



ผลของการเลือกใช้ลวดเชื่อมต่อความแกร่งของเนื้อเชื่อมเหล็กรางรถไฟเกรด 900A

Effect of Electrode Selection on Impact Toughness in Weld Metal of Rail Steel Grade 900A

ณัฐชนน พูลศิริ¹, สลิตา เพชรสังข์¹, มุฮัมมัด เต๊ะยอ², ซูไฮดี ซานิ³, ประภาส เมืองจันทร์บุรี^{1*}
Nutchanon Poolsiri¹, Salita Petchsang¹, Muhamad Tehyo², Suhaidee Sani³, Prapas Muangjunburee^{1*}

(Received: May 17, 2020; Revised: August 4, 2020; Accepted: October 22, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาชนิดของลวดเชื่อมที่ส่งผลต่อความแกร่ง (Toughness) ในการเชื่อมซ่อมเหล็กรางรถไฟเกรด 900A ซึ่งทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW) โดยทำการศึกษาลวดเชื่อมทั้งหมด 3 ชนิด ที่มีค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมใกล้เคียงกับรางรถไฟ จากผลการศึกษาพบว่า โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อมส่วนใหญ่ประกอบด้วยเบไนต์ โดยปริมาณเบไนต์ที่ปรากฏอยู่ในเนื้อเชื่อมขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของแต่ละเนื้อเชื่อม นอกจากนี้ความแกร่งของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมแต่ละชนิดมีผลแตกต่างกัน โดยมีอิทธิพลมาจากปริมาณธาตุคาร์บอนในเนื้อเชื่อม ซึ่งในงานวิจัยนี้บริเวณเนื้อเชื่อมที่ประกอบด้วยเบไนต์และเฟอร์ไรต์มีความแกร่งสูงสุด

คำสำคัญ: เหล็กรางรถไฟเกรด 900A การเชื่อมซ่อม ความแกร่ง เบไนต์ เฟอร์ไรต์

¹ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

¹Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

²สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

²Program in Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University

³คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

³Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

*Corresponding Author: mprapas@eng.psu.ac.th



Abstract

The objective of this research was to investigate electrode types on impact toughness of rail steel grade 900A repaired by the Shielded Metal Arc Welding (SMAW) process. Three different types of electrodes, which provide similar hardness of the weld metal compared to that of the rail steel base metal, were examined. The results found that the microstructure of the weld metal mostly consisted of bainite. The bainite structure in the weld metal depended on the chemical composition of each weld metal. Moreover, the impact toughness of each sample was different due to various carbon contents in the weld metal. In this research, the weld metal contained bainite and ferrite structures showed the highest impact toughness.

Keywords: Rail steel grade 900A, Welding, Impact toughness, Bainite, Ferrite

บทนำ

การคมนาคมด้วยรถไฟในประเทศไทยมีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับการขนส่งสินค้าและการเดินทาง อันเนื่องมาจากมีต้นทุนที่ต่ำและสามารถบรรทุกได้เป็นจำนวนมาก (Inthara, Rojanapunya, & Saiseng, 2017; Peng, Xie, Song, Li, & Luo, 2019) รวมถึงการประหยัดต้นทุนของพลังงานมากกว่าการคมนาคมด้วยชนิดอื่น ซึ่งในปัจจุบันรถไฟในประเทศไทยมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตลอดจนรถไฟทางคู่ภายในประเทศและรถไฟฟ้าในกรุงเทพมหานคร

ในขณะที่รถไฟในประเทศไทยเติบโตอย่างรวดเร็ว จะทำให้มีแนวโน้มการใช้รถไฟที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามการคมนาคมที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้มีการใช้รถไฟที่เพิ่มมากขึ้น และอาจจะก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุเร็วขึ้น (Roy et al., 2019) โดยเฉพาะการเสื่อมสภาพของรางรถไฟ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณหน้าสัมผัส (Contact surface) ระหว่างล้อรางรถไฟกับรางรถไฟ อันเนื่องมาจากเมื่อรถไฟเคลื่อนที่บนรางรถไฟ ทำให้เกิดการรับภาระและการเสียดสี จึงเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดการสึกหรอของรางรถไฟ (Nikas, Meyer, & Ahlström, 2017) ในขณะเดียวกันรางรถไฟเริ่มสึกหรอจะส่งผลให้เกิดการกระแทกขึ้น และอาจจะส่งผลให้เกิดการแตกหักของราง ตลอดจนทำให้รถไฟตกรางได้เช่นเดียวกัน (Wang, Hu, Guo, Liu, & Zhu, 2014) ด้วยเหตุผลเหล่านี้สามารถแก้ปัญหาได้ด้วยการแทนที่รางรถไฟที่สึกหรอใหม่ แต่พบว่ามีต้นทุนที่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการซ่อม ซึ่งการซ่อมแซมรางรถไฟที่สึกหรอสามารถลดต้นทุนได้ (Seo, Kim, Kwon, & Jun., 2019) ดังนั้นกระบวนการเชื่อมควรถูกนำมาพัฒนาเพื่อที่จะลดต้นทุน ซึ่งกระบวนการเชื่อมมีหลากหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น การเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding: FCAW) การเชื่อมอาร์คใต้ฟลักซ์ (Submerge Arc Welding: SAW) ฯลฯ อย่างไรก็ตาม



ส่วนใหญ่กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) มักถูกนำมาใช้เชื่อมซ่อมรางรถไฟ อันเนื่องมาจากเครื่องเชื่อมและอุปกรณ์มีขนาดเล็ก จึงสามารถเคลื่อนที่ไปปฏิบัติหน้างานได้ง่าย (Taylor, 1990)

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาชนิดลวดเชื่อมของการเชื่อมซ่อมเหล็กรางรถไฟเกรด 900A โดยใช้กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค และทดสอบสมบัติทางกล อันประกอบไปด้วยการทดสอบความแข็งและการทดสอบแรงกระแทกของชิ้นงานเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมที่แตกต่างกัน

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมจากการใช้ลวดเชื่อมต่างชนิด
2. เพื่อหาค่าของความแข็งแรงที่ดีที่สุดของการเชื่อมซ่อมเหล็กรางรถไฟ เกรด 900A

วิธีการวิจัย

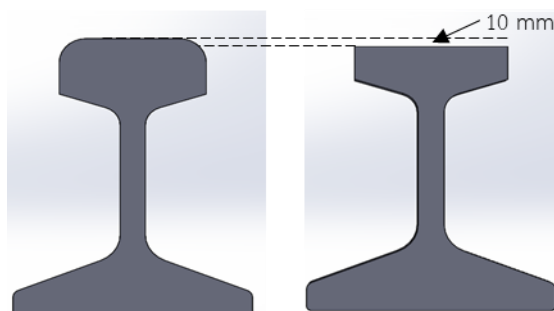
1. วัสดุและกระบวนการเชื่อม

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเชื่อมซ่อมเหล็กรางรถไฟ โดยใช้เหล็กรางรถไฟ (Rail steel) เกรด 900A เป็นโลหะฐาน (Base Metal: BM) ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 และเหล็กรางรถไฟถูกจำลองการสึกหรอบริเวณหัวราง (Rail head) ด้วยเครื่องกัด (Milling machine) ซึ่งบริเวณหัวรางถูกกัดออกเป็นระยะความลึก 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 1 และทำการเชื่อมบนผิวรางรถไฟด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Weld: SMAW) ด้วยเครื่องเชื่อมยี่ห้อ Fronius รุ่น TransPuls SyneGic 4000 โดยใช้ช่างเชื่อม (Manual Welding) ทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ ลวดเชื่อมชนิด A, B และ C ซึ่งลวดเชื่อมแต่ละชนิดมีค่าความแข็งใกล้เคียงกับรางรถไฟตามคำแนะนำของผู้ผลิต และตารางที่ 2 แสดงส่วนผสมทางเคมีและค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมที่ได้จากลวดเชื่อมแต่ละชนิดจากผู้ผลิต

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กรางรถไฟ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

	C	Mn	Si	Cr	Mo	Fe	CE
เหล็กรางรถไฟ เกรด 900A*	0.72	0.86	0.23	-	-	Bal.	0.8729

หมายเหตุ: ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กรางรถไฟ เกรด 900A มาจากการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของธาตุในกระบวนการพลาสมา (Optical Emission Spectrometer: OES)



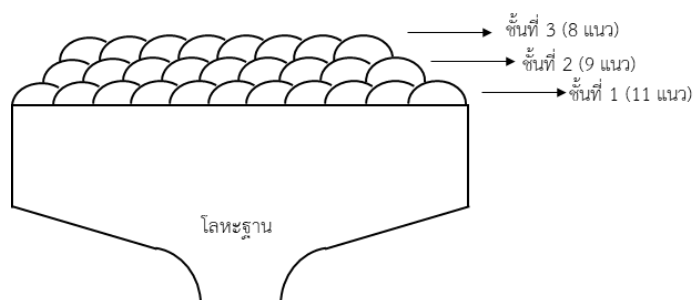
ภาพที่ 1 การจำลองการสึกหรอของรางรถไฟ

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีและค่าความแข็งของเนื้อเชื่อม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ชนิด	C	Mn	Si	Cr	Fe	Hardness	CE
ลวดเชื่อม A	0.2	1.4	1.2	1.8	Bal.	370 HB	0.8433
ลวดเชื่อม B	0.24	1	0.53	1.47	Bal.	400 HV ₁₀	0.7228
ลวดเชื่อม C	0.15	0.54	0.45	2.04	Bal.	35 HRC	0.6668

หมายเหตุ : $CE = C + 1/6Mn + 1/24Si + 1/40Ni + 1/5Cr + 1/4Mo + 1/14V(\%)$ (Yamamoto, 2008)

ทำให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) แก่เหล็กรางรถไฟที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 350 องศาเซลเซียส เนื่องจากเหล็กรางรถไฟมีค่าคาร์บอนเทียบเท่า (Carbon Equivalent: CE) มากกว่า 0.8 เปอร์เซนต์ ดังแสดงในตารางที่ 1 ทำให้เหล็กรางรถไฟมีความสามารถในการเชื่อมต่ำ (Yamamoto, 2008) และทำการเชื่อมในท่าราบ (Flat position) โดยใช้กระแสเชื่อม 140 แอมป์ (Welding current) ซึ่งอยู่ในช่วงของคำแนะนำของผู้ผลิต และความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/นาที (Travel speed) ทำการเชื่อมทั้งหมดเป็นจำนวน 3 ชั้น โดยชั้นที่ 1 จำนวน 11 แนว ชั้นที่ 2 จำนวน 9 แนว และชั้นที่ 3 จำนวน 8 แนว ดังแสดงในภาพที่ 2 และในระหว่างการเชื่อมควบคุมอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม (Interpass temperature) ให้อยู่ในช่วงเดียวกันกับอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนการเชื่อม และตารางที่ 3 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม



ภาพที่ 2 รูปแบบการเติมแนวเชื่อม

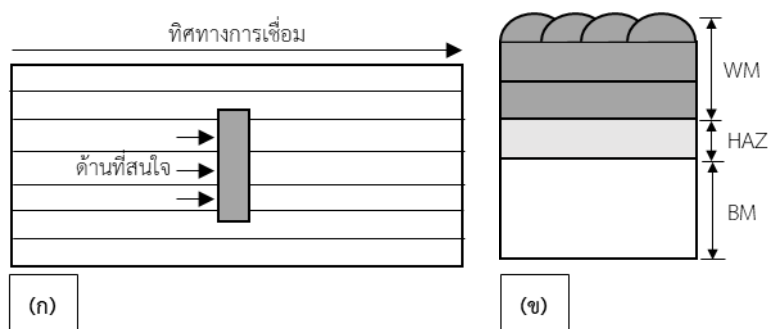


ตารางที่ 3 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม

ชิ้นงาน	ชนิดของ ลวดเชื่อม	เส้นผ่าศูนย์กลาง (ม.ม.)	ขั้วไฟฟ้า	กระแสเชื่อม (แอมป์)	แรงดันเชื่อม (โวลต์)	ความเร็ว ในการเชื่อม (ซ.ม./นาที)	ความร้อนเข้า (กิโลจูล/ซ.ม.)
A	A	4	DC EP	140	22-24	27.9-31.7	4.84
B	B	4	DC EP	140	28-31	29.1-30.8	6.1
C	C	4	DC EP	140	22-28	28.9-30.9	5.15

2. การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

หลังจากการเชื่อมนำชิ้นงานเชื่อมมาตัดเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค โดยเลือกมาจากกึ่งกลางความยาวของชิ้นงานเชื่อมในแนวตัดขวางกับแนวเชื่อม (Cross section) ดังแสดงในภาพที่ 3 จากนั้นทำการขัดหยาบด้วยกระดาษทราย และขัดละเอียดด้วยผงขัดลูมิน่าขนาด 5 ไมโครเมตร และทำการกัดผิวหน้าชิ้นงาน (Etching) ด้วยสารละลายไนตอล 2% (2% Nital) ตามมาตรฐาน ASTM E407 (Standard, A.S.T.M., 2012) จากนั้นนำชิ้นงานมาตรวจสอบโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องสเตอริโอ (Stereoscope) และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) ในบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal: WM) บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) และโลหะฐาน (BM)



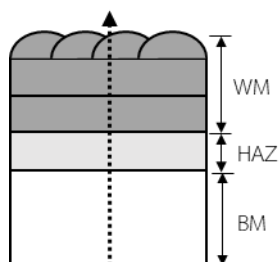
ภาพที่ 3 ตำแหน่งของชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค

(ก) มุมมองด้านบนของชิ้นงานเชื่อม (Top View) และ (ข) ชิ้นงานในแนวตัดขวาง (Cross section)



3. การทดสอบค่าความแข็ง

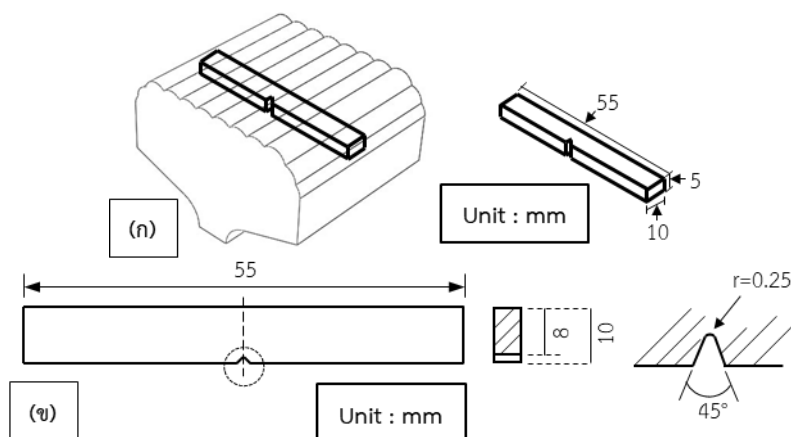
ขั้นตอนการทดสอบความแข็งนำชิ้นงานเชื่อมในแนวตัดขวางมาทำการทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่องมือโครวิเกอร์ส (Micro Vickers hardness) โดยเริ่มทดสอบจากบริเวณโลหะฐาน (BM) เข้าสู่บริเวณกระแทกร้อน (HAZ) จนถึงชั้นบนสุดของบริเวณเนื้อเชื่อม (WM) โดยในการทดสอบใช้แรงกดขนาด 200 กรัม ($HV_{0.2}$) ระยะเวลาในการกด 10 วินาที และในแต่ละจุดของการทดสอบห่างกัน 0.25 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องมือโครวิกเกอร์สในชิ้นงานเชื่อม

4. การทดสอบแรงกระแทก

การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปปี (Charpy impact test) บริเวณเนื้อเชื่อม ซึ่งชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการตัดมาเตรียมชิ้นงานทดสอบให้ได้ขนาด 5x10x55 มิลลิเมตร (Sub-size) ตามมาตรฐาน ISO 148-1 (ISO 148-1, 2006) จากนั้นนำชิ้นงานเตรียมร่องบากวี (V-notch) ในแนวตัดขวาง ซึ่งมีความลึกของร่องบากเป็นระยะ 2 มิลลิเมตร และร่องบากมีมุมเท่ากับ 45 องศา ตลอดจนรัศมีที่ปลายร่องบากเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 5 และในแต่ละเงื่อนไขทำการทดสอบซ้ำเป็นจำนวน 2 ครั้ง หลังจากการทดสอบนำชิ้นงานมาตรวจสอบลักษณะผิวหน้าแตกหัก (Fracture surface) ด้วยกล้องสเตอริโอ



ภาพที่ 5 การเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก

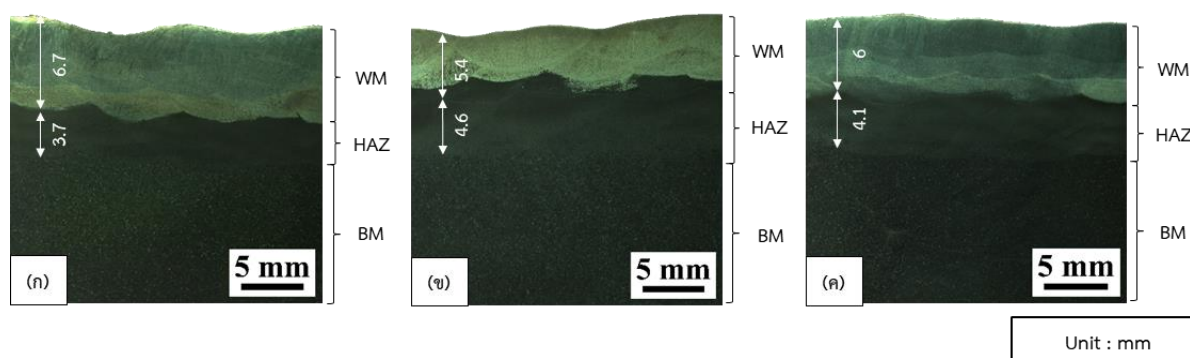
(ก) ทิศทางของร่องบากวีและขนาดชิ้นงาน (ข) ลักษณะของร่องบากวี



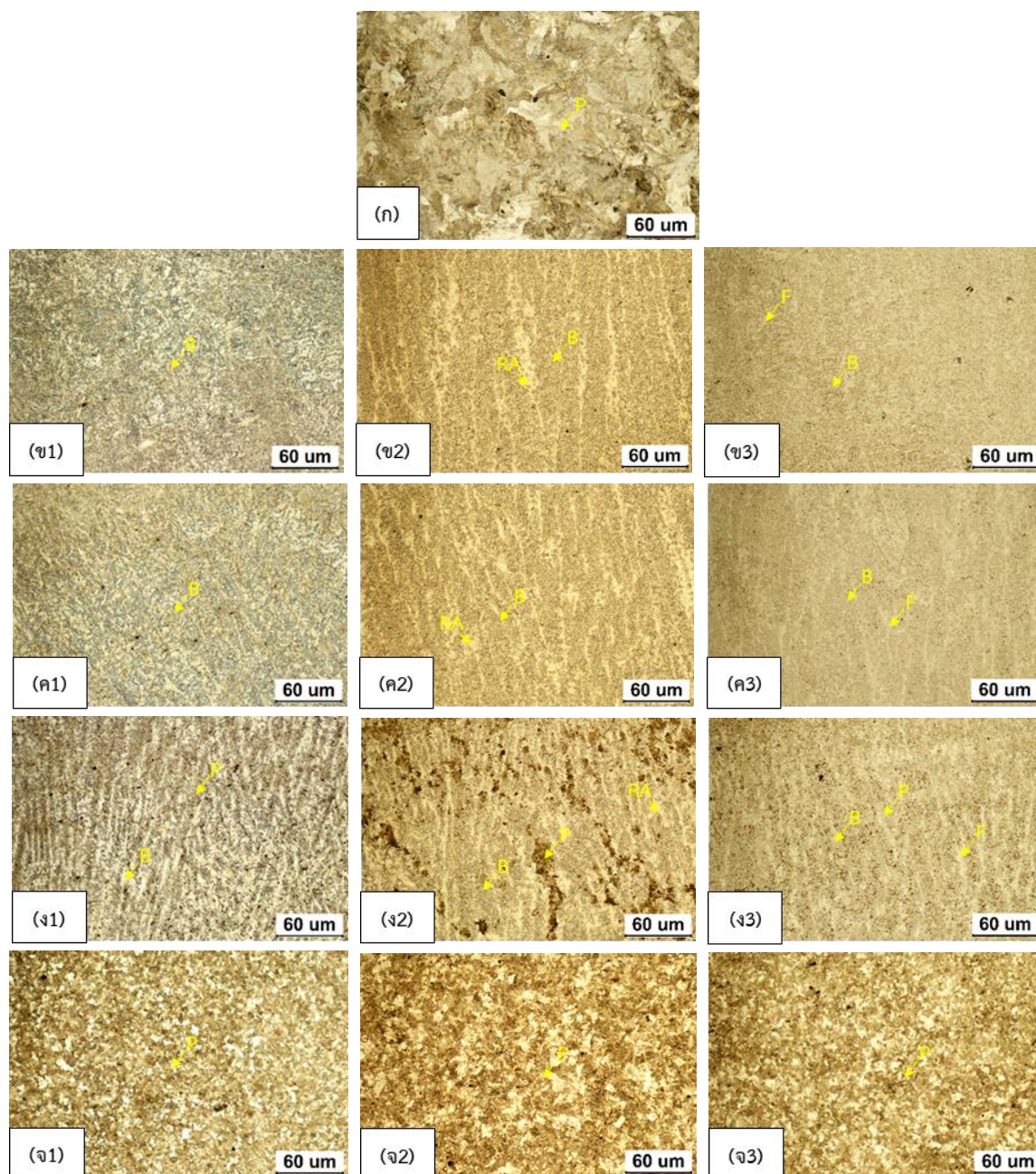
ผลการวิจัย

1. การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานเชื่อมทั้งหมด แสดงดังในภาพที่ 6 ซึ่งจะเห็นว่าชิ้นงานเชื่อมทั้งหมดประกอบไปด้วย 3 บริเวณ คือ บริเวณเนื้อเชื่อม (WM) บริเวณกระพร้อน (HAZ) และบริเวณโลหะฐาน (BM) ในขณะเดียวกันชิ้นงานเชื่อมทั้งหมดมีการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ระหว่างเนื้อเชื่อมและโลหะฐาน และไม่พบรอยแตกร้าวหรือข้อบกพร่องทั้ง 3 บริเวณ จากภาพที่ 6(ก) 6(ข) และ 6(ค) แสดงโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวด A B และ C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม A มีความสูงเนื้อเชื่อมเท่ากับ 6.7 มิลลิเมตร ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม B มีความสูงเนื้อเชื่อมเท่ากับ 5.4 มิลลิเมตร และชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม C มีความสูงเนื้อเชื่อม เท่ากับ 6 มิลลิเมตร ในขณะที่ความกว้างบริเวณกระพร้อนของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม A เท่ากับ 3.7 มิลลิเมตร ความกว้างบริเวณกระพร้อนของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม B เท่ากับ 4.6 มิลลิเมตร และความกว้างบริเวณกระพร้อนของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม C เท่ากับ 4.1 มิลลิเมตร



ภาพที่ 6 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม (ก) ลวดเชื่อมชนิด A (ข) ลวดเชื่อมชนิด B และ (ค) ลวดเชื่อมชนิด C



ภาพที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม

(1) ลวดเชื่อมชนิด A (2) ลวดเชื่อมชนิด B (3) ลวดเชื่อมชนิด C

(ก) โลหะฐาน (ข) เนื้อเชื่อมชั้นที่ 3 (ค) เนื้อเชื่อมชั้นที่ 2 (ง) เนื้อเชื่อมชั้นที่ 1 และ (จ) บริเวณกระแทบร้อน

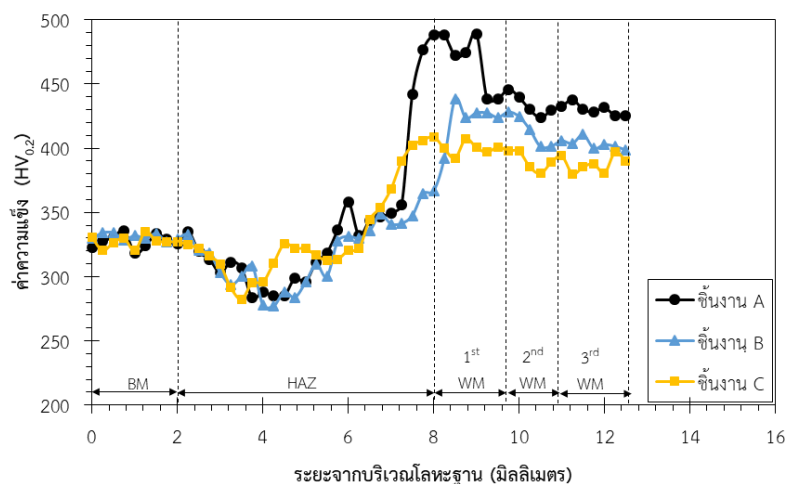


2. ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

จากการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของบริเวณ โลหะฐาน บริเวณกระแทกร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อมของชิ้นงานเชื่อมทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยภาพที่ 7(ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคของบริเวณ โลหะฐาน พบว่าประกอบไปด้วยโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite: P) (Haidemennopoulos et al., 2006) และในบริเวณเนื้อเชื่อมชั้นที่ 3 และ ชั้นที่ 2 ของชิ้นงานเชื่อมแต่ละชั้นมีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม A ประกอบไปด้วยโครงสร้างเบไนต์ (Banite: B) ในขณะที่โครงสร้าง จุลภาคของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม B ประกอบไปด้วยเบไนต์และออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained Austenite: RA) และชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม C ประกอบไปด้วยโครงสร้างเบไนต์และเฟอร์ไรท์ (Ferrite: F) ในส่วนของโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมชั้นที่ 1 ของชิ้นงานเชื่อมทั้งหมด พบว่า มี โครงสร้างคล้ายคลึงกับเนื้อเชื่อมชั้น 2 และ 3 แต่ปรากฏโครงสร้างเพิร์ลไลต์ปะปนเข้ามาด้วย (บริเวณสี เข้ม) สำหรับโครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระแทกร้อนของชิ้นงานทั้งหมด ประกอบไปด้วยโครงสร้าง เพิร์ลไลต์เกรนละเอียด เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณโลหะฐาน

3. ผลการทดสอบค่าความแข็ง

ภาพที่ 8 แสดงค่าความแข็งในบริเวณต่าง ๆ ของชิ้นงานเชื่อมทั้งหมด จากผลการทดสอบพบว่า ในบริเวณโลหะฐาน (BM) มีค่าความแข็งเฉลี่ย เท่ากับ $330 \text{ HV}_{0.2}$ และค่าความแข็งในบริเวณกระแทกร้อน (HAZ) ของทั้ง 3 ชิ้นงาน มีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน ซึ่งบริเวณกระแทกร้อนมีค่าความแข็งที่ไม่สม่ำเสมอ โดยบริเวณกระแทกร้อนที่ติดกับเนื้อเชื่อมชั้นที่ 1 มีค่าความแข็งที่สูงกว่าโลหะฐาน (ประมาณ $370 \text{ HV}_{0.2}$) ในขณะที่ในบริเวณกระแทกร้อนที่อยู่ติดกับบริเวณโลหะฐานของชิ้นงานเชื่อมทั้งหมด มีค่าความแข็งที่ ต่ำกว่าบริเวณโลหะฐาน (ประมาณ $280 \text{ HV}_{0.2}$) จากการทดสอบค่าความแข็งในบริเวณเนื้อเชื่อมชั้นที่ 1 (1^{st} WM) เนื้อเชื่อมชั้นที่ 3 (3^{rd} WM) พบว่า ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงทั้ง 3 ชิ้นงาน โดยเฉพาะ บริเวณเนื้อเชื่อมชั้นที่ 1 มีความแข็งสูง เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณเนื้อเชื่อมชั้นที่ 2 (2^{nd} WM) และ บริเวณเนื้อเชื่อมชั้นที่ 3 ซึ่งชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม A มีค่าความแข็งเฉลี่ยของบริเวณเนื้อเชื่อม เท่ากับ $430 \text{ HV}_{0.2}$ ในส่วนของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม B มีค่าความแข็งเฉลี่ยของบริเวณเนื้อเชื่อม เท่ากับ $380 \text{ HV}_{0.2}$ และค่าแข็งในบริเวณเนื้อเชื่อมของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม C เท่ากับ $400 \text{ HV}_{0.2}$



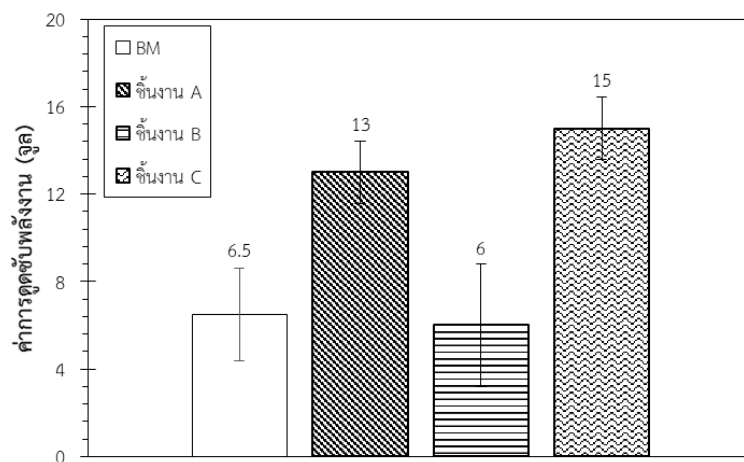
ภาพที่ 8 ค่าความแข็งของแต่ละชิ้นงานเชื่อม

4. ผลการทดสอบแรงกระแทก

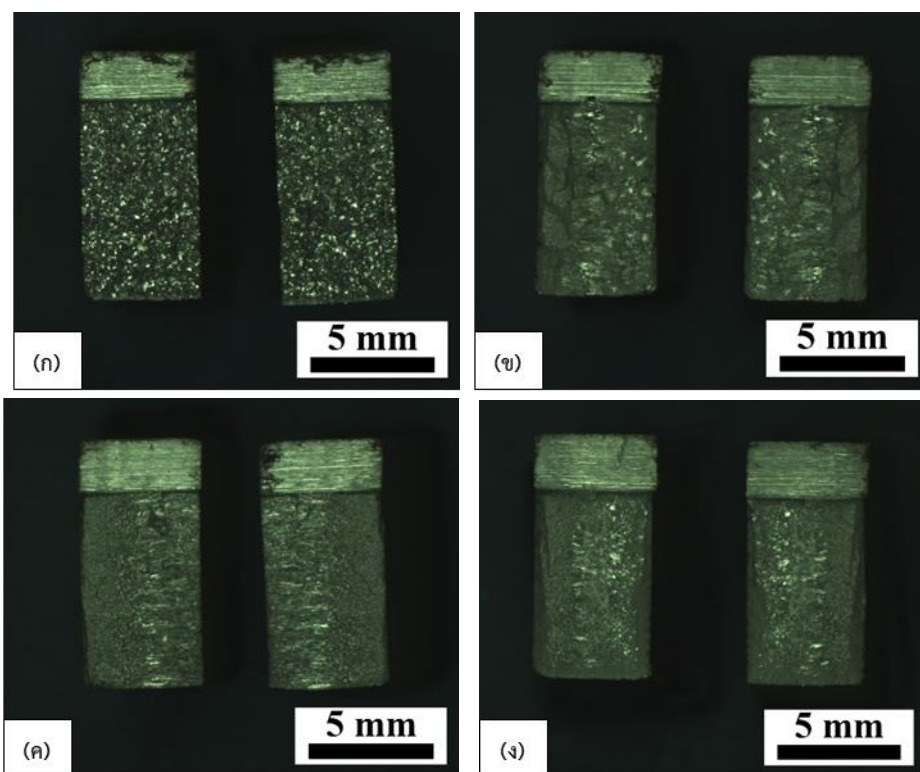
ผลการทดสอบแรงกระแทกของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 9 ซึ่งแสดงถึงค่าการดูดซับพลังงานของโลหะฐาน และชิ้นงานเชื่อม พบว่าค่าการดูดซับพลังงานของโลหะฐานเหล็กแรงรถไฟ เท่ากับ 6.5 จูล ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น ๆ เช่น ในงานวิจัยของ Wang และคณะ พบว่าค่าการดูดซับพลังงานของโลหะฐานเหล็กแรงรถไฟ (U71Mn) เท่ากับ 7.5 จูล (Wang, Zhou, Shi & Feng, 2012) และในงานวิจัยของ Cakir และ Celik พบว่าค่าการดูดซับพลังงานของโลหะฐานเหล็กแรงรถไฟ เท่ากับ 4 จูล (Cakir & Celik, 2017) เมื่อตรวจสอบลักษณะผิวหน้าแตกหักของโลหะฐาน มีผิวมันวาว สะท้อนแสง พื้นผิวหน้าแตกหักค่อนข้างเรียบ และไม่แสดงพฤติกรรมการเสียรูปอย่างถาวร ดังแสดงในภาพที่ 10(ก) ซึ่งลักษณะเหล่านี้บ่งชี้ว่าโลหะฐานมีพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะ (Brittle fracture) (Zhang, Li, Ding, Song & Geo, 2017) สำหรับชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม C มีค่าดูดซับพลังงานเท่ากับ 15 จูล เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม A เท่ากับ 13 จูล และชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม B เท่ากับ 6 จูล จากการตรวจสอบผิวหน้าแตกหักของชิ้นงานเชื่อมทั้งหมด สังเกตเห็นได้ว่ามี 2 ลักษณะผิวหน้าแตกหัก โดยพบบริเวณที่มีลักษณะทึบแสง และพื้นผิวก่อนข้างหยาบ ซึ่งแสดงถึงลักษณะผิวหน้าแตกหักของบริเวณกระแทกร้อน ในส่วนของบริเวณที่มีลักษณะผิวหน้าแตกหักที่มีความมันวาว สะท้อนแสง และพื้นผิวก่อนข้างเรียบ บ่งชี้ถึงลักษณะผิวหน้าแตกหักของบริเวณเนื้อเชื่อม โดยชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม B มีลักษณะผิวหน้าแตกหักค่อนข้างเรียบ มันวาว และสะท้อนแสง ตลอดจนไม่ปรากฏการเสียรูปอย่างถาวรหรือการยัดตัว ซึ่งสามารถบ่งชี้ว่าชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม B มีพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะ ดังแสดงในภาพที่ 10(ค) ในขณะที่ชิ้นงานที่



เชื่อมด้วยลวดเชื่อม A และ C มีค่าการดูดซับพลังงานใกล้เคียงกัน เมื่อตรวจสอบผิวหน้าแตกหักของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม A และ C พบว่า มีลักษณะทึบแสง และพื้นผิวค่อนข้างหยาบ รวมไปถึงแสดงถึงการเสียรูปอย่างถาวรเล็กน้อย แสดงว่าชิ้นงานเกิดการแตกหักแบบกึ่งเหนียวกึ่งเปราะ



ภาพที่ 9 ค่าการดูดซับพลังงานของชิ้นงานต่างๆ



ภาพที่ 10 ลักษณะผิวหน้าแตกหักของชิ้นงาน (ก) โลหะฐาน (ข) ชิ้นงาน A (ค) ชิ้นงาน B และ (ง) ชิ้นงาน C



อภิปรายผล

จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานเชื่อมทั้งหมด พบว่าชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม A มีความสูงเนื้อเชื่อมมากกว่าชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม B และ C อันเนื่องมาจากทั้ง 3 ชิ้นงานมีแรงดันเชื่อมในระหว่างการเชื่อมที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยเฉพาะชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม B มีแรงดันเชื่อมที่สูงที่สุด ซึ่งแรงดันเชื่อมในระหว่างการเชื่อมบ่งชี้ถึงระยะอาร์กระหว่างลวดเชื่อมและชิ้นงานเชื่อม เมื่อมีแรงดันเชื่อมสูง จะส่งผลให้ระยะอาร์กสูง รวมไปถึงทำให้เนื้อเชื่อมต่ำและกว้างขึ้น (Tewari, Gupta, & Prakash, 2010) ในขณะที่เดียวกันความกว้างของบริเวณกระทบบร้อนของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม A แคบที่สุด และชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม B กว้างที่สุด โดยพบว่าชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม A มีค่าความร้อนเข้าที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม B และ C ดังแสดงในตารางที่ 3 อย่างไรก็ตามค่าความร้อนเข้าที่สูงจะส่งผลให้บริเวณกระทบบร้อนมีขนาดกว้างขึ้น (Lee, Chandel, & Seow, 2000)

เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะฐาน บริเวณกระทบบร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อมของชิ้นงานเชื่อมทั้งหมด พบว่าปริมาณของโครงสร้างเบไนต์ในแต่ละชิ้นงานเชื่อมแตกต่างกัน โดยชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม A มีโครงสร้างเบไนต์มากที่สุด อันเนื่องมาจากส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม A มีปริมาณธาตุเจือ (Alloy) มากที่สุด ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณค่าคาร์บอนเทียบเท่า (CE) ในขณะที่โครงสร้างจุลภาคในบริเวณเนื้อเชื่อมชั้นที่ 1 มีเฟิร์ลไลต์ปะปน โดยมีสาเหตุมาจากการในบริเวณเนื้อเชื่อมชั้นที่ 1 เกิดการเจือจาง (Dilution) ระหว่างลวดเชื่อมและโลหะฐาน (Lai et al., 2018) สำหรับโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบบร้อนมีขนาดละเอียดกว่าโลหะฐาน เพราะภายในบริเวณนี้ได้รับความร้อนจากกระบวนการเชื่อมสูงจนเกิดเป็นเฟสออสเทนไนต์ อย่างไรก็ตามกลับพบว่าขนาดเกรนเฟิร์ลไลต์ในบริเวณกระทบบร้อนของชิ้นงานเชื่อมแต่ละชิ้นมีขนาดที่แตกต่างกัน อันเนื่องมาจากความร้อนเข้าของแต่ละชิ้นงานแตกต่างกัน โดยชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม B มีปริมาณความร้อนเข้าสูงที่สุด ซึ่งส่งผลให้ในบริเวณกระทบบร้อนได้รับความร้อนสูง และเกิดการโตของเกรน (Grain growth) (Khan, Shengfu, & Wang, 2019)

จากการทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส พบว่า ค่าความแข็งในบริเวณกระทบบร้อนไม่สม่ำเสมอ อันเนื่องมาจากในแต่ละบริเวณได้รับอุณหภูมิสูงสุดในระหว่างการเชื่อมที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้อัตราการเย็นตัวที่ไม่เท่ากัน (Poorhaydari, Patchett, & Ivey, 2005) ซึ่งบริเวณที่อยู่ห่างจากเนื้อเชื่อมจะมีอุณหภูมิสูงสุดในระหว่างการเชื่อมที่ต่ำ แต่ในบริเวณที่ติดกับเนื้อเชื่อมมีอุณหภูมิสูงสุดในระหว่างการเชื่อมที่สูง ในขณะที่เดียวกันจะเห็นได้ว่าค่าความแข็งบริเวณกระทบบร้อนที่ติดกับเนื้อเชื่อมชั้นที่ 1 ของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม A มีค่าความแข็งสูงที่สุด ($440 \text{ HV}_{0.2}$) ในขณะที่



ของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม B มีค่าความแข็งต่ำที่สุด ($340 \text{ HV}_{0.2}$) มีผลมาจากชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม A มีค่าความร้อนเข้าต่ำที่สุด จึงส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดในระหว่างการเชื่อมต่ำ ตลอดจนมีอัตราการเย็นตัวเร็ว (Khan et al., 2019) และค่าความแข็งในบริเวณเนื้อเชื่อมชั้นที่ 1 สูงที่สุด มีสาเหตุมาจากผลของการเจือจาง (Dilution) ระหว่างเนื้อเชื่อมกับโลหะฐาน (Jun, Seo, Jeon, Lee, & Chang, 2016) โดยเฉพาะเนื้อเชื่อมชั้นที่ 1 มีการเจือจางสูงสุด ก่อให้เกิดค่าความแข็งที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเชื่อมชั้นอื่น ๆ อันเนื่องมาจากโลหะฐาน คือ รางรถไฟ ซึ่งประกอบไปด้วยคาร์บอนที่ค่อนข้างสูง (0.72%) จึงส่งผลให้เกิดการเจือจางของธาตุคาร์บอนจากบริเวณกระแทกร้อน ส่วนค่าความแข็งในบริเวณเนื้อเชื่อมของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม C ต่ำที่สุด อันเนื่องมาจากปริมาณธาตุเจือต่ำที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยเมื่อมีปริมาณธาตุเจือที่สูงขึ้น พบว่าส่งผลให้มีค่าความแข็งที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม A มีค่าความแข็งในบริเวณเนื้อเชื่อมสูงที่สุด จากค่าความแข็งในบริเวณเนื้อเชื่อมของชิ้นงานทั้งหมดสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาค โดยเฉพาะชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม A พบเฟสเบไนต์ ซึ่งมีค่าความแข็งสูงที่สุด และชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม B พบโครงสร้างจุลภาค คือ เฟสเบไนต์และออสเทนไนต์ค้ำ ในขณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม C เป็นเบไนต์กับเฟอร์ไรท์ ซึ่งมีค่าความแข็งต่ำที่สุด

จากการทดสอบแรงกระแทกของโลหะฐานและชิ้นงานเชื่อมทั้งหมด พบว่า โลหะฐานมีค่าความแกร่งต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานเชื่อม A และ C ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาค กล่าวคือ โครงสร้างเฟอร์ไรต์-โลด อันประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์และซีเมนไต์สลับกัน (Alternate cementite) ในทางกลับกันซีเมนไต์มีลักษณะแข็งแต่เปราะ (Popovic et al., 2010) และชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม C มีค่าความแกร่งที่สูงที่สุด ในขณะที่ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม B มีค่าความแกร่งต่ำที่สุด อันเนื่องมาจากปริมาณคาร์บอนในชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม B มากกว่าชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม A และ C โดยเมื่อมีปริมาณคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการรับแรงกระแทกที่ต่ำ (Svensson & Grefott, 1990) ดังนั้นการที่เนื้อเชื่อมมีค่าความแกร่งมากกว่าโลหะฐานเหล็กรางรถไฟ จะช่วยยืดอายุการใช้งานของรางรถไฟ อันเป็นการลดต้นทุนของการซ่อมบำรุงรางรถไฟ

สรุป

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าลวดเชื่อมแต่ละชนิดที่ใช้ในการเชื่อมซ่อมเหล็กรางรถไฟเกรด 900A มีอิทธิพลต่อโครงสร้างจุลภาคและความแกร่งของเนื้อเชื่อม ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เนื้อเชื่อมของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม C อันประกอบด้วยเบไนต์และเฟอร์ไรท์ ซึ่งมีค่าความแกร่งสูงที่สุด อันเป็นผลมาจากปริมาณคาร์บอนในเนื้อเชื่อมต่ำที่สุด



2. เนื้อเชื่อมของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม B ซึ่งประกอบไปด้วยเบ้าไนต์ และออสเทนไนต์ ตกค้าง มีค่าความแข็งแรงต่ำที่สุด จากการมีปริมาณคาร์บอนมากที่สุดในเนื้อเชื่อม

ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยของการเชื่อมซ่อมเหล็กรางรถไฟนี้ทำการศึกษาความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมเหล็กรางรถไฟเกรด 900A เพื่อลดต้นทุนในการเปลี่ยนเหล็กรางรถไฟ โดยในงานวิจัยครั้งต่อไปผู้สนใจสามารถทำการศึกษาการสึกหรอของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดต่าง ๆ และศึกษาการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กรางรถไฟ รวมไปถึงการศึกษากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction: XRD) และการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy: EDS) เพื่อยืนยันเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อเชื่อม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยจากศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านโลหะและวิศวกรรมวัสดุ (Center of Excellence in Metal and Materials Engineering: CEMME) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรวิทยาดังกล่าว จังหวัดสงขลา สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในงานวิจัยครั้งนี้

รายการอ้างอิง (References)

- Cakir, F. H., & Celik, O. N. (2017). Effect of isothermal bainitic quenching on rail steel impact strength and wear resistance. *Metal Science and Heat Treatment*, 59(5-6), 289-293.
- Haidemenopoulos, G. N., Zervaki, A. D., Terezakis, P., Tzanis, J., Giannakopoulos, A. E., & Kotouzas, M. K. (2006). Investigation of rolling contact fatigue cracks in a grade 900A rail steel of a metro track. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 29(11), 887-900.
- Inthara, A., Rojanapunya, P., & Saiseng, N. (2017). Thailand's Railroad Development and Future High Speed Train Development. *Journal of Yala Rajabhat University*, 12, 151-167.
- ISO 148-1. (2006). 148-1, *Metallic Materials*. Charpy Pendulum Impact Test. Part 1: Test Method.



- 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.
- Khan, A. R., Shengfu, Y., & Wang, H. (2019). Influence of Heat Input and Preheating on Microstructure and Mechanical Properties of Coarse Grain Heat-Affected Zone of Metal Arc Gas-Welded Pearlitic Rail Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(12), 7676-7686.
- Lai, Q., Abrahams, R., Yan, W., Qiu, C., Mutton, P., Paradowska, A., ... & Wu, X. (2018). Effects of preheating and carbon dilution on material characteristics of laser-cladded hypereutectoid rail steels. *Materials Science and Engineering: A*, 712, 548-563.
- Lee, C. S., Chandel, R. S., & Seow, H. P. (2000). Effect of welding parameters on the size of heat affected zone of submerged arc welding. *Materials and Manufacturing Processes*, 15(5), 649-666.
- Nikas, D., Meyer, K. A., & Ahlström, J. (2017). Characterization of deformed pearlitic rail steel. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 219(1), 012035
- Peng, J., Xie, X., Song, W., Li, W., & Luo, Z. (2019). Wear properties of two U71Mn K and U71Mn G rail steel welds during rolling contact fatigue. *International Journal of Modern Physics B*, 33(01n03), 1940041.
- Poorhaydari, K., Patchett, B. M., & Ivey, D. G. (2005). Estimation of cooling rate in the welding of plates with intermediate thickness. *Welding Journal*, 84(10), 149s-155s.
- Popovic, O., Prokic-Cvetkovic, R., Sedmak, A., Grabulov, V., Burzic, Z., & Rakin, M. (2010). Characterisation of high-carbon steel surface welded layer. *Strojniški vjestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 56(5).
- Roy, T., Abrahams, R., Paradowska, A., Lai, Q., Mutton, P., Soodi, M., ... & Yan, W. (2019). Evaluation of the mechanical properties of laser cladded hypereutectoid steel rails. *Wear*, 432, 202930.
- 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.
- Standard, A. S. T. M. (2012). E407-07: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.



- Svensson, L. E., & Gretoft, B. (1990). Microstructure and impact toughness of C--Mn weld metals. *Welding Journal*, 69(12), 454.
- Taylor, D. S. (1990). The Role of MMA Welding in the 1990 s. *Weld. Met. Fabr.*, 58(4), 200.
- Tewari, S. P., Gupta, A., & Prakash, J. (2010). Effect of welding parameters on the weldability of material. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(4), 512-516.
- Wang, W. J., Hu, J., Guo, J., Liu, Q. Y., & Zhu, M. H. (2014). Effect of laser cladding on wear and damage behaviors of heavy-haul wheel/rail materials. *Wear*, 311(1-2), 130-136.
- Wang, Y. Q., Zhou, H., Shi, Y. J., & Feng, B. R. (2012). Mechanical properties and fracture toughness of rail steels and thermite welds at low temperature. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 19(5), 409-420.
- Yamamoto S. (2018). *Arc Welding of Specific Steels and Cast iron*, (3rd Ed.), Shinko Welding Service Co., Ltd., Japan, 2008.
- Zhang, Q., Li, L., Ding, W., Song, H. T., & Gao, Z. K. (2017). Investigation on process and welded joint mechanical properties of bainitic steel rail flash butt welding. In *Key Engineering Materials*. 723,406-411.