

ผลการเชื่อมพอกแข็งด้วยลวดเชื่อม DUR 65 และการทำกรรมวิธีทางความร้อนที่ส่งผลต่อความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูง

16%wt Cr - 2% Mo

Effect of Hardface Welding Using DUR 65 Electrode and Heat Treatment on Hardness and Microstructure of High Chromium Cast Iron 16%wt Cr - 2% Mo

ปริญญวัตร ทินบุตร¹ สำเภา โยธี^{1*} ธงชัย เครือผือ² สราวุธ บุตรพรหม¹

รัฐพล ภาวูธ¹ และอิสรา โคตา¹

Parinyawatr Dhinnabutra¹, Sumpao Yotee^{1*}, Thongchai Khrueaphue², Sarawut Butprom¹,
Rattapon Pawut¹, and Isara Kota¹

¹สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมเชื่อมประกอบ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

²สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

¹Department of Welding Technical Education, Faculty of Technical Education,
Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen Campus

²Program in Production Technology, Faculty of Agricultural and Industrial
Technology, Phetchabun Rajabhat University

*Corresponding author: sumpao.yo@rmuti.ac.th

Received: 5 February 2025 / Revised: 13 April 2025 / Accepted: 17 April 2025

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาผลการเชื่อมพอกแข็งและกรรมวิธีทางความร้อนที่ส่งผลต่อความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูง กระบวนการทดลอง 4 กระบวนการเริ่มจากอบอ่อนชิ้นทดลอง จากนั้นเชื่อมพอกแข็งด้วยลวดเชื่อม DUR 65 ชุบแข็งและอบคืนตัวตามลำดับ จากนั้นวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ผลการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมพบคาร์ไบด์ชนิด M7C3 สลับกับโครงสร้างยูเทคติก ส่วนบริเวณโลหะงานของทั้ง 4 กระบวนการพบคาร์ไบด์ชนิด M7C3 โครงสร้างเนื้อพื้นเปลี่ยนไปตามกระบวนการทางความร้อน โดยชิ้นทดลองที่ผ่านการอบอ่อนพบโครงสร้างเฟิร์สไลต์และการตกตะกอนคาร์ไบด์ชนิด Cr23C6 ส่วนชิ้น

ทดลองที่ผ่านการเชื่อม การชุบแข็ง และการอบคืนตัว พบโครงสร้างมาร์เทนไซต์และคาร์ไบด์ชนิด Cr₂₃C₆ การทดสอบความแข็งพบว่า การเชื่อมและการชุบแข็งส่งผลต่อค่าความแข็งบริเวณโลหะเชื่อมที่ไม่แตกต่างกันส่วนการอบคืนตัวส่งผลให้ค่าความแข็งโลหะเชื่อมลดลง บริเวณโลหะฐานพบว่ากระบวนการอบอ่อนส่งผลให้ค่าความแข็งต่ำสุด และกระบวนการชุบแข็ง ส่งผลให้มีค่าความแข็งสูงสุด อย่างไรก็ตามการเกิดคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูงทำให้ชิ้นทดลองมีความแข็ง เพราะ ส่งผลให้เกิดรอยแตกในชิ้นทดลองที่ผ่านการเชื่อม การชุบแข็ง และการอบคืนตัว

คำสำคัญ: เชื่อมพอกแข็ง, เหล็กหล่อโครเมียมสูง, กระบวนการทางความร้อน

Abstract: This research investigates the effects of hardface welding and heat treatment on the hardness and microstructure of high chromium cast iron. The experimental process consists of four process. First, annealing of the Specimens. Next, hardface welding using DUR 65 welding electrode, hardening, and tempering process. Finally, Microstructure analysis is conducted using optical microscope and Vickers hardness testing. The experimental results reveal that the microstructure in the weld metal zone consists of carbides M₇C₃ alternating with eutectic structures. However, the base metal zone of all four processes exhibit carbides M₇C₃, Microstructure of matrix varies with the heat treatment process. Annealing specimens show a pearlite structure and Cr₂₃C₆ carbides precipitated, while those specimen to welding, hardening, and tempering process show a martensite structure and Cr₂₃C₆. Hardness testing indicates that welding and hardening have similar effects on the hardness of the weld metal zone, whereas tempering reduces the hardness. In the base metal zone, annealing specimen results in the lowest hardness, while hardening processes result in the highest hardness. However, the formation of high-hardness carbides makes the pieces brittle, resulting in cracks in the specimen that have undergone welding, hardening, and tempering process.

Keywords: Hardface Welding, High Chromium Cast Iron, Heat Treatment

1. บทนำ

การเชื่อมซ่อม (Repair welding) เป็นหนึ่งในวิธีการการที่ถูกนำมาใช้ในการซ่อมแซมเพื่อ ชดเชยเนื้อโลหะที่เกิดการสึกหรอจากการใช้งานกระบวนการเชื่อมซ่อมเพื่อเพิ่มปริมาณโลหะ บนพื้นผิวเหล็กกล้าสามารถทำได้หลายวิธี [1] ที่ผ่านมามีผลการศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมซ่อม พอกผิวแข็งเหล็กกล้า [1-5] การเชื่อมพอกแข็งซ่อมแซมรางรถไฟ [6-8] การเชื่อมพอกแข็งซ่อมแซมเหล็กหล่อ [9-11] และการเชื่อมพอกแข็งเหล็กหล่อโครเมียมสูง [12-14] เหล็กหล่อโครเมียมสูง มีบทบาทสำคัญในกระบวนการผลิตและถูกนำมาใช้กับงานอุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เป็นต้น ผลิตเป็น

แม่พิมพ์ ลูกกลิ้ง ลูกบด หรืออุปกรณ์ชนิดอื่นๆ ที่ต้องการการรับแรงเสียดสีสูง เนื่องจากมีคาร์ไบด์ที่มีค่าความแข็งสูง ทำให้เหล็กหล่อโครเมียมสูงทนทานต่อการสึกหรอ

เหล็กหล่อโครเมียมสูง ใช้งานในลักษณะงานที่ต้องรับแรงเสียดสี มีโอกาสทำให้เกิดวัสดุเกิดการสึกหรอหรือแตกหักได้หากสามารถเชื่อม ซ่อมแซมเหล็กหล่อโครเมียมสูงนี้ได้ จะช่วยลดทั้งต้นทุนและระยะเวลาในการผลิต ส่วนการที่จะ สามารถเชื่อมเหล็กหล่อโครเมียมสูงนั้นเป็นเรื่องที่ยาก เนื่องจากมีข้อจำกัดอยู่หลายข้อ จึงทำให้การ เชื่อมที่ไม่ถูกต้องนั้นอาจจะยังทำให้วัสดุเกิดความเสียหายได้มากขึ้นซึ่งการเชื่อมเหล็กหล่อ จำเป็นต้อง ควบคุมตัวแปรในการเชื่อมเช่น การให้ความร้อนก่อน-หลังเชื่อม การเลือกลวดเชื่อม การอบคืบตัว และการควบคุมอัตราการเย็นตัวเพื่อให้ชิ้นทดลองเชื่อมมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งาน การเลือกใช้ตัวแปรในการเชื่อม เช่น กระแสไฟ ความเร็วเชื่อม และเทคนิคการส่ายลวดเชื่อม ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและค่าความแข็ง [12] นอกจากนี้การเลือกเลือกลวดเชื่อมก็ส่งผลอย่างมากต่อค่าความแข็ง เช่น การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมพอกแข็งที่มีปริมาณคาร์บอน และโครเมียมสูงจะได้โครงสร้างจุลภาคที่คาร์ไบด์ชนิด M_7C_3 [12-13] และคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ ซึ่งมีค่าความแข็งสูงเหมาะสำหรับการใช้งานที่รับแรงเสียดสี

อย่างไรก็ตามเหล็กหล่อโครเมียมสูง ก่อนที่จะนำไปใช้งานต้องผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการโดยพบว่าการอบคืนตัวหลังจากการชุบแข็งส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น [15] นอกจากนี้การชุบแข็งเหล็กหล่อโครเมียมสูงจะมีอุณหภูมิในดัดเหล็กล้าง การอบคืนตัวหลังการชุบแข็งอุณหภูมิในดัดจะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ได้มากขึ้นและส่วนหนึ่งจะเกิดจะเกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ [15] ทำให้ค่าความแข็งสูงขึ้นอีกด้วย

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาสรุปได้ว่าการเชื่อมพอกเหล็กหล่อโครเมียมสูงต้องใช้ตัวแปรในการเชื่อมที่เหมาะสมและต้องทำกรรมวิธีทางความร้อนก่อนนำไปใช้งาน ผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาการเชื่อมซ่อมเหล็กหล่อโครเมียมสูงโดยการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมพอกแข็ง DUR65 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีประกอบด้วยคาร์บอนและโครเมียมสูงซึ่งก่อตัวเป็นคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูงเหมาะกับงานที่มีการเสียดสี ศึกษาการชุบแข็งและการอบคืนตัวหลังจากการเชื่อม เพื่อเป็นแนวทางในการเชื่อมเหล็กหล่อโครเมียมสูง ให้มีคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมกับการใช้งานและเป็นแนวทางเพื่อพัฒนาต่อกรรมวิธีการเชื่อมเหล็กหล่อ โครเมียมสูงในภาคอุตสาหกรรม

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการเชื่อมซ่อมเหล็กหล่อโครเมียมสูงโดยการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมพอกแข็ง DUR65
- 2) เพื่อศึกษาการชุบแข็งและการอบคืนตัวหลังจากการเชื่อม

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมชิ้นทดลอง

ชิ้นทดลองทดลองเป็นเหล็กหล่อโครเมียมสูงมีส่วนผสมทางเคมี 2.91%C, 15.91%Cr, 0.47%Si, 0.55%Mn, 2.98%Mo, Fe% Balance ตัดชิ้นทดลองขนาด กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร หนา 8 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น เหล็กหล่อที่นำมาทดลองผ่านกระบวนการทางความร้อนมาก่อนคือผ่านการชุบแข็งและการอบคืนตัว ดังนั้นต้องอบอ่อน (Anneal) ชิ้นทดลองที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้เย็นตัวภายในเตา เพื่อปรับโครงสร้างจุลภาคให้มีความสม่ำเสมอ ดังตารางที่ 1

3.2 ขั้นตอนการเชื่อม

อุ่นชิ้นทดลองก่อนเชื่อม (Pre-heat) ที่อุณหภูมิ 650-700 องศาเซลเซียส จากนั้นเชื่อมด้วยลวดเชื่อมพอกแข็งDUR 65 ขนาด 4 มิลลิเมตร มีส่วนผสมทางเคมี 5%C, 5.5%Cr, Fe% Balance ด้วยกระแสไฟ 160 แอมแปร์ หลังจากการเชื่อมเคาะแนวเชื่อมคลายความเค้น (peening) และให้ชิ้นทดลองเย็นตัวในอากาศสภาวะปกติ

3.3 ขั้นตอนการชุบแข็งและอบคืนตัว

กระบวนการชุบแข็ง ให้ความร้อนชิ้นทดลองด้วยเตาอบชุบโลหะที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส อบแช่เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นให้เย็นตัวในน้ำมัน กระบวนการอบคืนตัวให้ความร้อนชิ้นทดลองที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ให้ชิ้นทดลองเย็นตัวในอากาศ ดังตารางที่ 1

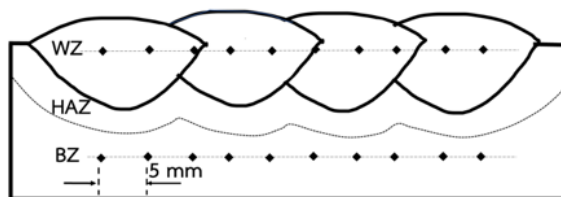
ตารางที่ 1 ชิ้นทดลองที่ผ่านการเชื่อมและการทำวิธีทางความร้อน

ชิ้นทดลอง	กระบวนการ			
	อบอ่อน	เชื่อม	ชุบแข็ง	อบคืนตัว
1	✓			
2	✓	✓		
3	✓	✓	✓	
4	✓	✓	✓	✓

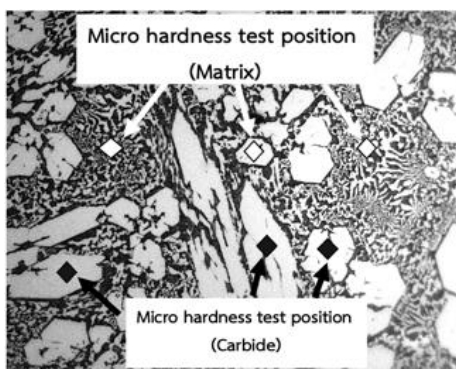
3.4 ทดสอบค่าความแข็ง

ตัดชิ้นทดลองตามขวางรอยเชื่อมตามความหนาขนาดกว้าง 15 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร การเตรียมชิ้นทดลองสำหรับทดสอบค่าความแข็งเริ่มจากขัดการปรับผิวชิ้นทดลองด้วยกระดาษทรายเบอร์ P200, P400, P600, P 800 และ P1000 ขัดผิวละเอียดด้วยผงอลูมินาขนาด 1 ไมโครเมตร ขัดบนผ้าสักหลาดด้วยเครื่องขัดแบบจานหมุนให้ผิวเรียบมันวาว ขั้นตอนสุดท้ายกัดชิ้นทดลองด้วยกรดเฟอริก-คลอไรด์เข้มข้น (FeCl₃) เป็นเวลา 1-3 วินาที เพื่อให้สามารถเห็นโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อม (WZ) และบริเวณโลหะฐาน (BZ) ซึ่งบริเวณโลหะฐาน ในการทดลองนี้รวมถึงบริเวณเขตที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) เนื่องจากชิ้นทดลองมีความหนาเพียง 8 มิลลิเมตร ให้ความร้อนจากการเชื่อมส่งผลต่อ

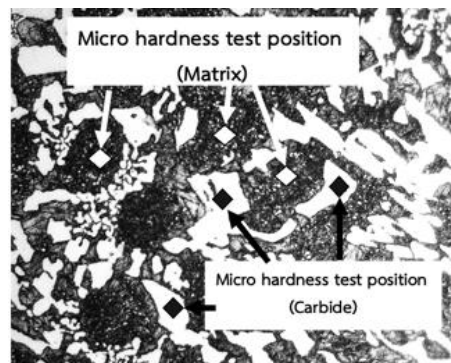
การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคขึ้นทดลองทั้งชิ้น การทดสอบความแข็งใช้เครื่องทดสอบแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness test) ตำแหน่งในการทดสอบความแข็งดังรูปที่ 1 โดยทดสอบบริเวณโลหะเชื่อมและบริเวณโลหะฐานบริเวณละ 10 จุด ในการทดสอบความแข็งเพื่อเปรียบเทียบค่าแข็งของคาร์ไบด์ (Carbide) และเนื้อพื้น (Matrix) ใช้การทดสอบความแข็งแบบไมโคร (Micro hardness test) ใช้น้ำหนักกดในการทดสอบ 0.1 กรัม (HV0.1) ตำแหน่งทดสอบเนื้อโลหะเชื่อมดังรูปที่ 2 (ก) และตำแหน่งทดสอบโลหะฐานดังรูปที่ 2 (ข)



รูปที่ 1 ตำแหน่งทดสอบความแข็ง



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 ตำแหน่งทดสอบความแข็งแบบไมโคร

3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

การขัดผิวเตรียมผิวชิ้นทดลองสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคมีขั้นตอนเช่นเดียวกับขั้นตอนการทดสอบความแข็ง ในส่วนของขั้นตอนการกัดกรดเพื่อให้เห็นโครงสร้างจุลภาคนั้น ผู้วิจัยกัดชิ้นทดลองด้วยกรดเพอร์ริกคลอไรด์เข้มข้น 1-2 วินาทีเพื่อให้เห็นโครงสร้างพื้นที่เป็นมาร์เทนไซต์และเพิ่มเวลาในการกัดด้วยกรด 3-4 วินาที เพื่อให้เห็นการตกตะกอนของคาร์ไบด์ (Carbide precipitation) จากนั้นใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) ถ่ายภาพเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคขึ้นทดลองเปรียบเทียบในแต่ละกระบวนการทางความร้อน

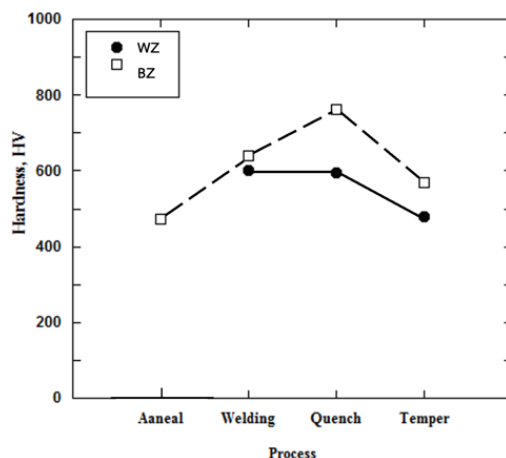
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติใช้การทดสอบความแปรปรวนแบบทางเดียว (One way anova) และการทดสอบค่าเฉลี่ยรายคู่ด้วยวิธี Tukey method

4. ผลการวิจัยและอภิปราย

4.1 ความแข็งโดยรวมของชิ้นทดลอง

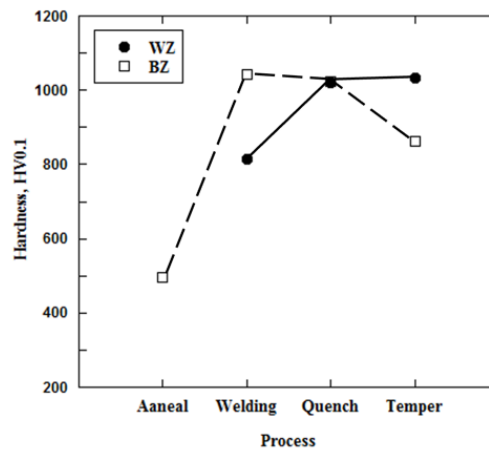
ความแข็งเนื้อโลหะเชื่อมมีค่าความแข็ง 601 HV ในกระบวนการชุบแข็งชิ้นทดลองมีความแข็ง 593 HV ค่าความแข็งใกล้เคียงกับชิ้นทดลองเชื่อม ในส่วนของกระบวนการอบคืนตัวพบค่าความแข็งลดลงอยู่ที่ 478 HV ในส่วนของค่าความแข็งบริเวณโลหะฐานนั้น ชิ้นทดลองที่ผ่านการอบอ่อนมีค่าความแข็งต่ำสุด 472 HV โลหะฐานมีความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 641 HV เมื่อผ่านการเชื่อมความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 671 HV เมื่อผ่านการชุบแข็งและความแข็งลดลง มีค่า 568 HV เมื่อผ่านการอบคืนตัว กราฟความแข็งแสดงผลดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความแข็งชิ้นทดลองโดยรวม

4.2 ความแข็งเนื้อพื้นแบบไมโคร

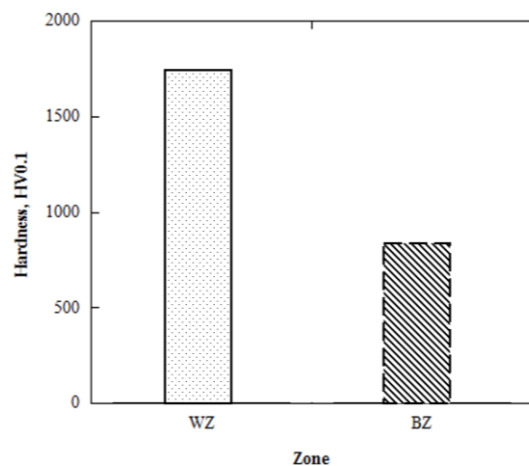
การทดสอบความแข็งแบบไมโคร บริเวณเนื้อพื้นของเนื้อโลหะเชื่อมแสดงผลดังรูปที่ 4 พบว่า ชิ้นทดลองเชื่อม มีค่าความแข็งเฉลี่ย 813.6 HV ชิ้นทดลองที่ผ่านการชุบแข็งและชิ้นทดลองที่ผ่านการอบคืนตัว ค่าความแข็งเฉลี่ย 1020.6 HV และ 1034.2 HVตามลำดับ ส่วนบริเวณโลหะฐาน พบว่าชิ้นทดลองที่ผ่านการอบอ่อน มีค่าความแข็งเฉลี่ย 495.8 HV ชิ้นทดลองที่ผ่านการเชื่อม และการชุบแข็ง มีค่าความแข็งเฉลี่ย 1022.2 - 1042.8 HV ตามลำดับและชิ้นทดลองที่ผ่านการอบคืนตัว ความแข็งลดลง มีค่าเฉลี่ย 863.4 HV



รูปที่ 4 ความแข็งเนื้อพื้น

4.3 ความแข็งคาร์ไบด์

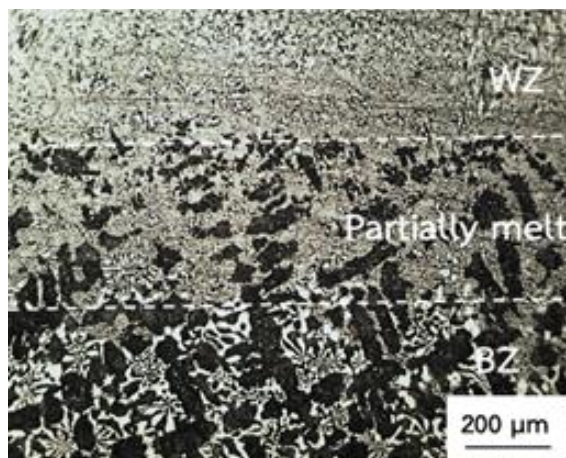
ผลการทดสอบความแข็งคาร์ไบด์แสดงผลดังรูปที่ 5 พบว่า คาร์ไบด์บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมมีค่าความแข็งเฉลี่ย 1738 HV ซึ่งค่าความแข็งสูงกว่าคาร์ไบด์บริเวณโลหะฐานเฉลี่ย 864 HV



รูปที่ 5 ความแข็งคาร์ไบด์

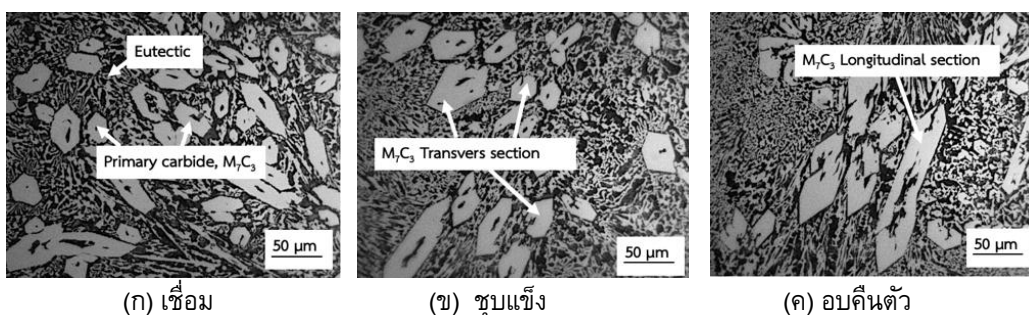
4.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ความร้อนจากการเชื่อมและส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกันระหว่างโลหะเชื่อมกับโลหะฐานแสดงให้เห็นความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาค 3 บริเวณ คือ บริเวณโลหะเชื่อม บริเวณหลอมละลายบางส่วน (Partially Melt) และบริเวณโลหะฐาน ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคที่แสดงความแตกต่างในแต่ละบริเวณ

บริเวณโลหะเชื่อมของชิ้นทดลองที่ผ่านกระบวนการเชื่อม การชุบแข็ง และการอบคืนตัวดังรูปที่ 7 (ก) และ(ข) พบเนื้อพื้นเป็นโครงสร้างยูเทคติก (Eutectic) [12] และพบคาร์ไบด์ปฐมภูมิ (Primary carbide) ชนิด M_7C_3 [12-14] มีลักษณะคล้ายรูปหกเหลี่ยมพบสองรูปแบบคือแบบตัดตามขวาง (transvers section) และตัดตามยาว(Longitudinal section) [14]



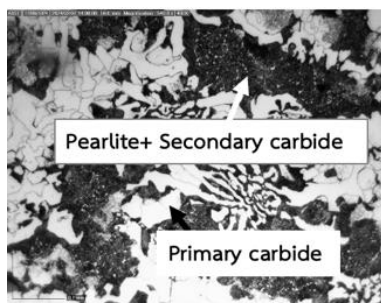
(ก) เชื่อม

(ข) ชุบแข็ง

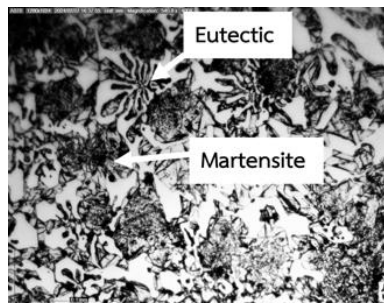
(ค) อบคืนตัว

รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อม

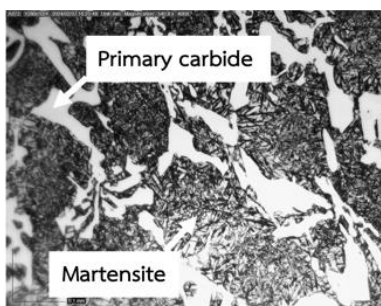
โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐาน รูปที่ 8 (ก) ชันทดลองที่ผ่านกระบวนการอบอ่อน โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยคาร์ไบด์และเนื้อพื้นเพอร์ไลต์ที่มีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิ (Secondary Carbide) ลักษณะเป็นก้อนกลมสีขาวแทรกตัวอยู่ [16] เมื่อผ่านกระบวนการเชื่อม รูปที่ 8 (ข) พบว่าเนื้อพื้นเปลี่ยนจากเพอร์ไลต์เป็นมาร์เทนไซต์จากการที่ชันทดลองได้รับความร้อนจากการเชื่อมและเย็นตัวในอากาศชั้นทดลองที่ผ่านการชุบแข็งรูปที่ 8 (ค) พบโครงสร้างมาร์เทนไซต์มากขึ้นเนื่องจากในกระบวนการชุบแข็งได้อบชันทดลองที่ 950 องศาเซลเซียสและชุบในน้ำมันซึ่งอัตราการเย็นตัวเร็วกว่าเย็นตัวในอากาศทำให้เกิดมาร์เทนไซต์มากกว่าชันทดลองที่ผ่านการเชื่อม ชันทดลองอบคืนตัวรูปที่ 8 (ง) พบว่ามาร์เทนไซต์มีลักษณะที่ละเอียดขึ้น บางส่วนมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างเพอร์ไลต์ละเอียด จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐานนั้นโครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงไปตามกระบวนการทางความร้อน การอบอ่อน การเชื่อม การชุบแข็ง และการอบคืนตัวส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น



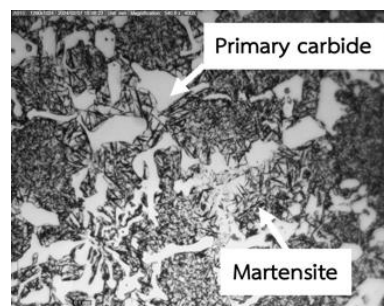
(ก) อบอ่อน



(ข) เชื่อม



(ค) ชุบแข็ง

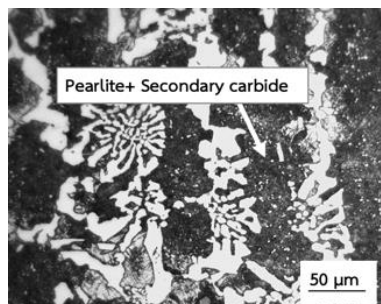


(ง) อบคืนตัว

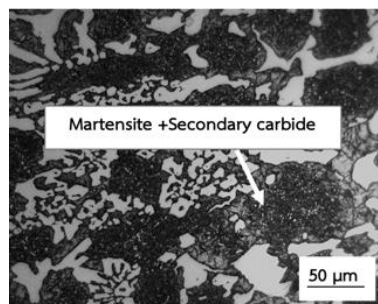
รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐาน

โดยทั่วไปการชุบแข็งและการอบคืนตัวเหล็กหล่อโครเมียมสูงเมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อนจะเกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ [15] ผู้วิจัยได้เพิ่มเวลาในการกักตุนชันทดลองด้วยกรด 3-4 วินาที

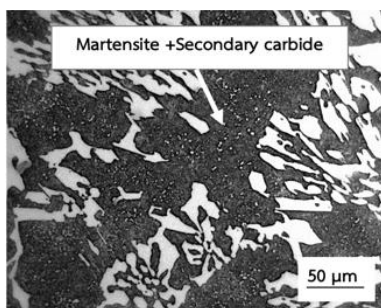
เพื่อให้เห็นการตกตะกอนของคาร์ไบด์ที่ได้ดังรูปที่ 9 พบการตกตะกอนของคาร์ไบด์แทรกในเนื้อพื้นมาร์เทนไซต์ ทั้ง 4 ชิ้น โดยเฉพาะชิ้นทดลองที่ผ่านการอบคืนตัวจะเกิดตกตะกอนของคาร์ไบด์มากขึ้น [15]



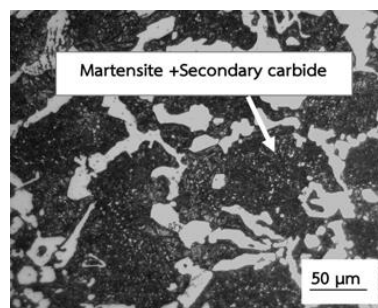
(ก) อบอ่อน



(ข) เชื่อม



(ค) ชุบแข็ง

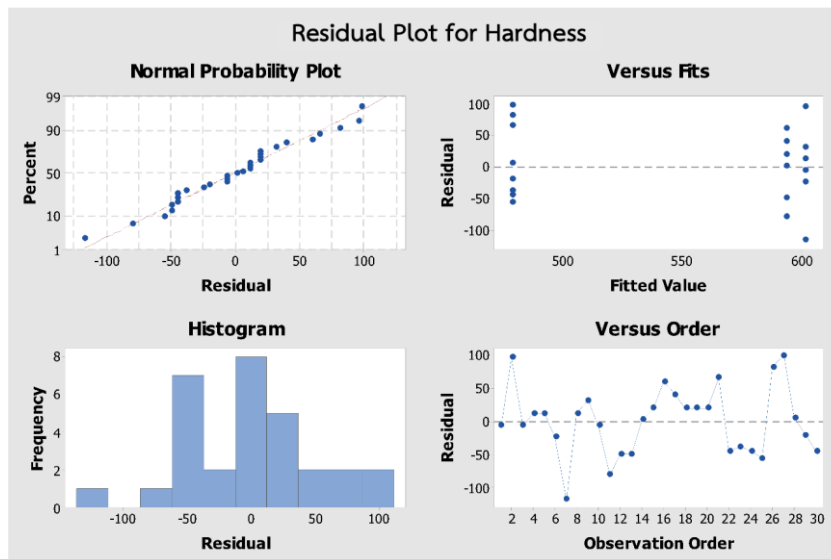


(ง) อบคืนตัว

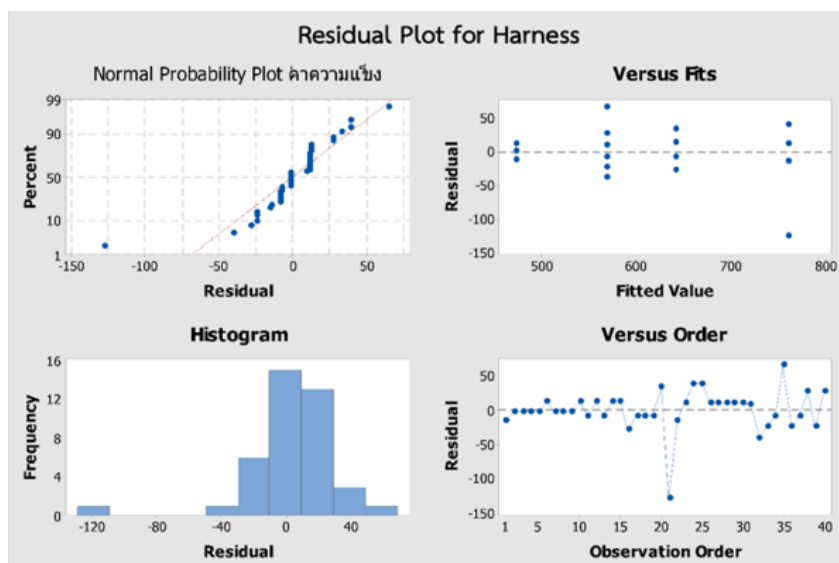
รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐานที่พบการตกตะกอนของคาร์ไบด์บริเวณเนื้อพื้น

4.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลจากการวิจัยได้จากการทดลองศึกษาปัจจัยของกระบวนการ ได้แก่ การอบอ่อน การเชื่อม การชุบแข็ง และการอบคืนตัว ที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง ได้เก็บข้อมูลความแข็งแต่ละบริเวณจำนวน 10 จุด นำข้อมูลมาวิเคราะห์สถิติ การวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมและบริเวณโลหะฐาน ดังรูปที่ 10 กราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) แสดงถึงข้อมูลที่กระจายตัวโดยมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง แสดงว่า ข้อมูลมีกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) การทดสอบส่วนตกค้างกับค่าพยากรณ์ (Versus Fits) เพื่อดูความอิสระของข้อมูล พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวจนละทิศทางไม่เป็นแนวโน้มหรือวัฏจักร สรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระกัน การทดสอบส่วนตกค้างกับค่าพยากรณ์ (Versus Order) เพื่อดูความอิสระของข้อมูล พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวมีทิศทางไม่เป็นแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระกัน ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลมีคุณภาพเพียงพอ สามารถนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนได้



(ก) บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม



(ข) บริเวณโลหะฐาน

รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูล

จากรูปที่ 10 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวน ปัจจัยของกระบวนการที่ส่งผลต่อความแข็งแรงบริเวณโลหะเชื่อม ได้ผลดังรูปที่ 11 ค่า P-value เข้าใกล้ 0.000 น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ปฏิเสธสมมติฐานหลัก

ยอมรับว่าสมมติฐานทางเลือกเป็นจริง สรุปได้ว่าปัจจัยด้านกระบวนการ ส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นทดลองที่แตกต่างกันอย่างน้อย 1 กระบวนการ ซึ่งต้องมีการวิเคราะห์เทียบแบบรายคู่ต่อไป

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
กระบวนการ	2	94180	47090	17.04	0.000
Error	27	74635	2764		
Total	29	168815			

รูปที่ 11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าความแข็งบริเวณโลหะเชื่อม

ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณโลหะเชื่อมแบบรายคู่ดังรูปที่ 12 สรุปได้ว่าความแข็งของเนื้อโลหะเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมและที่ผ่านการชุบแข็งมีค่าความแข็งไม่แตกต่างกัน ส่วนชิ้นทดลองที่ผ่านการอบคืนตัวมีค่าความแข็งที่ต่ำกว่าที่ความเชื่อมมัน 95%

Tukey Pairwise Comparisons				
กระบวนการ	N	Mean	Grouping	
เชื่อม	10	601.5	A	
ชุบแข็ง	10	593.4	A	
อบคืนตัว	10	478.8	B	

รูปที่ 12 ผลการวิเคราะห์เทียบความแตกต่างค่าความแข็งบริเวณโลหะเชื่อมแบบรายคู่
ด้วยวิธี Tukey method

ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนปัจจัยของกระบวนการที่ส่งผลต่อความแข็งบริเวณโลหะฐานได้ผลดังรูปที่ 13 ค่า P-value เข้าใกล้ 0.000 น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ยอมรับว่าสมมติฐานทางเลือกเป็นจริง สรุปได้ว่าปัจจัยด้านกระบวนการ ส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นทดลองที่แตกต่างกันอย่างน้อย 1 กระบวนการ ซึ่งต้องมีการวิเคราะห์เทียบแบบรายคู่ต่อไป

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
กระบวนการ	3	445221	148407	163.32	0.000
Error	36	32712	909		
Total	39	477933			

รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าความแข็งบริเวณโลหะฐาน

ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณโลหะฐานแบบรายคู่ดังรูปที่ 14 สรุปได้ว่าค่าความแข็งของโลหะฐาน ปัจจัยของกระบวนการทั้ง 4 ส่งผลต่อค่าความแข็งเฉลี่ยที่แตกต่างกัน ที่ความเชื่อมั่น 95% โดยค่าความแข็งเฉลี่ยขึ้นทดลองที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งมีค่าสูงที่สุด ความแข็งรองลงมาคือขึ้นทดลองที่ผ่านการเชื่อมและอบคืนตัว ส่วนขึ้นทดลองที่ผ่านการอบอ่อนมีค่าความแข็งต่ำที่สุด

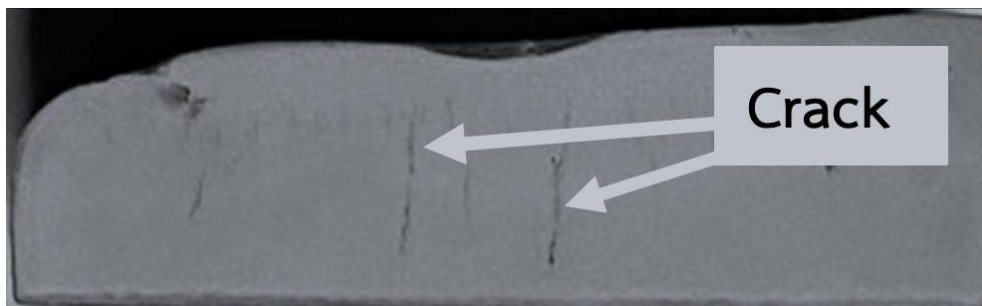
Tukey Pairwise Comparisons

กระบวนการ	N	Mean	Grouping
ชุบแข็ง	10	761.1	A
เชื่อม	10	641.10	B
อบคืนตัว	10	568.0	C
อบอ่อน	10	472.30	D

รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์เทียบความแตกต่างค่าความแข็งบริเวณโลหะฐานแบบรายคู่
ด้วยวิธี Tukey method

การเชื่อมเหล็กหล่อโครเมียมสูงด้วยลวดเชื่อมพอกแข็ง DUR65 ความแข็งของชั้นพอกผิวมีค่าความแข็งใกล้เคียงกับความแข็งบริเวณโลหะฐาน ชั้นแนวเชื่อมพอกแข็งสามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องชุบแข็ง เนื่องจากค่าความแข็งไม่แตกต่างกันเนื่องจากโครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์ไบด์ อย่างไรก็ตามในการวิจัยนี้จากการตรวจสอบรอยร้าวด้วยสารแทรกซึม (Penetrant test) พบปัญหาการแตกร้าวของชั้นทดลองจากกระบวนการเชื่อม ดังรูปที่ 15 การแตกร้าวเกิดจากส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อและลวดเชื่อมมีปริมาณคาร์บอนและโครเมียมในปริมาณมาก โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูง มีความเปราะ มีโอกาสแตกร้าวได้ง่าย ส่วนหนึ่งเกิดจากกระบวนการเชื่อมให้ชั้นทดลองเย็นตัวในอากาศชั้นทดลองอาจเย็นตัวเร็วเกินไป จำเป็นต้องให้ความร้อนหลังการเชื่อมเพื่อควบคุมการเย็นตัวหลังการเชื่อมให้มีอัตราการเย็นตัวที่ช้าลง นอกจากนี้ ยังสามารถนำเทคนิคการเชื่อมรองพื้น (Buttering) มาใช้

เนื่องจากการเชื่อมรองพื้นช่วยให้รอยเชื่อมมีความเหนียว ป้องกันการแตกร้าว [17] โดยสามารถเลือกใช้ลวดเชื่อมเหล็กกลุ่มนิเกิล (Ni base) เป็นชั้นแนวเชื่อมรองพื้นและเชื่อมทับด้วยลวดเชื่อมพอกแข็ง ซึ่งต้องศึกษาตัวแปรในการเชื่อมที่เหมาะสม



รูปที่ 15 การแตกร้าวของชิ้นทดลอง

5. สรุปผลการวิจัย

การเชื่อมและการชุบแข็งส่งผลต่อค่าความแข็งบริเวณโลหะเชื่อมที่ไม่แตกต่างกัน และการอบคืนตัวส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง ส่วนค่าความแข็งบริเวณโลหะฐาน ทั้ง 4 กระบวนการส่งผลต่อความความแข็งที่แตกต่างกัน ค่าความแข็งต่ำสุดคือกระบวนการอบอ่อน ความแข็งสูงสุดคือกระบวนการชุบแข็ง และความแข็งลดลงเมื่อผ่านการอบคืนตัวเช่นเดียวกับบริเวณโลหะเชื่อม

โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อมพบคาร์ไบด์ชนิด M_7C_3 สลับกับโครงสร้างยูเทคติก (Eutectic structure) ส่วนบริเวณโลหะฐานทั้ง 4 กระบวนการพบคาร์ไบด์ชนิด M_7C_3 ส่วนโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อพื้น (Matrix) เปลี่ยนไปตามกระบวนการทางความร้อน โดยชิ้นทดลองที่ผ่านการอบอ่อนพบโครงสร้างพื้นประกอบด้วย เฟอไรต์และการตกตะกอนคาร์ไบด์ชนิด $Cr_{23}C_6$ ส่วนชิ้นทดลองที่ผ่านการเชื่อม การชุบแข็ง และการอบคืนตัว พบโครงสร้างมาร์เทนไซต์และคาร์ไบด์ชนิด $Cr_{23}C_6$

พบรอยแตกในชิ้นทดลองที่ผ่านการเชื่อม การชุบแข็ง และการอบคืนตัว จากการที่โครงสร้างเนื้อโลหะเชื่อมและโลหะฐานเกิดโครงสร้างคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูง ส่งผลให้เกิดความเปราะ แตกร้าวได้ง่าย

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและสถานศึกษาเขตขอนแก่น สนับสนุนเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, สุรัตน์ ตรีวัฒน์พงศ์, สุริยา ประสมทอง และวราญา วัฒนจิตศิริ. (2559). อิทธิพลของการรองรับและการพอกผิวแข็งต่อสมบัติทางกล ของโลหะเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี*, 14(1), 77-86.
- [2] ภัสกร เลิศวิจิตรพันธุ์, พิเศษธีรวัฒน์ เจริญประดับ, ณรงค์เดช พัฒนไพบูลย์ และสิทธิพงษ์ แสงอินทร์. (2560). พฤติกรรมการสึกหรอแบบขีดขีดของลวดเชื่อมพอกผิวแข็งสแตนเลส 12 ในกระบวนการเชื่อม GMAW. *วารสารช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมไทย*, 3(2), 22-28.
- [3] อรรถกร จันทรชนะ, มนัส ศรีสวัสดิ์, ฤทธิชัย สังขทิพย์ และเจษฎา แก้ววิชิต. (2566). ผลกระทบของการเจือจางต่อความต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งหลายชั้น. *วารสารวิชาการ ปทุมวัน*, 13(36), 54-66.
- [4] ศิวัช สิทธิพงษ์, ประวิทย์ ไตวันนะ, อำนาจ สิทธิเจริญชัย และประวิทย์ พิพิธโกศลวงค์. (2560). การประเมินอัตราการกัดกร่อนของผิวเชื่อมพอกสแตนเลสเกรด X111-T5-K4 และ E71T-1CH8/T/9M-D. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 11(1), 23-33.
- [5] สุรัตน์ ตรีวัฒน์พงศ์, วราญา วัฒนจิตศิริ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์. (2559). โครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการสึกหรอของโลหะเชื่อมพอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง JIS-S50C. *วารสารวิชาการปทุมวัน*, 6(17), 23-30.
- [6] เอรวัฒน์ ขาญพหล. (2562). การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาของการเชื่อมพอกผิวแข็งรางรถไฟ ขนาด 50 ปอนด์ โดยกระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์. *วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, 19(3), 28-35.
- [7] นกสร พุ่มเกื้อ, อนุช สังขพงศ์ และสลิตา เพชรสังข์. (2565). การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติโลหะเชื่อมพอกผิวบนเหล็กกล้ารางรถไฟ BS100เกรด 900A ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ แตกต่าง. *วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, 22(1), 97-105.
- [8] เอรวัฒน์ ขาญพหล และบุษบากร คงเรือง. (2562). การศึกษาเปรียบเทียบชนิดของลวดเชื่อม H 350R และ E 8016 จากการเชื่อมพอกผิวแข็งรางรถไฟขนาด 100 ปอนด์/หลา โดยกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์. *วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง*, 12(2), 96-105.
- [9] ทวี หมดส๊ะ, ปิยะวรรณ สุนาสวน และอรจิตร แจ่มแสง. (2562). การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลูมและสมบัติของโลหะเชื่อมพอกแข็งเหล็กหล่อสีเทา. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี*, 17(1), 103-113.
- [10] Mician M, Konar R, Hlavaty I, Winczek J & Gucwa M. (2018). The Repair of Foundry Defects in Steel Castings Using Welding Technology. *Archives of Foundry Engineering*, 18(2), 177-180.

- [11] Xinghui, L. (2019). Welding Repair of High Chromium Cast Iron Defects. **Key Engineering Materials**, **814**, 229-232.
- [12] Wang, H., Yu, S.F., Khan, A.R. & Huang, A.G. (2018). Effects of Vanadium on Microstructure and Wear Resistance of High Chromium Cast Iron Hardfacing Layer by Electroslag Surfacing. *Metals*, **8**(6), 458.
- [13] Gucwa, M., Bęczkowski, R., Winczek, J. & Wyleciat, T. (2017). The Effect of Type of Welding Sequence During Hardfacing Chromium Cast Iron for Erosion Resistance. **Archives of Foundry Engineering**, **17**(3), 51-54.
- [14] Geng, B., Zhou, R., Li, L., Lv, H., Li, Y., Bai, D. & Jiang, Y. (2019). Change in Primary (Cr, Fe)₇C₃ Carbides Induced by Electric Current Pulse Modification of Hypereutectic High Chromium Cast Iron Melt. *Materials*, **12**(1), 32.
- [15] Inthidech, S., Kosasu, P., Yotee, S. & Matsubara, Y. (2013). Effect of Repeated Tempering on Abrasive Wear Behavior of Hypoeutectic 16 mass% Cr Cast Iron with Molybdenum. **Materials Transactions**, **54**(1), 28-35.
- [16] Kittikhun, R., Ruangdaj, T., John, T. H. P., Torranin, C. & Amporn, W. (2021). Effects of annealing treatment on microstructure and hardness in the 28 wt% Cr cast iron with Mo/W addition Journal of Metals, **Materials and Minerals**, **31**(2), 89-95.
- [17] American Welding Society. (2011). **Welding Handbook Ninth Edition Volume 4 material and application**. Miami: Printed in the United States of America.