

การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะผิวเชื่อมพอกแข็งด้วยลวดเชื่อมแบบแกน Cr-Nb-Ni-Fe based และ Cr-Mo-W-Fe based ที่เตรียมด้วยการเชื่อมแบบ Gas Metal Arc Welding

แมน ค้อยแพ้ว* และ คำรณ แก้วผัด

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษารอยเชื่อมพอกแข็ง 2 ชนิดคือรอยเชื่อมพอกแข็ง Cr-Nb-Ni-Fe based และรอยเชื่อมพอกแข็ง Cr-Mo-W-Fe based จากลวดเชื่อมแบบแกน ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบ Gas Metal Arc Welding และเชื่อมบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เพื่อประยุกต์ใช้ซ่อมแซมชิ้นส่วนที่เสียหาย การศึกษาพบลักษณะ รูปร่างของลวดเชื่อมแบบแกน ประกอบด้วยเปลือกและผงวัสดุในแกนลวดเชื่อม เปลือกของลวดเชื่อม Cr-Nb-Ni-Fe based พบเหล็ก โครเมียม นิกเกิล เป็นองค์ประกอบทางเคมีเป็นหลัก ส่วนวัสดุผงในแกนลวดเชื่อมพบองค์ประกอบทางเคมีคือธาตุเหล็ก ไนโอเบียม โบรอนและอลูมิเนียมเป็นหลัก สำหรับเปลือกของลวดเชื่อม Cr-Mo-W-Fe based พบเหล็กและโครเมียม เป็นองค์ประกอบทางเคมีหลักและพบโมลิบดีนัม ทังสเทนและคาร์บอนเป็นองค์ประกอบทางเคมีหลักในผงแกนลวดเชื่อม ความแข็งของรอยเชื่อม Cr-Mo-W-Fe based มีค่า 1007 HV_{300g} ซึ่งสูงกว่าค่าความแข็งเฉลี่ยของรอยเชื่อม Cr-Nb-Ni-Fe based เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีของ โมลิบดีนัมและทังสเทนกระจายอยู่ในรอยเชื่อมและยังส่งผลให้อัตราการสึกหรอต่ำด้วย สำหรับรอยเชื่อมพอกแข็ง Cr-Nb-Ni-Fe based พบองค์ประกอบทางเคมีไนโอเบียมกระจายในรอยเชื่อม ทำให้รอยเชื่อมมีค่าความแข็งเฉลี่ย 656 HV_{300g} ซึ่งสูงกว่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนประมาณ 3 เท่า นอกจากนี้ยังพบว่า มีการเจือจางต่ำระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงานจึงทำให้ความแข็งของรอยเชื่อมมีค่าสูงและสม่ำเสมอทั้งรอยเชื่อม

คำสำคัญ: การเชื่อมพอกผิวแข็ง, ลวดเชื่อมแบบแกน, การสึกหรอแบบไถล, การเชื่อมแบบ GMAW

Characterization Hard Surfacing of Cr-Nb-Ni-Fe based and Cr-Mo-W-Fe based Cored Wires Fabricated by Gas Metal Arc Welding

Man Tuiprae* Kumron Kaewpad

Abstract

In this research, the weldments of Cr-Nb-Ni-Fe based and Cr-Mo-W-Fe based electrode cored wires were fabricated onto low carbon steel by gas metal arc welding. The Cr-Nb-Ni-based electrodes cored wire consisting of iron, chromium and nickel alloy shell and iron, niobium, boron and aluminum alloy as the core material. Meanwhile, the Cr-Mo-W-Fe based electrode cored wire containing the iron and chromium alloy shell and a molybdenum, tungsten and carbon alloy as the core component. The measurement of average microhardness on the weldment Cr-Mo-W-Fe based was 1007 HV_{300g} which was higher than that of the Cr-Nb-Ni-Fe based. This was due to a well distribution of the molybdenum and tungsten carbide in the Cr-Mo-W-Fe weldment. Whereas the Cr-Nb-Ni-Fe based weldment showed a distribution of niobium providing the average hardness of 656 HV_{300g} which was about 3 times that of a mild steel substrate. Moreover, it was also found that very low dilutions between the cored wire and substrate resulting in high hardness and consistently in weldment.

Keyword: Hard surfacing, Cored wire, Sliding wear, Gas metal arc welding

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

* Corresponding author, E-mail: Tman@rmu.ac.th Received 22 March 2016, Accepted 17 October 2016

1. บทนำ

เทคโนโลยีพื้นผิวและวิศวกรรมพื้นผิว ได้มีบทบาทอย่างมากต่อการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่เสียหายจากการใช้งานและจากสิ่งแวดล้อมในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังตัวอย่างการสึกหรอของผิวชิ้นงานในรูปที่ 1 ซึ่งเกิดกับทั้งอุตสาหกรรมทั้งขนาดเล็กและอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า อุตสาหกรรมยานยนต์ โรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมซีเมนต์ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมการบิน โรงผลิตกระแสไฟฟ้า รวมถึงอุตสาหกรรมนอกชายฝั่ง เป็นต้น โดยได้มีการนำเทคโนโลยีพื้นผิวและวิศวกรรมพื้นผิวมาประยุกต์ใช้ซ่อมแซมส่วนที่เสียหายและอีกทั้งยังนำมาใช้พัฒนาสำหรับการออกแบบพื้นผิวและออกแบบวัสดุพื้นผิวเพื่อการป้องกันการสึกหรอและการยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนต่างในอุตสาหกรรม [1-3]



รูปที่ 1 ตัวอย่างชิ้นงาน Plunger ที่สึกหรอบริเวณผิวหลังจากการใช้งาน

การสร้างพื้นผิวใหม่หรือการซ่อมแซมผิวที่เสียหายมีเทคนิคและกระบวนการทำผิวเคลือบ (coating) หลายรูปแบบ ได้แก่การทำผิวเคลือบด้วยกระบวนการทางเคมีและทางกายภาพ (CVD, PVD) โดยมีการพัฒนาวัสดุที่สามารถทนทานต่อการสึกหรอบริเวณผิวของชิ้นงาน เช่น วัสดุกลุ่มทังสเตน (W) และทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) วัสดุกลุ่มไนโอเบียม (Nb) และไนโอเบียมคาร์ไบด์ (NbC) เป็นต้น [4] นอกจากนี้ยังมีการใช้กระบวนการทำเคลือบผิวด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า เช่น การเคลือบสังกะสีและเคลือบโครเมียมเพื่อการต้านทานการกัดกร่อน [5] การพ่นเคลือบด้วยความร้อน เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถสร้างและซ่อมแซมผิวของชิ้นงานที่สึกหรอได้เป็นอย่างดีและไม่มีผลกระทบต่อชิ้นงานเนื่องจากความร้อน ซึ่งจะอาศัยหลักการทำให้วัสดุเคลือบมีลักษณะกึ่งหลอมเหลวและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจากการอัดด้วยแก๊สหรืออากาศ ทำให้วัสดุเคลือบวิ่งกระทบกับชิ้นงานกลายเป็นชั้นผิวเคลือบในที่สุด โดยชิ้นงานมีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเทคนิคการพ่นเคลือบ [6-8] สำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง (hard surfacing) เป็นเทคนิคการซ่อมแซมผิวชิ้นงานที่สึกหรอที่นิยมและใช้กันมานาน ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง ทั้งในด้านลักษณะ รูปแบบและการพัฒนาวัสดุต่างๆ ได้แก่ลักษณะวัสดุเป็นแบบผง ลักษณะลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 - 2.0 มิลลิเมตร และยังมีลวดเชื่อมแบบแกน (cored wire) ซึ่งในแกนลวดเชื่อมมีส่วนผสมของเฟสคาร์ไบด์เช่น ทังสเตนคาร์ไบด์ โครเมียมคาร์ไบด์ ไนโอเบียมคาร์ไบด์และอลูมิเนียมออกไซด์ เป็นต้น [9] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาวิจัยถึงพารามิเตอร์ของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแบบแกนที่มี

นิกเกิลเป็นโลหะพื้นฐานและมีส่วนผสมของทังสเตนในแกนลวดเชื่อมเพื่อให้ได้คุณภาพของรอยเชื่อมที่ดีที่สุด [10-12] และยังมีกรพบว่าลวดเชื่อมแบบแกนที่มีส่วนผสมของโครเมียมและโคบอลสูง ทำให้รอยเชื่อมสามารถต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู (abrasive wear) ได้ดีและมีค่าความแข็งมากกว่า 2.5 เท่าของเหล็ก HARDDOC 400 รวมถึงลวดเชื่อมแบบแกนที่มีส่วนผสมของไนโอเบียม โมลิบดีนัมและทังสเตน ที่ให้คุณสมบัติในการทำงานเดียวกัน [13-15] ซึ่งขึ้นอยู่กับ การนำไปใช้ให้เหมาะสมกับงานต่างๆ รวมถึงสภาวะสิ่งแวดล้อมและสภาพการใช้งาน ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาลักษณะเฉพาะของลวดเชื่อมพอกผิวแข็งแบบแกน (cored wire) ที่มีองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ลวดเชื่อมแบบแกน Cr-Nb-Ni-Fe based และลวดเชื่อมแบบแกน Cr-Mo-W-Fe based ใช้กระบวนการเชื่อมแบบ Gas Metal Arc Welding: GMAW ในการทดลองครั้งนี้ และทำการศึกษาคูณลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติต่างๆ ของรอยเชื่อมพอกแข็ง ทั้งโครงสร้างจุลภาค คุณสมบัติทางเคมี ความแข็งและการต้านทานการสึกหรอของรอยเชื่อมพอกแข็ง เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของลวดเชื่อมแบบแกน

การวิจัยในครั้งนี้ใช้ลวดเชื่อมแบบแกน 2 ชนิดคือลวดเชื่อมแบบแกน Cr-Nb-Ni-Fe based และลวดเชื่อมแบบแกน Cr-Mo-W-Fe based มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตรเท่ากัน แต่มีส่วนผสมทางเคมี

ต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางการประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสมในด้านราคา ค่าความแข็งและค่าการต้านทานการสึกหรอ ประกอบด้วยการวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะของลวดเชื่อมแบบแกนทั้ง 2 ชนิด ประกอบด้วยการวิเคราะห์พื้นฐานวิทยา รูปร่าง ลักษณะและขนาดของลวด โครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบทางเคมี เริ่มจากการศึกษาข้อมูลของผู้ผลิตประกอบด้วยข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของลวดเชื่อมดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของลวดเชื่อมแบบแกนจากบริษัทผู้ผลิต (Polymet Corporation: USA)

Cored wires	Chemical Compositions (wt %)										
	Cr	Nb	B	Ni	Si	Mn	Al	C	Mo	W	Fe
Cr-Nb-Ni-Fe based	13	6	4.2	5.5	1.2	1.3	2	-	-	-	bal.
Cr-Mo-W-Fe based	15	-	5	-	-	-	-	5	15	10	bal.

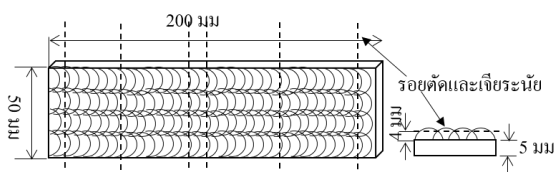
ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของลวดเชื่อมแบบแกนทั้ง 2 ชนิด ทั้งในส่วนเปลือกของลวดเชื่อมและในส่วนของวัสดุในแกนลวดเชื่อม โดยการนำลวดเชื่อมมาตัดตามแนวขวางและวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (JEOL JSM-5910) โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 15 kV พร้อมทั้งถ่ายรูปลักษณะรูปร่างของเปลือกและแกนลวดเชื่อม ด้วยโหมด BSE-SEM และ โหมด SE-SEM และทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการกระจายตัวของรังสีเอ็กซ์ (EDS-SEM) โดยมีรูปแบบการวิเคราะห์แบบจุดและแบบพื้นที่

การศึกษาผงในแกนลวดเชื่อม โดยการแกะผงวัสดุออกมาจากส่วนเปลือกของลวดเชื่อม จากนั้นวิเคราะห์

ลักษณะสัณฐานวิทยาของในแกนลวดเชื่อมด้วย SEM และเทคนิค EDS-SEM เช่นเดียวกับการวิเคราะห์เปลือกของลวดเชื่อม

2.2 การเชื่อมและวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของรอยเชื่อมพอกแข็ง

การเตรียมชิ้นงานรอยเชื่อมจากลวดเชื่อมแบบแกนทั้ง 2 ชนิด ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบ Gas Metal Arc Welding ยี่ห้อ Lincoln รุ่น CV 500-I, USA และใช้แก๊สอาร์กอนซึ่งเป็นแก๊สเฉื่อยเป็นแก๊สปกคลุมในขณะที่ทำการเชื่อม โดยใช้พารามิเตอร์การเชื่อมดังในตารางที่ 2 ตามพารามิเตอร์การเชื่อมที่ผู้ผลิตลวดเชื่อมแนะนำชิ้นงานสำหรับเชื่อมพอกผิวใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (AISI 1020) ขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 200 มิลลิเมตร และความหนา 5 มิลลิเมตร ทำการเชื่อมพอกผิวแข็งจำนวน 4 แนวเชื่อมต่อเนื่องโดยไม่ส่ายลวดเชื่อมและเชื่อมทับแต่ละแนวเท่ากับ 1/3 ส่วน ซึ่งมีลักษณะและรูปแบบการเชื่อมดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ไออะแกรมทดลองการเชื่อม

หลังจากเชื่อมเสร็จแล้ว ทิ้งให้รอยเชื่อมเย็นตัวในอากาศปกติจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วนำชิ้นงานเชื่อมไปตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงานโลหะวิทยาโดยมีการพ่นน้ำหล่อเย็นตลอดเวลาเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในรอยเชื่อม การตัดชิ้นงานทดสอบมี

รายละเอียดการตัดดังนี้ คือ ตัดภาคตัดขวางบริเวณตรงกลางชิ้นงานเชื่อมให้ได้ขนาดความกว้างของรอยเชื่อม 10 มิลลิเมตร เพื่อนำไปทำเรือนชิ้นงานแบบร้อน (hot mounting) จากนั้นนำไปขัดภาคตัดขวางของรอยเชื่อมด้วยกระดาษทรายหยาบและกระดาษทรายละเอียด ขัดมันด้วยผ้าสักหลาด พร้อมกับผงขัดอลูมิเนียมออกไซด์ ขนาด 1 ไมครอน และ 0.3 ไมครอนตามลำดับ นำชิ้นงานที่ขัดมันแล้วไปทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (ยี่ห้อ Wolpert W Group, UK) และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนส่งกราดต่อไป โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์

หลังจากขัดมันเสร็จแล้วนำชิ้นงานตัวอย่างไปทดสอบหาค่าความแข็งบริเวณภาคตัดขวางของรอยเชื่อม โดยเริ่มทดสอบตั้งแต่ด้านบนของรอยเชื่อมลงมาจนถึงบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนกับรอยเชื่อมด้านล่าง โดยทดสอบความแข็งแต่ละจุดห่างกัน 100 ไมครอน ใช้น้ำหนักการทดสอบ 300 กรัม และ dwell time เท่ากับ 10 วินาที แล้วนำค่าที่ได้จากการทดสอบรอยเชื่อมทั้ง 2 ไปพล็อตกราฟ ระหว่างค่าความแข็งกับระยะการทดสอบตั้งแต่ด้านบนรอยเชื่อมถึงรอยต่อ (interface)

2) การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ขัดมันเสร็จแล้วไปเคลือบทองด้วยเครื่อง sputtering เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อให้นำไฟฟ้าได้ดีก่อนการนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่งกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5910 ใช้แรงดันไฟฟ้า 15 kV พร้อมทั้งถ่ายรูป

โครงสร้างจุลภาคด้วยโหมด BSE-SEM และโหมด SE-SEM หลังจากวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในภาคตัดขวางรอยเชื่อมด้วยโหมด BSE-SEM แล้วจากนั้นวิเคราะห์ห้องค้ำประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ โดยการวิเคราะห์แบบจุดและแบบพื้นที่

3) การทดสอบการสึกหรอแบบไถล

ตัดชิ้นงานเชื่อมทั้ง 2 ให้ได้ขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 25 X 25 มิลลิเมตร จากนั้นทำการเจียรระโนบริเวณผิวด้านบนรอยเชื่อมออกให้ได้ความเรียบสม่ำเสมอดังรูปที่ 2 และนำชิ้นตัวอย่างไปขัดด้วยกระดาษทรายหยาบและกระดาษทรายละเอียด ให้ได้ความเรียบผิว 0.2 ไมครอน โดยประมาณตามมาตรฐานการทดสอบการสึกหรอแบบไถล ตาม ASTM G99-05 ด้วยเครื่อง Tribometer โดยใช้พารามิเตอร์การทดสอบดังนี้คือ ใช้ลูกบอลทดสอบอลูมิเนียมออกไซด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร น้ำหนักกดทดสอบเท่ากับ 500 กรัม รัศมีการทดสอบ 3 และ 5 มิลลิเมตร ระยะทางการทดสอบ 300 เมตร และความเร็วเชิงเส้นเท่ากับ 7 เซนติเมตรต่อวินาที จากนั้นวัดขนาดความกว้างของรอยสึกหรอ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกำลังขยาย 100 เท่า และบันทึกรูปไว้ จากนั้นวัดความกว้างของรอยสึกหรอด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ SCENTIS แล้วนำข้อมูลที่ได้ออกไปหาค่าปริมาตรที่สูญเสียของเนื้อวัสดุและอัตราการสึกหรอจากสมการ (1) และสมการ (2) ตามลำดับ [16]

$$V = \pi (r_t) (w_p)^3 / 6r_p \tag{1}$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรที่สูญเสียหลังจากทดสอบ (mm³)

r_t คือ รัศมีของรอยการทดสอบ (mm)

w_p คือ ความกว้างของรอยทดสอบ (mm)

r_p คือ รัศมีของลูกบอลทดสอบ (mm)

หาอัตราการสึกหรอจากสมการ (2)

$$Q = V/L \tag{2}$$

เมื่อ Q คือ อัตราการสึกหรอ (mm³/m)

V คือ ปริมาตรที่สูญเสียหลังจากทดสอบ (mm³)

L คือ ระยะทางการทดสอบ (m)

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์การเชื่อม

พารามิเตอร์	ชนิดลวดเชื่อมแบบแกน	
	Cr-Nb-Ni-Fe based	Cr-Mo-W-Fe based
	แรงดันไฟฟ้า (Volt)	26
กระแสไฟฟ้า (Amp.)	160	200
แก๊สอาร์กอนปกคลุม (psi)	15	15
อัตราการป้อนลวด (m/min)	17	17
ความเร็วการเชื่อม (cm/min)	20	20

3. ผลการทดลองและการอธิบายผลการทดลอง

3.1 คุณลักษณะเฉพาะของลวดเชื่อมแบบแกน

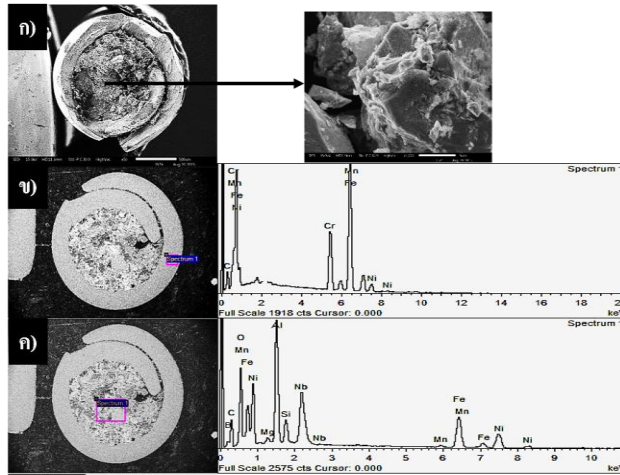
ลักษณะรูปร่างของลวดเชื่อมแบบแกน Cr-Nb-Ni-Fe based และลวดเชื่อมแบบแกน Cr-Mo-W-Fe based เป็นลักษณะเส้นลวดกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร โดยประมาณ บรรจุเป็นม้วนอยู่ในสื่อกับที่

พร้อมใช้งานกับเครื่องเชื่อมแบบ Gas Metal Arc Welding เมื่อตัดลวดเชื่อมตามขวางและวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด เพื่อหาลักษณะจำเพาะต่างๆ ได้แก่ รูปร่าง ขนาด สันฐานวิทยา โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี พบว่าลวดเชื่อมแบบแกนทั้ง 2 ชนิดประกอบด้วยส่วนเปลือกลวดและผงวัสดุที่อัดอยู่ด้านในแกนลวดเชื่อม ซึ่งส่วนเปลือกมีความหนา 200 ไมครอน โดยประมาณ ดังแสดงดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 จากภาพภาคตัดขวางของลวดเชื่อมแบบแกนทั้ง 2 คล้ายกับเป็นการผลิตโดยการรีดขึ้นรูปเปลือกบางส่วน จากนั้นบรรจุผงวัสดุในแกนลวดเชื่อม และรีดมันส่วนเปลือกอีกครั้ง โดยให้ส่วนปลายของเปลือกทั้งสองข้างมันเข้าหากันและเกยกัน สุดท้ายรีดซ้ำอีกครั้งเพื่ออัดให้แน่นทั้งผงในแกนและส่วนปลายของเปลือกลวด ให้มีลักษณะผิวเรียบและค่อนข้างกลม

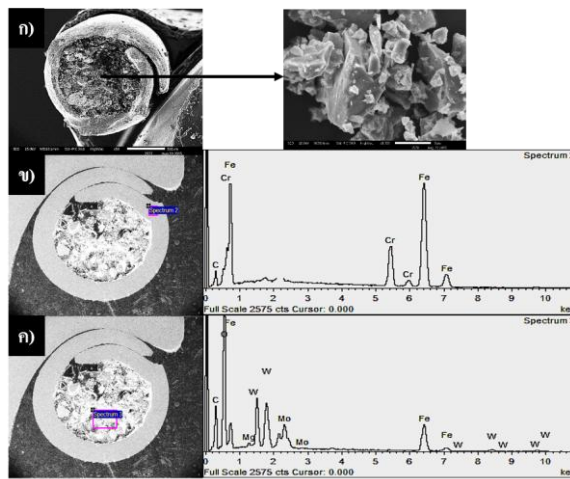
การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของลวดเชื่อมแบบแกนทั้ง 2 ด้วยเทคนิคการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ (EDS-SEM) พบองค์ประกอบทางเคมีของส่วนเปลือกลวดเชื่อม Cr-Nb-Ni-Fe based คือธาตุเหล็ก โครเมียม และนิกเกิลเป็นองค์ประกอบทางเคมีเป็นหลัก ส่วนวัสดุในแกนลวดเชื่อมพบองค์ประกอบทางเคมีคือธาตุเหล็ก ไนโอเบียม โบรอนและอลูมิเนียม เป็นหลัก สำหรับส่วนเปลือกของลวดเชื่อมแบบแกน Cr-Mo-W-Fe based พบธาตุโครเมียมและเหล็กเป็นองค์ประกอบทางเคมีหลัก และพบธาตุเหล็ก โมลิบดีนัม ทั้งสแตนเลสคาร์บอนเป็นองค์ประกอบทางเคมีหลักของผงในแกนลวดเชื่อม จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของส่วนเปลือกลวดเชื่อมทั้ง 2 พบเฉพาะธาตุที่เป็นโลหะเพื่อความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าได้ดี ทำให้มี

การอาร์คสม่ำเสมอขณะทำการเชื่อมพอกผิวขณะเดียวกันจะเกิดความร้อนสูงทำให้เกิดการหลอมละลายของส่วนเปลือกและผงในลวดเชื่อมไปพร้อมๆ กัน

ลักษณะ รูปร่างของเม็ดผงในแกนลวดเชื่อมทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะคล้ายเป็นเม็ดหลายเหลี่ยม มีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ปนกันและลักษณะรูปร่างของเม็ดผงขนาดใหญ่คล้ายกับการผ่านกระบวนการทำให้เกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) องค์ประกอบทางเคมีของผงในแกนลวดเชื่อมทั้ง 2 พบว่ามีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักและพบองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันคือ ในลวดเชื่อม Cr-Nb-Ni-Fe based พบธาตุ ไนโอเบียมและนิกเกิล เป็นหลัก และในลวดเชื่อม Cr-Mo-W-Fe based พบทั้งสแตนเลสและโมลิบดีนัมเป็นหลัก ดังแสดงดังรูปที่ 3 ข) และ ค) และรูปที่ 4 ข) และ ค) ซึ่งธาตุที่พบจากผงในแกนลวดเชื่อมจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของรอยเชื่อม [8] ซึ่งธาตุนิกเกิลและไนโอเบียมให้คุณสมบัติด้านการต้านทานการสึกกร่อนและการกัดกร่อนได้ดี อีกทั้งไนโอเบียมยังมีผลให้โลหะหลอมเหลวของบ่อหลอมละลายของรอยเชื่อมเกิดการเย็นตัวได้รวดเร็ว (super cooling) ทำให้มีโอกาสเกิดโครงสร้างผลึกขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร หรืออาจจะเกิดโครงสร้างแบบอสัณฐานได้ (amorphous) และสามารถส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงและสามารถต้านทานการสึกหรอได้ดี [17] ส่วนธาตุทั้งสแตนเลสและโมลิบดีนัมที่พบในผงแกนลวดเชื่อม Cr-Mo-W-Fe based จะให้คุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความแข็งที่อุณหภูมิสูง มีความสามารถต้านทานการสึกหรอสูงเช่นกัน [8-9]



รูปที่ 3 ภาพ SEM ภาคตัดขวางของลวดเชื่อม Cr-Nb-Ni- Fe based ก) ลักษณะและรูปร่างของส่วนเปลือกและผงในแกนลวด ข) สเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDS ของส่วนเปลือก และ ค) สเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDS ของผงในแกนลวด

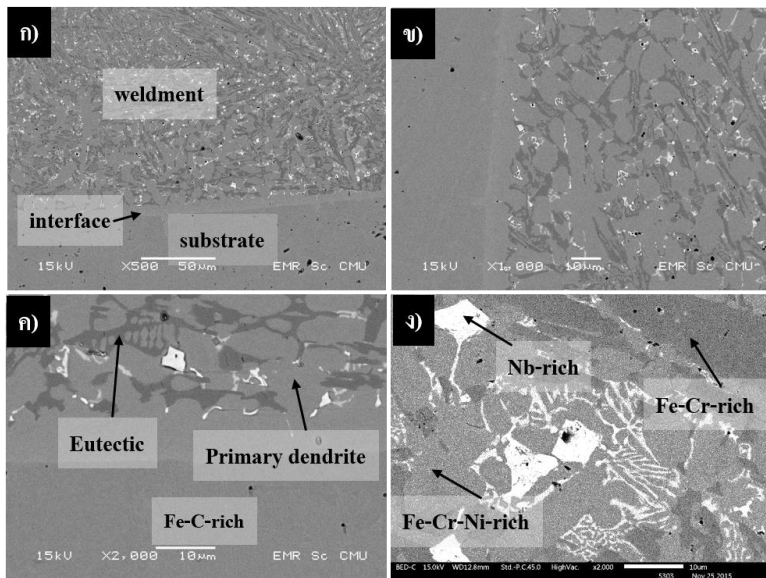


รูปที่ 4 ภาพ SEM ภาคตัดขวางของลวดเชื่อม Cr-Mo-W-Fe based ก) ลักษณะและรูปร่างของส่วนเปลือกและผงในแกนลวด ข) สเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDS ของส่วนเปลือก และ ค) สเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDS ของผงในแกนลวด

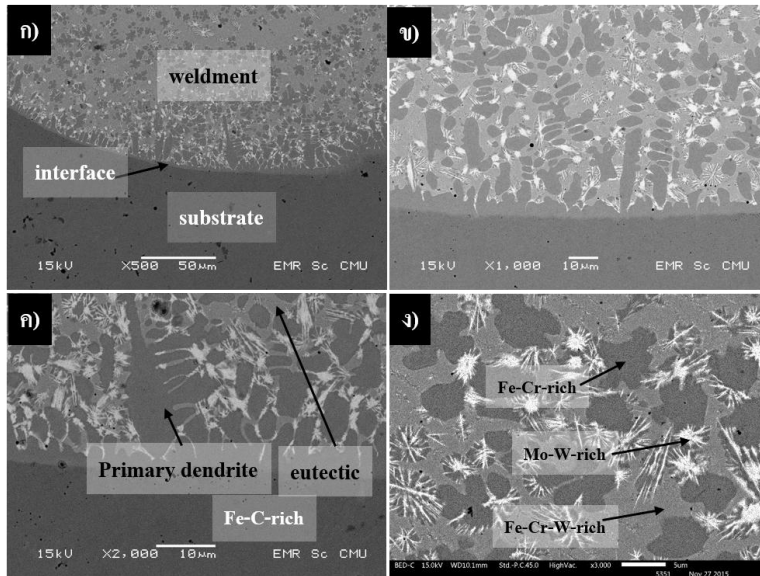
3.2 โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของรอยเชื่อม

รูปที่ 5 และรูปที่ 6 เป็นภาพ SEM ที่กำลังขยายต่ำและกำลังขยายสูง ซึ่งแสดงภาคตัดขวาง ของรอยเชื่อม Cr-Nb-Ni-Fe based และรอยเชื่อม Cr-Mo-W-Fe based ตามลำดับ รูปที่ 5 ก-ค แสดงภาคตัดขวางของรอยเชื่อม Cr-Nb-Ni-Fe based บริเวณรอยต่อระหว่างรอยเชื่อมกับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่กำลังขยายต่างกัน และแสดงชั้นของรอยเชื่อม ชั้นของรอยต่อและชั้นของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนอย่างชัดเจนและพบว่าบริเวณชั้นรอยต่อมีการหลอมละลายระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงานอย่างสมบูรณ์ ส่วนบริเวณของชั้นรอยเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคแบบกิ่งไม้ (dendrite) ซึ่งมีลักษณะการเกิดโครงสร้างแบบ eutectic คือมีการแยกเป็นของแข็ง 2

เฟส อย่างชัดเจนดังลักษณะเหมือนกับบทความของ Patricio F. Mendez. [11] ซึ่งชั้นของรอยเชื่อมเกิดจากการหลอมละลายของเปลือกลวดเชื่อม ผงในแกนลวดเชื่อมและชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนบางส่วน จากนั้นเกิดการเย็นตัวและแข็งตัวในที่สุด ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของการแข็งตัวคือเริ่มจากการเกิดนิวเคลียสเล็กๆ และการเติบโตของนิวเคลียสในทิศทางสวนทางกับการคายความร้อน (heat transfer) และกลายเป็นโครงสร้างแบบกิ่งไม้ดังกล่าวและมีลักษณะและขนาดแตกต่างกันของแต่ละเกรน [18] ยังพบว่าแต่ละเกรนอาจจะมียุคประกอบทางเคมีสังเกตุจากลักษณะความเข้มของเฉดสีจากภาพ BSE-SEM ซึ่งในบริเวณชั้นของรอยเชื่อมแสดงความเข้มของเฉดสีหลักที่แตกต่างกันคือ เฉดสีสว่าง เฉดสีเทา และเฉดสีเทาเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ภาพ BSE-SEM ภาคตัดขวางรอยเชื่อม Cr-Nb-Ni-Fe based ที่กำลังขยายต่ำและสูง



รูปที่ 6 ภาพ BSE-SEM ภาคตัดขวางรอยเชื่อม Cr-Mo-W-Fe based ที่กำลังขยายต่ำและสูง

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายของรังสีเอ็กซ์ (EDS) เพื่อหาลักษณะประกอบทางเคมีในบริเวณรอยเชื่อม พบว่าบริเวณที่มีเจดิสว่างมีองค์ประกอบทางเคมีธาตุไนโอเบียมเป็นหลัก ซึ่งแสดงว่ามีการกระจายตัวขององค์ประกอบทางเคมีของธาตุไนโอเบียมทั่วรอยเชื่อมอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของรอยเชื่อม ส่วนบริเวณที่แสดงเจดิสเทาเข้มและเจดิสเทาขององค์ประกอบทางเคมีของธาตุเหล็ก-โครเมียมและเหล็ก-โครเมียม-นิกเกิลเป็นหลัก ส่วนในบริเวณชิ้นงานซึ่งถัดจากรอยเชื่อมพบองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กและคาร์บอนเป็นหลักแสดงให้เห็นว่ามีการเจือจาง (dilution) ระหว่างวัสดุลวดเชื่อมกับวัสดุชิ้นงาน เหล็กกล้าคาร์บอนน้อยมากซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติของรอยเชื่อมด้วยเช่นกัน

ภาคตัดขวางของรอยเชื่อม Cr-Mo-W-Fe based ในรูปที่ 6 แสดงในส่วนบริเวณรอยต่อระหว่างรอยเชื่อมกับ

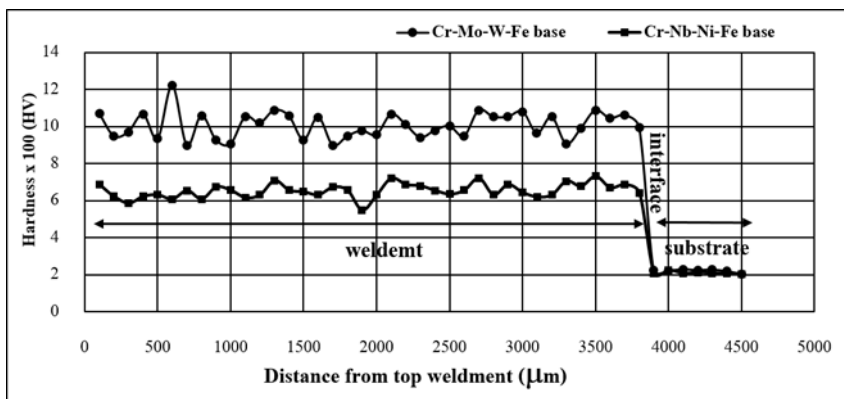
ชิ้นงานที่กำลังขยายต่ำและสูง แสดงชั้นของรอยเชื่อมชั้นรอยต่อและชั้นของชิ้นงานอย่างชัดเจน ในชั้นของรอยเชื่อมพบโครงสร้างแบบกิ่งไม้และเป็นลักษณะการเกิดโครงสร้างแบบ eutectic คือมีการแยกเป็นของแข็ง 2 เฟส อย่างชัดเจน ซึ่งมีกลไกการเกิดโครงสร้างคล้ายกับรอยเชื่อม Cr-Nb-Ni-Fe based และพบบริเวณของชั้นรอยต่อมีการหลอมละลายระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงานอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 6 ก-ค) โดยไม่พบรอยแยกหรือรอยแตกขนาดเล็ก ซึ่งการหลอมละลายเกิดจากการอาร์คระหว่างเปลือกลวดเชื่อมกับชิ้นงาน เหล็กกล้าคาร์บอนทำให้เกิดความร้อนที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้เกิดการหลอมละลายทั้งเปลือกลวดเชื่อม ผงในแกนลวดเชื่อมรวมถึงชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนบริเวณที่เกิดการอาร์ค จากนั้นเกิดการเย็นตัวและแข็งตัว โดยเริ่มจากการเกิดนิวเคลียสและการโตตามทิศทางตรงข้ามกับการคายความร้อน และเกิดเป็นโครงสร้างแบบกิ่งไม้

เนื่องจากเป็น โลหะผสมกันหลายชนิดเช่นเดียวกับรอยเชื่อม Cr-Nb-Ni-Fe based [11, 18] นอกจากนี้ยังพบว่า โครงสร้างจุลภาคมีลักษณะรูปร่างและขนาดแตกต่างกันของแต่ละเกรน ซึ่งแต่ละเกรนอาจมีองค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบเฟสต่างกัน สังกัดจากภาพ BSE-SEM ที่มีลักษณะความเข้มของเจดสีต่างกัน ซึ่งสามารถแยกความเข้มของเจดสีบริเวณรอยเชื่อมได้ดังนี้คือ เจดสีสว่าง เจดสีเทาและเจดสีเทาเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 6ง)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายของรังสีเอ็กซ์ (EDS) เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีบริเวณรอยเชื่อม Cr-Mo-W-Fe based พบว่าบริเวณที่มีเจดสีสว่างมีองค์ประกอบทางเคมีธาตุโมลิบดีนัม-ทังสเทน เป็นหลัก และบริเวณที่แสดงเจดสีเทาเข้มและเจดสีเทา พบองค์ประกอบทางเคมีของธาตุเหล็ก-โครเมียม และเหล็ก-โครเมียม-ทังสเทนเป็นหลัก ตามลำดับ ส่วนบริเวณชิ้นงานถัดจากรอยเชื่อม พบองค์ประกอบทางเคมีของ เหล็ก-คาร์บอน เป็นหลัก แสดงให้เห็นว่ามีการเจือจาง (dilution) ระหว่างวัสดุลวดเชื่อมกับวัสดุชิ้นงาน เหล็กกล้าคาร์บอนน้อยมากซึ่งจะส่งผลดีต่อคุณสมบัติของรอยเชื่อมพอกแข็ง

3.3 ความแข็งของรอยเชื่อม

การทดสอบความแข็งของรอยเชื่อมพอกแข็ง Cr-Nb-Ni-Fe based และรอยเชื่อมพอกแข็ง Cr-Mo-W-Fe based โดยใช้การทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์สบริเวณภาคตัดขวางรอยเชื่อมพอกแข็งทั้งสอง และการทดสอบความแข็งแต่ละจุดห่างกัน 100 ไมโครเมตร เริ่มตั้งแต่ด้านบนบริเวณผิวหน้ารอยเชื่อม ผ่านบริเวณภาคตัดขวางรอยเชื่อมและผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างรอยเชื่อมกับชิ้นงานจนถึงบริเวณชิ้นงานที่ไม่ได้รับอิทธิพลของความร้อนจากการเชื่อม ผลการทดสอบความแข็งของรอยเชื่อมทั้งสองแสดงดังกราฟรูปที่ 7 และพบว่าค่าความแข็งของรอยเชื่อม Cr-Mo-W-Fe based มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1007 HV_{300g} (69 HRC) ซึ่งสูงกว่าค่าความแข็งรอยเชื่อม Cr-Nb-Ni-Fe based ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 656 HV_{300g} (58 HRC) ซึ่งค่าความแข็งของรอยเชื่อมทั้ง 2 มากกว่าของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนถึง 5 เท่าและ 3 เท่า ตามลำดับ (ค่าความแข็งของชิ้นงานเฉลี่ยเท่ากับ 200 HV_{300g}) ทั้งนี้เนื่องจากรอยเชื่อม Cr-Mo-W-Fe based มีองค์ประกอบทางเคมีของธาตุโมลิบดีนัมและทังสเทน เป็นหลัก กระจายอยู่ในรอยเชื่อมดังกล่าว จึงทำให้มีความแข็งเฉลี่ยสูงกว่า [12]



รูปที่ 7 ความแข็งของภาคตัดขวางรอยเชื่อมพอกแข็ง Cr-Nb-Ni-Fe based และ Cr-Mo-W-Fe based

ส่วนรอยเชื่อม Cr-Nb-Ni-Fe based มีองค์ประกอบทางเคมีธาตุไนโอเบียม เป็นหลักและกระจายตัวอยู่ในรอยเชื่อม ซึ่งเป็นธาตุที่สามารถรวมตัวกับคาร์บอนและอาจจะเป็นสารประกอบไนโอเบียมคาร์ไบด์ [13-14] อีกทั้งยังมีบทความวิจัยที่กล่าวสนับสนุนว่าไนโอเบียมส่งเสริมให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (super cooling) ของโลหะเหลว ซึ่งจะทำให้ได้เกรนขนาดเล็ก ละเอียด จึงส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งค่อนข้างสูงเช่นเดียวกัน [17]

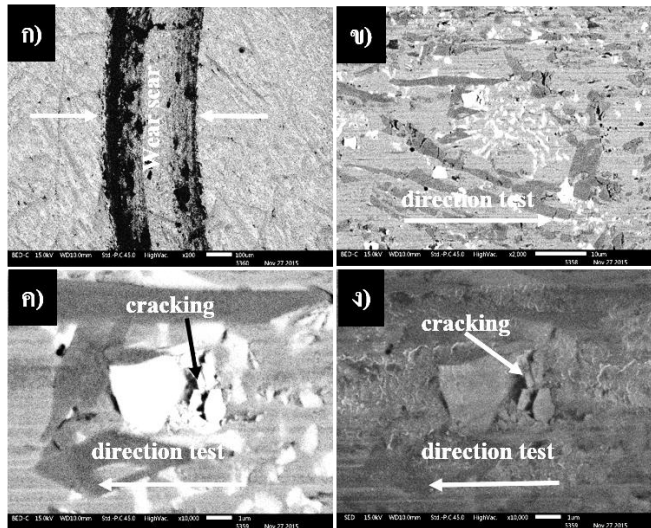
จากการศึกษาและวิเคราะห์ค่าความแข็งของรอยเชื่อมตั้งแต่ผิวด้านบนของรอยเชื่อม ผ่านบริเวณกลางรอยเชื่อมจนถึงบริเวณรอยต่อระหว่างรอยเชื่อมกับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน พบว่าค่าความแข็งของรอยเชื่อมค่อนข้างคงที่สม่ำเสมอทั้ง 2 รอยเชื่อม และค่าความแข็งจะลดลงทันทีจนเท่ากับค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนเมื่อผ่านบริเวณชั้นรอยต่อระหว่างรอยเชื่อมกับชิ้นงาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเชื่อมระหว่างรอยเชื่อมกับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนค่อนข้างดี อาจดูได้จากกราฟวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีดังรูปที่ 5 ก) และรูปที่ 6 ก) ซึ่งพบองค์ประกอบทางเคมีเฉพาะธาตุเหล็กและคาร์บอน เป็นหลักในบริเวณชั้นรอยต่อ

3.4 ความต้านทานการสึกหรอแบบไถลของรอยเชื่อม

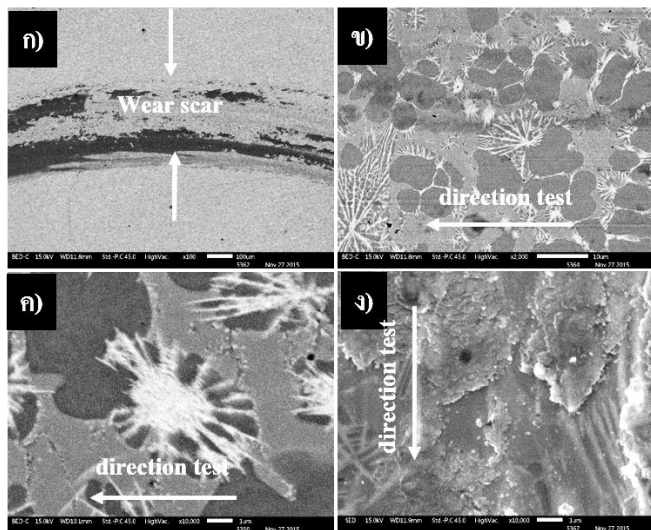
อัตราการสึกหรอแบบไถลของรอยเชื่อมพอกแข็งทั้ง 2 ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G99-05 (Pin on Disk) ซึ่งปริมาตรที่สูญเสียและอัตราการสึกหรอแบบไถลของรอยเชื่อมพอกแข็ง Cr-Nb-Ni-Fe

based มีค่าเท่ากับ 0.200 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และ 0.666×10^{-3} ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อเมตรตามลำดับ ในขณะที่ปริมาตรที่สูญเสีย และอัตราการสึกหรอของรอยเชื่อมพอกแข็ง Cr-Mo-W-Fe based มีค่าเท่ากับ 0.046 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และ 0.154×10^{-3} ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อเมตรตามลำดับ ซึ่งสาเหตุที่ปริมาตรที่สูญเสียและอัตราการสึกหรอแบบไถลของรอยเชื่อมพอกแข็ง Cr-Nb-Ni-Fe based สูงกว่าส่วนหนึ่งอาจมาจากมีค่าความแข็งของรอยเชื่อมต่ำกว่า [14] และพบพื้นผิวของการสึกหรอมีลักษณะถูกแรงเฉือน จนเกิดเป็นรอยครูดและการเสียรูปแบบถาวร (plastic deformation) ดังแสดงในรูปที่ 8 ก) และ ข) จนกระทั่งบริเวณดังกล่าวรับแรงกดต่อไปไม่ได้จนทำให้บริเวณใต้ผิวการสึกหรอเกิดรอยแตกและหลุดล่อนออกมา ดังแสดงในรูปที่ 8 ค) และ ง)

รูปที่ 9 แสดงผิวด้านบนของรอยสึกหรอหลังจากการทดสอบการสึกหรอแบบไถลของรอยเชื่อม Cr-Mo-W-Fe based ซึ่งพบรอยการครูดและการเสียรูปแบบถาวรเช่นเดียวกับรอยเชื่อม Cr-Nb-Ni-Fe based แต่มีลักษณะร่องที่ละเอียดกว่า ดังรูปที่ 9 ก) และ ข) เมื่อวิเคราะห์รอยสึกหรอด้วยโหมดภาพ SEI-SEM ที่กำลังขยายสูงขึ้น พบรูปแบบการสึกหรอโดยการเสียรูปแบบถาวรเป็นชั้นบางๆ จนกระทั่งไม่สามารถรับแรงต่อไปได้จนเกิดการหลุดล่อนออกมาเป็นแผ่นๆ และไม่พบรอยแตกในบริเวณดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 9 ค) และ ง) ซึ่งคล้ายกับบทความวิจัยของ E. Celik และคณะ [2]



รูปที่ 8 ภาพ SEM รอยสึกกร่อนของรอยเชื่อม Cr-Nb-Ni-Fe based ก-ค) ภาพโหมด BSE-SEM ง) ภาพโหมด SE-SEM



รูปที่ 9 ภาพ SEM รอยสึกกร่อนของรอยเชื่อม Cr-Mo-W-Fe based ก-ค) ภาพโหมด BSE-SEM ง) ภาพโหมด SE-SEM

4. สรุปผล

4.1 ลวดเชื่อมแบบแกน Cr-Nb-Ni-Fe based และ ลวดเชื่อมแบบแกน Cr-Mo-W-Fe based ประกอบด้วย ส่วนเปลือกและผงในแกนลวด โดยส่วนเปลือกของลวด เชื่อมมีลักษณะการรีดและม้วนท่อผงในแกนลวดเชื่อม

ไว้ และพองค้ประกอบทางเคมีคือธาตุเหล็กและ โครเมียมเป็นหลักซึ่งเป็นวัสดุกลุ่มโลหะ จึงมี ประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าที่ดีและสามารถทำให้เกิดการ อาร์คได้อย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง ในขณะที่เชื่อม ลักษณะ รูปร่างของเม็ดผงในแกนลวดเชื่อมทั้ง 2 ชนิดมี

ลักษณะคล้ายเป็นเม็ดหลายเหลี่ยม องค์ประกอบทางเคมีของผงในแกนลวดเชื่อมทั้ง 2 พบว่ามีธาตุหลักเป็นองค์ประกอบหลักและพบองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันคือ ในลวดเชื่อม Cr-Nb-Ni-Fe based พบธาตุ ไนโอเบียมและนิกเกิล เป็นหลัก และในลวดเชื่อม Cr-Mo-W-Fe based พบทั้งสแตนและโมลิบดีนัม เป็นหลัก

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของรอยเชื่อมพอกแข็ง Cr-Nb-Ni-Fe based ประกอบด้วยธาตุหลัก โครเมียม นิกเกิลเป็นหลักและมีไนโอเบียมกระจายอยู่ในรอยเชื่อมอย่างสม่ำเสมอ และพบองค์ประกอบทางเคมีของธาตุหลัก โครเมียม เป็นหลักและมีโมลิบดีนัมและทั้งสแตนกระจายอยู่ในรอยเชื่อม Cr-Mo-W-Fe based

4.3 ค่าความแข็งของรอยเชื่อม Cr-Mo-W-Fe based มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1007 \text{ HV}_{300\text{g}}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าความแข็งรอยเชื่อม Cr-Nb-Ni-Fe based ซึ่งมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ $656 \text{ HV}_{300\text{g}}$ เนื่องจากรอยเชื่อม Cr-Mo-W-Fe based มีองค์ประกอบทางเคมีของธาตุ โมลิบดีนัมและทั้งสแตนเป็นหลัก กระจายอยู่ในรอยเชื่อมดังกล่าว จึงทำให้มีความแข็งเฉลี่ยสูงกว่า

4.4 อัตราการสึกหรอแบบไถลของรอยเชื่อมพอกแข็ง Cr-Nb-Ni-Fe based เท่ากับ $0.666 \times 10^{-3} \text{ มม}^3/\text{ม.}$ และของรอยเชื่อมพอกแข็ง Cr-Mo-W-Fe based เท่ากับ $0.154 \times 10^{-3} \text{ มม}^3/\text{ม.}$ ซึ่งต่ำกว่าอัตราการสึกหรอของรอยเชื่อมพอกแข็ง Cr-Nb-Ni-Fe based ส่วนหนึ่งมาจากค่าความแข็งที่สูงกว่า ส่วนกลไกการสึกหรอทั้ง 2 รอยเชื่อมมีลักษณะเหมือนกันคือพบลักษณะพื้นผิวของการสึกหรอแบบถูกแรงเฉือน เกิดเป็นรอยครูดและการเสียดแบบรูปถาวร ก่อนที่จะเกิดการหลุดล่อนออกมา

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานตีพิมพ์ และงานสร้างสรรค์ ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่สนับสนุนงบประมาณสำหรับการทำวิจัย ขอขอบคุณบริษัท แอ็คควัน เซอร์เฟส เทคโนโลยี จำกัด ที่อนุเคราะห์สถานที่และการเชื่อมแบบ Gas Metal Arc Welding

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] O. Culhaa, M. Toparlia, E. Celika, T. Aksoya and H.S. Soykanb, “Indentation size effect on mechanical properties of HVOF sprayed WC based cermet coatings for a roller cylinder”, *Surface & Coating Technology* 203, 2009, pp. 2052-2057.
- [2] E. Celik, O. Culha, B. Uyulgan, N.F. Ak Azem, I. Ozdemir and A. Turk, “Assessment of microstructural and mechanical properties of HVOF sprayed WC-based cermet coatings for a roller cylinder”, *Surface & Coating Technology* 200, 2006, pp. 2320-2328.
- [3] P. Niranatlumpong, “*Wear of Industrials: Basic Knowledge and Protections*”, Promotion Association (Thailand-Japan), Thailand, 2004. (in Thai)
- [4] C.M. Fernandes, V. Popovich, M. Matos, A.M.R. Senos and M.T. Vieira, “Carbide phases formed in WC–M (M = Fe/Ni/Cr) systems”, *Ceramics International* 35, 2009, pp. 369–372.

- [5] J. Chen, G. Yu, B. Hu, Z. Liu, L. Ye and Z. Wang, “A zinc transition layer in electroless nickel plating”, *Surface & Coatings Technology* 201, 2006, pp. 686–690.
- [6] L. Pawlowski, “*The Science and Engineering of Thermal Spray Coating*”, John Wiley & Sons, 1995.
- [7] S. Wirojanuptump, “*Technology of Thermal Spray Coating*”, Faculty of Science, Chiang Mai University, Thailand, 2004. (in Thai)
- [8] T.Y. Choa, J.H. Yoona, K.S. Kima, K.O. Songa, Y.K. Joo, W. Fang, S.H. Zhang, S.J. Youn, H.G. Chun and S.Y. Hwang, “A study on HVOF coatings of micron and nano WC–Co powders”, *Surface & Coatings Technology* 202, 2008, pp. 5556–5559.
- [9] A.S.C.M. D'Oliveira, J.J. Tigrinho and R.R. Takeyama, “Coatings enrichment by carbide dissolution”, *Surface & Coatings Technology* 202, 2008, pp. 4660–4665.
- [10] A. Klimpel, L.A. Dobrzanski, D. Janicki and A. Lisiecki, “Abrasion resistance of GMA metal cored wires surfaced deposits”, *Journal of Materials Processing Technology* 164–165, 2005, pp. 1056–1061.
- [11] P.F. Mendez, N. Barnes, K. Bell, S.D. Borle, S.S. Gajapathi, S.D. Guest, H. Izadi, A.K. Gol, and G. Wood, “Welding processes for wear resistant overlays”, *Journal of Manufacturing Processes* 16, 2014, pp. 4–25.
- [12] E. Badisch and M. Kirchgaßner, “Influence of welding parameters on microstructure and wear behaviour of a typical NiCrBSi hardfacing alloy reinforced with tungsten carbide”, *Surface & Coatings Technology* 202, 2008, pp. 6016–6022.
- [13] M. Kirchgaßner, E. Badisch and F. Franek, “Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact”, *Wear* 265, 2008, pp. 772–779.
- [14] X.H. Wang, F. Han, X.M. Liu, S.Y. Qu and Z.D. Zou, “Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing coatings”, *Materials Science and Engineering A489*, 2008, pp. 193–200.
- [15] M.H. Amushahi, F. Ashrafizadeh and M. Shamanian, “Characterization of boride-rich hardfacing on carbon steel by arc spray and GMAW processes”, *Surface & Coatings Technology* 204, 2010, 2723–2728.
- [16] ASTM International, “Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus”, ASTM, 2010.
- [17] M. Tuipare, “Characterization of Tungsten Carbide-Metal Composite Coating Fabricate by Cored Wires Arc Spraying”, Doctor Thesis, Faculty of Science, Chiang Mai University, Thailand, 2013.
- [18] W.F. Smith, “*Principels of Material Science for Engineering* (3rd eds.)”, McGraw-Hill, 1999.