

Research Article

อิทธิพลของการเชื่อมเทมเปอร์บีทในวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนด้วย กระบวนการเชื่อมอาร์คไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

Effects of temper bead on carbon steel by shielded metal arc welding process

สิทธิพงษ์ แสงอินทร์^{1*}

Sittipong sang-in^{1*}

¹ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเชื่อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ
กรุงเทพฯ 10800

¹ Department of Welding Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology
North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800

*E-mail: sittipong.a@cit.kmutnb.ac.th

Received: 12/02/2018; Accepted: 12/06/2018

บทคัดย่อ

การเชื่อมเทมเปอร์บีทเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ได้ถูก
ดำเนินการเพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งของโลหะเชื่อม วัสดุในการทดลอง คือ แผ่นเหล็กกล้า
คาร์บอน ASTM A 36 ที่มีขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 150 และหนา 5 มิลลิเมตร ลวดเชื่อมที่ใช้คือ AWS A 5.1
E 7016 การทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรก ศึกษาอิทธิพลของระยะการเชื่อมทับแนวที่มีผลต่อสมบัติ
โลหะเชื่อม โดยทำการเชื่อมด้วยกระแส 90-110 แอมแปร์ ส่วนที่สอง ศึกษาอิทธิพลของชั้นแนวเชื่อมจำนวน 6 ชั้น ที่
กระแส 120 แอมแปร์ ที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อม จากผลการศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของ
พื้นที่ผลกระทบบร้อน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและมีรูปร่างเกรนที่มีความหยาบมากกว่าพื้นที่การ
หลอมละลาย โครงสร้างจุลภาคของพื้นที่การเชื่อมได้รับการปรับปรุงและแสดงความแข็งต่ำกว่าโลหะฐานและพื้นที่
กระทบบร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งก่อนและหลังการเชื่อมพบว่าความแข็งของโลหะเชื่อมมีค่าลดลงทุกชั้น
การเชื่อม

คำสำคัญ: การเชื่อมเทมเปอร์บีท, ความแข็งของโลหะเชื่อม, โครงสร้างจุลภาค

Abstract

A temper bead welding of carbon steel using a shielded metal arc welding (SMAW) process was performed to study microstructure and hardness of the weld metal. A material using in this experiment was ASTM A36 carbon steel plate that was 50 millimeters in width, 150 millimeters in length and 5 millimeters in thickness. The welding electrode was AWS A5.1 E7016. The experiment was divided into 2 parts. Firstly, the effect of welding bead overlap distance on the weld property with the welding current of 90-110 amperes was investigated. Secondly, the effect of the welding layer on the weld property with 6 welding layers and the welding current of 120 amperes was inspected. From the study and analysis on macro and microstructure of the heat affected zone (HAZ), it was found that there was the alteration in microstructure and more rough grains shape than in the fusion area. The microstructure of the tempered area was improved and showed the decreasing of hardness lower than the base metal and HAZ. When compared the hardness of pre- and post- temper, it was revealed that the hardness of the weld metal decreased in all weld layers.

Keywords: temper bead welding, weld metal hardness, microstructure

บทนำ

กระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ความร้อน ได้จากการอาร์ระหว่างลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์กับชิ้นงาน เพื่อหลอมละลายลวดเชื่อมและชิ้นงานให้ติดกัน แกนลวดเชื่อมทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าและหลอมละลายเป็นเนื้อโลหะเชื่อม ส่วนฟลักซ์ที่หุ้มลวดเชื่อมหลอมละลายแตกตัวเป็นแก๊สปกคลุม และหลอมละลายเป็นสแลกหลอมเหลว (molten slag) เพื่อป้องกันบรรยากาศภายนอกเข้ามาทำปฏิกิริยากับแนวเชื่อมและช่วยลดอัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อม

เหล็กกล้าคาร์บอนสามารถเปลี่ยนสมบัติทางกลได้โดยวิธีการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน การเพิ่มความแข็งแรงทางกล การเพิ่มธาตุผสม หรือหลายวิธีการร่วมกัน เหล็กกล้าคาร์บอนเมื่อได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ จะเปลี่ยนเป็นเฟสออสเทนไนต์ซึ่งเป็นเฟสที่ไม่เสถียร ณ อุณหภูมิห้อง และสามารถละลายคาร์บอนได้สูง ถ้าควบคุมการเย็นตัวอย่างช้า ๆ ลงมาที่อุณหภูมิห้อง เฟสออสเทนไนต์จะกลับมาเป็นเฟอร์ไรต์ หรือ เฟอร์ไรต์หรือเพิร์ลไลต์ หรือทั้งสองโครงสร้างร่วมกัน (Limmaneevichitr, 2005)

Shen et al. (2012) ได้ศึกษาผลของความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานต่อขนาดรูปร่างของแนวเชื่อม ผลกระทบต่อบริเวณกระทบร้อนของแนวเชื่อม (heat affected zone: HAZ) ในกระบวนการเชื่อมอาร์คใต้ฟลักซ์ (submerged arc welding: SAW) พบว่าเมื่อความร้อนลงสู่ชิ้นงานสูงขึ้น ขนาดรูปร่าง ทั้งความนูน ความกว้าง ความลึก ของแนวเชื่อม รวมถึงขนาดของบริเวณกระทบร้อนเพิ่มสูงขึ้น โครงสร้างจุลภาคเป็น โปริยูเทคตอยเฟอร์ไรท์เกรนละเอียด บริเวณ HAZ ซึ่งละเอียดกว่าเนื้อโลหะเดิมที่ทำการเชื่อมบริเวณ HAZ เกรนหยาบ ได้โครงสร้างเบนไนท์ เฟอร์ไรท์ และเฟรลิตไลท์ ในขณะที่ Aloraier et al. (2006) ได้ศึกษาการเชื่อมอาร์คฟลักซ์คอร์ (flux cored arc welding: FCAW) ด้วยการทำเทมเปอร์เบด (temper bead) เพื่อลดการให้ความร้อนหลังการเชื่อมเป็นวิธีการลดความเค้นตกค้างจากการเชื่อม ซึ่งส่งผลต่อการเทมเปอร์ โครงสร้างแนวเชื่อมและ HAZ ซึ่งทำให้สมบัติทางกลถูกลดทอนลงไปด้วย อันได้แก่ ความต้านทานการกีดตัว ความต้านทานแรงดึง เมื่อผ่านวัฏจักรทางความร้อนจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อมหลายครั้ง

ความร้อนจากการเชื่อมส่งผลทำให้บริเวณชิ้นงานที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อน HAZ เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาค เป็นผลให้สมบัติทางกลที่ได้เปลี่ยนแปลง จำเป็นต้องให้ความร้อนกับชิ้นงานหลังการเชื่อมเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกล อุณหภูมิสูงที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานขณะการเชื่อมซ้อนแนวหลายชั้น ในกรณีชิ้นงานหนาที่สูงเกินค่าอุณหภูมิวิกฤต เป็นช่วงอุณหภูมิที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค อย่างไรก็ตาม ความร้อนจากการเทมเปอร์เบดในแนวเชื่อมถัดไปมีข้อจำกัดเรื่องความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิอันเนื่องมาจากเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับที่ต่างกันและระดับของการเทมเปอร์เมื่อมีการเชื่อมซ้อนทับหลายแนวเชื่อม เพื่อที่จะเข้าใจถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ว่าส่งผลอย่างไรต่อสมบัติทางกล และ โครงสร้างทางจุลภาคที่เกิดขึ้น การวิจัยอิทธิพลของการเชื่อมเทมเปอร์เบดในเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์นี้จะทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติทางกล

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้แบ่งการทดลองออกเป็นชุดการทดลอง ใช้วัสดุ ASTM A36 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 1

การทดลองที่ 1 ศึกษาเปอร์เซ็นต์การเชื่อมทับแนวต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล โดยในการทดลองนำชิ้นงานวัสดุเหล็กกล้า ASTM A36 มาตัดให้ได้ขนาดกว้าง 50 ยาว 150 และหนา 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1 นำชิ้นงานมาลบคมจากการตัดบริเวณขอบของชิ้นงาน และบริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน จากนั้นอบลวดเชื่อมเพื่อลดความชื้นภายในฟลักซ์ ที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เชื่อมโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบ DC electrode positive (DCEP) ลวดเชื่อม AWS A5.1 E7016 เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร ด้วยกระแส 90, 100 และ 110 แอมแปร์ ทำการเชื่อมแนวที่หนึ่ง เป็นการเชื่อมเดินแนวบนแผ่นงาน ทำความสะอาดแนวเชื่อมแนวที่หนึ่งและปล่อยให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วเชื่อมแนวเชื่อมแนวที่สองตามจุดที่กำหนดไว้เพื่อให้ได้เปอร์เซ็นต์การเชื่อมทับ

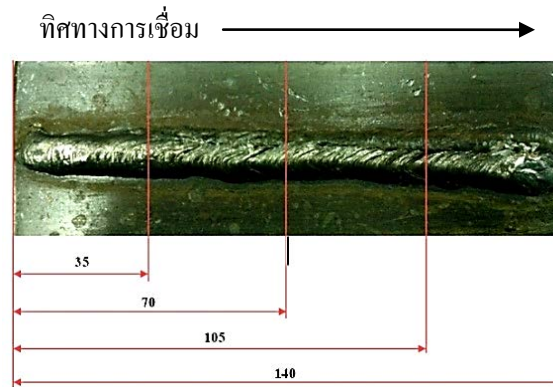
แนวที่หลากหลาย หลังจากนั้นจะทำการตัดชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การวัดการร่อนทับ และการทดสอบค่าความแข็งในแนวตัดขวางชิ้นงาน ดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1. ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงาน (ASTM A36/A36M-14 Standard Specification for Carbon Structural Steel) (American Society of Mechanical Engineers, 2007)

Fe	C	P	S	Mn	Cu
99%	0.26%	0.04%	0.05%	0.75%	0.2%



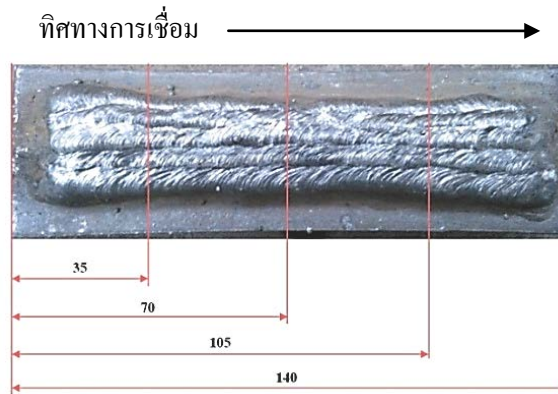
รูปที่ 1. ขนาดชิ้นงาน



รูปที่ 2. ตำแหน่งการตัดชิ้นงานทดสอบเปอร์เซ็นต์การร่อนทับ

การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของจำนวนชั้นของแนวเชื่อมต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล โดยในการทดลองนำชิ้นงานวัสดุเหล็กกล้า ASTM A36 มาตัดให้ได้ขนาดกว้าง 50 ยาว 150 และหนา 5 มิลลิเมตร ใช้กระแสไฟฟ้า

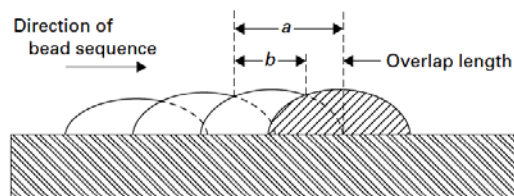
แบบ DCEP ด้วยกระแสไฟฟ้า 120 แอมแปร์ กับลวดเชื่อม AWS A5.1 E7016 เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 มิลลิเมตร เชื่อมทั้งหมด 6 ชั้น หลังจากนั้นทำการตัดขวางชิ้นงาน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3. ตำแหน่งการตัดชิ้นงานทดสอบ

การวัดผลเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ

การวัดผลเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับสามารถหาได้จากสมการ $\frac{(a-b)}{a} \times 100\%$ ตามวิธีการของ ASME section IX (American Society of Mechanical Engineers, 2015) ดังรูปที่ 4

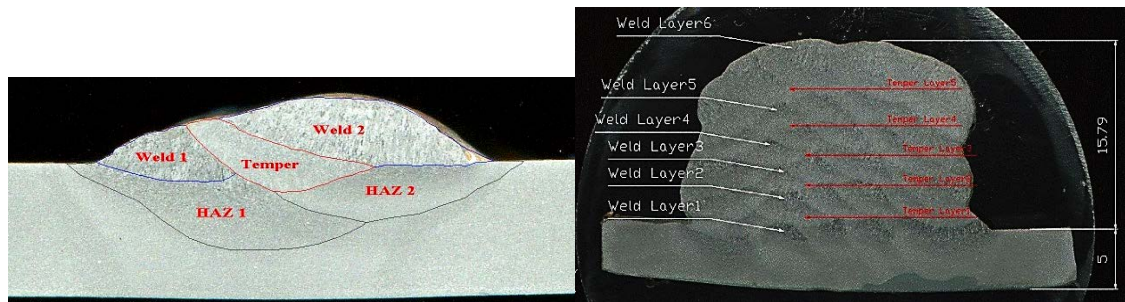


รูปที่ 4. การวัดผลเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ

ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบความแข็ง

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเพื่อศึกษาบริเวณผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อม เตรียมชิ้นงานการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ตัดด้วยเลื่อยกลในแนวตัดขวางที่แสดงก่อนหน้า แล้วจึงนำชิ้นงานมาขึ้นรูปตัวเรือนเย็น ชัดผิวให้ละเอียดด้วยกระดาษทรายและขัดชิ้นตอนสุดท้ายด้วยผงอะลูมินาออกไซด์ ถ้างชิ้นงานให้สะอาด กัดกรด ด้วยส่วนผสมของสารละลายที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างตามมาตรฐาน ASM handbook 2004 (Benscoter &

Bramfitt, 2004) ประกอบด้วย กรดไนตริก (HNO_3) เข้มข้น 5 มิลลิลิตร และเอทิลแอลกอฮอล์ ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) 95 มิลลิลิตร หลังจากการกัดกรวดเสร็จแล้ว นำชิ้นงานที่ได้ มาถ่ายภาพโครงสร้างและทดสอบความแข็งด้วยวิธีไมโครวิกเกอร์ (micro vickers hardness testing) ต่อไป ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5. ผิวงานที่ผ่านการกัดกรวดจากการทดลองที่ 1 (ซ้าย) และ 2 (ขวา)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวัดเปอร์เซ็นต์การซึ้นทับ

การวัดเปอร์เซ็นต์การซึ้นทับของแนวเชื่อมจากกระแสไฟฟ้า 90 และ 100 แอมแปร์ พบว่าที่ตำแหน่งเดียวกัน เมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การซึ้นทับก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เป็นผลมาจากความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความกว้างของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น แต่ในตำแหน่ง 1 และ 2 ของกระแสไฟฟ้า 100 และ 110 แอมแปร์ ความกว้างของแนวเชื่อมลดลงเล็กน้อย ทำให้เปอร์เซ็นต์การซึ้นทับลดลง เป็นผลมาจากความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานมีความเข้มข้นสูงขึ้นมา จึงทำให้ถ่ายเทลงสู่ด้านล่างของชิ้นงานส่งผลให้การหลอมลึกมากขึ้น ในขณะที่อัตราการเติมเนื้อโลหะงานเท่าเดิมความกว้างจึงลดลงแต่ไปเพิ่มขึ้นในส่วนของความลึกแทน ตำแหน่งที่ 3 นั้นได้ผลเปอร์เซ็นต์การซึ้นทับเพิ่มขึ้นเช่นเดิมเพราะใกล้กับจุดหยุดเชื่อมซึ่งบังคับให้ทับกันสมบูรณ์จากการออกแบบการทดลอง ตารางที่ 2 แสดงเปอร์เซ็นต์การเชื่อมซึ้นทับ จากการวัดที่ตำแหน่งเดียวกันเมื่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 90-110 แอมแปร์

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

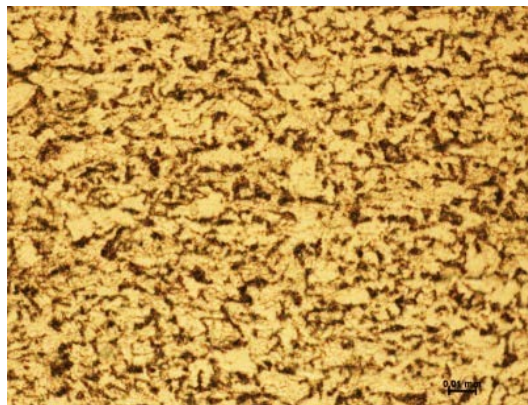
วัสดุ ASTM A36 เหล็กกล้าคาร์บอน มีโครงสร้างพื้นฐานเป็น โครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ลไลท์ ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งได้จากการเตรียมโครงสร้างจากวัสดุก่อนการเชื่อม

ตารางที่ 2. ผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมต่อเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับของแนวเชื่อมในตำแหน่งต่าง ๆ

กระแสไฟฟ้าเชื่อม (แอมป์)	เปอร์เซ็นต์ซ้อนทับแนวเชื่อม		
	หน้าตัดที่ 1	หน้าตัดที่ 2	หน้าตัดที่ 3
90	32	57	70
100	37	63	74
110	34	60	84

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

วัสดุ ASTM A36 เหล็กกล้าคาร์บอน มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งได้จากการเตรียมโครงสร้างจากวัสดุก่อนการเชื่อม


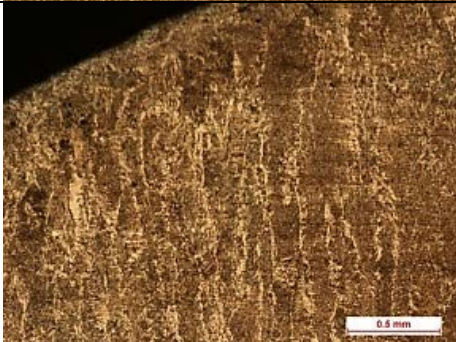
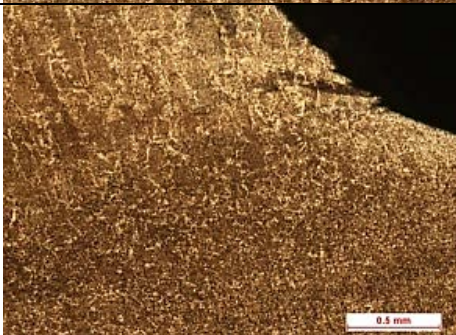


รูปที่ 6. แสดงภาคโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน (กำลังขยาย 500 เท่า)

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของบริเวณการเชื่อมซ้อนทับ

จากผลการทดลองในตารางที่ 3 หลังการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 แอมป์แปร์ บริเวณ HAZ ใกล้เคียงบริเวณแนวเชื่อม ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคมีขนาดเกรนที่โตและหยาบกว่า HAZ ที่ติดกับบริเวณเนื้อวัสดุ อันเป็นผลมาจากความร้อนจากการเชื่อมสูงเกินจุดวิกฤติ และเย็นตัวช้ากว่า HAZ ที่ติดกับชิ้นงานส่วนบริเวณแนวเชื่อม ส่วนบริเวณของแนวเชื่อมลักษณะ โครงสร้างจุลภาคเกิดจากการแข็งตัวของเนื้อเชื่อม บริเวณเทมเปอร์โครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมแนวแรกที่ถูกเทมเปอร์จากแนวเชื่อมแนวที่สอง เฟอร์ไลต์เปลี่ยนเป็นเฟอร์ไลต์ที่ละเอียดขึ้น ส่วนในตำแหน่งเหนือแนวเทมเปอร์จะมีเกรนที่หยาบ


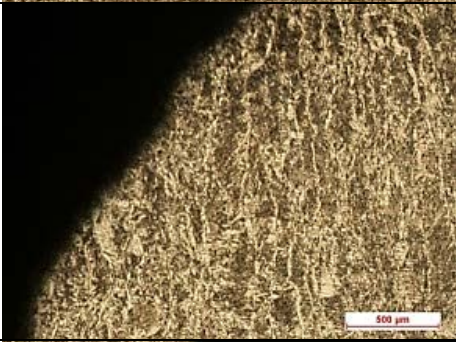

ตารางที่ 3. ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณการเชื่อมซ้อนทับของแนวเชื่อมในตำแหน่งต่าง ๆ โดยใช้กระแสไฟฟ้า 90 แอมแปร์

ภาพโครงสร้างทางจุลภาค	ตำแหน่ง	ลักษณะของโครงสร้างจุลภาค
	HAZ	บริเวณ HAZ
	Weld	ลักษณะการแข็งตัวของภายในแนวเชื่อม
	Temper Bead	บริเวณแนวเชื่อมแนวแรกถูกความร้อนจากแนวเชื่อมที่สองกระทำ

จากผลการทดลองในตารางที่ 4 หลังการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ บริเวณ HAZ ที่ติดกับส่วนที่หลอมละลายมีขนาดเกรนที่หยาบกว่าบริเวณชิ้นงาน เกรนในบริเวณดังกล่าวเกิดการขยายตัวเนื่องจากมีอุณหภูมิสูงขณะเชื่อมเป็นเวลานาน ช่วงของเกรนหยาบอยู่ใกล้กับแนวหลอมละลาย ในช่วงการจัดเรียงผลึกใหม่บางส่วนโครงสร้างจะประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลท์ บริเวณเทมเปอร์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมแนวแรกที่ถูกซ้อนทับจากแนวเชื่อมแนวที่สอง เพิร์ลไลท์เปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์ ทั้งนี้เมื่อโครงสร้างออสเทนไนท์

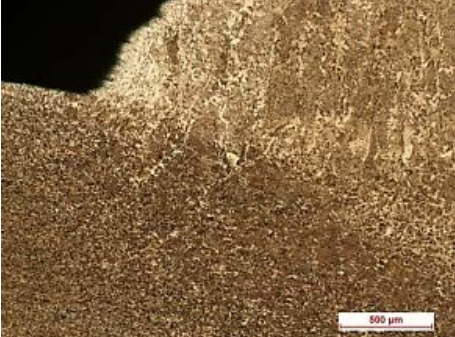


เย็นตัวลงจะเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอไรต์ที่ละเอียดขึ้น ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Shen et al. (2012) ที่ศึกษาผลของความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานต่อขนาดรูปร่างของแนวเชื่อม ผลกระทบต่อบริเวณ HAZ ในกระบวนการเชื่อม SAW โดยพบว่าเมื่อความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานสูงขึ้น ขนาดรูปร่าง ทั้งความหนา ความกว้าง ความลึก รวมถึงขนาดของ HAZ เพิ่มขึ้น โครงสร้างจุลภาคเป็นโปรยูเทคตอยเฟอไรต์ในเกรนละเอียดบริเวณ HAZ ซึ่งละเอียดกว่าเนื้อโลหะงานที่ทำการเชื่อม บริเวณ HAZ เกรนหยาบมีโครงสร้างเป็นเบนไนท์ เฟอไรต์ และเฟอไรต์

ตารางที่ 4. ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณการเชื่อมซ้อนทับของแนวเชื่อมในตำแหน่งต่าง ๆ โดยใช้กระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์

ภาพโครงสร้างทางจุลภาค	ตำแหน่ง	ลักษณะของโครงสร้างจุลภาค
	HAZ	บริเวณ HAZ
	Weld	ลักษณะการแข็งตัวภายในแนวเชื่อม
	Temper Bead	บริเวณแนวเชื่อมแนวแรกถูกความร้อนจากแนวเชื่อมแนวที่สองกระทำ

จากผลการทดลองในตารางที่ 5 หลังการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ บริเวณ HAZ มีขนาดเกรนที่หยาบกว่าบริเวณชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานได้รับความร้อนจากการเชื่อมสูงแต่ชิ้นงานยังมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลาย มีการจัดเรียงผลึกใหม่ มีอัตราการเย็นตัวต่ำเป็นผลให้โครงสร้าง HAZ บริเวณที่เทมเปอร์แสดงให้เห็นลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมแนวแรกที่ถูกซ้อนทับจากแนวเชื่อม แนวมีขนาดเกรนที่ละเอียดขึ้น ส่วนในตำแหน่งเหนือแนวเทมเปอร์มีขนาดเกรนโต

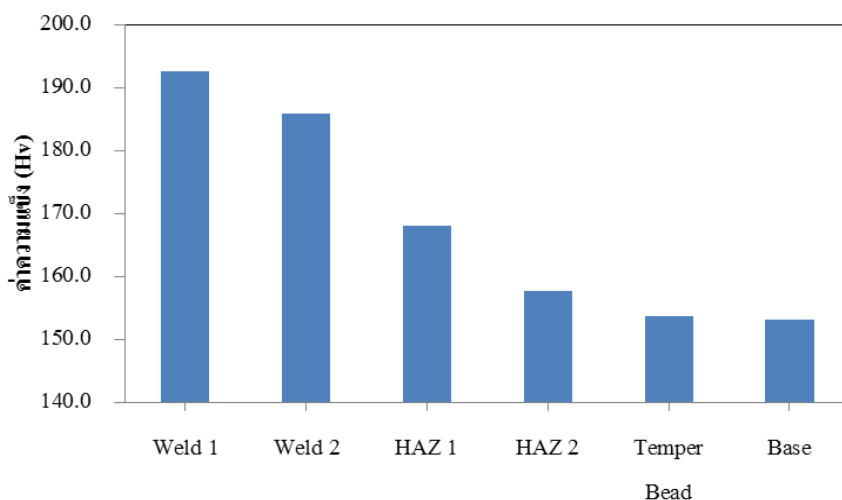
ตารางที่ 5. ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณการเชื่อมซ้อนทับของแนวเชื่อมในตำแหน่งต่าง ๆ โดยใช้กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์

ภาพโครงสร้างทางจุลภาค	ตำแหน่ง	ลักษณะของโครงสร้างจุลภาค
	HAZ	บริเวณ HAZ
	Weld	ลักษณะการแข็งตัวภายในแนวเชื่อม
	Temper Bead	บริเวณแนวเชื่อมแนวแรกถูกความร้อนจากแนวเชื่อมแนวที่สองกระทำ

ผลของการศึกษาโครงสร้างจุลภาคดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Aloraier et al. (2006) ที่ได้ศึกษาการเชื่อม FCAW ด้วยการทำเทมเปอร์บิตเพื่อลดการให้ความร้อนหลังการเชื่อม เป็นวิธีการลดความเค้นตกค้างจากการเชื่อม ซึ่งส่งผลต่อการเทมเปอร์โครงสร้างแนวเชื่อมและ HAZ ที่ทำให้สมบัติทางกลลดลงไปด้วย อันได้แก่ ความต้านทานการคืบตัว ความต้านทานแรงดึง เมื่อผ่านวัฏจักรทางความร้อนจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อม หลายครั้ง โดยศึกษาเปอร์เซ็นต์การเชื่อมซ้อนแนวที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ผลการวิจัยพบว่า ถึงแม้ว่าจะเกิดการเชื่อมซ้อนทับก็ยังไม่ให้โครงสร้างและสมบัติทางกลที่ดี โดยที่เปอร์เซ็นต์การเชื่อมซ้อนแนว 70 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นในบริเวณที่ไม่ถูกการเทมเปอร์และบริเวณที่ไม่ถูกการเชื่อมซ้อนทับ ส่วนบริเวณที่ถูกซ้อนทับและถูกเทมเปอร์บิตให้ค่าความแข็งที่ลดลง โดยพบเกรนที่หยาบในบริเวณ HAZ ของแนวเชื่อมแนวที่ 1 และละเอียดขึ้นใน HAZ ของแนวเชื่อมแนวที่ 2 จึงเห็นได้ชัดว่าเปอร์เซ็นต์การเชื่อมซ้อนแนวส่งผลต่อค่าความแข็งและโครงสร้างจุลภาค โดยยังคงให้โครงสร้างและค่าความแข็งที่ดีที่เปอร์เซ็นต์การเชื่อมซ้อนแนวระหว่าง 50-70 เปอร์เซ็นต์ โดยโครงสร้างของ HAZ มีค่าความแข็งลดลง 22 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดสอบความแข็ง (จากการทดลองที่ 1: เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับของแนวเชื่อม)

ในการทดสอบค่าความแข็งดังรูปที่ 7 แนวเชื่อมแนวแรกมีค่าความแข็งเฉลี่ย 192.5 Hv และแนวเชื่อมแนวที่สองมีค่าความแข็งเฉลี่ย 185.5 Hv เมื่อเทียบกับบริเวณที่ถูกเทมเปอร์มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 153.8 Hv จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งเฉลี่ยที่ได้มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากบริเวณแนวเชื่อมแนวที่ 1 ถูกเทมเปอร์โดยแนวที่ 2



ตำแหน่งในการวัดค่าความแข็ง

รูปที่ 7. ค่าความแข็งที่ตำแหน่งต่าง ๆ

บริเวณ HAZ 1 มีค่าความแข็งเฉลี่ย 168 Hv และบริเวณ HAZ 2 มีค่าความแข็งเฉลี่ย 155.7 Hv เมื่อเทียบกับบริเวณที่ถูกเทมเปอร์ค่าความแข็งเฉลี่ยของบริเวณ HAZ มีค่าสูงกว่า จะเห็นได้ว่า วัฏจักรทางความร้อนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรวมถึงค่าความแข็งอีกด้วย ผลการทดสอบนี้เป็นไปในทางเดียวกับการศึกษาของ Aloraier et al. (2004) ซึ่งได้ศึกษาถึงลำดับการเชื่อม FCAW ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและค่าความแข็งด้วยเทคนิคเทมเปอร์ปีท พบว่าลำดับขั้นการเชื่อมมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและส่งผลทำให้ค่าความแข็งและขนาดของ HAZ ลดลง หลังจากที่ได้ทำการเชื่อมแนวที่สองและความร้อนส่งผลต่อแนวเชื่อมแรก

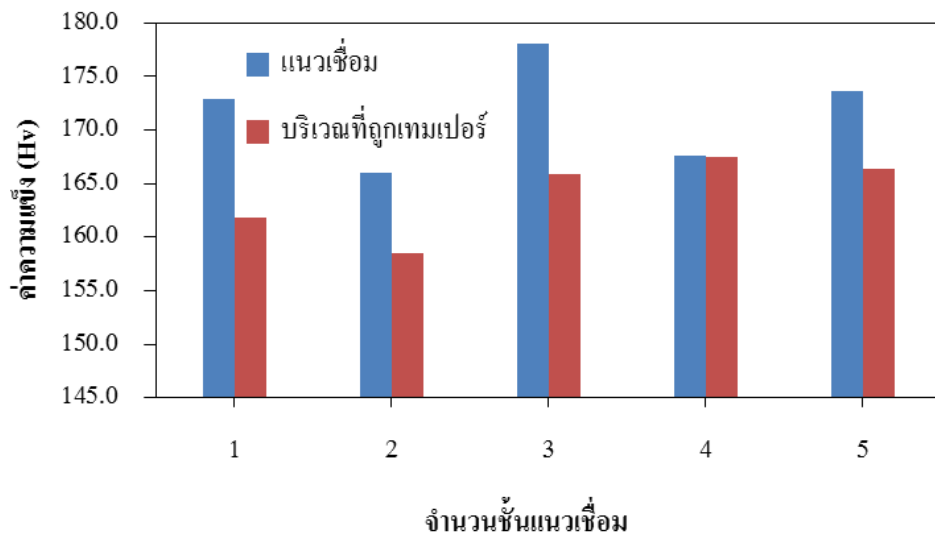
ผลการทดสอบความแข็ง (จากการทดลองที่ 2: จำนวนชั้นของแนวเชื่อม)

จากการทดสอบค่าความแข็งดังรูปที่ 8 แนวเชื่อมแนวที่ 1 มีค่าความแข็งเฉลี่ย 172.9 Hv แนวเชื่อมแนวที่ 1 ที่ถูกแนวเชื่อมแนวที่ 2 เทมเปอร์มีค่าความแข็งเฉลี่ย 161.9 Hv ค่าความแข็งแนวเชื่อมแนวที่ 2 มีค่าความแข็งเฉลี่ย 166 Hv แนวเชื่อมแนวที่ 2 ที่ถูกแนวเชื่อมแนวที่ 3 เทมเปอร์ มีค่าความแข็งเฉลี่ย 158.5 Hv ซึ่งผลการทดสอบความแข็งมีแนวโน้มเห็นได้ชัดว่า ค่าความแข็งบริเวณที่ถูกเทมเปอร์มีค่าความแข็งลดลงทุกชั้นที่ถูกเทมเปอร์ ซึ่งเทียบเคียงได้กับการศึกษาของ Suarez et al. (2015) ที่ศึกษาวิธีการเชื่อมเหล็กกล้าสำหรับทำแม่พิมพ์ AISI P20 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคัลม (gas tungsten arc welding: GTAW) โดยทำการเชื่อมแนวเชื่อมและแบบเชื่อมซ้อนแนว และศึกษาผลด้านขนาดรูปร่างของแนวเชื่อม ค่าความแข็งและโครงสร้างจุลภาค ซึ่งการเชื่อมซ้อนแนวทำให้เกิดการเทมเปอร์ด้วยวัฏจักรทางความร้อนกับแนวเชื่อมและ HAZ ซึ่งความร้อนในแนวถัดมาทำให้เกิดการเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ที่บริเวณ HAZ ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง โดยหากในแนวถัดไปใช้พลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น ก็จะทำให้ค่าความแข็งที่ได้ลดลงมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งกรณีของเหล็กกล้าไร้สนิมอาจให้ผลของค่าความแข็งต่างออกไปได้แก่การศึกษาของ Das et al. (2009) ที่ศึกษาเกี่ยวกับการเลือกให้โลหะเติมและผลของการเทมเปอร์ต่อสมบัติทางกลของการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม 403 และ 304L(N) พบว่า ความร้อนจากแนวบัดกรีด้วยลวดเชื่อม 403 SS และเชื่อมด้วยลวด ERNiCr-3 ผลของการเทมเปอร์ไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลในด้านลบโดยยังคงให้ค่าความเหนียวและความแข็งแรงจากการทดสอบการตัด โค้งที่ดี ซึ่งหลังจากเชื่อมเสร็จแล้วก็ไม่จำเป็นต้องทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

สรุปผลการทดลอง

1. จากการศึกษาการเชื่อมเปอร์เซ็นต์การซ้อนแนวและจำนวนชั้นของแนวเชื่อม 6 ชั้น พบว่าส่วนบริเวณแนวเชื่อม ลักษณะโครงสร้างจุลภาคเกิดจากการแข็งตัวภายในแนวเชื่อม บริเวณเทมเปอร์โครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมแนวก่อนหน้าที่ถูกเทมเปอร์จากแนวเชื่อมแนวที่ถัดไป มีผลให้เฟรลิตไลต์เปลี่ยนเป็นเฟรลิตไลต์ที่ละเอียดขึ้น ส่วนในตำแหน่งเหนือแนวเทมเปอร์จะเป็นส่วนของเกรนหยาบ

- ค่าความแข็งของแนวเชื่อมแนวแรกให้ค่าความแข็งที่ต่ำกว่าแนวที่สอง เนื่องจากแนวเชื่อมแนวแรกได้รับอิทธิพลของความร้อนทำให้ค่าความเครียดในเนื้อแนวเชื่อมลดลง
- ค่าความแข็งของจำนวนชั้นแนวเชื่อม 6 ชั้น บริเวณที่ถูกเทมเปอเรอร์ในทุกชั้นของแนวเชื่อม ค่าความแข็งเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับบริเวณเนื้อแนวเชื่อมเนื่องจากผลของความร้อนที่เกิดขึ้นในวัฏจักรทางความร้อนที่กระทำจากการเชื่อม



รูปที่ 8. ค่าความแข็งแนวเชื่อมและบริเวณที่ถูกเทมเปอเรอร์จากแนวถัดไป

เอกสารอ้างอิง

- Aloraier, A., Ibrahim, R. & Thomson, P. (2006). FCAW process to avoid the use of post weld heat treatment. *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, 83(5), 394-398. <http://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2006.02.028>
- Aloraier, A. S., Ibrahim, R. N. & Ghajel, J. (2004). Eliminating post-weld heat treatment in repair welding by temper bead technique: role bead sequence in metallurgical changes. *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154, 392-400. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.383>
- American Society of Mechanical Engineers. (2007). *ASME BPVC Section II, Part A (Beginning to SA-450) Materials*. New York: The American Society of Mechanical Engineers.

- American Society of Mechanical Engineers. (2015). *ASME BPVC Section IX, qualification standard for welding, brazing, and fusing procedures; welders; brazers; and welding, brazing, and fusing operators*. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- Benscoter, A. O. & Bramfitt, B. L. (2004). Metallography and microstructures of low-carbon and coated steels. In G. F. V. Voort (Ed.), *Metallography and Microstructures*, Vol 9, ASM Handbook pp. 588-607. Ohio: ASM International.
- Das, C. R., Bhaduri, A. K., Srinivasan, G., Shankar, V. & Mathew, S. (2009). Selection of filler wire for and effect of auto tempering on the mechanical properties of dissimilar metal joint between 403 and 304L(N) stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(3), 1428-1435. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.053>
- Limmaneevichitr, C. (2005). *Welding Metallurgy* (1st ed). Bangkok, Thailand: King Mongkut's University of Technology thonburi. (in Thai)
- Suarez, S.-A., Suarez, A. M. & Preciado, W. T. (2015). Arc welding procedures on steels for molds and dies. *Procedia Engineering*, 100, 584-591. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.408>
- Shen, S., Oguocha, I. N. A. & Yannacopoulos, S. (2012). Effect of heat input on weld bead geometry of submerged arc welded ASTM A709 Grade 50 steel joint. *Journal of Material Processing Technology*, 212(1), 286-294. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.09.013>