



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การศึกษาคุณลักษณะทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมโลหะที่ต่างกันระหว่างเหล็ก A335 P11 และ A312 TP304 ด้วยวิธีก๊าซทังสเตนอาร์ค

The study of mechanical characteristics and metallurgical of metal welding dissimilar between A335 P11 and A312 TP304 stainless steels by using GTAW

กนกอร รจนากิจ¹ เมืองแก้ว ยูตัน^{2*}

¹ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี 16/10 ถนนเลียบคลองทวีวัฒนา เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10170

² สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี 248 ซอยเพชรเกษม 110 ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160

Kanok-on Rodjanakid¹ Muangkaew Yutan^{2*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, BangkokThonburi University, Bangkok 10170

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University, Bangkok 10160

* Corresponding author.

E-mail: kanokon.rod@gmail.com; Telephone: 061-4738291

วันที่รับบทความ 3 พฤษภาคม 2567; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 21 กรกฎาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ 9 กันยายน 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อม เหล็ก A312 TP304 และ A335 P11 สำหรับท่อขนาด 2 นิ้ว ยาว 13 ซม. หนา 5.54 มม. ซึ่งนิยมใช้เป็นท่อสำหรับหม้อไอน้ำชนิดท่อน้ำด้วยวิธีก๊าซทังสเตนอาร์ค GTAW ใช้โลหะเติม Ni625/ER NiCrMo-3 เครื่องเชื่อมแบบอาร์กอน RILON TIG 200A กระแสไฟในการเชื่อม 95 V ความเร็วในการเชื่อม 13.4 มม./นาที ปริมาณการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตร/นาที ทำการทดสอบสมบัติทางกลและตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ผลการทดลองพบว่า ลักษณะการซึมลึกและการหลอมละลายระหว่างเนื้อเชื่อมกับ โลหะงานสม่ำเสมอ และมีความสมบูรณ์ระหว่างเนื้อเชื่อมและโลหะงาน ความกว้างของเขตบริเวณอิทธิพลทางความร้อนของกระบวนการเชื่อมใกล้เคียงกัน และไม่มีจุดบกพร่องของแนวเชื่อม กระบวนการเชื่อมด้วยวิธีก๊าซทังสเตนอาร์ค GTAW จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 730 MPa และจะให้ค่าความแข็งแรงมากที่สุดอยู่ในบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ P11) มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 209 HV การทดสอบแรงกระแทกพบว่าพลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อน HAZ (A312 TP304) มีความเหนียวที่ดีกว่าบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อน HAZ (A335 Gr.P11) และ บริเวณแนวเชื่อม ผลการทดสอบการดัดเมื่อทำการดัดจนถึงมุมโค้ง 180° และทำการตรวจสอบด้วยสายตาไม่พบรอยร้าวของชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมด สรุปได้ว่ากระบวนการเชื่อมด้วยวิธีก๊าซทังสเตนอาร์คของเหล็ก A335 P11 และ A312 TP304 ในชิ้นงานทั้งหมดนี้มีคุณภาพสูงเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งใช้ในการเลือกกระบวนการเชื่อมเพื่อให้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่เหมาะสม

คำสำคัญ

การเชื่อมแบบก๊าซทังสเตนอาร์ค โลหะเติม Ni625/ER NiCrMo-3 โครงสร้างทางโลหะวิทยา สมบัติทางกล

Abstract

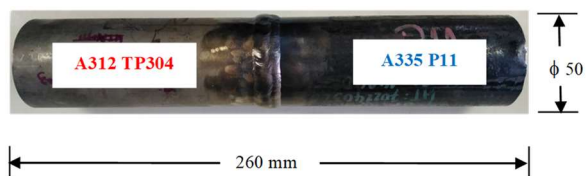
The objective of this research is to study the mechanical properties and metallurgical structure of welded joints of A312 TP304 and A335 P11 steel for pipes size 2 inches, length 13 cm., thickness 5.54 mm., which is commonly used as fire tube steam for water tube boilers by gas tungsten arc method using filler metals Ni625/ER NiCrMo-3. RILON TIG 200A argon welding machine, welding current 95 V, welding speed 13.4 mm/min, shielding gas flow volume 15 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 metal work and there is perfection between the weld metal 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 730 MPa and the highest hardness value is in the heat affected zone (HAZ P11) with an average maximum hardness of 209 HV. Impact tests have found that the average energy absorbed in the impact area Hot HAZ (A312 TP304) has better toughness than the HAZ (A335 Gr. P11) hot impact area and the welding area. Bending test results when bending to an angle of 180° and visual inspection did not reveal any cracks in all specimens. It can be concluded that the gas tungsten arc welding process of A335 P11 and A312 TP304 steel welds in all these workpieces was of satisfactory high quality which it is used in the selection of the welding process for the most usability efficiently.

Keywords

gas tungsten arc, filler metals Ni625/ER NiCrMo-3, metallurgical, mechanical properties,

1. คำนำ

หม้อไอน้ำ (Boiler) คือเครื่องกำเนิดไอน้ำเป็นภาชนะรับความดันระบบปิดที่มีอุณหภูมิและความดันสูงกว่าบรรยากาศปกติ โดยไอน้ำเกิดจากน้ำที่ได้รับการถ่ายเทความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจนกระทั่งกลายเป็นไอ สามารถนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย ได้แก่ โรงไฟฟ้า อุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมผลิตอาหารกระป๋อง โรงพยาบาล โรงสีข้าว โรงแรม เป็นต้น [1] โลหะที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตหม้อไอน้ำ A312 TP304 และ A335 P11 ซึ่งมีความสามารถในการเชื่อมได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนทนความร้อน คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้เป็นโลหะผสมที่นิยมใช้ในการทำท่อไฟของหม้อไอน้ำ [2, 3] จากข้อมูลและเหตุผลข้างต้น ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมด้วยวิธีก๊าซทังสเตนอาร์ค (GTAW) เพื่อเลือกกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับรอยเชื่อมของวัสดุทั้ง 2 ชนิดดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชิ้นงานทดสอบของท่อ A312 TP304 และ A335 P11 ที่เชื่อมด้วยวิธีก๊าซทังสเตนอาร์ค (GTAW)

มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาคูณสมบัติของแนวเชื่อมซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ วิชาญ ช่วยพันธ์ และคณะ [5] ได้ทำการทดลองด้วยการเชื่อมวิธีทังสเตนอาร์คเพื่อเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม 3 ประเภท ได้แก่ AISI 308L, AISI 309L และ AISI 316L ผลที่ได้พบว่าโลหะเชื่อมที่เกิดจากวัสดุทั้งหมดมีความแข็งเท่ากันคือ 350 HV โดยมีค่าที่สูงกว่าค่าของเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งบ่งชี้ถึงความแข็งแรงของโลหะเชื่อมที่ค่อนข้างสูง จากการตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะเชื่อมด้วยวิธีโพเทนชิโอไดนามิก พบว่าศักยภาพในการเจาะของโลหะที่เชื่อมโดยวัสดุ AISI 309L นั้นสูงกว่าศักยภาพของโลหะเชื่อมโดยวัสดุ AISI 308L และ AISI 316L ตามลำดับ เดช เหมือนขาว และคณะ [6] ทำการศึกษาคูณสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของกระบวนการเชื่อมด้วยโลหะแก๊สคลุม (GMAW; MIG/MAG) และกระบวนการเชื่อมโดยลวด

เชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW) และกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) เชื่อมเหล็กกล้าโครงสร้าง SS 400 ผลการวิจัยพบว่าแนวเชื่อมจากกระบวนการเชื่อมทั้ง 3 วิธีการ จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่แตกต่างกัน โดยกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์จะให้ค่าเฉลี่ยความต้านทาน แรงดึงมากที่สุดที่ 680.86 MPa และจะให้ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงได้มากที่สุดที่ 198.3 HV ส่วนกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์จะให้ค่าเฉลี่ย ความต้านทานแรงดึงได้น้อยสุด 565.02 MPa โดยมีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงน้อย สุดที่ 183.4 HV ผลสรุปกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์จะให้ผลของการเชื่อมที่เหมาะสมมากที่สุด M. Ahmadi และคณะ [7] ทำการศึกษา โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล และความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 316L กับข้อต่อที่ไม่เหมือนกันของเหล็กกล้าโลหะผสมต่ำ ASTM A335-P11 ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมน้ำมันและก๊าซ ใช้สำหรับการผลิตเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 600°C โดยเลือกโลหะเติม ER309L และ ERNiCrMo-3 สองชนิดเพื่อใช้กับกระบวนการ GTAW ผลการวิจัยพบว่าโครงสร้างจุลภาคโลหะเติม ERNiCrMo-3 มีโซนเดนไดรต์และอินเทอร์เดนไดรต์ และโครงสร้างจุลภาคของโลหะเติม ER309L มีส่วนประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ในเมทริกซ์ออสเทนนิติก ผลการทดสอบการกัดกร่อนพบว่า ERNiCrMo-3 มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่า ER309L สรุปได้ว่า ERNiCrMo-3 จะเป็นโลหะเติมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อม AISI 316L ถึง A335-P11 สำหรับการใช้งานที่หลากหลาย A. F. Yilmaz และคณะ [8] ทำการศึกษาความแข็งแรงและการบิดเบี้ยวในการเชื่อมของแผ่นเหล็ก AH36 สำหรับใช้งานในเรือ ทำการเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมอาร์กได้น้ำ มีการทดลอง 18 ครั้ง ชิ้นงานมีการบากร่อง 2 ขนาดที่แตกต่างกัน ใช้แผ่นหลังเซรามิกและการเชื่อมสองด้าน โดยไม่มีเซรามิกภายใต้ร่องการเชื่อมเดียวกัน และยังมีวิธีการเชื่อม กระแส ความเร็วในการเชื่อม และแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ชิ้นงานตัวอย่างรอยต่อทำการบากมุมเติมโลหะแบบ 45° หลังจากการตัดด้วยเครื่อง CNC ชิ้นงานทดสอบทางกลถูกตัดด้วยเทคนิคการตัดระบบแอbrasives เพอร์เจ็ค เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อเนื้อเชื่อมและบริเวณที่ได้รับความร้อน จากผลการทดสอบแรงดึงพบว่าการแตกหักในชิ้นงานทั้งหมดเกิดขึ้นนอกเขตแนวเชื่อมของโลหะเติม สรุปได้ว่าวิธีการเชื่อม

ทั้งสองด้านช่วยเพิ่มความแข็งแรงในการเชื่อม Yu Hu และคณะ [9] ทำการศึกษาผลกระทบของก๊าซเฉื่อยระหว่างการก่อตัวต่อตะเข็บคู่ (Twin Wire DP-MIG) สำหรับการเชื่อมความเร็วสูง พวกเขาได้มีการนำวิธีการใหม่ที่ใช้ก๊าซเฉื่อยระหว่างการก่อตัวมาใช้ในงานวิจัยนี้ มีการติดตั้งแผ่นกันก๊าซเฉื่อยไว้ใกล้กับปลายด้านหลังของฝาครอบเพื่อป้องกันหัวฉีด DP-MIG แผ่นกันก๊าซที่สร้างขึ้นนั้นใช้เพื่อเปิดการแทรกของก๊าซเฉื่อยในระหว่างการก่อตัวของรอย และยังใช้สำหรับการป้องกันก๊าซหตุยภูมิบนพื้นผิวของรอยเชื่อมอีกด้วย การทดสอบการเชื่อมในแผ่นเหล็กสเตนเลส 2205 ทำการวิเคราะห์ทางโลหะวิทยา การทดสอบทางกล และการทดสอบด้วยรังสีเอกซ์ (NDT) ผลการวิจัยพบว่าการใช้ก๊าซเฉื่อยในปริมาณที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงและลดรอยเชื่อมที่ไม่มีการหลอมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกล เช่น คุณสมบัติแรงดึงของรอยเชื่อม ความแข็งแรงและความเหนียวของรอยเชื่อม ดังนั้นการนำก๊าซเฉื่อยมาใช้จึงช่วยเพิ่มเติมประสิทธิภาพต่อรอยเชื่อมของงานวิจัยนี้ วิชาญ ช่วยพันธ์ และคณะ [10] ทำการศึกษาผลกระทบของความร้อนที่ป้อนเข้าและการผสมไนโตรเจนที่แตกต่างกันในก๊าซอาร์กอนของเหล็กสเตนเลสเกรด 202 โดยใช้กระบวนการเชื่อม GTA ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา สมบัติทางกล และความต้านทานการกัดกร่อน ผลการวิจัยพบว่าปริมาตรของเคลต้าเฟอร์ไรต์ ความยาวเดนไดรต์ และระยะห่างระหว่างอินเดนไดรต์ลดลง ความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ของการยึดตัวลดลงและความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนในก๊าซป้องกันอาร์กอนไม่ได้ทำให้ความกว้างของเมตเชื่อมเปลี่ยนแปลง วิชาญ ช่วยพันธ์ และคณะ [11] ทำการประเมินโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล และการกัดกร่อน ของเหล็กสเตนเลสเกรด 204Cu และ 304 โดยใช้กระบวนการเชื่อม GTA พบว่าทั้งโลหะเชื่อมและโลหะตัวเติมทั้งสองตัวมีพื้นที่หลอมเหลวในบริเวณเนื้อเชื่อม 204Cu มากกว่าด้าน 304 ปริมาณเคลต้าเฟอร์ไรต์ในโลหะเชื่อมของ 309L ต่ำกว่า 316L บริเวณแนวพื้นที่กระแทกและ PMZ บนด้าน 204Cu นั้นกว้างกว่าด้าน 304 ของโลหะเชื่อมทั้งสอง สำหรับคุณสมบัติทางกล ปริมาตรความแข็งแรงของโลหะเชื่อมของ 309L นั้นสูงกว่า 316L ความแข็งแรงที่อยู่ติดกับเส้นพิวชันของด้าน 304 ต่ำกว่าด้าน 204Cu ของโลหะตัวเติมทั้งสอง ความ

ต้านทานแรงดึงของโลหะเชื่อมของ 316L นั้นมากกว่า 309L และโลหะเชื่อมทั้งสองมีความเหนียวในบริเวณรอยเชื่อมที่ใกล้เคียงกับด้าน 304 ความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูพรุนของโลหะเชื่อมสำหรับ 309L สูงกว่าสำหรับ 316L และโลหะเชื่อมทั้งสองเริ่มต้นการเกิดรูพรุนที่ขอบเขตระหว่างเฟสออสเทนไนต์และเฟสเดิลต้าเฟอร์ไรต์ I. Reda Ibrahim และคณะ [12] ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก Ni-Medium และ Ni-Cr ด้วยกระบวนการเชื่อมวิธีก๊าซทั้งสแตนอาร์ค (GTAW) ผลการวิจัยพบว่าโครงสร้างทับซ้อนจากออสเทนไนต์เมทริกซ์และเดิลต้าเฟอร์ไรต์ได้รับการส่งเสริมในโซนฟิวชัน (FZ) ของรอยต่อที่ไม่เหมือนกันซึ่งประมวลผลด้วยการป้อนพลังงานต่ำและสูง (0.486 kJ/mm และ 0.558 kJ/mm) FZ ของชิ้นงานทดสอบที่เชื่อมด้วยความร้อนสูงแสดงค่าความแข็งต่ำสุด (151.2 HV) เมื่อเปรียบเทียบกับโซนที่ได้รับความร้อน (HAZ) (166.3 HV) นอกจากนี้ ข้อต่อยังมีความต้านทานแรงดึงต่ำที่ 610 MPa ความแข็งแรงที่ได้รับนั้นต่ำกว่าความแข็งแรงของโลหะเดิม (BM) M-Mn SS และ Ni-Cr SS อย่างมีนัยสำคัญ สาเหตุหลักมาจากโครงสร้างเดนไดรต์ที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันของ FZ ที่มีการตกตะกอนของ Cr-คาร์ไบด์

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาตัวแปรการเชื่อมก๊าซทั้งสแตนอาร์คด้วยลวดเชื่อม Ni 625/ER NiCrMo-3 [4] ที่มีผลต่อเหล็ก A312 TP304 และ A335 P11 โดยทำการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค และจุลภาค การตรวจสอบแรงดึง การตรวจสอบความแข็ง การทดสอบการดัด การทดสอบแรงกระแทก และวัดปริมาณธาตุผสมในแนวเชื่อมด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive spectroscopy) และในขั้นตอนสุดท้ายมีการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

2. วัสดุและวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

โลหะงานที่ใช้ในงานวิจัยคือท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ยาว 13 ซม. หนา 5.54 มม. โลหะงานชิ้นแรกเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด A312 TP304 ส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 และโลหะงานชิ้นที่สองเป็นเหล็ก ASTM A335 P11 ส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 2 ส่วนโลหะเติมที่ใช้คือ Ni

625/ER NiCrMo-3 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 มม. ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเติมดังตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของท่อเหล็ก ASTM A312 TP304 (จากใบรับรองส่วนผสมทางเคมีของผู้ผลิต) [2]

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

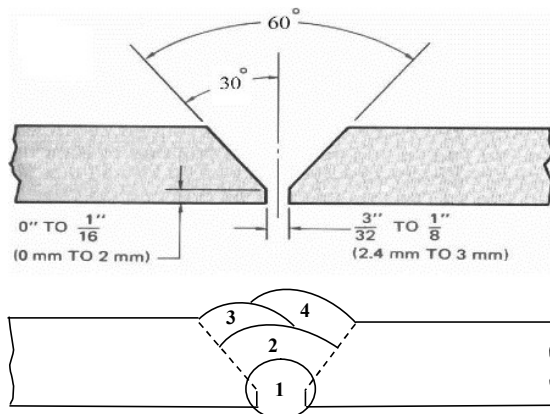
ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของท่อเหล็ก ASTM A335 P11 (จากใบรับรองส่วนผสมทางเคมีของผู้ผลิต) [3]

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

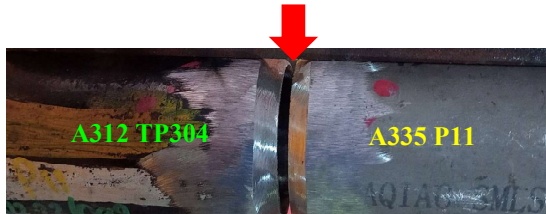
ตารางที่ 3 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม Ni 625/ER NiCrMo-3 (จากใบรับรองส่วนผสมทางเคมีของผู้ผลิต) [4]

Material	C	Si	Mn	P	S
NiCrMo-3	0.02	0.20	0.03	0.006	0.001
Material	Cr	Ni	Mo	Nb+Ta	
NiCrMo-3	22.0	64.0	9.00	3.60	

งานวิจัยนี้สร้างรอยเชื่อมโดยตัดเตรียมท่อ การกำหนดรอยต่อทำบากมุมเติมโลหะให้มีมุมรวม 60° และกำหนดลำดับการเชื่อมแต่ละแนว ดังรูปที่ 2 สำหรับกระบวนการเชื่อมโดยใช้โลหะเติมทั้งสแตนเป็นตัวอาร์คให้เกิดความร้อน และใช้แก๊สปกคลุมการเชื่อมด้วยมือ (GTAW) ในตำแหน่งท่าเชื่อม 6G โดยกำหนดพารามิเตอร์ในการเชื่อมดังตารางที่ 4



GTAW (Ni 6625/ER NiCrMo-3)



รูปที่ 2 ข้อกำหนดมาตรฐานรอยต่อและการกำหนดลำดับการเชื่อม

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ในการเชื่อม GTAW

พารามิเตอร์	หน่วย
แรงดันอาร์ก	14 Volt
กระแสเชื่อม	95 A
ความเร็วในการเชื่อม	13.4 mm/min
ปริมาณการไหลของแก๊สปกคลุม	15 L/min

การทดลองนี้ใช้เครื่องเชื่อมอาร์กอนรุ่น RILON TIG 200A 220V. [13] ตู้เชื่อมอาร์กอนขนาดเล็กสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก เหมาะกับงานเชื่อม สแตนเลส และเหล็ก ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมทดลองยี่ห้อ RILON TIG 200A 220V.

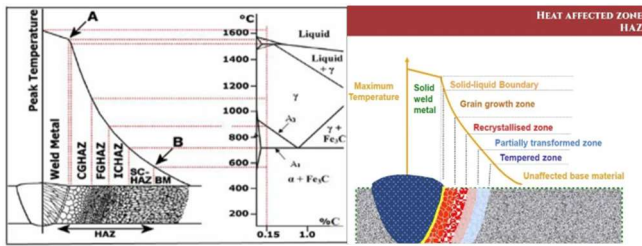
งานวิจัยได้มีการดำเนินการตรวจสอบใน 5 ลักษณะดังต่อไปนี้คือ

1. การตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยาและเทคนิค EDS
2. การทดสอบแรงดึง
3. การทดสอบความแข็ง
4. การทดสอบการกัด
5. การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี

รายละเอียดในการตรวจสอบและวิเคราะห์จะดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.2 การตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยาและเทคนิค EDS

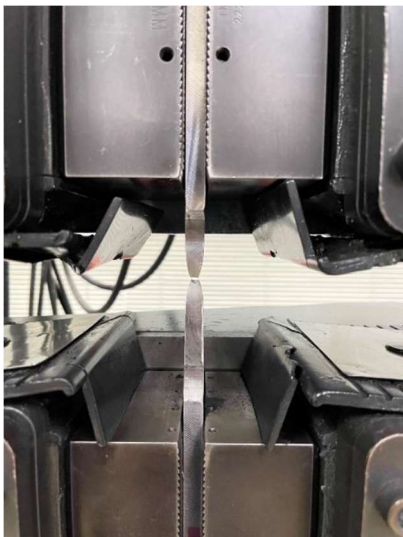
การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาจะตรวจสอบโครงสร้างมหภาค เพื่อดูลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อม เช่น ความกว้าง ความสูง การซึมลึก และจุดบกพร่องของแนวเชื่อม บริเวณอิทธิพลทางความร้อน ซึ่ง บริเวณอิทธิพลทางความร้อนแบ่งได้เป็นส่วน ๆ ตามความมากมายของ อุณหภูมิที่ได้รับส่วนที่อยู่ใกล้แนวเชื่อมจะมีอุณหภูมิสูงกว่า และอุณหภูมิจะลดลงมาจากระยะห่างของบริเวณส่วนนั้น ๆ เพราะเมื่อลวดเชื่อมเคลื่อนที่ไป คลื่นของอุณหภูมิความร้อนจะเคลื่อนที่ตามและการกระจายความร้อน ลักษณะเป็นวงรีดังคลื่นซึ่งเกิดจากเรื่อกำลังวิ่งกลางลำน้ำ การเปลี่ยนแปลง โครงสร้างของโลหะเนื่องจากความร้อนในการเชื่อม มีโอกาสเกิดขึ้นได้ทั้ง ขณะเชื่อมและภายหลังเชื่อมเย็นตัวลงแล้ว ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ได้รับ และระยะเวลาที่อยู่ภายใต้ อุณหภูมินั้น ดังแสดงในรูปที่ 4 พร้อมกันนี้ก็จะขยายภาพเพื่อให้เห็นโครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเนื้อเชื่อม บริเวณอิทธิพลทางความร้อนและโลหะงาน และมีการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive spectroscopy) จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของธาตุประกอบเฉพาะจุดในแนวเนื้อเชื่อม



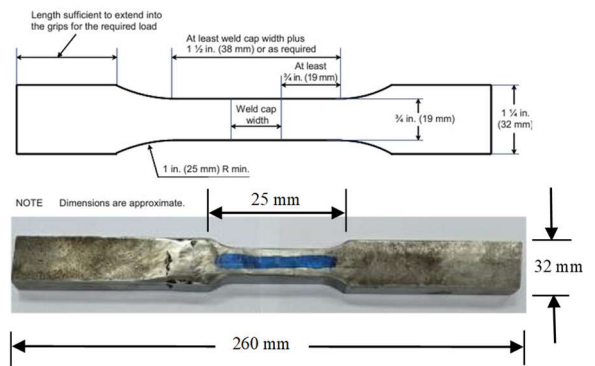
รูปที่ 4 โครงสร้างของโลหะบริเวณอิทธิพลทางความร้อน

2.3 การทดสอบแรงดึง

เครื่องทดสอบแรงดึงที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 5 ยี่ห้อ SHIMADZU: EHF-EV100K1-070-0A เป็นเครื่องสำหรับทดสอบแรงดึงในแนวตามยาวของเนื้อ โลหะเชื่อม (All Weld Metal) โดยเตรียมชิ้นงาน ทดสอบแบบลดขนาด การทดสอบสามารถป้อนค่าพารามิเตอร์ได้โดยตรงจากหน้าจอ การประมวลผลการทดสอบจะเป็นลักษณะของตัวเลขและกราฟ โดยในงานวิจัย ครั้งนี้ใช้ทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของงานเชื่อม (Ultimate Tensile Strength) ความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Strength) และ เปอร์เซ็นต์ในการยืดตัว (Percent Elongation) และชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึงให้ได้ตามมาตรฐาน กำหนด ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E 8 แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 เครื่องทดสอบแรงดึง SHIMADZU: EHF-EV100K1-070-0A



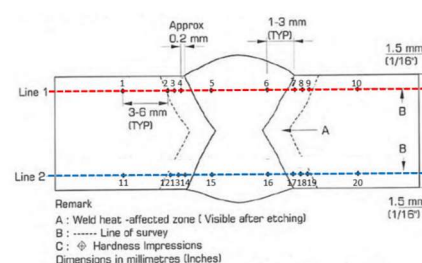
รูปที่ 6 การเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E 8

2.4 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์จะใช้เครื่องทดสอบความแข็ง (Anton Paar MHT-10) ดังรูปที่ 7 ชิ้นงานทดสอบได้จากบริเวณรอยเชื่อม การตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา การกำหนดตำแหน่งการทดสอบ บริเวณเนื้อเชื่อม บริเวณอิทธิพลทางความร้อนและโลหะงาน ดังแสดงในรูปที่ 8 ตามมาตรฐาน ASTM E3-11 ใช้แรงกด 10 kgf กดแช่ 10 วินาที เพื่อเปรียบเทียบความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อม บริเวณอิทธิพลทางความร้อน และโลหะงาน



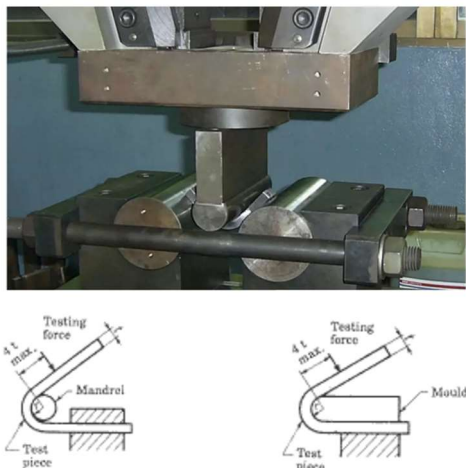
รูปที่ 7 เครื่องทดสอบความแข็ง (Anton Paar MHT-10)



รูปที่ 8 บริเวณตำแหน่งการทดสอบความแข็งของชิ้นงานตัวอย่าง

2.5 การทดสอบการตัด

ในการทดสอบแรงดัดสำหรับการทดสอบนี้ ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASME IX : 2019 โดยการใส่แรงกระทำกับชิ้นทดสอบแล้วทำให้เกิดแรงเค้นอัดที่บริเวณด้านบนของหน้าตัดชิ้นงานและเกิดแรงเค้นดึงที่บริเวณด้านล่างของหน้าตัดชิ้นงาน การตัดอาจกระทำด้วยแรงเค้นตรงแรงเฉือนดัด หรือแรงเฉือนบิด โดยแท่งชิ้นงานที่มีการใช้ลักษณะที่มีการรับแรงแบบสวนทางมักจะทำการทดสอบการดัดงอ ซึ่งแท่งชิ้นงานจะมีการโค้งงอเกิดขึ้น ณ จุดหนึ่งบนพื้นผิวบริเวณที่มีการรับแรง การทดสอบทำโดย ค่อยๆเพิ่มแรงที่ใช้ในการม้วนขึ้นทดสอบรอบๆ mandrel ตามที่กำหนดไว้ โดยการที่กดยึดปลายด้านหนึ่งของชิ้นทดสอบไว้ และทำการดัดโค้งที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ทำให้เกิดการดัดโค้งรอบ mandrel ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 เครื่องทดสอบการตัดและลักษณะชิ้นงานเชื่อมหลังการทดสอบ

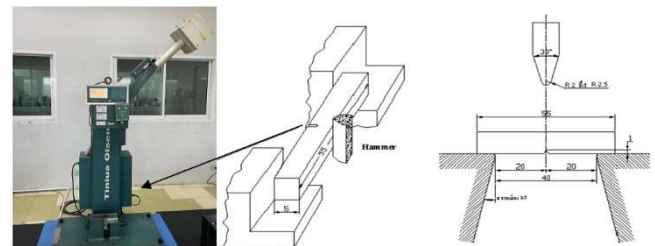
2.6 การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี

การทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี ทำได้โดยการตีขึ้น
ทดสอบเพียงครั้งเดียวด้วยการเหวี่ยงให้หักภายใต้ภาวะที่
กำหนด ขึ้นทดสอบต้องทำรอยบากที่มีขนาด และลักษณะ
กำหนดตามมาตรฐาน ASTM A370-21 ขึ้นทดสอบต้องทำเป็น
รอยบากตัว V ตรงกลาง มีทั้งหมด 3 ขึ้น ต่อหนึ่งจุดทดสอบของ
รอยเชื่อมที่ได้จาก บริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) บริเวณ
พื้นที่กระแทกร้อน HAZ (A335 Gr.P11) และ บริเวณพื้นที่
กระแทกร้อน HAZ (A312 TP304) ดังรูปที่ 10 การจับยึดขึ้น

ทดสอบแต่ละปลายให้แน่น ซึ่งถ้าเทียบกับคนที่รับน้ำหนักแล้ว จะเห็นว่าเหมือนคนธรรมดาตั่งรูปที่ 11 ขึ้นทดสอบจะถูกลงบนฐานรองรับสองจุดมีระยะห่างกัน 40 มิลลิเมตร จัดให้รอยบากอยู่ตรงกลาง และมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางที่ค้อนเหวี่ยงลงมากระแทก การจับยึดขึ้นทดสอบแบบนี้จะทำให้ความสะดวกและรวดเร็วเหมาะสำหรับการทดสอบกับชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิสูง และอุณหภูมิต่ำได้ดี สำหรับค้อนเหวี่ยงกระแทกจะมีลักษณะรูปตัววี มุม 30 องศา รัศมีโค้งที่ปลายคม 2 - 2.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 10 การเตรียมชิ้นงานเชื่อมสำหรับการทดสอบการกระแทก



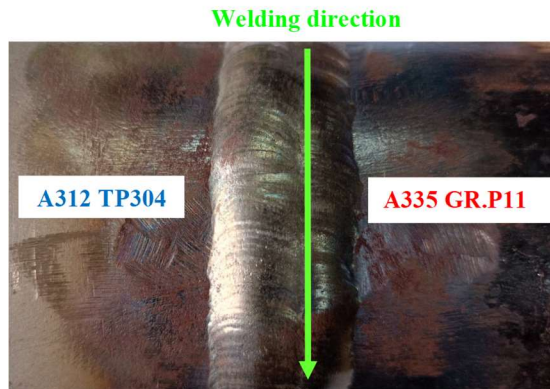
รูปที่ 11 เครื่องทดสอบการกระแทกและชิ้นงานเชื่อมหลังการทดสอบ

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

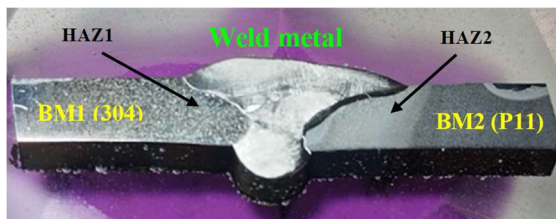
3.1 การตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยาและเทคนิค EDS

ผลการตรวจสอบทางกายภาพ ลักษณะทางกายภาพของรูปร่างแนวเชื่อมดังรูปที่ 12 การเกิดเมตโลหะบริเวณของชิ้นงาน ลักษณะผิวหน้าของแนวเชื่อม การซึมลึก การหลอมละลาย ระหว่างชั้นของเนื้อเชื่อมกับโลหะงาน ความกว้างบริเวณเขตอิทธิพลทาง ความร้อน และจุดบกพร่องของแนวเชื่อม พบว่ากระบวนการเชื่อมแบบ GTAW เกิดแนวเชื่อมมีความเรียบสม่ำเสมอ ลักษณะการซึมลึกและการหลอมละลายระหว่างเนื้อเชื่อมกับ โลหะงานสม่ำเสมอ และมีความสมบูรณ์

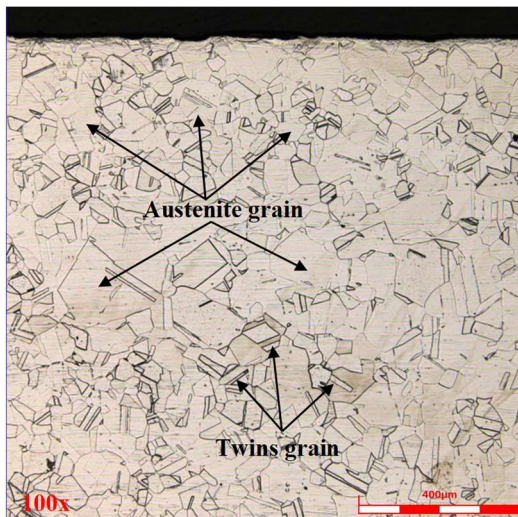
ระหว่างเนื้อเชื่อมและโลหะงาน ความกว้างของเขตบริเวณอิทธิพลทางความร้อนของกระบวนการเชื่อมใกล้เคียงกัน และไม่มีจุดบกพร่องของแนวเชื่อม [6]



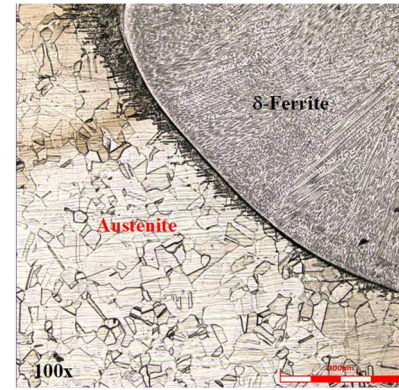
รูปที่ 12 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมของวัสดุ 2 ชนิด



รูปที่ 13 ภาพบริเวณแนวรอยเชื่อมของ A312 TP304 และ A335 P11

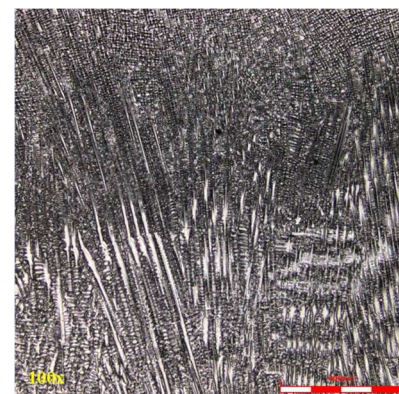


รูปที่ 14 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณเนื้อโลหะพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด A312 TP304 (Base metal: BM1)



รูปที่ 15 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ1)

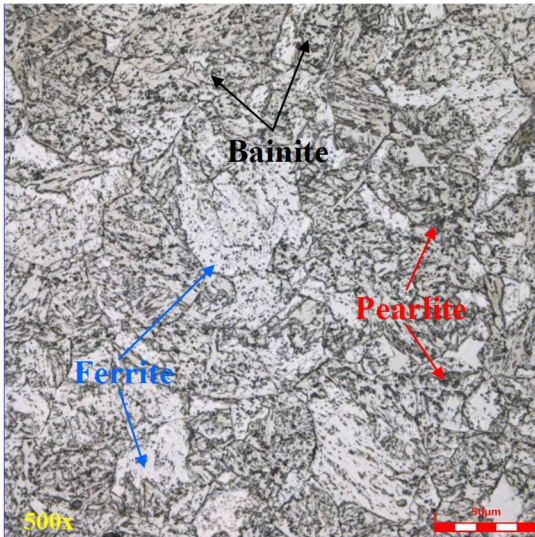
การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลภาคแบบใช้แสง (OM) รูปที่ 13 จะเป็นภาพตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบทั้ง 5 จุด รูปที่ 14 เป็นภาพบริเวณเนื้อโลหะเดิมของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด A312 TP304 (Base metal: BM1) ที่กำลังขยาย 100 เท่า 400 μm โครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปเป็นสแตนเลสชนิดออสเทนนิติกแบบทวิน [7, 10, 11] รูปที่ 15 เป็นภาพบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ1) ที่กำลังขยาย 100 เท่า 400 μm เห็นได้ชัดว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมทั้งสองประกอบด้วยเดนไดรต์เฟอร์ไรต์ปฐมภูมิกับออสเทนไนต์ระหว่างเดนไดรต์ เป็นที่น่าสนใจว่าทั้งสองมีปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรต์ค่อนข้างสูง อาจเนื่องมาจากผลกระทบของปริมาณคาร์บอนต่ำในโลหะตัวเดิมทั้งสองตัวในการเชื่อมในงานนี้ ซึ่งสอดคล้องกับบทบาทที่คาร์บอนมีแนวโน้มที่จะทำให้เฟสออสเทน-ไอต์เสถียรในโลหะเชื่อม [7, 10, 11]



รูปที่ 16 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal zone: WM)

ตารางที่ 5 ผลการตรวจสอบทางเคมีของบริเวณแนวเชื่อม (%wt)

Element	Al	Si	Cr	Fe
%wt	0.12	0.24	21.21	13.73
Element	Ni	Nb	Mo	
%wt	53.98	3.18	7.63	

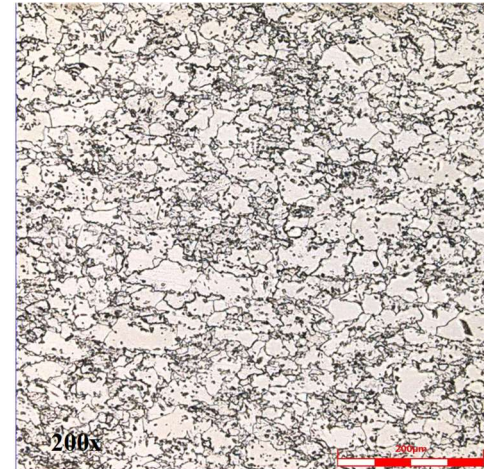


รูปที่ 17 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ2)

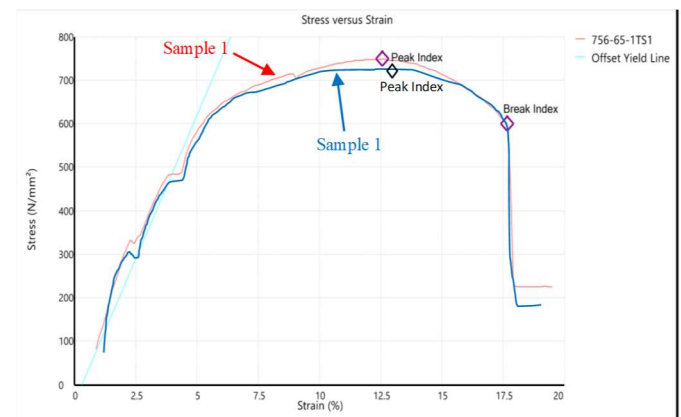
รูปที่ 16 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal zone: WM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า 400 μm ประกอบด้วยเดนไดรต์เฟอร์ไรต์ และ เมทริกซ์ออสเตไนต์ [7] พร้อมกันนี้ยังมีการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive spectroscopy) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลของการวิเคราะห์ พบว่ามีปริมาณธาตุโดยส่วนใหญ่เป็นส่วนประกอบของลวดเชื่อมที่มีธาตุเหล็กมากที่สุด ส่วนธาตุอื่นๆ จะมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 5

รูปที่ 17 เป็นภาพในบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อนต่อการเชื่อมของท่อเหล็ก ASTM A335 P11 (Heat affected zone: HAZ2) ที่กำลังขยาย 500 เท่า 50 μm โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเพิร์ลไลต์ เฟอร์ไรต์ เบนไนต์ที่เป็นเม็ด และคาร์ไบด์ที่เป็นเม็ดเล็กๆ บางชนิด เฟอร์ไรต์หยาบบางตัวจะกระจายไปตามขอบเกรนในลักษณะของโครงตาข่าย และมีคาร์ไบด์จำนวนเล็กน้อย [7] รูปที่ 18 เป็นภาพบริเวณเนื้อโลหะเดิมของ

เหล็ก A335 P11 (Base metal: BM2) ที่กำลังขยาย 200 เท่า 200 μm โครงสร้างจุลภาคของท่อเหล็ก ASTM A335 P11 ประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ รวมถึงเบนไนต์และคาร์ไบด์ที่เป็นเม็ดเล็กๆ จำนวนเล็กน้อย [7]



รูปที่ 18 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณเนื้อโลหะเดิมของเหล็ก A335 P11 (Base metal: BM2)



รูปที่ 19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในชิ้นงานที่ 1 และชิ้นงานที่ 2 ของการเชื่อมต่อ A312 TP304 และ A335 P11

3.2 การทดสอบแรงดึง

ผลการทดสอบแรงดึงจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานเชื่อมตัวอย่างในรูปที่ 19 พบว่าความเค้นทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากการแตกหักจากของชิ้นงานอันเป็นผลจากการทดสอบแรงดึง อย่างไรก็ตามยังตรวจพบว่าการแตกหักทั้งหมดเกิดขึ้นในด้านโลหะพื้นฐาน

A335 Gr.P11 โดยเฉพาะที่ HAZ [9, 10, 15] ดังแสดงในรูปที่ 20 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าส่วนที่เปราะบางที่สุดของชิ้นงานเชื่อม ตัวอย่างคือบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (A335 Gr.P11 HAZ) [12] ดังแสดงไว้ในตารางที่ 6



รูปที่ 20 รอยแตกของชิ้นงานทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบแรงดึง [13]

No.	Yield strength (MPa)	UTS (MPa)	Elongation %	Location of fracture
1	442	750	10.74	A335 Gr.P11 HAZ
2	395	710	10.12	A335 Gr.P11 HAZ

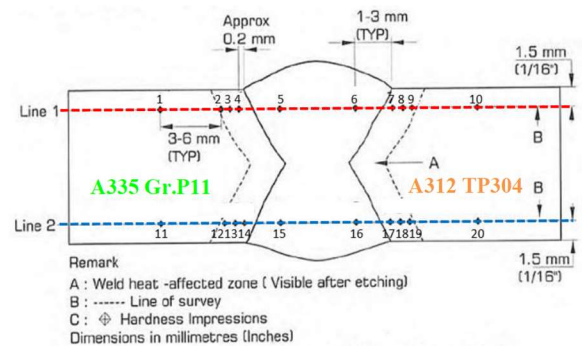
3.3 การทดสอบความแข็ง

ตำแหน่งของบริเวณจุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 21 ผลจากการทดสอบความแข็งจากกระบวนการเชื่อมแบบ GTAW ดังแสดงในรูปที่ 22 โปรไฟล์ความแข็งของรอยเชื่อมแบ่งออกเป็น 5 โซน ได้แก่ บริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base metal: BM P11) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ P11) บริเวณแนวเชื่อม (Weld metal: WM) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ TP304) บริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base metal: BM TP304)

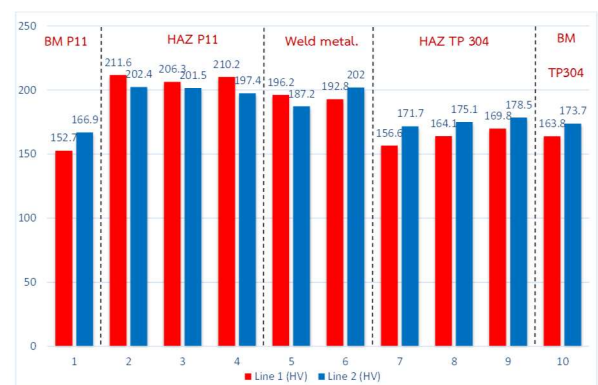
แนวโน้มของค่าความแข็งในแต่ละบริเวณจุดทดสอบทั้ง 10 จุด ในแนวกราฟแท่งที่ 1 (แท่งสีแดง) พบว่ามีค่าความแข็งมากที่สุดที่จุดที่ 2 บริเวณอิทธิพลทางความร้อนเท่ากับ 211.6 HV และค่าความแข็งน้อยที่สุดคือจุดที่ 1 เท่ากับ 152.7 HV และบริเวณอิทธิพลทางความร้อน (HAZ P11) จากตำแหน่งจุดทดสอบที่ 2 - 4 จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าบริเวณแนวเชื่อมเล็กน้อย (WM) ตำแหน่งจุดทดสอบที่ 5 - 6 แต่จะมีค่าความแข็งที่มากกว่าบริเวณอิทธิพลทางความร้อน (HAZ TP304) ตำแหน่งจุดทดสอบที่ 7 - 9 ส่วนแนวโน้มของค่าความแข็งในแต่ละบริเวณจุดทดสอบทั้ง 10 จุด ในแนวกราฟแท่งที่ 2 (แท่งสีน้ำเงิน) พบว่ามีค่าความแข็งมากที่สุดคือจุดที่ 2 บริเวณอิทธิพลทางความร้อนเท่ากับ 202.4 HV และค่าความแข็งน้อย

สุดคือจุดที่ 1 เท่ากับ 166.9 HV และบริเวณอิทธิพลทางความร้อน (HAZ P11) จากตำแหน่งจุดทดสอบที่ 2 - 4 จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าบริเวณแนวเชื่อมเล็กน้อย (WM) ตำแหน่งจุดทดสอบที่ 5 - 6 แต่จะมีค่าความแข็งที่มากกว่าบริเวณอิทธิพลทางความร้อน (HAZ TP304) ตำแหน่งจุดทดสอบที่ 7 - 9

จากการทดสอบพบว่าบริเวณเนื้อเชื่อมเมื่อได้รับความร้อนจากการเชื่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นโครงสร้างของแข็งจึงส่งผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น [9-12] และกระบวนการเชื่อมบริเวณอิทธิพลทางความร้อนที่อยู่ติดกับบริเวณโลหะงานจะมีค่าความแข็งที่มากกว่าบริเวณเนื้อเชื่อม แต่จะมากกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม และจะให้ผลที่เหมือนกันทั้ง 2 กราฟแท่งของการทดสอบ



รูปที่ 21 บริเวณตำแหน่งจุดทดสอบทั้ง 10 จุด



รูปที่ 22 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

3.4 การทดสอบการกัด

ผลการทดสอบการกัดที่ได้ชิ้นงานเชื่อมตัวอย่าง 4 ชิ้น ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C (อุณหภูมิห้อง) ค่าความขึ้นสัมพัทธ์

40% เมื่อทำการัดจนถึงมุมโค้ง 180° ดังในตารางที่ 7 เมื่อทำการตรวจสอบด้วยสายตาไม่พบรอยร้าวของชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมด จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ สรุปได้ว่ากระบวนการเชื่อมในชิ้นงานทั้งหมดนี้มีคุณภาพสูง [14, 15]

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบการัด

No.	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

3.5 การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี

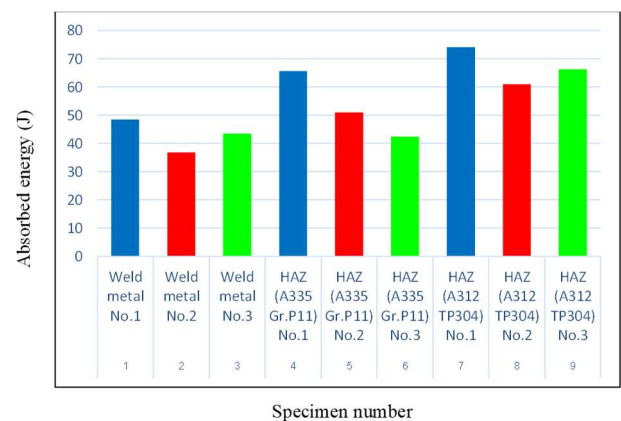
ชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C (อุณหภูมิห้อง) พลังงานที่ดูดซับเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิทดสอบและลักษณะการแตกหักของชิ้นงานหลังการทดสอบแบบชาร์ปีดังแสดงในรูปที่ 23 ปริมาณพลังงานดูดซับของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแบบชาร์ปีทั้งหมดจะแสดงในรูปที่ 24 ผลการทดสอบแรงกระแทกในตารางที่ 8 จะเห็นได้ว่าพลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน HAZ (A312 TP304) มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 67.1 J ในขณะที่พลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน HAZ (A335 Gr.P11) มีค่ารองลงมาเท่ากับ 53 J และ พลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 42.9 J สรุปได้ว่าพลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน HAZ (A312 TP304) มีความเหนียวที่ดีกว่าบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน HAZ (A335 Gr.P11) และ บริเวณแนวเชื่อม [8, 15]



รูปที่ 23 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างภายหลังการทดสอบแรงกระแทก

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบแรงกระแทก

No.	Location of Charpy V-Notch	Absorbed energy (J)	
		Individual	Average
1	Weld metal	48.5	42.9
2		36.8	
3		43.5	
4	HAZ (A335 Gr.P11)	65.6	53
5		51.0	
6		42.4	
7	HAZ (A312 TP304)	74.1	67.1
8		61.0	
9		66.3	



รูปที่ 24 ปริมาณพลังงานดูดซับของชิ้นงานหลังการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี ของการเชื่อมท่อ A312 TP304 และ A335 P11

4. สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมเหล็ก A335 P11 และ A312 TP304 ด้วยวิธีก๊าซทั้งสแตนอาร์คสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อมมีส่วนประกอบของเดนไดรต์เฟอร์ไรต์ และ เมทริกซ์ออสเทนไนต์ พร้อมกันนี้ยังมีผลของการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS พบว่ามีปริมาณธาตุโดยส่วนใหญ่เป็นส่วนประกอบของลวดเชื่อมที่มีธาตุนิเกิลมากที่สุดเท่ากับ 53.98% ธาตุรองลงมาคือโครเมียมเท่ากับ 21.21% ในโซนแนวเชื่อมนี้
2. ผลการทดสอบแรงดึง พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานเชื่อมตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากการแตกหักจากของชิ้นงานอันเป็นผลจากการทดสอบแรงดึง อย่างไรก็ตามยังตรวจพบว่าการแตกหักทั้งหมดเกิดขึ้นในด้านโลหะพื้นฐาน A 335Gr.P 11 โดยเฉพาะที่บริเวณพื้นที่กระทบร้อน HAZ
3. ผลจากการทดสอบความแข็ง พบว่ามีค่าความแข็งมากที่สุดอยู่ในบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ P11) เท่ากับ 211. 6HV และค่าความแข็งน้อยสุดคือบริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base metal: BM P11) เท่ากับ 152. 7HV บริเวณเนื้อเชื่อมเมื่อได้รับความร้อนจากการเชื่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นโครงสร้างของแข็งจึงส่งผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น และกระบวนการเชื่อมบริเวณอิทธิพลทางความร้อนที่อยู่ติดกับบริเวณโลหะงานจะมีค่าความแข็งที่มากกว่าบริเวณเนื้อเชื่อมแต่จะมากกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม
4. การทดสอบการดัดของตัวอย่างชิ้นงาน เมื่อทำการดัดจนถึงมุมโค้ง 180° และทำการตรวจสอบด้วยสายตาไม่พบรอยร้าวของชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมด จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ สรุปได้ว่ากระบวนการเชื่อมในชิ้นงานทั้งหมดนี้มีคุณภาพสูง
5. การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี พบว่าพลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระทบร้อน HAZ (A312 TP304) มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 67. 1J ในขณะที่พลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระทบร้อน HAZ (A335 Gr.P11) มีค่า

รองลงมาเท่ากับ 53 J และ พลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 42. 9J จะสังเกตได้ว่าพลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระทบร้อน HAZ (A312 TP304) มีความเหนียวที่ดีกว่าบริเวณพื้นที่กระทบร้อน HAZ (A335 Gr.P11) และ บริเวณแนวเชื่อม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์ในการทดลอง การให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ในระหว่างการทำงานจนส่งผลให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. หม้อไอน้ำและระบบส่งจ่ายไอน้ำ. เข้าถึงได้จาก: <https://www.dip.go.th/Portals/0/Thermal> [เข้าถึงเมื่อ 15 มกราคม 2566].
- [2] Octalsteel. ASTM A 312 Stainless Steel Pipe Specification. Available from: <https://www.octalsteel.com/wp-content/uploads/2017/10/ASTM-A312-2014-specification-for-seamless-and-welded-austenitic-stainless-steel-pipe.pdf> [Accessed 15th July 2023].
- [3] Cangzhou Yizeng Industry Co.,Ltd. ข้อมูลจำเพาะของท่อ ASTM A335. เข้าถึงได้จาก: <https://th.czyindustry.com/info/astm-a335-pipe-specifications-46087163.html> [เข้าถึงเมื่อวันที่ 18 มิถุนายน 2566].
- [4] SMT-625. AWS A5.14/ASME SFA5.14 ERNiCrMo-3. เข้าถึงได้จาก: <https://arcweldingservice.com/content/file/product/0618201592461732.pdf> [เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 ธันวาคม 2566]
- [5] Chuaiphan W, Chandra-ambhorn S, Sornil B, Bleck W. Microstructure: mechanical and corrosion behaviour of dissimilar weldments between AISI 304 stainless steels and AISI 1020 carbon steels produced by gas tungsten arc

- welding using different consumables. *Key Engineering Materials*. 2009;(410-411): 533-541.
- [6] เดช เหมือนขาว, ยงยุทธ ดุลยกุล, ชัยยุทธ มิ่งาม, วรวิทย์ ศรีวิทยากุล. การศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมเหล็กกล้าโครงสร้าง SS400. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*. 2565;(27): p. 1-7.
- [7] Ahmadi M, Mirsalehi SE. Investigation on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of AISI 316L stainless steel to ASTM A335- P11 low alloy steel dissimilar welding joints. *Materials at High Temperatures*. 2015;32(6): 627-635.
- [8] Yilmaz AF, Gunay M. Investigation of mechanical strength and distortion in submerged arc welding of AH36 ship steel plate. *Journal of Ship Production and Design*. 2017;33(4): 335–341.
- [9] Hu Y, Xue J, Dong C, Jin L, Zhang Z. Effect of additional shielding gas on welding seam formation during twin wire DP-MIG high-speed welding. *Apply Sciences*. 2018;(8): 1658.
- [10] Chuaiphan W, Srijaroenpramong L. Heat input and shielding gas effects on the microstructure, mechanical properties and pitting corrosion of alternative low cost stainless steel grade 202. *Results in Materials*. 2020;(7): 100111.
- [11] Chuaiphan W, Srijaroenpramong L. Evaluation of microstructure, mechanical properties and pitting corrosion in dissimilar of alternative low-cost stainless-steel grade 204 Cu and 304 by GTA welding joint. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(3): 5174-5183.
- [12] Ibrahim IR, Khedr M, Mahmoud TS, Abdel-Aleem HA, Hamada A. 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*. 2021;(11): 1439.
- [13] ตู้เชื่อมไฟฟ้า.COM. ตู้เชื่อมอาร์กอน RILON TIG 200S 220V. เข้าถึงได้จาก : <https://xn--b3cv5aai5eub9aq4e4b5bjj.com/product/rilon-tig-200s#> [เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม 2566].
- [14] Islamovic F, Muratovic P, Gaco D, Kulenovic F. Bend testing of the welded joints. *7th International Scientific Conference on Production Engineering*. 2019;(11): p. 1-7.
- [15] Zhang S, Wang H, Wang Y, Cao L. Study on the novel high manganese austenitic steel welded joints by arc welding for cryogenic applications of LNG tanks. *Materials*. 2023;(16): 2318.