

ผลของอุณหภูมิการทำละลายในกรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมและลวดเชื่อมเกรดอินโคเนล
625 และ 718 ต่อลักษณะของเฟสแกมมาไพร์มบริเวณรอยเชื่อมเลเซอร์ในโลหะผสมพิเศษ
เกรด GTD-111



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF SOLUTIONING TEMPERATURES IN PRE-WELD
HEAT TREATMENTS AND WELDING WIRE GRADES INCONEL 625 AND 718 ON GAMMA
PRIME PHASE MORPHOLOGY ON LASER WELDMENT IN SUPERALLOYS GRADE GTD-111



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical and Materials Engineering
Department of Metallurgical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2018
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของอุณหภูมิการทำละลายในกรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมและลวดเชื่อมเกรดอินโคเนล 625 และ 718 ต่อลักษณะของเฟสแกมมาไฟร์มบริเวณรอยเชื่อมเลเซอร์ในโลหะผสมพิเศษเกรด GTD-111
โดย	น.ส.จุฑาเมตต์ จารุรัชตพันธ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพร โรจน์หิรัญสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพร โรจน์หิรัญสกุล)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัมปนาท ศิริเวทิน)

จุฑาเมตต์ จารุรัชตพันธ์ : ผลของอุณหภูมิการทำละลายในกรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมและ
 ลวดเชื่อมเกรดอินโคเนล 625 และ 718 ต่อลักษณะของเฟสแกมมาไพร์มบริเวณรอยเชื่อมเลเซอร์ใน
 โลหะผสมพิเศษเกรด GTD-111. (EFFECTS OF SOLUTIONING TEMPERATURES IN PRE-WELD
 HEAT TREATMENTS AND WELDING WIRE GRADES INCONEL 625 AND 718 ON GAMMA
 PRIME PHASE MORPHOLOGY ON LASER WELDMENT IN SUPERALLOYS GRADE GTD-111)
 อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ปัญญาวัชร วัชยาว, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.ธนพร โรจนทิรัฐสกุล

งานวิจัยฉบับนี้มุ่งศึกษาถึงผลของการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนและหลังการเชื่อมเลเซอร์ต่อ
 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อพินิกเกิลเกรด GTD-111 โดยศึกษากรรมวิธีทางความร้อนก่อนการ
 เชื่อมที่แตกต่างกัน 5 สภาวะประกอบด้วย 1.กระบวนการทำละลายที่ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 2.
 กระบวนการบ่มแข็งโดยการทำละลายที่ 1160 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามด้วยการบ่มแข็งที่ 1025 °C เป็นเวลา
 16 ชั่วโมง 3.กระบวนการบ่มแข็งโดยการทำละลายที่ 1140 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามด้วยการบ่มแข็งที่ 1025
 °C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง 4.กระบวนการบ่มแข็งโดยการทำละลายที่ 1120 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามด้วยการบ่ม
 แข็งที่ 1025 °C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง และ 5.ชิ้นงานตั้งต้นที่ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนใดๆ จากนั้นนำชิ้นงาน
 ทั้งหมดไปผ่านการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมที่แตกต่างกัน 2 ชนิดได้แก่ ลวดเชื่อมชนิด IN-625 และ IN-718
 ตามด้วยการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมด้วยการทำละลายที่ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และการ
 บ่มแข็งที่ 825 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเหมือนกันในทุกชิ้นงาน จากผลการทดลองพบว่าไม่ปรากฏรอยแตกอันเป็น
 ผลมาจากการเชื่อมเลเซอร์ในทุกชิ้นงาน โดยการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมด้วยการทำละลายที่
 อุณหภูมิสูงส่งผลให้อนุภาคแกมมาไพร์มสามารถละลายกลับลงไปในเนื้อพินได้ดี ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีโครงสร้าง
 จุลภาคแกมมาไพร์มขนาดเล็กละเอียดกว่าชิ้นงานที่ผ่านการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการทำละลายที่อุณหภูมิ
 ต่ำ อีกทั้งยังไม่พบความแตกต่างในด้านโครงสร้างจุลภาคจากการเชื่อมชิ้นงานด้วยลวดเชื่อมทั้งสองชนิด
 นอกจากนี้การให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมยังส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคในทุกชิ้นงานมีลักษณะใกล้เคียง
 กันคือมีอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดเล็กสม่ำเสมอและมีความแข็งใกล้เคียงกันทุกชิ้นงาน โดยไม่ปรากฏผลที่ชัดเจน
 ของกรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมในชิ้นงานหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
 ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5971405421 : MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORD: Nickel based superalloy, GTD-111, preweld heat treatment, laser welding,
gamma prime precipitated particles

Juthamate Jaruratchataphun : EFFECTS OF SOLUTIONING TEMPERATURES IN PRE-
WELD HEAT TREATMENTS AND WELDING WIRE GRADES INCONEL 625 AND
718 ON GAMMA PRIME PHASE MORPHOLOGY ON LASER WELDMENT IN SUPERALLOYS
GRADE GTD-111. Advisor: Asst. Prof. Panyawat Wangyao, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof.
Tanaporn Rojhirunsakool, Ph.D.

This research work aims to study and evaluate effects of preweld and postweld heat treatment conditions in laser welding process on microstructure of cast nickel base superalloy grade, GTD-111. Preweld heat treatment conditions consist of a solution treatment at temperature of 1200 °C for 2 hours and three over-aging processes at temperatures of 1120, 1140, 1160°C for 2 hours followed with 1025°C for 16 hours comparing with as-received microstructure without any preweld heat treatment. All as-received and preweld heat treated specimens were followed by same postweld heat treatment, which consist of a solution treatment at temperature of 1200°C for 2 hours and precipitation aging at temperature of 845°C for 24 hours. From the obtained results, it was found that there is no any cracking found in all conditions. The higher temperature of solution treatment in preweld heat treatment provided more solutioning of coarse gamma prime particles dissolving into the in gamma matrix with more uniform microstructure and very fine gamma prime precipitated particles. Furthermore, following with postweld heat treatment or standard heat treatment of the alloy, the final microstructures of all as-received and preweld heat treated specimens were very similar with uniform gamma prime morphology. No any significant effect of preweld heat treatment conditions on welded microstructure was found after postweld heat treatment.

Field of Study:	Metallurgical and Materials Engineering	Student's Signature
Academic Year:	2018	Advisor's Signature
		Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ที่คอยให้ความรู้และคำปรึกษาตลอดการดำเนินงานนี้ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพร โรจน์ศิริสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ที่ให้การสนับสนุนในด้านอุปกรณ์และคำแนะนำในการทำวิจัย รวมไปถึง ศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัมปนาท ศิริเวทิน ที่ท่านสละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์และสำหรับคำแนะนำในการปรับปรุงงานวิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ คำสอน และกำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดช่วงที่ทำการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณการสนับสนุนค่าใช้จ่ายในงานวิจัยผ่านทางทุน Chulalongkorn Academic Advancement into its 2nd Century Project (CUAASC) ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณวีรศักดิ์ หอมกระจาย แห่งบริษัทการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยผู้ให้ความอนุเคราะห์ชิ้นงานเพื่อการวิจัย ขอขอบพระคุณบริษัท DSI Laser service ที่สนับสนุนเครื่องมือและบุคลากรในการเชื่อมชิ้นงานทดลอง ขอขอบพระคุณศูนย์บริการทดสอบวัสดุทางวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน (TGGS) และสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยสำหรับการสนับสนุนในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ สนับสนุนอุปกรณ์และบุคลากรในการทดสอบชิ้นงาน

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ดร.จตุพล โอภาไพบูลย์ คุณกำพล ลีลาฤดี คุณศิริวิทย์ ดวงทวี และเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโทภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษาและการช่วยเหลือตลอดจนเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงลงได้

ท้ายที่สุดต้องขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าผู้สนับสนุนหลักและกำลังใจอันสำคัญในการทำงานวิจัยฉบับนี้

จุฑาเมตต์ จารุรัชตพันธ์

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ง
สารบัญตาราง.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
2.1 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลที่ได้จากการหล่อเกรด GTD-111	4
2.2 การเชื่อมโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลและปัญหาที่พบ	8
2.2.1 การแตกขณะแข็งตัว (solidification cracking).....	13
2.2.2 การแตกขณะร้อน (hot cracking).....	15
2.2.3 การแตกจากการหลอมเหลวของเฟสที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ (liquation cracking)	16
2.2.4 การแตกขณะให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม (postweld heat treatment cracking).....	17
2.3 กรรมวิธีทางความร้อน	18

2.4 การซ่อมแซมใบพัดกังหันก๊าซที่ผลิตจากโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิล.....	19
2.5 พิธีศรัทธากรรมกรรม.....	21
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	27
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	27
3.2 วิธีการทดลอง	28
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	30
4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตั้งต้น	30
4.2 ชิ้นงานที่ผ่านการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม	32
4.2.1 โครงสร้างจุลภาค	32
4.2.2 ขนาดของอนุภาคแกมมาไฟรม.....	34
4.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625	36
4.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 ภายหลังจากการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม	41
4.5 การทดสอบความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ใช้ลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625	44
4.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 718.....	46
4.7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 718 ภายหลังจากการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม.....	50
4.8 การทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ใช้ลวดเชื่อมอินโคเนล 718.....	51
4.9 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในแต่ละขั้นตอนทดลอง	53
4.10 ความเป็นไปได้ในการใช้งานลวดเชื่อมอินโคเนล 625 และอินโคเนล 718 ด้วยการเชื่อมเลเซอร์บนโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิลเกรด GTD-111.....	54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	56
บรรณานุกรม.....	57
ภาคผนวก.....	60
ประวัติผู้เขียน.....	71



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2-1 โครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล	6
รูปที่ 2-2 สมบัติเชิงกลของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด GTD-111 ที่อุณหภูมิต่างๆ	7
รูปที่ 2-3 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด GTD-111 ชนิดเกรน สม่ำเสมอและชนิดแข็งตัวในทิศทางเดียว	8
รูปที่ 2-4 บริเวณต่างๆซึ่งเป็นผลมาจากการเชื่อม	10
รูปที่ 2-5 บริเวณต่างๆ ของรอยเชื่อม	10
รูปที่ 2-6 ลักษณะรอยต่อระหว่างบริเวณที่เกิดการหลอมเหลวที่เกิดในโลหะผสมเนื้อพื้่นิกเกิล.....	12
รูปที่ 2-7 จุดบกพร่องงานเชื่อม	13
รูปที่ 2-8 ความเค้นที่บริเวณต่างๆระหว่างการเชื่อม	14
รูปที่ 2-9 ภาพจำลองลักษณะการแตกขณะแข็งตัว	14
รูปที่ 2-10 รอยแตกขณะแข็งตัวของโลหะผสมเนื้อพื้่นิกเกิล.....	15
รูปที่ 2-11 รอยแตกขณะร้อนที่ปรากฏในบริเวณกระทะร้อนของวัสดุ U-700	15
รูปที่ 2-12 การแตกจากการหลอมเหลวของเฟสที่มีจุดหลอมเหลวต่ำในอินโคเนล 718	16
รูปที่ 2-13 ผลของปริมาณไทเทเนียมและอะลูมิเนียมต่อการแตกระหว่างกรรมวิธีทางความร้อน	17
รูปที่ 2-14 ภาพจำลองขั้นตอนการแตกขณะให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม.....	18
รูปที่ 2-15 (ก) ภาพโดยรวมของรอยเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านการทำละลายและบ่มแข็งก่อนการเชื่อมและ บ่มแข็งหลังการเชื่อม (ข) รุพารุนขนาดใหญ่ที่พบในบริเวณหลอมละลาย	21
รูปที่ 2-16 รอยแตกและหลุมขนาดเล็กบริเวณกระทะร้อน	22
รูปที่ 2-17 ความสามารถในการเชื่อม	23
รูปที่ 2-18 โลหะผสมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม ก) การกระจายตัวของแกมมาไพร์ม ปฐุมุมิและแกมมาไพร์มทุติยภูมิ ข) การกระจายตัวของ MC คาร์ไบด์	24

รูปที่ 2-19 โลหะผสมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม (ปั๊มแข็งที่ 850 และ 900 องศาเซลเซียส) ก) การกระจายตัวของแกมมาไพร์ม ข) MC คาร์ไบด์และแกมมา-แกมมาไพร์มยูเทคติกที่ละลายไม่สมบูรณ์บริเวณขอบเกรน	25
รูปที่ 2-20 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงชั้นฟิล์มหลอมเหลวใกล้กับบริเวณหลอมเหลวของรอยเชื่อมในชิ้นงานที่ปั๊มแข็งที่อุณหภูมิสูง.....	25
รูปที่ 2-21 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงรอยแตกขนาดเล็กใกล้กับบริเวณกระทบร้อนในชิ้นงานที่ปั๊มแข็งด้วยอุณหภูมิต่ำ	26
รูปที่ 4-1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน A.R. จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 725X	31
รูปที่ 4-2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน A.R. จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 5000X.....	31
รูปที่ 4-3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่างๆ โดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 362.5X, 725X และ 1450X.....	32
รูปที่ 4-4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 ภายหลังจากให้กรรมวิธีทางความร้อนที่สภาวะต่างๆ	34
รูปที่ 4-5 ขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มภายหลังจากให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมที่สภาวะต่างๆ	36
รูปที่ 4-6 โครงสร้างจุลทรรศน์ของชิ้นงานภายหลังจากเชื่อมเลเซอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (ก) ชิ้นงาน S.T. (ข) ชิ้นงาน O.A.338	38
รูปที่ 4-7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังจากเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่สภาวะต่างๆ	40
รูปที่ 4-8 ขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มภายหลังจากเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625.....	41
รูปที่ 4-9 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 ภายหลังจากให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ก) ชิ้นงาน A.R. ข) ชิ้นงาน O.A.3.....	42
รูปที่ 4-10 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังจากให้กรรมวิธีทางความร้อนแบบมาตรฐานหลังการเชื่อมโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 20000X	43

รูปที่ 4-11 ขนาดของอนุภาคแกมมาไพรม์ภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเลเซอร์ ในชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625.....	43
รูปที่ 4-12 ความแข็งของชิ้นงานภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม.....	44
รูปที่ 4-13 ความแข็งของชิ้นงานที่ระยะห่างต่างๆจากรอยเชื่อมภายหลังการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวด เชื่อมอินโคเนล 625.....	45
รูปที่ 4-14 ความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 ภายหลังการให้ กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม	46
รูปที่ 4-15 โครงสร้างจุลทรรศน์ของชิ้นงานภายหลังการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 718 โดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (ก) ชิ้นงาน S.T. และ (ข) ชิ้นงาน O.A.3.....	47
รูปที่ 4-16 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 718 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่สภาวะต่างๆ (ก) A.R.บริเวณเนื้อพื้น (ข) A.R.บริเวณ กระทบร้อน (ค) S.T. บริเวณเนื้อพื้น (ง) S.T. บริเวณกระทบร้อน (จ) O.A.1 บริเวณเนื้อพื้น (ฉ) O.A.1 บริเวณกระทบร้อน (ช) O.A.2 บริเวณเนื้อพื้น (ซ) O.A.2 บริเวณกระทบร้อน (ฅ) O.A.3 บริเวณเนื้อ พื้น (ญ) O.A.3 บริเวณกระทบร้อน	48
รูปที่ 4-17 ขนาดของอนุภาคแกมมาไพรม์ภายหลังการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 718 ...	49
รูปที่ 4-18 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโดยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	50
รูปที่ 4-19 ขนาดของอนุภาคแกมมาไพรม์ภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเลเซอร์ ในชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 718.....	51
รูปที่ 4-20 ความแข็งของชิ้นงานที่ระยะห่างต่างๆจากรอยเชื่อมภายหลังการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวด เชื่อมอินโคเนล 718.....	51
รูปที่ 4-21 ความแข็งของชิ้นงานที่ใช้ลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 718 ภายหลังการให้กรรมวิธีทางความ ร้อนหลังการเชื่อม.....	52

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด GTD-111.....	4
ตารางที่ 2-2 สรุบทบาทของธาตุผสมในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด GTD-111.....	5
ตารางที่ 2-3 องค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปของอินโคเนล 625	9
ตารางที่ 2-4 องค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปของอินโคเนล 718	9
ตารางที่ 2-5 เฟสที่แตกจากการหลอมเหลวของเฟสที่มีจุดหลอมเหลวต่ำในโลหะผสมต่างๆ	16
ตารางที่ 3-1 ค่าสภาวะต่างๆของกรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม	28
ตารางที่ 3-2 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมเลเซอร์	29

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันเครื่องจักรกังหันก๊าซ (Gas Turbine) เป็นอุปกรณ์สำคัญในการผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศไทย โดยใบพัด (Blade) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนจากอากาศที่ถูกอัดและเผาไหม้เป็นพลังงานกลเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นชิ้นส่วนที่ต้องเผชิญกับการสึกกร่อน (erosion) และการกัดกร่อน (corrosion) ที่อุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่องจึงจำเป็นต้องเลือกใช้วัสดุในการผลิตใบพัดที่มีสมบัติด้านความแข็งแรง (strength) ความต้านทานต่อการสึกกร่อน การกัดกร่อน ความล้า (fatigue) และการคืบ (creep) ที่ดีสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลที่ได้จากการหล่อเกรดจีทีดี-111 (Cast nickel based superalloys grade GTD-111) เป็นหนึ่งในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล (nickel based superalloys) ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นโดยบริษัทเจเนอรัล อิเล็กทริก (General Electric Company; GE) เพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับทำใบพัดเครื่องจักรกังหันก๊าซ โดยการปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมีจากโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดเรเน 80 และอินโคเนล 738 LC โดยการเติมหรือทดแทนส่วนผสมด้วยธาตุผสมทนความร้อนสูง (refractory elements) เช่น แทนทาลัม (tantalum; Ta) ทังสเตน (tungsten; W) โคบอลต์ (cobalt; Co) โครเมียม (chromium; Cr) และโมลิบดีนัม (molybdenum; Mo) เพื่อเพิ่มสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนเฉพาะที่ (localized hot corrosion) และความต้านทานการคืบ (creep resistance) ที่อุณหภูมิสูง [1]

เมื่อมีการใช้งานใบพัดที่อุณหภูมิและความดันสูงเป็นระยะเวลานานทำให้โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 เกิดการเปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดต่ำลง ร่วมกับการมีเศษสิ่งปนเปื้อนต่างๆในกระบวนการมากระทบผิวใบพัดซ้ำๆทำให้อาจเกิดรอยขีดสี (abrasive wear) หรือรอยร้าว (crack) ขึ้นบนใบพัด จึงนิยมซ่อมแซมใบพัดด้วยการเชื่อมหรือเชื่อมพอก (welding or cladding) [2], [3] เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ช่วยลดต้นทุนในการเปลี่ยนใบพัดใหม่ซึ่งมีราคาสูงและใช้เวลาในการผลิตยาวนาน โดยการเชื่อมที่ตื้นนั้นต้องไม่เกิดข้อบกพร่องงานเชื่อม (welding defects) เช่น การแตกระหว่างการเชื่อม การแตกหลังการเชื่อมหรือการแตกระหว่างการให้กรรมวิธีทางความร้อน (strain aged cracking) รวมทั้งต้องไม่ทำให้สมบัติเชิงกลลดลงจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค อย่างไรก็ตามการแตกร้าวระหว่างการเชื่อมจากการหลอมเหลวของ

เฟสที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ (liquation cracking) และการแตกร้าวระหว่างกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมในบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone; HAZ) ยังเป็นปัญหาที่พบมากในการเชื่อมโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล เช่น โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 ซึ่งเป็นโลหะที่มีกลไกการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กบนเนื้อพื้น เนื่องจากโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 มีธาตุไทเทเนียม (titanium; Ti) และอะลูมิเนียม (Aluminum; Al) เป็นองค์ประกอบในปริมาณรวมกันมากกว่าร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ซึ่งไทเทเนียมและอะลูมิเนียมสามารถรวมตัวกับนิกเกิลเกิดเป็นอนุภาคแกมมาไพรม์ (Gamma prime) ตกตะกอนออกมาจากเนื้อพื้นโดยอนุภาคดังกล่าวมีผลในการขัดขวางการหดตัวขณะร้อนและเพิ่มความเค้นภายในของโลหะ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของคุณอติตยา อธิโรจน์ [4] ที่ทำการศึกษาค่าของตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อม และงานวิจัยของ ดร.ปัญญาวัชร วัชยาว และคณะ [5] ที่ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกรรมวิธีทางความร้อนของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 จึงเกิดเป็นแนวคิดในการศึกษาถึงอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมและผลของลวดเชื่อม (welding wire) ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 เพื่อนำไปปรับใช้ในการเชื่อมซ่อมใบพัดเครื่องจักรกังหันก๊าซในอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิทำลายในกรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมซึ่งส่งผลต่อขนาดของเฟสแกมมาไพรม์และความแข็งบริเวณเนื้อพื้นและบริเวณกระทบร้อน
2. เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้ลวดเชื่อมเกรดอินโคเนล 625 และ 718 สำหรับการเชื่อมเลเซอร์บนวัสดุ GTD-111

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณกระทบร้อนและบริเวณเนื้อพื้นของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนด้วยกระบวนการทำลาย (solution treatment) ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส (องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. ศึกษาโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณกระทบร้อนและบริเวณเนื้อพื้นของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนด้วยกระบวนการบ่มแข็ง (over aging) โดยการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการทำลายที่อุณหภูมิ 1120, 1140 และ 1160 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 1025 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 16 ชั่วโมง

3. ศึกษาโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณรอยเชื่อมและบริเวณกระทบบร้อนของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมเลเซอร์พลังงานต่ำโดยใช้ลวดเชื่อมอินโคเนล 625 และลวดเชื่อมอินโคเนล 718 ด้วยกำลังการเชื่อม (Power) 500 วัตต์ (Watt) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (optical microscope; OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) รวมทั้งศึกษาความแข็งในแต่ละบริเวณโดยใช้เครื่องวัดความแข็งไมโครวิกเกอร์ (micro-Vickers hardness)

4. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณรอยเชื่อมและบริเวณกระทบบร้อนหลังกรรมวิธีทางความร้อนขึ้นงานในข้อ 1-3 โดยการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการทำละลายที่ 1,200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการบ่มแข็งที่ 845 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รวมทั้งศึกษาความแข็งในแต่ละบริเวณโดยใช้เครื่องวัดความแข็งไมโครวิกเกอร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจอิทธิพลของอุณหภูมิในการทำละลายก่อนการเชื่อมซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และสามารถกำหนดสภาวะสำหรับกรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 ได้อย่างเหมาะสม

2. เข้าใจอิทธิพลของลวดเชื่อมซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณกระทบบร้อน และสามารถเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 ด้วยเลเซอร์

3. เป็นแนวทางในการศึกษาการเชื่อมโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 โดยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ในอนาคต

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์

2.1 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลที่ได้จากการหล่อเกรด GTD-111

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรด GTD-111 เป็นโลหะที่จัดอยู่ในกลุ่มโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลซึ่งมีสมบัติทนต่อความร้อนและการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง คือมีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อการคืบและความล้าที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งยังมีการนำความร้อนที่ดีและมีอัตราการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ โดยโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรด GTD-111 ได้รับการพัฒนามาจากโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรด เรเน 80 และอินโคเนล 738 LC โดยบริษัทเจเนอร์อัล อิเล็กทริก ในทศวรรษ 1980 ด้วยการเพิ่มปริมาณธาตุทนไฟ (refractory elements) ได้แก่ โมลิบดีนัม ทังสเตน แทนทาลัม โครเมียม และโคบอลต์ เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนเฉพาะที่ที่อุณหภูมิสูง [1] องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรด GTD-111 แสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรด GTD-111 [4]

ธาตุ เนื้อพื้่น	Cr	Ni	Co	W	Mo	Ti	Al	C	B	Ta
โลหะผสม พิเศษเนื้อพื้่น นิกเกิลเกรด GTD-111	14	Bal.	9.5	3.8	1.5	4.9	3.0	0.10	0.001	2.8

ธาตุผสมในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลักตามลักษณะที่ปรากฏในเนื้อพื้่น ดังนี้

1. กลุ่มที่ละลายอยู่ในเนื้อพื้่น ได้แก่ โคบอลต์ เหล็ก โครเมียม โมลิบดีนัม ทังสเตนและวานาเดียม
2. กลุ่มที่สร้างพันธะกับนิกเกิลเกิดเป็นสารประกอบ (อนุภาคแกมมาไพร์ม) ได้แก่ ไทเทเนียม อะลูมิเนียม ไนโอเบียมและแทนทาลัม

3. กลุ่มที่เกิดการแยกตัวตามขอบเกรน ได้แก่ คาร์บอน แมกนีเซียม โบรอน และ เซอร์โคเนียม

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งตามชนิดของสารประกอบ ได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1. ธาตุผสมกลุ่มที่เกิดสารประกอบคาร์ไบด์ (carbide formers) ได้แก่ โครเมียม โมลิบดีนัม ทังสเทน แทนทาลัม และไทเทเนียม ซึ่งจับตัวกับคาร์บอนเกิดเป็นสารประกอบคาร์ไบด์ที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงช่วยขัดขวางการเคลื่อนของเกรน หรืออีกนัยหนึ่งคือการเพิ่มความต้านทานต่อการคืบที่อุณหภูมิสูง [1]

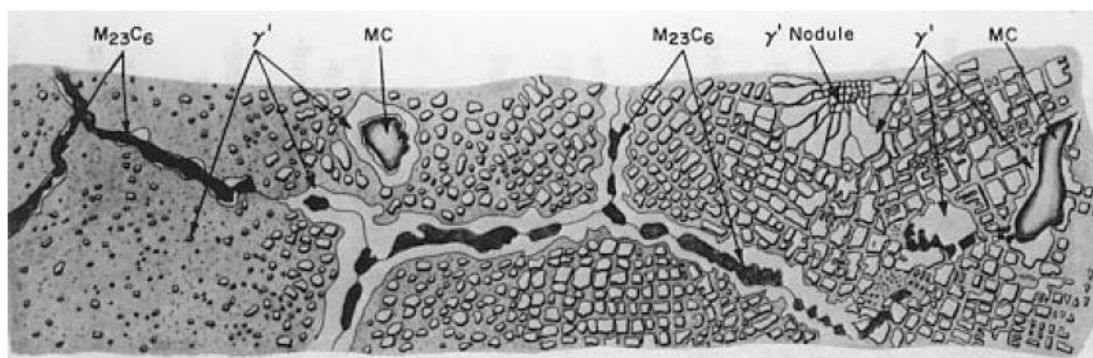
2. ธาตุผสมกลุ่มที่เกิดสารประกอบออกไซด์ (oxide formers) ได้แก่ โครเมียม และ อะลูมิเนียม โดยสารประกอบออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นชั้นฟิล์มช่วยป้องกันเนื้อโลหะจากการกัดกร่อนของสภาพแวดล้อม

ผลของธาตุผสมในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้เหล็กเกรด GTD-111 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-2 และโครงสร้างจุลภาคทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้เหล็กเกรด GTD-111 แสดงในรูปที่ 2-1 ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างเนื้อพื้เป็นโครงสร้างแกมมา (Face-Centered Cubic) อนุภาคแกมมาไพรม์ (Gamma prime) และสารประกอบคาร์ไบด์ (carbides)

ตารางที่ 2-2 สรุปบทบาทของธาตุผสมในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้เหล็กเกรด GTD-111[6]

บทบาทในโลหะผสม	ธาตุผสม
Solid solution strengtheners	Co, Cr, Mo, W, Ta,
Carbide Form:	
MC Type	W, Ta, Ti, Mo
M ₇ C ₃ Type	Cr
M ₂₃ C ₆ Type	Cr, Mo, W
M ₆ C Type	Mo, W
Gamma prime [Ni ₃ (Ti,Al)] Former	Ti, Al
Oxidation Resistance	Al,Cr
Raise solvus temperature of gamma prime	Co

Sulfidation resistance	Cr
Creep property improvement	B, Ta
Rupture strength improvement	B
Grain boundary refiners	B, C



รูปที่ 2-1 โครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล [6]

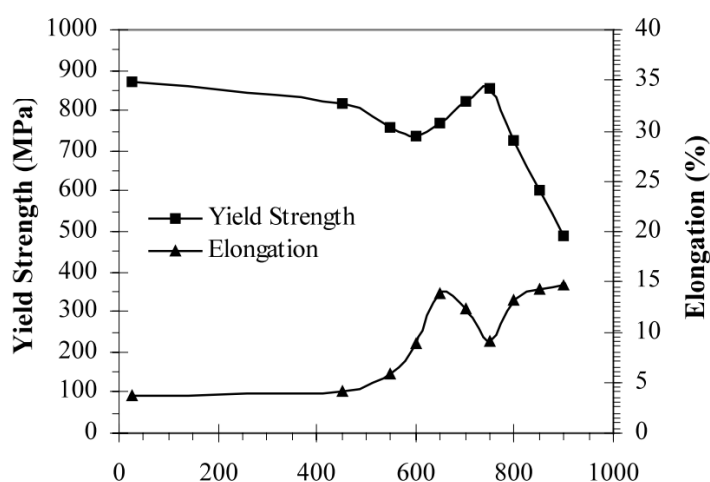
เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 ประกอบด้วย 3 เฟส ทำให้กลไกที่สำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 ประกอบด้วย 3 กลไกดังนี้

1. การเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อพื้นด้วยสารละลายของแข็ง (solid solution strengthening) โดยธาตุผสมได้แก่ โครเมียม โมลิบดีนัม และทังสเทน ซึ่งอยู่ในรูปสารละลายของแข็งในเนื้อพื้นจะช่วยส่งผลให้ความแข็งแรงของเนื้อพื้นเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้โมลิบดีนัมและทังสเทนซึ่งมีอัตราการแพร่ต่ำจึงขัดขวางการแพร่ของอะตอมอื่นในเนื้อพื้นที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ความต้านทานการคืบที่อุณหภูมิสูงของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 ดีกว่าอินโคเนล 738 LC ซึ่งเป็นโลหะต้นแบบ ดังการทดลองของ S. A. Sajjadi [1] โดยสมบัติทางกลที่อุณหภูมิต่างๆของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 แสดงในรูปที่ 2-2

2. การเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (precipitation strengthening) โดยไทเทเนียมและอะลูมิเนียมจะเกิดสารประกอบกับนิกเกิลมีสูตรเคมีคือ $Ni_3(Al,Ti)$ เรียกว่าอนุภาคแกมมาไพร์ม (Gamma prime) ซึ่งมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงถึงร้อยละ 70 ของจุดหลอมเหลวของวัสดุ อนุภาคแกมมาไพร์มที่มีขนาดและการกระจายตัวที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 โดยการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (dislocation)

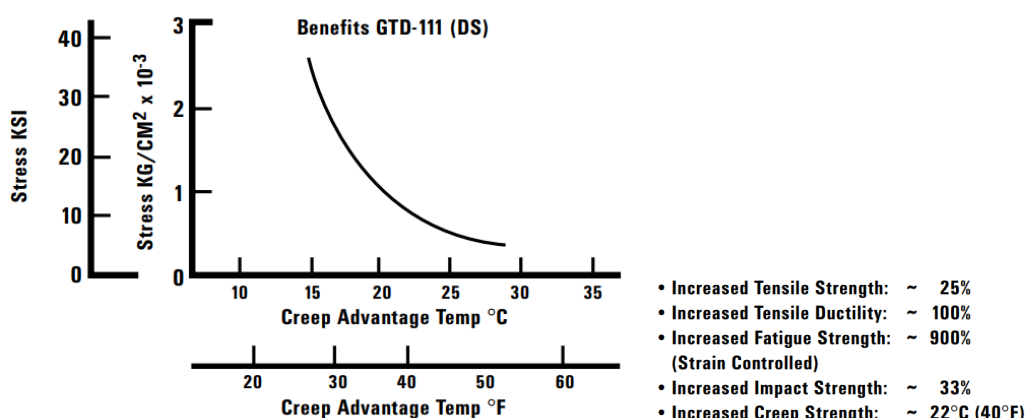
ในเนื้อวัสดุ อย่างไรก็ตามการใช้งานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด GTD-111 ที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยการแทนที่ของธาตุอื่นๆในตำแหน่งของอะลูมิเนียม เกิดเป็นเฟสสีดำ (η ; Ni_3Ti) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบหกเหลี่ยม (hexagonal closed packed; HCP) เป็นโครงสร้างที่มีความเปราะสูง ส่งผลเสียต่อสมบัติโดยรวมของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด GTD-111

3. การเพิ่มความแข็งแรงโดยการเกิดสารประกอบคาร์ไบด์ (carbide forming) เนื่องจากคาร์ไบด์เป็นอนุภาคที่มีความแข็งและความเปราะสูง การมีคาร์ไบด์ตามขอบเกรนอย่างไม่ต่อเนื่องจึงช่วยขัดขวางการเคลื่อนที่ของขอบเกรนที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ความแข็งแรงแบบคืบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด GTD-111 เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามหากคาร์ไบด์ที่บริเวณขอบเกรนมีลักษณะที่ต่อเนื่องกันเป็นฟิล์มจะส่งผลในทางตรงข้ามคือทำให้เนื้อวัสดุรับความเค้นได้ต่ำลงเนื่องจากเกิดการแตกตามขอบเกรน



รูปที่ 2-2 สมบัติเชิงกลของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด GTD-111 ที่อุณหภูมิต่างๆ [1]

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด GTD-111 มีการผลิตในเชิงพาณิชย์ 2 รูปแบบ คือ ชนิดเกรนสม่ำเสมอ (equiaxed) และชนิดแข็งตัวในทิศทางเดียว (directionally solidified) ซึ่งเป็นชนิดที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าแบบแรก ดังแสดงในรูปที่ 2-3 โดยโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด GTD-111 ชนิดแข็งตัวในทิศทางเดียวมักถูกใช้ในการผลิตใบพัดกังหันก๊าซในขั้นที่ 1 และใช้โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด GTD-111 ชนิดเกรนสม่ำเสมอในการผลิตใบพัดขั้นอื่นๆซึ่งมีสภาพการใช้งานที่รุนแรงน้อยกว่า



รูปที่ 2-3 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้กนิกเกิลเกรด GTD-111

ชนิดเกรนสม่ำเสมอและชนิดแข็งตัวในทิศทางเดียว [7]

2.2 การเชื่อมโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้กนิกเกิลและปัญหาที่พบ

แม้ว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้กนิกเกิลเกรด GTD-111 จะเป็นวัสดุที่มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งานใช้งานที่อุณหภูมิสูง แต่การใช้งานใบพัดกังหันก๊าซ (Blades) ที่ผลิตจากโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้กนิกเกิลเกรด GTD-111 ในสถานะที่มีการรับแรงและมีการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานย่อมส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคทำให้ใบพัดกังหันก๊าซเกิดการเสียหายในที่สุดซึ่งหากความเสียหายเกิดขึ้นที่บริเวณผิวส่วนปลายของใบพัดกังหันก๊าซ การเชื่อมจะเป็นกระบวนการที่สำคัญในการซ่อมแซมและฟื้นฟูใบพัดกังหันก๊าซ เนื่องจากสามารถช่วยลดต้นทุนและเวลาในการเปลี่ยนใบพัดกังหันก๊าซใหม่ได้ โดยการเชื่อมแบ่งออกเป็น 3 วิธีหลัก ได้แก่

1. การเชื่อมแบบหลอมละลาย (fusion welding) เป็นการเชื่อมที่แพร่หลายที่สุดโดยการใช้ความร้อนละลายเนื้อวัสดุบริเวณที่ต้องการต่อเชื่อม เมื่อวัสดุเย็นตัวลงเนื้อวัสดุก็จะเกิดการประสานติดกันทั้งนี้การเชื่อมต่ออาจมีหรือไม่มีลวดเชื่อมซึ่งมีหน้าที่ช่วยเพิ่มเนื้อประสานและความแข็งแรงของรอยเชื่อมก็ได้

2. การเชื่อมในสถานะของแข็ง (solid state welding) เป็นการเชื่อมขึ้นงานโดยอาศัยความร้อนและความดันในการประสานชิ้นงานเข้าด้วยกันด้วยกระบวนการแพร่ (diffusion bonding) หรือการเปลี่ยนรูป (deformation) โดยไม่มีการละลายของเนื้อวัสดุ

3. การบัดกรีแข็ง (brazing) เป็นการเชื่อมชิ้นงานโดยการละลายลวดเชื่อมเข้าไปในรอยเชื่อมเพื่อประสานชิ้นงานโดยไม่มีการละลายเนื้อวัสดุของชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม

โดยงานวิจัยฉบับนี้ให้ความสนใจในการเชื่อมเลเซอร์ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย โดยใช้ลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 และอินโคเนล 718 ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2-3 และ ตารางที่ 2-4 ตามลำดับ เนื่องจากเป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้ซ่อมแซมใบพัดกังหันก๊าซในอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2-3 องค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปของอินโคเนล 625 [8]

ธาตุ เนื้อพื้น	Cr	Ni	Co+Nb	Ta	Al	Ti	C	Fe	Mn
อินโคเนล 625	20.00 - 30.00	Bal.	1.0 max	3.15- 4.15	0.40 max	0.40 max	0.10 max	5.0 max	5.0 max

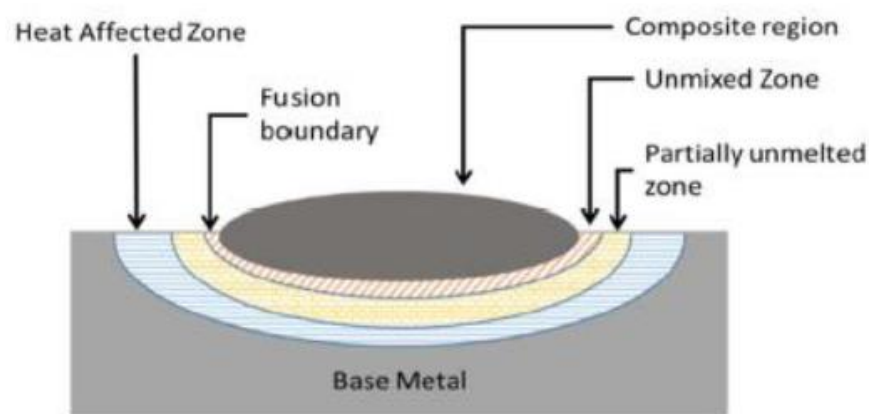
ตารางที่ 2-4 องค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปของอินโคเนล 718 [9]

ธาตุ เนื้อพื้น	Cr	Ni+Co	Nb+Ta	Mo	Al	Ti	C	Fe	Mn
อินโคเนล 718	17.00 - 21.00	50.00 - 55.00	4.75 - 5.50	2.80 - 3.30	0.20 - 0.80	0.65- 1.15	0.08 max	Bal.	0.35 max

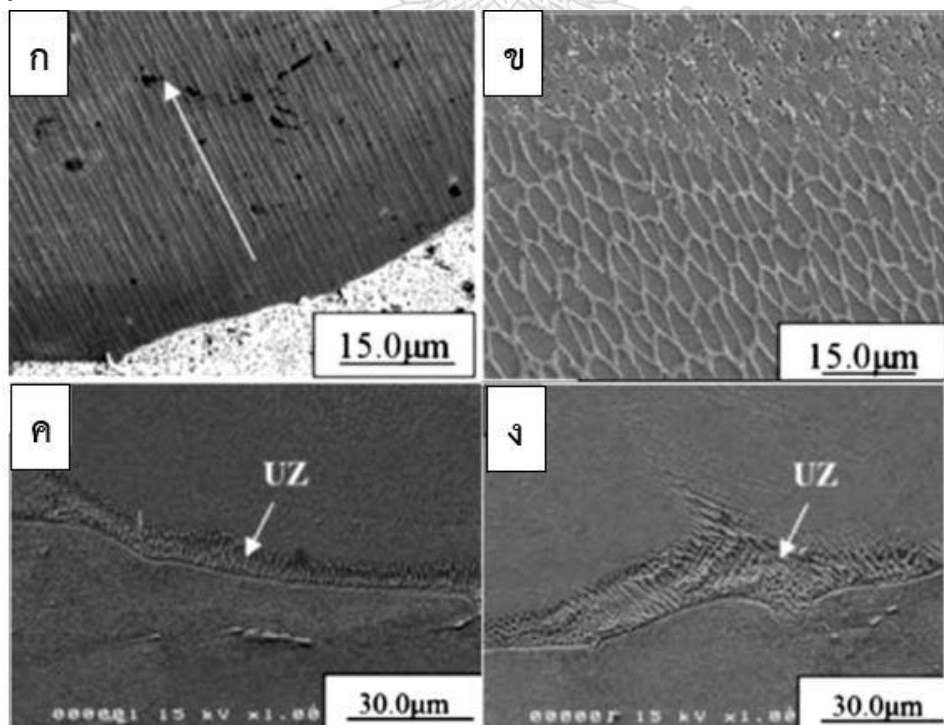
การเชื่อมเลเซอร์ (laser welding) เป็นการเชื่อมที่มีการหลอมเหลวบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมโดยใช้แสงความเข้มสูงหรือเลเซอร์ (LASER; light amplification by stimulated emission of radiation) เป็นตัวให้ความร้อนในการหลอมเหลวเนื้อวัสดุ การเชื่อมเลเซอร์มีจุดเด่นเนื่องจากลำเลเซอร์มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับการเชื่อมด้วยวิธีอื่นๆ ทำให้บริเวณหลอมละลาย (fusion zone; FZ) และ บริเวณกระทบร้อน (heat affected zone; HAZ) ที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและไม่เกิดการบิดตัว (distortion) ของชิ้นงาน

โครงสร้างของชิ้นงานเชื่อมที่มีการหลอมละลายแบ่งได้เป็น 3 บริเวณใหญ่ ได้แก่ บริเวณหลอมละลาย (FZ) บริเวณกระทบร้อน (HAZ) และบริเวณเนื้อพื้น (base metal) ที่ไม่ได้รับ

ผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม สำหรับการเชื่อมที่มีการใช้ลวดเชื่อมประสานรอยเชื่อมนั้น บริเวณหลอมละลายสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณย่อย ได้แก่ บริเวณที่เนื้อโลหะจากลวดเชื่อม และเนื้อพื้นหลอมเหลวผสมกันอย่างสมบูรณ์ (composite zone) บริเวณที่โลหะจากลวดเชื่อมและเนื้อพื้นหลอมเหลวไม่ผสมกัน (unmixed zone; UZ) และบริเวณที่เนื้อพื้นหลอมเหลวไม่สมบูรณ์ (partially unmelted zone) ดังรูปที่ 2-4 และ 2-5 โดยเมื่อลำเลเซอร์เคลื่อนที่ห่างออกไปบริเวณที่เกิดการหลอมเหลวจะมีการแข็งตัวในลักษณะที่คล้ายคลึงกับโครงสร้างงานหล่อ



รูปที่ 2-4 บริเวณต่างๆซึ่งเป็นผลมาจากการเชื่อม [4]



รูปที่ 2-5 บริเวณต่างๆ ของรอยเชื่อม [10]

(ก) composite zone บริเวณใกล้เส้นแบ่งเขตหลอมเหลว

(ข) บริเวณใจกลาง composite zone

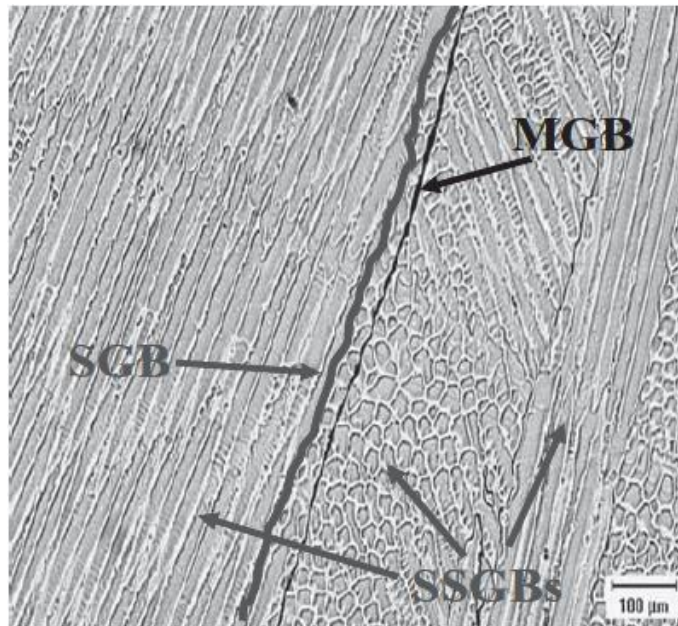
(ค) unmixed zone ระหว่างโลหะเดิมกับเนื้อพื้น

(ง) unmixed zone ระหว่างชั้นการเชื่อม

ลักษณะรอยต่อบริเวณหลอมละลายสำหรับวัสดุที่มีโครงสร้างเนื้อพื้นเป็นอสเทนนิติก

สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะที่สำคัญได้แก่

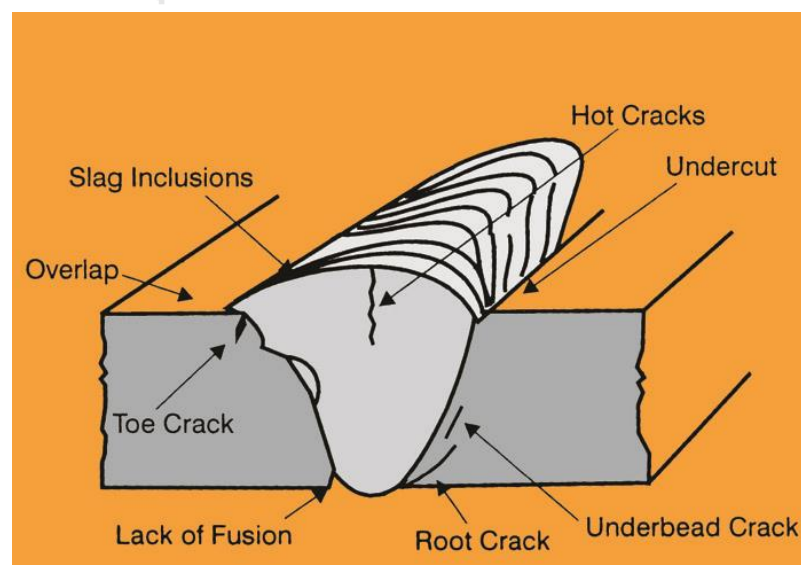
1. รอยต่อจากการแข็งตัวตามขอบเกรนย่อย (solidification sub-grain boundaries; SSGBs) ทำให้เกิดการแบ่งแยกระหว่างขอบเกรนย่อยที่อยู่ติดกัน เนื่องจากมีความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีในแต่ละบริเวณ ทั้งนี้รอยต่อในลักษณะนี้จะมีการเรียงตัวที่ผิดไปของแต่ละอะตอม (misorientation) ในปริมาณน้อยจึงจัดเป็นรอยต่อประเภท low angle grain boundary ซึ่งมีความหนาแน่นของดิสโลเคชันต่ำ
2. รอยต่อจากการแข็งตัวตามแนวขอบเกรน (solidification grain boundaries; SGB) เป็นผลมาจากการแข็งตัวของเดนไดรต์แบบแข่งขันกัน (competitive growth) เมื่อเดนไดรต์โตมาติดกันทำให้เกิดรอยต่อที่มีการเรียงตัวที่ผิดไปของอะตอมในปริมาณมาก จัดเป็นรอยต่อประเภท high angle grain boundary โดยผลจากการเรียงตัวที่ผิดไปของอะตอมในปริมาณมากนี้ก่อให้เกิดร่างแหดิสโลเคชัน (dislocation network) ตามแนวรอยต่อ
3. รอยต่อจากผลขององค์ประกอบทางเคมีและระบบโครงสร้างผลึกบริเวณขอบเกรน (migrated grain boundaries; MGB) บริเวณขอบเกรนที่แข็งตัวหลังจากได้รับความร้อนจากการเชื่อมอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีหรือระบบโครงสร้างผลึกทำให้เกิดเป็นรอยต่อจากความแตกต่างระหว่างสองบริเวณ [11] ดังแสดงในรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 ลักษณะรอยต่อระหว่างบริเวณที่เกิดการหลอมเหลวที่เกิดในโลหะผสมเนื้อพื้นนิกเกิล [11]

ในการเชื่อมโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลที่มีอนุภาคแกมมาไพรมเป็นกลไกสร้างความแข็งแรงนั้นอาจเกิดข้อบกพร่องจากการเชื่อมในระดับมหภาคดังแสดงในรูปที่ 2-7 นอกจากนี้ยังสามารถพบรอยแตกร้าวอันเป็นเหตุมาจาก 4 สาเหตุหลักได้แก่ 1.การแตกขณะแข็งตัว (solidification cracking) 2.การแตกขณะร้อน (hot cracking) 3.การแตกจากการหลอมเหลวของเฟสที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ (liquation cracking) และ 4.การแตกขณะให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม (post weld heat treatment cracking)

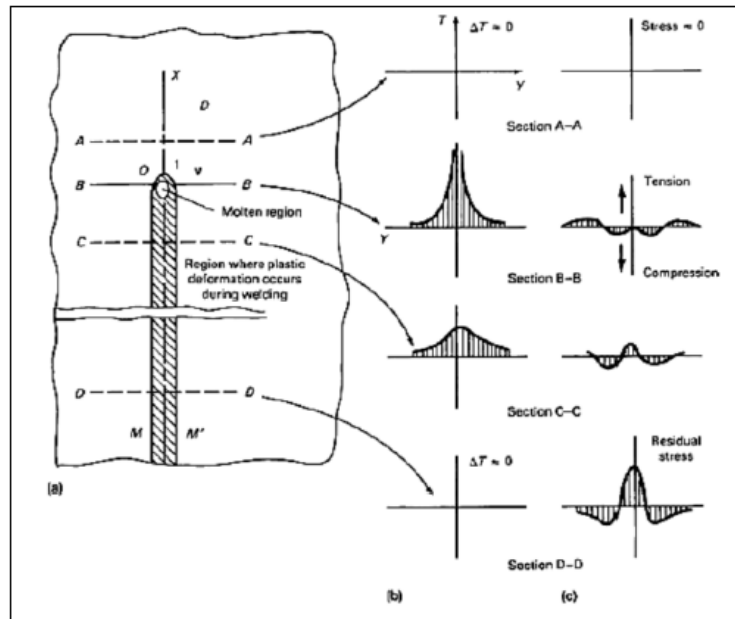
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



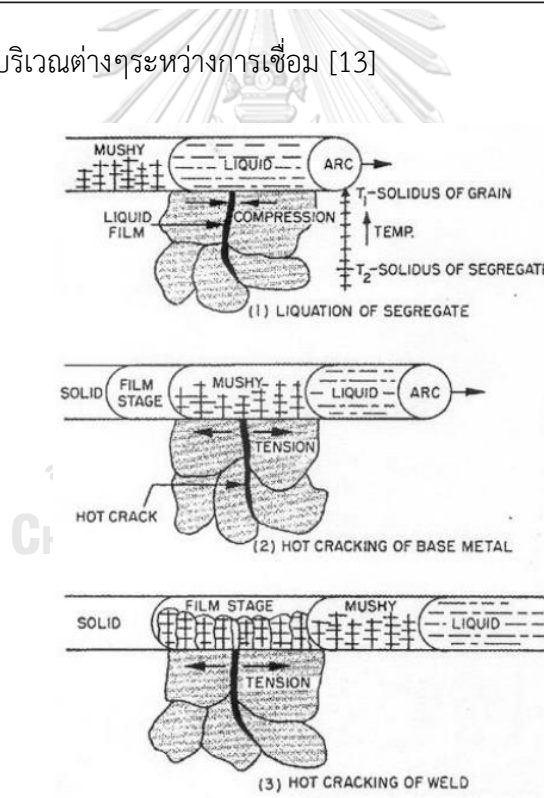
รูปที่ 2-7 จุดบกพร่องงานเชื่อม [12]

2.2.1 การแตกขณะแข็งตัว (solidification cracking)

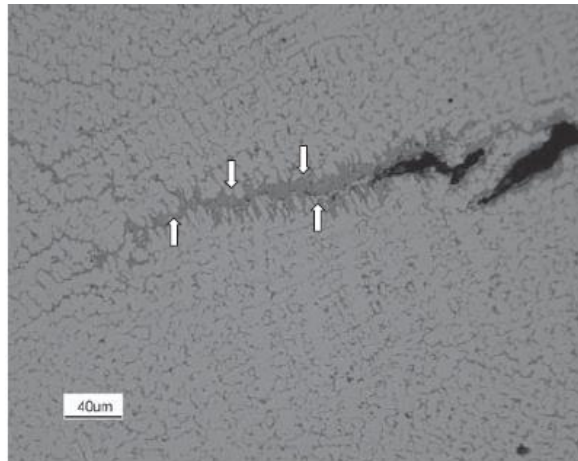
การแตกขณะแข็งตัวเกิดขึ้นในบริเวณหลอมละลายของรอยเชื่อมจากการที่โลหะในสภาพกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่เกิดขึ้นระหว่างการแข็งตัวไม่สามารถรับความเค้นและความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของเนื้อวัสดุอันเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันในแต่ละบริเวณทำให้เกิดการหดและขยายตัวในปริมาณที่แตกต่างกันของบริเวณหลอมละลายและบริเวณกระบร้อนระหว่างการเย็นตัว ดังแสดงในรูปที่ 2-8 โดยเมื่อวัสดุได้รับความร้อนจากการเชื่อมจะส่งผลให้วัสดุเกิดการขยายตัวอันเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ทั้งนี้ยิ่งวัสดุอยู่ใกล้แนวเชื่อมมากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิยิ่งสูงทำให้เกิดการขยายตัวมากแต่เนื่องจากเนื้อวัสดุที่อยู่ห่างออกไปซึ่งไม่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อมจำกัดการขยายตัวของวัสดุทำให้วัสดุที่ได้รับความร้อนไม่สามารถขยายตัวได้อย่างอิสระเกิดเป็นความอึดตัก้างในเนื้อวัสดุ หลังจากนั้นเมื่อทำการเชื่อมเสร็จบริเวณหลอมละลายและบริเวณเนื้อพื้นซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องเกิดการเย็นตัวลง ส่งผลให้เนื้อพื้นในทั้งสองบริเวณดังกล่าวพยายามที่จะหดตัวลงจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแต่การดึงรั้งของเนื้อวัสดุบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบทางความร้อนทำให้วัสดุบริเวณหลอมละลายและบริเวณกระบร้อนไม่สามารถหดตัวได้อย่างอิสระ ส่งผลให้เกิดความเค้นดึงตัก้างในเนื้อวัสดุภายหลังการเชื่อม ทั้งนี้การตกตะกอนของเฟสที่สองในเนื้อพื้นส่งผลให้เกิดการหดตัวมากกว่าปกติ ดังนั้นโลหะที่มีการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอนจึงมีโอกาสเกิดการแตกระหว่างการแข็งตัวได้มาก อีกทั้งธาตุผสมบางชนิด เช่น โบรอน คาร์บอนและไทเทเนียม ซึ่งสามารถละลายในเนื้อพื้นได้ดีเนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การแยกตัว (partitioning coefficient) ในเนื้อพื้นแกมมาต่ำจะเกิดการแข็งตัวในช่วงสุดท้ายทำให้เกิดเฟสที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและโครงสร้างยูเทคติก ซึ่งเฟสเหล่านี้จะเกิดในลักษณะฟิล์มของเหลวที่บริเวณขอบเกรน (grain boundary) ทำให้ความแข็งแรงโดยรวมของชิ้นงานลดลงอย่างมาก เมื่อชิ้นงานได้รับความเค้นจากการหดและขยายตัวระหว่างการเย็นตัว หากความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นสูงกว่าความแข็งแรงแตกหัก (rupture strength) ของขอบเกรนจะส่งผลให้ขอบเกรนแยกออกจากกันเป็นรอยแตก ความรุนแรงในการเกิดรอยแตกขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น ช่วงอุณหภูมิการแข็งตัว (solidification temperature range) การกระจายตัวของเฟสของเหลวระหว่างการแข็งตัว ปริมาณความเค้นจากการเย็นตัวเป็นต้น แบบจำลองการแตกระหว่างการแข็งตัวแสดงในรูปที่ 2-10 และลักษณะการแตกระหว่างการแข็งตัวแสดงดังรูปที่ 2-11



รูปที่ 2-8 ความเค้นที่บริเวณต่างๆระหว่างการเชื่อม [13]



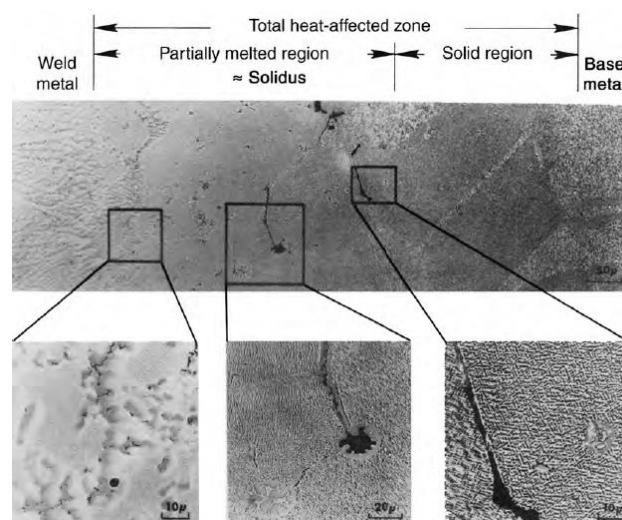
รูปที่ 2-9 ภาพจำลองลักษณะการแตกขณะแข็งตัว [14]



รูปที่ 2-10 รอยแตกขณะแข็งตัวของโลหะผสมเนื้อพินิกเกิล บริเวณสี่เหลี่ยมที่ลูกศรชี้คือเฟสที่มีส่วนผสมยูเทคติกซึ่งเกิดขึ้นจากน้ำโลหะที่มีธาตุปริมาณผสมอยู่มาก (solute rich liquid) ในช่วงท้ายของการแข็งตัว ซึ่งเป็นเฟสที่ช่วยยับยั้งการแตก (crack healing) [11]

2.2.2 การแตกขณะร้อน (hot cracking)

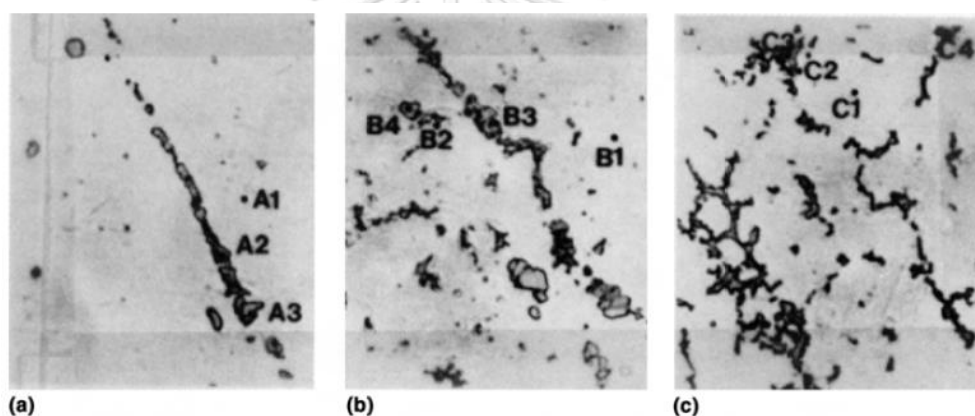
การแตกขณะร้อนเกิดขึ้นเมื่อมีการเชื่อมมากกว่าหนึ่งครั้งทำให้เกิดเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเนื้อวัสดุแบบเป็นวัฏจักร (thermal cycle of welding) การที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วนี้ส่งผลบริเวณกระทบร้อนโดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอนุภาคแกมมาไพรม์ที่ตกตะกอนอยู่จะละลายตัวกลับเข้าไปในเนื้อพื้นและตกตะกอนใหม่ (reprecipitate) เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงอย่างรวดเร็วทำให้นิวส์ตอยอยู่ในสภาวะที่ผ่านการบ่มแข็ง เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซ้ำหลายครั้งเป็นสาเหตุให้เกิดรอยแตกกว้างขึ้นในบริเวณกระทบร้อน ลักษณะรอยแตกขณะร้อนดังแสดงในรูปที่ 2-11



รูปที่ 2-11 รอยแตกขณะร้อนที่ปรากฏในบริเวณกระทบร้อนของวัสดุ U-700 [6]

2.2.3 การแตกจากการหลอมเหลวของเฟสที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ (liquation cracking)

การแตกจากการหลอมเหลวของเฟสที่มีจุดหลอมเหลวต่ำดังแสดงในรูปที่ 2-12 เกิดในบริเวณกระแทกร้อนโดยเป็นผลจากการหลอมเหลวของเฟสที่มีจุดหลอมเหลวต่ำที่บริเวณขอบเกรน เช่น คาร์ไบด์ Laves และ Sigma เป็นต้น ปัจจัยที่มีผลต่อความรุนแรงในการเกิดการแตกจากการหลอมเหลวบางส่วน ได้แก่ ขนาดเกรน ลักษณะของขอบเกรน การให้และถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยเชื่อมและส่วนผสมทางเคมีของโลหะ ดังแสดงในตารางที่ 2-5 โดยการหลอมเหลวของเฟสที่มีจุดหลอมเหลวต่ำยังคงเป็นปัญหาในโลหะผสมพิเศษเนื้อพินิกเกิลที่มีกลไกการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอน เช่น อินโคเนล 738 ที่มีส่วนผสมทางเคมีคล้ายคลึงกับ โลหะผสมพิเศษเนื้อพินิกเกิลเกรด GTD-111 ซึ่งเป็นโลหะที่สนใจในงานวิจัยนี้



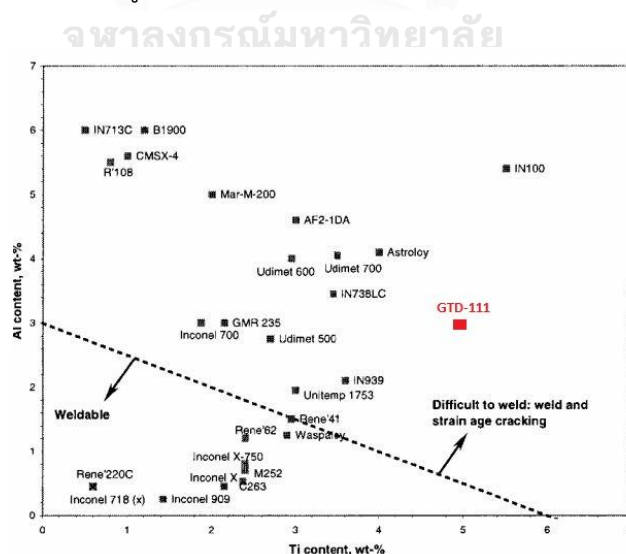
รูปที่ 2-12 การแตกจากการหลอมเหลวของเฟสที่มีจุดหลอมเหลวต่ำในอินโคเนล 718 [6]

ตารางที่ 2-5 เฟสที่แตกจากการหลอมเหลวของเฟสที่มีจุดหลอมเหลวต่ำในโลหะผสมต่างๆ [14]

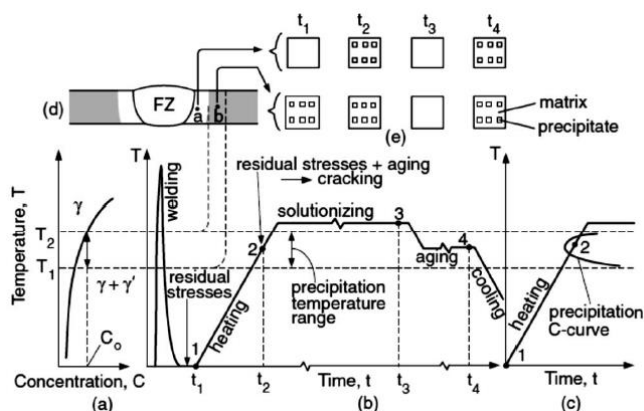
ชั้นคุณภาพของโลหะ	เฟสที่ทำให้เกิด Liquation cracking
Udimet 700	M_3B_2
18 Ni Maraging Steel	Titanium Sulphide
Hastelloy X	M_6C
Incoloy 903	MC and MNP Phosphides
Inconel 738	MC-type carbide, gamma prime, M_2SC , M_3B_2
Inconel 600	Ti(CN), Cr_7C_3
Inconel 718	NbC, Laves
DS Rene 80	MC-type carbide, gamma prime, M_5B_3
Austenitic A286	TiC

2.2.4 การแตกขณะให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม (postweld heat treatment cracking)

การแตกขณะให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมหรือการแตกจากความเครียดในการบ่มแข็ง (strain age cracking) มีจุดเริ่มต้นในบริเวณกระบอกเชื่อมและอาจขยายวงกว้างไปถึงบริเวณหลอมละลายและบริเวณเนื้อพื้ระหว่างกรรมวิธีทางความร้อนหรือการทำงานที่อุณหภูมิสูง การประเมินความสามารถในการเชื่อม (weldability) ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้ที่ผลิตในด้านการต้านทานต่อการแตกขณะให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเบื้องต้นสามารถทำได้โดยพิจารณาปริมาณไทเทเนียมและอะลูมิเนียมซึ่งมีผลต่อการเกิดอนุภาคแกมมาไพร์มดังรูปที่ 2-13 โดยวัสดุที่มีปริมาณไทเทเนียมและอะลูมิเนียมสูงกว่าเส้นประจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุที่เชื่อมได้ยากมักพบปัญหาการแตกขณะแข็งตัวและการแตกจากการได้รับความร้อนหลังการเชื่อม โดยการแตกขณะได้รับความร้อนหลังการเชื่อมนี้เป็นผลจากการลดลงของความสามารถในการคลายความเค้น (stress relaxation) อันเป็นผลมาจากการตกผลึกของอนุภาคแกมมาไพร์มระหว่างการให้ความร้อนหลังการเชื่อมทำให้ coherency stress ในเนื้อพื้เพิ่มสูงขึ้นซึ่งส่งผลให้ความเหนียว (ductility) ของเนื้อพื้ลดลง ประกอบกับการมีความเค้นตกค้าง (residual stresses) ในเนื้อวัสดุซึ่งเกิดจากการหดและขยายตัวของเนื้อวัสดุอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างกระบวนการเชื่อม โดยเมื่อความเค้นจากสองกระบวนการสูงพอจะส่งผลให้เกิดการแตกขึ้นในเนื้อวัสดุ ขั้นตอนการแตกขณะให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมแสดงในรูปที่ 2-14



รูปที่ 2-13 ผลของปริมาณไทเทเนียมและอะลูมิเนียมต่อการแตกระหว่างกรรมวิธีทางความร้อน [7]



รูปที่ 2-14 ภาพจำลองขั้นตอนการแตกขณะให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม [15]

2.3 กรรมวิธีทางความร้อน

จากปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเชื่อมพบว่าเกิดรอยแตกขึ้นในชิ้นงานเชื่อมซึ่งมีสาเหตุมาจากโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากความร้อนที่ได้รับจากการเชื่อม จึงมีความพยายามในการแก้ปัญหารอยแตกเหล่านี้โดยการนำชิ้นงานเชื่อมไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (heat treatment) เพื่อปรับปรุงโครงสร้างของวัสดุให้เหมาะสมทั้งก่อนและหลังการเชื่อม โดยกรรมวิธีทางความร้อนทำให้เกิดกลไกต่างๆดังต่อไปนี้

- ลดความเค้นตกค้างภายในเนื้อวัสดุ
- ปรับปรุงการเรียงตัวของอะตอมของธาตุต่างๆให้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ
- ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น (grain growth)
- ช่วยให้เกิดการตกผลึกซ้ำ (recrystallization) ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีความสม่ำเสมอยิ่งขึ้น
- ละลายบางเฟสกลับเข้าไปในเนื้อพื้น
- ช่วยให้เกิดเฟสใหม่จากการตกตะกอนของสารละลายของแข็ง (precipitate from solid solution)
- ส่งผลให้อะตอมของธาตุที่อยู่ในบรรยากาศแพร่เข้ามาละลายที่บริเวณผิวของวัสดุในรูปของสารละลายของแข็งที่ผิว หรือเกิดเป็นสารประกอบที่บริเวณผิว

กรรมวิธีทางความร้อนในโลหะผสมพิเศษ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 6 กระบวนการหลัก ได้แก่

1. การอบคลายตัว (Stress relieving)
2. การอบอ่อนระหว่างกระบวนการผลิตแบบขึ้นรูป (In-Process annealing)

3. การอบอ่อนสมบูรณ์ (Full annealing)
4. การอบอ่อนเพื่อการละลายของเฟส (Solution annealing)
5. การอบเพื่อการเคลือบผิวโดยวิธีการแพร่ซึม (Coating diffusion)
6. การบ่มแข็งเพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเฟสที่ต้องการ (Precipitation hardening) [6]

โดยงานวิจัยฉบับนี้ให้ความสนใจในอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของวัสดุเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 ให้เหมาะสมสำหรับการเชื่อมและลดปัญหาการแตกร้าวในชิ้นงานอันเป็นผลมาจากการเชื่อม

2.4 การซ่อมแซมใบพัดกังหันก๊าซที่ผลิตจากโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล

เมื่อใบพัดกังหันก๊าซผ่านการใช้งานในสภาวะที่รุนแรงนั้นคือมีอุณหภูมิสูงและมีอัตราการไหลของลมผ่านใบพัดสูง ทำให้ส่วนต่างๆของใบพัดกังหันก๊าซมีการสึกหรอจึงต้องมีการซ่อมแซมใบพัด โดยการซ่อมแซมใบพัดกังหันก๊าซจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆได้แก่

1. การซ่อมแซมเบื้องต้น เป็นการซ่อมแซมที่หน้างาน (field) โดยมีจุดประสงค์เพื่อใช้ระยะเวลาการซ่อมแซมให้น้อยที่สุดแม้ว่าประสิทธิภาพทำงานของใบพัดกังหันก๊าซจะลดลง การซ่อมแซมเบื้องต้นที่สามารถทำได้ที่หน้างาน เช่น การหยุดการแตกโดยการกำจัดจุดแหลมคม (crack tip) ที่เป็นจุดสะสมความเค้น (stress concentration)
2. การซ่อมแซมเต็มรูปแบบ เมื่อใช้งานใบพัดกังหันก๊าซไประยะหนึ่งมักพบความเสียหายซึ่งไม่สามารถซ่อมแซมที่หน้างานได้ อาทิเช่น รอยแตกที่หน้าใบพัด (airfoil) หรือการแตกที่บริเวณปลายของใบพัดซึ่งจำเป็นต้องใช้การเชื่อมซ่อมอย่างเป็นระบบ

ในประเทศไทยนั้นการซ่อมแซมใบพัดกังหันก๊าซนั้นทำโดยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสและไทเทเนียมเป็นหลักโดยมีผู้ให้บริการเพียงไม่กี่ราย สำหรับการซ่อมแซมใบพัดด้วยการเชื่อมเลเซอร์นั้นนับว่าเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างใหม่ในประเทศไทย อย่างไรก็ตามกระบวนการพื้นฐานที่ใช้ในการซ่อมแซมใบพัดที่เกิดความเสียหายนั้นมีความคล้ายคลึงกัน โดยจะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. การตรวจสอบก่อนการซ่อมแซมเพื่อพิจารณาความรุนแรงของความเสียหายและประเมินวิธีการซ่อมและตรวจสอบคุณภาพที่เหมาะสม
2. การกำจัดชั้นเคลือบ โดยทั่วไปใบพัดกังหันก๊าซจะมีการเคลือบสารประกอบโลหะชนิดพิเศษเพื่อเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนและการเกิดออกซิเดชันจากการใช้งานในอุณหภูมิสูง ส่วนประกอบสำคัญในชั้นเคลือบนี้ได้แก่นิกเกิล โครเมียม อิทเทรียมและอะลูมิเนียมซึ่งอาจส่งผลให้

สมบัติของรอยเชื่อมเปลี่ยนแปลงไปจากการมีธาตุปนเปื้อน นอกจากนี้การกำจัดชั้นเคลือบยังช่วยกำจัดออกไซด์ที่ตกค้างบนผิวชิ้นงานได้อีกด้วย

3. การตรวจสอบรอยแตกที่บริเวณผิวโดยการทำการทดสอบแบบแทรกซึม (penetration test) โดยใช้ของเหลวที่เป็นชนิดเรืองแสง (fluorescence penetrant) ซึ่งมีความไวในการตรวจสอบรอยแตกสูงกว่าสารแทรกซึมชนิดอื่น นอกจากนี้ยังอาจมีการวิเคราะห์ความหนาชิ้นงานโดยใช้คลื่นเสียง (ultrasonic testing) เพื่อพิจารณาความหนาที่เหลืออยู่ว่าเพียงพอต่อการเชื่อมซ่อมหรือไม่

4. การซ่อมแซมเพื่อคืนขนาด (dimensional repair) ทำได้โดยการเชื่อมลงบนบริเวณที่สึกหรอ ซึ่งความหนาและจำนวนชั้นของรอยเชื่อมที่ต้องการจะขึ้นกับปริมาณความเสียหายของใบพัด โดยทั่วไปความเสียหายที่บริเวณปลายของใบพัดกึ่งหน้ากึ่งหลังที่ 1 นั้นมักต้องการการเชื่อมเพียง 1-2 มิลลิเมตร (millimeters; mm) และใช้การเชื่อมเพียง 1-2 แกว (pass) เท่านั้น ทั้งนี้การให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมสามารถช่วยลดปัญหาการแตกจากการเชื่อมและการแตกขณะให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม

5. การตกแต่งชิ้นงานให้ได้ขนาดที่เหมาะสม (machining) โดยเป็นการขัดเอาเนื้อรอยเชื่อมส่วนเกินออกเพื่อให้ใบพัดมีขนาดและรูปร่างเหมือนใบพัดใหม่ตามการออกแบบจากผู้ผลิตซึ่งเป็นเป้าหมายหลักในการซ่อมแซมใบพัดกึ่งหน้ากึ่งหลัง

6. การให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคทั้งหมดของชิ้นงานให้กลับสู่สภาพที่เหมาะสมกับการใช้งาน

7. การเคลือบผิวเพื่อป้องกันการเกิดการกัดกร่อนและการเกิดออกซิเดชันจากการใช้งานที่อุณหภูมิสูง

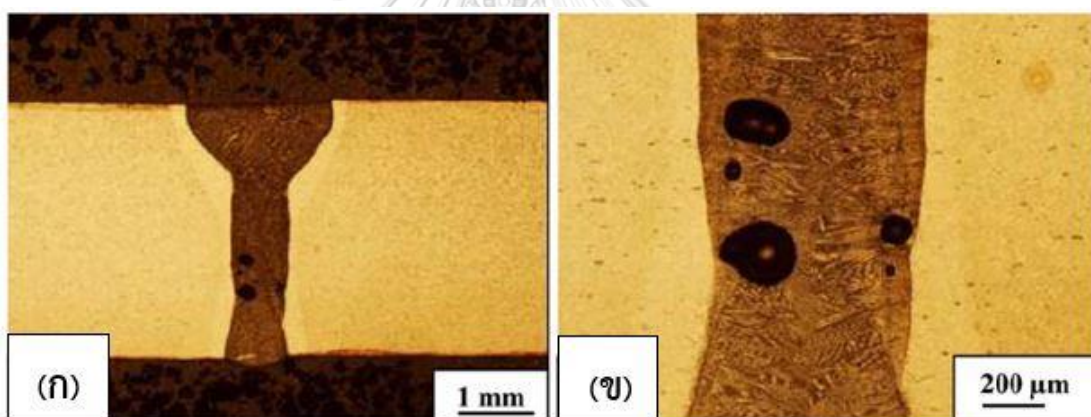
นอกจากขั้นตอนการตรวจสอบก่อนการซ่อมแซมเพื่อคืนขนาดแล้ว ยังมีการใช้การทดสอบแบบแทรกซึมด้วยสารเรืองแสงในการตรวจสอบรอยแตกที่เปิดสู่ผิวในขั้นตอนต่างๆ ได้แก่ขั้นตอนหลังการเชื่อม หลังกรรมวิธีทางความร้อน รวมทั้งในขั้นตอนหลังการตกแต่งชิ้นงาน โดยทั่วไปการตรวจสอบจะให้ความสนใจรอยแตกที่เปิดขึ้นสู่ผิวในขั้นตอนต่างๆ มากกว่ารอยแตกซึ่งอยู่ลึกลงไปใต้อันเชื่อม เนื่องจากการที่ชั้นเชื่อมมีความบางเพียง 1-2 มิลลิเมตร จึงมักพบรอยแตกที่ไม่เป็นที่ยอมรับ (unacceptable crack) ได้ในการตรวจสอบด้วยการทดสอบแบบแทรกซึมด้วยสารเรืองแสงในแต่ละขั้นตอน นอกจากนี้ยังสามารถใช้การตรวจสอบด้วยรังสี (radiographic testing) เพื่อตรวจสอบรอยแตกใต้ผิว

2.5 ปรีทศน์วรรณกรรม

1. Effect of pre and post weld heat treatment on metallurgical and tensile properties of inconel 718 alloy butt joints welded using 4 kW Nd:YAG laser [16]

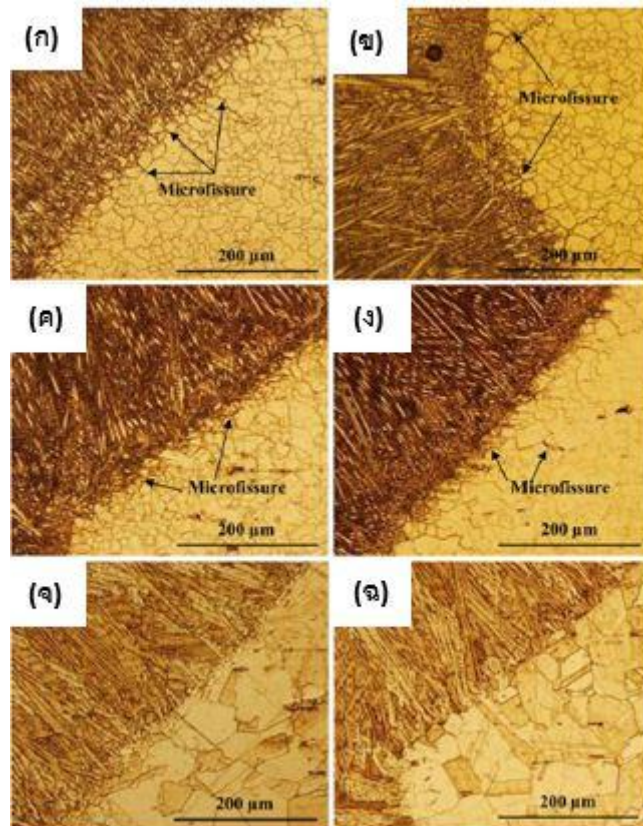
งานวิจัยฉบับนี้มุ่งศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนก่อนและหลังการเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของอินโคเนล 718 ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการศึกษาโดยใช้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนเชื่อม 2 สภาวะ ได้แก่ 1. การทำละลายเฟสกลับลงไปที่เนื้อพื้น (solution treatment; STed) 2. การทำละลายและบ่มแข็ง (solution treatment and aging; STAed) จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปเชื่อมด้วย Nd:YAG laser ตามด้วยกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม

โดยผลการทดลองพบว่าเกิดรอยแตกและตำหนิต่างๆในทุกลักษณะทดสอบ ยกเว้นชิ้นทดสอบที่เผาทำละลายและบ่มแข็ง (STAed) ทั้งก่อนและหลังการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2-15 และรูปที่ 2-16



รูปที่ 2-15 (ก) ภาพโดยรวมของรอยเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านการทำละลายและบ่มแข็งก่อนการเชื่อมและบ่มแข็งหลังการเชื่อม

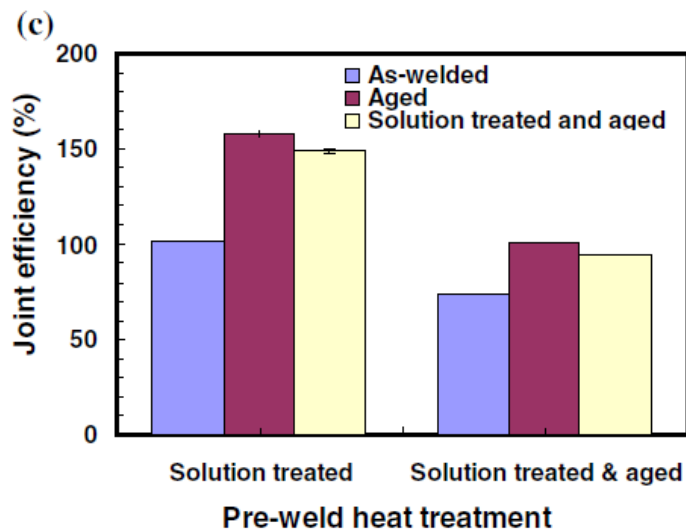
(ข) รูปพรุนขนาดใหญ่ที่พบในบริเวณหลอมละลาย [16]



รูปที่ 2-16 รอยแตกและหลุมขนาดเล็กบริเวณกระตบร้อน [16]

- ก) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ STed ก่อนเชื่อม แต่ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังเชื่อม
- ข) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ STAed ก่อนเชื่อม แต่ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังเชื่อม
- ค) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ STed ก่อนเชื่อม และบ่มแข็งหลังเชื่อม
- ง) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ STAed ก่อนเชื่อม และบ่มแข็งหลังเชื่อม
- จ) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ STed ก่อนเชื่อม และทำ STAed หลังเชื่อม
- ฉ) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ STAed ก่อนเชื่อม และทำ STAed หลังเชื่อม

นอกจากนี้ยังพบว่า การบ่มแข็งทั้งก่อนและหลังการเชื่อมยังสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงบริเวณเนื้อพื้นให้แก้วสตุได้ประมาณสองเท่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการทำให้ละลายเพียงอย่างเดียว อีกทั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเชื่อมให้ดียิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2-17



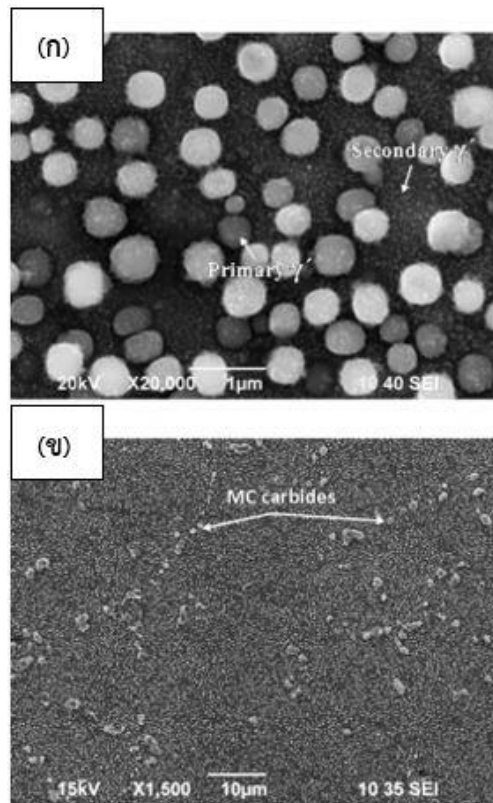
รูปที่ 2-17 ความสามารถในการเชื่อม [16]

2 Microstructural response to heat affected zone cracking of prewelding heat treated Inconel 939 superalloy [17]

งานวิจัยฉบับนี้ทำการศึกษาค่าอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมซึ่งส่งผลต่อรอยแตกบริเวณกระทบร้อนในวัสดุอินโคเนล 939 โดยการให้กรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆแก่ชิ้นงานหลังจากนั้นจึงนำไปเชื่อมด้วยวิธีอาร์คทั้งสแตนแก๊สปกคลุม (Tungsten inert Gas Welding) เป็นจำนวน 1 แถว

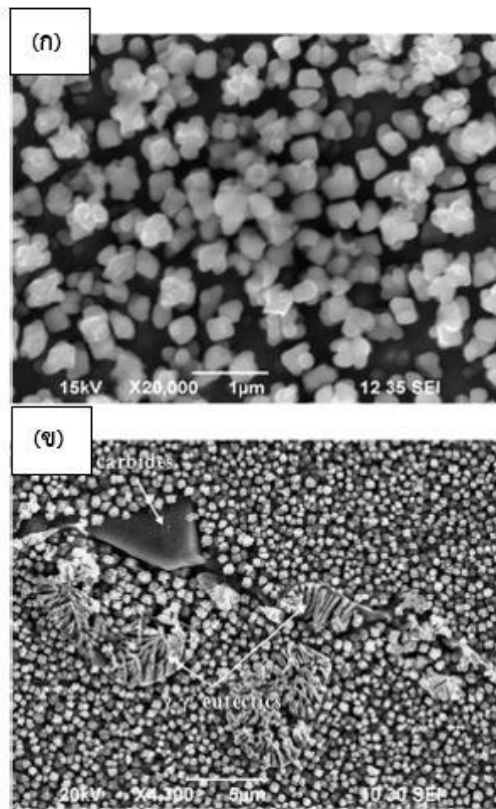
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูง เนื้อวัสดุเกิดการละลายอย่างสมบูรณ์ของเฟสสารประกอบเดิม ทำให้ได้โครงสร้างที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของเฟสแกมมาไพร์มปฐุมภูมิและแกมมาไพร์มทุติยภูมิที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2-18 ในขณะที่ชิ้นงานที่ทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำจะพบเฟสแกมมาไพร์มปฐุมภูมิและแกมมาไพร์มทุติยภูมิที่มีลักษณะเป็นลูกบาศก์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ทั้งยังพบคาร์ไบด์ชนิดหยาบและเฟสไม่เสถียรของแกมมา-แกมมาไพร์มยูเทคติคบริเวณขอบเกรนดังแสดงในรูปที่ 2-19

นอกจากนี้การบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงยังพบชั้นฟิล์มหลอมเหลวในเนื้อวัสดุ (liquid film migration (LFM) features) ดังแสดงในรูปที่ 2-20 แต่ไม่พบรอยแตกจากการหลอมเหลวของเฟสที่มีจุดหลอมเหลวต่ำเนื่องจากชิ้นงานทดสอบไม่ได้รับความเค้นที่สูงเพียงพอ ในขณะที่ชิ้นงานที่บ่มแข็งด้วยอุณหภูมิต่ำจะพบรอยแตกขนาดเล็กใกล้กับบริเวณกระทบร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2-21 แต่ไม่พบความแตกต่างของความแข็งแรงจากการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่างกัน



รูปที่ 2-18 โลหะผสมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม

- ก) การกระจายตัวของแกมมาไพรม์ปฐมภูมิและแกมมาไพรม์ทุติยภูมิ
- ข) การกระจายตัวของ MC คาร์ไบต์ [17]

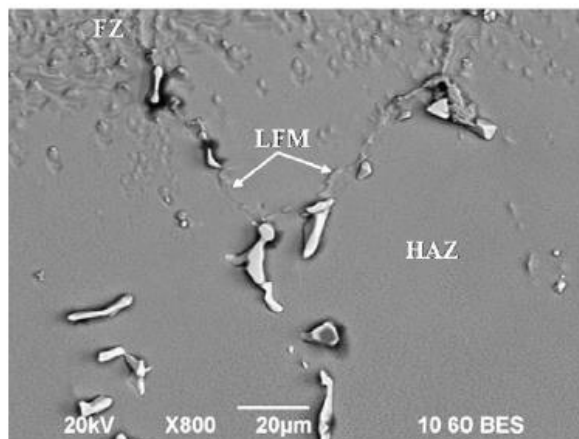


รูปที่ 2-19 โลหะผสมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม (บ่มแข็งที่ 850 และ 900 องศาเซลเซียส)

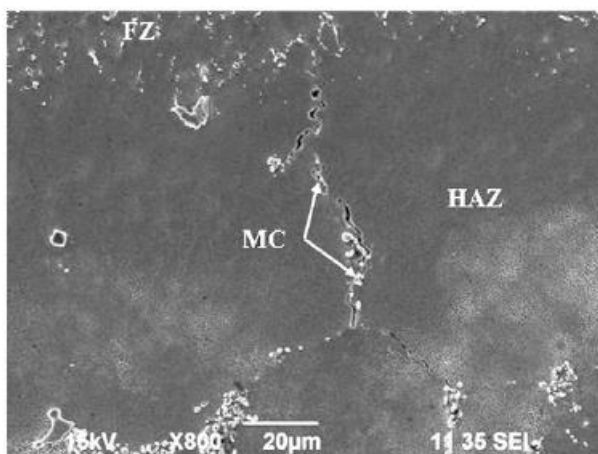
ก) การกระจายตัวของแกมมาไพร์ม

ข) MC คาร์ไบด์และแกมมา-แกมมาไพร์มยูเทคติกที่ละลายไม่สมบูรณ์บริเวณขอบเกรน [17]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-20 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงชั้นฟิล์มหลอมเหลวใกล้กับบริเวณหลอมเหลวของรอยเชื่อมในชิ้นงานที่บ่มแข็งที่อุณหภูมิสูง [17]



รูปที่ 2-21 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงรอยแตกขนาดเล็กใกล้กับบริเวณ
 กระทบร้อนในชิ้นงานที่บ่มแข็งด้วยอุณหภูมิต่ำ [17]

โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาในข้างต้นพบว่าการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมแก๊สโลหะผสมพิเศษสามารถปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษซึ่งส่งผลให้ลดโอกาสในการเกิดรอยแตกร้าวจากการเชื่อมโลหะผสมพิเศษด้วย TIG และเลเซอร์ได้ งานวิจัยฉบับนี้จึงต้องการจะศึกษาถึงผลของอุณหภูมิการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมที่แตกต่างกันซึ่งส่งผลต่อขนาดและความแข็งแรงของอนุภาคแกมมาไพร์มในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิล GTD-111 เพื่อพิจารณาถึงขนาดและความแข็งแรงของอนุภาคแกมมาไพร์มที่เหมาะสมในการลดโอกาสในการเกิดรอยแตกร้าวจากการเชื่อม GTD-111 ด้วยเลเซอร์พลังงานสูงและการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. ชิ้นส่วนไบพัตกัณฑ์ก้าซเครื่องผลิตไฟฟ้าภาคพื้นดินซึ่งเป็นโลหะผสมพิเศษเนื้อพินิกเกิลที่ได้จากการหล่อเกรด GTD-111

2. ลวดเชื่อมอินโคเนล 625 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 มิลลิเมตร

3. ลวดเชื่อมอินโคเนล 718 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 มิลลิเมตร

- การเชื่อมและการทำลาย

1. เครื่องเชื่อมเลเซอร์ชนิด Nd:Yag laser แบบ pulse กำลังเครื่องสูงสุด 500W

2. แก๊สอาร์กอน

3. เต้าเผาอุณหภูมิสูง

- การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

1. เครื่องตัดชิ้นงาน

2. อุปกรณ์ขึ้นเรือนเย็น

3. กระดาษทรายความละเอียด 80 120 220 320 600 1000 1200 และ 2000

4. จานขัดและผ้าสักหลาด

5. ผงอะลูมินาขนาด 1 ไมครอน

6. กรดมาเบิล

7. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

9. โปรแกรมวิเคราะห์ภาพอิมเมจเจ (Image Analyzer; ImageJ)

- การทดสอบความแข็ง

1. เครื่องวัดความแข็งไมโครวิกเกอร์

3.2 วิธีการทดลอง

- ชิ้นงานที่ใช้ในการเชื่อม

ชิ้นงานที่ใช้ในการเชื่อมมีหนา 3 มิลลิเมตร และมีขนาดโดยประมาณในแนวกว้างและแนว ยาว 2 และ 4 เซนติเมตร (centimeters; cm) ตามลำดับ

- กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม (preweld heat treatment)

ทำการให้กรรมวิธีทางความร้อนชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้เหล็กเกรด GTD-111 ที่ สภาวะต่างๆดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ค่าสภาวะต่างๆของกรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม

สภาวะ ที่	คำอธิบายสภาวะ	การทำละลาย	การบ่มแข็ง
1	As-received (A.R.)	-	-
2	Solution treatment (S.T.)	1200 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง	-
3	Over aging 1 (O.A.1)	1160 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง	1025 องศาเซลเซียส 16 ชั่วโมง
4	Over aging 2 (O.A.2)	1140 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง	1025 องศาเซลเซียส 16 ชั่วโมง
5	Over aging 3 (O.A.3)	1120 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง	1025 องศาเซลเซียส 16 ชั่วโมง

หมายเหตุ - ทุกสภาวะปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

- การเชื่อมเลเซอร์

นำชิ้นงานที่ 1-5 ตามตารางที่ 3-1 มาทำการเชื่อมเลเซอร์โดยใช้เครื่องเชื่อมแบบ semi-automatic โดยใช้โลหะเติมเป็นลวดเชื่อมอินโคเนล 625 และ ลวดเชื่อมอินโคเนล 718 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 มิลลิเมตร ที่ความเร็วในการเชื่อม 120 มิลลิเมตรต่อนาที เป็นจำนวน 1 แถว ค่าตัวแปรในการเชื่อมดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมเลเซอร์

ความต่างศักย์ (โวลต์)	ความถี่ (เฮิร์ต)	พลังงาน (วัตต์)	ช่วงพัลส์ (วินาที)	พลังงานสูงสุด (กิโลวัตต์)	ขนาดเลเซอร์ (มิลลิเมตร)
420	29	500	0.003	0.5	1.7

- กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม (postweld heat treatment)
นำชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมไปทำละลายที่ 1,200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และการบ่มแข็งที่ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคให้มีความสม่ำเสมอ

- การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทำใน 3 ขั้นตอนคือ 1) หลังให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม 2) หลังการเชื่อม และ 3) หลังให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโดยการนำชิ้นงานมาวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงที่กำลังขยายและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเริ่มจากการตัดชิ้นงานที่กึ่งกลางรอยเชื่อมด้วยเครื่องดิสโคทอมโดยมีการหล่อเย็นด้วยน้ำตลอดการตัด จากนั้นจึงขึ้นเรือนเย็นแล้วนำไปขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80–2000 และขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินาขนาด 1 ไมครอนตามวิธีการทางโลหวิทยาจนได้ชิ้นงานที่มีผิวเรียบมันจึงทำการกัดกรด (Etch) ด้วยกรด Marble เพื่อให้สามารถเห็นโครงสร้างจุลภาคได้อย่างชัดเจน

- การวัดความแข็ง
ทดสอบความแข็งของชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์น้ำหนักกด 0.5 kgf

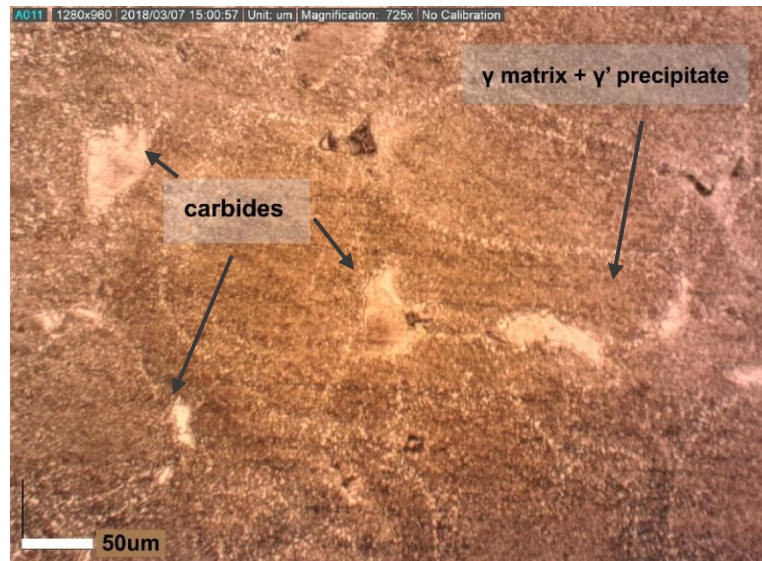
บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

สมบัติเชิงกลของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มเป็นหลักเนื่องจากอนุภาคแกมมาไพร์มเป็นเฟสสำคัญในกลไกการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอนในโครงสร้างของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 ทั้งนี้เมื่ออนุภาคแกมมาไพร์มได้รับความร้อนเป็นเวลานานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวในโครงสร้างจุลภาคซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 มีการลดลงตามไปด้วยซึ่งส่งผลทำให้เกิดความเสียหายตามมา โดยความเสียหายในหลายกรณีสามารถซ่อมแซมส่วนที่เสียหายหรือการแตกร้าวนี้ได้โดยกรรมวิธีการเชื่อมต่างๆ โดยเฉพาะการเชื่อมแบบ TIG และเลเซอร์ อย่างไรก็ตามในบางกรณีการแตกร้าวภายหลังการเชื่อมก็สามารถเกิดขึ้นมาได้เช่นกัน งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาถึงผลของกรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมต่อขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มและความแข็งของวัสดุเพื่อลดโอกาสในการเกิดรอยแตกในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 ภายหลังการเชื่อมด้วยเลเซอร์และภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม

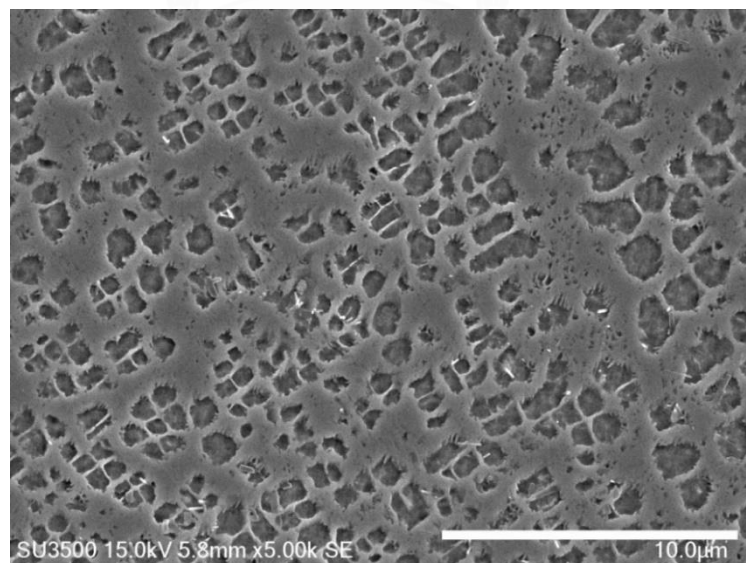
4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตั้งต้น

ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตั้งต้น (A.R.) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงด้วยเลนส์วัตถุกำลังขยาย 725X แสดงในรูปที่ 4-1 พบโครงสร้างเดนไดรต์ซึ่งเป็นผลมาจากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการหล่ออันเป็นกรรมวิธีหลักในการขึ้นรูปใบพัดเครื่องจักรกังหันก๊าซ นอกจากนี้ยังพบโครงสร้างคาร์ไบด์ขนาดใหญ่และอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 4-1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน A.R. จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 725X

เมื่อพิจารณาที่กำลังขยายสูงขึ้นภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5000X แสดงในรูปที่ 4-2 เผยให้เห็นอนุภาคแกมมาไพร์มหลากหลายขนาดกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอในเนื้อพื้นซึ่งเป็นผลมาจากชิ้นงานตั้งต้นเป็นชิ้นส่วนที่ผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานานทำให้อนุภาคแกมมาไพร์มเกิดการโตและเปลี่ยนรูปร่างไปจากอนุภาคแกมมาไพร์มในชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 มาตรฐานซึ่งมีลักษณะเป็นรูสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ $0.202 \mu\text{m}^2$ กระจายตัวสม่ำเสมออยู่ทั่วเนื้อพื้น [18]

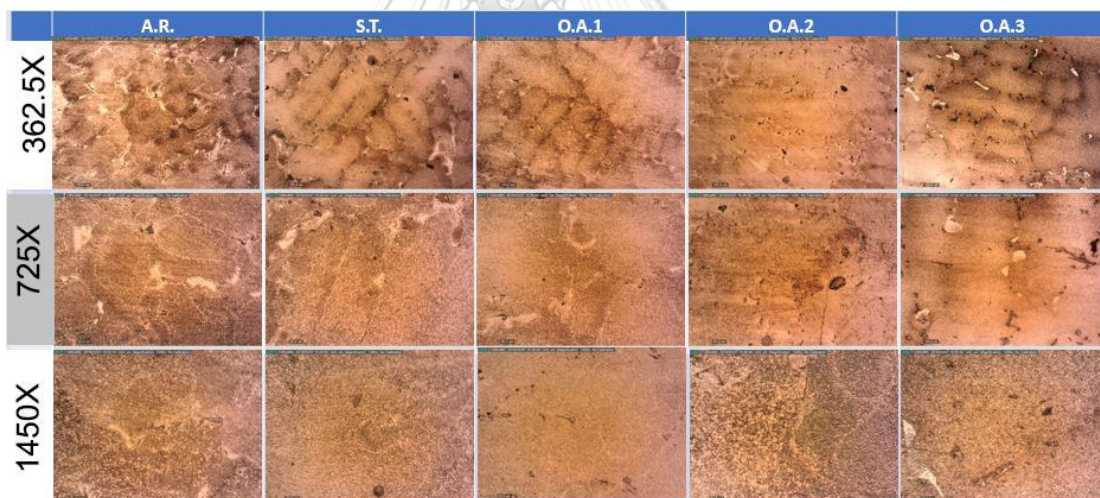


รูปที่ 4-2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน A.R. จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 5000X

4.2 ชิ้นงานที่ผ่านการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม

4.2.1 โครงสร้างจุลภาค

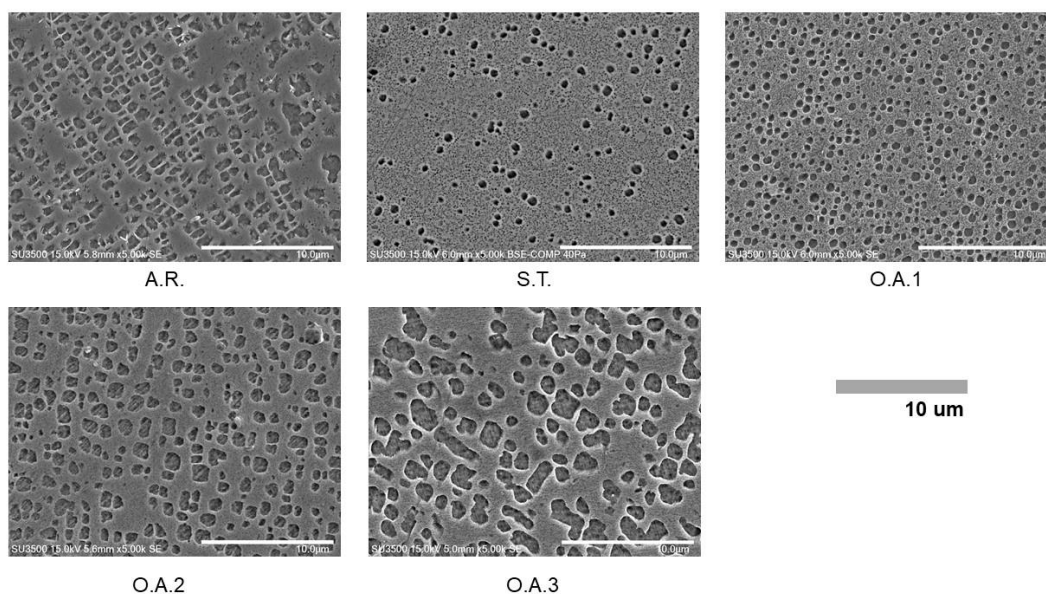
ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการกรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมในสภาวะต่างๆ ดังตารางที่ 3-1 โดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่เลนส์วัตถุกำลังขยายขนาด 362.5X, 725X และ 1450X แสดงในรูปที่ 4-3 พบว่าภาพถ่ายที่กำลังขยาย 362.5X และ 725X ของชิ้นงานที่ผ่านการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมทุกสภาวะมีโครงสร้างจุลภาคในลักษณะโครงสร้างเดนไดรต์อันเป็นลักษณะโครงสร้างที่เกิดจากการแข็งตัวของชิ้นงานหล่อซึ่งเป็นผลมาจากชิ้นงานตัวอย่างเป็นชิ้นส่วนจากใบพัดของเครื่องจักรกังหันแก๊สซึ่งมีการใช้กรรมวิธีการขึ้นรูปแบบหล่อในการผลิต เมื่อพิจารณาที่เลนส์วัตถุกำลังขยาย 1450X สามารถสังเกตเห็นอนุภาคแกมมาไพร์มมีลักษณะเป็นจุดสีเข้มขนาดเล็กระบายอยู่ทั่วเนื้อพื้นแต่ไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างของขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มในแต่ละสภาวะได้ด้วยรูปจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



รูปที่ 4-3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 ที่ผ่านการกรรมวิธีทางความร้อนต่างๆโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 362.5X, 725X และ 1450X

จึงทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทุกสภาวะด้วยกำลังขยายที่สูงขึ้นโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 5000X ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4-4 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตั้งต้น (A.R.) ในรูปที่ 4-4 ซึ่งมีอนุภาคแกมมาไพร์มหลากหลายขนาดกระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นชิ้นงาน S.T. ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการทำละลายที่ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มใน

ชิ้นงาน S.T. ส่วนใหญ่สามารถละลายกลับลงไปใ้เนื้อพื้นได้เกือบสมบูรณ์หลงเหลือเพียงอนุภาคแกมมาไพร์มที่มีขนาดตั้งต้นใหญ่ผิดปกติอันเป็นผลมาจากการโตเมื่อได้รับความร้อนจากการใช้งานเป็นระยะเวลานานซึ่งไม่สามารถละลายได้หมดกลายเป็นอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดเล็กตกค้างในเนื้อวัสดุ สำหรับชิ้นงาน O.A.1 พบว่าจากชิ้นงานตั้งต้นซึ่งมีอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่ผิดปกติเมื่อนำไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนด้วยการทำละลายที่ 1160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงสามารถละลายอนุภาคแกมมาไพร์มกลับลงไปใ้เนื้อพื้นได้น้อยกว่าชิ้นงานที่ผ่านการให้กรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง (S.T.) และเมื่อนำชิ้นงานไปให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 1025 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ทำให้อนุภาคแกมมาไพร์มที่หลงเหลืออยู่ในเนื้อพื้นเกิดการโตขึ้น ทำให้เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน O.A.1 ภายหลังจากให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมพบว่าชิ้นงาน O.A.1 มีอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่กว่าอนุภาคแกมมาไพร์มในชิ้นงาน S.T. ภายหลังจากให้กระบวนการทางความร้อนก่อนการเชื่อม สำหรับชิ้นงาน O.A.2 ในรูปที่ 4-4 เป็นการนำชิ้นงานตั้งต้นไปให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการทำละลายที่อุณหภูมิ 1140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามด้วยการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 1025 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง พบว่าเนื่องจากมีอุณหภูมิในการทำละลายที่ต่ำกว่าชิ้นงาน S.T. และชิ้นงาน O.A.1 ทำให้อนุภาคแกมมาไพร์มในชิ้นงาน O.A.2 สามารถละลายกลับลงไปใ้เนื้อพื้นได้น้อยกว่าอนุภาคแกมมาไพร์มในทั้งสองชิ้นงาน ประกอบกับมีการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการบ่มแข็งภายหลังจากให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการทำละลายทำให้อนุภาคแกมมาไพร์มที่ละลายไม่หมดนี้เกิดการโตต่อไป เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจึงพบอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่ในชิ้นงาน O.A.2 เช่นเดียวกับกับชิ้นงาน O.A.3 ซึ่งผ่านการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการทำละลายที่อุณหภูมิ 1120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งเป็นอุณหภูมิการทำละลายที่ต่ำที่สุดในการทดลองครั้งนี้ ตามด้วยการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 1025 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดใหญ่ที่สุดกว่าของทุกชิ้นงาน

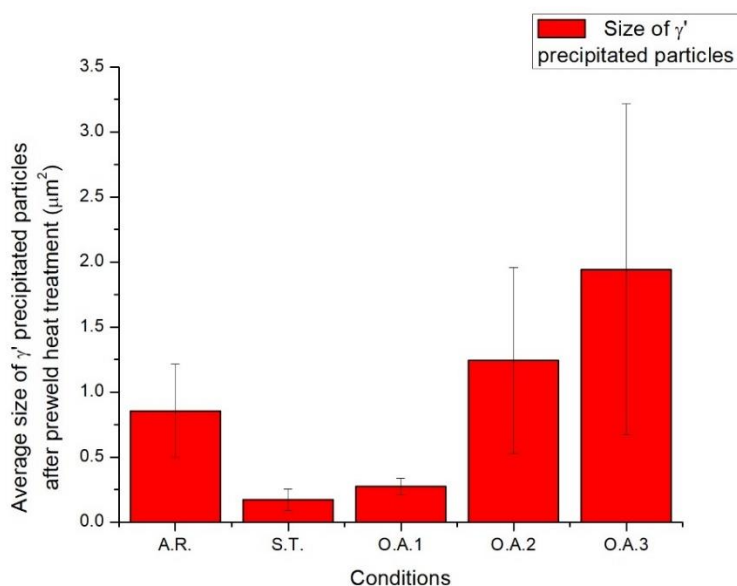


รูปที่ 4-4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111
 ภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนที่สภาวะต่างๆ

4.2.2 ขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์ม

หลังจากประเมินขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มคร่าวๆ ด้วยสายตาจึงทำการวัดขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพโดยการหาค่าเฉลี่ยพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์ม ได้แผนภูมิสรุพบขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์ม ดังแสดงในรูปที่ 4-5 พบว่าชิ้นงาน A.R. มีขนาดอนุภาคแกมมาไพร์ม ประมาณ $0.857 \mu\text{m}^2$ ซึ่งมีขนาดใหญ่มากกว่าอนุภาคแกมมาไพร์ม ในชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 มาตรฐานที่ยังไม่ผ่านการใช้งานซึ่งมีขนาดพื้นที่ประมาณ $0.202 \mu\text{m}^2$ [18] ประมาณ 3 เท่าแสดงให้เห็นถึงการเสื่อมสภาพของอนุภาคแกมมาไพร์มอันเนื่องมาจากการได้รับความร้อนจากการใช้งานต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลานาน ในขณะที่ชิ้นงาน S.T. ซึ่งมีอุณหภูมิในการทำละลายสูงที่สุดที่ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้อนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่สามารถละลายกลับสู่เนื้อพื้นได้เกือบสมบูรณ์ หลงเหลือเพียงอนุภาคแกมมาไพร์มซึ่งมีขนาดใหญ่ผิดปกติซึ่งไม่สามารถละลายได้หมดและเมื่อปล่อยชิ้นงานให้เย็นตัวในอากาศจากอุณหภูมิสูงก็สามารถเกิดการตกผลึกใหม่ของอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดเล็กละเอียดกระจายทั่วชิ้นงานทำให้เกิดโครงสร้างแบบผสม (bimodal structure) ระหว่างอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่และขนาดเล็กละเอียด แต่เนื่องจากข้อจำกัดของกระบวนการวัดขนาด รูปที่ 4-5 จึงทำการวัดเฉพาะอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่ในชิ้นงาน S.T. ซึ่งมีขนาด $0.174 \mu\text{m}^2$ เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคแกมมาไพร์มในชิ้นงาน A.R.

ซึ่งไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนด้วยการทำละลายและการบ่มแข็งพบว่า มีขนาดเล็กกว่าอนุภาคแกมมาไพร์มในชิ้นงาน A.R. ($0.857 \mu\text{m}^2$) ถึง 79% แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการทำละลายที่อุณหภูมิสูง 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สามารถละลายอนุภาคแกมมาไพร์มที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานานกลับสู่เนื้อพื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้ได้วัสดุโลหะผสมพิเศษเนื้อพินิกิลเกรด GTD-111 ซึ่งมีอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดเล็กกว่าอนุภาคแกมมาไพร์มในชิ้นงานมาตรฐานที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ($0.202 \mu\text{m}^2$) เพียงเล็กน้อย สำหรับชิ้นงาน O.A.1 ซึ่งใช้อุณหภูมิทำละลายที่ 1160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงซึ่งต่ำกว่าชิ้นงาน S.T. อีกทั้งยังมีการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการบ่มแข็งที่ 1025 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง เมื่อทำการวัดขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์ม มีขนาด $0.276 \mu\text{m}^2$ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคแกมมาไพร์ม ในชิ้นงาน S.T. โดยมีขนาดใกล้เคียงกับอนุภาคแกมมาไพร์มในชิ้นงานมาตรฐานที่ยังไม่ผ่านการใช้งานและมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคแกมมาไพร์มในชิ้นงาน A.R. มากถึง 68% สำหรับชิ้นงาน O.A.2 ที่ใช้อุณหภูมิการทำละลายต่ำลงเป็น 1140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามด้วยการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการบ่มแข็งที่ 1025 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาด $1.24 \mu\text{m}^2$ โดยมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคแกมมาไพร์มในชิ้นงาน A.R. ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนใดๆมากถึง 45% รวมไปถึงชิ้นงาน O.A.3 ซึ่งใช้อุณหภูมิในการทำละลายต่ำลงเป็น 1120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และมีการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการบ่มแข็งภายหลังการทำละลายทำให้ได้อนุภาคแกมมาไพร์ม ขนาด $1.94 \mu\text{m}^2$ ซึ่งใหญ่กว่าอนุภาคแกมมาไพร์มในชิ้นงาน A.R. ถึง 126% แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการทำละลายส่งผลอย่างมากต่อขนาดอนุภาคแกมมาไพร์ม อนุณหภูมิการทำละลายสูงแตกต่างกันเพียง 20 องศาเซลเซียสส่งผลต่อขนาดอนุภาคแกมมาไพร์ม ภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการทำละลายและการบ่มแข็งให้มีความแตกต่างกันได้มากถึง 78% (เมื่อเปรียบเทียบระหว่างขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มของชิ้นงาน O.A.1 และ O.A.2) โดยยิ่งอุณหภูมิในการทำละลายยิ่งต่ำ อนุภาคแกมมาไพร์มที่หลงเหลือในเนื้อวัสดุยิ่งมีขนาดใหญ่ แผนภาพเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มเฉลี่ยในชิ้นงานต่างๆภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมสรุปได้ดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 ขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มเฉลี่ยภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมที่สภาวะต่างๆ

4.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625

ภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการให้กรรมวิธีทางความร้อนในสภาวะที่แตกต่างกัน 5 สภาวะได้แก่ A.R. S.T. O.A.1 O.A.2 และ O.A.3 สภาวะละ 1 ชิ้นไปทำการเชื่อมแบบพอกผิว (bead on plate) ด้วยเครื่องเชื่อมเลเซอร์กำลัง 500 วัตต์ โดยมีการเติมรอยเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 ใช้ความเร็วในการเชื่อมประมาณ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที (2 mm/s) จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) ด้วยกำลังขยายเลนส์วัตถุ 362.5X ตัวอย่างชิ้นงานภายหลังการเชื่อมด้วยเลเซอร์แสดงในรูปที่ 4-6 (ก) และ (ข) พบว่าสามารถแยกแยะแนวของเนื้อลวดเชื่อมและเนื้อพื้นของวัสดุได้อย่างชัดเจนโดยรอยเชื่อมมีความลึกเฉลี่ยประมาณ 0.7 มิลลิเมตร และความกว้างเฉลี่ยประมาณ 2.3 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาบริเวณเนื้อลวดเชื่อมเนื่องจากใช้ลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 ซึ่งเป็นโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเช่นเดียวกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเกรด GTD-111 แต่มีปริมาณธาตุผสมอะลูมิเนียมและไทเทเนียมประมาณ 0.04 % ซึ่งต่ำกว่า โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเกรด GTD-111 ซึ่งมีอะลูมิเนียมและไทเทเนียมในปริมาณรวมกันมากกว่า 6%

อะลูมิเนียมและไทเทเนียมเป็นสองธาตุสำคัญในการจับตัวกับนิกเกิลเกิดเป็นอนุภาคแกมมาไพรม์ การมีอะลูมิเนียมและไทเทเนียมในปริมาณที่ต่ำจึงส่งผลให้ไม่พบอนุภาคแกมมาไพรม์ตกตะกอนในเนื้อลวดเชื่อมอินโคเนล 625 อีกทั้งอินโคเนล 625 ยังมีส่วนผสมของธาตุโครเมียมในปริมาณที่สูงถึง 20-30% ซึ่งธาตุโครเมียมมีส่วนช่วยในการป้องกันการเกิดการกัดกร่อนในเนื้อวัสดุทำให้ลวดเชื่อมอินโคเนล 625 มีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนที่สูงกว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 ซึ่งมีโครเมียมเป็นส่วนประกอบเพียง 14% เมื่อทำการกัดกรดเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยสารละลายมาเบิลจึงพบว่าสารละลายมาเบิลไม่สามารถทำปฏิกิริยาให้เกิดการเห็นความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคในเนื้อลวดเชื่อมอินโคเนล 625 ได้ เนื่องจากมีโครงสร้างที่อยู่ในรูปสารละลายของแข็งเนื้อพื้นแกมมาไม่มีเฟสอื่นปนทำให้ไม่สามารถเห็นความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคในเนื้อลวดเชื่อมอินโคเนล 625 ได้ ในขณะที่เนื้อพื้นโลหะผสมพิเศษเกรด GTD-111 ปรากฏโครงสร้างจุลภาคในลักษณะของโครงสร้างเดนไดรต์อันเป็นผลมาจากการรวมวิธีการขึ้นรูปแบบหล่อเช่นเดียวกับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนการเชื่อมด้วยเลเซอร์และปรากฏโครงสร้างคาร์ไบด์ขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงาน

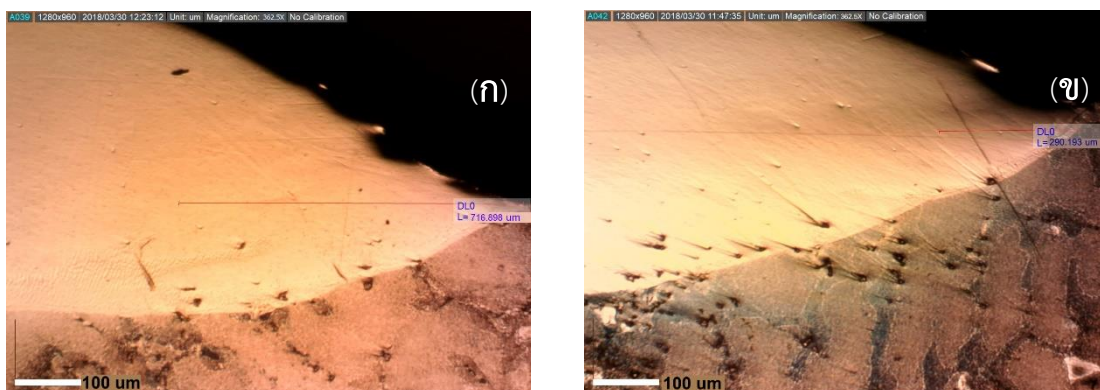
นอกจากนี้ยังไม่ปรากฏรอยแตกทั้งในบริเวณลวดเชื่อมและบริเวณกระทะร้อนในทุกชิ้นงาน ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการใช้พลังงานในการเชื่อม 500 วัตต์ ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา [4] ส่งผลให้ลดโอกาสในการเกิดรอยแตกร้าวในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลที่ผ่านการกระบวนการเชื่อม [19] เนื่องจากการใช้พลังงานสูงในการเชื่อมทำให้ลวดเชื่อมสามารถละลายเกิดเป็นชั้นฟิล์มของเหลว (liquid film) ซึ่งมีความหนาที่มากกว่าการเชื่อมด้วยเลเซอร์พลังงานต่ำ จากทฤษฎี Miller and Chadwick's theory [20] ดังแสดงในสมการที่ 1 พบว่าเมื่อชั้นฟิล์มของเหลวมีความหนามากขึ้นส่งผลให้ความเค้นดึงมีค่าลดต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยเลเซอร์พบว่าบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณกระทะร้อนของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยเลเซอร์พลังงานสูงจะมีความเค้นตกค้าง (residual stresses) ที่ต่ำกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยเลเซอร์พลังงานต่ำ ทำให้มีโอกาสในการเกิดรอยแตกร้าวในชิ้นงานได้น้อยกว่า

$$F = \frac{2\gamma L}{h} \quad (1)$$

เมื่อ F : ความเค้นดึง (tensile stress) ที่ทำให้เกิดการแตก

γ : แรงตึงผิวบริเวณผิวสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลว

h : ความหนาของชั้นฟิล์มของเหลว

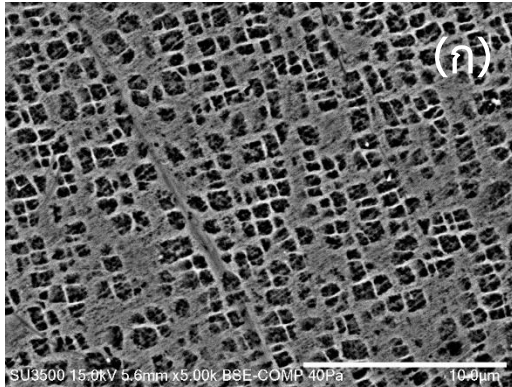


รูปที่ 4-6 โครงสร้างจุลทรรศน์ของชิ้นงานภายหลังการเชื่อมเลเซอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง
(ก) ชิ้นงาน S.T. (ข) ชิ้นงาน O.A.3

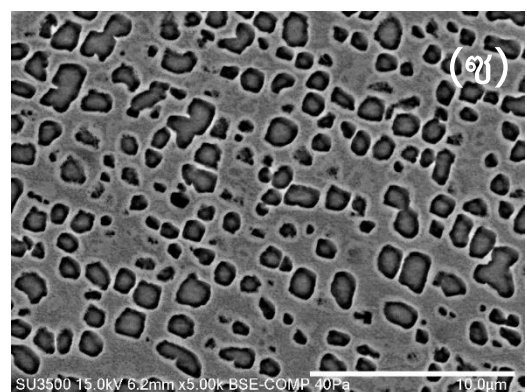
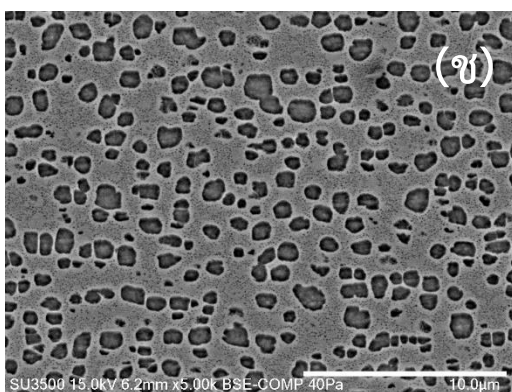
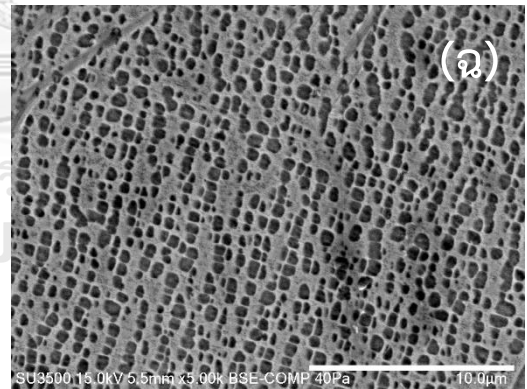
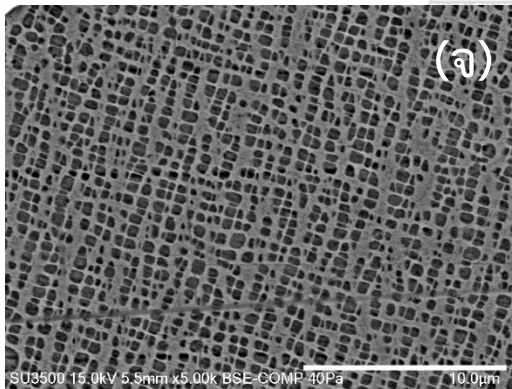
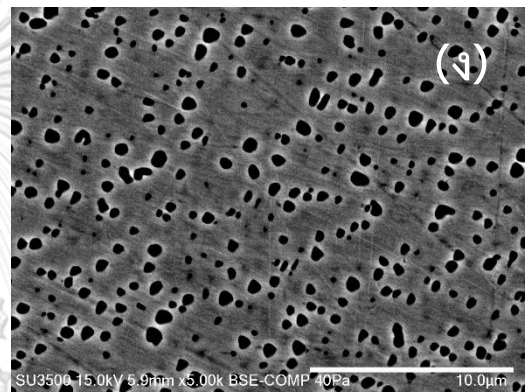
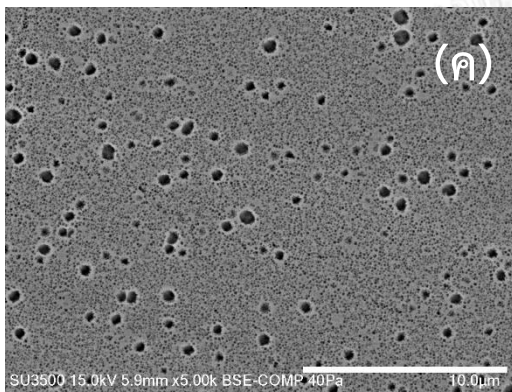
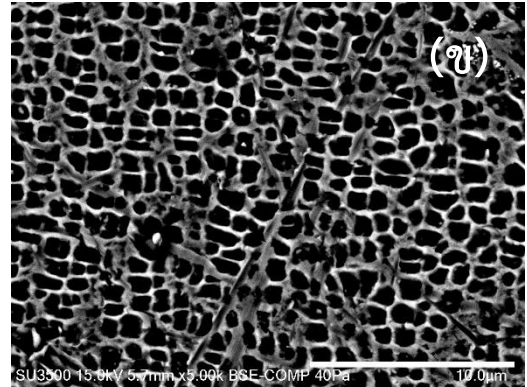
จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยเลเซอร์โดยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 5000X ในสองบริเวณ ได้แก่ บริเวณกระทบร้อน (HAZ) และบริเวณเนื้อพื้น โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมารายงานว่า บริเวณที่โครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงอันเป็นผลมาจากความร้อนจากการเชื่อมโลหะผสมพิเศษ เนื้อพื้นนิกเกิลมีระยะตั้งแต่ 0.0-0.5 มิลลิเมตรวัดจากรอยเชื่อม[21] จึงทำการเลือกวัดโครงสร้างบริเวณกระทบร้อนที่ระยะห่างจากแนวลวดเชื่อม 0.15 มิลลิเมตรและทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อพื้นซึ่งไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมเลเซอร์ โครงสร้างจุลภาคทั้งสองบริเวณของทุกชิ้นงานแสดงในรูปที่ 4-7 (ก-ญ) โดยแถวซ้ายรูปที่ 4-7 (ก),(ค),(จ),(ช) และ (ฉ) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อพื้นของชิ้นงาน A.R., S.T., O.A.1, O.A.2 และ O.A.3 ตามลำดับ ในขณะที่แถวขวาในรูปที่ 4-7 (ข),(ง),(ฉ),(ซ) และ (ญ) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ของชิ้นงาน A.R., S.T., O.A.1, O.A.2 และ O.A.3 ตามลำดับ

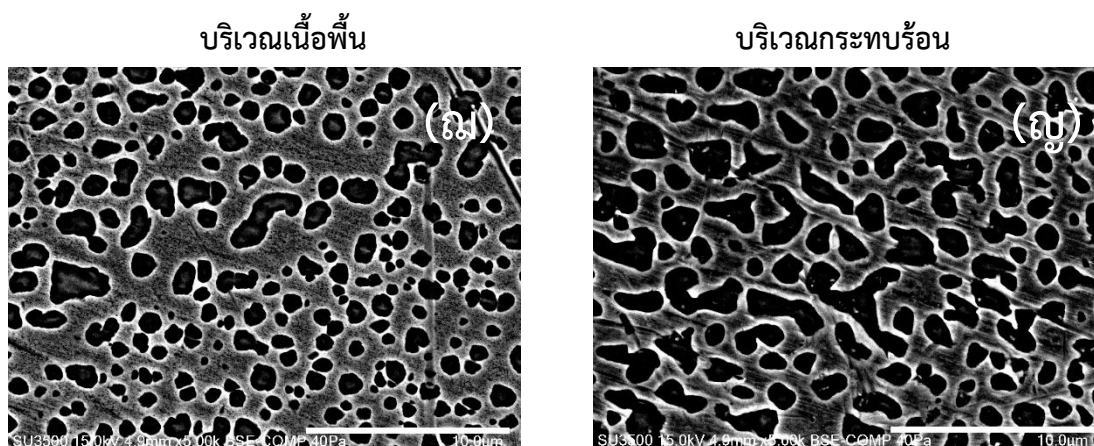
เมื่อทำการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเดียวกันระหว่างบริเวณกระทบร้อนกับบริเวณเนื้อพื้นพบว่าขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มที่บริเวณกระทบร้อนมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคแกมมาไพร์มในบริเวณเนื้อพื้นเพียงเล็กน้อยในทุกชิ้นงานซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากความร้อนจากการเชื่อมเลเซอร์ส่งผลให้อนุภาคแกมมาไพร์มในบริเวณกระทบร้อนเกิดการโตขึ้นในขณะที่บริเวณเนื้อพื้นซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อมทำให้อนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดใกล้เคียงกับอนุภาคแกมมาไพร์มหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อน (รูปที่ 4-4) และเมื่อทำการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณเดียวกันในแต่ละชิ้นงานพบว่าขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มมีแนวโน้มเดียวกับขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม

บริเวณเนื้อพื้น



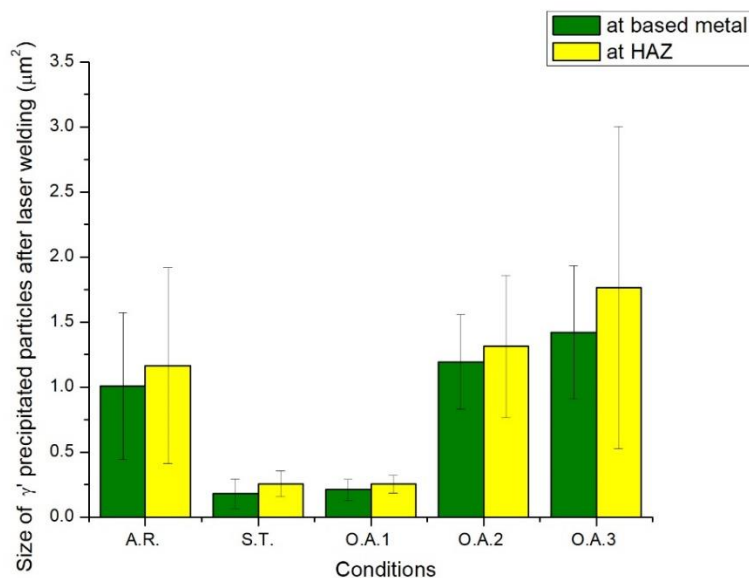
บริเวณกระทบร้อน





รูปที่ 4-7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่สภาวะต่างๆ (ก) A.R. บริเวณเนื้อพื้น (ข) A.R. บริเวณกระตบร้อน (ค) S.T. บริเวณเนื้อพื้น (ง) S.T. บริเวณกระตบร้อน (จ) O.A.1 บริเวณเนื้อพื้น (ฉ) O.A.1 บริเวณกระตบร้อน (ช) O.A.2 บริเวณเนื้อพื้น (ซ) O.A.2 บริเวณกระตบร้อน (ณ) O.A.3 บริเวณเนื้อพื้น (ญ) O.A.3 บริเวณกระตบร้อน

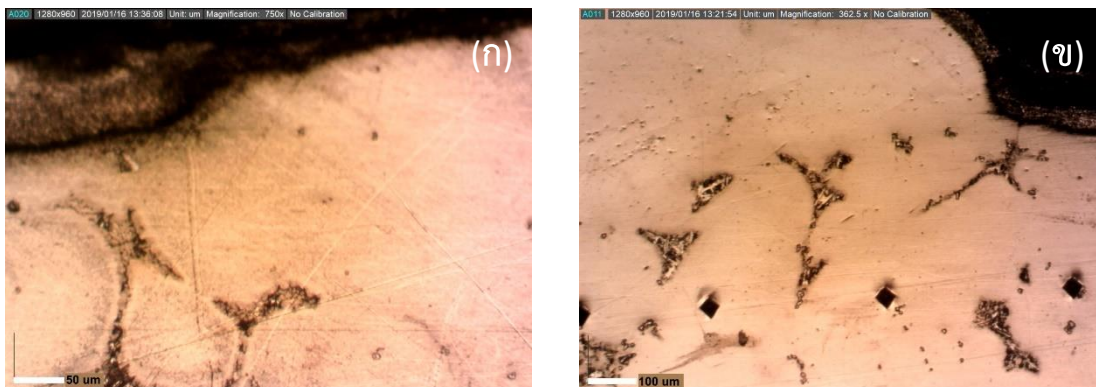
จากนั้นทำการวัดขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มภายหลังการเชื่อมเลเซอร์บริเวณเนื้อพื้นและบริเวณกระตบร้อนด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพพบว่าชิ้นงาน A.R. บริเวณเนื้อพื้นมีอนุภาคแกมมาไพร์ม ขนาด $1.01 \mu\text{m}^2$ และบริเวณ HAZ มีอนุภาคแกมมาไพร์มขนาด $1.17 \mu\text{m}^2$ ในขณะที่ชิ้นงาน S.T. บริเวณเนื้อพื้นมีอนุภาคแกมมาไพร์ม ขนาด $0.180 \mu\text{m}^2$ และบริเวณ HAZ มีอนุภาคแกมมาไพร์ม ขนาด $0.287 \mu\text{m}^2$ สำหรับชิ้นงาน O.A.1 มีอนุภาคแกมมาไพร์ม บริเวณเนื้อพื้นขนาด $0.211 \mu\text{m}^2$ และบริเวณ HAZ ขนาด $0.255 \mu\text{m}^2$ ชิ้นงาน O.A.2 มีอนุภาคแกมมาไพร์มบริเวณเนื้อพื้นขนาด $1.19 \mu\text{m}^2$ และอนุภาคแกมมาไพร์มบริเวณ HAZ ขนาด $1.31 \mu\text{m}^2$ และชิ้นงาน O.A.3 มีอนุภาคแกมมาไพร์มบริเวณเนื้อพื้นขนาด $1.43 \mu\text{m}^2$ และอนุภาคแกมมาไพร์ม บริเวณ HAZ ขนาด $1.42 \mu\text{m}^2$ จะเห็นได้ว่าอนุภาคแกมมาไพร์ม บริเวณ HAZ ซึ่งได้รับผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อมมีแนวโน้มที่จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มบริเวณเนื้อพื้นซึ่งไม่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อม ทั้งนี้อนุภาคแกมมาไพร์มทั้งในบริเวณเนื้อพื้นและในบริเวณ HAZ มีขนาดเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยจากชิ้นงานเดียวกันภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม กราฟเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มที่บริเวณเนื้อพื้นและบริเวณ HAZ ภายหลังการเชื่อมด้วยเลเซอร์ขนาดกำลัง 500 วัตต์ ด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 แสดงในรูปที่ 4-8



รูปที่ 4-8 ขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มภายหลังการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625

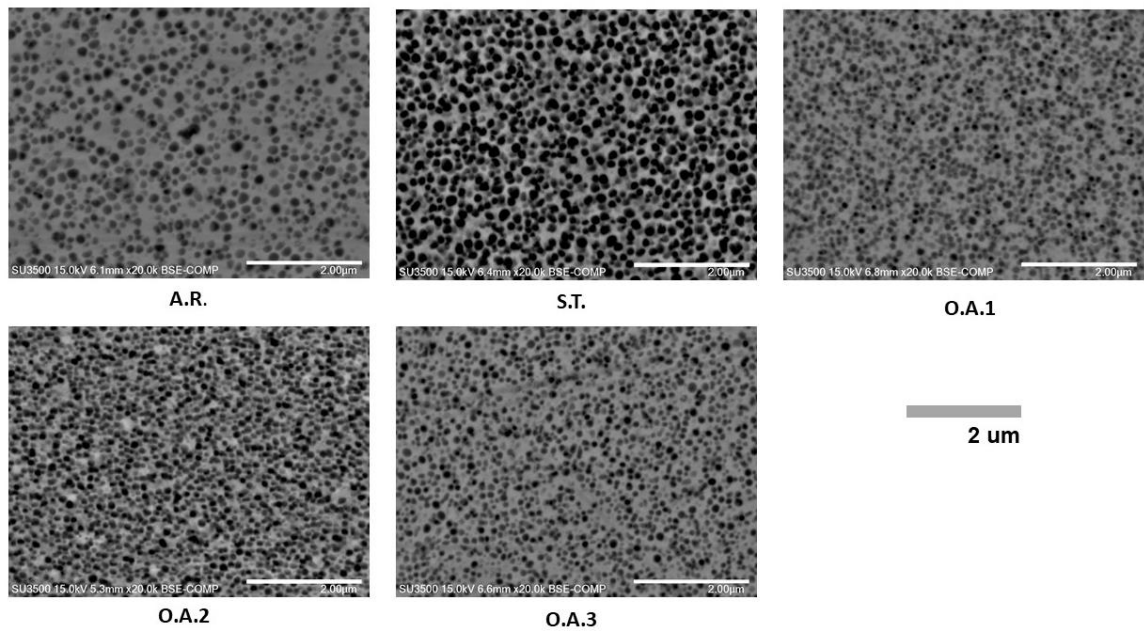
4.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 ภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม

ภายหลังการเชื่อมเลเซอร์ชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้นด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 นำชิ้นงานทั้งหมดไปให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมตามมาตรฐาน (standard heat treatment) ด้วยการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการทำละลายที่ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามด้วยการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการบ่มแข็งที่ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงปล่อยชิ้นงานให้เย็นตัวในอากาศ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4-9 (ก และ ข) พบว่าเมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมด้วยการทำละลายและการบ่มแข็งไม่ปรากฏแนวเส้นแบ่งที่ชัดเจนระหว่างลวดเชื่อมและเนื้อพื้น แต่สามารถแยกแยะบริเวณลวดเชื่อมและเนื้อพื้นได้จากการที่เนื้อพื้นจะมีเฟสคาร์ไบด์กระจายตัวอยู่ในขณะที่เนื้อลวดเชื่อมไม่ปรากฏเฟสคาร์ไบด์ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากวัสดุ โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 มีปริมาณไทเทเนียมและทังสเทนซึ่งสามารถจับตัวกับคาร์บอนเป็นสารประกอบประเภท MC คาร์ไบด์อยู่ในปริมาณมากเมื่อเทียบกับวัสดุอินโคเนล 625 จึงไม่ปรากฏเฟสคาร์ไบด์บริเวณลวดเชื่อม

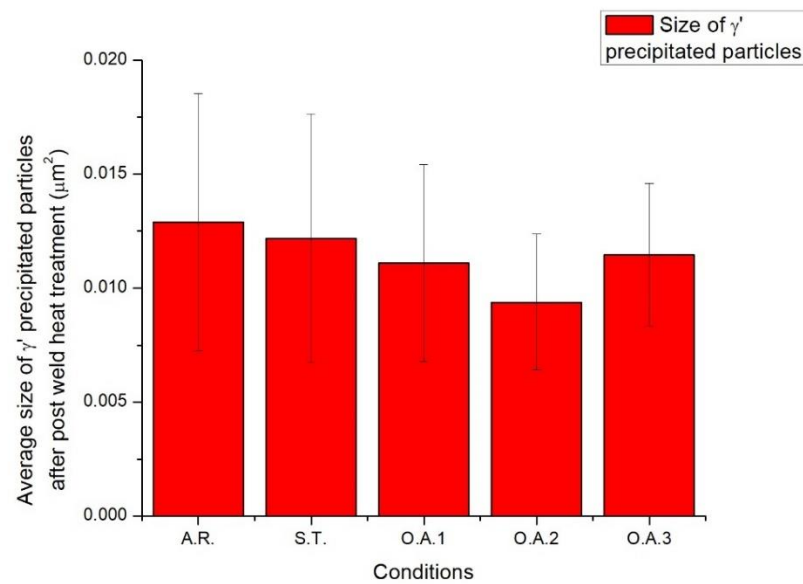


รูปที่ 4-9 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 ภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ก) ชิ้นงาน A.R. ข) ชิ้นงาน O.A.3

จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 20000X ภาพถ่ายแสดงในรูปที่ 4-10 พบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มในทุกชิ้นงานมีลักษณะใกล้เคียงกันคือมีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดเล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน จึงสรุปได้ว่าการให้กรรมวิธีทางความร้อนโดยการทำละลายที่ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สามารถละลายอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่ที่ค้างอยู่ในเนื้อวัสดุจากกระบวนการก่อนหน้ากลับลงสู่เนื้อพื้นได้เกือบสมบูรณ์ในทุกชิ้นงาน หลังจากนั้นมีการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการบ่มแข็งที่ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงทำให้เกิดการตกตะกอนใหม่ของอนุภาคแกมมาไพร์มในเนื้อวัสดุและเกิดการโตของอนุภาคแกมมาไพร์มอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงานและเมื่อทำการวัดขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมมีขนาดอยู่ระหว่าง $0.010-0.013 \mu\text{m}^2$ โดยกราฟเปรียบเทียบขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มเฉลี่ยภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมในแต่ละชิ้นงานแสดงในรูปที่ 4-11



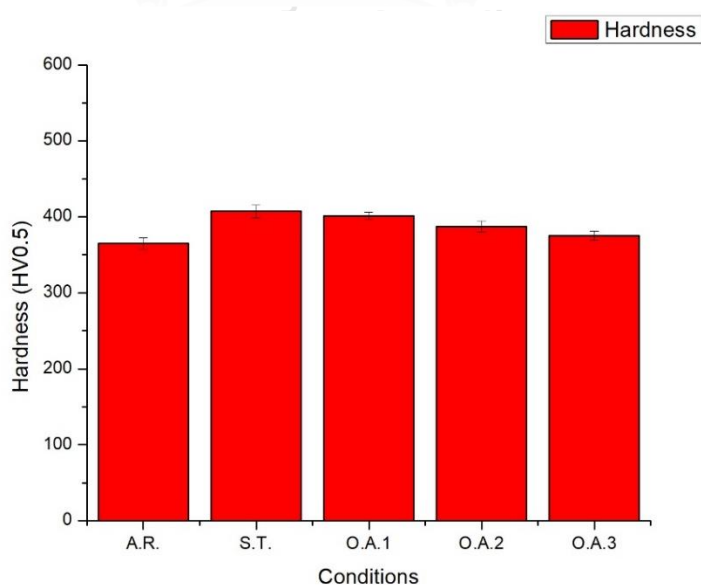
รูปที่ 4-10 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนแบบมาตรฐานหลังการเชื่อมโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 20000X



รูปที่ 4-11 ขนาดของอนุภาคแกมมาไพรม์เฉลี่ยภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเลเซอร์ ในชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625

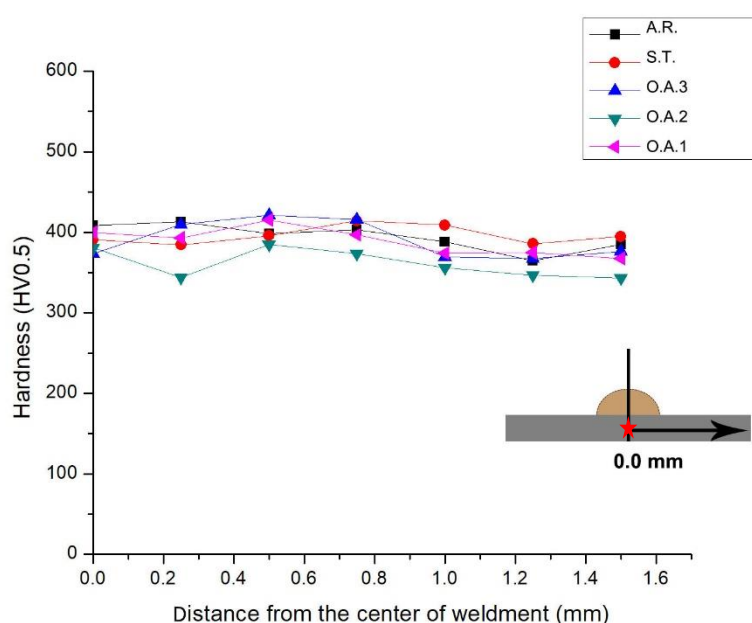
4.5 การทดสอบความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ใช้ลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625

การทดสอบความแข็งของชิ้นงานทำการทดสอบความแข็งทั้งสามขั้นตอนได้แก่ 1. ชิ้นงาน ภายหลังจากให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม 2. ชิ้นงานภายหลังจากเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อม ชนิดอินโคเนล 625 และ 3. ชิ้นงานภายหลังจากให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม ด้วยเครื่องวัด ความแข็ง Micro Vickers Hardness น้ำหนักกด 0.5 kgf โดยกราฟเปรียบเทียบความแข็งของชิ้นงาน ภายหลังจากให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมแสดงในรูปที่ 4-12 พบว่าค่าความแข็งของแต่ละ ชิ้นงานมีค่าอยู่ระหว่าง 365.2-407.1 HV โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่าความแข็งของโลหะแปร ผันตรงกับความแข็งแรงของวัสดุ [22] ซึ่งความแข็งแรงของวัสดุจากกระบวนการเพิ่มความแข็งแรง โดยการตกตะกอน (precipitation hardening) ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคที่ตกตะกอนในเนื้อวัสดุ คือความแข็งแรงของวัสดุจะลดต่ำลงตามขนาดของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นอันเป็นผลมาจากการที่อนุภาค ขนาดใหญ่จะมี coherence กับเนื้อพื้นต่ำกว่าอนุภาคขนาดเล็กซึ่งส่งผลให้สามารถขัดขวางการ เคลื่อนที่ของดิสโลเคชันได้ต่ำลงทำให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุต่ำลง [23] โดยจากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งของชิ้นงาน S.T. และชิ้นงาน O.A.1 มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันคือ 407.1 HV และ 401.56 HV โดยมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งในอีกสามชิ้นงานได้แก่ A.R., O.A.2 และ O.A.3 ซึ่งมีความ ความแข็ง 365.2 HV, 387.52 HV และ 375.08 HV ตามลำดับ สอดคล้องกับขนาดของอนุภาค แกมมาไพร์มในชิ้นงาน S.T. และ O.A.1 ซึ่งมีอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคในสาม ชิ้นงานที่เหลือ (รูปที่ 4-5)



รูปที่ 4-12 ความแข็งของชิ้นงานภายหลังจากให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม

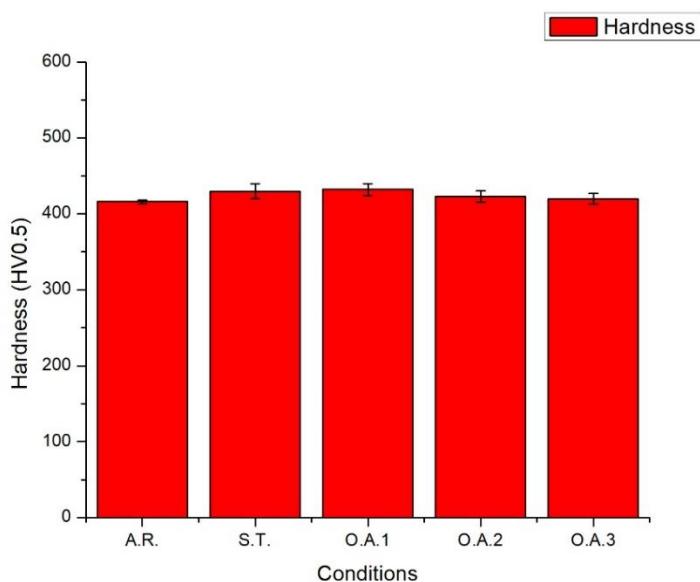
ค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 ที่ระยะห่างต่างๆจากรอยเชื่อมแสดงในรูปที่ 4-13 โดยจากรูปไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากรอยเชื่อมกับค่าความแข็งของวัสดุโดยค่าความแข็งที่ระยะห่างต่างๆจากรอยเชื่อมมีค่าใกล้เคียงกันโดยอยู่ในช่วง 385 ± 35 HV ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการเชื่อมด้วยเลเซอร์เป็นกระบวนการที่ใช้ลำแสงพลังงานสูงซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางลำเลเซอร์ขนาดเล็กเป็นตัวให้ความร้อนทำให้เกิดบริเวณหลอมละลายและบริเวณกระทบร้อนขนาดเล็กบนเนื้อวัสดุ เมื่อทำการวัดความแข็งจึงไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างบริเวณกระทบร้อนและบริเวณเนื้อพื้น



รูปที่ 4-13 ความแข็งของชิ้นงานที่ระยะห่างต่างๆจากรอยเชื่อมภายหลังการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625

จากนั้นทำการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ใช้ลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 ภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโดยกราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานต่างๆแสดงในรูปที่ 4-14 โดยค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมแต่ละชิ้นมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 415-432 HV ซึ่งมีค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม (รูปที่ 4-11) ซึ่งค่าความแข็งที่สูงขึ้นนี้สอดคล้องกับขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนแบบมาตรฐานหลังการเชื่อมที่มีขนาดเล็กลงเป็น $0.01-0.013 \mu\text{m}^2$ (รูปที่ 4-10) โดยมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคแกมมา

โพรม์ในชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมซึ่งมีขนาดอยู่ระหว่าง $0.174\text{-}1.94\ \mu\text{m}^2$
(รูปที่ 4-5)

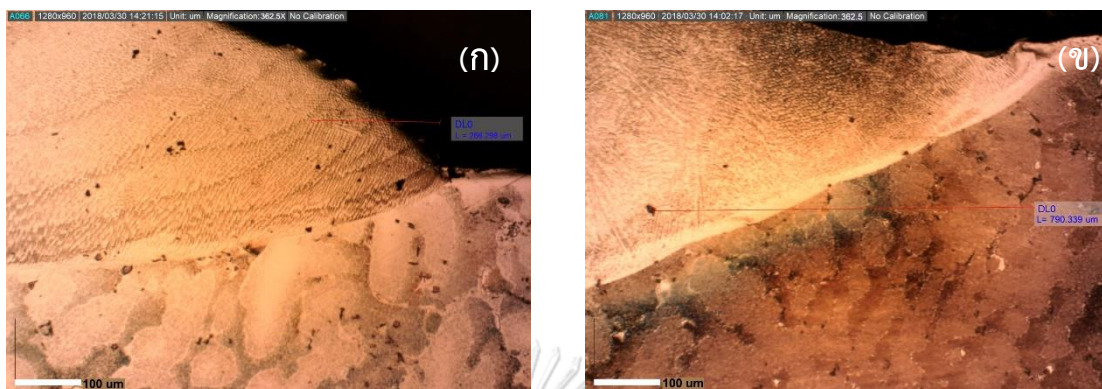


รูปที่ 4-14 ความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625
ภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม

4.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 718

ภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการให้กรรมวิธีทางความร้อนในสถานะที่แตกต่างกัน 5 สถานะได้แก่ A.R., S.T, O.A.1, O.A.2 และ O.A.3 สถานะละ 1 ชิ้นไปเชื่อมแบบพอกผิว (bead on plate) ด้วยเครื่องเชื่อมเลเซอร์โดยใช้ลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 718 จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) แสดงในรูปที่ 4-15 (ก และ ข) พบว่าสามารถแยกลวดเชื่อมและเนื้อพื้นของวัสดุได้อย่างชัดเจนโดยรอยเชื่อมมีความลึกประมาณ 0.7 มิลลิเมตร และกว้างประมาณ 2.4 มิลลิเมตร ใกล้เคียงกันทุกชิ้นงาน โดยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 718 มีลักษณะแตกต่างจากอินโคเนล 625 เนื่องจากอินโคเนล 718 เป็นวัสดุผสมพิเศษซึ่งมีส่วนผสมหลักเป็นนิกเกิลและเหล็ก (nicel-iron based superalloys) ในขณะที่อินโคเนล 625 เป็นวัสดุผสมพิเศษที่มีนิกเกิลเป็นส่วนผสมหลัก (nickel based superalloys) ทำให้ลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 718 สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าลวดเชื่อมอินโคเนล 625 เมื่อทำการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยการกัดด้วยสารละลายมาเบิลทำให้ปรากฏร่องรอยการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารละลายมาเบิลและเนื้อลวดเชื่อมอินโคเนล 718 นอกจากนี้ยังไม่พบรอยแตก

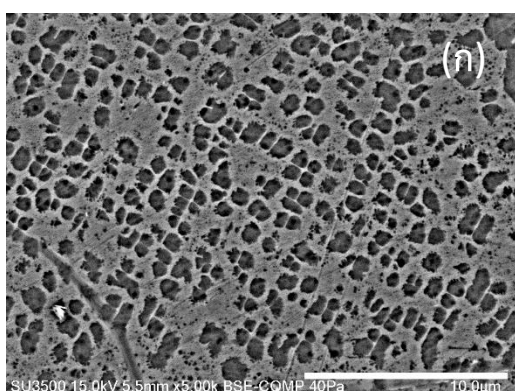
ทั้งในบริเวณลวดเชื่อมและบริเวณกระทบบร้อนซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการใช้พลังงานในการเชื่อมที่สูงเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ใช้ลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625



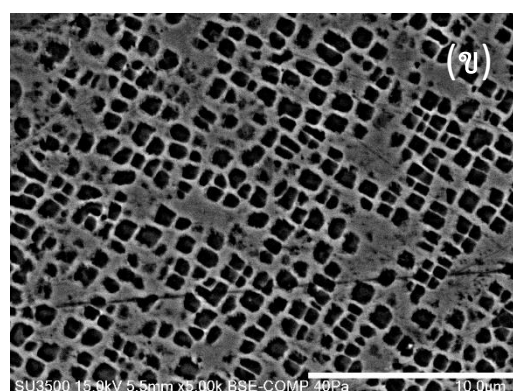
รูปที่ 4-15 โครงสร้างจุลทรรศน์ของชิ้นงานภายหลังการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 718 โดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (ก) ชิ้นงาน S.T. และ (ข) ชิ้นงาน O.A.3

จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 718 ทั้งหมดไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงในรูปที่ 4-16 (ก-ญ) โดยแถวซ้ายรูปที่ 4-16 (ก),(ค),(จ),(ข) และ (ฉ) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อพื้นของชิ้นงาน A.R., S.T., O.A.1, O.A.2 และ O.A.3 ตามลำดับ ในขณะที่แถวขวาในรูปที่ 4-16 (ข),(ง),(ฉ),(ช) และ (ญ) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบบร้อน (HAZ) ของชิ้นงาน A.R., S.T., O.A.1, O.A.2 และ O.A.3 ตามลำดับ โดยความร้อนจากการเชื่อมเลเซอร์ส่งผลให้อนุภาคแกมมาไพร์มที่บริเวณกระทบบร้อนมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าอนุภาคแกมมาไพร์มในบริเวณเนื้อพื้นซึ่งไม่ได้รับผลทางความร้อนจากการเชื่อมเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ใช้ลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 (รูปที่ 4-7) และสอดคล้องกับอนุภาคแกมมาไพร์มในชิ้นงานภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อน (รูปที่ 4-4)

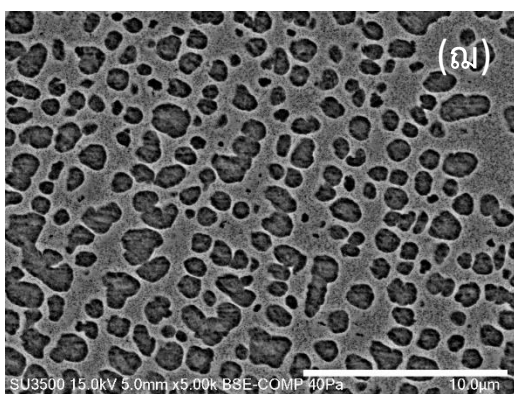
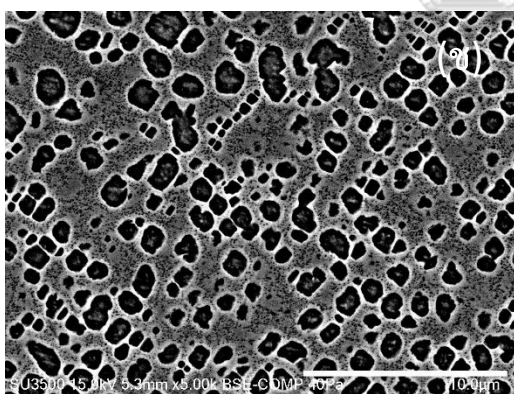
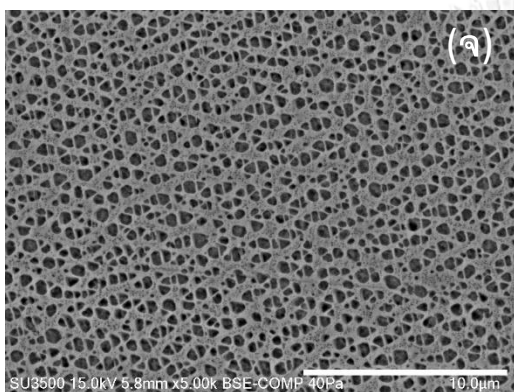
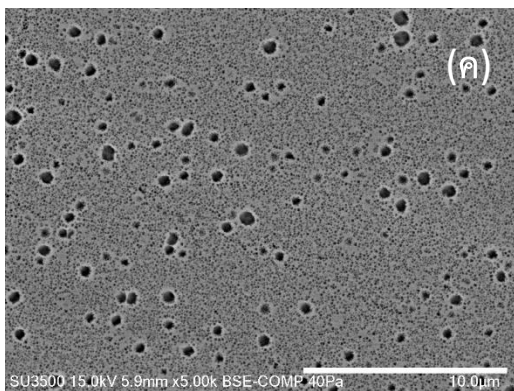
บริเวณเนื้อพื้น



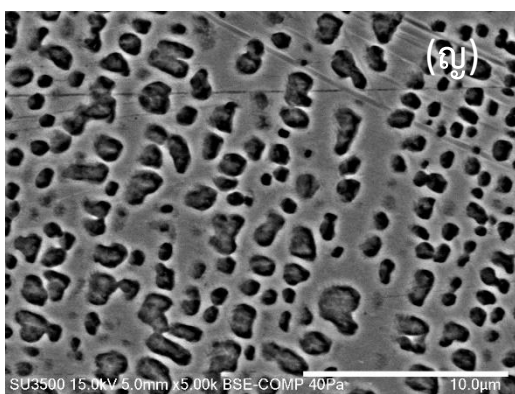
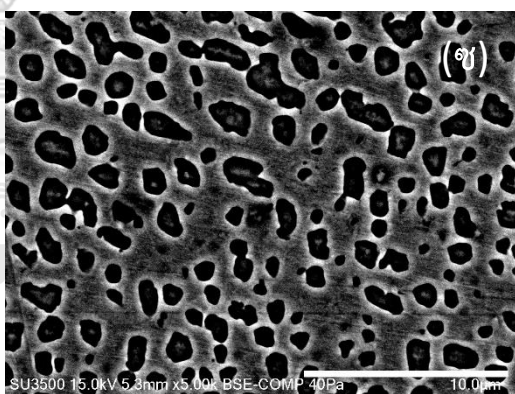
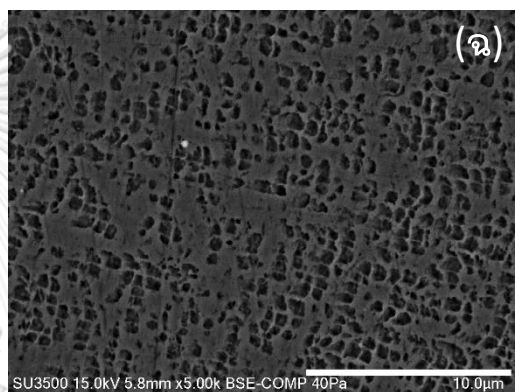
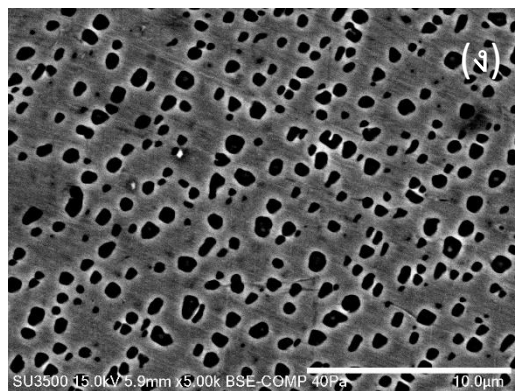
บริเวณกระทบบร้อน



บริเวณเนื้อพื้น

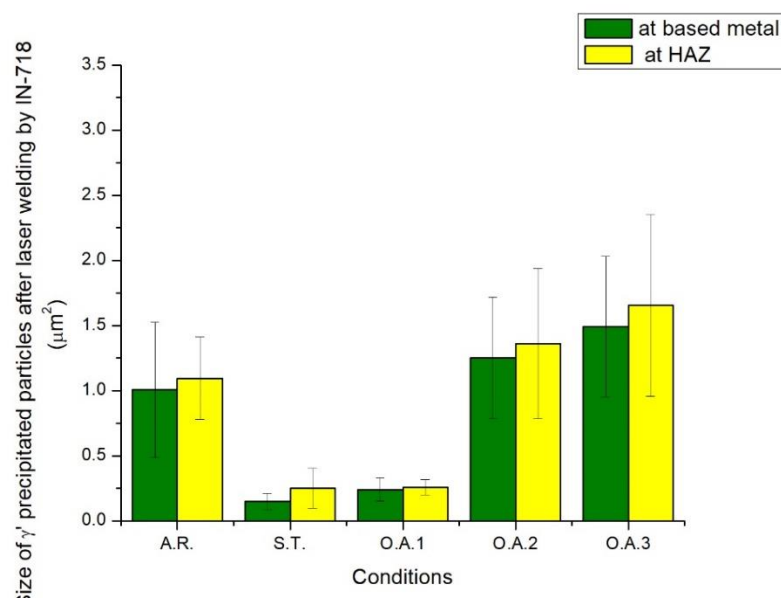


บริเวณกระทบร้อน



รูปที่ 4-16 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 718 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่สภาวะต่างๆ (ก) A.R.บริเวณเนื้อพื้น (ข) A.R.บริเวณกระทบร้อน (ค) S.T. บริเวณเนื้อพื้น (ง) S.T. บริเวณกระทบร้อน (จ) O.A.1 บริเวณเนื้อพื้น (ฉ) O.A.1 บริเวณกระทบร้อน (ช) O.A.2 บริเวณเนื้อพื้น (ฌ) O.A.2 บริเวณกระทบร้อน (ณ) O.A.3 บริเวณเนื้อพื้น (ญ) O.A.3 บริเวณกระทบร้อน

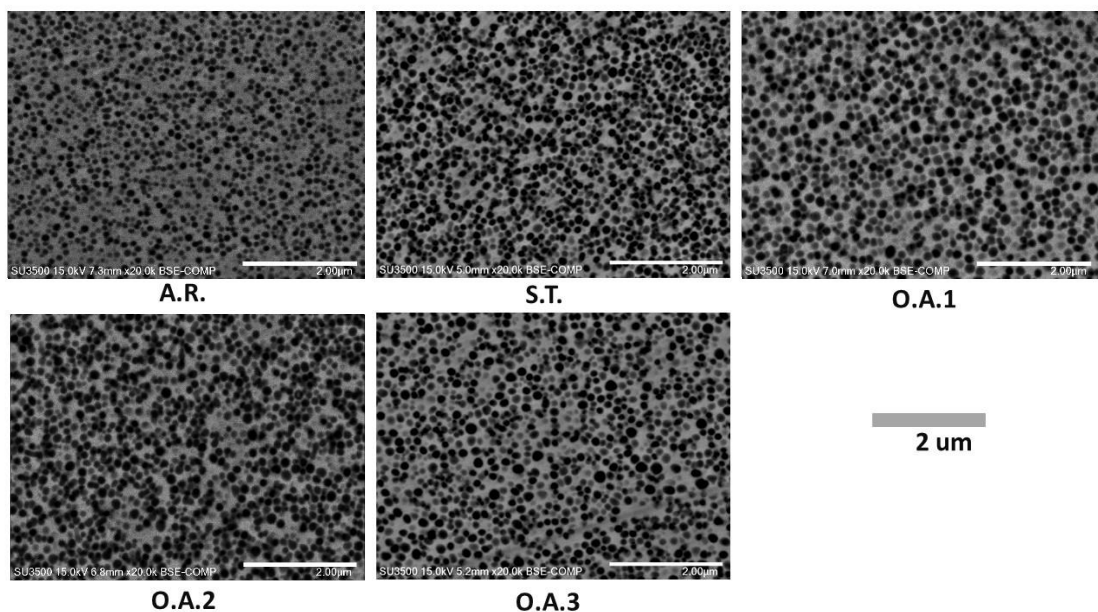
จากนั้นทำการวัดขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพได้ผลแสดงในรูปที่ 4-17 พบว่าขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มเฉลี่ยในบริเวณเนื้อพื้น (at based metal) มีค่าใกล้เคียงกับขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มเฉลี่ยในชิ้นงานภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมที่สภาวะเดียวกัน (รูปที่ 4-5) ในขณะที่อนุภาคแกมมาไพร์มในบริเวณกระทบร้อน (at HAZ) มีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคแกมมาไพร์มบริเวณเนื้อพื้น (at based metal) เช่นเดียวกับในชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 (รูปที่ 4-8)



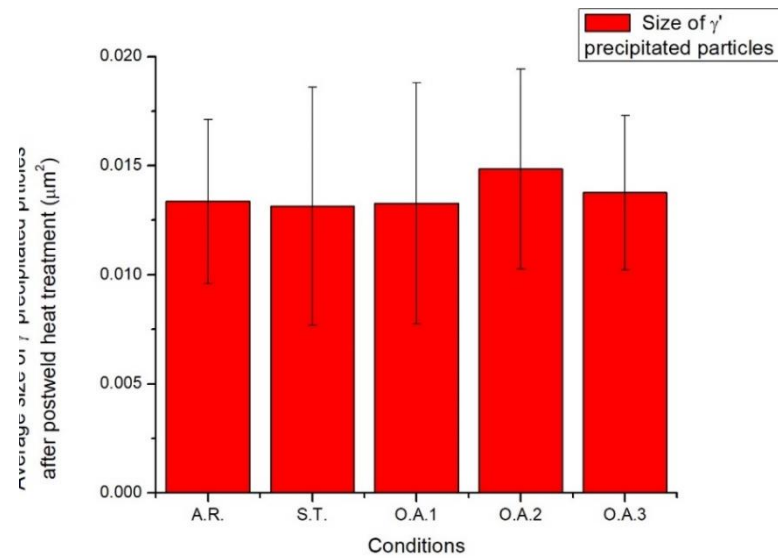
รูปที่ 4-17 ขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มเฉลี่ยภายหลังการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 718

4.7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 718 ภายหลังจากให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม

ภายหลังจากเชื่อมเลเซอร์ชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้นด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 718 นำชิ้นงานทั้งหมดไปให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมด้วยการทำละลายที่ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามด้วยการบ่มแข็งที่ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังจากให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมแสดงในรูปที่ 4-18 พบว่าการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโดยการทำละลายที่ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สามารถละลายอนุภาคแกมมาไพรม์ขนาดใหญ่กลับลงในเนื้อพื้นได้เกือบสมบูรณ์ในทุกชิ้นงาน เมื่อปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวเกิดการตกตะกอนซ้ำของอนุภาคแกมมาไพรม์ในลักษณะเป็นทรงกลมขนาดเล็กกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน จากนั้นมีการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการบ่มแข็งที่ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้อนุภาคแกมมาไพรม์เกิดการโตด้วยอัตราที่ใกล้เคียงกันทั่วทั้งชิ้นงาน ทำให้ได้โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายที่มีอนุภาคแกมมาไพรม์ในลักษณะทรงกลมขนาดเล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน โดยทำการวัดขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพพบว่าอนุภาคแกมมาไพรม์มีขนาดอยู่ระหว่าง $0.013-0.015 \mu\text{m}^2$ ดังแสดงในรูปที่ 4-19



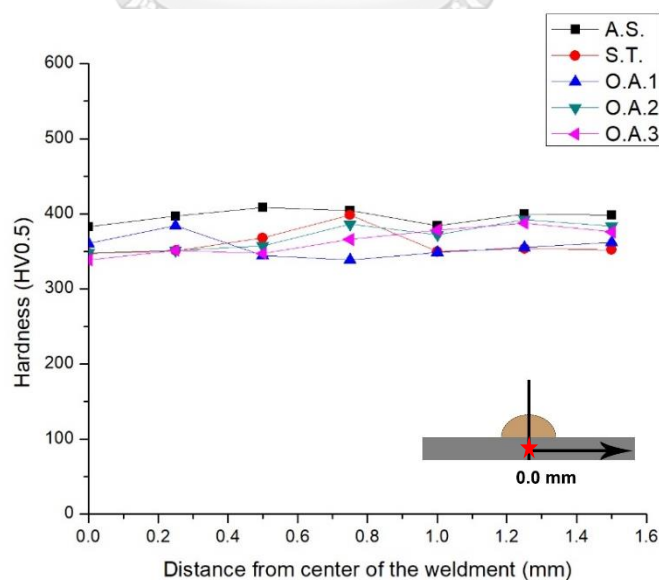
รูปที่ 4-18 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังจากให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 4-19 ขนาดของอนุภาคแกมมาไพรม์เฉลี่ยภายหลังจากการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเลเซอร์ ในชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 718

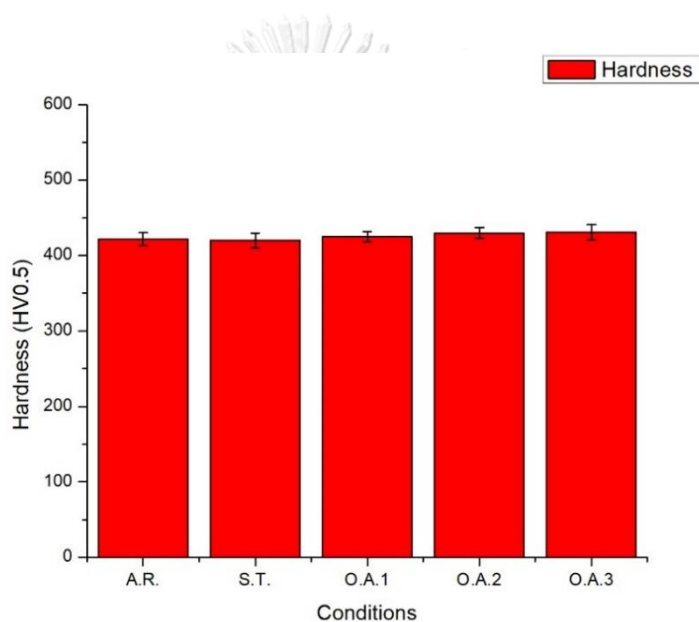
4.8 การทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ใช้ลวดเชื่อมอินโคเนล 718

ความแข็งของชิ้นงานภายหลังจากการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 718 ที่ระยะต่างๆห่างจากรอยเชื่อมแสดงในรูปที่ 4-20 โดยค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังจากการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 718 มีค่าอยู่ระหว่าง 369 ± 35.0 HV และไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากรอยเชื่อมกับความแข็งของวัสดุเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ใช้ลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625



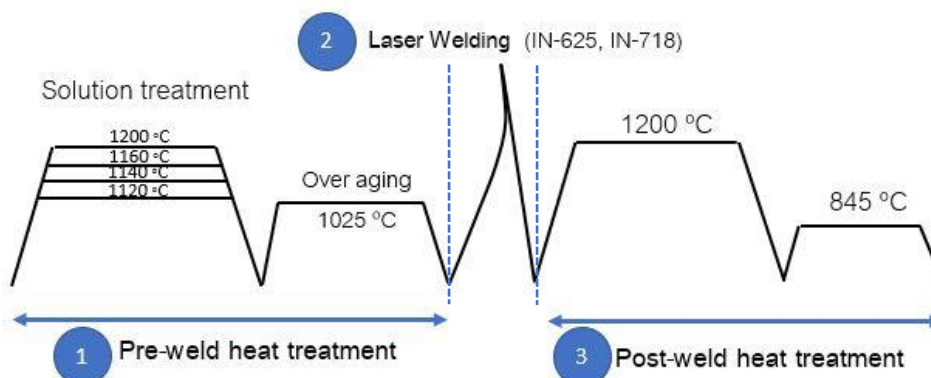
รูปที่ 4-20 ความแข็งของชิ้นงานที่ระยะห่างต่างๆจากรอยเชื่อมภายหลังจากการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 718

ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ใช้ลวดเชื่อมอินโคเนล 718 ภายหลังจากให้กรรมวิธีทางความร้อน หลังการเชื่อมแสดงในรูปที่ 4-21 โดยค่าความแข็งในแต่ละชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกันคือมีค่าความแข็ง อยู่ระหว่าง 419-432 HV ใกล้เคียงกับความแข็งของชิ้นงานที่ใช้ลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 ภายหลังจากให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม (รูปที่ 4-14) และมีค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อ เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม (รูปที่ 4-12) เนื่องจาก อนุภาคแกมมาไพร์มในชิ้นงานภายหลังจากให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด อินโคเนล 718 มีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มในชิ้นงานภายหลังจากให้กรรมวิธีทางความ ร้อนก่อนการเชื่อม



รูปที่ 4-21 ความแข็งของชิ้นงานที่ใช้ลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 718 ภายหลังจากให้ กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม

4.9 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในแต่ละขั้นตอนทดลอง



รูปที่ 4- 22 แผนผังสรุปขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง

จากการทดลองที่ผ่านมาสามารถสรุปขั้นตอนการทดลองและผลการทดลองได้เป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1.การให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม 2.การเชื่อมเลเซอร์ 3.การให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4-22 โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 และ อินโคเนล 718 ในแต่ละขั้นตอนปรากฏเป็นแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันดังนี้

1. อนุภาคแกมมาไพร์มของชิ้นงานภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม มีขนาดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการทำละลาย (Solution treatment) ที่แตกต่างกัน โดยอุณหภูมิการทำละลายที่สูงส่งผลให้อนุภาคแกมมาไพร์มสามารถละลายตัวกลับลงไปเนื้อพื้นได้ดีเหลือเป็นอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดเล็กตกค้างในเนื้อวัสดุ ในขณะที่อุณหภูมิทำละลายที่ต่ำลงมาจะส่งผลให้อนุภาคแกมมาไพร์มละลายกลับลงไปเนื้อพื้นได้น้อยกว่า อีกทั้งการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการบ่มแข็ง (Over-aging) ภายหลังจากทำละลายยังส่งผลให้อนุภาคแกมมาไพร์มที่ตกค้างในเนื้อวัสดุมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4-4

2. โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังการเชื่อมเลเซอร์กำลัง 500 วัตต์ ด้วยลวดเชื่อมสองชนิดได้แก่ อินโคเนล 625 และอินโคเนล 718 มีลักษณะคล้ายคลึงกันคืออนุภาคแกมมาไพร์มบริเวณเนื้อพื้นซึ่งไม่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อมมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม (ขั้นที่ 1) ในขณะที่อนุภาคแกมมาไพร์มบริเวณกระทบร้อนมีขนาดใหญ่ขึ้นอันเนื่องมาจากความร้อนจากการเชื่อมเลเซอร์มีการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็วทำให้ความร้อนที่ถูกถ่ายเทมายังบริเวณกระทบร้อนไม่สูงพอที่จะละลายอนุภาคแกมมาไพร์ม

กลับสู่เนื้อพื้นแต่กลับส่งผลให้อนุภาคแกมมาไพร์มบริเวณกระทบร้อนเกิดการโตขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4-7 และ 4-16

3. ชิ้นงานภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมพบว่ากรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐานสามารถปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดแตกต่างกัน (ชั้นที่ 2) ให้มีขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มที่ใกล้เคียงกันในทุกชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4-10 และ 4-18 และไม่ส่งผลต่อการเกิดรอยแตกร้าวข้างๆรอยเชื่อม เนื่องจากอนุภาคแกมมาไพร์มที่ได้ภายหลังการเชื่อมเลเซอร์นี้ โดยเฉพาะอนุภาคแกมมาไพร์มในบริเวณกระทบร้อนมีขนาดใหญ่ขึ้นแทนที่จะละลายกลับเข้าไปในเนื้อพื้นเหมือนกรณีการเชื่อมโลหะผสมพิเศษทั่วไปส่งผลให้มีค่า coherency strain ที่ลดลงและจะตกตะกอนต่ออีกครั้งเมื่อเริ่มให้ความร้อนขณะทำกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมผ่านช่วงอุณหภูมิตกตะกอนของเฟสแกมมาไพร์ม ซึ่งในกรณีนี้อนุภาคแกมมาไพร์มจะมีการโตต่อไปจนถึงอุณหภูมิที่สูงมากและเริ่มกลับมาละลายในเนื้อพื้นแกมมาอีกครั้งหนึ่ง ด้วยเหตุนี้จึงไม่เกิด coherency strain ระหว่าง 2 เฟสจึงช่วยลดการแตกร้าวจากการเชื่อมไปด้วย อย่างไรก็ตามในกรณีทั่วไปการตกตะกอนขนาดเล็กที่ออกมาพร้อมๆกันขณะให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมนี้จะไปเพิ่มความเค้นจากการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์มเนื่องจากมีค่า lattice mismatch ที่แตกต่างกันมาก ร่วมกับความเค้นตกค้างที่เกิดหลังการเชื่อมรวมตัวกันเป็นความเค้นที่มากพอที่ส่งผลให้เกิดรอยร้าวข้างๆรอยเชื่อมภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.10 ความเป็นไปได้ในการใช้งานลวดเชื่อมอินโคเนล 625 และอินโคเนล 718 ด้วยการเชื่อมเลเซอร์บนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111

จากการผลการทดลองทั้งหมดที่ผ่านมาพบว่าลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 และ อินโคเนล 718 สามารถเชื่อมติดกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 ด้วยการเชื่อมเลเซอร์พลังงานขนาด 500 วัตต์ได้เป็นอย่างดี โดยไม่พบรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณกระทบร้อนในชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้งสองชนิดและเมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD-111 บริเวณเนื้อพื้นและบริเวณกระทบร้อนพบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมที่สภาวะเดียวกันแต่มีการใช้ลวดเชื่อมต่างชนิดกันมีขนาดแกมมาไพร์มที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวด

เชื่อมทั้งสองชนิดก็พบว่ามีความแข็งที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้จึงอาจสรุปได้ว่าที่สภาวะและระยะเวลาที่ทำการศึกษาลวดเชื่อมทั้งสองชนิดให้ผลในลักษณะที่ใกล้เคียงกันสามารถใช้เป็นลวดเชื่อมสำหรับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเกรด GTD-111 ได้ทั้งสองชนิด

สำหรับผู้ที่สนใจจะศึกษาเพิ่มเติมควรพิจารณาถึงเรื่องความเสถียรของเฟสในลวดเชื่อมและอนุภาคแกมมาไพร์มในโลหะผสมพิเศษเกรด GTD-111 โดยควรมีการทดสอบให้กรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานานโดยให้มีสภาวะใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานของใบพัดเครื่องจักรกังหันก๊าซเพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของลวดเชื่อมทั้งสองชนิดและอนุภาคแกมมาไพร์ม เนื่องจากลวดเชื่อมอินโคเนล 625 และอินโคเนล 718 มีความแตกต่างกันของส่วนผสมทางเคมี โดยอินโคเนล 625 มีส่วนผสมหลักเป็นเนื้อพื้นนิเกิลและมีธาตุผสมอย่างโครเมียมในปริมาณที่สูงกว่าอินโคเนล 718 ทำให้อินโคเนล 625 สามารถต้านทานการสึกกร่อน กัดกร่อน และการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าอินโคเนล 718 นอกจากนี้อินโคเนล 625 ยังมีโครงสร้างผลึกแบบ Face-centered cubic ซึ่งมีกลไกการเพิ่มความแข็งแรงด้วยสารละลายของแข็งเป็นกลไกการเพิ่มความแข็งแรงหลัก ซึ่งแตกต่างจากอินโคเนล 718 ซึ่งมีโครงสร้างแบบออสเทนนิติกที่มีกลไกการเพิ่มความแข็งแรงหลักมาจากการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์มและอนุภาคแกมมาดับเบิลไพร์มทำให้อาจส่งผลต่อความเสถียรของลวดเชื่อมที่การใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานานได้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

1. การเชื่อมวัสดุ GTD-111 ด้วยเลเซอร์กำลัง 500 วัตต์ ความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 และ อินโคเนล 718 ไม่พบรอยแตกร้าวในทุกชิ้นงานในงานวิจัยนี้
2. พลังงานในการเชื่อมเลเซอร์ขนาด 500 วัตต์ ด้วยความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ทำให้ชิ้นงานภายหลังการเชื่อมมี residual stress ต่ำ ประกอบกับอนุภาคแกมมาไพรม์บริเวณกระทบร้อนมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งทำให้ coherency strain ในชิ้นงานภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนลดลง ส่งผลให้ลดโอกาสในการเกิดรอยแตกร้าวจากการเชื่อมในชิ้นงานได้
3. อุณหภูมิในการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมด้วยการทำละลายส่งผลโดยตรงกับความสามารถในการละลายของอนุภาคแกมมาไพรม์ในวัสดุโลหะผสมพิเศษเนื้อพินิกเกิลเกรด GTD-111 โดยอุณหภูมิทำละลายที่ยิ่งสูงส่งผลให้อนุภาคแกมมาไพรม์สามารถละลายกลับลงไปเนื้อพินิกเกิลได้มากขึ้นหลงเหลือเป็นอนุภาคแกมมาไพรม์ขนาดเล็กตกค้างในเนื้อวัสดุ
4. การให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมแบบมาตรฐานด้วยการทำละลายที่ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามด้วยการให้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยการบ่มแข็งที่ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สามารถลดความแตกต่างของขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ซึ่งเป็นผลมาจากการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อมได้โดยสมบูรณ์ ทำให้อนุภาคแกมมาไพรม์ภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมมีขนาดใกล้เคียงกันในทุกชิ้นงาน และมีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน

บรรณานุกรม

- [1] S. A. Sajjadi, S. Nategh, and R. I. L. Guthrie, "Study of microstructure and mechanical properties of high performance Ni-base superalloy GTD-111," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 325, no. 1, pp. 484-489, 2002.
- [2] B. Rottwinkel, C. Nölke, S. Kaieler, and V. Wesling, "Crack Repair of Single Crystal Turbine Blades Using Laser Cladding Technology," *Procedia CIRP*, vol. 22, pp. 263-267, 2014.
- [3] I. Alfred *et al.*, "Advanced high pressure turbine blade repair technologies," *Procedia CIRP*, vol. 74, pp. 214-217, 2018.
- [4] A. Athiroj, "Study of GTAW and laser welding of Nickel-based Superalloy GTD-111 with Inconel 625 filler metal " Master of Engineering Program in Metallurgical and Materials, Department of Metallurgical Engineering, Chulalongkorn University, 2015.
- [5] P. Wangyao and e. a. V. Krongtong, "The relationship between reheat-treatment and hardness behaviour of cast nickel superalloy, GTD-111," *Journal of materials and minerals*, vol. 16, pp. 55-62, 2006.
- [6] M.J. Donachie and S. J. Donachie. (2002) *Superalloys: a technical guide. ASM international.*
- [7] R. Ribichini, C. Giolli, and E. Scrinzi, "Gas turbine coatings eddy current quantitative and qualitative evaluation," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1806, no. 1, p. 110022, 2017.
- [8] M. Mex. (2010, 27 Oct). INCONEL® ALLOY 625. Available: http://megamex.com/inconel_625.html
- [9] S.M.Corporations.(2007/1/09).*INCONELalloy718*.Available: http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/inconel_alloy_718.pdf
- [10] H. Wang, C. Huang, K. Ho, and S. Deng, "Microstructure Evolution of Laser Repair Welded Rene´ 77 Nickel-Based Superalloy Cast," *Materials Transactions*, vol. 52, pp. 2197-2204, 2011.
- [11] J. DuPont, J. Lippold, and S. Kiser, *Welding metallurgy and weldability of nickel-*

base alloys. John Wiley & Sons, Inc., 2009.

- [12] jobs4welding. (2016, 21Oct). *Welding defects*. Available: <http://www.jobs4welding.com/weldwise/wp-content/uploads/2016/01/Typical-crack-defects-around-a-welding.jpg>
- [13] K. Masubuchi, *Analysis of Welded Structures*. Pergamon, 1980.
- [14] L. O. OSOBA, "A study on laser weldability improvement of newly developed Haynes 282 superalloy," Doctor of Philosophy, Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Manitoba, 2012.
- [15] S. Kou, *Welding Metallurgy*. John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [16] X. Cao, B. Rivaux, M. Jahazi, J. Cuddy, and A. Birur, "Effect of pre- and post-weld heat treatment on metallurgical and tensile properties of Inconel 718 alloy butt joints welded using 4 kW Nd:YAG laser," *Journal of Materials Science*, vol. 44, no. 17, pp. 4557-4571, 2009.
- [17] M. A. González, D. I. Martínez, A. Pérez, H. Guajardo, and A. Garza, "Microstructural response to heat affected zone cracking of prewelding heat-treated Inconel 939 superalloy," *Materials Characterization*, vol. 62, no. 12, pp. 1116-1123, 2011.
- [18] A. Turazi, C. A. S. de Oliveira, C. E. N. Bohórquez, and e. al, "Study of GTD-111 Superalloy Microstructural Evolution During High-Temperature Aging and After Rejuvenation Treatments," *Metallography, Microstructure, and Analysis*, vol. 4, no. 1, pp. 3-12, 2015.
- [19] O. A. Idowu, O. A. Ojo, and M. C. Chaturvedi, "Effect of heat input on heat affected zone cracking in laser welded ATI Allvac 718Plus superalloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 454-455, pp. 389-397, 2007.
- [20] M. Montazeri, F. Malek Ghaini, and O. A. Ojo, *Heat Input and the Liquation Cracking of Laser Welded IN738LC Superalloy*. 2013, pp. 258-s.
- [21] A.R.Said, J.Syarif, and Z.Sajuri, "HAZ CHARACTERIZATION OF GTD-111 NICKEL BASED SUPERALLOY WELDING," in *Engineering Postgraduate Conference (EPC)*, 2008.
- [22] P. Zhang, S. X. Li, and Z. F. Zhang, "General relationship between strength and hardness," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 529, pp. 62-73, 2011.

- [23] J. George E. Dieter, *Mechanical Metallurgy* (Metallurgy and Metallurgical Engineering). McGraw-Hill Book Company, Inc., 1961.



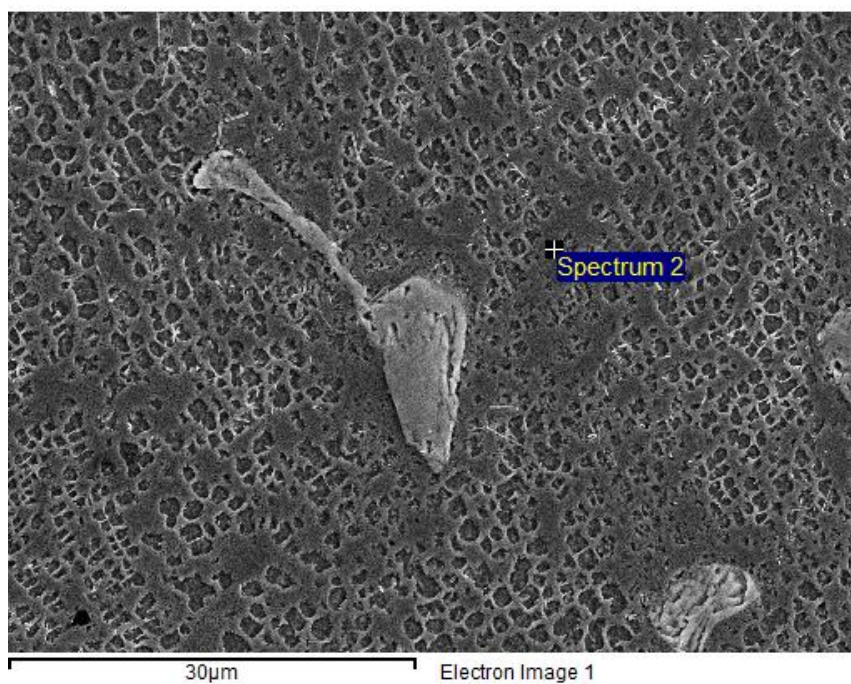
ภาคผนวก



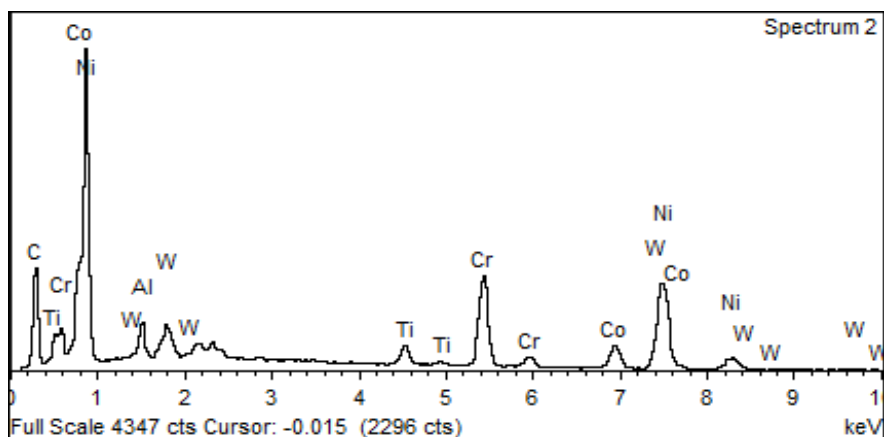
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานตั้งต้น

ทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานตั้งต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ร่วมกับเครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)



รูปที่ ก-1 ตัวอย่างภาพถ่ายชิ้นงานในสภาวะตั้งต้นจากกล้อง SEM บริเวณเนื้อพื้นที่ทำการทดสอบด้วยเครื่อง EDS

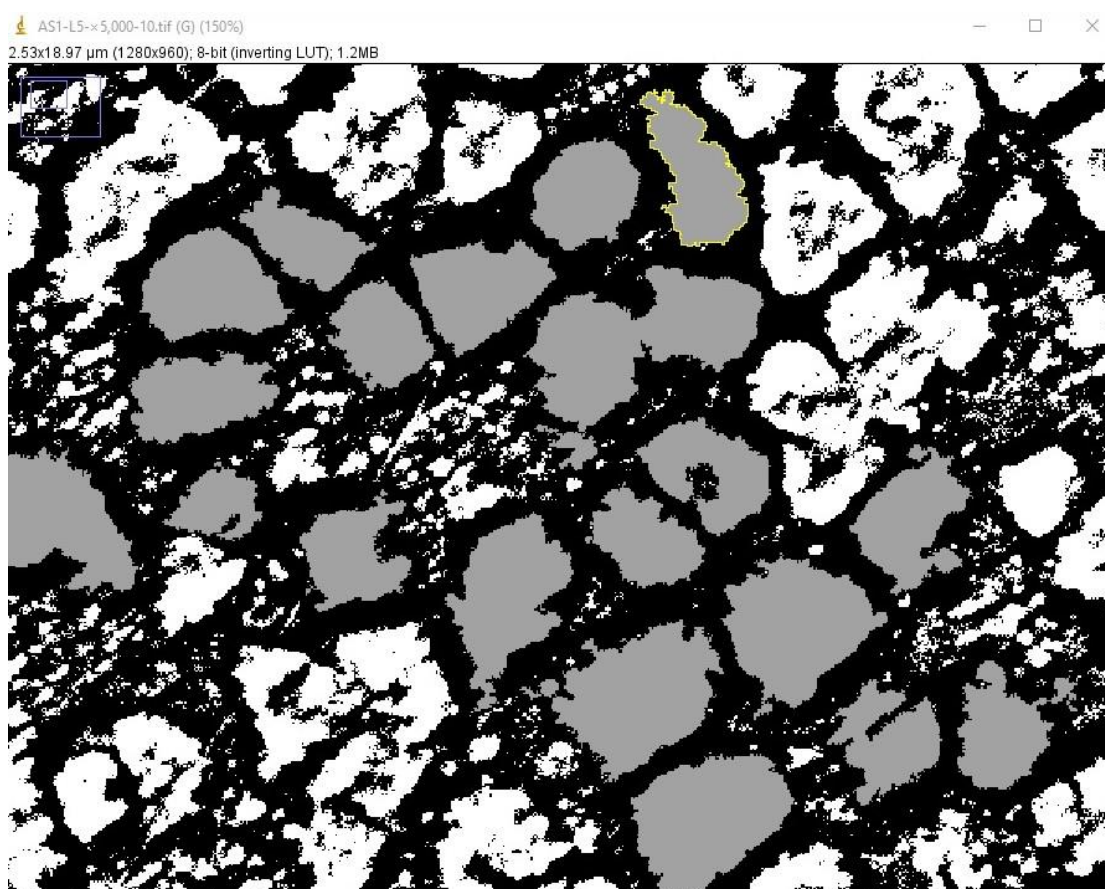


Element	Weight %	Atomic %
C K	22.14	57.45
Al K	1.82	2.11
Ti K	2.35	1.53
Element	Weight %	Atomic %
Co K	8.91	4.71
Ni K	44.79	23.78
W M	3.62	0.61
Totals	100.00	

รูปที่ ก-2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณส่วนผสมทางเคมีบริเวณเนื้อพื้นของชิ้นงานตั้งต้น

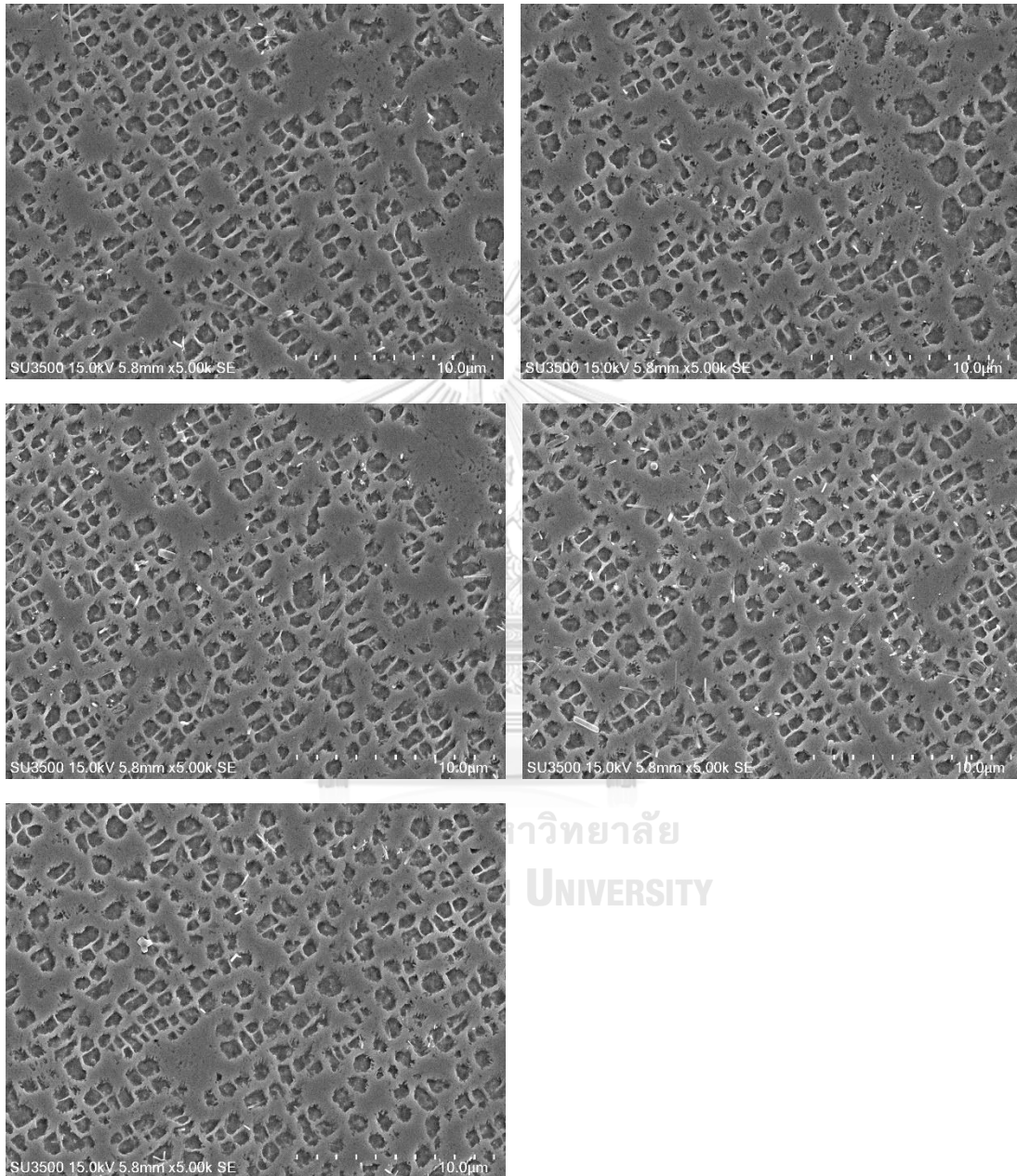
การคำนวณหาขนาดอนุภาคแกมมาไพร์ม

การคำนวณหาขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มสามารถทำได้โดยการถ่ายภาพ SEM จากนั้นนำภาพที่ได้ไปทำการตกแต่งเพื่อให้เห็นสามารถแยกแยะอนุภาคแกมมาไพร์มออกจากเนื้อพื้นได้อย่างชัดเจนและทำการวัดขนาดพื้นที่ของแต่ละอนุภาคด้วยโปรแกรม Image J software จากนั้นนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานด้วยโปรแกรม Microsoft Excel

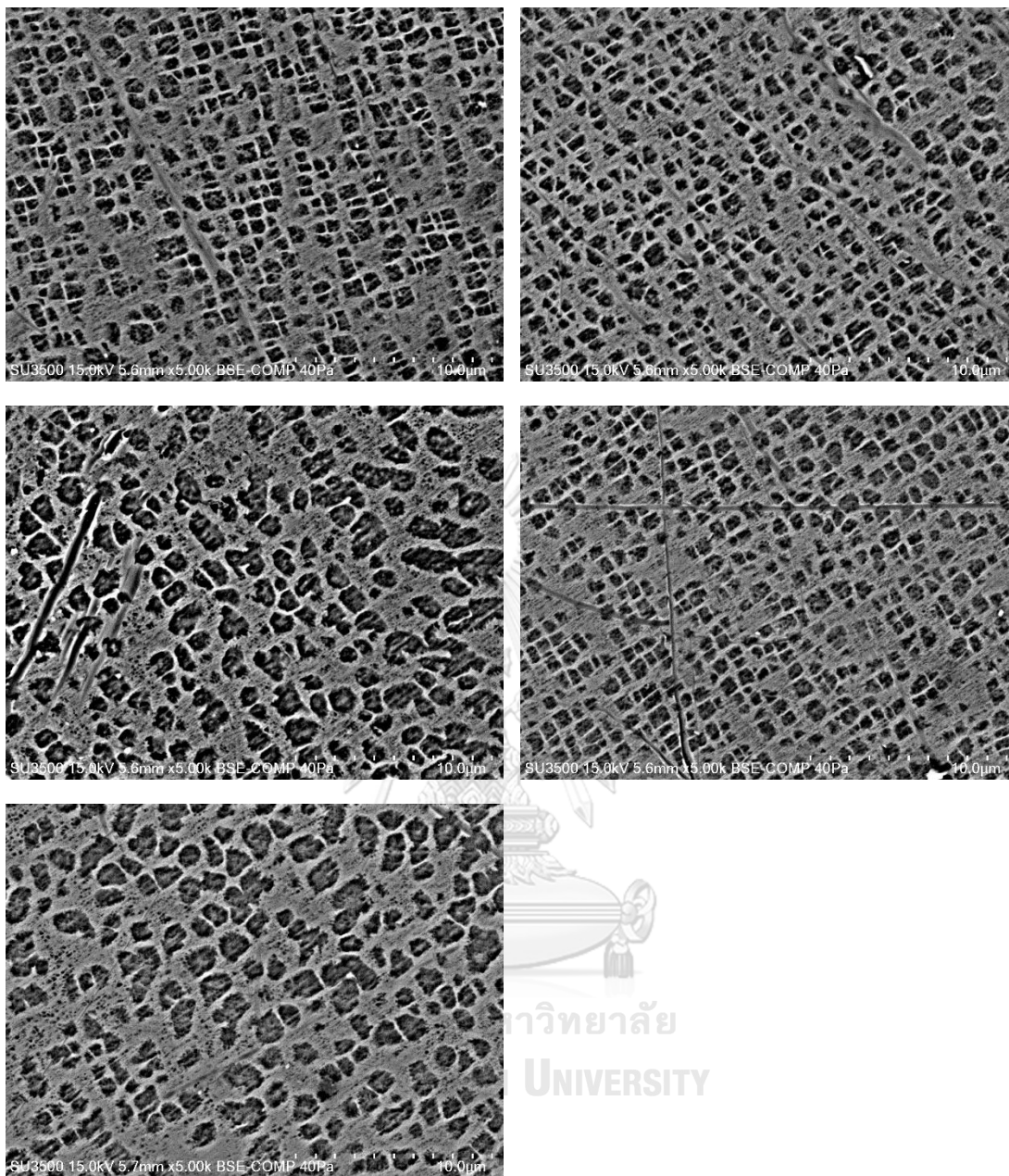


รูปที่ ก-3 ภาพตัวอย่างการวัดขนาดพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มในชิ้นงาน A.R. บริเวณเนื้อพื้นภายหลังการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625 ด้วยโปรแกรม Image J software

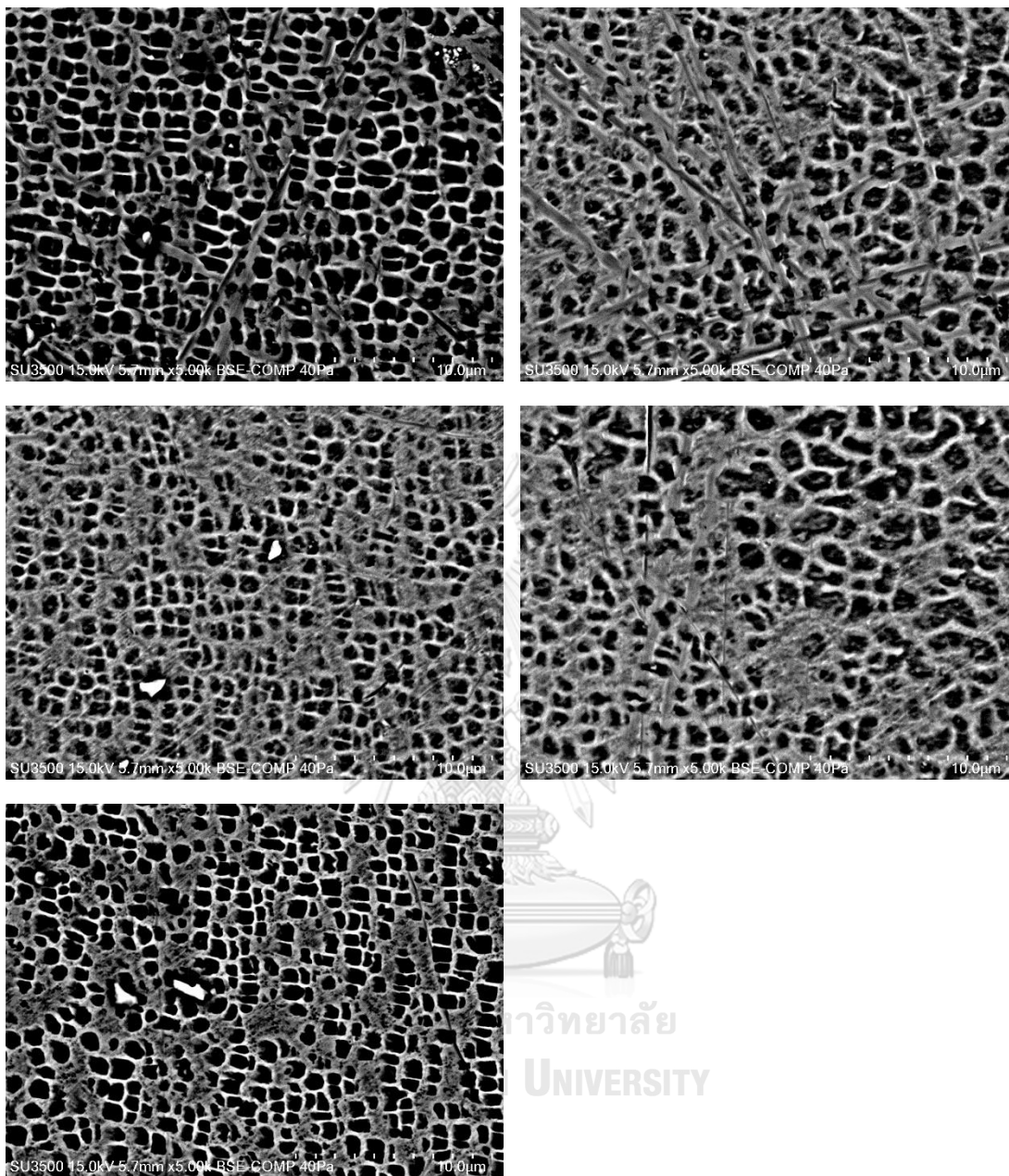
รูปถ่ายที่นำมาคำนวณหาขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มในขั้นตอนภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม, ในขั้นตอนภายหลังการเชื่อมด้วยเลเซอร์ และในขั้นตอนภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมแสดงในรูปที่ ก-4 ถึง ก-6



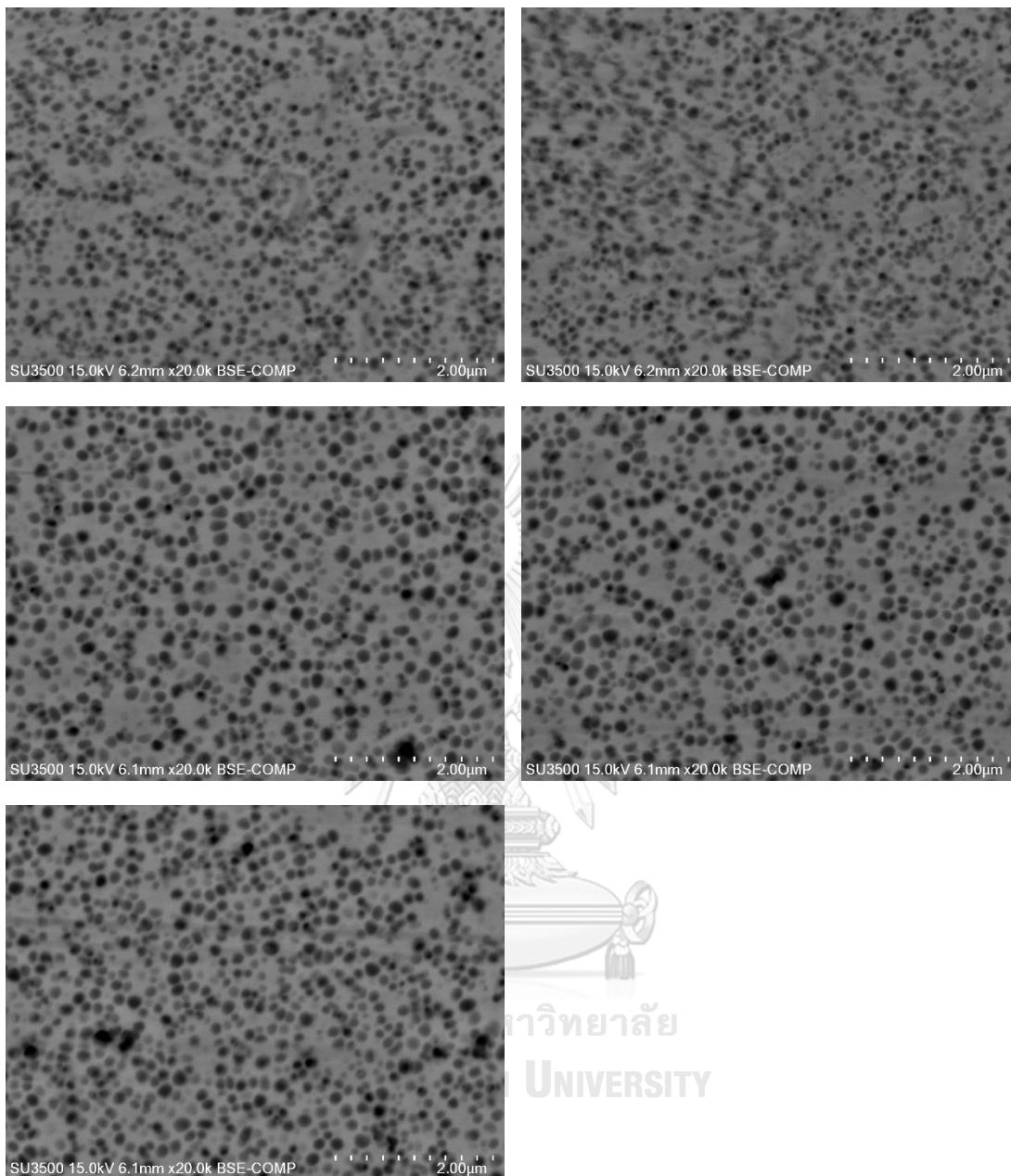
รูปที่ ก-4 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงาน A.R. ภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม



รูปที่ ก-5 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงาน A.R. บริเวณเนื้อพื้นภายหลังการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมชนิด อินโคเนล 625

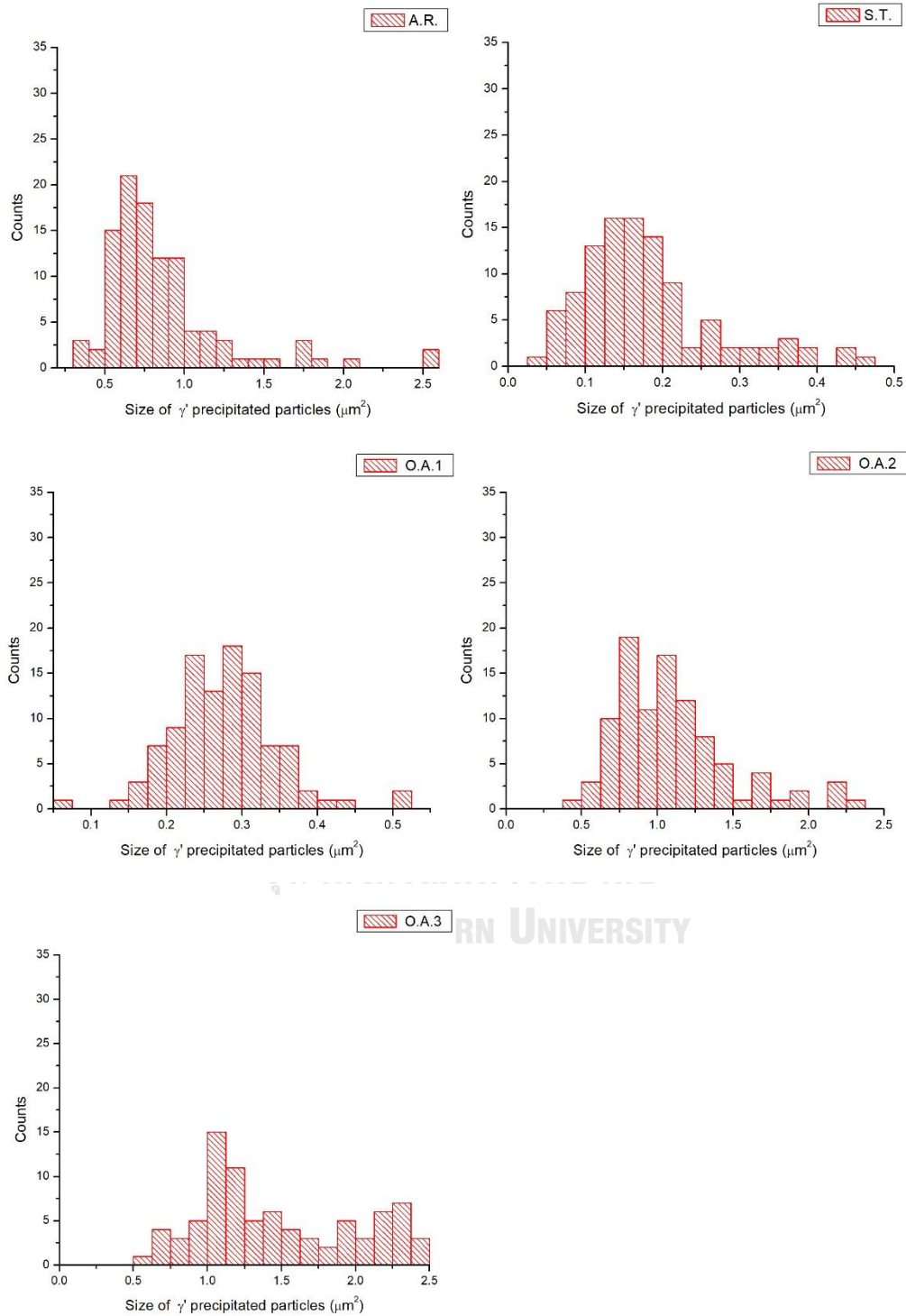


รูปที่ ก-6 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงาน A.R. บริเวณกระแทบร้อนภายหลังการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล 625

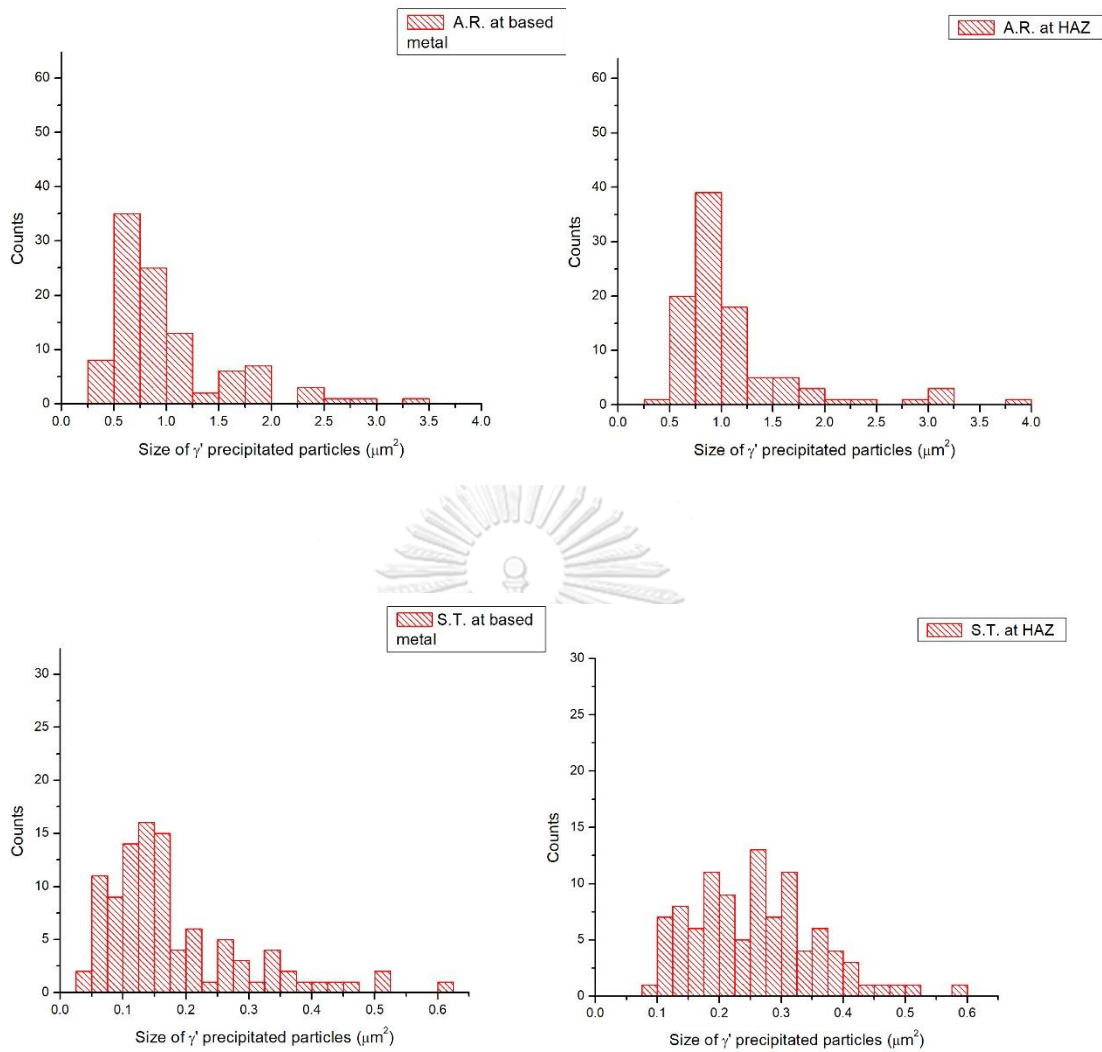


รูปที่ ก-7 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงาน A.R. ที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 บริเวณเนื้อ
พื้นภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม

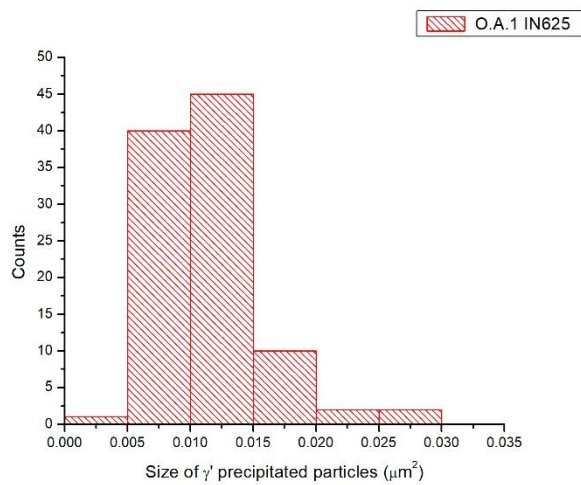
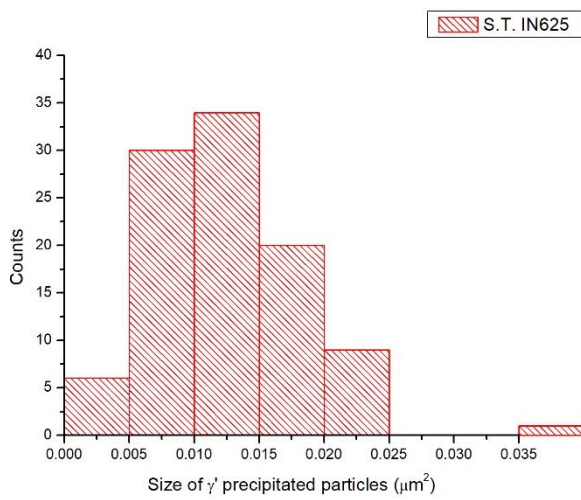
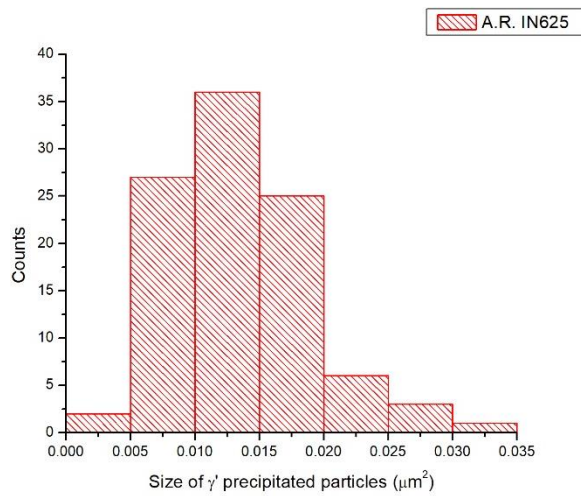
ตัวอย่างแผนภาพ Histogram แสดงขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ที่วัดด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ



รูปที่ ก-8 แผนภาพ histogram แสดงขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนก่อนการเชื่อม



รูปที่ ก-9 แผนภาพ histogram แสดงขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มภายหลังการเชื่อมเลเซอร์ด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625 บริเวณเนื้อพื้นและบริเวณกระตบร้อนของชิ้นงาน A.R. และ S.T.



รูปที่ ก-10 แผนภาพ histogram แสดงขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มภายหลังการให้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมอินโคเนล 625

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	จุฑาเมตต์ จารุรัตพันธ์
วัน เดือน ปี เกิด	18 มิถุนายน 2536
สถานที่เกิด	ขอนแก่น
วุฒิการศึกษา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	336/20 ถ.ศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY