



การศึกษาผลกระทบจากการปนเปื้อนออกซิเจนต่อการเปลี่ยนสีบริเวณรอยเชื่อมแนวรากท่อไทเทเนียมเกรด 2 ASTM B861 ด้วยการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุม

กฤษดา แก้วสุริวงษ์¹ ภูวิศ มีสันเทียะ¹ อำนาจ สอนวงษ์แก้ว¹ อติศักดิ์ อ่วมเปี่ยม²
ศิริพงศ์ ลัมพาทวิวัฒน์¹ และ ปรียสุทธิ์ วัฒนธรรม^{1*}

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเชื่อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² บริษัทไอเบล (ประเทศไทย) จำกัด

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: pariyasut@yahoo.com

วันที่รับบทความ: 22 กันยายน 2566 ; วันที่ทบทวนบทความ: 7 กุมภาพันธ์ 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 25 กรกฎาคม 2567
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 26 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ: การศึกษานี้ตรวจสอบการเปลี่ยนสีผิวของท่อไทเทเนียมจากการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุม (GTAW) โดยใช้มาตรฐาน Norsok M601:2016 เป็นแนวทางตรวจสอบ โดยการวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่ความแม่นยำของการตรวจสอบด้วยวิธีตรวจพินิจ โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์เพื่อตรวจสอบรอยเชื่อมรากภายในท่อ วัตถุประสงค์หลักเพื่อสร้างตารางอ้างอิงมาตรฐานสำหรับการประเมินการเปลี่ยนสีของท่อไทเทเนียมที่รอยเชื่อมรากด้านในท่อ โดยพิจารณาจากการตรวจสอบด้วยสายตาทั้งแบบใช้และไม่ใช้กล้องจุลทรรศน์ กำหนดกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุมภายใต้สภาวะความเข้มข้นของออกซิเจนในบรรยากาศอาร์กอนที่ 50, 100, 300, และ 700 ส่วนในล้านส่วน (ppm) นอกจากนี้ยังควบคุมความเร็วในการเชื่อมเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากความแตกต่างของค่าความร้อนเข้าสู่ชิ้นงาน เปรียบเทียบภาพที่ได้จากภายในท่อโดยการใช้กล้องส่องกับภาพของแนวเชื่อมด้านในท่อจากการตัดตามยาว ผลการวิจัยพบว่าภาพจากกล้องมีสีเข้มกว่าแต่ไม่ส่งผลกระทบต่อความถี่ความถี่ที่ความเข้มข้นของออกซิเจนที่เกินกว่า 100 ppm บริเวณรอยเชื่อมแนวรากมีการเปลี่ยนสีผิวอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในทุกความเร็วการเชื่อม

คำสำคัญ: ท่อไทเทเนียมเกรด 2; ความเข้มข้นของออกซิเจนในแก๊สรองหลัง; การเปลี่ยนสีที่ผิวหลังการเชื่อม; กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุม; กล้องจุลทรรศน์

The Study of the Effect of O₂ Contamination on Discoloration at Root Pass Welding of Titanium Grade 2 Pipe ASTM B 861 Using Gas Tungsten Arc Welding

Kitsada Kaewsuriwong¹, Phuwit Meesanthia¹, Umnad Sornwongkaew¹, Adisak Aumpiem²
Siripong Lumpapiwat¹ and Pariyasut Wattanathum^{1*}

¹ Department of Welding Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Aibel (Thailand) Co., Ltd

* Corresponding author, E-mail: pariyasut@yahoo.com

Received: 22 September 2023; Revised: 7 February 2024; Accepted: 25 July 2024

Online Published: 26 August 2024

Abstract: This study investigates the discoloration of as-welded titanium pipes using gas tungsten arc welding (GTAW) in accordance with the NORSOK standard M601:2016, which provides guidelines for welding and inspecting titanium piping. A key focus of this research centers on the precision of visual inspections, particularly when employing a borescope to examine the root weld within the pipe. The principal objective is to establish a standardized reference table for evaluating the discoloration of as-welded titanium pipes at the root, considering both visual inspections conducted with and without a borescope. The GTAW process was conducted under controlled conditions by deliberate manipulation of oxygen concentration in the Argon atmosphere, ranging from 50, 100, 300, to 700 parts per million (ppm). Furthermore, travel speed was regulated to create variations in heat input. A comparative analysis was conducted, contrasting images obtained inside the pipe using a borescope with images of the root after a lengthwise cut. The findings reveal that the images captured through the borescope exhibit darker shading; however, this divergence does not compromise the quality of interpretation. Notably, oxygen concentrations exceeding 100 ppm led to significant discoloration, rendering the material unsuitable for use at any travel speed.

Keywords: Titanium grade 2 pipe; oxygen concentration; discoloration; GTAW; borescope



1. บทนำ

การผลิตแท่นขุดเจาะน้ำมันจำเป็นต้องติดตั้งระบบการดับเพลิง โดยอุปกรณ์ดับเพลิงจะลำเลียงน้ำทะเลเพื่อดับเพลิงในกรณีเกิดเหตุฉุกเฉิน เพื่อความคงทนต่อการกัดกร่อน และอายุการใช้งานที่นานขึ้น วัสดุไทเทเนียมจึงถูกเลือกใช้เป็นตัวดับเพลิงบนแท่นขุดเจาะน้ำมัน [1, 2] อย่างไรก็ตามไทเทเนียมมีความไวต่อการเกิดการเปลี่ยนสีที่ผิวบริเวณรอยเชื่อม (Discoloration) หากควบคุมแก๊สปกคลุม (Shielding Gas) และแก๊สรองหลัง (Purging Gas) ไม่ดีพอ หรือมีการปนเปื้อนของแก๊สออกซิเจนสูงเกินกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนด [3, 4]

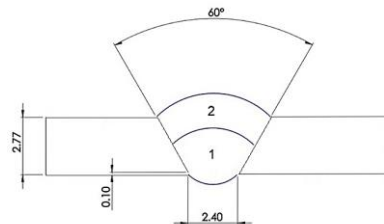
มาตรฐาน Norsok M-601 [5] กำหนดเกณฑ์การยอมรับการเปลี่ยนสีที่ผิวหลังการเชื่อมของวัสดุไทเทเนียมเกรด 1 และเกรด 2 ต้องได้รับการตรวจสอบด้วยสายตาทั้งภายนอก และภายใน ต้องเป็นไปตามเกณฑ์ดังนี้ 1. สีที่ยอมรับได้คือสีเงิน และสีฟางซีด 2. แถบสีเข้มที่ใกล้กับการป้องกันแก๊สเป็นที่ยอมรับได้ 3. ไม่ยอมรับสีน้ำตาลเข้ม สีม่วง สีน้ำเงิน สีเทา หรือสีขาวเป็นขุย โดยมีปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของผิวรอยเชื่อม [6] นอกจากนี้การตรวจสอบการเปลี่ยนสีบริเวณรอยเชื่อมด้านในท่อโดยใช้กล้องจุลทรรศน์จะเกิดข้อถกเถียงในการตีความเพื่อยอมรับหรือปฏิเสธการใช้งาน นำไปสู่การตัดผ่าท่อและทำการตรวจพิ นิจ โดยตรง (Direct Visual Inspection) เพื่อยืนยัน โดยพบว่าสีของรอยเชื่อมด้านในเป็นไปตามมาตรฐานแม้จะพบว่าสีเข้มกว่าเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์

ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการทดลองร่วมกับบริษัทไอเบล (ประเทศไทย) จำกัด โดยใช้ข้อกำหนดกรรมวิธีการเชื่อม (Welding Procedure Specification, WPS) No.P141-Ti-03 [7] ของบริษัทฯ มาเป็นแนวทางในการปฏิบัติงานเชื่อม เพื่อให้การผลิตชิ้นงานทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานและสามารถกำหนดตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนสีผิวบริเวณรอยเชื่อมด้านในท่อไทเทเนียมได้อย่างแม่นยำ โดยผู้วิจัยมีเป้าหมายที่จะสร้างตารางเปรียบเทียบการเปลี่ยนสีที่ผิวบริเวณรอยเชื่อมด้านในท่อไทเทเนียมตามมาตรฐาน Norsok M-601 โดยไม่ต้องทำการผ่าท่อตรวจยืนยัน เพื่อลดเวลาและค่าใช้จ่ายโดยในการตรวจสอบ

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมชิ้นงานทดลอง

วัสดุงานเป็นท่อไทเทเนียมเกรด 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มิลลิเมตร ความหนา 2.77 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร บากทำมุม 30 องศา ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยวัสดุงานและลวดเติมมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 และสมบัติทางกลของวัสดุงานจะแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 1 รายละเอียดการเตรียมรอยต่อ และชั้นเชื่อมตามข้อกำหนดการเชื่อม WPS No.P141-Ti-03 [7]



ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีไทเทเนียมเกรด 2 โดยน้ำหนัก (wt%) [8]

Grade	Ti	C	O	N	H	Fe
2	Bal.	0.08	0.25	0.03	0.015	0.30

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีวัสดุเติม ERTi-2 โดยน้ำหนัก (wt%) [8]

C	O	N	H	Fe
0.03	0.08-0.16	0.015	0.008	0.12

ตารางที่ 3 สมบัติทางกลของไทเทเนียมเกรด 2 [8]

Tensile Strength, min		Yield Strength				Elongation 2 in. or 50 mm
		Min.		Max.		Gage length, min%
ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	
50	345	40	275	65	450	20

2.2 การเตรียมอุปกรณ์

2.2.1 เครื่องเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสติกคูลม RILON TIG 300A (Down Slop) และอุปกรณ์การเชื่อมติดตั้งเข้ากับชุดถังแก๊สสติกคูลมอาร์กอนควบคุมด้วยชุดผสมแก๊ส (Gas mixer) เพื่อควบคุมปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนภายในท่อ

2.2.2 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน (Oxygen Analyzer) ORBITEC OXY-EVO

2.2.3 อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลสำหรับผู้ปฏิบัติงานเชื่อม

2.2.4 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบสัมผัส (Thermocouple R-type) สำหรับการวัดอุณหภูมิระหว่างเชื่อม

2.2.5 มัลติมิเตอร์ (Multimeter) สำหรับวัดค่าแรงดันอาร์กและกระแสไฟเชื่อม

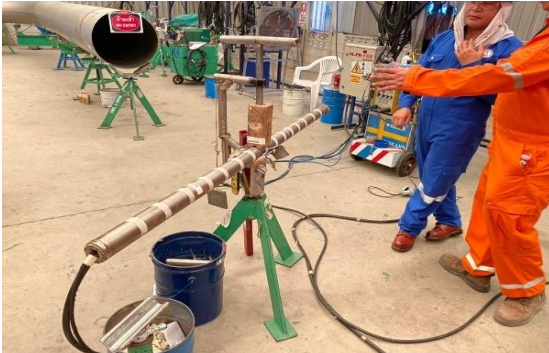
2.3 ขั้นตอนการเชื่อม

2.3.1 เช็ดทำความสะอาดรอยต่อชิ้นงานทดลองและลวดเชื่อมด้วยอะซิโตน (Acetone)

2.3.2 ทำการปล่อยแก๊สอาร์กอนเข้าภายในท่อและควบคุมปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนที่ 50, 100, 300 และ 700 ppm ด้วยชุดผสม (Gas mixture) โดยทำการวัดปริมาณออกซิเจนด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเข้มข้นของออกซิเจน (Oxygen Analyzer) โดยติดตั้งเซนเซอร์ในท่อให้อยู่ใกล้กับจุดที่ทำการเชื่อมมากที่สุด ดังรูปที่ 2

2.3.3 ในหนึ่งรอยต่อจะทำการเชื่อมทั้งหมด 2 แนว ประกอบด้วยแนวราก (Root Pass) และแนวทับหน้า (Cover Pass) โดยแนวรากจะควบคุมกระแสไฟไว้ที่ 63 แอมแปร์ แรงดันอาร์ก 10 โวลต์ และแนวทับหน้าจะควบคุมกระแสไฟไว้ที่ 80 แอมแปร์ แรงดันอาร์ก 10.8 โวลต์ คงที่ โดยทุกรอยต่อจะควบคุมความเร็วในการเชื่อมที่ความเร็วสูงและต่ำ ซึ่งจะหาได้จากกราฟจับเวลาในการเชื่อมที่ความยาวแนวเชื่อมเท่ากัน

2.3.4 ก่อนทำการเชื่อมต้องติดตั้งอุปกรณ์ปกคลุมแก๊ส (Trailer Shielding) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 การควบคุมบรรยากาศภายในท่อไทเทเนียม



รูปที่ 3 การเชื่อมแบบใช้มือ (Manual) ที่หัวเชื่อมต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์ปกคลุมแก๊ส (Trailer Shielding)

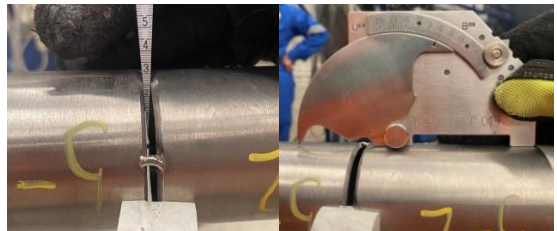
2.3.5 ทำการเชื่อมโดยรักษาอุณหภูมิระหว่างเชื่อม (Interpass Temperature) ที่ 65 องศาเซลเซียส

2.3.6 เมื่อเชื่อมจนถึงจุดหยุด (Stop Weld) ต้องรอให้อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส จึงหยุดการจ่ายแก๊สปกคลุม

2.4 การตรวจสอบคุณภาพงานเชื่อม

เพื่อให้การผลิตชิ้นงานทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานและสามารถกำหนดตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนสีผิวบริเวณรอยเชื่อมด้านในท่อไทเทเนียมได้อย่างแม่นยำ ผู้วิจัยได้แบ่งการตรวจสอบคุณภาพงานเชื่อมออกเป็นสามขั้นตอน คือ การตรวจสอบก่อนการเชื่อม การตรวจสอบระหว่างการเชื่อม และการตรวจสอบหลังการเชื่อม

2.4.1 เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดความแตกต่างในด้านองค์ประกอบของรอยต่อ ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบก่อนการเชื่อม โดยควบคุมรอยต่องานเชื่อมให้มีระยะห่างแนวร้าวคงที่และไม่มีค่าการเยื้องระหว่างชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4 (A) และ (B) ตามลำดับ



(A)

(B)

รูปที่ 4 การควบคุมองค์ประกอบของรอยต่อ: (A) การวัดระยะห่างแนวร้าว, (B) การวัดการเยื้องระหว่างชิ้นงาน

2.4.2 ขณะทำการเชื่อม ผู้วิจัยได้ทำการเฝ้าพินิจปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน ซึ่งเป็นเงื่อนไขหลักที่สร้างความแตกต่างต่อการเปลี่ยนสีผิวของท่อไทเทเนียมภายหลังการเชื่อม โดยปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนจะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 5% ตลอดการเชื่อม ดังแสดงในตารางที่ 4

2.4.3 ก่อนการตรวจพินิจภายในท่อด้วยกล้องงู ต้องทำการวัดค่าความส่องสว่างสามช่วงโดยห่างจากจุดที่จะทำการตรวจสอบ 10, 20, และ 30 มิลลิเมตร ได้ค่าความส่องสว่าง 1,335, 743, และ 445 ลักซ์ (Lux) ตามลำดับ จากนั้นทำการบันทึกภาพจากกล้องงูที่แสดงผลบนหน้าจอตั้งแสดงในรูปที่ 5



ตารางที่ 4 การควบคุมปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนภายในท่อ

OCC	Low Welding Speed	High Welding Speed
50 ppm		
100 ppm		
300 ppm		
700 ppm		
No control	ไม่มีรูปเพราะไม่ควบคุม	
	Joint 5L	Joint 5H

2.4.4 ตัดผ้าท่อไทเทเนียมเพื่อตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตาและบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัล โดยใช้เกณฑ์การตรวจสอบตามมาตรฐาน NORSOK M-601:2016 [5] ดังแสดงในรูปที่ 6

2.4.5 ตัดแนวเชื่อมตามขวาง ทำการขึ้นรูป (Mounting) เพื่อให้สะดวกต่อการจับขัดผิว (Polishing) ด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 120, 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1,200 1,500 และ 2,000 จากนั้นขัดมันด้วยผ้าสักหลาดร่วมกับผงอลูมิเนียมขนาด 0.25 ไมครอน ตามลำดับ



รูปที่ 5 การตรวจสอบในท่อด้วยกล้องงู



รูปที่ 6 ท่อไทเทเนียมที่ผ่านการตัดตามยาวเพื่อตรวจพินิจโดยตรงภายในท่อ

2.4.6 ทำการกัดกรด เพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) และโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ตามมาตรฐาน ASTM E470-99 [9] ใช้กรดไนตริก (HNO₃) 5 มิลลิลิตร (mL) กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 10 มิลลิลิตร และน้ำ 85 มิลลิลิตร เป็นเวลา 3-20 วินาที

3. ผลการทดลอง

3.1 การตรวจพินิจรอยเชื่อมแนวรากด้านในท่อด้วยกล้องงูและการตัดผ้าท่อ

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีผิวบริเวณแนวเชื่อมแนวรากและบริเวณข้างเคียงของชิ้นทดสอบที่มีค่าความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานและปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนแตกต่างกัน โดยใช้เกณฑ์การยอมรับของการตรวจพินิจตามมาตรฐาน NORSOK M-601: 2016 [5]



ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนที่ 50 ppm ภาพแสดงผลจากกล้องจุลทรรศน์แบบเชื่อมไม่มีการเปลี่ยนสี แต่มีแถบสีน้ำตาลอ่อนด้านข้างของรอยเชื่อม ขณะที่ภาพที่ได้จากท่อที่ทำการตัดผ่าโดยบันทึกภาพผ่านกล้องดิจิทัลแสดงให้เห็นถึงแถบสีม่วงอ่อน โดยที่ชั้นทดสอบที่ผ่านการเชื่อมด้วยความเร็วในการเชื่อมต่ำ จะเกิดแถบสีน้ำตาลในเขตที่เชื่อมและมีพื้นที่ที่กว้างกว่า การเชื่อมด้วยความเร็วสูง เมื่อปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนเพิ่มขึ้นเป็น 100 ppm ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสดงผลว่าไม่เกิดการเปลี่ยนสีที่บริเวณแนวเชื่อม แต่ด้านข้างแนวเชื่อมจะเกิดแถบสีฟ้าอ่อน ซึ่งตรงกับภาพดิจิทัลที่ได้จากการตัดผ่าท่อ โดยความกว้างของแถบสีที่เกิดด้านข้างแนวเชื่อมมีขนาดแคบลงเมื่อเพิ่มความเร็วในการเชื่อม ผลการตรวจพินิจชิ้นงานตามมาตรฐานฯ ภายใต้ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ 50 และ 100 ppm คือยอมรับการใช้งาน (Accept)

ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน 300 ppm ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบเชื่อมที่แนวเชื่อมร่วมกับแถบสีน้ำตาลที่ด้านข้างแนวเชื่อม แต่ภาพถ่ายดิจิทัลของการผ่าชิ้นตัวอย่างพบว่าการเปลี่ยนสีที่บริเวณแนวเชื่อมเป็นสีน้ำตาลผสมสีม่วงเป็นแถบกว้าง ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนที่ 700 ppm ภาพแสดงผลจากกล้องจุลทรรศน์ที่บริเวณรอยเชื่อมเป็นสีน้ำตาล และสีน้ำเงิน ในขณะที่ภาพถ่ายดิจิทัลของการผ่าชิ้นตัวอย่างพบว่าการเปลี่ยนสีที่บริเวณแนวเชื่อมเป็นสีน้ำตาลเข้ม และน้ำเงินเข้ม ผลการตรวจพินิจชิ้นงานตามมาตรฐานฯ ภายใต้ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ 300 และ 700 ppm คือไม่ยอมรับการใช้งาน (Reject)

ในกรณีที่ไม่ทำการใช้แก๊สรองหลัง (No control) ภาพแสดงผลจากกล้องจุลทรรศน์ และจากภาพถ่ายดิจิทัล บริเวณรอยเชื่อมมีสีขาวเป็นขุยและขอบด้านข้างรอยเชื่อมมีแถบสีน้ำเงินและสีน้ำตาล ผลการตรวจพินิจชิ้นงานตามมาตรฐานฯ คือไม่ยอมรับการใช้งาน

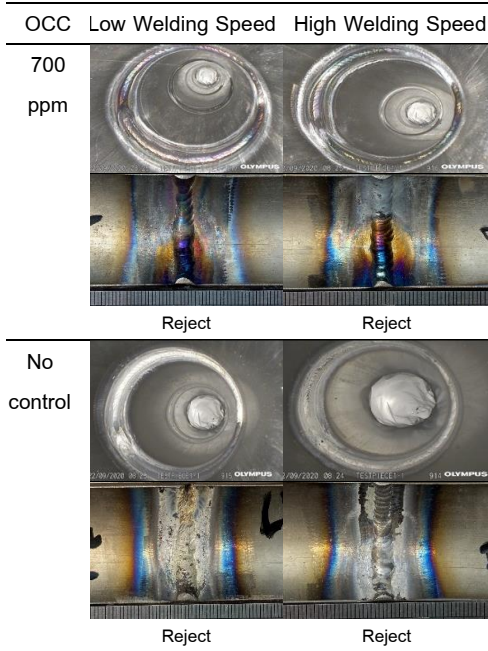
ตารางที่ 5 เปรียบเทียบการเปลี่ยนสีบริเวณรอยเชื่อมแนวรากภายในท่อจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์และภาพถ่ายดิจิทัลภายในท่อที่ทำการตัดผ่า

	OCC	Low Welding Speed	High Welding Speed
50 ppm			
	Accept	Accept	Accept
100 ppm			
	Accept	Accept	Accept
300 ppm			
	Reject	Reject	Reject

*Oxygen Concentration Content



ตารางที่ 5 (cont.)



*Oxygen Concentration Content

ตารางที่ 6 ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) กรณีความเร็วในการเชื่อมต่ำ

Speed	joint	Position	Time (min)	Welding Speed (mm/min)	Heat Input (kJ/mm)
Low Welding Speed	1L (50 ppm)	Root Pass	4.22	44.88	0.50
		Cover Pass	3.14	60.32	0.51
	2L (100 ppm)	Root Pass	4.34	43.64	0.51
		Cover Pass	3.21	59.01	0.52
	3L (300 ppm)	Root Pass	4.28	44.25	0.51
		Cover Pass	3.39	55.87	0.55
	4L (700 ppm)	Root Pass	3.16	59.94	0.37
		Cover Pass	2.55	74.28	0.41
	5L (No Control)	Root Pass	3.29	57.57	0.39
		Cover Pass	3.05	62.10	0.50

3.2 ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input)

ผลที่ได้จากการตรวจพินิจด้วยกล้องจุลทรรศน์และตัดผ่าท่อนแสดงให้เห็นถึงความหนาของแถบสีด้านข้างแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน เพื่อพิจารณาความแตกต่างในเชิงปริมาณ ผู้วิจัยได้คำนวณปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานตามมาตรฐาน BS EN 1011-1:1998 [10] โดยใช้สมการที่ (1) กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ทางความร้อนคงที่ 0.6 เนื่องจากใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสตีลเพื่อแสดงผลเปรียบเทียบค่าปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานจากการใช้ความเร็วเชื่อมต่ำและสูง ดังแสดงในตารางที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

$$Heat\ Input(kJ/mm) = k \frac{V \times A \times 60}{Welding\ Speed \times 1,000} \quad (1)$$



ตารางที่ 7 ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) กรณีความเร็วในการเชื่อมสูง

Speed	joint	Position	Time (min)	Welding Speed (mm/min)	Heat Input (kJ/mm)
High Welding Speed	1H (50 ppm)	Root Pass	3.41	55.55	0.40
		Cover Pass	3.00	63.14	0.49
	2H (100 ppm)	Root Pass	3.14	60.32	0.37
		Cover Pass	2.38	79.59	0.39
	3H (300 ppm)	Root Pass	2.52	75.17	0.30
		Cover Pass	2.16	87.69	0.35
	4H (700 ppm)	Root Pass	2.39	79.25	0.28
		Cover Pass	2.19	89.49	0.35
	5H (No Control)	Root Pass	2.32	81.65	0.27
		Cover Pass	2.33	81.30	0.38

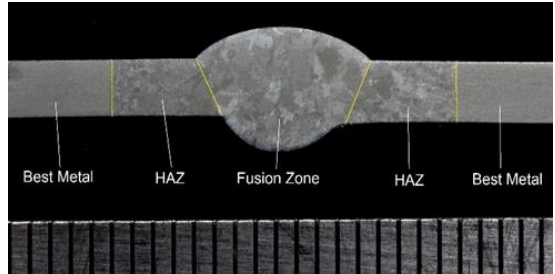
3.3 ภาพถ่ายโครงสร้างมหภาค (Macro Structure)

ผลการถ่ายภาพโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมท่อไทเทเนียม เกรด 2 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างบริเวณกระแทกร้อน และบริเวณหลอมละลาย ดังแสดงในรูปที่ 7

3.4 โครงสร้างจุลภาค (Micro Structure)

ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณวัสดุฐานแสดงถึงโครงสร้างพื้นฐานของไทเทเนียมเกรด 2 ที่มีลักษณะเกรนแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Equiaxed α) หรืออัลฟาเฟส (Alpha Phase) และมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซาโกนอล (Hexagonal Close-Packed: HCP) [11] ดังแสดงในรูปที่ 8

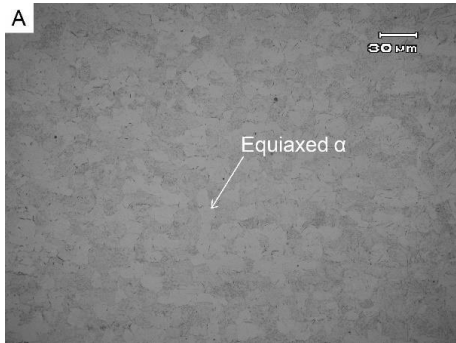
ขณะที่บริเวณได้รับผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อมพบว่าเกรนมีลักษณะใหญ่ขึ้นและมีโครงสร้างผลึกเป็นบอดีเซนเตอร์คิวบิก (Body-Centered Cubic: BCC) ซึ่งเรียกว่าเบต้าเฟส (Beta phase)



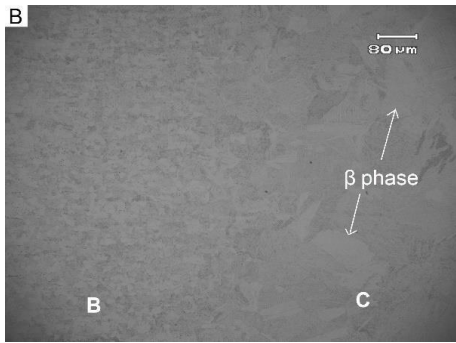
รูปที่ 7 ภาพถ่ายโครงสร้างมหภาค (Macro Structure) ของรอยเชื่อมท่อไทเทเนียม เกรด 2

โดยเงื่อนไขที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นเบต้าเฟสคือต้องได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิที่สูงกว่า 915 องศาเซลเซียส [11] ดังแสดงในรูปที่ 9

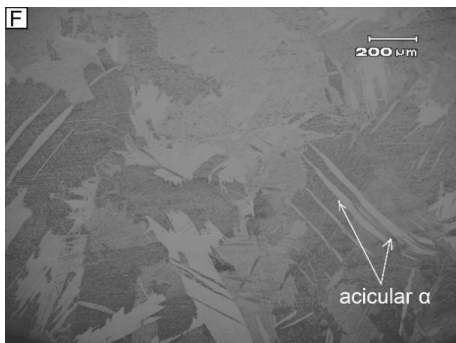
โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณเนื้อเชื่อมด้วยลวดเชื่อม AWS ERTi-2 โครงสร้างจะเป็นเบต้าเฟส และอัลฟาเฟส โดยแถบของอัลฟาแบบเข็มจะเป็นแผ่นขนาดใหญ่กว่าที่ปรากฏในบริเวณกระแทกร้อนเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีอัตราการเย็นตัวช้าที่สุด ดังรูปที่ 10



รูปที่ 8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณวัสดุงานกำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 9 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคระหว่างบริเวณวัสดุ (B) และพื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (C) กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 10 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่หลอมละลาย กำลังขยาย 100 เท่า

4. การอภิปรายผล

ระดับความเข้มข้นของออกซิเจนในบรรยากาศอาร์กอน ส่งผลอย่างชัดเจนต่อการเปลี่ยนสีภายหลังการเชื่อม จากสีน้ำตาล เพิ่มเป็นสีน้ำเงินและสีม่วง โดยจะมีเฉดสีที่เข้มขึ้น และความกว้างของแถบสีที่มากขึ้นในบางตำแหน่งเมื่อความเร็วในการเชื่อมลดลง โดยสาเหตุที่เกิดการเปลี่ยนเป็นสีที่แตกต่างกันนั้น เกิดจากที่อุณหภูมิเผาไหม้ของออกซิเจนบริสุทธิ์มีค่าประมาณ 600 องศาเซลเซียส และจะแพร่เข้าสู่ไทเทเนียมเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ผิวของไทเทเนียมหลุดออกในรูปของผงหรือเศษโลหะ [10] ดังนั้นจึงต้องควบคุมปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนให้ต่ำกว่า 100 ppm และต้องมีการปกคลุมแก๊สเอาไว้ที่จุดหยุดเชื่อมจนกว่าโลหะงานมีอุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส

เพื่อให้ผลการตรวจพินิจผ่านตามมาตรฐานฯ ยอมรับการใช้งาน การตรวจสอบภายในท่อไทเทเนียมจริงผ่านกล้องที่แม้จะให้เฉดสีที่คล้ำแต่เมื่อพิจารณาร่วมกับตารางเปรียบเทียบที่ผู้วิจัยจัดทำขึ้น ช่วยลดเวลาและลดการผ่าพิสูจน์ เป็นการเพิ่มความสามารถในการผลิตและลดค่าใช้จ่ายของการตรวจสอบอย่างมาก

อย่างไรก็ตามค่าความเร็วในการเชื่อมที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดยังอยู่ในช่วงที่ข้อกำหนดกรรมวิธีการเชื่อม No.P141-Ti-03 [7] กำหนดไว้ กล่าวคือจะมีสมบัติของเนื้อเชื่อมไม่แตกต่างกันมากนักเพราะต้องได้ผลลัพธ์อยู่ในช่วงการยอมรับเดียวกัน และเมื่อพิจารณาร่วมกับการเปลี่ยนสีผิวภายหลังจากการเชื่อมพบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนเดียวกันที่ความเร็วในการเชื่อมไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนเฉดสีอย่างมีนัยสำคัญ จึงกล่าวได้ว่าค่าความเข้มข้นของ



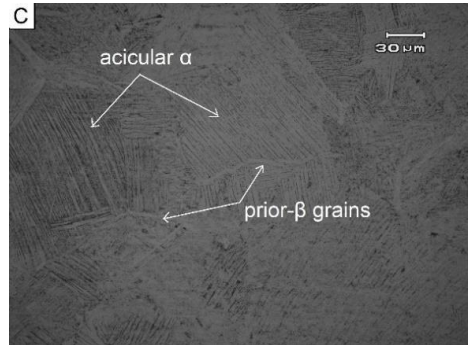
ออกซิเจนและคุณภาพของการควบคุมบรรยากาศ การเชื่อมส่งผลโดยตรงต่อการเกิดการเปลี่ยนสีผิว ภายหลังการเชื่อม

นอกจากนี้ ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค บริเวณกระแทกร้อนที่เกิดการเปลี่ยนสี พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงจากอัลฟาเฟสเป็นเบต้าเฟสเกรนใหญ่ เป็นผลมาจากได้รับผลกระทบจากความร้อนที่เกินกว่า 915 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังเกิดโครงสร้างอัลฟาเฟส แบบเข็ม (acicular α) ในเบต้าเมทริกซ์ (β matrix) ถัดจากขอบเกรนของเฟสเบต้าก่อนหน้า (Prior- β grains) [12] ดังแสดงในรูปที่ 11, 12 และ 13 ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างข้างต้นเกิดขึ้นกับทุกสภาวะ การเชื่อมในการทดลอง แม้ว่าจะมีปริมาณความเข้มข้น ของออกซิเจนแตกต่างกัน

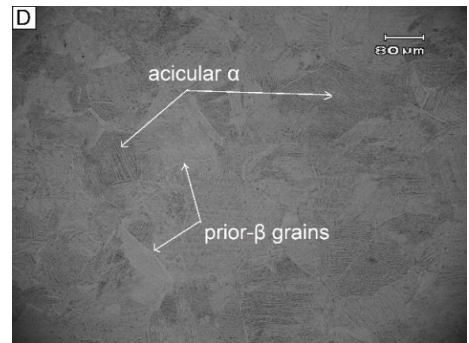
5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาการเปลี่ยนสีบริเวณรอยเชื่อมแนวราบ ท่อไทเทเนียม เกรด 2 ASTM B861 ด้วยการเชื่อม อาร์กทั้งสแตนแก๊สปกคลุมที่ออกแบบและควบคุมการ ทดลองร่วมกับ บริษัท ไอเบล (ประเทศไทย) จำกัด โดยใช้ข้อกำหนดกรรมวิธีการเชื่อม (Welding procedure specification, WPS) No.P141-Ti-03 [7] ของบริษัทฯ มาเป็นแนวทางในการปฏิบัติงานเชื่อม สามารถกำหนดตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนสี ผิวบริเวณรอยเชื่อมด้านในท่อไทเทเนียมได้อย่าง แม่นยำ โดยผลการศึกษาสามารถสรุปเป็นข้อได้ดังนี้

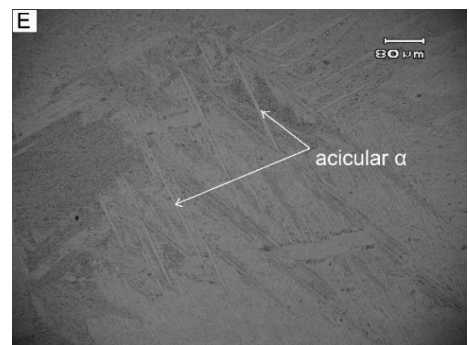
- ผู้วิจัยสามารถสร้างตารางเปรียบเทียบการ เปลี่ยนสีที่ผิวบริเวณรอยเชื่อมด้านในท่อไทเทเนียม ตามมาตรฐาน NORSOK M-601 โดยไม่ต้องทำการ ผ่าท่อตรวจยืนยัน



รูปที่ 11 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 12 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 13 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน กำลังขยาย 200 เท่า



- แนวเชื่อมที่ควบคุมปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนที่น้อยกว่า 100 ppm ให้ผลจากตรวจสอบที่ยอมรับได้

- แนวเชื่อมที่มีปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนเกินกว่า 100 ppm ให้ผลการตรวจสอบที่ไม่สามารถยอมรับได้ และเกิดการเปลี่ยนสีเนื่องมาจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะที่ไทเทเนียมได้รับความร้อนสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ทำให้ผิวโลหะหลุดออกในรูปของผงหรือเศษโลหะไททาเนียม

- แนวเชื่อมที่มีปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนสูงจะเกิดการเปลี่ยนเฉดสีหลังจากการเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าค่าความร้อนเข้าสู่ชิ้นงาน

- เมื่อหยุดเชื่อมยังต้องคงสภาวะอาร์กอนไว้จนกว่าอุณหภูมิจะลดลงต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส เพื่อลดโอกาสในการเปลี่ยนสีภายหลังการเชื่อม

- ไม่พบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและการเปลี่ยนสีที่ผิวต่อไทเทเนียมภายหลังการเชื่อม

6. แนวทางการวิจัยในอนาคต

การสร้างมาตรฐานในการตรวจพินิจผ่านกล้องจุลทรรศน์เป็นก้าวแรกสู่การสร้างระบบการตรวจพินิจแบบอัตโนมัติ ในขั้นต่อไปผู้วิจัยมุ่งหวังจะรวบรวมผลการตรวจพินิจเพื่อสร้างคลังข้อมูลเพื่อใช้ระบบสมองกลในการประเมินผล และสร้างรายงานการผลตรวจสอบเพื่อยอมรับ หรือปฏิเสธการใช้งานโดยอัตโนมัติ

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ เครื่องจักร สถานที่ รวมถึงบุคลากรในการดำเนินการทดลองจากบริษัทไอเบล (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัททีไลน์คอนสตรัคชั่น จำกัด

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] I.V. Gorynin, Titanium alloys for marine application, Materials Science and Engineering, 1999, 263(2), 112-116.
- [2] D.A. Shifler, Marine and offshore piping systems, LaQue's Handbook of Marine Corrosion, 2002, 667-689.
- [3] S. Min, S. An, J. Park, Y. Park and N. Kang, Effects of GTAW pulse condition on penetration, discoloration and bending property for titanium tube, Journal of Welding and Joining, 2014, 32(6), 583-591.
- [4] R.W. Erskine, Design, fabrication, installation, and operation of titanium seawater piping systems, Journal of Ship Production, 1997, 13(04), 270-289.
- [5] NORSOK Standard M-601: Welding and Inspection of Piping, 2016.
- [6] S. Lathabai, B.L. Jarvis and K.J. Barton, Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium, Materials Science and Engineering, 2001, 299(1-2), 81-93.
- [7] WPS No. P141-Ti-03, IBEL Thailand, 2019.
- [8] ASME BPVC Section II Part B, Nonferrous Material Specification, 2019.



- [9] ASTM E407-99, Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, 1999.
- [10] BS EN1011-1, Welding Recommendations for Welding of Metallic Materials, Part 1: General Guidance for Arc Welding, 1998.
- [11] Metallography and microstructures, ASM handbook, ASM International, MI, USA, 1985.
- [12] G. Lutjering, J.C. Williams, and A. Gysler, Microstructure and mechanical properties of titanium alloys, Lawrence Berkeley National Laboratory, CA, USA, 2003, 6-10.