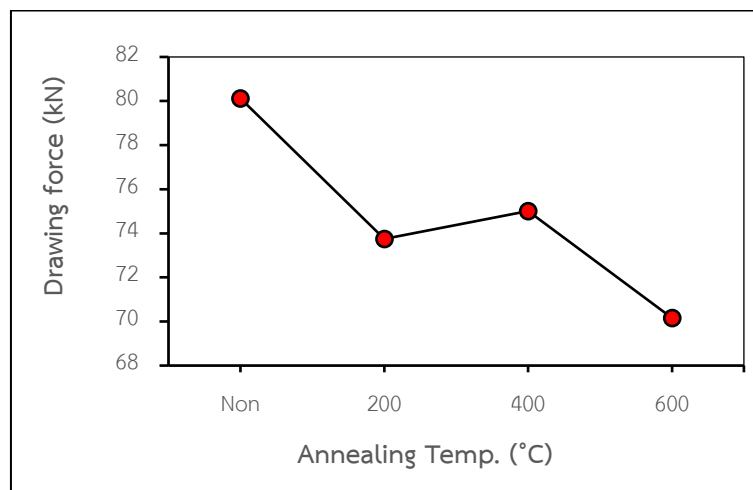
ตารางที่ 2 สมบัติทางกลเฉลี่ยของโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 ก่อนและหลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างๆ

Annealing Temperature	Rolling direction	Yield Stress (N/mm ²)	Ultimate Tensile Strength (N/mm ²)	Total Elongation (%)
Non	0°	241.967	721.477	65.834
	45°	241.233	695.141	69.351
	90°	251.575	726.387	63.167
200 °C	0°	234.884	720.340	68.421
	45°	234.171	694.045	72.076
	90°	244.210	725.242	65.649
400 °C	0°	260.157	719.970	68.750
	45°	259.367	693.689	72.423
	90°	270.487	724.870	65.965
600 °C	0°	262.074	717.169	66.186
	45°	261.279	690.991	69.722
	90°	272.481	722.050	63.505

จากผลการทดสอบแรงดึงของโลหะแผ่นเมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นคลาก (Yield Stress; YS) จะพบว่าชิ้นทดสอบซึ่งผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 600 °C ในทิศทางขวางแนวรีดมีค่าความเค้นคลากเฉลี่ยสูงสุดที่ 272.481 N/mm² และชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C ในทิศทางเฉียงแนวรีดมีค่าความเค้นคลากเฉลี่ยต่ำที่สุดที่ 234.171 N/mm² ส่วนผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึง (Ultimate Tensile Stress; UTS) พบว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อนในทิศทางขวางแนวรีดมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดที่ 726.387 N/mm² ส่วนชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 600 °C ในทิศทางเฉียงแนวรีดมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุดที่ 690.991 N/mm² และผลการเปรียบเทียบอัตราการยืดตัวโดยรวม (Total Elongation; TE) จะพบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 °C ในทิศทางเฉียงแนวรีดมีอัตราการยืดตัวโดยรวมเฉลี่ยมากที่สุดที่ 72.423 % และชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อนในทิศทางขวางแนวรีดมีอัตราการยืดตัวโดยรวมเฉลี่ยน้อยสุดที่ 63.167%

3.2 แรงลากขึ้นรูป (Drawing force)

ผลการเปรียบเทียบผลกระทบของอุณหภูมิการอบอ่อนหลังกระบวนการที่ส่งผลต่อแรงในการลากขึ้นรูปด้วยเครื่องทดสอบการขึ้นรูปของอิริกสัน โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6

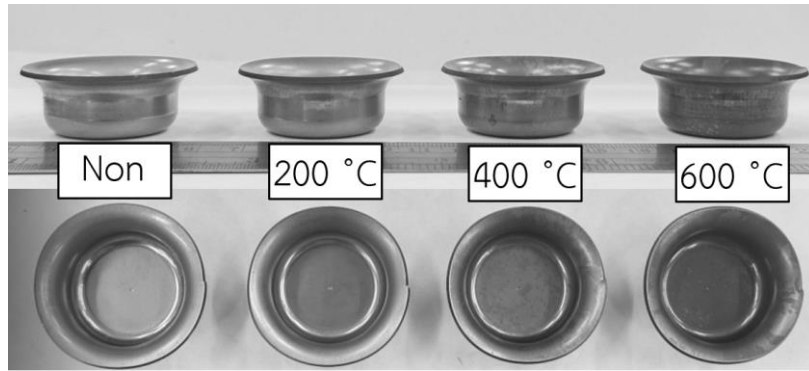


รูปที่ 6 แรงลากขึ้นรูปถ้วย

จากผลการทดลองรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าแรงในการลากขึ้นรูปจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้น โดยชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อนใช้แรงในการขึ้นรูปสูงที่สุดที่ 80.12 kN. เมื่ออุณหภูมิการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้นพบว่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปจะมีแนวโน้มลดลงขึ้น โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิ 600 °C จะใช้แรงในการขึ้นรูปต่ำสุดที่ 70.16 kN. ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าขนาดของแรงในการขึ้นรูปมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความแข็งแรงดึงและสมบัติทางกลของวัสดุ [14]

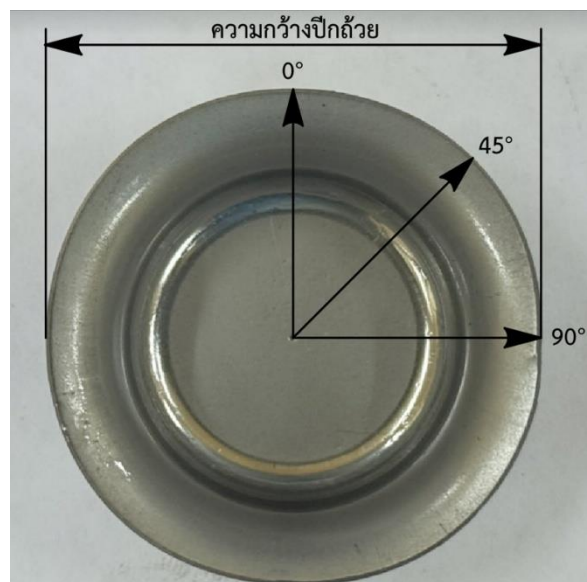
3.3 ความกว้างปีกถ้วย

ทำการเตรียมชิ้นทดสอบโลหะแผ่นก่อนและหลังการอบอ่อนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ เพื่อทดสอบการลากขึ้นรูปลึกโดยกำหนดขนาดแผ่นเปล่ารูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร เพื่อลากขึ้นรูปลึกด้วยอัตราการลากขึ้นรูป (Drawing ratio) ที่ 1.8 โดยกำหนดขนาดของพินซ์ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตรและรัศมีพินซ์ที่ 4 มิลลิเมตร ส่วนของตายกำหนดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32.6 มิลลิเมตร และกำหนดรัศมีตายที่ 5 มิลลิเมตร จากนั้นจะทำการทดสอบการลากขึ้นรูปลึกถ้วยแบบมีปีกที่ระยะความลึก 16 มิลลิเมตร โดยกำหนดแรงกดแผ่นขึ้นงาน (Blank holder force) ที่ 3.0 กิโลนิวตัน โดยลักษณะของถ้วยซึ่งได้จากการลากขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 7

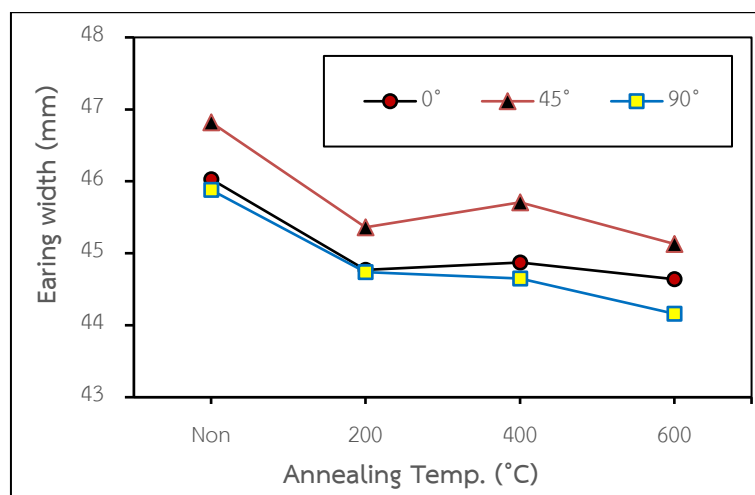


รูปที่ 7 ลักษณะถ้วยทรงกระบอกกลมจากการลากขึ้นรูปลึก

ถ่ายภาพด้านบนของถ้วยที่ได้จากการลากขึ้นรูปเพื่อวัดขนาดความกว้างของปีกถ้วยด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (Optical macro-scope) โดยตำแหน่งการวัดขนาดความกว้างของปีกถ้วยในทิศทางการรีดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 8 และผลการวัดค่าความกว้างของปีกถ้วย แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 การวัดค่าความกว้างปีกถ้วยในทิศทางการรีดต่างๆ



รูปที่ 9 กราฟความกว้างปีกถ้วยในทิศทางการรีดต่างๆ

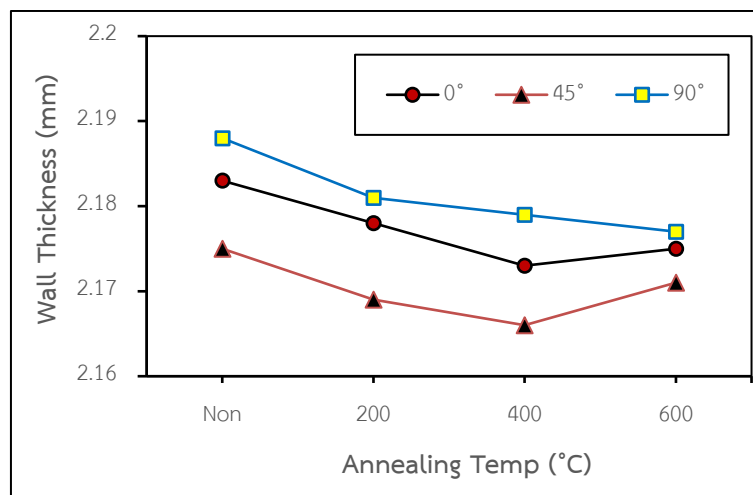
จากผลการทดลองรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าความกว้างของปีกถ้วยในทิศทางการรีดซึ่งทำมุม 45° กับแนวรีดมีค่าความกว้างของปีกถ้วยมากที่สุด และในทิศทางขวางแนวการรีด (90°) ปีกถ้วยจะมีความกว้างน้อยที่สุด ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวมีความสอดคล้องและสัมพันธ์กับอัตราการยืดตัวโดยรวม (Total elongation) ของวัสดุที่ได้จากการทดสอบแรงดึงดังตารางที่ 1 ทั้งนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบอ่อนเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความกว้างของปีกถ้วยในทุกทิศทางการรีดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงในตารางที่ 2 โดยผลการทดลองดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า อุณหภูมิการอบอ่อนส่งผลต่อคุณสมบัติความเป็นแอนไอโซทรอปิกของเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างมีนัยสำคัญ

3.4 ความหนาผนังถ้วย

นำถ้วยซึ่งได้จากการลากขึ้นรูปไปตัดแบ่งด้วยเครื่องตัดขึ้นสอบที่ระยะกึ่งกลางความสูงของถ้วยเพื่อวัดค่าความหนาของผนังถ้วยในทิศทางการรีดต่างๆ โดยลักษณะของถ้วยขึ้นทดสอบที่ผ่านการตัดแบ่งและตำแหน่งการวัดค่าความหนาผนังถ้วยแสดงดังรูปที่ 10 ส่วนผลการวัดค่าความหนาผนังถ้วยจะแสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 ภาพตัดขวางของถ้วยทรงกระบอกกลมจากการลากขึ้นรูปลึก



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบความหนาผนังถ้วยในแต่ละทิศทางการรีด

จากผลการทดลองรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าความหนาของผนังถ้วยในทิศทางซึ่งทำมุม 45° กับแนวรีด มีค่าความหนาของผนังถ้วยน้อยที่สุด ส่วนในทิศทางตั้งฉากกับแนวรีด (90°) มีขนาดความหนาของผนังถ้วยมากที่สุด อีกทั้งจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการอบอ่อนเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อการลดลงของค่าความหนาผนังอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้พฤติกรรมดังกล่าวมีความสัมพันธ์โดยตรงและสอดคล้องสมบัติทางกลของขึ้นทดสอบจากผลการทดสอบแรงดึงและการเปลี่ยนแปลงของความกว้างปีกถ้วย

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของอุณหภูมิการอบอ่อนที่ส่งผลต่อพฤติกรรมแอโนไอโซทรอปิกและความสามารถในการลากขึ้นรูปลึกของโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม โดยวิเคราะห์ผลจากสมบัติทางกล ขนาดแรงในการลากขึ้นรูป และลักษณะของชิ้นงานสำเร็จ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการยืดตัวสูง โดยสามารถยืดตัวได้สูงสุดในทิศทางซึ่งทำมุม 45° กับแนวรีด ขณะที่ในทิศทางขวางแนวการรีดจะมีความแข็งแรงดึงสูงสุดแต่มีความสามารถในการยืดตัวต่ำสุด

2) ค่าแรงลากขึ้นรูปของชิ้นทดสอบจะแปรผันตามค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุ กล่าวคือการดึงขึ้นรูปวัสดุที่ไม่ผ่านการอบอ่อนซึ่งมีความแข็งแรงดึงสูงจะใช้แรงในการดึงขึ้นรูปสูงสุด เมื่อนำชิ้นทดสอบไปทำการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้วัสดุมีค่าความแข็งแรงลดลง จึงส่งผลโดยตรงให้แรงในการลากขึ้นรูปมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด

3) ค่าความกว้างของปีกถั่วขึ้นอยู่กับความสามารถในการยืดตัวของวัสดุในแต่ละทิศทางโดยความกว้างของปีกถั่วในทิศทางการรีดซึ่งทำมุม 45° กับแนวรีดมีค่าความกว้างของปีกถั่วมากที่สุด และในทิศทางขวางแนวการรีด (90°) ปีกถั่วจะมีความกว้างน้อยที่สุด

4) ความหนาของผนังถั่วขึ้นอยู่กับความสามารถในการยืดตัวและอุณหภูมิการอบอ่อน โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบอ่อนเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้วัสดุมีความสามารถในการยืดตัวโดยรวมเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงให้ค่าความหนาของผนังถั่วมีแนวโน้มลดลงในทุกทิศทางการรีด

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล นักศึกษาและคณะอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์และการดำเนินการทดลอง งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Kaladhar, K.V. Subbaiah and C.H.S. Rao, "Machining of austenitic stainless steels – a review", Int. J. Machining and Machinability of Materials, Vol. 12, Nos. 1/2, (2012).
- [2] D. Ding, "Properties of stainless steel and its application in construction", Proceedings of the 4th International Conference on Materials Chemistry and Environmental Engineering., (2024). DOI: 10.54254/2755-2721/59/20240748
- [3] A.F. Padilha, R.L. Plaut and P.R. Rios, "Annealing of Cold-worked Austenitic Stainless Steels" ISIJ International, Vol. 43 (2003), No. 2, pp. 135–143.
- [4] M. Safaei, and W.D. Waele, "Evolution of anisotropy of sheet metals during plastic deformation", Sustainable Construction and Design, (2013). DOI: 10.21825/scad.v4i1.746.
- [5] Wang, H., Niu, Q., & Yan, Y. (2024). Study of anisotropic behavior in sheet metal forming. Materials, 17(9), 2031. <https://doi.org/10.3390/ma17092031>
- [6] D. Banabic, F. Barlat, O. Cazacu and T. Kuwabara, "Advances in anisotropy and formability", Int J Mater Form (2010), Vol. 3, pp.165–189.
- [7] T. Trzepieciniski, and H.L. Gelgele, "Investigation of anisotropy problems in sheet metal forming using finite element method", International Journal of Material Forming, (2011). DOI

- 10.1007/s12289-010-0994-7.
- [8] A.C.S. Reddy, S. Rajesham, P.R. Reddy, and A.C. Umamaheswar, “Formability: A review on different sheet metal tests for formability” AIP Conference Proceedings 2269, 030026 (2020).
<https://doi.org/10.1063/5.0019536>
 - [9] R. Nur, M.A. Suyuti, M. Iswar and A.N. Muttaqin, “Springback Analysis in the Bending Process of V-shaped Stainless Steel AISI 304 Using Central Composite Design (CCD) Approach” E3S Web of Conferences 517 ICETIA 2023, 12001 (2024).
 - [10] W.C. Emmens, “A Review of Parameters and Processes that Control, Limit or Enhance the Formability of Sheet Metal”, Springer Briefs in Applied Sciences and Technology, (2011).
<http://www.springer.com/series/8884>
 - [11] M. Azadeh and M.R. Toroghinejad, “Effect of Heat Treatment on Formability of Hot-dip Galvanized Low Carbon Steel Sheet”, ISIJ International, Vol. 49 (2009), No. 12, pp. 1945–1951.
 - [12] A.K. Gupta, S. Priyadarshi, D. Pustovoytov and P. Tandon, “Effects of Heat Treatment on the Surface Quality and Improvement in Formability of Deformation Machined Products of Al 6061”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, (2022), Vol. 144.
 - [13] C. Ji, L. WANG and M.Y. ZHU, “Effect of Subcritical Annealing Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of SCM435 Steel”, JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH, INTERNATIONAL., (2015), 22(11), pp.1031-1036.
 - [14] U. Pranavi, P.V. Reddy, K. Lavanya, N.V. Charyulu, and P.J. Ramulu, “Effect of Mechanical Properties on Deep Drawing Formability Prediction”, International Journal of Current Engineering and Technology, (2014). DOI: 10.14741/ijcet/spl.2.2014.55