

อิทธิพลรูปแบบโลหะเติมที่มีผลต่อสมบัติรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิม  
ต่างชนิด AISI 304 และ AISI 316L

EFFECT OF FILLER METALS ON DISSIMILAR AISI 304 AND  
AISI 316L STAINLESS STEEL TUBE BUTT JOINT PROPERTIES

ชเนรินทร์ รักสัตย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อิทธิพลรูปแบบโลหะเต็มที่มีผลต่อสมบัติรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิม  
ต่างชนิด AISI 304 และ AISI 316L

ชเนรินทร์ รักสัตย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อิทธิพลรูปแบบโลหะเติมที่มีผลต่อสมบัติรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI 304 และ AISI 316L

Effect of Filler Metals on Dissimilar AISI 304 and AISI 316L Stainless Steel Butt Joint Properties

ชื่อ - นามสกุล

นายชนเรรินทร์ รักสตัย

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.

ปีการศึกษา

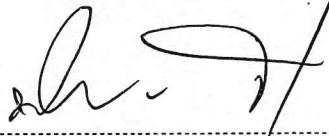
2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.)



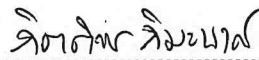
กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทร์มณี, Ph.D.)



กรรมการ

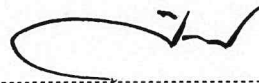
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.-Ing.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 25 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลรูปแบบโลหะเติมที่มีผลต่อสมบัติรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิม ต่างชนิด AISI 304 และ AISI 316L
นักศึกษา	นายชเนรินทร์ รักสัตย์
สาขา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2562

## บทคัดย่อ

รอยต่อต่อเหล็กกล้าไร้สนิมถูกใช้งานเพิ่มขึ้นในอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้เนื่องจากความต้องการโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่น ความต้านทานการกัดกร่อน และเกณฑ์การเลือกใช้วัสดุเกรดอาหาร อย่างไรก็ตามการหาค่าตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดรอยต่อที่มีความสมบูรณ์เป็นสิ่งที่ท้าทายและมีการศึกษาอย่างต่อเนื่องเพื่อยืดอายุการใช้งานของรอยต่อ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติทางกลของรอยต่อต่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316L และ 2) ศึกษาและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างโลหะวิทยาของสมบัติทางกลของรอยต่อต่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316L

ต่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316L ไร้ตะเข็บที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 60.3 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 54.7 มม. คือ วัสดุหลักในการทดลองนี้ ขึ้นทดสอบรอยต่อต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดที่มีความยาวรวม 120 มม. ถูกเตรียมด้วยการเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุมตามแนวรอยต่อชนตามเส้นรอบวงด้วยตัวแปรกระบวนการเชื่อมที่กำหนด รอยต่อที่ได้จากการเชื่อมถูกนำไปทำการเตรียมและศึกษาความแข็งแรงดึง ความแข็ง และโครงสร้างจุลภาค

ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การเพิ่มกระแสเชื่อมในการเชื่อมรอยต่อด้วยโลหะเติมทั้ง 3 ชนิดคือ ER309LSi ER316L และ ER316LSi ส่งผลโดยตรงต่อความสมบูรณ์ของโลหะเชื่อมในรอยต่อและทำให้เกิดการเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อ อย่างไรก็ตามการใช้กระแสเชื่อมที่มีค่าสูงทำให้เกิดค่าความร้อนเข้าสูงไม่แนะนำให้ทำการเชื่อมรอยต่อนี้เนื่องจากสามารถทำให้เกิดโลหะเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์และเป็นจุดเริ่มต้นในการเกิดการพังทลายของชิ้นทดสอบ การเปลี่ยนแปลงโลหะเติมที่มีส่วนผสมทางเคมีของธาตุผสมที่แตกต่างมีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมโลหะเติมที่มีปริมาณโครเมียมสูงส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งดึงของโลหะเชื่อมเนื่องจากการเพิ่มเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ที่กระจายตัวสม่ำเสมอในพื้นที่หลักโลหะเชื่อม สภาวะตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ความแข็งแรงดึงสูงสุด 607 เมกะปาสคาล คือ กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ รอยต่อชนแบบไม่มีร่องบาก และโลหะเติม ER309LSi

**คำสำคัญ:** รอยต่อโลหะต่างชนิด เหล็กกล้าไร้สนิม การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม ความแข็งแรงดึง

**Thesis Title** Effect of Filler Metals on Dissimilar AISI 304 and AISI 316L  
Stainless Steel Tube Butt Joint Properties

**Name – Surname** Mr. Chanerin Ruksut

**Program** Manufacturing Engineering

**Thesis Advisor** Assistant Professor Kitiipong Kimapong, Ph.D.

**Academic Year** 2019

## Abstract

Dissimilar stainless steel tube joint was increasingly applied in fruit juice manufacturing industry according to the requirement of a flexible structure, a local corrosion resistance, and the food grade material selection criteria. However, an optimized welding process parameter for producing a sound joint was challenged and continuously studied. Therefore, this research aimed to: 1) study an effect of TIG welding process parameters on AISI 304 and AISI 316L stainless steels butt joint properties and 2) identify the relationship between the microstructure and the mechanical properties of the AISI 304 and AISI 316L stainless steels butt joints.

The AISI 304 and AISI 316L stainless steel seamless tubes with an outer diameter of 60.3 mm and an inner diameter of 54.7 mm, were used as base materials in this experiment. The dissimilar stainless steel tube butt joints, 120 mm in total length, were prepared using a gas tungsten arc welding (GTAW) along the circumference butt line with specific welding process parameters. Then, the tensile strength, the hardness, and the microstructure of the produced joints were investigated.

The study results revealed that the increase of the welding current using three different filler metals - ER309LSi, ER316L, and ER316LSi - directly affected the sound weld metal of the joint. Moreover, it increased the tensile strength of the joint. However, the high welding current was not recommended for welding the joint because it produced high heat input that caused the incomplete weld metal. This incomplete point could lead to fractures in the test specimen. The filler metals that contained various alloying elements tended to vary mechanical properties and microstructure of the weld metal. In addition, the filler metal contained high chromium that could increase the hardness and the tensile strength of the weld metal because it increased the chromium carbide phase of the uniform dispersion in the weld metal matrix. The optimum welding process parameter that produced the maximum tensile strength of 607 MPa was the welding current of 140 A, the no V groove butt joint, and ER309LSi filler metal.

**Keywords:** dissimilar metal joint, stainless steel, gas tungsten arc welding, tensile strength

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องอิทธิพลรูปแบบโลหะเติมที่มีผลต่อสมบัติรอยต่อชนท้อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L สำเร็จได้ด้วยความสำเร็จและความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่อง เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องทดสอบวัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ในการดำเนินโครงการ รวมทั้งคำแนะนำข้อมูลและเอกสารในการจัดทำวิทยานิพนธ์และการศึกษาตลอดหลักสูตร มา ณ ที่นี้ด้วย

ชเนรินทร์ รักสัตย์



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(13)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	16
1.3 ขอบเขตโครงการวิจัย.....	16
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.1 วัสดุ.....	17
2.2 กระบวนการเชื่อม.....	20
2.3 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน.....	28
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน.....	43
3.1 การดำเนินวิทยานิพนธ์.....	43
3.2 วัสดุในการทดลอง.....	44
3.3 กระบวนการเชื่อม.....	46
3.4 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง.....	49
3.5 วิธีการเชื่อม.....	51
3.6 การตรวจสอบชิ้นงานทดลอง.....	52
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน.....	57
4.1 อิทธิพลของกระแสเชื่อม GTAW ที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304และAISI304L แบบไม่มีร่องบาก.....	57
4.2 การเปรียบเทียบสมบัติรอยต่อชนท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L แบบมีร่องบากวีและแบบไม่มีร่องบาก.....	66
4.3 อิทธิพลโลหะเติม (Filler Metal ) ที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อชนท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304และAISI316L.....	74

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 อิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีของโลหะเติมต่างชนิดที่มีผลต่อสมบัติของทางกลของ ท่อต่อชน AISI304และAISI316L.....	92
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	99
5.1 สรุป.....	99
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	100
บรรณานุกรม.....	101
ภาคผนวก.....	105
ภาคผนวก ก ผลการทดลองที่ได้และภาพโครงสร้างระดับจุลภาค.....	106
ภาคผนวก ข ผลงานที่ตีพิมพ์เผยแพร่.....	120
ประวัติผู้เขียน.....	141





## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนิติก (Austenitic stainless steels).....	19
ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steels).....	19
ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steels).....	20
ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation hardening stainless steels).....	20
ตารางที่ 2.5 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนิติก (Austenitic stainless steels).....	26
ตารางที่ 2.6 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steels).....	27
ตารางที่ 2.7 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steels).....	27
ตารางที่ 2.8 แสดงค่าความแข็งของโลหะ.....	32
ตารางที่ 2.9 ตารางเปรียบเทียบความแข็ง.....	33
ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก AISI 304และAISI 316L.....	44
ตารางที่ 3.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง.....	47
ตารางที่ 3.3 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการทดลองแต่ละชุด.....	49

## สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1.1	ผลไม้และน้ำผลไม้ทั่วไป.....	14
รูปที่ 1.2	ส่วนของท่อส่งน้ำผลไม้ที่ต้องเชื่อมต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด.....	15
รูปที่ 2.1	การเชื่อมรูปแบบต่างๆ.....	21
รูปที่ 2.2	เชลฟเลอร์ไดอะแกรม (Schaeffler diagram).....	25
รูปที่ 2.3	ตัวอย่างลักษณะของขึ้นทดสอบแรงดึงแบบแผ่นและแบบแท่ง.....	29
รูปที่ 2.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress - Strain diagram).....	30
รูปที่ 2.5	ลักษณะการกดความแข็งแบบวิกเกอร์.....	31
รูปที่ 2.6	แสดงตำแหน่งการความแข็งของงานเชื่อม.....	31
รูปที่ 2.7	แสดงตำแหน่งของการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม.....	35
รูปที่ 2.8	กล้องจุลทรรศน์.....	36
รูปที่ 2.9	แสดงภาพที่ถ่ายด้วยกล้อง SEM.....	37
รูปที่ 2.10	แผนภาพแสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....	37
รูปที่ 2.11	แผนภาพแสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....	38
รูปที่ 2.12	แผนภาพแสดงสัญญาณต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร.....	39
รูปที่ 2.13	ภาพจากสัญญาณแบบอิเล็กตรอนทุติยภูมิ.....	39
รูปที่ 2.14	ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ.....	40
รูปที่ 2.15	ภาพจากสัญญาณ X-ray.....	40
รูปที่ 3.1	แผนภาพการไหลแสดงกระบวนการทดลอง.....	43
รูปที่ 3.2	ขนาดชิ้นงานก่อนทำการทดลองของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316L.....	44
รูปที่ 3.3	แบบจำลองการจับชิ้นงานเชื่อมแบบต่อท่อชน.....	45
รูปที่ 3.4	รูปแบบของร่องบาก.....	45
รูปที่ 3.5	รูปแบบรอยต่อชนที่ใช้ในการทดลอง.....	45
รูปที่ 3.6	อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสำหรับการเชื่อม.....	46
รูปที่ 3.7	เครื่องเชื่อมทิกที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานทดลอง.....	47
รูปที่ 3.8	อุปกรณ์จับยึดหัวเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง.....	48
รูปที่ 3.9	แก๊สปกคลุมที่ใช้ในการทดลอง.....	48
รูปที่ 3.10	Schaeffler Diagram แสดง % เฟอร์ไรต์ของลวดเชื่อม AWS ER 309LSi.....	50
รูปที่ 3.11	Schaeffler Diagram แสดง % เฟอร์ไรต์ของลวดเชื่อม AWS ER 316L.....	50
รูปที่ 3.12	Schaeffler Diagram แสดง % เฟอร์ไรต์ของลวดเชื่อม AWS ER 316LSi.....	51
รูปที่ 3.13	แบบจำลองการจับชิ้นงานเชื่อมแบบต่อท่อชน.....	52
รูปที่ 3.14	เครื่องทดสอบแรงดึง.....	52

## สารบัญญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.15	ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส.....	53
รูปที่ 3.16	เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส.....	53
รูปที่ 3.17	ตำแหน่งการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส.....	53
รูปที่ 3.18	เครื่องขัดแบบจานหมุนใช้กระดาษทราย.....	54
รูปที่ 3.19	เครื่องขัดแบบจานหมุนใช้ผ้าสักหลาด.....	55
รูปที่ 3.20	กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างโลหะ.....	56
รูปที่ 3.21	ตำแหน่งการทดสอบโครงสร้างมหภาค.....	56
รูปที่ 3.22	ตำแหน่งการทดสอบโครงสร้างจุลภาคและตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี.....	56
รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรง การยึดตัว และกระแสมเชื่อมของรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L.....	57
รูปที่ 4.2	ตำแหน่งการฉีกขาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนไม่มีร่องบากท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสมเชื่อมต่างๆ.....	58
รูปที่ 4.3	โครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงของรอยต่อชนแบบไม่มีร่องบากท่อนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316L ที่เชื่อมด้วยกระแสมเชื่อมต่างๆ.....	59
รูปที่ 4.4	การวัดค่ารูปร่างของโลหะเชื่อมรอยต่อชนไม่มีร่องบากท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสมเชื่อมต่างๆ.....	60
รูปที่ 4.5	อิทธิพลของชนิดโลหะเติมที่มีผลต่อขนาดรอยเชื่อมลักษณะต่างๆของโลหะเชื่อมรอยต่อชนไม่มีร่องบาก.....	61
รูปที่ 4.6	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนไม่มีร่องบากท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด.....	62
รูปที่ 4.7	ขนาดของโลหะเชื่อมของรอยต่อชนแบบไม่มีร่องบากท่อนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสมเชื่อมต่างๆ.....	63
รูปที่ 4.8	โครงสร้างพื้นฐานของโลหะฐาน AISI304 และ AISI316L.....	64
รูปที่ 4.9	โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อรอยต่อชนไม่มีร่องบากท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสมเชื่อม 140 แอมแปร์.....	64
รูปที่ 4.10	การทดสอบความแข็งแรงของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมที่กระแสมเชื่อม 140 แอมแปร์ โดยใช้โลหะเติม ER 316LSi.....	65
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง อัตราการยึดตัว และกระแสมเชื่อมของรอยต่อชนแบบมีร่องบากตัววีท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L.....	66
รูปที่ 4.12	ตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนแบบมีร่องบากตัววีเหล็กกล้า ไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสมเชื่อมต่างๆ.....	67

## สารบัญรูป (ต่อ)

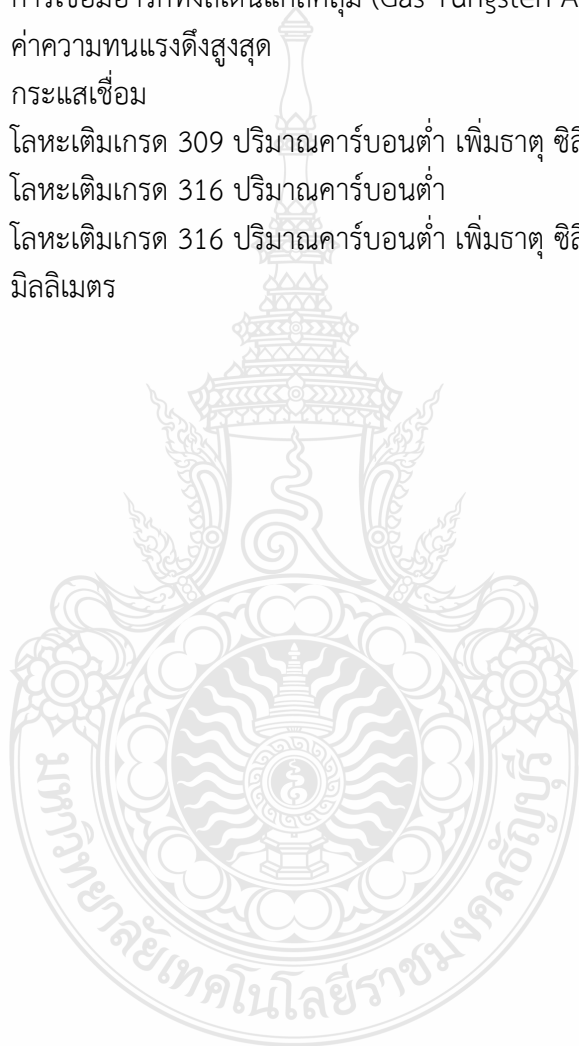
	หน้า
รูปที่ 4.13	อิทธิพลของโลหะเติม ER316LSi ที่มีผลต่อขนาดรอยโลหะเติมลักษณะต่างๆ ของโลหะเติมรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L แบบมีร่องบาก..... 68
รูปที่ 4.14	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนแบบมีร่องบากต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI 304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ..... 69
รูปที่ 4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง การยึดตัว และกระแสเชื่อมของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L..... 70
รูปที่ 4.16	แสดงตำแหน่งของการฉีกขาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนแบบไม่มีร่องบากต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ..... 71
รูปที่ 4.17	อิทธิพลของชนิดโลหะเติมที่มีผลต่อขนาดรอยเชื่อมลักษณะต่างๆ ที่เชื่อมด้วยกระแสต่างๆ ของรอยต่อชนแบบไม่มีร่องบากของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด..... 72
รูปที่ 4.18	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนไม่มีร่องบากต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ..... 73
รูปที่ 4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง อัตราการยึดตัว และกระแสเชื่อมของรอยต่อแบบไม่มีร่องบากที่เชื่อมด้วยลวด ER309LSi..... 74
รูปที่ 4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง การยึดตัว และกระแสเชื่อมของรอยต่อแบบไม่มีร่องบากที่เชื่อมด้วยลวด ER316L..... 75
รูปที่ 4.21	เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนไม่มีร่องบากเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L กระแส 140 แอมแปร์ของโลหะเติมทั้ง 3 รูปแบบ..... 76
รูปที่ 4.22	ตำแหน่งการฉีกขาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนไม่มีร่องบากต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยลวด ER309LSi กระแสเชื่อมต่างๆ..... 77
รูปที่ 4.23	ตำแหน่งการฉีกขาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนไม่มีร่องบากต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยลวด ER316L กระแสเชื่อมต่างๆ..... 78
รูปที่ 4.24	รูปร่างแนวเชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi ด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ..... 79
รูปที่ 4.25	รูปร่างแนวโลหะเติมด้วยโลหะเติม ER316L ด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ..... 80
รูปที่ 4.26	อิทธิพลของโลหะเติม ER309LSi ที่มีผลต่อขนาดรอยเชื่อมลักษณะต่างๆ..... 81
รูปที่ 4.27	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วย โลหะเติม ER309LSi กระแสเชื่อมต่างๆ..... 82
รูปที่ 4.28	อิทธิพลของโลหะเติม ER 316L ที่มีผลต่อขนาดรอยเชื่อมลักษณะต่างๆ..... 83

## สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.29	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER316L กระแสเชื่อมต่างๆ..... 84
รูปที่ 4.30	โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนไม่มีร่องบากเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ด้วยโลหะเติม ER309LSi ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์..... 85
รูปที่ 4.31	โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนไม่มีร่องบากท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ด้วยโลหะเติม ER316L ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์..... 86
รูปที่ 4.32	โครงสร้างจุลที่ตำแหน่งฉีกขาดที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi..... 87
รูปที่ 4.33	โครงสร้างจุลที่ตำแหน่งฉีกขาดที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER316L..... 88
รูปที่ 4.34	การทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์โดยใช้โลหะเติม ER309LSi..... 89
รูปที่ 4.35	การทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ โดยใช้โลหะเติม ER316L..... 90
รูปที่ 4.36	การทดสอบความแข็งของรอยต่อชนไม่มีร่องบากเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ โดยใช้โลหะเติม ER309LSi ER316L และ ER316LSi..... 91
รูปที่ 4.37	แสดงตำแหน่งการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานตัวอย่าง..... 92
รูปที่ 4.38	แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดด้วยโลหะเติม ER309LSi ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์..... 93
รูปที่ 4.39	ส่วนผสมทางเคมีของจุดที่ตรวจสอบของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่ผ่านการเชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์..... 94
รูปที่ 4.40	แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดด้วยโลหะเติม ER316L ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์..... 95
รูปที่ 4.41	ส่วนผสมทางเคมีของจุดที่ตรวจสอบของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่ผ่านการเชื่อมด้วยโลหะเติม ER316L ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์..... 96
รูปที่ 4.42	แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดด้วยโลหะเติม ER316LSi ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์..... 97
รูปที่ 4.43	ส่วนผสมทางเคมีของจุดที่ตรวจสอบของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่ผ่านการเชื่อมด้วยโลหะเติม ER316LSi ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์..... 98

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AISI304	เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304
AISI316L	เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316
HV	หน่วยความแข็ง (Micro Hardness Vickers)
GTAW	การเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม (Gas Tungsten Arc Welding)
TIG	การเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม (Gas Tungsten Arc Welding)
MPa	ค่าความทนแรงดึงสูงสุด
A	กระแสนเชื่อม
ER309LSi	โลหะเติมเกรด 309 ปริมาณคาร์บอนต่ำ เพิ่มธาตุ ซิลิคอน
ER316L	โลหะเติมเกรด 316 ปริมาณคาร์บอนต่ำ
ER316LSi	โลหะเติมเกรด 316 ปริมาณคาร์บอนต่ำ เพิ่มธาตุ ซิลิคอน
mm.	มิลลิเมตร



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

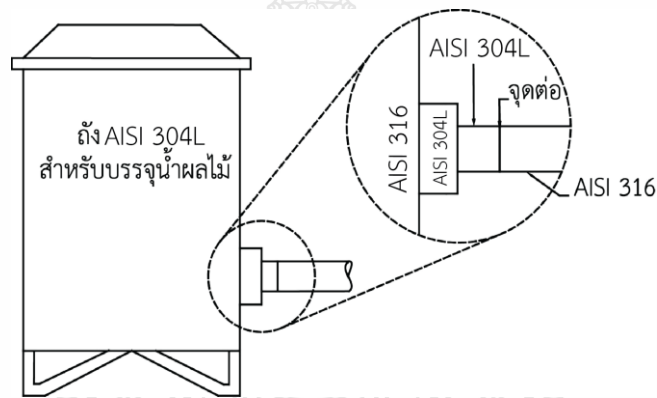
อุตสาหกรรมการผลิตน้ำผลไม้เป็นอุตสาหกรรมในการแปรรูปสินค้าเกษตรสำคัญที่ช่วยเพิ่มมูลค่าสินค้าเกษตรไทย เช่น ผักและผลไม้ ซึ่งมีปริมาณเกินความต้องการในฤดูกาลเก็บเกี่ยว และส่งผลทำให้ราคาของผักและผลไม้ในฤดูกาลเก็บเกี่ยวนั้นมีราคาตกต่ำลง [1] นอกจากนี้อุตสาหกรรมนี้เป็นอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าทำเงินทั้งในและนอกประเทศมากกว่าหนึ่งหมื่นล้านบาทและเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวสูงอย่างต่อเนื่อง [2] การเพิ่มมูลค่าของอุตสาหกรรมการผลิตน้ำผลไม้เข้าสู่ตลาดนับว่าเป็นแนวคิดสำคัญที่สามารถตอบโจทย์ยุทธศาสตร์การวิจัยรายประเด็นด้านอาหารและความมั่นคงของประเทศที่ต้องการทำให้ประเทศเป็นศูนย์กลางและการกระจายอาหารของประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน (AEC Food production and processing hub) ได้ [3]

เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมอาหารที่ผลิตเพื่อการส่งออกให้ผู้บริโภครับประทาน การเลือกวัสดุและอุปกรณ์ในการผลิตน้ำผลไม้จำเป็นต้องผลิตภายใต้หลักเกณฑ์ข้อกำหนดขั้นพื้นฐานที่จำเป็นในการผลิตและควบคุม (Good Manufacturing Practice: GMP) [4] ในโครงสร้างระบบการส่งถ่ายและบรรจุน้ำผลไม้ ประกอบด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมหลายชนิด กล่าวคือในส่วนของถังบรรจุนั้นในปัจจุบันใช้วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคเกรด AISI 304 เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) สูง มีความต้านทานการกัดกร่อนดีเยี่ยม และมีราคาเหมาะสมในการใช้งาน ขณะเดียวกันในท่อส่งน้ำผลไม้ปัจจุบันได้ถูกกำหนดให้ใช้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคเกรด AISI 316L ซึ่งเป็นเกรดที่ใช้กับผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับอาหาร [5] การนำเอาเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองเกรดมาใช้งานนี้ส่งผลทำให้เกิดโครงสร้างโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคเกรด AISI 304 และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคเกรด AISI 316L ที่จุดต่อของการนำเอาน้ำผลไม้ออกจากถังพักดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.1 ผลไม้และน้ำผลไม้ทั่วไป [6]

การเชื่อมต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคต่างชนิดระหว่าง AISI 304 และ AISI 316L นั้นเป็นสิ่งท้าทายและยากลำบากในการปฏิบัติการเนื่องจากเหล็กกล้าทั้งสองชนิดนี้มีสมบัติทางกล เคมีและกายภาพที่แตกต่างกัน ความยากลำบากในการควบคุมตัวแปรการเชื่อมเพื่อทำให้เกิดการอาร์คคงที่บริเวณรอยต่อส่งผลทำให้เกิดรอยเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ (Sound joint) ค่อนข้างยาก เมื่อทำการเชื่อมรอยต่อแล้วมักทำให้เกิดจุดบกพร่องต่างๆ โดยเฉพาะจุดบกพร่องที่เกิดการเปลี่ยนรูปของคาร์บอนเมื่อได้รับความร้อน (Weld decay) ส่งผลทำให้โครเมียมออกไซด์เป็นโครเมียมคาร์ไบด์ และทำให้เกิดการลดความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเป็นจุดๆ สุดท้ายเมื่อนำไปใช้งานแล้วส่งผลทำให้เกิดการรั่วซึมบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) รอบๆ แนวเชื่อมขึ้น [7] ด้วยเหตุนี้การเชื่อมซ่อมพื้นที่เกิดการกัดกร่อนและชำรุดจึงจำเป็นต้องมีการดำเนินการเชื่อมซ่อมหรือการเชื่อมซ้อนแนวบนพื้นที่การเชื่อมเดิม (Multi-pass welding) เพื่อให้ได้รอยต่อที่มีความสมบูรณ์และสามารถใช้งานในระบบท่อส่งน้ำผลไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 1.2 ส่วนของท่อส่งน้ำผลไม้ที่ต้องเชื่อมต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด

ที่ผ่านมาวิธีการเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีประสิทธิภาพและถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่น การเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สคลุม (Gas Tungsten Arc Welding: GTAW) [8,9] การเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม [10] การเชื่อมอาร์คลวดหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW) [11-14] การเชื่อมอาร์คลวดไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding: FCAW) [15] การเชื่อมเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> Laser Welding) [16, 17] เป็นต้น การพยากรณ์สมบัติของรอยต่อเชื่อมส่วนใหญ่เป็นการสร้างรูปแบบจำลองเพื่อหาค่าความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ที่เกิดขึ้นในการเชื่อมท่อเข้ากับแผ่นในเครื่องเปลี่ยนถ่ายความร้อน [18] หรือในการเชื่อมท่อต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค 304 [14] หรือการเชื่อมแผ่นเหล็ก DIN EN 10025-2:2011 [10] หรือท่อผนังหนาเหล็กกล้าต่างชนิด [8] เป็นต้น

ข้อมูลการวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการเชื่อมซ่อมซ้อนแนวรอยเชื่อมต่อระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316L ไม่ได้มีรายงานไว้ และมีความเป็นไปได้ในการเชื่อมซ่อมเพื่อสามารถนำกลับมาใช้งานได้ หากมีการรายงานผลการเชื่อมซ่อมรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดนี้ อาจสามารถ



ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์การเชื่อมซ่อมในระบบท่อส่งถ่ายน้ำผลไม้ได้ โครงการวิจัยนี้จึงมีกรอบแนวคิดในการศึกษาการเชื่อมซ่อมรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316L ที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยทำการศึกษาตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประยุกต์ใช้ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 ศึกษาตัวแปรการเชื่อมทิกด้วยโลหะเติมต่างชนิดที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อชนท่อกเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI 304 และ AISI 316L

1.2.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยต่อชนท่อกเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI 304 และ AISI 316L

## 1.3 ขอบเขตโครงการวิจัย

1.3.1 การเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม (Gas Tungsten Arc Welding: GTAW) หรือการเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas: TIG) แบบเติมลวดอัตโนมัติในการเชื่อมชิ้นงานทดลอง

1.3.2 โลหะเติม AWS ER309LSi, ER316L, 316LSi

1.3.3 รอยต่อชนท่อกเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI 316L มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 60.3 มิลลิเมตรและความหนาของผนังท่อ 2.8 มิลลิเมตร ท่อถูกตัดให้มีความยาว 60 มิลลิเมตรเพื่อประกอบเป็นรอยต่อชนท่อกที่มีความยาวรวม 120 มิลลิเมตร

1.3.4 การเชื่อมเดินแนวรอบท่อโดยหัวเชื่อมถูกยึดอยู่กับที่ และชิ้นงานถูกจับยึดหมุนตามเส้นรอบวง และสิ้นสุดที่จุดเริ่มต้น ด้วยความเร็วรอบ 150 มิลลิเมตร/นาที อัตราไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตร/นาที อัตราการป้อนลวดเชื่อม 200 มิลลิเมตร/นาที

1.3.5 ตัวแปรการเชื่อม

1) ชนิดโลหะเติม: AWS ER309LSi, ER316L, 316LSi

2) กระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อม: 80 100 120 140 และ 160 แอมแปร์

1.3.6 ศึกษาสมบัติของรอยต่อหลังจากการเชื่อมซ่อมประกอบด้วย การทดสอบความแข็งแรงดึง ความแข็ง และโครงสร้างทางโลหะวิทยา

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพิ่มศักยภาพการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการเชื่อมซ่อมรอยต่อชนท่อกเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI 304 และ AISI 316L ในระบบส่งถ่ายน้ำผลไม้ ที่เป็นรอยต่อที่อยู่ในช่วงการพัฒนาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้

1.4.2 จัดเตรียมข้อมูล วิธีการ และผลการทดลองเบื้องต้น ที่สามารถนำเสนอให้แก่อุตสาหกรรมน้ำผลไม้ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อทำการเชื่อมได้ทันที

1.4.3 เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต โดยคาดว่าผลการทดลองที่ได้จะเป็นหนึ่งทางเลือกในการใช้เป็นข้อมูลพิจารณาในการซ่อมแซมและยึดอายุรอยต่อชนท่อกเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI 304 และ AISI 316L ในสารละลายน้ำผลไม้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วัสดุ

##### 2.1.1 เหล็กกล้าไร้สนิม [19]

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็น ศัพท์ทั่วไปที่ใช้เรียกเหล็กในกลุ่มที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นโลหะผสมระหว่างเหล็กและคาร์บอน ซึ่งส่วนประกอบจะมีโครเมียมเป็นส่วนผสมเหล็ก 10% ของน้ำหนักโดยรวมหรือมากกว่าการเพิ่มโครเมียมเข้าไปเป็นลักษณะเฉพาะของเหล็กกล้าไร้สนิมทำให้มีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนที่ดี นอกจากนี้สมบัติพื้นฐานของเหล็กกล้าไร้สนิมนั้น สามารถปรับปรุงได้ โดยการเพิ่มส่วนผสมของโครเมียมและเพิ่มธาตุอื่นๆ เช่น โมลิบดีนัม นิกเกิล และไนโตรเจน เพื่อให้ได้เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพที่สูงขึ้น [26] โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมจะแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มใหญ่ๆตามโครงสร้างดังนี้

1) กลุ่มออสเทนนิค (Austenitic stainless steels) มีโครงสร้างเนื้อเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) อะตอมของผลึกจัดเรียงตัวแบบ FCC (Face-Centered Cubic) มีนิกเกิล และแมงกานีส เป็นธาตุสำคัญที่ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์

สมบัติที่สำคัญของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิค คือ สมบัติที่แม่เหล็กดูดไม่ติด (Non-Magnetic) หรืออาจดูดติดแบบอ่อนอ่อนหากเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) ไม่สามารถนำมาชุบแข็งได้ มีส่วนผสมหลักที่สำคัญได้แก่โครเมียมไม่ต่ำกว่า 16% คาร์บอนไม่เกิน 0.15% และส่วนผสมของธาตุนิกเกิล หรือ แมงกานีส อย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองอย่างรวมกัน เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิคเป็นที่ใช้งานแพร่หลายมากที่สุดถึงกว่า 70% เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคยังแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ได้แก่

- ประเภทออสเทนนิคโครเมียม-นิกเกิล (Chromium-nickel stainless steels) ใช้หมวด 300 เป็นตัวสื่อ ประเภทนี้มีนิกเกิลผสมไม่ต่ำกว่า 8% บางชนิดอาจมีไททาเนียมและโมลิบดีนัมผสมอยู่ด้วย สมบัติที่สำคัญคือ มีสมบัติการขึ้นรูปได้ดีเยี่ยม มีสมบัติทนการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยม และใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงและต่ำได้ดี ตัวอย่างชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมในประเภทนี้เช่น 301 302 303 304 305 308 309 310 314 31, 317 321 และ 347 เป็นต้น

- ประเภทออสเทนนิคโครเมียม-นิกเกิล-แมงกานีส (Chromium-nickel-manganese stainless steels) ใช้หมวด 200 เป็นตัวสื่อประเภทนี้มีแมงกานีสผสมอยู่ประมาณ 4-5% และอาจมีนิกเกิลผสมอีก 1-4% แต่สมบัติโดยรวมไม่ว่าจะเป็นเรื่องการขึ้นรูปและสมบัติทนทานต่อการผุกร่อนยังเป็นรองกลุ่มออสเทนนิคหมวด 300 ตัวอย่างชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมในประเภทนี้ เช่น 201 และ 202 เป็นต้น

2) กลุ่มเฟอร์ริค (Ferritic stainless steels) มีโครงสร้างเนื้อโลหะเป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) อะตอมของผลึกจัดเรียงตัวแบบ BCC (Body-Centered Cubic) เป็นโครงสร้างอะตอมพื้นฐานของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เหมือนกับเหล็กกล้าคาร์บอน ธาตุสำคัญที่เป็นตัวหลักของเหล็กกล้าไร้

สนิมกลุ่มนี้ได้แก่ โครเมียม ไม่ต่ำกว่า 11% และ คาร์บอนไม่เกิน 0.12% ใช้หมวด 400 เป็นตัวสื่อสมบัติที่สำคัญของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้คือ แม่เหล็กสามารถดูดติดได้ (Magnetic) แปรรูปได้ง่าย มีความสามารถในการนำความร้อนได้ดีเยี่ยม ราคาต่ำและเสถียร

3) กลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steels) มีโครงสร้างเริ่มต้นเช่นเดียวกับกลุ่มเฟอร์ริติก อะตอมของผลึกจัดเรียงตัวแบบ BCC (Body-Centered Cubic) แต่เมื่อผ่านการชุบแข็งแล้วจะได้โครงสร้างเป็นมาเทนไซด์ ใช้หมวด 400 เป็นตัวสื่อเช่นเดียวกับกลุ่มเฟอร์ริติก มีส่วนผสมใกล้เคียงกับกลุ่มเฟอร์ริติกมีธาตุโครเมียมราว 11.5-18% คาร์บอนอยู่ราว 0.08%-0.75% ที่สำคัญคือไม่มีนิเกิลหรือหากมีก็ไม่เกิน 0.6%

สมบัติที่สำคัญของเหล็กกล้าไร้สนิมตระกูลนี้คือ แม่เหล็กดูดติดได้ (Magnetic) สามารถปรับความแข็งได้โดยการชุบแข็ง (การให้ความร้อนแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว: Quenching) ที่อุณหภูมิ 400-510 °C และอบคืนตัว (Tempering) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 °C สามารถลดความแข็งได้คล้ายกับเหล็กกล้าคาร์บอน ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ มีสมบัติต้านทานการสึกกร่อนและแข็งแรงทนทานได้ดียิ่งกว่าเหล็กไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกและเฟอร์ริติก มักนำไปใช้งานที่สำคัญในการผลิตเครื่องตัด อุตสาหกรรมเครื่องบิน พัดลมกังหัน เป็นต้น ตัวอย่างชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมในประเภทนี้ เช่น 403 410 416 420 และ 440 เป็นต้น

4) กลุ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation hardening stainless steels) มีโครงสร้างเริ่มต้นเป็นออสเทนนิติกเมื่อผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1030 °C แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศจะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นมาเทนไซด์ จากนั้นนำไปตกผลึกแข็งที่อุณหภูมิช่วง 500-600 °C แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศอีกครั้ง จะทำให้ได้โครงสร้างมาเทนไซด์สมบูรณ์แบบ จะมีเม็ดเกรนละเอียดกว่าเดิมและมีความเหนียวสูง

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีส่วนผสมของโครเมียม 15-18% และนิเกิล 3.00-7.75% เมื่อเพิ่มความแข็งแรงโดยกลไกเพิ่มความแข็งจากการตกผลึก (Precipitation hardening mechanism) จะสามารถเพิ่มความแข็งแรงสูงมาก มีค่าความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) อยู่ระหว่าง 1,000 – 1,500 เมกะปาสคาล (MPa) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน (Heat Treatment) ด้วยสมบัติที่โดดเด่นของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ จึงมักนำไปใช้ทำชิ้นส่วนพวก วาล์ว ข้อต่อ เฟือง เพล่า ชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมเคมีและชิ้นส่วนในเครื่องบิน เป็นต้น ตัวอย่างชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมในประเภทนี้เช่น 630 631 และ 17-4PH เป็นต้น

5) กลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steel) มีโครงสร้างผสมระหว่าง โครงสร้างเฟอร์ริติก และออสเทนนิติก ในสัดส่วน ประมาณ 30% และ 70% ตามลำดับ จุดเด่นของ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้คือ มีสมบัติทนต่อการกัดกร่อนได้เยี่ยมยอด ด้วยความแข็งแรงทนทานที่เยี่ยมยอดกว่ากลุ่มออสเทนนิติก ขณะที่ง่ายต่อการขึ้นอีกด้วย สมบัติทางกายภาพอยู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกและกลุ่มเฟอร์ริติก แต่ใกล้เคียงกับกลุ่มเฟอร์ริติกและเหล็กคาร์บอนมากกว่า สมบัติทนต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting) และแบบซอกอับ (Crevice) เป็นผลจากความสัมพันธ์ระหว่าง โครเมียม โมลิบดีนัม ทังสแตนและไนโตรเจน ที่เป็นส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดู

เหล็กกล้าทุกชนิดมีสมบัติทนต่อการเกิดการกัดกร่อนตามแนวขอบเกรนจากคลอไรด์ (Chloride stress corrosion cracking) ได้ดียิ่งกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติกหมวด 300 ด้วย

โดยการทดลองนี้ได้เลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 กับ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดนี้มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic stainless steels)

วัสดุ	ส่วนผสมทางเคมี (%)					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
AISI 304	0.0187	0.4695	1.4638	18.3448	7.194	0.059
AISI 316L	0.0504	0.4752	1.0491	15.3228	8.505	0.6663
AISI 308	0.08	1.0	2.0	19-21	10.0-12.0	-
AISI 309	0.20	1.0	2.0	22-24	12.0-15.0	-
AISI 310	0.25	1.5	2.0	24-26	19-22	-
AISI 321	0.08	1.0	0.045	17-19	11-15	-

**ตารางที่ 2.2** ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steels)

วัสดุ	ส่วนผสมทางเคมี (%)					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	p
AISI 405	0.15	1.0	1.0	11.5-14.00	0.5 max	0.04
AISI 430	0.12	1.0	1.0	14.0-18.0	1.0	0.04
AISI 430F	0.12	1.0	1.25	14.0-18.0	0.5 max	0.06
AISI 442	0.20	1.0	1.0	18.0-23.0	0.5 max	0.04
AISI 446	0.20	1.0	1.5	23.0-27.0	0.5 max	0.04
AISI 430	0.12	1.0	1.0	14.0-18.0	1.0	0.04

**ตารางที่ 2.3** ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic Stainless Steels)

วัสดุ	ส่วนผสมทางเคมี (%)					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	p
AISI 403	0.15	0.5	1.0	11.5-13.0	-	0.04
AISI 410	0.15	1.0	1.0	11.5-13.5	0.5max	0.04
AISI 414	0.15	1.0	1.0	11.5-13.5	1.25-2.50	0.04
AISI 416(b)	0.15	1.0	1.0	12.0-14.0	-	0.06
AISI 420	0.15	1.0	1.0	12.0-14.0	-	0.04
AISI 431	0.15	1.0	1.0	15.0-17.0	1.25-2.50	0.04
AISI 440A	0.60-0.75	1.0	1.0	16.0-18.0	0.5max	0.04
AISI 440B	0.75-0.95	1.0	1.0	16.0-18.0	0.5max	0.04
AISI 440C	0.95-1.20	1.0	1.0	16.0-18.0	0.5max	0.04

**ตารางที่ 2.4** ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation hardening stainless steels)

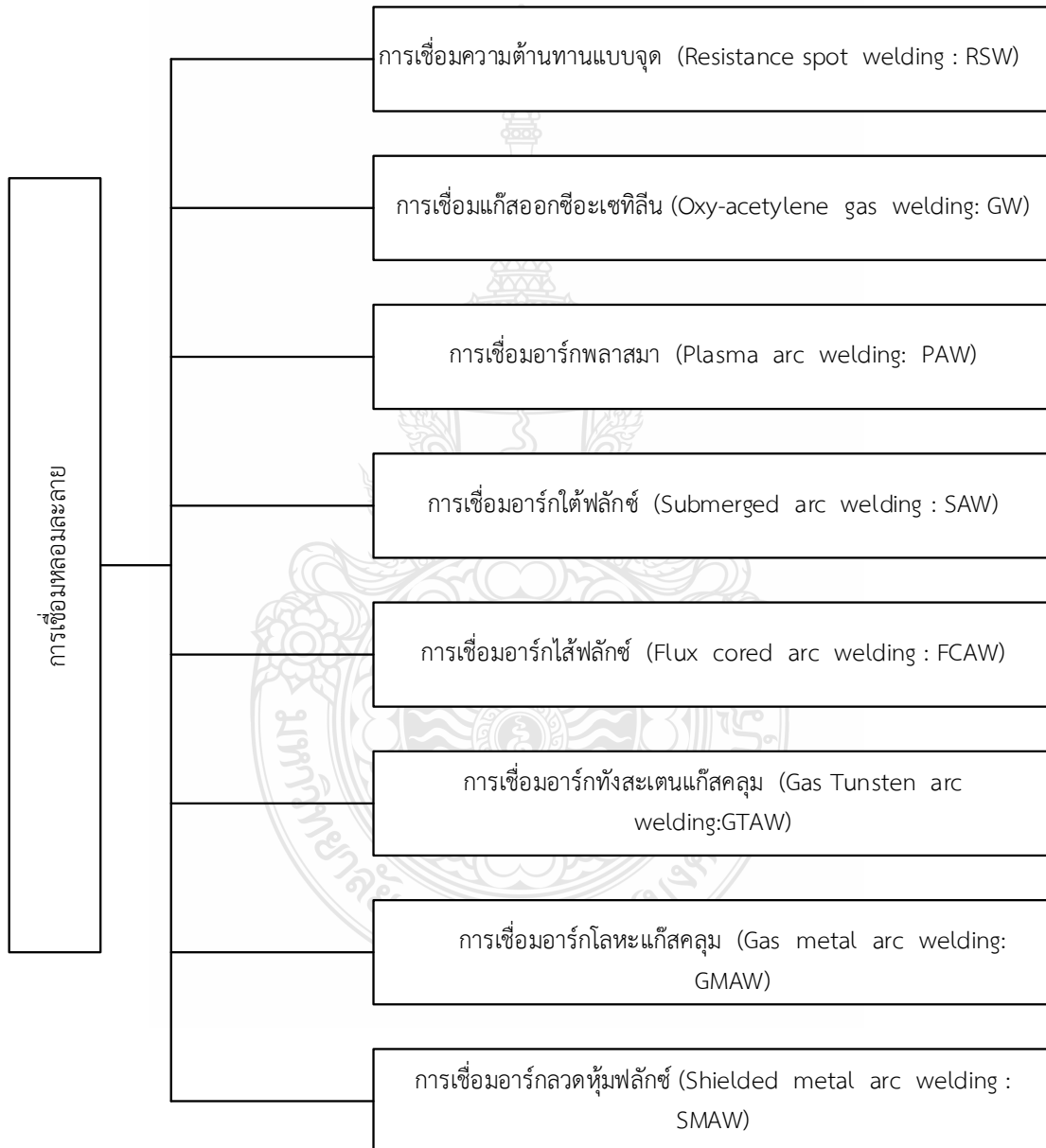
วัสดุ	ส่วนผสมทางเคมี (%)					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	p
AISI 630	0.04	0.01	0.25	16.0	4.0	0.20
AISI 631	0.07	0.4	0.6	17.0	7.0	0.02
AISI 632	0.07	0.4	0.6	15.0	7.0	0.02
AISI 633	0.10	0.01	0.8	16.5	4.3	0.02
AISI 634	0.13	0.25	0.95	15.5	4.3	0.02
AISI 630	0.04	0.01	0.25	16.0	4.0	0.20

## 2.2 กระบวนการเชื่อม

### 2.2.1 การเชื่อม

การเชื่อม (Welding) ตามความหมายของพจนานุกรมศัพท์งานเชื่อมฉบับราชบัณฑิตยสถาน [20] หมายถึง “การทำให้โลหะหลายชิ้นติดเข้าด้วยกัน” การเกิดการเกาะยึดหรือการติดเข้าด้วยกันบริเวณจุดต่อของโลหะสองชิ้นที่ประกบกันอยู่นั้นมีความแตกต่างกันตามกรรมวิธีการเชื่อมและแบ่งออกเป็นกลุ่มดังนี้

การเชื่อมหลอมละลาย (Fusion welding) โลหะชิ้นงานที่จุดต่อได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนเกินจุดหลอมละลาย ทำให้เกิดความร้อนสูงจนเกิดการหลอมเหลวหรือโลหะเกิดการเปลี่ยนสถานะจากเฟสของแข็งไปเป็นเฟสของเหลว และเมื่อเคลื่อนแหล่งความร้อนออกไปทำให้โลหะที่มีเฟสเป็นของเหลวเกิดการเย็นตัว และเกิดการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวไปสู่ของแข็ง เกิดเป็นโลหะเชื่อมระหว่างโลหะชิ้นงาน การเกิดลักษณะนี้เรียกว่า การเชื่อมหลอมละลาย ตัวอย่างการเชื่อมหลอมละลายในงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.1 การเชื่อมรูปแบบต่างๆ

ข้อดีของการเชื่อมเมื่อเปรียบเทียบกับ การต่อโลหะแบบอื่น การเชื่อมเป็นวิธีการต่อโลหะที่ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายได้มากกว่าและสามารถทำการต่อโลหะได้รวดเร็วกว่า เมื่อเปรียบเทียบการต่อโลหะด้วยวิธีการทางกล เช่น การใช้หมุดย้ำ หรือการใช้รีเวท ที่ต้องมีการเจาะรูให้ได้ขนาดของหมุดย้ำหรือรีเวทก่อนใช้แรงกดอัดหมุดย้ำหรือรีเวทให้ทำการยึดโลหะชิ้นงานเข้าด้วยกัน การใช้หมุดย้ำหรือรีเวทต้องเสียเวลาในการเจาะรูและกดอัด ขณะที่การเชื่อมไม่ต้องเสียเวลาในการทำถึงสองขั้นตอน แต่สามารถทำให้เสร็จได้ในขั้นตอนเดียว คุณภาพของรอยต่อที่ได้จากการเชื่อมสามารถควบคุมได้ในขั้นตอนการเชื่อมและส่งผลให้รอยต่อมีสมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรง ความแข็ง หรือโครงสร้างจุลภาค เป็นต้น มีค่าเท่ากับหรือสูงกว่าโลหะที่ใช้ในการเชื่อม โลหะส่วนใหญ่สามารถทำการเชื่อมยึดกันได้โดยการเชื่อม ถึงแม้ว่ารอยต่อของโลหะนั้นเป็นรอยต่อของโลหะชนิดเดียวกัน หรือโลหะต่างชนิดกัน นอกจากนี้การเชื่อมสามารถประยุกต์ใช้ในการเชื่อมพอลิเมอร์ เซรามิก หรือต่อวัสดุต่างชนิดกันได้ เครื่องมือและอุปกรณ์การเชื่อมบางชนิดสามารถปรับเปลี่ยนจากแบบประจำที่เป็นแบบเคลื่อนที่ได้ง่าย เครื่องมือและอุปกรณ์การเชื่อมมีราคาไม่สูงมากนัก

ข้อด้อยของการเชื่อมเมื่อเปรียบเทียบกับ การต่อโลหะแบบอื่น เนื่องจากการเชื่อมบางชนิด เช่น การเชื่อมหลอมละลาย โลหะเกิดการเปลี่ยนสภาวะจากเฟสของแข็งก่อนการเชื่อมเป็นเฟสของเหลว ขณะทำการเชื่อม และเปลี่ยนสภาวะกลับมาเป็นเฟสของแข็งอีกครั้งเมื่อโลหะเชื่อมแข็งตัว การเปลี่ยนสภาวะต่างๆ เหล่านี้มีการขยายตัวและหดตัวของโลหะอย่างรวดเร็วไปมาส่งผลทำให้เกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงาน และทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดเบี้ยวเสียรูปได้ การได้รับความร้อนในการหลอมละลายโลหะบริเวณรอยต่อและเย็นตัวกลับมาเป็นเฟสของแข็งอีกครั้งของโลหะเชื่อมบริเวณรอยต่อส่งผลทำให้โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมมีความแตกต่างจากโลหะชิ้นงานเกิดเป็นโครงสร้างงานหล่อขึ้น สมบัติทางกลของโลหะเชื่อมและชิ้นงานมีความแตกต่างกัน ในกรณีแนวเชื่อมรอยต่อมีความสมบูรณ์ (Sound joint) ความแข็งแรงและความแข็งแรงของโลหะเชื่อมบริเวณรอยต่อมักมีค่าสูงกว่าโลหะชิ้นงานที่ใช้ในการเชื่อม การเชื่อมก่อให้เกิดมลภาวะต่อผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม เช่น แสงที่เกิดจากการอาร์กของลวดเชื่อม คิว้นจากการอาร์ก และเม็ดโลหะหลอมเหลวที่เกิดจากการอาร์กที่มีอุณหภูมิสูงกระเด็นออกไปจากแนวเชื่อม อาจเกิดการเผาไหม้ได้ การขยายตัวและการหดตัวของโลหะเชื่อมส่งผลทำให้รอยต่อเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของโลหะชิ้นงาน ดังนั้นการเชื่อมจำเป็นต้องมีอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเพื่อให้ได้รอยต่อตามที่ออกแบบไว้ รอยต่อที่มีคุณภาพสูงตามการออกแบบจำเป็นต้องมีการเตรียมพื้นผิวรอยต่อที่นำมาประกบกันให้เป็นไปตามกำหนด การเชื่อมรอยต่อที่มีคุณภาพสูงบางกระบวนการเชื่อมต้องใช้ช่างฝีมือที่มีคุณภาพที่ผ่านการทดสอบฝีมือแรงงาน จากหน่วยงานที่เป็นที่ยอมรับในงานอุตสาหกรรม เช่น กรมพัฒนาฝีมือแรงงาน กระทรวงแรงงานและพัฒนาสังคม เป็นต้น

## 2.2.2 การเชื่อมอาร์กทังสแตนแก๊สคลุมหรือการเชื่อมทิก (Gas Tungsten Arc Welding : GTAN or Tungsten Inert Gas : TIG) [21]

การเชื่อมทิกคือ การเชื่อมที่ทำให้เกิดความร้อนในการหลอมละลายจากการอาร์ก ระหว่างแท่งทังสแตนอิเล็กโทรด (Tungsten electrode) กับชิ้นงาน ขณะเดียวกันบริเวณที่เกิดการอาร์กจะมีแก๊สเฉื่อย (Inert gas) ปกคลุม บริเวณนั้น เพื่อป้องกันออกซิเจน ไนโตรเจน และความชื้นในอากาศเข้ามารวมกับโลหะที่กำลังหลอมละลาย ซึ่งเรียกว่า เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จนกระทั่งความร้อน

จากการอาร์กหลอมละลายโลหะชิ้นงานในบริเวณดังกล่าว จนเกิดเป็นบ่อหลอมละลาย ดังนั้นเมื่อบ่อหลอมละลายเกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อใดๆ ก็จะทำให้ชิ้นงานนั้นหลอมติดกัน แต่เนื่องจากแท่งทั้งสแตนอิลีคโทรดเป็นวัสดุที่ไม่ละลายหรือไม่สิ้นเปลือง (Non consumable electrode) จึงจำเป็นต้องเติมโลหะลวดเชื่อม (Filer metal) ลงไปในบ่อหลอมละลายนั้นด้วย กรณีที่ทำการเชื่อมโลหะบางๆ อาจไม่จำเป็นต้องเติมโลหะลวดเชื่อมก็ได้ การเชื่อม TIG สามารถเชื่อมเหล็กที่มีความหนาตั้งแต่ 0.79 มิลลิเมตร ถึง 4 มิลลิเมตร ได้

ข้อดีของการเชื่อมแบบทิก

- 1) ในการเชื่อมไม่มีฟลักซ์ที่ใช้ปกคลุมแนวเชื่อมจึงหมดปัญหาเกี่ยวกับสแลคฝังในแนวเชื่อม
- 2) รอยเชื่อมและแนวเชื่อมมีคุณภาพสูงทนต่อการสึกกร่อนได้ดีกว่าการเชื่อมด้วยวิธีอื่น
- 3) สามารถเชื่อมได้ทุกตำแหน่งในช่างเชื่อม
- 4) ขณะทำงานเชื่อมสามารถมองเห็นระยะอาร์กและบ่อหลอมได้ชัดเจน ทำให้ควบคุมการเชื่อมได้ตามต้องการ
- 5) การบิดงอของชิ้นงานมีน้อย
- 6) ขณะทำการเชื่อมจะปราศจากสะเก็ดประกายไฟและควันแนวเชื่อมทำให้ร่ายเชื่อมสะอาดเพราะไม่มีสแลค (Slag) และ หยดของน้ำโลหะ (Spatter)
- 7) เกิดควันพิษน้อยกว่ากระบวนการเชื่อมแบบอื่นๆ
- 8) แนวเชื่อมมีคุณภาพสูง

ข้อเสียของการเชื่อมแบบทิก

- 1) อุปกรณ์มีราคาแพง
- 2) อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมมาก
- 3) ต้องใช้เวลาในการเตรียมก่อนที่จะเชื่อมนานกว่าเมื่อเทียบกับการเชื่อมไฟฟ้า

### 2.2.3 โลหะเติม [22]

โลหะเติม เป็นวัสดุที่จำเป็นต้องใช้งานในงานเชื่อมของบรรดาช่างที่ทำงานในด้านการเชื่อมโลหะ ใช้ทำให้ชิ้นงานที่เป็นโลหะผสมเข้าด้วยกันเป็นชิ้นเดียว ด้วยน้ำโลหะเหลวที่เกิดจากตัวลวดเชื่อม เพื่อให้ชิ้นงานติดกันมีความแข็งแรงสามารถใช้งานในการรับแรงหรือคงรูปอยู่ได้ ซึ่งชนิดของลวดเชื่อมที่ช่างเชื่อมใช้ในการทำงาน แบ่งออกได้เป็นชนิดใหญ่ๆ 6 ชนิด ดังนี้

1) ลวดเชื่อมรูป หรือลวดเชื่อมรูปไฟฟ้า (Welding electrode) เป็นลวดเชื่อมที่ด้านนอกจะมีสารเคลือบ (Flux) ดูแล้วมีลักษณะคล้ายรูปที่จุดทั่วไป แกนกลางเป็นลวดโลหะ ซึ่งตัวโลหะนี้จะมีอยู่หลายชนิด เช่น ลวดเชื่อมเหล็ก และลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเลือกใช้ตามประเภทของชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม เป็นลวดเชื่อมที่นิยมใช้งานกันมาก อุปกรณ์และเส้นลวดเชื่อมมีราคาไม่แพง

2) ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux cored wire) เป็นลวดเชื่อมที่มีลักษณะผสมผสานระหว่างลวดเชื่อมรูป และลวดเชื่อมมิก เป็นลวดเชื่อมโลหะแบบเป็นม้วนลวดโลหะมีแกนกลางบรรจุด้วยสารพอกคล้ายๆ สารพอกภายนอกของลวดเชื่อมรูป แต่เปลี่ยนมาอยู่ภายในแทน มีราคาค่อนข้างสูง แต่มีประสิทธิภาพสูง เชื่อมได้รวดเร็วและสวยงาม



3) ลวดเชื่อมมิก หรือ ลวดเชื่อม CO<sub>2</sub> (Mig welding wire) เป็นลวดเชื่อมแบบลวดโลหะเปลือกไม่มีสารพอกหุ้มภายนอก มีลักษณะเป็นม้วน ข้อดีของลวดเชื่อมและการเชื่อมประเภทนี้คือสามารถเชื่อมได้เร็วมาก เมื่อเทียบกับการเชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อมรูป และต้นทุนค่าลวดเชื่อมมีราคาถูกกว่า ลักษณะของโรลม้วนลวดจะมี 2 แบบคือ ม้วนโรลพลาสติกและม้วนโรลเหล็ก

4) ลวดเชื่อมทิก หรือลวดเชื่อมอาร์กอน (Tig welding rod) มีลักษณะคล้ายลวดเชื่อมมิก คือเป็นลวดเชื่อมเปลือยเช่นเดียวกัน แต่จะมาเป็นเส้นๆ แต่ละเส้นยาวประมาณ 1 เมตร ไม่ได้มาเป็นม้วนเหมือนลวดเชื่อมมิก ลวดเชื่อมทิกนิยมใช้กับงานที่ต้องการความสวยงามและต้องการความละเอียดสูงๆ มีทั้งที่เป็น เหล็ก อลูมิเนียม สแตนเลส ทองเหลือง และโลหะอื่นๆ

5) ลวดเชื่อมเซาะร่อง หรือลวดเชื่อมเกาจ์ (Gouging electrode) เป็นลวดเชื่อมแบบพิเศษที่มีไว้ใช้ในการกำจัดเนื้อโลหะที่เชื่อมไม่ได้คุณภาพให้ออกไปจากชิ้นงาน และยังใช้ในการทำความสะอาดแนวเชื่อมเพื่อเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อมอีกด้วย เหมาะสำหรับใช้ในการเซาะร่อง เจาะรู หรือ ใช้ในงานตัด

6) ลวดเชื่อมพิเศษ เป็นกลุ่มชนิดของลวดเชื่อมที่ออกแบบมาเพื่อใช้งานเฉพาะ เช่น ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง ลวดเชื่อมอินโคเนล ลวดเชื่อมไฟฟ้าอลูมิเนียม ลวดเชื่อมนิกเกิลอัลลอยด์ ลวดเชื่อมไฟฟ้าทองแดง เป็นต้น

#### 2.2.4 คุณสมบัติของธาตุผสมในโลหะเติม [23]

ประกอบด้วย ธาตุ คาร์บอน ( C ) ซิลิคอน ( Si ) แมงกานีส ( Mn ) โครเมียม ( Cr ) นิกเกิล ( Ni ) และ โมลิบดีนัม ( Mo ) ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

1) คาร์บอน (Carbon) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ C เป็นธาตุที่สำคัญที่สุด จะต้องผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก มีคุณสมบัติทำให้เหล็กแข็งเพิ่มขึ้น หลังจากนำไปอบชุบ (Heat Treatment) โดยรวมตัวกับเนื้อเหล็กเป็นสารที่เรียกว่า มาร์เทนไซต์ (Martensite) และซีเมนไตต์ (Cementite) นอกจากนั้น คาร์บอนยังสามารถรวมตัวกับเหล็ก และธาตุอื่น ๆ กลายเป็นคาร์ไบด์ (Carbide) ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของเหล็ก อย่างไรก็ตาม คาร์บอนจะลดความยืดหยุ่น (Elasticity) ความสามารถในการตีขึ้นรูป (Forging) และความสามารถในการเชื่อม (Welding) และไม่มีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อน

2) ซิลิคอน (Silicon) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Si ซิลิคอน มีในเหล็กทุกชนิด เนื่องจากสินแร่เหล็กมักมีซิลิคอนผสมอยู่ด้วยเสมอ ซิลิคอนไม่ใช่โลหะ แต่มีสภาพเหมือนโลหะ ใช้เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิง (Oxidizing) ทำให้เหล็กแข็งแรงและทนทานต่อการเสียดสีได้ดีขึ้น เพิ่มค่าแรงดึงที่จุดคราก (Yield point) ของเหล็กให้สูงขึ้นมาก ดังนั้น จึงใช้ผสมในการทำเหล็กสปริง (Spring steels) ช่วยทำให้เหล็กทนทานต่อการตกสะเก็ด (Scale) ที่อุณหภูมิสูงได้ดี จึงใช้ผสมในเหล็กทนความร้อน เหล็กกล้าที่มีซิลิคอนสูงจะมีเกรนหยาบ

3) แมงกานีส (Manganese) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Mn ใช้เป็นตัวไล่กำมะถัน (S) ซึ่งเป็นตัวที่ต้องการในเนื้อเหล็ก จะถูกกำจัดออกในขณะที่หลอม ทำให้เหล็กอบชุบแข็งง่ายขึ้น เนื่องจากเป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical cooling rate) ทำให้เหล็กทนทานต่อแรงดึงได้มากขึ้น เพิ่มสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเหล็กเมื่อถูกความร้อน แต่จะลดคุณสมบัติในการเป็นตัวนำไฟฟ้า

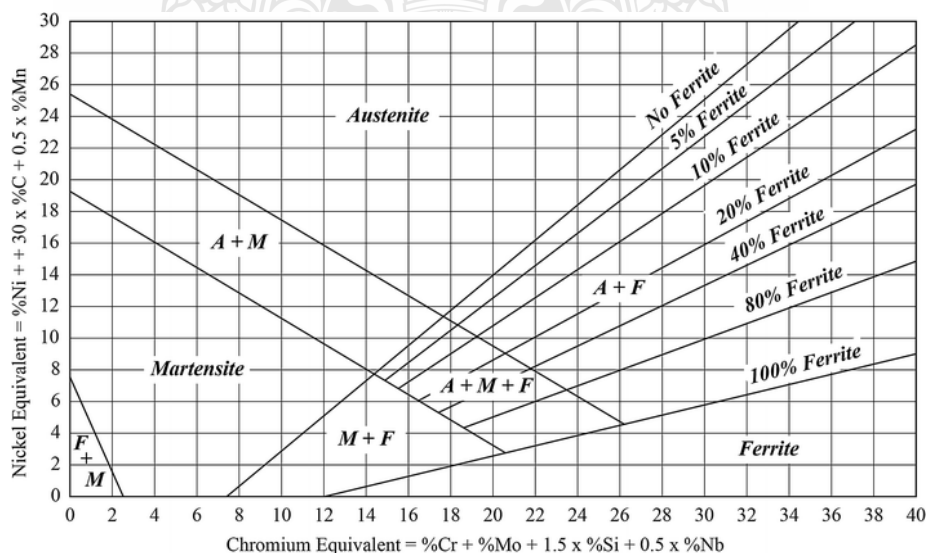
และความร้อน นอกจากนั้น แมงกานีสยังมีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปหรือเชื่อม เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้น จะทนต่อการเสียดสีได้ดีขึ้นมาก

4) โครเมียม (Chromium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cr ทำให้เหล็กอบชุบได้ง่ายขึ้น เพราะลดอัตราการเย็นตัววิกฤตลงอย่างมาก สามารถชุบในน้ำมันหรืออากาศได้ (Oil or air quenching) เพิ่มความแข็งให้เหล็ก แต่ลดความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact) ลง โครเมียมที่ผสมในเหล็กจะรวมตัวกับคาร์บอน เป็นสารประกอบพวกคาร์ไบด์ ซึ่งแข็งมาก ดังนั้น จึงทำให้เหล็กทนทานต่อแรงเสียดสี และเป็นสนิมได้ยาก เพิ่มความแข็งแรงของเหล็กที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง เพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารต่างๆ ได้ดีขึ้น

5) นิกเกิล (Nickel) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ni เป็นตัวที่เพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกของเหล็ก ดังนั้น จึงใช้ผสมในเหล็กที่จะนำไปชุบแข็งที่ผิว ใช้ผสมกับโครเมียม ทำให้เหล็กทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ไม่เป็นสนิมง่าย ทนความร้อน

6) โมลิบดีนัม (Molybdenum) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Mo ผสมรวมกับธาตุอื่น ๆ เป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต ทำให้อบชุบง่ายขึ้น ป้องกันการเปราะขณะอบคืนตัว (Temper brittleness) ทำให้เหล็กมีเนื้อละเอียด เพิ่มความทนทานต่อแรงดึง สามารถรวมตัวกับคาร์บอนเป็นคาร์ไบด์ได้ง่ายมาก ดังนั้น จึงปรับปรุงคุณสมบัติในการตัดโลหะ (Cutting) ของเหล็กไฮสปีดได้ดีขึ้น เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion resistance) แก่เหล็ก อย่างไรก็ตาม เหล็กที่มีโมลิบดีนัมสูง จะตีขึ้นรูปยาก

ในการเชื่อมโลหะประเภทเหล็กกล้าโรสนิมต่างเกรดนั้นจำเป็นต้องจะต้องคำนวณปริมาณเฟอร์ไรต์ เพื่อป้องกันการเกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัว [24] บริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อม ซึ่งวิธีที่ใช้ในการทำนายปริมาณเฟอร์ไรต์ก่อนที่จะทำการเชื่อมคือใช้ไดอะแกรม ที่เรียกว่าเซลฟเลอร์ไดอะแกรม (Schaeffler Diagram)



รูปที่ 2.2 เซลฟเลอร์ไดอะแกรม (Schaeffler diagram) [24]

การใช้ไดอะแกรมนี้ผู้ใช้จะต้องทราบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานที่จะเชื่อม รวมทั้งส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม เพื่อนำค่าส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมและชิ้นงานมาทำการคำนวณค่าโครเมียมและนิกเกิลเทียบเท่า (Chromium and nickel equivalent) ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$\text{โครเมียมเทียบเท่า (Chromium Equivalent : Cr}_{eq}) = \text{Cr} + \text{Mo} + (1.5 \times \text{Si}) + (0.5 \times \text{Nb}) \quad (2.1)$$

$$\text{นิกเกิลเทียบเท่า (Nickel Equivalent : Ni}_{eq}) = \text{Ni} + (30 \times \text{C}) + (0.5 \times \text{Mn}) \quad (2.2)$$

หลังจากที่คำนวณได้ค่าออกมาแล้วก็จะนำค่าที่ได้มาทำการพล็อตลงในไดอะแกรม โดยพล็อตจุดของชิ้นงานชิ้นแรกและชิ้นงานชิ้นที่สอง หลังจากนั้นลากเส้นตรงเชื่อมต่อดูทั้งสอง ทำการหาจุดกึ่งกลางระหว่างเส้นที่เชื่อม ณ จุดกึ่งกลางนี้จะจุดที่บอกให้ทราบว่าหากทำการเชื่อมชิ้นงานทั้งสองโดยเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อมแล้วนั้น โครงสร้างของแนวเชื่อมที่ได้จะเป็นโครงสร้างอะไร และเมื่อทำการเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อมผู้ใช้จะต้องทำการพล็อตจุดของลวดเชื่อม แล้วลากเส้นตรงจากจุดลวดเชื่อมไปยังจุดกึ่งกลางของเส้นที่เชื่อมระหว่างชิ้นงานทั้งสอง จะพบว่าจุดที่ได้จะอยู่บริเวณเส้นที่แสดงปริมาณ เพอร์เซ็นต์ของเฟอร์ไรต์เท่ากับเท่าไร

หลังจากที่ได้ทำการพล็อตกราฟเพื่อหาปริมาณเฟอร์ไรต์ไปแล้วนั้น จึงได้ลวดเชื่อมที่มีความเหมาะสมกับการเชื่อมในการทดสอบนี้มา 3 ชนิด คือ AWS ER-309LSi, AWS ER-316L, AWS ER-316LSi ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 2.5-2.7

**ตารางที่ 2.5** ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนิติก (Austenitic stainless steels)

ลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (%)					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
AWS ER 308	0.08	0.90	2.5	19.5	10.5	-
AWS ER 308LSi	0.04	0.90	2.5	19.5	10.5	-
AWS ER 316L	0.08	0.90	2.5	18.5	12.5	2.5
AWS ER 316LSi	0.04	0.90	2.5	18.5	12.5	2.5
AWS ER 347	0.08	0.90	2.5	19.5	10.0	-
AWS ER 310	0.20	0.75	2.5	26.5	21.5	-

**ตารางที่ 2.6** ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก  
(Ferritic stainless steels)

วัสดุ	ส่วนผสมทางเคมี (%)					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
AWS ER 309LSi	0.15	0.90	2.5	23.5	13.5	0.29
AWS ER 308L	0.04	0.90	2.5	19.5	10.5	-
AWS ER 430	0.10	0.90	1.0	16.5	0.60	-

**ตารางที่ 2.7** ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก  
(Martensitic stainless steels)

วัสดุ	ส่วนผสมทางเคมี (%)					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
AWS ER 309	0.15	0.90	2.5	23.5	13.5	-
AWS ER 410	0.12	0.90	1.0	12.5	0.60	-

### 2.2.5 แก๊สปกคลุม [25]

แก๊สปกคลุมทำหน้าที่ปกคลุมแนวเชื่อมและบ่อหลอมละลายเพื่อไม่ให้อากาศโดยรอบเข้าไปทำปฏิกิริยาในขณะที่ทำการเชื่อม

1) แก๊สอาร์กอน (Argon) เป็นแก๊สเฉื่อยที่ได้จากกรรมวิธีผลิตออกซิเจน ซึ่งจะมีอยู่ในอากาศประมาณ 0.9 % แก๊สอาร์กอน จะทำให้การเริ่มต้นเชื่อมง่ายให้อาร์กที่เปลวเรียบและสม่ำเสมอ แก๊สอาร์กอนมีความหนาแน่นมากกว่า บรรยากาศ และถึงสำหรับเก็บอาร์กอนเหลว จะต้องมีฉนวนที่ดีสามารถเก็บแก๊สอาร์กอนที่อุณหภูมิต่ำกว่า -184 องศาเซลเซียส การใช้งานกับโลหะทุกชนิด มีความบริสุทธิ์ 99.95 % ดีกว่า แก๊สฮีเลียม (He) คือ อาร์กเรียบและนิ่งกว่า ชีมีลิกน้อยกว่า ความสะอาดของการ (Cleaning effect) ดีกว่า อัตราการไหลน้อยกว่า และ เริ่มต้นอาร์กดีกว่า และราคาถูกกว่า

2) แก๊สฮีเลียม (Helium) เป็นแก๊สเฉื่อยที่ได้จากกรรมวิธีผลิตแก๊สธรรมชาติ ศักยภาพของไอออไนซ์ ( Ionization potential ) มีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าดีเลิศ ทำให้เปลวอาร์กแผ่ขยายกว้างความเข้มของความร้อนสูงกว่า แก๊สอาร์กอน (Ar) ทำให้แนวเชื่อมชีมีลิกได้ดี การใช้แก๊สฮีเลียมเหมาะกับการเชื่อมด้วยวิธีอัตโนมัติ ที่ให้ความเร็วในการ เชื่อมสูง ไม่เกิดรูพรุนและการกัดแหว่งแนวเชื่อมรวมทั้งแนวเชื่อมมีบริเวณ เขตอิทธิพลของความร้อนจาก การเชื่อมแคบ การใช้งานกับโลหะทุกชนิด ความบริสุทธิ์ 99.99 % ราคาค่อนข้างแพง

3) แก๊สอาร์กอน (Ar) ผสม 15-75 % ฮีเลียม (He) เหมาะกับการเชื่อมทิก ฮีเลียม (He) ช่วยลดรูพรุน และแตกร้อน เดินแนวเชื่อมเร็ว ลดการบิดงอ อาจเปลืองแก๊สมากขึ้น เพราะฮีเลียม (He) ลอยสู่ด้านบน ใช้โวลท์ในการจุดอาร์กสูงกว่า ใช้งานกับโลหะทุกชนิด

4) แก๊สอาร์กอน (Ar) ผสม 7 % ไฮโดรเจน (H) เพิ่มความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และลดรูพรุน ใช้งานกับเหล็กกล้า Cr/Ni และ Ni

### 2.2.6 กระแสที่ใช้ในการเชื่อม [26]

กระแสไฟที่นิยมใช้ในกระบวนการเชื่อมทิกนั้นมี 3 แบบด้วยกันคือ

1) กระแสตรงขั้วลบ (Direct Current Electrode Negative) DCEN หมายความว่า หัวเชื่อม หรือทั้งสแตนอิลีกโทรดใช้กระแสไฟเชื่อมเป็นขั้วลบ และกระแสไฟเชื่อมขั้วบวกเป็นตำแหน่งของชิ้นงาน โดยบรรจุไฟฟ้าลบลไหลจากหัวเชื่อมหรืออิลีกโทรดไปสู่ชิ้นงานดังนั้นความร้อนจะเกิดขึ้นที่ชิ้นงานมาก โดยเกิดที่ชิ้นงาน ประมาณ 70 % และเกิดที่ทั้งสแตนอิลีกโทรดประมาณ 30 % แนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแคบแต่กินลึกมาก

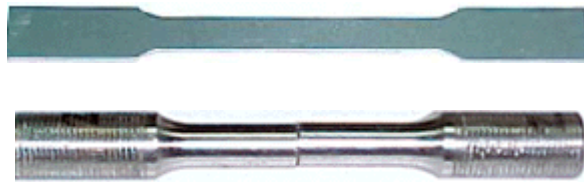
2) กระแสตรงขั้วบวก (Direct Current Electrode Positive) DCEP หมายความว่า หัวเชื่อมหรือทั้งสแตนอิลีกโทรดใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมเป็นขั้วบวก และกระแสไฟฟ้าเชื่อมลบเป็นตำแหน่งของชิ้นงาน ดังนั้นความร้อนจะเกิดขึ้นที่ชิ้นงานมาก โดยเกิดที่ชิ้นงานประมาณ 30% และเกิดที่ทั้งสแตนอิลีกโทรดประมาณ 70% แนวเชื่อมจะมีลักษณะแบนกว้างกินลึกน้อย แท่งทั้งสแตนอิลีกโทรดที่ใช้กับกระแสไฟเชื่อมแบบนี้ จะมีขนาดโตกว่าทั้งสแตนอิลีกโทรดที่ใช้กับกระแสไฟฟ้าแบบ DCEN และ ACHF

3) กระแสสลับ ความถี่สูง (Alternating Current & High Frequency) ACHF กระแสไฟสลับเป็นสิ่งจำเป็นในการเชื่อมโลหะที่มีออกไซด์ฉาบอยู่บริเวณผิวของชิ้นงาน ถ้าพิจารณาคลื่นของกระแสไฟสลับ จะพบว่าในครึ่งไซเคิลแรกที่ทั้งสแตนอิลีกโทรดเป็นขั้วบวก ออกไซด์ที่ผิวของชิ้นงานตรงบริเวณที่ทำการอาร์ก จะถูกขจัดออกไปจากบริเวณนั้น ในครึ่งไซเคิลต่อมาทั้งสแตนอิลีกโทรดเป็นขั้วลบ ขณะที่ทั้งสแตนอิลีกโทรดจะเย็นลง แต่กลับเกิดความร้อนมากที่ชิ้นงานตรงบริเวณที่เกิดการอาร์ก จึงทำให้เกิดบ่อหลอมละลายบนชิ้นงาน แต่ความเป็นจริงแล้วออกไซด์และความชื้น จะเป็นฉนวนกันไม่ให้กระแสผ่านจาก แท่งทั้งสแตนอิลีกโทรดไปยังชิ้นงานได้สะดวกนั้น เพื่อเป็นการขจัดปัญหาเหล่านี้จึงนำเอาระบบความถี่สูง (High frequency) มาช่วยกระตุ้นการอาร์กในช่วงแรกที่มีลักษณะเป็นกระแสบวก (AC) การทำเช่นนี้จะทำให้กระแสไหลออกจากแท่งทั้งสแตนอิลีกโทรดไปสู่ชิ้นงานได้ตลอดเวลา และสม่ำเสมอ

## 2.3 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

### 2.3.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test) [27]

การทดสอบแรงดึงใช้สำหรับการประเมินความแข็งแรงของโลหะหรือโลหะผสมด้วยการใช้ วิธีดึงจนขาดในช่วงเวลาสั้น ๆ ด้วยอัตราคงที่ ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะมีลักษณะแตกต่างกันไปสำหรับโลหะอาจทำเป็นแผ่นหรืออาจ ทำเป็นแท่ง โดยข้อมูลที่ได้คือกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรม หรือแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงาน



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างลักษณะของชิ้นทดสอบแรงดึงแบบแผ่นและแบบแท่ง [27]

ข้อมูลสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงและ แผนภาพความเค้นและความเครียด ทางวิศวกรรมมีดังนี้

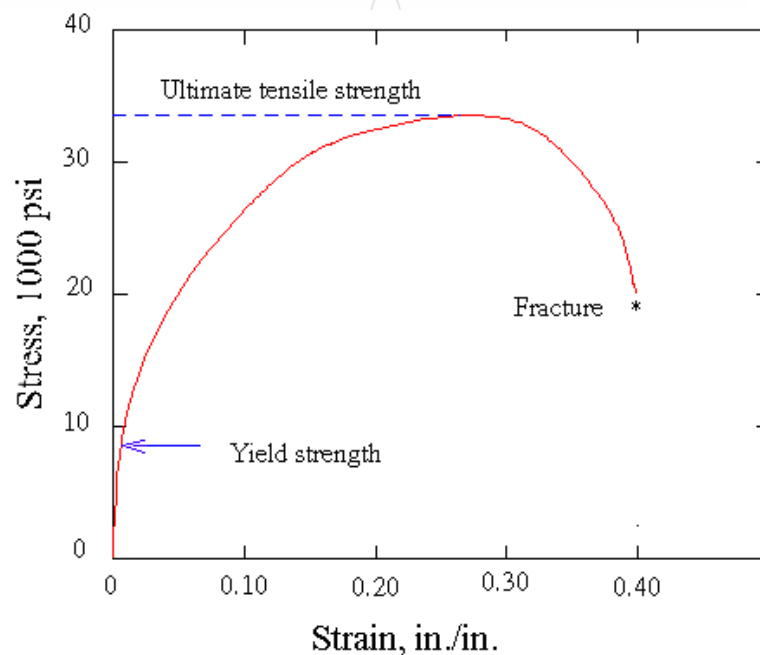
- 1) โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)
- 2) ความเค้นและความเครียด ณ. จุดคราก (Stress and strain at yield)
- 3) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile stress)
- 4) เปอร์เซนต์การยืดตัว (Percent elongation)

โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) เป็นค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ เมื่อได้ รับแรงกระทำสามารถหาได้จากความชันของกราฟความเค้นและความเครียดของวัสดุใน ระยะแรก ที่ยังแสดงสมบัติยืดหยุ่นอยู่ สำหรับโลหะจะมีค่าน้อยกว่า 0.5 % ของความเครียด โดยที่โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่นนี้เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของพันธะ (Bond strength) ระหว่างอะตอม ของโลหะหรือของโลหะผสม โลหะที่มีค่าโมดูลัสของความเป็นอีลาสติกสูงจะแกร่ง ไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่างง่าย เช่น เหล็กกล้ามีค่าโมดูลัสของการยืดตัว  $30 \times 10^6$  psi. (207 GPa) ในขณะที่โลหะอลูมิเนียมมีค่าต่ำกว่าประมาณ  $10 - 11 \times 10^6$  psi (69 - 76 GPa) โปรดสังเกตว่า ในช่วงความยืดตัวของแผนภาพความเค้นและความเครียดค่าโมดูลัสจะไม่มี การเปลี่ยนแปลง เมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น

ความเค้นและความเครียด ณ. จุดคราก (Stress and strain at yield) ความเค้นและความเครียด ณ. จุดคราก : เป็นค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุ ณ.จุดที่เปลี่ยน สมบัติจากอีลาสติกไปเป็นพลาสติก หรืออีกนัยหนึ่งหมายความว่าวัสดุนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง อย่างถาวรเมื่อความเค้นหรือความเครียดมีค่ามากกว่านี้ สำหรับวัสดุที่แสดงจุดครากอย่างชัดเจนเราจะ สังเกตได้จากที่กราฟมีค่าความชันเท่ากับศูนย์ ส่วนในกรณีที่วัสดุไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจนนั้น อาจกำหนดให้ใช้ 0.2% หรือ 0.1% ของความเค้นที่จุดคราก (Plastic strain) ที่เกิดขึ้นในแผนภาพความเค้นและความเครียด เป็นค่ากำหนดในการหาจุดคราก อาจเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า จุดขดเขย (Offset yield)

ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) คือความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ พิจารณาจากความเค้นทางวิศวกรรม สูงสุดในแผนภาพความเค้นและความเครียดค่านี้ไม่ค่อยใช้มากในงานออกแบบทาง วิศวกรรมก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพวกโลหะอ่อน (Ductile alloy) เนื่องจากมีการการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรขึ้น อย่างมากก่อนถึงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดนี้ ยังสามารถบ่งชี้ได้ว่าโลหะนั้นมีความสมบูรณ์หรือไม่ถ้าโลหะนั้นไม่สมบูรณ์ เช่น มีรูพรุน (Porosity) จะทำให้ค่าความแข็งแรง (strength) ลดลง

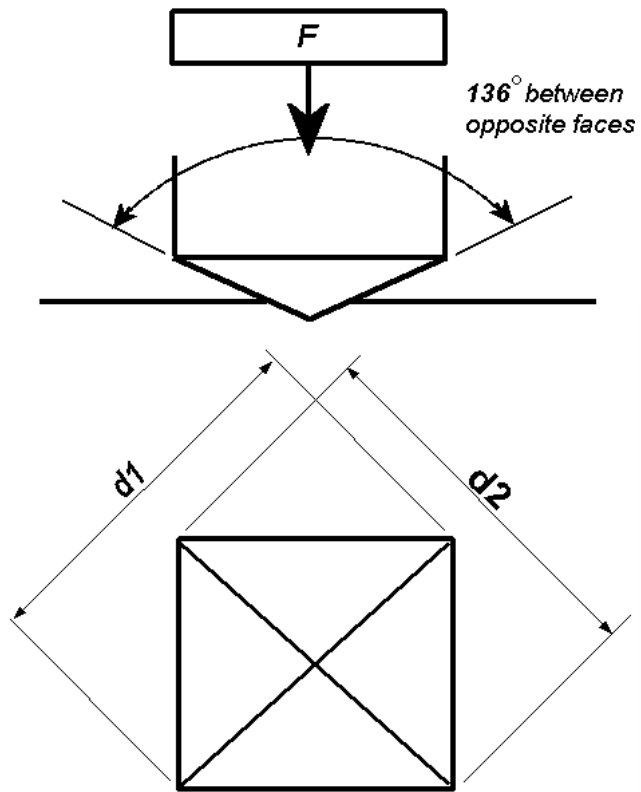
เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent elongation) (%Strain) คือปริมาณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานตัวอย่างภายใต้แรงดึง เมื่อเทียบกับระยะการวัด (Gage length) ของชิ้นงานทดสอบ และยังเป็นค่าที่ใช้บอกถึงความเหนียว (Ductile) ของวัสดุ โดยทั่วไปโลหะยิ่งเหนียวยิ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดตัวมากแสดงว่าโลหะนั้น เปลี่ยนรูปมาก สำหรับโลหะอลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่เป็นแผ่นหนา 0.062 นิ้ว (1.6 มิลลิเมตร) จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงถึง 35 % แต่ถ้าเป็นโลหะอลูมิเนียมผสม (ความแข็งแรงสูงกว่า) 7075-T6 ที่หนาเท่ากัน จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพียง 11 % เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดที่ขาดมีความสำคัญทางด้านวิศวกรรมมาก เพราะนอกจากจะทำให้ทราบว่าโลหะนั้นเหนียวเพียงใดแล้วยังจะเป็นดัชนีที่ชี้ให้ทราบว่าโลหะ นั้นมีคุณภาพอย่างไรอีกด้วย



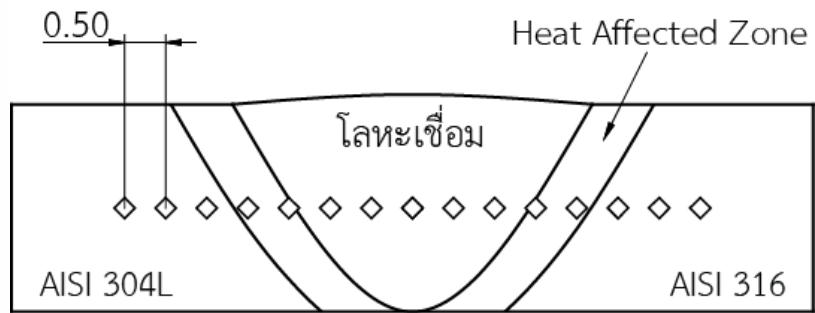
รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress - strain diagram) [27]

### 2.3.2 การทดสอบความแข็ง (Hardness test) [28]

โดยใช้วิธีการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส ( Vickers hardness test ) ซึ่งใช้หัวกดทดสอบเป็นหัวกดกรรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมยอดมีขนาด 136 องศาทำจากเพชร การทดสอบวิธีนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่มีลักษณะอ่อนไปจนถึงแข็งมาก โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้นโดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ



รูปที่ 2.5 ลักษณะการกดความแข็งแบบวิกเกอร์ [29]



รูปที่ 2.6 แสดงตำแหน่งการความแข็งของงานเชื่อม [30]



ตารางที่ 2.8 แสดงค่าความแข็งของโลหะ

Material/Structural constituent	Vickers hardness (HV)
Ferrite	100-250
Austenite	300-650
Martensite	550-1100
Steel, hardened to 65 RC	Approx. 900
Hard chromium plating	800-1300
Cementite	900-1200
Nitrided layers on steel	700-1500
Corundum	abt 1650
Sintered carbide	1600-2500
Boride layers	1900-2100
Titanium nitride	2000-2700
Chromium carbide	2200-2700
Tungsten carbide	2200-2700
Vanadium carbide	2300-2700
Titanium carbide	4000-4600
Diamond	10000

ตารางที่ 2.9 ตารางเปรียบเทียบความแข็ง

Vickers HV	HRC	Shore-C	Shore-D & JIS	Shore-HS & JIS	LD	LE
926	67.6	105	100	97	886	850
913	67.3	104	99	96	882	846
900	67	103	98	95.6	879	843
888	66.7	102	97	95	876	840
875	66.3	101	96	94	872	836
862	65.9	100	95	93.1	868	832
850	65.6	99	94	92.4	865	829
837	65.2	98	93.5	91.5	861	825
825	64.8	97	93	90.6	858	821
812	64.4	96	92	89.6	854	817
800	64	95	91	89	850	814
787	63.7	94	90.5	88.4	847	811
774	63.1	93	90	87.3	841	805
761	62.4	92	89	86	834	798
748	62.1	91	88	85.3	831	795
735	61.6	90	87	84.5	826	791
723	61.1	89	86	83.5	822	786
710	60.6	88	85	82.6	817	781
698	60	87	83	81.6	811	776
685	59.5	86	82.5	81.2	797	771
672	58.9	85	82	79.6	796	765
660	58.3	84	81	78.6	795	760
647	57.7	83	80	77.3	790	754
635	57.2	82	79	76.9	785	750
622	56.5	81	77.5	75.9	769	744
610	55.7	80	76	74.5	767	736
597	55.1	79	75	73.6	766	731
584	54.5	78	74	72.5	761	725
571	53.7	77	73	71.2	753	718

ตารางที่ 2.9 ตารางเปรียบเทียบความแข็ง (ต่อ)

Vickers HV	HRc	Shore-C	Shore-D & JIS	Shore-HS & JIS	LD	LE
558	52.9	76	71.5	70	746	711
545	52	75	70	68.9	739	703
533	51.5	74	69	67.9	734	699
520	50.7	73	68	66.8	727	692
508	49.6	72	67	65.5	718	682
495	48.8	71	65	64.3	711	676
482	47.9	70	64	63	704	669
470	47	69	63	62	696	662
457	46	68	61.5	60.6	688	653
445	45	67	59	59.5	680	646
432	43.9	66	57	58.3	672	637
420	42.8	65		56.8	663	628
412	42			55.9	658	622
402	41			54.8	650	615
392	40			53.8	642	608
382	39			52.7	634	601
372	38			51.6	628	
363	37			50.8	620	
354	36			49.8	612	
345	35			48.5	606	
336	34			47.4	598	
327	33			46.7	592	
318	32			45.5	584	
310	31			44.6	578	
302	30			43.2	572	

### 2.3.3 การตรวจสอบโครงสร้างโลหะ [31]

การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ ไม่ว่าจะเป็นการจัดเรียงตัวของอะตอม อีออน หรือโมเลกุลของสารต่างๆ นั้นสามารถตรวจสอบได้โดยใช้เครื่องมือทางโลหะวิทยา และทางฟิสิกส์มาช่วย เช่นการใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) ทำการตรวจสอบที่เรียกว่าการตรวจพื้นที่ขนาดเล็ก

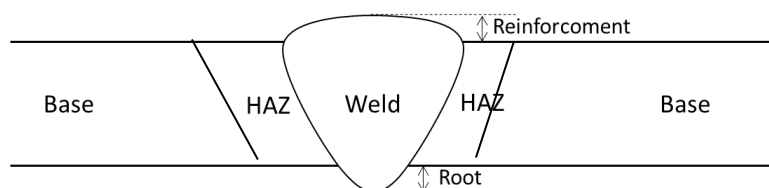
(Micro Examination) เช่น คุณลักษณะการกระจายของเฟส รูปร่างของเกรน รูรอยแตกร้าว แต่การตรวจสอบโครงสร้างภายในให้ละเอียดจริงๆ จะต้องใช้รังสีเอ็กซ์เรย์ (X-Ray Technic) ช่วยในการตรวจสอบ การใช้รังสี X ตรวจสอบโครงสร้างภายในผลึก เพื่อวัดระยะทางระหว่างระนาบหรือวัดระยะห่างระหว่างอะตอมหาตำแหน่งของผลึกโดยความกว้างของเส้นที่เกิดขึ้นภายในภาพ จะแสดงถึงข้อบกพร่องในผลึก ความหนาแน่นของโลเคชันทั้งหมดจะเป็นสัดส่วนกับความกว้างของเส้น ส่วนการตรวจสอบรูปร่างขนาด และการจัดเรียงตัวของอะตอมในผลึกนั้นจะต้องใช้วิธีการทางโลหะวิทยา (Metallographic method) ในการตรวจสอบ

เนื่องจากโลหะเป็นวัสดุที่เปราะ การตรวจสอบขนาดรูปร่าง และการจัดเรียงตัวของผลึก จะต้องใช้วิธีการตัดชิ้นงานตามแนวที่ต้องการศึกษา แล้วนำไปขัดมันกัดกรดตามชนิดของโลหะ โดยกรดจะกัดบริเวณขอบเกรนอย่างรุนแรงกว่าส่วนอื่นของผลึกเพราะว่าขอบเกรนจะมีข้อบกพร่องมากที่สุดกัดกรดจะกัดขอบเกรนให้เป็นร่อง เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ แสงที่ตกลงกระทบขอบเกรนจะสะท้อนหักเหออกนอกทิศทางเดิม ขอบเกรนจึงมีสีดำ ขณะที่เนื้อเกรนจะสว่าง

การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยา ได้แบ่งออกเป็น

1) การตรวจสอบในระดับมหภาค (Macroscopic examination) [36] เป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาของตัวอย่างชิ้นงานโดยใช้กำลังขยายต่ำกล่าวคือ เมื่อเตรียมชิ้นงานโดยการขัดหยาบ ขัดละเอียด ขัดเงา (Polishing) และกัดกรด (Etching) แล้วสามารถตรวจสอบได้โดยตาเปล่า (Visual Inspection) หรืออาจใช้กำลังขยายได้ไม่เกิน 10 เท่า

2) การตรวจสอบในระดับจุลภาค (Microscopic examination) [36] เป็นการตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นงานโลหะโดยใช้กำลังขยายที่สูงขึ้นกล่าวคือ ตั้งแต่ 10 เท่าเป็นต้นไป ซึ่งอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างฯ ในระดับจุลภาค คือ กล้องจุลทรรศน์สำหรับงานทางโลหะวิทยา (Metallurgical microscope) หรือกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) โดยจะมีกำลังขยายอยู่ระหว่าง 10-1,000 เท่า ที่กำลังขยายสูงช่วยทำให้การจำแนกชนิดของเฟส (Phase) โครงสร้าง (Structure) ที่ปรากฏอยู่รวมถึงลักษณะรูปร่าง และขนาดของเฟส หรือโครงสร้างนั้น ๆ ในชิ้นงานตัวอย่างได้ง่ายขึ้น ในบางกรณีที่โครงสร้าง หรือเฟสที่ปรากฏในตัวอย่างชิ้นงานมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถตรวจสอบได้ที่ระดับกำลังขยาย 10-1,000 เท่า จึงต้องมเลือกใช้เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่มีศักยภาพสูง ในที่นี้คือมีกำลังขยายที่มากกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และใช้แหล่งกำเนิดแสงจากลำแสงอิเล็กตรอนดังนั้นกล้องชนิดนี้จึงได้ชื่อว่า “กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน” (กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้งานในทางโลหะกรรมมีอยู่ 2 ชนิดคือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน)



รูปที่ 2.7 แสดงตำแหน่งของการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม [32]

ซึ่งตำแหน่งของการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมประกอบไปด้วยตำแหน่งต่างๆดังนี้

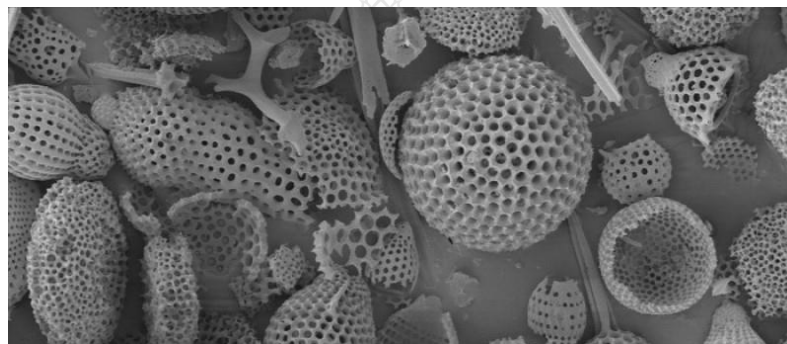
- Base คือ โลหะซึ่งเป็นส่วนของโครงสร้างหลังของชิ้นงานเชื่อม
- Heat effected zone คือ บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนจากความร้อนของรอยเชื่อมจากการนำความร้อนทำให้โครงสร้างและสมบัติของวัสดุที่เชื่อมตรงบริเวณนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง
- Weld คือ เนื้อโลหะเชื่อม การเชื่อมจะได้เนื้อเชื่อมที่เปรียบเสมือนงานหล่อขนาดเล็กที่มีการเย็นตัวและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างมากนัก สมบัติของเนื้อโลหะเชื่อมไม่ค่อยแตกต่างจากชิ้นงานและบริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน
- Reinforcement คือ ความสูงนูนของรอยเชื่อม ความสูงของแนวเชื่อมมีความสำคัญต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม กล่าวคือ การเชื่อมด้วยกระแสสูงหรือร่องบากแนวเชื่อมมุมแคบ จะได้แนวเชื่อมซึมลึกสูงและแคบซึ่งทำให้แนวเชื่อมมีความไวต่อการแตกร้าว ส่วนแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสต่ำหรือร่องบากกว้าง การซึมลึกต่ำมีโอกาที่จะเกิดการแตกร้าวได้น้อย
- Root คือ ราวแนวเชื่อม



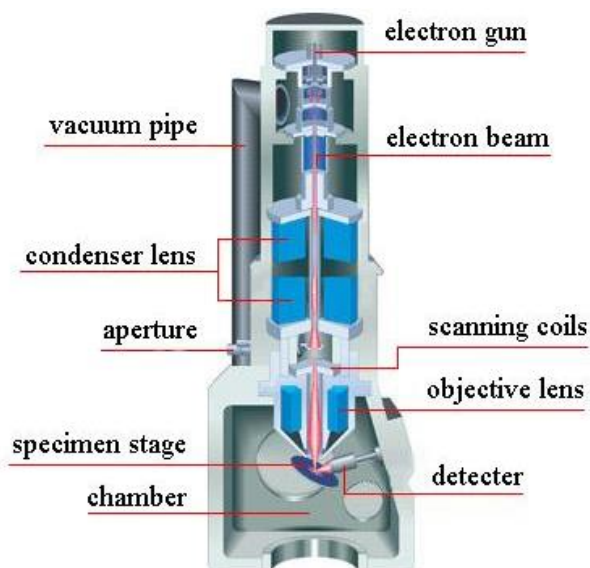
รูปที่ 2.8 กล้องจุลทรรศน์ [33]

3) ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้พลังงานอิเล็กตรอน (Electron) เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา มีค่าต่ำ ใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์

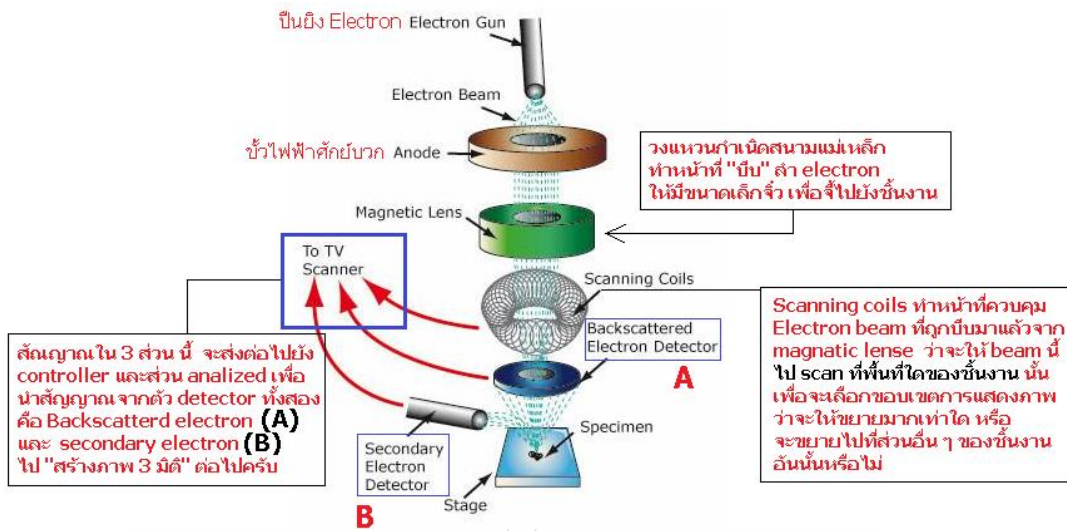
อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น เครื่องสเปกโตรมิเตอร์แบบกระจายตัวของพลังงาน ( Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน รูปที่ 2.9 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM



รูปที่ 2.9 แสดงภาพที่ถ่ายด้วยกล้อง SEM [34]



รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [34]

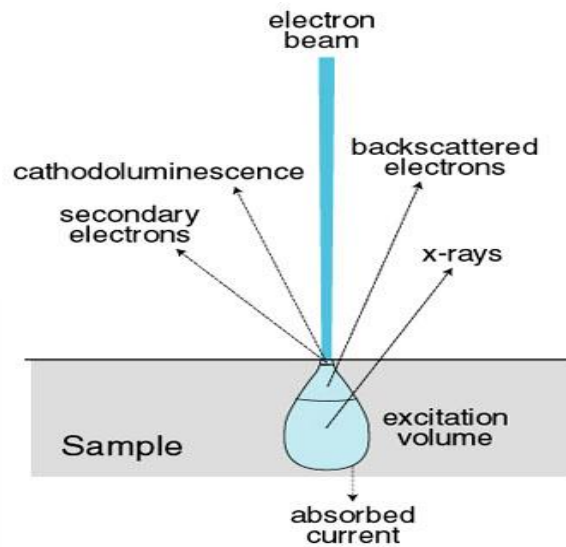


รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [34]

ส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพเป็น สุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating voltage) ในช่วง 0 – 30 kV (บางเครื่องอาจทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุด และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดย แอปเพอร์เจอร์ (Aperture) หรือ ช่องเปิดซึ่งมีขนาดต่างๆกันตามลักษณะการใช้งาน เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (Electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำแสงที่ขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลงส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ไปตกบนผิวของชิ้นตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำแสงอิเล็กตรอนให้ไปตกบนผิวตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆ ซึ่งพื้นที่ผิวตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำแสงอิเล็กตรอนนี้ จะเกิดเป็นสัญญาณ (Signal) ต่างๆขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน SEM จะเป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณชนิดต่างๆ เหล่านั้น แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนหน้าจอแสดงผล

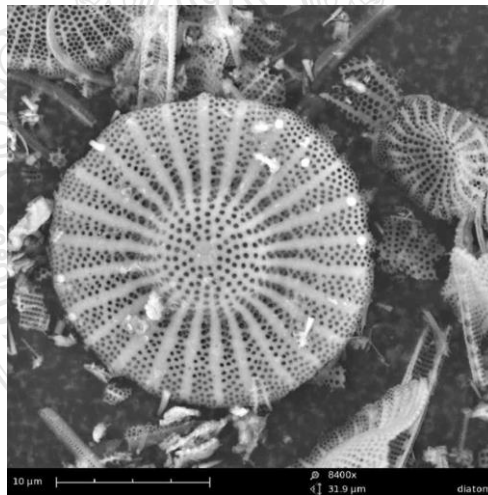
#### 2.3.4 สัญญาณต่างๆ (Various types of signal)

สัญญาณแบบต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสารและอันตรกิริยาอื่นๆ ที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงสัญญาณต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร [34]

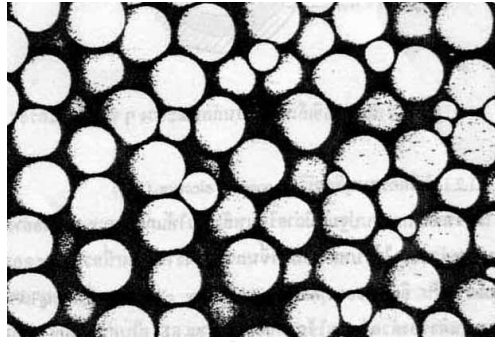
- สัญญาณแบบอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons ,SE) สัญญาณชนิดนี้ จะให้ข้อมูลลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างและเป็นสัญญาณที่ถูกนำไปใช้ในการสร้างภาพมากที่สุดภาพที่ได้ จากสัญญาณชนิดนี้เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image ,SEI)



รูปที่ 2.13 ภาพจากสัญญาณแบบอิเล็กตรอนทุติยภูมิ [34]

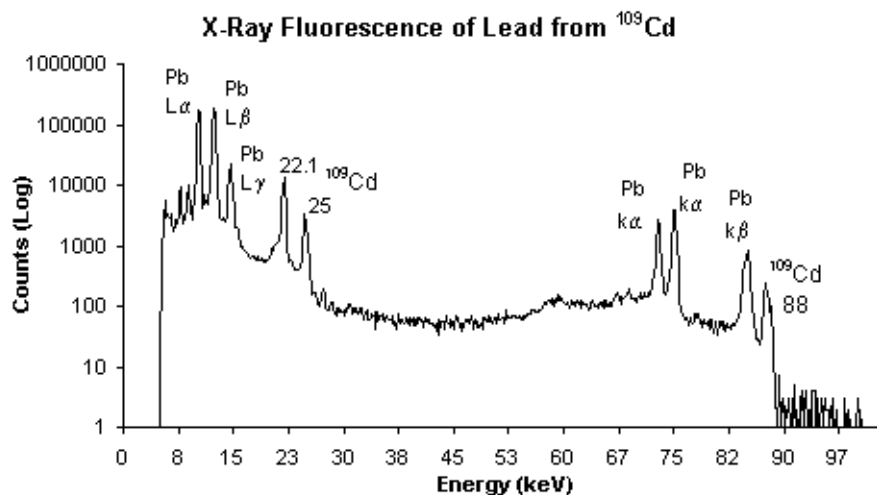
- สัญญาณแบบอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons, BSE) เป็น สัญญาณที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีของผิวตัวอย่างและแสดงให้เห็นถึงลักษณะทางโทโพ กราฟีหรือลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว





รูปที่ 2.14 ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ [34]

- สัญญาณแบบเอ็กซ์เรย์ (X-ray) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของธาตุองค์ประกอบและเป็นสัญญาณที่ใช้เทคนิคของกระบวนการ EDS และ WDS



รูปที่ 2.15 ภาพจากสัญญาณ X-ray [34]

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฉัตรทอง ไสแสง [35] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 การวิจัยเป็นการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design ที่มีพารามิเตอร์ในการศึกษาได้แก่ กระแสเชื่อม, ความเร็วเดินแนวเชื่อม และแก๊สปกคลุม โดยทำการศึกษาทางด้าน ความแข็งแรงดึงสูงสุด, ความแข็งแรงดึงจุดคราก, อัตราการยืดตัวและความแข็ง โดยได้ผลการทดลองดังนี้ 1) ผลการศึกษาต่อความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile) พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง คือ ความเร็วเดินแนวเชื่อม ความสัมพันธ์คือ กระแสเชื่อม\*ความเร็วเดินแนวเชื่อม\*แก๊สปกคลุม โดยพารามิเตอร์การเชื่อมที่กระแสเชื่อม 90 แอมแปร์

ความเร็วเดินแนวเชื่อม 500 มิลลิเมตรต่อนาที และปกคลุมด้วยแก๊ส Ar+5%O<sub>2</sub> จะให้ค่าความแข็งแรง ดึงสูงสุดที่มีค่าสูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 95.85 kg/มิลลิเมตร<sup>2</sup> 2) ผลการศึกษาต่อความแข็งแรงดึงจุดคราก (Yield Point) พบว่าปัจจัยหลักทั้งสามตัวไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์ คือ กระแส เชื่อม\*ความเร็วเดินแนวเชื่อม\*แก๊สปกคลุม โดยพารามิเตอร์การเชื่อมที่กระแสเชื่อม 90 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที ปกคลุมด้วยแก๊ส Ar+3%N<sub>2</sub> มีค่าเท่ากับ 66.09 kg/ มิลลิเมตร<sup>2</sup> 3) ผลการศึกษาต่ออัตราการยืดตัว (Elongation) พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการ เปลี่ยนแปลง คือพารามิเตอร์การเชื่อมทั้งสาม ความสัมพันธ์ คือ กระแสเชื่อม ความเร็วเดินแนวเชื่อม แก๊สปกคลุม โดยพารามิเตอร์การเชื่อมที่กระแส 100 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตร ต่อนาที ปกคลุมด้วยแก๊ส Ar+5%H<sub>2</sub> มีค่าเท่ากับ 20 % 4) ผลการศึกษาต่อความแข็ง (Hardness) พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง คือ ความเร็วเดินแนวเชื่อมและแก๊สปกคลุม ความสัมพันธ์ คือ กระแสเชื่อม\*ความเร็วเดินแนวเชื่อม\*แก๊สปกคลุม โดยพารามิเตอร์การเชื่อมที่กระแส เชื่อม 90 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที ปกคลุมด้วยแก๊ส Ar+5%H<sub>2</sub> มีค่า เท่ากับ 278.33 HV ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile) ที่มีค่ามากที่สุดกับชิ้นงานที่มีค่าต่ำที่สุด พบว่าลักษณะโครงสร้างของ Columnar dendrite และการโตของเกรนในบริเวณ HAZ มีความแตกต่างกันมาก กล่าวคือ ขนาดของ Columnar dendrite จะเล็กกว่า ในกรณีของชิ้นงานที่มี Ultimate tensile สูงกว่า และขนาดของเกรนที่โตใน บริเวณ HAZ ก็โตได้น้อยกว่าส่วนโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr<sub>23</sub> C<sub>6</sub>) สามารถเกิดขึ้นได้กับทั้งสอง

ปริญญา แสงทอง [36] ได้ทำการศึกษาปัจจัยซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยใช้กระบวนการเชื่อม MIG โดยมีปัจจัยคือ กระแสเชื่อมมี 3 ระดับคือ 150 160 และ 170 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้ามี 3 ระดับ คือ 20 22 และ 24 Volt และแก๊ส อาร์กอนมี 2 ระดับคือ ความบริสุทธิ์ของแก๊สอาร์กอน 99.990% และความบริสุทธิ์ของแก๊สอาร์กอน 99.999% ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อ ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดคือ กระแสเชื่อม แรงดันไฟฟ้าและแก๊สอาร์กอน ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวคือ กระแสเชื่อม แรงดันไฟฟ้าและแก๊สอาร์กอน ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดที่จุด ครากคือ กระแสเชื่อม แรงดันไฟฟ้าและแก๊สอาร์กอน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

T.OGAWA, K.SUAUKI และ T.ZAIZEN [37] ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนผสมต่อการเกิดโพรง รอยร้าว (Cracking) และ สมบัติการคืบ (Creep properties) โดยการใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนบริสุทธิ์ และแก๊สอาร์กอนผสมแก๊ส ไนโตรเจน พบว่าเมื่อปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดปัญหาคือ 1) เกิดโพรง เพิ่มขึ้น 2) เกิดรอยแตกเร็วขณะร้อน (Hot cracking) เพิ่มขึ้นจากการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก เกรด 304 ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่า เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีโพรงเกิดขึ้น และเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมแก๊สปกคลุมอาร์กอน ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม ซึ่งปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอย เชื่อมที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดแตกเร็วของรอยเชื่อม ในกรณีที่เนื้อโลหะรอยเชื่อมมี โครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมด เนื่องจากไนโตรเจนทำให้ขนาดเกรนออสเทนไนต์เล็กลง

Lee al. [38] ทำการศึกษาเพื่อหาค่าการพังทลายจากการเกิดความล้า (Fatigue) และการเกิดการคืบตัว (Creep) ของรอยต่อเชื่อมมิกรอยต่อชนเหล็กกล้าผสม 9Cr – 1 Mo และมีเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ชิ้นงานที่ได้นำมาทำการทดสอบความล้าคืบตัว (Creep fatigue testing) ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และให้แรงคงที่ 30 MPa ผลการทดลองที่ได้ถูกนำไปทำการเปรียบเทียบกับรอยต่อที่เป็นโลหะชนิดเดียวพบว่ารอยต่อวัสดุต่างชนิดนั้นมีค่าการพังทลายที่วิกฤตกว่าคือทนต่อความล้าคืบตัวที่ต่ำกว่า

Sireesha et al. [39] ทำการศึกษาการเชื่อมรอยต่อวัสดุต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม 316LN และโลหะผสมอินโคเนล 800 โดยการเชื่อมทิก (GTAW) เพื่อศึกษาหาค่าการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อม ขอบของพื้นที่กระทบร้อนกับโลหะเชื่อม และพื้นที่กระทบร้อนของแนวเชื่อม ที่ผ่านการเปลี่ยนแปลงและถูกนำไปทำการใช้งานที่อุณหภูมิสูงหลังจากการเชื่อมผลการทดลองพบว่า โลหะเชื่อมมีการแข็งตัวเป็นโครงสร้างเดนไดรท์ และแสดงโครงสร้างที่เป็นเซลล์นาบริเวณโลหะเชื่อมด้านโลหะผสมอินโคเนล 800 มีแอสเลคฟิงในโลหะเชื่อมที่เกิดจากฟลักซ์ที่ใช้ในการเชื่อม แต่บางส่วนหลุดออกไปได้เนื่องจากการเชื่อมภายใต้สภาวะแก๊สเฉื่อย การให้ความร้อนซ้ำที่อุณหภูมิสูงก่อให้เกิดเฟสที่มีความเปราะ คือ เฟสซิกมาตกผลึกด้านเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ไม่พบในโลหะผสมอินโคเนล 800 ทำให้แสดงให้เห็นว่าโลหะผสมอินโคเนล 800 มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่า

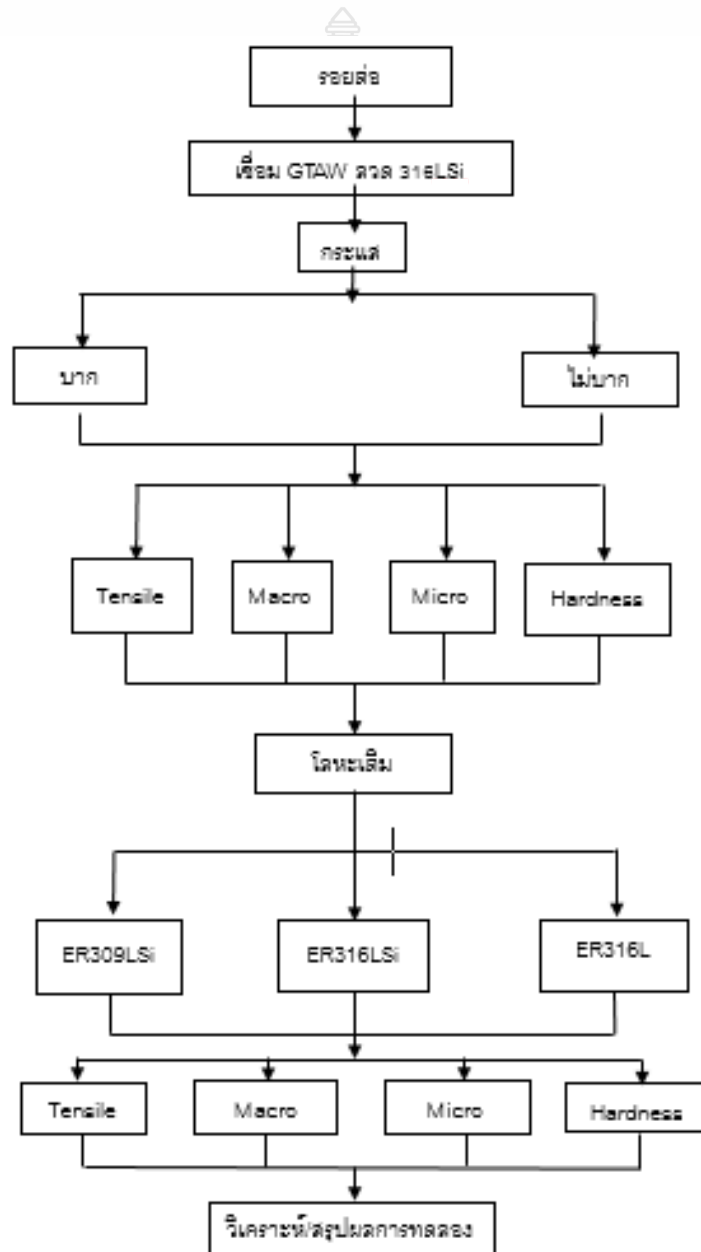
Das et al. [40] ทำการศึกษาความสามารถในการเชื่อมของรอยต่อชนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก 304 เหล็กกล้าไร้สนิม 403 โดยการเชื่อมทิก (GTAW) โดยการใช้ลวดเชื่อม ERNiCr-3 โดยการเชื่อม 2 รูปแบบ คือ การเชื่อมแนวบัพเฟอร์ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม 403 อีกแบบการเชื่อมแนวบัพเฟอร์ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม 403 พร้อมทำการอบหลังการเชื่อม (Post – Weld heat – Treatment) ผลการทดลองพบว่า พื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม 403 มีความเหนียวและสามารถยึดตัวคล้ายกับด้านที่ทำการอบหลังการเชื่อม ผลการทดลองระบุว่า หากทำการเชื่อมลักษณะนี้ไม่จำเป็นต้องทำการอบชุบหลังการเชื่อมเพราะว่ากระบวนการเชื่อมที่ออกแบบนั้นมี วัฏจักรความร้อนที่ส่งผลคล้ายการอบชุบให้แก่ชิ้นงานแล้ว

บทความวิจัยข้างต้นเป็นการศึกษาหาตัวแปรการเชื่อมต่างๆที่มีผลต่อสมบัติทางกลของรอยต่อชนของวัสดุเดียวกันหรือเหล็กกล้าไร้สนิม [9] และวัสดุต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าผสม [38] หรือโลหะอินโคเนล [39] หรือเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดแตกต่าง [40] ผลการทดลองที่ได้เป็นการศึกษาเพื่อหาค่าสมบัติทางกลที่มีค่าสูงสุด [9,40] และเปรียบเทียบกับรูปแบบโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่เกิดขึ้น [39] นอกจากนี้เป็นการอธิบายถึงผลของค่าความร้อนที่ส่งผลต่อสมบัติของรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับวัสดุต่างๆ [40] อย่างไรก็ตามการปรับปรุงส่วนผสมทางเคมีของรอยต่อ โดยการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อมด้วยการเชื่อมที่แตกต่างของรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดไม่ได้รายงานไว้ ด้วยเหตุนี้การศึกษาเพื่อเลือกลวดเชื่อมที่มีความเหมาะสมอาจสามารถทำให้เกิดประโยชน์ในการนำเอารอยต่อวัสดุต่างชนิดไปใช้งานได้ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงคาดหวังในการศึกษาสมบัติทางกลของรอยต่อต่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุมที่มีการใช้ลวดเชื่อมที่แตกต่างเพื่อพัฒนาสมบัติของรอยต่อให้มีค่าที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ต่อไป

### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 การดำเนินวิทยานิพนธ์เรื่อง

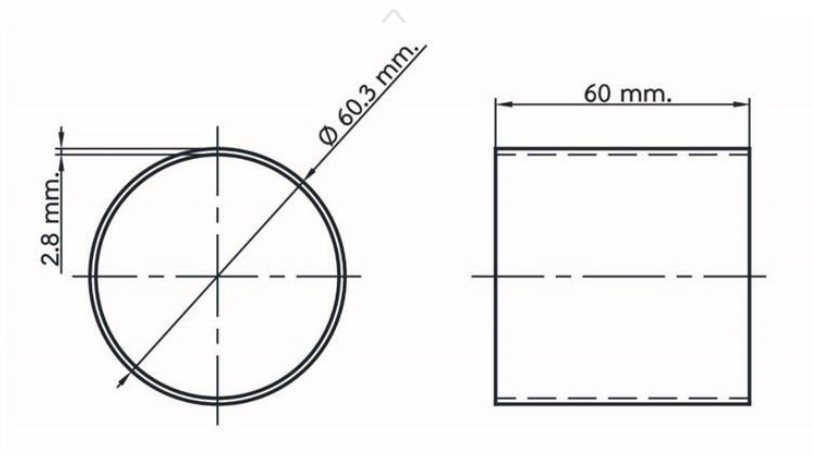
อิทธิพลรูปแบบลวดเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI 304/316L มีขอบเขตของการศึกษาดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพการไหลแสดงกระบวนการทดลอง

### 3.2 วัสดุในการทดลอง

3.2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก AISI 304 และ AISI 316L ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 60.3 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตร หนา 2.8 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.2 และมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.2 ถูกใช้เป็นวัสดุในการทดลอง หลังจากทำการตัดท่อให้มีขนาดดังรูป 3.2 ท่อทั้งสองถูกนำมาประกอบเป็นรอยต่อชนดังรูปที่ 3.3 และทำการเชื่อมจุดเพื่อทำให้เกิดการยึดเกาะของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสอง

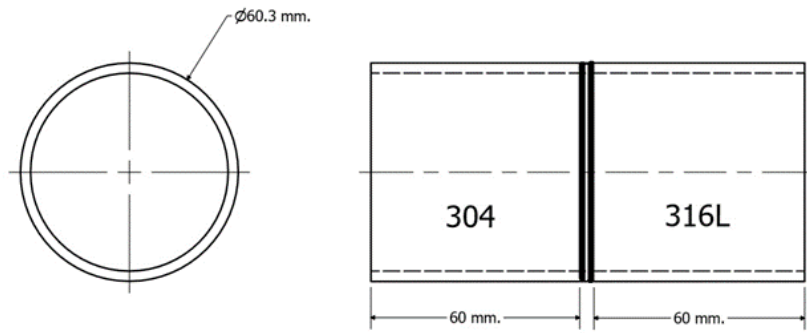


รูปที่ 3.2 ขนาดชิ้นงานก่อนทำการทดลองของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316L

วัสดุในการทดลองคือ ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมไร้ตะเข็บ (Seamless stainless steel tube) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 60.3 มิลลิเมตรผนังท่อหนา 2.8 มิลลิเมตรและมีส่วนผสมทางเคมีค่าความแข็งแรงดึง ล่าความแข็ง 46 ดังตารางที่ 3.1 ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมถูกตัดด้วยเลื่อยกลที่มีการหล่อเย็นด้วยสารหล่อเย็นจนมีขนาดความยาวเท่ากับ 60 มิลลิเมตรดังรูปที่ 3.2

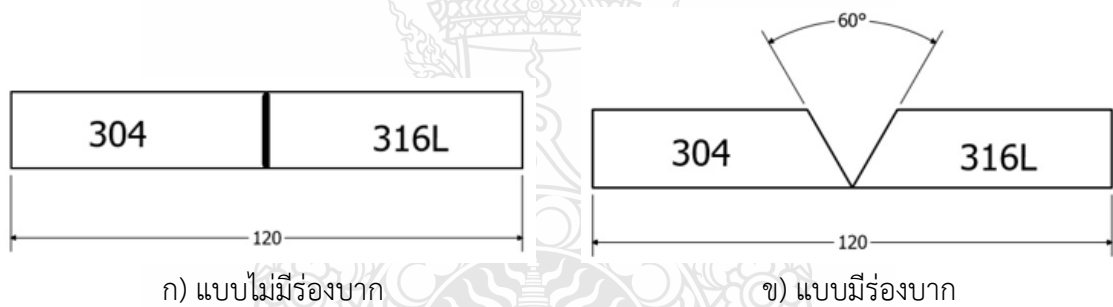
ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก AISI 304 และ AISI 316L

วัสดุ	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)						ความแข็งแรงดึง MPa	ความแข็งHV
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo		
AISI 304	0.0187	0.4695	1.4638	18.3448	7.194	0.059	576	165
AISI 316L	0.0504	0.4752	1.0491	15.3228	8.505	0.6663	607	177



รูปที่ 3.3 แบบจำลองการจับชิ้นงานเชื่อมแบบต่อท่อชน

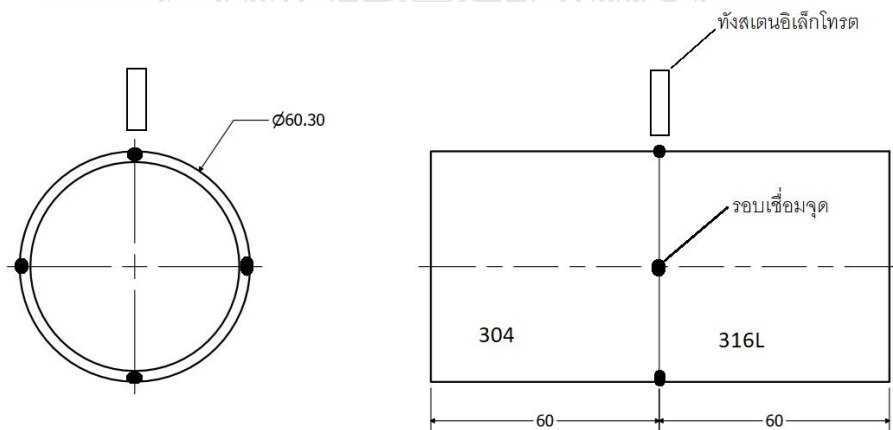
บริเวณรอยต่อของท่อถูกเตรียมแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ รอยต่อที่ไม่มีร่องบาก และรอยต่อที่มีร่องบากดังรูปที่ 3.3 รอยต่อแบบมีร่องบากนั้น ได้ถูกเตรียมด้วยการกลึงแบบมีสารหล่อเย็นและผิวการกลึงถูกขัดละเอียดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150 ร่องบากที่ถูกเตรียมขึ้นมาคือร่องบากวี (V groove) ที่มีมุมรวม  $60^\circ$  และมีช่องว่างของแนวบาก (Root opening) เท่ากับ 0.0 มิลลิเมตร



ก) แบบไม่มีร่องบาก

ข) แบบมีร่องบาก

รูปที่ 3.4 รูปแบบของร่องบาก



รูปที่ 3.5 รูปแบบรอยต่อชนที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อผิวร่องบากถูกเตรียมดังรูป 3.4 ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองถูกนำมาประกอบเป็นรอยต่อชนดังรูปที่ 3.5 รอยต่อถูกทำการเชื่อมยึดด้วยการเชื่อมจุด (Tack welding) จำนวน 4 จุดที่ตำแหน่ง 0 3 6 และ 9 นาฬิกาเพื่อยึดไม่ให้ชิ้นส่วนหลุดออกจากกัน ก่อนประกอบชิ้นงานเข้ากับอุปกรณ์การจับยึดดังรูปที่ 3.6 ที่มีความสามารถในการหมุนรอบตัวเองที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสำหรับการเชื่อม

### 3.3 กระบวนการเชื่อม

กระบวนการในการเชื่อมรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิมในการทดลองนี้คือ การเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุมหรือการเชื่อมทิกที่ดำเนินการใช้โดย เครื่องเชื่อมทิก Fronius KD 4010 เครื่องเชื่อมชนิดนี้สามารถปรับตั้งความเร็วในการป้อนลวดได้ 10-1300 เซนติเมตร/นาที ถูกออกแบบให้มีฝาครอบเปิดปิดได้สำหรับใส่ลวดเชื่อมแบบม้วนขนาด 300 มิลลิเมตร น้ำหนักไม่เกิน 15 กิโลกรัม มีลักษณะพิเศษคือตัวเครื่องสามารถเติมลวดเชื่อมได้อัตโนมัติ ขดลวดตัวนำแบบเย็นยาว 3 เมตร ที่สามารถใช้ได้ทั้งในการเชื่อมทิกด้วยมือและการเชื่อมทิกแบบอัตโนมัติ การคอนแทกทิกที่ใช้ควบคุมทิศทางไหลของลวดทำจากทองแดง ทนต่อความร้อนสูง หัวเชื่อมทิกที่ติดกับตัวเครื่องป้อนลวดเชื่อมด้วยมือ และมีอุปกรณ์การปรับแต่ง หัวเชื่อมแบบทิกควบคุมด้วยระบบ FPA 2003/FPA 9000 มีการเชื่อมต่อสายไปยังตัวควบคุมระบบเครื่องจ่ายไฟ



รูปที่ 3.7 เครื่องเชื่อมทิกที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานทดลอง

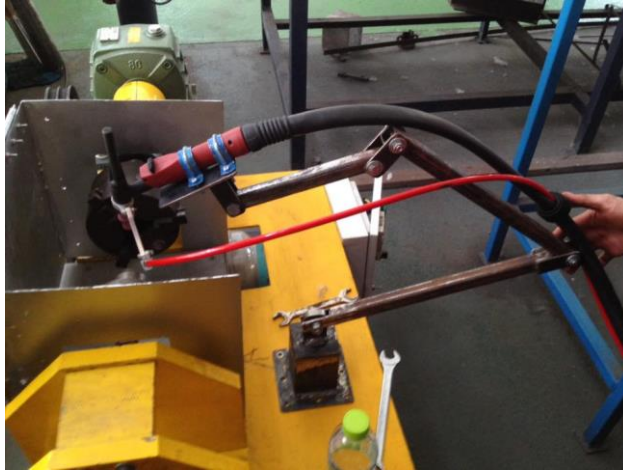
ลวดเชื่อมที่ใช้ในการเติมลงไปบ่อหลอมละลายของกระบวนการเชื่อมทิกประกอบด้วย ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AWS ER 309LSi ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AWS ER 316L และลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AWS ER 316LSi ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมสามชนิดนี้ เมื่อทำการเชื่อมจะทำให้มีเฟสเพอร์ไรท์เกิดขึ้นอยู่ในช่วง 1-10% ช่วยในการลดการเกิดการแตกร้าวขณะร้อน Hot Cracking ขณะทำการเชื่อมทิก โดยโลหะเติมทั้งสามชนิดมีส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 3.3 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดเชื่อมเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุ	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
AWS ER 309LSi	0.150	0.900	2.500	23.130	13.610	0.290
AWS ER 306L	0.025	0.420	1.910	19.100	12.580	2.570
AWS ER 316LSi	0.028	0.850	1.400	18.300	12.500	2.550

อุปกรณ์จับยึดหัวเชื่อม ออกแบบมาเพื่อยึดหัวเชื่อมให้อยู่กับที่ ใช้ในการเชื่อมอัตโนมัติ โดยจะสามารถปรับความสูง, ระยะห่างจากชิ้นงาน และองศาที่จะใช้เชื่อมได้





รูปที่ 3.8 อุปกรณ์จับยึดหัวเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

แก๊สปกคลุมที่ใช้ในการทดลอง คือ 100% Ar ที่เลือกใช้แก๊สนี้เพราะแนวเชื่อมที่ได้ไม่กว้างมากเกินไปดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.2.5



รูปที่ 3.9 แก๊สปกคลุมที่ใช้ในการทดลอง

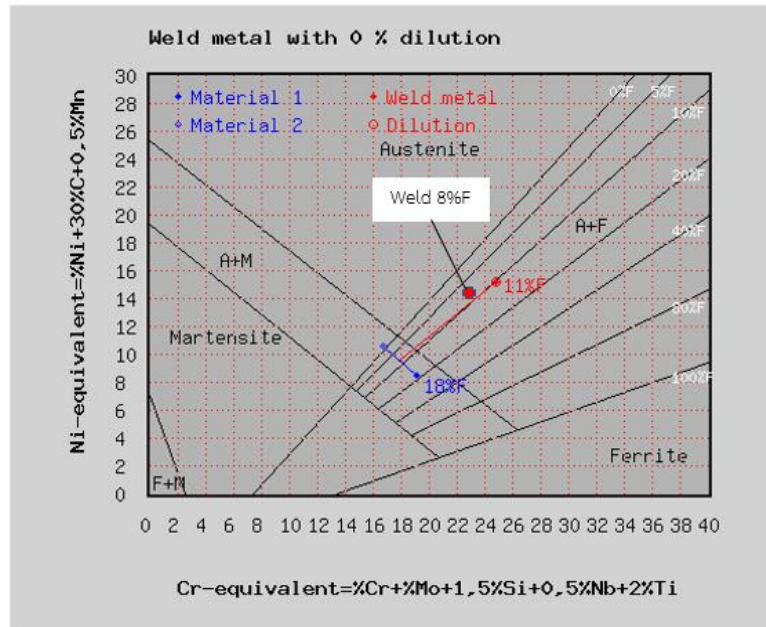
### 3.4 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองแต่ละชุด

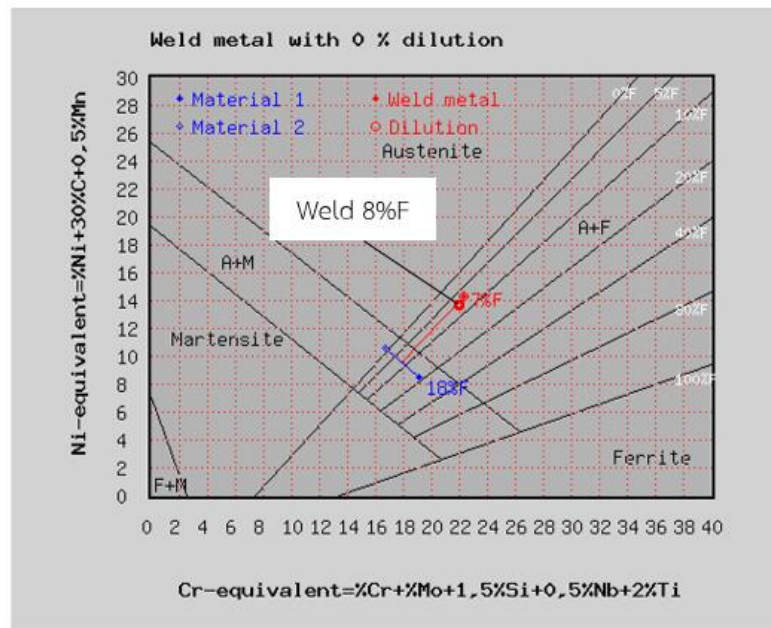
ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	การทดลองชุดที่1	การทดลองชุดที่2	การทดลองชุดที่3
ชนิดของลวดเชื่อม	AWS ER309LSi	AWS ER316L	AWS ER316LSi
กระแส (แอมแปร์)	80 -160	80 – 160	80 – 160
ความเร็วรอบ (มิลลิเมตร/นาที)	150	150	150
อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม (ลิตร/นาที)	10	10	10
อัตราการป้อนลวดเชื่อม (มิลลิเมตร/นาที)	200	200	200

การเลือกลวดเชื่อมที่ใช้ทั้ง 3 ชุดการทดลอง ได้มาจากการนำส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม ดังตารางที่ 3.3 และส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก AISI 304/AISI 316L ดังตารางที่ 3.2 มาพล็อตลงในแผนภาพเชฟเลอร์ Schaeffler diagram ผลที่ได้แสดงออกมาในค่าของ % เฟอร์ไรต์ โดยจะต้องมี %เฟอร์ไรต์ อยู่ในช่วง 1-10% เพื่อป้องกันการแตกร้าาขณะแข็งตัวของบริเวณแนวเชื่อม ผลที่ได้คือ ลวดเชื่อม AWS ER 309LSi มี % เฟอร์ไรต์ 11%, AWS ER 316L มี % เฟอร์ไรต์ 7%, AWS ER 316LSi มี % เฟอร์ไรต์ 10% ดังรูปที่ 3.10-3.12 ส่วนลวดเชื่อมลวดเชื่อม AWS ER 309LSi ซึ่งมีค่า % เฟอร์ไรต์ เกินช่วงที่กำหนด แต่ที่นำมาใช้เป็นตัวแปร เพราะลวดเชื่อมนั้นหายากจึงนำลวดเชื่อมที่มี % เฟอร์ไรต์ใกล้เคียงที่สุดมาใช้

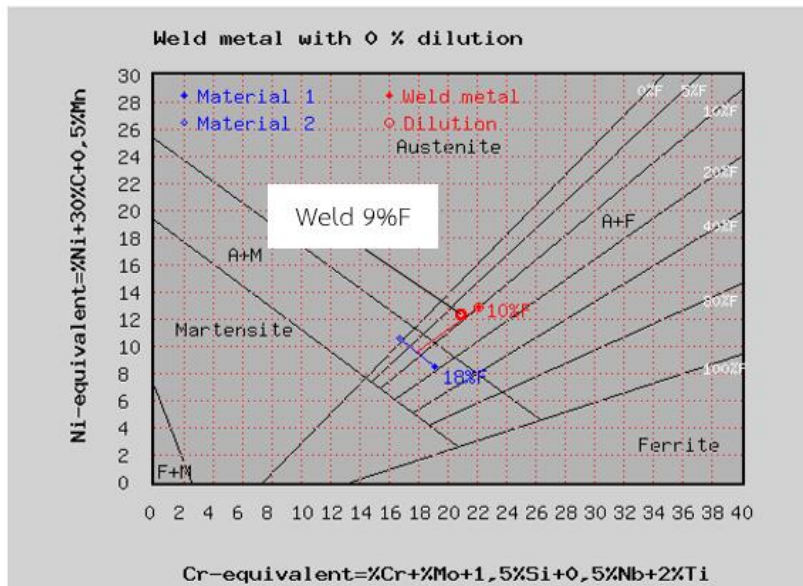
เมื่อนำโลหะเติมทั้ง 3 รูปแบบไปทำการเชื่อมรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดจากนั้นได้นำแนวเชื่อมไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและนำผลส่วนผสมทางเคมีมาพล็อตลงในแผนภาพเชฟเลอร์ Schaeffler diagram อีกครั้ง ผลที่ได้คือ ลวดเชื่อม AWS ER 309LSi มี % เฟอร์ไรต์ 8%, AWS ER 316L มี % เฟอร์ไรต์ 8%, AWS ER 316LSi มี % เฟอร์ไรต์ 9% ดังรูปที่ 3.10-3.12 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า %เฟอร์ไรต์ ของโลหะเติมทั้ง 3 รูปแบบหลังจากผ่านการนำไปเชื่อมมีค่า%เฟอร์ไรต์ที่บริเวณแนวเชื่อมไม่เกินช่วงที่กำหนด ส่งผลให้แนวเชื่อมของรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดมีค่าความแข็งแรงดึงและความแข็งและไม่เกิดการแตกร้าาขณะแข็งตัว



รูปที่ 3.10 Schaeffler Diagram แสดง % เฟอร์ไรท์ของลวดเชื่อม AWS ER 309LSi [40]



รูปที่ 3.11 Schaeffler Diagram แสดง % เฟอร์ไรท์ของลวดเชื่อม AWS ER 316L [40]



รูปที่ 3.12 Schaeffler Diagram แสดง % เฟอร์ไรท์ของลวดเชื่อม AWS ER 316LSi [40]

ตัวแปรกระแส 3 ระดับ และอัตราไหลของแก๊สปกคลุมที่ใช้ นั้นได้มาจาก ตารางของ เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนค่าตัวแปรความเร็วรอบในการหมุน 150 มิลลิเมตร/นาที ลดลงมาจากค่ามาตรฐาน 300 มิลลิเมตร/นาที เพราะถ้าใช้ค่าจริง ช่างงานเชื่อมจะหมุนเร็วมากจะทำให้เกิดปัญหาในการเชื่อม ช่างงานได้

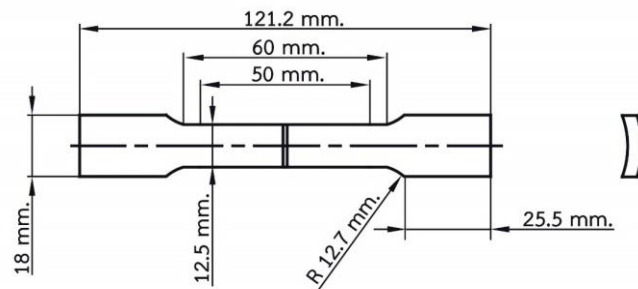
### 3.5 วิธีการเชื่อม

- 1) ตรวจสอบว่าอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานและเครื่องเชื่อมอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานหรือไม่
- 2) ทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำความสะอาดท่อเหล็กทั้งสองด้วยแปรงลวด
- 3) นำชิ้นงานทดสอบทั้งสองชนิดมาทำการจับยึดชิ้นงาน
- 4) ทำการเปิดเครื่องเชื่อม
- 5) เริ่มต้นเชื่อม โดยเริ่มเชื่อมยึดชิ้นงานไม่ให้หลุดที่จุด 4 จุดที่มุม 90°, 180°, 270°, และ 360° หรือ 0 3 6 9 นาฬิกา ของชิ้นงานที่แนวรอยต่อของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม
- 6) ใส่ลวดเชื่อม AWS ER 309LSi, AWS ER 316L และ AWS ER 316LSi ตามลำดับการทดลอง
- 7) ทำการปรับอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 100%Ar เป็น 10 ลิตรต่อนาที
- 8) ปรับอัตราการป้อนลวดเชื่อมเป็น 200 มิลลิเมตรต่อนาที
- 9) ปรับกระแสเชื่อมเป็น 80 100 120 140 และ 160 แอมแปร์ ตามลำดับการทดลอง
- 10) เคลื่อนที่หัวเชื่อมไปตามรอยต่อของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยการเชื่อมแบบรอบชิ้นงาน

### 3.6 การตรวจสอบชิ้นงานทดลอง

#### 3.6.1 การทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM A 370

1) ชิ้นงานทดสอบแรงดึง นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมมาทำการเตรียมชิ้นงานตามขนาดดังรูปที่ 3.13 เพื่อใช้สำหรับการทดสอบแรงดึง



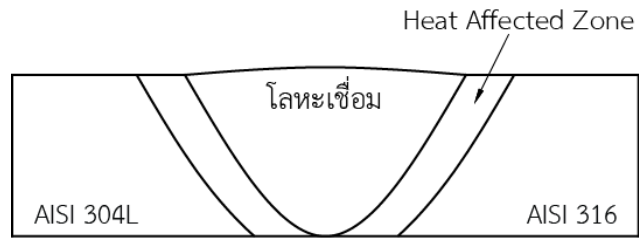
รูปที่ 3.13 แบบจำลองการจับชิ้นงานเชื่อมแบบต่อท่อชน



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบแรงดึง

#### 3.6.2 การทดสอบความแข็ง ตามมาตรฐาน ASTM E92

1) ชิ้นงานทดสอบความแข็ง ถูกเตรียมเพื่อให้สามารถนำไปตรวจสอบความแข็งของแนวเชื่อม ดังรูปที่ 3.15

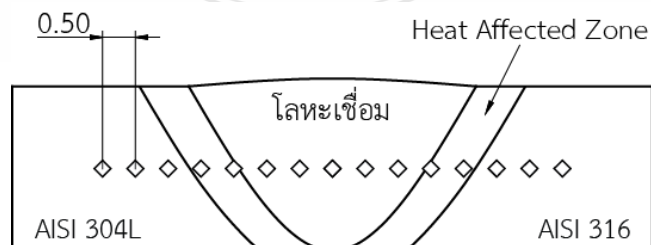


รูปที่ 3.15 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส

2) เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส ทดสอบความแข็งได้โดยการกดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อม บริเวณพื้นที่กระทบร้อน และเนื้อโลหะเดิม ใช้แรงกด 100 กรัม เวลาในการแช่ 10 วินาที



รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส



รูปที่ 3.17 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส

### 3.6.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

#### 1) เครื่องมือและอุปกรณ์

- กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอแบบซูม ใช้สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค
- กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ใช้สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค
- กรด  $\text{NH}_4\text{HF}_2 + \text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5 + \text{น้ำกลั่น}$  ใช้สำหรับการกัดขึ้นรอยขึ้นงานเชื่อม
- เครื่องขัดเหล็ก
- กระดาษทรายเบอร์ 100 240 400 800 1000 และ 1500
- เรซิน ใช้สำหรับการยึดชิ้นงานที่จะทำการขัดผิวหน้า
- เตอบแห้ง
- เครื่องตัดเหล็ก Micro cutter
- ถุงมือ
- ที่คีบชิ้นงาน
- ผ้าสักหลาด ใช้สำหรับการขัดเงาที่ผิวหน้าชิ้นงานเชื่อม ใช้คู่กับผงเพชร
- ผงเพชร
- อัลตราโซนิก

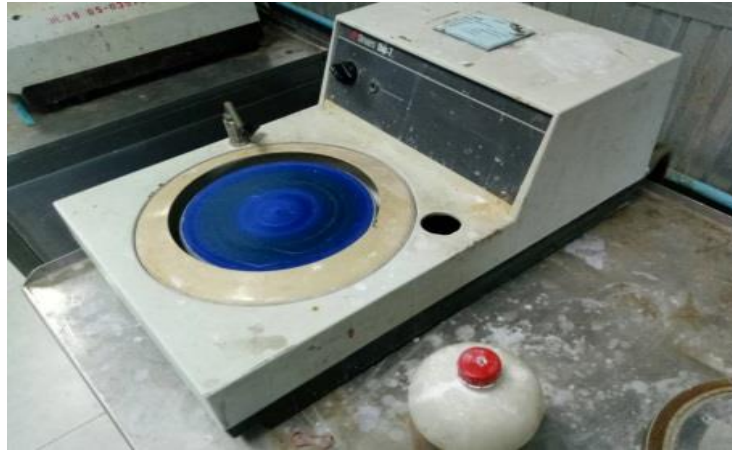
#### 2) การเตรียมชิ้นงาน

- ตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัดเหล็ก Micro cutter
- ทำการจับยึดชิ้นงานด้วยเรซิน โดยทำการหล่อชิ้นงานลงในแม่พิมพ์ที่เป็นทรงกระบอก เช่น ท่อ pvc แล้วรอให้เรซินแข็งตัว



รูปที่ 3.18 เครื่องขัดแบบจานหมุนใช้กระดาษทราย

- ขัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยกระดาษทรายน้ำ โดยนำกระดาษทรายติดบนเครื่องขัดแบบจานหมุน ทำการขัดเปิดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 ให้ผิวหน้าเริ่มเงา แล้วจึงทำการเปลี่ยนกระดาษทรายเป็นเบอร์ 240, 400, 800, 1000 และ 1500 ตามลำดับ และเมื่อเปลี่ยนกระดาษทราย เป็นเบอร์ที่ละเอียดขึ้นจะต้องเปลี่ยนทิศทางการขัด เพื่อลบรอยกระดาษทรายเบอร์ก่อนหน้า



รูปที่ 3.19 เครื่องขัดแบบจานหมุนใช้ผ้าสักหลาด

- นำชิ้นงานที่ขัดผิวหน้าแล้วมาทำการขัดเงาบน ผ้าสักหลาด โดยใช้ผงเพชร ทำหน้าที่เป็นผงขัด

- ทำการเตรียมกรด  $\text{NH}_4\text{HF}_2 + \text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5 + \text{น้ำกลั่น}$  สำหรับการกัดขึ้นรอยโดย ส่วนผสมทางเคมีของกรดชนิดนี้คือ

- แอมโมเนียมไบฟลูออไรด์ 20 กรัม

- โพตัสเซียมเมตาไบซัลไฟท์ 0.5 กรัม

- น้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

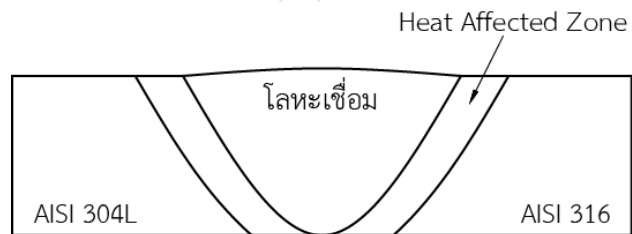
- นำชิ้นงานที่ขัดเงาแล้วมาล้างทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก จากนั้นนำ ชิ้นงาน มาทำการกัดขึ้นรอย ด้วยกรด  $\text{NH}_4\text{HF}_2 + \text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5 + \text{น้ำกลั่น}$  ประมาณ 15-20 วินาที จากนั้นทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานด้วยด้วยเครื่องอัลตราโซนิกอีกครั้ง แล้วอบให้แห้ง

3) นำชิ้นงานมาตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและส่วนผสมทางเคมีเพื่อหาปริมาณธาตุของบริเวณขึ้นตัวอย่างและ เพื่อตรวจสอบโครงสร้างของรอยเชื่อมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอแบบซูมทำการตรวจสอบดูจุดบกพร่องบริเวณโลหะเชื่อมและตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กวาด บริเวณพื้นที่กระแทกร้อน ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เพื่อ แสดงรายละเอียดเฟสของเกรนตามตำแหน่งที่กำหนด ตรวจสอบเพื่อวิเคราะห์ความแข็งและความเหนียว

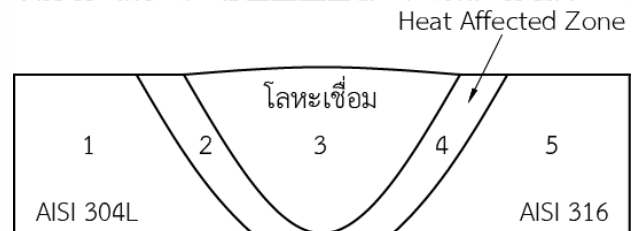




รูปที่ 3.20 กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างโลหะ



รูปที่ 3.21 ตำแหน่งการทดสอบโครงสร้างมหภาค

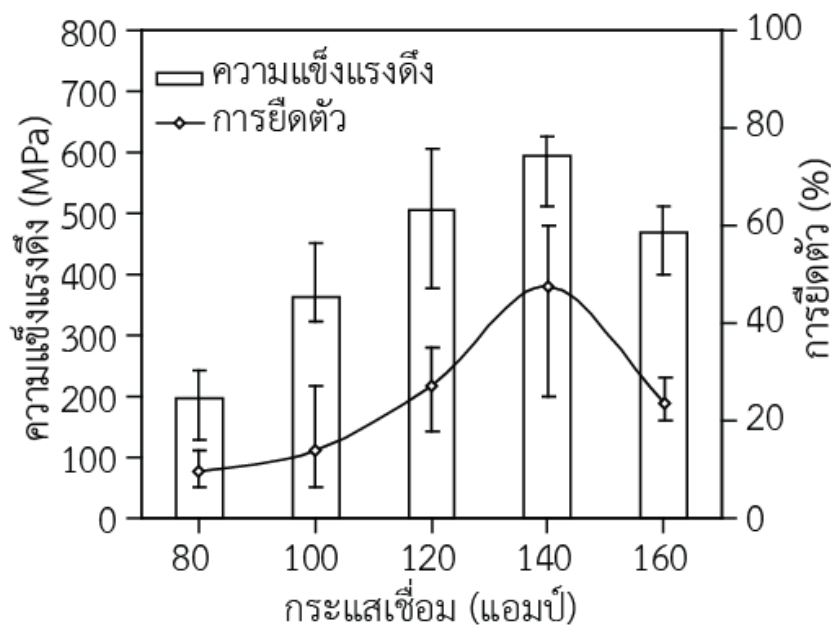


รูปที่ 3.22 ตำแหน่งการทดสอบโครงสร้างจุลภาคและตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

## บทที่ 4 ผลการดำเนินการ

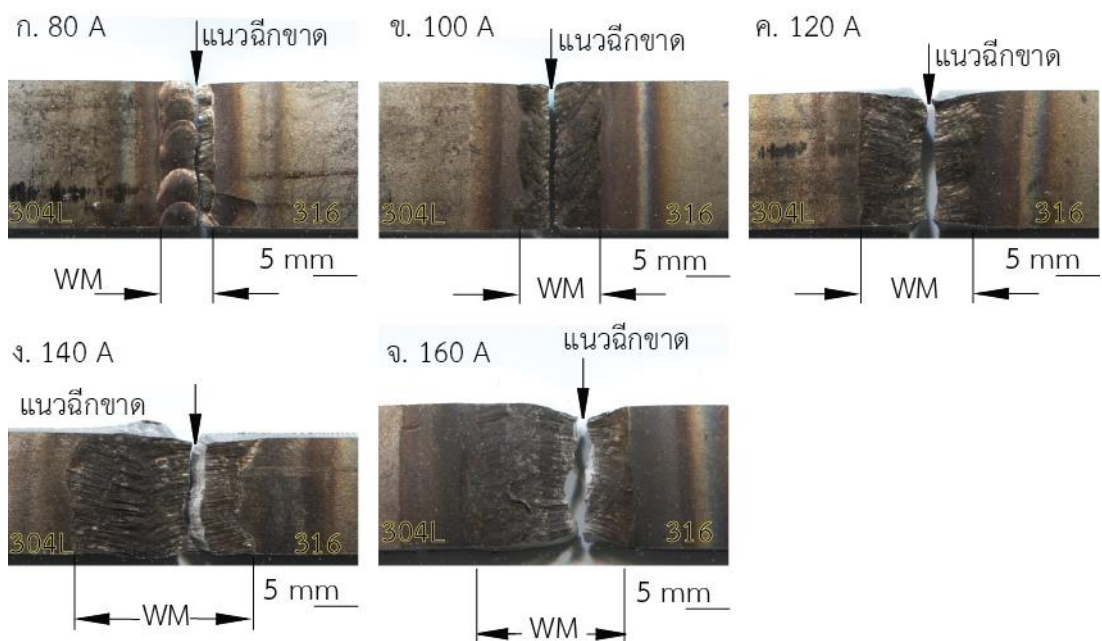
### 4.1 อิทธิพลของกระแสเชื่อม GTAW ที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304และ AISI304L แบบไม่มีร่องบาก

ผลการตรวจสอบความแข็งแรงดึง อัตราการยึดตัวของรอยต่อชนท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด ที่ทำการเชื่อมแบบ GTAW ด้วยโลหะเติม ER316LSi ที่กระแส 80 100 120 140 และ 160 แอมแปร์ เพื่อหากระแสที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.1



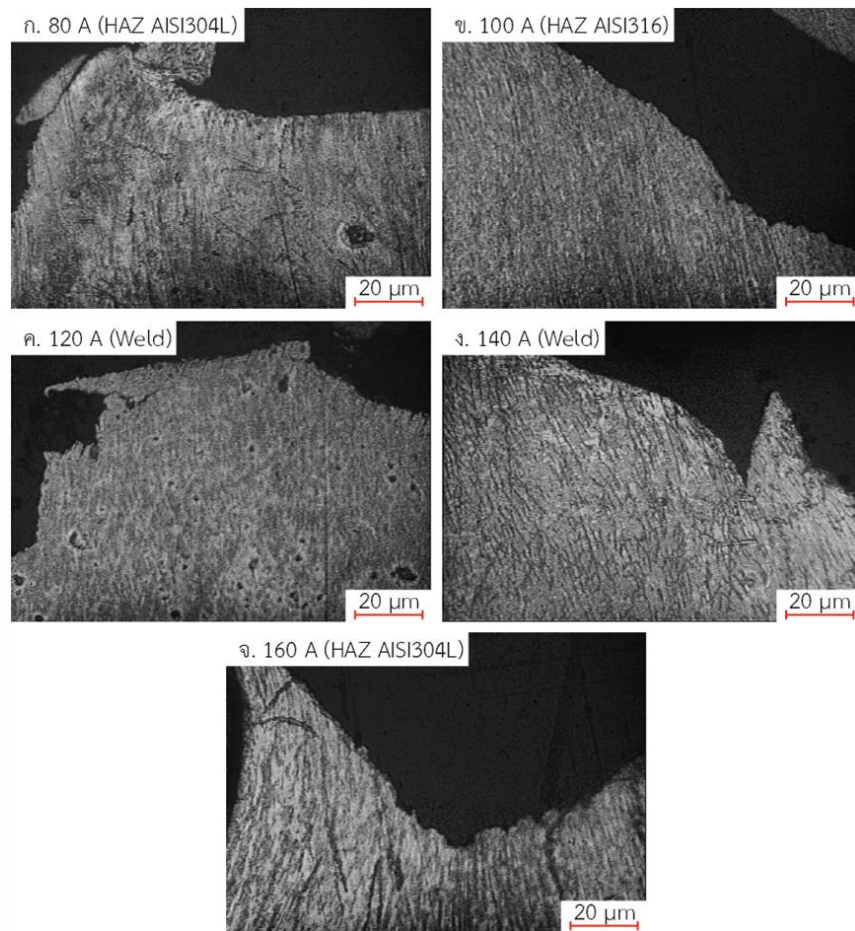
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง การยึดตัว และกระแสเชื่อมของรอยต่อชนท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI 304 และ AISI316L

รูปที่ 4.1 แสดงผลของค่าความแข็งแรงดึง อัตราการยึดตัว และกระแสเชื่อมของรอยต่อชนท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L โดยความแข็งแรงดึงถูกแสดงเป็นหน่วย เมกะปาสคาล (MPa) โดยที่กระแส 80 แอมแปร์ ได้ค่าความแข็งแรงดึงน้อยที่สุดเท่ากับ 196.62 เมกะปาสคาล ซึ่งค่าความแข็งแรงดึง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากกระแส 80 แอมแปร์ จนกระทั่งกระแส 140 แอมแปร์ ซึ่งมีค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมของรอยต่อชนชิ้นงานที่กระแสอื่นซึ่งที่กระแส 140 แอมแปร์ มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 595.41 เมกะปาสคาล และค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการกระแสเพิ่มเป็น 160 แอมแปร์



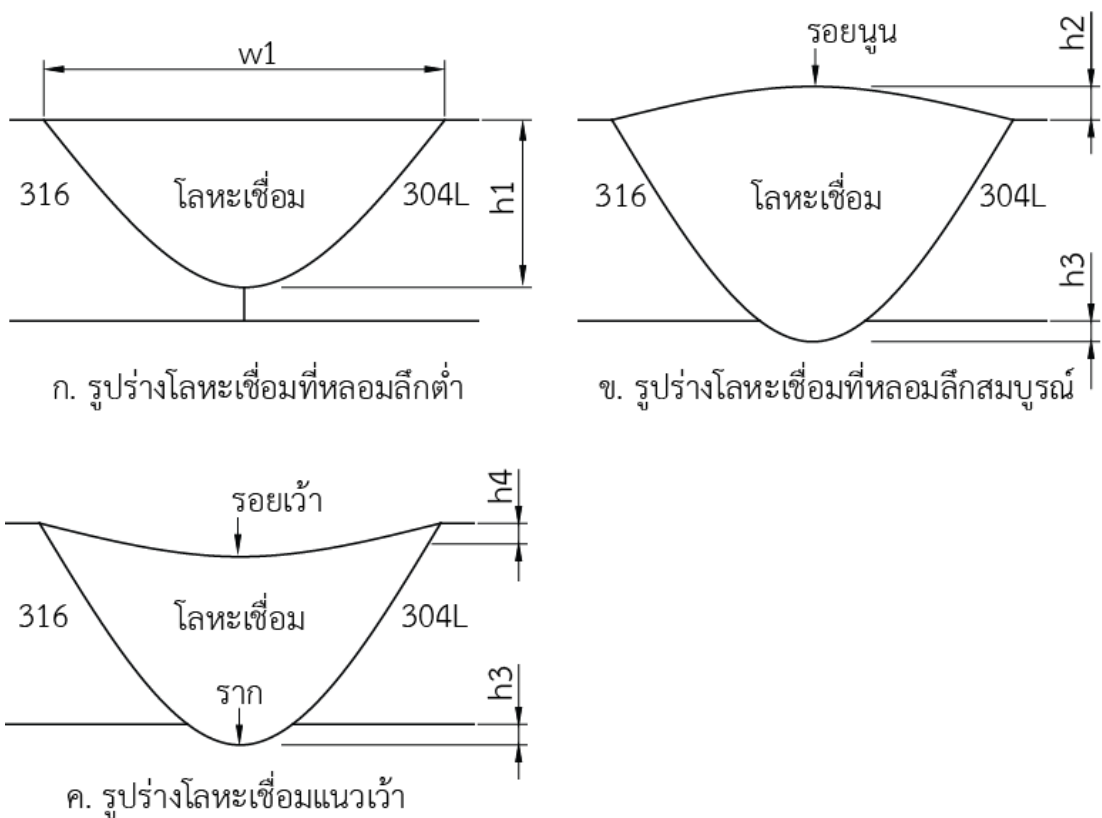
รูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่งของการฉีกขาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนแบบไม่มีร่องบากต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ

รูปที่ 4.2 ตำแหน่งของการฉีกขาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนแบบไม่มีร่องบากต่อเหล็กต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ ซึ่งพบว่าตำแหน่งของการพังทลายจะเกิดตรงบริเวณแนวโลหะเติมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L ที่กระแส 80, 140 และ 160 แอมแปร์จากการหลอมละลายของโลหะเติมที่สมบูรณ์ และที่กระแส 100 และ 120 แอมแปร์ ตำแหน่งการพังทลายจะเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของแนวโลหะเติมเนื่องจากการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์ของโลหะเติม



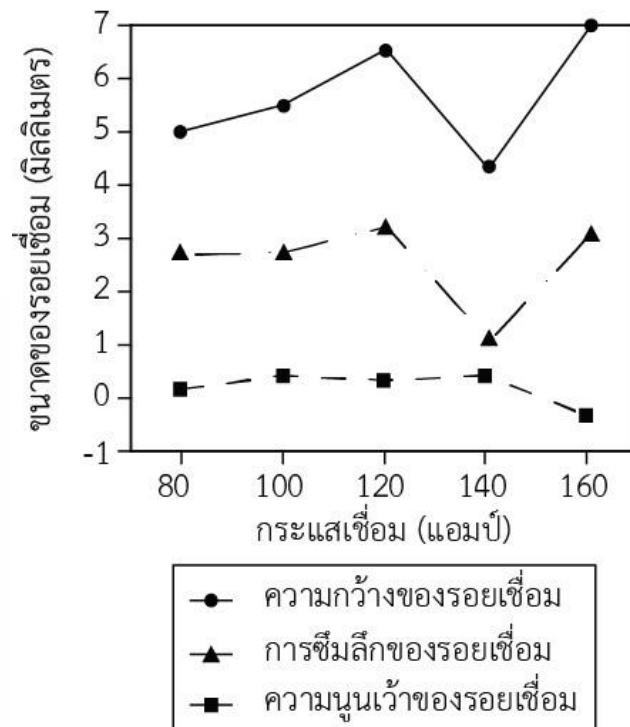
**รูปที่ 4.3** โครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงของรอยต่อชนแบบไม่มีร่องบากท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ

รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนแบบไม่มีร่องบากท่อเหล็กต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ ซึ่งพบรูป(ก)เป็นการฉีกขาดของรอยต่อชนที่กระแส 80 แอมแปร์ ลักษณะการฉีกขาดค่อนข้างเป็นแนวตรงเนื่องจากรอยต่อชนมีค่าความแข็งแรงต่ำ (ข) และ (ค) ที่กระแส 100 120 แอมแปร์ ลักษณะการฉีกขาดเริ่มเป็นแนวเส้นโค้งเนื่องจากรอยต่อชนที่มีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากกระแสที่เพิ่มขึ้นและ (ง) ที่กระแส 140 แอมแปร์ ลักษณะการฉีกขาดของรอยต่อชนมีลักษณะเหมือนปากฉลามแสดงถึงรอยต่อชนมีความแข็งแรงดึงและอัตราการยืดตัวสูงขึ้น และ (จ) กระแส 160 แอมแปร์ แสดงถึงลักษณะของรอยต่อชนที่มีค่าความแข็งแรงลดลงเนื่องจากกระแสที่เพิ่มขึ้นทำให้โลหะเติมเกิดการเว้าและนูนของรากโลหะเติมส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและอัตราการยืดตัวมีแนวโน้มลดลง



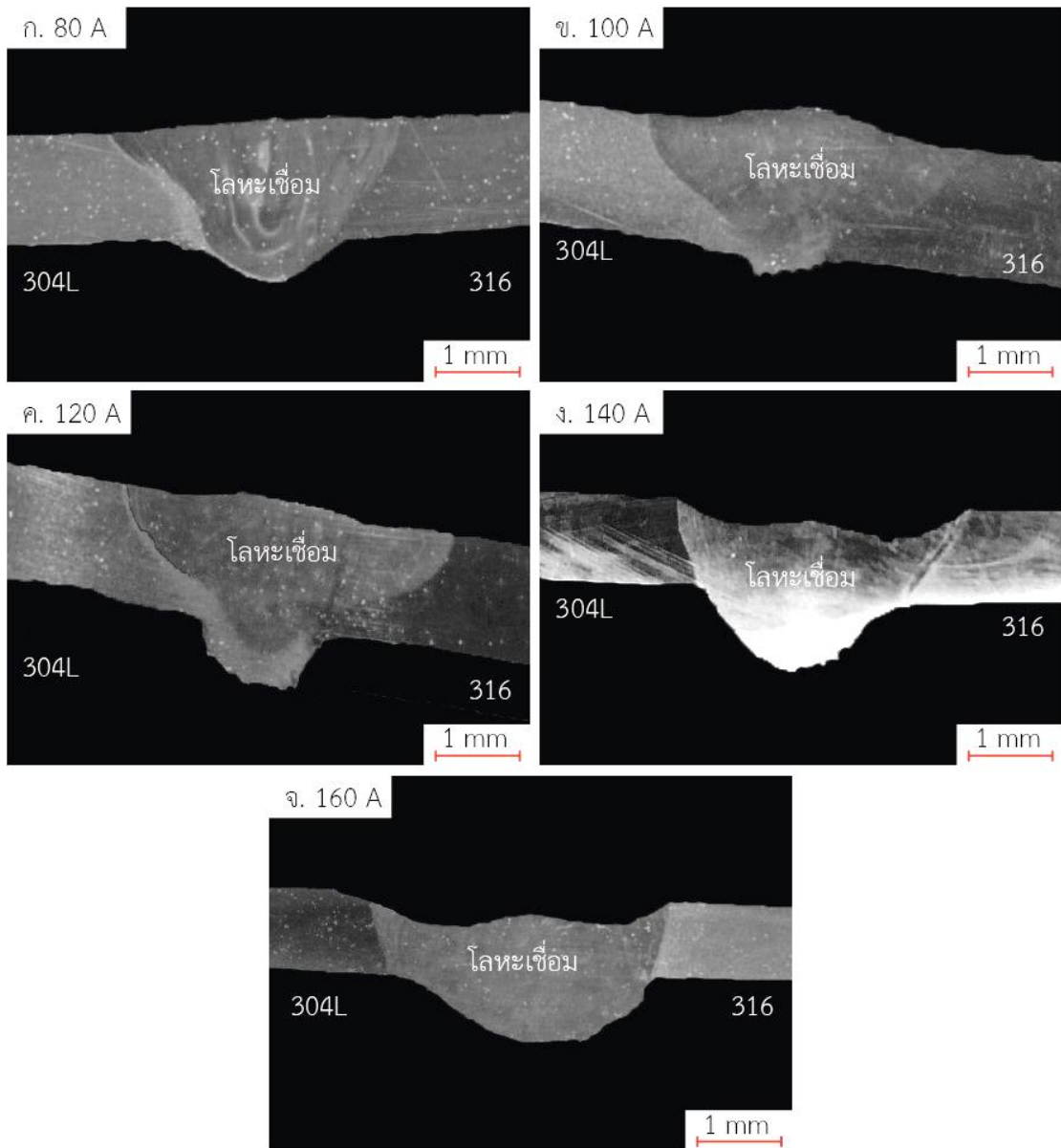
รูปที่ 4.4 แสดงการวัดขนาดรูปร่างของโลหะเต็มรอยต่อชนแบบไม่มีร่องบากต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ

รูปที่ 4.4 ได้แสดงลักษณะของแนวเชื่อมออกเป็น 3 ลักษณะคือ (ก) ลักษณะของแนวเชื่อมที่มีการหลอมลึกลงต่ำ (ข) ลักษณะของแนวเชื่อมที่มีการหลอมลึกลึกอย่างสมบูรณ์ (ค) ลักษณะของแนวเชื่อมที่เกิดการเว้าของโลหะเต็มจากกระแสที่ไม่เหมาะกับรอยต่อชน



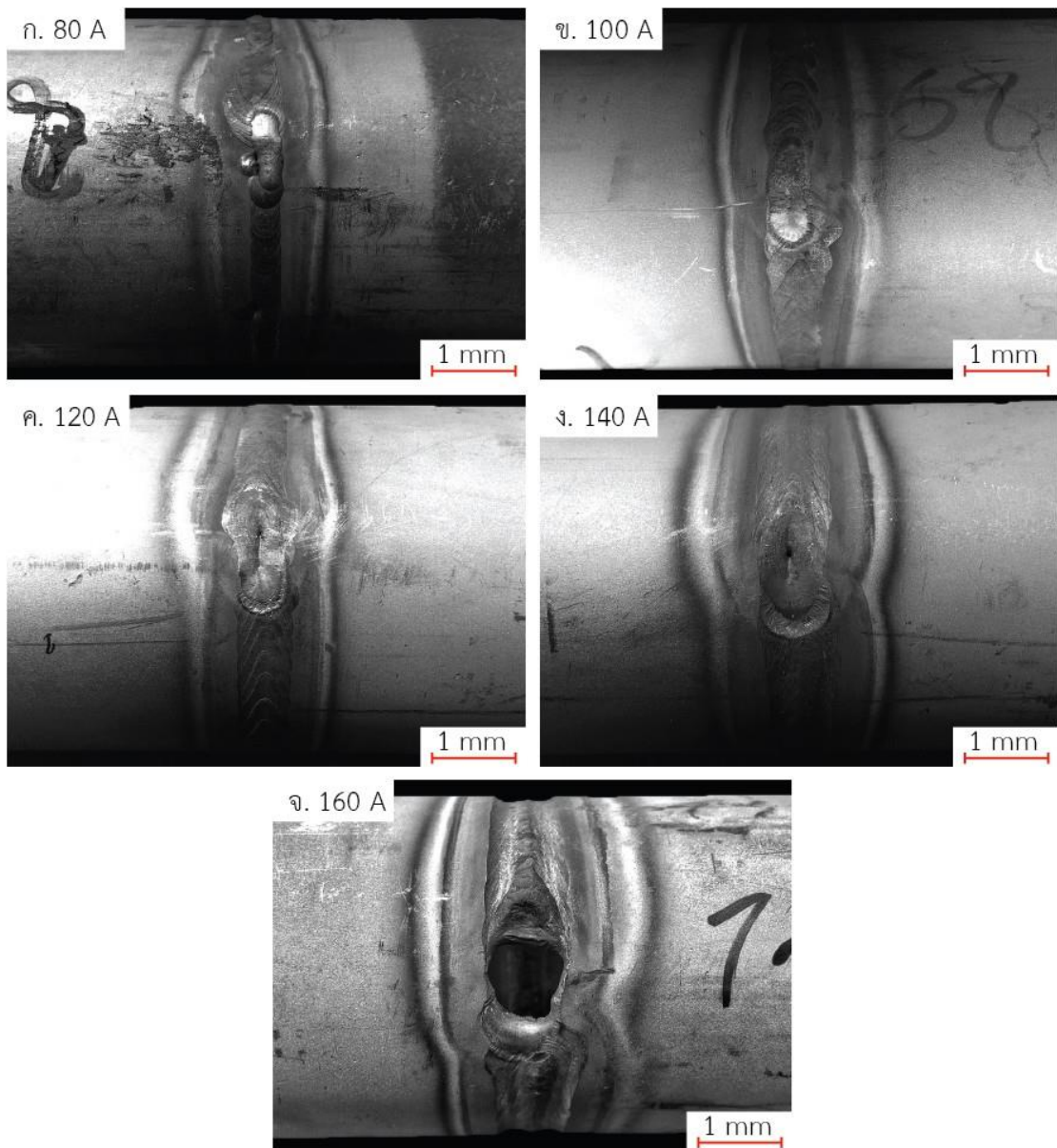
รูปที่ 4.5 อิทธิพลของชนิดโลหะเติมที่มีผลต่อขนาดรอยเชื่อมลักษณะต่างๆ ที่เชื่อมด้วยกระแสต่างๆ ของรอยต่อชนแบบไม่มีร่องบากของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L

รูปที่ 4.5 กราฟเส้นแสดงความกว้างของรอยโลหะเติมเห็นได้ว่าการเพิ่มกระแสขึ้นขนาดความกว้างของรอยโลหะเติมจะมีขนาดกว้างขึ้น แต่ที่กระแส 140 แอมแปร์ ค่าขนาดความกว้างของรอยโลหะเติมมีค่าน้อยสุด จากกราฟเส้นการซีมลิ้งพบว่าที่กระแส 140 แอมแปร์ ค่าการซีมลิ้งของโลหะเติมมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.81 มิลลิเมตร แต่ที่กระแส 80, 100, 120 และ 160 แอมแปร์ มีค่าการซีมลิ้งของโลหะเติมใกล้เคียงกันเส้นความนูนเว้าของรอยโลหะเติมที่กระแส 160 แอมแปร์ มีค่าความนูนเว้ามากที่สุด คือ 0.43 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.6 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนไม่มีร่องบากท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ

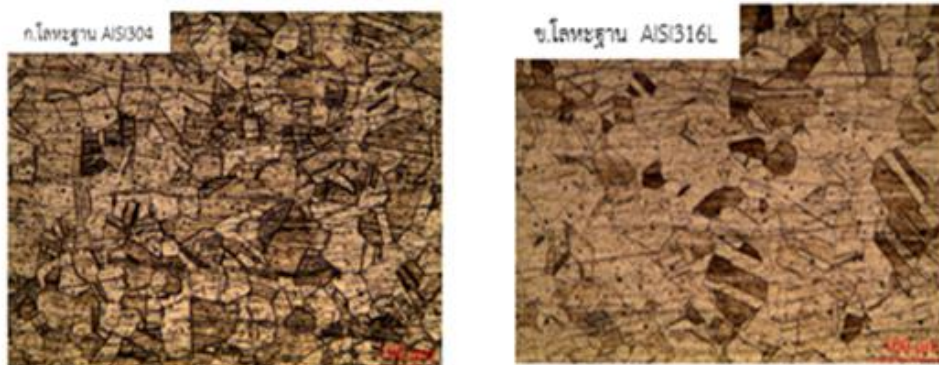
รูปที่ 4.6 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI 316L แบบไม่มีร่องบาก ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ พบว่ากระแสเชื่อมทำให้โลหะเติมเกิดการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ ที่กระแส 140 และที่กระแส 160 แอมแปร์ โลหะเติมเกิดการเว้าและนูนของรากโลหะเติมเกิดขึ้นส่งผลทำให้รอยต่อชนมีแนวโน้มค่าความแข็งแรงดึงและอัตราการยึดตัวลดลง



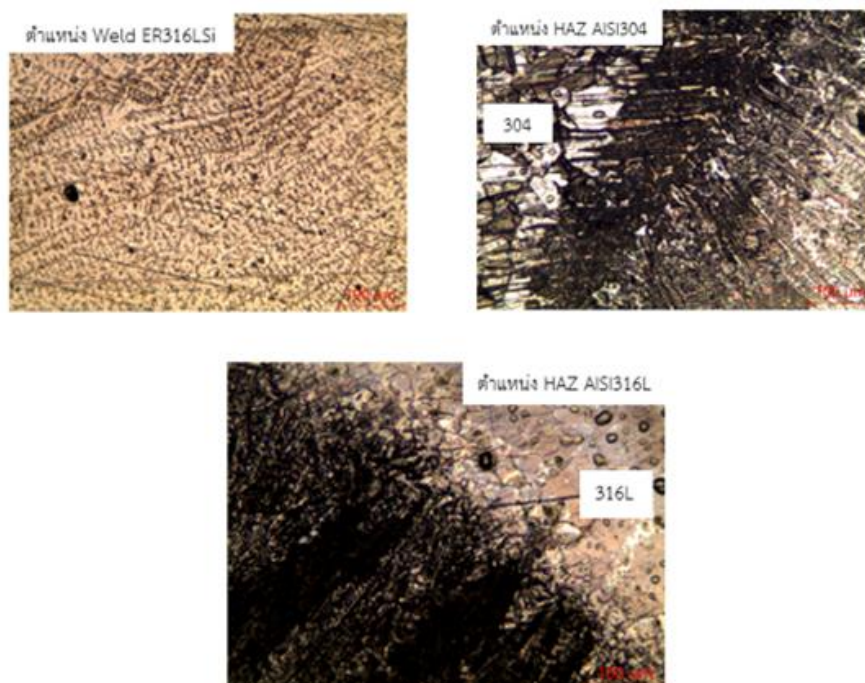
รูปที่ 4.7 ขนาดของโลหะเชื่อมของรอยต่อชนแบบไม่มีร่องบากท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ

รูปที่ 4.7 (ก) ที่กระแส 80 แอมแปร์ พบว่าขนาดของแนวโลหะเติมมีขนาดเล็กและแนวโลหะเติมลักษณะนูนขึ้นมา รูปที่ 4.7 (ข, ค) ที่กระแส 100 และ 120 แอมแปร์ ขนาดของแนวโลหะเติมมีขนาดกว้างขึ้นและแนวโลหะเติมไม่มีลักษณะนูน รูปที่ 4.7 (ง, จ) ที่กระแส 140 และ 160 แอมแปร์ ขนาดของแนวโลหะเติมมีขนาดกว้างมากและแนวโลหะเติมเริ่มมีลักษณะเว้ามากขึ้น



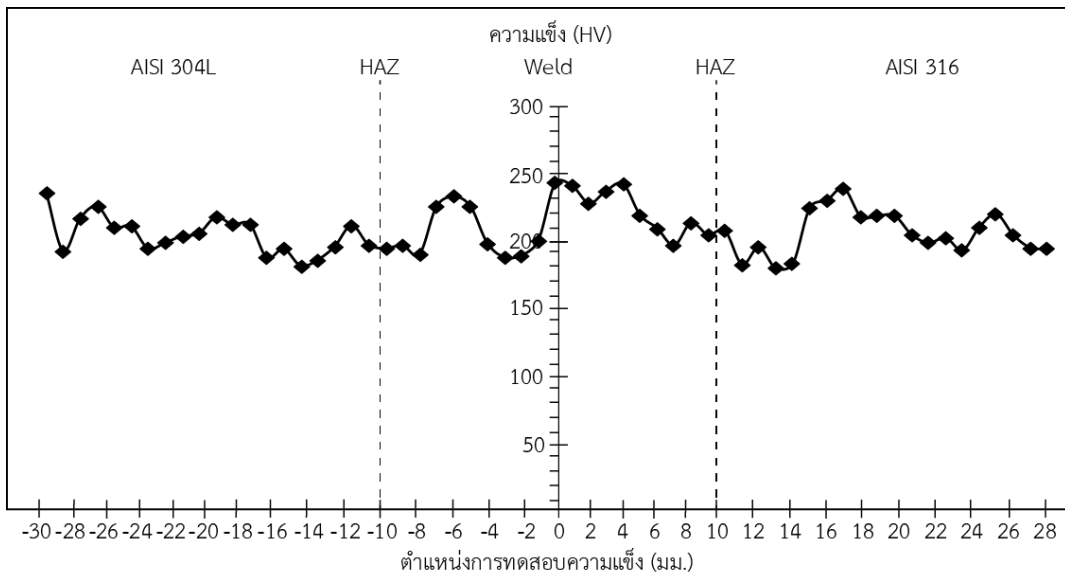


รูปที่ 4.8 โครงสร้างพื้นฐานของโลหะฐาน AISI304 และ AISI316L



รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนแบบไม่มีร่องบากต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 140 แอมแปร์

รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนไม่มีร่องบากต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI 304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.9 (ก) โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม จะพบว่าโครงสร้างเดนไดรท์ที่เกิดขึ้นมีการเรียงตัวเข้าสู่ศูนย์กลาง โดยมีเส้นสีดำแบ่งแยกพื้นที่ของเดนไดรท์ รูปที่ 4.9 (ข) บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 เดนไดรท์ที่ก่อตัวมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ รูปที่ 4.9 (ค) บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L เดนไดรท์ที่เกิดขึ้นมีการเรียงตัวเข้าสู่ศูนย์กลางจากขวาไปซ้าย

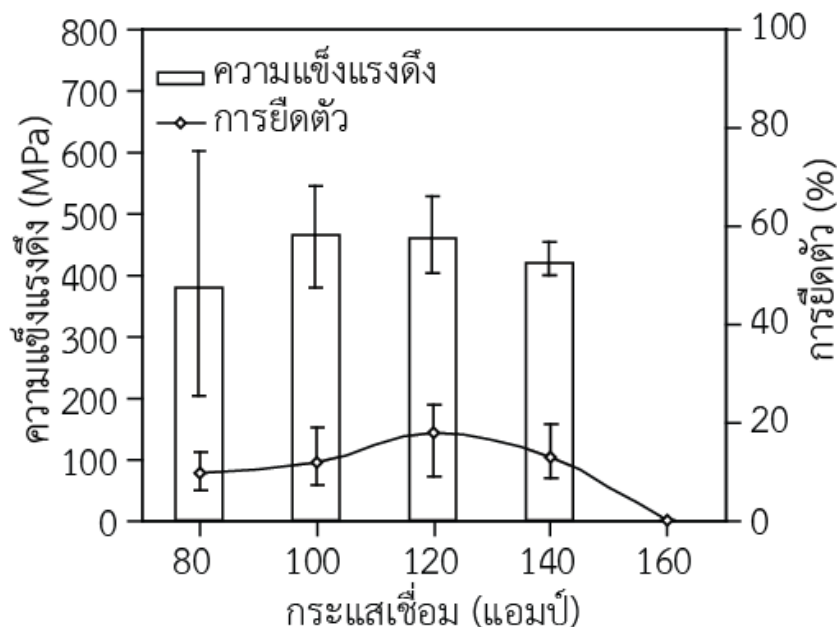


รูปที่ 4.10 การทดสอบความแข็งของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่ผ่านการเชื่อมด้วยโลหะเติม ER316LSi ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์

รูปที่ 4.10 แสดงความแข็งของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่ผ่านการเชื่อมด้วยโลหะเติม ER316LSi ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ ซึ่งแต่ละตำแหน่งมีระยะห่าง 0.5 มิลลิเมตร พบว่าบริเวณโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 203.25 HV เมื่อทดสอบความแข็งมาถึงบริเวณพื้นที่กระทบร้อนทางฝั่ง AISI304 พบว่าค่าความแข็งที่บริเวณ AISI304 มีค่าต่ำกว่าบริเวณโลหะเชื่อม และเมื่อทดสอบความแข็งบริเวณโลหะเติมค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 215.09 HV เมื่อทดสอบความแข็งมาถึงบริเวณพื้นที่กระทบร้อนฝั่ง AISI316L พบว่าค่าความแข็งที่บริเวณโลหะเติมมีค่าสูงกว่าบริเวณ AISI316L และเมื่อทดสอบความแข็งบริเวณโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 205.14 HV

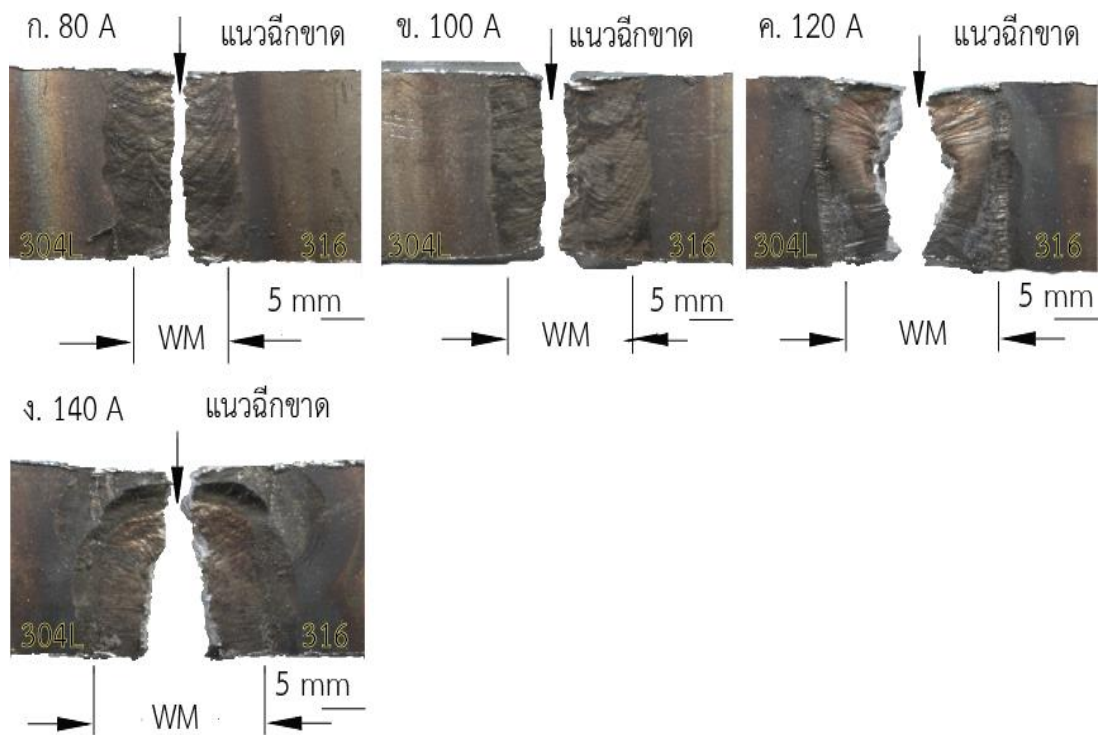
## 4.2 การเปรียบเทียบสมบัติรอยต่อชนท้อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L แบบมีร่องบากวีและแบบไม่มีร่องบาก

### 4.2.1 สมบัติรอยต่อชนท้อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L แบบมีร่องบากวี



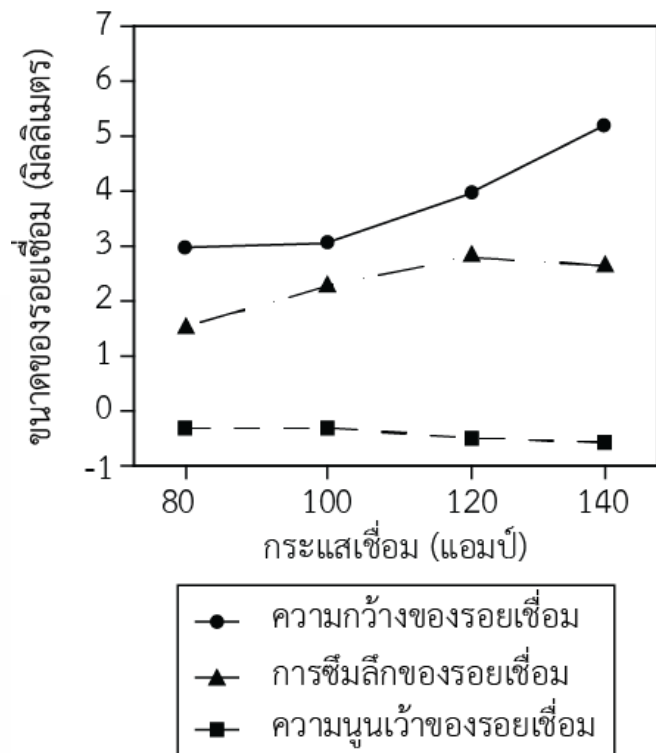
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง อัตราการยืดตัว และกระแสเชื่อมของรอยต่อชนแบบมีร่องบากตัววีท้อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L

รูปที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึง การยืดตัว และกระแสเชื่อมของรอยต่อชนแบบมีร่องบากตัววีท้อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ค่าความแข็งแรงดึงถูกแสดงเป็นหน่วย เมกะปาสคาล (MPa) พบว่าที่กระแส 80 - 140 แอมแปร์ มีค่าความแข็งแรงดึงใกล้เคียงกัน มีค่าอยู่ในช่วง 379.46 - 492.42 เมกะปาสคาล จึงทำให้ไม่สามารถรู้แนวโน้มที่ชัดเจนของกระแสเชื่อมที่กระแสต่างกัน



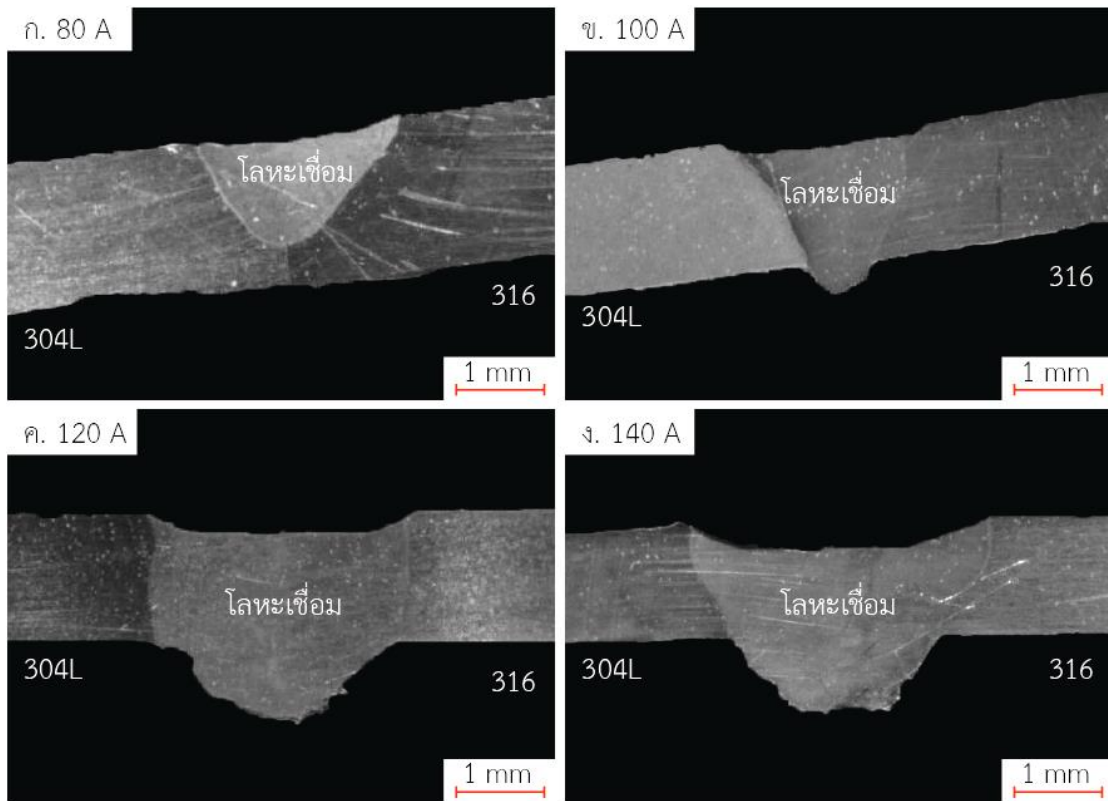
รูปที่ 4.12 ตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนแบบมีร่องบากตัววี เหล็กกล้า ไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ

รูปที่ 4.12 ตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนแบบมีร่องบากตัววีเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 80 - 140 แอมแปร์ พบว่าทั้ง 4 กระแส เกิดการพังทลายที่ตำแหน่งบริเวณกึ่งกลางแนวโลหะเติม



รูปที่ 4.13 อิทธิพลของโลหะเติม ER316LSi ที่มีผลต่อขนาดรอยโลหะเติมลักษณะต่างๆ ของโลหะเติมรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L แบบมีร่องบาก

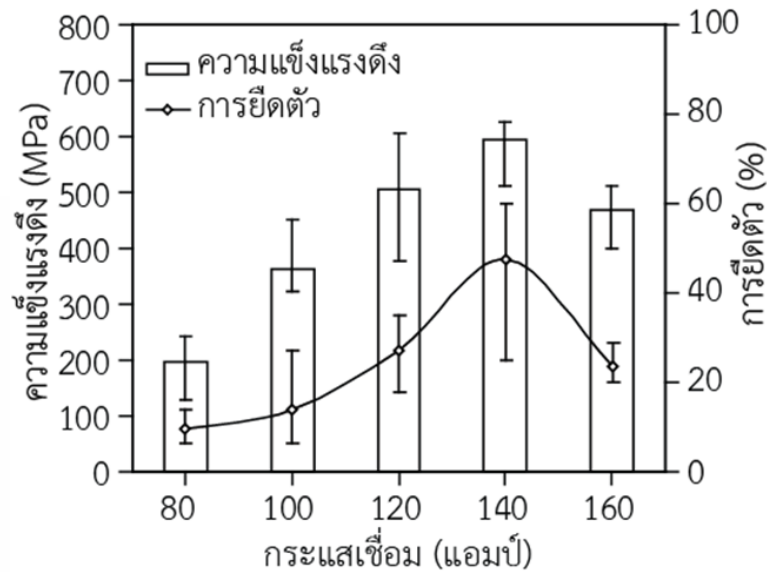
รูปที่ 4.13 กราฟเส้นความกว้างของรอยโลหะเติมจะเห็นได้ว่าเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น ขนาดความกว้างของรอยโลหะเติมจะมีขนาดกว้างขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อถึงกระแส 140 แอมแปร์ ค่าขนาดความกว้างมีค่ามากที่สุด จากกราฟเส้นการขี้มลิคพบว่าเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น ค่าการขี้มลิคมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เส้นความนูนเว้าของรอยโลหะเติมที่กระแส 140 แอมแปร์ มีค่าความเว้ามากที่สุด



**รูปที่ 4.14** โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนแบบมีร่องบากต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI 304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ

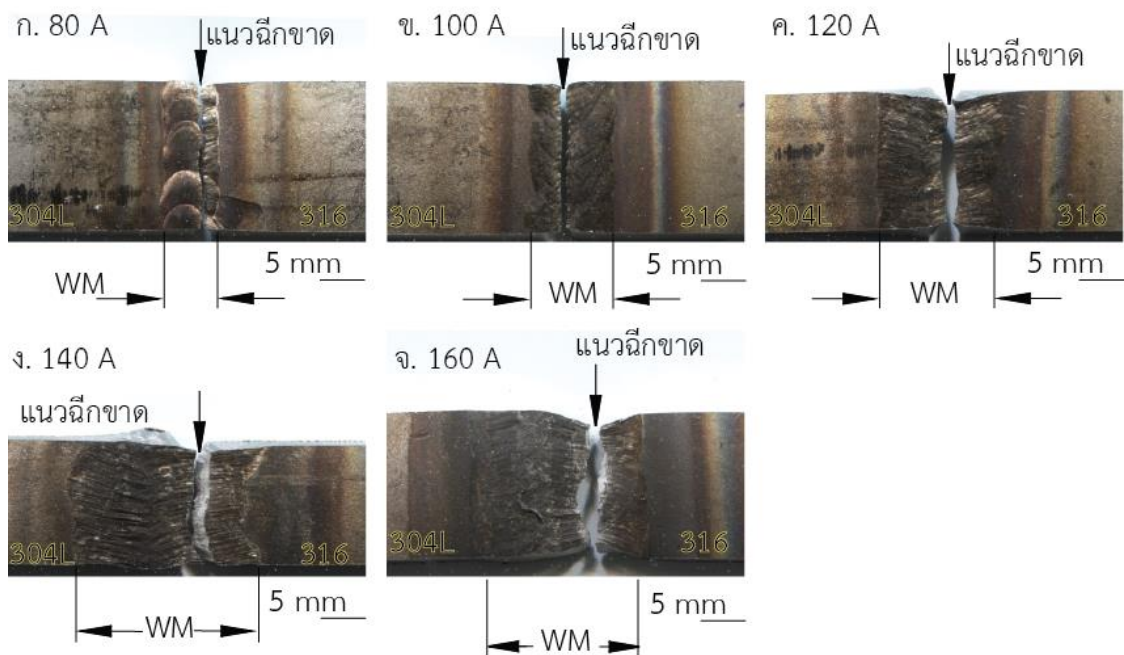
รูปที่ 4.14 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนแบบมีร่องบากต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ พบว่าที่กระแสเชื่อม 80 แอมแปร์ โลหะเดิมเกิดการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ แต่เมื่อกระแสเพิ่มขึ้นเป็น 100, 120 และ 140 แอมแปร์ โลหะเดิมเกิดการหลอมละลายสมบูรณ์ และเมื่อถึงกระแส 120 และ 140 แอมแปร์ โลหะเดิมเกิดการเว้าและนูนของรากโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้น

#### 4.2.2 สมบัติรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L แบบมีไม่ร่องบาก



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง การยืดตัว และกระแสเชื่อมของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI 304 และ AISI316L

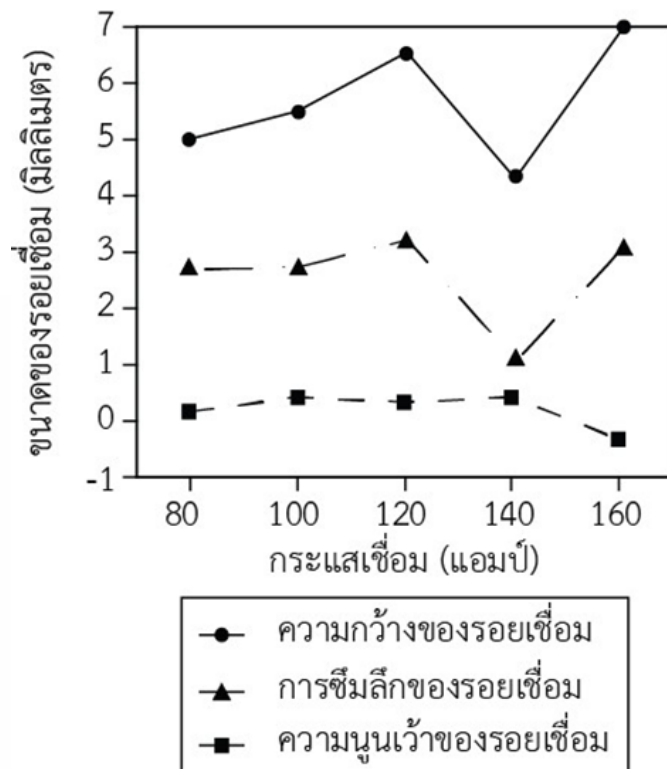
รูปที่ 4.15 แสดงผลของค่าความแข็งแรงดึง อัตราการยืดตัว และกระแสเชื่อมของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L โดยความแข็งแรงดึงถูกแสดงเป็นหน่วย เมกะปาสคาล (MPa) โดยที่กระแส 80 แอมแปร์ ได้ค่าความแข็งแรงดึงน้อยที่สุดเท่ากับ 196.62 เมกะปาสคาล ซึ่งค่าความแข็งแรงดึง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากกระแส 80 แอมแปร์ จนกระทั่งกระแส 140 แอมแปร์ ซึ่งมีค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมของรอยต่อชนชิ้นงานที่กระแสนี้ซึ่งที่กระแส 140 แอมแปร์ มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 595.41 เมกะปาสคาล และค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการกระแสเพิ่มเป็น 160 แอมแปร์



รูปที่ 4.16 แสดงตำแหน่งของการฉีกขาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนแบบไม่มีร่องบากท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ

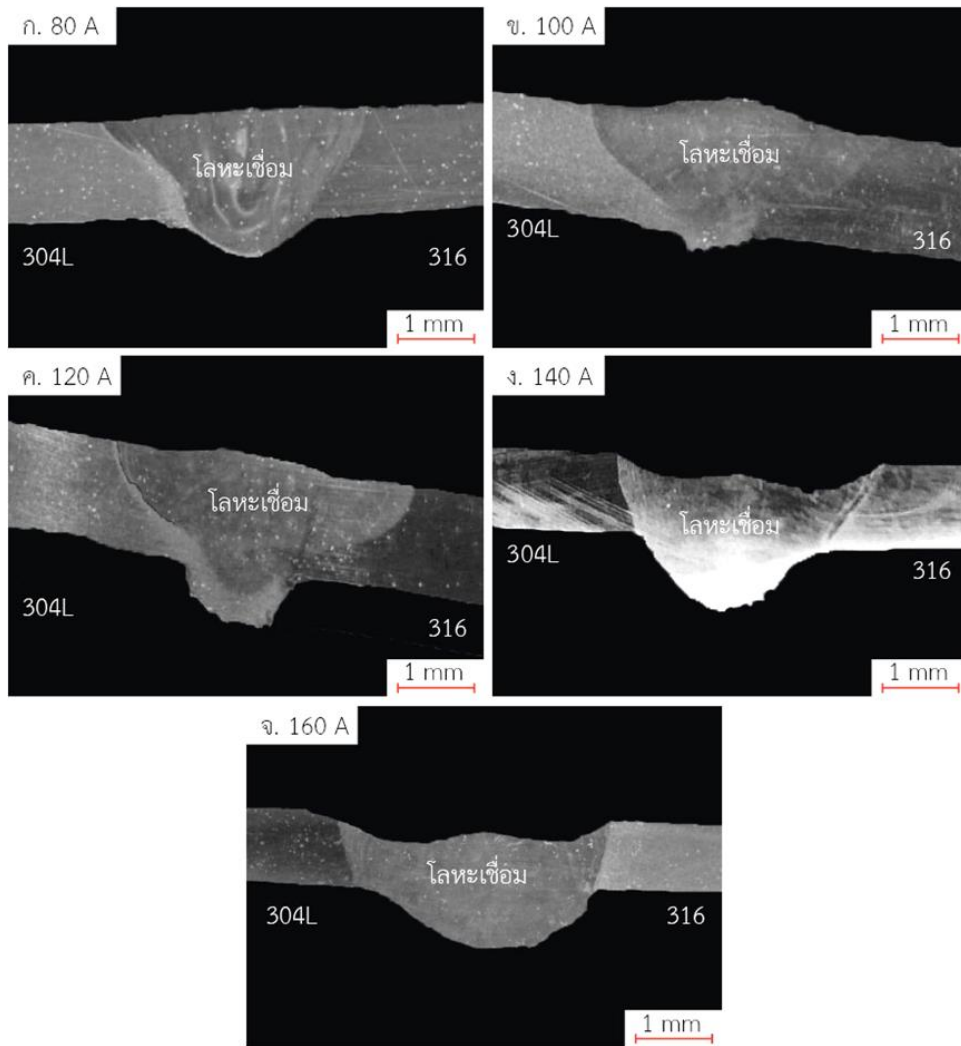
รูปที่ 4.16 ตำแหน่งของการฉีกขาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนแบบไม่มีร่องบากท่อเหล็กต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ ซึ่งพบว่าตำแหน่งของการพังทลายจะเกิดตรงบริเวณแนวโลหะเติมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L ที่กระแส 80, 140 และ 160 แอมแปร์ และที่กระแส 100 และ 120 แอมแปร์ ตำแหน่งการพังทลายจะเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของแนวโลหะเติม





รูปที่ 4.17 อิทธิพลของชนิดโลหะเติมที่มีผลต่อขนาดรอยเชื่อมลักษณะต่างๆที่เชื่อมด้วยกระแสต่างๆของรอยต่อชนแบบไม่มีร่องบากของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L

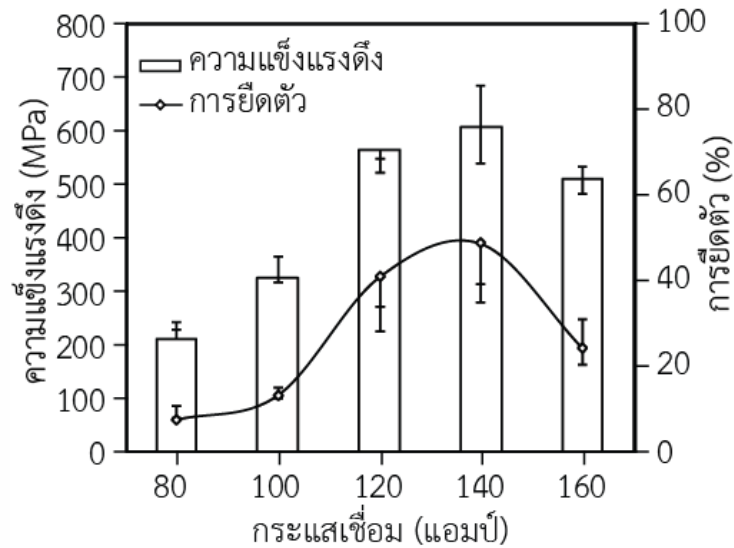
รูปที่ 4.17 กราฟเส้นแสดงความกว้างของรอยโลหะเติมเห็นได้ว่าการเพิ่มกระแสขึ้นขนาดความกว้างของรอยโลหะเติมจะมีขนาดกว้างขึ้น แต่ที่กระแส 140 แอมแปร์ ค่าขนาดความกว้างของรอยโลหะเติมมีค่าน้อยสุด จากกราฟเส้นการซีมลึกพบว่าที่กระแส 140 แอมแปร์ ค่าการซีมลึกของโลหะเติมมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.81 มิลลิเมตร แต่ที่กระแส 80, 100, 120 และ 160 แอมแปร์ มีค่าการซีมลึกของโลหะเติมใกล้เคียงกันเส้นความนูนเว้าของรอยโลหะเติมที่กระแส 160 แอมแปร์ มีค่าความนูนเว้ามากที่สุด คือ 0.43 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.18 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนไม่มีร่องบากท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ

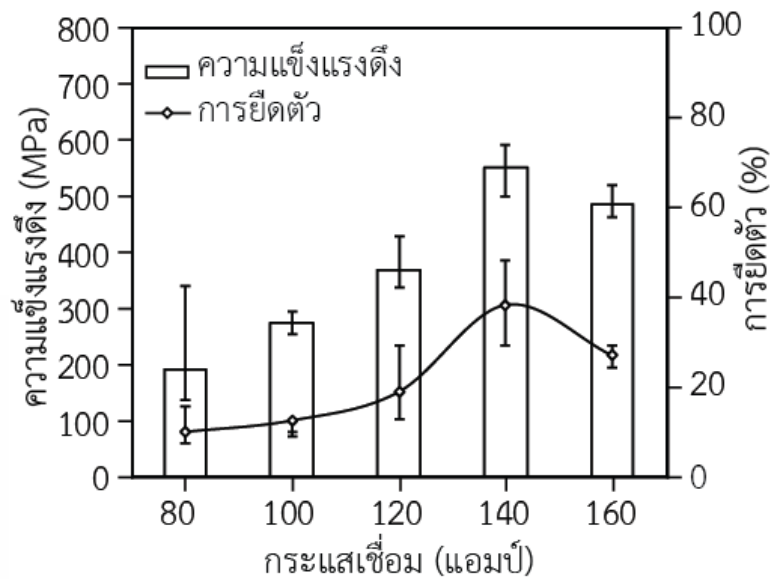
รูปที่ 4.18 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI 316L แบบไม่มีร่องบาก ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ พบว่าที่กระแสเชื่อม 80 100 120 แอมแปร์ โลหะเติมเกิดการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ และเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นที่กระแส 140 และที่กระแส 160 แอมแปร์ โลหะเติมเกิดการเว้าและนูนของรากโลหะเติมเกิดขึ้น

#### 4.3 อิทธิพลโลหะเติม (Filler Metal) ที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304และAISI316L



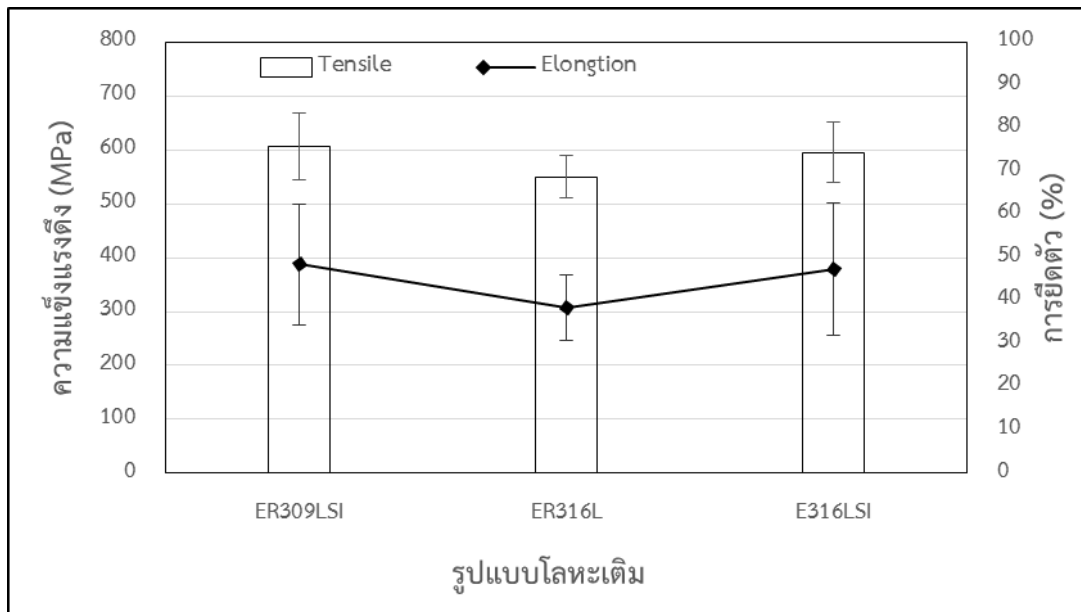
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง อัตราการยืดตัว และกระแสนเชื่อมของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดแบบไม่มีร่องบากที่เชื่อมด้วยลวด ER309LSi

รูปที่ 4.19 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึง อัตราการยืดตัว และกระแสนเชื่อมของรอยต่อแบบไม่มีร่องบากที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi ซึ่งความแข็งแรงดึงถูกแสดงเป็นหน่วย เมกะปาสคาล (MPa) โดยที่กระแสน 80 แอมแปร์ มีค่าความแข็งแรงดึงน้อยที่สุดเท่ากับ 209.81 เมกะปาสคาล ซึ่งค่าความแข็งแรงดึง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากกระแสน 80 แอมแปร์ จนกระทั่งกระแสน 140 แอมแปร์ ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับรอยโลหะเติมของชิ้นงานที่กระแสนอื่นซึ่งมีค่าเท่ากับ 606.73 เมกะปาสคาล และเมื่อกระแสนเพิ่มเป็น 160 แอมแปร์ ค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากค่าความร้อนขาเข้าจากกระแสนที่สูงเกินไปทำให้โลหะเติมเกิดการเว้าและนูนของรากโลหะเชื่อมขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงรอยต่อชนที่กระแสน 160 อมแปร์ มีค่าลดลง



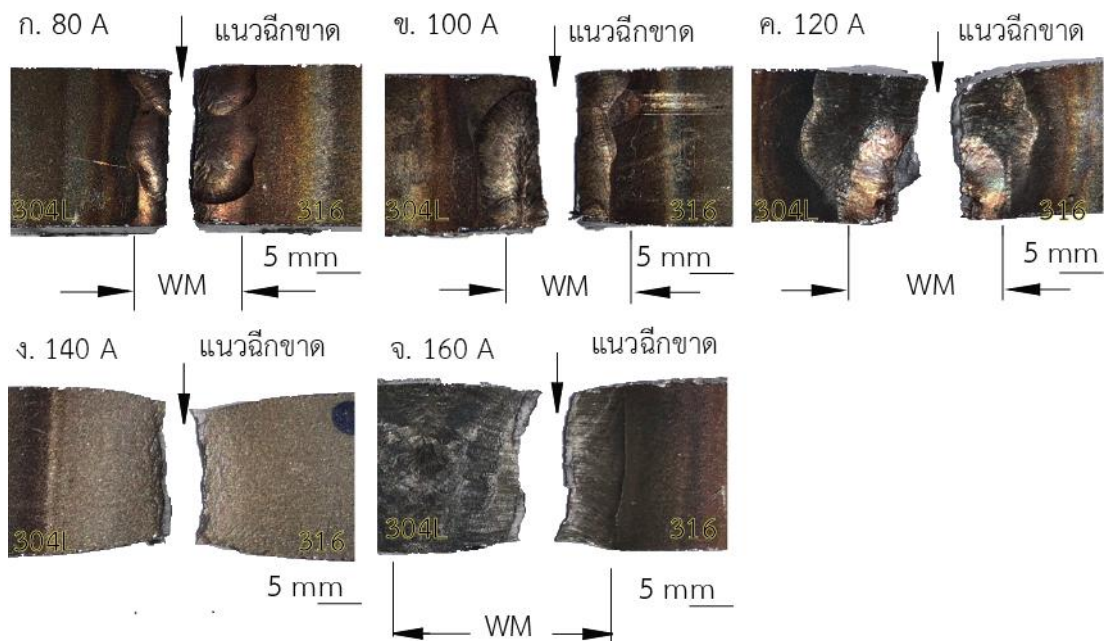
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง การยืดตัว และกระแสเชื่อมของรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดแบบไม่มีร่องบากที่เชื่อมด้วยลวด ER316L

รูปที่ 4.20 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึง การยืดตัว และกระแสเชื่อมของรอยต่อแบบไม่มีร่องบากที่เชื่อมโลหะเติม ER316L ซึ่งความแข็งแรงดึงถูกแสดงเป็นหน่วย เมกะปาสคาล (MPa) โดยที่กระแส 80 แอมแปร์ มีค่าความแข็งแรงดึงน้อยที่สุดเท่ากับ 188.84 เมกะปาสคาล ซึ่งค่าความแข็งแรงดึง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากกระแส 80 แอมแปร์ จนกระทั่งกระแส 140 แอมแปร์ ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับรอยเชื่อมของชิ้นงานที่กระแสอื่นซึ่งมีค่าเท่ากับ 550.09 เมกะปาสคาล และเมื่อกระแสเพิ่มเป็น 160 แอมแปร์ ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าลดลง



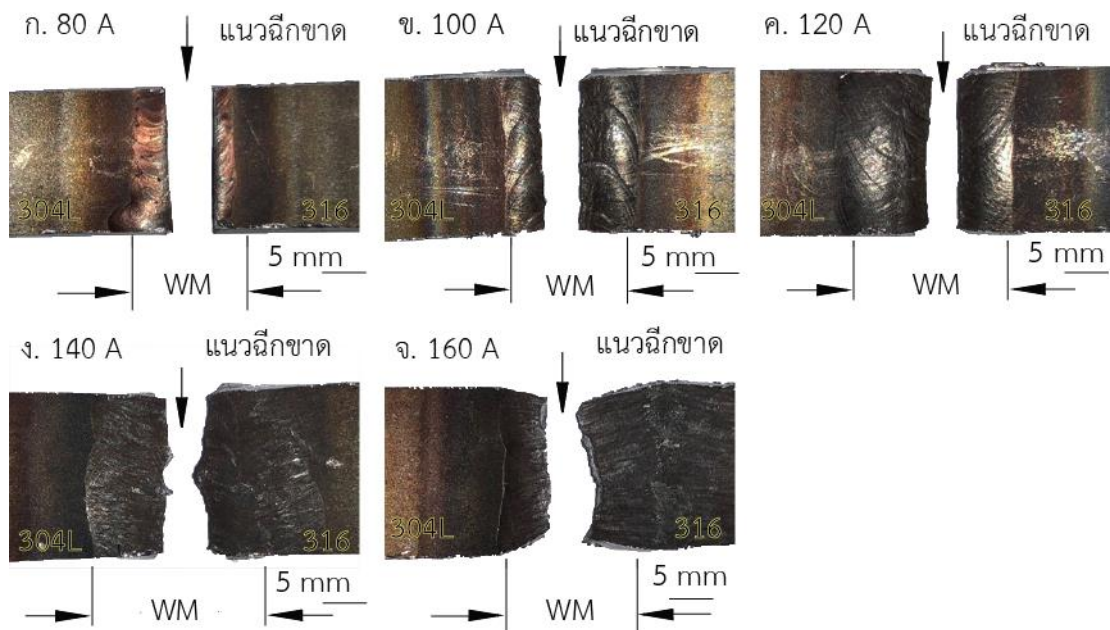
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนไม่มีร่องบากเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L กระแส 140 แอมแปร์ ของโลหะเติมทั้ง 3 รูปแบบ

รูปที่ 4.21 แสดงผลของค่าความแข็งแรงดึงและการยืดตัวของรอยต่อชนไม่มีร่องบากเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L กระแส 140 แอมแปร์ ที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi ER316L และ ER316LSi มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยตามลำดับ 606.73 เมกะปาสคาล 550.09 เมกะปาสคาล และ 595.41 เมกะปาสคาล อัตราการยืดตัวเฉลี่ยตามลำดับ 51% 39% และ 47% จากผลค่าความแข็งแรงดึงและการยืดตัวสรุปได้ว่าโลหะเติม ER309LSi เป็นโลหะเติมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงและการยืดตัวสูงสุด ที่กระแส 140 แอมแปร์ ซึ่งเป็นกระแสที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมรอยต่อชนไม่มีร่องบากเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L



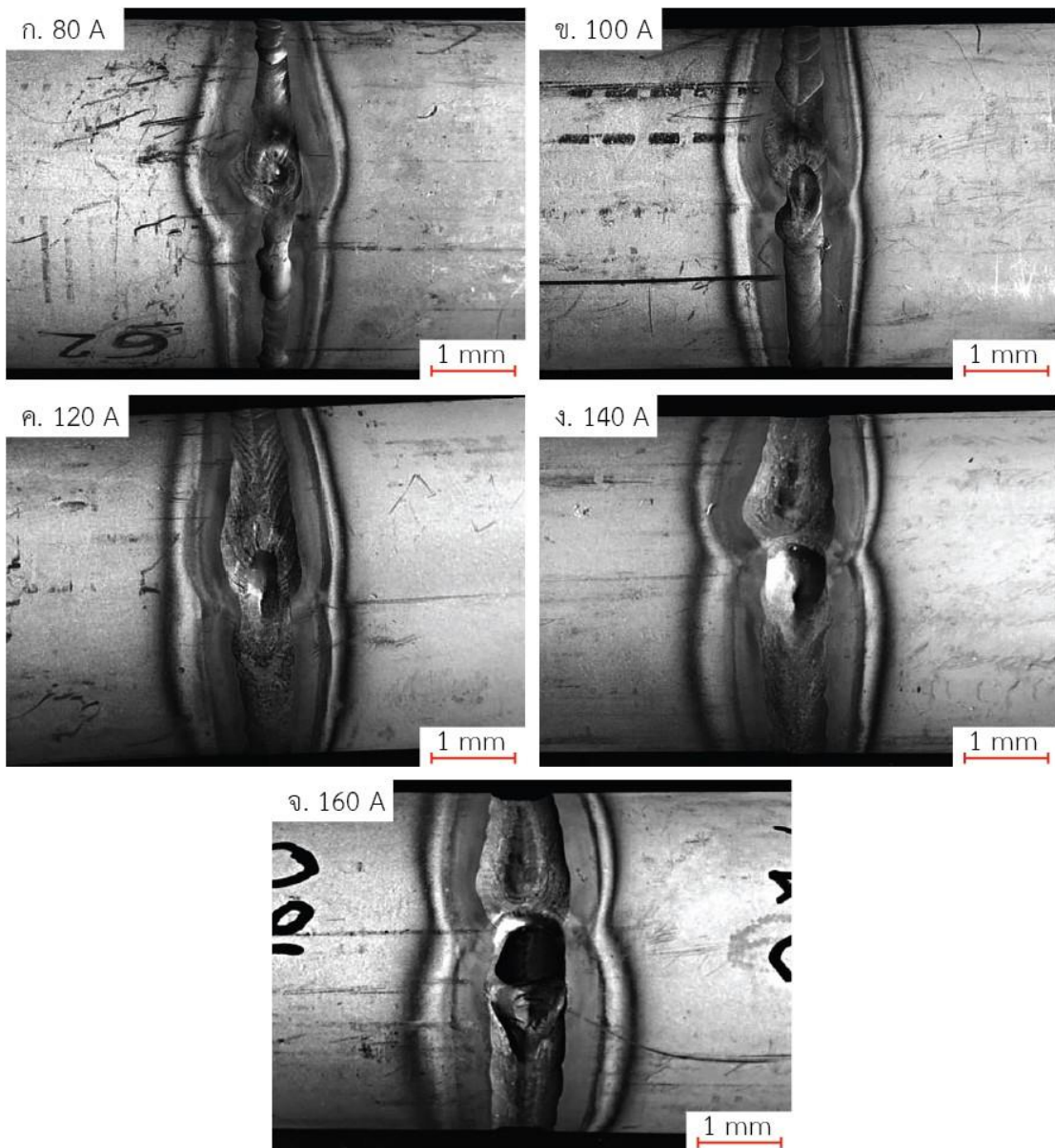
รูปที่ 4.22 ตำแหน่งการฉีกขาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนไม่มีร่องบากต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304และAISI316L ที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi กระแสเชื่อมต่างๆ

รูปที่ 4.22 ตำแหน่งการฉีกขาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนไม่มีร่องบากต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด 304/316L ที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi กระแสเชื่อมต่างๆ พบว่าที่กระแส 80 และ 100 แอมแปร์ ตำแหน่งการพังทลายเกิดบริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อม และที่กระแส 120 และ 160 แอมแปร์ ตำแหน่งการพังทลายเกิดบริเวณแนวเชื่อมฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L และที่กระแส 140 แอมแปร์ ตำแหน่งการฉีกขาดเกิดบริเวณเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L



รูปที่ 4.23 ตำแหน่งการฉีกขาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนไม่มีร่องบากต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER316L กระแสเชื่อมต่างๆ

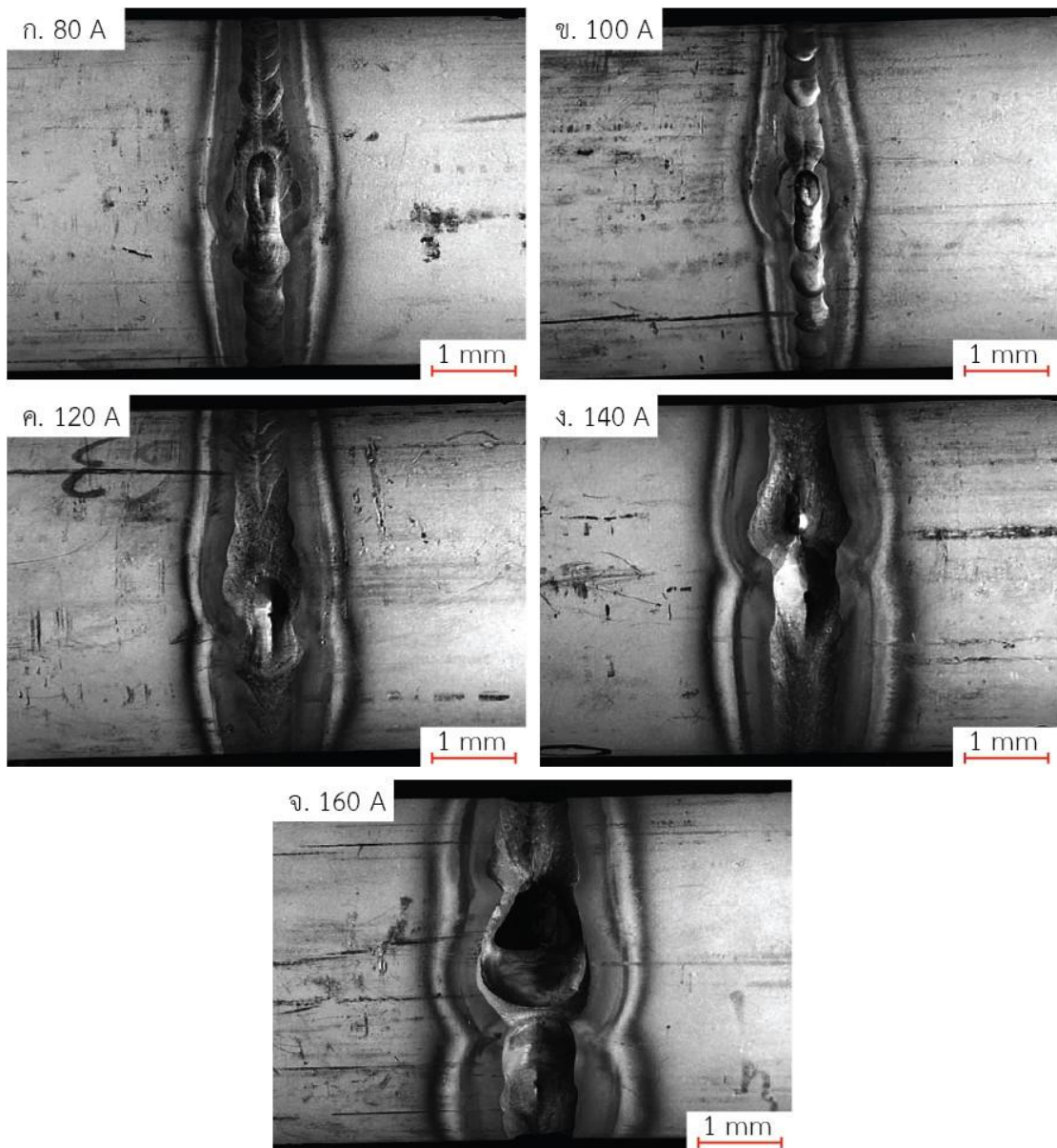
รูปที่ 4.23 ตำแหน่งการฉีกขาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนไม่มีร่องบากต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมโลหะเติม ER316L กระแสเชื่อมต่างๆ พบว่าที่กระแส 80, 100 และ 120 แอมแปร์ ตำแหน่งการฉีกขาดเกิดบริเวณ กึ่งกลางแนวโลหะเติม และที่กระแส 140 และ 160 แอมแปร์ ตำแหน่งการฉีกขาดเกิดบริเวณแนวเชื่อมฝั่ง AISI304



รูปที่ 4.24 รูปร่างแนวเชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi ด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ

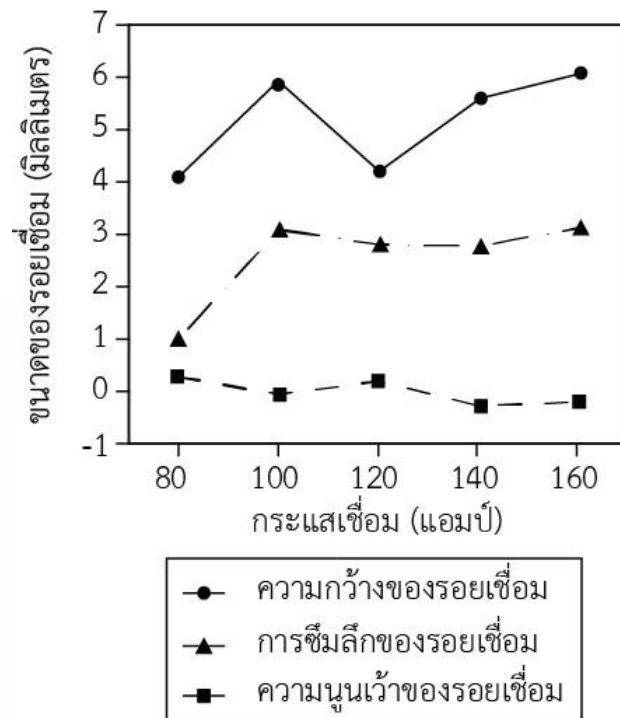
รูปที่ 4.24 (ก, ข) ที่ใช้กระแส 80 และ 100 แอมแปร์ จะเห็นได้ว่าขนาดของแนวเชื่อมมีขนาดเล็กและแนวเชื่อมมีลักษณะนูนขึ้นมา รูปที่ 4.19 (ค) ที่ใช้กระแส 120 แอมแปร์ ขนาดของแนวเชื่อมมีขนาดกว้างขึ้นและแนวเชื่อมไม่มีลักษณะนูน รูปที่ 4.19 (ง, จ) ที่ใช้กระแส 140 และ 160 แอมแปร์ ขนาดของแนวเชื่อมมีขนาดกว้างมากและแนวเชื่อมเริ่มมีลักษณะเว้ามากขึ้น





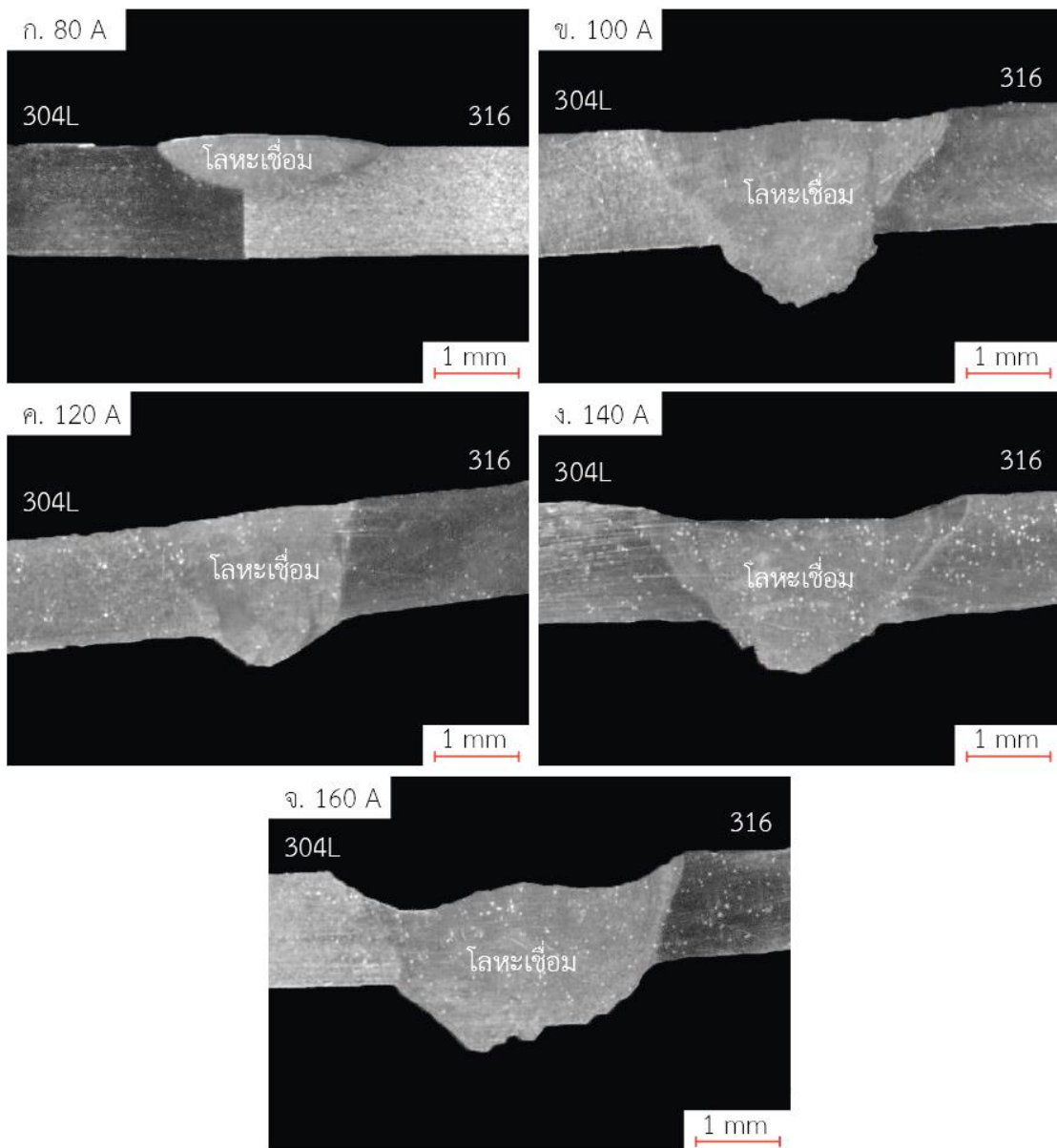
รูปที่ 4.25 รูปร่างแนวโลหะเติมด้วยโลหะเติม ER316L ด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ

รูปที่ 4.25 (ก, ข) ที่ใช้กระแส 80 และ 100 แอมแปร์ จะเห็นได้ว่าขนาดของแนวเชื่อมมีขนาดเล็กและแนวเชื่อมมีลักษณะนูนขึ้นมา รูปที่ 4.20 (ค) ที่ใช้กระแส 120 แอมแปร์ ขนาดของแนวเชื่อมมีขนาดกว้างขึ้นและแนวเชื่อมไม่มีลักษณะนูน รูปที่ 4.20 (ง, จ) ที่ใช้กระแส 140 และ 160 แอมแปร์ ขนาดของแนวเชื่อมมีขนาดกว้างมากและแนวเชื่อมเริ่มมีลักษณะเว้ามากขึ้น



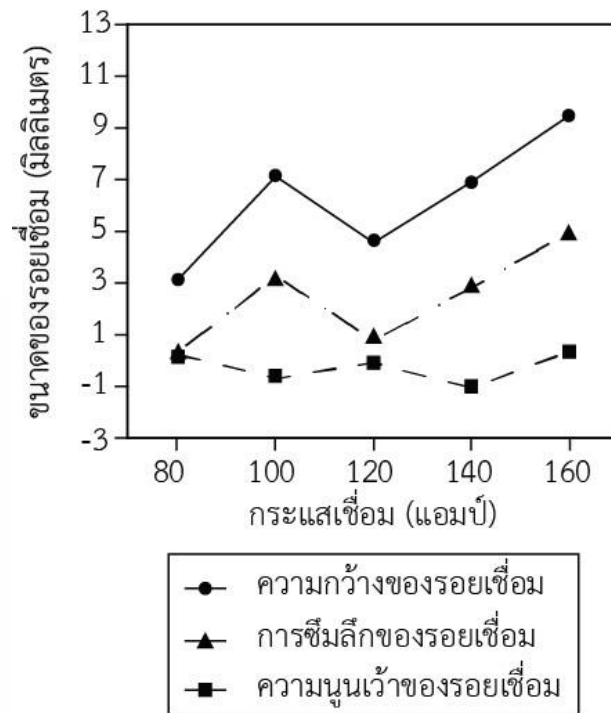
รูปที่ 4.26 อิทธิพลของโลหะเติม ER309LSi ที่มีผลต่อขนาดรอยเชื่อมลักษณะต่างๆ

รูปที่ 4.26 กราฟเส้นความกว้างของรอยเชื่อมที่กระแส 80 และ 120 แอมแปร์ จะมีความกว้างน้อยและขนาดใกล้เคียงกัน และเมื่อกระแสเป็น 100, 140 และ 160 แอมแปร์ จะมีความกว้างมากและขนาดใกล้เคียงกัน เส้นการขีมีลิกของรอยเชื่อมที่กระแส 80 แอมแปร์ จะมีค่าน้อยสุด แต่เมื่อกระแสเพิ่มเป็น 100, 120, 140 และ 160 แอมแปร์ มีค่าการขีมีลิกมีขนาดใกล้เคียงกัน เส้นความนูนเว้าของรอยเชื่อมที่กระแส 140 แอมแปร์ มีค่าความเว้ามากที่สุด คือ 0.36 มิลลิเมตร



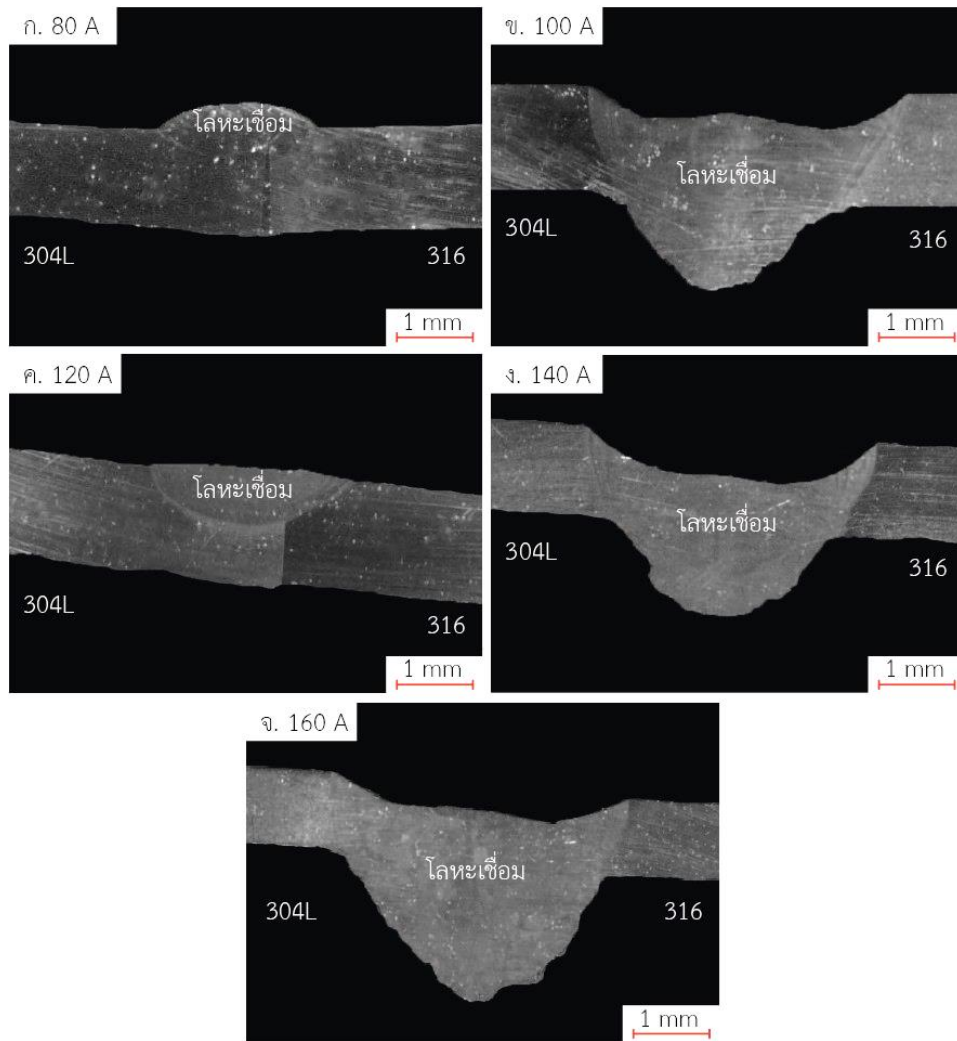
รูปที่ 4.27 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วย โลหะเติม ER309LSi กระแสเชื่อมต่างๆ

รูปที่ 4.27 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด 304/316L ที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi กระแสเชื่อมต่างๆ จะเห็นได้ว่าที่กระแสเชื่อม 80 แอมแปร์ การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ โดยลักษณะการหลอมลึกของแนวเชื่อม ไม่เต็มความหนาของหน้าตัดชิ้นงาน ซึ่งพบว่าที่กระแสเชื่อม 100, 120 และ 140 แอมแปร์ โลหะเติมเกิดการหลอมละลายสมบูรณ์ และที่กระแส 160 แอมแปร์ โลหะเติมเกิดการเว้าและนูนของรากโลหะเชื่อมขึ้น



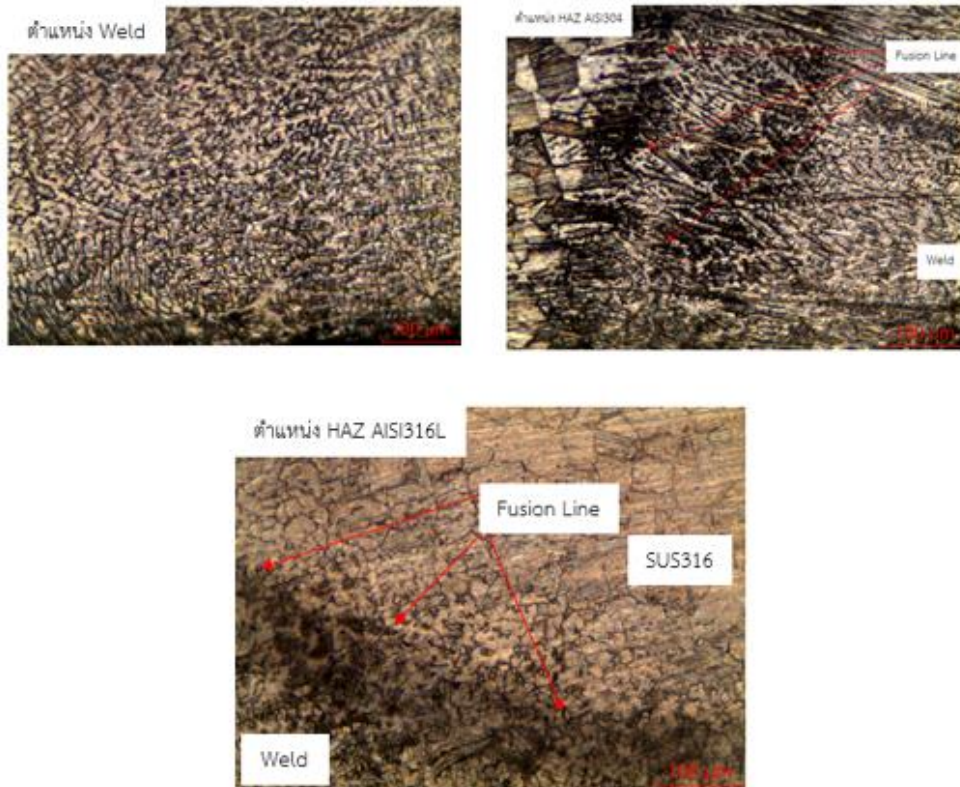
รูปที่ 4.28 อิทธิพลของโลหะเติม ER316L ที่มีผลต่อขนาดรอยเชื่อมลักษณะต่างๆ

รูปที่ 4.28 กราฟเส้นความกว้างและเส้นการซึมลึกของรอยเชื่อมจะเห็นได้ว่าที่กระแสรอยเชื่อม 80 แอมแปร์ มีค่าความกว้างน้อยสุด และเมื่อเพิ่มกระแสรอยเชื่อมค่าความกว้างของแต่ละกระแสรอยเชื่อมก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ที่กระแสรอยเชื่อม 120 แอมแปร์ อาจเกิดข้อผิดพลาดระหว่างเชื่อมค่าความกว้างจึงน้อยกว่ากระแสรอยเชื่อม 100 แอมแปร์ แต่ยังมีค่ามากกว่าที่กระแสรอยเชื่อม 80 แอมแปร์ เส้นความนูนเว้าของรอยเชื่อมที่กระแสรอยเชื่อม 140 แอมแปร์ มีค่าความนูนเว้ามากที่สุด คือ 0.96 มิลลิเมตร



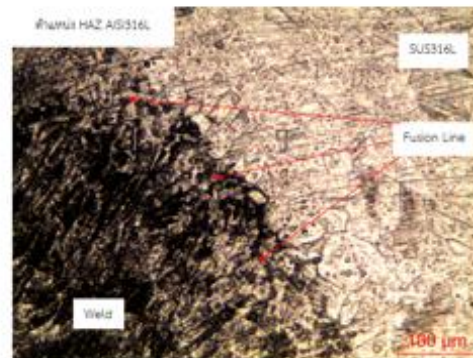
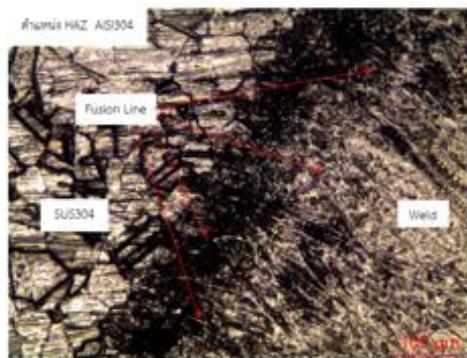
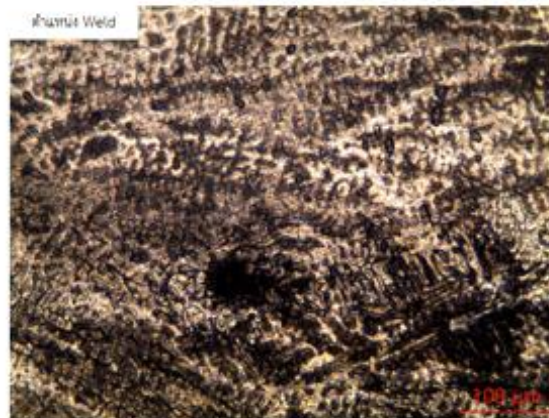
รูปที่ 4.29 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER316L กระแสเชื่อมต่างๆ

รูปที่ 4.29 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด 304/316L ที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER316L กระแสเชื่อมต่างๆ จะเห็นได้ว่าที่กระแสเชื่อม 80 และ 120 แอมแปร์ การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ โดยลักษณะการหลอมลึกของแนวเชื่อม ไม่เต็มความหนาของหน้าตัดชิ้นงาน ซึ่งพบว่าที่กระแสเชื่อม 100, 140 และ 160 แอมแปร์ โลหะเติมเกิดการหลอมละลายสมบูรณ์ และที่กระแส 100, 140 และ 160 แอมแปร์ โลหะเติมเกิดการเว้าและนูนของรากโลหะเชื่อมขึ้น



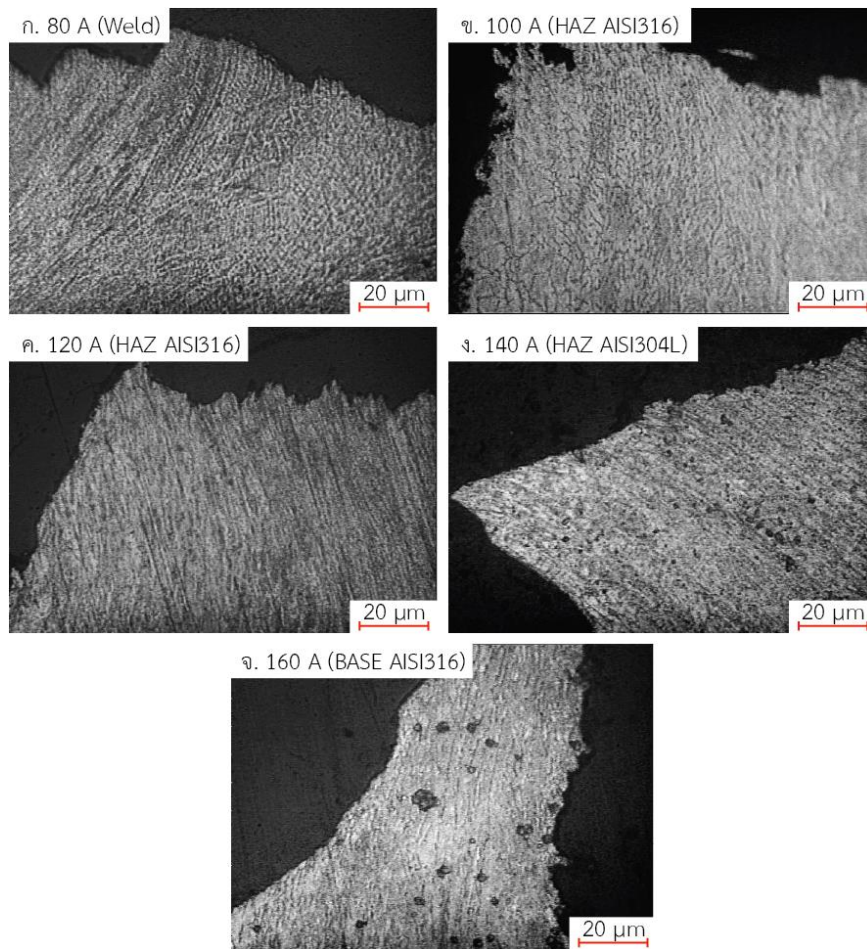
รูปที่ 4.30 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนไม่มีร่องบากต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์

รูปที่ 4.30 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดด้วยโลหะเติม ER309LSi แสดงในรูปที่ 4.30 (ก) โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม จะพบว่าโครงสร้างเดนไดรท์ที่เกิดขึ้นมีการเรียงตัวกันอย่างสม่ำเสมอ โดยมีเส้นสีดำแบ่งแยกพื้นที่ของเดนไดรท์ รูปที่ 4.30 (ข) บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 เดนไดรท์ที่ก่อตัวมีการเรียงตัวเข้าสู่ศูนย์กลางจากซ้ายไปขวา รูปที่ 4.30 (ค) บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L เดนไดรท์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ



**รูปที่ 4.31** โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนไม่มีร่องบากต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER316L ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์

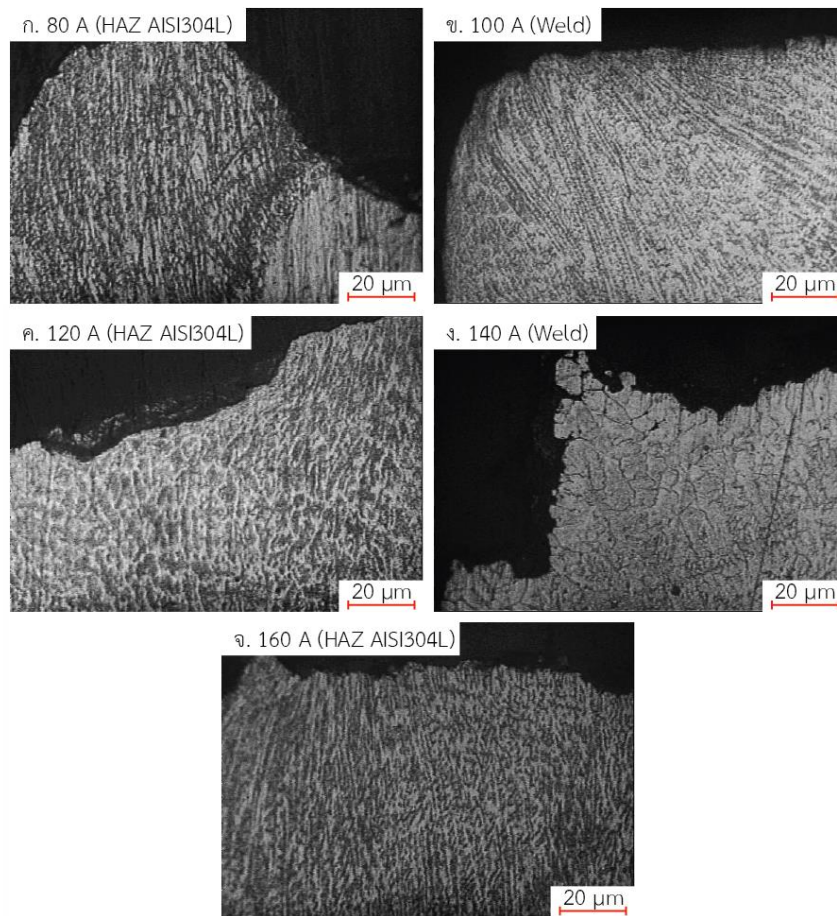
รูปที่ 4.31 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดด้วยโลหะเติม ER316L แสดงในรูปที่ 4.31 (ก) โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม จะพบว่าโครงสร้างเดนไดรท์ที่เกิดขึ้นมีการเรียงตัวกันอย่างสม่ำเสมอ โดยมีเส้นสีดำแบ่งแยกพื้นที่ของเดนไดรท์ รูปที่ 4.31 (ข) บริเวณพื้นที่กระทบร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 เดนไดรท์ที่ก่อตัวมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ รูปที่ 4.31 (ค) บริเวณพื้นที่กระทบร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L เดนไดรท์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลที่ตำแหน่งฉีกขาดที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi

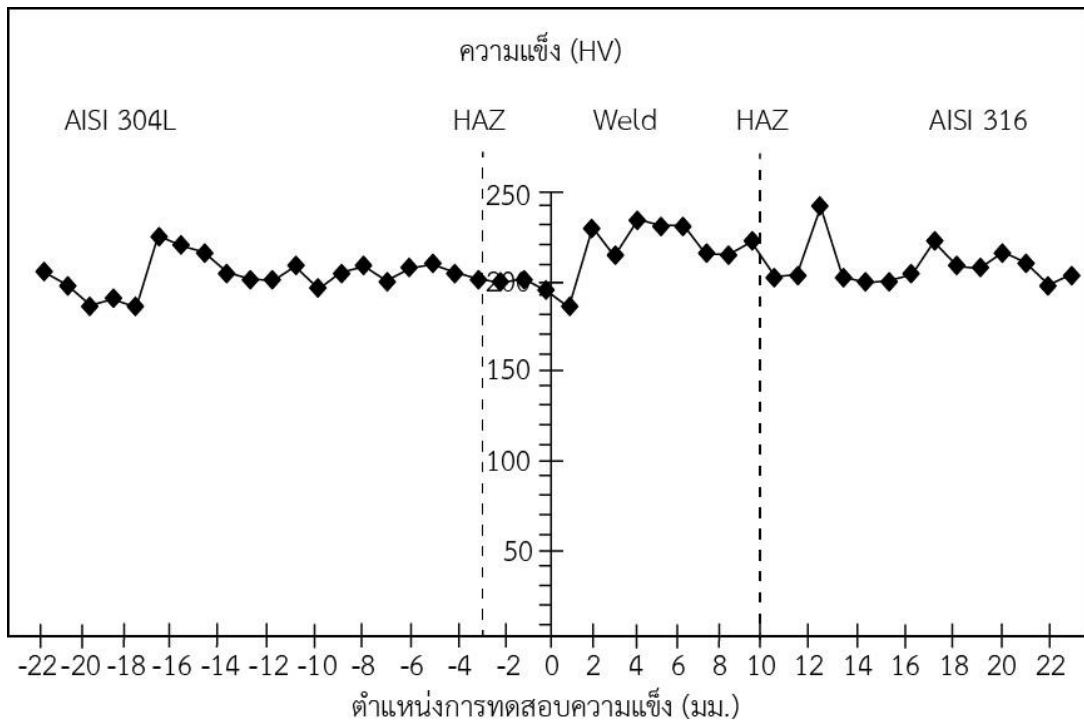
รูปที่ 4.32 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนแบบไม่มีร่องบากท่อเหล็กต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi ด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ ซึ่งพบรูป (ก) เป็นการฉีกขาดของรอยต่อชนที่กระแส 80 แอมแปร์ ลักษณะการฉีกขาดค่อนข้างเป็นแนวตรงเนื่องจากรอยต่อชนมีค่าความแข็งแรงต่ำ (ข) และ (ค) ที่กระแส 100 120 แอมแปร์ ลักษณะการฉีกขาดเริ่มเป็นแนวเส้นโค้งเนื่องจากรอยต่อชนที่มีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากกระแสที่เพิ่มขึ้นและ (ง) ที่กระแส 140 แอมแปร์ ลักษณะการฉีกขาดของรอยต่อชนมีลักษณะทำมุมเฉียงเป็นแนวยาวแสดงถึงรอยต่อชนมีความแข็งแรงดึงและอัตราการยืดตัวสูงขึ้น และ (จ) กระแส 160 แอมแปร์ แสดงถึงลักษณะของรอยต่อชนที่มีค่าความแข็งแรงลดลงเนื่องจากกระแสที่เพิ่มขึ้นทำให้โลหะเติมเกิดการเว้าและนูนของรากโลหะเติมส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและอัตราการยืดตัวมีแนวโน้มลดลง





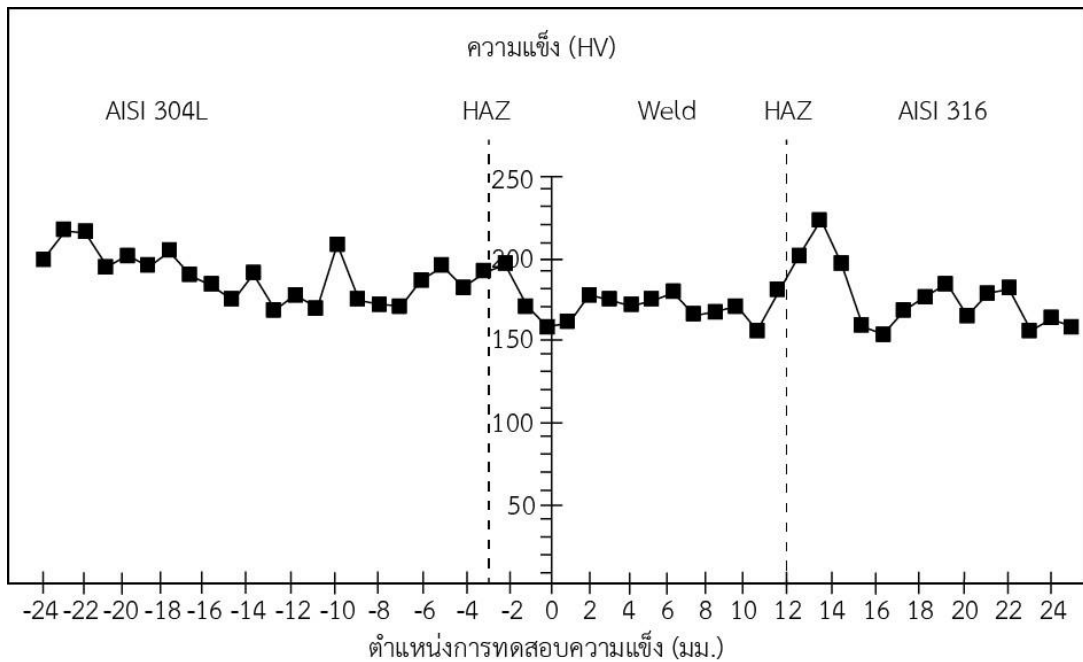
รูปที่ 4.33 โครงสร้างจุลที่ตำแหน่งฉีกขาดที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER316L

รูปที่ 4.33 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนแบบไม่มีร่องบากท่อเหล็กต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER316L กระแสเชื่อมต่างๆ ซึ่งพบรูป(ก)เป็นการฉีกขาดของรอยต่อชนที่กระแส 80 แอมแปร์ ลักษณะการฉีกขาดค่อนข้างเป็นแนวตรงเนื่องจากรอยต่อชนมีค่าความแข็งแรงต่ำ (ข) และ (ค) ที่กระแส 100 120 แอมแปร์ ลักษณะการฉีกขาดเริ่มเป็นแนวเส้นโค้งเนื่องจากรอยต่อชนที่มีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากกระแสที่เพิ่มขึ้นและ (ง) ที่กระแส 140 แอมแปร์ ลักษณะการฉีกขาดของรอยต่อชนมีลักษณะเหมือนปากฉลามแสดงถึงรอยต่อชนมีความแข็งแรงดึงและอัตราการยืดตัวสูงขึ้น และ (จ) กระแส 160 แอมแปร์ แสดงถึงลักษณะของรอยต่อชนที่มีค่าความแข็งแรงลดลงเนื่องจากกระแสที่เพิ่มขึ้นทำให้โลหะเติมเกิดการแว่และนูนของรากโลหะเติมส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและอัตราการยืดตัวมีแนวโน้มลดลง



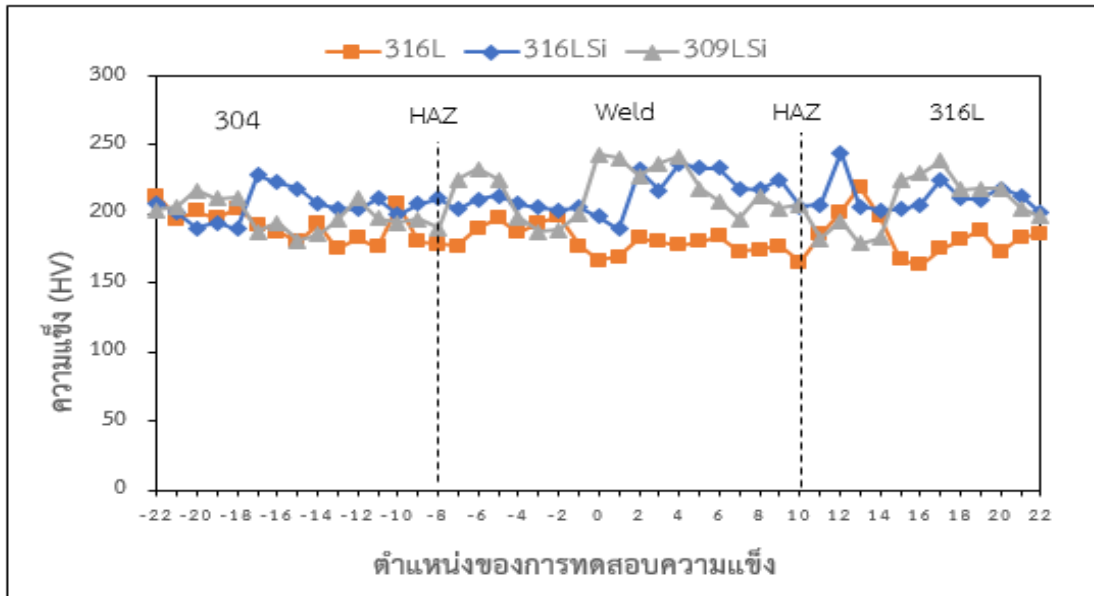
รูปที่ 4.34 การทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ โดยใช้โลหะเติม ER309LSi

รูปที่ 4.34 แสดงค่าความแข็งของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่ผ่านการเชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ โดยระยะห่างของตำแหน่งที่ตรวจสอบความแข็งคือ 0.5 มิลลิเมตร พบว่าบริเวณโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 206.58 HV เมื่อตรวจสอบความแข็งมาถึงบริเวณพื้นที่กระตบร้อนทางด้านโลหะฐาน AISI304 พบว่าค่าความแข็งมีค่าน้อยกว่าบริเวณโลหะเติม และเมื่อตรวจสอบความแข็งบริเวณโลหะเติมค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 217.16 HV เมื่อตรวจสอบความแข็งมาถึงบริเวณพื้นที่กระตบร้อนทางด้านโลหะฐาน AISI316L พบว่าค่าความแข็งที่บริเวณโลหะเติมมีค่าความแข็งสูงกว่าบริเวณ AISI316L เล็กน้อย และเมื่อทดสอบความแข็งบริเวณโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 211.70 HV



รูปที่ 4.35 การทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ โดยใช้โลหะเติม ER316L

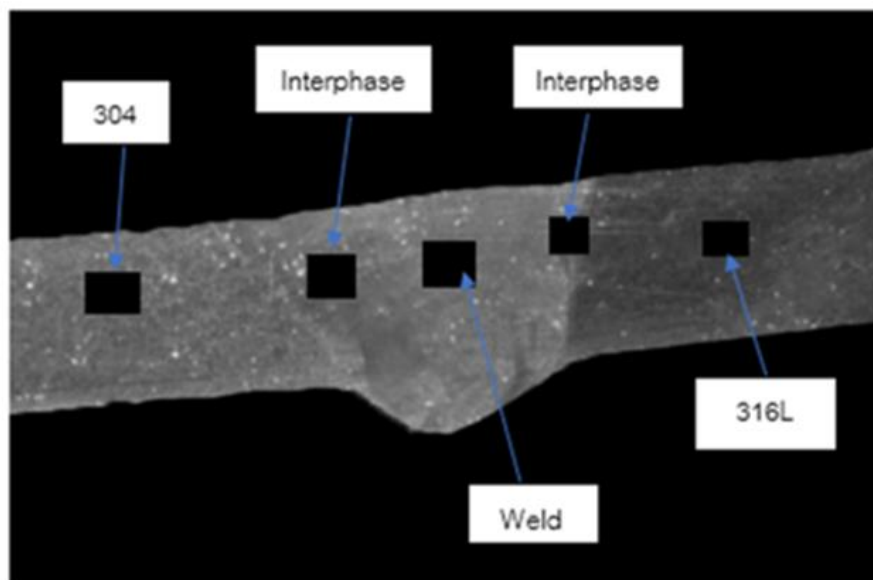
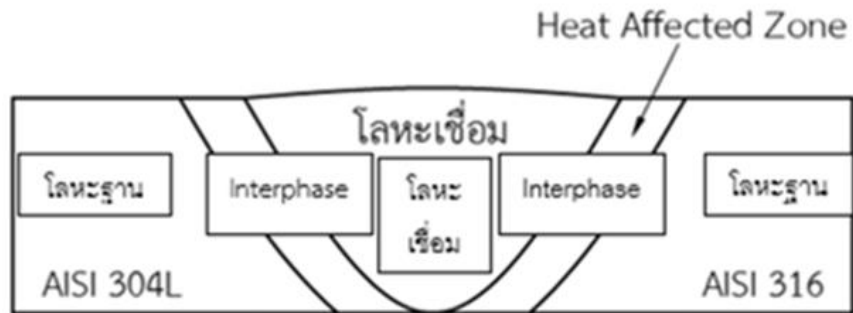
รูปที่ 4.35 แสดงความแข็งของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่ผ่านการเชื่อมด้วยโลหะเติม ER316L ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ ซึ่งแต่ละตำแหน่งมีระยะห่าง 0.5 มิลลิเมตร พบว่าบริเวณโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 191.52 HV เมื่อทดสอบความแข็งมาถึงบริเวณพื้นที่กระทบร้อนทางฝั่ง AISI304 พบว่าค่าความแข็งที่บริเวณ AISI304 มีค่าความแข็งสูงกว่าบริเวณโลหะเติม และเมื่อทดสอบความแข็งบริเวณโลหะเติมค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 179.05 HV เมื่อทดสอบความแข็งมาถึงบริเวณพื้นที่กระทบร้อนฝั่ง AISI316L พบว่าค่าความแข็งที่บริเวณโลหะเติมกับบริเวณ AISI316L ค่าความแข็งมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อทดสอบความแข็งบริเวณโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 176.01 HV



รูปที่ 4.36 การทดสอบความแข็งของรอยต่อชนไม่มีร่องบากเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ โดยใช้โลหะเติม ER309LSi ER316L และ ER316LSi

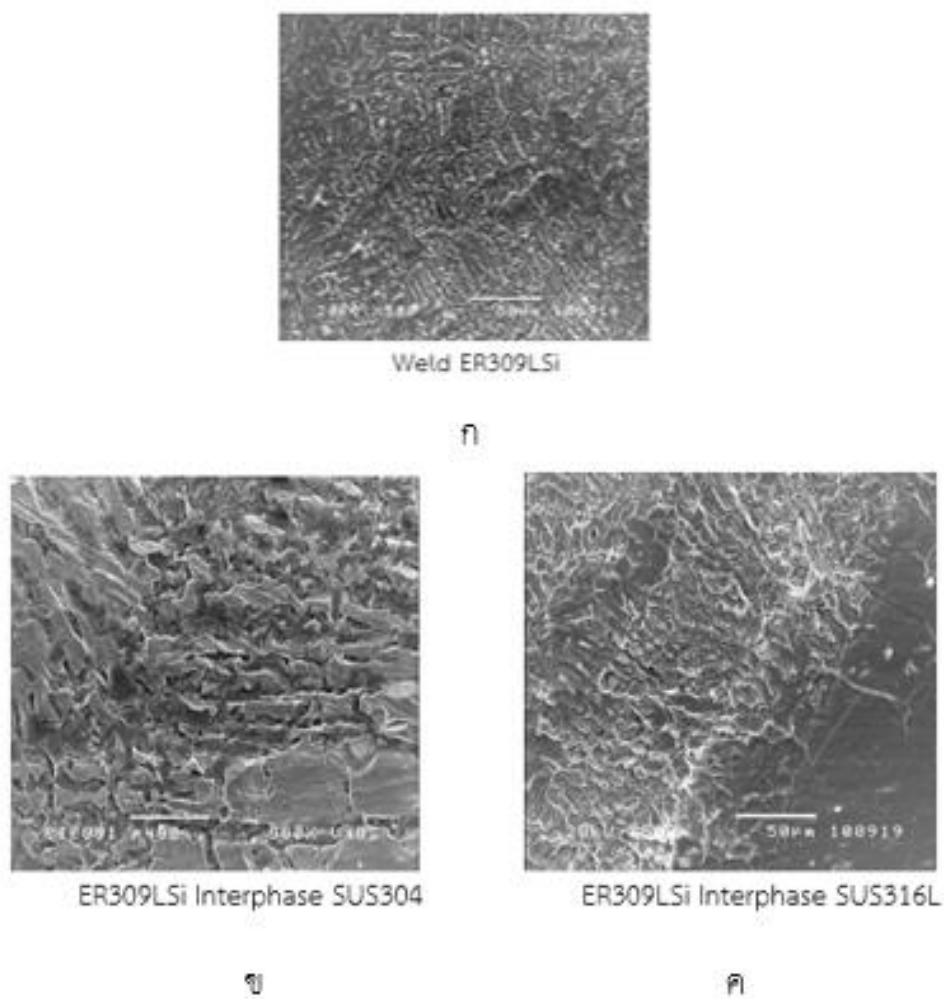
รูปที่ 4.36 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งบริเวณโลหะเติมทั้ง 3 แบบ มีค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณโลหะเติม ER316L เท่ากับ 179.05 HV ER316LSi เท่ากับ 215.09 HV และ ER309LSi เท่ากับ 217.16 HV แสดงได้ว่าโลหะเติม ER309LSi มีค่าความแข็งสูงสุดที่กระแส 140 แอมแปร์ ผลมาจากตรงบริเวณโลหะเชื่อม ER309LSi มีส่วนผสมทางเคมีของธาตุเสริมความแข็งแรงและความแข็งสูงกว่าโลหะเติม ER316LSi และ ER316L ส่งผลให้รอยต่อชนที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi มีค่าความแข็งดีและความแข็งสูงสุด

4.4 อิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีของโลหะเติมต่างชนิดที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L



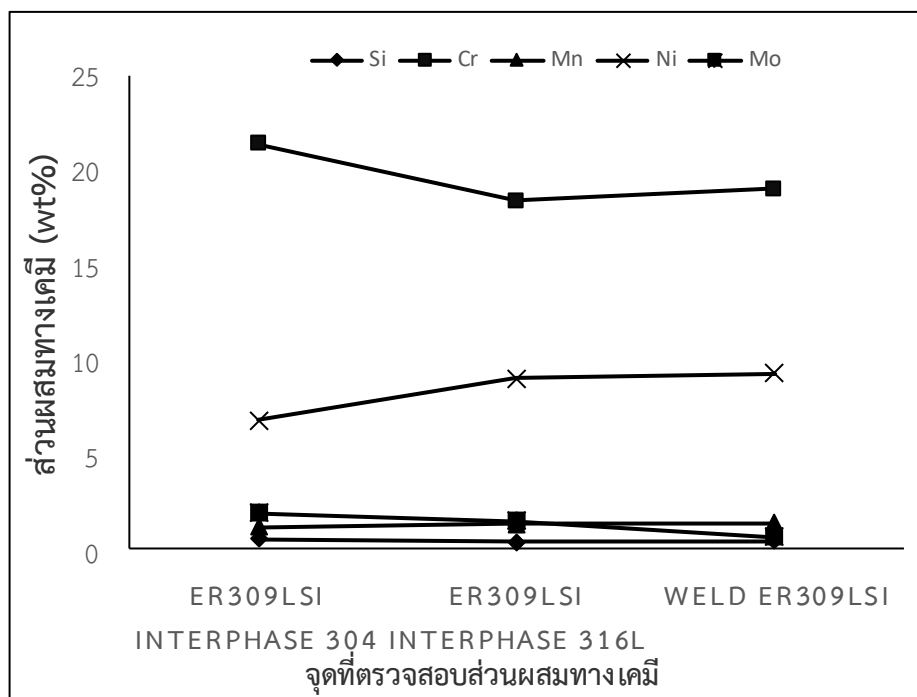
รูปที่ 4.37 แสดงตำแหน่งการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานตัวอย่าง

รูปที่ 4.37 แสดงบริเวณของการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของรอยต่อชนไม่มีร่องบาเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L โดยทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด SEM (Scanning Electron Microscope) ด้วยวิธี EDS (Energy Dispersive X-ray)



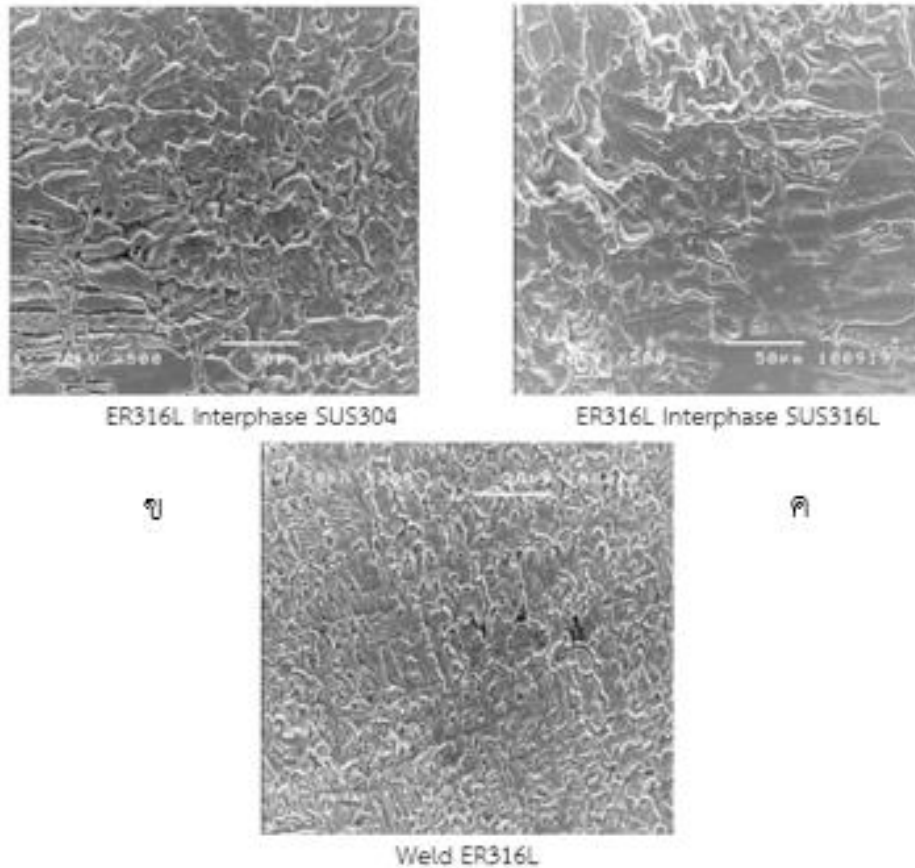
รูปที่ 4.38 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์

รูปที่ 4.38 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด SEM (Scanning Electron Microscope) ด้วยวิธี EDS (Energy Dispersive X-ray) ตรงบริเวณของรอยต่อชนดังรูปที่ 4.36 (ก) บริเวณกลางแนวเชื่อม (ข) บริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะเติม ER309LSi กับโลหะฐาน AISI304 (ค) บริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะเติม ER309LSi กับโลหะฐาน AISI306L ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีได้แสดงดังรูปที่ 4.39



รูป 4.39 ส่วนผสมทางเคมีของจุดที่ตรวจสอบของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่ผ่านการเชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์

รูป 4.39 ส่วนผสมทางเคมีของจุดที่ตรวจสอบของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่ผ่านการเชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ ผลการการตรวจสอบพบว่าปริมาณของธาตุเสริมความแข็งแรงและความแข็ง (Reinforcement element) ตรงบริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะฐาน AISI304 กับโลหะเติม ER309LSi ( AISI304 Interface ER309LSi ) มีค่าโครเมียมสูงกว่าบริเวณโลหะเติม ( ER309LSi ) และตรงบริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะเติม ER309LSi กับโลหะฐาน AISI316L และตรงบริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะเติม ER309LSi กับโลหะฐาน AISI316L มีค่านิกเกิลสูงกว่าบริเวณโลหะเติม ( ER309LSi ) และบริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะฐาน AISI304 กับโลหะเติม ER309LSi ในขณะที่ธาตุผสมอื่น ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน โครเมียมที่มีปริมาณสูงกว่าส่งผลทำให้เกิดโลหะคาร์ไบด์กระจายตัวในพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะฐาน AISI304 กับโลหะเติม ER309LSi และทำให้มีความแข็งแรงและความแข็งได้มากกว่าบริเวณโลหะเติม ( ER309LSi ) และตรงบริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะเติม ER309LSi กับโลหะฐาน AISI316L จึงเป็นเหตุผลทำให้รอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi ขาดตรงบริเวณพื้นที่กระทบร้อนของโลหะฐาน AISI316L

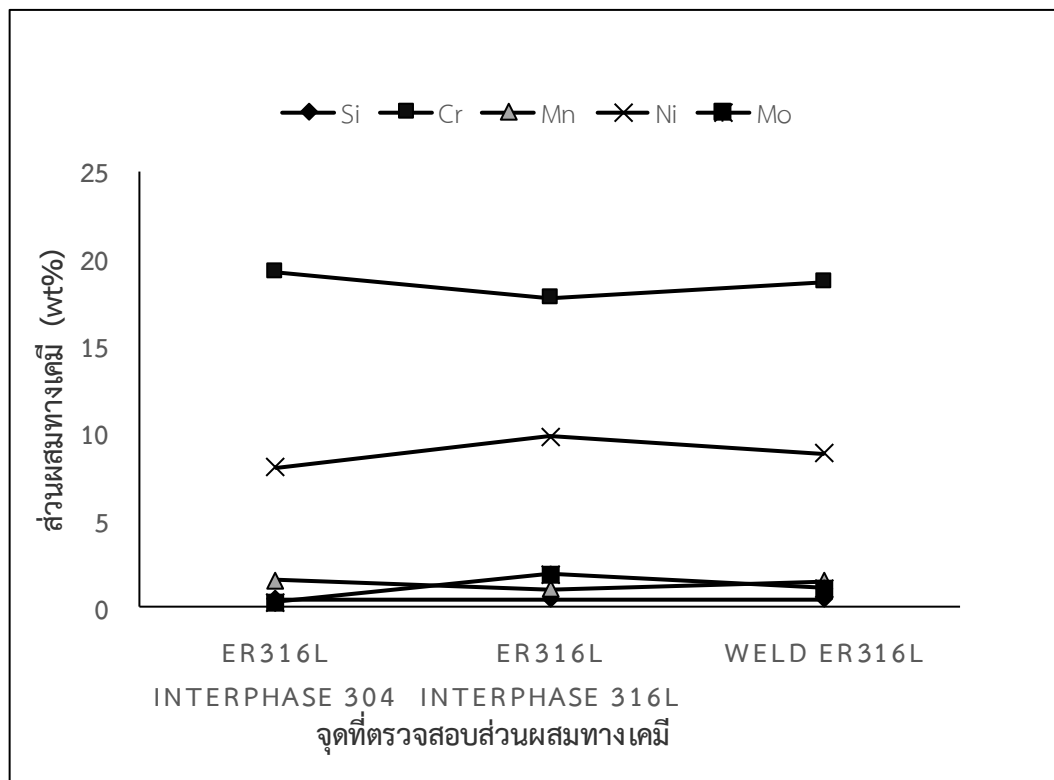


ก

รูปที่ 4.40 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER316L ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์

รูปที่ 4.40 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER316L ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด SEM (Scanning Electron Microscope) ด้วยวิธี EDS (Energy Dispersive X-ray) ตรงบริเวณของรอยต่อชนดังรูปที่ 4.38 (ก) บริเวณกลางแนวเชื่อม (ข) บริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะเติม ER316L กับโลหะฐาน AISI304 (ค) บริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะเติม ER316L กับโลหะฐาน AISI306L ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีได้แสดงดังรูปที่ 4.41

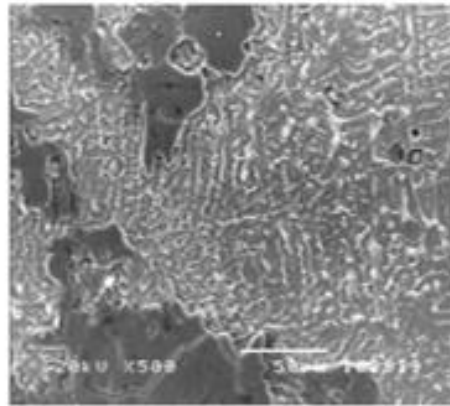




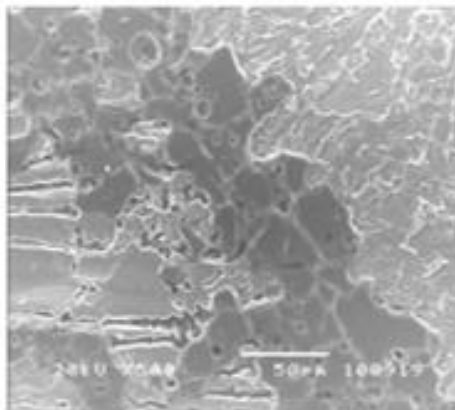
รูป 4.41 ส่วนผสมทางเคมีของจุดที่ตรวจสอบของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่ผ่านการเชื่อมด้วยโลหะเติม ER316L ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์

รูป 4.41 ส่วนผสมทางเคมีของจุดที่ตรวจสอบของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่ผ่านการเชื่อมด้วยโลหะเติม ER316L ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ ผลการตรวจสอบพบว่า ปริมาณของธาตุเสริมความแข็งแรงและความแข็ง (Reinforcement element) ตรงบริเวณพื้นที่ ระหว่างเฟสของโลหะฐาน AISI304 กับโลหะเติม ER316L (AISI304 Interface ER316L) มีค่าโครเมียมสูงกว่าบริเวณโลหะเติม (ER316L) และตรงบริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะเติม ER316L กับโลหะฐาน AISI316L และตรงบริเวณโลหะเติม (ER316L) มีปริมาณนิกเกิลสูงกว่าและบริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะฐาน AISI316L กับโลหะเติม ER316L และตรงบริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะเติม ER319L กับโลหะฐาน AISI316L ในขณะที่ธาตุผสมอื่น ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน

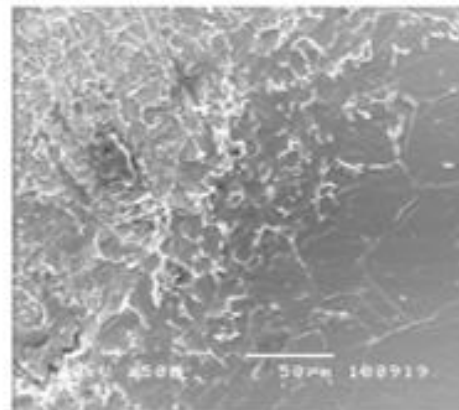
ก



Weld ER316LSi



ER316LSi Interphase SUS304



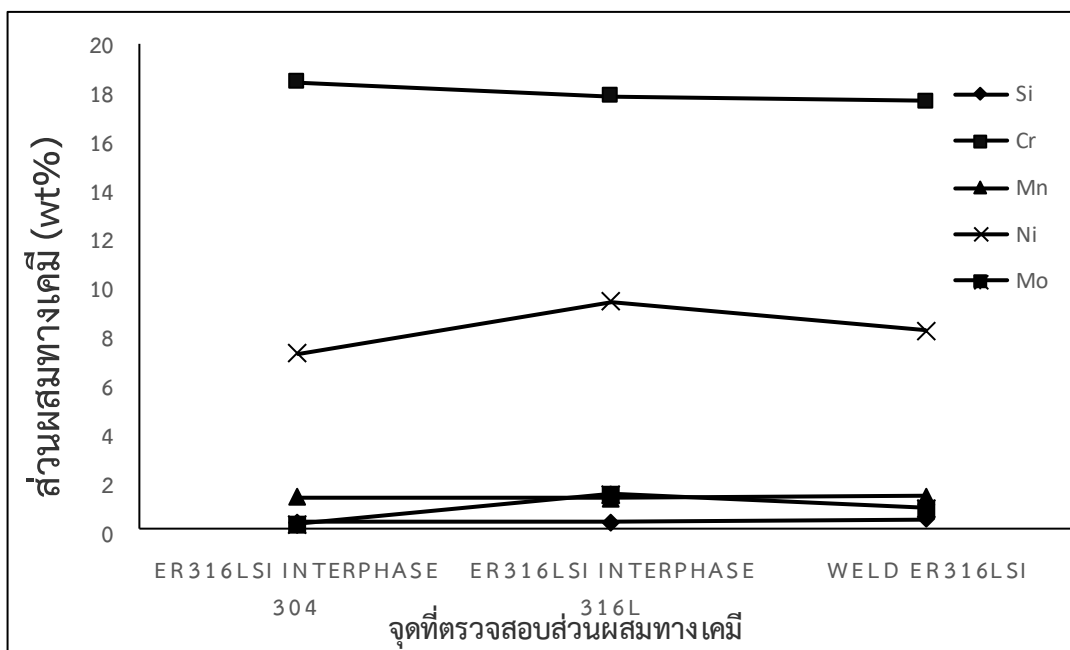
ER316LSi Interphase SUS316L

ข

ค

รูปที่ 4.42 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER316LSi ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์

รูปที่ 4.42 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER316LSi ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด SEM (Scanning Electron Microscope) ด้วยวิธี EDS (Energy Dispersive X-ray) ตรงบริเวณของรอยต่อชนดังรูปที่ 4.40 (ก) บริเวณกลางแนวเชื่อม (ข) บริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะเติม ER316LSi กับโลหะฐาน AISI304 (ค) บริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะเติม ER316LSi กับโลหะฐาน AISI306L ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีได้แสดงดังรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 ส่วนผสมทางเคมีของจุดที่ตรวจสอบของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่ผ่านการเชื่อมด้วยโลหะเติม ER316LSi ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์

รูปที่ 4.43 ส่วนผสมทางเคมีของจุดที่ตรวจสอบของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304/AISI316L ที่ผ่านการเชื่อมด้วยโลหะเติม ER316LSi ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ ผลการตรวจสอบพบว่าปริมาณของธาตุเสริมความแข็งแรงและความแข็ง (Reinforcement element) ตรงบริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะฐาน AISI304 กับโลหะเติม ER316LSi (AISI304 Interface ER316LSi) มีค่าโครเมียมสูงกว่าบริเวณโลหะเติม (ER316LSi) และตรงบริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะเติม ER316LSi กับโลหะฐาน AISI316L และตรงบริเวณโลหะเติม (ER316LSi) มีปริมาณนิกเกิลสูงกว่และบริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะฐาน AISI316L กับโลหะเติม ER316LSi และตรงบริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะเชื่อม ER319LSi กับโลหะฐาน AISI316L ในขณะที่ธาตุผสมอื่น ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน โครเมียมที่มีปริมาณสูงกว่าส่งผลทำให้เกิดโลหะคาร์ไบด์กระจายตัวในพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะฐาน AISI304 กับโลหะเติม ER316LSi และทำให้มีความแข็งแรงและความแข็งมากกว่าบริเวณโลหะเชื่อม (ER316LSi) และตรงบริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะเชื่อม ER316LSi กับโลหะฐาน AISI316L จึงเป็นเหตุผลทำให้รอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER316LSi เกิดการเสียหายตรงบริเวณพื้นที่กระหีบร้อนของโลหะฐาน AISI316L

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานศึกษาอิทธิพลรูปแบบโลหะเติมที่มีผลต่อสมบัติรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 กับ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้ง สะเตนแก๊สคลุม โดยกำหนดตัวแปรที่ทำการศึกษาดังนี้ กระแสไฟที่ใช้เชื่อม 5 ระดับ คือ 80, 100, 120, 140 และ 160 แอมแปร์ ชนิดของโลหะเติม 3 ชนิด คือ ER309LSi, ER316L และ ER316LSi ความเร็วรอบ 150 มิลลิเมตร/นาที อัตราไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตร/นาที อัตราการป้อนลวดเชื่อม 200 มิลลิเมตร/นาที จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุป

5.1.1 อิทธิพลของกระแสเชื่อม GTAW ที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อต่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304และ AISI304L แบบไม่มีร่องบาก กระแสที่ให้ค่าสมบัติแรงดึงสูงสุดและดีที่สุดคือ กระแส 140 แอมแปร์ มีค่าแรงดึงเท่ากับ 595.41 เมกะปาสคาล และเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มลดลง

5.1.2 อิทธิพลของรอยต่อชนไม่มีร่องบากกับรอยต่อชนมีร่องบากโดยใช้กระแสเชื่อมทิกด้วยโลหะเติม ER316LSi ต่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304และ AISI316L

1) รอยต่อชนไม่มีร่องบากมีค่าความแข็งแรงดึง 595.41 เมกะปาสคาล มากกว่า รอยต่อชนมีร่องบากซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 379.46 - 492.42 เมกะปาสคาล และค่าแรงดึงของรอยต่อชนไม่มีร่องบากมีแนวโน้มที่เห็นชัดเจนกว่ารอยต่อชนมีร่องบาก

2) ตำแหน่งการฉีกขาดของรอยต่อชนมีร่องบากเกิดบริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อมทั้งหมด

5.1.3 อิทธิพลโลหะเติม (Filler Metal) ที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304และ AISI316L

1) โลหะเติม ER309LSi ให้ค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดที่กระแส 140 แอมแปร์เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะเติม ER316LSi ER316L ให้ค่าแรงดึงเท่ากับ 606.73 595.41และ550.09 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

2) ความแข็งแรงเฉลี่ยของโลหะเติม ER309LSi ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะเติม ER316LSi และ ER316L ที่กระแส 140 แอมแปร์ และส่งผลโดยตรงทำให้รอยต่อชนมีความแข็งแรงดึงสูงสุด

3) ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของบริเวณที่ตรวจสอบของเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ ผลการตรวจสอบพบว่าโลหะเติม ER309LSi มีปริมาณของธาตุเสริมความแข็งแรงและความแข็ง (Reinforcement element) สูงกว่าโลหะเติม ER316L และ ER316LSi ตรงบริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะฐาน AISI304กับโลหะเติมและตรงบริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะเติมกับโลหะฐาน AISI316L และบริเวณโลหะเติม

4) โครเมียมที่ตรงบริเวณระหว่างเฟสของโลหะฐาน SUS304 กับ โลหะเติมมีปริมาณสูงกว่าบริเวณโลหะเติมและพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะฐาน AISI316L กับ โลหะเติม ส่งผลทำให้เกิดโลหะคาร์ไบด์กระจายตัวในพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะฐาน AISI304 กับโลหะเติม และส่งผลทำให้มีความแข็งแรงและความแข็งได้มากกว่าบริเวณโลหะเชื่อม และตรงบริเวณพื้นที่ระหว่างเฟสของโลหะเติมกับโลหะฐาน AISI316L จึงเป็นเหตุผลโดยตรงที่ทำให้รอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดการฉีกขาดตรงบริเวณพื้นที่กระแทกร้อนของโลหะฐาน AISI316L

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการทดลองศึกษาอิทธิพลรูปแบบลวดเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 กับ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม ปัญหาที่พบในการดำเนินการทดลอง เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและศึกษาค้นคว้าต่อไป จึงได้รวบรวมปัญหาและข้อเสนอแนะต่างๆ ดังต่อไปนี้

5.2.1 ในการทดลองศึกษาครั้งต่อไปควรทดลองปรับตัวแปรอื่นๆ ในการเชื่อมเพื่อเพิ่มเติมการเปรียบเทียบสมบัติทางกล และโครงสร้างโลหะวิทยา



## บรรณานุกรม

- [1] ศูนย์ธุรกิจอุตสาหกรรม, **ธุรกิจน้ำผลไม้**. (28 มิถุนายน 2559). [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: [http://boc.dip.go.th/index.php?option=com\\_content&view=article&id=388&Itemid=48](http://boc.dip.go.th/index.php?option=com_content&view=article&id=388&Itemid=48).
- [2] ศูนย์วิจัยเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร. (28 มิถุนายน 2559). **น้ำผลไม้**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:[http://fic.nfi.or.th/foodsectordatabank-all2\\_detailnext.php?smid=1250](http://fic.nfi.or.th/foodsectordatabank-all2_detailnext.php?smid=1250)
- [3] สำนักงานส่งเสริมการลงทุน. (25 มิถุนายน 2559). **THAILAND-An ASEAN Hub, a World of Opportunity**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: [http://www.boi.go.th/upload/content/Seminar%20in%20Paris%2006.11.13\\_54967.pdf](http://www.boi.go.th/upload/content/Seminar%20in%20Paris%2006.11.13_54967.pdf).
- [4] สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (1 มิถุนายน 2559). **GMP (Good Manufacturing Practice)**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : [http://www.onep.go.th/library/index.php?option=com\\_content&view=article&id=86:gmp-good-manufacturing-practice&catid=22:2012-03-12-02-54-55&Itemid=31](http://www.onep.go.th/library/index.php?option=com_content&view=article&id=86:gmp-good-manufacturing-practice&catid=22:2012-03-12-02-54-55&Itemid=31).
- [5] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์และนิยารัตนาปนนท์. (2 กรกฎาคม 2559). **เหล็กกล้าไร้สนิม**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1236/stainless-steel-เหล็กกล้าไร้สนิม>.
- [6] หนังสือพิมพ์แนวหน้า. (2556). **แพทย์แนะวิธีต้มน้ำผลไม้กล่องให้ได้คุณประโยชน์เต็ม**, วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [7] D. Brandon and W.D. Kaplan. (1997). **Joining Processes**, An introduction. Great Britain: John Wiley & Sons Ltd.
- [8] D. Deng, S. Kiyoshima, K. Ogawa, N. Yanagida, and K. Saito. (2011). **Predicting welding residual stresses in a dissimilar metal girth welded pipe using 3D finite element model with a simplified heat source**, Nuclear Engineering and Design, vol. 241. (pp. 46-54).
- [9] H.-J. Kim, S.-H. Jeon, S.-T. Kim, and Y.-S. Park. (2015). **Influence of the shielding gas composition on the passive film and erosion corrosion of tube-to-tube sheet welds of hyper duplex stainless steel**, Corrosion Science, vol. 91. (pp. 140-150).
- [10] C. Heinze, C. Schwenk, and M. Rethmeier. (2012). **Numerical calculation of residual stress development of multi-pass gas metal arc welding under high restraint conditions**, Materials & Design, vol. 35.(pp.201-209).

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] T. Branza, F. Deschaux-Beaume, V. Velay, and P. Lours. (2009). **A microstructural and low-cycle fatigue investigation of weld-repaired heat-resistant cast steels**, Journal of Materials Processing Technology, vol.209. (pp. 944-953).
- [12] J. Onoro. (2066). **Weld metal microstructure analysis of 9-12% Cr steels**, International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol.83 (pp. 540-545).
- [13] P.-C. Tung, M.-C. Wu, and Y.-R. Hwang. (2004). **An image-guided mobile robotic welding system for SMAW repair processes**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. (pp.1223-1233).
- [14] D. Deng, H. Murakawa, and W. Liang. (2008). **Numerical and experimental investigations on welding residual stress in multi-pass butt-welded austenitic stainless steel pipe**, Computational Materials Science, vol. 42.(pp. 234-244).
- [15] H. W. Lee. (2007). **Weld metal hydrogen-assisted cracking in thick steel plate weldments**, Materials Science and Engineering: A, vol. 445-446.(pp. 328-335).
- [16] A.F.M. Arif, A.S. Al-Omari, B.S. Yilbas, and Y.N. Al-Nassar. (2011). **Thermal stress analysis of spiral laser-welded tube**, Journal of Materials Processing Technology, vol.211. (pp. 675-687).
- [17] W. Jiang, Y. Luo, B.Y. Wang, S.T. Tu, and J.M. Gong. (2014). **Residual stress reduction in the penetration nozzle weld joint by overlay welding**, Materials & Design, vol. 60. (pp. 443-450).
- [18] S. Xu and W. Wang. (2013). **Numerical investigation on weld residual stresses in tube to tube sheet joint of a heat exchanger**, International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 101. (pp. 37-44).
- [19] สแตนเลสเพื่อคนไทย. **การแบ่งกลุ่มสแตนเลส**. (20 มกราคม 2560). [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.siamstainless.com/?p=409>.
- [20] ISPAT GURU, **Corrosion of Cast Steels**. (27 มกราคม 2560). [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://ispatguru.com/corrosion-of-cast-steels/>.
- [21] **การเชื่อมโลหะด้วยวิธี TIG**. (25 มกราคม 2560). [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.meeboard.com/users/weld/imgupload/4-4.pdf>.
- [22] houzzMate. (27มกราคม 2560). **รู้ไหม ชนิดของลวดเชื่อม ที่ช่างเชื่อมใช้มีกี่ชนิด**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.houzzmate.com/topic/2615111615315452>.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [23] คุณสมบัติของธาตุๆที่ผสมในโลหะเชื่อม. (9 ตุลาคม 2562). [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.bssteel.co.th/knowledge-2.php>.
- [24] MIGAL.CO GmbH. (25 มกราคม 2560). **Schaeffler diagram - different base materials**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.migweld.de/english/service/welding-stainless-steels/schaeffler-diagram-with-different-base-materials/>.
- [25] KINZ. (20 มกราคม 2560). **ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเหล็กกล้าไร้สนิม**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.kinzi.com/knowledge-thai>.
- [26] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (25 มกราคม 2560). **ความเค้นและความเครียด (Stress)**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://www.mtec.or.th/mcu/phml/index.php/th/component/content/article/6-2009-03-30-03-57-16/forlinkin/25-stress>.
- [27] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (25 มกราคม 2560). **การทดสอบแรงดึงของโลหะ**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://www.mtec.or.th/mcu/phml/index.php/th/2014-09-12-03-39-42/24-tensile-test-of-metal>.
- [28] PB All Techno. (20 มกราคม 2560). **การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://www.pballtechno.com/article/22/การทดสอบความแข็ง-hardness-test>.
- [29] K. Kimapong, P. Poonnayoom, V. Wattanjitsiri. (2016). Microstructure and Wear Resistance of Hardfacing WeldMetal on JIS – S50C Carbon Steel in Argicultural Machine Parts, Materials Science Forum vol.872. (pp. 55-61).
- [30] Amscope. (28 มกราคม 2560). **50X-2500X Bright & Darkfield Polarizing Metallurgical Microscope + 18MP USB 3.0 Camera**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.amscope.com/50x-2500x-bright-darkfield-polarizing-metallurgical-microscope-18mp-usb-3-0-camera.html>.
- [31] บทเรียนออนไลน์ วิชาโลหะวิทยาเบื้องต้น. (28 มกราคม 2560). **การตรวจสอบโครงสร้างของเหล็กกล้า**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: [http://www.sipotec.ac.th/bunchoo/2103-2103/lesson/lesson8-1\\_2.html](http://www.sipotec.ac.th/bunchoo/2103-2103/lesson/lesson8-1_2.html).
- [32] พรวิสา วงศ์ปัญญา. (28 มกราคม 2560). **การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงสะท้อน**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : [http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/Lab\\_3\\_Microstructural\\_Examination\\_using\\_Reflective\\_Light\\_Optical\\_Microscope.pdf](http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/Lab_3_Microstructural_Examination_using_Reflective_Light_Optical_Microscope.pdf).



## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [33] ชัชชัย อินนุมาตร. (27 มกราคม 2560). การป้องกันการแตกร้าวขณะแข็งตัวในการเชื่อมสแตนเลสกลุ่มเฟอร์ริติกและมาร์เทนซิติก, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.honor.co.th/images/N-Knowledge/Welding/WL.01.pdf>.
- [34] ราชบัณฑิตยสถาน, พจนานุกรมศัพท์การเชื่อม ฉบับราชบัณฑิตยสถาน. (2544). กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด ไอเดีย สแควร์.
- [35] ฉัตรทอง ไสแสง. (2548). อิทธิพลของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติติก เกรด304, กรุงเทพฯ. (หน้า 1-75).
- [36] ปริญญา ไสแสง. (2549). ผลการแปรพารามิเตอร์ การเชื่อม MIG ต่อ โครงสร้างและสมบัติของงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม, กรุงเทพฯ. (หน้า 1-93).
- [37] Ogawa T, Suzuki K, and Zaizen T. (2004). The Weldability of nitrogen-containing austenitic stainless steel part II porosity cracking and creep properties, Welding Journal, vol. 63. (pp. 213-223).
- [38] Hyeong – Yeon Lee, Se-Hwan Lee, Jong-Bum Kim and Jea-Han Lee. (2007). Creep-fatigue damage for a structure with dissimilar metal weld of modified 9Cr-1Mo steel and 316L stainless steel, International Journal of Fatigue, vol. 29. (pp. 1868–1879).
- [39] M. Siresha, V. Shankar, Shaju K. Albert, and S. Sundaresan. (200). Microstructural features of dissimilar welds between 316LN austenitic stainless steel and alloy 800, Materials Science and Engineering A, vol. 292. (pp. 74–82).
- [40] C.R. Das, A.K. Bhaduri, G. Srinivasan, V. Shankar, and S. Mathew. (2009). Selection of filler wire for and effect of auto tempering on the mechanical properties of dissimilar metal joint between 403 and 304L(N) stainless steels, Journal of materials processing technology, vol. 209.(pp. 1428–1435).

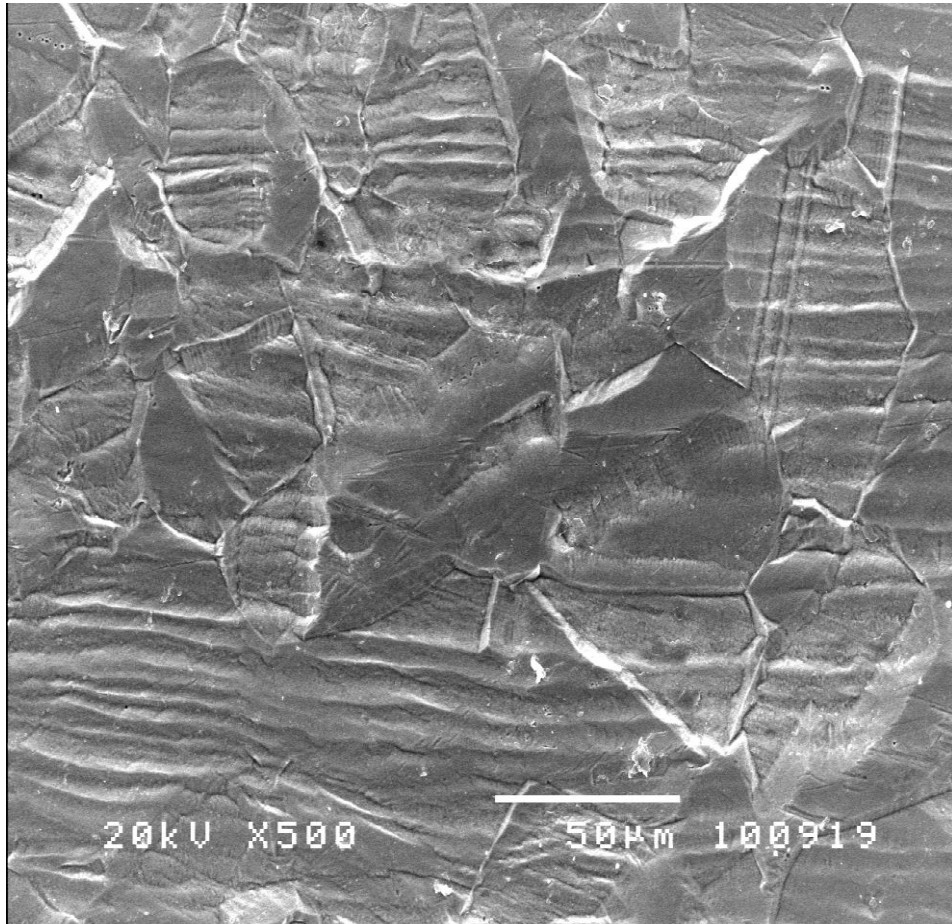
ภาคผนวก



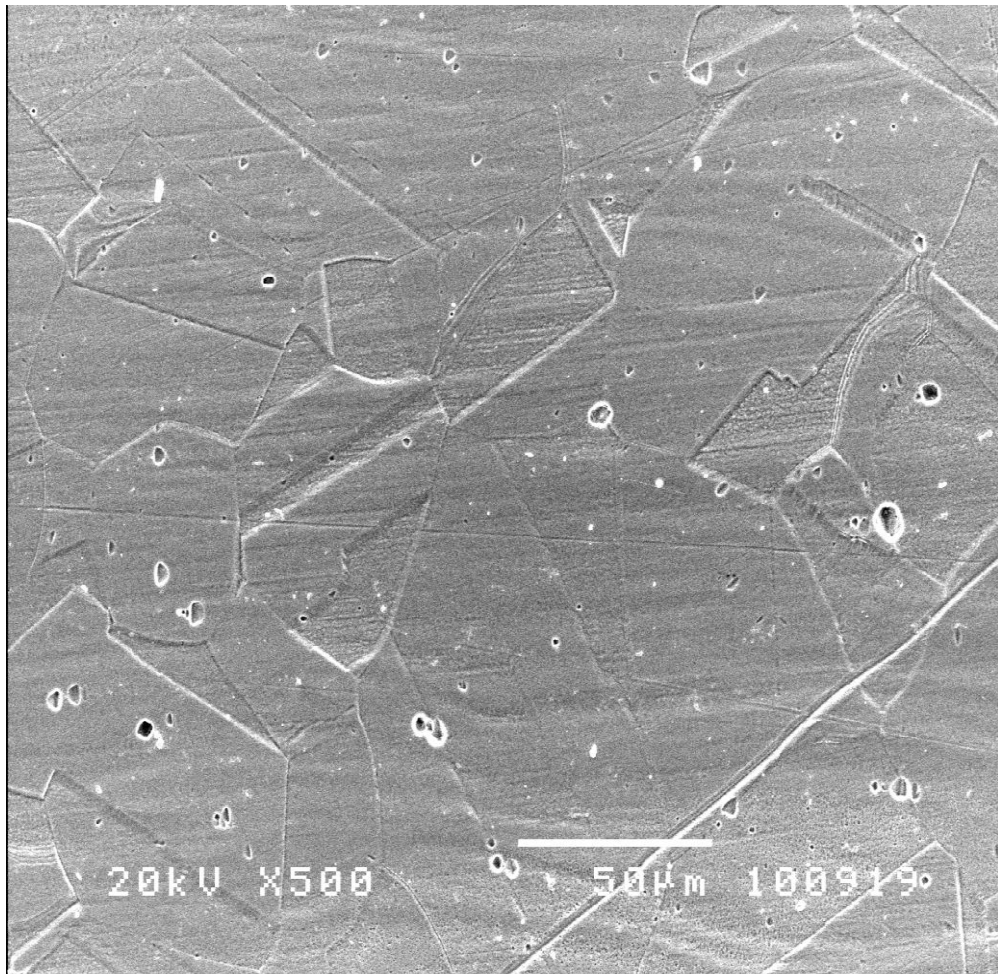
ภาคผนวก ก  
ผลการทดลองที่ได้จากเครื่องทดสอบและภาพโครงสร้างระดับจุลภาคที่ใช้  
ในการวิเคราะห์



ภาพโครงสร้างจุลภาควิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด  
( SEM )

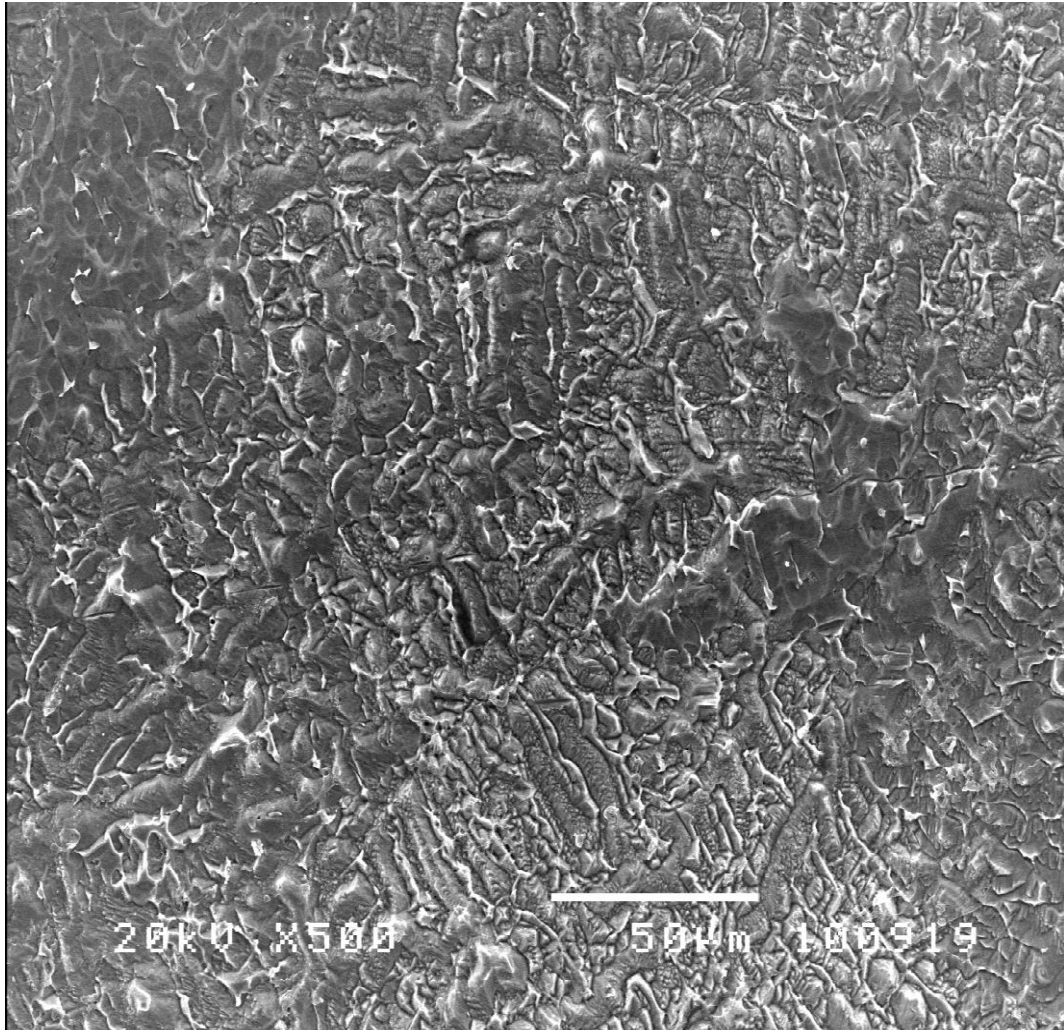


รูปที่ ก-1 โครงสร้างจุลภาคโลหะฐาน SUS304



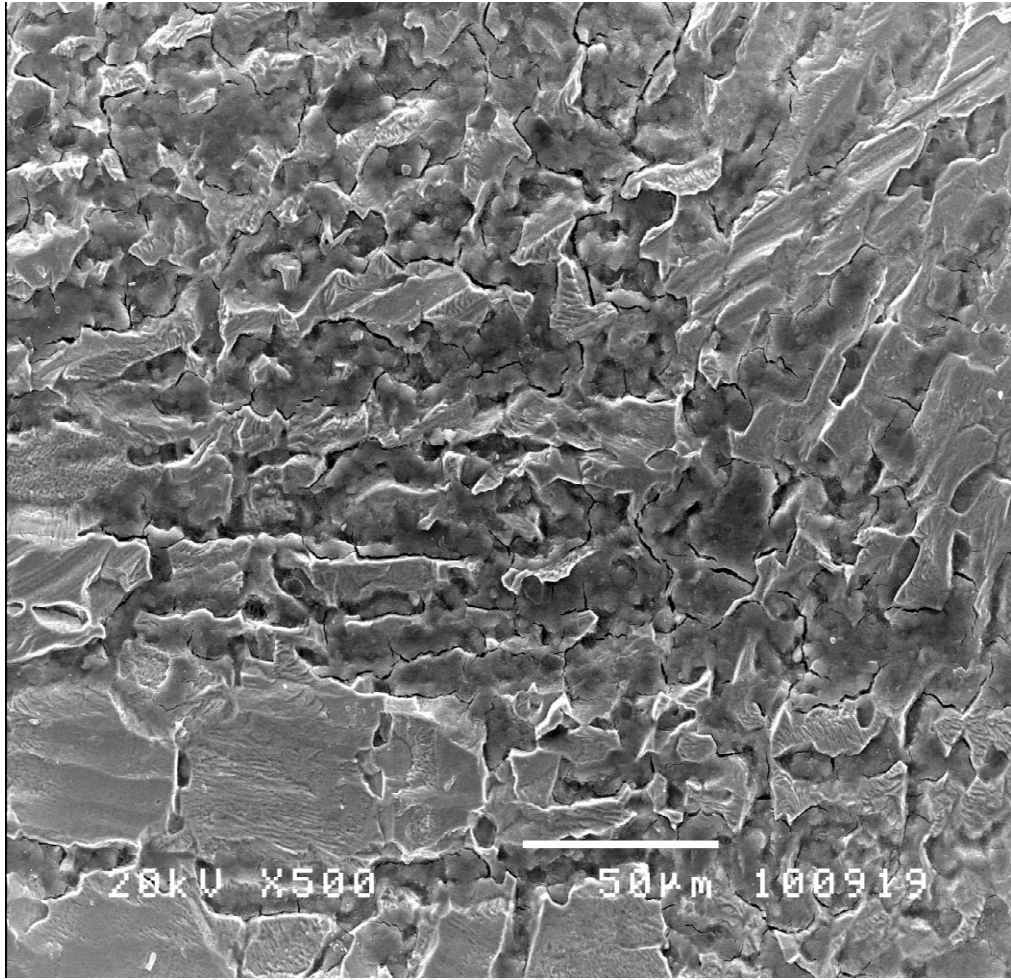
รูปที่ ก-2 โครงสร้างจุลภาคโลหะฐานSUS316L





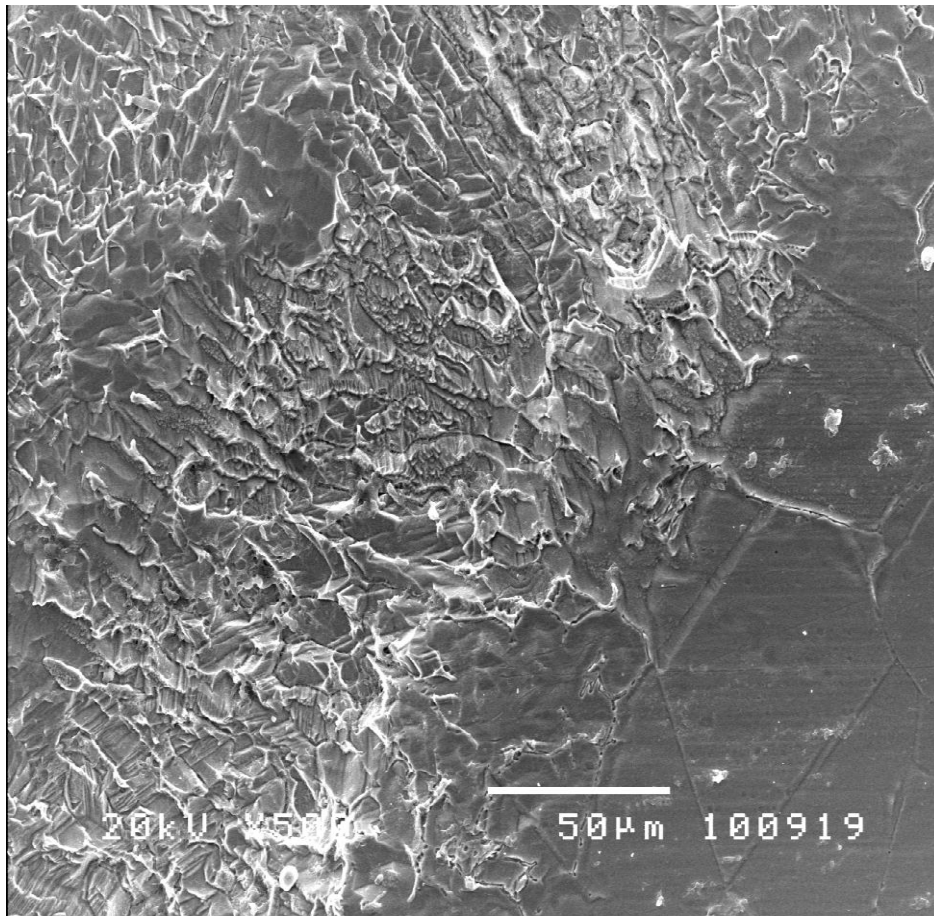
รูปที่ ก-3 โครงสร้างจุลภาคโลหะเติม ER309LSi





รูปที่ ก-4 โครงสร้างจุลภาค ER309LSI Interphase SUS304

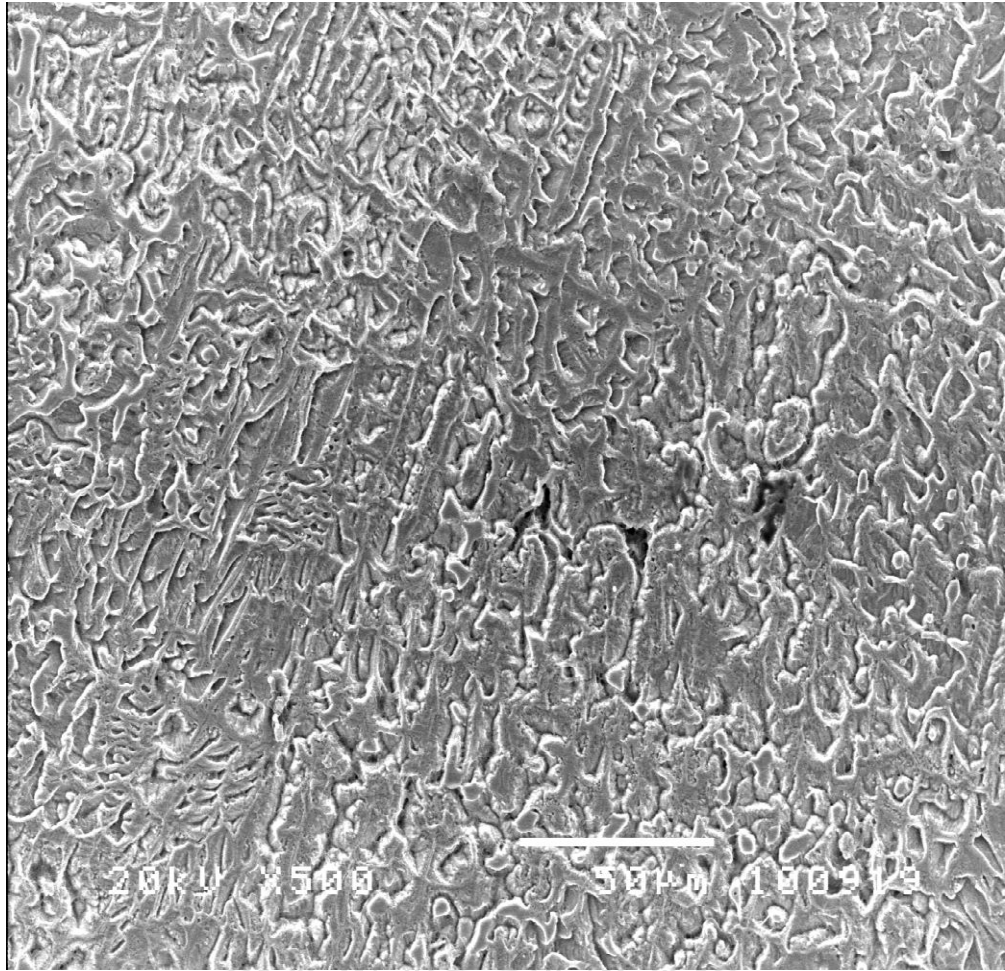




รูปที่ ก-5 โครงสร้างจุลภาคER309LSi Interphase SUS316L

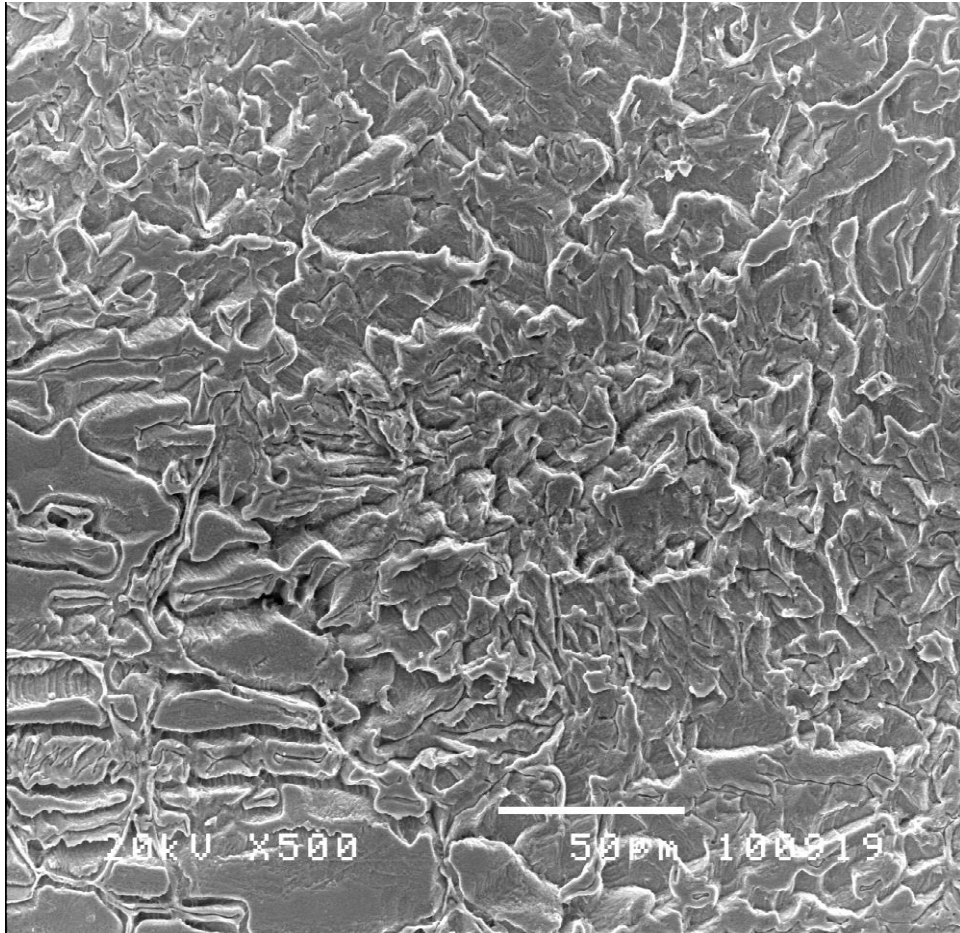






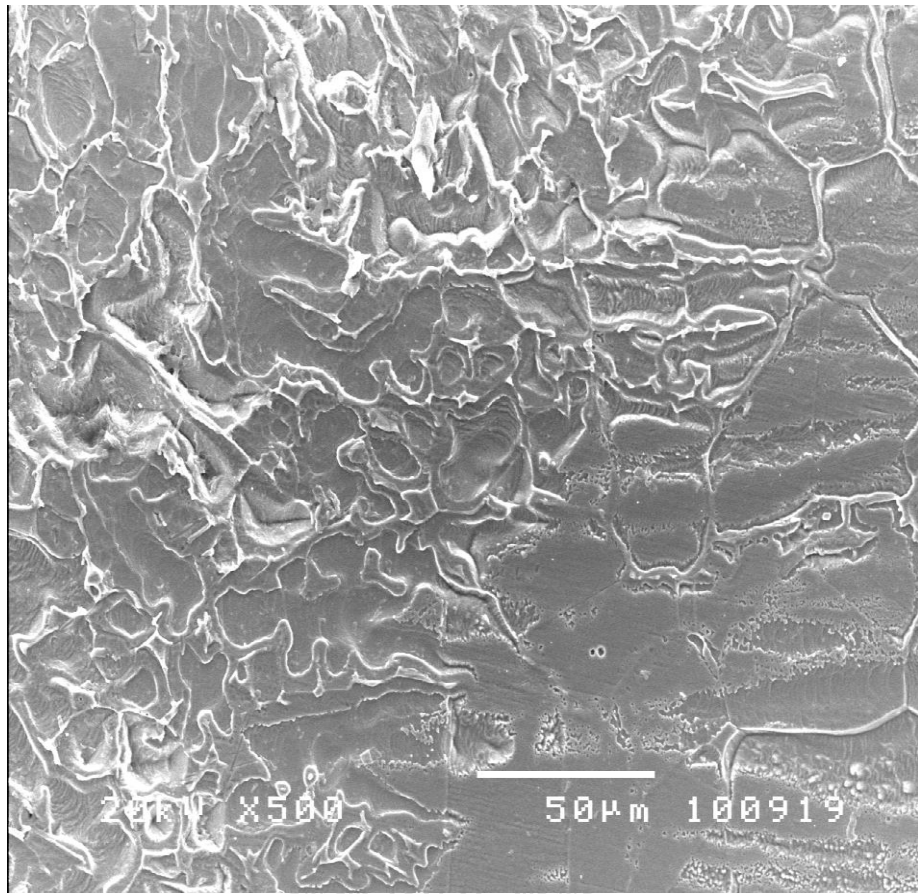
รูปที่ ก-6 โครงสร้างจุลภาคER316L





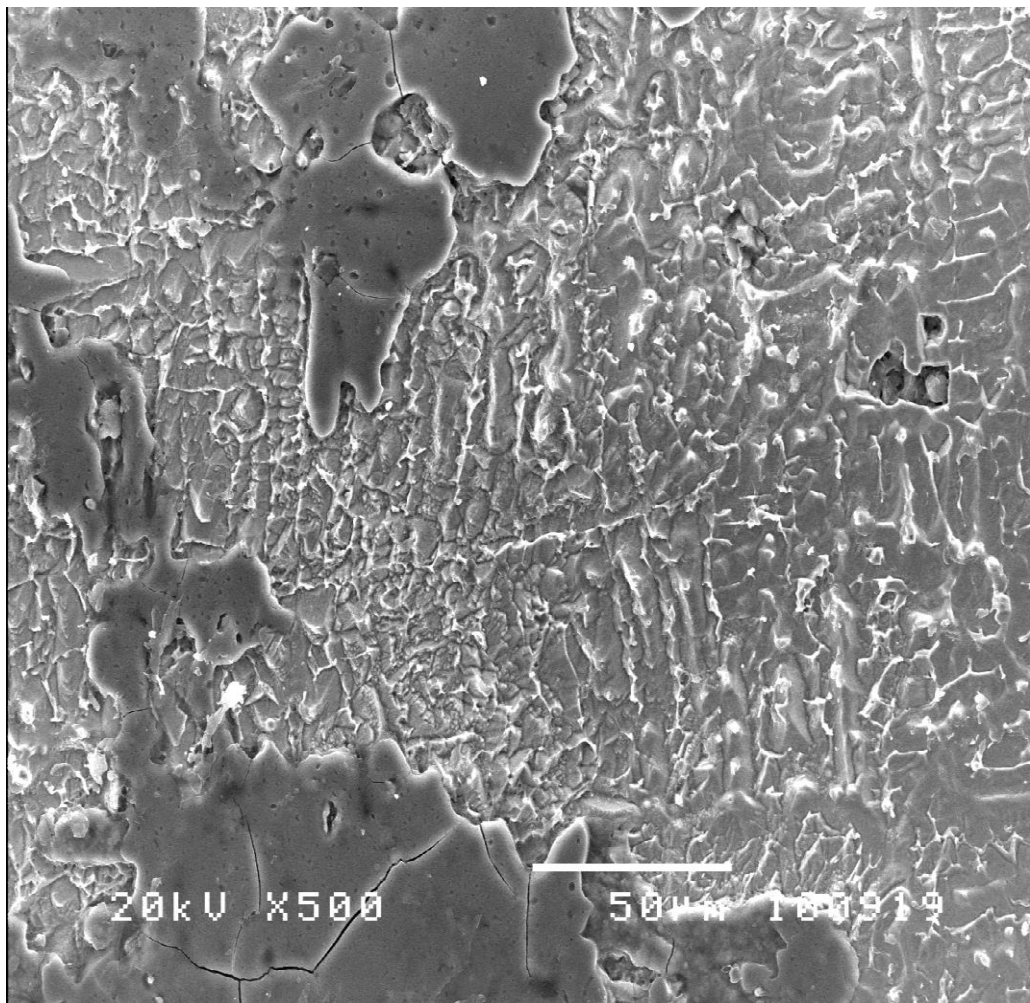
รูปที่ ก-7 โครงสร้างจุลภาค ER316L Interphase SUS304





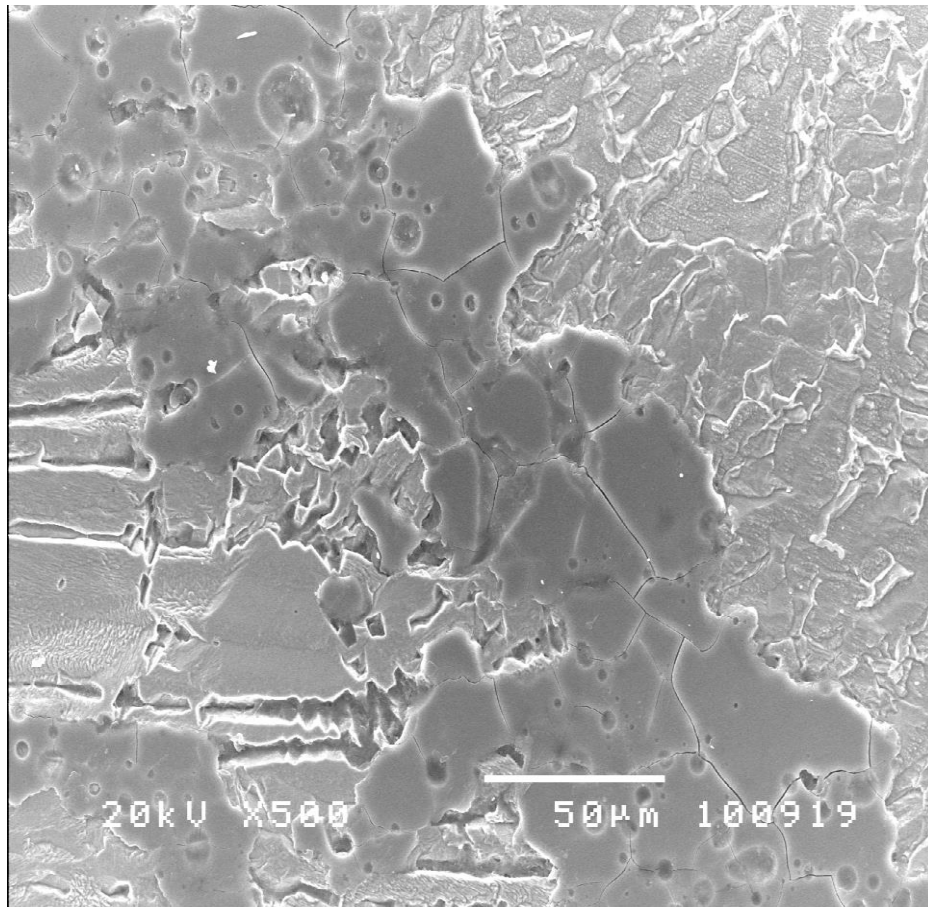
รูปที่ ก-8 โครงสร้างจุลภาค ER316L Interphase SUS316L





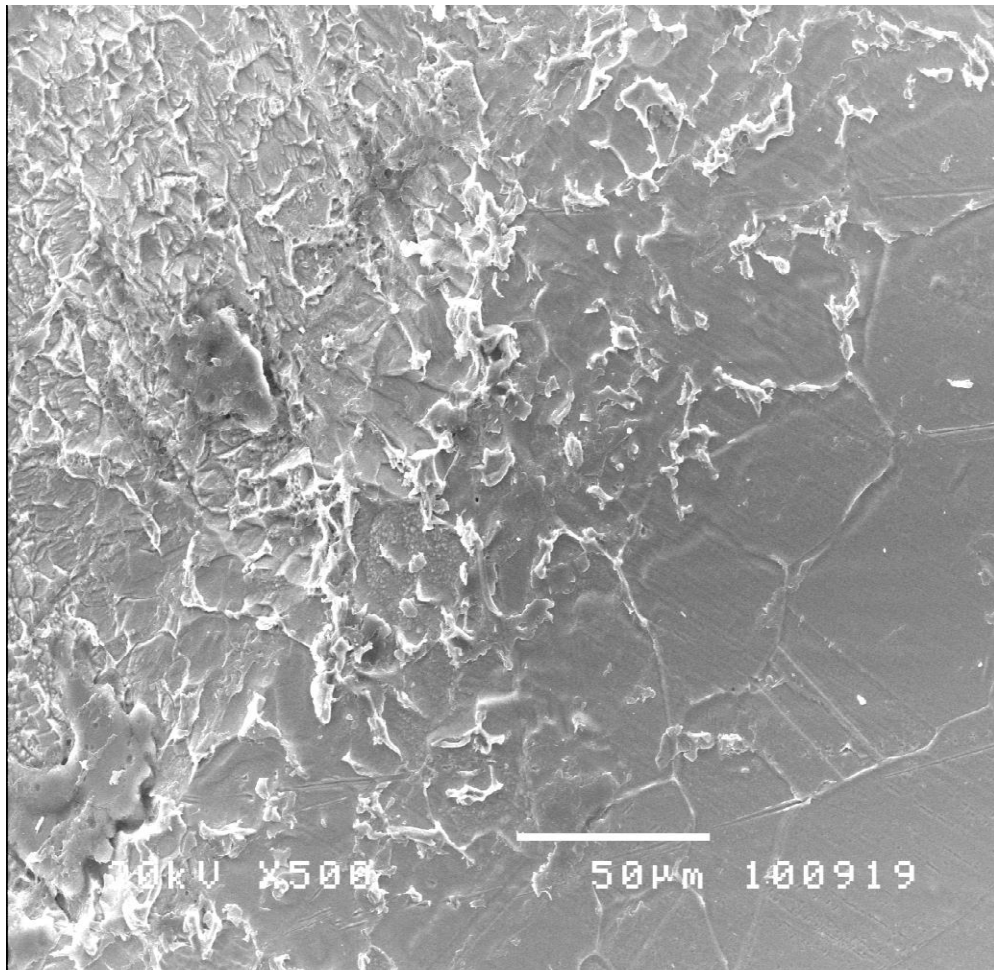
รูปที่ ก-9 โครงสร้างจุลภาค ER316LSi





รูปที่ ก-10 โครงสร้างจุลภาค ER316LSi Interphase SUS304





รูปที่ ก-11 โครงสร้างจุลภาค ER 316LSi Interphase SUS316L

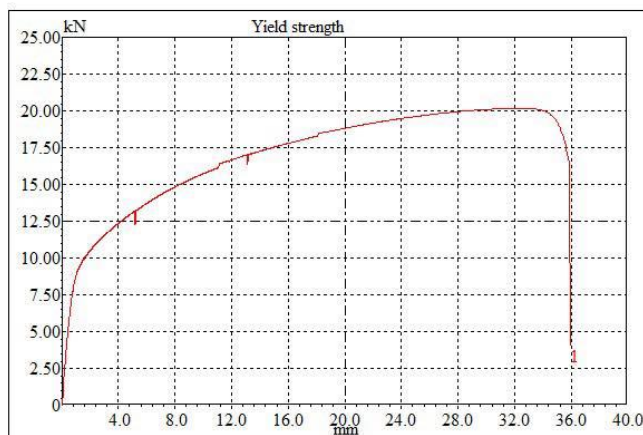


ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงตัดจากเครื่องทดสอบ



SUS304

Test No.	Test date	Area mm <sup>2</sup>	Max. Load kN	Tensile strength N/mm <sup>2</sup>	Yield point kN	Yield strength N/mm <sup>2</sup>	Elongation %
1	2017-09-1	31.75	20.19	635.75	10.77	339.32	61.40
---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---



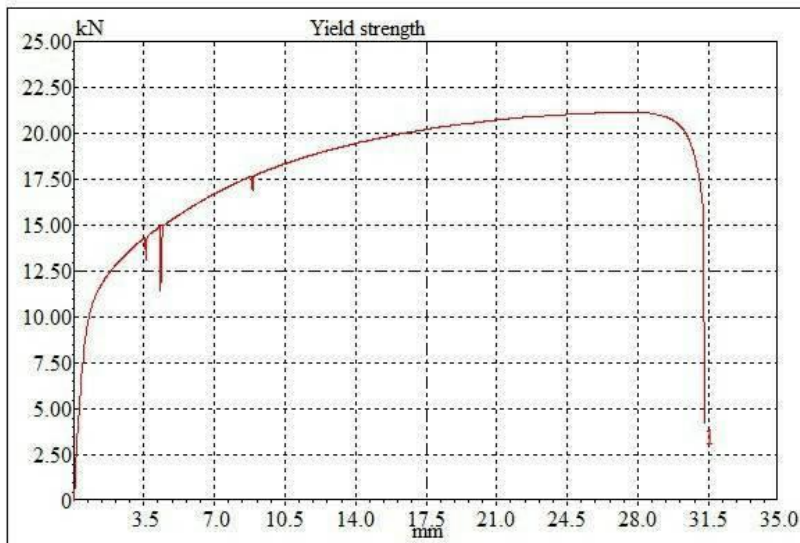
Test By.....

รูปที่ ก-12 กราฟที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงของโลหะฐาน SUS304



SUS316

Test No.	Test date	Area mm <sup>2</sup>	Max. Load kN	Tensile strength N/mm <sup>2</sup>	Yield point kN	Yield strength N/mm <sup>2</sup>	Elongation %
1	2017-11-2	35.00	21.13	603.77	14.36	410.19	-
---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---



Test By.....

รูปที่ ก-13 กราฟที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงโลหะฐาน SUS316L



ภาคผนวก ข  
ผลงานที่ตีพิมพ์เผยแพร่





CHULA ENGINEERING  
Transformation toward excellence

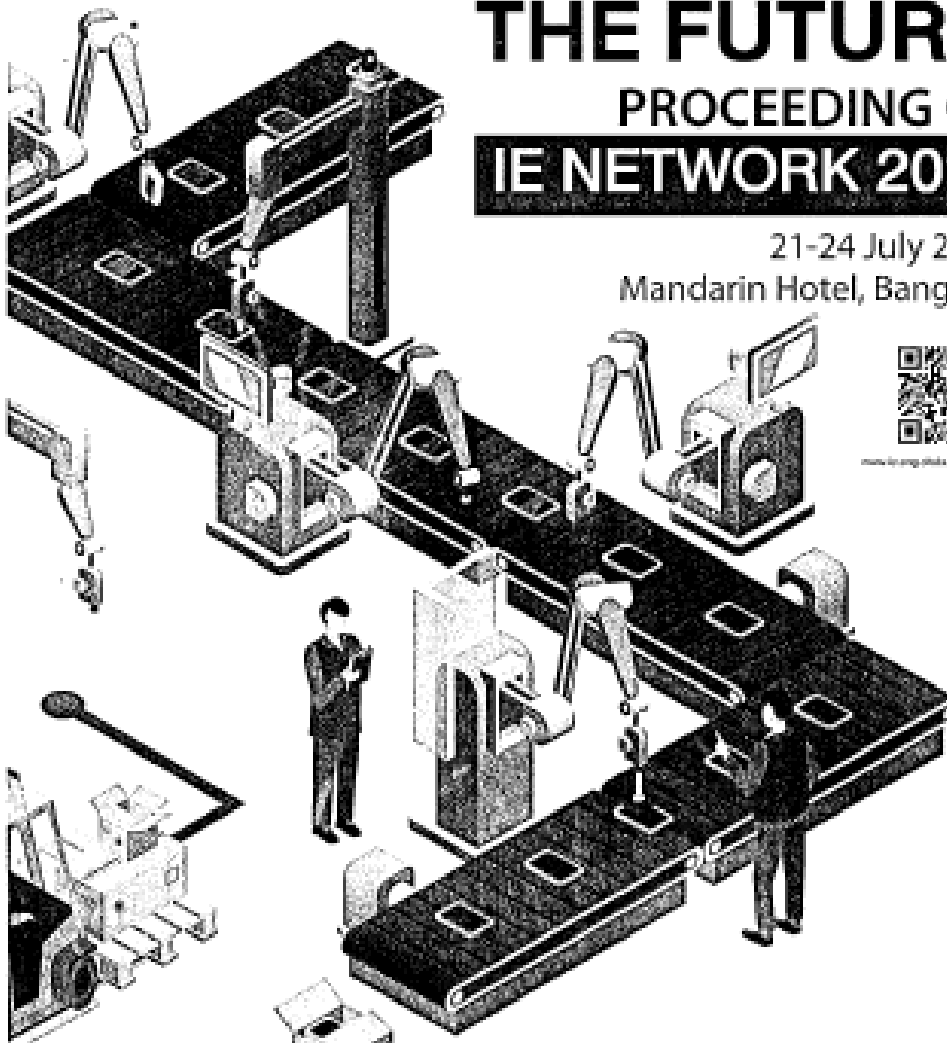
# SHAPING THE FUTURE

PROCEEDING OF  
**IE NETWORK 2019**

21-24 July 2019  
Mandarin Hotel, Bangkok



[www.ie-np.org/ie-network-2019/](http://www.ie-np.org/ie-network-2019/)



**HEXAGON**  
MANUFACTURING INTELLIGENCE



**BOSSARD**  
Process Productivity



Minitab



งานประชุมวิชาการข้ามงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2562 (IE Network Conference 2019) นี้ ได้มีกำหนด จัดขึ้นระหว่างวันที่ 21 - 23 กรกฎาคม 2562 ณ โรงแรมแมนดาริน ฮาย่าม ฮาล์โล่ พัทยา "Shaping the future" โดยมีศาสตราจารย์วิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นประธานในการดำเนินการจัดงาน ในการจัดงานประชุมวิชาการนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเวทีให้กับนักวิชาการ นักวิจัย วิศวกร ผู้ประกอบการ นักศึกษา ตลอดจนบุคคลทั่วไปที่สนใจ ได้มีโอกาสแลกเปลี่ยน และเรียนรู้ซึ่งกันและกัน อีกทั้ง ยังก่อให้เกิดเครือข่าย และกระตุ้นความเข้มแข็งในการร่วมมือในการพัฒนาองค์ความรู้ และเทคโนโลยีที่ทันสมัย อันเป็นพื้นฐานสำคัญต่อการพัฒนาคนและเทคโนโลยีของประเทศให้เจริญและก้าวหน้าต่อไป

ในการนี้ คณะภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณผู้เข้าร่วมการประชุม ผู้ทรงคุณวุฒิในการจัดการประกวดความ ผู้ทรงคุณวุฒิบรรยายพิเศษ และผู้ให้การสนับสนุนทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการจัดประชุมวิชาการในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ  
ข้ามงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2562  
IE Network Conference 2019



ศาสตราจารย์ ดร.สุวงศ์ เดชพรสิณกุล  
คณบดี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีความ  
ยินดีอย่างยิ่งที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้รับเกียรติให้เป็น  
เจ้าภาพในการจัดงานประชุมวิชาการด้านงานวิศวกรรม  
อุตสาหกรรมประจำปี พ.ศ. 2562 IE Network Conference  
2019) ภายใต้หัวข้อ "Shaping the future" ที่จัดขึ้นระหว่าง  
วันที่ 21 - 23 กรกฎาคม 2562 ณ โรงแรมแมนดาริน สามย่าน  
นครินทร์

การจัดงานประชุมวิชาการในครั้งนี้ถือเป็นโอกาสอันดียิ่ง  
ในการส่งเสริมให้เกิดความเชื่อมโยงและความร่วมมือกันระหว่าง  
นักวิชาการ นิสิต นักศึกษา รวมถึงมีปฏิสัมพันธ์ ของสังคมวิศวกรรม  
อุตสาหกรรมในประเทศไทย อันจะนำไปสู่การร่วมกันพัฒนาองค์  
ความรู้ และเทคโนโลยีที่ดีขึ้นเป็นการพัฒนาคนและเทคโนโลยีของ  
ประเทศให้เจริญก้าวหน้าต่อไป

ในการนี้ ทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ขอขอบคุณ ผู้สนับสนุนการประชุม ผู้เข้าร่วมการประชุม และ  
คณะกรรมการดำเนินการจัดงาน ที่มีส่วนร่วมในการจัดงาน  
ประชุมครั้งนี้ ได้สร้างช่วงเวลาวิเศษสุดของการจัดงาน และ  
หวังเป็นอย่างยิ่งว่า การจัดงานในครั้งนี้ จะก่อให้เกิดการ  
เปลี่ยนแปลงที่นำไปสู่อนาคตของอุตสาหกรรมในประเทศไทยที่  
เจริญก้าวหน้าและสามารถแข่งขันได้ในระดับสากลต่อไป

ศาสตราจารย์ ดร. สุวงศ์ เดชพรสิณกุล  
คณบดี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีความเป็นหนึ่งเดียว ได้รับเกียรติในการต้อนรับทุกท่านเข้าสู่งานประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2562 (E Network Conference 2019) ภายใต้หัวข้อ "Shaping the future" ที่จัดขึ้นระหว่างวันที่ 21 - 23 กรกฎาคม 2562 ณ โรงแรมแอมบาสกัน สามย่าน

งานประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม เป็นหนึ่งในกิจกรรมที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการสร้างความเข้มแข็งให้แก่วงการวิชาการในสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม อีกทั้งยังช่วยส่งเสริมให้นักวิชาการในสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม นักวิจัย นิสิต นักศึกษา และบุคลากรในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม เพื่อร่วมกันการคิดค้นองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมของประเทศ ไทยให้มีความเจริญก้าวหน้ายิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ ก็หวังเป็นอย่างยิ่งว่างานประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี พ.ศ. 2562 ในครั้งนี้ จะก่อให้เกิดประโยชน์ในการพัฒนาองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อการ "Shaping the future" ของวงการวิชาการ ภาคธุรกิจและอุตสาหกรรมของประเทศต่อไป และขอขอบคุณผู้สนับสนุน ผู้เข้าร่วมการประชุม ผู้ทรงคุณวุฒิ และคณะกรรมการจัดงานทุกท่านที่ร่วมแรงร่วมใจกันทำให้การจัดประชุมวิชาการครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. ปวีณา เชาวลิตวงศ์  
ประธานคณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการข่ายงาน  
วิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2562



รองศาสตราจารย์ ดร.ปวีณา เชาวลิตวงศ์  
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม (Industrial Engineering Network) หรือ IE Network เป็นองค์การที่สร้างความร่วมมือและความเข้าใจอันดีระหว่างสถาบันการศึกษา ที่ผลิตบุคลากรด้านวิศวกรรมอุตสาหกรรมและที่เกี่ยวข้องกับงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ก่อตั้งขึ้นเมื่อเดือนตุลาคม พ.ศ. 2523 โดยได้รับการสนับสนุนจากวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) มีสมาชิกที่ร่วมกันก่อตั้งจำนวน 10 สถาบัน และภาคีสมาชิกอีก 1 สถาบัน มีวัตถุประสงค์หลักในการสนับสนุนให้เกิดการแลกเปลี่ยนข่าวสารข้อมูลด้านงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมมีความร่วมมือในการจัดทำ โครงการวิจัยในงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม มีการแลกเปลี่ยนคณาจารย์และนิสิตนักศึกษาาระหว่างสถาบันศิระระหว่างสถาบันที่เป็นสมาชิกและมีความร่วมมือกับหน่วยงานต่างๆ ในการจัดการพัฒนางานวิศวกรรมอุตสาหกรรมอันจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวิชาการและเศรษฐกิจ โดยรวมของประเทศไทยในด้านธุรกิจอุตสาหกรรม การออกแบบ การผลิต การจัดระบบงาน ผลิตสินค้า งานบริหารระบบคุณภาพวิศวกรรมควบคู่กับผลผลิตงานปฏิบัติการในธุรกิจให้บริการต่างๆ ปัจจุบันข่ายงานมีสมาชิกกว่า 40 สถาบันทั่วประเทศ มีการจัดกิจกรรมทางวิชาการ เพื่อสนับสนุนทั้งภาคการศึกษาและหน่วยงานธุรกิจอุตสาหกรรม อย่างต่อเนื่องกันมากว่า 20 ปี โดยเฉพาะมีการจัดประชุมวิชาการ ข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม (IE Network Conference) อย่างต่อเนื่องทุกปี

สำหรับงานประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2562 (IE Network Conference 2019) นี้ หน่วยงานวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้รับเกียรติให้เป็นประธานการจัดงานดังกล่าว โดยได้มีกำหนด จัดขึ้นระหว่างวันที่ 21 -23 กรกฎาคม 2562 ณ โรงแรมและเคาท์เฮาส์ ย่านย่าน ภายใต้หัวข้อ "Shaping the future"

## ผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ



### • มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.ดร.เทพเทพ บุญสถานิศาส  
 ผศ.ดร.วราวุฒิ นววิจิตรกุล  
 ผศ.ดร.วิฑูรย์ สุทธิพิทักษ์  
 อ.ดร.สุภาวรัตน์ วงศ์วิระเบ็ญยวดี

ผศ.ดร.สุวิกรมณ์ วิบูลย์  
 อาจารย์เนืองพิริวา พิทยศักดิ์  
 อ.ดร.กฤษ วรรณเกษม  
 อาจารย์สุวิวัฒน์ สืบสวนกุล

### • มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ผศ.ดร.กรรฎา จำนำคุณหล่อ  
 ผศ.ดร.ฐิติกร พิเศษพิบูล  
 ผศ.ดร.เกษมสุภา พินธุวัฒน์  
 ผศ.ดร.ปาริชาติพรหม เกษมราษฎร์

อ.ดร.ธงชัย ชินภอธรรม  
 ผศ.ดร.นิฏฐวิภา จินทรศักดิ์  
 ผศ.ดร.วิโรจักษ์ กถินคำสอน  
 ผศ.ดร.ศิริวิวัฒน์ ชูศิริบุษ

### • มหาวิทยาลัยขอนแก่น

อ.ดร.อภิชาติ บุญญา  
 รศ.ดร.ปณิธาน พิศัยพัฒนา  
 อ.ดร.ธนา ราชธวัชวิทย์  
 ผศ.ดร.ปณิธิวัฒน์ สุวิมลนาถาส  
 ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ เฉลยอำนาจกุล  
 อ.ดร.ฐิติพงษ์ จำรัส

อ.ดร.ศิริชาติ อริญญากร  
 อ.ดร.ศิริโกวิทน์ พัฒนไพโรจน์  
 อ.ดร.ฐนวรรณรัตน์ นีละโมศ  
 ผศ.ดร.วิวัฒน์ เศรษฐ์สุนทรบูรณ์  
 ผศ.ดร.ศมนฤช ปิสิฎุภรณ์  
 ผศ.ดร.สุเชษฐภคณา แฉะอภัยพันธ์

### • มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ผศ.ดร.วราภร ภาคนิเวศ  
 รศ.ดร.นิเวศ เจริญใจ  
 รศ.ดร.ธัญชชาต โสภานนถ  
 รศ.ดร.วิชัย อัครพิณวัฒน์  
 รศ.ดร.ศกฤต เศียรกุล  
 รศ.ดร.นันทิมา เวฬุสศิริธาร  
 รศ.ดร.วิมลนิต ราชธัญจิรา  
 ผศ.ดร.ธรรมาภพ สฤทธสุนต์  
 รศ.ดร.รุ่งนิตร์ ขนภูอินทร์  
 ผศ.ดร.กรกฎ ไชยบัวเทศ พิทยาวงศ์

รศ.ดร.ศุภนิภภม วัฒนังคังค์  
 รศ.ดร.ชนนุชุต ภาณุเศรษฐ์  
 ผศ.ดร.ธนิตกุล ไชยจางกูรณิษ  
 ผศ.ดร.โพธิ์ จิวโรยศาล  
 ผศ.ดร.วิภา วิสิษฐิพานิช  
 อ.ดร.สาธิตี สันติศิริราษฎร์  
 ผศ.ดร.ชนนังเจริญ แสงเจริญ  
 อ.ดร.ธรรมาศ นิมังเจริญ  
 อ.ดร.วาทิ นันทินันต  
 อ.ดร.ชาติ บุญดี

◆ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผศ.ดร.เจริญชัย ไชยพิทักษ์ภรณ์  
 ผศ.ดร.วุฒินันท์ คำสุข  
 อ.ดร.พรวิมลพงษ์ ป่านดี  
 ผศ.พจนาน เที่ยงวัฒนา  
 อ.ดร.ณัฐพร วงศ์เวียง  
 ผศ.ดร.ธวัชภพนา อุดมศักดิ์กุล

รศ.ดร.เดือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์  
 ผศ.ดร.ช่อมแก้ว จตุรานนท์  
 ผศ.ดร.สมบุญ เจริญใจศิริ  
 รศ.ดร.บารโหศ ผู้พิวัฒน์  
 ผศ.มงคล กิณะวัฒน์  
 อ.ดร.ประจักษ์ จรรยาบุญรัตน์

◆ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ดร.วรินทร์ เบ็ญสิริบุญ  
 ผศ.ดร.ธนิศา อุนารักษ์  
 อ. สุชาวดี อินทร์คล้าย

อ. สุกพิวัฒน์ ปิงลา  
 อ. ณราวดี อีพิไลยธรรม  
 อ.ดร.สุจี ภัทรสุข

◆ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อตระกูล  
 ผศ.ดร.จิณะ ประณีตทองคำ  
 ผศ.ดร.ภคพิชญ์ กิณะพงศ์  
 อ.ดร.สุชาติ อุดมเทวี  
 อ.ดร.ณวัฒน์ มีนงค์  
 ผศ.ดร.สุเมธ พงษ์ศรี

ผศ.ดร.สัมพันธ์ คงสินธุ์  
 รศ.ดร.ธนา ศุภสิงห์  
 ผศ.ดร.ระพี การุญนะ  
 ผศ.ศวีโร จารุกิจบุญ  
 ผศ.สุวัฒน์ ศรีธรรมพงศ์  
 อ.ดร.ประภท สิริสุวัฒน์

◆ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ผศ.เบญจมาภรณ์ มาลีฮง

◆ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

อ. วิภาต์ เก้าหวด  
 ผศ.ดร.ภาณุ บูรณสารกุล  
 ผศ.ดร.ขวัญนิตี คำเมือง  
 ผศ.ดร.ไพรัชเกษม สมบุญ  
 ผศ.ดร.ศรัณย์จนา วิเศษศักดิ์  
 อ.ดร.ธีรฉัตร พงษ์พัฒน์ศิริ  
 ผศ.ศัญญา อิมารักษ์

รศ.ดร.ณิชากร กุศลวิวัฒน์  
 อ.ดร.สุชาดา อุ่นแก้ว  
 อ.ดร.สุดนิตย์ อุดมพรม  
 รศ.ดร.กวิณ สนธิสัมพันธ์  
 อ. เกตุชนา บุญฤทธิ์  
 อ.ดร.ปณิฏพจน์ บุญบรรณ  
 อ.ดร.ภรณ์รัตน์ ชื่นธรรม



◆ มหาวิทยาลัยมหิดล

อ.ดร.เอกชัย วารินศิริรักษ์  
 ผ.ดร.เบ็ญจศิริศักดิ์ ศรีธรรมกุลชัย  
 ผ.ดร.นเรศรา ธีระวัฒน์  
 ผ.ดร.รณชัย พิโรธบุญกุล  
 ผ.ดร.ศุภชัย ราชบุรีศรี  
 ผ.ดร.สรานาง ไชย  
 อ.ดร.ศอชชา นัจฉ์

อ.ดร.นพพร ภูธรษา  
 ผ.ดร.ศางยศ อู่อภิสิทธิ์  
 อ. กัญจน์ สมถาวรพิชัย  
 อ.ดร.จิราพรพรรณ เต็มไพกาพาน  
 อ.ดร.ดวงพรรณณ ศฤงคารินทร์  
 ผ.ดร.ชนกรณ์ นน့်พนา

◆ มหาวิทยาลัยรังสิต

ผ.ดร.ธนวรรณ สิวาไพบูลย์  
 อ. สาธุณีย์ พงษ์พัฒน์ศึกษา  
 ผ.ดร.เมื่องจันทร์ ไทญจนบท

อ. ศิลาปิติ วัฒนสมภ  
 อ. ประสพ ธีระพงษ์พันธ์

◆ มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผ.ดร.ศโรจน์พงษ์ ศรีทองดี

อ.ดร.ภาวรินทร์ ชูชาติวิทย์

◆ มหาวิทยาลัยอรรถราชภัฏบรจันทร์

ผ.ศ.เพ็ญยุ สระการชัยศิริ  
 รศ.ดร.สมยศ วัฒนวิไล  
 รศ.ดร.นิกร สิริวงค์ไพศาล  
 รศ.ดร.นพาสรร สุธรรมานนท์  
 รศ.สมชาย ชูโอบ  
 รศ.วนิดา วัฒนชัย  
 ผ.ดร.นภัทพร มีนชย

ผ.ดร.อรุณ สัตยพงศ์  
 ผ.ดร.ภาสกรดิษฐ์ โพนนา  
 ผ.ดร.สุภาพรรณ ใจประไพพันธ์  
 ผ.ดร.วิบูลชนา สิมธาวดี  
 ผ.ดร.วันวิมลพงษ์ คงแก้ว  
 อ.ดร.ชุกี นศดา  
 อ. สัตย์ศิริ ศรีวิภาบุญรัตน์

◆ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

อ.ดร.รุจิระ ฉานศิริ  
 รศ.ดร.ปัทมาวดี คำศรีศิริ  
 รศ.ดร.สืบศักดิ์ นันทวานิช  
 รศ.ดร.ฉิมขันธ์ จันทร์วรราชูพันธ์  
 ผ.ดร.ณัฐธิดา อู่อภิสิทธิ์พันธ์ุ

รศ.ดร.ไพศาล เป็ญฤดี  
 ผ.ดร.สุชาติดา เมธีบุญไมรา  
 อ.ดร.วรุฒ ป่านนัทชัย  
 ผ.ดร.ณิชา โสภณศิริอรุณกุล

## ผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ



### ♦ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

อ.ดร.เขาวัด พจนคดี  
 รศ.ดร.ภรณ์ชัย คีมาศิริ  
 รศ.ดร.วิจิตร วัฒนกุล  
 รศ.ดร.ศานต์ วัฒนฤทธิชัย  
 รศ.ดร.สุดี ฉาสุรินทร์  
 รศ.ดร.ทศพล นีละไพจิตรกุล  
 ผศ.ดร.วิฑู ศรีวิเศษ  
 ผศ.ดร.ชุมพล ยวงโย  
 ผศ.ดร.สุคนธ์ ชินทร์วิเศษ

ผศ.ดร.วิศวิวัฒน์ สิริเกษมสุข  
 ผศ.ดร.ณัฐชนก ขงประสิทธิ์พร  
 อ.ดร.พชรชัย ไชยปราการกุล  
 อ.ดร.นิรันดร์ พิสุทธิธาดาเนน  
 อ.ดร.เพชรพล ฉิมทวีคุณ  
 อ.ดร.ภาณุ ชูเนกักดิ์  
 อ.ดร.จรรยาธรรม โกษาภักดิ์  
 อ.ดร.นพพล สุขแสงปัญญา  
 อ. รณณ เป็ยระตะกุล

### ♦ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รศ.ดร.ปวีณา เขารัตนวงศ์  
 ศ.ดร.ปานเมศ ชูวัฒนา  
 รศ.ดร.ฉิรา ฐิติจางการพาณิชย์  
 รศ.วิศวิวัฒน์ เกาประณตวิญญูวงศ์  
 รศ.ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย  
 รศ.ดร.นิภาวี อรรถกษรณพิลาต  
 รศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งวิศวิเศษวิญญู  
 ผศ.ดร.ศาริชา สุธีวงศ์  
 ผศ.ดร.นภัสนวงศ์ โสภณศิณี  
 ผศ.ดร.นรณภรณ์ ชุ่มชูศรี  
 ผศ.ดร.ประจวบ สุวิจารย์โณ  
 ผศ.ประจักษ์วิฑู ภัทรประณตพงศ์

ผศ.ดร.พิศัญญา จารุณณิโรจน์  
 ผศ.ดร.ไพโรจน์ อตาวิสิษฐกุล  
 ผศ.สุณี เพ็ญจามิตร  
 ผศ.ดร.ณชยา พิจัยศาสนภ  
 ผศ.สุภาพงษ์ ศิริสุทวิวัฒนา  
 ผศ.พญ.อัย โอนะศิริวัฒน์  
 ผศ.ดร.อริศสา เจริญผานวงศ์  
 ผศ.ดร.นันทนาถิณ ฉานจันทร์ศิริชัย  
 ผศ.ดร.โยนนาถ กิตติวิฑูชาชัย  
 อ.ดร.ณัฐชัย สิมะวัฒน์  
 อ. วรโชค ไชยวงศ์  
 อ.ดร.ณภศิริ วิภาสเสขานนท์

อิทธิพลรูปแบบลวดเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลูมที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมของรอยต่อชน  
ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304L และ AISI316  
Effect of Gas Metal Arc Welding Electrode on Weld Properties of Dissimilar  
AISI304L and AISI316 Stainless Steel Tube Joint

ชเนรินทร์ รักสตัย<sup>1\*</sup> และ กิตติพงษ์ กิมะพงษ์<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

\*E-mail: chaerin.r@en.rmutt.ac.th

Chanerin Ruksut<sup>1\*</sup> and Kittipong Kimapong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Thanyaburi

\*E-mail: [chaerin.r@en.rmutt.ac.th](mailto:chaerin.r@en.rmutt.ac.th)

บทคัดย่อ

รอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากความต้องการโครงสร้างยึดหยุ่น มีความต้านทานการกัดกร่อนเฉพาะส่วนที่เหมาะสม และราคาการผลิตต่ำ อย่างไรก็ตามการเชื่อมหลอมละลายรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดที่มีความแข็งแรงสูงได้ถูกศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อการเพิ่มผลิตภาพการผลิตในงานอุตสาหกรรม ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์หลักในการเลือกใช้ลวดเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลูม (Gas tungsten arc welding: GTAW) เพื่อทำให้เกิดรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304L และ AISI316 ที่ทำให้เกิดความแข็งแรงสูง และศึกษาตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อ วัสดุในการทดลอง คือ ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และ AISI316 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 60.3 มิลลิเมตรและความหนาของผนังท่อ 2.8 มิลลิเมตร ท่อถูกตัดให้มีความยาว 60 มิลลิเมตรเพื่อประกอบเป็นรอยต่อชนที่มีความยาวรวม 120 มิลลิเมตร โดยการเชื่อม GTAW แบบจุด รอยต่อชนของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดถูกทำการเชื่อมด้วย GTAW ด้วยตัวแปรการเชื่อมต่างๆ เพื่อหาค่าตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมสามารถทำให้ได้รอยต่อคุณภาพสูง ผลการทดลองที่ได้พบว่า ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ความแข็งแรงดึงสูงสุด 607 MPa คือ กระแสเชื่อม 140 A ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 mm/min และลวดเชื่อม ER309LSi

**คำหลัก** รอยต่อโลหะต่างชนิด, เหล็กกล้าไร้สนิม, การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลูม, ความแข็งแรงดึง

## Abstract

Dissimilar stainless steel tube joint is widely applied in industries due to a requirement of a flexible structure and an optimum local corrosion resistance. However, a fusion welding of this joint was difficult for reaching a high quality joint and was continuously developed for increasing productivity in industries. So, this research aimed to select gas tungsten arc welding (GTAW) electrode which could produce a high strength of a joint between AISI304L and AISI316 stainless steel and to study an effect of welding parameter on joint properties. Experimental materials were AISI304L and AISI316 stainless steel tube that had an outside diameter of 60 mm and a wall thickness of 2.8 mm. The tubes were mechanically prepared to be 60 mm. long and then fabricated to be a butt joint that showed a total length of 120 mm using a GTAW tack welding. The butt joint of the dissimilar stainless steel tubes was welded by GTAW process with various welding parameters for optimizing the welding parameters that could produce a high quality joint. The optimum welding parameter that produced a maximum tensile strength of 607 MPa was the welding current of 140 A, the welding speed of 200 mm/min and the ER309LSi welding electrode.

**Keywords:** dissimilar metal joint, stainless steel, gas tungsten arc welding, tensile strength,

## 1. บทนำ

รอยต่อท่อโลหะต่างชนิดถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในโครงสร้างของโรงไฟฟ้า หรือโรงงานอุตสาหกรรมเคมีต่างๆ [1] การต่อยึดท่อโลหะต่างชนิดเพื่อการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมเหล่านี้มักใช้การเชื่อมในการประกอบชิ้นส่วน ยกตัวอย่าง เช่น การเชื่อมทิกหลายแนว รอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมาแทนชดิก 13%Cr และเหล็กกล้าไร้สนิมตีวเพิล็กซ์ 2205 [2] การเชื่อมทิกท่อเหล็กกล้าโครเมียม X20 และ P91 [3] การเชื่อมเสียดทานท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมาแทนชดิก [4, 5] การเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304HCu [6] การเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก AISI310S [7] การเชื่อมอาร์กท่อเหล็กกล้าเฟอร์ริติก 2.25Cr-1Mo กับเหล็กกล้าไร้สนิม SS316 [8] การเชื่อมอาร์กรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน SFVQ1A และเหล็กกล้าไร้สนิม SUSF316 [9] หรือการเชื่อมทิกเหล็กกล้าไร้สนิมตีวเพิล็กซ์และเหล็กกล้ามาแทนชดิกพิเศษ [2] เป็นต้น ในการศึกษาและพัฒนากระบวนการเชื่อมเพื่อให้ได้สมบัติของแนวเชื่อมที่ต้องการ ตัวแปรการเชื่อมสำคัญที่มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงประกอบด้วยกระแสเชื่อมและความเร็วเดินแนวที่บ่งให้ทราบถึงความร้อนที่ให้แก่แนวเชื่อม (Heat input) [1, 9] หรือการให้เวลาและแรงดันเสียดสีที่ทำให้ความร้อนที่ให้แก่รอยต่อเกิดการเปลี่ยนแปลง [4, 6, 7] หรือการเปรียบเทียบกระบวนการเชื่อม [1] หรือการเชื่อมรองพื้นผิวรอยต่อ [8] หรือการให้ความร้อนอ่อนและหลังการเชื่อม [3, 8, 10] เป็นต้น ผลของการศึกษาอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมส่วนใหญ่พบว่าเป็นการศึกษาเพื่อรายงานความเค้นตกค้างภายในที่มีความแตกต่างระหว่างโลหะเชื่อม และพื้นที่ที่กระทบร้อนของโลหะฐานทั้งสองด้าน ซึ่งเป็นผลการทดลองสำคัญที่ทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อเปลี่ยนแปลงมักเกิดขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงความเค้นตกค้างในโลหะเชื่อมและพื้นที่ที่กระทบร้อนใกล้เคียง ค่าการให้ความร้อนที่สูงส่งผลทำให้ค่าความเค้นตกค้างที่เกิด [4, 5, 8] อย่างไรก็ตามค่าความเค้นเหล่านี้สามารถลดลงได้ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิการอบชุบหลังการเชื่อมและทำให้การแตกร้าและพังทลายของรอยต่อลดลงได้ [3] นอกจากนี้แล้วความต้านทานการกัดกร่อนท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดเมื่อรอยต่อได้รับความร้อนที่ให้แก่แนวเชื่อมที่แตกต่างกันนี้ยังส่งผลทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนลดลงได้ดังเห็นได้ในรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และโมเนล 400 การเลือกลดเชื่อมที่มีปริมาณโครเมียมสูงสามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนและความแข็งแรงดึงของรอยต่อได้ [11]

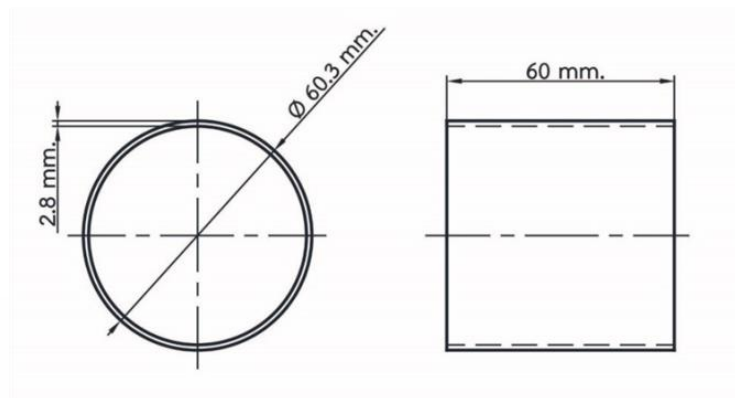
ข้อมูลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเชื่อมท่อรอยชนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และ AISI316 มีการรายงานค่อนข้างจำกัด อย่างไรก็ตามในการปฏิบัติงานในอุตสาหกรรมแปรรูปผลไม้ได้มีการใช้งานแล้วแต่ขาดการศึกษาและพัฒนาเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีความแข็งแรงและความต้านทานการกัดกร่อนสูง รอยต่อที่ได้สามารถใช้งานได้ในระยะเวลานานสั้น ก่อให้เกิดกัดกร่อน และเกิดการพังทลายของรอยต่อขึ้นได้ ด้วยเหตุนี้ โครงการวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาสมบัติของรอยต่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316 ให้มีค่าสมบัติทางกลสูงสุด โดยการศึกษาตัวแปรการเชื่อมสำคัญ คือ รูปแบบลดเชื่อมต่างๆ ความแข็งแรงดึง ความแข็ง และโครงสร้างโลหะวิทยาของรอยต่อเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316 ที่ได้สามารถส่งผลทำให้อายุการใช้งานและสมบัติของรอยต่อเพิ่มขึ้น และส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มผลผลิตของอุตสาหกรรมอาหารของประเทศได้

## 2. วิธีดำเนินการทดลอง

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง (wt%)

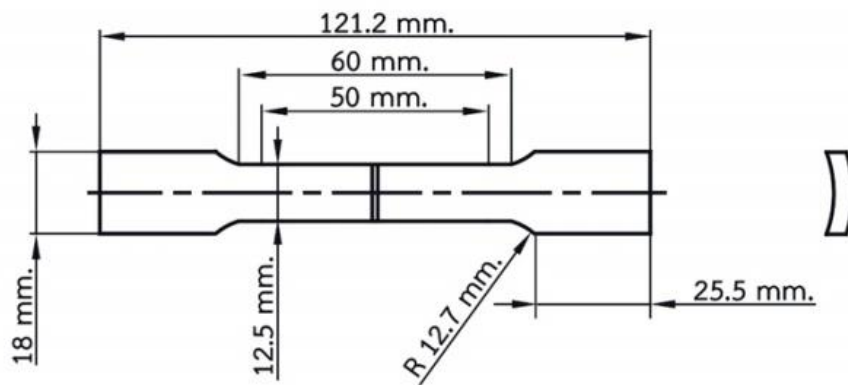
ธาตุ	SUS304L	SUS316	ER309LSi	ER316LSi	ER316L
C	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01
Cr	18.00	17.50	23.00	18.50	18.75
Ni	8.10	10.00	12.00	11.50	12.25
Mo	0.00	2.50	0.60	2.50	2.50
Mn	1.90	1.80	1.00	1.70	1.80
Si	0.60	0.70	0.65	0.90	0.34
P	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01
S	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01

วัสดุในการทดลอง คือเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก AISI304L และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก AISI316 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 60.3 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตร หนา 2.8 มิลลิเมตรซึ่งมีรูปร่างดังรูปที่ 1 และส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 ท่อเหล็กกล้าถูกทำการเชื่อม GTAW แบบจุดที่ 90° 180° 270° และ 360° ของชิ้นงานที่แนวรอยต่อของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด ความยาวรวมของรอยต่อเคมีค่าเท่ากับ 120 มิลลิเมตร ก่อนทำการยึดท่อเข้าอุปกรณ์ช่วยในการเชื่อมที่สามารถหมุนรอบตัวเองด้วยความเร็วที่กำหนด

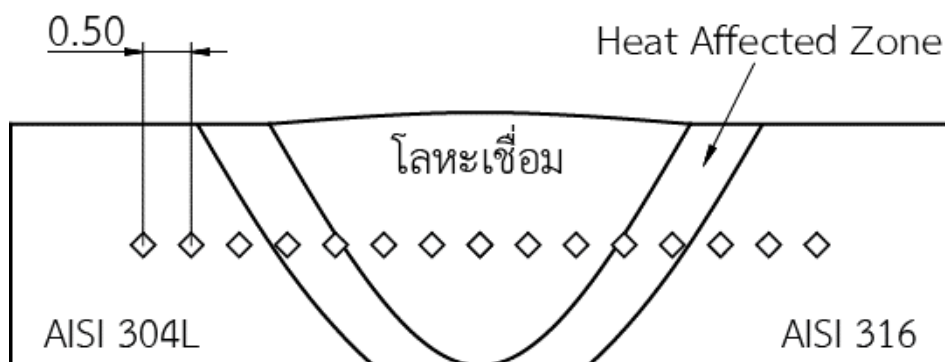


รูปที่ 1 ขนาดชิ้นงานก่อนทำการทดลองของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และ AISI316

กระบวนการเชื่อมรอยต่อชน คือ การเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม โดยมีตัวแปรการเชื่อม ประกอบด้วย ลวดเชื่อม AWS-ER309LSi, AWS-ER316L และ AWS-ER316LSi ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 1 อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 99.99% เท่ากับ 10 l/min อัตราการป้อนลวดเชื่อมเป็น 200 mm/min ความเร็วรอบในการหมุนของชิ้นงาน 150 mm/min กระแสเชื่อม 80-160 A



รูปที่ 2 ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส

การทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-A370 นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยตัวแปรการเชื่อมที่กำหนดนำมาทำการเตรียมชิ้นงานตามขนาดและรูปร่างดังรูปที่ 2 เพื่อใช้สำหรับการทดสอบแรงดึงที่อัตราการเกิดความเครียด 1 mm/min

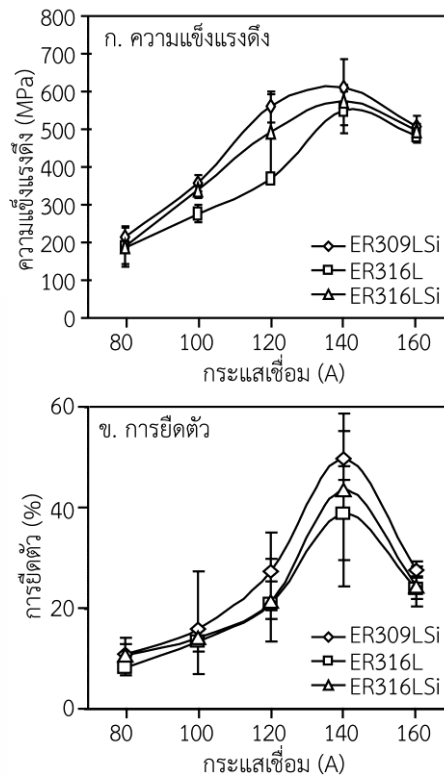
ขั้นทดสอบการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาครอยต่อดำเนินการโดยการตัดแนวเชื่อมตั้งฉากกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม พื้นผิวที่ได้ถูกขัดหยาบด้วยกระดาษ ขัดมันด้วยผงเพชร และกัดรอย (Etching) ด้วยสารละลายที่กำหนดก่อนตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

การทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ส ตามมาตรฐาน ASTM E92 ถูกใช้ในการตรวจสอบความแข็งบนพื้นผิวชิ้นงานการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยมีตำแหน่งการทดสอบดังรูปที่ 4 กำหนดใช้แรงกด 100 กรัมแรง เวลากดแช่ 10 วินาที และระยะห่างจุด 0.5 มิลลิเมตร

### 3. ผลการทดลองและการวิจารณ์

รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึง การยึดตัว และกระเชื่อมของรอยต่อแบบไม่มีร่องบากที่เชื่อมด้วยลวด ER309LSi ค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเปลี่ยนแปลงจาก 80-140 A ซึ่งเป็นสูงสุด 607 MPa เมื่อเทียบกับกระแสอื่นๆ และลดต่ำลงเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันค่าการยึดตัวมีค่าแนวโน้มคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงดึง กล่าวคือการยึดตัวของรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นและแสดงค่าสูงสุด 45% ที่กระแสเชื่อม 140 A

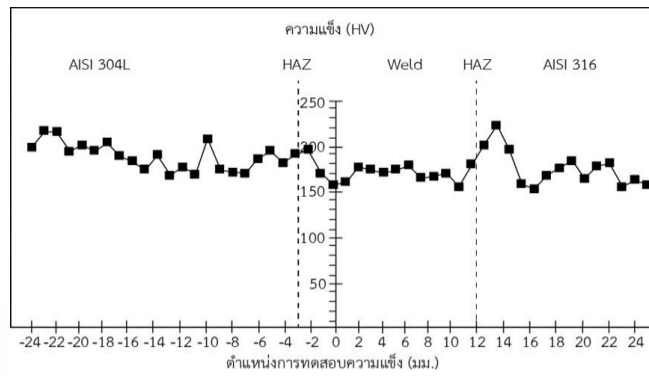




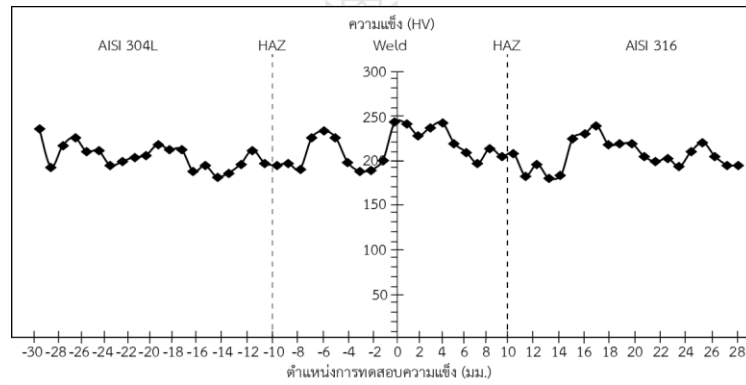
รูปที่ 4 ค่าความแข็งแรงดึงและการยืดตัวของรอยต่อชนที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมต่างชนิด

เมื่อเปรียบเทียบรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER309LSi รอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER316L และ ER316LSi ค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อและการยืดตัวของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้งสองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นและแสดงค่าความแข็งแรงดึงและการยืดตัวสูงสุดที่กระแสเชื่อม 140 A ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER316L และ ER316LSi มีค่า 551 และ 596 MPa ซึ่งมีค่าต่ำกว่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER309L ประมาณ 5 และ 3% ตามลำดับ ขณะที่ค่าการยืดตัวของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER316L และ ER316LSi มีค่า 551 และ 596 MPa ซึ่งต่ำกว่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER309L ประมาณ 15 และ 5% ตามลำดับ

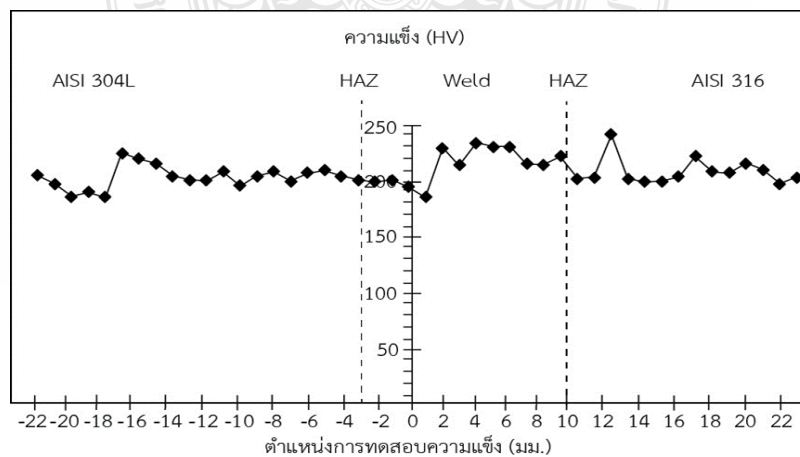
เมื่อพิจารณาตำแหน่งการพังทลาย (Fracture path: FP) ของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของทุกสภาวะการเชื่อม พบว่าการพังทลายของชิ้นทดสอบที่แสดงค่าความแข็งแรงดึงที่เชื่อมด้วยกระแส 100-160 A ของลวดเชื่อมทั้ง 3 ชนิด เกิดขึ้นนอกพื้นที่โลหะเชื่อมที่บริเวณโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 และแสดงการพังทลายที่กึ่งกลางแนวเชื่อม (Weld metal: WM) เมื่อกระแสเชื่อมมีค่า 80 A ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าลวดเชื่อมทั้ง 3 ชนิดนั้นสามารถทำให้เกิดแนวเชื่อมที่มีคุณภาพสูงและปราศจากจุดบกพร่องภายในเนื้อโลหะเชื่อม ความสมบูรณ์ของโลหะเชื่อมที่ได้ส่งผลทำให้โลหะเชื่อมมีความแข็งแรงสูงกว่าโลหะฐาน และเมื่อทำการทดสอบความแข็งแรงดึงจึงทำให้เกิดการพังทลายที่บริเวณโลหะฐาน



รูปที่ 5 ความแข็งชิ้นงานเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 140 A - ER309LSi

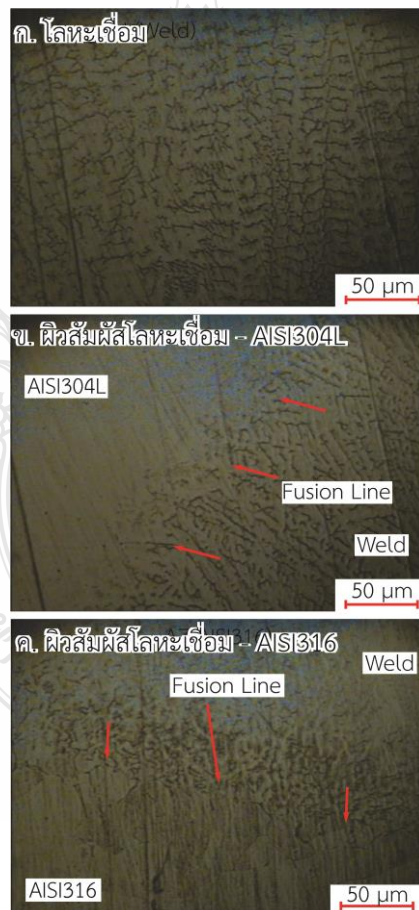


รูปที่ 6 ความแข็งชิ้นงานเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 140 A - ER316L



รูปที่ 7 ความแข็งชิ้นงานเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 140 A - ER316LSi

การตรวจสอบตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงสามารถทำได้โดยการวัดความแข็งของชิ้นทดสอบด้วยวิธีการดังรูปที่ 2 และได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5-7 เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความแข็งพบว่า โลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L มีค่าความแข็งสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 เล็กน้อย ค่าความแข็งของโลหะฐานมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อตำแหน่งการวัดค่าความแข็งเข้าสู่พื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) การเพิ่มค่าความแข็งในพื้นที่กระทบร้อนด้านโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 มีค่าสูงกว่าพื้นที่กระทบร้อนด้านโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L การเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งด้านพื้นที่กระทบร้อนด้านโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 นั้นเป็นตำแหน่งที่ทำให้เกิดการพังทลายของชิ้นทดสอบ และมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ลวดเชื่อม ER309LSi ER316LSi และ ER316L ในการเชื่อมรอยต่อตามลำดับ



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดด้วยลวดเชื่อม ER309LSi ที่ กระแสเชื่อม 140 A

รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER309LSi และกระแสเชื่อม 140 A ซึ่งเป็นสภาวะการเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงดิ่งสูงสุดในการทดลองนี้ ที่โลหะเชื่อมของรอยต่อดังรูปที่ 8 ก. โครงสร้างเกิดการก่อตัวของเดนไดรต์ของโลหะเชื่อมที่ประกอบด้วยส่วนผสมของลวดเชื่อมและโลหะฐานทั้งสอง จุดบกพร่องต่างๆ ที่มักเกิดขึ้นในการเชื่อมรอยต่อโลหะต่างชนิด เช่น รูพรุน (Porosity) โพรง (Blow hole) การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Lack of fusion) ไม่สามารถตรวจพบได้ในโลหะเชื่อมนี้ และเป็นสาเหตุทำให้รอยต่อแสดงค่าความแข็งแรงสูงกว่าโลหะฐาน การเรียงตัวของโครงสร้างเดนไดรต์เกิดการเรียงตัวไปสู่พื้นผิวด้านบนที่กึ่งกลางแนวเชื่อมและมีแนวโน้มเอียงไปทางโลหะฐานเมื่อเข้าใกล้โลหะฐานทั้งสอง

เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L ดังรูปที่ 8 ข. ผิวสัมผัสของรอยต่อบริเวณเส้นหลอมละลาย (Fusion line) แสดงการละลายเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ ไม่เกิดจุดบกพร่องใดๆ เกิดขึ้นทั้งด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 ดังรูปที่ 8 ค. ผิวสัมผัสที่มีการหลอมละลายเข้ากันได้นี้แตกต่างบริเวณพื้นที่กระทบร้อนจากผิวสัมผัสของการเชื่อมรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER-309 และกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas metal arc metal: GMAW) ที่บริเวณผิวสัมผัสของรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าไร้สนิมดังกล่าวแสดงความไม่เข้ากันของส่วนผสมทางเคมีของโลหะทั้งสองชนิดและเป็นสาเหตุหลักทำให้เป็นจุดกำเนิดการพังทลายของรอยต่อเมื่อถูกนำไปใช้งาน [12]

#### 4. สรุปผลการทดลอง

4.1 ความแข็งแรงดิ่งของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 140 A และลวดเชื่อม ER309LSi มีค่าสูงกว่ารอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER316LSi และ ER316L กระแส 140 A ให้ค่าความแข็งแรงดิ่งสูงสุด 607 MPa

4.2 ตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อชิ้นงานเชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER309LSi ที่กระแส 140 A พบได้ที่ด้านนอกแนวเชื่อมบริเวณโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316

4.3 ความแข็งแรงเฉลี่ยของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER316LSi ให้ค่าความแข็งแรงมากกว่าลวดเชื่อม ER316L และ ER309LSi ที่กระแส 140 A และความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มกระแสเชื่อมมากกว่า 140A

## เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Akbari and I. Sattari-Far, Effect of the welding heat input on residual stresses in butt-welds of dissimilar pipe joints, *Inter. J. of Press. Ves. and Pip.*, 86, 769-776, 2009.
- [2] K. Bettahar, M. Bouabdallah, R. Badji, M. Gaceb, C. Kahloun, and B. Bacroix, Microstructure and mechanical behavior in dissimilar 13Cr/2205 stainless steel welded pipes, *Mat.& Des.*, 85, 221-229, 2015.
- [3] J. Brózda and M. Zeman, Wrong heat treatment of martensitic steel welded tubes caused major cracking during assembly of resuperheaters in a fossil fuel power plant, *Eng. Fail. Anal.*, 10, 569-579, 2003.
- [4] C. A. Della Rovere, C. R. Ribeiro, R. Silva, N. G. Alcântara, and S. E. Kuri, Local mechanical properties of radial friction welded supermartensitic stainless steel pipes, *Mat.& Des.*, 56, 423-427, 2014.
- [5] C. A. Della Rovere, J. M. Aquino, C. R. Ribeiro, R. Silva, N. G. Alcântara, and S. E. Kuri, Corrosion behavior of radial friction welded supermartensitic stainless steel pipes, *Mat.& Des.*, 65, 318-327, 2015.
- [6] M. Vinoth Kumar and V. Balasubramanian, Microstructure and tensile properties of friction welded SUS 304HCu austenitic stainless steel tubes, *Inter. J. of Pres. Ves. and Pip.*, 113, 25-31, 2014.
- [7] M. Kimura, A. Ichihara, M. Kusaka, and K. Kaizu, Joint properties and their improvement of AISI 310S austenitic stainless steel thin walled circular pipe friction welded joint, *Mat.& Des.*, 38, 38-46, 2012.
- [8] A. Joseph, S. K. Rai, T. Jayakumar, and N. Murugan, Evaluation of residual stresses in dissimilar weld joints, *Inter. J. of Pres. Ves. and Pip.*, 82, 700-705, 2005.
- [9] D. Deng, S. Kiyoshima, K. Ogawa, N. Yanagida, and K. Saito, Predicting welding residual stresses in a dissimilar metal girth welded pipe using 3D finite element model with a simplified heat source, *Nuclear Eng. and Des.*, 241, 46-54, 2011.
- [10] S. D. Norris, The degradation of dissimilar explosively welded joints due to thermal ageing, *Inter. J. of Pres. Ves. and Pip.* 75, 735-748, 1998.
- [11] K. Devendranath Ramkumar, N. Arivazhagan, and S. Narayanan, Effect of filler materials on the performance of GTAW AISI 304 and Monel 400, *Mat.& Des.*, vol. 40, pp. 70-79, 2012.
- [12] P. Poonayom, S. Chantasri, J. Kaewwichit, W. Roybang, and K. Kimapong, Microstructure and Tensile Properties of SS400 Carbon Steel and SUS430 Stainless Steel Butt Joint by Gas Metal Arc Welding, *Inter. J. of Adv. Cult. Tech.*, vol. 3, no. 1, pp. 61-67, 2015.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - ชื่อสกุล นายชนเนรินทร์ รักสัตย์  
วัน เดือน ปี เกิด 30 มกราคม 2529  
ที่อยู่ปัจจุบัน 6/6 หมู่ 2 ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง  
จังหวัดปทุมธานี 12120  
ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปี พ.ศ. 2555  
เบอร์โทรศัพท์ 085-215-6335  
อีเมลล์ chanerin.r@en.rmutt.ac.th

