

**สมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อม
อาร์คทั้งสแตนเลสสเปคคูลระหว่างวัสดุเหล็ก A335 P11 และ A312 TP304**
**Mechanical properties and Microstructure of GTAW Welded Joints Between
A335 P11 and A312 TP304**

ธารา มีทรัพย์นิคม*, วันเฉลิม จันทร์หนู, ศิริวัฒน์ งามนางนาค, ศราวุฒิ คำลา และ ทศพร แสงสกุล
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

248 ซอย เพชรเกษม 110 แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160

Thara Meesapnikhom*, Wanchalrem Channu, Siriwat Ngamnangnak, Sarawut khamla
and Todsaporn Sangsakul

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University,
248 Soi Phetkasem 110, Nong Khang Phlu Subdistrict, Nong Khaem District, Bangkok 10160, Thailand

*Corresponding author Email: Thara85210@gmail.com

(Received: June 17, 2025 / Revised: June 27, 2026 / Accepted: June 28, 2026)

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมเหล็ก A335 P11 และ A312 TP304 สำหรับท่อขนาด 3 นิ้ว ยาว 13 ซม. หนา 5.54 มม. ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสเปคคูล (Gas Tungsten Arc Welding; GTAW) โดยใช้ลวดเชื่อม SMT-625 (ER NiCrMo-3) เครื่องเชื่อมแบบอาร์กอน RILON TIG 200S กระแสไฟเชื่อม 120 A ความเร็วเชื่อม 13.7 มม./นาที ปริมาณการไหลของแก๊สสเปคคูล 16 ลิตร/นาที ทำการทดสอบสมบัติทางกลและตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ผลการทดลองพบว่าลักษณะการซึมลึกและการหลอมละลายระหว่างเนื้อเชื่อมกับ โลหะงานสม่ำเสมอ และมีความสมบูรณ์ระหว่างเนื้อเชื่อมและโลหะงาน ความกว้างของเขตบริเวณอิทธิพลทางความร้อนของกระบวนการเชื่อมใกล้เคียงกัน และไม่มีจุดบกพร่องของแนวเชื่อม รอยเชื่อมมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 675 MPa และมีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 230.4 HV การทดสอบแรงกระแทกพบว่าพลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) ของวัสดุ A312 TP304 มีความเหนียวที่ดีกว่าบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) ของวัสดุ A335 P11 ผลการทดสอบการดัดโค้งบริเวณรอยเชื่อมเมื่อทำการดัดโค้งจนถึงมุมโค้ง 180° และทำการตรวจสอบด้วยสายตาไม่พบรอยร้าวของชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมด นั้นแสดงให้เห็นว่ากระบวนการเชื่อมขึ้นงานทั้งหมดนี้มีคุณภาพเป็นที่น่าพอใจและเป็นแนวทางในการเลือกใช้กระบวนการเชื่อมนี้สำหรับการนำไปใช้งานเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่เหมาะสม

คำสำคัญ: กระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสเปคคูล, สมบัติเชิงกล, โครงสร้างจุลภาค

Abstract

This study aimed to determine the mechanical properties and metallurgical structure of welded joints of A335 P11 and A312 TP304 steel for pipe size 3 inches, length 13 cm., thickness 5.54 mm. by gas tungsten arc GTAW method using filler metals SMT-625 (ER NiCrMo-3), RILON TIG 200S argon welding machine, welding current 120 A, welding speed 13.7 mm/min, shielding gas flow volume 16 liters/min. Perform mechanical property tests and metallurgical structures. The results of the experiment found that characteristics of deep penetration and melting between the weld metal and consistent fusion and there is sound metallurgical bonding and the work metal. The width of the thermal influence zone of the welding process is similar and there are no defects in the welding line. The gas tungsten arc welding process will produce an average maximum tensile strength of 675 MPa and an average maximum hardness of 230.4 HV. Impact tests have found that the average energy absorbed in the HAZ (A312 TP304) has better toughness than the HAZ (A335 P11) and the weld metal. Bending test results when bending to an angle of 180° and visual inspection did not reveal surface cracks in all specimens. It can be concluded

that the welding processes in all these workpieces were of satisfactory quality and will serve as a guideline for selecting welding processes for applications to achieve optimum performance.

Keywords: Gas Tungsten Arc Welding, Mechanical Properties, Microstructure

1. บทนำ

หม้อไอน้ำคือภาชนะความดันปิดที่ใช้สำหรับให้ความร้อนกับน้ำหรือของเหลวอื่นๆ ภายในภาชนะปิดสนิท โดยไอน้ำเกิดจากน้ำที่ได้รับการถ่ายเทความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจนกระทั่งกลายเป็นไอ หม้อไอน้ำขนาดใหญ่ส่วนมากมักถูกนำไปใช้ในกระบวนการต่างๆ สำหรับอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์และสาธารณูปโภค เช่น วัสดุแปรรูป และการผลิตไฟฟ้า ขนาดและความซับซ้อนของหม้อไอน้ำอาจแตกต่างกันอย่างมาก ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดการใช้งาน [1] โลหะที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตหม้อไอน้ำคือ A335 P11 และ A312 TP304 ซึ่งมีความสามารถในการเชื่อมได้ดี ทนต่อการกัดกร่อน ทนความร้อน คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้เป็นโลหะผสมที่คุ้นเคยและใช้บ่อยที่สุด

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสมบัติทางโลหะวิทยาและเชิงกลของรอยเชื่อมมีมากมายดังนี้ Rakesh Chaudhari และ Asha Ingle [2] ได้ทำการศึกษารอยเชื่อมของโลหะต่างชนิดระหว่าง SA335 P11 และ SA312 TP304 ที่เกิดจากการเชื่อมโลหะด้วยก๊าซเฉื่อย (MIG) ดำเนินการตรวจสอบโดยใช้การทดสอบแรงดึง การวัดความแข็ง และการสังเกตโครงสร้างจุลภาค ผลการทดลองพบว่าความแข็งแรงในการดึงที่วัดได้ต่ำกว่าในรอยเชื่อม MIG เมื่อเทียบกับโลหะพื้นฐาน พบว่าบริเวณแนวเชื่อมมีความแข็งแรงที่สูงกว่าบริเวณโลหะพื้นฐานเนื่องจากการก่อตัวของคาร์ไบด์ในบริเวณแนวเชื่อม ความแข็งแรงของแนวเชื่อมยังคงไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากการอบด้วยความร้อน ในขณะที่ความแข็งเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ที่ขอบเกรน Vipin Tandon และคณะ [3] ได้ทำการทดลองวิธีการเชื่อมด้วยก๊าซทั้งสแตนอาร์กเพื่อเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม 201 และ 316L โดยใช้โลหะเติมชนิดต่างๆ คือ 316L, 309L และ 309LMO ผลการทดลองพบว่ารอยเชื่อมทั้งหมดมีลักษณะการแตกหักแบบเหนียว นอกจากนี้ ยังพบการความไวในการแข็งตัวที่สูงกว่าในการเชื่อมด้วยโลหะเติม 309LMO โดยการเชื่อมด้วยโลหะเติม 309L และ 316L ก็เกิดปรากฏการณ์ที่เหมือนกัน ซึ่งเกิดจากปริมาณเฟอร์ไรต์ที่เพิ่มสูงขึ้น ปริมาณเฟอร์ไรต์ที่สูงขึ้นส่งผลให้มีบริเวณอินเทอร์เฟสของเฟอร์ไรต์/ออสเทนไนต์มากขึ้น และยังส่งผลให้ความไวต่อโลหะเติมมากขึ้น

การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่หาสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding; GTAW) โดยใช้ลวดเชื่อม SMT-625 (ER NiCrMo-3) ที่มีผลต่อเหล็ก A335 P11 และเหล็กกล้าไร้สนิม A312 TP304 เพื่อเลือกกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับรอยเชื่อมของวัสดุทั้ง 2 ชนิดดังรูปที่ 1 ซึ่งจะทำการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค และจุลภาค การตรวจสอบแรงดึง และการตรวจสอบความแข็ง ในขั้นตอนสุดท้ายมีการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง



รูปที่ 1 ลักษณะชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อมของท่อสำหรับวัสดุ A335 P11 และ A312 TP304 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สปกคลุม

2. ขั้นตอนการดำเนินงาน

การเชื่อมระหว่างวัสดุ 2 ชนิด ได้แก่ เหล็ก A335 P11 และเหล็กกล้าไร้สนิม A312 TP304 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding หรือ GTAW) โดยใช้ลวดเชื่อม SMT-625 (ER NiCrMo-3) แสดงวัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ ดังนี้

1) วัสดุทดสอบ

วัสดุที่ใช้สำหรับเชื่อมเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้งานท่อไฟของหม้อน้ำมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 3 นิ้ว ยาว 13 ซม. หนา 5.54 มม. โดยวัสดุเชื่อมเป็นเหล็ก ASTM A335 P11 ดังแสดงส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 และ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด A312 TP304 ดังแสดงส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กท่อ ASTM A335 P11 [4]

Materials	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
A335 P11	0.05-0.15	0.30-0.60	≤ 0.025	≤ 0.025	0.50-0.10	1.00-1.50	0.44-0.65

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กท่อ ASTM A312 TP 304 [5]

Materials	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
A312 TP304	≤ 0.080	≤ 2.00	≤ 1.00	≤ 0.045	≤ 0.030	18.0-20.0	8.0-11.0

2) เครื่องเชื่อมที่ใช้สำหรับทดลอง เป็นอาร์กอน รุ่น TIG 200S ยี่ห้อ RILON กระแสเชื่อม 120 แอมแปร์ เป็นเชื่อม TIG ระบบเดียวซึ่งเหมาะสำหรับการเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าคาร์บอน

3) ลวดเชื่อม เป็นลวดเชื่อมชนิด SMT-625 (ER NiCrMo-3) ซึ่งถูกเลือกใช้ในการเชื่อมที่มีความเหมาะสมกับวัสดุทดลองเชื่อมทั้ง 2 ชนิด ซึ่งส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 3 และรายละเอียดเงื่อนไขที่ใช้ในการเชื่อม ดังแสดงในตารางที่ 4

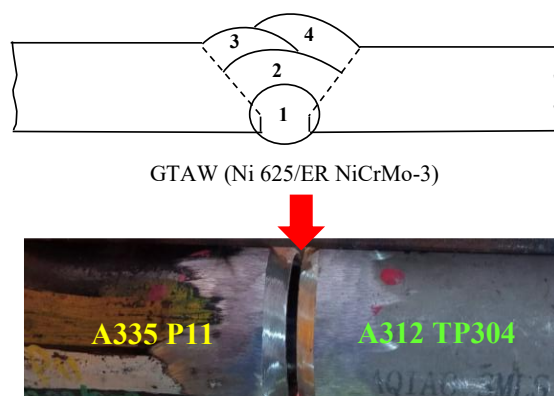
ตารางที่ 3 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม SMT-625 (ER NiCrMo-3) [6]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb+Ta
0.02	0.20	0.03	0.006	0.001	22.0	64.0	9.00	3.60

ตารางที่ 4 เงื่อนไขการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สปกคลุม (GTAW)

ชนิดลวดเชื่อม	Ni 625/ER NiCrMo-3
ขนาดลวดเชื่อม /หรือเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	2.4
แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	14
กระแสเชื่อม (แอมแปร์)	120
ความเร็วในการเชื่อม (มม./นาที)	13.7
ปริมาณการไหลของแก๊สปกคลุม (ลิตร/นาที)	16 (Argon)

2.4 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ สำหรับศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อมระหว่างเหล็ก ASTM A335 P11 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด A312 TP304 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สปกคลุม (GTAW) ตามมาตรฐาน AWS D1.1 โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง ซึ่งถูกกำหนดรอยต่อและลำดับการเชื่อมแต่ละแนว แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเตรียมชิ้นงานและการกำหนดลำดับการเชื่อมตามกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคคูลม (GTAW)

2.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

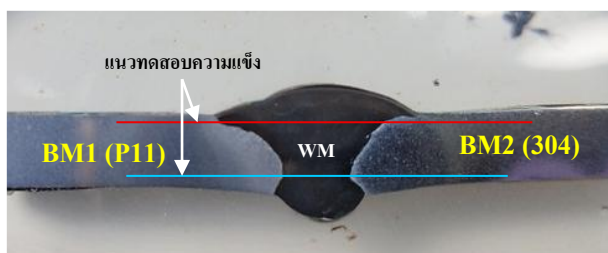
รอยเชื่อมที่ถูกเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคคูลม (GTAW) ระหว่างวัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ เหล็ก ASTM A335 P11 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด A312 TP304 ถูกตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาควิเคราะห์ความกว้างและความสูงของรอยเชื่อม ลักษณะการซึมลึกของรอยเชื่อม และจุดบกพร่องของแนวเชื่อมหรือภายในรอยเชื่อม และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในกระบวนการเชื่อม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light microscope) เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาควิเคราะห์เนื้อโลหะเดิม (Base metal: BM) บริเวณแนวเชื่อม (Weld metal zone: WM) และบริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) และ ตามมาตรฐาน ASTM E340 และ E407

2.6 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

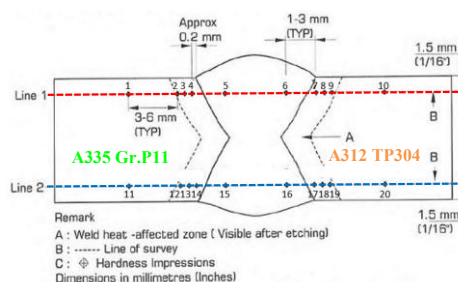
ชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อมถูกทดสอบแรงดึงเพื่อหาสมบัติทางกลของรอยเชื่อม โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ INSTRON รุ่น 8801 ขนาด 10 ตัน โดยทำการทดสอบตามยาวของเนื้อโลหะเชื่อม (Weld Metal) ตามมาตรฐาน ASTM E8M-22

2.7 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

ชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อมถูกทดสอบความแข็งของรอยเชื่อมด้วยการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง SHIMADZU รุ่น HMV-G ตามมาตรฐาน ASTM E3-11 ใช้แรงกด 200 kgf เวลาทดสอบ 15 วินาที เพื่อเปรียบเทียบความแข็งบริเวณแนวเชื่อม บริเวณกระทบร้อน และบริเวณโลหะงาน ตามลำดับ การเตรียมชิ้นงานทดสอบและตำแหน่งการทดสอบความแข็งของรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 3



(ก) แนวทดสอบความแข็ง



(ข) ตำแหน่งการทดสอบความแข็ง

รูปที่ 3 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็ง

2.9 การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Impact Test)

ชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อมถูกทดสอบความต้านทานแรงกระแทกด้วยการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact Test) เพื่อประเมินค่าความเหนียวหรือวัดค่าพลังงานที่ดูดซับไว้ของวัสดุทดสอบ โดยกำหนดลักษณะของชิ้นงานทดสอบที่ถูกกำหนดตามมาตรฐาน ASTM A370-21 จำนวน 3 ชิ้นตัวอย่าง/ต่อหนึ่งจุดทดสอบของรอยเชื่อมที่ได้จากชิ้นงาน

ตัวอย่าง บริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) บริเวณกระทบร้อน (HAZ) A335 Gr.P11 และ บริเวณกระทบร้อน (HAZ) A312 TP304 แสดงตัวอย่างชิ้นงานทดสอบดังในรูปที่ 4



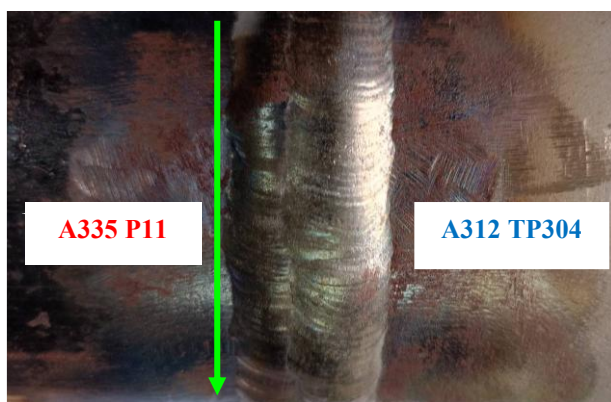
รูปที่ 4 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบการกระแทก

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม

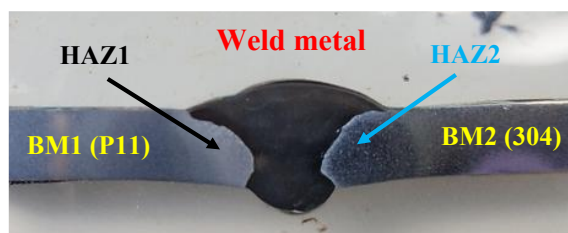
3.1.1 ผลการตรวจสอบทางกายภาพ ลักษณะทางกายภาพของรูปร่างแนวเชื่อมดังรูปที่ 5 การเกิดเม็ดโลหะบริเวณของ ชิ้นงาน ลักษณะผิวหน้าของแนวเชื่อม การซึมลึก การหลอมละลาย ระหว่างชั้นของเนื้อเชื่อมกับโลหะงาน ความกว้างบริเวณเขตอิทธิพลทางความร้อน และจุดบกพร่องของแนวเชื่อม พบว่ากระบวนการเชื่อมแบบ GTAW เกร็ดแนวเชื่อมมีความเรียบสม่ำเสมอ ลักษณะการซึมลึกและการหลอมละลายระหว่างเนื้อเชื่อมกับ โลหะงานสม่ำเสมอ และมีความสมบูรณ์ระหว่างเนื้อเชื่อมและโลหะงานความกว้างของบริเวณอิทธิพลทางความร้อนของกระบวนการเชื่อมใกล้เคียงกัน และไม่มีจุดบกพร่องของแนวเชื่อม

Welding direction

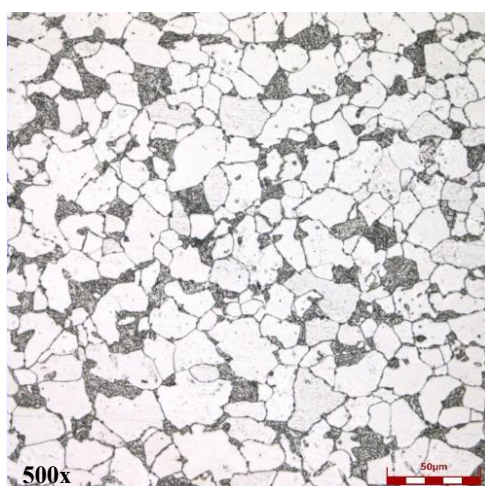


รูปที่ 5 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างมหภาค

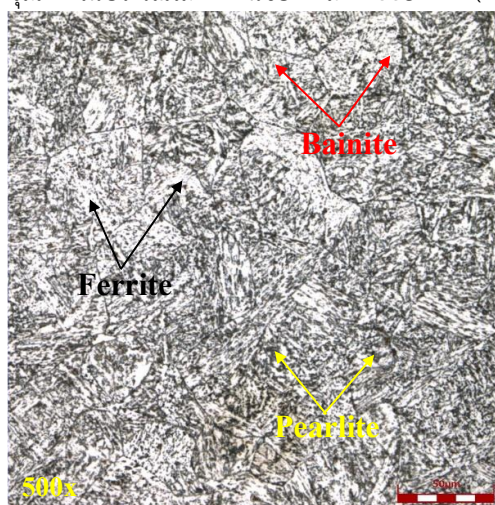
3.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลภาคแบบใช้แสง (OM) รูปที่ 6 จะเป็นภาพตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบทั้ง 5 จุด รูปที่ 7 เป็นภาพบริเวณเนื้อโลหะงานของเหล็ก A335 P11 (Base metal: BM1) ที่กำลังขยาย 500 เท่า 50 μm โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ รวมถึงเบนไนต์และคาร์ไบด์ที่เป็นเม็ดเล็กๆ จำนวนเล็กน้อย [2] รูปที่ 8 เป็นภาพในบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อนต่อการเชื่อมของท่อเหล็ก ASTM A335 P11 (Heat affected zone: HAZ1) ที่กำลังขยาย 500 เท่า 50 μm โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเพิร์ลไลต์ เฟอร์ไรต์ เบนไนต์ที่เป็นเม็ด และคาร์ไบด์ที่เป็นเม็ดเล็กๆ บางชนิด เฟอร์ไรต์หยาบบางตัวจะกระจายไปตามขอบเกรนในลักษณะของโครงตาข่าย และมีคาร์ไบด์จำนวนเล็กน้อย [2]



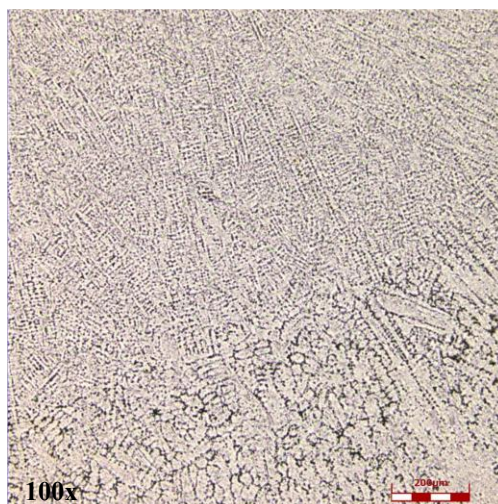
รูปที่ 6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยเชื่อมเหล็ก ASTM A335 P11 และเหล็กกล้าไร้สนิม A312 TP304



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณโลหะงานของเหล็ก A335 P11 (Base metal: BM1)



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ1)

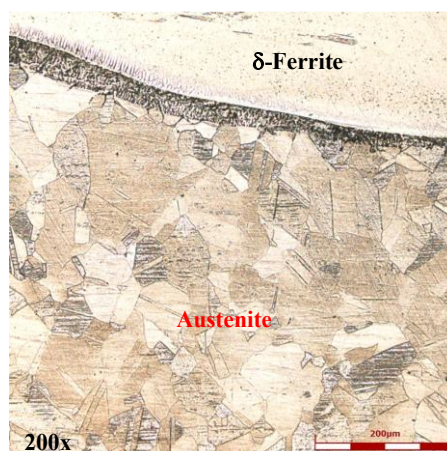


รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal zone: WM)

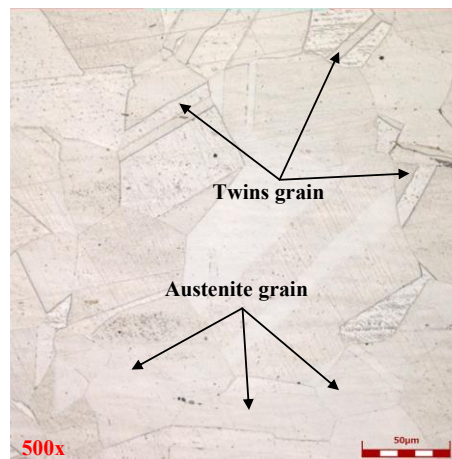
ตารางที่ 5 ผลการตรวจสอบทางเคมีของบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) (%wt)

Element	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb
Wt%	59.28	23.89	6.04	7.08	3.71

รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal zone: WM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า 200 μm ประกอบด้วยเดนไดรต์เฟอร์ไรต์ และ เมทริกซ์ออสเทนไนต์ พร้อมกันนี้ยังมีการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive spectroscopy) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลของการวิเคราะห์ พบว่ามีปริมาณธาตุโดยส่วนใหญ่เป็นส่วนประกอบของลวดเชื่อมที่มีธาตุเหล็กมากที่สุด ส่วนธาตุอื่นๆ จะมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 5 รูปที่ 10 เป็นภาพในบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อนต่อการเชื่อมของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด A312 TP304 (Heat affected zone: HAZ2) ที่กำลังขยาย 200 เท่า 200 μm โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมทั้งสองประกอบด้วยเดนไดรต์เฟอร์ไรต์ปฐมภูมิ กับออสเทนไนต์ระหว่างเดนไดรต์ เป็นที่น่าสนใจว่าทั้งสองมีปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรต์ค่อนข้างสูง อาจเนื่องมาจากผลกระทบของปริมาณคาร์บอนต่ำในโลหะตัวเดิมทั้งสองตัวในการเชื่อมในงานนี้ ซึ่งสอดคล้องกับบทบาทที่คาร์บอนมีแนวโน้มที่จะทำให้เฟสออสเทนไนต์เสถียรในโลหะเชื่อม [2] รูปที่ 11 เป็นภาพบริเวณเนื้อโลหะงานของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด A312 TP304 (Base metal: BM2) ที่กำลังขยาย 500 เท่า 50 μm โครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปเป็นสแตนเลสชนิดออสเทนนิติกแบบทวิน [2]



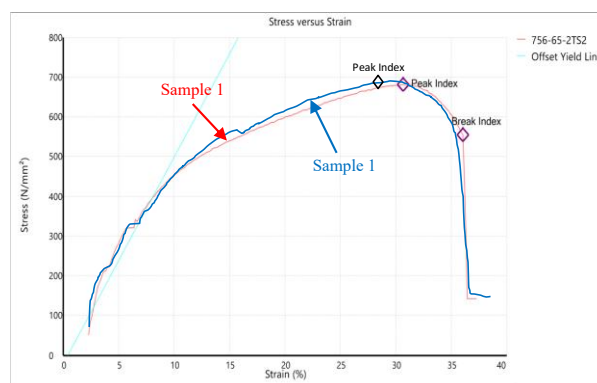
รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ2)



รูปที่ 11 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณเนื้อโลหะเดิมของเหล็กกล้าไร้สนิม A312 TP304 (Base metal: BM2)

3.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile test)

ผลการทดสอบแรงดึงจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานเชื่อมตัวอย่างในรูปที่ 12 พบว่าความเค้นทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากการแตกหักจากของชิ้นงานอันเป็นผลจากการทดสอบแรงดึง อย่างไรก็ตามยังตรวจพบว่าการแตกหักทั้งหมดเกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน A335 P11 (HAZ) [7] ดังแสดงในรูปที่ 13 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าส่วนที่เปราะบางที่สุดของชิ้นงานเชื่อมตัวอย่างคือบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน A335 Gr.P11 (HAZ) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5



รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด



รูปที่ 13 การแตกหักทั้งหมดของชิ้นงานตัวอย่างเกิดขึ้นในบริเวณบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน A335 P11 (HAZ) หลังการทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบแรงดึง

ชิ้นงาน	Yield strength (MPa)	UTS (MPa)	Elongation %	Location of fracture
1	325	670	10.14	A335 Gr.P11 HAZ
2	330	681	10.62	A335 Gr.P11 HAZ

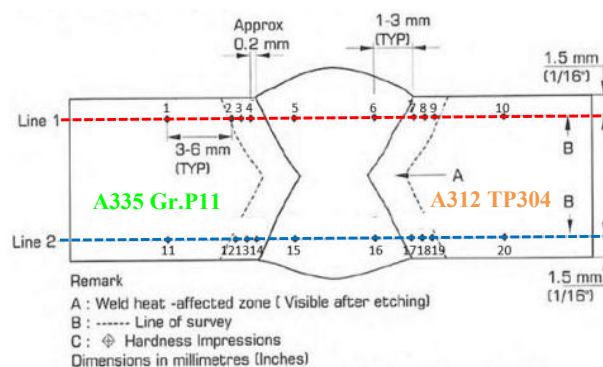
3.3 ผลการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness test)

ตำแหน่งของบริเวณจุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 14 ผลจากการทดสอบความแข็งจากกระบวนการเชื่อมแบบ GTAW ดังแสดงในรูปที่ 15 โปรไฟล์ความแข็งของรอยเชื่อมแบ่งออกเป็น 5 โซน ได้แก่ บริเวณโลหะงาน (Base metal: BM P11) บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ P11) บริเวณแนวเชื่อม (Weld metal: WM) บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ TP304) และบริเวณโลหะงาน (Base metal: BM TP304) [2]

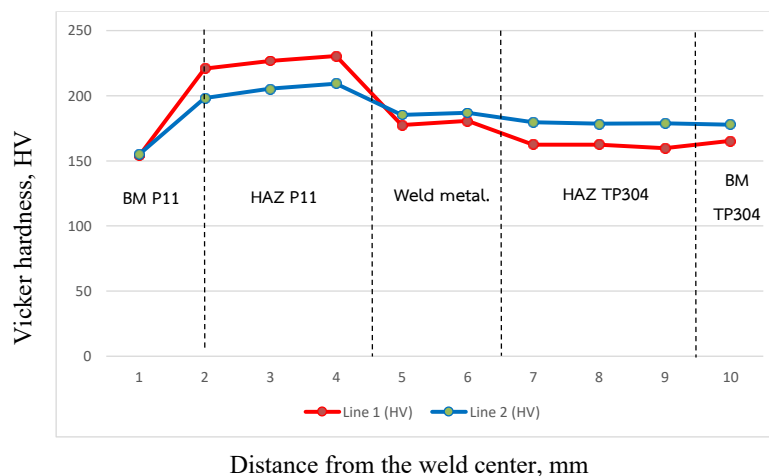
แนวโน้มของการค่าความแข็งในแต่ละบริเวณจุดทดสอบทั้ง 10 จุด ในแนวเส้นที่ 1 (เส้นสีแดง) พบว่ามีค่าความแข็งมากที่สุดในจุดที่ 4 บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนเท่ากับ 230.4 HV และค่าความแข็งได้น้อยที่สุดคือจุดที่ 1 บริเวณโลหะงาน BM P11 เท่ากับ 153.8 HV และบริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (HAZ P11) จากตำแหน่งจุดทดสอบที่ 2 - 4 จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าบริเวณแนวเชื่อมเล็กน้อย (WM) ตำแหน่งจุดทดสอบที่ 5 - 6 แต่ค่าความแข็งจะสูงกว่าบริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (HAZ TP304) ที่จุด 7-9

ส่วนแนวโน้มของการค่าความแข็งในแต่ละบริเวณจุดทดสอบทั้ง 10 จุด ในแนวเส้นที่ 2 (เส้นสีน้ำเงิน) พบว่ามีค่าความแข็งมากที่สุดในจุดที่ 4 บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนเท่ากับ 209.3 HV และค่าความแข็งได้น้อยที่สุดคือจุดที่ 1 บริเวณโลหะงาน BM P11 เท่ากับ 154.9 HV และบริเวณอิทธิพลทางความร้อน (HAZ P11) จากตำแหน่งจุดทดสอบที่ 2 - 4 จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าบริเวณแนวเชื่อมเล็กน้อย (WM) ตำแหน่งจุดทดสอบที่ 5 - 6 แต่ค่าความแข็งจะสูงกว่าบริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (HAZ TP304) ที่จุด 7-9

จากการทดสอบพบว่าบริเวณเนื้อเชื่อมเมื่อได้รับความร้อนจากการเชื่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นโครงสร้างของแข็งจึงส่งผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น และกระบวนการเชื่อมบริเวณอิทธิพลทางความร้อนที่อยู่ติดกับบริเวณโลหะงานจะมีค่าความแข็งที่มากกว่าบริเวณเนื้อเชื่อมแต่จะมากกว่าบริเวณเนื้อโลหะงาน และจะให้ผลที่เหมือนกันทั้ง 2 เส้นของการทดสอบ [2]



รูปที่ 14 บริเวณตำแหน่งจุดทดสอบทั้ง 10 จุด



รูปที่ 15 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

3.3 ผลการทดสอบการดัดโค้ง (Bending test)

ผลการทดสอบการดัดโค้งได้ชิ้นงานเชื่อมตัวอย่าง 4 ชิ้น ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C (อุณหภูมิห้อง) ค่าความขึ้นสัมผัส 50% เมื่อทำการดัดจนถึงมุมโค้ง 180° ดังในตารางที่ 6 เมื่อทำการตรวจสอบด้วยสายตาไม่พบรอยร้าวของชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมด จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ สรุปได้ว่ากระบวนการเชื่อมในชิ้นงานทั้งหมดนี้มีคุณภาพสูง [7]

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบการดัดโค้งของชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 4 ชิ้น

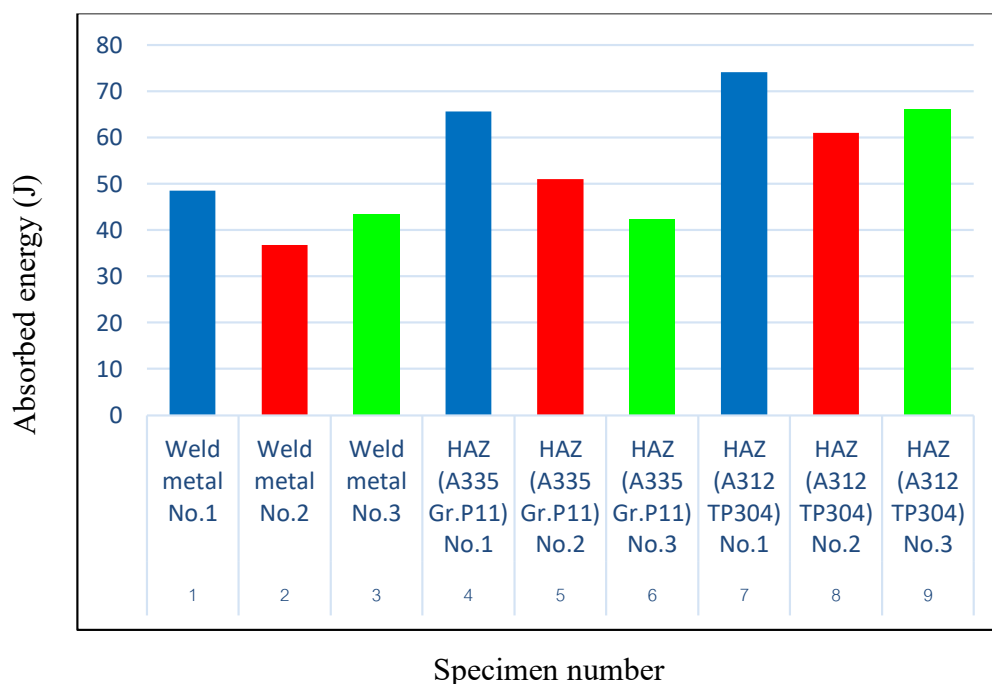
ชิ้นงาน	Mandrel Diameter (mm)	Bend Angle (degree)	Visually examined result for surface discontinuity
1	22	180°	No Surface Discontinuity
2	22	180°	No Surface Discontinuity
3	22	180°	No Surface Discontinuity
4	22	180°	No Surface Discontinuity

3.4 การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Impact Test)

ชิ้นงานทดสอบถูกทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact Test) ที่อุณหภูมิ 25°C (อุณหภูมิห้อง) พลังงานที่ดูดซับเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิทดสอบและลักษณะการแตกหักของชิ้นงานหลังการทดสอบแบบชาร์ปีดังแสดงในรูปที่ 16 ปริมาณพลังงานดูดซับของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแบบชาร์ปีทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 17 และตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่าพลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน HAZ (A312 TP304) มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 87.53 J ในขณะที่พลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน HAZ (A335 Gr.P11) มีค่ารองลงมาเท่ากับ 64.47 J และ พลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 48.73 J สรุปได้ว่าพลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน HAZ (A312 TP304) มีความเหนียวที่ดีกว่าบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน HAZ (A335 Gr.P11) และ บริเวณแนวเชื่อม [8]



รูปที่ 16 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างภายหลังการทดสอบแรงกระแทก



รูปที่ 17 ปริมาณพลังงานดูดซับของชิ้นงานหลังการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบแรงกระแทก

ชิ้นงาน	Location of Charpy V-Notch	Absorbed energy (J)	
		Individual	Average
1	Weld metal	44.7	48.73
2		46.6	
3		54.9	
4	HAZ (A335 Gr.P11)	32.7	64.47
5		89.6	
6		71.1	
7	HAZ (A312 TP304)	89.2	87.53
8		86.5	
9		86.9	

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาสัมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของการเชื่อมเหล็ก A335 P11 และ A312 TP304 ด้วยกระบวนการก๊าซทั้งสแตนอาร์ค (GTAW) โดยมีการวิเคราะห์โครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของโลหะทั้ง 2 ชนิด สัมบัติทางกล ข้อสรุปที่ได้จากการตรวจสอบสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) การตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาค พบว่า ลักษณะการเชื่อมและการหลอมละลายระหว่างเนื้อเชื่อมกับ โลหะงานสม่ำเสมอ และมีความสมบูรณ์ระหว่างเนื้อเชื่อมและโลหะงาน ความกว้างของเขตบริเวณอิทธิพลทางความร้อนของกระบวนการเชื่อมใกล้เคียงกัน และไม่มีจุดบกพร่องของแนวเชื่อม

2) โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อมประกอบด้วยเดนไดรต์เฟอร์ไรต์และเมทริกซ์ออสเทนไนต์ นอกจากนี้ ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค EDS พบธาตุหลายชนิดซึ่งเป็นส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม โดยนิกเกิลมีปริมาณสูงสุดที่ 59.28 %wt รองลงมาคือโครเมียมที่ 23.89 %wt ในบริเวณแนวเชื่อมของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ทดลองนี้

3) การทดสอบแรงดึงในชิ้นงานตัวอย่าง 2 ชิ้น พบว่ามีสมบัติทางกลที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม การแตกหักทั้งหมดเกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน A335 P11 (HAZ)

4) ผลการทดสอบความแข็ง พบว่าค่าความแข็งสูงสุดอยู่ที่บริเวณพื้นที่กระแทกร้อน (HAZ P11) เท่ากับ 230.4 HV และค่าความแข็งต่ำสุดอยู่ที่โลหะฐาน (BM P11) เท่ากับ 153.8 HV เมื่อบริเวณโลหะเชื่อมได้รับความร้อนจากการเชื่อม จะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างแข็ง ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ในกระบวนการเชื่อม บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่อยู่ติดกับโลหะฐานจะมีค่าความแข็งสูงกว่าบริเวณแนวเชื่อมแต่สูงกว่าบริเวณโลหะงาน

5) การทดสอบการดัดของตัวอย่างชิ้นงาน เมื่อทำการดัดจนถึงมุมโค้ง 180° และทำการตรวจสอบด้วยสายตาไม่พบรอยร้าวของชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมด จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ สรุปได้ว่ากระบวนการเชื่อมในชิ้นงานทั้งหมดนี้มีคุณภาพสูง

6) ผลการทดสอบแรงกระแทกแสดงให้เห็นว่าพลังงานที่ดูดซับเฉลี่ยในโซนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน HAZ (A312 TP304) มีค่าสูงสุดที่ 87.53 J ในขณะที่พลังงานที่ดูดซับเฉลี่ยในบริเวณพื้นที่กระแทกจากความร้อน HAZ (A335 P11) มีค่าสูงสุดเป็นอันดับสองที่ 64.47 J และพลังงานที่ดูดซับเฉลี่ยในแนวเชื่อมมีค่าต่ำสุดที่ 48.73 J จะเห็นได้ว่าพลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน HAZ (A312 TP304) มีความเหนียวที่ต่ำกว่าบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน HAZ (A335 P11) และบริเวณแนวเชื่อม

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Koch Applied Solutions. (2025, January 20). Steam & Hot Water Boilers [Online]. Available: <https://www.kochapplied.com/blog/boilers-101/>.
- [2] Rakesh Chaudhari and Asha Ingle, "Experimental Investigation of Dissimilar Metal Weld of SA335 P11 and SA312 TP304 Formed by Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)," Trans Indian Inst Met, vol. 72, 2019, pp. 1145-1152.
- [3] Vipin Tandon, Awanikumar P. Patil, Suhas Kowshik, "Impact of Filler Electrodes on Welding Properties of Dissimilar Welded 316L/ 201 Austenitic Stainless Steels." Engineering proceedings, vol. 59, 2023, pp. 90.
- [4] Octalsteel. (2025, January 20). ASTM A335 P11 Pipe Specification (Chrome Moly Seamless Pipe) [Online]. Available: <https://www.octalsteel.com/resources/astm-a335-p11-pipe/>.
- [5] Octalsteel. (2025, January 20). ASTM A312 Stainless Steel Pipe Specification [Online]. Available: <https://www.octalsteel.com/resources/astm-a312-tp304-tp316-ss-pipe/>.
- [6] SMT-625. (2025, January 20). AWS A5.14/ ASME SFA5.14 ERNiCrMo-3 [Online]. Available: <https://arcweldingservice.com/content/file/product/0618201592461732.pdf>.
- [7] Chang'an Li, Guoliang Qin, Yuansheng Tang, Binggang Zhang, Sanbao Lin, Peihao Geng, "Study on the Mechanical Performance of Dissimilar Butt Joints between Low Ni Medium-Mn and Ni-Cr Austenitic Stainless Steels Processed by Gas Tungsten Arc Welding." Metals, vol. 11, 2021, pp. 1439.
- [8] Sachin Sirohi, Shailesh M. Pandey, Aleksandra Swierczyńska, Grzegorz Rogalski, Naveen Kumar, Michał Landowski, Dariusz Fydrych, Chandan Pandey, "Microstructure and Mechanical Properties of Combined GTAW and SMAW Dissimilar Welded Joints between Inconel 718 and 304L Austenitic Stainless Steel." Metals, vol. 13, 2023, pp. 14.