

## การปรับปรุงสมบัติทางกลที่รับแรงดันด้วยการชุบแข็งแบบกระแสเหนี่ยวนำ

สุรเดช เกลิมบุญ<sup>1\*</sup> สิทธิธา สายดาราสุมุทร<sup>1</sup>

สาวิตรี ผาวจันตา<sup>1</sup> อภิรัฐ โกสิดานนท์<sup>1</sup> และ กฤษณะ ธรรมิกานนท์<sup>1</sup>

วันที่รับ 1 พฤษภาคม 2567 วันที่แก้ไข 1 สิงหาคม 2567 วันที่ตอบรับ 20 กันยายน 2567

### บทคัดย่อ

ความเสียหายของท่อรับแรงดันระหว่างการใช้งานเกิดจากบริเวณปลายท่อทั้งสองด้านได้รับการกระทบที่มากกว่าค่าความแข็งแรงของเนื้อวัสดุ แต่ด้วยข้อจำกัดของรูปร่างท่อรับแรงดัน จึงไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงจากการชุบแข็งด้วยเตาไฟฟ้าแบบดั้งเดิมได้ จึงต้องการศึกษาวิธีการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำ ที่สามารถทำกรรมวิธีทางความร้อนเฉพาะบริเวณได้งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำ ที่มีต่อคุณสมบัติของท่อเหล็กกล้าผสม AISI 4130 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการขึ้นรูปโดยการไหล (Flow Forming) เพื่อเป็นแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้เพิ่มความแข็งแรงให้แก่ท่อรับแรงดัน การทดลองเริ่มจากนำข้อมูล และตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำมาทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คาดการณ์ผลที่จะเกิดกับชิ้นงาน จากนั้นจึงนำท่อตัวอย่างมาทำการเหนี่ยวนำความร้อนด้วยชุดอุปกรณ์เหนี่ยวนำความร้อนชนิดความถี่กลาง 15 kHz ในลักษณะการทำให้เป็นออสเทนไนต์ แล้วจึงทำให้เย็นตัวอย่างยิ่งยวดด้วยการฉีดยาน้ำบริเวณผิวชิ้นงานโดยรอบ หลังการชุบแข็งนำชิ้นงานมาตัดเป็นชิ้นตัวอย่างทำการศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค ทดสอบความแข็งแรงจุลภาค และทดสอบความต้านทานแรงดึง ระหว่างบริเวณที่ไม่ได้ทำการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำ (Non-Hardening Zone: NHZ) กับบริเวณที่ทำการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำ (Hardening Zone: HZ) ก่อนการอบชุบท่อมีค่าความแข็งแรง 284.65 วิกเกอร์ ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าความเค้น ณ จุดคราก เท่ากับ 749.39 และ 685.17 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า การชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากโครงสร้างงานรีดเป็นมาร์เทนไซต์แบบแผ่นที่มีออสเทนไนต์เหลือค้างผสมอยู่สำหรับความแข็งแรงจุลภาคและความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 2 เท่า ในส่วนของผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้มีความใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำส่งผลให้ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4130 มีโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงที่เปลี่ยนไป สามารถนำวิธีการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้กับท่อรับแรงดันให้มีความแข็งแรงตอบสนองต่อการใช้งานได้ อีกทั้งเป็นการยืนยันได้ว่าสามารถใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการออกแบบกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**คำสำคัญ :** การชุบแข็งแบบเหนี่ยวนำ, การเย็นตัวอย่างยิ่งยวด, เหล็กกล้าผสม 4130

<sup>1</sup> ส่วนงานวิศวกรรมโลหการและวัสดุ, ฝ่ายวิจัยและพัฒนา, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

\* ผู้แต่ง, อีเมล: suradet.c@dti.or.th

# The Improvement Mechanical Properties of Pressure Tube by Induction Hardening Process

Suradet Chalermboon <sup>1\*</sup> Sittha Saidarasamoot <sup>1</sup>

Sawitri Phabjanda <sup>1</sup> Apirath Gositanon <sup>1</sup> and Kritsana Thummikanonth <sup>1</sup>

Received 1 May 2024, Revised 1 August 2024, Accepted 20 September 2024

## Abstract

The aim of this study was to explore the impact of induction hardening on the microstructure and mechanical properties of AISI 4130 steel improvement strength of pressure tube application. The primary objective is to enhance the strength of the tube ends, which are susceptible to failure due to excessive loads during service. However, due to the shape limitations of the pressure tube, traditional electric furnace hardening methods cannot be used to increase its strength. Therefore, there is a need to study induction hardening methods that can apply localized heat treatment. The investigation commenced use of finite element analysis to predict the result of the process. In experiments the samples were heated with a 15 kHz medium frequency induction hardening process, followed by water quenching. Subsequently, the samples underwent metallographic preparation, microstructural analysis, hardness testing and tensile testing. The findings revealed that the microstructure of Hardening Zone, HZ exhibited lath martensite and retained austenite in their microstructures. The average as-rolled was mechanical properties measured at 284.65 HV for hardness and ultimate and yield strength 749.39 MPa, 685.17 MPa respectively for tensile properties. In contrast, Hardening Zone, HZ containing lath martensite, experienced an approximately two-fold increase in mechanical properties compared to the as-rolled state. The finite element analysis results are closely align with experimental findings. Conclusion, induction hardening proved to be an effective heat treatment method for enhancing the mechanical properties of the AISI 4130 steel, as evidenced by the observed changes in microstructure and mechanical properties. The above method can be applied to improve the mechanical properties of pressure tube to application more responsive to usage. Furthermore, it confirms the usefulness of finite element methods in the design process.

**Keywords :** Induction hardening, Quenching, AISI 4130 Steel

---

<sup>1</sup> Metallurgical and Materials Engineering Division, Research and development Department, Defence Technology Institute

\* Corresponding author, E-mail: suradet.c@dti.or.th

## 1. บทนำ

ท่อรับแรงดัน (Pressure Tube) คือ ท่อที่ออกแบบมาเพื่อใช้รับแรงดันของของเหลวหรือก๊าซภายในโดยที่สามารถทนทานและป้องกันการรั่วไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพ การผลิตท่อรับแรงดันด้วยวิธีการขึ้นรูปโดยการไหล (Flow Forming) ทำให้ได้ท่อที่มีความหนา ลดลง และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จากการใช้งานพบว่าเมื่อท่อได้รับแรงดันเพิ่มขึ้น บริเวณปลายท่อทั้ง 2 ด้านที่ใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์หรือระบบอื่น ๆ มีค่าการกระรุมมากระทำ 1,056 เมกะปาสกาล ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าค่าความแข็งแรงของเนื้อวัสดุเป็นเท่าตัว ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวได้รับความเสียหาย [1] ดังนั้น เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น จึงมีความจำเป็นต้องทำการเพิ่มความแข็งแรงให้กับบริเวณดังกล่าว การเพิ่มความแข็งแรงของท่อสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเปลี่ยนชนิดของวัสดุ การเพิ่มความหนา การออกแบบ และการปรับปรุงการผลิตซึ่งในกรณีดังกล่าว การปรับปรุงการผลิตในลักษณะการทำการกรรมวิธีทางความร้อนมีความสอดคล้องกับทรัพยากรที่มีอยู่ในปัจจุบัน แต่เมื่อพิจารณาถึงรูปร่างและขนาดชิ้นงานสำเร็จของท่อรับแรงดันหลังกระบวนการผลิตแล้วนั้นพบว่าไม่สามารถทำการการชุบแข็งด้วยเตาไฟฟ้าแบบดั้งเดิมได้จึงมีความต้องการศึกษากรรมวิธีการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำที่สามารถทำการกรรมวิธีทางความร้อนเฉพาะบริเวณได้

คุณสมบัติของเหล็กกล้าผสม (Alloy Steel) สามารถปรับเปลี่ยนได้ด้วยการทำการกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) การปรับคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อน คือ การนำชิ้นงานมาทำการให้ความร้อนในระดับต่าง ๆ จนได้อุณหภูมิที่ต้องการ จากนั้นทำให้เกิดการเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวตามความต้องการเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ หากพิจารณาตามลักษณะการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนจะพบว่า มี 2 รูปแบบ คือ การทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และการทำให้ชิ้นงาน

อ่อนตัวลง วิธีในการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การอบอ่อน (Annealing) การอบปกติ (Normalizing) การชุบแข็ง (Hardening) การอบคืนไฟ (Tempering) และการชุบผิวแข็ง (Surface Hardening) โดยวิธีที่กล่าวมานั้นสามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกันเพื่อให้ได้ชิ้นส่วนที่มีคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมต่อการผลิตและการใช้งาน เช่น การชุบแข็งและการอบคืนไฟ (Hardening and Tempering) เพื่อให้ได้ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) ความเหนียวหรือความยืดหยุ่น (Ductility) หรือผ่านการอบอ่อน (Annealing) เพื่อทำให้สามารถนำไปตกแต่งทางกลได้ง่ายขึ้น การปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนทั้ง 2 รูปแบบ จะบรรลุผลได้จำเป็นต้องศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เช่น แผนภาพสมดุลของเหล็กคาร์ไบด์ แผนภาพการเย็นตัวของโลหะชนิดนั้น ๆ [2]

การชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำ (Induction Hardening) เป็นวิธีการในการชุบแข็งชิ้นงานที่อาศัยหลักการทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากการใช้กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนอย่างรวดเร็ว นิยมใช้กับเหล็กกลุ่มที่มีคาร์บอนปานกลางเป็นต้นไป ในปัจจุบันวิธีการดังกล่าวได้นำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องมือ ชิ้นส่วนต่าง ๆ อุตสาหกรรมหล่อโลหะ รวมถึงการขึ้นรูปโลหะ [3] เนื่องจากมีจุดเด่นในเรื่องต้นทุนต่อเวลาทำให้มีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทำการกรรมวิธีทางความร้อนแบบดั้งเดิมด้วยการใช้เตาอบ อีกทั้งยังสามารถเลือกใช้ปรับสมบัติเฉพาะตำแหน่งที่ต้องการได้ ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีบริเวณผิวชิ้นงาน การเสียรูปร่างหลังกระบวนการค่อนข้างต่ำ รวมถึงมีคุณภาพผิวหลังกระบวนการที่น่าพอใจ เนื่องจากเกิดออกไซด์บริเวณผิวที่น้อย [4]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของท่อเหล็กกล้าผสม AISI 4130

ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการขึ้นรูปโดยการไหล เพื่อนำผลการทดลองที่ได้มาใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้กับท่อรับแรงดันต่อไป

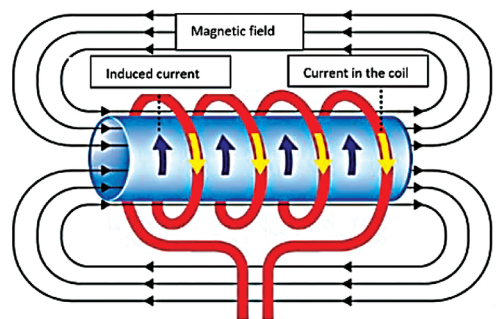
## 2. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เหล็กกล้าผสม AISI 4130 จัดอยู่ในกลุ่มของเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloy Steel) ที่มีคาร์บอน และธาตุอื่น ๆ รวมกันไม่เกิน 10% โดยทั่วไปมักเรียกกันว่าเหล็กโครเมียม (Chromium Steel) หรือเหล็กกล้าโครเมียมโมลิบดีนัม (Chromium-molybdenum Steel) ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน ร้อยละ 0.28 - 0.33, โครเมียม ร้อยละ 0.8 - 1.1 และโมลิบดีนัม ร้อยละ 0.15 - 0.25 เป็นหลัก มีโครงสร้างคล้ายเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา (Plain Carbon Steel) แต่มีคุณสมบัติที่ดีกว่า สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ นิยมนำมาใช้งานในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ และเครื่องมือเครื่องจักร อุตสาหกรรมน้ำมัน และก๊าซ อุตสาหกรรมการบิน และอวกาศ อุตสาหกรรมโครงสร้างและการก่อสร้าง รวมถึงอุตสาหกรรมการเกษตร

การขึ้นรูปโดยการไหล เป็นวิธีการขึ้นรูปเย็นแบบหนึ่ง ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรง (Strengthening) ของโลหะเพิ่มมากขึ้น เหมาะสำหรับการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะ เมื่อชิ้นงานได้รับแรงเฉือนจนเกินกว่าความเค้นที่จุดคราก (Yield Point) จะเกิดการไหล (Slip) ทำให้ชิ้นงานเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic Deformation) กระบวนการรีดเย็นจะทำให้ปริมาณดิสโลเคชันในชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณดิสโลเคชันในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การไหลของอะตอมทำได้ยากขึ้น ชิ้นงานจึงมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น การขึ้นรูปด้วยกระบวนการนี้นอกจากช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะแล้วยังมีข้อดีอื่น ๆ อีก เช่น สามารถควบคุมขนาดของชิ้นงานได้ตามต้องการ และมีความละเอียดสูง มีการสูญเสียวัสดุน้อยกว่าการขึ้นรูปทางกล (Machining) และใช้ระยะเวลาไม่มากสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงาน [5]

การเหนี่ยวนำความร้อนเป็นวิธีการถ่ายเทพลังงาน

จากการกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นไปตามหลักการของแมกซ์เวลล์ที่เกิดกับวัตถุกลุ่มเฟอร์โรแมกเนติก และมีหลักการทำงานคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นการให้กระแสไฟฟ้าสลับไหลผ่านขดลวดและก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จากรูปที่ 1 เมื่อนำชิ้นวัสดุโลหะเข้าไปในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น และทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวัสดุนั้น โดยทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด เนื่องจากโลหะทุกชนิดมีค่าความต้านทานไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ไหลในโลหะจึงทำให้เกิดความร้อนขึ้น ดังนั้น ความร้อนที่เกิดขึ้น คือ พลังงานไฟฟ้าที่ถูกถ่ายเทออกไปเป็นความร้อนในชิ้นโลหะ โดยที่ไม่มีการสัมผัสทางกลเกิดขึ้น [6]



รูปที่ 1 โครงสร้างอย่างง่ายของการเหนี่ยวนำความร้อน [6]

จากหลักการดังกล่าวกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นจะมีความหนาแน่นมากที่สุดที่บริเวณผิวของชิ้นงาน เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ทางพื้นผิว (Skin Effect) ส่งผลให้ความหนาแน่นของกระแสลดลงโดยประมาณร้อยละ 37 คงเหลือความหนาแน่นของกระแสโดยประมาณร้อยละ 63 ที่มีผลต่อการซึมลึกของความร้อนที่เกิดขึ้นงาน หรือที่เรียกว่า ความร้อนลึกผิว (Skin Depth) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) [6]

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_{el}}{\pi \mu_o \mu_r f}} \quad (1)$$

$\delta$  คือ ความลึกผิว (m)

$\rho_{el}$  คือ ความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน ( $\Omega \cdot m$ )

$\mu_o$  คือ ความซึมซาบแม่เหล็กของสุญญากาศ (H/m)

$\mu_r$  คือ ความซึมซาบแม่เหล็กในสภาพแวดล้อม (-)

$f$  คือ ความถี่ของกระแส (Hz)

จากสมการ (1) แสดงให้เห็นว่าค่าความลึกผิวขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับที่จ่ายให้ขดลวดเหนี่ยวนำค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) และความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน (Resistivity) สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาควบคู่ไปกับผลของ Skin Effect คือ การเลือกใช้ช่วงความถี่ให้เหมาะสมกับชิ้นงาน โดยช่วงความถี่กับการประยุกต์ใช้งานด้วยระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำได้มีการจำแนกไว้ตามชนิดของแหล่งจ่ายกำลัง [7] ในทางปฏิบัติการเหนี่ยวนำความร้อนชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นท่อ (Tubular Products) จะเลือกใช้ย่านความถี่กลางหรือความถี่ต่ำนำมาใช้งาน เนื่องจากมีความเสถียรของระบบและมีความคุ้มค่ากับต้นทุนการผลิตมากกว่าการใช้ความถี่สูง สำหรับความถี่ที่เหมาะสมกับชิ้นงานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) [8]

$$F_{optimal} = 8.65 \cdot \frac{\rho \cdot 10^5}{A_m h} \quad (2)$$

โดย

$F_{optimal}$  คือ ความถี่ที่เหมาะสมกับชิ้นงานท่อ (Hz)

$\rho$  คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะเมื่อได้รับความร้อน ( $\mu\Omega \cdot m$ )

$A_m$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของท่อ (m)

$h$  คือ ความหนาของท่อ (m)

การชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำเริ่มจากนำชิ้นงานไปวางในขดลวด แล้วจึงปล่อยกระแสไฟความถี่สูงเข้าไปในขดลวดเหนี่ยวนำ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ผิวของตัวชิ้นงาน ความต้านทานกระแสไฟฟ้า

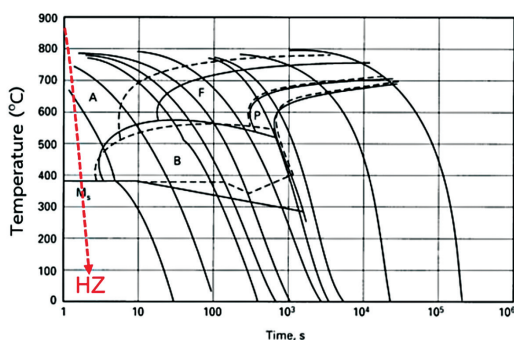
ของชิ้นงานนี้จะทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิเหนือจุดวิกฤตภายในเวลา 3 - 5 วินาที จากนั้นทำให้เย็นตัวโดยการพ่นละอองน้ำ ซึ่งองค์ประกอบสำคัญในกระบวนการดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น เช่น ขดลวดเหนี่ยวนำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน กระแสในการเหนี่ยวนำ ช่วงความถี่ของชุดแหล่งจ่าย เวลาที่ใช้ในกระบวนการ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน อัตราการชุบแข็ง [9]

อุณหภูมิในการอบละลายเฟสให้เป็นออสเทนไนต์ (Austenitizing) ของเหล็กกล้าผสม AISI 4130 ในการชุบแข็ง (Hardening) ด้วยเตาอบ (Furnace Heating) มีอุณหภูมิในช่วง 830 - 870 องศาเซลเซียส สำหรับในกระบวนการชุบแข็งแบบกระแสเหนี่ยวนำจะต้องใช้อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นเพื่อเป็นการชดเชยให้มีการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชิ้นงาน เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 900 องศาเซลเซียสขึ้นไป [2], [10]

ในการปรับคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อน ข้อมูลสำคัญที่ใช้พิจารณาเลือกกระบวนการที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของชิ้นงาน คือ แผนภาพการเย็นตัว (Cooling Diagram) โดยในบทความนี้จะขอกล่าวเพียงแผนภาพการเย็นตัวต่อเนื่อง ซึ่งเป็นลักษณะการเย็นตัวของชิ้นงานในงานวิจัยนี้

แผนภาพการเย็นตัวต่อเนื่อง (Continuous Cooling Transformation Diagram: CCT) เป็นลักษณะเฉพาะตัวของเหล็กกล้าผสมแต่ละชนิดที่หารายละเอียดเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหลังการเย็นตัวจากเฟสออสเทนไนต์ (Austenite) ที่อัตราการเย็นตัวต่างกัน ช่วยให้สามารถคาดการณ์โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นได้ โดยมีเส้นโค้งต่าง ๆ เป็นตัวแทนลักษณะการเย็นตัวที่อัตราการเย็นตัวแตกต่างกัน ลักษณะการเย็นตัวจะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างที่เกิดขึ้น และส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของเหล็กกล้าผสม แผนภาพการเย็นตัวต่อเนื่องสำหรับเหล็กกล้าผสม AISI 4130 แสดงดังรูปที่ 2 ในงานวิจัยนี้

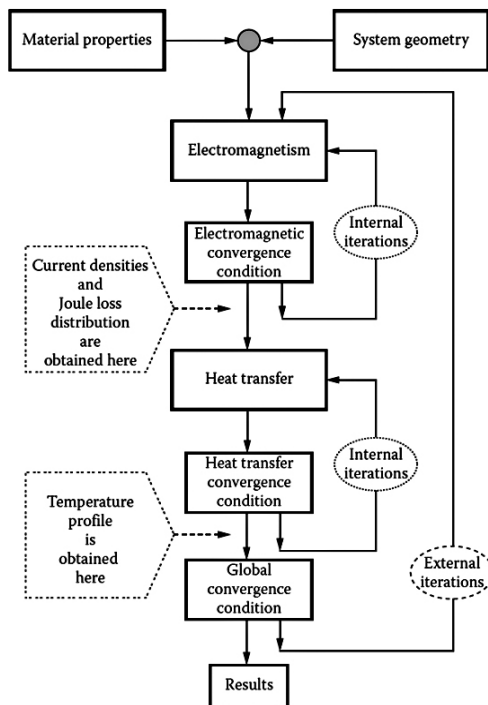
ใช้ลักษณะการเย็นตัวตามแนวเส้นประ (Hardening Zone: HZ) ซึ่งเป็นลักษณะการทำกรรมวิธีทางความร้อนในรูปแบบการชุบแข็ง (Hardening) โดยมีขั้นตอนเริ่มจากการละลายเฟสให้เป็นออสเทนไนต์ (Austenitizing) แล้วจึงทำให้เย็นตัวอย่างยิ่งยวด (Quenching) ในช่วงอัตราการเปลี่ยนแปลงวิกฤต (Critical Cooling Rate) สำหรับเหล็กกล้าผสม AISI 4130 มีค่าอยู่ในช่วง 170 - 200 องศาเซลเซียสต่อวินาที [2] จะได้โครงสร้างจุลภาคที่มีโครงสร้างพื้นเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งสามารถรับภาระกรรมได้ดีกว่าโครงสร้างหลังการรีด



รูปที่ 2 รูปแบบการเย็นตัวในการทำ Hardening ชิ้นงาน เหล็กกล้าผสม AISI 4130 (ดัดแปลงจากเอกสารอ้างอิง [2])

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการคำนวณเชิงตัวเลขที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมของวัสดุ และทำนายความเป็นไปได้ของพฤติกรรมวัสดุในรูปแบบต่าง ๆ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะปกติไปสู่สภาวะใหม่ จุดเด่นของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือ ลดต้นทุนและเวลาในขั้นตอนของการออกแบบ โดยแสดงรูปร่างของแบบจำลองสองมิติและสามมิติบนคอมพิวเตอร์แทนการสร้างต้นแบบจริง การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการเหนี่ยวนำความร้อน ใช้การวิเคราะห์ผลจากการเชื่อมโยงข้อมูลแสดงดังรูปที่ 3 เริ่มจากการนำเข้าข้อมูลเกี่ยวกับการขึ้นรูปแบบจำลองและการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ จากนั้นทำการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบ (Electromagnetism) และต่อมาทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในระบบ (Heat

Transfer) โดยสร้างความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการบรรจบกันแบบรวม (Global Convergence Condition) การวิเคราะห์แต่ละขั้นตอนจะดำเนินการภายใต้เงื่อนไขของกระบวนการทำซ้ำ (Iteration Process) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์จากกระบวนการทั้งหมด นำไปใช้เป็นตัวแปรต้นสำหรับการทำนายการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเฟสและโครงสร้างภายหลังจากการชุบ หลังจากนั้นจึงนำผลลัพธ์ในขั้นที่สองไปคำนวณค่าความแข็งต่อไป [3], [11]



รูปที่ 3 ภาพขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการเหนี่ยวนำความร้อน [3]

สำหรับสมการในการวิเคราะห์อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในชิ้นงานและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชิ้นงานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในกระบวนการเหนี่ยวนำความร้อน เป็นการประยุกต์ใช้สมการฟูเรียร์ - เคอร์ชอฟฟ์ (Fourier-Kirchhoff's) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3) - (6) [12] พิจารณาตามลำดับของกระบวนการที่เกิดขึ้นเพื่อหาผลเฉลยต่อไป ดังนี้

กระบวนการให้ความร้อน (Heating) ;  
ภายในชิ้นงาน :

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \nabla^2 T + Q_{ind} \quad (3)$$

ผิวชิ้นงาน :

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \nabla^2 T + Q_{ind} - S \cdot \sigma \cdot \varepsilon(T^4 - T_{air}^4) - S \cdot \alpha(T - T_{air}) \quad (4)$$

กระบวนการชุบแข็ง (Hardening) ;  
ภายในชิ้นงาน :

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \nabla^2 T \quad (5)$$

ผิวชิ้นงาน :

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \nabla^2 T + S \cdot \alpha(T_{water} - T) \quad (6)$$

โดยที่  $\rho$  คือ ค่าความหนาแน่น,  $c$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะ,  $T$  คือ อุณหภูมิของชิ้นงาน,  $T_{air}$  คือ อุณหภูมิของอากาศ,  $T_{water}$  คือ อุณหภูมิของน้ำ,  $S$  คือ พื้นที่ผิวของชิ้นงาน,  $\sigma$  คือ ของค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์,  $\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน,  $\varepsilon$  คือ อัตราการแผ่รังสี,  $\lambda$  คือ ค่าการนำความร้อน และ  $Q_{ind}$  คือ ค่าความหนาแน่นพลังงานความร้อน

การวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นหลังการเย็นตัวจากเฟสออสเทนไนต์ใช้สมการคำนวณแฟร็กชันเชิงปริมาตร (Volume Fraction) ของอ็ฟรามิ และ จอห์นสัน-เมห์ล (Avrami and Johnson-Mehl's) ดังสมการที่ (7) และ (8) [12]

แฟร็กชันเชิงปริมาตรของเฟสเพิร์ลไลต์ (Pearlite) :

$$y_P(T, t) = y_A(1 - \exp(-b(T) t^{n(T)})) \quad (7)$$

แฟร็กชันเชิงปริมาตรของเฟสเบนไนต์ (Bainite) :

$$y_B(T, t) = y_A(1 - y_P)(1 - \exp(-b(T) t^{n(T)})) \quad (8)$$

สำหรับแฟร็กชันเชิงปริมาตรของเฟสมาร์เทนไซต์ ใช้การคำนวณด้วยสมการของคอยส์ตีเนนและ

มาร์เบอร์เกอร์ (Koistinen and Marburger's) ดังสมการที่ 9 [12]

$$y_M = y_A(1 - y_B - y_P)(1 - \exp(-k(M_s - T)^m)) \quad (9)$$

โดยที่  $y_A, y_P, y_B, y_M$  คือ แฟร็กชันเชิงปริมาตรของเฟส,  $b(T), n(T)$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กัอุณหภูมิ และ  $k, m$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กัชิ้นงาน

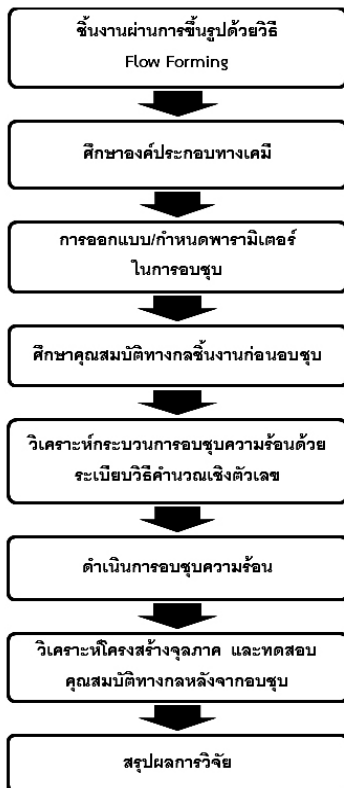
การทำนายค่าความแข็งแบบวิกเกอร์จะใช้การวิเคราะห์ความถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) ดังสมการที่ (10) [12]

$$HV = C_o + \sum(C_{1i} \cdot c_i \cdot Fe) + \sum(C_{2i} \cdot c_i \cdot Pe) + \sum(C_{3i} \cdot c_i \cdot Ba) + \sum(C_{4i} \cdot c_i \cdot Ma) \quad (10)$$

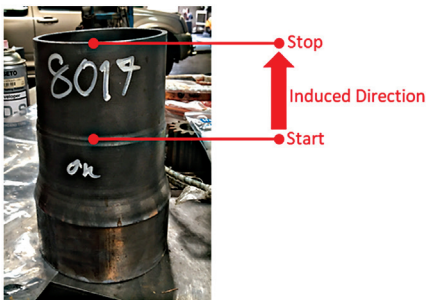
$C_o, C_1, C_2, C_3, C_4$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย,  $C_i$  คือ ร้อยละของธาตุผสม,  $Fe, Pe, Ba, Ma$  คือ ร้อยละของเฟสเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์ เบนไนต์ และมาร์เทนไซต์

### 3. วิธีการวิจัย

การวิจัยดำเนินการตามแผนภาพแสดงดังรูปที่ 4 โดยนำชิ้นส่วนท่อเหล็กกล้าผสม AISI 4130 ที่ผ่านการรีดขึ้นโดยการไหล มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 125 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 115 มิลลิเมตร สูง 220 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 5 มาดำเนินการวิเคราะห์ห้องประกอบทางเคมีโดยเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีมาตรฐานจากนั้นจึงทำการออกแบบ/กำหนดพารามิเตอร์ในการอบชุบทดสอบคุณสมบัติทางกลก่อนการดำเนินการมวธิ์อบชุบและทำการวิเคราะห์กระบวนการอบชุบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วจึงนำชิ้นส่วนท่อเหล็กกล้าผสม AISI 4130 มาทำการอบชุบตามพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดไว้ การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค และทดสอบคุณสมบัติทางกลจะดำเนินการอีกครั้งหลังจากขึ้นงานผ่านการอบชุบแล้ว จากนั้นนำผลการวิเคราะห์และทดสอบที่ได้หลังจากอบชุบ



รูปที่ 4 แผนภาพวิธีดำเนินการวิจัย



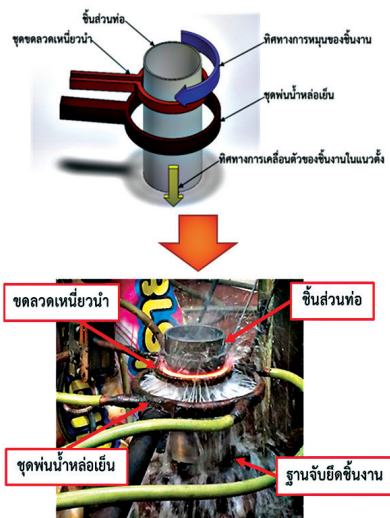
รูปที่ 5 ชิ้นส่วนท่อที่ใช้ทำการทดลอง

มาเปรียบเทียบกับก่อนการอบชุบ อภิปรายผล และสรุปผลการวิจัย

### 3.1 การดำเนินการอบชุบ

การอบชุบความร้อนด้วยกระแสเหนี่ยวนำ เริ่มจากนำชิ้นส่วนท่อที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูป โดยการไหลมาทำการเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อละลาย

เฟสเดิมให้เป็นออสเทนไนต์ (Austenitizing) ด้วยเครื่องอบชุบ ความร้อนแบบกระแสเหนี่ยวนำความถี่กลาง (~15 kHz) ซึ่งได้มาจากการคำนวณตามสมการที่ (2) ตัวเครื่องมีกำลังไฟฟ้า 160 กิโลวัตต์ หมุนชิ้นงานด้วยความเร็วรอบ 70 รอบต่อนาที อัตราเร็วในการเคลื่อนชิ้นงานผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ 3 มิลลิเมตรต่อวินาที ช่วงความยาวในการเหนี่ยวนำความร้อนเท่ากับ 80 มิลลิเมตร (Start-Stop) อบชุบ ณ บริเวณตามรูปที่ 5 ทำการเหนี่ยวนำความร้อนชิ้นงานจนกระทั่งอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ตรวจสอบและบันทึกอุณหภูมิบริเวณผิวชิ้นงานด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ยี่ห้อ Fluke รุ่น Ti400 จากนั้นจึงทำให้เย็นตัวอย่างยิ่งยวดด้วยน้ำ (Water Quenching) รอบบริเวณผิวด้านนอก ดังแสดงในรูปที่ 6

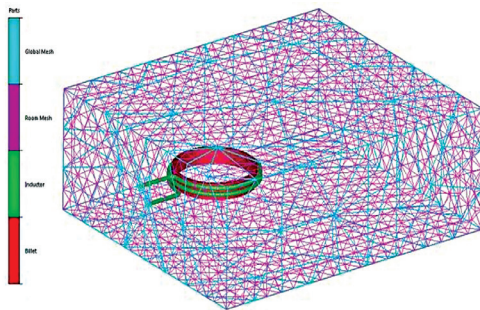


รูปที่ 6 การอบชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำชิ้นส่วนท่อที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2 การทำนายและวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม FORGE® NXt 3.2 เพื่อทำนายและวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนท่อในระหว่างการเหนี่ยวนำ

ความร้อน ปริมาณของเฟสที่ปรากฏหลังการเย็นตัวอย่างยิ่งยวด รวมถึงค่าความแข็งที่ได้จากกระบวนการอบชุบ ขั้นตอนเริ่มจากการทำโครงสร้างแบบจำลองของชิ้นงาน ต่อมาจึงนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (FE Model) แสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่เป็นข้อมูลของชิ้นงาน (Billet) ข้อมูลชุดจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Inductor) สภาวะแวดล้อมในการทดสอบ (Room Mesh) จากนั้นทำการเชื่อมโยงข้อมูลทั้งหมดเข้าด้วยกัน เพื่อทำการวิเคราะห์ให้ครอบคลุมพารามิเตอร์ที่กำหนด (Global Mesh) แล้วจึงทำการวิเคราะห์สำหรับจำนวนเอลิเมนต์ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในแบบจำลอง แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (FE Model) ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 1 โหนด (Node) และเอลิเมนต์ (Element) ที่ใช้กับพารามิเตอร์ในวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

| พารามิเตอร์ | โหนด  | เอลิเมนต์ |
|-------------|-------|-----------|
| Billet      | 3545  | 7090      |
| Inductor    | 14314 | 28624     |
| Room Mesh   | 1423  | 2842      |
| Global Mesh | 19267 | 111930    |

### 3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer ยี่ห้อ Bruker รุ่น Q4 TASMAN ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 2 จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์

กับองค์ประกอบทางเคมีมาตรฐานของเหล็กกล้า AISI 4130 พบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของเหล็กกล้า AISI 4130 [13]

| องค์ประกอบทางเคมี | ค่ามาตรฐาน (%wt.) |       | ชิ้นส่วนท่อที่ใช้ทำการทดลอง (%wt.) |
|-------------------|-------------------|-------|------------------------------------|
|                   | Min.              | Max.  |                                    |
| คาร์บอน           | 0.28              | 0.33  | 0.318                              |
| ซิลิกอน           | 0.15              | 0.35  | 0.250                              |
| แมงกานีส          | 0.40              | 0.60  | 0.531                              |
| โครเมียม          | 0.80              | 1.10  | 1.071                              |
| โมลิบดีนัม        | 0.15              | 0.25  | 0.231                              |
| ฟอสฟอรัส          | -                 | 0.035 | 0.0047                             |
| กำมะถัน           | -                 | 0.040 | <0.0050                            |

### 3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงยี่ห้อ Olympus รุ่น DSX510 และวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope) ยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Sigma 500 VP การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E407 เริ่มจากการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายน้ำ ขัดละเอียดด้วยผงลูมินา และกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารละลายไนตอล (Nital) มีอัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค จะดำเนินการเปรียบเทียบระหว่างบริเวณที่ไม่ได้อบชุบ (Non-Hardening Zone: NHZ) และบริเวณที่ผ่านการอบชุบ (Hardening Zone: HZ)

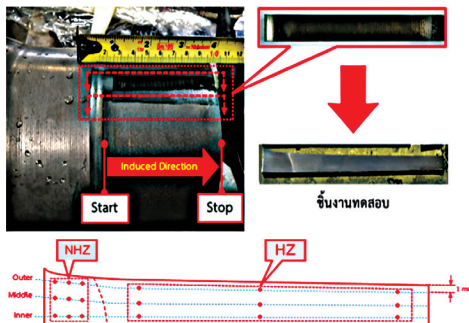
### 3.5 การทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบคุณสมบัติทางกลแบ่งออกเป็น 2 วิธีการ ดังนี้

#### 3.5.1 การทดสอบความแข็งจุลภาค

การทดสอบค่าความแข็งได้นำชิ้นส่วนท่อที่ผ่าน

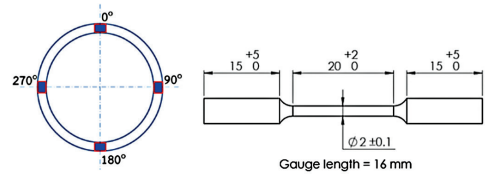
การชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำมาตัดเป็นชิ้นงาน ตัวอย่างลักษณะดังรูปที่ 8 การทดสอบชิ้นงานเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E384 ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Micro Vickers Hardness Tester ยี่ห้อ INNOVATEST รุ่น FALCON 400 ใช้น้ำหนักกดทดสอบ 1 กิโลกรัมแรง เวลาทดสอบ 10 วินาที ทำการทดสอบตามรูปแบบดังรูปที่ 8 แบ่งเป็นบริเวณที่ไม่ได้ทำการอบชุบ (NHZ) และบริเวณที่ทำการอบชุบ (HZ) ซึ่งในแต่ละบริเวณจะทดสอบตามตำแหน่งหน้าตัดของชิ้นทดสอบ คือ ผิวด้านนอกชิ้นงาน (Outer) กึ่งกลางชิ้นงาน (Middle) และผิวด้านในชิ้นงาน (Inner) ตำแหน่งละ 3 จุด แล้วจึงนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 8 ตำแหน่งการตัดชิ้นทดสอบ และรูปแบบการทดสอบค่าความแข็งจุลภาค

### 3.5.2 การทดสอบความแข็งแรง

การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นส่วนต่อตำแหน่งที่ไม่ได้อบชุบ (NHZ) และชิ้นส่วนต่อตำแหน่งที่ผ่านการอบชุบ (HZ) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ยี่ห้อ Test รุ่น 113 อัตราเร็วในการดึงทดสอบ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Strength) ค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield Strength) และร้อยละอัตราการยืดตัว (Percent Elongation) โดยแต่ละข้อได้เตรียมเป็นชิ้นทดสอบอย่างละ 4 ชิ้น หลังการทดสอบนำค่าที่ได้นำมาหาค่าเฉลี่ย ชิ้นทดสอบความต้านทานแรงดึงตัดเตรียมจากชิ้นส่วนก่อนและหลังการชุบ ท่อละ 4 ชิ้น จากตำแหน่ง 0°, 90°, 180° และ 270° ตามลำดับ ได้ชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 9

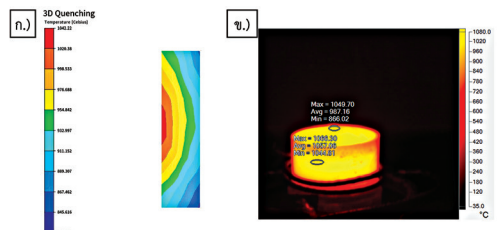


รูปที่ 9 ตำแหน่งการเตรียมชิ้นทดสอบ และลักษณะของชิ้นทดสอบความแข็งแรง

## 4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

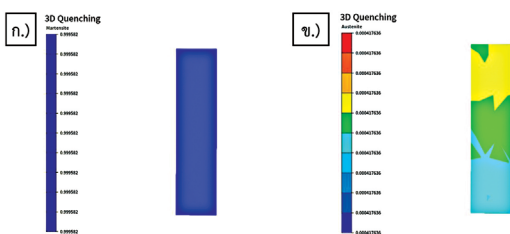
### 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์อุณหภูมิที่เกิดขึ้นส่วนต่อจากการเหนี่ยวนำความร้อนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 10 (ก) พบว่า บริเวณผิวนอกโดยเฉพาะบริเวณที่อยู่ใกล้กับขดลวดมีอุณหภูมิที่สูงสุดโดยมีค่าอยู่ในช่วง 1,020 - 1,042 องศาเซลเซียส บริเวณผิวด้านในมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 911 - 933 องศาเซลเซียส โดยทั้งสองตำแหน่งมีความแตกต่างคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 10.4 - 10.6 ซึ่งอุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์นี้เพียงพอต่อการละลายเฟสเดิมให้เป็นออสเทนไนต์สำหรับเหล็กกล้าผสม AISI 4130 ที่มีค่าอยู่ในช่วง 830 - 870 องศาเซลเซียส [2] และยังพบอีกว่ามีความใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดอุณหภูมิบนชิ้นงานที่บันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นส่วนต่อมีค่าอยู่ระหว่าง 866 - 1,066 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 10 (ข)

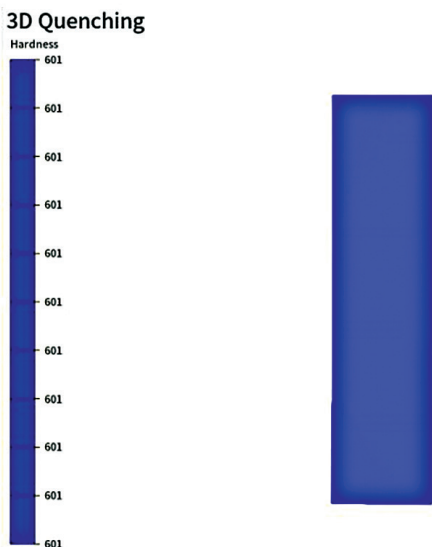


รูปที่ 10 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นงานในการทดลอง (ก) ผลการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ข) อุณหภูมิบนชิ้นงานที่วัดได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อน

การทำนายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นส่วนท่อเมื่อทำการเหนี่ยวนำความร้อน พบว่า การเหนี่ยวนำความร้อนทำให้ชิ้นส่วนท่อมีโครงสร้างที่เป็นออสเทนไนต์ได้ทั้งหมด และเมื่อทำให้เย็นตัวอย่างยิ่งยวด ชิ้นงานมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ ร้อยละ 99.96 ) แสดงดังรูปที่ 11 (ก) ผสมกับเฟสออสเทนไนต์เหลือค้าง (Retained Austenite) อยู่ในปริมาณเล็กน้อย (ร้อยละ 0.04) แสดงดังรูปที่ 11 (ข) ในส่วนของการทำนายค่าความแข็งหลังการเย็นตัวอย่างยิ่งยวดของชิ้นงาน หลังการชุบแข็งชิ้นส่วนท่อมีค่าความแข็งเท่ากับ 601 วิกเกอร์ แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 11 ผลการทำนายเฟสที่เกิดขึ้นงานหลังการอบชุบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ก) ผลการทำนายเฟสมาร์เทนไซต์หลังการอบชุบ (ข) ผลการทำนายเฟสออสเทนไนต์หลังการอบชุบ



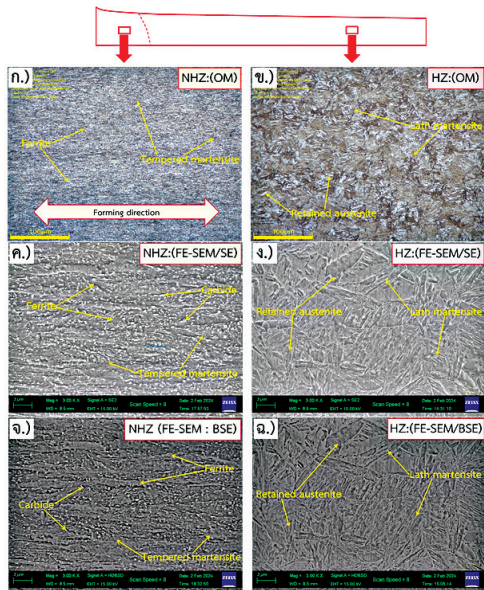
รูปที่ 12 ผลการทำนายค่าความแข็งหลังการอบชุบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## 4.2 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ไม่ได้อบชุบ (NHZ) เป็นโครงสร้างหลังการรีดที่ประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (Tempered martensite) ที่มีการยึดตัวของเกรนตามทิศทางการรีดจากกระบวนการขึ้นรูปโดยการไหล แสดงดังรูปที่ 13 (ก) เมื่อพิจารณาสัญญาณวิทยาที่กล้องขยาย 3,000 เท่า ทั้งในสัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image: SEI) และสัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image: BEI) แสดงดังรูปที่ 13 (ค) และ 13 (จ) สามารถเห็นลักษณะเกรนที่รียาวจากการขึ้นรูปได้ชัดเจนมากขึ้น ภาพจาก SEI สามารถสังเกตเห็นการกระจายตัวของคาร์ไบด์ทั่วโครงสร้าง ซึ่งคาดว่าเป็นคาร์ไบด์ที่เกิดจากกระบวนการชุบแข็ง (Quenched and Tempered) ท่อ Preform ก่อนการรีดขึ้นรูป [14] ต่อมาเมื่อนำมารีดขึ้นรูปทำให้คาร์ไบด์สามารถกระจายตัวได้มากขึ้น ซึ่งความหนาแน่นในการกระจายตัวจะขึ้นอยู่กับปริมาณการรีดขึ้นรูป [15]

โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ผ่านการอบชุบ (HZ) มีโครงสร้างหลักเป็นมาร์เทนไซต์แบบแฝง (Lath Martensite) ที่มีออสเทนไนต์เหลือค้างผสมอยู่ แสดงดังรูปที่ 13 (ข), 13 (ง) และ 13 (ฉ) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 11 (ก) และ 11 (ข) เนื่องจากชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวที่มากกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤต โดยเหล็กกล้าผสม AISI 4130 มีอัตราการเย็นตัววิกฤตประมาณ 170 - 200 องศาเซลเซียสต่อวินาที [2] มาร์เทนไซต์แบบแฝงที่เกิดขึ้นนี้ สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นจากภาพ SEI และ BEI แสดงดังรูปที่ 13 (ง) และ 13 (ฉ) ตามลำดับ มาร์เทนไซต์แบบแฝงมีลักษณะเฉพาะตัวที่เกิดขึ้นกับเหล็กกล้ากลุ่มที่มีปริมาณของคาร์บอนผสมอยู่ในระดับปานกลาง ทั้งนี้ ไม่ปรากฏอนุภาคของคาร์ไบด์เนื่องจากเกิดการสลายตัวในระหว่างการละลายเฟสให้เป็นออสเทนไนต์ [16] สำหรับปริมาณของเฟสออสเทนไนต์เหลือค้าง (Retained Austenite) ที่พบนั้นมีสาเหตุมาจากเหล็กกล้าผสม AISI 4130 มีอุณหภูมิมาร์เทนไซต์

เสร็จสิ้น (Martensite Finish Temperature:  $M_f$ ) ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง จึงไม่สามารถเกิดมาร์เทนไซต์ได้ 100%



รูปที่ 13 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวอย่างในบริเวณ NHZ และ HZ

- (ก) - (ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสง (OM)
- (ค) - (ง) ภาพ SEI จาก FE-SEM
- (จ) - (ฉ) ภาพ BEI จาก FE-SEM

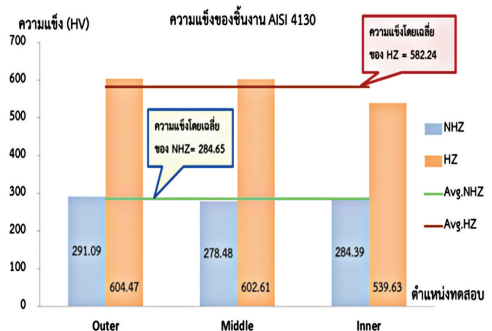
#### 4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางกล

##### 4.3.1 ความแข็งจุลภาค

ผลการทดสอบความแข็งจุลภาคได้ค่าความแข็งเฉลี่ยแสดงดังรูปที่ 14 พบว่า บริเวณที่ไม่ได้ออบชุบ (NHZ) มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 284.65 วิกเกอร์ โดยในแต่ละตำแหน่งมีค่าความแข็งที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลจากกลไกการจัดเรียงตัวใหม่ของอะตอมภายในผลึกหลังกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานท่อตัวอย่าง หลังการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณที่ไม่ได้ออบชุบ (NHZ) พบว่า บริเวณที่ผ่านการอบชุบ (HZ) มีค่าความแข็งเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 2 เท่า โดยประมาณ โดยมีค่าเท่ากับ 582.24 วิกเกอร์ ในบริเวณนี้ตำแหน่งผิวนอก (Outer) มีค่าความแข็งสูงที่สุด เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่สัมผัสกับสารชุบจึงมีอัตราการเย็นตัวสูงที่สุด

ส่วนตำแหน่งผิวใน (Inner) มีค่าความแข็งที่ต่ำกว่า เนื่องจากมีอัตราการเย็นตัวที่ต่ำกว่าตำแหน่งผิวนอก ซึ่งความแตกต่างของค่าความแข็งที่พบในบริเวณนี้คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 10.7

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบกับการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 12 พบว่า ค่าความแข็งเฉลี่ยมีความแตกต่างคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 3.12 บริเวณผิวนอก (Outer) และบริเวณกึ่งกลาง (Middle) มีค่าที่ใกล้เคียงมากที่สุด ส่วนบริเวณผิวใน (Inner) มีความแตกต่างมากที่สุดคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 10.2 เนื่องจากในทางปฏิบัติการหล่อเย็นเพียงด้านเดียวไม่สามารถทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างยิ่งยวดเท่ากันได้ทั้งชิ้นงาน

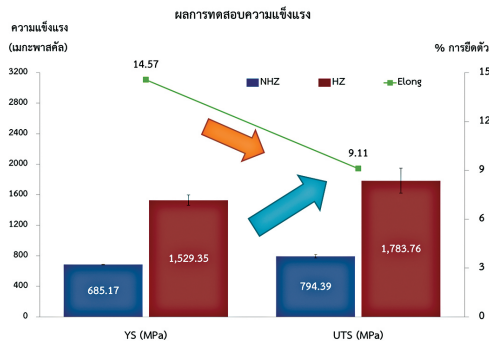


รูปที่ 14 แผนภาพผลการวัดค่าความแข็งจุลภาค

##### 4.3.2 ความแข็งแรง

ผลการทดสอบความแข็งแรงแรงขึ้นทดสอบที่ไม่ได้ทำการอบชุบ (NHZ) และขึ้นทดสอบที่ผ่านการอบชุบ (HZ) แสดงดังรูปที่ 15 พบว่า บริเวณที่ไม่ได้ออบชุบ (NHZ) ขึ้นทดสอบมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 749.39 เมกะปาสกาล ค่าความเค้นฉุดคราก 685.17 เมกะปาสกาล และอัตราการยืดตัวร้อยละ 14.56 บริเวณที่ผ่านการอบชุบ (HZ) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าความเค้นฉุดคราก มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า โดยมีค่าเท่ากับ 1,783.75 และ 1,529.35 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ส่วนอัตราการยืดตัวมีค่าที่ลดลงโดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 9.11

ดังนั้น เห็นได้ว่าขึ้นทดสอบหลังการชุบแข็งมีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการอบชุบที่ปรากฏโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ทั้งนี้ ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอบชุบเพียงพอต่อการรับภาระกรรมที่เกิดขึ้นบริเวณปลายท่อรับแรงดันทั้ง 2 ด้าน



รูปที่ 15 ผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน NHZ และ HZ

## 5. สรุปผลการทดลอง

การชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำส่งผลให้เหล็กกล้า AISI 4130 มีโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ในการทดลองการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งในส่วนของอุณหภูมิ โครงสร้างจุลภาค และค่าความแข็งแรงมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ชิ้นส่วนท่อบริเวณที่ทำชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์แบบผสม และมีออสเทนไนต์เหลือค้างผสมอยู่ สำหรับค่าความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ดังนั้น การชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลให้กับชิ้นงานเหล็กกล้าผสม AISI 4130 ได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับท่อรับแรงดันเพื่อตอบสนองต่อการใช้งานตามวัตถุประสงค์

## 6. ข้อเสนอแนะ

1. ในกระบวนการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำ ควรควบคุมเวลาในการละลายเฟสให้เป็นออสเทนไนต์ (Austenitizing) ให้มีความสอดคล้องกับความหนาและ

ชนิดของวัสดุ เพื่อความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาค และคุณสมบัติทางกลที่ได้

2. การเหนี่ยวนำความร้อนให้กับชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับคุณสมบัติให้มีความเหมาะสมต่อการตกแต่งทางกลหรือเป็นไปตามวัตถุประสงค์การใช้งานอื่นได้

3. ในทางปฏิบัติกระบวนการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำมีข้อจำกัดสำคัญ คือ การเลือกใช้ชนิดของชุดอุปกรณ์เหนี่ยวนำให้เหมาะสมกับชิ้นงาน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ต้องพิจารณาร่วม เช่น ปัจจัยทางด้านวัสดุ ซึ่งเกี่ยวข้องกับชนิดและมิติของชิ้นงาน ปัจจัยทางด้านกระบวนการ ซึ่งเกี่ยวข้องกับต้นทุนในกระบวนการ ความซับซ้อน และความสามารถในการควบคุมกระบวนการ รวมถึงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับชิ้นงาน

4. การศึกษาและวิเคราะห์เพิ่มเติมเกี่ยวกับโครงสร้างในรายละเอียดถึงการกระจายตัวของเฟสต่าง ๆ ที่ปรากฏควรศึกษาด้วยเทคนิค Electron Backscatter Diffraction (EBSD) และวิเคราะห์หาปริมาณของเฟสต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction Analysis (XRD) เป็นต้น

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ โครงการวิจัยและพัฒนากระบวนการตรวจสอบระดับสูง แบบ DTI-2 (D2) สำหรับการสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานวิจัย และส่วนงานวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ในการสนับสนุนอุปกรณ์การวิจัย รวมทั้งอำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Thummikanonth, T. Boonluang, T. Pornyungyuen, and S. Saidarasamutr, "A Study of Trapezoidal Thread for Thin-Wall Tube Application," in *AMMSE 2015*, Jeju Island, South Korea, 2015.

- [2] ASM International Handbook Committee, *ASM Handbook Volume 4: Heat Treatment*, 10th ed. Ohio, USA: ASM Int., 1991.
- [3] V. Rudnev, D. Loveless, and R. L. Cook, *Handbook of Induction Heating*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2017.
- [4] J. J. Coryell, D. K. Matlock, and J. G. Speer, "The Effect of Induction Hardening on the Mechanical Properties of Steel with Controlled Prior Microstructures," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 2, p. 8, 2005.
- [5] S. Saidarasamutr, T. Suriyea, and T. Pornyungyuen, "A Study of Property of Materials for Rocket Motor Case Prototype," in *IE Netw. Conf. 2012*, Pethchaburi, Thailand, 2012.
- [6] R. Lenhard, M. Malcho, and K. Kaduchová, "Numerical Simulation of Induction Heating Thick-Walled Tubes," in *MATEC Web Conf.*, vol. 168, 2018, p. 02004.
- [7] V. Hathairathsiri, S. Chudjuarjeen, and S. Koomsap, "A High Frequency Induction Heater by using Pulse Density Modulation for Surface Hardening Application," Office of the Higher Education Commission, Bangkok, Thailand, Rep. 2554A16662006, 2012.
- [8] V. Rudnev, "A Fresh Look at Induction Heating of Tubular Products: Part 1," *Heat Treating Prog.*, pp. 17-19, 2004.
- [9] R. Ismail, D. I. Prasetyo, M. Tauviqirrahman, E. Yohana, and A. P. Bayuseno, "Induction Hardening of Carbon Steel Material: The Effect of Specimen Diameter," *Adv. Mater. Res.*, vol. 911, pp. 210 - 214, 2014.
- [10] L. Semiatin, "Induction Heat Treatment," Techcommentary: EPRI Center for Materials Fabrication, vol. 2, no. 2, 1985. (Reprinted March, 1990).
- [11] R. Choteborsky and M. Linda, "FEM based Numerical Simulation for Heat Treatment of The Agricultural Tools," *Agronomy Res.*, vol. 13, no.3, 629 - 638, 2015.
- [12] K. Kurek and D. Dolega, "Modeling of Induction Hardening," in *Proc. Int. Sci. Colloq.: Model. Electromagn. Process.*, Hannover, Germany, 2003, pp. 125 - 130.
- [13] Standard Specification for General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought, ASTM A29/A29M-20, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2020.
- [14] D. Vysochinskiy and D. Rybakov, "On the Effect of Various Heat Treatments on Microstructure of AISI 4130 Steel Used in Sour Service Pipes," in *Proc. 39th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Eng.*, Fort Lauderdale, FL, USA, 2020.
- [15] O. Poyraz and B. Ogel, "Recrystallization, Grain Growth and Austenite Formation in Cold Rolled Steels during Intercritical Annealing," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 5, pp. 11263 - 11277, 2020, pp. 1 - 6.
- [16] S. Papaefthymiou, M. Bouzouni, and R. H. Petrov, "Study of Carbide Dissolution and Austenite Formation during Ultra - Fast Heating in Medium Carbon Chromium Molybdenum Steel," *Met.*, vol. 8, no. 8, p. 646, 2018.