การออกแบบและพัฒนาบ่อชุบแข็งด้วยน้ำมันสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตมีดชุมชน

Design and Development of an Oil Quenching Tank for Community-Based Knife Manufacturing

ประสาท ภูปรึ้ม และ ภูริพัส แสนพงษ์

Prasart Pupram and Bhuriphat Saenpong

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

มานพ ดอนหมื่น

Manop Donmuen

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

ธงชัย เครือผือ

Thongchai Khrueaphue

คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

Faculty of Agricultural Technology and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University

ปริญญวัตร ทินบุตร*

Parinyawatr Dhinnabutra*

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

E-mail: prasart.ph@rmuti.ac.th, bhuriphat.sa@rmuti.ac.th, manop.do@rmuti.ac.th, thongchai.k@pcru.ac.th and parinyawat.ti@rmuti.ac.th*

*Corresponding author

(Received: 25 April 2026, Revised: 2 October 2026, Accepted: 5 October 2026)

https://doi.org/10.57260/stc.2026.1719

บทคัดย่อ

การผลิตมีดในระดับอุตสาหกรรมชุมชน ซึ่งใช้เหล็กกล้าเกรด AISI 5160 เป็นวัสดุหลักในการทำใบมีด มักประสบปัญหาของเสียจากการชุบแข็งด้วยน้ำ เนื่องจากอัตราการเย็นตัวที่รุนแรงส่งผลให้เกิดการแตกร้าวและความแปรปรวนของสมบัติเชิงกล งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ออกแบบและพัฒนาบ่อชุบน้ำมันโดยอาศัยหลักสมดุลพลังงาน(2) ประเมินสมรรถนะของระบบผ่านการทดสอบความแข็งและการวิเคราะห์

Copyright © 2026 Science and Technology to Community
This is an open access article distributed under the terms of the CC BY 4.0 license

โครงสร้างจุลภาค และ 3) เปรียบเทียบผลลัพธ์กับการชุบน้ำภายใต้เงื่อนไขการชุบที่แตกต่างกัน โดยใช้มีดพร้าเหล็กกล้าเกรด AISI 5160 เป็นชิ้นทดสอบ ผลการออกแบบระบุว่าปริมาตรน้ำมันขั้นต่ำเท่ากับ 2.0 ลิตรต่อการชุบหนึ่งครั้ง และได้พัฒนาบ่อชุบที่มีปริมาตรใช้งาน 6 ลิตรเพื่อเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน โดยอุณหภูมิน้ำมันระหว่างใช้งานต่อเนื่องไม่เกิน 82 °C ซึ่งต่ำกว่าจุดวาบไฟอย่างปลอดภัย ผลการทดลองที่ระดับชิ้นงาน (n = 6 ต่อกลุ่ม) พบว่ากลุ่มชุบน้ำมันให้ค่าความแข็งเฉลี่ย 54.67 ± 1.31 HRC สูงกว่ากลุ่มชุบน้ำที่ 52.80 ± 1.75 HRC โดยมีขนาดอิทธิพลระดับสูง (Cohen's d = 1.21) และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนต่ำกว่า (2.40% เทียบกับ 3.31%) แม้ค่าความแข็งอาจแตกต่างในระดับเข้าใกล้นัยสำคัญทางสถิติ (Welch's t-test, p = 0.065) เนื่องจากข้อจำกัดด้านขนาดตัวอย่าง แต่ค่าความแปรปรวนที่ลดลงอย่างชัดเจนนี้สะท้อนถึงความสม่ำเสมอของกระบวนการที่เหนือกว่าได้อย่างเป็นรูปธรรม การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วย SEM สนับสนุนผลดังกล่าว โดยกลุ่มชุบน้ำมันมีโครงสร้างที่ละเอียดและสม่ำเสมอกว่า สอดคล้องกับลักษณะของ tempered martensite อย่างไรก็ตาม สมบัติเชิงกลของชิ้นงานได้รับอิทธิพลร่วมกันจากทั้งชนิดของตัวกลางชุบและเงื่อนไขกระบวนการชุบ โดยสรุป ระบบบ่อชุบน้ำมันที่พัฒนาขึ้นไม่เพียงแต่มีแนวโน้มเพิ่มความแข็งของชิ้นงาน แต่ยังสามารถแก้ปัญหาความแปรปรวนในกระบวนการผลิตได้อย่างเป็นรูปธรรม จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นแนวทางเชิงวิศวกรรมเพื่อยกระดับมาตรฐานการชุบแข็งในอุตสาหกรรมชุมชนต่อไป

คำสำคัญ: การชุบแข็งด้วยน้ำมัน บ่อชุบแข็ง สมดุลพลังงาน เหล็กกล้าเกรด AISI 5160 มีดชุมชน

Abstract

Community-based knife manufacturing, which uses AISI 5160 steel as the primary blade material, often encounters high defect rates associated with water quenching, primarily due to the severe cooling rate, which can contribute to cracking and variability in mechanical properties. This study aims to 1) design and develop an oil quenching tank based on energy balance principles, 2) evaluate system performance through hardness testing and microstructural analysis, and 3) compare the outcomes with conventional water quenching under different processing conditions. Machetes made of AISI 5160 steel were used as test specimens. The design results indicated that the minimum required oil volume was 2.0 liters per quenching cycle, and a quenching tank with an operating volume of 6 liters was developed to enhance thermal stability; the oil temperature during continuous operation remained below 82 °C, safely beneath the flash point. At the specimen level (n = 6 per group), the oil-quenched group exhibited a higher average hardness than the water-quenched group (54.67 ± 1.31 HRC vs 52.80 ± 1.75 HRC), with a large effect size (Cohen's d = 1.21) and a lower coefficient of variation (2.40% vs 3.31%). Although the difference in hardness approached conventional statistical significance (Welch's t-test, p = 0.065) due to the small sample size, the markedly

reduced variability reflects a superior and highly consistent process. SEM microstructural analysis supported these findings, revealing that oil-quenched samples exhibited a finer and more uniform structure, suggesting features consistent with a tempered martensitic microstructure. However, the mechanical properties were influenced by both the quenching medium and process conditions. In conclusion, the developed oil quenching system not only exhibits potential for enhancing specimen hardness but concretely resolves process variability. It demonstrates significant potential for improving mechanical consistency and can serve as a practical engineering guideline for upgrading quenching processes in community-based industries.

Keywords: Oil quenching, Quenching tank, Energy balance, AISI 5160 steel, Community-based knife

บทนำ

ภาคเกษตรยังมีสัดส่วนการจ้างงานของไทยในระดับสำคัญ (The World Bank, 2023) และในหลายพื้นที่ชนบทยังมีการผลิตมีดพื้นบ้านที่อาศัยภูมิปัญญาท้องถิ่น โดยงานศึกษากลุ่มทำมีดในไทยรายงานว่าความรู้การผลิตถูกถ่ายทอดจากบรรพบุรุษ และผลิตภัณฑ์มีดบางกลุ่มเหมาะกับงานเกษตรและการใช้งานในชีวิตประจำวัน (Rhayim, 2010) สำหรับวัสดุใบมีด เหล็กสปริงเกรด AISI 5160 หรือเหล็กแหนบที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงสามารถผ่านการชุบแข็งให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์หรือโครงสร้างมาร์เทนไซต์ร่วมกับออสเทนไนต์คงค้างและให้ค่าความแข็งสูง จึงเหมาะต่อการใช้งานเป็นมีดและเครื่องมือตัด (Apichai, 2020; Sudiyanto ey al., 2021) ทั้งนี้ เหตุผลสำคัญที่กลุ่มผู้ผลิตมีดในพื้นที่ศึกษาเลือกใช้เหล็กกล้าเกรด AISI 5160 คือเป็นเหล็กแหนบรถยนต์ที่จัดหาได้ง่ายในท้องถิ่นจากร้านรับซื้อของเก่าและอู่ซ่อมรถยนต์ มีราคาต่ำกว่าเหล็กเครื่องมือเกรดพิเศษที่ต้องสั่งซื้อจากภายนอก และเป็นวัสดุหลักที่ช่างตีมีดในชุมชนใช้สืบทอดกันมา ปัจจัยด้านการเข้าถึงวัสดุและต้นทุนดังกล่าวทำให้ผลการศึกษาที่ได้จากเหล็กเกรดนี้สามารถขยายผลสู่การปฏิบัติจริงของชุมชนได้โดยตรง

ในเชิงโลหะวิทยา กระบวนการอบชุบความร้อน โดยเฉพาะการชุบแข็ง (Quenching) มีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเหล็ก เนื่องจากจุลภาคหลังการชุบขึ้นกับองค์ประกอบ อุณหภูมิการแปรสภาพ และอัตราการเย็นของชิ้นงาน (Dossett, 2020; Lozano et al., 2024) อย่างไรก็ตาม ในพื้นที่ศึกษาที่เป็นการผลิตระดับชุมชนยังพบการให้ความร้อนด้วยเตาดินเหนียวและการชุบน้ำแบบดั้งเดิม (ข้อมูลภาคสนามของผู้วิจัย) ซึ่งสัมพันธ์กับข้อเท็จจริงทางโลหะวิทยาที่ว่า น้ำให้การเย็นตัวรุนแรงกว่าน้ำมัน ขณะที่น้ำมันให้การเย็นตัวต่ำกว่าแต่สม่ำเสมอกว่า และความไม่สม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานกับสารชุบเป็นปัจจัยสำคัญของความเค้นตกค้าง การบิดตัว และการแตกร้าว (Samuel & Prabhu, 2022; Ramesh & Prabhu, 2014; Totten et al., 1993) ข้อมูลการผลิตภาคสนามของกลุ่มผู้ผลิตในพื้นที่ศึกษาชี้ว่า

การชุบแข็งด้วยน้ำก่อให้เกิดของเสียประมาณร้อยละ 3.80 ของการผลิตทั้งหมด สะท้อนข้อจำกัดด้านการควบคุมการถ่ายเทความร้อนและความสม่ำเสมอของผลลัพธ์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิต ต้นทุน และคุณภาพผลิตภัณฑ์

ในเชิงวิชาการ มีรายงานจำนวนมากเกี่ยวกับพฤติกรรมของเหล็ก AISI 5160 ภายใต้ตัวกลางชุบและเงื่อนไขการเย็นที่แตกต่างกัน รวมทั้งผลต่อจุลภาค ความแข็ง และความเค้นตกค้าง (Apichai, 2020; Sudiyanto et al., 2021; Samuel & Prabhu, 2022; López-García et al., 2019) อย่างไรก็ตาม จากการพิจารณาวิธีทดลองของงานที่ทบทวน พบว่างานส่วนใหญ่ดำเนินการภายใต้สภาวะควบคุม เช่น การกำหนดอุณหภูมิออสเทนไนต์และเวลาแช่อย่างแม่นยำ การใช้เตาไฟฟ้าหรือแบบจำลองเชิงตัวเลข และการควบคุมเงื่อนไขการจุ่มหรือตัวกลางชุบอย่างเป็นระบบ (Apichai, 2020; Sudiyanto et al., 2021; López-García et al., 2019) เงื่อนไขดังกล่าวแตกต่างจากบริบทการผลิตระดับชุมชนซึ่งพึ่งพาอุปกรณ์พื้นฐานและประสบการณ์ของช่างเป็นสำคัญ

ดังนั้น ช่องว่างของงานวิจัยจึงอยู่ที่การแปลงหลักวิศวกรรมการชุบแข็งให้เป็นระบบที่ใช้งานได้จริงในบริบทอุตสาหกรรมชุมชน โดยเฉพาะการกำหนดขนาดบ่อชุบ ปริมาตรสารชุบ และความสามารถในการระบายความร้อนให้สอดคล้องกับภาระความร้อนของชิ้นงาน (MacKenzie, 2024) เพื่อตอบโจทย์ดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงใช้หลักสมดุลพลังงานเป็นฐานในการออกแบบบ่อชุบน้ำมัน เพื่อกำหนดปริมาตรสารชุบให้สามารถดูดซับพลังงานความร้อนจากชิ้นงานได้เพียงพอและจำกัดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่างการใช้งาน (MacKenzie, 2024) พร้อมกำหนดเงื่อนไขความปลอดภัยให้อุณหภูมิใช้งานต่ำกว่าจุดวาบไฟของน้ำมันตามแนวทางมาตรฐานและข้อแนะนำด้านความปลอดภัย (ASTM International, 2007; FM Global, 2022) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 3 ประการ คือ 1) ออกแบบและพัฒนาบ่อชุบแข็งด้วยน้ำมันโดยอาศัยหลักสมดุลพลังงาน 2) ประเมินสมรรถนะของระบบผ่านการทดสอบค่าความแข็งและการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 3) เปรียบเทียบผลลัพธ์กับกระบวนการชุบแข็งด้วยน้ำแบบดั้งเดิม เพื่อสนับสนุนการประยุกต์ใช้ในการลดของเสีย เพิ่มความสม่ำเสมอของสมบัติเชิงกล และยกระดับกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมชุมชน

ระเบียบวิธีวิจัย

วัสดุ ชิ้นทดสอบ และสารชุบ

ชิ้นทดสอบที่ใช้ในการวิจัยเป็นมีดพร้าซึ่งผลิตจากเหล็กกล้าเกรด AISI 5160 โดยมีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 500 กรัม ความยาวประมาณ 45 เซนติเมตร และความกว้างประมาณ 7 เซนติเมตร ชิ้นงานทุกชิ้นผ่านกระบวนการขึ้นรูปเบื้องต้นเรียบร้อยแล้วก่อนเข้าสู่การทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 1 ทั้งนี้ ได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นทดสอบและเปรียบเทียบกับองค์ประกอบมาตรฐานของเหล็กกล้าเกรด AISI 5160 ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าองค์ประกอบอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน ทำให้เหมาะสมต่อการนำมาใช้ศึกษาพฤติกรรมการชุบแข็ง



ภาพที่ 1 ชิ้นทดสอบมีดพร้า

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นทดสอบเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าเกรด AISI 5160 (Apichai, 2020)

ธาตุ	C	Si	Mn	Cr	P	S
AISI 5160 (% โดยน้ำหนัก)	0.56 - 0.64	0.15 - 0.30	0.75 - 1.00	0.70 - 0.90	≤0.030	≤0.040
Sample (% โดยน้ำหนัก)	0.60	0.24	0.86	0.86	0.015	0.027

สารชุบที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยน้ำและน้ำมันชุบแข็ง โดยกำหนดให้น้ำเป็นตัวกลางอ้างอิงที่ใช้ในกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิมของชุมชน ขณะที่น้ำมันชุบแข็งถูกเลือกใช้เป็นตัวกลางทางเลือกเพื่อประเมินศักยภาพในการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ น้ำมันที่ใช้เป็นน้ำมันสำหรับการชุบแข็งเหล็กโดยเฉพาะ ซึ่งมีคุณสมบัติด้านการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมต่อการควบคุมอัตราการเย็นตัว และมีจุดวาบไฟประมาณ 210 °C อันเอื้อต่อการใช้งานอย่างปลอดภัยเมื่อออกแบบระบบชุบอย่างเหมาะสม คุณสมบัติเชิงกายภาพและสมบัติการถ่ายเทความร้อนของน้ำมันชุบแข็งที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 2 โดยพบว่ามีอัตราการเย็นตัวสูงสุดประมาณ 50 °C /s ที่อุณหภูมิ 522 °C ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการชุบแข็งเหล็กกล้า AISI 5160 และมีแนวโน้มช่วยลดความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเปรียบเทียบกับการชุบด้วยน้ำ

ตารางที่ 2 คุณสมบัติจำเพาะของน้ำมันชุบแข็ง

รายการ	วิธีทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ
Viscosity at 40 °C	ASTM D445	mm²/s	29.0
Viscosity at 100 °C	ASTM D445	mm²/s	4.5
Viscosity Index	ASTM D2270	-	102
Flash Point	ASTM D92	°C	210
Pour Point	ASTM D97	°C	-9
Density at 15 °C	ASTM D4052	kg/L	0.86
Maximum Cooling Rate	ASTM D6200	°C /s	50
Temperature at Maximum Cooling Rate	ASTM D6200	°C	522

การออกแบบบ่อชุบแข็งด้วยหลักสมดุลพลังงาน (Methodology)

การออกแบบบ่อชุบแข็งมุ่งเน้นความเหมาะสมกับการใช้งานในภาคสนามของวิสาหกิจชุมชน โดยกำหนดเกณฑ์ด้านความแข็งแรงของโครงสร้าง ความปลอดภัย และความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิเป็นสำคัญ โครงสร้างหลักผลิตจากเหล็กท่อกลมดำ (Black steel pipe) ความหนา 5 มิลลิเมตร ปิดฐานด้วยแผ่นเหล็กหนาเพื่อรองรับน้ำหนักและแรงดันจากสารชุบ เพื่อให้มั่นใจว่าน้ำมันมีความสามารถเพียงพอในการดูดซับพลังงานความร้อนจากชิ้นงานระหว่างการชุบแข็ง โดยกำหนดให้อุณหภูมิของน้ำมันหลังการชุบไม่เกิน 120 °C ซึ่งยังต่ำกว่าจุดวาบไฟของน้ำมันอย่างเพียงพอสำหรับการใช้งานอย่างปลอดภัย ภายใต้สมมติฐานเชิงการประมาณค่าอันดับหนึ่ง (first-order approximation) ว่าความร้อนที่สูญเสียสู่สิ่งแวดล้อมและผนังภาชนะในช่วงเวลาการจุ่มมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่ถ่ายเทจากชิ้นงานสู่น้ำมัน และอุณหภูมิของน้ำมันภายหลังการชุบกระจายตัวได้สม่ำเสมอ สมดุลพลังงานระหว่างโลหะและสารชุบสามารถเขียนได้ดังสมการ (Totten, Bates, & Clinton, 1993)

$$M_m \cdot C_{pm} \cdot \Delta T_m = M_q \cdot C_{pq} \cdot \Delta T_q$$

เมื่อ

M_m คือ มวลของชิ้นงานโลหะ (Kg)

C_{pm} คือ ค่าความร้อนจำเพาะประสิทธิผลของโลหะ (kJ/(kg. °C)

Δ_{Tm} คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลหะ (°C)

M_q คือ มวลของสารชุบ (Kg)

C_{pq} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของสารชุบ (kJ/(kg .°C)

Δ_{Tq} คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารชุบ (°C)

ในการคำนวณนี้กำหนดให้น้ำหนักชิ้นงานเฉลี่ย(M_m)เท่ากับ 500 กรัม อุณหภูมิเริ่มต้นของชิ้นงานเท่ากับ 870 °C อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำมันเท่ากับ 45 °C และอุณหภูมิสมดุลสูงสุดที่ยอมรับได้ของน้ำมันเท่ากับ 120 °C ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลหะ (ΔT_m) = 750 °C และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารชุบ (ΔT_q) = 75 °C

สำหรับค่าความร้อนจำเพาะ ได้กำหนดใช้ค่าเฉลี่ยประสิทธิผลของเหล็กกล้า (C_{pm}) เท่ากับ 0.71 kJ/(kg·°C) ค่าดังกล่าวเป็นค่าเฉลี่ยประสิทธิผลที่รวมผลของพลังงานแฝงจากการแปรสภาพเฟส (Effective averaged specific heat including phase transformation effects) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 45–870 °C ที่ครอบคลุมผลของพลังงานแฝงจากการแปรสภาพเฟส (Phase transformation latent heat) ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงจาก Ferrite/pearlite สู่ Austenite โดยอ้างอิงจากข้อมูลสมบัติเทอร์โมฟิสิกส์ของเหล็กกล้า SAE 5160 ที่รายงานโดย López-García et al. (2019) ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการวิเคราะห์สมดุลพลังงานในกระบวนการชุบแข็งตามที่อธิบายใน Lozano et al. (2024)

ขณะที่ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำมันชุบแข็ง(C_{pq}) กำหนดไว้ที่ 2.09 kJ/(kg·°C) เมื่อแทนค่าตัวแปรทั้งหมดลงในสมการที่ 1) พบว่ามวลน้ำมันขั้นต่ำที่ (M_q) ต้องใช้มีค่า เท่ากับ 1.70 กิโลกรัม และเมื่อพิจารณาความหนาแน่นของน้ำมันที่ระดับ 0.86 kg/L จะได้ปริมาตรน้ำมันขั้นต่ำประมาณ 2.0 ลิตรต่อการชุบหนึ่งครั้ง

อย่างไรก็ตาม เพื่อรองรับการใช้งานต่อเนื่อง ลดอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิน้ำมันต่อรอบการชุบ และเพิ่มส่วนเผื่อด้านความปลอดภัย จึงกำหนดปริมาณน้ำมันใช้งานจริงที่ 6 ลิตร ซึ่งมากกว่าค่าต่ำสุดที่คำนวณได้ประมาณ 3 เท่า และทำหน้าที่เป็นส่วนถ่ายเทความร้อน ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นในการควบคุมเสถียรภาพทางความร้อนของระบบ

การออกแบบการทดลอง

การวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงเปรียบเทียบภายใต้สภาวะควบคุม โดยกำหนดให้ ชนิดของตัวกลางชุบ เป็นตัวแปรอิสระหลัก ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มชุบแข็งด้วยน้ำ กลุ่มชุบแข็งด้วยน้ำมัน แต่ละกลุ่มใช้ชิ้นงานจำนวน 6 ชิ้น รวมทั้งหมด 12 ชิ้นงาน ตัวแปรตอบสนองหลักคือ ค่าความแข็งแบบร็อกเวลล์สเกลซี (HRC) ส่วนตัวแปรตอบสนองรองได้แก่ ลักษณะทางมหภาคของชิ้นงาน และ โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ในการทดลองนี้มีการควบคุมตัวแปรอื่นให้ใกล้เคียงกันมากที่สุด ได้แก่ ชนิดของเหล็ก ขนาดของชิ้นงาน แหล่งความร้อน วิธีการคืนไฟ และวิธีการทดสอบ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากลักษณะการปฏิบัติงานจริงของชุมชนแตกต่างกันระหว่างการชุบน้ำและการชุบน้ำมัน จึงกำหนดกระบวนการชุบให้สอดคล้องกับแนวปฏิบัติที่ใช้จริงของแต่ละระบบ เพื่อให้ผลที่ได้สามารถสะท้อนการประยุกต์ใช้จริงในระดับอุตสาหกรรมชุมชน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการเปรียบเทียบกระบวนการเชิงปฏิบัติ (practical processes) มากกว่าการแยกอิทธิพลของตัวกลางชุบเพียงปัจจัยเดียว (rather than isolating quenching media effects) ซึ่งเป็นการออกแบบที่เหมาะสมกับเป้าหมายของงานวิจัยในการประยุกต์ใช้ในบริบทอุตสาหกรรมชุมชนจริง ทั้งนี้ กลุ่มชุบแข็งด้วยน้ำทำหน้าที่เป็นกลุ่มอ้างอิงฐาน (baseline) ที่แทนกระบวนการผลิตเดิมของชุมชน การเปรียบเทียบผลระหว่างสองกลุ่มจึงเป็นเครื่องมือทวนสอบสมรรถนะของบ่อชุบแข็งด้วยน้ำมันที่ออกแบบขึ้น

กระบวนการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Thermal Treatment Process)

การศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของเหล็กกล้าผสมต่ำเกรด AISI 5160 ในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นการควบคุมการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค (Microstructural transformation) เพื่อให้ได้สมบัติทางกลตามเกณฑ์มาตรฐาน โดยมีรายละเอียดขั้นตอนทางโลหะการดังนี้

กระบวนการออสเทนไนไทซิง (Austenitizing)

กระบวนการเริ่มต้นจากการเพิ่มอุณหภูมิชิ้นงานภายในเตาดินเหนียวแบบดั้งเดิม ดังภาพที่ 2 โดยอาศัยระบบเป่าลมเชิงกล (Mechanical blower) เพื่อเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้และเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนจนวัสดุเข้าสู่สถานะโครงสร้างออสเทนไนท์อย่างสมบูรณ์ การประเมินอุณหภูมิพื้นผิววัสดุอาศัยเทคนิคการสังเกตสีจากการแผ่รังสีความร้อนของโลหะ (Thermal radiation color observation) เปรียบเทียบกับแผนภูมิสีอุณหภูมิมาตรฐาน (Dhinnabutra & Nansaang, 2022) โดยควบคุมอุณหภูมิไม่ให้ต่ำกว่า 870 °C หรือเทียบเคียงกับระดับสีดอกทองกวาว (Orange-red hue) พร้อมรักษาอุณหภูมิดังกล่าวไว้ประมาณ 8 นาที เพื่อให้คาร์บอนแพร่เข้าสู่สารละลายของแข็งได้อย่างสม่ำเสมอ (Homogenization) ทั้งนี้ เพื่อให้การควบคุม

กระบวนการมีความรัดกุมเชิงวิศวกรรม คณะผู้วิจัยได้ติดตั้งสายวัดอุณหภูมิชนิดเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K ร่วมด้วย เพื่อทวนสอบ (Verify) ระดับอุณหภูมิและสอบเทียบความแม่นยำของการประเมินสีด้วยสายตา (Visual calibration) ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวช่วยลดความคลาดเคลื่อนและสร้างมาตรฐานการรับรู้พิกัดอุณหภูมิจากการแผ่รังสีความร้อนให้มีความเข้าใจที่สอดคล้องกันในทางปฏิบัติ



ภาพที่ 2 เตาดินเหนียวแบบดั้งเดิมสำหรับการให้ความร้อนชิ้นงานมีดพร้าในระดับอุตสาหกรรมชุมชน

การชุบแข็งในตัวกลางชนิดน้ำมัน (Oil Quenching)

เมื่อชิ้นงานมีอุณหภูมิถึงเกณฑ์ที่กำหนด จะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการชุบแข็ง (Quenching) โดยทันทีเพื่อรักษาสภาวะอุณหภูมิไม่ให้ตกลงต่ำกว่าจุดวิกฤตก่อนการชุบ สำหรับกลุ่มทดลองที่ใช้ตัวกลางชนิดน้ำมัน (Quench oil) ชิ้นงานจะถูกจุ่มแบบเต็มตัว (Full immersion) ลงในน้ำมันชุบแข็งที่อุณหภูมิเริ่มต้น 45 °C โดยจุ่มในแนวตั้งและให้ส่วนปลายมีดของมีดพร้าเข้าสู่สารชุบก่อนเป็นลำดับแรก ด้วยอัตราเร็วการจุ่มที่สม่ำเสมอและต่อเนื่องจนชิ้นงานจมมิดทั้งชิ้น เพื่อป้องกันการบิดตัวและการเกิดชั้นฟิล์มไอความร้อนที่ไม่เท่ากันรอบชิ้นงาน เพื่อให้อัตราการเย็นตัว (Cooling rate) เป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งช่วยลดความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรในขณะที่เปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์

การชุบแข็งในตัวกลางชนิดน้ำ (Water Quenching)

ในกลุ่มทดลองที่ใช้น้ำเป็นตัวกลาง จะดำเนินการชุบแข็งเฉพาะบริเวณคมมีด (Selective edge quenching) ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เทคนิคการจุ่มแบบเป็นจังหวะ (Intermittent quenching) กำหนดรอบการจุ่มเป็นเวลา 1 วินาที สลับกับการระบายความร้อนในอากาศ 3 วินาที ต่อเนื่องกันจำนวน 10 รอบ เพื่อชะลออัตราการลดลงของอุณหภูมิและลดแรงเค้นจากการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Thermal stress) ที่อาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวบริเวณโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Quench cracking)

กระบวนการอบคืนตัว (Tempering Process)

ภายหลังการชุบแข็ง ชิ้นงานจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการอบคืนตัวในทันที เพื่อลดความเค้นตกค้าง (Residual stress recovery) และปรับเปลี่ยนโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีความเปราะสูงให้เป็น เทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (Tempered martensite) ที่อุณหภูมิ 200-250 °C เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นจึงปล่อยให้ชิ้นงานระบายความร้อนในอากาศ (Air cooling) เพื่อให้ได้ความสมดุลระหว่างความแข็งและความเหนียว (Strength

and toughness balance) ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ชิ้นงานทั้งสองกลุ่มทดลองผ่านการอบคืนตัวด้วยเงื่อนไขอุณหภูมิและระยะเวลาเดียวกัน เพื่อให้ความแตกต่างของค่าความแข็งที่วัดได้สะท้อนอิทธิพลของขั้นตอนการชุบแข็งเป็นหลัก

กระบวนการทดสอบและการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติวัสดุ

การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะดำเนินการวัดความแข็งชิ้นละ 5 ตำแหน่ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยความแข็งประจำชิ้นงานแต่ละชิ้น จากนั้นใช้ค่าเฉลี่ยรายชิ้น (specimen mean) จำนวน 6 ค่าต่อกลุ่มเป็นหน่วยวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหา pseudo-replication ที่อาจเกิดจากการถือว่าการวัดหลายจุดภายในชิ้นงานเดียวกันเป็นข้อมูลอิสระ

การตรวจสอบลักษณะทางมหภาคและตำหนิพื้นผิว (Macro and Surface Defect Examination)

ภายหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน ชิ้นงานจะถูกนำมาประยุกต์ใช้กระบวนการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing: NDT) ด้วยการทดสอบด้วยสารแทรกซึม (Dye Penetrant Testing: PT) ตามมาตรฐาน ASTM E165/E165M (ASTM International, 2023a) เพื่อตรวจพิสูจน์ความสมบูรณ์เชิงโครงสร้างหลังการชุบแข็ง (Quench integrity) โดยเน้นการวิเคราะห์การเกิดรอยแตกร้าวจากการชุบ (Quench cracking) และจุดบกพร่องในระดับพื้นผิว (Surface discontinuities) บริเวณแนวคมตัดในกลุ่มตัวอย่างเงื่อนไขละ 5 เล่ม

การวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างจุลภาค (Microstructural Analysis)

การเตรียมชิ้นงานทางโลหะวิทยา เริ่มต้นจากการตัดแยกตัวอย่างด้วยกระบวนการตัดด้วยลวดผ่านกระแสไฟฟ้า (Wire-cut Electrical Discharge Machining) เพื่อลดความร้อนสะสมที่อาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุ จากนั้นนำชิ้นงานดำเนินการขัดผิวตามลำดับความละเอียดด้วยกระดาษทรายซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) เบอร์ 400, 800, 1,200 และ 2,400 ตามลำดับ ขั้นตอนการขัดละเอียด (Polishing) ดำเนินการด้วยผ้าสักหลาดร่วมกับผงขัดอะลูมินา (Alumina suspension) ขนาด 1 ไมโครเมตร สำหรับการเปิดเผยโครงสร้างจุลภาค จะใช้สารละลายทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM E407 (ASTM International, 2023b) หลังจากนั้นจึงดำเนินการตรวจสอบวิเคราะห์รายละเอียดในระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคกับสมบัติทางกลที่เกิดขึ้น

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

ข้อมูลค่าความแข็ง (HRC) ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD) และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of variation; CV) เพื่อประเมินระดับความแข็งและความสม่ำเสมอของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานในแต่ละกลุ่ม การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มชุบน้ำและชุบน้ำมันดำเนินการด้วย Welch's t-test (Welch, 1947) ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ตั้งสมมติฐานว่าความแปรปรวนของทั้งสองกลุ่มต้องเท่ากัน และมีความทนทาน (Robust) ต่อความไม่เท่ากันของความแปรปรวนและขนาดตัวอย่าง โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ (Montgomery, 2019) ค่าสถิติ Welch's t-test คำนวณได้จากสมการ

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

เมื่อ

$\bar{X}_1, \bar{X}_2$ คือ ค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่ม

s_1^2, s_2^2 คือ ความแปรปรวนของแต่ละกลุ่ม

n_1, n_2 คือ จำนวนตัวอย่างในแต่ละกลุ่ม

องศาอิสระ (Degrees of Freedom; df) คำนวณโดยใช้สมการของ Welch–Satterthwaite (Welch, 1947; Montgomery, 2019) ดังนี้

$$df = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}}$$

นอกจากนี้ ได้ทำการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนด้วย Levene's test เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาเลือกวิธีการทดสอบทางสถิติ เพื่อประเมินความสำคัญเชิงปฏิบัติของความแตกต่างระหว่างกลุ่ม ได้คำนวณ ขนาดอิทธิพล (effect size) ด้วยค่า Cohen's d (Cohen, 1988) ตามสมการ

$$d = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{s_p}$$

โดย S_p คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวม (pooled standard deviation) และการตีความค่า Cohen's d ใช้เกณฑ์ดังนี้ $d < 0.2$ หมายถึง ขนาดอิทธิพลต่ำ, $0.2 \leq d < 0.5$หมายถึง ขนาดอิทธิพลน้อย $0.5 \leq d < 0.8$ หมายถึง ขนาดอิทธิพลปานกลาง และ $d \geq 0.8$หมายถึง ขนาดอิทธิพลสูง (Cohen, 1988) การคำนวณทางสถิติทั้งหมดดำเนินการด้วยโปรแกรมทางสถิติ

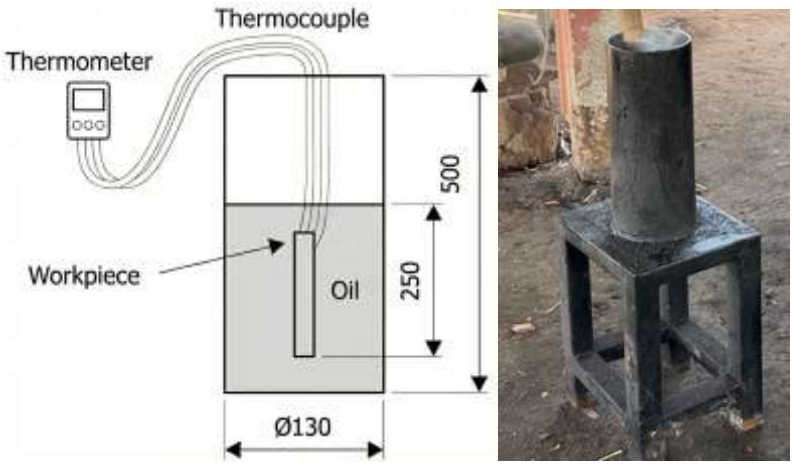
ผลการวิจัย

สถานการณ์ของเสียจากกระบวนการผลิตจริง

จากการเก็บข้อมูลกระบวนการผลิตมีดชุมชนในช่วงเดือนมกราคมถึงสิงหาคม พ.ศ. 2566 พบว่าขั้นตอนการชุบแข็งด้วยน้ำเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่ก่อให้เกิดความสูญเสียในกระบวนการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีดที่เกิดความเสียหายภายหลังการชุบแข็งมีจำนวน 137 เล่ม คิดเป็นมูลค่าความเสียหาย 61,650 บาท หรือคิดเป็นของเสียประมาณ ร้อยละ 3.8 ของการผลิตทั้งหมด ปัญหาที่พบส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับความเสียหายที่เกิดจากพฤติกรรมการเย็นตัวที่รุนแรงของตัวกลางชุบ ซึ่งส่งผลให้เกิดการแตกร้าว การบิดตัว และความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ ข้อมูลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าปัญหาของเสียในกระบวนการชุบแข็งมิได้เป็นเพียงประเด็นเชิงเทคนิคในระดับปฏิบัติการเท่านั้น แต่ยังส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนการผลิต ความสามารถในการควบคุมคุณภาพ และศักยภาพการแข่งขันของผู้ผลิตมีดชุมชน ดังนั้น การพัฒนาระบบชุบแข็งด้วยน้ำมันในงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อสร้างแนวทางทางวิศวกรรมที่สามารถลดความเสี่ยงของปัญหาดังกล่าว และยกระดับเสถียรภาพของกระบวนการผลิตในระดับชุมชน

ผลการออกแบบและพัฒนาบ่อชุบแข็งด้วยน้ำมัน

บ่อชุบแข็งที่พัฒนาขึ้นแสดงลักษณะทางกายภาพและรายละเอียดมิติดังปรากฏใน ภาพที่ 3 ซึ่งผลจากการคำนวณเชิงวิศวกรรมยืนยันว่า ปริมาณน้ำมันใช้งานจริงที่ 6 ลิตร มีปริมาตรสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่คำนวณได้ (2.0 ลิตร) ถึง 3 เท่า สภาวะดังกล่าวส่งผลให้ระบบมีสมรรถนะในการเป็นตัวหน่วงความร้อน (Heat sink) ที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถรักษาเสถียรภาพอุณหภูมิน้ำมันระหว่างกระบวนการชุบต่อเนื่องได้ดี และรักษาอุณหภูมิใช้งานให้ต่ำกว่าจุดวาบไฟอย่างชัดเจนเพื่อความปลอดภัยในพื้นที่ปฏิบัติงาน บ่อชุบที่พัฒนาแล้วเสร็จนี้ไม่เพียงแต่ทำหน้าที่เป็นภาชนะบรรจุสารชุบ แต่ยังทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในการควบคุมอัตราการเย็นตัว (Cooling rate) ของเหล็ก AISI 5160 ให้มีความสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการลดความเสี่ยงของการบิดตัวและการแตกร้าวเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชุบน้ำแบบดั้งเดิม เพื่อทวนสอบสมรรถนะของระบบในเชิงปฏิบัติ ได้บันทึกอุณหภูมิของน้ำมันระหว่างการใช้งานต่อเนื่องด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่ติดตั้งภายในบ่อชุบ ผลการวัดพบว่าอุณหภูมิของน้ำมันเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 45 °C เป็นประมาณ 68–72 °C ภายหลังการชุบชิ้นงานครั้งที่ 1 และเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 82 °C ภายหลังการชุบชิ้นงานครบ 6 ชิ้น ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการออกแบบ (120 °C) และต่ำกว่าจุดวาบไฟของน้ำมันชุบแข็ง (210 °C) อย่างมีนัยสำคัญ ผลดังกล่าวยืนยันว่าปริมาตรน้ำมันใช้งานจริงที่ 6 ลิตรมีความสามารถในการดูดซับพลังงานความร้อนเพียงพอ และสอดคล้องกับแบบจำลองสมดุลพลังงานที่ใช้ในการออกแบบ



ภาพที่ 3 ลักษณะและแบบร่างทางวิศวกรรมของบ่อชุบแข็งด้วยน้ำมัน

ผลการทดสอบความแข็งและการวิเคราะห์เชิงสถิติ

ผลการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์สเกลซี (HRC) ของชิ้นงานในแต่ละกลุ่มทดลอง รายงานเป็นค่าเฉลี่ยระดับชิ้นงาน (n = 6 ต่อกลุ่ม) พบว่ากลุ่มชิ้นงานที่ชุบแข็งด้วยน้ำมันมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 54.67 ± 1.31 HRC ซึ่งสูงกว่ากลุ่มชิ้นงานที่ชุบแข็งด้วยน้ำ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 52.80 ± 1.75 HRC โดยช่วงค่าเฉลี่ยรายชิ้นของกลุ่มชุบน้ำอยู่ระหว่าง 49.60–54.80 HRC ขณะที่กลุ่มชุบน้ำมันอยู่ระหว่าง 52.60–56.40 HRC แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่กลุ่มชุบน้ำมันสามารถให้ค่าความแข็งที่สูงกว่าและสม่ำเสมอกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์คุณลักษณะที่ต้องการตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 82/2546 เรื่องมีด ซึ่งกำหนดค่าความแข็งของคมมีดไว้ไม่ต่ำกว่า 48 HRC (Thai Industrial Standards Institute, 2003) พบว่าค่าเฉลี่ยของทั้งสองกลุ่มทดลองผ่านเกณฑ์ดังกล่าว อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่ระดับชิ้นงาน กลุ่มชุบแข็งด้วยน้ำมันมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 52.60 HRC ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำ 4.60 HRC ขณะที่กลุ่มชุบแข็งด้วยน้ำมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 49.60 HRC ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำเพียง 1.60 HRC ผลดังกล่าวสะท้อนว่ากระบวนการชุบแข็งด้วยน้ำมันให้ระยะเผื่อความปลอดภัย (safety margin) เหนือเกณฑ์มาตรฐานที่กว้างกว่า จึงมีความเสี่ยงต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานต่ำกว่าในทางปฏิบัติ ดังรายละเอียดในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์สเกลซี (HRC)

กลุ่มทดลอง	n	ค่าเฉลี่ย (HRC)	SD (HRC)	CV (%)	ต่ำสุด (HRC)	สูงสุด (HRC)
ชุบแข็งด้วยน้ำ	6	52.80	1.75	3.31	49.60	54.80
ชุบแข็งด้วยน้ำมัน	6	54.67	1.31	2.40	52.60	56.40

เมื่อพิจารณาความสม่ำเสมอของกระบวนการจากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of variation; CV) พบว่ากลุ่มชุบน้ำมันมีค่า CV = 2.40% ซึ่งต่ำกว่ากลุ่มชุบน้ำที่มีค่า CV = 3.31% สะท้อนถึง

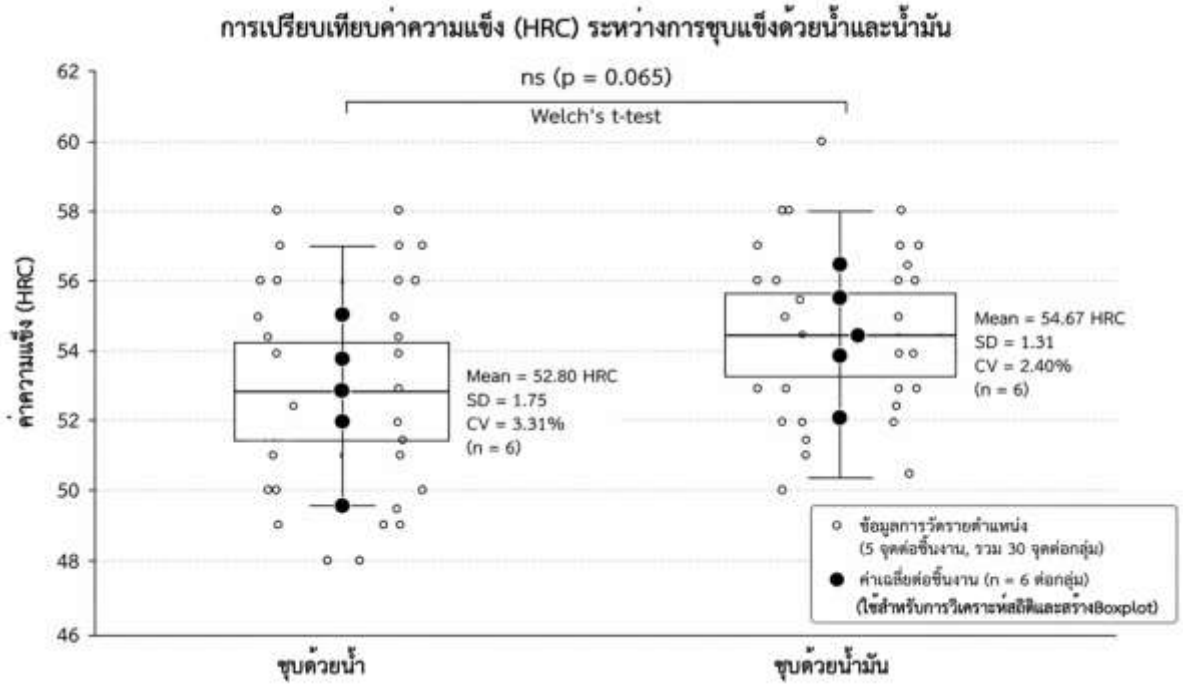
การกระจายตัวของค่าความแข็งที่แคบกว่าในกลุ่มชุบน้ำมัน ผลการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนด้วย Levene's test ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($W = 0.10$, $p = 0.753$) ซึ่งสนับสนุนการใช้ Welch's t-test ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งระหว่างสองกลุ่มด้วย Welch's t-test พบว่า $t(9.28) = 2.092$, $p = 0.065$ ซึ่งเข้าใกล้แต่ไม่ถึงระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 อย่างไรก็ตาม การประเมินขนาดอิทธิพล (Effect size) ด้วยค่า Cohen's d ให้ค่าเท่ากับ 1.21 ซึ่งจัดเป็นขนาดอิทธิพลสูง (Large effect) ตามเกณฑ์ของ Cohen (1988) และช่วงความเชื่อมั่น 95% ของผลต่างค่าเฉลี่ย (Oil – water) เท่ากับ [–0.12, 3.86] HRC ซึ่งแสดงแนวโน้มชัดเจนว่าการชุบด้วยน้ำมันให้ค่าความแข็งสูงกว่า แม้ความเชื่อมั่นในทางสถิติจะถูกจำกัดจากขนาดตัวอย่างที่เล็ก ($n = 6$ ต่อกลุ่ม)

เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์ทางสถิติ ได้ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ที่ระดับชิ้นงานดังแสดงในตารางที่ 4 ผลพบว่า $F(1, 10) = 4.375$, $p = 0.063$ ซึ่งสอดคล้องกับผล Welch's t-test และสนับสนุนแนวโน้มว่า ภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ตัวกลางชุบและรูปแบบกระบวนการชุบส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็ง (HRC)

แหล่งความแปรปรวน	df	SS	MS	F	p-value
ระหว่างกลุ่ม	1	10.45	10.45	4.375	0.063
ภายในกลุ่ม	10	23.89	2.39		
รวม	11	34.35			

การกระจายตัวของข้อมูลแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งนำเสนอในรูปแบบ SuperPlot ที่รวมข้อมูลรายตำแหน่งและค่าเฉลี่ยรายชิ้นไว้ในภาพเดียว โดยแผนภาพกล่องคำนวณจากค่าเฉลี่ยรายชิ้น (specimen means, $n = 6$ ต่อกลุ่ม) พบว่ากลุ่มชุบน้ำมันมีค่ามัธยฐานสูงกว่ากลุ่มชุบน้ำ และมีช่วงการกระจายตัวที่แคบกว่าอย่างชัดเจน ซึ่งสะท้อนถึงความสม่ำเสมอของกระบวนการที่เหนือกว่า นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นชิ้นงานหนึ่งในกลุ่มชุบน้ำที่ให้ค่าเฉลี่ยต่ำผิดปกติ (49.60 HRC) ซึ่งสะท้อนถึงความไม่สม่ำเสมอของกระบวนการชุบด้วยน้ำในบริบทการผลิตระดับชุมชน ข้อสังเกตดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระบุว่ากลุ่มชุบน้ำมันให้ค่าความแข็งสูงกว่าและมีความสม่ำเสมอมากกว่า



ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบค่าความแข็ง (HRC) ของกลุ่มชุบน้ำและชุบน้ำมัน

จุดเทาเข้มแสดงการวัดรายตำแหน่ง (5 จุด/ชิ้น รวม 30 จุด/กลุ่ม) และจุดสีดำแสดงค่าเฉลี่ยต่อชิ้น (specimen means, n = 6 ต่อกลุ่ม) ซึ่งเป็นหน่วยวิเคราะห์ทางสถิติ แผนภาพกล่องคำนวณจากค่าเฉลี่ยต่อชิ้น พบว่ากลุ่มชุบน้ำมันมีค่ามัธยฐานสูงกว่าและมีช่วงการกระจายตัวที่แคบกว่ากลุ่มชุบน้ำ อย่างไรก็ตาม ผล Welch's t-test พบว่า ยังไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p = 0.065$) แต่มีค่า Cohen's $d = 1.21$ ซึ่งจัดอยู่ในระดับขนาดอิทธิพลสูง

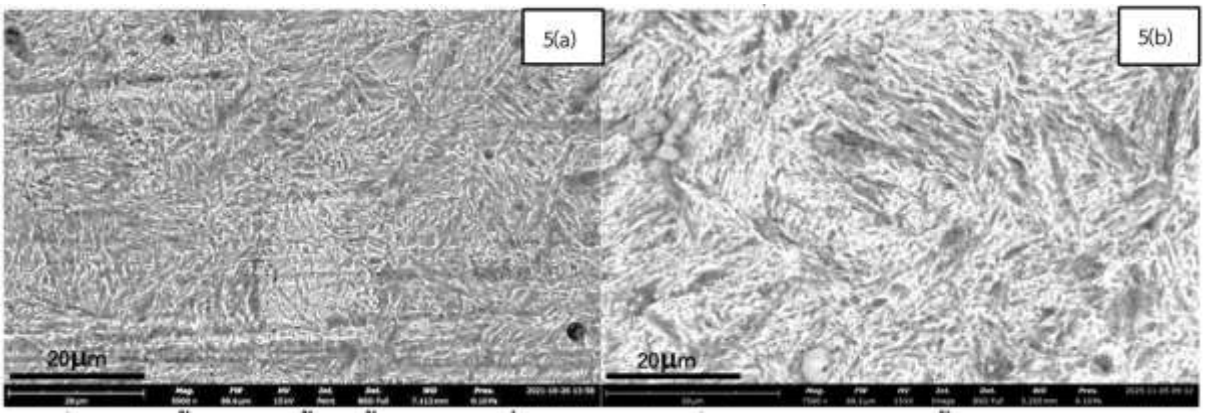
ผลการวิเคราะห์พื้นผิวและโครงสร้างมหภาคและจุลภาค

จากการตรวจสอบลักษณะทางมหภาคของชิ้นงานหลังการชุบแข็งและการอบคืนตัว ไม่พบร่องรอยการแตกร้าวหรือความเสียหายจากการทดสอบสารแทรกซึม (Dye Penetrant Testing: PT) ตามมาตรฐาน ASTM E165/E165M แสดงว่าชิ้นงานยังคงสภาพโครงสร้างได้ดีภายใต้เงื่อนไขการชุบที่ใช้ในการทดลอง

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วย SEM (ภาพที่ 5) พบว่ากลุ่มชุบน้ำมันมีลักษณะโครงสร้างแบบ lath-like ที่ค่อนข้างละเอียดและสม่ำเสมอ ขณะที่กลุ่มชุบน้ำมีโครงสร้างที่กระจายตัวไม่สม่ำเสมอมากกว่า และพบความแตกต่างของโครงสร้างในบางบริเวณ ซึ่งอาจเกิดจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วและไม่คงที่ของการชุบด้วยน้ำ

โครงสร้างแบบ lath-like ที่พบในกลุ่มชุบน้ำมันมีแนวโน้มสอดคล้องกับ tempered martensite (Krauss, 1999) ซึ่งมักสัมพันธ์กับค่าความแข็งที่ดี อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ในงานนี้อาศัยภาพ SEM เป็นหลัก และยังไม่มีการยืนยันชนิดของเฟสด้วยวิธีอื่น เช่น XRD หรือการวัดความแข็งตามความลึก ดังนั้นจึงควรใช้ผลนี้เป็นเพียงข้อมูลสนับสนุน

โครงสร้าง tempered martensite มีดิสโลเคชันสูงและมีคาร์ไบด์ขนาดละเอียด ซึ่งช่วยเพิ่มความต้านทานการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันและส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้น (Krauss, 1999) แนวโน้มนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบความแข็งที่พบว่ากลุ่มชุบน้ำมันมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าและมีการกระจายตัวต่ำกว่า โดยรวม แม้จะยังไม่สามารถยืนยันชนิดของโครงสร้างได้อย่างชัดเจน แต่ผล SEM สามารถใช้อธิบายแนวโน้มที่พบจากการทดสอบความแข็งได้ในระดับหนึ่ง



ภาพที่ 5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานมีดหลังการชุบแข็งและอบคืนตัวจาก SEM: (a) ชุบด้วยน้ำ และ (b) ชุบด้วยน้ำมัน (กำลังขยาย 5,900× และ 7,500×; accelerating voltage 15 kV; scale bar = 20 µm)

การอภิปรายผล

ผลของตัวกลางชุบต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาค

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวกลางชุบ (Quenchants) และรูปแบบกระบวนการชุบมีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน โดยกลุ่มชุบแข็งด้วยน้ำมันให้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มชุบแข็งด้วยน้ำ อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบทางสถิติพบว่ายังไม่ถึงระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Welch's t-test, $p = 0.065$) แต่มีขนาดอิทธิพลในระดับสูง (Cohen's $d = 1.21$) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึง ความสำคัญเชิงปฏิบัติ (Practical significance) ของความแตกต่างดังกล่าว

ในเชิงโลหะวิทยา ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดที่ว่าอัตราการเย็นตัวของตัวกลางชุบมีผลโดยตรงต่อการแปรสภาพเฟสและการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ในเหล็กกล้า AISI 5160 (Apichai, 2020; Sudiyanto et al., 2021; Samuel & Prabhu, 2022; López-García et al., 2019) โดยการชุบด้วยน้ำมีแนวโน้มก่อให้เกิดอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วและไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวและแกนกลางของชิ้นงาน ซึ่งสัมพันธ์กับการสะสมของความเค้นตกค้างและความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาค (Samuel & Prabhu, 2022)

อย่างไรก็ตาม ควรพิจารณาว่าในการทดลองนี้ ความแตกต่างของผลลัพธ์ไม่ได้เกิดจากชนิดของตัวกลางชุบเพียงปัจจัยเดียว แต่ยังได้รับอิทธิพลจากรูปแบบกระบวนการชุบร่วมด้วย โดยกลุ่มชุบน้ำมันใช้

วิธีการจุ่มแบบเต็มตัว (Full immersion) ขณะที่กลุ่มชุบน้ำใช้การจุ่มเฉพาะคมร่วมกับการจุ่มแบบเป็นจังหวะ (Intermittent quenching) ดังนั้น ผลลัพธ์ที่ได้จึงควรถูกตีความในลักษณะของ การเปรียบเทียบกระบวนการเชิงปฏิบัติ (Practical process comparison) มากกว่าการแยกอิทธิพลของตัวกลางชุบเพียงอย่างเดียว

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคจาก SEM สนับสนุนแนวโน้มดังกล่าว โดยพบว่ากลุ่มชุบน้ำมันมีลักษณะโครงสร้างแบบ lath-like ที่มีความละเอียดและสม่ำเสมอมากกว่า ซึ่ง มีแนวโน้มสอดคล้องกับโครงสร้าง tempered martensite ภายหลังการชุบแข็งและการอบคืนตัว โครงสร้างดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะค่าความแข็ง เนื่องจากมีความหนาแน่นของดิสโลเคชันสูงและมีการตกผลึกของคาร์ไบด์ขนาดละเอียดที่ช่วยขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Krauss, 1999)

ในทางตรงกันข้าม กลุ่มชุบน้ำแสดงลักษณะโครงสร้างที่มีความไม่สม่ำเสมอมากกว่า ซึ่งอาจเป็นผลจากอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วและมีความแปรผันสูง ส่งผลให้การแปรสภาพเฟสเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอภายในชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม ควรเน้นว่าการตีความโครงสร้างจุลภาคในงานวิจัยนี้อาศัยการสังเกตจาก SEM เป็นหลัก และยังไม่ได้รับการยืนยันเชิงปริมาณด้วยเทคนิคเพิ่มเติม เช่น X-ray diffraction (XRD) ดังนั้นจึงควรพิจารณาเป็น หลักฐานเชิงสนับสนุน (Supportive evidence) มากกว่าข้อสรุปเชิงยืนยัน

นัยเชิงประยุกต์ต่ออุตสาหกรรมการผลิตมีดชุมชน

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ตัวกลางชุบชนิดน้ำมันร่วมกับบ่อชุบที่ออกแบบตามหลักสมดุลพลังงาน สามารถเพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการชุบแข็งในระดับอุตสาหกรรมชุมชน โดยช่วยควบคุมอัตราการเย็นตัวอย่างเหมาะสม ลดความแปรปรวนของโครงสร้างจุลภาค และส่งผลให้ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์มีความสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์คุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (Thai Industrial Standards Institute, 2003) แม้ผลการทดสอบทางสถิติจะยังไม่ถึงระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ($p = 0.065$) แต่กลุ่มชุบน้ำมันให้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงกว่า มีค่าการกระจายตัวต่ำกว่า และมีขนาดอิทธิพลในระดับสูง สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของระบบในการปรับปรุงกระบวนการผลิตในเชิงปฏิบัติ โดยเฉพาะในงานที่ต้องการความสม่ำเสมอของคุณภาพมากกว่าการเพิ่มค่าความแข็งเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ การออกแบบที่ใช้วัสดุหาได้ในท้องถิ่นและมีต้นทุนไม่สูง ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่เอื้อต่อการยอมรับเทคโนโลยีในระดับชุมชน ทำให้ผู้ผลิตสามารถนำแนวทางดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ได้จริงโดยไม่เพิ่มภาระด้านการลงทุนอย่างมีนัยสำคัญ

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและพัฒนาบ่อชุบแข็งด้วยน้ำมันสำหรับการผลิตมีดชุมชน โดยอาศัยหลักสมดุลพลังงานในการกำหนดปริมาตรสารชุบ ผลการคำนวณระบุว่าปริมาตรน้ำมันขั้นต่ำประมาณ 2.0 ลิตรต่อรอบการชุบ และได้พัฒนาบ่อชุบที่มีปริมาตรใช้งานจริง 6 ลิตร เพื่อเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนและความปลอดภัย โดยอุณหภูมิน้ำมันระหว่างการใช้งานต่อเนื่องไม่เกิน 82 °C ซึ่งต่ำกว่าจุดวาบไฟอย่างปลอดภัย

ผลการประเมินที่ระดับชิ้นงาน ($n = 6$ ต่อกลุ่ม) พบว่า กลุ่มชุบน้ำมันให้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มชุบน้ำ (54.67 ± 1.31 เทียบกับ 52.80 ± 1.75 HRC) และมีความแปรปรวนต่ำกว่า (CV = 2.40% เทียบกับ 3.31%) แม้ผลทางสถิติยังไม่ถึงระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ($p = 0.065$) แต่มีขนาดอิทธิพลในระดับสูง

(Cohen's d = 1.21) สะท้อนถึงศักยภาพของระบบในเชิงปฏิบัติ ผลการวิเคราะห์ SEM สนับสนุนแนวโน้มดังกล่าว โดยพบโครงสร้างแบบ lath-like ที่มีความละเอียดและสม่ำเสมอ ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกับ tempered martensite

ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งหน่วงความร้อน (thermal buffer) ช่วยลดความผันผวนของอุณหภูมิและเพิ่มความสม่ำเสมอของสมบัติเชิงกล ซึ่งเอื้อต่อการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมชุมชน อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ยังสะท้อนอิทธิพลร่วมของตัวกลางชุบและรูปแบบกระบวนการ อีกทั้งยังไม่ได้วัด cooling curve อย่างเป็นระบบ และยังไม่มีการติดตามผลในสายการผลิตจริง สำหรับงานวิจัยในอนาคต ควรใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเพื่อแยกอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ วัด cooling curve ด้วยเครื่องมือที่เหมาะสม ประเมินสมบัติเชิงกลเพิ่มเติม และติดตามอัตราของเสียในสภาพการใช้งานจริง เพื่อพัฒนาเป็นแนวทางเชิงวิศวกรรมสำหรับการยกระดับการผลิตในวงกว้าง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่สนับสนุนสถานที่และเครื่องมือวิจัย และขอขอบคุณ กลุ่มตีมีดบ้านม่วงหวาน อำเภอน้ำพอง จังหวัดขอนแก่น สำหรับข้อมูลกระบวนการผลิตและความร่วมมือในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ ซึ่งมีส่วนสำคัญยิ่งในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

เอกสารอ้างอิง

Apichai, P. (2020). Effects of quenchants on microstructures and mechanical properties of steel grade AISI 5160. *Journal of Metals, Materials and Minerals, 30*(3), 15–23. https://doi.org/10.55713/jmmm.v30i3.631

ASTM International. (2007). *ASTM D6710-02(2007): Standard guide for evaluation of hydrocarbon-based quench oils*. ASTM International.

ASTM International. (2023a). *ASTM E165/E165M-23: Standard practice for liquid penetrant testing for general industry*. ASTM International.

ASTM International. (2023b). *ASTM E407-23: Standard practice for microetching metals and alloys*. ASTM International.

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.

Dhinnabutra, P., & Nansaang, S. (2022). Development hardening process of big knife: Case study: Muang Wan knife products, Nam Phong District, Khon Kaen Province. In *Proceedings of the Conference of Industrial Engineering Network (IE NETWORK 2022)* (pp. 405–411).

Dossett, J. L. (2020). Transformation of austenite and quenching of steel. In *Practical heat treating: Basic principles* (pp. 55–78). ASM International. https://doi.org/10.31399/asm.tb.phtbp.t59310055

FM Global. (2022). *Data Sheet 7-41: Heat treating of materials using oil quenching and molten salt baths*. FM Global Property Loss Prevention Data Sheets. https://www.fm.com

Krauss, G. (1999). Martensite in steel: Strength and structure. *Materials Science and Engineering: A, 273–275*, 40–57. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00288-9

López-García, R. D., García-Pastor, F. A., Maldonado-Reyes, A., Jiménez-Gómez, M. A., & Rodríguez-García, J. A. (2019). Analysis of the effect of immersion rate on the distortion and residual stresses in quenched SAE 5160 steel using FEM. *Journal of Materials Research and Technology, 8*(6), 5557–5571. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.024

Lozano, D. E., Martínez-Cázares, G. M., & Bedolla-Gil, Y. (2024). Metallurgical fundamentals of quenching. In G. E. Totten, R. S. Otero, X. Luo, & L. C. F. Canale (Eds.), *ASM Handbook, Vol. 4F: Quenchants and quenching technology* (pp. 3–25). ASM International. https://doi.org/10.31399/asm.hb.v4F.a0006995

MacKenzie, D. S. (2024). Calculating quench tank size for continuous furnaces. *Gear Solutions*. https://gearsolutions.com/departments/hot-seat/calculating-quench-tank-size-for-continuous-furnaces/

Montgomery, D. C. (2019). *Design and analysis of experiments*. (10th ed.). John Wiley & Sons.

Ramesh, G., & Prabhu, K. N. (2014). Wetting and cooling performance of mineral oils for quench heat treatment of steels. *ISIJ International, 54*(6), 1426–1435. https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.1426

Rhayim, T. (2010). *A study of community handicraft products of knife-making group in the middle region of Thailand*. https://so01.tci-thaijo.org/index.php/ajnu/article/view/26372

Samuel, A., & Prabhu, K. N. (2022). Residual stress and distortion during quench hardening of steels: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance, 31*(7), 5161–5188. https://doi.org/10.1007/s11665-022-06667-x

Sudiyanto, A., Amalia, Y., & Pujiyulianto, E. (2021). The effect of varying quenching media on cooling time and microstructures of leaf spring steel AISI 5160. *AIP Conference Proceedings, 2363*(1), 030024. https://doi.org/10.1063/5.0066030

Thai Industrial Standards Institute. (2003). *TCPS 82/2546: Thai community product standard for knives*. TISI.

The World Bank. (2023). *Employment in agriculture (% of total employment) (modeled ILO estimate) – Thailand*. World Development Indicators. https://data.worldbank.org/indicator/SL.AGR.EMPL.ZS?locations=TH

Totten, G. E., Bates, C. E., & Clinton, N. A. (1993). *Handbook of quenchants and quenching technology*. ASM International.

Welch, B. L. (1947). The generalization of 'Student's' problem when several different population variances are involved. *Biometrika, 34*(1/2), 28–35. https://doi.org/10.2307/2332510