

ผลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังเชื่อมและชนิดของลวดเชื่อมต่อความแข็งและ
โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าที่มีโครเมียม 2.25% และ 9% โดยน้ำหนัก



นาย ณัฐพล ธรรมโสภณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF POSTWELD HEAT TREATMENT AND FILLER METAL TYPE
ON HARDNESS AND MICROSTRUCTURES BETWEEN
2.25 wt.%Cr AND 9 wt.%Cr STEEL WELDMENT

Mr. Nattaphon Tammasophon



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical Engineering
Department of Metallurgical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2010
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังเชื่อมและชนิดของลวดเชื่อมต่อความแข็งแรงและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าที่มีโครเมียม 2.25% และ 9% โดยน้ำหนัก

โดย

นายณัฐพล ธรรมโสภณ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร. ปัญญวัชร วังยาว

คณะกรรมการศาสตราจารย์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แก่นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


.....

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....


ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)


.....

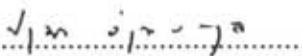
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)


.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ ดร. ปัญญวัชร วังยาว)


.....

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐม วิสุทธิพิทักษ์กุล)


.....

กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. ประทีป วงศ์บัณฑิต)

ณัฐพล ธรรมโสภณ : ผลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังเชื่อมและชนิดของลวดเชื่อมต่อความแข็งแรงและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าที่มีโครเมียม 2.25% และ 9% โดยน้ำหนัก (EFFECTS OF POSTWELD HEAT TREATMENT AND FILLER METAL TYPE ON HARDNESS AND MICROSTRUCTURES BETWEEN 2.25 wt.%Cr AND 9 wt.%Cr STEEL WELDMENT) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ.ดร.ปัญญาวัชร วัชยาว, 184 หน้า.

ในการใช้งานแนวเชื่อมทึกระหว่างเหล็กกล้า P22 (2.25%โครเมียม) และเหล็กกล้า P91 (9%โครเมียม) ที่เชื่อมต่อกันด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 หรืออินโคเนล 617 ที่อุณหภูมิสูง พบว่าเกิดการแตกร้าวที่บริเวณกระแทบร้อนของเหล็กกล้า P91 เพื่อความเข้าใจปัญหาการแตกร้าวนี้ จึงศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500, 1000, 2000 และ 2500 ชั่วโมง หลังจากกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม ต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรง

หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งแรงที่บริเวณกระแทบร้อนของเหล็กกล้า P91 สูงกว่าค่าความแข็งแรงหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง แต่ค่าไม่เกิน 350 HV ซึ่งเป็นค่ากำหนดทั่วไปในงานเชื่อมเหล็กกล้า หลังจากนั้นการทำกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เวลา 1000 ชั่วโมง บริเวณกระแทบร้อนของเหล็กกล้า P91 มีค่าความแข็งแรงสูงกว่าการทำกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาอื่น ความแข็งแรงหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เวลา 2000 ชั่วโมง ลดลง การผ่านกรรมวิธีทางความร้อนทำให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนจากมาร์เทนไซต์เป็นเทมเปอรั่มมาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์

เนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ อินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง มีค่าความแข็งแรงสูงสุด ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด พบตะกอนภายในเนื้อเชื่อมและคาร์ไบด์ตามขอบเกรน ส่งผลทำให้ความแข็งแรงมีค่าสูง

จากการผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังทุกกรณี พบว่า บริเวณโลหะพื้นของเหล็กกล้า P22 และ P91 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรง และบริเวณกระแทบร้อนของเหล็กกล้า P22 ไม่พบปัญหาค่าความแข็งแรงสูงกว่าที่กำหนด

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....*ณัฐพล ธรรมโสภณ*
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....*กอบบุญ หล่อทองคำ*
 ปีการศึกษา.....2553.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....*ปัญญาวัชร วัชยาว*

5070276821: MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : P91/P22/INCONEL 625/INCONEL 617/MICROSTRUCTURES /CARBIDE

NATTAPHON TAMMASOPHON : EFFECTS OF POSTWELD HEAT TREATMENT AND FILLER METAL TYPE ON HARDNESS AND MICROSTRUCTURES BETWEEN 2.25 wt.%Cr AND 9 wt.%Cr STEEL WELDMENT. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF GOBBOON LOTHONGKUM, Dr.-Ing., THESIS Co-ADVISOR: PANYAWAT WANGYAO, Ph.D., 184 pp

In the practical use at high temperature of TIG weldments between P22 (2.25Cr steel) and P91 (9Cr steel) using Inconel 625 or Inconel 617 as filler metals, cracking at the heat affected zone (HAZ) of P91 steel was reported. In order to understand this cracking problem, the effect of postweld heat treatment (PWHT) at 750°C for 2, 4, and 6 hrs, as well as the effect of long-term heat treatment (LTHT) at 550, 633, 717 and 800°C for 500, 1000, 2000 and 2500 hrs on microstructure and hardness of weldments were studied.

The hardness at HAZ of P91 steel after PWHT at 750°C for 2 hrs was higher than those after PWHT at 750°C for 4 and 6 hrs, but it was not in excess of 350 HV, which is the general limit value for welding of steel. The hardness at HAZ of P91 after PWHT and LTHT at 633°C for 1,000 hours was higher than those at the other conditions. The hardness was reduced after PWHT and LTHT at 633°C for 2,000 hours. The martensite microstructure was changed to be tempered martensite and carbide.

The Inconel-625 or Inconel-617 weld metals, after PWHT at 750°C for 4, 6 hours and LTHT at 633°C for 1000 hours, had the highest hardness. The microstructures of those weld metals observed by SEM showed some precipitates in the grain and carbide at the grain boundary. This was responsible for the high hardness.

In any case of the PWHT and LTHT conditions, the microstructure and hardness at the base metals of P22 and P91 steels were not changed. The hardness at HAZ of P22 steel was not so high.

Department : Metallurgical Engineering
Field of Study : Metallurgical Engineering
Academic Year : 2010

Student's Signature Nattaphon Tammasonphon
Advisor's Signature Gobboon Lothongkum
Co-Advisor's Signature Panyawat Wangyao

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยคำแนะนำและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รongศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์.ดร. ปัญญวัชร วัจยาว อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ให้แนวทาง รวมทั้งการวิเคราะห์ผลการทดลองและตรวจเล่มวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และขอขอบพระคุณ รongศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล และ ดร.ประทีป วงศ์บัณฑิต กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลา แนะนำแก้ไขวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย คุณวีระศักดิ์ และ คุณปวีณา หอมกระจาย วิศวกรการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย สำหรับการเตรียมชิ้นงานเชื่อม วัสดุ อุปกรณ์และสถานที่ทำวิจัย ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านภาควิชา วิศวกรรมโลหการ ที่ได้ให้คำแนะนำและความรู้ต่องานวิจัยนี้ และเนื่องจากทุนวิจัยได้รับการ สนับสนุนจากโครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สกว. ผู้วิจัยจึง ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ทั้งนี้ผู้เขียนใคร่ขอขอบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัว พี่ ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ และบุคคลรอบข้าง ที่ให้กำลังใจทำให้สามารถผ่านอุปสรรคและปัญหา ต่างๆ มาได้โดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1.....	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. ปรัชญาของนวัตกรรมการ.....	4
2.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	22
3.1 อุปกรณ์ให้ความร้อน.....	22
3.2 อุปกรณ์ในการเชื่อม.....	22
3.3 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	22
3.4 เครื่องมือสำหรับการเตรียมชิ้นงาน.....	22
3.5 เครื่องมือวิเคราะห์.....	23
3.6 วิธีการเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	23
3.7 กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลาต่อความแข็งและ โครงสร้างจุลภาค.....	24
3.8 วิธีการทดสอบสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	24
3.9 วิธีการทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารประกอบของชิ้นงาน	24

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.10. ตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเชื่อม.....	25
4. ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	26
4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91	27
4.2 ความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยเชื่อม อินโคเนล 625 และ อินโคเนล 617 หลังเชื่อม.....	28
4.3 ความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิอุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง.....	29
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.....	41
4.5 ความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2,4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง.....	68
4.6 ความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง.....	95
4.7 ความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง	109
4.8 บทสรุปภาพรวมผลการทดลอง.....	118
5. สรุปผลการทดลอง.....	123

สารบัญ(ต่อ)

รายการอ้างอิง.....	124
ภาคผนวก.....	129
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	184



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ตัวอย่างส่วนผสมเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของโลหะผสมนิกเกิลอินโคเนล 625 [4].... 5
2.2	ตัวอย่างส่วนผสมเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของโลหะผสมนิกเกิลอินโคเนล 617 [4].... 7
2.3	เฟสต่างๆ และระบบผลึกที่สามารถเกิดขึ้นได้ในอินโคเนล 617 เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง [3, 4]..... 8
2.4	ตัวอย่างส่วนผสมเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้า P22) [5]..... 9
2.5	ตัวอย่างส่วนผสมเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้า P91 [5]..... 10
2.6	รายละเอียดของการอบชุบความร้อนของอินโคเนล 625 ตามการทดลองของ K.Bhanu Sankara Rao และคณะ [7]..... 13
2.7	ค่าความเค้นคราก ความแข็งแรงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอินโคเนล 625 ผ่านการใช้งานและกรรมวิธีทางความร้อนแบบต่าง ๆ [7]..... 19
2.8	ค่าความเค้นคราก ความแข็งแรงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอินโคเนล 625 ผ่านการใช้งาน การอบอ่อนและกรรมวิธีทางความร้อนต่าง ๆ [7]..... 19
2.9	ค่าความแข็งแรงสูงสุดและการตกตะกอนเฟสต่าง ๆ หลังการทดลอง [7]..... 19
4.1	ความหมายของสัญลักษณ์ของกรรมวิธีความร้อน รอยเชื่อม และเฟสต่างๆ..... 27
4.2	โครงสร้างจุลภาคของ ก) เหล็กกล้า P22 ข) เหล็กกล้า P91..... 118
4.3	ความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่เชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังเชื่อม..... 28
4.4	แสดงค่าความแข็งแรงแสดงค่าความแข็งแรงของเหล็กกล้า P22 และ P91 บริเวณโลหะพื้น กระทั่งร้อนและรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางร้อนหลังการเชื่อม..... 119
4.5	แสดงค่าความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม..... 119
ก1	แสดงค่าความแข็งแรงบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมอินโคเนล 625..... 131
ก2	แสดงค่าความแข็งแรงบริเวณโลหะพื้น P22 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625..... 132
ก3	แสดงค่าความแข็งแรงบริเวณกระทั่งร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625..... 133

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก4	แสดงความแข็งแรงบริเวณกระทู้ร้อน P22 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625.....	134
ก5	แสดงความแข็งแรงบริเวณรอยเหล็กกล้าP91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมอินโคเนล 625.....	135
ก6	แสดงความแข็งแรงบริเวณรอยเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625.....	136
ก7	แสดงความแข็งแรงบริเวณเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91.....	137
ก8	แสดงความแข็งแรงบริเวณรอยของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดกับเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมอินโคเนล 625.....	138
ก9	แสดงความแข็งแรงบริเวณรอยเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91.....	139
ข1	แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อพื้นและคาร์ไบต์ด้วยเทคนิคอีดีเอสของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง.....	142
ข2	แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อพื้นและคาร์ไบต์ด้วยเทคนิคอีดีเอสของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง.....	143
ค1	แสดงความแข็งแรงบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมอินโคเนล 617.....	145
ค2	แสดงความแข็งแรงบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617.....	146
ค3	แสดงความแข็งแรงบริเวณกระทู้ร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617.....	147
ค4	แสดงความแข็งแรงบริเวณกระทู้ร้อนเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617.....	148

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ค5	แสดงความแข็งบริเวณรอยเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมอินโคเนล 617.....	149
ค6	แสดงความแข็งบริเวณรอยเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617.....	150
ค7	แสดงความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91.....	151
ค8	แสดงความแข็งบริเวณรอยของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ด้านติดกับเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมอินโคเนล 617.....	152
ค8	แสดงความแข็งบริเวณรอยเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ด้านติดเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91.....	153
จ1	แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อพื้นและคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค เอ็ดไอเอสของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง.....	180

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1	วาล์วที่ทำด้วยเหล็กกล้าที่มีโครเมียม 2.25%Cr โดยน้ำหนัก (P22) เชื่อมต่อกับเหล็กกล้าที่มีโครเมียม 9%Cr โดยน้ำหนัก (P91) ด้วยลวดเชื่อมโลหะผสมนิกเกิลอินโคเนล [1]..... 2
2.1	ภาพตัดขวางแสดงบริเวณของชิ้นงานเชื่อมที่ศึกษาโดย M. Vijayalakshmi และคณะ [6]..... 11
2.2	โครงสร้างจุลภาคและเส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กที่มี 9Cr-1Mo เชื่อมกับเหล็กที่มี 2.25Cr-1Mo โดยที่ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน [6]..... 11
2.3	a) โครงสร้างจุลภาค b) เส้นแสดงความแข็ง c) ตะกอนคาร์ไบด์ในบริเวณที่แข็ง d) เฟอร์ไรต์ในบริเวณที่อ่อนของแนวงานเชื่อมผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 1023 K 15 ชั่วโมง [6]..... 11
2.4	โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1023 K [6]..... 12
2.5	เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 1023 K [6]..... 12
2.6	ภาพคาร์ไบด์ที่เกิดในแนวเชื่อมหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1023 K เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [6]..... 13
2.7	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแสดงคาร์ไบด์ตามขอบและภายในเกรนของโลหะเนื้อพื้นวัสดุที่ผ่านการใช้งานแล้ว [7]..... 14
2.8	ผลการวิเคราะห์เชิงเส้นบนวัสดุที่ผ่านการใช้งาน a) บริเวณขอบเกรน b) คาร์ไบด์ภายในโลหะพื้นมี Nb และ Mo อยู่มาก c) การกระจายตัวของ Nb และ Mo ในคาร์ไบด์ [7]..... 15
2.9	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านวัสดุที่ผ่านการใช้งานแล้ว a) คาร์ไบด์ตามขอบเกรน b) เฟส $Ni_2(Cr,Mo)$ c) รูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนของ $Ni_2(Cr,Mo)$ และแกรมมาตออบเบลัฟไร้ม (γ'') d) รูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนของภาพ c) [7]..... 15
2.10	กราฟแสดง a) ความเค้นคราก b) ระยะเวลา c) ความแข็งแรงสูงสุด d) ความแกร่งคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟความเค้นความเครียด ของ อินโคเนล 625 ที่ผ่านการใช้งาน ผ่านการอบอ่อน และกรรมวิธีทางความร้อนแบบต่าง ๆ [7]..... 16

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.11	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน วัสดุที่ผ่านการใช้งานหลังการ อบอ่อนเป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1423 K แสดงให้เห็นแต่โลหะเนื้อพื้น และขอบเกรน [7]..... 16
2.12	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน a) วัสดุที่ผ่านการใช้งานและ ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 923 K ส่วนใหญ่จะเป็น แกรมมาดอบเบิลไพร์ม (γ'') b) แกรมมาดอบเบิลไพร์ม (γ'') c) รูปแบบการ เลี้ยวเบนอิเล็กตรอนของแกรมมาดอบเบิลไพร์ม (γ'') [7]..... 17
2.13	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน วัสดุที่ผ่านการใช้งานและหลัง ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน 10 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 923 K a) คาร์ไบด์ที่ขอบเกรน และแกรมมาดอบเบิลไพร์ม (γ'') b) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของ แกรมมาดอบเบิลไพร์ม (γ'') ไม่พบ $Ni_2(Cr,Mo)$ c) รูปแบบการเลี้ยวเบนของ อิเล็กตรอนของ b) [7]..... 17
2.14	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด วัสดุที่ผ่านการใช้งานและ การอบชุบความร้อน 500 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 923 K แสดงให้เห็นการตกตะกอน ของเฟสเดลต้า (δ -phase) [7]..... 18
2.15	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน วัสดุที่ผ่านการใช้งานหลังผ่าน กรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1123 K a) คาร์ไบด์ที่ขอบ เกรน ไม่พบ $Ni_2(Cr,Mo)$ และแกรมมาดอบเบิลไพร์ม (γ'') b) การตกตะกอนของ เฟสเดลต้า (δ -phase) หลังเวลาผ่านไป 100 ชั่วโมง [7]..... 18
2.16	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน วัสดุที่ผ่านการอบอ่อนภาย หลังการอบชุบความร้อนทางร้อน a) อุณหภูมิ 923 K 100 ชั่วโมง แสดงคาร์ไบด์ที่ ขอบเกรนและแกรมมาดอบเบิลไพร์ม (γ'') b) อุณหภูมิ 1123 K 100 ชั่วโมง แสดงเฟสเดลต้า (δ -phase) [7]..... 19
2.17	โลหะผสมนิกเกิล Ni-22Cr-12Co-9Mo (อินโคเนล 617) หลังผ่านกรรมวิธีทาง ความร้อนที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง a) ภาพถ่ายโดยกล้อง จุลทรรศน์แสง b), c) $M_{23}C_6$ และเฟสเดลต้า (δ -phase) ตกตะกอนตามขอบ เกรน [8]..... 21

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 โลหะผสมนิกเกิล Ni-22Cr-12Co-9Mo (อินโคเนล 617) มาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง a) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสง b) ภาพถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านพบว่ามีการมาไฟรม (γ') ลดลง [8]	21
3.1 ภาพตัวอย่างชิ้นงานก่อนเชื่อมและหลังเชื่อม.....	23
3.2 ภาพตัวอย่างชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C.....	24
4.1 บริเวณต่างของแนวเชื่อมพร้อมสัญลักษณ์ที่ใช้.....	25
4.2 โครงสร้างจุลภาคของ ก) เหล็กกล้า P22 ข) เหล็กกล้า P91.....	26
4.3 ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมเหล็กกล้า P22 (2.25 %โครเมียม) และเหล็กกล้าP91 (9%โครเมียม) ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 และอินโคเนล 617 หลังเชื่อม.....	27
4.4 ความแข็งของแนวเชื่อมหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C.....	29
4.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 หลังผ่านการเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมอุณหภูมิ 750°C.....	30
4.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระแทบร้อนเหล็กกล้า P22 หลังผ่านการเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมอุณหภูมิ 750°C.....	30
4.7 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 หลังผ่านการเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C.....	31
4.8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านการเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C.....	35
4.9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระแทบร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านการเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C.....	36

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 625 หลังผ่านการเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการ เชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C..... 39
4.11	ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธี ทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง..... 41
4.12	ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธี ทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง..... 42
4.13	ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธี ทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง..... 43
4.14	ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธี ทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง..... 44
4.15	โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอิน โคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็น เวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน..... 45
4.16	โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระแทบร้อนเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน..... 48
4.17	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน..... 51
4.18	โครงสร้างจุลภาคของโลหะพื้นของเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอิน โคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็น เวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน..... 55

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19	58
<p>โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน.....</p>	
4.20	63
<p>โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน.....</p>	
4.21	68
<p>ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธี ทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง.....</p>	
4.22	69
<p>ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธี ทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง.....</p>	
4.23	70
<p>โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมอินโคเนล 625หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง.....</p>	
4.24	72
<p>โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็น เวลา 1000 ชั่วโมง.....</p>	
4.25	75
<p>โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง.....</p>	
4.26	78
<p>โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอิน โคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็น เวลา 1000 ชั่วโมง</p>	
4.27	80
<p>โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง</p>	

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28	<p>โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง.....</p> <p style="text-align: right;">83</p>
4.29	<p>โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน หลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....</p> <p style="text-align: right;">86</p>
4.30	<p>ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 1 ก่อนตะกอน ในรูปที่ 4.29 ด้วย เทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....</p> <p style="text-align: right;">87</p>
4.31	<p>ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 3 ตะกอน ในรูปที่ 4.29 ด้วย เทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....</p> <p style="text-align: right;">87</p>
4.32	<p>ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 4 บริเวณเนื้อพื้น ในรูปที่ 4.29 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....</p> <p style="text-align: right;">87</p>
4.33	<p>ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 5 ตะกอนตามขอบเกรน ในรูปที่ 4.29 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....</p> <p style="text-align: right;">88</p>
4.34	<p>โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน หลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....</p> <p style="text-align: right;">89</p>
4.35	<p>ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 2 ก่อนตะกอน ในรูปที่ 4.34 ด้วย เทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....</p> <p style="text-align: right;">89</p>
4.36	<p>ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 3 ตะกอนตามขอบเกรน ในรูปที่ 4.34 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....</p> <p style="text-align: right;">90</p>
4.37	<p>ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 4 บริเวณเนื้อพื้น ในรูปที่ 4.34 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....</p> <p style="text-align: right;">90</p>
4.38	<p>ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 5 ก่อนตะกอน ในรูปที่ 4.34 ด้วย เทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....</p> <p style="text-align: right;">90</p>

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.39	โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน หลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	92
4.40	รูปที่ 4.40 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 1 ก่อนตะกอน ในรูปที่ 4.39 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....	93
4.41	รูปที่ 4.41 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 2 ตะกอนตามขอบเกรน ในรูปที่ 4.39 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....	93
4.42	ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 3 บริเวณเนื้อพื้น ในรูปที่ 4.39 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....	94
4.43	เส้นแสดงความเข้มของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง.....	95
4.44	เส้นแสดงความเข้มของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง.....	96
4.45	โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง.....	97
4.46	โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระแทบร้อนเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง.....	99
4.47	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง.....	101
4.48	โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง.....	103

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.49	104
โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อม อินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็น เวลา 2000 ชั่วโมง.....	
4.50	106
โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมอินโคเนล 625 หลัง ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง....	
4.51	109
ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธี ทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง.....	
4.52	110
โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 ของเหล็กกล้า บริเวณ โลหะพื้นหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง.....	
4.53	111
โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 625 บริเวณกระทันหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง.....	
4.54	112
โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมอินโคเนล 625 บริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง.....	
4.55	113
โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง.....	
4.56	115
โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง.....	
4.57	116
โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง.....	

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข1	ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 2 ตะกอนตามขอบเกรน ด้วยเทคนิคเอ็ดดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด..... 141
ข2	ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 6 บริเวณเนื้อพื้น ด้วยเทคนิคเอ็ดดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด..... 141
ง1	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังเชื่อม..... 155
ง2	โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้าเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C..... 155
ง3	โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C.... 156
ง4	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C..... 156
ง5	โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C..... 156
ง6	โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C..... 157
ง7	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C..... 157
ง8	โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง..... 158

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง27	โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 แนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรม วิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง..... 176
ง28	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรม วิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง..... 177
ง29	โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรม วิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง..... 177
ง30	โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรม วิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง..... 178
ง31	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรม วิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง..... 178
จ1	ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 4 บริเวณเนื้อพื้นด้วยเทคนิค อีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด..... 180
ฉ1	การออกแบบงานเชื่อมของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 ของแนวเชื่อม เหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91..... 182
ฉ2	การออกแบบงานเชื่อมของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ของแนวเชื่อม เหล็กกล้า P22 และ เหล็กกล้า P91..... 183

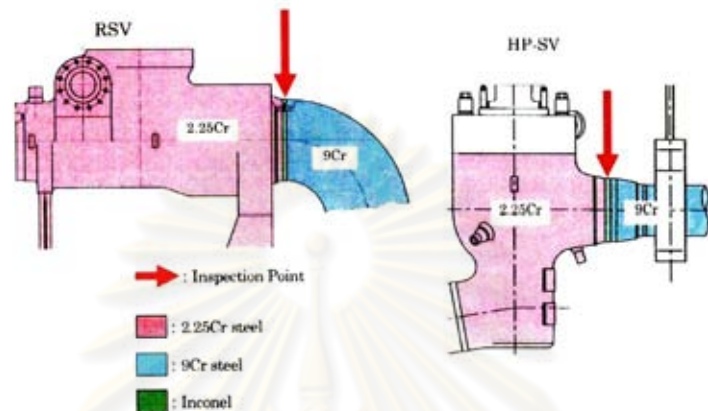
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ลักษณะการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมเป็นการนำเทคโนโลยีของโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซและโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำมาใช้ร่วมกัน โดยการนำไอเสียจากโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซซึ่งยังมีปริมาณความร้อนสูง (อุณหภูมิประมาณ 520°C) ไปผ่านหม้อไอน้ำที่ใช้ความร้อนเหลือทิ้ง (Waste Heat Boiler) หรือ (Heat Recovery Steam Generator) ถ่ายความร้อนให้กับน้ำทำให้น้ำเดือดกลายเป็นไอเพื่อขับกังหันไอน้ำเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อไป ส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม คือ เครื่องยนต์กังหันก๊าซ หม้อไอน้ำที่ใช้ความร้อนเหลือทิ้ง และเครื่องยนต์กังหันไอน้ำ (เช่นเดียวกับโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ) โดยทั่วไปโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมจะประกอบด้วยเครื่องยนต์กังหันก๊าซ 1-2 เครื่อง ร่วมกับเครื่องยนต์กังหันไอน้ำ 1 เครื่อง โดยมีประสิทธิภาพรวมประมาณ 40-45% และมีอายุการใช้งานประมาณ 20 ปี ถือเป็นโรงไฟฟ้าผลิตพลังงานไฟฟ้าระดับปานกลางถึงระดับฐาน (Medium to Base Load Plant) ไอน้ำจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซจะไหลเข้ามาทางท่อเหล็กกล้า P91 (9% โครเมียม) ผ่านไปที่วาล์วซึ่งทำด้วยเหล็กกล้า P22 (2.25% โครเมียม) แล้วไอน้ำจะผ่านไปยังกังหันไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป ปัญหาที่พบคือ มีการรั่วของไอน้ำตรงบริเวณท่อของ HP Stop Valve (รูปที่ 1) ของเครื่องยนต์กังหันไอน้ำ ซึ่งเป็นท่อเหล็กกล้า P91 (9% โครเมียม) ต่อกับตัววาล์วด้วยการเชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมเป็นโลหะผสมนิกเกิล จากรายงานผลการทดสอบรอยแตกแนวเชื่อมวาล์วเครื่องยนต์กังหันไอน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยโดยผู้เชี่ยวชาญชาวญี่ปุ่นพบว่า หลังจากการใช้งานนานระยะหนึ่งพบรอยแตกบริเวณเนื้อเชื่อมส่วนที่ติดกับท่อเหล็กกล้า P91 บริเวณแนวจุดหลอมเหลว (Fusion Line) ส่วนแนวเชื่อมด้านที่ติดกับท่อเหล็กกล้า P22 (2.25% โครเมียม) ไม่พบรอยแตก ทั้งนี้ยังไม่ทราบสาเหตุที่แน่ชัดของรอยแตกที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กกล้า P91 กับเนื้อเชื่อมซึ่งเป็นโลหะผสมนิกเกิลอินโคเนล (Inconel) อาจมีสาเหตุจากกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่ไม่เหมาะสมหรือโครงสร้างจุลภาคหลังการเชื่อมไม่เหมาะสม การไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ จึงมีความสนใจที่จะหาข้อมูลกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อเป็นความรู้พื้นฐานและเป็นแนวทางสำหรับการไขปัญหารอยแตกของแนวเชื่อมต่อไป ในที่นี้จะทดลองเชื่อมเหล็กกล้า P91 กับเหล็กกล้า P22 ด้วยลวด

เชื่อมโลหะผสมนิกเกิลอินโคเนลหลายเกรดที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ ใช้งานและทดลองกรรมวิธีทางความร้อนภายหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลาของขั้นตอนกรรมวิธีทางความร้อน และส่วนผสมเคมีของลวดเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม



รูปที่ 1.1 วาล์วที่ทำด้วยเหล็กกล้า P91 เชื่อมต่อกับเหล็กกล้า P22 ด้วยลวดเชื่อมโลหะผสมนิกเกิลอินโคเนล [1]

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อม

1.2.2 ศึกษาผลของส่วนผสมเคมีของลวดเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงของแนวเชื่อม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เตรียมชิ้นงานเชื่อมด้วยทิกระหว่างเหล็กกล้า P91 และเหล็กกล้า P22 โดยใช้ลวดเชื่อม อินโคเนล 625 และ อินโคเนล 617 และนำชิ้นงานเชื่อมผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง

1.3.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ 550, 633, 717 และ 800°C ของกรรมวิธีทางความร้อนโดยใช้เวลา 500, 1000, 2000 และ 2500 ชั่วโมง ต่อความแข็งแรงและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P91 และเหล็กกล้า P22

1.3.3 ศึกษาผลของชนิดลวดเชื่อมโลหะผสมนิกเกิลต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P91 และเหล็กกล้า P22

1.3.4 วิเคราะห์ความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P91 และเหล็กกล้า P22

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ทราบผลของอุณหภูมิและเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนที่เหมาะสมสำหรับแนวเชื่อมต่อระหว่างเหล็กกล้า P91 และเหล็กกล้า P22 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมโลหะผสมนิกเกิล

1.4.2 ทราบชนิดของลวดเชื่อมโลหะผสมนิกเกิลที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างเหล็กกล้า P91 และเหล็กกล้า P22



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรม

2.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของโลหะผสมนิกเกิลซึ่งใช้เป็นลวดเชื่อมในการเชื่อมเหล็กกล้า P22 (2.25% โครเมียม) และ เหล็กกล้า P91 (9% โครเมียม)

2.1.1 นิกเกิล [2]

โลหะนิกเกิลถูกค้นพบในศตวรรษที่ 18 โดยพนักงานเหมืองในเขตแซกโซนี (Saxony) ของประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมันได้พยายามถลุงแร่ทองแดงแล้วได้พบโลหะสีขาวซึ่งถลุงยากจึงเรียกโลหะชนิดนี้ว่า โอลด์ นิกค์ คอปเปอร์ (Old Nick's Copper) หรือ คิวเฟอร์-นิกเกิล (Kupfer-Nickel) ต่อมา A.F. Cronstedt ซึ่งทำงานในกรมเหมืองแร่ของประเทศสวีเดน (Swedish Department of Mines) ด้วยความอยากรู้อยากเห็นทำให้เขาทดลองแยกและวิเคราะห์ ธาตุชนิดใหม่แล้วตั้งชื่อธาตุใหม่นี้ว่า นิกเกิล ห้าปีต่อมาหลังจากการค้นพบธาตุนิกเกิลนักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดน ชื่อ Von Engestrom ได้พบว่า นิกเกิลเป็นส่วนประกอบหลักในโลหะผสมระหว่างนิกเกิลและเงิน (Nickel-Silver)

นิกเกิลเป็นธาตุที่มีประโยชน์มากมายและสามารถละลายเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์กับทองแดง นิกเกิลมีระบบผลึกเป็น Face Centered Cubic (FCC) สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยการเติมธาตุผสม การตกตะกอนของคาร์ไบด์ และการตกตะกอนของเฟสเกรนมาไฟร็ม (γ')

การเพิ่มความแข็งแรงโดยการเติมธาตุผสม [3, 4]

โคบอลต์ เหล็ก โครเมียม โมลิบดีนัม ทังสเตน วาเนเดียม และอะลูมิเนียม ทั้งหมดเป็นธาตุที่ผสมเพิ่มความแข็งแรงให้กับนิกเกิลได้ เนื่องจากมีขนาดอะตอมแตกต่างจากขนาดอะตอมของนิกเกิลประมาณ 1-13%

การเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนของคาร์ไบด์

คาร์บอนที่อยู่ในนิกเกิลจะเกิดการรวมตัวกับธาตุอื่นๆเกิดเป็นคาร์ไบด์ คาร์ไบด์ที่พบส่วนใหญ่คือ MC, M_6C , M_7C_3 และ $M_{23}C_6$ โดยทั่วไป MC จะมีขนาดใหญ่และกระจายอยู่ทั่วไปซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ M_6C จะตกตะกอนตามขอบเกรนใช้ในการควบคุมขนาดเกรน เมื่อเกิดตามขอบเกรนจะส่งผลเสียต่อความเหนียว M_7C_3 จะเกิดเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงส่วนใหญ่จะเป็น Cr_7C_3 จะเป็นประโยชน์เมื่อเกิดการตกตะกอนแบบไม่ต่อเนื่อง จะทำให้วัสดุเปราะเมื่อเกิดการตกตะกอนเป็นกลุ่มและอยู่ตามขอบเกรน $M_{23}C_6$ จะเกิดการตกตะกอนเมื่อใช้งานที่ 760-980 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มจะตกตะกอนตามขอบเกรน ซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติกลของโลหะผสมนิกเกิล

การเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนของเฟสแกรมมาไฟร์ม (γ')

การตกตะกอนของแกรมมาไฟร์ม (γ' , $Ni_3(Al,Ti)$) จะทำให้เกิดการไม่เข้ากัน (Mismatch) ทำให้เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ ความแข็งแรงของวัสดุจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของแกรมมาไฟร์ม (γ') เพิ่มขึ้น แกรมมาไฟร์ม (γ') จะตกตะกอนเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง ปริมาณของแกรมมาไฟร์ม (γ') จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุที่ผสม คือ อะลูมิเนียม ไทเทเนียม ไนโอเบียม แทนทาลัม แกรมมาไฟร์มสามารถที่จะเปลี่ยนไปเป็นตะกอน Ni_3X ได้ขึ้นอยู่กับธาตุผสมถ้ามีปริมาณไทเทเนียมอยู่มากจะเปลี่ยนไปเป็นอิตา (η , (Ni_3Ti)) ทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงและเมื่อมีปริมาณของไนโอเบียมอยู่มากพออิตา (η) จะเปลี่ยนไปเป็น แกรมมาดอบเบิลไฟร์ม (γ'' , (Ni_3Nb)) ทั้งแกรมมาไฟร์ม (γ' , $Ni_3(Al,Ti)$) และแกรมมาดอบเบิลไฟร์ม (γ'' , (Ni_3Nb)) จะทำให้ค่าความแข็งแรงสูงเช่นเดียวกัน

2.1.2 อินโคเนล 625 [4]

เป็นโลหะผสมนิกเกิล โครเมียม โมลิบดีนัมและมีการผสมไนโอเบียมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุโดยไม่ต้องทำการอบชุบความร้อน โลหะผสมชนิดนี้ด้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่กัดกร่อนได้หลายแบบ ด้านทานต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็มได้เป็นอย่างดี นิยมใช้งานเกี่ยวกับอุตสาหกรรมเดินเรือทะเล ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนผสมเคมีของโลหะผสมนิกเกิลอินโคเนล 625

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างส่วนผสมเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของโลหะผสมนิกเกิลอินโคเนล 625 [4]

ธาตุ	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb/ Ta	Ti	Al	C	Mn	Si	Cu
ปริมาณ	64.6	21.9	9.00	0.24	3.59	0.23	0.12	0.01	0.01	0.50	0.07

คุณสมบัติกลของโลหะผสมนิกเกิลอินโคเนล 625 ที่อุณหภูมิห้อง [4]

ความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)	930 MPa
ความเค้นคราก (Yield Strength 0.2% offset)	517 MPa
เปอร์เซ็นต์ยืดตัว (Elongation in 50 mm)	42.5
มอดุลัสของการยืดหยุ่น (Elastic Modulus)	207 GPa
ความแข็ง (Hardness)	190 HRB

2.1.3 อินโคเนล 617 [4]

เป็นโลหะผสมนิกเกิล โครเมียม โคบอลต์ โมลิบดีนัม ซึ่งมีความแข็งแรงและต้านทานต่อการออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง การผสมอะลูมิเนียมจะช่วยเพิ่มความต้านทานการออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง โลหะผสมชนิดนี้ต้านทานต่อการกัดกร่อนได้หลายแบบ ใช้งานในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุปกรณ์สำหรับกรรมวิธีการอบชุบความร้อน และใช้ในกระบวนการผลิตกรดไนตริก ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมนิกเกิลอินโคเนล 617

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างส่วนผสมเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของโลหะผสมนิกเกิลอินโคเนล 617 [4]

ธาตุ	Ni	Cr	Mo	Co	Fe	Ti	Al	C	Mn	Si	Cu
ปริมาณ		20.28	8.3	10.55	0.31	0.38	0.95	0.05	0.13	0.13	0.006

คุณสมบัติกลของโลหะผสมอินโคเนล 617 ที่อุณหภูมิห้อง [4]

ความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) 755 MPa

ความเค้นคราก (Yield Strength 0.2% offset) 350 MPa

เปอร์เซ็นต์ยืดตัว (Elongation in 50 mm) 58.0

มอดูลัสของการยืดหยุ่น (Elastic Modulus) 211 GPa

ความแข็ง (Hardness) 173 HRB

ตะกอนหรือเฟสที่สามารถเกิดขึ้นได้ในอินโคเนล 617 เมื่อถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูง คือ γ' - $[\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})]$, γ'' - $[\text{Ni}_3\text{Nb}]$. ตารางที่ 2.3 แสดงตะกอนหรือเฟสที่สามารถเกิดขึ้นได้ในอินโคเนล 617

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 เฟสต่างๆ และระบบผลึกที่สามารถเกิดขึ้นได้ในอินโคเนล 617 เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง [3, 4]

เฟส	ระบบผลึก
γ' -[Ni ₃ (Al,Ti)]	FCC
γ'' -[Ni ₃ Nb]	BCT
η -[Ni ₃ Ti]	HCP
δ -[Ni ₃ Nb]	Orthorhombic
μ -phase	Rhombohedral
σ -phase	Tetragonal
MC	Cubic
M ₂₃ C ₆	FCC
M ₆ C	FCC
M ₇ C ₃	Hexagonal
MN	Cubic

2.1.5 เหล็กกล้า P22 [5]

เป็นเหล็กกล้าที่ผสมโครเมียม โมลิบดีนัม ซึ่งเป็นเหล็กที่ใช้ต้านทานต่อการคืบ ความแข็งแรงของเหล็กกล้าชนิดนี้มาจากการละลายของทั้ง โครเมียมและโมลิบดีนัม และคาร์ไบด์ที่เกิดตามขอบเกรนช่วยในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน เหล็กกล้าชนิดนี้ถูกออกแบบมาให้ใช้งานในการต้านทานต่อการคืบเป็นเวลานานที่อุณหภูมิ 560°C อย่างไรก็ตามความแข็งแรงการคืบ (Creep strength) ของเหล็กชนิดนี้จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเหล็กที่ต้านทานการคืบเกรดอื่น

เช่น เหล็กกล้า P91 ทำให้ต้องออกแบบใช้งานที่ความหนามากกว่า เมื่อใช้งานลักษณะเดียวกัน แนวเชื่อมเหล็กชนิดนี้เมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานจะทำให้เกิดความเสียหายจากการเปราะด้วยการอบคืนตัว (Temper-embrittlement) ตารางที่ 2.4 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า P22

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างส่วนผสมเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้า P22 [5]

ธาตุ	C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo
ปริมาณ	0.07	0.6	0.3	<0.02	<0.02	2.25	1.0

การใช้งาน [5]

เหล็กกล้าชนิดนี้ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในโรงกลั่นน้ำมันเนื่องจากต้านทานต่อการทำปฏิกิริยากับกำมะถัน (Sulfidation) ที่อุณหภูมิ 250-450 °C และยังใช้ในอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจากต้านทานต่อการทำลายด้วยก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen Attack)

2.1.6 เหล็กกล้า P91 [5]

ในช่วงปี 1950 ได้มีการพัฒนาเหล็กกล้าที่มีโครเมียม 9% โดยน้ำหนักขึ้นมาเพื่อใช้ทำหม้อต้มไอน้ำผลิตกระแสไฟฟ้า (Power Boiler) เป็นเหล็กกล้าที่ทนทานการคืบดีกว่าเหล็กกล้า P22 ต่อจากนั้นในปี 1974 Oak Ridge Nation Laboratory (ORNL) ได้ปรับปรุงเหล็กกล้าผสม 9% โครเมียม ขึ้นโดยผสมวานาเดียม ไนโอเบียม และไนโตรเจน ทำให้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้นานขึ้น ส่วนผสมของเหล็กกล้า P91 แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างส่วนผสมเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้า P91 [3]

ธาตุ	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Nb	V	N
ปริมาณ	0.1	0.5	0.3	<0.01	<0.02	9.0	0.1	1.0	0.08	0.2	0.05

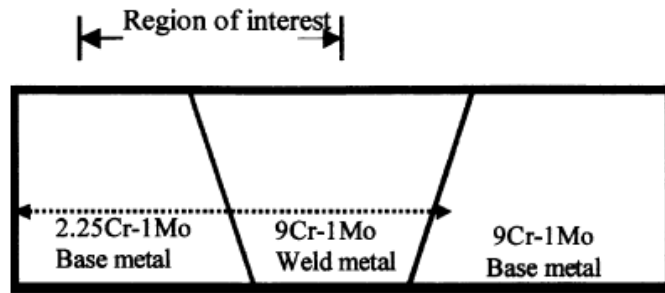
การใช้งาน [3]

ในช่วงแรกมีการพัฒนาใช้สำหรับทำเป็นหม้อต้มไอน้ำผลิตกระแสไฟฟ้า ในปี 1980 เหล็กกล้า P91 ได้เริ่มถูกใช้งานเป็นครั้งแรกสำหรับการใช้แทนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 321 ในทศวรรษ 1990 เหล็กกล้า P91 เป็นวัสดุที่ถูกเลือกใช้ในการเปลี่ยนและการสร้างโรงไฟฟ้าโดยมักถูกใช้งานทำเป็นท่อไอน้ำและอื่นๆ เนื่องจากสามารถออกแบบใช้ความหนาที่ลดลง ใช้งานได้ที่อุณหภูมิและความดันสูง

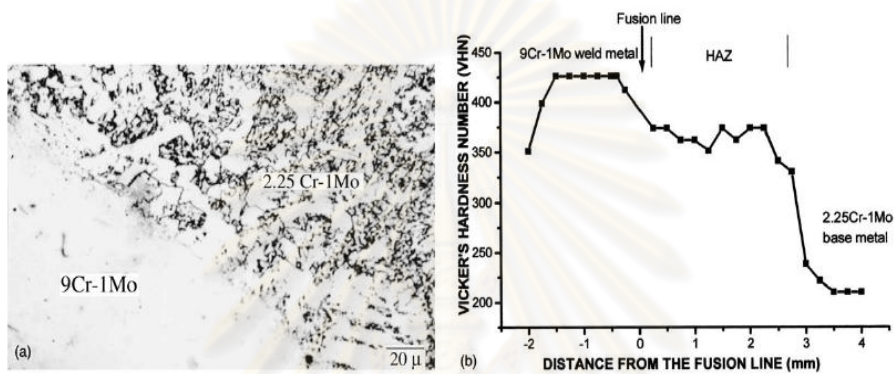
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91

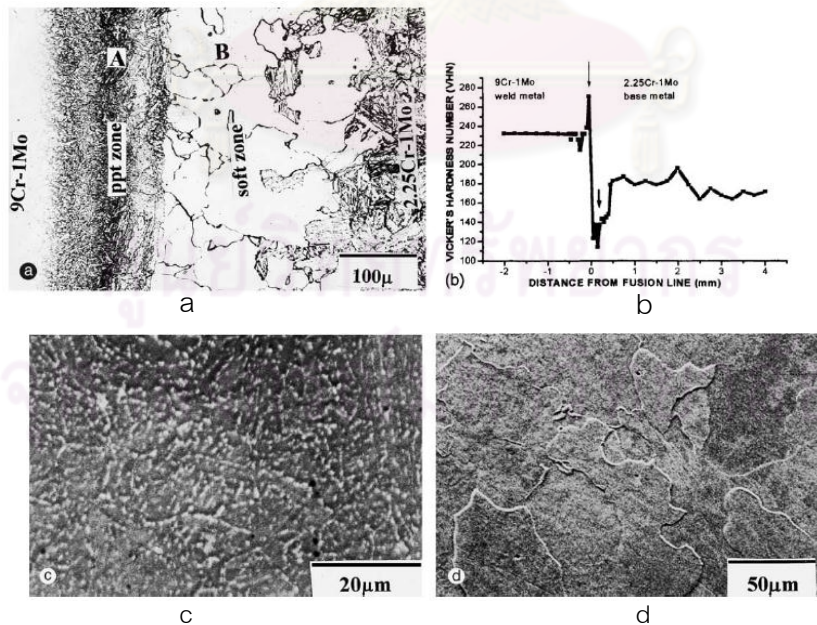
M. Vijayalakshmi และคณะ [6] ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของรอยเชื่อมเหล็ก 9Cr-1Mo เชื่อมกับเหล็ก 2.25Cr-1Mo ในบริเวณโลหะพื้นและเนื้อเชื่อมตามแนวเส้นประในรูปที่ 2.1 และได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 1023 K เป็นเวลา 1, 2, 5, 10 และ 15 ชั่วโมง ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 2.2-2.6 จากการศึกษาพบว่าเมื่อนำเหล็ก 9Cr-1Mo เชื่อมกับเหล็ก 2.25Cr-1Mo ไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อน จะทำให้เกิดคาร์ไบด์ (รูปที่ 2.6) ที่มีโครเมียมอยู่มากทางด้านเหล็ก 9Cr-1Mo และเกิดการสูญเสียคาร์บอนด้านเหล็ก 2.25Cr-1Mo เนื่องจากการแพร่ของคาร์บอนด้านเหล็ก 2.25Cr-1Mo ไปยังด้านเหล็ก 9Cr-1Mo ทำให้เกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ในบริเวณที่แข็ง (Hard Zone) (รูปที่ 2.3 c) และเกิดเฟร์ไรต์ในบริเวณที่อ่อน (Soft Zone) (รูปที่ 2.3 d) ด้านเหล็ก 2.25Cr-1Mo



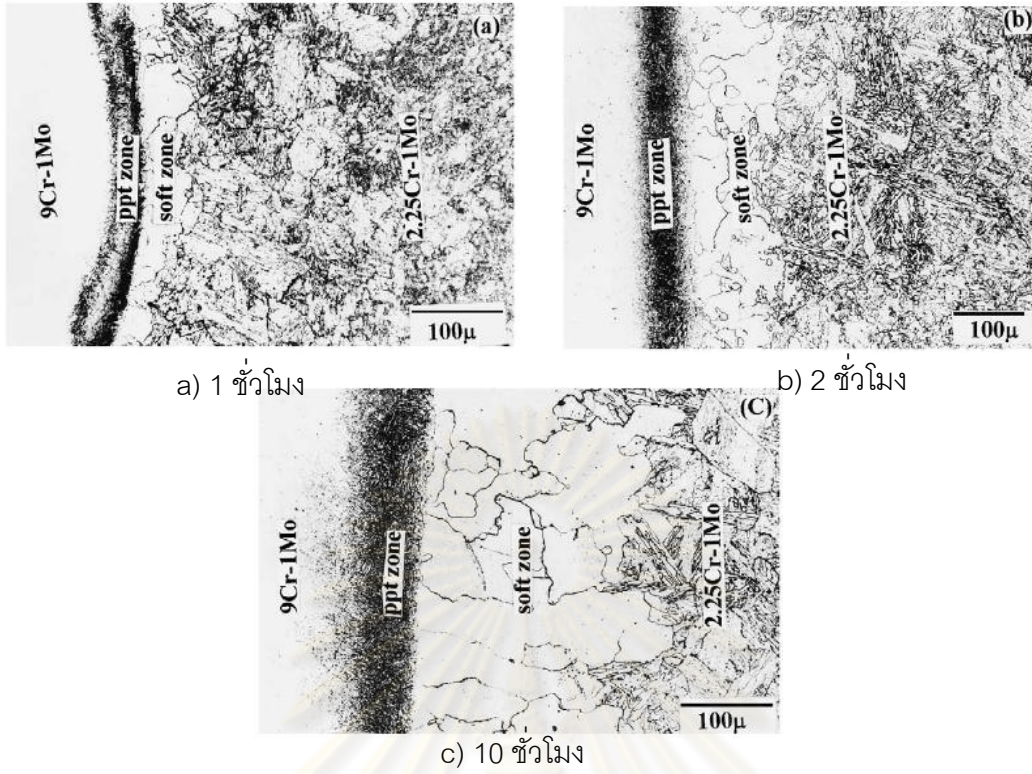
รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางแสดงบริเวณของชิ้นงานเชื่อมที่ศึกษาโดย M. Vijayalakshmi และคณะ [6]



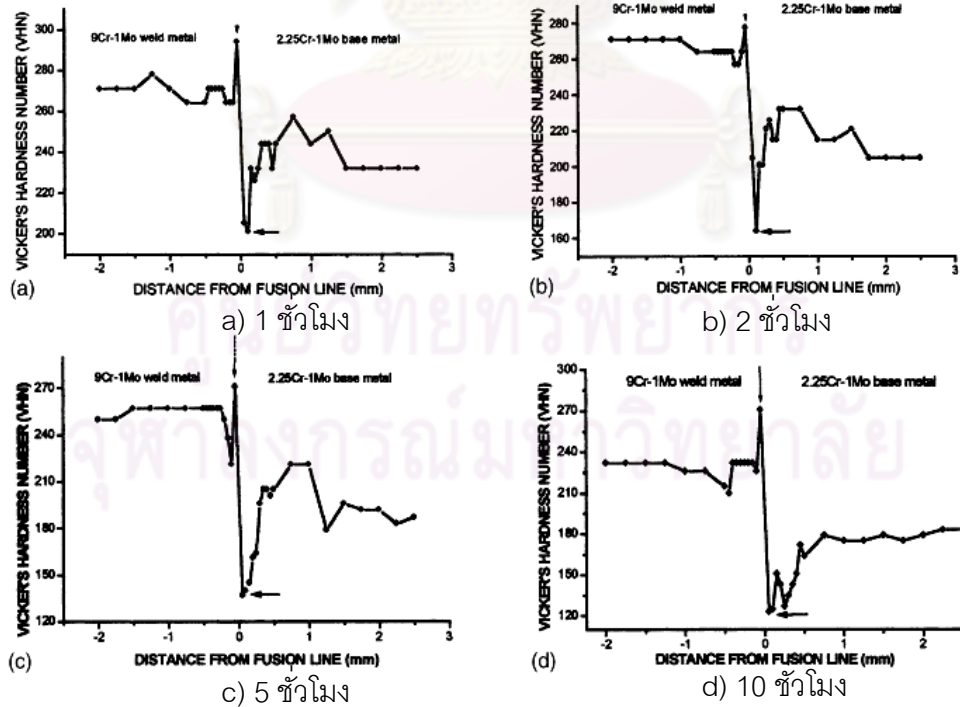
รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคและเส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กที่มี 9Cr-1Mo เชื่อมกับเหล็กที่มี 2.25Cr-1Mo โดยที่ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน [6]



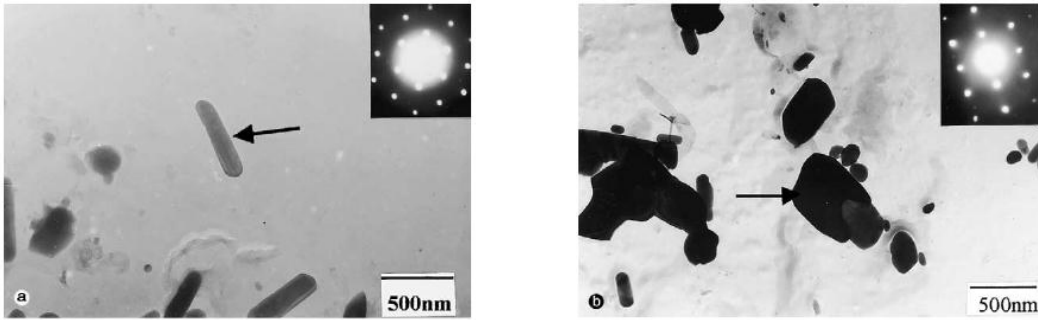
รูปที่ 2.3 a) โครงสร้างจุลภาค b) เส้นแสดงความแข็ง c) ตะกอนคาร์ไบด์ในบริเวณที่แข็ง d) เฟอไรต์ในบริเวณที่อ่อนของแนวงานเชื่อมผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 1023 K 15 ชั่วโมง [6]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1023 K [6]



รูปที่ 2.5 เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 1023 K [6]



รูปที่ 2.6 ภาพคาร์ไบด์ที่เกิดในแนวเชื่อมหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1023 K เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [6]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโลหะผสมนิกเกิลซึ่งใช้เป็นลวดเชื่อมในการเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91

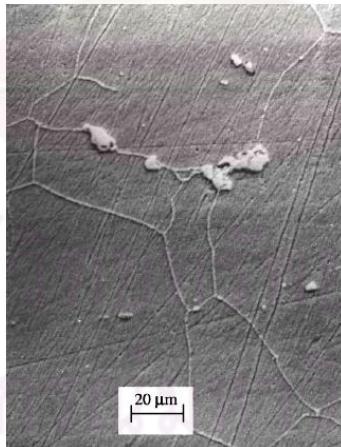
K. Bhanu Sankara Rao และคณะ [7] ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติกลของอินโคเนล 625 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 923 และ 1123 K ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 2.6 การศึกษาของคณะวิจัยนี้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติกลของอินโคเนล 625 หลังจากผ่านการใช้งานแล้ว

ตารางที่ 2.6 รายละเอียดของการอบชุบความร้อนของอินโคเนล 625 ตามการทดลองของ K.Bhanu Sankara Rao และคณะ [7]

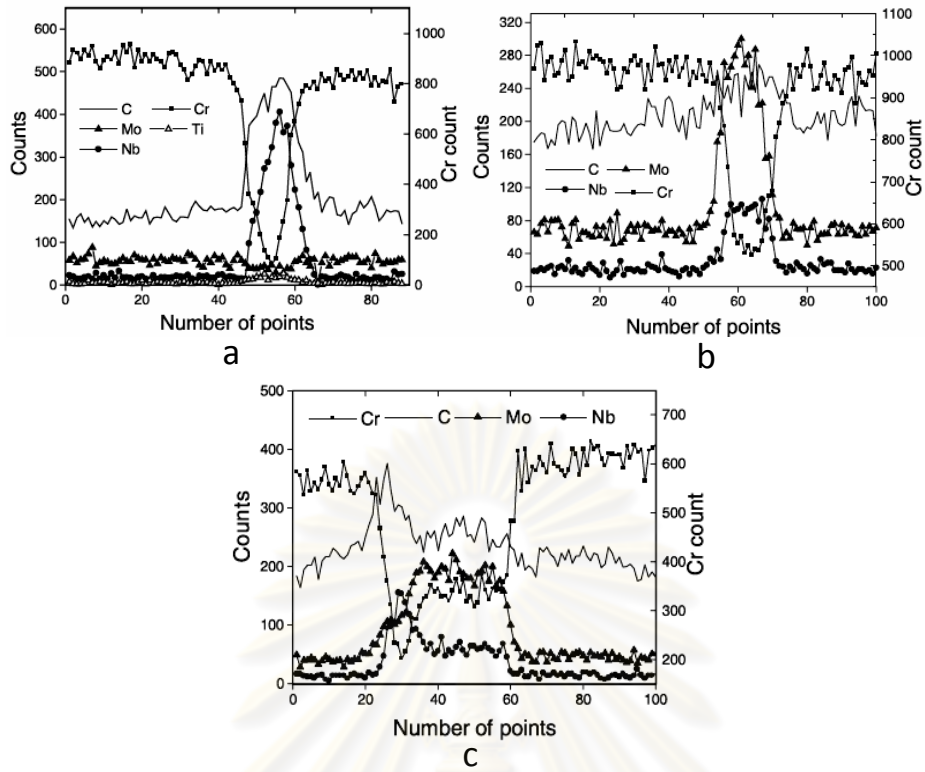
S. No.	Condition	Aging treatment temperature (K)	Duration (h)	Remarks
1	Service-exposed	-	-	Exposed to ~873 K for ~60 000 h
2	Post-service Aging treatment	(i) 923 (ii) 1123	1, 100, 200, 500 1, 10, 30, 100, 200, 500	-
3	Re-solution annealed (1423 K) + aging treatment	(i) 923 (ii) 1123	1, 10, 100, 200, 500 1, 10, 100, 200, 500	-

จากการศึกษาอินโคเนล 625 ที่ผ่านการใช้งาน ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคแสดงตะกอนคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนดังในรูปที่ 2.7 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงเส้นบริเวณที่เกิดตะกอนแสดงในรูปที่ 2.8 และการวิเคราะห์ตะกอนโดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) แสดงดังรูปที่ 2.9 เมื่อนำวัสดุที่ผ่านการใช้งานมาแล้วผ่านการอบละลาย (Annealing) ที่อุณหภูมิ 1423 K เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจะมีค่าความเค้นคราก (Yield strength) ลดลงอย่างมาก (รูปที่ 2.10)

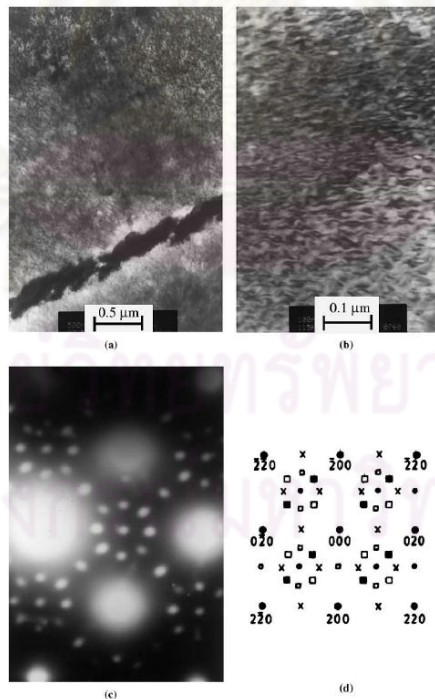
เนื่องมาจากการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ของตะกอน $\text{Ni}_2(\text{Cr},\text{Mo})$ และแกรมมาดอบเบิลไฟร์ม (γ'' -phase) ดังภาพถ่ายที่ 2.11 เมื่อนำวัสดุที่ผ่านการอบอ่อน (Annealing) มาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 923 K ทำให้ค่าความเค้นครากเพิ่มขึ้นเนื่องจากการตกตะกอนของแกรมมาดอบเบิลไฟร์ม (γ'' -phase) ตามรูปที่ 2.12 และ 2.13 และพบการตกตะกอนของ δ -phase เช่นกันดังแสดงในรูปที่ 2.14 แต่ต้องใช้เวลาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนนาน เมื่อนำวัสดุที่ผ่านการใช้งานมาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1123K จะทำให้เกิดการตกตะกอนของแกรมมาดอบเบิลไฟร์ม (γ'' -phase) ได้ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.15-2.16 คุณสมบัติกลของอินโคเนล 625 ที่ผ่านการใช้งาน ผ่านการอบอ่อน และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่าง ๆ รูปที่ 2.10 ตารางที่ 2.7 แสดงค่าความเค้นคราก ความแข็งแรงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอินโคเนล 625 ที่ผ่านการใช้งาน และกรรมวิธีทางความร้อนแบบต่าง ๆ [7] ตารางที่ 2.8 แสดงค่าความเค้นคราก ความแข็งแรงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอินโคเนล 625 ที่ผ่านการใช้งานนำมาผ่านการอบอ่อนและกรรมวิธีทางความร้อนแบบต่าง ๆ [7] ตารางที่ 2.9 แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดและการตกตะกอนเฟสต่าง ๆ หลังการทดลอง



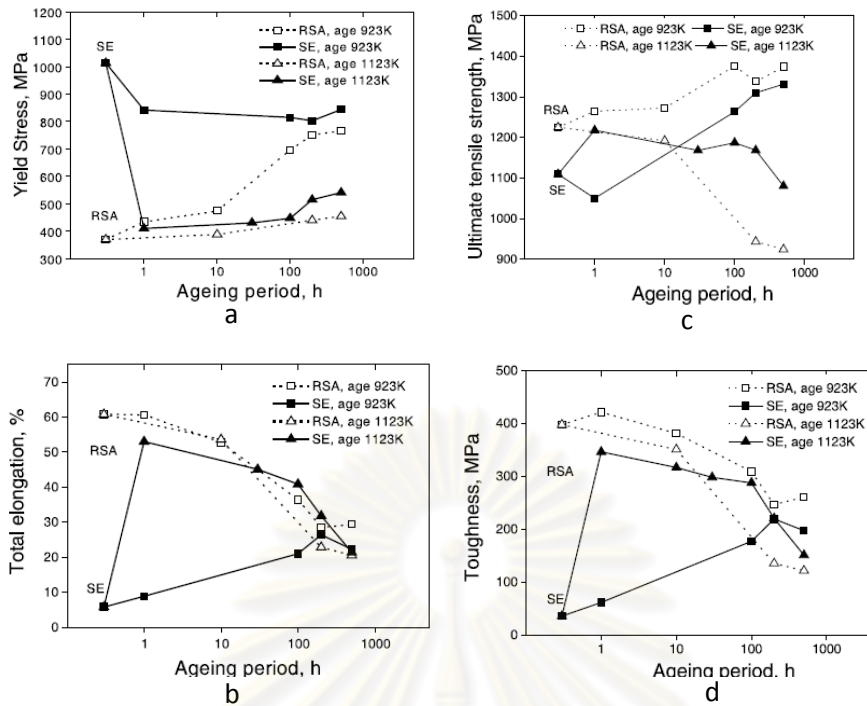
รูปที่ 2.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแสดงคาร์ไบด์ตามขอบและภายในเกรนของโลหะเนื้อพื้นวัสดุที่ผ่านการใช้งานแล้ว [7]



รูปที่ 2.8 ผลการวิเคราะห์เชิงเส้นบนวัสดุที่ผ่านการใช้งาน a) บริเวณขอบเกรน b) คาร์ไบด์ภายในโลหะพื้นมี Nb และ Mo อยู่มาก c) การกระจายตัวของ Nb และ Mo ในคาร์ไบด์ [7]



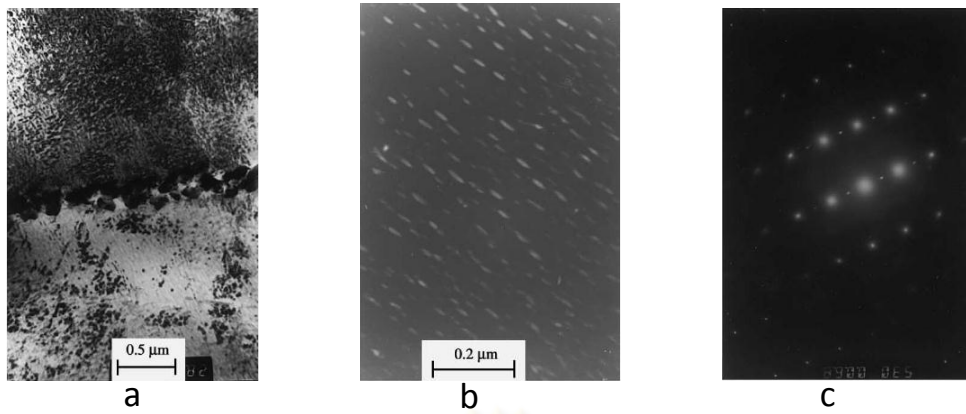
รูปที่ 2.9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านวัสดุที่ผ่านการใช้งานแล้ว a) คาร์ไบด์ตามขอบเกรน b) เฟส $Ni_2(Cr,Mo)$ c) รูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนของ $Ni_2(Cr,Mo)$ และแกรมมาดอบเบิลไพร์ม (γ'') d) รูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนของภาพ c) [7]



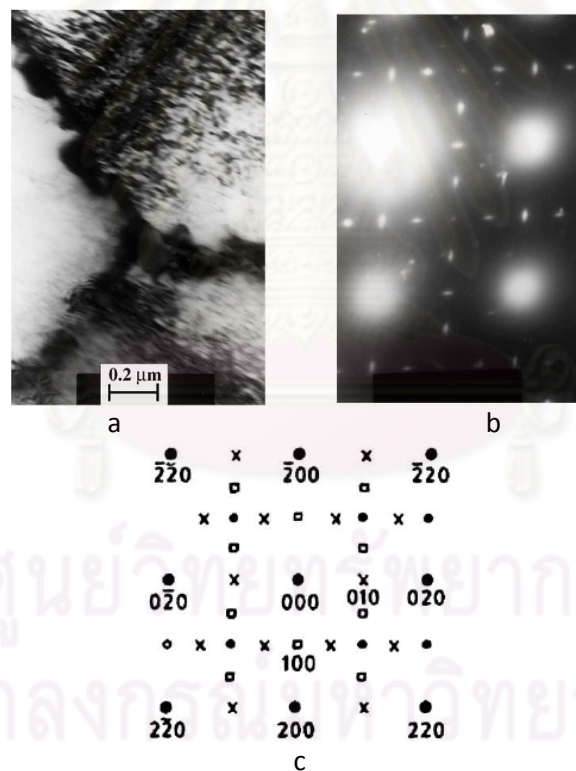
รูปที่ 2.10 กราฟแสดง a) ความเค้นคราก b) ระยะเวลา c) ความแข็งแรงสูงสุด d) ความแกร่ง
 คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟความเค้นความเครียด ของ อินโคเนล 625 ที่ผ่านการใช้งาน
 ผ่านการอบอ่อน และกรรมวิธีทางความร้อนแบบต่าง ๆ [7]



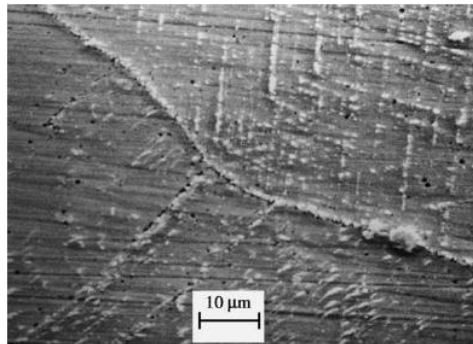
รูปที่ 2.11 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน วัสดุที่ผ่านการใช้งานหลังการอบอ่อน
 เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1423 K แสดงให้เห็นแต่โลหะเนื้อพื้นและขอบเกรน [7]



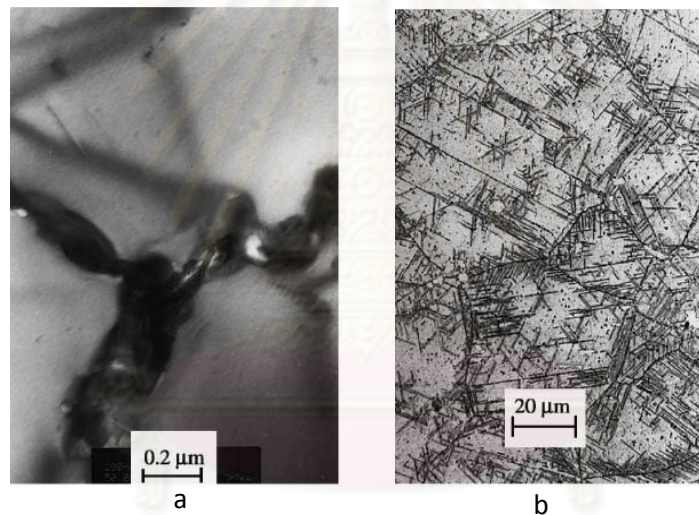
รูปที่ 2.12 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน a) วัสดุที่ผ่านการใช้งานและผ่านกรรมวิธีทางความร้อน 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 923 K ส่วนใหญ่จะเป็นแกรมมาดอบเบิลไพร์ม (γ'') b) แกรมมาดอบเบิลไพร์ม (γ'') c) รูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนของแกรมมาดอบเบิลไพร์ม (γ'') [7]



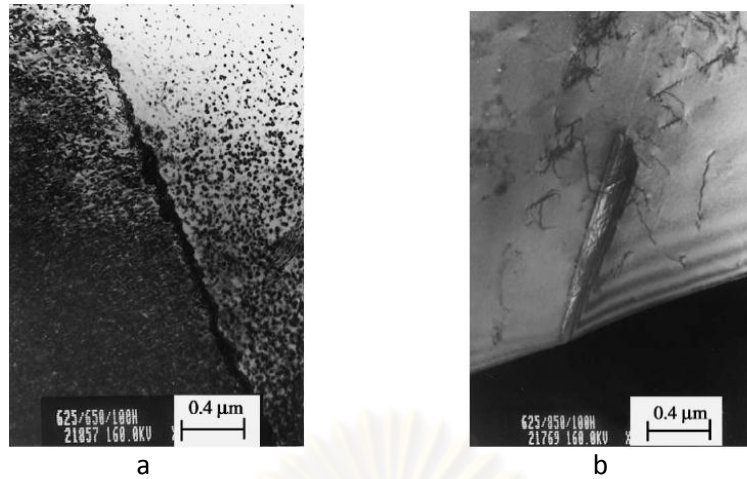
รูปที่ 2.13 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน วัสดุที่ผ่านการใช้งานและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน 10 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 923 K a) คาร์ไบด์ที่ขอบเกรน และแกรมมาดอบเบิลไพร์ม (γ'') b) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของแกรมมาดอบเบิลไพร์ม (γ'') ไม่พบ $\text{Ni}_2(\text{Cr}, \text{Mo})$ c) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของ b) [7]



รูปที่ 2.14 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด วัสดุที่ผ่านการใช้งานและการอบชุบ ความร้อน 500 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 923 K แสดงให้เห็นการตกตะกอนของเฟสเดลต้า (δ -phase) [7]



รูปที่ 2.15 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน วัสดุที่ผ่านการใช้งานหลังจากกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1123 K a) คาร์ไบด์ที่ขอบเกรน ไม่พบ $\text{Ni}_2(\text{Cr},\text{Mo})$ และแกรนมาดอบเบิลไพรม์ (γ'') b) การตกตะกอนของเฟสเดลต้า (δ -phase) หลังเวลาผ่านไป 100 ชั่วโมง [7]



รูปที่ 2.16 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน วัสดุที่ผ่านการอบอ่อนภายหลังจากอบชุบความร้อน a) อุณหภูมิ 923 K 100 ชั่วโมง แสดงคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนและแกมมาคอบเบิลไพร์ม (γ'') b) อุณหภูมิ 1123 K 100 ชั่วโมง แสดงเฟสเดลต้า (δ -phase) [7]

ตารางที่ 2.7 ค่าความเค้นคราก ความแข็งแรงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอินโคเนล 625 ผ่านการใช้งานและกรรมวิธีทางความร้อนแบบต่าง ๆ [7]

Heat treatment condition	YS (MPa)	UTS (MPa)	Total elongation (%)
SE	1013	1110	5.8
SE · 923 K; 1 h	842	1050	8.8
SE · 923 K; 100 h	815	1263	21.0
SE · 923 K; 200 h	803	1310	26.4
SE · 923 K; 500 h	844	1331	22.3
SE · 1123 K; 1 h	410	1218	53
SE · 1123 K; 10 h	426	1171	48.3
SE · 1123 K; 30 h	431	1168	45.1
SE · 1123 K; 100 h	447	1187	40.8
SE · 1123 K; 200 h	515	1169	31.8
SE · 1123 K; 500 h	541	1081	21.4
Virgin material (pre-service condition)	375	1225	60.8

ตารางที่ 2.8 ค่าความเค้นคราก ความแข็งแรงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอินโคเนล 625 ผ่านการใช้งาน การอบอ่อนและกรรมวิธีทางความร้อนต่าง ๆ [7]

Heat treatment condition	YS (MPa)	UTS (MPa)	Total elongation (%)
RSA	370	1225	60.8
RSA + 923 K; 1 h	434	1265	60.7
RSA + 923 K; 10 h	473	1272	52.8
RSA + 923 K; 100 h	696	1376	36.5
RSA + 923 K; 200 h	750	1337	28.5
RSA + 923 K; 500 h	766	1374	29.4
RSA + 1123 K; 10 h	388	1192	53.6
RSA + 1123 K; 200 h	440	943	22.8
RSA + 1123 K; 500 h	454	925	20.6

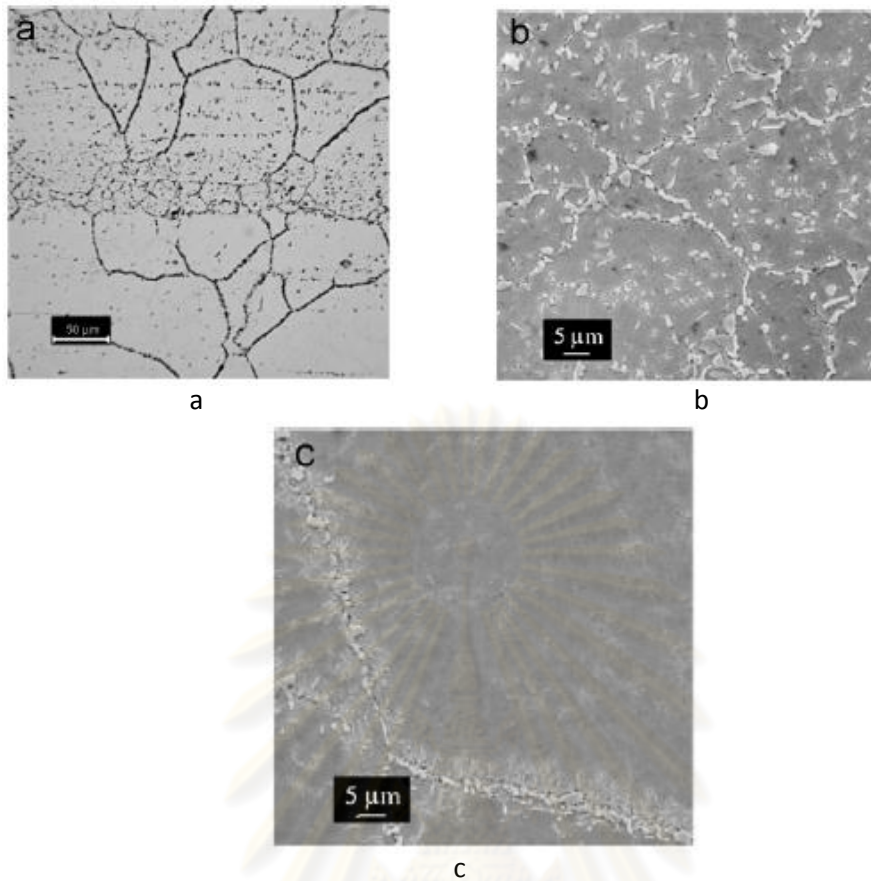
ตารางที่ 2.9 ค่าความแข็งแรงสูงสุดและการตกตะกอนเฟสต่าง ๆ หลังการทดลอง [7]

S. No.	Condition	Mechanical properties	Interpretation
1.	SE	Poor ductility (~6%); high YS value	Precipitation of intermetallic phases $\text{Ni}_2(\text{Cr},\text{Mo})$ and γ' , continuous grain boundary carbide films
2.	SE + 923 K-1 h	Large ↓ YS; slight ↑ ductility	Dissolution of $\text{Ni}_2(\text{Cr},\text{Mo})$ prominent
3.	SE + 923 K-500 h	↑ YS; ↓ ductility	Precipitation of δ
4.	SE + 1123 K-1 h	↓ YS; ↓ ductility	Dissolution of $\text{Ni}_2(\text{Cr},\text{Mo})$ and γ'
5.	SE + 1123 K-longer aging	↑ YS; large ↓ ductility	Precipitation of δ
6.	SE + 1423 K-0.5 h	↓ YS; ↑ ductility	Dissolution of all $\text{Ni}_2(\text{Cr},\text{Mo})$, γ' and secondary carbides present initially

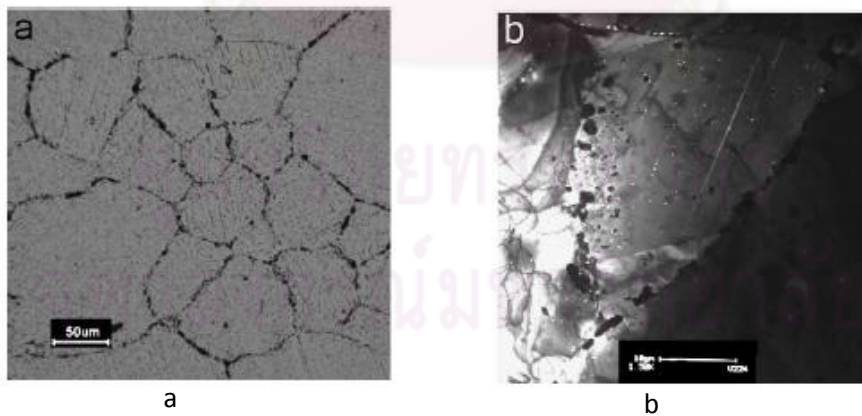
^aSE – service-exposed; ↑ increase; ↓ decrease.

Elisabetta Gariboldi และคณะ [8] ศึกษาการตกตะกอนในโลหะผสมนิกเกิล Ni-22Cr-12Co-9Mo (อินโคเนล 617) โดยนำโลหะผสมนิกเกิลอินโคเนล 617 มาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 700 และ 800°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง จากการศึกษพบว่า การผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง จะทำให้เกิดการตกตะกอนของแกมมาไพร์ม (γ' , $(\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti}))$) และเฟสเดลต้า (δ -phase) การตกตะกอนของเฟสเดลต้า (δ -phase) และแกมมาไพร์มมีส่วนเกี่ยวข้องกัน นอกจากนี้พบการตกตะกอนของ M_{23}C_6 รูปที่ 2.17 แสดงภาพถ่าย M_{23}C_6 และเฟสเดลต้า (δ -phase) และเมื่อนำวัสดุผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง จะพบว่าแกมมาไพร์ม (γ') มีปริมาณลดลงทำให้ไม่พบการตกตะกอนของเฟสเดลต้า (δ -phase) ดังผลภาพถ่ายแสดงในรูปที่ 2.18 ทุกอุณหภูมิและเวลาการทดลองพบการตกตะกอนของ M_{23}C_6 ($(\text{Cr},\text{Co},\text{Ni},\text{Mo})_{23}\text{C}_6$)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.17 โลหะผสมนิกเกิล Ni-22Cr-12Co-9Mo (อินโคเนล 617) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง a) ภาพถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์แสง b), c) $M_{23}C_6$ และเฟสเคลด้า (δ -phase) ตกตะกอนตามขอบเกรน [8]



รูปที่ 2.18 โลหะผสมนิกเกิล Ni-22Cr-12Co-9Mo มาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง a) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสง b) ภาพถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านพบว่ามีการมาไฟรม (γ') ลดลง [8]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เตือบไฟฟ้า

เตือบยี่ห้อ Carbolite กำลังไฟ 14 กิโลวัตต์ กระแส 21 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 220-380 โวลต์ สำหรับทดลองกรรมวิธีทางความร้อนของชิ้นงานเชื่อม

3.2 อุปกรณ์ในการเชื่อม

เครื่องเชื่อมยี่ห้อ Frunius แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ 10-13 โวลต์ กระแส 130-160 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 3-5 ซม.ต่อนาที การออกแบบงานเชื่อมแสดงในภาคผนวก จ

3.3 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1 เหล็กกล้า P91 (9% โครเมียม)

3.3.2 เหล็กกล้า P22 (2.25% โครเมียม)

3.3.3 ลวดเชื่อมอินโคเนล 625

3.3.4 ลวดเชื่อมอินโคเนล 617

3.3.5 ฟ้าสักหลาดและกระดาษทรายเบอร์ 80, 180, 320, 400, 600, 800, 1,000, 1,200 และ 2,000

3.3.7 ผงอะลูมินา ขนาด 1 ไมโครเมตร

3.3.8 สารละลายกรดไนตริก 10%

3.3.9 ก๊าซอาร์กอนเกรดอุตสาหกรรม

3.4 เครื่องมือสำหรับการเตรียมชิ้นงาน

3.4.1 เครื่องตัดชิ้นงาน

3.4.2 เครื่องขัดชิ้นงาน

3.5 เครื่องมือวิเคราะห์

3.5.1 กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscopy)

3.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscopy) ที่ติดตั้งเครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีด้วยวิธี Energy Dispersion X-Ray (EDX) หรืออีดีเอก

3.5.3 เครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ส (Microvicker Hardness Testing Machine)

3.6 วิธีการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.6.1 เตรียมชิ้นงานเชื่อมโดยใช้วิธี Gas Tungsten Arc welding (GTAW) เหล็กกล้า P91 เชื่อมกับเหล็กกล้า P22 โดยจะเชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 และอินโคเนล 617 โดยใช้อาร์กอนเป็นแก๊สปกคลุม ตัวอย่างชิ้นงานก่อนและหลังเชื่อมแสดงในรูปที่ 3.1



ก) ตัวอย่างชิ้นงานก่อนเชื่อม

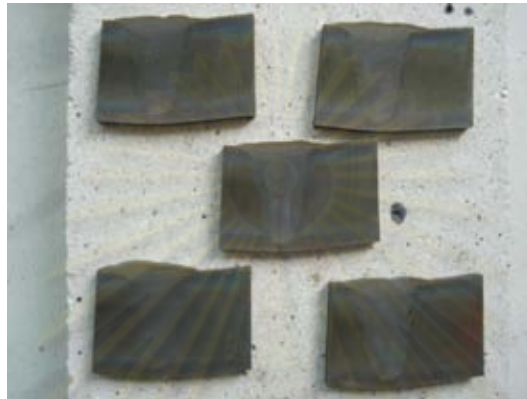
ข) ตัวอย่างชิ้นงานหลังเชื่อม

รูปที่ 3.1 ตัวอย่างชิ้นงานก่อนเชื่อมและหลังเชื่อม

3.6.2 นำชิ้นงานเชื่อมทั้งหมดผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C โดยใช้เวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง

3.7 กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลาต่อความแข็งและโครงสร้างจุลภาค

3.7.1 นำชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800 °C เป็นเวลาเวลา 500, 1000, 2000 และ 2500 ชั่วโมง



รูปที่ 3.2 ภาพตัวอย่างชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C

3.7.2 นำชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800 °C เป็นเวลาเวลา 500, 1000, 2000 และ 2500 ชั่วโมง

3.7.3 นำชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800 °C เป็นเวลาเวลา 500, 1000, 2000 และ 2500 ชั่วโมง

3.8 วิธีการทดสอบสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

นำชิ้นงานในหัวข้อ 3.7 ขัดผิวหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80, 180, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 และ 2000 และขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินาขนาด 1 ไมโครเมตร แล้วจึงนำชิ้นงานที่ผ่านการขัดไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม

3.9 วิธีการทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารประกอบของชิ้นงาน

ตรวจสอบธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิคอีดีเอส เพื่อศึกษาส่วนผสมทางเคมีที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อม บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อเชื่อมกับบริเวณกระทัน และโครงสร้างจุลภาคที่สนใจ

3.10 ตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเชื่อม

การตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลในที่นี้ ใช้วิธีการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมตลอดแนวตั้งแต่เนื้อโลหะเดิมของเหล็กกล้า P22 และ P91 บริเวณกระทบร้อน เนื้อเชื่อม ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส ใช้น้ำหนักกด 100 กรัม เวลากด 10 วินาที



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

เพื่อความสะดวกในการอภิปรายผลความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและความแข็ง ต้องกล่าวอ้างถึงอุณหภูมิและเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลายครั้ง จึงขอใช้สัญลักษณ์แทนลวดเชื่อม 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 แสดงความหมายสัญลักษณ์ของกรรมวิธีความร้อน และสัญลักษณ์ของแนวเชื่อม

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

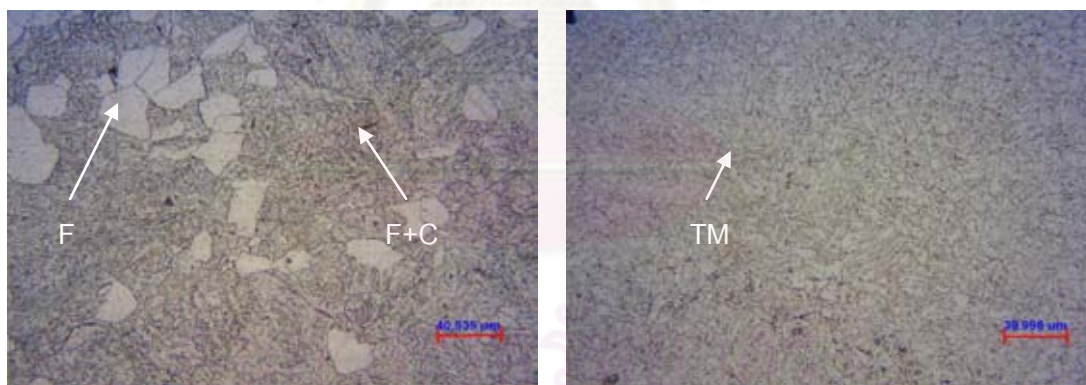


รูปที่ 4.1 บริเวณต่างๆของแนวเชื่อมพร้อมสัญลักษณ์ที่ใช้

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	เทมเปอ์ มาร์เทนไซต์ (Tempered Martensite)
B	เบไนต์ (Bainite)

4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91



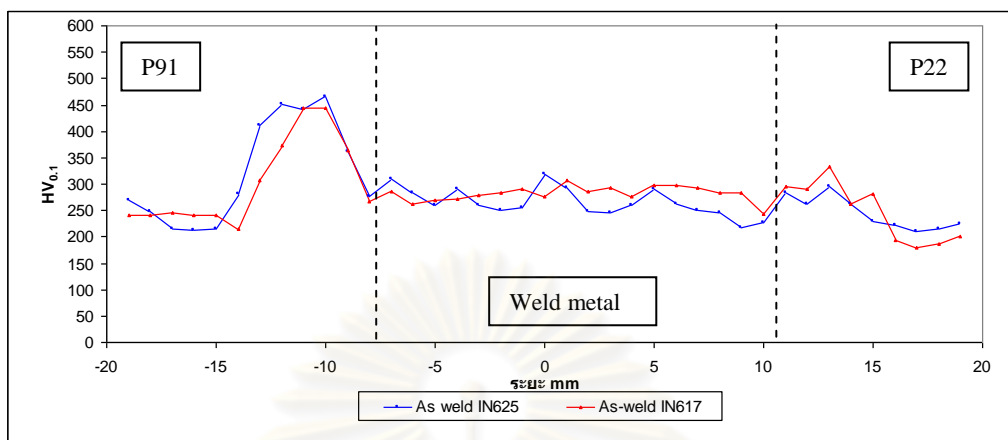
ก) เหล็กกล้า P22

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 เทมเปอ์ มาร์เทนไซต์

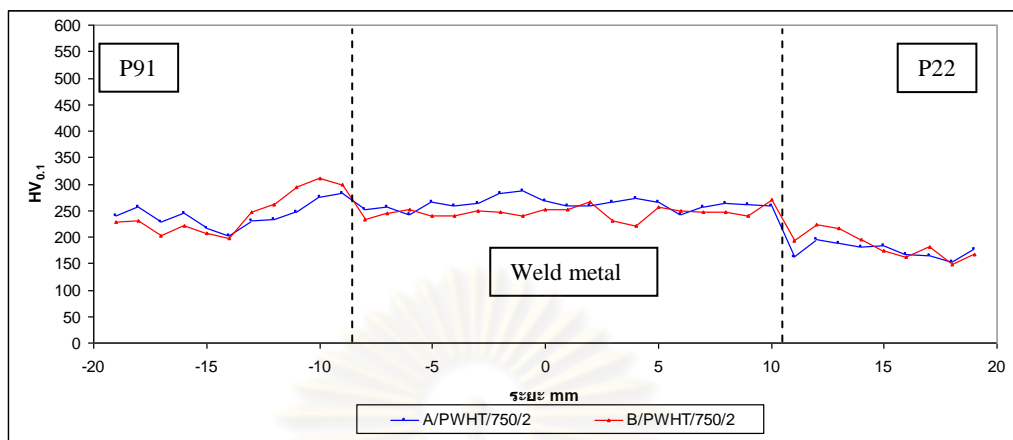
4.2 ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 และ อินโคเนล 617 หลังเชื่อม



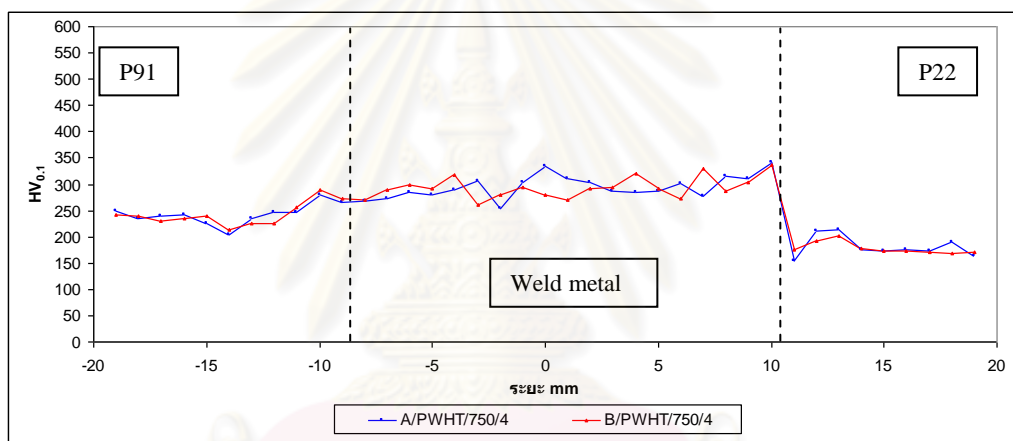
รูปที่ 4.3 ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังเชื่อม

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] ตรงกันข้ามกับบริเวณกระทบร้อนที่ติดกับเหล็ก P22 ที่ค่าความแข็งไม่แตกต่างจากค่าที่บริเวณเนื้อโลหะพื้นแต่มีค่าใกล้เคียง 350 HV ด้วยเหตุผลนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังเชื่อมเพื่อลดค่าความแข็ง อุณหภูมิของกรรมวิธีความร้อนหลังเชื่อมที่เลือกใช้ในที่นี้ คือ 750 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตเลือกใช้ และเป็นอุณหภูมิที่แนะนำ

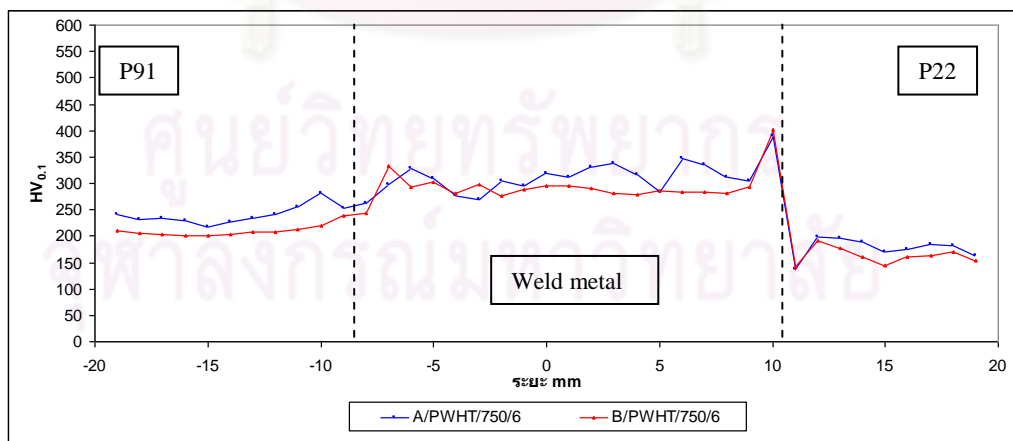
4.3 ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิอุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

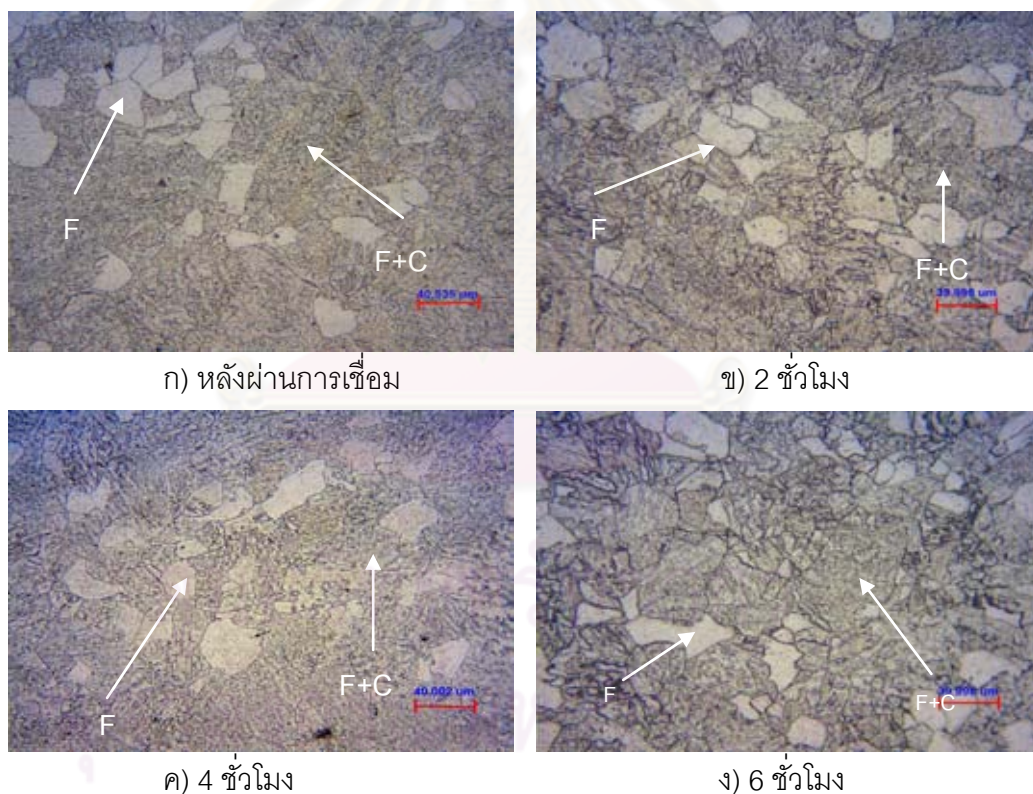


ค) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

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 (แกมมาดอบเบิลเฟสหรือเดลต้าใน 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

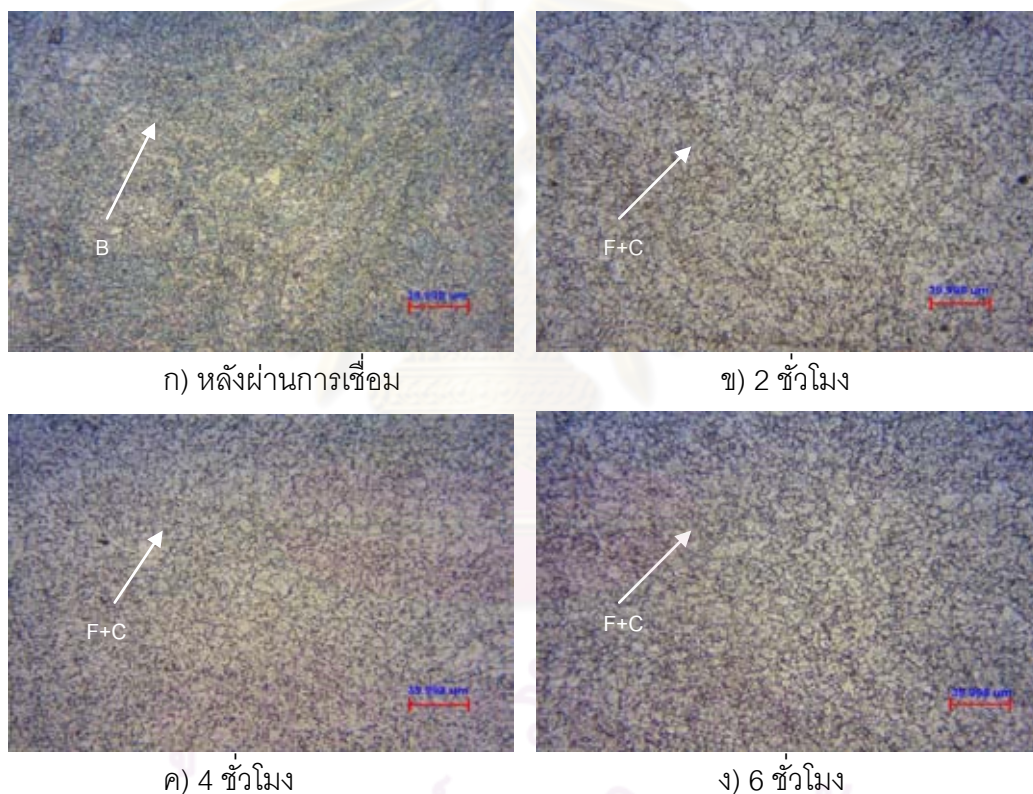


รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 หลังผ่านการเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมอุณหภูมิ 750°C

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

ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม โครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะพื้น ประกอบเป็นเฟอไรต์และเฟอไรต์ที่มีตะกอนคาร์ไบด์ บริเวณนี้ห่างจากเนื้อเชื่อมจึงไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค จากรูปที่ 4.3 ความแข็งของบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 หลังผ่านการเชื่อมมีค่า 178-225 HV_{0.1} และจากรูปที่ 4.4 ความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมมีค่า 153-183 HV_{0.1} ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกัน

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



รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนเหล็กกล้า P22 หลังผ่านการเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมอุณหภูมิ 750°C

รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงบริเวณกระทบร้อนเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 ในสภาพหลังเชื่อมแสดงรูปที่ 4.6 ก) โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทบร้อน (HAZ) หลังเชื่อม คือ เบไนต์ (Bainite) [10] เนื่องจากบริเวณกระทบร้อนได้รับความร้อนหรืออุณหภูมิที่สูงจากการเชื่อมจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นออสเท

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

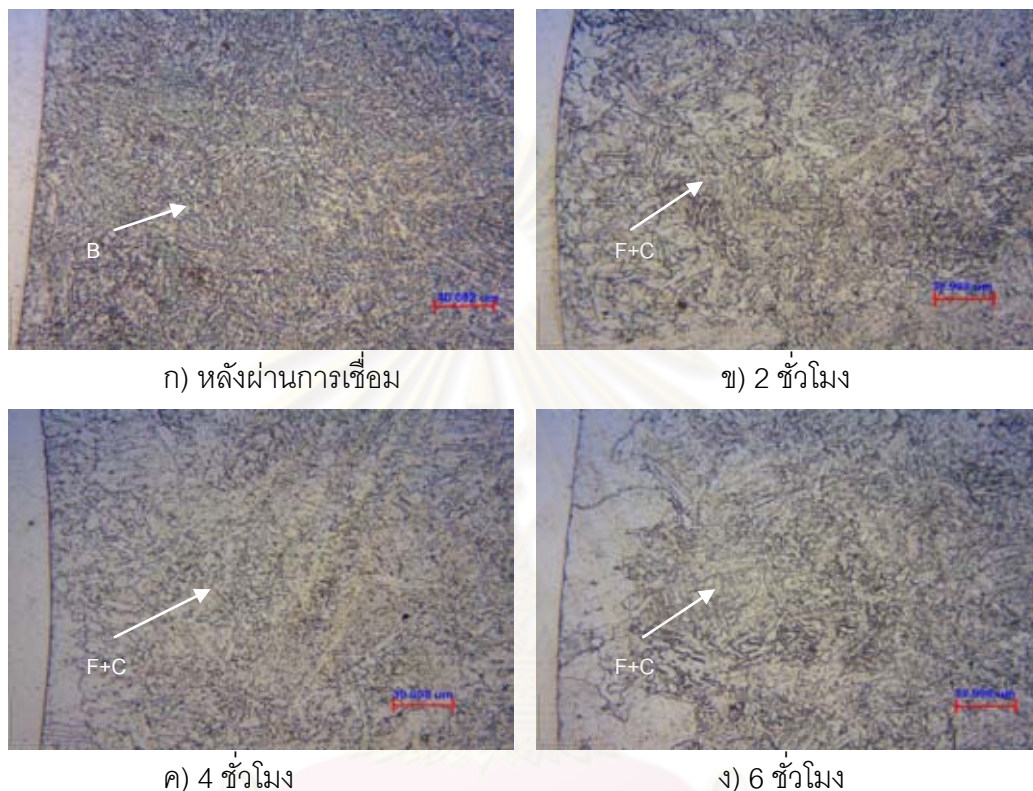
รูปที่ 4.4 ก) แสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 คือ 180-194 $HV_{0.1}$ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งคือ 174-223 $HV_{0.1}$

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_{0.1} ส่วนบริเวณรอยต่อของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่าความแข็งเฉลี่ย 295

$HV_{0.1}$ บริเวณรอยต่อหลังจากการเชื่อมมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเบไนต์ทำให้ความแข็งเฉลี่ยใกล้เคียงกัน หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C ทำให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนเป็นเฟอไรต์และตะกอนคาร์ไบด์ เปรียบเทียบบริเวณรอยต่อโครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยต่อหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เกรนของเฟอไรต์จะมีการขยายขนาดมากที่สุด รูปที่ 4.4 แสดงความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 คือ $162 HV_{0.1}$, $155 HV_{0.1}$, และ $137 HV_{0.1}$ ตามลำดับ ส่วนความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 617 คือ $191 HV_{0.1}$, $176 HV_{0.1}$, และ $141 HV_{0.1}$ ตามลำดับ

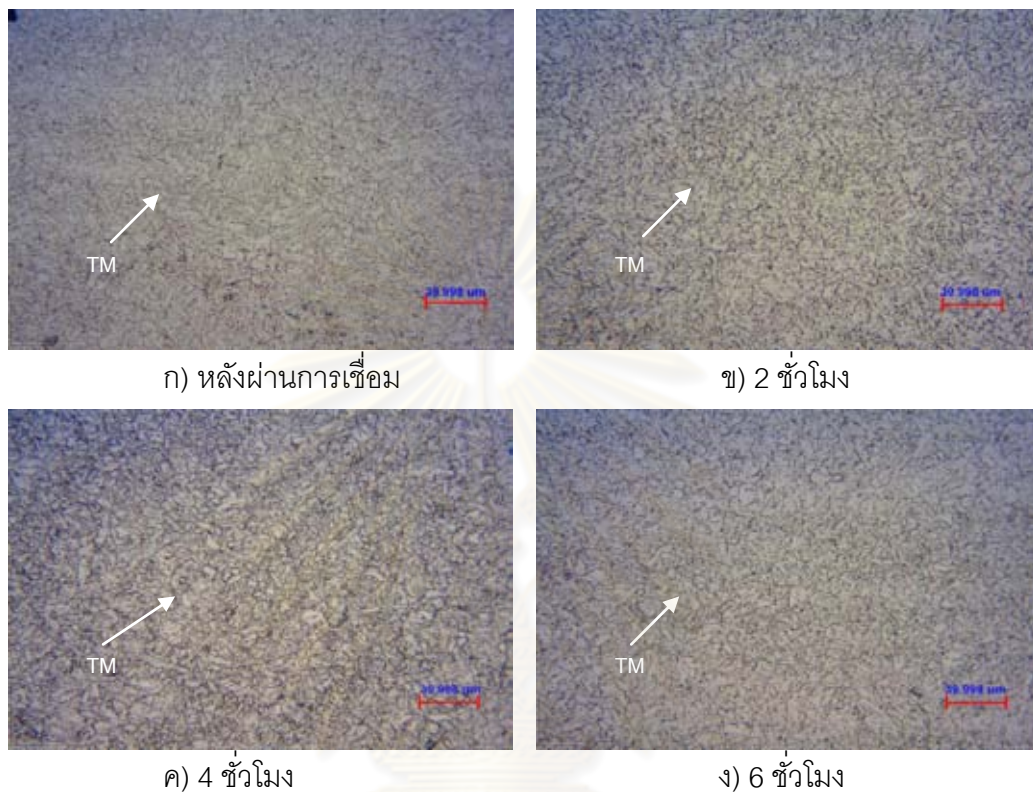
บริเวณรอยต่อของเหล็กกล้า P22 เกิดกระบวนการการกลับคืนสู่สภาวะปกติเช่นเดียวกับบริเวณกระทบร้อนทำให้บริเวณรอยต่อหลังจากกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งสูงกว่าบริเวณรอยต่อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง เนื่องจากเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่มากขึ้นทำให้ความหนาแน่นของดิสโลเคชัน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

จากรูปที่ 4.3 ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 ด้านติดกับเหล็กกล้า P22 หลังเชื่อม คือ $227 HV_{0.1}$ และ $244 HV_{0.1}$ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.4 ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดกับเหล็กกล้า P22 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่าสูงกว่าบริเวณเนื้อเชื่อม ความแข็งเพิ่มสูงขึ้นตามเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม คือ $258 HV_{0.1}$, $340 HV_{0.1}$ และ $389 HV_{0.1}$ ตามลำดับ และความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง คือ $270 HV_{0.1}$, $337 HV_{0.1}$ และ $402 HV_{0.1}$ ตามลำดับ

หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 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

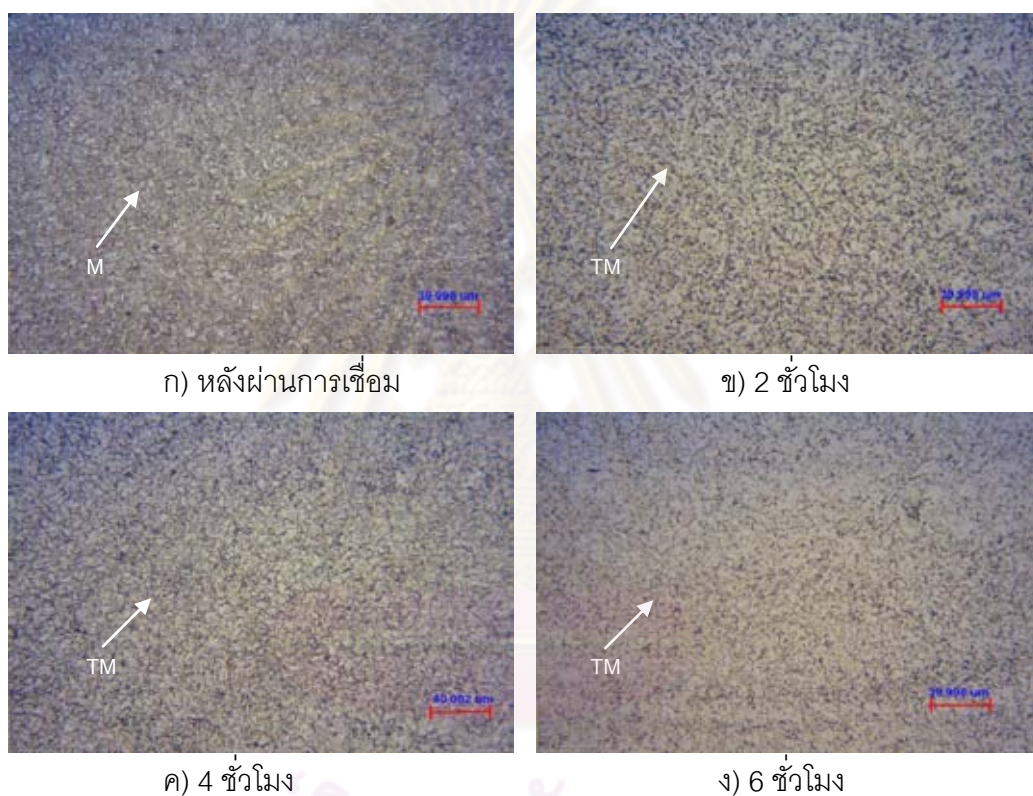


รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านการเชื่อมและผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C

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 เเทมเปอร์ มาร์เทนไซต์และตกอนคาร์ไบด์เหมือนกัน

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



รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทะร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านการเชื่อมและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C

รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงบริเวณกระทะร้อนของเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังเชื่อมโครงสร้างจุลภาคคือ มาร์เทนไซต์ (รูปที่ 4.9 ก) บริเวณกระทะร้อนจะได้รับอุณหภูมิหรือความร้อนที่สูงจากการเชื่อมส่งผลให้บริเวณที่มีระยะห่างจากแนวหลอมเหลวน้อยจะได้รับความร้อนหรือมีอุณหภูมิสูง 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

กระทบร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง เนื่องจากเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนที่น้อยกว่าจึงทำการแพร่ของอะตอมและการกำจัดดิสโลเคชันทำได้น้อย ความแข็งจึงสูง ความแข็งของบริเวณกระทบร้อนมีค่าสูงยังมีผลจากธาตุผสม (Alloying Element) ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของคาร์ไบด์ บริเวณกระทบร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง นั้นมีเวลามากพอในการที่อะตอมของธาตุผสมจะแพร่และทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เริ่มที่จะมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ การเกิดคาร์ไบด์ทำให้ธาตุผสมที่ละลายอยู่ในเนื้อพื้นลดลงด้วย การเริ่มตกตะกอนของคาร์ไบด์ไม่ทำให้ความแข็งของบริเวณกระทบร้อนสูง เนื่องจากตะกอนคาร์ไบด์มีปริมาณน้อย [17].

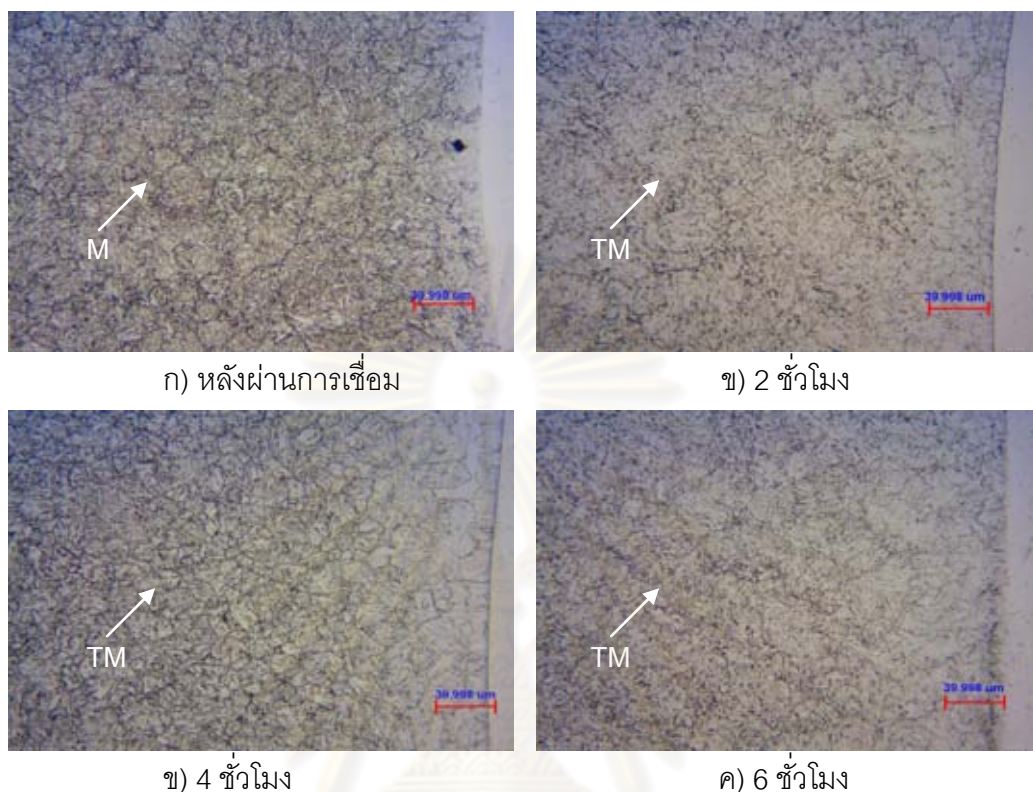
4.3.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ ความแข็งบริเวณรอยต่อของเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง

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 และบริเวณกระทบร้อน เนื่องจากขณะเชื่อมบริเวณนี้ได้รับความร้อนหรืออุณหภูมิสูงจึงเปลี่ยนเป็น ออสเทนไนต์ คาร์ไบด์สลายตัวทำให้บริเวณนี้มีขนาดเกรนที่ใหญ่ เมื่ออุณหภูมิลดลงเปลี่ยนเฟส เป็นมาร์เทนไซต์ที่มีเกรนใหญ่และออสเทนไนต์เหลือค้าง (รูปที่ 4.10 ก) ทำให้ความแข็งสูง [15-18] หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนเป็น เเทมเปอร์ มาร์เทนไซต์ และตะกอนคาร์ไบด์

รูปที่ 4.3 แสดงความแข็งบริเวณรอยต่อของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 ความแข็ง บริเวณรอยต่อด้านเหล็กกล้า P91 มีค่าเฉลี่ย 360 HV_{0.1} ส่วนแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มี ค่าเฉลี่ย 363 HV_{0.1}

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_{0.1} ส่วนแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่าเฉลี่ย คือ 299, 272 และ 237 HV_{0.1} ตามลำดับ บริเวณรอยต่อจะมีความแข็งต่ำกว่าบริเวณกระทบร้อนเนื่องจากบริเวณนี้ได้รับความ

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, 271 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

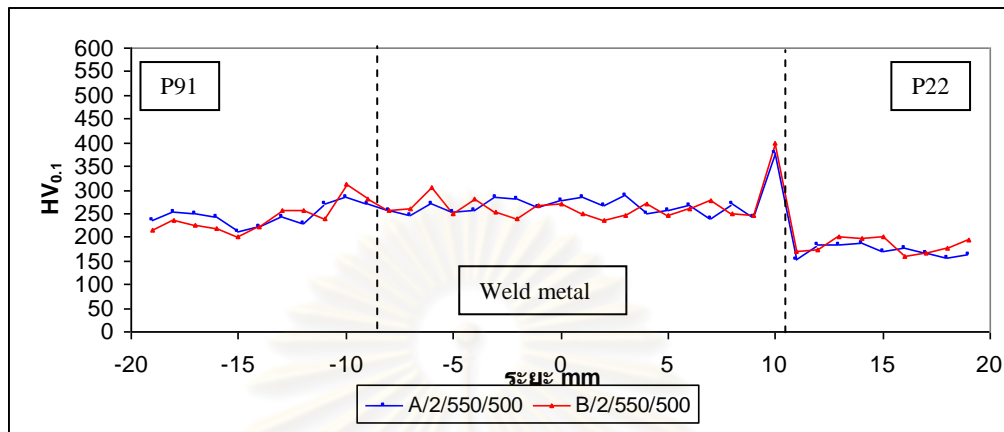
617 คือ 259-328 HV_{0.1} ความแข็งของบริเวณเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง มีค่า 268-346 HV₁₀₀ ส่วนความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 คือ 276-333 HV_{0.1}

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

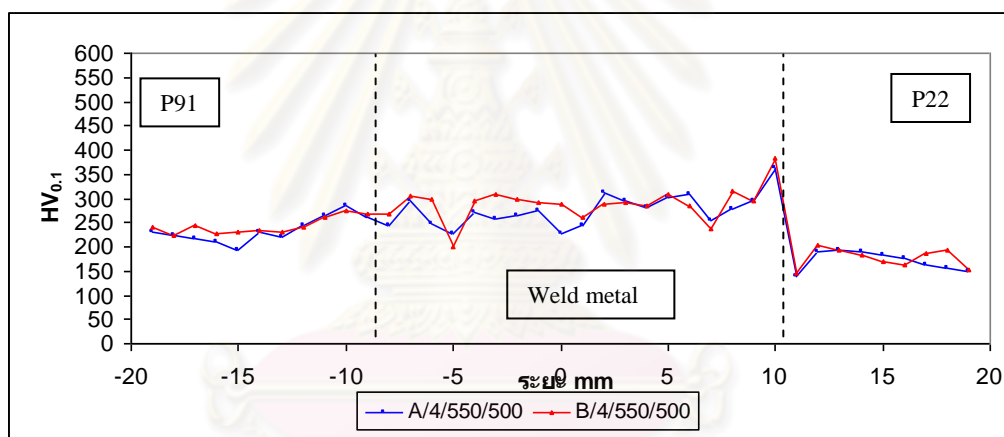


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

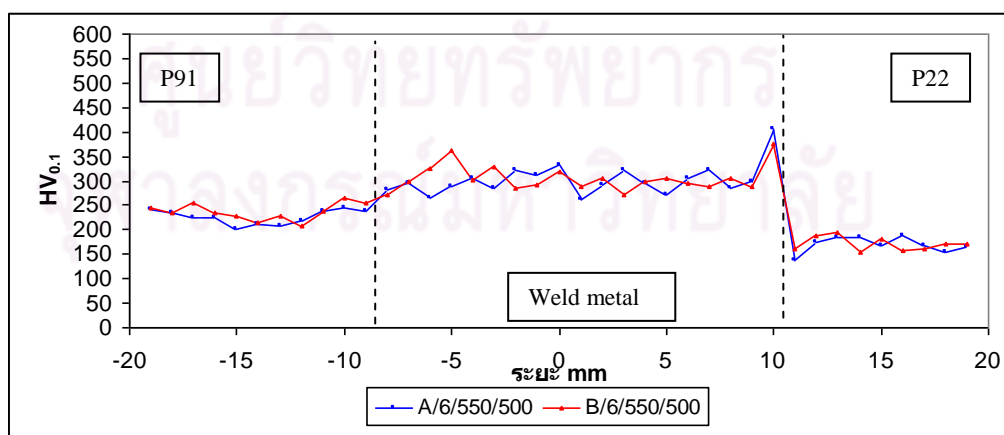
4.4 ความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

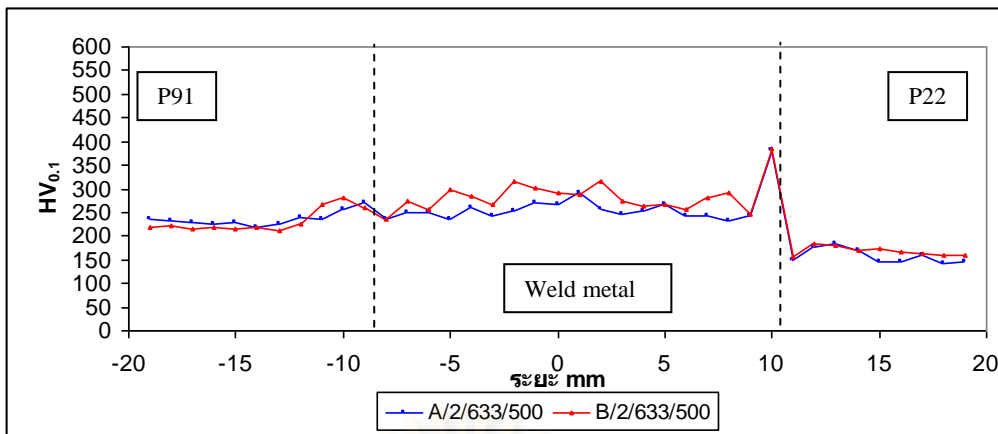


ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

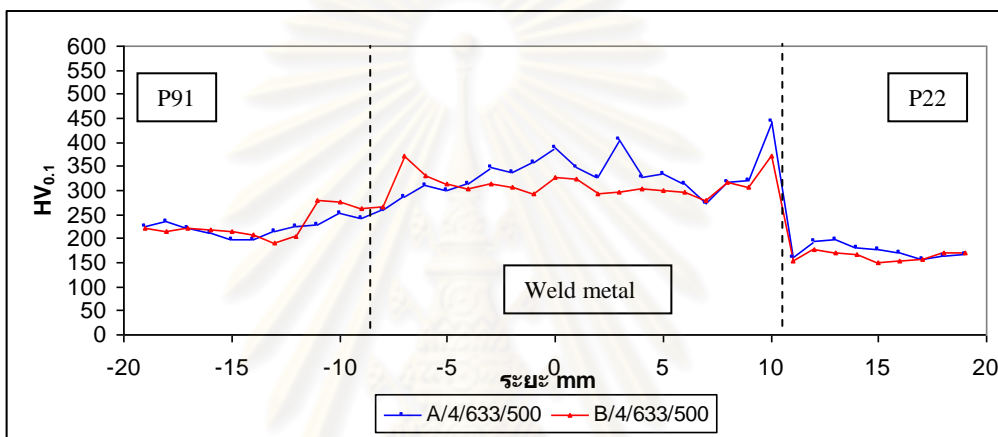


ค) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

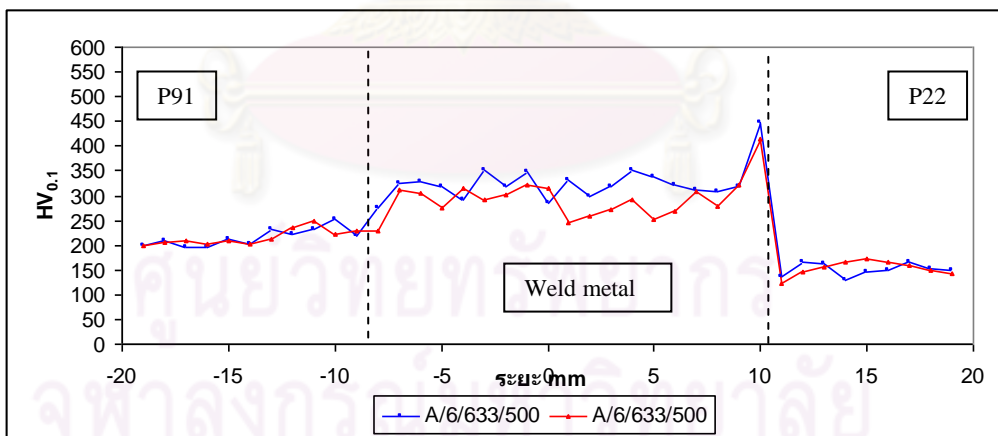
รูปที่ 4.11 ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

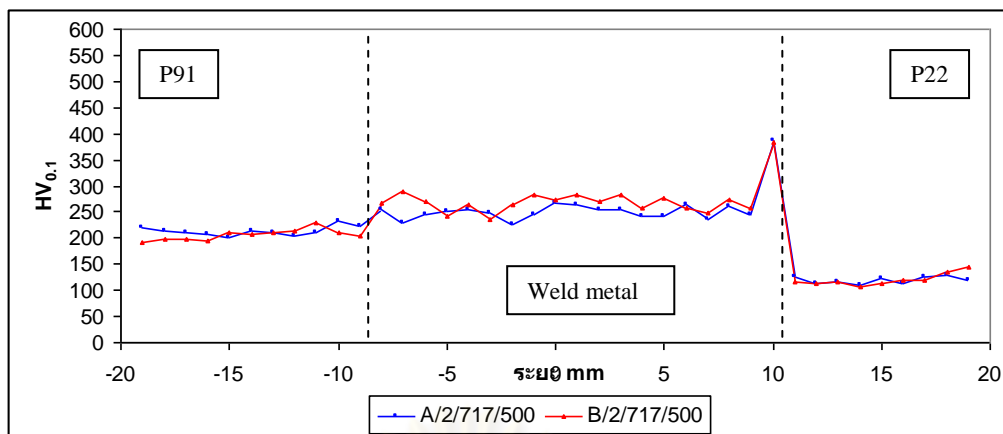


ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

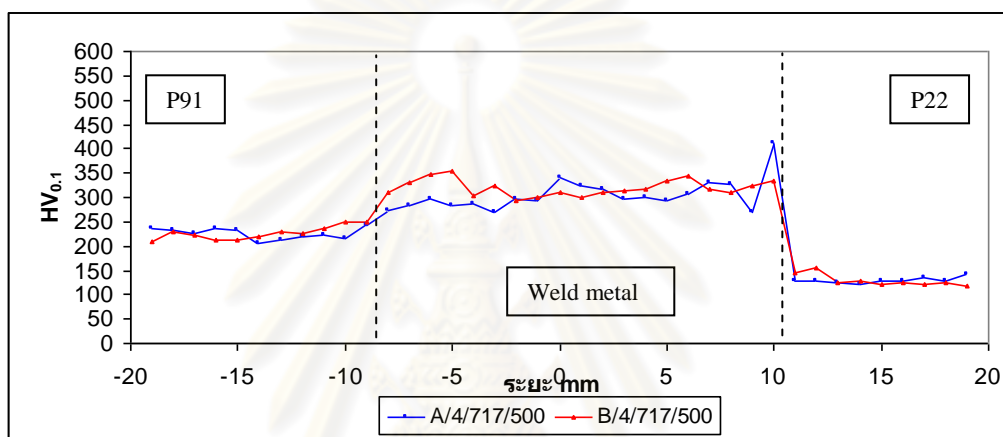


ค) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

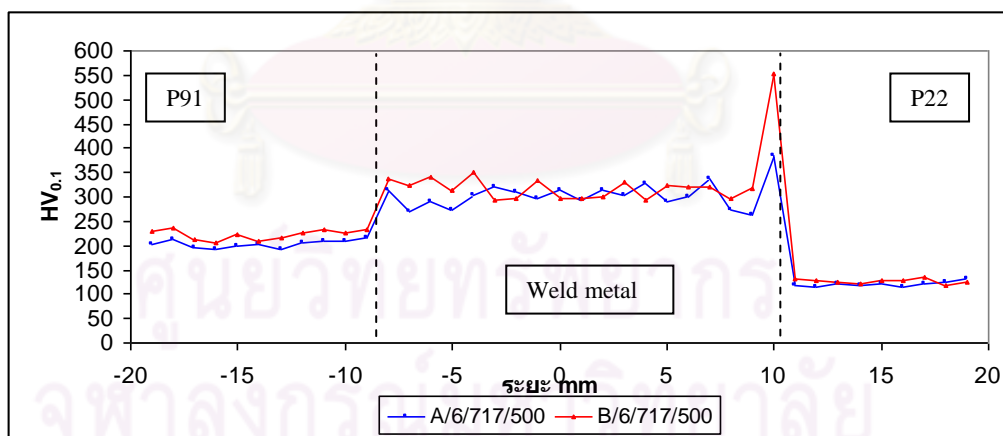
รูปที่ 4.12 ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

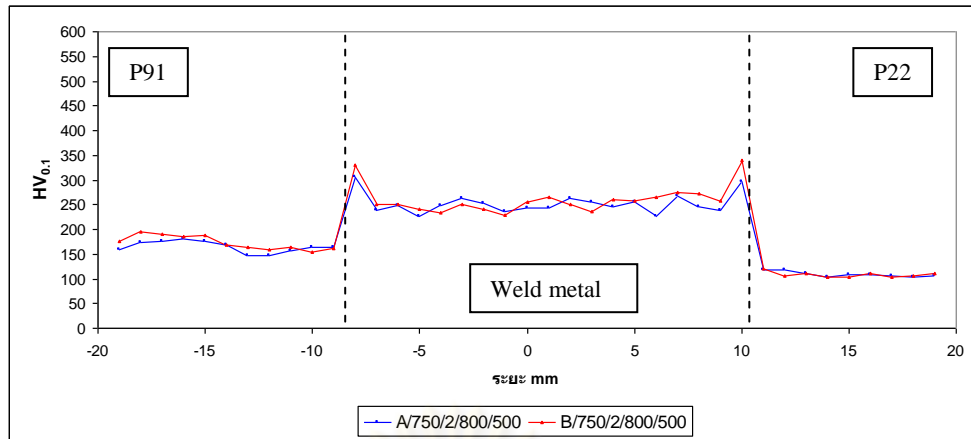


ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

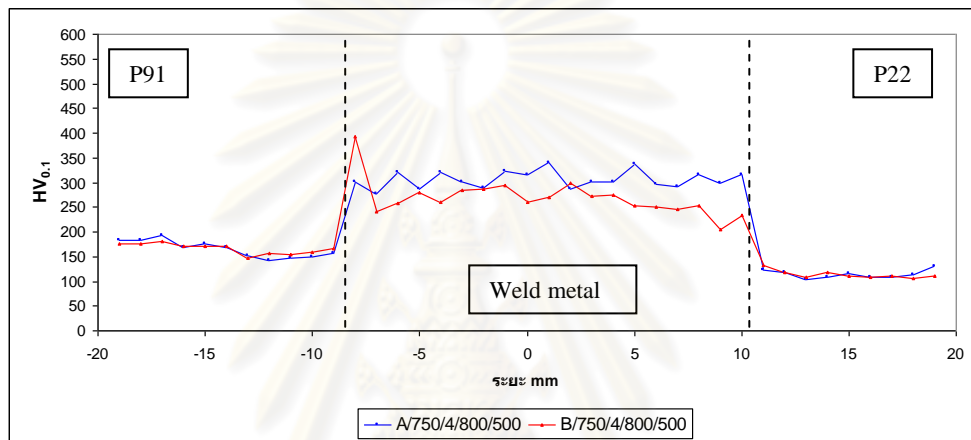


ค) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

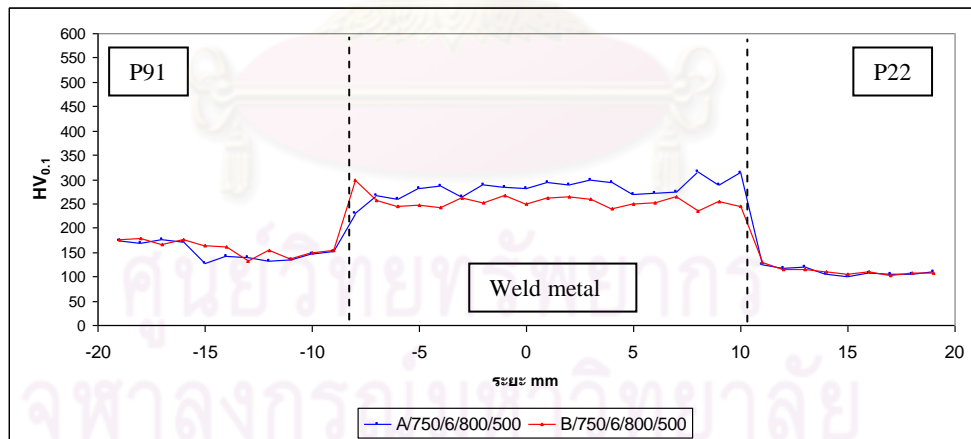
รูปที่ 4.13 ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

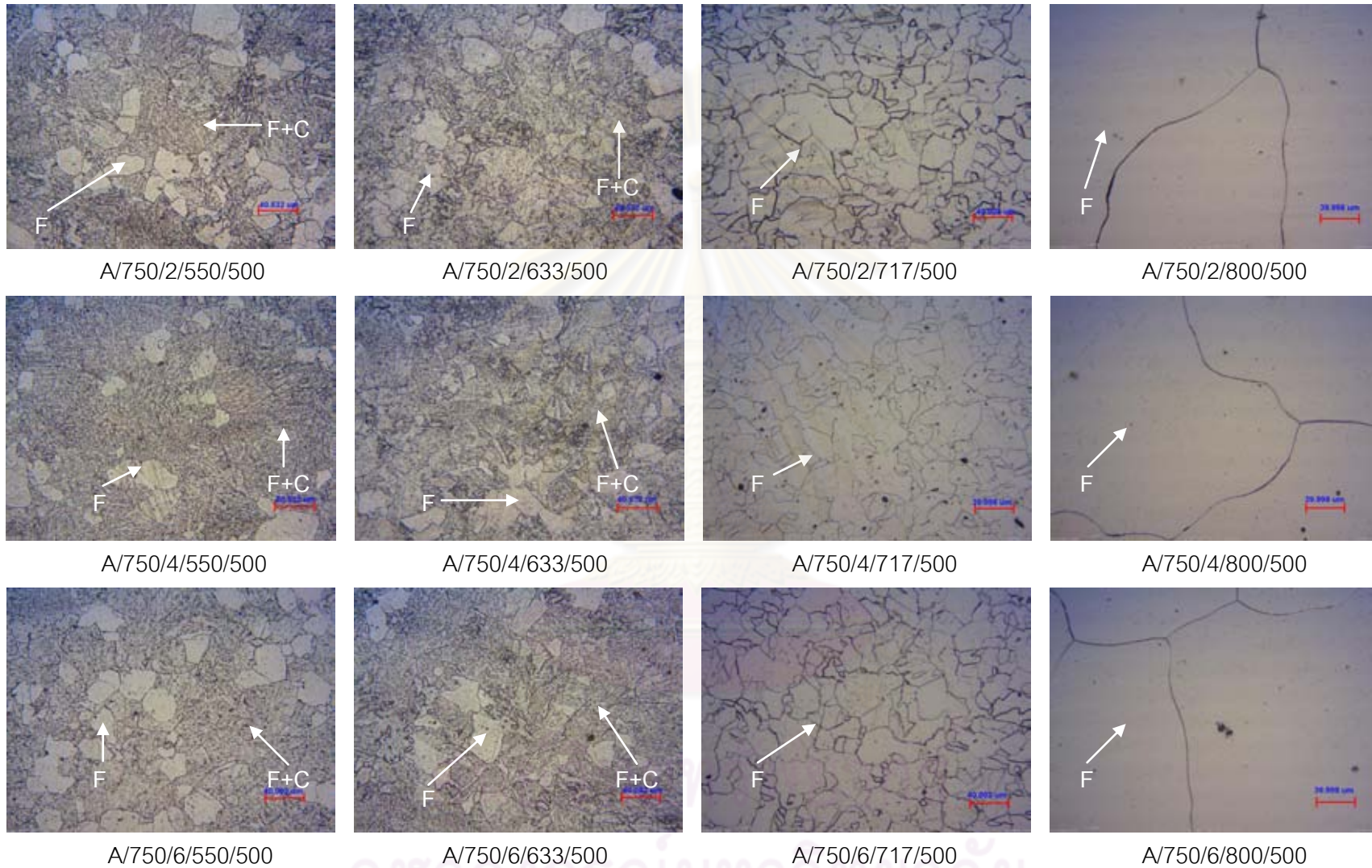


ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง



ค) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

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



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/750/2/717/500) 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.

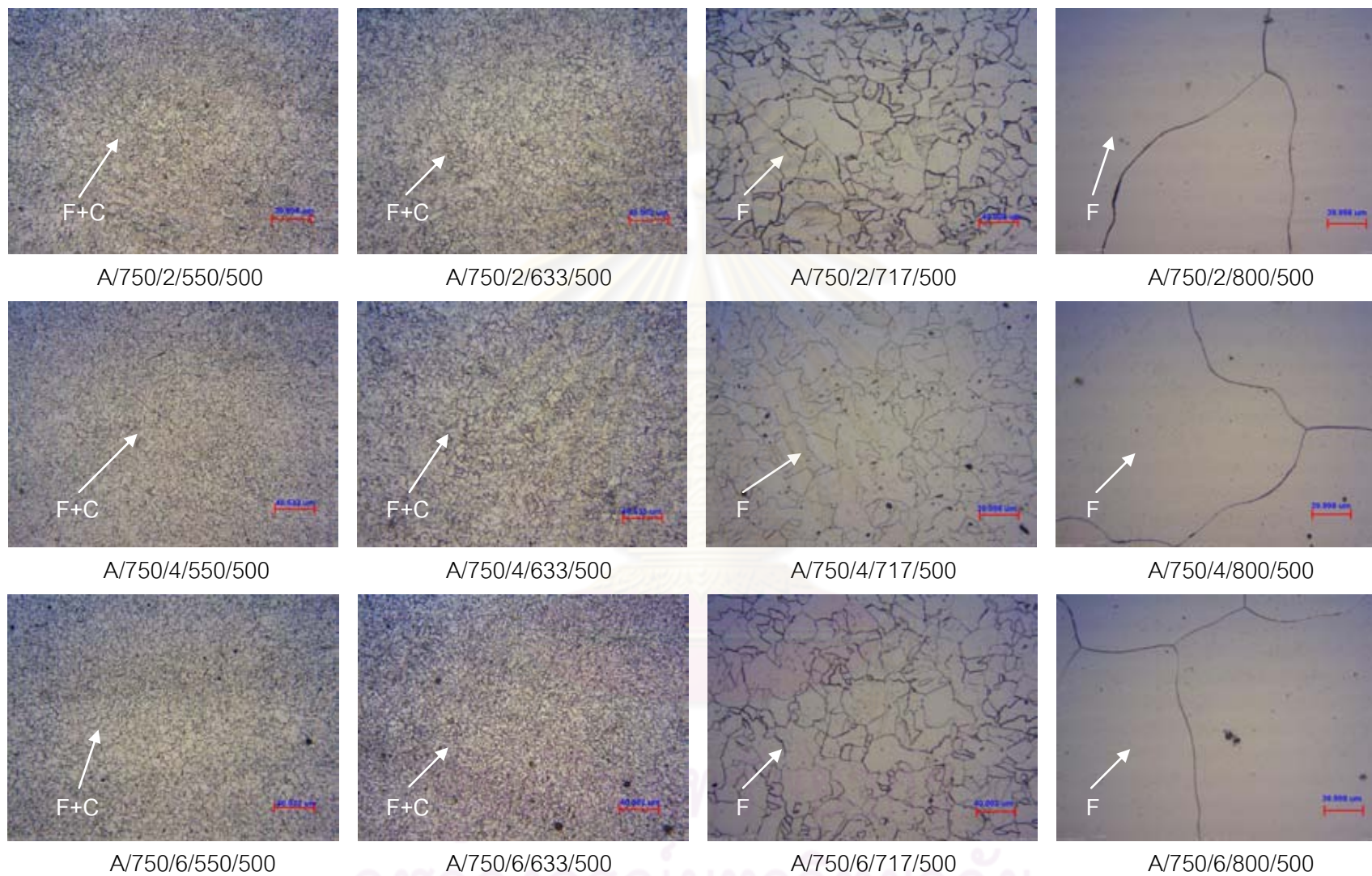
ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคตามแถวแนวตั้งในแต่ละแถวตามที่แสดงในรูปที่ 4.15 คือ ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800 °C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง. ตามแถวแนวตั้งแรกคือ บริเวณโลหะพื้นหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4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

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_{0.1} ส่วนบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717 และ 800°C ความแข็งของบริเวณโลหะพื้นลดลงอย่างชัดเจน ความแข็งมีค่า 113-1447 HV_{0.1} และ 104-129 HV_{0.1} ตามลำดับ เนื่องจากมีโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนเป็นเฟอไรต์จากเดิมที่เป็นเฟอไรต์และเพอไรต์ ที่ตะกอนคาร์ไบด์ทำให้ความแข็งลดลงและพบว่าความแข็งของบริเวณโลหะพื้นทีผ่านกรรมวิธีทาง ความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C จะมีความแข็งต่ำกว่าบริเวณโลหะพื้นทีผ่านกรรมวิธีทาง ความร้อนที่ อุณหภูมิ 717°C เนื่องขนาดเกรนของเฟอไรต์มีขนาดโตกว่าจึงทำให้ความแข็งต่ำกว่า



คุรุวิทยุทธรพยกร
จุพอลงกรณัฒหาวิตยาลัย์



รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า 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}

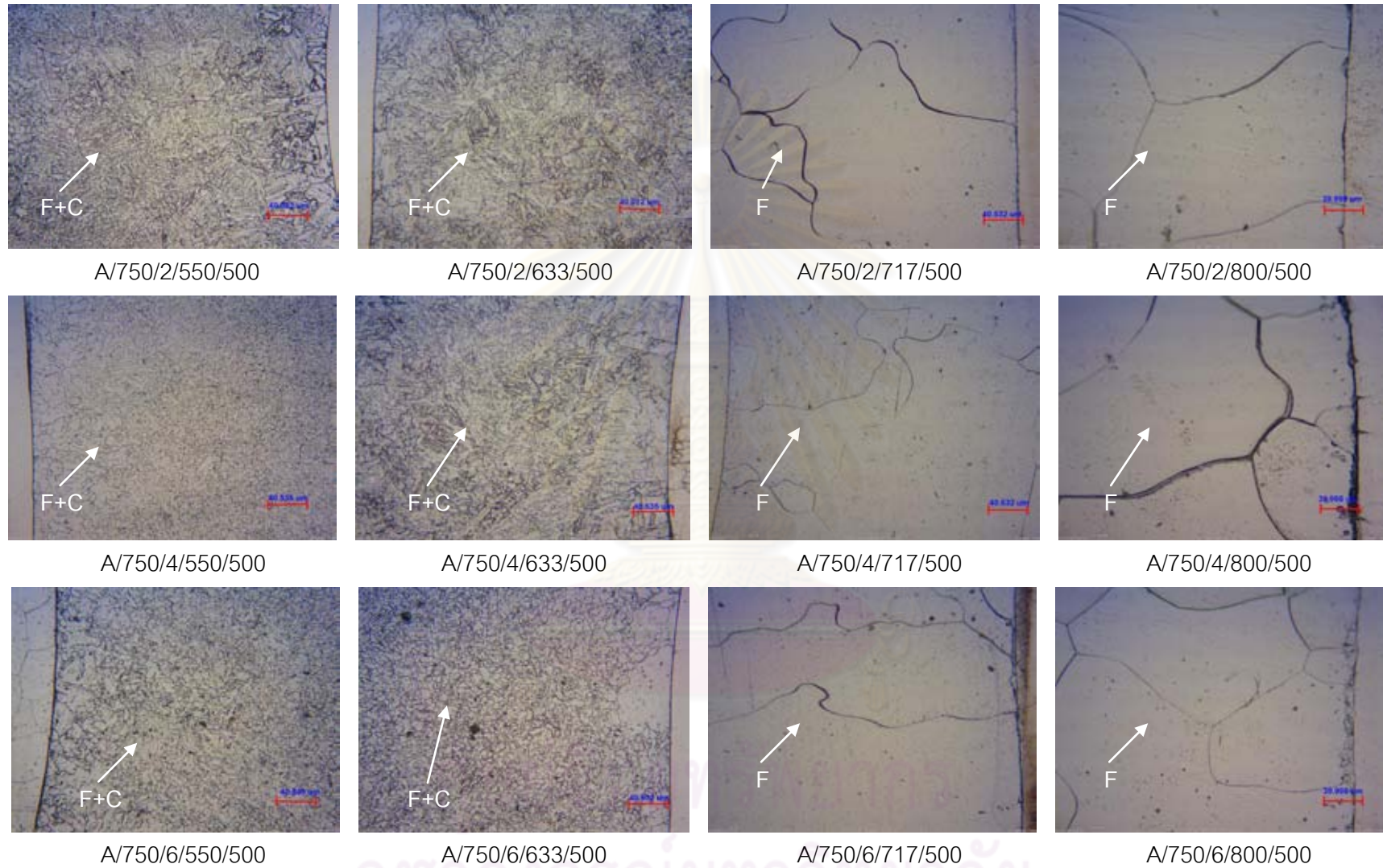
รูปที่ 4.12 แสดงความแข็งหลังเชื่อมของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ความแข็งบริเวณกระทันของเหล็กกล้า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

เชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 มีค่า 130-193 HV_{0.1} ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 146-182 HV_{0.1}

รูปที่ 4.13 แสดงความแข็งหลังเชื่อมของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน หลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ความแข็งบริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 มีค่า 110-127 HV_{0.1} ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 126-129 HV_{0.1}

รูปที่ 4.14 แสดงความแข็งหลังเชื่อมของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน หลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ความแข็งบริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 มีค่า 100-118 HV_{0.1} ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 103-118 HV_{0.1}

ความแข็งบริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้า 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 ความแข็งบริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717 และ 800°C ความแข็งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งความแข็งบริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้า P22 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคคือ เฟอไรต์ ความแข็งของบริเวณกระทบร้อน หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C จะมีค่าน้อยกว่าบริเวณกระทบร้อน หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C เล็กน้อยเนื่องจากมีการขยายเกรนทำให้โตกว่า



รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 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 ของบริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 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 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณนี้เป็นตามที่แสดงรูปที่ 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 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในแต่ละแถวแนวตั้งไม่แตกต่างกัน

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_{0.1} ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า คือ 168, 145 และ 162 HV_{0.1} 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_{0.1} ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 157, 152 และ 121 HV_{0.1} 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_{0.1} ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 117, 144 และ 130 HV_{0.1} 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_{0.1} ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 121 HV_{0.1}, 133 HV_{0.1} และ 128 HV_{0.1} ตามลำดับ

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

ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 381, 444 และ 446 HV_{0.1} ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งเฉลี่ยคือ 383, 371 และ 414 HV_{0.1} ตามลำดับ (รูปที่ 4.12)

ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 385, 412 และ 382 HV_{0.1} ตามลำดับ

ส่วนความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ความแข็งเฉลี่ยคือ 381, 333 และ 551 HV_{0.1} ตามลำดับ (รูปที่ 4.13)

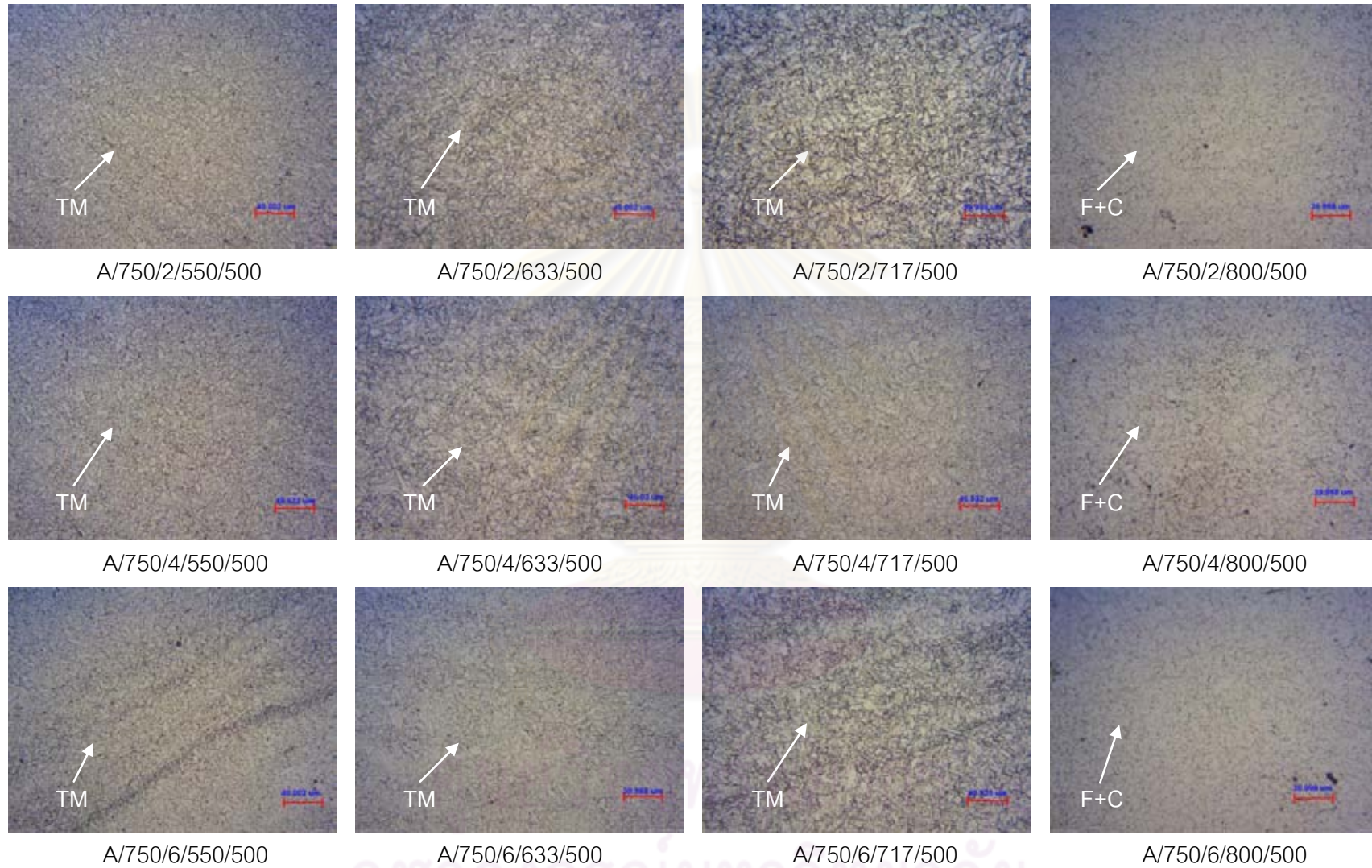
ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C เป็น

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 โดยทั่วไปจะมีความแข็งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง และบริเวณรอยต่อของชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง จะมีความแข็งสูงที่สุดคาดว่าเนื่องมาจากตะกอนเกรนมา ไพร้ม (γ') และคาร์ไบด์ การเพิ่มอุณหภูมิของกรรมวิธีทางความร้อนมีแนวโน้มทำให้บริเวณรอยต่อ มีความแข็งเฉลี่ยสูงขึ้น อาจมีสาเหตุมาจากตะกอนที่เกิดขึ้นสลายตัวความแข็งจึงลดลง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



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 ตะกอนคาร์ไบด์คาดว่าน่าจะเป็น ชนิด $M_{23}C_6$ 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 เป็นเฟร์ไรต์และมีตะกอนคาร์ไบด์

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

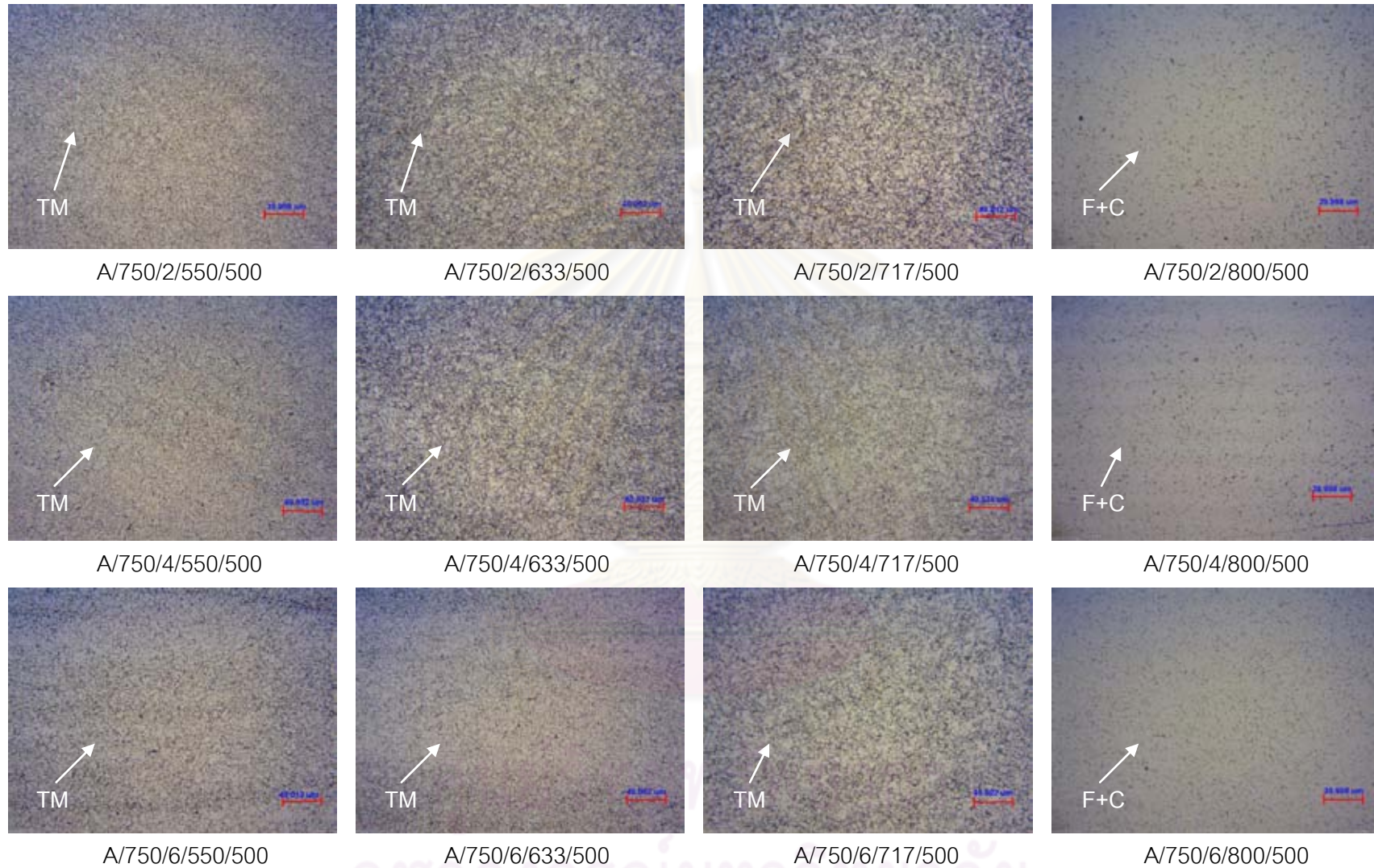
รูปที่ 4.11 เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2,4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง บริเวณโลหะความแข็งมีค่า 201-252 $HV_{0.1}$ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 200-254 $HV_{0.1}$

รูปที่ 4.12 เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2,4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง บริเวณโลหะความแข็งมีค่า 198-236 $HV_{0.1}$ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 198-223 $HV_{0.1}$

รูปที่ 4.13 เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2,4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง บริเวณโลหะความแข็งมีค่า 193-236 HV_{0.1} ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 193-228 HV_{0.1}

รูปที่ 4.14 เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2,4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง บริเวณโลหะความแข็งมีค่า 126-192 HV_{0.1} ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ซึ่งมีค่า 162-194 HV_{0.1}

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 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระแทกร้อนเหล็กกล้า 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 คาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นคาดว่าจะ เป็นชนิด $M_{23}C_6$ [21-26] แต่หลังกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C พบความเปลี่ยนแปลง โครงสร้างจุลภาคอย่างชัดเจนจากเเทมเปอร์มาร์เทนไซต์เปลี่ยนเป็นเฟร์ไรต์และตะกอนคาร์ไบด์

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

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_{0.1} ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 210-252 HV_{0.1}

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_{0.1} ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 190-276 HV_{0.1}

จากรูปที่ 4.13 ก) เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P91 มีค่า 204-232 HV_{0.1} ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 209-229 HV_{0.1}

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_{0.1} ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 217-249 HV_{0.1}

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_{0.1} ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 131-164 HV_{0.1}

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]

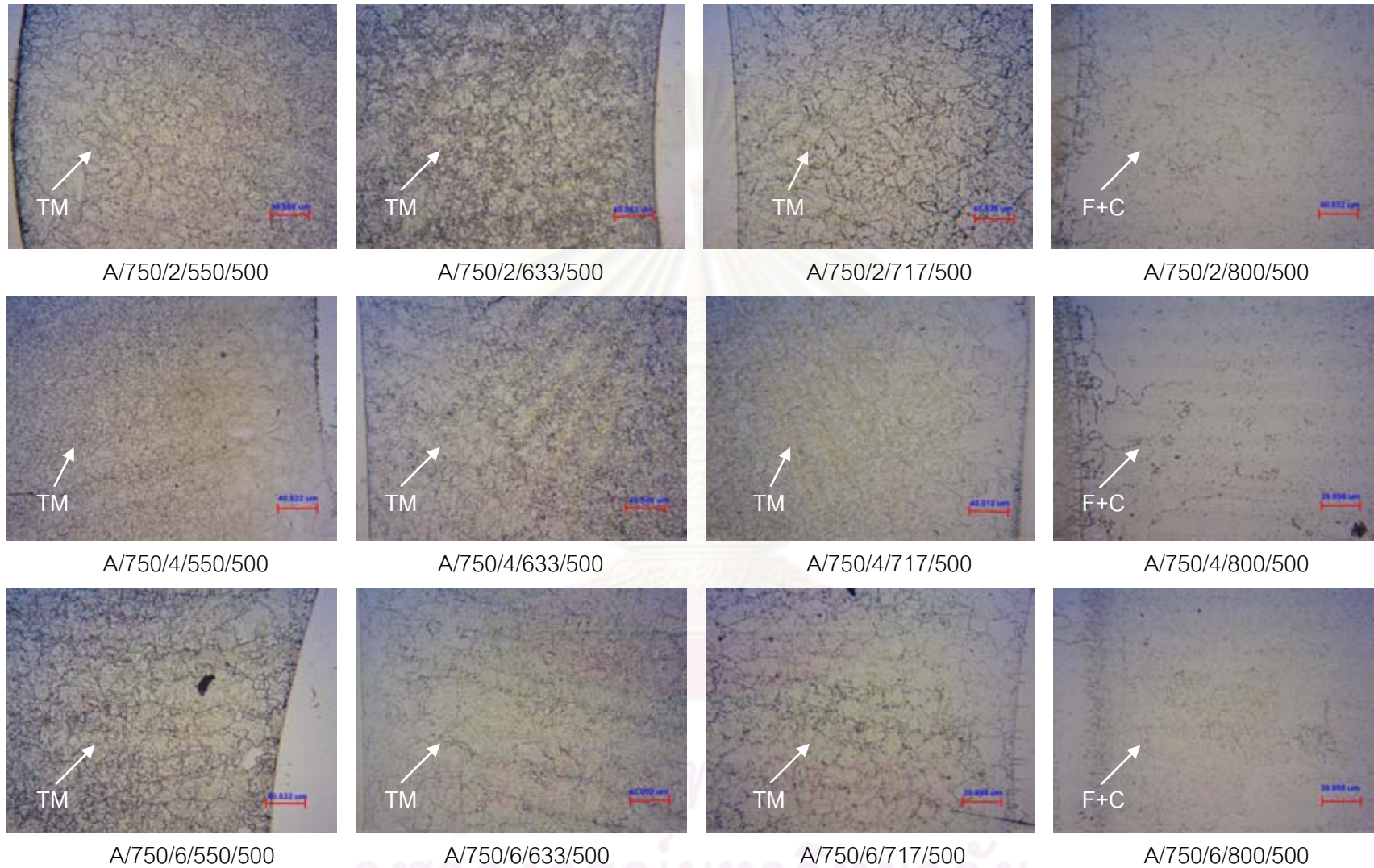
ส่วนบริเวณกระทันที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 4 และ 6 มีเวลามากพอที่จะเกิดการกลับคืนสู่สภาวะปกติและเริ่มมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์

แต่ยังไม่ส่งผลให้ความแข็งแรงของบริเวณกระทะร้อนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จึงให้ปริมาณธาตุผสมที่ละลายในเนื้อพื้นมีน้อยกว่าบริเวณกระทะร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ทำให้มีคาร์ไบด์ตกตะกอน พบว่าบริเวณกระทะร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ความแข็งแรงไม่แตกต่างกันมากนักแต่ก็มีแนวโน้มที่ความแข็งแรงของบริเวณกระทะร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมงจะมีความแข็งแรงสูงกว่าบริเวณกระทะร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน 4 และ 6 ชั่วโมง

ส่วนบริเวณกระทะร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงและมีเวลานานถึง 500 ชั่วโมง ทำให้คาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นขยายขนาด จึงทำให้ความแข็งแรงของบริเวณกระทะร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็น 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C มีความแข็งแรงใกล้เคียงกัน

ส่วนบริเวณกระทะร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง พบว่าความแข็งแรงมีค่าใกล้เคียงกันและลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณกระทะร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633 และ 717°C เนื่องจากมีการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคเนื้อพื้นจากเดิมที่เป็นเทมเปอร์มาร์เทนไซต์เปลี่ยนเป็นเฟร์ไรต์และตะกอนคาร์ไบด์

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 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 เเทมเปอร์ มาร์เทนไซต์ และตะกอนคาร์ไบด์ เนื่องจากบริเวณรอยต่อขณะเชื่อมอยู่ติดกับเนื้อเชื่อมจึงทำให้ได้รับความร้อนหรืออุณหภูมิที่สูงจนเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นออสเทนไนต์และมีการสลายตัวของคาร์ไบด์ ทำให้ของออสเทนไนต์มีการขยายขนาดของเกรน เมื่ออุณหภูมิลดลงหลังเชื่อมโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนเป็น เเทมเปอร์ มาร์เทนไซต์ และตะกอนคาร์ไบด์ [21-26] หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633 และ 717°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยต่อยังคงเป็น เเทมเปอร์ มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์แต่หลังกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนจากเดิมคือ เเทมเปอร์ มาร์เทนไซต์ เปลี่ยนเป็นเฟร์ไรต์ และตะกอนคาร์ไบด์

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

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_{0.1} ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 279, 267 และ 254 HV_{0.1} 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_{0.1} ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมอินโคเนล 617 คือ 258, 262 และ 228 HV_{0.1} 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_{0.1} ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมอินโคเนล 617 คือ 202, 247 และ 233 HV_{0.1}

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_{0.1} ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 คือ 162, 165 และ 154 HV_{0.1}

ความแข็งของบริเวณรอยต่อจะมีค่าต่ำกว่าบริเวณกระแทบร้อนเนื่องจากขณะเชื่อมได้รับความร้อนหรืออุณหภูมิที่สูงกว่าบริเวณกระแทบร้อนจึงคาดว่าน่าจะมีปริมาณของออสเทนไนต์เหลือค้างปริมาณมากทำให้บริเวณนี้มีความแข็งที่ต่ำ บริเวณรอยต่อที่กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม 2 ชั่วโมง สูงกว่าบริเวณรอยต่อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม 4 และ 6 ชั่วโมง ความแข็งโดยเฉลี่ยของรอยต่อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C จะมีความแข็งสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633 และ 717°C โครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยต่อ คือ เหมเปอร์ มาร์เทนไซต์และคาร์ไบด์ตกตะกอน ส่วนโครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยต่อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C โครงสร้างจุลภาค คือ เฟอไรต์และคาร์ไบด์ตกตะกอนตามขอบเกรน 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_{0.1} ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมอินโคเนล 617 คือ 255, 266 และ 272 HV_{0.1} 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_{0.1} ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมอินโคเนล 617 คือ 234, 267 และ 228 HV_{0.1} 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_{0.1} ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมอินโคเนล 617 คือ 265, 311 และ 336 HV_{0.1} 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_{0.1} ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมอินโคเนล 617 คือ 329 HV_{0.1}, 393 HV_{0.1} และ 299 HV_{0.1} ตามลำดับ

บริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยทั่วไปจะมีความแข็งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง เนื่องมาจากการเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมทำให้มีการตกตะกอน คาดว่าน่าจะเป็น แกรมมาไพร์ม (γ') และคาร์ไบด์ หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลานานทำให้ตะกอนเพิ่มปริมาณมากขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิของกรรมวิธีทางความร้อนมีแนวโน้มทำให้บริเวณรอยต่อมีความแข็งเฉลี่ยสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้การแพร่ของธาตุทำได้เร็วขึ้นทำให้การตกตะกอนแกรมมาไพร์ม (γ') และคาร์ไบด์เพิ่มปริมาณมากขึ้นความแข็งจึงสูง

รูปที่ 4 .11 ก) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งคือ 240-287 HV_{0.1} ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ความแข็ง คือ 236-305 HV_{0.1}

รูปที่ 4 .12 ก) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งคือ 232-291 HV_{0.1} ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ความแข็ง คือ 247-316 HV_{0.1}

รูปที่ 4 .13 ก) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717°C และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งคือ 227-265 HV_{0.1} ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ความแข็ง คือ 234-287 HV_{0.1} ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ความแข็ง คือ 247-316 HV_{0.1}

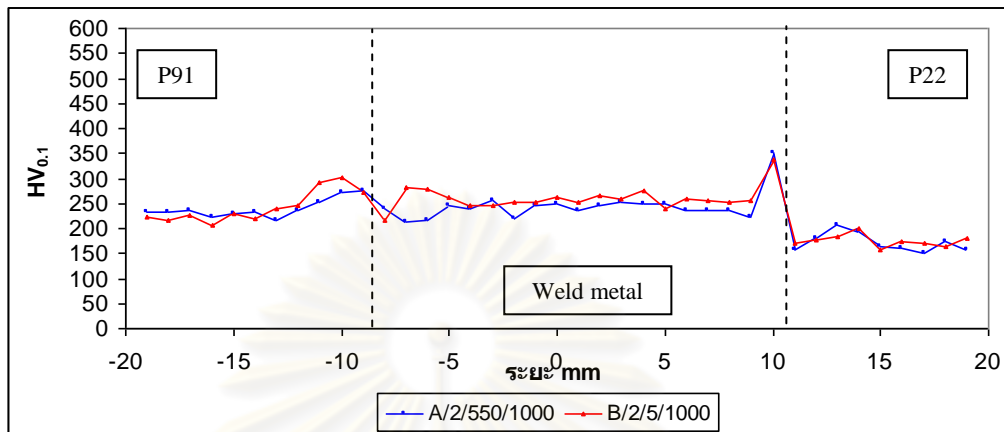
รูปที่ 4 .14 ก) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งคือ 225-266 HV_{0.1} ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ความแข็ง คือ 229-273 HV_{0.1}

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°C ส่วนกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิที่ 800°C ทำให้ความแข็งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C จากงานวิจัยของ Elisabetta Gariboldi และคณะ [8] ทำการทดลองโดยนำอินโคเนล 617 ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C พบว่าตะกอนแกมมาไพร์มมีการสลายตัว ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองนี้ที่ความแข็งมีค่าลดลง ส่วนเนื้อเชื่อมของอินโคเนล 625 และ 617 หลังเชื่อมและขึ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะมีความแข็งใกล้เคียงกัน

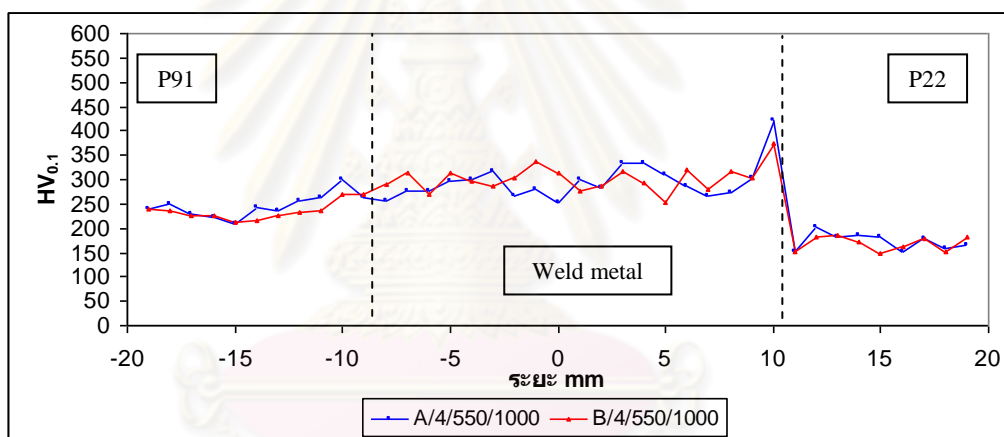


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

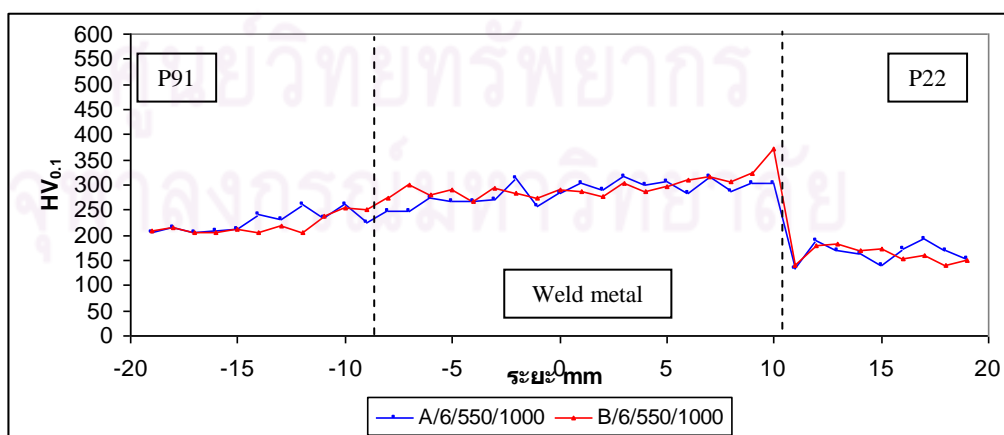
4.5 ความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2,4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

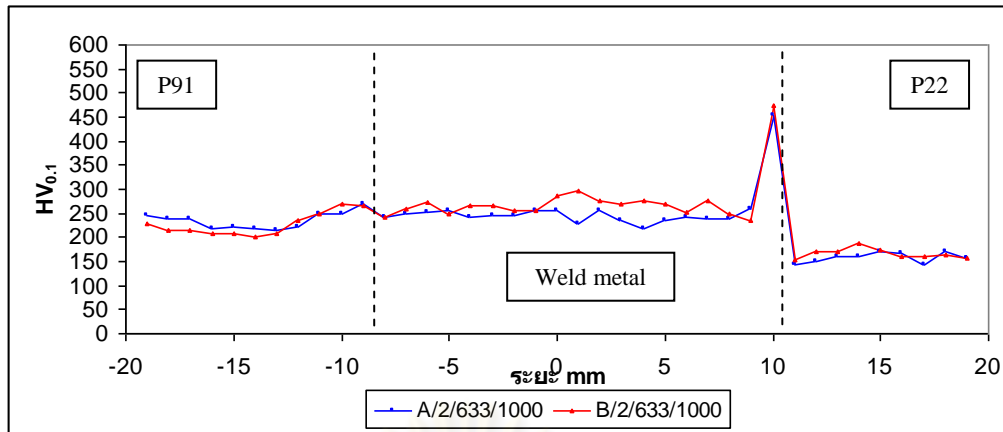


ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

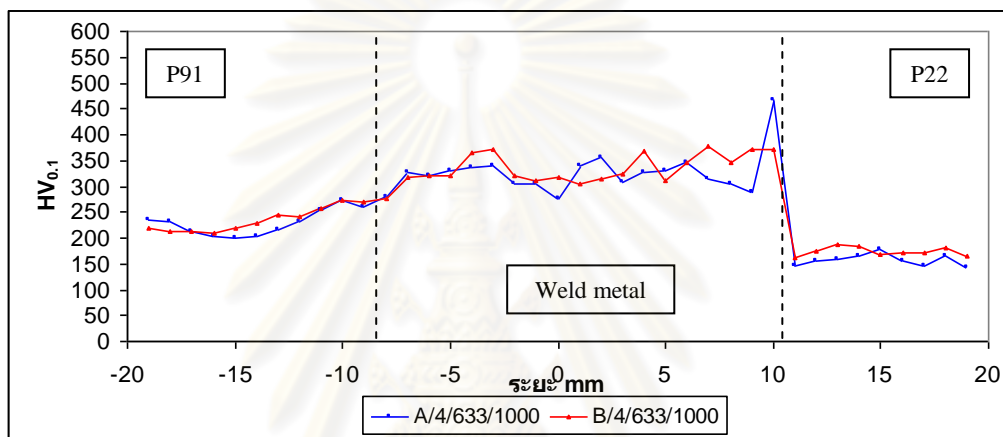


ค) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

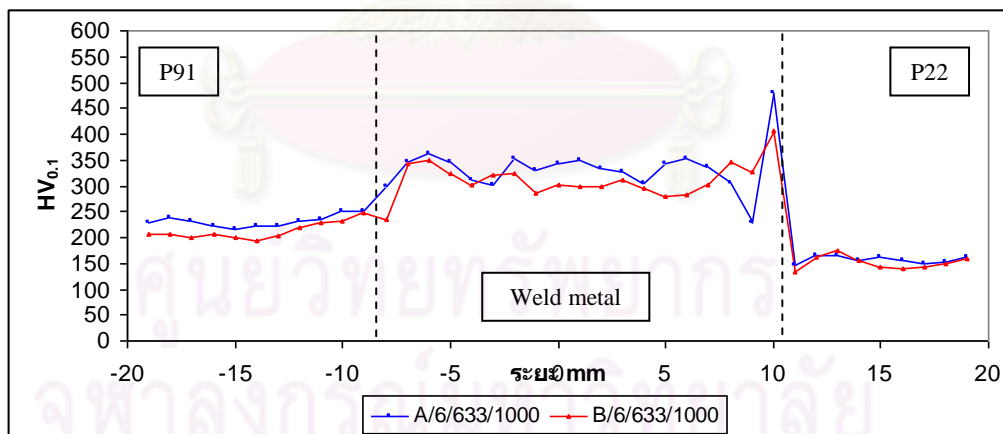
รูปที่ 4.21 ความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



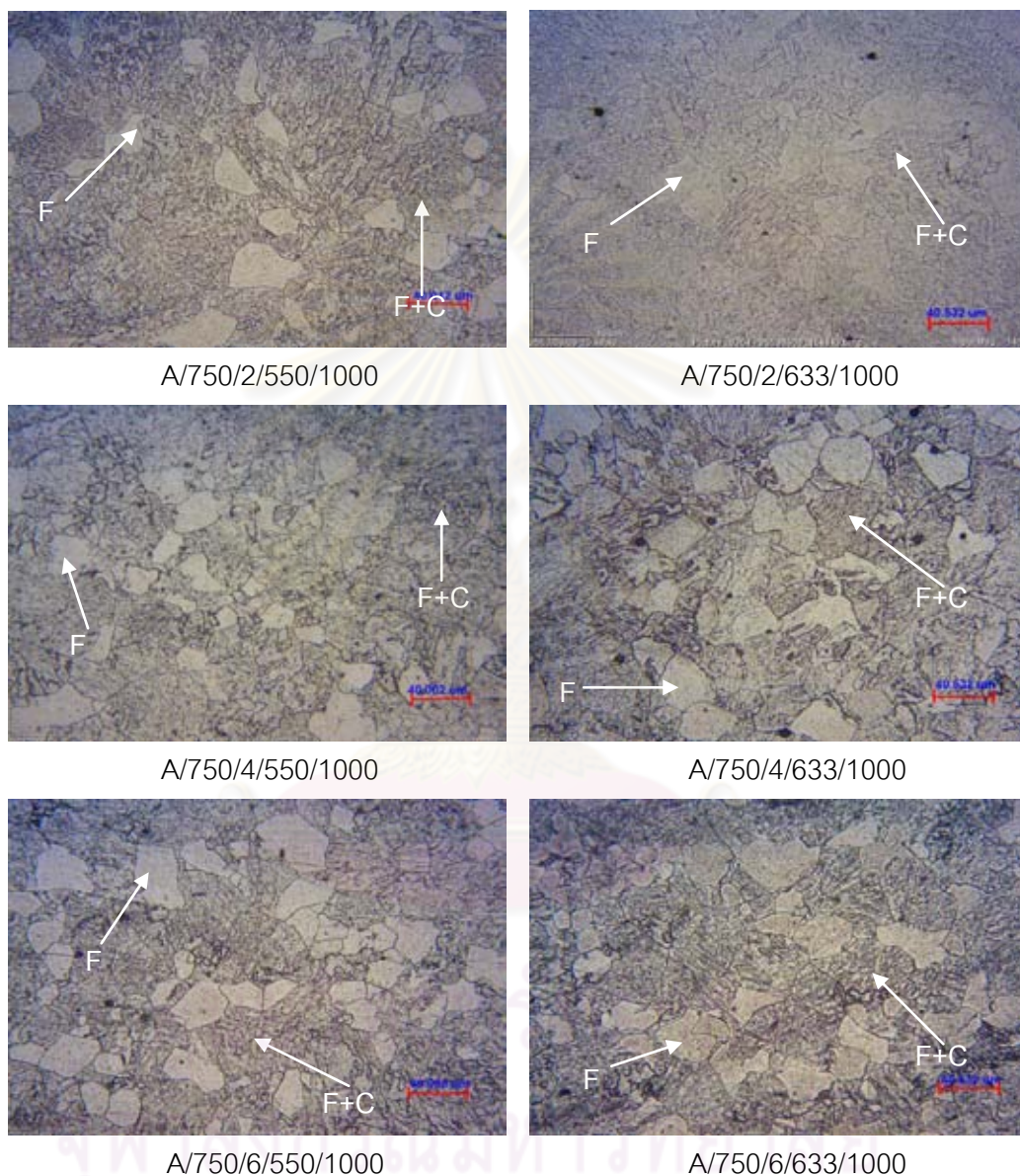
ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง



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



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]

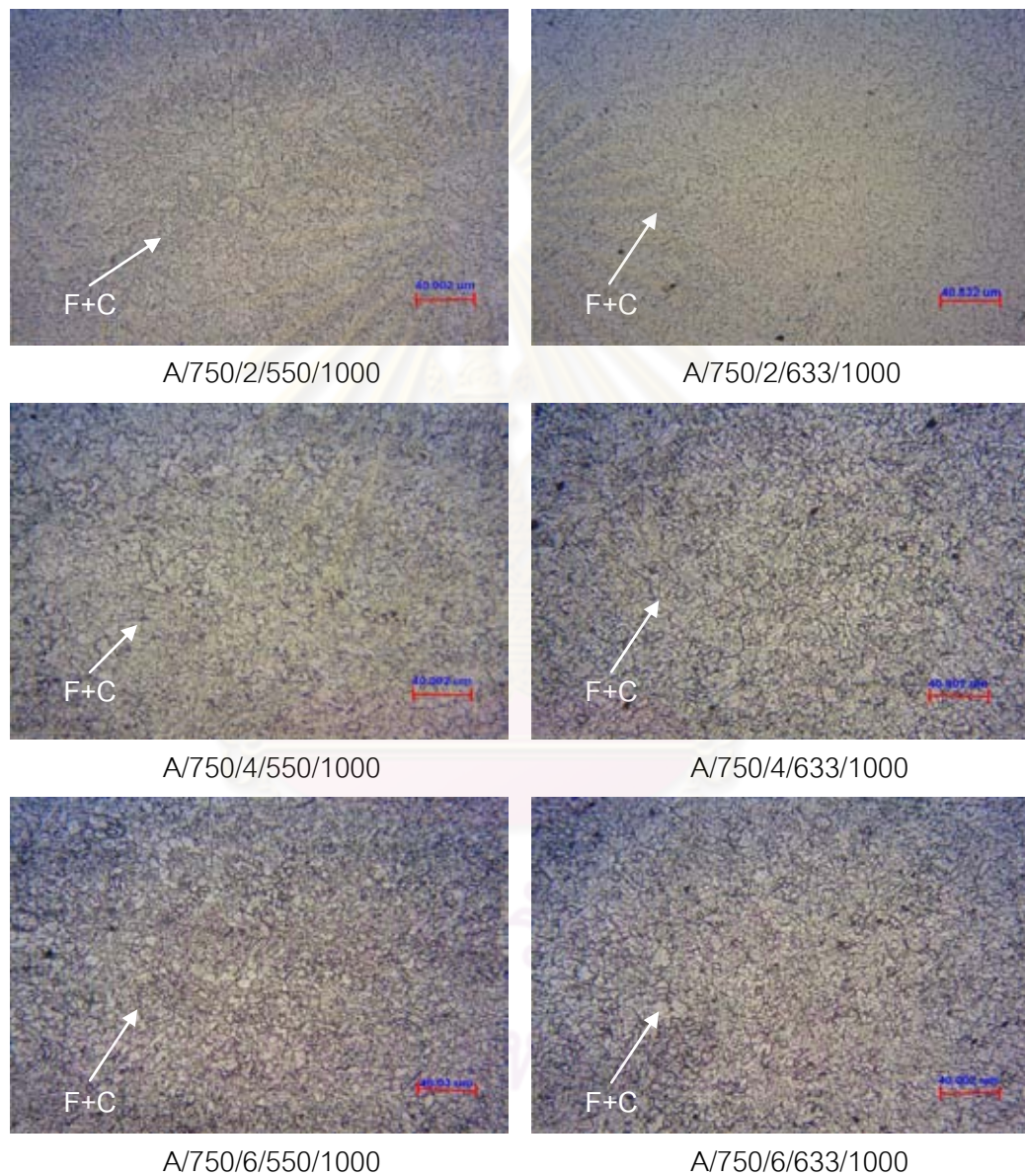
ส่วนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคตามที่แสดงในรูปที่ 4.23 บริเวณรอยต่อตามแนวตั้งในแต่ละแถวคือภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิเท่ากันแต่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C โดยใช้เวลาไม่เท่ากันคือ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.23 การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระแทบร้อนไม่พ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

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 ซึ่งคาดว่าจะน่าจะเป็น 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_{0.1} ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่า 158-199 HV_{0.1}

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_{0.1} ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่า 149-185 HV_{0.1}

รูปที่ 4.22 ค) เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ เหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งบริเวณกระทบร้อนมีค่า 141-190 HV_{0.1} ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่า 168-181 HV_{0.1}

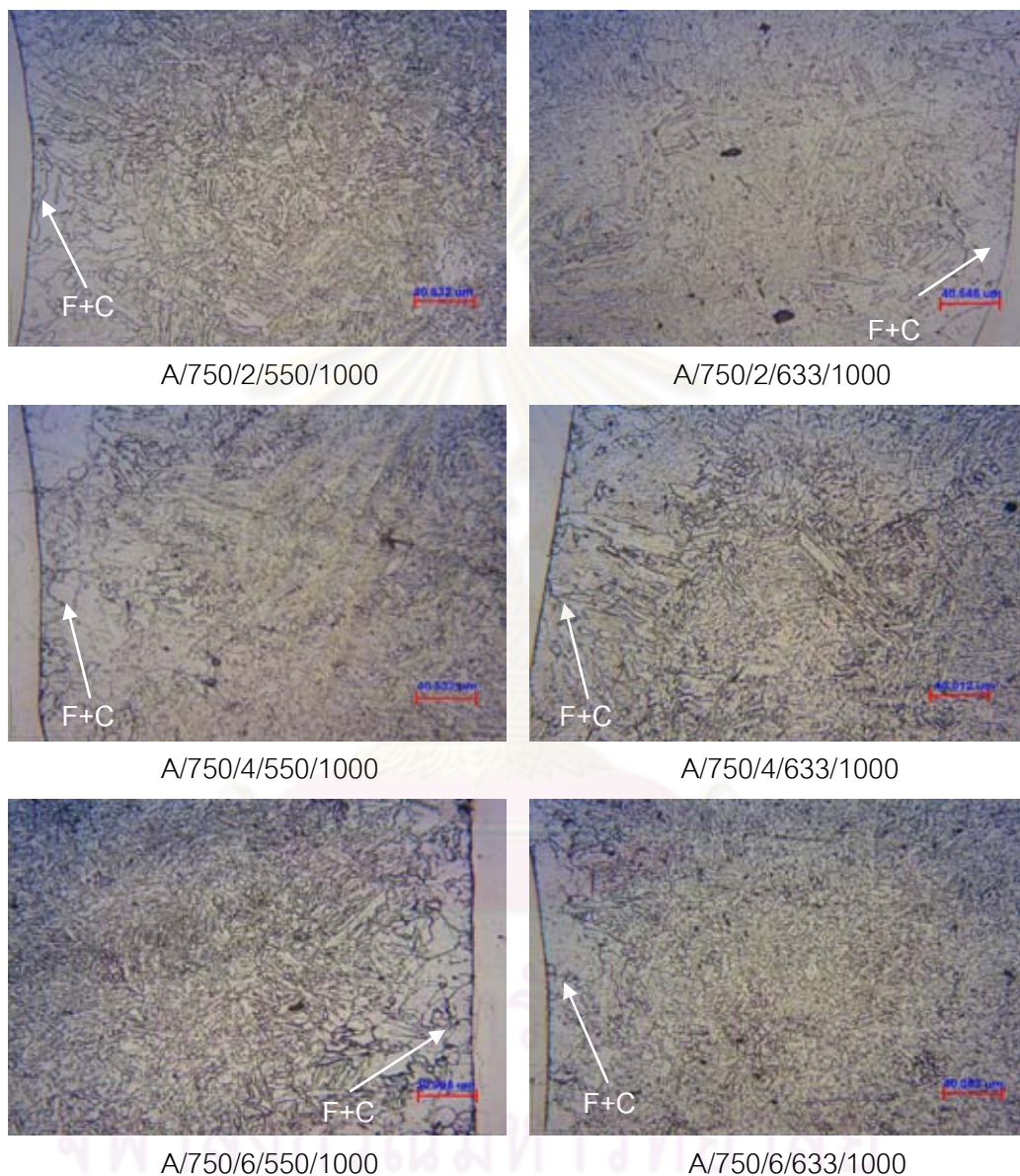
รูปที่ 4.23 ก) เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ เหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งบริเวณกระทบร้อนมีค่า 148-171 HV_{0.1} ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่า 170-185 HV_{0.1}

รูปที่ 4.23 ข) เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ เหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งบริเวณกระทบร้อนมีค่า 155-177 HV_{0.1} ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่า 167-187 HV_{0.1}

รูปที่ 4.23 ค) เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ เหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งบริเวณกระทบร้อนมีค่า 156-166 HV_{0.1} ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่า 141-175 HV_{0.1}

ความแข็งของบริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้า P22 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกัน ความแข็งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณกระทบร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 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



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 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยต่อติดกับเนื้อเชื่อมเกรนมีการขยายขนาดโตขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณกระทบร้อน โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อคือ เฟร์ไรต์

ส่วนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคตามที่แสดงในรูปที่ 4.25 บริเวณรอยต่อตามแนวตั้งในแต่ละแถวคือภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิเท่ากันแต่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C โดยใช้เวลาไม่เท่ากันคือ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.24 การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนไม่พบความแตกต่าง

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_{0.1} ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่า 157, 150 และ 139 HV_{0.1} 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_{0.1} ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่า 153, 160 และ 133 HV_{0.1} ตามลำดับ

พบว่าความแข็งบริเวณรอยต่อของเหล็กกล้า P22 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง มีความแข็งต่ำกว่าบริเวณพื้นและบริเวณกระทบร้อนเนื่องจากมีขนาดเกรนที่โตกว่า บริเวณกระทบร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะมีความแข็งต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณรอยต่อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง เนื่องจากขนาดเกรนของเฟร์ไรต์มีขนาดโตกว่าจึงทำให้ความแข็งมีค่าต่ำที่สุด

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

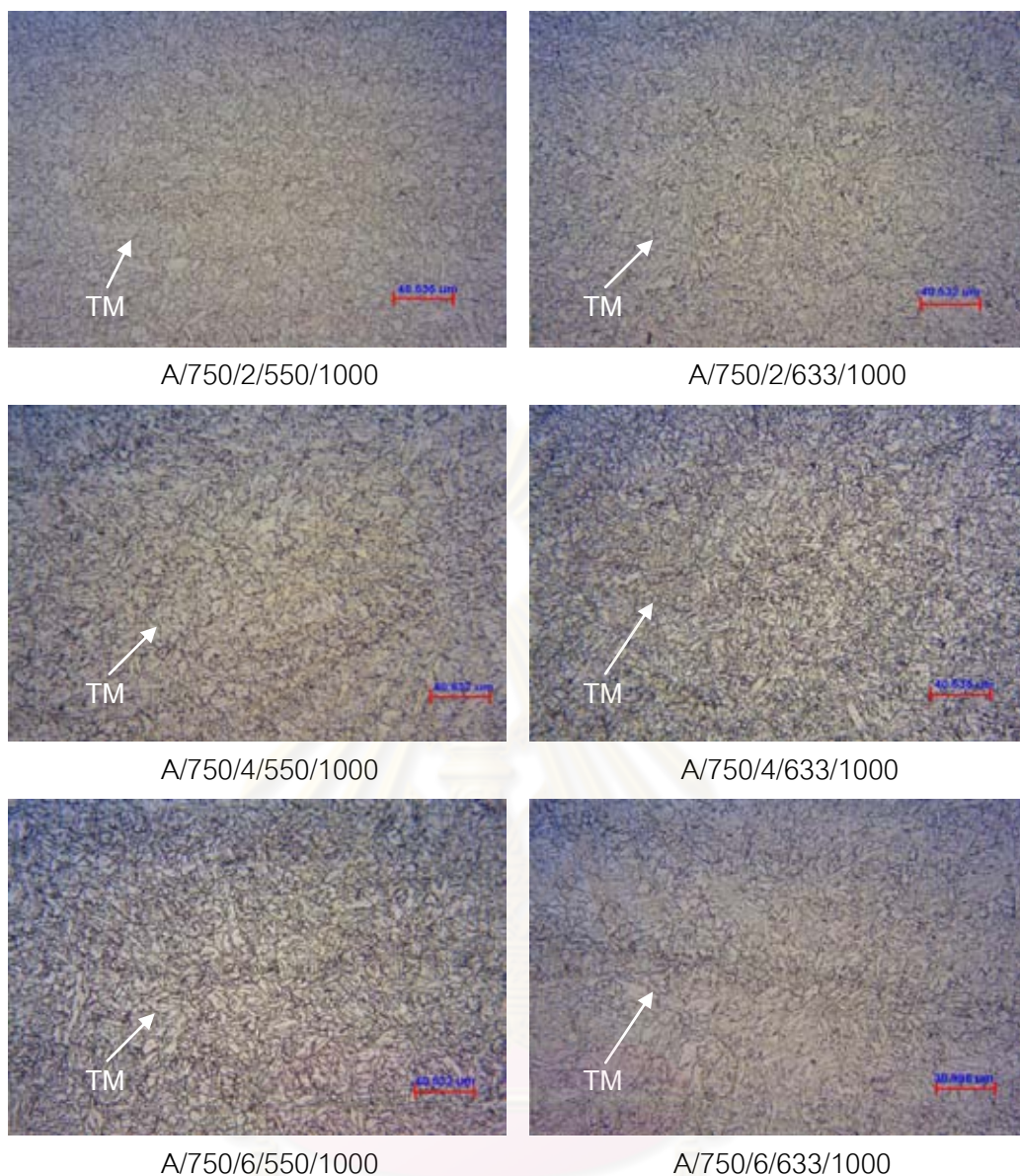
6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 350, 422 และ 303 HV_{0.1} ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 338, 372 และ 372 HV_{0.1} ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.22 ก)-ค) ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดกับเหล็กกล้า P22 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 455, 466 และ 477 HV_{0.1} ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 474, 371 และ 406 HV_{0.1} ตามลำดับ

บริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 ด้านติดกับเหล็กกล้า P22 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยทั่วไปจะมีความแข็งสูงสุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง และบริเวณรอยต่อของชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง จะมีความแข็งสูงสุด การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนมีแนวโน้มทำให้บริเวณรอยต่อมีความแข็งเฉลี่ยสูงขึ้น เนื่องจากการตกตะกอนแกมมาคอบเบิลไพร์มหรือเดลต้าในอินโคเนล 625 และแกมมาไพร์มในอินโคเนล 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 โครงสร้างจุลภาคยังคงเป็นเทมเปอร์มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์ คาดว่าเป็นชนิด M₂₃C₆ [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 ตามแถวแนวดิ่งในแต่ละแถวคือภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิเท่ากันแต่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C โดยใช้เวลาไม่เท่ากันคือ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.24 การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นไม่พบความแตกต่าง

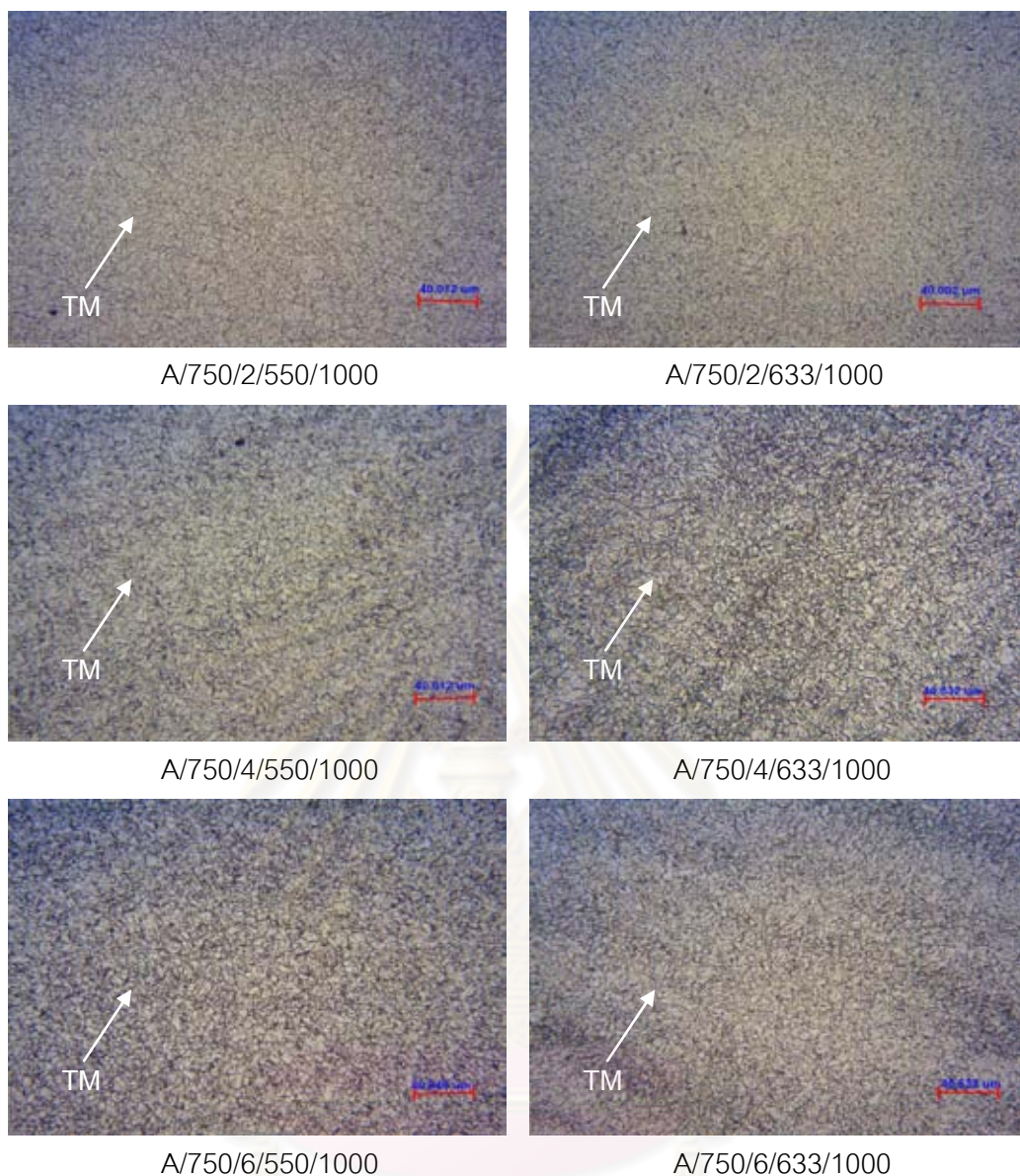
จากรูปที่ 4.21 ก)-ค) ความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 206-248 HV₁₀₀ ส่วนความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 205-239 HV₁₀₀

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 HV₁₀₀ ส่วนความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 199-230 HV₁₀₀

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 เวมเปออร์ มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์ คาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นเป็นชนิด M₂₃C₆ [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 ตามแถวแนวดิ่งในแต่ละแถวคือภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันหลังจากกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิเท่ากันแต่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C โดยใช้เวลาไม่เท่ากันคือ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.24 การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันไม่พบความแตกต่าง

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

บริเวณกระทะร้อนความแข็งสูงกว่าบริเวณโลหะพื้นเล็กน้อยเนื่องจากขนาดเกรนที่เล็กกว่า และอาจจะมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ในขณะผ่านกรรมวิธีทางความร้อน จากรูปที่ 4.21 ก) ความแข็งบริเวณกระทะร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็ง คือ 215-271 HV_{0.1} ส่วนความแข็งบริเวณกระทะร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 คือ 240-301 HV_{0.1}

จากรูปที่ 4.21 ข)-ค) ความแข็งบริเวณกระทะร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C เป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็ง คือ 232-301 HV_{0.1} ส่วนความแข็งบริเวณกระทะร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 คือ 219-268 HV_{0.1}

จากรูปที่ 4.22 ก) ความแข็งบริเวณกระทะร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิที่ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็ง คือ 216-249 HV_{0.1} ส่วนความแข็งบริเวณกระทะร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 คือ 235-270 HV_{0.1}

จากรูปที่ 4.22 ข)-ค) ความแข็งบริเวณกระทะร้อนเหล็กกล้า 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_{0.1} ส่วนความแข็งบริเวณกระทะร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 คือ 202-256 HV_{0.1}

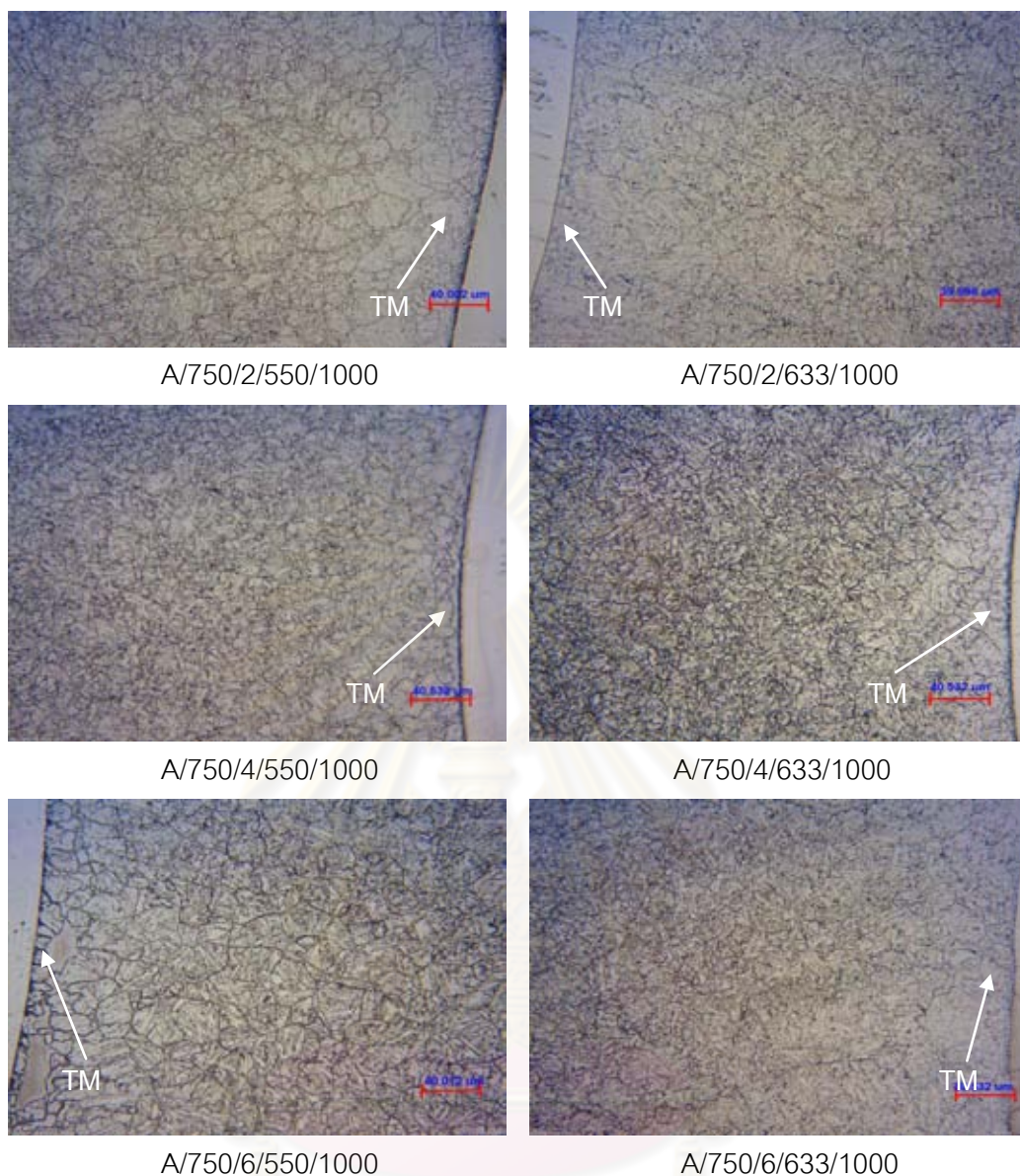
พบว่าความแข็งของบริเวณกระทะร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C มีความแข็งสูงกว่าบริเวณกระทะร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เนื่องบริเวณกระทะร้อนหลังเชื่อมเกิดการสลายตัวของคาร์ไบด์ทำให้มีธาตุผสมในเนื้อพื้นออกสเตนไนด์มีมากขึ้น หลังอุณหภูมิลดลงโครงสร้างจุลภาคคือ มาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งสูง หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมทำให้เกิดการแพร่ของ

อะตอม ซึ่งกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ส่งผลให้เกิดการกลับคือสู่สภาวะปกติ (Recovery) เป็นหลักเมื่อเทียบกับบริเวณกระทะร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็น 4 และ 6 ชั่วโมง ซึ่งมีเวลามากพอที่คาร์ไบด์จะเริ่มตกตะกอนจึงทำให้ธาตุผสมในเนื้อพื้นมีปริมาณลดลง เมื่อบริเวณกระทะร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 500 และ 1000 ชั่วโมง มีเวลามากพอที่จะเกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ [17] ทำให้ความแข็งบริเวณกระทะร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีความแข็งสูงกว่าบริเวณกระทะร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง บริเวณกระทะร้อนมีความแข็งสูงบริเวณโลหะพื้นเนื่องจากขนาดเกรนที่เล็กกว่าและมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ 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 ขนาดเกรนบริเวณรอยต่อมีขนาดใหญ่กว่าทั้งบริเวณโลหะพื้นและบริเวณกระทะร้อนเนื่องจากบริเวณรอยต่อนี้เป็นบริเวณที่ติดกับเนื้อเชื่อมซึ่งได้รับความร้อนหรืออุณหภูมิที่สูงจากการเชื่อมทำให้เกิดการขยายขนาดของเกรน โครงสร้างจุลภาคของบริเวณนี้เป็น เเทมเปอร์ มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์ จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ขนาดเกรนของเทมเปอร์ มาร์เทนไซต์ มีขนาดใกล้เคียงกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



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

ส่วนรูปตามแถวแนวตั้งเป็นการเปรียบเทียบผลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่าการเพิ่มเวลากรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยต่อ ในแต่ละแถวแนวตั้งไม่พบความแตกต่างกัน

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 $HV_{0.1}$ ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งเฉลี่ยมีค่า 271, 269 และ 250 $HV_{0.1}$ 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 $HV_{0.1}$ ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ความแข็งเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ คือ 265, 271 และ 249 $HV_{0.1}$ 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 $HV_{0.1}$ ตามลำดับ ส่วนบริเวณรอยต่อของอินโคเนล 617 ความแข็งคือ 218, 291 และ 274 $HV_{0.1}$ 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 $HV_{0.1}$ ตามลำดับ ส่วนบริเวณรอยต่อของอินโคเนล 617 ความแข็งคือ 243, 274 และ 234 $HV_{0.1}$ ตามลำดับ

พบว่าบริเวณรอยต่อของอินโคเนล 625 และ 617 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะมีความแข็งต่ำที่สุดและมีค่าความแข็งใกล้เคียงกับเนื้อเชื่อมหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนมีแนวโน้มทำให้บริเวณรอยต่อของอินโคเนล 625 และ 617 มีความแข็งเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น คาดว่าการเพิ่มเวลาและอุณหภูมิของกรรมวิธีทางความร้อนจะทำให้เกิดการตกตะกอน(แกมมาดอบเบิลไพร์มหรือเดลต้าในอินโคเนล 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_{0.1} ส่วนความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 239-283 HV_{0.1} ความแข็งของเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีแนวโน้มไม่เพิ่มขึ้น ความแข็งมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 ชั่วโมง₁

รูปที่ 4.21 ข) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งคือ 253-334 HV_{0.1} ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 268-336 HV_{0.1}

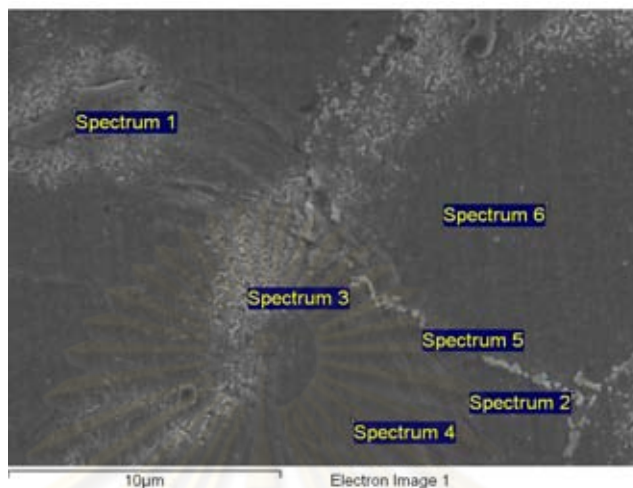
รูปที่ 4.21 ค) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งคือ 303-33 HV_{0.1} ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 269-322 HV_{0.1}

รูปที่ 4.22 ก) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งคือ 216-260 HV_{0.1} ส่วนความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 239-283 HV_{0.1} 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_{0.1} ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 304-376 HV_{0.1}

รูปที่ 4.22 ค) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ความแข็งคือ 303-362 HV_{0.1} ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 297-344 HV_{0.1}

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

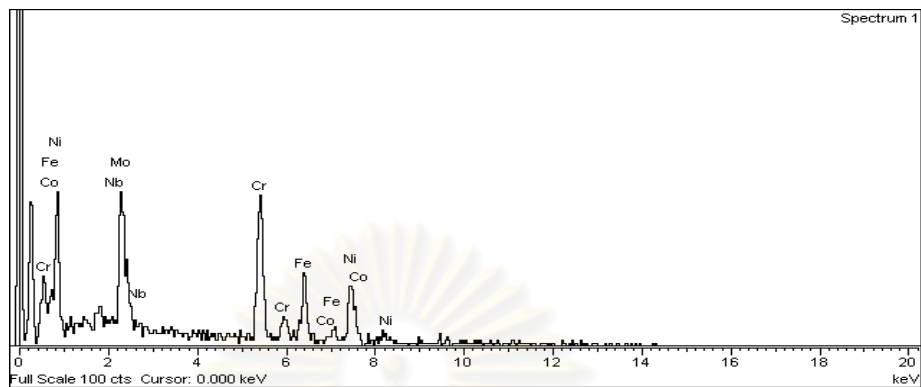
รูปที่ 4.29 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง พบการตกตะกอนภายในเนื้อและตามขอบเกรนตามที่แสดงในรูปที่ 4.29

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

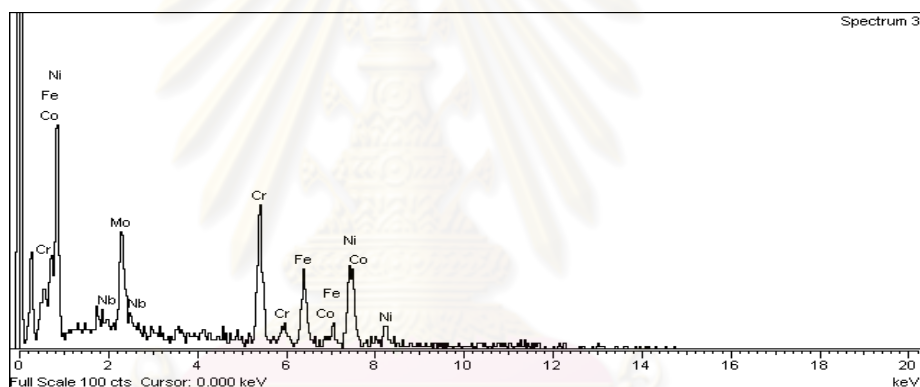
รูปที่ 4.31 แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของก้อนตะกอนในเนื้อพื้นซึ่งแสดงในรูปที่ 4.29 (Spectrum ที่ 3) มีปริมาณธาตุโครเมียม และโมลิบดีนัมสูง คาดว่าน่าจะเป็นคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$

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

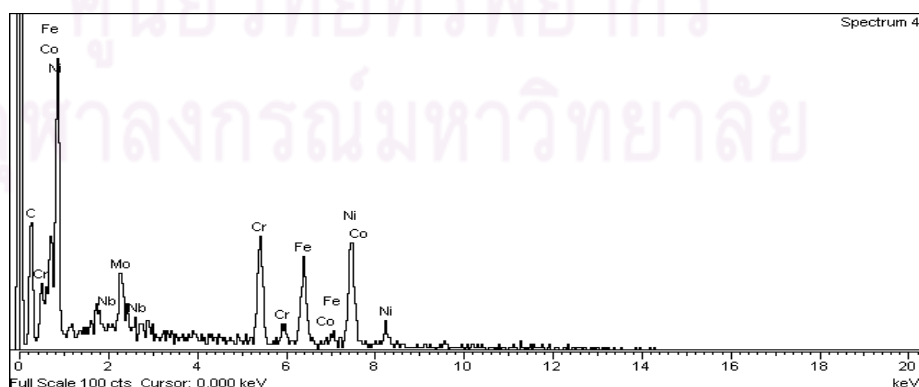
รูปที่ 4.33 แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของก้อนตะกอนในเนื้อพื้นซึ่งแสดงในรูปที่ 4.29 (Spectrum ที่ 5) มีปริมาณธาตุโครเมียม และโมลิบดีนัมสูง คาดว่าน่าจะเป็นคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$



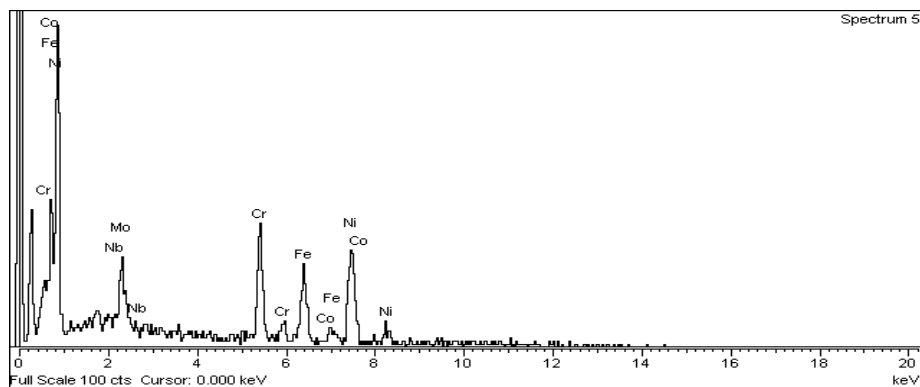
รูปที่ 4.30 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 1 ก้อนตะกอน ในรูปที่ 4.29 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



รูปที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 3 ตะกอน ในรูปที่ 4.29 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



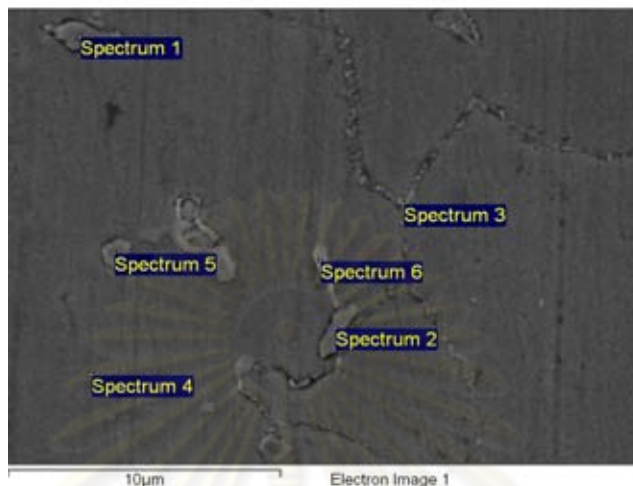
รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 4 บริเวณเนื้อพื้น ในรูปที่ 4.29 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



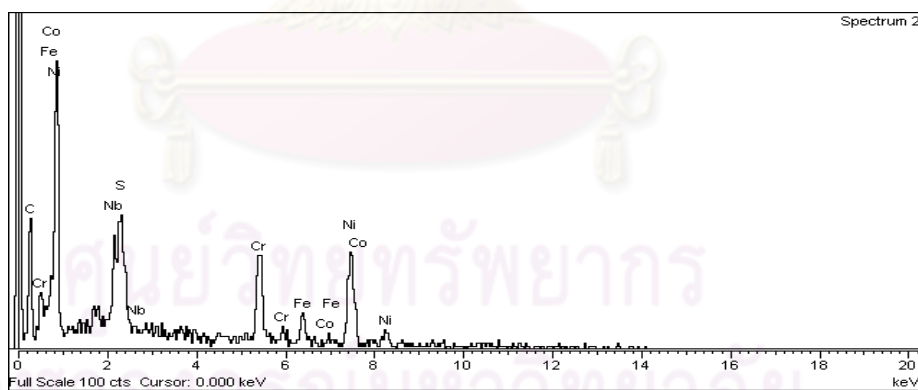
รูปที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 5 ตะกอนตามขอบเกรน ในรูปที่ 4.29 ด้วยเทคนิคดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

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 จากการตรวจสอบส่วนผสมเคมีของตะกอนด้วยเทคนิคดีเอส ขนาดหัวตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดีเอสในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 ไมโครเมตร คาดว่าตะกอนในเนื้อพื้นและตามขอบเกรนน่าจะเป็นคาร์ไบด์ชนิด MC และ $M_{23}C_6$ [3,4,7,27] ผลวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีพบธาตุโครเมียม และโมลิบดีนัมสูง ส่วนผลวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของเนื้อพื้น Spectrum ที่ 4 แสดงตามรูปที่ 4.32

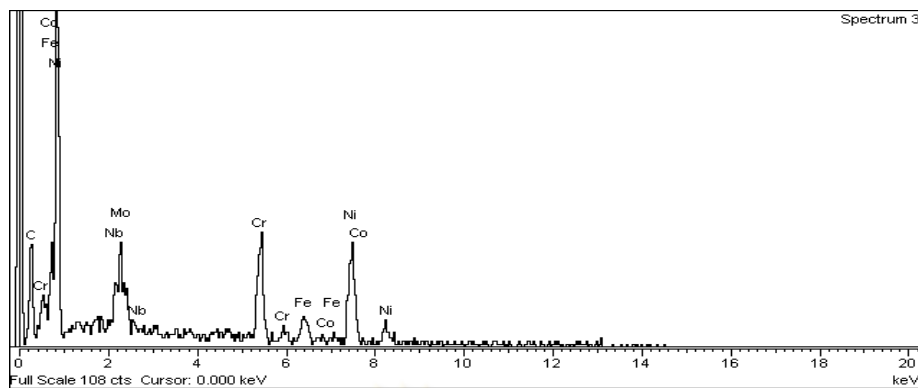
4.5.8 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด กำลังขยาย 5000 เท่า ของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง



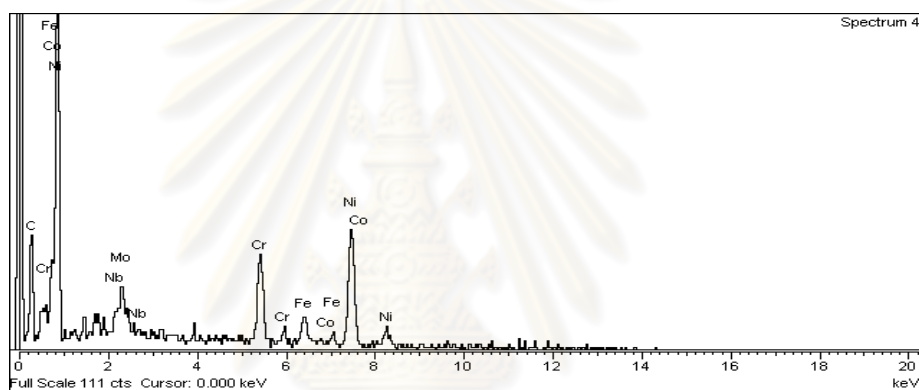
รูปที่ 4.34 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 5000 เท่า



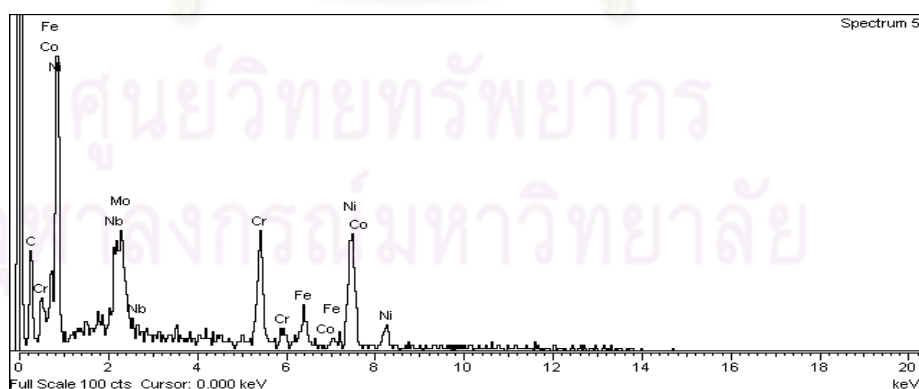
รูปที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 2 ก้อนตะกอน ในรูปที่ 4.34 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



รูปที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 3 ตะกอนตามขอบเกรน ในรูปที่ 4.34 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



รูปที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 4 บริเวณเนื้อพื้น ในรูปที่ 4.34 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



รูปที่ 4.38 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 5 ก่อนตะกอน ในรูปที่ 4.34 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

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 (δ -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]

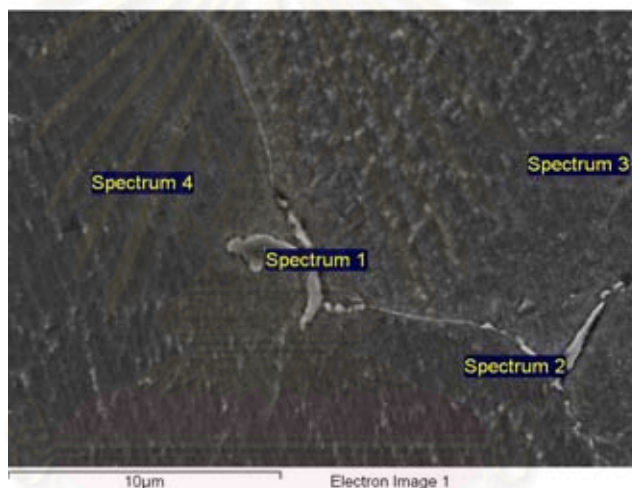
จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ตามที่แสดงในรูปที่ 4.29 ตะกอนส่วนใหญ่ที่พบคาดว่าน่าจะเป็นคาร์ไบด์ชนิด MC และ $M_{23}C_6$ [3, 4, 7, 27] ตกตะกอนอยู่ในเนื้อพื้นและตามขอบเกรนซึ่งมีปริมาณธาตุโครเมียมและโมลิบดีนัมสูง 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 (δ -phase) ซึ่งมีผลทำให้ความแข็งแรงมีค่าสูง

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

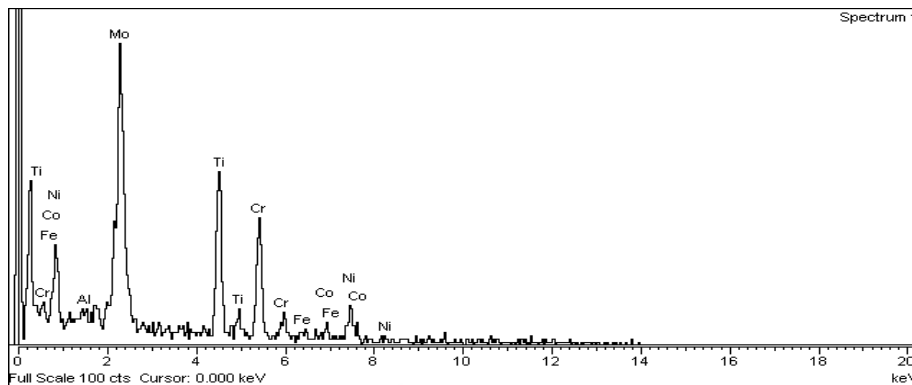
จากรูปแสดงความแข็งแรงพบว่าการเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนจาก 500 ชั่วโมง เป็น 1000 ชั่วโมง และการเพิ่มอุณหภูมิของกรรมวิธีทางความร้อน ไม่ทำให้ความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมอิน

โคเนล 625 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพิ่มสูงขึ้น ส่วนเนื้อเชื่อมอื่นโคเนล 625 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนจาก 500 ชั่วโมง เป็น 1000 ชั่วโมง ทำให้ความแข็งเพิ่มสูงขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิของกรรมวิธีทางความร้อนจาก 550°C เป็น 633°C ทำให้ความแข็งเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน การเพิ่มอุณหภูมิมีผลที่ทำให้ความแข็งเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อน ความแข็งของเนื้อเชื่อมหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C จะมีความแข็งมากกว่าที่อุณหภูมิ 550°C

4.5.9 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด กำลังขยาย 5000 เท่า ของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

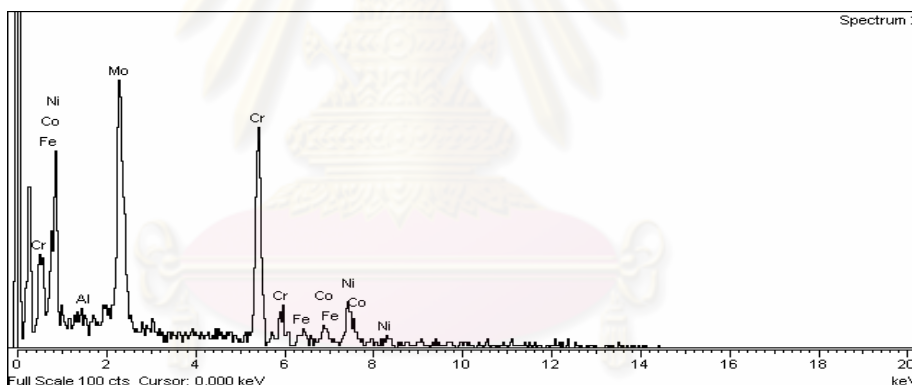


รูปที่ 4.39 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 5000 เท่า



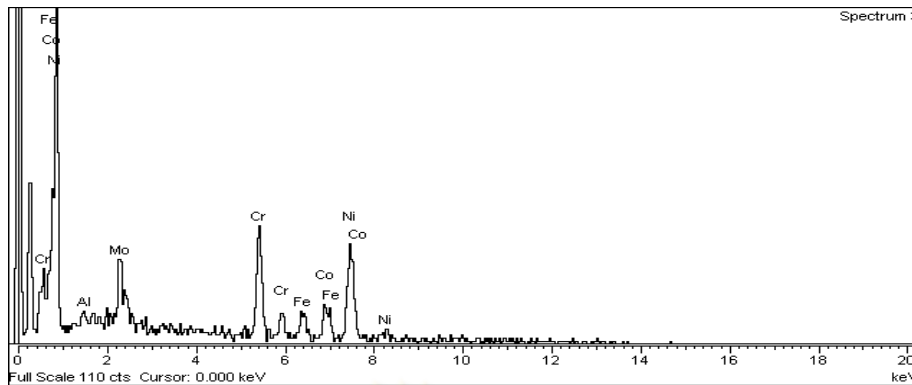
รูปที่ 4.40 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 1 ก่อนตะกอน ในรูปที่ 4.39 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

รูปที่ 4.40 แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของก้อนตะกอนในเนื้อพื้นตามรูปที่ 4.39 Spectrum ที่ 1 มีปริมาณธาตุโครเมียม ไทเทเนียม โมลิบดีนัม โคบอลต์และเหล็กสูง คาดว่าน่าจะเป็นแกรมมาไฟรม (γ')



รูปที่ 4.41 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 2 ตะกอนตามขอบเกรน ในรูปที่ 4.39 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

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

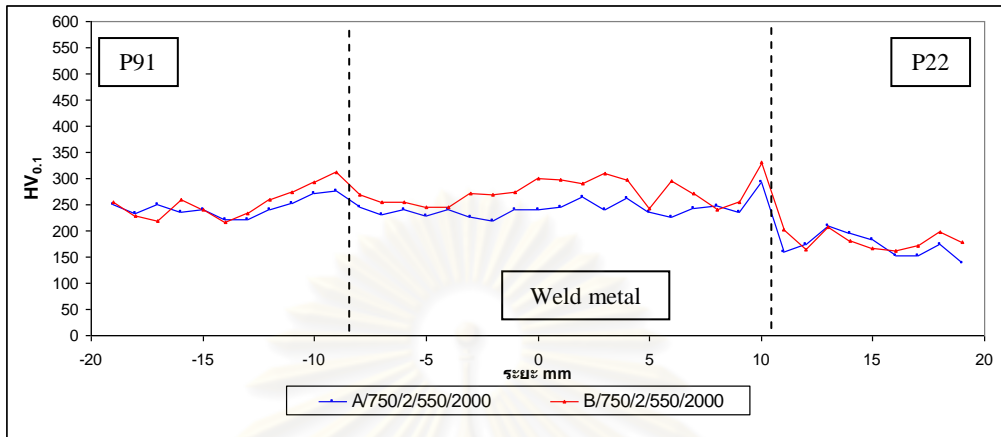


รูปที่ 4.41 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 3 บริเวณเนื้อพื้น ในรูปที่ 4.39 ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

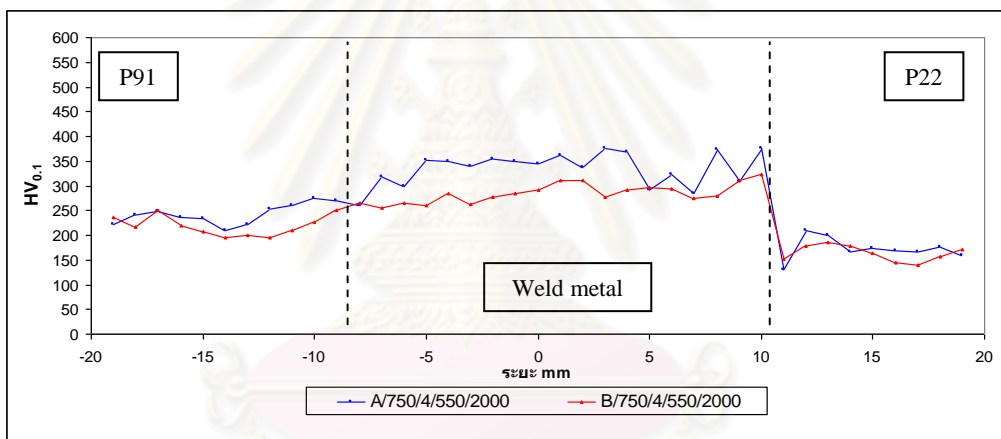
โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ตามที่แสดงในรูปที่ 4.40 พบมีตะกอนในเนื้อพื้นและตามขอบเกรน รูปที่ 4.41 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของ Spectrum ที่ 1 ของก้อนตะกอนภายในเนื้อพื้นด้วยเทคนิคอีดีเอส ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตรวจวิเคราะห์ประมาณ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

จากภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ตามที่แสดงในรูปที่ 4.39 ก้อนตะกอนคาดว่าน่าจะเป็นแกรมมาไฟรึม (γ') มีปริมาณธาตุโครเมียม ไททาเนียม โคบอลท์ โมลิบดีนัมและเหล็กสูง จากการศึกษาของ Elisabetta Gariboldi และคณะ [8] นำอินโคเนล 617 ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 700 และ 800°C พบการตกตะกอนของแกรมมาไฟรึม (γ') ซึ่งปริมาณธาตุไททาเนียมสูง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองนี้ที่พบตะกอนที่ประกอบด้วยธาตุไททาเนียม ตะกอนที่เกิดขึ้นมีผลทำให้ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง มีความแข็งเพิ่มสูงขึ้น

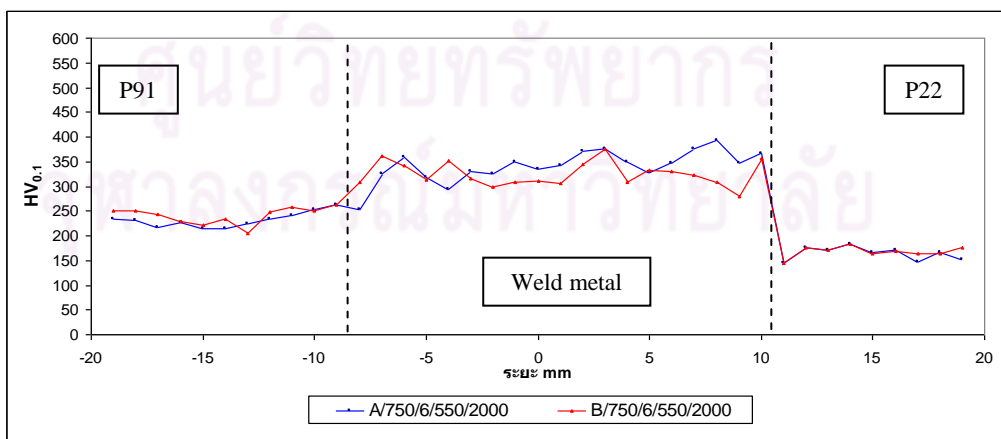
4.6 ความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

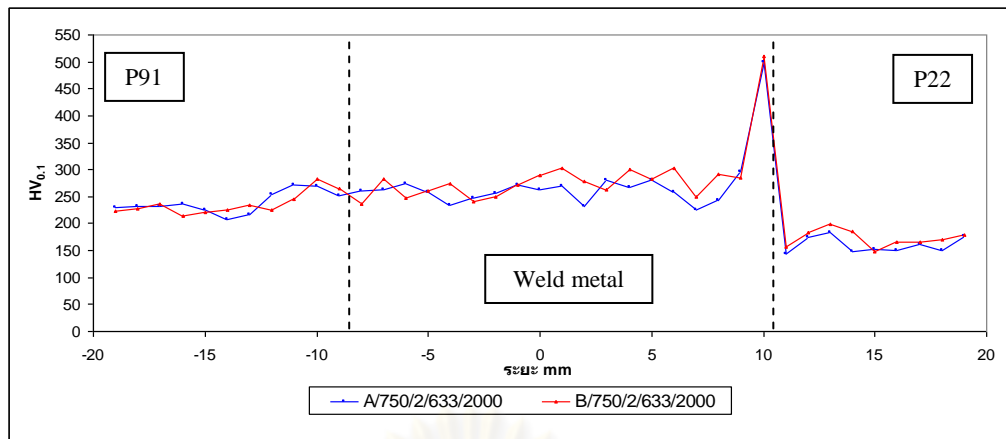


ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

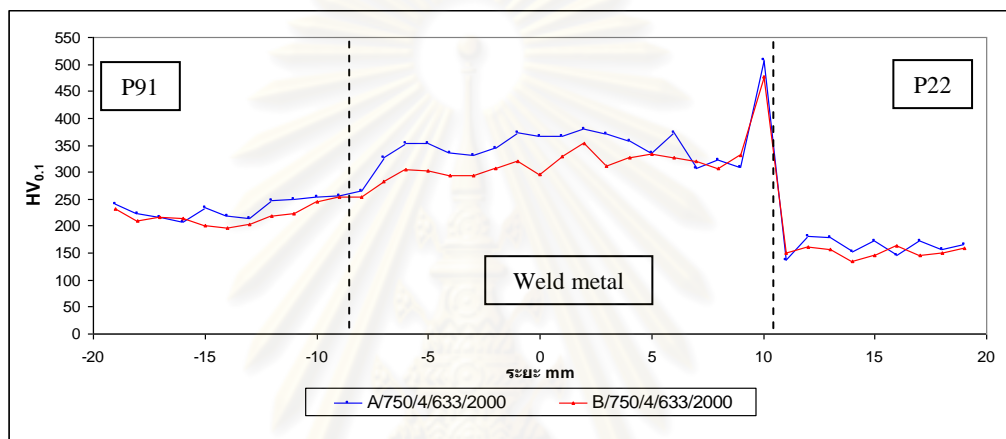


ค) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

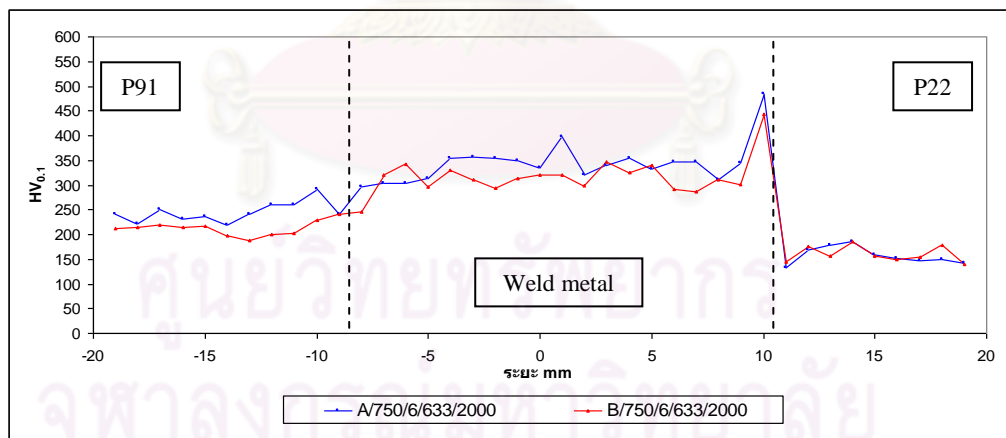
รูปที่ 4.43 เส้นแสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



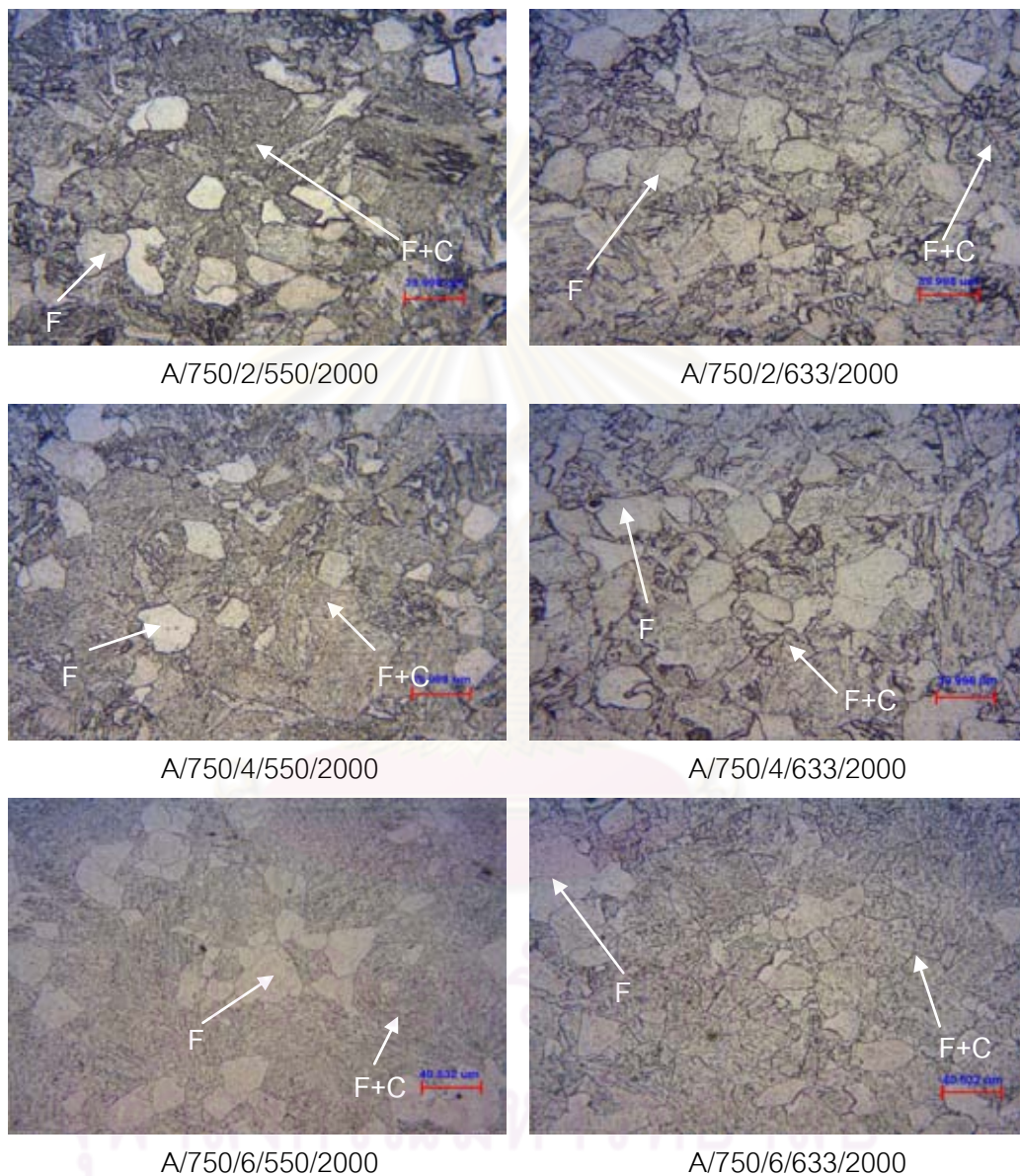
ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง



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



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}

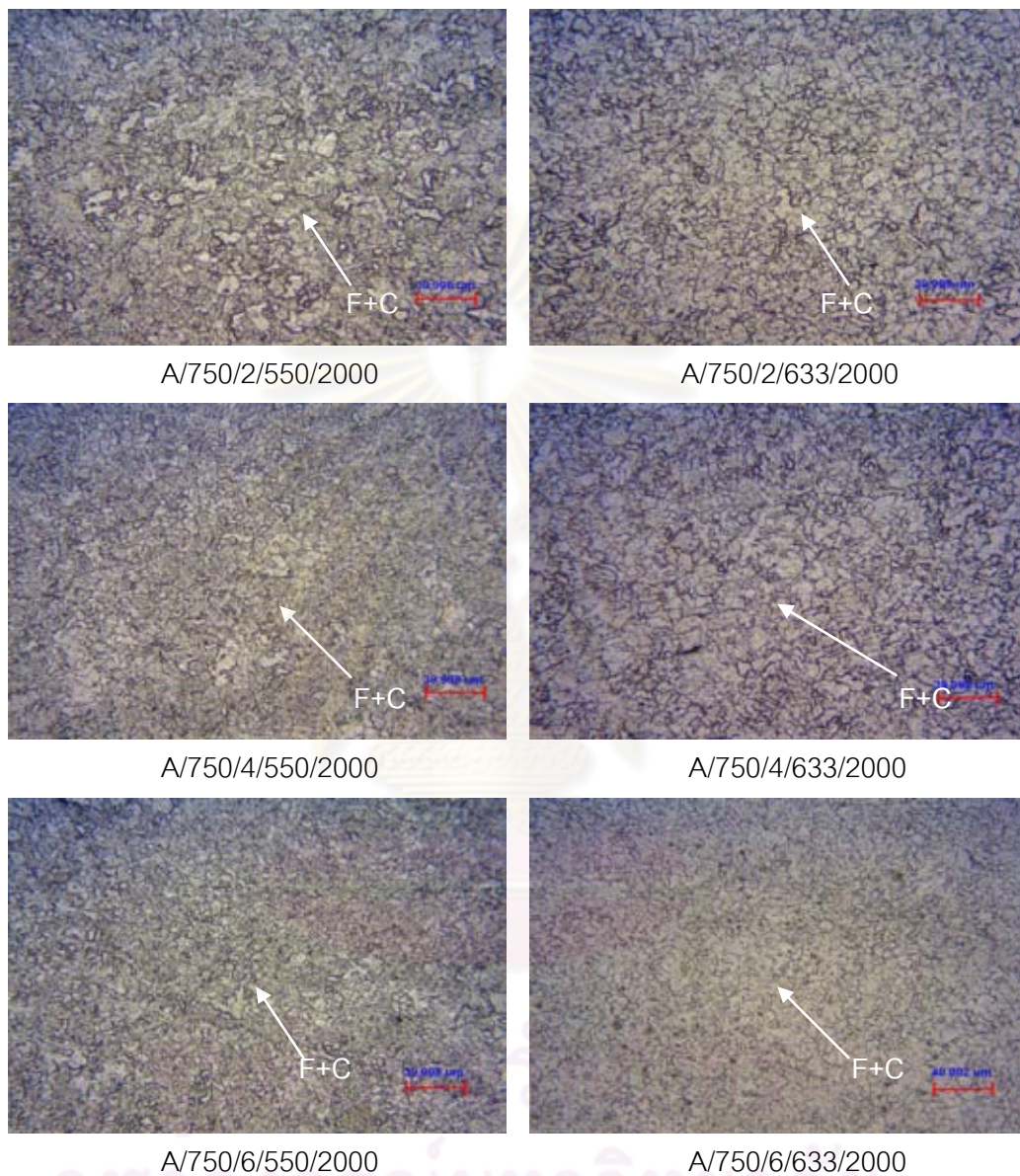
รูปที่ 4.44 แสดงค่าความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง มีค่า 143-175 HV_{0.1} ส่วนแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล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

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



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

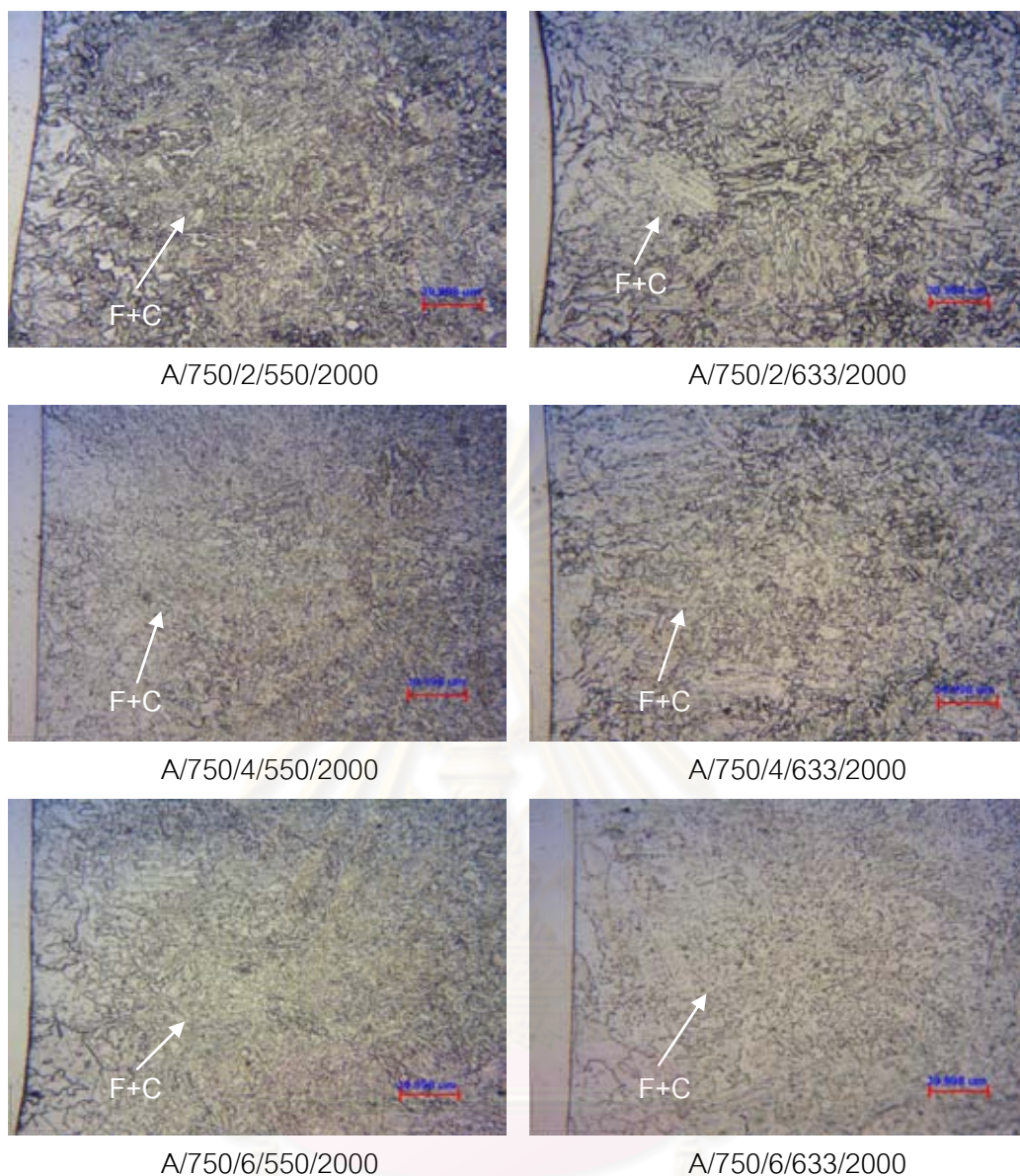
รูปที่ 4.43 และ 4.44 แสดงความแข็งของบริเวณกระทันของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 166-210 HV_{0.1} และ 164-207 HV_{0.1} ตามลำดับ ส่วนชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังเชื่อมเช่นเดียวกันแต่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633 °C มีค่าอยู่ระหว่าง 148-177 HV_{0.1} และ 134-198 HV_{0.1} ตามลำดับ

4.6.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ ความแข็งบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

รูปที่ 4.47 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง ไม่พบความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาค ส่วนโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อ คือ เฟอไรต์และ ตะกอนคาร์ไบด์ [11,12,19,20]

รูปที่ 4.43 แสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 บริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C มีค่า 158, 129 และ 145 HV_{0.1} ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 201, 152 และ 143 HV_{0.1} ตามลำดับ

รูปที่ 4.44 แสดงความแข็งของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 บริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C มีค่า 144, 136 และ 132 HV_{0.1} ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 156, 150 และ 145 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 ความแข็งแรงเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะมีความแข็งแรงต่ำกว่าบริเวณรอยต่อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง สาเหตุมาจากขนาดเกรนที่โตกว่า ความแข็งแรงของบริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนจนถึง 2000 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกับบริเวณรอยต่อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 และ 1000 ชั่วโมง เนื่องจากว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเหมือนกัน คือ เฟอไรต์และตะกอนคาร์ไบด์

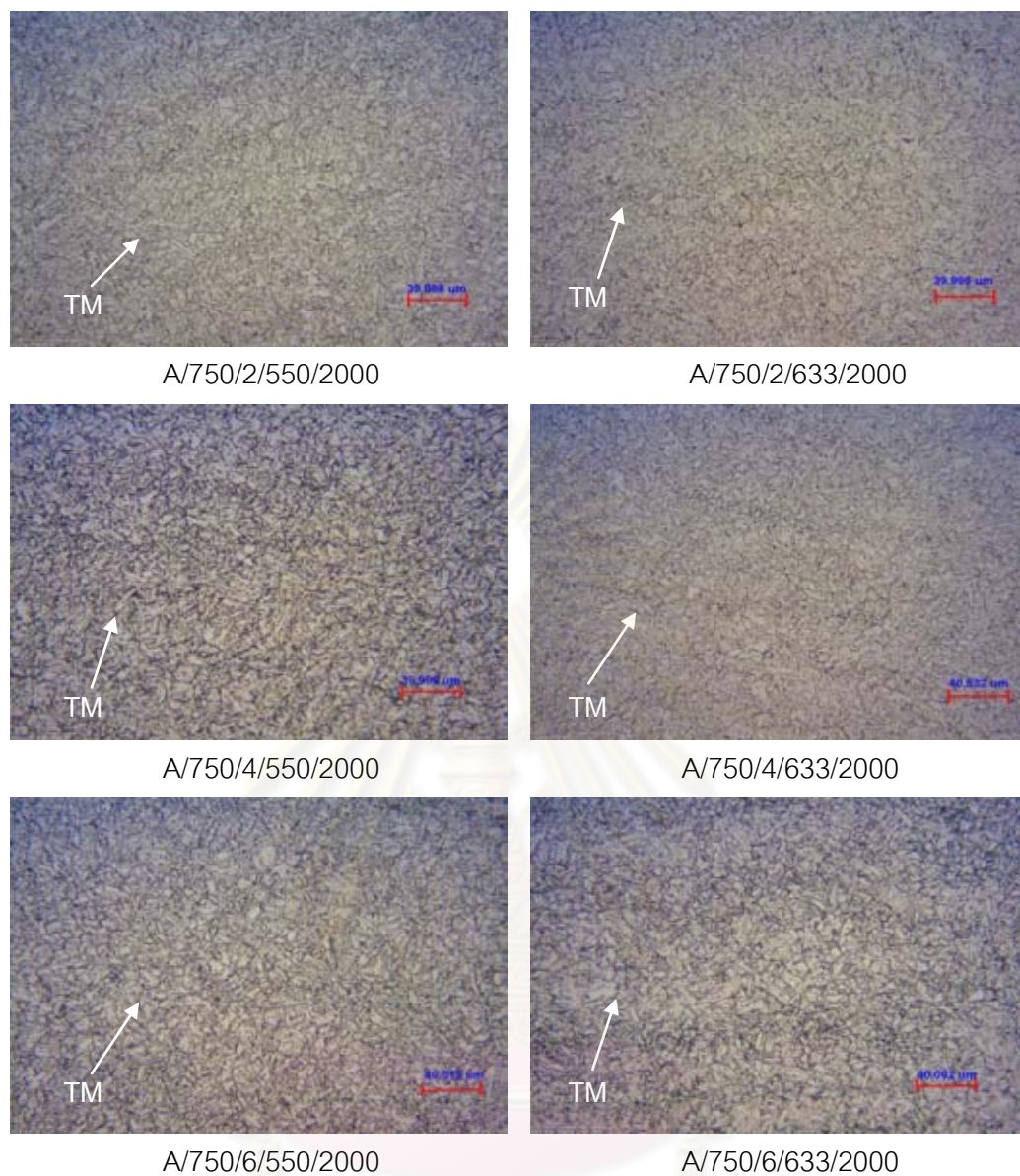
รูปที่ 4.43 แสดงความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C มีค่า 293, 374 และ 365 HV_{0.1} ตามลำดับ ส่วนอินโคเนล 617 มีค่า 331, 322 และ 355 HV_{0.1} ตามลำดับ

รูปที่ 4.44 แสดงความแข็งของบริเวณรอยต่ออินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C มีค่า 499, 507 และ 485 HV_{0.1} ตามลำดับ ส่วนอินโคเนล 617 คือ 510, 467 และ 443 HV_{0.1} 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 เทมเปอร์ มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์ [21-26] พบว่าเกรนมีการขยายขนาดขึ้นเมื่อเทียบกับหลังเชื่อมและหลังกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม แต่ขนาดเกรนใกล้เคียงกับชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

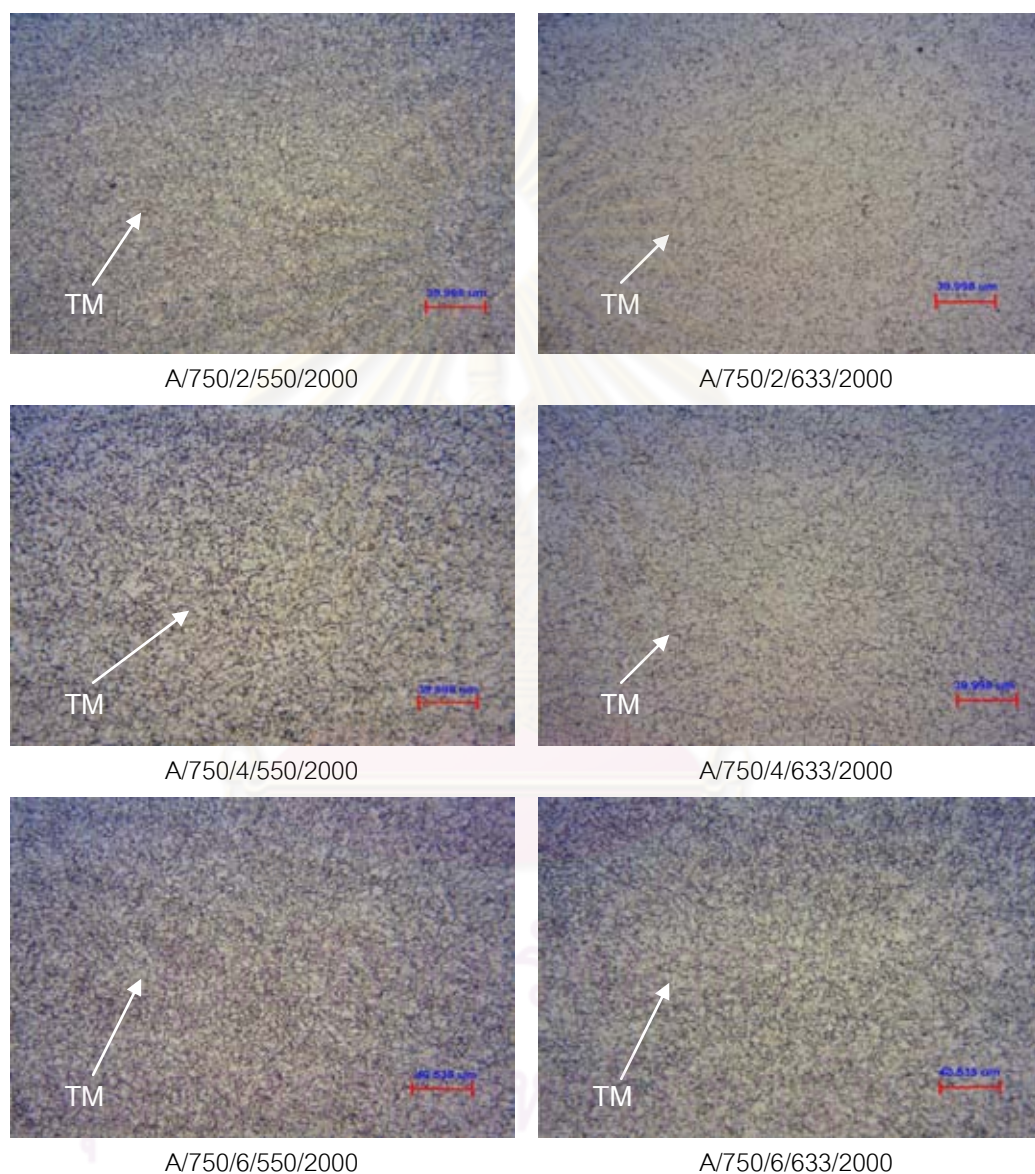
รูปที่ 4.43 และ 4.44 แสดงความแข็งของบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 195-250 HV_{0.1} เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 เหมือนกันจึงทำความแข็งจึงมีค่าใกล้เคียงกัน การเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบบร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 และความแข็งบริเวณกระทบบร้อนเหล็กกล้า 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 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบบร้อนเหล็กกล้า 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 เเทมเปอ์ มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์ ขนาดเกรนของบริเวณกระทันของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 633°C โตกว่าที่ 550°C เล็กน้อย

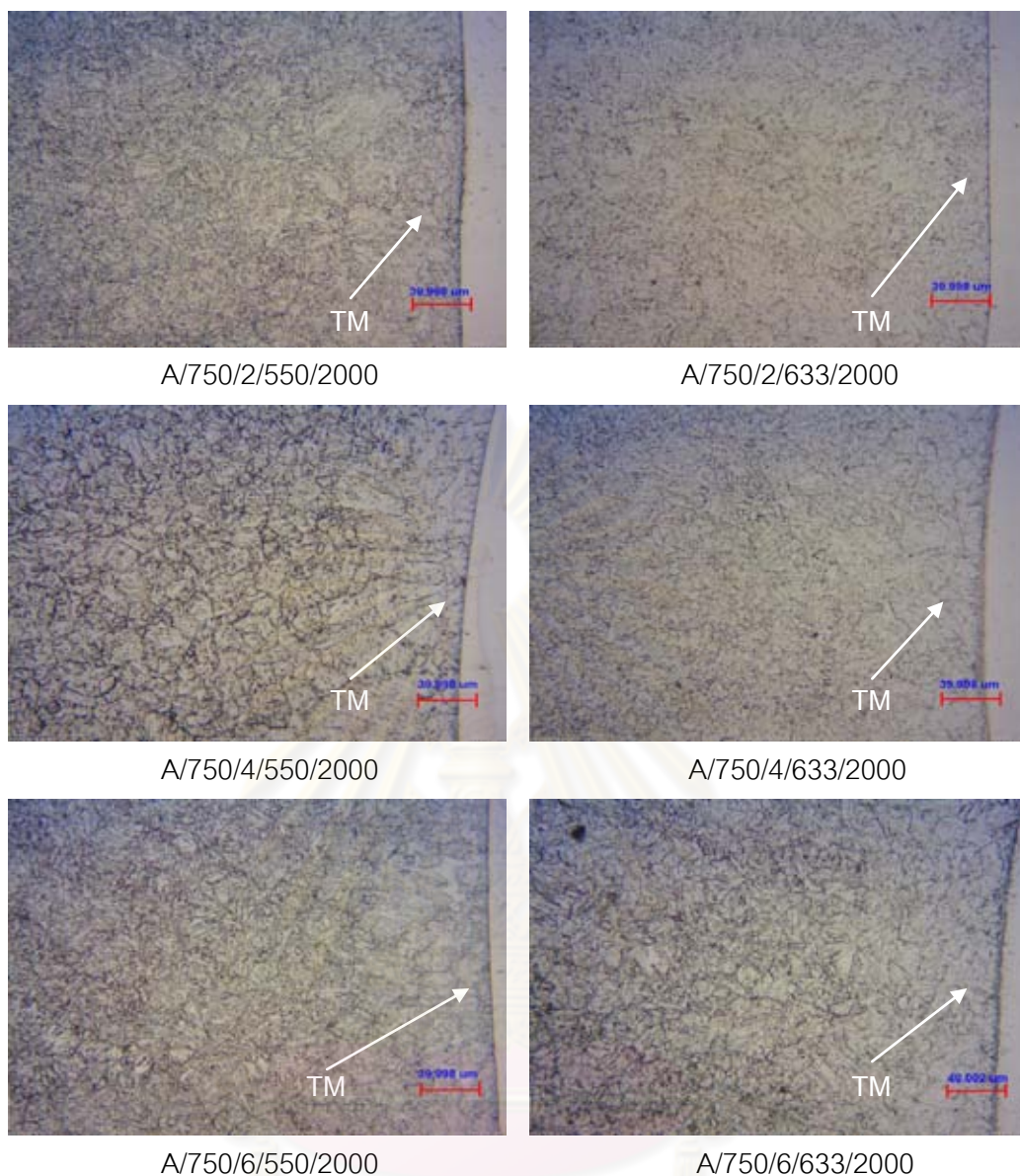
รูปที่ 4.43 แสดงความแข็งบริเวณกระทันของเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง มีค่าอยู่ระหว่าง 221-272 HV_{0.1} และ 234-292 HV_{0.1} 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_{0.1} และ 200-283 HV_{0.1} 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 และ ความแข็งบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า 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 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย ลวดเชื่อมอินโคเนล 625 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็น เวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง มีลักษณะไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 และ 1000 ชั่วโมง ขนาดเกรนของรอยต่อโตกว่าบริเวณโลหะพื้นและบริเวณกระทัน ส่วน โครงสร้างจุลภาคคือ เเทมเปอ์ มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์



รูปที่ 4.50 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยด้วยอินโคเนล 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 $\text{HV}_{0.1}$ ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 311, 251 และ 262 $\text{HV}_{0.1}$ 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_{0.1} ตามลำดับตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 มีค่า 265 254 และ 241 HV_{0.1}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_{0.1} ตามลำดับ ส่วนบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 270, 264 และ 307 HV_{0.1} ตามลำดับ

ความแข็งของบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดกับเหล็กกล้าที่ P91 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง มีค่า 259, 266 และ 295 HV_{0.1} ตามลำดับ ส่วนความแข็งบริเวณรอยต่อเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่า 236, 254 และ 245 HV_{0.1} 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_{0.1} และ 244-309 HV_{0.1}

รูปที่ 4.43 ข)-ค) ความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 284-392 HV_{0.1} ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่าอยู่ระหว่าง 254-374 HV_{0.1}

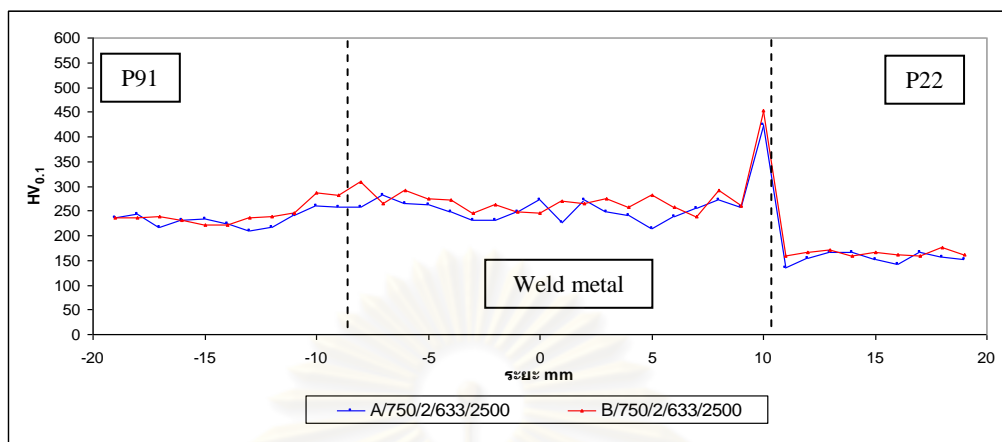
รูปที่ 4.44 ก) ความแข็งของบริเวณเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 224-295 HV_{0.1} ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่าระหว่าง 241-303 HV_{0.1}

รูปที่ 4.44 ข)-ค) แสดงความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 304-397 HV_{0.1} ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 มีค่าระหว่าง 283-333 HV_{0.1}

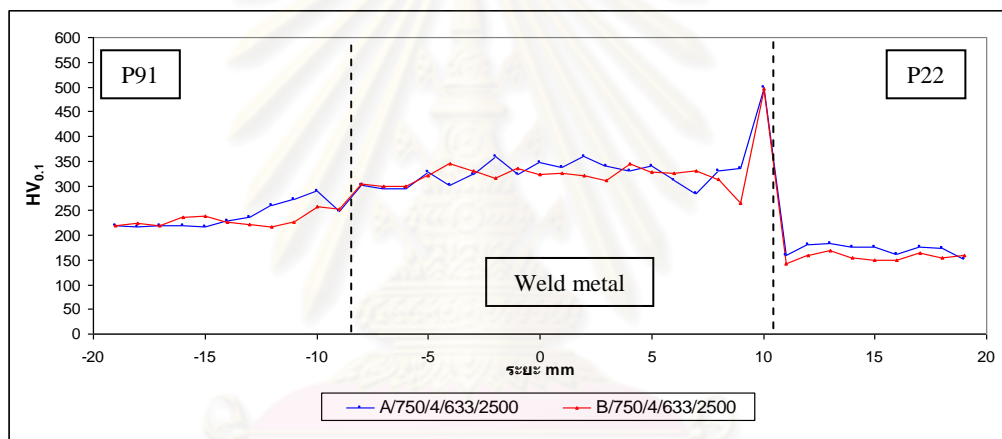
พบว่าความแข็งของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนจนถึง 2000 ชั่วโมง ความแข็งมีค่าใกล้เคียงกันกับเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500 และ 1000 ชั่วโมง คาดว่าน่าจะเป็นผลของตะกอนซึ่งส่วนใหญ่คาดว่าจะเป็คาร์ไบด์ M₂₃C₆ [7] ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อเชื่อมเองทำให้ความแข็งจึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

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

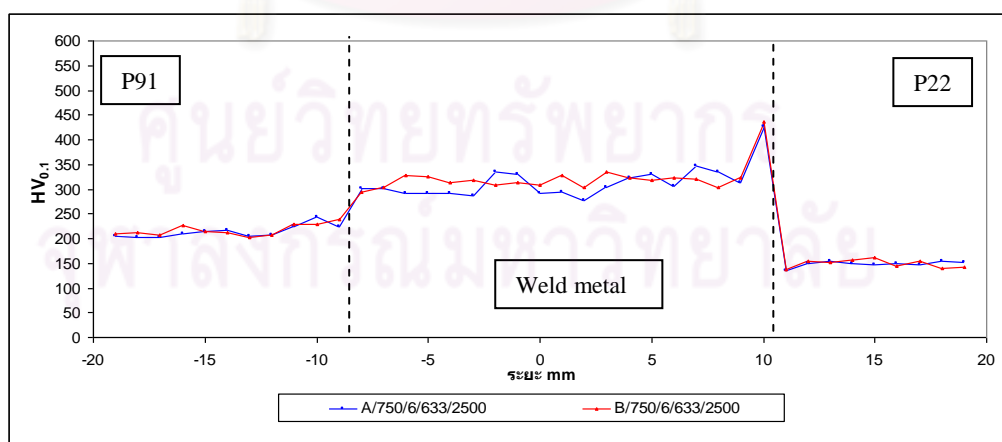
4.7 ความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง



ก) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



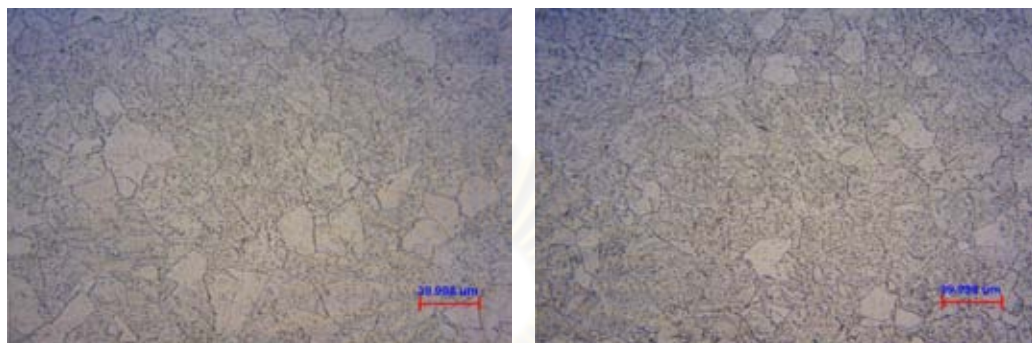
ข) หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง



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



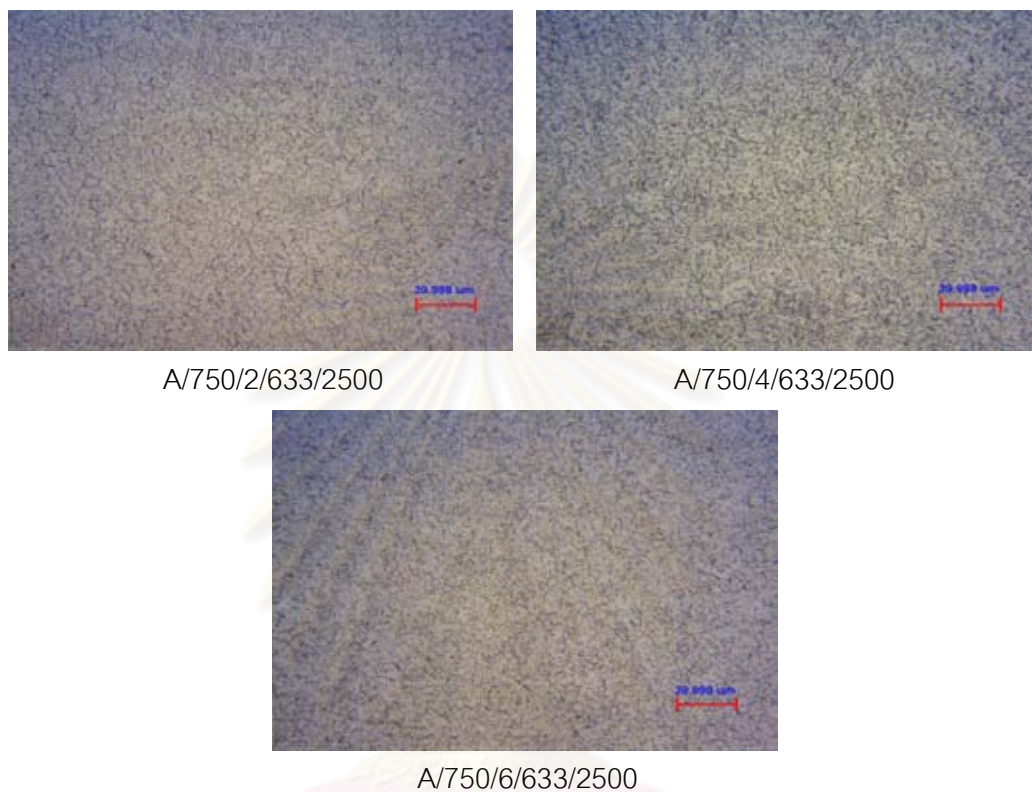
A/750/6/633/2500

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_{0.1} 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

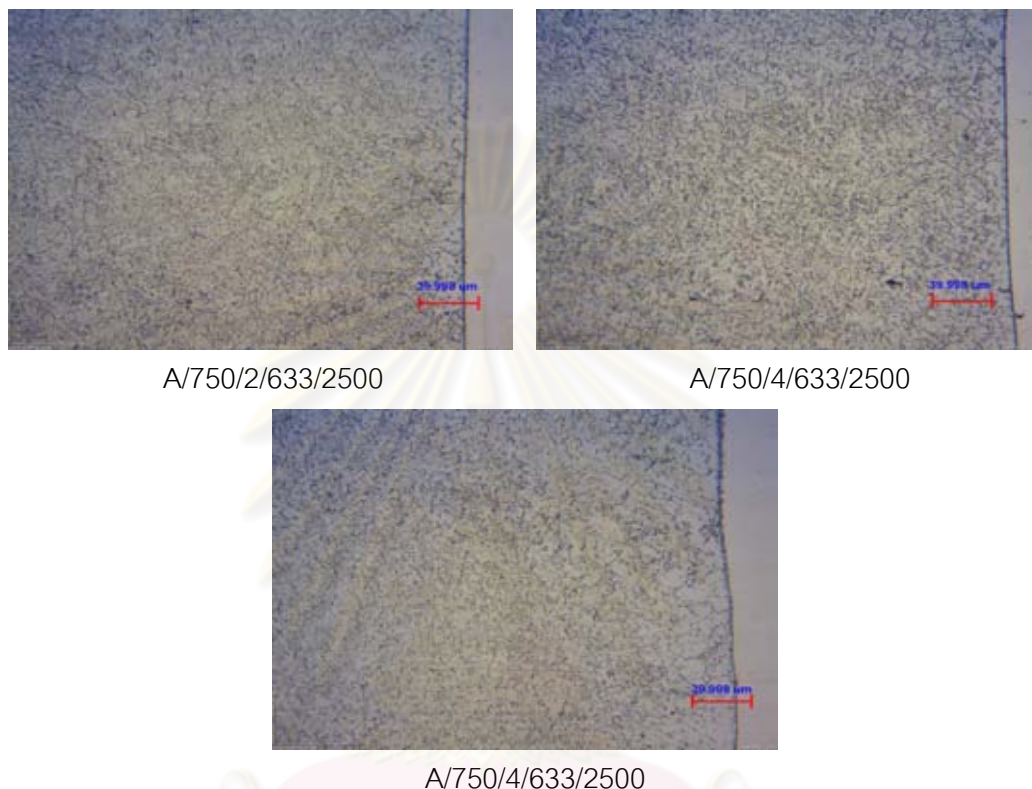


รูปที่ 4.53 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง

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

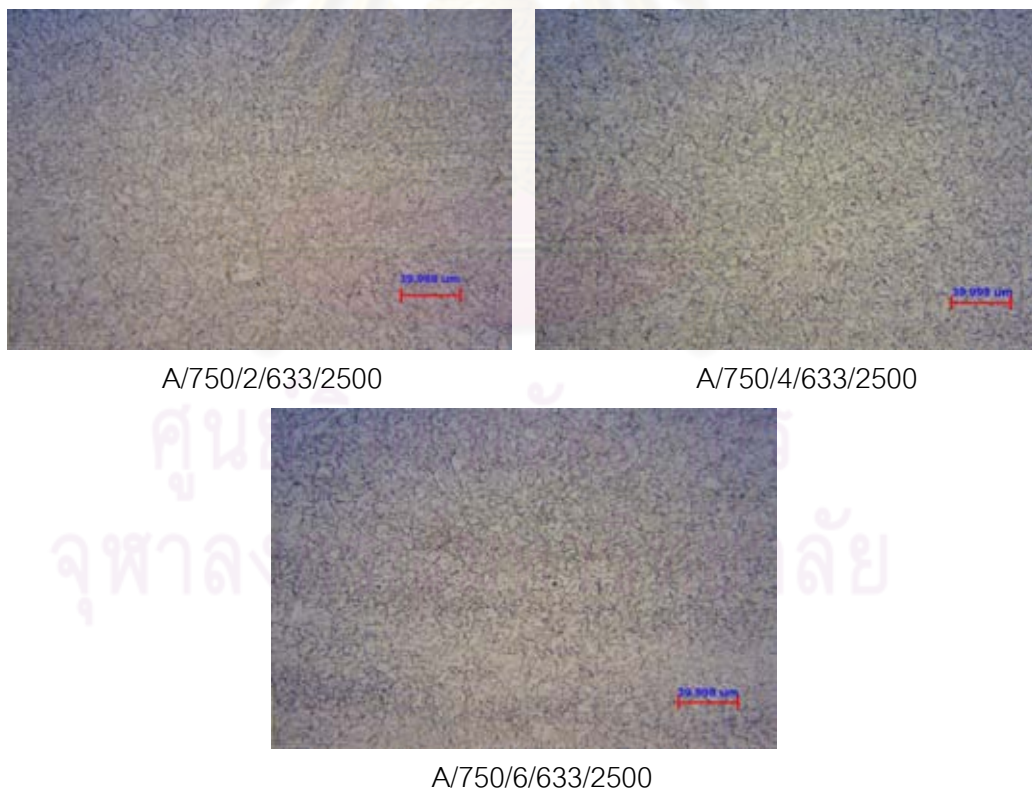
รูปที่ 4.54 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ที่เชื่อมอินโคเนล 625 โครงสร้างจุลภาคยังคงเป็น เฟอไรต์และตะกอนคาร์ไบด์ ไม่พบลักษณะเกรนที่มีลักษณะยาวและแหลม เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500, 1000 และ 2000 ชั่วโมง คาดว่าเนื่องจากเหล็กกล้า 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_{0.1} 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



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_{0.1} และ 207-237 HV_{0.1} ตามลำดับ

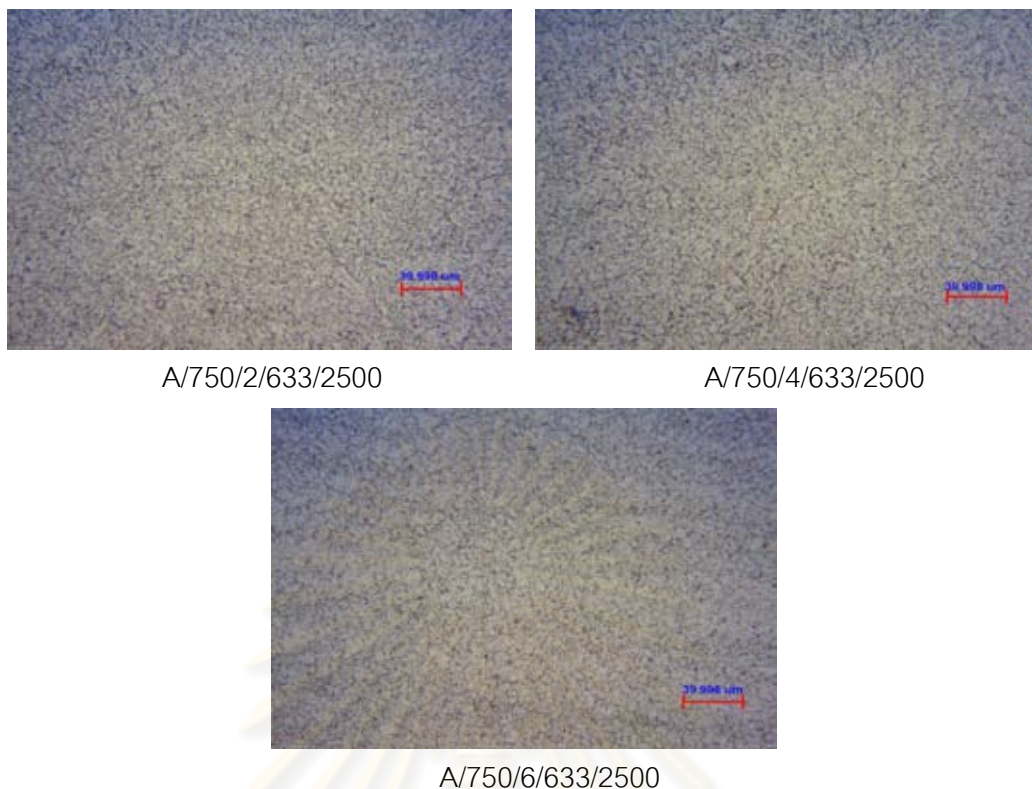
กรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500, 1000 และ 2000 ชั่วโมง ความแข็งมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเพิ่มเวลาจนถึง 2500 ชั่วโมง ความแข็งมีค่าลดลงเล็กน้อยเนื่องจากเกรนมีการขยายขนาดโตขึ้น

4.6.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 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 พบว่าเกรนมีแนวโน้มขยายขนาดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับหัวจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 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_{0.1} และ 202-257 HV_{0.1} ตามลำดับ

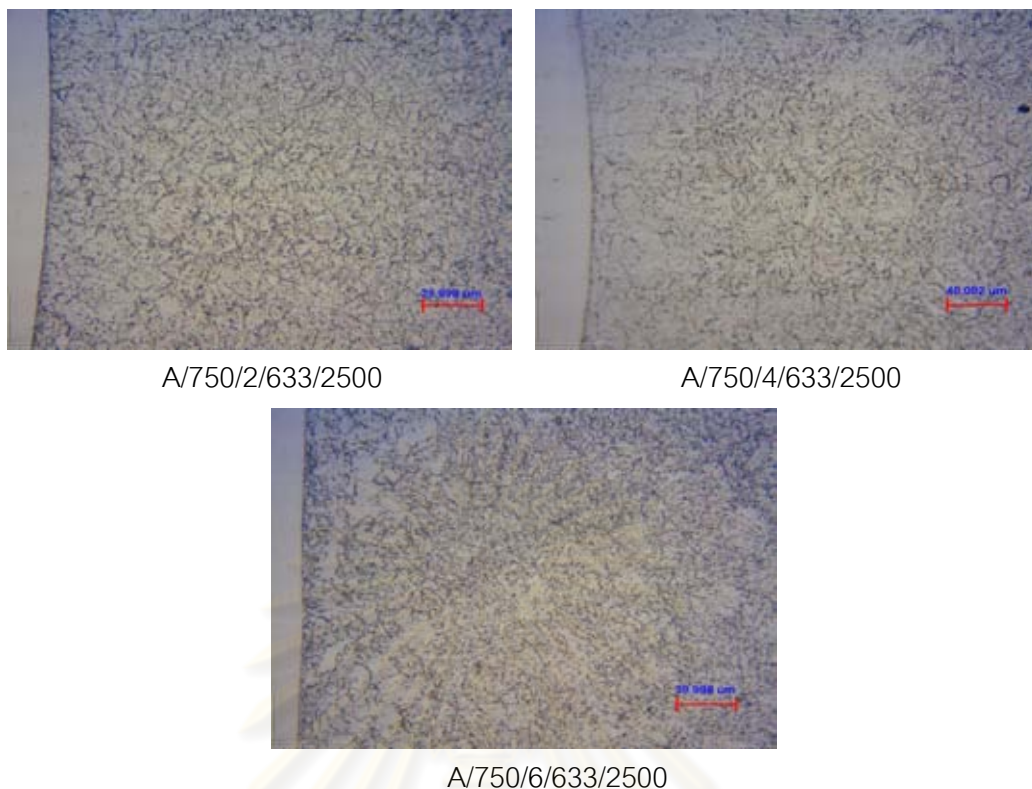
พบว่าความแข็งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณกระทันหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500, 1000 และ 2000 ชั่วโมง คาดว่าเนื่องจากขนาดเกรนขยายขนาดขึ้นทำให้ความแข็งลดลง



รูปที่ 4.56 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนเหล็กกล้า 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 มาร์เทนไซด์ และตะกอนคาร์ไบด์ [21-26]



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 $HV_{0.1}$ ตามลำดับ ส่วนที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 คือ 281, 254 และ 239 $HV_{0.1}$ 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 $HV_{0.1}$ ตามลำดับ ส่วนบริเวณรอยต่อของอินโคเนล 617 คือ 308, 303 และ 294 $HV_{0.1}$ ตามลำดับ

พบว่าบริเวณรอยต่อของอินโคเนล 625 และ 617 ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 500, 1000 และ 2000 ชั่วโมง คาดว่าเนื่องมาจากตกตะกอน (แกมมาคอบเบิลไฟร์มหรือเดลต้าใน 625 และแกมมาไฟร์มใน 617) มีปริมาณมากขึ้น และบริเวณรอยต่อที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งต่ำกว่าหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง คาดว่าเนื่องมาจากมีเพียงตะกอนคาร์ไบด์ชนิด MC และ $M_{23}C_6$ เท่านั้น

ความแข็งของบริเวณเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง คือ 214-281 $HV_{0.1}$, ส่วนอินโคเนล 617 คือ 237-291 $HV_{0.1}$ ตามลำดับ

ความแข็งของบริเวณเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 278-358 $HV_{0.1}$, ส่วนอินโคเนล 617 มีค่าระหว่าง 265-345 $HV_{0.1}$ ตามลำดับ

พบว่าเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนให้กับเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความแข็งไม่เพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนให้กับเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง จนถึง 2500 ชั่วโมง ความแข็งลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 500, 1000 และ 2000 ชั่วโมง คาดว่าเนื่องมาจากตะกอนแกมมาคอบเบิลไฟร์มหรือเดลต้าในอินโคเนล 625 และแกมมาไฟร์มในอินโคเนล 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 เหมเปออร์มาร์เทนไซต์และตะกอนคาร์ไบด์ คาดน่าจะเป็นชนิด $M_{23}C_6$ ค่าความแข็งของเหล็กกล้า P22 และ P91 แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้า P22 และ P91 บริเวณโลหะพื้น กระทบร้อนและรอยต่อหลังเชื่อม

เหล็กกล้า	ค่าความแข็ง HV _{0.1}		
	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 _{0.1}
	เนื้อเชื่อม
625	217-308
617	261-306

โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนและรอยต่อของเหล็กกล้า P22 คือ เบไนต์ 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

เปาะซึ่งเสี่ยงในการแตกร้าทำให้เหมาะสมต่อการใช้งาน 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 กระทบร้อนและรอยต่อหลังผ่านกรรมวิธีทางร้อนหลังการเชื่อม

เหล็กกล้า	PWHT	ค่าความแข็ง HV _{0.1}		
		โลหะพื้น	กระทบร้อน	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 บริเวณกระทบร้อนและรอยต่อของเหล็กกล้า P22 โครงสร้างจุลภาคคือเฟร์ไรต์และตะกอนคาร์ไบด์คาดว่าน่าจะเป็นชนิด M₃C ความแข็งมีค่า

ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับหลังเชื่อม ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.5 ส่วนเหล็กกล้า P91 โครงสร้างจุลภาคคือ เเทมเปอร์มาร์เทนไซต์และตะกอนอนุคาร์ไบด์ 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 คาดว่าเนื่องมาจากการตกตะกอนของแกมมาไพร์มและคาร์ไบด์.

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 โครงสร้างจุลภาคยังคงเป็นเฟอร์ไรต์และเฟอร์ไรต์ที่มีตะกอนคาร์ไบด์แสดงในรูปที่ 4.45 และ 4.52 ซึ่ง คาดน่าจะเป็นชนิด M_7C_3 ส่วนความแข็งมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากมีโครงสร้างจุลภาคที่เหมือนกัน กรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาค เปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรต์แสดงในรูปที่ 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 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของเปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรต์และตะกอน คาร์ไบด์ ค่าความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางร้อนหลังการเชื่อม และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633 และ 717°C มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนความแข็ง หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C ความแข็งมีค่าลดลงเนื่องจากโครงสร้างจุลภาค เปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรต์และตะกอนคาร์ไบด์

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

เล็กน้อย ส่วนบริเวณกระทบร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคเป็นเฟร์ไรต์และความแข็งลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณกระทบร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C

บริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้า P91 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C บริเวณกระทบร้อนมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์จากธาตุผสมที่มีการละลายอยู่มากภายในเนื้อพื้นทำให้ความแข็งมีค่าสูงขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การตกตะกอนของคาร์ไบด์ในช่วงอบคืนตัว (Secondary hardening) [30] ซึ่งคาร์ไบด์ที่ตกตะกอนจะมีขนาดเล็กมากและตกตะกอนส่วนใหญ่ตามขอบเกรน (Grain boundary) การตกตะกอนของคาร์ไบด์นี้ทำให้ความแข็งของบริเวณกระทบร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและคาดว่าจะเป็สาเหตุของการแตกร้าตามขอบเกรน (Intergranular cracking) [31-38] ซึ่งการตกตะกอนของคาร์ไบด์ที่ทำให้ความแข็งเพิ่มสูงขึ้นจะเห็นผลที่ชัดเจนในบริเวณกระทบร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง แต่เมื่อเพิ่มเวลาของกรรมวิธีทางความร้อนจนถึง 2000 ชั่วโมง ความแข็งของบริเวณกระทบร้อนมีค่าลดลง คาดว่าเนื่องจากตะกอนคาร์ไบด์เริ่มขยายขนาด [21] คาร์ไบด์ที่ตกตะกอนสันนิฐานว่าส่วนใหญ่คือชนิด $M_{23}C_6$ ส่วนบริเวณกระทบร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C ความแข็งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณกระทบร้อนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 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 ซึ่งคาดว่าจะมีการตกตะกอนที่เกิดขึ้นในเนื้อพื้นน่าจะเป็นแกมมาแมดอบเปิดไพร์ม (γ'') หรือเฟสเดลต้า (δ -phase) ประกอบด้วยธาตุ โครเมียม ไนโอเบียมและโมลิบดีนัม ตะกอนที่เกิด

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้ศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผลของกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800 °C เป็นเวลา 500, 1,000, 2,000 และ 2,500 ชั่วโมง ต่อความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่กระหว่างเหล็กกล้า P91 (9% โครเมียม) และ เหล็กกล้า P22 (2.25% โครเมียม) ที่ใช้ลวดเชื่อม อินโคเนล 625 และ อินโคเนล 617 สรุปผลโดยแยกส่วนต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. บริเวณโลหะพื้นของเหล็กกล้า P91 และเหล็กกล้าเหล็กกล้า หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633 °C โครงสร้างจุลภาคเหมือนกับโครงสร้างจุลภาคก่อนเชื่อม ส่วนกรรมวิธีทางความร้อนที่ 800°C ทำให้เหล็กกล้า P91 โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนเป็นเฟร์ไรต์และตะกอนคาร์ไบด์ ส่วนเหล็กกล้าเหล็กกล้า P22 โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนเป็นเฟร์ไรต์
2. บริเวณกระแทบร้อนของเหล็กกล้า P91 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C ความแข็งเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการตะกอนคาร์ไบด์ตามขอบเกรนทำให้บริเวณกระแทบมีความแข็งสูงเสี่ยงต่อการแตกร้าวตามขอบเกรน
3. เนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ความแข็งไม่เพิ่มสูงขึ้น ส่วนเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 และ 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง ความแข็งจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากตะกอนภายในเนื้อพื้นและตามขอบเกรน

รายการอ้างอิง

1. รายงานผลการทดสอบรอยแตกแนวเชื่อมวาล์วเครื่องยนต์กังหันไอน้ำ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 2550.
2. Mankins, W.L. and Lamb, S. Non ferrous Alloy and Special purpose Metal, ASM Handbook Vol. 2, 1992.
3. วีระ ควนเลี้ยง. ผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อพฤติกรรมการคลายความเค้นของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ที่อุณหภูมิสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
4. Matthew, J. D, Stephen, J. D. SUPERALLOYS: A Technical Guide, ASM International, 2002.
5. Farrar, J.C.M. The alloy tree. A guide to alloy steel Stainless steel and Nickel base alloy, Wood Head Publishing limited. Cambridge, England, 2004.
6. Vijayalakshmi, M., Sudha, C., Terrence, A.L.E. and Albert, S.K. Systematic study of formation of soft and hard zone in the dissimilar weldment of the Cr-Mo steel. Journal of Nuclear Materials, 302: 193-205, 2002.
7. Bhanu Sankara Rao K., Vani Shankar. and Mannan, S.L. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy. Journal of Nuclear Materials, 288 (201): 222-232.
8. Elisabetta Gariboldi, Marcello Cabibbo, Stefano Spigarelli. and Dario Ripamonti. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 85: 63-71, 2008.
9. Lancaster, J.F. Metallurgy of Welding, 6th ed, Cambridge, Abington Publishing, 1999, pp 244.

10. Jandova, D., Kasl, J. and Rek, A. Electron microscopy and microanalysis of steel weld joints after long time exposure at high temperature. 11th European Workshop on Modern Developments and Application in Microbeam Analysis, 2010.
11. Peddle, B.E. and Pickles, C.A. Carbide and Hardness Development in the Heat-Affected Zone of Tempered and Postweld Heat-Treated 2.25Cr-1Mo Steel Weldments. Journal of Materials Engineering and Performance. Vol. 9(5) (October 2000): 477-488.
12. Moorthy, V., Vaidyanathan, S., Laha, K., Jayakumar, T., Bhanu Sankara Rao, K. and Baldev Raj. Evaluation of microstructures in 2.25Cr-1Mo and 9Cr-1Mo steel weldments using magnetic Barkhausen noise. Materials Science and Engineering A, 231, : 98-104, 1997.
13. Sidney H. Avner. Introduction to Physical Metallurgy, 2nd ed, Singapore, McGraw-Hill, 1974, pp 129-130.
14. William D. Callister, Materials Science and Engineering: An Introduction 7th ed, Asia, John Wiley & Sons, 2007, pp 195.
15. Sudha, C., Thomas Paul, V., Terrence, A.L.E., Saroja, S. and Vijayalakshmi, M. Microstructure and Microchemistry of Hard zone in dissimilar weldments of Cr-Mo Steels. Welding research: 71-80, 2006.
16. Das, C.R., Albert, S.K., Bhaduri, A.K., Srinivasan, G. and Murty, B.S. Effect of prior microstructure and mechanical properties of modified 9Cr-1Mo steel weld joints. Materials Science and Engineering A, 477: 185-192, 2008.
17. Arivazhagan, B., Rananath Prabhu, Albert, S.K., Kamaraj, M. and Sundaresan, S. Microstructure and Mechanical Properties of 9Cr-1Mo steel Weld Fusion Zones as a Function of Weld Metal Composition. Journal of Materials Engineering and Performance. Vol. 18(8) (November 2009): 999-1004.

18. Harendra Kumar, Mohapatra, J.N., Rajat Kumar Roy, Justin Joseyphus, R. And Amitava Mitra. Evaluation of tempering behavior in modified 9Cr-1Mo steel by magnetic non-destructive techniques. Journal of Materials Processing technology, 210: 669-674, 2010.
19. Peddle, B.E. and Pickles, C.A. Carbide development in the heat affected zone of tempered and post-weld heat treated 2.25Cr-1Mo steel weld mented. Canadain Metallurgical Quartery, Vol. 40: 1105-126, 2001.
20. Tsai, M.C. and Yang, J.R. Microstructural degeneration of simulated heat-affected zone in 2.25Cr-1Mo steel during high-temperature exposure. Materials Science and Engineering A 340: 15-32, 2003.
21. Thomas Paul, V., Saroja, S. and Vijayalakshmi, M. Microstructural stability of modified 9Cr-1Mo steel during long term exposures at elevated temperature. Journal of Nuclear Materials, 378: 273-281, 2008.
22. Sanchez-Hanton, J.J and Thomson, R.C. Charecterization of isothermally aged Grade 91(9Cr-1Mo-Nb-V) steel by electron back scatter diffraction. Materials Science and Engineering A, 460-461: 261-267, 2007.
23. Mythili, R., Thomas Paul, V., Saroja, S., Vijayalakshmi, M. and Raghunathan, V.S. Microstructural modification due to reheating in multipass manual metal arc welds of 9Cr-1Mo steel. Journal of Nuclear Materials, 312: 199-206, 2003.
24. Czyska-Filemonowicz, A., Zielinska-Lipiac, A. and Ennis, P.J. Modified 9%Cr steel for advanced power generation: Microstructure and properties. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 19, (December 2006): Issue 2.
25. Mitchell, D.R.G. and Sulaiman, S. Advanced TEM specimen preparation methods for replication of P91 steel. Materials Characterization, 56: 49-58, 2006.
26. Mitchell, D.R.G. Some applications of analytical TEM to characterisation of high temperature equipment. Micron, 32: 831-840, 2001.

27. Sanjay K. Rai, Aish Kumar, Vani Shankar, Jayakumar, T., Bhanu Sankara Rao, K. and Baldev Raj. Characterization of microstructure in Inconel 625 using X-ray diffraction peak broadening and lattice parameter measurements. Scripta Materialia, 51: 59-63, 2004.
28. Mohammad Akbari-Garakani and Mohsen Mehdizadeh. Effect of long-term service exposure on microstructure and mechanical properties of Alloy 617. Materials and Design, 32: 2695-2700, 2011.
29. Chomette, S., Gentzmittel, J.M. and Viguier, B. Creep behaviour of as-received, aged and cold worked INCONEL 617 at 850°C and 950°C. Journal of Nuclear Materials, 399: 266-274, 2010.
30. มนต์ สติรจินดา. เหล็กกล้า STEEL. พิมพ์ครั้งที่ 5. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543.
31. Sireesha, M., Shaju K. Albert and Sundaresan, S. Influence of High-Temperature Exposure on the Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Metal welds between Modified 9Cr-1Mo Steel and Alloy 800, Metallurgical and Materials Transaction A, Vol. 36A (June 2005): 1495-1506.
32. Chen, B., Flewitt, P.E.J. and Smith, D.J. Microstructural sensitivity of 316H austenitic stainless steel: Residual stress relaxation and grain boundary fracture. Materials Science and Engineering A 527: 7387-7399, 2010.
33. Roos, E., Bauer, M., Klenk, A. and Maile, K. Description of failure modes in welded component operating in creep regime. Transaction of the Indian of Metals, Vol.63 Issues 2-3: 101-109, 2010.

34. Skelton, R.P., Goodall, I.W., Webster, G.A. and Spindler, M.W. Factors affecting reheat cracking in the HAZ of austenitic steel weldments. International of Pressure Vessels and Piping, Vol. 80:441-451, 2003.
35. Ghiya, S.P., Bhatt, D.V. and Rao, R.V. Stress Relief Cracking in Advance Steel Material –Overview. Proceedings of the World Congress on Engineering 2009 Vol. II, London United Kingdom.
36. Auzoux, Q., Allais, L., Caes, C., Monnet, I., Gourgues, A.F. and Pineau, A. Effect of pre-strain on creep of three AISI 316 austenitic stainless steels in relation to reheat cracking of weld-affected zones. Journal of Nuclear Materials, 400: 127-137, 2010.
37. Benvenuti, A., Bontempi, P., Corti, S., and Ricci, N. Assessment of material Thermal history in elevated temperature Components. Materials Characterization, 36: 271-278, 1996.
38. Brozda, J., Zeman, M. Wrong heat treatment of martensitic steel weld tube cause major cracking during assembly of resuperheater in fossil fuel power plant. Engineering Failure Analysis, 10: 569-579, 2003.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 (2.25% โครเมียม) และ P91
(9% โครเมียม) ที่เชื่อมด้วย อินโคเนล 625

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก1 แสดงความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมอินโคเนล 625

ค่าความแข็ง (HV _{0.1})																	
บริเวณ	กรรมวิธีทาง ความร้อนหลัง การเชื่อมที่ อุณหภูมิ 750°C (ชม.)	กรรมวิธีทางความร้อน															
		550°C				633°C				717°C				800°C			
		500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.
โลหะ พื้น P91	2	211- 252	223- 236	222- 250	-	217- 235	216- 244	207- 236	216- 244	200- 212	-	-	-	147- 181	-	-	-
	4	193- 232	207- 248	209- 240	-	197- 236	198- 234	208- 241	216- 228	206- 236	-	-	-	151- 192	-	-	-
	6	201- 241	206- 241	214- 233	-	196- 212	216- 238	219- 249	203- 217	193- 211	-	-	-	126- 176	-	-	-

ตารางที่ ก2 แสดงความแข็งบริเวณโลหะพื้น P22 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625

ค่าความแข็ง (HV _{0.1})																	
บริเวณ	กรรมวิธีทาง ความร้อนหลัง การเชื่อมที่ อุณหภูมิ 750°C (ชม.)	กรรมวิธีทางความร้อน															
		550°C				633°C				717°C				800°C			
		500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.
โลหะ พื้น P22	2	164- 176	151- 172	137- 174	-	140- 159	144- 171	150- 175	143- 165	113- 130	-	-	-	143- 165	-	-	-
	4	149- 175	151- 179	158- 176	-	158- 169	145- 166	145- 171	151- 176	126- 140	-	-	-	151- 176	-	-	-
	6	154- 188	154- 192	147- 169	-	150- 165	150- 162	143- 150	147- 153	113- 130	-	-	-	147- 143	-	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก3 แสดงความแข็งบริเวณกระทะร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625

ค่าความแข็ง (HV _{0.1})																	
บริเวณ	กรรมวิธีทาง ความร้อนหลัง การเชื่อมที่ อุณหภูมิ 750°C (ชม.)	กรรมวิธีทางความร้อน															
		550°C				633°C				717°C				800°C			
		500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.
กระทะ ร้อน P91	2	229- 283	215- 271	221- 272	-	226- 256	216- 249	215- 272	217- 260	204- 232	-	-	-	147- 163	-	-	-
	4	222- 283	237- 301	221- 273	-	213- 252	215- 272	214- 254	235- 288	212- 222	-	-	-	143- 151	-	-	-
	6	208- 243	232- 260	224- 253	-	220- 251	223- 251	240- 291	204- 243	191- 210	-	-	-	133- 147	-	-	-

ตารางที่ ก4 แสดงความแข็งบริเวณกระทะร้อน P22 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625

ค่าความแข็ง (HV _{0.1})																	
บริเวณ	กรรมวิธีทาง ความร้อนหลัง การเชื่อมที่ อุณหภูมิ 750°C (ชม.)	กรรมวิธีทางความร้อน															
		550°C				633°C				717°C				800°C			
		500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.
กระทะ ร้อน P22	2	170- 187	163- 206	174- 210	-	144- 183	148- 171	152- 182	151- 165	110- 122	-	-	-	104- 117	-	-	-
	4	183- 193	182- 202	165- 209	-	176- 196	155- 177	142- 180	176- 182	121- 127	-	-	-	104- 118	-	-	-
	6	168- 185	141- 190	166- 183	-	130- 165	156- 166	158- 186	148- 154	113- 120	-	-	-	100- 119	-	-	-

ตารางที่ ก5 แสดงความแข็งบริเวณรอยเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมอินโคเนล 625

ค่าความแข็ง (HV _{0.1})																	
บริเวณ	กรรมวิธีทาง ความร้อนหลัง การเชื่อมที่ อุณหภูมิ 750°C (ชม.)	กรรมวิธีทางความร้อน															
		550°C				633°C				717°C				800°C			
		500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.
รอยต่อ P91	2	269	276	276	-	272	270	251	258	223	-	-	-	164	-	-	-
	4	260	261	269	-	241	256	255	247	241	-	-	-	155	-	-	-
	6	239	225	263	-	218	249	241	225	214	-	-	-	151	-	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก6 แสดงความแข็งบริเวณรอยเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625

ค่าความแข็ง (HV _{0.1})																	
บริเวณ	กรรมวิธีทาง ความร้อนหลัง การเชื่อมที่ อุณหภูมิ 750°C (ชม.)	กรรมวิธีทางความร้อน															
		550°C				633°C				717°C				800°C			
		500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.
รอยต่อ P22	2	151	157	158	-	148	142	142	134	125	-	-	-	119	-	--	-
	4	138	150	129	-	159	145	136	160	127	-	-	-	122	-	-	-
	6	136	133	145	-	134	145	132	135	118	-	-	-	126	-	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก7 แสดงความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91

ค่าความแข็ง (HV _{0.1})																	
บริเวณ	กรรมวิธีทาง ความร้อนหลัง การเชื่อมที่ อุณหภูมิ 750°C (ชม.)	กรรมวิธีทางความร้อน															
		550°C				633°C				717°C				800°C			
		500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.
เนื้อเชื่อม อินโคเนล 625	2	244- 287	214- 255	219- 265	-	231- 269	227- 260	224- 295	214- 281	227- 265	-	-	-	227- 266	-	-	-
	4	227- 312	235- 334	284- 373	-	273- 406	275- 346	306- 380	285- 358	268- 329	-	-	-	278- 338	-	-	-
	6	262- 320	248- 315	294- 392	-	290- 352	229- 362	304- 397	286- 334	263- 326	-	-	-	259- 316	-	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก8 แสดงความแข็งบริเวณรอยของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดกับเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมอินโคเนล 625

ค่าความแข็ง (HV _{0.1})																	
บริเวณ	กรรมวิธีทาง ความร้อนหลัง การเชื่อมที่ อุณหภูมิ 750°C (ชม.)	กรรมวิธีทางความร้อน															
		550°C				633°C				717°C				800°C			
		500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.
รอยต่อ อินโคเนล 625	2	256	240	244	-	272	242	266	258	255	-	-	-	305	-	-	-
	4	245	257	259	-	241	279	259	301	271	-	-	-	302	-	-	-
	6	280	247	254	-	218	298	295	302	314	-	-	-	230	-	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก9 แสดงความแข็งบริเวณรอยเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 ด้านติดเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91

ค่าความแข็ง (HV _{0.1})																	
บริเวณ	กรรมวิธีทาง ความร้อนหลัง การเชื่อมที่ อุณหภูมิ 750°C (ชม.)	กรรมวิธีทางความร้อน															
		550°C				633°C				717°C				800°C			
		500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.
รอยต่อ อินโคเนล 625	2	378	350	293	-	381	455	499	423	385	-	-	-	296	-	--	-
	4	363	422	374	-	444	466	507	498	412	-	-	-	315	-	-	-
	6	407	303	365	-	446	477	485	426	382	-	-	-	312	-	-	-

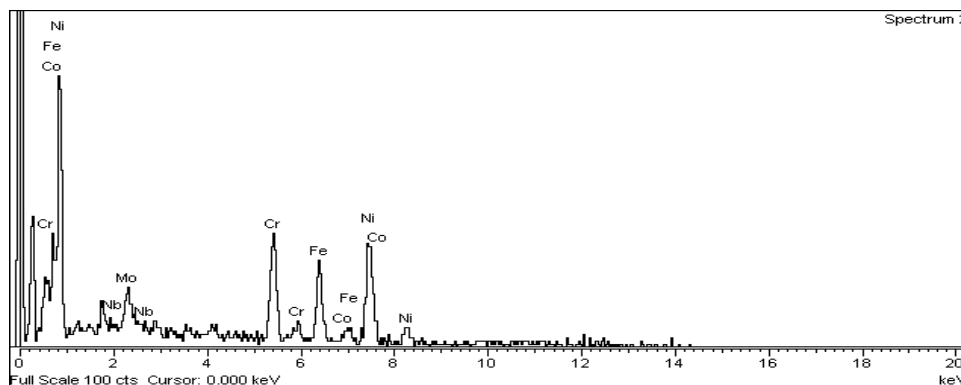
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



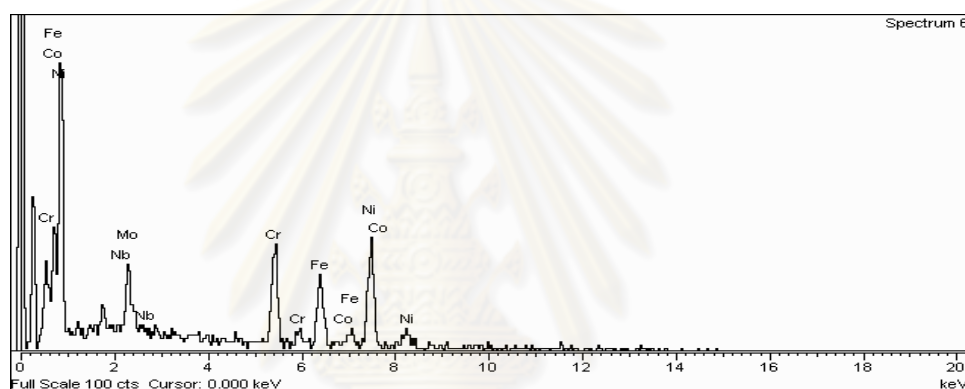
ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของเนื้อพื้นและคาร์ไบด์ด้วยเทคนิคดีเอส
ของเนื้อเชื่อม อินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการ
เชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 และ 6 ชั่วโมง และผ่านกรรม
วิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข1 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 2 ตะกอนตามขอบเกรน ด้วยเทคนิคอีดีเอส โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ ข2 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 6 บริเวณเนื้อพื้น ด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข1 แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อพื้นและคาร์ไบด์ด้วยเทคนิคอีดีเอสของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

Spectrum ที่	ปริมาณธาตุ (โดยน้ำหนัก)						
	Ni	Cr	Ti	Nb	Co	Mo	Fe
1	Bal	29.23	-	-	-	21.54	19.56
2	Bal	20.67	-	-	-	4.85	23.76
3	Bal	22.12	-	-	-	14.72	20.97
4	Bal	14.91	-	-	-	6.48	16.33
5	Bal	18.35	-	1.70	-	9.48	18.74
6	Bal	20.29	-	-	-	9.09	21.07

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข2 แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อพื้นและคาร์ไบด์ด้วยเทคนิคดีเอสของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 625 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

Spectrum ที่	ปริมาณธาตุ (โดยน้ำหนัก)						
	Ni	Cr	Ti	Nb	Co	Mo	Fe
1	Bal	15.15	-	16.42	-	21.64	5.43
2	Bal	14.68	-	6.51	-	-	7.39
3	Bal	22.52	-	4.18	-	7.00	6.75
4	Bal	14.22	-	2.86	-	5.18	5.62
5	Bal	16.13	-	7.81	-	6.25	6.86
6	Bal	12.62	-	15.11	-	7.47	5.56

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

ความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 (2.25% โครเมียม) และ เหล็กกล้า P91
(9% โครเมียม) ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค1 แสดงความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมอินโคเนล 617

ค่าความแข็ง (HV _{0.1})																	
บริเวณ	กรรมวิธีทาง ความร้อนหลัง การเชื่อมที่ อุณหภูมิ 750°C (ชม.)	กรรมวิธีทางความร้อน															
		550°C				633°C				717°C				800°C			
		500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.
โลหะ พื้น P91	2	200- 236	206- 230	216- 258	-	215- 222	200- 229	214- 235	222- 238	193- 209	-	-	-	169- 194	-	-	-
	4	224- 244	211- 239	195- 251	-	209- 223	210- 230	197- 231	219- 236	210- 228	-	-	-	170- 180	-	-	-
	6	216- 254	203- 215	222- 251	-	198- 209	193- 206	197- 217	207- 225	206- 235	-	-	-	162- 178	-	-	-

ตารางที่ ค2 แสดงความแข็งบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617

ค่าความแข็ง (HV _{0.1})																	
บริเวณ	กรรมวิธีทาง ความร้อนหลัง การเชื่อมที่ อุณหภูมิ 750°C (ชม.)	กรรมวิธีทางความร้อน															
		550°C				633°C				717°C				800°C			
		500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.
โลหะ พื้น P22	2	159- 194	162- 179	163- 197	-	160- 166	157- 162	164- 178	158- 176	120- 144	-	-	-	104- 111	-	-	-
	4	153- 192	153- 181	140- 171	-	153- 171	163- 181	145- 164	150- 163	119- 125	-	-	-	106- 110	-	-	-
	6	157- 170	139- 158	164- 175	-	142- 166	138- 158	138- 178	140- 154	118- 133	-	-	-	103- 109	-	-	-

ตารางที่ ค3 แสดงความแข็งบริเวณกระทะร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617

ค่าความแข็ง (HV _{0.1})																	
บริเวณ	กรรมวิธีทาง ความร้อนหลัง การเชื่อมที่ อุณหภูมิ 750°C (ชม.)	กรรมวิธีทางความร้อน															
		550°C				633°C				717°C				800°C			
		500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.
กระทะ ร้อน P91	2	239- 312	240- 301	234- 292	-	210- 280	208- 270	226- 283	236- 284	209- 229	-	-	-	153- 164	-	-	-
	4	231- 274	226- 268	196- 227	-	190- 278	241- 274	202- 245	218- 257	225- 249	-	-	-	147- 160	-	-	-
	6	208- 264	206- 254	205- 258	-	212- 249	202- 232	187- 228	202- 229	217- 231	-	-	-	131- 154	-	-	-

ตารางที่ ค4 แสดงความแข็งบริเวณกระทบริ้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617

ค่าความแข็ง (HV _{0.1})																	
บริเวณ	กรรมวิธีทาง ความร้อนหลัง การเชื่อมที่ อุณหภูมิ 750°C (ชม.)	กรรมวิธีทางความร้อน															
		550°C				633°C				717°C				800°C			
		500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.
กระท ร้อน P22	2	175- 202	158- 199	164- 207	-	170- 182	170- 188	148- 198	158- 170	106- 114	-	-	-	103- 110	-	-	-
	4	167- 204	149- 185	164- 186	-	150- 176	167- 187	134- 161	148- 168	122- 153	-	-	-	107- 118	-	-	-
	6	153- 193	168- 181	164- 183	-	146- 172	141- 185	157- 186	150- 162	120- 129	-	-	-	104- 115	-	-	-

ตารางที่ ค5 แสดงความแข็งบริเวณรอยเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมอินโคเนล 617

ค่าความแข็ง (HV _{0.1})																	
บริเวณ	กรรมวิธีทาง ความร้อนหลัง การเชื่อมที่ อุณหภูมิ 750°C (ชม.)	กรรมวิธีทางความร้อน															
		550°C				633°C				717°C				800°C			
		500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.
รอยต่อ P91	2	279	271	311	-	258	265	265	281	202	-	-	-	162	-	-	-
	4	267	269	251	-	262	271	254	254	241	-	-	-	165	-	-	-
	6	254	250	262	-	228	249	241	239	233	-	-	-	154	-	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค6 แสดงความแข็งบริเวณรอยเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617

ค่าความแข็ง (HV _{0.1})																	
บริเวณ	กรรมวิธีทาง ความร้อนหลัง การเชื่อมที่ อุณหภูมิ 750°C (ชม.)	กรรมวิธีทางความร้อน															
		550°C				633°C				717°C				800°C			
		500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.
รอยต่อ P22	2	168	170	201	-	157	153	156	159	117	-	-	-	121	-	--	-
	4	145	151	152	-	152	160	150	141	144	-	-	-	133	-	-	-
	6	162	141	143	-	121	133	145	138	130	-	-	-	128	-	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค7 แสดงความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91

ค่าความแข็ง (HV _{0.1})																	
บริเวณ	กรรมวิธีทาง ความร้อนหลัง การเชื่อมที่ อุณหภูมิ 750°C (ชม.)	กรรมวิธีทางความร้อน															
		550°C				633°C				717°C				800°C			
		500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.
เนื้อเชื่อม อินโคเนล 617	2	236- 305	239- 283	239- 309	-	247- 301	234- 297	241- 303	237- 291	234- 287	-	-	-	232- 273	-	-	-
	4	200- 314	251- 336	254- 309	-	279- 371	304- 376	283- 333	265- 345	293- 353	-	-	-	205- 293	-	-	-
	6	271- 361	269- 322	279- 374	-	245- 322	280- 344	285- 347	304- 334	293- 349	-	-	-	234- 266	-	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค8 แสดงความแข็งบริเวณรอยของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ด้านติดกับเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91 ที่เชื่อมอินโคเนล 617

ค่าความแข็ง (HV _{0.1})																	
บริเวณ	กรรมวิธีทาง ความร้อนหลัง การเชื่อมที่ อุณหภูมิ 750°C (ชม.)	กรรมวิธีทางความร้อน															
		550°C				633°C				717°C				800°C			
		500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.
รอยต่อ อินโคเนล 617	2	255	218	270	-	234	243	236	308	265	-	-	-	329	-	-	-
	4	266	291	264	-	267	274	254	303	311	-	-	-	393	-	-	-
	6	272	274	307	-	228	234	245	294	336	-	-	-	299	-	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค9 แสดงความแข็งบริเวณรอยเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 ด้านติดเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ P91

ค่าความแข็ง (HV _{0.1})																	
บริเวณ	กรรมวิธีทาง ความร้อนหลัง การเชื่อมที่ อุณหภูมิ 750°C (ชม.)	กรรมวิธีทางความร้อน															
		550°C				633°C				717°C				800°C			
		500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.	500 ชม.	1000 ชม.	2000 ชม.	2500 ชม.
รอยต่อ อินโคเนล 617	2	397	338	331	-	383	474	510	453	381	-	-	-	339	-	--	-
	4	348	372	322	-	371	371	476	497	333	-	-	-	233	-	-	-
	6	376	372	355	-	414	406	443	437	551	-	-	-	244	-	-	-

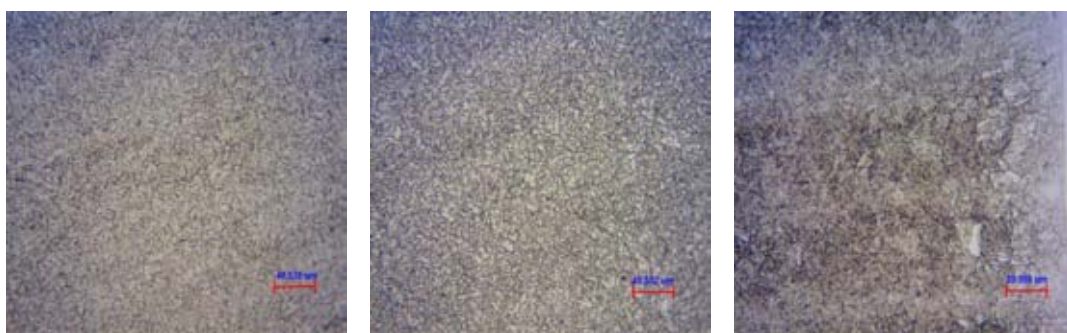
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง

โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมระหว่างเหล็กกล้า P22 (2.25% โครเมียม) และ
เหล็กกล้า P91 (9% โครเมียม) ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม อินโคเนล 617

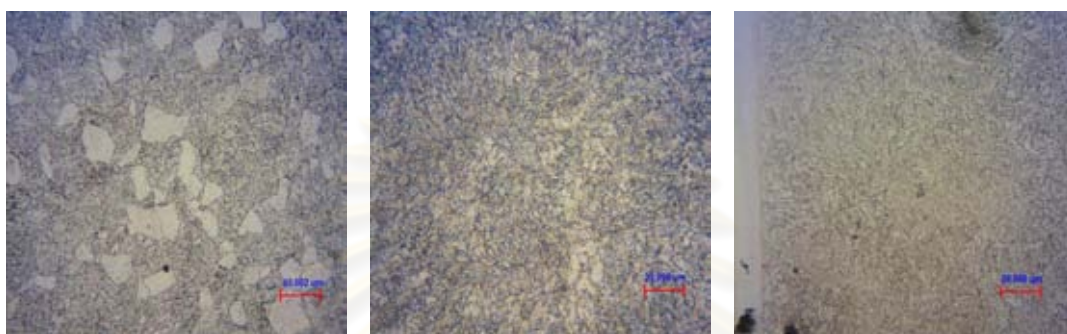
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) โลหะพื้น P91

ข) บริเวณกระทบร้อน P91

ค) รอยต่อ P91

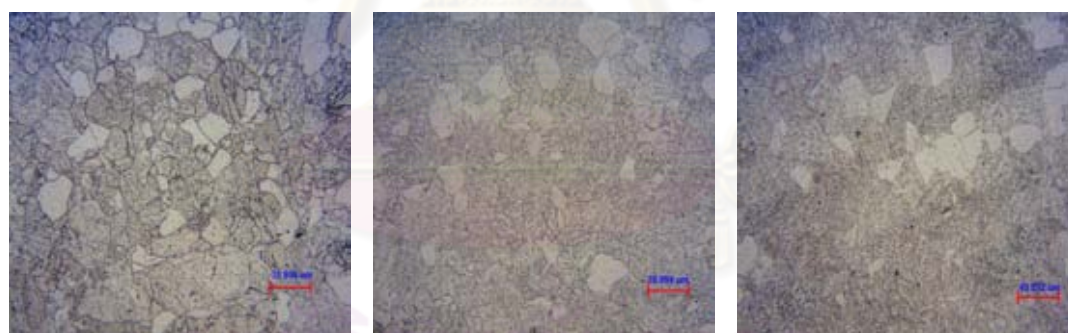


ง) โลหะพื้น P22

จ) บริเวณกระทบร้อน P22

ฉ) รอยต่อ P22

รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย
อินโคเนล 617 หลังเชื่อม

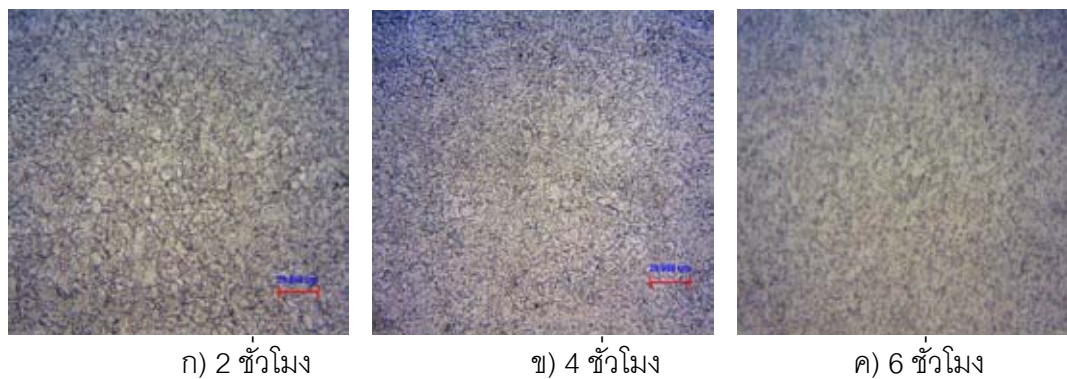


ก) 2 ชั่วโมง

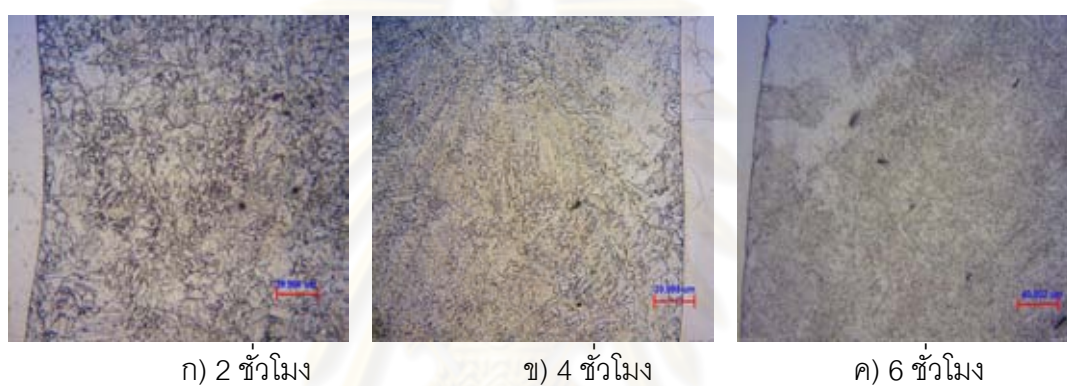
ข) 4 ชั่วโมง

ค) 6 ชั่วโมง

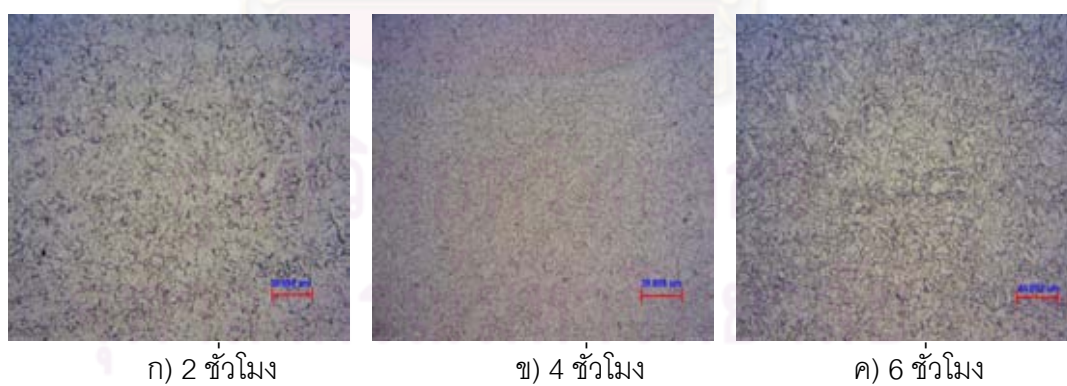
รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้าเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย
อินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C



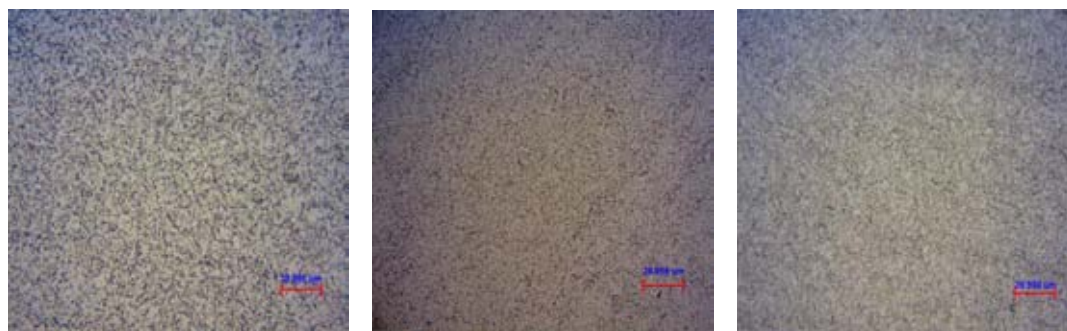
รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระแทกร้อนเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C



รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C



รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C

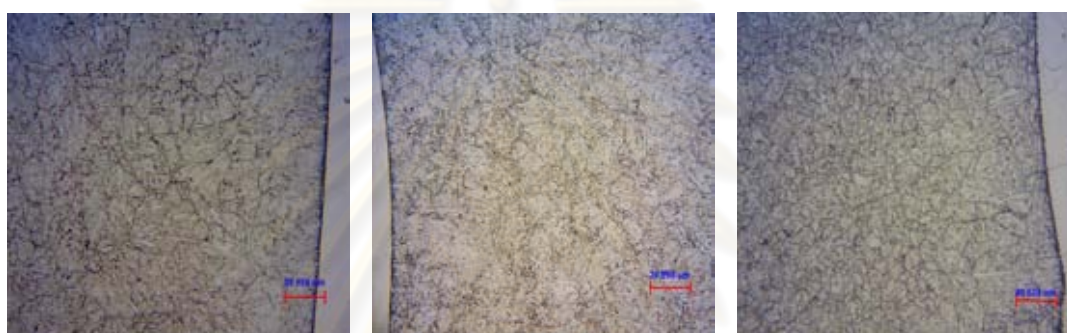


ก) 2 ชั่วโมง

ข) 4 ชั่วโมง

ค) 6 ชั่วโมง

รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระบอกเชื่อมเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C



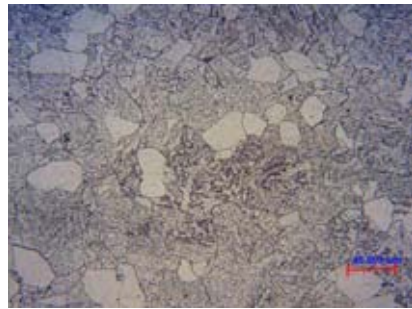
ก) 2 ชั่วโมง

ข) 4 ชั่วโมง

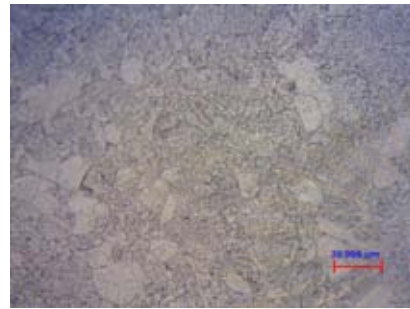
ค) 6 ชั่วโมง

รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C

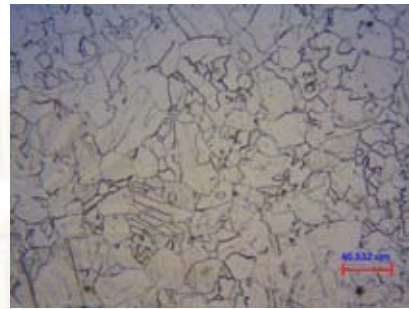
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



B/750/2/550/500



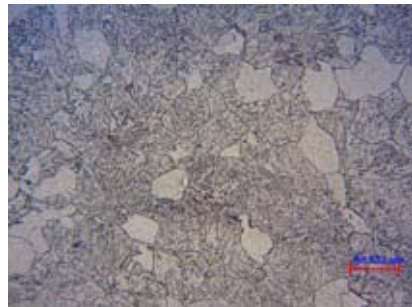
B/750/2/633/500



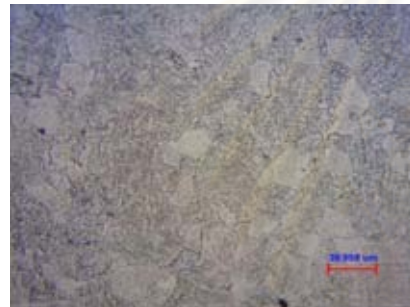
B/750/2/717/500



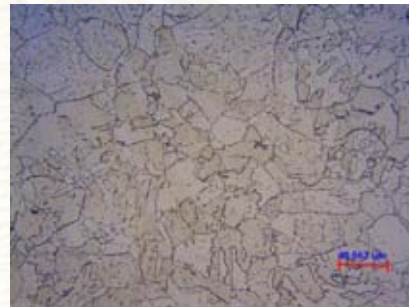
B/750/2/800/500



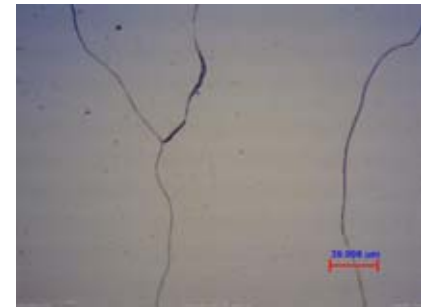
B/750/4/550/500



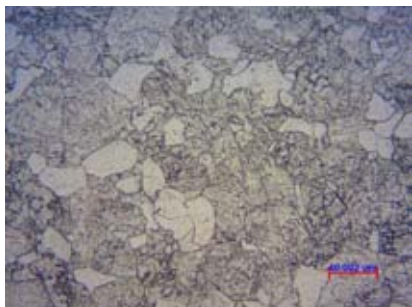
B/750/4/633/500



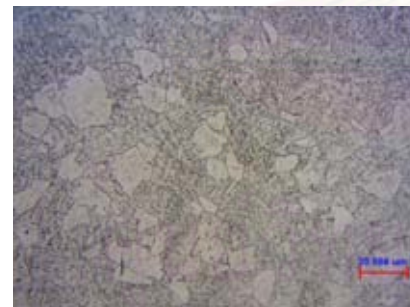
B/750/4/717/500



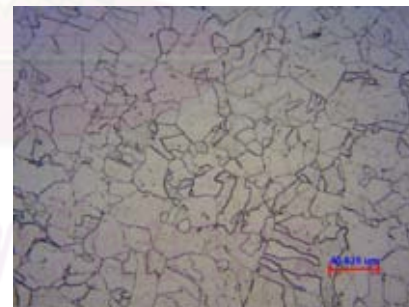
B/750/4/800/500



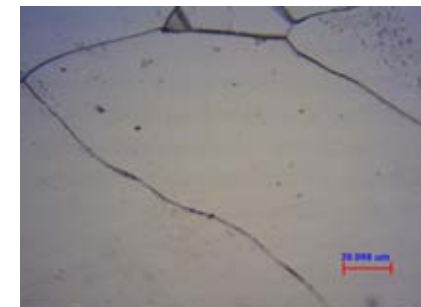
B/750/6/550/500



B/750/6/633/500

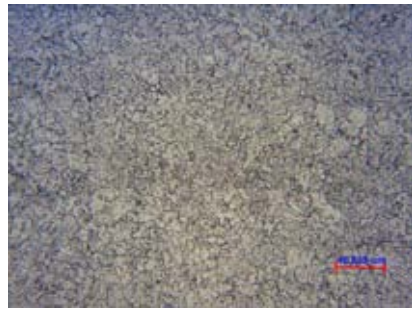


B/750/6/717/500

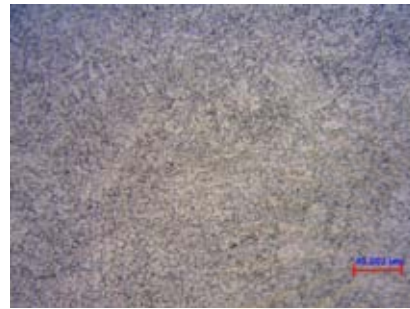


B/750/6/800/500

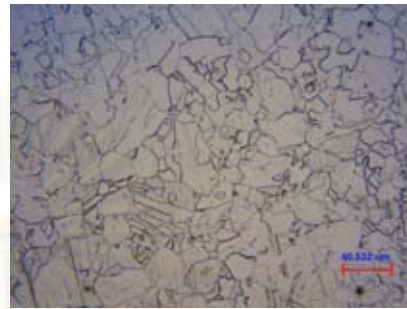
รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง



B/750/2/550/500



B/750/2/633/500



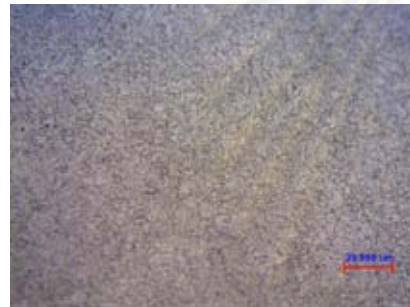
B/750/2/717/500



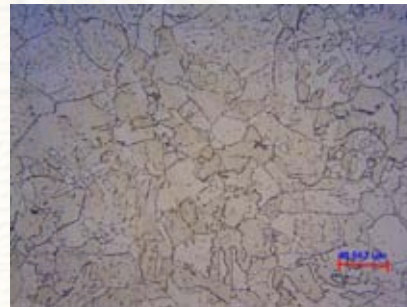
B/750/2/800/500



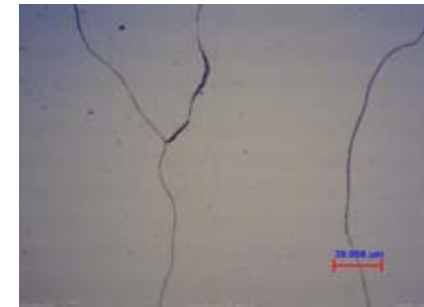
B/750/4/550/500



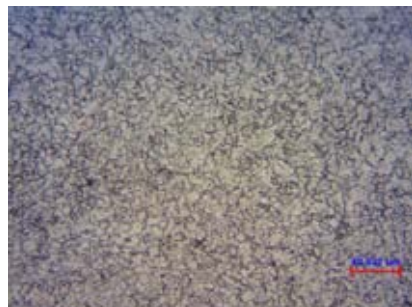
B/750/4/633/500



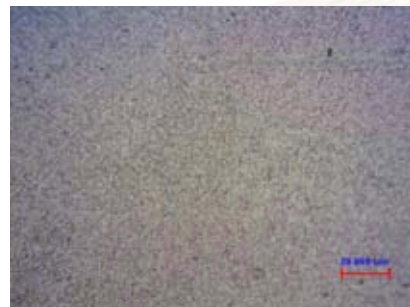
B/750/4/717/500



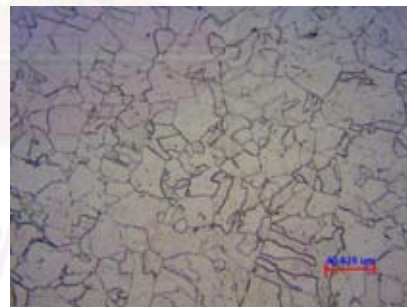
B/750/4/800/500



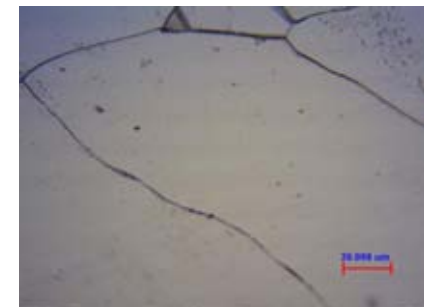
B/750/6/550/500



B/750/6/633/500

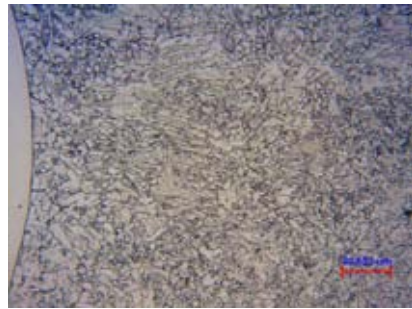


B/750/6/717/500

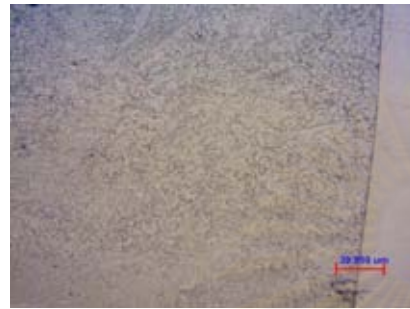


B/750/6/800/500

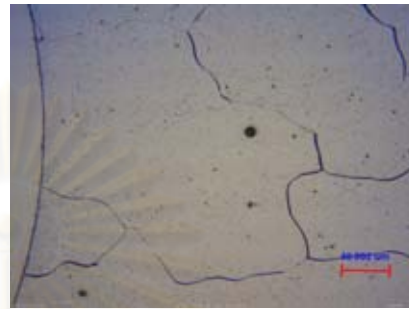
รูปที่ ๑๙ โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง



B/750/2/550/500



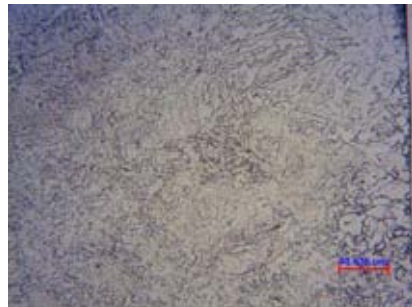
B/750/2/633/500



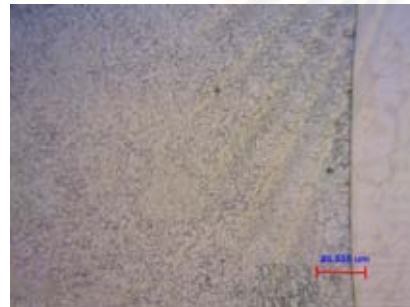
B/750/2/717/500



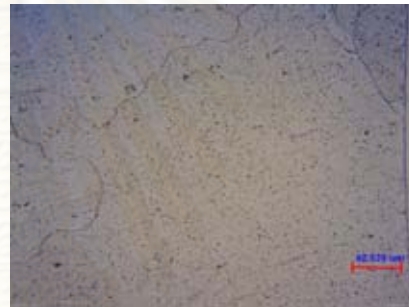
B/750/2/800/500



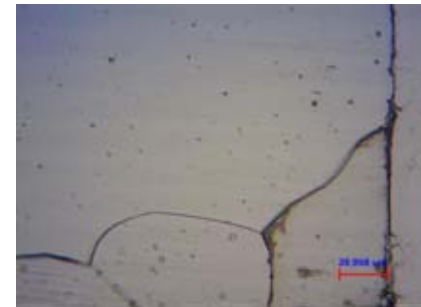
B/750/4/550/500



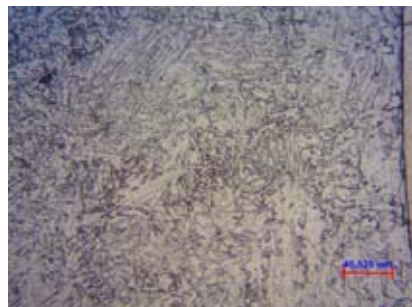
B/750/4/633/500



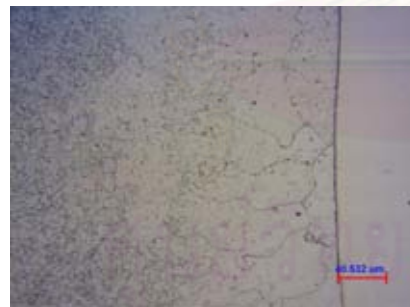
B/750/4/717/500



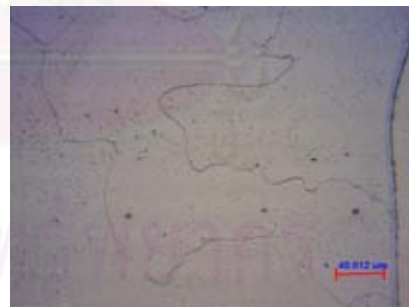
B/750/4/800/500



B/750/6/550/500



B/750/6/633/500

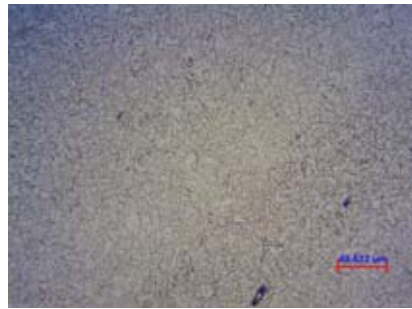


B/750/6/717/500

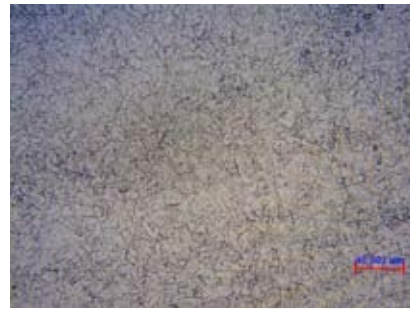


B/750/6/800/500

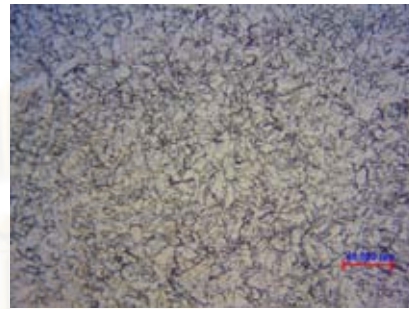
รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง



B/750/2/550/500



B/750/2/633/500



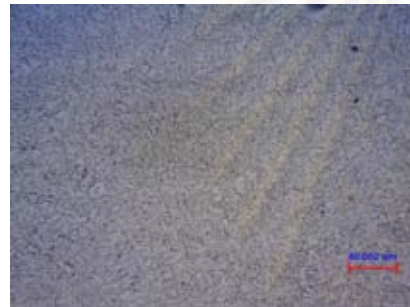
B/750/2/717/500



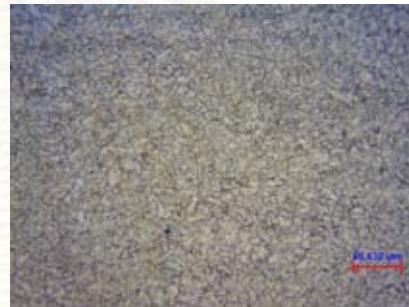
B/750/2/800/500



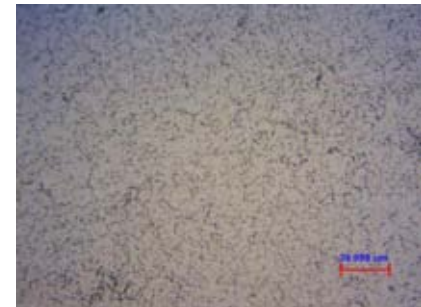
B/750/4/550/500



B/750/4/633/500



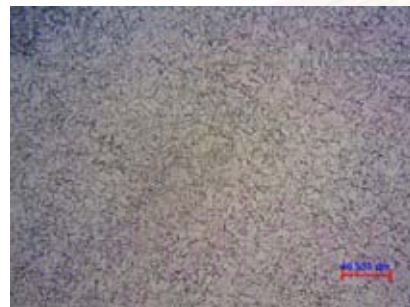
B/750/4/717/500



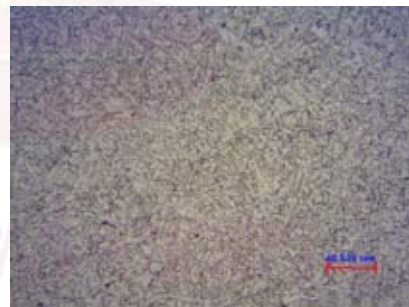
B/750/4/800/2500



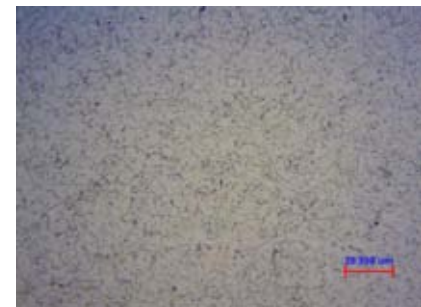
B/750/6/550/500



B/750/6/633/500

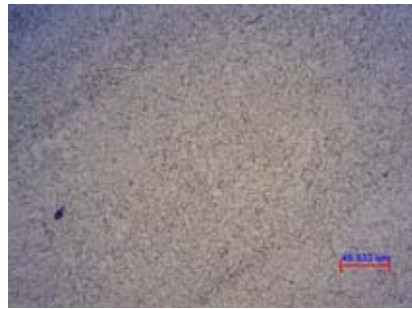


B/750/6/717/500

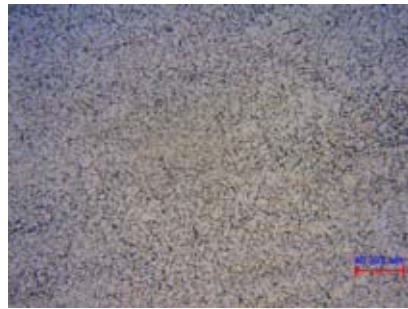


B/750/6/800/500

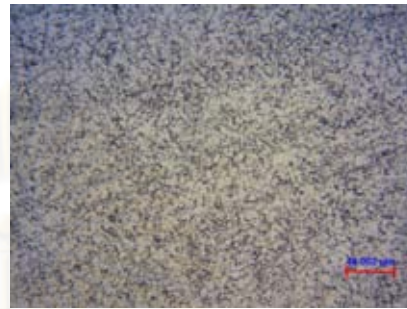
รูปที่ ง11 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง



B/750/2/550/500



B/750/2/633/500



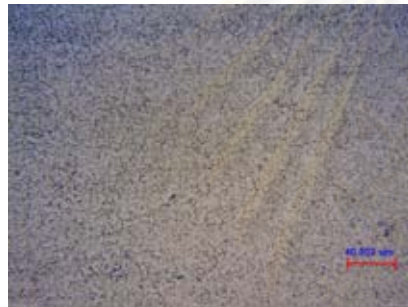
B/750/2/717/500



B/750/2/800/500



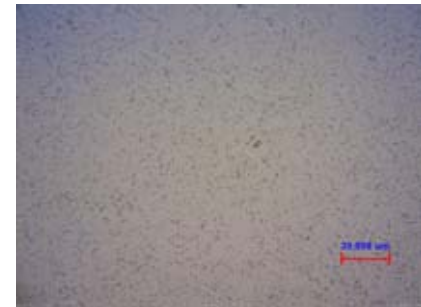
B/750/4/550/500



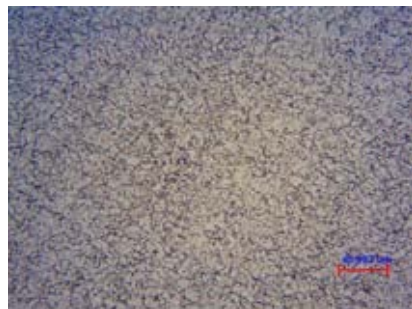
B/750/4/633/500



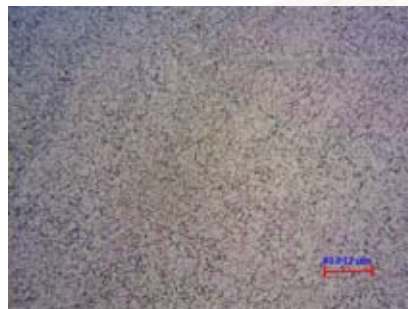
B/750/4/717/500



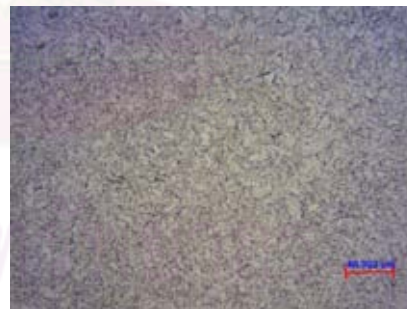
B/750/4/800/500



B/750/6/550/500



B/750/6/633/500

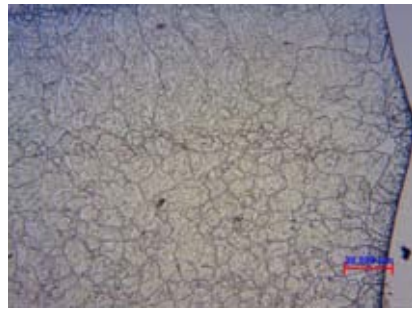


B/750/6/717/500

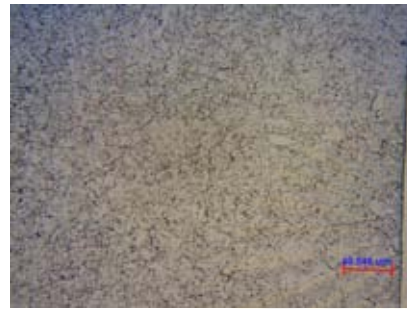


B/750/6/800/500

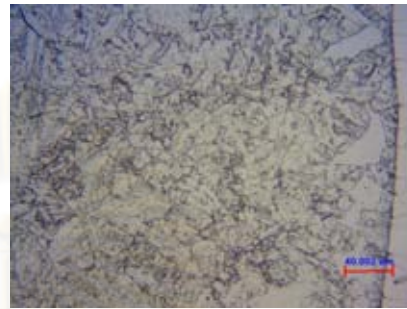
รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง



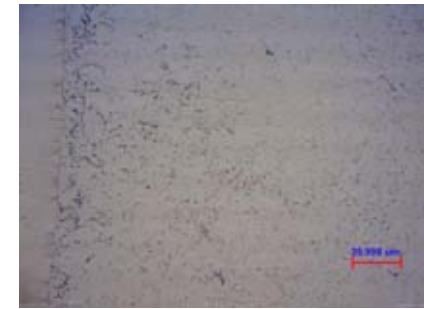
B/750/2/550/500



B/750/2/633/500



B/750/2/717/500



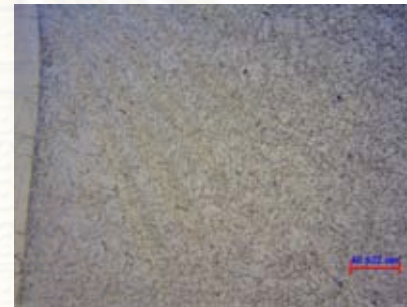
B/750/2/800/500



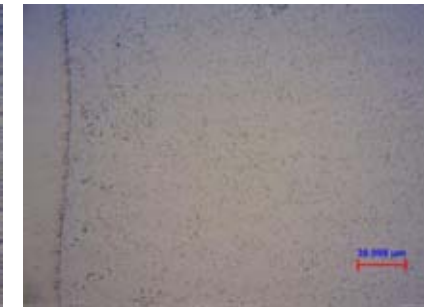
B/750/4/550/500



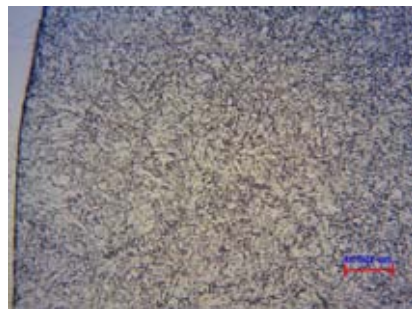
B/750/4/633/500



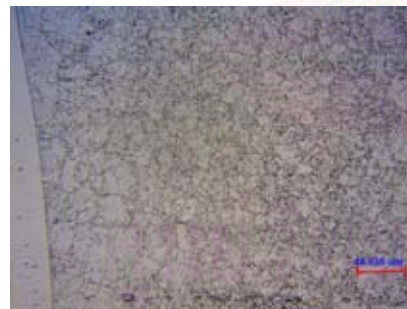
B/750/4/717/500



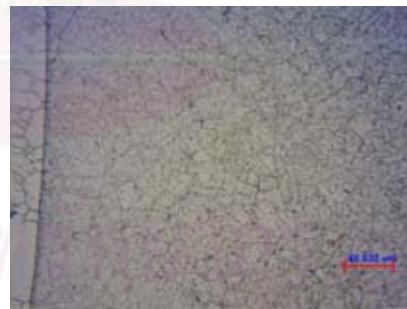
B/750/4/800/500



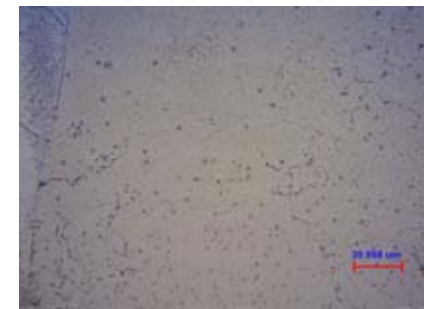
B/750/6/550/500



B/750/6/633/500

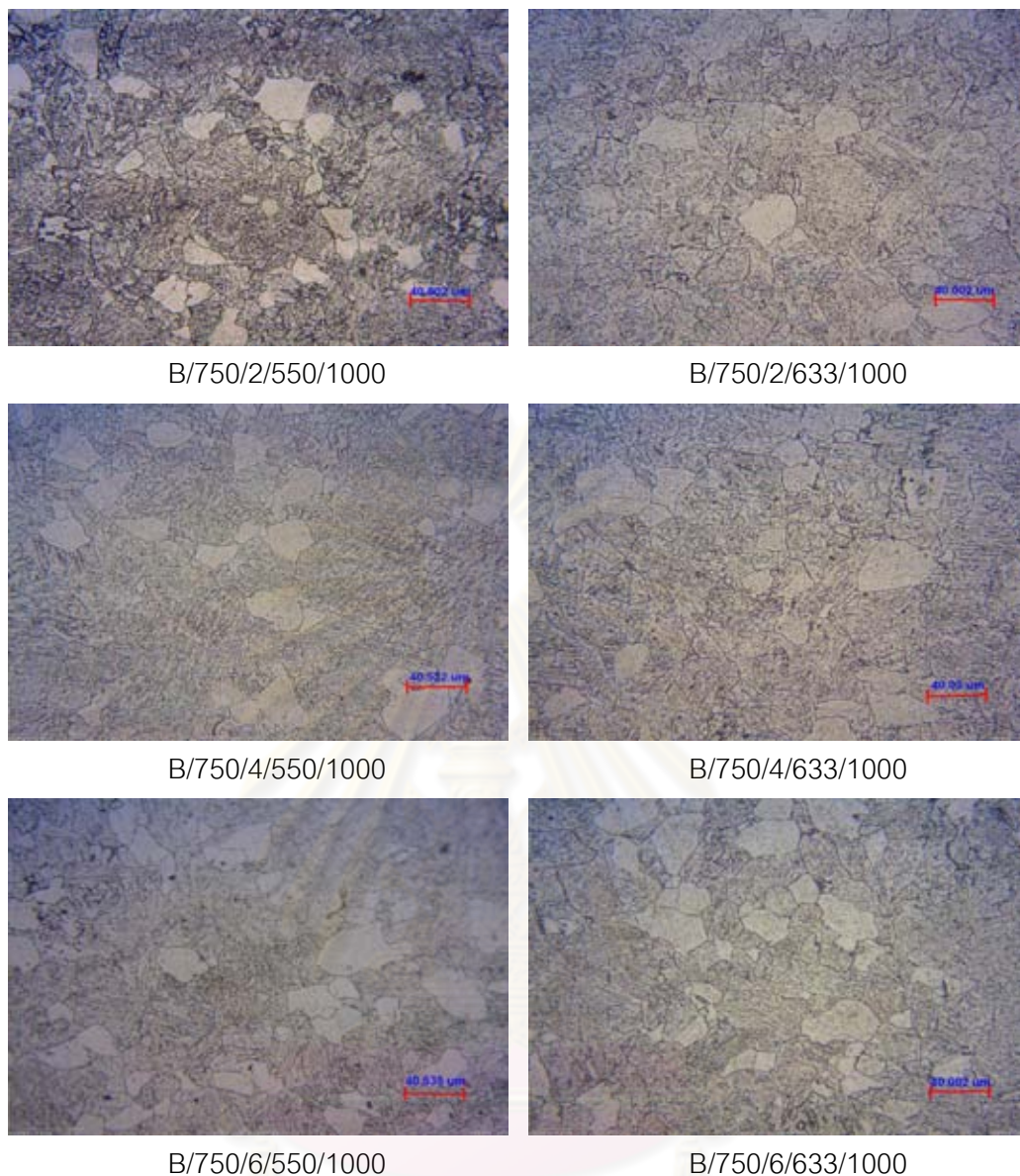


B/750/6/717/500



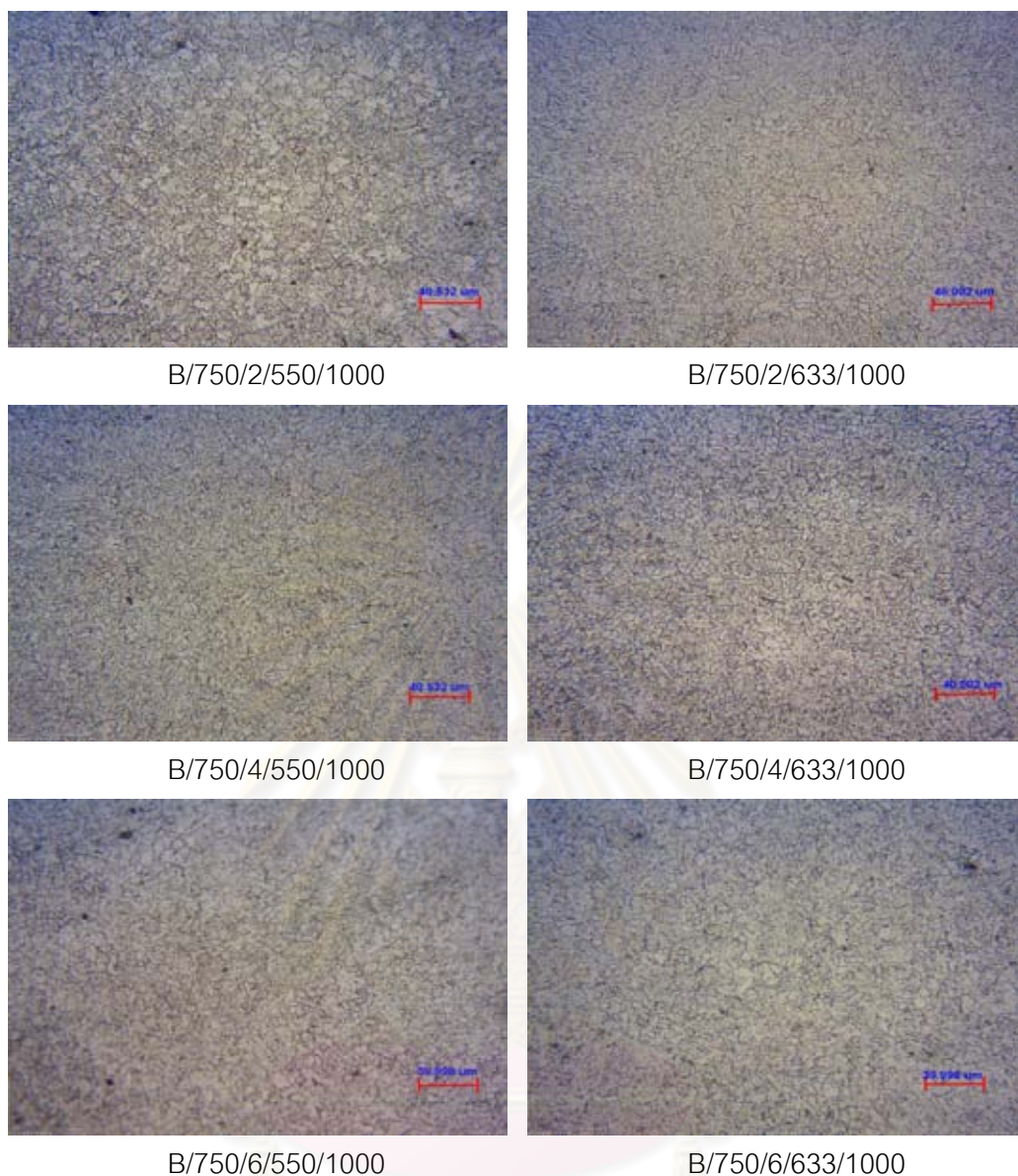
B/750/6/800/500

รูปที่ 13 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, 633, 717 และ 800°C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง



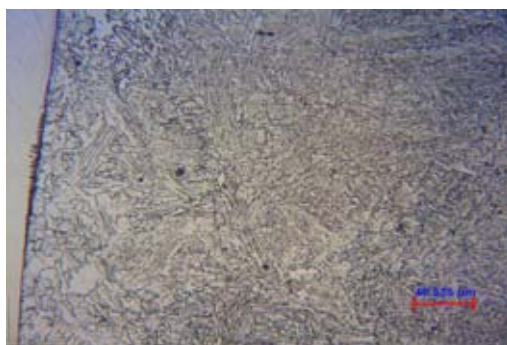
รูปที่ 14 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 15 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระแทกร้อนเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



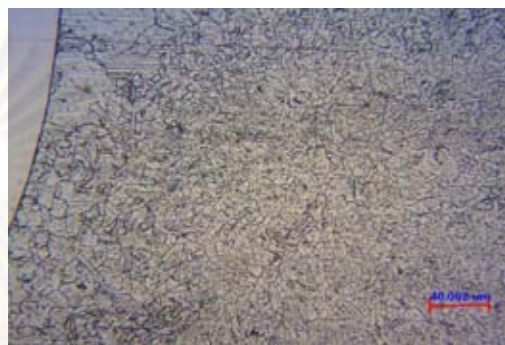
B/750/2/550/1000



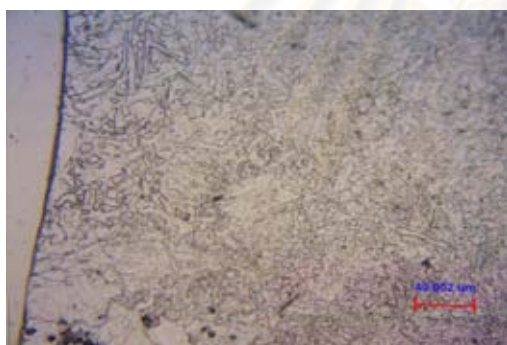
B/750/2/633/1000



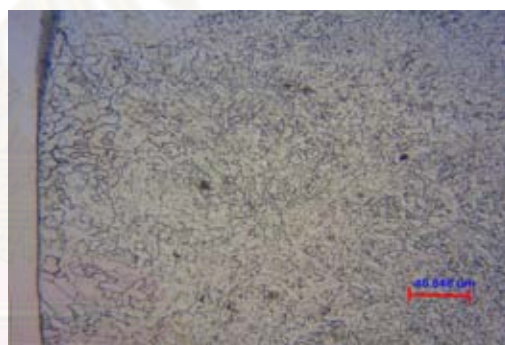
B/750/4/550/1000



B/750/4/633/1000



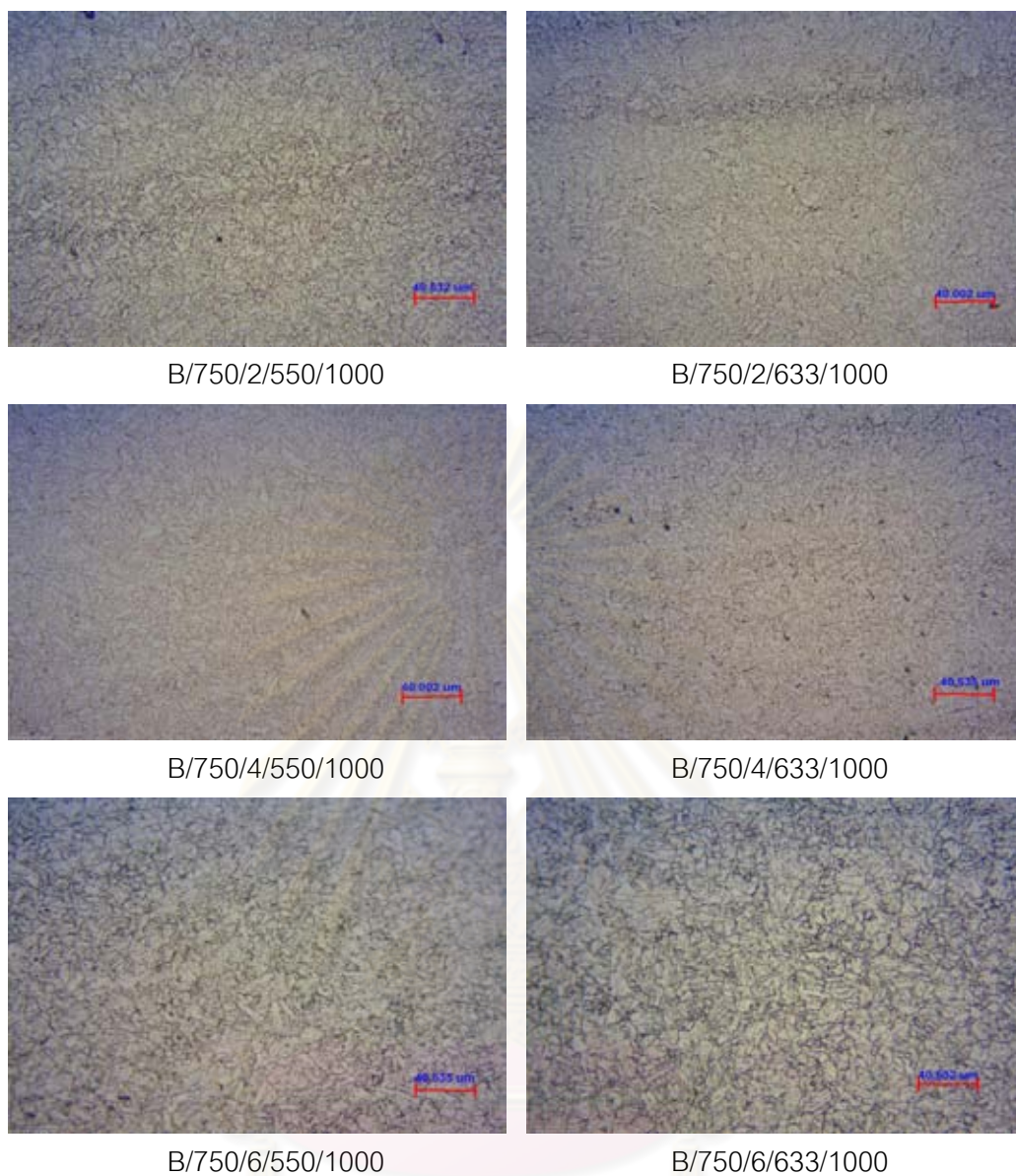
B/750/6/550/1000



B/750/6/633/1000

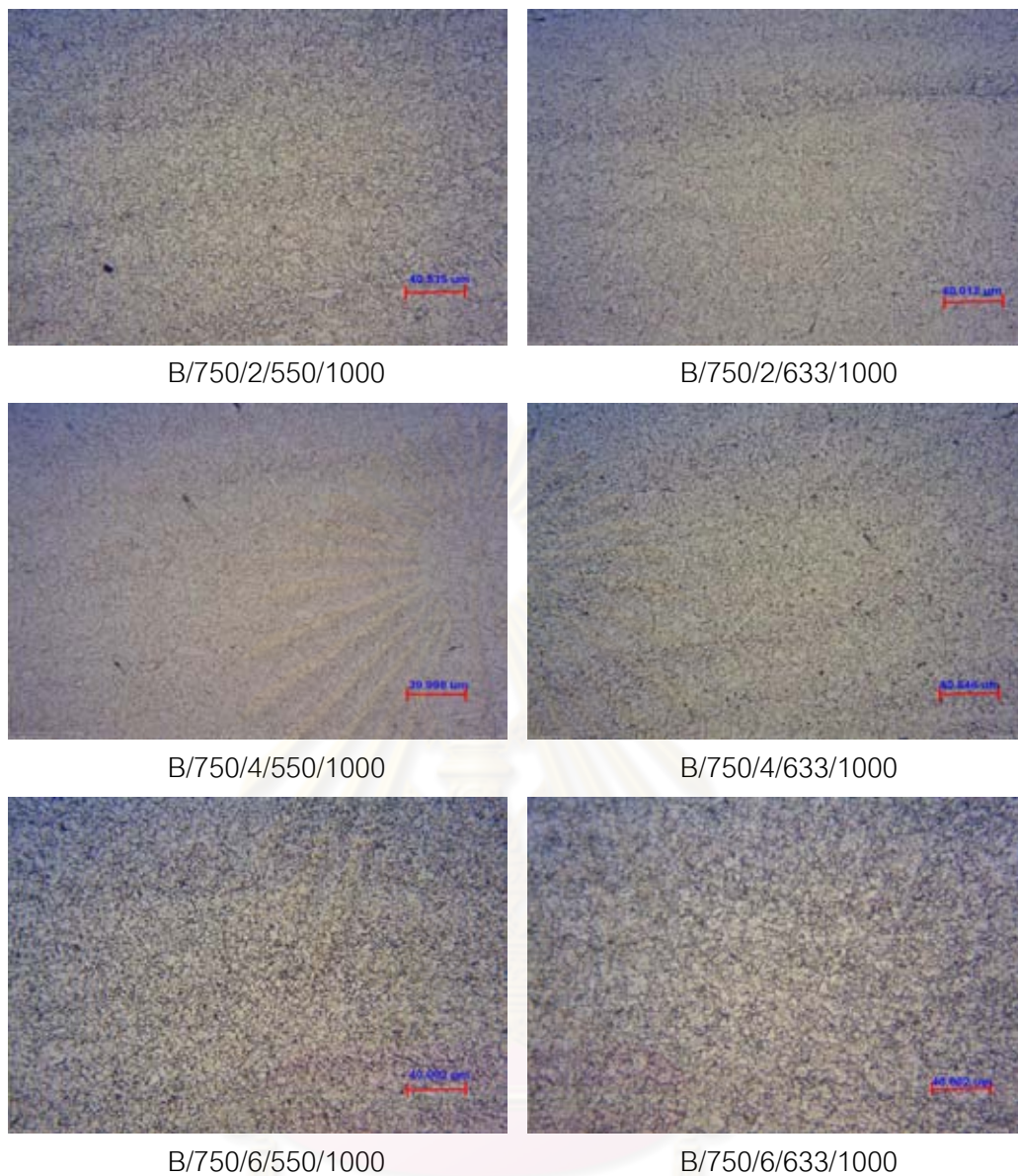
รูปที่ 16 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 แนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



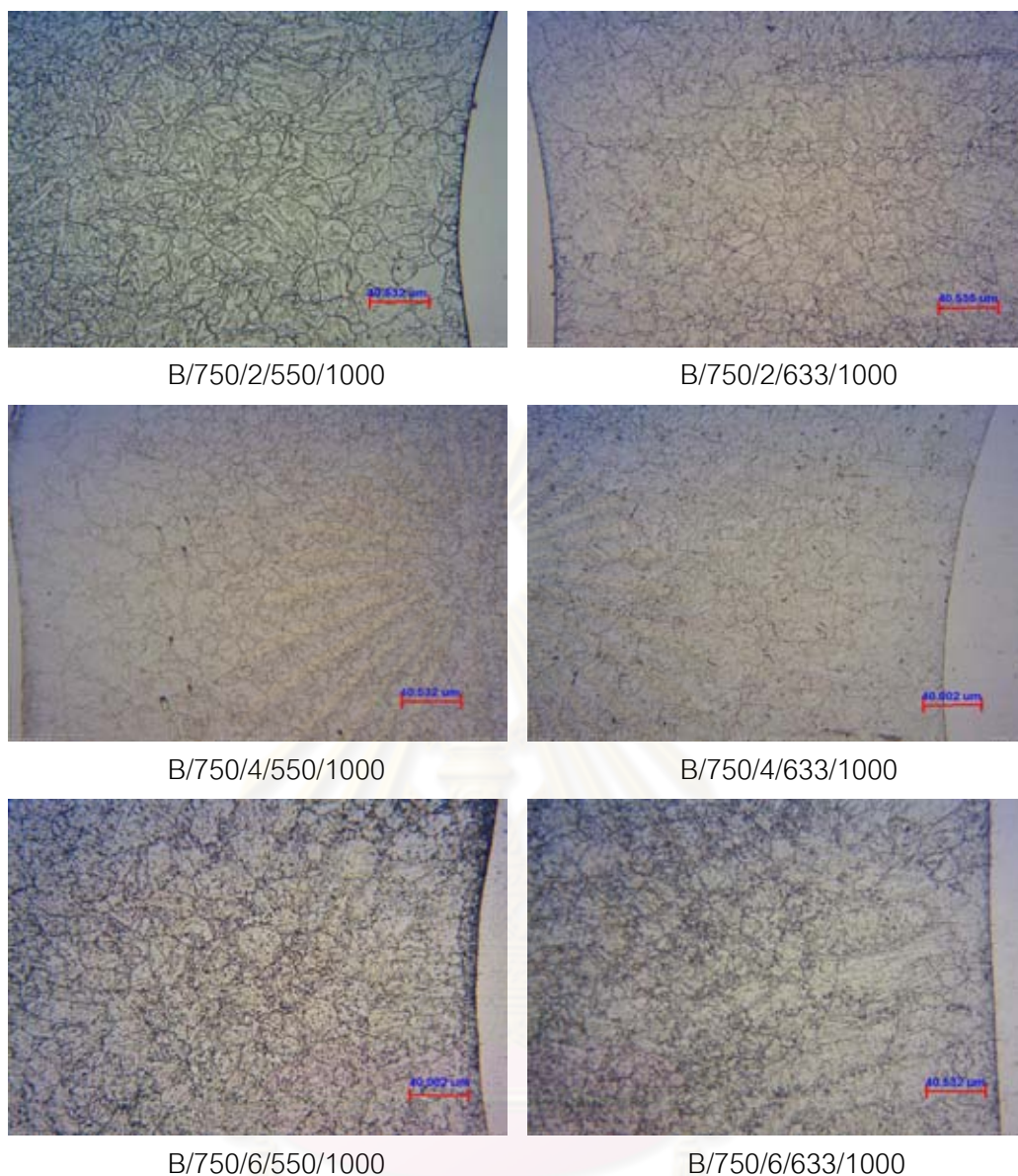
รูปที่ 17 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 แนวมเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



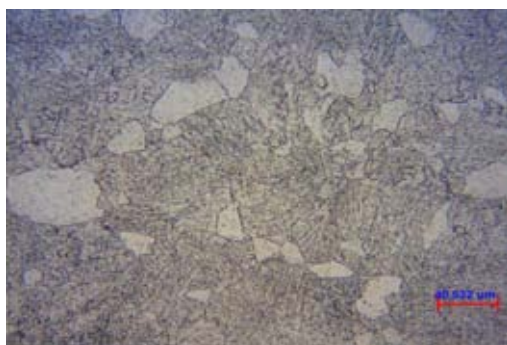
รูปที่ 18 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

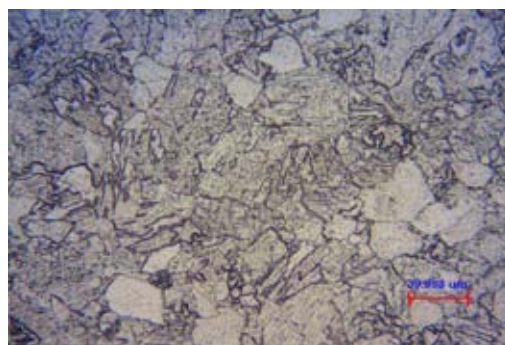


รูปที่ 19 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550, และ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

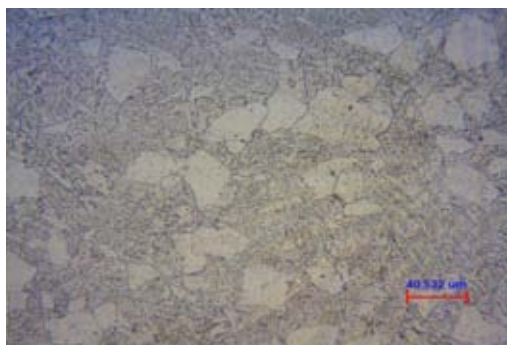
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



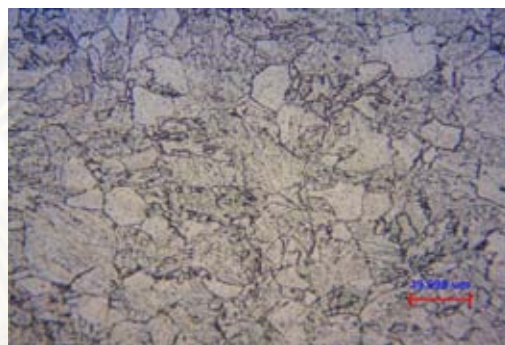
B/750/2/550/2000



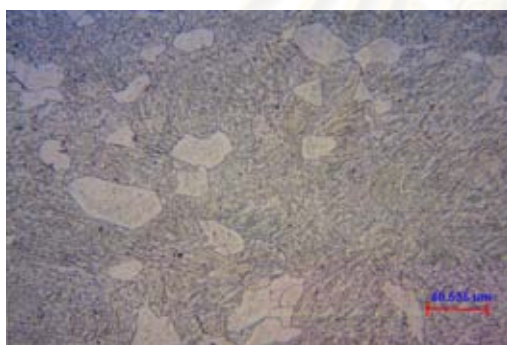
B/750/2/633/2000



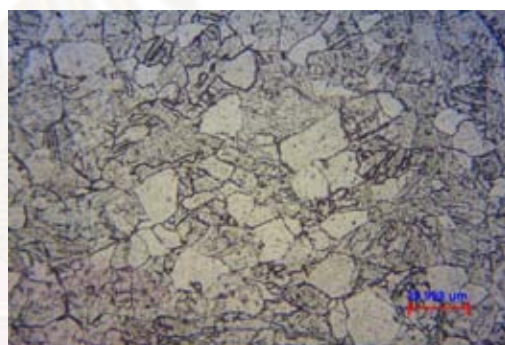
B/750/4/550/2000



B/750/4/633/2000



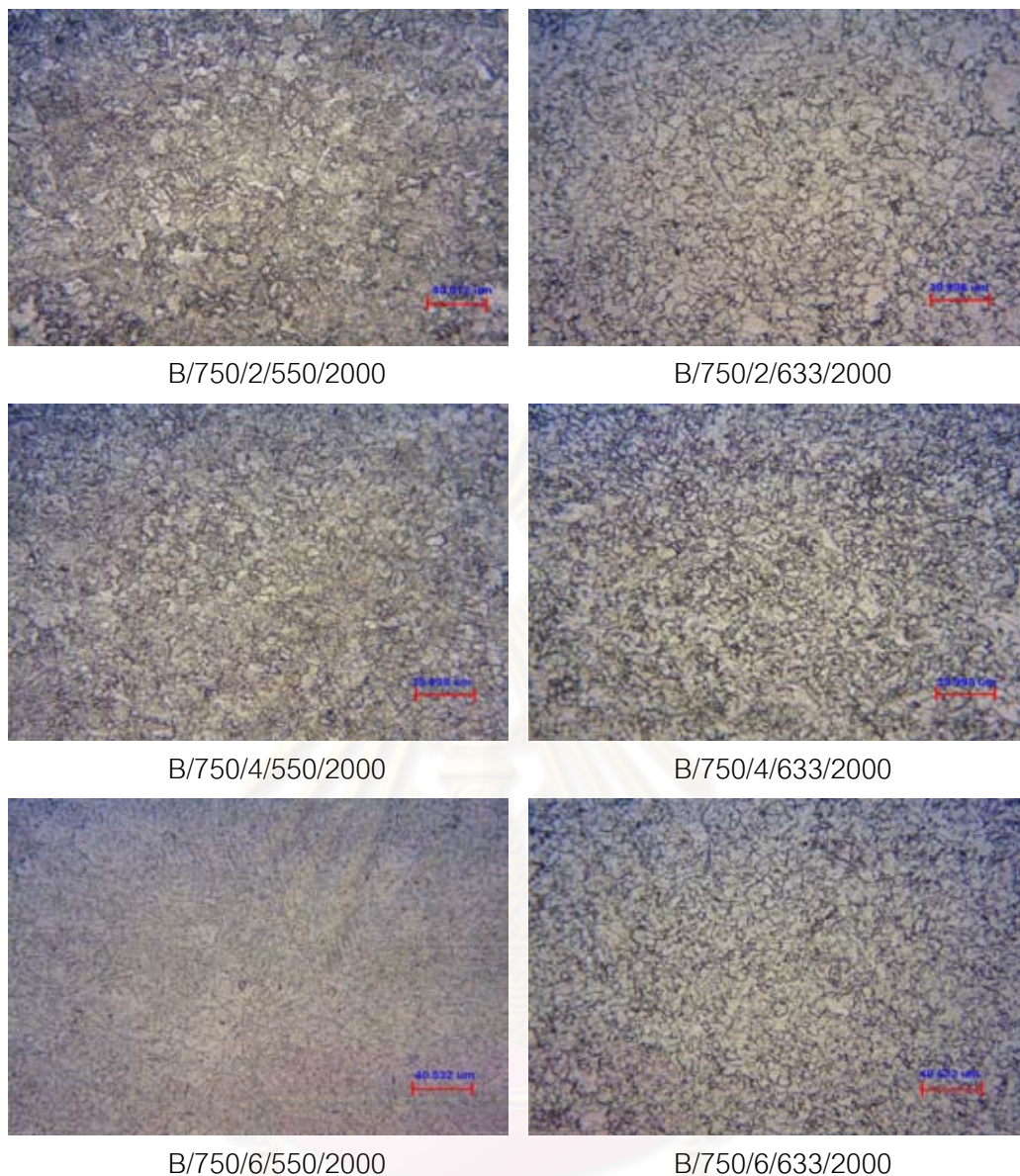
B/750/6/550/2000



B/750/6/633/2000

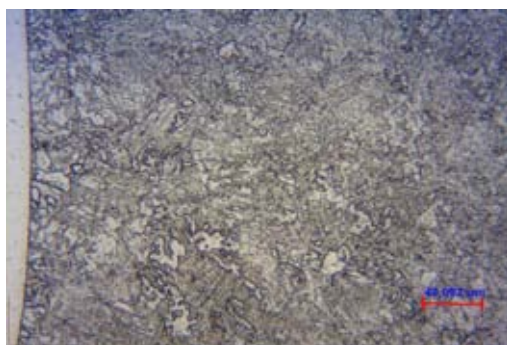
รูปที่ 20 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

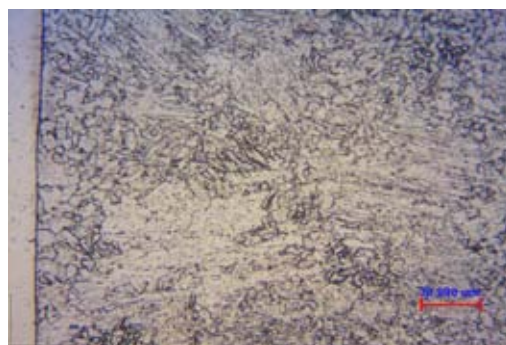


รูปที่ 21 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

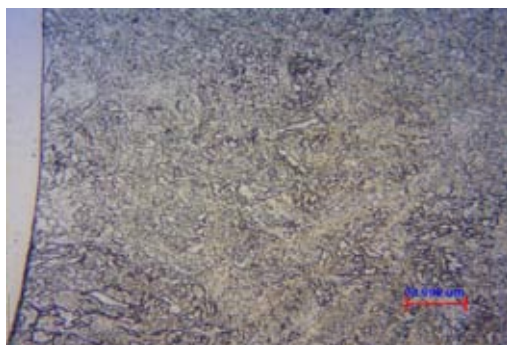
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



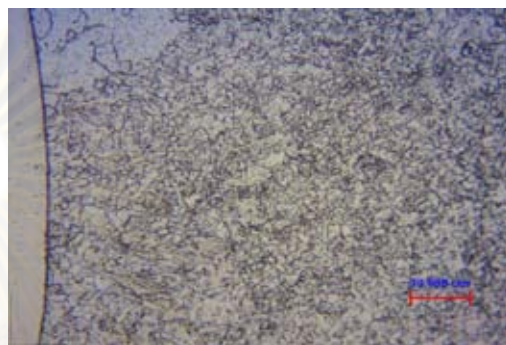
B/750/2/550/2000



B/750/2/633/2000



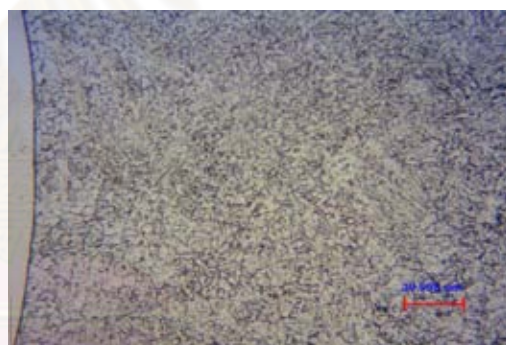
B/750/4/550/2000



B/750/4/633/2000



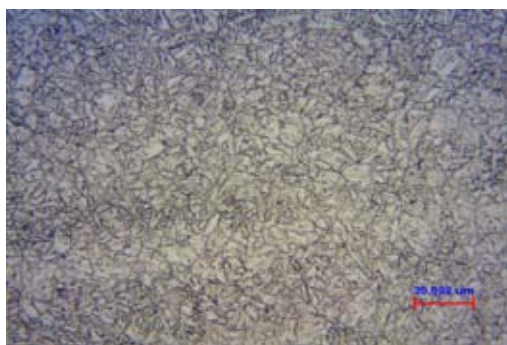
B/750/6/550/2000



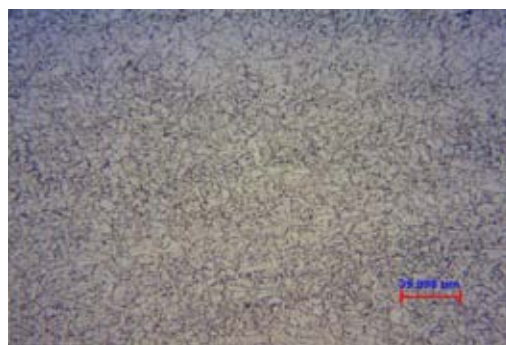
B/750/6/633/2000

รูปที่ 22 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

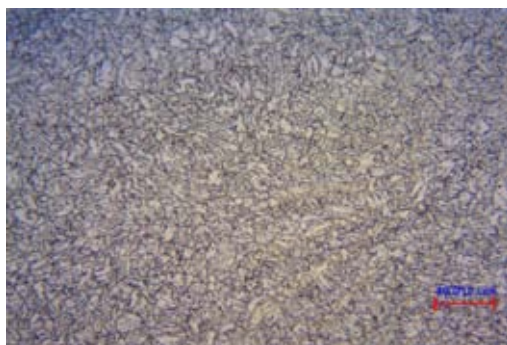
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



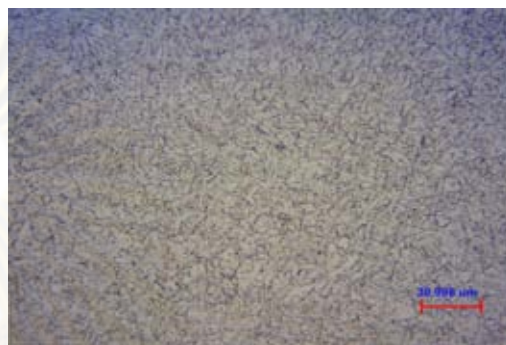
B/750/2/550/2000



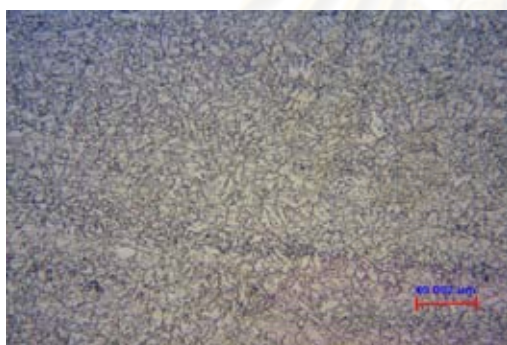
B/750/2/633/2000



B/750/4/550/2000



B/750/4/633/2000



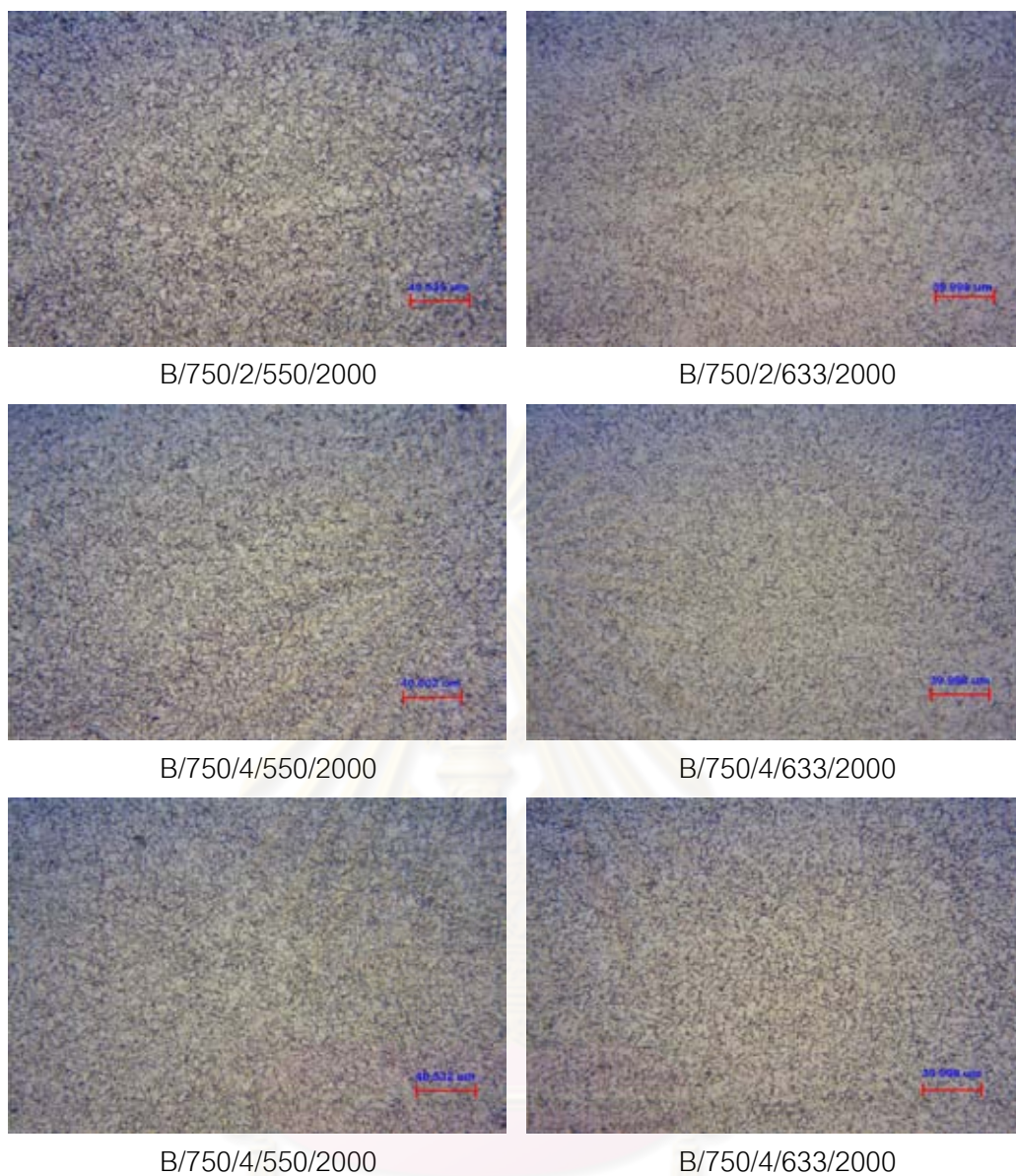
B/750/6/550/2000



B/750/6/633/2000

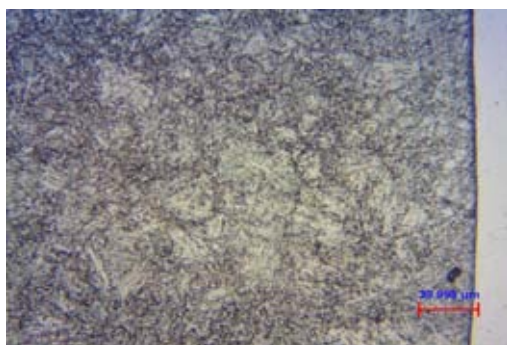
รูปที่ 23 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

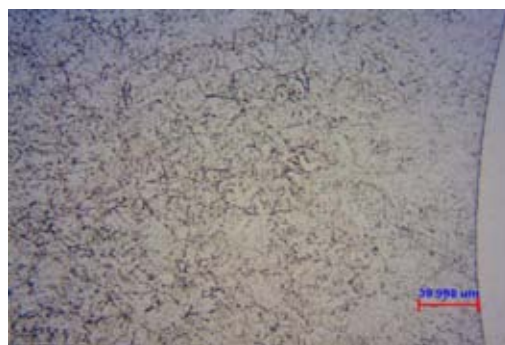


รูปที่ 24 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

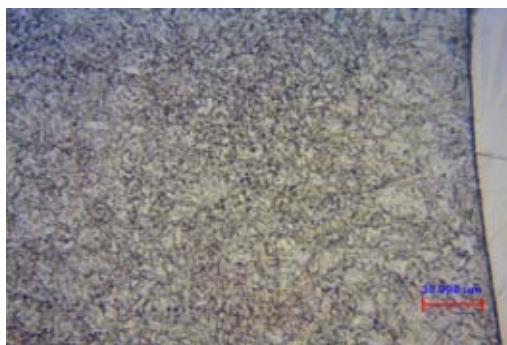
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



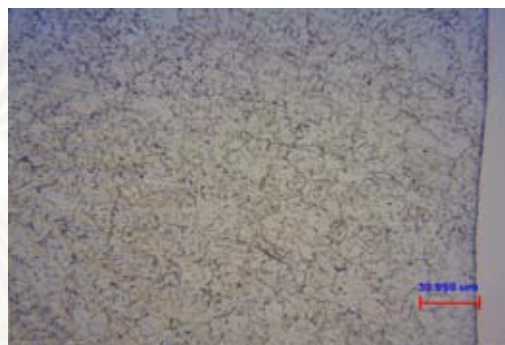
B/750/2/550/2000



B/750/2/633/2000



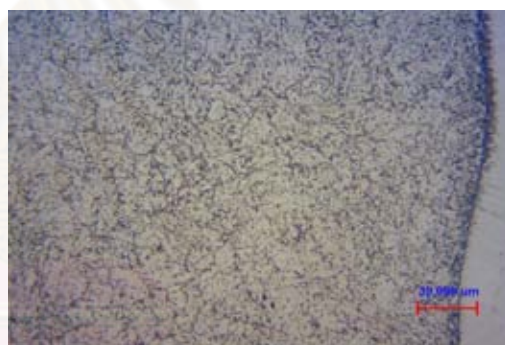
B/750/4/550/2000



B/750/4/633/2000



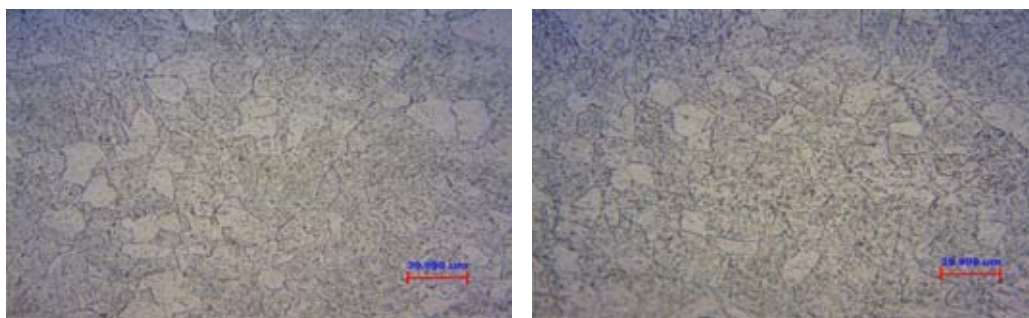
B/750/6/550/2000



B/750/6/633/2000

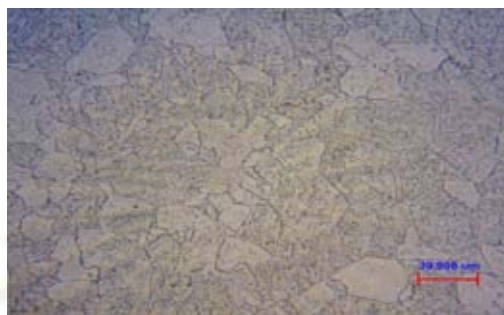
รูปที่ 25 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 และ 633°C เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



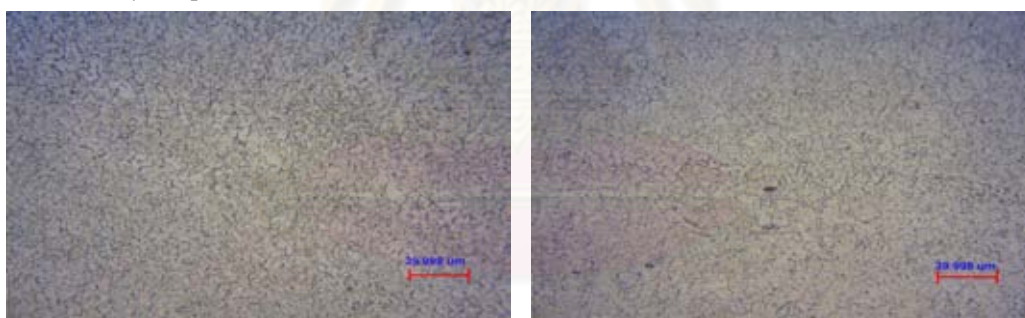
B/750/2/633/2500

B/750/4/633/2500



B/750/6/633/2500

รูปที่ 26 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง



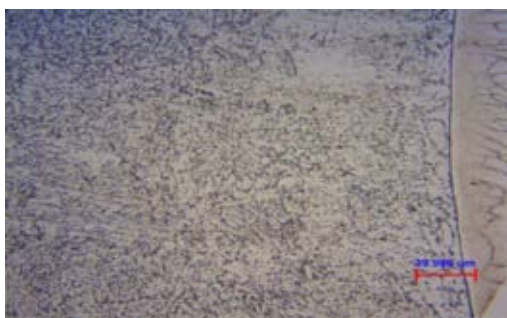
B/750/2/633/2500

B/750/4/633/2500



B/750/6/633/2500

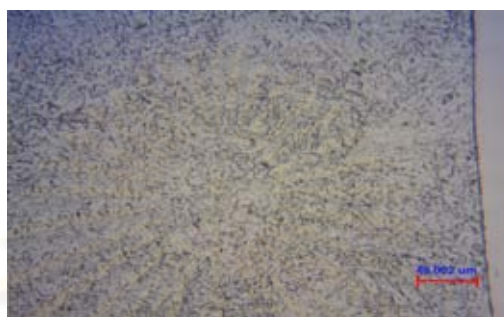
รูปที่ 27 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P22 แนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง



B/750/2/633/2500

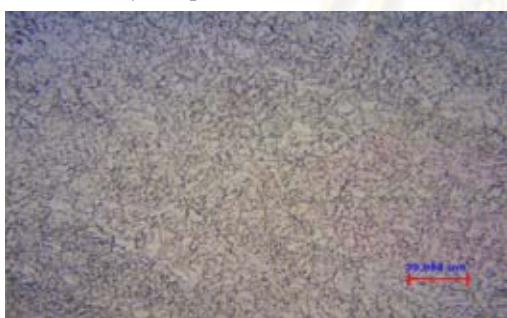


B/750/4/633/2500

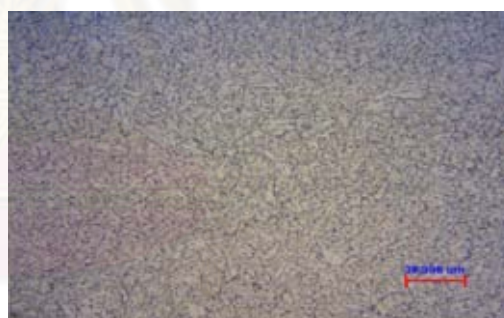


B/750/6/633/2500

รูปที่ 28 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P22 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง



B/750/2/633/2500

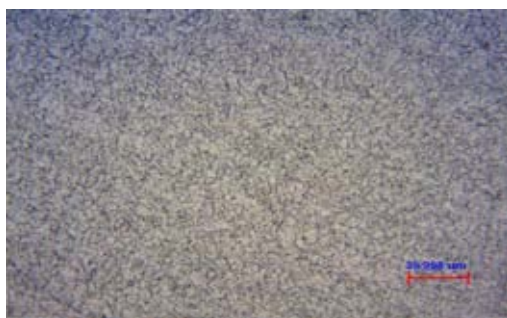


B/750/4/633/2500



B/750/6/633/2500

รูปที่ 29 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง



B/750/2/633/2500

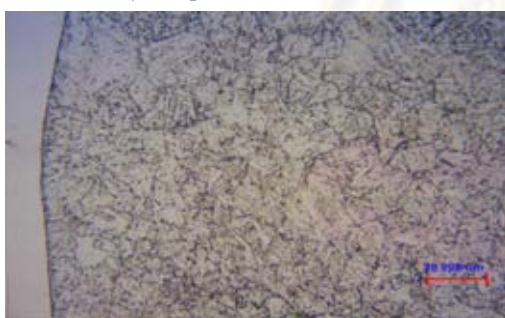


B/750/4/633/2500

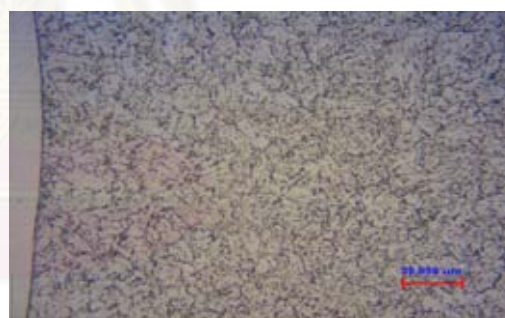


B/750/6/633/2500

รูปที่ 30 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง



B/750/2/633/2500

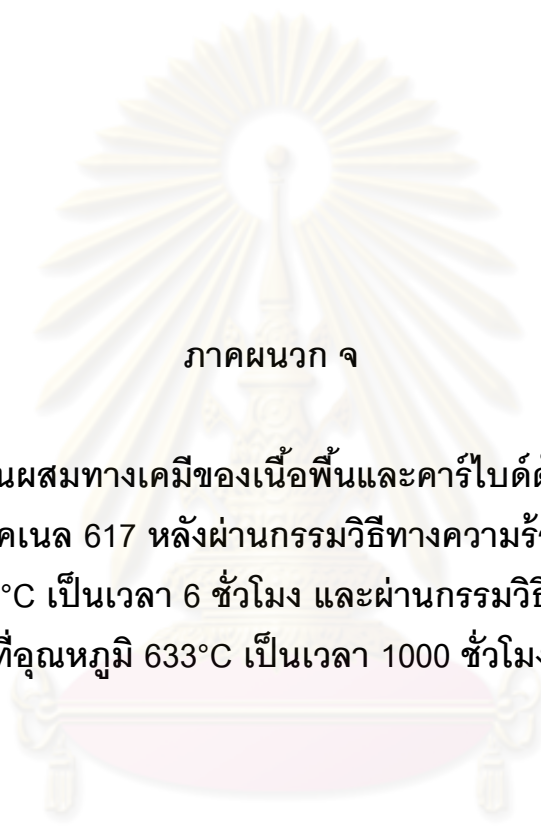


B/750/4/633/2500



B/750/6/633/2500

รูปที่ 31 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเหล็กกล้า P91 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 2500 ชั่วโมง



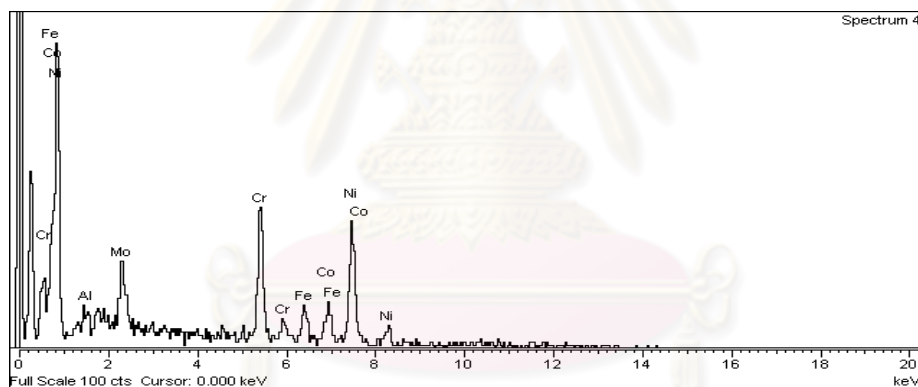
ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อพื้นและคาร์ไบด์ด้วยเทคนิคอีดีเอซของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

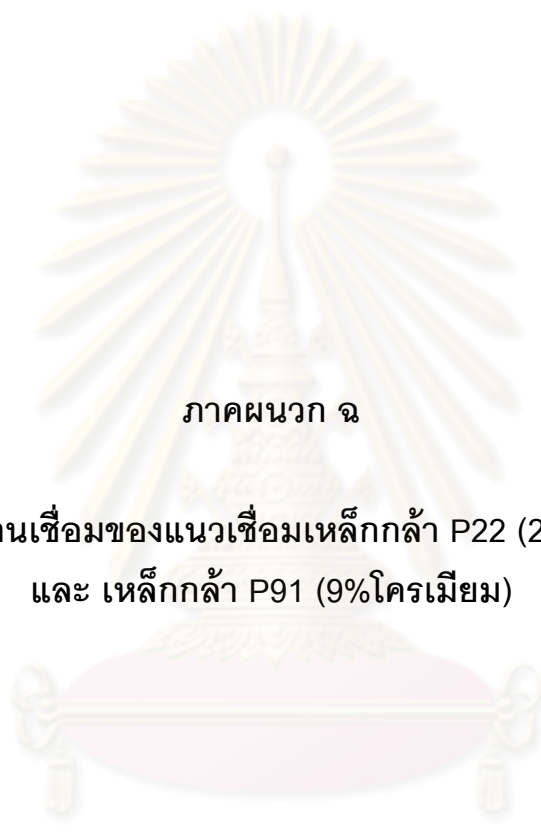
ตารางที่ ๑1 แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อพื้นและคาร์ไบด์ด้วยเทคนิคอีดีเอสของเนื้อเชื่อมอินโคเนล 617 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 633°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

Spectrum ที่	ปริมาณธาตุ(โดยน้ำหนัก)							
	Ni	Cr	Ti	Nb	Co	Mo	Fe	Al
1	Bal	25.49	22.25	-	5.46	30.18	2.50	-
2	Bal	41.92	-	-	5.68	34.30	3.40	-
3	Bal	20.75	-	-	12.44	10.95	6.75	0.62
4	Bal	22.35	-	-	10.74	5.92	8.55	0.61



รูปที่ ๑1 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ Spectrum ที่ 4 บริเวณเนื้อพื้นด้วยเทคนิคอีดีเอสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

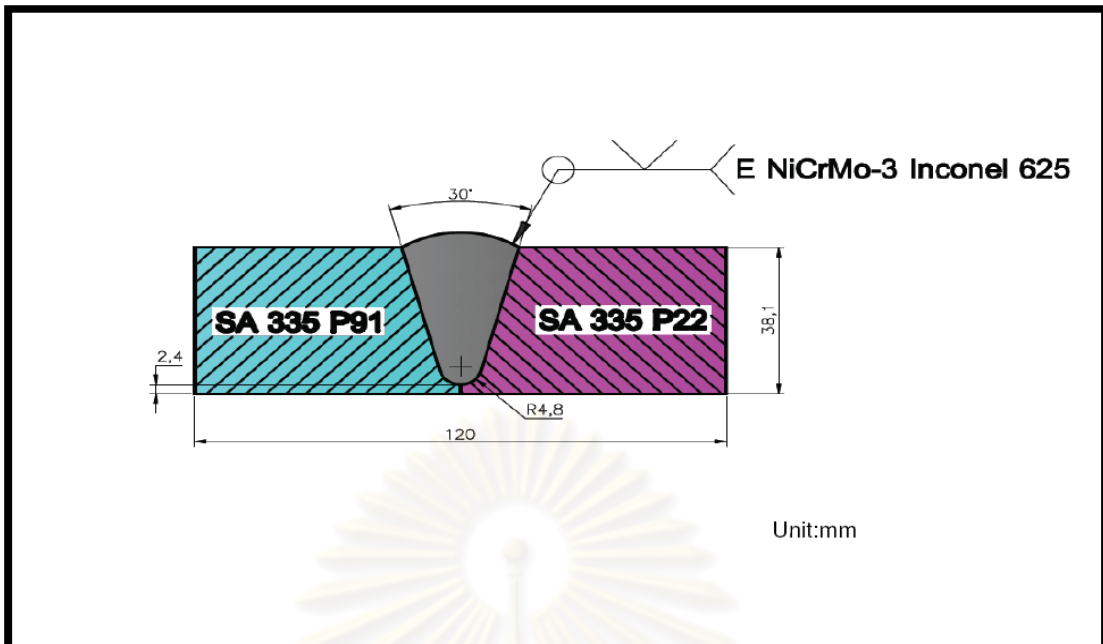
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

การออกแบบงานเชื่อมของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 (2.25%โครเมียม)
และ เหล็กกล้า P91 (9%โครเมียม)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Base Metals					
Specification Type and Grade :	SA-355 P91	P-No. 5B	Group No 2		
To Specification Type and Grade :	SA-335 P22	P-No. 5A	Group No 1		
Thickness					
Base Metals: Groove 1.5"					
Filler Metals					
Consumable	Spec.No. (SFA)	AWS Class	Size	F-No.	A-No.
Filler rod	5.14	ERNiCrMo-3	2.4 mm	43	
Gas		Composition	Flow Rate		
Shielding		Ar 99.99%	16-20 l/min		
Trailing					
Backing					
Post weld heat treatment			PREHEAT		
Temperature	750 °C	Preheat Temp	250-350 °C		
Time	2,4,6 hr	Interpass Temp	250-350 °C		
Amps (Range)		Travel speed Range			
GTAW	130-160 A	GTAW	3-5 c/min		
Voltage		Tungsten Electrode Size and Type			
Current	AC	EWTh-2			
Note					

รูปที่ ๑1 การออกแบบงานเชื่อมของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 625 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และเหล็กกล้า P91

Unit:mm					
Base Metals					
Specification Type and Grade :		SA-335 P91	P-No. 5B	Group No 2	
To Specification Type and Grade :		SA-335 P22	P-No. 5A	Group No 1	
Thickness					
Base Metals: Groove 1.5"					
Filler Metals					
Consumable	Spec.No. (SFA)	AWS Class	Size	F-No.	A-No.
Filler rod	5.14	ERNiCrCoMo-1	2.4 mm	43	
Gas		Composition	Flow Rate		
Shielding		Ar 99.99%	16-20 l/min		
Trailing					
Backing					
Post weld heat treatment			PREHEAT		
Temperature	750°C	Preheat Temp	250-350 °C		
Time	2,4,6 hr	Interpass Temp	250-350 °C		
Amps (Range)			Travel speed Range		
GTAW	130-160 A	GTAW	3-5 c/min		
Voltage			Tungsten Electrode Size and Type		
Current	AC	EWTh-2			
Note					

รูปที่ ๑๒ การออกแบบงานเชื่อมของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอินโคเนล 617 ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า P22 และ เหล็กกล้า P91

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-นามสกุล	นายณัฐพล ธรรมโสภณ
วัน-เดือน-ปีเกิด	วันที่ 25 พฤศจิกายน พ.ศ.2525
ที่อยู่	96/12 หมู่ 6 ตำบลบางพลับ อำเภอโพธิ์ทอง จังหวัดอ่างทอง 14120
สถานที่เกิด	อ่างทอง
วุฒิการศึกษา	สำเร็จหลักสูตรชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียน อ่างทองปัทมโรจน์วิทยาคม พ.ศ. 2543 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิตจากสาขาวิชาวิศวกรรม โลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2548 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาคการศึกษาที่ 1/2550

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย