



ผลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมต่อความต้านทานการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AWS A5.9 ER420 ด้วยกระบวนการเชื่อม GMAW

ภิสัก เลิศวิจิตรพันธุ์* และ ณิชฐา บัวเหี้ยว

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเชื่อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: pisak.l@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 8 กุมภาพันธ์ 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 19 เมษายน 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 24 เมษายน 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 2 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาผลจากกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม (Post Weld Heat Treatment: PWHT) ต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติเชิงกล และความต้านทานการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงของรอยเชื่อมพอกผิวด้วยลวดเชื่อม AWS A5.9 ER420 ดำเนินการโดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding: GMAW) พารามิเตอร์ในการเชื่อมใช้กระแสไฟ 190-230 แอมแปร์ แรงดันอาร์ก 21.5±1 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 6.4 มิลลิเมตรต่อวินาที หลังการเชื่อมนำชิ้นงานไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 500°C, 700°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive Wear Test) ตามมาตรฐาน ASTM G99 ที่อุณหภูมิ 30°C, 100°C, 200°C, และ 300°C ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิกรรมวิธีทางความร้อนหลังจากการเชื่อม 500°C ส่งผลให้ค่าความแข็งของรอยเชื่อมพอกผิวสูงขึ้นเล็กน้อย ทำให้อัตราการสึกหรอลดลง และในกรณีที่ใช้อุณหภูมิกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม 700°C ค่าความแข็งของรอยเชื่อมพอกผิวลดลงอย่างมาก ทำให้อัตราการสึกหรอของรอยเชื่อมสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทดสอบการสึกหรอสูงขึ้นมีผลทำให้อัตราการสึกหรอของรอยเชื่อมลดลง เนื่องจากอิทธิพลของสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไปรวมถึงการเกิดสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมบริเวณรอยเชื่อมพอกผิว

คำสำคัญ: การเชื่อมพอกผิว; ER420; กระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม; ความต้านทานการสึกหรอ

Effect of Post Weld Heat Treatment on High-temperature Wear Resistance of Martensitic Stainless Steel AWS A5.9 ER420 Weldment by GMAW Process

Pisak Lertvijitpun* and Nutta Bourniew

Department of Welding Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: pisak.l@cit.kmutnb.ac.th

Received: 8 February 2023; Revised: 19 April 2023; Accepted: 24 April 2023

Online Published: 2 June 2023

Abstract: This research studies the effect of post weld heat treatment (PWHT) on microstructure, mechanical properties, and high-temperature wear resistance of AWS A5.9 ER420 deposited filler metal. The gas metal arc welding process (GMAW) was performed by using the welding parameters: current range 190-230 A., Arc voltage 21.5 V, and welding speed 6.4 mm/s. After welding, the specimens were carried out into the PWHT at 500 °C and 700 °C for 2 hrs. According to ASTM G99, the abrasive wear test was performed at room temperature, 100°C, 200°C, and 300°C respectively. The experimental result shows that the hardness of weld metal increased when the PWHT at 500°C was performed, conducting a decrease in wear rate. On the contrary, the wear rate increases when the hardness of deposited metal reduces caused by PWHT at 700°C. However, it was found that the high-temperature wear rate decreases when the test temperature increase due to the modification of mechanical properties and oxide formation of iron and chromium on the deposited metal surface.

Keywords: Hardfacing; ER420; Post Weld Heat Treatment; Wear Resistance



1. บทนำ

การสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเป็นสิ่งที่สามารถเกิดขึ้นได้เสมอสำหรับภาคอุตสาหกรรมการผลิต ชิ้นส่วนทางวิศวกรรมต่างๆ เช่น โรเตอร์ประคองล้อในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กรูปพรรณ เหล็กข้อเหวี่ยง และเพลาลูกเบี้ยวในเครื่องยนต์สันดาปภายใน รวมถึงเพลาลูกกรัดในอุตสาหกรรมขึ้นรูปโลหะต่างๆ โดยชิ้นส่วนเหล่านี้จะต้องรับภาระการสึกหรอทั้งที่อุณหภูมิห้องตลอดจนอุณหภูมิที่สูงขึ้นขณะเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรนั้นๆ กำลังทำงาน นอกจากนี้ยังมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี [1] วัสดุที่ได้รับความนิยมในการผลิตชิ้นส่วนดังกล่าวคือเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 8620 เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดีเช่น สามารถชุบแข็งได้ (ค่าความแข็งหลังชุบแข็งสามารถทำได้สูงถึง 62HRC) ทำให้มีความต้านทานการสึกหรอที่ผิวนอก และมีความเหนียวในแกนกลางของตัววัสดุ [2-3] อย่างไรก็ตามเมื่อการสึกหรอเกิดขึ้นสิ่งหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาแทนการเปลี่ยนใหม่ทั้งชิ้น คือการซ่อมแซมให้ชิ้นส่วนดังกล่าวสามารถนำกลับมาใช้งานได้ดังเดิมกรรมวิธีการซ่อมบำรุงแบบหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมคือการเชื่อมซ่อมด้วยการพอกผิว เนื่องจากสามารถทำให้ชิ้นส่วนดังกล่าวกลับมามีขนาดและมิติตามต้องการ และยังสามารถกำหนดสมบัติเชิงกลให้สามารถต้านทานการสึกหรอได้ดียิ่งขึ้น [4]

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก มีสมบัติความแข็งแรง และความต้านทานการสึกหรอที่ดี รวมถึงมีความต้านทานการกัดกร่อนในระดับปานกลาง หากนำไปใช้งานที่อุณหภูมิไม่สูงเกินกำหนดจะสามารถควบคุมสมบัติเชิงกลที่ดีไว้ได้ [5] การประยุกต์ใช้วัสดุกลุ่มนี้ในงานพอกผิวแข็งเพื่อทำการซ่อมบำรุงสามารถ

ทำได้หลากหลายกระบวนการเช่น การพ่นเคลือบด้วยความร้อน (Thermal Spray) การพ่นเคลือบด้วยกระบวนการเลเซอร์ (Laser Cladding) หรือการเชื่อมพอกผิวด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์ค (Arc Welding) อย่างไรก็ตามจากตัวอย่างของกระบวนการพอกผิวที่กล่าวถึง กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding: GMAW) เป็นกระบวนการเชื่อมพอกประเภทหนึ่งที่ยอมรับใช้ในภาคอุตสาหกรรม เพราะมีจุดเด่นด้านความรวดเร็วในการหลอมเติมเนื้อโลหะพอกผิว รวมถึงมีต้นทุนต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการพอกผิวประเภทอื่นๆ [6] อย่างไรก็ตามวัสดุกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก โดยปกติจะมีข้อกำหนดให้นำชิ้นงานที่ถูกเชื่อมมาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม (Post Weld Heat Treatment: PWHT) เพื่อลดปริมาณความเค้นตกค้างจากการเชื่อม เนื่องจากมีโครงสร้างจุลภาคพื้นฐานเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซด์ (Martensite) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งสูง มีโอกาสเกิดการแตกร้าวในการใช้งาน [7]

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมต่อความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงของรอยเชื่อม AWS A5.9 ER420 รวมถึงความต้านทานการสึกหรอของรอยเชื่อมในสภาวะการทดสอบที่มีอุณหภูมิสูง เพื่อจำลองสภาวะการใช้งานที่ใกล้เคียงกับอุตสาหกรรมการผลิตที่เกี่ยวข้อง

2. วัสดุและขั้นตอนในการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุโลหะงานที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเหล็กกล้า AISI 8620 เพลากลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ตัดให้ได้ความหนา 20 มิลลิเมตร เชื่อมพอกผิวแข็ง



ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding: GMAW) โดยใช้ลวดเชื่อมพอกผิว AWS A5.9 ER420 เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร องค์กรประกอบทางเคมี และสมบัติทางกลของวัสดุโลหะงานและลวดเชื่อม ดังตารางที่ 1 ถึง 2

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุและลวดเชื่อม

| Chemical Composition of Base Material and Filler Metal (%) | | |
|--|-----------|----------------|
| Elements | AISI 8620 | AWS A5.9 ER420 |
| C | 0.25 | 0.33 |
| Si | 0.22 | 0.39 |
| Mn | 0.73 | 0.40 |
| P | 0.013 | - |
| S | 0.016 | - |
| Ni | 0.57 | 0.16 |
| Cr | 0.50 | 12.56 |
| Mo | 0.16 | - |
| Fe | 97.11 | Bal. |

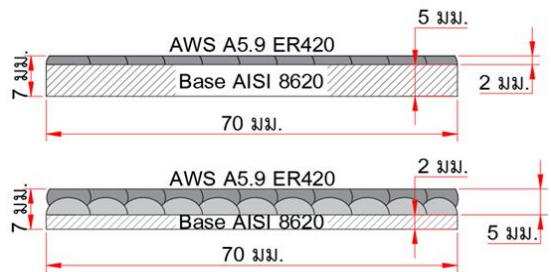
ตารางที่ 2 สมบัติทางกลของวัสดุและลวดเชื่อม

| Material Grade and Filler Metal Grade | AISI 8620 (UNS G86200) (Annealed) | | AWS A5.9 ER420 (As-weld) |
|---------------------------------------|-----------------------------------|-----|--------------------------|
| | Yield strength | MPa | 385 |
| Tensile strength | MPa | 530 | 1,000 |
| Elongation | % | ≥17 | 45 |
| Hardness | HV | 155 | 458-513 |

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ในการเชื่อมพอกผิวแข็ง

| กระแสไฟเชื่อม (Amp) | แรงดันอาร์ก (Volt) | ความเร็วในการเชื่อม (mm/s) | แก๊สปกคลุม 98% Ar + 2% O ₂ (L/min) |
|---------------------|--------------------|----------------------------|---|
| 190-230 | 21.5 | 6.4 | 18 |

ก่อนการเชื่อมจะนำชิ้นงานมาให้ความร้อนก่อนเชื่อม (Preheat) ที่ 250-350°C (ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตลวดเชื่อม) เป็นเวลา 20 นาที ต่อจากนั้นจะดำเนินการเชื่อมพอกผิว ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding) ด้วยเครื่องเชื่อม Thermatech NB-350 ชิ้นงานจะถูกเชื่อมให้มีแนวเชื่อม 1 ชั้น และ 2 ชั้น เชื่อมซ้อนแนวทั้งหมด 11 แนวเชื่อม ดังรูปที่ 1 พารามิเตอร์ในการเชื่อมแสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 1 ชิ้นงานเชื่อมพอกผิว แนวเชื่อม 1 ชั้น และ ชิ้นงานเชื่อมแนวเชื่อม 2 ชั้น

เมื่อเชื่อมเสร็จจะนำชิ้นงานมาปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนหลังจากการเชื่อม (Post Weld Heat Treatment: PWHT) ที่ อุณหภูมิ 500°C (มีอัตราการเย็นตัวเฉลี่ยจากอุณหภูมิ 500-140°C ที่ 18°C/h) และ 700°C (มีอัตราการเย็นตัวเฉลี่ยจากอุณหภูมิ 700-140°C ที่ 25.6°C/h) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยปล่อยให้เย็นตัวในเตา รายละเอียดของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมแสดงดังตารางที่ 4 จากนั้นนำชิ้นงานมากลึงปาดหน้าและเจียรระโนราบให้มีความหนา 7 มิลลิเมตร โดยกำหนดขนาดชิ้นงานเชื่อม 1 ชั้น ให้แนวเชื่อมสูงจากผิววัสดุ 2 มิลลิเมตร ส่วนชิ้นงานเชื่อม 2 ชั้น ให้แนวเชื่อมสูงจากผิววัสดุ 5 มิลลิเมตร



ตารางที่ 4 การปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนหลังจากการเชื่อม

| | |
|-------------------------|------------------------------|
| ER420 | As Weld 1 Layer 6 pieces |
| Filler Metal | As Weld 2 Layers 6 pieces |
| Hardfacing | PWHT 500°C 1 Layer 6 pieces |
| by GMAW | PWHT 500°C 2 Layers 6 pieces |
| 98%Ar +2%O ₂ | PWHT 700°C 1 Layer 6 pieces |
| | PWHT 700°C 2 Layers 6 pieces |

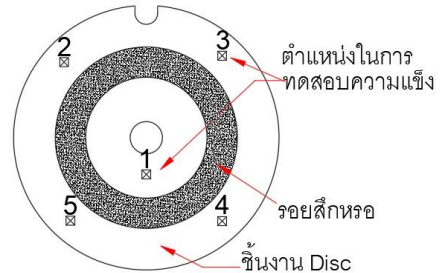
2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Micro Structure Examination)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมพอกผิวแข็ง AWS A5.9 ER 420 บนเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 8620 ทำโดยขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 จนถึง 1200 จากนั้นขัดมันด้วยผ้าสักหลาด ร่วมกับการใช้ผงขัดอะลูมิน่า ทำการกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดออกซาลิก 10 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ตรวจสอบบริเวณรอยเชื่อมพอกผิว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope: OM) รุ่น Nikon Eclipse MA200 เพื่อประเมินโครงสร้างพื้นฐานของรอยเชื่อม

2.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

การทดสอบความแข็ง ทำโดยนำชิ้นงานทั้งก่อนและหลังผ่านการทดสอบการสึกหรอ มาทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers) ด้วยเครื่องทดสอบรุ่น Microhardness Tester FM-310e ใช้หัวกดเพชรทรงปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีองศาของปลายแหลม 136 องศา ใช้แรงกด 1000 กรัม บริเวณรอยเชื่อมพอกผิว โดยจะทดสอบหาค่าความแข็งทั้งหมด 5 ตำแหน่ง บริเวณผิวหน้าของรอยเชื่อมหลังจากผ่าน

การขัดผิวด้วยกระดาษทรายถึงเบอร์ 1200 กรัดตั้งรูปที่ 2 จากนั้น คำนวณค่าเฉลี่ยจากผลการทดสอบความแข็ง



รูปที่ 2 ภาพ Top View ตำแหน่งในการทดสอบค่าความแข็ง

2.4 การทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ (Pin on Disc)

ทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive Wear) แบบพินออนดิสก์ โดยเป็นอุปกรณ์ที่ที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้นตามมาตรฐาน ASTM G99 มีพารามิเตอร์ในการทดสอบดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตัวแปรในการทดสอบการสึกหรอ

| วัสดุพิน | JIS S45C |
|----------------------------------|-------------------|
| ตำแหน่งพินถึงศูนย์กลางดิสก์ (mm) | 20 |
| ความเร็ว (rpm) | 60 |
| จำนวนรอบ (Round) | 1500 |
| ระยะทาง (m) | 188 |
| แรงกด (kg) | 15 |
| อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ (°C) | 30, 100, 200, 300 |
| ค่าความแข็งพิน (HB) | 160-220 |



การประเมินอัตราการสึกหรอแบ่งออกเป็น 3 วิธี ดังนี้
2.4.1 ซึ่งนำหนักเปรียบเทียบหาอัตราการสึกหรอ โดยการชั่งน้ำหนักก่อน และหลังการทดสอบ ด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 กรัม จากนั้นนำค่าน้ำหนักก่อน และหลังการทดสอบมาหาผลต่างเพื่อบ่งชี้ถึงปริมาณการสึกหรอที่เกิดขึ้น

2.4.2 คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของรอยทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ โดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิวแบบสัมผัส (Surface Roughness) และหาพื้นที่หน้าตัดรอยสึกหรอด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่าย

2.4.3 ประเมินลักษณะของรอยแผลที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบการสึกหรอ (Wear Scar Morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope: OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) รวมถึงเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy: EDS)

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

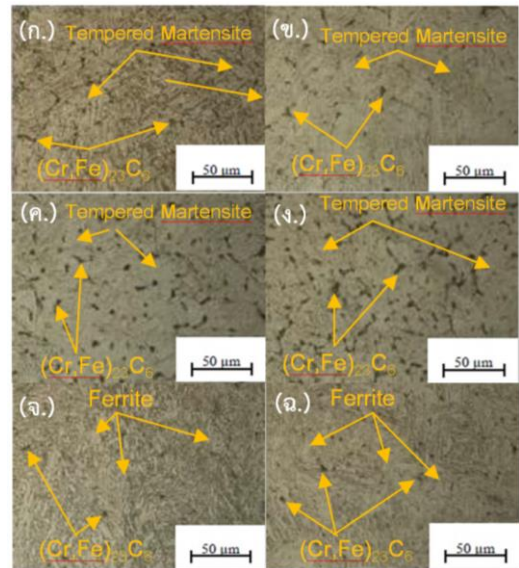
3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Micro Structure Examination Result)

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงก่อนการทดสอบการสึกหรอ แสดงดังรูปที่ 3

ผลการทดลอง ในเงื่อนไข As-weld ทั้งกรณีเชื่อมพอกผิว 1 Layer และ 2 Layers ดังรูปที่ 3 (ก) และ (ข) พบว่ามีโครงสร้างจุลภาคเนื้อพื้นเป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ (Tempered Martensite) และมีสารประกอบคาร์ไบด์ ((Cr,Fe)₂₃C₆) (บริเวณที่มีสีดำ) [8] กระจายตัวอยู่ตามตำแหน่งต่างๆ ปริมาณเล็กน้อย

กรณีชิ้นงานในเงื่อนไข PWHT ที่ 500 °C ทั้งกรณีเชื่อมพอกผิว 1 Layer และ 2 Layers ดังรูปที่ 3 (ค) และ (ง) พบว่าโครงสร้างจุลภาคเป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ และมีสารประกอบคาร์ไบด์((Cr,Fe)₂₃C₆ และ M₇C₃) [8-9] กระจายตัวอยู่ในปริมาณสูงขึ้นไปเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม

ส่วนชิ้นงานในเงื่อนไข PWHT ที่ 700 °C ทั้งกรณีเชื่อมพอกผิว 1 Layer และ 2 Layers ดังรูปที่ 3 (จ) และ (ฉ) พบว่าการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม ก่อให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างของมาร์เทนไซด์จำนวนมากไปเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และสารประกอบคาร์ไบด์ ((Cr,Fe)₂₃C₆) [8]



รูปที่ 3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า (ก.) As-weld 1 Layer (ข.) As-weld 2 Layers (ค.) PWHT 500°C 1 Layer (ง.) PWHT 500°C 2 Layers (จ.) PWHT 700°C 1 Layer และ (ฉ.) PWHT 700°C 2 Layers

3.2 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

ผลจากการทดสอบหาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers) โดยทดสอบหาค่าความแข็งทั้งหมด 5 ตำแหน่ง จากนั้น นำผลการทดสอบความแข็งทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบความแข็งก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอได้ ดังรูปที่ 4 และ รูปที่ 5 ตามลำดับ

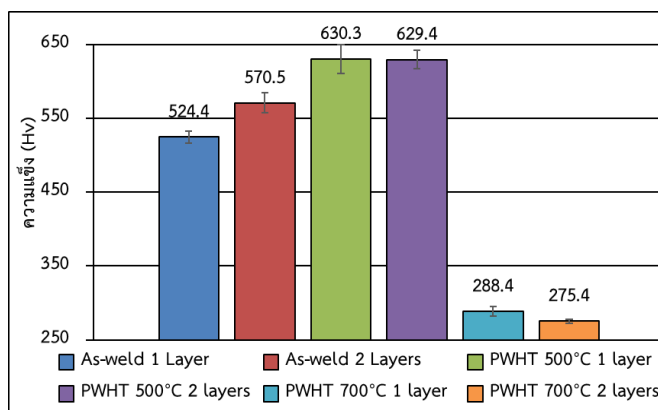
จากรูปที่ 4 พบว่ากลุ่มชิ้นงานที่ให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมที่ 500°C มีค่าความแข็งมากที่สุด เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ Secondary Hardening [5] ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่มีการตกตะกอนสารประกอบคาร์ไบด์ของธาตุจำพวก โครเมียม (M_7C_3) [9] โดยพบว่าค่าความความแข็ง ขอรอยเชื่อมพอกผิวแข็งชนิด 1 ชั้น และ 2 ชั้น ของแต่ละเงื่อนไขการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (As-weld) มีความแข็งน้อยกว่าชิ้นงานที่ให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมที่ 500°C และชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมที่ 700°C มีค่าความแข็งต่ำที่สุด นอกจากนี้เมื่อชิ้นงานผ่านการทดสอบการสึกหรอที่

อุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้อุณหภูมิการทดสอบการสึกหรอสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งของชั้นพอกผิวมีแนวโน้มลดลง

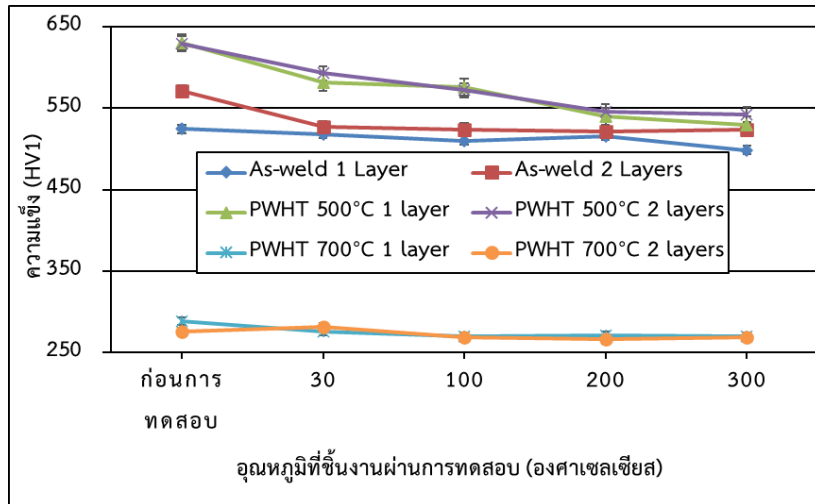
3.3 ผลการทดสอบการสึกหรอแบบพินออดิสก์ (Pin on Disc)

3.3.1 ผลการทดสอบหาอัตราการสึกหรอ โดยการชั่งน้ำหนักก่อน และหลังการทดสอบ ด้วยเครื่องความละเอียด 0.0001 กรัม จากนั้นนำมาหาผลต่าง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่สูญเสียไปของชิ้นทดสอบจากการสึกหรอที่อุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 6

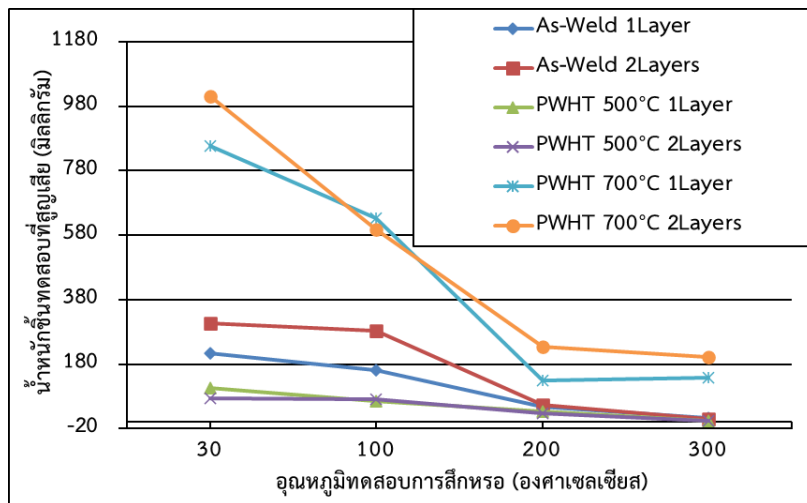
สำหรับรอยเชื่อมพอกผิวแข็ง (Disc) พบว่ากลุ่มชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 500°C เกิดการสึกหรอต่ำที่สุด กลุ่มชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมเกิดการสึกหรอเกิดการสึกหรอในระดับปานกลาง และกลุ่มชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 700°C เกิดการสึกหรอสูงที่สุด ทั้งนี้สำหรับชิ้นงานทุกกลุ่มมีแนวโน้มเกิดการสึกหรอลดลงเมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4 ค่าความแข็งก่อนการทดสอบการสึกหรอ



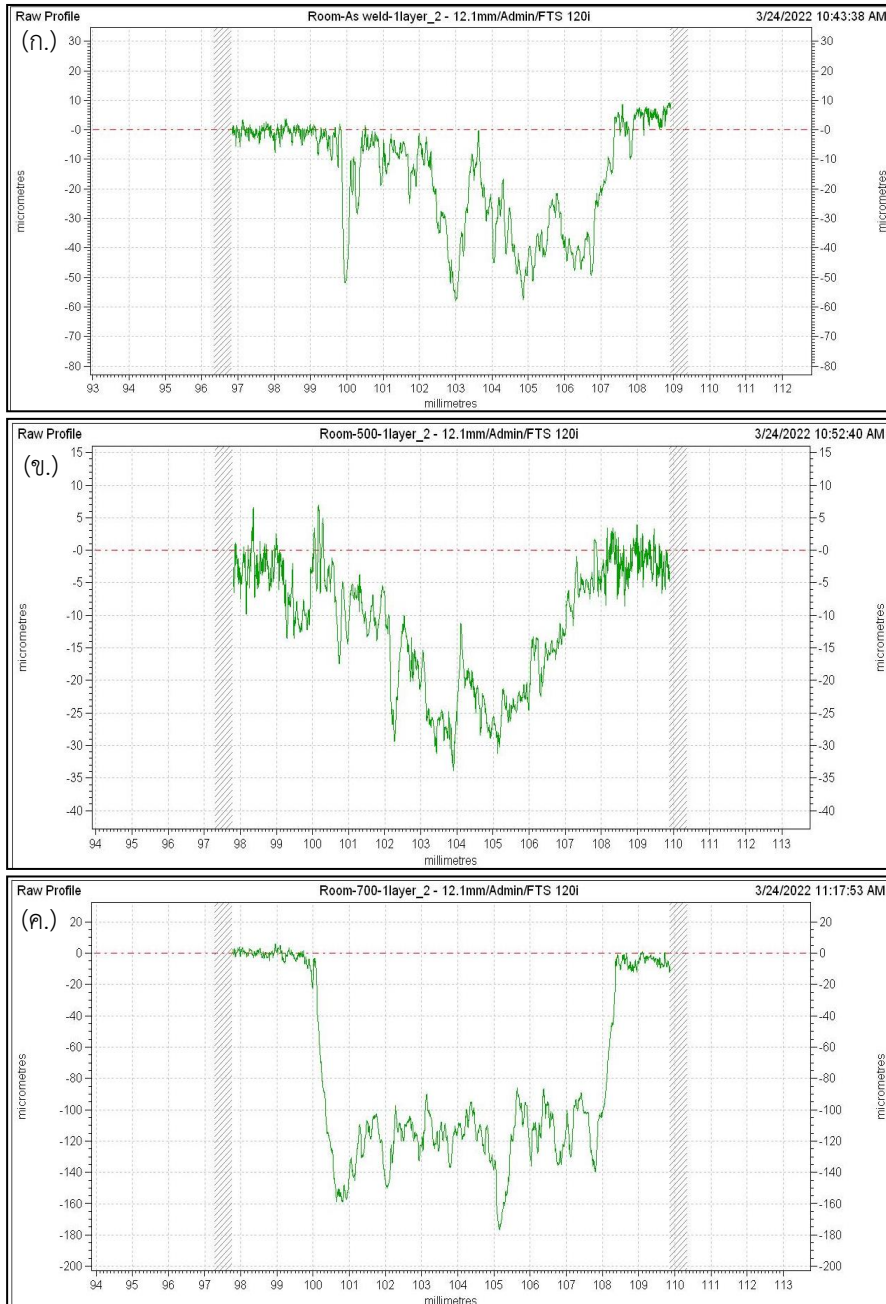
รูปที่ 5 ผลการทดสอบความแข็งก่อนและหลังการทดสอบการสีกหรือ



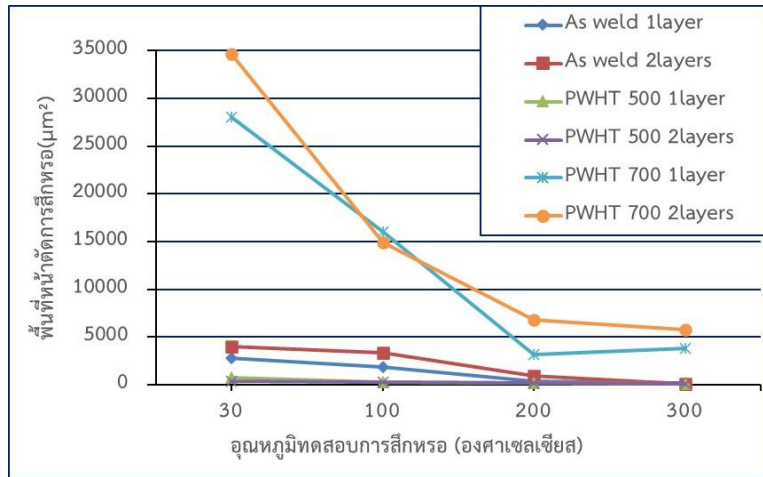
รูปที่ 6 ผลการซ่งนำหน้าห้กห้อัรการสีกหรือดิสก์

3.3.2 ผลการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของรอยทดสอบการสีกหรือแบบพินออนดิสก์ โดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิวแบบสัมผัส (Surface Roughness) และหาพื้นที่รอยสีกหรือด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่าย

ตัวอย่างการตรวจสอบรูปทรงของพื้นผิวบริเวณทดสอบการสีกหรือที่อุณหภูมิ 30°C และผลการวัดพื้นที่หน้าตัดรอยแผลการสีกหรือแสดงดังรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ



รูปที่ 7 ผลการตรวจสอบรูปทรงของพื้นผิวบริเวณรอยแผลหลังการทดสอบการลึกรที่อุณหภูมิ 30°C
(ก.) As-weld, (ข.) PWHT 500°C 1 Layer และ (ค.) PWHT 700°C 1 Layer

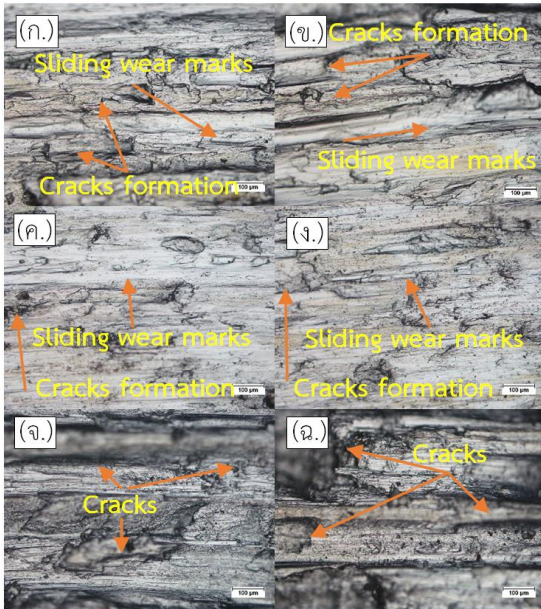


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทดสอบต่อพื้นที่หน้าตัดของรอยแผลจากสึกหรอ

จากรูปที่ 8 พบว่าที่อุณหภูมิทดสอบการสึกหรอเดียวกัน กลุ่มชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังจากการเชื่อมที่ 500°C มีพื้นที่หน้าตัดของรอยแผลจากการสึกหรอต่ำกว่ากลุ่มชั้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม และกลุ่มชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมที่ 700°C โดยจากรูปที่ 7 (ข.) สังเกตได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมที่ 500°C มีลักษณะรอยแผลการสึกหรอที่แคบและตื้น ส่วนชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังจากการเชื่อม (รูปที่ 7 (ก.)) มีลักษณะรอยแผลการสึกหรอที่กว้าง และลึกมากขึ้น และชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังจากการเชื่อมที่ 700 °C มีลักษณะรอยแผลการสึกหรอที่กว้าง และลึกมากที่สุดดังรูปที่ 7 (ค.) ซึ่งการวัดพื้นที่หน้าตัดของรอยการทดสอบการสึกหรอมีความสอดคล้องกับผลการประเมินอัตราการสึกหรอด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก

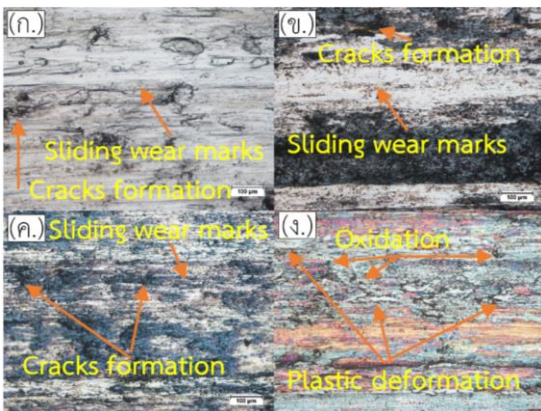
3.3.3 ผลการวิเคราะห์รอยแผลการสึกหรอรอยเชื่อม (Wear Scar) ที่อุณหภูมิ 30°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิทดสอบที่เกิดการสึกหรอสูงสุด ทำโดยถ่ายภาพรอยแผลการสึกหรอของเนื้อเชื่อมพอกผิว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 200 เท่า ดังรูปที่ 9

จากรูปที่ 9 (ก.) As-weld 1 Layer และ (ข.) As-weld 2 Layers บริเวณรอยแผลหลังการทดสอบการสึกหรอมีลักษณะเกิดการหลุดร่อนของเนื้อเชื่อมพอกผิวและพบรอยร้าวขนาดเล็กบางส่วน ส่วนรูปที่ 9 (ค.) PWHT at 500°C 1 Layer และ (ง.) PWHT at 500°C 2 Layers มีลักษณะการหลุดร่อนของเนื้อเชื่อมที่รุนแรงน้อยที่สุด โดยพบรอยร้าวจำนวนน้อยและมีขนาดเล็กกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมและผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมที่ 700°C และในรูปที่ 9 (จ.) PWHT at 700°C 1 Layer และ (ฉ.) PWHT at 700°C 2 Layers มีลักษณะการหลุดร่อนของเนื้อเชื่อมที่รุนแรงมากที่สุดโดยสังเกตได้จากรอยร้าวที่มีขนาดใหญ่กว่ากรณีอื่นๆ



รูปที่ 9 รอยแผลการสึกหรอทดสอบที่อุณหภูมิ 30°C

- (ก.) As-weld 1 Layer (ข.) As-weld 2 Layers
- (ค.) PWHT 500°C 1 Layer (ง.) PWHT 500°C 2 Layers
- (จ.) PWHT 700°C 1 Layer
- (ฉ.) PWHT 700°C 2 Layers



รูปที่ 10 รอยแผลการสึกหรอของชิ้นงาน

PWHT 500°C ทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิ

- (ก.) 30°C, (ข.) 100°C, (ค.) 200°C, (ง.) 300°C

นอกจากนี้ผลการตรวจสอบรอยแผลการสึกหรอรอยเชื่อมในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C 1 Layer ณ อุณหภูมิทดสอบการสึกหรอที่ 100°C, 200°C, และ 300°C ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 200 เท่า แสดงดังรูปที่ 10

จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นถึงผลของอุณหภูมิทดสอบการสึกหรอต่อลักษณะรอยแผลที่เกิดขึ้น พบว่าที่ทุกอุณหภูมิการทดสอบรอยแผลการสึกหรอจะปรากฏรอยการลื่นไถล (Sliding Wear Mark) และรอยร้าว (Crack) ขนาดเล็ก รวมถึงสังเกตเห็นกลุ่มออกไซด์ที่เกิดขึ้นในการทดสอบการสึกหรอ (บริเวณสีดำ) ที่เพิ่มปริมาณเมื่ออุณหภูมิในการทดสอบสูงขึ้น ดังรูปที่ 10 (ก.), (ข.), (ค.) และ (ง.) ตามลำดับ

ผลการตรวจสอบรอยแผลการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงดังรูปที่ 11

จากรูปที่ 11 (ก.) พบว่ามีลักษณะการสึกหรอแบบแปรรูปถาวรของรอยเชื่อม (Plastic Deformation) ที่เกิดการยกตัวขึ้นเมื่อสัมผัสกับพื้นอย่างต่อเนื่องในการทดสอบและพบรอยร้าว (Crack) บางตำแหน่งของรอยแผลจากการสึกหรอ ทำให้รอยเชื่อมหลุดร่อนตามทิศทางที่เกิดการแปรรูปแบบถาวร

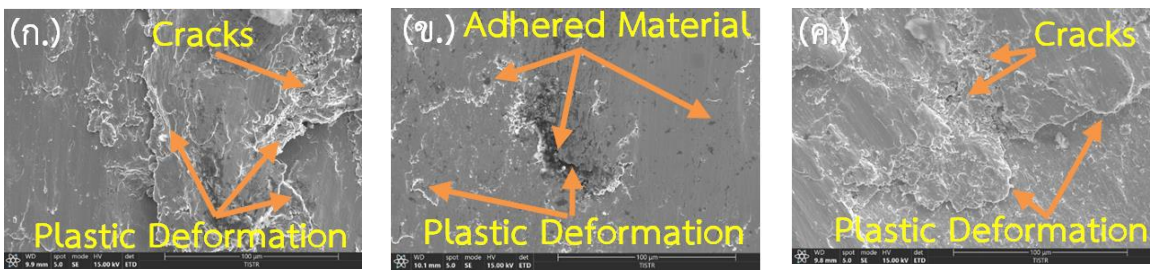
ส่วนรูปที่ 11 (ข.) มีรูปแบบการแปรรูปถาวรของรอยเชื่อมต่ำและไม่พบรอยร้าวบริเวณรอยแผลการทดสอบการสึกหรอ จึงมีแนวโน้มที่รอยเชื่อมจะหลุดร่อนต่ำกว่ากรณีอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบว่ามีลักษณะของวัสดุต่างชนิดที่ยึดติด ผังตัว (Adhered Material) อยู่บนพื้นผิวของรอยแผลการสึกหรอ



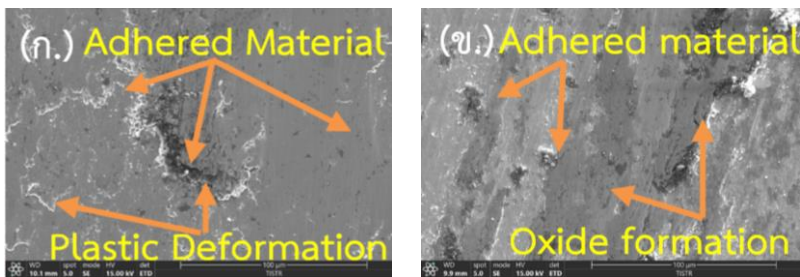
ส่วนรูปที่ 11 (ค.) มีลักษณะการแปรรูปถาวรเป็นบริเวณกว้างมากที่สุดเมื่อเทียบกับทุกเงื่อนไข อีกทั้งยังพบรอยร้าวปรากฏอยู่หลายบริเวณ จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดการหลุดร่อนตามทิศทางการแปรรูปถาวรมากกว่าในกรณีอื่นๆ หากพิจารณาบริเวณรอยแผลของชั้นทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิห้องดังรูปที่ 12 (ก.) จะมีลักษณะการแปรรูปถาวรเกิดขึ้นสูงกว่าเมื่อ

เปรียบเทียบกับ การทดสอบที่อุณหภูมิ 300°C ดังรูปที่ 12 (ข.) ที่สังเกตเห็นว่ามีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี แบบสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy: EDS) บริเวณตำแหน่งต่างๆ ของรอยเชื่อมแสดงดังรูปที่ 12 ถึง 16



รูปที่ 11 รอยแผลของรอยเชื่อมพอกผิวหลังการทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิ 30°C (ก.) As-Weld 1 Layer, (ข.) PWHT 500°C 1 Layer และ (ค.) PWHT 700°C 1 Layer



รูปที่ 12 รอยแผลการสึกหรอของรอยเชื่อมพอกผิวที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่ 500°C (ก.) อุณหภูมิทดสอบ 30°C และ (ข.) อุณหภูมิทดสอบ 300°C

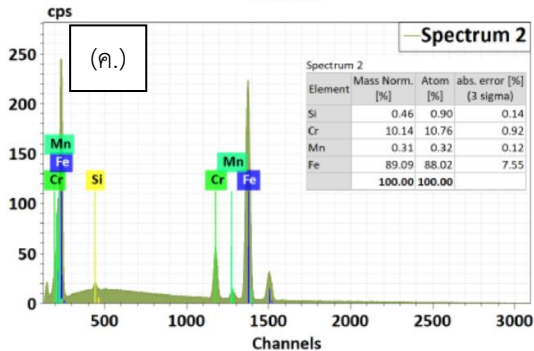
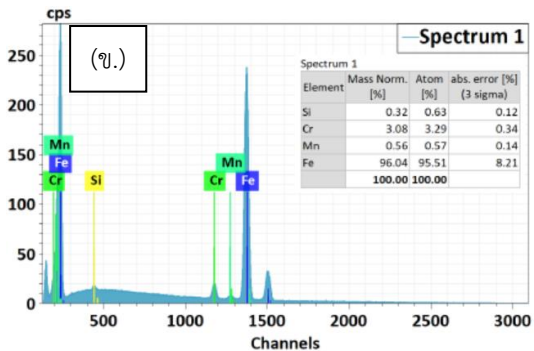
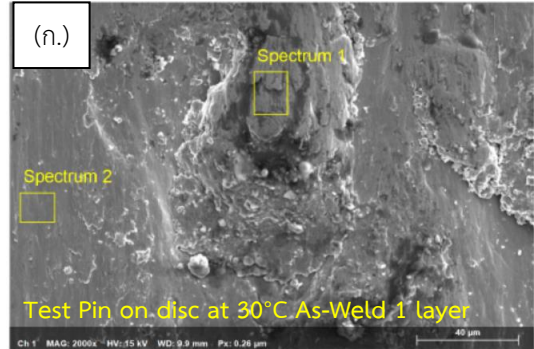
จากการวิเคราะห์ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM) ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ การสึกหรอแบบพินออดิสก์ที่อุณหภูมิ 30°C ของชิ้นงาน As-weld 1 Layer ถูกนำมา

วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (EDS) ในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 13 (ก.) ทั้งนี้พบว่าในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 นั้นมีปริมาณเหล็กสูงถึง 96.04% และโครเมียม 3.08% โดยน้ำหนักดังรูปที่ 13 (ข.) ซึ่งแตกต่างจากองค์ประกอบทางเคมี



พื้นฐานของรอยเชื่อมและวัสดุพินที่มีโครเมียม 12-14% และ 0.4-0.6% ตามลำดับ เนื่องจากการทดสอบการสึกหรอเกิดการขัดสี (Abrasion) และยึดติด (Adhesion) จนเกิดเป็นเศษโลหะ (Wear Debris) ที่ผสมผสานกันระหว่างวัสดุพินและวัสดุรอยเชื่อม ส่วนในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 สังเกตได้ว่าไม่มีลักษณะการยึดติดของเศษโลหะจากการสึกหรอโดยมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงพื้นฐานของวัสดุรอยเชื่อมดังรูปที่ 13 (ค.)

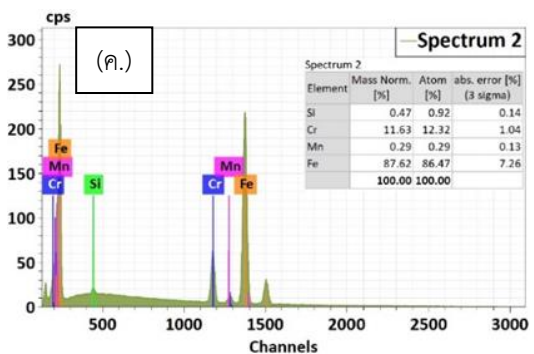
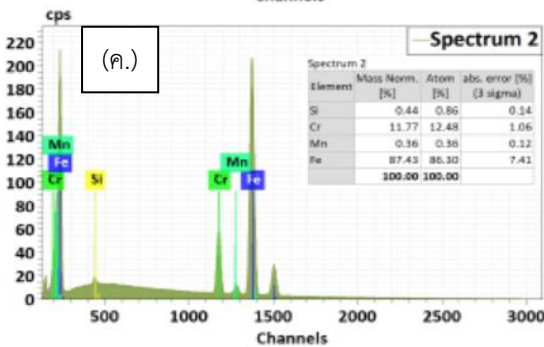
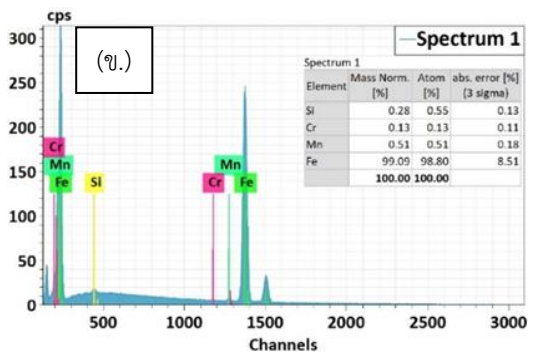
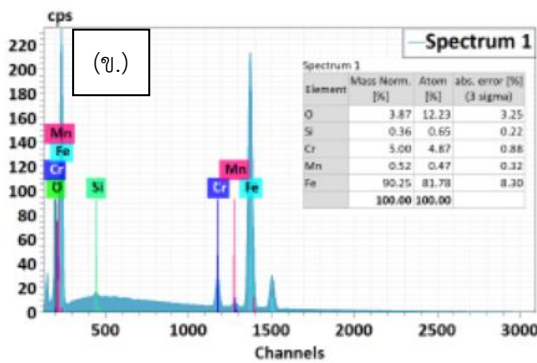
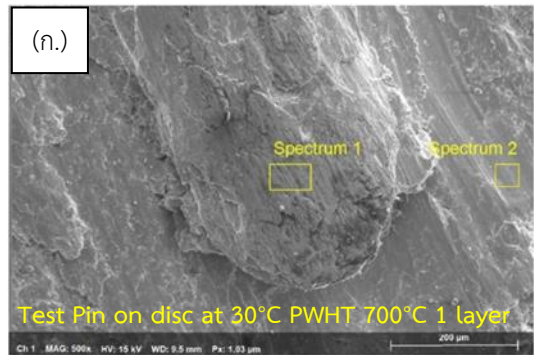
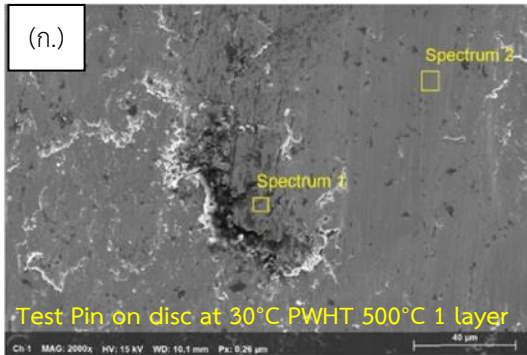
กรณีชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 30°C PWHT 500°C 1 Layer แสดงตำแหน่งการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุดังรูปที่ 14 (ก.) โดยในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 พบธาตุเหล็ก 90.25% โครเมียม 5% และออกซิเจน 3.87% โดยน้ำหนัก โดยมีจำนวนอะตอมของเหล็ก, โครเมียม และออกซิเจนคือ 81.78, 4.87, และ 12.23 ตามลำดับ ดังรูปที่ 14 (ข.) ซึ่งแตกต่างจากองค์ประกอบทางเคมีพื้นฐานของวัสดุรอยเชื่อมและวัสดุพิน อย่างไรก็ตามเนื่องจากตรวจพบออกซิเจนในบริเวณนี้จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวสัมผัสบริเวณที่เกิดการสึกหรอ ส่วนในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงพื้นฐานของวัสดุรอยเชื่อมดังรูปที่ 14 (ค.) และมีลักษณะพื้นผิวที่มีร่องการสึกหรอแบบขัดสีตามทิศทางการเคลื่อนที่ของพิน



รูปที่ 13 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ พินออนดิสก์ ที่อุณหภูมิ 30°C As-Weld 1 Layer ภาพ (ก.) แสดงตำแหน่งการวิเคราะห์, (ข.) สเปกตรัม 1 และ (ค.) สเปกตรัม 2

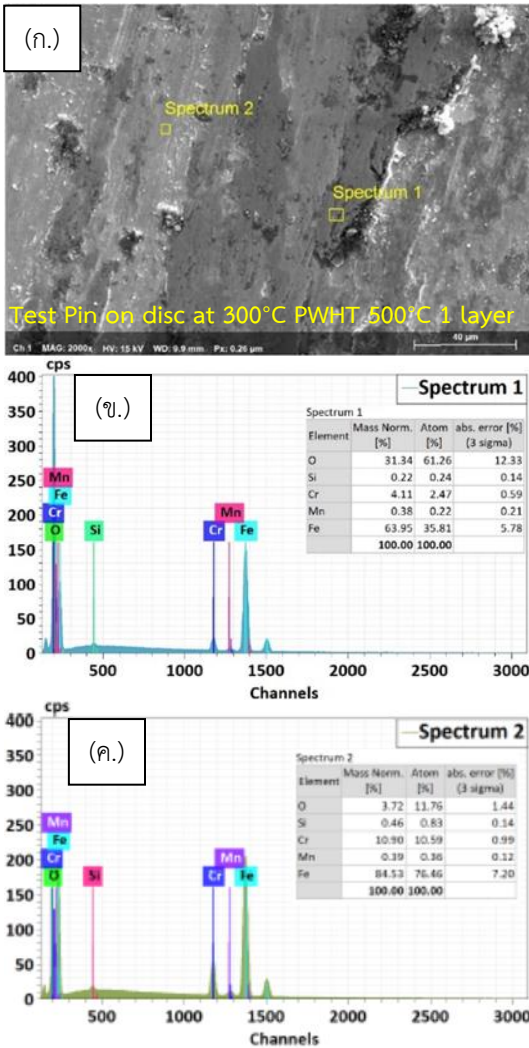


บทความวิจัย



รูปที่ 14 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุ ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ พิน ออน ดิสก์ (Pin on Disc) ที่อุณหภูมิ 30°C PWHT 500°C 1 Layer (ก.) แสดงตำแหน่งการวิเคราะห์, (ข.) สเปกตรัม 1, และ (ค.) สเปกตรัม 2

รูปที่ 15 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุ ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ พิน ออน ดิสก์ (Pin on Disc) ที่อุณหภูมิ 30°C PWHT 700°C 1 Layer (ก.) แสดงตำแหน่งการวิเคราะห์, (ข.) สเปกตรัม 1, และ (ค.) สเปกตรัม 2



รูปที่ 16 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ พิน ออน ดิสก์ (Pin on Disc) ที่อุณหภูมิ 300°C PWHT 500°C 1 Layer (ก.) แสดงตำแหน่งการวิเคราะห์, (ข.) สเปกตรัม 1, และ (ค.) สเปกตรัม 2

สำหรับชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 30°C PWHT 700°C 1 Layer แสดงตำแหน่งการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุตั้งรูปที่ 15 (ก.) โดยในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 พบธาตุเหล็กในปริมาณสูงถึง 99.05% โครเมียม 0.13% ซิลิกอน 0.28% และแมงกานีส 0.51% โดยน้ำหนัก ตั้งรูปที่ 15 (ข.) โดยเป็นตำแหน่งที่ตรวจพบปริมาณโครเมียมค่อนข้างต่ำจึงมีแนวโน้มที่จะเป็นเนื้อวัสดุของพินเกิดการสึกหรอแบบยึดติดกับพื้นผิวของรอยเชื่อม ส่วนในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงพื้นฐานของวัสดุรอยเชื่อมตั้งรูปที่ 15 (ค.) และมีลักษณะพื้นผิวที่เกิดการแปรรูปถาวรสูงตามทิศทางการเคลื่อนที่ของพิน

ส่วนชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 300°C PWHT 500°C 1 Layer แสดงตำแหน่งการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุตั้งรูปที่ 16 (ก.) โดยในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 พบธาตุเหล็ก 31.34% โครเมียม 4.11% และออกซิเจน 63.95% โดยน้ำหนัก โดยมีจำนวนอะตอมของเหล็ก, โครเมียม และออกซิเจน คือ 35.81, 2.47, และ 61.26 ตามลำดับ ตั้งรูปที่ 16 (ข.) จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมบริเวณผิวสัมผัสระหว่างดิสก์และพินที่เกิดการสึกหรอ นอกจากนี้ในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 ตั้งรูปที่ 16 (ค.) ยังตรวจพบจำนวนอะตอมของเหล็ก, โครเมียม และออกซิเจน คือ 76.46, 10.59, และ 11.76 ตามลำดับ จึงมีโอกาสเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมได้เช่นกันแม้จะมีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1



4. อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมของรอยเชื่อม AWS A5.9 ER 420 บนเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 8620 ต่อความต้านทานการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงพบว่าเมื่อนำชิ้นทดสอบมาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C จะส่งผลให้เกิดโครงสร้างจุลภาคเป็นเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (Tempered Martensite) ทั้งนี้ช่วงอุณหภูมิเทมเปอร์ริงทำให้เกิดปรากฏการณ์ Secondary Hardening ซึ่งจะเกิดการตกตะกอนสารประกอบคาร์ไบด์จำพวก ((Cr,Fe)₂₃C₆ และ M₇C₃) ที่มีปริมาณสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญส่งผลให้ค่าความแข็งสูงขึ้นซึ่งเป็นพฤติกรรมของวัสดุกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซด์ิก [8-10] แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมไปที่ 700°C มีผลทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างมาร์เทนไซต์จำนวนมากไปเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์และสารประกอบคาร์ไบด์ ((Cr,Fe)₂₃C₆) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งที่ลดลงในช่วงดังกล่าว [11] โดยค่าความแข็งมีผลโดยตรงต่อความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี ซึ่งหากวัสดุมีความแข็งที่ผิวสูง โดยปกติจะมีความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีที่ดีกว่าวัสดุที่ผิวมีความแข็งต่ำ [12] จากผลการทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิ 30°C นั้น พบว่าความแข็งสูงสุดเกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมอุณหภูมิ 500°C ซึ่งมีความต้านทานการสึกหรอสูงสุด โดยมีค่าความแข็งสูงกว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเล็กน้อย ส่วนชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมอุณหภูมิ 700°C มีค่าความแข็งต่ำสุดจึงส่งผลให้มีความต้านทานการสึกหรอต่ำสุด อย่างไรก็ตามไม่มีความแตกต่างของ

ความต้านทานการสึกหรออย่างมีนัยสำคัญกรณีเชื่อมพอกผิว 1 หรือ 2 ชั้นสำหรับงานวิจัยนี้

ส่วนกระบวนการทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบจาก 30 - 300°C นั้นมีแนวโน้มทำให้ค่าความแข็งของผิววัสดุบริเวณคู่สัมผัสลดลงเนื่องจากการให้ความร้อนระหว่างการทดสอบเปรียบได้กับการนำวัสดุไปทำการอบในช่วงเวลาหนึ่งที่ทำให้วัสดุมีความอ่อนตัวมากยิ่งขึ้น [13] อย่างไรก็ตามอุณหภูมิทดสอบการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มให้อัตราการสึกหรอของรอยเชื่อมลดลงเนื่องจากเนื้อรอยเชื่อมมีพฤติกรรมแปรรูปถาวรต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิ 30°C ทั้งยังก่อให้เกิดสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมที่มีบทบาทในการต้านทานการสึกหรออย่างมีนัยสำคัญ [13-14]

5. สรุปผลการวิจัย

1. การใช้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 500°C ส่งผลให้ค่าความแข็งของรอยเชื่อม AWS A5.9 ER420 มีค่าความแข็งสูงสุดเนื่องจากปรากฏการณ์ Secondary Hardening ส่วนที่อุณหภูมิ 700°C ทำให้ค่าความแข็งของรอยเชื่อมต่ำสุด
2. ค่าความแข็งส่งผลต่อความต้านทานการสึกหรอของรอยเชื่อมพอกผิว โดยหากค่าความแข็งสูงจะมีผลทำให้ความต้านทานการสึกหรอสูง
3. เมื่ออุณหภูมิทดสอบการสึกหรอสูงขึ้น อัตราการสึกหรอมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากปริมาณการแปรรูปถาวรบริเวณผิวคู่สัมผัสลดลง
4. เมื่ออุณหภูมิทดสอบการสึกหรอสูงขึ้น จะทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความต้านทานการสึกหรอของรอยเชื่อมพอกผิว



5. ค่าความแข็งของรอยเชื่อมพอกผิวมีแนวโน้มลดลงต่ำลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Calik and M.S. Karaka, Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of martensitic stainless-steel joints welded with austenitic stainless-steel fillers, *Materials and Technology*, 2013, 47, 403-407.
- [2] R. Kumar, P.K. Ghosh and S. Kumar, Thermal and metallurgical characteristics of surface modification of AISI 8620 steel produced by TIG arcing process, *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 240, 420-431.
- [3] Y. Shen, S.M. Moghadam, F. Sadeghi, K. Paulson and R.W. Trice, Effect of retained austenite – Compressive residual stresses on rolling contact fatigue life of carburized AISI 8620 steel, *International Journal of Fatigue*, 2015, 75, 135-144.
- [4] A. Ray, K.S. Arora, S. Lester and M. Shome, Laser cladding of continuous caster lateral rolls: Microstructure, wear and corrosion characterisation and on-field performance evaluation, *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(8), 1566-1575.
- [5] J.C. Lippold and D.J. Kottecki, *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*, John Wiley & Sons Inc., NJ, USA, 2005.
- [6] K. Yang, Z. Zhang, W. Hu, Y. Bao and Y. Jiang, A new type of submerged-Arc flux-cored wire used for hardfacing continuous casting rolls, *Journal of Iron and Steel Research International*, 2011, 18(11), 74-79.
- [7] A.V. Nemani, M. Ghaffari, S. Salahi, and A. Nasiri, Effects of post-printing heat treatment on the microstructure and mechanical properties of a wire arc additive manufactured 420 martensitic stainless steel part, *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 813, 141167.
- [8] A.N. de Moura, C.M. de Alcântara, E.A. Vieira, W.S. Labiapari, M.A. da Cunha, T.R. de Oliveira and M.T.D. Orlando, Microstructure, crystallographic aspects and mechanical properties of AISI 420 martensitic stainless steel after different thermomechanical process routes, *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 305, 127723.
- [9] A.N. Isfahany, H. Saghafian and G. Borhani, The effect of heat treatment on mechanical properties and corrosion behavior of AISI420 martensitic stainless steel, *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509, 3931-3936.



- [10] K. Lokesh, M.M. Gandhi, S.R. Sekhar, N. Sateesh and Ram Subbiah, Wear behavior analysis of AISI440 martensitic steel by annealing and tempering process, International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2019, 9, 1012-1017.
- [11] E.O. Correa, N.G. Alcântara, L.C. Valeriano, N.D. Barbedo and R.R. Chaves, The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe–Cr–C–Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process, Surface and Coatings Technology, 2015, 276, 479-484.
- [12] A. Bain, K. Reddy, S. Jagadeesan, A.A. Lakshmi, N. Sateesh, S.K. Singh and R. Subbiah, Wear and microstructure analysis on AISI420 stainless steel by annealing & tempering process under dry sliding conditions, Advances in Materials and Processing Technologies, 2022, 8, 445-455.
- [13] J. Kuan, Effects of heat treatment on microstructure and wear resistance of stainless steels and superalloys, Thesis, University of Ottawa, Canada, 2013.
- [14] D.A. Ahmed and M.M. Mulapeer, Differentiation of specific wear rates of AISI 304 austenitic and AISI 2205 duplex stainless steels at room and high temperatures, Heliyon, 2022, 8(11), e11807.