



การศึกษสาเหตุการเกิดรอยร้าวท่อ Expander
ของ Main Steam Stop Valve โรงไฟฟ้าวังน้อย

นายพิเชษฐ์ สุขโต

โครงการวิจัยอุตสาหกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2556

การศึกษสาเหตุการเกิดรอยร้าวท่อ Expander
ของ Main Steam Stop Valve โรงไฟฟ้าวังน้อย

นายพิเชษฐ์ สุขโต อส.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล)

โครงการวิจัยอุตสาหกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบโครงการวิจัยอุตสาหกรรม

..... ประธานกรรมการสอบโครงการวิจัยอุตสาหกรรม
(ดร.ไพบุลย์ ช่างทอง)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัยอุตสาหกรรม
(ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข)

..... กรรมการ
(ดร.ศุภฤกษ์ บุญเกียรติ)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อโครงการวิจัยอุตสาหกรรม การศึกษาสาเหตุการเกิดรอยร้าวท่อ Expander ของ Main
Steam Stop Valve โรงไฟฟ้าวังน้อย

หน่วยกิต	6
ผู้เขียน	นายพิเชษฐ์ สุขโต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

โครงการอุตสาหกรรมนี้ มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาสาเหตุการเกิดรอยร้าวของท่อ Expander ของ Main Steam Stop Valve โรงไฟฟ้าวังน้อยซึ่งแต่เดิมท่อ Expander ใช้ Material ที่เป็นเหล็กธรรมดา ต่อมาเปลี่ยนเป็นเหล็ก P22 ทำให้ขนาดใหญ่และเปลืองพื้นที่มาก จึงได้มีการพัฒนามาใช้ Material ที่ทำจากเหล็ก P91 (ASME T91) ใช้สำหรับส่งถ่ายไอน้ำจากหม้อน้ำไปเพื่อขับเคลื่อน Steam Turbine เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของท่อ Expander ให้ทนต่ออุณหภูมิสูงและทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ซึ่งเมื่อนำเข้าใช้งานไประยะหนึ่งตรวจพบการแตกร้าวภายนอกท่อประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์โดยรอบและภายในบางส่วน ซึ่งเป็นรอยเชื่อมต่อระหว่างเหล็ก P91 กับ เหล็ก P22 ที่ทำการเชื่อมต่อด้วยลวด Inconel82 บริเวณ (Weld Fusion Line) ซึ่งจากการทดลองได้นำชิ้นงานที่เกิดจากการแตกร้าว นำไปส่องดู โครงสร้างจุลภาคและเทคนิคการตรวจสอบด้วยกล้อง SEM ดูส่วนผสมของธาตุบริเวณรอยแตกร้าว และบริเวณใกล้เคียงเพื่อนำมาวิเคราะห์ถึงปัจจัยและสาเหตุและสภาวะการใช้งาน โดยผลของการทดสอบนำมาอ้างอิงกับทฤษฎี เพื่อสรุปหาสาเหตุของการเกิดต่อไป

คำสำคัญ : ยิงดูส่วนผสม / รอยแตกของท่อ Expander / ลวดเชื่อม Inconel82 / ส่องดูโครงสร้าง / เหล็ก P91 / เหล็ก P22

Industrial Research Project Title	Study cause of crack of Expander pipe of Main Steam Stop Valve at Wong Noi Hydro Power Plant
Industrial Research Project Credits	6
Researcher	Mr. Phichet Sukto
Research Advisor	Dr. Pongsak Tuengsook
Program	Master of Engineering
Field of Study	Metallurgical Engineering
Department	Production Engineering
Faculty	Engineering
Academic Year	2013

Abstract

This industrial project was established on the purpose of studying failure of the tube expanders of Main Steam Stop Valve at Wang Noi Power Plant. The material of tube expanders had been manufactured by carbon steel and was subsequently changed to be manufactured by Steel P22 resulting in the tube enlargement and huge space required for placement. However, the development of Steel P91 (ASME T91) use was subsequently replaced for steam transmission from the heat recovery generator to drive the steam turbine in order for high-temperature and corrosion resistance increase. After a period of service, some fractures were found on the external surface at approximately 65% and somewhere on internal surface where Steel P91 and Steel P22 were jointly welded with Inconel 82 wire at the weld fusion line.

According to this study, the fracture welding work affected and caused fracture was examined for material microstructure and scanned for material compositions by SEM at the fracture and surrounding area to analyze the relevant factors, causes and service condition. The experimental findings would be referred to the theories in order for conclusion of fracture occurrence.

Keywords: Examined for material microstructure / Fracture of the tube expanders / Inconel 82 wire / Scanned for material compositions / Steel P22 / Steel P91

กิตติกรรมประกาศ

เนื่องจากการทำงานวิจัยต้องใช้ระยะเวลาในการทดลอง และต้องใช้เครื่องมือและ อุปกรณ์หลายอย่าง ทำให้การดำเนินงานวิจัยจึงสำเร็จลุล่วงไปได้ ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณในความสนับสนุนของกองหมื่อน้ำ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้วัสดุชิ้นงานตัวอย่างมาทำการศึกษาทดลองรวมทั้งความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกเรื่องเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ผู้ทำการวิจัยขอขอบพระคุณในความสนับสนุน รวมถึงคร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข อาจารย์ที่ปรึกษา และกรรมการทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษาชี้แนะตลอดจนการแก้ไขปัญหาต่างๆ ให้สำเร็จด้วยดี

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดาและมารดาของผู้วิจัยที่ให้โอกาสทางการศึกษา ขอบคุณภรรยาของผู้วิจัยที่เป็นกำลังหนุนและกำลังใจในการศึกษาครั้งนี้ ตลอดถึงคุณวิฑูรย์กองหมื่อน้ำและเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา และประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ย่อมเป็นผลจากความกรุณาของท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณอย่างยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ฉ
รายการสัญลักษณ์	ด
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	5
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	5
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	5
2. ทฤษฎี / งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 โลหะวิทยางานเชื่อม	6
2.2 คุณสมบัติของเหล็กเกรด P91 และเหล็กเกรด P22	13
2.3 การเชื่อม DISSIMILAR WELDING	17
2.4 ความเค้นตกค้าง	20
2.5 วิธีการวิเคราะห์ความเสียหาย	22
3. วิธีการทดลอง / ระเบียบวิธีวิจัย	28
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	28
3.2 วัสดุการทดลอง	28
3.3 การเตรียมชิ้นงานทดลอง	33
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	37

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	46
4.1 ผลการแสดงรูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยแตกและบริเวณใกล้เคียง	46
4.2 ผลการแสดงรูปเทคนิคการตรวจสอบด้วยกล้อง SEM บริเวณรอยแตกและบริเวณโครงสร้างใกล้เคียง	55
4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง	84
5. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	89
5.1 สรุปผลการทดลอง	89
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ	90
5.3 ข้อเสนอแนะ	90
เอกสารอ้างอิง	91
ภาคผนวก	
ก ข้อมูลทางการทดลอง	93
ข ข้อมูลทางการทดลอง	98
ค ขั้นตอนการเตรียมการทดลอง	135
ประวัติผู้วิจัย	145

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงผลกระทบที่เกิดจากธาตุไนโตรเจน ออกซิเจน และไฮโดรเจน กับงานเชื่อม [2]	9
2.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ P91 และวัสดุ P22 [16]	14
2.3 แสดงคุณสมบัติทางกลของวัสดุ P91 และวัสดุ P22 [14]	14
2.4 แสดงการเปรียบเทียบอายุการใช้งานของวัสดุที่เชื่อมโดยการ Butter [14]	17
2.5 แสดงวิธีการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกัน (Dissimilar Weld) [14]	18
2.6 การเลือกใช้สวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกัน [14]	18
2.7 แนวทางการทำ Post Weld Heat Treatment (PWHT) [14]	19
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ	30
4.1 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.16	56
4.2 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.18	58
4.3 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.20	59
4.4 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.22	61
4.5 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.24	62
4.6 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.26	64
4.7 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.28	66
4.8 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.30	68
4.9 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.33	71
4.10 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.35	72
4.11 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.37	74
4.12 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.39	75
4.13 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.41	77
4.14 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.43	78
4.15 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.45	80
4.16 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.47	82
4.17 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.49	83
ก.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ	95
ข.1 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.15	106

รายการตาราง(ต่อ)

ตาราง		หน้า
ข.2	อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.17	108
ข.3	อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.19	109
ข.4	อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.21	111
ข.5	อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.23	112
ข.6	อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.25	114
ข.7	อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.27	116
ข.8	อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.29	118
ข.9	อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.32	121
ข.10	อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.34	122
ข.11	อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.36	124
ข.12	อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.38	125
ข.13	อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.40	127
ข.14	อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.42	128
ข.15	อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.44	130
ข.16	อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.46	132
ข.17	อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.48	133

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
1.1	ตำแหน่งของท่อ Expander บน Line Main Steam pipe ในโรงไฟฟ้าวังน้อย	1
1.2	การเปรียบเทียบความหนาและน้ำหนักระหว่าง P91 และ P22	2
1.3	แสดงตำแหน่งการประกอบและแนวเชื่อมท่อ Expander	2
1.4	การเชื่อมต่อท่อ Expander ที่ 30% ของความหนาท่อ	3
1.5	การเชื่อมต่อท่อ Expander ที่ 60% ของความหนาท่อ	3
1.6	การเชื่อมต่อท่อ Expander ที่ 100% ของความหนาท่อ	4
1.7	รอย Crack ที่เกิดภายนอก และภายในผิวท่อ	4
2.1	Shielded metal arc welding :(a) overall process;(b) welding area enlarge [2]	6
2.2	Gas-tungsten arc welding: (a) overall process ;(b) welding area enlarged [2]	7
2.3	ประสิทธิภาพแหล่งความร้อนในกระบวนการเชื่อมโลหะ [2]	8
2.4	แสดงผลกระทบจากสารประกอบออกไซด์ที่แทรกฝังในเนื้อรอยเชื่อม [2]	10
2.5	แสดงผลกระทบของก๊าซที่ทำให้เกิดรูพรุนกระจายในรอยเชื่อม [2]	10
2.6	แสดงการพัฒนาของวัสดุ 9Cr-1Mo เป็นวัสดุ 9Cr-1MoVNb [15]	13
2.7	ภาพแสดงการเปรียบเทียบความหนาและน้ำหนักระหว่าง P91 กับ P22 [14]	15
2.8	กราฟแสดง Creep Strength ของวัสดุ T/P91 กับ T/P22 [16]	15
2.9	แสดงสัมประสิทธิ์การขยายของวัสดุ T/P91 กับ T/P22 [14]	16
2.10	แสดงแนวเชื่อมของ P91 บริเวณ Fine grain HAZ จุด Soft zone เป็นจุดที่มีค่าความแข็งของเนื้อวัสดุต่ำสุด ซึ่งต่ำกว่า Base Material [14]	16
3.1	ท่อ Expander ที่ต่อเข้ากับ Main Steam Stop Valve อุณหภูมิเฉลี่ยภายในท่อ 538 ⁰ C ความดันเฉลี่ยภายในท่อ 125 kg/cm ²	29
3.2	รูปการเชื่อมต่อของท่อ Expander	29
3.3	รูปการประกอบก่อนเชื่อมต่อของท่อ Expander	30
3.4	รูปการเชื่อมต่อของท่อ Expander	31
3.5	รูปหลังการเชื่อมต่อของท่อ Expander และนำเข้าใช้งาน	31
3.6	รอย Crack ที่เกิดภายนอกผิวท่อโดยรอบแนวเชื่อมระหว่างรอยต่อของ Main Steam Stop Valve กับท่อ Expander แตกเป็นแนวยาวแบบไม่ต่อเนื่อง ประมาณ 65% ของเส้นรอบวง	32
3.7	รอย Crack ที่เกิดภายนอกผิวท่อส่วนที่เหลืออีก 35% แตกเป็นจุดๆ	32

รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป	หน้า
3.8 ทำการตัดท่อ Expander ด้วย Cutting Wheel เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงแก้ไข	33
3.9 ทำการตัดท่อ Expander ด้วย Cut Off Wheel ตัดขาดชิ้นตอนสุดท้าย	34
3.10 ท่อ Expander หลังทำการตัดออกจาก Main Steam Stop Valve	34
3.11 รอยแตกรอบนอกได้ทำการเจียรออก	35
3.12 ทำการClean เพื่อทำการตรวจสอบด้วยน้ำยา Penetrant test	35
3.13 ด้านในของท่อ Expander ที่มีความหนา 80 mm. (ด้านที่ต่อเข้ากับ Main Steam Stop Valve)	36
3.14 ทำการวัดตำแหน่งด้านนอกที่เจียรรอยร้าวออกลึกประมาณ 50 mm.	36
3.15 ชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบหาตำแหน่งการแตกร้าว	38
3.16 พบรอยแตกร้าวด้านในท่อExpander โดยตำแหน่งใกล้กับรอยที่เจียรออกด้านนอก	38
3.17 นำชิ้นงานที่พบรอยแตกร้าวและทำการMark ไปตัดทอนด้วยเครื่องตัดขนาดใหญ่	39
3.18 ชิ้นงานที่นำมาตัดและตำแหน่งที่จัดคูโครงสร้าง บริเวณ No.5 เป็นบริเวณรอยแตก	39
3.19 นำชิ้นงานที่พบรอยแตกร้าวไปตัดด้วยเครื่องตัดขนาดเล็กและทำเรือนหุ้มแบบ Cold Mount	40
3.20 เครื่องตัดขนาดใหญ่	40
3.21 เครื่องตัดขนาดเล็ก	41
3.22 น้ำยาทำเรือน Mounting	41
3.23 เครื่องขัดผิวชิ้นงาน	42
3.24 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	42
3.25 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์	45
4.1 แสดงตำแหน่งโครงสร้างจุดต่างๆ บนชิ้นงาน	47
4.2 P1-100X (ตำแหน่งหมายเลข1) เป็นเนื้อ P22	48
4.3 P2-100X (ตำแหน่งหมายเลข 2) เป็นเนื้อรอยต่อของ P22 กับ Buffer Inconel82	48
4.4 P3-100X (ตำแหน่งหมายเลข 3) โซนใกล้รอยต่อ P22 กับ Buffer Inconel82	49
4.5 P4-100X (ตำแหน่งหมายเลข 4) เป็น โครงสร้างออสเทนไนต์เนื้อลวด Inconel82	49
4.6 รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยายต่ำ บริเวณตำแหน่งที่ 5 ของชิ้นงานเชื่อม	50
4.7 แสดงลักษณะการแตกผ่าแนวเชื่อมภายในพบสิ่งแปลกปลอมฝังอยู่ในแนวแตกร้าว	50

รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป		หน้า
4.8	แสดงลักษณะของรอยแตกตรงกลางพบสิ่งแปลกปลอมเป็นก้อนกลมๆ	51
4.9	แสดงลักษณะส่วนปลายของรอยแตก เกิดการขยายตัวและเกาะรวมกันเป็นกลุ่มพบคราบของออกไซด์เกาะปกคลุมรอบรอยแตก	51
4.10	ส่วนปลายเกิดจากการขยายตัวเกาะรวมกันเป็นกลุ่มและกระจายตัวเป็นช่วงๆบริเวณขอบพบคราบของออกไซด์เกาะปกคลุมโดยรอบ	52
4.11	P5-100X (ตำแหน่งหมายเลข5) แสดงบริเวณแนวเชื่อมทำให้เห็นแนวการเย็นตัวของผลึกเดนไดรต์ที่เย็นตัวเร็ว ที่มีลักษณะคล้ายกิ่งก้านของต้นไม้	52
4.12	P6-200X (ตำแหน่งหมายเลข6) โครงสร้างเป็นอสเทนไนต์พบเกิดการตกตะกอนเป็นคาร์ไบต์และเกิดการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ทำให้เกิดเกรนขนาดใหญ่	53
4.13	P7-100X (ตำแหน่งหมายเลข7) โครงสร้างเป็นอสเทนไนต์พบเกิดการตกตะกอนเป็นคาร์ไบต์และเกิดการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ทำให้เกิดเกรนขนาดใหญ่	53
4.14	P8-100X (ตำแหน่งหมายเลข8) แสดงบริเวณแนวเชื่อม ทำให้เห็นแนวการเย็นตัวของผลึก	54
4.15	P9 - 100X(ตำแหน่งหมายเลข 9 - 12)แสดงบริเวณแนวเชื่อมที่เป็นโครงสร้างของเบไนท์ (Bainite)	54
4.16	ตำแหน่งหมายเลข 1 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของเหล็ก P22 ซึ่งเป็นบริเวณของแนว Fusion zone และมีการรวมตัวของธาตุบางตัวเกิดขึ้น	56
4.17	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.16	57
4.18	ตำแหน่งหมายเลข 1 ซึ่งเป็นบริเวณของแนว Fusion zone พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกัน	57
4.19	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.18	58
4.20	ตำแหน่งหมายเลข 2 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของเหล็ก P22	59
4.21	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.20	60

รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป		หน้า
4.22	ตำแหน่งหมายเลข 2 ซึ่งเป็นบริเวณของแนว Fusion zone พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกัน	60
4.23	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.22	61
4.24	ตำแหน่งหมายเลข 3 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.5 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกับบริเวณตำแหน่งหมายเลข 2	62
4.25	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.24	63
4.26	ตำแหน่งหมายเลข 4 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.6 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างและมีปริมาณของธาตุคาร์บอนสูง	64
4.27	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.26	65
4.28	ตำแหน่งหมายเลข 6 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.7 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกัน	66
4.29	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.28	67
4.30	ตำแหน่งหมายเลข 9 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.8 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของเหล็ก P91 พบค่าของธาตุคาร์บอนสูงและโครงสร้างจุลภาคเป็นโครงสร้างเบไนท์ (Bainite)	68
4.31	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.30	69
4.32	รูปบริเวณรอย Crack และบริเวณใกล้เคียงของเนื้องานเชื่อม	70
4.33	บริเวณ Spectrum ที่ 1 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.9	70
4.34	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.33	71
4.35	บริเวณ Spectrum ที่ 2 พบการแยกตัวขององค์ประกอบธาตุดังตารางที่ 4.10 ซึ่งเป็นบริเวณขอบของรอยแตกที่พบการบวมออกไซด์และมีปริมาณของคาร์บอนอยู่แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของธาตุมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอบริเวณรอยแตก	72
4.36	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.35	73
4.37	บริเวณ Spectrum ที่ 3 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.11 ซึ่งใกล้เคียงกับองค์ประกอบธาตุของลวดเชื่อม Inconel82 และเนื้อเหมือนกับบริเวณ Spectrum ที่ 1	74

รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป		หน้า
4.38	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.37	74
4.39	บริเวณ Spectrum ที่ 2 พบสิ่งแปลกปลอมอยู่ในแนวตรงกลางรอยแตกก้อนกลมๆ ที่พบเป็นธาตุซิลิกอนซึ่งเป็นสิ่งแปลกปลอมบนผิวชิ้นงานซึ่งอาจเกิดจากการเตรียมชิ้นงานระหว่างการขัดเพื่อส่งคูโครงสร้าง	75
4.40	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.39	76
4.41	บริเวณ Spectrum ที่ 4 ซึ่งเป็นรอยแตกพองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าเนื้อตรงรอยแตกองค์ประกอบของธาตุเกิดการกระจายตัวที่แตกต่างกัน	76
4.42	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.41	77
4.43	บริเวณ Spectrum ที่ 1 เป็นบริเวณที่ถัดลงมาและเป็นส่วนปลายของรอยแตกพองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.14 ซึ่งเป็นบริเวณองค์ประกอบธาตุของเนื้อแนวเชื่อม Inconel82	78
4.44	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.43	79
4.45	บริเวณ Spectrum ที่ 2 เป็นบริเวณขอบของรอยแตกที่กระจายกระจายแบบไม่ต่อเนื่องพบซึ่งแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบธาตุเกิดการกระจายตัวที่แตกต่างกัน	80
4.46	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.45	81
4.47	บริเวณ Spectrum ที่ 5 ที่เป็นเนื้อนอกรอยแตกพองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.16 ซึ่งใกล้เคียงกับส่วนประกอบธาตุของลวดเชื่อม Inconel82 เนื้อเหมือนกับบริเวณ Spectrum ที่ 1	81
4.48	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.47	82
4.49	บริเวณ Spectrum ที่ 1 พองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.17 ซึ่งเป็นบริเวณองค์ประกอบธาตุของเนื้อแนวเชื่อม Inconel82 และเป็นการยืนยันว่ารอยแตกร้าวอยู่บนเนื้อของลวดเชื่อม	83
4.50	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.49	84
ก.1	ท่อ Expander ที่ต่อเข้ากับ Main Steam Stop Valve อุณหภูมิเฉลี่ยภายในท่อ 538 ⁰ C ความดันเฉลี่ยภายในท่อ 125 kg/cm ²	94
ก.2	รูปการเชื่อมต่อของท่อ Expander	94
ก.3	รูปการประกอบก่อนเชื่อมต่อของท่อ Expander	95
ก.4	รูปการเชื่อมต่อของท่อ Expander	96

รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป		หน้า
ก.5	รูปหลังการเชื่อมต่อของท่อ Expander และนำเข้าใช้งาน	96
ก.6	รอย Crack ที่เกิดภายนอกผิวท่อโดยรอบแนวเชื่อม	97
ก.7	รอย Crack ที่เกิดภายนอกผิวท่อส่วนที่เหลืออีก 35% แตกเป็นจุดๆ	97
ข.1	P1-100X (ตำแหน่งหมายเลข1) เป็นเนื้อ P22	99
ข.2	P2-100X (ตำแหน่งหมายเลข 2) เป็นเนื้อรอยต่อของ P22 กับ Buffer Inconel82	99
ข.3	P3-100X (ตำแหน่งหมายเลข 3) โซนใกล้รอยต่อ P22 กับ Buffer Inconel82	100
ข.4	P4-100X (ตำแหน่งหมายเลข 4) เป็นโครงสร้างออสเทนไนต์เนื้อลวด Inconel82	100
ข.5	รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยายต่ำ บริเวณตำแหน่งที่ 5 ของชิ้นงานเชื่อม	101
ข.6	แสดงลักษณะการแตกผ่านแนวเชื่อมภายในพบสิ่งแปลกปลอมฝังอยู่ในแนวแตกร้าว	101
ข.7	แสดงลักษณะของรอยแตกตรงกลางพบสิ่งแปลกปลอมเป็นก้อนกลมๆ	102
ข.8	แสดงลักษณะส่วนปลายของรอยแตก เกิดการขยายตัวและเกาะรวมกันเป็นกลุ่มพบคราบของออกไซด์เกาะปกคลุมรอบรอยแตก	102
ข.9	ส่วนปลายเกิดจากการขยายตัวเกาะรวมกันเป็นกลุ่มและกระจายตัวเป็นช่วงๆ บริเวณขอบพบคราบของออกไซด์เกาะปกคลุมโดยรอบ	103
ข.10	P5-100X (ตำแหน่งหมายเลข 5) แสดงบริเวณแนวเชื่อมทำให้เห็นแนวการเย็นตัวของผลึกเดนไดรต์ที่เย็นตัวเร็ว ที่มีลักษณะคล้ายกิ่งก้านของต้นไม้	103
ข.11	P6-200X (ตำแหน่งหมายเลข 6) โครงสร้างเป็นออสเทนไนต์พบเกิดการตกตะกอนเป็นคาร์ไบต์และเกิดการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ทำให้เกิดเกรนขนาดใหญ่	104
ข.12	P7-100X (ตำแหน่งหมายเลข 7) โครงสร้างเป็นออสเทนไนต์พบเกิดการตกตะกอนเป็นคาร์ไบต์และเกิดการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ทำให้เกิดเกรนขนาดใหญ่	104
ข.13	P8-100X (ตำแหน่งหมายเลข8) แสดงบริเวณแนวเชื่อมทำให้เห็นแนวการเย็นตัวของผลึก	105
ข.14	P9-100X (ตำแหน่งหมายเลข 9-12) แสดงบริเวณแนวเชื่อมที่เป็นโครงสร้างของเบนไนท์ (Bainite)	105
ข.15	ตำแหน่งหมายเลข 1 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.1 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของเหล็ก P22 ซึ่งเป็นบริเวณของแนว Fusion zone และมีการรวมตัวของธาตุบางตัวเกิดขึ้น	106
ข.16	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.15	107

รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป		หน้า
ข.17	ตำแหน่งหมายเลข 1 ซึ่งเป็นบริเวณของแนว Fusion zone พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.2 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกัน	107
ข.18	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.17	108
ข.19	ตำแหน่งหมายเลข 2 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของเหล็ก P22	109
ข.20	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.19	110
ข.21	ตำแหน่งหมายเลข 2 ซึ่งเป็นบริเวณของแนว Fusion zone พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกัน	110
ข.22	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.21	111
ข.23	ตำแหน่งหมายเลข 3 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.5 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกับบริเวณตำแหน่งหมายเลข 2	112
ข.24	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.23	113
ข.25	ตำแหน่งหมายเลข 4 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.6 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างและมีปริมาณของธาตุคาร์บอนสูง	114
ข.26	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.25	115
ข.27	ตำแหน่งหมายเลข 6 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.7 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกัน	116
ข.28	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.27	117
ข.29	ตำแหน่งหมายเลข 9 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.8 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของเหล็ก P91 พบค่าของธาตุคาร์บอนสูงและโครงสร้างจุลภาคเป็นโครงสร้างเบนไนท์ (Bainite)	118
ข.30	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.29	119
ข.31	รูปบริเวณรอย Crack และบริเวณใกล้เคียงของเนื้องานเชื่อม	120
ข.32	บริเวณ Spectrum ที่ 1 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.9	120

รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป		หน้า
ข.33	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.32	121
ข.34	บริเวณ Spectrum ที่ 2 พบการแยกตัวขององค์ประกอบธาตุดังตารางที่ ข.10 ซึ่งเป็นบริเวณขอบของรอยแตกที่พบคราบออกไซด์และมีปริมาณของคาร์บอนอยู่แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของธาตุมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอบริเวณรอยแตก	122
ข.35	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.34	123
ข.36	บริเวณ Spectrum ที่ 3 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.11 ซึ่งใกล้เคียงกับองค์ประกอบธาตุของลวดเชื่อม Inconel82 และเนื้อเหมือนกับบริเวณ Spectrum ที่ 1	124
ข.37	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.36	124
ข.38	บริเวณ Spectrum ที่ 2 พบสิ่งแปลกปลอมอยู่ในแนวตรงกลางรอยแตกก่อนกลมๆ ที่พบเป็นธาตุซิลิกอนซึ่งเป็นสิ่งแปลกปลอมบนผิวชิ้นงานซึ่งอาจเกิดจากการเตรียมชิ้นงานระหว่างการขัดเพื่อส่งคูโครงสร้าง	125
ข.39	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.38	126
ข.40	บริเวณ Spectrum ที่ 4 ซึ่งเป็นรอยแตกพบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.13 แสดงให้เห็นว่าเนื้อตรงรอยแตกองค์ประกอบของธาตุเกิดการกระจายตัวที่แตกต่างกัน	126
ข.41	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.40	127
ข.42	บริเวณ Spectrum ที่ 1 เป็นบริเวณที่ถัดลงมาและเป็นส่วนปลายของรอยแตกพบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.14 ซึ่งเป็นบริเวณองค์ประกอบธาตุของเนื้อแนวเชื่อม Inconel82	128
ข.43	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.42	129
ข.44	บริเวณ Spectrum ที่ 2 เป็นบริเวณขอบของรอยแตกที่กระจุกกระจายแบบไม่ต่อเนื่องพบซึ่งแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบธาตุเกิดการกระจายตัวที่แตกต่างกัน	130
ข.45	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.44	131
ข.46	บริเวณ Spectrum ที่ 5 ที่เป็นเนื้อนอกรอยแตกพบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.16 ซึ่งใกล้เคียงกับส่วนประกอบธาตุของลวดเชื่อม Inconel82 เนื้อเหมือนกับบริเวณ Spectrum ที่ 1	131
ข.47	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.46	132

รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป		หน้า
ข.48	บริเวณ Spectrum ที่ 1 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.17 ซึ่งเป็นบริเวณองค์ประกอบธาตุของเนื้อแนวเชื่อม Inconel82 และเป็นการยืนยันว่ารอยแตกร้าวยู่บนเนื้อของลวดเชื่อม	133
ข.49	สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.48	134

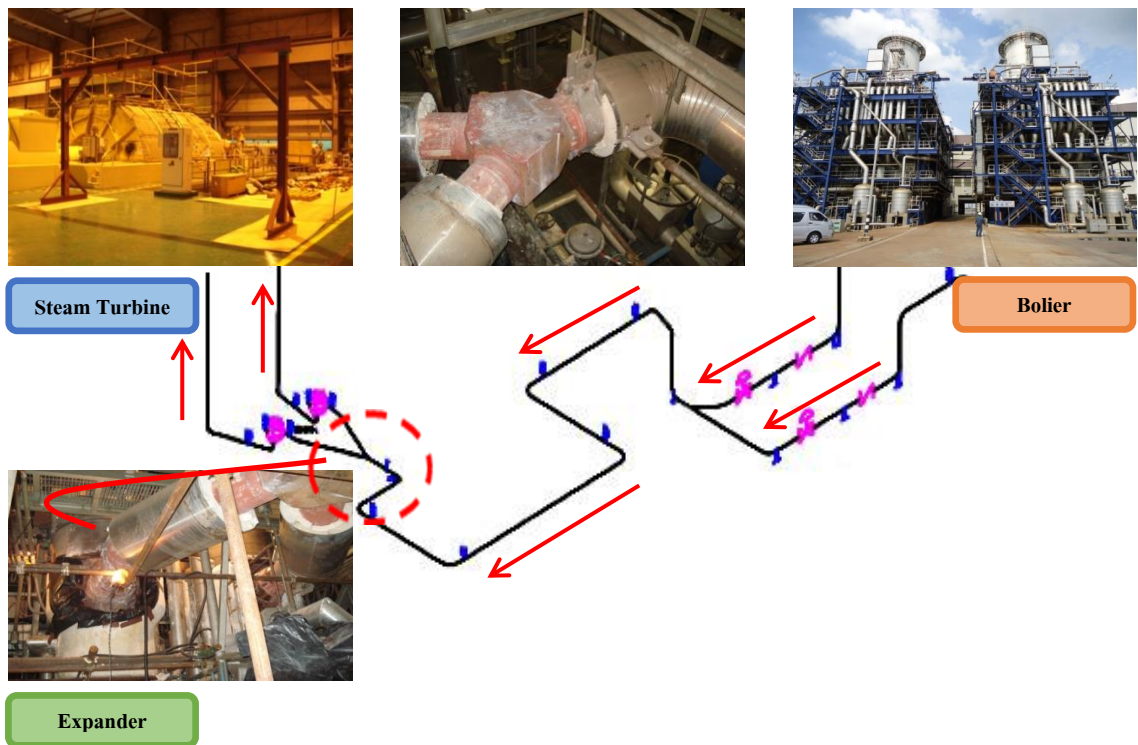
รายการสัญลักษณ์

A	=	Ampere
A5.11	=	Process การเชื่อมของAWS. Code.
A5.14	=	Process การเชื่อมของAWS. Code.
$^{\circ}\text{C}$	=	degree Celsius
EDS	=	Energy Dispersive X-ray Spectrometer
ERNiCr-3	=	Electrode Rod
ER90S-B9	=	Electrode Rod
ER308	=	Electrode Rod
eV	=	electronvolts
GTAW	=	Gas Tungsten Arc Welding
HAZ	=	Heat affected zone
Inconel82	=	ASME AWS Class A5.14
Kg/cm^2	=	Killogram per Square centimeter
mm	=	มิลลิเมตร
P22	=	ASTM Grade P22
P91	=	ASTM Grade P91
PT	=	Penetrant Testing
RT	=	Radiographic Testing
SEM	=	Scanning Electron Microscope
SMAW	=	Shield Metal Arc Welding
TIG	=	Tungsten Inert Gas
UT	=	Penetrant Testing
μm	=	ไมโครเมตร 1 ใน 1,000,000 เมตร

บทที่ 1 บทนำ

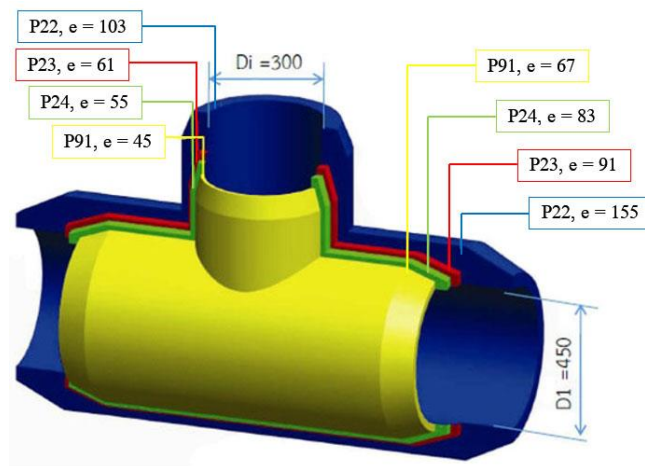
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันโรงไฟฟ้าใหม่ถูกออกแบบมาให้ใช้วัสดุ ที่รองรับการใช้งานที่ความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น ท่อExpanderเป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่าง Boiler กับ Steam Turbine ดังรูปที่ 1.1 มี Steam ไหลผ่าน ภายในท่อเพื่อนำ Steam ไปขับ Turbine ที่ความดัน และอุณหภูมิสูงโดยมีค่าความดันเฉลี่ย 125kg/cm^2 และมีอุณหภูมิเฉลี่ย 538°C

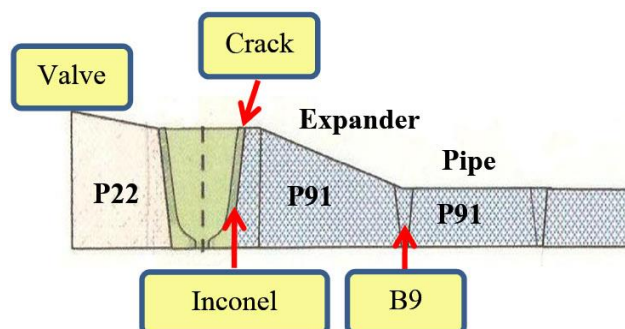


รูปที่ 1.1 ตำแหน่งของท่อ Expander บน Line Main Steam pipe ในโรงไฟฟ้าวงน้ย

ดังนั้นจึงมีการนำเหล็กเกรด P91 มาใช้งานในส่วนนี้ โดยเหล็กเกรด P91 มีส่วนผสมของโครเมียม 9 เปอร์เซ็นต์ โมลิบดีนัม 1 เปอร์เซ็นต์ และการเติมธาตุวานาเดียมและไนโอเบียมลงไป เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้มีความต้านทานในการยึดตัวสูงและมี Creep Rupture Strength ที่สูงขึ้น จากรูปที่ 1.2 การเปรียบเทียบความหนาและน้ำหนักที่ต้องใช้ ระหว่างเหล็กเกรด P91 กับเหล็กเกรด P22 ทำให้เห็นว่าความหนาที่ลดลงมากกว่า 54 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบเดิมที่ใช้เหล็กเกรด P22 ซึ่งมีส่วนผสมของโครเมียม 2.5 เปอร์เซ็นต์ โมลิบดีนัม 1 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ท่อ Expander ที่ทำจากเหล็กเกรด P91 มีขนาดเล็กกว่าและน้ำหนักเบากว่าท่อที่ทำจากเหล็กเกรด P22 ท่อ Expander ที่มาจากโรงงานผลิต ได้ถูกทำการเชื่อม Buffer มาจากโรงงานและได้ทำตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASME



รูปที่ 1.2 การเปรียบเทียบความหนาและน้ำหนักระหว่าง P91 กับ P22 [14]

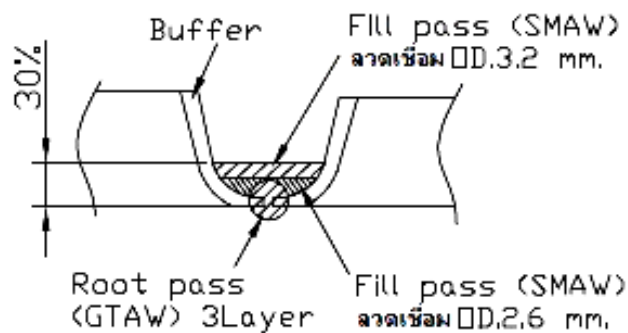


รูปที่ 1.3 แสดงตำแหน่งการประกอบและแนวเชื่อมท่อ Expander

ท่อ Expander ได้นำมาติดตั้งที่โรงไฟฟ้าโดยช่างเชื่อมได้ทำการเชื่อมต่อกับตัว Main Steam Stop Valve โดยมีขั้นตอนการเชื่อมต่อท่อดังต่อไปนี้

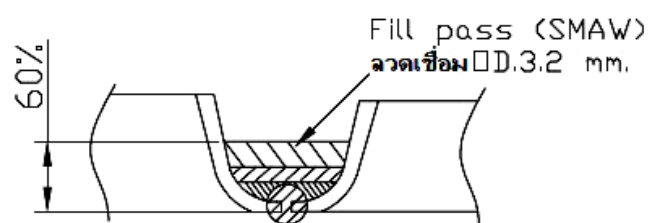
ขั้นตอนกระบวนการเชื่อมท่อ Expander

- Buffer จากโรงงานทำการเชื่อมต่อ Root Pass โดยกระบวนการเชื่อม TIG (GTAW) ด้วยลวดเชื่อม ERNiCr-3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมเท่ากับ 2.4 mm. โดยมีการเชื่อมทั้งหมด 3 Layer อุณหภูมิ Preheat เท่ากับ 200°C การ Fill Pass ทำโดยการเชื่อมแบบอาร์คไฟฟ้า (SMAW) ด้วยลวดเชื่อม ENiCrFe-3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมเท่ากับ 2.6 mm. และ 3.2 mm. และทำการตรวจสอบที่ 30% ของความหนาท่อ Expander โดย UT.



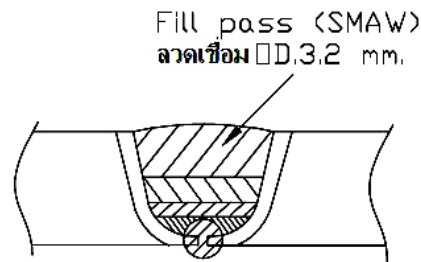
รูปที่ 1.4 การเชื่อมต่อท่อ Expander ที่ 30% ของความหนาท่อ

- หลังจากนั้นทำการเชื่อม ขั้นตอนที่ 2 ที่ 60 เปอร์เซนต์ ของความหนาท่อ Expander โดยมีอุณหภูมิการ Preheat เท่ากับ 200°C การ Fill Pass ทำโดยการเชื่อมแบบอาร์คไฟฟ้า (SMAW) ด้วยลวดเชื่อม ENiCrFe-3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อม 3.2 mm. และทำการตรวจสอบที่ 60 เปอร์เซนต์ ของความหนาท่อ Expander โดย RT. หลังจากนั้นทำการเชื่อม



รูปที่ 1.5 การเชื่อมต่อท่อ Expander ที่ 60% ของความหนาท่อ

- ขั้นตอนที่ 3 ที่ 100% ของความหนาท่อ Expander อุณหภูมิการ Preheat เท่ากับ 200°C การ Fill Pass ทำโดยการเชื่อมแบบอาร์คไฟฟ้า (SMAW) ด้วยลวดเชื่อม ENiCrFe-3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อม 3.2 mm. หลังจากนั้นมีการทำ Postheat ที่อุณหภูมิ $300-350^{\circ}\text{C}$ นาน 30 นาทีและทำการตรวจสอบที่ 100% ของความหนาท่อ Expander โดย RT. ซึ่งทำตามข้อกำหนดของ Standard ASME



รูปที่ 1.6 การเชื่อมต่อท่อ Expander ที่ 100% ของความหนาท่อ

ท่อ Expander ที่ทำจากเหล็ก P91 พบปัญหาในส่วนของการเชื่อมซึ่งเป็นการเชื่อมต่อกับเหล็ก P22 ซึ่งเป็นโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar Weld) เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งจะพบปัญหาการแตกร้าวบริเวณแนวเชื่อมดังเช่นที่โรงไฟฟ้าวังน้อยพบการแตกร้าวภายนอกท่อประมาณ 65% โดยรอบและภายในบางส่วนซึ่งเป็นตำแหน่งเชื่อมต่อระหว่างเหล็ก P91 กับเหล็ก P22 เชื่อมต่อด้วยลวด Inconel82 หลังการใช้งานในสภาพการใช้งานปกติเป็นระยะเวลา 58,254 ชั่วโมง พบปัญหารอยร้าว (crack) ที่บริเวณแนวเชื่อม จึงเป็นที่มาของงานวิจัยที่ต้องการทราบสาเหตุที่ก่อให้เกิดความเสียหาย โดยการนำชิ้นงานที่เกิดการแตกร้าวไปตรวจสอบเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของการแตกร้าวที่แท้จริงต่อไป



รูปที่ 1.7 รอย Crack ที่เกิดภายนอก และภายในผิวท่อ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาหาสาเหตุการเกิดรอยร้าวท่อ Expander ที่เชื่อมต่อด้วยลวด Inconel82 ระหว่างเหล็ก P91 กับเหล็ก P22
2. เพื่อยืนยันกระบวนการเชื่อมท่อ Expander มีความเหมาะสมหรือไม่ในการเชื่อมต่อเหล็ก P91 กับเหล็ก P22 ด้วยลวดเชื่อม Inconel82
3. เพื่อศึกษาผลกระทบในโครงสร้างทางโลหะวิทยา

1.3 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถใช้เป็นข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างที่เกิดขึ้นในการเชื่อมซึ่งนำมาวิเคราะห์หาสาเหตุของความเสียหายท่อ Expander ของ Main Steam Stop Valve ของโรงไฟฟ้าวังน้อย
2. สามารถต่อยอดในการศึกษาหาสาเหตุทางด้านอื่นๆ เพิ่มเติมและหาแนวทางแก้ไขป้องกันต่อไป
3. เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายในลักษณะเดียวกันเกิดขึ้นอีก

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาวิเคราะห์สาเหตุของการแตกร้าวจากโครงสร้างที่ตำแหน่งที่เกิดการแตกและบริเวณที่ทำการเชื่อมต่อด้วยลวด Inconel82
2. ศึกษาวิเคราะห์สาเหตุของการแตกร้าวจากส่วนผสมที่ตำแหน่งที่เกิดการแตกและบริเวณที่ทำการเชื่อมต่อด้วยลวด Inconel82
3. ศึกษากระบวนการเชื่อมท่อ Expander มีความเหมาะสมในการเชื่อมต่อระหว่างเหล็ก P91 กับเหล็ก P22 ด้วยลวด Inconel82 อย่างไร

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาข้อมูลของเหล็ก P91 สภาวะการใช้งานและกระบวนการเชื่อมที่มีผลต่อการแตกร้าว
2. ศึกษาหาวิธีที่ใช้ในการทดลอง
3. วางแผนออกแบบการทดลอง
4. เตรียมวัสดุและอุปกรณ์เพื่อทำการทดลอง
5. ดำเนินการทดลอง
6. สรุปผลการทดลองโดยใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องหาสาเหตุของการเกิดรอยร้าวและเสนอแนวทางการปรับปรุงแก้ไข

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

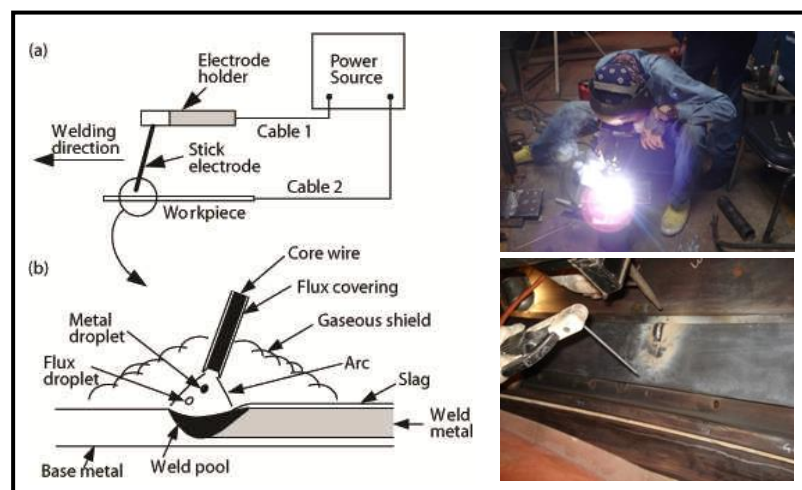
2.1 โลหะวิทยางานเชื่อม

การศึกษสาเหตุการเกิดรอยร้าวที่ Expander ของ Main Steam Stop Valve จำเป็นต้องทำการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการเชื่อมและการแตกร้าวจากการเชื่อมเพื่อที่จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยจะอ้างอิงในหัวข้อที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1.1 การเชื่อมโลหะ

2.1.1.1 กระบวนการเชื่อมไฟฟ้า (SMAW)

มีชื่อเรียกตามมาตรฐานอเมริกาว่า Shield Metal Arc Welding (SMAW) เกิดจากการอาร์คระหว่างปลายลวดเชื่อมไฟฟ้า (Electrode) กับชิ้นงาน (Base Metal) ทำให้เกิดความร้อนอันรุนแรง (ประมาณ $3,300^{\circ}\text{C} - 5,000^{\circ}\text{C}$) เพื่อเผาแผ่นโลหะงานตรงจุดที่อาร์คให้หลอมละลายเป็นแอ่ง ดังรูปที่ 2.1 ขณะเดียวกันปลายลวดเชื่อมก็หลอมละลายและหยดเติมลงไปในแอ่งนั้นฟลักซ์ที่หุ้มลวดก็จะแตกตัวทำให้เกิดกลุ่มแก๊สต่างๆขึ้นทำหน้าที่ปกคลุมแนวเชื่อมและกลายเป็นสแลก



รูปที่ 2.1 Shielded metal arc welding :(a) overall process;(b) welding area enlarge [2]

ข้อดีของกระบวนการเชื่อมไฟฟ้า

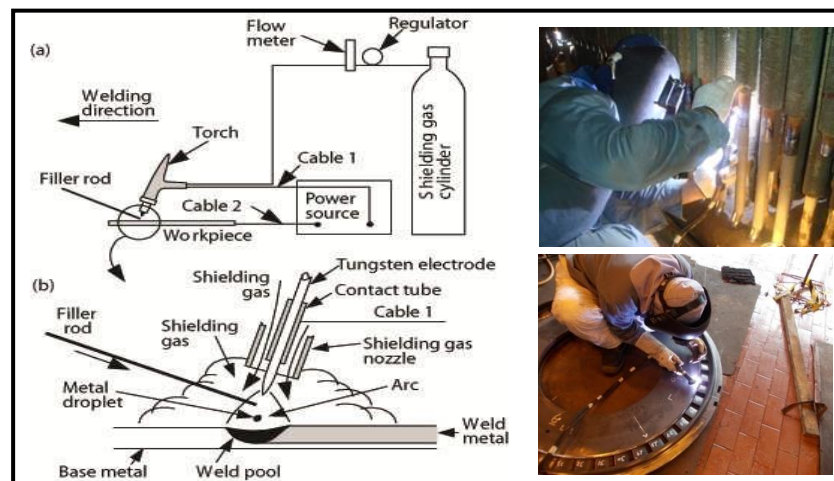
- มีต้นทุนต่ำ
- ทำได้ทั้งใน และนอกสถานที่
- กระบวนการเชื่อมไม่ยุ่งยาก

ข้อเสียของกระบวนการเชื่อมไฟฟ้า

- เกิด SPATTER ขณะเชื่อม
- เกิดควันมากขณะเชื่อม
- งานบีดตัว และหดตัว
- การตรวจสอบคุณภาพของงานเชื่อมทำได้ยาก

2.1.1.2 กระบวนการเชื่อมทิก (GTAW)

มีชื่อเรียกตามมาตรฐานอเมริกาว่า Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) เกิดจากการอาร์คระหว่างแท่งทังสเตนอิเล็กโทรดกับชิ้นงานบริเวณที่เกิดการอาร์คจะมีแก๊สเฉื่อย (Inert gas) ปกคลุมบริเวณนั้นเพื่อป้องกันออกซิเจน ไนโตรเจน และความชื้นในอากาศเข้ามารวมกับโลหะที่กำลังหลอมละลาย ดังรูปที่ 2.2 แต่เนื่องจากแท่งทังสเตนอิเล็กโทรดเป็นวัสดุที่ไม่หลอมละลายหรือไม่สิ้นเปลือง จึงจำเป็นต้องเติมลวดเชื่อมลงในบ่อหลอมละลาย กรณีที่เชื่อมโลหะบางๆ อาจไม่จำเป็นต้องเติมลวดเชื่อมก็ได้ การเชื่อมทิกสามารถเชื่อมเหล็กที่มีความหนาตั้งแต่ 0.79 - 4 มม. ได้



รูปที่ 2.2 Gas-tungsten arc welding: (a) overall process ;(b) welding area enlarged [2]

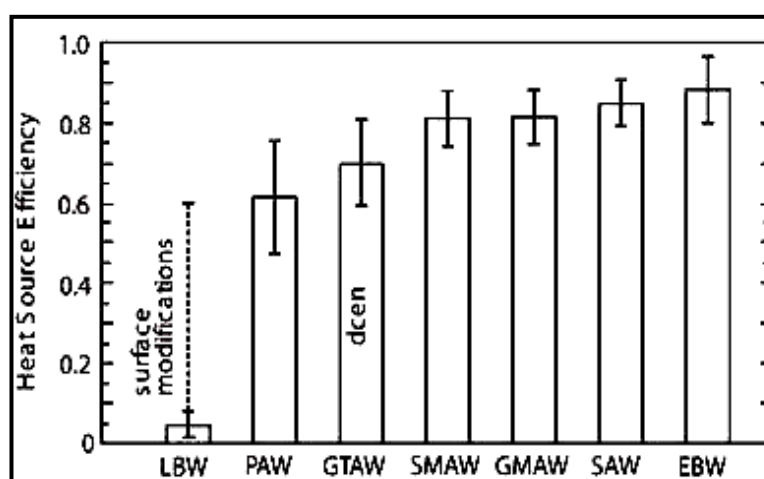
ข้อดีของกระบวนการเชื่อมทิก

- แนวเชื่อมสะอาดปราศจากสะเก็ดปกคลุม
- ไม่มีสะเก็ดโลหะ
- ไม่มีควัน
- สามารถมองเห็นบ่อหลอมละลายได้ชัดเจน
- ไม่มีเสียงดังรบกวน
- ใช้เชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิด อาทิเช่น เหล็ก สแตนเลส อลูมิเนียม
- ใช้ในงานเชื่อมที่ต้องการคุณภาพสูง อาทิเช่น เชื่อมแนวรุต (Root)

ข้อเสียของกระบวนการเชื่อมทิก

- อัตราการเติมลดช้าทำให้เชื่อมได้ช้า
- ต้องใช้ทักษะในการเชื่อมสูง

การถ่ายเทความร้อนระหว่างการเชื่อมโลหะจะมีผลกระทบโดยตรงและรุนแรงต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบโครงสร้างเนื้อโลหะหรือเฟส ทั้งในส่วนแนวเชื่อมและเนื้อโลหะข้างเคียงที่ได้รับความร้อนจนมีระดับอุณหภูมิสูงมาก การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวกระทบต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติของเนื้อโลหะทั้งในรอยเชื่อมและเนื้อโลหะข้างเคียง นอกจากนี้ยังส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้างของชิ้นงาน จากรูปที่ 2.3 การเชื่อม SMAW จะแตกต่างจาก GTAW เพราะความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่อิเล็กโทรดจะถ่ายเทเข้าสู่ชิ้นงานได้จากหยดน้ำโลหะ ทำให้ประสิทธิภาพแหล่งความร้อนเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.3 ประสิทธิภาพแหล่งความร้อนในกระบวนการเชื่อมโลหะ [2]

2.1.2 ปฏิริยาเคมีในงานเชื่อม

ปฏิริยาเคมีพื้นฐานที่เกิดขึ้นระหว่างการหลอมเนื้อโลหะในงานเชื่อม จะเกิดขึ้นระหว่างก๊าซ-น้ำโลหะและระหว่างตะกรัน-น้ำโลหะเหล่านี้ล้วนแต่มีผลกระทบต่อส่วนผสมเคมีเนื้อโลหะและคุณสมบัติทางกลของเนื้อโลหะ

ภาพรวมปฏิริยาเคมี

2.1.2.1 ผลกระทบของไนโตรเจน ออกซิเจน และไฮโดรเจน

ไนโตรเจน ออกซิเจน และไฮโดรเจนสามารถละลายปนในน้ำโลหะระหว่างการเชื่อม ก๊าซเหล่านี้มาจากอากาศ มาจากวัสดุสิ้นเปลือง ก๊าซคลุมแนวเชื่อมและฟลักซ์ มาจากโลหะงานเชื่อมที่มีความชื้น เกาะผิว ผิวโลหะสกปรก ก๊าซเหล่านี้มีผลกระทบต่อความสมบูรณ์ของเนื้อโลหะแนวเชื่อมอย่างมาก สรุปผลกระทบของก๊าซแสดงไว้ในตาราง 2.1

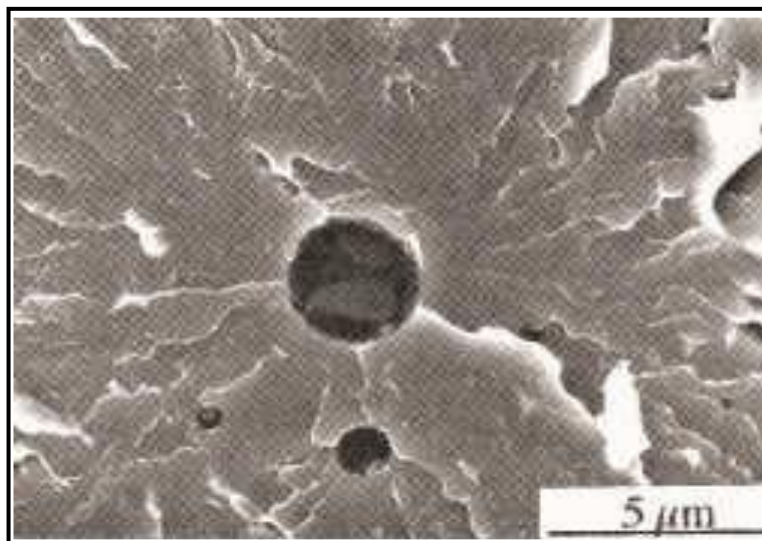
ตารางที่ 2.1 แสดงผลกระทบที่เกิดจากธาตุไนโตรเจน ออกซิเจน และไฮโดรเจนกับงานเชื่อม [2]

	Nitrogen	Oxygen	Hydrogen
Steel	Increases strength but reduces toughness	Reduces toughness but improves it if acicular ferrite is promoted	Induces hydrogen cracking
Austenitic or duplex Stainless steels Aluminum	Reduces ferrite and promotes solidification cracking		
		Forms oxide films that can be trapped as inclusions	Forms gas porosity and reduces both strength and ductility
Titanium	Increases strength but reduces ductility	Increases strength but reduces ductility	

2.1.2.2 ผลกระทบของออกซิเจนที่ละลายปนในน้ำโลหะ

แนวเชื่อมจะออกซิไดซ์คาร์บอนและธาตุผสมเดิมต่างๆ ในน้ำเหล็ก บ่อหลอมละลายทำให้เนื้อเหล็กหลังการแข็งตัวมีคุณสมบัติหุบแข็งลดลง ทำให้เกิดสารประกอบแทรกฝังในเนื้อเหล็ก ออกซิเดชั่นของธาตุผสมเดิมอื่นๆ ในปฏิริยาระหว่างตะกรัน-น้ำโลหะ จะกลายเป็นออกไซด์ทั้งละลายปนในตะกรันและละลายปนในน้ำโลหะกลายเป็นสารประกอบออกไซด์แทรกฝังในเนื้อโลหะรอยเชื่อม ทำให้เนื้อเหล็กสูญเสียธาตุผสมเดิมละลายปนในตะกรันในปริมาณมาก คุณสมบัติทางกลเนื้อเหล็กรอยเชื่อมจะลดต่ำลงเป็นผลเสียต่อการใช้งาน

ที่มาของออกซิเจน ออกซิเจนในเนื้อโลหะแนวเชื่อมมีที่มาจากอากาศ ความชื้นผสมรวมอยู่ด้วย นอกจากนี้ ออกซิเจนยังมาจากการสลายตัวของสารประกอบออกไซด์บางชนิดทั้งที่อยู่ในฟลักซ์หรือมาจากปฏิกิริยาเคมี



รูปที่ 2.4 แสดงผลกระทบจากสารประกอบออกไซด์ที่แทรกฝังในเนื้อรอยเชื่อม [2]

และสารประกอบออกไซด์แทรกฝังในเนื้อเหล็กซึ่งดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะทำให้ตำแหน่งที่แทรกฝังเป็นจุดเริ่มของการแตกของเนื้อเหล็กได้และออกซิเจนในบ่อหลอมละลายยังทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในน้ำเหล็กกลายเป็น CO ในขณะที่การแข็งตัวของน้ำเหล็กดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงผลกระทบของก๊าซที่ทำให้เกิดรูพรุนกระจายในรอยเชื่อม [2]

2.1.3 โลหะผสมนิกเกิล

หน้าที่ของธาตุต่างๆ ในโลหะผสมนิกเกิลของโลหะผสม [17]

2.1.3.1 นิกเกิล (Ni) จะเพิ่มคุณสมบัติความแข็งแรงของเหล็กและลดค่าอัตราเย็นตัววิกฤต เหล็กกล้าที่มีโครเมียม 18% และนิกเกิล 2% จะสามารถถูกทำให้แข็งโดยนิกเกิล และถูกทำให้เป็นสแตนเลสด้วยโครเมียม เหล็กกล้าเหล่านี้จะเป็นเหล็กกล้ามาเทนไซต์โลหะหลักที่ดีมาก เพราะไม่เพียงแต่มีความต้านทานการกัดกร่อนระดับปานกลางแล้วยังสามารถนำมาผสม โมลิบดีนัม โครเมียม เหล็ก ทังสเตน ได้อีกด้วย แต่ยังคงสามารถรักษาโครงสร้างลูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์ที่สามารถเปลี่ยนรูปได้ คุณสมบัติเฉพาะบางประเภทที่ถ่ายทอดจากนิกเกิลไปสู่โลหะผสมก่อให้เกิดการความต้านทานต่อรอยแตกหรือรอยร้าวที่เกิดจากการกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (SCC) ความต้านทานต่อการประกอบอื่นที่เป็นตัวทำลาย และต้านทานต่อการครดไฮโดรฟลูออริก

2.1.3.2 โครเมียม (Cr) เป็นธาตุผสมหลักในเหล็กกล้าทนความร้อน มีหน้าที่ต้านทานต่อการเกิดการกัดกร่อนและการเติมออกซิเจน ซึ่งมีเพียง 5% ก็สามารถช่วยในการป้องกันความเสียหายจากปฏิกิริยาเคมีได้ การที่มันสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ก็เพราะว่าที่ผิวเกิดฟิล์มออกไซด์ ซึ่งโดยมากจะเป็นโครเมียมออกไซด์ ซึ่งป้องกันส่วนผสมไม่ให้เกิดการเติมออกซิเจนมากนัก โครเมียมนี้เป็นตัวทำให้เกิดเฟอร์ไรต์ ถ้าเหล็กกล้าเหล่านี้ถูกเผาให้ร้อนกว่าอุณหภูมิหนึ่ง เกรนจะเริ่มโตขึ้นเนื่องจากการร้อนจัดเกินไปและไม่สามารถเล็กลงเมื่อเย็นตัว ทั้งนี้ก็เพราะไม่มีการเปลี่ยนรูปเกิดขึ้น ดังนั้นเกรนของเฟอร์ไรต์จึงยังคงหยาบและโลหะจะเริ่มเปราะ ทำให้เหล็กโครเมียมอัลลอยด์เปราะ ในช่วงโครเมียม 12-13% โครงสร้างของโลหะผสมจะเป็นแบบ duplex และสามารถที่จะเปลี่ยนรูปเป็นมาร์เทนไซต์ที่ละเอียดมากได้ คุณสมบัติของโครเมียมที่อยู่ในโลหะผสมนิกเกิลนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับที่อยู่ในสแตนเลสสตีลก็คือ เพื่อก่อตัวให้เกิดการสร้างฟิล์ม ฟิล์มชนิดนี้เป็นเกราะป้องกันจากสภาวะแวดล้อมที่มีออกซิเจน คุณสมบัติอีกอย่างรองลงมาคือเพิ่มความแข็งแรงให้แก่สารละลายของแข็ง

2.1.3.3 โมลิบดีนัม (Mo) เป็นตัวทำให้เกิดเฟอร์ไรต์อีกตัวหนึ่ง โมลิบดีนัมนอกจากจะมีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของสภาวะแล้ว ยังช่วยป้องกันปฏิกิริยาทางเคมีบางอย่างด้วย ดังนั้นมันจึงมีอิทธิพลต่อโครงสร้างเล็กๆ มาก โมลิบดีนัมยังสามารถเพิ่มคุณสมบัติความเหนียวที่อุณหภูมิให้แก่อสเทนิตซึ่งทำให้ลดความโน้มเอียงที่จะร้าวได้ดีขึ้น การเพิ่มสาร โมลิบดีนัมในนิกเกิลจะยิ่งช่วยเพิ่มมิให้โลหะทำปฏิกิริยาในสภาวะที่กระตุ้นการกัดกร่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการเคมีที่ทำปฏิกิริยารีดักชัน กรดไฮโดรคลอริกหากมีการผสมกับโครเมียมจะทำให้โลหะผสมยังมีคุณสมบัติเพิ่มขึ้น (มีความต้านทานต่อทั้งสารเคมีที่ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน) สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบหลุมในสภาวะที่มีคลอไรด์ การกัดกร่อนแบบช่องแคบ อีกทั้งโมลิบดีนัมยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงของสารละลายของแข็งที่มีนิกเกิลสูงเนื่องจากมีขนาดอะตอมขนาดใหญ่

2.1.3.4 ทังสเตน (W) สสารชนิดนี้มีคุณสมบัติในลักษณะเช่นเดียวกับโมลิบดีนัมและโดยมากจะนำมาผสมกับโมลิบดีนัม และยังเป็นตัวเพิ่มความแข็งแรงให้แก่สารละลายของแข็งอีกด้วย

2.1.3.5 เหล็ก วัตถุประสงค์หลักในการเพิ่มเหล็กในโลหะผสมนิกเกิลก็เพื่อเป็นการลดต้นทุน แต่ก็มีประโยชน์เช่นกัน ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นและในกรดไนตริกโดยอาจช่วยเสริมให้เกิดการสร้างฟิล์มป้องกัน (Passive films)

2.1.3.6 คาร์บอน (C) เป็นตัวทำให้เกิดคาร์ไบด์ที่ซับซ้อนต่างๆ กันในเหล็กโครเมียมผสม

2.1.3.7 แมงกานีส (Mn) สามารถใช้แทนนิกเกิลได้บ้างบางส่วนหรืออาจแทนได้หมดเลย โครเมียม - แมงกานีส และโครเมียม - นิกเกิล - แมงกานีสสตีล เหล็กเหล่านี้พร้อมที่จะสามารถเชื่อมได้เหมือนกับ Ni - Cr austenitic steel โดยตรง

2.1.3.8 ซิลิกอน (Si) เป็นตัวทำให้เกิดเฟอร์ไรท์ และยังเพิ่มความต้านทานในการเกิดสเกลของ Ni-Cr austenite steel ในแก๊สออกซิเจนได้ซึ่งที่ร้อน ซึ่งมันให้ผลคล้ายกับโครเมียมในการช่วยการเกิดของสภาวะเฟอร์ไรท์ การที่มีซิลิกอนมากเกินไปจะเพิ่มความโน้มเอียงที่จะร้าวเมื่อร้อนแก่เหล็กกล้าออสเทนิติก ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดปริมาณซิลิกอน เพื่อป้องกันการร้าวในขณะที่เชื่อมเหล็กกล้าเหล่านี้ ซิลิกอนมีความสำคัญมากในเหล็กกล้าผสมนิกเกิลสูง

2.1.3.9 อลูมิเนียม (Al) เป็นตัวทำให้เกิดเฟอร์ไรท์เช่นกัน แต่อลูมิเนียมยังทำหน้าที่คล้ายซิลิกอนในการป้องกันโลหะไม่ให้ออกซิเจนได้ซึ่งได้ที่อุณหภูมิสูงๆ จำนวนที่ใช้ต้องจำกัดไว้ เพราะมันทำให้เกิดการร้าวได้ง่าย

2.1.3.10 ทิตาเนียม (Ti) ถูกนำมาใช้ในเหล็กกล้าออสเทนิติก ปฏิกิริยาของมันกับคาร์บอนนั้นทิตาเนียมมีความโน้มเอียงที่จะรวมตัวกับคาร์บอนได้มากกว่าโครเมียม จึงทำให้เกิดทิตาเนียมคาร์ไบด์ซึ่งมาป้องกันการเกิดและการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 700°C การเกิดทิตาเนียมคาร์ไบด์นี้จะช่วยในการลดลงของปริมาณโครเมียมอิสระในบริเวณรอบ ๆ ตะกอนคาร์ไบด์ (ซึ่งเป็นสาเหตุแรกของ grain boundary corrosion หรือ weld decay) หายไป ทิตาเนียมเป็นตัวสร้างเฟอร์ไรท์ (ferrite former) ที่มีอำนาจมากและมักใช้ปริมาณประมาณ 0.4 ถึง 0.5 คือประมาณ 4 เท่าของปริมาณคาร์บอน ทิตาเนียมเป็นตัวทำให้เกรนละเอียดในออสเทนิติก โครเมียม นิกเกิล ซึ่งให้ผลน้อยกว่าในเหล็กกล้าเฟอร์ไรท์

2.1.3.11 นีโอเบียม (Nb) คล้ายกันในการป้องกันการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ ด้วยเหตุผลที่ว่ามันมี affinity ที่จะรวมกับคาร์บอนมากกว่า ด้วยเหตุนี้มันจึงช่วยลดการขาดแคลนโครเมียมของเกรน นีโอเบียมเป็นตัวสร้างเฟอร์ไรท์โดยตรงโดยเฉพาะกับ heat resisting alloys ที่มีปริมาณโครเมียมและนิกเกิลมาก และมันจะทำให้ ferrite phase field กว้างขึ้น

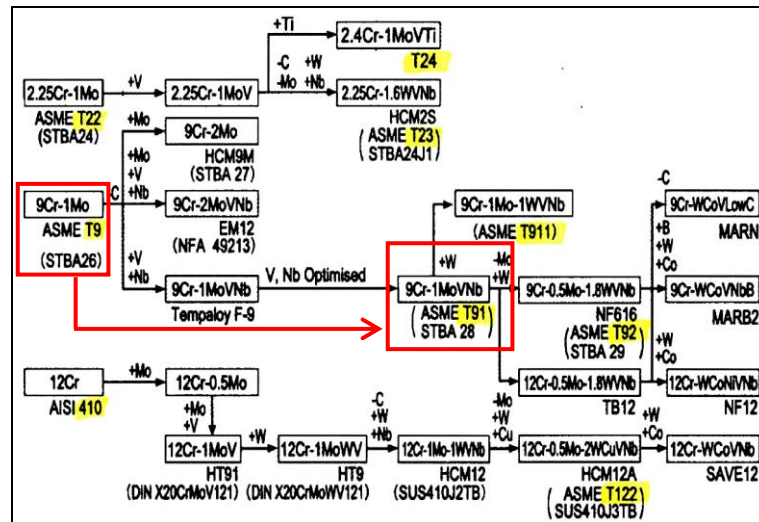
2.1.3.12 ไนโตรเจน (N) มีปฏิกิริยาคลายกับคาร์บอนและนิกเกิล เนื่องจากไนโตรเจน 1% จะให้ผลเท่ากับนิกเกิล 10 % ความสามารถในการทำให้เกรนละเอียด

2.1.3.13 ทองแดง (Cu) ที่เติมทองแดงลงในสแตนเลสเพื่อป้องกันการกัดกร่อน

ปัจจุบันโรงไฟฟ้าต้องการเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นดังนั้นวัสดุที่นำมาใช้ต้องมีคุณสมบัติตรงตามต้องการจึงนำวัสดุ SA335-P91 เข้ามาใช้งานและต้องให้ความสำคัญกับงานเชื่อมจึงจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

2.2 คุณสมบัติของเหล็กเกรด P91 และเหล็กเกรด P22

เหล็กเกรด P91 เป็นวัสดุกลุ่ม Creep Resistant Steel พัฒนาจากเหล็กเกรด P9 โดยการเติมธาตุวานาเดียม (V) และไนโอเบียม (Nb) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้มีความต้านทานในการยืดตัวสูงและต้านทานการเกิด Creep ได้สูงขึ้น ปัจจุบันนำมาใช้กับอุปกรณ์ที่ต้องการความดัน (Pressure) และอุณหภูมิ (Temperature) ที่สูงขึ้นแทนวัสดุ P22 เดิม



รูปที่ 2.6 แสดงการพัฒนาของวัสดุ 9Cr-1Mo เป็นวัสดุ 9Cr-1MoVNB [15]

ในเดือนพฤษภาคมปี ค.ศ. 1980 ได้มีการนำเหล็กเกรด P91 มาทดลองใช้กับอุปกรณ์รับความดัน (Super heater Tube) ของ VTA Kingston หน่วยที่ 5 ซึ่งจากเดิมวัสดุที่ใช้เป็น Stainless Steel เกรด 321 และในปี ค.ศ. 1983 วัสดุ 9Cr-1Mo ได้รับการยอมรับจาก American Society for Testing and Material (ASTM) สำหรับ Tube เป็น SA213 Grade T91 และสำหรับ Pipe เป็น SA335 Grade P91 ในปี ค.ศ. 1984 ส่วนทางยุโรป (Germany) วัสดุเกรด 91 เปรียบเทียบได้กับ วัสดุเกรด X10CrMo.V.Nb 91 ในมาตรฐานของ DIN 1.4903

การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุ P91 กับวัสดุ P22

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ P91 และวัสดุ P22 [16]

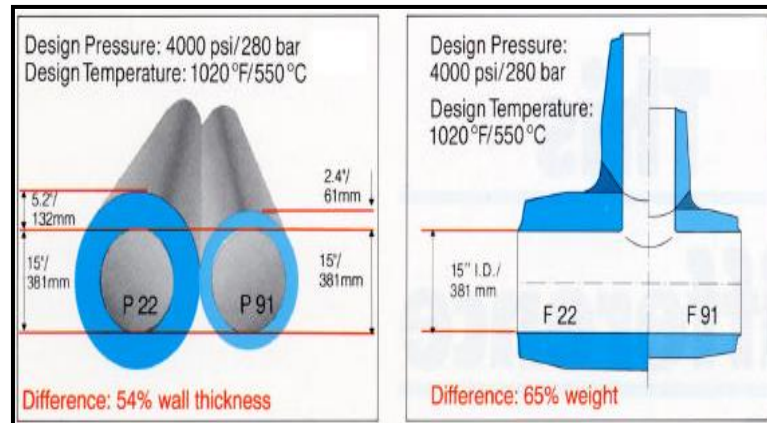
	P91	P92	P122	E 911
C	0.08 – 0.12	0.07 – 0.13	0.07 – 0.13	0.09 – 0.13
Si	0.20 – 0.50	max. 0.50	max. 0.50	0.10 – 0.50
Mn	0.30 – 0.60	0.30 – 0.60	max. 0.70	0.30 – 0.60
P	Max. 0.020	max. 0.020	max. 0.020	max. 0.020
S	Max. 0.010	max. 0.010	max. 0.010	max. 0.010
Ni	Max. 0.40	max. 0.40	max. 0.50	0.10 – 0.40
Cu	-	-	0.30 – 1.70	-
Cr	8.00 – 9.50	8.50 – 9.50	10.0 – 12.5	8.50 – 9.50
Mo	0.85 – 1.05	0.30 – 0.60	0.25 – 0.60	0.90 – 1.10
W	-	1.50 – 2.00	1.50 – 2.50	0.90 – 1.10
V	0.18 – 0.25	0.15 – 0.25	0.15 – 0.30	0.18 – 0.25
Nb	0.06 – 0.10	0.04 – 0.09	0.04 – 0.10	0.06 – 0.10
Al	Max. 0.040	max. 0.040	max. 0.040	max. 0.040
N	0.030 – 0.070	0.030 – 0.070	0.040 – 0.100	0.050 – 0.090
B	-	0.001 – 0.006	max. 0.005	0.0005 – 0.005

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติทางกลของวัสดุ P91 และวัสดุ P22 [14]

Standard	Grade	Yield strength Mpa (ksi)	Tensile strength Mpa (ksi)	Minimum longitudinal elongation %	Maximum hardness HB
A213 - A335	T/P22	Min. 205	Min. 415	30	163
A213 – A335	T/P91	Min. 415	Min. 585	20	250

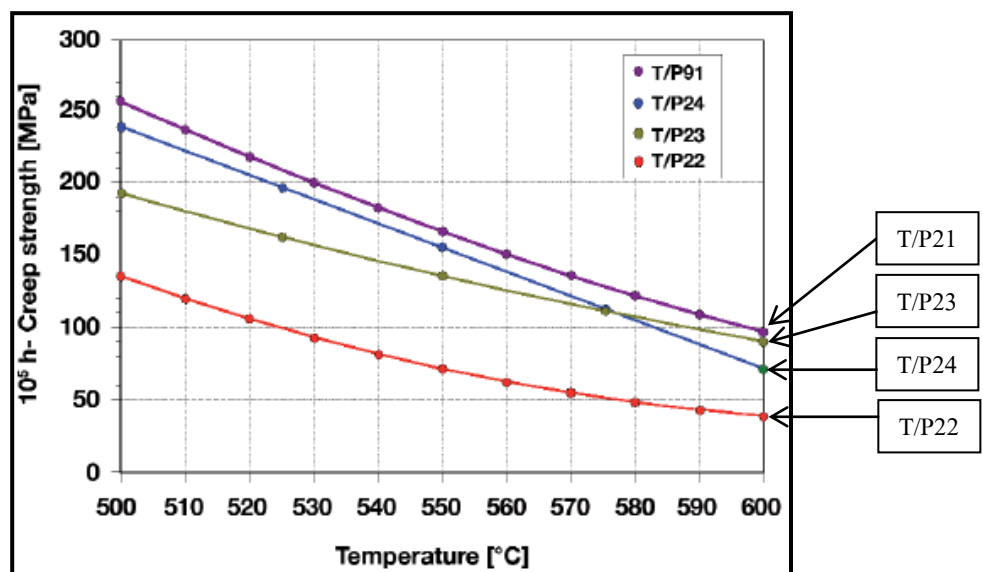
ความแตกต่างด้านกายภาพของวัสดุ P22 และวัสดุ P91

ทดสอบที่อุณหภูมิ 550 °C และความดันที่ 280 bar. วัสดุใช้ P22 ความหนา 132 มม. เมื่อใช้วัสดุ P91 จะมีความหนาลดลงเหลือ 61 มม. จะมีความหนาแตกต่างกัน 54% และมีน้ำหนักแตกต่างกันถึง 65% ดังแสดงในรูปที่ 2.7

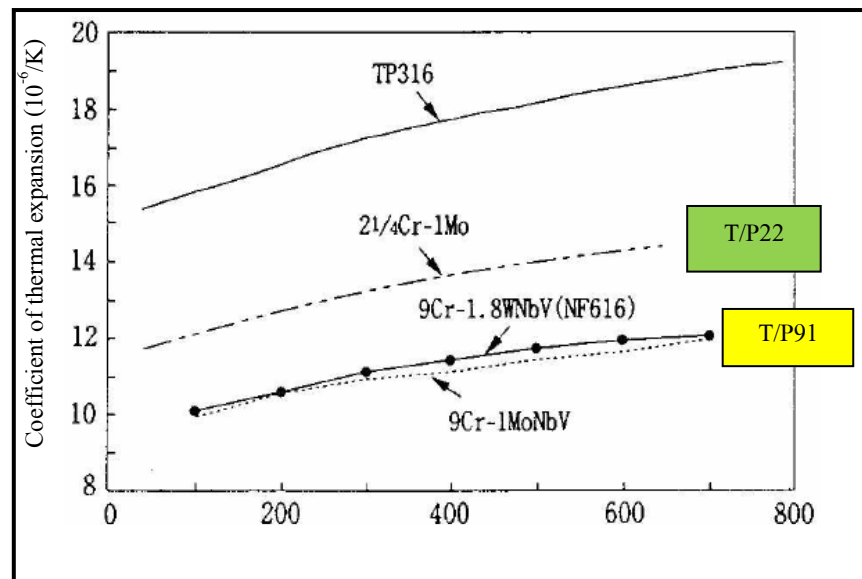


รูปที่ 2.7 ภาพแสดงการเปรียบเทียบความหนาและน้ำหนักระหว่าง P91 กับ P22 [14]

วัสดุ P91 ยังสามารถรับอุณหภูมิ ความดันได้สูงกว่าวัสดุ P22 โดยมีความแข็งแรง (Strength) มากกว่า 44 - 170% ที่อุณหภูมิระหว่าง 510 - 593 °C คุณสมบัติของวัสดุ P91 ยังสามารถมีความต้านทานในการยืดตัวสูง และมี Creep Strength สูงดังแสดงในรูปที่ 2.8 Creep Strength ของวัสดุ T/P91 จะสูงกว่า Creep Strength ของ T/P22 ที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส ที่ 100,000 ชั่วโมง และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนที่ต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.9

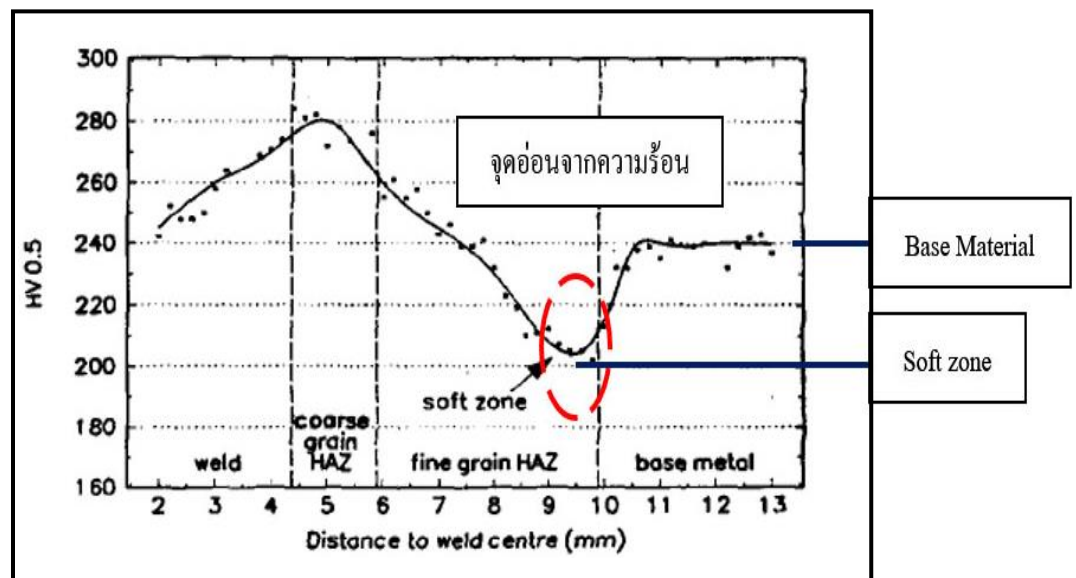


รูปที่ 2.8 กราฟแสดง Creep Strength ของวัสดุ T/P91 กับ T/P22 [16]



รูปที่ 2.9 แสดงสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ T/P91 กับ T/P22 [14]

ความร้อนจากงานเชื่อมที่ส่งผลกระทบต่อวัสดุ P91 ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงแนวเชื่อมของ P91 บริเวณ Fine grain HAZ จุด Soft zone เป็นจุดที่มีค่าความแข็งของเนื้อวัสดุต่ำสุด ซึ่งต่ำกว่า Base Material [14]

2.3 การเชื่อม DISSIMILAR WELDING [14]

การเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกัน (Dissimilar Weld) เช่นวัสดุ Low alloy ที่มี alloy แตกต่างกันเมื่อนำมาเชื่อมต่อกันจะเกิดการแพร่กระจายของคาร์บอนบริเวณแนวเชื่อม คาร์บอนจะกระจายตัวไปจับกับโครเมียมเป็นสาเหตุของการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ การหลีกเลี่ยงอาจใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสม Nickel-base แทนการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกัน โดยทั่วไปที่อุณหภูมิปกติจะส่งผลกระทบกับคุณสมบัติของวัสดุด้านความเหนียว (Toughness) ของวัสดุ การเกิด Creep Rupture มักจะไม่ได้รับผลกระทบ การเชื่อม Dissimilar Weld ระหว่าง P91 กับ Stainless Austenitic โดยมากจะใช้ลวด Nickel- base เป็นหลักแนวเชื่อมสามารถประยุกต์โดยเชื่อม Buttering Electric Power Research Institute (EPRI) ประเมินอายุการใช้งานของวัสดุโดยการปรับปรุงวิธีการเชื่อมสำหรับวัสดุต่างชนิดกัน (Dissimilar Weld) โดยทดลองเชื่อมวัสดุ P91 Buttered ด้วยลวดเชื่อม E9018-B3 และทำ PWHT ที่อุณหภูมิ 760°C จากนั้นนำมาเชื่อมต่อกับวัสดุ P22 ทำ PWHT ที่อุณหภูมิ 677 °C - 704 °C ผลการทดลองพบว่าการทำ Buttering Step จะช่วยให้อายุการใช้งานยาวนานขึ้น และทดลองเพิ่มโดยใช้ลวดเชื่อม Nickel- base (ERNiCrMo-3) ผลการทดลองประเมินอายุการใช้งานของวัสดุที่อุณหภูมิ 566 °C ตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบอายุการใช้งานของวัสดุที่เชื่อมโดยการ Butter [14]

Estimate Life @566°C (1050°F) and 52.8 MPa (7.8 ksi)	Weldment PWHT 677°C (1250°F)	Weldment PWHT 732°C (1350°F)
E9018-B3	53.158	347.809
E9018-B3 w/butter PWHT @ 760°C (1400°F)	551.445	642.573
ENiCrFe e-3	177.017	122.484
ENiCrFe -3 w/butter PWHT @ 760°C (1400°F)	362.446	293.892

วิธีการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกัน (Dissimilar Weld) จะแสดงในตารางที่ 2.5 ส่วนการเลือกใช้ลวดเชื่อม จะแสดงในตารางที่ 2.6 สำหรับแนวทางการทำ Post Weld Heat Treatment (PWHT) จะแสดงใน ตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.5 แสดงวิธีการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกัน (Dissimilar Weld) [14]

Combination	Approach
P91 to P22	B3 & PWHT @ 1350°F
P91 to P11	Butter P91 w/B2 & PWHT @ 1350°F; Then, join w/B2 & PWHT @ 1100°F
P91 to SS	Butter P91 w/Ni & PWHT @ 1400°F; Then, join to SS w/Ni

ตารางที่ 2.6 การเลือกใช้ลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกัน [14]

P(T)	11	22	23	91	911	92	SS
11	B2	B2	B2	B2	B2	B2	309
22	B2	B3	B3,G	B3	B3,G	B3,G	309,Ni
23	B2	B3,G	W, B3,G,Ni	G,Ni	W,G	B, W,G,B9	G,Ni,SS
91	B2	B3	G,Ni	B9	W,B9,G	W,G,B9	Ni
911	B2	B3,G	W,G	W,B9,G	W,G	B, W,G,B9	Ni
92	B2	B3,G	B, W,G,B9	B, W,B9,G	B, W,G,B9	B,W,G	Ni
SS	309	309,Ni	G,Ni,SS	Ni	Ni	Ni	SS,Ni

G	=	Nonstandard composition
B2	=	1-1/4 Cr1/2Mo
B3	=	2-1/4Cr 1 Mo
B9	=	9 Cr 1 Mo V
W	=	Tungsten Modified
B	=	Boron Modified, etc.
Ni	=	Nickel Base (ENiCrFe-2 or -3)
SS	=	Stainless, 308H, 309H, 316H, 347H, 16-8-2

Butter or buffer layers may be required.

NOTE: ENiCrMo-3 (“625”) should NOT be used because it will embrittle at the PWHT temperature for Grade 91.

ตารางที่ 2.7 แนวทางการทำ Post Weld Heat Treatment (PWHT) [14]

P(T)	11	22	23	91	911	92	SS
11	1350 ± 25	1350 ± 25	Butter 11 1350 ± 25	Butter 91 1375 ± 25; 1275 ± 25	Butter 911 1375 ± 25; 1275 ± 25	Butter 92 1375 ± 25; 1275 ± 25	Butter 11 (opt) 1275 ± 25
22	1350 ± 25	1350 ± 25	Butter 22 1350 ± 25	1375 ± 25	1375 ± 25	1375 ± 25	Butter (opt) 1350 ± 25
23	Butter 11 1350 ± 25	Butter 22 1350 ± 25	None	Butter 91 1375 ± 25	Butter 911 1375 ± 25	Butter 92 1375 ± 25	None
91	Butter 91 1375 ± 25; 1275 ± 25	1375 ± 25	Butter 91 1375 ± 25	1400 ± 25	1375 ± 25	1375 ± 25	Butter 91 1375 ± 25
911	Butter 911 1375 ± 25; 1275 ± 25	1375 ± 25	Butter 911 1375 ± 25	1375 ± 25	1375 ± 25	1375 ± 25	Butter 911 1375 ± 25
92	Butter 92 1375 ± 25; 1275 ± 25	1375 ± 25	Butter 92 1375 ± 25	1375 ± 25	1375 ± 25	1375 ± 25	Butter 92 1375 ± 25
SS	Butter 11 (opt) 1275 ± 25	Butter (opt) 1350 ± 25	None	Butter 91 1375 ± 25	Butter 911 1375 ± 25	Butter 92 1375 ± 25	None

Notes:

1. The recommendations in the above table were develop from References 9,22,26 & 27.
2. The objective in dissimilar welding is to maintain properties while addressing differences in the respective base metals, HAZ's and PWHT temperatures. See table 14 for weld metals.
3. Buttering and multi-step PWHT is used where PWHT required for one base metal, HAZ or weld metal is excessive for one or more of the others.
4. Where “Butter” is shown, “Butter” the indicated base metal, perform PWHT of the butter at the temperature listed, then join the other material to the butter and perform PWHT of the completed weldment at the second temperature.
5. 123 has shown tendancies toward reheat cracking from PWHT. This alloy was originally designed to be used without PWHT. Thus, buttering may be required.
6. 124 typically does not require PWHT. Thus, buttering may be required.
7. Caution must be observed when selecting PWHT temperatures that will not encroach on the A_{C1} of the lowere temperature material.
8. Where B9 weld Metal is used for buttering or joining, $1400\pm 25F$ is the recommended heat treatment temperature.

2.4 ความเค้นตกค้าง [1]

ความเค้นตกค้างเป็นความเค้นที่ยังคงเหลืออยู่ภายในชิ้นงาน แม้ว่าชิ้นงานนั้นจะไม่มีแรงภายนอกกระทำอยู่ก็ตาม ความเค้นตกค้างเกิดขึ้นจากผลของ Mismatch ระหว่างบริเวณใดๆ ก็ตามที่ติดกันภายในชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้เกิดการเสียรูปในพื้นที่โดยรอบด้วยความเค้นยืดหยุ่น (Elastic stresses) ถึงแม้ว่าความเค้นตกค้างจะไม่สามารถตรวจสอบ วัดค่า และทำการคำนวณออกมาได้ง่าย แต่ก็มีผลสำคัญอย่างมากต่อชิ้นงาน เปรียบเสมือนเป็นความเค้นภายนอกที่กระทำต่อชิ้นงาน เนื่องจากผลึกหรือเกรนในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน จะมีปฏิกิริยาตอบสนองต่อความเค้นที่กระทำเหมือนกัน ไม่ว่าความเค้นนั้นจะเป็นความเค้นตกค้างหรือความเค้นภายนอกก็ตาม ดังนั้นความเค้นใดๆก็ตามที่เกิดขึ้นในชิ้นงานก็จะมีผลต่อความเสียหายและการแตกหักของชิ้นงานทั้งสิ้น ด้วยสาเหตุนี้จึงจำเป็นที่เรจะต้องพิจารณาและเข้าใจในความเค้นตกค้างให้มาก

2.4.1 พื้นฐานเกี่ยวกับความเค้นตกค้าง

2.4.1.1 ระบบความเค้นตกค้างต้องมีความสมดุล

ความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในระบบ จะทำให้ความเค้นส่วนอื่นๆในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงและปรับตัวให้เข้ากับความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้น เพื่อรักษาสสมดุลของความเค้นในระบบ ผลจากการปรับความเค้นนี้จะทำให้เกิดการบิดเบี้ยว การเพิ่มหรือลดขนาดซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปในชิ้นงาน

2.4.1.2 ความเค้นตกค้างอาจแบ่งตามขนาดได้ 3 ระดับ

ได้แก่ ขนาดมหภาค ขนาดจุลภาค และขนาดแลตทิซ

ขนาดมหภาค หมายถึง ความเค้นตกค้างทั้งหมดที่มีในชิ้นงานทั้งชิ้น เมื่อดูผ่านภาพตัดขวาง ความเค้นตกค้างในชิ้นงานที่ใดที่หนึ่งจะส่งผลต่อชิ้นงานและทำให้เกิดความเค้นตรงกันข้ามที่มีขนาดเท่ากัน เช่น ถ้ามีความเค้นอัดคงเหลือที่บริเวณผิวของชิ้นงานก็จะทำให้มีความต้านทานแรงดึงเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางของชิ้นงานเพื่อที่จะสร้างความสมดุลของความเค้นในระบบ

ขนาดจุลภาค หมายถึง ความเค้นตกค้างที่ส่งผลต่อเกรนเดี่ยวหรือกลุ่มของเกรนความเค้นตกค้าง ขนาดจุลภาคจะส่งผลต่อเกรนแต่ละเกรนแตกต่างกัน เนื่องจากเกรนแต่ละเกรนจะมีทิศทางและตำแหน่งหรือความบกพร่องในเกรนที่แตกต่างกัน

ขนาดแลตทิซ หมายถึง ความเค้นตกค้างที่ส่งผลต่อโครงสร้างแลตทิซของอะตอม และจะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวหรือเสียรูปของแลตทิซในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง

2.4.1.3 สิ่งปนเปื้อนในชิ้นงานจะส่งผลต่อความเค้นตกค้าง

ในกระบวนการผลิตโลหะ กรรมวิธีทางความร้อนหลายๆ อย่างที่ใช้จะส่งผลต่อความเค้นตกค้างในชิ้นงาน เช่น ในการผลิตเหล็กกล้า กรรมวิธีทางความร้อนอย่างการเพิ่มคาร์บอน การเพิ่มไนโตรเจน จะทำให้อะตอมของคาร์บอนหรือไนโตรเจนแพร่ผ่านผิวของชิ้นงานลงไปเนื้อโลหะที่อยู่ใต้ผิว อะตอมเหล่านี้จะไปแทรกอยู่ในช่องว่างของแลตทิซ และจะทำให้เกิดความเค้นอัดคงเหลือในทิศทางขนานกับผิวของชิ้นงาน ผลที่เกิดขึ้นคือการเพิ่มความแข็งแรงในผิวของชิ้นงาน

2.4.1.4 วิธีการป้องกันการแตกหักเนื่องจากความล้าที่ดีที่สุด คือการทำให้เกิดความเค้นอัดตกค้างที่ผิว การทำให้ผิวของชิ้นงานมีความเค้นอัดตกค้างในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการแตกหัก เนื่องจากความล้าที่คาดว่าจะเกิดขึ้นโดยที่ความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้น จะต้องอยู่บนผิวของชิ้นงาน การสร้างความเค้นอัดตกค้างบนผิวของชิ้นงาน จะสามารถต้านทานความเค้นภายนอกที่กระทำต่อชิ้นงานได้

2.4.1.5 ความเค้นตกค้างอาจจะเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตและสภาวะการใช้งานต่างๆ

โดยทั่วไปกระบวนการผลิตจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในชิ้นงานโลหะ อันเป็นผลมาจากความร้อนจากทางด้านโลหะวิทยา ทางกล ทางเคมี และจะทำให้เกิดความเค้นตกค้างขึ้นได้ในชิ้นงาน ความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นอาจมีผลดีหรือผลเสียต่อชิ้นงานก็ได้ขึ้นอยู่กับประเภทของกระบวนการผลิตและสภาวะการใช้งานต่างๆสำหรับชิ้นงานนั้น

2.4.1.6 ความเค้นตกค้างทางด้านความร้อน

ความเค้นตกค้างทางด้านความร้อน เกิดขึ้นจากการขยายตัวของโลหะเมื่อได้รับความร้อนและการหดตัวของโลหะเมื่อได้รับความเย็น ปัจจัยที่ทำให้เกิดความเค้นตกค้างทางด้านความร้อนมีอยู่สองปัจจัย ได้แก่ ความร้อนหรือความเย็นและการจัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากความร้อนหรือความเย็นนั้น ในการที่จะเกิดความเค้นตกค้างทางด้านความร้อนขึ้นจะต้องประกอบด้วยปัจจัยทั้งสองนี้ หลักพื้นฐานในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับความเค้นตกค้างทางด้านความร้อนก็คือเนื้อโลหะที่เย็นตัวสุดท้ายจะเกิดความเค้นตกค้างขึ้น

2.4.1.7 ความเค้นตกค้างทางโลหะวิทยา

ในกระบวนการผลิตโลหะความเค้นตกค้างอาจเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงทางด้านโลหะวิทยาในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ได้แก่ การเกิดความเค้นตกค้างทางโลหะวิทยาของเหล็กกล้า อันเป็นผลจากการขยายตัวไม่สม่ำเสมอของเฟสมาร์เทนไซต์ ในการเพิ่มความแข็งของเหล็กกล้าซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนเฟสออสเทนไนต์เป็นเฟสมาร์เทนไซต์และทำให้เกิดการขยายตัวทางปริมาตรประมาณ 3-4 % หลักพื้นฐานในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับความเค้นตกค้างทางโลหะวิทยาก็คือ เนื้อโลหะที่ทำให้แข็งสุดท้ายจะเกิดความเค้นอัดคงเหลือขึ้นหรืออาจพูดได้ว่าการขยายตัวทางปริมาตรของเนื้อโลหะสุดท้ายที่เปลี่ยนเฟสจะทำให้เกิดความเค้นอัดคงเหลือขึ้นอันเนื่องมาจากการถูกจำกัดการขยายตัว

2.4.1.8 ความเค้นตกค้างทางกล

เนื่องจากโลหะเกือบทั้งหมดที่ใช้กันอยู่ทั่วไป มีโครงสร้างจุลภาคแบบหลายเกรน เมื่อเกรนถูกบีบอัดเข้าด้วยกัน ในทิศทางขนานกับผิวของชิ้นงาน อันเป็นผลมาจากแรงกระทำภายนอก ก็จะทำให้รอยแตกที่แยกเกรนเหล่านี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ และชิ้นงานก็ไม่เกิดการแตกหัก หลักพื้นฐานในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับความเค้นตกค้างทางกลก็คือ การครากอันเป็นผลจากแรงดึงภายนอกจะทำให้เกิดความเค้นอัดตกค้างขึ้นในชิ้นงานเมื่อแรงกระทำนั้นถูกกำจัดไป

2.5 วิธีการวิเคราะห์ความเสียหาย [1]

การเกิดขึ้นของความเสียหายของชิ้นงานจะทำให้เกิดผลเสียในการใช้งาน ทำให้ใช้งานได้ไม่เต็มที่เกิดความไม่สมบูรณ์ตามที่ควรจะเป็น ทำให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจและทรัพย์สินบ่อยครั้งที่พบว่าความสูญเสียเหล่านี้รวมไปถึงการบาดเจ็บและการเสียชีวิต ความเสียหายที่เกิดขึ้นมักมีสาเหตุมาจากการเลือกใช้วัสดุและกระบวนการผลิตที่ไม่ถูกต้องเหมาะสม การออกแบบส่วนประกอบต่างๆ ของชิ้นส่วนอุปกรณ์และเครื่องจักรที่ไม่ดีพอ นอกจากนี้ ยังมีการใช้งานที่ผิดประเภท โดยทั่วไปความเสียหายที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนอุปกรณ์ เรามักจะพบการเกิดการแตกหัก การเกิดการกัดกร่อน หรือการเปลี่ยนรูปของส่วนใดส่วนหนึ่งในชิ้นส่วนส่วนอุปกรณ์ แต่นิยามของความเสียหายในทางวิศวกรรมมี

ความหมาย ซึ่งหมายถึงการที่ชิ้นส่วนอุปกรณ์ ส่วนประกอบของโครงสร้างหรือเครื่องจักรต่างๆ ไม่สามารถที่จะทำหน้าที่ของตัวมันเองได้อย่างเต็มที่ ดังนั้นเมื่อส่วนใดส่วนหนึ่งของชิ้นส่วนอุปกรณ์ หรือเครื่องจักรไม่สามารถที่จะทำหน้าที่ได้ตามปกติ ก็พิจารณาได้ว่ามีความเสียหายเกิดขึ้นกับ ชิ้นส่วนอุปกรณ์หรือเครื่องจักร วิศวกรที่เกี่ยวข้องจะต้องตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นและหา สาเหตุที่แท้จริงของความเสียหายนั้น เพื่อจะหามาตรการการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นอีกใน อนาคต กรรมวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบหาสาเหตุของความเสียหายนั้นเรียกว่า การวิเคราะห์ความเสียหายในทางวิศวกรรม

การวิเคราะห์ความเสียหาย หมายถึง การตรวจสอบชิ้นส่วนอุปกรณ์หรือส่วนประกอบของโครงสร้าง ที่เกิดความเสียหาย เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงของความเสียหายที่เกิดขึ้น จุดประสงค์ทั่วไปเพื่อ ป้องกัน ช่อมแซม หรือออกแบบใหม่สำหรับชิ้นส่วนอุปกรณ์หรือส่วนประกอบของโครงสร้างที่ ได้รับความเสียหาย เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นอีกในอนาคต ความเสียหายอาจเกิดขึ้นได้จากปัจจัย เพียงปัจจัยเดียว หรืออาจเป็นการเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากหลายๆ ปัจจัยรวมกัน บ่อยครั้งที่สาเหตุที่ แท้จริงของความเสียหายนั้นไม่สามารถพบได้ง่ายและจำเป็นต้องมีการตรวจสอบที่ละเอียดการ วิเคราะห์ความเสียหายสามารถนำมาใช้ในการพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการออกแบบ เพื่อให้ ชิ้นส่วนอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่ผลิตขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.5.1 จุดประสงค์ของการวิเคราะห์ความเสียหาย

การวิเคราะห์ความเสียหายนั้นมีจุดประสงค์มากมายหลายอย่าง ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ที่จะ ตรวจสอบวิเคราะห์ความเสียหาย

2.5.1.1 เพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงของความเสียหายและเพื่อป้องกันความเสียหายนั้นในอนาคต

การวิเคราะห์ความเสียหายจะช่วยหาสาเหตุที่แท้จริงของความเสียหาย และจะได้เรียนรู้ปรับปรุงในตัว วัสดุ การออกแบบ การผลิต การขนส่ง การเก็บรักษา การซ่อมบำรุง ตลอดจนการใช้งาน และช่วย ป้องกันไม่ให้ความเสียหายนั้นเกิดขึ้นอีกในอนาคต

2.5.1.2 เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ

ผลที่เกิดขึ้นสามารถนำไปใช้ในการแก้ไขปรับปรุงชิ้นงานหรือกระบวนการผลิต ซึ่งจะช่วยให้ ประสิทธิภาพของชิ้นงาน หรือประสิทธิภาพในการผลิตดีขึ้น เช่น ทำให้ชิ้นงานมีความทนทานต่อ การใช้งานเพิ่มขึ้น

2.5.1.3 เพื่อใช้ทำประโยชน์ด้านอื่น

ในบางครั้งการวิเคราะห์ความเสียหายอาจทำให้เกิดการพัฒนาในด้านอื่นๆ อีกนอกเหนือจากการพัฒนาปรับปรุงในชิ้นงานที่เกิดความเสียหาย การพัฒนาใหม่ๆ ในกระบวนการผลิตหรือกระบวนการตรวจสอบวิเคราะห์อาจเกิดขึ้นได้อย่างไม่คาดคิดก็เป็นได้

2.5.2 สาเหตุหลักของความเสียหาย

สาเหตุหลักๆ ของความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นมี 3 ประเภท ได้แก่

2.5.2.1 การออกแบบ

ความเสียหายของชิ้นส่วนอุปกรณ์จากการออกแบบเป็นปัญหาพื้นฐานที่พบบ่อยในความเสียหาย และมักมีรูปแบบของความเสียหายมาจากรูปร่างและขนาด ประเภท คุณสมบัติของวัสดุที่ออกแบบไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริง

2.5.2.2 การเลือกใช้วัสดุและกระบวนการผลิตที่ไม่เหมาะสม

การใช้งานของวัสดุหรืออุปกรณ์ในสภาพที่ไม่ได้รับการออกแบบไว้ เนื่องจากความไม่รู้ของผู้ใช้งาน เป็นปัญหาสำคัญและมักพบเสมอในการวิเคราะห์ความเสียหาย

2.5.2.3 การประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์และการบำรุงรักษาที่ไม่เหมาะสม

การประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ไม่ถูกต้อง เช่น การใช้สกรูยึดชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กเกินไปหรือการใช้สารหล่อลื่นที่ไม่เหมาะสมในการใช้งานของอุปกรณ์เครื่องจักรบางประเภทโดยเฉพาะในสภาพการใช้งานภายใต้สิ่งแวดล้อมที่รุนแรง ความเสียหายอาจเกิดขึ้นได้จากสาเหตุหนึ่งโดยเฉพาะหรืออาจเป็นการเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากหลายๆ สาเหตุรวมกันก็ได้ สาเหตุที่แท้จริงของความเสียหายถูกตรวจพบได้ง่ายและจำเป็นต้องมีการตรวจสอบที่ละเอียดเพิ่มเติมขึ้นไป สาเหตุต่างๆ ที่เป็นไปได้ที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่ชิ้นงาน ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์เครื่องมือหรือเครื่องจักรจะมีสาเหตุของความเสียหายที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับประเภทและลักษณะของการใช้งาน

2.5.3 หลักการวิเคราะห์ความเสียหาย

ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ความเสียหาย จำเป็นที่ผู้ทำการวิเคราะห์จะต้องพิจารณาถึงสิ่งสำคัญต่างๆ ที่จะเป็นตัวกำหนดทิศทาง ขอบเขต และกรอบการทำงานในการวิเคราะห์ความเสียหายต้องตระหนักอยู่เสมอว่า การวิเคราะห์ความเสียหาย จะมีจุดประสงค์ในการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงมีเป้าหมาย ขอบเขต ค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการวิเคราะห์ที่แตกต่าง

สิ่งที่ต้องพิจารณาก่อนทำการวิเคราะห์ความเสียหาย

2.5.3.1 เป้าหมายของการวิเคราะห์ความเสียหาย

การวิเคราะห์ความเสียหายจำเป็นต้องทราบเป้าหมายในการวิเคราะห์ก่อนลงมือปฏิบัติเสมอ เป้าหมายในการวิเคราะห์ความเสียหายจะเป็นตัวกำหนดทิศทางและระดับของการวิเคราะห์

2.5.3.2 ข้อมูลและหลักฐานประกอบที่เพียงพอ

ก่อนทำการวิเคราะห์ความเสียหาย ผู้วิเคราะห์ความเสียหายต้องพิจารณาข้อมูลและหลักฐานประกอบที่จะใช้ในการวิเคราะห์ก่อนว่ามีเพียงพอหรือไม่

2.5.3.3 ค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ความเสียหาย

การวิเคราะห์ความเสียหายมีอยู่หลายระดับ และมีขนาดของการคิดวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน ถ้าการวิเคราะห์มีขนาดเล็ก ใช้อุปกรณ์เครื่องมือไม่กี่ประเภทและใช้บุคลากรไม่กี่คน รวมทั้งใช้เวลาในการวิเคราะห์ไม่นาน มีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าในกรณีที่การวิเคราะห์ความเสียหายนั้นต้องใช้อุปกรณ์เครื่องมือหลายๆ ประเภท และใช้บุคลากรจำนวนมาก รวมถึงต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์เป็นระยะเวลายาวนาน

2.5.3.4 ระยะเวลาในการวิเคราะห์ความเสียหาย

ระยะเวลาในการวิเคราะห์ความเสียหายจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับและขนาดในการวิเคราะห์ โดยทั่วไปถ้าผู้วิเคราะห์ความเสียหายต้องการทราบผลอย่างรวดเร็ว ไม่ละเอียดการวิเคราะห์ความเสียหายก็อาจทำได้เร็ว เพราะไม่ต้องใช้อุปกรณ์เครื่องมือจำนวนมาก

2.5.3.5 ขอมรับกับผลวิเคราะห์ความเสียหาย

บ่อยครั้งที่ผลการวิเคราะห์ความเสียหายอาจไม่ได้เป็นอย่างที่คาดหวังไว้ในตอนแรกก่อนวิเคราะห์ ผู้ทำการวิเคราะห์ความเสียหายต้องทำใจยอมรับในผลวิเคราะห์ที่ได้ถึงแม้ว่าจะขัดกับความรู้สึกและการคาดหวัง

2.5.4 แนวทางปฏิบัติในการวิเคราะห์ความเสียหาย

ในการวิเคราะห์ความเสียหาย ผู้วิเคราะห์ความเสียหายต้องไม่มีอคติต่อความวิเคราะห์ ต้องไม่ตัดสินใจอะไรง่ายๆ จากการฟังบุคคลที่เกี่ยวข้องเพียงไม่กี่คนแค่ผิวเผิน หรือจากหลักฐานที่ไม่ละเอียดแน่นอน เพียงไม่กี่ชิ้น การที่ผู้วิเคราะห์มีใจเปิดกว้างต่อข้อมูล การทดสอบ และการวิเคราะห์ จะทำให้ผู้วิเคราะห์สามารถคิดพิจารณาจากข้อมูลหลักฐานต่างๆ ทุกอย่างที่มีร่วมกันได้ก่อนทำการตัดสินใจ ซึ่งผลที่ได้จะมีความเป็นกลางและมีความน่าเชื่อถือ เนื่องจากการที่กระบวนการวิเคราะห์ความเสียหายมีแนวโน้มสูงที่จะเกี่ยวข้องกับบุคคลมากมาย หลากหลายสาขาอาชีพ การศึกษา ประสบการณ์ อายุ ความรู้ และอื่นๆ ผู้วิเคราะห์จึงจำเป็นต้องมีความสัมพันธ์ที่ดีต่อทุกๆ คนที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ได้ข้อมูลหลักฐานต่างๆ ครบถ้วนตามที่ผู้วิเคราะห์ต้องการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับบุคคลที่สามารถให้ข้อมูลหลักฐานได้โดยตรง เช่น ผู้ที่ใช้งาน

2.5.5 ผลของการวิเคราะห์ความเสียหาย

การวิเคราะห์ความเสียหายมีข้อดีอยู่มากมาย แต่ที่สำคัญที่สุดก็คือการที่เราจะได้ทราบถึงสาเหตุของความเสียหาย เพื่อจะได้ป้องกันไม่ให้ความเสียหายนั้นเกิดขึ้นได้อีกในอนาคต ซึ่งสามารถแจกแจงได้ดังนี้ เช่น มีความปลอดภัยเพิ่มมากขึ้น ปรับปรุงความเชื่อมั่น สมรรถนะการทำงานดีขึ้น ประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ซ่อมบำรุงรักษาได้ง่ายขึ้น ลดต้นทุนการใช้งาน ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.5.6 สิ่งที่เป็นในการวิเคราะห์ความเสียหาย

เมื่อต้องการวิเคราะห์ความเสียหาย ผู้วิเคราะห์ความเสียหายจำเป็นต้องทราบว่าสิ่งใดที่เป็นและสำคัญที่เกี่ยวข้องในกระบวนการวิเคราะห์ความเสียหาย เพื่อให้ได้ข้อมูลหลักฐานที่พอเพียงต่อการสรุปผล

2.5.6.1 หลักฐานด้านเอกสาร

หลักฐานด้านเอกสารในการวิเคราะห์ความเสียหายนั้นมีความสำคัญพอๆกับหลักฐานทางกายภาพ บางส่วนของเอกสารเหล่านี้เป็นข้อมูลทางเทคนิคหรือมาตรฐานทางอุตสาหกรรม มาตรฐานด้านความปลอดภัย กฎหมายรายงานผลการทดสอบ ใบรับประกัน บทความวิจัย บทความทางวิทยาศาสตร์หรือทางวิศวกรรมแบบร่าง ลักษณะเฉพาะของชิ้นงาน ข้อมูลเหล่านี้ควรสรุปให้สั้นและสามารถนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้รับจากการตรวจสอบชิ้นงาน ผลที่ได้จากข้อมูลเบื้องต้นนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการตรวจสอบว่าสมรรถนะและประสิทธิภาพของชิ้นงานที่เกิดความเสียหายนั้นเป็นไปตามข้อกำหนดต่างๆ ที่มีอยู่ในข้อมูลเบื้องต้นหรือไม่ ข้อมูลเกี่ยวกับเงื่อนไขการใช้งานหรือการปฏิบัติงานนั้นมีความสำคัญอย่างมาก ข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิในขณะใช้งานควรถูกเก็บและนำมาเปรียบเทียบกับเงื่อนไขในการออกแบบและข้อกำหนดต่างๆ ไปจากที่กำหนดหรือไม่ เงื่อนไขเหล่านี้ ได้แก่ การปฏิบัติงาน การบำรุงรักษาอุณหภูมิ ความดัน และอื่นๆ นอกจากนี้ภาวะต่างๆ ในการใช้งานที่ผิดไปจากข้อกำหนด เช่น ส่วนผสมทางเคมีของของเหลวที่ชิ้นงานนั้นสัมผัส ความชื้นสัมพัทธ์ การปนเปื้อนของสารอื่นๆ ความสะอาด และอื่นๆ บ่อยครั้งพบว่าเมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงในตัววัสดุ หรือการออกแบบ หรือกระบวนการผลิต ความวิบัติเกิดจากการใช้งานในภาวะที่ผิดปกติ

2.5.6.2 การจัดการ การเก็บ และการจำแนกประเภทของวัสดุ

นอกเหนือจากการใช้งานตามปกติแล้ว ความเสียหายอาจเกิดขึ้นได้อันมีสาเหตุมาจากข้อบกพร่องหรือความผิดพลาดในการจัดการ การเก็บ หรือจากการระบุประเภทของวัสดุ

2.5.6.3 การวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

ในการตรวจสอบชิ้นงานที่เกิดความเสียหาย จำเป็นที่จะต้องนำชิ้นงานนั้นมาทำการวิเคราะห์ในห้องทดลอง จะทำให้ทราบสาเหตุของความเสียหายอย่างแท้จริง การวิเคราะห์สามารถทำได้ทั้งทางกลและทางเคมี

2.5.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความเสียหาย

เมื่อผู้วิเคราะห์ทราบถึงสิ่งต่างๆที่สำคัญและจำเป็นที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการการวิเคราะห์ความเสียหายแล้ว ผู้วิเคราะห์ควรที่จะทราบถึงขั้นตอนต่างๆในการวิเคราะห์ความเสียหายโดยทั่วไป ขั้นตอนการวิเคราะห์ความเสียหายจะมีลำดับการทำงาน ดังนี้ การรวบรวมข้อมูล การตรวจสอบเบื้องต้น การทดสอบแบบไม่ทำลาย การทดสอบทางกล การวิเคราะห์ความเสียหายทางมหภาค การวิเคราะห์ความเสียหายทางจุลภาค การพิจารณากลไกความเสียหาย การวิเคราะห์ทางเคมี การวิเคราะห์โดยกลศาสตร์การแตกหัก การทดสอบภายใต้สภาวะจำลอง การสรุปผลการวิเคราะห์ การเขียนรายงาน ขั้นตอนต่างๆ นี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้

บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานเพื่อศึกษาหาสาเหตุการเกิดรอยร้าวท่อ Expander ระหว่างเหล็ก P91 โดยการเชื่อมต่อด้วยลวด Inconel82 กับเหล็ก P22 และเพื่อยืนยันกระบวนการเชื่อมต่อ Expander มีความเหมาะสมหรือไม่ในการเชื่อมต่อเหล็ก P91 กับเหล็ก P22 ด้วยลวดเชื่อม Inconel82 โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

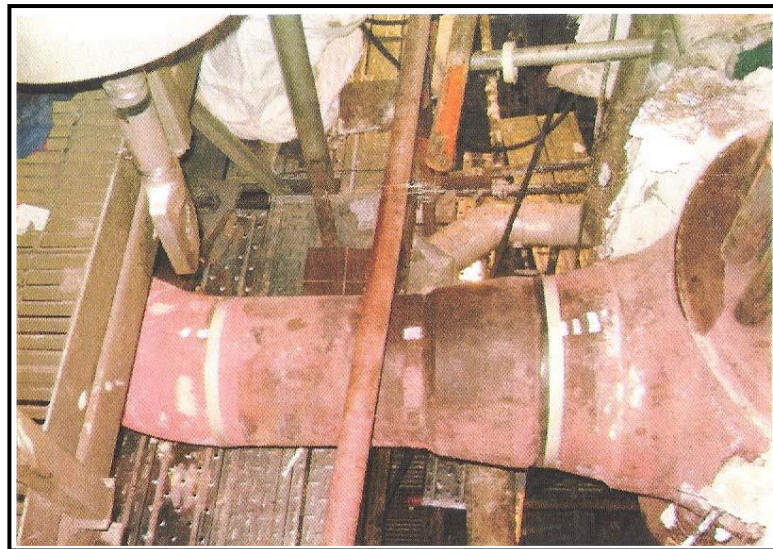
การดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาหาสาเหตุการเกิดรอยร้าวท่อ Expander ประกอบด้วยหัวข้อการดำเนินงานหลักดังนี้

1. เตรียมวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ได้แก่ท่อ Expander ที่ใช้เป็นแนวทางในการทดลอง
2. ดำเนินการทดสอบหารอยแตกของท่อ Expander ด้วยน้ำยา Penetrant testing เพื่อดูตำแหน่งของรอยแตกของท่อ Expander
3. นำชิ้นงานที่เกิดการแตกมาทำการทดลองโดยวิธีการ Polishing ส่องกล้อง Optical Microscope ดูโครงสร้างและเทคนิคการตรวจสอบด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope
4. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

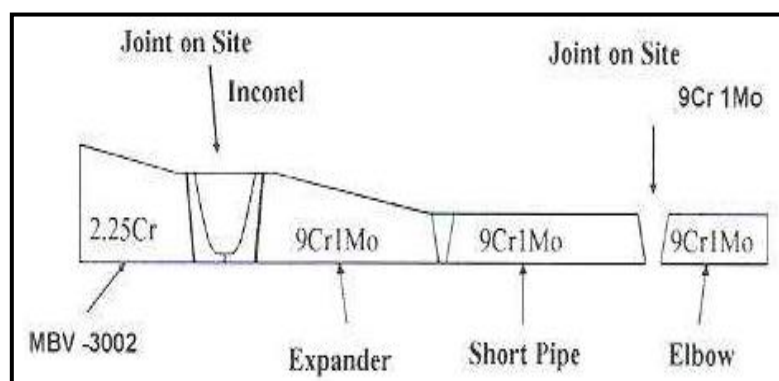
3.2 วัสดุการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นท่อ Expander เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่าง Boiler กับ Steam Turbine มี Steam ไหลภายในท่อดังรูปที่ 3.1 และส่วนผสมทางเคมีของวัสดุตามตารางที่ 3.1 ท่อ Expander ทำมาจากเหล็ก P91 (9Cr1MoNbV) ซึ่งลักษณะการเชื่อมต่อท่อ Expander กับตัว Main Steam Stop Valve ที่ทำจากเหล็ก P22 (2.5Cr1Mo) ดังรูปที่ 3.2 มีการประกอบและเชื่อมยึด ท่อก่อนการเชื่อมเพื่อทำการจัด Alignment ของดังรูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเชื่อมต่อท่อ Expander กับ Elbow ที่ On Site ด้วยลวด ER90S-B9; E9016-B9 และเชื่อมต่อท่อ Expander กับตัว Main Steam Stop Valve ที่ On Site ด้วยลวด ERNiCr-3; ENiCrFe-3 ดังรูปที่ 3.4 หลังจากการเชื่อมแล้วเสร็จท่อ Main Steam pipe ทำหน้าที่รับส่ง Steam ที่มีความดันและอุณหภูมิสูงโดยมีค่าความดันเฉลี่ย 125 kg/cm^2 และมีอุณหภูมิเฉลี่ย 538°C ดังรูปที่ 3.5 เพื่อขับเคลื่อน Turbine ของโรงไฟฟ้าหลังจากการเดินเครื่องใช้งานไป 58,254 ชั่วโมงพบปัญหา Crack ที่บริเวณแนวเชื่อมดังรูปที่ 3.6 เกิดรอย Crack ภายนอกผิวท่อโดยรอบรอยเชื่อมระหว่าง

รอยต่อของ Main Steam Stop Valve กับท่อ Expander แยกเป็นแนวยาวแบบไม่ต่อเนื่องประมาณ 65% ของเส้นรอบวงส่วนที่เหลืออีก 35% แยกเป็นจุดๆ ดังรูปที่ 3.7 และระหว่างการใช้งานมี Insulate เป็นฉนวนหุ้มปกคลุมท่อหนา 4 นิ้ว โดยใช้แอสเบสตอลเป็นตัวฉนวนหุ้มสภาพการใช้งานตามปกติโดยโรงไฟฟ้าเริ่มดำเนินการเดินเครื่องเข้าระบบ จนกระทั่งหยุดเดินเครื่องเพื่อดำเนินการตรวจสอบอุปกรณ์ตามวาระพบรอย Crack ที่เกิดภายนอกท่อ จึงจำเป็นต้องตรวจหาสาเหตุที่แท้จริงที่ก่อให้เกิดความเสียหายโดยการตรวจสอบด้วยวิธีการต่างๆ ตามที่ได้กำหนดไว้



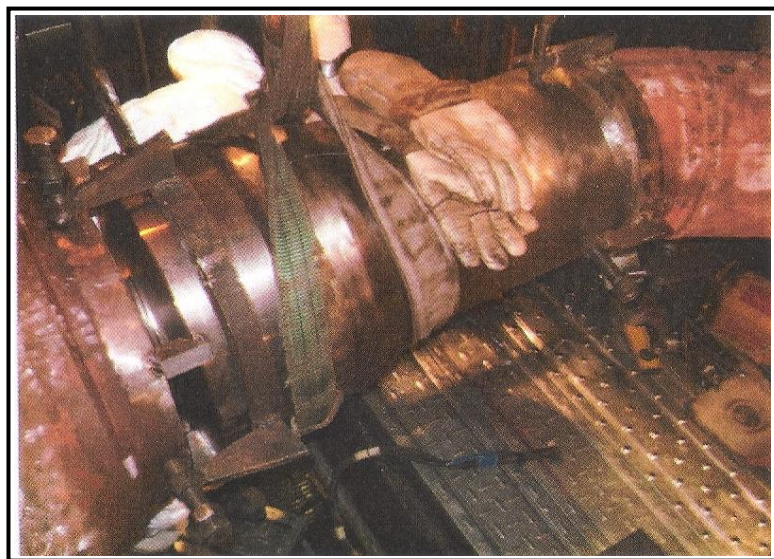
รูปที่ 3.1 ท่อ Expander ที่ต่อเข้ากับ Main Steam Stop Valve อุณหภูมิเฉลี่ยภายในท่อ 538°C ความดันเฉลี่ยภายในท่อ 125 kg/cm^2



รูปที่ 3.2 รูปการเชื่อมต่อของท่อ Expander

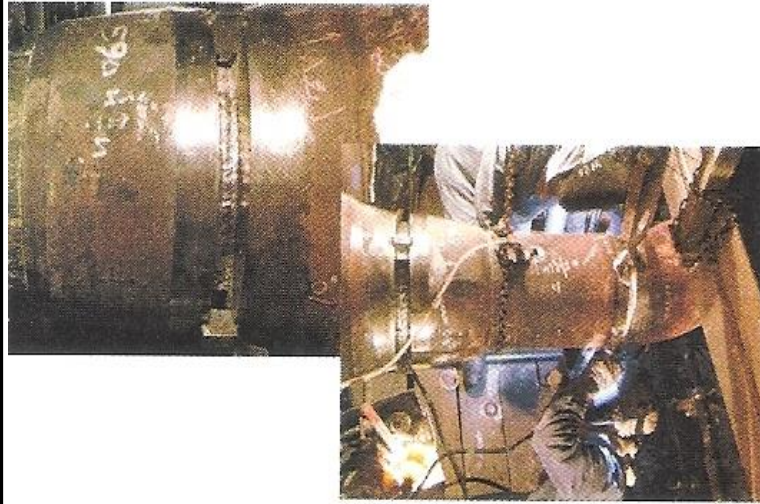
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ

Grade	C	Mn	P,S max	Si	Cr	Mo
P91	0.08-0.12	0.30-0.60	0.020/0.010	0.20-0.50	8.00-9.50	0.85-1.05
	V 0.18-0.25	N 0.03-0.07	Ni 0.40 max	Al 0.02 max	Nb 0.06- 0.10	Ti 0.01 max
F22	0.05-0.15	0.30-0.60	0.04 max	0.50 max	2.00-2.50	0.87-1.13
Inconel	0.10 max	2.5-3.5	0.03max/ 0.015max	0.50 max	18.00-22.00	-
	Fe 3.0 max	Ti 0.75 max	Nb+Ta 2.0-3.0	Cu 0.50 max	Others 0.50 max	

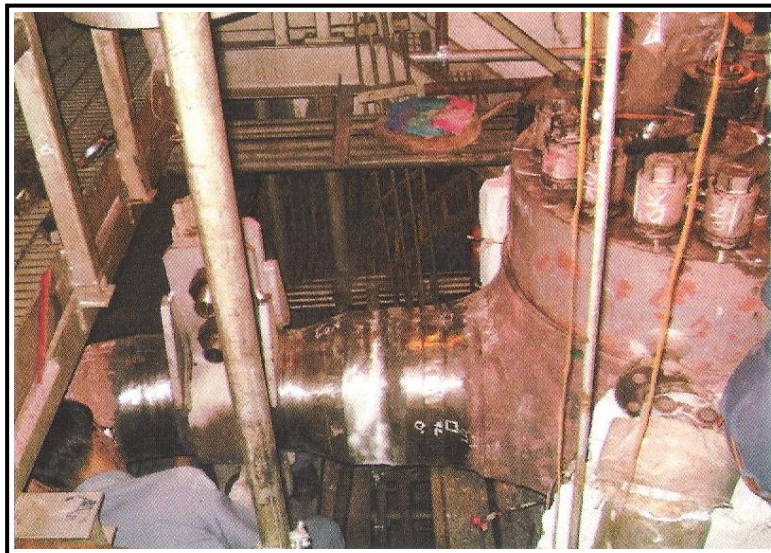


รูปที่ 3.3 รูปการประกอบก่อนเชื่อมต่อของท่อ Expander

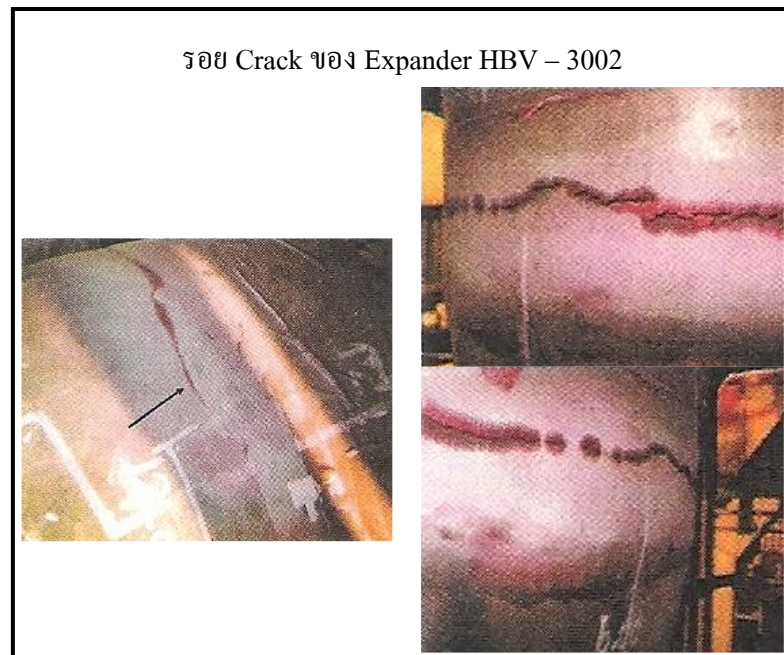
ขั้นตอนการเชื่อม Expander และ Pipe



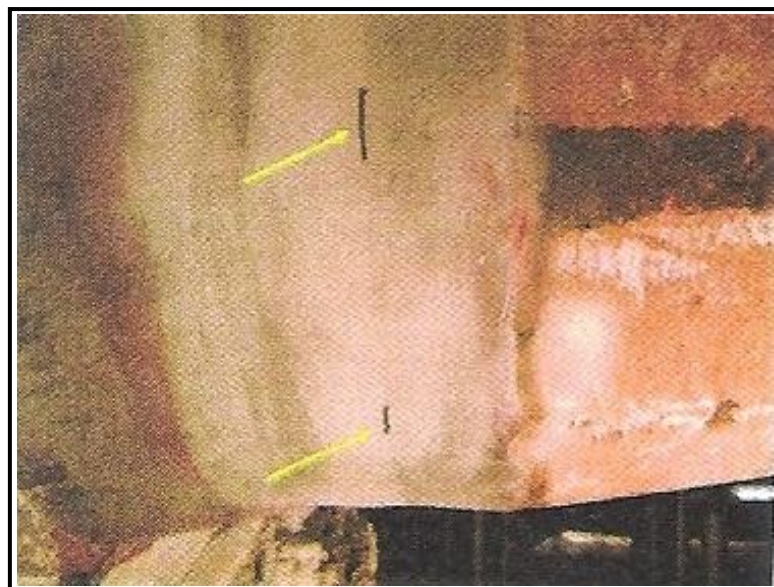
รูปที่ 3.4 รูปการเชื่อมต่อของท่อ Expander



รูปที่ 3.5 รูปหลังการเชื่อมต่อของท่อ Expander และนำเข้าใช้งาน



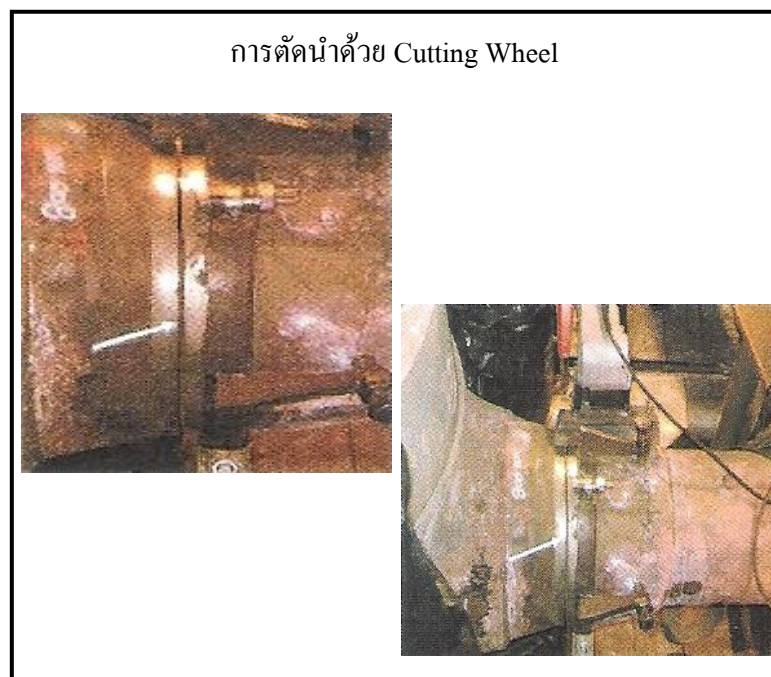
รูปที่ 3.6 รอย Crack ที่เกิดภายนอกผิวท่อโดยรอบแนวเชื่อมระหว่างรอยต่อของ Main Steam Stop Valve กับท่อ Expander แตกเป็นแนวยาวแบบไม่ต่อเนื่องประมาณ 65% ของเส้นรอบวง



รูปที่ 3.7 รอย Crack ที่เกิดภายนอกผิวท่อส่วนที่เหลืออีก 35% แตกเป็นจุดๆ

3.3 การเตรียมชิ้นงานทดลอง

ชนิดของวัสดุที่นำมาทำการทดลองเป็นท่อ Expander ซึ่งเชื่อมด้วยลวดเชื่อม Inconel82 และเชื่อมต่อกับ Main Steam Stop Valve ซึ่งพบปัญหา Crack ที่บริเวณแนวเชื่อมจึงทำการตัดนำด้วย Cutting Wheel ดังรูปที่ 3.8 เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงแก้ไขและทำการตัดขาดชิ้นตอนสุดท้ายด้วย Cut off Wheel ดังรูปที่ 3.9 เพื่อนำมาวิเคราะห์หาสาเหตุซึ่งหลังจากการตัดชิ้นงานออกจาก Line pipe คุณภาพของชิ้นงานที่ทำการตัดออกมาจะมีสภาพผิวที่ผ่านการตัดด้วย Cut off Wheel ที่เรียบพร้อมจะนำมาตรวจสอบชิ้นตอนอื่นต่อไป ดังรูปที่ 3.10 ชิ้นงานภายหลังตัดออกจาก Main Steam Stop Valve รอย Crack ที่เกิดภายนอกผิวท่อโดยรอบแนวเชื่อมได้ถูกเจียรออก ดังรูปที่ 3.11 จึงไม่เหลือรอย Crack ที่จะทำการตรวจสอบได้จึงเริ่มดำเนินการมาทำการ Clean เพื่อที่จะทำการตรวจสอบหารอย Crack ที่เหลือ ดังรูปที่ 3.12 ต่อไป และดำเนินการเก็บข้อมูลและรอย Crack ที่เกิดกับด้านนอกมาทำการวัดค่าซึ่งชิ้นงานท่อ Expander ด้านที่ต่อเข้ากับ Main Steam Stop Valve มีความหนา 80 mm. และได้ทำการวัดหาตำแหน่งด้านนอกที่เจียรรอย Crack ออกไว้ซึ่งลึกประมาณ 50 mm. ดังรูปที่ 3.13 และดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.8 ทำการตัดท่อ Expander ด้วย Cutting Wheel เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงแก้ไข



รูปที่ 3.9 ทำการตัดท่อ Expander ด้วย Cut Off Wheel ตัดขาดขั้นตอนสุดท้าย



รูปที่ 3.10 ท่อ Expander หลังทำการตัดออกจาก Main Steam Stop Valve



รูปที่ 3.11 รอยแตกรอบนอกได้ทำการเจียรออก



รูปที่ 3.12 ทำการ Clean เพื่อทำการตรวจสอบด้วยน้ำยา Penetrant test



รูปที่ 3.13 ด้านในของท่อ Expander ที่มีความหนา 80 mm. (ด้านที่ต่อเข้ากับ Main Steam Stop Valve)



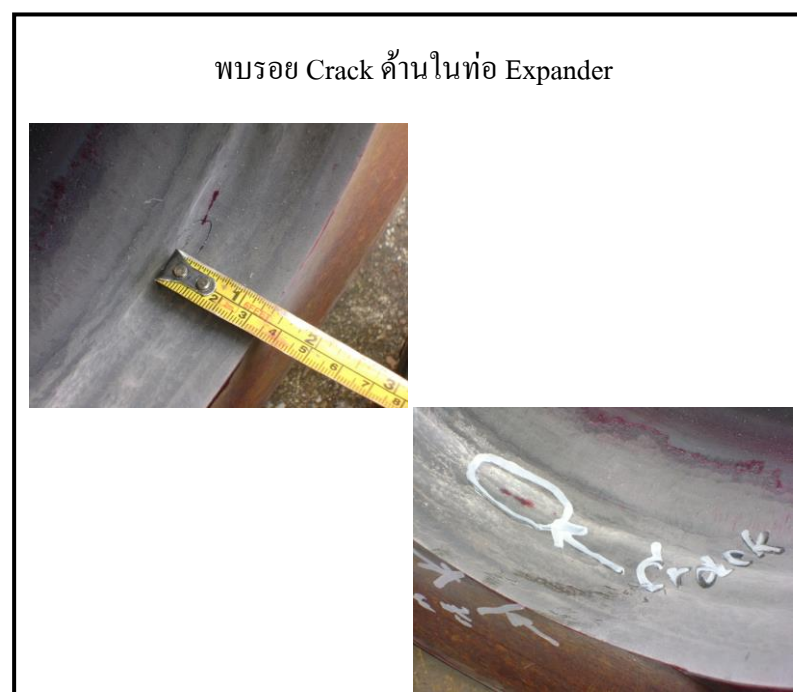
รูปที่ 3.14 ทำการวัดตำแหน่งด้านนอกที่เจียรรอยร้าวออกลึกประมาณ 50 mm.

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

ท่อ Expander ที่ถูกตัดออกจาก Main Steam Stop Valve หลังจากทำความสะอาดชิ้นงานท่อเพื่อทำการตรวจสอบหารอย Crack ที่เหลือโดยวิธีสารแทรกซึม (Penetrant Testing) ดังรูปที่ 3.15 ทำการขจัดสารแทรกซึมส่วนเกินและใช้ Apply developer ทำปฏิกิริยากับน้ำยาแทรกซึมลงบนชิ้นงานพบรอย Crack ที่เป็นสีแดงบนพื้นหลังที่เป็นสีของ Developer สีขาวดังรูปที่ 3.16 ด้านภายในท่อ Expander โดยตำแหน่งที่พบใกล้เคียงกับรอยที่เจียรออกด้านนอกนำชิ้นงานตรงบริเวณที่พบรอย Crack มาทำการตัดด้วยแก๊สเพื่อตัดทอนขนาดของชิ้นงานให้เล็กลง ดังรูปที่ 3.17 แล้วนำไปตัดด้วยเครื่องตัดย่อยอีกครั้งหนึ่งเพื่อรักษาสภาพไม่ให้เกิดผลกระทบต่อโครงสร้างของชิ้นงานภายหลังจากทำการตัดหลังจากนั้นนำชิ้นงานส่วนที่เกิดรอย Crack และบริเวณใกล้เคียงมาทำการกำหนดเครื่องหมายในการส่งดูโครงสร้าง และนำไปตัดทอนเป็นส่วนๆ เพื่อนำไปหล่อ Mount ขัดดูโครงสร้าง ดังรูปที่ 3.18 และจากรูปที่ 3.19 บริเวณหมายเลข 5 เป็นบริเวณที่เกิดรอยแตกซึ่งเป็นบริเวณที่นำมาทำการวิเคราะห์โดยวิธีภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานที่จะมาทำการวิเคราะห์ต้องผ่าน ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทำ ดังรูปที่ 3.20 - 3.23 การตัดต้องใช้เครื่องตัดขนาดใหญ่เพื่อลดทอนชิ้นงานที่ตัดมาจากแก๊สให้เล็กลง การตัดขึ้นอยู่กับรูปร่างในการทำเรือน Mount ซึ่งต้องการความเรียบของผิวชิ้นงานและให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างให้น้อยที่สุด ดังนั้นจึงทำการตัดด้วยเครื่องตัดขนาดเล็กอีกขั้นตอนหนึ่ง ชิ้นงานที่ผ่านการตัดนำมาหล่อทำเรือนหุ้มแบบ Cold Mount ด้วยน้ำยาเรซิน จุดประสงค์ของการขึ้นรูปตัวเรือนก็เพื่อที่จะทำให้ผู้ตรวจสอบ สามารถทำการจับยึดชิ้นงานทดสอบให้อยู่ในสภาพที่ง่าย และสะดวกต่อการจัดชิ้นงานให้มีความเรียบมากที่สุด เพื่อให้ผู้ตรวจสอบสามารถเห็นลักษณะโครงสร้างภายในของชิ้นงานได้ โดยไม่มีสิ่งใดมาปกปิดหรือบิดเบือนโครงสร้างที่แท้จริง โดยจะแบ่งเป็นการขัดหยาบและการขัดละเอียด เพื่อให้ผิวที่ได้มีคุณภาพตามต้องการ โดยทำการขัดด้วยมือและใช้เครื่องขัดผิวชิ้นงานที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที ขัดกระดาษทรายน้ำตั้งแต่เบอร์ 120 ถึงเบอร์ 4000 และทำการขัดมันด้วยผงเพชร 3 ไมครอน และ 1 ไมครอน เตรียมกลีเซอรอล:ไนตริก:ไฮโดรคลอริก อัตราส่วน 3:2:1 กัดดูโครงสร้างเพื่อทำการวิเคราะห์ ตรวจสอบด้วยกล้องต่อไป



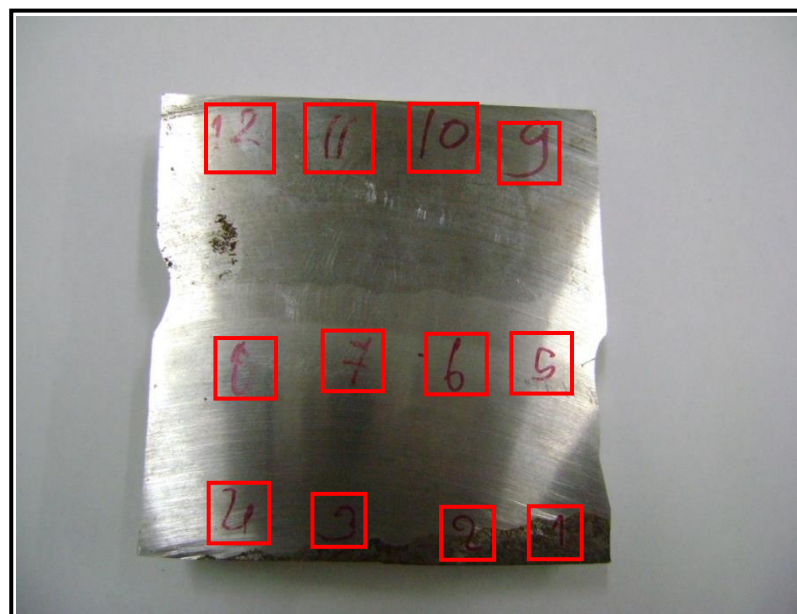
รูปที่ 3.15 ชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบหาตำแหน่งการแตกร้าว



รูปที่ 3.16 พบรอยแตกร้าวด้านในท่อExpander โดยตำแหน่งใกล้กับรอยที่เจียรออกด้านนอก



รูปที่ 3.17 นำชิ้นงานที่พบรอยแตกร้าวและทำการMarkไปตัดทอนด้วยเครื่องตัดขนาดใหญ่



รูปที่ 3.18 ชิ้นงานที่นำมาตัดและตำแหน่งที่ขุดดูโครงสร้าง บริเวณ No.5 เป็นบริเวณรอยแตก



รูปที่ 3.19 นำชิ้นงานที่พบรอยแตกร้าวไปตัดด้วยเครื่องตัดขนาดเล็กและทำเรือนหุ้มแบบ Cold Mount



รูปที่ 3.20 เครื่องตัดขนาดใหญ่ [18]



รูปที่ 3.21 เครื่องตัดขนาดเล็ก [18]



รูปที่ 3.22 น้ำยาทำเรื่อน Mounting [18]



รูปที่ 3.23 เครื่องขัดผิวชิ้นงาน [18]



รูปที่ 3.24 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [1]

หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะคล้ายกับหลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แสง เพียงแต่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะใช้ลำแสงอิเล็กตรอนแทนแหล่งกำเนิดแสงในการสร้างภาพ และจะใช้ตรวจสอบชิ้นงานได้ในระดับกำลังขยายสูงมากกว่ามาก ภาพที่ได้จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะแสดงลักษณะพื้นผิว ลักษณะรูปร่าง ส่วนประกอบทางเคมี ชนิดและปริมาณของสารประกอบที่มีอยู่ในวัสดุได้อย่างคร่าวๆ

นอกจากนี้ผู้ตรวจสอบยังหาข้อมูลเกี่ยวกับ โครงสร้างผลึกของวัสดุนั้นได้อีกด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีข้อจำกัดในการใช้งาน เช่น ชิ้นงานที่จะทำการตรวจสอบต้องนำไฟฟ้าได้ การตรวจสอบชิ้นงานต้องกระทำในสภาวะสุญญากาศ หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เมื่ออิเล็กตรอนชนกับตัวอย่างจะเกิดการถ่ายเทพลังงาน ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้น อิเล็กตรอนจะหลุดออกมาจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระอิเล็กตรอนในระดับพลังงานที่สูงกว่า จะเข้ามาแทนที่และปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า รังสีเอกซ์ ดังนั้นเมื่อนำหัววัดมาวัดความเข้มและพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ การแยกแยะชนิดของธาตุต่างๆทำได้โดยการพิจารณาค่าพลังงานของฟิสิกที่กระจายพลังงานรังสีเอกซ์ แล้วระบุค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นเป็นของธาตุอะไรได้

โดยทั่วไปจะใช้วัสดุที่นำไฟฟ้าดีในการเคลือบผิวโลหะเช่น ทอง ความหนาแน่นของการเคลือบผิวจะอยู่ที่ระดับ 10-20 นาโนเมตร ภายหลังจากเคลือบผิวบริเวณผิวของชิ้นงานจะมีประจุไฟฟ้าสถิตเนื่องจากในลำแสงอิเล็กตรอนจะมีกระแสไฟฟ้าอยู่ การเคลือบผิวจะทำให้ประจุไฟฟ้าที่มากเกินไปหลุดออกไปจากผิวของชิ้นงาน การเลือกวัสดุเพื่อใช้เคลือบผิวของชิ้นงาน ต้องคำนึงเสมอว่าวัสดุนั้นจะไม่รบกวนการวิเคราะห์ของเครื่องเอกซเรย์ ด้วยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างลำแสงอิเล็กตรอนกับชิ้นงานทดสอบ จะทำให้เกิดอนุภาคต่างๆ ที่มีระดับพลังงานต่างกันสะท้อนออกจากผิวของชิ้นงาน อนุภาคเหล่านี้ จะทำให้ผู้วิเคราะห์ทราบถึงลักษณะและสมบัติต่างๆ ในชิ้นงานทดสอบได้ โดยส่วนใหญ่แล้วจะเกี่ยวข้องกับสัญญาณภาพที่ได้จากการสะท้อนกลับของอนุภาค เมื่อลำแสงอิเล็กตรอนเดินทางเข้าสู่ภายในชิ้นงานทดสอบ จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนและอะตอมของชิ้นงานทำให้เกิดการกระจายของอิเล็กตรอนที่เดินทางเข้ามาในชิ้นงาน การกระจายอิเล็กตรอนนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่

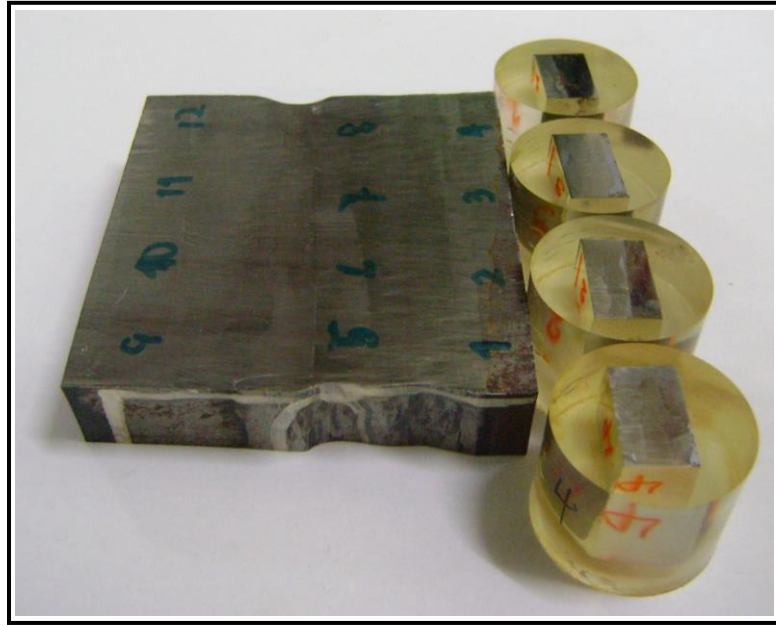
- ประเภทยืดหยุ่น อิเล็กตรอนสามารถรักษาระดับพลังงานไว้ได้เกือบทั้งหมดเมื่อกระจายกลับออกจากผิวของชิ้นงาน อิเล็กตรอนประเภทนี้จึงมีระดับพลังงานสูงใกล้เคียงกับพลังงานของลำแสงอิเล็กตรอน โดยจำนวนของอิเล็กตรอนจะสัมพันธ์กับเลขอะตอมของธาตุ จึงนิยมใช้อิเล็กตรอนประเภทนี้ในการตรวจสอบความแตกต่างในส่วนประกอบทางเคมีในภาพของชิ้นงาน
- ประเภทไม่ยืดหยุ่น อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานมากเกินไป จากการเกิดปฏิกิริยากับชิ้นงานทดสอบ พลังงานอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกดูดซับไว้ภายในชิ้นงาน ยกเว้นอิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้ผิวเท่านั้นที่สามารถหลบหนีออกจากผิวของชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนประเภทนี้มีระดับพลังงานต่ำ

วิธีการทดลอง

ในการเตรียมชิ้นงานก่อนนำไปวิเคราะห์นำชิ้นงานไปพันทองเคลือบให้ทั่วชิ้นงาน แล้วก็นำเข้าเครื่องเพื่อไปวิเคราะห์ชิ้นงาน เมื่ออิเล็กตรอนชนกับตัวอย่างชิ้นงาน จะเกิดการถ่ายเทพลังงานทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้น หากพลังงานนั้นมากพอจนสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสได้ อิเล็กตรอนจะหลุดออกมาจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ อิเล็กตรอนในระดับพลังงานที่สูงกว่าจะเข้ามาแทนที่และปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า รังสีเอกซ์ ดังนั้นเมื่อนำหัววัดมาวัดความเข้มและพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ การแยกแยะชนิดของธาตุต่างๆทำได้โดยการพิจารณาค่าพลังงานของฟิสิกที่กระจายพลังงานรังสีเอกซ์ แล้วระบุค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นเป็นของธาตุอะไร เพราะว่าในแต่ละค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ในแต่ละธาตุที่มีค่าแน่นอน

จุดประสงค์

การวิเคราะห์รูปผิวรอยแตก เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุและสาเหตุของการแตกหักจากหลักฐานทางกายภาพที่ปรากฏบนผิวรอยแตก สามารถหาชนิดและปริมาณของธาตุในพื้นที่ขนาดเล็กในชิ้นงานได้ ความละเอียดของภาพดีกว่าภาพที่เห็นจากกล้องจุลทรรศน์แสง สามารถนำไปเปรียบเทียบกับภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แสง



รูปที่ 3.25 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
และการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์

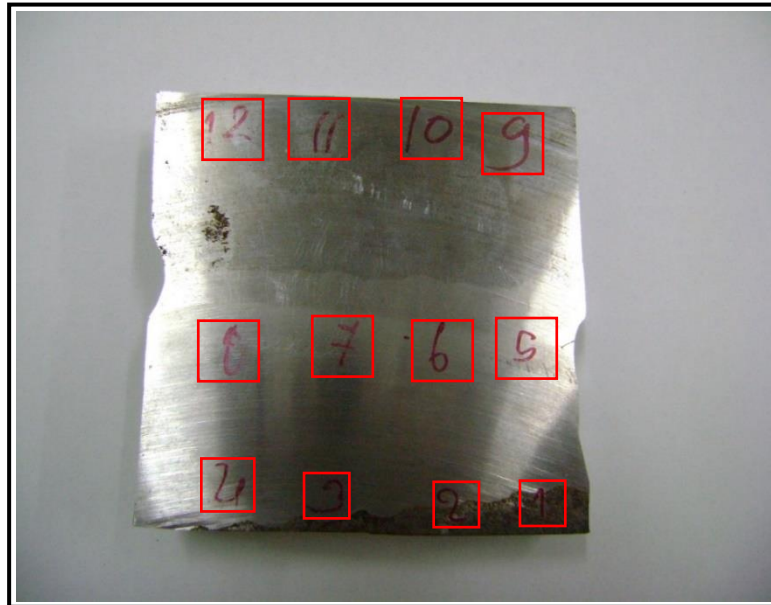
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลจากการทดลอง เพื่อศึกษาหาสาเหตุการเกิดรอยร้าวต่อ Expander ระหว่างเหล็ก P91 ที่เชื่อมต่อด้วย ลวด Inconel82 กับเหล็ก P22 การนำชิ้นงาน ไปทำการขัด และส่องดูโครงสร้างบริเวณที่เกิดการแตก แสดงผลรูปโครงสร้างบริเวณรอยแตกและบริเวณใกล้เคียงโดยรอบ และลักษณะการแตกการนำ ชิ้นงานไปใช้เทคนิคการตรวจสอบด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) คู่งค์ประกอบทางเคมีตรงบริเวณรอยแตก เปรียบเทียบกับเนื้อเชื่อมบริเวณใกล้เคียงโดยรอบ และบริเวณโครงสร้างที่เกิดจากการเชื่อม รูปร่างลักษณะของการแตก เพื่อทำการวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดรอยร้าวต่อ Expander ดังนี้

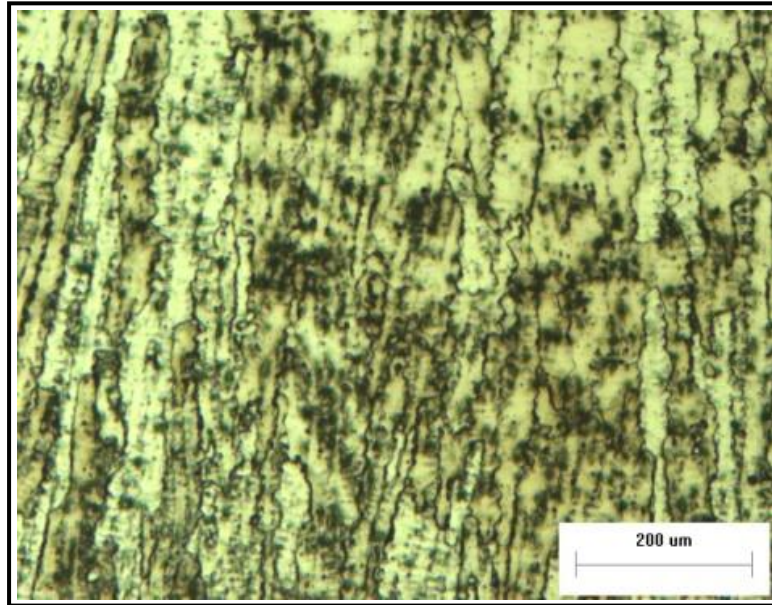
4.1 ผลการแสดงรูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยแตกและบริเวณใกล้เคียง

จากการตรวจสอบด้วยสายตาและการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม พบรอยแตกบริเวณผิวด้านในท่อจึง นำชิ้นงานมาทำการตัดและทำการกำหนดเครื่องหมาย เพื่อส่องดูโครงสร้างที่เกิดจากการเชื่อมและ ตำแหน่งของโครงสร้างบริเวณที่เกิดการแตก ดังรูปที่ 4.1 ส่วนรูปที่ 4.2 เป็นรูปโครงสร้างตำแหน่งที่ 1 เป็นเนื้อของ P22 ซึ่งเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ ทำการเชื่อม Buffer ด้วยลวดเชื่อม Inconel82 ดังรูป โครงสร้างที่ 4.3 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ 2 เห็นเป็นรอยชั้นเชื่อมต่อของ P22 กับ Buffer Inconel82 ส่วน ตำแหน่งที่ 3 ดังรูปโครงสร้างที่ 4.4 เป็นโซนใกล้รอยต่อของ P22 กับ Buffer Inconel82 ที่เกิดการเย็น ตัวลงทำให้เกิดเกรนขนาดใหญ่และรูปที่ 4.5 เป็นตำแหน่งที่ 4 ซึ่งเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ที่เกิด จากลวดเชื่อม Inconel82 (ข้อมูลจากตารางที่ 3.1) ที่มีส่วนผสมของนิเกิลเป็นหลักและมีธาตุ Stabilized เป็นส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม Inconel82 พบการตกตะกอนเป็นคาร์ไบด์ภายในโครงสร้าง และ เมื่อทำการถ่ายภาพโครงสร้างที่กำลังขยายต่ำแสดงภาพรวมของลักษณะการแตกดังรูปที่ 4.6 เมื่อทำ การถ่ายภาพโครงสร้างที่มีกำลังขยายสูงขึ้นพบว่าลักษณะรอยแตกผ่านแนวเชื่อมบริเวณเนื้อเชื่อมที่เป็น แนวต่อระหว่างแนว ภายในพบสิ่งแปลกปลอมฝังอยู่ในแนวแตกร้าวดังรูปที่ 4.7 ซึ่งได้ทำการวัดรอย แตกจากปากของรอยแตกด้านในท่อยาวลงมาผ่านสิ่งแปลกปลอมถึงปลายหางของรอยแตกยาว 2026.699 μm . และได้ทำการวัดความกว้างของรอยแตกที่ผ่านแนวเชื่อมกว้างเฉลี่ย 127.693 μm . ซึ่ง ภายในพบสิ่งแปลกปลอมฝังอยู่ในเนื้อเชื่อมวัดความโตได้ 82.58 μm . และบริเวณขอบของรอยแตก พบคราบออกไซด์ที่ปกคลุมรอบแนวแตกตามแนวยาวดังรูปที่ 4.8 และจากรูปที่ 4.9 ส่วนปลายของ รอยแตกเกิดการขยายตัวเป็นแนวยาวเกาะรวมกันเป็นกลุ่มและกระจายเป็นช่วง ได้ทำการวัดความยาว ในรูปที่ 4.10 ตรงส่วนปลายของรอยแตกที่ผ่านแนวเชื่อมกลุ่มล่างสุดความยาวได้ 921.107 μm . พบคราบออกไซด์ปกคลุมโดยรอบและเมื่อดูโครงสร้างจุลภาคของรูปที่ 4.11 แล้วพบว่าบริเวณแนว

เชื่อมซึ่งเป็นบริเวณแนวกระทบร้อน (HAZ) เป็นบริเวณที่ได้รับอุณหภูมิสูง บริเวณแนวเชื่อมมีการเย็นตัวของผลึกเดนไดรต์ที่เย็นตัวเร็วและมีลักษณะคล้ายกิ่งก้านของต้นไม้และจากรูปที่ 4.12 - 4.13 ตำแหน่งที่ 6 และ 7 ซึ่งเป็นแนวเดียวกับที่พบรอยแตกพบโครงสร้างที่เกิดการตกตะกอนเป็นคาร์ไบด์ และเกิดการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ทำให้เกิดเกรนขนาดใหญ่ และจากรูปที่ 4.14 บริเวณตำแหน่งที่ 8 แสดงบริเวณแนวเชื่อมทำให้เห็นแนวการเย็นตัวของผลึกโครงสร้างของเกรนที่แตกต่างกัน และจากรูปที่ 4.15 แสดงบริเวณแนวเชื่อมที่เป็นโครงสร้างแบบเบนไนต์ตั้งแต่ตำแหน่งที่ 9 - 12 ซึ่งเป็นเนื้อแนวเชื่อมของเหล็ก P91 จากข้อมูลของการส่องดูโครงสร้างพบว่าแนวเชื่อมของเหล็ก P22 ที่เชื่อมสร้าง Buffer ด้วยลวด Inconel82 และทำการเชื่อมต่อด้วยลวด Inconel82 กับ Buffer ที่เชื่อมต่อกับเหล็ก P91 บริเวณรอยแตกที่พบอยู่ในโซนของเนื้อ Inconel82 ส่วนที่ติดกับ Buffer ของเหล็ก P91

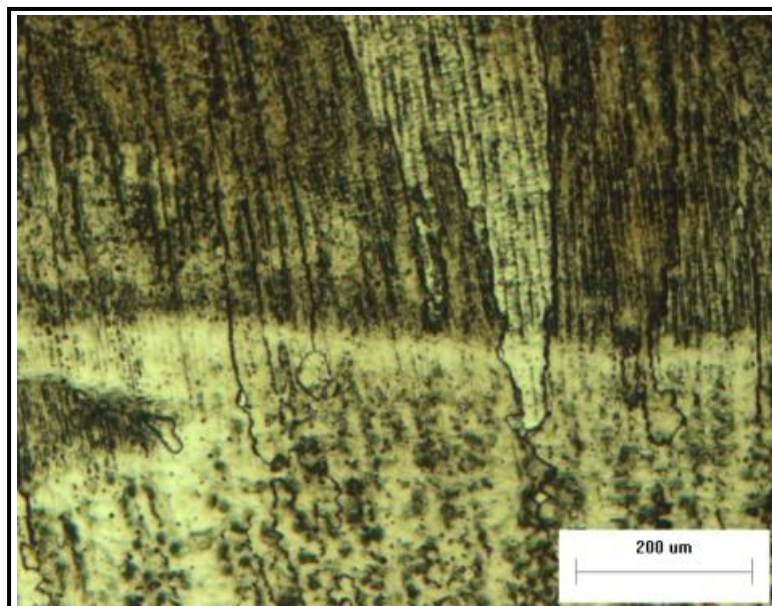


รูปที่ 4.1 แสดงตำแหน่งโครงสร้างจุดต่างๆ บนชิ้นงาน



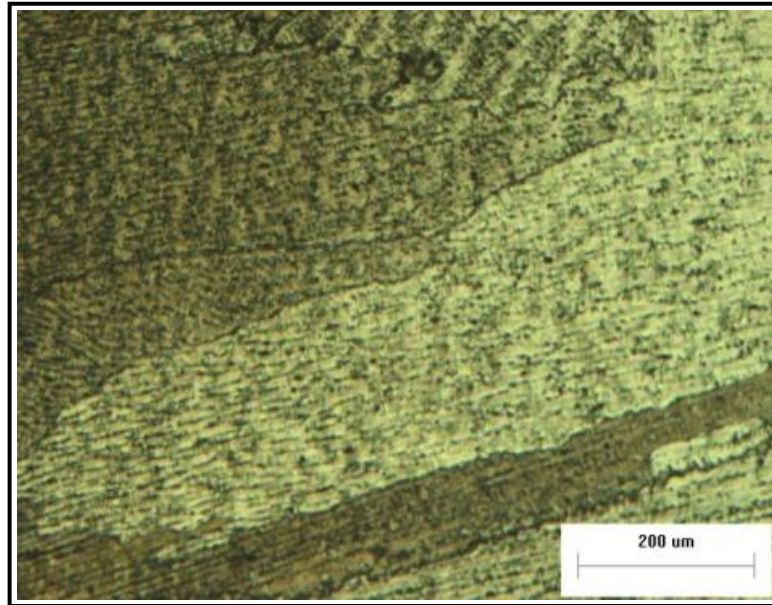
รูปที่ 4.2 P1-100X (ตำแหน่งหมายเลข1) เป็นเนื้อ P22

รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างบริเวณตำแหน่งหมายเลข 1 ในรูปที่ 4.1 จากรูปแสดงถึงโครงสร้างเฟอร์ไรท์ (Ferrite) และมีคาร์ไบด์กระจายอยู่ในโครงสร้าง



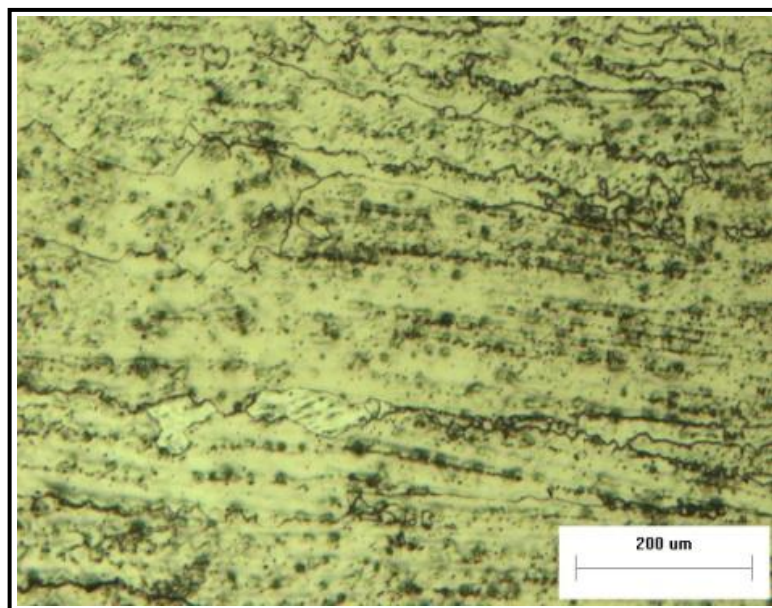
รูปที่ 4.3 P2-100X (ตำแหน่งหมายเลข 2) เป็นเนื้อรอยต่อของ P22 กับ Buffer Inconel82

รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในรูปที่ 4.1 ในตำแหน่งที่ 2 จากภาพโครงสร้างทางจุลภาคแสดงลักษณะรอยต่อระหว่าง P22 และ Buffer Inconel82



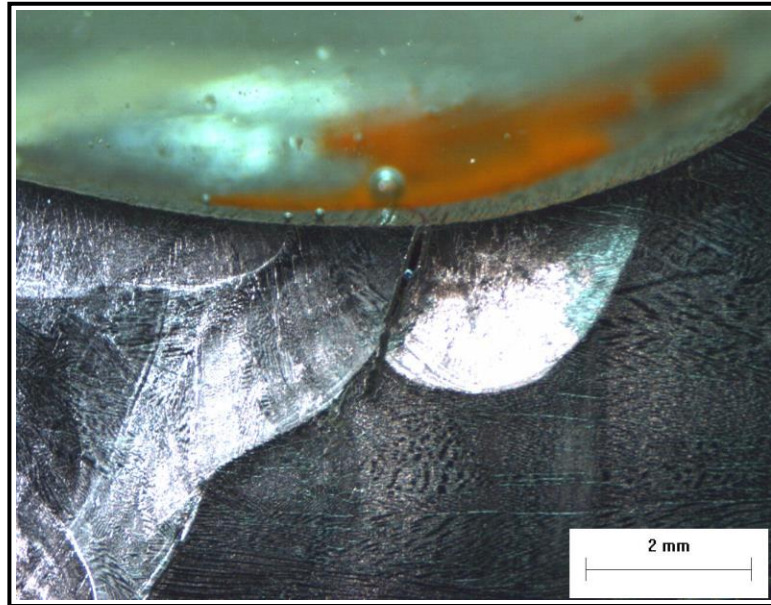
รูปที่ 4.4 P3-100X (ตำแหน่งหมายเลข 3) โชนโก๊สร้อยต่อ P22 กับ Buffer Inconel82

รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในรูปที่ 4.1 ในตำแหน่งที่ 3 จากภาพโครงสร้างทางจุลภาคแสดงลักษณะบริเวณโก๊สร้อยต่อระหว่าง P22 และ Buffer Inconel82



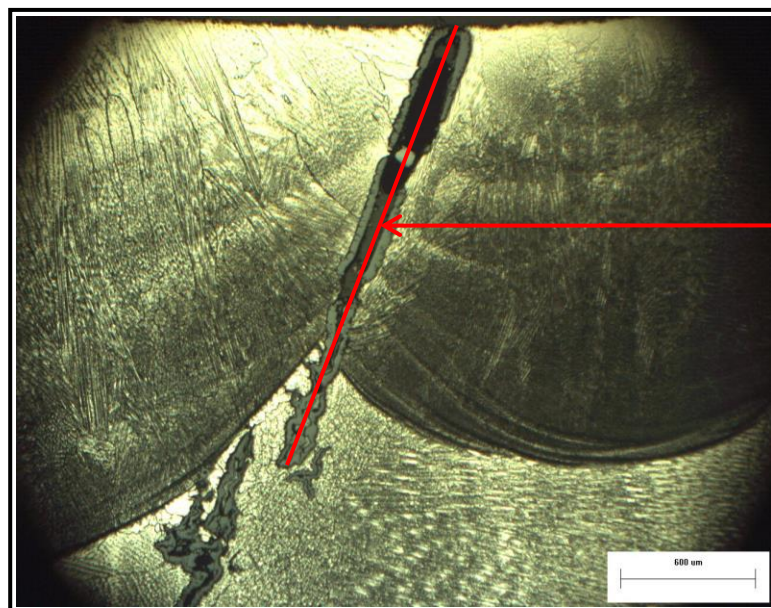
รูปที่ 4.5 P4-100X (ตำแหน่งหมายเลข 4) เป็นโครงสร้างอสเทนไนต์เนื้อลวด Inconel82

รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในรูปที่ 4.1 ในตำแหน่งที่ 4 จากภาพโครงสร้างทางจุลภาคแสดงลักษณะของเนื้อลวดเชื่อม Inconel82 ซึ่งเป็น โครงสร้างของอสเทนไนต์ (Austenite)



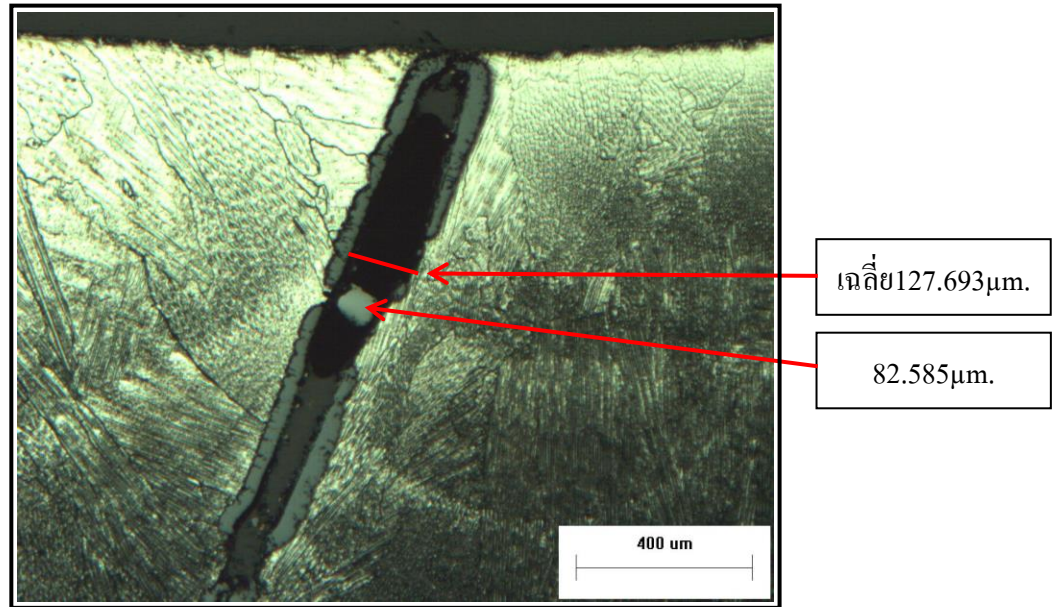
รูปที่ 4.6 รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยายต่ำ บริเวณตำแหน่งที่ 5 ของชิ้นงานเชื่อม

รูปที่ 4.6 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคที่กำลังขยายต่ำของชิ้นงานในรูปที่ 4.1 ในตำแหน่งที่ 5 จากภาพโครงสร้างทางจุลภาคแสดงลักษณะบริเวณที่พบรอยแตกในชิ้นงานเชื่อม



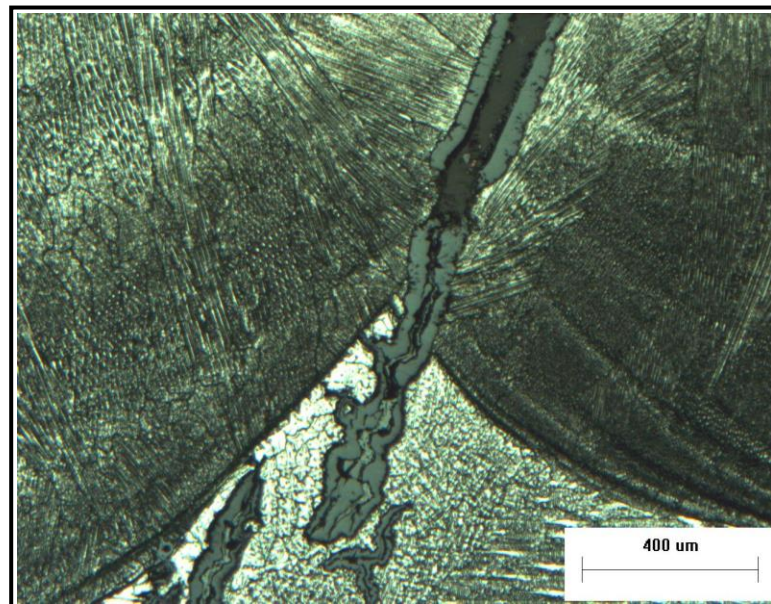
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะการแตกผ่าแนวเชื่อมภายในพบสิ่งแปลกปลอมฝังอยู่ในแนวแตกร้าว

รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคที่กำลังขยายที่สูงขึ้นของรอยแตกในรูปที่ 4.6 จากภาพโครงสร้างทางจุลภาคแสดงลักษณะบริเวณที่พบรอยแตกในชิ้นงาน ซึ่งรอยแตกมีความยาว 2026.7 μm และมีสิ่งแปลกปลอมฝังอยู่ในรอยแตก



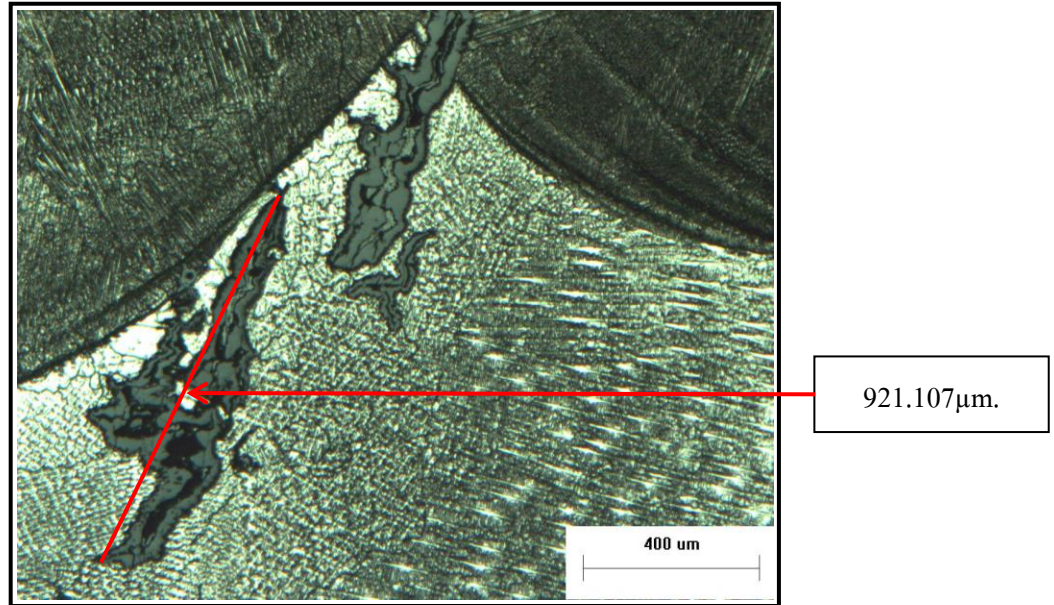
รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะของรอยแตกตรงกลางพบสิ่งแปลกปลอมเป็นก้อนกลมๆ

รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคที่กำลังขยายที่สูงขึ้นของรอยแตกในรูปที่ 4.6 จากภาพโครงสร้างทางจุลภาคแสดงลักษณะบริเวณที่พบรอยแตกในชิ้นงาน ซึ่งรอยแตกมีความกว้าง 127.693 μm และมีสิ่งแปลกปลอมฝังอยู่ในรอยแตกขนาด 82.585 μm โดยผิวรอยแตกปกคลุมไปด้วยออกไซด์



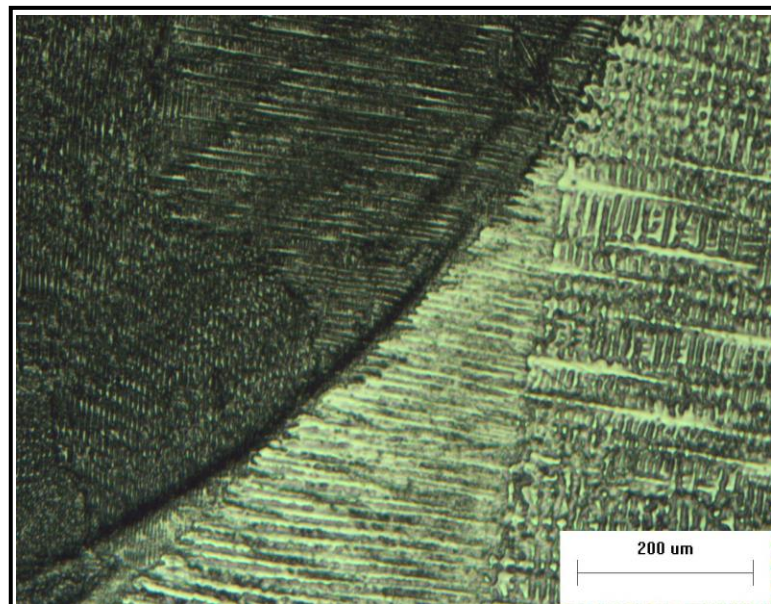
รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะส่วนปลายของรอยแตก เกิดการขยายตัวและเกาะรวมกันเป็นกลุ่มพบคราบของออกไซด์เกาะปกคลุมรอบรอยแตก

รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคที่กำลังขยายที่สูงขึ้นของรอยแตกในรูปที่ 4.6 จากภาพโครงสร้างทางจุลภาคแสดงลักษณะบริเวณที่พบรอยแตกในชิ้นงาน โดยแสดงลักษณะส่วนปลายของรอยแตก



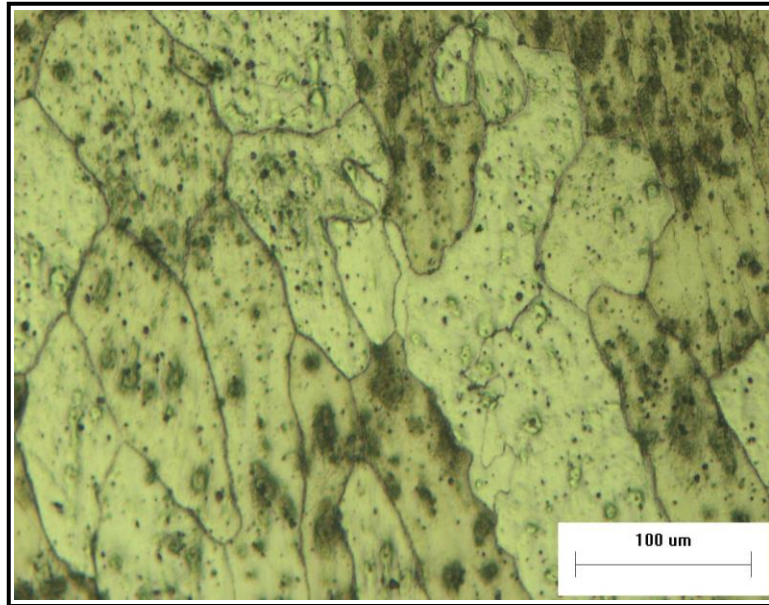
รูปที่ 4.10 ส่วนปลายเกิดจากการขยายตัวเกาะรวมกันเป็นกลุ่มและกระจายตัวเป็นช่วงๆ บริเวณขอบพบคราบของออกไซด์เกาะปกคลุมโดยรอบ

รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคที่กำลังขยายที่สูงขึ้นของรอยแตกในรูปที่ 4.6 จากภาพโครงสร้างทางจุลภาค แสดงลักษณะบริเวณที่พบรอยแตกในชิ้นงาน โดยแสดงลักษณะส่วนปลายของรอยแตก และบริเวณใกล้เคียงมีกลุ่มของ voids เกาะกลุ่มกัน โดยมีขนาดความยาว 921.107 μm และพบร่องรอยของออกไซด์ปกคลุมโดยรอบ



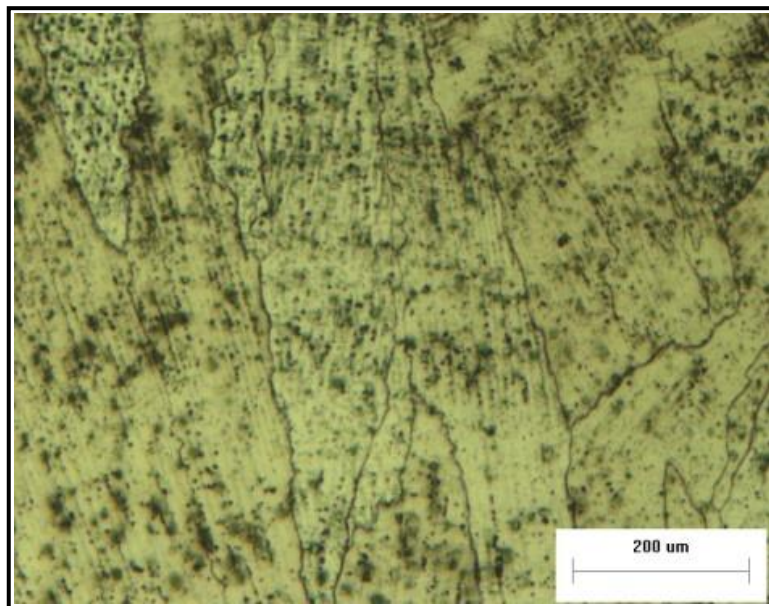
รูปที่ 4.11 P5-100X (ตำแหน่งหมายเลข 5) แสดงบริเวณแนวเชื่อมทำให้เห็นแนวการเย็นตัวของผลึกเดนไดรต์ที่เย็นตัวเร็ว ที่มีลักษณะคล้ายกิ่งก้านของต้นไม้

รูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในรูปที่ 4.1 ในตำแหน่งที่ 5 จากภาพโครงสร้างทางจุลภาคแสดงลักษณะบริเวณแนวเชื่อม โครงสร้างที่พบเป็นลักษณะของเดนไดรต์



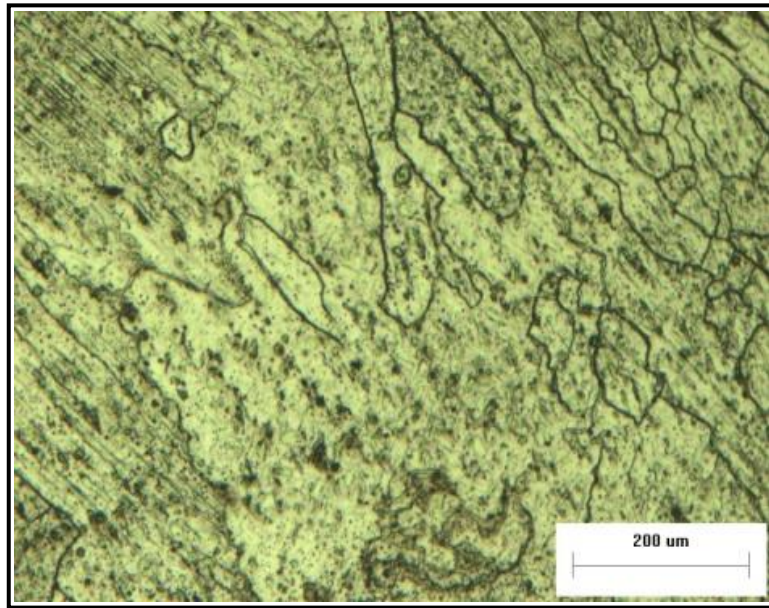
รูปที่ 4.12 P6-200X (ตำแหน่งหมายเลข 6) โครงสร้างเป็นออสเทนไนต์พบเกิดการตกตะกอนเป็นคาร์ไบด์และเกิดการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ทำให้เกิดเกรนขนาดใหญ่

รูปที่ 4.12 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในรูปที่ 4.1 ในตำแหน่งที่ 6 จากภาพโครงสร้างทางจุลภาคแสดงลักษณะบริเวณแนวเชื่อม โครงสร้างที่พบเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์(Austenite)

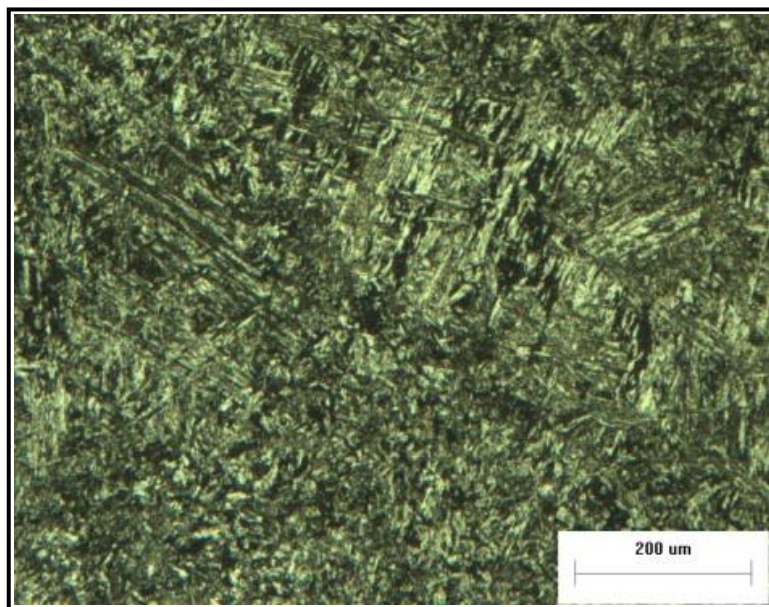


รูปที่ 4.13 P7-100X (ตำแหน่งหมายเลข7) โครงสร้างเป็นออสเทนไนต์พบเกิดการตกตะกอนเป็นคาร์ไบด์และเกิดการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ทำให้เกิดเกรนขนาดใหญ่

รูปที่ 4.13 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในรูปที่ 4.1 ในตำแหน่งที่ 7 จากภาพโครงสร้างทางจุลภาคแสดงลักษณะบริเวณแนวเชื่อม โครงสร้างที่พบเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์พบเกิดการตกตะกอนเป็นคาร์ไบด์กระจายอยู่ในโครงสร้าง



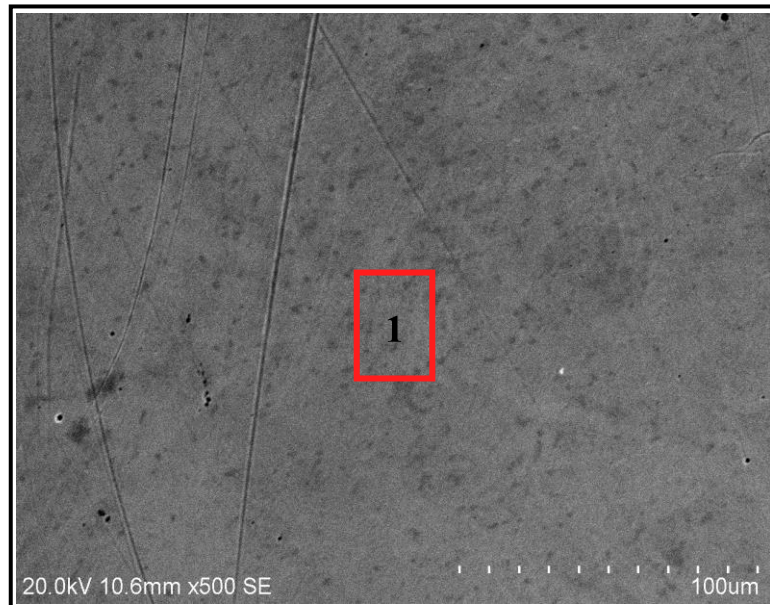
รูปที่ 4.14 P8-100X (ตำแหน่งหมายเลข 8) แสดงบริเวณแนวเชื่อม ทำให้เห็นแนวการเย็นตัวของผลึก
รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในรูปที่ 4.1 ในตำแหน่งที่ 8 โครงสร้างที่พบเป็น
 โครงสร้างอสเทนไนต์พบเกิดการตกตะกอนเป็นคาร์ไบด์กระจายอยู่ในโครงสร้าง



รูปที่ 4.15 P9 - 100X (ตำแหน่งหมายเลข 9 - 12) แสดงบริเวณแนวเชื่อมที่เป็นโครงสร้างของ
 เบนไนท์ (Bainite)
รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในรูปที่ 4.1 ในตำแหน่งที่ 9 - 12 โครงสร้างบริเวณ
 เนื้อเชื่อมที่มีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยโครงสร้างที่พบเป็นโครงสร้างของเบนไนท์ (Bainite)

4.2 ผลการแสดงรูปเทคนิคการตรวจสอบด้วยกล้อง SEM บริเวณรอยแตกและบริเวณโครงสร้างใกล้เคียง

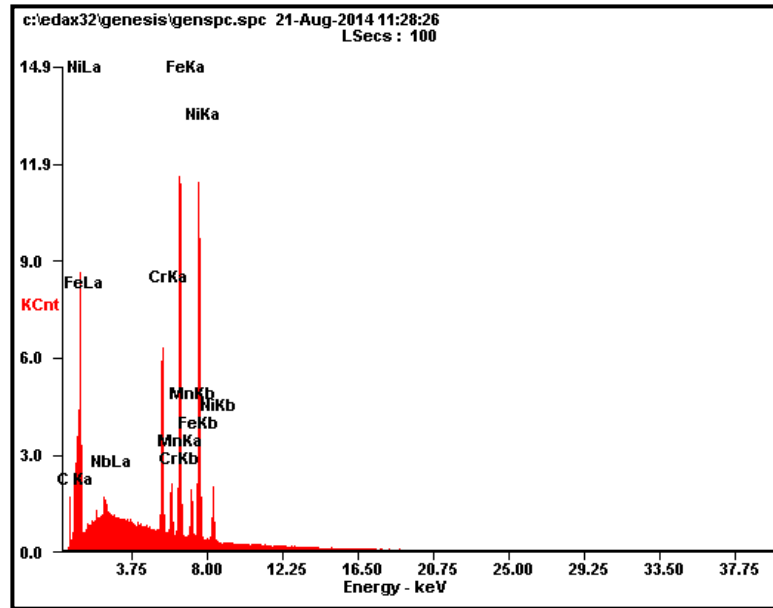
จากการตรวจสอบด้วยกล้อง SEM ของชิ้นงานเชื่อมดังตำแหน่งของรูปที่ 4.1 เมื่อทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีจากรูปที่ 4.16 - 4.30 ตามตารางส่วนผสมของธาตุที่ 4.1 - 4.8 พบว่าตำแหน่งหมายเลข 1 เป็นองค์ประกอบธาตุของเหล็ก P22 ซึ่งเป็นบริเวณของแนว Fusion zone มีการรวมตัวของธาตุบางตัวเกิดขึ้นและบริเวณแนว Fusion นี้ซึ่งเป็นรอยเชื่อมต่อ Buffer ระหว่างเหล็ก P22 กับลวดเชื่อม Inconel82 ตามตารางที่ 4.2 และ 4.3 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 4.24 ตำแหน่งหมายเลข 3 ซึ่งอยู่ใกล้รอยเชื่อมต่อพองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกันกับบริเวณตำแหน่งหมายเลข 2 และจากรูปที่ 4.26 เป็นตำแหน่งหมายเลข 4 พบว่าค่าขององค์ประกอบธาตุลวด Inconel82 มีค่าใกล้เคียงกับบริเวณหมายเลข 3 แต่ปริมาณของธาตุคาร์บอนจะสูงกว่ามาก และดูจากโครงสร้างจุลภาคบริเวณหมายเลข 4 พบเกิดการตกตะกอนเป็นคาร์ไบต์ภายในโครงสร้าง และจากรูปที่ 4.28 เป็นตำแหน่งหมายเลข 6 ซึ่งรอยอยู่ในแนวเดียวกันกับที่เกิดรอยแตก คือบริเวณตำแหน่งหมายเลข 5 พองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ตามตารางส่วนผสมของธาตุที่ 4.7 มีปริมาณของธาตุคาร์บอนสูง และดูจากโครงสร้างจุลภาคบริเวณหมายเลข 6 พบเกิดการตกตะกอนเป็นคาร์ไบต์ภายในโครงสร้าง จากรูปที่ 4.30 เป็นตำแหน่งหมายเลข 9 พบว่าค่าองค์ประกอบธาตุของเหล็ก P91 ตามตารางส่วนผสมของธาตุที่ 4.8 และดูจากโครงสร้างจุลภาคบริเวณหมายเลข 9 พบเกิดโครงสร้างเป็นแบบเบนไนท์ ที่มีปริมาณของธาตุคาร์บอนสูงและจากรูปที่ 4.33 กับ 4.37 พบว่าธาตุบริเวณใกล้เคียงมีค่าใกล้เคียงกับองค์ประกอบของลวดเชื่อม Inconel82 และพบการแยกตัวขององค์ประกอบของธาตุ ซึ่งเป็นบริเวณขอบของรอยแตกที่พบคราบน้ำมันในรูปที่ 4.35 ตามตารางส่วนผสมของธาตุที่ 4.10 ซึ่งจากรูปที่ 4.39 ตามตารางส่วนผสมของธาตุที่ 4.12 พบสิ่งแปลกปลอมฝังอยู่ภายในเนื้อเชื่อมเป็นธาตุซิลิกอน ซึ่งเป็นสิ่งแปลกปลอมบนผิวชิ้นงาน ซึ่งอาจจะเกิดจากการเตรียมชิ้นงานระหว่างการขัด เพื่อส่งดูโครงสร้าง เมื่อทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยกล้อง SEM บริเวณในรอยแตกแล้ว ดังรูปที่ 4.41 ตามตารางส่วนผสมของธาตุที่ 4.13 และบริเวณใกล้เคียง พบว่าส่วนผสมทางเคมีของธาตุบริเวณดังกล่าว องค์ประกอบของธาตุมีการกระจายตัวที่แตกต่างกัน ส่วนรูปที่ 4.30 - 4.33 ตามตารางส่วนผสมของธาตุที่ 4.43, 4.45, 4.47 และ 4.49 เป็นบริเวณของส่วนปลายของรอยแตก จากการตรวจสอบซึ่งแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของธาตุมีการกระจายตัวที่แตกต่างกัน ซึ่งส่วนผสมทางเคมีของธาตุที่ต่างกันนี้ย่อมส่งผลกระทบต่อ การแข็งตัวของเนื้อเชื่อมที่ไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.16 ตำแหน่งหมายเลข 1 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของเหล็ก P22 ซึ่งเป็นบริเวณของแนว Fusion zone และมีการรวมตัวของธาตุบางตัวเกิดขึ้น

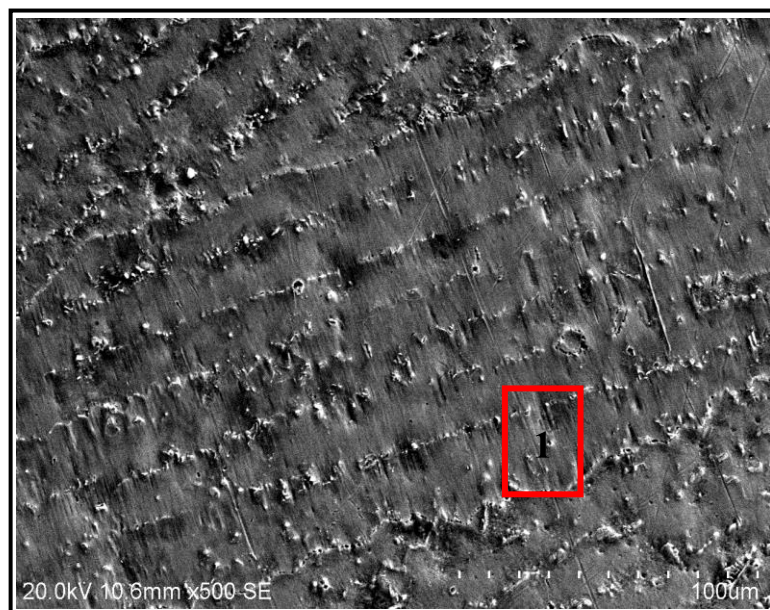
ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.16

Element	Weight %	Atomic %
C	3.59	14.73
Nb	0.16	0.08
Cr	2.44	2.32
Mn	0.50	0.45
Fe	93.31	82.42



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.16

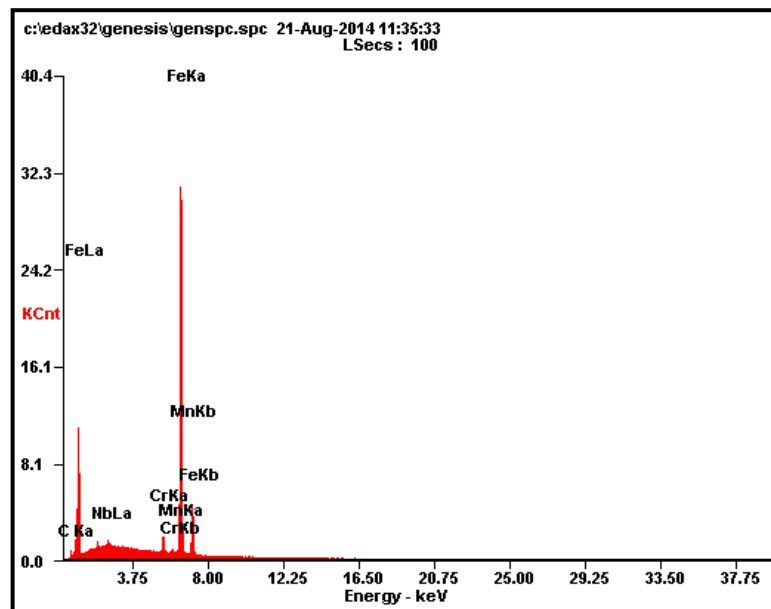
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในตำแหน่งหมายเลข 1 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 3.59 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 2.44 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 0.16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีปริมาณธาตุคาร์บอน 14.73 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 2.32 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 0.08 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม และมีปริมาณธาตุแมงกานีส 0.45 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของเหล็ก P22



รูปที่ 4.18 ตำแหน่งหมายเลข 1 ซึ่งเป็นบริเวณของแนว Fusion zone พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.18

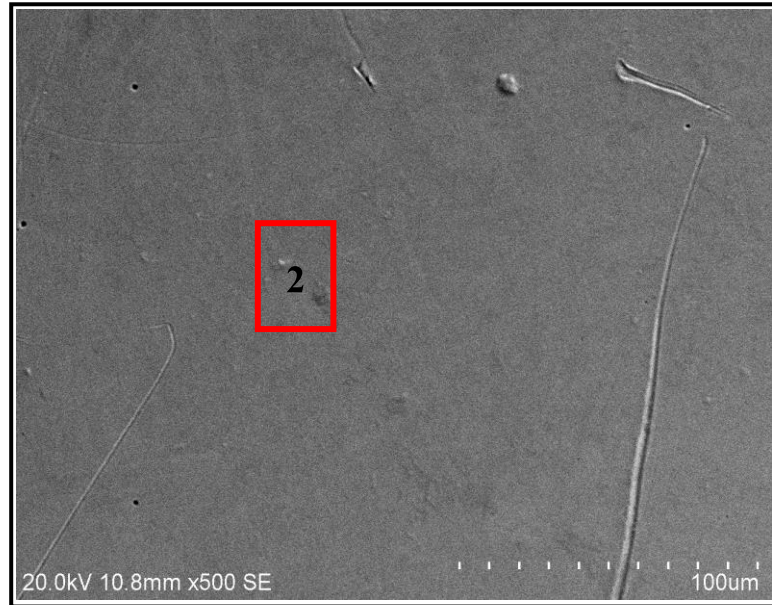
Element	Weight %	Atomic %
C	8.97	31.94
Nb	1.71	0.79
Cr	10.92	8.98
Mn	2.05	1.59
Fe	29.59	22.65
Ni	46.76	34.05



รูปที่ 4.19 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.18

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในตำแหน่งหมายเลข 1 (Fusion zone) พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 8.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 10.92 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 1.71 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุเหล็ก 29.59 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 46.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุคาร์บอน 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 8.98 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 0.79 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส

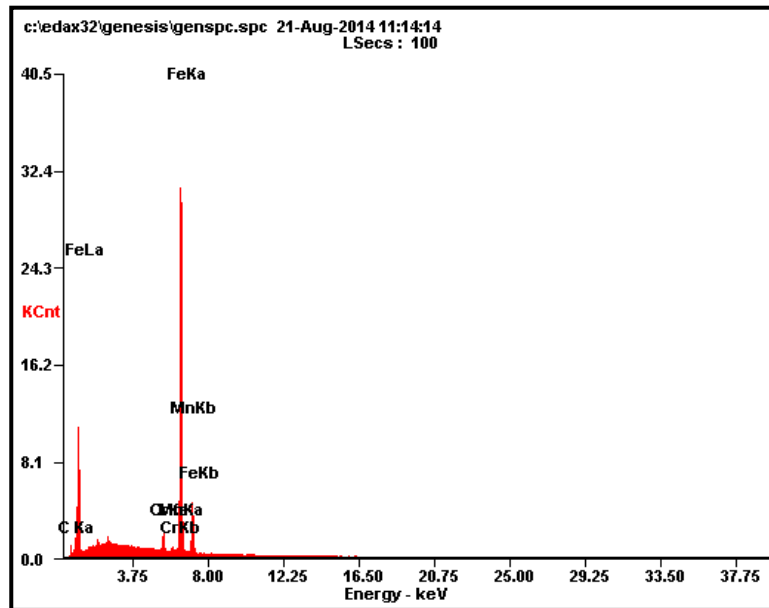
1.59 เปอร์เซนต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุเหล็ก 22.65 เปอร์เซนต์โดยอะตอมมีปริมาณของธาตุนิกเกิล 34.05 เปอร์เซนต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของลวดเชื่อม Inconel82



รูปที่ 4.20 ตำแหน่งหมายเลข 2 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของเหล็ก P22

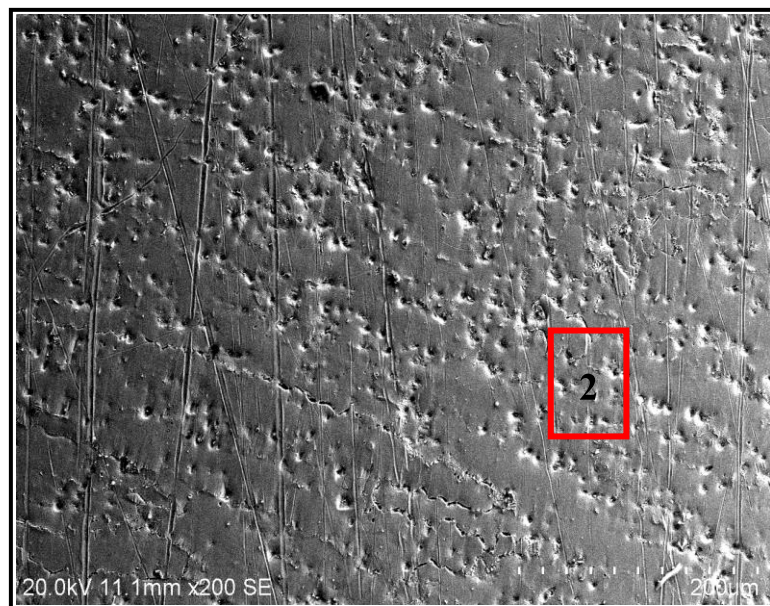
ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.20

Element	Weight %	Atomic %
C	4.58	18.23
Cr	2.46	2.26
Mn	0.51	0.44
Fe	92.45	79.07



รูปที่ 4.21 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.20

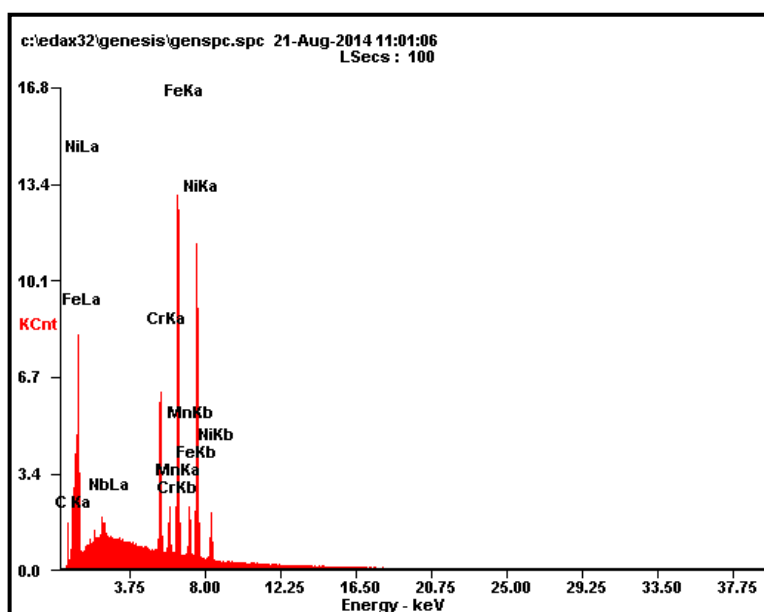
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุในตำแหน่งหมายเลข 2 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 4.58 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 2.46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 0.51 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีปริมาณธาตุคาร์บอน 18.23 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 2.26 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 0.44 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของเหล็ก P 22



รูปที่ 4.22 ตำแหน่งหมายเลข 2 ซึ่งเป็นบริเวณของแนว Fusion zone พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.22

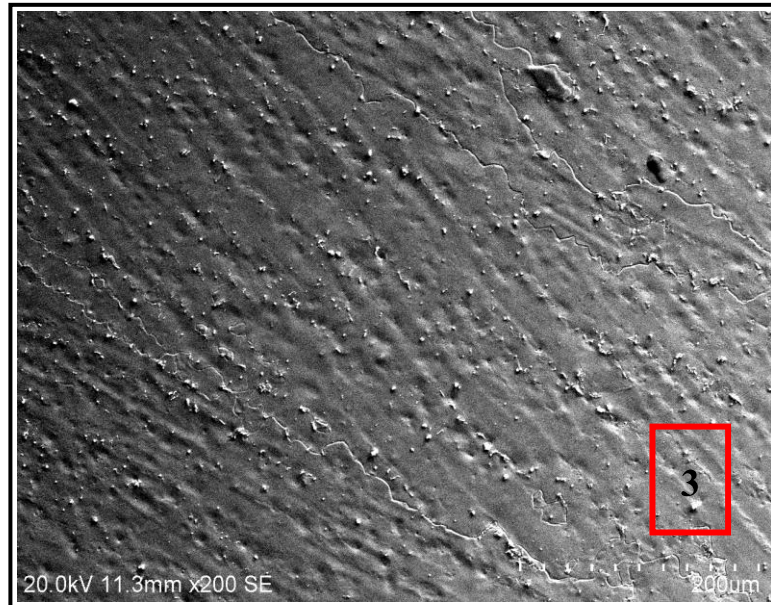
Element	Weight%	Atomic%
C	8.17	29.72
Nb	1.69	0.80
Cr	10.57	8.89
Mn	1.80	1.44
Fe	33.07	25.89
Ni	44.69	33.27



รูปที่ 4.23 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.22

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในตำแหน่งหมายเลข 2 (Fusion zone) พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.4 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 8.17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 10.57 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 1.69 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 1.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุเหล็ก 33.07 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 44.69 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุคาร์บอน 29.72 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 8.89 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 0.80 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 1.44 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุเหล็ก 25.89

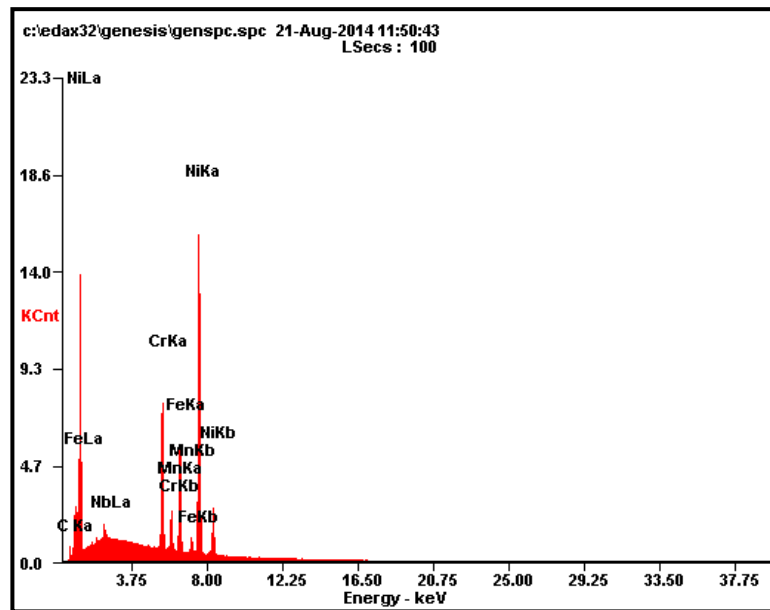
เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณของธาตุ निकเกิล 33.27 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของลวดเชื่อม Inconel82



รูปที่ 4.24 ตำแหน่งหมายเลข 3 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.5 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกับบริเวณตำแหน่งหมายเลข 2

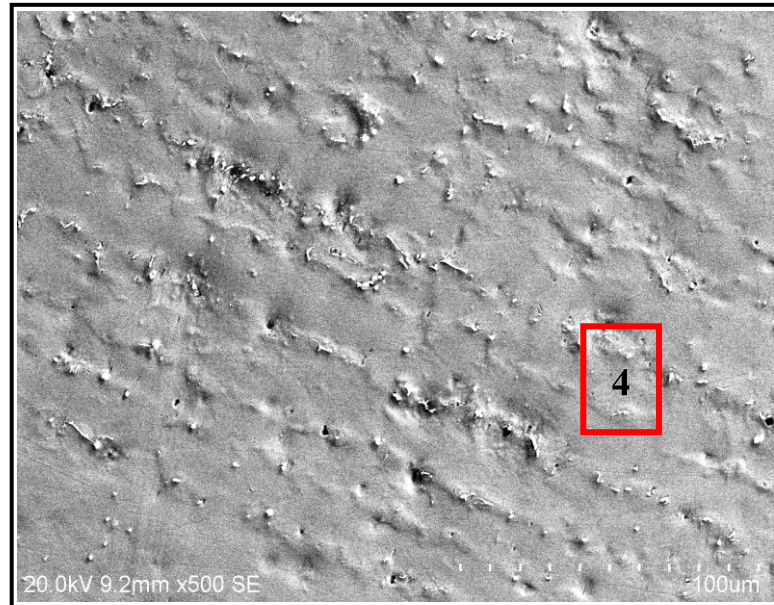
ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.24

Element	Weight %	Atomic %
C	3.83	16.01
Nb	1.93	1.04
Cr	14.30	13.82
Mn	2.52	2.31
Fe	12.95	11.65
Ni	64.46	55.17



รูปที่ 4.25 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.24

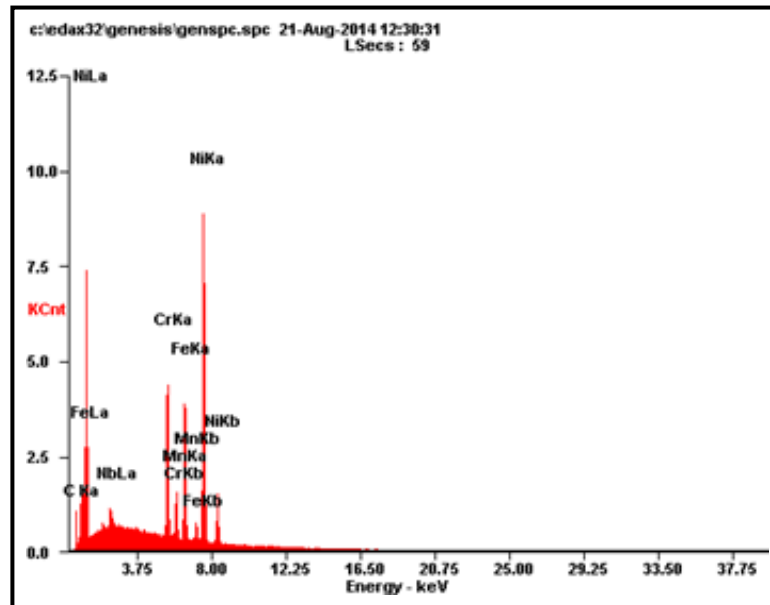
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในตำแหน่งหมายเลข 3 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 3.83 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 14.30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 1.93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.52 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุเหล็ก 12.95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 64.46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีปริมาณธาตุคาร์บอน 16.01 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 13.82 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 1.04 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.31 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุเหล็ก 11.65 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 55.17 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของลวดเชื่อม Inconel82



รูปที่ 4.26 ตำแหน่งหมายเลข 4 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.6 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างและมีปริมาณของธาตุคาร์บอนสูง

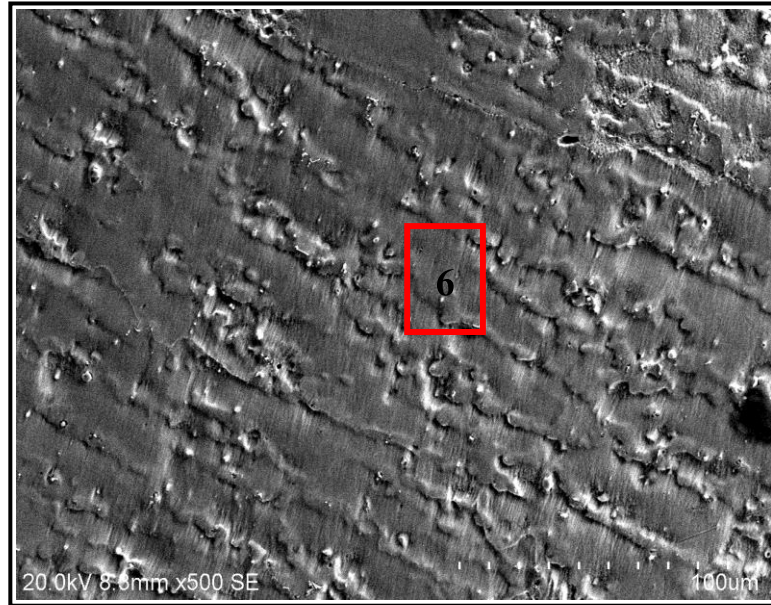
ตารางที่ 4.6 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.26

Element	Weight %	Atomic %
C	11.37	38.10
Nb	2.40	1.04
Cr	12.78	9.89
Mn	2.31	1.69
Fe	15.05	10.84
Ni	56.08	38.43



รูปที่ 4.27 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.26

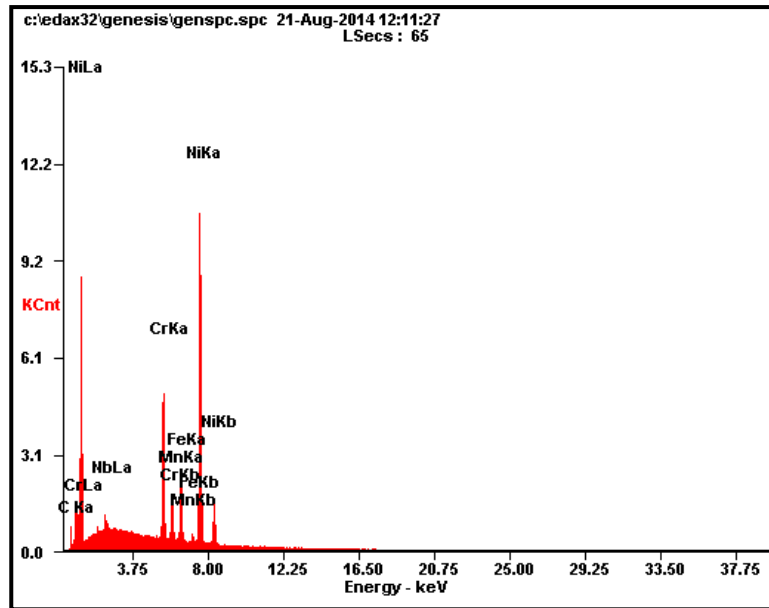
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในตำแหน่งหมายเลข 4 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.6 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 11.37 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 12.78 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 2.40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.31 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุเหล็ก 15.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 56.08 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีปริมาณธาตุคาร์บอน 38.10 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 9.89 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 1.04 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 1.69 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุเหล็ก 10.84 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 38.43 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของลวดเชื่อม Inconel82 แต่ในบริเวณนี้มีปริมาณธาตุคาร์บอนที่สูงกว่าปกติ



รูปที่ 4.28 ตำแหน่งหมายเลข 6 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.7 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกัน

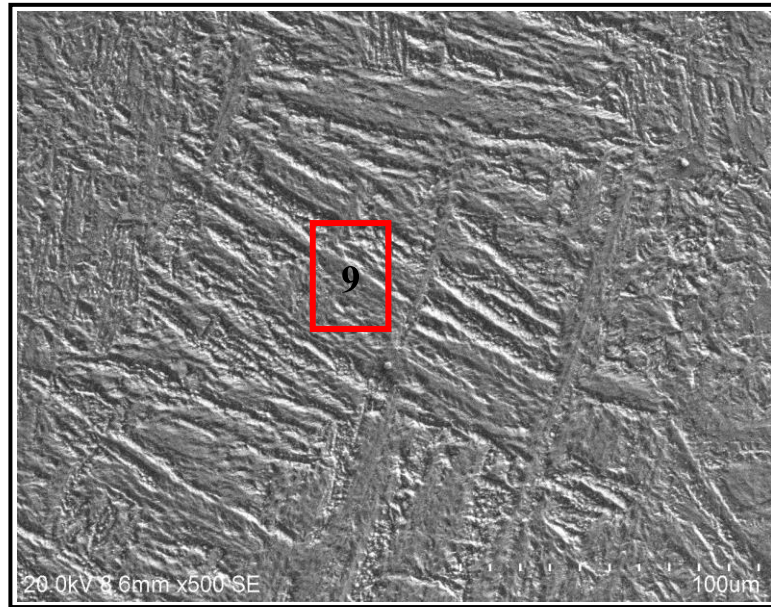
ตารางที่ 4.7 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.28

Element	Weight %	Atomic %
C	8.95	32.13
Nb	2.69	1.25
Cr	14.28	11.83
Mn	2.70	2.12
Fe	7.16	5.52
Ni	64.22	47.15



รูปที่ 4.29 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.28

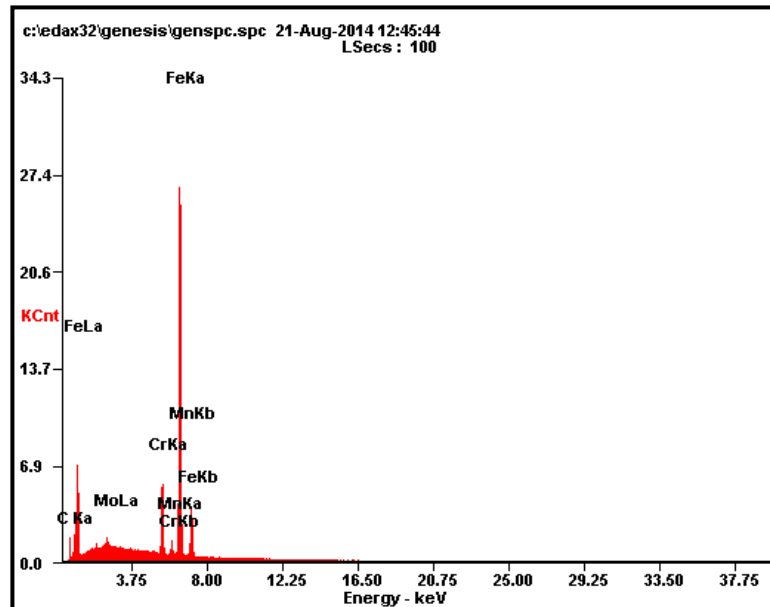
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในตำแหน่งหมายเลข 6 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 8.95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 14.28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 2.69 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุเหล็ก 7.16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 64.22 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีปริมาณธาตุคาร์บอน 32.13 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 11.83 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.12 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุเหล็ก 5.52 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 47.15 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของลวดเชื่อม Inconel 82 แต่ในบริเวณนี้มีปริมาณธาตุคาร์บอนที่สูงกว่าปกติ



รูปที่ 4.30 ตำแหน่งหมายเลข 9 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.8 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของเหล็ก P91 พบค่าของธาตุคาร์บอนสูงและโครงสร้างจุลภาคเป็นโครงสร้างเบนไนท์ (Bainite)

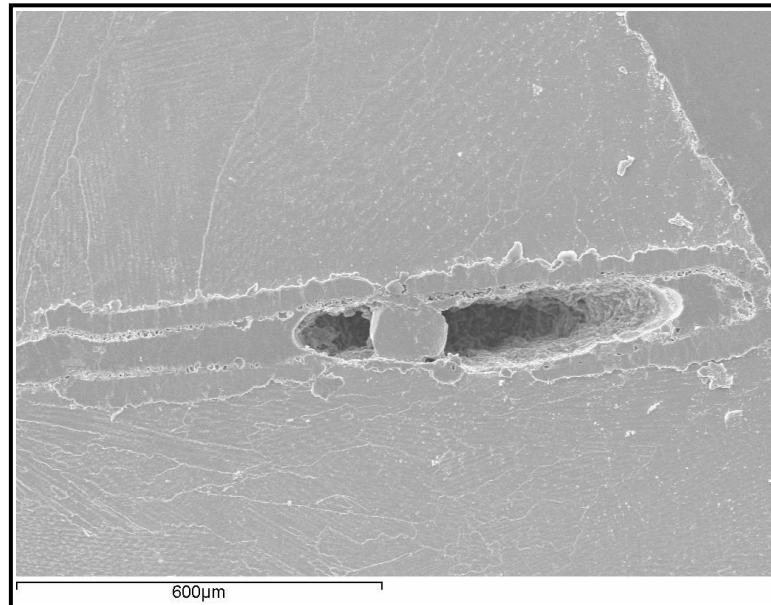
ตารางที่ 4.8 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.30

Element	Weight %	Atomic %
C	11.74	38.19
Mo	1.39	0.57
Cr	9.16	6.88
Mn	0.46	0.33
Fe	77.24	54.03

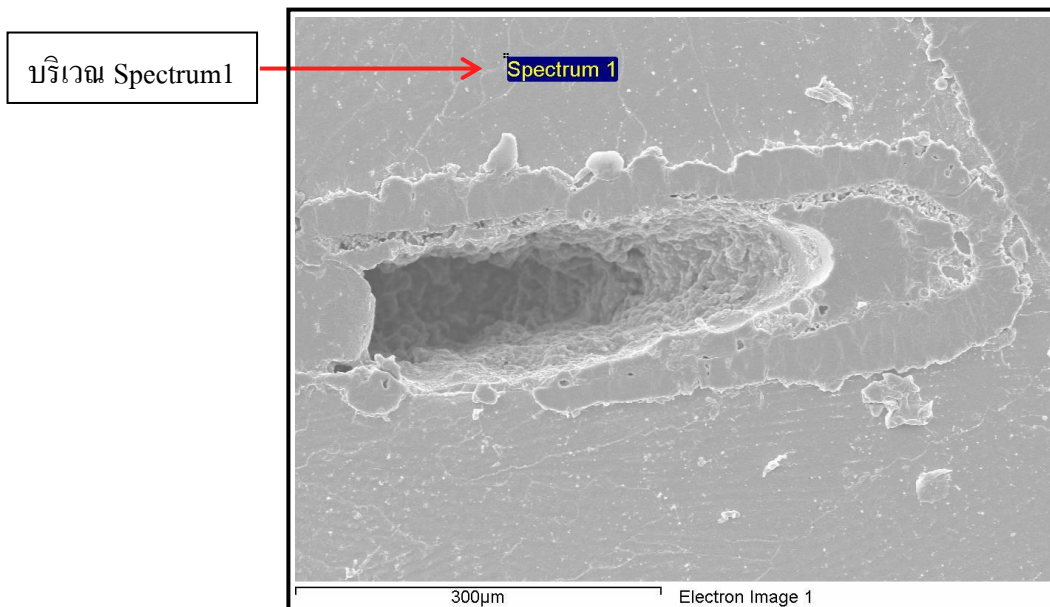


รูปที่ 4.31 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.30

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในตำแหน่งหมายเลข 9 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.8 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 11.74 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 9.16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 0.46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโมลิบดีนัม 1.39 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีปริมาณธาตุคาร์บอน 38.19 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 6.88 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 0.33 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโมลิบดีนัม 0.57 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของเหล็ก P91



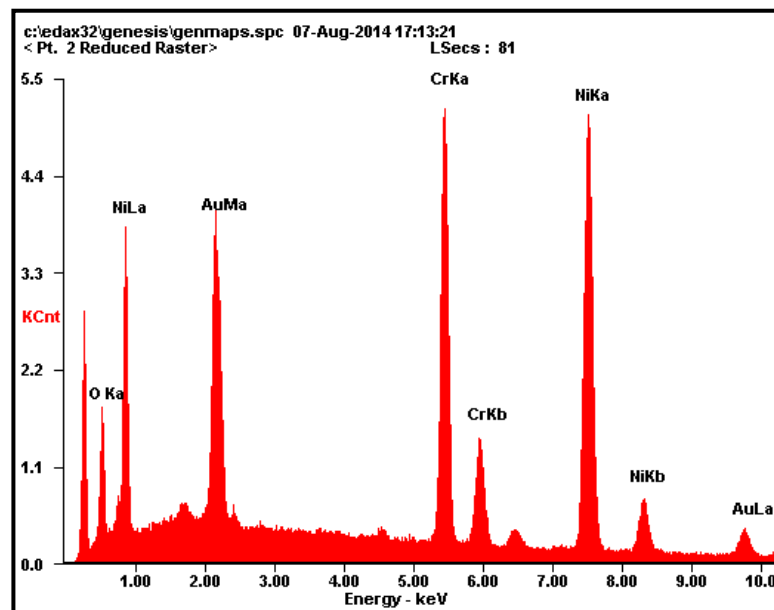
รูปที่ 4.32 รูปบริเวณรอย Crack และบริเวณใกล้เคียงของเนื้องานเชื่อม



รูปที่ 4.33 บริเวณ Spectrum ที่ 1 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.9

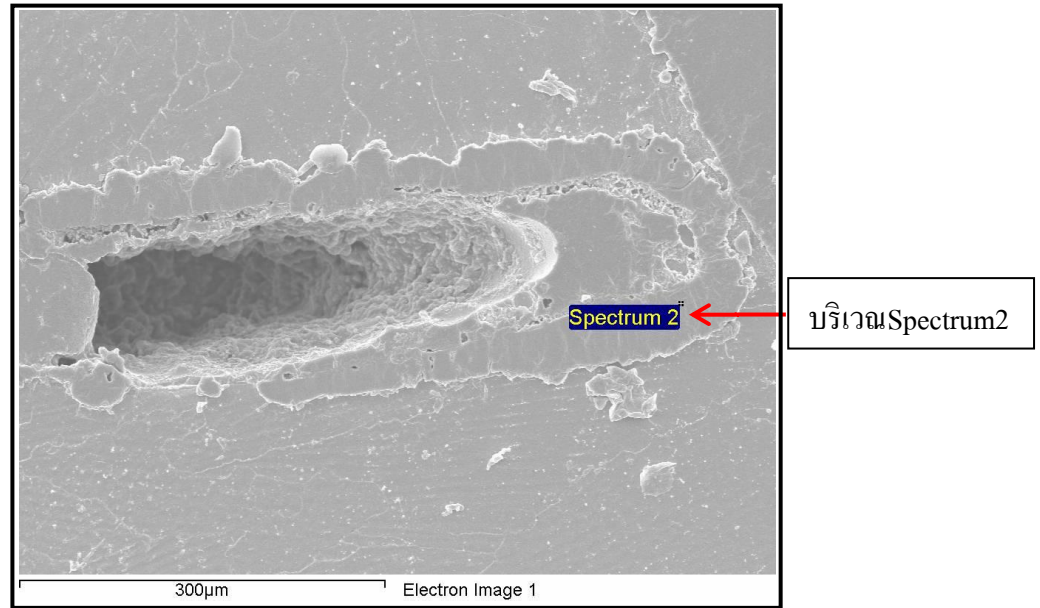
ตารางที่ 4.9 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.33

Element	Weight %	Atomic %
O	7.64	16.96
Cr	28.32	14.44
Ni	64.04	41.41



รูปที่ 4.34 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.33

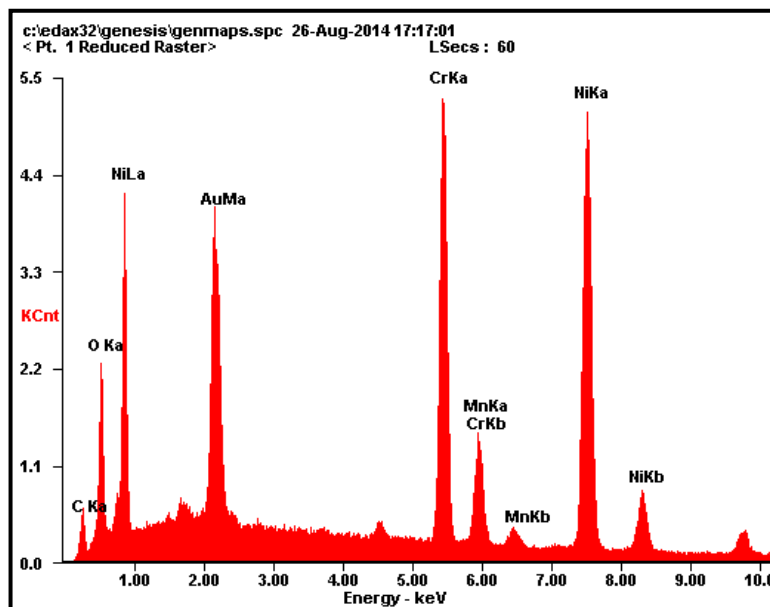
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในบริเวณรอยแตกดังรูปที่ 4.25 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.9 โดยมีปริมาณธาตุออกซิเจน 7.64 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 28.32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุนิกเกิล 64.04 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุออกซิเจน 16.96 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 14.44 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุนิกเกิล 41.41 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม โดยส่วนผสมดังกล่าวใกล้เคียงกับเนื้อเชื่อมของลวด Inconel82



รูปที่ 4.35 บริเวณ Spectrum ที่ 2 พบการแยกตัวขององค์ประกอบธาตุดังตารางที่ 4.10 ซึ่งเป็นบริเวณขอบของรอยแตกที่พบคราบน้ำมันและมีความหนาแน่นของคาร์บอนอยู่แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของธาตุมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอบริเวณรอยแตก

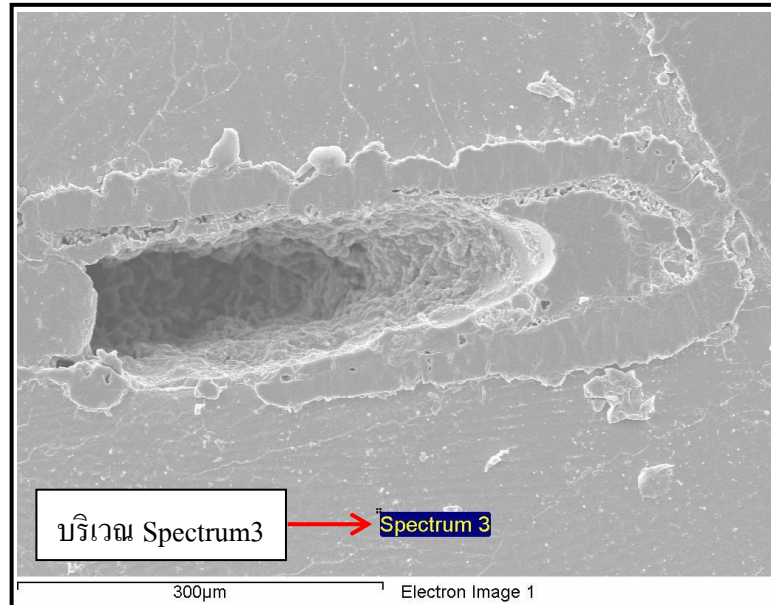
ตารางที่ 4.10 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.35

Element	Weight %	Atomic %
C	5.10	19.10
O	7.64	21.49
Cr	21.33	18.45
Mn	3.32	2.72
Ni	44.49	34.09
Au	18.13	4.14



รูปที่ 4.36 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.35

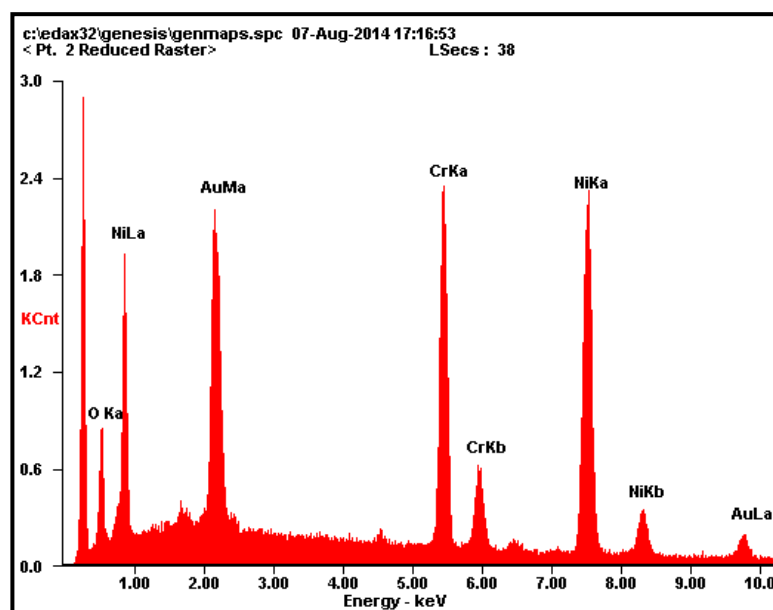
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในบริเวณรอยแตกดังรูป 4.35 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.10 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 5.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุออกซิเจน 7.64 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 21.33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 3.32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 44.49 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุคาร์บอน 19.10 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุออกซิเจน 21.49 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 18.45 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.72 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 34.09 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวแสดงถึงการมีอยู่ของออกไซด์ของธาตุในบริเวณรอยแตก



รูปที่ 4.37 บริเวณ Spectrum ที่3 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.11 ซึ่งใกล้เคียงกับองค์ประกอบธาตุของลวดเชื่อม Inconel82 และเนื้อเหมือนกับบริเวณ Spectrum ที่ 1

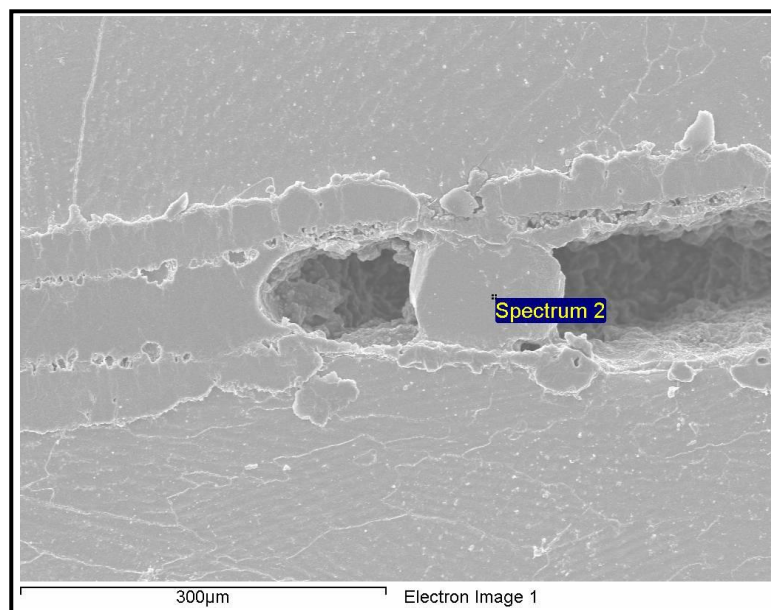
ตารางที่ 4.11 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.37

Element	Weight %	Atomic %
O	8.06	20.81
Cr	28.23	22.42
Ni	63.71	44.82



รูปที่ 4.38 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.37

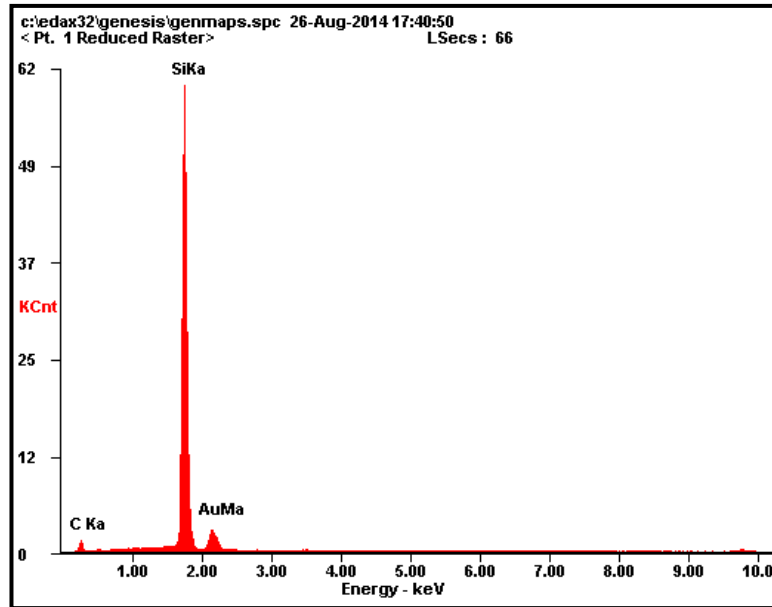
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในบริเวณรอยแตกดังรูป 4.37 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.11 โดยมีปริมาณธาตุออกซิเจน 8.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 28.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุนิกเกิล 63.71 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุออกซิเจน 20.81 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 22.42 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุนิกเกิล 44.82 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งตรงกันกับบริเวณ Spectrum 1 โดยส่วนผสมดังกล่าวใกล้เคียงกับเนื้อเชื่อมของลวด Inconel82



รูปที่ 4.39 บริเวณ Spectrum ที่ 2 พบสิ่งแปลกปลอมอยู่ในแนวตรงกลางรอยแตกก้อนกลมๆ ที่พบเป็นธาตุซิลิกอนซึ่งเป็นสิ่งแปลกปลอมบนผิวชิ้นงานซึ่งอาจเกิดจากการเตรียมชิ้นงานระหว่างการขัดเพื่อส่งคูโครงสร้าง

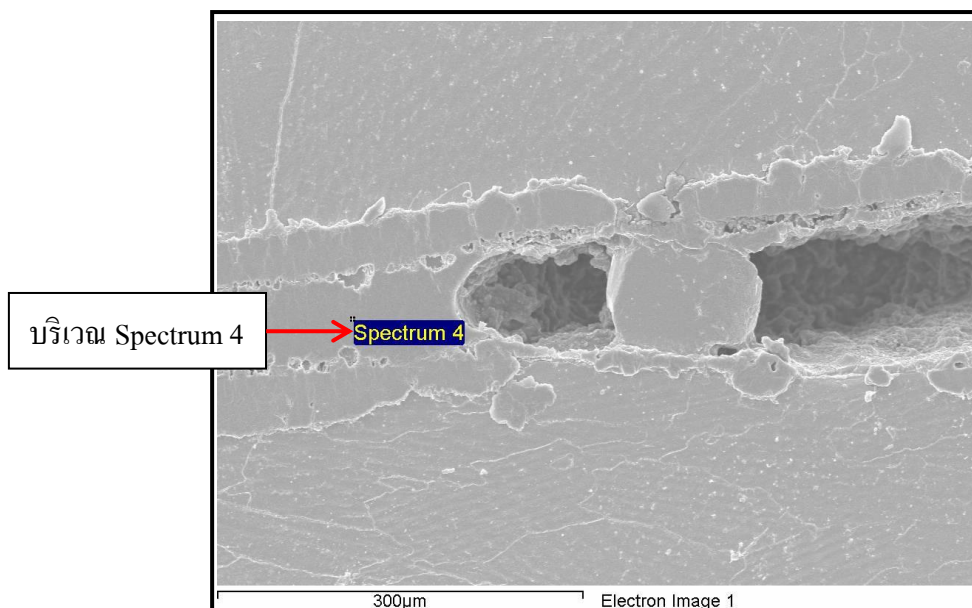
ตารางที่ 4.12 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.39

Element	Weight%	Atomic%
C	21.06	43.98
Si	60.04	53.62
Au	18.90	2.41



รูปที่ 4.40 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.39

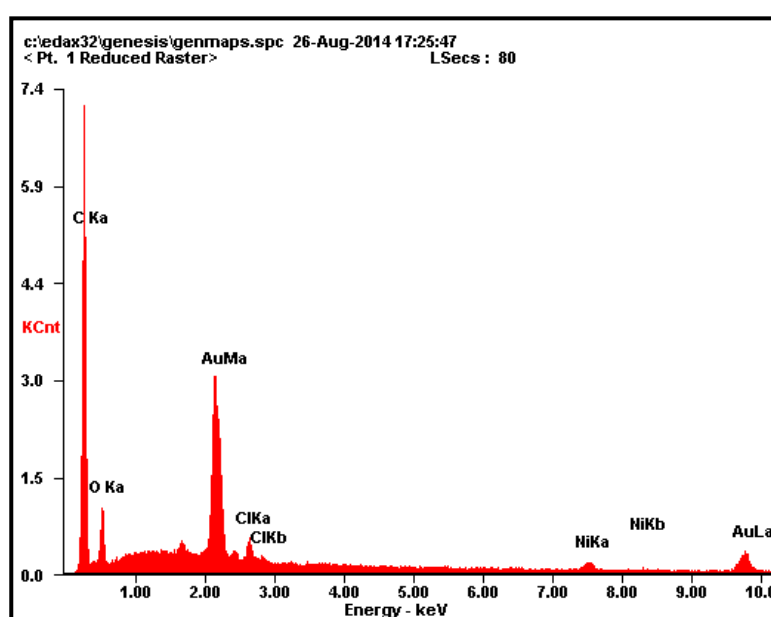
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในบริเวณรอยแตกดังรูป 4.39 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.12 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 21.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุซิลิคอน 60.04 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุอาร์บอน 43.98 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุซิลิคอน 53.62 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งเป็นสิ่งแปลกปลอมบนผิวชิ้นงานซึ่งอาจเกิดจากการเตรียมชิ้นงานระหว่างการขัดเพื่อส่งคูโครงสร้าง



รูปที่ 4.41 บริเวณ Spectrum ที่ 4 ซึ่งเป็นรอยแตกพบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าเนื้อตรงรอยแตกองค์ประกอบของธาตุเกิดการกระจายตัวที่แตกต่างกัน

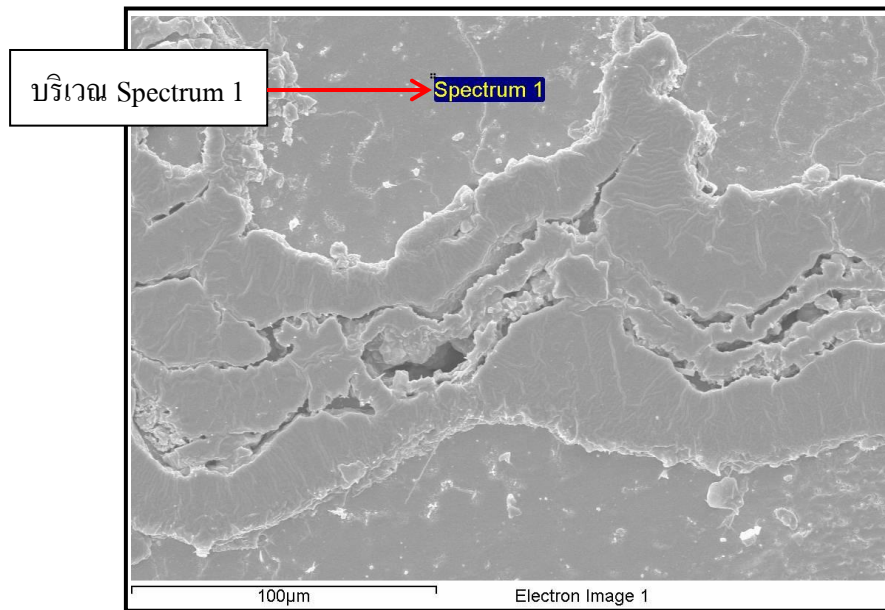
ตารางที่ 4.13 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.41

Element	Weight %	Atomic %
C	58.86	86.12
O	9.36	10.28
Cl	1.03	0.51
Ni	1.64	0.49
Au	29.11	2.60



รูปที่ 4.42 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.41

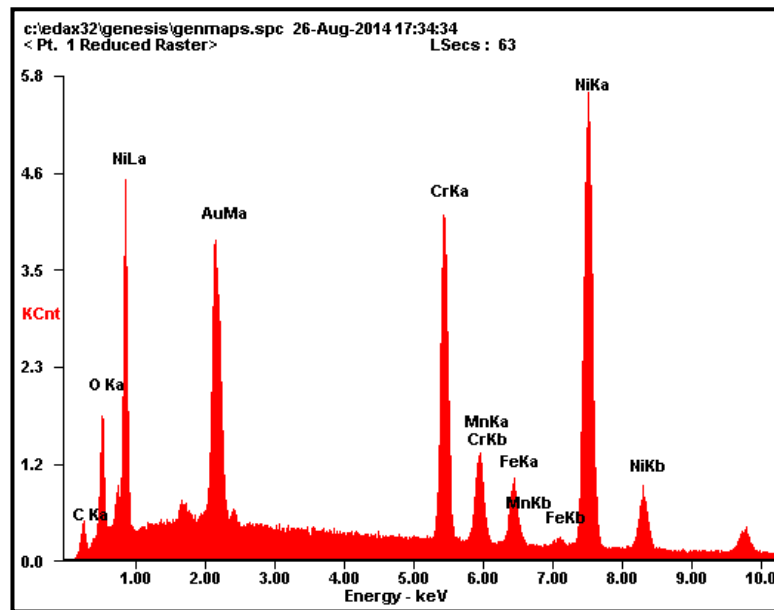
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในบริเวณรอยแตกดังรูป 4.41 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.13 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอนเป็นหลัก 58.86 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุออกซิเจน 9.36 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 1.64 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุคาร์บอน 86.12 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุออกซิเจน 10.28 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 0.49 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม



รูปที่ 4.43 บริเวณ Spectrum ที่ 1 เป็นบริเวณที่ถัดลงมาและเป็นส่วนปลายของรอยแตกพบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.14 ซึ่งเป็นบริเวณองค์ประกอบธาตุของเนื้อแนวเชื่อม Inconel82

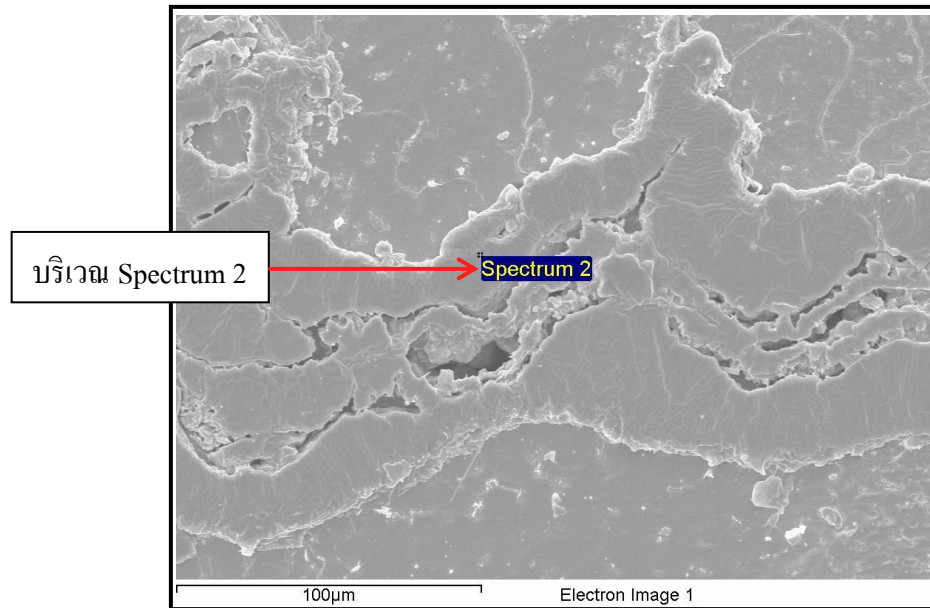
ตารางที่ 4.14 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.43

Element	Weight %	Atomic %
C	3.70	15.42
O	6.09	19.05
Cr	15.59	5.72
Mn	3.34	15.01
Ni	44.95	3.04
Fe	3.82	3.43
Au	22.50	38.33



รูปที่ 4.44 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.43

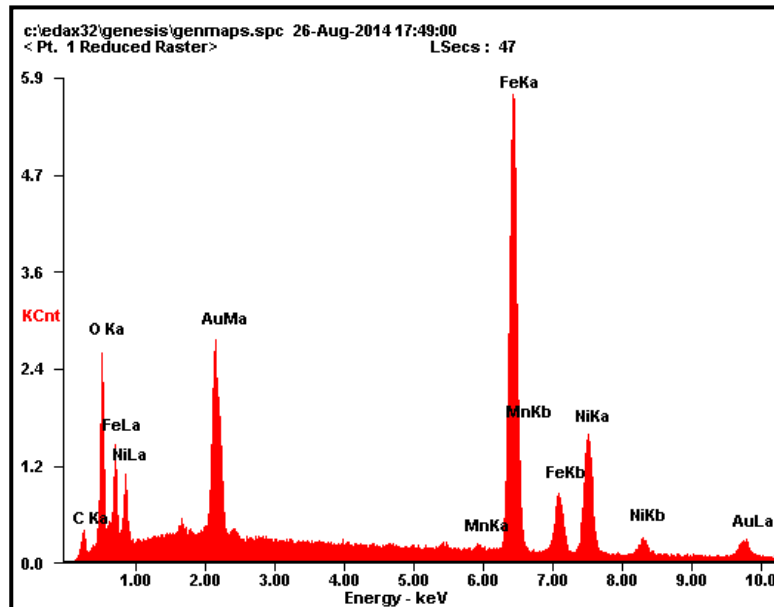
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในบริเวณรอยแตกดังรูป 4.43 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.14 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 3.70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุออกซิเจน 6.09 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 15.59 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 3.34 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุเหล็ก 3.82 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 44.95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุคาร์บอน 15.42 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุออกซิเจน 19.05 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 5.72 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 15.01 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุเหล็ก 3.43 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 3.04 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมแสดงถึงองค์ประกอบของเนื้อเชื่อม Inconel82



รูปที่ 4.45 บริเวณ Spectrum ที่ 2 เป็นบริเวณขอบของรอยแตกที่กระจายแบบไม่ต่อเนื่องพบ
ซึ่งแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบธาตุเกิดการกระจายตัวที่แตกต่างกัน

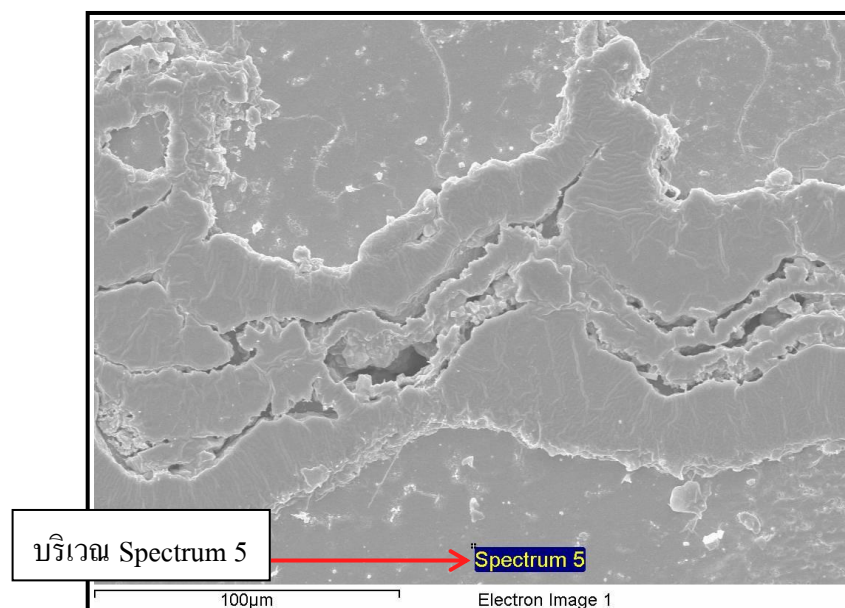
ตารางที่ 4.15 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.45

Element	Weight %	Atomic %
C	4.66	16.36
O	12.08	31.84
Fe	44.02	0.40
Mn	0.52	33.24
Ni	19.59	14.07
Au	19.13	4.10



รูปที่ 4.46 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.45

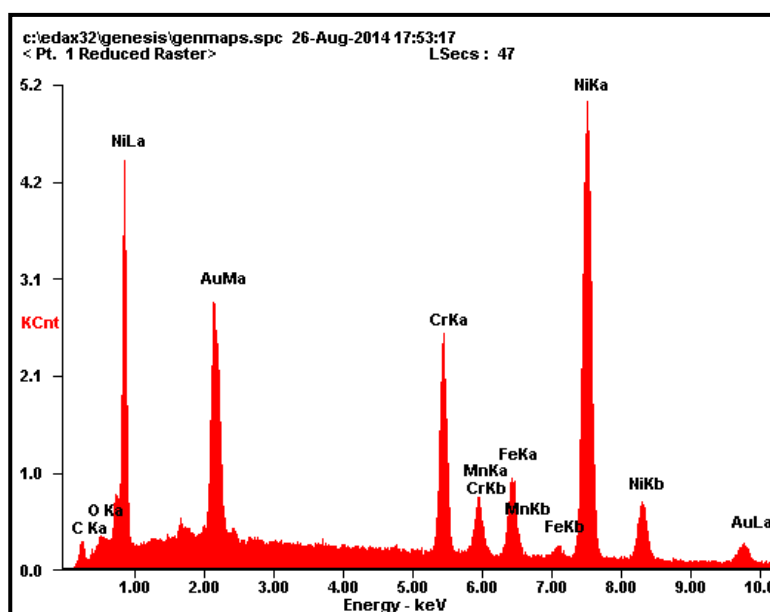
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในบริเวณรอยแตกดังรูป 4.45 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.15 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 4.66 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุออกซิเจน 12.08 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 0.52 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุเหล็ก 44.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิเกิล 19.59 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุคาร์บอน 16.36 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุออกซิเจน 31.84 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 33.24 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุเหล็ก 0.40 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณของธาตุนิเกิล 14.07 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม



รูปที่ 4.47 บริเวณ Spectrum ที่ 5 ที่เป็นเนื้อนอกรอยแตกพบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.16 ซึ่งใกล้เคียงกับส่วนประกอบธาตุของลวดเชื่อม Inconel82 เนื้อเหมือนกับบริเวณ Spectrum ที่ 1

ตารางที่ 4.16 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.47

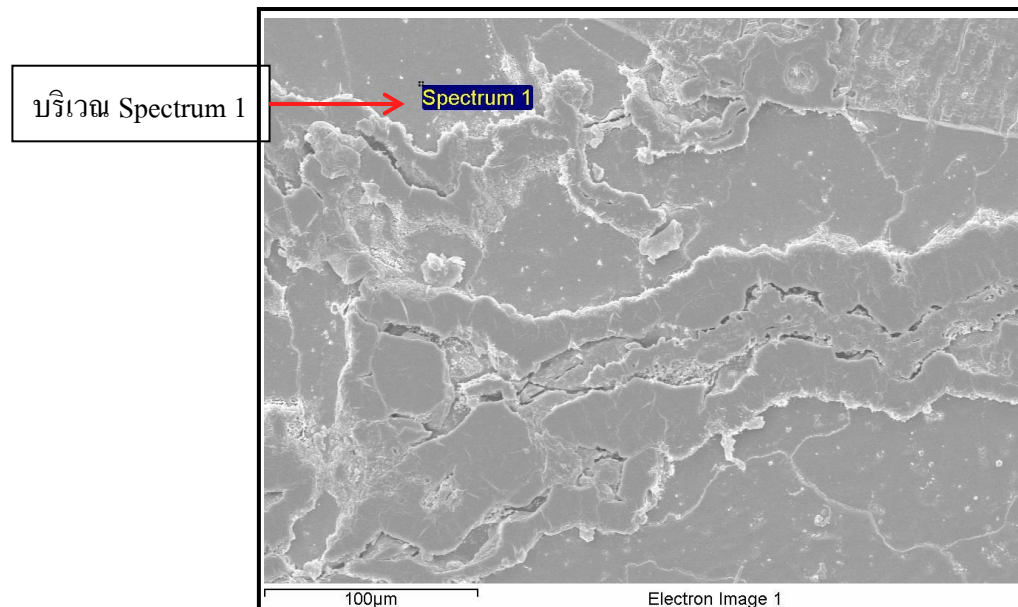
Element	Weight %	Atomic %
C	3.49	16.02
O	1.36	4.69
Cr	11.92	12.63
Mn	2.22	2.23
Ni	56.81	6.04
Fe	6.12	53.33
Au	18.08	5.06



รูปที่ 4.48 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.47

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในบริเวณรอยแตกดังรูป 4.47 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.16 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 3.49 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุออกซิเจน 1.36 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 11.92 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.22 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุเหล็ก 6.12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 56.81 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีปริมาณธาตุคาร์บอน 16.02 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุออกซิเจน 4.69 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 12.63 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.23 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุเหล็ก 53.33 เปอร์เซ็นต์โดย

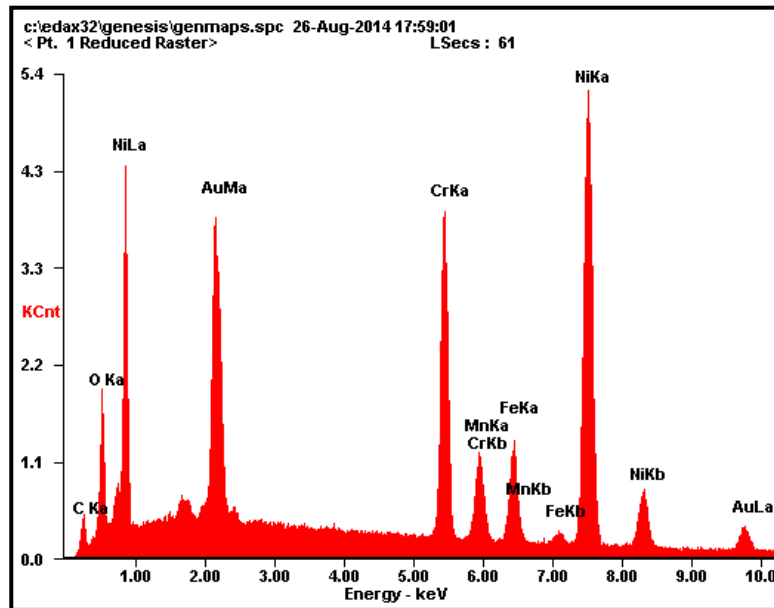
อะตอม มีปริมาณของธาตุ निकเกิล 6.04 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมแสดงถึงองค์ประกอบของเนื้อเชื่อม Inconel82



รูปที่ 4.49 บริเวณ Spectrum ที่ 1 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.17 ซึ่งเป็นบริเวณองค์ประกอบธาตุของเนื้อแนวเชื่อม Inconel82 และเป็นการยืนยันว่ารอยแตกร้าวยู่บนเนื้อของลวดเชื่อม

ตารางที่ 4.17 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ 4.49

Element	Weight %	Atomic %
C	4.38	17.33
O	6.32	18.75
Cr	15.53	14.18
Mn	3.03	2.62
Ni	46.44	5.15
Fe	6.05	37.56
Au	18.25	4.40



รูปที่ 4.50 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ 4.49

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในบริเวณรอยแตกดังรูป 4.49 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.17 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 4.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุออกซิเจน 6.32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 15.53 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 3.03 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุเหล็ก 6.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 46.44 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุคาร์บอน 17.33 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุออกซิเจน 18.75 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 14.18 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.62 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุเหล็ก 37.56 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 5.15 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมแสดงถึงองค์ประกอบของเนื้อเชื่อม Inconel82

4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคระหว่างเหล็ก P91 ที่เชื่อมต่อกับลวด Inconel82 กับเหล็ก P22 พบว่า (ตำแหน่งหมายเลข1) ระบุว่าเป็นเนื้อของเหล็ก P22 ซึ่งเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ และมีคาร์ไบด์กระจายอยู่ในโครงสร้าง (ตำแหน่งหมายเลข2) แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานเป็นเนื้อรอยต่อของเหล็ก P22 ที่เชื่อมต่อกับ Buffer Inconel82 ในตำแหน่งที่ 3 จากภาพโครงสร้างทางจุลภาคแสดงลักษณะบริเวณใกล้รอยต่อระหว่างเหล็ก P22 และ Buffer Inconel82 ในตำแหน่งที่ 4 แสดงลักษณะของเนื้อลวดเชื่อม Inconel82 ซึ่งเป็นโครงสร้างของออสเทนไนต์ในตำแหน่งที่ 5 จากภาพโครงสร้าง

ทางจุลภาค แสดงลักษณะบริเวณที่พบรอยแตกในชิ้นงานเชื่อม ซึ่งมีลักษณะการแตกผ่านแนวเชื่อม ซึ่งรอยแตกมีความยาว 2026.7 μm และมีความกว้าง 127.693 μm ภายในรอยแตกพบสิ่งแปลกปลอมเป็นก้อนกลมๆ ฝังอยู่ในรอยแตกขนาด 82.585 μm โดยผิวรอยแตกปกคลุมไปด้วยออกไซด์ และส่วนปลายของรอยแตกเกิดการขยายตัวเกาะรวมกันเป็นกลุ่ม โดยมีขนาดความยาว 921.107 μm และกระจัดกระจายตัวเป็นช่วงๆ บริเวณขอบพบคราบของออกไซด์เกาะปกคลุมโดยรอบในตำแหน่งที่ 5 บริเวณแนวเชื่อมเห็นแนวการเย็นตัวของผลึกเดนไดรต์ที่เย็นตัวเร็ว ที่มีลักษณะคล้ายกิ่งก้านของต้นไม้ ในตำแหน่งที่ 6 บริเวณแนวเชื่อมโครงสร้างที่พบเป็นโครงสร้างอสเทนไนต์พบเกิดการตกตะกอนเป็นคาร์ไบด์และเกิดการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ทำให้เกิดเกรนขนาดใหญ่และในตำแหน่งที่ 7 และตำแหน่งที่ 8 ลักษณะบริเวณของแนวเชื่อม โครงสร้างที่พบเหมือนกับโครงสร้างในตำแหน่งที่ 6 ส่วนในตำแหน่งที่ 9 - 12 โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมที่มีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยโครงสร้างที่พบเป็นโครงสร้างเบนไนต์ (Bainite) ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมา จากการส่องดูโครงสร้างพบว่าบริเวณที่เกิดรอยแตก เกิดขึ้นในบริเวณเนื้อเชื่อมที่เป็นแนวเชื่อมที่ทับซ้อนกันและแนวเชื่อมที่เกิดความเสียหายจะอยู่ติดกับบริเวณของแนว Heat Affected zone ซึ่งเป็นจุดเชื่อมที่อ่อนแอของโครงสร้างและโลหะพื้นฐาน (เหล็ก P91) ซึ่งโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์ และจากโลหะพื้นฐานเหล็ก P91 ซึ่งถูกหลอมละลายและเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วบริเวณที่ได้รับอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคเป็นเบนไนต์ และที่เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อมของชิ้นงานที่เกิดการแตก พบว่าเป็นโครงสร้างอสเทนไนต์พบเกิดการตกตะกอนเป็นคาร์ไบด์และเกิดการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ทำให้เกิดเกรนขนาดใหญ่ ซึ่งลักษณะเกรนที่เกิดเป็นลักษณะเกรนแบบ Columnar dendritic มีการขยายตัวตามทิศทางของการถ่ายเทความร้อน อาจเป็นไปได้ว่าในการเชื่อมมีการใช้พลังงานในการเชื่อมที่สูงในระหว่างการเชื่อม Interpass ในชิ้นงานที่มีความหนาทำให้อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานมีค่าต่ำ การที่โลหะที่ทำการเชื่อมมีเกรนหยาบ ย่อมส่งผลให้พื้นที่ระหว่างเกรนมีขนาดเล็กลง ดังนั้นทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นมีความเข้มข้นมากขึ้นและจากการที่ชิ้นงานเป็นโลหะผสมนิกเกิล (Inconel82) ซึ่งมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำอาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลกระทบบัให้ความร้อนสะสมในระหว่างการเชื่อมสูงและและทำให้อัตราการเย็นตัวในขณะที่ทำการเชื่อมต่ำ

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในตำแหน่งหมายเลข 1 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.1 ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของเหล็ก P22 ซึ่งเป็นบริเวณของแนว Fusion zone และมีการรวมตัวของธาตุบางตัวเกิดขึ้นและใน ตำแหน่งหมายเลข 1 ซึ่งเป็นบริเวณของแนว Fusion zone พบองค์ประกอบธาตุตามตารางที่ 4.2 ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกัน

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในตำแหน่งหมายเลข 2 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.3 ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของเหล็ก P22 และในตำแหน่งหมายเลข 2 ซึ่งเป็นบริเวณของแนว Fusion zone พบองค์ประกอบธาตุตามตารางที่ 4.4 ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของลวดเชื่อม Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกัน

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในตำแหน่งหมายเลข 3 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.5 ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นองค์ประกอบส่วนผสมของลวดเชื่อม Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกันกับบริเวณตำแหน่งหมายเลข 2

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในตำแหน่งหมายเลข 4 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.6 ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของลวดเชื่อม Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างและในบริเวณนี้มีปริมาณของธาตุคาร์บอนสูงกว่าปกติ

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในตำแหน่งหมายเลข 6 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.7 ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของลวดเชื่อม Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกันและในบริเวณนี้มีปริมาณธาตุคาร์บอนที่สูงกว่าปกติ

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในตำแหน่งหมายเลข 9 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.8 ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของเหล็ก P 91 ซึ่งเป็นโครงสร้างเบนไนต์และพบค่าของธาตุคาร์บอนสูง

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในบริเวณรอยแตกดังรูปที่ 4.33 บริเวณ Spectrum ที่ 1 พบองค์ประกอบธาตุตามตารางที่ 4.9 โดยส่วนผสมดังกล่าวใกล้เคียงกับเนื้อเชื่อมของลวด Inconel82

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในบริเวณรอยแตกดังรูปที่ 4.35 บริเวณ Spectrum ที่ 2 พบการแยกตัวของธาตุตามตารางที่ 4.10 ซึ่งเป็นบริเวณขอบของรอยแตกที่พบคราบน้ำมันและส่วนผสมดังกล่าวก็แสดงถึงการมีอยู่ของออกไซด์ของธาตุในบริเวณรอบรอยแตก และยังพบปริมาณของคาร์บอนอยู่ แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบธาตุมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอบริเวณรอยแตก

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในบริเวณรอยแตกดังรูปที่ 4.37 บริเวณ Spectrum ที่ 3 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.11 โดยน้ำหนักซึ่งเนื้อเหมือนกับบริเวณ Spectrum ที่ 1 โดยส่วนผสมดังกล่าวใกล้เคียงกับเนื้อเชื่อมของลวด Inconel82

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในบริเวณรอยแตกดังรูปที่ 4.39 บริเวณ Spectrum ที่ 2 องค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.12 พบสิ่งแปลกปลอมอยู่ในแนวตรงกลางรอยแตกก่อนกลมๆ โดยที่พบเป็นธาตุซิลิกอนซึ่งเป็นสิ่งแปลกปลอมบนผิวชิ้นงาน ซึ่งอาจเกิดจากการเตรียมชิ้นงานระหว่างการขัดเพื่อส่งคูโครงสร้าง

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในบริเวณรอยแตกดังรูปที่ 4.41 บริเวณ Spectrum ที่ 4 ซึ่งเป็นรอยแตกพบองค์ประกอบธาตุตามตารางที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าเนื้อตรงรอยแตกองค์ประกอบของธาตุเกิดการกระจายตัวที่แตกต่างกัน

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในบริเวณรอยแตกดังรูปที่ 4.43 บริเวณ Spectrum ที่ 1 เป็นบริเวณที่ถัดลงมาและเป็นส่วนปลายของรอยแตกพบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.14 ซึ่งเป็นบริเวณองค์ประกอบธาตุของเนื้อแนวเชื่อม Inconel82

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในบริเวณรอยแตกดังรูปที่ 4.45 บริเวณ Spectrum ที่ 2 เป็นภายในขอบของรอยแตก ที่กระจัดกระจายแบบไม่ต่อเนื่องตามตารางที่ 4.15 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบธาตุเกิดการกระจายตัวที่แตกต่างกัน

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในบริเวณรอยแตกดังรูปที่ 4.47 บริเวณ Spectrum ที่ 5 ที่เป็นเนื้อนอกรอยแตก พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.16 ซึ่งใกล้เคียงกับส่วนประกอบธาตุของลวดเชื่อม Inconel82 เนื้อเหมือนกับบริเวณ Spectrum ที่ 1

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในบริเวณรอยแตกดังรูปที่ 4.49 บริเวณ Spectrum ที่ 1 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ 4.17 ซึ่งส่วนผสมแสดงถึงองค์ประกอบของเนื้อเชื่อม Inconel82 และเป็นการยืนยันว่ารอยแตกนี้อยู่บนเนื้อของลวดเชื่อม Inconel82

ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาจากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของธาตุ พบว่าส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอบๆ รอยแตกมีความแตกต่างกันมาก ซึ่งการที่ส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอบรอยแตกมีความแตกต่างกันมาก แสดงว่ามีการใช้พลังงานในการเชื่อมที่สูง ส่งผลกระทบต่ออัตราการเย็นตัวของเนื้อเชื่อมเร็วช้าแตกต่างกัน ซึ่งอาจทำให้เกิดการแข็งตัวแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน เกิดการหดตัวของเนื้อโลหะทำให้เกิด Residual stress เกิดขึ้นในชิ้นงานที่มีความหนาแตกต่างกันอีก เมื่อใช้งานอยู่ในบริเวณที่ถูกความร้อนจะทำให้คุณสมบัติการยึดตัวลดลง

โดยทั่วไปเหล็กโครงสร้างออสเทนไนต์ถ้าได้รับอุณหภูมิในช่วง 500-800°C เป็นเวลานานจะทำให้เกิดโครเมียมคาร์ไบต์ โดยโครเมียมที่เดิมเคยอยู่ในเนื้อเหล็กจะรวมตัวกับคาร์บอนทำให้บริเวณใกล้ๆ หรือชิดกับขอบเกรนที่มีโครเมียมต่ำตามขอบเกรน อาจเกิด Weld decay ได้ง่ายกว่าบริเวณอื่นและความร้อนจากการเชื่อมทำให้ธาตุบางตัวเกิดคาบออกไซด์ครอบคลุมบริเวณรอยแตก และเมื่อมีการใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงเกิดการกินลึกลงไปเนื้อเหล็กและเกิดการขยายตัวออกไปเป็นรอยแตกเกาะรวมตัวกัน

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะในการวิจัย

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลจากการทดลอง เพื่อศึกษาหาสาเหตุการเกิดรอยร้าวของท่อ Expander ระหว่างเหล็ก P91 กับเหล็ก P22 โดยการเชื่อมด้วยลวด Inconel82 และเพื่อยืนยันกระบวนการเชื่อมท่อ Expander มีความเหมาะสมหรือไม่ในการเชื่อมต่อเหล็ก P91 กับเหล็ก P22 ด้วยลวด Inconel82 เพื่อนำผลการทดลองนี้ไปใช้ประโยชน์ในการสรุปหาสาเหตุของการเกิดรอยร้าว ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- สาเหตุการแตกของท่อ Expander คือพบว่าบริเวณที่เกิดรอยแตก เกิดขึ้นในบริเวณเนื้อเชื่อมที่เป็นแนวเชื่อมที่ทับซ้อนกัน และแนวเชื่อมที่เกิดความเสียหายจะอยู่ติดกับบริเวณของแนว Heat Affected zone ซึ่งเป็นจุดเชื่อมที่อ่อนแอของโครงสร้าง ซึ่งเป็นเนื้อของ Buffer ซึ่งเชื่อมต่อกับโลหะพื้นฐาน (เหล็ก P91) งานเชื่อมโลหะต่างชนิดกันก่อให้เกิด stress เกิดขึ้นในแนวเชื่อม ชิ้นงานที่มีความหนาซึ่งเมื่อมีการใช้งานบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง บริเวณนี้เป็นตัวเสริมความเค้นรอยต่อและเป็นสาเหตุการเกิดโดยโครงสร้างออสเทนไนท์ ถ้าได้รับอุณหภูมิในช่วงใช้งานนี้เป็นเวลานานจะทำให้อาจเกิด Weld decay ได้ง่ายและความร้อนจากการเชื่อม ทำให้ธาตุบางตัวเกิดคราบออกไซด์ครอบคลุมบริเวณรอยแตก และเมื่อมีการใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงเกิดการกินลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงานและเกิดการขยายตัวออกไปเป็นรอยแตกได้

- กระบวนการเชื่อมท่อ Expander ไม่มีความเหมาะสมในการเชื่อมต่อ Dissimilar Weld ของเหล็ก P91 กับเหล็ก P22 ด้วยลวดเชื่อม Inconel82 เพราะมีปัจจัยและอุปสรรคมากมายในการเชื่อม Dissimilar Weld โดยเฉพาะธาตุผสมแต่ละชนิดที่มีความแตกต่างกัน การให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน การเลือกใช้กระบวนการทางความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม สำหรับรอยต่อที่เชื่อมอาจจะเกิดปัญหาในกรณีที่มีการผสมผสานของโลหะต่างชนิดกัน กระบวนการทางความร้อนที่เหมาะสมกับสารประกอบชนิดหนึ่ง อาจเป็นผลเสียต่อสารประกอบอีกชนิดหนึ่งก็เป็นได้ในภาวะการใช้งานอีกประเภทหนึ่ง

- ผลกระทบในโครงสร้างทางโลหะวิทยา สารประกอบระหว่างโลหะที่มีการก่อตัวขึ้นระหว่างโลหะต่างชนิดกัน ต้องมีการตรวจสอบเพื่อวิเคราะห์หาความไวของการเกิดรอยร้าว ความเหนียว สภาพการรับไว้ได้ต่อการกัดกร่อน โครงสร้างจุลภาคของสารประกอบระหว่างโลหะสำคัญมาก ต้องใช้โลหะชนิดที่ 3 เพื่อสามารถทำละลายกับโลหะต่างชนิดกันได้ เพื่อให้ได้ข้อต่อที่ได้ประสิทธิภาพมาใช้งาน

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

- สามารถสรุปหาสาเหตุการเกิดรอยร้าวต่อ Expander จากการตรวจสอบด้วยภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคและจากการตรวจสอบด้วยกล้อง SEM คูณกับประกอบของธาตุบริเวณรอยแตก โดยการเชื่อมต่อของ Material ที่ต่างชนิดกัน ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นดังที่ได้สรุปในการทดลองไปแล้ว
- สามารถหาวิธีแก้ไขปัญหและป้องกันกระบวนการเชื่อมต่อต่อ Expander ระหว่างเหล็ก P91 กับเหล็ก P22 ด้วยลวด Inconel82 ไม่ให้เกิดความเสียหายในลักษณะเดียวกันเกิดขึ้นอีกและพัฒนาต่อยอดในการหาสาเหตุด้านอื่นๆเพิ่มเติมและนำมาปรับปรุงให้มีความคงทนและยืดอายุการใช้งานต่อไปในอนาคต

5.3 ข้อเสนอแนะ

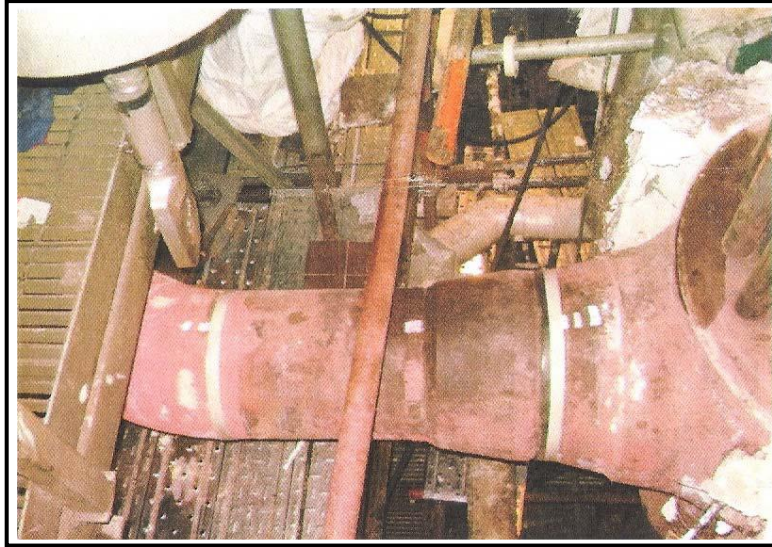
จากกระบวนการเชื่อมต่อ Expander เหล็ก P91 กับเหล็ก P22 โดยการเชื่อมด้วยลวด Inconel82 ควรจะมีก๊าซปกคลุมแนวเชื่อมที่ดี เนื่องจากก๊าซปกคลุมแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นในการเชื่อม SMAW ยังไม่สะอาดเพียงพอที่จะป้องกันโลหะ ที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ การทำความสะอาดแนวเชื่อมก่อนเชื่อมแนวต่อไป ควรตรวจสอบหลังการทำความสะอาดแนวอย่างละเอียด โดยใช้วิธีที่ตรวจสอบได้ทั้งที่ผิวและที่อยู่ใต้ผิว และต้องทำตามมาตรฐานการตรวจสอบอย่างเคร่งครัด

เอกสารอ้างอิง

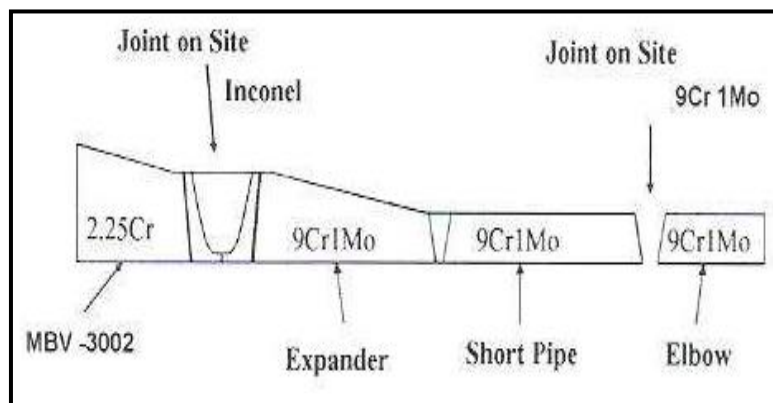
1. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 2554, การวิเคราะห์ความเสียหายทางโลหะการ, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, หน้า 1-18, 154-158, 225-229.
2. Kou, S. 2002, **Welding Metallurgy**, 2nd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
3. Donachie, M.J. and Donachie, S.J., 1998, "Superalloys", **Metals Handbook Desk Edition**, 2nd ed., ASM International, Materials Park, Ohio.
4. Donachie, M.J. and Donachie, S.J., 2002, "Superalloys", **A Technical Guide**, 2nd ed., ASM International, Materials Park, Ohio.
5. Lai, G.Y., 1990, **High-Temperature Corrosion of Engineering Alloys**, ASM International, Materials Park, Ohio.
6. American Welding Society, 1997, "Specification for Nickel and Nickel Alloy Bare Welding Electrodes and Rods", A5.14 , American Welding Society, Miami, Florida.
7. American Welding Society, 1997, "Specification for Nickel and Nickel Alloy Welding Electrodes for Shielded Metal Arc Welding", A5.11 , American Welding Society, Miami, Florida.
8. Matthews, S.J., 1979, "Simulated Heat – Affected Zone Studies of Hastelloy Alloy B-2 Weld", **J. Res. Suppl.**
9. Masubuchi, K., 1980, **Analysis of Welded Structures**, Pergamon, Elmsford, New York.
10. American Welding Society, 1976, **Welding Handbook**, 7th ed., Vol. 1, American Welding Society, Miami, Florida, pp. 2-32.

11. Colangelo, V. J. and Heiser, F. A. , 1974, **Analysis of Metallurgical Failures**, Wiley, New York.
12. American Welding Society, 1980, **Welding Handbook**, 7th ed., Vol. 3, American Welding Society, Miami, Florida, pp. 170-238.
13. American Welding Society, 1978, **Welding Handbook**, 7th ed., Vol. 2, American Welding Society, Miami, Florida, pp. 78-112, 296-330 .
14. Newell, W.F., Jr, 2001, **Guideline for Welding P(T)91**, Euroweld, Ltd. , pp. 1-45.
15. Coleman, K., 2001, **EPRI Conference on 9Cr Materials Fabrication and Joining Technologies**, Epri , pp. 28.
16. Coleman, K., 2001, **Guideline for Welding Creep Strength-Enhanced Ferritic Alloys**, Epri , pp. 1-8.
17. ประสงค์ ท้วมยิ้ม, 2530, **วิศวกรรมเชื่อมประสาน** , พิมพ์ครั้งที่ 1, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 201-220, 243-279.
18. Bjerregaard, L., Geels, K., Ottesen, B. and Riickert, M., 1992, **Metallog Guide**, Testing Instrument Co., Ltd., pp. 41-55.

ภาคผนวก ก
ข้อมูลทางการทดลอง



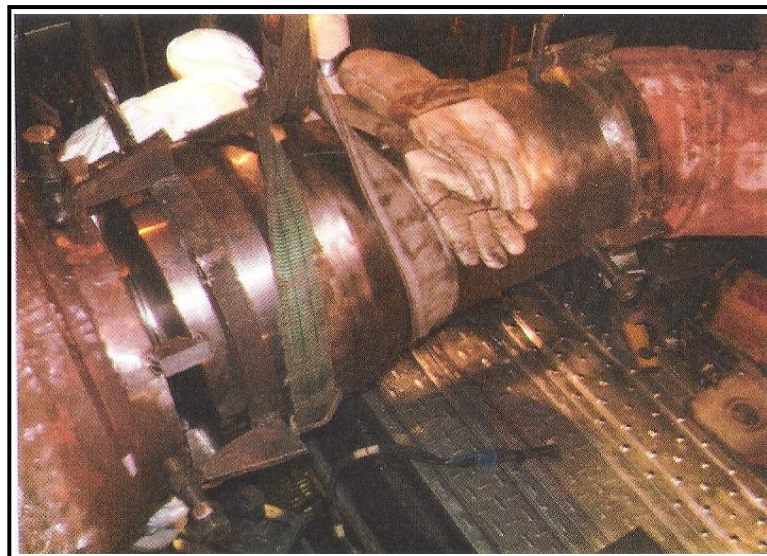
รูปที่ ก.1 ท่อ Expander ที่ต่อเข้ากับ Main Steam Stop Valve
อุณหภูมิเฉลี่ยภายในท่อ 538°C ความดันเฉลี่ยภายในท่อ 125 kg/cm^2



รูปที่ ก.2 รูปการเชื่อมต่อของท่อ Expander

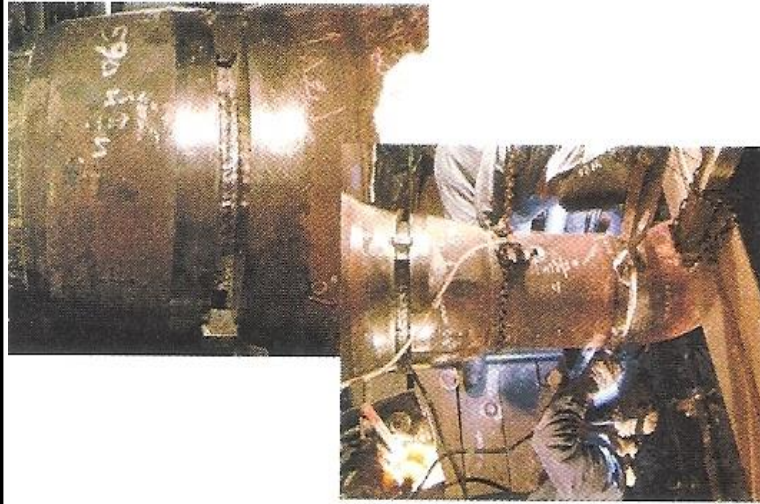
ตารางที่ ก.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ

Grade	C	Mn	P,S max	Si	Cr	Mo
P91	0.08-0.12	0.30-0.60	0.020/0.010	0.20-0.50	8.00-9.50	0.85-1.05
	V 0.18-0.25	N 0.03-0.07	Ni 0.40 max	Al 0.02 max	Nb 0.06- 0.10	Ti 0.01 max
F22	0.05-0.15	0.30-0.60	0.04 max	0.50 max	2.00-2.50	0.87-1.13
Inconel	0.10 max	2.5-3.5	0.03max/ 0.015max	0.50 max	18.00-22.00	-
	Fe 3.0 max	Ti 0.75 max	Nb+Ta 2.0-3.0	Cu 0.50 max	Others 0.50 max	

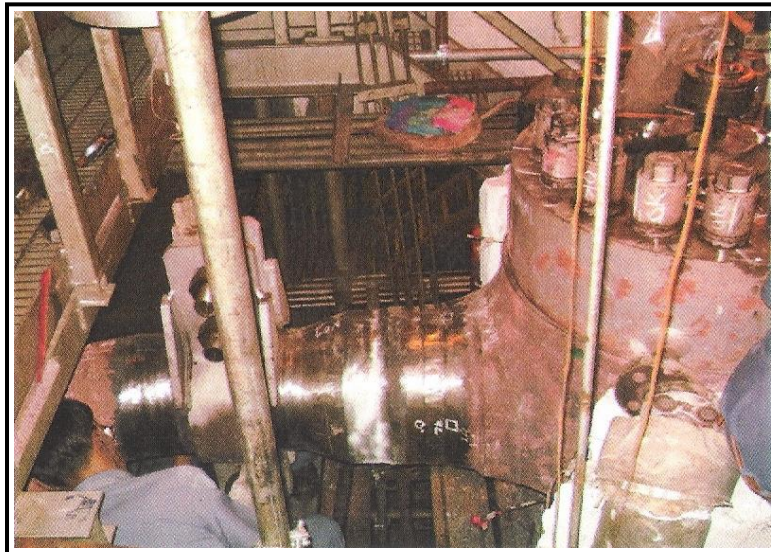


รูปที่ ก.3 รูปการประกอบก่อนเชื่อมต่อของท่อ Expander

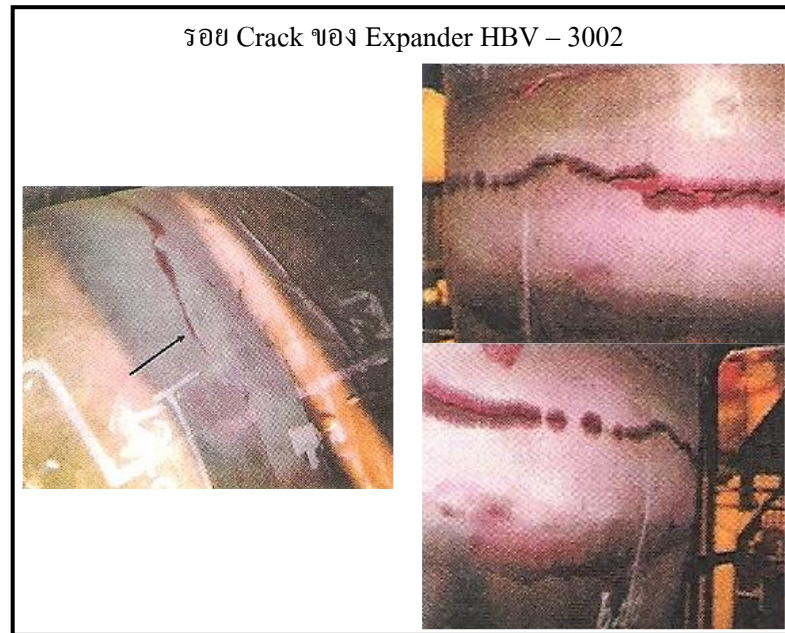
ขั้นตอนการเชื่อม Expander และ Pipe



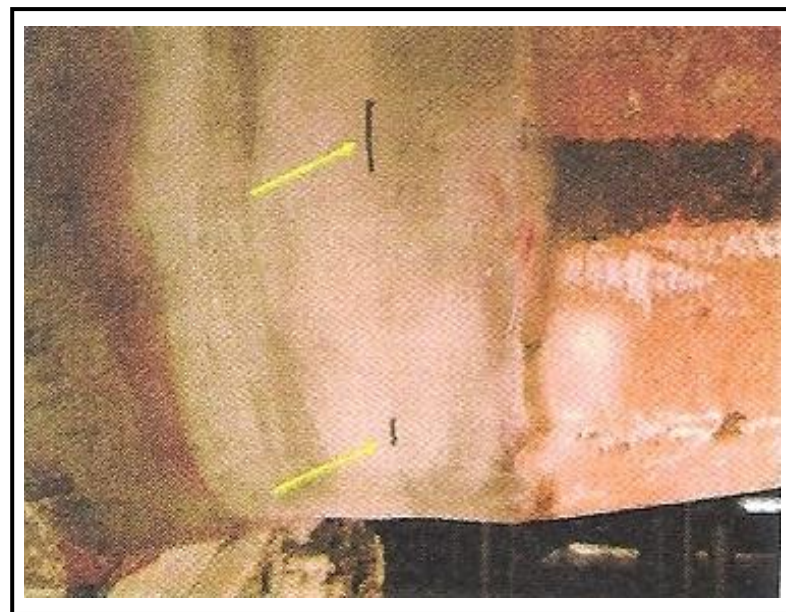
รูปที่ ก.4 รูปการเชื่อมต่อของท่อ Expander



รูปที่ ก.5 รูปหลังการเชื่อมต่อของท่อ Expander และนำเข้าใช้งาน

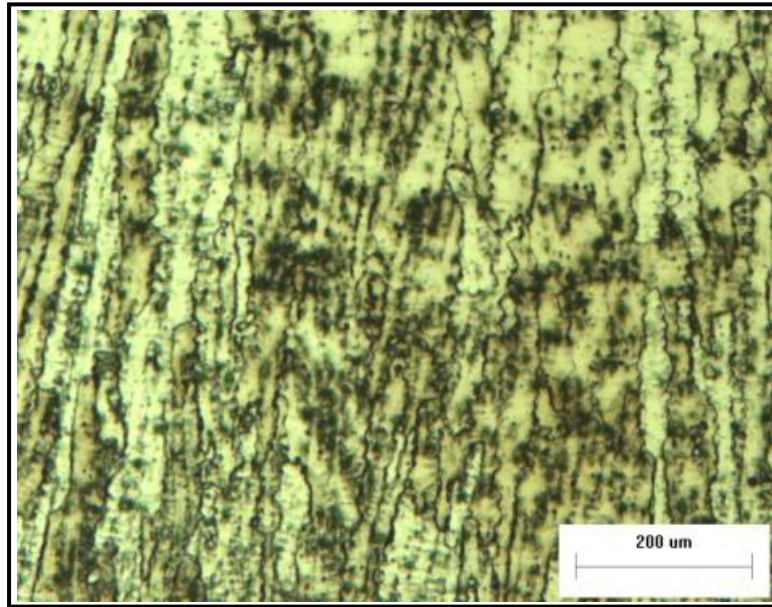


รูปที่ ก.6 รอย Crack ที่เกิดภายนอกผิวท่อ โดยรอบแนวเชื่อม

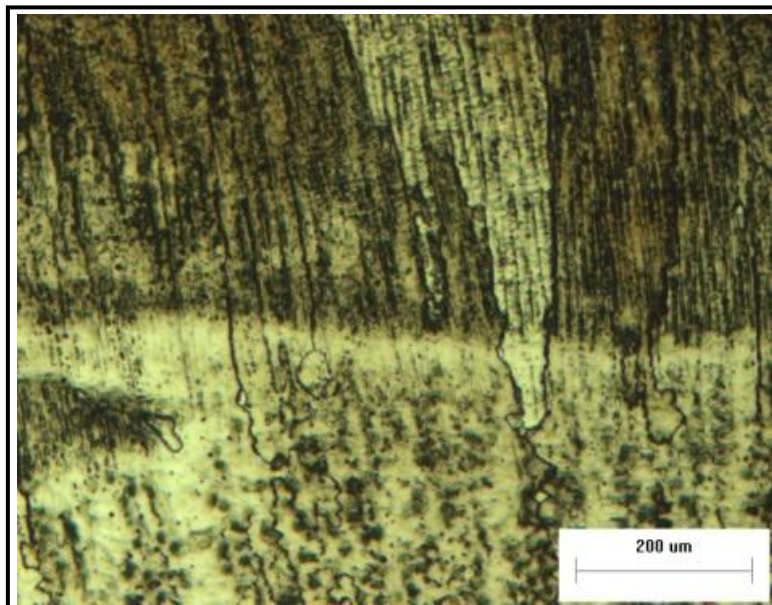


รูปที่ ก.7 รอย Crack ที่เกิดภายนอกผิวท่อส่วนที่เหลืออีก 35% แตกเป็นจุดๆ

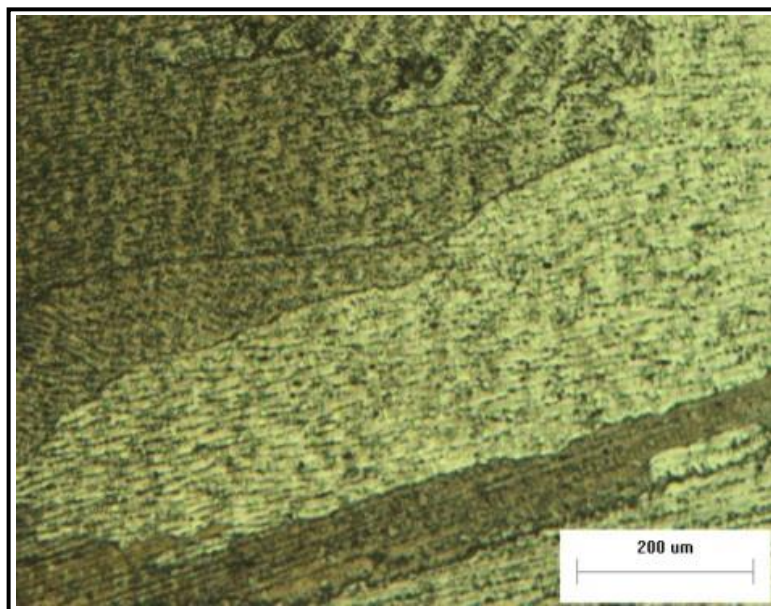
ภาคผนวก ข
ผลการวิเคราะห์



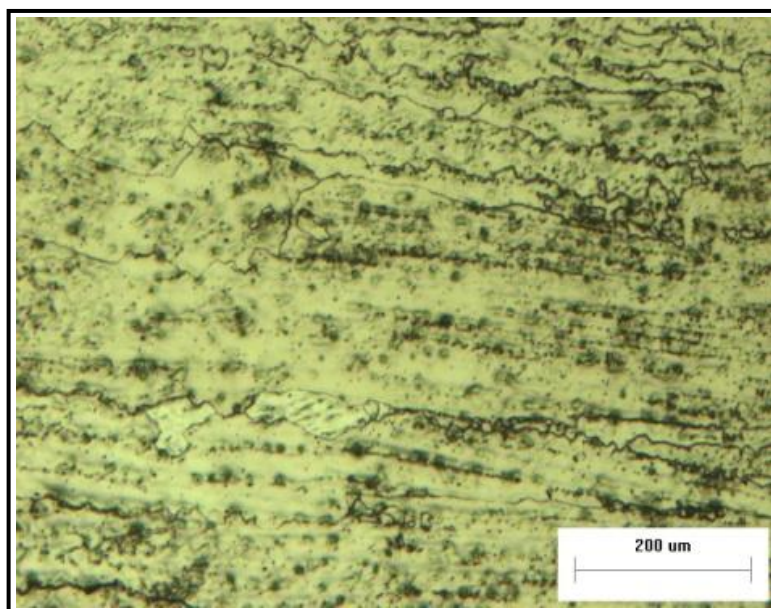
รูปที่ ข.1 P1-100X (ตำแหน่งหมายเลข1) เป็นเนื้อ P22



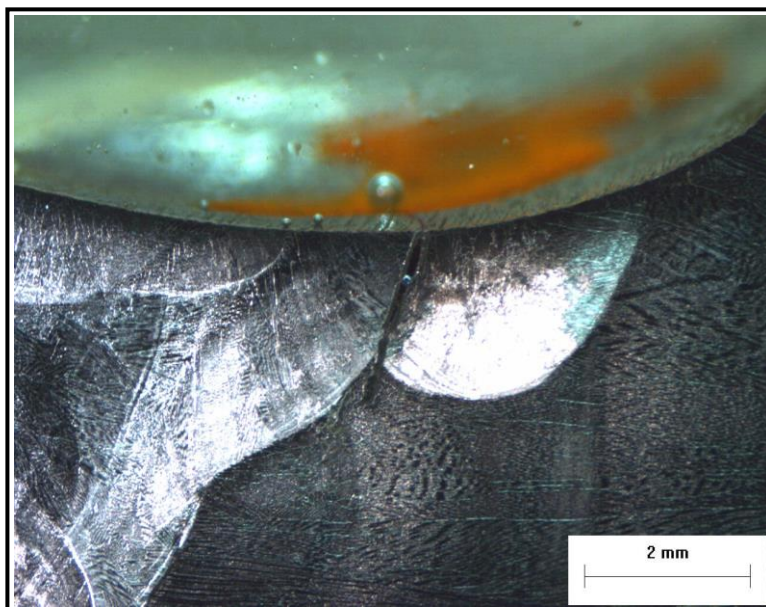
รูปที่ ข.2 P2-100X (ตำแหน่งหมายเลข 2) เป็นเนื้อรอยต่อของ P22 กับ Buffer Inconel82



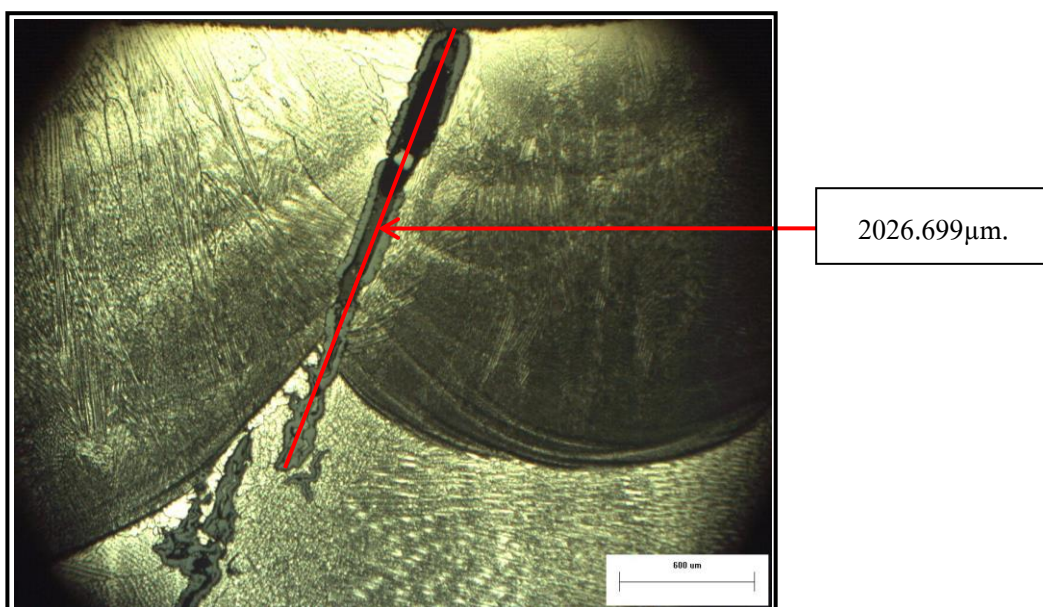
รูปที่ ข.3 P3-100X (ตำแหน่งหมายเลข 3) โชนิกัลรอยต่อ P22 กับ Buffer Inconel82



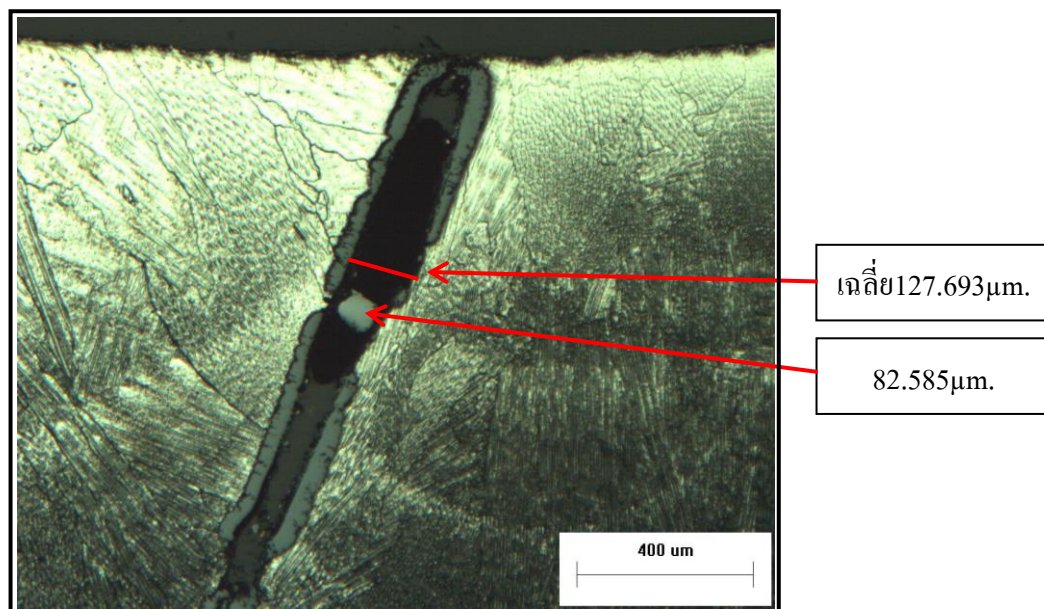
รูปที่ ข.4 P4-100X (ตำแหน่งหมายเลข 4) เป็นโครงสร้างอสเทนไนต์เนื้อลวด Inconel82



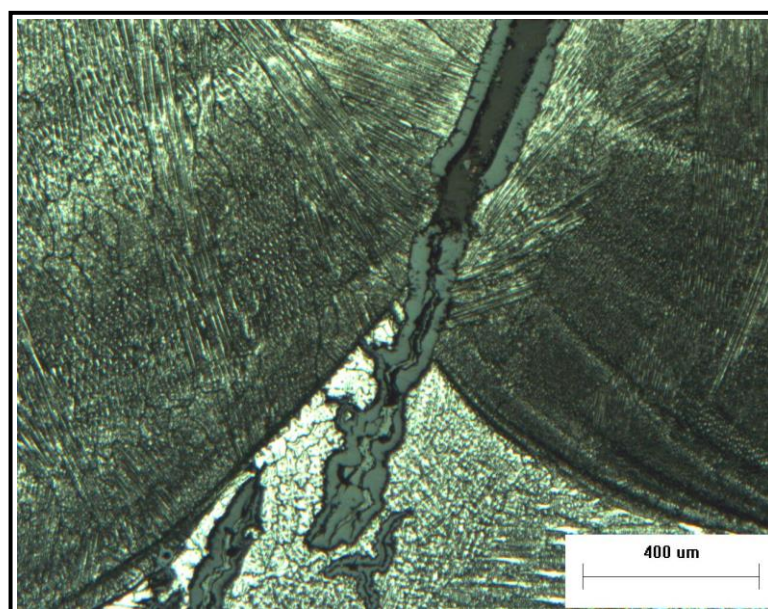
รูปที่ ข.5 รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยายต่ำ บริเวณตำแหน่งที่ 5 ของชิ้นงานเชื่อม



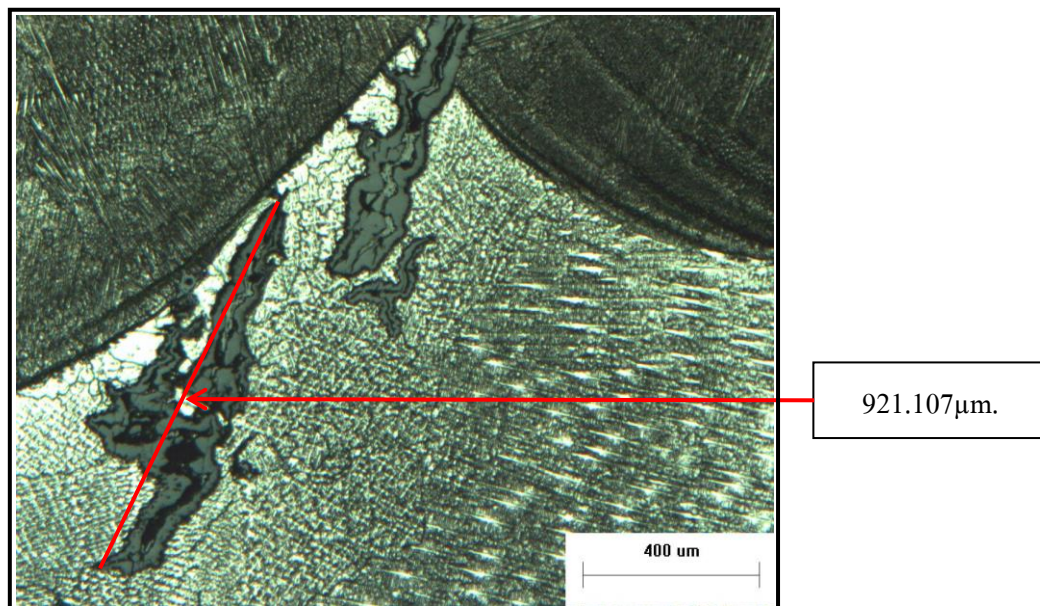
รูปที่ ข.6 แสดงลักษณะการแตกผาแนวเชื่อมภายในพบสิ่งแปลกปลอมฝังอยู่ในแนวแตกร้าว



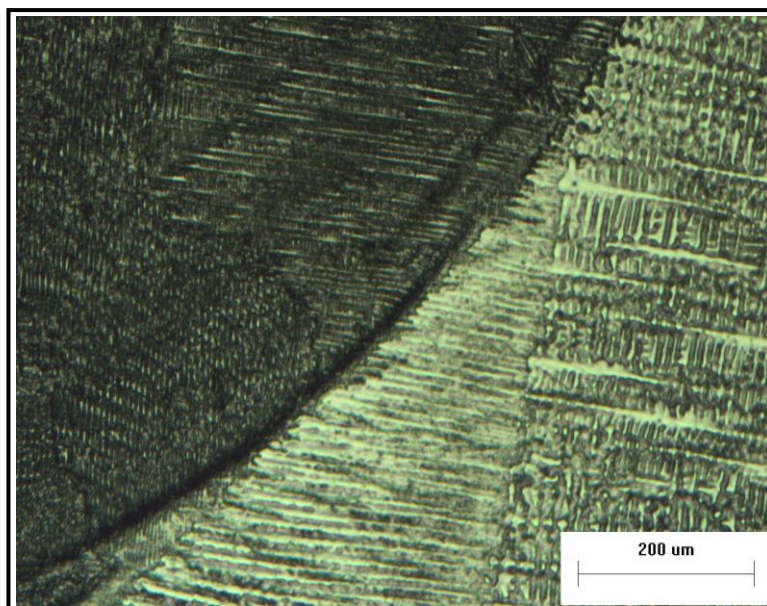
รูปที่ ข.7 แสดงลักษณะของรอยแตกตรงกลางพบสิ่งแปลกปลอมเป็นก้อนกลมๆ



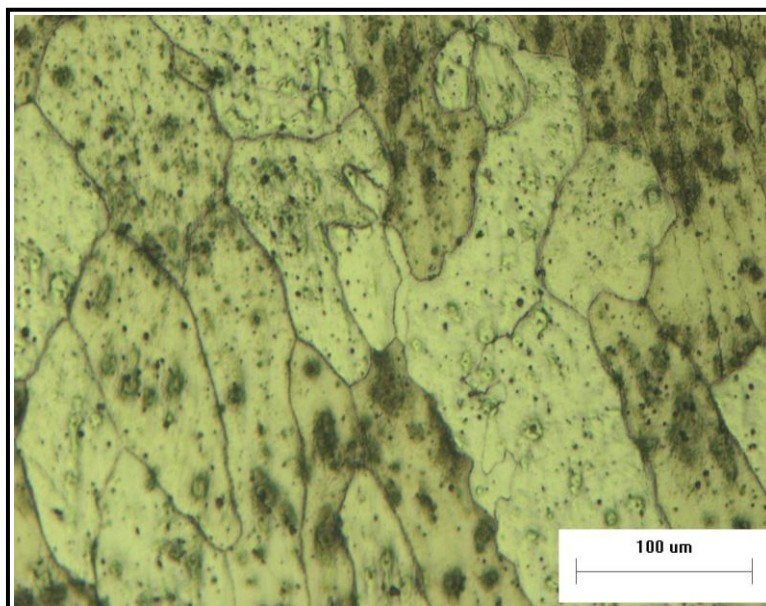
รูปที่ ข.8 แสดงลักษณะส่วนปลายของรอยแตก เกิดการขยายตัวและเกาะรวมกันเป็นกลุ่มพบคราบของออกไซด์เกาะปกคลุมรอบรอยแตก



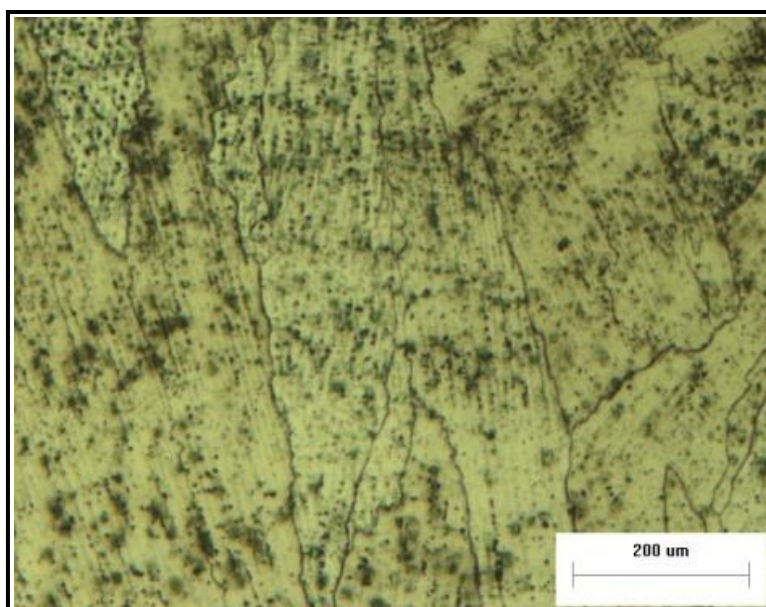
รูปที่ ข.9 ส่วนปลายเกิดจากการขยายตัวเกาะรวมกันเป็นกลุ่มและกระจัดกระจายตัวเป็นช่วงๆ บริเวณขอบพบคราบของออกไซด์เกาะปกคลุมโดยรอบ



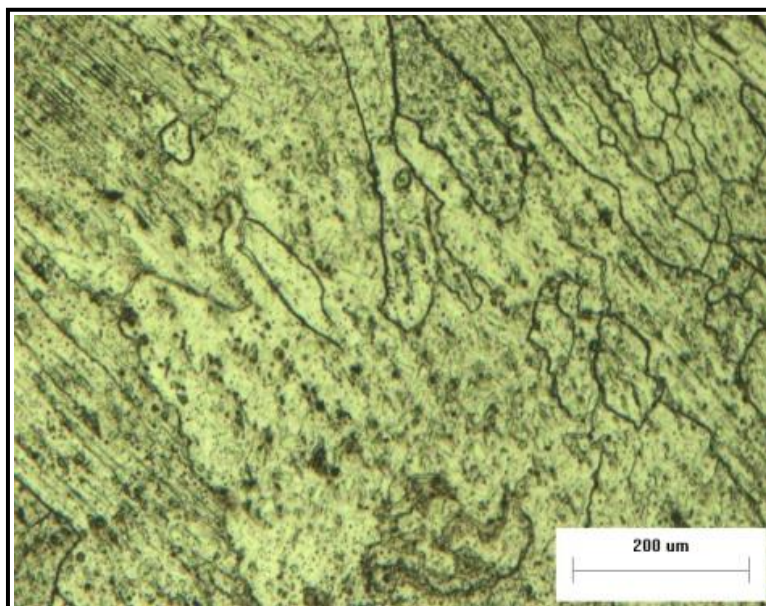
รูปที่ ข.10 P5-100X (ตำแหน่งหมายเลข5) แสดงบริเวณแนวเชื่อมทำให้เห็นแนวการเย็นตัวของผลึก เคนไดท์ที่เย็นตัวเร็ว ที่มีลักษณะคล้ายกิ่งก้านของต้นไม้



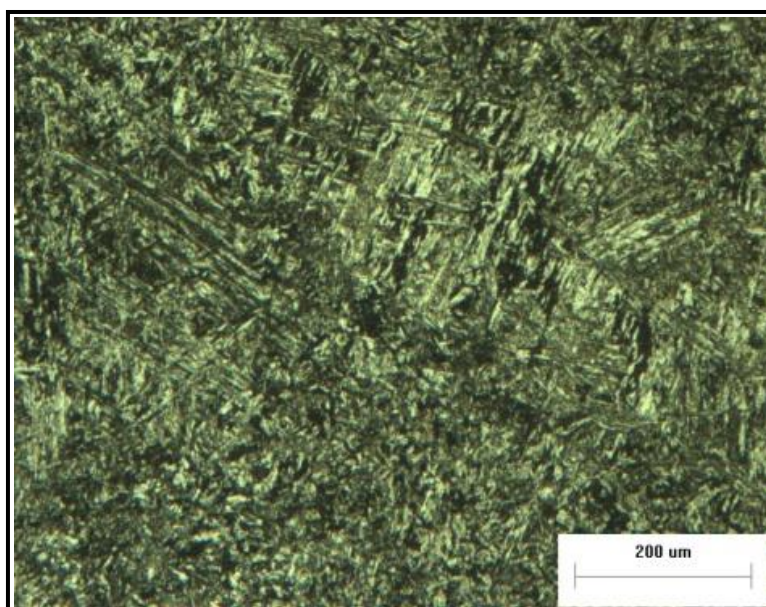
รูปที่ ข.11 P6-200X (ตำแหน่งหมายเลข 6) โครงสร้างเป็นออสเทนไนต์พบเกิดการตกตะกอนเป็นคาร์ไบด์และเกิดการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ทำให้เกิดเกรนขนาดใหญ่



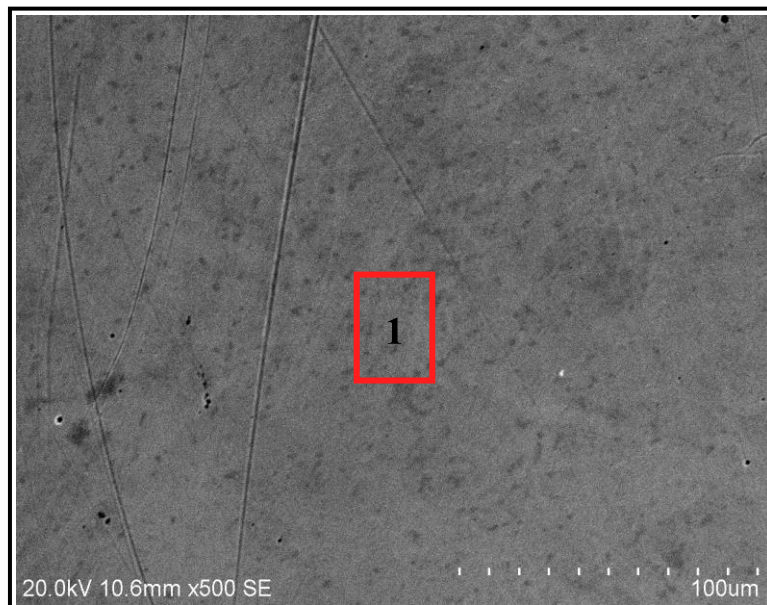
รูปที่ ข.12 P7-100X (ตำแหน่งหมายเลข 7) โครงสร้างเป็นออสเทนไนต์พบเกิดการตกตะกอนเป็นคาร์ไบด์และเกิดการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ทำให้เกิดเกรนขนาดใหญ่



รูปที่ ข.13 P8-100X (ตำแหน่งหมายเลข 8) แสดงบริเวณแนวเชื่อมทำให้เห็นแนวการเย็นตัวของผลึก



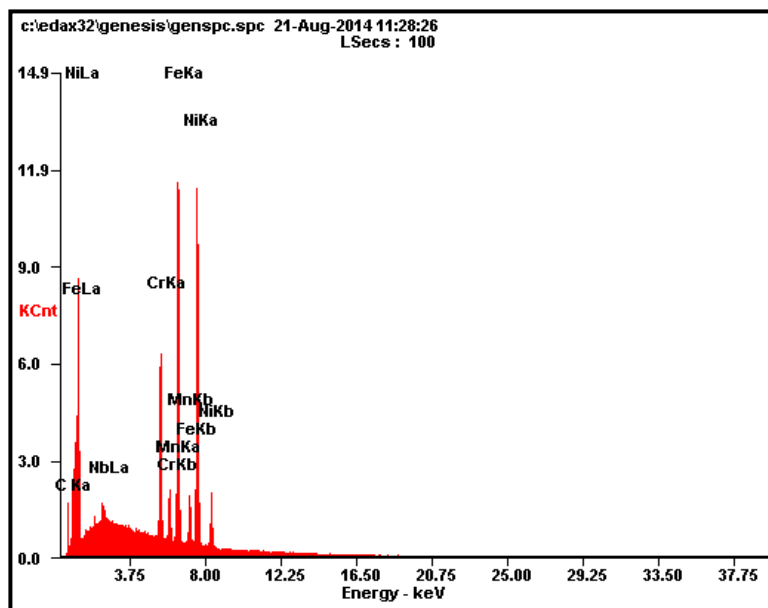
รูปที่ ข.14 P9-100X (ตำแหน่งหมายเลข 9-12) แสดงบริเวณแนวเชื่อมที่เป็นโครงสร้างของเบนไนท์ (Bainite)



รูปที่ ข.15 ตำแหน่งหมายเลข 1 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.1 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของเหล็ก P22 ซึ่งเป็นบริเวณของแนว Fusion zone และมีการรวมตัวของธาตุบางตัวเกิดขึ้น

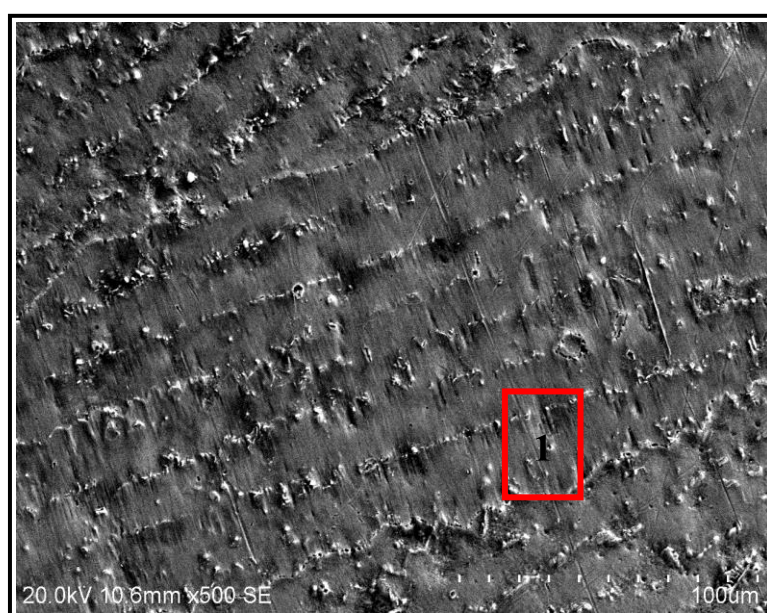
ตารางที่ ข.1 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.15

Element	Weight %	Atomic %
C	3.59	14.73
Nb	0.16	0.08
Cr	2.44	2.32
Mn	0.50	0.45
Fe	93.31	82.42



รูปที่ ข.16 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.15

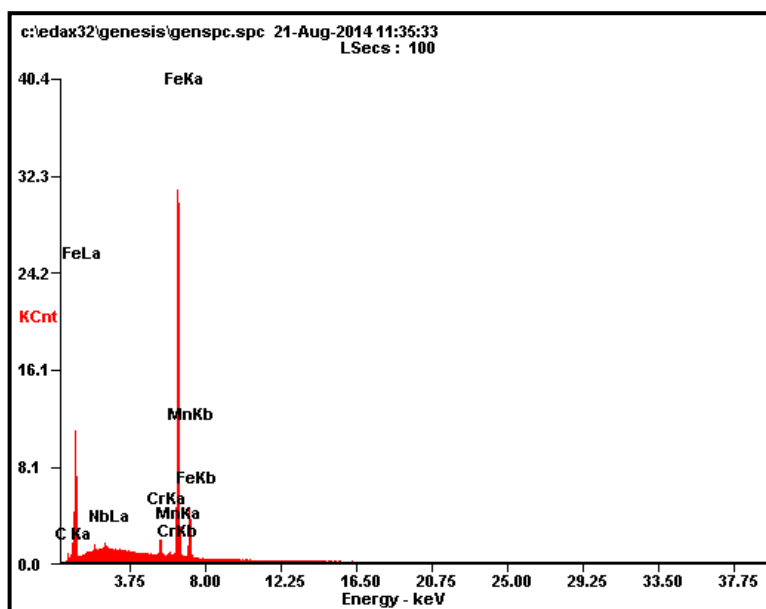
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในตำแหน่งหมายเลข 1 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ ข.1 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 3.59 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 2.44 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 0.16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีปริมาณธาตุคาร์บอน 14.73 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 2.32 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 0.08 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม และมีปริมาณธาตุแมงกานีส 0.45 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของเหล็ก P22



รูปที่ ข.17 ตำแหน่งหมายเลข 1 ซึ่งเป็นบริเวณของแนว Fusion zone พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.2 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกัน

ตารางที่ ข.2 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.17

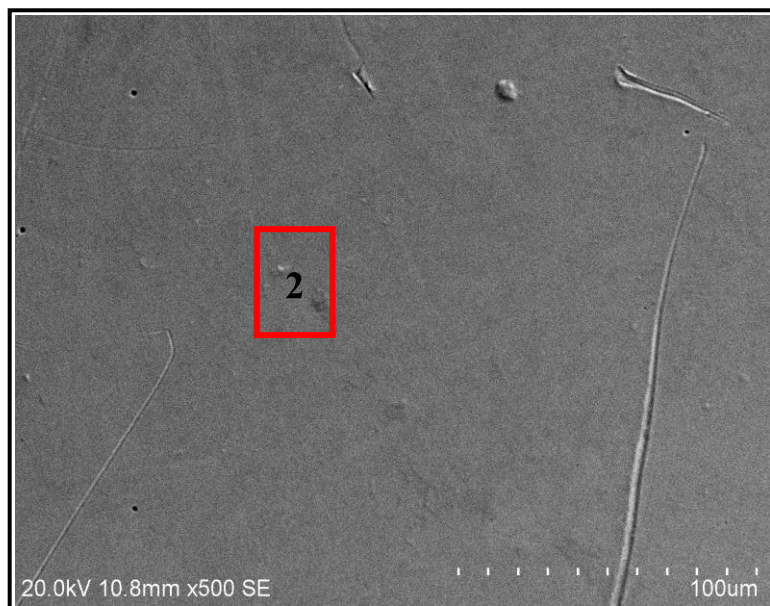
Element	Weight %	Atomic %
C	8.97	31.94
Nb	1.71	0.79
Cr	10.92	8.98
Mn	2.05	1.59
Fe	29.59	22.65
Ni	46.76	34.05



รูปที่ ข.18 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.17

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในตำแหน่งหมายเลข 1 (Fusion zone) พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ ข.2 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 8.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 10.92 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 1.71 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุเหล็ก 29.59 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 46.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุคาร์บอน 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 8.98 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 0.79 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส

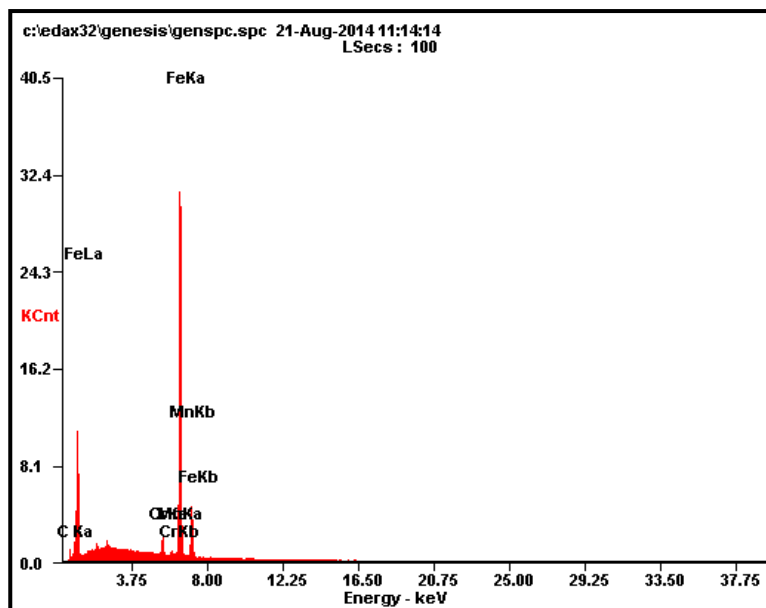
1.59 เปอร์เซนต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุเหล็ก 22.65 เปอร์เซนต์โดยอะตอมมีปริมาณของธาตุนิกเกิล 34.05 เปอร์เซนต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของลวดเชื่อม Inconel82



รูปที่ ข.19 ตำแหน่งหมายเลข 2 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของเหล็ก P22

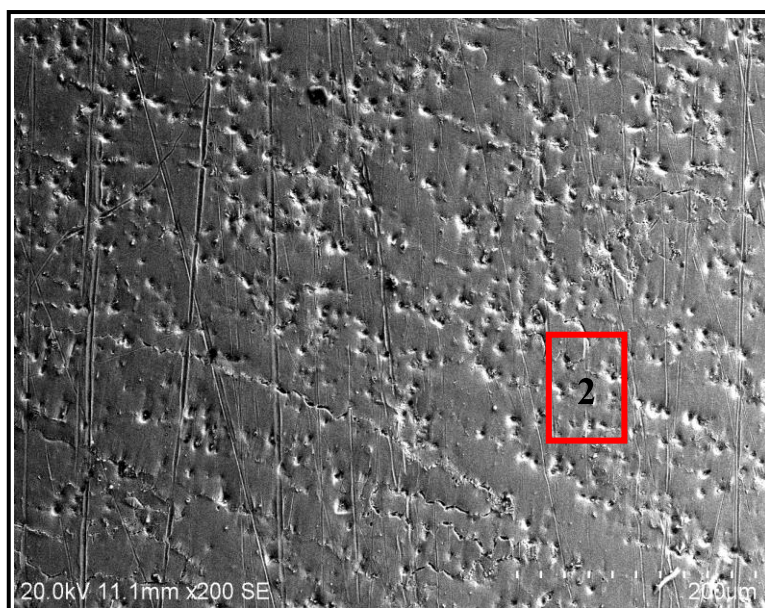
ตารางที่ ข.3 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.19

Element	Weight %	Atomic %
C	4.58	18.23
Cr	2.46	2.26
Mn	0.51	0.44
Fe	92.45	79.07



รูปที่ ข.20 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.19

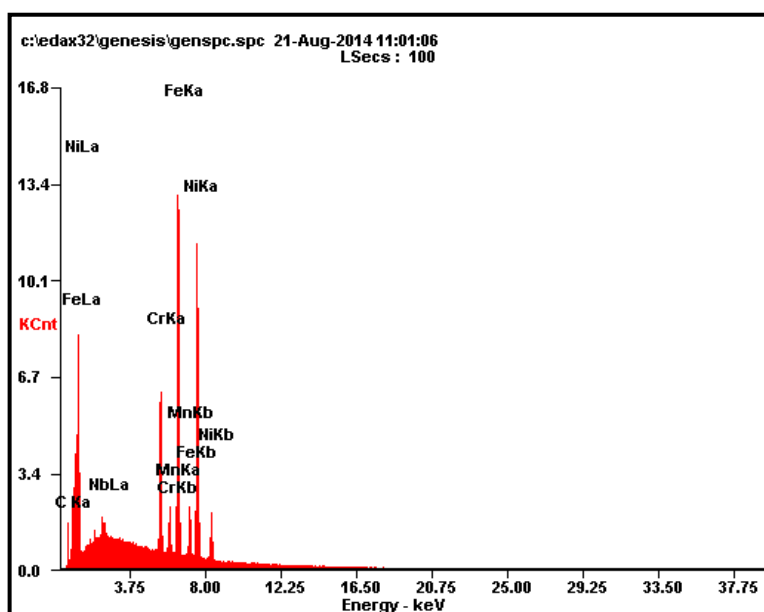
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุในตำแหน่งหมายเลข 2 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ ข.3 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 4.58 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 2.46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 0.51 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีปริมาณธาตุคาร์บอน 18.23 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 2.26 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 0.44 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของเหล็ก P 22



รูปที่ ข.21 ตำแหน่งหมายเลข 2 ซึ่งเป็นบริเวณของแนว Fusion zone พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกัน

ตารางที่ ข.4 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.21

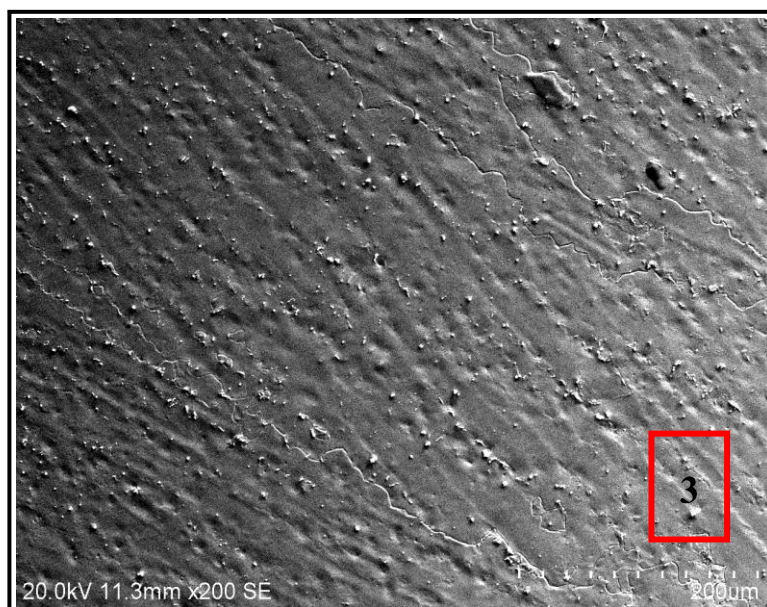
Element	Weight%	Atomic%
C	8.17	29.72
Nb	1.69	0.80
Cr	10.57	8.89
Mn	1.80	1.44
Fe	33.07	25.89
Ni	44.69	33.27



รูปที่ ข.22 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.21

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในตำแหน่งหมายเลข 2 (Fusion zone) พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ ข.4 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 8.17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 10.57 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 1.69 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 1.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุเหล็ก 33.07 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 44.69 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุคาร์บอน 29.72 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 8.89 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 0.80 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 1.44 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุเหล็ก 25.89

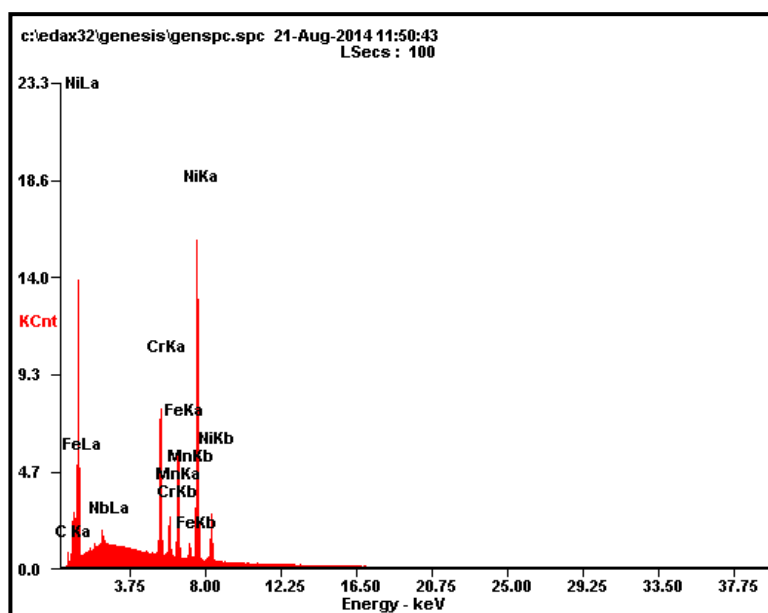
เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณของธาตุ निकเกิล 33.27 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของลวดเชื่อม Inconel82



รูปที่ ข.23 ตำแหน่งหมายเลข 3 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.5 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกับบริเวณตำแหน่งหมายเลข 2

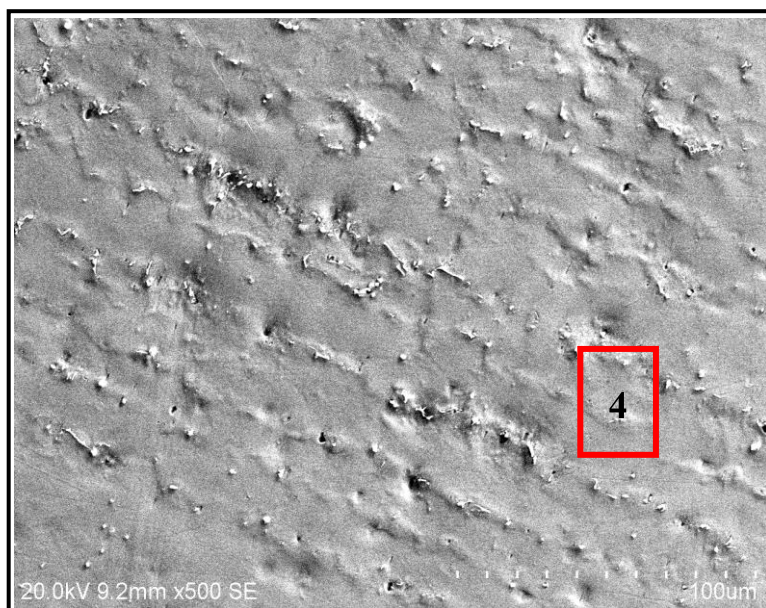
ตารางที่ ข.5 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.23

Element	Weight %	Atomic %
C	3.83	16.01
Nb	1.93	1.04
Cr	14.30	13.82
Mn	2.52	2.31
Fe	12.95	11.65
Ni	64.46	55.17



รูปที่ ข.24 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.23

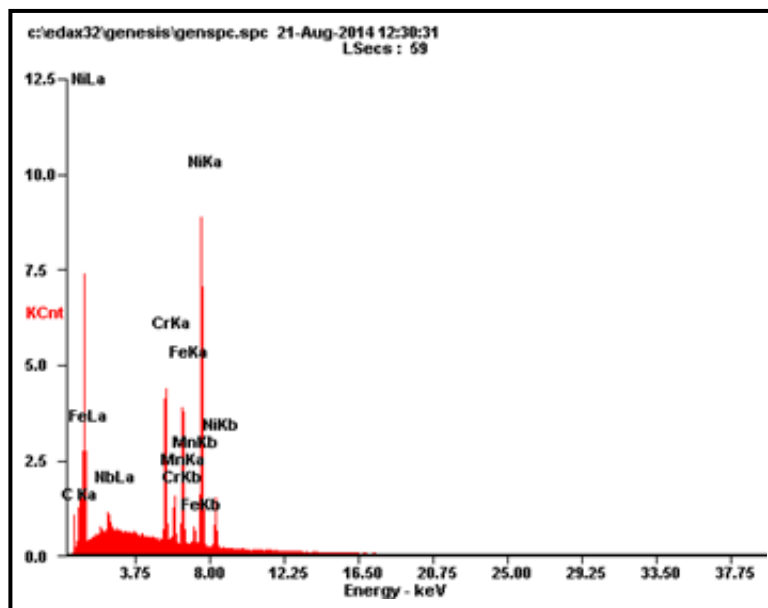
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในตำแหน่งหมายเลข 3 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ ข.5 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 3.83 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 14.30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 1.93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.52 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุเหล็ก 12.95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 64.46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีปริมาณธาตุคาร์บอน 16.01 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 13.82 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 1.04 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.31 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุเหล็ก 11.65 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 55.17 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของลวดเชื่อม Inconel82



รูปที่ ข.25 ตำแหน่งหมายเลข 4 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.6 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างและมีปริมาณของธาตุคาร์บอนสูง

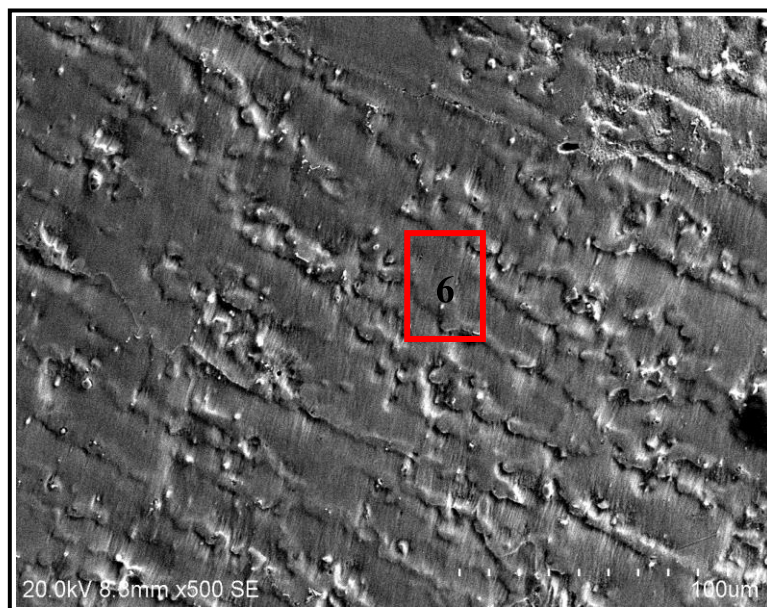
ตารางที่ ข.6 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.25

Element	Weight %	Atomic %
C	11.37	38.10
Nb	2.40	1.04
Cr	12.78	9.89
Mn	2.31	1.69
Fe	15.05	10.84
Ni	56.08	38.43



รูปที่ ข.26 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.25

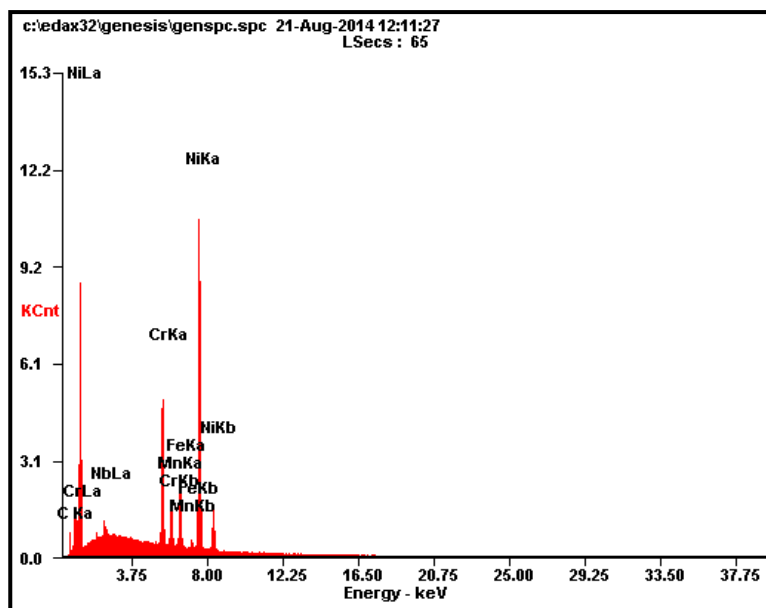
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในตำแหน่งหมายเลข 4 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ ข.6 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 11.37 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 12.78 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 2.40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.31 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุเหล็ก 15.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 56.08 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีปริมาณธาตุคาร์บอน 38.10 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 9.89 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 1.04 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 1.69 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุเหล็ก 10.84 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 38.43 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของลวดเชื่อม Inconel82 แต่ในบริเวณนี้มีปริมาณธาตุคาร์บอนที่สูงกว่าปกติ



รูปที่ ข.27 ตำแหน่งหมายเลข 6 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.7 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของลวด Inconel82 ที่มีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกัน

ตารางที่ ข.7 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.27

Element	Weight %	Atomic %
C	8.95	32.13
Nb	2.69	1.25
Cr	14.28	11.83
Mn	2.70	2.12
Fe	7.16	5.52
Ni	64.22	47.15

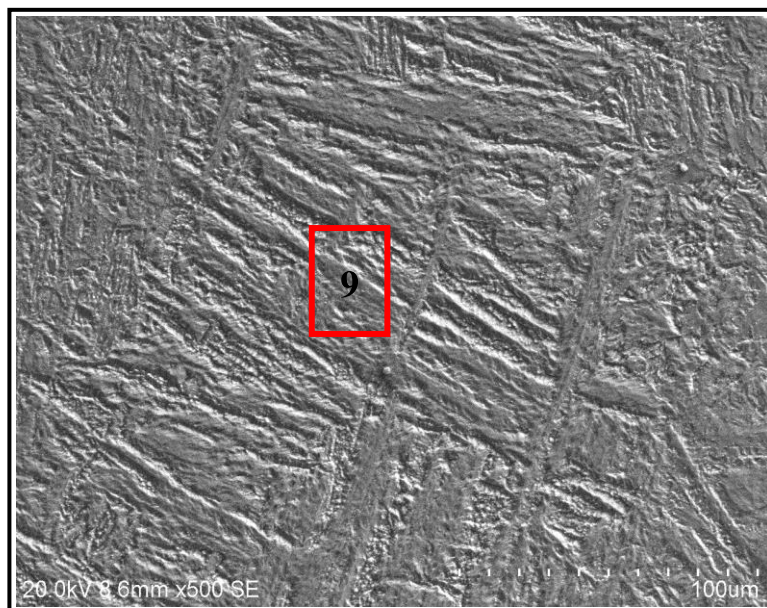


รูปที่ ข.28 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.27

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในตำแหน่งหมายเลข 6 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ ข.7 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 8.95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 14.28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 2.69 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุเหล็ก 7.16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 64.22 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีปริมาณธาตุคาร์บอน 32.13 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 11.83 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุไนโอเบียม 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม

/

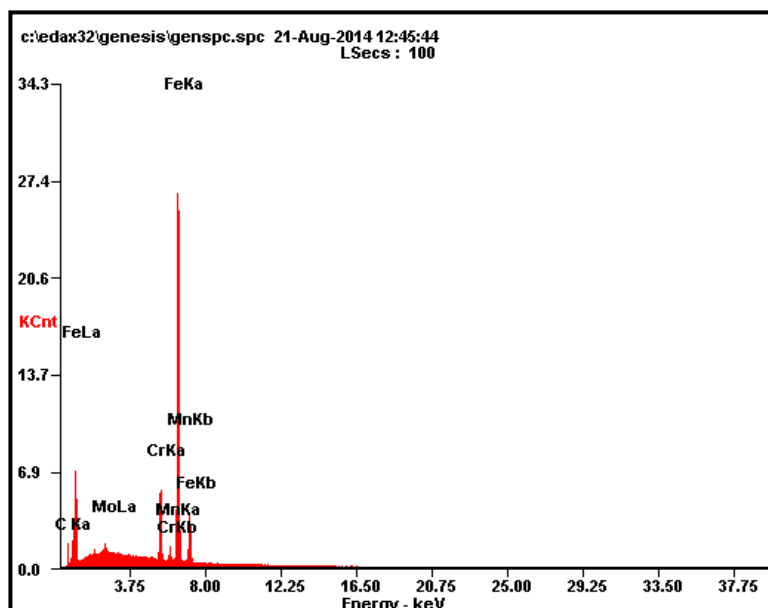
/.”มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.12 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุเหล็ก 5.52 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 47.15 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของลวดเชื่อม Inconel 82 แต่ในบริเวณนี้มีปริมาณธาตุคาร์บอนที่สูงกว่าปกติ



รูปที่ ข.29 ตำแหน่งหมายเลข 9 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.8 ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุของเหล็ก P91 พบค่าของธาตุคาร์บอนสูงและโครงสร้างจุลภาคเป็นโครงสร้างเบนไนท์ (Bainite)

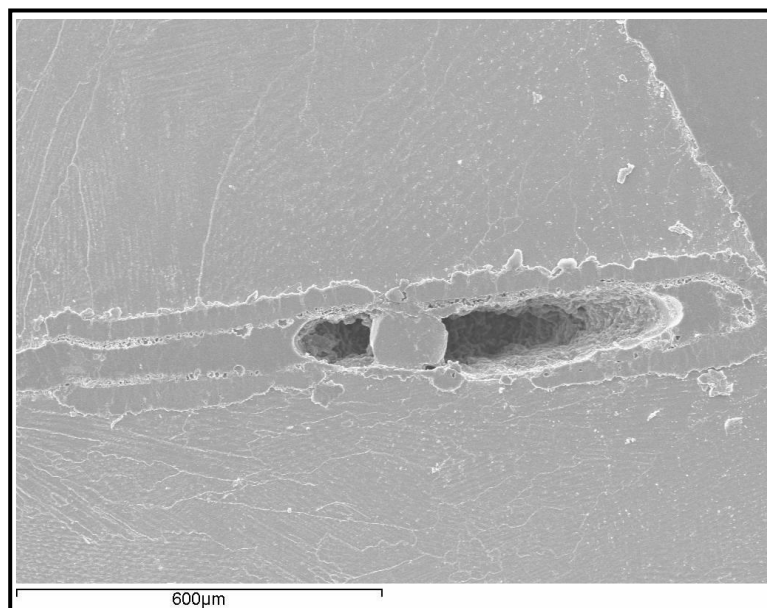
ตารางที่ ข.8 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.29

Element	Weight %	Atomic %
C	11.74	38.19
Mo	1.39	0.57
Cr	9.16	6.88
Mn	0.46	0.33
Fe	77.24	54.03

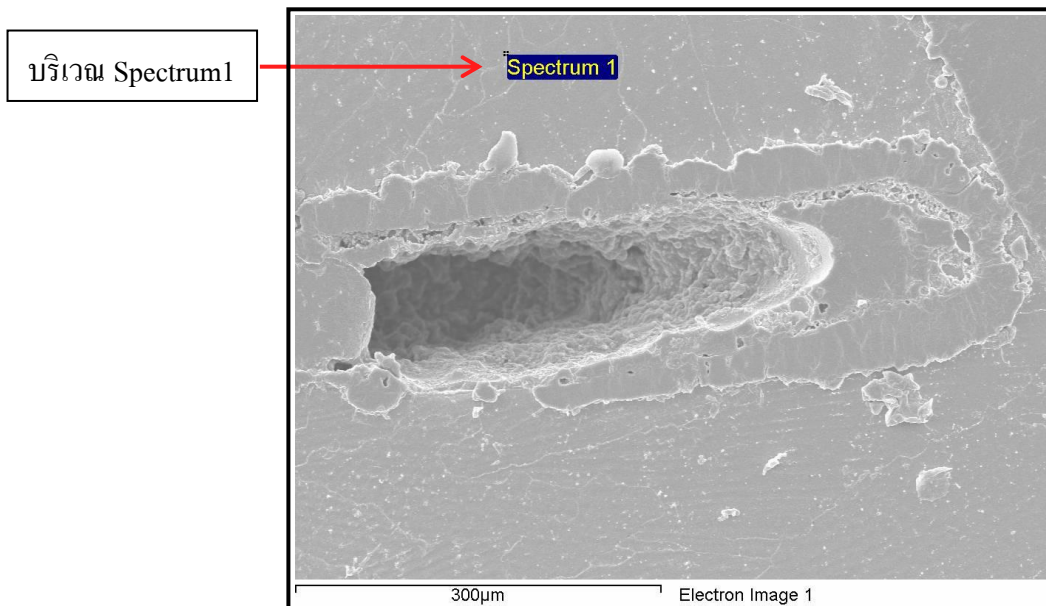


รูปที่ ข.30 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.29

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในตำแหน่งหมายเลข 9 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ ข.8 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 11.74 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 9.16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 0.46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโมลิบดีนัม 1.39 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีปริมาณธาตุคาร์บอน 38.19 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 6.88 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 0.33 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโมลิบดีนัม 0.57 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวเป็นส่วนผสมของเหล็ก P91



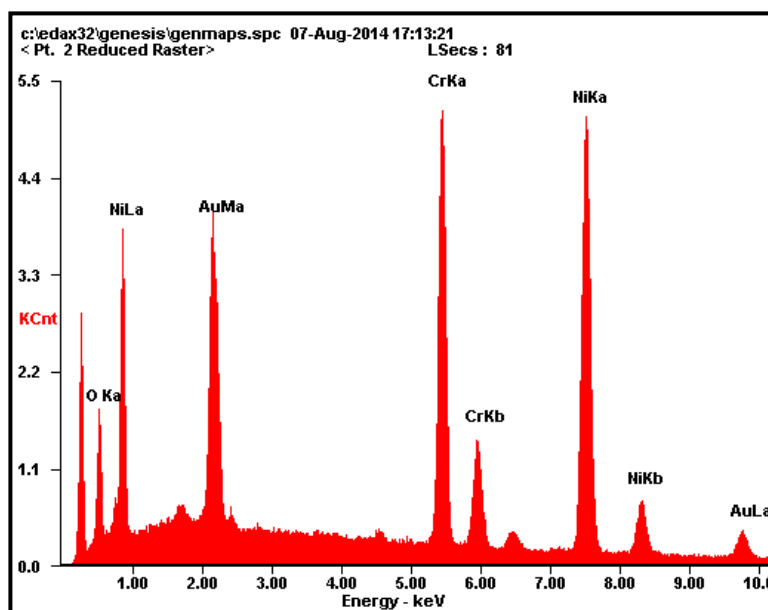
รูปที่ ข.31 รูปบริเวณรอย Crack และบริเวณใกล้เคียงของเนื้องานเชื่อม



รูปที่ ข.32 บริเวณ Spectrum ที่ 1 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.9

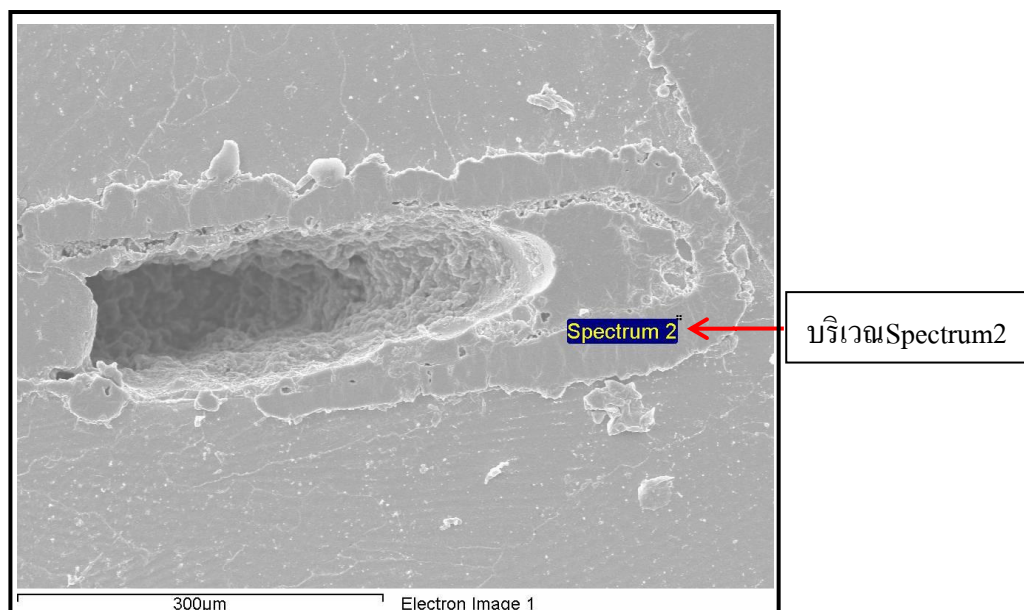
ตารางที่ ข.9 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.32

Element	Weight %	Atomic %
O	7.64	16.96
Cr	28.32	14.44
Ni	64.04	41.41



รูปที่ ข.33 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.32

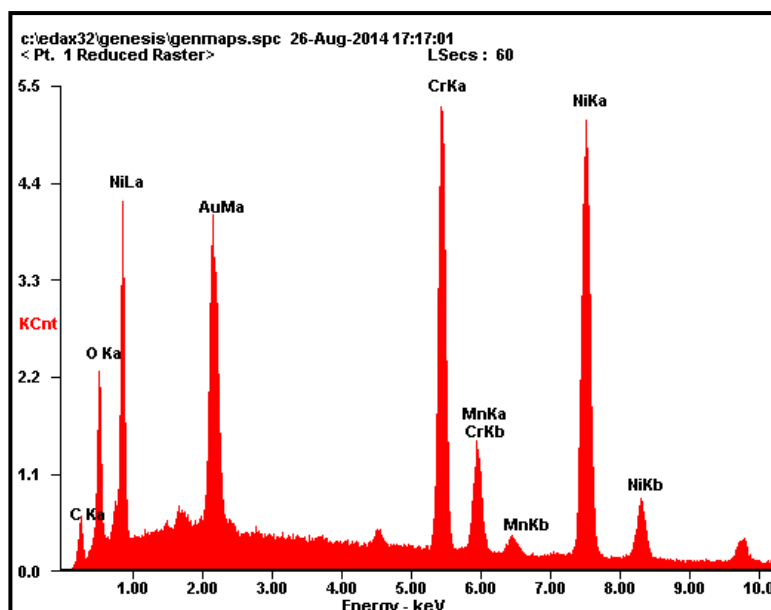
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในบริเวณรอยแตกดังรูปที่ ข.32 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ ข.9 โดยมีปริมาณธาตุออกซิเจน 7.64 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 28.32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุนิกเกิล 64.04 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุออกซิเจน 16.96 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 14.44 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุนิกเกิล 41.41 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม โดยส่วนผสมดังกล่าวใกล้เคียงกับเนื้อเชื่อมของลวด Inconel82



รูปที่ ข.34 บริเวณ Spectrum ที่ 2 พบการแยกตัวขององค์ประกอบธาตุดังตารางที่ ข.10 ซึ่งเป็นบริเวณขอบของรอยแตกที่พบคราบออกไซด์และมีปริมาณของคาร์บอนอยู่แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของธาตุมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอบริเวณรอยแตก

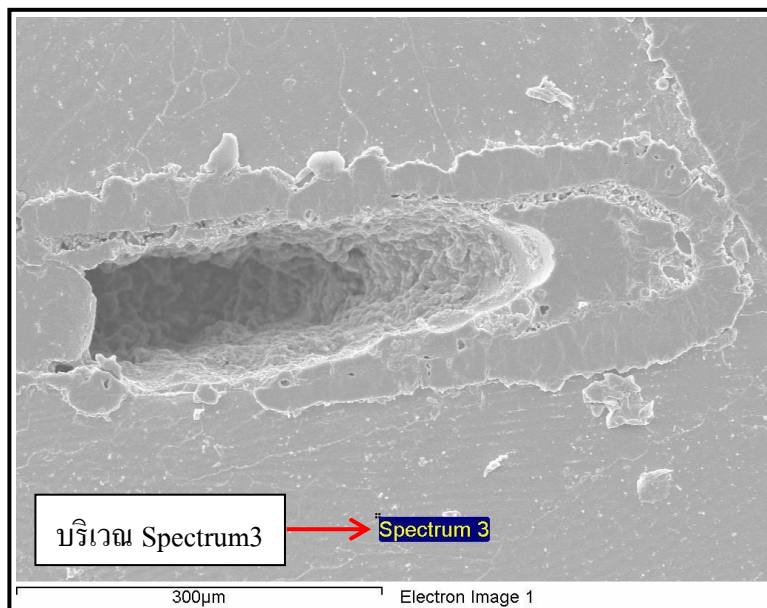
ตารางที่ ข.10 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.34

Element	Weight %	Atomic %
C	5.10	19.10
O	7.64	21.49
Cr	21.33	18.45
Mn	3.32	2.72
Ni	44.49	34.09
Au	18.13	4.14



รูปที่ ข.35 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.34

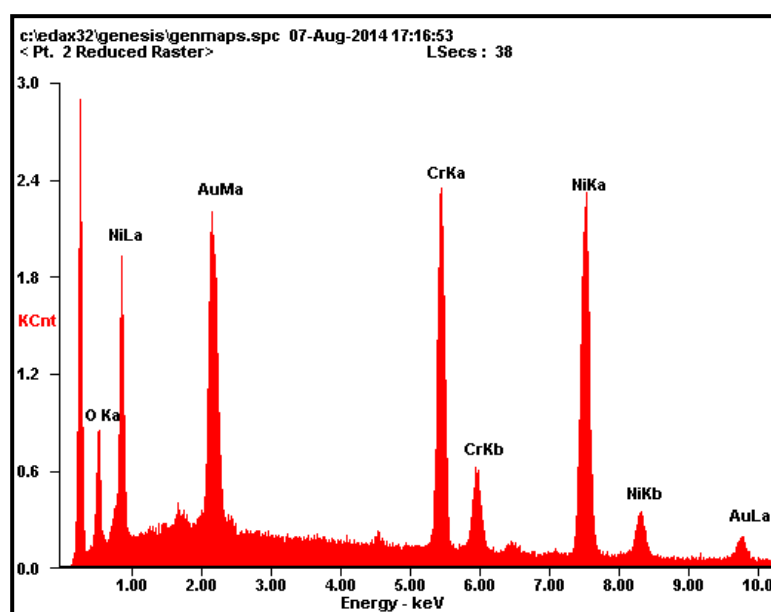
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในบริเวณรอยแตกดังรูป ข.34 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ ข.10 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 5.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุออกซิเจน 7.64 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 21.33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 3.32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 44.49 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุคาร์บอน 19.10 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุออกซิเจน 21.49 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 18.45 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.72 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 34.09 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวแสดงถึงการมีอยู่ของออกไซด์ของธาตุในบริเวณรอยแตก



รูปที่ ข.36 บริเวณSpectrumที่3พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.11 ซึ่งใกล้เคียงกับองค์ประกอบธาตุของลวดเชื่อม Inconel82 และเนื้อเหมือนกับบริเวณ Spectrum ที่ 1

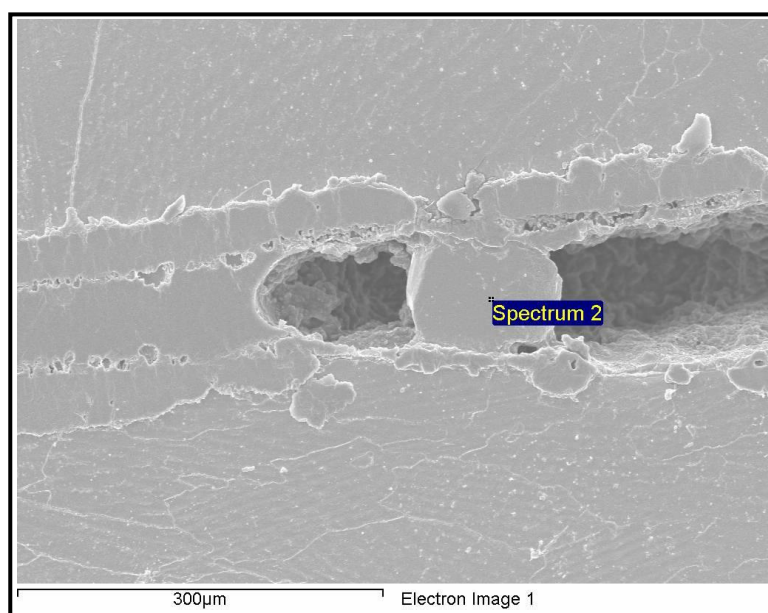
ตารางที่ ข.11 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.36

Element	Weight %	Atomic %
O	8.06	20.81
Cr	28.23	22.42
Ni	63.71	44.82



รูปที่ ข.37 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.36

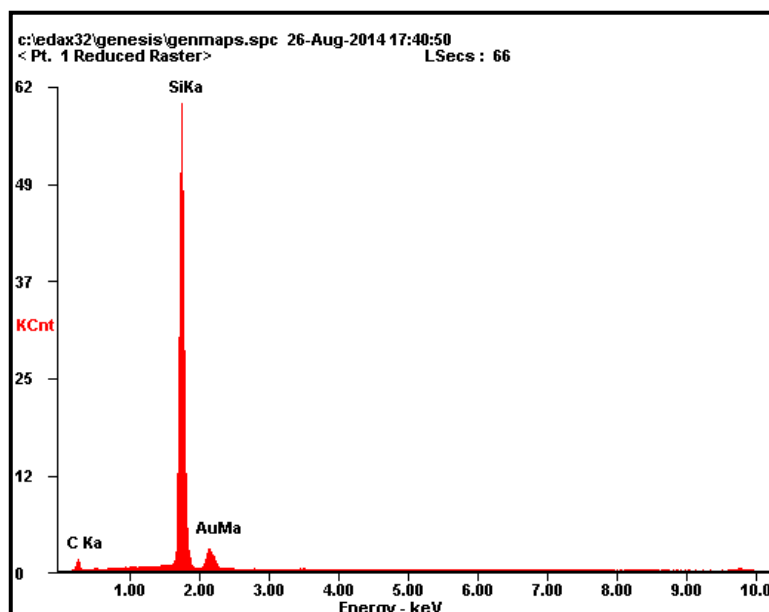
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในบริเวณรอยแตกดังรูป ข.36 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ ข.11 โดยมีปริมาณธาตุออกซิเจน 8.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 28.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุนิกเกิล 63.71 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุออกซิเจน 20.81 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 22.42 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุนิกเกิล 44.82 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งตรงกันกับบริเวณ spectrum 1 โดยส่วนผสมดังกล่าวใกล้เคียงกับเนื้อเชื่อมของลวด Inconel 82



รูปที่ ข.38 บริเวณ Spectrum ที่ 2 พบสิ่งแปลกปลอมอยู่ในแนวตรงกลางรอยแตกก้อนกลมๆ ที่พบเป็นธาตุซิลิกอนซึ่งเป็นสิ่งแปลกปลอมบนผิวชิ้นงานซึ่งอาจเกิดจากการเตรียมชิ้นงานระหว่างการขัดเพื่อส่งคูโครงสร้าง

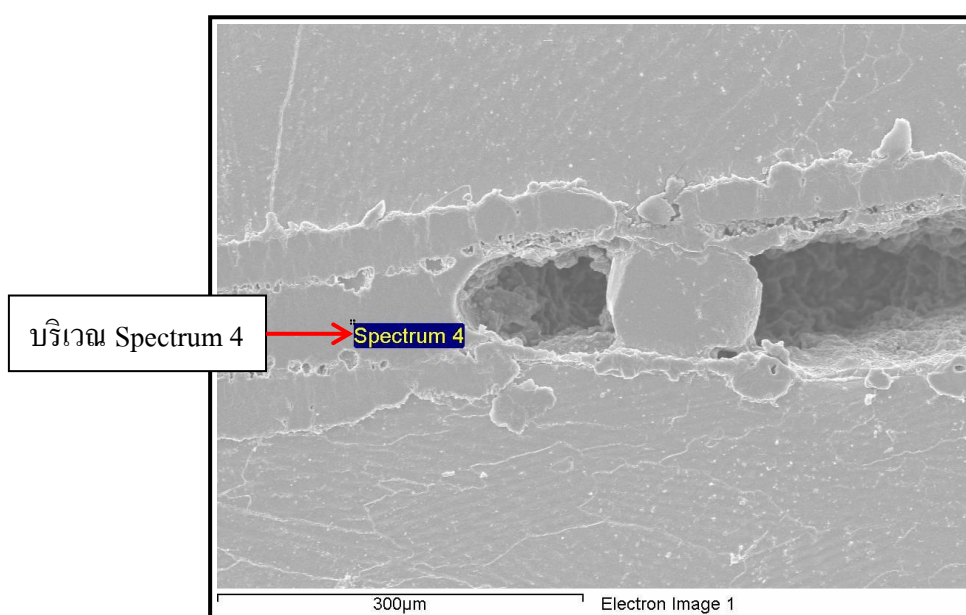
ตารางที่ ข.12 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.38

Element	Weight%	Atomic%
C	21.06	43.98
Si	60.04	53.62
Au	18.90	2.41



รูปที่ ข.39 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.38

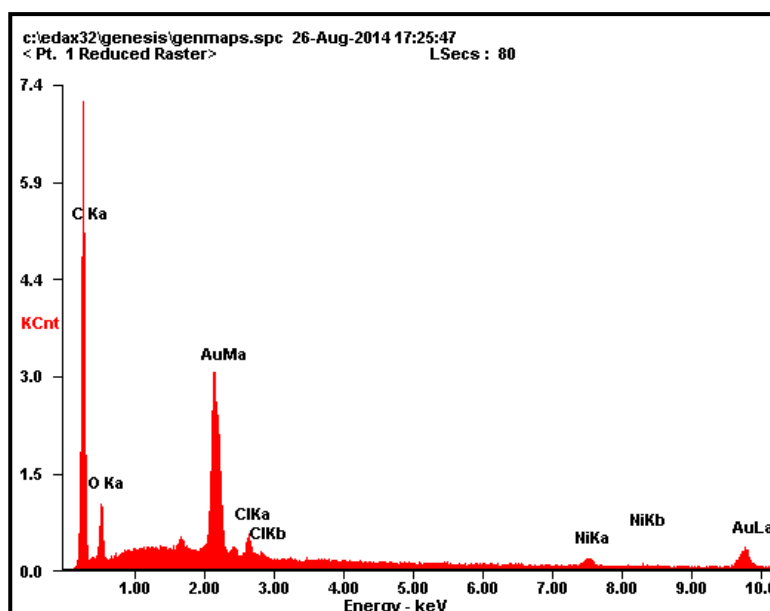
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในบริเวณรอยแตกดังรูป ข.38 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ ข.12 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 21.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุซิลิกอน 60.04 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุคาร์บอน 43.98 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุซิลิกอน 53.62 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งเป็นสิ่งแปลกปลอมบนผิวชิ้นงานซึ่งอาจเกิดจากการเตรียมชิ้นงานระหว่างการขัดเพื่อส่งคูโครงสร้าง



รูปที่ ข.40 บริเวณ Spectrum ที่ 4 ซึ่งเป็นรอยแตกพบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.13 แสดงให้เห็นว่าเนื้อตรงรอยแตกองค์ประกอบของธาตุเกิดการกระจายตัวที่แตกต่างกัน

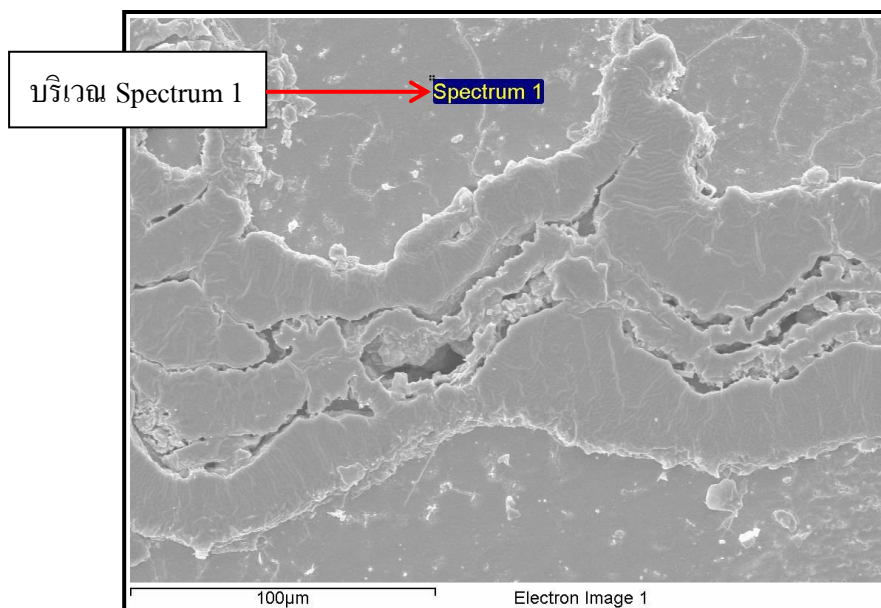
ตารางที่ ข.13 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.40

Element	Weight %	Atomic %
C	58.86	86.12
O	9.36	10.28
Cl	1.03	0.51
Ni	1.64	0.49
Au	29.11	2.60



รูปที่ ข.41 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.40

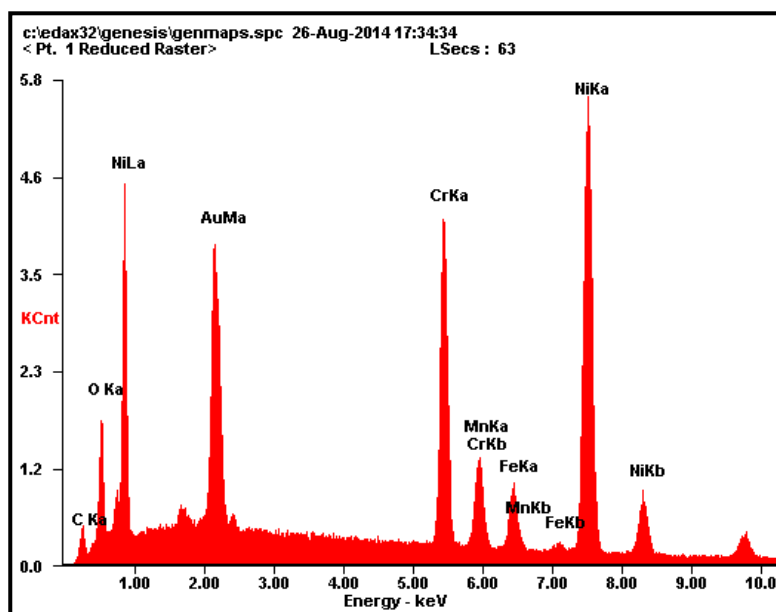
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในบริเวณรอยแตกดังรูป ข.40 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ ข.13 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอนเป็นหลัก 58.86 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุออกซิเจน 9.36 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 1.64 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุคาร์บอน 86.12 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุออกซิเจน 10.28 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 0.49 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม



รูปที่ ข.42 บริเวณ Spectrum ที่ 1 เป็นบริเวณที่ถัดลงมาและเป็นส่วนปลายของรอยแตกพบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.14 ซึ่งเป็นบริเวณองค์ประกอบธาตุของเนื้อแนวเชื่อม Inconel82

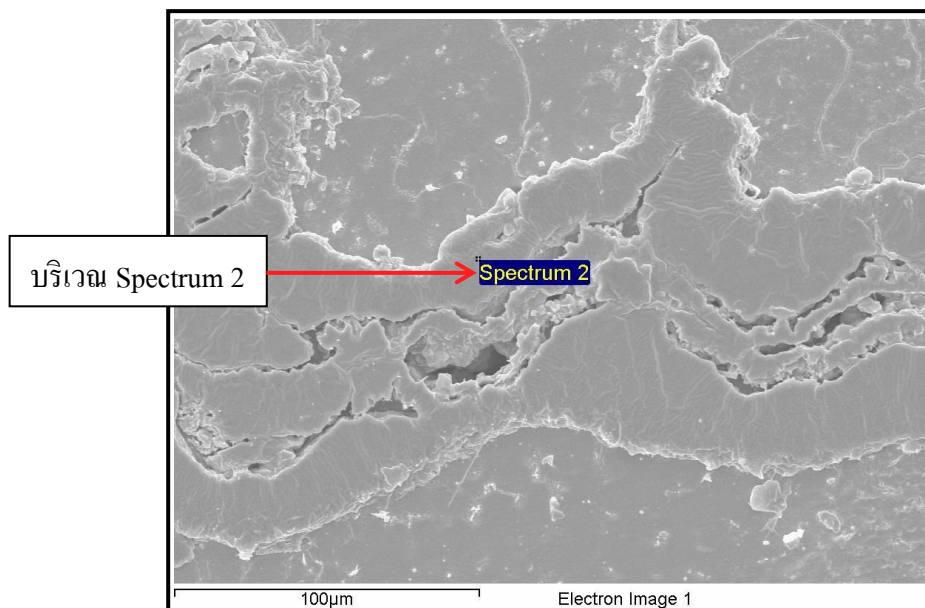
ตารางที่ ข.14 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.42

Element	Weight %	Atomic %
C	3.70	15.42
O	6.09	19.05
Cr	15.59	5.72
Mn	3.34	15.01
Ni	44.95	3.04
Fe	3.82	3.43
Au	22.50	38.33



รูปที่ ข.43 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.42

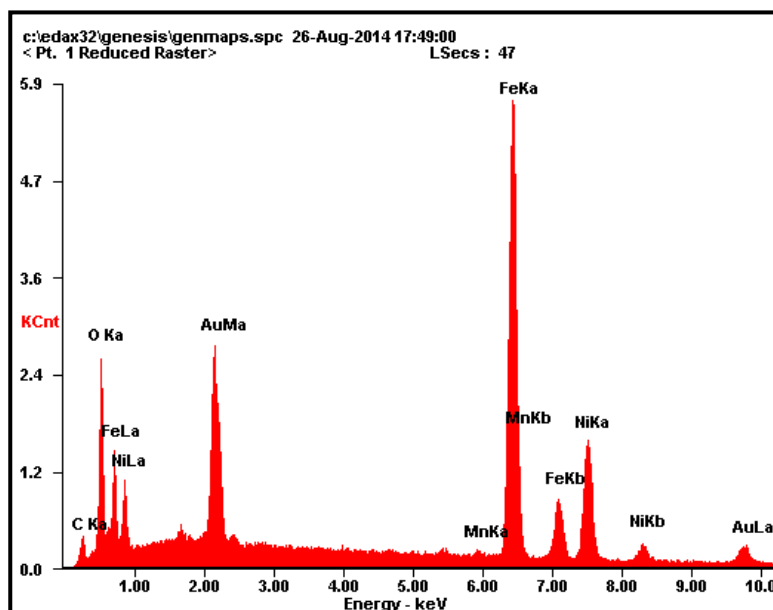
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในบริเวณรอยแตกดังรูป ข.42 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ ข.14 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 3.70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุออกซิเจน 6.09 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 15.59 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 3.34 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุเหล็ก 3.82 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 44.95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุคาร์บอน 15.42 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุออกซิเจน 19.05 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 5.72 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 15.01 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุเหล็ก 3.43 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 3.04 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมแสดงถึงองค์ประกอบของเนื้อเชื่อม Inconel82



รูปที่ ข.44 บริเวณ Spectrum ที่ 2 เป็นบริเวณขอบของรอยแตกที่กระจายแบบไม่ต่อเนื่องพบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบธาตุเกิดการกระจายตัวที่แตกต่างกัน

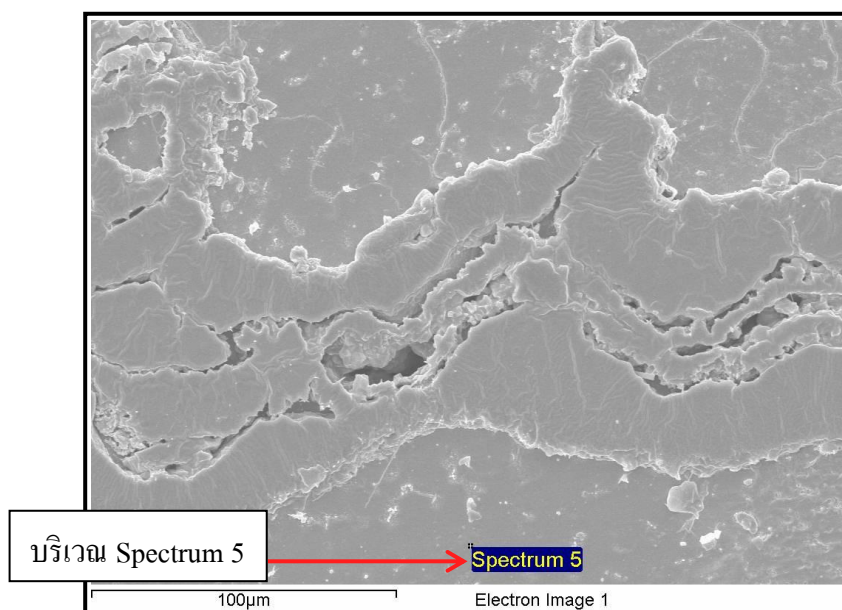
ตารางที่ ข.15 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.44

Element	Weight %	Atomic %
C	4.66	16.36
O	12.08	31.84
Fe	44.02	0.40
Mn	0.52	33.24
Ni	19.59	14.07
Au	19.13	4.10



รูปที่ ข.45 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.44

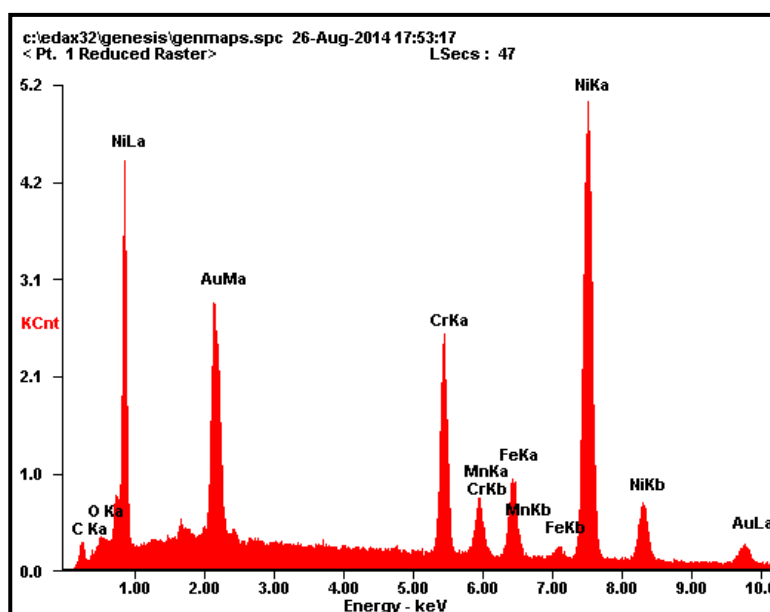
จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในบริเวณรอยแตกดังรูป 4.45 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.15 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 4.66 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุออกซิเจน 12.08 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 0.52 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุเหล็ก 44.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 19.59 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุคาร์บอน 16.36 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุออกซิเจน 31.84 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 33.24 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุเหล็ก 0.40 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 14.07 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม



รูปที่ ข.46 บริเวณ Spectrum ที่ 5 ที่เป็นเนื้อนอกรอยแตกพบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.16 ซึ่งใกล้เคียงกับส่วนประกอบธาตุของลวดเชื่อม Inconel82 เนื้อเหมือนกับบริเวณ Spectrum ที่ 1

ตารางที่ ข.16 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.46

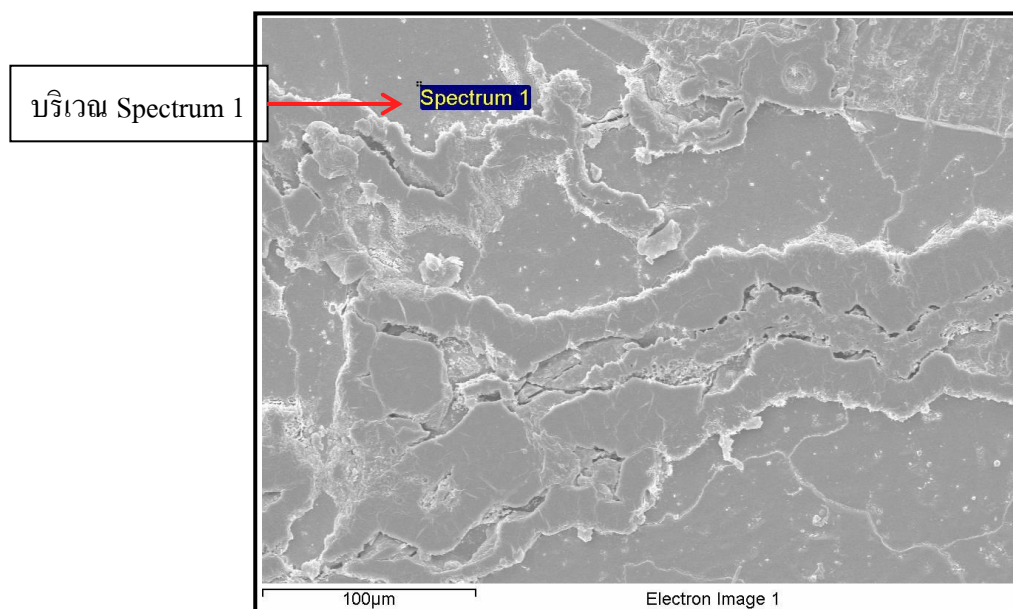
Element	Weight %	Atomic %
C	3.49	16.02
O	1.36	4.69
Cr	11.92	12.63
Mn	2.22	2.23
Ni	56.81	6.04
Fe	6.12	53.33
Au	18.08	5.06



รูปที่ ข.47 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.46

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในบริเวณรอยแตกดังรูป 4.47 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.16 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 3.49 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุออกซิเจน 1.36 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 11.92 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.22 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุเหล็ก 6.12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 56.81 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีปริมาณธาตุคาร์บอน 16.02 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุออกซิเจน 4.69 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 12.63 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.23 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุเหล็ก 53.33 เปอร์เซ็นต์โดย

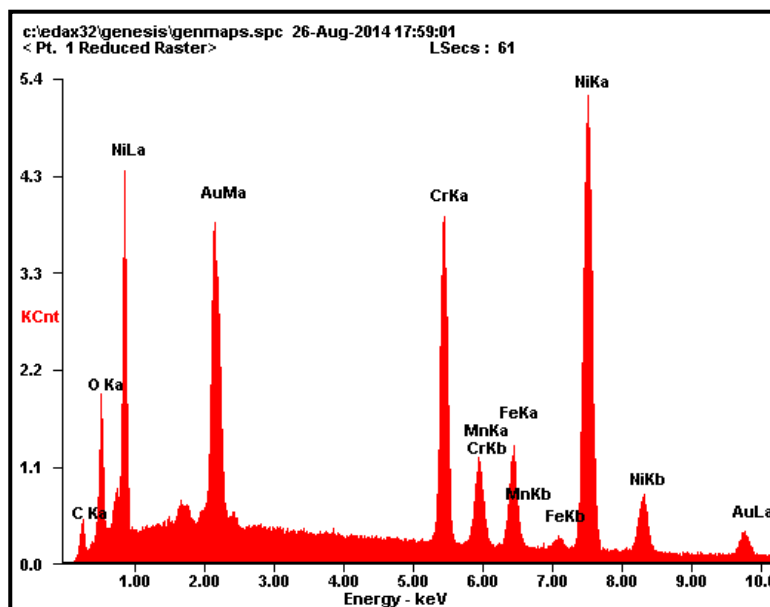
อะตอม มีปริมาณของธาตุ निकเกิล 6.04 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมแสดงถึงองค์ประกอบของเนื้อเชื่อม Inconel82



รูปที่ ข.48 บริเวณ Spectrum ที่ 1 พบองค์ประกอบของธาตุตามตารางที่ ข.17 ซึ่งเป็นบริเวณองค์ประกอบธาตุของเนื้อแนวเชื่อม Inconel82 และเป็นการยืนยันว่ารอยแตกร้าวยู่บนเนื้อของลวดเชื่อม

ตารางที่ ข.17 อัตราส่วนผสมของธาตุโดยน้ำหนักของรูปที่ ข.48

Element	Weight %	Atomic %
C	4.38	17.33
O	6.32	18.75
Cr	15.53	14.18
Mn	3.03	2.62
Ni	46.44	5.15
Fe	6.05	37.56
Au	18.25	4.40



รูปที่ ข.49 สเปกตรัมการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ส่วนผสมของธาตุรูปที่ ข.48

จากการทำ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ ในบริเวณรอยแตกดังรูป ข.48 พบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ ข.17 โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอน 4.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุออกซิเจน 6.32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุโครเมียม 15.53 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุแมงกานีส 3.03 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณธาตุเหล็ก 6.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 46.44 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณธาตุคาร์บอน 17.33 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุออกซิเจน 18.75 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุโครเมียม 14.18 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุแมงกานีส 2.62 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณธาตุเหล็ก 37.56 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม มีปริมาณของธาตุนิกเกิล 5.15 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม ซึ่งส่วนผสมแสดงถึงองค์ประกอบของเนื้อเชื่อม Inconel82

ภาคผนวก ค
ขั้นตอนการจัดเตรียมการทดลอง

ค.1 การเตรียมทำการตัดชิ้นงานท่อ

การตัดนำด้วย Cutting Wheel

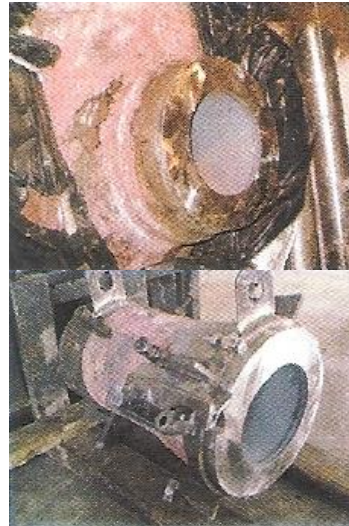


การตัดท่อด้วยเครื่อง Cut off Wheel



ค.2 ชิ้นงานที่ทำการตัดและทำความสะอาดเพื่อหารอยแตก

แสดงชิ้นงานภายหลังตัดขาด





ค.3 วัดตำแหน่งรอยแตกจากรอยภายนอกเทียบกับภายในและทำการทดสอบหารอย Crack ด้วยน้ำยา PT.Test

ทำการวัดตำแหน่งด้านที่เจียรรอย Crack ออก



ทำการทดสอบหารอย Crack ด้วยน้ำยา PT.Test



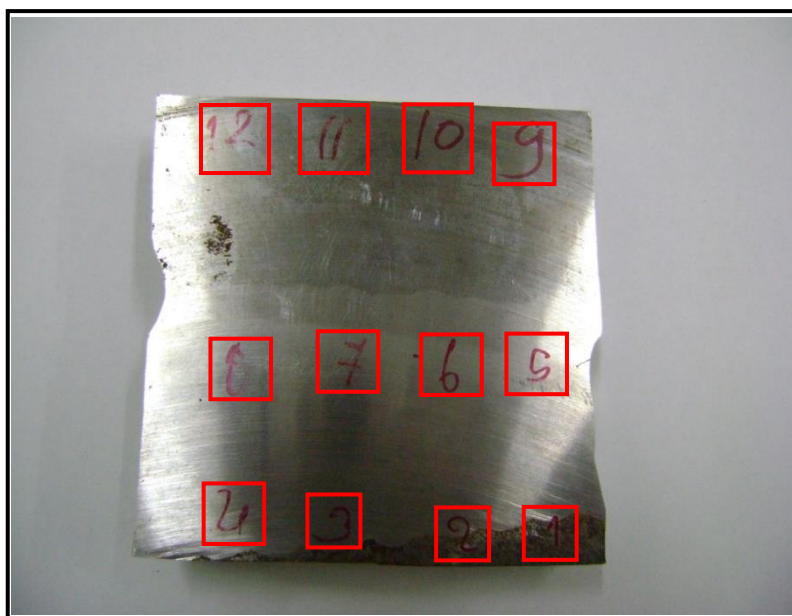
พบรอย Crack ด้านในท่อ Expander



ค.4 ทำการตัดทอนชิ้นงานเพื่อทำMount

ชิ้นงานที่พบรอย Crack นำไปตัดทอนให้เล็กลง





ค.5 ชิ้นงานที่ทำMountนำไปทำการขัดและกัดกรดเพื่อส่องดูโครงสร้างจุลภาค



ค.6 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง







ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล

นายพิเชษฐ์ สุขโต

วัน เดือน ปีเกิด

3 ธันวาคม 2514

ประวัติการศึกษา

ระดับอาชีวศึกษา

ประกาศนียบัตรชั้นสูง สาขาวิชาช่างยนต์

สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตพระนครเหนือ พ.ศ. 2534

ระดับปริญญาตรี

อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2540

ระดับปริญญาโท

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโลหการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2556

ประวัติการทำงาน

Maintenance Mechanical Hydro Power Plant พ.ศ. 2533-2543

Machine Test ทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์โรงไฟฟ้าพลังน้ำ
พ.ศ. 2543-2546โครงการวิจัยงาน Small Hydro (ทดสอบประสิทธิภาพTurbine)
พ.ศ. 2547-2550งานตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing)NDT.
พ.ศ. 2550-2553

โครงการพัฒนาโรงไฟฟ้าท้ายเขื่อนชลประทาน พ.ศ. 2553-2557