

โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo

สลิตา เพชรสังข์^{1*} และ ประภาศ เมืองจันทร์บุรี²

¹สถานวิจัยความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

²ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

salita_Raul@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิดของลวดเชื่อมที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงดึงในชิ้นงานเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo ซึ่งทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมทิก (TIG) โดยมีการใช้ลวดเชื่อมทั้งหมด 2 ชนิด คือ ลวดเชื่อมชนิด ER90S-B3 และ ERNiCrMo-3 และทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากผลการวิจัยพบว่า บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมเมื่อใช้ลวดเชื่อม ER90S-B3 ประกอบด้วยเทมเปอร์เบนไนท์ ซึ่งมีความแข็งค่อนข้างสูง ในขณะที่เมื่อใช้ลวดเชื่อม ERNiCrMo-3 พบว่าประกอบด้วยออสเทนไนท์เป็นหลัก ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวมีความแข็งต่ำกว่าเทมเปอร์เบนไนท์ และเมื่อทำการทดสอบแรงดึงพบว่า ชิ้นงานเชื่อมเกิดความเสียหายในบริเวณเนื้อโลหะเดิม อันเป็นบริเวณที่มีความแข็งต่ำที่สุด โดยชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้งสองชนิดมีความแข็งแรงดึงใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่าชิ้นงานวัสดุพื้น 2.25Cr-1Mo เล็กน้อย

คำสำคัญ: ความแข็งแรงดึง, เหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo, การให้ความร้อนหลังการเชื่อม, บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม, บริเวณเนื้อโลหะเดิม

บทนำ

วัสดุเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloy steel) หรือเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม (Cr-Mo steel) ถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและโรงไฟฟ้า เป็นต้น วัสดุกลุ่มนี้ถูกออกแบบสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่อุณหภูมิสูงและความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี โดยวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo (SA213 grade T22) ได้ถูกนำมาผลิตเป็นอุปกรณ์ของเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Steam boiler) ในโรงไฟฟ้า เช่น ท่อไอน้ำ (Steam pipe) [1-3]

เมื่ออุปกรณ์เกิดการชำรุดเสียหาย เช่น เกิดรอยแตกร้าว เป็นต้น การเชื่อมซ่อม (Weld repair) จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อให้อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถใช้งานได้ เมื่อทำการเชื่อมซ่อมรอยแตก ชิ้นงานเชื่อมโดยเฉพาะบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal; WM) ต้องมีสมบัติเทียบเท่าหรือดีกว่าวัสดุเดิม เช่น สมบัติทางโลหะวิทยา (Metallurgical properties) และสมบัติทางกล (Mechanical properties) และต้องไม่มีจุดบกพร่อง (Defect) ที่อาจนำไปสู่ความเสียหายในภายหลังได้

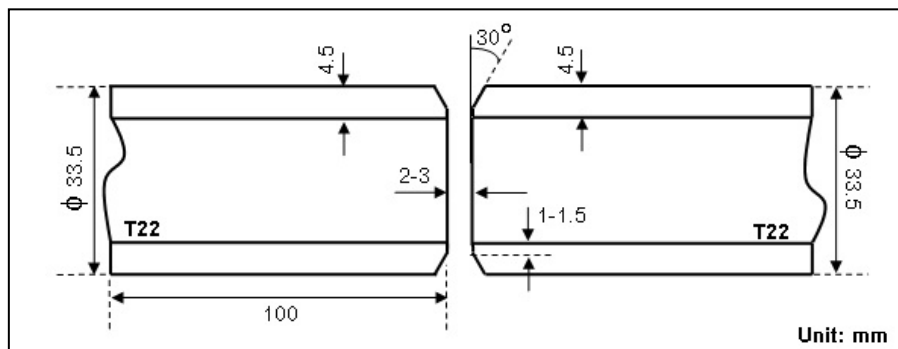
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อศึกษาชนิดของลวดเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล โดยเฉพาะค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมในวัสดุเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo ที่เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมทิก (TIG) โดยทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม 2 ชนิด คือ ลวดเชื่อมเกรดเทียบเท่า (Matching) อันได้แก่ ลวดเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมชนิด ER90S-B3 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงกับชิ้นงานที่นำมาเชื่อม และลวดเชื่อมเกรดที่สูงกว่า (Overmatching) อันได้แก่ ลวดเชื่อมโลหะผสมที่มีนิกเกิลเป็นหลัก (Ni-based alloy) ชนิด ERNiCrMo-3 การเลือกใช้ลวดเชื่อมชนิดนี้เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่อุณหภูมิสูงและความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่า อีกทั้งยังมีความแกร่ง (Toughness) ที่สูง ซึ่งยากต่อการเกิดรอยแตกร้าว (Crack) [4,5] ดังนั้นลวดเชื่อมชนิดนี้จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการเชื่อมวัสดุกลุ่มเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม

วิธีดำเนินการวิจัย

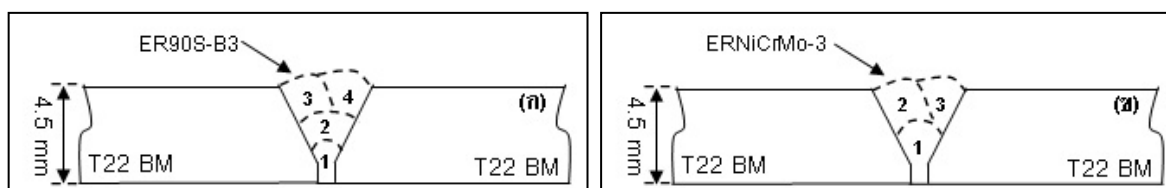
วัสดุและกระบวนการเชื่อม

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยคือ ท่อเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo หรือ SA-213-T22 ซึ่งผ่านการอบปกติและการอบคืนตัว (Normalizing and Tempering) โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 33.5 มิลลิเมตร หนา 4.5 มิลลิเมตร และยาว 100 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของวัสดุที่ใช้ ทำการเตรียมรอยบากแบบตัววี (Single V groove weld) ที่มีมุมรอยบาก 60 องศา ความกว้างหน้าราก (Root Face) 1-1.5 มิลลิเมตร และระยะห่างราก 2-3 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 ทำการเชื่อมโดยกระบวนการเชื่อมทิกด้วยลวดเชื่อมทั้งหมด 2 ชนิด ได้แก่ ลวดเชื่อม ER90S-B3 ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร อันมีส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงกับวัสดุที่นำมาเชื่อม (ตารางที่ 1) และลวดเชื่อม ERNiCrMo-3 ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.4 มิลลิเมตร อันมีธาตุ निकเกิลเป็นส่วนผสมหลัก (ตารางที่ 1) ซึ่งใช้เทคนิคการเชื่อมหลายชั้น (Multipass welding) จำนวน 4 และ 3 แนวตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม โดยทำการให้ความร้อนก่อนเชื่อม (Preheat) ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และควบคุมอุณหภูมิระหว่างเชื่อม (Interpass temperature) ไม่ให้เกิน 300 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานเชื่อมเข้าเตาเผาและทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตา



รูปที่ 1 ขนาดชิ้นงานสำหรับการเชื่อม



รูปที่ 2 รูปแบบการเติมลวดเชื่อม (ก) T22/B3 และ (ข) T22/NiCrMo-3

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุและลวดเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อม

วัสดุ	ส่วนผสมทางเคมี (wt-%)						
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Fe
ชิ้นงานเชื่อม 2.25Cr-1Mo Steel [6]	0.05-0.15	0.30-0.60	0.50	-	1.90-2.60	0.87-1.13	Bal.
ลวดเชื่อม ER90S-B3 [7]	0.07-0.12	0.40-0.70	0.40-0.70	0.20	2.30-2.70	0.90-1.20	Bal.
ลวดเชื่อม ERNiCrMo-3 [8]	0.10	0.50	0.50	58.00	20.0-23.0	8.0-10.0	5.00

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม

ชิ้นงาน	ลำดับ ชั้น	กระบวนการ การเชื่อม	ชนิดลวดเชื่อม		ขั้วไฟฟ้า	กระแสเชื่อม (แอมป์)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	ความเร็วใน การเชื่อม (ซ.ม./นาที)
			AWS Class.	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง (ม.ม.)				
T22/B3	All	TIG	ER90S-B3	2.00	DCEN	100	11-12	7.10
T22/NiCrMo-3	All	TIG	ERNiCrMo-3	2.40	DCEN	100	11-12	8.21

- อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม: 250 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิระหว่างที่ยาวเชื่อม: ไม่เกิน 300 องศาเซลเซียส

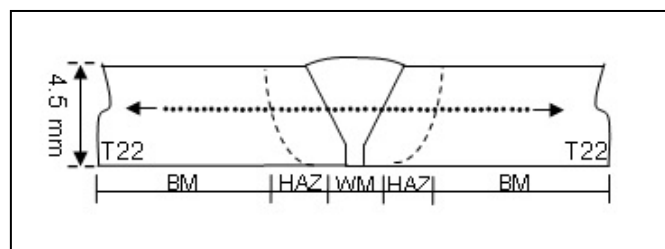
- ก๊าซปกคลุมแนวเชื่อม/ ก๊าซปกคลุมด้านหลัง: ก๊าซอาร์กอน
- อัตราการไหลก๊าซปกคลุมแนวเชื่อม: 10 ลิตร/นาที
- อัตราการไหลก๊าซปกคลุมด้านหลัง: 15 ลิตร/นาที

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ทำการตัดและเตรียมผิวสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมในแต่ละสภาวะ โดยทำการขึ้นเรือนแบบเย็น (Cold mount) ตามด้วยการขัดหยาบ (Grinding) ด้วยกระดาษทรายแล้วทำการขัดเงา (Polishing) ด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน จากนั้นทำการกัดผิวหน้า (Etching) ด้วยกรดไนตริก 5% (5% Nitral) เป็นเวลา 30 วินาที สำหรับบริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base metal; BM) และบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER90S-B3 [9] และด้วยกรด HCl + HNO₃ + Acetic acid (1:1:1) เป็นเวลา 30 วินาที สำหรับบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ERNiCrMo-3 [10] จากนั้นล้างทำความสะอาดชิ้นงานด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ และทำการเป่าให้แห้ง ทำการตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง (Optical Microscopy: OM)

การทดสอบความแข็ง (Microhardness test)

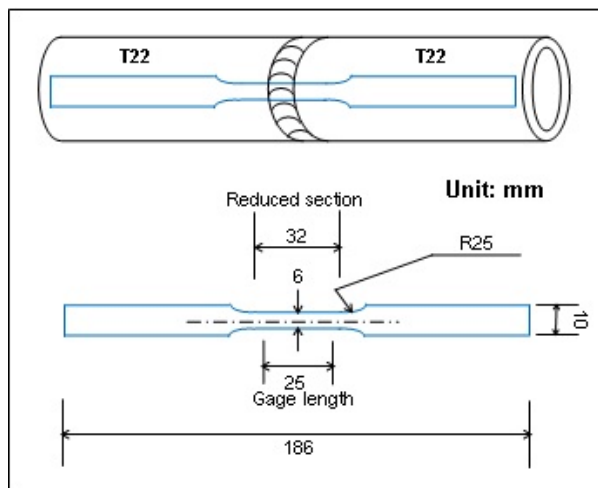
ทำการวัดความแข็งในชิ้นงานเชื่อมด้วยเครื่องมือโครวิกเกอร์ส โดยใช้น้ำหนักกดเท่ากับ 200 กรัมในหน่วยของแรง (Gram-force; gf) เป็นเวลา 10 วินาที และระยะห่างแต่ละตำแหน่งของการทดสอบเท่ากับ 250 ไมครอน (0.25 มิลลิเมตร) ซึ่งกำหนดให้กึ่งกลางของบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมเป็นตำแหน่งที่เริ่มต้นของการทดสอบ จากนั้นทำการวัดไปทางด้านซ้ายและด้านขวาของชิ้นงานเชื่อมเข้าไปในบริเวณกระทบร้อน (Heat affected Zone; HAZ) และบริเวณเนื้อโลหะเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องมือโครวิกเกอร์สในชิ้นงานเชื่อม

การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

ทำการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างจากชิ้นงานวัสดุพื้น 2.25Cr-1Mo และชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้งสองชนิดสำหรับการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM A370 [11] ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยกำหนดให้บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมอยู่ตรงกลางของชิ้นงานทดสอบ และทำการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) ยี่ห้อ HOUNSFIELD รุ่น H100KS โดยกำหนดให้ความเร็วในการดึงเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 4 ขนาดชิ้นงานเชื่อมสำหรับการทดสอบแรงดึง

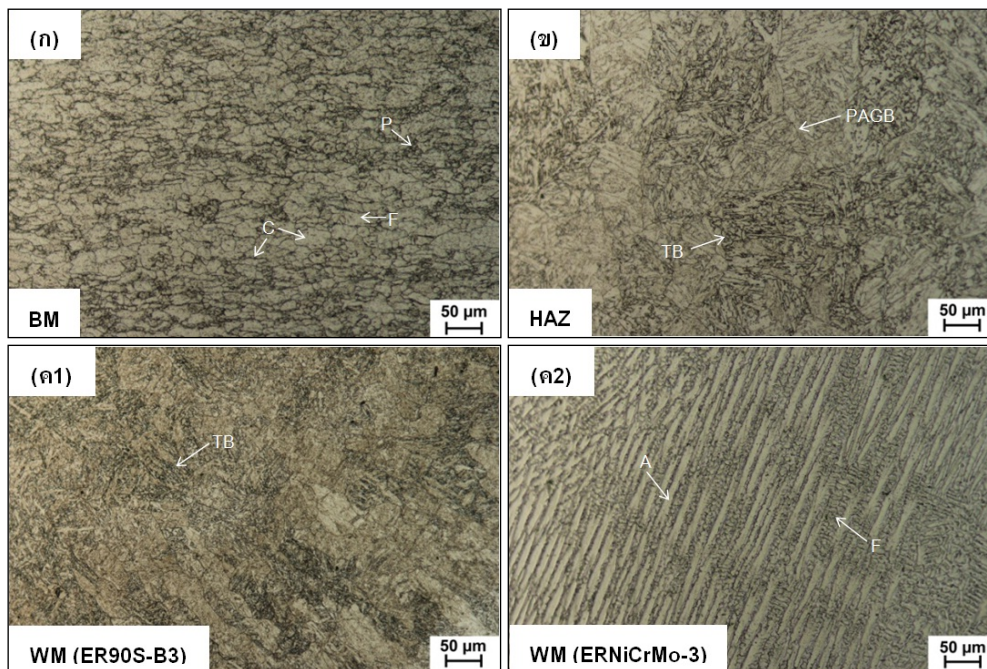
ผลและอภิปรายผล

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo พบว่าประกอบด้วย 3 บริเวณหลัก ได้แก่ บริเวณเนื้อโลหะเดิม บริเวณกระแทบร้อน และบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยบริเวณเนื้อโลหะเดิม ประกอบด้วยเฟอไรต์ (Ferrite; F) และเพิร์ลไลต์ (Pearlite; P) รวมถึงผลึกคาร์ไบด์ (Carbide; C) ทั้งภายในเกรนและตามขอบเกรน [12] ดังแสดงในรูปที่ 5(ก)

สำหรับบริเวณกระแทบร้อน (รูปที่ 5(ข)) พบว่าประกอบด้วยเทมเปอร์เบนไนท์ (Tempered bainite; TB) และขอบเกรน ออสเทนไนท์เดิม (Prior austenite grain boundary; PAGB) [13] อันเป็นผลมาจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อมช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคในบริเวณดังกล่าวจากเบนไนท์ (Bainite) ที่เกิดจากการอัตราการเย็นตัวที่สูงจากออสเทนไนท์ (Austenite; A) ในระหว่างการเชื่อมเปลี่ยนเป็นเทมเปอร์เบนไนท์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีสมบัติทางกลที่ดีกว่า [14]

และสำหรับบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมในชิ้นงานเชื่อม T22/B3 (รูปที่ 5(ค1)) พบว่าประกอบด้วยเทมเปอร์เบนไนท์ [15] อันเป็นผลมาจากการมีปริมาณธาตุผสมสูง ในขณะที่ในชิ้นงานเชื่อม T22/NiCrMo-3 (รูปที่ 5(ค2)) ประกอบด้วยออสเทนไนท์ที่มีเฟอไรต์ (Ferrite) ตามขอบเกรนในรูปแบบของเดนไดรต์ (Dendrite) พร้อมด้วยสารประกอบโลหะ (Intermetallic phase) ทั้งภายในเกรนและตามขอบเกรน [16] เนื่องจากลวดเชื่อมชนิดนี้มีปริมาณนิกเกิลค่อนข้างสูง (ประมาณ 60 เปอร์เซนต์) ซึ่งธาตุดังกล่าวถือว่าเป็นธาตุที่ส่งเสริมให้เกิดออสเทนไนท์ (Austenite Former) โดยจะช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนและความแข็งแรงของแนวเชื่อมให้ดีขึ้น [17]

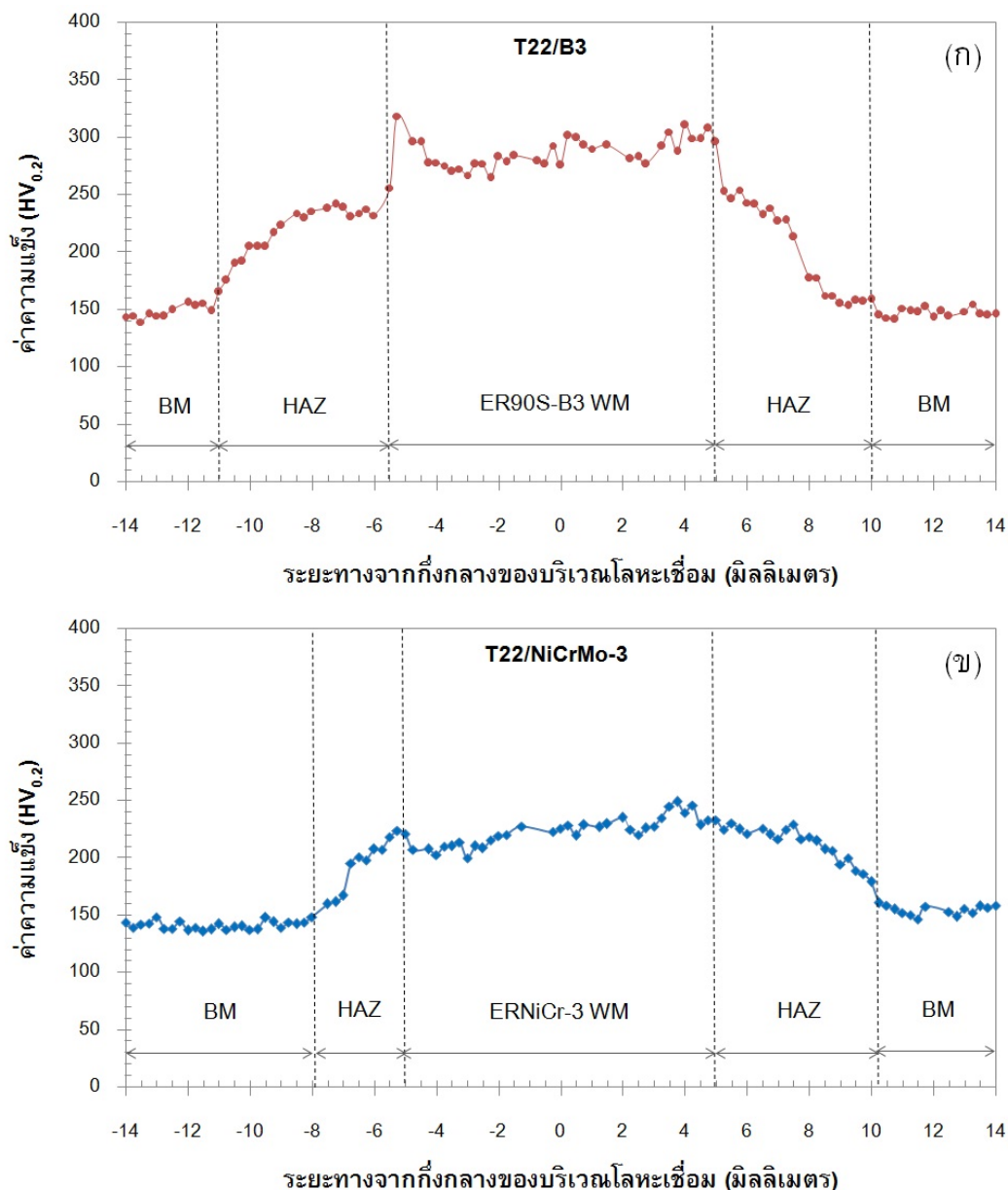


รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo (ก) บริเวณเนื้อโลหะเดิม (ข) บริเวณกระทบร้อน และ (ค) บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม

ผลการทดสอบความแข็ง

รูปที่ 6 แสดงค่าความแข็งในบริเวณต่างๆ ของชิ้นงานเชื่อม T22/B3 และ T22/NiCrMo-3 ที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากผลการทดสอบพบว่า บริเวณเนื้อโลหะเดิมมีความแข็งต่ำ (145 HV) เนื่องจากประกอบด้วยเฟอไรต์และเพิร์ลไลต์ ในขณะที่บริเวณกระทบร้อนอันประกอบด้วยเทมเปอร์เบนไนท์มีความแข็งเฉลี่ยสูงกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม (240 HV) อันเป็นผลมาจากในระหว่างการเชื่อมบริเวณกระทบร้อนเป็นบริเวณที่มีอัตราการเย็นตัวสูงโดยเปลี่ยนจากออสเทนไนท์กลายเป็นเบนไนท์ [18] อย่างไรก็ตามเนื่องจากชิ้นงานเชื่อมได้รับการให้ความร้อนหลังการเชื่อมอันถือเป็นการอบอ่อนชิ้นงาน (Annealing) เพื่อปรับปรุงโครงสร้างและสมบัติทางกลในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมและบริเวณกระทบร้อน [14] จึงทำให้บริเวณมีความแข็งไม่สูงมากนัก

สำหรับบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของชิ้นงานเชื่อม T22/B3 ที่ประกอบด้วยเทมเปอร์เบนไนท์เช่นเดียวกับในบริเวณกระทบร้อนพบว่ามีความแข็งค่อนข้างสูง (290 HV) เนื่องจากลวดเชื่อมชนิดนี้มีปริมาณธาตุผสมที่สูง ในขณะที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของชิ้นงานเชื่อม T22/NiCrMo-3 มีค่าความแข็งต่ำกว่า (220 HV) เนื่องจากส่วนใหญ่ประกอบด้วยออสเทนไนท์ อันเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งต่ำกว่าโครงสร้างเทมเปอร์เบนไนท์



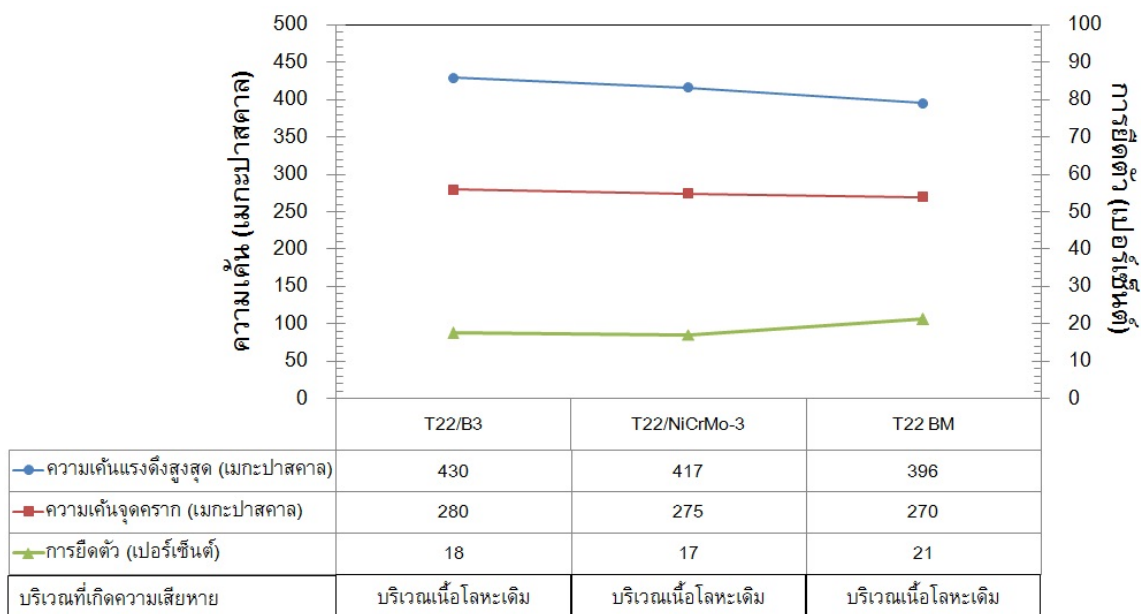
รูปที่ 6 ค่าความแข็งในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo (ก) T22/B3 และ (ข) T22/NiCrMo-3

ผลการทดสอบความแข็งแรงดึง

รูปที่ 6 แสดงค่าสมบัติทางกลในชิ้นงานเชื่อมและชิ้นงานวัสดุพื้น 2.25Cr-1Mo เมื่อทำการทดสอบแรงดึง โดยค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) และค่าความเค้นจุดคราก (Yield strength) เฉลี่ยสูงสุดของชิ้นงานเชื่อม T22/B3 ชิ้นงานเชื่อม T22/NiCrMo-3 และชิ้นงานวัสดุพื้น 2.25Cr-1Mo มีค่าเท่ากับ 430 417 และ 396 เมกะปาสคาล และ 280 275 และ 270 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) มีค่าเท่ากับ 18 17 และ 21 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้ง 2 ชนิดมีความสามารถในการรับแรงดึงใกล้เคียงกัน ซึ่งบริเวณที่ชิ้นงานเชื่อมเกิดการเสียหายหรือขาดออกจากกันเกิดขึ้นในบริเวณเนื้อโลหะเดิม อันเป็นบริเวณที่มีความแข็งต่ำจากผลของการวัดความแข็ง

นอกจากนี้ ยังพบว่าชิ้นงานเชื่อมมีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าและมีค่าความเหนียวน้อยกว่าเล็กน้อย เมื่อเทียบกับในชิ้นงานวัสดุพื้น 2.25Cr-1Mo อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดในชิ้นงานเชื่อม T22/B3 กับชิ้นงานวัสดุพื้น 2.25Cr-1Mo พบว่ามีค่าแตกต่างกันประมาณ 8% ซึ่งเป็นไปได้ว่าเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการวัดขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบแรงดึง เนื่องจากชิ้นงานที่นำมาทดสอบเตรียมมาจากชิ้นงานท่อซึ่งมีความโค้ง โดยเมื่อทำการวัดความหนาชิ้นงานทดสอบสำหรับการคำนวณพื้นที่รับแรงอาจเกิดความผิดพลาดได้



รูปที่ 6 ค่าความแข็งแรงดึงในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo

สรุปผลการวิจัย

- 1) บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมเมื่อใช้ลวดเชื่อม ER90S-B3 พบว่าประกอบด้วยเทมเปอร์เบนไนท์ อันเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งค่อนข้างสูง
- 2) ในขณะที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมเมื่อใช้ลวดเชื่อม ERNiCrMo-3 พบว่าประกอบด้วยออสเทนไนท์เป็นหลัก ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งต่ำกว่าโครงสร้างเทมเปอร์เบนไนท์จากการใช้ลวดเชื่อม ER90S-B3 อันเป็นผลมาจากการที่ลวดเชื่อมชนิดนี้มีปริมาณนิกเกิลสูง
- 3) ชิ้นงานเชื่อมเกิดความเสียหายในบริเวณเนื้อโลหะเดิม อันเป็นบริเวณที่มีความแข็งต่ำที่สุดในชิ้นงานเชื่อม โดยประกอบด้วยเฟอไรต์และเฟิร์ลไลต์
- 4) ชิ้นงานเชื่อม T22/B3 และ T22/NiCrMo-3 มีค่าความแข็งแรงดึงใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่าในชิ้นงานวัสดุพื้น 2.25Cr-1Mo เล็กน้อย
- 5) อย่างไรก็ตาม พบว่าชิ้นงานเชื่อม T22/B3 มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมากกว่าชิ้นงานวัสดุพื้น 2.25Cr-1Mo ประมาณ 8% ซึ่งเป็นไปได้ว่าอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการวัดขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบแรงดึง เนื่องจากความหนาของชิ้นงานทดสอบเป็นส่วนโค้งของท่อ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วยความร่วมมือจากหลายฝ่าย ผู้เขียนขอขอบพระคุณสถานวิจัยความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมวัสดุ (Center of excellence in materials engineering; CEME) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย และขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องจักรและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง รวมถึงผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

บรรณานุกรม

- [1] S Yamamoto. Arc Welding of Heat-Resistant Low-Alloy Steel. *In: Arc Welding of Specific Steels and Cast Irons*. 4th ed. Kobe Steel, Ltd., Tokyo, Japan, 2011, p. 2-1-2-34.
- [2] T Peng, Z Chi, Y Zhi-gang and T Hiroyuki. Evolution and coarsening of carbides in 2.25Cr-1Mo steel weld metal during high temperature tempering. *J. Iron & Steel Res.* 2010; 17(5), 74-78.
- [3] J Chen, H Liu, Z Pan, K Shi, H Zhang and J Li. Carbide evolution and service life of simulated post weld heat treated in 2.25Cr-1Mo steel. *Mater. Sci. Eng. A.* 2015; 622, 153-159.
- [4] G. Longlong, Z. Hualin, L. Shaohu, L. Yueqin, X. Xiaodon and F. Chunyu. Formation quality optimization and corrosion performance of Inconel 625 weld overlay using hot wire pulsed TIG. *Rare Met. Mater. Eng.* 2016, 45(9), 2219-2226.
- [5] S.S. Sandhu and A.S.Shahi. Metallurgical, wear and fatigue performance of Inconel 625 weld claddings. *J. Mater. Process. Technol.*, 2016, 233, 1-8.
- [6] ASME SA-213/SA-213M. Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy-Steel Boiler, Superheater, and Heat Exchanger Tubes. The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2015, p. 314-326.
- [7] ASME Section II Part C: SFA-5.28. Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding. The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2015, p. 716-745.
- [8] ASME Section II Part C: SFA-5.14. Specification for Nickel and Nickel-Alloy Bare Welding Electrodes and Rods. The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2015, p. 397-421.
- [9] ASTM E407. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. ASTM standards, PA, United States, 2007, p. 1-23.
- [10] X Xing, X Di and B Wang. The effect of post-weld heat treatment temperature on the microstructure of Inconel 625 deposited metal. *J. Alloys Compd.* 2014; 593, 110-116.
- [11] ASTM A370. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. ASTM standards, PA, United States, 2014, p. 1-50.
- [12] M. Regev, S. Berger and B.Z. Weiss. Investigation of microstructure mechanical and creep properties of weldments between T91 and T22 steels. *Weld. J.* 1996, 75(8), 261s-268s.
- [13] C Sudha, VT Paul, ALE Terrance, S Saroja and M Vijayalakshmi. Microstructure and microchemistry of hard zone in dissimilar weldments of Cr-Mo steels. *Weld. J.* 2006; 85(4), 71s-80s.
- [14] BK Srivastava, SP Tewari and J Prakash. A review on effect of preheating and/or post weld heat treatment (PWHT) on mechanical behavior of ferrous metals. *Int. J. Eng. Sci. Technol.* 2010; 2(4), 625-631.
- [15] K Laha, KS Chadravathi, KBS Rao, SL Mannan and DH Sastry. An assessment of creep deformation and fracture behavior of 2.25Cr-1Mo similar and dissimilar weld joints. *Metall. Mater. Trans. A.* 2001; 32A, 115-124.

- [16] X Xiang, G Mi, L Chen, L Xiong, P Jiang, X Shao and C Wang. Research on microstructures and properties of Inconel 625 coatings obtained by laser cladding with wire. *J. Alloys Compd.* 2017; 715, 362-373.
- [17] JC Lippold and DJ Kotecki. *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*. John Wiley and Sons, New Jersey, 2005, p. 287-301.
- [18] H Cerjak and P Mayr. Creep Strength of Welded Joints of Ferritic Steels. *In: Abe F, Kern T and Viswanathan R (ed.) Creep Resistant Steels in 1st ed.* Woodhead Publishing Limited, Florida, 2008, p. 474-493.