

การเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด  
DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีที่ไม่ใช้โลหะเติมและ  
ใช้โลหะเติม

RESISTANCE SPOT WELDING OF DP1180 DUAL PHASE  
STEEL AND AISI 304 STAINLESS STEEL WITH AND WITHOUT  
FILLER METAL

นางสาวกชพร สุจริต

MS. KOCHAPORN SUJARIT

นางสาวนารีรัตน์ บำรุงรักษ์

MS. NAREERAT BAMRUNGRAK

นายศวัสกร เหมะพรรณ

MR. SAWATSAKORN HEMAPAN

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

และสาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RESISTANCE SPOT WELDING OF DP1180 DUAL PHASE  
STEEL AND AISI 304 STAINLESS STEEL WITH AND WITHOUT  
FILLER METAL



MS. KOCHAPORN SUJARIT  
MS. NAREERAT BAMRUNGRAK  
MR. SAWATSAKORN HEMAPAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING AND  
PRODUCTION DESIGN AND MATERIALS ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีที่ไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม  
RESISTANCE SPOT WELDING OF DP1180 DUAL PHASE STEEL AND AISI 304 STAINLESS STEEL WITH AND WITHOUT FILLER METAL

นักศึกษา

นางสาวกชพร สุจริต รหัสประจำตัว 61010004  
นางสาวนารีรัตน์ บำรุงรักษ์ รหัสประจำตัว 61010578  
นายศวัสกร เหมะพรรณ รหัสประจำตัว 61011005

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ  
และสาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์



(รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ)

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีที่ไม่ใช้โลหะเติม และใช้โลหะเติม

นักศึกษา

นางสาวกชพร สุจริต  
นางสาวนารีรัตน์ บำรุงรักษ์  
นายศวีสร เหมะพรรณ

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ  
และสาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2564

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของกระแสเชื่อมและระยะเวลาเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้างมหภาคและจุลภาคในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีที่ไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม โดยโลหะเติมทำมาจากแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ ในการศึกษาใช้กระแสเชื่อม 3 ระดับ คือ 7 8.5 และ 10 กิโลแอมแปร์ และใช้ระยะเวลาเชื่อม 3 ระดับ คือ 25 38 และ 50 ไชเคิล จากผลการทดลองพบว่า ค่ากระแสเชื่อมมีอิทธิพลต่อโครงสร้างมหภาค ได้แก่ ระยะซิมลิก ระยะกดลิก ขนาดของรอยเชื่อม และพื้นที่ของรอยเชื่อม การใช้โลหะเติมทำให้ระยะซิมลิก ระยะกดลิกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนขนาดและพื้นที่ของรอยเชื่อมมีค่าน้อยลง โครงสร้างจุลภาคทั้งกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติมพบว่า บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน มีขนาดเกรนใหญ่กว่าและฉิวหยาบกว่า (Coarser Grains) เมื่อเทียบกับบริเวณโลหะพื้น ส่วนในบริเวณโลหะที่เกิดการหลอมละลาย เกิดเกรนตามยาว (Columnar Grains) และกรณีที่ใช้โลหะเติมพบรอยร้าว (Crack) มากกว่ากรณีไม่ใช้โลหะเติม นอกจากนี้ พบเฟสมาร์เทนไซต์ในบริเวณหลอมละลายในกรณีที่ไม่ใช้โลหะเติม ส่วนกรณีที่ใช้โลหะเติมนอกจากจะเกิดเฟสมาร์เทนไซต์แล้ว ยังพบส่วนผสมของทองแดง (Cu) ปรากฏอยู่ในบริเวณหลอมละลาย

<b>Thesis Title</b>	Resistance Spot Welding of DP1180 Dual Phase Steel and AISI 304 Stainless Steel With and Without Filler Metal
<b>Student</b>	Ms. Kochaporn Sujarit Ms. Nareerat Bamrungrak Mr. Sawatsakorn Hemapan
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering and Production Design and Materials Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
<b>Academic Year</b>	2021
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Kanachai Kanlayasiri

### ABSTRACT

This project is to study the influence of welding current and welding time on macrostructure and microstructure in resistance spot welding between DP1180 dual phase steel and AISI 304 stainless steel in the case with and without filler metal. The filler metal is made of pure copper sheet. In the study, three welding currents were selected at 7, 8.5, and 10 kA. and welding times were set at 25, 38, and 50 cycles. From the experimental results, it is found that the current influences the macrostructures including penetration depth, indentation depth, diameter of the weld, and area of the weld. The use of pure copper sheet as a filler metal results in a higher of penetration and indentation depths. The diameter and area of the weld are reduced. The microstructures of heat affected zone in both cases have larger and coarser grain sizes compared to the base metal region. Columnar grains were found in the fusion zone and when using the filler metal, more cracks were discovered than that of without the filler metal. Martensite phase was found in the fusion zone in the case of without filler metal and when applying the filler metal, in addition to the martensite phase, copper content was also detected in the fusion zone.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP980 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีที่ไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม สามารถสำเร็จลุล่วงตามเป้าหมายและมีความสมบูรณ์ของเนื้อหาได้ครบถ้วน เนื่องจากได้รับความรู้ คำแนะนำ การตรวจทาน การแก้ไข และได้รับคำปรึกษาในกรณีที่มีปัญหาเกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้คณะผู้จัดทำจึงขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้

ขอขอบคุณ รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ตลอดจนชี้แนะจุดบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้เกิดการปรับปรุงและแก้ไข ด้วยความเอาใจใส่ คณะผู้จัดทำขอกล่าวขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งในความกรุณาและความทุ่มเทที่ได้มอบให้กับคณะผู้จัดทำ

ขอขอบคุณนายกัธร สุขพิมาย เป็นอย่างสูงที่คอยช่วยเหลือและแนะนำวิธีการใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณคณาจารย์ภายในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้มอบความรู้ ความช่วยเหลือ คำชี้แนะและคำปรึกษาในเรื่องต่างๆ รวมทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือและกำลังใจมาโดยตลอด ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาวกชพร สุจริต  
นางสาวนารีรัตน์ บำรุงรักษ์  
นายศวัสกร เหมะพรรณ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตปริญญาานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 การเชื่อมความต้านทาน (Resistance Welding).....	4
2.1.1 การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Spot Welding).....	4
2.1.2 การเกิดความร้อน.....	5
2.2 พารามิเตอร์ของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด.....	6
2.2.1 กระแสที่ใช้ในการเชื่อม.....	6
2.2.2 แรงกดที่ใช้ในการเชื่อม.....	6
2.2.3 เวลาในการเชื่อม.....	7
2.3 อิเล็กโทรดที่ใช้ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด.....	8
2.4 การเล่นประสาน (Brazing).....	10
2.4.1 การเล่นประสานโดยใช้ทอร์ชเชื่อม (Torch Brazing).....	10
2.4.2 การเล่นประสานในเตา (Furnace Brazing).....	10
2.4.3 การเล่นประสานโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Brazing).....	11
2.4.4 การเล่นประสานด้วยความต้านทาน (Resistance Brazing).....	11

## สารบัญ

	หน้า
2.4.5 การเล่นประสานแบบการจุ่ม (Dip Brazing).....	11
2.4.6 การเล่นประสานด้วยอินฟราเรด (Infrared Brazing).....	11
2.4.7 ชนิดของรอยต่อในการเล่นประสาน .....	12
2.4.8 โลหะเติม (Filler Metal).....	12
2.5 เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ (Advanced High Strength Steel: AHSS).....	13
2.5.1 เหล็กกล้าสองเฟส (Dual Phase Steel: DP) .....	13
2.6 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steels).....	14
2.6.1 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic Grade) .....	14
2.6.2 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic Grade).....	14
2.6.3 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (Martensitic Grade).....	14
2.6.4 เหล็กกล้าไร้สนิมสองเฟส (Duplex Grade).....	15
2.6.5 เหล็กกล้าไร้สนิมแบบตกผลึกแข็ง (Precipitation-Hardening Grade, PH Grade) .....	15
2.7 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM).....	15
2.8 กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล (Confocal Microscope).....	16
2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	17
2.9.1 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	17
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินปริญญานิพนธ์</b>	
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	19
3.2 การออกแบบการทดลอง .....	21
3.3 กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด.....	22
3.3.1 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุด กรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม (Filler Metal).....	22
3.3.2 การทำความสะอาดชิ้นงานเพื่อทำการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุด กรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม (Filler Metal).....	22
3.3.3 กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด กรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม (Filler Metal)	23
3.4 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค .....	24

## สารบัญ

	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินงานปริญญานิพนธ์</b>	
4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาครอยเชื่อม.....	25
4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของกรณีไม่ใช้โลหะเติม .....	27
4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของกรณีใช้โลหะเติม.....	32
4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม.....	36
4.2.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะพื้น (Base Metal) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด (SEM) .....	37
4.2.2 ลักษณะความเสียหายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม .....	38
4.2.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน .....	40
4.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) .....	46
<b>บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 การสรุปและอภิปรายผล .....	53
5.1.1 โครงสร้างมหภาค .....	53
5.1.2 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) .....	55
5.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) .....	55
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	55
<b>เอกสารอ้างอิง .....</b>	<b>57</b>
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก ค่ากระแสเชื่อมและระยะเวลาเชื่อมแต่ละเงื่อนไข.....	60
ภาคผนวก ข ข้อมูลชิ้นงานที่เลือกวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	62
ภาคผนวก ค ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมทั้งกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม .....	64

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของปริญญาานิพนธ์.....	3
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 และเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180.....	19
ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะเติมแบบแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ (Cu 99.95%).....	20
ตารางที่ 3.3 ตารางค่าตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีไม่ใช่โลหะเติมและใช้โลหะเติม (Filler Metal).....	21
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคกรณีไม่ใช่โลหะเติม .....	27
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคกรณีใช้โลหะเติม .....	32
ตารางที่ 4.3 ปริมาณธาตุในบริเวณโลหะหลอมละลายจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจาก EDS ในกรณีไม่ใช่โลหะเติม.....	47
ตารางที่ 4.4 ปริมาณธาตุในบริเวณโลหะหลอมละลายจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจาก EDS ในกรณีใช้โลหะเติม.....	49

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเกิดความต้านทานทางไฟฟ้าในการเชื่อมต้านทานแบบจุด.....	6
รูปที่ 2.2 รอบการเชื่อมแบบจุด.....	7
รูปที่ 2.3 รูปร่างมาตรฐานของอิเล็กโทรด.....	9
รูปที่ 2.4 ลักษณะรอยต่อ (a) รอยต่อชน (b) รอยต่อมุม (c) รอยต่อเกย (d) รอยต่อตัวที่ (e) รอยต่อขอบ ....	12
รูปที่ 2.5 ภาพระดับจุลภาคของเหล็กกล้าสองเฟส (Dual Phase Steel).....	13
รูปที่ 2.6 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM).....	16
รูปที่ 2.7 หลักแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล .....	16
รูปที่ 2.8 กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล .....	17
รูปที่ 2.9 แสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) .....	18
รูปที่ 3.1 ฟิกซ์เจอร์ (Fixture) .....	20
รูปที่ 3.2 การวางชิ้นงานกรณีไม่ใช้โลหะเติม (Filler Metal) .....	23
รูปที่ 3.3 การวางกรณีใช้โลหะเติม (Filler Metal) .....	23
รูปที่ 3.4 การกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยเทคนิค Ion-Milling.....	24
รูปที่ 4.1 ลักษณะองค์ประกอบของการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมในกรณีไม่ใช้โลหะเติม .....	25
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างโครงสร้างมหภาคจากการทดลองกรณีไม่ใช้โลหะเติม .....	26
รูปที่ 4.3 ลักษณะองค์ประกอบของการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมในกรณีใช้โลหะเติม.....	26
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างโครงสร้างมหภาคจากการทดลองกรณีใช้โลหะเติม .....	26
รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์การซึมลึกฝั่งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กรณีไม่ใช้โลหะเติม.....	28
รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์การซึมลึกฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีไม่ใช้โลหะเติม .....	28
รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การกัดลึกฝั่งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กรณีไม่ใช้โลหะเติม.....	29
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์การกัดลึกฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีไม่ใช้โลหะเติม .....	29
รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ขนาดของรอยเชื่อม กรณีไม่ใช้โลหะเติม.....	30
รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ของรอยเชื่อม กรณีไม่ใช้โลหะเติม.....	31
รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์การซึมลึกฝั่งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กรณีใช้โลหะเติม .....	33
รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์การซึมลึกฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีใช้โลหะเติม.....	33
รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์การกัดลึกฝั่งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กรณีใช้โลหะเติม .....	34
รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์การกัดลึกฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีใช้โลหะเติม.....	34
รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ขนาดของรอยเชื่อม กรณีใช้โลหะเติม .....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ของรอยเชื่อม กรณีใช้โลหะเติม .....	36
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304.....	37
รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาพของเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180.....	37
รูปที่ 4.19 ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อมในเงื่อนไขที่ 3 กรณีไม่ใช้โลหะเติม... 38	38
รูปที่ 4.20 ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อมในเงื่อนไขที่ 7 กรณีไม่ใช้โลหะเติม... 38	38
รูปที่ 4.21 ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อมในเงื่อนไขที่ 4 กรณีใช้โลหะเติม..... 39	39
รูปที่ 4.22 ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อมในเงื่อนไขที่ 8 กรณีใช้โลหะเติม..... 39	39
รูปที่ 4.23 แผนภาพโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล (เงื่อนไขที่ 3).....	42
รูปที่ 4.24 แผนภาพโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล (เงื่อนไขที่ 7).....	43
รูปที่ 4.25 แผนภาพโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล (เงื่อนไขที่ 4).....	44
รูปที่ 4.26 แผนภาพโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล(เงื่อนไขที่ 8).....	45
รูปที่ 4.27 จุด Spectrum 1, 2 ในบริเวณหลอมละลายของเงื่อนไขที่ 3 .....	46
รูปที่ 4.28 จุด Spectrum 1, 2 ในบริเวณหลอมละลายของเงื่อนไขที่ 7 .....	46
รูปที่ 4.29 จุด Spectrum 1, 2, และ 3 ในบริเวณหลอมละลายของเงื่อนไขที่ 4.....	48
รูปที่ 4.30 จุด Spectrum 1, 2, และ 3 ในบริเวณหลอมละลายของเงื่อนไขที่ 8.....	48
รูปที่ 4.31 ปริมาณธาตุในบริเวณโลหะหลอมละลายจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจาก EDS กรณีไม่ใช้โลหะเติมของเงื่อนไขที่ 3 ก) Spectrum 1 ข) Spectrum 2.....	50
รูปที่ 4.32 ปริมาณธาตุในบริเวณโลหะหลอมละลายจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจาก EDS กรณีไม่ใช้โลหะเติมของเงื่อนไขที่ 7 ก) Spectrum 1 ข) Spectrum 2.....	50
รูปที่ 4.33 ปริมาณธาตุในบริเวณโลหะหลอมละลายจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจาก EDS กรณีใช้โลหะเติมของเงื่อนไขที่ 4 ก) Spectrum 1 ข) Spectrum 2 ค) Spectrum 3.....	50
รูปที่ 4.34 ปริมาณธาตุในบริเวณโลหะหลอมละลายจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจาก EDS กรณีใช้โลหะเติมของเงื่อนไขที่ 8 ก) Spectrum 1 ข) Spectrum 2 ค) Spectrum 3.....	51

# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียด ขอบเขต ของปริญญาานิพนธ์เรื่อง การเชื่อมความต้านทานแบบจุด ระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP980 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีที่ไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

- 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
- 1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา
- 1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์
- 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
- 1.5 แผนการดำเนินงาน

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากท่อไอเสียรถยนต์เป็นสาเหตุหลักของปัญหาด้านมลพิษทางอากาศ สมาคมอุตสาหกรรมอลูมิเนียมโลกได้รายงานไว้ว่า น้ำหนักของรถยนต์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับการใช้พลังงาน การลดน้ำหนักรถยนต์ 1% สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 0.6%~0.8% [1] ในอุตสาหกรรมยานยนต์จึงมีการใช้เทคโนโลยีการลดน้ำหนักโดยใช้แผ่นโลหะที่เป็นวัสดุส่วนใหญ่ในรถยนต์ให้มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานและลดมลพิษจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ดังนั้น กลุ่มเหล็กกล้าชั้นสูง (Advanced High Strength Steel: AHSS) ซึ่งเป็นเหล็กคุณภาพสูง มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา จึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงของรถยนต์ โดยการลดน้ำหนัก ในขณะเดียวกันก็ให้ความปลอดภัยและความแข็งแรง แต่ในการใช้งานในอุตสาหกรรมยังคงต้องการความสมดุลที่ดีระหว่างความแข็งแรง ความเหนียว และต้นทุน ซึ่งเหล็กสองเฟส (Dual Phase Steel: DP) เป็นตัวเลือกที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าชั้นสูงตัวอื่น ๆ เนื่องจากมีความแข็งแรง มีความสามารถในการขึ้นรูป มีราคาค่อนข้างถูก และได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมยานยนต์สำหรับการใช้งานด้านกันชนและชิ้นส่วนอื่น ๆ ของยานยนต์ [2] เช่นเดียวกับเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel : SS) ที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนและการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง มีความแข็งแรง และรักษาคุณสมบัติทางกลไว้ได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง จึงมีการนำมาใช้งานในส่วนประกอบของยานยนต์ รวมทั้งในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติก (Austenitic) เป็นหนึ่งในเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีการนำมาใช้ในการผลิตส่วนประกอบของยานยนต์ [3], [4]

การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding : RSW) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยานยนต์ในการเชื่อมประกอบแผ่นโลหะหรือชิ้นส่วนที่วางทับซ้อนกัน ซึ่งเป็น

กระบวนการเชื่อมประสานที่สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ทำให้มีอัตราการผลิตสูง และเป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่มีประสิทธิภาพให้รอยเชื่อมที่แข็งแรงและสม่ำเสมอ [4] ในปัจจุบันยานพาหนะทั่วไปมีจุดเชื่อมประมาณ 2,000-5,000 จุด ทำให้คุณภาพและคุณสมบัติรอยเชื่อมของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดมีอิทธิพลอย่างมากต่อความปลอดภัยของยานยนต์ [5] ซึ่งมีงานวิจัยที่ศึกษาการเชื่อมความต้านทานจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟส (Dual Phase Steel: DP) กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติก (Austenitic) ทั้งงานวิจัยที่ไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติมพบว่า ส่วนใหญ่มีการศึกษาเพียงการหาค่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมและโครงสร้างจุลภาคเท่านั้น [4], [5] อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาการเปรียบเทียบการไม่ใช้โลหะเติมกับใช้โลหะเติมโดยตรงในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304

ปัญหานี้มีความต้องการที่จะศึกษาอิทธิพลของกระแสเชื่อมและระยะเวลาเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้างมหภาคและจุลภาคในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ทั้งกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระแสเชื่อมและระยะเวลาเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ทั้งกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม

## 1.3 ขอบเขตปัญหานี้

1. ตัวแปรในการศึกษา คือ กระแสเชื่อมมีค่าต่ำสุด 7 กิโลแอมแปร์ ค่ากลาง 8.5 กิโลแอมแปร์ และค่าสูงสุด 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อมมีค่าต่ำสุด 25 ไซเคิล ค่ากลาง 38 ไซเคิล และมีค่าสูงสุด 50 ไซเคิล
2. ใช้เหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ความยาว 25 มิลลิเมตร และความกว้าง 20 มิลลิเมตร
3. ใช้แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ (Cu 99.95%) เป็นโลหะเติมในกรณีใช้โลหะเติม ความหนา 0.2 มิลลิเมตร ความยาว 25 มิลลิเมตร และความกว้าง 20 มิลลิเมตร

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดในกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติมที่มีผลต่อโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมความต้านทานจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304
2. ทราบลักษณะโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อมชิ้นงานที่ถูกเชื่อมในกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม โดยกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทราบถึงผลของการใช้โลหะเติม ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด
4. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาหรือเพิ่มประสิทธิภาพในการเชื่อมชิ้นงานในอุตสาหกรรมยานยนต์

### 1.5 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินปริญญานิพนธ์ได้กำหนดระยะเวลาในการดำเนิน โดยเริ่มตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2564 และสิ้นสุดในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2565 โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงาน ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของปริญญานิพนธ์

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2564					พ.ศ. 2565				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาและระบุหัวข้อปริญญานิพนธ์ ที่มาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ ขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	→									
2. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง			→							
3. ออกแบบการทดลองและเตรียมชิ้นงานสำหรับการเชื่อม				→						
4. ทำการเชื่อมชิ้นงาน					→					
5. เตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค						→				
6. ตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน							→			
7. ศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน								→		
8. สรุปผลและเสนอแนวทางการเชื่อมที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น									→	
9. รวบรวมข้อมูลสำหรับการทำเล่มปริญญานิพนธ์										→

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ประกอบการศึกษาการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีไม่ใช่โลหะเติมและใช้โลหะเติม โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย ดังต่อไปนี้

- 2.1 การเชื่อมความต้าน (Resistance Welding)
- 2.2 พารามิเตอร์ของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด
- 2.3 อิเล็กโทรดที่ใช้ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด
- 2.4 การเชื่อมประสาน (Brazing)
- 2.5 เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ (Advanced High Strength Steel: AHSS)
- 2.6 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steels)
- 2.7 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM)
- 2.8 กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล (Confocal Microscope)
- 2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

#### 2.1 การเชื่อมความต้านทาน (Resistance Welding)

เป็นการเชื่อมโดยอาศัยหลักการความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างรอยต่อของชิ้นงานสามารถใช้ทำการเชื่อมได้ทั้งชิ้นงานที่มีความหนาและบาง เป็นการเชื่อมที่ไม่ต้องใช้ทักษะของผู้ทำการเชื่อมมากนัก กลุ่มกระบวนการเชื่อมนี้จะใช้เยอะในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ งานโลหะแผ่นบาง โดยทั่วไปกระบวนการเชื่อมนี้ทำให้เกิดมลพิษต่ำ แต่มีข้อจำกัดด้านการใช้งานที่ไม่หลากหลาย และอุปกรณ์มีราคาแพงสามารถแบ่งกลุ่มย่อยได้อีก 5 ประเภท คือ Spot Welding, Seam Welding, Projection Welding, Upset Welding, Flash Welding [6] ซึ่งในปฏิญญาวิพนธ์นี้สนใจและเลือกใช้ในศึกษาในส่วนของกระบวนการ Spot Welding

##### 2.1.1 การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (spot welding)

การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (spot welding) เป็นการเชื่อมความต้านทานชนิดหนึ่งที่เป็นที่นิยมใช้งานในการเชื่อมต่อแผ่นโลหะที่วางซ้อนกันโดยมีความหนาได้ถึง 3 มิลลิเมตร ในการเชื่อมนั้น อิเล็กโทรดสองชิ้นจะทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ชิ้นงานและกดชิ้นงานในเวลาเดียวกัน ข้อดีของกระบวนการนี้คือ ใช้พลังงานน้อย และไม่ทำให้ชิ้นงานเสียรูปทรงงานได้รวดเร็ว ทำเป็นระบบอัตโนมัติได้ง่าย และไม่จำเป็นต้องใช้ลวดเติม แต่ความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่ได้จะต่ำกว่าการเชื่อมด้วยกระบวนการอื่น ๆ ซึ่งรอยเชื่อมเกิดขึ้นได้

จากการทำงานร่วมกันอย่างเหมาะสมของความร้อน แรกกด และชิ้นงานเชื่อม โดยปริมาณความร้อนที่ได้ขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 อย่าง คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้า ความต้านทานของชิ้นงาน และเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ซึ่งกระบวนการเชื่อมนี้เป็นวิธีการสำคัญที่ใช้กันมากในงานอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ เช่น การเชื่อมประกอบตัวถัง โครงสร้าง เพราะสามารถเชื่อมประกอบชิ้นงานได้อย่างรวดเร็ว ทำให้มีอัตราการผลิตสูง มีผลกระทบทางความร้อนต่อการบิดรูปของชิ้นงานน้อย ไม่ต้องใช้วัสดุประสาน สามารถเชื่อมวัสดุได้หลากหลาย ผิวงานหลังการเชื่อมเรียบเนียน มีความแข็งแรงต่อจุดเพียงพอในการรับแรง ต้นทุนต่ำ ความน่าเชื่อถือสูงเหมาะสำหรับระบบอัตโนมัติ และรอยของการเชื่อมต้านทานแบบจุดนั้นจะเกิดขึ้นด้านในของรอยต่อ [7]

### 2.1.2 การเกิดความร้อน

การที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านความต้านทานของแผ่นโลหะจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งจากกฎของโอห์ม สามารถ คำนวณหาปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ 2.1

$$P = I^2R \quad (2.1)$$

โดยที่ P คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น (จากการแปลงกฎของโอห์มสามารถพิจารณาให้กำลังไฟฟ้าและความร้อนนั้นเหมือนกัน)

I คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ชิ้นงาน โดยคิดเป็นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) ต่อพื้นที่หน้าตัด หากใช้กระแสสูงจะมีปริมาณความร้อนเกิดขึ้นสูง ทำให้เวลาในการเชื่อมลดลงและสามารถยืดอายุการใช้งานของอิเล็กโทรดให้นานขึ้น การปรับกระแสเชื่อมจะต้องคำนึงถึงเวลาในการเชื่อม และกำลังของเครื่องเชื่อมเป็นสำคัญ

R คือ ความต้านทานไฟฟ้าเป็นจุดที่ส่งผลกระทบต่อการไหลของกระแสเชื่อมและการเกิดความร้อน โดยถ้าจุดที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูงจะมีความร้อนเกิดขึ้นสูงตามไปด้วย โดยค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมชิ้นงาน ประกอบด้วยความต้านทานทั้งหมด 7 จุด ดังรูปที่ 2.1

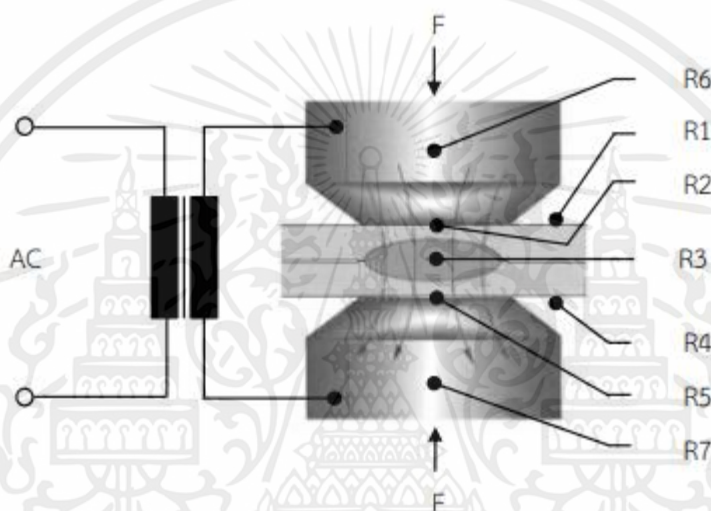
1. ค่าความต้านทาน “R1” คือ ความต้านทานของผิวชิ้นงานทดสอบด้านบน (Upper Specimen Resistance)
2. ค่าความต้านทาน “R2” คือ ความต้านทานระหว่างผิวชิ้นงานทดสอบบริเวณด้านบน (Upper Specimen Resistance) และผิวของอิเล็กโทรดด้านบน (Upper Electrode Contact Resistance)
3. ค่าความต้านทาน “R3” คือ ความต้านทานระหว่างผิวชิ้นงานทดสอบบริเวณด้านบน (Upper Specimen Resistance) และผิวของชิ้นทดสอบด้านล่าง (Lower Specimen Resistance)
4. ค่าความต้านทาน “R4” คือ ความต้านทานของผิวชิ้นงานทดสอบด้านล่าง (Lower Specimen Resistance)
5. ค่าความต้านทาน “R5” คือ ความต้านทานระหว่างผิวชิ้นทดสอบด้านล่าง (Lower Specimen Resistance) และผิวของหัวอิเล็กโทรดด้านล่าง (Lower Electrode Contact Resistance)

6. ค่าความต้านทาน “R6” คือ ความต้านทานของหัวอิเล็กโทรดด้านบน (Upper Electrode Resistance)

7. ค่าความต้านทาน “R7” คือ ความต้านทานของหัวอิเล็กโทรดด้านล่าง (Lower Electrode Resistance)

Asianlar ได้สรุปการหาค่าความต้านทานโดยรวมของการเชื่อมต้านทานแบบจุด ได้ตามสมการที่ 2.2 คือ [7]

$$R = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + R6 + R7 \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.1 การเกิดความต้านทานทางไฟฟ้าในการเชื่อมต้านทานแบบจุด [8]

## 2.2 พารามิเตอร์ของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลมากที่สุดในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสามารถ แบ่งออกเป็น 3 พารามิเตอร์ ดังนี้

### 2.2.1 กระแสที่ใช้ในการเชื่อม

ค่ากระแสไฟฟ้าเป็นตัวแปรที่สำคัญของการเชื่อมความต้านทาน ซึ่งจะส่งผลต่อความร้อนมากที่สุด ขนาดของรอยเชื่อม หรือที่เรียกว่า Welding Nugget จะขยายตัวอย่างรวดเร็วจากการเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้า แต่หากกระแสไฟฟ้ามากเกินไปอาจส่งผลให้ชิ้นงานระเบิด และเกิดความเสียหายต่อหัวอิเล็กโทรด โดยกระแสไฟฟ้าจะมีทั้งกระแสตรง และกระแสสลับขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องเชื่อม [7]

### 2.2.2 แรงกดที่ใช้ในการเชื่อม

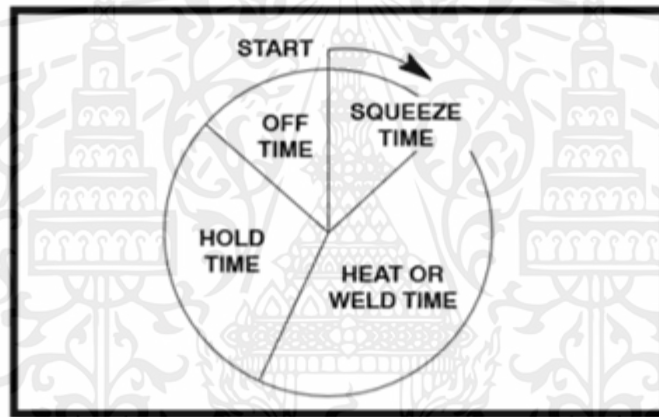
แรงกดของอิเล็กโทรดเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด จุดประสงค์ของการใช้แรงกดต่อการเชื่อมความต้านทานแบบจุด คือ การกดยึดชิ้นงานสองชิ้นเข้าด้วยกันในขั้นตอนเริ่มต้นการเชื่อมเพื่อทำให้เกิดความต้านทานไฟฟ้าและการนำไฟฟ้าที่จุดที่ต้องการเชื่อมไม่ได้ทำหน้าที่ในการจับยึดชิ้นงาน

ให้แน่นเข้าหากัน ด้วยเหตุนี้ในการเชื่อมด้านทานแบบจุด ชิ้นงานต้องใช้เครื่องมืออื่น ๆ เช่น อุปกรณ์จับยึด ในการจับยึดชิ้นงานให้แน่นและอยู่ในตำแหน่งการเชื่อมก่อนการกดของอิเล็กโทรดเสมอ

ค่าแรงกดที่มีค่ามากจะทำให้ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมนั้นมีค่าลดลงที่จุดสัมผัสระหว่างปลายอิเล็กโทรดและผิวชิ้นงาน ค่าแรงกดที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการนำความร้อนจากโลหะเชื่อม ค่ากระแสที่มีค่าสูงนั้นจำเป็นต้องใช้ค่าแรงกดที่มีค่ามาก ขณะที่แรงกดน้อยต้องการค่ากระแสที่มีค่าน้อย ดังนั้นในการใช้งานเครื่องเชื่อมจึงควรมีการใช้งานอย่างระมัดระวัง

### 2.2.3 เวลาในการเชื่อม

ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับแรงกดและกระแสที่ไหลผ่านแล้วอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญคือ เวลา เนื่องจากส่วนใหญ่การเชื่อมแบบจุดนั้นจะมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าในปริมาณที่สูง โดยผ่านจุดที่มีความต้านทานสูง เพื่อให้เกิดความร้อนสูงในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งเวลาในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ดังรูป 2.2 จะประกอบด้วยเวลา 4 ส่วนหลัก ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 รอบการเชื่อมแบบจุด [9]

1. เวลากด (Squeeze Time) คือ เวลาเริ่มต้นเข้ามาของกระแสเชื่อมและสัญญาณเชื่อมเป็นเวลาที่ยอดอิเล็กโทรดสัมผัสกับชิ้นงานและมีแรงกดเพียงพอก่อนที่กระแสเชื่อมถูกปล่อยออกมา
2. ระยะเวลาเชื่อม (Weld Time) คือ เวลาที่กระแสเชื่อมถูกปล่อยเข้ามาในชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมในช่วงลักษณะการเชื่อมหนึ่งครั้ง
3. เวลากดค้าง (Hold Time) ช่วงเวลาที่แรงกดของหัวอิเล็กโทรดยังคงกระทำต่อชิ้นงานหลังจากการเชื่อมในช่วงสุดท้ายสิ้นสุดลง ช่วงเวลานี้เป็นช่วงเวลาที่ปล่อยให้รอยเชื่อมมีเวลาแข็งตัวมากเพียงพอที่จะสร้างความแข็งแรงในรอยเชื่อม จนสามารถยอมรับได้
4. เวลาเย็นตัว (Off Time) ช่วงเวลาระหว่างเวลาที่หัวอิเล็กโทรดเสร็จสิ้นการทำงาน ณ ตำแหน่งที่ทำการเชื่อม และเคลื่อนที่ไปทำการเชื่อมที่ตำแหน่งต่อไป เป็นลักษณะการเชื่อมซ้ำรอบของการเชื่อมเดิม (กระแสเชื่อมและระยะเวลาเชื่อมยังคงเดิม)

ดังนั้นเพื่อให้ได้การเชื่อมจุดที่ดี จึงจำเป็นต้องควบคุมเวลาการไหลของกระแสเชื่อม ด้วยเหตุนี้เมื่อทำการพิจารณาเวลาในการเชื่อมเข้ามาเกี่ยวข้องแล้ว จะมีการเปลี่ยนแปลงสมการการเกิดความร้อน (H) ที่มีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า (I) ความต้านทานรวม (R) และ ระยะเวลาเชื่อม (t) และการสูญเสียความร้อน (K) ดังสมการที่ 2.3

$$H = I^2RTK \quad (2.3)$$

เวลาในการเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการเชื่อมต้านทานแบบจุด ถ้าเวลาในการเชื่อมยาวนานเกินไป อาจทำให้โลหะเชื่อมเกิดการหลอมละลายได้และอาจส่งผลทำให้เกิดโพรงอากาศภายในนอกจากนั้นอาจทำให้เกิดการดึงเอาโลหะหลอมเหลวออกจากพื้นที่การเชื่อม ซึ่งทำให้เกิดการลดพื้นที่หน้า ตัดลง เวลาในการเชื่อมที่สั้นเกินไป ทำให้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปได้ยากในโลหะเชื่อม และรอยน้กเกิดมีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตาม สมการความร้อนที่แสดงในสมการที่ 2.3 ไม่นิยมนำมาใช้มากนัก เนื่องจากค่าสูญเสียความร้อนนั้นมีค่าที่สามารถวัดได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงมีการประยุกต์ใช้สมการความร้อน (Q) ที่ก่อตัวในแนวเชื่อม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า (I) ความต้านทาน (R) และระยะเวลาเชื่อม (t) ดังสมการที่ 2.4 [9]

$$Q = I^2Rt \quad (2.4)$$

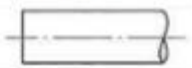

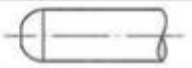
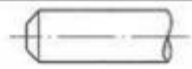


### 2.3 อิเล็กโทรดที่ใช้ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

หัวอิเล็กโทรด (Electrode Tip) เป็นส่วนที่สัมผัสกับชิ้นงาน โดยทองแดง คือ โลหะพื้นฐานที่ถูกนำมาใช้ทำเป็นอิเล็กโทรดในการเชื่อมแบบจุด หน้าที่หลังของอิเล็กโทรดคือ เพื่อเป็นตัวนำกระแสเชื่อมสู่ชิ้นงาน เพื่อเป็นจุดโฟกัสของแรงกดที่ใช้กับจุดเชื่อม เพื่อนำความร้อนจากผิวชิ้นงาน และเพื่อรักษาคุณสมบัติของรูปร่างและลักษณะของการนำความร้อนและไฟฟ้าขณะทำการเชื่อม

ปลายอิเล็กโทรดทำจากทองแดงผสมวัสดุอื่น ๆ โดยสมาคมผู้ผลิตเครื่องเชื่อมต้านทาน (The Resistance Welders Manufacturing Association: RWMA) ได้แบ่งกลุ่มปลายอิเล็กโทรดออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

1. กลุ่ม A ทองแดงผสม (Copper Based Alloy) และมีการแบ่งกลุ่มย่อยโดยใช้เลขโรมัน I-V โดยกลุ่ม I นั้นเป็นกลุ่มที่มีส่วนผสมเคมีใกล้เคียงกับทองแดงบริสุทธิ์มากที่สุด เมื่อตัวเลขแบ่งกลุ่มเพิ่มขึ้นความแข็ง และคุณสมบัติการอบอ่อนจะเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าการนำความร้อนและการนำไฟฟ้าลดลง

2. กลุ่ม B โลหะทนความร้อนสูง (Refractory Metal) เป็นโลหะผงขึ้นรูป ยกตัวอย่างเช่น การผสมระหว่างทองแดงและไททาเนียมที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันการเกิดการสึกกร่อน และความต้านทานการกัดกัดที่อุณหภูมิสูง ในกลุ่มนี้มีการแบ่งกลุ่มย่อยออกเป็นระดับ 10 11 12 13 และ 14 ยกตัวอย่างเช่น กลุ่ม 10 หมายถึงค่าสมบัติการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับร้อยละ 40 ของทองแดง ค่าการนำไฟฟ้านี้มีค่าลดลงเมื่อจำนวนตัวเลขเพิ่มขึ้น

Symbol	Reference	Shape
F	Flat	
R	Radius	
DR	Dome radius	
CF	Cone flat	
P	Point	
E	Off set	



รูปที่ 2.3 รูปร่างมาตรฐานของอเล็กโทรด [7]

รูปร่างมาตรฐานของเครื่องเชื่อมอเล็กโทรดทั้ง 6 รูปแบบ แสดงด้วยสัญลักษณ์อักษรตั้งแต่ A ถึง F ได้แก่

1. Type A หรือ Pointed คือ หัวอเล็กโทรดปลายแคบ เหมาะสำหรับงานเชื่อมเฉพาะจุดส่วนใหญ่
2. Type B หรือ Dome คือ หัวอเล็กโทรดปลายโค้งมน เป็นที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากการออกแบบที่รองรับปัญหาการจัดแนวที่ไม่ตรง เนื่องจากสามารถสัมผัสกับรัศมีได้ในระหว่างการเชื่อม
3. Type C หรือ Flat คือ หัวอเล็กโทรดแบน ใช้สำหรับการเชื่อมส่วนของเครื่องสำอาง และการปรับสมดุลความร้อน ช่วยลดการเยื้องของรอยเชื่อม โดยจะเกิดการกระจายแรง และกระแสไฟฟ้าออกไปบนพื้นที่ผิวขนาดใหญ่
4. Type D หรือ Offset คือ หัวอเล็กโทรดที่ออกแบบมาเพื่อให้สามารถเชื่อมเฉพาะจุดในที่ที่แน่นหนาได้ อาจเป็นหน้าแปลนขนาดเล็ก หรือในมุมแคบ
5. Type E หรือ Truncated คือ หัวอเล็กโทรดหัวตัด ใช้กับงานที่ต้องการปรับปรุงพื้นผิวงานเชื่อมที่เรียบ โดยองศาของหัวตัดมีผลต่อความร้อนในการเชื่อม
6. Type F หรือ Radius คือ หัวอเล็กโทรดหน้ารัศมีกว้าง มักใช้ในการเชื่อมอลูมิเนียม รัศมีที่มีขนาดใหญ่จะให้จุดสัมผัสที่ดีในการเชื่อมผ่านอลูมิเนียม และยังคงมีพื้นที่ผิวเพียงพอในการควบคุมไม่ให้เกิดช่องว่างระหว่างการเชื่อม [7]

## 2.4 การเล่นประสาน (Brazing)

การเล่นประสานหรือการบัดกรีแข็งคือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกันซึ่งโลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ โดยการให้ความร้อนแก่รอยต่อที่อุณหภูมิสูงกว่า 450 °C แต่ไม่ถึงกับอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะพื้นื่อนำมาเล่นประสาน วิธีนี้ใช้โลหะเติมที่เป็นโลหะที่ไม่อยู่ในจำพวกเหล็ก เช่น ลวดเงินหรืออาจเป็นโลหะผสม เช่น ลวดทองเหลือง ลวดทองแดงผสมฟอสฟอรัสก็ได้ ซึ่งโลหะเติมจะเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 450 °C แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะพื้นื่อนำมาทำการเล่นประสานโลหะเติมจะถูกเติมลงไปที่ยรอยต่อของโลหะพื้น โดยโลหะเติมที่หลอมละลายจะแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วยปฏิกิริยาเคมี ซึ่งข้อดีในการเล่นประสาน คือ สามารถทำได้รวดเร็ว สามารถต่อโลหะต่างชนิดและความหนาเข้าด้วยกันได้ แต่มีข้อควรระวังที่ต้องคำนึงถึงในเรื่องฟลักซ์ที่ใช้ เพราะสารเคมีอาจมีอันตรายต่อร่างกาย จึงควรทำการเล่นประสานในที่อากาศถ่ายเทสะดวก ลักษณะงานที่ใช้การต่อโลหะด้วยการเล่นประสาน ได้แก่ งานต่อคมตัดคาร์ไบด์ติดกับด้ามมีด งานต่อท่อทองแดงในระบบเครื่องทำความเย็นหรืองานเชื่อมต่อท่ออลูมิเนียมบาง ๆ เป็นต้นข้อดีของการเล่นประสาน ได้แก่ ใต้รอยต่อที่เล็กและไม่ต้องตกแต่งภายหลังการเชื่อม ใช้ความร้อนต่ำ ลดการเปลี่ยนรูปของโลหะชิ้นงาน ไม่มีประกายไฟและการกระเด็นของเม็ดโลหะขณะทำการเล่นประสาน สำหรับชิ้นงานที่ต้องการตกแต่งภายหลังการเชื่อมก็ตกแต่งได้ไม่ยาก ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการต่อยึดชิ้นงาน และที่สำคัญสามารถต่อวัสดุต่างชนิดที่ยากแก่การเชื่อมด้วยวิธีอื่น ๆ ได้

กระบวนการเล่นประสาน เมื่อพิจารณาตามวิธีการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน สามารถแบ่งกระบวนการเล่นประสานได้ดังต่อไปนี้ [10]

### 2.4.1 การเล่นประสานโดยใช้ทอร์ชเชื่อม (Torch Brazing)

การเล่นประสานโดยทอร์ชเชื่อม เป็นการเล่นประสานโดยใช้หัวทอร์ชเชื่อมหัวเดียว หรือหลายหัวเผาชิ้นงานให้ร้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่ต้องการและก๊าซที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง ได้แก่ อะเซทิลีน โพรเพน และก๊าซหุงต้มทั่วไป [10] ในการเลือกใช้ชนิดเปลวไฟในกระบวนการเล่นประสานจะใช้เปลวไฟรีดิวซิ่ง (Reducing Flame) เพื่อยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) [11]

### 2.4.2 การเล่นประสานในเตา (Furnace Brazing)

วิธีนี้เป็นการประสานงานที่สามารถวางประกอบกันได้ง่าย โดยวางบนสายพานเติมโลหะเติม และฟลักซ์ไว้ที่รอยต่อแล้วให้สายพานจะเคลื่อนพานผ่านเข้าไปในเตาโดยที่งานจะเล่นประสานจนเสร็จสิ้นเมื่อเคลื่อนออกมาจากเตา การเล่นประสานแบบนี้เหมาะสมกับงานที่ต้องการผลผลิตจำนวนมาก ส่วนโลหะเติมที่เติมบนรอยต่ออาจเป็นชนิดเส้น แผ่นบาง ผง ก้อนขนาดเล็ก หรือครีม เป็นต้น เตาที่ใช้ให้ความร้อนแก่งานเพื่อให้เกิดการเล่นประสาน ส่วนใหญ่จะเป็นเตาที่ควบคุม บรรยากาศให้เป็นแก๊สรีดิวซิ่ง เช่น ไฮโดรเจน แก๊สเอ็กโซเธอร์มิก หรือเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอน หรือฮีเลียม ถ้าเป็นเตาขนาดใหญ่มักนิยมใช้แบบสุญญากาศเพื่อป้องกันออกซิเดชันบางครั้งไม่ต้องใช้ฟลักซ์ เตาสุญญากาศเหมาะกับการเล่นประสานงานที่ใช้กับอากาศยานหรืออุปกรณ์นิวเคลียร์ ถ้าคงสภาพสุญญากาศโดยใช้ปั๊มสุญญากาศออกอย่างต่อเนื่อง สารต่าง ๆ ที่ระเหยขณะเล่นประสานจะถูกดูดออกไปด้วย อย่างไรก็ตามโลหะผสมหรือโลหะเติมหลายชนิดไม่เหมาะกับ

การเล่นประสานในเตาสุญญากาศ เพราะอาจสูญเสียสารหรือธาตุผสมที่มีจุดเดือดต่ำหรือความดันไอสูงไป [10]

#### 2.4.3 การเล่นประสานโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Brazing)

กระบวนการเล่นประสานโดยการเหนี่ยวนำอาศัยกระแสไฟฟ้าความถี่สูงเหนี่ยวนำงานจนเกิดความร้อนสูงพอที่จะทำให้โลหะเติมละลาย โดยจะวางงานที่ต้องการเล่นประสานไว้ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่สูง โดยชิ้นงานจะไม่สัมผัสกับขดลวดเหนี่ยวนำโดยตรง ช่วงความถี่ตั้งแต่ 5 kHz ถึง 5 MHz แหล่งพลังงานความถี่สูงมักจะให้ความร้อนที่พื้นผิว ในขณะที่ความถี่ต่ำทำให้เกิดการซึมผ่านความร้อนเข้าไปในชิ้นงาน กระบวนการนี้สามารถใช้เพื่อตอบสนองความต้องการผลผลิตที่ต่ำจนถึงสูงได้ [11]

#### 2.4.4 การเล่นประสานด้วยความต้านทาน (Resistance Brazing)

การเล่นประสานด้วยความต้านทานเป็นการเล่นประสานโดยอาศัยความร้อนจากการต้านทานไฟฟ้าของโลหะชิ้นงาน โดยชิ้นงานจะเป็นส่วนหนึ่งของวงจรไฟฟ้าส่วนโลหะเติมควรเติมก่อนที่จะเล่นประสานและใช้ฟลักซ์เสมอ นอกจากจะควบคุมบรรยากาศ เมื่อจะเล่นประสานให้วางชิ้นงานระหว่างแท่งอิเล็กโทรด (2 แท่ง) และกดอิเล็กโทรดเข้ากับชิ้นงานพร้อมกับปล่อยกระแสไฟในขณะเดียวกัน ซึ่งเมื่อกระแสไหลผ่านชิ้นงานจะทำให้รอยต่อร้อน (เนื่องจากความต้านทาน) โลหะเติมจะละลายและไหลเข้าตามซอกผิวสัมผัสและต้องให้อิเล็กโทรดกดชิ้นงานจนกว่าโลหะเติมจะแข็งตัว [10]

#### 2.4.5 การเล่นประสานแบบการจุ่ม (Dip Brazing)

การประสานแบบการจุ่มนี้มี 2 วิธี คือ

1. จุ่มในน้ำยาสารเคมี (Chemical Bath Dip Brazing) โดยเติมโลหะเติมบนรอยต่อแล้วจุ่มชิ้นงานลงในเกลือเหลว เกลือจะเป็นตัวให้ความร้อนแก่ชิ้นงานและโลหะเติมช่วยป้องกันชิ้นงานจากออกซิเจน ซึ่ง อาจไม่จำเป็นต้องใช้ฟลักซ์ ภาชนะบรรจุเกลืออาจเป็นแก้วหรือหม้อที่เหมาะสม

2. จุ่มในโลหะเหลว (Molten Metal Bath Brazing) โดยจุ่มชิ้นงานลงในโลหะเติมซึ่งหลอมเหลวบรรจุอยู่ในแก้วหรือที่เหมาะสม ที่สำคัญคือชิ้นงานต้องสะอาดและต้องใช้ฟลักซ์คลุมผิวโลหะเติมเหลวตลอดเวลาเพื่อป้องกันออกซิเจน [10]

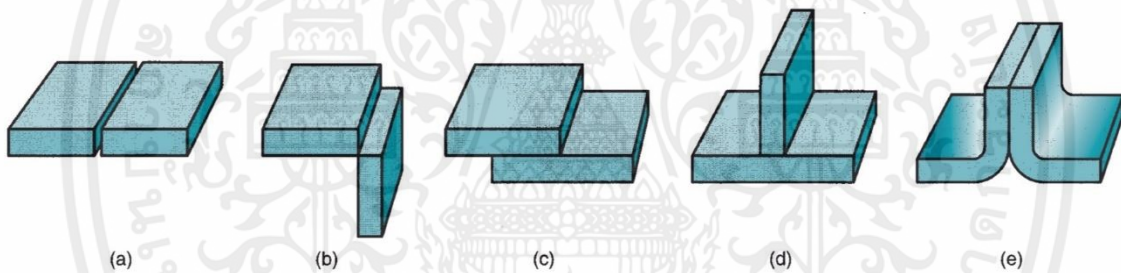
#### 2.4.6 การเล่นประสานด้วยอินฟราเรด (Infrared Brazing)

การเล่นประสานด้วยอินฟราเรดเป็นการประสานโดยอาศัยความร้อนอินฟราเรด (Infrared Heat) ซึ่งแผ่รังสีออกจากรังสีสีแดงในสเปกตรัมหลอดไฟที่เป็นแหล่งความร้อนในการเล่นประสาน เรียกว่า Quartz Lamp สามารถสร้างพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีได้สูงถึง 5,000 วัตต์ หลอดไม่จำเป็นต้องมีรูปร่างตามลักษณะงาน แต่อาจ ใช้วิธีสะท้อนความร้อนให้ไปรวมตัวที่จุดหนึ่งตามต้องการ กระบวนการนี้เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการเชื่อมชิ้นงานที่บางมาก โยปกติจะมีความหนาน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร รวมถึงโลหะที่มีรูปร่างแบบรังผึ้งหรือแบบ โลหะโฟม (Honeycomb Structures and Metal Foam) ชิ้นงานที่จะเล่นประสานต้องประกอบและอยู่ในตำแหน่งที่สามารถรับความร้อนได้ดี บางครั้งจะวางชิ้นงานและหลอดไฟให้ความร้อนไว้ภายในภาชนะที่สามารถสูบลมอากาศออกได้ (เพื่อทำให้เป็นสุญญากาศขณะเล่นประสาน) หรือสามารถควบคุมบรรยากาศ (อาจใช้แก๊สเฉื่อย) หลังจากนั้นจึงเริ่มให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนถึงอุณหภูมิเล่นประสาน

### 2.4.7 ชนิดของรอยต่อในการเชื่อมประสาน

ในการต่อวัสดุ มีรอยต่อแบบต่าง ๆ ได้แก่ รอยต่อชน รอยต่อมุม รอยต่อขอบ รอยต่อเกย และรอยต่อตัวที ลักษณะรอยต่อต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.4

1. รอยต่อชน (Butt Joint) เป็นการนำขอบชิ้นงานทั้งสองชิ้นมาชนกัน โดยผิวของงานทั้งสองอยู่ในระนาบเดียวกัน ลักษณะของการต่อชนแบ่งออกเป็นหลายแบบขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน เช่น ต่อชนไม่เว้นช่องว่าง ต่อชนไม่บากงาน และต่อชนรูปตัววี เป็นต้น
2. รอยต่อมุม (Conner Joint) เป็นการนำขอบชิ้นงานสองชิ้นมาชนกันโดยผิวของชิ้นงานทั้งสอง ทำมุมประมาณ  $90^{\circ}$  (จะมากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้)
3. รอยต่อเกย (Lap Joint) เป็นวิธีการนำชิ้นงานสองชิ้นมาวางซ้อนกันหรือเกยกัน
4. รอยต่อตัวที (Tee Joint) เป็นการนำขอบของชิ้นงานชิ้นหนึ่งตั้งบนผิวชิ้นงานอีกชิ้น มีลักษณะเป็นรูปตัวที
5. รอยต่อขอบ (Edge Joint) เป็นการนำขอบชิ้นงานทั้งสองมาชนกันในลักษณะผิวของชิ้นงาน ทั้งสองมาทาบแนบชิดกัน ทำให้ขอบของงานทั้งสองชิดกันและขนานกันตลอดแนว



รูปที่ 2.4 ลักษณะรอยต่อ (a) รอยต่อชน (b) รอยต่อมุม (c) รอยต่อเกย (d) รอยต่อตัวที (e) รอยต่อขอบ [11]

### 2.4.8 โลหะเติม (Filler Metal)

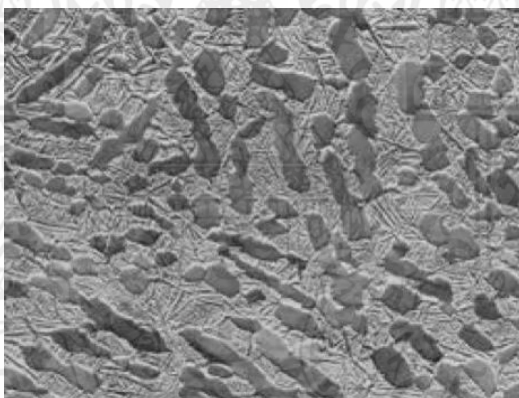
การเลือกใช้โลหะเติมจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับโลหะพื้น (Base Metal) ซึ่งจุดหลอมเหลวของโลหะเติมที่เลือกใช้จะต้องไม่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะพื้น (Base Metal) เมื่อโลหะเติมอยู่ในสถานะของเหลวจะต้องมีค่าแรงตึงผิวต่ำเพื่อให้มีการกระจายตัว (Wettability) ที่ดีบนผิว มีความสามารถในการไหล (Fluidity) สูงซึ่งทำให้โลหะเติมไหลเข้าไปในรอยต่อได้ดีและให้ความแข็งแรงของรอยต่อที่เหมาะสมกับการใช้งาน นอกจากนี้โลหะเติมที่ใช้ต้องไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีหรือทางกายภาพกับชิ้นงาน เช่น การเกิดการกัดกร่อน สำหรับโลหะเติมที่ใช้ในการเชื่อมประสานนั้นมีหลายรูปแบบ เช่น เป็นแท่งโลหะ เป็นแผ่นโลหะ อยู่ในรูปครีม (Paste) อยู่ในรูปผง (Powder) หรืออาจจะอยู่ในรูปแบบอื่น ๆ ที่เหมาะสมกับการใช้งาน [12] ซึ่งรูปแบบของโลหะเติมที่นำมาใช้ในการทดลองนี้เป็นแบบแผ่น (แผ่นทองแดงบริสุทธิ์)

## 2.5 เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ (Advanced High Strength Steel: AHSS)

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ หรือ AHSS นิยมใช้ในงานโครงสร้างและอุตสาหกรรมยานยนต์ เนื่องจากมีน้ำหนักที่เบา แต่มีความแข็งแรงที่สูง เป็นวัสดุที่มีความซับซ้อน โดยมีองค์ประกอบทางเคมี ที่ถูกคัดเลือกมาเป็นอย่างดีและมีโครงสร้างทางจุลภาคที่หลากหลาย ประกอบไปด้วยสองเฟสหรือ มากกว่า เช่น เฟอร์ไรต์ มาร์เทนไซต์ เบนไนท์ ออสเทนไนท์เหลือค้าง โดยมีลักษณะการกระจายตัว และปริมาณที่แตกต่างกันไป ซึ่งเป็นผลมาจากการควบคุมกระบวนการให้ความร้อนและความเย็น อย่างถูกต้องและแม่นยำ นอกจากนี้ยังใช้กลไกการเพิ่มความแข็งแรงที่หลากหลาย เพื่อให้ได้คุณสมบัติด้านความแข็งแรง (Strength), ความเหนียว (Ductility), ความแกร่งหรือความเหนียว (Toughness) และความล้า (Fatigue)

ประเภทของ AHSS จะแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยตามลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคก่อน ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้ Dual Phase (DP), Complex-Phase (CP), Ferritic-Bainitic (FB), Martensitic (MS), Transformation-Induced Plasticity (TRIP), Hot-Formed (HF) และ Twinning-Induced Plasticity (TWIP) จากนั้นค่อยแบ่งออกตามค่าต่ำสุดของความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength: UTS) และค่าความเค้นจุดคราก (Yield Strength) [13]

### 2.5.1 เหล็กกล้าสองเฟส (Dual Phase Steel: DP)



รูปที่ 2.5 ภาพระดับจุลภาคของเหล็กกล้าสองเฟส (Dual Phase Steel) [13]

เหล็กกล้าสองเฟสมีโครงสร้างทางจุลภาคที่ประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์เป็นส่วนใหญ่และมีมาร์เทนไซต์อยู่ประมาณ ไม่เกิน 30% โดยมาร์เทนไซต์จะกระจายตัวอยู่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างสามเกรนของเฟอร์ไรต์ ซึ่งเกรน ของเฟอร์ไรต์นั้นแท้จริงแล้วจ่อเนื่องกันเป็นโครงข่าย มาร์เทนไซต์ซึ่งมีความแข็งแรงสูง กระจายตัวอยู่ใน เนื้อพื้นเฟอร์ไรต์ซึ่งมีความเหนียวมากจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและทำให้เหล็กกล้าสองเฟส แสดง ลักษณะเด่นคือ มีอัตราส่วนของค่าความเค้นจุดครากต่อค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดต่ำ ค่า Strain hardening exponent สูง และมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมาก ส่วนผสมทางเคมีโดยทั่วไปของกลุ่มเหล็กกล้าสองเฟส ควรมีธาตุ C ไม่เกิน 0.18 % และมีการเจือด้วย Mn และ Si สูงกว่าเหล็กกล้ารีดร้อนทั่วไป การผลิตเหล็กกล้าสองเฟส ในรูปของผลิตภัณฑ์รีดร้อนอาศัยการควบคุมอัตราการเย็นตัวของออสเทนไนท์ภายหลังสิ้นสุดการรีด ส่วนกรณีของการ

รีดเย็น ผลิตได้โดยการอบอ่อนต่อเนื่องหรือแม้แต่ในการนำไปชุบสังกะสีร้อน โดยควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงระหว่างอุณหภูมิวิกฤติ (ออสเทนไนท์ + เฟอร์ไรต์) เพื่อให้เกิดเฟอร์ไรต์ในปริมาณที่เหมาะสม จากนั้นจึงทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วเพื่อให้ออสเทนไนท์ที่เหลือเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ [13]

## 2.6 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steels)

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steels) เป็นเหล็กที่มีสมบัติทนต่อการเกิดการกัดกร่อนเนื่องมาจากการเติมธาตุโครเมียม (Chromium) ลงไประหว่างกระบวนการหลอมเหล็ก ในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งมีปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก โดยการที่เติมโครเมียมลงไปจะทำให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์ ( $\text{Cr}_x\text{O}_y(\text{OH})_z$ ) ปกคลุมผิวเหล็กไว้ ทำให้เนื้อเหล็กไม่สามารถทำปฏิกิริยากับบรรยากาศภายนอกเกิดเป็นสนิมได้ และยังเป็นเหล็กที่มีความแข็งแรง สามารถรักษาคุณสมบัติทางกลไว้ได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมแบ่งออกเป็น 5 ประเภทหลักตามลักษณะของโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ดังต่อไปนี้ [14]

### 2.6.1 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic Grade)

เป็นเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของคาร์บอน (Carbon) นิกเกิล (Nickel) ในปริมาณต่ำ และมีโครเมียม (Chromium) เป็นส่วนผสมหลักในปริมาณร้อยละ 12-27 ขึ้นอยู่กับแต่ละเกรด โดยความต้านทานต่อการกัดกร่อนจะขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุโครเมียมเป็นสำคัญ โดยเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของ เหล็กกล้าทั่วไป ไม่สามารถทำการชุบแข็ง (Hardening) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ และมีสมบัติที่แม่เหล็กสามารถดูดติดได้ เป็นกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นพื้นฐานของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งหมด [14]

### 2.6.2 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic Grade)

เป็นกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) ซึ่งเป็นผลจากเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้มีธาตุประกอบไปด้วย คาร์บอน (Carbon) โครเมียม (Chromium) ประมาณร้อยละ 18-25 และนิกเกิล (Nickel) ประมาณร้อยละ 1-20 [15] หรือธาตุแมงกานีส (Manganese) ขึ้นอยู่กับแต่ละเกรด โครงสร้างจุลภาคแบบออสเทนไนต์จะมีสมบัติโดดเด่นด้านการยืดตัวสูงกว่าโครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์ ทำให้สามารถขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ได้โดยไม่เสี่ยงต่อการแตกร้าว นอกจากนี้โครงสร้างออสเทนไนต์ยังเป็นโครงสร้างที่แม่เหล็กไม่สามารถดูดติดได้ แต่ถ้าหากทำการขึ้นรูปมาแล้วจะทำให้แม่เหล็กดูดติดบริเวณที่ทำการขึ้นรูปได้ เนื่องจากโครงสร้างบริเวณที่ถูกขึ้นรูปจะเปลี่ยนแปลงไปจากโครงสร้างออสเทนไนต์แล้ว เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเป็นกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมที่นิยมใช้งานอย่างกว้างขวางมากที่สุดประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิมในอุตสาหกรรมต่าง ๆ รวมไปถึงการนำไปใช้งานในส่วนประกอบของรถยนต์ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ซึ่งเกรดที่รู้จักกันและมีการนำไปใช้อย่างมาก เช่น AISI 304 304L 316 และ 316L เป็นต้น [14]

### 2.6.3 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (Martensitic Grade)

เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีส่วนผสมของธาตุโครเมียม (Chromium) ประมาณร้อยละ 12 [15] โมลิบดีนัม (Molybdenum) และคาร์บอน (Carbon) มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกแต่มี

ปริมาณคาร์บอนที่สูงกว่า เพื่อให้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้สามารถทำการชุบแข็ง (Hardening) ซึ่งภายหลังการชุบแข็งจะได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็ง การใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก ส่วนใหญ่คำนึงถึงความแข็งแรงและความทนทานต่อการเกิดสนิมในระดับปานกลางเท่านั้น เนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่สูงจะทำให้ความต้านทานต่อการกัดกร่อนลดลง ตัวอย่างการใช้งาน เช่น ลูกปืน เพลลา เฟือง สปริง เป็นต้น [14]

#### 2.6.4 เหล็กกล้าไร้สนิมสองเฟส (Duplex Grade)

เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างจุลภาคผสมระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก แต่มีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 2 ชนิด โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้เกิดจากการมีปริมาณของธาตุนิเกิล (Nickel) ไม่ถึงร้อยละ 8 และมีปริมาณของธาตุโครเมียม (Chromium) สูงมากกว่าร้อยละ 20 เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีราคาค่อนข้างแพง เนื่องจากมีความแข็งแรงและความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง (เนื่องจากปริมาณโครเมียมสูง) [14]

#### 2.6.5 เหล็กกล้าไร้สนิมแบบตกผลึกแข็ง (Precipitation-Hardening Grade, PH Grade)

เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีส่วนผสมของธาตุโครเมียม (Chromium) ประมาณร้อยละ 17 ธาตุนิเกิล ทองแดง และไนโอเบียมผสมอยู่ด้วย มีคุณสมบัติของการต้านทานการกัดกร่อน และความแข็งแรงทนทาน ได้ดี เหล็กกล้ากลุ่มนี้สามารถทำการชุบแข็งได้จึงเหมาะสำหรับทำแกนปั๊ม หัววาล์ว [15]

### 2.7 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM)

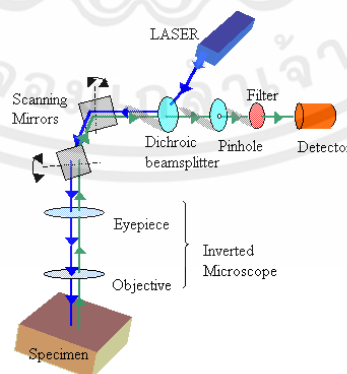
กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) จัดอยู่ในเกณฑ์แบ่งตามลักษณะสัญญาณ ซึ่งประกอบไปด้วยเลนส์นูน สำหรับรวมแสงส่องลงบนชิ้นงาน โดยในใต้ชิ้นงานนั้นจะมีเลนส์นูนอย่างน้อย 2 ตัว ไว้ทำหน้าที่ขยายขนาดของวัตถุต่อเนื่องกัน เลนส์ตัวที่ 1 จะสร้างภาพขยายชิ้นงานที่กำลังศึกษา ส่วนเลนส์ตัวที่ 2 นั้นมีหน้าที่ขยายภาพจากเลนส์ที่ 1 อีกทีหนึ่ง ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาจึงเป็นภาพที่มีกำลังขยายสูงกว่าการใช้เพียงหนึ่งเลนส์ เหมาะกับการใช้งาน ได้แก่ ใช้ดูลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานในรูปแบบ 2 มิติ โดยเราสามารถกำหนดกำลังขยายตามความต้องการได้ วิธีการใช้งาน คือ วางชิ้นงานให้อยู่บริเวณที่แสงผ่านและให้ตัวลำกล้องเลื่อนเข้ามาอยู่ใกล้ชิ้นงาน จากนั้นปรับความชัดของภาพด้วยปุ่มปรับภาพหยาบและปุ่มปรับภาพละเอียด ลักษณะตัวอย่างงานที่นำมา ใช้จะเป็นชิ้นงานที่มีขนาดเล็กพอที่จะสามารถวางลงบนแท่นวางวัตถุได้ โดยชิ้นงานจะต้องผ่านการเจียรนัย (Grinding), การขัดเงา (Polishing) และการกัดกร่อน (Etching) [16], [17]



รูปที่ 2.6 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) [17]

## 2.8 กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล (Confocal Microscope)

กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล หรือสามารถเรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่า กล้องจุลทรรศน์สแกนการสแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล (Laser Scanning Confocal Microscopy: LSCM) เนื่องจากกล้องชนิดนี้สามารถทำการวิเคราะห์ภาพออกมาเป็นภาพ 3 มิติได้ โดยจากการใช้โปรแกรมจากเครื่องคอมพิวเตอร์เป็นตัวประมวลผลภาพ สำหรับภาพ 2 มิตินั้น จะใช้ Scanning Mirrors ในการถ่ายภาพในมุมมองต่างๆ จากการถ่ายภาพในบริเวณแต่ละจุด ซึ่งเมื่อเลื่อนถ่ายภาพในแต่ละจุดแบบต่อเนื่องกันจนได้เป็นพื้นที่ระนาบขนาดหนึ่ง เราจะสามารถใช้โปรแกรมจากเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการวิเคราะห์เป็นภาพ 3 มิติออกมาได้ ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลจะใช้ในการวิเคราะห์เซลล์ เนื้อเยื่อหรือวัตถุต่างๆ ที่ต้องการวัดขนาดความหนา โดยหลักการทำงาน คือ อาศัยแสงเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสง ส่องผ่านไปยังวัตถุ เมื่อวัตถุได้รับพลังงานจากแสงเลเซอร์ ก็จะปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบของการเรืองแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 [18]



รูปที่ 2.7 หลักแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล [18]



รูปที่ 2.8 กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล [19]

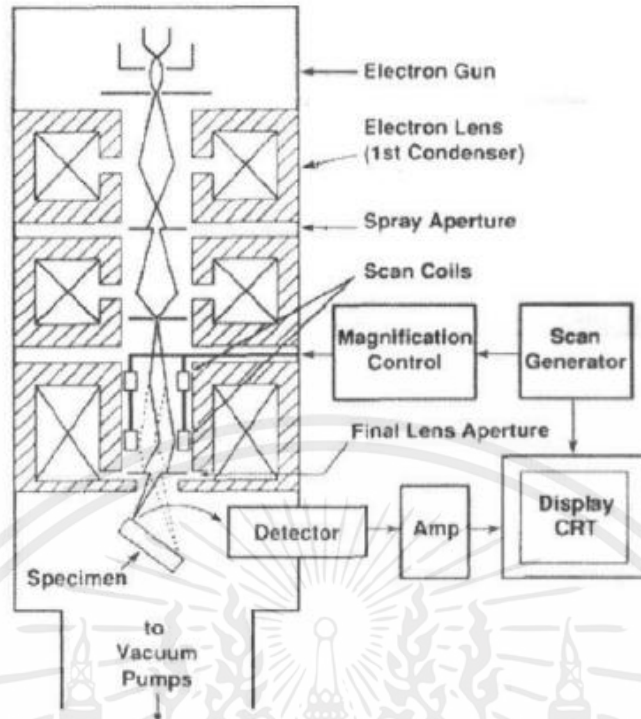
## 2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดหนึ่ง que ถ่ายภาพชิ้นงานโดยอาศัยหลักการกราดไปบนพื้นผิวตัวอย่างด้วยลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงที่ถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิด (Electron Gun) เมื่ออิเล็กตรอนดังกล่าวกระทบกับพื้นผิวของวัตถุ องค์ประกอบของพื้นผิว และคุณสมบัติอื่น ๆ จะปล่อยสัญญาณที่สามารถนำไปประมวลผลและให้ข้อมูลเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ องค์ประกอบของพื้นผิว และคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น คุณสมบัติการนำไฟฟ้า เป็นต้น ส่วนประกอบของ SEM ประกอบไปด้วยส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ ซึ่งมีสภาพสุญญากาศด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ในช่วง 0-30 kV (บางเครื่องทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางของการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) 2 ชุดหรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมด้วยแอฟเพอเจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิดที่มีลักษณะต่างๆกันตามลักษณะการใช้งาน

จุดเด่นของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) คือ มีระยะชัดลึก และมีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (Spatial Resolution) สูงเนื่องจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้คุณสมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นที่สั้น ทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีอำนาจแยกแยะเชิงระยะได้มากถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบ ๆ ได้ทำให้ได้ภาพที่มีความชัดลึกสูง [20]

### 2.9.1 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ส่วนประกอบและหลักการทำงานโดยสังเขปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงในรูปที่ 2.13 ส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่มาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพสุญญากาศด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ในช่วง 0-30 kV (บางเครื่องทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางของการเคลื่อนที่นั้นจะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) 2 ชุด หรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมด้วยแอฟเพอเจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิดที่มีลักษณะต่าง ๆ กันตามลักษณะการใช้งาน [21]



รูปที่ 2.9 แสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) [20]

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser Lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (Electron Optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective Lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron Beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (Scan Coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้ จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่าง ๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) มีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่าง ๆ เหล่านี้ แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้น ได้แก่

1. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons: SE) สัญญาณชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้ เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image: SEI)

2. อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons: BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว นอกเหนือจากสัญญาณเหล่านี้แล้วยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น เอ็กซ์เรย์ (X-Ray) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) โอลิเจนอิเล็กตรอน (Auger Electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป [21]

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานสำหรับการศึกษาการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติมประกอบไปด้วย

- 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
- 3.2 การออกแบบการทดลอง
- 3.3 กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด
- 3.4 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองสำหรับการศึกษาเรื่องการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม มีการใช้วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง ดังต่อไปนี้

1. ชิ้นงานสำหรับการทดลองในปริญญานิพนธ์นี้ใช้โลหะพื้น (Base Metal) ต่างชนิดกัน คือ ระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ซึ่งส่วนประกอบทางเคมีของ ๑ เหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 แสดงดังตาราง 3.1 และขนาดของโลหะพื้นทั้งสองชนิดที่ใช้สำหรับการทดลองเป็นดังต่อไปนี้ ขนาดของเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ความยาว 25 มิลลิเมตร และความกว้าง 20 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 [22], [23] และเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 [24]

Chemical Compositions	Materials	
	AISI 304 Stainless Steel (wt%)	DP1180 Dual Phase Steel (wt%)
C	0.08 Max	0.18
Si	0.75 Max	0.60
Mn	2.00 Max	2.40

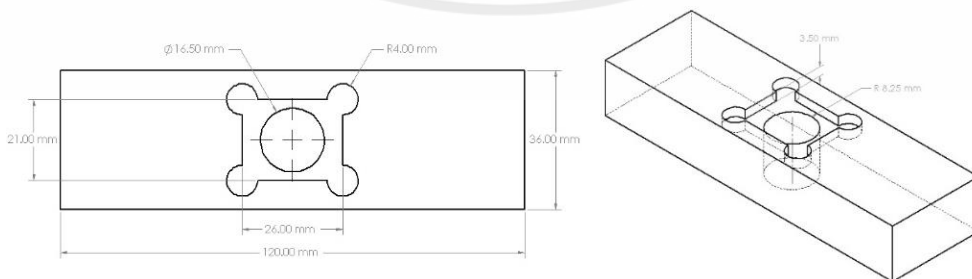
Cr	18.00 – 20.00	0.02
Ni	8.00 – 10.50	-
P	0.045 Max	0.10
S	0.03 Max	0.005
Mo	-	0.01
Cu	-	0.02
Al	-	0.05
Fe	Balance	Balance

2. โลหะเติม (Filler Metal) ใช้เป็นแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ (Cu 99.95%) ความหนา 0.2 มิลลิเมตร ความยาว 25 มิลลิเมตร และความกว้าง 20 มิลลิเมตร ในกรณีใช้โลหะเติมของการเชื่อมความต้านทานจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ซึ่งส่วนประกอบทางเคมีของโลหะเติม แสดงดังตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะเติมแบบแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ (Cu 99.95%) [25], [26]

Filler Metal	Chemical Component (wt%)			Solidus Temperature (°C)	Liquidus Temperature (°C)	Brazing Temperature Range (°C)
	Cu	O	Other			
pure copper sheet	99.95	0.0010	0.05	1083	1083	1093-1149

3. ฟิกซ์เจอร์ (Fixture) ใช้ในการจับยึดชิ้นงานและกำหนดตำแหน่งชิ้นงานในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด



รูปที่ 3.1 ฟิกซ์เจอร์ (Fixture)

4. เครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดเครื่องหมายการค้า PANASONIC รุ่น YR500-CM2 ชนิดไฟฟ้า กระแสสลับ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ แรงดันไฟฟ้า 50 กิโลโวลต์แอมแปร์ หัวกตอเล็กโทรดทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร รัศมีความโค้ง 50 มิลลิเมตร

5. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM) รุ่น Olympus BX53M

6. กล้องจุลทรรศน์สแกนการสแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล (Laser Scanning Confocal Microscopy: LSCM) รุ่น OLS500 3D Measuring Laser Microscope

7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

8. การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS)

### 3.2 การออกแบบการทดลอง

#### 1. ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ในปฏิญานพจน์นี้ใช้ตัวแปร 2 ตัวแปร ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และการเปรียบเทียบโครงสร้างของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ทั้งกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม ได้แก่ ตัวแปรกระแสเชื่อมและตัวแปรระยะเวลาเชื่อม โดยแต่ละตัวแปรศึกษาทั้งหมดตัวแปรละ 3 ระดับ แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางค่าตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม (Filler Metal)

กรณีเชื่อม	ตัวแปร					
	กระแสเชื่อม (กิโลแอมแปร์)			ระยะเวลาเชื่อม (ไซเคิล)		
	ค่าต่ำ	ค่ากลาง	ค่าสูง	ค่าต่ำ	ค่ากลาง	ค่าสูง
ไม่ใช้โลหะเติม	7	8.5	10	9	10	11
ใช้โลหะเติม	7	8.5	10	9	10	11

#### 2. การทดลองสำหรับการเชื่อมความต้านแบบจุดกรณีไม่ใช้โลหะเติมเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

โดยทำการทดลองสำหรับการเชื่อมความต้านแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีใช้โลหะเติมทั้งหมด 9 การทดลอง ซึ่งในแต่ละการทดลองจะทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรกระแสเชื่อมและตัวแปรระยะเวลาเชื่อมที่มีค่าตัวแปรละ 3 ระดับ ดังตารางที่ 3.3 ไปจนครบทุกค่าตัวแปร ครบทั้ง 9 การทดลอง

3. การทดลองสำหรับการเชื่อมความต้านแบบจุดกรณีใช้โลหะเติมเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยจะทำการทดลองสำหรับการเชื่อมความต้านแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีไม่ใช้โลหะเติมทั้งหมด 9 การทดลอง ซึ่งในแต่ละการทดลองจะทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรกระแสเชื่อมและตัวแปรระยะเวลาเชื่อมที่มีค่าตัวแปรละ 3 ระดับดังตารางที่ 3.3 ไปจนครบทุกค่าตัวแปร ครบทั้ง 9 การทดลอง

### 3.3 กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการเชื่อมความต้านแบบจุดเพื่อนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคในกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติมระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 และ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304

#### 3.3.1 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุด กรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม (Filler Metal)

1. เหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ความยาว 25 มิลลิเมตร และความกว้าง 20 มิลลิเมตร ทั้งหมดจำนวน 18 ชิ้น แบ่งเป็นชิ้นงานสำหรับกรณีไม่ใช้โลหะเติมจำนวน 9 ชิ้น และชิ้นงานสำหรับกรณีใช้โลหะเติมจำนวน 9 ชิ้น

2. เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ความยาว 25 มิลลิเมตร และความกว้าง 20 มิลลิเมตร ทั้งหมดจำนวน 18 ชิ้น แบ่งเป็นชิ้นงานสำหรับกรณีไม่ใช้โลหะเติมจำนวน 9 ชิ้น และชิ้นงานสำหรับกรณีใช้โลหะเติมจำนวน 9 ชิ้น

3. โลหะเติมแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ (Cu 99.95%) ความยาว 25 มิลลิเมตร ความกว้าง 20 มิลลิเมตร และความหนา 0.2 มิลลิเมตร จำนวน 9 ชิ้น สำหรับการเชื่อมความต้านแบบจุดกรณีใช้โลหะเติม

#### 3.3.2 การทำความสะอาดชิ้นงานเพื่อทำการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุด กรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม (Filler Metal)

ก่อนการนำชิ้นงานไปทำการเชื่อมความต้านแบบจุดจะต้องทำความสะอาดชิ้นงานก่อน เพื่อทำการกำจัดคราบคราบสกปรก อย่างเช่น คราบน้ำมันหรือสิ่งสกปรกที่เกาะอยู่บนผิวของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังเป็นการช่วยให้ชิ้นงานสามารถเชื่อมติดกันได้ง่ายขึ้น โดยแบ่งเป็นการทำความสะอาดโลหะพื้น (Base Metal) และโลหะเติมดังนี้

1. ทำความสะอาดโลหะพื้น (Base Metal) ได้แก่ เหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ดังต่อไปนี้

หลังจากการเตรียมเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ได้ตามขนาดที่ต้องการแล้ว นำโลหะพื้น (Base Metal) ทั้ง 2 ชนิดนี้มาล้างทำความสะอาดด้วยอะซิโตน (Acetone) จากนั้นนำเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 มาทำความสะอาดต่อด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol) เป็นขั้นตอนสุดท้าย

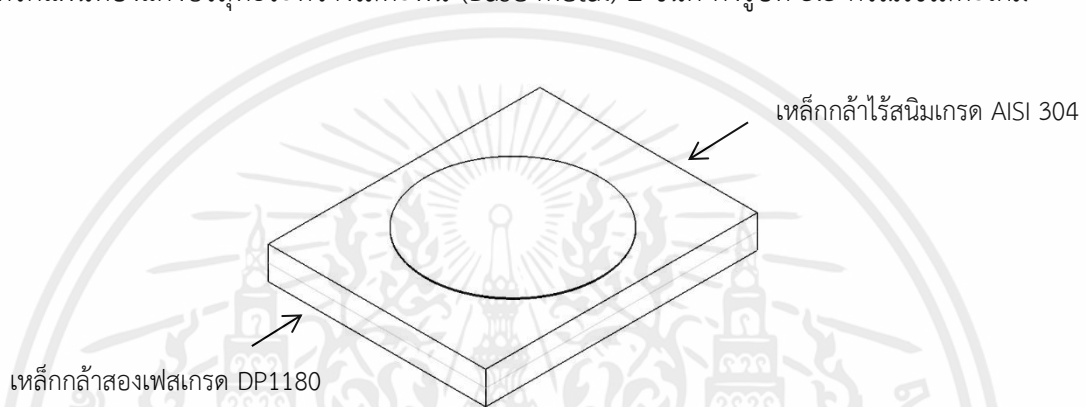
2. ทำความสะอาดโลหะเติม (Filler Metal) ได้แก่ แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ (Cu 99.95%) ดังต่อไปนี้

หลังจากการเตรียมแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ (Cu 99.95%) ได้ตามขนาดที่ต้องการแล้ว นำมาทำความสะอาดด้วยอะซิโตน (Acetone) จากนั้นทำความสะอาดขั้นสุดท้ายด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol)

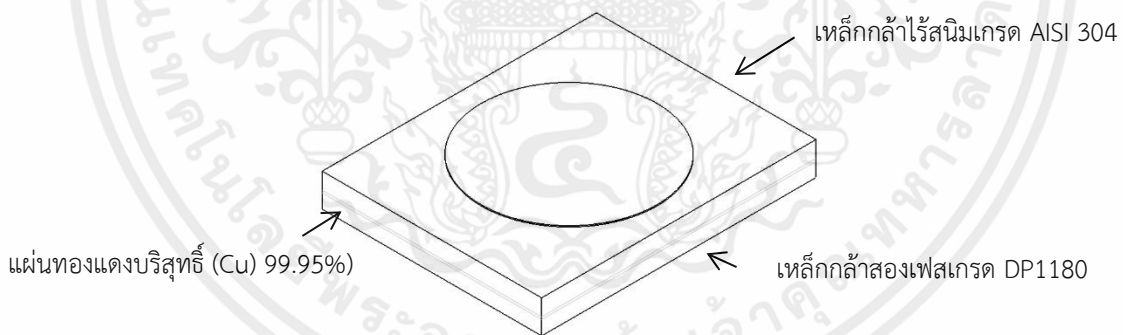
### 3.3.3 กระบวนการเชื่อมความต้านแบบจุด กรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม (Filler Metal)

ขั้นตอนกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม ประกอบไปด้วยต่อไปนี้

1. นำชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมความต้านแบบจุดมาวางในฟิกซ์เจอร์ (Fixture) โดยวางเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ไว้บนเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 ดังรูปที่ 3.2 กรณีไม่ใช้โลหะเติม และในกรณีใช้โลหะเติม จะแทรกแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ระหว่างโลหะพื้น (Base Metal) 2 ชนิด ดังรูปที่ 3.3 กรณีใช้โลหะเติม



รูปที่ 3.2 การวางชิ้นงานกรณีไม่ใช้โลหะเติม (Filler Metal)



รูปที่ 3.3 การวางกรณีใช้โลหะเติม (Filler Metal)

2. ถูฟิกซ์เจอร์ (Fixture) ให้อยู่ในตำแหน่งเชื่อมระหว่างหัวกดอิเล็กโทรดของเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด เครื่องหมายการค้า PANASONIC รุ่น YR500-CM2 และทำการตรวจสอบว่า ชิ้นงานมีความพร้อมสำหรับการเชื่อมความต้านทานจุดทั้งกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม

3. ทำการปรับค่าตัวแปรกระแสเชื่อม และระยะเวลาเชื่อม ตามตารางที่ 3.3 ทั้งกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม บนเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด เครื่องหมายการค้า PANASONIC รุ่น YR500-CM2

4. ทำการเชื่อมชิ้นงาน โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ด้วยเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุด เครื่องหมายการค้า PANASONIC รุ่น YR500-CM2 ชนิดไฟฟ้ากระแสสลับ หัวกดอิเล็กโทรดทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร

5. หลังจากเชื่อมชิ้นงานด้วยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดทั้งกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติมเสร็จเรียบร้อยแล้ว ปลดชิ้นงานให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

### 3.4 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค

หลังจากทำการทดลองเชื่อมชิ้นงาน โดยวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ทั้งกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม ตามเงื่อนไขการออกแบบการทดลองแล้ว

ขั้นตอนต่อไปเป็นการเตรียมชิ้นงาน เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

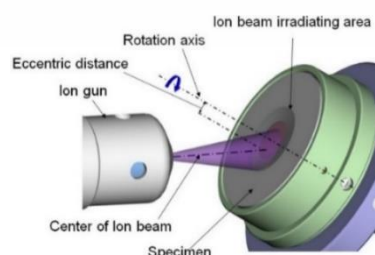
1. Sectioning คือ การทำชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จเรียบร้อยแล้วมา Cross-Section บริเวณตรงกลางรอยเชื่อม โดยใช้เครื่องตัดโลหะ Metallography Cutting Machine เพื่อให้ชิ้นงานมีขนาดเล็กพอที่จะใส่ลงไป ในช่องวางชิ้นงานตรงฐานกล้องจุลทรรศน์

2. Cold Mounting ชิ้นงานโดยทำการเตรียมท่อพีวีซีเพื่อเป็นใช้เป็นแบบหล่อให้มีขนาดความสูงกว่าชิ้นงานที่ทำการ Cross-Section ประมาณ 4-5 มิลลิเมตร นำพลาสติกแรปห่อบริเวณปากท่อพีวีซีที่จะใช้เป็นฐานหล่อแล้วนำยางมารัดรอบท่อพีวีซี จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการ Cross-Section มาวางตรงกลางแบบหล่อ แล้วจึงเทเรซินที่ผสมสาร Epoxy ลงในแบบหล่อ โดยสารชนิดนี้มีแรงยึดเกาะระหว่างชิ้นงานกับเรซินดีมาก และยังสามารถใช้กับระบบสุญญากาศได้

3. Grinding หรือการขัดหยาบ โดยนำชิ้นงานมาขัดกระดาษทรายเบอร์ 400 800 1200 2000 และ 5000 ตามลำดับเพื่อเปิดหน้าชิ้นงาน โดยเปลี่ยนทิศทางการขัดทุกครั้งที่เปลี่ยนเบอร์กระดาษทราย เพื่อให้แน่ใจว่า รอยกระดาษทรายเบอร์เก่าหมดไปแล้ว

4. Polishing หรือการขัดละเอียด คือ การขัดรอยกระดาษทรายให้หมดไป โดยนำไปขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินาขนาด 1 ไมครอน

5. กัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยเทคนิค Ion-Milling โดยใช้ปืนไอออนพลังสูงเพื่อยิงเข้าไปที่ผิวหน้าของชิ้นงาน ซึ่งไอออนพลังงานสูงจะทำปฏิกิริยาด้วยอะตอมของพื้นผิวที่มีขอบเขตหลวม ๆ ในชั้นอนุฐานด้านบนเพื่อแสดงพื้นผิวที่สะอาดระดับอะตอมทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานเรียบยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.4 การกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยเทคนิค Ion-Milling [27]

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินปริญญานิพนธ์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิธีการดำเนินปริญญานิพนธ์สำหรับการศึกษาการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม ประกอบไปด้วย

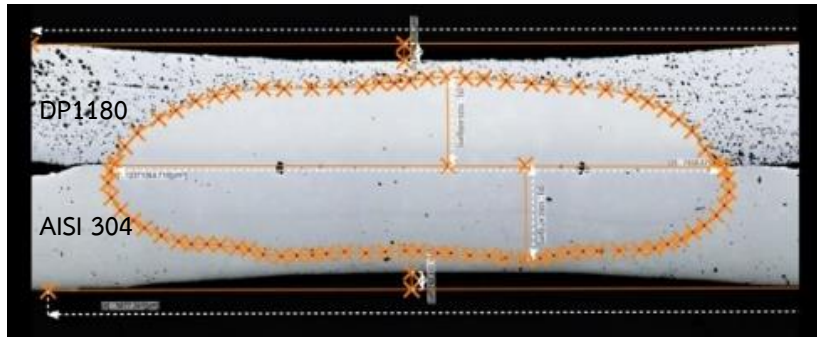
- 4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาครอยเชื่อม
- 4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

#### 4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาครอยเชื่อม

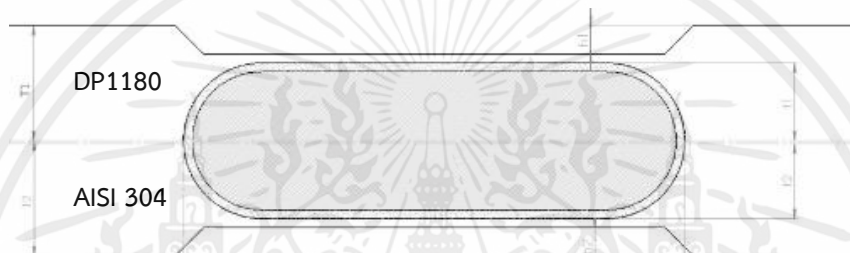
การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและคุณภาพของรอยเชื่อมในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ทั้งกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม โดยใช้เงื่อนไขค่าปัจจัยกระแสเชื่อมและระยะเวลาเชื่อมตามที่กำหนด และแรงกด 3.4 กิโลนิวตัน ในทุกชิ้นงานเชื่อม โดยพิจารณาโครงสร้างมหภาคทั้งหมด 6 องค์ประกอบ ได้แก่ ระยะการซึมลึก (Penetration:  $t_1$ ,  $t_2$ ) ระยะการกดลึก (Indentation Depth:  $h_1$ ,  $h_2$ ) ขนาดของรอยเชื่อม (Nugget Diameter:  $d_i$ ) พื้นที่ของรอยเชื่อม (Nugget Area) ดังรูป 4.1-4.4 ตัวอย่างการวัดโครงสร้างมหภาคทั้ง 6 องค์ประกอบ และผลจากการวัดขนาดโครงสร้างมหภาคทั้ง 6 องค์ประกอบ แบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม แสดงดังตารางที่ 4.1-4.2



รูปที่ 4.1 ลักษณะองค์ประกอบของการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมในกรณีไม่ใช้โลหะเติม



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างโครงสร้างมหภาคจากการทดลองกรณีไม่ใช้โลหะเต็ม



รูปที่ 4.3 ลักษณะองค์ประกอบของการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมในกรณีใช้โลหะเต็ม



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างโครงสร้างมหภาคจากการทดลองกรณีใช้โลหะเต็ม

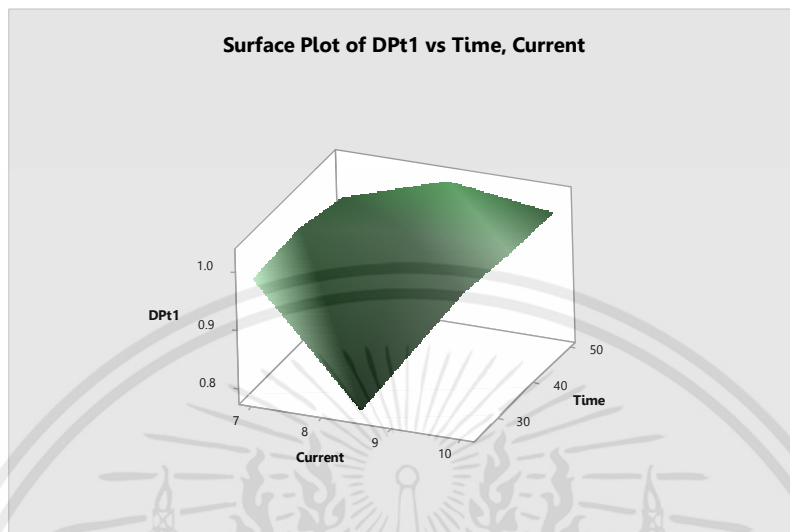
#### 4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของกรณีไม่ใช่โลหะเติม

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคกรณีไม่ใช่โลหะเติม

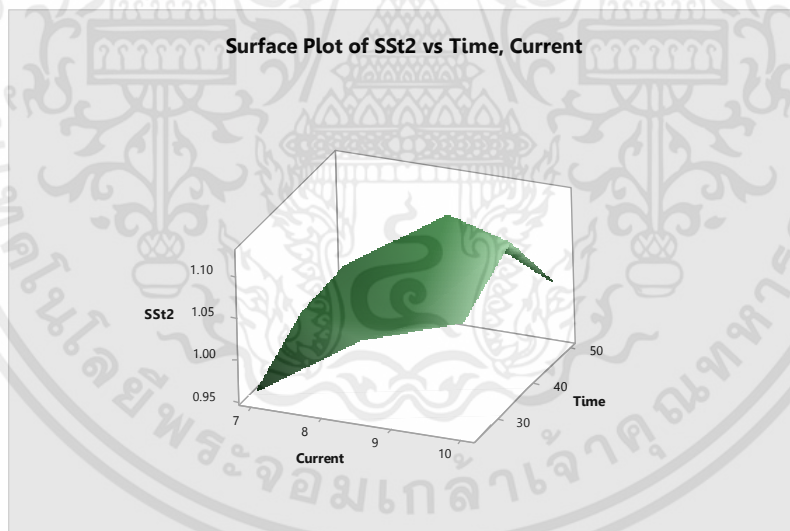
เงื่อนไข	ระยะเวลาซีมติก ฝั่ง DP1180 (t1) มิลลิเมตร	ระยะเวลาซีมติก ฝั่ง AISI 304 (t2) มิลลิเมตร	ระยะการกดลึก ฝั่ง DP1180 (h1) มิลลิเมตร	ระยะการกดลึก ฝั่ง AISI 304 (h2) มิลลิเมตร	ขนาดของรอย เชื่อม (di) มิลลิเมตร	พื้นที่รอยเชื่อม (Area) ตาราง มิลลิเมตร
1	0.982169	0.958205	0.144721	0.154702	6.116549	10436.720870
2	0.991256	0.997755	0.176293	0.146368	5.642453	9520.544397
3	0.969602	1.002092	0.149976	0.142442	5.047401	8224.332995
4	0.787435	1.039044	0.184475	0.167024	6.078087	9156.063440
5	1.017610	1.000262	0.192693	0.192664	7.169546	12077.938607
6	1.025606	1.082471	0.194538	0.197171	7.038675	12271.264710
7	1.016158	1.080956	0.184302	0.219171	7.879682	14094.757539
8	1.006789	1.121409	0.232589	0.224288	7.792852	13512.919396
9	1.000290	1.022601	0.251491	0.268145	6.937820	11749.719047

หมายเหตุ 1 เงื่อนไขเป็นไปตามตารางที่ ก.1 แสดงค่ากระแสเชื่อมและระยะเวลาเชื่อมในแต่ละเงื่อนไข

#### 4.1.1.1 การวิเคราะห์ระยะการซึมลึก (Penetration: $t_1$ , $t_2$ )



รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์การซึมลึกฝั่งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กรณีไม่ใช่โลหะเต็ม

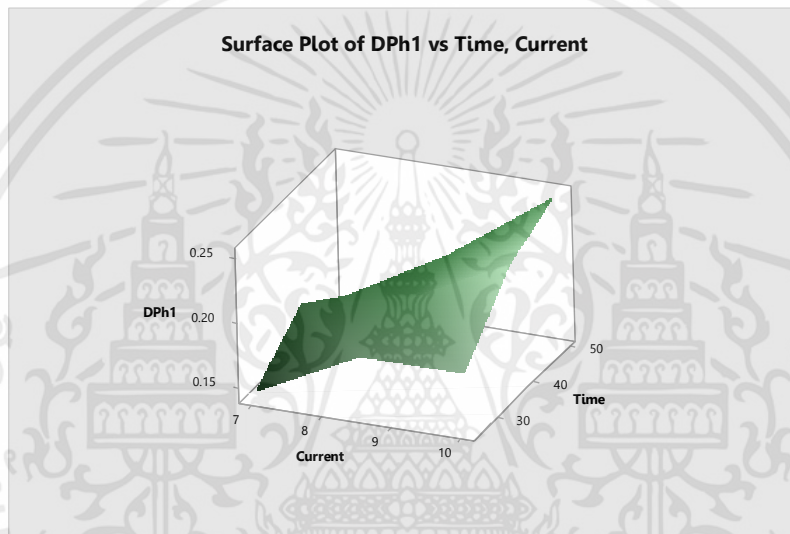


รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์การซึมลึกฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีไม่ใช่โลหะเต็ม

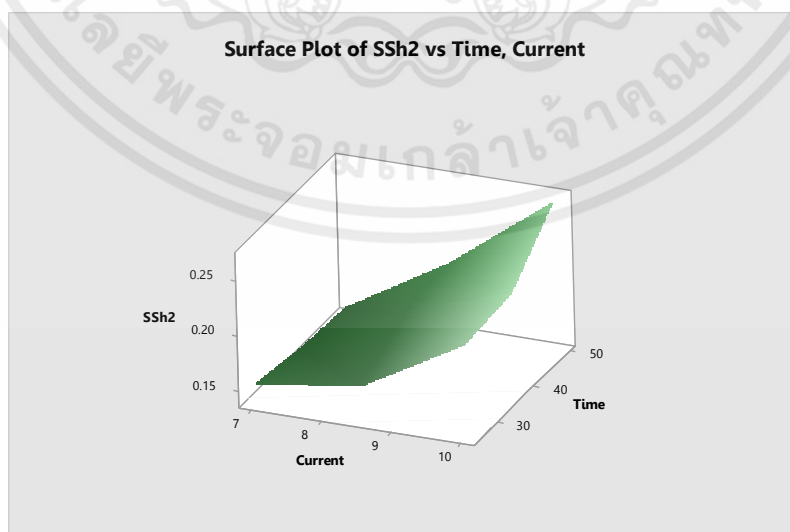
จากการพิจารณารูปกราฟ 3 มิติ (Surface Plot) จากโปรแกรม MINITAB Version 17 ในส่วนของระยะการซึมลึกของฝั่งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 ในกรณีไม่ใช่โลหะเต็ม ดังรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่ากระแสเชื่อมมีผลต่อระยะการซึมลึกเล็กน้อย ขณะที่ระยะเวลาเชื่อมนั้นแทบจะไม่ส่งผลต่อระยะการซึมลึก เงื่อนไขที่ได้ค่าระยะการซึมลึกมากที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล เงื่อนไขที่ได้ค่าระยะการซึมลึกลดน้อยที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล เมื่อลองพิจารณาจากค่าในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ค่าของระยะเวลาการเชื่อมลึกลึกมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนระยะเวลาการเชื่อมลึกลึกของฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ในกรณีไม่ใช่โลหะเติม ดังรูปที่ 4.6 ทั้งกระแสเชื่อมและระยะเวลาเชื่อมมีผลต่อระยะเวลาการเชื่อมลึกลึก เมื่อค่ากระแสเชื่อมเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าระยะเวลาการเชื่อมลึกลึกมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ในทุกระดับปัจจัย ส่วนระยะเวลาเชื่อมเมื่อมีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าระยะเวลาการเชื่อมลึกลึกเพิ่มมากขึ้นแต่เมื่อถึงจุดหนึ่งจะทำให้ค่าระยะเวลาการเชื่อมลึกลึกมีค่าลดต่ำลงมา และเงื่อนไขที่ได้ค่าระยะเวลาการเชื่อมลึกลึกมีค่ามากที่สุด คือ เงื่อนไขค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล เงื่อนไขที่ได้ค่าระยะเวลาการเชื่อมลึกลึกมีน้อยที่สุด คือ เงื่อนไขค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล

#### 4.1.1.2 การวิเคราะห์ระยะเวลาการกดลึก (Indentation Depth: h1, h2)



รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การกดลึกฝั่งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กรณีไม่ใช่โลหะเติม

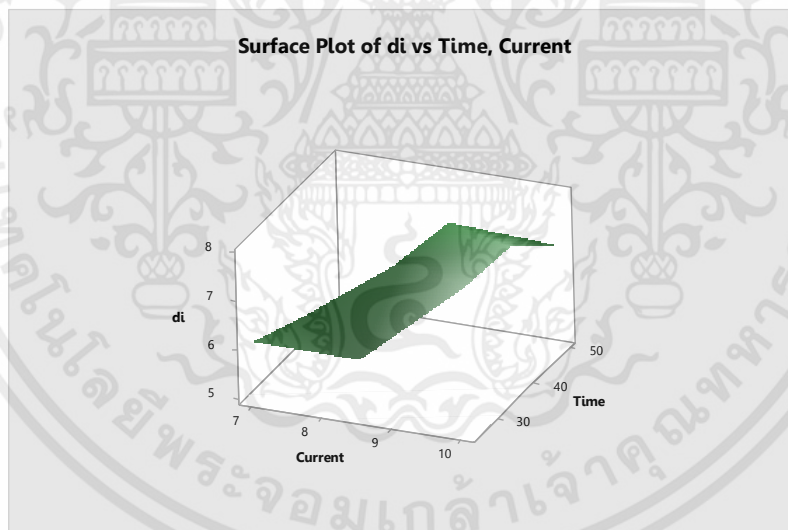


รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์การกดลึกฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีไม่ใช่โลหะเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพิจารณารูปกราฟ 3 มิติ (Surface Plot) จากโปรแกรม MINITAB Version 17 ในส่วนของระยะการกดลึงของฝั่งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 ในกรณีไม่ใช้โลหะเติม ดังรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่ากระแสเชื่อมมีผลต่อระยะการกดลึงเพียงเล็กน้อย ซึ่งเมื่อกระแสเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะการกดลึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อถึงจุดหนึ่งค่าระยะการกดลึงก็จะลดต่ำลง ในขณะที่ระยะเวลาเชื่อมส่งผลต่อระยะการกดลึงเพียงเล็กน้อย เมื่อระยะเวลาเชื่อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าระยะการกดลึงเพิ่มขึ้น เงื่อนไขที่ได้ค่าระยะการกดลึงมากที่สุดที่เห็นได้จากกราฟ คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล เงื่อนไขที่ได้ค่าระยะการกดลึงน้อยที่สุดที่เห็นได้จากกราฟ คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล เมื่อลองพิจารณาจากค่าในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ค่าของระยะการกดลึงมีค่าต่างกันเล็กน้อย ส่วนระยะการกดลึงของฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ในกรณีไม่ใช้โลหะเติม ดังรูปที่ 4.8 ทั้งกระแสเชื่อมและระยะเวลาเชื่อมเมื่อมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าระยะการกดลึงเพิ่มมากขึ้น และเงื่อนไขที่ส่งผลให้ระยะการเชื่อมลึงมีค่ามากที่สุด คือ เงื่อนไขค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล เงื่อนไขที่ส่งผลให้ระยะการเชื่อมลึงมีน้อยที่สุด คือ เงื่อนไขค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล

#### 4.1.1.3 การวิเคราะห์ขนาดของรอยเชื่อม (Nugget Diameter: di)

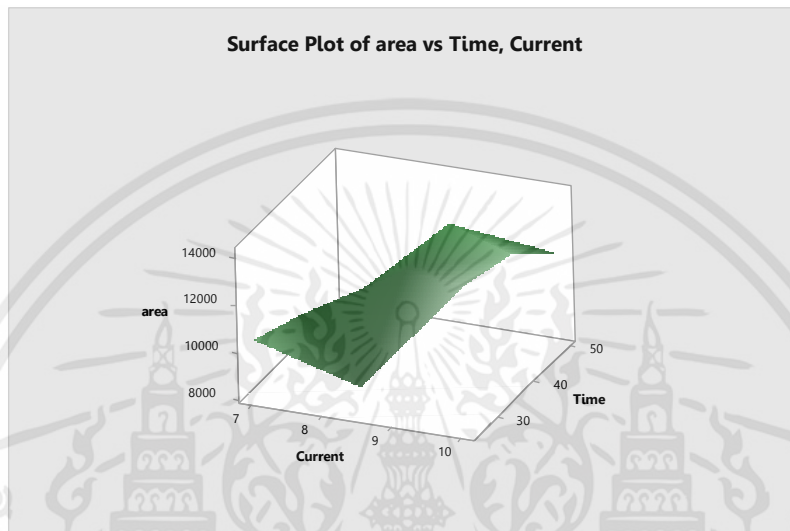


รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ขนาดของรอยเชื่อม กรณีไม่ใช้โลหะเติม

จากการพิจารณารูปกราฟ 3 มิติ (Surface Plot) จากโปรแกรม MINITAB Version 17 ในส่วนของขนาดของรอยเชื่อมในกรณีไม่ใช้โลหะเติม ดังรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกกระแสเชื่อมมีผลต่อขนาดของรอยเชื่อมลดลงเพียงเล็กน้อยจนถึงจุดหนึ่ง จากนั้นขนาดของรอยเชื่อมจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในขณะที่ระยะเวลาเชื่อมส่งผลต่อระยะการกดลึงเพียงเล็กน้อย เมื่อระยะเวลาเชื่อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าขนาดของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง จากนั้นขนาดของรอยเชื่อมจะมีค่าลดลงเล็กน้อย เงื่อนไขที่ได้ค่าขนาดของรอยเชื่อม

มากที่สุดที่เห็นได้จากกราฟ คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล เงื่อนไขที่ได้ค่านาขนาดของรอยเชื่อมน้อยที่สุดที่เห็นได้จากกราฟ คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล เมื่อลองพิจารณาจากค่าในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ค่าของขนาดของรอยเชื่อมแต่ละค่ามีค่าต่างกัน

#### 4.1.1.4 การวิเคราะห์พื้นที่ของรอยเชื่อม (Nugget Area)



รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ของรอยเชื่อม กรณีไม่ใช้โลหะเติม

จากการพิจารณารูปกราฟ 3 มิติ (Surface Plot) จากโปรแกรม MINITAB Version 17 ในส่วนของพื้นที่ของรอยเชื่อมในกรณีไม่ใช้โลหะเติม จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่ากระแสเชื่อมมีผลต่อพื้นที่ของรอยเชื่อม ในขณะที่ระยะเวลาเชื่อมนั้นไม่ค่อยส่งผลต่อขนาดของพื้นที่รอยเชื่อม เงื่อนไขที่ได้ค่าพื้นที่ของรอยเชื่อมมากที่สุด คือ กระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล เงื่อนไขที่ได้ค่าพื้นที่ของรอยเชื่อมน้อยที่สุด คือ กระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล

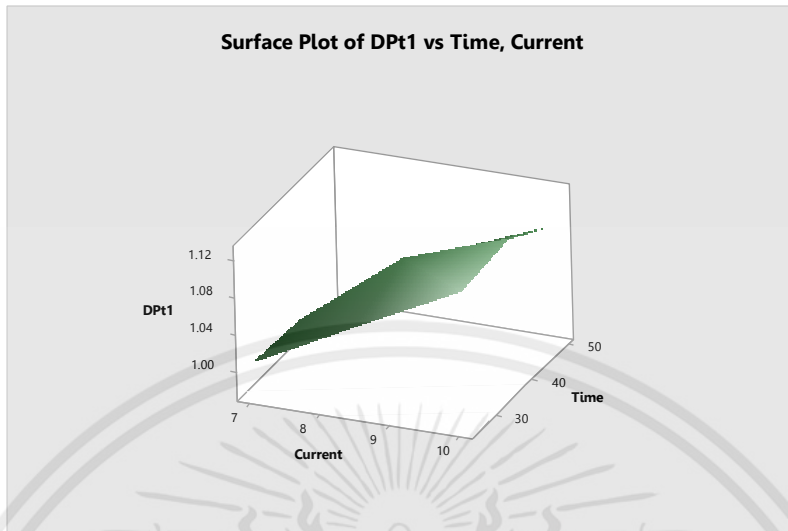
#### 4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาครอยเชื่อมของกรณีใช้โลหะเติม

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคกรณีใช้โลหะเติม

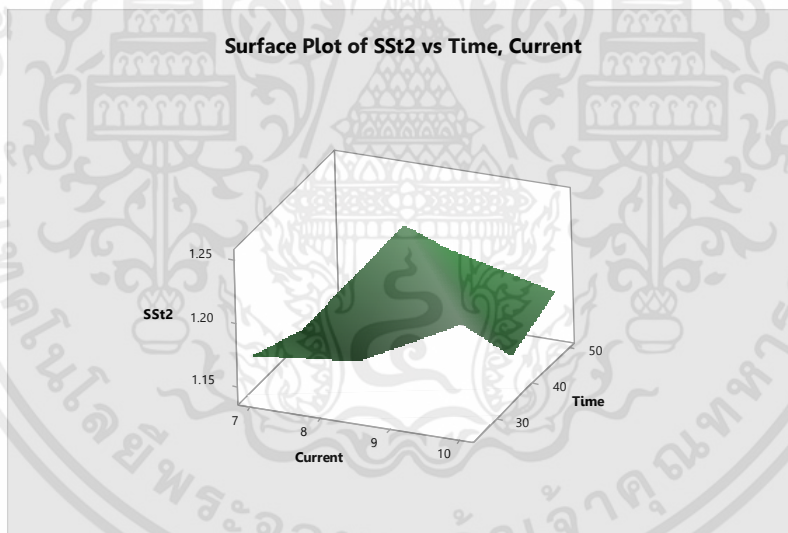
เงื่อนไข	ระยะการซึมลึก ฝั่ง DP1180 (t1) มิลลิเมตร	ระยะการซึมลึก ฝั่ง AISI 304 (t2) มิลลิเมตร	ระยะการกดลึก ฝั่ง DP1180 (h1) มิลลิเมตร	ระยะการกดลึก ฝั่ง AISI 304 (h2) มิลลิเมตร	ขนาดของรอย เชื่อม (di) มิลลิเมตร	พื้นที่รอยเชื่อม (Area) ตาราง มิลลิเมตร
1	1.007283	1.171921	0.171548	0.164554	4.758009	9276.938941
2	1.003084	1.154546	0.153037	0.192989	4.638387	8878.399456
3	0.97742	1.142029	0.164642	0.1895	4.838549	8950.277057
4	1.064791	1.181257	0.209631	0.222966	5.753284	11402.070656
5	1.086833	1.251426	0.215205	0.23099	5.713996	11322.22244
6	1.047916	1.198646	0.223106	0.270539	5.751538	11092.919148
7	1.118360	1.223095	0.244619	0.249624	6.442154	13147.255312
8	1.126177	1.161085	0.269133	0.291786	7.015516	13252.590902
9	1.092804	1.177628	0.284463	0.344297	6.990792	13188.662681

หมายเหตุ 1 เงื่อนไขเป็นไปตามตารางที่ ก.1 แสดงค่ากระแสเชื่อมและระยะเวลาเชื่อมในแต่ละเงื่อนไข

#### 4.1.2.1 การวิเคราะห์ระยะการซึมลึก (Penetration: $t_1, t_2$ )



รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์การซึมลึกฝั่งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กรณีใช้โลหะเต็ม

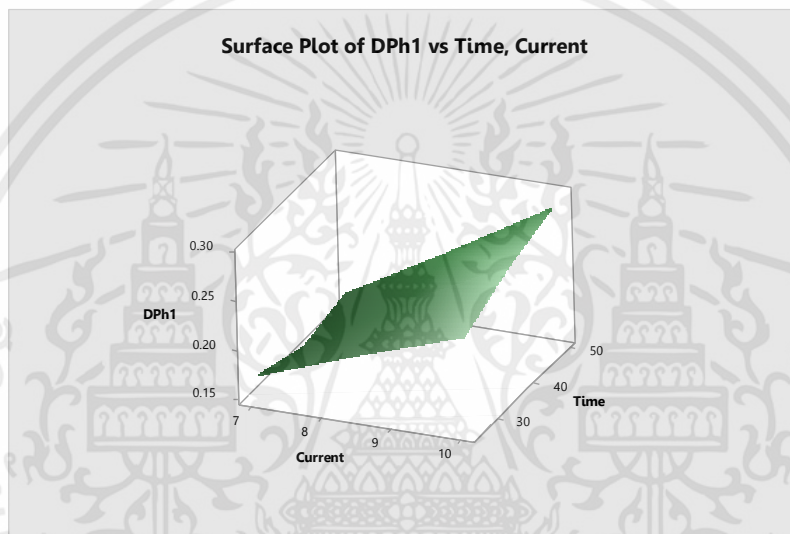


รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์การซึมลึกฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีใช้โลหะเต็ม

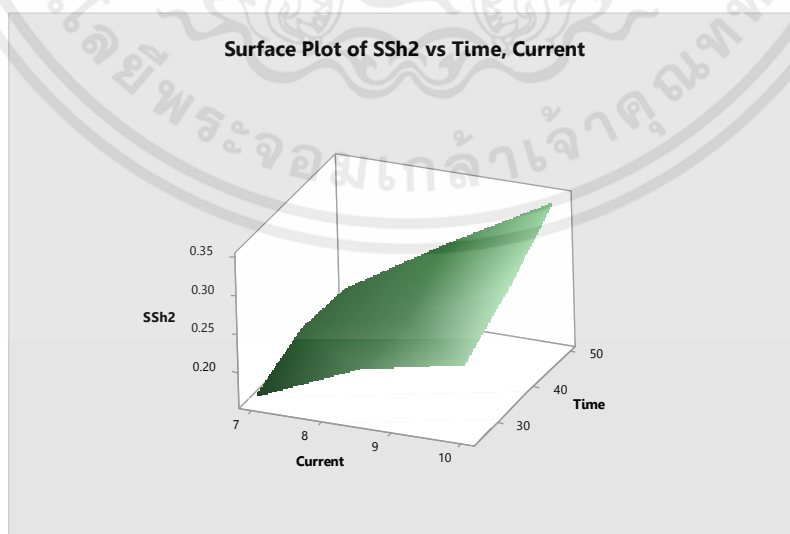
จากการพิจารณารูปกราฟ 3 มิติ (Surface Plot) จากโปรแกรม MINITAB Version 17 ในส่วนของระยะการซึมลึกของฝั่งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 ในกรณีใช้โลหะเต็ม ดังรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่า เมื่อกระแสเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระยะการซึมลึกนั้นเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาเชื่อมนั้นส่งผลกับระยะการซึมลึกเล็กน้อย เงื่อนไขที่ได้ค่าระยะการซึมลึกมากที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล เงื่อนไขที่ได้ค่าระยะการซึมลึกน้อยที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล เมื่อลองพิจารณาจากค่าในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ค่าของระยะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การซึมลึกมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนระยะเวลาการซึมลึกของฝิ่งเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ในกรณีไม่ใช้โลหะเติม ดังรูปที่ 4.12 ทั้งกระแสเชื่อมและระยะเวลาเชื่อมมีผลต่อระยะเวลาการซึมลึก เมื่อค่ากระแสเชื่อมเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าระยะเวลาการซึมลึกมีค่าเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยจนถึงจุดหนึ่งแล้วเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงที่มีค่าปัจจัยสูงขึ้น ส่วนระยะเวลาเชื่อมเมื่อมีค่ามากขึ้นจะทำให้ระยะเวลาการซึมลึกลดลงแต่เมื่อถึงจุดหนึ่งจะทำให้ค่าระยะเวลาการซึมลึกมีเพิ่มมากขึ้น และเงื่อนไขที่ได้ค่าระยะเวลาการซึมลึกมากที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล เงื่อนไขที่ได้ค่าระยะเวลาการซึมลึกน้อยที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล

#### 4.1.2.2 การวิเคราะห์ระยะเวลาการกดลึก (Indentation Depth: $h_1$ , $h_2$ )



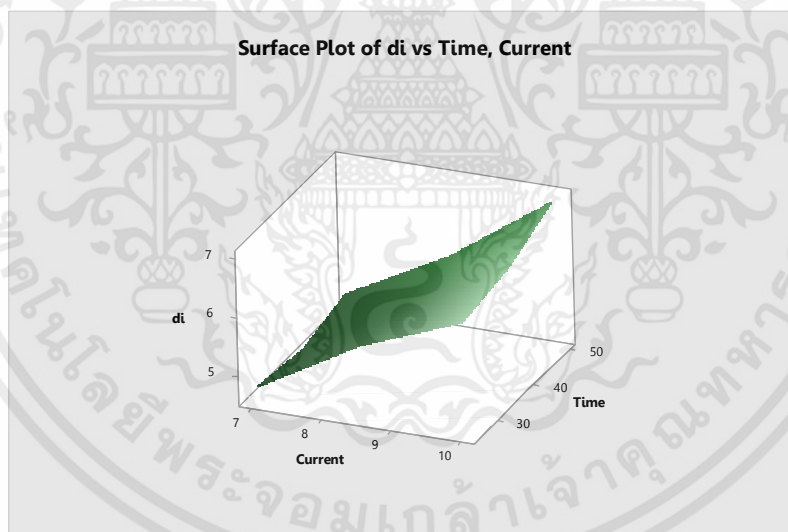
รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์การกดลึกฝิ่งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กรณีใช้โลหะเติม



รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์การกดลึกฝิ่งเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีใช้โลหะเติม

จากการพิจารณารูปกราฟ 3 มิติ (Surface Plot) จากโปรแกรม MINITAB Version 17 ในส่วนของระยะการกดลึงของฝั้งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 ในกรณีไม่ใช้โลหะเติม ดังรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่า กระแสเชื่อมมีผลต่อระยะการกดลึงโดยเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น ระยะการกดลึงก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่ถ้าระยะเวลาเชื่อมนั้นเพิ่มขึ้น ระยะการกดลึงก็จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เงื่อนไขที่ได้ค่าระยะการกดลึงมากที่สุดที่เห็นได้จากกราฟ คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล เงื่อนไขที่ได้ค่าระยะการกดลึงน้อยที่สุดที่เห็นได้จากกราฟ คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล เมื่อลองพิจารณาจากค่าในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ค่าของระยะการซึมลึงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนระยะการกดลึงของฝั้งเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ในกรณีไม่ใช้โลหะเติม ดังรูปที่ 4.14 ทั้งกระแสเชื่อมและระยะเวลาเชื่อมมีผลต่อระยะการกดลึง เมื่อค่ากระแสเชื่อมเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าระยะการกดลึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ในทุกระดับปัจจัย ส่วนระยะเวลาเชื่อมเมื่อมีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าระยะการกดลึงเพิ่มมากขึ้น และเงื่อนไขที่ได้ค่าระยะการกดลึงมากที่สุดที่เห็นได้จากกราฟ คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล เงื่อนไขที่ได้ค่าระยะการกดลึงน้อยที่สุดที่เห็นได้จากกราฟ คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล

4.1.2.3 การวิเคราะห์ขนาดของรอยเชื่อม (Nugget Diameter: di)

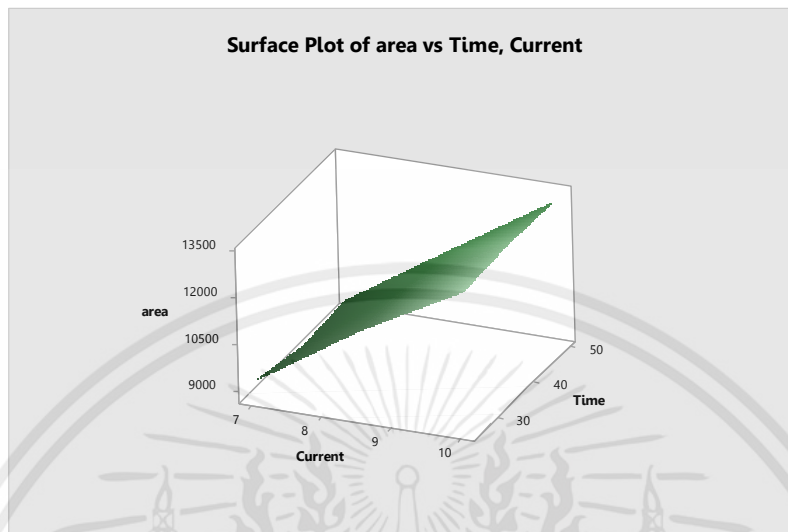


รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ขนาดของรอยเชื่อม กรณีใช้โลหะเติม

จากการพิจารณารูปกราฟ 3 มิติ (Surface Plot) จากโปรแกรม MINITAB Version 17 ในส่วนของขนาดของรอยเชื่อมในกรณีใช้โลหะเติม ดังรูปที่ 1.15 จะเห็นได้ว่ากระแสเชื่อมมีผลต่อระยะการขนาดของรอยเชื่อมโดยเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น ขนาดของรอยเชื่อมก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่ถ้าระยะเวลาเชื่อมเพิ่มขึ้นนั้น ขนาดของรอยเชื่อมก็จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เงื่อนไขที่ได้ค่าขนาดของรอยเชื่อมมากที่สุดที่เห็นได้จากกราฟ คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล เงื่อนไขที่ได้ค่าขนาดของรอยเชื่อม

น้อยที่สุดที่เห็นได้จากกราฟ คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล

4.1.2.4 การวิเคราะห์พื้นที่ของรอยเชื่อม (Nugget Area)



รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ของรอยเชื่อม กรณีใช้โลหะเติม

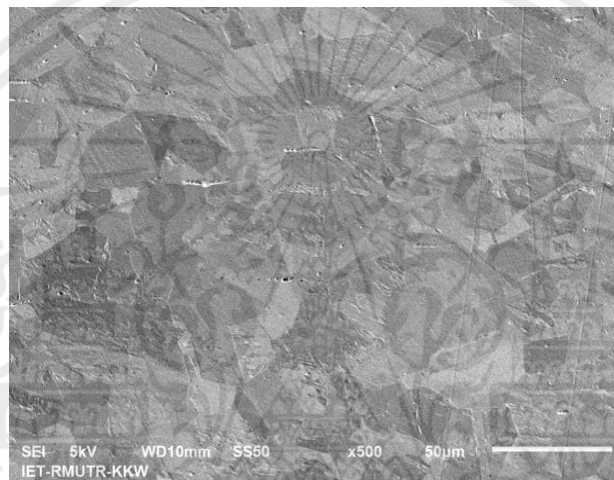
จากการพิจารณารูปกราฟ 3 มิติ (Surface Plot) จากโปรแกรม MINITAB Version 17 ในส่วนของพื้นที่ของรอยเชื่อมในกรณีใช้โลหะเติม ดังรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่ากระแสเชื่อมมีผลต่อพื้นที่ของรอยเชื่อม โดยเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น พื้นที่ของรอยเชื่อมก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่ถ้าระยะเวลาเชื่อมนั้นเพิ่มขึ้น พื้นที่ของรอยเชื่อมก็จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เงื่อนไขที่ได้ค่าพื้นที่ของรอยเชื่อมมากที่สุด คือ กระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล เงื่อนไขที่ได้ค่าพื้นที่ของรอยเชื่อมน้อยที่สุด คือ กระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล

#### 4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

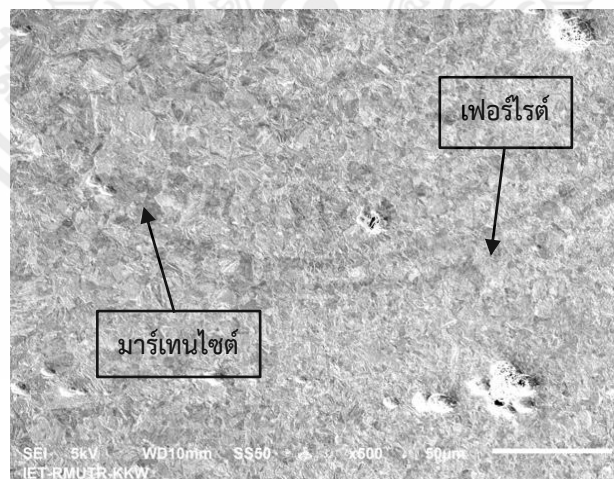
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ทั้งกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม (Filler Metal) โดยใช้เงื่อนไขค่าปัจจัยกระแสเชื่อมและระยะเวลาเชื่อมตามที่กำหนดดังตารางที่ 3.3 แรงกด 3.4 กิโลนิวตัน ในทุกชิ้นงาน โดยได้พิจารณาชิ้นงาน 4 ชิ้นงานจากทั้งหมด 18 ชิ้นงาน แบ่งออกเป็นกรณีใช้โลหะเติม 2 ชิ้นงาน กับกรณีไม่ใช้โลหะเติม 2 ชิ้นงาน แสดงดังตารางที่ ผข.1 โดยเลือกชิ้นงานจากพื้นที่ของรอยเชื่อมตามสมมติฐานที่ว่า หากพื้นที่ของรอยเชื่อมมีขนาดใหญ่ หมายความว่า มีพื้นที่รองรับแรงได้มาก มีความแข็งแรงมาก นอกจากนี้พื้นที่ของรอยเชื่อมจะสอดคล้องกับขนาดของรอยเชื่อมอีกด้วย จึงได้เลือกชิ้นงานที่มีพื้นที่ของรอยเชื่อมมากที่สุดและน้อยที่สุดตามตารางที่ 4.1-4.2 มาทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคทั้งกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม

#### 4.2.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะพื้น (Base Metal) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

โลหะพื้นที่ใช้ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 และเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 จากผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะพื้นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.17-4.18 พบว่า โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 เป็นโครงสร้างแบบออสเทนไนต์ (Austenite) โดยมีลักษณะเกรนหยาบกว่า ในขณะที่โครงสร้างจุลภาคฝั่งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 เป็นโครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และมาร์เทนไซต์ (Martensite) โดยมีลักษณะของเกรนที่ละเอียดกว่า



รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304



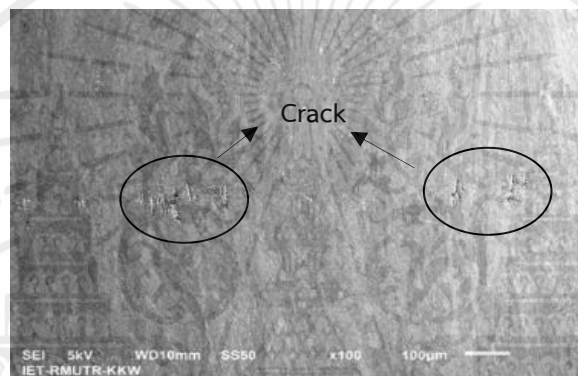
รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180

#### 4.2.2 ลักษณะความเสียหายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม

ได้ทำการศึกษาลักษณะความเสียหายของรอยเชื่อมทั้ง 4 ชิ้นงานที่เลือกวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคดังตารางที่ ผข.1 ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่าง เหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ทั้งกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม (Filler Metal) จากภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อม (Weld Nugget) ที่กำลังขยาย 100 เท่า

##### 4.2.2.1 เงื่อนไขที่ 3 กรณีไม่ใช้โลหะเติม ปัจจัยกระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 50 ไมโครวินาที

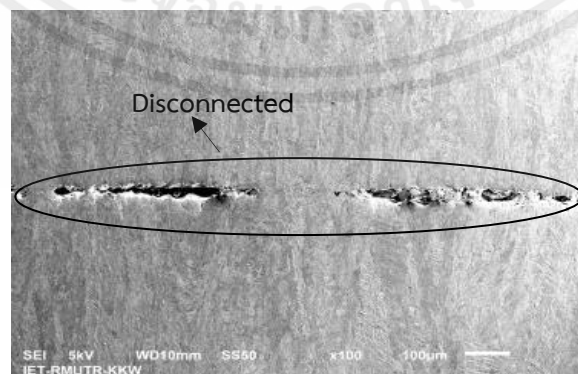
พบว่า เกิดรอยร้าว (Crack) ขึ้นบริเวณรอยเชื่อมดังรูปที่ 4.19 เนื่องจากการเชื่อมเหล็กสองเฟสและเหล็กกล้าไร้สนิม ทำให้เกิดเฟสมาร์เทนไซต์ที่มีคุณสมบัติแข็งแรงแต่มีความเปราะ ซึ่งความเปราะที่เกิดขึ้นที่จึงเป็นที่มาของการเกิดรอยร้าว (Crack)



รูปที่ 4.19 ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อมในเงื่อนไขที่ 3 กรณีไม่ใช้โลหะเติม

##### 4.2.2.2 เงื่อนไขที่ 7 กรณีไม่ใช้โลหะเติม ปัจจัยกระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไมโครวินาที

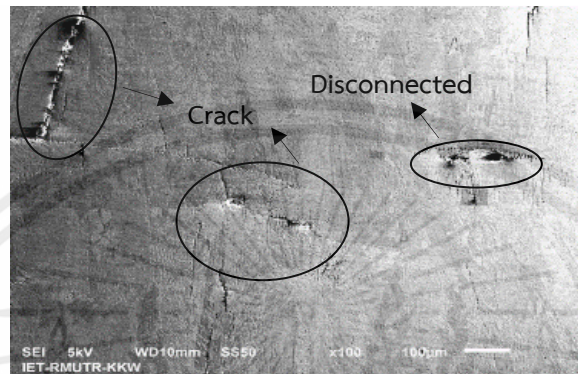
พบว่า เกิดการเชื่อมไม่ติดชิ้น (Disconnected) หรือเรียกว่า การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Incomplete Fusion) ดังรูปที่ 4.20 เกิดจากการให้ความร้อนของชิ้นงานไม่เท่ากันในขณะเชื่อม เนื่องจากตัวโลหะพื้นทั้งสองชนิดมีจุดหลอมเหลวไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.20 ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อมในเงื่อนไขที่ 7 กรณีไม่ใช้โลหะเติม

#### 4.2.2.3 เงื่อนไขที่ 4 กรณีใช้โลหะเติม ปัจจัยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล

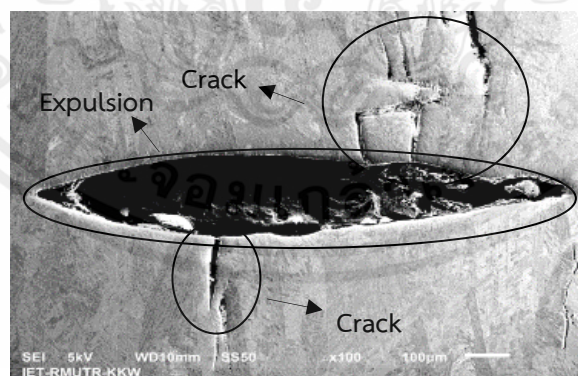
พบว่า เกิดการเชื่อมไม่ติดขึ้นหรือเรียกว่า การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Incomplete Fusion) ดังรูปที่ 4.21 เกิดจากการให้ความร้อนของชิ้นงานไม่เท่ากัน เนื่องจากโลหะพื้นทั้งสองชนิดมีจุดหลอมเหลวไม่เท่ากัน นอกจากนี้ยังพบรอยร้าว (Crack) ดังรูปที่ 4.21 เป็นแนวขวางกับแนวรอยเชื่อม เป็นสาเหตุมาจากการใช้เงื่อนไขกระแสเชื่อม และระยะเวลาเชื่อมไม่เหมาะสมกับโลหะเติมที่นำมาใช้



รูปที่ 4.21 ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อมในเงื่อนไข 4 กรณีใช้โลหะเติม

#### 4.2.2.4 เงื่อนไขที่ 8 กรณีใช้โลหะเติม ปัจจัยกระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล

พบว่า เกิด Expulsion ขึ้นดังรูปที่ 4.22 เนื่องจากการใช้ปัจจัยกระแสเชื่อมที่สูง นอกจากนี้ยังพบรอยร้าว (Crack) ดังรูปที่ 4.22 ตามแนวขวางกับรอยเชื่อมหลายจุด ซึ่งเป็นผลจากการเกิด Expulsion โดยทั้งหมดนี้มีสาเหตุมาจากการใช้เงื่อนไขกระแสเชื่อม และระยะเวลาเชื่อมไม่เหมาะสมกับโลหะเติมที่นำมาใช้



รูปที่ 4.22 ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อมในเงื่อนไข 8 กรณีใช้โลหะเติม

### 4.2.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

โดยศึกษาโครงสร้างจุลภาคในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) บริเวณโลหะหลอมละลาย (Fusion Zone: FZ) และโลหะพื้น (Base metal) ของกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304

จากรูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.26 รูปย่อยที่ ก) และ ข) แสดงภาพบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนฝั่ง เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 รูปย่อยที่ ค) แสดงภาพรอยเชื่อมที่ทำการศึกษาจากโครงสร้างจุลภาค รูปย่อยที่ ง) แสดงภาพบริเวณโครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะหลอมละลาย รูปย่อยที่ จ) และ ฉ) แสดงภาพบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนฝั่ง เหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 ซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณี คือ ชิ้นงานเชื่อมในกรณีไม่ใช้โลหะเติมจำนวน 2 ชิ้นประกอบด้วยชิ้นงานในเงื่อนไขที่ 3 มีค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 50 ไมโครวินาที ชิ้นงานในเงื่อนไขที่ 7 ค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไมโครวินาที และ ชิ้นงานเชื่อมในกรณีใช้โลหะเติมจำนวน 2 ชิ้นประกอบด้วย ชิ้นงานในเงื่อนไขที่ 4 ค่ากระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไมโครวินาที และชิ้นงานในเงื่อนไขที่ 8 ค่ากระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 38 ไมโครวินาที โดยการเลือกชิ้นงานจากพื้นที่ของรอยเชื่อม มีสมมติฐานที่ว่าหากพื้นที่ของรอยเชื่อมมีขนาดใหญ่ หมายความว่า มีพื้นที่รองรับแรงกดได้มาก มีความแข็งแรงมาก นอกจากนี้พื้นที่ของรอยเชื่อมจะสอดคล้องกับขนาดของรอยเชื่อมอีกด้วย จึงได้เลือกชิ้นงานที่มีพื้นที่ของรอยเชื่อมมากที่สุดและน้อยที่สุดมาทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ในทั้งกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม

จากรูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-Section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดในกรณีไม่ใช้โลหะเติมในเงื่อนไขที่ 3 มีค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 50 ไมโครวินาที เมื่อพิจารณาของชิ้นงานนี้พบว่ารูป 4.23 ก), 4.23 ข), 4.23 จ), 4.23 ฉ) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) โดยเกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีผิวเกรนหยาบ (Coarser Grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณโลหะพื้น (Base Metal) และพบว่า มีเฟสมาร์เทนไซต์เกิดขึ้น ในส่วนของรูปที่ 4.23 ค) และ 4.23 ง) แสดงบริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) พบว่า มีมาร์เทนไซต์เกิดขึ้นเช่นเดียวกัน โดยรอยเชื่อมบริเวณนี้เกิดเกรนตามยาว (Columnar Grains) ซึ่งเกรนชนิดนี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่โลหะหลอมเหลวเย็น ตัวลงอย่างช้า ๆ [28] และพบรอยร้าว (Crack) เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อม ดังรูปที่ 4.19

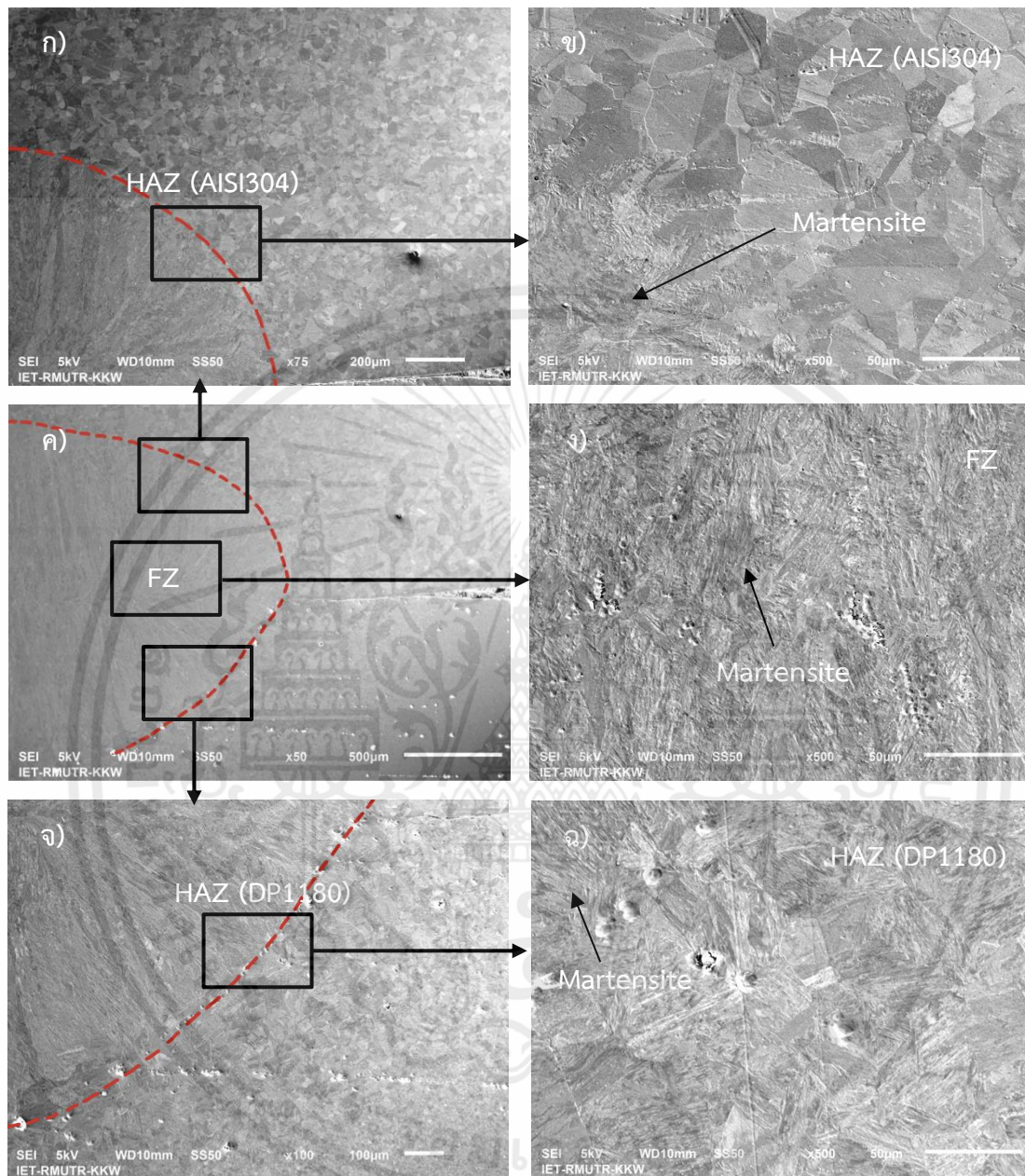
จากรูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-Section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดในกรณีไม่ใช้โลหะเติมในเงื่อนไขที่ 7 มีค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไมโครวินาที เมื่อพิจารณาของชิ้นงานนี้พบว่ารูป 4.24 ก), 4.24 ข), 4.24 จ), 4.24 ฉ) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) โดยเกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีผิวเกรนหยาบ (Coarser Grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณโลหะพื้น (Base Metal) และพบว่า มีเฟสมาร์เทนไซต์เกิดขึ้น ในส่วนของรูปที่ 4.24 ค) และ 4.24 ง) แสดงบริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) พบว่า มีมาร์เทนไซต์เกิดขึ้นเช่นเดียวกัน โดยรอยเชื่อมบริเวณนี้เกิดเกรนตามยาว (Columnar Grain) ซึ่งเกรนชนิดนี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่โลหะหลอมเหลวเย็น ตัวลงอย่างช้า ๆ [28] นอกจากนี้พบว่า เมื่อใช้ค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไมโครวินาที

จะทำให้เกิดการเชื่อมไม่ติดชิ้น (Disconnected) หรือเรียกว่า การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Incomplete Fusion) ดังรูปที่ 4.20

จากรูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-Section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดในกรณีใช้โลหะเติมในเงื่อนไขที่ 4 มีค่ากระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล โดยเมื่อใช้โลหะเติมเป็นทองแดงพบว่า เมื่อขึ้นงานผ่านการเชื่อมจะพบทองแดงอยู่ด้านข้างของรอยเชื่อมระหว่างโลหะพื้นที่ 2 ชนิดเป็นส่วนใหญ่ จะมีเพียงบางส่วนที่แพร่เข้าไปในรอยเชื่อม เมื่อพิจารณารอยเชื่อมของชิ้นงานนี้พบว่า รูป 4.25 ก), 4.25 ข), 4.25 จ), 4.25 ฉ) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) โดยเกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีผิวเกรนหยาบ (Coarser Grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณโลหะพื้น (Base Metal) ในส่วนของรูปที่ 4.25 ค) และ 4.25 ง) แสดงบริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) โดยรอยเชื่อมบริเวณนี้เกิดเกรนตามยาว (Columnar Grains) ซึ่งเกรนชนิดนี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่โลหะหลอมเหลวเย็น ตัวลงอย่างช้า ๆ [28] และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) และบริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) นอกจากจะพบว่า มีเฟสมาร์เทนไซต์เกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าว ยังพบส่วนผสมของทองแดง (Cu) ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้โลหะเติมเป็นแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ นอกจากนี้เมื่อใช้ค่ากระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล เกิดการเชื่อมไม่ติดชิ้นหรือเรียกว่า การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Incomplete Fusion) นอกจากนี้ยังพบรอยร้าว (Crack) เป็นแนวขวางกับแนวรอยเชื่อมอีกด้วย ดังรูปที่ 4.21

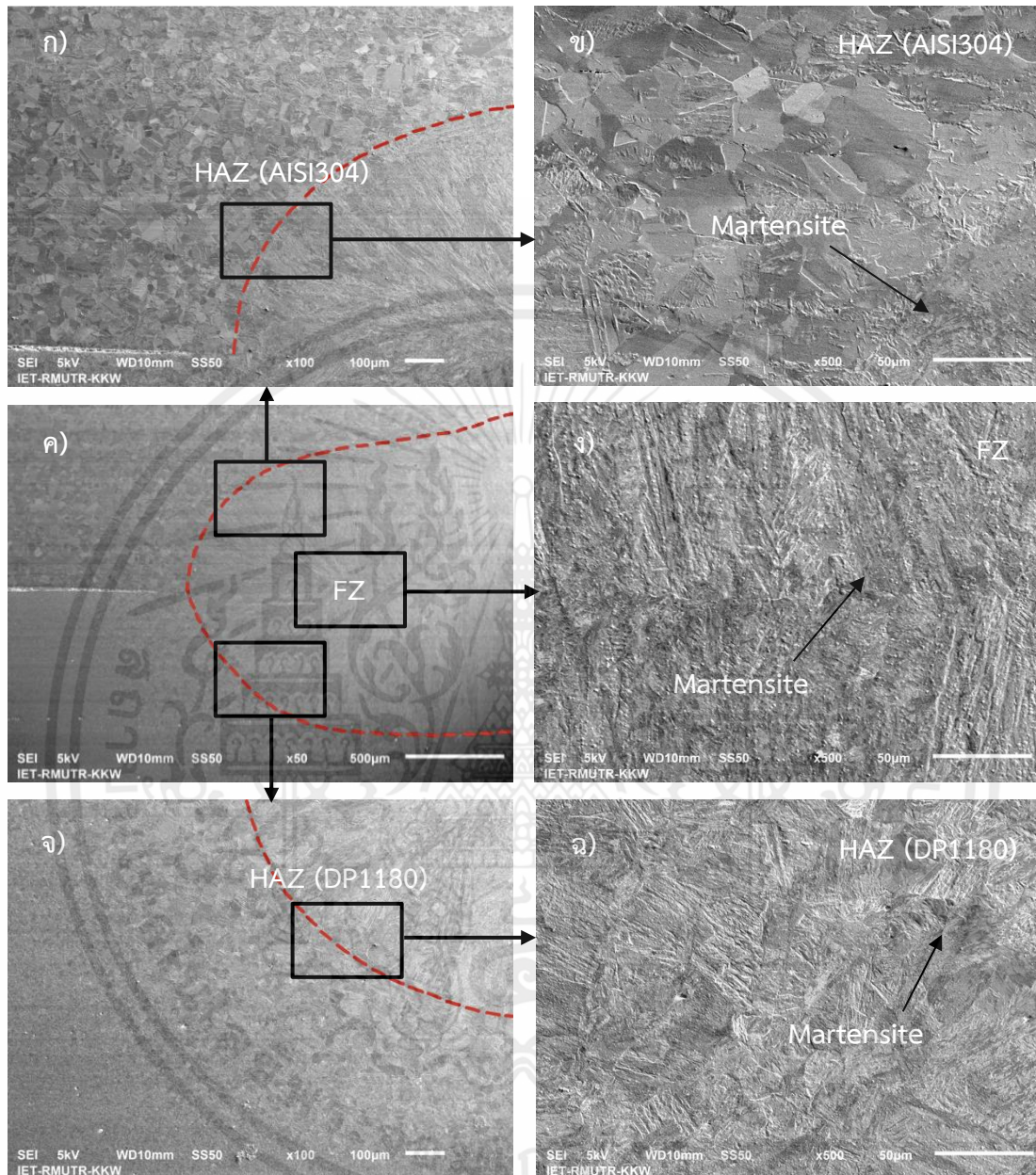
จากรูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-Section) โดยการเชื่อมความต้านทานจุดในกรณีใช้โลหะเติมในเงื่อนไขที่ 8 มีค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล เมื่อพิจารณารอยเชื่อมของชิ้นงานนี้พบว่า รูป 4.26 ก), 4.26 ข), 4.26 จ), 4.26 ฉ) แสดงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) โดยเกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีผิวเกรนหยาบ (Coarser Grains) เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณโลหะพื้น (Base Metal) ในส่วนของรูปที่ 4.26 ค) และ 4.26 ง) แสดงบริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) โดยรอยเชื่อมบริเวณนี้เกิดเกรนตามยาว (Columnar Grains) ซึ่งเกรนชนิดนี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่โลหะหลอมเหลวเย็น ตัวลงอย่างช้า ๆ [28] และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) และบริเวณที่โลหะหลอมจากการเชื่อม (FZ) นอกจากจะพบว่า มีเฟสมาร์เทนไซต์เกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าว ยังพบส่วนผสมของทองแดง (Cu) ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้โลหะเติมเป็นแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ และพบว่า เมื่อใช้ค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล จะทำให้เกิด Expulsion ซึ่งเกิดจากการใช้ปัจจัยกระแสเชื่อมที่สูง นอกจากนี้ยังพบรอยร้าว (Crack) ตามแนวขวางกับรอยเชื่อมหลายจุด ซึ่งเป็นผลจากการเกิด Expulsion อีกด้วย ดังรูปที่ 4.22

4.2.3.1 เงื่อนไขที่ 3 กรณีไม่ใช้โลหะเติม ปัจจัยกระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล



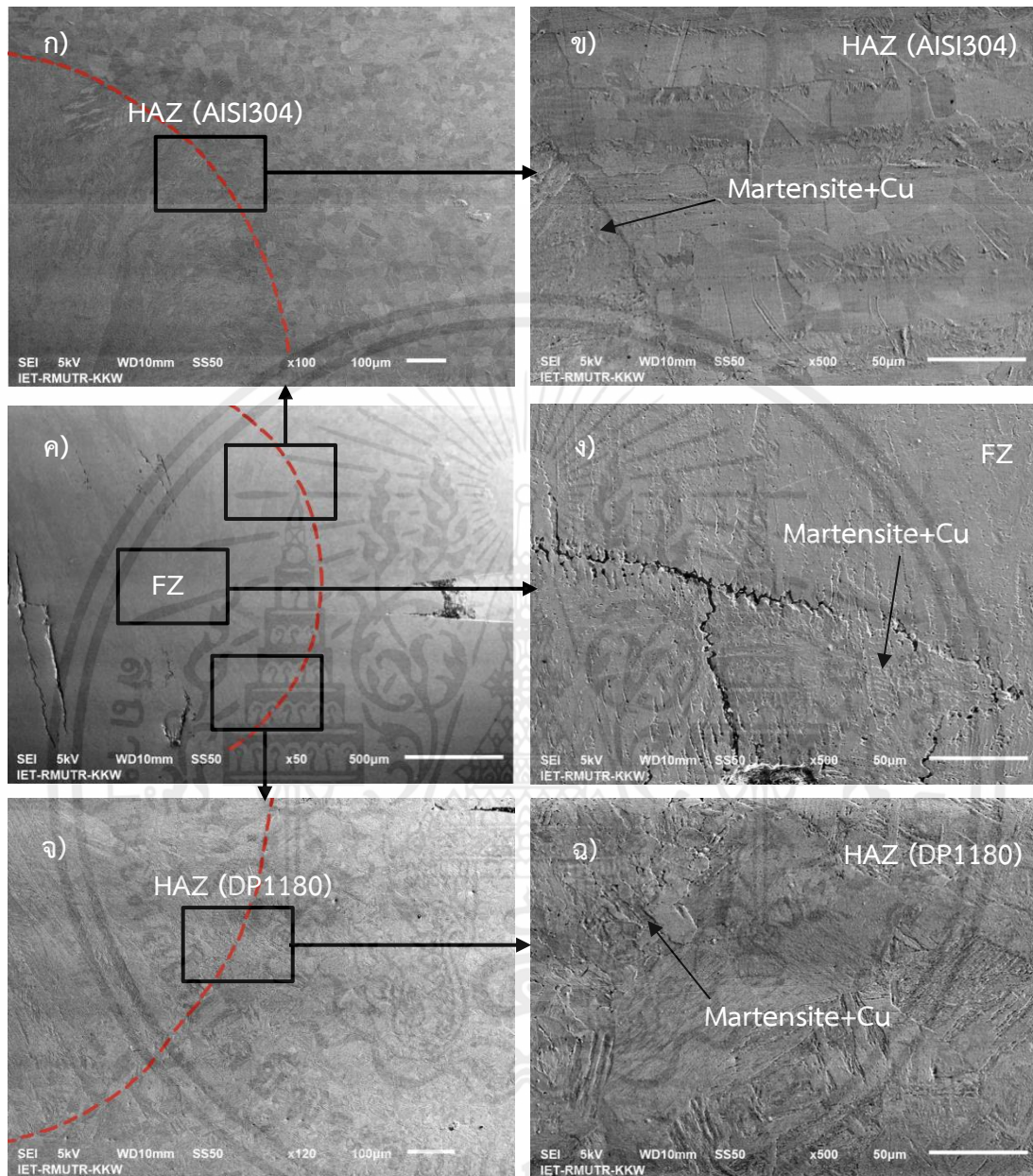
รูปที่ 4.23 แผนภาพโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล (เงื่อนไขที่ 3)

4.2.3.2 เงื่อนไขที่ 7 กรณีไม่ใช้โลหะเติม ปัจจัยกระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 วินาที



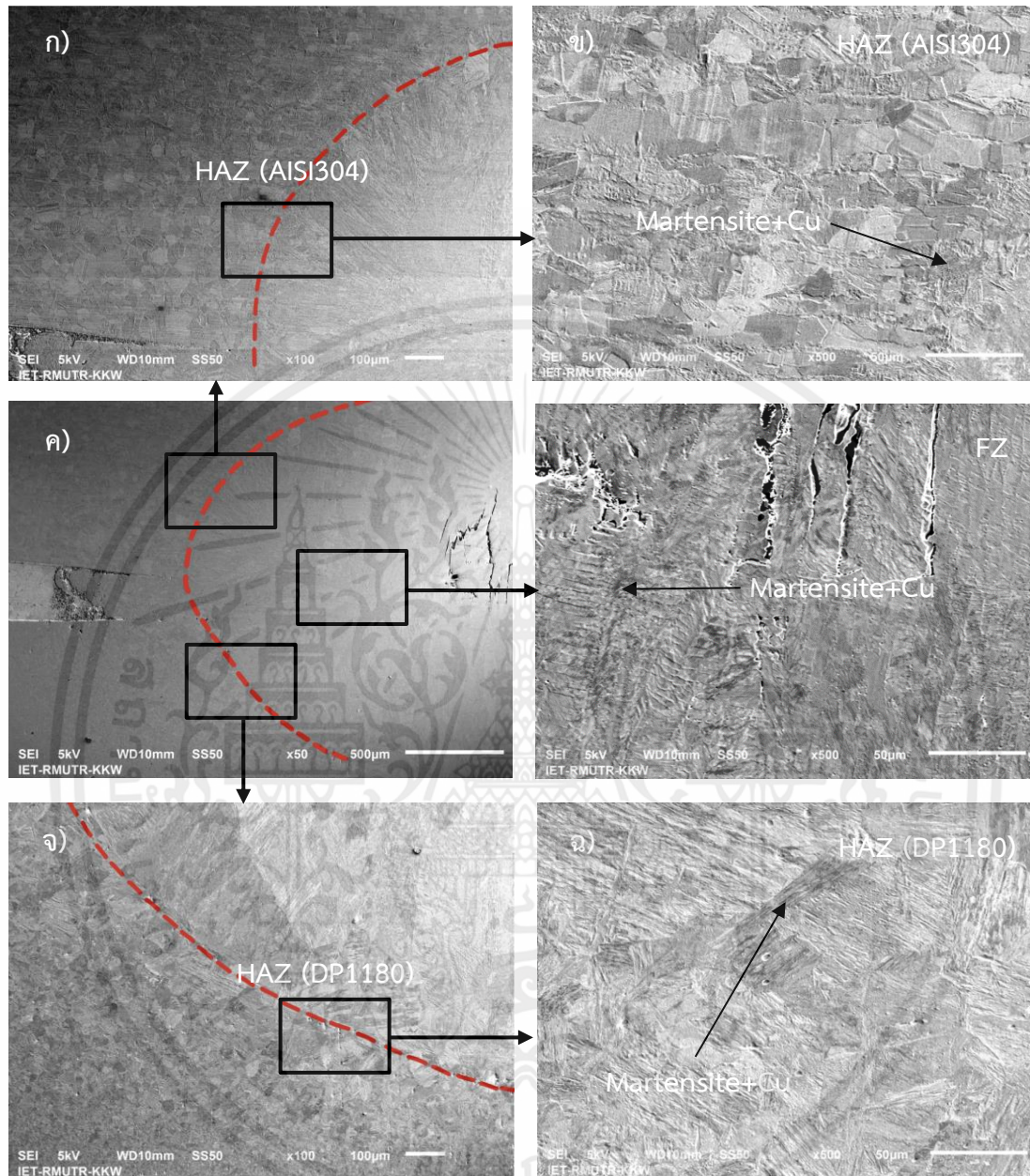
รูปที่ 4.24 แผนภาพโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 วินาที (เงื่อนไขที่ 7)

4.2.3.3 เงื่อนไขที่ 4 กรณีใช้โลหะเติม ปัจจัยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 วินาที



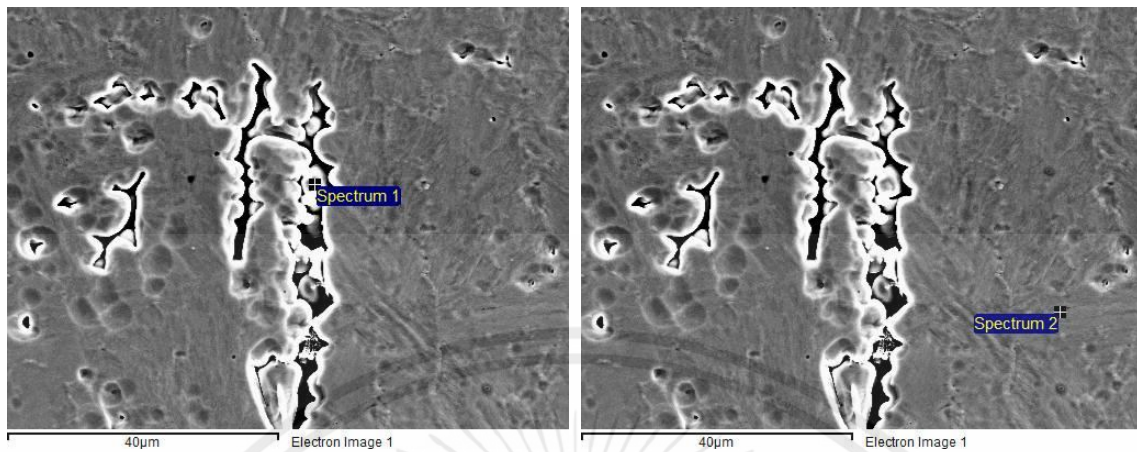
รูปที่ 4.25 แผนภาพโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 วินาที (เงื่อนไขที่ 4)

4.2.3.4 เงื่อนไขที่ 8 กรณีใช้โลหะเติม ปัจจัยกระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 38 ชั่วโมง

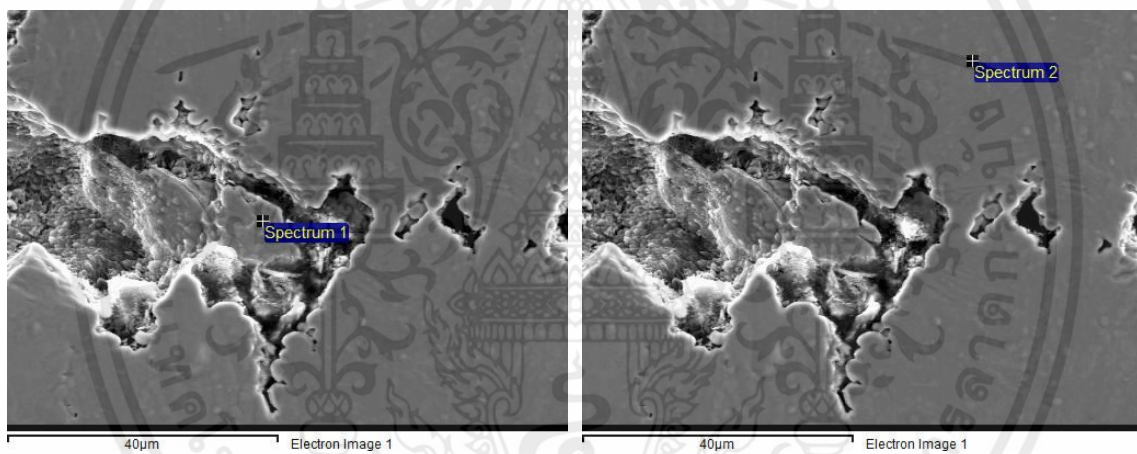


รูปที่ 4.26 แผนภาพโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 10.0 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 38 ชั่วโมง (เงื่อนไขที่ 8)

#### 4.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS)



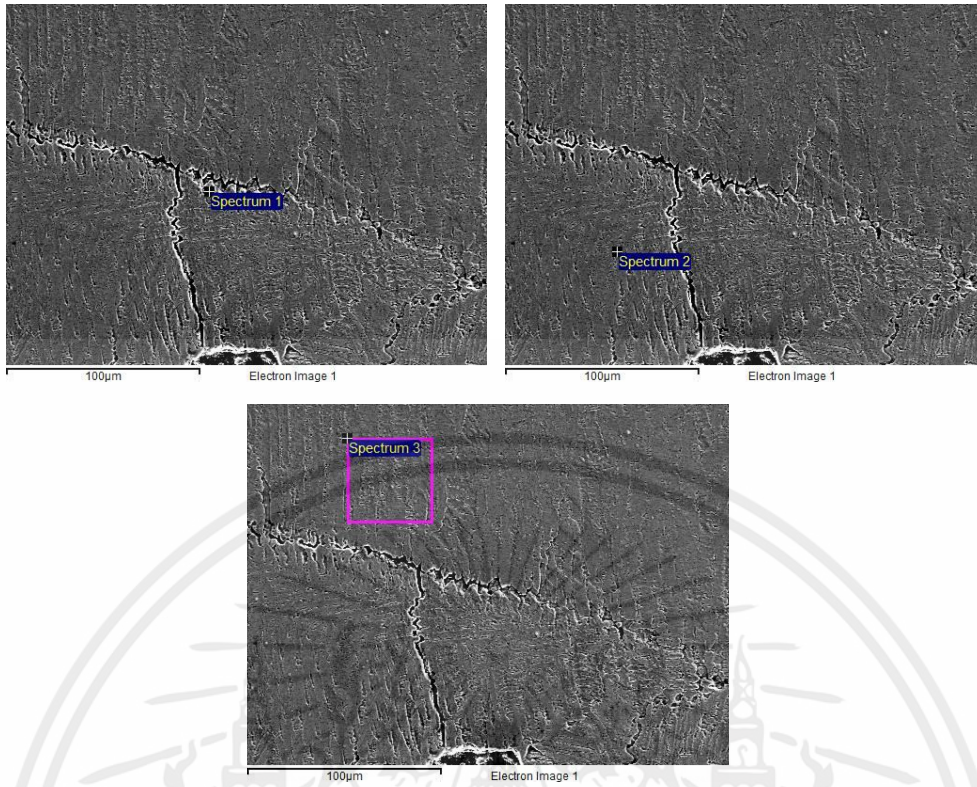
รูปที่ 4.27 แสดงจุด Spectrum 1, 2 ในบริเวณหลอมละลายของเส้นใยที่ 3



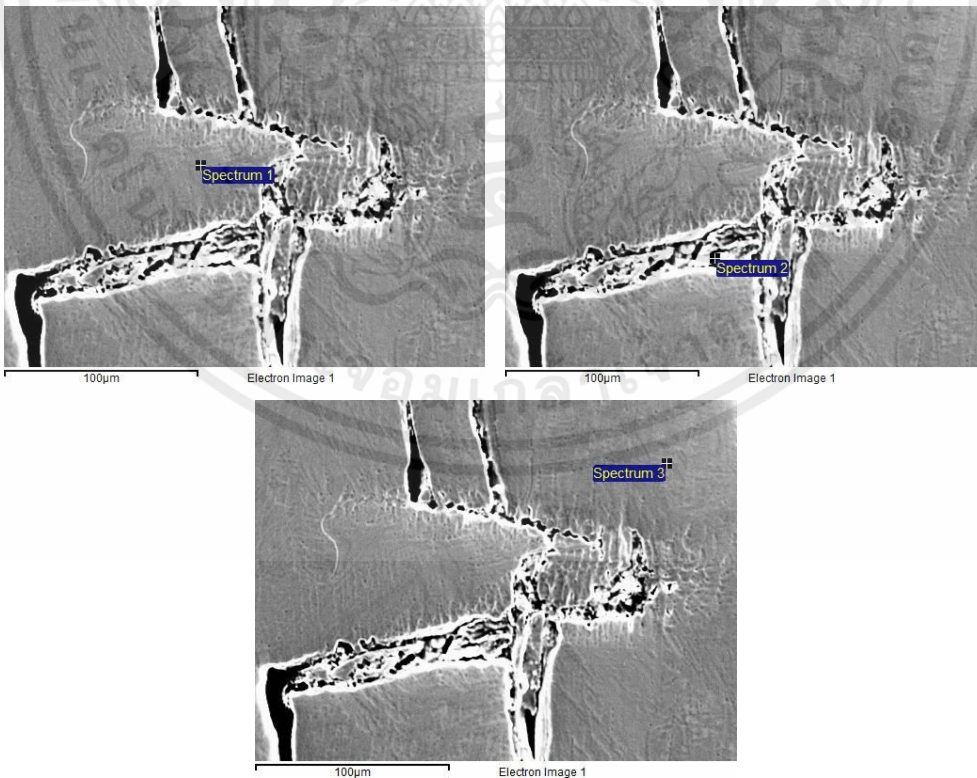
รูปที่ 4.28 จุด Spectrum 1, 2 ในบริเวณหลอมละลายของเส้นใยที่ 7

ตารางที่ 4.3 ปริมาณธาตุในบริเวณโลหะหลอมละลายจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจาก EDS ในกรณีไม่ใช้โลหะเติม

ธาตุ	ปัจจัยการเชื่อม ลำดับ Spectrum	กระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล (เงื่อนไขที่ 3)		กระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล (เงื่อนไขที่ 7)	
		Wt%	Atomic%	Wt%	Atomic%
ปริมาณ C ในพื้นที่	Spectrum 1	15.37	45.5	11.01	36.22
	Spectrum 2	12.51	39.67	12.84	40.39
ปริมาณ Si ในพื้นที่	Spectrum 1	0.49	0.62	0.63	0.89
	Spectrum 2	0.45	0.61	0.46	0.62
ปริมาณ Cr ในพื้นที่	Spectrum 1	8.64	5.91	9.28	7.05
	Spectrum 2	8.93	6.54	8.97	6.52
ปริมาณ Mn ในพื้นที่	Spectrum 1	1.54	1.00	1.80	1.30
	Spectrum 2	1.45	1.00	1.55	1.06
ปริมาณ Fe ในพื้นที่	Spectrum 1	70.39	44.81	72.88	51.58
	Spectrum 2	73.36	50.03	72.76	49.21
ปริมาณ Ni ในพื้นที่	Spectrum 1	3.58	2.17	4.40	2.96
	Spectrum 2	3.30	2.14	3.42	2.20



รูปที่ 4.29 จุด Spectrum 1, 2, และ 3 ในบริเวณหลอมละลายของเงื่อนไขที่ 4

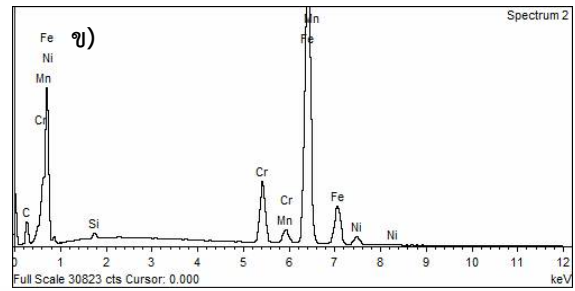
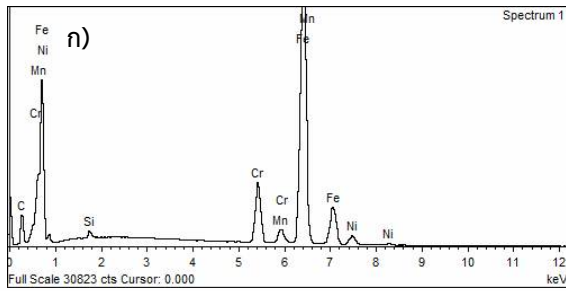


รูปที่ 4.30 จุด Spectrum 1, 2, และ 3 ในบริเวณหลอมละลายของเงื่อนไขที่ 8

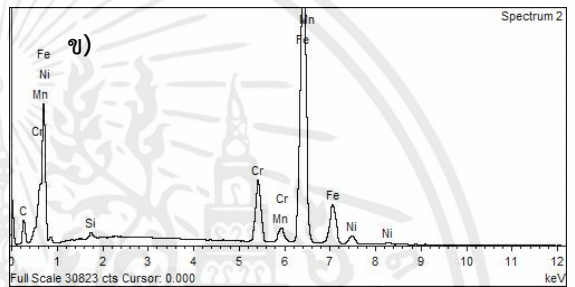
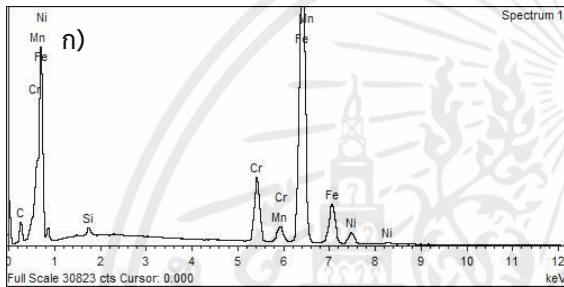
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ปริมาณธาตุในบริเวณโลหะหลอมละลายจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจาก EDS กรณีใช้โลหะเต็ม

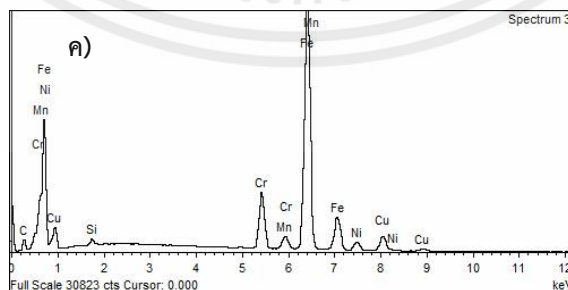
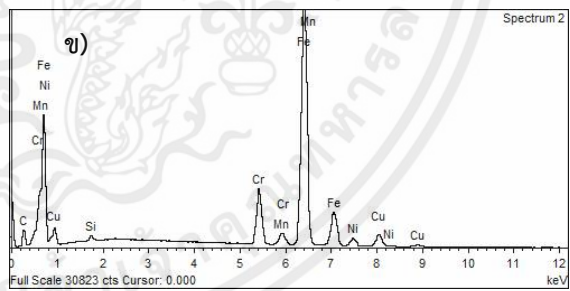
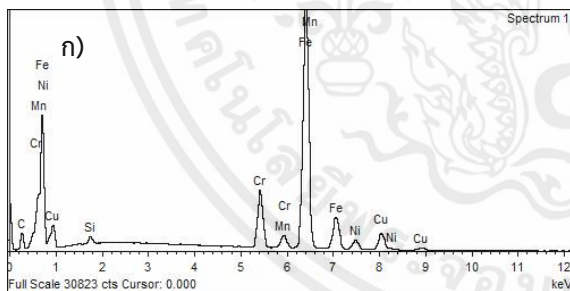
ธาตุ	ปัจจัยการเชื่อม ลำดับ spectrum	กระแสเชื่อม 8.5 กิโล แอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล (เงื่อนไขที่ 4)		กระแสเชื่อม 10 กิโล แอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล (เงื่อนไขที่ 8)	
		Wt%	Atomic%	Wt%	Atomic%
ปริมาณ C ใน พื้นที่	Spectrum 1	10.58	35.46	9.83	33.52
	Spectrum 2	10.34	34.87	24.38	37.19
	Spectrum 3	7.35	26.93	10.56	35.27
ปริมาณ Si ใน พื้นที่	Spectrum 1	0.61	0.88	0.46	0.67
	Spectrum 2	0.40	0.58	1.01	0.66
	Spectrum 3	0.52	0.81	0.50	0.72
ปริมาณ Cr ใน พื้นที่	Spectrum 1	9.16	7.10	9.60	7.56
	Spectrum 2	8.90	6.93	1.98	0.70
	Spectrum 3	9.33	7.90	9.24	7.13
ปริมาณ Mn ในพื้นที่	Spectrum 1	1.32	0.97	1.41	1.05
	Spectrum 2	1.26	0.93	0.43	0.14
	Spectrum 3	1.51	1.21	1.51	1.10
ปริมาณ Fe ในพื้นที่	Spectrum 1	65.83	47.47	70.88	51.97
	Spectrum 2	69.34	50.28	15.19	4.98
	Spectrum 3	69.50	54.76	71.63	51.45
ปริมาณ Ni ใน พื้นที่	Spectrum 1	4.04	2.77	3.66	2.55
	Spectrum 2	3.44	2.37	0.87	0.27
	Spectrum 3	3.87	2.90	3.75	2.56
ปริมาณ Cu ในพื้นที่	Spectrum 1	8.46	5.36	4.16	2.68
	Spectrum 2	6.31	4.02	2.09	0.60
	Spectrum 3	7.92	5.48	2.81	1.77



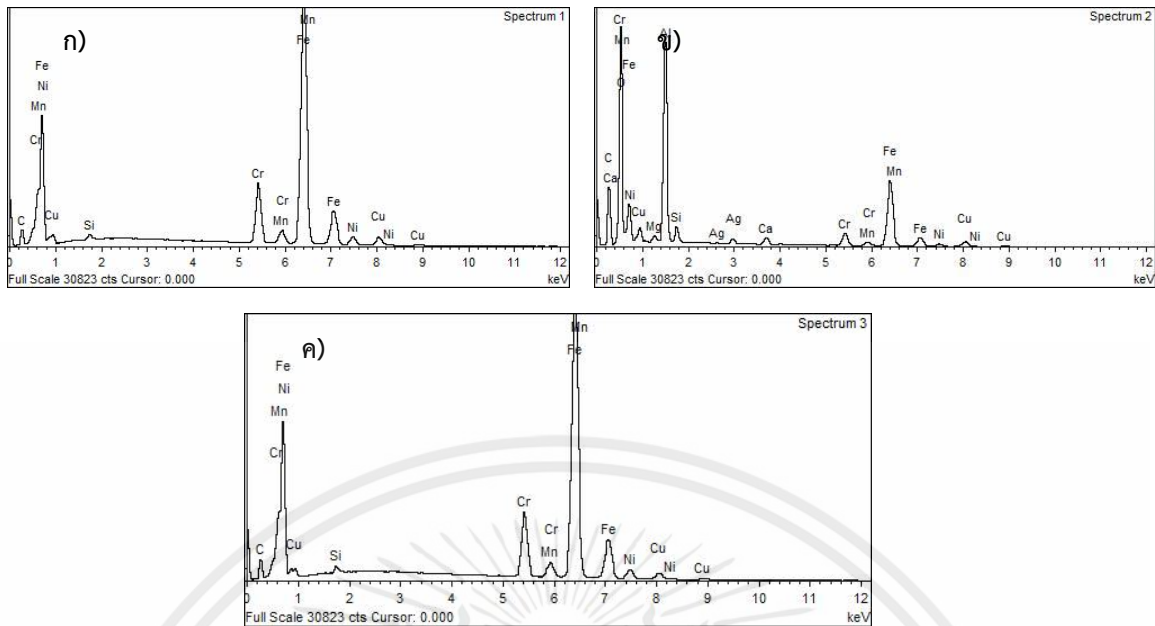
รูปที่ 4.31 ปริมาณธาตุในบริเวณโลหะหลอมละลายจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจาก EDS กรณีไม่ใช้โลหะเติมของเงื่อนไขที่ 3 ก) Spectrum 1 ข) Spectrum 2



รูปที่ 4.32 ปริมาณธาตุในบริเวณโลหะหลอมละลายจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจาก EDS กรณีไม่ใช้โลหะเติมของเงื่อนไขที่ 7 ก) Spectrum 1 ข) Spectrum 2



รูปที่ 4.33 ปริมาณธาตุในบริเวณโลหะหลอมละลายจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจาก EDS กรณีใช้โลหะเติมของเงื่อนไขที่ 4 ก) Spectrum 1 ข) Spectrum 2 ค) Spectrum 3



รูปที่ 4.34 ปริมาณธาตุในบริเวณโลหะหลอมละลายจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุจาก EDS กรณีใช้โลหะเติมของเงื่อนไขที่ 8 ก) Spectrum 1 ข) Spectrum 2 ค) Spectrum 3

จุด spectrum แต่ละจุดที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) คือ จุดบริเวณปกติเทียบกับจุดที่คาดว่าอาจมีการเปลี่ยนแปลงของเฟสเกิดขึ้น เนื่องจากมีช่องว่าง หรือรอยร้าวเกิดขึ้นในบริเวณนั้น ๆ

จากตารางที่ 4.3 เมื่อวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในกรณีไม่ใช้โลหะเติม เงื่อนไขที่ 3 กระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) ในบริเวณโลหะหลอมละลาย จากปริมาณธาตุในจุด Spectrum 1 และ Spectrum 2 ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.30 พบว่า ทั้ง 2 จุดเกิดเฟสเดียวกัน โดยจะเห็นได้จากปริมาณธาตุและ Peak มีความใกล้เคียงกัน

จากตารางที่ 4.3 เมื่อวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในกรณีไม่ใช้โลหะเติม เงื่อนไขที่ 7 กระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) ในบริเวณโลหะหลอมละลายจุด จากปริมาณธาตุในจุด Spectrum 1 และ Spectrum 2 ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.31 พบว่า ทั้ง 2 จุดเกิดเฟสเดียวกัน โดยจะเห็นได้จากปริมาณธาตุและ Peak มีความใกล้เคียงกัน นอกจากนี้สังเกตได้ว่า ชิ้นงานในเงื่อนไขที่ 7 และชิ้นงานในเงื่อนไขที่ 3 มีเฟสเหมือนกัน

จากตารางที่ 4.4 เมื่อวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในกรณีใช้โลหะเติม เงื่อนไขที่ 4 กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) ในบริเวณโลหะหลอมละลาย จากปริมาณธาตุในจุด Spectrum 1 Spectrum 2 และ Spectrum 3 ดังในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.32 พบว่า ทั้ง 3 จุดเกิดเฟสเดียวกัน โดยจะเห็นได้จากปริมาณธาตุและ Peak มีความใกล้เคียงกัน

จากตารางที่ 4.4 เมื่อวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในกรณีใช้โลหะเติม เส้นใยที่ 8 กระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 38 วินาที ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) ในบริเวณโลหะหลอมละลาย จากปริมาณธาตุในจุด Spectrum 1 Spectrum 2 และ Spectrum 3 ดังในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.33 ทำให้พบว่า จุดที่เกิดเฟสแตกต่างจากจุดอื่น คือ ในจุด Spectrum 2 เนื่องจากมีปริมาณธาตุที่แตกต่างจากสองจุดที่เหลือ โดยนอกจากนี้จะเห็นได้ Peak ที่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้สังเกตได้ว่า ชิ้นงานในเส้นใยที่ 8 และชิ้นงานในเส้นใยที่ 4 มีเฟสเหมือนกัน



## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลของปริญาานิพนธ์เรื่อง การเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่าง เหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม (Filler Metal) ดังหัวข้อต่อไปนี้

#### 5.1 การสรุปผลการทดลอง

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

โดยวัตถุประสงค์หลักของการศึกษาในปริญาานิพนธ์นี้คือ เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระแสเชื่อมและระยะเวลาเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่าง เหล็กสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ทั้งกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม (Filler Metal)

##### 5.1.1 โครงสร้างมหภาค

##### 5.1.1.1 การเชื่อมความต้านทานแบบจุดเหล็กสองเฟสเกรด DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กรณีไม่ใช้โลหะเติม (Filler Metal)

จากการเชื่อมในกรณีที่ไม่ใช้โลหะเติม โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาเป็นไปตามตารางที่ 3.3 พบว่าเงื่อนไขที่ทำให้ค่าระยะการซึมลึกฝั่งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 ที่มากที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล และน้อยที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล เงื่อนไขที่ทำให้ค่าระยะการซึมลึกฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 มากที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล และน้อยที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล เงื่อนไขที่ทำให้ค่าระยะการกัดลึกฝั่งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 มากที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล และน้อยที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล เงื่อนไขที่ทำให้ค่าระยะการกัดลึกฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 มากที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล และน้อยที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล เงื่อนไขที่ค่าขนาดของรอยเชื่อมมากที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล และน้อยที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล เงื่อนไขที่ค่าพื้นที่ของรอยเชื่อมมากที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม

10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล และน้อยที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล

#### 5.1.1.2 การเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟส DP1180 กับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 กรณีใช้โลหะเติม (Filler Metal)

จากการเชื่อมในกรณีที่ใช้โลหะเติม โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาเป็นไปตามตารางที่ 3.3 พบว่า เงื่อนไขที่ทำให้ค่าระยะการซึมลึกฝั่งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 มากที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล และน้อยที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล เงื่อนไขที่ทำให้ค่าระยะการซึมลึกฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มากที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล และน้อยที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล เงื่อนไขที่ทำให้ค่าระยะการกัดลึกฝั่งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 มากที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล และน้อยที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 7.0 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล เงื่อนไขที่ทำให้ค่าระยะการกัดลึกฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 มากที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล และน้อยที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล เงื่อนไขที่ค่าขนาดของรอยเชื่อมมากที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล และน้อยที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล เงื่อนไขที่ค่าพื้นที่ของรอยเชื่อมมากที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล และน้อยที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีค่ากระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล

จากการวิเคราะห์ข้างต้นสังเกตได้ว่า เมื่อเปลี่ยนค่ากระแสเชื่อมให้เพิ่มขึ้นทำให้ค่าระยะซึมลึก ระยะกัดลึกทั้งฝั่งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ขนาดของรอยเชื่อม และพื้นที่ของรอยเชื่อมมีค่าเพิ่มมากขึ้น หมายความว่า ค่ากระแสเชื่อมที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมแปรผันตรงกับโครงสร้างมหภาคทั้ง 6 องค์ประกอบ ส่วนระยะเวลาเชื่อมไม่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างมหภาค และเมื่อใช้โลหะเติม (Filler Metal) คือ แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ ในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 พบว่า เมื่อใช้โลหะเติมจะทำให้ค่าระยะซึมลึก ระยะกัดลึกทั้งฝั่งเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 มีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ขนาดของรอยเชื่อมและพื้นที่ของรอยเชื่อมมีค่าน้อยลง หมายความว่า การใช้แผ่นทองแดงบริสุทธิ์เป็นโลหะเติม (Filler Metal) แปรผกผันกับขนาดของรอยเชื่อมและพื้นที่ของรอยเชื่อม ซึ่งความแข็งแรงมีความสัมพันธ์กับขนาดและพื้นที่ของรอยเชื่อม กล่าวได้ว่า เมื่อยรอยเชื่อมมีขนาดและพื้นที่มาก ความแข็งแรงก็จะมากขึ้น จึงสรุปได้ว่า เมื่อใช้กระแสเชื่อมเพิ่มมากขึ้นทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น แต่เมื่อใช้โลหะเติมจะสันนิษฐานได้ว่า ความแข็งแรงลดลง

และจะเห็นได้ว่า ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ไม่ว่าจะกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม พบว่า โลหะพื้นฝั่งเหล็กกล้า

ไร้สนิมเกรด AISI 304 จะแพร่ได้ดีกว่าโลหะพื้นผิวเหล็กกล้าสองเฟสเกรด DP1180 นอกจากนี้ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 จะแพร่ได้ดียิ่งขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากภาคผนวก ค

### 5.1.2 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-Section) ในกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติม มีส่วนที่เหมือนกัน คือ บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) มีขนาดเกรนใหญ่กว่าและผิวหยาบ (Coarser Grains) กว่าเมื่อเทียบกับบริเวณโลหะพื้น (BM) ส่วนในบริเวณโลหะที่เกิดการหลอมละลาย (FZ) เกิดเกรนตามยาว (Columnar Grains) ส่วนที่แตกต่างกันในแต่ละเงื่อนไขมีดังนี้ ในกรณีไม่ใช้โลหะเติม เงื่อนไขที่ 3 กระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล จะมีการเกิดรอยร้าว (Crack) ตามแนวรอยเชื่อม ในขณะที่เงื่อนไขที่ 7 กระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล จะเกิดการเชื่อมไม่ติดหรือการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Incomplete Fusion) กรณีใช้โลหะเติม เงื่อนไขที่ 4 กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล จะเกิดการเชื่อมไม่ติดหรือการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Incomplete Fusion) และเกิดรอยร้าว (Crack) เป็นแนวขวางกับแนวรอยเชื่อม และเงื่อนไขที่ 8 กระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล เกิด Expulsion และรอยร้าว (Crack) ตามแนวขวางกับรอยเชื่อมหลายจุดซึ่งเป็นผลจากการเกิด Expulsion จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่า ในกรณีใช้โลหะเติมจะพบว่า เกิดรอยร้าว (Crack) ขึ้นมากกว่ากรณีไม่ใช้โลหะเติม

### 5.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS)

จากการวิเคราะห์ทั้งในกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติมพบว่า ในส่วนของบริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone) หรือบริเวณรอยเชื่อมของกรณีไม่ใช้โลหะเติมทั้ง 2 เงื่อนไขมีเฟสเหมือนกัน คือ เฟสมาร์เทนไซต์ และกรณีใช้โลหะเติมทั้ง 2 เงื่อนไขมีเฟสเหมือนกัน โดยเกิดเฟสมาร์เทนไซต์ และมีส่วนผสมของทองแดง (Cu) ผสมอยู่ด้วย ทำให้สรุปได้ว่า ระหว่างกรณีไม่ใช้โลหะเติมและใช้โลหะเติมมีเฟสต่างกัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทดสอบแรงดึงของรอยเชื่อม และศึกษารอยแตกของรอยเชื่อม เพื่อหาความสัมพันธ์กับโครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างจุลภาค
2. การขัดผิวหน้าของชิ้นงานในขั้นตอนขัดกระดาษทราย ควรจับชิ้นงานให้ตรงเพื่อไม่ให้ระนาบของชิ้นงานเอียง เพราะ จะส่งผลกับการส่องดูโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน
3. หลังจากขัดชิ้นงานแล้วไม่ควรปล่อยชิ้นงานทิ้งไว้นานเกินไป เพราะ จะทำให้ชิ้นงานขึ้นสนิม และมีผลกระทบต่อการใช้งานไปเข้ากระบวนการ SEM
4. ในการขัดผิวงานหลังจากขั้นตอนขัดชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าสองเฟสกับเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระดาษทรายแนะนำให้ใช้กระดาษทรายสำหรับห้องปฏิบัติการวิจัยทำความสะอาดให้แห้งก่อน โดยขัด 1 ครั้งจากทางด้านหนึ่งไปอีกทางหนึ่ง เพื่อลดคราบน้ำหรือเศษโลหะที่ติดอยู่บนหน้าชิ้นงาน

5. ควรเลือกเงื่อนไขกระแสเชื่อมและระยะเวลาเชื่อมในการศึกษาต่อไปให้เหมาะสมโลหะพื้นและคำ  
หนึ่งถึงโลหะเติม (Filler Metal) ที่นำมาใช้ ซึ่งในที่นี้คือ แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ (Cu 99.95%) เพื่อลดการเกิด  
จุดบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นในบริเวณรอยเชื่อม หรือให้เกิดน้อยที่สุด



## เอกสารอ้างอิง

- [1] Q. B. Feng, Y. F. Zhu, and H. X. Zhao, "Research on Resistance Spot Welding of DP980Dual Phase Steel," *Adv. Mater. Res.*, vol. 860–863, pp. 780–783, Dec. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.860-863.780.
- [2] F. Zhang, A. Ruimi, P. C. Wo, and D. P. Field, "Morphology and distribution of martensite in dual phase (DP980) steel and its relation to the multiscale mechanical behavior," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 659, pp. 93–103, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.msea.2016.02.048.
- [3] S. Kotari, E. Punna, S. M. Gangadhar, M. Cheepu, P. Sarkar, and S. Venukumar, "Dissimilar metals TIG welding-brazing of AZ31 magnesium alloy to 304 stainless steel," *Mater. Today Proc.*, vol. 39, pp. 1549–1552, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.553.
- [4] N. Mookam, "Optimization of resistance spot brazing process parameters in AHSS and AISI 304 stainless steel joint using filler metal," *Def. Technol.*, vol. 15, no. 3, pp. 450–456, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.dt.2019.03.005.
- [5] S. H. Mousavi Anijdan, M. Sabzi, M. Ghobeiti-Hasab, and A. Roshan-Ghiyas, "Optimization of spot welding process parameters in dissimilar joint of dual phase steel DP600 and AISI 304 stainless steel to achieve the highest level of shear-tensile strength," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 726, pp. 120–125, May 2018, doi: 10.1016/j.msea.2018.04.072.
- [6] มิตรเจริญเคเบิลเวอร์คส์. "การเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance Welding)." [ออนไลน์]. สืบค้นจาก: <https://www.longwellthai.com/17485045/-resistance-welding> [29 กันยายน 2564].
- [7] นางสาวประภาพรพรหมทอง และนายปुरुณ์พนินท์ คำศรี. 2563. "การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม. สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] ชีรวิทย์ เชื้อนแก้ว. 2562. "การเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L กับ SUS425." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม. สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [9] พ.อ.อ. ศักดิ์ชัย จันทศรี, ผศ. ไพบุลย์ แยมเนียน และ ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์. 2555. "การศึกษาสมบัติรอยเชื่อมต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [10] P. Sangrayub, "A STUDY ON INFLUENCE OF RESISTANCE BRAZING PARAMETERS ON BRAZED JOINT BETWEEN 316L STAINLESS STEEL PLATES," p. 166.
- [11] Mikell P. Groover, "Fundamentals of Modern Manufacturing," Fourth Edition, Lehigh University.

- [12] อาทรร แสงทับทิม. 2557. “การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานที่มีต่อความต้านทานแรงเฉือนในรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400 และทังสเตนคาร์ไบด์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ. สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [13] WorldAutoSteel, “Advanced High-Strength Steels Application Guidelines,” Version 6, 2017.
- [14] อีรพงษ์ หาญวิโรจน์กุล. 2554. “เหล็กกล้า (ไร้สนิม) สำหรับงานทนความร้อน.” ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [15] รัฐนาฏ ประยูรมหิศร. 2553. “การออกแบบการทดลองสำหรับตัวแปรของการกัดอาร์คด้วยไฟฟ้าบนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 410.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [16] ดร.ชัยชูญา ธนชยานนท์. 2557. “จุลทรรศน์ศาสตร์ ตอนที่ 1 ภาพรวม.” [ออนไลน์]. สืบค้นจาก: [https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/289\\_51-54.pdf](https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/289_51-54.pdf) [14 มีนาคม 2564].
- [17] “Optical Microscope (OM).” [ออนไลน์]. สืบค้นจาก: [http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id\\_sub=42&id=139](http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=42&id=139) [15 ธันวาคม 2564].
- [18] 2554. “กล้องจุลทรรศน์ Confocal Microscope.” [ออนไลน์]. สืบค้นจาก: <http://www.microscopes.in.th/236/c-confocal.html> [15 ธันวาคม 2564].
- [19] Quality Report. 2563. “จำหน่าย OLYMPUS OLS5100 Laser Confocal Microscopes.” [ออนไลน์]. สืบค้นจาก: <https://qualityreport.co.th/2020/08/17/olympus-ols5000-laser-confocal-microscope/> [20 พฤษภาคม 2564].
- [20] “การศึกษาภาชนะดินเผาด้วยการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับเทคนิควัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์” [ออนไลน์]. สืบค้นจาก: [https://soreda.oas.psu.ac.th/files/944\\_file\\_Chapter4.pdf](https://soreda.oas.psu.ac.th/files/944_file_Chapter4.pdf) [18 ธันวาคม 2564].
- [21] ดนัย กิจชัยนุกูล. “เรื่องน่ารู้ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)” [ออนไลน์]. สืบค้นจาก: [https://www.dss.go.th/images/st-article/pep\\_4\\_2547\\_sem.pdf](https://www.dss.go.th/images/st-article/pep_4_2547_sem.pdf) [12 ตุลาคม 2564].
- [22] “Stainless Steel - Grade 304.” [ออนไลน์]. สืบค้นจาก: <https://www.dm-consultancy.com/TR/dosya/1-59/h/aisi-340-info.pdf> [29 กันยายน 2564].
- [23] กัญจนสิทธิ์ โกศัย และ ณัฐวัฒน์ อยู่อ่อน. 2562. “การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์เสริมเพื่อการทดลองการเชื่อมแบบแก๊สทังสเตนอาร์คด้วยแขนกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 319L.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [24] Z. W. Wang et al., “Microstructural Evolution and Mechanical Behavior of Friction-Stir-Welded DP1180 Advanced Ultrahigh Strength Steel,” *Acta Metall. Sin. Engl. Lett.*, vol. 33, no. 1, pp. 58–66, Jan. 2020, doi: 10.1007/s40195-019-00949-5.
- [25] “Technical Data Sheet: CDA 102.” .pdf. Lucas-Milhaupt, Inc., 2017. pp. 1
- [26] บริษัท ต.วิซซูรณ์ จำกัด. “เกรดและมาตรฐานทองแดง.” [ออนไลน์]. สืบค้นจาก: <https://www.torwitic.com/>

hukorn.com/th/articles/120722 [29 กันยายน 2564].

[27] ST Instruments B.V. 2565. “Ion milling,” [ออนไลน์]. สืบค้นจาก: <https://www.stinstruments.com/samplepreparation/ion-milling/> [20 พฤษภาคม 2565].

[28] รองศาสตราจารย์ แม้น อมรสิทธิ์. 2555. “เอกสารประกอบการบรรยายเรื่องวัสดุวิศวกรรม,” [ออนไลน์]. สืบค้นจาก: <https://sites.google.com/site/typesofmaterialsindustrial/home/unit-2> [29 กันยายน 2564].



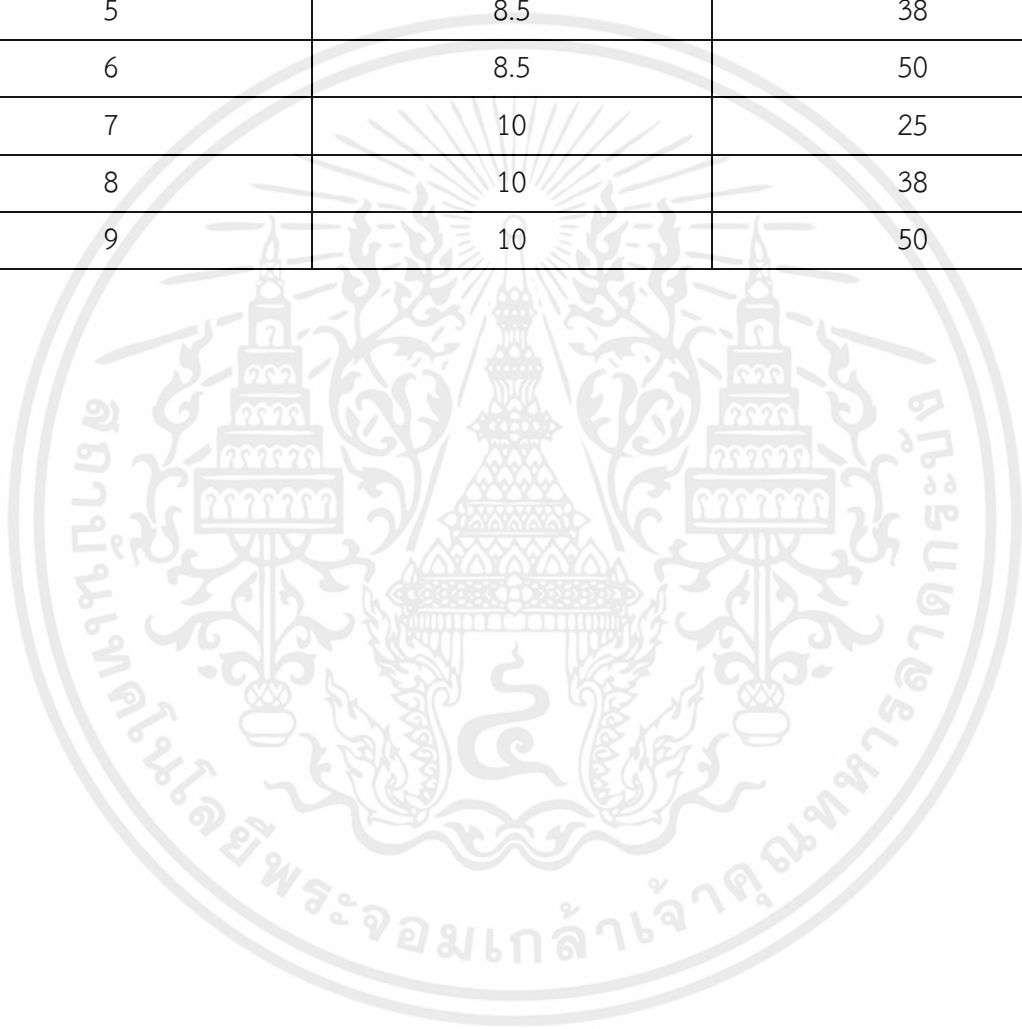
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผก.1 แสดงค่ากระแสเชื่อมและเวลาเชื่อมในแต่ละเงื่อนไข

เงื่อนไข	กระแสเชื่อม (กิโลแอมแปร์)	ระยะเวลาเชื่อม (ไซเคิล)
1	7	25
2	7	38
3	7	50
4	8.5	25
5	8.5	38
6	8.5	50
7	10	25
8	10	38
9	10	50





ภาคผนวก ข

ข้อมูลชิ้นงานที่เลือกวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข.1 แสดงข้อมูลชิ้นงานที่เลือกวิเคราะห์โครงสร้างจูลภาค

กรณี	ชิ้นงาน	เงื่อนไข	กระแสนเชื่อม (กิโลแอมแปร์)	ระยะเวลาเชื่อม (ไซเคิล)
ไม่ใช้โลหะเติม	1	3	7	50
	2	7	10	25
ใช้โลหะเติม	3	4	8.5	25
	4	8	10	38





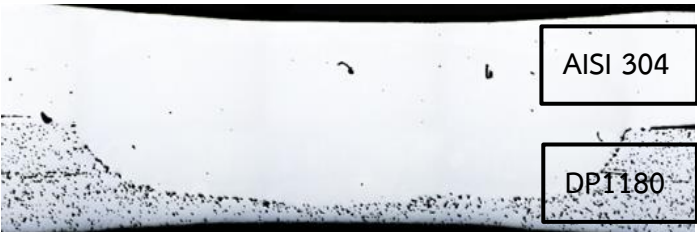


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้








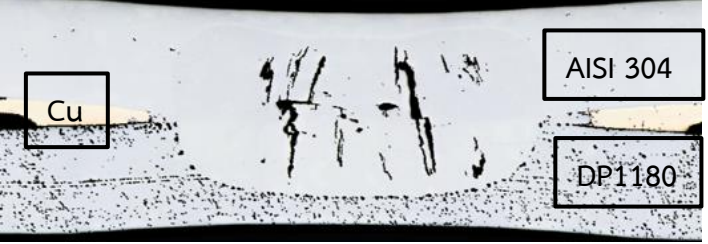




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

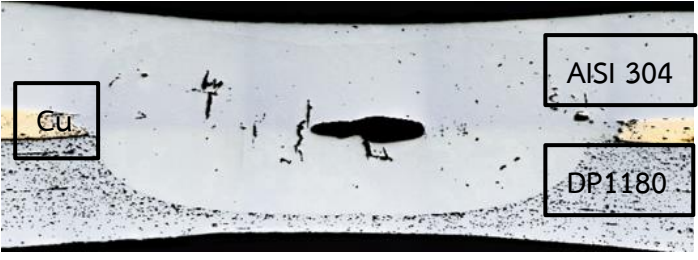

ตารางที่ ผค.1 ภาพแสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม

กรณี	เงื่อนไข	ลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม
ไม่ใช่โลหะเต็ม	กระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล	
	กระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล	
	กระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล	
	กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล	
	กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<p>กระแสเชื่อม 8.5 กิโล แอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคล</p>	 <p>AISI 304</p> <p>DP1180</p>
	<p>กระแสเชื่อม 10 กิโล แอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคล</p>	 <p>AISI 304</p> <p>DP1180</p>
	<p>กระแสเชื่อม 10 กิโล แอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคล</p>	 <p>AISI 304</p> <p>DP1180</p>
	<p>กระแสเชื่อม 10 กิโล แอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคล</p>	 <p>AISI 304</p> <p>DP1180</p>
<p>ใช้โลหะ เติม</p>	<p>กระแสเชื่อม 7 กิโล แอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคล</p>	 <p>AISI 304</p> <p>DP1180</p>

<p>กระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล</p>	
<p>กระแสเชื่อม 7 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล</p>	
<p>กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล</p>	
<p>กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล</p>	
<p>กระแสเชื่อม 8.5 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล</p>	

<p>กระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 25 ไซเคิล</p>	
<p>กระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 38 ไซเคิล</p>	
<p>กระแสเชื่อม 10 กิโลแอมแปร์ ระยะเวลาเชื่อม 50 ไซเคิล</p>	