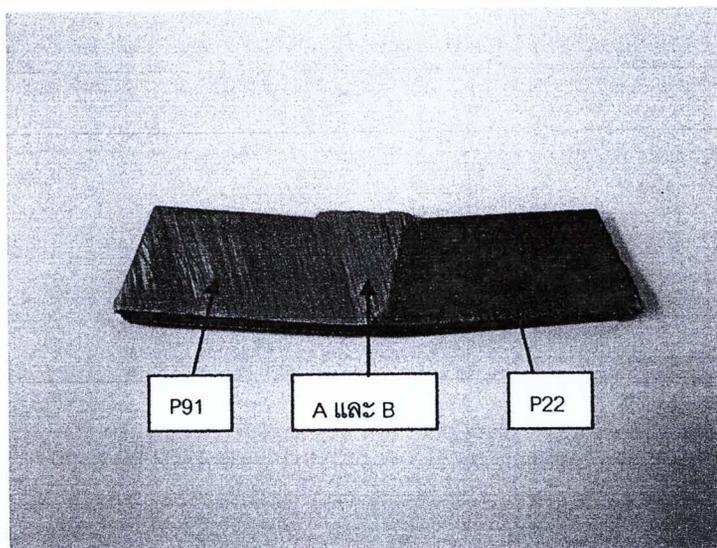


## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

เพื่อความสะดวกในการอภิปรายผลความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและความแข็ง ต้องกล่าวอ้างถึงอุณหภูมิและเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลายครั้ง จึงขอใช้สัญลักษณ์แทน ลวดเชื่อม อุณหภูมิ และเวลาของกรรมวิธีทางความร้อน ตัวอย่างเช่น A/750/2/550/500 หมายถึง ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม A = อินโคเนล 625, B = อินโคเนล 617, 750 = ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม (Postweld Heat treatment) ที่อุณหภูมิ 750°C 2 = เวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม 2 ชั่วโมง 550 = ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C และ 500 = เวลาของกรรมวิธีทางความร้อน 500 ชั่วโมง นอกจากนี้ได้ใช้สัญลักษณ์แทนส่วนต่างๆ ของแนวเชื่อมด้วย รูปที่ 4.1 แสดงบริเวณต่างๆ ของแนวเชื่อมพร้อมสัญลักษณ์ที่ใช้ ตารางที่ 4.1 แสดง ความหมายสัญลักษณ์ของกรรมวิธีความร้อน และสัญลักษณ์ของแนวเชื่อม

ในการอภิปรายผลการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจะขอแสดงเพียงโครงสร้างจุลภาคของ แนวเชื่อมเหล็กกล้า P91 (9% โครเมียม) และเหล็กกล้า P22 (2.25%โครเมียม) ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P91 และเหล็กกล้า P22 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 เปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน ซึ่งภาพโครงสร้างจุลภาคแสดงในภาคผนวก ง



รูปที่ 4.1 บริเวณต่างๆ ของแนวเชื่อมพร้อมสัญลักษณ์ที่ใช้

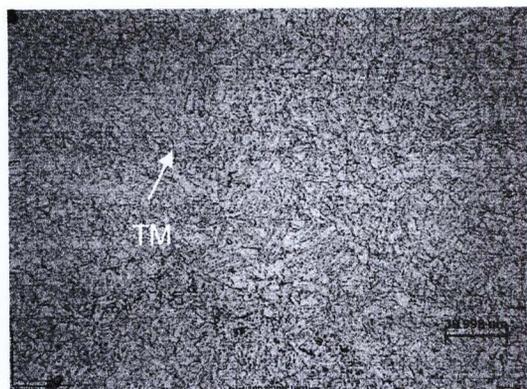
ตารางที่ 4.1 ความหมายของสัญลักษณ์ของกรรมวิธีความร้อน รอยเชื่อม และเฟสต่างๆ

สัญลักษณ์	ความหมาย
A	อินโคเนล 625
B	อินโคเนล 617
P91 and P22	เหล็กกล้าที่มีโครเมียม 9% และ 2.25% โดยน้ำหนัก
BM	Base Metal
WM	Weld Metal
HAZ	Heat Affected Zone
F	เฟร์ไรต์ (Ferrite)
F+C	เฟร์ไรต์และคาร์ไบด์ (Ferrite and Carbide)
M	มาร์เทนไซต์ (Martensite)
TM	เทมเปอร์ด มาร์เทนไซต์ (Tempered Martensite)
B	เบไนต์ (Bainite)

4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91



ก) เหล็กกล้า P22

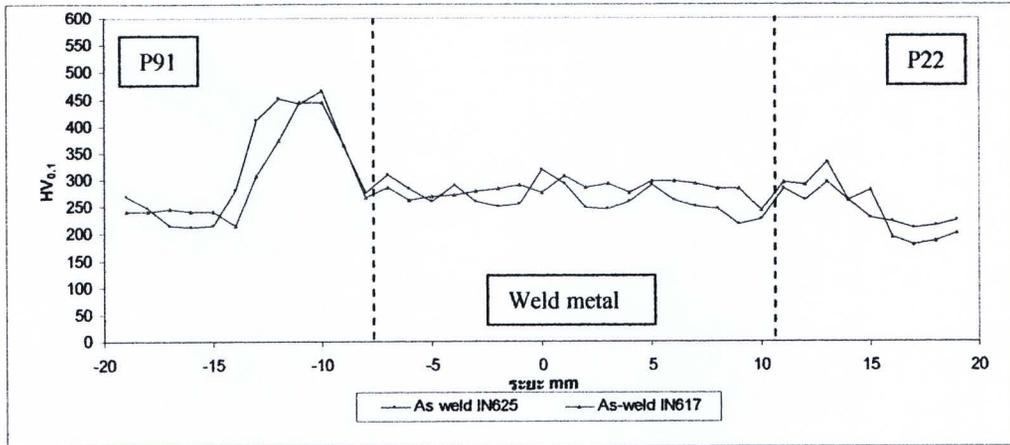


ข) เหล็กกล้า P91

รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของ ก) เหล็กกล้า P22 ข) เหล็กกล้า P91

รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง จากรูปที่ 4.2ก) เหล็ก P22 ก่อนเชื่อม โครงสร้างจุลภาค คือ เฟร์ไรต์และเฟร์ไรต์ที่มีตะกอนคาร์ไบด์ (Ferrite and Ferrite with Carbide) จากรูปที่ 4.2 ข) เหล็กกล้า P91 ก่อนเชื่อม โครงสร้างจุลภาค คือ เทมเปอร์ด มาร์เทนไซต์

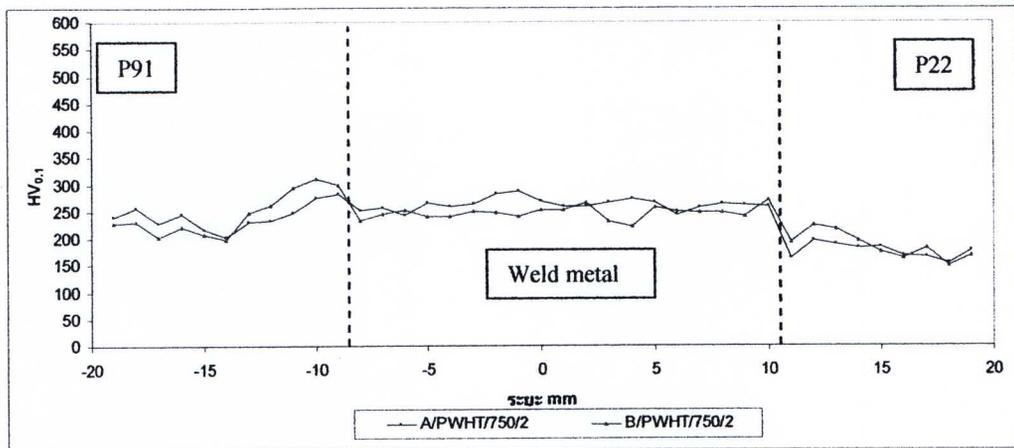
#### 4.2 ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 และ อินโคเนล 617 หลังเชื่อม



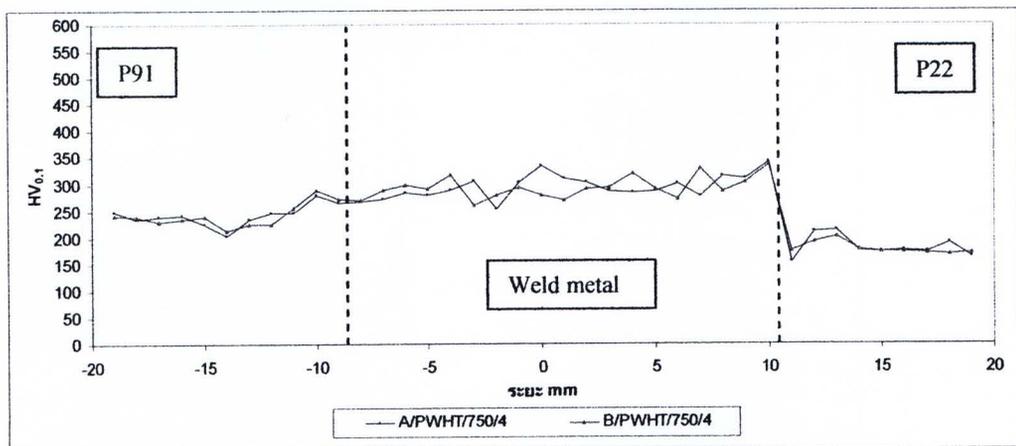
รูปที่ 4.3 ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังเชื่อม

รูปที่ 4.3 แสดงผลการวัดค่าความแข็งของแนวเชื่อม ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส ใช้น้ำหนักกด 100 กรัม แบ่งแนวเชื่อมเป็นสามบริเวณตามเส้นประ บริเวณแรก คือ ส่วนที่เป็นเหล็กกล้าที่มีโครเมียม P91 บริเวณที่สอง คือ เนื้อเชื่อม และบริเวณที่สาม คือ เหล็กกล้าที่มีโครเมียม 2.25%โดยน้ำหนัก (P22) จากรูปที่ 4.3 จะพบว่า ความแข็งบริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กกล้า P91 และเนื้อเชื่อม ซึ่งเรียกว่า บริเวณแนวกระทบร้อน (Heat Affected zone) มีค่าสูงกว่าค่าความแข็งของเนื้อโลหะพื้น (Base Metal) ค่าความแข็งสูงกว่า 350 HV โดยทั่วไปแนวเชื่อมควรมีค่าความแข็งไม่เกิน 350 HV เพราะจะทำให้เกิดรอยแตกร้าวภายหลังได้ บริเวณแนวกระทบร้อนติดกับเหล็ก P91 นี้จึงเป็นบริเวณที่เสี่ยงต่อการแตกร้าว [9] ตรงกันข้ามกับบริเวณกระทบร้อนติดกับเหล็ก P22 ที่ค่าความแข็งไม่แตกต่างจากค่าที่บริเวณเนื้อโลหะพื้นแต่มีค่าใกล้เคียง 350 HV ด้วยเหตุผลนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังเชื่อมเพื่อลดค่าความแข็ง อุณหภูมิของกรรมวิธีความร้อนหลังเชื่อมที่เลือกใช้ในที่นี้ คือ 750°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตเลือกใช้ และเป็นอุณหภูมิที่แนะนำ

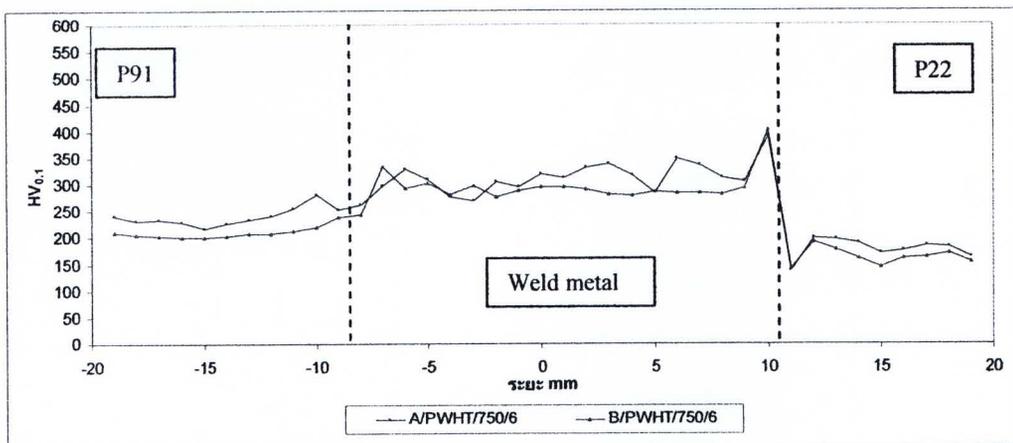
4.3 ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

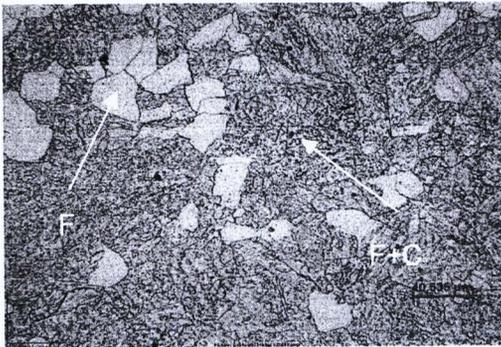


ค) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

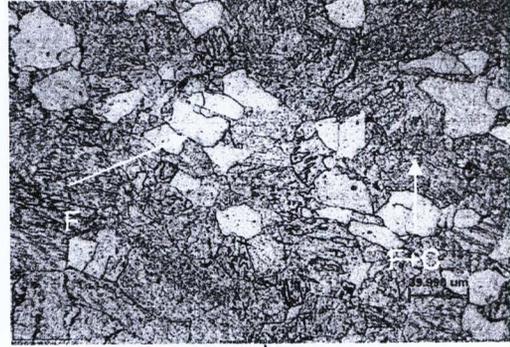
รูปที่ 4.4 ความแข็งของแนวเชื่อมหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C

การวัดค่าความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 หลังเชื่อมและผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส ใช้น้ำหนักกด 100 กรัม เวลากด 10 วินาที ผลการวัดค่าความแข็งแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่า ค่าความแข็งของบริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้า P91 และ P22 ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับค่าความแข็งแนวเชื่อมก่อนการผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังเชื่อม (รูปที่ 4.3) แต่ค่าความแข็งเนื้อเชื่อมมีแนวโน้มสูงขึ้นอาจเป็นเพราะเนื้อเชื่อมอินโคเนลมีตะกอน (แกมมาดอบเบิลไพรม์หรือเดลต้าใน 625 และแกมมาใน 617) เกิดขึ้น [4,7,8]

4.3.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณโลหะพื้นของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง



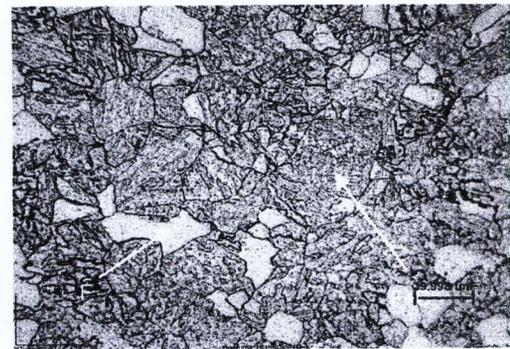
ก) หลังผ่านการเชื่อม



ข) 2 ชั่วโมง



ค) 4 ชั่วโมง



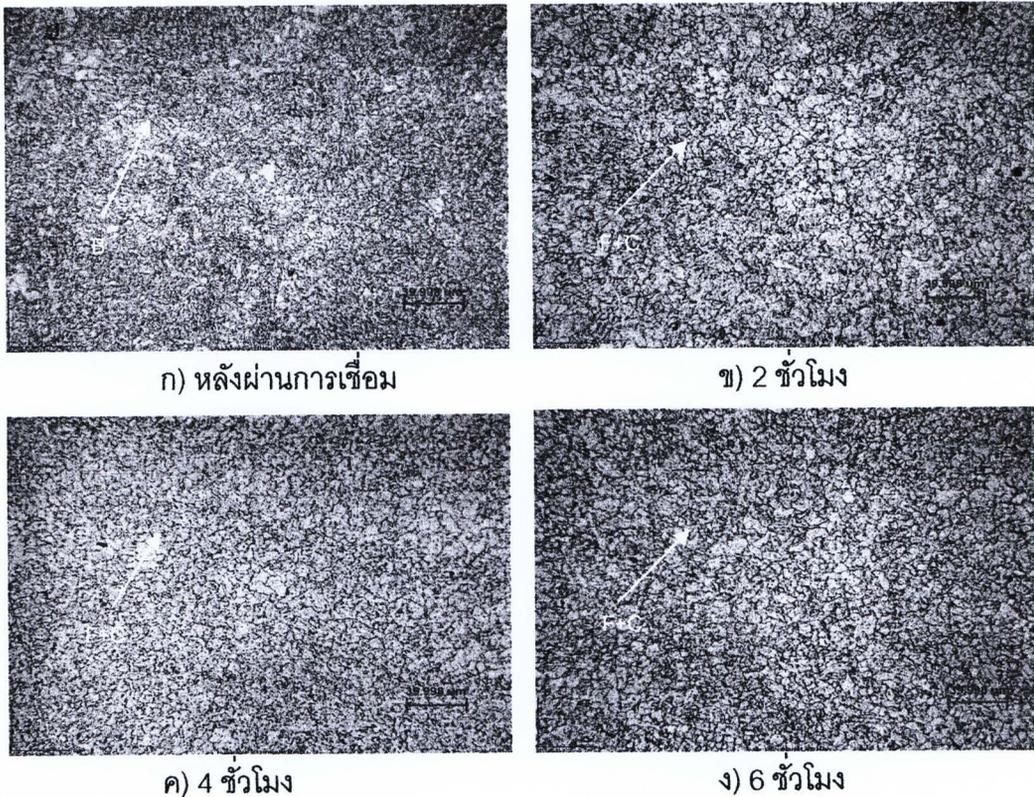
ง) 6 ชั่วโมง

รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 หลังผ่านการเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมอุณหภูมิ 750°C

รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้น (BM) ของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 รูปที่ 4.5 ก) หลังการเชื่อม (As Welded) รูปที่ 4.5 ข)-ง) หลัง

ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม โครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะพื้น ประกอบเป็นเฟอไรต์และเฟอไรต์ที่มีตะกอนคาร์ไบด์ บริเวณนี้ห่างจากเนื้อเชื่อมจึงไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค จากรูปที่ 4.3 ความแข็งของบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 หลังผ่านการเชื่อมมีค่า 178-225 HV<sub>0.1</sub> และจากรูปที่ 4.4 ความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมมีค่า 153-183 HV<sub>0.1</sub> ซึ่งถือว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

4.3.2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง



รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 หลังผ่านการเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมอุณหภูมิ 750°C

รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 ในสภาพหลังเชื่อมแสดงรูปที่ 4.6 ก) โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทัน (HAZ) หลังเชื่อม คือ เบไนต์ (Bainite) [10] เนื่องจากบริเวณกระทันได้รับความร้อนหรืออุณหภูมิที่สูงจากการเชื่อมจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นออสเท

ไนต์ (Austenite) และคาร์ไบด์สลายตัว เมื่ออุณหภูมิลดลงจึงเปลี่ยนเฟสเป็นเบไนต์ รูปที่ 4.6 ข)-ง) บริเวณกระทันหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม โครงสร้างจุลภาค คือ เฟร์ไรต์ที่มีคาร์ไบด์ตกตะกอน คาดว่าคาร์ไบด์เป็นชนิด  $M_3C$  [11,12] จากรูปที่ 4.2 ส่วนที่แสดงความแข็งของบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังเชื่อม ความแข็งคือ 228-295  $HV_{0.1}$  ความแข็งของบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 (2.25% โครเมียม) ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังเชื่อม มีค่า 262-333  $HV_{0.1}$  หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมความแข็งของบริเวณกระทันมีค่าลดลงเนื่องจากโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนเป็นเฟร์ไรต์และตะกอนคาร์ไบด์

รูปที่ 4.4 ก) แสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 คือ 180-194  $HV_{0.1}$  ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งคือ 174-223  $HV_{0.1}$

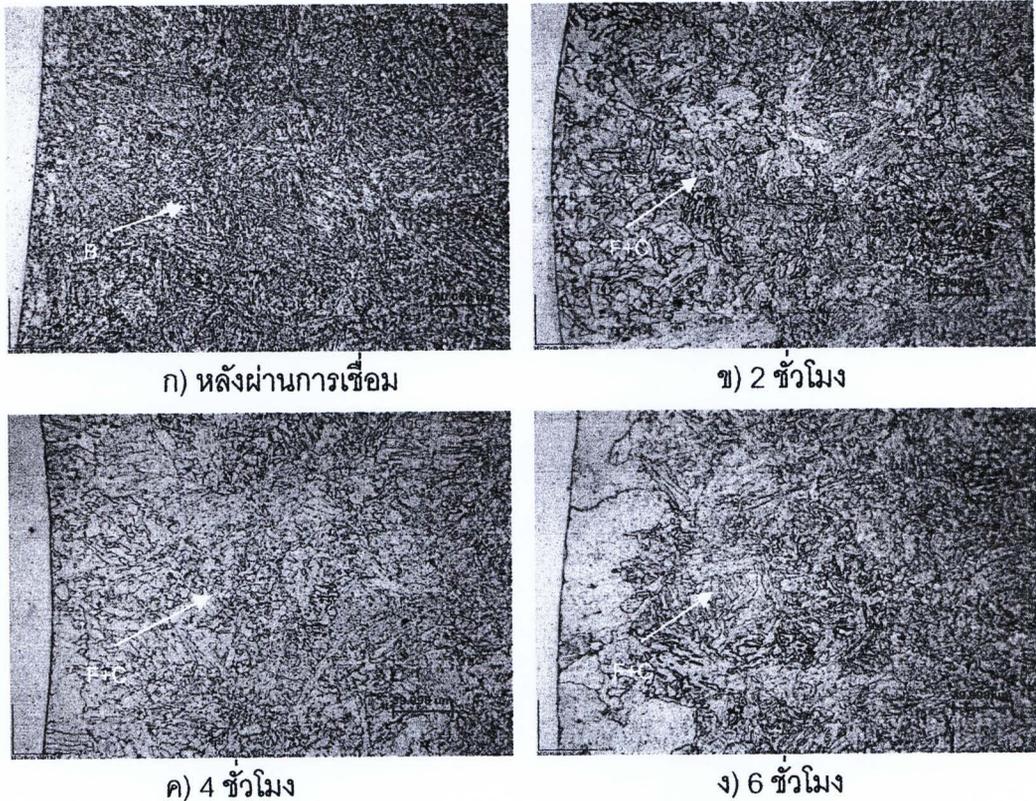
รูปที่ 4.4 ข) แสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 คือ 172-121  $HV_{0.1}$  ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งคือ 174-202  $HV_{0.1}$

รูปที่ 4.4 ค) แสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 คือ 171-198  $HV_{0.1}$  ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งคือ 144-191  $HV_{0.1}$

บริเวณกระทันหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมความแข็งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณกระทันหลังเชื่อม เกิดจากบริเวณกระทันได้รับความร้อนหรืออุณหภูมิสูงจากกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม อะตอมเกิดการแพร่ ลดความไม่เป็นระเบียบของระบบผลึกและกลับคืนสู่สภาวะปกติ (Recovery) [13,14] ความแข็งจึงลดลง จากรูปที่ 4.4 ก)-ค) ความแข็งของบริเวณกระทันที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม 2 ชั่วโมง ความแข็งสูงกว่าบริเวณกระทันที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง เนื่องจากการเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม อะตอมมีเวลามากพอในการแพร่ ทำให้กำจัดดิสโลเคชันได้มากขึ้น (Dislocation) ความแข็งจึงลดลง



4.3.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง



รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 หลังผ่านการเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C

รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของแนวเชื่อมที่เชื่อมอินโคเนล 625 ของบริเวณรอยต่อติดกับเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 รูปที่ 4.7 ก) หลังผ่านการเชื่อม โครงสร้างจุลภาค คือ เบไนต์ รูปที่ 4.7 ข)-ง) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาค คือ เฟอไรต์และคาร์ไบด์ บริเวณรอยต่อติดกับเนื้อเชื่อมที่หลอมเหลวทำให้ได้ความร้อนหรืออุณหภูมิที่สูงจากการเชื่อม เฟอไรต์จึงเปลี่ยนเฟสเป็นออสเทนไนต์และเกิดการสลายตัวของคาร์ไบด์จึงทำให้ออสเทนไนต์มีการขยายตัว อุณหภูมิลดลงจึงเปลี่ยนเป็นเบไนต์ [10] จากรูปที่ 4.3 ความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 หลังผ่านการเชื่อมพบว่าบริเวณรอยต่อของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 มีความแข็งเฉลี่ย 283 HV<sub>0.1</sub> ส่วนบริเวณรอยต่อของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่าความแข็งเฉลี่ย 295

HV<sub>0.1</sub> บริเวณรอยต่อหลังจากการเชื่อมมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเบไนต์ทำให้ความแข็งเฉลี่ยใกล้เคียงกัน หลังจากกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C ทำให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนเป็นเฟร์ไรต์และตะกอนคาร์ไบด์ เปรียบเทียบบริเวณรอยต่อโครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยต่อหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เกรนของเฟร์ไรต์จะมีการขยายขนาดมากที่สุด รูปที่ 4.4 แสดงความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 คือ 162 HV<sub>0.1</sub>, 155 HV<sub>0.1</sub>, และ 137 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 617 คือ 191 HV<sub>0.1</sub>, 176 HV<sub>0.1</sub>, และ 141 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

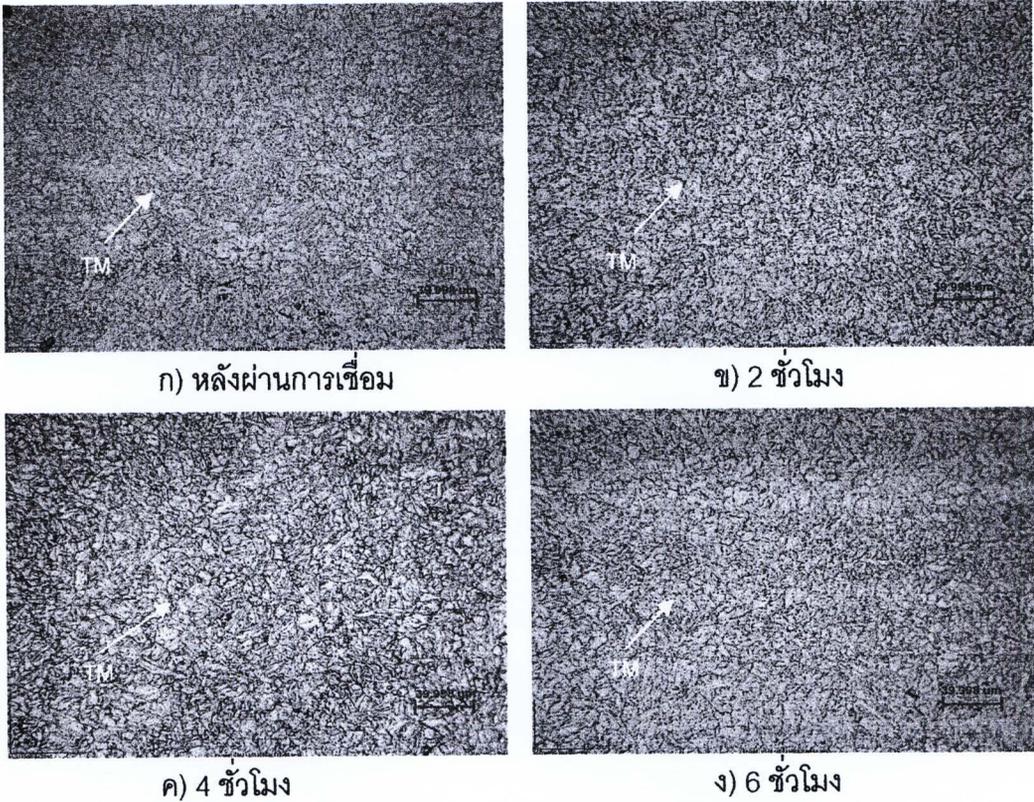
บริเวณรอยต่อของเหล็กกล้า P22 เกิดกระบวนการการกลับคืนสู่สภาวะปกติเช่นเดียวกับบริเวณกระทันร้อนทำให้บริเวณรอยต่อหลังจากกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งสูงกว่าบริเวณรอยต่อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง เนื่องจากเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่มากขึ้นทำให้ความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (Dislocation Density) ลดลง [13,14]

จากรูปที่ 4.3 ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 ด้านติดกับเหล็กกล้า P22 หลังเชื่อม คือ 227 HV<sub>0.1</sub> และ 244 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.4 ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดกับเหล็กกล้า P22 หลังจากกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่าสูงกว่าบริเวณเนื้อเชื่อม ความแข็งเพิ่มสูงขึ้นตามเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม คือ 258 HV<sub>0.1</sub>, 340 HV<sub>0.1</sub> และ 389 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ และความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 หลังจากกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง คือ 270 HV<sub>0.1</sub>, 337 HV<sub>0.1</sub> และ 402 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

หลังจากกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งหลังเชื่อม คาดเนื่องจากมีการตกตะกอนในบริเวณรอยต่อ การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 มีความแข็งเพิ่มสูงขึ้น คาดว่าน่าเกิดตกตะกอนของคาร์ไบด์ที่มีปริมาณมากขึ้น

4.3.4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง

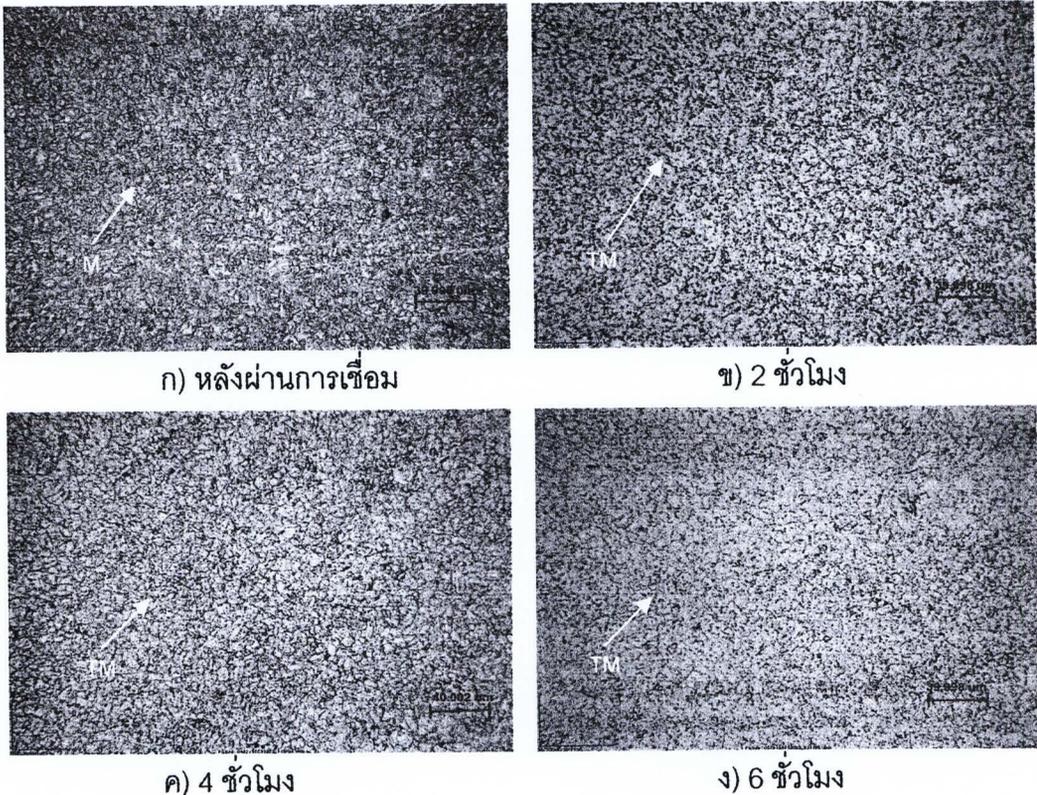


รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านการเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C

รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 หลังผ่านการเชื่อมและผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง คือ เทมเปอร์ มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์ ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นชนิด  $M_{23}C_6$  [15-17] จากรูปที่ 4.3 แสดงความแข็งแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ เหล็กกล้า P91 ความแข็งส่วนของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 ความแข็งบริเวณโลหะพื้นคือ 213-281  $HV_{0.1}$  ส่วนแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งบริเวณโลหะพื้นคือ 213-246  $HV_{0.1}$  รูปที่ 4.4 แสดงความแข็งของแนวเชื่อมหลังเชื่อมและผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง บริเวณโลหะพื้นความแข็ง คือ 202-257  $HV_{0.1}$  ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งของโลหะพื้นคือ 197-241  $HV_{0.1}$  ซึ่งค่าความแข็งใกล้เคียงกัน

ความแข็งของบริเวณโลหะพื้นหลังผ่านการเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากโครงสร้างจุลภาคคือ เหมเปอริ มาร์เทนไซต์และตกอนคาร์ไบด์เหมือนกัน

4.3.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง



รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านการเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C

รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังเชื่อมโครงสร้างจุลภาคคือ มาร์เทนไซต์ (รูปที่ 4.9 ก) บริเวณกระทันจะได้รับอุณหภูมิหรือความร้อนที่สูงจากการเชื่อมส่งผลให้บริเวณที่มีระยะห่างจากแนวหลอมเหลวน้อยจะได้รับความร้อนหรือมีอุณหภูมิสูง โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์ คาร์ไบด์สลายตัวจึงไม่สามารถ

ยับยั้งการขยายขนาดของออสเทนไนต์ คาร์ไบด์สลายตัวส่งผลให้ออสเทนไนต์มีปริมาณคาร์บอนและธาตุผสมปริมาณมาก ส่วนบริเวณที่มีระยะห่างจากแนวหลอมเหลวมากได้รับอุณหภูมิหรือความร้อนที่น้อยกว่า คาร์ไบด์สลายตัวเพียงบางส่วน ส่งผลให้ออสเทนไนต์มีปริมาณคาร์บอนและธาตุผสมปริมาณน้อย เมื่ออุณหภูมิลดลง บริเวณออสเทนไนต์เกรนโตเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์เกรนโตและเป็นบริเวณกระทบร้อนที่มีขนาดเกรนโต (Coarse Grain Heat Affected Zone) มีความแข็งสูง ส่วนบริเวณออสเทนไนต์เกรนละเอียดเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์เกรนละเอียดและเป็นบริเวณกระทบร้อนที่มีขนาดเกรนละเอียด (Fine Grain Heat Affected Zone) ความแข็งต่ำกว่าเป็นบริเวณกระทบร้อนที่มีขนาดเกรนโต

รูปที่ 4.9 ข)-ง) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง คือเทมเปอร์ มาร์เทนไซต์และคาดว่าน่าจะมีตะกอนคาร์ไบด์  $M_{23}C_6$  [15-17]

รูปที่ 4.4 ความแข็งบริเวณกระทบร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่าลดลง หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 ความแข็งมีค่า 247-274  $HV_{0.1}$  เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่า 247-310  $HV_{0.1}$  ซึ่งมีค่ามากกว่าความแข็งของบริเวณกระทบร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง ซึ่งความแข็งของบริเวณกระทบร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 มีค่า 235-280  $HV_{0.1}$  และ 234-280  $HV_{0.1}$  ส่วนความแข็งของบริเวณกระทบร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 224-290  $HV_{0.1}$  และ 206-219  $HV_{0.1}$

รูปที่ 4.4 ความแข็งของบริเวณกระทบร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีความแข็งต่ำกว่าบริเวณกระทบร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เนื่องจากกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เกิดการคืนสู่สภาวะปกติ (Recovery) บริเวณกระทบร้อนหลังเชื่อมทำให้เกิดเปลี่ยนเฟส มีความเค้นเหลือค้างจากการเชื่อม (Residual Stress) จึงทำให้ดิสโลเคชันหนาแน่นขึ้นและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C ซึ่งรับความร้อนหรืออุณหภูมิสูง เกิดการแพร่ของอะตอมช่วยลดความเค้นเหลือค้างและกำจัดจำนวนของดิสโลเคชัน ทำให้ความเค้นเหลือค้างและความหนาแน่นของดิสโลเคชันลดลง บริเวณกระทบร้อนความแข็งจึงลดลง จากรูปที่ 4.4 ความแข็งของบริเวณกระทบร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะมีค่าสูงกว่าบริเวณ

กระทันหันที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง เนื่องจากเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนที่น้อยกว่าจึงทำการแพร่ของอะตอมและการกำจัดดิสโลเคชันทำได้น้อย ความแข็งจึงสูง ความแข็งของบริเวณกระทันหันมีค่าสูงยังมีผลจากธาตุผสม (Alloying Element) ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของคาร์ไบด์ บริเวณกระทันหันที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง นั้นมีเวลามากพอในการที่อะตอมของธาตุผสมจะแพร่และทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เริ่มที่จะมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ การเกิดคาร์ไบด์ทำให้ธาตุผสมที่ละลายอยู่ในเนื้อพื้นลดลงด้วย การเริ่มตกตะกอนของคาร์ไบด์ไม่ทำให้ความแข็งของบริเวณกระทันหันสูง เนื่องจากตะกอนคาร์ไบด์มีปริมาณน้อย [17].

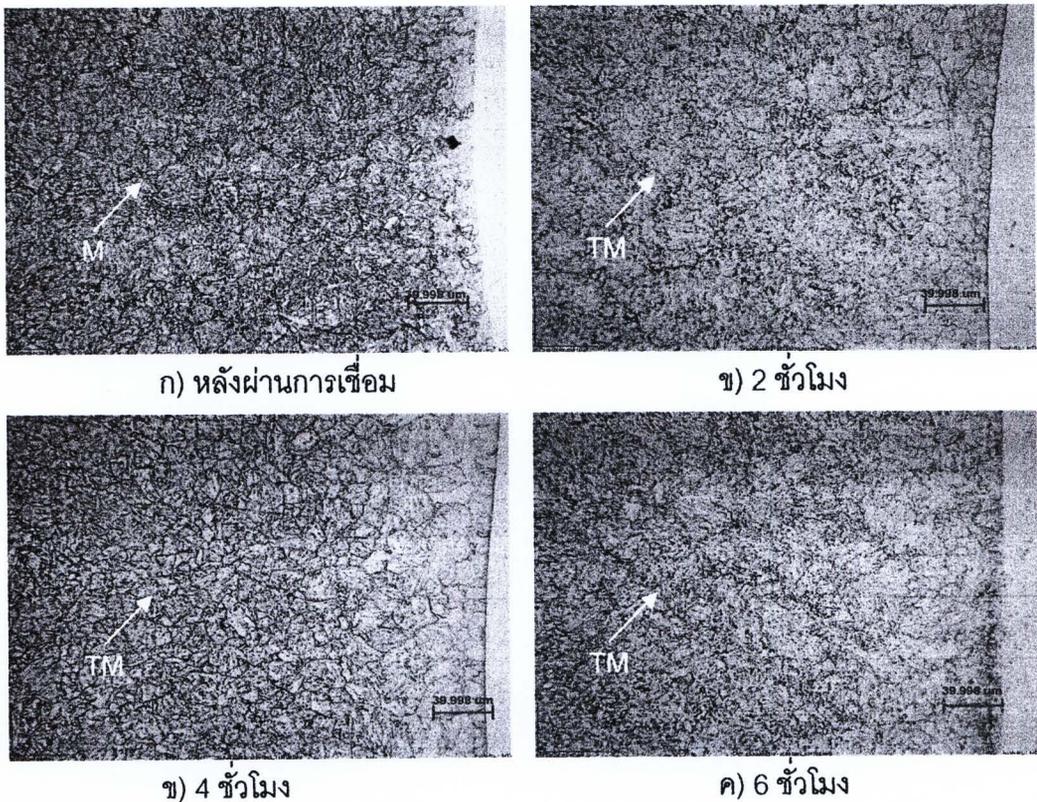
4.3.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ ความแข็งบริเวณรอยต่อของเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง

รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 จากกล้องจุลทรรศน์แบบ แสงของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังการเชื่อมและผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง บริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ติดกับเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 พบว่าเกรนมีขนาดใหญ่กว่าบริเวณโลหะพื้น และบริเวณกระทันหัน เนื่องจากขณะเชื่อมบริเวณนี้ได้รับความร้อนหรืออุณหภูมิสูงจึงเปลี่ยนเป็น ออสเทนไนต์ คาร์ไบด์สลายตัวทำให้บริเวณนี้มีขนาดเกรนที่ใหญ่ เมื่ออุณหภูมิลดลงเปลี่ยนเฟส เป็นมาร์เทนไซต์ที่มีเกรนใหญ่และออสเทนไนต์เหลือค้าง (รูปที่ 4.10 ก) ทำให้ความแข็งสูง [15-18] หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนเป็น เวมเปอร์ มาร์เทนไซต์ และตะกอนคาร์ไบด์

รูปที่ 4.3 แสดงความแข็งบริเวณรอยต่อของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 ความแข็ง บริเวณรอยต่อด้านเหล็กกล้า P91 มีค่าเฉลี่ย 360 HV<sub>0.1</sub> ส่วนแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มี ค่าเฉลี่ย 363 HV<sub>0.1</sub>

รูปที่ 4.4 แสดงความแข็งบริเวณรอยต่อของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง แนว เชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 ความแข็งบริเวณรอยต่อ มีค่าเฉลี่ย คือ 283, 264 และ 252 HV<sub>0.1</sub> ส่วนแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่าเฉลี่ย คือ 299, 272 และ 237 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ บริเวณรอยต่อจะมีความแข็งต่ำกว่าบริเวณกระทันหันเนื่องจากบริเวณนี้ได้รับความ

ร้อนหรืออุณหภูมิที่สูงจากการเชื่อม ทำให้เมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมคาดว่าจะมีออกสเตนไนต์เหลือค้างปรากฏอยู่ทำให้บริเวณรอยต่อนี้มีความแข็งต่ำกว่าบริเวณกระทบร้อน



รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านการเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C

ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านที่ติดกับเหล็กกล้า P91 ความแข็งเฉลี่ยบริเวณรอยต่อหลังเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง มีความแข็งเฉลี่ยใกล้เคียงกัน คือ 275, 251, 269 และ 263  $HV_{0.1}$  ส่วนความแข็งเฉลี่ยบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ความแข็งเฉลี่ยใกล้เคียงกัน คือ 266, 233  $HV_{0.1}$  และ 242  $HV_{0.1}$  ตามลำดับ

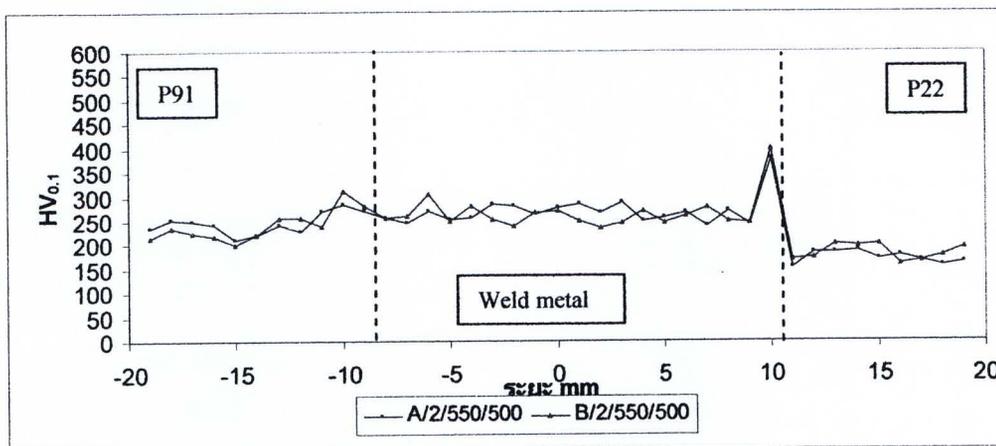
ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 มีค่า 217-319  $HV_{0.1}$  ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 261-306  $HV_{0.1}$  ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งมีค่า 242-286  $HV_{100}$  ส่วนความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 คือ 221-266  $HV_{0.1}$

ความแข็งของบริเวณเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีค่า 253-316  $HV_{100}$  ส่วนความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล

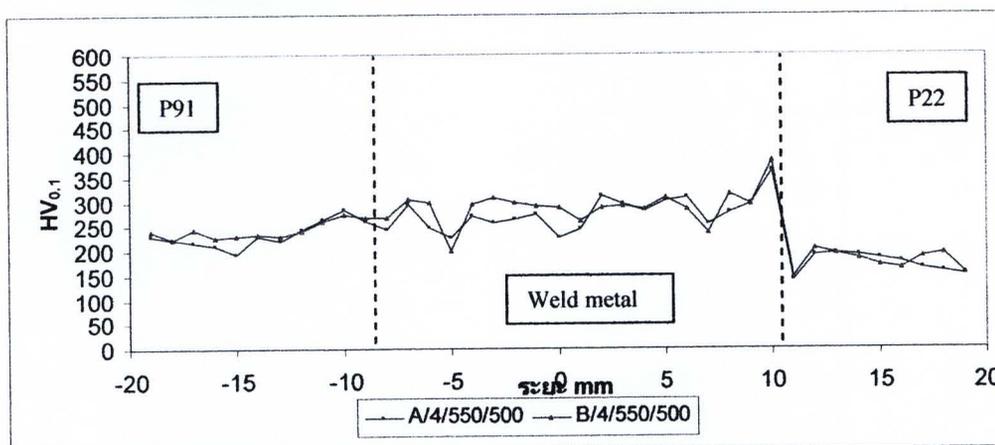
617 คือ 259-328 HV<sub>0.1</sub> ความแข็งของบริเวณเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง มีค่า 268-346 HV<sub>100</sub> ส่วนความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 คือ 276-333 HV<sub>0.1</sub>

ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเชื่อมผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง คาดว่าเป็นผลมาจากตะกอนแกมมาไพร์ม ( $\gamma'$ ) ที่เกิดขึ้นในเนื้อเชื่อม กรรมวิธีทางความร้อนหลังเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง

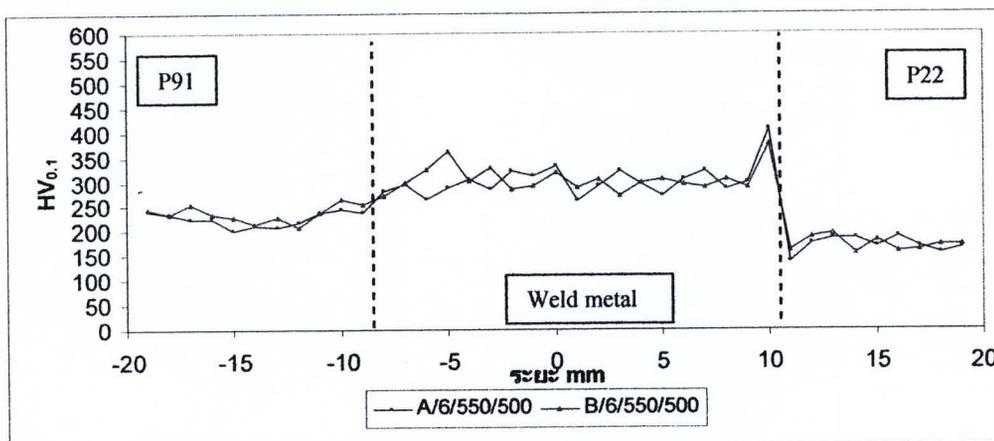
4.4 ความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

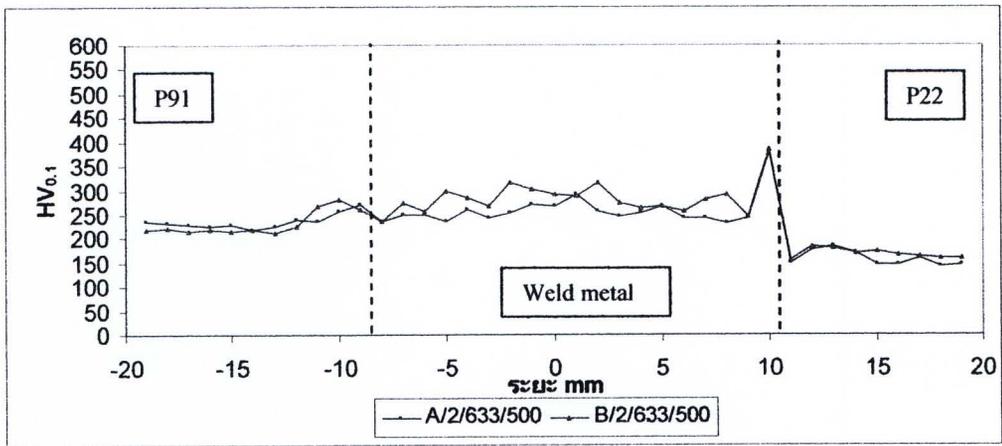


ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

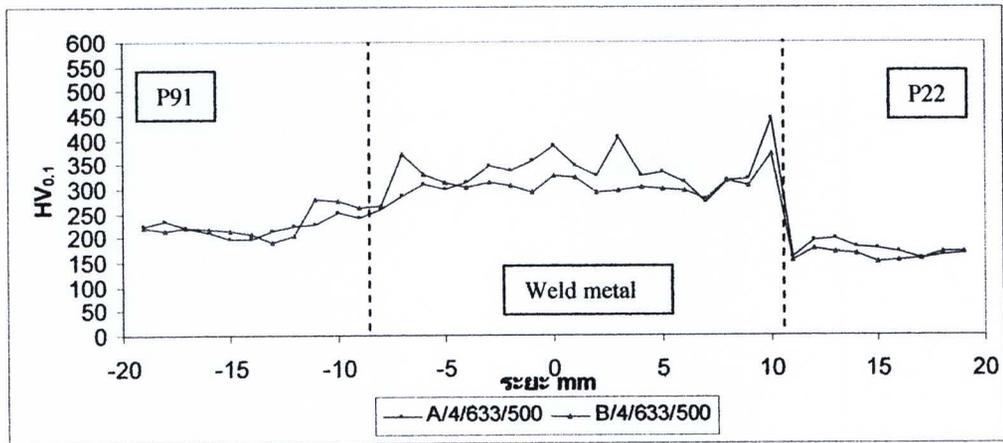


ค) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

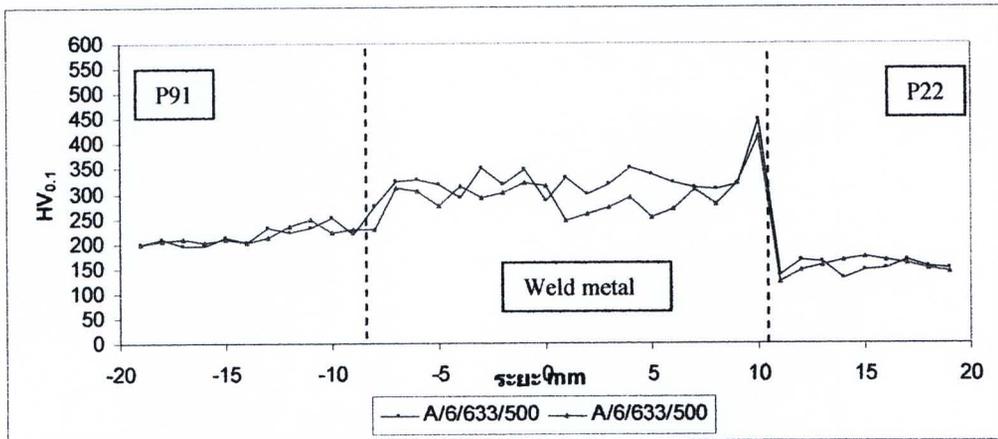
รูปที่ 4.11 ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

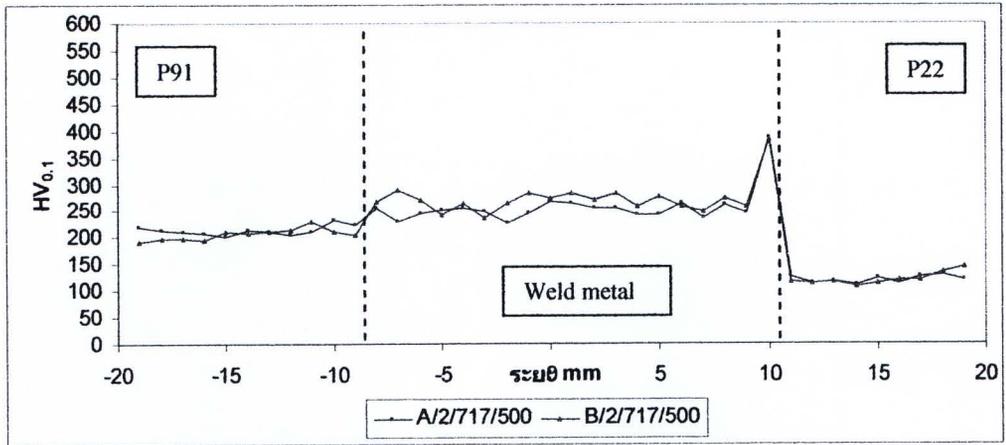


ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

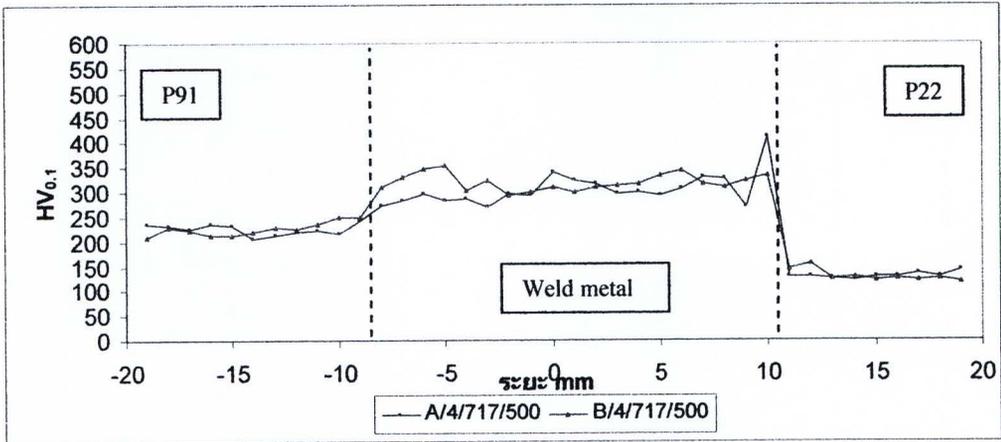


ค) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

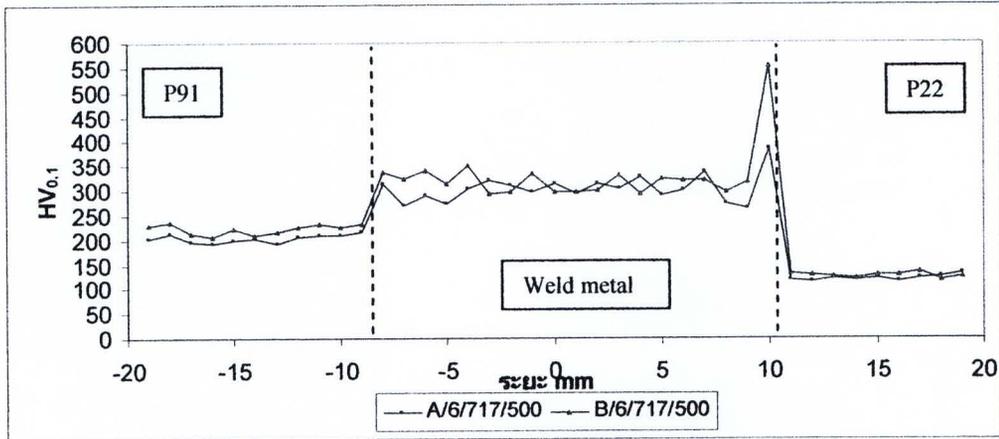
รูปที่ 4.12 ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

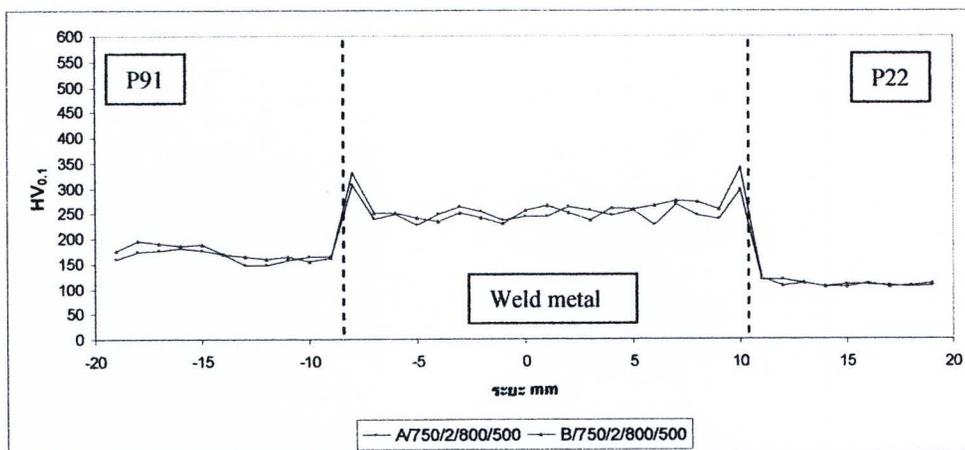


ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

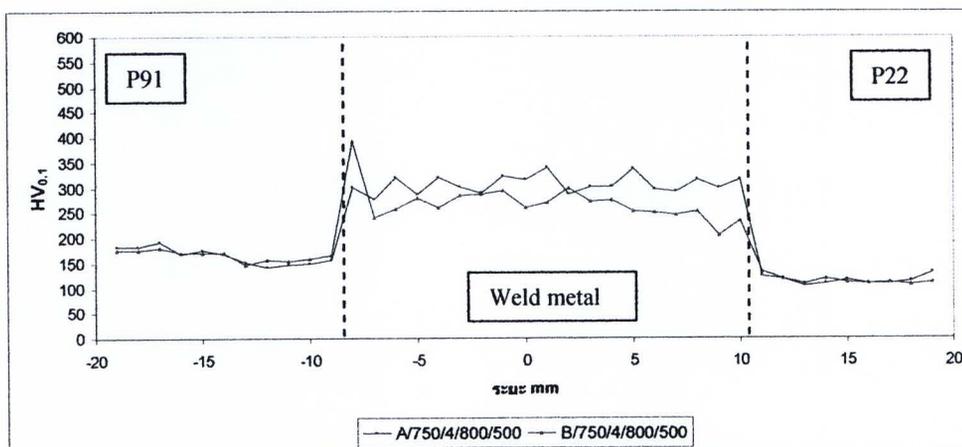


ค) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

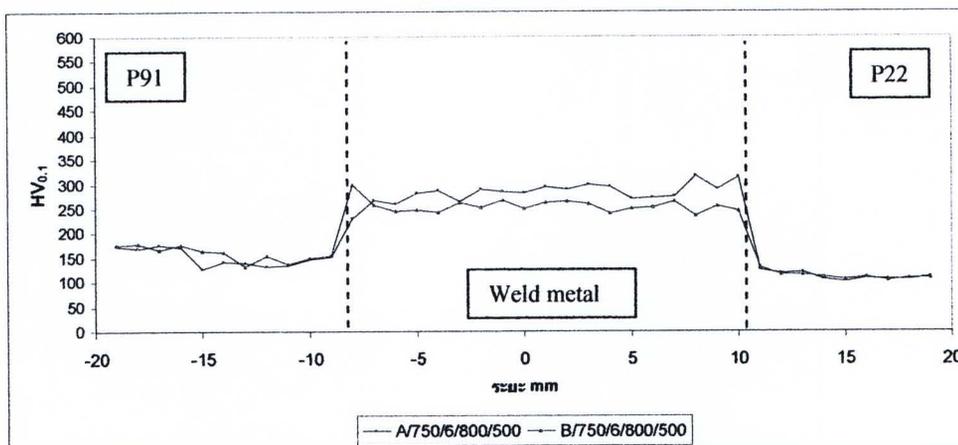
รูปที่ 4.13 ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



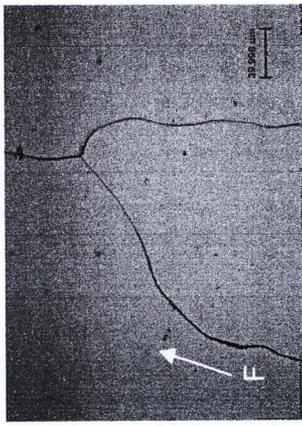
ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง



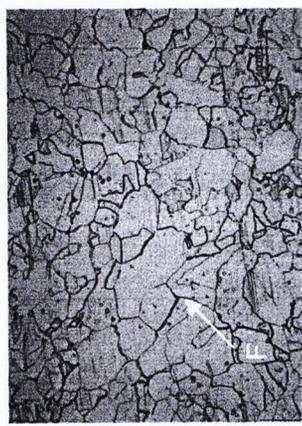
ค) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

รูปที่ 4.14 ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง

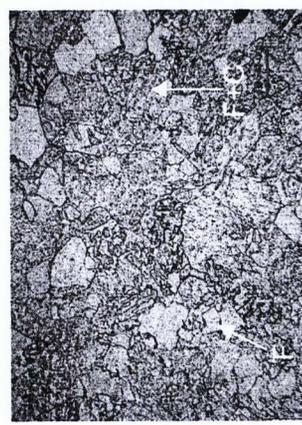




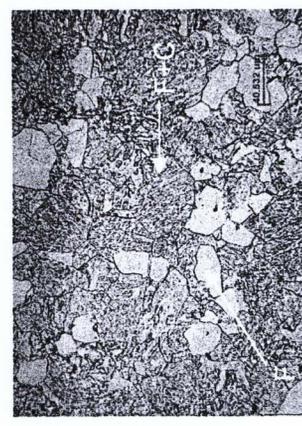
A/750/2/800/500



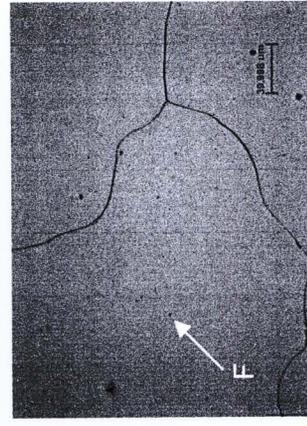
A/750/2/717/500



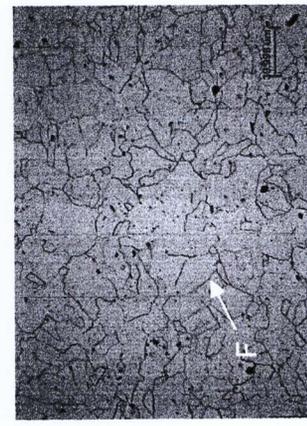
A/750/2/633/500



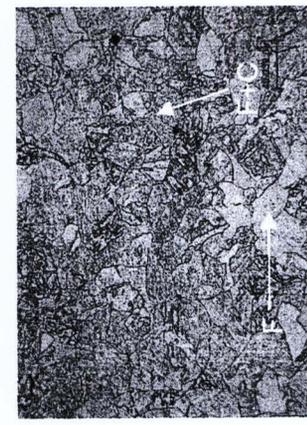
A/750/2/550/500



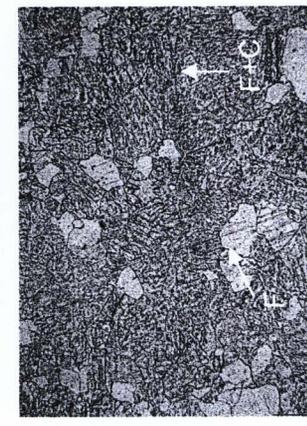
A/750/4/800/500



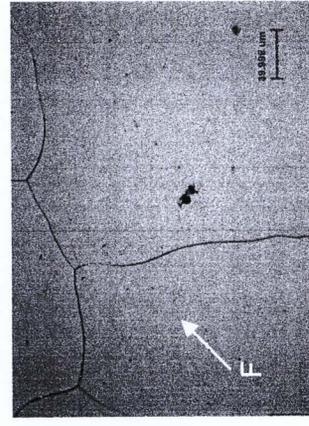
A/750/4/717/500



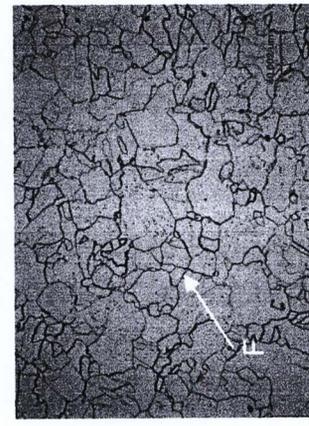
A/750/4/633/500



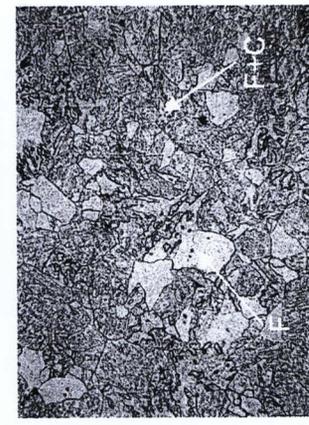
A/750/4/550/500



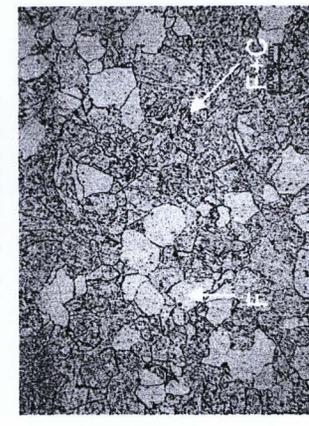
A/750/6/800/500



A/750/6/717/500



A/750/6/633/500



A/750/6/550/500

รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800 °C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง

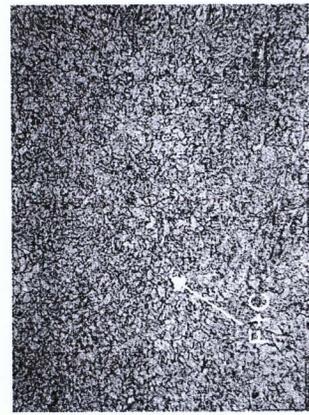
4.4.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณโลหะพื้นของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง

รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้า P22 บริเวณโลหะพื้น หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C (รูปที่ 4.15 A/750/2/550/500, A/750/4/550/500 และ A/750/2/550/500) และ 633°C (รูปที่ 4.15 A/750/2/633/500, A/750/2/633/500 และ A/750/2/633/500) คือ เฟอไรต์และเฟอไรต์ที่มีตะกอนคาร์ไบด์ คาดว่าน่าจะเป็นชนิด  $M_7C_3$  [11,12,19,20] จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเหมือนโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นหลังเชื่อม ขนาดเกรนมีขนาดใกล้เคียงกัน บริเวณโลหะพื้นหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C โครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะพื้นเปลี่ยนเป็นเฟอไรต์ ไม่พบตะกอนคาร์ไบด์ (รูปที่ 4.15 A/750/2/717/500, A/750/4/717/500 และ A/750/717/500) ส่วนบริเวณโลหะพื้นหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C โครงสร้างจุลภาคยังคงเป็นเฟอไรต์ ไม่พบตะกอนคาร์ไบด์ (รูปที่ 4.15 A/750/2/800/500, A/750/4/800/500, A/750/6/800/500) เกรนขยายขนาดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณโลหะพื้นหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C.

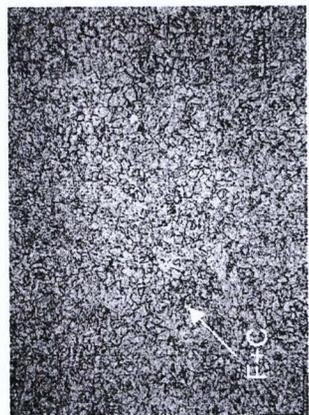
ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคตามแถวแนวตั้งในแต่ละแถวตามที่แสดงในรูปที่ 4.15 คือ ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800 °C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง. ตามแถวแนวตั้งแรกคือ บริเวณโลหะพื้นหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคคือ เฟอไรต์และเฟอไรต์ที่มีตะกอนคาร์ไบด์ พบว่าการเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมไม่ทำให้โครงสร้างจุลของบริเวณโลหะพื้นแตกต่างกัน

รูปที่ 4.3 แสดงความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังเชื่อม แนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 ความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 คือ 210-225  $HV_{0.1}$  ส่วนแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 178-200  $HV_{0.1}$  ความแข็งมีค่าสูงกว่าบริเวณโลหะพื้นหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเนื่องจากการเย็นตัว

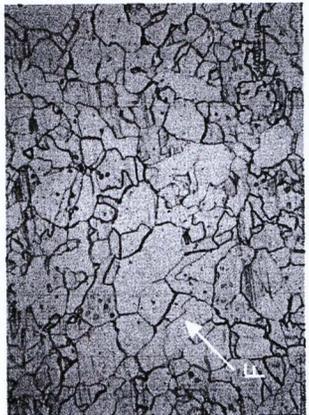
เร็วหลังเชื่อมทำให้เกิดความเค้นจากการเชื่อม ความแข็งจึงเพิ่มสูงขึ้น ส่วนแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย  
ลวดเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C  
เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา  
500 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 140-169 HV<sub>0.1</sub>  
ส่วนบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717 และ 800°C  
ความแข็งของบริเวณโลหะพื้นลดลงอย่างชัดเจน ความแข็งมีค่า 113-1447 HV<sub>0.1</sub> และ 104-129  
HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ เนื่องจากมีโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนเป็นเฟอไรต์จากเดิมที่เป็นเฟอไรต์และเพอไรต์  
ที่ตะกอนคาร์ไบด์ทำให้ความแข็งลดลงและพบว่าความแข็งของบริเวณโลหะพื้นที่ผ่านมากรรมวิธีทาง  
ความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C จะมีความแข็งต่ำกว่าบริเวณโลหะพื้นที่ผ่านมากรรมวิธีทางความร้อนที่  
อุณหภูมิ 717°C เนื่องขนาดเกรนของเฟอไรต์มีขนาดโตกว่าจึงทำให้ความแข็งต่ำกว่า



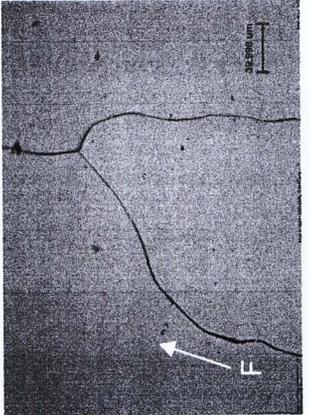
A/750/2/550/500



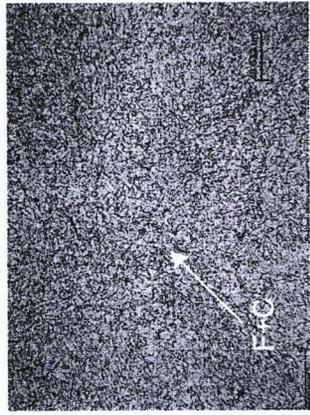
A/750/2/633/500



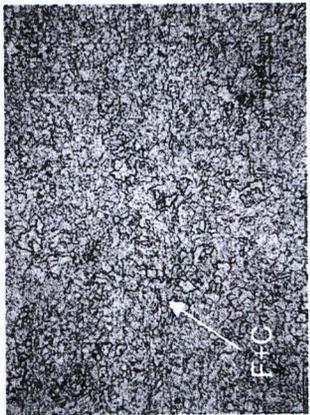
A/750/2/717/500



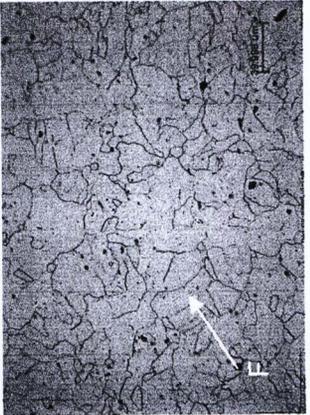
A/750/2/800/500



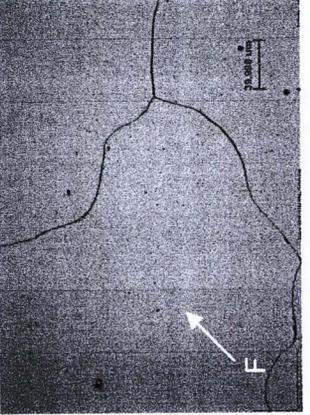
A/750/4/550/500



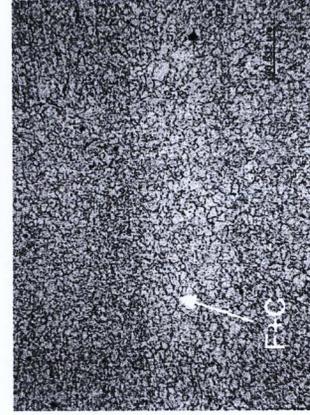
A/750/4/633/500



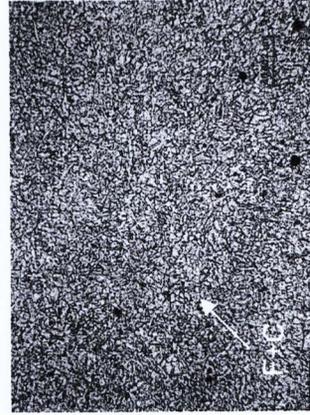
A/750/4/717/500



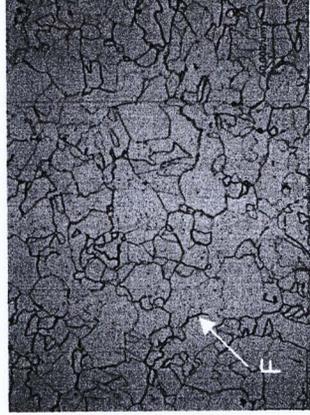
A/750/4/800/500



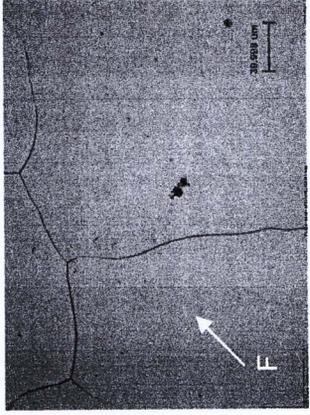
A/750/6/550/500



A/750/6/633/500



A/750/6/717/500



A/750/6/800/500

รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระแทบร้อนเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง

4.4.2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อม ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง

รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้า P22 บริเวณกระทันร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C (รูปที่ 4.16 A/750/2/550/500, A/750/4/550/500 และ A/750/2/550/500) และ 633°C (รูปที่ 4.16 A/750/2/633/500, A/750/2/633/500 และ A/750/2/633/500) คือ เฟอไรต์และตะกอนคาร์ไบด์ คาดว่าน่าจะเป็นชนิด  $M_7C_3$  และ  $M_{23}C_6$  [11,12,19,20] บริเวณกระทันของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง มีลักษณะไม่แตกต่างกัน เกรนมีขนาดเล็กกว่าบริเวณโลหะพื้น หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิเป็น 717 °C โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทันเปลี่ยนแปลงของอย่างชัดเจน โดยเปลี่ยนเป็นเฟอไรต์ ไม่พบตะกอนคาร์ไบด์ หลังกรรมวิธีทางความร้อนอุณหภูมิที่ 800°C โครงสร้างจุลภาคคือ เฟอไรต์ เกรนขยายขนาดขึ้น

รูปที่ 4.1 แสดงความแข็งหลังเชื่อมของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 บริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 หลังเชื่อมของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 มีค่า 228-295  $HV_{0.1}$  ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 262-333  $HV_{0.1}$

รูปที่ 4.11 แสดงความแข็งหลังเชื่อมของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ความแข็งบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 มีค่า 168-193  $HV_{0.1}$  ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 บริเวณ มีค่า 153-204  $HV_{0.1}$

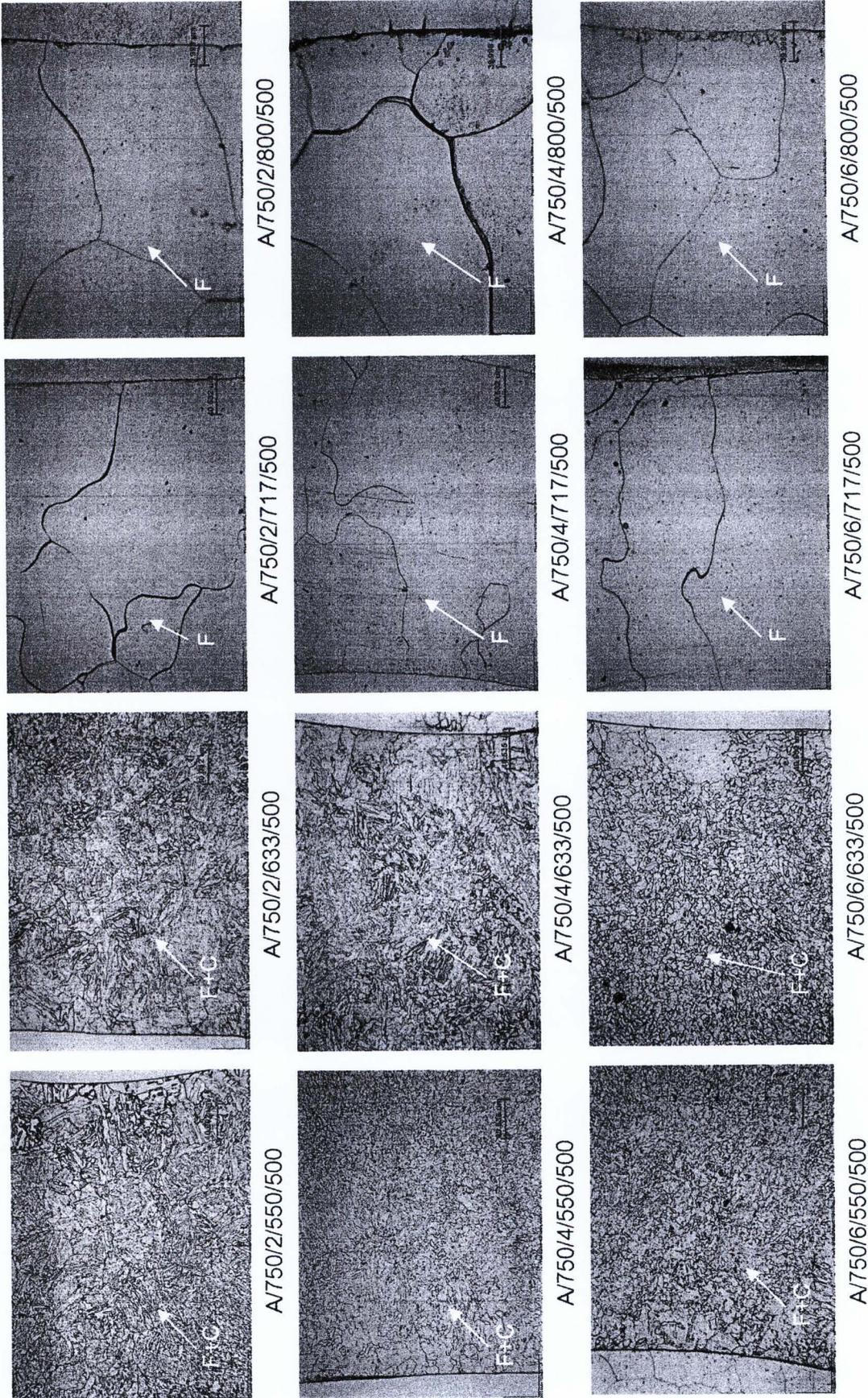
รูปที่ 4.12 แสดงความแข็งหลังเชื่อมของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ความแข็งบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 ของแนว

เชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 มีค่า 130-193 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 146-182 HV<sub>0.1</sub>

รูปที่ 4.13 แสดงความแข็งหลังเชื่อมของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ความแข็งบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 มีค่า 110-127 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 126-129 HV<sub>0.1</sub>

รูปที่ 4.14 แสดงความแข็งหลังเชื่อมของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ความแข็งบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 มีค่า 100-118 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 103-118 HV<sub>0.1</sub>

ความแข็งบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณนี้มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคเหมือนกันคือ เฟอไรต์และตะกอนคาร์ไบด์ ความแข็งบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717 และ 800°C ความแข็งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งความแข็งบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคคือ เฟอไรต์ ความแข็งของบริเวณกระทัน หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C จะมีค่าน้อยกว่าบริเวณกระทัน หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C เล็กน้อยเนื่องจากการขยายเกรนทำให้โตกว่า



รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนตั้งหทารเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง

4.4.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง เท่ากัน

จากรูปที่ 4.17 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้า P22 ของบริเวณรอยต่อหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง หลังกรรมวิธีทางความร้อนที่ 550 (รูปที่ 4.17 A/750/2/550/500 A/750/4/550/500 และ A/750/6/550/500) และ 633°C (รูปที่ 4.17 A/750/2/633/500, A/750/4/633/500 และ A/750/6/633/500) ไม่ทำให้บริเวณรอยต่อมีความแตกต่างกัน โครงสร้างจุลภาคคือ เฟอไรต์และตะกอนคาร์ไบด์ เนื่องจากบริเวณรอยต่อขณะเชื่อมอยู่ติดกับเนื้อเชื่อมจึงทำให้ได้รับความร้อนหรืออุณหภูมิที่สูงจนเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นออสเทนไนต์และมีการสลายตัวของคาร์ไบด์ เมื่ออุณหภูมิลดลงโครงสร้างจุลภาคเป็นเบไนต์ เมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมจึงทำให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนเป็นเฟอไรต์และตะกอนคาร์ไบด์ โครงสร้างจุลภาคของบริเวณนี้เป็นตามที่ได้แสดงรูปที่ 4.17 หลังกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717 (รูปที่ 4.17 A/750/2/717/500, A/750/4/717/500 และ A/750/6/717/500) และ 800°C (รูปที่ 4.17 A/750/2/800/500, A/750/4/800/500 และ A/750/6/800/500) โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เฟอไรต์ขยายขนาดเกรนใหญ่ขึ้นและไม่พบคาร์ไบด์

รูปตามแถวแนวตั้งแต่ละแถว คือภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแต่ละอุณหภูมิ โดยที่ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคภายในแถวแนวตั้งเดียวกันผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C ใช้เวลาที่แตกต่างกัน พบว่าการเพิ่มเวลากรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม โครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยต่อหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในแต่ละแถวแนวตั้งไม่แตกต่างกัน

รูปที่ 4.11 แสดงเส้นความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง บริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ความแข็งเฉลี่ย คือ 151, 139 และ 136 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า คือ 168, 145 และ 162 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

รูปที่ 4.12 แสดงเส้นความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่าน

กรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง บริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ความแข็งเฉลี่ย คือ 148, 159 และ 134 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 157, 152 และ 121 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

รูปที่ 4.13 แสดงเส้นส่วนความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง บริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ความแข็งเฉลี่ย คือ 125, 127 และ 118 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 117, 144 และ 130 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

รูปที่ 4.14 แสดงเส้นความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง บริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ความแข็งคือ 119, 122 และ 126 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 121 HV<sub>0.1</sub>, 133 HV<sub>0.1</sub> และ 128 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดกับเหล็กกล้า P22 ความแข็งของชิ้นงานหลังเชื่อม มีความแข็งเฉลี่ย คือ 227 HV<sub>0.1</sub> ส่วนความแข็งของบริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 378, 363 และ 407 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งเฉลี่ยคือ 397, 384 และ 376 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ (รูปที่ 4.11)

ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 381, 444 และ 446 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งเฉลี่ยคือ 383, 371 และ 414 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ (รูปที่ 4.12)

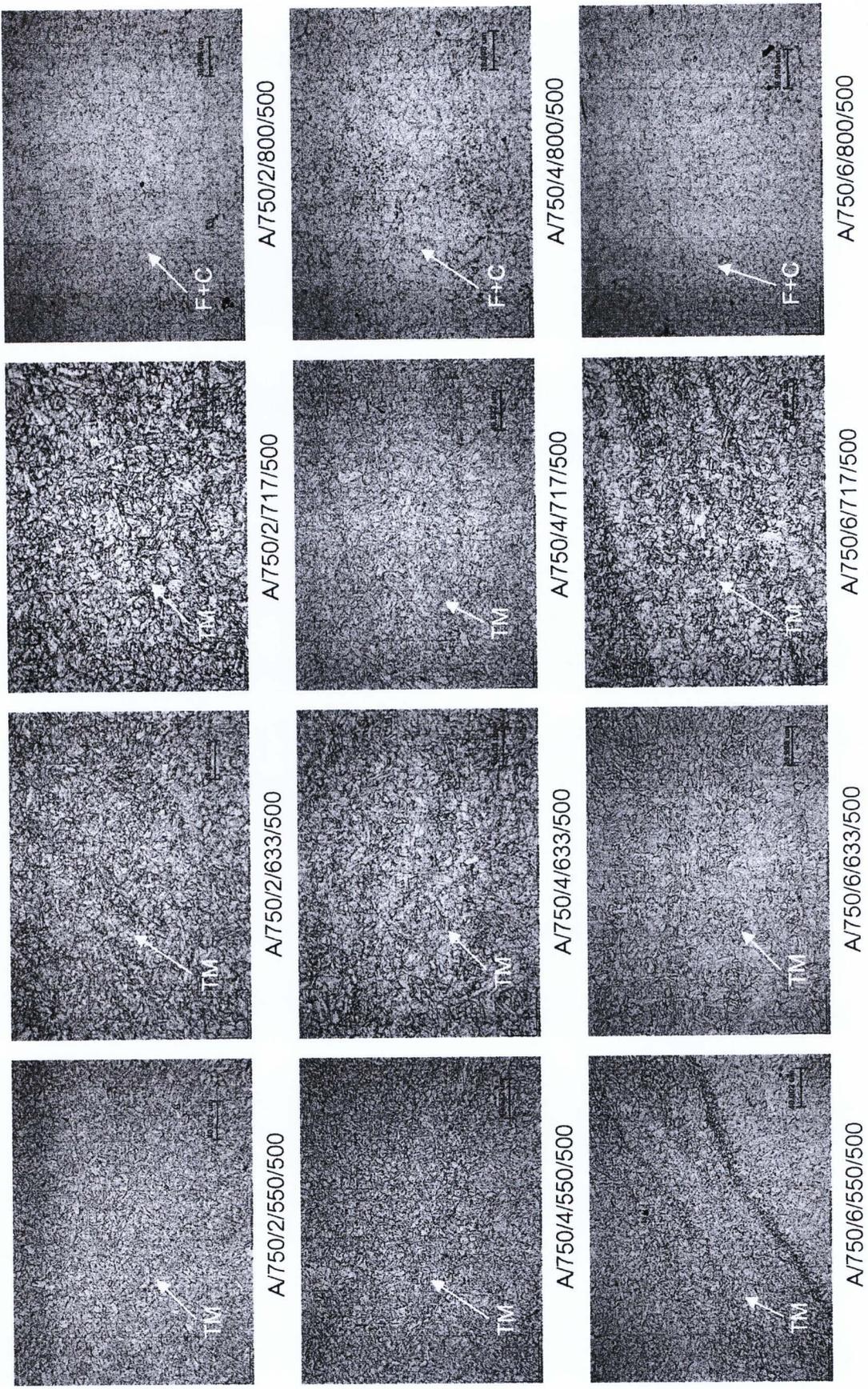
ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 385, 412 และ 382 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

ส่วนความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ความแข็งเฉลี่ยคือ 381, 333 และ 551 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ (รูปที่ 4.13)

ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C เป็น

เวลา 500 ชั่วโมง ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 296, 315 และ 312  $HV_{0.1}$  ส่วนที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 617 ความแข็งเฉลี่ย คือ 339, 233 และ 244  $HV_{0.1}$  ตามลำดับ (รูปที่ 4.14)

พบว่าบริเวณรอยต่อของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยทั่วไปจะมีความแข็งสูงสุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง และบริเวณรอยต่อของชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง จะมีความแข็งสูงสุดคาดว่าเนื่องมาจากตะกอนแกรมม่า ไพร้ม ( $\gamma'$ ) และคาร์ไบด์ การเพิ่มอุณหภูมิของกรรมวิธีทางความร้อนมีแนวโน้มทำให้บริเวณรอยต่อ มีความแข็งเฉลี่ยสูงขึ้น อาจมีสาเหตุมาจากตะกอนที่เกิดขึ้นสลายตัวความแข็งจึงลดลง



รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของโลหะพื้นของเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง

4.4.4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นของเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง

รูปที่ 4.18 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้า P91 ของบริเวณโลหะพื้นหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง บริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 550 (รูปที่ 4.18 A/750/2/550/500, A/750/4/550/500 และ A/750/6/550/500) 633°C (รูปที่ 4.18 A/750/2/633/500, A/750/4/633/500 และ A/750/6/633/500) โครงสร้างจุลภาคคือ เคมเปอร์ มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์ ขนาดเกรนมีขนาดใกล้เคียงกัน ตะกอนคาร์ไบด์คาดว่าจะมีชนิด  $M_{23}C_6$  กรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C (รูปที่ 4.18 A/750/2/717/500, A/750/4/717/500 และ A/750/6/717/500) โครงสร้างจุลภาคคือ เคมเปอร์ มาร์เทนไซต์และตะกอน [21-26] คาร์ไบด์เช่นเดียวกัน แต่เกรนขยายขนาดโตขึ้นเล็กน้อย ส่วนกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C (รูปที่ 4.18 A/750/2/800/500, A/750/4/800/500 และ A/750/6/800/500) โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนจากเคมเปอร์ มาร์เทนไซต์ เป็นเฟอไรต์และมีตะกอนคาร์ไบด์

ส่วนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคตามที่แสดงในรูปที่ 4.18 บริเวณโลหะพื้นตามแถวแนวตั้งในแต่ละแถวคือภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ เท่ากันแต่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C โดยใช้เวลาไม่เท่ากันคือ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.18 การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นไม่พบความแตกต่าง

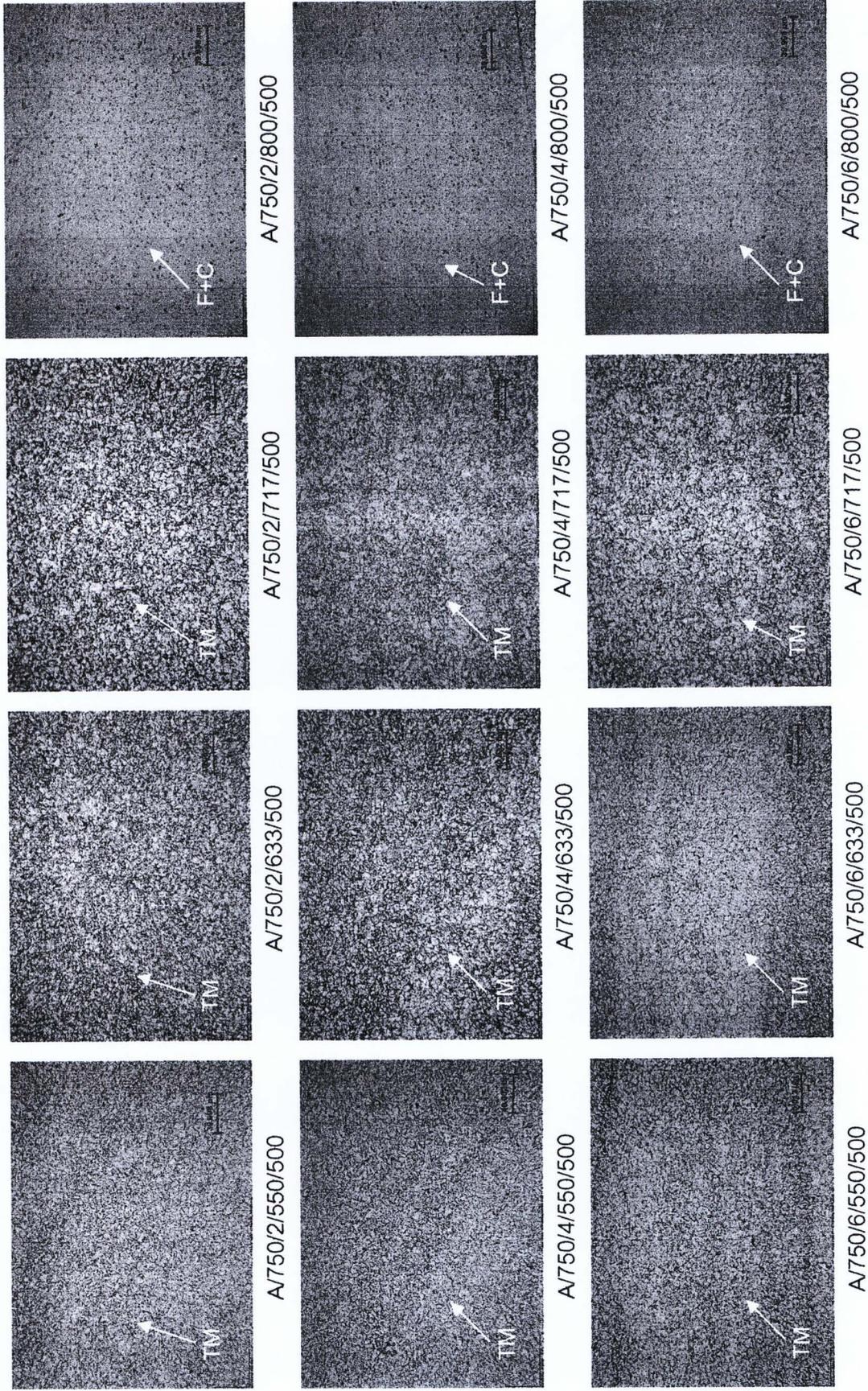
รูปที่ 4.11 เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2,4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง บริเวณโลหะความแข็งมีค่า 201-252 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 200-254 HV<sub>0.1</sub>

รูปที่ 4.12 เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2,4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง บริเวณโลหะความแข็งมีค่า 198-236 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 198-223 HV<sub>0.1</sub>

รูปที่ 4.13 เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2,4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง บริเวณโลหะความแข็งมีค่า 193-236 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 193-228 HV<sub>0.1</sub>

รูปที่ 4.14 เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2,4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง บริเวณโลหะความแข็งมีค่า 126-192 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ซึ่งมีค่า 162-194 HV<sub>0.1</sub>

หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633 และ 717°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคคือ เคมเปอร์ มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์ ความความแข็งของบริเวณโลหะพื้นที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากโครงสร้างจุลภาคที่เหมือนกัน ส่วนบริเวณโลหะพื้นที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C ความแข็งลดลงเนื่องจากขนาดเกรนที่โตกว่าเล็กน้อย แต่กรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิที่ 800°C ความแข็งลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคไปเป็นเฟร์ไรต์และตะกอนคาร์ไบด์



รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระเพาะปรอทเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง

4.4.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทับร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งของบริเวณกระทับร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง

รูปที่ 4.19 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของบริเวณกระทับร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลานานที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง กรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C (รูปที่ 4.19 A/750/2/550/500, A/750/4/550/500 และ A/750/6/550/500) 633°C (รูปที่ 4.19 A/750/2/633/500, A/750/4/633/500 และ A/750/6/633/500) 717°C (รูปที่ 4.19 A/750/4/717/500, A/750/4/717/500 และ A/750/6/717/500) ไม่ทำให้โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทับร้อนมีความแตกต่างกัน ขนาดเกรนมีขนาดใกล้เคียงกัน โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทับร้อนคือ เเทมเปอร์มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์ คาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นคาดว่าน่าจะเป็นชนิด  $M_{23}C_6$  [21-26] แต่หลังกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C พบความเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคอย่างชัดเจนจากเเทมเปอร์มาร์เทนไซต์เปลี่ยนเป็นเฟอไรต์และตะกอนคาร์ไบด์

ส่วนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคตามที่แสดงในรูปที่ 4.19 บริเวณกระทับร้อนตามแถวแนวตั้งในแต่ละแถวคือภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทับร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิเท่ากันแต่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C โดยใช้เวลาไม่เท่ากันคือ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.19 การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทับร้อนไม่พบความแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.11 ก) เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณกระทับร้อนของเหล็กกล้า P91 มีค่า 229-283  $HV_{0.1}$  ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 239-312  $HV_{0.1}$

รูปที่ 4.11 ข)-ค) เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณกระทับร้อนของเหล็กกล้า P91 มีค่า 208-283  $HV_{0.1}$  ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 208-274  $HV_{0.1}$

รูปที่ 4.12 ก) เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

ที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณกระทันของเหล็กกล้าร้อน P91 มีค่า 226-256 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 210-252 HV<sub>0.1</sub>

จากรูปที่ 4.12 ข)-ค) เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณกระทันของเหล็กกล้าร้อน P91 มีค่า 213-252 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 190-276 HV<sub>0.1</sub>

จากรูปที่ 4.13 ก) เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P91 มีค่า 204-232 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 209-229 HV<sub>0.1</sub>

จากรูปที่ 4.13 ข)-ค) เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P91 มีค่า 191-222 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 217-249 HV<sub>0.1</sub>

จากรูปที่ 4.14 เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P91 มีค่า 133-163 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 131-164 HV<sub>0.1</sub>

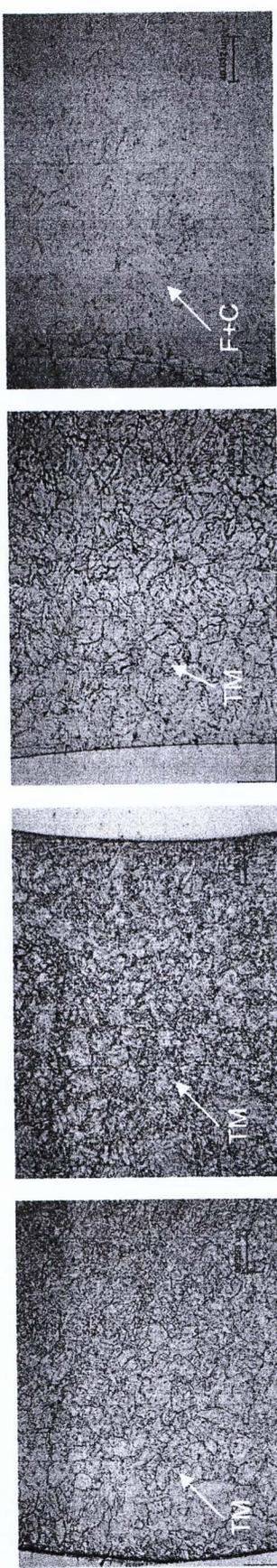
จากค่าความแข็งจะพบว่าบริเวณกระทันที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C จะมีแนวโน้มที่ความแข็งจะสูงกว่าบริเวณกระทันที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง เนื่องจากบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P91 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีเวลาน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง ทำให้การแพร่ของคาร์บอนเพื่อมารวมตัวกับธาตุผสมเป็นคาร์ไบด์จึงทำได้ยาก ธาตุผสมที่ละลายอยู่ในเนื้อพื้นจึงมีปริมาณมาก แต่หลังจากกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง มีเวลามากพอที่คาร์บอนจะแพร่เพื่อรวมตัวกับธาตุผสมเป็นคาร์ไบด์ ความแข็งของบริเวณกระทันที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C จึงสูงขึ้น [17]

ส่วนบริเวณกระทันที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 4 และ 6 มีเวลามากพอที่จะเกิดการกลับคืนสู่สภาวะปกติและเริ่มมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์

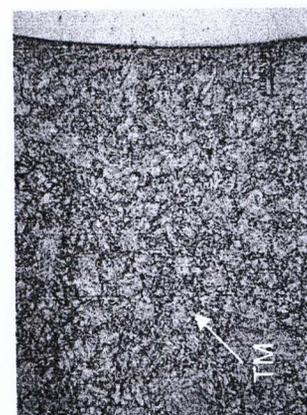
แต่ยังไม่ส่งผลให้ความแข็งแรงของบริเวณกระทรงร้อนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จึงให้ปริมาณธาตุผสมที่ละลายในเนื้อพื้นมีน้อยกว่าบริเวณกระทรงร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ทำให้มีคาร์ไบด์ตกตะกอน พบว่าบริเวณกระทรงร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ความแข็งแรงไม่แตกต่างกันมากนักแต่ก็มีแนวโน้มที่ความแข็งแรงของบริเวณกระทรงร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมงจะมีความแข็งแรงสูงกว่าบริเวณกระทรงร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน 4 และ 6 ชั่วโมง

ส่วนบริเวณกระทรงร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงและมีเวลานานถึง 500 ชั่วโมง ทำให้คาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นขยายขนาด จึงทำให้ความแข็งแรงของบริเวณกระทรงร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็น 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C มีความแข็งแรงใกล้เคียงกัน

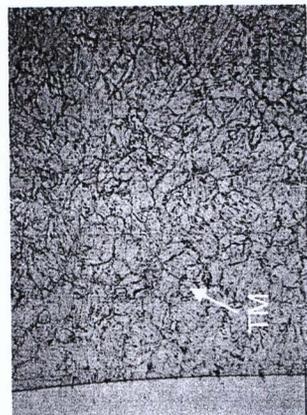
ส่วนบริเวณกระทรงร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง พบว่าความแข็งแรงมีค่าใกล้เคียงกันและลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณกระทรงร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633 และ 717°C เนื่องจากการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคเนื้อพื้นจากเดิมที่เป็นเทมเปอร์มาร์เทนไซต์เปลี่ยนเป็นเฟร์ไรต์และตะกอนคาร์ไบด์



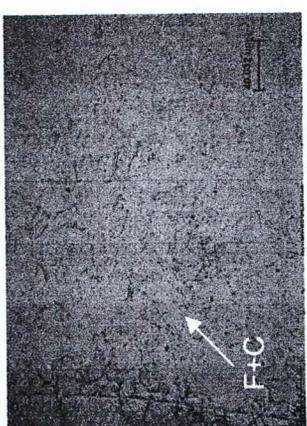
A/750/2/550/500



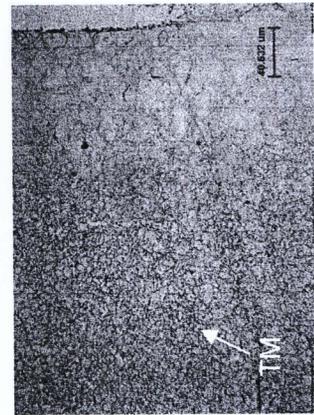
A/750/2/633/500



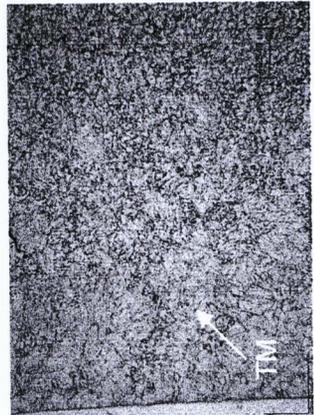
A/750/2/717/500



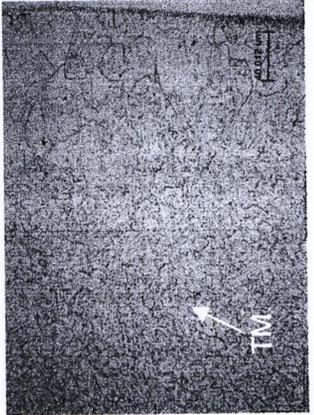
A/750/2/800/500



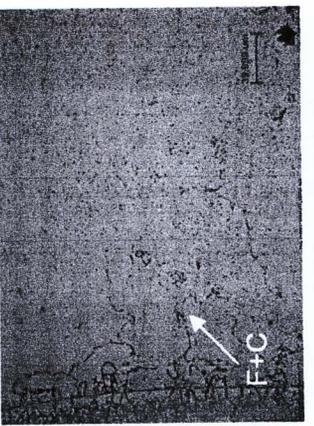
A/750/4/550/500



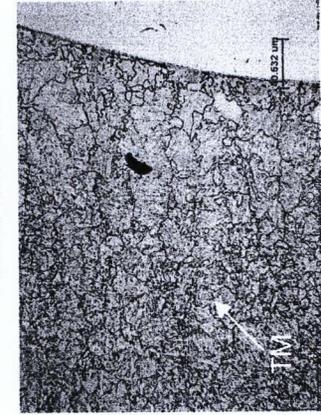
A/750/4/633/500



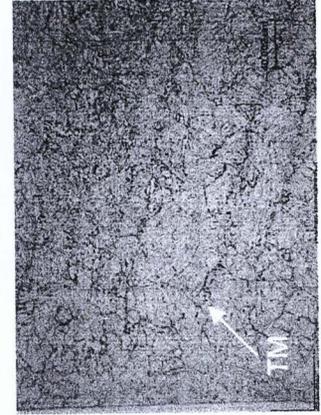
A/750/4/717/500



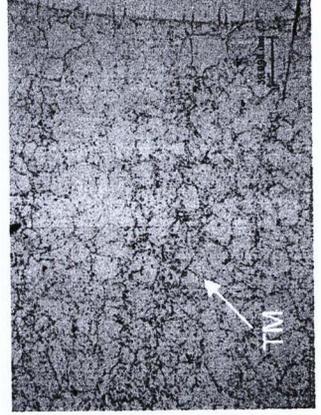
A/750/4/800/500



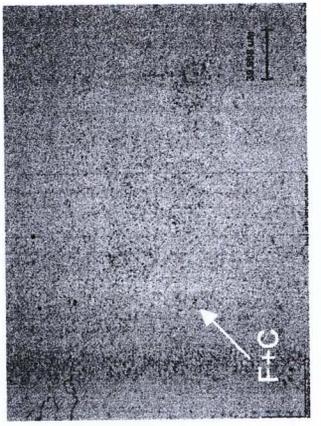
A/750/6/550/500



A/750/6/633/500



A/750/6/717/500



A/750/6/800/500

รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง

4.4.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณรอยต่อรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง

รูปที่ 4.20 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลานานที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง กรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C (รูปที่ 4.20 A/750/2/550/500, A/750/4/550/500 และ A/750/6/550/500) 633°C (รูปที่ 4.20 A/750/2/633/500, A/750/4/633/500 และ A/750/6/633/500) 717°C (รูปที่ 4.20 A/750/4/717/500, A/750/4/717/500 และ A/750/6/717/500) โครงสร้างจุลภาคคือ เคมเปอร์ มาร์เทนไซต์ และตะกอนคาร์ไบด์ เนื่องจากบริเวณรอยต่อขณะเชื่อมอยู่ติดกับเนื้อเชื่อมจึงทำให้ได้รับความร้อนหรืออุณหภูมิที่สูงจนเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นออสเทนไนต์และมีการละลายตัวของคาร์ไบด์ ทำให้ของออสเทนไนต์มีการขยายขนาดของเกรน เมื่ออุณหภูมิลดลงหลังเชื่อมโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนเป็น เคมเปอร์ มาร์เทนไซต์ และตะกอนคาร์ไบด์ [21-26] หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633 และ 717°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยต่อยังคงเป็น เคมเปอร์ มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์แต่หลังกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนจากเดิมคือ เคมเปอร์ มาร์เทนไซต์ เปลี่ยนเป็นเฟร์ไรต์ และตะกอนคาร์ไบด์

ส่วนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคตามที่แสดงในรูปที่ 4.20 บริเวณรอยต่อตามแถวแนวตั้งในแต่ละแถวคือภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิเท่ากันแต่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C โดยใช้เวลาไม่เท่ากันคือ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.20 การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระแทกร้อนไม่พบความแตกต่างกัน

รูปที่ 4.11ก)-4.11 ค) ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C ความแข็งเฉลี่ย คือ 269, 260 และ 239 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 279, 267 และ 254 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

รูปที่ 4.12 ก)-4.12 ค) ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C ความแข็งเฉลี่ย คือ 272, 241 และ 218 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมอินโคเนล 617 คือ 258, 262 และ 228 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

รูปที่ 4.13 ก)-4.13 ค) ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 223, 241 และ 214 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมอินโคเนล 617 คือ 202, 247 และ 233 HV<sub>0.1</sub>

รูปที่ 4.14 ก)-4.14 ค) ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 164, 155 และ 151 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 คือ 162, 165 และ 154 HV<sub>0.1</sub>

ความแข็งของบริเวณรอยต่อจะมีค่าต่ำกว่าบริเวณกระทันเนื่องจากขณะเชื่อมได้รับความร้อนหรืออุณหภูมิที่สูงกว่าบริเวณกระทันจึงคาดว่าน่าจะมีปริมาณของออสเทนไนต์เหลือค้างปริมาณมากทำให้บริเวณนี้มีความแข็งที่ต่ำ บริเวณรอยต่อที่กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม 2 ชั่วโมง สูงกว่าบริเวณรอยต่อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม 4 และ 6 ชั่วโมง ความแข็งโดยเฉลี่ยของรอยต่อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C จะมีความแข็งสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633 และ 717°C โครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยต่อ คือ เคมเปอร์ มาร์เทนไซต์และคาร์ไบด์ตกตะกอน ส่วนโครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยต่อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C โครงสร้างจุลภาค คือ เฟร์ไรต์และคาร์ไบด์ตกตะกอนตามขอบเกรน ทำให้ความแข็งลดลงอย่างมาก

รูปที่ 4.11 ก)-4.11 ค) ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดกับเหล็กกล้า P91 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 256, 245 และ 280 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมอินโคเนล 617 คือ 255, 266 และ 272 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

รูปที่ 4.12 ก)-4.12 ค) ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดกับเหล็กกล้า P91 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 234, 257 และ 273 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมอินโคเนล 617 คือ 234, 267 และ 228 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

รูปที่ 4 .13 ก)-4.13 ค) ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดกับเหล็กกล้า P91 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 255, 271 และ 314 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมอินโคเนล 617 คือ 265, 311 และ 336 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

รูปที่ 4 .14 ก)-4.14 ค) ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดกับเหล็กกล้า P91 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 305, 302 และ 230 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมอินโคเนล 617 คือ 329 HV<sub>0.1</sub>, 393 HV<sub>0.1</sub> และ 299 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

บริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยทั่วไปจะมีความแข็งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง เนื่องมาจากการเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมทำให้มีการตกตะกอน คาดว่าน่าจะเป็น แกรมม่าไพร์ม ( $\gamma'$ ) และคาร์ไบด์ หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลานานทำให้ตะกอนเพิ่มปริมาณมากขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิของกรรมวิธีทางความร้อนมีแนวโน้มทำให้บริเวณรอยต่อมีความแข็งเฉลี่ยสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้การแพร่ของธาตุทำได้เร็วขึ้นทำให้การตกตะกอนแกรมม่าไพร์ม ( $\gamma'$ ) และคาร์ไบด์เพิ่มปริมาณมากขึ้นความแข็งจึงสูง

รูปที่ 4 .11 ก) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งคือ 240-287 HV<sub>0.1</sub> ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ความแข็ง คือ 236-305 HV<sub>0.1</sub>

รูปที่ 4 .12 ก) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งคือ 232-291 HV<sub>0.1</sub> ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ความแข็ง คือ 247-316 HV<sub>0.1</sub>

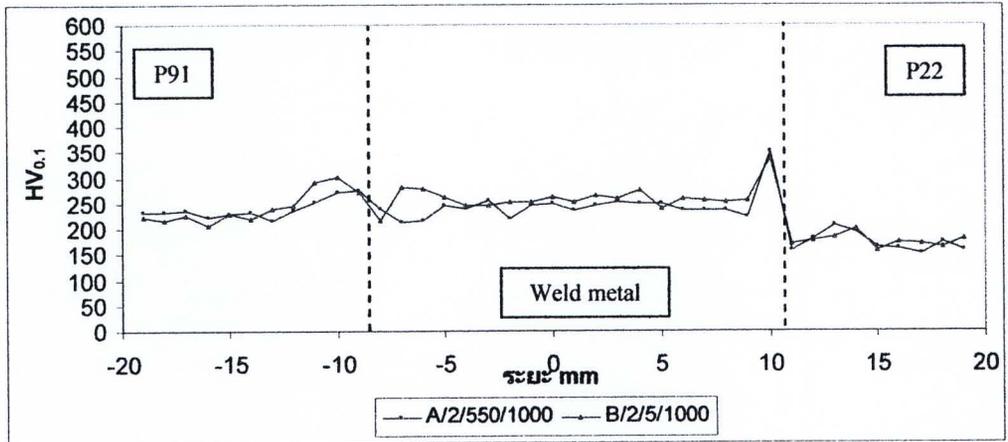
รูปที่ 4 .13 ก) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งคือ 227-265 HV<sub>0.1</sub> ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ความแข็ง คือ 234-287 HV<sub>0.1</sub> ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ความแข็ง คือ 247-316 HV<sub>0.1</sub>

รูปที่ 4 .14 ก) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งคือ 225-266 HV<sub>0.1</sub> ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ความแข็ง คือ 229-273 HV<sub>0.1</sub>

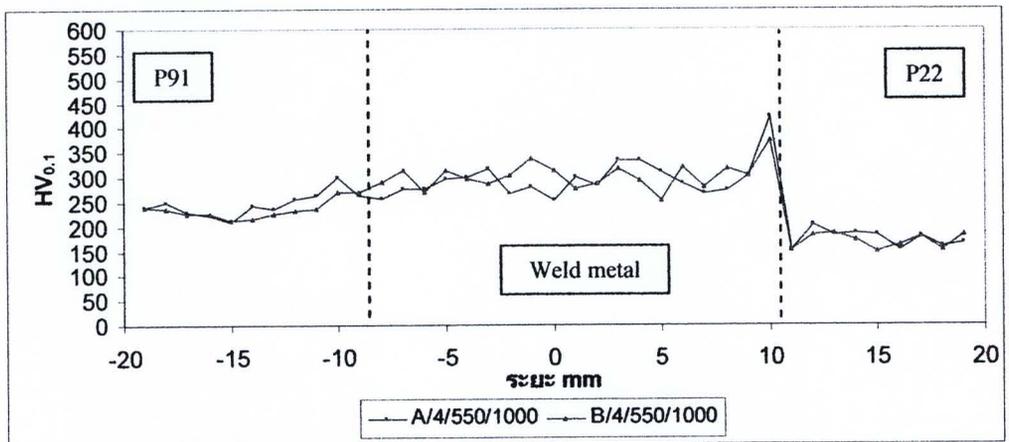


พบว่าความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง ความแข็งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง อาจจะเป็นผลจากการตกตะกอนของเฟสบางชนิด เช่น แกมมาไพร์ม (อินโคเนล 617) และเฟสเดลต้า (อินโคเนล 625) [7,8] อุณหภูมิที่ทำให้ความแข็งของเนื้อเชื่อมมีค่าสูงสุด คือ  $633^{\circ}\text{C}$  ส่วนกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิที่  $800^{\circ}\text{C}$  ทำให้ความแข็งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ  $550$  และ  $633^{\circ}\text{C}$  จากงานวิจัยของ Elisabetta Gariboldi และคณะ [8] ทำการทดลองโดยนำอินโคเนล 617 ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$  พบว่าตะกอนแกมมาไพร์มมีการสลายตัว ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองนี้ที่ความแข็งมีค่าลดลง ส่วนเนื้อเชื่อมของอินโคเนล 625 และ 617 หลังเชื่อมและขึ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะมีความแข็งใกล้เคียงกัน

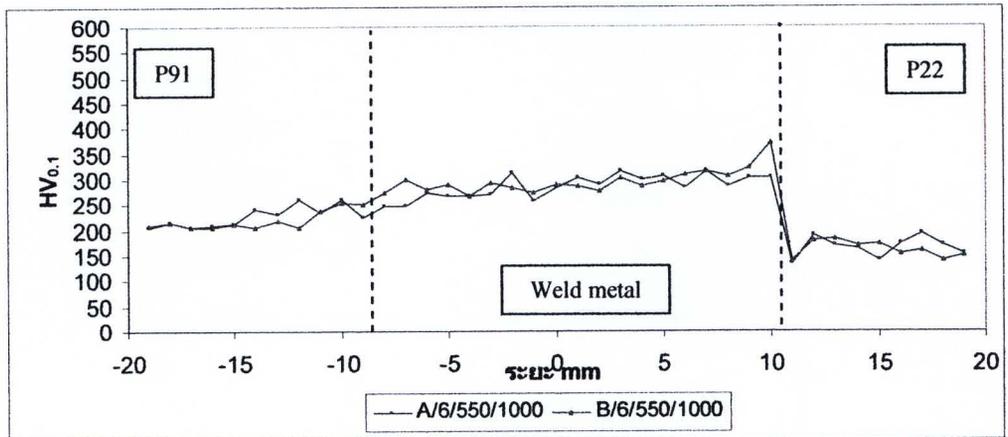
4.5 ความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2,4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

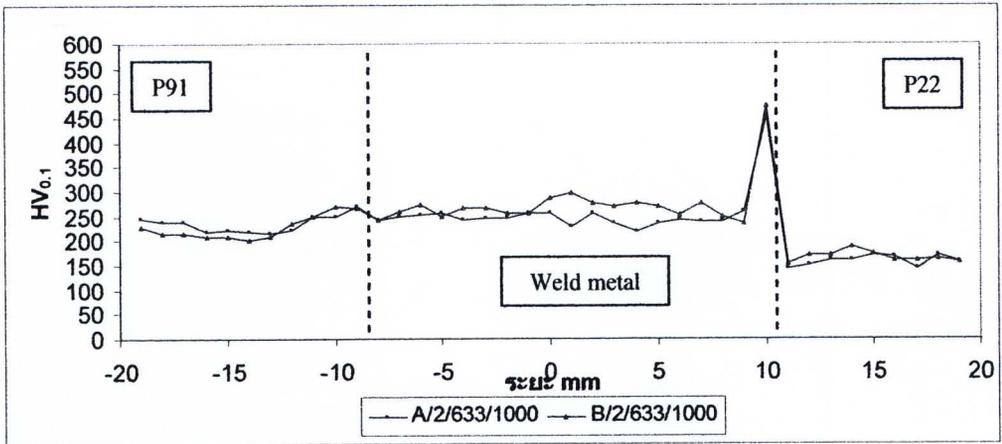


ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

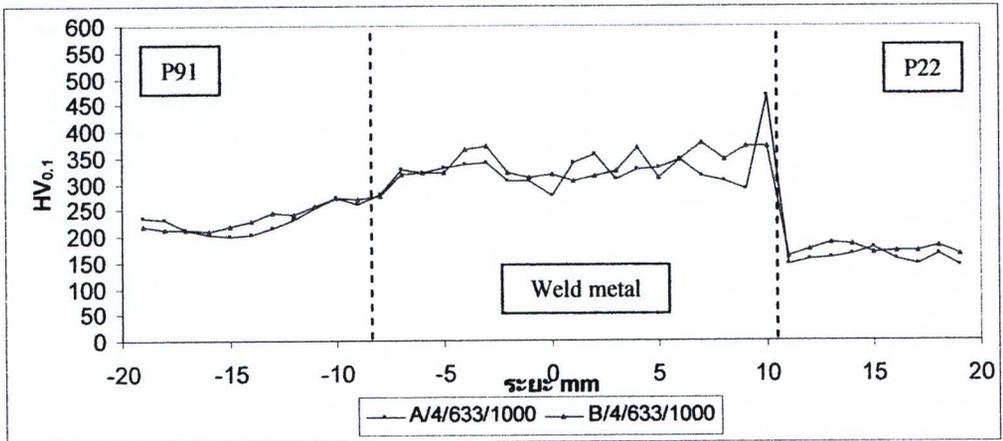


ค) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

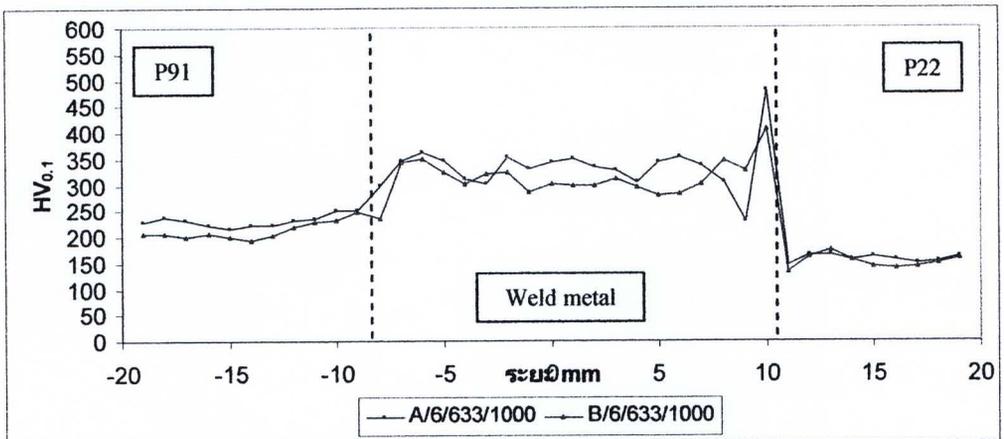
รูปที่ 4.21 ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



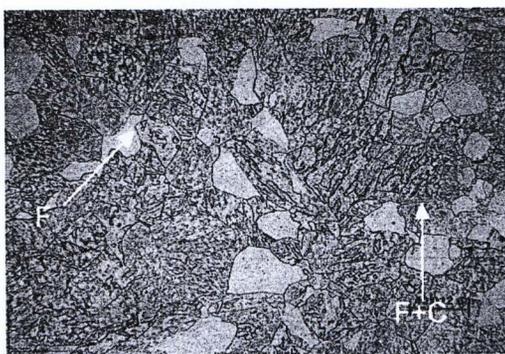
ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง



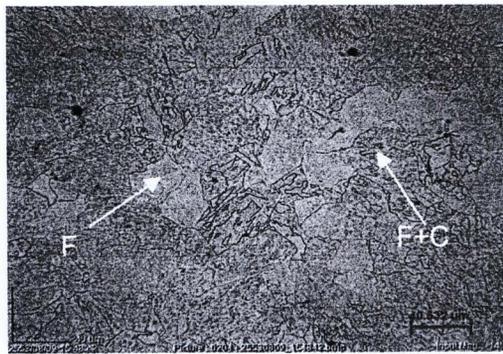
ค) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

รูปที่ 4.22 ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

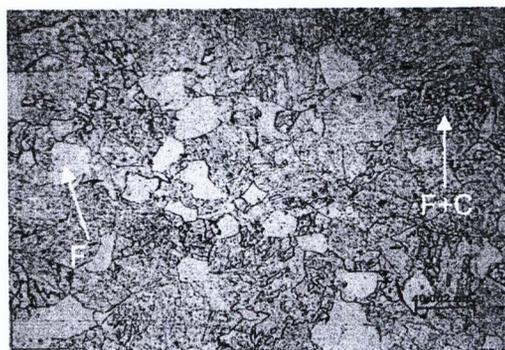
4.5.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง



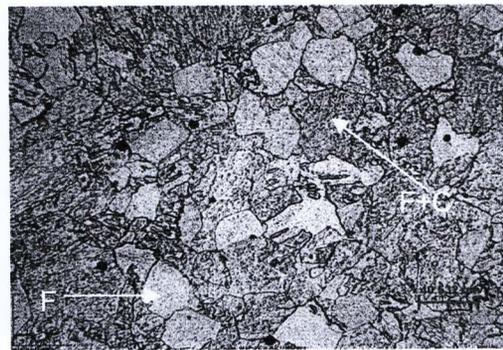
A/750/2/550/1000



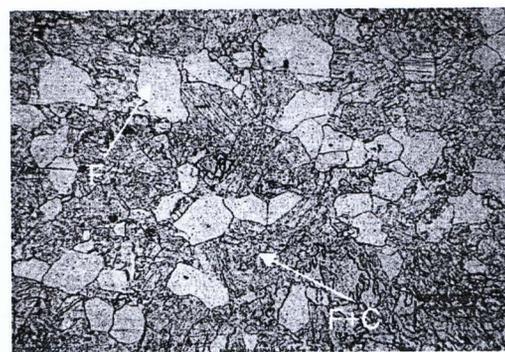
A/750/2/633/1000



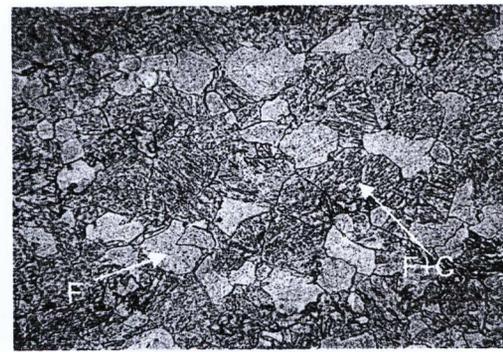
A/750/4/550/1000



A/750/4/633/1000



A/750/6/550/1000



A/750/6/633/1000

รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง



รูปที่ 4.23 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้า P22 บริเวณโลหะพื้นของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C (รูปที่ 4.23 A/750/2/550/1000, A/750/4/550/1000 และ A/750/6/550/1000) 633°C (รูปที่ 4.23 A/750/2/633/1000, A/750/4/633/1000 และ A/750/6/633/1000) เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง กรรมวิธีทางความร้อนที่ 550 และ 633°C ไม่ทำให้โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นมีความแตกต่างกัน โครงสร้างจุลภาคเหมือนกับบริเวณโลหะพื้นหลังเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ขนาดเกรนมีขนาดใกล้เคียงกัน โครงสร้างจุลภาค คือ เฟอไรต์และเฟอไรต์ที่มีตะกอนคาร์ไบด์ คาดว่าน่าจะเป็นชนิด  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$  [11,12,19,20]

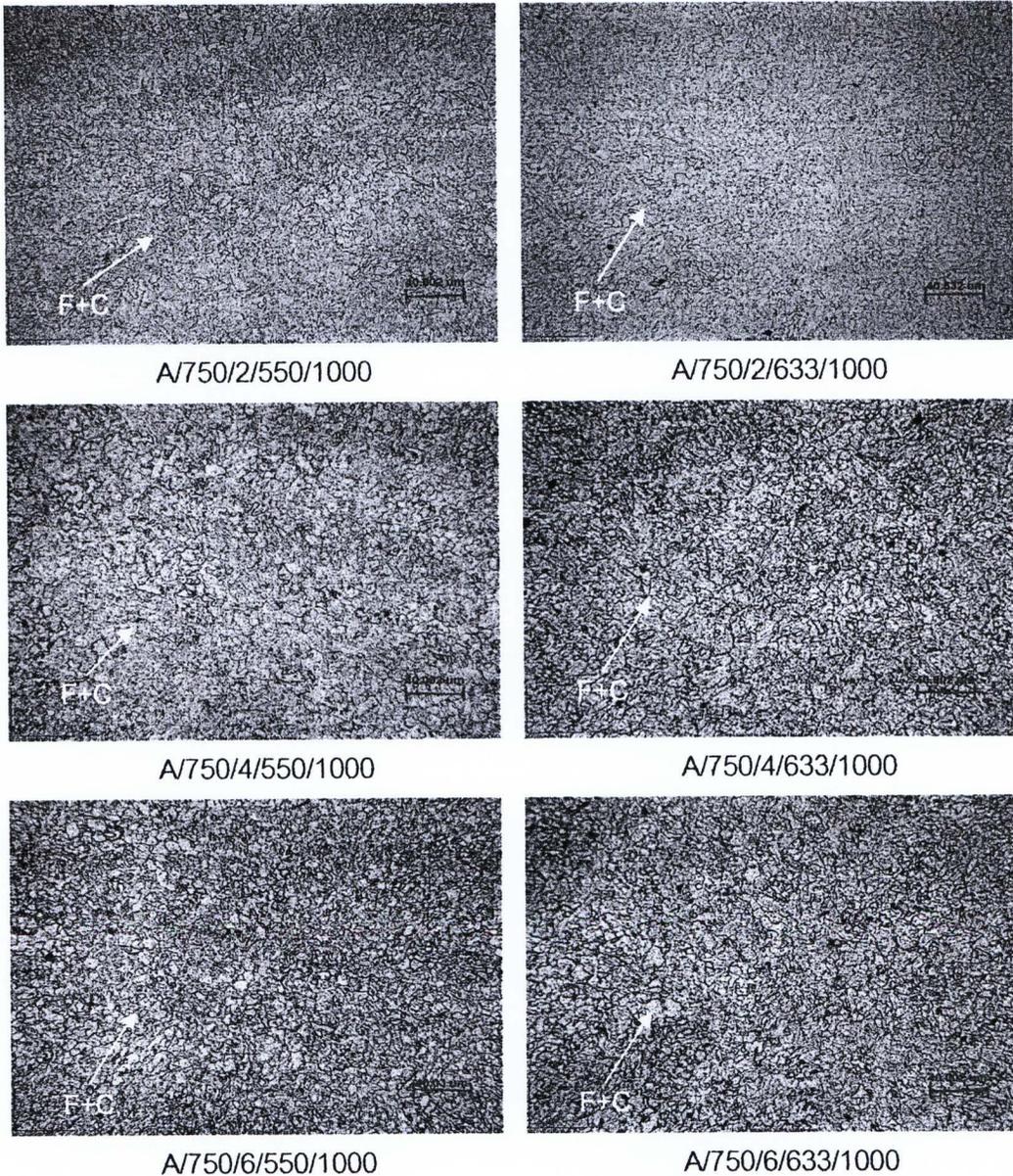
ส่วนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคตามที่แสดงในรูปที่ 4.23 บริเวณรอยต่อตามแนวตั้งในแต่ละแถวคือภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิเท่ากันแต่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C โดยใช้เวลาไม่เท่ากันคือ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.23 การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันไม่พบความแตกต่าง

รูปที่ 4.21 แสดงความแข็งของบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 แนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณโลหะพื้นมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 154-192  $HV_{0.1}$  ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 139-181  $HV_{0.1}$

รูปที่ 4.22 ความแข็งของบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 แนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งใกล้เคียงกัน คือ 141-171  $HV_{0.1}$  ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งใกล้เคียงกัน คือ 138-181  $HV_{0.1}$

หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมและหลังกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณโลหะพื้นมีค่าใกล้เคียงกับความแข็งของบริเวณโลหะพื้นหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 ชั่วโมง เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคยังคงเป็นเฟอไรต์และเฟอไรต์ที่มีตะกอนคาร์ไบด์ ซึ่งคาดว่าคาร์ไบด์หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

4.5.2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง



รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

รูปที่ 4.24 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของบริเวณกระทบร้อน เหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 กรรมวิธีทางความร้อนที่ 550°C (รูปที่ 4.24 A/750/2/550/1000, A/750/4/550/1000 และ A/750/6/550/1000) และ 633°C (รูปที่ 4.24 A/750/2/633/1000, A/750/4/633/1000 และ A/750/6/633/1000) ไม่ทำให้บริเวณกระทบร้อนมีความแตกต่างกัน หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ขนาดเกรนเฟอไรต์ของบริเวณกระทบร้อนมีแนวโน้มขยายขนาดโตขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณกระทบร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาค คือ เฟอไรต์และตะกอนคาร์ไบด์ ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็น  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$  [11,12,19,20]

ส่วนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคตามที่แสดงในรูปที่ 4.24 บริเวณรอยต่อตามแนวแนวตั้งในแต่ละแถวคือภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิเท่ากันแต่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C โดยใช้เวลาไม่เท่ากันคือ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.24 การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนไม่พบความแตกต่าง

รูปที่ 4.22 ก) เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ เหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งบริเวณกระทบร้อนมีค่า 163-206 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่า 158-199 HV<sub>0.1</sub>

รูปที่ 4.22 ข) เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ เหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งบริเวณกระทบร้อนมีค่า 182-202 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่า 149-185 HV<sub>0.1</sub>

รูปที่ 4.22 ค) เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งบริเวณกระทบร้อนมีค่า 141-190 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่า 168-181 HV<sub>0.1</sub>

รูปที่ 4.23 ก) เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ เหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งบริเวณกระทบร้อนมีค่า 148-171 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่า 170-185 HV<sub>0.1</sub>

รูปที่ 4.23 ข) เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ เหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งบริเวณกระทันร้อนมีค่า 155-177 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่า 167-187 HV<sub>0.1</sub>

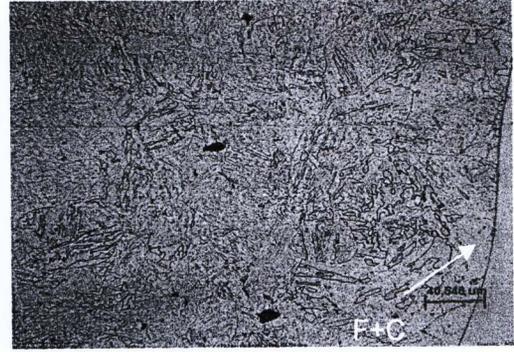
รูปที่ 4.23 ค) เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ เหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งบริเวณกระทันร้อนมีค่า 156-166 HV<sub>0.1</sub> ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่า 141-175 HV<sub>0.1</sub>

ความแข็งของบริเวณกระทันร้อนของเหล็กกล้า P22 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกัน ความแข็งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณกระทันร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 ชั่วโมง เนื่องจากขนาดเกรนของเฟอไรต์มีการขยายขนาดขึ้นเล็กน้อยทำให้ความแข็งจึงลดลง

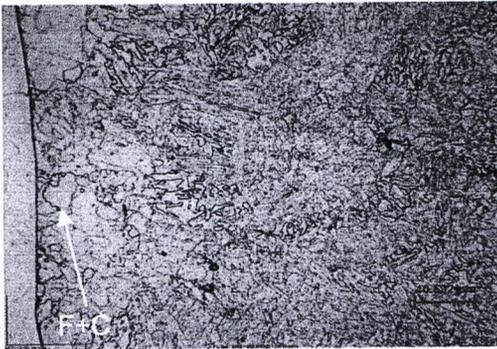
4.5.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง



A/750/2/550/1000



A/750/2/633/1000



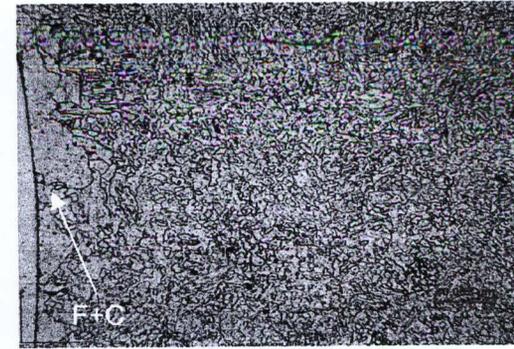
A/750/4/550/1000



A/750/4/633/1000



A/750/6/550/1000



A/750/6/633/1000

รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

รูปที่ 4.25 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลานานที่อุณหภูมิ 550°C (รูปที่ 4.25 A/750/2/550/1000, A/750/4/550/1000 และ A/750/6/550/1000) และ 633°C (รูปที่ 4.25 A/750/2/633/1000, A/750/4/633/1000 และ A/750/6/633/1000) เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง หลังกรรมวิธีทางความร้อนที่ 550 และ 633°C ไม่ทำให้บริเวณรอยต่อมีโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน โครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยต่อติดกับเนื้อเชื่อมเกรนมีการขยายขนาดโตขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณกระทันร้อน โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อคือ เฟร์ไรต์

ส่วนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคตามที่แสดงในรูปที่ 4.25 บริเวณรอยต่อตามแถวแนวตั้งในแต่ละแถวคือภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิเท่ากันแต่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C โดยใช้เวลาไม่เท่ากันคือ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.24 การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันร้อนไม่พบความแตกต่าง

รูปที่ 4.21 ก)-ค) เส้นแสดงความแข็งของส่วนของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งเฉลี่ยบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 มีค่า 136, 142 และ 145 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่า 157, 150 และ 139 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

รูปที่ 4.22 ก)-ค) เส้นแสดงความแข็งของส่วนของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งเฉลี่ยบริเวณรอยต่อของเหล็กกล้า P22 มีค่า 142, 145 และ 145 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่า 153, 160 และ 133 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

พบว่าความแข็งบริเวณรอยต่อของเหล็กกล้า P22 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง มีความแข็งต่ำกว่าบริเวณผิวและบริเวณกระทันร้อนเนื่องจากมีขนาดเกรนที่โตกว่า บริเวณกระทันร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะมีความแข็งต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณรอยต่อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง เนื่องจากขนาดเกรนของเฟร์ไรต์มีขนาดโตกว่าจึงทำให้ความแข็งมีค่าต่ำที่สุด

จากรูปที่ 4.21 ก)-ค) ความแข็งบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดกับเหล็กกล้า P22 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ

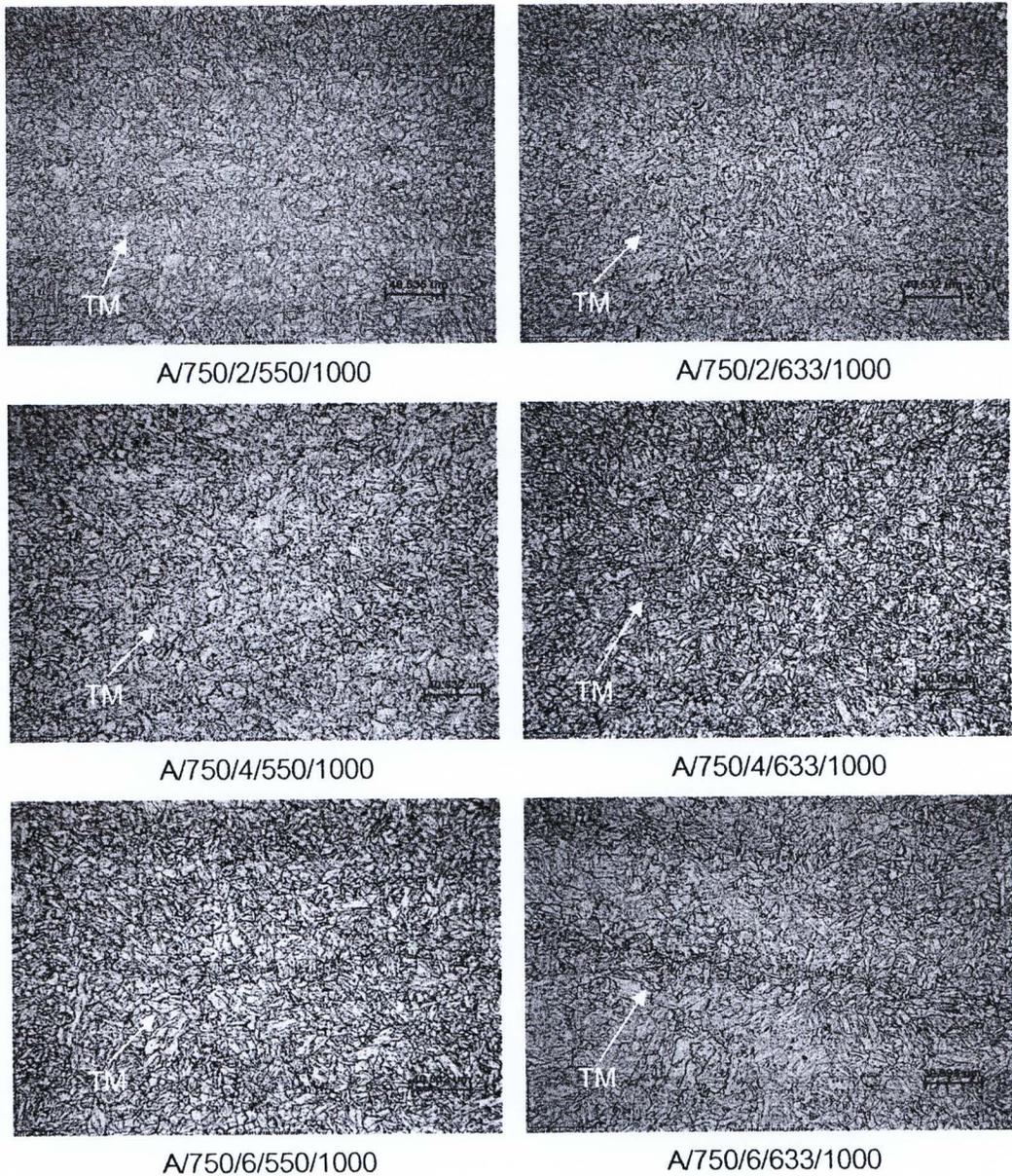
6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 350, 422 และ 303 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 338, 372 และ 372 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.22 ก)-ค) ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดกับเหล็กกล้า P22 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงและผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 455, 466 และ 477 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 474, 371 และ 406 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

บริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 ด้านติดกับเหล็กกล้า P22 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยทั่วไปจะมีความแข็งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง และบริเวณรอยต่อของชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง จะมีความแข็งสูงที่สุด การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนมีแนวโน้มทำให้บริเวณรอยต่อมีความแข็งเฉลี่ยสูงขึ้น เนื่องจากการตกตะกอนแกมมาคอบเบิลไพรม์หรือเดลต้าในอินโคเนล 625 และแกมมาไพรม์ในอินโคเนล 617 ทำให้ความแข็งสูงขึ้น

4.5.4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

รูปที่ 4.26 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้า P91 บริเวณโลหะพื้นของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C ( รูปที่ 4.26 A/750/2/550/1000, A/750/4/550/1000) และ อุณหภูมิ 633°C ( รูปที่ 4.26 A/750/2/633/1000, A/750/4/633/1000 และ A/750/6/633/1000) เวลา 1000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคยังคงเป็นเทมเปอรัมาไรเทนไซด์และตะกอนคาร์ไบด์ คาดว่าเป็นชนิด M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> [21-26] จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ขนาดเกรนของเหล็กกล้า P91 บริเวณโลหะพื้นใกล้เคียงกัน การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนขนาดเกรนมีแนวโน้มที่จะขยายขึ้นเล็กน้อย



รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

รูปส่วนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคตามที่แสดงในรูปที่ 4.26 บริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ตามแถวแนวตั้งในแต่ละแถวคือภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิเท่ากันแต่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C โดยใช้เวลาไม่เท่ากันคือ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.24 การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นไม่พบความแตกต่าง

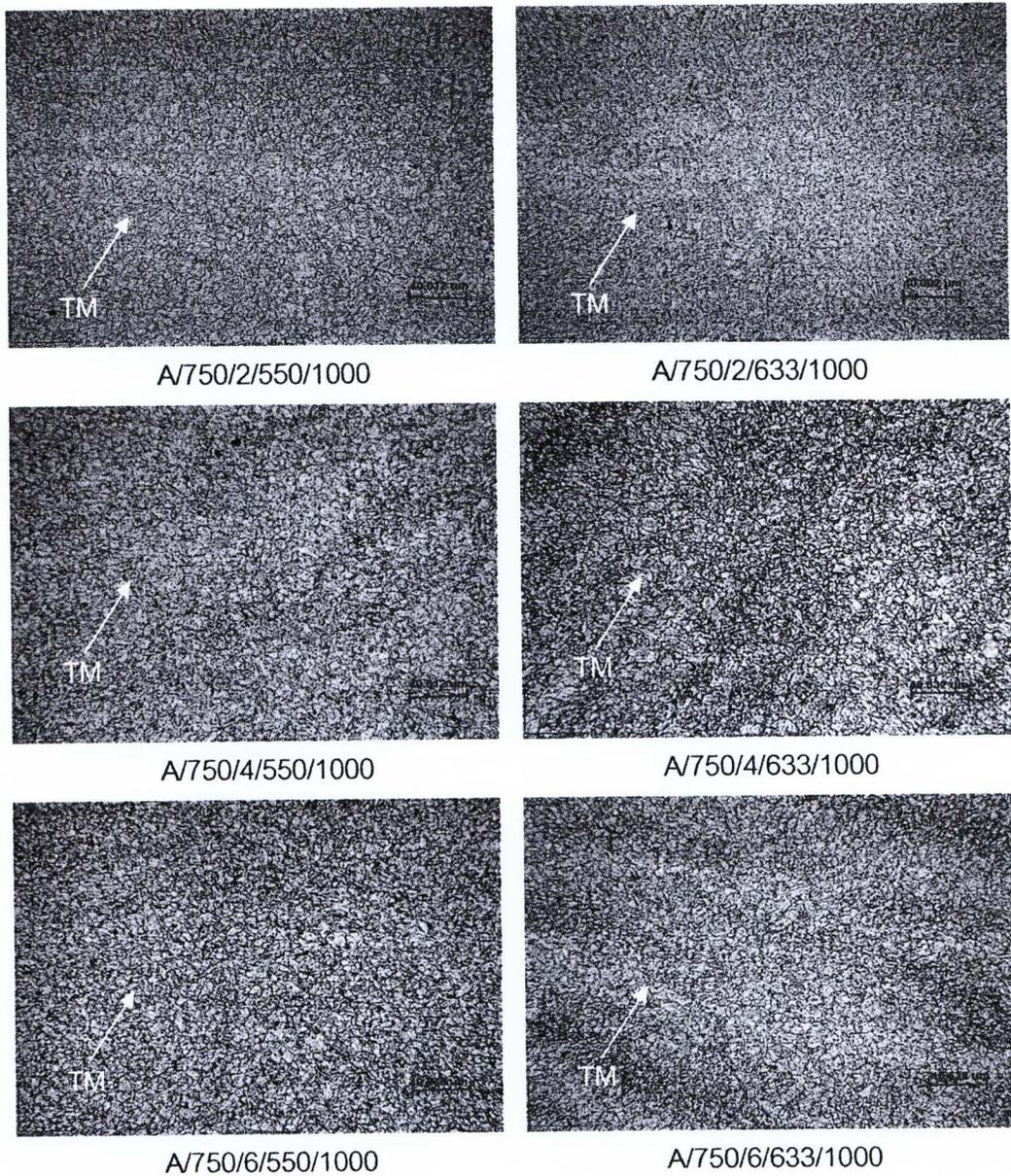
จากรูปที่ 4.21 ก)-ค) ความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 206-248 HV<sub>100</sub> ส่วนความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 205-239 HV<sub>100</sub>

จากรูปที่ 4.22 ก)-ค) ความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 198-244 HV<sub>100</sub> ส่วนความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 199-230 HV<sub>100</sub>

การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนจาก 500 ชั่วโมง เป็น 1000 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 พบมีค่าใกล้เคียงกัน

4.5.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

รูปที่ 4.27 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้า P91 บริเวณบริเวณกระทันของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C ( รูปที่ 4.27 A/750/2/550/1000, A/750/4/550/1000 และ A/750/6/550/1000) และ 633°C ( รูปที่ 4.27 A/750/2/633/1000, A/750/4/633/1000 และ A/750/6/633/1000) เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคยังคงเป็น เทมเปอ์ มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์ คาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นเป็นชนิด M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> [21-26] จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคเกรนของเหล็กกล้า P91 บริเวณกระทันมีขนาดใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.27 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

ส่วนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคตามที่แสดงในรูปที่ 4.27 บริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ตามแถวแนวตั้งในแต่ละแถวคือภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันหลังจากกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิเท่ากันแต่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C โดยใช้เวลาไม่เท่ากันคือ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.24 การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันไม่พบความแตกต่าง

ส่วนความแข็งบริเวณกระทับร้อนของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

บริเวณกระทับร้อนความแข็งสูงกว่าบริเวณโลหะพื้นเล็กน้อยเนื่องจากขนาดเกรนที่เล็กกว่า และอาจจะมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ในขณะผ่านกรรมวิธีทางความร้อน จากรูปที่ 4.21 ก) ความแข็งบริเวณกระทับร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็ง คือ 215-271 HV<sub>0.1</sub> ส่วนความแข็งบริเวณกระทับร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 คือ 240-301 HV<sub>0.1</sub>

จากรูปที่ 4.21 ข)-ค) ความแข็งบริเวณกระทับร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C เป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็ง คือ 232-301 HV<sub>0.1</sub> ส่วนความแข็งบริเวณกระทับร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 คือ 219-268 HV<sub>0.1</sub>

จากรูปที่ 4.22 ก) ความแข็งบริเวณกระทับร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็ง คือ 216-249 HV<sub>0.1</sub> ส่วนความแข็งบริเวณกระทับร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 คือ 235-270 HV<sub>0.1</sub>

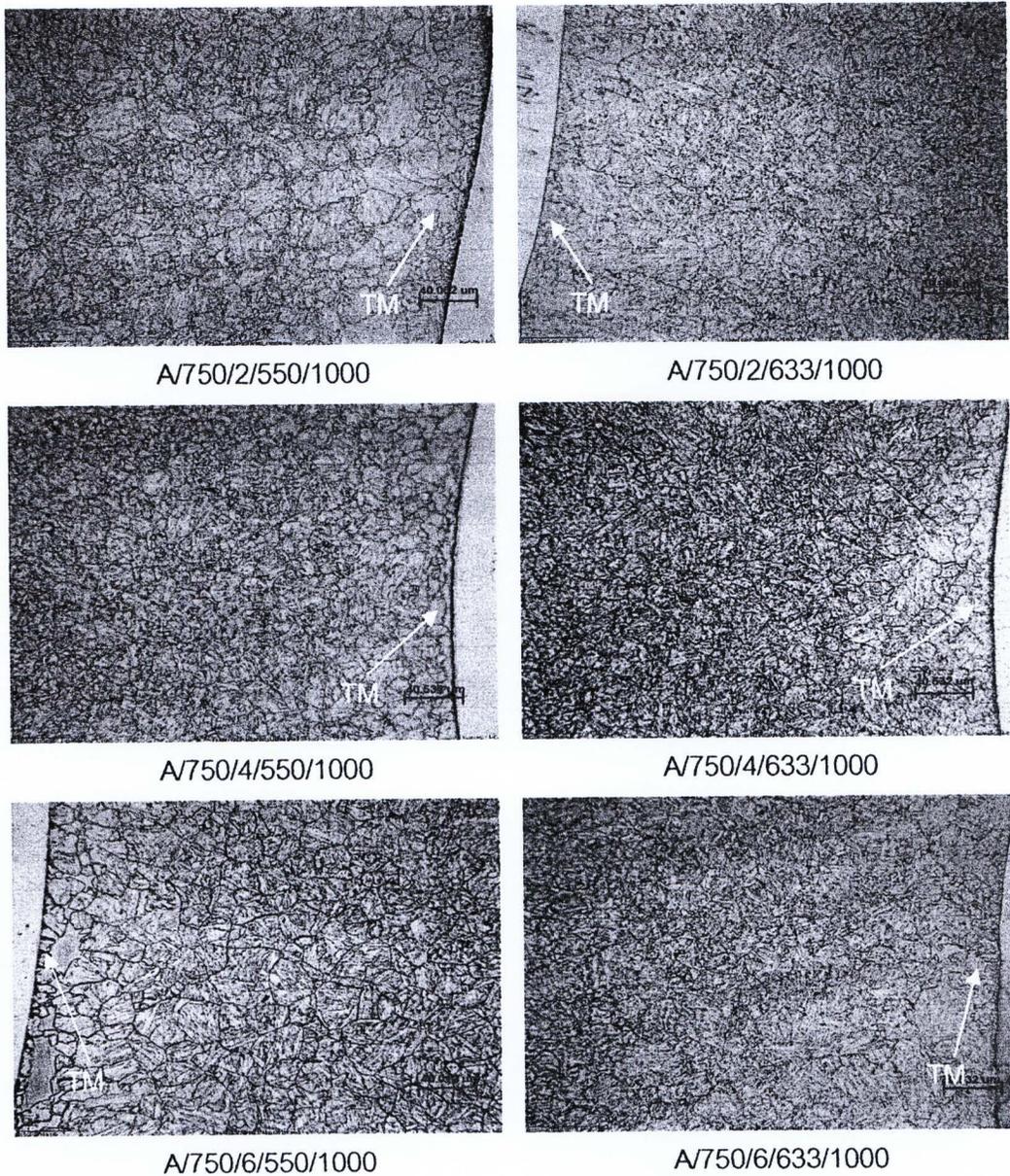
จากรูปที่ 4.22 ข)-ค) ความแข็งบริเวณกระทับร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C เป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็ง คือ 215-251 HV<sub>0.1</sub> ส่วนความแข็งบริเวณกระทับร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 คือ 202-256 HV<sub>0.1</sub>

พบว่าความแข็งของบริเวณกระทับร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C มีความแข็งสูงกว่าบริเวณกระทับร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เนื่องบริเวณกระทับร้อนหลังเชื่อมเกิดการสลายตัวของคาร์ไบด์ทำให้มีธาตุผสมในเนื้อพื้นออกสเตนตีมีมากขึ้น หลังอุณหภูมิลดลงโครงสร้างจุลภาคคือ มาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งสูง หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมทำให้เกิดการแพร่ของ

อะตอม ซึ่งกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ส่งผลให้เกิดการกลับคือสู่สภาวะปกติ (Recovery) เป็นหลักเมื่อเทียบกับบริเวณกระทบร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็น 4 และ 6 ชั่วโมง ซึ่งมีเวลามากพอที่คาร์ไบด์จะเริ่มตกตะกอนจึงทำให้ธาตุผสมในเนื้อพื้นมีปริมาณลดลง เมื่อบริเวณกระทบร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 500 และ 1000 ชั่วโมง มีเวลามากพอที่จะเกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ [17] ทำให้ความแข็งบริเวณกระทบร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีความแข็งสูงกว่าบริเวณกระทบร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง บริเวณกระทบร้อนมีความแข็งสูงบริเวณโลหะพื้นเนื่องจากขนาดเกรนที่เล็กกว่าและมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ คาร์ไบด์ที่เกิดคาดว่าเป็นชนิด  $M_{23}C_6$

4.5.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.28 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้า P91 ของบริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ขนาดเกรนบริเวณรอยต่อมีขนาดใหญ่กว่าทั้งบริเวณโลหะพื้นและบริเวณกระทบร้อนเนื่องจากบริเวณรอยต่อนี้เป็นบริเวณที่ติดกับเนื้อเชื่อมซึ่งได้รับความร้อนหรืออุณหภูมิที่สูงจากการเชื่อมทำให้เกิดการขยายขนาดของเกรน โครงสร้างจุลภาคของบริเวณนี้เป็น เวมเปอ์ มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์ จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ขนาดเกรนของเวมเปอ์ มาร์เทนไซต์ มีขนาดใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

ส่วนรูปตามแถวแนวดิ่งเป็นการเปรียบเทียบผลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่าการเพิ่มเวลากรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยต่อ ในแต่ละแถวแนวดิ่งไม่พบความแตกต่างกัน

รูปที่ 4.21 ก)-ค) ความแข็งบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ

276, 261 และ 225 HV<sub>0,1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งเฉลี่ยมีค่า 271, 269 และ 250 HV<sub>0,1</sub> ตามลำดับ

รูปที่ 4.22 ก)-ค) ความแข็งบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 270, 259 และ 249 HV<sub>0,1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 265, 271 และ 249 HV<sub>0,1</sub> ตามลำดับ

พบว่า การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมถึง 6 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเหล็กกล้า P91 บริเวณติดกับเนื้อเชื่อมความแข็งต่ำสุด ส่วนกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่เวลา 2 และ 4 ชั่วโมง พบว่าความแข็งมีใกล้เคียงกัน การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนจาก 500 ชั่วโมง เป็น 1000 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณรอยต่อมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการแพร่ของธาตุผสมมีเวลามากพอที่จะมารวมตัวกับคาร์บอนเกิดเป็นคาร์ไบด์มีปริมาณมากขึ้นทำให้ความแข็งบริเวณรอยต่อมีค่าสูงขึ้น ส่วนความแข็งบริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณรอยต่อมีค่าใกล้เคียงกัน

รูปที่ 4.21 ก)-ค) ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อคือ 240, 257 และ 247 HV<sub>0,1</sub> ตามลำดับ ส่วนบริเวณรอยต่อของอินโคเนล 617 ความแข็งคือ 218, 291 และ 274 HV<sub>0,1</sub> ตามลำดับ

รูปที่ 4.22 ก)-ค) ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ส่วนความแข็งบริเวณรอยต่อของชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อคือ 242, 279 และ 298 HV<sub>0,1</sub> ตามลำดับ ส่วนบริเวณรอยต่อของอินโคเนล 617 ความแข็งคือ 243, 274 และ 234 HV<sub>0,1</sub> ตามลำดับ

พบว่า บริเวณรอยต่อของอินโคเนล 625 และ 617 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะมีความแข็งต่ำที่สุดและมีค่าความแข็งใกล้เคียงกับเนื้อเชื่อมหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนมีแนวโน้มทำให้บริเวณรอยต่อของอินโคเนล 625 และ 617 มีความแข็งเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น คาดว่าการเพิ่มเวลาและอุณหภูมิของกรรมวิธีทางความร้อนจะทำให้เกิดการตกตะกอน(แกมมาตอปปเบลไพร์มหรือเดลต้าในอินโคเนล 625 และแกมมาไพร์มในอินโคเนล

617) มีปริมาณมากขึ้นจึงทำให้ความแข็งมีค่าสูงขึ้น บริเวณรอยต่อของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยทั่วไปจะมีความแข็งสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง

รูปที่ 4.21 ก) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งคือ 214-255 HV<sub>0.1</sub> ส่วนความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 239-283 HV<sub>0.1</sub> ความแข็งของเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีแนวโน้มไม่เพิ่มขึ้น ความแข็งมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 ชั่วโมง,

รูปที่ 4.21 ข) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งคือ 253-334 HV<sub>0.1</sub> ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 268-336 HV<sub>0.1</sub>

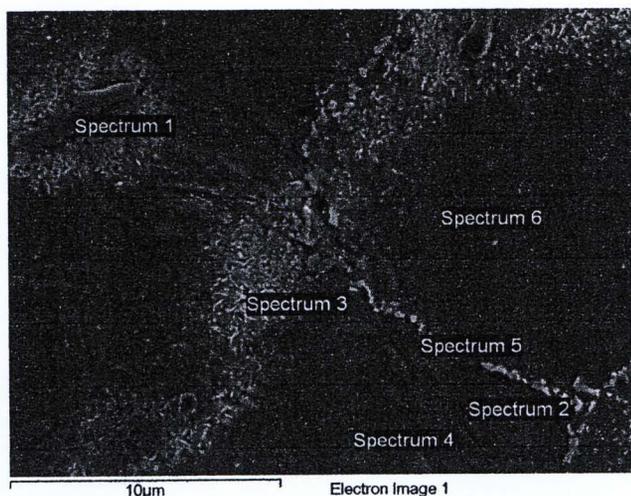
รูปที่ 4.21 ค) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งคือ 303-33 HV<sub>0.1</sub> ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 269-322 HV<sub>0.1</sub>

รูปที่ 4.22 ก) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งคือ 216-260 HV<sub>0.1</sub> ส่วนความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 239-283 HV<sub>0.1</sub> ความแข็งของเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีแนวโน้มไม่เพิ่มขึ้น ความแข็งมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 ชั่วโมง

รูปที่ 4.22 ข) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งคือ 275-356 HV<sub>0.1</sub> ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 304-376 HV<sub>0.1</sub>

รูปที่ 4.22 ค) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งคือ 303-362 HV<sub>0.1</sub> ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 297-344 HV<sub>0.1</sub>

4.5.7 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง



รูปที่ 4.29 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 5000 เท่า

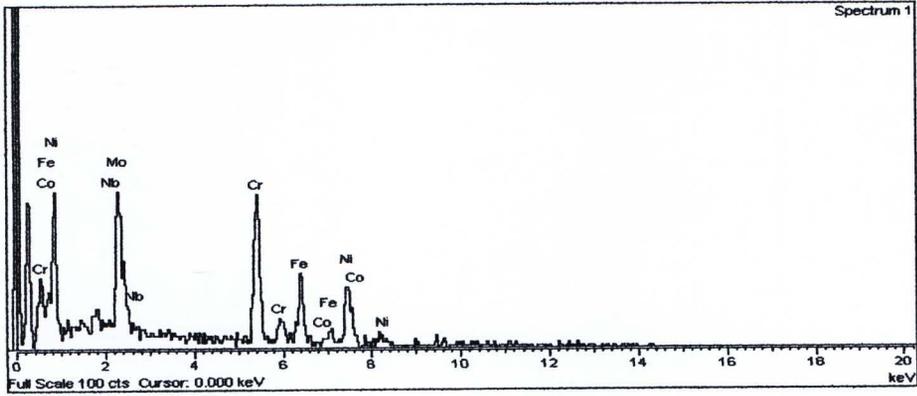
รูปที่ 4.29 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง พบการตกตะกอนภายในเนื้อและตามขอบเกรนตามที่แสดงในรูปที่ 4.29

รูปที่ 4.30 แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของก้อนตะกอนในเนื้อพื้นที่แสดงในรูปที่ 4.29 (Spectrum ที่ 1) พบว่ามีปริมาณธาตุโครเมียม และโมลิบดีนัมสูง คาดว่าน่าจะเป็นคาร์ไบด์ชนิด MC

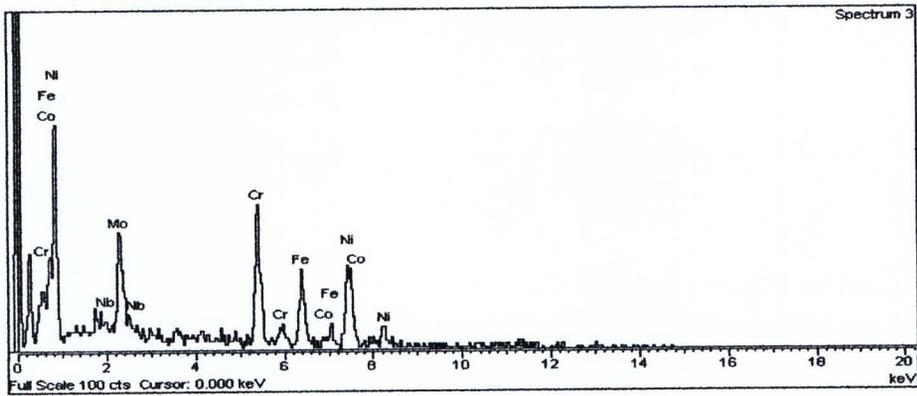
รูปที่ 4.31 แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของก้อนตะกอนในเนื้อพื้นที่แสดงในรูปที่ 4.29 (Spectrum ที่ 3) มีปริมาณธาตุโครเมียม และโมลิบดีนัมสูง คาดว่าน่าจะเป็นคาร์ไบด์ชนิด  $M_{23}C_6$

รูปที่ 4.32 แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีเนื้อพื้นที่แสดงในรูปที่ 4.29 (Spectrum ที่ 5) ประกอบด้วย นิกเกิล โครเมียม โมลิบดีนัมสูง และไนโอเบียม

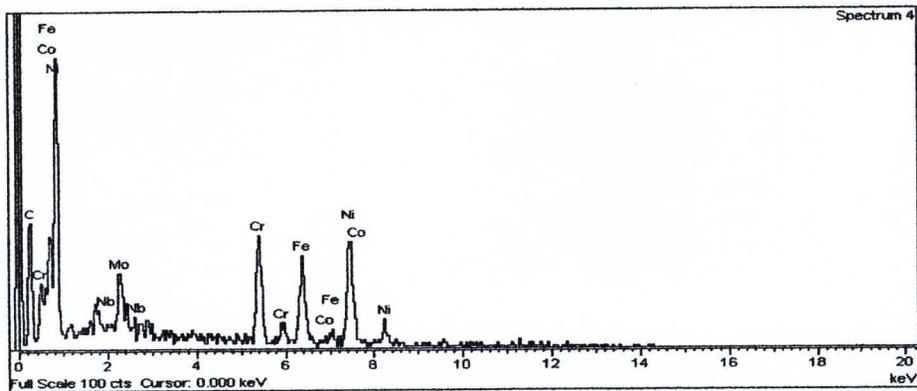
รูปที่ 4.33 แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของก้อนตะกอนในเนื้อพื้นซึ่งแสดงในรูปที่ 4.29 (Spectrum ที่ 5) มีปริมาณธาตุโครเมียม และโมลิบดีนัมสูง คาดว่าน่าจะเป็นคาร์ไบด์ชนิด  $M_{23}C_6$



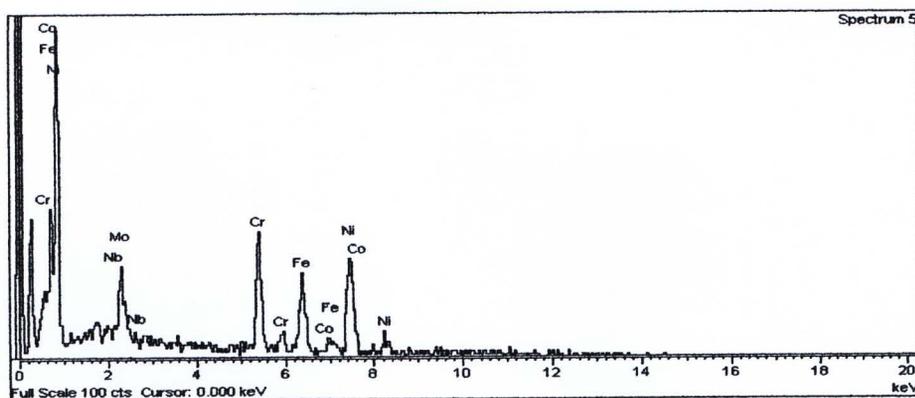
รูปที่ 4.30 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 1 ก้อนตะกอน ในรูปที่ 4.29 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด



รูปที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 3 ตะกอน ในรูปที่ 4.29 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด



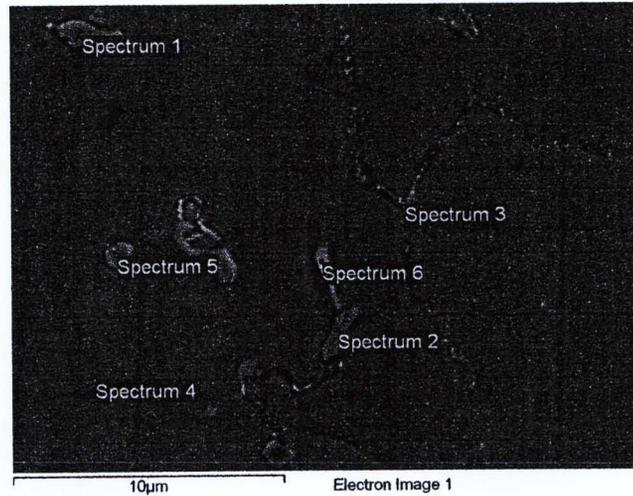
รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 4 บริเวณเนื้อพื้น ในรูปที่ 4.29 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด



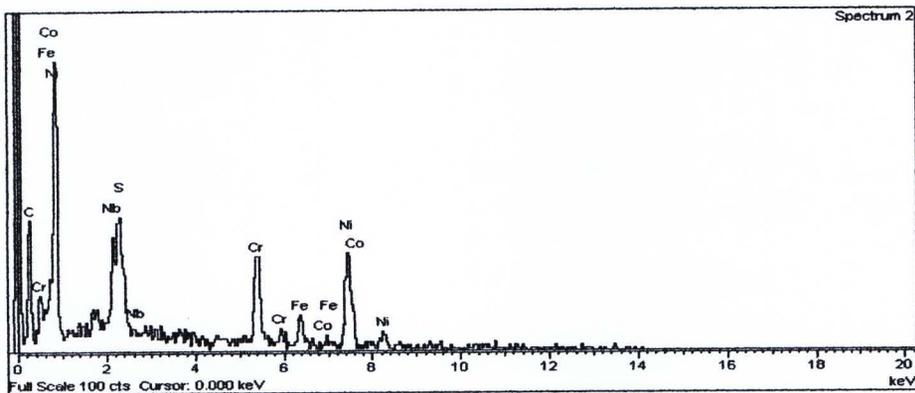
รูปที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 5 ตะกอนตามขอบเกรน ในรูปที่ 4.29 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

รูปที่ 4.29 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง พบตะกอนภายในเนื้อและตามขอบเกรน รูปที่ 4.30, 4.31 และ 4.33 แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของ Spectrum ที่ 1, 3 และ 5 จากการตรวจสอบส่วนผสมเคมีของตะกอนด้วยเทคนิคอีดีเอส ขนาดหัวตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอีดีเอสในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 ไมโครเมตร คาดว่าตะกอนในเนื้อพื้นและตามขอบเกรนน่าจะเป็นคาร์ไบด์ชนิด MC และ  $M_{23}C_6$  [3,4,7,27] ผลวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีพบธาตุโครเมียม และโมลิบดีนัมสูง ส่วนผลวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของเนื้อพื้น Spectrum ที่ 4 แสดงตามรูปที่ 4.32

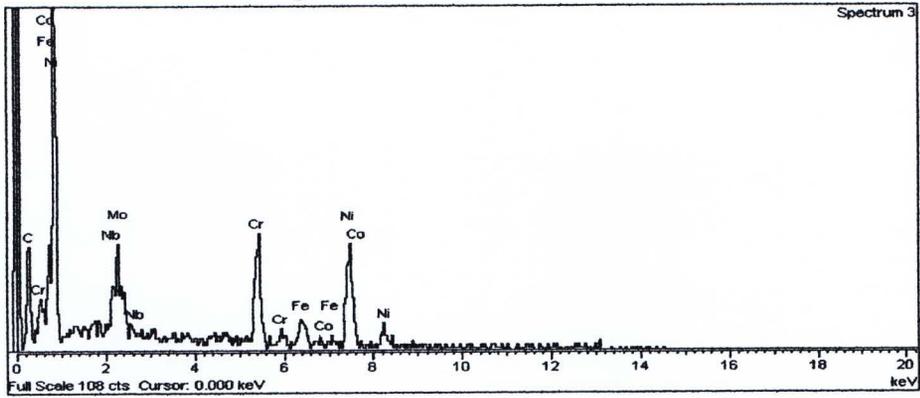
4.5.8 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด กำลังขยาย 5000 เท่า ของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง



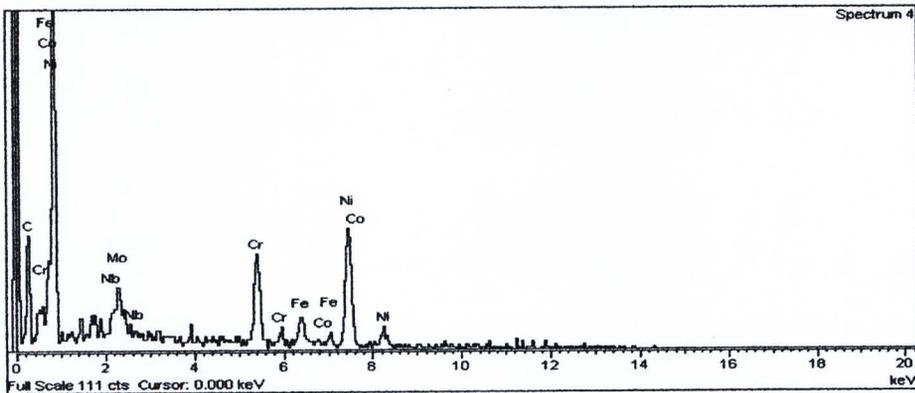
รูปที่ 4.34 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 5000 เท่า



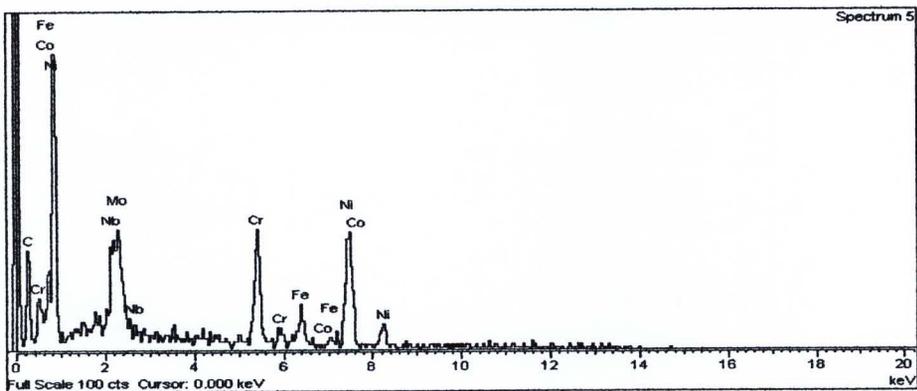
รูปที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 2 ก่อนตะกอน ในรูปที่ 4.34 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



รูปที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 3 ตะกอนตามขอบเกรน ในรูปที่ 4.34 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด



รูปที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 4 บริเวณเนื้อพื้น ในรูปที่ 4.34 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด



รูปที่ 4.38 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 5 ก่อนตะกอน ในรูปที่ 4.34 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด

รูปที่ 4.34 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง พบตะกอนในเนื้อพื้นและตามขอบเกรน รูปที่ 4.35 และ 4.39 แสดงผลวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 1 และ 5 จากการตรวจสอบธาตุเชิงปริมาณของก้อนตะกอนภายในเนื้อพื้นด้วยเทคนิคอีดีเอส ขนาดหัวตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอีดีเอสในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 ไมโครเมตร คาดว่าน่าจะเป็นเฟสเดลต้า ( $\delta$ -phase) [3, 4, 7, 27] ประกอบด้วยธาตุโครเมียม ไนโอเบียมและโมลิบดีนัมสูง รูปที่ 4.36 แสดงผลวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 2 ก้อนตะกอนในเนื้อพื้นมีปริมาณธาตุโครเมียมและไนโอเบียมสูง คาดว่าน่าจะเป็นคาร์ไบด์ชนิด MC [3, 4] รูปที่ 4.37 แสดงผลผลวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 3 ประกอบด้วยธาตุโครเมียม ไนโอเบียมและโมลิบดีนัม คาดว่าน่าจะเป็นคาร์ไบด์  $M_{23}C_6$  [3, 4, 7, 27]

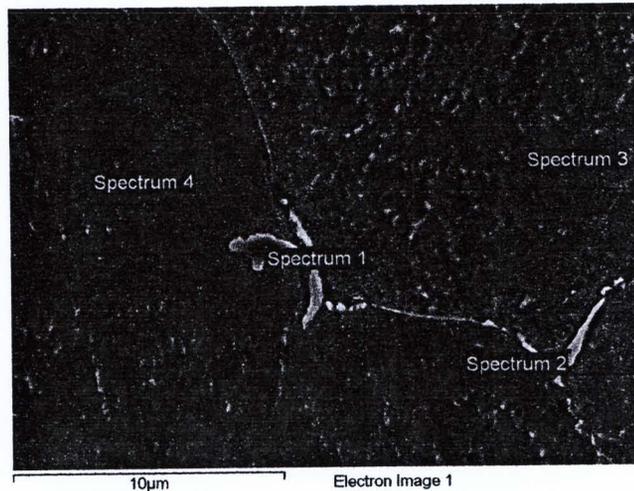
จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ตามที่แสดงในรูปที่ 4.29 ตะกอนส่วนใหญ่ที่พบคาดว่าน่าจะเป็นคาร์ไบด์ชนิด MC และ  $M_{23}C_6$  [3, 4, 7, 27] ตกตะกอนอยู่ในเนื้อพื้นและตามขอบเกรนซึ่งมีปริมาณธาตุโครเมียม และโมลิบดีนัมสูง ทำให้ความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าไม่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคและการตรวจสอบปริมาณธาตุของเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ตามที่แสดงในรูปที่ 4.34 ตะกอนที่เกิดขึ้นคาดว่าน่าจะเป็นคาร์ไบด์ชนิด MC,  $M_{23}C_6$  และเฟสเดลต้า ( $\delta$ -phase) ซึ่งมีผลทำให้ความแข็งแรงมีค่าสูง

K. Bhanu Sankara Rao และคณะ [7] ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติกลของอินโคเนล 625 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 923 และ 1123 K พบว่ามีการตกตะกอนของเฟสเดลต้า ( $\delta$ -phase) ซึ่งเฟสเดลต้า ( $\delta$ -phase) ที่เกิดขึ้นประกอบด้วยธาตุ โมลิบดีนัมและไนโอเบียม ทำให้ความแข็งแรงของอินโคเนล 625 เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อความแข็งแรงของอินโคเนล 625 เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้ความแข็งแรงและความเหนียวของอินโคเนล 625 ลดลง

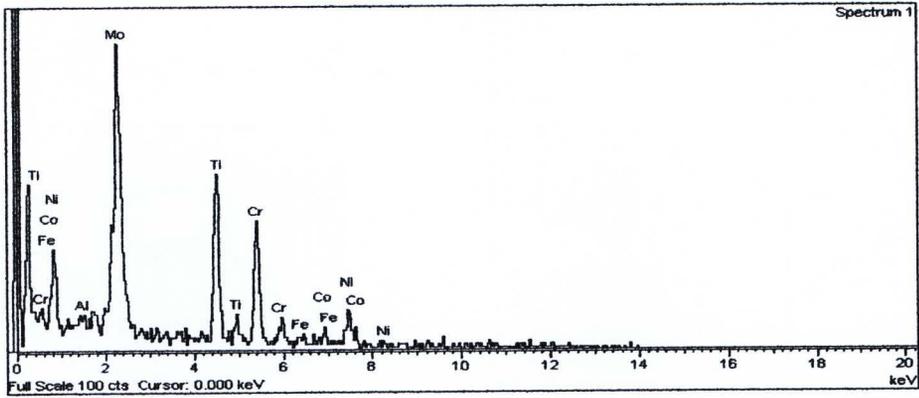
จากรูปแสดงความแข็งแรงพบว่าการเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนจาก 500 ชั่วโมง เป็น 1000 ชั่วโมง และการเพิ่มอุณหภูมิของกรรมวิธีทางความร้อน ไม่ทำให้ความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมอิน

โคเนล 625 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพิ่มสูงขึ้น ส่วนเนื้อเชื่อม อื่นโคเนล 625 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง การเพิ่มเวลา ของกรรมวิธีทางความร้อนจาก 500 ชั่วโมง เป็น 1000 ชั่วโมง ทำให้ความแข็งเพิ่มสูงขึ้น และการ เพิ่มอุณหภูมิของกรรมวิธีทางความร้อนจาก 550°C เป็น 633°C ทำให้ความแข็งเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน การเพิ่มอุณหภูมิมีผลที่ทำให้ความแข็งเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อน ความแข็งของเนื้อเชื่อมหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C จะมีความแข็งมากกว่าที่ อุณหภูมิ 550°C

4.5.9 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด กำลังขยาย 5000 เท่า ของ เนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็น เวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

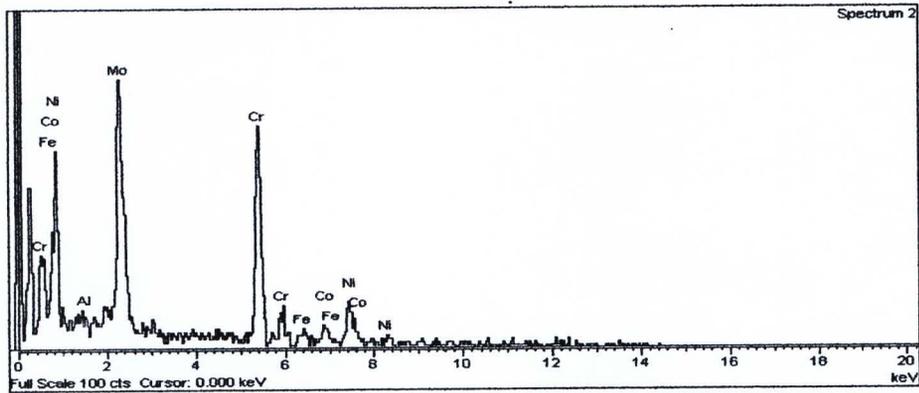


รูปที่ 4.39 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการ เชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



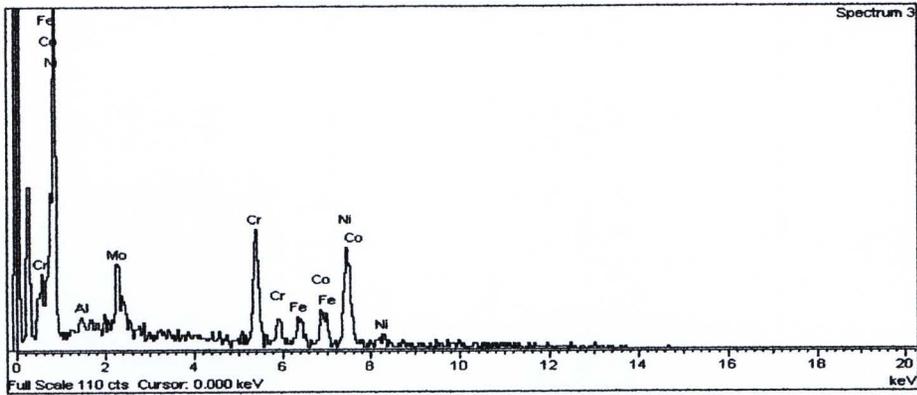
รูปที่ 4.40 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 1 ก่อนตะกอน ในรูปที่ 4.39 ด้วยเทคนิค เอ็ดเอชโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด

รูปที่ 4.40 แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของก้อนตะกอนในเนื้อพื้นตามรูปที่ 4.39 Spectrum ที่ 1 มีปริมาณธาตุโครเมียม ไทเทเนียม โมลิบดีนัม โคบอลต์และเหล็กสูง คาดว่าน่าจะเป็นแกรวมาไพรม ( $\gamma'$ )



รูปที่ 4.41 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 2 ตะกอนตามขอบเกรน ในรูปที่ 4.39 ด้วยเทคนิคเอ็ดเอชโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด

รูปที่ 4.42 แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของตะกอนตามขอบเกรน ตามรูปที่ 4.39 Spectrum ที่ 2 มีปริมาณธาตุโครเมียม โมลิบดีนัม โคบอลต์และเหล็กสูง คาดว่าน่าจะเป็นคาร์ไบด์ ชนิด  $M_{23}C_6$



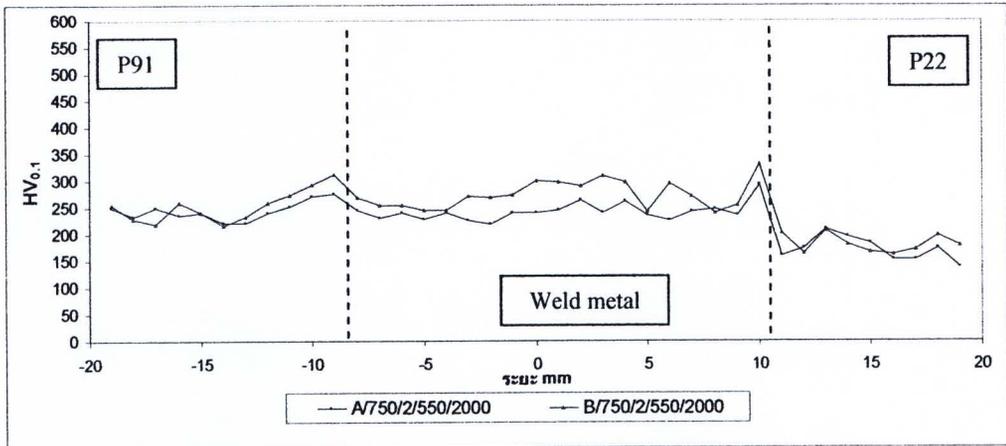
รูปที่ 4.41 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 3 บริเวณเนื้อพื้น ในรูปที่ 4.39 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ตามที่แสดงในรูปที่ 4.40 พบมีตะกอนในเนื้อพื้นและตามขอบเกรน รูปที่ 4.41 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของ Spectrum ที่ 1 ของก้อนตะกอนภายในเนื้อพื้นด้วยเทคนิคอีดีเอส ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตรวจวิเคราะห์ประมาณ 5 ไมโครเมตร คาดว่าน่าจะเป็นแกรมมาไฟรึม  $\gamma'$  [3,4,8,28,29] มีธาตุโครเมียม ไททาเนียม โคบอลต์ โมลิบดีนัมและเหล็กสูง ส่วน Spectrum ที่ 2 จากการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของตะกอนที่เกิดตามขอบเกรน ด้วยเทคนิคอีดีเอส ได้ผลดังรูปที่ 4.42 คาดว่าน่าจะเป็นคาร์ไบด์  $M_{23}C_6$  [3,4,8,28,29] มีปริมาณธาตุโครเมียม โคบอลต์และโมลิบดีนัมสูง ส่วนผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อพื้นแสดงใน Spectrum ที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.43

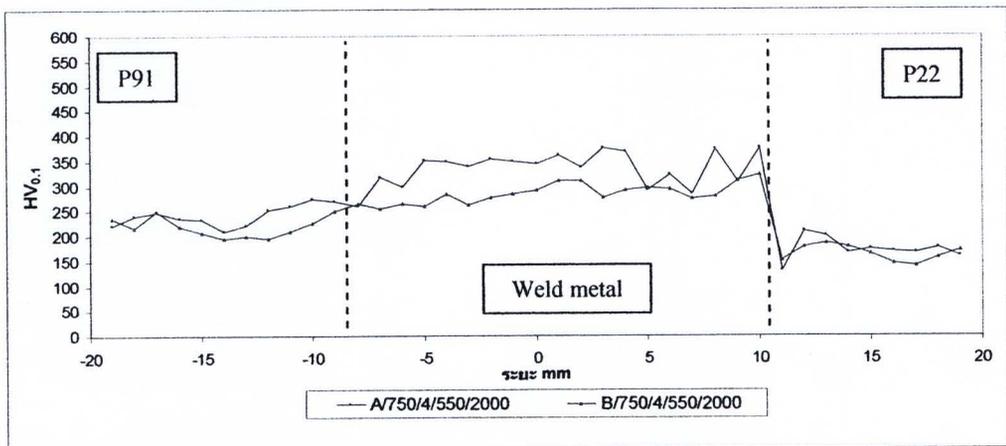
จากภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ตามที่แสดงในรูปที่ 4.39 ก้อนตะกอนคาดว่าน่าจะเป็นแกรมมาไฟรึม ( $\gamma'$ ) มีปริมาณธาตุโครเมียม ไททาเนียม โคบอลต์ โมลิบดีนัมและเหล็กสูง จากการศึกษาของ Elisabetta Gariboldi และคณะ [8] นำอินโคเนล 617 ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 700 และ 800°C พบการตกตะกอนของแกรมมาไฟรึม ( $\gamma'$ ) ซึ่งปริมาณธาตุไททาเนียมสูง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองนี้ที่พบตะกอนที่ประกอบด้วยธาตุไททาเนียม ตะกอนที่เกิดขึ้นมีผลทำให้ความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น



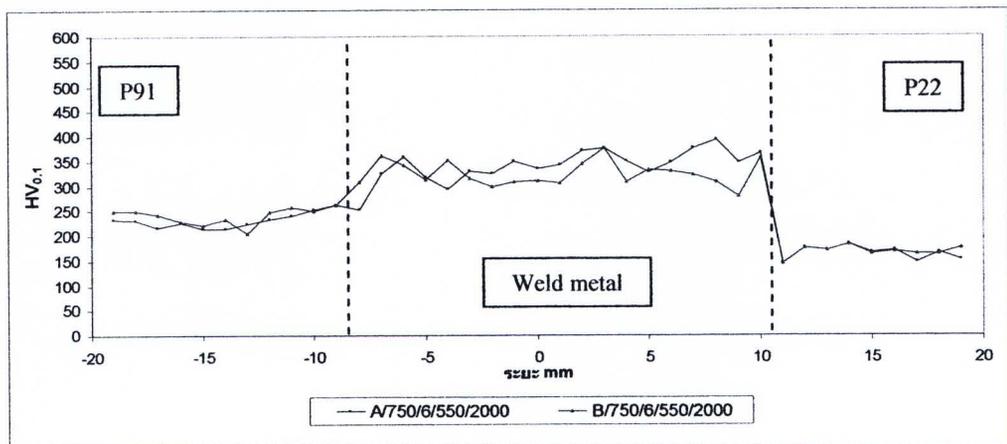
4.6 ความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

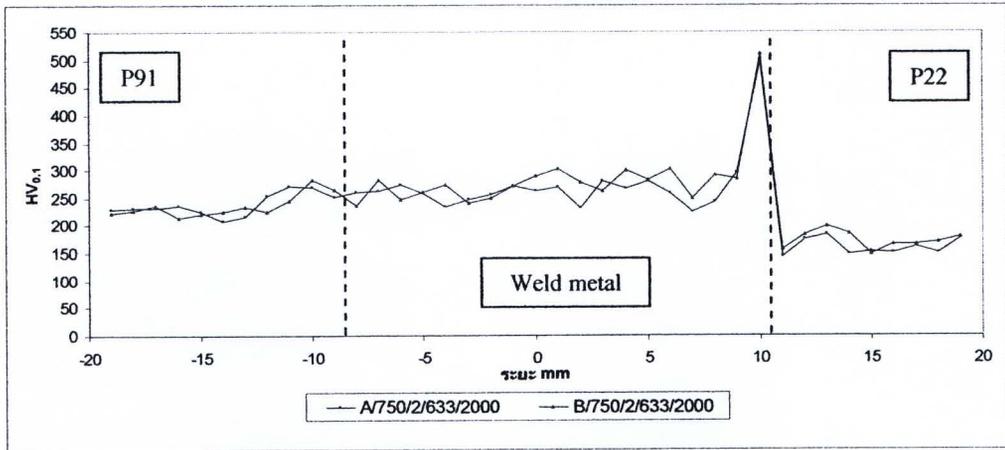


ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

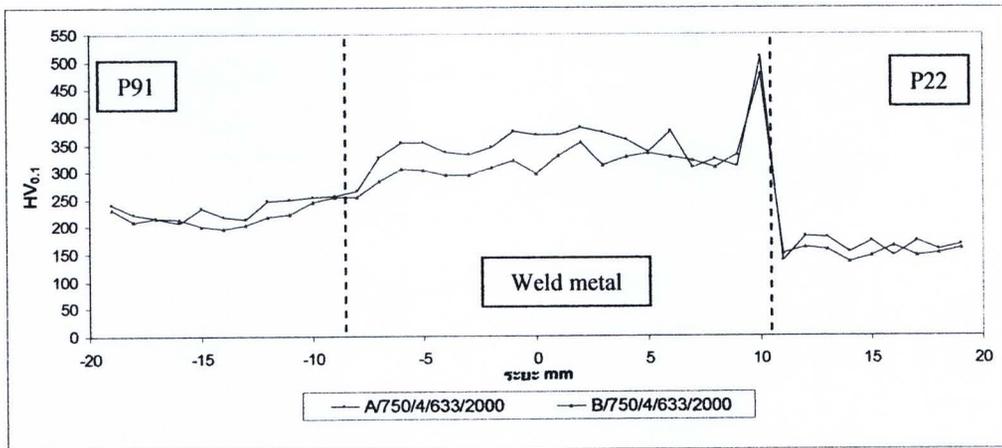


ค) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

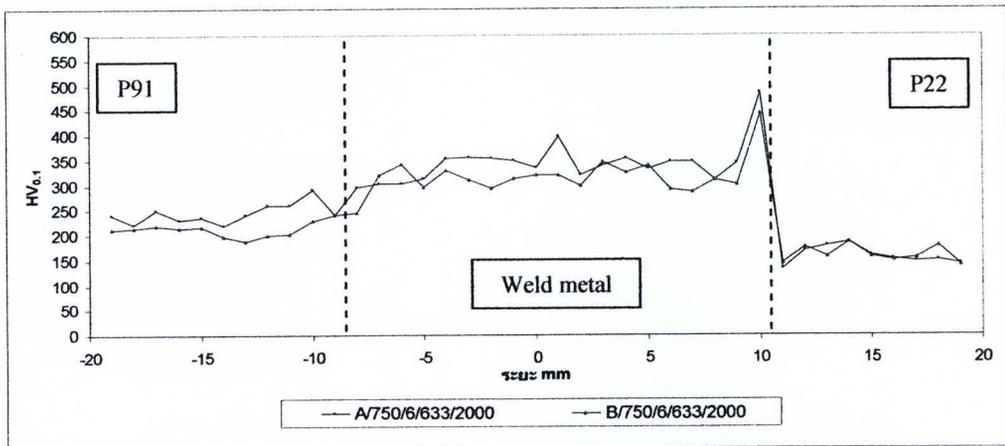
รูปที่ 4.43 เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง



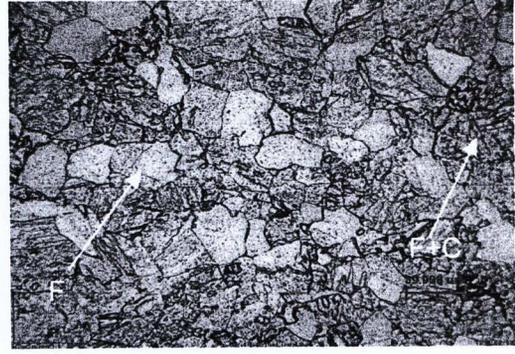
ค) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

รูปที่ 4.44 แสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

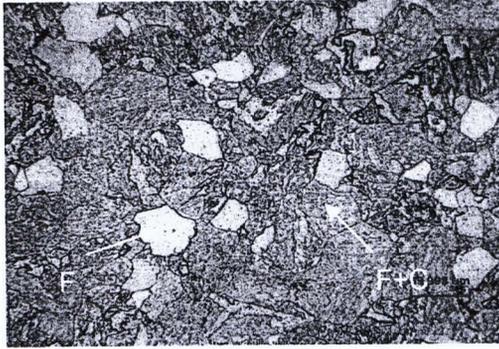
4.6.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง



A/750/2/550/2000



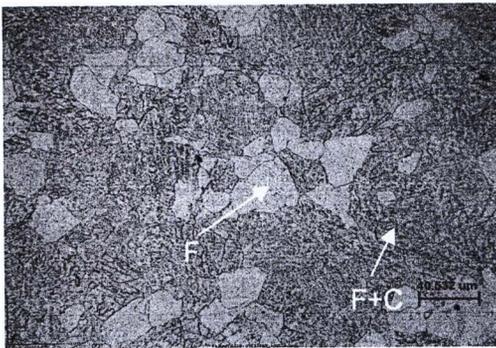
A/750/2/633/2000



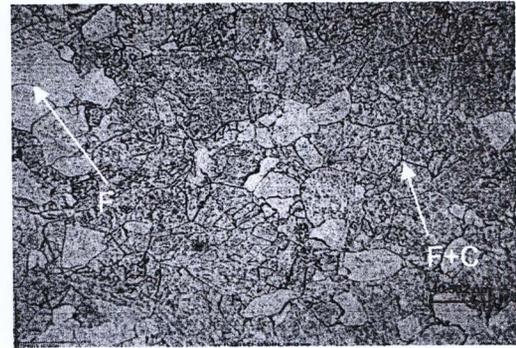
A/750/4/550/2000



A/750/4/633/2000



A/750/6/550/2000



A/750/6/633/2000

รูปที่ 4.45 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

รูปที่ 4.45 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กกล้า P22 (บริเวณโลหะพื้นหลังของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C (รูปที่ 4.23 A/750/2/550/1000, A/750/4/550/1000 และ A/750/6/550/1000) และ 633°C (รูปที่ 4.23 A/750/2/633/1000, A/750/4/633/1000 และ A/750/6/633/1000) เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคไม่แตกต่างกัน ลักษณะเหมือนกับหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 500 และ 1000 ชั่วโมง เกรนมีขนาดใกล้เคียงกัน โครงสร้างจุลภาค คือ เฟอไรต์และเฟอไรต์ที่มีตะกอนคาร์ไบด์ ซึ่งคาดว่าจะจะเป็นชนิด  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$  [11,12,19,20]

รูปที่ 4.43 แสดงค่าความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 137-176  $HV_{0.1}$  ส่วนแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่าระหว่าง 140-197  $HV_{0.1}$

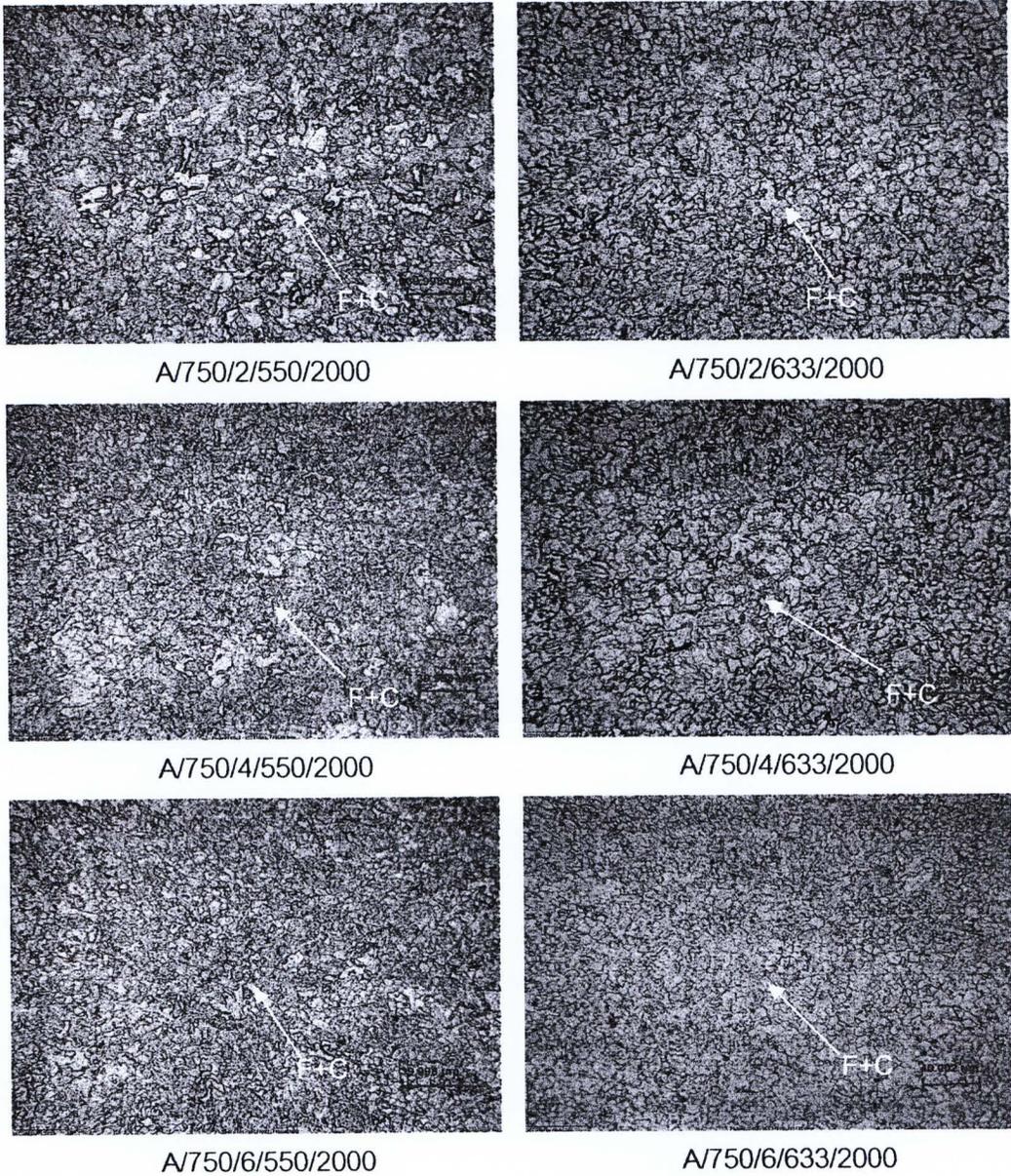
รูปที่ 4.44 แสดงค่าความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง มีค่า 143-175  $HV_{0.1}$  ส่วนแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 138-178  $HV_{0.1}$

ความแข็งของบริเวณโลหะพื้นของเหล็กกล้า P22 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมและผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง พบว่า ค่าความแข็งใกล้เคียงกับบริเวณโลหะพื้นหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 และ 1000 ชั่วโมง เนื่องจากโครงสร้างจุลภาค คือ เฟอไรต์และเฟอไรต์ที่มีตะกอนคาร์ไบด์เหมือนกัน [23,24]

4.6.2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

รูปที่ 4.46 แสดงโครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง พบว่าบริเวณกระทันหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

ขนาดเกรนของบริเวณกระทบบร้อนมีขนาดเกรนโตกว่าบริเวณกระทบบร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 และ 1000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบบร้อน คือ เฟอไรต์และตะกอนคาร์ไบด์ ซึ่งคาดว่าจะน่าจะเป็นชนิด  $M_7C_3$  และ  $M_{23}C_6$  [11,12,19,20]



รูปที่ 4.46 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบบร้อนเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

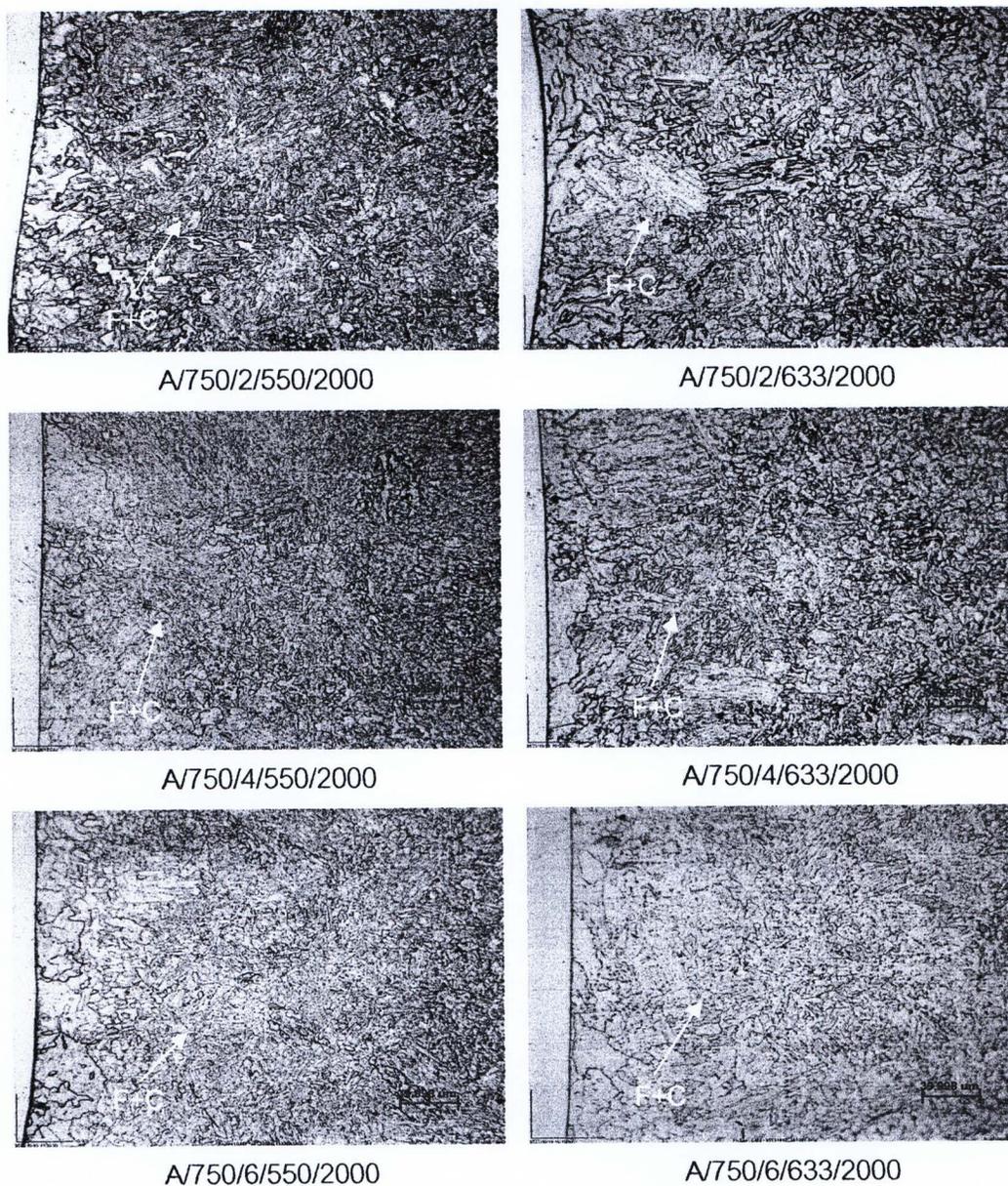
รูปที่ 4.43 และ 4.44 แสดงความแข็งของบริเวณกระทะร้อนของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$  มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 166-210  $\text{HV}_{0.1}$  และ 164-207  $\text{HV}_{0.1}$  ตามลำดับ ส่วนชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังเชื่อมเช่นเดียวกันแต่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ  $633^{\circ}\text{C}$  มีค่าอยู่ระหว่าง 148-177  $\text{HV}_{0.1}$  และ 134-198  $\text{HV}_{0.1}$  ตามลำดับ

4.6.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ  $750^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ  $633^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

รูปที่ 4.47 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ  $750^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ  $633^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง ไม่พบความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาค ส่วนโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อ คือ เฟอไรต์และตะกอนคาร์ไบด์ [11,12,19,20]

รูปที่ 4.43 แสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 บริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$  มีค่า 158, 129 และ 145  $\text{HV}_{0.1}$  ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 201, 152 และ 143  $\text{HV}_{0.1}$  ตามลำดับ

รูปที่ 4.44 แสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 บริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ  $633^{\circ}\text{C}$  มีค่า 144, 136 และ 132  $\text{HV}_{0.1}$  ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 156, 150 และ 145  $\text{HV}_{0.1}$  ตามลำดับ



รูปที่ 4.47 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 2000 ชั่วโมง ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะมีความแข็งต่ำกว่าบริเวณรอยต่อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง สาเหตุมาจากขนาดเกรนที่โตกว่า ความแข็งของบริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนจนถึง 2000 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกับบริเวณรอยต่อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 และ 1000 ชั่วโมง เนื่องจากว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเหมือนกัน คือ เฟอไรต์และตะกอนคาร์ไบด์

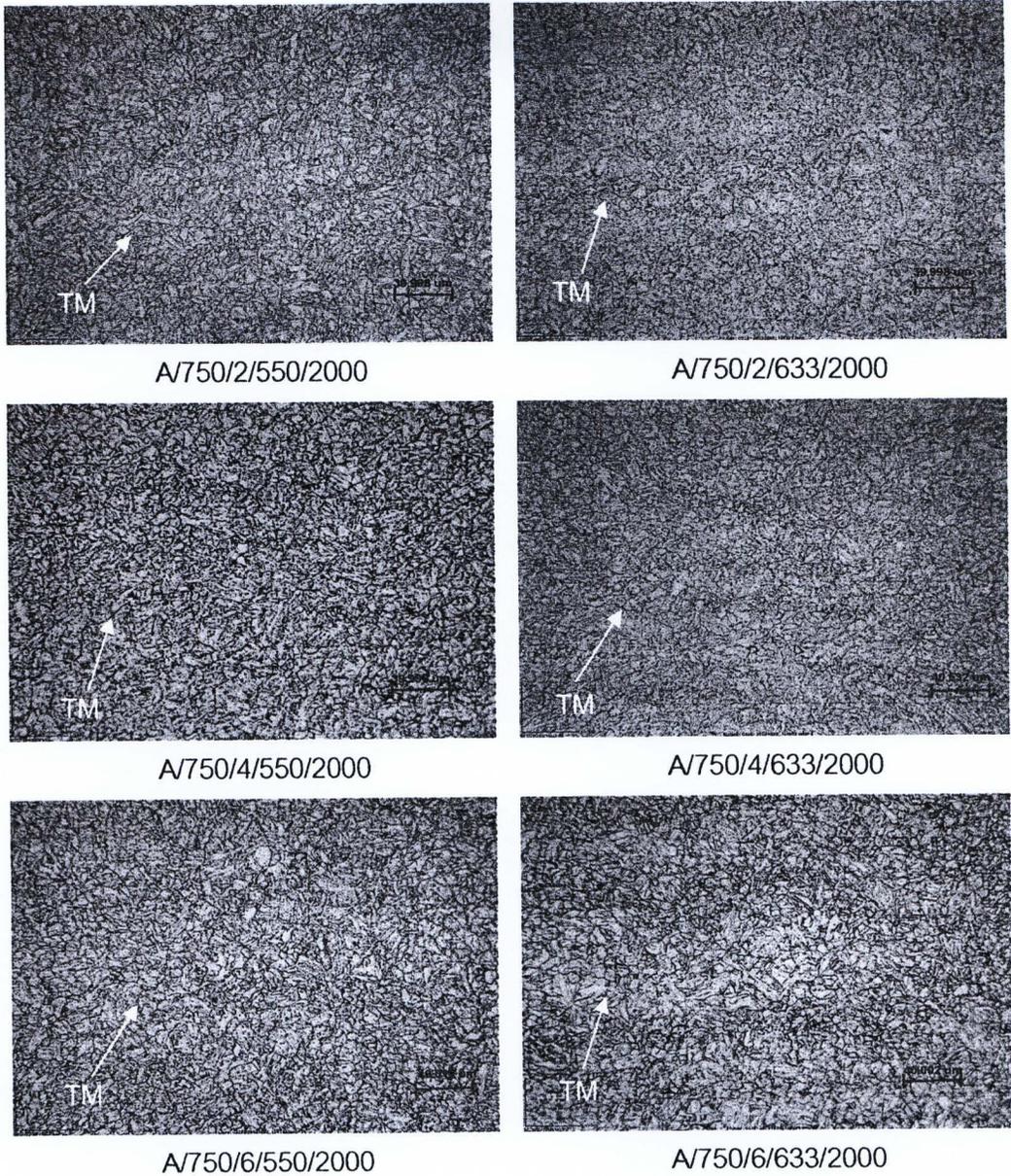
รูปที่ 4.43 แสดงความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C มีค่า 293, 374 และ 365 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนอินโคเนล 617 มีค่า 331, 322 และ 355 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

รูปที่ 4.44 แสดงความแข็งของบริเวณรอยต่ออินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C มีค่า 499, 507 และ 485 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนอินโคเนล 617 คือ 510, 467 และ 443 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

4.6.4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

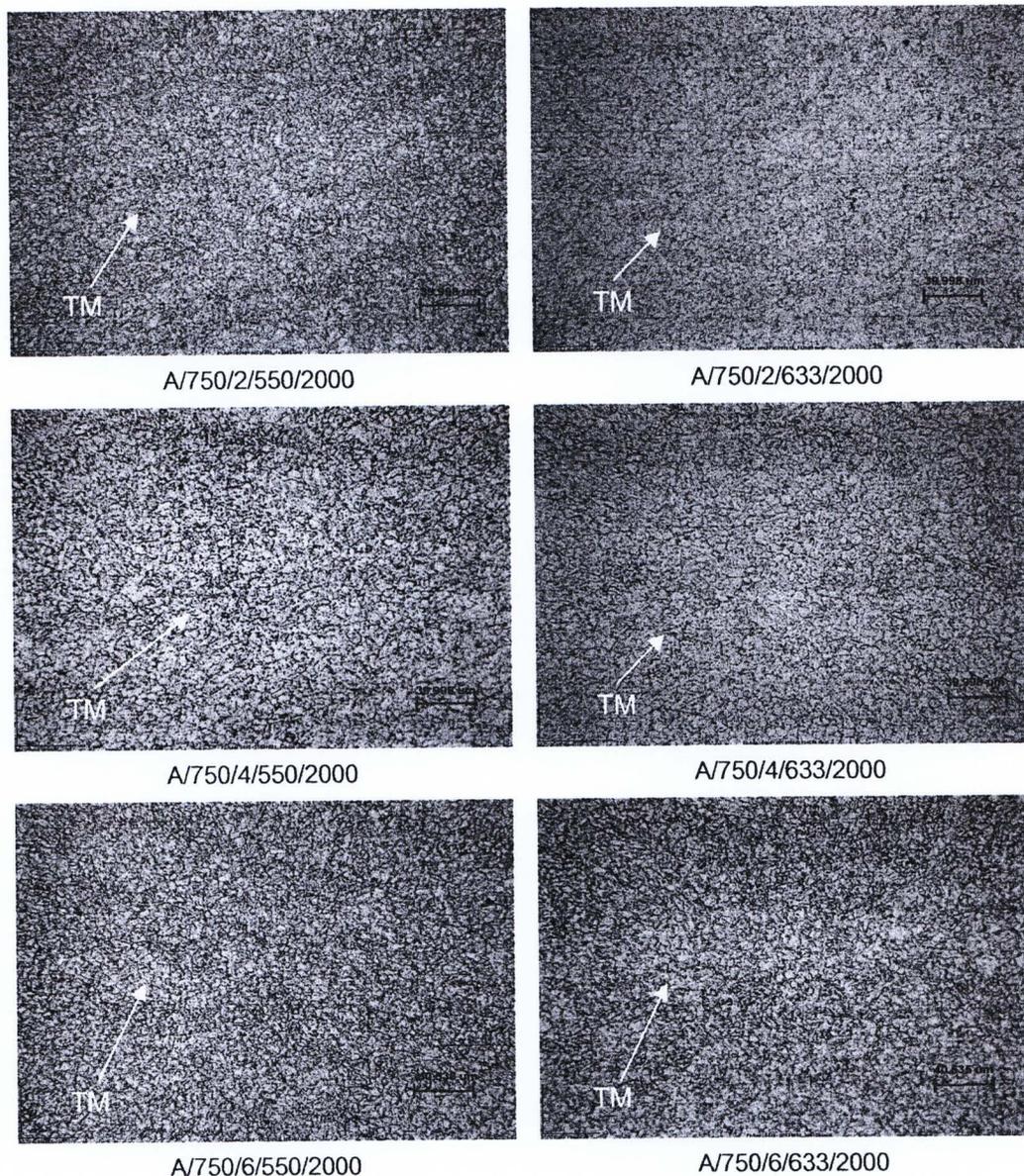
รูปที่ 4.48 แสดงโครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมอินโคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคยังคงเป็น เเทมเปอร์ มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์ [21-26] พบว่าเกรนมีการขยายขนาดขึ้นเมื่อเทียบกับหลังเชื่อมและหลังกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม แต่ขนาดเกรนใกล้เคียงกับชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

รูปที่ 4.43 และ 4.44 แสดงความแข็งของบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 195-250 HV<sub>0.1</sub> เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 เหมือนกันจึงทำความแข็งจึงมีค่าใกล้เคียงกัน การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C ไม่ทำให้ความแข็งบริเวณโลหะพื้นมีค่าที่แตกต่างจากกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 และ 1000 ชั่วโมง



รูปที่ 4.48 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

4.6.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระตบร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 และความแข็งบริเวณรกระตบร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง



รูปที่ 4.49 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระตบร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

รูปที่ 4.49 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคคือ เคมเปอร์ มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์ ขนาดเกรนของบริเวณกระทันของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 633°C โตกว่าที่ 550°C เล็กน้อย

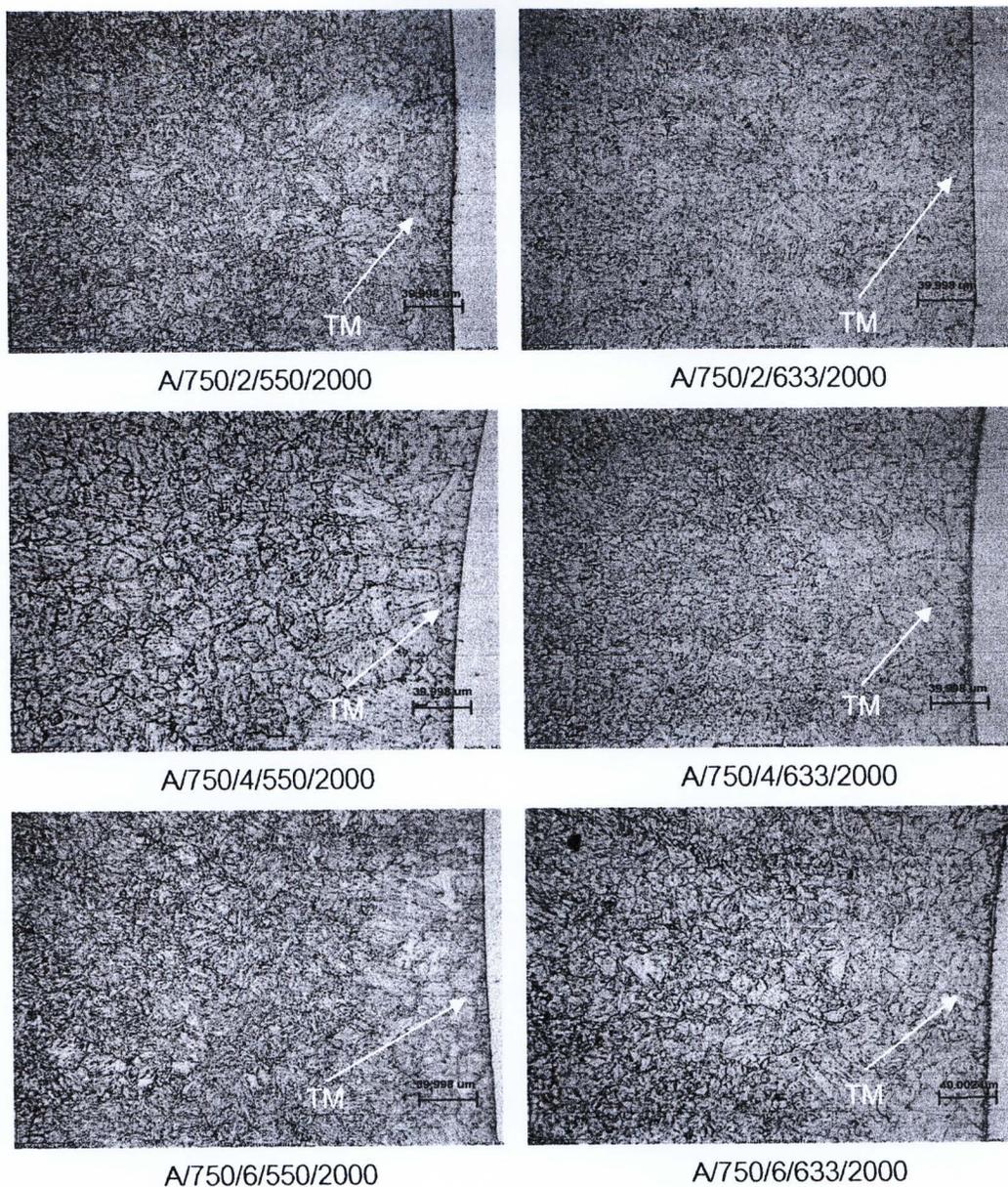
รูปที่ 4.43 แสดงความแข็งบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง มีค่าอยู่ระหว่าง 221-272 HV<sub>0.1</sub> และ 234-292 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

รูปที่ 4.44 แสดงความแข็งบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633 °C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง มีค่าอยู่ระหว่าง 214-291 HV<sub>0.1</sub> และ 200-283 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

พบว่าความแข็งบริเวณกระทันหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง ความแข็งใกล้เคียงกันและลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณกระทันที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ซึ่งความแข็งที่ลดลงสาเหตุน่าจะเกิดจากตะกอนคาร์ไบด์เกิดการขยายขนาดส่งผลให้ความแข็งบริเวณกระทันลดลง [21]

4.6.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

รูปที่ 4.51 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง มีลักษณะไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 และ 1000 ชั่วโมง ขนาดเกรนของรอยต่อโตกว่าบริเวณโลหะพื้นและบริเวณกระทัน ส่วนโครงสร้างจุลภาคคือ เคมเปอร์ มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์



รูปที่ 4.50 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.43 แสดงความแข็งของบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C มีค่า 276, 269 และ 263 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 311, 251 และ 262 HV<sub>0.1</sub>ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.44 แสดงความแข็งของบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา

2, 4 และ 6 และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C มีค่า 251, 255 และ 241 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 265 254 และ 241 HV<sub>0.1</sub>ตามลำดับ

พบว่าความแข็งบริเวณรอยต่อของเหล็กกล้า P91 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะมีความแข็งสูงกว่าบริเวณรอยต่อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C จนถึง 2000 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 มีค่าใกล้เคียงกับความแข็งหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง คาดว่าสาเหตุที่ความแข็งของบริเวณรอยต่อไม่เพิ่มสูงขึ้นมากเนื่องคาร์ไบด์ที่ตกตะกอนอยู่มีการขยายขนาดขึ้น [21]

ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดกับเหล็กกล้า P91 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 244, 259 และ 254 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 270, 264 และ 307 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดกับเหล็กกล้าที่ P91 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง มีค่า 259, 266 และ 295 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนความแข็งบริเวณรอยต่อเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 236, 254 และ 245 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

ความแข็งบริเวณรอยต่อของอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็น 2000 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกับบริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

รูปที่ 4.43 ก) ความแข็งของบริเวณเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 227-265 HV<sub>0.1</sub> และ 244-309 HV<sub>0.1</sub>

รูปที่ 4.43 ข)-ค) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 284-392 HV<sub>0.1</sub> ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่าอยู่ระหว่าง 254-374 HV<sub>0.1</sub>

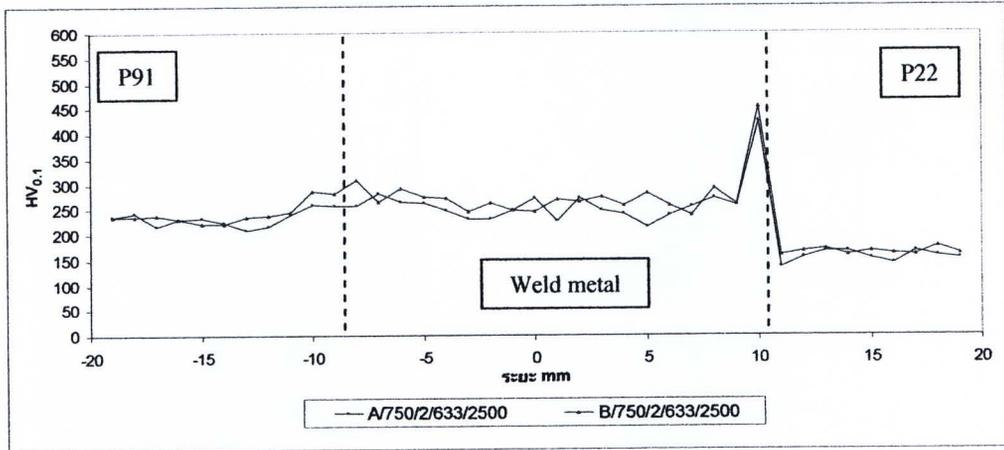
รูปที่ 4.44 ก) ความแข็งของบริเวณเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 224-295 HV<sub>0.1</sub> ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่าระหว่าง 241-303 HV<sub>0.1</sub>

รูปที่ 4.44 ข)-ค) แสดงความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 304-397 HV<sub>0.1</sub> ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่าระหว่าง 283-333 HV<sub>0.1</sub>

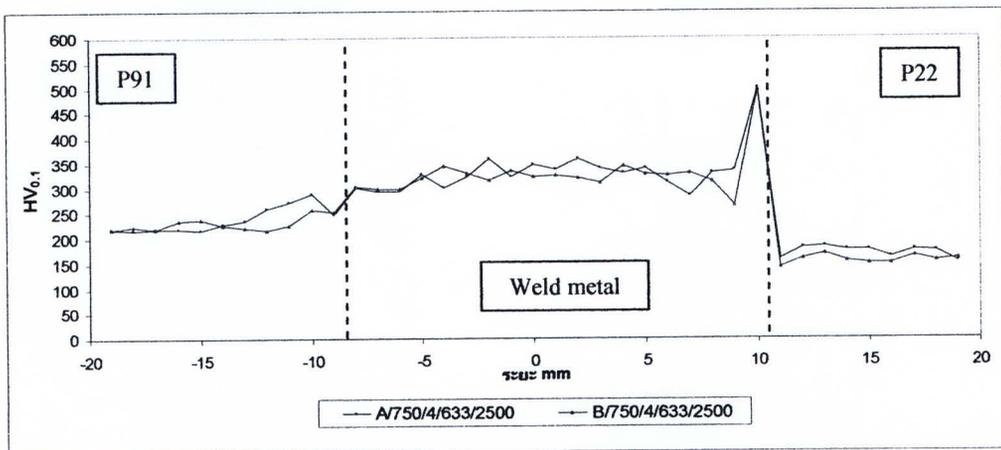
พบว่าความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนจนถึง 2000 ชั่วโมง ความแข็งมีค่าใกล้เคียงกันกับเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 และ 1000 ชั่วโมง คาดว่าน่าจะเป็นผลของตะกอนซึ่งส่วนใหญ่คาดว่าจะเป็นการไพบีต์  $M_{23}C_6$  [7] ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อเชื่อมเองทำให้ความแข็งจึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนจนถึง 2000 ชั่วโมง พบว่าความแข็งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 และ 1000 ชั่วโมง คาดว่าความแข็งที่เพิ่มสูงน่าจะเป็นผลของตะกอน (แกมมาดอบเบิลไพร์มหรือเดลต้าในอินโคเนล 625 และแกมมาไพร์มในอินโคเนล 617) ที่มีปริมาณมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อน ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิของกรรมวิธีทางความร้อนความแข็งของเนื้อเชื่อมมีค่าใกล้เคียงกัน

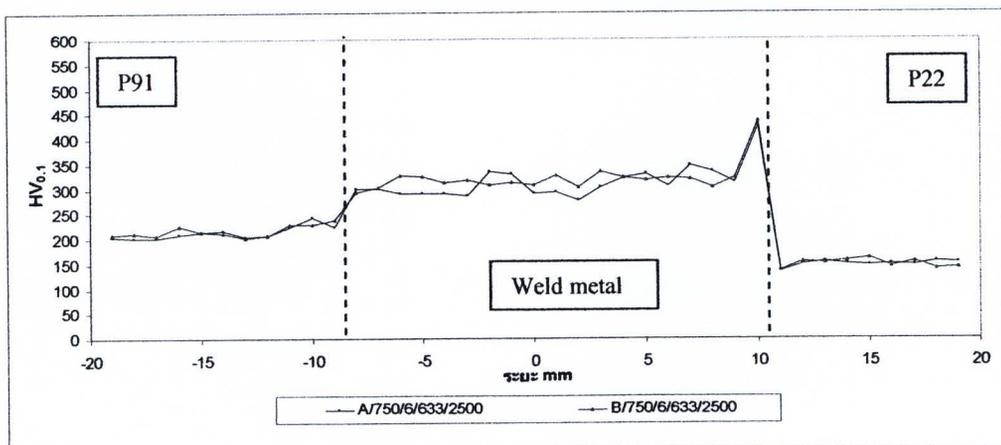
4.7 ความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง



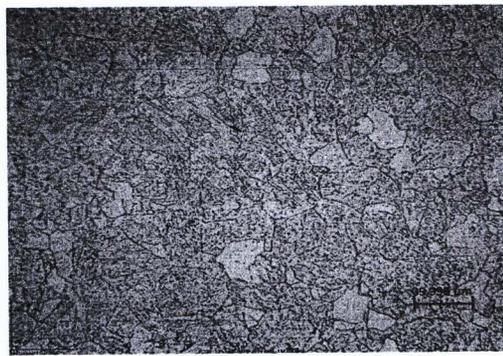
ค) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

รูปที่ 4.51 ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง

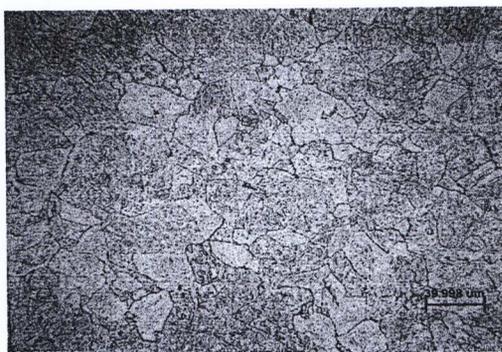
4.7.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง



A/750/2/633/2500



A/750/4/633/2500



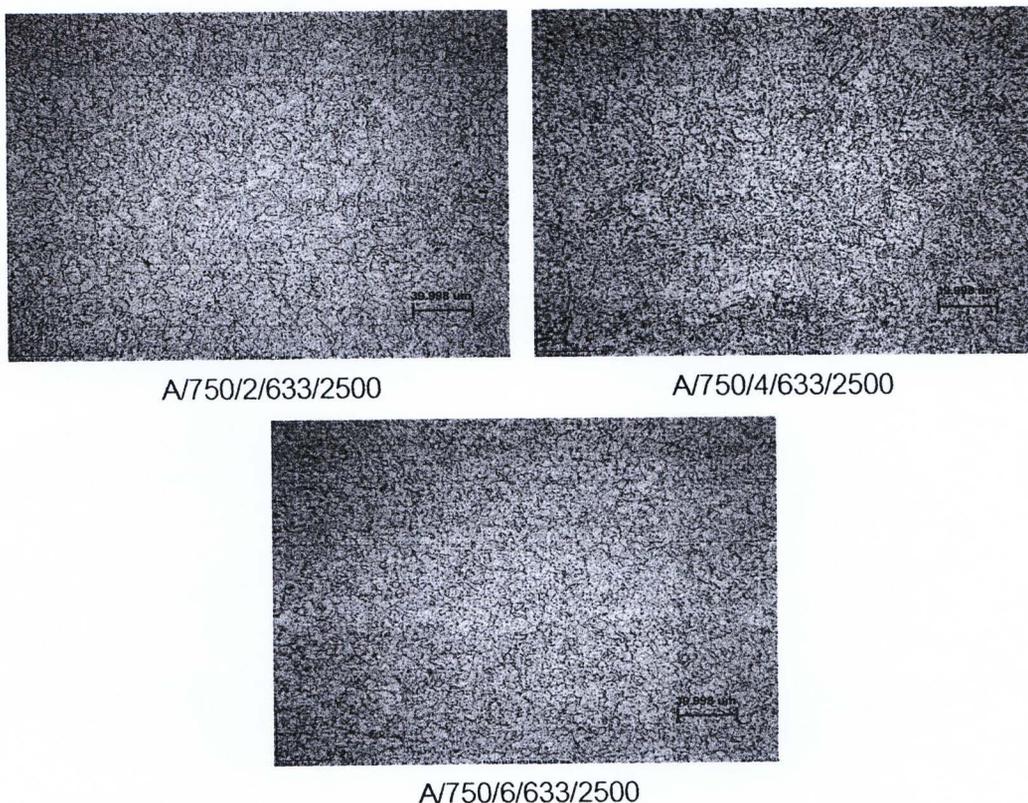
A/750/6/633/2500

รูปที่ 4.52 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง

รูปที่ 4.52 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 บริเวณโลหะพื้นหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง พบว่าโครงสร้างจุลภาคยังคงมีลักษณะเหมือนกับก่อนเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500, 1000 และ 2000 ชั่วโมง คือ เฟอไรต์และเฟอไรต์ที่มีตะกอนคาร์ไบด์ ซึ่งว่าน่าจะเป็นชนิด  $M_7C_3$  และ  $M_{23}C_6$  [11,12,19,20]

รูปที่ 4.51 แสดงความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 615 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 140-176 HV<sub>0.1</sub> เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคคือ เฟอไรต์และเฟอไรต์ที่มีตะกอนคาร์ไบด์เหมือนกัน

4.7.2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง

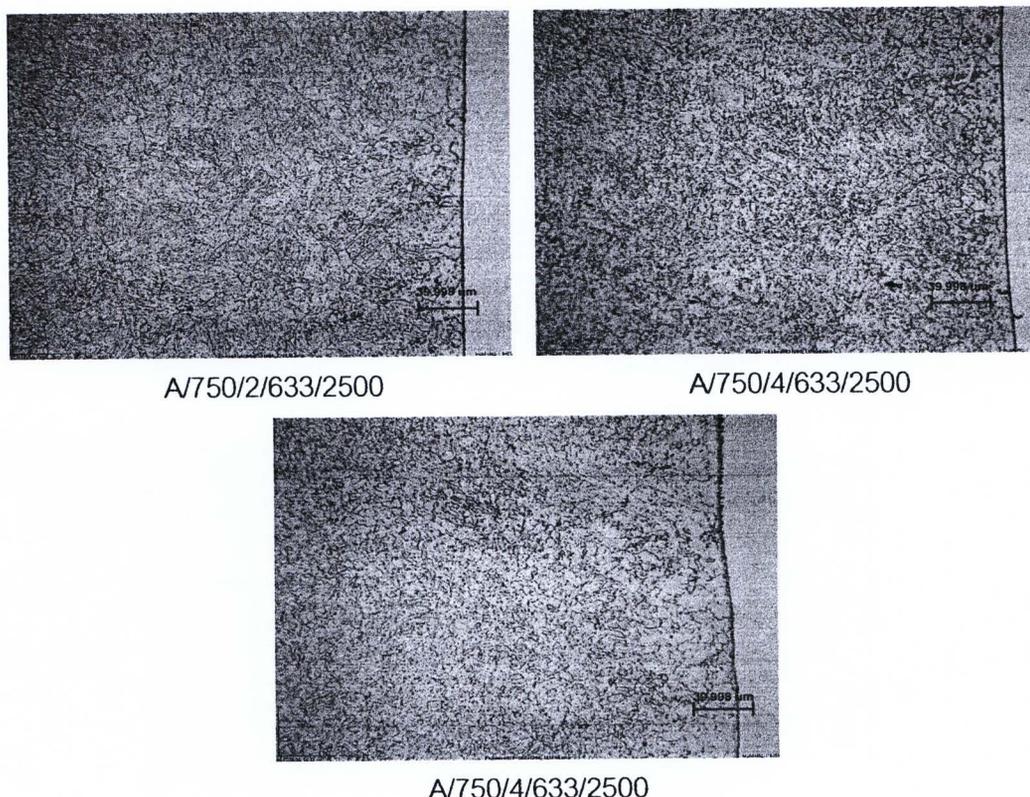


รูปที่ 4.53 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง

รูปที่ 4.53 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง พบว่าขนาดเกรนบริเวณกระทันมีการขยายขนาดโตขึ้น โครงสร้างจุลภาคของคือ เฟอไรต์และตะกอนคาร์ไบด์ คาดว่าน่าจะเป็นชนิด  $M_7C_3$  และ  $M_{23}C_6$  [11,12,19,20]

รูปที่ 4.51 แสดงความแข็งบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าระหว่าง 148-182  $HV_{0.1}$  แต่จะมีค่าต่ำลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633 เป็นเวลา 500, 1000 และ 2000 ชั่วโมง เนื่องจากขนาดเกรนที่โตกว่า

4.6.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง



รูปที่ 4.54 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง

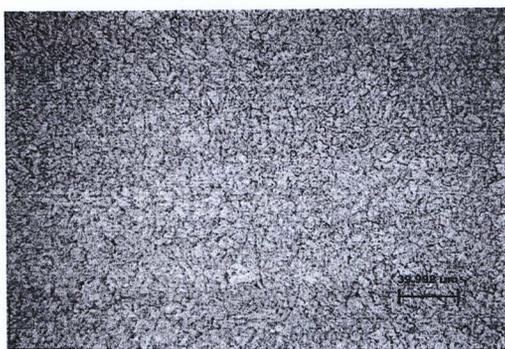
รูปที่ 4.54 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ที่เชื่อมอินโคเนล 625 โครงสร้างจุลภาคยังคงเป็น เฟอไรต์และตะกอนคาร์ไบด์ ไม่พบลักษณะเกรนที่มีลักษณะยาวและแหลม เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500, 1000 และ 2000 ชั่วโมง คาดว่าเนื่องจากเหล็กกล้า P22 พยายามปรับตัวเพื่อกลับสู่สภาวะเดิมก่อนการเชื่อม

รูปที่ 4.51 ความแข็งของบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง มีค่า 134, 160 และ 135 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

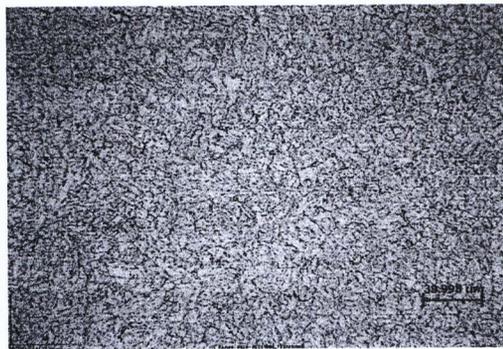
ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 159, 141 และ 138  $HV_{0.1}$  ตามลำดับ พบว่ามีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็น 500, 1000 และ 2000 ชั่วโมง

รูปที่ 4.51 ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดกับเหล็กกล้า P22 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง มีค่า 423, 498 และ 426  $HV_{0.1}$  ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 453, 497 และ 437  $HV_{0.1}$  ตามลำดับ พบว่ามีใกล้เคียงกับบริเวณรอยต่อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 2000 ชั่วโมง เนื่องจากการเพิ่มเวลาอีก 500 ชั่วโมง เป็น 2500 ชั่วโมง ตะกอนอาจจะไม่เพิ่มปริมาณขึ้นมากนักจึงยังทำให้ความแข็งใกล้เคียงกัน

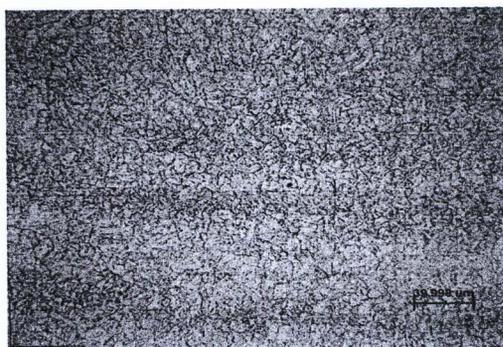
4.7.4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง



A/750/2/633/2500



A/750/4/633/2500



A/750/6/633/2500

รูปที่ 4.55 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง

รูปที่ 4.55 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง พบว่าขนาดเกรนมีแนวโน้มขยายขนาดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณโลหะพื้นหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500, 1000 และ 2000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคยังคงเป็น เเทมเปอร์มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์ [21-26]

รูปที่ 4.51 แสดงความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 203-244 HV<sub>0.1</sub> และ 207-237 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

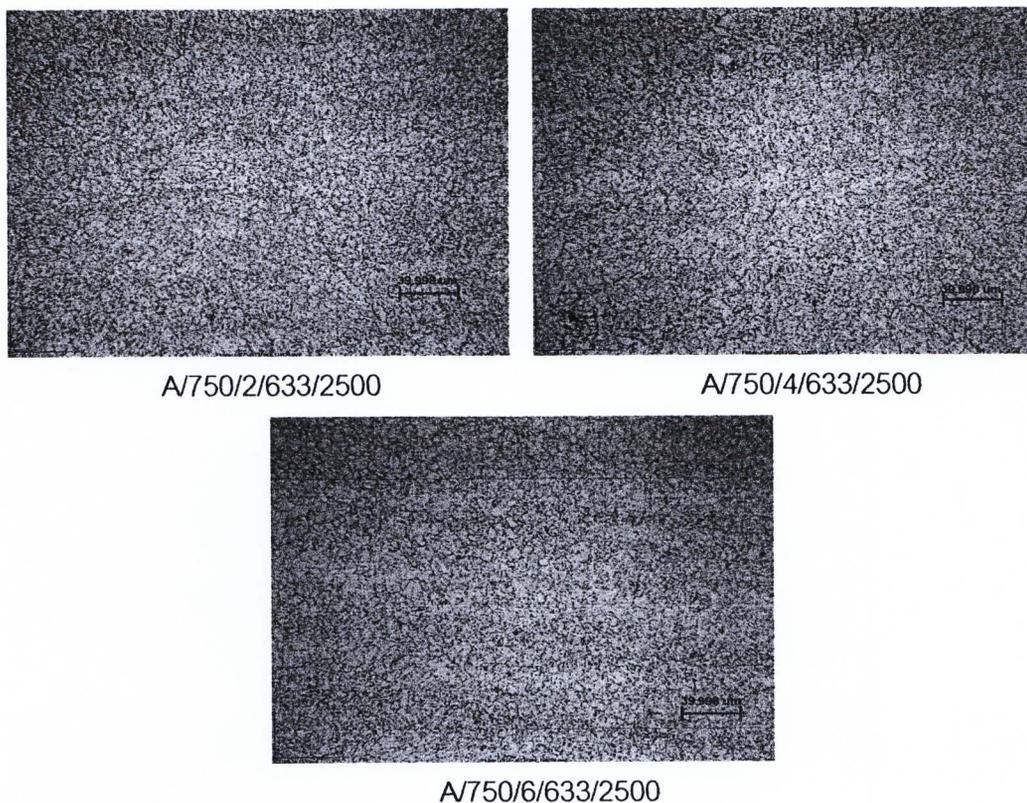
กรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500, 1000 และ 2000 ชั่วโมง ความแข็งมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเพิ่มเวลาจนถึง 2500 ชั่วโมง ความแข็งมีค่าลดลงเล็กน้อยเนื่องจากเกรนมีการขยายขนาดโตขึ้น

4.6.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง

รูปที่ 4.56 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 พบว่าเกรนมีแนวโน้มขยายขนาดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500, 1000 และ 2000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคคือ เเทมเปอร์มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์

รูปที่ 4.51 แสดงความแข็งบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง คือ 209-288 HV<sub>0.1</sub> และ 202-257 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

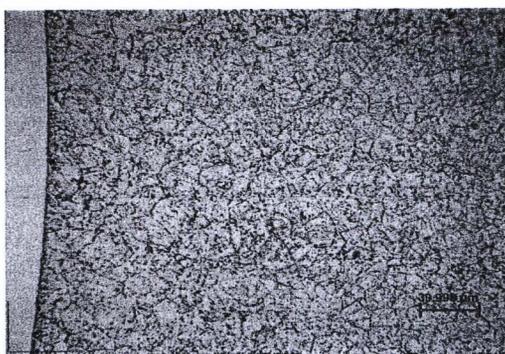
พบว่าความแข็งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณกระทันหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500, 1000 และ 2000 ชั่วโมง คาดว่าเนื่องจากขนาดเกรนขยายขนาดขึ้นทำให้ความแข็งลดลง



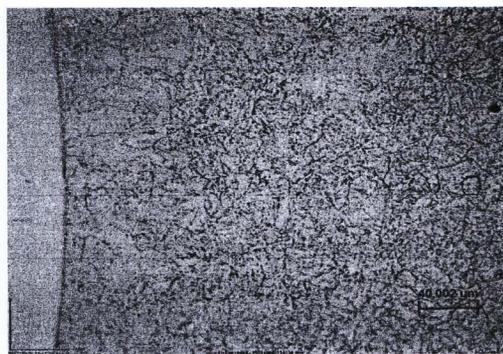
รูปที่ 4.56 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระแทกร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง

4.7.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และความแข็งบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง

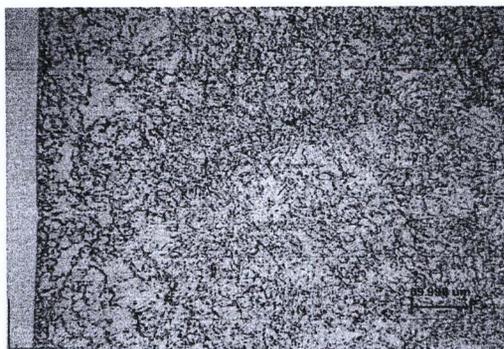
รูปที่ 4.57 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเหมือนกับหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500 ,1000 และ 2000 ชั่วโมง คือ เทมเปอ์ มาร์เทนไซต์ และตะกอนคาร์ไบด์ [21-26]



A/750/2/633/2500



A/750/4/633/2500



A/750/6/633/2500

รูปที่ 4.57 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง

รูปที่ 4.51 แสดงความแข็งบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง คือ 258, 247 และ 225 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 คือ 281, 254 และ 239 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

พบว่า การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนทำให้ความแข็งมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500, 1000 และ 2000 ชั่วโมง คาดว่าเนื่องจากคาร์ไบด์ที่ตกตะกอนเกิดการรวมตัวขยายขนาดเพิ่มขึ้น

ความแข็งของบริเวณรอยต่อเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดกับเหล็กกล้า P91 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อคือ 258, 301 และ 302 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ ส่วนบริเวณรอยต่อของอินโคเนล 617 คือ 308, 303 และ 294 HV<sub>0.1</sub> ตามลำดับ

พบว่าบริเวณรอยต่อของอินโคเนล 625 และ 617 ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ  $633^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 500, 1000 และ 2000 ชั่วโมง คาดว่าเนื่องมาจากตะกอน (แกมมาคอบเบิลไพร์มหรือเดลต้าใน 625 และแกมมาไพร์มใน 617) มีปริมาณมากขึ้น และบริเวณรอยต่อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งต่ำกว่าหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง คาดว่าเนื่องมาจากมีเพียงตะกอนคาร์ไบด์ชนิด MC และ  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  เท่านั้น

ความแข็งของบริเวณเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ  $633^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง คือ 214-281  $\text{HV}_{0.1}$ , ส่วนอินโคเนล 617 คือ 237-291  $\text{HV}_{0.1}$  ตามลำดับ

ความแข็งของบริเวณเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ  $633^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 278-358  $\text{HV}_{0.1}$ , ส่วนอินโคเนล 617 มีค่าระหว่าง 265-345  $\text{HV}_{0.1}$  ตามลำดับ

พบว่าเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนให้กับเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งไม่เพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนให้กับเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง จนถึง 2500 ชั่วโมง ความแข็งลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500, 1000 และ 2000 ชั่วโมง คาดว่าเนื่องมาจากตะกอนแกมมาคอบเบิลไพร์มหรือเดลต้าในอินโคเนล 625 และแกมมาไพร์มในอินโคเนล 617 ที่เกิดขึ้นอาจรวมตัวมีขนาดใหญ่ขึ้น

#### 4.8 บทสรุปภาพรวมผลการทดลอง

จากผลการวัดค่าความแข็งดังรูปที่ 4.3 และภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคดังรูป 4.5 ก) และ 4.8 ก) ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 พบว่า บริเวณโลหะพื้นหลังเชื่อมของเหล็กกล้า P22 โครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอไรต์และเฟอไรต์ที่ตะกอนคาร์ไบด์ คาดน่าจะเป็นชนิด  $M_7C_3$  ส่วนโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า P91 คือ เคมเปอร์มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์ คาดน่าจะเป็นชนิด  $M_{23}C_6$  ค่าความแข็งของเหล็กกล้า P22 และ P91 แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้า P22 และ P91 บริเวณโลหะพื้น กระทบร้อนและรอยต่อหลังเชื่อม

เหล็กกล้า	ค่าความแข็ง HV <sub>0.1</sub>		
	โลหะพื้น	กระทบร้อน	รอยต่อ
P91	213-281	308-466	363
P22	178-225	228-333	290

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังเชื่อม

ลวดเชื่อม	ค่าความแข็ง HV <sub>0.1</sub>
	เนื้อเชื่อม
625	217-308
617	261-306

โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนและรอยต่อของเหล็กกล้า P22 คือ เบนไนต์ ส่วนบริเวณกระทบร้อนและรอยต่อของเหล็กกล้า P91 คือ มาร์เทนไซต์ จะเห็นว่าความแข็งของบริเวณกระทบร้อนและรอยต่อของเหล็กกล้า P91 สูงเกิน 350 HV เมื่อนำไปใช้งานจะทำให้เกิดการแตกร้าวได้ จึงต้องผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเพื่อปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคและทำให้ความแข็งลดลงซึ่งจะกล่าวต่อไป ส่วนความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 ค่าความแข็งเนื้อเชื่อมแสดงในตารางที่ 4.3

หลังเชื่อมพบว่าความแข็งของบริเวณกระทบร้อนและรอยต่อของเหล็กกล้า P91 มีค่าสูงเกิน 350 HV จึงต้องผ่านกรรมวิธีทางความร้อนซึ่งจะใช้อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง เพื่อลดความแข็งของบริเวณกระทบร้อนและเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคที่เป็นมาร์เทนไซต์ที่ความแข็ง

เปาะซึ่งเสี่ยงในการแตกร้าวให้เหมาะสมต่อการใช้งาน หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนเป็นเทมเปอร์ มาร์เทนไซต์ (รูปที่ 4.9 ข-ง) ส่วนค่าความแข็งของเหล็กกล้า P91 และ P22 แสดงในตารางที่ 4.4 ส่วนความแข็งของเนื้อเชื่อมแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความแข็งแสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้า P22 และ P91 บริเวณโลหะพื้น กระบร้อนและรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางร้อนหลังการเชื่อม

เหล็กกล้า	PWHT	ค่าความแข็ง HV <sub>0.1</sub>		
		โลหะพื้น	กระบร้อน	รอยต่อ
P91	2	202-257	230-310	299
	4	204-248	224-290	272
	6	219-240	206-280	252
P22	2	148-181	174-223	191
	4	164-189	172-210	176
	6	154-184	144-199	141

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม

ลวดเชื่อม	PWHT	ค่าความแข็ง HV
		เนื้อเชื่อม
625	2	242-286
	4	227-335
	6	268-346
617	2	221-251
	4	271-328
	6	276-333

หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นของเหล็กกล้า P22 ยังคงเป็นเฟร์ไรต์และตะกอนคาร์ไบด์ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ข-ง) ความแข็งมีค่าลดลง ส่วนเหล็กกล้า P91 โครงสร้างจุลภาค คือ เทมเปอร์ มาร์เทนไซต์ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ข-ง) ค่าความแข็งบริเวณโลหะพื้นแสดงในตารางที่ 4.4 บริเวณกระบร้อนและรอยต่อของเหล็กกล้า P22 โครงสร้างจุลภาคคือเฟร์ไรต์และตะกอนคาร์ไบด์คาดว่าน่าจะเป็นชนิด  $M_3C$  ความแข็งมีค่า

ลดลงเมื่อเปรียบกับหลังเชื่อม ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.5 ส่วนเหล็กกล้า P91 โครงสร้างจุลภาคคือ เหมเปอร์มาร์เทนไซต์และตะกอนอนุคาร์ไบด์ คาดน่าจะเป็นชนิด  $M_{23}C_6$  ซึ่งค่าความแข็งแสดงใน ตารางที่ 4.4 ความแข็งบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P91 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลัง การเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งมีค่าสูงกว่าบริเวณกระทันที่ใช้เวลา 4 และ 6 ชั่วโมง เนื่องจากมีเวลาในการลดความเค้นเหลือค้างและกำจัดจำนวนของดิสโลเคชันได้น้อยกว่า ความ แข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 แสดงในตารางที่ 4.5 เนื้อเชื่อมหลังผ่านกรรมวิธีทาง ความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง ความแข็งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อ เชื่อมที่ใช้เวลา 2 ชั่วโมง คาดว่าเนื่องมาจากการตกตะกอนของแกมมาไพรม์และคาร์ไบด์.

หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมแล้วจึงได้นำแนวเชื่อมไปผ่านกรรมวิธีทาง ความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500, 1000, 2000 และ 2500 ชั่วโมง เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาต่อความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม ซึ่งค่าความ แข็งแสดงในภาคผนวก ก และ ค

แนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 บริเวณ โลหะพื้นของเหล็กกล้า P22 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมและผ่านกรรมวิธีทาง ความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C จนถึง 2000 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 633°C จนถึง 2500 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคยังคงเป็นเฟอไรต์และเฟอไรต์ที่มีตะกอนคาร์ไบด์แสดงในรูปที่ 4.45 และ 4.52 ซึ่ง คาดน่าจะเป็นชนิด  $M_7C_3$  ส่วนความแข็งมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากมีโครงสร้างจุลภาคที่เหมือนกัน กรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาค เปลี่ยนเป็นเฟอไรต์แสดงในรูปที่ 4.15 ความแข็งลดลง ส่วนเหล็กกล้า P91 หลังผ่านกรรมวิธีทาง ความร้อนที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคของบริเวณยังคงเป็นเทมเปอร์ มาร์เทนไซต์ ส่วนกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง โครงสร้างก็ยังคงเป็นเทมเปอร์ มาร์เทนไซต์ กรรมวิธีทางความร้อนที่ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง พบว่าโครงสร้างจุลภาคของเปลี่ยนเป็นเฟอไรต์และตะกอน คาร์ไบด์ ค่าความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางร้อนหลังการเชื่อม และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633 และ 717°C มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนความแข็ง หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C ความแข็งมีค่าลดลงเนื่องจากโครงสร้างจุลภาค เปลี่ยนเป็นเฟอไรต์และตะกอนคาร์ไบด์

บริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 500, 1000 และ 2000 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500, 1000, 2000 และ 2500 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคคือเฟอไรต์และตะกอนคาร์ไบด์ คาดว่าน่าจะเป็นชนิด  $M_7C_3$  และ  $M_{23}C_6$  การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนทำให้เกรนของบริเวณกระทันขยายขนาดขึ้น

เล็กน้อย ส่วนบริเวณกระทันร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคเป็นเฟร์ไรต์และความแข็งลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณกระทันร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C

บริเวณกระทันร้อนของเหล็กกล้า P91 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C บริเวณกระทันร้อนมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์จากธาตุผสมที่มีการละลายอยู่มากภายในเนื้อพื้นทำให้ความแข็งมีค่าสูงขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การตกตะกอนของคาร์ไบด์ในช่วงอบคืนตัว (Secondary hardening) [30] ซึ่งคาร์ไบด์ที่ตกตะกอนจะมีขนาดเล็กมากและตกตะกอนส่วนใหญ่ตามขอบเกรน (Grain boundary) การตกตะกอนของคาร์ไบด์นี้ทำให้ความแข็งของบริเวณกระทันร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและคาดว่าจะเป็สาเหตุของการแตกร้าวตามขอบเกรน (Intergranular cracking) [31-38] ซึ่งการตกตะกอนของคาร์ไบด์ที่ทำให้ความแข็งเพิ่มสูงขึ้นจะเห็นผลที่ชัดเจนในบริเวณกระทันร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง แต่เมื่อเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนจนถึง 2000 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณกระทันร้อนมีค่าลดลง คาดว่าเนื่องจากตะกอนคาร์ไบด์เริ่มขยายขนาด [21] คาร์ไบด์ที่ตกตะกอนสันนิษฐานว่าส่วนใหญ่คือชนิด  $M_{23}C_6$  ส่วนบริเวณกระทันร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C ความแข็งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณกระทันร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนเป็นเฟร์ไรต์และคาร์ไบด์ตกตะกอน

บริเวณเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800 °C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง พบว่าเนื้อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง ความแข็งมีค่าสูงกว่าเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717 และ 800°C ความแข็งต่ำกว่าเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C คาดว่าจะมีสาเหตุมาจากตะกอนที่เกิดขึ้นปริมาณน้อยกว่าทำให้ความแข็งมีค่าต่ำกว่า

เนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งมีค่าใกล้เคียงกับหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 ชั่วโมง ส่วนเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมงและผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (รูปที่ 4.34 และ 4.39) เนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 มีตะกอนเกิดขึ้นทั้งภายในเนื้อพื้นและตามขอบเกรน ซึ่งคาดว่าจะมีการตกตะกอนที่เกิดขึ้นในเนื้อพื้นน่าจะเป็นแกมมาดับเบิลไพรม์ ( $\gamma''$ ) หรือเฟสเดลต้า ( $\delta$ -phase) ประกอบด้วยธาตุ โครเมียม ไนโอเบียมและโมลิบดีนัม ตะกอนที่เกิด

ตามขอบเกรนคาดว่าน่าจะเป็นคาร์ไบด์ชนิด  $M_{23}C_6$  ประกอบด้วยธาตุ โครเมียม ไนโอเบียมและโมลิบดีนัม [3,4,7, 27] ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 พบการตกตะกอนทั้งภายในเนื้อพื้นและตามขอบเกรนเช่นเดียวกัน ตะกอนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อพื้นคาดว่าน่าจะเป็นแกมมาไพร์ม ( $\gamma'$ ) ประกอบด้วยธาตุโครเมียม ไททาเนียม โคบอลท์และโมลิบดีนัมสูง ส่วนตามขอบเกรนคาดว่าน่าจะเป็นคาร์ไบด์ชนิด  $M_{23}C_6$  ประกอบด้วยธาตุโครเมียม โคบอลท์และโมลิบดีนัมสูง [3,4,8,28,29] จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 พบการตกตะกอนของเฟสต่างๆ ทั้งภายในเนื้อพื้นและตามขอบเกรนซึ่งคาดว่าจะเป็นแกมมาดอบเบิลไพร์มหรือเดลต้าอินอินโคเนล 625 และแกมมาไพร์มในอินโคเนล 617 ทำให้ความแข็งแรงมีค่าสูงกว่าเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งส่วนใหญ่คาดว่าจะเป็นตะกอนคาร์ไบด์ชนิด  $M_{23}C_6$  ส่วนการเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนให้กับเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 จนถึง 2500 ชั่วโมง ก็พบว่าเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง ความแข็งแรงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกเล็กน้อย ส่วนเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งแรงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ความแข็งแรงแสดงในภาคผนวก ก และ ค

