

ผลกระทบของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์ต่อโครงสร้างและความแข็ง รางรถไฟเกรด 900A

Effects of factors in flux-cored arc welding process on the structure and hardness of
900A grade railway track

พงษ์ศักดิ์ รุนกระโทก, กัมปนาท ถ่ายสูงเนิน, ชานนท์ บุณนัท และ พิตินันท์ วสันตเสนานนท์
Phongsak Runkratok, Kampanart Taysungnoeng, Chanon Bunon and Pitinun Vasantasanant

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมซ่อมรางรถไฟเกรด 900A ที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและความแข็งจากกระบวนการเชื่อมแบบฟลักซ์คอร์ (FCAW) ซึ่งลวดเชื่อมมีค่าคาร์บอนเทียบเท่าแตกต่างกัน 4 ชนิด คือ 0.684, 2.233, 4.600 และ 0.743 เปอร์เซ็นต์ ก่อนการเชื่อมทำการอุ่นรางด้วยอุณหภูมิ 150, 250 และ 350 องศาเซลเซียส และทำการเชื่อมจำนวน 1, 2 และ 3 ชั้น จากนั้นตรวจสอบการกระจายความร้อนด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ผลการศึกษาแสดงถึงความร้อนแพร่กระจายตัวออกจากจุดศูนย์กลางรอยเชื่อมและกระจายตามแนวรัศมี โครงสร้างรางรถไฟภายหลังการเชื่อมซ่อมด้วยลวดเชื่อมทั้ง 4 ชนิด ประกอบด้วยเพิร์ลไลต์ (pearlite) และเฟอร์ไรต์ (ferrite) การอุ่นรางด้วยอุณหภูมิ 150 และ 350 องศาเซลเซียส ทำให้รอยต่อระหว่างรอยเชื่อมและเนื้อรางไม่สามารถกลืนกันได้ที่ควร ขณะที่การอุ่นรางอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส รอยเชื่อมและเนื้อรางสามารถกลืนกันได้ดี การเชื่อมซ่อมรางที่อุ่นด้วยอุณหภูมิต่ำทำให้รางมีความแข็งสูงกว่ารางที่อุ่นด้วยอุณหภูมิสูง สำหรับผลกระทบจากจำนวนชั้นในการเชื่อมส่งผลต่อความแข็งลดลงตามจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นและโครงสร้างโดยรวมหยาบขึ้น ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ บ่งชี้ว่า ปัจจัยด้านลวดเชื่อม จำนวนชั้นในการเชื่อม และอุณหภูมิการอุ่นรางก่อนการเชื่อมมีอิทธิพลต่อโครงสร้างและความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: การเชื่อมซ่อม, รางรถไฟเกรด 900A, การอุ่นราง

Abstract

This study aimed to investigate the effects of repair welding process parameters on the structure and hardness of 900A grade railway track using the Flux-Cored Arc Welding (FCAW) process. Four types of filler wires with different carbon equivalent (CE) values 0.684, 2.233, 4.600 and 0.743% were used. Prior to welding, the rails were preheated at 150, 250, and 350°C, followed by welding with 1, 2 and 3 passes. Heat distribution was then examined using a thermal imaging camera, which revealed that heat propagated radially outward from the weld center. The structures of the repaired rail sections welded with all four filler wires consisted primarily of pearlite and ferrite. Preheating at 150 and 350°C resulted in insufficient fusion between the weld metal and the rail base metal, whereas preheating at 250°C produced better metallurgical bonding with no visible boundary separation. The hardness results indicated that lower preheat temperatures led to higher hardness values compared to higher preheat temperatures. Additionally, Regarding the effect of the number of weld layers, the hardness decreases with increasing layers, and the overall structure becomes coarser. Statistical analysis further indicated that the type of filler wire, number of weld passes, and preheat temperature had significant effects on both the structure and hardness of the welded rail steel.

Keywords: repair welding, 900A grade railway, rail preheating

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

¹ Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Mueang Nakhon Ratchasima District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

* Corresponding author. E-mail: piinun.va@muti.ac.th

บทนำ

การสึกหรอของรางรถไฟส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณหัวรางเนื่องจากเป็นจุดที่รางสัมผัสกับล้อ รางต้องรับภาระแบบซ้ำ ๆ ทำให้รางเกิดการล้าตัว ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพและเกิดกลไกการสึกหรอ (wear) จากการสัมผัสแบบกลิ้ง (rolling contact) (Pribadi et al., 2024; Akama, 2025) ประกอบกับลักษณะพื้นที่และสภาพแวดล้อมในแต่ละภูมิภาคส่งผลกระทบต่อความเสียหายของรางรถไฟ โดยเฉพาะภาคเหนือของประเทศไทยที่มีลักษณะพื้นที่เป็นทางลาดชันและเส้นทางโค้งไปตามหุบเขาทำให้รางเกิดการเสื่อมสภาพและความเสียหายรุนแรงกว่าพื้นที่อื่น ทางโค้งก่อให้เกิดการสึกหรอเฉพาะบริเวณด้านข้างหัวรางซึ่งสัมผัสกับบังใบ ขณะที่ทางลาดชันเพิ่มภาระต่อระบบขับเคลื่อนจากการไต่ระดับ ส่งผลให้สันรางเกิดการสึกหรอ ซึ่งสัมผัสกับพื้นล้อ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อชิ้นส่วนอื่นในทางรถไฟเกิดการสึกหรอเร็วขึ้น (Thawatchai & Anek, 2025) การสึกหรอของรางรถไฟที่รุนแรงทำให้อายุการใช้งานลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางโค้งและทางลาดชัน (Wang et al., 2023) ขณะที่รางรถไฟถูกใช้งานเริ่มตั้งแต่การก่อสร้างและยังคงใช้งานถึงปัจจุบันทำให้อายุการใช้งานมาก ส่งผลให้ปริมาณและอัตราการสึกหรอสูง ดังนั้นการซ่อมบำรุงรางรถไฟที่เกิดการสึกหรอจำเป็นต้องมีการวางแผนอย่างรอบคอบ หากละเลยในการซ่อมบำรุงอาจทำให้การสึกหรอลูกกลิ้งมากขึ้น รางรถไฟที่สึกหรอส่งผลต่อความปลอดภัยในการเดินรถ การซ่อมบำรุงรางรถไฟที่เกิดการสึกหรอบริเวณหัวรางสามารถดำเนินการได้โดยการเชื่อมพอกผิว ซึ่งเป็นวิธีการที่หน่วยงานซ่อมบำรุงทางรถไฟเลือกใช้เนื่องจากขั้นตอนไม่ยุ่งยาก ต้นทุนต่ำและคุณภาพภายหลังการเชื่อม (Kaewniam & Kunthong (2020) ทั้งนี้การเชื่อมจะช่วยยืดอายุการใช้งานของรางรถไฟได้อย่างมีนัยสำคัญ (Zani et al., 2024) การเชื่อมแบบฟลักซ์คอร์ (flux cored arc welding: FCAW) เป็นวิธีการที่สามารถเชื่อมพอกผิวรางรถไฟที่เกิดการสึกหรอได้ มีข้อดีคือคุณภาพและความแข็งแรงของแนวเชื่อม (Ajenifuja, 2025; Wang et al., 2025) แต่กระบวนการเชื่อมต้องระมัดระวังและให้ความสำคัญกับขั้นตอนในการปฏิบัติงาน เพราะความร้อนในกระบวนการเชื่อมส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของราง (Shaikh et al., 2025) ด้วยสาเหตุนี้การอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อม (preheating) จึงจำเป็นเพื่อวัตถุประสงค์ในการปรับสภาพผิวรางก่อนเชื่อม กำจัดความชื้น สนิม สารปนเปื้อนอื่น ๆ และลดความเร็วในการเย็นตัว ป้องกันไม่ให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (martensite) ซึ่งมีความแข็งแรงสูงในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (heat-affected zone: HAZ) และเพื่อลดความเค้นตกค้าง (residual stress) ตามมาตรฐาน AWS D15.2 กำหนดอุณหภูมิในการอุ่นราง 150-300 องศาเซลเซียส (American Welding Society, 2022) ขณะที่อุณหภูมิระหว่างการเชื่อมจะต้องมีการควบคุมด้วยเช่นกันเนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำจะช่วยลดปัญหาการไม่สม่ำเสมอและช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของรอยเชื่อม ลดความเค้นตกค้างและยืดอายุการใช้งาน (Schropfer et al., 2024) ขณะที่ความร้อนในขณะเชื่อมสูงเกินไปจะทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ความเหนียว (toughness) ลดลง และอาจพบคาร์ไบด์ที่ไม่พึงประสงค์ (carbide precipitation) โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนไปไม่สามารถต้านทานการเสียดสี (abrasion) ทำให้ยิ่งเพิ่มความเสี่ยงให้รางแตกร้าว (Muangjunburee, 2024) ความร้อนในขณะเชื่อมหรือพลังงานความร้อนที่เกิดจากการหลอมละลายของรอยเชื่อมในช่วงเวลาเชื่อมเป็นผลจากพลังงานความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (heat input) ความร้อนดังกล่าวทำให้รางมีอุณหภูมิสูง เนื่องจากการหลอมเหลวบริเวณแนวเชื่อมจึงส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของรางในบริเวณใกล้เคียงรอยเชื่อม การเชื่อมซ่อมรางทำให้เกิดความร้อนสูงเฉพาะจุด ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการเชื่อมจึงมีความสำคัญเนื่องจากส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของรางรถไฟ โครงสร้างของรางรถไฟที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานจะต้องประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และเฟอไรต์โลด (Fei et al., 2023; Aksenova et al., 2024; Tressia et al., 2024) ที่ผ่านมาในการเชื่อมซ่อมรางต้องอาศัยทักษะและความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งอาจพบข้อผิดพลาดเกิดขึ้นในขั้นตอนการเชื่อม ซึ่งรางรถไฟที่ผ่านการเชื่อมซ่อมต้องมีโครงสร้างและสมบัติทางกลใกล้เคียงกับรางเดิม การใช้ปัจจัยและควบคุมระดับของปัจจัย

ในกระบวนการเชื่อมอันได้แก่ การอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อม ชนิดลวดเชื่อม และจำนวนชั้นในการเชื่อมย่อมส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของรางรถไฟ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมซ่อมรางรถไฟที่ส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของรางรถไฟเกรด 900A เพื่อนำข้อมูลที่ได้เป็นแนวทางในการวางแผนบำรุงรักษารางรถไฟได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัยสำหรับใช้งาน

วิธีการศึกษา

การเชื่อมซ่อมรางรถไฟที่เกิดการสีกหรือในงานวิจัยนี้ใช้การเชื่อมแบบฟลักซ์คอร์ ด้วยเครื่องเชื่อมยี่ห้อ Lincoln Power Wave R450 ทำงานร่วมกับหุ่นยนต์แขนกล ABB IRB 1520ID พร้อมกับอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบการเชื่อม ได้แก่ กล้องถ่ายภาพความร้อนและอุปกรณ์ในการอุ่นราง ดัง (Figure 1)

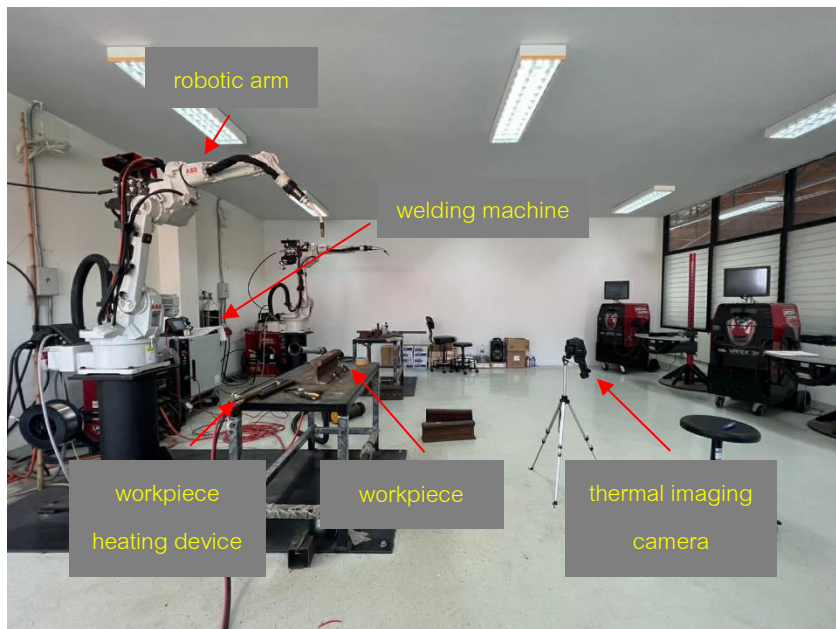


Figure 1 Equipment used for welding.

ลวดเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมซ่อมรางรถไฟในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาลวดเชื่อมจำนวน 4 ชนิด ที่มีส่วนผสมทางเคมีแตกต่างกัน ซึ่งทำให้ค่าคาร์บอนเทียบเท่า (carbon equivalent: CE) แตกต่างกันด้วยเช่นกัน ส่งผลต่อความสามารถในการเชื่อมและการแตกร้าวภายหลังการเชื่อม โดยสามารถคำนวณได้ ดังสมการ (1) และลวดเชื่อมมีส่วนผสมทางเคมีดัง (Table 1)

$$CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \quad (1)$$

Table 1 Chemical composition.

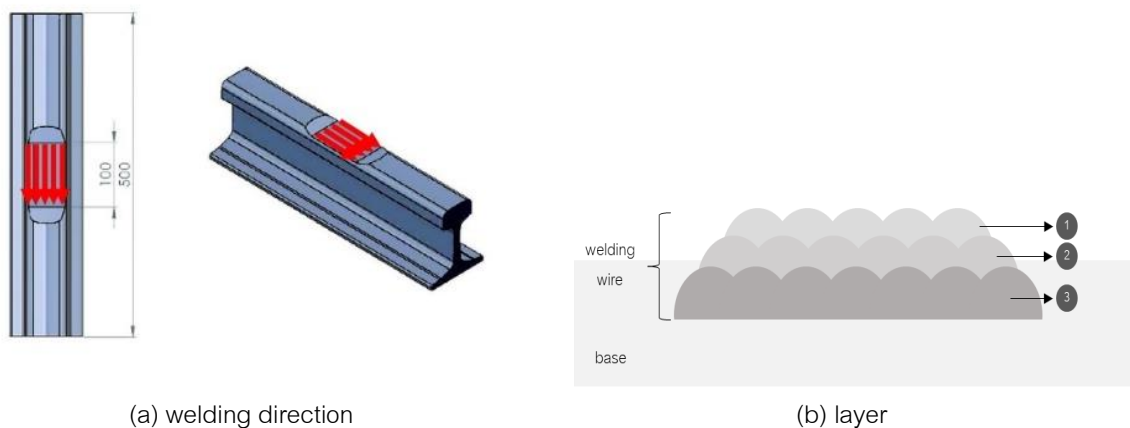
type	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	%CE
welding wire a	0.210	0.680	1.530	0.290	0.500	1.710	0.684
welding wire b	0.380	0.540	1.650	2.220	0.450	0.900	2.233
welding wire c	0.190	0.650	3.720	15.60	0.930	7.970	4.600
welding wire d	0.150	0.600	2.000	1.300	-	-	0.743

จาก (Table 1) แสดงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมซ่อมรางรถไฟแบ่งเป็นลวดเชื่อมกลุ่มที่มีปริมาณคาร์บอนสูงและกลุ่มที่มีปริมาณธาตุผสมอื่นสูง ซึ่งส่งผลให้ค่าคาร์บอนเทียบเท่าของลวดเชื่อม a, b, c และ d เท่ากับ 0.684, 2.233, 4.600 และ 0.743 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

รางรถไฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือรางรถไฟขนาด 100 ปอนด์ ตามมาตรฐาน UIC54 Grade 900A ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี ดัง (Table 2) มีความยาว 500 มิลลิเมตร ถูกเตรียมพื้นผิวบริเวณสันรางเพื่อจำลองการสึกหรอด้วยการกัดให้เป็นร่องโดยใช้เครื่องกัด (milling machine) รูปทรงสี่เหลี่ยมความยาวขนาด 100 มิลลิเมตร ความลึก 10 มิลลิเมตร และมีทิศทางการเชื่อมตามแนวความยาวของราง ดัง (Figure 2a) และลักษณะของการเชื่อมแบ่งการทดลองออกเป็น การเชื่อม 1, 2 และ 3 ชั้น ดัง (Figure 2b)

Table 2 Chemical composition (wt.%).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	V
0.712	0.300	0.752	0.011	0.008	0.035	0.007	0.011	-	0.007	0.001

**Figure 2** Specimens.

กระบวนการเชื่อมซ่อมรางรถไฟ เริ่มจากการทำความสะอาดด้วยแปรงลวด จากนั้นให้ความร้อนเพื่ออุ่นรางด้วยอุณหภูมิ 150, 250 และ 350 องศาเซลเซียส และทำการเชื่อม 1, 2 และ 3 ชั้น โดยใช้ระยะอาร์ก 1-2 มิลลิเมตร กระแสไฟฟ้า 220-230 แอมแปร์ และความเร็วในการเชื่อมคงที่ 3 มิลลิเมตรต่อวินาที ดัง (Tables 3-4)

Table 3 Welding process.

no.	process	picture
1	clean the workpiece by scrubbing it clean with a wire brush.	
2	the workpiece was preheated at 150, 250, and 350°C, specifically at the rail head located in the center of the test piece along its length.	
3	welding was performed using an ABB IRB 1520ID robotic welding arm in conjunction with a Lincoln Power Wave R450 welding machine.	

Table 4 Welding process parameters.

layer	preheat (°C)	arc length (mm)	current (A)	travel speed (mm/s)
1	150	1-2	220-230	3
2	250	1-2	220-230	3
3	350	1-2	220-230	3

วิธีการทดสอบชิ้นงาน มีดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายความร้อนในขณะเชื่อมด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ตามมาตรฐาน ISO 18434-1
2. การตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมด้วยสารแทรกซึม (PT) ตามมาตรฐาน ISO 3452-2
3. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ตามมาตรฐาน ASTM E3
4. การทดสอบความแข็ง ตามมาตรฐาน ASTM E384
5. การวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab 2017

การตัดชิ้นงานทดสอบ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การตัดชิ้นงานด้วยเครื่องไวร์คัท (wire cut) เพื่อป้องกันผลกระทบที่เกิดจากความร้อนในขณะตัดที่อาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของรางรถไฟ ชิ้นงานมีความหนา 10 มิลลิเมตร ความยาว 70 มิลลิเมตร และความสูง 25 มิลลิเมตร ดัง (Figure 3)

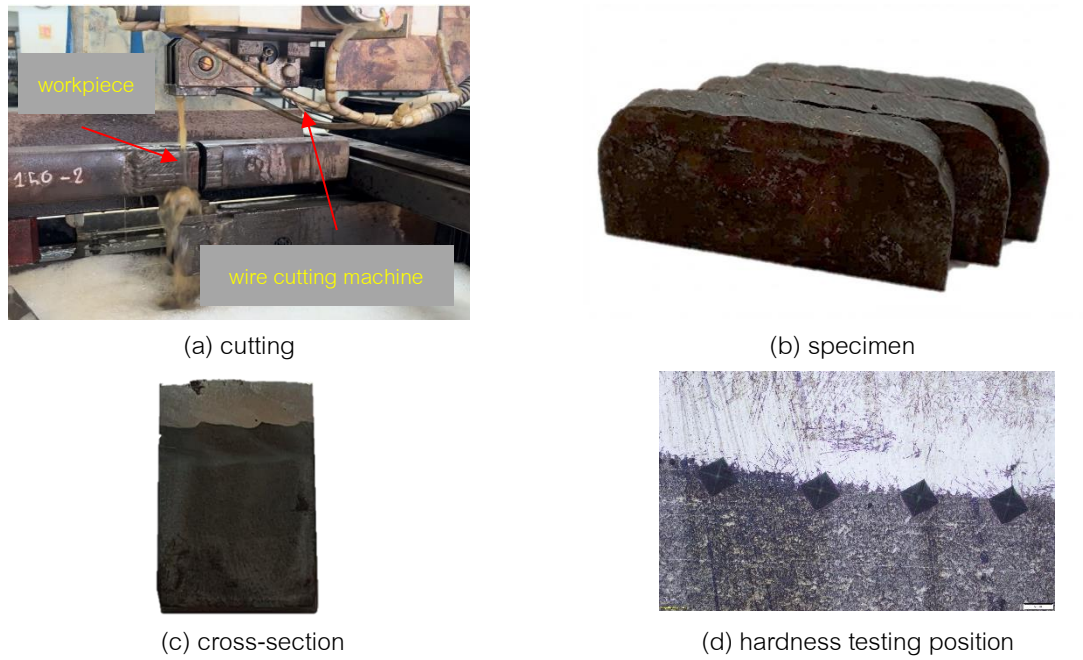


Figure 3 Cutting of the test specimen.

ผลการทดลองการเชื่อมรางรถไฟขนาด 100 ปอนด์ ตามมาตรฐาน UIC54 Grade 900A ด้วยการเชื่อมแบบฟลักซ์คอร์ แสดงดังนี้

1. ผลการตรวจสอบการกระจายความร้อนในขณะเชื่อม โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน infrared camera รุ่น FLIR E8 เพื่อตรวจสอบการกระจายความร้อนในขณะเชื่อม ดัง (Figure 4)

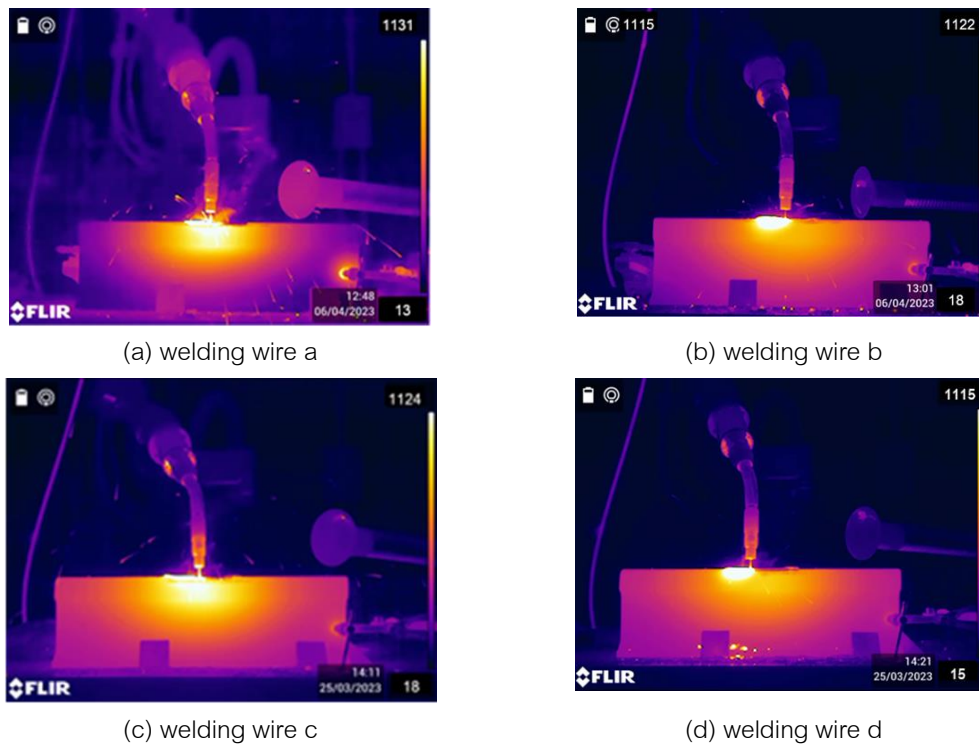


Figure 4 Results of heat distribution inspection.

จาก (Figure 4) แสดงผลการตรวจสอบการกระจายความร้อนซึ่งประกอบด้วย บริเวณหลอมละลาย (fusion zone) ซึ่งเป็นสีขาวผสมสีเหลือง แสดงถึงบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงสุดในขณะเชื่อม บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (heat affected zone: HAZ) สังเกตได้จากการไล่ระดับความต่างของสีจากสีเหลืองไปสีส้มและสีม่วง ซึ่งแสดงถึงการลดลงของอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องจากจุดศูนย์กลางการเชื่อม อุณหภูมิในบริเวณดังกล่าวสูงพอที่จะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของรางรถไฟให้เปลี่ยนไป และบริเวณโลหะพื้นฐาน (base metal) ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนปรากฏเป็นสีม่วงเข้มหรือดำ ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิต่ำสุดและไม่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลอย่างมีนัยสำคัญ (Zaw & Muangjunburee, 2023)

2. ผลการตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมด้วยสารแทรกซึม (PT) เพื่อตรวจสอบจุดบกพร่องบนผิวของแนวเชื่อมและยืนยันกระบวนการเชื่อมเป็นไปตามขั้นตอนและหลักการเชื่อม ขั้นตอนการตรวจสอบเริ่มจากการทำความสะอาดชิ้นงาน จากนั้นพ่นสารแทรกซึมลงบนบริเวณแนวเชื่อมให้ทั่วและทำการฟั่นสารที่ช่วยดึงสารแทรกซึมเพื่อเร่งให้สารแทรกซึมไหลเข้าไปยังบริเวณข้อบกพร่องของแนวเชื่อม ผลการตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมด้วยสารแทรกซึม (PT) ดัง (Figure 5)



Figure 5 Weld inspection using penetrant testing (PT).

จาก (Figure 5) แสดงการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสารแทรกซึม (PT) พบว่าลักษณะสารแทรกซึมที่พ่นลงบนแนวเชื่อมเป็นสีแดงอ่อน ไม่มีจุดใดมีสีแดงเข้มแสดงว่าแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ ปราศจากรอยแตก ร้าว รอยรั่ว รุพุน การหลอมรวมที่ไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่องที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า

3. ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

กระบวนการตรวจสอบโครงสร้างเริ่มจากการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 200, 400, 600, 800, 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ จากนั้นขัดด้วยผ้าสักหลาดและผง Alumina ขนาด 0.05-1.0 ไมครอน และกัดด้วยสารละลาย ประกอบด้วย กรดไนตริก 2 เปอร์เซ็นต์ และเอทานอล 98 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร จากนั้นนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ (optical microscope) และผลการตรวจสอบโครงสร้าง ดัง (Figure 6)

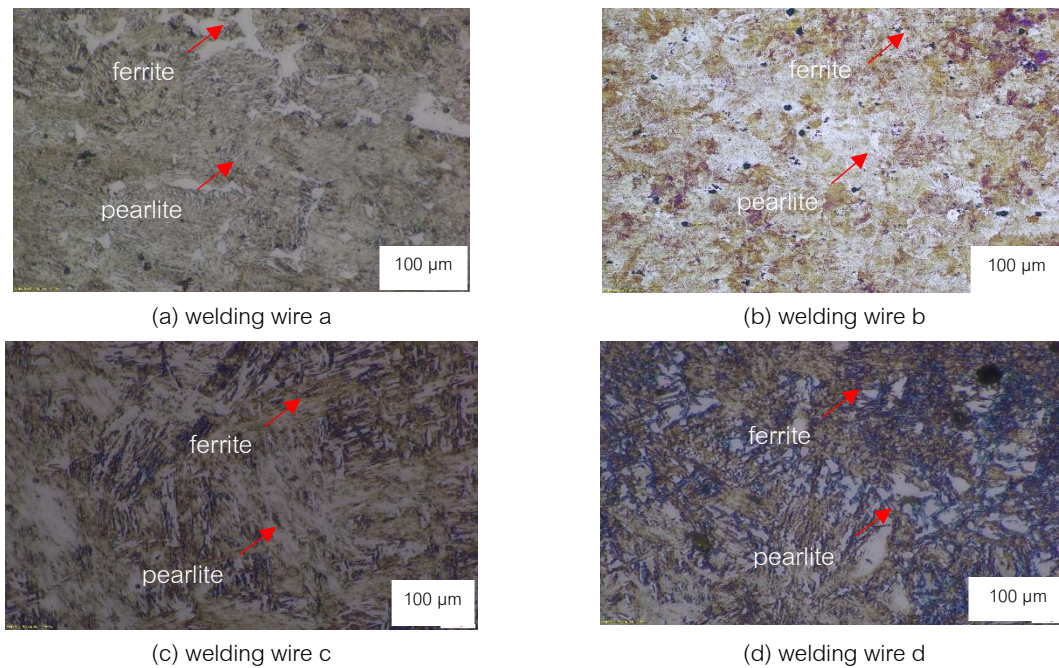


Figure 6 Microstructure.

จาก (Figure 6) ผลการตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นงาน พบว่า รางรถไฟที่ผ่านการเชื่อมเชื่อมมีโครงสร้างหลักประกอบด้วย เฟอไรต์ละเอียด ซึ่งมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและสามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีและเฟอร์ไรต์บริเวณขอบเกรน ทำให้งานเชื่อมมีความเหนียว (Poolsiri et al., 2021)

การอุ่นรางด้วยอุณหภูมิ 150, 250 และ 350 องศาเซลเซียส ก่อนการเชื่อมส่งผลให้ลักษณะโครงสร้างรางรถไฟภายหลังการเชื่อมแตกต่างกัน ดัง (Figure 7)

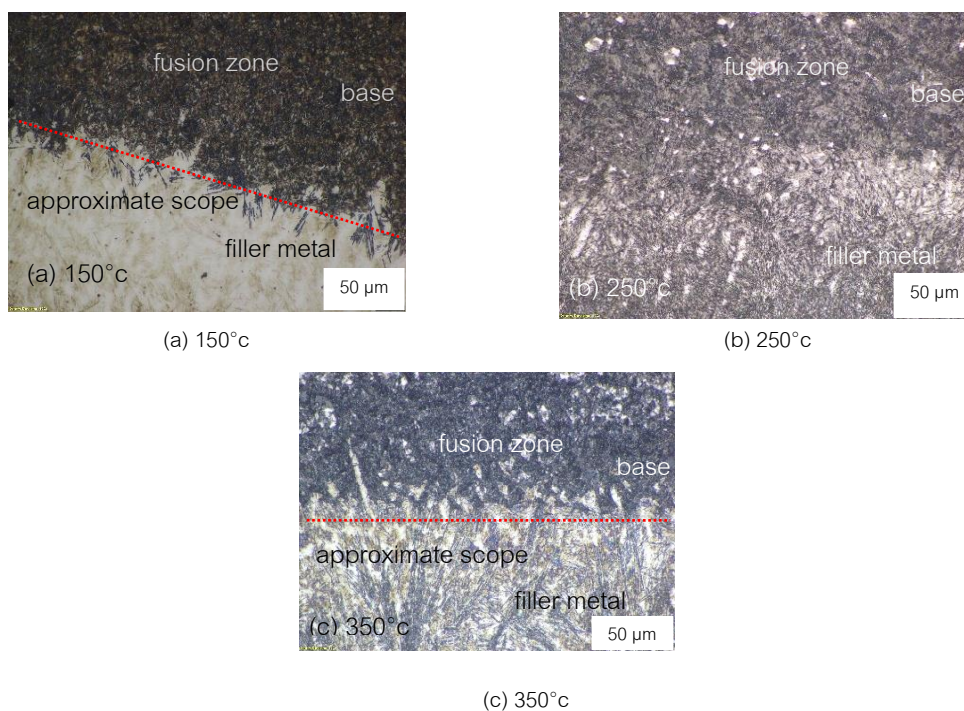


Figure 7 Microstructure at the weld - rail interface.

จาก (Figure 7) แสดงโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมซ่อมรางรถไฟที่ผ่านการอุ่นด้วยอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส มีลักษณะการแบ่งพื้นที่ของแนวเชื่อมและเนื้อรางรถไฟอย่างชัดเจนซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่สามารถกลืนเป็นเนื้อเดียวกันได้ระหว่างลวดเชื่อมและรางรถไฟ ความร้อนจากกระบวนการเชื่อมถูกดึงออกอย่างรวดเร็วเพราะอุณหภูมิบริเวณอื่นของรางรถไฟยังคงต่ำเนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบจากกระบวนการเชื่อม การละลายของลวดเชื่อมและรางไม่สม่ำเสมอ ภายหลังการเย็นตัวจึงไม่สามารถเป็นเนื้อเดียวกัน ตรงข้ามกันพบว่ารางรถไฟที่ผ่านการอุ่นด้วยอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ลักษณะการต่อระหว่างแนวเชื่อมและเนื้อรางรถไฟมีความสมบูรณ์อย่างชัดเจน เนื้อวัสดุทั้งสองชนิดสามารถหลอมรวมกันได้เป็นอย่างดี ขณะที่รางรถไฟที่ผ่านการอุ่นด้วยอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ลักษณะการต่อของรอยต่อไม่เป็นเนื้อเดียวกันโดยพบได้จากพื้นที่ของแนวเชื่อมและเนื้อรางรถไฟแยกออกจากกันอย่างชัดเจนซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่สามารถกลืนเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุทั้งสองชนิดได้ จากความแตกต่างของโครงสร้างรางรถไฟบริเวณหลอมละลาย (fusion zone) ภายหลังการเชื่อมจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลของรางรถไฟ

4. ผลการทดสอบความแข็ง

ผลการทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM E384 โดยกำหนดตำแหน่งในการทดสอบที่มีความสำคัญต่อการใช้งานคือบริเวณหลอมละลาย (fusion zone) บริเวณกระทบร้อน (HAZ) และบริเวณโลหะฐาน (base) ของชิ้นงาน ตัวอย่างทั้ง 3 ชิ้น ผลการทดสอบความแข็ง ดัง (Figure 8)

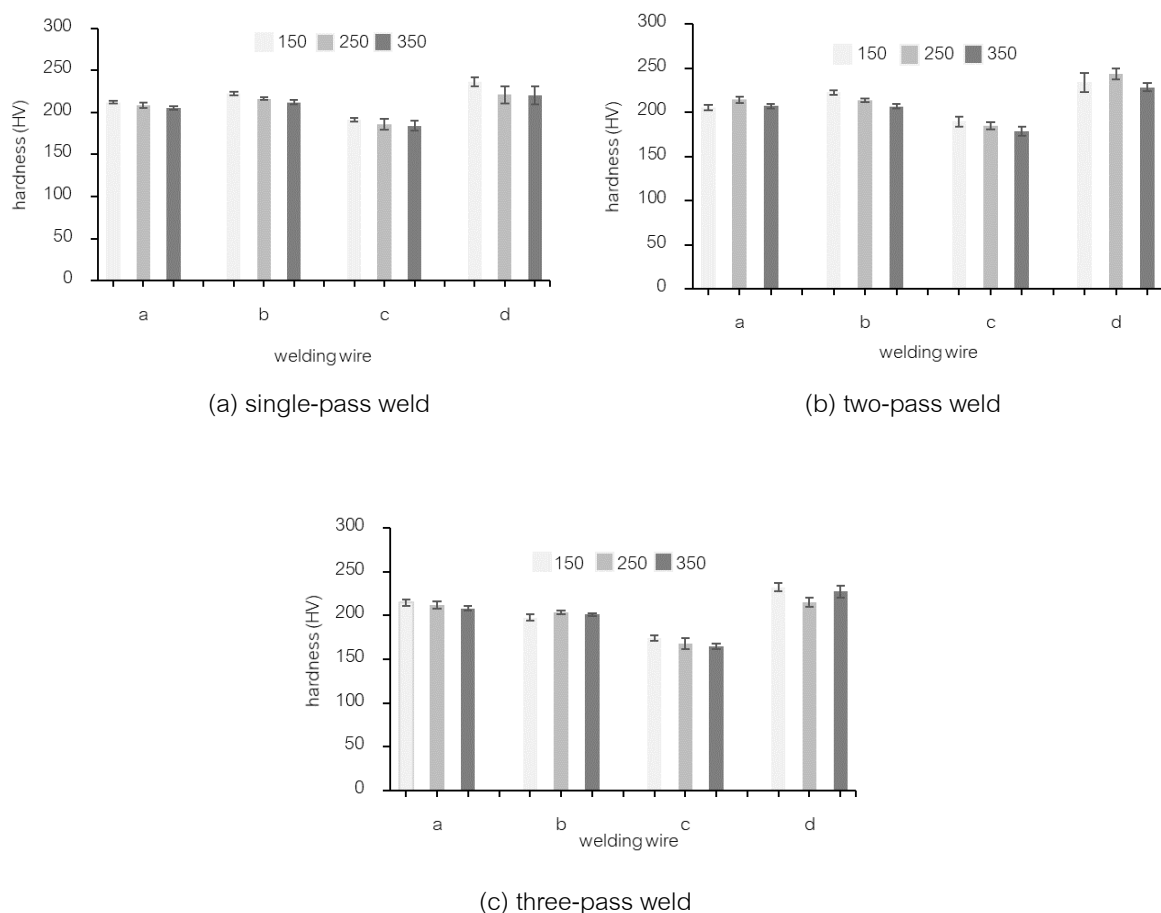


Figure 8 Hardness test results.

จาก (Figure 8a) ผลการทดสอบความแข็งแรงเชื่อม 1 ชั้น ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด a ให้ความร้อนก่อนการเชื่อม 150, 250 และ 350 องศาเซลเซียส ความแข็งแรงเฉลี่ย 211.86, 208.14 และ 204.71 HV ตามลำดับ สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด b ความแข็งแรงเฉลี่ย 222.14, 216.29 และ 212.00 HV ตามลำดับ สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด c ความแข็งแรงเฉลี่ย 191.43, 185.71 และ 183.86 HV ตามลำดับ สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด d ความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุด 236.43, 220.71 และ 220.00 HV ตามลำดับ

จาก (Figure 8b) ผลการทดสอบความแข็งแรงเชื่อม 2 ชั้น ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด a ให้ความร้อนก่อนเชื่อม 150, 250 และ 350 องศาเซลเซียส ความแข็งแรงเฉลี่ย 205.43, 214.29 และ 207.00 HV ตามลำดับ สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด b ความแข็งแรงเฉลี่ย 222.57, 213.43 และ 206.71 HV ตามลำดับ สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด c ความแข็งแรงเฉลี่ย 189.71, 184.71 และ 178.57 HV ตามลำดับ สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด d ความแข็งแรงเฉลี่ย 234.29, 243.57 และ 228.57 HV ตามลำดับ

จาก (Figure 8c) ผลการทดสอบความแข็งแรงเชื่อม 3 ชั้น ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด a ให้ความร้อนก่อนเชื่อม 150, 250 และ 350 องศาเซลเซียส ความแข็งแรงเฉลี่ย 214.57, 211.57 และ 207.86 สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด b ความแข็งแรงเฉลี่ย 197.57, 203.29 และ 200.86 HV ตามลำดับ สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด c ความแข็งแรงเฉลี่ย 173.86, 167.86 และ 164.86 HV ตามลำดับ สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด d ความแข็งแรงเฉลี่ย 232.14, 215.00 และ 227.14 HV ตามลำดับ

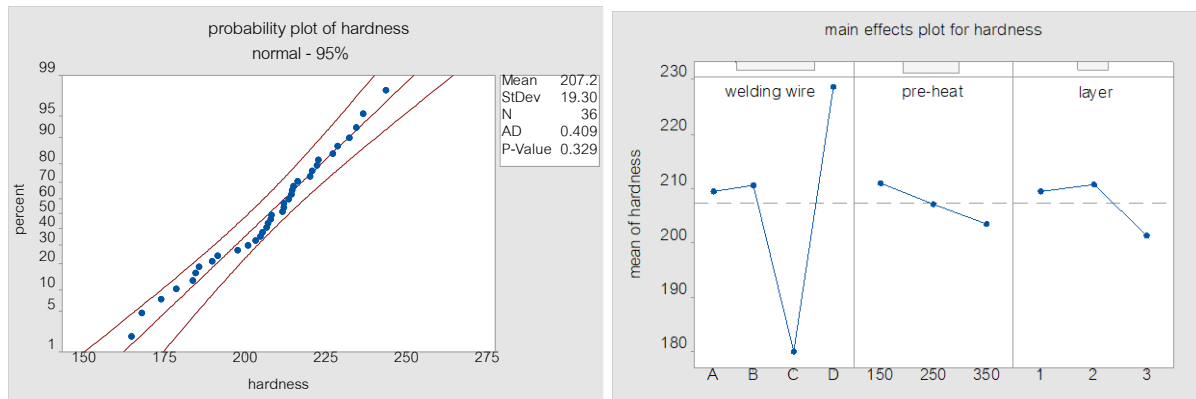
ผลการทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อมทั้ง 3 ชั้นแสดงให้เห็นว่า แนวเชื่อม 1 ชั้น ทั้ง 3 อุณหภูมิ ความแข็งแรงมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับการเชื่อม 2 และ 3 ชั้น เนื่องจากการสะสมความร้อนต่ำและการเย็นตัวภายหลังการเชื่อมสูงกว่าลวดเชื่อม d ให้ความร้อนก่อนการเชื่อม 150 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งแรงสูงในการเชื่อม 1 ชั้น และแนวเชื่อม 1 ชั้น ทั้ง 3 อุณหภูมิ ทำให้เกิดโครงสร้างเพิร์ลไลต์ละเอียด ซึ่งทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและค่าความเหนียวลดลงเนื่องจากมีการสะสมความร้อนน้อยกว่าการเชื่อม 2 และ 3 ชั้น แนวเชื่อม 2 ชั้น ทั้ง 3 อุณหภูมิ ความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลงจากการเชื่อม 1 ชั้น ความร้อนจากการเชื่อมชั้นที่ 2 ส่งผลกระทบต่อการเชื่อมชั้นที่ 1 โครงสร้างบริเวณดังกล่าวเกิดความเสถียรเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงลดลงเนื่องจากการสะสมความร้อนจากการเชื่อมชั้นที่ 2 แนวเชื่อม 3 ชั้น ทั้ง 3 อุณหภูมิ ความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเนื่องจากการสะสมความร้อนทำให้การเย็นตัวช้ากว่าการเชื่อม 1 และ 2 ชั้น การสะสมความร้อนทำให้เกิดโครงสร้างเพิร์ลไลต์หยาบและพบเฟอไรต์ ขณะทีลวดเชื่อม d ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นในบางจุดเนื่องจากส่วนผสมทางเคมี

5. ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติเริ่มจากการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นเส้นตรง มีความเป็นอิสระ กระจายตัวแบบสุ่ม ไม่สามารถคาดเดาได้ และมีการกระจายตัวแบบ normal probability แสดงถึงข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ดัง (Figure 9a)

จาก (Figure 9b) ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยหลัก (main effects) ด้านอุณหภูมิการอุ่นชิ้นงาน (preheat) จำนวนชั้นแนวเชื่อม และชนิดลวดเชื่อมที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรางรถไฟ 900A เมื่อผ่านการเชื่อมซ่อม

ปัจจัยด้านอุณหภูมิการอุ่นชิ้นงาน สำหรับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้ง 4 ชนิด ในการเชื่อมซ่อมรางรถไฟ พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิ 150, 250 และ 350 องศาเซลเซียส พบว่าแนวโน้มค่าเฉลี่ยความแข็งแรงรางเป็นไปในทางลบ แสดงถึงความแข็งแรงรางไฟลดลงเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิในการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมซ่อม แนวโน้มความแข็งแรงมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับความแข็งแรงรางเดิม



(a) Analysis of variance (ANOVA)

(b) Effects of welding process parameters

Figure 9 Analysis statistical.

ปัจจัยด้านจำนวนชั้นแนวเชื่อม การเพิ่มจำนวนในการเชื่อมซ่อมรางรถไฟจาก 1 ชั้นเป็น 2 ชั้น ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และเมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนในการเชื่อมซ่อมรางรถไฟจาก 2 ชั้นเป็น 3 ชั้น พบว่าส่งผลเชิงลบต่อค่าเฉลี่ยความแข็งแรงรางรถไฟ ซึ่งอธิบายได้ว่า ความแข็งแรงรางรถไฟลดลง

ปัจจัยด้านชนิดของลวดเชื่อม การใช้ลวดเชื่อม d ในการเชื่อมซ่อมรางรถไฟความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุด 228.65 HV รองลงมาคือลวดเชื่อม b มีความแข็งแรงเฉลี่ย 210.54 HV รองลงมาคือลวดเชื่อม a มีความแข็งแรงเฉลี่ย 209.49 HV และลวดเชื่อม c มีความแข็งแรงน้อยที่สุดคือ 180.06 HV ตามลำดับ

การวิเคราะห์หิทธิพลของปัจจัยร่วม (interaction) ระหว่าง คุณสมบัติการขึ้นงาน จำนวนชั้นแนวเชื่อม และชนิดลวดเชื่อม พบว่าการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยมีอิทธิพลร่วมกันต่อค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของรางอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือความแข็งแรงรางรถไฟภายหลังการเชื่อมซ่อมจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ การขึ้นงาน จำนวนชั้นแนวเชื่อม และชนิดลวดเชื่อม อธิบายได้ว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมจะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงรางรถไฟ ดัง (Figure 10)

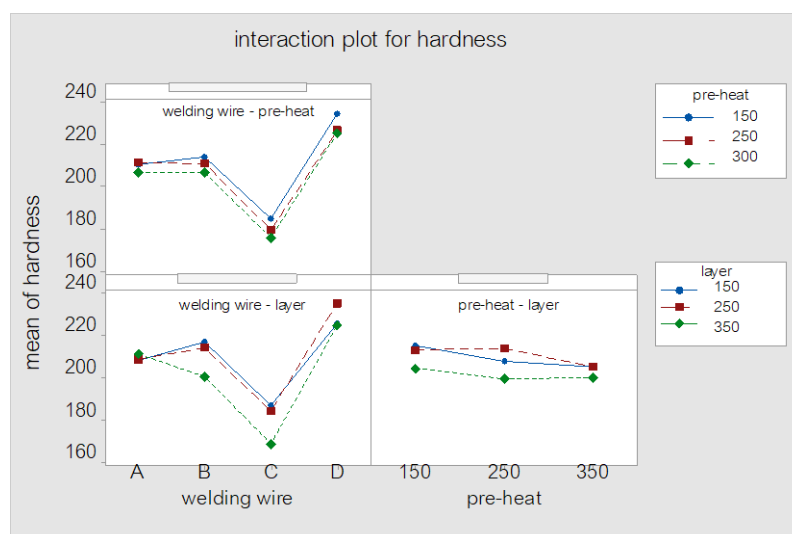


Figure 10 Interaction effects of welding wire type, workpiece preheating temperature, and number of weld passes.

การวิเคราะห์ขอบเขตอิทธิพลของปัจจัย (contour plot) ในกระบวนการเชื่อมซ่อมรางรถไฟระหว่าง อุณหภูมิ การอุ่นชิ้นงาน และจำนวนชั้นแนวเชื่อม ของลวดเชื่อมทั้ง 4 ชนิด ที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยความแข็งของรางรถไฟ ดัง (Figure 11)

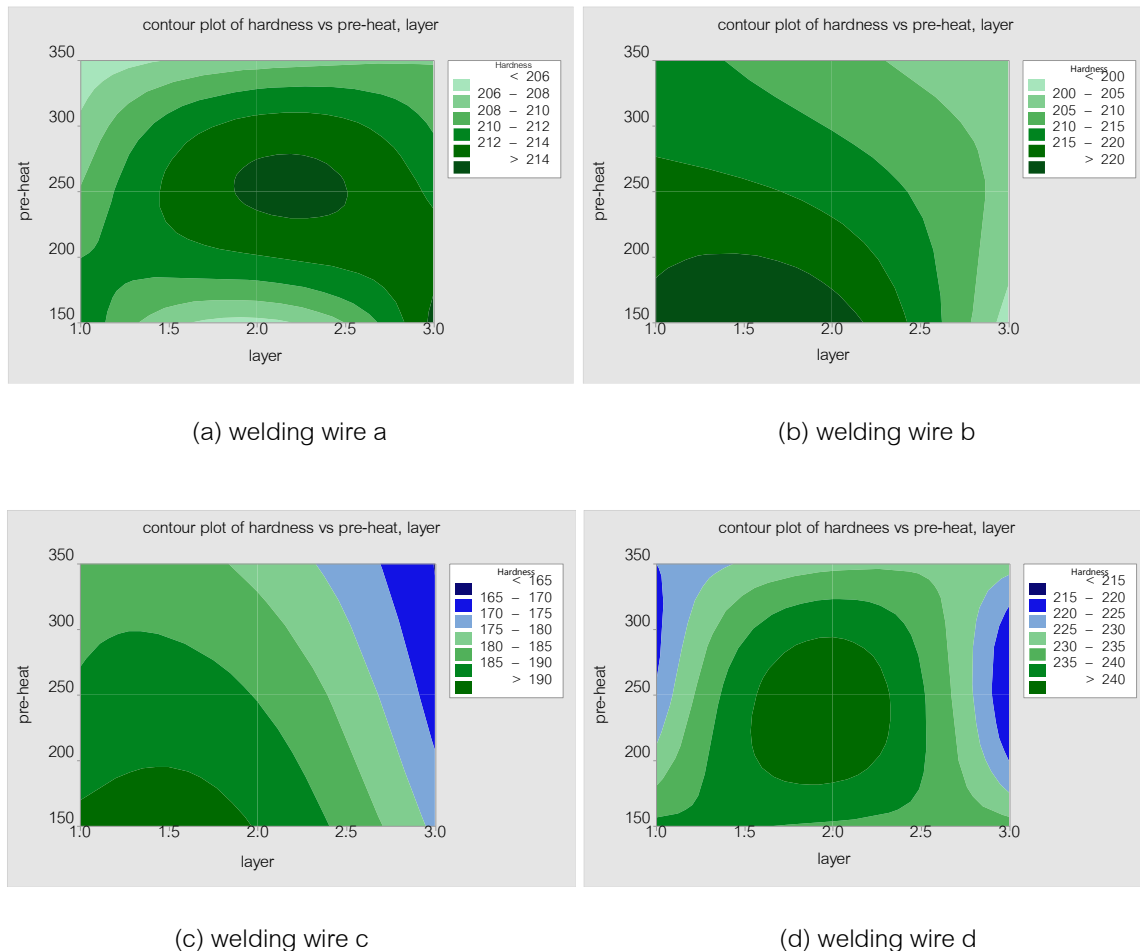


Figure 11 Results of contour plot.

จาก (Figure 11) ผลการวิเคราะห์ขอบเขตอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมซ่อมรางรถไฟระหว่างปัจจัย ด้านอุณหภูมิการอุ่นชิ้นงาน และจำนวนชั้นแนวเชื่อม พบว่า ปัจจัยที่เหมาะสมและส่งผลต่อค่าเฉลี่ยความแข็งรางรถไฟ สำหรับลวดเชื่อม a คือ อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงาน 250 องศาเซลเซียส และเชื่อมจำนวน 2 ชั้น สำหรับลวดเชื่อม b คือ อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงาน 150-200 องศาเซลเซียส และเชื่อมไม่เกิน 2 ชั้น สำหรับลวดเชื่อม c คือ อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส และเชื่อมไม่เกิน 2 ชั้น สำหรับลวดเชื่อม d คือ อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงาน 175-275 องศาเซลเซียส และเชื่อมจำนวน 2 ชั้น

การเลือกใช้ตัวแปรในการเชื่อมซ่อมรางรถไฟในงานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางในการเลือกใช้ระดับของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยความแข็งโดยผลการวิเคราะห์จากขอบเขตอิทธิพลของปัจจัย ระดับของปัจจัยที่เหมาะสมต่อค่าเฉลี่ยความแข็งรางรถไฟในการใช้ลวดเชื่อมชนิด a, b, c และ d จะต้องใช้อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงาน 150-200 องศาเซลเซียส โดยต้องควบคุมไม่ให้เกิน 300 องศาเซลเซียส และจำนวนชั้นในการเชื่อมระหว่าง 1-2 ชั้น จะส่งผลให้มีค่าเฉลี่ยความแข็งใกล้เคียงกับรางเดิมก่อนเชื่อมคือ 260 HV

อภิปรายผล

รางรถไฟ UIC54 Grade 900A มีโครงสร้างพื้นฐานคือเพิร์ลไลต์ และเฟอร์ไรต์ และมีความแข็งแรงระหว่าง 260-300HB (Andersson, 2025) เมื่อมีการใช้งานประกอบกับผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมส่งผลให้เกิดการสึกหรอ การบำรุงรักษารางรถไฟ และยืดอายุการใช้งานทำได้โดยการเชื่อมซ่อม กระบวนการเชื่อมจะต้องควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้อย่างเข้มงวด โดยเฉพาะอย่างยิ่งความร้อน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของรางรถไฟ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของการกระจายความร้อนในขณะเชื่อมซ่อม พบว่าบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดคือจุดที่เกิดการอาร์คหรือจุดที่เกิดการหลอมละลายของลวดเชื่อมและรางรถไฟ (arc zone) ความร้อนกระจายตัวออกจากจุดศูนย์กลางการอาร์คและจุดที่เกิดการหลอมละลายในทิศทางไปตามแนวรัศมีซึ่งจุดนี้จะมีอุณหภูมิสูงเพียงพอต่อการทำให้โครงสร้างและสมบัติทางกลของรางรถไฟเปลี่ยน (Banleng, 2015) พื้นที่ที่จะได้รับผลกระทบจากความร้อนดังกล่าว คือบริเวณผลกระทบจากความร้อน สังเกตได้จากการไถระดับสีจากเหลืองไปสีส้มและสีม่วง ซึ่งแสดงถึงการลดลงของอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องจากจุดหลอมละลาย อุณหภูมิในบริเวณดังกล่าวยังคงสูงพอที่จะส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของรางรถไฟ และบริเวณโลหะพื้นฐานที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน แต่จะไม่ส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของรางรถไฟ (Fourlakidis et al., 2023; Jabtonska et al., 2023; Le et al., 2024)

โครงสร้างบริเวณรอยต่อเป็นจุดที่รอยเชื่อมและเนื้อรางเดิมหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน จากการอุ่นรางก่อนการเชื่อมด้วยอุณหภูมิ 150 และ 350 องศาเซลเซียส ทำให้โครงสร้างและรอยต่อมีการแบ่งแนวชัดเจนเนื่องจากอุณหภูมิการอุ่นรางก่อนการเชื่อม (150 องศาเซลเซียส) ต่ำเกินไป ทำให้มีอัตราการเย็นตัวสูงซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและความเหนียวลดลง ในบริเวณผลกระทบจากความร้อน (Srijampan, 2016; Sangsuriya & Surin, 2019) และมีโอกาสรอยเชื่อมจะเกิดการแตกร้าวหลังจากการเชื่อม รอยเชื่อมและรางมีอุณหภูมิแตกต่างกันสูง ส่งผลให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและความเหนียวลดลง (Intawong et al., 2023) ขณะที่การอุ่นรางที่อุณหภูมิการอุ่นรางก่อนการเชื่อม (350 องศาเซลเซียส) สูงเกินไปสำหรับการเชื่อม เนื่องจากการกระจายตัวของอุณหภูมิทำให้หลังการเชื่อมรางเย็นตัวช้า ส่งผลต่อสมบัติทางกลของรางคือความแข็งแรงลดลงและความเหนียวเพิ่มขึ้น ความร้อนดังกล่าวทำให้เกรนหยาบความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานต่อการสึกหรอลดลง (Qin et al., 2021) แนวเชื่อมหรือเนื้อรางรถไฟบริเวณดังกล่าวแยกกันอย่างชัดเจนแสดงให้เห็นถึงความไม่สามารถกลืนเป็นเนื้อเดียวกันได้ระหว่างลวดเชื่อมและรางรถไฟ เนื่องจากรางรถไฟมีอุณหภูมิต่ำ ความร้อนจากกระบวนการเชื่อมถูกดึงออกอย่างรวดเร็วเนื่องด้วยอุณหภูมิส่วนอื่นของรางรถไฟยังคงต่ำอยู่เพราะไม่ได้รับผลกระทบจากกระบวนการเชื่อม การละลายของลวดเชื่อมและรางไม่สม่ำเสมอ ภายหลังการเย็นตัวจึงไม่สามารถเป็นเนื้อเดียวกัน ตรงข้ามกันพบว่ารางรถไฟที่ผ่านการอุ่นด้วยอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ลักษณะการต่อระหว่างแนวเชื่อมและเนื้อรางรถไฟมีความสมบูรณ์อย่างชัดเจน เนื้อวัสดุทั้งสองชนิดสามารถหลอมละลายรวมกันได้เป็นอย่างดี ในขณะที่รางรถไฟที่ผ่านการอุ่นด้วยอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ลักษณะการหลอมละลายไม่สมบูรณ์และไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยพบได้จากลวดเชื่อมที่หลอมละลายแทรกตัวอยู่ในเนื้อรางรถไฟอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่สามารถหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุทั้งสองชนิดได้จากความแตกต่างของโครงสร้างรางรถไฟบริเวณหลอมละลาย (weld metal) ภายหลังการเชื่อมจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลของรางรถไฟ (Li et al., 2023) ผลการทดสอบความแข็งแรงแสดงให้เห็นว่าความร้อนจากกระบวนการเชื่อมส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกล โดยเฉพาะความแข็งแรงซึ่งทำให้ความสามารถในการรับแรงลดลง เมื่อนำไปใช้งานจะมีอัตราการสึกหรอที่รวดเร็ว (Wang et al., 2025) การอุ่นชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง ทำให้ความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากภายหลังจากการเชื่อมซ่อมรางมีอัตราการเย็นตัวช้า ขณะที่การอุ่นชิ้นงานด้วยอุณหภูมิต่ำทำให้ความแข็งแรงสูงเนื่องจากอัตราการเย็นตัวเร็ว ขณะที่ค่าคาร์บอนเทียบเท่าที่แตกต่างกันของลวดเชื่อมส่งผลต่อค่าความแข็งแรงและโครงสร้าง โดยที่ค่า

คาร์บอนเทียบเท่าสูง เพิ่มความสามารถในการเปลี่ยนแปลงจากออสเตไนต์เป็นเฟอไรต์และเพอร์ไรต์ต่ำลง และทำให้โครงสร้างละเอียดมากขึ้น ขณะที่ค่าคาร์บอนเทียบเท่าต่ำ ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงจากออสเตไนต์เป็นเฟอไรต์และเพอร์ไรต์เร็วกว่าและทำให้โครงสร้างหยาบมากขึ้น การควบคุมอุณหภูมิการขึ้นชิ้นงานก่อนการเชื่อมและอัตราการเย็นตัวภายหลังการเชื่อมที่ไม่เหมาะสม ทำให้มีแนวโน้มเกิดความเค้นตกค้างและแตกร้าวจากไฮโดรเจน ดังนั้นในการเชื่อมซ่อมรางรถไฟต้องควบคุมอุณหภูมิก่อนการเชื่อม ขณะเชื่อมและหลังการเชื่อมเพื่อไม่ให้เกิดการเชื่อมส่งผลกระทบต่อโครงสร้าง สมบัติทางกล และอายุการใช้งาน

สรุป

ผลกระทบของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์ต่อโครงสร้างและความแข็งแรงของรางรถไฟเกรด 900A พบว่าความร้อนจากกระบวนการเชื่อมกระจายตัวในแนวรัศมีออกจากจุดศูนย์กลางของจุดเชื่อม โครงสร้างรางรถไฟภายหลังการเชื่อมซ่อมด้วยลวดเชื่อมทั้ง 4 ชนิดประกอบด้วยเฟอไรต์และเพอร์ไรต์ เนื่องจากส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมและอัตราการเย็นตัวหลังการเชื่อมซ่อม การขึ้นร่างด้วยอุณหภูมิ 150 และ 350 องศาเซลเซียส ทำให้มีการหลอมละลายระหว่างรอยเชื่อมและเนื้อรางไม่สมบูรณ์ ขณะที่การขึ้นร่างด้วยอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส รอยเชื่อมและเนื้อรางสามารถหลอมละลายสมบูรณ์ และกลืนกันได้ดี การขึ้นร่างด้วยอุณหภูมิต่ำทำให้รางมีความแข็งแรงสูงกว่ารางที่ขึ้นด้วยอุณหภูมิสูง และแนวเชื่อม 1 ชั้น มีความแข็งแรงสูงสุดเมื่อเทียบกับการเชื่อม 2 และ 3 ชั้น เนื่องจากการเย็นตัวเร็วกว่า ขณะที่การเพิ่มจำนวนชั้นในการเชื่อมทำให้ความแข็งแรงลดลงและพบโครงสร้างโดยรวมหยาบขึ้น เนื่องจากการขึ้นร่างที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการสะสมความร้อน การเย็นตัวภายหลังการเชื่อมจึงช้าลงไปด้วย ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า อุณหภูมิการขึ้นชิ้นงาน 150-200 องศาเซลเซียส และจำนวนชั้นในการเชื่อมระหว่าง 1-2 ชั้น เป็นปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์รางรถไฟเกรด 900A ทั้งนี้ผลการทดลองที่แสดงไม่ครอบคลุมถึงการวิเคราะห์ความเหมาะสมสำหรับการใช้งานจริงเนื่องจากข้อจำกัดด้านเครื่องมือ

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากแผนงานบูรณาการพัฒนามนาคมนาคมและระบบโลจิสติกส์ โครงการการจัดทำร่างมาตรฐานการตรวจสอบและซ่อมบำรุงรถไฟที่มีความลาดชันสายเหนือ จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ประจำปีงบประมาณ 2567

เอกสารอ้างอิง

- American Welding Society. (2022). *AWS D15.2/D15.2M:2022 An American National Standard, Specification for Joining Railroad Rail and Related Rail Components*. American Welding Society.
- Akama, M. (2025). Rolling contact Fatigue and wear of rails and wheels: A comprehensive review. *Machines* 2025, 13, 970. <https://doi.org/10.3390/machines13100970>
- Ajenifuja, E., Popoola, A. P. I., & Popoola, O. (2025). Comparative analysis of structural and mechanical properties of duplex stainless steel (DSS) weldments prepared by flux core arc welding and shielded metal arc welding processes. *Journal of Advanced Joining Processes*, 11, 100295. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2025.100295>

- Aksenova, K. V., Gromov, V. E., Ivanov, Y. F., Vashchuk, E. S., & Porfiriev, M. A. (2024). Evolution of the lamellar pearlite structure of rail steel under tension. *Technical Physics*, 69(1), 57-61.
<https://doi.org/10.1134/S1063784224700312>
- Andersson, B., Steyn, E., Ekh, M. & Josefson, L. (2025). Simulation-based assessment of railhead repair welding process parameters. *Welding in the World*, 69, 177-197. <https://doi.org/10.1007/s40194-024-01837-y>
- Banleng, S., Lothongkham, K., & Hartung, F. (2015). Welding of rail: Technology and metallurgy. *The Journal of Welding Institute of Thailand*, 1(2), 37-45. [https://wit.kmutnb.ac.th/myfile/Journals/journals/web-วารสารวิชาการสถาบันการเชื่อมแห่งประเทศไทย%20ปีที่%201%20ฉบับที่%202%20ปี%202558-AWT-23feb16-r2-2%20\(AWT\)-re.pdf](https://wit.kmutnb.ac.th/myfile/Journals/journals/web-วารสารวิชาการสถาบันการเชื่อมแห่งประเทศไทย%20ปีที่%201%20ฉบับที่%202%20ปี%202558-AWT-23feb16-r2-2%20(AWT)-re.pdf)
- Fei, J., Zhou, G., Zhou, J., Zhou, X., Li, Z., Zuo, D., & Wu, R. (2023). Research on the effect of pearlite lamellar spacing on rolling contact wear behavior of U75V rail steel. *Metals*, 13(2), 237.
<https://doi.org/10.3390/met13020237>
- Fourlakidis, V., Hernando, J. C., Diószegi, A., & Holmgren, D. (2023). Relationship between thermal conductivity and tensile strength in cast irons. *International Journal of Metalcasting*, 17(4), 2862-2867. <https://doi.org/10.1007/s40962-023-00970-6>
- Intawong, N., Phaoniam, R., & Wonthaisong, S. (2023). Evaluation of cold cracking susceptibility in fully pearlitic rail steel during flux cored-arc welding using implant testing. *Solid State Phenomena*, 378, 13-21. <https://doi.org/10.4028/p-aC2Ppn>
- Jabtonska, M., Lewandowski, F., Chmiela, B., & Gronostajski, Z. (2023). Advanced heat treatment of pearlitic rail steel. *Materials*, 16(19), 6430. <https://doi.org/10.3390/ma16196430>
- Kaewniam, W., & Kunthong, P. (2020). *A study of rail weld inspection using acoustic emission* (pp. 397-403). In Proceedings of the 4th KU SRC Annual Conference. Kasetsart University Si Racha Campus, Chon Buri, Thailand
- Le, T. N., Vu, A. T., Le, H. C., Dong, V. H., Nguyen, V. P., & Dang, T. N. (2024). Effect of heat source on the formation of welding zone structure between carbon steel and stainless steel applied in shipbuilding. *International Journal of Applied Science, Engineering and Information Technology*, 14(2), 749-760.
<https://doi.org/10.18517/ijaseit.14.2.18828>
- Li, J., Hu, B., Zhao, L., Li, F., He, J., Wang, Q., & Liu, R. (2023). Influence of heat input on the microstructure and impact toughness in weld metal by high-efficiency submerged arc welding. *Metals*, 13(7), 1217. <https://doi.org/10.3390/met13071217>
- Muangjunburee, P., Oo, H. Z., Abd Rahim, S. Z., & Srikarun, B. (2024). Effects of heat input and preheating temperature on the microstructure and hardness of repairing the heat-affected zone of thermite welded rail head surface. *Indonesian Journal of Science & Technology*, 9(2), 421-440.
<https://doi.org/10.17509/ijost.v9i2.71238>

- Poolsiri, N., Petchsang, S., Tehyo, M., Sani, S., & Muangjunburee, P. (2021). Effect of electrode selection on impact toughness in weld metal of rail steel grade 900A. *Princess of Naradhiwas University Journal*, 13(2), 183-198. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/pnujr/article/view/242937>
- Pribadi, Y. U., Gunawan, L., & Suweca, I. W. (2024). A review of wheel wear damage in railway vehicle. *Jurnal Perkeretaapian Indonesia (Indonesian Railway Journal)*, 8(1), 42-52. <https://jurnal.ppi.ac.id/jpi/en/article/view/348>
- Qin, H., Tang, Y., & Liang, P. (2021). Effect of heat input on microstructure and corrosion behavior of high strength low alloy steel welds. *International Journal of Electrochemical Science*, 16, 210449. <https://doi.org/10.20964/2021.04.07>
- Sangsuriya, M., & Surin, P. (2019). Study of microstructure and creep resistance of electrical welding process in spheroidal graphite cast-iron. *Eau Heritage Journal Science and Technology*, 13(1), 197-209. <https://he01.tcithaijo.org/index.php/EAUHJSci/article/view/177206/129746>
- Schröpfer, D., Witte, J., Kromm, A., Barroi, A., Kannengiesser, T., & Nolze, G. (2024). Stresses in repair welding of high-strength steels Part 2: Heat control and stress optimization. *Welding in the World*, 68, 2537-2551. <https://doi.org/10.1007/s40194-024-01731-7>
- Shaikh, M. S., Shajib, M. S., Kader, M. A., Mondal, D., & Islam, M. A. (2025). Effect of preheating on microstructure and mechanical properties in mild steel arc weld joints. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 22(1), 12133-12145. <https://doi.org/10.15282/ijame.22.1.2025.14.0931>
- Srijampan, W., Tongsri, R., Yotkaew, T., Torsangthum, N., Morakotjinda, M., Krataitong, R., & Wiengmoon, A. (2016). Relationship between microstructure and mechanical property of sintered Fe-Cr-Mo steels. *Naresuan University Journal: Science and Technology*, 24(2), 175-182. <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/ahstr/article/view/1914>
- Thawatchai, P., & Anek, N. (2025). *Factors that cause Rail Broken or Cracked with standard rail defect code number UIC712R*. In Proceedings of the 28th National Convention on Civil Engineering. Phuket, Thailand.
- Tressia, G., Alves, L. H. D., Goldenstein, H., Grandini, C. R., Mohtadi-Bonab, M. A., & Masoumi, M. (2024). Enhancing wear resistance and mechanical properties of eutectoid pearlitic steel through low-temperature annealing: Microstructural transformations and performance implications in railway applications. *Materials Research*, 27, e20240295. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2024-0295>
- Wang, S., Wen, B., Ren, D., Ding, Y., Wen, Z., Dong, D., & Tao, G. (2023). Analysis of the causes of severe side wear of the high rail on metro curves by numerical simulation and field investigation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 238(4), 381-393. <https://doi.org/10.1177/095444097231193274>

- Wang, L., Jiang, Y., Hu, C., Wan, X., & Li, G. (2025). Effect of heat input on microstructure evolution and fracture toughness of interlayer heat affected zone in ultra-high strength steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 39, 5189-5198. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.10.201>
- Zani, N., Mazzù, A., Solazzi, L., & Petrogalli, C. (2024). Examining wear mechanisms in railway wheel steels: Experimental insights and predictive mapping. *Lubricants*, 12(3), 93. <https://doi.org/10.3390/lubricants12030093>
- Zaw O, H., & Muangjunburee, P. (2023). Improving microstructure and hardness of softening area at HAZ of thermite welding on rail running surface. *Materials Today Communications*, 34, 105485. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105485>