

อิทธิพลของรูปแบบการเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูง

Fe-16Cr-2Mo ที่มีการเติมซิลิคอน

Influence of Welding Sequence on the Hardness

of High Chromium Cast Iron Fe-16Cr-2Mo adding Silicon

กฤษ อนุรักษ์¹, สำเนา โยธี^{2*}, ปริญญวัตร ทินบุตร² และ พิสิษฐชัย โคสะสุ³¹สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น²สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมเชื่อมประกอบ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วิทยาเขตขอนแก่น

³สาขาวิชาเทคโนโลยีงานท่ออุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

* Corresponding E-mail: Sumpao.yo@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบของชั้นแนวเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมที่มีการเติมซิลิคอน 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์ เพื่อเป็นแนวทางในการเชื่อมพอกแข็งชิ้นงานที่เสียหาย ชั้นทดลองถูกนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยชิ้นงานสำหรับทดลอง 4 รูปแบบ จะถูกเชื่อมด้วยลวดเชื่อม MG 750 W และลวดเชื่อม 450 R จากนั้นทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ผลการทดลองพบว่า การเชื่อมแบบหนึ่งชั้นและแบบสองชั้นแนวเชื่อมด้วยลวดเชื่อม 450R พบโครงสร้างคาร์ไบด์ชนิด M_7C_3 และ $M_{23}C_6$ ซึ่งให้ค่าความแข็งที่สูงกว่าการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม 750 W ที่พบคาร์ไบด์ส่วนใหญ่เป็นชนิด $M_{23}C_6$ การเชื่อมแบบสองชั้นส่งผลให้ค่าความแข็งบริเวณเขตกระทบร้อนมีแนวโน้มที่สูงกว่าการเชื่อมแบบชั้นเดียว เนื่องจากการที่เขตกระทบร้อนได้รับความร้อนซ้ำจากการเชื่อมเทียบได้กับกระบวนการอบคืนตัว เกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ (Carbide precipitation) บริเวณเนื้อพื้นในส่วนของชนิดวัสดุตามปริมาณซิลิคอนที่เติม พบว่าความแข็งเพิ่มขึ้นในชิ้นงานที่เติมซิลิคอน 0.5 – 1.5 เปอร์เซ็นต์ และค่าความแข็งลดลงเมื่อปริมาณซิลิคอนเพิ่มขึ้นเป็น 2% ทั้งบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมและบริเวณเขตกระทบร้อน

คำสำคัญ: เหล็กหล่อโครเมียมสูง, การเชื่อมพอกแข็ง, ชั้นแนวเชื่อม

ABSTRACT

The objective of this research was to study the welding layer on hardness properties of high chromium cast iron with silicon additions of 0.5%, 1%, 1.5%, and 2%, aiming to provide guidelines for hard facing welding of workpieces susceptible to wear. Specimens were annealed at 950 degrees celsius for 1 hour and then welded in four patterns using MG 750 W and 450 R welding wires. Subsequently, hardness tests were conducted using a Vickers hardness tester, and microstructural examination. Experimental results revealed that single and double-layer

welds using 450R welding wire exhibited higher hardness values with the presence of carbides M_7C_3 and $M_{23}C_6$ compared to welds using MG 750W wire, where predominantly $M_{23}C_6$ carbides were found. Double-layer welding resulted in higher hardness values in the HAZ region compared to single-layer welding due to repeated heating from welding compared to the tempering process, which promoted the precipitation of secondary carbides in the matrix. Regarding the material type according to the silicon content, an increase in hardness was observed in specimens with 0.5-1.5% silicon additions, while hardness decreased when the silicon content increased to 2%, both in the welded metal and base metal regions.

Keywords: High chromium Cast Iron, Hard facing welding, Welding layer

1. บทนำ

เหล็กหล่อโครเมียมเป็นวัสดุที่มีความต้านทานการสึกหรอได้ดีและต้นทุนการผลิตที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น [1] เหล็กหล่อชนิดนี้มีบทบาทสำคัญในการใช้งานที่ต้องการความทนทานต่อการสึกหรอแบบขัดสี เช่น ในอุตสาหกรรมซีเมนต์ อุตสาหกรรมเหมืองแร่ ลูกรีดในอุตสาหกรรมรีดเหล็ก [2] ในกระบวนการผลิตเหล็กหล่อ หากเกิดข้อบกพร่องบนชิ้นงานหล่อสามารถซ่อมแซมด้วยกระบวนการเชื่อมได้ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม [1] [3] [4] นอกจากนี้ชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมที่ผ่านการใช้งานที่เกิดการสึกหรอจากการเสียดสีสามารถซ่อมแซมได้ด้วยกระบวนการเชื่อม ซึ่งต้องเลือกตัวแปรหรือปัจจัยในการเชื่อมอย่างระมัดระวัง เช่น การพิจารณาส่วนผสมทางเคมี กระแสเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม กระบวนการเชื่อมและลวดเชื่อมที่เหมาะสมเพื่อให้มีความแข็งแรงและทนทาน ยึดระยะเวลาการใช้งานได้ยาวนานขึ้น [4] ปัจจัยอย่างหนึ่งที่น่าสนใจคือการศึกษากำหนดจำนวนชั้นของแนวเชื่อมซึ่งการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการเพิ่มจำนวนชั้นในการ

พอกแข็ง ส่งผลทำให้ความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้น [5] นอกจากนี้ยังมีผลการศึกษาการเชื่อมโดยใช้เทคนิคการเชื่อมรองพื้น (Buttering) พบว่าการเชื่อมพอกแข็งที่มีการสร้างชั้นรองพื้นมีค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมสูงกว่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่ไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น [6] การเชื่อมรองพื้นช่วยให้รอยเชื่อมมีความเหนียว ป้องกันการแตกร้าวในแนวเชื่อม [7] เทคนิคการเชื่อมแบบรองพื้นมีความจำเป็นสำหรับการเชื่อมเหล็กหล่อเนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงประกอบด้วย คาร์ไบด์ (Carbide) มาร์เทนไซต์ (Martensite) [1] ที่มีความแข็งแรงสูงมีโอกาสเกิดการแตกเปราะได้ง่าย

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการเชื่อมพอกแข็งชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ใช้เทคนิคการเชื่อมรองพื้นและเปรียบเทียบรูปแบบการเชื่อมแบบชั้นเดียวและแบบสองชั้นแนวเชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อมรองพื้นและลวดเชื่อมพอกแข็งที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรง เพื่อข้อมูลพื้นฐานและเป็นแนวทางในการเลือกใช้เทคนิคในการเชื่อมสำหรับเชื่อมซ่อมแซมเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานและสามารถนำไป

ประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมการเชื่อมซ่อมบำรุงด้วยวิธีการเชื่อมพอกผิวแข็งต่อไป

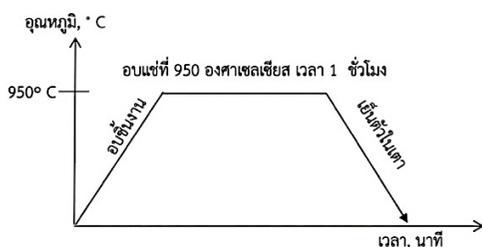
2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ชิ้นงานทดลองเป็นเหล็กหล่อโครเมียมสูงชนิด 16wt%Cr, 2wt%Mo ที่เติมซิลิโคน (Si) ในปริมาณ 0.5wt%, 1.0 wt%, 1.5wt% และ 2.0 wt% วัสดุผสมทางเคมีด้วยเครื่องสเปคโตรมิเตอร์ ได้ข้อมูลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีชิ้นงานทดลอง

ชิ้นงาน	ส่วนผสมทางเคมี					
	C	Cr	Si	Mn	Mo	C
0.5 %Si	2.96	15.96	0.52	0.68	1.99	2.96
1.0 %Si	2.95	15.79	1.04	0.63	2.05	2.95
1.5 %Si	2.90	16.07	1.55	0.62	1.97	2.90
2.0 %Si	2.95	16.07	1.98	0.62	1.99	2.95

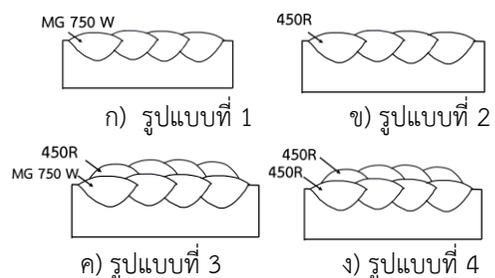
2.2 ตัดชิ้นงานขนาด กว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตรหนา 5 มิลลิเมตร ออบอ่อนชิ้นงานทดลองที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ให้เย็นตัวในเตา ดังแสดงภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เสร็จสิ้นกระบวนการอบอ่อน

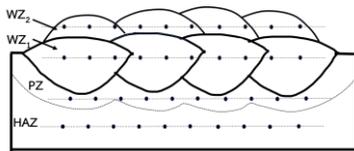
2.3 ขั้นตอนการเชื่อม เริ่มจากการใช้เปลวแก๊สให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 650-700 องศาเซลเซียส [7] ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ Thermocouple Thermometers Type K รุ่น HT-9815 เชื่อมชิ้นงานทดลองด้วยแขนกลเชื่อม KAWASAKI ใช้กระแสไฟเชื่อม 200 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าเชื่อม 20 โวลต์ ความเร็วเชื่อม

55 เซนติเมตรต่ออนาที ขนาดลวดเชื่อม 1.2 มิลลิเมตร แนวเชื่อมชั้นรองพื้นเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สปกคลุมด้วยลวดเส้นตัน (Solid wire) MG 750W ส่วนผสมทางเคมี 0.09%Cr, 7.0%Mn, 0.9%Si, 19%Cr, 8.5%Ni, 0.1%Mo, 0.08%Cu ชั้นพอกแข็งเชื่อมด้วยลวดไส้ฟลักซ์ (Flux core wire) 450R ส่วนผสมทางเคมี 0.3%C, <1.5%Si, <2.0%Mn, 2.4%Cr ทดลองเชื่อม 4 รูปแบบ ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 รูปแบบการเชื่อมโลหะด้วยลวดไฟฟ้า (wire electrical discharge machine, WEDM)

2.4 การทดสอบโครงสร้างจุลภาคและความแข็งชิ้นงานเริ่มจากตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัด จากนั้นวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical micro scope) ในบริเวณโลหะเชื่อม (Weld zone, WZ) บริเวณเขตกระทบร้อน (Heat affected zone, HAZ) วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ใช้เทคนิค EDS ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในบริเวณโลหะเชื่อม และทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness test, HV30) โดยตำแหน่งในการทดสอบความแข็ง 10 จุด ในแต่ละชั้นแนวเชื่อม ดังภาพที่ 3

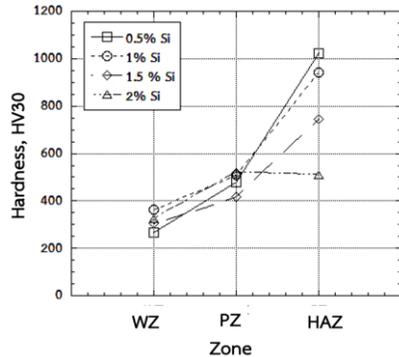


ภาพที่ 3 ตำแหน่งในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและการทดสอบความแข็งชิ้นแนวเชื่อม

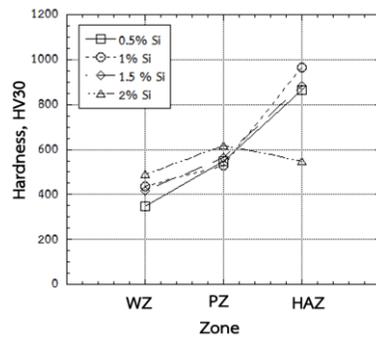
3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

ความแข็งบริเวณโลหะเชื่อมต่ำกว่าความแข็งบริเวณหลอมละลายบางส่วน (Partial melt zone, PZ) และบริเวณเขตกระทบร้อนทุกรูปแบบการเชื่อม โดยเนื้อโลหะเชื่อมรองรับหนึ่งชั้นตามรูปแบบที่ 1 ด้วยลวดเชื่อม MG 750W มีความแข็งต่ำสุด 265 HV โลหะเชื่อมที่ความแข็งสูงสุดคือเชื่อมแบบสองชั้นด้วยลวดเชื่อม 450R ค่าความแข็ง 473 HV บริเวณเขตกระทบร้อนมีความแข็งสูงกว่าเนื้อโลหะเชื่อมทุกตัวแปรการทดลอง โดยชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอน 1.5 % มีความแข็งสูงสุด 1,050 HV และค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซิลิคอนเพิ่มเป็น 2 % [2]

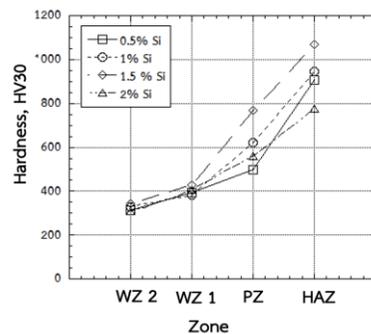
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับรูปแบบการเชื่อม ดังภาพที่ 4-7



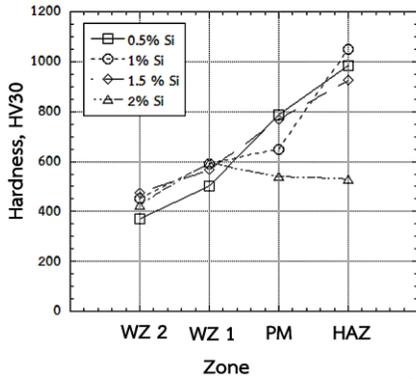
ภาพที่ 4 กราฟความแข็งโลหะเชื่อมแบบหนึ่งชั้นด้วยลวดเชื่อม MG 750W



ภาพที่ 5 กราฟความแข็งโลหะเชื่อมแบบหนึ่งชั้นด้วยลวดเชื่อม 450R

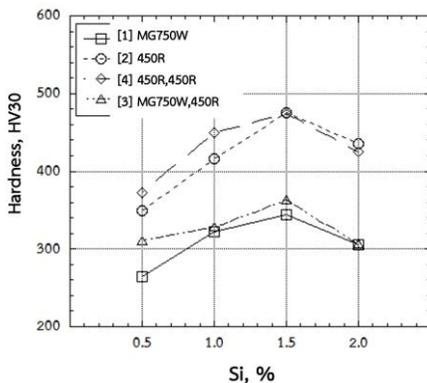


ภาพที่ 6 กราฟความแข็งโลหะเชื่อมชั้นแรกด้วย MG 750W ชั้นที่สองเชื่อมด้วย 450R



ภาพที่ 7 กราฟความแข็งโลหะเชื่อมแบบสองชั้นเชื่อมด้วยลวดเชื่อม 450R

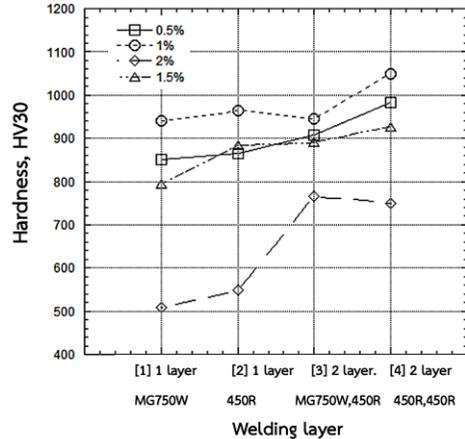
พิจารณาความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมดังภาพที่ 8 กราฟแสดงความแข็งกับชนิดลวดเชื่อมและรูปแบบการเชื่อมพบว่า การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมพอกแข็ง 450R ตามรูปแบบที่ 2 เชื่อมชั้นเดียว และตามรูปแบบที่ 4 เชื่อมแบบสองชั้น มีค่าความแข็งที่สูงกว่าการเชื่อมตามรูปแบบที่ 1 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมรองพื้น MG 750 W แบบชั้นเดียวและรูปแบบที่ 3 เชื่อมสร้างชั้นรองพื้นก่อนเชื่อมทับหน้าด้วยลวดเชื่อมพอกแข็ง



ภาพที่ 8 กราฟความแข็งบริเวณแนวเชื่อม

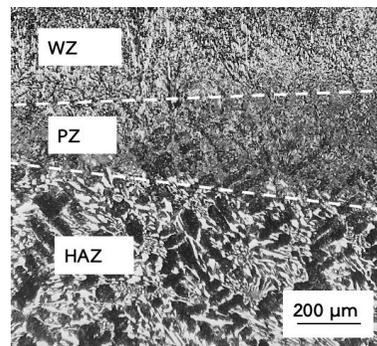
ความแข็งบริเวณเขตกระทบบร้อนพบว่ารูปแบบการเชื่อมแบบที่ 3 และรูปแบบการเชื่อมแบบที่ 4 มีค่าความแข็ง 750-1050 HV ซึ่งสูงกว่าการเชื่อมแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ที่มีค่าความแข็ง

ระหว่าง 500-960 HV ดังภาพที่ 9 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความแข็งบริเวณเขตกระทบบร้อนนั้นรูปแบบการเชื่อมแบบสองชั้นให้ค่าความแข็งสูงกว่าการเชื่อมแบบแนวเชื่อมชั้นเดียว



ภาพที่ 9 กราฟความแข็งบริเวณเขตกระทบบร้อน

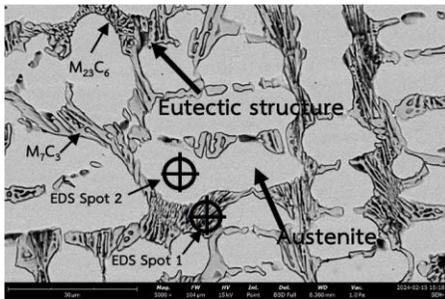
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคพบว่าบริเวณโลหะเชื่อมและบริเวณหลอมละลายบางส่วนมีลักษณะเกรน (grain) ที่ละเอียดกว่าบริเวณเขตกระทบบร้อน ดังภาพที่ 10 แสดงความแตกต่างโครงสร้างจุลภาคทั้ง 3 บริเวณซึ่งความแตกต่างของโครงสร้างนี้ส่งผลต่อความแข็ง



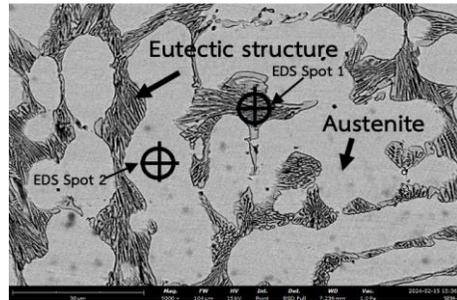
ภาพที่ 10 เปรียบเทียบโครงสร้างแต่ละบริเวณ

โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะเชื่อมทั้ง MG750 W และ 450R พบโครงสร้างยูเทคติก

(Eutectic structure) และเนื้อพื้นออสเทนไนท์ (Austenite) [8],[9] โครงสร้างจุลภาคที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของลวดเชื่อมคือการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ ลวดเชื่อม 450R พบแถบคาร์ไบด์ชนิด M_7C_3 สลับกับ $M_{23}C_6$ ดังภาพที่ 11 ซึ่งลักษณะของโครงสร้างจุลภาคสอดคล้องกับงานวิจัยของ K. WIECZERZAK [10] ส่วนลวดเชื่อม MG750 W พบแถบคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กดังภาพที่ 12 คาร์ไบด์ชนิด M_7C_3 มีความแข็งแรงสูงกว่าคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ ดังนั้นเป็นสาเหตุเนื้อโลหะเชื่อม 450R มีค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าเนื้อโลหะเชื่อม MG750W



ภาพที่ 11 โครงสร้างเนื้อโลหะเชื่อม 450R



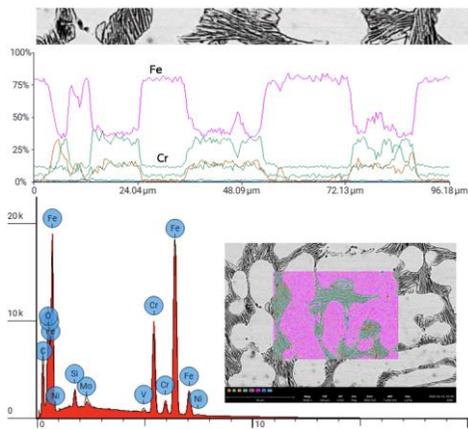
ภาพที่ 12 โครงสร้างเนื้อโลหะเชื่อม MG 750W

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยเทคนิค EDS แบบจุด โดยเลือกวิเคราะห์บริเวณแถบคาร์ไบด์ (EDS Spot 1) และบริเวณโครงสร้างพื้นออสเทนไนท์ (EDS Spot 2) ตำแหน่งในการวิเคราะห์ดังภาพที่ 11 และ ภาพที่ 12 ผลแสดงดังตารางที่ 2 อัตราส่วนอะตอมของธาตุ Cr/Fe พบว่าบริเวณแถบคาร์ไบด์ของโลหะเชื่อม MG750 W ได้ค่า Cr/Fe= 1.0 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ K. WIECZERZAK และคณะ [10] ที่อธิบายไว้ว่า Cr/Fe= 0.99 จะเกิดคาร์ไบด์ชนิด $M_{26}C_3$ ส่วนผลการวิเคราะห์บริเวณแถบคาร์ไบด์ของโลหะเชื่อม 450R ได้ค่า Cr/Fe= 1.4 จะเกิดคาร์ไบด์ชนิด M_7C_3 [10]

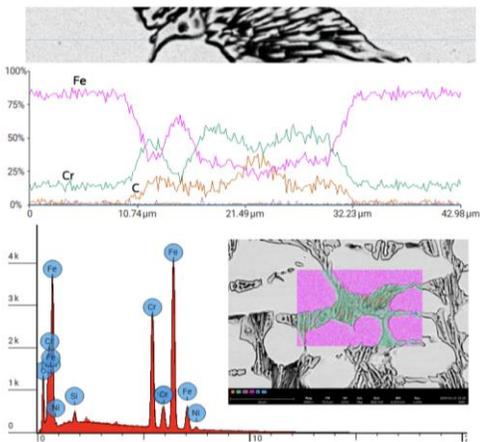
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี

โลหะเชื่อม	ตำแหน่งวิเคราะห์	ส่วนผสมทางเคมี (Atomic Conc.)			Cr/Fe Ratio
		C	Cr	Fe	
450R	Spot 1	49.194	22.443	15.030	1.4
	Spot 2	14.242	12.781	65.714	0.18
MG 750 W	Spot 1	43.216	27.484	27.814	1.0
	Spot 2	36.715	6.200	49.428	0.12

ผู้วิจัยใช้การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิค EDS แบบ Line scan และแบบ MAP เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงการกระจายตัวของธาตุทั้งบริเวณแถบคาร์ไบด์และเนื้อพื้นออสเทนไนต์ผลการวิเคราะห์พบว่า บริเวณเนื้อพื้นออสเทนไนต์มีปริมาณเหล็ก (Fe) สูง และโครเมียม (Cr) ต่ำ ส่วนบริเวณแถบคาร์ไบด์มีปริมาณเหล็กที่ลดลงและโครเมียมมีปริมาณเพิ่มขึ้น กราฟแสดงปริมาณธาตุต่างๆ ในแต่ละบริเวณและการกระจายตัวของธาตุแสดงดังภาพที่ 13 ภาพที่ 14

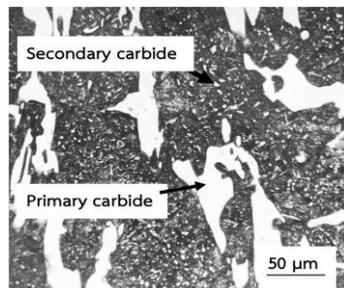


ภาพที่ 13 ผลการวิเคราะห์ EDS แบบ Line scan และแบบ MAP บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม MG 750W



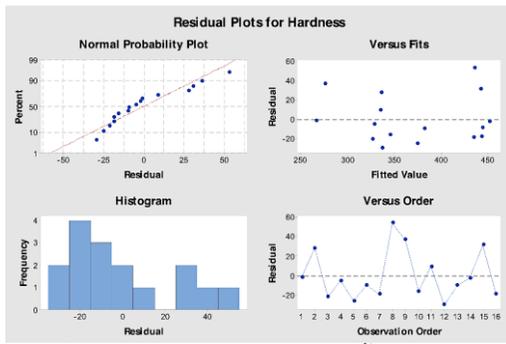
ภาพที่ 14 ผลการวิเคราะห์ EDS แบบ Line scan และแบบ MAP บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม 450R

ในสภาพอบอ่อนโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงประกอบด้วยคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นลำดับแรก (Primary carbide) หรือยูเทคติกคาร์ไบด์ (Eutectic carbide) ชนิด M_7C_3 และโครงสร้างพื้นเพิร์ลไลต์ (Pearlite) เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนจากการเชื่อมและเย็นตัวในอากาศเสมือนเป็นกระบวนการชุบแข็งสำหรับเหล็กหล่อโครเมียมสูงซึ่งจะได้โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อพื้นของบริเวณเขตกระทันประกอบด้วยมาร์เทนไซต์และคาร์ไบด์ลำดับสอง (Secondary carbide) ชนิด $M_{23}C_6$ ที่มีความแข็งสูง จากการทดลองนี้บริเวณเขตกระทันร้อนมีความแข็งระหว่าง 500-960 HV ขึ้นอยู่กับปริมาณส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดลอง เมื่อเชื่อมแนวเชื่อมสองชั้นทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนซ้ำ ซึ่งเทียบได้กับที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัว (Temper) ซึ่งกระบวนการอบคืนตัวนั้นจะเกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับสอง (Secondary carbide) ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้บริเวณเขตกระทันมีความแข็งสูงขึ้น โดยมีค่าความแข็งระหว่าง 750-1,050 HV ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคบริเวณเขตกระทันที่ผ่านการเชื่อมสองชั้นแสดงดังภาพที่ 15



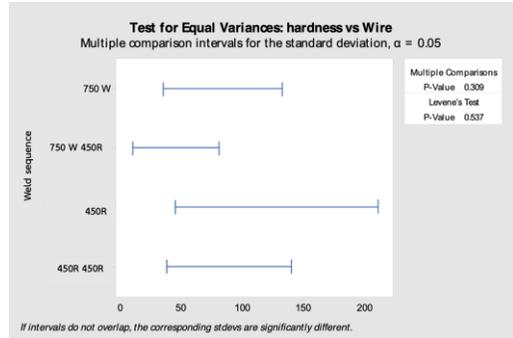
ภาพที่ 15 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเขตกระทัน

การวิเคราะห์ทางสถิติผลการวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูลดังภาพที่ 16 กราฟ normal probability plot มีค่า P-Value 0.367 มากกว่านัยสำคัญทางสถิติ 0.05 แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ กราฟ versus fits ข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างอิสระ ไม่เป็นแนวโน้มและกราฟ versus order มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอรอบค่ากลางไม่เป็นรูปแบบที่ชัดเจน

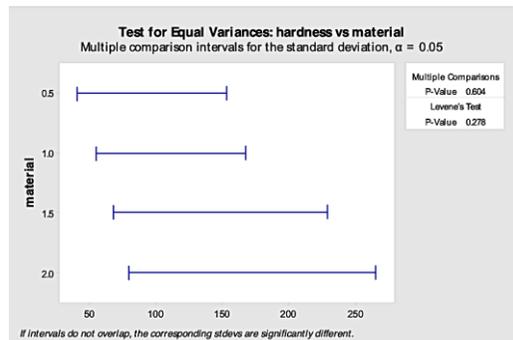


ภาพที่ 16 ผลการตรวจสอบคุณภาพข้อมูล

การทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของข้อมูล (test equal of variance) ของค่าความแข็งสำหรับปัจจัยด้านรูปแบบการเชื่อมพบว่า มีค่า P-Value 0.537 ดังภาพที่ 17 และปัจจัยชนิดวัสดุในแต่ละปริมาณซิลิกอนที่ผสมเติมมีค่า P-Value 0.278 ดังภาพที่ 18 ซึ่งมากกว่านัยสำคัญทางสถิติ 0.05 สรุปได้ว่าข้อมูลมีความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน มีคุณภาพที่สามารถนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไปได้



ภาพที่ 17 การทดสอบความแปรปรวนเท่ากันของข้อมูลปัจจัยรูปแบบการเชื่อม



ภาพที่ 18 การทดสอบความแปรปรวนเท่ากันของข้อมูลปัจจัยปริมาณซิลิกอนที่ผสมเติม

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Weld sequence	3	46762	15587	15.34	0.001
Material	3	12426	4142	4.08	0.044
Error	9	9145	1016		
Total	15	68334			

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA) ดังตารางที่ 3 พบว่าปัจจัยรูปแบบการเชื่อม มีค่า P-Value .001 ปัจจัยปริมาณซิลิกอนที่ผสมเติมมีค่า P-Value 0.044 น้อยกว่านัยสำคัญ 0.05 สรุปได้ว่ารูปแบบการเชื่อมและชนิดวัสดุตามปริมาณซิลิกอนที่ผสมเติมมีอย่างน้อย 1 คู่ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งที่แตกต่างกัน

การทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยด้วย Fisher pairwise model พบว่ารูปแบบการเชื่อมแบบที่ 2 ที่เชื่อมหนึ่งชั้นแนวเชื่อมด้วยลวดเชื่อม 450R และแบบที่ 4 ที่เชื่อมสองชั้นแนวเชื่อมด้วยลวดเชื่อม 450R มีค่าความแข็งเฉลี่ยจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกันโดยให้ค่าความแข็งที่สูงกว่าการเชื่อมรูปแบบที่ 1 และ รูปแบบที่ 3 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม MG 750W ดังตารางที่ 4 ส่วนปัจจัยชนิดวัสดุตามปริมาณซิลิกอนที่เติมพบว่า ชี้นงานที่มีปริมาณซิลิกอน 0.5%, 1.0% และ 1.5 % มีค่าความแข็งเฉลี่ยจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งค่าความแข็งเฉลี่ยสูงกว่าชี้นงานที่มีปริมาณซิลิกอน 0.5% ดังตารางที่ 5

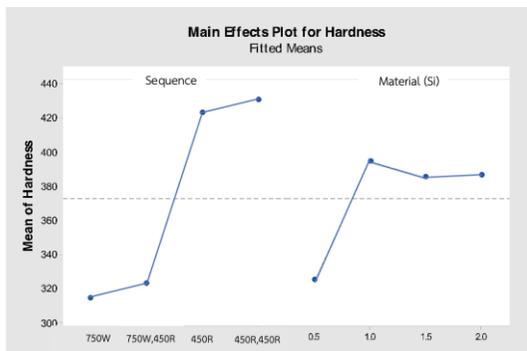
ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์การจัดกลุ่มข้อมูลโดยใช้ Fisher pairwise สำหรับปัจจัยปัจจัยรูปแบบการเชื่อม

Weld Sequence	N	Mean	Grouping	
4	4	430.36	A	
2	4	422.72	A	
3	4	323.12		B
1	4	314.35		B

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์การจัดกลุ่มข้อมูลโดยใช้ Fisher pairwise สำหรับปัจจัยชนิดของวัสดุตามปริมาณซิลิกอน

Material (Si)	N	Mean	Grouping	
1.0	4	394.519	A	
2.0	4	386.306	A	
1.5	4	384.953	A	
0.5	4	324.791		B

กราฟแสดงปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมใช้ Main effects plot พบว่าปัจจัยรูปแบบการเชื่อมส่งผลต่อค่าความแข็งของเนื้อโลหะเชื่อมอย่างเห็นได้ชัด โดยพบว่า การเชื่อมด้วยลวดเชื่อม 450R ทั้งแบบหนึ่งชั้นแนวเชื่อมและแบบสองชั้นแนวเชื่อมให้ความแข็งที่สูงกว่าการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม MG750 W อย่างเห็นได้ชัด ส่วนปัจจัยด้านปริมาณซิลิคอนที่เติมจะเห็นว่าส่งผลต่อความแข็งที่ชัดเจนเมื่อเติมซิลิคอนจากช่วง 0.5% ไปเป็น 1 % ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความแข็ง

การเชื่อมพอกแข็งด้วยลวดเชื่อม 450R ทั้งการเชื่อมแบบชั้นเดียวและแบบสองชั้นให้ความแข็งที่สูงกว่าการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม MG 750W แต่เทคนิคการเชื่อมสร้างชั้นรองพื้นมีความจำเป็นในการเชื่อมเนื่องจากเหล็กหล่อโครเมียมสูงมีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูง ในการเชื่อมเหล็กกลุ่มนี้หากเลือกปัจจัยในการเชื่อมที่ไม่เหมาะสมอาจส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการแตกร้าวได้ง่าย ซึ่งการเชื่อมสร้างชั้นรองพื้นช่วยให้รอยเชื่อมมีความเหนียวและช่วยป้องกันการแตกร้าวในแนวเชื่อม [7] การใช้ลวดเชื่อม MG

750W ในการเชื่อม เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาเชื่อมสร้างแนวเชื่อมชั้นรองพื้นได้ดี ในส่วนของการเชื่อมแบบสองชั้นเทียบได้กับการอบคืนตัวสำหรับเหล็กหล่อโครเมียมสูงซึ่งส่งผลให้บริเวณเขตกระทะร้อนเกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ที่มากขึ้น [11] หากเพิ่มจำนวนชั้นแนวเชื่อมความร้อนจากการเชื่อมจะเป็นการอบคืนตัวซ้ำทำให้การตกตะกอนของคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย [12] จากการศึกษาชิ้นเนื้อเชื่อมพอกแข็งด้วยลวดเชื่อม 450R มีความแข็งตรงตามคุณสมบัติที่ระบุจากผู้ผลิตซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานทนต่อการเสียดสี อย่างไรก็ตามเนื้อโลหะเชื่อมยังมีค่าความแข็งที่ต่ำกว่าเขตกระทะร้อน หากต้องการความแข็งที่ใกล้เคียงกับเขตกระทะร้อนเพื่อให้เนื้อโลหะเชื่อมมีความแข็งทนการเสียดสีได้มากขึ้นนั้นควรเลือกลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของธาตุที่สนับสนุนการเกิดคาร์ไบด์ เช่น ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของธาตุ โมลิบดีนัม วานาเดียม และโครเมียม เป็นต้น ซึ่งต้องศึกษาตัวแปรในการเชื่อมที่เหมาะสมต่อไป ในงานวิจัยนี้ไม่ได้กล่าวถึงบริเวณโลหะฐานเนื่องจากชิ้นงานทดลองมีความหนา 5 มิลลิเมตร ดังนั้นความร้อนจากการเชื่อมส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งและโครงสร้างจุลภาคทั้งชิ้นงานทำให้ไม่เหลือสภาพของโลหะฐานเดิม สำหรับนักวิจัยที่สนใจศึกษาเพิ่มเติมควรเพิ่มความหนาของชิ้นงานทดลองเพื่อให้เห็นความเปลี่ยนแปลงความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อเชื่อม บริเวณเขตกระทะร้อน และบริเวณโลหะฐาน

4. สรุปผลการวิจัย

4.1 การเชื่อมแบบชั้นเดียวและแบบสองชั้นด้วยลวดเชื่อม 450R พบโครงสร้างคาร์ไบด์ทั้งชนิด

M_7C_3 และ $M_{23}C_6$ ซึ่งให้ค่าความแข็งที่สูงกว่าการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม 750 W ที่พบคาร์ไบด์ส่วนใหญ่เป็นชนิด $M_{23}C_6$

4.2 การเชื่อมแบบแนวเชื่อมสองชั้นส่งผลให้ค่าความแข็งบริเวณเขตกระทบบร้อนมีแนวโน้มที่ความแข็งสูงกว่าการเชื่อมแบบชั้นเดียวเนื่องจากการที่เขตกระทบบร้อนได้รับความร้อนซ้ำจากการเชื่อมซึ่งเทียบได้กับกระบวนการอบคืนตัว เกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ (Secondary carbide) บริเวณเนื้อพื้น

4.3 วัสดุเหล็กหล่อโครเมียมสูง 16 wt% Cr-2wt % Mo ที่เติมซิลิคอน 0.5%-2% พบว่า ความความแข็งเพิ่มขึ้นในชั้นทดลองที่มีปริมาณซิลิคอน 0.5%-1.5% และค่าความแข็งลดลงเมื่อปริมาณซิลิคอนเพิ่มขึ้นเป็น 2% ทั้งบริเวณโลหะเชื่อมและบริเวณเขตกระทบบร้อน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Gucwa M, Bęczkowski R, Winczek J, Wyleciał T. The Effect of Type of Welding Sequence During Hardfacing Chromium Cast Iron for Erosion Resistance . Archives of foundry Engineering .2017; 17(3): 51-54.
- [2] Kosasu P, Inthidech S, Srichareonchai P Yasuhiro M. Effect of Silicon on Subcritical Heat Treatment Behavior and Wear Resistance of 16 wt% Cr Cast Iron

with 2 wt% Mo. Journal of Metals, Materials and Minerals. 2012;22(2):89-95.

- [3] Mician M, Konar R, Hlavaty I, Winczek J, M. Gucwa The Repair of Foundry Defects in Steel Castings Using Welding Technology .Archives of foundry Engineering .2018; 18(2): 177-180.
- [4] Xinghui L, Welding Repair of High Chromium Cast Iron Defects. Key Engineering Materials .2019;814:229-232.
- [5] ทวี หมดส๊ะ, ปิยะวรรณ สุนาสวนม, อรจิตร แจ่มแสง. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมและ สมบัติของโลหะเชื่อมพอกแข็งเหล็กหล่อสีเทา. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี 2019;17(1) :103-113.
- [6] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, สุรัตน์ ตรียวนพงศ์, สุรียา ประสมทอง และคณะ. อิทธิพลของการรองพื้นและการพอกผิวแข็งต่อสมบัติทางกล ของโลหะเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี. 2016; 14(1): 77-86.
- [7] American Welding Society. Welding Handbook Ninth Edition Volume 4 material and application, Part 1. Miami: Printed in the United States of America; 2011.
- [8] H. Wang and S. Yu Influence of heat treatment on microstructure and sliding wear resistance of high chromium cast iron electroslag hardfacing layer.Surface

[53]

- & Coatings Technology. 2017;319: 182–190.
- [9] Zixiang L , Yinan C , Jie W, et al. Characterization of Microstructure and Mechanical Properties of Stellite 6 Part Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing. Metals. 2019: 9:474.
- [10] Wiczerzak k, Bał p, Stepień m, et al. The characterization of cast Fe-Cr-C alloy charakterystyka stopu Fe-Cr-C W stanie lanym archives of metallurgy and materials. 2015; 60: 779-782.
- [11] Kosasu P , Inthidech S Effect of Silicon on Abrasive Wear Behavior of Heat-Treated 16% Cr - 2% Mo Cast Iron RMUTI JOURNAL Science and Technology.2019; 12 (1):42-56.
- [12] Inthidech S, Boonmak K, Sricharoenchai P, et al. Effect of Repeated Tempering on Hardness and Retained Austenite of High Chromium Cast Iron Containing Molybdenum Materials Transactions. 2010; 51(7): 1264- 127

