

อิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม The Influence of Post-Weld Heat Treatment on High-Pressure Vessel Steel ASTM A285 Grade C with Gas Metal Arc Welding Process

บุศยา สนใจยุทธ์^{1*} ขวัญชัย คำศรี¹ ชมพูนุท เขียวเมือง¹ และ ปรัชญา เพียสุระ¹

Busaya Sonjaiyout^{1*} Kwanchai Kamsri¹ Chompoonooth Khiewmuang¹ and Prachya Peasura¹

¹ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

¹Department of Production Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi

126 Pracha Uthit Rd., Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140, Thailand

*Corresponding author E-mail: busaya.son@gmail.com

Received 29 April 2022, Accepted 28 November 2022, Published 6 December 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของโครงสร้างในบริเวณรอยเชื่อม และบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน โดยการเชื่อมจะใช้เหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C ที่ความหนา 4 มิลลิเมตร รอยต่อชน เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมด้วยหุ่นยนต์เชื่อมอุตสาหกรรม เมื่อทำการเชื่อมเสร็จแล้วนำไปทำกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม (อบคลายความเค้นตกค้าง) ที่อุณหภูมิ 520, 570 และ 670 องศาเซลเซียส แต่ละอุณหภูมิใช้เวลาในการอบ 30 นาที และ 60 นาที เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคลายความเค้นตกค้าง (Stress Relieve) จากนั้นนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และทดสอบค่าความแข็งโดยวิธีการวิกเกอร์ ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิและเวลาในการอบคลายความเค้นตกค้าง มีผลกระทบร่วมต่อค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อม และบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน อย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณรอยเชื่อม และบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบคลายความเค้นตกค้าง พบว่าเป็นโครงสร้างเพิร์ลไลท์ โครงสร้างอะซิคลูลาเฟอร์ไรท์ และโครงสร้างวิตแมนสแตทเทนเฟอร์ไรท์ ที่มีเกรนหยาบกว่าชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ผ่านการอบคลายความเค้นตกค้าง

คำสำคัญ: การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม กรรมวิธีความร้อนหลังการเชื่อม โครงสร้างจุลภาค ค่าความแข็ง

ABSTRACT

The objective of this research was to study the influence of the post-weld heat treatment of a high-pressure vessel steel ASTM A285 Grade C with a gas metal arc welding process on its hardness and

microstructure of the Weld Metal (WM) and Heat-Affected Zone (HAZ). In a welding process, the 4 mm high-pressure vessel steel ASTM A285 Grade C was welded by a gas metal arc welding robot arcing. Then, the post-weld heat treatment (stress relieving process) was continued at 520, 570, and 670 degrees Celsius for 30 and 60 minutes at each temperature level, compared with the as-weld specimens. After that, optical microscopy was tested. The hardness was also tested by using the Vickers hardness test. The result showed that temperature and time in the stress relieving process significantly affected the hardness in WM and HAZ ($p < 0.05$). The WM and HAZ microstructures of stress-relieved specimens were Pearlite, Acicular ferrite, and Widmanstatten ferrite which showed coarser grain than as-weld specimens.

Keywords: Gas Metal Arc Welding, Post Weld Heat Treatment, Microstructure, Hardness Test

บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิต ภาชนะรับแรงดัน (Pressure Vessels) ถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในกระบวนการผลิตและติดตั้งอยู่เกือบทุกประเภท ที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการทำภาชนะรับแรงดัน หม้อไอน้ำ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และภาชนะอื่น ๆ ที่เก็บของเหลวหรือแก๊สที่มีแรงดันสูง เช่น ถังเก็บน้ำมันดิบ ถังเก็บแก๊สธรรมชาติ ถังเก็บสารเคมีและของเหลว ถังดับเพลิง ถังแก๊สสำหรับงานเชื่อม เป็นต้น ซึ่งเครื่องมืออุปกรณ์หรือชิ้นส่วนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตต้องทำการประกอบโดยกระบวนการเชื่อม โดยกระบวนการเชื่อมที่นิยมใช้คือกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding; GMAW) ซึ่งกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding; GMAW) เป็นกระบวนการที่ต้องการทักษะช่างเชื่อมทำให้คุณภาพการเชื่อมที่ดี สามารถเชื่อมได้ทั้งระบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติเพื่อให้ได้อัตราการผลิตที่สูงขึ้น โดยสามารถควบคุมพารามิเตอร์ในการเชื่อมได้ เช่น กระแสเชื่อม แรงดันวงจรเปิด และความเร็วในการเชื่อม (Chetan and Lalwani, 2018) ด้วยเหตุนี้การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมจึงมีความนิยมนำมาใช้งาน ทั้งนี้เหล็กที่นำมาใช้ในกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมในอุตสาหกรรมภาชนะรับแรงดันส่วนใหญ่ใช้เหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C ซึ่งจะมีความต้านทานแรงดึงสูง มีประสิทธิภาพในสภาวะต่ำ แต่ยังสามารถใช้งานได้หลายสภาวะ และมีปริมาณคาร์บอนสูงจึงทำให้มีความแข็งแรงสูงกว่าเกรด A และเกรด B ของเหล็กกล้าทนแรงดันสูง A285 (ASTM International, 2017) อย่างไรก็ตามยังคงพบปัญหาการใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม เช่น การกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้างในรอยต่อได้ ซึ่งความเค้นตกค้างที่มีค่าสูงหากถูกนำไปใช้งานที่สัมผัสกับไฮโดรเจนหรือความชื้นมักทำให้เกิดการกัดกร่อนและแตกร้าวเพิ่มขึ้นได้ (Hassan et al., 2017)

ในงานวิจัยที่ได้ศึกษาเพิ่มเติม พบงานวิจัยเรื่องการศึกษาค่าอิทธิพลของการอบอ่อนและการอบปกติที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A285 Gr.C พบว่ากรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมทั้งสองประเภทมีความคล้ายคลึงกัน ค่าความแข็งแรงลดลงจากเปราะเป็นเหนียว โดยกระบวนการหลอมที่ต่ำที่สุดสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM 285 เกรด C ที่ 860 °C โดยใช้เวลาแช่ในเตา 30 นาที โครงสร้างจุลภาคพบเกรนที่หยาบขึ้นแต่ยังไม่สูญเสียองค์ประกอบ (Yassin Mustafa Ahmed, 2020) เช่นเดียวกับงานวิจัยเรื่องผลของการอบคลายเค้นตกค้าง ต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่เชื่อมต่างๆ ของเหล็กกล้าคาร์บอน A517 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเหนียวที่เพิ่มขึ้น ความแข็งแรง ความต้านทานการกัดกร่อนและความเค้นตกค้างลดลง พบว่าโครงสร้างจุลภาคไม่มีการเปลี่ยนแปลงในบริเวณแนวเชื่อม (Hassan et al., 2017) จากงานวิจัยเรื่องการศึกษากonstruktion แบบจำลองการแตกหักแบบเหนียวโดยการทดสอบแรงดึง พบว่าการแตกหักแบบเหนียวทำให้เกิดข้อบกพร่องเชิงระนาบ (Carlos and Diego, 2020) และงานวิจัยเรื่อง

การศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ในการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุมบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณเขตอิทธิพลกระทบร้อนที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ พบว่าพารามิเตอร์อัตราการป้อนและแรงดันไฟฟ้ามีผลอย่างมากต่อโครงสร้างจุลภาคของ HAZ และ WM ในขณะที่ความเร็วในการเชื่อมมีผลน้อยต่อโครงสร้างจุลภาคเมื่อเทียบกับอัตราการป้อนและแรงดันไฟฟ้า (Tarik, 2017)

จากการศึกษางานวิจัยข้างต้นเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมในเหล็กกล้าทนแรงดันสูง A285 เกรด C ที่มีการสร้างแบบจำลองการแตกหักแบบเหนียว การทดสอบแรงดึง รวมทั้งผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมด้วยวิธีการอบอ่อนและการอบปกติของเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM 285 เกรด C และการอบคลายเค้นตกค้างของเหล็กกล้าคาร์บอน A517 แต่ยังไม่ได้มีการศึกษาที่ได้ทำการศึกษาในเรื่องการทำการกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมด้วยการอบคลายความเค้นตกค้าง (Stress Relieve) ของเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM 285 เกรด C ซึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตที่ใช้กระบวนการอบคลายความเค้นตกค้างยังมีไม่มากนัก โดยส่วนมากจะใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตหม้อน้ำ และภาชนะรับแรงดัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุมที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งและโครงสร้างจุลภาค โดยงานวิจัยนี้ภาคอุตสาหกรรมการผลิตที่เกี่ยวข้อง ไม่ว่าจะเป็นหม้อน้ำทางอุตสาหกรรม ถึงแก๊สสำหรับงานเชื่อม ถึงเก็บสารเคมีและของเหลว สามารถนำข้อมูลวิจัยดังกล่าวไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกใช้เวลา อุณหภูมิที่เหมาะสมกับกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเหล็กกล้าทนแรงดันสูง A285 เกรด C

วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุมที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็ง
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุมที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาค

วิธีการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม คือ เหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C มีส่วนประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C

Chemical Requirements	C	Mn	P	S
% [wt]	0.28	0.90	0.035	0.040

จากตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C มีส่วนประกอบทางเคมี ได้แก่ คาร์บอน (C) 0.28%, แมงกานีส (Mn) 0.90%, ฟอสฟอรัส (P) 0.035% และกำมะถันหรือซัลเฟอร์ (S) 0.040% (Kearns, 1982)

การเตรียมชิ้นงานเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม ชิ้นงานเหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C มีความหนาขนาด 4 มิลลิเมตร กว้าง 115 มิลลิเมตร ยาว 130 มิลลิเมตร จำนวน 42 แผ่น (21 ชิ้นงาน) รอยต่อแบบต่อชน (Butt joint) ในตำแหน่งท่าราบ (Flat Position) โดยใช้หุ่นยนต์เชื่อมอุตสาหกรรม Almega AX-V6 กระแสไฟชนิด

DCEP ที่แรงดันไฟฟ้า 25 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 95 แอมแปร์ ลวดเชื่อม ER70S-6 เส้นผ่านศูนย์กลางลวดเชื่อม 1.2 มิลลิเมตร ระยะยื่นของลวดเชื่อม 6 มิลลิเมตร (Tarik, 2017) แก๊สปกคลุมที่ใช้ในการเชื่อมคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราการไหล 7 ลิตร/นาที่ (Lostado-Lorza et al., 2018; Croft, 1996)

วิธีการเชื่อม

ทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding; GMAW) ด้วยระบบป้อนลวดเชื่อม (Wire Feeder System) ส่วนหัวเชื่อมจะทำหน้าที่ให้ลวดเชื่อมและแก๊สปกคลุมไหลผ่านออกมาสู่พื้นที่อาร์ก แก๊สจากท่อบรรจุจะไหลเข้าท่อจ่ายสู่หัวฉีด พุ่งออกมาปกคลุมบ่อหลอมเหลวและบริเวณรอบเปลวอาร์ก เพื่อทำหน้าที่เป็นม่านป้องกันไม่ให้ O_2 หรือแก๊สอื่นในบรรยากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับเปลวอาร์กและโลหะที่กำลังหลอมเหลว (Granjon, 1991)

การอบคลายความเค้นตกค้าง (Stress Relieve)

การอบเพื่อคลายความเค้นตกค้างเป็นการให้ความร้อนกับเหล็กกล้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตต่ำ และอบแช่ไว้ที่อุณหภูมินี้ให้นานพอที่จะลดความเค้นตกค้าง (Residual Stress) สาเหตุของความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นกับเหล็กกล้ามีได้หลายสาเหตุ ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการรีด การหล่อ การตีขึ้นรูป การตัดเฉือน การตัด หรือการเชื่อม เวลาในการอบแช่จะอยู่ที่ 1 hr/in และอัตราการเย็นตัวจะอยู่ระหว่าง $55\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ ถึง $100\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบคลายความเค้นตกค้าง (Stress Relieve) โดยทั่ว ๆ ไปจะอยู่ระหว่าง $500 - 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความร้อนที่ให้กับชิ้นงานจะเป็นตัวช่วยลดตึงเครียดและกลุ่มอะตอมที่บิดเบี้ยวมาจากการขึ้นรูปให้หมดไป และในกรณีของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นมาจะทำให้ผลึกเกิดการคืนรูปด้วย (Kearns, 1982) เหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C ที่ผ่านการรีดขึ้นรูปหรือผ่านการเชื่อมจะต้องผ่านการอบคลายความเค้นตกค้าง (Stress Relieve) เนื่องจากเป็นข้อกำหนดตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) (ASTM International, 2017) เมื่อคำนวณปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า (CE) ของเหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C จะพบว่ามีความเสี่ยงต่อการแตกร้าว สามารถคำนวณปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า (CE) จากสูตร (Valery et al., 2002) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{CE} &= \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{(\%Cr + \%Mo + \%V)}{5} + \frac{(\%Ni + \%Cu)}{15} \\ &= 0.28\% + \frac{0.90}{6}\% \\ &= 0.28\% + 0.15\% \\ &= 0.43\% \end{aligned}$$

สรุปได้ว่า เหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C มีปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า (CE) สูงกว่า 0.40% ส่งผลให้มีความเสี่ยงต่อการแตกร้าวในบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน (Heat-Affected Zone : HAZ) จึงจำเป็นต้องอบคลายความเค้นตกค้าง (Stress Relieve)

การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ โดยกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลร่วมของปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิในการอบคลายความเค้นตกค้าง และเวลาในการอบคลายความเค้นตกค้าง (Stress Relieve) มีผลกระทบร่วมต่อปัจจัยตอบสนอง ได้แก่ ค่าความแข็งและโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม

(Weld Metal Zone: WM) และบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน (Heat-Affected Zone : HAZ) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จำนวนชิ้นงานทดลองรวม 18 ชิ้น และชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคลายความเค้นตกค้างจำนวน 3 ชิ้น โดยจัดลำดับการทดลองแบบสุ่มด้วยการจับฉลาก ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางการออกแบบการทดลองการอบคลายความเค้นตกค้าง และผลการทดสอบค่าความแข็ง

Std Order	Run Order	Time (min.)	Temperature (C°)	ค่าความแข็ง (HV)			
				บริเวณรอยเชื่อม	ค่าเฉลี่ย	บริเวณเขตอิทธิพลความร้อน	ค่าเฉลี่ย
1	9	30	520	172.4		184.1	
2	3	30	520	170.8	171.0	186.5	187.1
3	4	30	520	169.7		185.1	
4	1	60	520	159.3		176.6	
5	16	60	520	165.3	162.0	173.3	177.3
6	10	60	520	161.5		177.3	
7	2	30	570	164.3		185.9	
8	5	30	570	167.4	165.8	181.5	185.0
9	6	30	570	165.6		185.2	
10	15	60	570	166.7		177.2	
11	8	60	570	164.1	166.4	174.7	173.9
12	17	60	570	168.4		176.5	
13	7	30	620	159.5		181.0	
14	11	30	620	162.0	160.1	184.7	183.9
15	12	30	620	158.9		185.9	
16	18	60	620	169.5		181.5	
17	13	60	620	167.1	168.5	183.9	183.0
18	14	60	620	169.0		179.8	

ผลการวิจัย และวิจารณ์ผลการวิจัย

ผลการทดลองค่าความแข็ง

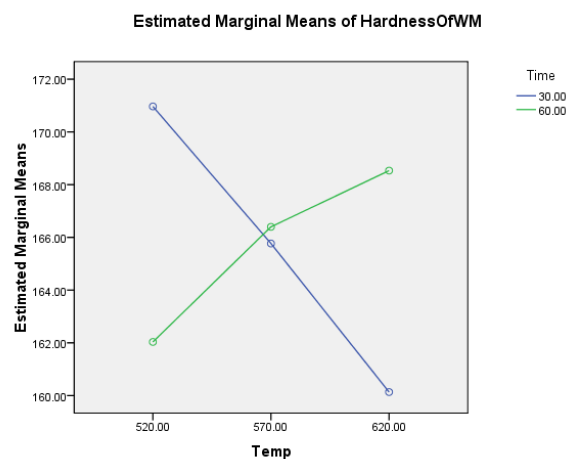
ผลการทดลองค่าความแข็งงานวิจัยได้นำผลการทดสอบค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อม และบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน มาทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลา และอุณหภูมิในการอบคลายความเค้นตกค้างที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็ง ผลการทดลองค่าความแข็งในแต่ละการทดลอง แสดงในตารางที่ 2 มีผลวิเคราะห์ปัจจัยในการอบคลายความเค้นตกค้าง แสดงในตารางที่ 3 และ 4 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อม

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	242.009 ^a	5	48.402	12.921	.000
Intercept	493852.347	1	493852.347	1.318E5	.000
temp	.005	1	.005	.001	.971
time	15.861	2	7.931	2.117	.163
temp * time	226.143	2	113.072	30.184	.000
Error	44.953	12	3.746		
Total	494139.310	18			
Corrected Total	286.963	17			

a. R Squared = .843 (Adjusted R Squared = .778)

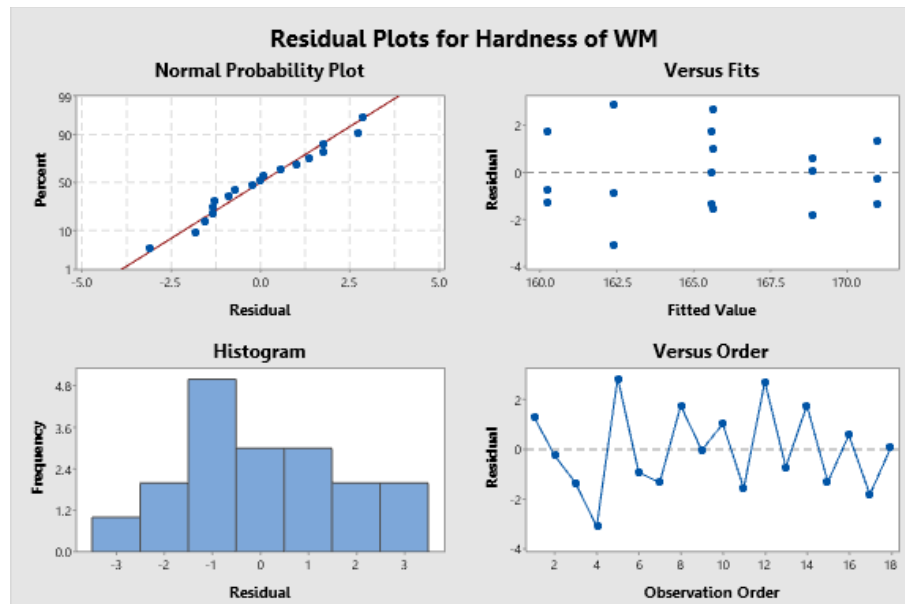
จากตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 (adj) = 0.778 มีความน่าเชื่อถือในการพยากรณ์ หรือมีอิทธิพลถึง 77.80% และเมื่อพิจารณาค่าความแข็งของระดับอุณหภูมิในการอบคลายความเค้นตกค้างที่มีความสัมพันธ์กับเวลาในการอบคลายความเค้นตกค้างที่บริเวณรอยเชื่อม มีค่า P - Value = 0.000 < α (0.05) ดังนั้นจึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่าปัจจัยทั้งสองมีผลกระทบร่วมต่อค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 หรือกล่าวได้ว่าอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อม



ภาพที่ 1 ผลกระทบร่วมของปัจจัยในการอบคลายความเค้นตกค้าง สำหรับค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อม

จากภาพที่ 1 แสดงเวลาในการอบคลายความเค้นตกค้าง (Stress Relieve) พบว่า เวลาในการอบคลายความเค้นตกค้าง 60 นาที ที่อุณหภูมิ 520 °C และเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 620 °C มีค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคลายความเค้นตกค้างที่มีค่าความแข็งเท่ากับ 177.2 HV เวลาในการอบคลายความเค้นตกค้าง 60 นาที ที่อุณหภูมิ 570 °C และ 620 °C ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมลดลงเล็กน้อย และเวลาในการอบคลายความเค้นตกค้าง 30 นาที ที่อุณหภูมิ 520 °C และ 570 °C ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมลดลงเล็กน้อย ดังนั้นที่เวลา

60 นาที อุณหภูมิ 620 °C และที่เวลา 30 นาที อุณหภูมิ 520 °C ไม่เหมาะที่จะนำมาทำการอบคลายความเค้นตกค้าง เนื่องจากอุณหภูมิเป็นอุณหภูมิที่ใกล้จะถึงอุณหภูมิออสเทนไนต์ (Austenite Temperature) จึงอาจมีผลกระทบต่อค่าความแข็งได้



ภาพที่ 2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองบริเวณรอยเชื่อม

จากภาพที่ 2 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของข้อมูลหลังจากการทดลอง พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Probability Plot of the Residuals) ตามแนวเส้นตรง มีการกระจายเทียบกับค่าประมาณ (Residuals Versus the Fitted Values) รูปแบบเป็นอิสระและมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง และไม่ได้มีลักษณะแบบกรวยปลายเปิดหรือรูปแบบลำโพง พิจารณาจากฮิสโตแกรม (Histogram of the Residuals) โดยพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นรูปทรงแบบเบ้ซ้าย และจากแผนภูมิการกระจาย (Residuals Versus the Order of the Data) เป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าความคลาดเคลื่อน พบว่าการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนมีรูปแบบที่เป็นอิสระไม่มีรูปแบบที่แน่นอนแสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent) ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเสถียรของความแปรปรวน มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้ สามารถเขียนสมการถดถอยหรือโมเดลการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณมีเทอมปฏิสัมพันธ์ (Multiple regression analysis model with interaction term) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร กรณีที่มีอิทธิพลทั้งอิทธิพลหลักและอิทธิพลปฏิสัมพันธ์ต่อตัวแปรตาม ได้ดังสมการนี้

$$\text{Hardness of WM} = 326.1 - 3.292 \text{ Time} - 0.2817 \text{ Temp} + 0.005778 \text{ Time*Temp} \quad (1)$$

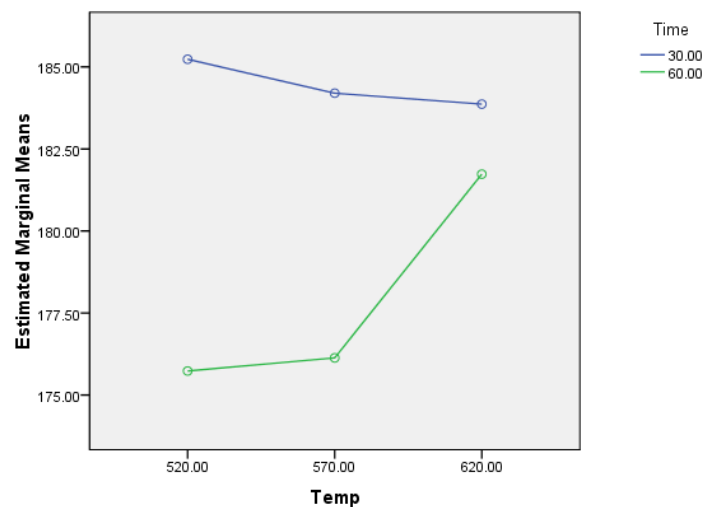
ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	264.612 ^a	5	52.922	13.210	.000
Intercept	590675.805	1	590675.805	1.474E5	.000
temp	194.045	1	194.045	48.437	.000
time	24.803	2	12.402	3.096	.082
temp * time	45.763	2	22.882	5.712	.018
Error	48.073	12	4.006		
Total	590988.490	18			
Corrected Total	312.685	17			

a. R Squared = .846 (Adjusted R Squared = .782)

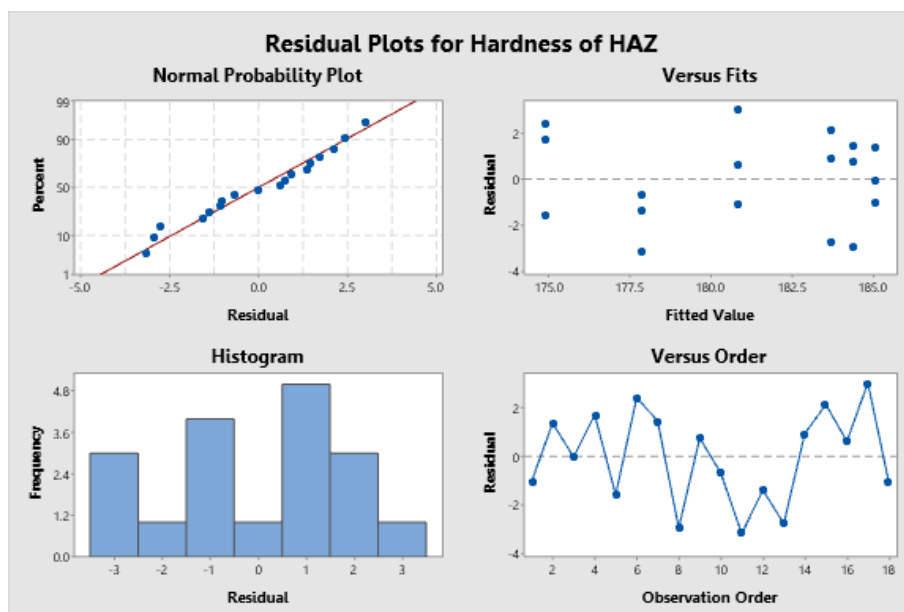
จากตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 (adj) = 0.782 มีความน่าเชื่อถือในการพยากรณ์ หรือมีอิทธิพลถึง 78.20% และเมื่อพิจารณาค่าความแข็งของระดับอุณหภูมิในการอบคลายความเค้นตกค้างที่มีความสัมพันธ์กับเวลาในการอบคลายความเค้นตกค้างที่บริเวณเขตอิทธิพลความร้อน มีค่า P - Value = 0.018 < α (0.05) ดังนั้นจึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่าปัจจัยทั้งสองมีผลกระทบร่วมต่อค่าความแข็งบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 อีกทั้งยังพบว่าระดับอุณหภูมิในการอบคลายความเค้นตกค้าง มีค่า P - Value = 0.000 < α (0.05) สรุปได้ว่าระดับอุณหภูมิในการอบคลายความเค้นตกค้างมีผลกระทบต่อค่าความแข็งบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 หรือกล่าวได้ว่าอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน

Estimated Marginal Means of HardnessOfHAZ



ภาพที่ 3 ผลกระทบร่วมของปัจจัยในการอบคลายความเค้นตกค้าง สำหรับค่าความแข็งบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน

จากภาพที่ 3 เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยอุณหภูมิในการอบคลายความเค้นตกค้าง (Stress Relieve) และเวลาในการอบคลายความเค้นตกค้างที่บริเวณเขตอิทธิพลความร้อน แสดงให้เห็นถึงเวลาในการอบคลายความเค้นตกค้าง 60 นาที ที่อุณหภูมิ 520 °C และอุณหภูมิ 570 °C มีค่าความแข็งบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคลายความเค้นตกค้างที่มีค่าความแข็งเท่ากับ 210.3 HV และเวลาในการอบคลายความเค้นตกค้าง 60 นาที ที่อุณหภูมิ 620 °C และเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 520 °C, 570 °C และ 620 °C ค่าความแข็งบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนลดลงน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 520 °C และอุณหภูมิ 570 °C ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำมาทำการอบคลายความเค้นตกค้างเนื่องจากอุณหภูมิ 620 °C เป็นอุณหภูมิที่ใกล้จะถึงอุณหภูมิออสเทนไนต์ (Austenite Temperature) จึงอาจมีการส่งผลต่อค่าความแข็งได้



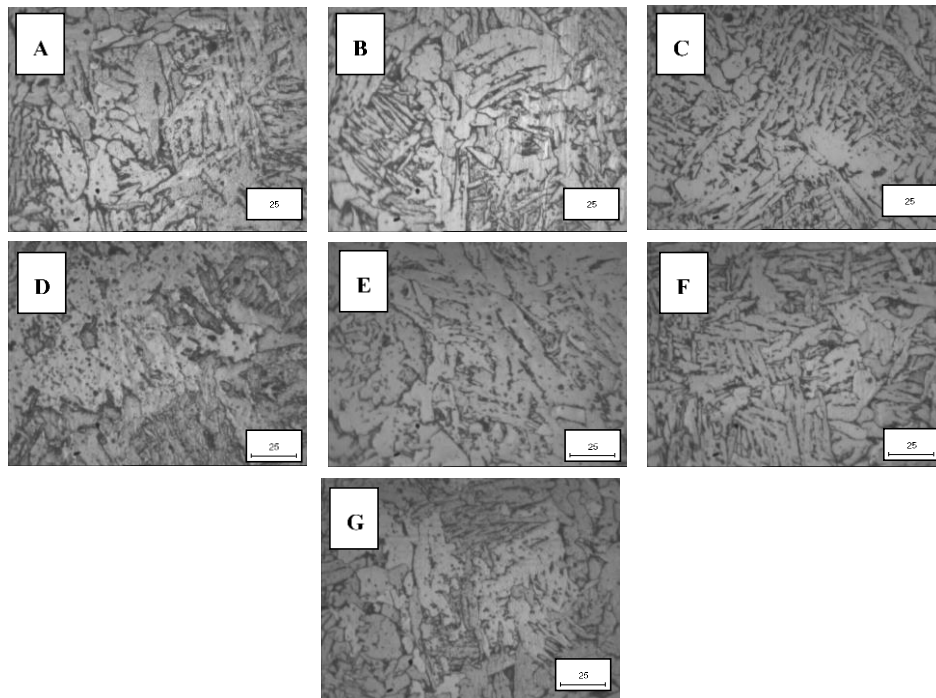
ภาพที่ 4 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน

จากรูปที่ 4 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของข้อมูลหลังการทดลอง พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Probability Plot of the Residuals) ตามแนวเส้นตรง มีการกระจายเทียบกับค่าประมาณ (Residuals Versus the Fitted Values) รูปแบบเป็นอิสระและมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง และไม่ได้มีลักษณะแบบกรวยปลายเปิดหรือรูปแบบลำโพง พิจารณาจากฮิสโตแกรม (Histogram of the Residuals) โดยพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นรูปทรงแบบเบ้ขวา และจากแผนภูมิการกระจาย (Residuals Versus the Order of the Data) เป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าความคลาดเคลื่อน พบว่าการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนมีรูปแบบที่เป็นอิสระไม่มีรูปแบบที่แน่นอนแสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent) ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเสถียรของความแปรปรวน มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้ สามารถเขียนสมการถดถอยหรือโมเดลการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณมีเทอมปฏิสัมพันธ์ (Multiple regression analysis model with interaction term) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร กรณีที่มีอิทธิพลทั้งอิทธิพลหลักและอิทธิพลปฏิสัมพันธ์ต่อตัวแปรตาม ได้ดังสมการนี้

$$\text{Hardness of HAZ} = 240.8 - 1.619 \text{ Time} - 0.0873 \text{ Temp} + 0.002456 \text{ Time*Temp} \quad (2)$$

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

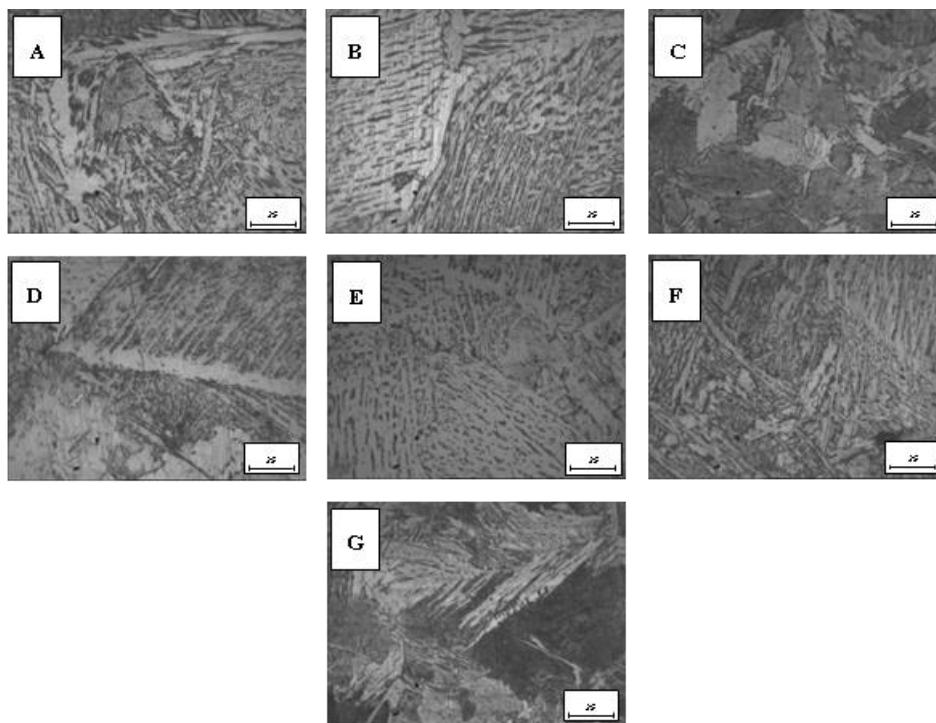
ผลการทดลองโครงสร้างจุลภาคงานวิจัยได้นำผลการโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม และบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน มาทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลา และอุณหภูมิในการอบละลายความเค้นตกค้างที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาค ผลการทดลองโครงสร้างจุลภาคในแต่ละการทดลอง แสดงในภาพที่ 5 และภาพที่ 6 สามารถวิเคราะห์ปัจจัยในการอบละลายความเค้นตกค้าง ได้ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานที่อบละลายความเค้นตกค้าง (A) อุณหภูมิ 570 °C เป็นเวลา 30 นาที (B) อุณหภูมิ 570 °C เป็นเวลา 60 นาที (C) อุณหภูมิ 520 °C เป็นเวลา 30 นาที (D) อุณหภูมิ 520 °C เป็นเวลา 60 นาที (E) อุณหภูมิ 620 °C เป็นเวลา 30 นาที (F) อุณหภูมิ 620 °C เป็นเวลา 60 นาที (G) ไม่ผ่านการอบละลายความเค้นตกค้าง

จากภาพที่ 5 และผลการทดสอบค่าความแข็งในตารางที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบที่แต่ละระดับปัจจัยพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบละลายความเค้นตกค้างเพิ่มมากขึ้น ที่เวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 520 °C และ 570 °C มีแนวโน้มที่จะส่งผลให้ค่าความแข็งเฉลี่ยที่บริเวณรอยเชื่อมลดลง โครงสร้างจุลภาคเป็นโครงสร้างเพิร์ลไลท์ และโครงสร้างอะซิคลูลาเฟอร์ไรท์ (Acicular ferrite) มีลักษณะเป็นผลึกเข็มสั้นสานกันซึ่งมีเม็ดเกรนหยาบขึ้นตามลำดับอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้นทั่วทั้งบริเวณรอยเชื่อม (Leonardo et al., 2020; Almigdad et al., 2020) และที่เวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 520 °C และ 570 °C มีแนวโน้มที่จะส่งผลให้ค่าความแข็งเฉลี่ยที่บริเวณรอยเชื่อมลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากเป็นผลจากการกระจายความร้อนจากบริเวณรอยเชื่อมสู่บริเวณอิทธิพลกระทันร้อน (Zangeneha, 2020) แต่เมื่อเปรียบเทียบกันพบว่าที่อุณหภูมิ 620 °C มีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นผลเนื่องจากที่อุณหภูมิ 620 °C เป็นอุณหภูมิที่ใกล้จะถึงอุณหภูมิออสเทนไนต์ (Austenite Temperature) ที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงาน (Helio Pires Junior et al., 2019; Croft, 1996) จึงไม่เหมาะที่จะนำมาทำการอบละลายความเค้นตกค้าง โดยมีโครงสร้างจุลภาคเป็นโครงสร้างเพิร์ลไลท์ และโครงสร้างอะซิคลูลาเฟอร์ไรท์ มีลักษณะเป็นผลึกเข็มสั้นสานกันซึ่งมีเม็ดเกรนหยาบขึ้น ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบละลายความเค้นตกค้าง และชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ผ่านการอบละลายความเค้นตกค้าง พบว่าชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบละลายความเค้นตกค้าง มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่บริเวณรอย

เชื่อมลดลง โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการอบคลายความเค้นตกค้าง เป็นโครงสร้างเฟิร์ลไลต์ และโครงสร้างอะซิคลูลาที่มีเม็ดเกรนหยาบกว่าชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ผ่านการอบคลายความเค้นตกค้าง จึงกล่าวได้ว่ากรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมมีอิทธิพลส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งและโครงสร้างจุลภาค สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hassan Sharifi et al. ที่ได้ทำการศึกษาลักษณะของกรรมวิธีการอบคลายความเค้นตกค้างที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่เชื่อมต่าง ๆ ของเหล็กกล้า A517 ซึ่งพบว่ากรรมวิธีการอบคลายความเค้นตกค้างหลังการเชื่อมช่วยลดความแข็งบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน (Hassan et al., 2017)



ภาพที่ 6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนของชิ้นงานที่อบคลายความเค้นตกค้าง (A) อุณหภูมิ 570 °C เป็นเวลา 30 นาที (B) อุณหภูมิ 570 °C เป็นเวลา 60 นาที (C) อุณหภูมิ 520 °C เป็นเวลา 30 นาที (D) อุณหภูมิ 520 °C เป็นเวลา 60 นาที (E) อุณหภูมิ 620 °C เป็นเวลา 30 นาที (F) อุณหภูมิ 620 °C เป็นเวลา 60 นาที (G) ไม่ผ่านการอบคลายความเค้นตกค้าง

จากภาพที่ 6 และผลการทดสอบค่าความแข็งในตารางที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบที่แต่ละระดับปัจจัยพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบคลายความเค้นตกค้าง (Stress Relieve) เพิ่มขึ้น ที่เวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 520 °C, 570 °C และ 620 °C มีแนวโน้มที่จะส่งผลให้ค่าความแข็งเฉลี่ยที่บริเวณเขตอิทธิพลความร้อนลดลง โครงสร้างจุลภาคเป็นโครงสร้างเฟิร์ลไลต์ และโครงสร้างวิตแมนสแตทเทินเฟอไรต์ (Widmanstatten Ferrite) มีลักษณะเป็นผลึกเข็มค่อนข้างยาวเรียงตัวในแนวเดียวกัน โครงสร้างนี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากมีอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าบริเวณรอยเชื่อม (Leonardo et al., 2020) มีเม็ดเกรนหยาบขึ้นตามลำดับอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้น และที่เวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 520 °C และ 570 °C มีแนวโน้มที่จะส่งผลให้ค่าความแข็งเฉลี่ยที่บริเวณเขตอิทธิพลความร้อนลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากเป็นผลจากการกระจายความร้อนจากบริเวณรอยเชื่อมสู่บริเวณอิทธิพลความร้อน (Zangeneha et al., 2020) และที่อุณหภูมิ 620 °C มีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นผลเนื่องจากที่อุณหภูมิ 620 °C เป็นอุณหภูมิที่ใกล้จะถึงอุณหภูมิออสเทนไนต์ (Austenite Temperature) ที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงาน (Helio Pires Junior et al., 2019; Croft, 1996) ไม่เหมาะที่จะนำมาทำการอบคลายความเค้นตกค้าง โดยมี

โครงสร้างจุลภาคเป็นโครงสร้างเพิร์ลไลท์ และโครงสร้างวิดแมนสแตทเทนเฟอร์ไรท์ ที่มีเม็ดเกรนหยาบขึ้นตามลำดับอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบคลายความเค้นตกค้าง และชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ผ่านการอบคลายความเค้นตกค้าง พบว่าชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบคลายความเค้นตกค้าง มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่บริเวณเขตอิทธิพลความร้อนลดลง โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการอบคลายความเค้นตกค้าง เป็นโครงสร้างเพิร์ลไลท์ และโครงสร้างวิดแมนสแตทเทนเฟอร์ไรท์ ที่มีเม็ดเกรนหยาบกว่าชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ผ่านการอบคลายความเค้นตกค้าง จึงกล่าวได้ว่ากรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมมีอิทธิพลส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งและโครงสร้างจุลภาค สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hassan Sharifi et al ที่ได้ทำการศึกษาผลกระทบของกรรมวิธีการอบคลายความเค้นตกค้างที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่เชื่อมต่าง ๆ ของเหล็กกล้า A517 ซึ่งพบว่กรรมวิธีการอบคลายความเค้นตกค้างหลังการเชื่อมช่วยลดความแข็งบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน (Hassan et al., 2017)

สรุปผลการวิจัย

ผลการทดสอบค่าความแข็งและทดสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบคลายความเค้นตกค้าง ที่อุณหภูมิ 520 °C เป็นเวลา 30 นาที, อุณหภูมิ 520 °C เป็นเวลา 60 นาที, อุณหภูมิ 570 °C เป็นเวลา 30 นาที, อุณหภูมิ 570 °C เป็นเวลา 60 นาที, อุณหภูมิ 620 °C เป็นเวลา 30 นาที, อุณหภูมิ 620 °C เป็นเวลา 60 นาที และชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ผ่านการอบคลายความเค้นตกค้าง สามารถสรุปได้ว่าค่าความแข็งบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนมีค่าความแข็งเฉลี่ยมากกว่าค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเป็นผลมาจากส่วนประกอบทางเคมีของลวดเชื่อม และเป็นผลมาจากบริเวณรอยเชื่อมมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปกคลุมทำให้บริเวณรอยเชื่อม มีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่าบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน โดยชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ผ่านการอบคลายความเค้นตกค้าง พบโครงสร้างเพิร์ลไลท์ (Pearlite) และโครงสร้างเฟอร์ไรท์ (Ferrite) เป็นโครงสร้างพื้นที่บริเวณรอยเชื่อม และบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน โดยบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน มีค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 210.3 HV บริเวณรอยเชื่อม มีค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 177.2 HV และชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบคลายความเค้นตกค้าง บริเวณรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งเฉลี่ยน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 154.8 HV ที่อุณหภูมิ 520 °C เป็นเวลา 60 นาที พบโครงสร้างเพิร์ลไลท์ และพบโครงสร้างเฟอร์ไรท์ที่มีเม็ดเกรนหยาบขึ้น เป็นโครงสร้างพื้นที่ บริเวณรอยเชื่อม ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 175.0 HV ที่อุณหภูมิ 520 °C เป็นเวลา 30 นาที พบโครงสร้างเพิร์ลไลท์ และพบโครงสร้างเฟอร์ไรท์ที่มีเม็ดเกรนหยาบขึ้นเป็นโครงสร้างพื้นที่ และบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนที่มีค่าความแข็งเฉลี่ยน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 154.8 HV ที่อุณหภูมิ 570 °C เป็นเวลา 60 นาที พบโครงสร้างเพิร์ลไลท์ และโครงสร้างเฟอร์ไรท์ที่มีเม็ดเกรนหยาบขึ้นเป็นโครงสร้างพื้นที่ บริเวณเขตอิทธิพลความร้อนที่มีค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 185.9 HV ที่อุณหภูมิ 620 °C เป็นเวลา 30 นาที พบโครงสร้างเพิร์ลไลท์ และโครงสร้างเฟอร์ไรท์ที่มีเม็ดเกรนหยาบขึ้นเป็นโครงสร้างพื้นที่ จากค่าความแข็งที่ลดลงและโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยของชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบคลายความเค้นตกค้าง และชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ผ่านการอบคลายความเค้นตกค้าง (Stress Relieve) จะเห็นได้ว่า การอบคลายความเค้นตกค้าง หลังการเชื่อมเหล็กกล้าทนแรงดันสูง ASTM A285 เกรด C ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมมีอิทธิพลส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งและโครงสร้างจุลภาค

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่เอื้อเฟื้อสถานที่การดำเนินการศึกษาทดลอง รวมไปถึงเครื่องมืออุปกรณ์ที่ช่วยอำนวยความสะดวกตลอดจนการทดลองสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- ASTM International. (2017). Standard Specification For Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, Low- And Intermediate-Tensile Strength. **ASTM A285/A285M-17**.
- Almigidad, B., Fadi, A., Al-Badour, Akeem, Y. A., and Nesar M. (2020). Effect of Process Parameters on Microstructural and Mechanical Properties of Friction Stir Diffusion Cladded ASTM A516-70 Steel using 5052 Al Alloy. **Journal of Manufacturing Procedd**, 34, 451-462.
- Carlos, A. C., and Diego, F. B. S. (2020). Modeling ductile fracture using critical strain locus and softening law for a typical pressure vessel steel. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 196, 1-17.
- Chetan, A. S., and Lalwani, D. I. (2018). Experimental Investigation of Gas Metal Arc Welding (GMAW) Process Using Developed Articulator. **Materials Science and Engineering**, 455(2).
- Croft, D. N. (1996). Heat Treatment of Welded Steel Structures. **Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies**, 21-47.
- Granjon, H. (1991). **Fundamentals of Welding Metallurgy**. Abington Publishing. Cambridge, UK.
- Helio, P. J., Fernanda, S. L., Wagner, A. P., Sergio, N. M., Verônica, S. C., and Alisson, C. R. S. (2019). Mechanical properties and microstructural characterization of a novel 316L austenitic stainless steel coating on A516 Grade 70 carbon steel weld. **Journal of Materials Research and Technology**, 1-15.
- Hassan, S., Solayman, R., and Morteza, T. (2017). The effect of stress relieving treatment on mechanical properties and microstructure of different welding areas of A517 steel. **Materials Research Express**, 4(12), 1-27.
- Kearns, W. H. (1982). **Welding Handbook Metals and Their Weldability**. American Welding Society. Miami, Florida, USA, 7th edition.
- Lostado-Lorza, R., Escribano-Garcia, R., Roberto, F., María A., and Martínez, C. (2018). Using genetic algorithms with multi - objective optimization to adjust finite element models of welded joints. **Metals** 2018, 230(8), 1-23.
- Leonardo, B. G., Luiz, C. C., Claudinei, R. G., and Sidney, C. A. (2020). Failure analysis of a steel slide ring of a tubular ball mill used in an iron ore mining plant. **Engineering Failure Analysis**, 110, 1-15.
- Teena, C., and Kailash, C. (2017). A Study on effect of various process variables in gas metal arc welding. **International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering**, 7(12), 147 – 154.

- Tarik, T. (2017). Study the influence of gas metal arc welding parameters on the weld metal and heat affected zone microstructures of low carbon steel. **International Journal of Engineering and Technology**, 9(3), page 2013-2019.
- Valery, R., Don, L., Raymond, L., Cook, and Micah, B. (2002). **Handbook of Induction Heating**. Engineering & Technology. Boca Raton, Florida, USA, 1th edition.
- Yassin, M. A. (2020). The influence of annealing and normalizing processes on the mechanical properties and chemical composition of carbon steel ASTM A285 Gr.C. **International Journal of Recent Technology and Engineering**, 8(5), 4928-4933.
- Zangeneha, Sh., Bakhtiaria, R., Veysib, F., and Jowzib, M. (2020). Thermal/stress analysis of a failed fire-tube heater treater. **Engineering Failure Analysis**, 116, 1-12.