



การศึกษาการสึกหรอแบบขัดสีของการเชื่อมซ่อมเหล็กรางรถไฟเกรด R260

Study of Abrasive Wear of Railway Welding Steel Repair, Grade R260

บันเทิง ศรีकरัน^{1*}, สลิตา เพชรสังข์², ประภาศ เมืองจันทร์บุรี²

Buntoeng Srikarun^{1*}, Salita Petchsang², Prapas Muangjunburee²

(Received: May 27, 2020; Revised: July 16, 2020; Accepted: July 24, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กรางรถไฟเกรด R260 ที่ไม่ผ่านการเชื่อมซ่อมและผ่านการเชื่อมซ่อมด้วยการเชื่อมอาร์คคลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ โดยใช้ลวดเชื่อมมาตรฐาน DIN 8555: E1-UM-350 จำนวน 3 ยี่ห้อเพื่อเปรียบเทียบกัน จากนั้นทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาค ความแข็ง การสึกหรอ และผิวที่สึกหรอบริเวณเหล็กรางรถไฟเดิมและบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมซ่อม จากผลการศึกษาพบว่าเหล็กรางรถไฟเกรด R260 ที่ไม่ผ่านการเชื่อมซ่อมมีโครงสร้างโดยรวมเป็นเพิร์ลไลต์ (Pearlite Matrix) ในขณะที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมซ่อมด้วยลวดเชื่อมยี่ห้อ A B และ C มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่ขอบเกรน (Grain Boundary Ferrite) และโครงสร้างจุลภาคเป็นลักษณะเบไนต์ (Bainite) ที่เพิ่มเข้ามา นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความแข็งไม่มีผลต่อการสึกหรอ โดยเหล็กรางรถไฟเดิมเกิดการสึกหรอน้อยที่สุดแต่มีความแข็งต่ำที่สุด ในขณะที่เหล็กรางรถไฟที่ผ่านการเชื่อมซ่อมด้วยลวดเชื่อมยี่ห้อ C มีค่าความแข็งสูงที่สุดแต่กลับมีการสึกหรอสูงที่สุด เหล็กรางรถไฟเดิมและเหล็กรางรถไฟที่ผ่านการเชื่อมซ่อมด้วยลวดเชื่อมยี่ห้อ A มีกลไกการสึกหรอส่วนใหญ่เป็นแบบการตัดขนาดเล็ก (Micro Cutting) ส่วนเหล็กรางรถไฟที่ผ่านการเชื่อมซ่อมด้วยลวดเชื่อมยี่ห้อ B และ C มีกลไกการสึกหรอส่วนใหญ่เป็นแบบการไถขนาดเล็ก (Micro Ploughing) และการแตกขนาดเล็ก (Micro Fracture) ดังนั้นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ยี่ห้อ A จึงเหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้สำหรับการเชื่อมซ่อมเหล็กรางรถไฟเกรด R260

คำสำคัญ: เหล็กรางรถไฟ การเชื่อมซ่อม การเชื่อมอาร์คคลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ การสึกหรอแบบขัดสี

¹สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

¹School of Engineering and Technology, Walailak University

²ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

²Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

* Corresponding Author: buntoeng.sr@wu.ac.th



Abstract

The purpose of this research was to investigate an abrasive wear of the railway steel grade R260 that had not been repaired and one that had been repaired by shielded metal arc welding (SMAW). The covered electrodes used were DIN 8555: E1-UM-350. There were 3 different brands to compare. The chemical composition, microstructure, hardness, wear test, and worn surface of railway steel and repaired weld metals were investigated. The results presented that the railway steel grade R260 without repaired contained pearlite matrix while the repaired weld metal by covered electrodes A, B, and C exhibited grain boundary ferrite and bainitic structure being added. Besides, the hardness values did not follow the wear resistance. The railway steel showed the highest wear resistance, but the lowest hardness. The maximum hardness could be found in the repaired weld metal using covered electrode C compared to other types of the electrode, whereas its wear resistance was minimum. In addition, the worn surface mechanism of the railway steel and the repaired weld metal by covered electrode A was mainly micro cutting. On the other hand, the repaired weld metal by covered electrode B and C resulted in micro ploughing and micro fracture. Therefore, the cover electrode brand A showed the most suitable for repaired welding of railway steel grade R260.

Keywords: Railway steel, Repaired welding, Shielded metal arc welding, Abrasive wear

บทนำ

ในปัจจุบันการคมนาคมและการขนส่งในประเทศไทยมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะการคมนาคมและการขนส่งทางรางซึ่งได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง มีการขยายงานอย่างรวดเร็วในระยะเวลา 20 ปีที่ผ่านมา กระทรวงคมนาคมมีแผนงานการปรับปรุงระบบและโครงสร้างพื้นฐานและพัฒนากระบวนรถไฟรางคู่มาแทนระบบรางเดี่ยว ระบบโครงสร้างพื้นฐานอย่างหนึ่งคือการวางรางรถไฟ การวางรางรถไฟใหม่รวมถึงการบำรุงทางจะต้องมีการเชื่อมเข้ามาเกี่ยวข้องอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยเฉพาะการเชื่อมซ่อมบำรุง (Tipsunave, Thawornsupacharoen, Hommuang, Simlee, & Paitoonphon, 2019; Sato, Matsumoto, & Knothe, 2002)

เหล็กรางรถไฟเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งของระบบรางรถไฟ ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการใช้เหล็กรางรถไฟ EN 13674-1 เกรด R260 (EN 54 E1) ในโครงการรถไฟทางคู่ เหล็กรางรถไฟทำหน้าที่รับน้ำหนักของรถไฟ ช่วยบังคับทิศทางของรถไฟ และช่วยให้การเคลื่อนที่ของรถไฟเป็นไปอย่างราบเรียบ รางรถไฟจะต้องมีความแข็งแรงในการรับภาระเชิงกล การโก่งตัวทั้งในแนวนอนและแนวขวาง



แรงคัต แรงเหวี่ยง แรงดึง แรงอัด การบิดตัว การล้าจากการก่อกวนของล้อย รวมทั้งการรับการก่อกวนด้วยความเร็วสูง นอกจากนี้ยังต้องทนทานต่อการกระทำในหลายๆ ลักษณะ เช่น การเสียดสีในลักษณะการประกอบกรวย การเสียดสีของล้อยกับราง และการสึกหรอจากการก่อกวนกระแทก (Sornil, Lothongkum, & Hartung, 2015; Jun, Seo, Jeon, Lee, & Chang, 2016)

เหล็กรางรถไฟประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ หัวราง (Head) เอวราง (Web) และฐานราง (Foot) สำหรับเหล็กรางรถไฟเมื่อผ่านการใช้งานก็จะเกิดการชำรุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการชำรุดที่บริเวณหัวรางซึ่งเป็นบริเวณที่มีการสัมผัสกับล้อรถไฟ การเปลี่ยนรางรถไฟใหม่แทนที่รางรถไฟที่ชำรุดเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เนื่องจากต้องใช้งบประมาณค่อนข้างสูงและมีความยุ่งยากเป็นอย่างมาก ดังนั้นการซ่อมเพื่อยืดอายุการใช้งานจึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งการซ่อมโดยกรรมวิธีการเชื่อมอาร์คลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เป็นที่นิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นกรรมวิธีที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและมีต้นทุนน้อย (Shibe & Chawla, 2018; Seo, Kim, Kwom, & Jun, 2019) สำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อคุณภาพของบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม ดังนั้นการเลือกใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญตามไปด้วย โดยมีข้อกำหนดว่าบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมจะต้องมีสมบัติที่ดีกว่าหรือใกล้เคียงกับเหล็กรางรถไฟเดิมที่ไม่ผ่านการเชื่อมซ่อม (Sergejevs & Tipainis, 2016; Roy et al., 2018)

จากข้อมูลและเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ โดยมีแนวคิดในการเลือกลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่เหมาะสมต่อการเชื่อมซ่อมเหล็กรางรถไฟเกรด R260 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมอาร์คลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ แล้วทำการเปรียบเทียบกับเหล็กรางรถไฟเดิม รวมทั้งได้มีการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีเพื่อยืนยันถึงความสามารถในการทนต่อการสึกหรอแบบขัดสี

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กรางรถไฟเกรด R260 ที่ไม่ผ่านและผ่านการเชื่อมซ่อม
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของเหล็กรางรถไฟเกรด R260 ที่ไม่ผ่านและผ่านการเชื่อมซ่อม
3. เพื่อเลือกลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่เหมาะสมต่อการเชื่อมซ่อมเหล็กรางรถไฟเกรด R260

วิธีการวิจัย

1. วัสดุ

เหล็กรางรถไฟที่ใช้เป็นโลหะฐาน (Base Metal) ในงานวิจัยนี้คือ เหล็กรางรถไฟมาตรฐาน EN 13674-1 เกรด R260 (EN 54 E1) แสดงดังภาพที่ 1(ก) ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีแสดงดังตารางที่ 1 โดยมีค่า

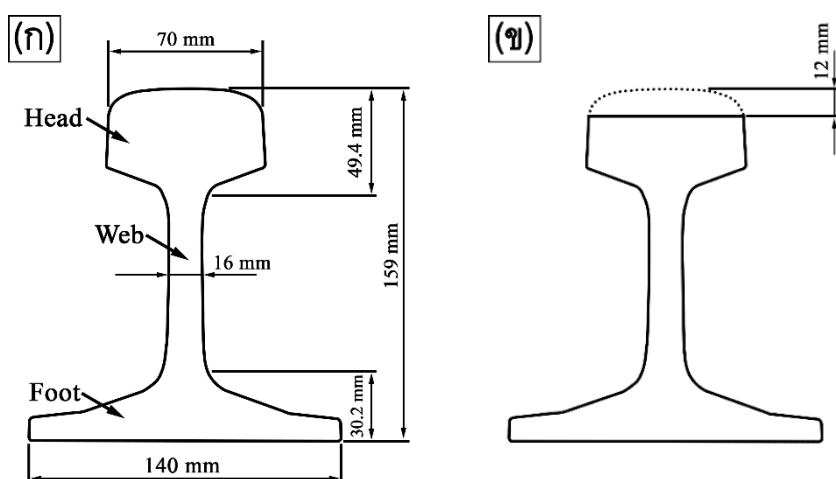


ความแข็ง 258-303 วิกเกอร์ เหล็กทรงรถไฟถูกเตรียมให้มีความยาว 250 มิลลิเมตร จากนั้นจึงทำการกัด (Milling) บริเวณหัวราง โดยวัดจากหัวรางลงมา 12 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 1(ข) เพื่อเป็นการจำลอง สภาพเหล็กทรงรถไฟที่เกิดการสึกหรอจากการใช้งาน

ลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐาน DIN 8555: E1-UM-350 ซึ่งนิยมใช้สำหรับงาน เชื่อมพอกแข็ง (Hardfacing) เพื่อการซ่อมบำรุง โดยในงานวิจัยนี้มีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ทั้งหมด 3 ยี่ห้อ คือ ยี่ห้อ A B และ C ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตรเท่ากันทั้งหมด

2. ขั้นตอนการเชื่อม

ทำการเชื่อมซ่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมอาร์คลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ โดยใช้เครื่องเชื่อมยี่ห้อ Fronius รุ่น TransPuls Synegic 4000 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้ต้องทำการอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นก่อนนำไปใช้งาน สำหรับเหล็กทรงรถไฟต้องมีการให้ความร้อนก่อนเชื่อมที่ อุณหภูมิ 400 °C ตามหลักการคำนวณค่าคาร์บอนเทียบเท่า (Carbon Equivalent) แสดงดังสมการที่ 1 (Yamamoto, 2008) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.94% จากนั้นจึงทำการเชื่อมซ่อมที่บริเวณหัวรางโดยมีตัวแปรเชื่อม แสดงดังตารางที่ 2 ทำการเชื่อมทั้งหมด 3 ชั้น ชั้นแรกมีแนวเชื่อม 9 แนว ชั้นที่ 2 มี 8 แนว และชั้นที่ 3 มี 7 แนว ตามลำดับ โดยแต่ละแนวเชื่อมมีการซ้อนทับกันประมาณ 30% แสดงดังภาพที่ 2(ก) หลังจากทำการเชื่อมเสร็จแล้วจึงปล่อยให้ชิ้นงานเชื่อม (Welded Sample) เย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำชิ้นงานเชื่อมไปกัดบริเวณผิวด้านบน (Top Surface) ตรงบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมชั้นที่ 3 โดยกัด ออกประมาณ 2 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 2(ข) แล้วจึงนำชิ้นงานเชื่อมไปตัดแบ่งด้วยเครื่องมือทางกลที่ ตำแหน่งต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 3 เพื่อเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบ (Specimen) ในลำดับต่อไป



ภาพที่ 1 เหล็กทรงรถไฟ EN 54 E1 (ก) ก่อนการกัดที่บริเวณหัวราง (ข) หลังการกัดที่บริเวณหัวราง



ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กทรงรีไฟและลวดเชื่อมตามที่ผู้ผลิตกำหนด (% โดยน้ำหนัก)
(Steel & Metal, 2014)

วัสดุ	มาตรฐาน	C	Si	P	S	Mn	Cr	Fe
เหล็กทรงรีไฟ	EN 13674-1	0.62-	0.15-	≤ 0.025	≤ 0.025	0.70-	≤ 0.15	Balance
เกรด R260		0.80	0.58			1.20		

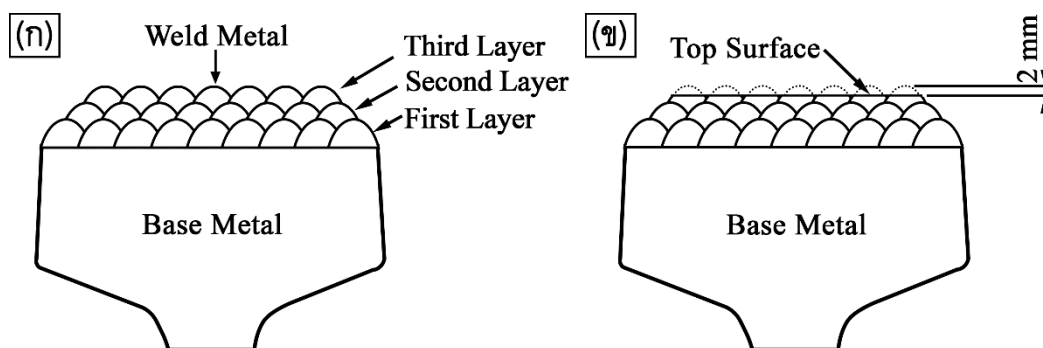
$$\text{คาร์บอนเทียบเท่า (\%)} = C + 1/6Mn + 1/24Si + 1/5Cr + 1/4Mo + 1/15Ni \quad (1)$$

ตารางที่ 2 ตัวแปรเชื่อมสำหรับการเชื่อมซ่อมเหล็กทรงรีไฟ

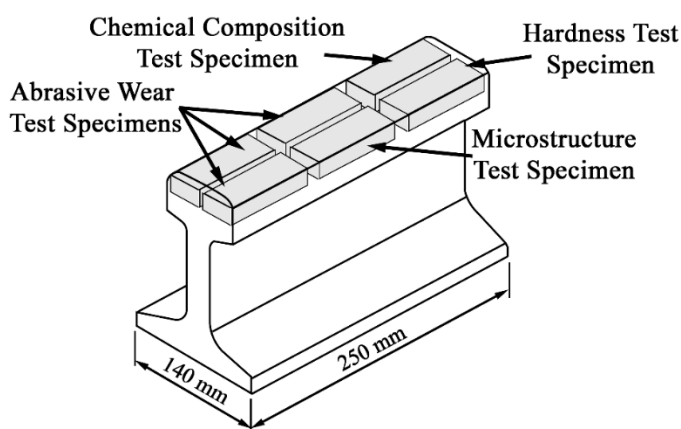
ตัวแปรเชื่อม	ลวดเชื่อมยี่ห้อ A	ลวดเชื่อมยี่ห้อ B	ลวดเชื่อมยี่ห้อ C
ชนิดของสารพอกหุ้ม	รูไทล์	ด่าง/ไฮโดรเจนต่ำ	รูไทล์
กระแสเชื่อม (แอมป์)	149-150	150-155	150-158
แรงดันเชื่อม (โวลต์)	29-33	20-23	21-25
ชนิดกระแสเชื่อม	DCEP	DCEP	DCEP
ความเร็วในการเชื่อม (เซนติเมตร/นาที)	36-40	26-29	26-28
ความร้อนเข้า (กิโลจูล/เซนติเมตร)	5.49	5.36	6.01

3. การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี

เตรียมชิ้นงานทดสอบให้มีขนาดกว้าง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 76.2 มิลลิเมตร และหนา 12.7 มิลลิเมตร ทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณเหล็กทรงรีไฟเดิมและบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมตรงผิวด้านบนด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Optical Emission Spectrometer: OES) ยี่ห้อ Thermo ARL รุ่น 3460 โดยวิเคราะห์เป็นจำนวน 3 ตำแหน่ง



ภาพที่ 2 การเชื่อมซ่อมเหล็กทรงรีไฟบริเวณหัวราง (ก) ก่อนการกัดตรงบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม
(ข) หลังการกัดตรงบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม



ภาพที่ 3 ตำแหน่งการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

4. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคมีขนาดเท่ากับชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี โดยในขั้นตอนแรกนำชิ้นงานทดสอบตรงผิวด้านบนของบริเวณเหล็กแรงดึงไฟเค็มและบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมมาขัดหยาบด้วยกระดาษทราย แล้วจึงขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินาขนาด 3 ไมครอน จากนั้นนำมากัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารละลายไนตอล (ASTM E407-07, 2007) หลังจากนั้นจึงนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope: OM) ยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Axio Scope.A1 ที่กำลังขยาย 500 เท่า นอกจากนี้ยังได้มีการหาปริมาณเฟสของโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมด้วยโปรแกรม ImageJ ซึ่งเป็นวิธีการหาเปอร์เซ็นต์พื้นที่ของเฟสจากการจำแนกความแตกต่างระดับความเข้มของสีจากภาพโครงสร้างจุลภาค (ASTM E1245-03, 2003)

5. การทดสอบความแข็ง

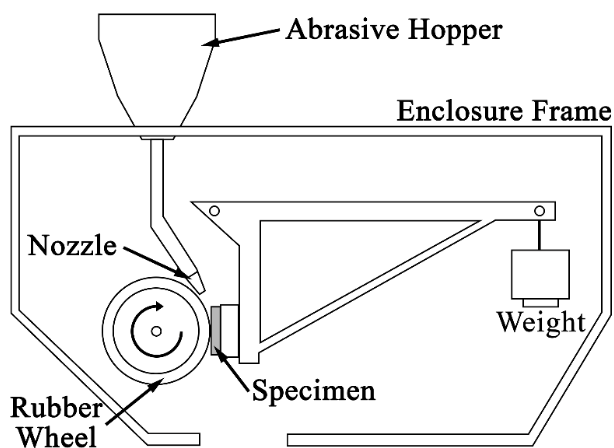
ทำการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers Hardness) ด้วยเครื่องวัดความแข็งยี่ห้อ Matsuzawa รุ่น MMT-X7B โดยวัดความแข็งบริเวณเหล็กแรงดึงไฟเค็มและบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมตรงผิวด้านบน โดยเป็นการวัดแบบสุ่มจำนวน 10 ตำแหน่งต่อชิ้นงานทดสอบ ใช้แรงในการกด 0.2 กิโลกรัม เป็นเวลา 10 วินาที นอกจากนี้ยังได้มีวัดค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมในตำแหน่งของโครงสร้างหรือเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้น โดยใช้แรงในการกด 0.05 กิโลกรัม (ASTM E384-17, 2017)



6. การทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี

ชิ้นงานทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีมีขนาดกว้าง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 76.2 มิลลิเมตร และหนา 12.7 มิลลิเมตร ในขั้นตอนแรกเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบให้มีความเรียบประมาณ 0.8 ไมครอน โดยการนำไปขัดด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์กริต 600 (Grit 600) ทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive Wear Test Machine) แสดงดังภาพที่ 4 โดยใช้ทรายควอตซ์เป็นอนุภาคในการขัดสี (Abrasive Particles) ซึ่งมีขนาด 212-300 ไมครอน โดยมีอัตราการไหลของทรายควอตซ์คงที่ 340 กรัมต่อนาที ความเร็วรอบของล้อยางหมุนเท่ากับ 200 รอบต่อนาที แรงที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบเท่ากับ 130 นิวตัน และระยะทางเชิงเส้นในการทดสอบเท่ากับ 4,309 เมตร (ASTM G65-00, 2000) โดยก่อนการทดสอบการสึกหรอต้องนำชิ้นงานทดสอบไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Denver รุ่น TB-214 ที่มีความละเอียดถึง 0.0001 กรัม แล้วทำการชั่งน้ำหนักอีกครั้งหลังการทดสอบการสึกหรอเพื่อนำไปคำนวณมวลที่หายไป (Mass Loss) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากชิ้นงานทดสอบจำนวน 3 ชิ้นงาน จากนั้นจึงนำไปคำนวณค่าความต้านทานการสึกหรอ (Wear Resistance) โดยวิธีการคำนวณแสดงดังสมการที่ 2 นอกจากนี้ยังได้มีการนำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอไปตรวจสอบบริเวณผิวที่สึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 200 เท่า

$$\text{ความต้านทานการสึกหรอ (เมตร/มิลลิกรัม)} = 4,309 \text{ (เมตร) / มวลที่หายไป (มิลลิกรัม)} \quad (2)$$



ภาพที่ 4 เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี



ผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี

ส่วนผสมทางเคมีบริเวณผิวด้านบนของเหล็กรางรถไฟและบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมแสดงดังตารางที่ 3 โดยพบว่าเหล็กรางรถไฟเดิมมีส่วนผสมทางเคมีที่ใกล้เคียงกับที่ผู้ผลิตกำหนดมา ส่วนเหล็กรางรถไฟที่ผ่านการเชื่อมซ่อมด้วยลวดเชื่อมยี่ห้อ A B และ C พบว่าที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมมีส่วนผสมทางเคมีที่ใกล้เคียงกับที่ผู้ผลิตกำหนดมาเช่นกัน ยกเว้นธาตุคาร์บอนและโครเมียมที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีพบว่าเหล็กรางรถไฟเดิมมีปริมาณคาร์บอนมากที่สุดและปริมาณโครเมียมน้อยที่สุด ส่วนบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของลวดเชื่อมยี่ห้อ C มีปริมาณคาร์บอนน้อยที่สุดแต่มีปริมาณโครเมียมมากที่สุด

ตารางที่ 3 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กรางรถไฟและบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (% โดยน้ำหนัก)

วัสดุ	C	Si	Mn	Ni	Cr	V	Fe	C
เหล็กรางรถไฟเกรด R260	0.79	0.32	0.80	0.01	0.04	-	98.02	0.94
ชิ้นงานเชื่อม A	0.40	0.52	0.87	0.03	1.60	0.04	96.40	0.89
ชิ้นงานเชื่อม B	0.20	0.98	1.26	0.07	2.16	0.013	95.21	0.89
ชิ้นงานเชื่อม C	0.18	0.60	0.68	0.03	3.15	0.03	95.24	0.95

2. ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคแสดงดังภาพที่ 5 โดยภาพที่ 5(ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กรางรถไฟเดิมซึ่งมีโครงสร้างโดยรวมเป็นเฟอไรต์ที่จุดยูเทคตอยด์ (Eutectoid) เนื่องจากเป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอน 0.79% (Taleff, Lewandowski, & Pouradian, 2002) ส่วนโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมยี่ห้อ A B และ C แสดงดังภาพที่ 5(ข)-(ง) โดยพบว่าบริเวณพื้นที่สีที่บัพที่จับตัวเป็นกลุ่มก้อนคือโครงสร้างเบไนต์ที่เพิ่มเข้ามา (Bainitic Structure) และบริเวณพื้นที่สีขาวที่อยู่บริเวณขอบเกรนคือเฟสเฟอร์ไรต์ (Grain Boundary Ferrite) โดยโครงสร้างเบไนต์ที่เพิ่มเข้ามาเกิดจากการมีส่วนผสมทางเคมีที่เพียงพอและมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการเชื่อม (Viafara, Castro, Velez, & Toro, 2005) ส่วนเฟสเฟอร์ไรต์ที่บริเวณขอบเกรนคาดว่าเกิดจากการจับตัวกันของเหล็กคาร์บอนกับธาตุผสมอื่นๆ เช่น แมงกานีส และ โครเมียม (Yang et al., 2013)

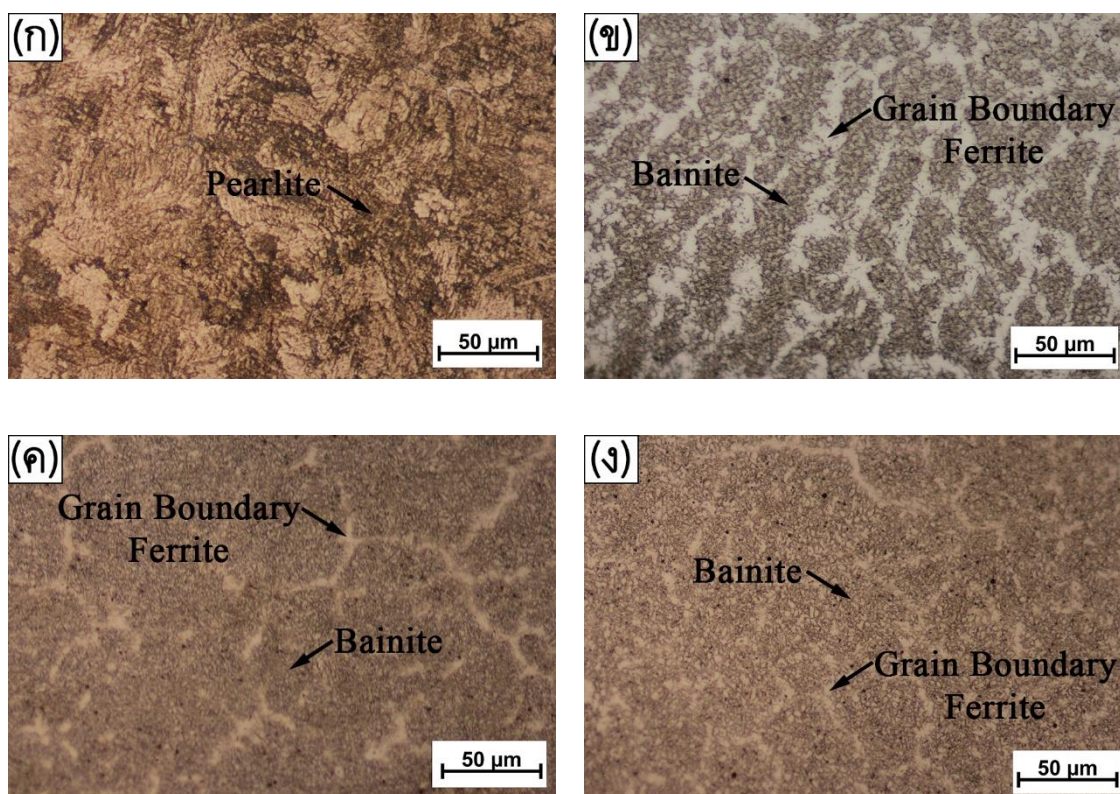
ผลการหาปริมาณเฟสของโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพโครงสร้างจุลภาคพบว่าการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมยี่ห้อ A มีโครงสร้างเบไนต์น้อยที่สุดคือ 40.63% แต่มีปริมาณเฟสเฟอร์ไรต์มากที่สุดคือ 59.37% การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมยี่ห้อ B มีโครงสร้างเบไนต์ 51.58%



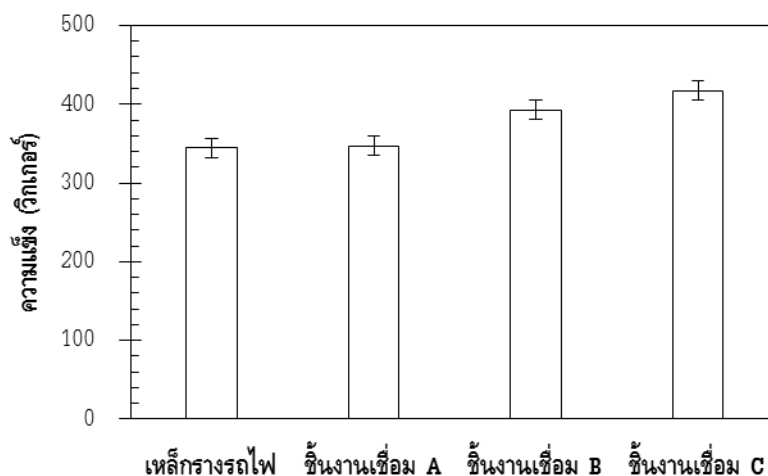
และมีปริมาณเฟสเฟอร์ไรต์ 48.42% ส่วนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมยี่ห้อ C พบว่ามีปริมาณโครงสร้างเบไนต์มากที่สุดคือ 56.13% แต่มีปริมาณเฟสเฟอร์ไรต์น้อยที่สุดคือ 43.87%

3. ผลการทดสอบความแข็ง

ผลการทดสอบความแข็งบริเวณผิวด้านบนของชิ้นงานทดสอบแสดงดังภาพที่ 6 โดยเหล็กถาวรรถไฟเดิมมีความแข็ง 344.3 วิกเกอร์ เนื่องจากมีโครงสร้างโดยรวมเป็นเพิร์ลไลต์ สำหรับบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมซึ่งมีโครงสร้างเบไนต์และเฟสเฟอร์ไรต์ที่บริเวณขอบเกรนนั้นพบว่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมยี่ห้อ A มีค่าต่ำที่สุดคือ 347.3 วิกเกอร์ บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมยี่ห้อ B มีค่าความแข็ง 392.9 วิกเกอร์ ส่วนบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมยี่ห้อ C มีค่าความแข็งสูงที่สุดคือ 417.4 วิกเกอร์ โดยทั่วไปแล้วเป็นที่ทราบกันดีว่าโครงสร้างเบไนต์มีความแข็งที่สูงกว่าโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Lai et al., 2018) ผลจากการทดสอบความแข็งที่บริเวณโครงสร้างเฟสต่างๆ ที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมพบว่าบริเวณพื้นที่สีทึบซึ่งเป็นโครงสร้างเบไนต์มีความแข็ง 380-440 วิกเกอร์ ส่วนบริเวณพื้นที่สีขาวที่อยู่บริเวณขอบเกรนซึ่งเป็นเฟสเฟอร์ไรต์มีความแข็ง 210-250 วิกเกอร์



ภาพที่ 5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวด้านบนของชิ้นงานทดสอบ (ก) เหล็กถาวรรถไฟ (ข) ชิ้นงานเชื่อม A (ค) ชิ้นงานเชื่อม B และ (ง) ชิ้นงานเชื่อม C

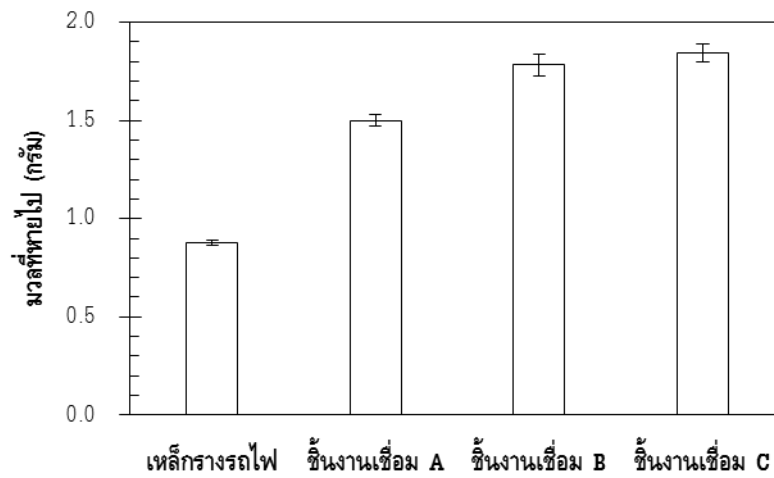


ภาพที่ 6 ความแข็งแรงบริเวณผิวด้านบนของเหล็กแรงรถไฟและชิ้นงานเชื่อม

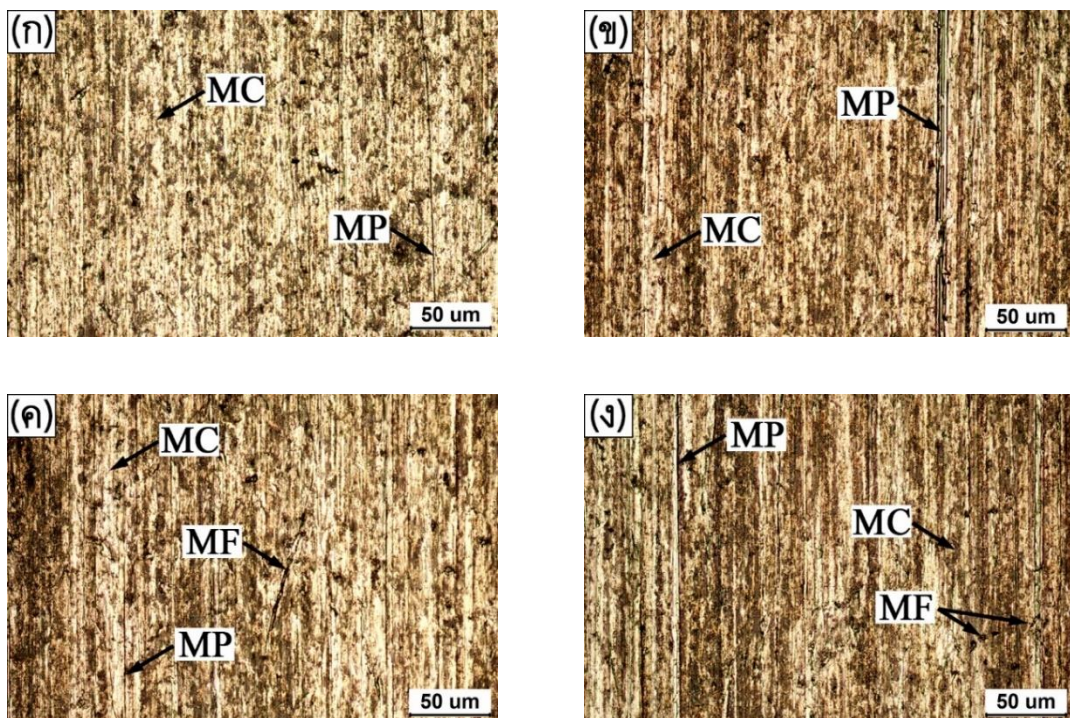
4. ผลการทดสอบการสึกหรอ

การสึกหรอหมายถึงมวลที่หายไปของชิ้นงานทดสอบหลังการทดสอบการสึกหรอ โดยผลการทดสอบการสึกหรอแสดงดังภาพที่ 7 ซึ่งพบว่าเหล็กแรงรถไฟเดิมมีมวลที่หายไปน้อยที่สุดคือ 0.8783 กรัม เนื่องจากเป็นโลหะที่มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ซึ่งมีสมบัติต้านทานการสึกหรอที่ดี (Bakshi, Shipway, & Bhadeshia, 2013) สำหรับการสึกหรอบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ยี่ห้อ A B และ C พบว่ามีมวลที่หายไปคือ 1.4989 1.7834 และ 1.8435 กรัม ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเหล็กแรงรถไฟเดิม เนื่องจากบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมมีโครงสร้างเบอไนต์และเฟอร์ไรต์ที่ขอบเกรน โดยที่โครงสร้างเฟอร์ไรต์นั้นมีความแข็งและความต้านทานการสึกหรอต่ำกว่าโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Zeng, Lu, Zhang, Gong, & Zhang, 2016)

บริเวณผิวที่สึกหรอของชิ้นงานทดสอบทั้งหมดพบว่ามีการสึกหรอประกอบด้วย การตัดขนาดเล็ก (Micro Cutting: MC) การไถขนาดเล็ก (Micro Ploughing: MP) และการแตกขนาดเล็ก (Micro Fracture: MF) แสดงดังภาพที่ 8 โดยชิ้นงานทดสอบของเหล็กแรงรถไฟเดิมและชิ้นงานทดสอบบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมยี่ห้อ A มีการสึกหรอที่ใกล้เคียงกัน คือ มีการตัดขนาดเล็กและการไถขนาดเล็กเกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ชิ้นงานทดสอบบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม B และ C มีการสึกหรอแบบการไถขนาดเล็กและการแตกขนาดเล็กเกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากการมีโครงสร้างเบอไนต์เป็นจำนวนมากซึ่งมีสมบัติแข็งแต่เปราะ (Wang et al., 2013)



ภาพที่ 7 มวลที่หายไปของชิ้นงานหลังการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี



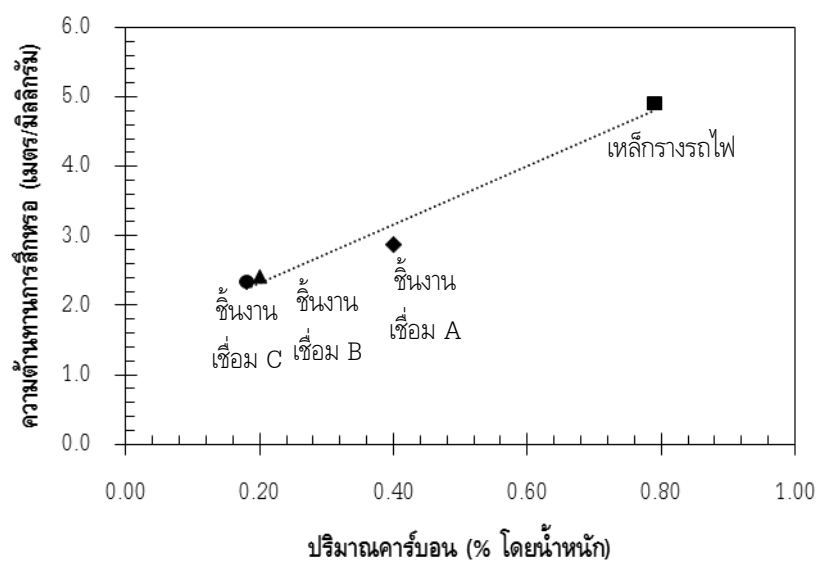
ภาพที่ 8 บริเวณผิวที่สึกหรอของชิ้นงานทดสอบ (ก) เหล็กกรรงรถไฟ (ข) ชิ้นงานเชื่อม A
(ค) ชิ้นงานเชื่อม B และ (ง) ชิ้นงานเชื่อม C



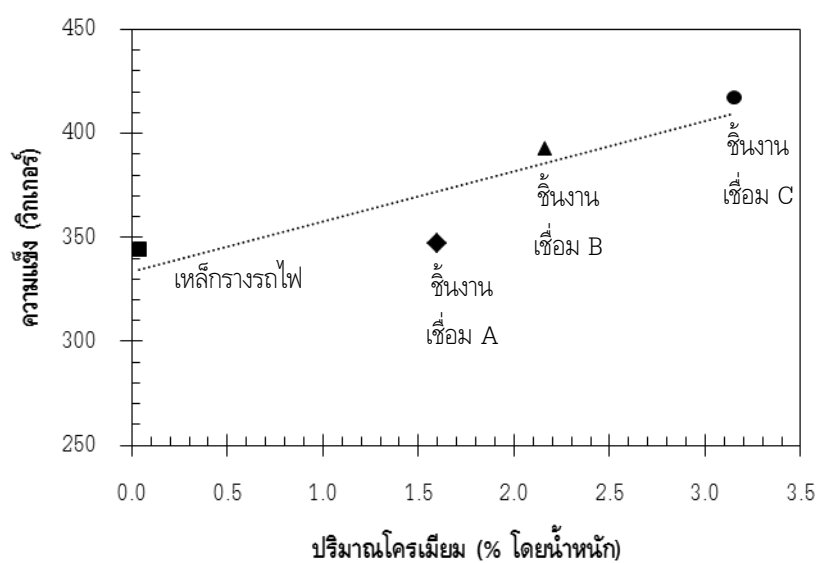
อภิปรายผล

ส่วนผสมทางเคมีบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ทั้ง 3 ยี่ห้อ มีความใกล้เคียงกับที่ทางผู้ผลิตกำหนดมา เนื่องจากบริเวณที่วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเป็นบริเวณชั้นบนสุดของบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม ทำให้การเจือจาง (Dilution) จากบริเวณโลหะฐานเกิดขึ้นได้น้อย ส่วนผสมทางเคมีนั้นมีบทบาทต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลเป็นอย่างมาก ซึ่งทำให้เกิดโครงสร้างเพิร์ลไลต์ของเหล็กเกรนไฟเนด R260 ที่ไม่ผ่านการเชื่อม ส่วนบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมมีโครงสร้างเบไนต์และเฟอร์ไรต์ที่ขอบเกรน โดยพบว่าบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่มีปริมาณธาตุผสม เช่น แมงกานีสและโครเมียมมากที่สุดจะมีปริมาณโครงสร้างเบไนต์มากที่สุด ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณเฟสเฟอร์ไรต์ และยังพบอีกว่าคาร์บอนมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับความต้านทานทานการสึกหรอ แสดงดังภาพที่ 9 ซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่คาร์บอนตกตะกอน (Precipitation) ในระหว่างการเย็นตัวหลังการเชื่อมกลายเป็นคาร์ไบด์ (Carbide) ที่สามารถต้านทานการสึกหรอได้ดี (Chang, Chen, & Wu, 2010), (Leiro et al., 2013) ในขณะที่โครเมียมซึ่งเป็นธาตุผสมที่เพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) ของเหล็กกล้าได้ดี (Huang, Liu, & Chuang, 2009) จากผลการวิจัยจึงพบว่าโครเมียมมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับความแข็ง แสดงดังภาพที่ 10 ซึ่งคาดว่าเกิดจากโครเมียมมีส่วนทำให้เกิดโครงสร้างเบไนต์ในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Zhou, Xu, Tian, Hu, & Yuan, 2017)

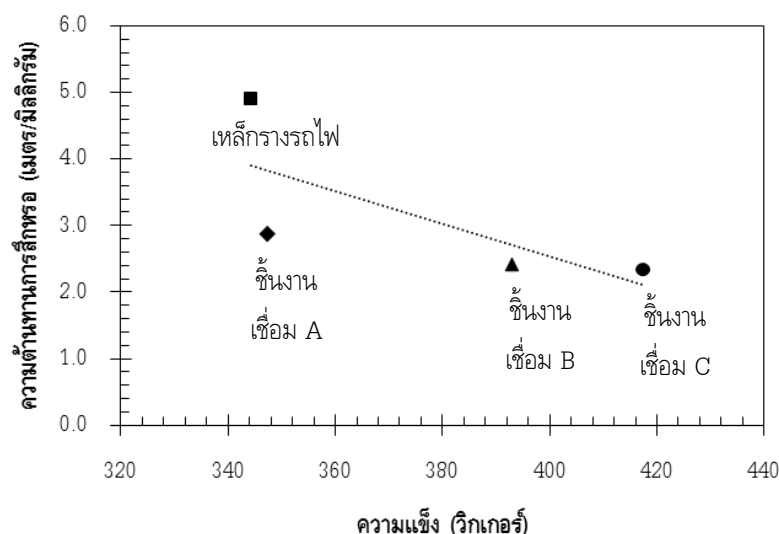
ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับความต้านทานการสึกหรอพบว่ามีความสัมพันธ์แบบแปรผกผัน แสดงดังภาพที่ 11 ซึ่งไม่เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ เนื่องจากบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม A ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ยต่ำที่สุดแต่กลับพบว่ามีค่าความต้านทานการสึกหรอสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยลวดเชื่อม B และ C ทั้งนี้มีความเป็นไปได้ว่าบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม A อาจมีคาร์ไบด์เกิดขึ้นและกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างจุลภาคซึ่งมีความซับซ้อนในการวิเคราะห์เป็นอย่างมาก ดังนั้นจำเป็นต้องมีการใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ขั้นสูง เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) หรือเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction: XRD) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค โดยทางผู้วิจัยมีความสนใจที่จะทำการวิจัยในอนาคต



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนกับความต้านทานการสึกหรอ



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครเมียมกับความแข็ง



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับความต้านทานการสึกหรอของชิ้น

ปัจจัยอีกอย่างที่ใช้ในการพิจารณาการเลือกใช้ลวดเชื่อมคือ ค่าความแข็งแรงหลังการเชื่อมและราคาของลวดเชื่อม โดยที่ค่าความแข็งแรงบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมต้องไม่สูงกว่าค่าความแข็งแรงของเหล็กแรงรถไฟเดิม (BS EN 15594, 2009) ส่วนราคาลวดเชื่อมนั้นพบว่าลวดเชื่อมยี่ห้อ A B และ C มีราคา 250 350 และ 100 บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ถึงแม้ว่าลวดเชื่อมยี่ห้อ A จะมีความสูงเป็นลำดับที่สองก็ตาม แต่มีความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอที่ใกล้เคียงกับเหล็กแรงรถไฟเกรด R260 มากที่สุด ดังนั้นลวดเชื่อมยี่ห้อ A จึงมีความเหมาะสมที่สุดในการใช้สำหรับเชื่อมซ่อมเหล็กแรงรถไฟเกรด R260

สรุป

การศึกษาการสึกหรอแบบขัดสีของการเชื่อมซ่อมเหล็กแรงรถไฟเกรด R260 ด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ มีข้อสรุปดังนี้

1. เหล็กแรงรถไฟเกรด R260 ที่ไม่ผ่านการเชื่อมซ่อมมีโครงสร้างโดยรวมเป็นเฟิร์ลไลต์ ส่วนบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมมีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่ขอบเกรนและโครงสร้างเบไนต์ที่เพิ่มเข้ามา
2. ความต้านทานการสึกหรอขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างจุลภาค
3. กลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นประกอบด้วย การัดขนาดเล็ก การไถขนาดเล็ก และการแตกขนาดเล็ก
4. ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ยี่ห้อ A มีความเหมาะสมที่สุดในการนำไปเชื่อมซ่อมเหล็กแรงรถไฟเกรด R260



ข้อเสนอแนะ

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ยี่ห้อ A สามารถใช้ในการเชื่อมซ่อมเหล็กรางรถไฟมาตรฐาน UIC860-R เกรด 900A ได้เช่นกัน เนื่องจากเป็นเกรดที่ใกล้เคียงกับเหล็กรางรถไฟมาตรฐาน EN13674-1 เกรด R260 นอกจากนี้จากผลการวิจัยยังสามารถพัฒนาไปสู่กรรมวิธีการเชื่อมที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ เช่น กรรมวิธีการเชื่อมอาร์คลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมอาร์คได้ฟลักซ์ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านโลหะและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภูหามัด เต๊ะยอ และนาย กฤษณ์ ฤทธิเดช สำหรับการร่วมวิจัยในครั้งนี้

รายการอ้างอิง (References)

- ASTM E1245-03. (2003). *Standard Practice for Determining the Inclusion or Second-Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM E384-17. (2017). *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM E407-07. (2007). *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM G65-00. (2000). *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/rubber Wheel Apparatus*. West Conshohocken: ASTM International
- Bakshi, S. D., Shipway, P. H., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2013). Three-body Abrasive Wear of Fine Pearlite, Nanostructured Bainite and Martensite. *Wear*, 308(1-2), 46-53.
- BS EN 15594: 2009. (2009). *Railway applications-Track-Restoration of Rails by Electric Arc Welding*, London: BSI.
- Chang, C.M., Chen, Y.C., & Wu, W. (2010). Microstructural and Abrasive Characteristics of High Carbon Fe-Cr-C Hardfacing Alloy. *Tribology International*, 43(5-6), 929-934.



- Huang, C.A., Liu, Y.W., & Chuang, C.H. (2009). The Hardening Mechanism of a Chromium-carbon Deposit Electroplated from a Trivalent Chromium-based Bath. *Thin Solid Films*, 517(17), 4902-4904.
- Jun, H.K., Seo, J.W., Jeon, I.S., Lee, S.H., & Chang, Y.S. (2016). Fracture and Fatigue Crack Growth Analyses on a Weld-repaired Railway Rail. *Engineering Failure Analysis*, 59, 478-492.
- Lai, Q., Abrahams, R., Yan, W., Qiu, C., Mutton, P., Paradowska, A., et al. (2018). Effects of Preheating and Carbon Dilution on Material Characteristics of Laser-cladded Hypereutectoid Rail Steels. *Materials Science and Engineering: A*, 712, 548-563.
- Leiro, A., Vuorinen, E., Sundin, K.G., Prakash, B., Sourmail, T., Smanio, V., et al. (2013). Wear of Nano-structured Carbide-free Bainitic Steels under Dry Rolling-sliding Conditions. *Wear*, 298, 42-47.
- Roy, T., Lai, Q., Abrahams, R., Mutton, P., Paradowska, A., Soodi, M., et al. (2018). Effect of Deposition Material and Heat Treatment on Wear and Rolling Contact Fatigue of Laser Cladded Rails. *Wear*, 412, 69-81.
- Sato, Y., Matsumoto, A., & Knothe, K. (2002). Review on Rail Corrugation Studies. *Wear*, 253(1-2), 130-139.
- Seo, J.W., Kim, J.C., Kwon, S.J., & Jun, H.K. (2019). Effects of Laser Cladding for Repairing and Improving Wear of Rails. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20(7), 1207-1217.
- Sergejevs, D., & Tipainis, A. (2016). Assessment of Railway Turnout Element Restoration Using MMA and FCAW Welding. In *15th International Scientific Conference Engineering for Rural Development Proceedings, Jelgava*, 25, 606-611.
- Shibe, V., & Chawla, V. (2018). Characterization of Fe-C-Cr Based Hardfacing Alloys. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71(9), 2211-2220.
- Sornil, B., Lothongkum, G., & Hartung, F. (2015). Welding of Rail: Technology and Metallurgy. *The Journal of Welding Institute of Thailand*, 1(2), 37-45.
- Steel, N., & Metal, S. (2015). *Rails*. Retrieved January 16, 2020 from <http://www.nssmc.com>.
- Taleff, E.M., Lewandowski, J.J., & Poursadian, B. (2002). Microstructure-property Relationships in Pearlitic Eutectoid and Hypereutectoid Carbon Steels. *Jom*, 54(7), 25-30.



- Tipsunave, C., Thawornsupacharoen, P., Hommuang, S., Simlee, K., & Paitoonphon, S. (2019). *Office of the Permanent Secretary*. Ministry of Transport. Retrieved February 1, 2020 from <http://www.mot.go.th>.
- Viafara, C.C., Castro, M.I., Velez, J.M., & Toro, A. (2005). Unlubricated Sliding Wear of Pearlitic and Bainitic Steels. *Wear*, 259(1-6), 405-411.
- Wang, X., Zurob, H.S., Xu, G., Ye, Q., Bouaziz, O., & Embury, D. (2013). Influence of Microstructural Length Scale on the Strength and Annealing Behavior of Pearlite, Bainite, and Martensite. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44(3), 1454-1461.
- Yamamoto, S. (2008). *Arc Welding of Specific Steels and Cast Irons*. (4th ed.) Tokyo: Kobe Steel.
- Yang, J., Yang, Y., Zhou Y., Qi, X., Gao, Y., Ren, X., et al. (2013). Microstructure and Wear Properties of Fe-2 wt-% Cr-X wt-% W-0.67 wt-% C Hardfacing Layer. *Welding Journal*, 92(8), 225-230.
- Zeng, D., Lu, L., Zhang, N., Gong, Y., & Zhang, J. (2016). Effect of Different Strengthening Methods on Rolling/Sliding Wear of Ferrite-Pearlite Steel. *Wear*, 358, 62-71.
- Zhou, M., Xu, G., Tian, J., Hu, H., & Yuan, Q. (2017). Bainitic Transformation and Properties of Low Carbon Carbide-free Bainitic Steels with Cr Addition. *Metals*, 7(7), 263.