

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากดำเนินการทดลองครบตามที่ได้ออกแบบไว้ ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองที่ได้ พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยสามารถจำแนกผลการทดลองออกเป็น 2 หัวข้อหลัก อันได้แก่

1. การเชื่อมในร่องยูนผิวหน้าเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ด้วยลวดเชื่อมทองแดง ERCu (ในกรณีไม่มีการเชื่อมรองพื้น)

เพื่อศึกษาการแพร่ของทองแดงเข้าสู่เหล็กกล้าคาร์บอน พร้อมทั้งทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค เมื่อไม่มีการเชื่อมรองพื้น

2. การเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับทองแดงบริสุทธิ์แบบต่อชน (ในกรณีมีการเชื่อมรองพื้น)

2.1 การเชื่อมเพื่อตรวจสอบค่าความร้อนเข้าที่สามารถคงความหนาของแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิล ERNi-1 ไว้ได้

เพื่อทำการตรวจสอบว่าปริมาณความร้อนเข้าที่ใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับทองแดงบริสุทธิ์ สามารถคงความหนาของแนวเชื่อมรองพื้นไว้ได้หรือไม่

2.2 การเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับทองแดงบริสุทธิ์แบบต่อชนที่มีการอุ่นชิ้นงานทองแดงด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

เพื่อศึกษาผลกระทบจากการอุ่นชิ้นงานทองแดงบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อมีการเชื่อมรองพื้นด้วยลวดเชื่อมนิกเกิล ERNi-1 ทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอน ที่มีต่อโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค และปริมาณทองแดงที่แพร่เข้าสู่เหล็กกล้าคาร์บอน พร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 1

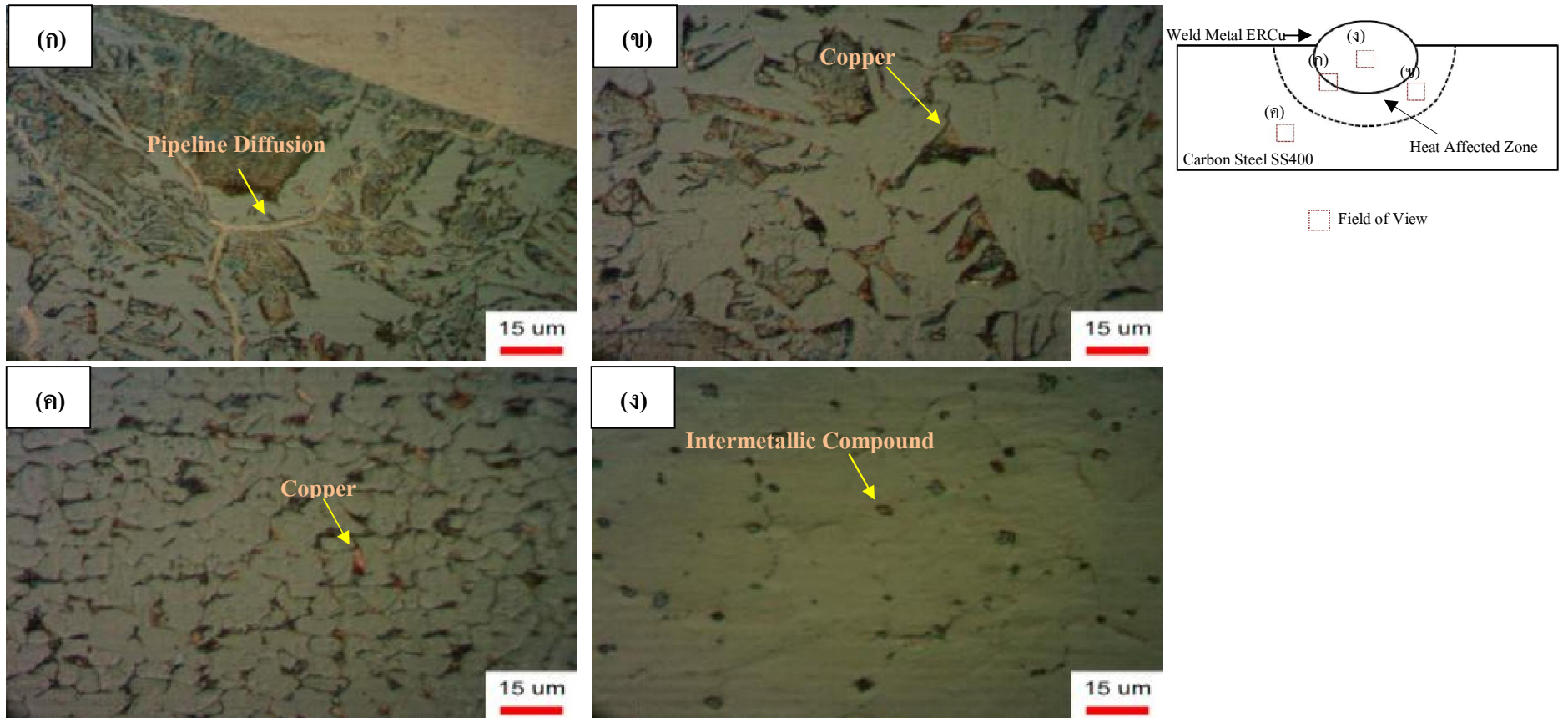
4.1 การเชื่อมในร่องยูนบนผิวหน้าเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ด้วยลวดเชื่อมทองแดง ERCu (ในกรณีไม่มีการเชื่อมรองพื้น)

1. ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

จากผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค แสดงให้เห็นว่า บริเวณกระทันร้อนที่อยู่ใกล้กับขอบแนวเชื่อมทองแดงซึ่งประกอบด้วยเฟสเพิร์ลไลท์ (Pearlite) และเฟสเฟอร์ไรท์ (Ferrite) ที่มีลักษณะเกรนหยาบ มีการพบทองแดงแพร่อยู่ตามขอบเกรน (Grain Boundary) ซึ่งเรียกการแพร่ลักษณะนี้ว่า “การแพร่แบบท่อ (Pipeline Diffusion)” [9] ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) อันเป็นผลมาจากทองแดงที่มีสถานะเป็นของเหลวในบ่อหลอมละลาย (Weld Pool) แพร่เข้าสู่บริเวณกระทันร้อน และเมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันร้อนที่อยู่ห่างออกไปและบริเวณโลหะฐาน (Base Metal) เหล็กกล้าคาร์บอนอันประกอบไปด้วยเฟสเพิร์ลไลท์และเฟอร์ไรท์ ยังคงพบทองแดงอยู่ตามขอบเกรน (Grain Boundary) เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) และ (ค) ตามลำดับ

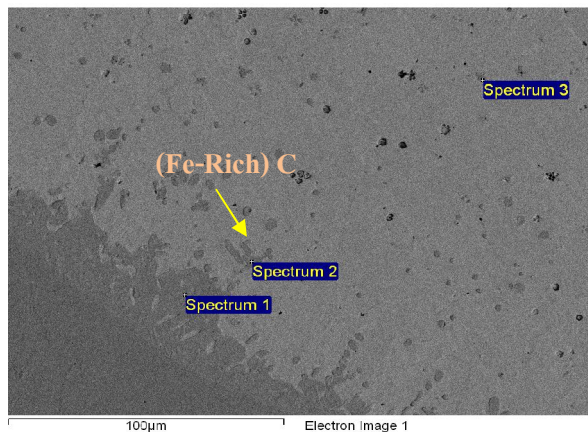
การพบทองแดงในบริเวณดังกล่าว เนื่องจากทองแดงมีจุดหลอมเหลว (M.P.Copper = 1,084 °C) ต่ำเมื่อเทียบกับของเหล็กกล้าคาร์บอน (M.P.Carbon Steel = 1,535 °C) [2] ทำให้ทองแดงในบ่อหลอมละลายสามารถยังคงสถานะเป็นของเหลวอยู่ เมื่อบ่อหลอมละลายเย็นตัวถึงจุดหลอมเหลวของเหล็กกล้าคาร์บอน ส่งผลให้ทองแดงแพร่เข้าสู่เหล็กกล้าคาร์บอนได้ง่าย นอกจากนี้ในระหว่างการเชื่อม บริเวณกระทันร้อน (Heat Affected Zone; HAZ) ที่อยู่ใกล้กับขอบแนวเชื่อมทองแดงมีอุณหภูมิที่สูง (~1500 °C) [5] ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของทองแดงมาก ส่งผลให้ทองแดงที่อยู่ตามขอบเกรนในบริเวณกระทันร้อนยังคงสถานะของเหลวอยู่เช่นกัน ทองแดงจึงแพร่เข้าสู่บริเวณโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอนได้ง่ายอีกด้วย

สำหรับบริเวณแนวเชื่อมทองแดง (Weld Metal) พบการตกผลึก (Precipitate) ของสารประกอบโลหะ (Intermetallic Compound) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ง) อันเป็นผลมาจากมีการหลอมละลายของโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอนเข้าสู่แนวเชื่อมทองแดง อีกทั้งเหล็กกล้าคาร์บอนกับทองแดงเป็นวัสดุต่างชนิดกัน ทำให้ยากต่อการละลายเข้าด้วยกัน (Solubility) ดังนั้นจึงทำให้เกิดการตกผลึกของสารประกอบโลหะขึ้นในแนวเชื่อมทองแดง

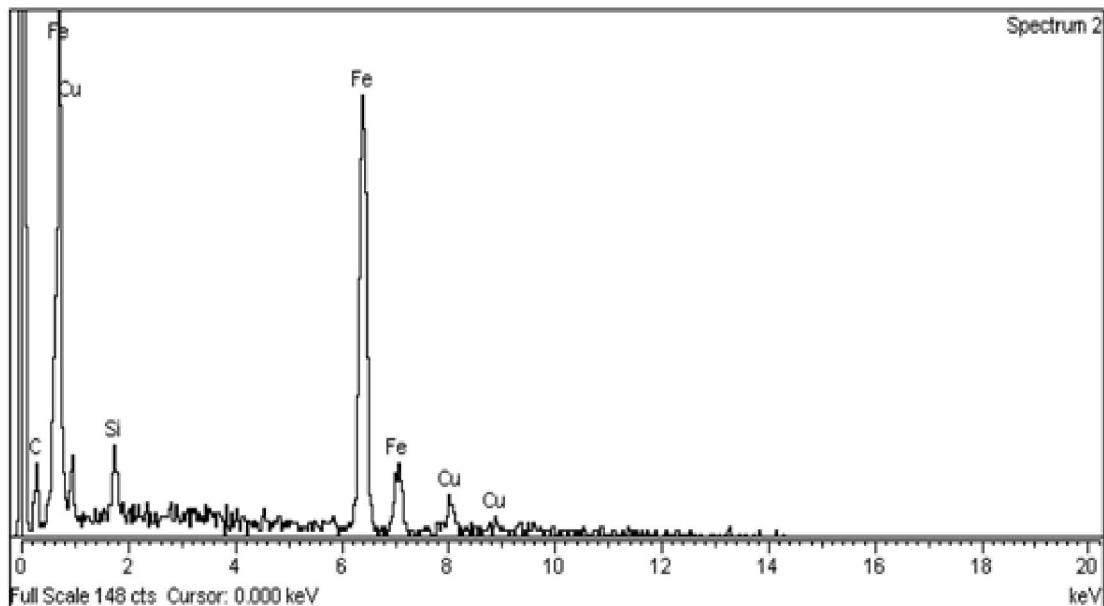


รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมในร่องยูบนผิวหน้าเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 (ก) บริเวณกระทบบร้อนเหล็กกล้าคาร์บอนที่ติดกับแนวเชื่อมทองแดง, (ข) บริเวณกระทบบร้อนเหล็กกล้าคาร์บอน, (ค) บริเวณโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอน, (ง) บริเวณแนวเชื่อมทองแดง

และเมื่อทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของสารประกอบโลหะดังกล่าว พบว่า ประกอบด้วยเหล็ก และคาร์บอน เป็นหลัก ((Fe-Rich) C) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 สำหรับการตรวจพบทองแดง (Cu) และซิลิกอน (Si) เนื่องจากธาตุทั้ง 2 ชนิดเป็นส่วนผสมที่มีอยู่ในลวดเชื่อมทองแดง ERCu ดังนั้นเมื่อทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีในบริเวณแนวเชื่อมทองแดงด้วยเทคนิค EDS จึงมีการตรวจพบธาตุดังกล่าว



Element	Weight%
CK	9.59
SiK	1.79
FeK	78.03
CuL	10.59
Total	100

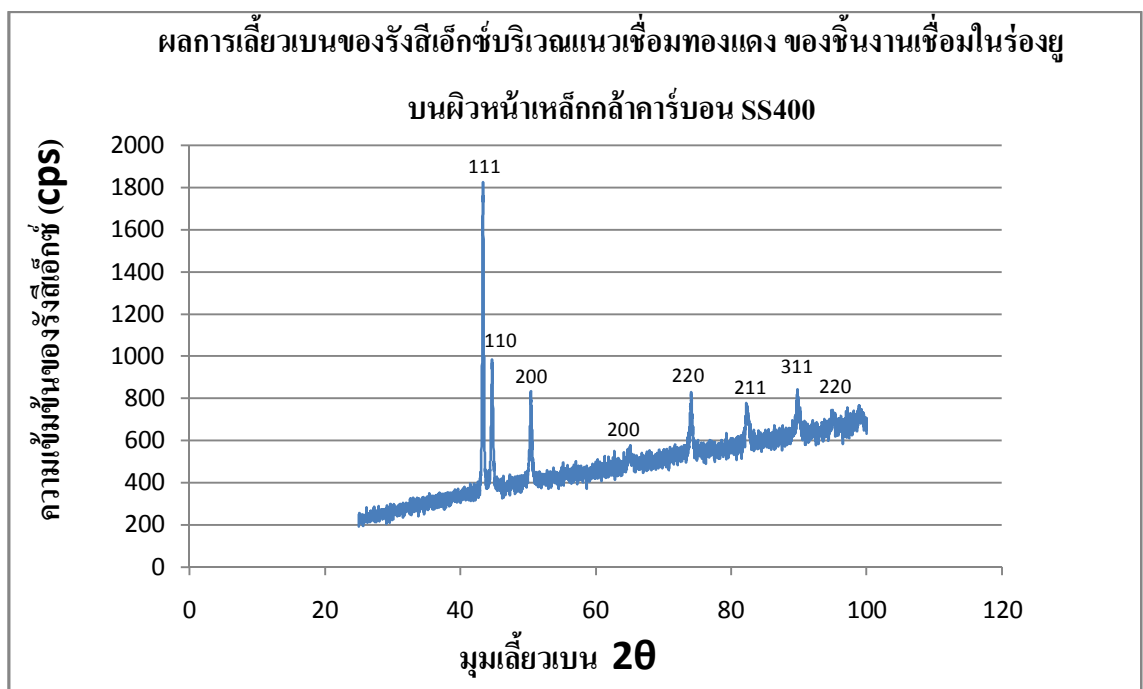


รูปที่ 4.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของสารประกอบโลหะที่ตกผลึกในแนวเชื่อมทองแดง

เมื่อนำชิ้นงานเชื่อมมาทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบโลหะที่ตกผลึกในแนวเชื่อมทองแดง ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD) เมื่อใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 1.54060 Å (0.15406 nm) ผลการวิเคราะห์พบว่า บริเวณแนวเชื่อมทองแดงมีฟิสิก

(Peak) ของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนเกิดขึ้นที่มุม 2θ จำนวน 2 ชุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 43.34° 50.40° 74.10° 89.80° และ 44.68° 65.40° 82.24° 98.92° ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับแบบแผนมาตรฐาน (Standard Pattern) ที่ได้ทำการเก็บรวบรวมไว้ ซึ่งแบบแผนมาตรฐานที่นำมาเปรียบเทียบคือ ทองแดงและเหล็ก เนื่องจากมีฟิสิกของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนเกิดขึ้นที่มุม 2θ ใกล้เคียงกัน (2θ ของ Cu เท่ากับ 43.298° 50.434° 74.133° และ 89.934° ตามลำดับ และ 2θ ของ Fe เท่ากับ 44.674° 65.023° 82.335° และ 98.949° ตามลำดับ) จากผลการวิเคราะห์พบว่า ไม่สามารถระบุโครงสร้างผลึกของสารประกอบโลหะได้ เนื่อง XRD ไม่สามารถตรวจพบสารประกอบโลหะที่ปริมาณน้อยกว่า 5 % ได้

ทั้งนี้การที่ฟิสิกของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนเกิดขึ้นที่มุม 2θ ที่พบมีค่าใกล้เคียงกับฟิสิกของทองแดงและเหล็กในแบบแผนมาตรฐาน เนื่องจากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ได้มีการตรวจจับบริเวณแนวเชื่อมทองแดงซึ่งประกอบด้วยทองแดงเป็นหลัก อย่างไรก็ตามเนื่องจากบริเวณแนวเชื่อมทองแดงนั้นมีขนาดเล็กมาก ทำให้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จึงเกิดการตรวจจับบริเวณโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอนอีกด้วย



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บริเวณแนวเชื่อมทองแดง ของชิ้นงานเชื่อมในร่องบนผิวหน้าเหล็กกล้าคาร์บอน SS400

เพื่อป้องกันปัญหาการแพร่ของทองแดงเข้าสู่เหล็กกล้าคาร์บอน และป้องกันการตกผลึกของสารประกอบโลหะในแนวเชื่อมทองแดง ดังนั้น ในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับทองแดงบริสุทธิ์แบบต่อชน จึงควรมีการเชื่อมรองพื้น ทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยลวดเชื่อมนิกเกิล ERNi-1 ก่อนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมทองแดง ERCu เนื่องจากว่านิกเกิล มีความสามารถในการละลายเข้ากับเหล็กกล้าคาร์บอนและทองแดงได้ดี ซึ่งเป็นการป้องกันหรือลดการแพร่ของทองแดงจากบ่อหลอมละลายเข้าสู่เหล็กกล้าคาร์บอน อีกทั้งยังเป็นการป้องกันการหลอมละลายของโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอนในระหว่างการเชื่อมที่ก่อให้เกิดการตกผลึกของสารประกอบทางโลหะที่กล่าวถึงในข้างต้น ภายในแนวเชื่อมทองแดง

4.2 การเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับทองแดงบริสุทธิ์แบบต่อชน (ในกรณีมีการเชื่อมรองพื้น)

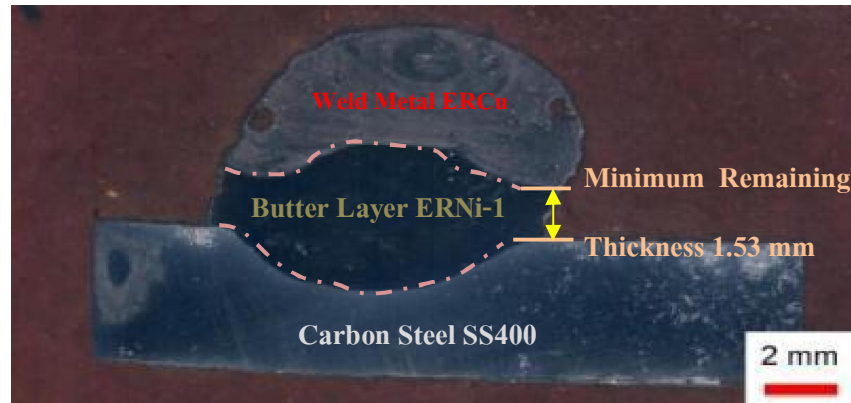
4.2.1 การเชื่อมเพื่อตรวจสอบค่าความร้อนเข้าที่สามารถคงความหนาของแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิล ERNi-1 ไว้ได้

1. ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

ในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับทองแดงบริสุทธิ์ จำเป็นต้องมีการเชื่อมรองพื้นด้วยลวดเชื่อมนิกเกิล ERNi-1 ทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอน เพื่อป้องกันปัญหาที่เกิดขึ้น ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 4.1 อย่างไรก็ตาม หากทำการเชื่อมวัสดุทั้งสองชนิดด้วยค่าความร้อนเข้าที่ไม่เหมาะสม ทำให้เกิดการหลอมละลายของแนวเชื่อมรองพื้นจนหมด ทำให้ไม่สามารถป้องกันปัญหาดังกล่าวได้ ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องมีการเชื่อมตรวจสอบปริมาณความร้อนเข้าที่ส่งผลต่อการหลอมละลายของแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิล ERNi-1

ทั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ค่าความร้อนเข้าสูงสุดที่ใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับทองแดงบริสุทธิ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25.03 กิโลจูล/ซม. มาทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมทองแดงลงบนผิวหน้าแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลที่มีความหนา 3 มม. จากผิวหน้าโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอน จากผลการทดลองพบว่า แนวเชื่อมรองพื้นยังคงเหลืออยู่ และมีค่าความหนาคงเหลือต่ำสุด (Minimum Remaining Thickness) อยู่ที่ 1.53 มม. จากผิวหน้าโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ดังนั้นการ

เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับทองแดงบริสุทธิ์แบบต่อชนที่มีแนวเชื่อมร่องพื้นหนา 3 มม. ด้วยค่าความร้อนเข้าไม่เกิน 25.03 กิโลจูล/ซม. สามารถคงความหนาของแนวเชื่อมร่องพื้นนิกเกิลไว้ได้



รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างทางมหภาคและความหนาต่ำสุดคงเหลือของแนวเชื่อมรอยพื้นในการตรวจสอบค่าความร้อนเข้าที่สามารถคงความหนาของแนวเชื่อมร่องพื้นนิกเกิล ERNi-1 ไว้ได้

ทั้งนี้ ในการทดลองเชื่อมได้มีการกำหนดหัวเชื่อมบนผิวหน้าแนวเชื่อมร่องพื้น ซึ่งทำให้แนวเชื่อมร่องพื้นได้รับความร้อนของเปลวอาร์คโดยตรง และได้รับความร้อนจากเปลวอาร์คในปริมาณที่สูง ซึ่งแตกต่างจากการเชื่อมแบบต่อชน เนื่องจากในการเชื่อมแบบต่อชนไม่มีการกำหนดหัวเชื่อมบนผิวหน้าแนวเชื่อมร่องพื้น ทำให้แนวเชื่อมร่องพื้นได้รับความร้อนจากเปลวอาร์คในปริมาณต่ำกว่า ซึ่งหากทำการทดลองเชื่อมด้วยค่าความร้อนเข้าที่ 25.03 กิโลจูล/ซม. สามารถคงความหนาแนวเชื่อมร่องพื้นไว้ได้ ดังนั้นในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนกับทองแดงแบบต่อชนที่มีแนวเชื่อมร่องพื้นขนาด 3 มม. ด้วยความร้อนเข้าไม่เกิน 25.03 กิโลจูล/ซม. สามารถคงความหนาของแนวเชื่อมร่องพื้นไว้ได้ด้วยเช่นกัน

4.2.2 การเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับทองแดงบริสุทธิ์แบบต่อชน (Butt Joint) ที่มีการอุ่นชิ้นงานทองแดงด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

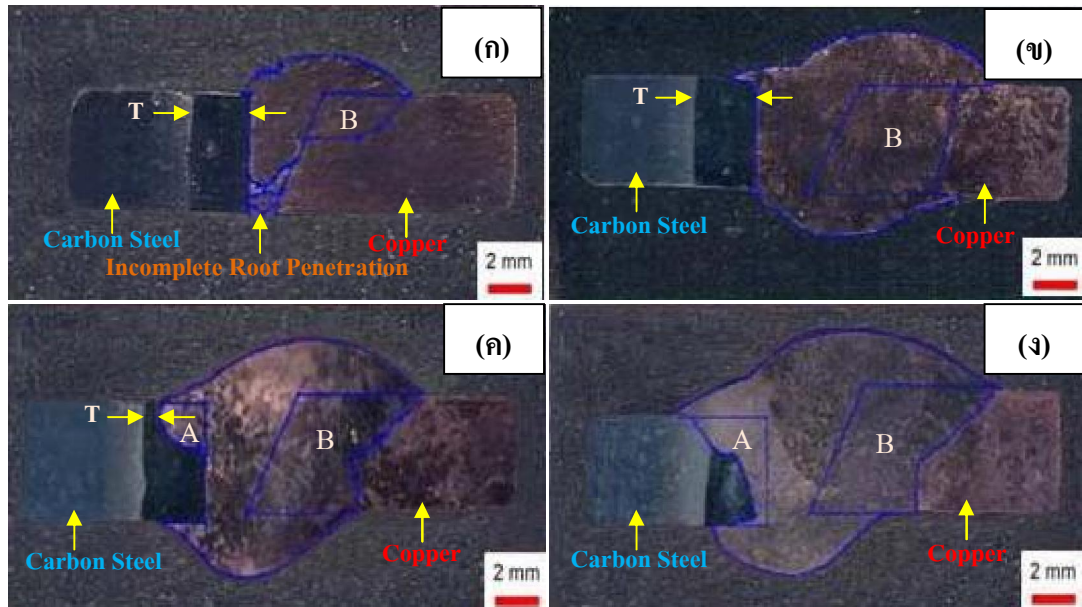
ในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับทองแดงบริสุทธิ์ ผู้วิจัยได้เลือกใช้กระบวนการเชื่อมทิกแบบ Machine ในการเชื่อม เพื่อควบคุมความเร็วในการเชื่อม (Travel Speed) ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม (Wire Feed Speed) ทิศทางหัวเชื่อม (Welding Torch Direction) และระยะอาร์ค ให้คงที่ในระหว่างการเชื่อม

ทั้งนี้เมื่อทำการกำหนดหัวเชื่อมที่ตำแหน่งตรงกลางรอยต่อ เกิดการเบี่ยงเบนของเปลวอาร์คเข้าหาเหล็กกล้าคาร์บอน เนื่องจากค่าความเป็นแม่เหล็กที่แตกต่างกันระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนกับทองแดง [13] ส่งผลให้โลหะฐานทองแดงไม่เกิดการหลอมละลายในระหว่างการเชื่อม จึงได้ย้ายตำแหน่งการกำหนดหัวเชื่อมให้ห่างจากเหล็กกล้าคาร์บอน อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการกำหนดระยะอาร์คที่สูงเกินไป ยังคงพบว่าเปลวอาร์คยังเบี่ยงเบนเข้าหาเหล็กกล้าคาร์บอนเช่นเดิม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดหัวเชื่อมและระยะอาร์คให้เหมาะสม เพื่อป้องกันการเบี่ยงเบนของเปลวอาร์ค ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (ในหัวข้อที่ 3.4.3 ของบทที่ 3)

1. ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

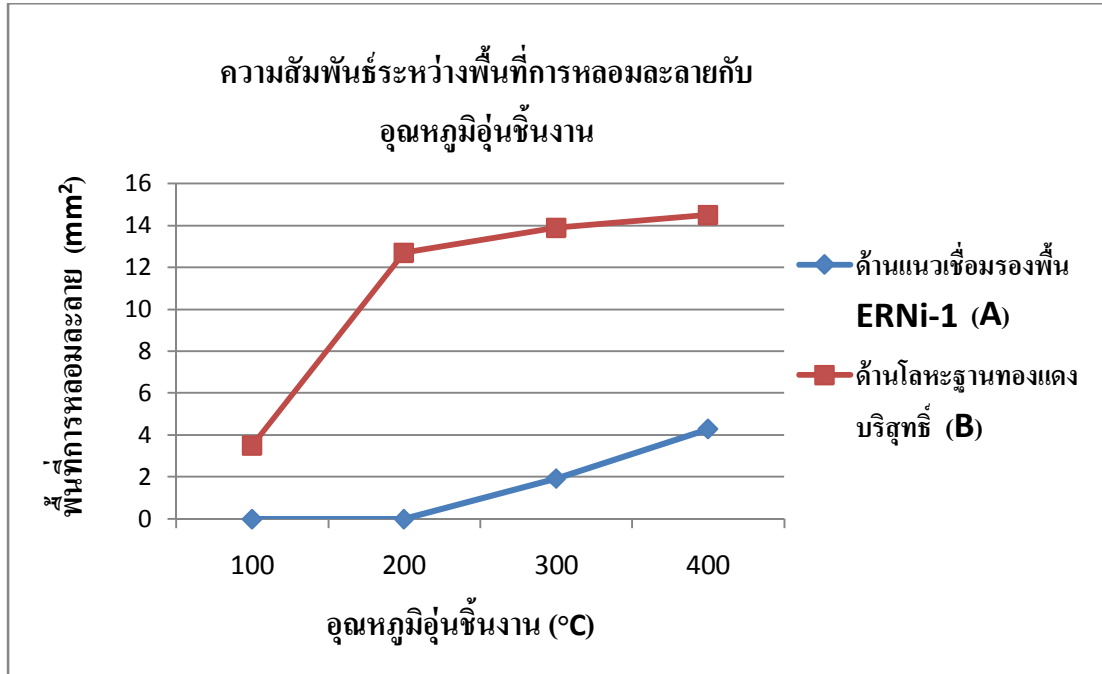
การเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับทองแดงบริสุทธิ์ ที่มีการอุ่นชิ้นงานทองแดงด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดการหลอมละลาย (A) บริเวณแนวเชื่อมร่องพื้นนิกเกิล ERNi-1 และ (B) บริเวณโลหะฐานทองแดง ในปริมาณที่แตกต่างกัน และส่งผลให้ (T) ความหนาของพื้นคงเหลือต่ำสุดของแนวเชื่อมร่องพื้นนิกเกิล มีขนาดแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5

จากการตรวจสอบ พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ 100°C เกิดการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์บริเวณราก (Incomplete Root Penetration) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) เนื่องจากอุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานที่ 100°C ไม่สัมพันธ์กับค่าความร้อนเข้าที่ใช้ ส่งผลให้อัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายสูง จึงทำให้เกิดการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานเชื่อม และสำหรับชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ 200°C , 300°C และ 400°C มีการหลอมละลายที่สมบูรณ์ (Complete Penetration) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ



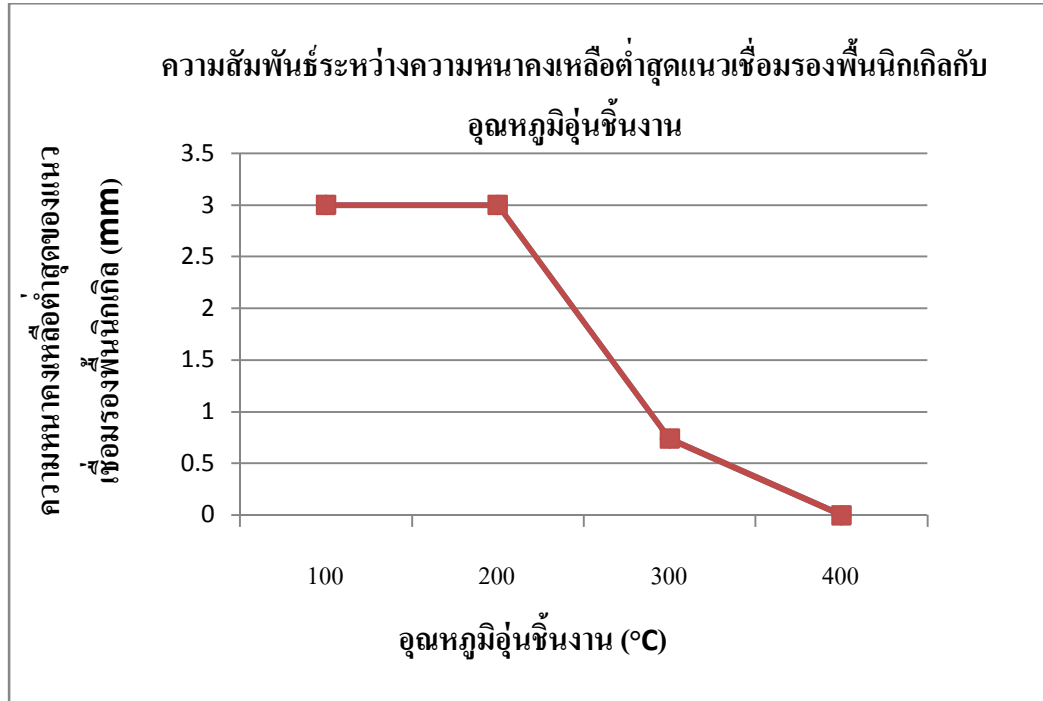
รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นชิ้นงานที่อุณหภูมิ (ก) 100 °C, (ข) 200 °C, (ค) 300 °C และ (ง) 400 °C (A = พื้นที่การหลอมละลายด้านแนวเชื่อมรองพื้น นิกเกิล ERNi-1, B = พื้นที่การหลอมละลายด้านโลหะฐานทองแดง และ T = ความหนา คงเหลือต่ำสุดของแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิล)

จากรูปที่ 4.6 ที่แสดงการวัดพื้นที่การหลอมละลายบริเวณ (A) แนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิล ERNi-1 และ (B) บริเวณโลหะฐานทองแดง ของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ 100 °C ไม่พบการหลอมละลายบริเวณแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิล และมีพื้นที่การหลอมละลายของบริเวณโลหะฐานทองแดงเท่ากับ 3.51 มม.² สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ 200 °C ยังคงไม่พบการหลอมละลายบริเวณแนวเชื่อมรองพื้น และมีพื้นที่การหลอมละลายของบริเวณโลหะฐานทองแดงเท่ากับ 12.70 มม.² สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ 300 °C พบพื้นที่การหลอมละลายบริเวณแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลเท่ากับ 1.93 มม.² และมีพื้นที่การหลอมละลายบริเวณโลหะฐานของทองแดงเท่ากับ 13.88 มม.² และสำหรับชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ 400 °C พบพื้นที่การหลอมละลายของโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอนและแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลเท่ากับ 4.29 มม.² และมีพื้นที่การหลอมละลายของโลหะฐานทองแดงเท่ากับ 14.50 มม.²



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่การหลอมละลายกับอุณหภูมิการอุ้งนงาน

อีกทั้งจากรูปที่ 4.7 ที่แสดงความหนาของเหลือต่ำสุดของแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิล ของชิ้นงานที่ผ่านการอุ้งนที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอุ้งนที่อุณหภูมิต่างกัน 100 °C, 200 °C มีความหนาของเหลือของแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิล อยู่ที่ 3.00 mm ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการอุ้งนที่อุณหภูมิต่างกัน 300 °C มีความหนาต่ำสุดของเหลือของแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิล อยู่ที่ 0.74 mm และชิ้นงานที่ผ่านการอุ้งนที่อุณหภูมิต่างกัน 400 องศาเซลเซียส มีบางส่วนแนวเชื่อมรองพื้นได้หลอมละลายเข้าไปกับแนวเชื่อมจนหมด ส่งผลทำให้พื้นที่บางส่วนของโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอนหลอมละลายเข้าสู่แนวเชื่อมทองแดง



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเหลือต่ำสุดแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลกับ อุณหภูมิอุ่นชิ้นงาน

จากผลทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอุ่นชิ้นงานโลหะฐานทองแดง พื้นที่การหลอมละลายบริเวณแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลและบริเวณโลหะฐานทองแดงเพิ่มมากขึ้น และความหนาของแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอุ่นชิ้นงานโลหะฐานทองแดง ทำให้โลหะฐานทองแดงมีอุณหภูมิเริ่มต้นก่อนการเชื่อมสูงขึ้น นอกจากนี้ก่อนทำการเชื่อมในแต่ละแนวต้องมีการอุ่นชิ้นงานทองแดงก่อนทุกครั้ง เนื่องจากทองแดงมีการนำความร้อนสูง ทำให้ความร้อนในการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมแนวที่ 2 และ 3 ส่งผ่านแนวเชื่อมก่อนหน้าเข้าสู่แนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิล ส่งผลให้แนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลมีอุณหภูมิเริ่มต้นก่อนการเชื่อมสูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นจึงส่งผลให้บริเวณทั้งสองเกิดการหลอมละลายได้มากขึ้น และความหนาของแนวเชื่อมรองพื้นลดลง เมื่อได้รับความร้อนจากบ่อหลอมละลาย

2. ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

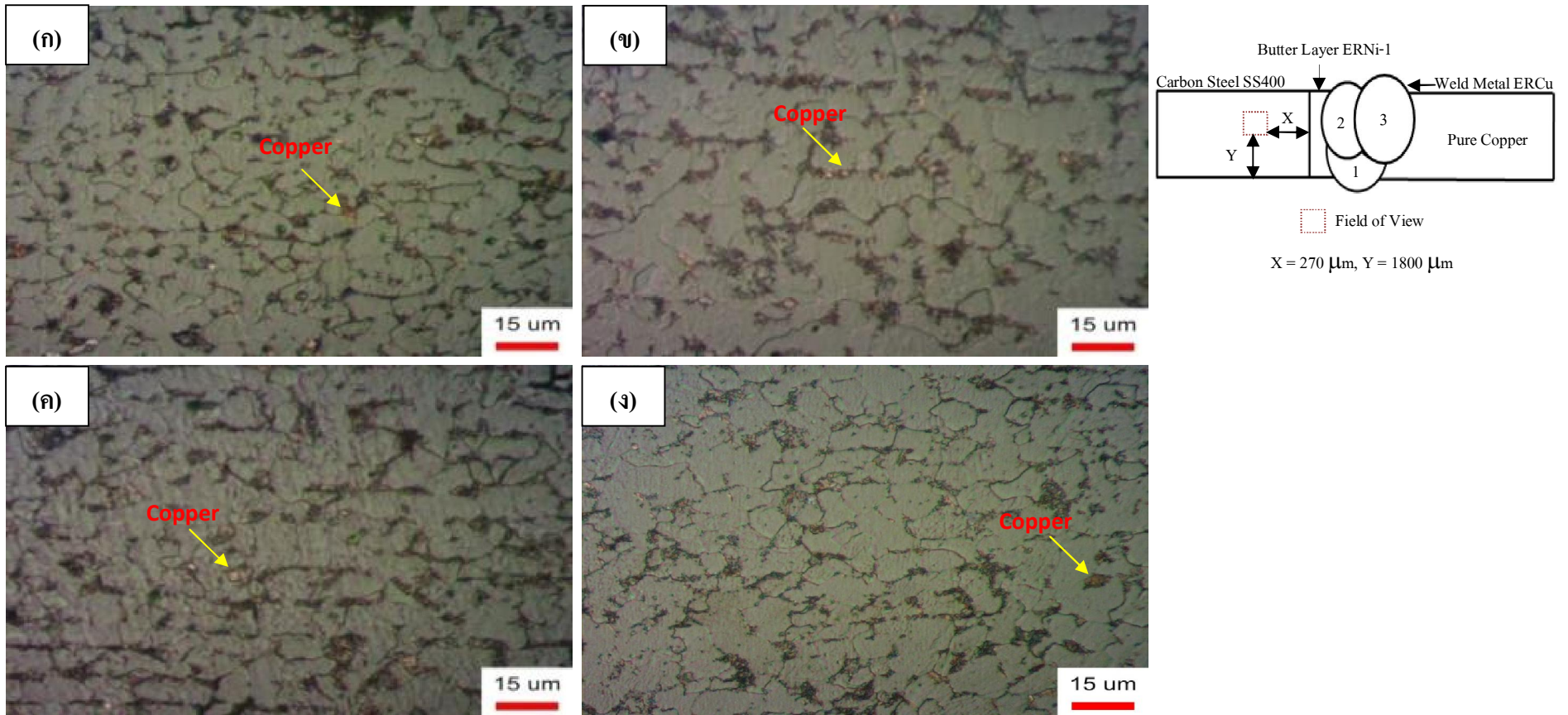
2.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอน SS400

จากผลจากการตรวจสอบพบว่า บริเวณ โลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอนของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นชิ้นงานที่อุณหภูมิ 100 °C, 200 °C, 300 °C, และ 400 °C ประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์และเฟสเพอร์ไรท์ และยังคงพบทองแดงอยู่ตามขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ

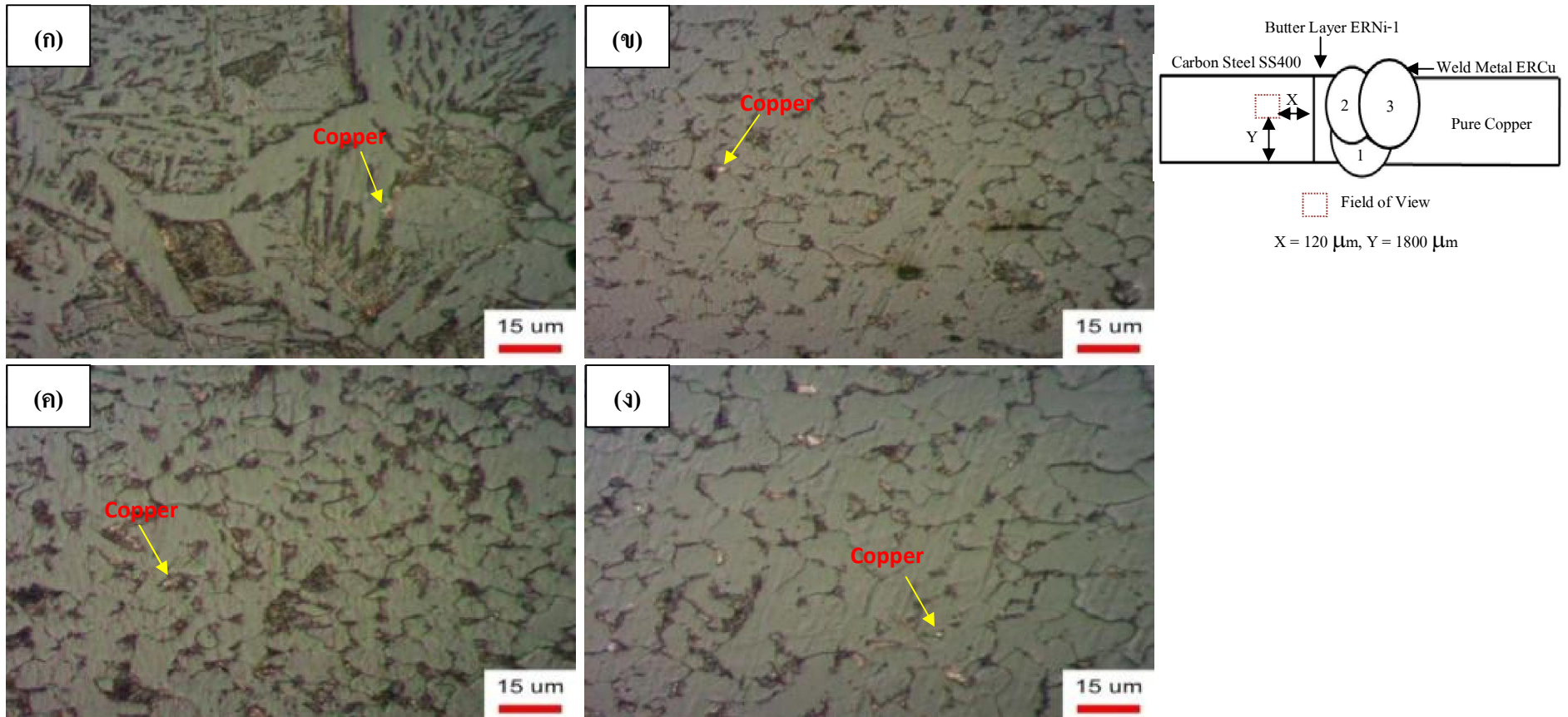
2.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณกระทืบร้อนเหล็กกล้าคาร์บอน SS400

ในบริเวณกระทืบร้อนเหล็กกล้าคาร์บอนของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ 100 °C ประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์และเฟสเพอร์ไรท์ที่มีลักษณะเป็นเกรนปลายแหลม ยังคงพบทองแดงอยู่ตามขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ก) สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ 200 °C, 300 °C และ 400 °C ในบริเวณกระทืบร้อนประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์และเฟสเพอร์ไรท์ที่มีลักษณะเป็นเกรนละเอียด และยังคงพบทองแดงอยู่ตามขอบเกรนเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ

การที่บริเวณกระทืบร้อนของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่อุณหภูมิ 100 °C มีลักษณะเกรนปลายแหลมนั้น เนื่องจากชิ้นงานดังกล่าวมีการเชื่อมเพียงแนวเดียว ทำให้บริเวณกระทืบร้อนไม่ได้รับความร้อนจากการเชื่อมซ้ำ จึงส่งผลให้บริเวณดังกล่าวยังคงลักษณะเกรนที่เกิดจากอัตราการเย็นตัวสูง สำหรับบริเวณกระทืบร้อนของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ 200 °C, 300 °C และ 400 °C ซึ่งมีลักษณะเกรนละเอียดนั้น เนื่องจากชิ้นงานดังกล่าวมีการเชื่อมทั้งหมด 3 แนวเชื่อม โดยแนวเชื่อมก่อนหน้าทำให้เกิดความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ในบริเวณกระทืบร้อนเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งเป็นพลังงานสะสม (Stored Energy) ในบริเวณดังกล่าว และเมื่อมีการให้ความร้อนซ้ำกับบริเวณกระทืบร้อนจากการเชื่อมแนวถัดไป ทำให้พลังงานสะสมที่มีอยู่เร่งให้เกิดการตกผลึกใหม่ของเกรน [14] จึงเป็นเหตุทำให้บริเวณกระทืบร้อนของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นชิ้นงานที่ 200 °C, 300 °C และ 400 °C มีเฟสเพอร์ไรท์ที่มีลักษณะเกรนละเอียด



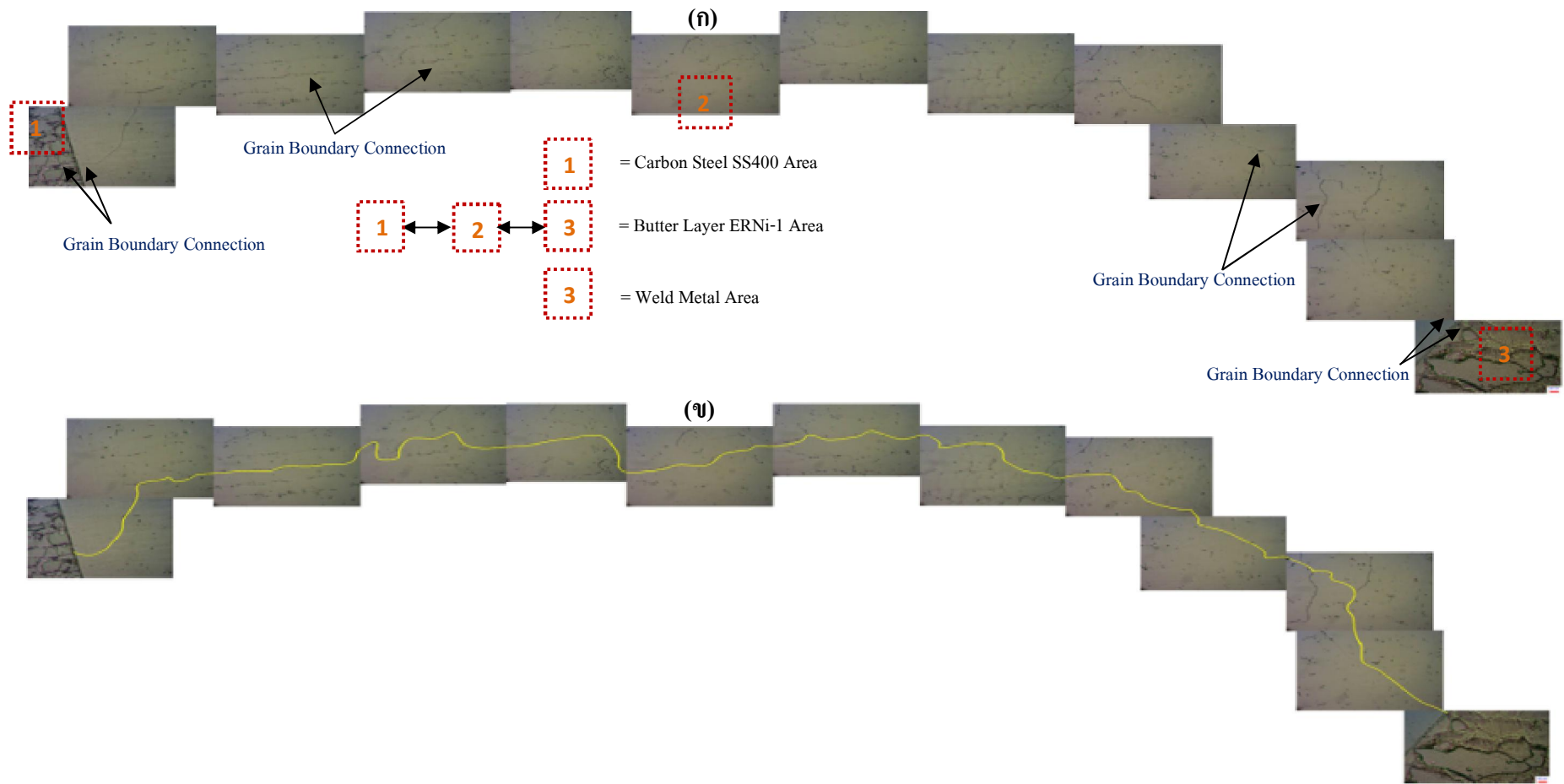
รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่อุณหภูมิ (ก) 100 °C, (ข) 200 °C, (ค) 300 °C และ (ง) 400 °C



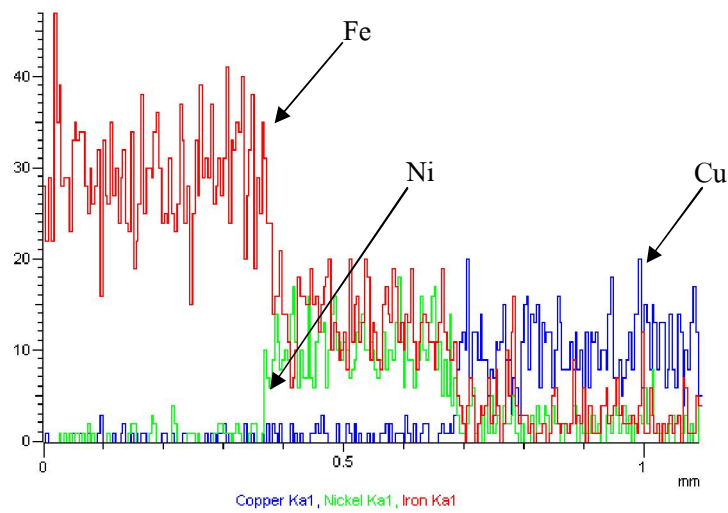
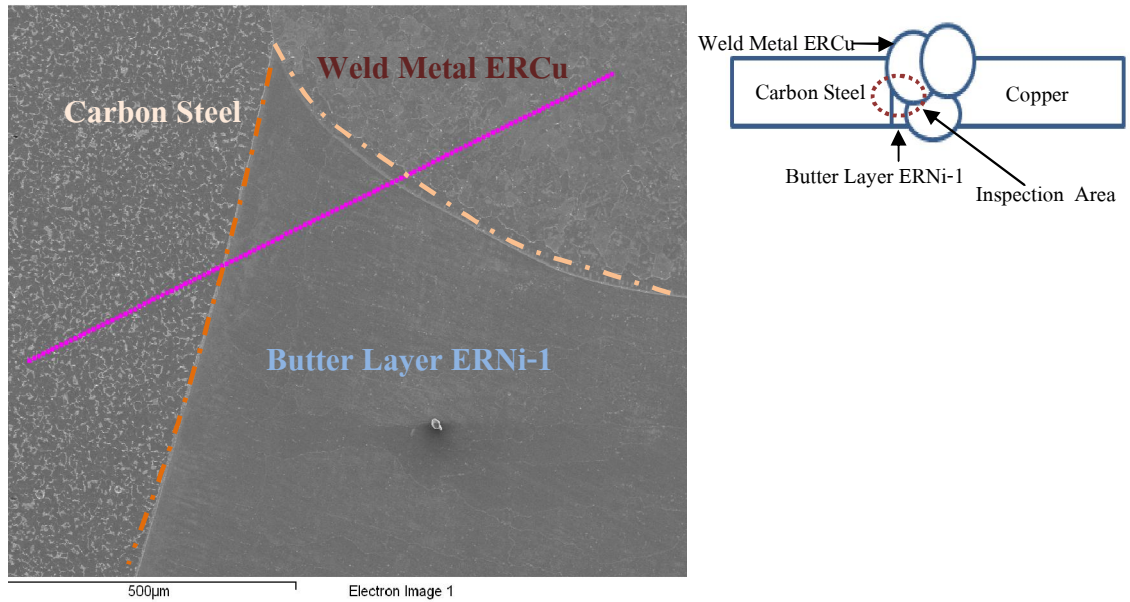
รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณกระทบร้อนเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่อุณหภูมิ (ก) 100 °C, (ข) 200 °C, (ค) 300 °C และ (ง) 400 °C

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเห็นได้ว่า ยังคงพบทองแดงในบริเวณโลหะฐานและบริเวณ กระทบร้อนเหล็กกล้าคาร์บอนของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่อุณหภูมิ 100 °C, 200 °C, 300 °C และ 400 °C เนื่องจากเมื่อมีการอุ่นชิ้นงาน ส่งผลให้บ่อหลอมละลายมีอัตราการเย็นตัวต่ำลง ทองแดงแพร่ เข้าสู่โลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอนได้ง่ายขึ้น ซึ่งการแพร่ดังกล่าวเป็นการแพร่แบบท่อ โดยแพร่ตาม ขอบเกรนที่เชื่อมโยงกันระหว่าง แนวเชื่อมทองแดง แนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิล และโลหะฐานเหล็กกล้า คาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ทั้งนี้การที่ขอบเกรนของทั้ง 3 บริเวณมีการเชื่อมโยงกัน เกิดจากการ แข็งตัวในทิศทางอย่างง่าย (Easy Growth Direction) ของแนวเชื่อม โดยแข็งตัวตามทิศทางการเรียงตัว ของเกรนโลหะฐาน แม้ว่าโดยปกติแล้วในการเชื่อมวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน การแข็งตัวใน ทิศทางอย่างง่ายเป็นไปได้ยาก [9] อย่างไรก็ตาม ในระหว่างการเชื่อม บริเวณกระทบร้อนเหล็กกล้า คาร์บอนมีการเปลี่ยนเฟสเป็นออสเตนไนท์ซึ่งมีโครงสร้างผลึก FCC [5] ซึ่งเหมือนกับโครงสร้างผลึก ของนิกเกิล (ซึ่งนิกเกิลไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเมื่ออยู่ในสถานะของแข็ง) ดังนั้นในระหว่างการ เย็นตัว แนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลมีโอกาสเกิดการแข็งตัวในทิศทางอย่างง่าย และเกิดขอบเกรนที่ เชื่อมโยงกันระหว่างแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลกับโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอน

ทั้งนี้จากการตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีของแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลของชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งเป็น ชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่อุณหภูมิ 400 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่า มีเหล็กในแนวเชื่อมรองพื้น นิกเกิล แสดงว่าแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลมีการผสมกับโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอน ทำให้ ความสามารถในการละลายทองแดงในแนวเชื่อมรองพื้นลดลง จึงเกิดการแพร่ของทองแดงตามขอบ เกรนของแนวเชื่อมรองพื้นและแพร่เข้าสู่โลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอนได้ง่ายขึ้น



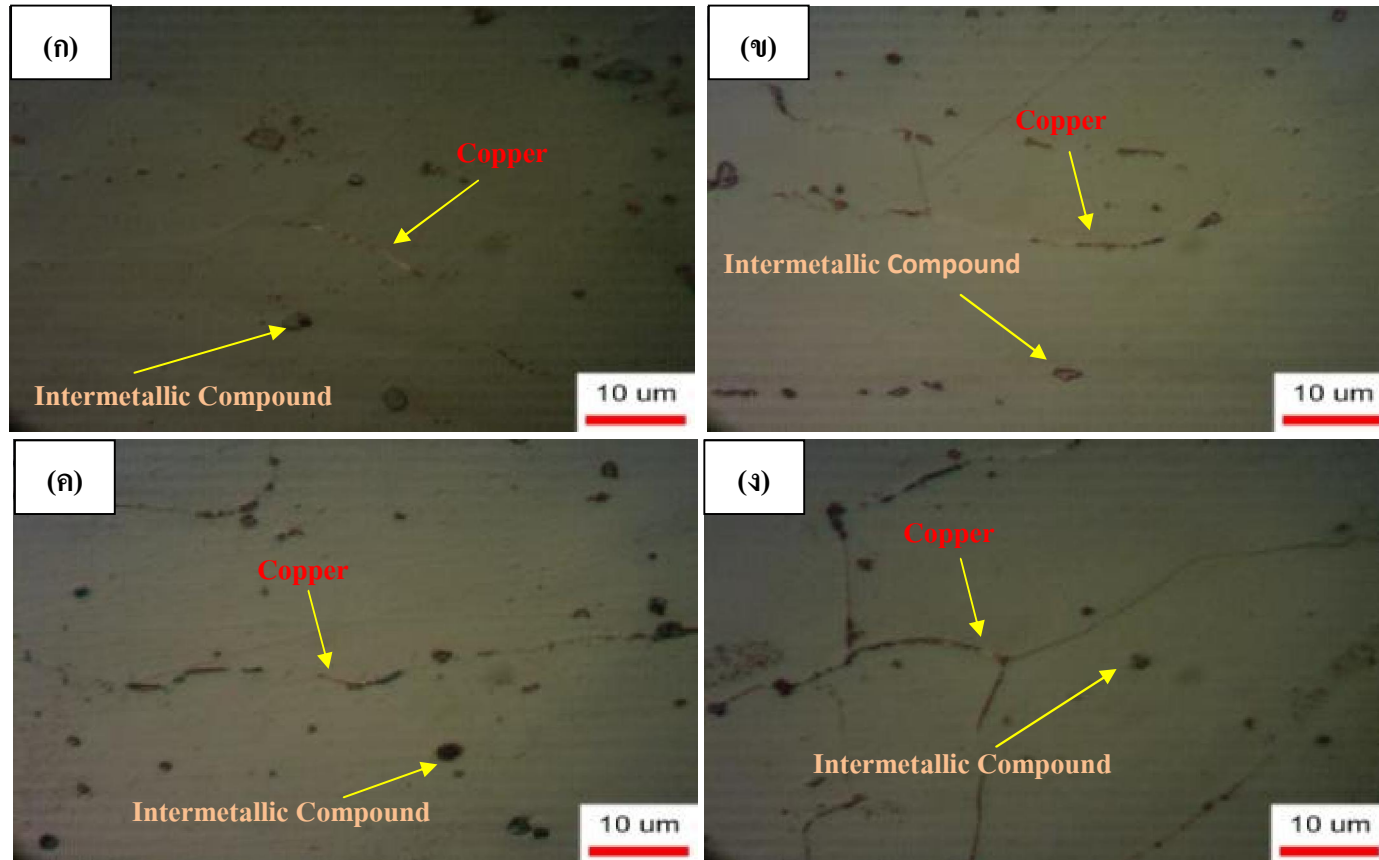
รูปที่ 4.10 แสดง (ก) ลักษณะขอบเกรนที่เชื่อมโยงกันระหว่างบริเวณ โลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 แนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิล ERNi-1 และแนวเชื่อมทองแดง
 (ข) เส้นสมมติที่ลากตามขอบเกรนที่เชื่อม โยงกันของทั้ง 3 บริเวณ



รูปที่ 4.11 แสดงส่วนประกอบทางเคมีบริเวณ โลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 แนวเชื่อมรองพื้น นิกเกิล ERNi-1 และแนวเชื่อมทองแดงของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่อุณหภูมิ 400 °C

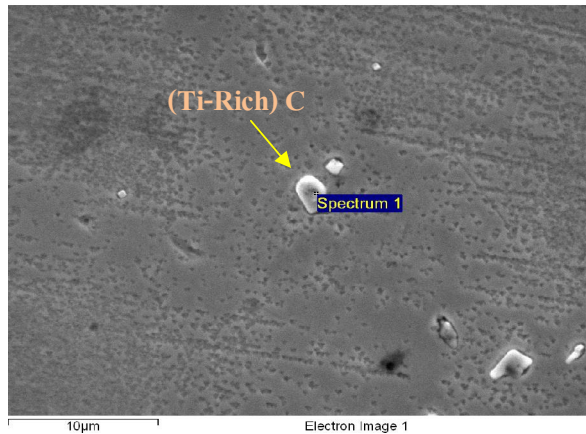
2.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิล ERNi-1

บริเวณแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิล ERNi-1 ของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นชิ้นงานที่ 100 °C, 200 °C, 300 °C และ 400 °C พบการตกผลึกของสารประกอบโลหะ และเกิดการแยกตัวของทองแดงตัวตามขอบเกรนในบริเวณแนวเชื่อมรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ เนื่องจากแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลมีการผสมกันกับเหล็กเหล็กกล้าคาร์บอน ทั้งนี้การผสมกันดังกล่าว ส่งผลให้ความสามารถในการละลายทองแดงเข้ากับแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลลดลง ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 2.2 และเกิดการแยกตัวของทองแดงตามขอบเกรนแนวเชื่อมรองพื้น

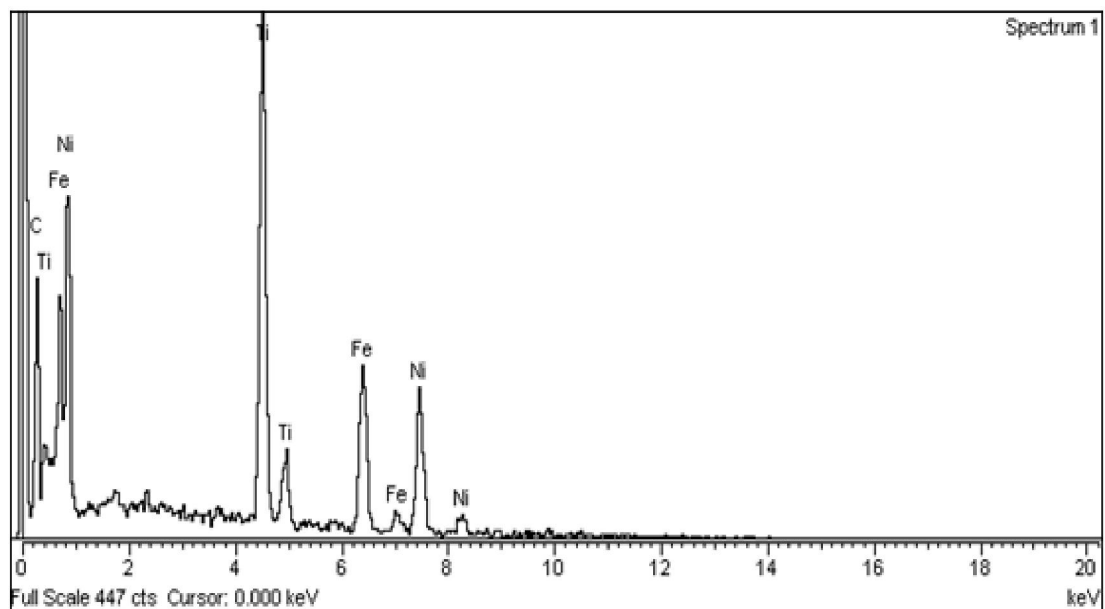


รูปที่ 4.12 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิล ERNi-1 ของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่อุณหภูมิ (ก) 100 °C, (ข) 200 °C, (ค) 300 °C และ (ง) 400 °C

เมื่อทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของสารประกอบโลหะที่ตกผลึกในแนวเชื่อมร่องพื้นนิกเกิลของชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ 400 °C พบว่าสารประกอบโลหะดังกล่าวมีธาตุประกอบหลัก คือ ไทเทเนียมและคาร์บอน ((Ti-Rich) C) ดังแสดงในรูปที่ 4.13 โดยไทเทเนียมเป็นธาตุที่ประกอบอยู่ในส่วนผสมทางเคมีทั่วไปของลวดเชื่อมนิกเกิล ERNi-1



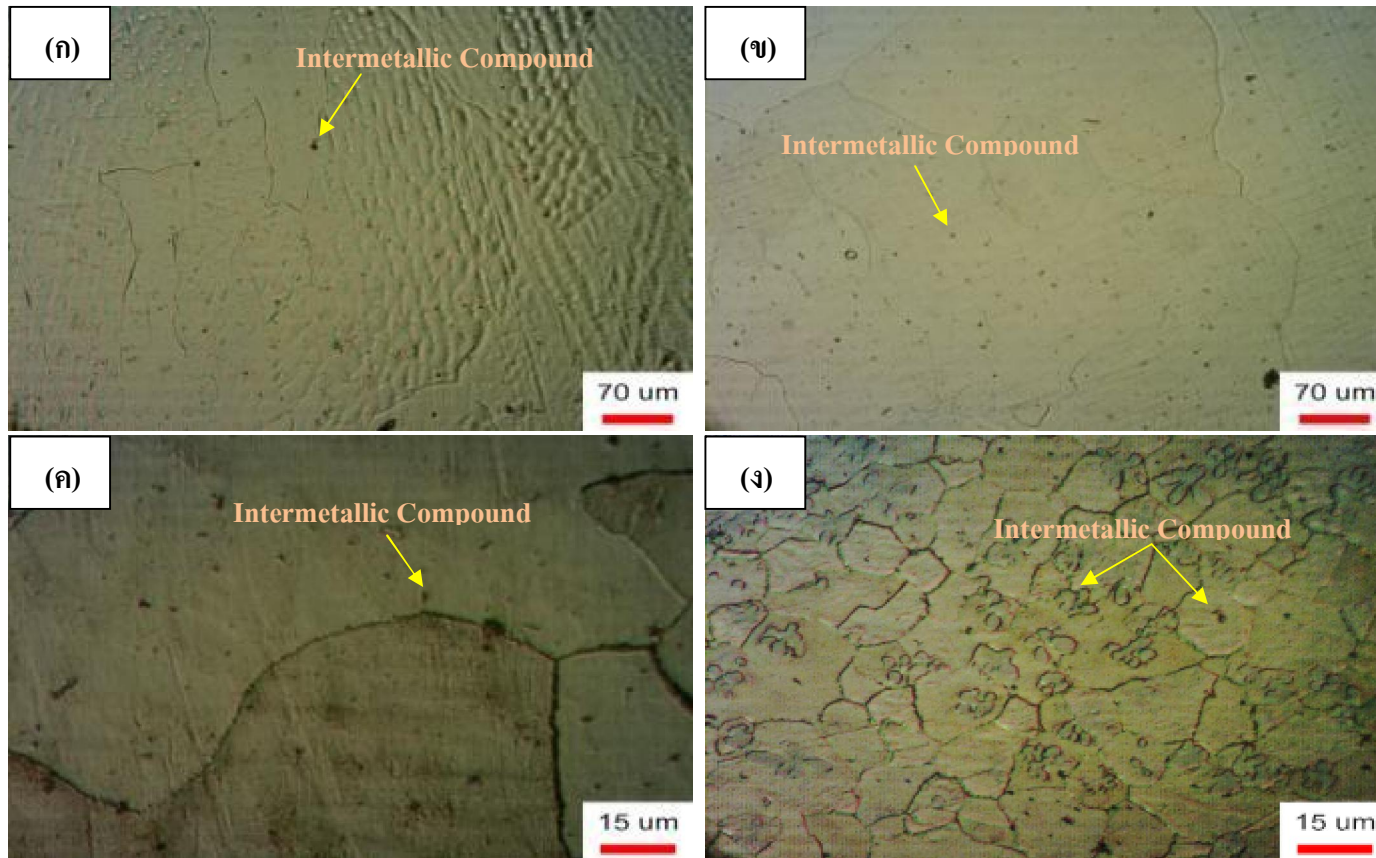
Element	Weight%
CK	21.62
TiK	29.11
FeK	20.87
NiK	28.40
Total	100



รูปที่ 4.13 แสดงส่วนผสมทางเคมีของสารประกอบโลหะในแนวเชื่อมร่องพื้นนิกเกิล ERNi-1 ของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่อุณหภูมิ 400 °C

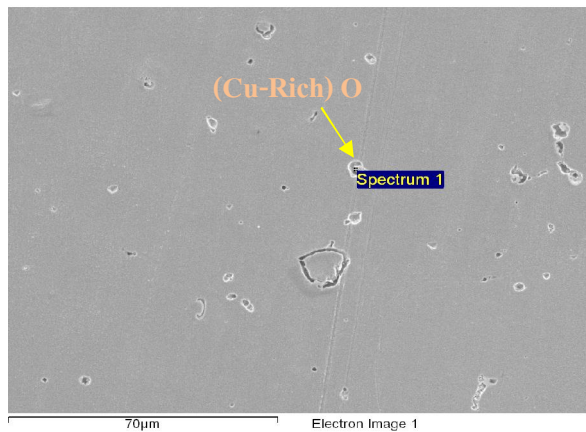
2.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมทองแดง

เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมทองแดงของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นชิ้นงานที่ 100 °C, 200 °C, 300 °C และ 400 °C พบการตกผลึกของสารประกอบโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ก), (ข), ค) และ (ง) ตามลำดับ

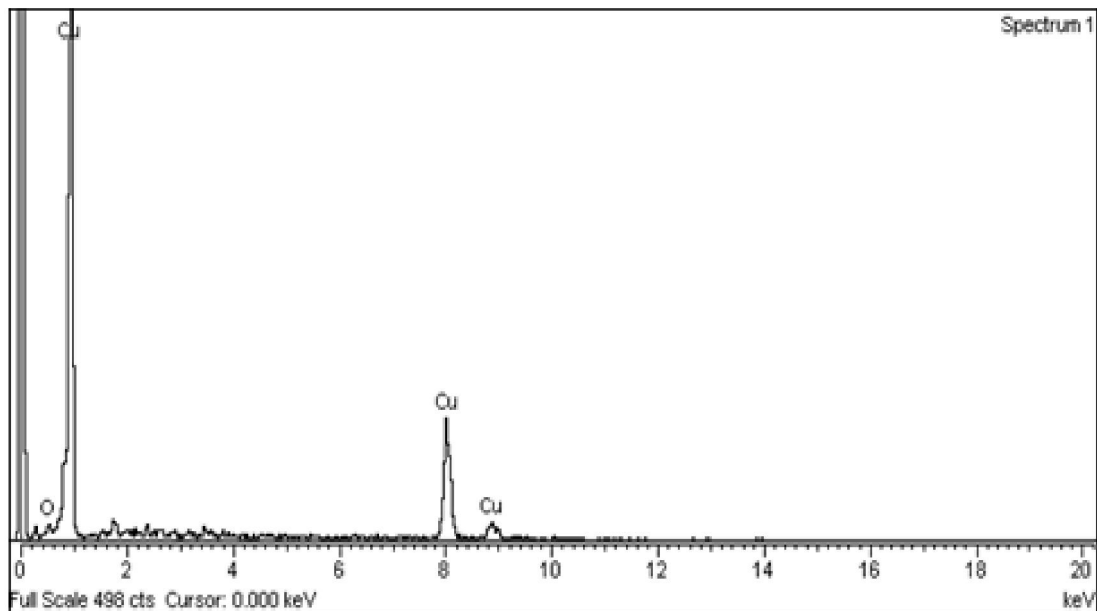


รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมทองแดงของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่อุณหภูมิ (ก) 100 °C, (ข) 200 °C, (ค) 300 °C, และ (ด) 400 °C

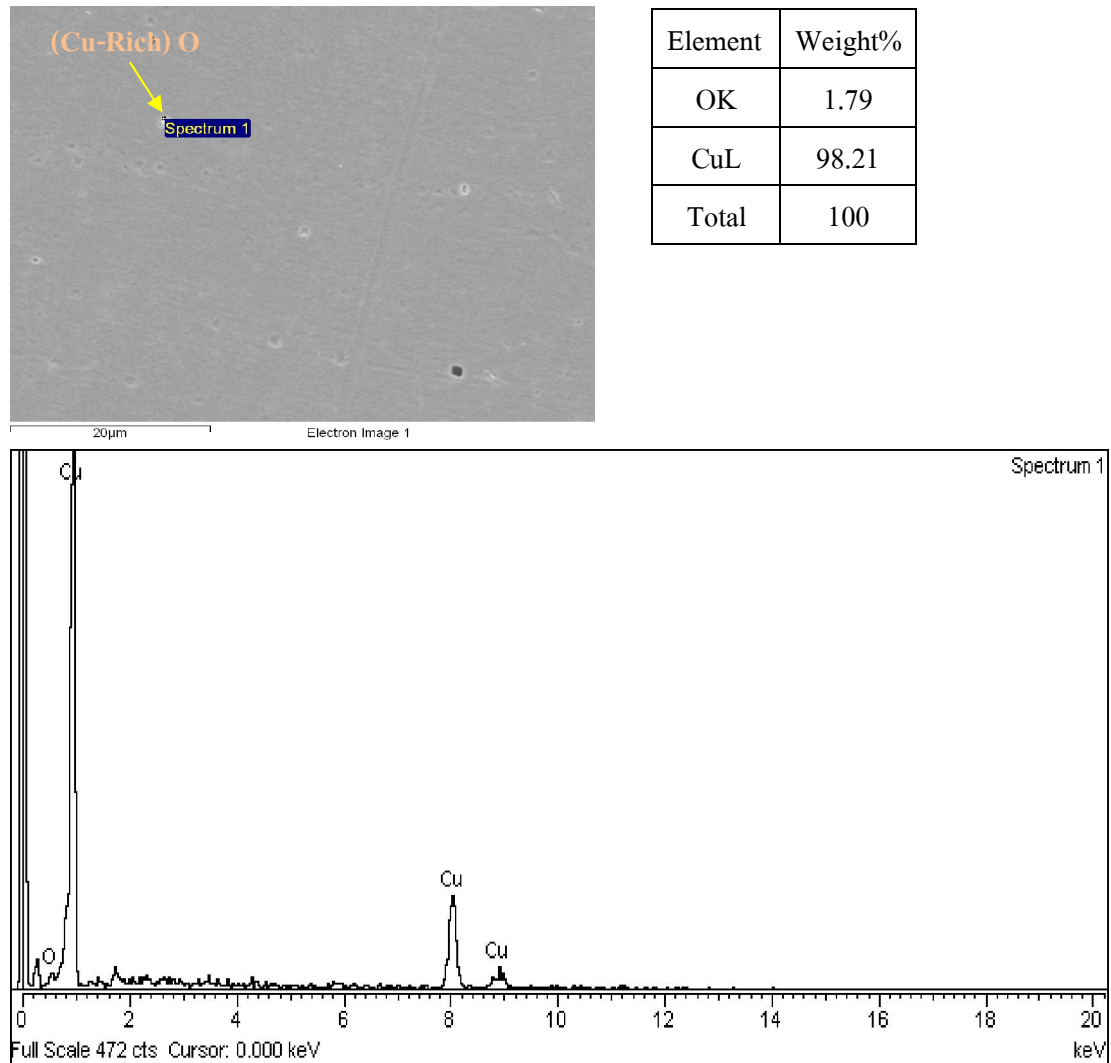
สำหรับการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของสารประกอบโลหะที่พบในแนวเชื่อมทองแดงของชิ้นงาน ที่ผ่านการอุ่นที่ 100 °C และ 200 °C ซึ่งสารประกอบโลหะดังกล่าวประกอบด้วยธาตุทองแดงและ ออกซิเจน ((Cu-Rich) O) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ โดยสารประกอบที่เกิดขึ้น ดังกล่าวเป็นผลมาจากการใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน ที่ใช้เพียง 8 ลิตรต่อนาที ส่งผลให้ ความสามารถของแก๊สปกคลุมในการปกคลุมบ่อหลอมละลายต่ำ ทำให้แก๊สจากบรรยากาศเข้าไปผสม ในบ่อหลอมละลาย



Element	Weight%
OK	2.41
CuL	97.59
Total	100



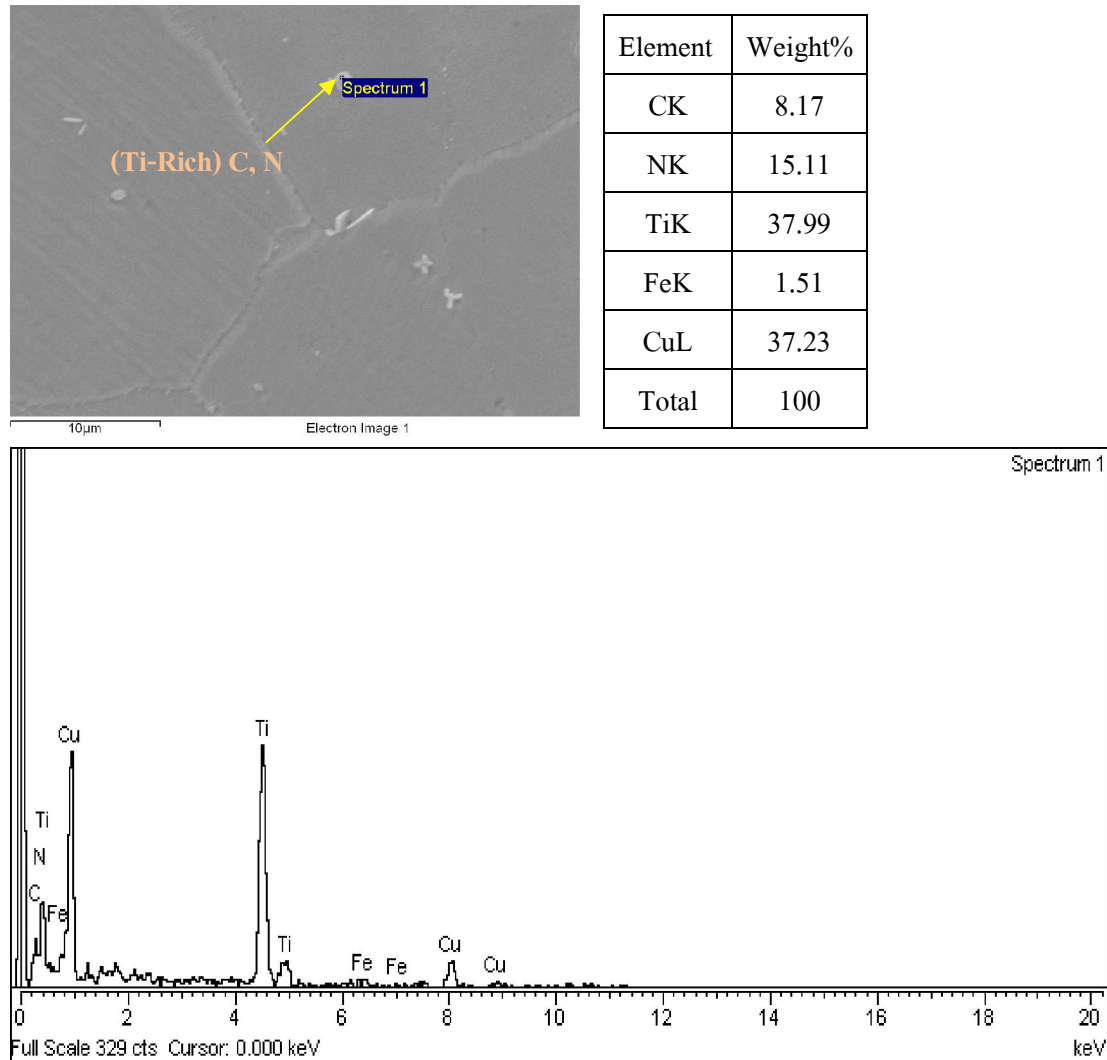
รูปที่ 4.15 แสดงส่วนผสมทางเคมีของสารประกอบโลหะที่ตกผลึกในแนวเชื่อมทองแดงของชิ้นงาน ที่ผ่านการอุ่นที่อุณหภูมิ 100 °C



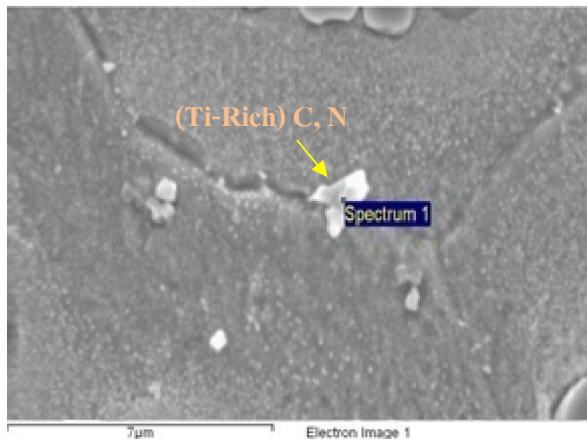
รูปที่ 4.16 แสดงส่วนผสมทางเคมีของสารประกอบโลหะที่ตกผลึกในแนวเชื่อมทองแดงของชิ้นงาน ที่ผ่านการอุ่นที่อุณหภูมิ 200 °C

อีกทั้งเมื่อทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของสารประกอบโลหะที่พบในแนวเชื่อมทองแดงของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นชิ้นงานที่ 300 °C และ 400 °C พบว่าสารประกอบดังกล่าวมีธาตุประกอบหลักคือ ไทเทเนียม คาร์บอน และไนโตรเจน ((Ti-Rich) C, N) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ โดยสารประกอบดังกล่าวเป็นผลมาจากแก๊สจากบรรยากาศเข้าไปผสมในบ่อหลอมละลาย อีกทั้งชิ้นงานทั้งสองชิ้นมีการหลอมละลายของแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลเข้าสู่แนวเชื่อมทองแดง ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค โดยชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นชิ้นงานที่ 300 °C และ

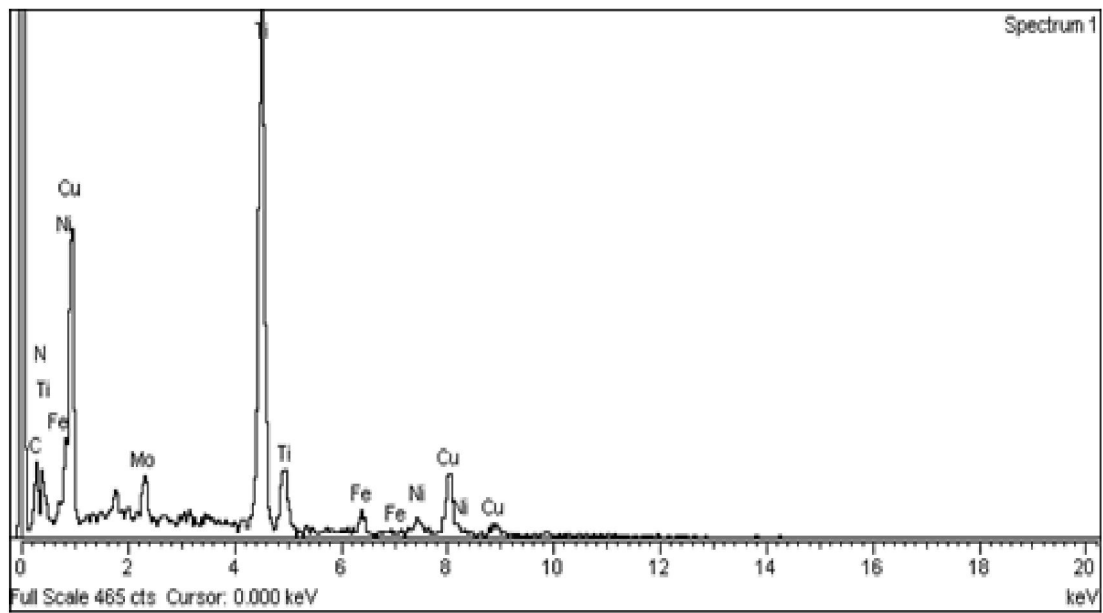
400 °C มีพื้นที่การหลอมละลายแนวเชื่อมร่องพื้นนิกเกิลเข้าสู่แนวเชื่อมทองแดง 1.93 มม² และ 4.29 มม² ตามลำดับ ซึ่งไทเทเนียมที่พบเป็นธาตุที่ประกอบอยู่ในส่วนผสมทางเคมีทั่วไปของลวดเชื่อม นิกเกิล ERNi-1 โดยไทเทเนียมมีความสามารถในการจับตัวได้ดีกับคาร์บอนและไนโตรเจน [5] จึงส่งผลให้เกิดการตกผลึกของสารประกอบโลหะดังกล่าว



รูปที่ 4.17 แสดงส่วนผสมทางเคมีของสารประกอบโลหะที่ตกผลึกในแนวเชื่อมทองแดงของชิ้นงาน ที่ผ่านการอุ่นที่อุณหภูมิ 300 °C

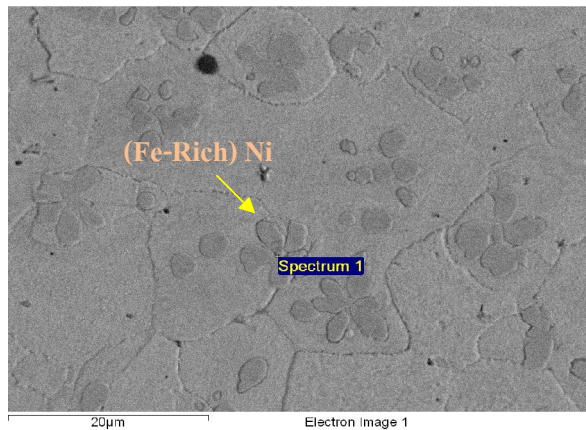


Element	Weight%
CK	11.52
NK	4.92
TiK	42.01
FeK	3.60
NiK	3.71
CuL	30.54
MoL	3.70
Total	100

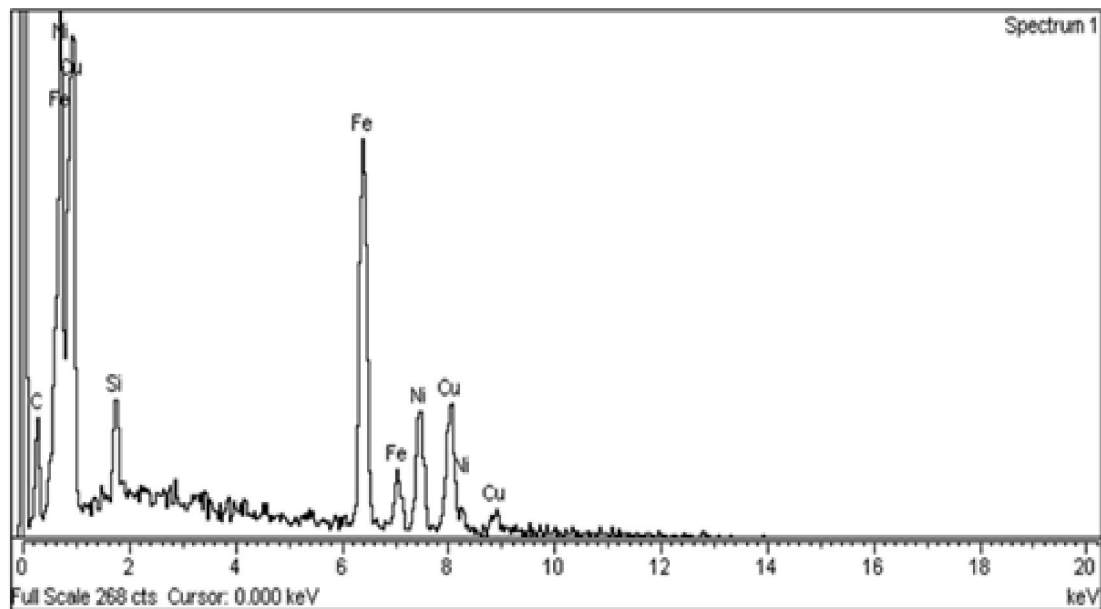


รูปที่ 4.18 แสดงส่วนผสมทางเคมีของสารประกอบโลหะที่ตกผลึกในแนวเชื่อมทองแดงของชิ้นงาน
ที่ผ่านการอุ่นที่อุณหภูมิ 400 °C

และเมื่อทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของสารประกอบโลหะอีกประเภทที่พบในแนวเชื่อมทองแดงที่ผ่านการอุ่นที่ 400 °C พบว่าสารประกอบโลหะดังกล่าวมีธาตุประกอบหลักคือ เหล็ก และ นิกเกิล ((Fe-Rich) Ni) ดังแสดงในรูปที่ 4.19 อันเป็นผลมาจากแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลที่มีเหล็กผสมอยู่ หลอมเข้าไปในแนวเชื่อมทองแดง และเกิดการตกผลึกเป็นสารประกอบโลหะดังกล่าว

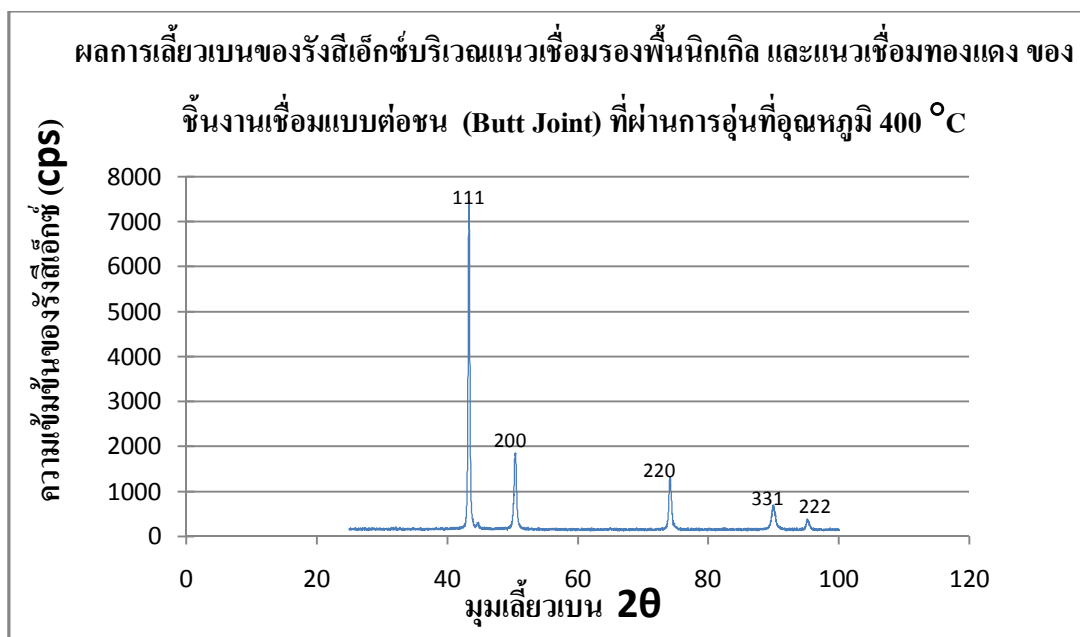


Element	Weight%
CK	9.54
SiK	2.03
FeK	36.80
NiK	19.05
CuL	32.58
Total	100



รูปที่ 4.19 แสดงส่วนผสมทางเคมีของสารประกอบโลหะที่ตกผลึกในแนวเชื่อมทองแดงของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่อุณหภูมิ 400 °C

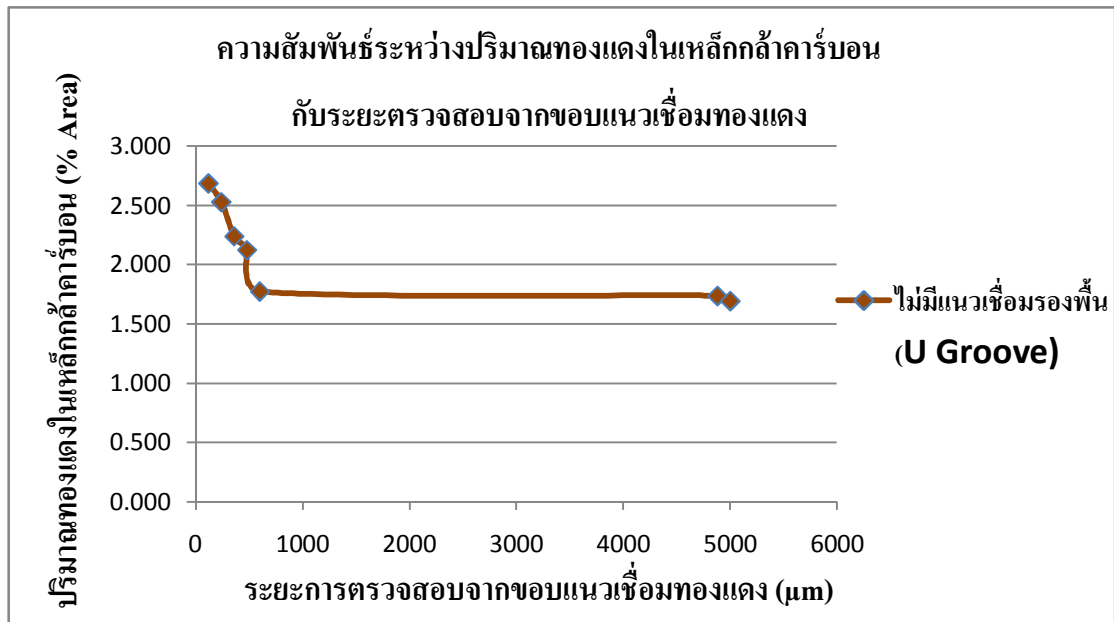
ในการตรวจสอบเพื่อระบุโครงสร้างผลึกของสารประกอบโลหะที่ตกผลึกในแนวเชื่อมร่องพื้นนิกเกิล ERNi-1 และแนวเชื่อมทองแดง ของชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ 400 °C ผลการวิเคราะห์พบว่า พีคของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนเกิดขึ้นที่มุม 2θ มีค่าเท่ากับ 43.34° 50.46° 74.16° และ 89.88° ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับแบบแผนมาตรฐาน (Standard Pattern) ที่ได้ทำการเก็บรวบรวมไว้ ซึ่งแบบแผนมาตรฐานที่นำมาเปรียบเทียบคือ ทองแดงและนิกเกิล เนื่องจากมีพีคของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนเกิดขึ้นที่มุม 2θ ใกล้เคียงกัน (2θ ของทองแดงเท่ากับ 43.298° 50.434° 74.133° และ 89.934° ตามลำดับ และ 2θ ของนิกเกิลเท่ากับ 44.508° 51.847° 76.372° และ 92.947°) จากแบบแผนมาตรฐาน ซึ่งเห็นได้ว่า พีคของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนเกิดขึ้นที่มุม 2θ ของนิกเกิลและทองแดง มีค่าใกล้เคียงกัน โดยพีคที่ตรวจพบไม่สามารถระบุได้ว่าโครงสร้างผลึกของธาตุชนิดใด เนื่องจากในแนวเชื่อมร่องพื้นนิกเกิลมีเหล็กและทองแดงเข้าไปผสมอยู่ โดยที่ธาตุทั้งสองตัวมีการแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างผลึกของนิกเกิล ทำให้ค่า d spacing ของนิกเกิลมีการเปลี่ยนแปลงไป จึงส่งผลให้มุม 2θ ของนิกเกิลเกิดเปลี่ยนแปลงด้วย และเกิดการซ้อนทับกันกับมุม 2θ ของทองแดง ดังนั้นพีคของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนเกิดขึ้นที่มุม 2θ ที่พบอาจเป็นพีคของทองแดงและนิกเกิลที่ซ้อนทับกัน



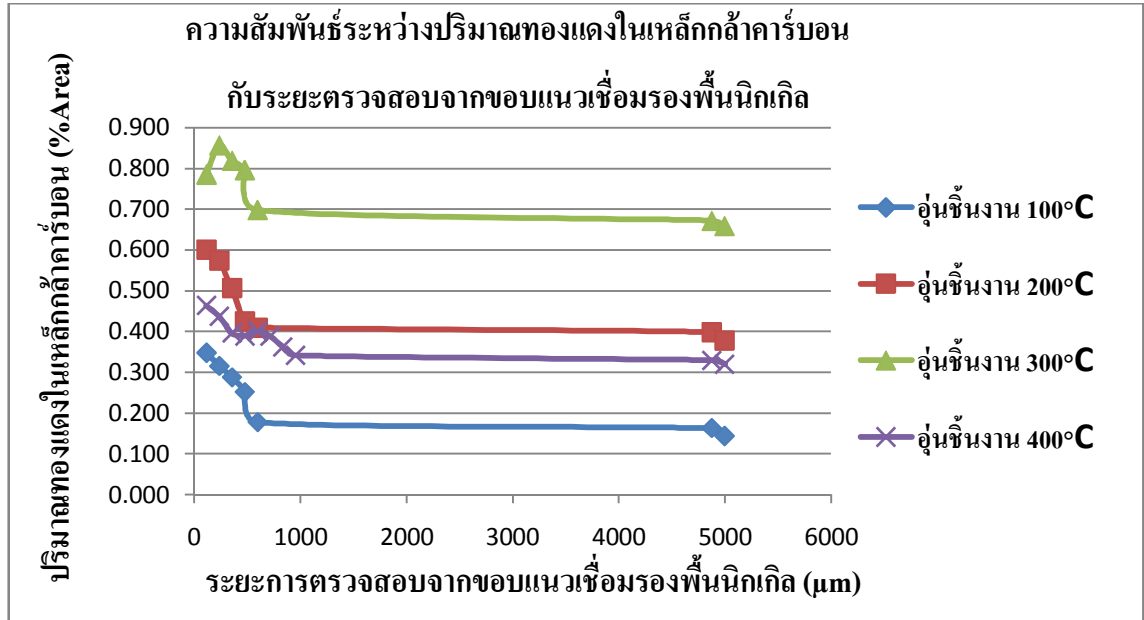
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บริเวณแนวเชื่อมร่องพื้นนิกเกิล และแนวเชื่อมทองแดงของชิ้นงานเชื่อมต่อชน (Butt Joint) ที่ผ่านการอุ่นที่อุณหภูมิ 400 °C

3. ผลการตรวจสอบปริมาณทองแดงในโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอน SS400

การตรวจสอบปริมาณทองแดงในโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอนของการเชื่อมทั้ง 2 ส่วน เป็นการตรวจสอบในทิศทางที่ตั้งฉากกับขอบแนวเชื่อมซึ่งเป็นทิศทาง Temperature Gradient จากการตรวจสอบพบว่า การเชื่อมในร่องยูบนผิวหน้าเหล็กกล้าคาร์บอน และการเชื่อมแบบต่อชน ในชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ 100 °C, 200 °C และ 300 °C มีระยะ Temperature Gradient เท่ากับ 600 ไมครอน และสำหรับชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ 400 °C มีระยะ Temperature Gradient เท่ากับ 960 ไมครอน ทั้งนี้ ตำแหน่งของระยะ Temperature Gradient ดังกล่าว มีปริมาณทองแดงใกล้เคียงกับที่ระยะ 4880 ไมครอน ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำการตรวจสอบปริมาณทองแดงในช่วงระยะดังกล่าว (600 ไมครอน หรือ 960 ไมครอน ถึง 4880 ไมครอน) และจากผลการตรวจสอบพบว่า ปริมาณทองแดงในโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอนมีแนวโน้มลดลงจากตำแหน่งขอบแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.21 และ 4.22



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงปริมาณทองแดงในเหล็กกล้าคาร์บอนของการเชื่อมในร่องยู ณ ระยะการตรวจสอบจากขอบแนวเชื่อมทองแดง (กรณีไม่มีการเชื่อมร่องพื้น)



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงปริมาณทองแดงในเหล็กกล้าคาร์บอนของการเชื่อมแบบต่อชน ณ ระยะการตรวจสอบจากขอบแนวเชื่อมร่องพื้นนิกเกิล (กรณีมีการเชื่อมร่องพื้น)

จากผลการตรวจสอบ ซึ่งเห็นได้ว่า ชีงงานเชื่อมในร่องยู ซึ่งไม่มีการเชื่อมร่องพื้น มีการตรวจพบปริมาณทองแดงในเหล็กกล้าคาร์บอนมากกว่าชีงงานเชื่อมแบบต่อชนซึ่ง มีการเชื่อมร่องพื้นทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยลวดเชื่อมนิกเกิล ERNi-1 แม้ว่าชีงงานเชื่อมในร่องยู ทำการเชื่อมด้วยค่าความร้อนขาเข้าที่ต่ำกว่าก็ตาม ดังนั้นการเชื่อมร่องพื้นด้วยลวดเชื่อมนิกเกิล ERNi-1 ทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอนสามารถลดปริมาณทองแดงในเหล็กกล้าคาร์บอนที่แพร่มาจากบ่อหลอมละลายได้

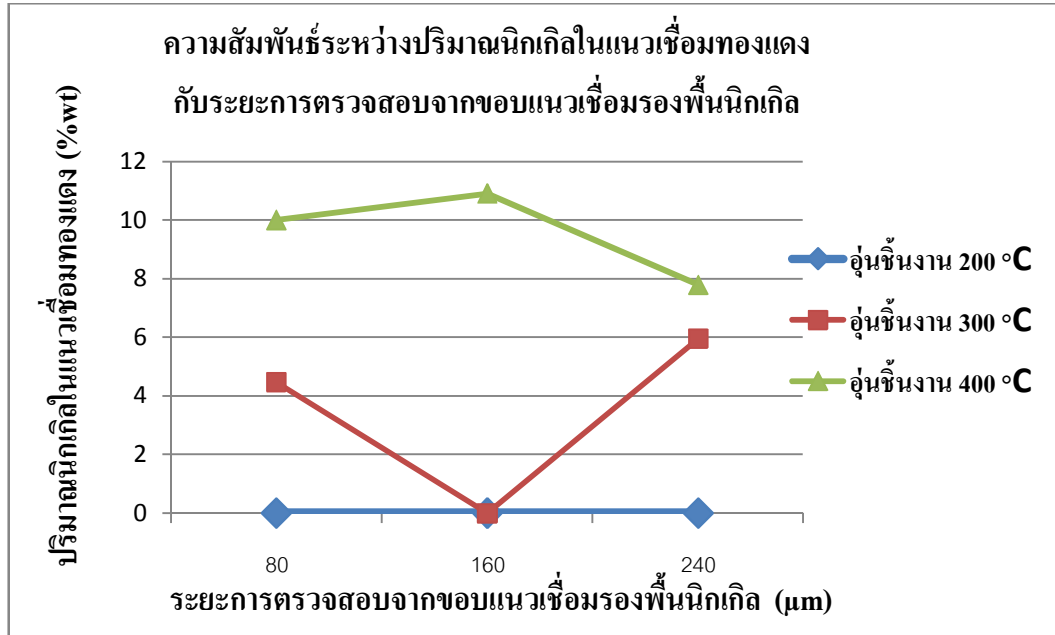
และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณทองแดงในเหล็กกล้าคาร์บอนของชีงงานที่มีการเชื่อมร่องพื้นที่ได้รับอุณหภูมิการอุ่นชีงงานแตกต่างกัน พบว่า ชีงงานที่ผ่านการอุ่นที่ 300 °C มีปริมาณทองแดงแพร่เข้าสู่เหล็กกล้าคาร์บอนมากที่สุด รองลงมาคือ 200 °C, 400 °C และ 100 °C ตามลำดับ

การเพิ่มอุณหภูมิการอุ่นชีงงานถือว่าการเพิ่มพื้นที่การหลอมละลายบริเวณ โลหะฐานทองแดง และลดความหนาของแนวเชื่อมร่องพื้นนิกเกิล ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณทองแดงในบ่อหลอมละลาย และเป็นการลดขนาดความหนาของแนว

เชื่อมรองพื้นที่เป็นส่วนป้องกันการแพร่ของทองแดงเข้าสู่เหล็กกล้าคาร์บอน ตามลำดับ ส่งผลทำให้ทองแดงแพร่เข้าสู่เหล็กกล้าคาร์บอนได้มากขึ้น จึงเป็นผลทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีพื้นที่การหลอมละลายบริเวณโลหะฐานทองแดงอยู่ที่ 13.88 มม.^2 และแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลมีขนาดความหนาของเหลือต่ำสุดอยู่ที่ 0.74 มม. มีปริมาณทองแดงแพร่เข้าสู่เหล็กกล้าคาร์บอนมากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีพื้นที่การหลอมละลายบริเวณโลหะฐานทองแดงเพียง 12.70 มม.^2 และ 3.51 มม.^2 และแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลมีขนาดความหนาของเหลือต่ำสุดอยู่ที่ 3 มม. ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีพื้นที่การหลอมละลายโลหะฐานทองแดงถึง 14.50 มม.^2 และมีบางส่วนของแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลหลอมละลายจนหมด ทั้งนี้จากการทำการวัดพื้นที่การหลอมละลายบริเวณดังกล่าว มีพื้นที่ถึง 4.29 มม.^2 ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการหลอมละลายมากที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นชิ้นงานที่อุณหภูมิอื่นๆ จึงทำให้นิกเกิลจากแนวเชื่อมรองพื้นหลอมละลายเข้าสู่ท่อหลอมละลายทองแดงได้มากที่สุด ซึ่งทองแดงมีความสามารถในการละลายตัวเข้ากับนิกเกิลได้ดี [2] ส่งผลให้ทองแดงที่มีสถานะเป็นของเหลวในชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ สามารถหลอมละลายรวมกับนิกเกิลได้มาก ดังนั้นทองแดงจึงแพร่เข้าสู่เหล็กกล้าคาร์บอนได้น้อยกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$

และเมื่อทำการตรวจสอบปริมาณนิกเกิลในแนวเชื่อมทองแดงด้วยเทคนิค EDS โดยทำการตรวจสอบจากขอบแนวเชื่อมรองพื้นนิกเกิลเป็นระยะ 240 ไมครอน ซึ่งระยะห่างของตำแหน่งการตรวจสอบแต่ละจุดเท่ากับ 80 ไมครอน จากผลการตรวจสอบพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีปริมาณนิกเกิลในแนวเชื่อมทองแดงมากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่ $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ทั้งนี้การตรวจสอบชิ้นงานที่ผ่านการอุ่นที่อุณหภูมิ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ระยะ 160 ไมครอน ไม่พบนิกเกิล เนื่องจากตำแหน่งการตรวจสอบดังกล่าวไม่มีนิกเกิลผสมอยู่



รูปที่ 4.23 แสดงปริมาณนิกเกิลในแนวเชื่อมทองแดงของการเชื่อมแบบต่อชน ณ ระยะการตรวจสอบจากขอบแนวเชื่อมร่องพื้นนิกเกิล

ทั้งนี้ในการตรวจสอบปริมาณทองแดงในเหล็กกล้าคาร์บอน พบว่า มีค่าความถูกต้องสัมพัทธ์ (Relative Accuracy; %RA) ต่ำกว่า 10 % ที่ทุกๆระยะการวัดในแต่ละชั้นงาน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 อันหมายถึงค่าการวัดปริมาณทองแดงในเหล็กกล้าคาร์บอนมีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับได้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถูกต้องสัมพัทธ์ (%RA) ของการตรวจสอบปริมาณทองแดงในเหล็กกล้าคาร์บอนในแต่ละระยะการตรวจสอบ

ชิ้นงาน	ระยะการตรวจสอบ (μm)									
	120	240	360	480	600	720	840	960	4880	5000
ชิ้นงานเชื่อมแบบในร่อง (กรณีไม่มีการเชื่อมรองพื้น)										
U Groove	4.450%	4.054%	2.812%	3.715%	4.777%	-	-	-	4.151%	2.613%
ชิ้นงานเชื่อมแบบต่อชน (กรณีมีการเชื่อมรองพื้น) ที่มีการอุ่นชิ้นงานที่อุณหภูมิต่างๆ										
อุ่นที่ 100 °C	7.009%	6.387%	8.354%	9.942%	8.863%	-	-	-	9.149%	8.452%
อุ่นที่ 200 °C	7.532%	6.235%	9.800%	9.612%	5.185%	-	-	-	5.605%	4.398%
อุ่นที่ 300 °C	9.573%	9.910%	9.497%	9.848%	4.327%	-	-	-	3.300%	2.801%
อุ่นที่ 400 °C	5.151%	5.946%	3.022%	2.894%	2.880%	2.861%	3.753%	3.893%	4.927%	5.783%