

อิทธิพลกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สคลุมต่อสมบัติรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้
สนิม AISI304L และ ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316

EFFECT OF GAS TUNGSTEN ARC WELDING CURRENT ON AISI304L
AND AISI316 STAINLESS STEEL TUBE JOINT PROPERTIES



นฤเบศร เพียรชัยกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อิทธิพลกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สคลุมต่อสมบัติรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้
สนิม AISI304L และ ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316

นฤเบศร เพียรชัยกุล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อิทธิพลกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมต่อสมบัติรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้
สนิม AISI304L และ ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316

Effect of Gas Tungsten Arc Welding Current on AISI304L and
AISI316 Stainless Steel Tube Joint Properties

ชื่อ - นามสกุล

นายณัฐเบศร เพียรชัยกุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.

ปีการศึกษา

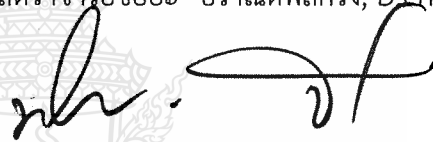
2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทร์มณี, Ph.D.)



กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 4 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2563

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สคลุมต่อสมบัติรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และ ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316
ชื่อ-นามสกุล	นายณฤเบศร เพ็ญชัยกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

โครงสร้างระบบการส่งถ่ายและบรรจุน้ำผลไม้ ประกอบด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมหลายชนิด กล่าวคือในส่วนของถังบรรจุนั้นในปัจจุบันใช้วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคเกรด AISI304L เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการขึ้นรูป(Formability)สูง มีความต้านทานการกัดกร่อนดีเยี่ยม และมีราคาเหมาะสมในการใช้งาน ขณะเดียวกันในท่อส่งน้ำผลไม้ปัจจุบันได้ถูกกำหนดให้ใช้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคเกรด AISI316 ซึ่งเป็นเกรดอาหาร การนำเอาเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองเกรดมาใช้งานนี้ส่งผลทำให้เกิดโครงสร้างโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคเกรด AISI304L และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคเกรด AISI316 ที่จุดต่อของการนำเอาน้ำผลไม้ออกจากถังพัก และเมื่อใช้ไป ในระยะเวลาหนึ่งจะทำให้บริเวณรอยเชื่อมเกิดการชำรุดเสียหายจึงต้องทำการเชื่อมซ่อม เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการซื้อชิ้นส่วนใหม่มาทดแทนและไม่ก่อให้เกิดขยะอุตสาหกรรม

ในการศึกษาทดลองครั้งนี้จะใช้วัสดุในการทดลอง คือ ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 เส้นผ่าศูนย์กลาง 60.3 มิลลิเมตร ความหนา 2.8 มิลลิเมตร ขนาดความยาว 60 มิลลิเมตร รอยต่อถูกทำการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมที่กระแส 90-165 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตร/นาที ชิ้นงานที่ถูกผ่านการเชื่อมถูกเตรียมด้วยวิธีทางกลเพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ ประกอบด้วยการทดสอบความแข็งแรงดึง การตรวจสอบความแข็ง และการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค

ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การเพิ่มขึ้นของความร้อนขาเข้าส่งผลต่อการเพิ่มการหลอมลึกของแนวเชื่อม เพิ่มพื้นที่การเกาะยึดของรอยต่อ และเพิ่มความแข็งแรงดึงของรอยต่อ เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของแนวการพังทลายของชิ้นส่วนทดสอบความแข็งแรงดึง การเพิ่มขึ้นนี้เนื่องจากการลดขนาดเกรนและช่องว่างระหว่างแขนเดนไดรท์ทุติยภูมิในโลหะเชื่อม ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดความแข็งแรง 832 เมกกะปาสคาล คือกระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตร/นาที ค่าความร้อนขาเข้าที่เพิ่มขึ้นทำให้โลหะเชื่อมสมบูรณ์เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: วัสดุต่างชนิด เหล็กกล้าไร้สนิม การเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สคลุม

Thesis Title Effect of Gas Tungsten Arc Welding Current on AISI304L and AISI316 Stainless Steel Tube Joint Properties
Name-Surname Narubeth Pianchaikul
Program Manufacturing Engineering
Thesis Advisor Assistant Professor Kittipong Kimapong, Ph.D.
Academic Year 2019

ABSTRACT

The structure of transferring and packing systems for fruit juice comprises many types of stainless steel. At present AISI 304L austenitic stainless steel is used for fruit juice tanks due to a greater formability, an excellent corrosion resistance and reasonable price while AISI 316 austenitic stainless steel which is food grade is designated for making juice pipes. Because of using two types of stainless steel, there is the difference of metallic structure between AISI 304L austenitic stainless steel and AISI 316 austenitic stainless steel at the connection point pumping fruit juice out of the storage tank, and later, the welded joint will be cracked. In order to reduce cost and industrial waste, it needs to be re-welded instead of buying new parts.

The materials used in this research were AISI 304L and AISI 316 stainless steel pipes with diameter of 60.3 mm, thickness of 2.8 mm, and length of 60 mm. The joints were welded by gas tungsten arc welding (GTAW) without a filler metal and using welding currents at 90-165 amperes and welding speed of 200 mm/min. The welded specimens were prepared by mechanical methods for the tensile strength test, hardness inspection, and macrostructure and microstructure inspection.

The experimental results were summarized as follows: an increase in heat input affected an increase in the deep penetration of the weld bead, an increase in bonded joint area, and increase in tensile strength of the joints. Considering the microstructure of fracture path of the tensile strength specimen, these increases were caused by decreasing grain size and the secondary dendrite arm spacing (SDAS). The optimum welding parameters for tensile strength of 832 MPa were the welding current of 135 amperes and the welding speed of 200 mm/min. The increase in heat input caused a more perfect weld metal.

Keywords: dissimilar materials, stainless steel, gas metal arc welding

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้จากการช่วยเหลือของผู้มีอุปการคุณที่ให้ข้อเสนอแนะให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์และให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำในการจัดทำให้งานสำเร็จตามวัตถุประสงค์ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้ห้องทดลองทางโลหะวิทยา ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความร่วมมือและอนุญาตให้ใช้อุปกรณ์การทดลองในการจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายขอขอบคุณ บิดา มารดา ครูบาอาจารย์ ญาติ และเพื่อนๆ ที่คอยเป็นกำลังใจ ประโยชน์ใดที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยในครั้งนี้ เป็นผลจากความกรุณาของบุคคลข้างต้น ผู้วิจัยรู้สึกขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

นฤเบศร เพ็ชรชัยกุล



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.....	15
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.1 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steels).....	17
2.2 การเชื่อม.....	26
2.3 การทดสอบสมบัติทางกลของแนวเชื่อม.....	33
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	51
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	54
3.1 วัสดุและอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	54
3.2 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการเชื่อม.....	57
3.3 การกำหนดตัวแปรการทดลอง.....	58
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	58
3.5 การทดสอบสมบัติของรอยเชื่อม.....	61
3.6 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและวิเคราะห์ปริมาณธาตุ.....	66
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	67
4.1 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316 และ AISI304L.....	67
4.2 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมซ้ำแนวที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316 และ AISI316.....	88
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	98
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	98
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	99

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	100
ภาคผนวก	106
ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	111
ประวัติผู้เขียน.....	128



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 รูปแบบของแท่งทั้งสแตน.....	28
ตารางที่ 2.2 แสดงขนาดกระแสน้ำเชื่อมและลวดเชื่อมที่สัมพันธ์กัน.....	29
ตารางที่ 2.3 สมบัติของแก๊สคลุมในการเชื่อมทิก.....	30
ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะของกระแสน้ำเชื่อมทิกแต่ละชนิด.....	31
ตารางที่ 2.5 Jeffries multipliers ที่ค่ากำลังขยายต่างๆ.....	46
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง.....	55
ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกลของวัสดุทดลอง.....	55
ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงตัวแปรในการทดลองเชื่อม.....	58



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 ส่วนของท่อส่งน้ำผลไม้ที่ต้องเชื่อมต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด.....	14
ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	17
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก.....	18
ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก.....	19
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก AISI304.....	20
ภาพที่ 2.5 แผนภาพเฟสเฟอร์ของโลหะเชื่อมในเหล็กกล้าไร้สนิม.....	21
ภาพที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดต่างๆในกลุ่มออสเทนนิติก.....	22
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก.....	23
ภาพที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดต่างๆ ในกลุ่มมาร์เทนซิติก.....	24
ภาพที่ 2.9 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์.....	25
ภาพที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดต่างๆในกลุ่มมาร์ดูเพล็กซ์.....	25
ภาพที่ 2.11 โครงสร้างเฟสตกผลึกภายในเหล็กกล้าไร้สนิมไร้สนิมแบบชุบแข็งโดยการตก ตะกอน.....	26
ภาพที่ 2.12 วงจรและอุปกรณ์การเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุม.....	27
ภาพที่ 2.13 พื้นฐานการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุม.....	27
ภาพที่ 2.14 ลักษณะและทิศทางการล้าทั้งสแตนเลสไฟ DC.....	29
ภาพที่ 2.15 ลักษณะและทิศทางการล้าทั้งสแตนเลสไฟ AC.....	30
ภาพที่ 2.16 กราฟความเค้น-ความเครียด.....	35
ภาพที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งต่อสมบัติด้านต่างๆ ของวัสดุและตัวแปรที่มีผลต่อ ความแข็งของโลหะ.....	36
ภาพที่ 2.18 ลักษณะรอยกัดของการทดสอบแบบวิกเกอร์.....	38
ภาพที่ 2.19 แสดงอุณหภูมิบริเวณผลกระทบร้อน (HAZ) และบริเวณต่างๆจากกึ่งกลางแนว เชื่อม.....	39
ภาพที่ 2.20 การกำหนดตำแหน่งการวัดรูปร่างของแนวเชื่อม.....	40
ภาพที่ 2.21 รูปแบบการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและมหภาคที่ผ่านกระบวนการเชื่อม.....	41
ภาพที่ 2.22 กล้องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	44
ภาพที่ 2.23 การสะท้อนแสงที่แตกต่างกันของบริเวณขอบเกรนและภายในเกรน.....	44
ภาพที่ 2.24 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI316.....	45
ภาพที่ 2.25 ตัวอย่างการสร้างเส้นรอบวง 3 เส้น เพื่อหาขนาดเกรนแบบ Circular intercept procedure	49
ภาพที่ 2.26 แบบจำลองการเติบโตของผลึก (DendriticGrowth).....	50
ภาพที่ 2.27 แสดงการเกิดของเกรนเดนไดรต์ที่กลายเป็นเกรนบนผนังแบบหล่อ.....	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.1 ขนาดของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316.....	54
ภาพที่ 3.2 เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการวิจัย.....	55
ภาพที่ 3.3 ลักษณะการจับยึดชิ้นงาน.....	56
ภาพที่ 3.4 ลวดเชื่อมทั้งสแตน.....	56
ภาพที่ 3.5 แก๊สอาร์กอน.....	57
ภาพที่ 3.6 ขนาดของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316.....	57
ภาพที่ 3.7 ชิ้นงานทดลองก่อนการเชื่อม.....	58
ภาพที่ 3.8 ลักษณะการเชื่อมยึดชิ้นงานทดสอบ.....	59
ภาพที่ 3.9 ลักษณะการจับยึดชิ้นงาน.....	59
ภาพที่ 3.10 ชิ้นงานหลังทำการเชื่อมครั้งที่ 1.....	60
ภาพที่ 3.11 ชิ้นงานก่อนการเชื่อมครั้งที่ 2.....	61
ภาพที่ 3.12 ชิ้นงานหลังการเชื่อมครั้งที่ 2.....	61
ภาพที่ 3.13 ขั้นตอนทดสอบความแข็งแรงดึง (หน่วย: มิลลิเมตร).....	62
ภาพที่ 3.14 การจับยึดชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง.....	62
ภาพที่ 3.15 การทดสอบความแข็งโดยใช้เครื่องทดสอบไมโครวิกเกอร์.....	63
ภาพที่ 3.16 เครื่องทดสอบความแข็ง (Micro Vickers hardness tester).....	63
ภาพที่ 3.17 การหล่อเรซินตัวประกอบการขัดชิ้นงาน.....	64
ภาพที่ 3.18 เครื่องขัดกระดาษทราย.....	65
ภาพที่ 3.19 เครื่องขัดผ้าสักหลาด.....	65
ภาพที่ 3.20 กล้องจุลทรรศน์แบบฉายแสง (Optical microscope).....	66
ภาพที่ 3.21 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด.....	66
ภาพที่ 4.1 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมที่มีผลต่อ ผิวหน้าของโลหะเชื่อมต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316 และ AISI304L.....	67
ภาพที่ 4.2 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมที่มีผลต่อ โครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316 และ AISI304L.....	69
ภาพที่ 4.3 การกำหนดตำแหน่งการวัดรูปร่างของโลหะเชื่อมในรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิม ต่างชนิด AISI304L/AISI316 (ค่า w_1 คือความกว้างโลหะเชื่อม ค่า h_1 คือการหลอม ลึก ค่า h_2 คือความนูนโลหะเชื่อม ค่า h_3 คือความนูนแนวราก ค่า h_4 คือความเว้า ของผิวหน้าโลหะเชื่อม.....	70
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมและความกว้างของโลหะเชื่อม.....	71
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมและระยะการหลอมลึกของโลหะเชื่อม.....	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.6 การทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่กระแสมเชื่อม 135 แอมแปร์.....	73
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมเชื่อมและความแข็ง.....	74
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมเชื่อม ความแข็งแรงดึง และอัตราการยืดตัวของรอยต่อ ชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316และAISI304L.....	74
ภาพที่ 4.9 อิทธิพลของกระแสมเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุมแบบไม่เต็มลวดเชื่อมต่อลักษณะการ ฉีกขาดของรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316และAISI304L.....	75
ภาพที่ 4.10 อิทธิพลของกระแสมเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุมแบบไม่เต็มลวดเชื่อมต่อพฤติกรรม การพังทลายของรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316 และ AISI304L.....	76
ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316และAISI304L (กำลังขยาย 200 เท่า).....	77
ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมของรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316 และAISI304L ที่กระแสมเชื่อม 135 แอมแปร์ (กำลังขยาย 200 เท่า)	78
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมเชื่อมและระยะห่างแกนเดนไดรท์ทุติยภูมิ.....	79
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมเชื่อม ความแข็ง และระยะห่างแกนเดนไดรท์ทุติยภูมิ	80
ภาพที่ 4.15 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงคุณภาพที่กระแสม 90 แอมแปร์.....	81
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมทางเคมีบริเวณโลหะเชื่อมที่กระแสม 90 แอมแปร์.....	82
ภาพที่ 4.17 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงคุณภาพที่กระแสม 135 แอมแปร์.....	83
ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมทางเคมีบริเวณโลหะเชื่อมที่กระแสม 135 แอมแปร์	84
ภาพที่ 4.19 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงคุณภาพที่กระแสม 165 แอมแปร์.....	85
ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมทางเคมีบริเวณโลหะเชื่อมที่กระแสม 165 แอมแปร์	86
ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมทางเคมีบริเวณโลหะเชื่อมที่ความแข็งแรงดึงสูงสุด กับต่ำสุด.....	87
ภาพที่ 4.22 อิทธิพลของกระแสมเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมขี้แนวแบบไม่เต็มลวดเชื่อมที่มีผล ต่อผิวหน้าของโลหะเชื่อมที่ชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดAISI316 และ AISI304L.....	88
ภาพที่ 4.23 โครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมขี้แนวรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316และAISI304L ที่กระแสมเชื่อม 135 แอมแปร์.....	89

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.24 การทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเชื่อมซ้ำโดยมีโลหะฐาน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 เป็นโลหะที่ติดกับรอยต่อชนเก่า.....	90
ภาพที่ 4.25 การทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเชื่อมซ้ำโดยมีโลหะฐาน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L เป็นโลหะที่ติดกับรอยต่อชนเก่า.....	91
ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการเชื่อมซ้ำแนว ความแข็งแรงดึง และอัตราการยืดตัวของ รอยต่อชนท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316และAISI304.....	91
ภาพที่ 4.27 ลักษณะการพังทลายของการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุมซ้ำแนวแบบไม่เต็มลวด เชื่อม.....	92
ภาพที่ 4.28 อิทธิพลของกระแสเชื่อมต่อพฤติกรรมการฉีกขาดของรอยต่อชนท่อเหล็กกล้าไร้ สนิมต่างชนิด AISI316และAISI304L ของการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุมซ้ำแนว แบบไม่เต็มลวดเชื่อม.....	92
ภาพที่ 4.29 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมซ้ำแนวของรอยต่อชนท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่าง ชนิดAISI304LและAISI316 ที่กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์.....	94
ภาพที่ 4.30 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมซ้ำแนวของรอยต่อชนท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304LและAISI316 ที่กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์.....	95
ภาพที่ 4.31 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงคุณภาพที่กระแส 135 แอมแปร์ของโลหะเชื่อม ซ้ำแนว โดยมีโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L เป็นโลหะที่ติดกับรอยต่อชนเก่า	96
ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมทางเคมีเชิงปริมาณบริเวณโลหะเชื่อมเก่าและใหม่ โดยมีโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L เป็นโลหะที่ติดกับรอยต่อชนเก่า	96
ภาพที่ 4.33 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงคุณภาพที่กระแส 135 แอมแปร์ของโลหะเชื่อม ซ้ำแนวโดยมีโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 เป็นโลหะที่ติดกับรอยต่อชนเก่า	97
ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมทางเคมีเชิงปริมาณบริเวณโลหะเชื่อมเก่าและใหม่ โดยมีโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L เป็นโลหะที่ติดกับรอยต่อชนเก่า	97

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Ar

Argon

Cr

Chromium

HV

Vickers Hardness

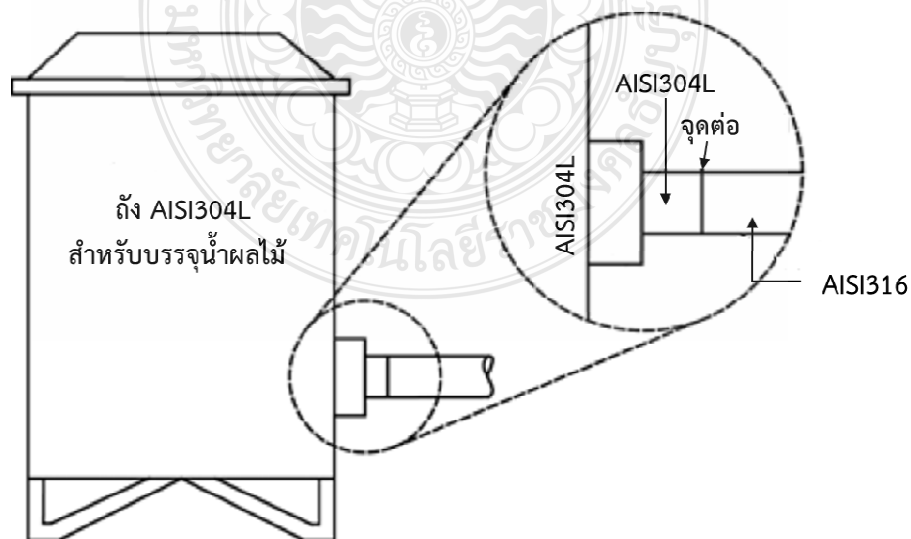


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

อุตสาหกรรมน้ำผลไม้เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่สำคัญของประเทศ สามารถสร้างรายได้จากการส่งออกปีละหลายพันล้านบาท ขณะที่น้ำผลไม้ภายในประเทศ มีมูลค่าประมาณ 1.3 หมื่นล้านบาท มีอัตราการเติบโตเฉลี่ยร้อยละ 9 ต่อปี ซึ่งผลมาจากพฤติกรรมผู้บริโภคที่หันมาดูแลสุขภาพมากยิ่งขึ้น โดยมุ่งเน้นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณประโยชน์ต่อร่างกาย และน้ำผลไม้เป็นอีกหนึ่งที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างสูง [1] เนื่องจากอุตสาหกรรมอาหารที่ผลิตเพื่อการส่งออกให้ผู้บริโภคได้รับประทาน การเลือกวัสดุและอุปกรณ์ในการผลิตน้ำผลไม้จำเป็นต้องผลิตภายใต้หลักเกณฑ์ข้อกำหนดขั้นพื้นฐานที่จำเป็นในการผลิตและควบคุม (Good Manufacturing Practice: GMP) [2] ในโครงสร้างระบบการส่งถ่ายและบรรจุน้ำผลไม้ ประกอบด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมหลายชนิด กล่าวคือในส่วนของถังบรรจุนั้นในปัจจุบันใช้วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคเกรด AISI304 เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) สูง มีความต้านทานการกัดกร่อนดีเยี่ยม และมีราคาเหมาะสมในการใช้งาน ขณะเดียวกันในท่อส่งน้ำผลไม้ปัจจุบันได้ถูกกำหนดให้ใช้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคเกรด AISI316 ซึ่งเป็นเกรดอาหาร [3] การนำเอาเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองเกรดมาใช้งานนี้ส่งผลทำให้เกิดโครงสร้างโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคเกรด AISI304L และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคเกรด AISI316 ที่จุดต่อของการนำเอาน้ำผลไม้ออกจากถังพัก [4] และเมื่อใช้ไปในระยะเวลาหนึ่งจะทำให้บริเวณรอยเชื่อมเกิดการชำรุดเสียหายจึงต้องทำการเชื่อมซ่อม เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการซื้อชิ้นส่วนใหม่ มาทดแทนและไม่ก่อให้เกิดขยะอุตสาหกรรม



รูปที่ 1.1 ส่วนของท่อส่งน้ำผลไม้ที่ต้องเชื่อมต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด

การเชื่อมซ่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนติคต่างชนิดระหว่าง AISI304L และ AISI316 นั้น เป็นสิ่งท้าทายและยากลำบากในการปฏิบัติการ เนื่องจากเหล็กกล้าทั้งสองชนิดนี้มีสมบัติทางกล เคมี และกายภาพที่แตกต่างกัน ความยากลำบากในการควบคุมตัวแปรการเชื่อมเพื่อทำให้เกิดการอาร์กคงที่ บริเวณรอยต่อส่งผลทำให้เกิดรอยเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ค่อนข้างยาก เมื่อทำการเชื่อมรอยต่อแล้วมักทำให้เกิดจุดบกพร่องต่างๆ ทำให้คุณสมบัติทางกล และทางกายภาพของเหล็กบริเวณรอยเชื่อมลดลง โดยเฉพาะจุดบกพร่องที่เกิดการเปลี่ยนรูปของคาร์บอนเมื่อได้รับความร้อน (Weld Decay) และทำให้เกิดการลดความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเป็นจุดๆ สุดท้ายเมื่อนำไปใช้งานแล้วส่งผลทำให้เกิดการรั่วซึมบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) รอบๆแนวเชื่อมขึ้น [5] การเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสแก๊สคลุม (Gas tungsten arc welding:GTAW)หรือกระบวนการเชื่อมทิก (Tungsten inert gas:TIG) จึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีบทบาทในการการเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากการเชื่อมทิกนั้นข้อดี คือ ไม่ต้องใช้ปลั๊กซ์ ไม่มีสะเก็ดเชื่อม (Spatter) งานบิดตัวน้อย และสะดวกในการปฏิบัติงานในการเชื่อมโลหะ [6]

ด้วยเหตุผู้ดำเนินการนี้จึงมีแนวความคิดที่จะทำการศึกษาตัวแปรการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสแก๊สคลุมที่มีผลต่อสมบัติรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และ AISI316 ที่สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเชื่อมท่อในอุตสาหกรรมการผลิตต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 ศึกษาตัวแปรการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสแก๊สคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และ AISI316

1.2.2 ศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และ AISI316

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ชิ้นงานเชื่อมทดลองท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และ AISI 316

1.3.2 การเชื่อมชิ้นงานทดลองใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสแก๊สคลุมหรือกระบวนการเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas: TIG)

1.3.3 การเชื่อมเดินแนวรอบท่อโดยหัวเชื่อมถูกยึดอยู่กับที่ และท่อจะหมุนตามเส้นรอบวงจนสิ้นสุดที่จุดเริ่มต้น

1.3.4 กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 90,105,120,135,150และ165 A

1.3.5 ความเร็วการเดินแนวเชื่อม 200 mm/min

1.3.6 ศึกษาสมบัติของรอยต่อหลังจากการเชื่อม ประกอบด้วยการทดสอบแรงดึง และการทดสอบความแข็ง

1.3.7 ศึกษาสมบัติของรอยต่อหลังจากการเชื่อม โดยการทดสอบโครงสร้างโลหะวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อคุณสมบัติของการเชื่อมเชื่อมรอยต่อชนเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และ AISI316

1.4.2 ผลการทดลองที่ได้จะเป็นหนึ่งทางเลือกในการใช้เป็นข้อมูลพิจารณาในการซ่อมแซมและยืดอายุรอยต่อชนเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และ AISI316 ในระบบส่งถ่ายน้ำผลไม้

1.4.3 เพื่อทราบถึงโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชื่อม

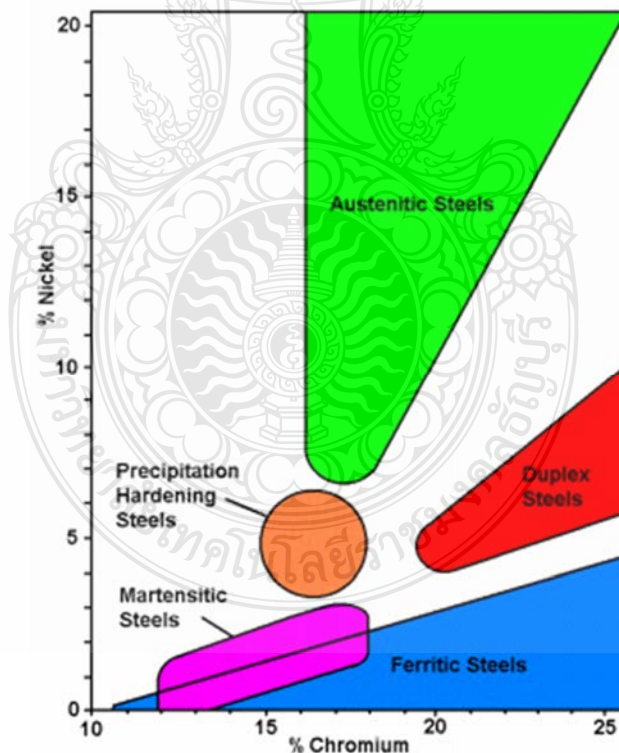
1.4.4 การเพิ่มศักยภาพการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการเชื่อมเชื่อมรอยต่อชนเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304L และ AISI316



บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

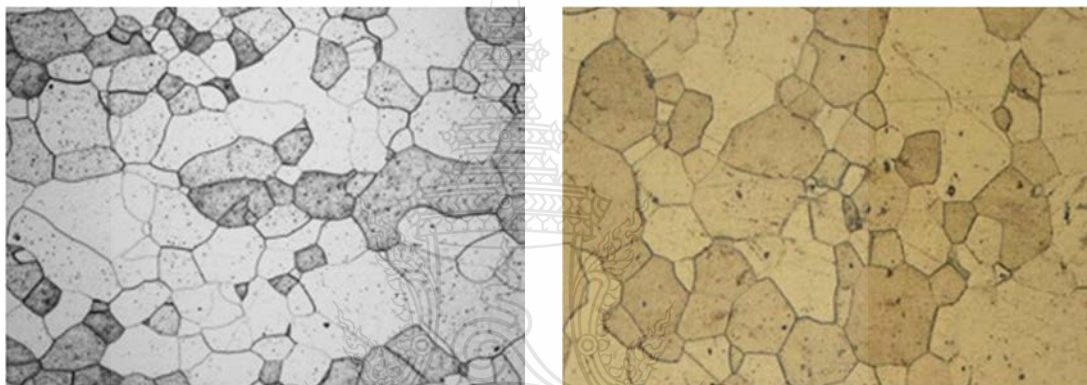
2.1 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steels) [7]

เหล็กกล้าไร้สนิมมีสมบัติทนต่อการเกิดสนิมเนื่องมาจากการเติมธาตุโครเมียม (Chromium) ลงไประหว่างกระบวนการหลอมเหล็กในปริมาณที่เหมาะสม (ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก) โครเมียมที่เติมลงไปจะทำให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}_x\text{O}_y(\text{OH})_z$) ปกคลุมผิวเหล็กไว้ทำให้เนื้อเหล็กไม่สามารถทำปฏิกิริยากับอากาศเกิดเป็นสนิมได้ เหล็กกล้าไร้สนิมจะเกี่ยวข้องกับการใช้งานเพื่อทนต่อการกัดกร่อน (corrosion resistance) เป็นสำคัญแต่การใช้งานเพื่อทนความร้อนซึ่งมีความสำคัญไม่แพ้กันกลับไม่ค่อยถูกกล่าวถึงมากนัก เหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับงานทนความร้อนมีพื้นฐานและลักษณะที่ใกล้เคียงกับเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับงานทนการกัดกร่อนแต่มีความแตกต่างอย่างมากในการนำไปใช้งาน เหล็กกล้าไร้สนิมแบ่งออกเป็น 5 ประเภทหลัก [7] (ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของชนิดเหล็กกล้าไร้สนิม) ตามลักษณะของโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ได้แก่



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของเหล็กกล้าไร้สนิม [8]

2.1.1 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic Stainless Steel) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กกล้าทั่วไปโดยกระจายตัวอยู่เป็นหลัก [7] และคาร์ไบด์ชนิดต่างๆกระจายตัวรวมอยู่ด้วย โดยคาร์ไบด์จะอยู่ในรูปของ เฟสซิกม่า (Sigma phase) เฟสเลฟส์ (Laves-phase) และเฟสไซ (Chi phase) [9] ดังแสดงในรูปที่ 2.2 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก โดยทั่วไปปริมาณคาร์บอนมีน้อยกว่า 0.2% [10] และมีปริมาณโครเมียมระหว่าง 12-27 % ขึ้นอยู่กับแต่ละเกรดและความต้านทานต่อการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุโครเมียมเป็นสำคัญ [7] โดยเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ BCC (Body-centered cubic) ทุกช่วงอุณหภูมิ [11] เนื่องจากไม่มีสมบัติในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก (Non-allotropic property) [12] ดังนั้นจึงไม่สามารถเพิ่มความแข็งได้ด้วยกระบวนการอบชุบทางความร้อน [13] แต่สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยกระบวนการการขึ้นรูปเย็น [10]

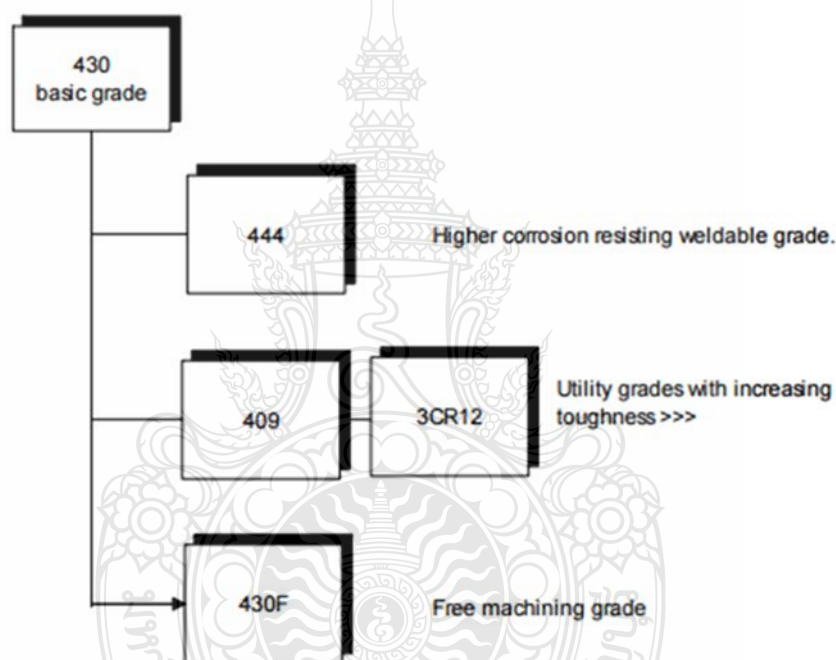


รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก (ก) AISI430 [14] (ข) AISI443 CT [15]

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีคุณสมบัติที่แม่เหล็กสามารถดูดติดได้ มีความแข็งแรง (Toughness) ปานกลาง ความยืดตัว (Ductility) ปานกลาง ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ปานกลาง การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion) ปานกลาง ความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion resistance) ปานกลาง [10-16] ความสามารถในการเชื่อม (Weldability) ปานกลาง โดยการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติกนี้เหมือนกับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน แต่มีสิ่งที่จะต้องควรระวังอยู่หลายประการ ได้แก่ การเติบโตของเกรนบริเวณผลกระทบร้อน (Heat affected zone:HAZ) [17] ทำให้เกรนบริเวณนี้มีความหยาบมาก ซึ่งส่งผลโดยตรงให้ความสามารถในการยืดตัว (Ductility) ความแข็งแรง (Toughness) ลดต่ำลง [18] และการเกิดคาร์ไบด์ทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งและเปราะ ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติกจึงควรถือปฏิบัติ โดยการให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) ขึ้นงานที่อุณหภูมิ 100-120 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการแตกเย็น (Cold cracking) และต้องควบคุมความร้อนให้กับชิ้นงาน (Heat input) น้อยที่สุดหรือไม่ควรจะมีชิ้นงานมากเกินไป ในการปรับปรุงคาร์ไบด์ที่เกิดจากการเชื่อม ทำได้โดยการให้ความร้อนหลังการเชื่อม (Post weld-heat treatment:PWHT) ที่อุณหภูมิ 750-850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30-60 นาที เป็นการช่วยลดความ

เค้นตักข้างภายในแนวเชื่อม ปรับปรุงคุณสมบัติการยืดตัว (Ductility) และความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion resistance) บริเวณผลกระทบร้อน (HAZ) ด้วย [17-18]

ลักษณะการการนำเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติกไปใช้งาน ได้แก่ ชิ้นส่วนท่อไอเสีย เครื่องยนต์ ท่อพักเสียง ถังน้ำ แม่พิมพ์ผลิตแก้ว ท่อเผาไหม้ เครื่องครัว และอ่างล้างหน้า ฯลฯ [10-19] โดยเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้สามารถแบ่งเกรดแต่ละเกรดมีความสัมพันธ์กัน [8] (ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก) ซึ่งแต่ละเกรดมีลักษณะใช้งานที่ต่างกันได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิมใช้เพื่องานตกแต่ง ได้แก่เกรด 409 409L 430 2B 430BA 430 No.4 430 No.8 430 HL 430 VIB3S และเหล็กกล้าไร้สนิมทนต่อการสึกกร่อน 439 441 443CT (JFE) 443 NSSC180 446 [20]



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก [8]

2.1.2 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel)

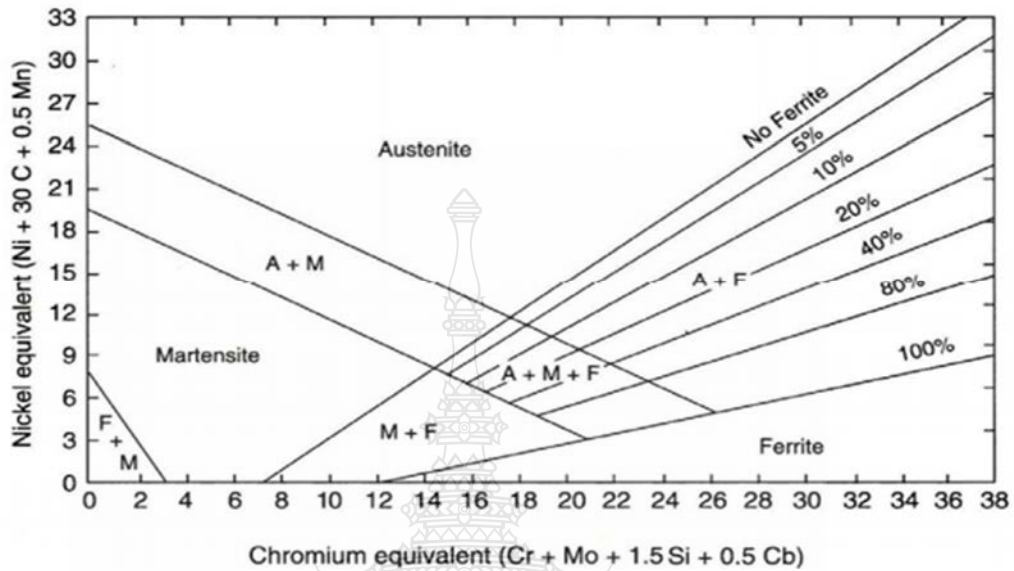
เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกเป็นกลุ่มที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ธาตุ निकิลที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ช่วยให้ออสเทนไนต์มีความเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้น [10] หากปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 0.03% คาร์ไบต์ไม่สามารถก่อตัวขึ้นได้ ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด [21] ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ที่แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC (Face-Centered Cubic) [21] นอกจากธาตุนิกิลจะเป็นธาตุสำคัญที่สุดที่ทำให้เฟสของออสเทนไนต์มีความเสถียรแล้ว ธาตุคาร์บอนและธาตุนิโตรเจนก็นิยมใช้เป็นธาตุผสม เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางเคมี โดยธาตุทั้งสองสามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ในโครงสร้างผลึกแบบ FCC [22]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก AISI304 [23]

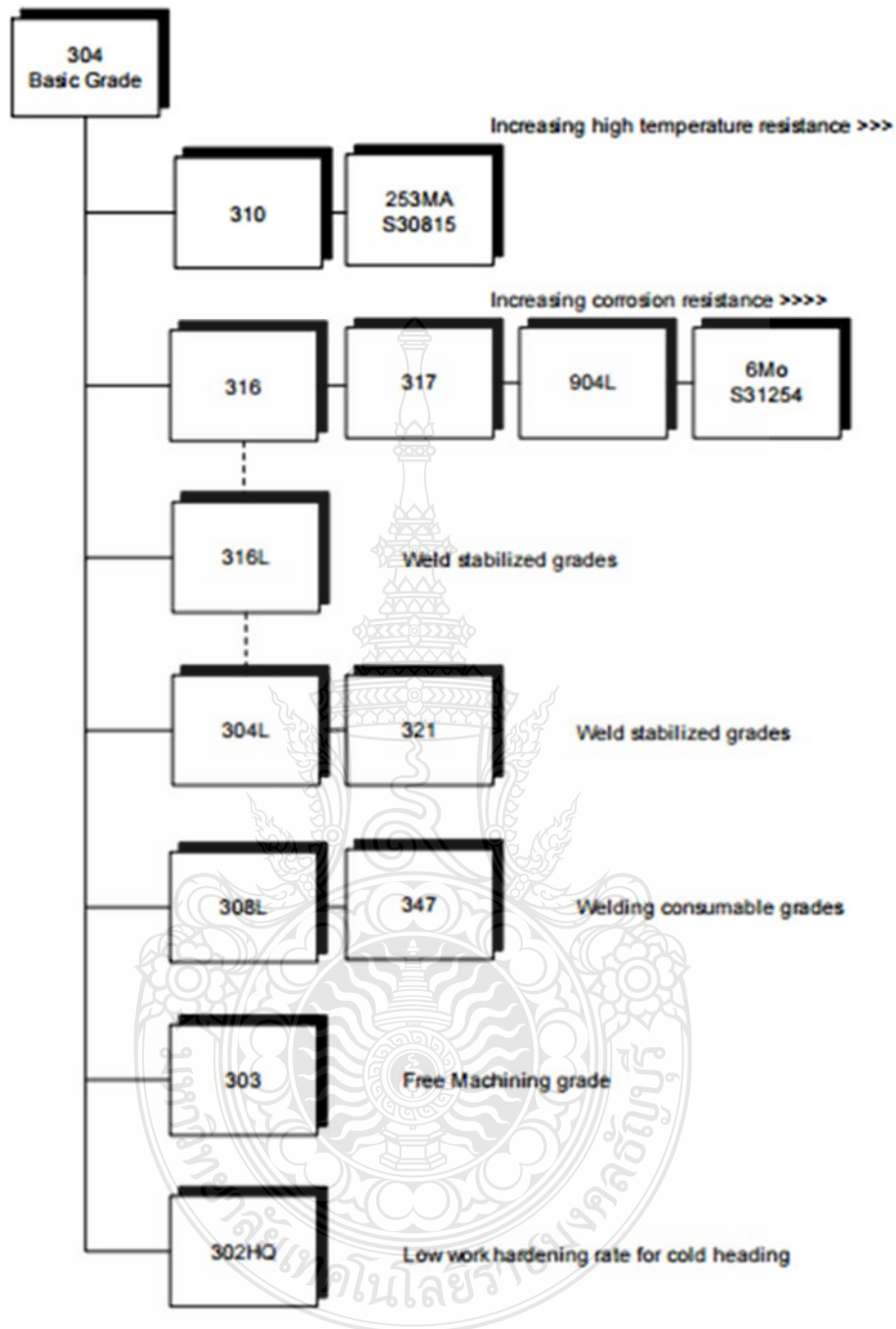
เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีสมบัติทางกลโดดเด่นด้านการยืดตัว (Ductility) สูงทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ขึ้นรูปได้โดยไม่เสี่ยงต่อการแตกร้าว [24] ความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีเยี่ยม ความแข็งแรงของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ได้ด้วยการเพิ่มความแข็งแรงโดยสารละลายของแข็ง [21] แต่ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้จากกระบวนการทางความร้อน ความแข็งแรงสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการขึ้นรูปเย็น (Work hardening) [22] ความแข็งแรงที่ได้จะสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีสมบัติที่แม่เหล็กไม่สามารถดูดติดได้ [21] ในสภาพหลังการอบอ่อน (Annealed condition) เว้นแต่การขึ้นรูปเย็นในสภาวะรุนแรง ส่งผลให้วัสดุมีความเค้นตกค้าง (Residual stress) และไม่ได้รับการอบอ่อนส่งผลให้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก กลุ่มนี้มีคุณสมบัติที่แม่เหล็กสามารถดูดติดได้ [22] ความสามารถในการเชื่อม (Weldability) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ดีเยี่ยม [25] กว่าเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก แต่สิ่งที่เกิดขึ้นในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้คือ ในขณะที่เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเริ่มเย็นตัวจากอุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส จนถึง 480 องศาเซลเซียส [20] หลังจากการเชื่อมธาตุคาร์บอนและธาตุโครเมียมรวมตัวกันกลายเป็นสารประกอบ “โครเมียมคาร์ไบด์” ตกตะกอนที่ขอบเกรน [20-26] ซึ่งทำให้สมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ลดลง [20] แม้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีประสิทธิภาพในการเชื่อมที่ดีเยี่ยม แต่ปัญหามักเกิดขึ้นกับกับการเชื่อมเสมอหากไม่ได้ใช้มาตรการป้องกันที่เหมาะสม จุดบกพร่องอาจขึ้นอยู่กับการเลือกโลหะเติมและระดับสิ่งเจือปน [27] ข้อควรปฏิบัติของการควบคุมโลหะเชื่อมคือ กำหนดให้การหลอมละลายลึกของแนวเชื่อม (Penetration) ให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม เนื่องด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด โดยมีแนวโน้มที่อาจเกิดรอยแตกร้อน (Hot cracks) [20] แน่แน่นอนว่าถ้าหากมีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ 5-10 % ภายในโครงสร้างออสเทนไนต์สามารถลดโอกาสการเกิดรอยแตกร้าวลงได้ [28] เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ไม่ต้องให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Pret Heat) แต่ให้ลดปริมาณและควบคุมความร้อนขาเข้าแก่แนวเชื่อม (Weld heat input) เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ที่ขอบเกรน [20] และสามารถคาดการณ์ได้ด้วยแผนภาพเชฟเลอร์ (Schaeffler) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อนำส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาคำนวณหาค่า

โครเมียมเทียบเท่าและนิกเกิลเทียบเท่าและนำไปลากหาจุดตัดในแผนภาพเฟสเลอร์แล้ว หากค่าเฟอร์ไรต์มีปริมาณสูงกว่า 10% โลหะเชื่อมมักเกิดการแตกร้าว [29]



รูปที่ 2.5 แผนภาพเฟสเลอร์ของโลหะเชื่อมในเหล็กกล้าไร้สนิม [30]

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะงานที่ใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนอย่างรุนแรง ได้แก่ โรงงานบำบัดน้ำเสีย, งานระบบท่อ, โรงงานผลิตสารเคมี, งานระบบแลกเปลี่ยนความร้อน ฯลฯ [31] สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกสามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการเติมธาตุโมลิบดีนัม ทองแดงหรือไททาเนียม เพื่อปรับปรุงให้สอดคล้องกับลักษณะการใช้งานในสภาพแวดล้อมดังกล่าว [32] โมลิบดีนัมช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ สภาพแวดล้อมแบบออกซิไดซิง (Oxidizing) เกรดที่เหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะดังกล่าว เช่น AISI309 และ AISI310 และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ แต่ต้องไม่เกิน 1,150 องศาเซลเซียส [33] ในกรณีที่ต้องการสมบัติต้านทานการกัดกร่อนตามขอบเกรน เมื่อตกอยู่ภายใต้การใช้งานที่อุณหภูมิสูงเกรดที่เหมาะสม เช่น AISI321 และ AISI347 ส่วนเกรดที่มีคาร์บอนต่ำ เช่น AISI304L และ AISI316L ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการใช้งานในสภาวะดังกล่าวและมีความสามารถในการเชื่อมที่ดียิ่งด้วย [15] เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ยังเหมาะต่อสภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิตดล (Cryogenic condition) ผลจากอิทธิพลของธาตุนิกเกิลทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกสามารถป้องกันการแตกหักแบบเปราะที่อุณหภูมิต่ำได้ [34] (ความสัมพันธ์ของเกรดเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก ดังแสดงในรูปที่ 2.6)

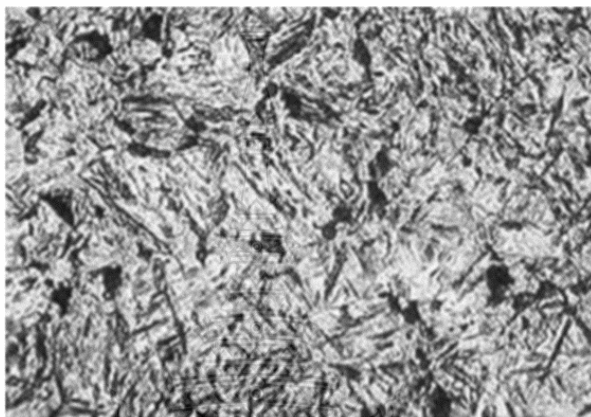


รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดต่างๆในกลุ่มออสเทนนิติก [8]

2.1.3 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค (Martensitic Stainless Steel)

เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก แต่มีปริมาณธาตุคาร์บอนที่สูงกว่า [7] อาจมีคาร์บอนมากถึง 1.2% และมีโครเมียมผสมอยู่ในระหว่าง 10.5-18% [35] มีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ [10] (ดังแสดงในรูปที่ 2.7 แสดงลักษณะโครงสร้างมาร์เทนไซต์) สามารถอบชุบทางความร้อนเพื่อเพิ่มสมบัติของความแข็งและทำให้มีสมบัติเป็นแม่เหล็กได้

[35] ทั้งนี้หากให้ความร้อนกับเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกที่มีส่วนผสมของธาตุโครเมียมไม่ต่ำกว่า 17% และปริมาณคาร์บอนไม่ต่ำกว่า 0.5% ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกเปลี่ยนโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ 100% โดยหากมีการจุ่มชุบด้วยน้ำมัน เหล็กกล้าไร้สนิมจะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซด์ เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน หากนำเหล็กกล้าไปอบคืนไฟจะทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซด์มีความแข็งและความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น [21]

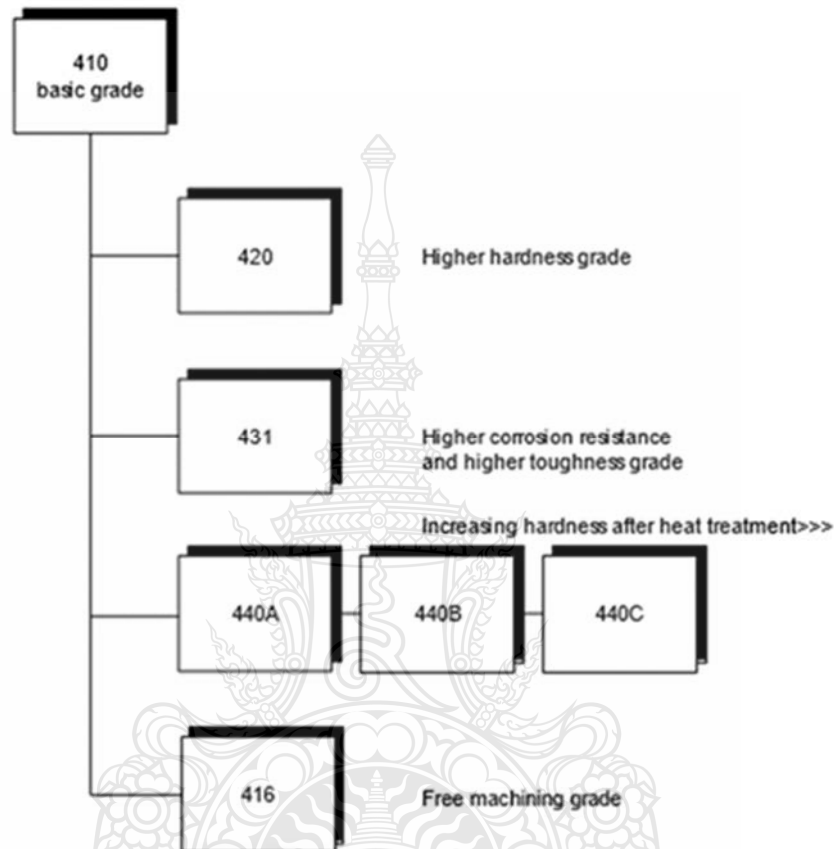


รูปที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก [24]

สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก ขึ้นอยู่กับกระบวนการทางความร้อนเป็นหลักสำคัญ เช่น ขนาดของสารที่มีการตกตะกอนอยู่ภายในโครงสร้างมีผลกระทบต่อความแข็ง ความแข็งแรง การกัดกร่อนและการสึกหรอ [36] แต่บางครั้งก็พบว่าการตกตะกอนส่งผลในเชิงบวกกับความต้านทานการล้าตัว ต้านทานต่อการสึกหรอ และเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องความเหนียวขณะใช้งาน [37] แม้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกมีสมบัติทางกลสูงและความต้านทานต่อการกัดกร่อนอยู่ในระดับปานกลาง ด้วยเหตุนี้การเพิ่มคุณสมบัติของเหล็กกล้าให้มีประสิทธิภาพที่ทนต่อการสึกหรอ โดยการนำเหล็กกล้าไปปรับปรุงสมบัติของผิวด้วยกระบวนการไนไตรดิง (Nitriding) [38] หรือกระบวนการโบรอนไนซิง (Boronizing) [39] ความสามารถในการเชื่อม (Weldability) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ค่อนข้างต่ำเชื่อมได้ยาก [10] ในการเชื่อมความร้อนที่บริเวณรอยเชื่อมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและก็เย็นตัวอย่างรวดเร็วอีกด้วย จึงทำให้โครงสร้างตรงบริเวณรอยเชื่อมเป็นโครงสร้างมาเทนไซด์ [18] หรืออาจมีโครงสร้างเฟอร์ไรต์เหลือค้างภายในโครงสร้างพื้นมาร์เทนซิติก [40] ซึ่งสมบัติมีความเปราะทำให้รอยเชื่อมแตกหักง่าย [18] ซึ่งส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลและการกัดกร่อน [40] จึงเป็นเหตุผลที่ว่า ความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมมาเทนซิติกจึงไม่ดี ข้อควรระวังและปฏิบัติในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมมาเทนซิติก คือ ให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Pre-heat) ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 400 องศาเซลเซียส และรักษาอุณหภูมินี้ไว้ในขณะทำการเชื่อม หลังเชื่อมเสร็จให้ความร้อนหลังการเชื่อม (Post Weld-Heat PWHT) ที่อุณหภูมิ 700-800 องศาเซลเซียส [18]

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติกสามารถใช้งานในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นลงได้ดี [41] จึงเหมาะต่อการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ เช่น ท่อทนแรงดัน เครื่องมืองานตัด เครื่องผลิตไอน้ำ

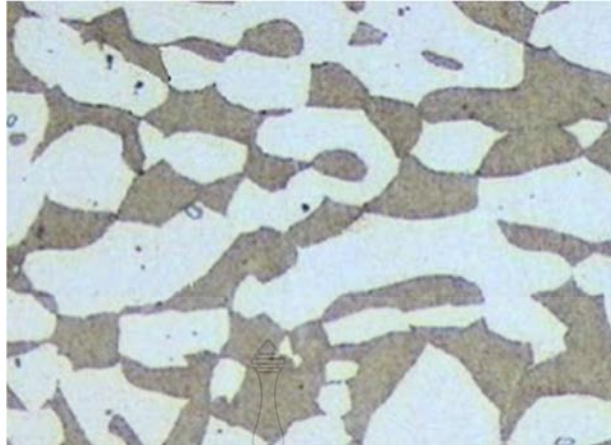
ชิ้นส่วนใบพัดกังหัน ตลับลูกปืน เครื่องมือแพทย์ และชิ้นส่วนวาล์วในโรงไฟฟ้า [40] เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติกประกอบไปด้วย เกรด 403 410 414 416 418 420 431 440 510 และ 502 [10] ดังแสดงในรูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดต่างๆในกลุ่มสนิมมาร์เทนซิติก



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดต่างๆ ในกลุ่มมาร์เทนซิติก [8]

2.1.4 เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์เป็นเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมระหว่างโครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) และโมลิบดีนัม (Mo) [42] เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างจุลภาคผสมอยู่ด้วยกัน 2 เฟสระหว่างเฟสเฟอร์ไรต์กับเฟสออสเทนไนต์ [10-42] มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ BCC (Body-centered cubic) และโครงสร้างผลึกแบบ FCC (Face-Centered Cubic) [43] ในปริมาณสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน [42] ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์



รูปที่ 2.9 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์ [15]

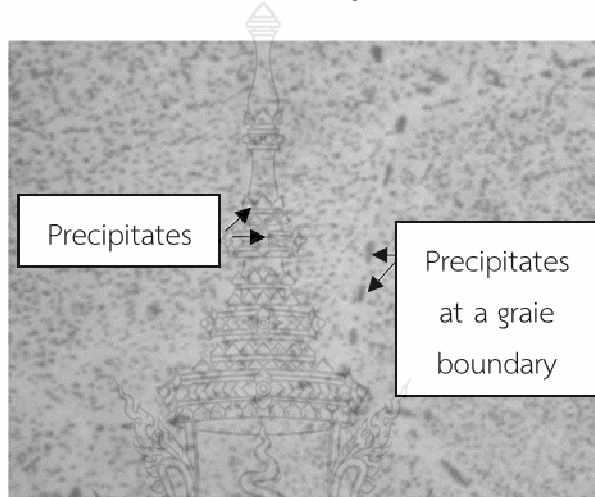
เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์มีสมบัติทางกลเด่นในด้านความต้านทานต่อการกัดกร่อน [44] แม้เหล็กสามารถดูดติดได้ ลักษณะโครงสร้างที่เป็นแบบผสมนี้ส่งผลให้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์มีความแข็งแรงสูง ทนต่อการกัดกร่อนในสภาวะสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงได้ ทนต่อการสึกหรออันเนื่องมาจากความล้า ทนต่อการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า [45] มีความต้านทานต่อแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) อยู่ในช่วง 550-690 MPa ในสภาวะหลังการอบอ่อน ซึ่งจะมีค่าสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกประมาณ 2 เท่า [46] หากมีปริมาณโครเมียมและโมลิบดีนัมสูงจะช่วยเพิ่มความสามารถต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรนและการกัดกร่อนแบบรูเข็มอีกด้วย [47] มีความสามารถในการเชื่อม (Weldability) อยู่ในเกณฑ์ดี [43-45] เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ปกติจะนำไปใช้งานในสภาพที่ผ่านการอบอ่อน ซึ่งจะทำให้มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม [10] แต่ในด้านกลับกันในกรณีที่ผ่านมากระบวนการทางความร้อนที่ไม่เหมาะสมจะสามารถทำให้เกิดเฟสที่สอง (Second phase) ได้ ซึ่งการตกตะกอนดังกล่าวจะลดคุณสมบัติทางกลของวัสดุในด้านความแข็งแรงและความต้านทานต่อการกัดกร่อนด้วย [48] เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีการนำมาใช้งานเพิ่มขึ้นจากเมื่อก่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมผลิตสารเคมี โรงกลั่นน้ำมัน อุปกรณ์ใช้งานในทางทะเลของปิโตรเคมี เรือดำน้ำ และการใช้งานทางวิศวกรรมทั่วไป [49-50] เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์สามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทได้แก่ 1).ประเภทลีนดูเพล็กซ์ (Lean duplex stainless steel) ชนิดเกรด 2304 2).ประเภทดูเพล็กซ์มาตรฐาน (Standard duplex stainless steel) ชนิดเกรด 2205 3).ประเภทซูเปอร์ดูเพล็กซ์ (Super duplex stainless steel) ชนิดเกรด 2507 และ 4).ประเภทไฮเปอร์ดูเพล็กซ์ (Hyper duplex stainless steel) [43] ดังแสดงในรูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดต่างๆในกลุ่มดูเพล็กซ์



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดต่างๆในกลุ่มดูเพล็กซ์ [8]

2.1.5 เหล็กกล้าไร้สนิมชุบแข็งโดยการตกตะกอน (Precipitation-hardening Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมชุบแข็งโดยการตกตะกอนเป็นเหล็กกล้าผสมที่มีโครเมียมและนิกเกิลเป็นธาตุผสมหลัก [10] โดยมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นแบบมาเทนไซต์และออสเทนไนต์ [7] ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (แสดงลักษณะโครงสร้างเฟสตกผลึกภายในเหล็กกล้าไร้สนิมไร้สนิมแบบชุบแข็งโดยการตกตะกอน) ธาตุที่มีส่วนในการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอนในระหว่างกระบวนการทางความร้อน ได้แก่ ทองแดง ไททาเนียม โมลิบดีนัม อลูมิเนียม และไนโอเบียม [10-21]



รูปที่ 2.11 โครงสร้างเฟสตกผลึกภายในเหล็กกล้าไร้สนิมไร้สนิมแบบชุบแข็งโดยการตกตะกอน[15]

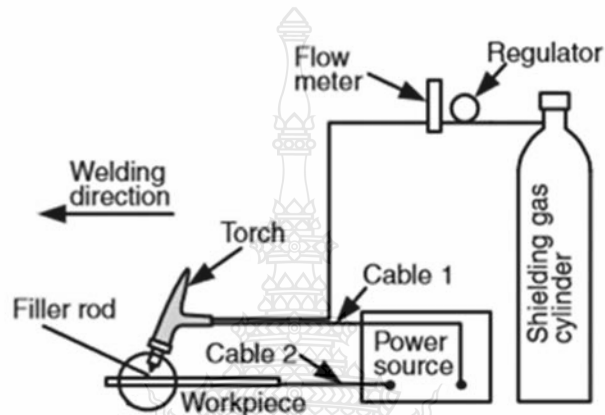
เหล็กกล้าไร้สนิมชุบแข็งโดยการตกตะกอน มีคุณสมบัติทางกลคือ ขึ้นรูปได้ง่าย มีความแข็งแรงสูง มีความเหนียว มีความต้านทานการกัดกร่อนดีเยี่ยม และมีความสามารถในการเชื่อมตีเชื่อม [51-52] จากสมบัติทางกลที่สามารถขึ้นรูปได้ง่าย จึงสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดและรูปร่างหลากหลาย เช่น แท่งน้ำ เส้นลวด และผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ โดยเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ได้แก่ เกรด AISI 17-4 PH เกรด AISI 17-7 PH เกรด AISI 600 [7] เป็นต้น

2.2 การเชื่อม

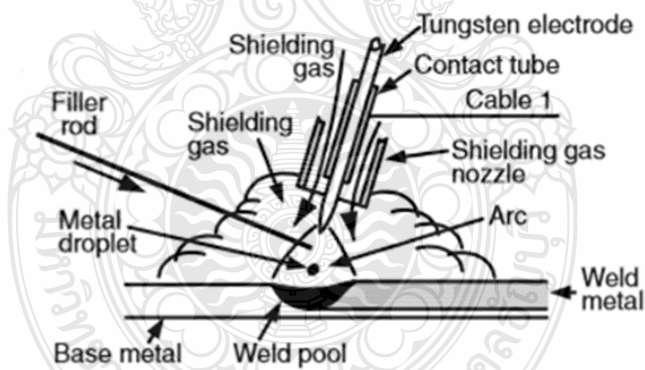
การเชื่อม (Welding) เป็นขบวนการที่ใช้สำหรับต่อวัสดุ ตามคำจำกัดความของ DIN (Deutsche Industrie Normen) กล่าวว่า “การเชื่อม คือการทำให้ประสานติดกันของโลหะทางโลหะวิทยา หรือการเกิดโลหะผสมภายใต้การหลอมละลายที่รอยต่อ” [18]

การเชื่อมหลอมละลาย (Fusion welding) ขึ้นงานที่ต้องการต่อกันจะหลอมละลายเข้าด้วยกันตรงบริเวณแนวเชื่อมอาจมีการเติมลวดเชื่อมหรือไม่เติมลวดเชื่อมก็ได้ในขณะที่เชื่อม [53] ทำให้เกิดความร้อนสูงจนเกิดการหลอมเหลว หรือโลหะเกิดการเปลี่ยนสถานะจากเฟสของแข็งไปเป็นเฟสของเหลว เมื่อพื้นที่การหลอมละลายเริ่มแข็งตัวจะทำให้วัสดุทั้งสองต่อเข้าหากัน [21] การเกิดลักษณะนี้เรียกว่า “การเชื่อมหลอมละลาย”

ตัวอย่างการเชื่อมหลอมละลายในงานอุตสาหกรรม เช่น 1) การเชื่อมอาร์กหลอดหุ้มฟลักซ์ (Shielded metal arc welding: SMAW) 2) การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas metal arc welding: GMAW) 3) การเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุม (Gas Tungsten arc welding: GTAW) 4) การเชื่อมอาร์กไส้ฟลักซ์ (Flux cored arc welding: FCAW) 5) การเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (Submerged arc welding: SAW) 6) การเชื่อมอาร์กพลาสมา (Plasma arc welding: PAW) 7) การเชื่อมแก๊สออกซิอะเซทีลีน (Oxy-acetylene gas welding: GW) 8) การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding: RSW)



รูปที่ 2.12 วงจรและอุปกรณ์การเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุม [54]



รูปที่ 2.13 พื้นฐานการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุม [54]

2.2.1 การเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุม (Gas tungsten arc welding : GTAW)

เป็นกระบวนการเชื่อมที่ใช้แท่งทังสเตนเป็นลวดเชื่อม อาร์กกับโลหะชิ้นงาน ทำให้เกิดความร้อนและทำให้ชิ้นงานหลอมเหลว โดยแท่งทังสเตนจะไม่หลอมเหลวไปกับการเชื่อมแต่มีลวดเติมสำหรับป้อนเติมลงไปในปีหล่อลอมเหลว บริเวณบ่อหลอมเหลวมีแก๊สปกคลุมเพื่อป้องกันไม่ให้บรรยากาศจากภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะเหลวหรือแนวเชื่อม [55] ในการเชื่อมนี้มีกระแสไฟฟ้าเป็นตัวกระตุ้นให้แก๊สที่ปลายทังสเตนอิเล็กโทรดกลายเป็นไอออน และทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างทังสเตนอิเล็กโทรดและบ่อหลอมเห็นเป็นลำพลาสมา [18] แก๊สปกคลุมที่ใช้ในกรรมวิธีการเชื่อม

อาร์คทั้งสแตนปัจจุบันใช้แก๊สเฉื่อย (Inert Gas) เช่นแก๊สอาร์กอน แก๊สฮีเลียม เป็นต้น แต่ในอดีตอุตสาหกรรม การเชื่อมส่วนใหญ่จะนิยมใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สปกคลุม เนื่องจากให้คุณภาพของแนวเชื่อมที่ดี นอกจากนี้แก๊สอาร์กอนสามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาปานกลาง [56] อุปกรณ์สำคัญของการเชื่อม แสดงดังรูปที่ 2.12 และ 2.13 ประกอบไปด้วย เครื่องเชื่อม สายไฟเชื่อมและท่อส่งแก๊สท่อบรรจุแก๊ส แท่งทั้งสแตนอเล็กโตรด ลวดเชื่อม และมือเชื่อม เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างจากการเชื่อมอาร์คโลหะ แก๊สคลุมแล้ว การหลอมละลายของโลหะเชื่อมของการเชื่อมวิธีนี้เกิดขึ้นจากการอาร์คของแท่ง ทั้งสแตน (โดยทั่วไปใช้แท่งทั้งสแตนที่มีส่วนผสมทางเคมีของ W และ 2%wt ThO₂) [57] รายละเอียด แท่งทั้งสแตนอเล็กโตรดแสดงในตารางที่ 2.1 อเล็กโตรดที่ใช้ในการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนนั้น ทำจากทั้งสแตน หรือทั้งสแตนผสมกับโลหะอื่นๆ เนื่องจากทั้งสแตนมีจุดหลอมเหลวสูงที่สุดในบรรดาโลหะ บริสุทธิ์คือ 3,422 °C ทำให้ตัวอเล็กโตรดนี้ไม่หลอมละลายไปในระหว่างการเชื่อม แต่มีการสึกหรอ เกิดขึ้นบ้าง ผิวของอเล็กโตรดที่ใช้งานมีทั้งแบบที่ได้รับการทำความสะอาดด้วยกระบวนการทางเคมีและ แบบที่ลับเจียร ตัดแต่งด้วยวิธีทางกลโดยทั่วไปอเล็กโตรดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 – 6.4 mm และมีความยาวอยู่ในช่วง 75-610 mm ทั้งสแตนผสมกับโลหะชนิดอื่น ทำให้ได้อเล็กโตรดที่ หลากหลาย ซึ่งมีมาตรฐานที่สามารถใช้ในการอ้างอิง และเลือกใช้งานได้ด้วยตัวอย่างเช่น International Organization for Standardization หรือ American Welding Society ใน ISO 6848 และ AWS A5.12

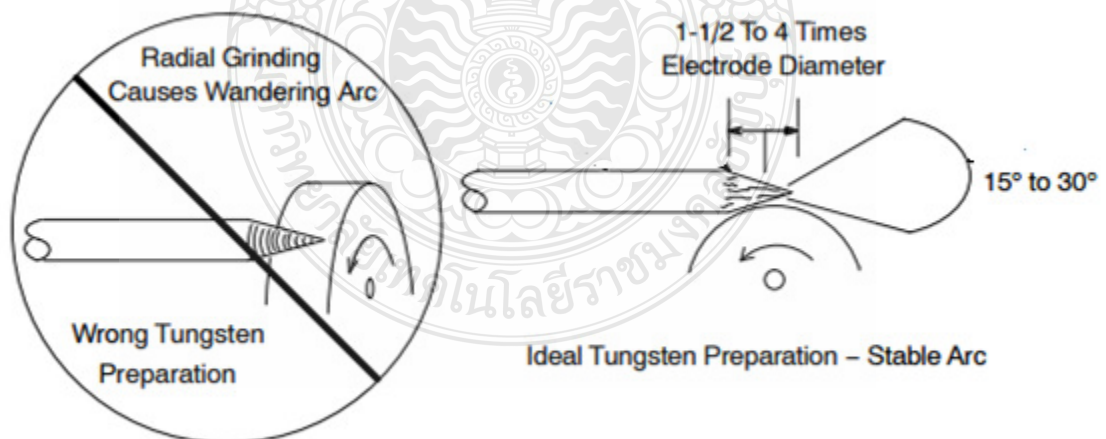
ตารางที่ 2.1 รูปแบบของแท่งทั้งสแตน [58]

มาตรฐาน AWS	ส่วนผสมทางเคมี	สีของปลายแท่งทั้งสแตน
EWP	ทั้งสแตนบริสุทธิ์	เขียว
EWTh-1	เติม 1% ธอเรียม	เหลือง
EWTh-2	เติม 2% ธอเรียม	แดง
EWZr	เติม 0.25-0.5% ธอเรียม	น้ำตาล
EWCe-2	เติม 2% ซีเรียม	ส้ม
EWLa-1	เติม 1% แลนธาอิม	ดำ

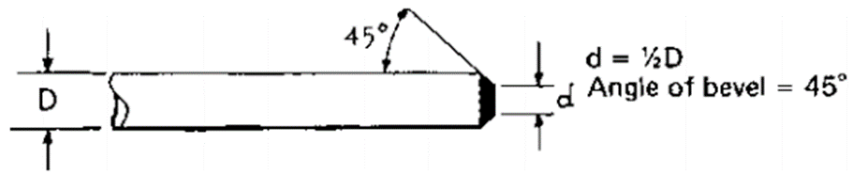
ตารางที่ 2.2 แสดงขนาดกระแสเชื่อมและลวดเชื่อมที่สัมพันธ์กัน [59]

Tungsten Electrode Diameter		DCEN	DCEP	AC		AC	
				Unbalanced Wave		Balanced Wave	
In.	mm.	EWX-X	EWX-X	EWP	EWX-X	EWP	EWX-X
0.01	0.3	Up to 15	NA*	Up to 15	Up to 15	Up to 15	Up to 15
0.02	0.5	5 -12	NA*	5 -15	5 -20	10 -20	5 -20
0.04	1	15-80	NA*	10 -60	15 -18	20 - 30	20 - 60
0.06	1.6	70-150	10 - 20	50 - 100	70 - 150	30 - 80	60 - 120
0.093	2.4	150-250	15 - 30	100 - 160	140 - 235	60 - 130	100 -180
0.125	3.2	250-400	25 -40	150 - 200	225 - 325	100 - 180	160 - 250
0.156	4	400-500	40 -55	200 - 275	300 - 400	160 - 240	200 - 320
0.187	5	500-750	55 - 80	250 - 350	400 - 500	190 - 300	290 - 390
0.25	6.4	750-1000	80 - 125	325 - 450	500- 630	250 - 400	340 - 525

การลับปลายแท่งทังสเตน โดยทั่วไปแบ่งการลับแท่งทังสเตน ตามการใช้งานตามกระแสไฟฟ้าเชื่อมเช่น AC หรือ DC มีการลับแท่งทังสเตนที่แตกต่างกันออกไป โดยการลับแท่งทังสเตนลับตามแนวยาวของแท่งทังสเตน



รูปที่ 2.14 ลักษณะและทิศทางการลับแท่งทังสเตนกระแสไฟ DC [60]



รูปที่ 2.15 ลักษณะและทิศทางการลับแท่งทังสเตนกระแสไฟ AC [61]

2.2.2 แก๊สปกคลุม

การเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุม หรือการเชื่อมทิก ในขณะที่ทำการเชื่อมนั้นมักใช้แก๊สเฉื่อยในการปกคลุมบ่อหลอมละลาย [54] ในอากาศโดยทั่วไป จะมีธาตุไนโตรเจนและออกซิเจนรวมอยู่มากกว่าสารอื่นถ้าอุณหภูมิยิ่งสูงมากขึ้น โดยเฉพาะโลหะจะช่วยให้ธาตุเหล่านี้เข้าไปผสมรวมอยู่ด้วย ในการเชื่อมอากาศที่อยู่รอบนอกสามารถเข้ามารวมกับเนื้อโลหะที่กำลังหลอมละลาย ทำให้เนื้อโลหะเชื่อมเป็นรูพรongไม่มีคุณภาพ [62] โดยหน้าที่หลักของแก๊สปกคลุมในการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุม มีหน้าที่อยู่ 2 อย่างคือทำให้วิธีการเชื่อมอาร์กทังสเตนสมบูรณ์ โดยทำให้เกิดการอาร์คและรักษาสภาพของแท่งทังสเตนไว้ไม่ให้เสียหาย และทำหน้าที่ปกคลุมแนวเชื่อมหรือบ่อหลอมละลายไม่ให้อากาศจากภายนอกเข้ามาทำปฏิกิริยาในระหว่างการเชื่อมซึ่งจะส่งผลให้คุณภาพของงานเชื่อมต่ำได้ [63]

ตารางที่ 2.3 สมบัติของแก๊สคลุมในการเชื่อมทิก [54]

แก๊ส	น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	ความถ่วงจำเพาะ*	ความหนาแน่น (g/L)	ศักย์การแตกตัวของไอออน (eV)
อาร์กอน	39.95	1.38	1.784	15.7
คาร์บอนไดออกไซด์	44.01	1.53	1.978	14.4
ฮีเลียม	4.00	0.1368	0.178	24.5
ไฮโดรเจน	2.016	0.0695	0.090	13.5
ไนโตรเจน	28.01	0.967	1.25	14.5
ออกซิเจน	32.00	1.105	1.43	13.2

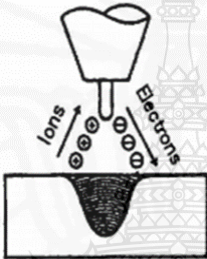
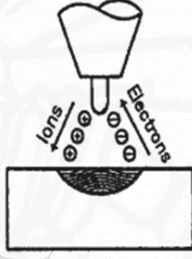
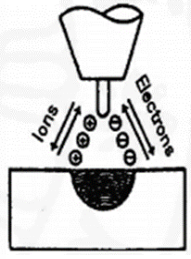
หมายเหตุ *ที่ 1 บรรยากาศ และ 0°C

2.2.3 ตัวแปรในการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุม

การควบคุมตัวแปรและคุณภาพของงานเชื่อม ทำได้หลังจากเลือกโลหะงาน ลวดเติม และการออกแบบรอยต่อแล้ว การเลือกตัวแปรที่เหมาะสมทำให้การเชื่อมกระทำได้ง่ายขึ้น และได้ผลิตภัณฑ์ตรงตามความต้องการ [54]

(1)ชนิดและกระแสเชื่อม โดยทั่วไปปัจจุบันกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุมจะสามารถใช้กระแสไฟได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current : DC) และไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current : AC) คุณสมบัติของไฟฟ้าทั้งสองชนิดนี้ มีผลลัพธ์ที่ต่างกันแต่อย่างมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ซึ่งมันจะช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถเลือกชนิดที่ดีที่สุดสำหรับงานได้ ดังตารางที่ 2.4 แสดงถึงการใช้กระแสไฟในการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุมแต่ละชนิดว่ามีคุณสมบัติอย่างไร [64]

ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะของกระแสเชื่อมทิกแต่ละชนิด [60]

ชนิดกระแสเชื่อม	DCEN	DCEP	AC
ขั้วลวดเชื่อม	ขั้วลบ	ขั้วบวก	ขั้วลบและขั้วบวก
การไหลของอิเล็กตรอนและไอออน คุณลักษณะของการซึมลึก			
ปฏิกิริยาทำความสะอาด	ไม่ดี	ดี	ทำครึ่งหนึ่งของไซเกิล
ความร้อนในบริเวณอาร์ค	70% ของชิ้นงาน 30% ของลวดเชื่อม	30% ของชิ้นงาน 70% ของลวดเชื่อม	50% ของชิ้นงาน 50% ของลวดเชื่อม
การซึมลึกของแนวเชื่อม	ซึมลึกดีและแคบ	ซึมลึกเล็กน้อยและกว้าง	ซึมลึกปานกลาง
ความสามารถของลวดทั้งสแตน	ดีเลิศ e.g. 1/8 นิ้ว (3.2) 400A	ไม่ดี e.g. 1/4 นิ้ว (6.4) 120A	ดี e.g. 1/8 นิ้ว 225A

(2)แรงดันอาร์ก (ระยะอาร์ก) แรงดันอาร์กขึ้นอยู่กับแก๊สปกคลุมและระยะห่างของปลายลวดทั้งสแตนกับชิ้นงาน สำหรับการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุมด้วยมีระยะอาร์กถูกควบคุมโดยช่างเชื่อม การเชื่อมอัตโนมัติและการเชื่อมด้วยเครื่องจักรระยะอาร์กได้ถูกตั้งไว้ก่อนเชื่อมแล้ว ในการเชื่อมอัตโนมัติระยะอาร์กควบคุมเพื่อได้ระยะอาร์กที่ต้องการ แก๊สปกคลุมมีผลต่อแรงดันอาร์ก อาทิ แก๊สฮีเลียมให้การซึมลึกดีกว่าแก๊สอาร์กอนระยะอาร์กมีผลโดยตรงต่อแรงดันอาร์ก เมื่อระยะอาร์กเพิ่มแรงดันอาร์กก็จะเพิ่มขึ้นและเมื่อลดระยะอาร์ก แรงดันอาร์กลดลง ระยะอาร์กสูงเกินไปแนวเชื่อมที่ได้ไม่สม่ำเสมอ การซึมลึกน้อยแก๊สปกคลุมไม่เพียงพอและแนวเชื่อมเปลี่ยนสีเห็นได้อย่างชัดเจน คือการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม [59]

ระยะอาร์กสั้น

การซึ่มลึกสูง

แนวเชื่อมแคบ

ระยะอาร์กสูง

การซึ่มลึกน้อย

แนวเชื่อมกว้าง

(3) **ความเร็วเชื่อม** เป็นความเร็วที่เกิดขึ้นตลอดตามแนวความยาวของชิ้นงาน ความเร็วเชื่อม กระแสเชื่อมและแรงดันอาร์กมีผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน เมื่อความเร็วเชื่อมและกระแสเชื่อม เพิ่มขึ้นหรือลดลงที่เป็นอัตราส่วนทั้งคู่ แนวเชื่อมที่ได้ยังคงมีขนาดและการซึ่มลึกคงที่ และเมื่อความเร็วเชื่อมสูงเกินไป ได้แนวเชื่อมเล็กการซึ่มลึกไม่ดีและแนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ ถ้าความเร็วเชื่อมช้าเกินไปแนวเชื่อมมีขนาดใหญ่สิ้นเปลืองเนื้อเชื่อมมาก และทำให้การซึ่มลึกมากเกินไป [59]

2.2.3 ปัญหาทั่วไปของการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสตีล [59]

การเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสตีลเหมือนกับ การเชื่อมอื่นๆ ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นกับการเชื่อมเนื่องมาจากจุดบกพร่องในรอยเชื่อม จุดบกพร่องบางชนิดเกิดจากการใช้วัสดุไม่เหมาะสม ได้แก่ วัสดุงาน ลวดเติมหรือแก๊สปกคลุม และยังมีปัญหาอื่นๆ อีกทั้งที่ไม่อาจรู้ล่วงหน้าได้ เช่น การเปียงเบนของลำอาร์ก ปลายลวดทั้งสแตนเลสสตีล ซึ่งอาจแก้ไขให้ถูกต้องทันทีได้ การใช้เทคนิคการเชื่อมและการเลือกใช้อุปกรณ์ประกอบในการเชื่อมไม่เหมาะสม ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดตำหนิในรอยเชื่อม ตำหนิที่เกิดขึ้นกับการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสตีล ได้แก่ ทั้งสแตนฝั่งใน รูพรุน รูพรุนตัวหนอน รอยกัด ขอบรอยเชื่อม การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ การหลอมละลายทะลุ เกิดรอยขีดอาร์กบนชิ้นงาน และแอ่งหลอมละลายปลาย รอยเชื่อม ปัญหาจากเทคนิคการเชื่อม หรือความไม่แข็งแรงของรอยเชื่อมเป็นเหตุให้เกิดการแตกร้าวได้ ชิ้นงานเชื่อมและลวดเติมต้องสะอาดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาต่างๆ ขึ้น ปัญหาที่เกิดจากการเปียงเบนของลำอาร์ก การขาดแคลนแก๊สปกคลุม และลมเป่าแก๊สปกคลุมหนีออกจากบริเวณอาร์ก การเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสตีลไม่เกิดปัญหามากนักในเรื่องสแลกฝังใน เนื่องจากกระบวนการเชื่อมใช้แก๊สปกคลุมแทนการใช้ฟลักซ์มีเพียงชิ้นบางๆ ของสแลก โดยเฉพาะการใช้ลวดเติมที่เป็นเหล็กกล้า ลมุนเกิดสแลกขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นต้องทำความสะอาดรอยเชื่อมให้ดีก่อนการเชื่อมทับซ้อนแนว เพื่อจะได้ไม่เกิดสแลกฝังใน แต่ปัญหานี้มานานๆ ครั้งจึงจะเกิดขึ้น สำหรับปัญหาที่เกิดจากสะเก็ดเชื่อมกระเด็น นานๆ ครั้งจึงจะเกิดขึ้น เนื่องจากลวดทั้งสแตนเลสสตีลไม่หลอมละลายและลวดเติมจะป้อนโดยตรงไปที่บ่อหลอมละลายโดยไม่มีการส่งถ่ายน้ำโลหะไปยังบ่อหลอมละลาย สิ่งสำคัญในการควบคุมรอยเชื่อมก็คือ การเลือกใช้ลวดเชื่อม และกำหนดให้การหลอมละลายลึกของรอยเชื่อม (Penetration) อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม [59]

เหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ทั้งหมด มีความโน้มเอียงที่จะเกิดรอยแตกร้าว ซึ่งมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เป็นที่ทราบกันว่าถ้าหากมีโครงสร้างเฟอร์ไรท์มากกว่า 4% ในโครงสร้างออสเทนไนท์แล้วสามารถทำให้การแตกร้าวลดน้อยลง เพราะฉะนั้นในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมควรระมัดระวังในสิ่งเหล่านี้

- 1) ไม่ต้องบ่มชิ้นงานก่อนเชื่อม แต่ให้ลดความร้อนก่อนเชื่อม เพื่อหลีกเลี่ยงการตกตะกอนของคาร์ไบด์ที่ขอบเกรน
- 2) ใช้ลวดเชื่อมไฟฟ้าชนิด Nb ชนิด Ti หรือชนิดคาร์บอนต่ำมาก ๆ ($C \leq 0.03\%$)
- 3) เลือกใช้ลวดเชื่อมชนิดที่ทำให้เกิดโครงสร้างของโลหะรอยเชื่อมอยู่ภายในบริเวณปลอดภัยของแผนภาพเฟสเลอร์ [65] ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5

2.3 การทดสอบสมบัติทางกลของแนวเชื่อม

2.3.1 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบพื้นฐานทางวิศวกรรมเพื่อศึกษาความแข็งแรงของวัสดุ เมื่อได้รับแรงดึงในทิศทางเดียว (Uniaxial tensile test) ซึ่งเป็นการทดสอบที่มีการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง โดยค่าสมบัติเชิงกลที่เราสนใจ คือ ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength : UTS) ความแข็งแรงคราก (Yield strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) จะถูกนำมาใช้สำหรับการออกแบบและเลือกสรรวัสดุเพื่อนำมาใช้งานทางวิศวกรรมได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

2.3.1.1 การเสียรูปแบบยืดหยุ่นและแบบถาวร เมื่อขึ้นทดสอบโลหะได้รับแรงดึงในแกนเดียวจะเกิดการเสียรูปขึ้นและถ้าขึ้นทดสอบโลหะสามารถคืนตัวกลับไปสู่ขนาดเริ่มต้นเมื่อนำแรงที่กระทำออกไปนั้นคือโลหะมีการเสียรูปแบบคืนตัว (Elastic deformation) ขนาดของการเสียรูปแบบคืนตัวของโลหะจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากในระหว่างที่เกิดการเสียรูปแบบคืนตัวอะตอมของโลหะจะเคลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมในปริมาณที่ไม่มากดังนั้นเมื่อเอาแรงที่กระทำออกไปโลหะที่เกิดการเสียรูปแบบคืนตัวอะตอมของโลหะจะเคลื่อนกลับไปสู่ตำแหน่งเดิมทำให้โลหะกลับไปสู่รูปทรงเดิมถ้าโลหะเกิดการเสียรูปเป็นจำนวนมากจนมันไม่สามารถกลับไปสู่รูปทรงเดิมได้อย่างสมบูรณ์แสดงว่าโลหะเกิดการเสียรูปแบบถาวร (Plastic deformation) ในระหว่างที่เกิดการเสียรูปแบบถาวรอะตอมของโลหะเกิดการเคลื่อนออกไปอย่างถาวรจากตำแหน่งเดิมและจะคงอยู่ที่ตำแหน่งใหม่นี้แม้ว่าจะนำแรงที่กระทำออกไปก็ตาม บางโลหะสามารถเกิดการเสียรูปแบบถาวรได้มากโดยปราศจากการแตกร้าว ซึ่งถือเป็นสมบัติหนึ่งทางวิศวกรรมของโลหะที่นำไปใช้ประโยชน์มากที่สุดสามารถนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนของรถยนต์ได้ เช่น หลังคาฝากระโปรงและประตูด้วยการขึ้นรูปแบบการอัดด้วยแม่พิมพ์ ทางกลโดยไม่เกิดการแตกหัก[66]

2.3.1.2 ความเค้นและความเครียด

ก. ความเค้น (Stress) ในการทดสอบแรงดึง แรงดึงแทนด้วยสัญลักษณ์ F ในหน่วยของปอนด์ กิโลกรัม หรือนิวตัน ความแข็งแรงดึงคิดเป็นแรงต่อพื้นที่ขึ้นทดสอบ สามารถหาได้ต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดน้ำหนักเทียบกับพื้นที่หน้าตัดหนึ่งตารางหน่วยเรียกว่า ความเค้น (Stress : σ) โดยความเค้นจะมีหน่วย เป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว (lb/in^2) หรือพาสคาล (Pa) ในหน่วยเมตริกน้ำหนักบันทึกเป็น กิโลกรัม แล้วแปลงเป็นนิวตันส่วนพื้นที่หน้าตัดจะคิดเป็นตารางเมตรซึ่งได้หน่วยของความเค้นเป็น นิวตันต่อตารางเมตร หรือพาสคาล (Pa) โดย 1 MPa เท่ากับ $145 \text{ lb}/\text{in}^2$ และ $1000 \text{ lb}/\text{in}^2$ เท่ากับ 6.985 MPa เมื่อพิจารณาแท่งทรงกระบอกที่มีความยาวเป็น l_0 และมีพื้นที่หน้าตัดเป็น A_0 ได้รับแรงดึงในทางเดียวกับ F จะได้ความเค้นที่กระทำกับแท่งโลหะนั้นคือสมการที่ 2.1 [66]

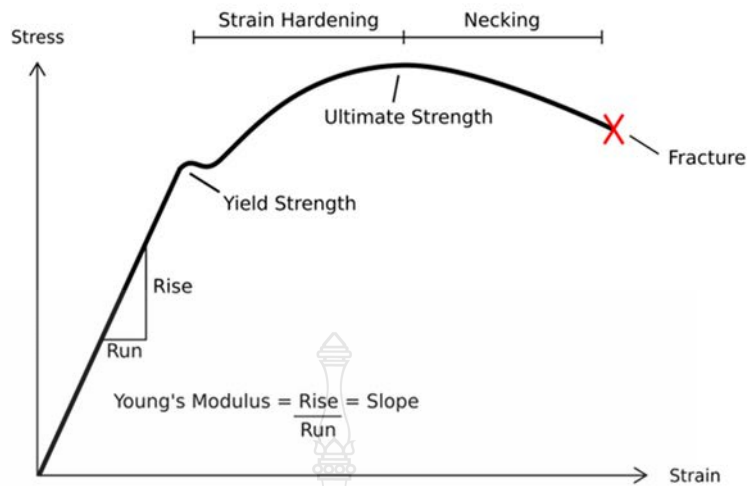
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

โดยความเค้นในหน่วยของ U.S เป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว (lb/in.² หรือ psi) และในหน่วยของ ISO เป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m²) หรือปาสคาล (Pa) เมื่อ 1N/m² = 1 Pa

ข. ความเครียด (Strain) เมื่อแท่งโลหะได้รับแรงดึงในทางเดียวเป็นเหตุให้แท่งโลหะเกิดการยืดออกในทิศทางของแรงนั้นการเคลื่อนนี้เรียกว่า ความเครียด (Strain) โดยนิยามความเครียดเป็น การยืดอันเนื่องมาจากแรงดึงทางเดียวที่กระทำกับชิ้นทดสอบซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว ของชิ้นทดสอบในทิศทางของแรงนั้นเทียบกับความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบดังนั้นก่อนทำการ ทดสอบต้องวัดพื้นที่หน้าตัดและระยะทดสอบเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ โดยระยะทดสอบเริ่มต้นจะทำการเป็นเครื่องหมายสองจุดบนชิ้นทดสอบอุปกรณ์วัดการยืดหรือความเครียด จะใช้ในการวัดระยะยืดของชิ้นทดสอบในระหว่างการทดสอบหรืออาจวัดจากผลต่างของระยะห่างของสองจุดข้างต้น ผลต่างระหว่างระยะทดสอบเริ่มต้นกับสุดท้ายเรียกว่าระยะยืดตัว (Elongation) หน่วยของระยะยืดใช้เป็น นิ้ว หรือ มิลลิเมตร และถ้านำค่าระยะยืดหารด้วยระยะทดสอบเริ่มต้นเรียกว่า ความเครียด สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.2 [66]

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.2)$$

2.3.1.3 กราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) ความเค้นเป็นความเข้มของแรงที่เกิดขึ้นกระจายอยู่ภายในวัสดุในระหว่างการทดสอบค่าความเค้นคำนวณได้จากแรงกระทำหรือน้ำหนักดึงหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นวัสดุที่กลับคืนรูปทรงเดิมโดยปราศจากการเสียรูปถาวรหลังจากที่นำความเค้นออกเรียกว่าวัสดุยืดหยุ่น และวัสดุเหล่านี้จะแสดงพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นในช่วงยืดหยุ่นของวัสดุจะใช้กฎของฮุกส์ (Hook's law) ในการอธิบายพฤติกรรมและความเครียดที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะมีลักษณะเป็นสัดส่วนกับความเค้นที่กระทำในกราฟ ความเค้น ความเครียดช่วงยืดหยุ่น คือช่วงเริ่มแรกของกราฟจนถึงช่วงขีดจำกัดการยืดหยุ่นช่วงขีด จำกัดการยืดหยุ่นคือตำแหน่งซึ่งความเค้นเพิ่มขึ้นและเริ่ม เข้าสู่ช่วงของการเสียรูปถาวร ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [66]



รูปที่ 2.16 กราฟความเค้น-ความเครียด [66]

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดนี้ นอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) ความเค้นสูงสุด แล้วยังจะใช้บอกค่าต่างๆได้อีกดังนี้ คือ

ก. โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) เป็นค่าที่ใช้วัดโดยจะบอกเป็น เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percentage elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of area)

$$\text{ร้อยละการยืดตัว (\%EI)} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (2.3)$$

โดยที่ L_f คือ ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน

L_0 คือ ความยาวเดิมของชิ้นงาน

$$\text{การลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (\%R.A.)} = \frac{A_f - A_0}{A_0} \times 100\% \quad (2.4)$$

โดยที่ A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง

A_f คือ พื้นที่หน้าตัดหลังจากดึงขาด

ในทางปฏิบัติเรามักใช้ค่า %Elongation มากกว่าเพราะสะดวกในการวัดความเหนียวของวัสดุนี้ และจะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมัน คือ ถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (%EI สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายเช่น รีด ตีขึ้นรูป ดึงเป็นลวด เป็นต้น แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำก็จะนำไปขึ้นรูปยากหรือทำไม่ได้

ข. โมดูลัสยืดหยุ่นหรือความเหนียว (Modulus of elasticity or stiffness) ภายใต้อิทธิพลของวัสดุที่มีพฤติกรรมเป็นอิลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ค่าคงที่ๆเรียกว่า โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity (E)) หรือ โมดูลัสของยัง (Young's modulus) หรือ ความเหนียว (Stiffness)

ค่า E ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉลี่ยคงที่ และเป็นตัวบอกความสามารถคงรูป (Stiffness, Rigidity) ของวัสดุนั้นคือ ถ้า E และ G มีค่าสูงวัสดุจะเปลี่ยนรูปร่างอย่างยืดหยุ่นได้น้อย แต่ถ้า E และ G ต่ำ มันก็จะเปลี่ยนรูปร่างอย่างยืดหยุ่นได้มาก ค่า E และ G นี้มีประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบวัสดุที่ต้องรับแรงต่างๆ [66]

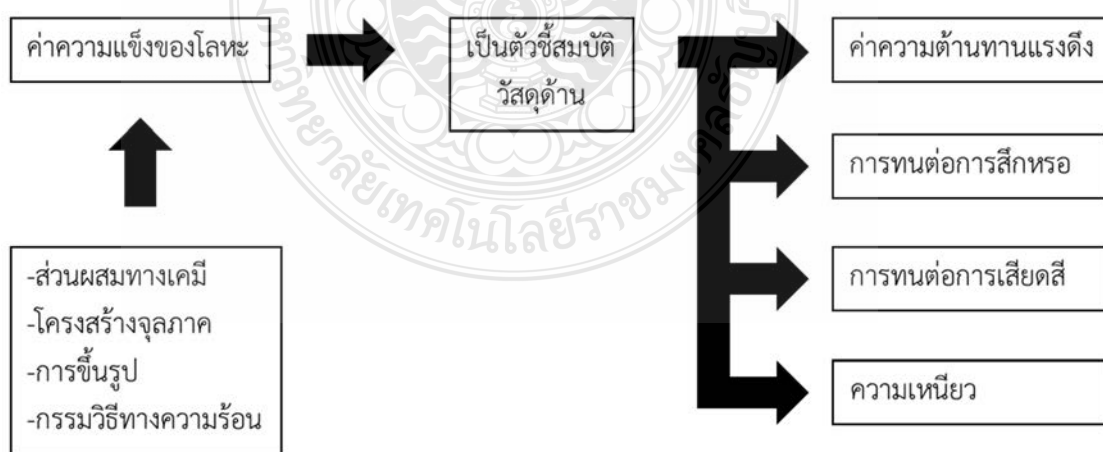
ค. ความแข็งแรงคราก (Yield strength) เป็นจุดที่วัสดุมีการเปลี่ยนรูปร่างถาวร โดยหากให้แรงกระทำกับวัสดุเกินจุดครากนี้ไป วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างไปและไม่กลับสู่สภาพเดิม 100% หรือหากมองลึกลงไปในระดับโครงสร้างของผลึกจุดครากคือจุดที่โครงสร้างผลึกเกิดการเลื่อน (Slip) ของระนาบผลึก จุดครากคือค่าความแข็งแรงที่จุดเชื่อมต่อระหว่างการเปลี่ยนรูปร่างยืดหยุ่น (Elastic deformation) และการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Plastic deformation)

วัสดุบางชนิดจะไม่สามารถสังเกตจุดครากที่แน่นอนได้ ดังนั้นจึงต้องมีการประมาณค่า โดยการออฟเซตที่ 0.2% (0.2% offset) ของความเครียด นั่นคือค่า 0.002 นิ้ว/นิ้ว ในทางวิศวกรรมจะใช้ความเค้นที่จุดครากนี้ในการออกแบบโครงสร้างต่างๆ ความเค้น 0.2% ออฟเซตนี้ บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) [10]

ง. ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile stress) เป็นความแข็งแรงสูงสุด ณ จุดสูงสุดของเส้นกราฟแรงเค้น ความเครียด และเมื่อขึ้นทดสอบเกิดการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเฉพาะบริเวณซึ่งปกติเรียกว่า การเกิดคอคอด [66]

2.3.2 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) [67]

การทดสอบความแข็งของวัสดุนับว่าเป็นการทดสอบคุณสมบัติทางกลที่สำคัญค่าหนึ่ง เพราะสามารถใช้เป็นตัวชี้ให้เห็นถึงคุณสมบัติด้านอื่นๆ ของวัสดุเช่น การทนต่อการสึกหรอ ความแข็งแรงและวิธีการทดสอบที่ไม่ยุ่งยาก โดยใช้หลักการวัดความสามารถต้านทานการกดเข้าของตัวกดที่แข็งกว่าวัสดุที่ทดสอบ ทั้งนี้ค่าความแข็งของวัสดุขึ้นกับส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาค การขึ้นรูป และกรรมวิธีทางความร้อน



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งต่อสมบัติด้านต่างๆ ของวัสดุและตัวแปรที่มีผลต่อความแข็งของโลหะ [67]

ปัจจุบันการวัดค่าความแข็งสามารถกระทำได้ง่าย เนื่องจากอุปกรณ์วัดความแข็งล้วนแต่เป็นระบบอัตโนมัติ แต่สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ การเลือกวิธีทดสอบให้เหมาะสมกับงานที่จะทดสอบ เพราะว่าวิธีทดสอบความแข็งนั้นมีหลายประเภท สำหรับวิธีการวัดความแข็งที่นิยมใช้ในงานโลหะนั้นมี 3 วิธี คือ

2.3.2.1 การทดสอบแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test) การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ อาศัยการกดของหัวกดทรงกลมที่ผลิตจากเหล็กกล้าชุบแข็งหรือทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D ลงบนพื้นผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F โดยคงค่าแรงกดเป็นระยะเวลา 10 ถึง 15 วินาทีสำหรับวัสดุประเภทเหล็กหรือเหล็กกล้า และคงค่าแรงเป็นระยะเวลา 30 วินาทีสำหรับโลหะอ่อน เช่น อะลูมิเนียม และทองเหลือง เป็นต้น โดยทั่วไปลูกบอลที่ใช้เป็นหัวกดมีขนาด 10 มิลลิเมตร และสามารถใช้แรงกดได้ตั้งแต่ 500 กิโลกรัม สูงสุดถึง 3,000 กิโลกรัม หน่วยความแข็งของการทดสอบแบบบริเนลล์คือ BHN หรือ HB [68]

2.3.2.2 การทดสอบแบบรอกเวลล์ (Rockwell Hardness Test) เป็นการวัดค่าความแข็งของวัสดุโดยการวัดความลึกของหัวกดซึ่งทำด้วยเพชรทรงกรวย หรือลูกบอลเหล็กกล้าที่มีขนาด 1.6-12.7 มิลลิเมตร (1/16 – 1/2 นิ้ว) และเลี้ยวอิทธิพลของผิวชิ้นงานทดสอบด้วยการใช้แรงกดนำค่าหนึ่ง (minor load) เพื่อกำหนดจุดอ้างอิงในการวัดความลึก การวัดความแข็งแบบรอกเวลล์สามารถแบ่งออกได้หลายหน่วยการทดสอบจากการใช้แรงกดและหัวกดที่ต่างกัน แต่วิธีการทดสอบที่นิยมใช้ทดสอบกับโลหะมี 3 วิธี คือ รอกเวลล์ซี (Rockwell – C) , รอกเวลล์บี (Rockwell – B) และรอกเวลล์เอ (Rockwell – A) การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซีใช้หัวกดเพชรทรงกรวย มีมุมปลาย 120 องศา ในการทดสอบเริ่มต้นให้แรงกดนำ (Minor load) 10 kgf กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ จากนั้นเพิ่มแรงกดหลัก (Major load) อีก 140 kgf ค่าความแข็งจะถูกอ่านเมื่อนำแรงกดหลักออก ซึ่งเนื้อชิ้นงานที่ถูกกดจะคืนตัวกลับในปริมาณหนึ่ง และคงเหลือเพียงแรงกดนำ [68] เนื่องจากการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell นี้มีหัวกดหลายขนาดและการใช้แรงในการกดที่ต่างกันในเราจึงสามารถเลือกใช้หัวกดและแรงกดที่เหมาะสม สำหรับชิ้นงานทดสอบที่มีความแข็งต่าง ๆ กันได้ตั้งแต่วัสดุที่มีความแข็งต่ำ เช่น พอลิเมอร์ ซึ่งจะใช้ Rockwell scale R จนถึงวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือและใบมีดตัด (Tool materials) ซึ่งจะใช้ Rockwell scale A [69] เป็นต้น

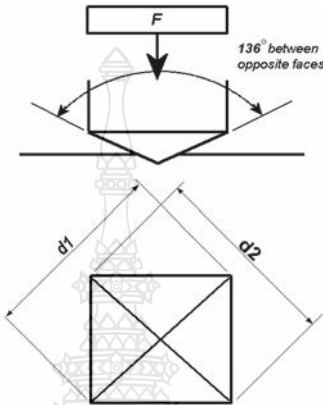
2.3.2.3 การทดสอบแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness test) การทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมที่ปลายหัวกดทำมุม 136 (เป็นมุมที่มีองศาที่ใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) การเคลื่อนที่ของหัวกดที่กดลงบนชิ้นงานจะใช้เวลา 10-15 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวเช่นเดียวกับการทดสอบแบบบริเนล แต่วิธีนี้หัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมาก ๆ ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมาก (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่มีความแข็งมาก ๆ (HV ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกดจะเปลี่ยนเฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ใช้ทดสอบ ซึ่งทำให้วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่าการทดสอบแบบบริเนล (Brinell hardness test) คือไม่ต้องคำนึงถึงอัตราส่วน P/D² และข้อจำกัดในด้านความหนาของชิ้นงานทดลองเนื่องจากหัวกดเพชรมีขนาดเล็กมาก ซึ่งค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หาได้จากสมการที่ 2.5 [70]

$$HV = \frac{1.854 \times P}{D^2} \quad (2.5)$$

โดยที่ HV คือ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ หน่วยเป็น กิโลกรัมแรง/ตารางมิลลิเมตร (kgf/mm²)

P คือ แรงกด หน่วยเป็น กิโลกรัมแรง (kgf)

D คือ ขนาดเส้นทแยงมุมของเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย หน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)



รูปที่ 2.18 ลักษณะรอยกดของการทดสอบแบบวิกเกอร์ [70]

ข้อดี หัวกดมีขนาดเล็กและแรงที่ใช้กดต่ำ รอยกดจึงอาจมีขนาดเล็กกว่าเกรนของโลหะ จึงสามารถวัดความแข็งได้ถึงระดับโครงสร้างจุลภาค เหมาะกับงานทดสอบที่ต้องการความละเอียดของค่าความแข็งสูง สามารถทดสอบได้ทั้งวัสดุอ่อนและวัสดุแข็ง [68]

ข้อเสีย ต้องเตรียมผิวชิ้นงานให้เรียบและสะอาดมากในระดับที่สามารถส่องดูผิวเรียบภายใต้กำลังขยาย 40X ได้ ต้องไม่มีคราบน้ำมัน รอยขีดข่วน หรือฟิล์มออกไซด์ อยู่บนผิวชิ้นงานทดสอบ [68]

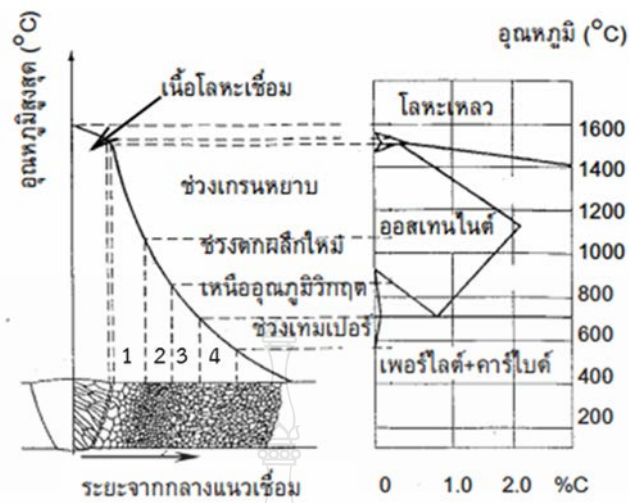
ข้อจำกัด

-ความหนาของชิ้นงานทดสอบไม่ควรน้อยกว่า 1.2 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด [68]

-ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรอยกดกับขอบชิ้นงานทดสอบหรือขอบของรอยกด ควรมีขนาดไม่น้อยกว่า 3 เท่าของความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ยของรอยกด [68]

2.3.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

การตรวจสอบงานเชื่อมด้วยวิธีการทางโลหะวิทยา โดยการตัดเอาชิ้นงานทดสอบจากชิ้นงานตัวอย่าง (Sampling) เพื่อส่องดูโครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณผลกระทบร้อนเทียบกับโครงสร้างเดิม เป็นการตรวจสอบหาความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมเพื่อการตัดสินใจ [71] การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การตรวจสอบในระดับมหภาคและการตรวจสอบในระดับจุลภาค [72] หลักเกณฑ์และตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อการตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างระดับมหภาคและโครงสร้างระดับจุลภาคของแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงอุณหภูมิบริเวณผลกระทบร้อน (HAZ) และบริเวณต่างๆจากกึ่งกลางแนวเชื่อม [73]

2.3.3.1 พื้นที่เนื้อเชื่อม (Weld Metal) เป็นส่วนที่เนื้อโลหะงาน (Base Metal) บางส่วนหลอมเหลวเข้ามารวมตัวกับลวดเชื่อมหรือโลหะเติม เรียกว่า เกิดการ “Dilution” เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน มีโครงสร้างคล้ายงานหล่อ คือ มีการเย็นตัวจากผนังของร่องบากพุ่งเข้าหาที่กึ่งกลางรอยต่อ อุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่า 1700 องศาเซลเซียส และมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว โครงสร้างเกรนจึงค่อนข้างจะมีความละเอียดเนื่องจากโครงสร้างของเดนไดรต์ ไม่มีเวลาฟอร์มตัวเจริญเติบโตมากนัก โดยทั่วไปจะเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมใกล้เคียงกับโลหะงาน ซึ่งส่วนผสมทางเคมีเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้รอยเชื่อมเกิดการรวมตัวกับโลหะงานสมบูรณ์มากที่สุด [71]

2.3.3.2 พื้นที่แนวหมายเลข 1 คือ แนวแบ่งเขตการหลอมเหลวระหว่างเนื้อเชื่อมกับเนื้อโลหะงานเรียกว่า “Fusion Line” จะประกอบไปด้วยส่วนที่โลหะงานหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ (Melting Zone) และส่วนที่หลอมเหลวบางส่วน (Partially Melt Zone) เป็นส่วนที่อ่อนแอที่สุดของแนวเชื่อม [71]

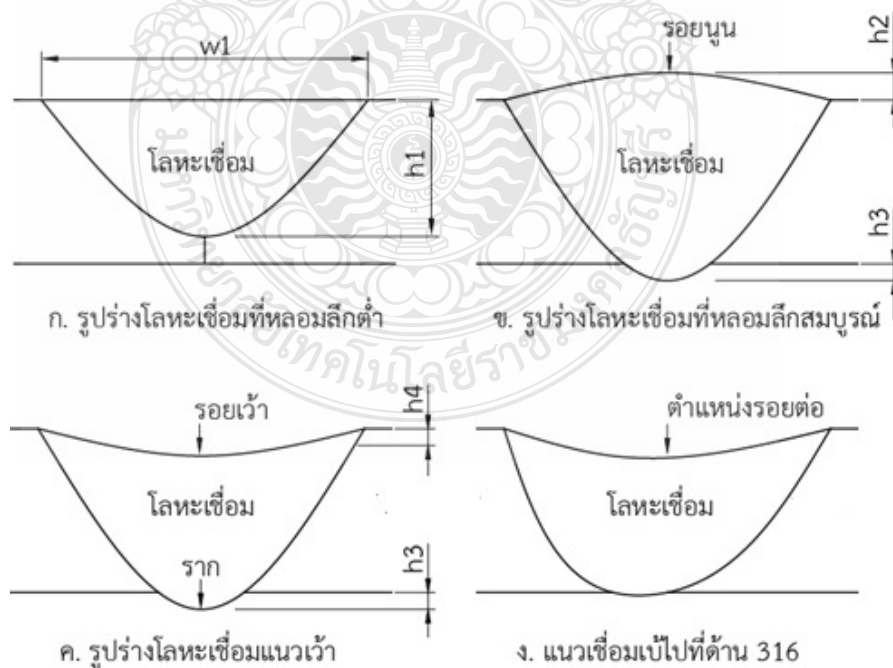
2.3.3.3 พื้นที่ระหว่างหมายเลข 1 และ หมายเลข 2 คือ บริเวณผลกระทบร้อน ที่โลหะงานไม่หลอมเหลวแต่ได้รับ ผลกระทบร้อนจากการเชื่อมสูงถึง 1100 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าจุดวิกฤติมากเกินไป จึงขยายตัวมากและมีอัตราการเย็นตัวสูง ทำให้เกรนของโครงสร้างที่ขยายตัวเนื่องจากได้รับความร้อนสูงขณะเชื่อมไม่มีโอกาสกลับคืนโครงสร้างจุลภาคเดิมเกรนโครงสร้างจุลภาคบริเวณผลกระทบร้อนส่วนนี้จึงหยาบมาก (Coarse Grain Structure) [71]

2.3.3.4 พื้นที่ระหว่างหมายเลข 2 และ หมายเลข 3 คือ บริเวณผลกระทบร้อน ที่โลหะงานไม่หลอมเหลวแต่ได้รับ ผลกระทบร้อนจากการเชื่อมสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อนเพื่อปรับปรุงคุณภาพโครงสร้างจุลภาค เหล็กกล้าตามปกติในกรรมวิธีอบอ่อน หรืออบปกติ แต่ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ มีอัตราการเย็นตัวช้าลงกว่าพื้นที่ ระหว่าง หมายเลข 1 และ

หมายเลข 2 จึงทำให้เกรนมีโอกาสเรียงตัวกลับคืนสภาพเดิม แต่ไม่ถึงขนาดกลับคืนโครงสร้างฯ เดิมเกรนโครงสร้างจุลภาคบริเวณผลกระทบร้อนส่วนนี้จึงละเอียดขึ้น (Fine Grain Zone) [71]

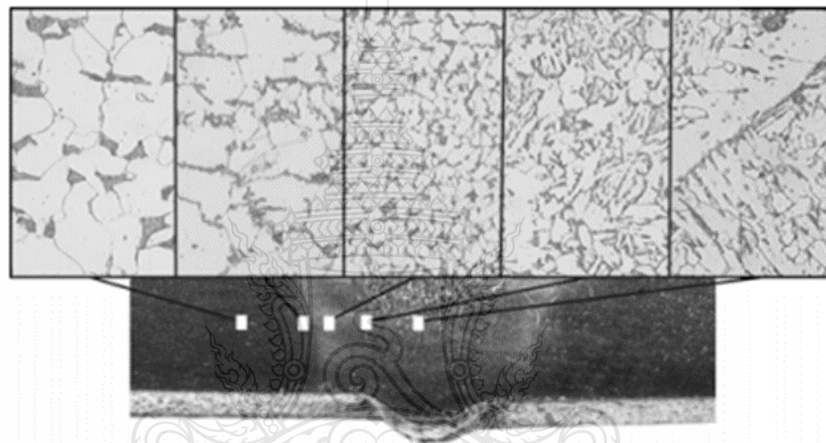
2.3.3.5 พื้นที่ระหว่างหมายเลข 3 และ หมายเลข 4 คือ บริเวณผลกระทบร้อน ที่โลหะงานไม่หลอมเหลวแต่ได้รับ ผลกระทบร้อนจากการเชื่อมสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ 723 องศา เล็กน้อย และมีอัตราการเย็นตัวไม่สูงพอ โครงสร้างจุลภาคจึงเกิด การเปลี่ยนแปลงเพียงบางส่วน พื้นที่นอกเหนือบริเวณผลกระทบร้อน คือ โครงสร้างจุลภาคเดิมของโลหะงาน (Structural of Parent Material) เป็นส่วนที่ได้รับผลกระทบของความร้อนจากการเชื่อมต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง [71]

การตรวจสอบในระดับมหภาค (Macroscopic examination) เป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหวิทยาของตัวอย่างชิ้นงานโดยใช้กำลังขยายต่ำกล่าวคือ เมื่อเตรียมชิ้นงานโดยการขัดหยาบ ขัดละเอียด ขัดเงา (Polishing) และกัดกรด (Etching) แล้วสามารถตรวจสอบได้โดยตาเปล่า (Visual inspection) หรืออาจใช้กำลังขยายได้ไม่เกิน 10 เท่า จุดประสงค์ของการตรวจสอบเพื่อดูความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม ลักษณะ รูปร่าง การแบ่งชั้นของแนวเชื่อม การหลอมละลายของชิ้นงาน ความกว้างความลึกของบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อน (HAZ) ตลอดจนรูปแบบของจุดบกพร่องต่างๆ ของแนวเชื่อม [72] การวัดขนาดรอยซึมลึกแนวเชื่อม (Weld Bead) เป็นอีกส่วนหนึ่งในการตรวจสอบแบบมหภาค (Macro Examination) [74] ซึ่งการวัดรอยซึมลึกแนวเชื่อมนี้ เป็นส่วนสำคัญของการวิเคราะห์ถึงอิทธิพลความร้อนในการเชื่อม (Heat Input) เนื่องจากอิทธิพลความร้อนในการเชื่อมส่งผลโดยตรงต่อการหลอมลึก ความกว้าง ความสูง และบริเวณผลกระทบร้อน [75] ซึ่งจะทำให้การตัดสินคุณภาพแนวเชื่อมมีความถูกต้องมากกว่าการตรวจสอบด้วยตาเปล่า (Visual Inspection) [74] ดังแสดงในรูปที่ 2.20 การกำหนดตำแหน่งการวัดรูปร่างของแนวเชื่อม



รูปที่ 2.20 การกำหนดตำแหน่งการวัดรูปร่างของแนวเชื่อม

การตรวจสอบในระดับจุลภาค (Microscopic examination) เป็นการตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นงานโลหะโดยใช้กำลังขยายที่สูงขึ้นกล่าวคือ ตั้งแต่ 10 เท่าเป็นต้นไป ซึ่งอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค คือ กล้องจุลทรรศน์สำหรับงานทางโลหะวิทยา (Metallurgical microscope) หรือกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 โดยจะมีกำลังขยายอยู่ระหว่าง 10-1,000 เท่า จุดประสงค์ของการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเพื่อตรวจสอบการกระจายตัวและลักษณะของเกรนโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อม (WZ) บริเวณผลกระทบร้อน (HAZ) และบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) [72] ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งจุดประสงค์ดังกล่าวสามารถอธิบายรูปแบบหรือลักษณะโครงสร้างได้ดังนี้



รูปที่ 2.21 รูปแบบการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและมหภาคที่ผ่านกระบวนการเชื่อม [76]

โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมหรือบริเวณที่เกิดการหลอมละลาย (Fusion zone) ลักษณะโครงสร้างจุลภาคจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ ส่วนผสมทางเคมีความเป็นเนื้อเดียวกันและกลไกการแข็งตัว [77]

โครงสร้างบริเวณผลกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของความร้อนจะเกิดกับบริเวณเนื้อโลหะที่ติดกับเนื้อเชื่อม ซึ่งจะกินบริเวณกว้างหรือแคบขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนจากกระบวนการเชื่อม [72] ในกระบวนการเชื่อมบริเวณ (HAZ) จะมีอุณหภูมิระหว่าง 1,100-1,500 องศาเซลเซียส ทำให้โครงสร้างจุลภาคบริเวณนี้เปลี่ยนไปจากเดิมที่ เป็นอยู่ เช่น เเทมเปอร์มาเทนไซต์ (Tempered martensite) เเทมเปอร์เบนไนต์ (Tempered bainite) หรือ เฟอไรต์-เพอร์ไลต์ (Ferrite-pearlite) เปลี่ยนเป็น ออสเทนไนต์ (Austenite) เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงเกิน 1,100°C ทำให้เกรนเติบโต (Grain growth) จากขนาดเดิม [78] ซึ่งทำให้เกรนบริเวณนี้หยาบ (Coarse grain) [79]

โครงสร้างบริเวณโลหะฐาน (Base metal) บริเวณนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคหรือสมบัติทางกลใดๆ [77]

ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการเลือกใช้เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่มีศักยภาพสูง ในที่นี้คือมีกำลังขยายที่มากกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และใช้แหล่งกำเนิดแสงจากลำแสงอิเล็กตรอน ดังนั้นกล้องชนิดนี้จึงได้ชื่อว่า “กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน” [72]

1) การเตรียมชิ้นงาน เพื่อนำชิ้นงานไปทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์มีขั้นตอนดังนี้

ก. การตัดชิ้นงานตัวอย่าง การตัดชิ้นงานที่จะนำมาตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ ขณะตัดต้องไม่ให้ชิ้นงานร้อน การตัดที่นิยมใช้กันมาก เช่น เลื่อยมือ เครื่องเลื่อย ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดและง่าย ชิ้นงานที่จะนำมาตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์นิยมเรียกกันว่า ชิ้นงานทดสอบหรือชิ้นงานตัวอย่าง(Specimens)

ข. การทำเรือนชิ้นงานตัวอย่าง โดยนำชิ้นงานที่เตรียมไว้ไปทำเรือน (Mounting) หุ้มชิ้นงานด้วยอัดเบเกไลท์ (Bagelite) หรือหล่อด้วยเรซิน ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการจับถือและการเตรียมชิ้นงานในขั้นตอนการขัดดูโครงสร้างก็สามารถทำได้สะดวกและรวดเร็วขึ้น

ค. การขัดด้วยกระดาษทราย (Grinding) เป็นการปรับระนาบผิวขัดให้ได้ระดับเรียกว่าเป็นการขัดหยาบหรือปรับระนาบ และเป็นการขัดให้ผิวหน้าให้เรียบ เรียกว่า เป็นการขัดละเอียด ในกรณีชิ้นงานทดสอบผิวหน้าไม่เรียบและเอียงอีกทั้งเป็นการลดความลึกของรอยขีดข่วนให้น้อยลง จนกระทั่งไม่มีรอยขีดข่วนบนผิวหน้างาน ถ้าผิวงานไม่เรียบมีรอยและเอียงจะทำให้การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ภาพที่ไม่ถูกต้องและคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง การขัดด้วยกระดาษทรายชิ้นงานจะต้องทำการลบมุมลบเหลี่ยมก่อนเพื่อป้องกันไม่ให้กระดาษทรายขาดในระหว่างการทำการขัด การขัดเริ่มต้นด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80-150 ในกรณีชิ้นงานทดสอบผ่านการตัดด้วยเลื่อยมือหรือเครื่องเลื่อย และขัดกระดาษทรายเบอร์ 150-180 ในกรณีชิ้นงานทดสอบผ่านการตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงานทดสอบ (Cut off machine) การขัดด้วยกระดาษทรายมักขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ต่างๆ จากหยาบไปจนกระทั่งละเอียดที่สุด คือ เบอร์ 80 240 320 400 600 800 1000 และ 1,200 ตามลำดับ การขัดด้วยกระดาษทรายไม่ควรขัดข้ามเกินสองเบอร์ เช่น ขั้นแรกขัดด้วยเบอร์ 180 ต่อไปขัดด้วยเบอร์ 400 เป็นต้น เพราะทำให้เวลาในการขัดนานและรอยขีดข่วนไม่หมดการขัดด้วยกระดาษทราย ควรใช้แรงในการขัดที่พอเหมาะไม่ควรใช้แรงกดมากเกินไปจะทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนผิวหน้างานลึกเกินไปมีขนาดไม่สม่ำเสมอ เศษผงขัดอาจฝังอยู่ในรอยขีดและระนาบผิวขัดเอียงหรือบิดเบี้ยวได้ ถ้าใช้แรงกดน้อยจะทำให้การขัดซ้ำในการขัดจะใช้วิธีการขัดเปียก (Wet grinding) โดยให้น้ำไหลผ่านกระดาษทรายตลอดเวลา เพราะน้ำจะช่วยพัดเอาเศษผงขัดออกไปจากผิวหน้าและช่วยหล่อเย็นไม่ให้ผิวชิ้นงานทดสอบร้อน วิธีการขัดกระทำโดยจับชิ้นงานทดสอบให้ด้านผิวหน้าที่ขัดจะหันลงมากากกระดาษทราย แล้วกดชิ้นงานด้วยแรงกดที่เท่ากันทุกด้าน เพื่อให้ผิวขัดได้ระนาบเดียวกันอย่างทั่วถึง รอยขีดไปในทิศทางเดียวกัน และรอยขีดมีขนาดใกล้เคียงกัน เมื่อเปลี่ยนกระดาษทรายแต่ละเบอร์ทิศทางของการขัดต้องทำมุมกับรอยขีดของกระดาษทรายเบอร์เก่า 45° - 90° ทุกครั้ง และขัดในทิศทางเดียวกันตลอดจนกว่าจะเปลี่ยนเบอร์ใหม่จนกระทั่งตรวจสอบดูผิวขัดไปทางเดียวกัน ไม่มีรอยตัดผ่านใดๆ การตรวจสอบอาจตรวจสอบด้วยตาเปล่าหรือกล้องจุลทรรศน์ การขัดด้วยกระดาษทรายแต่ละเบอร์ เมื่อขัดเสร็จจะต้องล้างชิ้นงานและล้างมือให้สะอาด เพื่อป้องกันไม่ให้เศษผงขัดจากขั้นต้นไปถึงขั้นต่อไปซึ่งจะละเอียดขึ้นเรื่อยๆ วิธีการขัด

กระทำได้ 2 วิธี คือ การขัดมือ (Hand grinding) และการขัดด้วยเครื่องอาจเป็นเครื่องขัดแบบสายพานงานขัด แลปปิ้ง (Lapping) และการขัดอัตโนมัติ (Automatic grinding)

ง. การขัดมัน (Polishing) เป็นขั้นตอนการขัดผิวชิ้นงานทดสอบขั้นสุดท้าย เพื่อขจัดรอยขีดข่วนที่เกิดจากขั้นตอน การขัดผิวด้วยกระดาษทรายให้หมดไป และให้ผิวชิ้นงานเรียบเป็นมันเงา การขัดมันกระทำได้หลายวิธี ได้แก่ การขัดด้วยวิธีทางกล (Mechanical polishing), การขัดด้วยมือ (Hand polishing), การขัดด้วยเครื่องขัดอัตโนมัติ (Automatic polishing), การขัดด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic polishing) และ การขัดด้วยวิธีพิเศษ (Special polishing) การขัดมันกระทำโดยใช้ผ้าขัด (Polishing cloth) กับผงขัดหรือสารขัด (Polishing abrasive) ผงขัดหรือสารขัดที่ใช้ในการขัดมันเป็นผงขัดที่มีความละเอียดสูง สามารถแบ่งตามชนิดของวัสดุได้ 3 ชนิดใหญ่ๆ ได้แก่

ผงขัดชนิดออกไซด์ (Oxide polishing : OP) ได้แก่ อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO_3) ผงขัดออกไซด์เป็นที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป โดยเฉพาะอลูมิเนียมออกไซด์ และอลูมินากับแมกนีเซียมออกไซด์ เพราะมีความเหนียวและนุ่มไม่ทำให้ผิวชิ้นงานเสียหายและเกิดรอยขีดข่วน

ผงขัดชนิดอลูมิเนียมออกไซด์ หรือมักเรียกกันว่า อลูมินา เป็นวัสดุที่มีความแข็งประมาณ 9 โมลส์เกล ใช้สำหรับขัดโลหะแข็งแบ่งได้ 2 ชนิด คือ ชนิดอัลฟาอลูมินา (Alpha alumina) มีขนาด $0.3-15 \mu m$ มีความแข็งสูงใช้สำหรับขัดมันหยาบหรือขัดมันก่อน กับชนิดแกมมาอลูมินา (Gamma alumina) มีขนาด $0.3-15 \mu m$ มีความแข็งปานกลางและต่ำกว่าชนิดอัลฟาอลูมินาใช้สำหรับ ขัดมันละเอียดหรือขัดมันขั้นสุดท้าย

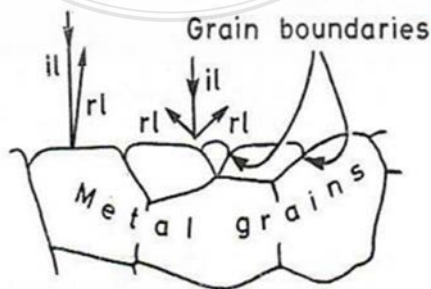
ผงขัดชนิดเพชร (Diamond polishing : DP) เป็นผงขัดที่มีอำนาจในการขัดสูงทำให้ขัด ได้เร็วและได้ระนาบดี สามารถใช้ขัดวัสดุได้ทุกชนิด

2) วิธีการทดสอบ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Light microscope) ในขั้นตอนนี้ ชิ้นงานตรวจสอบจะถูกเตรียม เพื่อให้สามารถนำชิ้นตรวจสอบนั้นไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ [72]

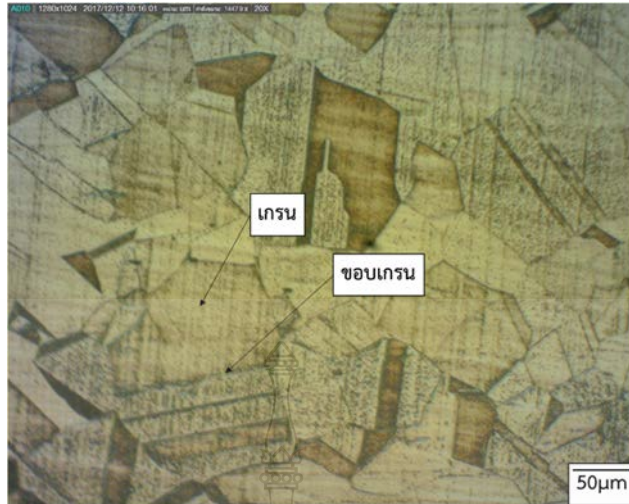


รูปที่ 2.22 กล้องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค [72]

ขั้นตรวจสอบที่ถูกกัดด้วยกรดเรียบร้อยแล้ว ไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light microscope) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 กรดจะทำปฏิกิริยากับโครงสร้างหรือเฟสแต่ละชนิดที่อยู่ภายในโครงสร้างของโลหะ ด้วยอัตราปฏิกิริยาเคมีที่ต่างกันทำให้เกิดความลึกที่ต่างกันของโครงสร้างที่ถูกกัดกรด โครงสร้างจุลภาคของโลหะบริเวณขอบเกรน (Grain boundary) มีความไวในการทำปฏิกิริยากับกรดได้เร็วกว่าบริเวณภายในเกรนด้วยเหตุนี้ขอบเกรนจึงมีความลึกมากกว่า [80] โดยการตรวจสอบวางชิ้นงานให้อยู่ตรงกลางบริเวณที่แสงผ่านและให้ลำกล้องเลื่อนมาอยู่ใกล้ขึ้นตรวจสอบมากที่สุด ลำแสงไฟที่ส่องผ่านตกกระทบกับผิวชิ้นทดสอบจะสะท้อนผ่านเลนส์วัตถุและเลนส์ตาของกล้อง ขอบเกรนมีความลึกมากกว่าเมื่อแสงจากกล้องจุลทรรศน์ส่องผ่านก็จะสะท้อนกลับมายังเลนส์ตาน้อยกว่าบริเวณภายในเกรนที่ตื้นกว่าจึงทำให้เห็นที่บริเวณขอบเกรนจะเห็นเป็นเส้นสีดำ (มืด) ขณะที่เนื้อเกรนเป็นสีเหลือง (สว่าง) [80-81] แล้วทำการบันทึกผลเพื่อใช้ประกอบในการวิเคราะห์เปรียบเทียบพื้นที่ที่เกิดการเชื่อมต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.23 และรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.23 การสะท้อนแสงที่ต่างกันของบริเวณขอบเกรนและภายในเกรน [81]



รูปที่ 2.24 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI316

การวัดขนาดเกรน (Grain size determination) ขนาดเกรนของโครงสร้างจุลภาคมีผลต่อสมบัติทางกลของโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความแข็งแรง ค่าความแข็งแรงดึง โลหะที่มีเกรนขนาดเล็กย่อมมีขอบเกรนมากกว่าโลหะที่มีขนาดเกรนโตกว่า ด้วยเหตุนี้โลหะที่มีขนาดเกรนเล็กจึงมีความแข็งแรงสูง ดังสมการ Hall-Petch equation [80]

$$\sigma_o = \sigma_i + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (2.6)$$

เมื่อ σ_o = ความเค้นจุดคราก (Yield stress)

σ_i = ความเค้นเสียดทาน (Friction stress)

K = Locking parameter

d = ขนาดเกรน (Grain diameter)

การวัดขนาดของเกรนโครงสร้างโลหะตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุอเมริกา (ASTM standard, American Standard of Testing Materials) มีวิธีการวัดอยู่ 3 วิธี คือ

1). วิธีการเปรียบเทียบ (Comparison method) ปกติภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายประมาณ 100 เท่า พิจารณาขนาดของเกรนด้วยการเปรียบเทียบกับภาพของโครงสร้างจุลภาคมาตรฐาน แล้วกำหนดหมายเลขมาตรฐานที่มีชื่อว่า “ASTM grain size number” ซึ่งค่าเลขที่มีค่ามากขนาดของเกรนจะมีความละเอียด วิธีการนี้เหมาะสมกับโครงสร้างจุลภาคที่มีเกรนแบบ Equiaxed grain (เกรนค่อนข้างกลม) โดยสามารถคำนวณหา “ASTM grain size number” โดยการนับจำนวนของเกรนในพื้นที่ 1 ตารางนิ้วที่กำลังขยาย 100 เท่า แล้วคำนวณได้ตามสมการดังต่อไปนี้ [80-81]

$$N = 2^{n-1} \quad (2.7)$$

N = จำนวนเกรนในหนึ่งตารางนิ้วที่ขนาดกำลังขยาย 100 เท่า

n = ขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM (Grain size number)

2). วิธีกำหนดพื้นที่ (Planimetric method หรือ Jeffries method) พื้นที่วงกลม พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาพให้มีพื้นที่ 5,000 ตารางมิลลิเมตร โดยภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจะต้องมีจำนวนเกรนไม่น้อยกว่า 50 เกรน และมีจำนวนเกรนไม่เกิน 100 เกรน แล้วหาจำนวนเกรนต่อตารางมิลลิเมตร (N_A) ได้จากสมการ [80-81]

$$N_A = f \left(N_{inside} + \frac{N_{intercept}}{2} \right) \quad (2.8)$$

เมื่อ N_A = จำนวนเกรนต่อตารางมิลลิเมตรที่กำลังขยาย 1 เท่า

f = Jeffries' multiplier

N_{inside} = จำนวนเกรนที่อยู่ภายในพื้นที่

$N_{intercept}$ = จำนวนเกรนที่ถูกตัดผ่าน

ตารางที่ 2.5 Jeffries multipliers ที่ค่ากำลังขยายต่างๆ [81]

กำลังขยาย	Jeffries multipliers	กำลังขยาย	Jeffries multipliers
1	0.0002	150	4.5
10	0.02	200	8.0
25	0.125	300	18.0
50	0.5	500	50.0
75	1.125	750	112.5
100	2.0	1000	200.0

ขนาดพื้นที่ 5,000 ตารางมิลลิเมตรในรูปทรงต่าง ๆ เป็นดังนี้

- วงกลมจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 79.8 มิลลิเมตร
- สี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาด 70.7 × 70.7 มิลลิเมตร
- สี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาด 50.0 × 100.0 มิลลิเมตร

หาขนาดเกรนมาตรฐาน ASTM ได้จากสมการ

$$G = 2.9542 + 3.3219 \log_{10} N_A \quad (2.9)$$

เมื่อ G = ขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM

กรณีที่ใช้กำลังขยายอื่นในการถ่ายภาพสามารถคำนวณหาจำนวนเกรนต่อตารางมิลลิเมตรที่กำลังขยาย 1 เท่าได้ จากสมการ

$$N_A = N_{AO} \left(\frac{M}{M_b} \right)^2 \quad (2.10)$$

N_A = จำนวนเกรนต่อตารางมิลลิเมตรที่กำลังขยาย 1 เท่า

N_{AO} = จำนวนเกรนต่อตารางมิลลิเมตรที่กำลังขยาย M_b

M_b = กำลังขยายพื้นฐาน (Basic magnification) ปกติจะมีค่า 100 หรือ 1 เท่า

M = กำลังขยายใดๆ

3). วิธีการลากเส้นตัดผ่าน (Intercept method) การหาขนาดเกรนด้วยวิธีการลากเส้นตัดผ่านมีด้วยกันหลายวิธี เช่น

- Heyn lineal intercept procedure โดยการลากเส้นตัดผ่านบนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค จากนั้นนับจำนวนเกรนที่เส้นตรงตัดเกรนทำจำนวนหลายๆเส้นแล้วหาค่าเฉลี่ย (Arithmetic average) โดยบางครั้งอาจใช้วิธีการขีดเส้นลงบนผิวของชิ้นงานโลหะที่จะทำการวัดขนาดของเกรนด้วยความยาว 0.005 นิ้ว แล้วขยายดูจากกล้องไมโครสโคปเมื่อขยายที่ 500 เท่า ความยาวของเส้นจะอยู่ที่ 2.5 นิ้ว และ 3.75 นิ้ว ที่กำลังขยาย 750 เท่า โดยในทางปฏิบัติเส้นที่ขีดตัดผ่านเกรนจำนวน 8-11 เกรน

จัดว่ามีลักษณะเกรนหยาบ ถ้านับได้ 12-15 เกรน จัดได้ว่าเป็นเกรนละเอียด (Fine grain) ถ้ามีมากกว่า 15 เกรน จัดได้ว่าเป็นเกรนที่มีความละเอียดมาก (Very fine grain) [80]

- Circular intercept procedure โดยการลากเส้นวงกลม 3 เส้น บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ต้องการหาขนาดเกรนโดยที่วงกลมทั้ง 3 วงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ 79.58, 53.05 และ 26.53 ตามลำดับ โดยความยาวเส้นรอบวงของทั้ง 3 เส้นรวมกันแล้วมีค่า 500 มิลลิเมตรพอดี จากนั้นนับจำนวนเกรนที่ถูกเส้นตัดผ่านจุดที่เป็นรอยต่อระหว่าง 3 เกรน ให้มีค่า 1.5 จึงนำไปแทนค่าในสมการเพื่อหาค่าจำนวนขอบเกรนที่ถูกตัดผ่านต่อความยาวของเส้นทดสอบ (P_L Number of grain boundary intersections per unit length of test line) [80]

$$\tilde{P}_L = \frac{P_i}{L/M} \quad (2.11)$$

P_i = จำนวนขอบเกรนที่ถูกตัดผ่านด้วยเส้นทดสอบ

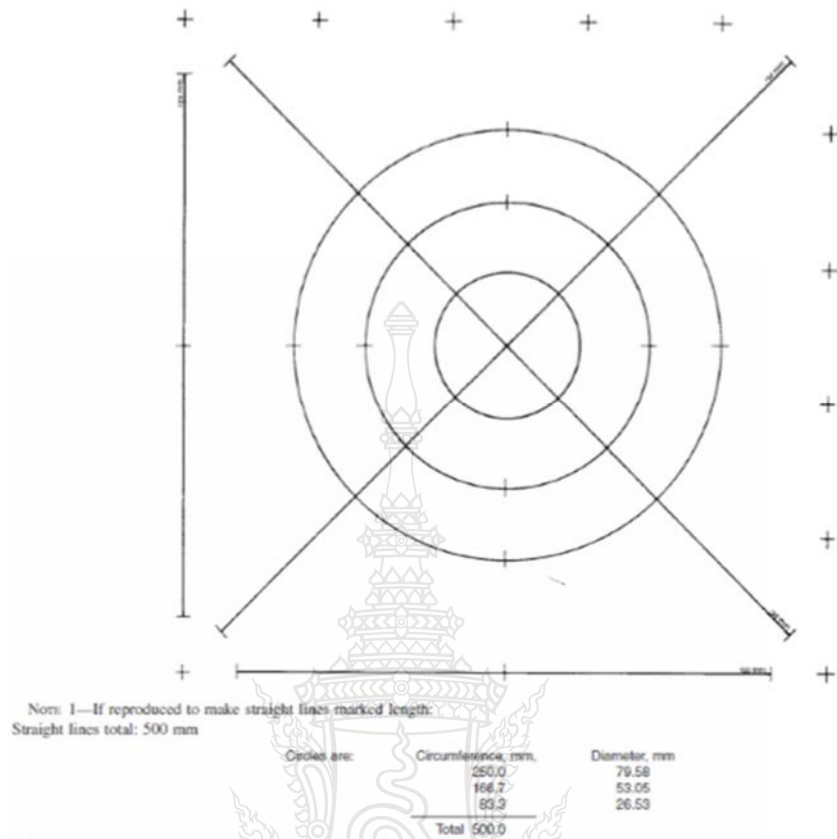
\tilde{P}_L = จำนวนขอบเกรนที่ถูกตัดผ่านต่อความยาวของเส้นทดสอบ

L = ความยาวของเส้นทดสอบ (มิลลิเมตร)

M = ขนาดกำลังขยาย

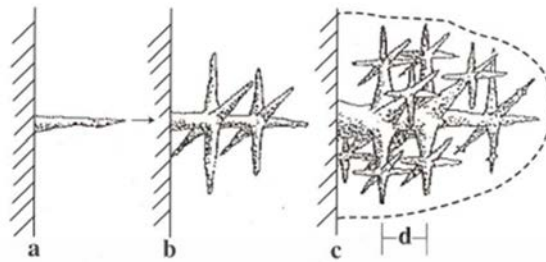
เมื่อทราบค่า \tilde{P}_L แล้วสามารถนำไปคำนวณหาขนาดเกรนได้ตามสมการ

$$G = (6.6438561 \log_{10} \tilde{P}_L) \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างการสร้างเส้นรอบวง 3 เส้น เพื่อหาขนาดเกรนแบบ Circular intercept procedure [81]

ช่องว่างระยะห่างระหว่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิ (Secondary Dendrite Arm Spacing, SDAS) เป็นส่วนที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของโลหะมากกว่าขนาดของเกรน ทั้งนี้ SDAS เป็นตัวกำหนดการกระจายตัวของสารประกอบ (Intermetallic Compound) ซึ่งอยู่ระหว่างแขนของเดนไดรต์ (Interdendritic Intermetallic Constituent) [82]



ขั้นตอนการโตของเดนไดรต์

a). แขนเดนไดรต์ขั้นปฐมภูมิ

b). แขนเดนไดรต์ทุติยภูมิเกิดจากด้านข้าง

c). แตกกิ่งก้านมากมาย

d). ระยะห่างระหว่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิ

รูปที่ 2.26 แบบจำลองการเติบโตของผลึก (Dendritic Growth) [82]

การเติบโตของเดนไดรต์มีลักษณะรูปแบบการเติบโตในทิศทางด้านหน้าและด้านข้าง มีการสร้างแขนทุติยภูมิ (Secondary arms) เพิ่มขึ้นจนมีลักษณะรูปร่างเหมือนแพ (raft) ดังแสดงในรูปที่ 2.27 แขนของเดนไดรต์มีทิศทางขนานกันทั้งหมด ในรูปแบบการเรียงตัวในระนาบของอะตอม (atomic plane) ทั้งนี้ระหว่างการแข็งตัวของแขนเดนไดรต์จะเกิดการเชื่อมติดกันเกือบสมบูรณ์ เป็นเหตุทำให้เกิดผลึกเดี่ยวที่เรียกว่า “เกรน” เกรนหนึ่งเกรนจะประกอบไปด้วยเดนไดรต์หนึ่งพันเดนไดรต์ อยู่ในแพเดียว หรือในหนึ่งเกรนอาจประกอบไปด้วยแขนของเดนไดรต์ปฐมภูมิเพียงตัวเดียวหรืออาจประกอบไปด้วยแขนของเดนไดรต์ทุติยภูมิแขนเดียวก็เป็นไปได้ [83]



รูปที่ 2.27 แสดงการเกิดของเกรนเดนไดรต์ที่กลายเป็นเกรนบนผนังแบบหล่อ [84]

ในกรณีที่ส่วนผสมทางเคมีที่ไม่สมดุลจะเกิดการแข็งตัวที่ไม่สมดุลทำให้ส่วนผสมทางเคมีแยกตัว ในขณะที่ส่วนผสมทางเคมีมีการแยกตัวที่ระดับจุลภาค คือการแยกตัวของส่วนผสมทางเคมีระหว่างแขนเดนไดรต์เป็นพื้นที่ในส่วนของโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง จึงเกิดการแข็งตัวก่อนและพื้นที่

ระหว่างแกนเดนไดรต์เป็นพื้นที่ของโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ จึงทำให้เกิดการแข็งตัวซ้ำเป็นเหตุให้พื้นที่ระหว่างแกนเดนไดรต์มีส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของพื้นที่แตกต่างจากพื้นที่ของเดนไดรต์และเป็นสาเหตุส่งผลให้ชิ้นงานมีสมบัติที่ไม่ดี [21]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มูหามัด เต๊ะยอ [6] บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติทางกลรวมไปถึงโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมต่อชนระหว่างอลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งต่างชนิดกันคือ SSM356 และ SSM6061 ในสภาพที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 (as cast และ T6) ด้วยกระบวนการเชื่อมที่แตกต่างกันระหว่างการเชื่อมเสียดทานแบบกวนการเชื่อมทิก แบบเติมลวดและการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดเป็นการเชื่อมต่อนชิ้นงานที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร ในการวิจัยชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 นั้นเป็นการวิจัยขั้นต้นพบว่ากระบวนการเชื่อมทิกแบบเติมลวด การเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดและการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถเชื่อมอลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งต่างชนิดกันได้ดี และจากผลการวิจัยชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 พบว่าทุกกระบวนการเชื่อมสามารถเชื่อมชิ้นงานได้กระบวนการเชื่อมที่แตกต่างกันมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงซึ่งกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด คือ 168.32 MPa ค่าความแข็งแรงดึงทุกกระบวนการเชื่อมที่บริเวณตรงกลางแนวเชื่อมจะมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และค่าความแข็งแรงจะค่อย ๆ ลดลงต่ำสุดจนถึงบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากนั้นค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นจนถึงบริเวณ ของเนื้อโลหะเดิมโดยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมสูงสุด คือ 74.1 HV จากการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการสถิติพบว่ากระบวนการเชื่อมและลักษณะของชิ้นงานมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ประภาศ เมืองจันทร์บุรี [56] ศึกษาผลกระทบของแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมทิกประสิทธิภาพสูงโดยใช้แก๊สแอคทีฟเป็นแก๊สปกคลุมเพื่อเชื่อมรอยต่อชนทำราบเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 โดยทำการออกแบบชุด หัวเชื่อมบนระบบน็อตเชิลสองชั้นและศึกษาผลการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบไม่เติมเนื้อเชื่อม (Autogeneous) โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุมชั้นในซึ่งเป็นแก๊สอาร์กอนและอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมชั้นนอกซึ่งเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมชั้นในต่อแก๊สปกคลุมชั้นนอก(Ar/CO₂) ในปริมาณที่แตกต่างกันได้แก่ 3/9,4/8,5/7 ลิตรต่ออนาทีเปรียบเทียบกับ การเชื่อมทิกแบบธรรมดา (Conventional) ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนปกคลุม 12 ลิตรต่ออนาที โดยมี ตัวแปรคงที่คือ กระแสเชื่อม DCEN 150 แอมแปร์ ความเร็วเดินเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่ออนาทีและระยะอาร์ค 3 มิลลิเมตร หลังจากการทดลองเชื่อมนำแนวเชื่อมที่ได้มาวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค ได้แก่สัดส่วนการหลอมละลายลึก (D/W) และโครงสร้างจุลภาคจากการทดลองพบว่าการเชื่อมระบบแก๊สปกคลุมสองชั้นเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สปกคลุมน้อยสุดและอัตรา การไหลของแก๊สปกคลุมชั้นนอกสูงสุด(Ar/CO₂ =3/9 ลิตรต่ออนาที) ให้ค่าสัดส่วนการหลอมละลายลึกเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 0.31 เมื่อเทียบกับทุกสภาวะการเชื่อม สำหรับโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมมีลักษณะเป็นแบบ skeletal δ -ferrite dendritic

ตรีเนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ [75] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของแก๊สคลูมที่มีผลกระทบต่อการการหลอมลิกของแนวเชื่อม โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อาร์กอน ฮีเลียม แก๊สผสมระหว่างอาร์กอน 82 เปอร์เซ็นต์ กับคาร์บอนไดออกไซด์ 18 เปอร์เซ็นต์และแก๊สผสมระหว่างอาร์กอน 95 เปอร์เซ็นต์ กับออกซิเจน 5 เปอร์เซ็นต์ จะให้ลักษณะการหลอมลิกที่ที่แตกต่างกันออกไปตามสมบัติของแก๊ส แต่ละชนิดการดำเนินงานได้ทำการทดลองเชื่อมเหล็กกล้า ASTM A 36 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลูม ควบคุมด้วยหุ่นยนต์งานเชื่อมในช่วงกระแสเชื่อมที่เหมาะสมจากนั้นทำการทดสอบโครงสร้างมหภาคและทำการเปรียบเทียบลักษณะการหลอมลิกของแนวเชื่อมโดยการวัดขนาด ความกว้าง ความลึก และความสูงของแนวเชื่อมตลอดจนพื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อมด้วยโปรแกรม MotiC Image Plus 2.0 ML ผลการดำเนินงานวิจัยสามารถทราบถึงข้อแตกต่างของแก๊สคลูมที่ใช้ในการเชื่อมเหล็กชนิดเดียวกัน แต่มีความแตกต่างกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาด และรูปร่างของแนวเชื่อมเมื่อใช้แก๊สคลูมต่างกัน ผลที่ได้จากการทดสอบ คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะให้การหลอมลิกที่ดีที่สุด เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะนำความร้อนได้ดี จึงส่งผลทำให้ความร้อนไปยังชิ้นงานได้มาก และให้การหลอมลิกได้ดีเมื่อเทียบกับแก๊สคลูมชนิดอื่นที่พารามิเตอร์เหมือนกัน

สิทธิพงษ์ แสงอินทร์ [92] ได้ทำการศึกษาผลของการกระจายความร้อนต่อรูปร่างของแนวเชื่อมในชิ้นงานที่มีความหนาต่างกัน โดยพิจารณาจากความกว้าง อัตราการหลอมลิก ความนูนแนวเชื่อม และพื้นที่ซึ่งได้รับอิทธิพลจากการกระจายความร้อน ทำการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนมาตรฐาน ASTM A36 ที่มีความหนา 3-9 มิลลิเมตร ด้วยการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลูม (Gas Metal Arc Welding: GMAW) เพื่อดูปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน โดยเปรียบเทียบอัตราเร็วป้อนลวดและความเร็วในการเชื่อมที่ 42.33-59.26 กับ 4.23-6.35 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ารูปร่างของแนวเชื่อมมีลักษณะแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน และการกระจายความร้อนในพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่มีความหนาต่างกัน โดยความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานในอัตราที่สูงส่งผลให้อัตราการหลอมลิกแนวเชื่อมสูง ความนูนแนวเชื่อมต่ำ และแนวเชื่อมมีความกว้าง ในขณะที่ความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานในอัตราที่ต่ำส่งผลให้อัตราการหลอมลิกแนวเชื่อมต่ำและมีความนูนแนวเชื่อมสูง นอกจากนี้ชิ้นงานที่บางกว่าส่งผลให้มีความกว้างของบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากการกระจายความร้อนมากกว่าชิ้นงานที่หนากว่า

Takatoshi Yamamoto [22] ได้ศึกษาพฤติกรรมของสแตนเลสชนิด 312L ที่มีโมลิบดีนัม 6% ทำการทดสอบในสารละลาย NaCl โดยใช้เทคนิค micro-indentation ร่วมกับสแตนเลสชนิด 304 และ 316L ความเสถียรสูงของแผ่นฟิล์มพาสซีฟที่เกิดขึ้นบนสแตนเลสชนิด 312L ถูกตรวจสอบโดยการวิเคราะห์การทำโพลาไรซ์เชิงลึกของฟิล์มพาสซีฟโดยใช้การปล่อยแสงแบบ (GDOES) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.9 mol dm⁻³ NaCl ที่ 296 ปรากฏว่าเหล็กกล้าไร้สนิมประเภท 304 และ 316L พบพาสซีฟสูงสุด 0.3 V (SHE) ซึ่งสูงกว่าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ในทางตรงกันข้ามไม่มีการกัดกร่อนแบบรูเข็มเกิดขึ้นกับสแตนเลสชนิด 312L แม้จะมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็ม แต่จลนพลศาสตร์การดูดซับของสแตนเลสทั้งสามที่ตรวจสอบโดยการเอียงขนาดเล็กที่ 0.3 V (SHE) มีลักษณะคล้ายคลึงกัน การปรากฏตัวของโมลิบดีนัมในเหล็กกล้าไร้สนิมไม่ได้ส่งผลต่อจลนพลศาสตร์ การคืนสภาพพื้นผิวสแตนเลสชนิด 312L จะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับความเป็นไปได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไม่ผ่านการคงสภาพจะเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดในบริเวณใกล้เคียงกับแนวขวาง การชุบใหม่

เกิดขึ้นโดยไม่ได้มาพร้อมกับการละลายของเหล็กอย่างมีนัยสำคัญโดยไม่คำนึงถึงความมั่นคงของสถานะ
แฝง การวิเคราะห์สถานะการณเชิงลึกของฟิล์มพาสซีฟบนสแตนเลสชนิด 312L ที่เกิดขึ้นในหลาย ๆ
ด้านพบว่าสปีชีส์ของโมลิบดีนัมเสริมสมรรถนะในชั้นนอกของฟิล์มพาสซีฟด้านล่างมีชั้นที่เสริมด้วย
โครเมียม การซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนอาจถูกขัดขวางโดยชั้นนอกที่มีโมลิบดีต

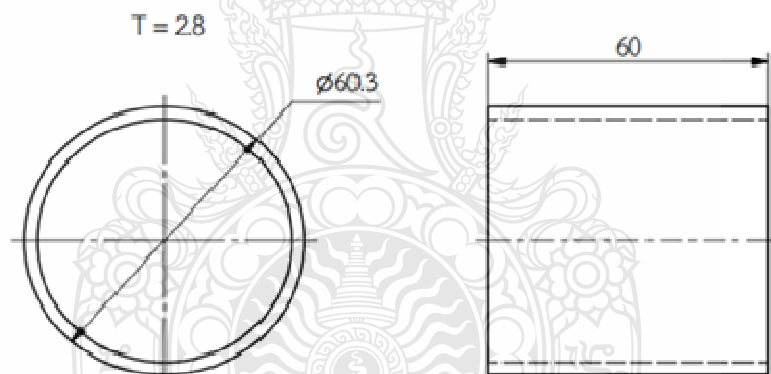


บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินงานวิจัยนี้ใช้กรรมวิธีการเชื่อม GTAW วัสดุต่างชนิด โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 กับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L เป็นชิ้นงานเชื่อมทดลอง ลักษณะรอยต่อชิ้นงานเป็นแบบ รอยต่อชนชนิดไม่บากหน้างาน การเชื่อมจะเป็นแบบอัตโนมัติโดยกำหนดให้หัวเชื่อมอยู่กับที่และชิ้นงาน หมุนตามเข็มนาฬิกา จากนั้นนำชิ้นงานเชื่อมไปทดสอบสมบัติทางกลและตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะ วิทยา การวิจัยครั้งนี้มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.1 วัสดุและอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการทดลองมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI316 และ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L โดยวัสดุทั้งสองชนิดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกโดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60.3 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตร และหนา 2.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 ขนาดของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง (Wt%)

ชนิดเหล็กกล้าไร้สนิม	ส่วนผสมทางเคมี							
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
AISI304L	0.0504	1.4638	0.0249	0.0143	0.4695	18.3448	7.1940	0.0590
AISI316	0.0504	1.0491	0.0236	0.0199	0.4752	15.3228	8.5050	0.6663

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกลของวัสดุทดลอง

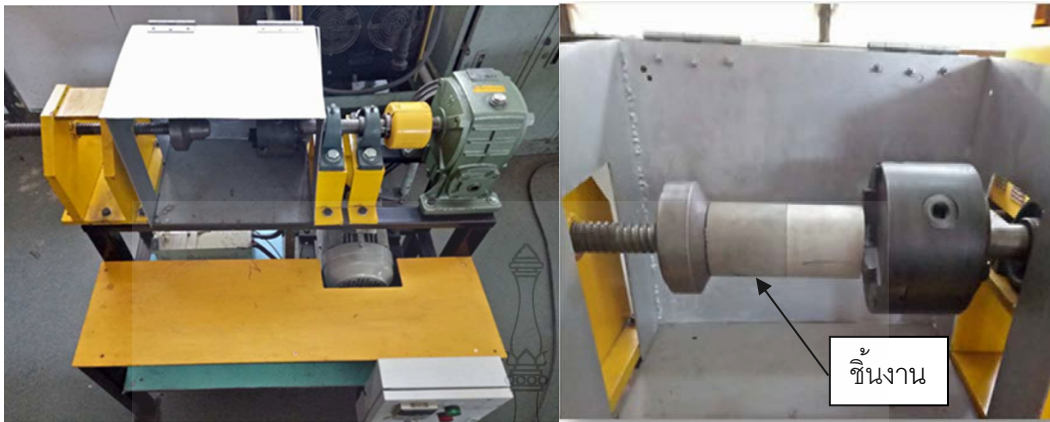
ชนิดเหล็กกล้าไร้สนิม	ค่าทดสอบ			
	UTS (MPa)	YS (MPa)	Elongation (%)	Hardness Vicker
AISI304L	576	307	61.4	171
AISI316	607	400	74	177

3.1.3 เครื่องเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสและสแตนเลส เครื่องหมายการค้า Fronius KD 4010



รูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการวิจัย

3.1.4 เครื่องจับยึดชิ้นงาน



รูปที่ 3.3 ลักษณะการจับยึดชิ้นงาน

3.1.5 ลวดเชื่อมทั้งสแตน (EWTh-2)



รูปที่ 3.4 ลวดเชื่อมทั้งสแตน

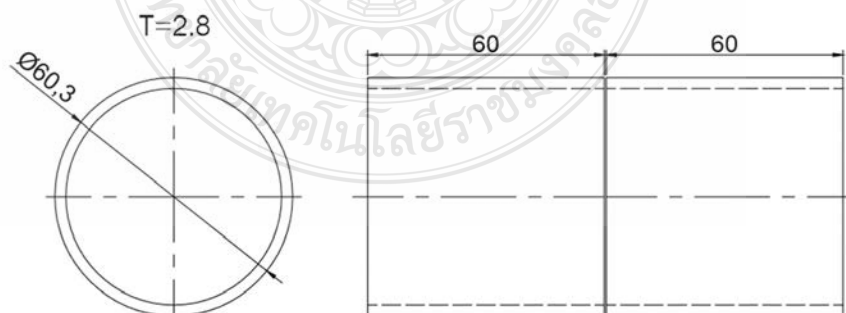
3.1.6 แก๊สอาร์กอน



รูปที่ 3.5 แก๊สอาร์กอน

3.2 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการเชื่อม

การเตรียมชิ้นงานสำหรับกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสแก๊สคลุม (GTAW) ดำเนินการเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน JIS Z3121 เพื่อให้งานเชื่อมเป็นไปตามข้อกำหนดที่ออกแบบไว้ของงานท่อส่งน้ำผลไม้ ต่อชิ้นงานแบบต่อชน (Butt) ชนิดแนวเชื่อมไม่บากงาน (Square groove weld) เตรียมประกอบชิ้นงานไม่เว้นช่องว่างรอยต่อ เพื่อทำการเชื่อมทดสอบตามเงื่อนไข



รูปที่ 3.6 ขนาดของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316

3.3 การกำหนดตัวแปรการทดลอง

การทดลองในครั้งนี้เพื่อศึกษาปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ในการเชื่อม คือ กระแสไฟฟ้า อัตราการไหลของแก๊สคลุม และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม จะมีผลต่อคุณสมบัติของรอยต่อแนวเชื่อม ลักษณะทางกายภาพโครงสร้างทางโลหะวิทยา และสมบัติทางกลต่องานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 อย่างไร ซึ่งได้กำหนดปัจจัยสำคัญที่จะทำการศึกษาได้ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงตัวแปรในการทดลองเชื่อม

ตัวแปรการเชื่อม	สถานะที่					
	1	2	3	4	5	6
1. กระแส (A)	90	105	120	135	150	165
2. อัตราการไหลของแก๊สคลุม (l/min)	12.5 [85]					
3. ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (mm/min)	200 [86]					
4. เส้นผ่านศูนย์กลางของทั้งสแตน (mm)	2.4 [87]					

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

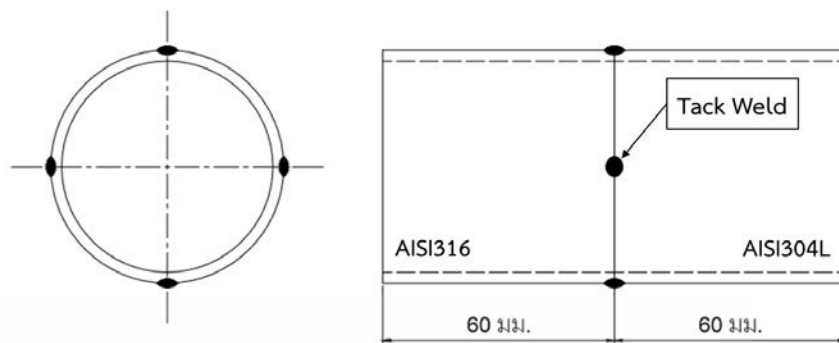
การดำเนินการทดลองเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สคลุม (GTAW) รอยต่อชนวัสดุต่างชนิดสามารถแบ่งตัวแปรในการทดลองและวิธีการทดลองโดยละเอียดไว้ดังนี้

3.4.1 การเตรียมชิ้นงานทดลอง เหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L กับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 ให้ได้ขนาดความยาว 60 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน



รูปที่ 3.7 ชิ้นงานทดลองก่อนการเชื่อม

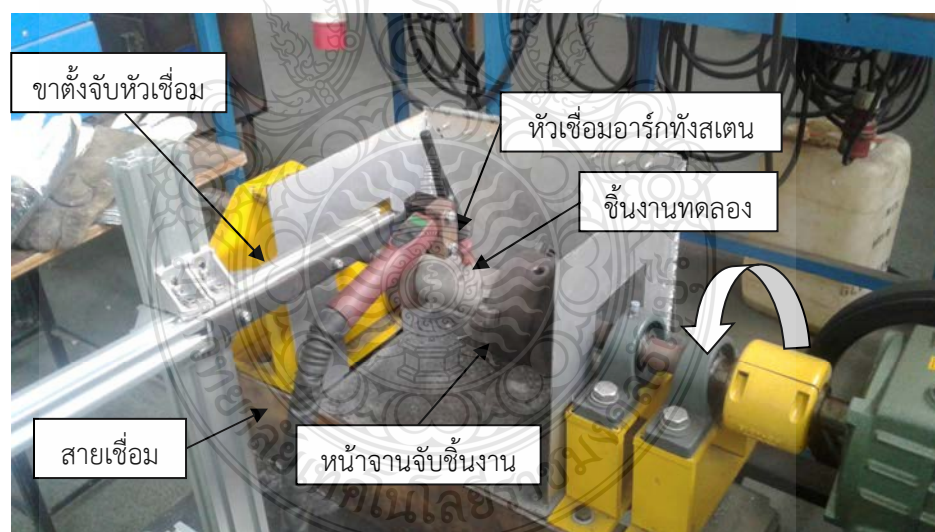
3.4.2 นำชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 2 ชนิดที่ได้จากการตัดตามรูปแบบที่กำหนดในขั้นตอนที่ 1 มาเชื่อมยึดต่อทั้ง 2 เข้าด้วยกันที่กระแส 90 A ดังในรูปที่ 3.6



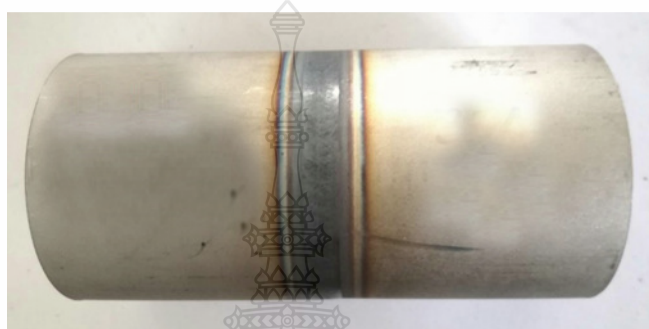
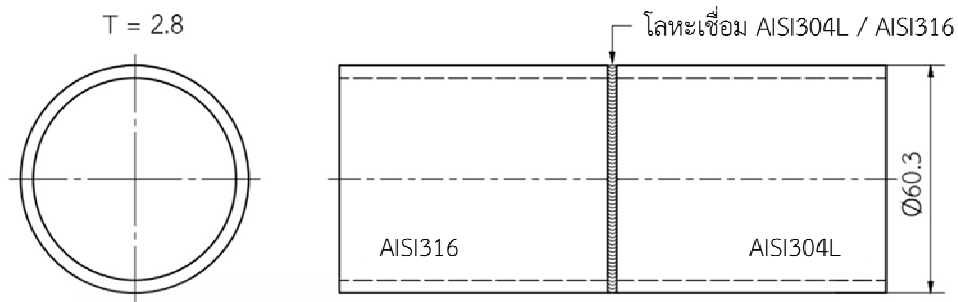
รูปที่ 3.8 ลักษณะการเชื่อมยึดชิ้นงานทดสอบ

3.4.3 การเชื่อมชิ้นงานทดลอง

นำชิ้นงานทดลองที่ได้ผ่านกระบวนการเตรียมชิ้นงานมาในหัวข้อ 3.4.2 จับยึดกับเครื่องอุปกรณ์จับยึดพร้อมกับหัวเชื่อม และทำการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ กระแสเชื่อม อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม ความเร็วเดินเชื่อม ค่าตัวแปรที่กำหนดปริมาณกระแสเชื่อม 6 ระดับ คือ 90,105,120,135,150 และ 165 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุมคงที่ 12.5 ลิตรต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม(คงที่) 200 มิลลิเมตรต่อนาที และเมื่อทำการเชื่อมเสร็จจะได้ชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.9 ลักษณะการจับยึดชิ้นงาน



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานหลังทำการเชื่อมครั้งที่ 1

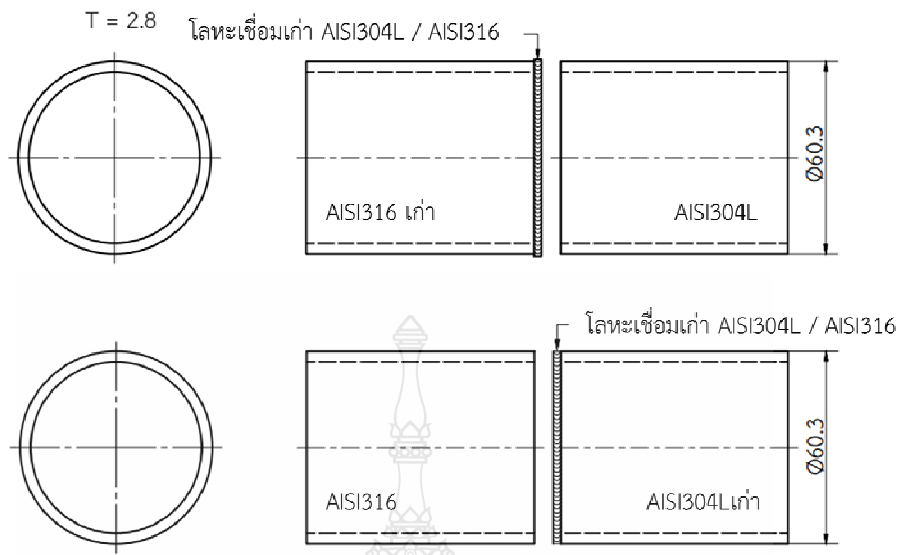
หลังจากทำการเชื่อมครั้งที่ 1 เสร็จนำชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จไปทำการทดสอบคุณสมบัติของรอยเชื่อม และทำการเลือกสภาวะการเชื่อมที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติของรอยเชื่อมครั้งที่ 1 มาทำการเชื่อมซ้ำ

3.4.4 การทดลองเชื่อมซ้ำ

ทำการเลือกสภาวะการเชื่อมที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติของรอยเชื่อมครั้งที่ 1 มาทำการเชื่อมซ้ำ

1) ทำการเชื่อมเหมือนการเชื่อมครั้งที่ 1
 2) ทำการตัดชิ้นงานระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 ออกจากกัน โดยให้เหล็ก AISI304L ติดรอยเชื่อมไว้ แล้วนำเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 นั้นมาเชื่อมใหม่อีกครั้งกับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 ที่ยังไม่เคยผ่านกระบวนการเชื่อมมาก่อน โดยใช้กระแสไฟฟ้าตามกระแสที่สภาวะดีที่สุด

3) ทำการตัดชิ้นงานระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L ออกจากกัน โดยให้เหล็ก AISI316 ติดรอยเชื่อมไว้ แล้วนำเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 นั้นมาเชื่อมใหม่อีกครั้งกับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L ที่ยังไม่เคยผ่านกระบวนการเชื่อมมาก่อน โดยใช้กระแสไฟฟ้าตามกระแสที่สภาวะดีที่สุด



รูปที่ 3.11 ชิ้นงานก่อนการเชื่อมครั้งที่ 2



รูปที่ 3.12 ชิ้นงานหลังการเชื่อมครั้งที่ 2

3.5 การทดสอบสมบัติของรอยเชื่อม

3.5.1 การทดสอบแรงดึง

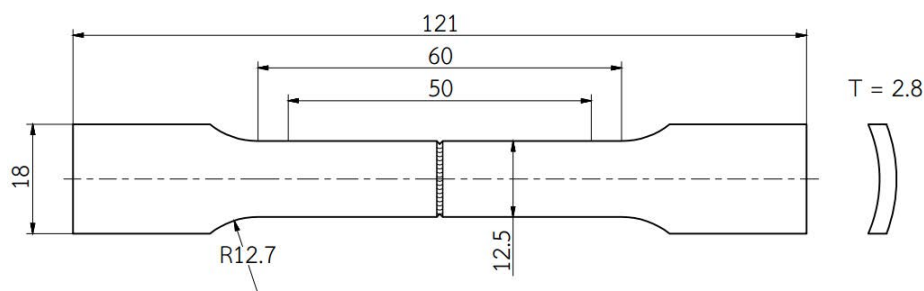
1) เครื่องมือและอุปกรณ์

ก. เครื่องทดสอบแรงดึง

ข. เครื่องตัดชิ้นงาน

2) การเตรียมชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมมาทำการตัด

ตามขนาดเพื่อนำไปทดสอบสมบัติทางกลของรอยเชื่อมโดยการทดสอบแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.13 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึง (หน่วย: มิลลิเมตร)

3) ขั้นตอนการทดสอบแรงดึง

- ก. นำชิ้นงานที่เตรียมไว้ใน ข้อ 1) มาทำการขีดเส้นความยาวเกจซึ่งเท่ากับ 50 มิลลิเมตร
- ข. จับชิ้นงานทดสอบที่หัวจับชิ้นงาน (Grip) บนและล่างหลังจากนั้นทำการป้อนค่าตัวแปรต่าง ๆ



รูปที่ 3.14 การจับยึดชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง

- ค. กดปุ่มควบคุมเพื่อให้เครื่องทดสอบทำการดึงชิ้นงานให้ขาดออกจากกัน
- ง. เอาชิ้นงานที่ดึงขาดออกมาทำการวัดความยาวเกจหลังดึง แล้วทำการป้อนค่าที่วัดได้เพื่อคำนวณค่าอัตราการยืดตัวของรอยเชื่อม

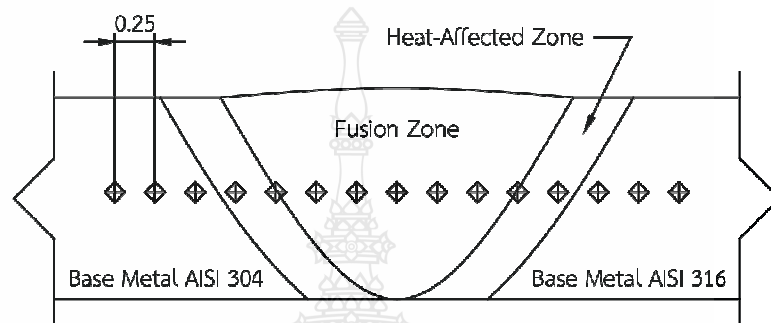
3.5.2 การทดสอบความแข็ง โดยใช้การทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers)

1) เครื่องมือและอุปกรณ์

- ก. เครื่องทดสอบความแข็งมีเครื่องหมายการค้า Matsuzawa รุ่น MXT 70
- ข. เครื่องตัดชิ้นงาน

2) การเตรียมชิ้นงาน นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมมาทำการตัดตามขนาดเพื่อนำไปทดสอบสมบัติทางกลของรอยเชื่อมโดยการทดสอบความแข็ง โดยใช้การทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers) ดังแสดงในรูปที่ 3.14

3) ขั้นตอนการทดสอบความแข็ง เปิดเครื่องทดสอบพร้อมทำการปรับแรงกด (Load) 0.2 kgf จากนั้นนำชิ้นงานที่จะทดสอบมาทำการทดสอบความแข็งบนเครื่องทดสอบ และทำการเล็งตำแหน่งที่ต้องการกดจากนั้นทำการกดเวลาประมาณ 10 วินาที



รูปที่ 3.15 การทดสอบความแข็งโดยใช้เครื่องทดสอบไมโครวิกเกอร์



รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบความแข็ง (Micro Vickers hardness tester)

3.5.3 การทดสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

1) เครื่องมือและอุปกรณ์

ก. เครื่องตัดเหล็ก

ข. เครื่องขัดเหล็ก

ค. กระดาษทรายเบอร์ 100 400 600 800 1000 และ 1200

ง. ผ้าสักหลาด

จ. ผงอลูมิน่า

- ฉ. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) + น้ำกลั่น + เฟอริกคลอไรด์ (FeCl₃)
- ซ. ที่สืบчинงาน
- ซ. ถุงมือ
- ฉ. เตือบแห้ง
- ญ. กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอแบบซูม (Stereo microscope)
- ฎ. กล้องจุลทรรศน์แบบฉายแสง (Optical microscope)
- 2) การเตรียมชิ้นงาน
 - ก. ตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัด
 - ข. ทำการจับยึดชิ้นงานด้วยเรซิน



รูปที่ 3.17 การหล่อเรซินตัวประกอบการตัดชิ้นงาน

ค. การตัดกระดาษทราย ขัดผิวชิ้นงานจะใช้กระดาษทรายน้ำ ติดบนเครื่องขัดแบบจานหมุน เริ่มขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 400 600 800 1000 และ 1500 ต้องขัดทิศทางเดียวกันตลอดผิวชิ้นงานแล้วหมุนไปมุม 90 องศา โดยให้มีน้ำไหลผ่านชิ้นงานตลอดเวลา



รูปที่ 3.18 เครื่องขัดกระดาษทราย

ง. การขัดมัน หลังจากขัดกระดาษทรายแล้วนำชิ้นงานมาขัดบนผ้าสักหลาดซึ่งมีผงขัดได้แก่ ผงเพชรขนาด 3 ไมครอน และแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ โดยหยุดผงเพชรลงบนผ้าสักหลาดประมาณ 3 หยด และหยุดแอลกอฮอล์ลงผ้าสักหลาดประมาณ 10 หยดให้ชุ่มอยู่เสมอ แล้วจึงนำชิ้นงานมาทำการขัดจนกว่าผิวชิ้นงานเรียบ และไม่มีรอยต่าง ๆ ปรากฏที่ผิวชิ้นงาน ชิ้นงานจะมีความเงาใสคล้ายกระจก



รูปที่ 3.19 เครื่องขัดผ้าสักหลาด

จ. เมื่อขัดชิ้นงานด้วยผ้าสักหลาดแล้ว นำชิ้นงานมาล้างทำความสะอาด จากนั้นนำชิ้นงานมากัดผิวด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) + น้ำกลั่น + เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) ประมาณ 15-20 วินาที จากนั้นทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานด้วยน้ำกลั่นและตามด้วยแอลกอฮอล์ แล้วอบให้แห้ง

3) ทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยานำชิ้นงานไปส่องกล้องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบฉายแสง (Optical microscope) เพื่อแสดงรายละเอียดเฟสของเกรนตามตำแหน่งที่กำหนด



รูปที่ 3.20 กล้องจุลทรรศน์แบบฉายแสง (Optical microscope)

4) เก็บข้อมูลภาพโครงสร้างและวิเคราะห์ผล

3.6 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและวิเคราะห์ปริมาณธาตุ

การตรวจสอบจะแบ่งได้เป็น 2 แบบ การวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ (Quantitative analysis) การวิเคราะห์เชิงปริมาณ Quantitative Analysis การวิเคราะห์ธาตุ Line scan



รูปที่ 3.21 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด



บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การทดลองเริ่มด้วยการศึกษาอิทธิพลปริมาณของกระแสเชื่อม 6 ระดับ ได้แก่ 90 , 105 , 120 , 135 150 , และ 165 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 12.5 ลิตรต่อนาทีและความเร็วในการเดินเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบดังนี้

4.1 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316 และ AISI304L



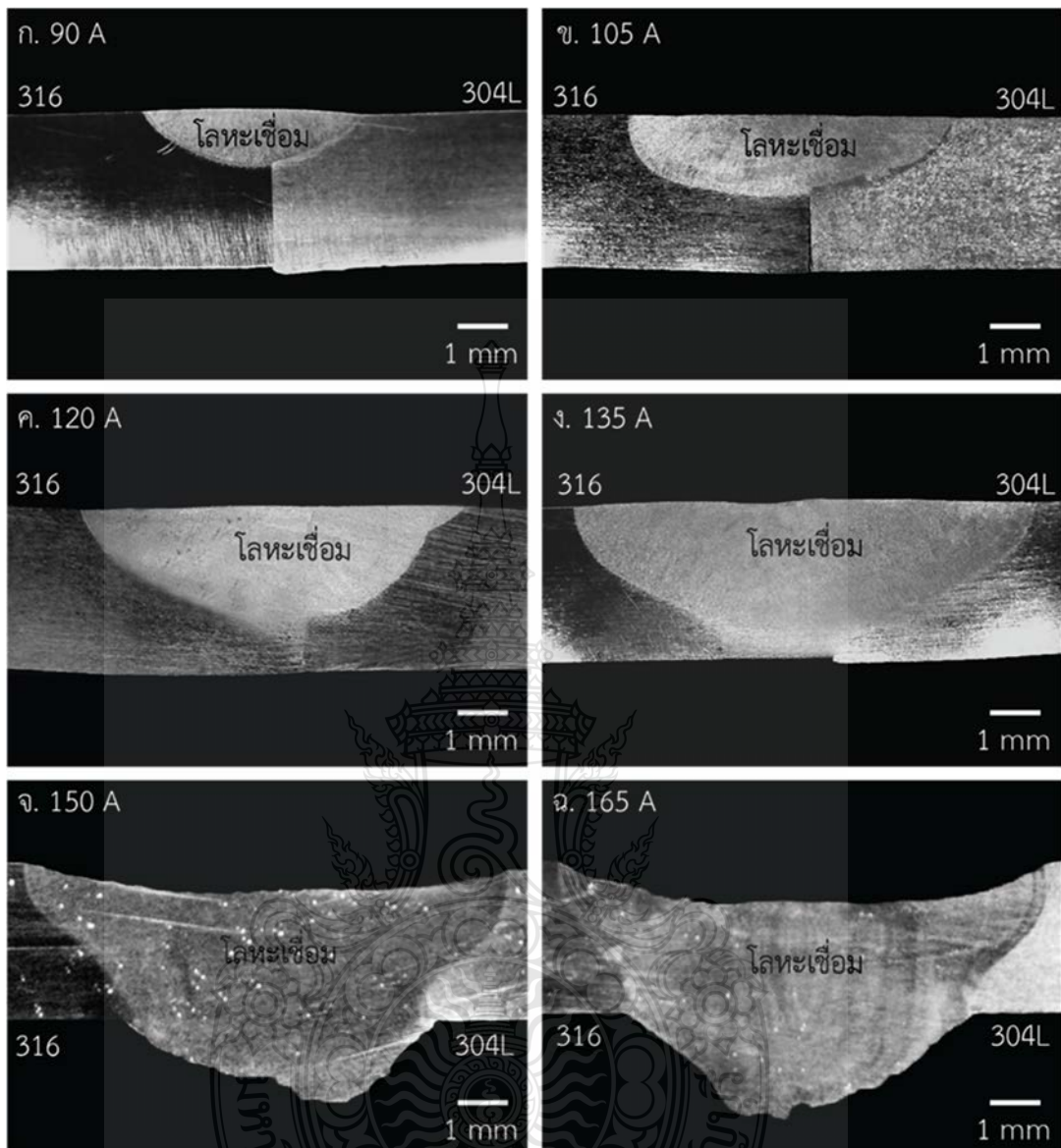
รูปที่ 4.1 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมที่มีผลต่อผิวหน้าของโลหะเชื่อมท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316 และ AISI304L

4.1.1 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมต่อโครงสร้างมหภาค

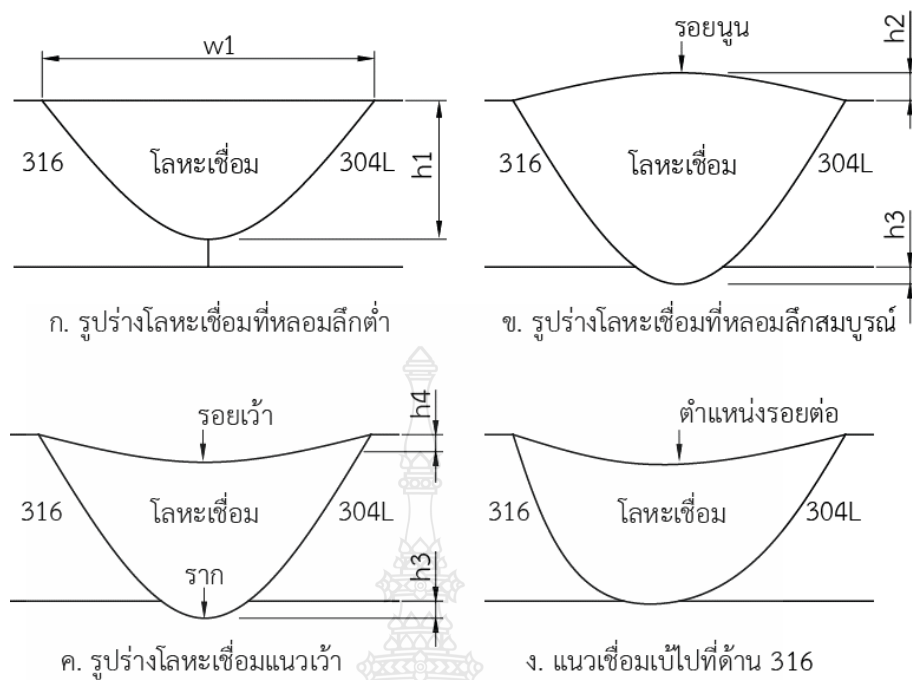
ในรูปที่ 4.2 แสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมท่อนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 และ AISI304L ที่ผ่านการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมแบบไม่เติมลวด ผลการทดลองเชื่อมแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมส่วนใหญ่แปรผันไปตามตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งสังเกตเห็นขอบเขตลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อมได้อย่างชัดเจน

โดยผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคที่กระแสนเชื่อม 90 105 และ 120 แอมแปร์ พบว่าลักษณะของแนวเชื่อมแสดงให้เห็นถึงขนาดความกว้างของแนวเชื่อมที่มีขนาดเล็กและลักษณะการหลอมลึกของแนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ (Weld penetration) เป็นผลมาจากปริมาณความร้อนขาเข้า (Heat input) ค่อนข้างต่ำ ซึ่งส่งผลให้ความร้อนสะสมในแนวเชื่อมมีปริมาณน้อย ด้วยเหตุผลนี้ทำให้เกิดการหลอมลึกของแนวเชื่อมที่ต่ำลง จุดบกพร่องดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ โดยการปรับเปลี่ยนตัวแปรการเชื่อม อาทิ กระแสแรงดันและความเร็วเดินเชื่อมให้มีความเหมาะสม [88] โดยเมื่อเพิ่มกระแสเชื่อมเป็น 135 150 และ 165 แอมแปร์ พบว่าที่กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ (ระยะหลอมลึกสมบูรณ์) โลหะเชื่อมเกิดการหลอมละลายสมบูรณ์ดังรูปที่ 4.2 (ง) และที่กระแสเชื่อม 150 และ 165 แอมแปร์ โลหะเชื่อมเกิดการเว้าและความนูนของรากโลหะเชื่อมขึ้น ดังรูปที่ 4.2 (จ-ฉ) และในชิ้นงานทดสอบที่เชื่อมด้วยกระแส 165 แอมแปร์ พบว่าโลหะเชื่อมมีความกว้างมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสอื่นที่ผ่านมามาดังรูปที่ 4.2 (ฉ) ซึ่งในงานวิจัยของ Ibrahim et al และคณะ [89] ได้กล่าวไว้ว่า เมื่อเชื่อมด้วยความเร็วเดินเชื่อมคงที่ แต่เพิ่มปริมาณของกระแส ส่งผลให้อัตราการหลอมละลายเพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับ Shuwan Cui และคณะ [90] ที่ได้กล่าวไว้ว่า เมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้พลังงานความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat input) เพิ่มขึ้นไปด้วย ซึ่งส่งผลต่อรูปร่างและขนาดของแนวเชื่อม





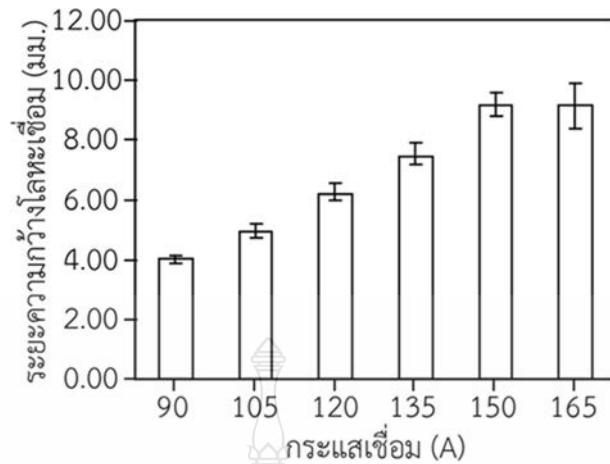
รูปที่ 4.2 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316 และ AISI304L



รูปที่ 4.3 การกำหนดตำแหน่งการวัดรูปร่างของโลหะเชื่อมในรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304L/AISI316 (ค่า w_1 คือความกว้างโลหะเชื่อม ค่า h_1 คือการหลอมลึก ค่า h_2 คือความนูนโลหะเชื่อม ค่า h_3 คือความนูนแนวราก ค่า h_4 คือความเว้าของผิวหน้าโลหะเชื่อม)

4.1.2 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนด์สแตนด์แบบไม่เติมลวดเชื่อมที่มีผลต่อความกว้างของโลหะเชื่อม

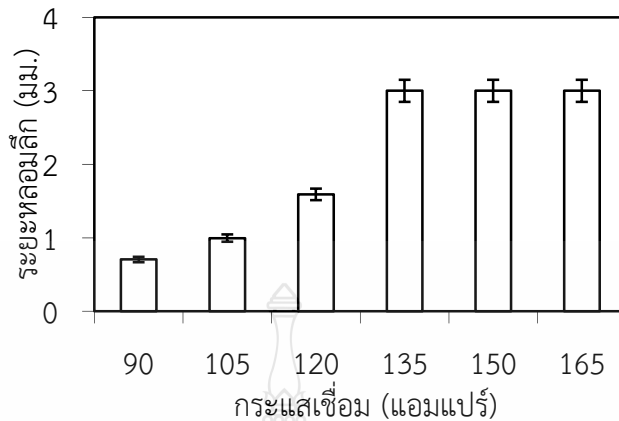
ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคในรูปที่ 4.2 พบว่าแนวเชื่อมแต่ละตัวแปร มีความแตกต่างกัน จึงได้ทำการวัดขนาดความกว้างของแนวเชื่อมที่กระแส 90 105 120 135 150 และ 165 แอมแปร์ พบว่า กระแสเชื่อมที่ 90 แอมแปร์ ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมเฉลี่ย 4.01 มิลลิเมตร เมื่อทำการเพิ่มกระแสในการเชื่อมส่งผลให้รูปร่างความกว้างของแนวเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงของระดับกระแสในการเชื่อม และพบว่ากระแสเชื่อมที่ 165 แอมแปร์ มีความกว้างของแนวเชื่อมเฉลี่ย 9.16 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่ามากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผลของกระแสเชื่อมที่ผ่านมา ดังในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นผลมาจากพลังงานความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat input) มีปริมาณที่แตกต่างกัน เมื่อพลังงานความร้อนเข้าสู่ชิ้นงาน มีปริมาณน้อยส่งผลให้ความกว้างของแนวเชื่อมมีขนาดเล็กและแคบไปด้วย และเมื่อพลังงานความร้อนที่เพิ่มเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat input) เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความกว้างของแนวเชื่อมก็จะมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย [91] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shuwan Cui และคณะ [90] ได้ทำการทดลองเชื่อมด้วยการเพิ่มกระแสในการเชื่อมสังเกตเห็นว่าความกว้างของรอยเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมและความกว้างของโลหะเชื่อม

4.1.3 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมต่อระยะการหลอมลึกของโลหะเชื่อม

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมในหัวข้อ 4.1.1 ได้ทำการวัดระยะการหลอมลึกของโลหะเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สคลุมแบบไม่เติมลวดที่กระแสเชื่อม 90 105 120 135 150 และ 165 แอมแปร์ พบว่าที่กระแสเชื่อม 90 แอมแปร์ ค่าระยะอัตราการหลอมลึกมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.70 มิลลิเมตร ซึ่งความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานไม่เพียงพอที่จะหลอมละลายชิ้นงานให้สมบูรณ์ ความร้อนสะสมที่ชิ้นงานได้รับต่ำ เป็นเหตุให้แนวเชื่อมมีอัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว [92] เมื่อกระแสเพิ่มขึ้นปริมาณความร้อนสูงขึ้นจึงทำให้มีความร้อนสะสมเพียงพอให้ชิ้นงานหลอมละลาย และพบว่าระยะการหลอมลึกมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งกระแส 135 แอมแปร์ขึ้นไป โลหะเชื่อมของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดเกิดการหลอมลึกสมบูรณ์ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ K. Devendranath Ramkumar และคณะ [93] ได้กล่าวไว้ว่า การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าทำให้พลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นต่อหน่วยความยาวของแนวเชื่อมและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นก่อให้เกิดการหลอมละลายบนวัสดุฐานในปริมาณมาก นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการซึมลึกของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นไปด้วย เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Pengfei Bai และคณะ [94] ได้ระบุว่า การเพิ่มขึ้นของกระแสเชื่อม เป็นผลให้แรงดันอาร์คมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อการซึมลึกของบ่อหลอมละลายของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น



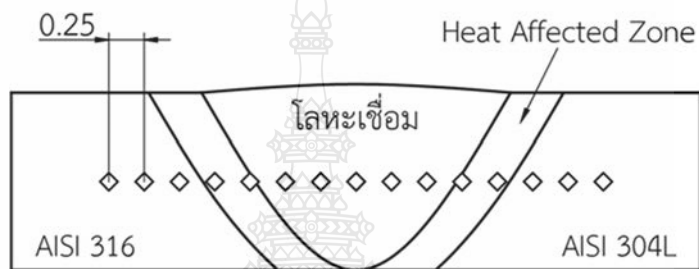
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมและระยะการหลอมลึกของโลหะเชื่อม

4.1.4 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมต่อสัดส่วนของการหลอมละลายโลหะเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม 316

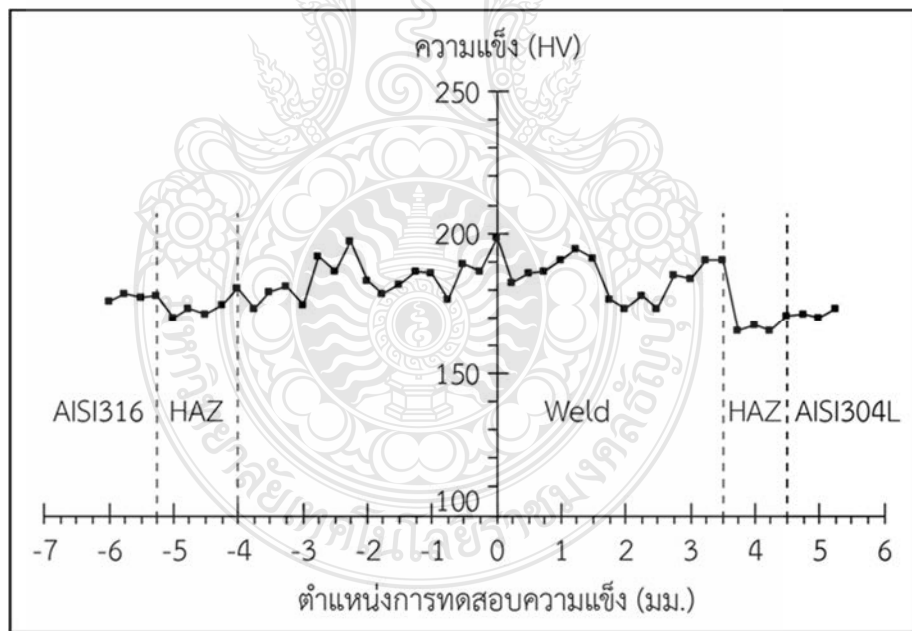
ในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304L และ AISI316 ต่อกัน จึงทำการศึกษาลักษณะของการหลอมละลายของโลหะเชื่อม จากรูปโครงสร้างมหภาคที่ 4.2 สังเกตเห็นว่า การถ่ายเทของบ่อหลอมละลายไปยังชิ้นงานเชื่อมมีส่วนที่แตกต่างกัน เนื่องจากบ่อหลอมละลายมีการถ่ายเทไปยังฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 สูงกว่าฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดนี้มีคุณสมบัติทางเคมี ลักษณะโครงสร้างจุลภาค ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) และจุดหลอมละลาย (Melting point) ที่แตกต่างกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 มีค่าเท่ากับ 16.3 W/m-K มากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L มีค่าเท่ากับ 16.2 W/m-K และจุดหลอมละลายของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 มีค่าเท่ากับ 1370-1400 องศาเซลเซียส น้อยกว่า AISI304L มีค่าเท่ากับ 1400-1455 องศาเซลเซียส [95,96,97,98] ซึ่งสอดคล้องกับบทความของ Limmaneeviehitn [99] ได้กล่าวไว้ว่า การนำความร้อนของโลหะโดยทั่วไปมีค่าความสามารถของการนำความร้อนที่ดีแตกต่างกัน เมื่อนำโลหะต่างชนิดมาทำการเชื่อมเข้าด้วยกัน ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากบ่อหลอมละลายในสัดส่วนที่ต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโลหะเชื่อม

4.1.5 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมต่อการทดสอบความแข็ง จากรูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมรอยต่อเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304L และ AISI316 ที่ผ่านการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมแบบไม่เติมลวดที่กระแสเชื่อม 90 105 120 135 150 และ 165 แอมแปร์ พบว่าชิ้นงานทดสอบที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 90-120 แอมแปร์ โลหะเชื่อมมีการหลอมลึกไม่สมบูรณ์จึงเลือกเฉพาะชิ้นงานที่มีการหลอมลึกสมบูรณ์มาทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างซึ่งประกอบด้วยชิ้นงานทดสอบที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 135 150 และ 165 แอมแปร์ ที่ 4.6 แสดงความแข็งของรอยต่อเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316 ที่ผ่านการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมแบบไม่เติมลวดที่กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ ซึ่งเป็นรอยต่อเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการเชื่อมที่กระแสอื่น โดยได้กำหนดตำแหน่งต่าง ๆ ในการ

ทดสอบ ซึ่งแต่ละตำแหน่งมีระยะห่าง 0.25 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.6 (ก) พบว่าบริเวณโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 177 HV ดังรูปที่ 4.6(ข) และเมื่อทำการทดสอบความแข็งเข้าไปใกล้บริเวณพื้นที่กระทบร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 พบว่าค่าความแข็งลดต่ำลงเล็กน้อยโดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 172 HV และเมื่อทดสอบค่าความแข็งบริเวณโลหะเชื่อมค่าความแข็งมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยโดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 184 HV และเมื่อเข้าไปใกล้พื้นที่กระทบร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดต่ำลงซึ่งมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 165 HV อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดสอบความแข็งในบริเวณของพื้นที่โลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 171 HV ดังรูปที่ 4.6 (ข) และบริเวณโลหะเชื่อมที่กระแสเชื่อม 150 และ 165 แอมแปร์ ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 179 และ 175 HV ตามลำดับ

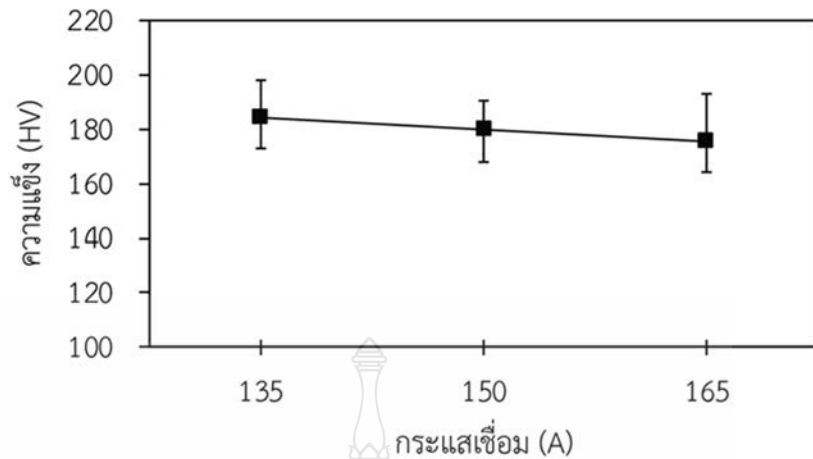


ก. ตำแหน่งการทดสอบความแข็ง



ข. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการทดสอบและค่าความแข็ง

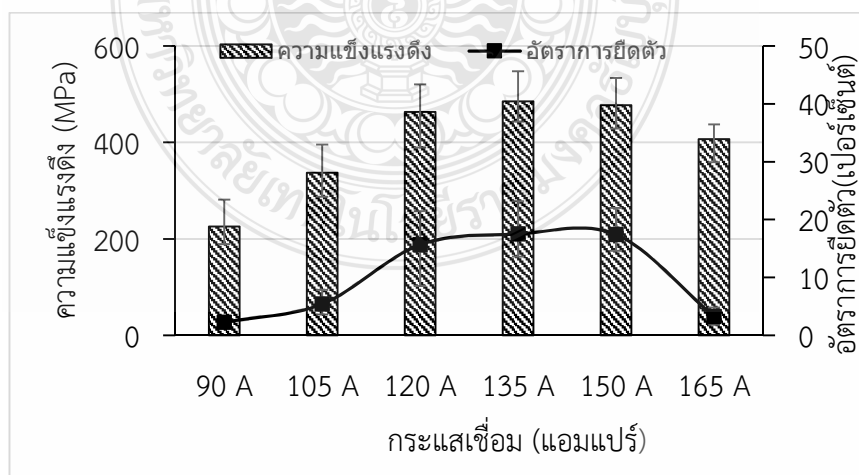
รูปที่ 4.6 การทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์



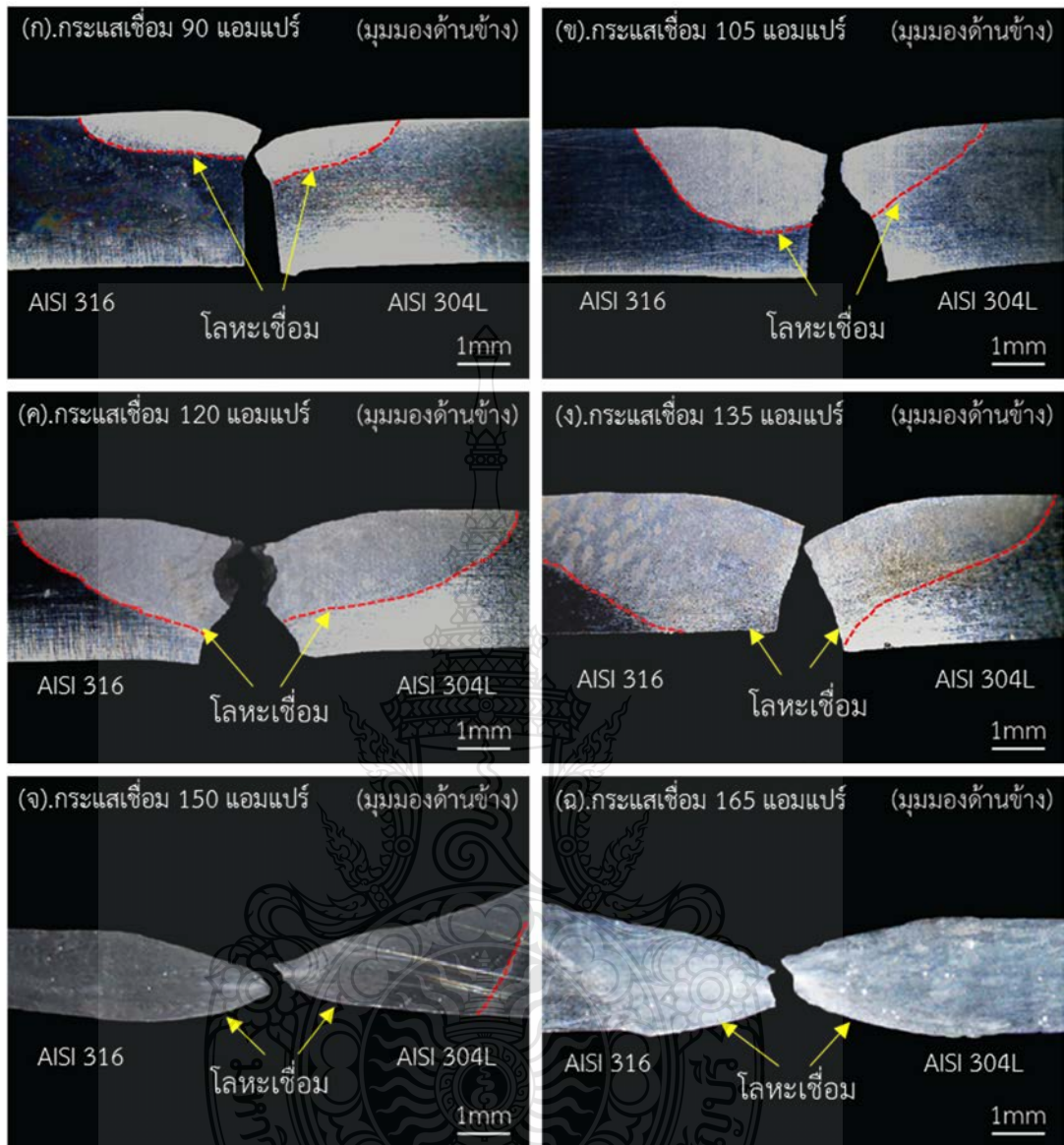
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมและความแข็ง

4.1.6 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงดึง และอัตราการยืดตัว

รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึง และอัตราการยืดตัวของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316และAISI304L พบว่าที่กระแสเชื่อม 90 แอมแปร์ มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 631.31 MPa อัตราการยืดตัวเท่ากับ 2.27% เมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 90 แอมแปร์ จนกระทั่ง 135 แอมแปร์ ค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 831.55 MPa อัตราการยืดตัวเท่ากับ 17.46% ซึ่งมีความมากที่สุดเมื่อเทียบกับรอยเชื่อมของชิ้นงานที่กระแสเชื่อมอื่น การเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงดึงนี้เกิดเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของกระแสเชื่อมที่มีอิทธิพลโดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของความร้อนขาเข้า (Heat input) ได้ส่งผลทำให้การยึดติดกันของรอยเชื่อมระหว่างรอยต่อชนมีความสมบูรณ์มากขึ้น ดังรูปที่ 4.2 (ก-ง) และเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 150 และ 165 แอมแปร์ พบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มลดลง



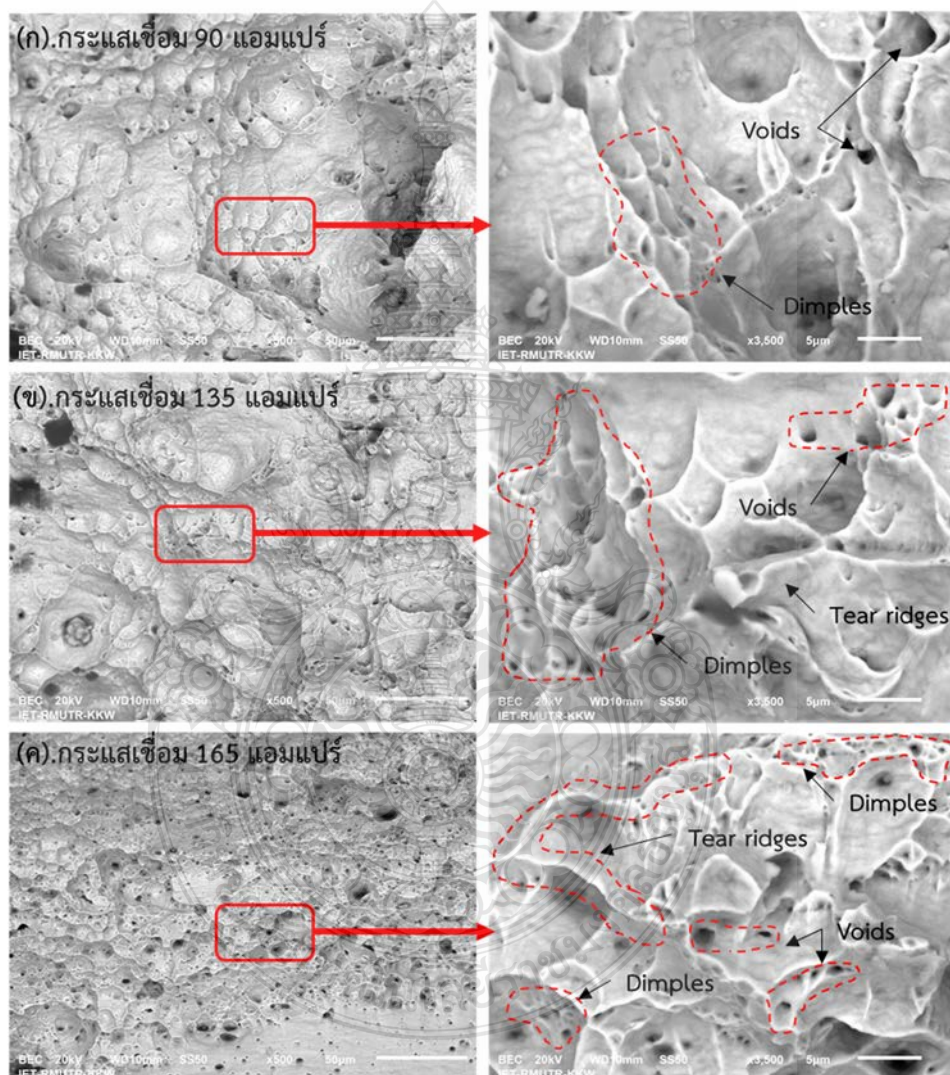
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อม ความแข็งแรงดึง และอัตราการยืดตัวของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316และAISI304L



รูปที่ 4.9 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนด์สแตนด์แบบไม่เต็มลวดเชื่อมต่อลักษณะการฉีกขาดของรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316และAISI304L

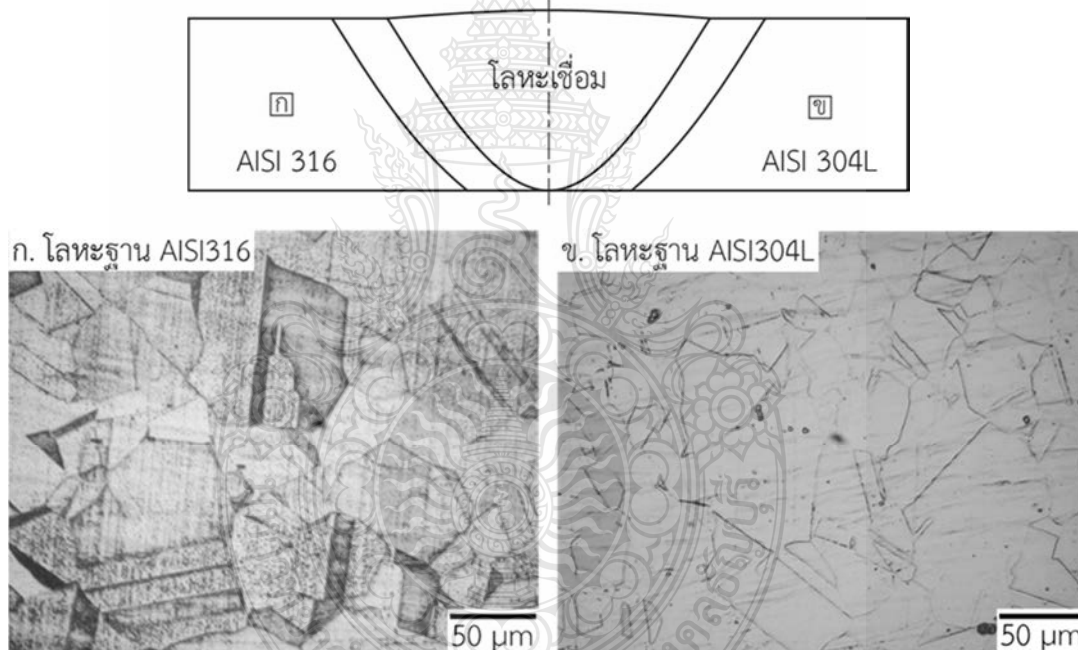
รูปที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นผิวพฤติกรรมการฉีกขาดของรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316และAISI304L ของชิ้นงานทดสอบแรงดึงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) โดยทำการเลือกชิ้นงาน ทดสอบ 3 ชิ้น ได้แก่ชิ้นงานที่กระแสเชื่อม 90 แอมแปร์ มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุด กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและกระแสเชื่อม 165 แอมแปร์ เพื่อทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของกระแสเชื่อมในสภาวะแตกต่างกัน พบว่า ขนาดและรูปร่างพื้นผิวที่เกิดจากการฉีกขาดมีรูปแบบที่แตกต่างกัน สังเกตที่กระแส 90 และ 165 แอมแปร์ พื้นผิวมีลักษณะเป็นรอยบุ๋ม (Dimples) ขนาดใหญ่และลึก เมื่อเปรียบเทียบกับกระแสเชื่อมที่ 135 แอมแปร์ ซึ่งมีลักษณะของรอยบุ๋ม (Dimples) ขนาดเล็กลงมาและดูตื้นกว่า ลักษณะดังกล่าวส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Subodh Kumar และคณะ [100] ได้ระบุไว้ว่า พื้นผิวที่เกิดจากการฉีกขาด

มีลักษณะเป็นรอยบุ๋ม (Dimples) ทั่วบริเวณมีขนาดเล็กและตื้น ซึ่งบ่งบอกถึงความแข็งแรงและความแข็งแรงดิ่งค่อนข้างสูง จากการศึกษาคุณภาพรวม Dimples มีรูปร่างเป็นวงรี ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองที่กระแสม 135 แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ข) เนื่องจากชิ้นงานวัสดุบางการเกิดคอคอดมีค่อนข้างน้อย ผิวชิ้นงานทั้งหมดอาจแสดงการฉีกขาดด้วยแรงเฉือนเพียงอย่างเดียว การตรวจสอบระดับจุลภาคจึงตรวจพบผิวการฉีกขาดแบบ Dimples รูปร่างเป็นวงรีมากกว่ากลมมน เมื่อเทียบกับโลหะหนา [21]



รูปที่ 4.10 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมต่อพฤติกรรมการพังทลายของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316 และ AISI304L

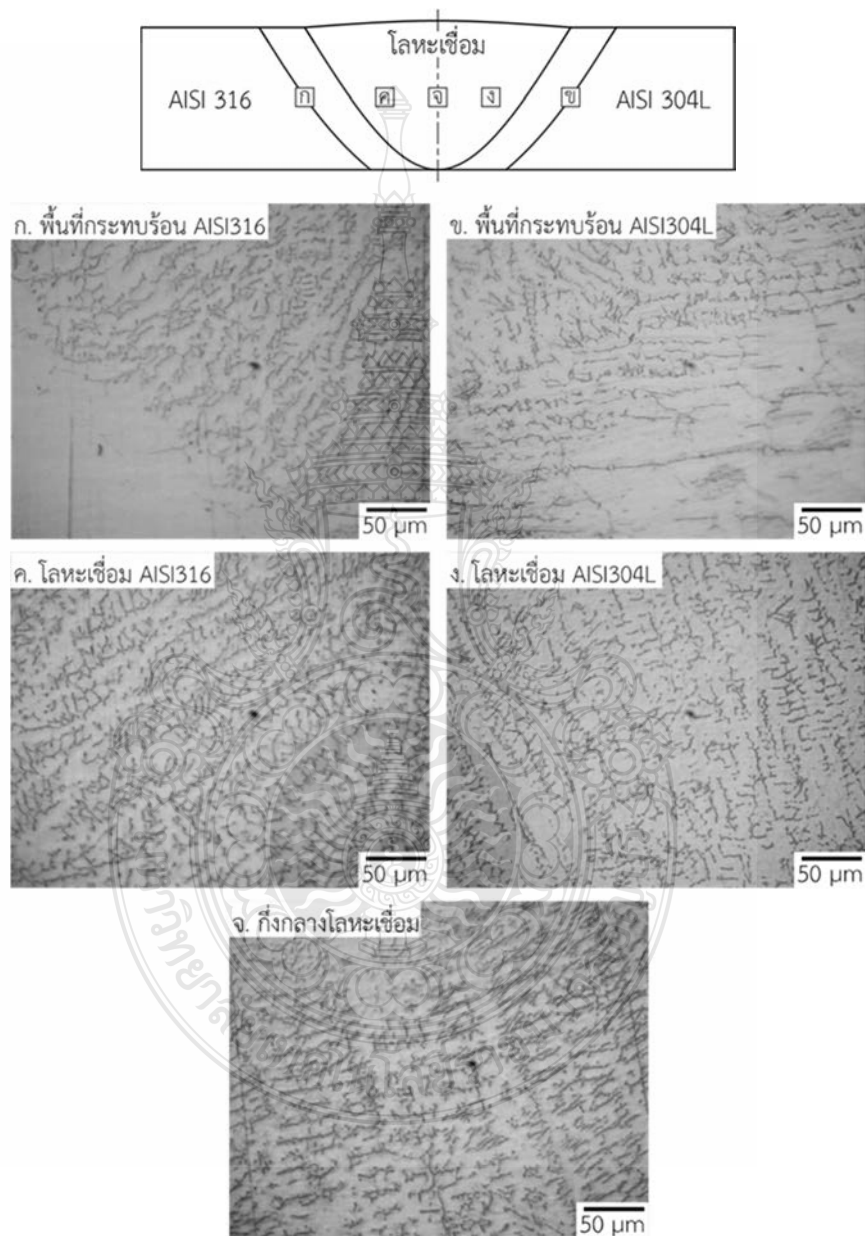
4.1.7 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304L และ AISI316 รูปที่ 4.11 แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สคลุมแบบไม่เติมลวดที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแส 135 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 12.5 ลิตรต่อนาที ตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่กำหนด พบว่าบริเวณโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 โครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยเกรนที่มีลักษณะค่อนข้างกลมมีความละเอียด (Fine equared grains) ของออสเทนไนต์ซึ่งมีส่วนคล้ายกับการอบอ่อนในโครงสร้างออสเทนไนต์คิงรูปที่ 4.11 (ก) และ มีการปะปนของเฟสเดลต้าเฟอร์ไรต์ (Delta ferrite) ในรูปแบบของการแทรกตัวกระจายอยู่ในเกรนและขอบเกรน และรูปที่ 4.11 (ข) แสดงถึงโครงสร้างจุลภาคของโลหะฐานด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L เห็นว่าเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม 304L มีการเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบแต่เม็ดเกรนของโลหะไม่ได้มีความกลมมนและสมมาตร



รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 และ AISI304L (กำลังขยาย 200 เท่า)

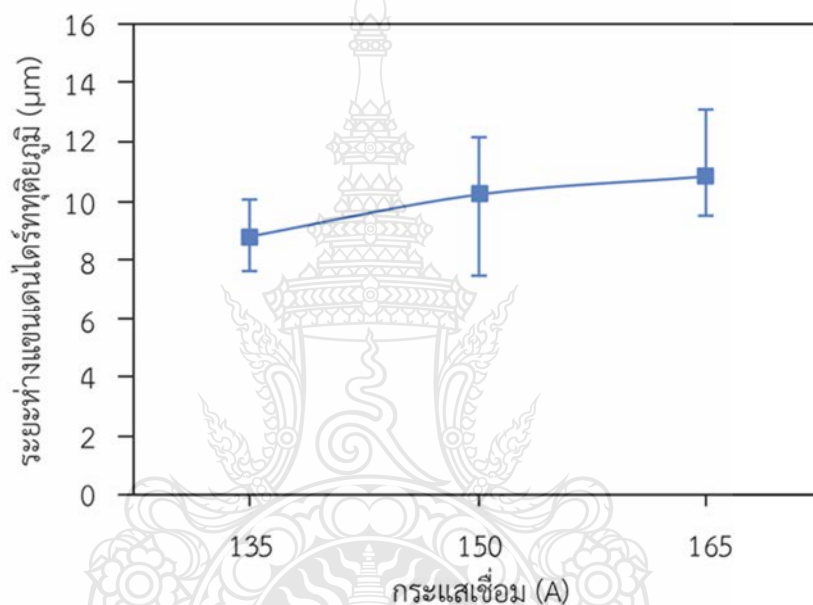
รูปที่ 4.12 (ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 สามารถสังเกตได้ว่าพื้นที่บริเวณนี้มีเอกลักษณ์ที่เฉพาะด้วยการเพิ่มขึ้นของขนาดเกรน อันเนื่องมาจากข้อเท็จจริงที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิปกติที่บริเวณเขตหลอมละลาย [23] โดยลักษณะของเดนไดรท์ทิศทางการเรียงตัวเข้าสู่กึ่งกลางจากซ้ายไปขวาของโลหะเชื่อม และโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L พบว่าโครงสร้างมีลักษณะของเดนไดรท์ละเอียดทิศทางการเรียงตัวเข้าสู่กึ่งกลางจากขวาไปซ้ายของโลหะเชื่อม นอกจากนี้ไม่พบจุดบกพร่องใด ๆ บนรอยเชื่อมที่บริเวณพื้นที่กระทบร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และเมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมของทุกตำแหน่งในการเชื่อม

ซึ่งประกอบด้วยโลหะเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 ดังรูปที่ 4.12 (ค) โลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L ดังรูปที่ 4.12 (ง) และกึ่งกลางโลหะเชื่อมดังรูปที่ 4.12 (จ) พบว่ามีการก่อตัวของโครงสร้างเดนไดรต์เกิดขึ้นพื้นที่สีขาวของโครงสร้างจุลภาค และพื้นที่สีดำดังแสดงพื้นที่แบ่งแยกเดนไดรต์ และลักษณะของเดนไดรต์มีทิศทางการเรียงตัวเข้าสู่กึ่งกลางของโลหะเชื่อม



รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316และ AISI304L ที่กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ (กำลังขยาย 200 เท่า)

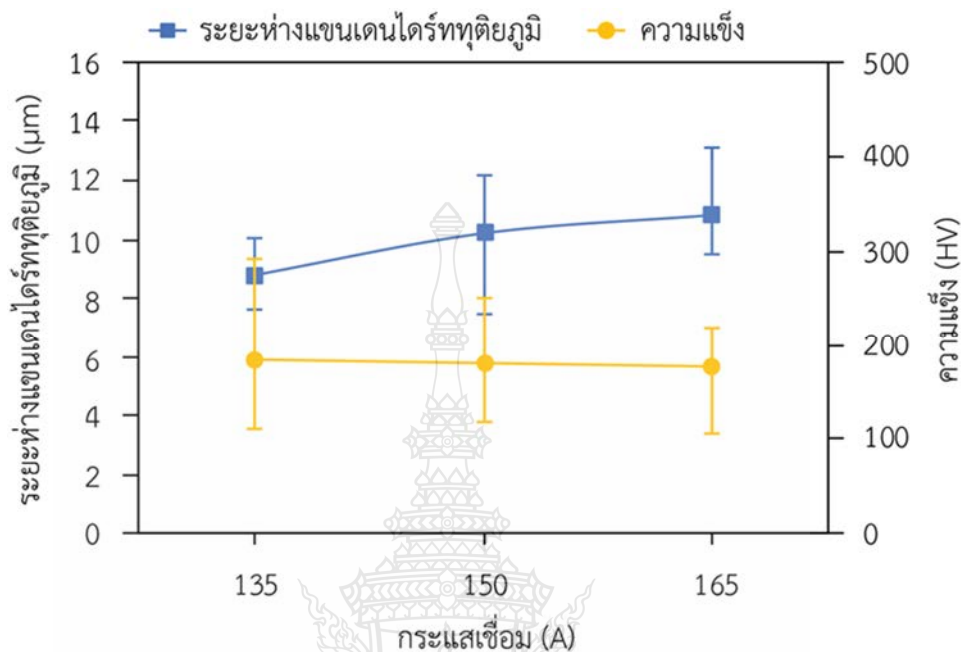
4.1.8 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมที่มีผลต่อระยะห่างระหว่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิ รูปที่ 4.13 ได้ทำการเปรียบเทียบถึงโครงสร้างของโลหะเชื่อมของชิ้นงานทดสอบที่ถูกเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่แตกต่างกัน 3 ระดับได้แก่ 135 150 และ 165 แอมแปร์ พบว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อมที่มีการกระจายตัวของเฟสเดนไดรต์ จึงได้ทำการวัดระยะห่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิ (Secondary dendrite arm spacing : SDAS) พบว่าระยะห่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิของชิ้นงานทดสอบที่กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.81 μm อย่างไรก็ตามเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นระยะห่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 150 และ 165 แอมแปร์ ระยะห่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.21 และ 10.82 μm ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมและระยะห่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิ

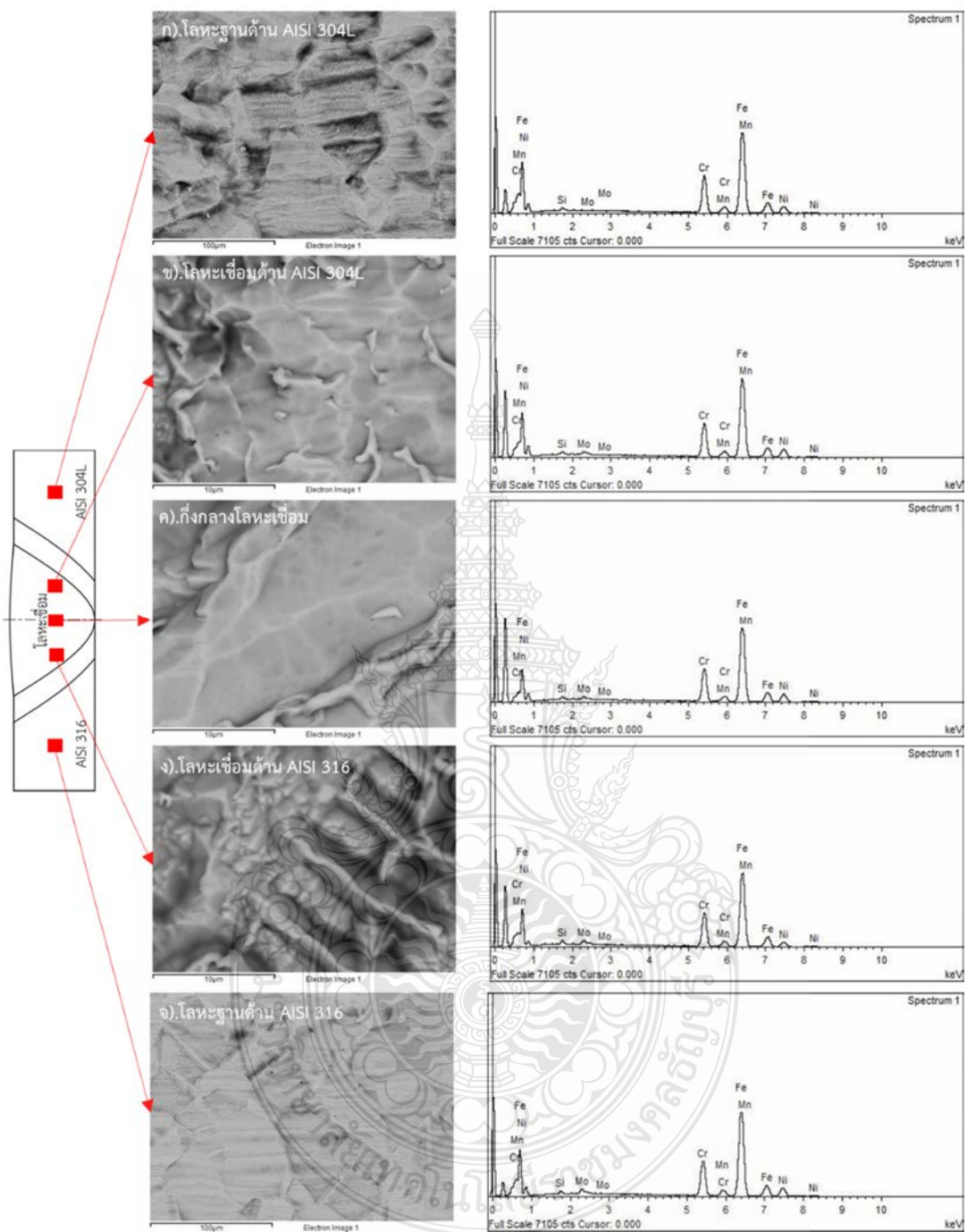
เมื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อม ความแข็ง และระยะห่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิ พบว่าการเพิ่มขึ้นของกระแสเชื่อมจาก 135-165 แอมแปร์ ทำให้ระยะห่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ ดังรูปที่ 4.14 โดย Merchant Samir Y. [101] ได้กล่าวไว้ว่าการเปลี่ยนกระแสเชื่อมส่งผลโดยตรงต่อปริมาณความร้อนขาเข้า เมื่อกระแสเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณความร้อนขาเข้าเพิ่มขึ้นด้วย และในงานวิจัยเดียวกันนี้เขาได้ทำการสรุปว่าปริมาณความร้อนขาเข้ามีผลต่ออัตราการเย็นตัวและเวลาการแข็งตัวของโลหะเชื่อมโดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณความร้อนขาเข้าส่งผลให้อัตราการเย็นตัวของโลหะเชื่อมมีค่าลดลง และเวลาแข็งตัวของโลหะเชื่อมมีค่ามากขึ้น และ Srdjan Milenkovic et al. [102] ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเย็นตัว ระยะห่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิ และความแข็ง โดยได้ทำการสรุปไว้ว่าเมื่ออัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ระยะห่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิมีค่าน้อยลง และค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Subodh Kumar และคณะ [100] ได้ระบุไว้ว่า เมื่ออัตราความร้อนขาเข้าเพิ่มมากขึ้นขนาดของ dendrite และระยะห่างระหว่าง dendrite ในโลหะเชื่อมก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งความ

แปรปรวนของเดนไดรต์นี้ เกิดขึ้นจากข้อเท็จจริงที่ว่า เมื่ออัตราความร้อนขาเข้าต่ำจะส่งผลให้อัตราการเย็นตัวของโลหะเชื่อมค่อนข้างสูง เป็นผลให้อัตราการเติบโตของเดนไดรต์ลดน้อยลง



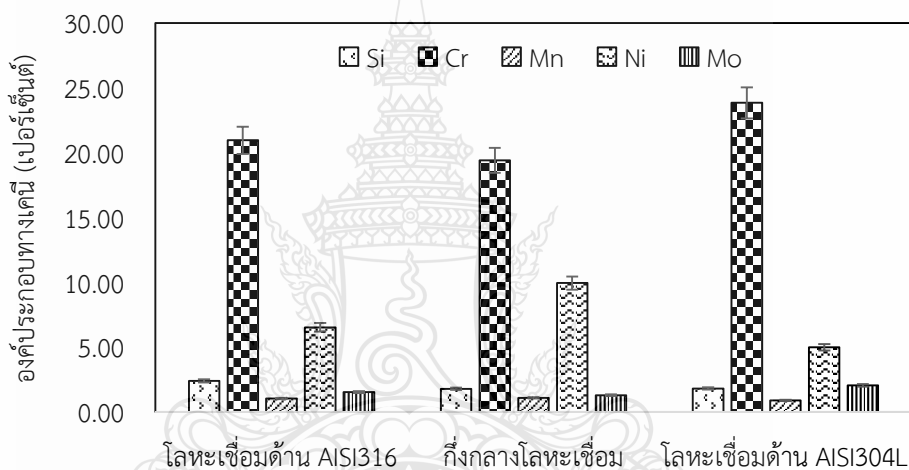
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อม ความแข็ง และระยะห่างแกนเดนไดรต์ทุติยภูมิ

4.1.9 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมที่มีผลต่อการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณโลหะเชื่อม การเปรียบเทียบการตรวจสอบการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณโลหะเชื่อม ของกระแส 90 135 และ 165 แอมแปร์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ได้ทำการตรวจสอบ 3 ตำแหน่ง ได้แก่บริเวณโลหะเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 บริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อมและบริเวณโลหะเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ดังแสดงในรูปที่ 4.15-4.16 และ 4.17 ด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometry :EDS) ในบริเวณโลหะเชื่อมทั้ง 3 ตำแหน่ง พบว่า มีองค์ประกอบของส่วนผสมทางเคมีหลักๆอยู่จำนวน 6 ธาตุ ได้แก่ ซิลิคอน(Si) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) และโมลิบดีนัม (Mo)

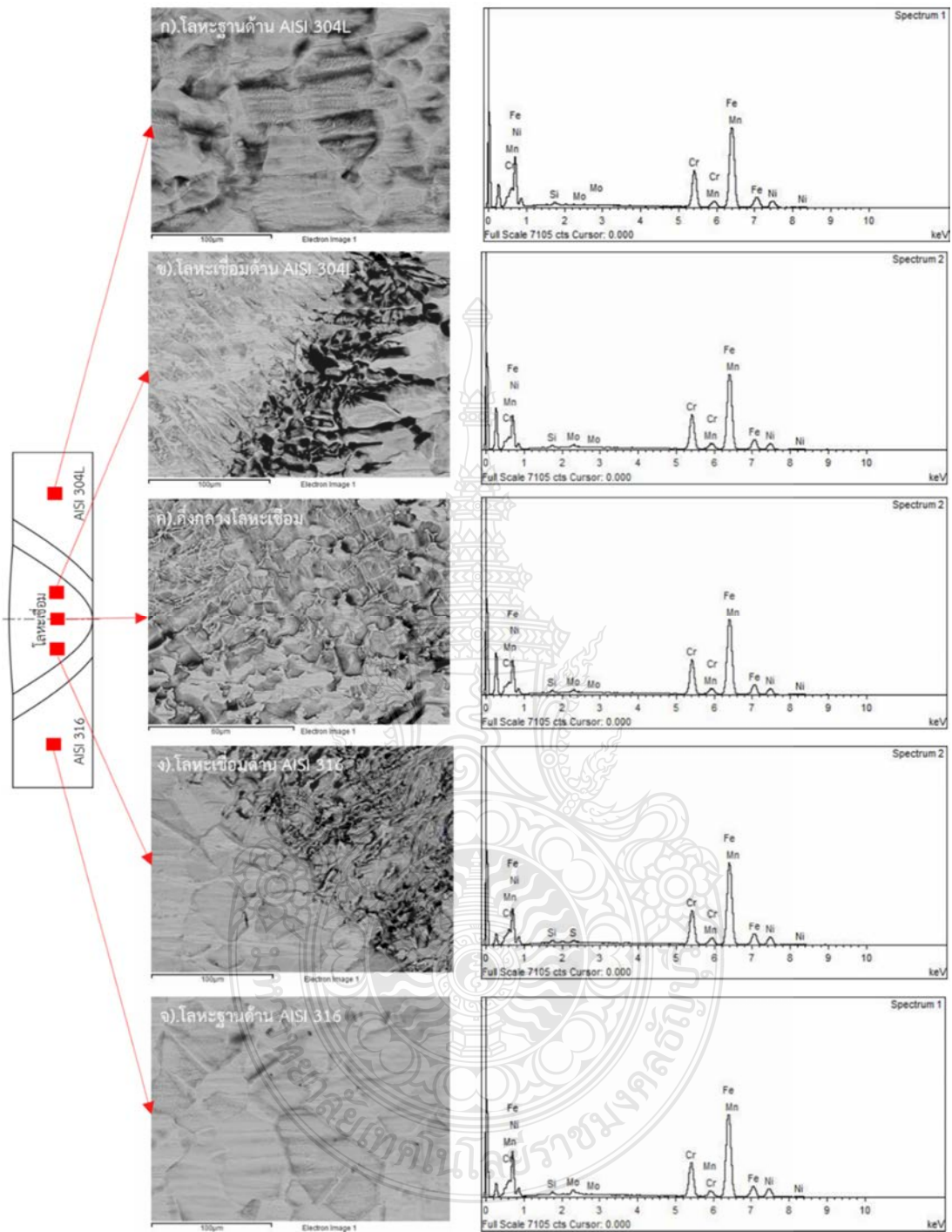


รูปที่ 4.15 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงคุณภาพที่กระแส 90 แอมแปร์

จากรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมทางเคมีบริเวณโลหะเชื่อมที่กระแส 90 แอมแปร์ พบว่า ปริมาณของธาตุโครเมียม (Cr) มีปริมาณสูงในระดับหนึ่งทางด้านโลหะเชื่อม AISI316 เมื่อเทียบกับบริเวณกึ่งกลางโลหะเชื่อมแล้วปริมาณธาตุโครเมียม (Cr) มีแนวโน้มลดลง เว้นแต่ปริมาณของธาตุนิกเกิล (Ni) ที่มีปริมาณสูง ส่วนบริเวณโลหะเชื่อมด้าน AISI304L พบปริมาณธาตุโครเมียมสูงสุด ซึ่งอาจเป็นไปได้ในการเกิดการเจือจางของปริมาณธาตุ และอาจเป็นสาเหตุให้คุณสมบัติทางกลของโลหะเชื่อมลดลง จากงานวิจัยของ Hesam Pouraliakbara และคณะ [103] ได้ทำการศึกษาการออกแบบการเชื่อมของโลหะเชื่อมต่างชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง CK45 กับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ระบุว่าปริมาณของธาตุโครเมียม (Cr) และนิกเกิล (Ni) ลดลง มีผลทำให้คุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมลดลงไปด้วย เนื่องจากโครเมียม (Cr) และนิกเกิล (Ni) เมื่อผสมอยู่ในโลหะ มีคุณสมบัติเป็นตัวเพิ่มความต้านทานแรงดึง ความเหนียวและความแข็งแรง

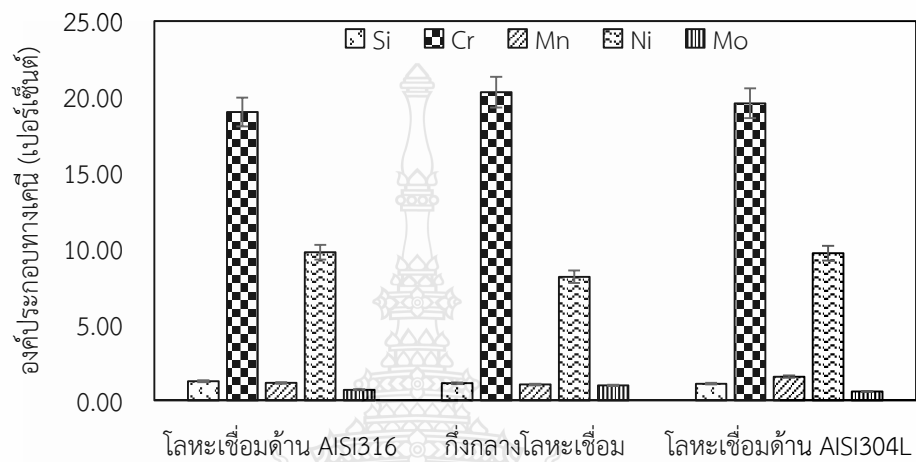


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมทางเคมีบริเวณโลหะเชื่อมที่กระแส 90 แอมแปร์



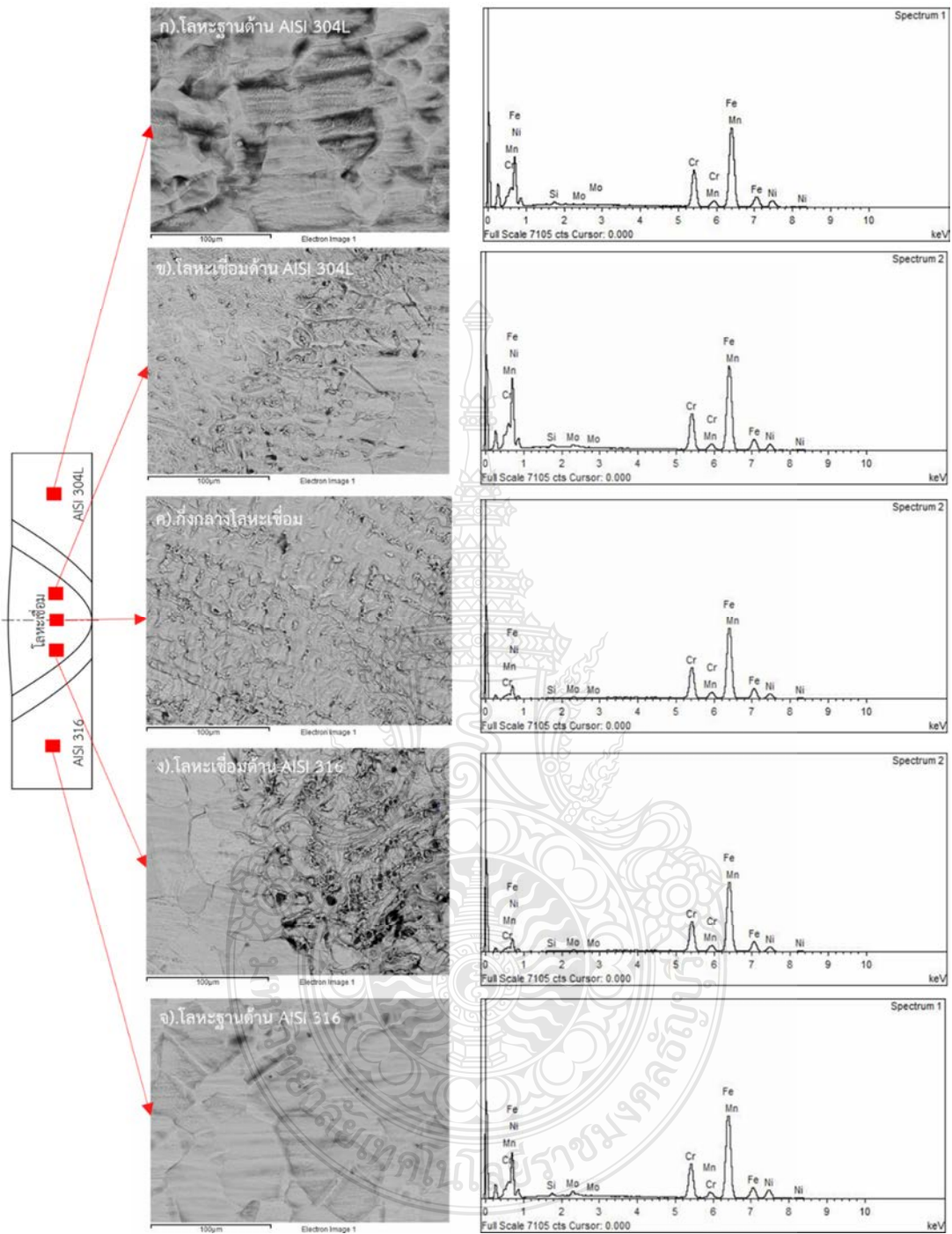
รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงคุณภาพที่กระแส 135 แอมแปร์

จากรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมทางเคมีบริเวณโลหะเชื่อมที่กระแส 135 แอมแปร์ พบว่า ปริมาณของธาตุโครเมียม (Cr) มีปริมาณสูงทางด้านโลหะเชื่อม AISI316 เมื่อเทียบกับบริเวณกึ่งกลางโลหะเชื่อมแล้วปริมาณธาตุโครเมียม (Cr) มีแนวโน้มที่สูงขึ้น เว้นแต่ปริมาณของธาตุนิกเกิล (Ni) ที่มีปริมาณลดลง ส่วนบริเวณโลหะเชื่อมด้าน AISI304L พบปริมาณธาตุโครเมียมสูง ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า กระแสที่เพิ่มขึ้นและเกิดการเจือจางของปริมาณธาตุที่สูงขึ้นตามกระแส



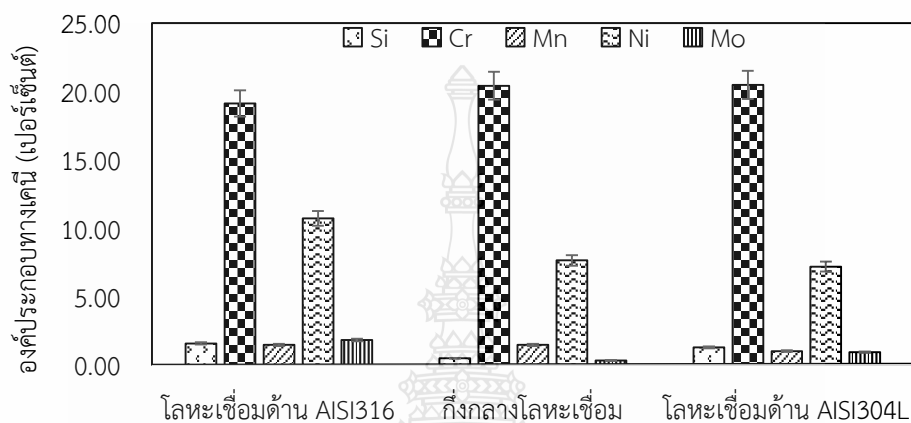
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมทางเคมีบริเวณโลหะเชื่อมที่กระแส 135 แอมแปร์





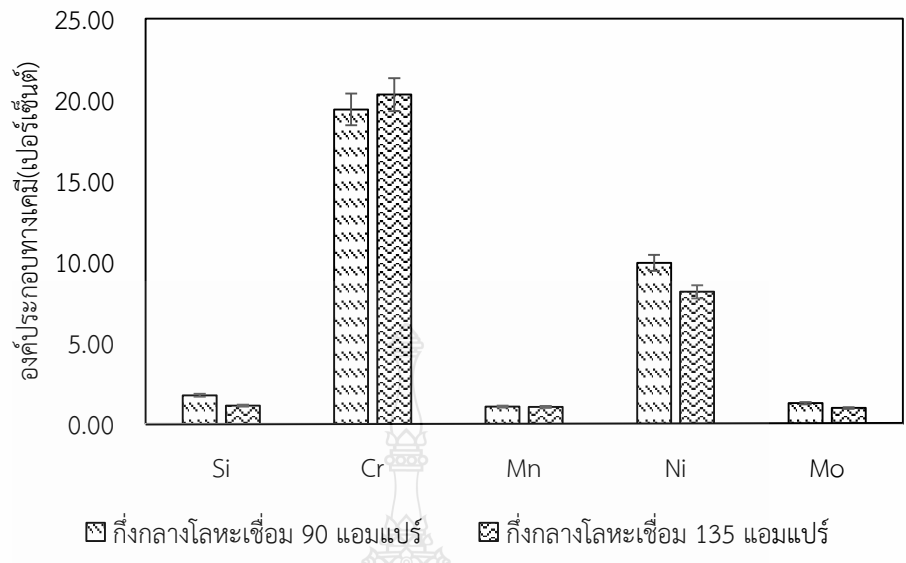
รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงคุณภาพที่กระแส 165 แอมแปร์

จากรูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมทางเคมีบริเวณโลหะเชื่อมที่กระแส 165 แอมแปร์ พบว่า ปริมาณของธาตุโครเมียม (Cr) มีปริมาณค่อนข้างสูงด้านโลหะเชื่อม AISI316 เมื่อเทียบกับบริเวณกึ่งกลางโลหะเชื่อมแล้วปริมาณธาตุโครเมียม (Cr) มีแนวโน้มที่สูงขึ้น แต่ปริมาณของธาตุนิกเกิล (Ni) ที่มีปริมาณลดลง ส่วนบริเวณโลหะเชื่อมด้าน AISI304L พบปริมาณธาตุโครเมียมสูง แต่ปริมาณของธาตุนิกเกิล (Ni) มีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมทางเคมีบริเวณโลหะเชื่อมที่กระแส 165 แอมแปร์

4.1.10 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนด์สแตนด์แบบไม่เติมลวดเชื่อมที่มีผลต่อการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณโลหะเชื่อม จากหัวข้อที่ 4.1.6 ได้ทำการทดสอบความแข็งแรงดึง ของชิ้นงานทดสอบที่เชื่อมด้วยกระแส 90 105 120 135 150 และ 165 แอมแปร์ พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดคือ ชิ้นงานที่กระแส 135 แอมแปร์ และชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดคือชิ้นงานเชื่อมที่กระแส 90 แอมแปร์ จึงนำชิ้นงานทดสอบทั้ง 2 กระแสมาทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีพบว่า ในบริเวณโลหะเชื่อมของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแส 90 แอมแปร์ มีปริมาณของธาตุโครเมียม(Cr) 19.40 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิล(Ni) 9.93 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทดสอบชิ้นงานเชื่อมที่กระแส 135 แอมแปร์ มีปริมาณของธาตุโครเมียม(Cr) 20.31 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิล(Ni) 8.15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Moganraj Arivarasua และคณะ [104] ได้ศึกษาและทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีในบริเวณโลหะเชื่อมของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 4340 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L พบว่า การแพร่กระจายของธาตุ Cr และ Ni ในสัดส่วนที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการก่อตัวของคาร์ไบด์ ซึ่งมีผลต่อค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น สรุปความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณ (Cr และ Ni) ที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมทางเคมีบริเวณโลหะเชื่อมที่ความแข็งแรงดึงสูงสุดกับต่ำสุด



4.2 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสกลุ่มแบบไม่เติมลวดเชื่อมซ้ำแนวที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316และAISI316

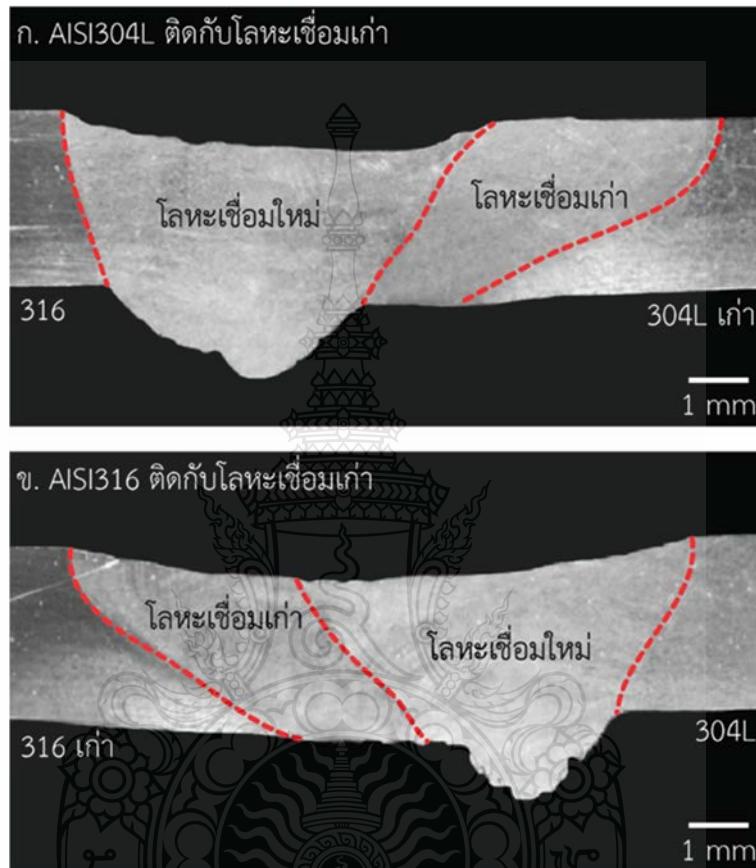
จากหัวข้อ 4.1 ที่ทำการศึกษาอิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสกลุ่มแบบไม่เติมลวดเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304L/AISI316 ที่กระแสเชื่อม 90 105 120 135 150 และ165 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สคลุม 12.5 ลิตรต่อนาที พบว่ารอยต่อชนที่ทำการเชื่อมที่กระแส 135 แอมแปร์ เป็นรอยต่อชนที่มีสมบัติทางกลที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเทียบกับรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสต่าง ๆ ซึ่งความแข็งแรงดึงมีค่าเท่ากับ 831.55 MPa และความแข็งแรงมีค่าเท่ากับ 184 HV ผู้วิจัยจึงได้เลือกสภาวะการเชื่อมที่ประกอบด้วยตัวแปรกระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สคลุมเท่ากับ 12.5 ลิตรต่อนาที มาทำการเชื่อมทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสกลุ่มซ้ำแนวแบบไม่เติมลวดเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304L/AISI316



รูปที่ 4.22 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสกลุ่มซ้ำแนวแบบไม่เติมลวดเชื่อมที่มีผลต่อผิวหน้าของโลหะเชื่อมต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316 และ AISI304L

4.2.1 อิทธิพลการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสกลุ่มซ้ำแนวแบบไม่เติมลวดเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้างมหภาค รูปที่ 4.23 แสดงโครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดระหว่าง AISI304L/AISI316 ที่ผ่านการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสกลุ่มซ้ำแนวแบบไม่เติมลวดที่กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สคลุม 12.5 ลิตรต่อนาที โดยในรูปที่ 4.23 (ก) รอยต่อชนซ้ำแนวที่มีเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L เป็นด้านที่ผ่านการเชื่อมครั้งแรก พบว่ารอยต่อชนเดิมที่ผ่านการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสกลุ่มไม่เติมลวดที่กระแส 135 แอมแปร์ ซึ่งติดกับโลหะฐานด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L มีลักษณะการหลอมลึกสมบูรณ์ แต่บริเวณรอยต่อชนใหม่ซึ่งติดกับด้านโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 รอยเชื่อมมีลักษณะเป็นความเว้าและความนูน โดยความเว้ามีลักษณะเอียงจากด้านโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 ลงไปยังบริเวณฝั่งรอยต่อชนเดิม และในรูปที่ 4.23 (ข) รอยต่อชนซ้ำแนวที่มีเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 เป็นด้าน

ที่ผ่านการเชื่อมครั้งแรก พบว่ารอยต่อชนเดิมที่ผ่านการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมไม่เต็มลวดที่กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ ซึ่งติดกับโลหะฐานด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 มีลักษณะความเว้า และบริเวณรอยต่อชนใหม่ซึ่งติดกับด้านโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L รอยเชื่อมมีลักษณะเป็นความเว้าและความนูน โดยความเว้ามีลักษณะเอียงจากด้านโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L ลงไปยังบริเวณฝั่งรอยต่อชนเดิม



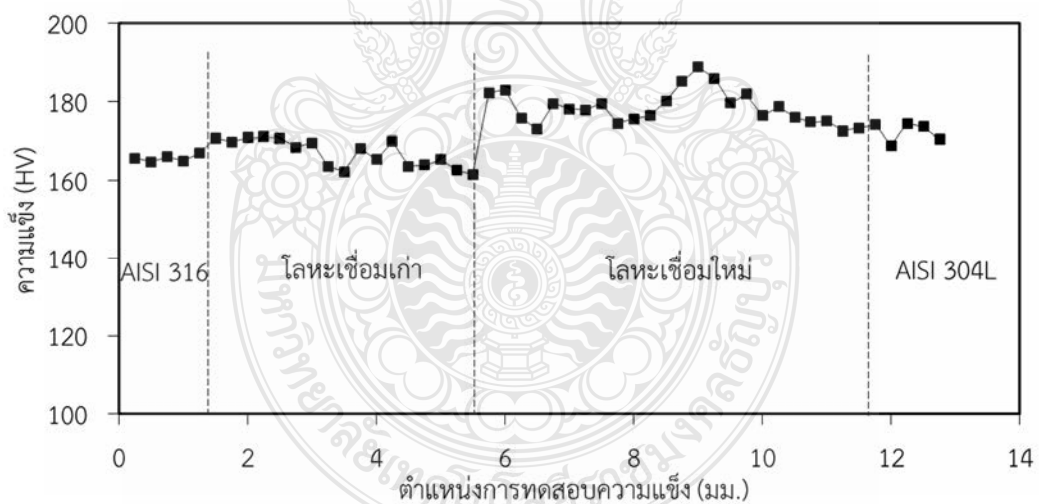
รูปที่ 4.23 โครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมเข้าแนวรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316 และ AISI304L ที่กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์

4.2.2 อิทธิพลการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมไม่เต็มลวดเชื่อมที่มีผลต่อความแข็ง รูปที่ 4.24 ได้แสดงถึงสมบัติความแข็งของรอยต่อชนเข้าแนวเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316 และ AISI304 ที่ผ่านการเชื่อมเข้าแนวอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมแบบไม่เต็มลวดที่กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ โดยมีโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 เป็นโลหะที่ติดกับรอยต่อชนเก่าโดยได้กำหนดตำแหน่งต่าง ๆ ในการทดสอบ ซึ่งแต่ละตำแหน่งมีระยะห่าง 0.25 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.24 (ก) พบว่าบริเวณโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 165 HV ดังรูปที่ 4.24 และเมื่อทำการทดสอบความแข็งบริเวณพื้นที่โลหะเชื่อมเก่าพบว่าค่าความแข็งสูงขึ้นเล็กน้อย โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 166 HV และเมื่อทดสอบค่าความแข็งบริเวณโลหะเชื่อมใหม่ค่าความแข็งมีแนวโน้มสูงขึ้นโดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 178 HV อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดสอบความแข็งในบริเวณของพื้นที่โลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L พบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 172 HV ดังรูปที่

4.24 (ข) รูปที่ 4.25 ได้แสดงถึงสมบัติความแข็งของรอยต่อชนซ้ำแนวเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316 และ AISI304 ที่ผ่านการเชื่อมซ้ำแนวอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมแบบไม่เติมลวดที่กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ โดยมีโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L เป็นโลหะที่ติดกับรอยต่อชนเก่าโดยได้กำหนดตำแหน่งต่าง ๆ ในการทดสอบ ซึ่งแต่ละตำแหน่งมีระยะห่าง 0.25 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.25 พบว่าบริเวณโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 173 HV ดังรูปที่ 4.25 และเมื่อทำการทดสอบความแข็งบริเวณพื้นที่โลหะเชื่อมเก่าพบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 183 HV และเมื่อทดสอบค่าความแข็งบริเวณโลหะเชื่อมใหม่ค่าความแข็งมีแนวโน้มสูงขึ้นจากเดิมโดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 214 HV อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดสอบความแข็งในบริเวณของพื้นที่โลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 พบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 169 HV ดังรูปที่ 4.25 (ข)

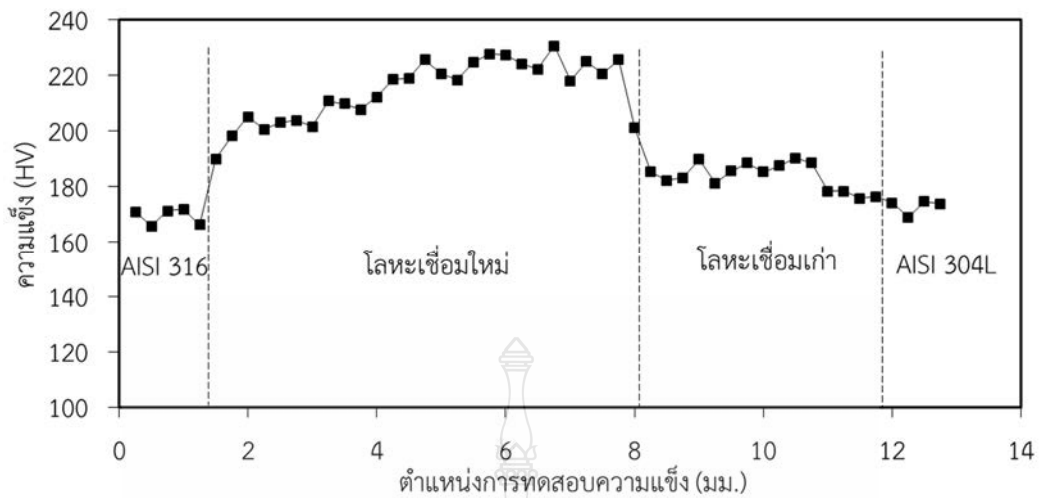


ก. ตำแหน่งการทดสอบความแข็ง



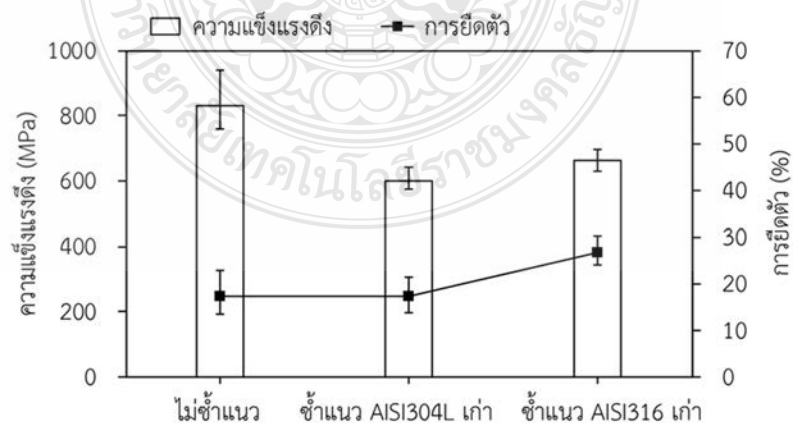
ข. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการทดสอบและค่าความแข็ง

รูปที่ 4.24 การทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเชื่อมซ้ำโดยมีโลหะฐาน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 เป็นโลหะที่ติดกับรอยต่อชนเก่า

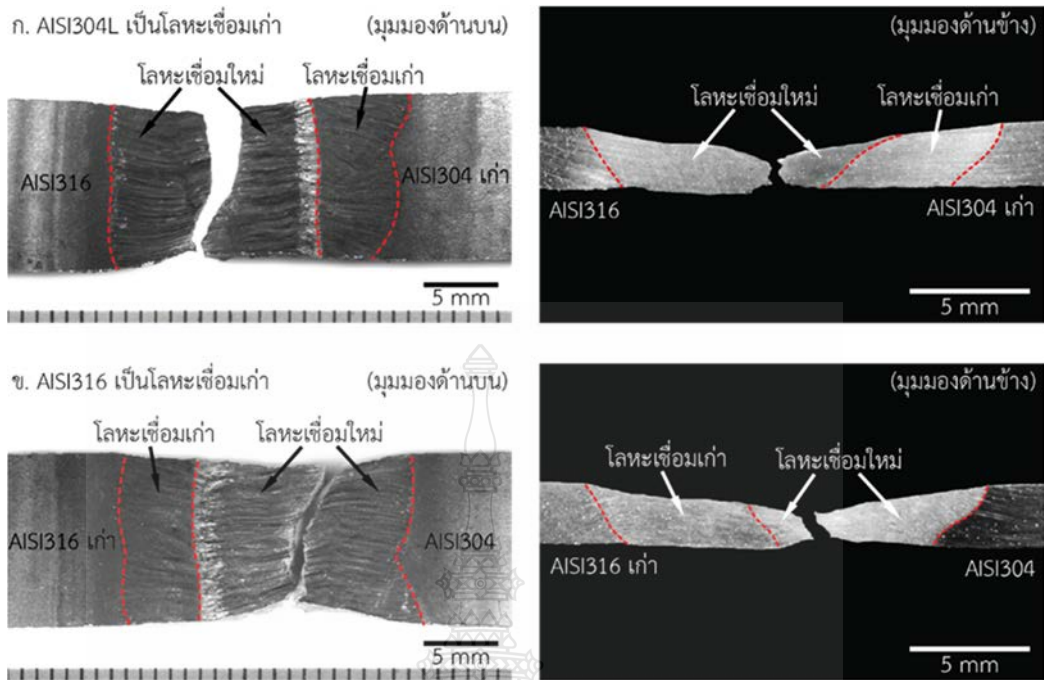


รูปที่ 4.25 การทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเชื่อมซ้ำโดยมีโลหะฐาน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L เป็นโลหะที่ติดกับรอยต่อชนเก่า

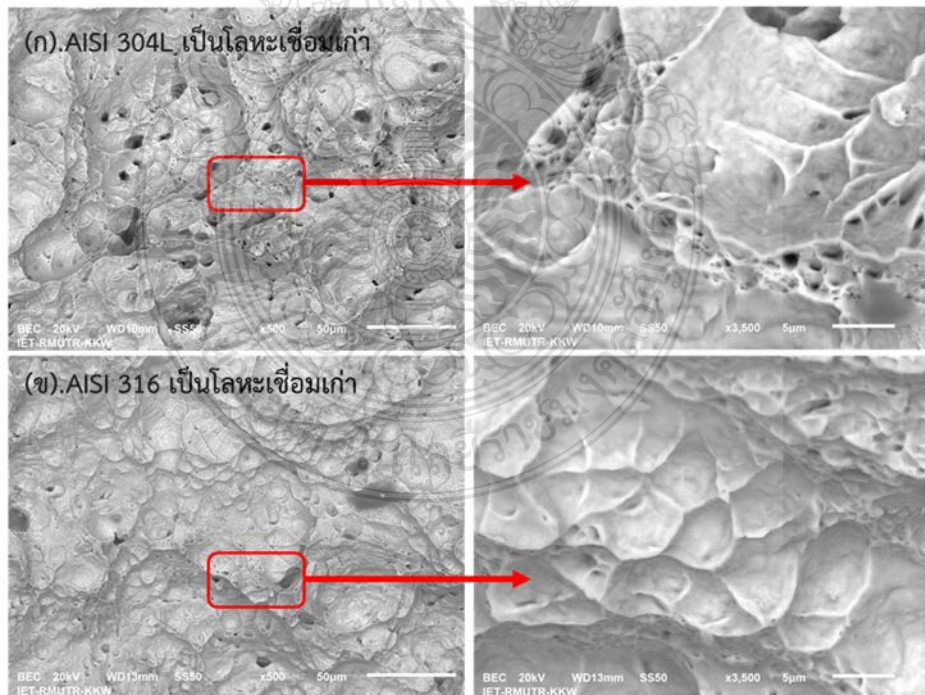
4.2.3 อิทธิพลการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมซ้ำแนวแบบไม่เต็มลวดเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงดึง และอัตราการยืดตัว รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึง และอัตราการยืดตัวของการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมซ้ำแนวแบบไม่เต็มลวดเชื่อมที่กระแส 135 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สคลุม 12.5 ลิตรต่อนาที พบว่าการเชื่อมซ้ำระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L มีโลหะเชื่อมเก่ากับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 ที่เป็นโลหะฐานใหม่ มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 600.95 MPa อัตราการยืดตัวเท่ากับ 17.31% และการเชื่อมซ้ำระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 มีโลหะเชื่อมเก่ากับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L ที่เป็นโลหะฐานใหม่ ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 660.68 MPa อัตราการยืดตัวเท่ากับ 26.84%



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการเชื่อมซ้ำแนว ความแข็งแรงดึง และอัตราการยืดตัวของรอยต่อชนท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316และ AISI304



รูปที่ 4.27 ลักษณะการพังทลายของการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสกลุ่มซ้ำแนวแบบไม่เต็มลวดเชื่อมทำการตรวจสอบลักษณะการพังทลายของรอยต่อชนพบว่าการฉีกขาดเกิดขึ้นตรงบริเวณรอยต่อชนใหม่ที่รอยต่อชนที่มีโลหะฐานเดิมเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และ AISI316

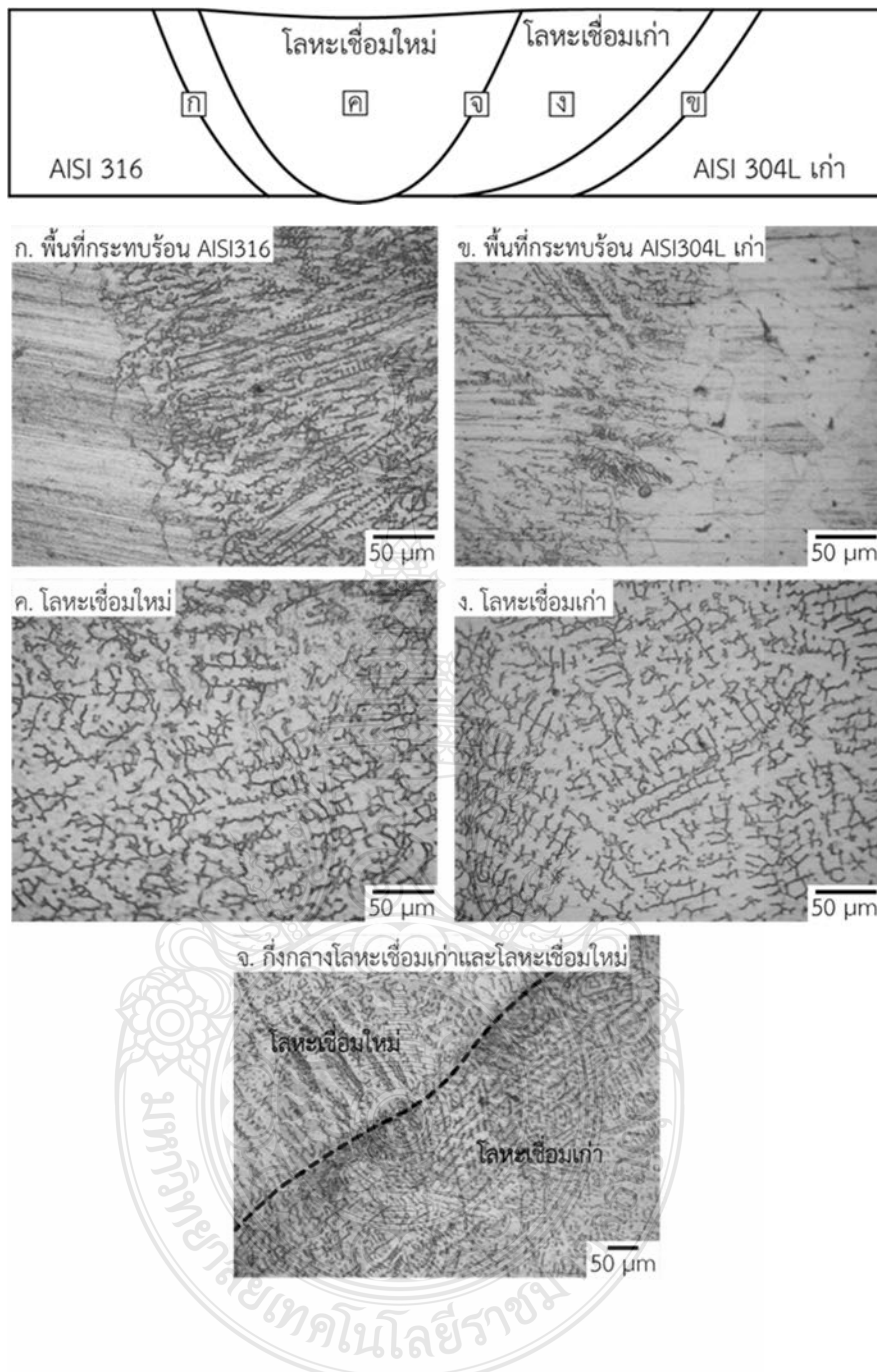


รูปที่ 4.28 อิทธิพลของกระแสเชื่อมต่อพฤติกรรมการฉีกขาดของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316 และ AISI304L ของการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสกลุ่มซ้ำแนวแบบไม่เต็มลวดเชื่อม

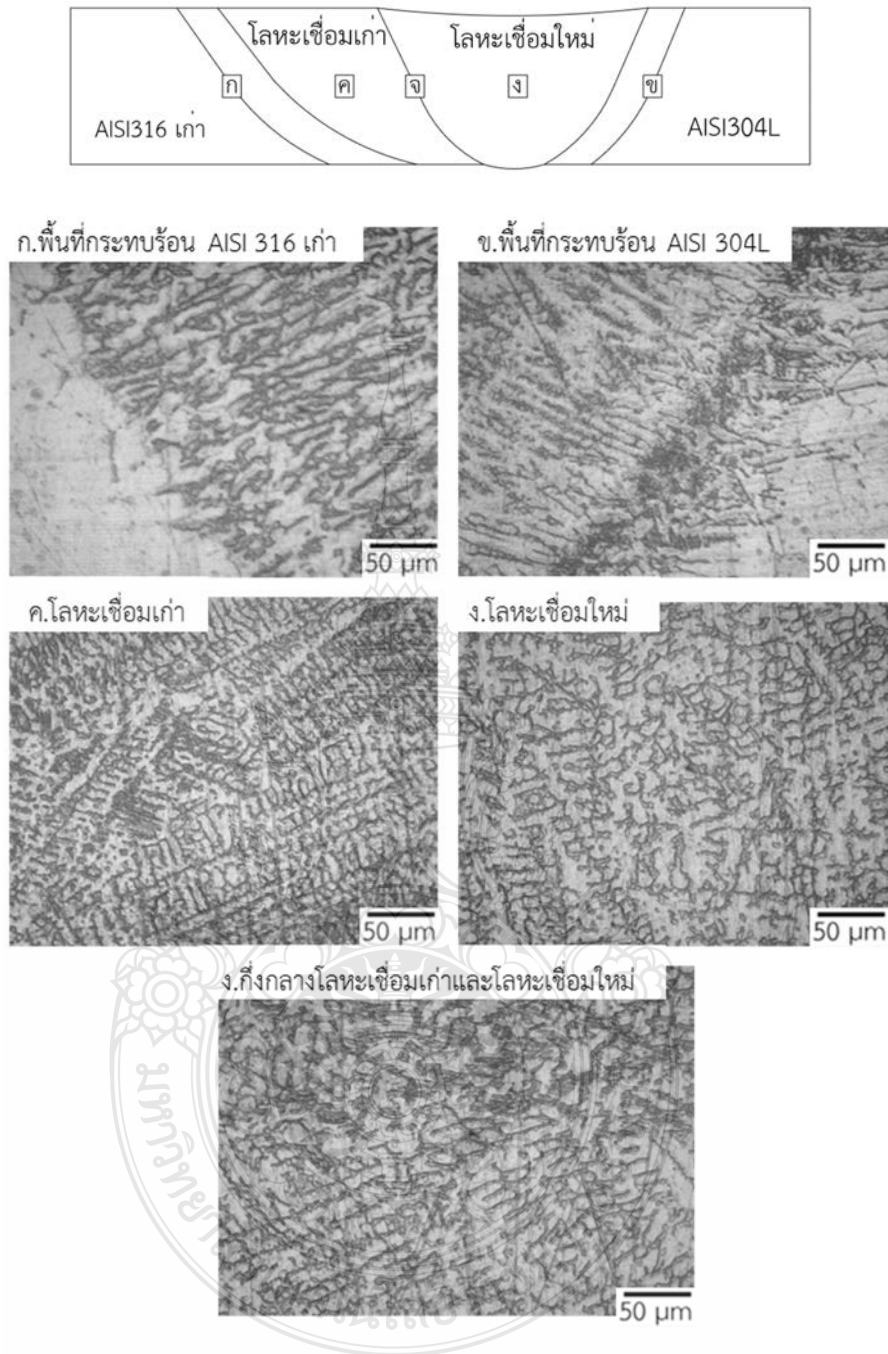
4.2.4 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสกลุ่มแบบไม่เติมลวดเชื่อมซ้ำแนวที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304LและAISI316

แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสกลุ่มซ้ำแนวของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316และAISI316 ที่ทำการเชื่อมด้วยกระแส 135 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 12.5 ลิตรต่อนาที ตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่กำหนด ดังรูปที่ 4.29 แสดงโครงสร้างจุลภาครอยต่อชนซ้ำแนวที่มีเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L เป็นด้านที่ผ่านการเชื่อมครั้งแรก พบว่าที่บริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 เริ่มจากพื้นที่ติดกับเส้นแบ่งเขตการหลอมละลาย (Fusion line) ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างออสเทนไนต์ และขณะเดียวกันมีการก่อตัวของเดนไดรต์โดยมีทิศทางจากซ้ายไปขวาเข้าสู่กึ่งกลางแนวเชื่อมเก่า และเมื่อทำการตรวจสอบบริเวณโลหะเชื่อมเก่าพบว่าโครงสร้างประกอบด้วยโครงสร้างออสเทนไนต์มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ที่ละเอียดขยายตัวเข้าสู่กึ่งกลางของรอยเชื่อมเก่าโดยเริ่มต้นที่เส้นแบ่งเขตการหลอมละลายติดกับบริเวณได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ด้านโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 ดังรูปที่ 4.29 (ก) ตรงบริเวณ Interface ระหว่างโลหะเชื่อมเก่าและโลหะเชื่อมใหม่สังเกตเห็นว่าโครงสร้างมีทิศทางการเรียงตัวของเดนไดรต์เข้าสู่โลหะเชื่อมแต่ละด้านดังรูปที่ 4.29 (จ) และตรงบริเวณโลหะเชื่อมใหม่พบว่าโครงสร้างมีลักษณะคล้ายกับพื้นที่โลหะเชื่อมเก่าซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างออสเทนไนต์มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ที่ละเอียด ส่วนตรงบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L เริ่มจากพื้นที่ติดกับเส้นแบ่งเขตการหลอมละลาย (Fusion line) พบว่าโครงสร้างประกอบด้วยโครงสร้างออสเทนไนต์ มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ที่ละเอียดและหนากว่า



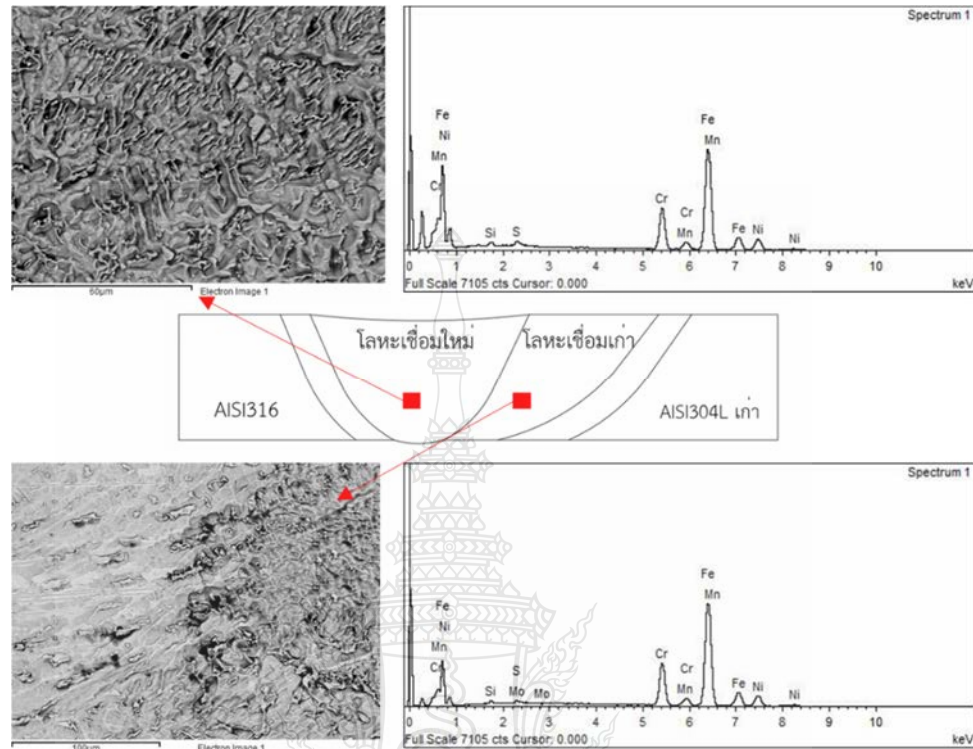


รูปที่ 4.29 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมซ้ำแนวของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304LและAISI316 ที่กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์

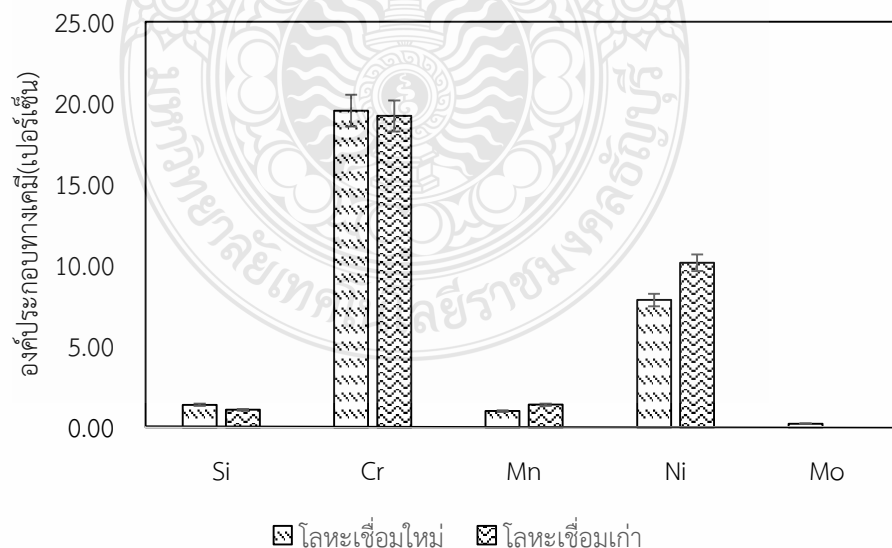


รูปที่ 4.30 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมซ้ำแนวของรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304LและAISI316 ที่กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์

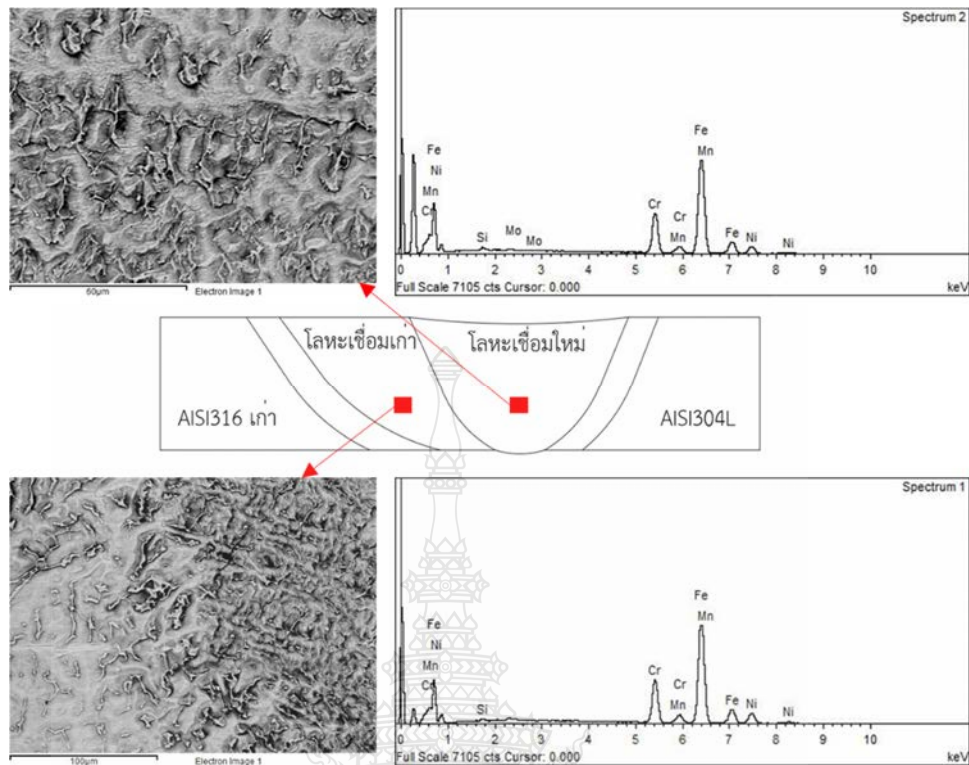
4.2.5 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสกลุ่มแบบไม่เติมลวดเชื่อมซ้ำแนวที่มีผลต่อการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณโลหะเชื่อม



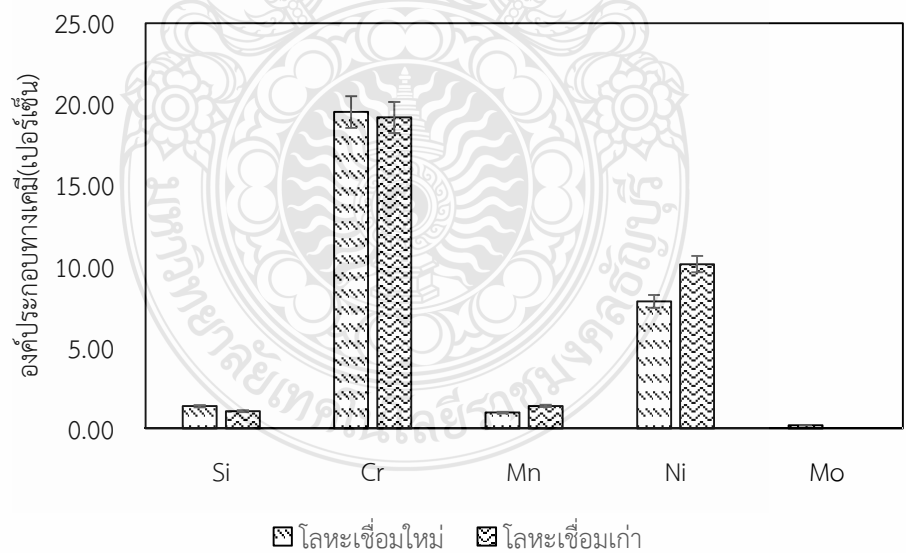
รูปที่ 4.31 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงคุณภาพที่กระแส 135 แอมแปร์ของโลหะเชื่อมซ้ำแนวโดยมีโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L เป็นโลหะที่ติดกับรอยต่อชนเก่า



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมทางเคมีเชิงปริมาณบริเวณโลหะเชื่อมเก่าและใหม่ โดยมีโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L เป็นโลหะที่ติดกับรอยต่อชนเก่า



รูปที่ 4.33 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงคุณภาพที่กระแส 135 แอมแปร์ของโลหะเชื่อมซ้ำแนวโดยมีโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 เป็นโลหะที่ติดกับรอยต่อชนเก่า



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมทางเคมีเชิงปริมาณบริเวณโลหะเชื่อมเก่าและใหม่ โดยมีโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 เป็นโลหะที่ติดกับรอยต่อชนเก่า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองและวิเคราะห์ผลเพื่อศึกษาการศึกษาตัวแปรการเชื่อมซ้ำแนวอาร์คทั้งสแตน แก๊สคลุมต่อคุณสมบัติของรอยต่อชนต่อต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L/AISI316 โดยได้กำหนดตัวแปรของการทดลองดังนี้ กระแสเชื่อม 90 105 120 135 150 และ 165 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 12.5 ลิตรต่อนาที ที่ได้ส่งผลต่อทางสมบัติทางกลและโครงสร้างโลหะวิทยาสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 กระแสเชื่อมมีผลต่อคุณสมบัติของรอยต่อชนต่างชนิดระหว่างโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 และ AISI304

5.1.2 จากการวิเคราะห์ความกว้างของแนวเชื่อม พบว่าเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น ทำให้ความกว้างของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความกว้างของแนวเชื่อมที่มีมากที่สุดในงานวิจัยนี้อยู่ที่ 9.16 มิลลิเมตรที่กระแสเชื่อม 165 แอมแปร์

5.1.3 กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ โครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI316 และ AISI304 สมบูรณ์มากที่สุดเมื่อเทียบกับกระแสอื่นที่ใช้ในการทดลองเชื่อม

5.1.4 กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 832 MPa อัตราการยืดตัวเท่ากับ 17.45 % และค่าความแข็งเฉื่อยของโลหะเชื่อมเท่ากับ 184 HV

5.1.5 การเชื่อมซ้ำแนวอาร์คทั้งสแตน แก๊สคลุมต่อต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L/AISI316 พบว่าการเชื่อมที่ใช้โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 เป็นด้านที่ติดกับโลหะเชื่อมเก่าให้ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 660.68 MPa อัตราการยืดตัวเท่ากับ 26.84% และความแข็งเฉื่อยของโลหะเชื่อมเท่ากับ 177 HV เมื่อการเชื่อมซ้ำแนวที่ใช้โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L เป็นด้านที่ติดกับโลหะเชื่อมเก่าให้ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 600.95 MPa อัตราการยืดตัวเท่ากับ 17.46% และค่าความแข็งเฉื่อยของโลหะเชื่อมเท่ากับ 215 HV

5.1.6 ผลการทดลองวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด จะสังเกตเห็นว่า โครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 พบว่าโครงสร้างมีลักษณะของเดนไดรต์ละเอียดสม่ำเสมอ บริเวณกึ่งกลางโลหะเชื่อม ประกอบด้วยโครงสร้างเดนไดรต์ละเอียดสม่ำเสมอ และลักษณะของเดนไดรต์มีทิศทางการเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการศึกษาครั้งต่อไปควรทดลองใช้ตัวแปรอื่น ๆ ในการเชื่อมอาร์คทั้งสแตน เช่น ความเร็วเดินแนวเชื่อม หรือชนิดของแก๊สคลุมเพื่อสามารถเพิ่มเติมการเปรียบเทียบสมบัติทางกล และโครงสร้างทางโลหะวิทยา

5.2.2 ในการศึกษาครั้งต่อไปควรเปลี่ยนวัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดอื่น ๆ มาทำการทดลอง

5.2.3 ควรมีการศึกษาผลกระทบทางด้านอื่น ๆ อีกเพื่อให้การวิเคราะห์ผลครอบคลุมมากยิ่งขึ้นเช่น การศึกษาการกัดกร่อน เป็นต้น



บรรณานุกรม

- [1] ศูนย์วิจัยเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร “อุตสาหกรรมน้ำผลไม้ สถานการณ์ผลิตและตลาดน้ำผลไม้ไทย” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : http://fic.nfi.or.th/foodsectordatabank-all2_detailnext.php?smid=1250 [สืบค้นเมื่อ 6 เมษายน 60]
- [2] กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. ม.ป.ป. “การผลิต-กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม,” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.dip.go.th/Portals/0/cluster/มาตรฐานการผลิตอาหารอุตสาหกรรม.pdf>, [สืบค้นเมื่อ 10 มกราคม 2560].
- [3] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนานนท์. ม.ป.ป. “Stainless steel/เหล็กกล้าไร้สนิม,” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1236/stainless-steel-เหล็กกล้าไร้สนิม>, [สืบค้นเมื่อ 14 มกราคม 2560].
- [4] อธิพงศ์ ลอยชื่น. 2559. “แพทย์แนะวิธีดื่มน้ำผลไม้กล่องให้ได้คุณประโยชน์เต็ม,” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.naewna.com/lady/217453>, [สืบค้นเมื่อ 10 มกราคม 2560].
- [5] D. Brandon, G. Kaplan and D. Wayne. 1997. Joining Processes : An Introduction. Great Britain: John Wiley & Sons, Ltd.
- [6] มุhammad เต๊ะยอและคณะ 2562. การเชื่อมอลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็งระหว่าง SSM356 กับ SSM6061 โดยกรรมวิธีการเชื่อมทิกและการเชื่อมเสียดทานแบบกวน. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [7] “Principles of Materials Science and Engineering, 3ED” William F. Smith JIS HANDBOOK Ferrous Materials & Metallurgy
- [8] Atlas Steels Technical Department. (2013). Technical Handbook of Stainless Steels.
- [9] Thiago Fontoura de Andrade, Andrea Madeira Kliauga, Ronald Lesley Plaut, Angelo Fernando Padilha . **Precipitation of Laves phase in a 28%Cr-4%Ni-2%Mo-Nb superferritic stainless steel.** Materials Characterization 2008; 59(5): pp.503-7.
- [10] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2559). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] Eun-Young Na, Jae-Yong Ko, Shin-Young Baik. Electrochemical evaluation of crevice corrosion of 430 ferritic stainless steel using the microcapillary tube technique. Desalination 2005 ; 186 (1-3) : pp. 65-74.
- [12] M. Aksoy, V. Kuzucu, M. H. Korkut. The influence of strong carbide-forming elements and homogenization on the wear resistance of ferritic stainless steel. Wear 1997 ; 211(2) : pp. 265-70.
- [13] M. Aksoy, O. Yilmaz, M. H. Korkut. The effect of strong carbide-forming elements on the adhesive wear resistance of ferritic stainless steel. Wear 2001; 249(8): pp. 639-46.
- [14] Jian Han , Huijun Li , Haigang Xu “Microalloying effects on microstructure and mechanical properties of 18Cr–2Mo ferritic stainless steel heavy plates” Materials & Design 2014 , Pages 518-526
- [15] สยาม แก้วคำไสย์.(2558).เหล็กกล้าไร้สนิม(ตอนที่ 9,6):เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติกและ ออสเทนนิติก), สืบค้นเมื่อ 10 สิงหาคม พ.ศ.2561, จาก:
<http://siamkaewkumsai.blogspot.com/2010/11/8-ferritic-stainless-steel.html>
- [16] Admin.(2556). The Stainless Steel Family – An Overview, สืบค้นเมื่อ 10 สิงหาคม พ.ศ. 2561, จาก: <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2013/10/the-stainless-steel-family-an-overview/>
- [17] ชูชาติ ต้วงสงค์.บริษัท ธนาแสงชัยสแตนเลส จำกัด. (ม.ป.ป.).**การเชื่อมสแตนเลส Tig Welding**, สืบค้นเมื่อ 10 สิงหาคม พ.ศ.2561, จาก
http://www.thanasang.com/stainless_knowhow3.php
- [18] เชียงเชลง ชิตชวนกิจ, ยงยุทธ เสริมสุธีอนุวัฒน์, อัครกร กลั่นความดี, และโตชิเอ โอกูมูระ .(2524). **วิศวกรรมเชื่อม**.กรุงเทพฯ:สมาคมส่งเสริมความรู้ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ
- [19] บริษัท พี แอนด์ พี สตีล [ไทยแลนด์ จำกัด].(ม.ป.ป.) สแตนเลสเฟอร์ริติก, สืบค้นเมื่อ 10 สิงหาคม พ.ศ.2561, จาก: <http://pandpsteel.co.th/>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] บริษัท จุฬาวรรณ จำกัด.(ม.ป.ป.) สแตนเลส, สืบค้นเมื่อ 10 สิงหาคม พ.ศ.2561, จาก:
<http://www.juthawan.co.th/product/product-stainless-steel/>
- [21] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, นรพร กลั่นประชา, ศิริชัย ต่อสกุล, และอนินท์ มีมนต์ .(2553). **วัสดุวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ:บริษัท พงษ์วรินทร์การพิมพ์ จำกัด
- [22] Takatoshi Yamamoto, Koji Fushimi, Masahiro Seo, Shiro Tsuru, Tetsuo Adachi, Hiroki Habazaki. Depassivation–repassivation behavior of type-312L stainless steel in NaCl solution investigated by the micro-indentation. Corrosion Science 2009; 51(7): pp. 1545-53.
- [23] ASM Handbook Vol.9: Metallography and Microstructures, ASM International, Ohio, USA, 1985
- [24] ชีรพงษ์ หาญวิโรจน์กุล.(2554).เหล็กกล้า (ไร้สนิม) สำหรับงานทนความร้อน.**วารสารศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ**, 70-73.
- [25] Southern africa stainless steel development association (sassda). (2016). **THE WELDING OF STAINLESS STEEL AN OVERVIEW OF THE BASIC PRINCIPLES**.
- [26] Lincoln Electric Company.(2003). **Stainless Steels Welding Guide**.
- [27] V. Shankar, T. P. S. Gill, S. L. Mannan, S. Sundaresan, 2003,Solidification cracking in austenitic stainless steel welds, Sadhana Vol.28, Parts 3 & 4, June & August pp. 359-382
- [28] Glenn Allen.(2015). Good welding practice Stainless Steels. **World Centre for Materials Joining Technology**.
- [29] A. L. Schaeffler, Selection of austenitic electrodes for welding dissimilar metals, Welding Journal (1947) 26(10), pp. 601s-620s
- [30] A. L. Schaeffler, Constitution diagram for stainless steel weld metal, etal Progress, 1949, 56(11) pp. 680-680B

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [31] Magdy A.M. Ibrahim, S.S. Abd El Rehim, M.M. Hamza. Corrosion behavior of some austenitic stainless steels in chloride environments. *Materials Chemistry and Physics* 2009; 15(1): pp. 80-5.
- [32] J. Oñoro. Corrosion fatigue behavior of 317LN austenitic stainless steel in phosphoric acid. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 2009; 86(10): pp. 656-60
- [33] Kaewkumsai S. and Tuengsook P., 'Study of the degradation of austenitic stainless steel pipe AISI 310 at high temperature' The First Thailand Metallurgy Conference, 15-16 October 2550.
- [34] K.V.S. Ramana, T. Anita, Sumantra Mandal, S. Kaliappan, H. Shaikh, P.V. Sivaprasad, R.K. Dayal, H.S. Khatak. Effect of different environmental parameters on pitting behavior of AISI type 316L stainless steel: Experimental studies and neural network modeling. *Materials & Design* 2009; 30(9): pp. 3770-5.
- [35] M. A. Neri, R. Colás. Analysis of a martensitic stainless steel that failed due to the presence of coarse carbides. *Materials Characterization* 2001; 47(3-4): pp. 283-9.
- [36] M. C. Tsai, C. S. Chiou, J. S. Du, J. R. Yang. Phase transformation in AISI 410 stainless steel. *Materials Science and Engineering A* 2002; 332(1-2): pp. 1-10
- [37] Jee-Yong Park, Yong-Soo Park. The effects of heat-treatment parameters on corrosion resistance and phase transformations of 14Cr–3Mo martensitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*; 449-451: pp. 1131-4.
- [38] S. K. Kim, J. S. Yoo, J. M. Priest, M. P. Fewell. Characteristics of martensitic stainless steel nitrided in a low-pressure RF plasma. *Surface and Coatings Technology* 2003; 163-164: pp. 380-5.
- [39] Sang Yul Lee, Gwang Seok Kim, Bum-Suk Kim. Mechanical properties of duplex layer formed on AISI 403 stainless steel by chromizing and boronizing treatment. *Surface and Coatings Technology* 2004; 177-178: pp. 178-84.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [40] Y. C. Lin, S. C. Chen. Effect of residual stress on thermal fatigue in a type 420 martensitic stainless steel weldment. *Journal of Materials Processing Technology* 2003; 138(1-3): pp. 22-7.
- [41] D. H. Mesa, A. Toro, A. Sinatora, A. P. Tschiptschin. The effect of testing temperature on corrosion-erosion resistance of martensitic stainless steels. *Wear* 2003; 255(1-6): pp. 139-45.
- [42] Hua Tan, Yiming Jiang, Bo Deng, Tao Sun, Juliang Xu, Jin Li. Effect of annealing temperature on the pitting corrosion resistance of super duplex stainless steel UNS S32750. *Materials Characterization* 2009; 60(9): pp. 1049-54
- [43] How to Weld Type 2205 Duplex Stainless Steel (OUTO KUMPU), 1063, Schaumburg, USA, December 2008.
- [44] Lihua Zhang, Wei Zhang, Yiming Jiang, Bo Deng, Daoming Sun, Jin Li. Influence of annealing treatment on the corrosion resistance of lean duplex stainless steel 2101. *Electrochimica Acta* 2009; 54(23): pp. 5387-92.
- [45] S.K. Ghosh, S. Mondal. High temperature ageing behaviour of a duplex stainless steel. *Materials Characterization* 2008; 59(12): pp. 1776-83.
- [46] I. Mészáros. Magnetic characterisation of duplex stainless steel. *Physica B: Condensed Matter* 2006; 372(1-2): pp. 181-4.
- [47] Ihsan-ul-Haq Toor, Park Jung Hyun, Hyuk Sang Kwon. Development of high Mn-N duplex stainless steel for automobile structural components. *Corrosion Science* 2008; 50(2): pp. 404-10.
- [48] R.K. Singh Raman, W.H. Siew. Role of nitrite addition in chloride stress corrosion cracking of a super duplex stainless steel. *Corrosion Science* 2010; 52(1): pp. 113-7.
- [49] Wen-Ta Tsai, Jhen-Rong Chen. Galvanic corrosion between the constituent phases in duplex stainless steel. *Corrosion Science* 2007; 49(9): pp. 3659-68.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [50] Chuan-Ming Tseng, Horng-Yih Liou, Wen-Ta Tsai. The influence of nitrogen content on corrosion fatigue crack growth behavior of duplex stainless steel. *Materials Science and Engineering A* 2003; 344(1-2): pp. 190-200.
- [51] C. N. Hsiao, C. S. Chiou, J. R. Yang. Aging reactions in a 17-4 PH stainless steel. *Materials Chemistry and Physics* 2002; 74(2): pp. 134-42.
- [52] M. Aghaie-Khafri, F. Adhami. Hot deformation of 15-5 PH stainless steel. *Materials Science and Engineering: A* 2010; 527(4-5): pp. 1052-7.
- [53] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2559).กระบวนการผลิต.กรุงเทพฯ:ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- [54] S. Kou, *Welding Metallurgy*, 2 ed. USA: John Wiley & Sons, 2003.
- [55] LARRY D. SMITH. *The fundamentals of gas tungsten arc welding: Preparation, consumables, and equipment necessary for the process*, 2001.
- [56] ประกาศ เมืองจันทร์บุรี และคณะ 2560 “ผลกระทบของกรรมวิธีการเชื่อมทิกประสิทธิภาพสูงโดยใช้แก๊สแอคทีฟเป็นแก๊สปกคลุมต่อรูปร่างของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม 304, “ ภาควิชาวัสดุวิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2560
- [57] J. Beddoes and M. J. Bibby, *Principles of Metal Manufacturing Processes*, 2 ed. Massachusetts: Elsevier Butterworth-heinemann, 2003.
- [58] Jeffus L., *Welding and Metal Fabrication*. USA: Delmar Cengage Learning, 2012.
- [59] สมบูรณ์ เต็งหงษ์เจริญ, *วิศวกรรมเชื่อม*. กรุงเทพฯ: ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ,, 2541.
- [60] Miller Weld. *Guidelines For Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)*, 2018.
- [61] GERMAN DEVELOPMENT SERVICE. *Gas Tungsten Arc Welding – GTAW – (40 Hours Course)*2000
- [62] ยุคล จุลอุภัย, *งานเชื่อมระบบทิก*. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ,, 2527

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [63] Hidetoshi, F., Toyoyuki, S., Shanping, L. & Kiyoshi, N., (2007). Development of an advanced A-TIG (AA-TIG) welding method by control of maragoni convection. Material Science and Engineering A495,296-303.
- [64] CK.WorldWide, THE STANDARD IN TIG WELDING , “ TECHNICAL SPECIFICATIONS FOR TIG WELDING” USA,2016
- [65] C. R Das et al. 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, pages 1428-1435.
- [66] การทดสอบแรงดึง. ม.ป.ป. Available: [http://e-book.ram.edu/ebook/m/MY318\(51\)/MY318-6.pdf](http://e-book.ram.edu/ebook/m/MY318(51)/MY318-6.pdf)
- [67] สมนึก วัฒนศรีกุล. 2549. การทดสอบวัสดุ (Material Testing). กรุงเทพฯ : กรีนเวิร์ลด์ มีเดีย
- [68] อภิชาติ พานิชกุล และ อุษณีย์ กิตกำธร. ม.ป.ป. การวัดความแข็ง.หน่วยวิจัยการประยุกต์ใช้ความรู้ทางโลหะวิทยาสำหรับการขึ้นรูปโลหะ (IMIARU) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [69] มหาวิทยาลัยพะเยา. (2559) . บทความการทดสอบความแข็งของเหล็ก
- [70] มลทล ฉายอรุณ. 2536. การทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ. กรุงเทพฯ : เจริญธรรม.
- [71] Chamlong Champakul. (2557) . การตรวจสอบด้วยการดูโครงสร้างโดยวิธีการทางโลหะวิทยา
- [72] ขวลิต เชียงกุล. 2542. โลหะวิทยา. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น).
- [73] Metal Handbook, Vol. 1, 10th edition, ASM, 1990, pp. 603-613.
- [74] บริษัท เทสดี้ อินสตรูเมนต์จำกัด. (ม.ป.ป.) การวัดขนาดรอยเชื่อม (Weld Bead Measurement)
- [75] ตรีเนตรยิ่งสัมพันธ์เจริญ (2549.) . การศึกษาอิทธิพลของแก๊สคลุมที่มีผลต่ออัตราการหลอมลึกลงในการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม. ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเชื่อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [76] J. M. Krupa and W. Wojciechowski.(2010). Studies of welded joints. ARCHIVES OF FOUNDRY ENGINEERING. Pages 195 – 200
- [77] Metal Handbook, Vol. 1, 10th edition, ASM, 1990
- [78] Radaj, D. Heat Effect of Welding. Springer-Verlay, New York, 1992
- [79] Rolfe. ST., Brasom, JM. “Fracture and Fatigue Control in Structure Application of Fracture Mechanics”, Englewood Cliff wood, New Jersey, Prentice-Hall, 1977.
- [80] พรวสา วงศ์ปัญญา : “เอกสารประกอบการสอนปฏิบัติการโลหการกายภาพ 1”, สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [81] C. A. Higginson, Experiments in materials technology, Affiliated east-west press PVT.,Ltd.: (1973)
- [82] ธนาภรณ์ โกรษณ์, วิลาสิณี วุฒิธิรสกล และธีระพัฒน์ สมบัติวงศ์: “เทคโนโลยีและโลหะวิทยาของอะลูมิเนียมหล่อ”, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ(MTEC), พิมพ์ครั้งที่ 1, 2543
- [83] รังสิณี แคนยุกต์. (2556) . “กลไกการเกิดโครงสร้างโลหะกึ่งแข็งในกระบวนการหล่อแบบรีโอแคสต์ติง” ภาควิชา วัสดุวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2556
- [84] Campbell, J . Castings, 2nd ed ; Butterworth Heinemann Ltd : Oxfod , 1991
- [85] Sajjad Gholami SHIRI1, Mohsen NAZARZADEH1, Mahmood SHARIFITABAR2 and Mehdi Shafiee AFARANI1. (2012) . “ Gas tungsten arc welding of CP-copper to 304 stainless steel using different filler materials” . Transactions of Nonferrous Metels Society of China 22(2012) 2937–2942
- [86] M. Ragavendrana, N. Chandrasekharb, R. Ravikumarb, Rajesh Saxenab, M. Vasudevanb and A.K. Bhadurib. (2017) . “Optimization of hybrid laser – TIG welding of 316LN steel using response surface methodology (RSM)” . Optics and Lasers in Engineering 94(2017) 27-36

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [87] M. Shojaati and B. Beidokhti. (2017). “Characterization of AISI 304/AISI 409 stainless steel joints using different filler materials” *Construction and Building Materials* 147 (2017) 608–61
- [88] Shirali AA, Mills KC. The effect of welding parameters on penetration in GTA welds. *Weld Res Suppl* 1993;72(7):327s–53s.
- [89] Ibrahim, I. A., Mohamat, S. A., Amir, A. & Ghalib, A. (2012). The effect of gas metal arc welding (GMAW) processes on different welding parameters. *Procedia Engineering*, 41: 1502-1506.
- [90] Shuwan Cui et al. 2018. “Microstructure evolution and mechanical properties of keyhole deep penetration TIG welds of S32101 duplex stainless steel,” *Materials Science & Engineering A*. Vol. 709, Issues 4–5 Pages 214-222.
- [91] American Society of Mechanical Engineers. (2007). *ASME BPVC Section II, Part A (Beginning to SA-450) Materials*. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- [92] สิทธิพงษ์ แสงอนิทร์ (2560) .ผลของการกระจายความร้อนต่อรูปร่างแนวเชื่อมในวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีความหนาต่างกันด้วยการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม. 1.ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเชื่อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
- [93] K. Devendranath Ramkumar, Aditya Chandrasekhar, Aditya Kumar Singh ,Sharang Ahuja, Anurag Agarwal, N. Arivazhagan and Arul Maxiumus Rabel (2015) . “Comparative studies on the weldability, microstructure and tensile properties of autogeneous TIG welded AISI 430 ferritic stainless steel with and without flux” *Journal of Manufacturing Processes* 20 (2015) 54-69
- [94] Pengfei Bai , Zhijiang Wang , Shengsun Hu and Shangwen Ma (2017) “Sensing of the weld penetration at the beginning of pulsed gas metal arc welding” *Journal of Manufacturing Processes* Pages 343-350

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [95] Engineering Properties of Steels, Philip D. Harvey, editor, American Society for Metals, Metals Park, OH, (1982).
- [96] Handbook of Stainless Steels, Donald Peckner and I. M. Bernstein, McGraw-Hill Book Company, New York, NY, (1977)
- [97] Metals Handbook, Howard E. Boyer and Timothy L. Gall, Eds., American Society for Metals, Materials Park, OH, 1985.
- [98] Metals Handbook, 10th ed., vol. 1, ASM International Handbook Committee., ASM International, Materials Park, OH, (1990)
- [99] Limmaneevichitr, C. (2005). Welding Metallurgy (1st ed.). Bangkok: King Mongkut's University of Technology Thonburi
- [100] Subodh Kumar, A.S. Shahi (2011) “Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints” Materials and Design 32 (2011) 3617–362
- [101] Merchant Samir Y. 2015. “Investigation on Effect of Heat Input on Cooling Rate and Mechanical Property (Hardness) Of Mild Steel Weld Joint by MMAW Process,” International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). Vol. 5, Issues 1 Pages 34-41.
- [102] Srdjan Milenkovic et al. 2012. “Effect of the cooling rate on microstructure and hardness of MAR-M247 Ni-based superalloy,” Materials Letters. Vol. 73, Pages 216-219.
- [103] Hesam Pouraliakbara,b, Mohsen Hamedia, Amir Hossein Kokabia, Ali Nazarib (2014) “Designing of CK45 Carbon Steel and AISI 304 Stainless Steel Dissimilar Welds” Materials Research. 2014; 17(1): 106-114

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [104] Moganraj Arivarasua, Devendranath Ramkumar Kasinatha, Arivazhagan Natarajana (2015) “Effect of Continuous and Pulsed Current on the Metallurgical and Mechanical Properties of Gas Tungsten Arc Welded AISI 4340 Aeronautical and AISI 304L Austenitic Stainless Steel Dissimilar Joints” Materials Research. 2015; 18(1): 59-77





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



ESTACON 10th 2019

10th Engineering Science Technology and Architecture Conference 2019



การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์
เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 10

The 10th Engineering Science Technology
and Architecture Conference 2019



ความท้าทายด้านวิศวกรรมในอนาคต
Engineering Challenge Future

วันที่ 30 สิงหาคม 2562

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
จ.นครราชสีมา

ดร.วิทยา เรืองฤทธิ์

วิทยากรบรรยายพิเศษ

ผู้ช่วยโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครราชสีมา
 สำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครราชสีมา

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิจัย

กลุ่มวิศวกรรมาโยธา : CE

รศ.รังษี	นันทสาร	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
ดร.อาภา	สนนเสาวภาคย์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ดร.ดวงธิดา	โคตรโยธา	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ดร.เมธาวี	ศรีวิพัฒน์พงศ์ โพธิ์สาร	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.จิระยุทธ	สิบลุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.เชิดศักดิ์	สุขศิริพัฒน์พงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.เกียรติสุดา	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.ชีวินทร์	สัมศิริ	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
รศ.ดร.อนุชิต	อุทัยภักขิต	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ดร.ศิริชัย	ห้วงจริง	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
อ.หวังแก้ว	บุญสวน	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
อ.ธนวิทธิ์	สุชนแสน	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

กลุ่มวิศวกรรมาไฟฟ้า : EE

ผศ.ถวัลย์	คุณไทมม	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
ดร.พงษ์นรินทร์	ศรีพลอย	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ดร.สุรัชย์	วงษ์ฟูเกียรติ	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ดร.กฤตยา	นาคประสิทธิ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ดร.ทศพร	จันทร์เมือง	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.ณอมศักดิ์	โสภณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.อุบล	สุวิมล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.วรรณวิทย์	วงศ์ไตรวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ดร.ภูริพงษ์	สุทธิโสภณพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ดร.ปวีณา	วิมลนะ	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
อ.สิทธิศักดิ์	เจิงฤทธิ์	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผศ.กฤษฏา	วิไลลักษณ์	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ผศ.ดร.พัชรินทร์	อาคมียะนันท์	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ผศ.ดร.ชมพู่	ทวีย์ปทุมสิน	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ผศ.ชิตพงษ์	เกตุคนอม	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
อ.นพพล	โคตรพันธ์	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

กลุ่มวิศวกรรมเครื่องกล : ME

รศ.ดร.จำลอง	ฉัตรระกูล	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
ดร.รตินันท์	เหล็คมพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลางนครราชสีมา
ดร.พลเทพ	เวงสูงเนิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลางนครราชสีมา
ผศ.วศิษฐ์	ธีระเจตกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.สุระ	คันดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.ศุภฤกษ์	ชามงคลประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.สุภัทรวชิย	สุวรรณพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.พิศาล	มูลอำคา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.ปฐมภรณ์	ชัยกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.ชัชวรินทร์	ศักดิ์กำปัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.ภาณุพิชญ์	ชินเขียว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.กฤษณพันธ์	ศรีมงคล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อ.ไทร	ศรีโยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อ.ทศพล	แจ้งน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อ.เอกวุฒิ	แสนคำวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อ.ดร.สิริธร	สุภาคาร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อ.พิศาล	พรมแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.สุรินทร์	พงษ์สกุล	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผศ.สุรสิทธิ์	พ้อคำ	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ดร.วิริยะ	แดงทน	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ดร.โกศล	เวียงแสน	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ดร.เกษียร	ควงอุปมา	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ดร.สถิตพงษ์	เสงี่ยมศักดิ์	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ดร.สุภัทรา	บุโรลง	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ดร.ไทยทัศน์	สุดศวนสี	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ดร.บัณฑิต	สุริยวงศ์หงสา	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผศ.ประโยชน์	ชฌบุศกร	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ดร.ยุทธชัย	เกี่ยวสำเฑียะ	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
อ.รักพงษ์	ชันอวีธิ	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
อ.ธวัชชัย	ชาญสูงเนิน	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

ผศ.ดร.ชัยนิกร	กุลวงษ์	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ผศ.ดร.จุฑาทิพย์	ทองเดชาสามารถ	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ผศ.อานนท์	ศรีสว่าง	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
อ.จ๊กวิน	วงษ์ชวลิตกุล	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

กลุ่มวิศวกรรมอุตสาหกรรม : IE และสถาปัตยกรรมศาสตร์ : AR

รศ.ดร.ชัยสิทธิ์	ด้านกิตติกุล	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รศ.สุคนธ์	อาจอุทธิ์	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
ดร.ปวีญ์	บุญงาม	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ดร.วรุทัย	เศษตานนท์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.สุทัศน์	ยอดเพชร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.จิตติวัฒน์	นิธิกาญจนธาร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.สุวิทย์	วรรณศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ดร.จารุพงษ์	บรรเทา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
อ.นราธิกษ์	บุตธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ดร.วิทยา	ดาวดอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
อ.รุ่งสันท	ไกรกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ดร.ชาอุชัย	เหลลหา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.ณภัทร	อินทพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อ.ภูวิฬ	แสนพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.สุรเชษฐ์	เดือนแก้วสิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อ.คมกริช	จันทร์เสนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ดร.อภิชาติ	คำภาหาล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ดร.พัชรพล	โพธิ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.นิคม	บุญญาสุทธิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.อลงกรณ์	กัมมหาญณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
รศ.ดร.สุพรรณ	สุทนต์	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ดร.นรงค์	วิชาผา	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ดร.อาจารี	แสงเสถียร	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
อ.อรรณพงษ์	ศิริสุวรรณ	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
อ.พีญา	สิงห์ศรี	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
อ.กรรณิกา	สุภาพรรณ์	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ดร.มันทนา	ทองสุท	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
อ.ประพนธ์	เนียมสา	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
รศ.ดร.สงวน	วงษ์ชวลิตกุล	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ดร.มารุต	โคตรพันธ์	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ดร.ศิริวัฒน์	สาระเขตต์	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

ดร.ประยงค์	กิริติอุไร	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ดร.สุวิพร	มีหอม	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
อ.อรรถพงษ์	โกชนม์เกาะ	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
อ.รุ่งทิภา	เวทยะเวทิน	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
อ.ศุภกฤต	ทรีวโรตง	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
อ.อนุวัักษ์	มะโนมัย	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
อ.นพดล	สุนมาตย์	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

กลุ่มวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี : ST

ดร.พินิจ	กิจขุนทด	สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)
ดร.นิรันดร์	คงฤทธิ	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ดร.ภูษิตา	คู่ชัยภูมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา
ผศ.ดร.ญาณววรรณ	แสนกลางชัยภักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ดร.วิเชียร	แสงอรุณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ดร.วิชนก	เอียวราวิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ดร.คมกฤช	อรุณฉายพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.วรุณทิพย์	ฉัตรจุฑามณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ดร.คมพิชิต	สีห ชาติย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
รศ.ดร.สาวิตรี	โพธิ์เอกุ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ดร.เบญจมาศ	ศรีสองเมือง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.ชยาตมน์	บุริมศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.อัญฉวียา	เจียรศิริสมบุรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.วัชณี	พัฒนชนะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.ฐิติกานต์	ธมบุรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.วิมลรัตน์	ทองภูธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.วัชรินทร์	ชุมจันทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.พันธกานต์	แก้วอาษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.กฤษณพันธ์	ศรีมงคล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.พิชเนศ	อุปชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.วุฒิไกร	โสเหลื่อม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.ปวีญญาณี	ไถปั้น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ธีระพันธ์	ระวีธรรมย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.ศเวช	หงษ์ประสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.พิมพ์พร	ลักขณาวรรณกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.เฉลิมวุฒิ	น้อยอุ่นแสน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
อ.นาวา	งามวิทยานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
อ.ประสาธ	เชื้อทาน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

บทความวิจัยแบบโปสเตอร์ กลุ่มวิศวกรรมเครื่องกล

ME24	ศึกษานและออกแบบเครื่องตัดท่อคาน์บูและสับย่อยคาน์บูสำหรับถัง	319
ME25	ศึกษานและออกแบบพัฒนาเครื่องผสมอาหารสุกรแบบแห้ง	328

บทความวิจัยแบบบรรยาย กลุ่มวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการและสถาปัตยกรรมศาสตร์

IE&AR07	พอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลทหรือโพลีไวนิลเทรฟทาเลต: สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัมมูลานวิทยา	335
IE&AR09	อิทธิพลความเร็วรอบเครื่องสลับที่มีผลต่อความถี่การสั่นของคาน์บู	342
IE&AR10	พอลิเมอร์ผสมโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลท/โพลีโพรพิลีน	349
IE&AR12	การพัฒนาตัวแบบในการจัดเส้นทางในการขนส่งที่ขึ้นที่เฉพาะสม กรณีศึกษา เขตสุขภาพที่ 9	354
IE&AR13	การศึกษาอิทธิพลของไนโตรเจนที่มีผลต่อการหล่อเย็นจากสิ่งเหล็กกล้าไร้สนิม SUS420	362
IE&AR15	การจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล สำหรับการสั่นของท่อคู่ป้อนในที่เฉพาะสม	369
IE&AR16	ปัจจัยที่ส่งเสริมศักยภาพการเข้าถึงของธุรกิจการขนส่งผู้โดยสารสำหรับสินค้าขั้นสูง ของประเทศไทย	376
IE&AR17	การจัดการวางการผลิตแบบไหลที่มีความยืดหยุ่น ของงานที่มีหลายขั้นตอนการผลิตบนเครื่องจักรแต่ละเครื่องที่มีประสิทธิภาพแตกต่างกัน	383
IE&AR18	การออกแบบตารางเวลาการผลิตขนส่งวัสดุในมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา โดยใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์	390
IE&AR19	อิทธิพลปัจจัยของกระบวนการตัดเฉือนด้วยไฟฟ้าต่อวัสดุเหล็กแม่พิมพ์ NAK80	396
IE&AR20	อิทธิพลกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสเปคตัมต่อสมบัติของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316	402
IE&AR21	การประยุกต์ใช้กับแบบการจัดการเส้นทางการสำหรับพนักงานขายเพื่อจัดเส้นทางและเวลา	414
IE&AR23	การศึกษาอิทธิพลของวิธีการหล่อเย็นที่มีผลต่อความถี่การสั่นของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304	424
IE&AR24	การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเดินอัตราการผลิตในโรงงานตัดวัสดุเหล็กคาร์บอนสูง SSOC ด้วยการใช้การออกแบบการทดสอบ	432
IE&AR25	การปรับปรุงกระบวนการเพื่อลดความสูญเสียในขั้นตอนการบรรจุกรณีศึกษา : บริษัทผู้ผลิตและส่งออกกุ้งแปรรูปแช่เยือกแข็ง	441
IE&AR26	การประเมินภาระงานของกรทำงานในสำนักงาน กรณีศึกษา พนักงานในสำนักงานแห่งหนึ่ง	447
IE&AR27	การประเมินความเสี่ยงทางเศรษฐศาสตร์ในการใช้เครื่องมือที่ใช้มือจับกรณีศึกษา งานฝึกพื้นฐานทางวิศวกรรม	456
IE&AR28	การปรับปรุงงานด้วยวิธีการทางศาสตร์ในการปฏิบัติงานของพนักงานกรณีศึกษา สำนักงานคณะวิศวกรรมศาสตร์	465
IE&AR29	การพัฒนาอุปกรณ์ช่วยในการนั่งเพื่อลดความถี่การสั่นของกรทำงาน	472
IE&AR31	การศึกษาสมบัติของพอลิเอสเตอร์รีซินชนิดไม่อิ่มตัวจากโกลโกลใช้เซ PET	481
IE&AR32	การจัดการพลังงานของระบบการทำความเย็นในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง	488
IE&AR33	ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบคั้นไฟที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล	497
IE&AR34	การปรับปรุงประสิทธิภาพสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมโดยการจัดการสมดุลสายการผลิต	507
IE&AR35	การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์อาคารของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ปีการศึกษา 2558 และ 2559	514
IE&AR36	อิทธิพลของอุณหภูมิแบบหล่อต่อข้อบกพร่องของบรอนซ์อะลูมิเนียมในกระบวนการหล่อขึ้นรูป	523

อิทธิพลกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสเชื่อมต่อสแตนเลสกลุ่มต่อสแตนเลส AISI304L
และ ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316

Effect of Gas Tungsten Arc Welding Current on AISI304L and AISI316
Stainless Steel Tube Joint Properties

นฤเบศร เพียรชัยกุล^{1,*} และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์²

¹⁻² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

*E-mail: narubeth_p@mail.rmutt.ac.th โทรศัพท์ 0 2549 4416 โทรสาร 0 2549 3442

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสเชื่อมต่อสแตนเลสกลุ่มแบบไม่ใช้โลหะเติมที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 ตัวแปรการเชื่อมในการทดลองนี้ประกอบด้วย กระแสเชื่อม 90-165 แอมแปร์ และ ความเร็วเดินเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที รอยต่อเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมด้วยตัวแปรการเชื่อมเฉพาะถูกนำไปทำการเตรียมด้วยวิธีการทางกลภายใต้สารหล่อเย็นเพื่อทำการศึกษาความแข็งแรง ความแข็ง และโครงสร้างจุลภาค ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การเพิ่มความร้อนเข้าส่งผลต่อการเพิ่มการหลอมลึกของแนวเชื่อม เพิ่มพื้นที่การเกาะยึดของรอยต่อ และเพิ่มความแข็งแรงดึงของรอยต่อ เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของแนวการพังทลายของชิ้นส่วนทดสอบความแข็งแรงดึง การเพิ่มขึ้นนี้เนื่องจากการลดขนาดเกรน และช่องว่างระหว่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิในโลหะเชื่อม ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดความแข็งแรง 832 MPa คือกระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที

คำสำคัญ: วัสดุต่างชนิด , เหล็กกล้าไร้สนิม , การเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสเชื่อม

Abstract

This research aimed to study an effect of fillerless gas tungsten arc welding (GTAW) current on mechanical properties and microstructure of tube butt joint between AISI304L and AISI316 stainless steel. A welding current of 90-165 A and a welding speed of 200 mm/min were welding process parameters that were applied in this experiment. Welded butt joints that produced by specified welding process parameters were mechanically prepared under a cooling media for investigation of tensile strength, hardness, and microstructure. The summarized results were as follows. Increase of a heat input affected to increase the penetration of the weld, increase the bonding area of the joint, and increase the tensile strength of the joint. When considering the microstructure of the tensile specimen fracture path, thus increasing was caused by the decrease of the grain size and the decrease of the secondary dendrite arm spacing (SDAS). The optimum welding current that produce the tensile strength of 832 MPa, was the welding current of 135 A and the welding speed of 200 millimeters/min.

Keywords: dissimilar materials, stainless steel, gas metal arc welding,

1. บทนำ

อุตสาหกรรมน้ำผลไม้เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่สำคัญของประเทศ สามารถสร้างรายได้จากการส่งออกปีละหลายพันล้านบาท ซึ่งผลมาจากพฤติกรรมผู้บริโภคที่หันมาดูแลสุขภาพมากยิ่งขึ้น โดยมุ่งเน้นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณประโยชน์ต่อร่างกาย และน้ำผลไม้เป็นอีกหนึ่งที่ได้รับคามนิยมเป็นอย่างสูง [1] เนื่องจากอุตสาหกรรมอาหารที่ผลิตเพื่อการส่งออกให้ผู้บริโภคประทับใจ การเลือกวัสดุและอุปกรณ์ในการผลิตน้ำผลไม้จำเป็นต้องผลิตภายใต้หลักเกณฑ์ข้อกำหนดขั้นพื้นฐานที่จำเป็นในการผลิตและควบคุม (Good Manufacturing Practice: GMP) [2]

ในโครงสร้างระบบการส่งถ่ายและบรรจุน้ำผลไม้ประกอบด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมหลายชนิด กล่าวคือในส่วนของถังบรรจุนั้นในปัจจุบันใช้วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคเกรด AISI 304 เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการขึ้นรูป(Formability)สูง มีความต้านทานการกัดกร่อนดีเยี่ยม และมีราคาเหมาะสมในการใช้งาน ขณะเดียวกันในท่อส่งน้ำผลไม้ปัจจุบันได้ถูกกำหนดให้ใช้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคเกรด AISI 316 ซึ่งเป็นเกรดอาหาร [3] การนำเอาเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองเกรดมาใช้งานนี้ส่งผลทำให้เกิดโครงสร้างโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคเกรด AISI 304 และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคเกรด AISI 316 ที่จุดต่อของการนำเอาน้ำผลไม้ออกจากถังพัก [4] และเมื่อใช้ไปในระยะเวลาหนึ่งจะทำให้บริเวณรอยเชื่อมเกิดการชำรุดเสียหายจึงต้องทำการเชื่อมซ่อม การเชื่อมซ่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคต่างชนิดระหว่าง AISI304L และ AISI 316 นั้นเป็นสิ่งท้าทายในการปฏิบัติการ เนื่องจากเหล็กกล้าทั้งสองชนิดนี้มีสมบัติทางกล เคมีและกายภาพที่แตกต่างกัน ในการควบคุมตัวแปรการเชื่อมเพื่อทำให้เกิดการอาร์กคงที่บริเวณรอยต่อส่งผลทำให้เกิดรอยเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ค่อนข้างยาก เมื่อทำการเชื่อมรอยต่อแล้วมักทำให้เกิดจุดบกพร่องต่างๆ ทำให้คุณสมบัติทางกล และทางกายภาพของเหล็กบริเวณรอยเชื่อมลดลง โดยเฉพาะจุดบกพร่องที่เกิดการเปลี่ยนรูปของคาร์บอนเมื่อได้รับความร้อน (Weld

Decay) และทำให้เกิดการลดความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเป็นจุดๆ สุดท้ายเมื่อนำไปใช้งานแล้วส่งผลทำให้เกิดการรั่วซึมบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) รอบๆแนวเชื่อมขึ้น [5] การเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมหรือกระบวนการเชื่อมทิก (TIG) จึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีบทบาทในการการเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากการเชื่อมทิกนั้นข้อดี คือ ไม่ต้องใช้ฟลักซ์ ไม่มีสะเก็ดเชื่อม (Spatter) งานบิดตัวน้อย และสะดวกในการปฏิบัติงานในการเชื่อมโลหะ [6] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุมแบบไม่เติมลวดเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และ AISI 316 ศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L และ AISI 316

ด้วยเหตุนี้ผู้ดำเนินการจึงมีแนวความคิดที่จะทำการศึกษาที่สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเชื่อมท่อในอุตสาหกรรมการผลิตต่อไปได้

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304L และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60.3 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตรหนา 2.8 มิลลิเมตร ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L และ AISI316 ที่ใช้ในการทดลอง(%W)

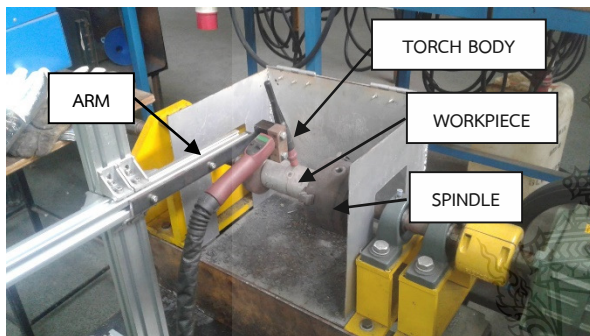
เหล็กกล้าไร้สนิม	ธาตุ							
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
AISI 304L	0.05	1.46	0.02	0.01	0.46	18.34	7.19	0.05
AISI 316	0.05	1.04	0.02	0.01	0.47	15.32	8.50	0.66

2.2 วิธีการทดลอง

เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60.3 มิลลิเมตร จะถูกตัดให้ได้ขนาดความยาว 60 มิลลิเมตร และเตรียม

ผิวงานให้เรียบก่อนทำการทดลองเชื่อมโดยการกลึง
ปาดหน้าและทำความสะอาดผิวก่อนทำการเชื่อม

หลังจากเตรียมชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว จะทำการเชื่อม
โดยใช้เครื่องเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสกลุ่มเครื่องหมาย
การค้า Fronius KD 4010 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการ
เชื่อมแสดงไว้ในตารางที่ 2 ทำการเชื่อมแบบ Square
Butt (ต่อชนแบบไม่บากชิ้นงาน) ซึ่งจะทำการเชื่อม
เพื่อศึกษาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมก่อน จากนั้น
ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ จะถูกนำไปเชื่อมแบบซ้ำแนวแบบ
autogenous butt welding เป็นการเชื่อมแบบไม่
ต้องใช้ลวดเติม



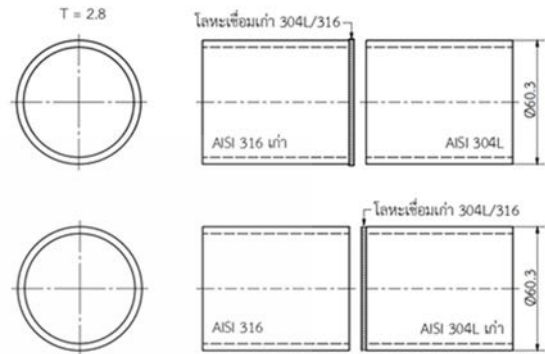
รูปที่ 1 แสดงลักษณะการเชื่อมชิ้นงาน

ตารางที่ 2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

welding parameters	Fix Parameters					
	1	2	3	4	5	6
current (A)	90	105	120	135	150	165
Shielding gas/ (l/min)	12.5 [7]					
Welding Speed (mm/min)	200 [8]					
Tungsten Electrode (mm)	2.4 [9]					

หลังจากทำการเชื่อมชิ้นงานเสร็จแล้ว จะนำ
ชิ้นงานที่ได้ไปตัดเพื่อวิเคราะห์ผลทางโลหะวิทยา
เลือกสภาวะการเชื่อมที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดสอบครั้ง
ที่ 1 มาทำการเชื่อมซ้ำ โดยการตัดชิ้นงานระหว่าง
เหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และเหล็กกล้าไร้สนิม
AISI316 ออกจากกัน โดยให้เหล็กกล้าไร้สนิม AISI
304L ติดรอยเชื่อมไว้ แล้วนำเหล็กกล้าไร้สนิม AISI
304L ที่ตัดเตรียมไว้มาเชื่อมใหม่อีกครั้งกับเหล็กกล้า
ไร้สนิม AISI 316 ที่ยังไม่เคยผ่านกระบวนการเชื่อมมา

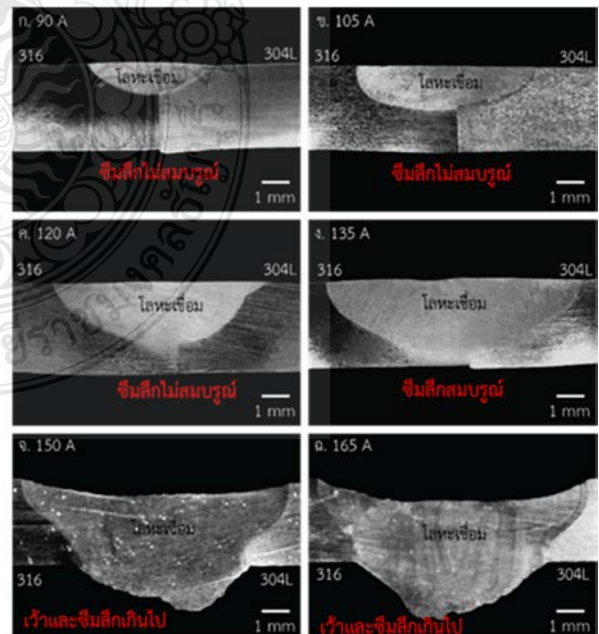
ก่อน โดยใช้กระแสไฟฟ้าที่สภาวะดีที่สุดที่ได้จากการ
ทดสอบครั้งแรก ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวจะทำการเชื่อม
ชิ้นงานทดสอบด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 ด้วย
ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ชิ้นงานก่อนการเชื่อมครั้งที่ 2

3. ผลการทดลอง

รูปที่ 3 แสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคชิ้นงานที่
ได้จากการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสกลุ่มในการศึกษา
หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมพบว่า กระแสเชื่อมที่ 135
แอมแปร์ คือตัวแปรที่เหมาะสมที่สุด ลักษณะรอย
เชื่อมเกิดการซึมลึกสมบูรณ์ โดยค่าความแข็งแรงตึง
อยู่ที่ 832 MPa

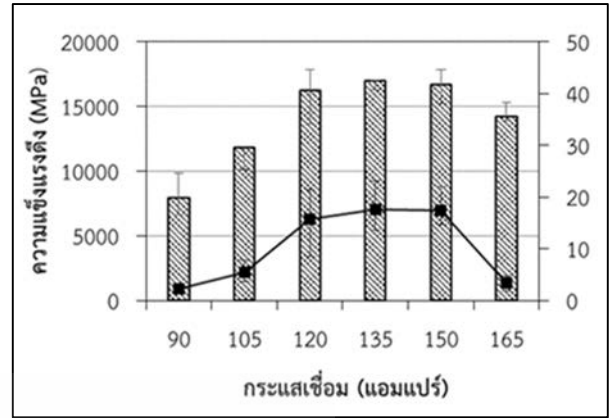


รูปที่ 3 โครงสร้างมหภาค

ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความร้อนเข้า
ส่งผลต่อการเพิ่มการหลอมลึกของแนวเชื่อม เพิ่มพื้นที่

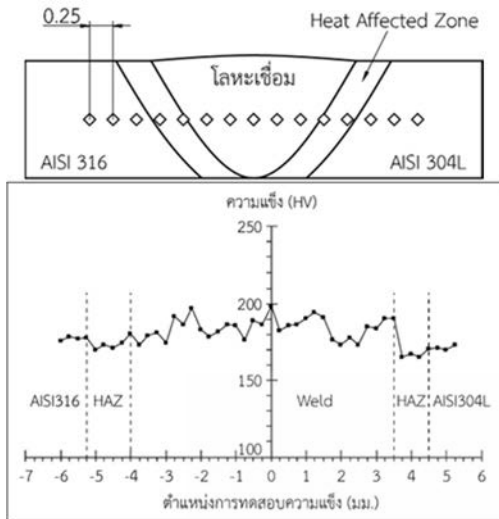
การเกาะยึดของรอยต่อ และเพิ่มความแข็งแรงดึงของ รอยต่อ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ

K. Devendranath Ramkumar และคณะ [10] ได้กล่าวไว้ว่า การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าทำให้พลังงาน ความร้อนเพิ่มขึ้นต่อหน่วยความยาวของแนวเชื่อม และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น ก่อให้เกิด การหลอมละลายบนวัสดุฐานในปริมาณมาก นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการซึมลึกของแนว เชื่อมเพิ่มขึ้นไปด้วย เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Pengfei Bai และคณะ [11] ได้ระบุไว้ว่า การเพิ่มขึ้น ของกระแสเชื่อม เป็นผลให้แรงดันอาร์กมีปริมาณเพิ่ม มากขึ้น ส่งผลต่อการซึมลึกของบ่อหลอมละลายของ แนวเชื่อม และจากรูปโครงสร้างมหภาคที่ 3 จะ สังเกตเห็นว่า การถ่ายเทของบ่อหลอมละลายไปยัง ชิ้นงานเชื่อมมีสัดส่วนที่แตกต่างกัน เนื่องจากบ่อ หลอมละลายมีการถ่ายเทไปยังฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 สูงกว่าฝั่งเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L และมี แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของ กระแส เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดนี้มี คุณสมบัติทางเคมี ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) และจุดหลอมละลาย (Melting point) ที่แตกต่างกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์ การนำความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 มีค่า เท่ากับ 16.3 W/m-K มากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำ ความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L มีค่าเท่ากับ 16.2 W/m-K และจุดหลอมละลายของเหล็กกล้าไร้ สนิม AISI 316 มีค่าเท่ากับ 1370-1400 องศาเซลเซียส น้อยกว่า เหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L มีค่าเท่ากับ 1400-1455 องศาเซลเซียส [12,13,14,15] ซึ่ง สอดคล้องกับบทความของ Limmaneeviehitn [16] ได้กล่าวไว้ว่า การนำความร้อนของโลหะโดยทั่วไปมี ค่าความสามารถของการนำความร้อนที่ดีแตกต่างกัน เมื่อนำโลหะต่างชนิดมาทำการเชื่อมเข้าด้วยกัน ความ ร้อนจะถูกถ่ายเทจากบ่อหลอมละลายในสัดส่วนที่ แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากสัมประสิทธิ์การนำความ ร้อนของโลหะเชื่อม



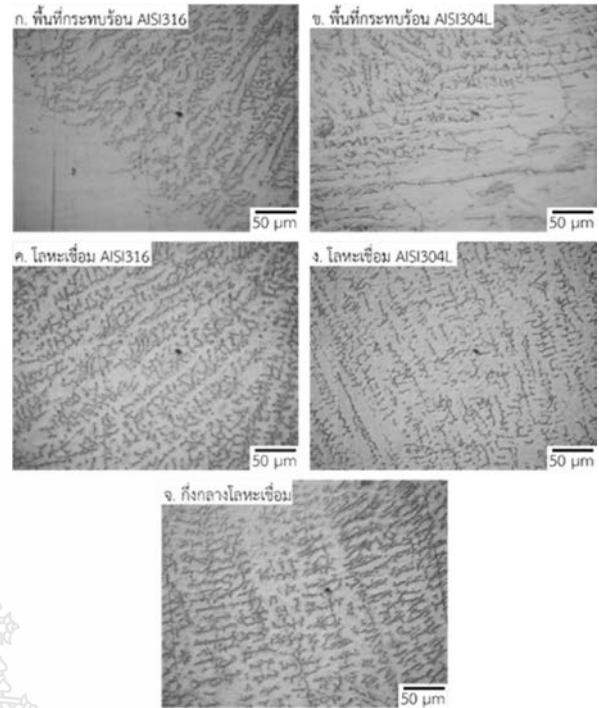
รูปที่ 4 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงและอัตราการ ยึดตัวของกระแสเชื่อม 90-165 แอมแปร์ ความเร็ว เดินเชื่อม 200 mm/min

จากรูปที่ 5 การตรวจสอบความแข็งแรงที่บริเวณ กึ่งกลางรอยเชื่อมและชิ้นงานพบว่าชิ้นงานทดสอบที่ เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 90-120 แอมแปร์ โลหะเชื่อมมี การหลอมลึกไม่สมบูรณ์จึงเลือกเฉพาะชิ้นงานที่มีการ หลอมลึกสมบูรณ์มาทำการศึกษาต่อซึ่งประกอบด้วย ชิ้นงานทดสอบที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 135 150 และ 165 แอมแปร์ โดยได้กำหนดตำแหน่งต่าง ๆ ในการ ทดสอบ ดังรูปที่ 5 พบว่าบริเวณโลหะฐานเหล็กกล้า ไร้สนิม AISI 316 มีค่าความแข็งแรงเฉื่อยเท่ากับ 177 HV ดังรูปที่ 5 และเมื่อทำการทดสอบความแข็งแรงเข้าใกล้ บริเวณพื้นที่ที่กระแทกร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 พบว่าค่าความแข็งแรงลดลงเล็กน้อยโดยมีค่าความแข็งแรง เฉื่อยเท่ากับ 172 HV และเมื่อทดสอบค่าความแข็งแรง บริเวณโลหะเชื่อมค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มสูงขึ้น เล็กน้อยโดยมีค่าความแข็งแรงเฉื่อยเท่ากับ 184 HV และ เมื่อเข้าใกล้พื้นที่ที่กระแทกร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L ค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลงซึ่งมีค่า ความแข็งแรงเฉื่อยเท่ากับ 165 HV อย่างไรก็ตามเมื่อทำ การทดสอบความแข็งแรงในบริเวณของพื้นที่โลหะฐาน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L มีค่าความแข็งแรงเฉื่อยเท่ากับ 171 HV ดังรูปที่ 5 และบริเวณโลหะเชื่อมที่กระแส เชื่อม 150 และ 165 แอมแปร์ ค่าความแข็งแรงเฉื่อย เท่ากับ 179 และ 175 HV ตามลำดับ

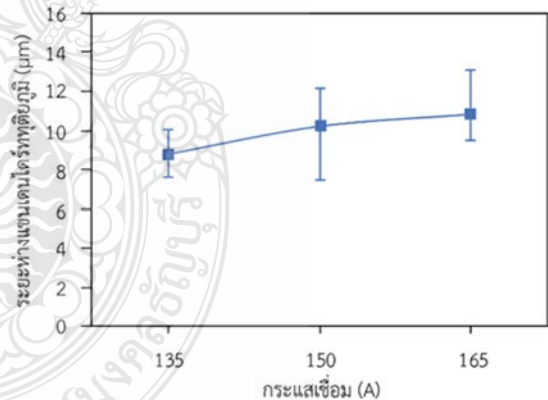


รูปที่ 5 การทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค รูปที่ 6 (ก) แสดง โครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 สามารถสังเกตเห็นได้ว่าพื้นที่บริเวณนี้มีเอกลักษณ์ที่ เฉพาะด้วยการเพิ่มขึ้นของขนาดเกรน อันเนื่องมาจาก ข้อเท็จจริงที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูงกว่า อุณหภูมิปกติที่บริเวณเขตหลอมละลาย [17] โดย ลักษณะของเดนไดรท์มีทิศทางการเรียงตัวเข้าสู่ กึ่งกลางจากซ้ายไปขวาของโลหะเชื่อม และโครงสร้าง จุลภาคของพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L พบว่าโครงสร้างมี ลักษณะของเดนไดรท์ละเอียดมีทิศทางการเรียงตัวเข้า สู่กึ่งกลางจากขวาไปซ้ายของโลหะเชื่อม นอกจากนี้ ไม่พบจุดบกพร่องใด ๆ บนรอยเชื่อมที่บริเวณพื้นที่ กระทบร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L [18] และ เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อม ของทุกตำแหน่งในการเชื่อม ซึ่งประกอบด้วยโลหะ เชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 ดังรูปที่ 6 (ค) โลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L ดังรูปที่ 6 (ง) และกึ่งกลางโลหะเชื่อมดังรูปที่ 6 (จ) พบว่ามีการก่อ ตัวของโครงสร้างเดนไดรท์เกิดขึ้นพื้นที่สีขาวของ โครงสร้างจุลภาค และพื้นที่สีดำดังแสดงพื้นที่แบ่งแยก เดนไดรท์ [18] และลักษณะของเดนไดรท์มีทิศ ทางการเรียงตัวเข้าสู่กึ่งกลางของโลหะเชื่อม



รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมของรอยต่อ ขนท้อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304L/AISI316 ที่ กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ (กำลังขยาย 200 เท่า)



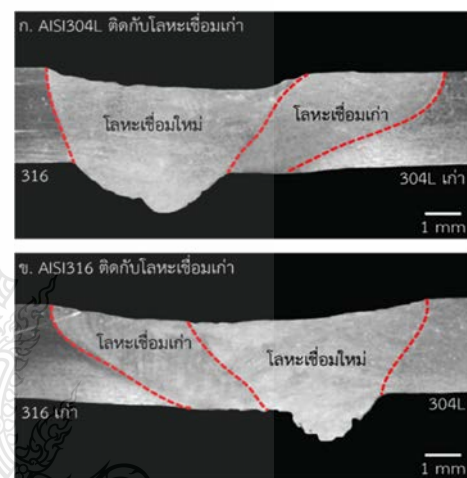
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมและ ระยะห่างแกนเดนไดรท์ทุติยภูมิ

จากรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส เชื่อมและระยะห่างแกนเดนไดรท์ทุติยภูมิของชิ้นงาน ทดสอบที่ถูกเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่แตกต่างกัน 3 ระดับได้แก่ 135 150 และ 165 แอมแปร์ โครงสร้าง จุลภาคบริเวณโลหะเชื่อมที่มีการกระจายตัวของเฟส เดนไดรท์ จึงทำการวัดระยะห่างแกนเดนไดรท์ทุติยภูมิ พบว่าระยะห่างแกนเดนไดรท์ทุติยภูมิของชิ้นงาน ทดสอบที่กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ

8.81 μm อย่างไรก็ตามเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น ระยะห่างแกนเดนไดรท์ทุติยภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 150 และ 165 แอมแปร์ ระยะห่างแกนเดนไดรท์ทุติยภูมิเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 10.21 และ 10.82 μm ตามลำดับ เมื่อทำการ เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อม ความ แข็ง และระยะห่างแกนเดนไดรท์ทุติยภูมิ พบว่าการ เพิ่มขึ้นของกระแสเชื่อมจาก 135-165 แอมแปร์ ทำให้ระยะห่างแกนเดนไดรท์ทุติยภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ โดย Merchant Samir Y. [19] ได้กล่าวไว้ว่าการเปลี่ยน กระแสเชื่อมส่งผลโดยตรงต่อปริมาณความร้อนขาเข้า เมื่อกระแสเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณความร้อนขาเข้า เพิ่มขึ้นด้วย และในงานวิจัยเดียวกันนี้เขาได้ทำการ สรุปว่าปริมาณความร้อนขาเข้ามีผลต่ออัตราการเย็นตัว และเวลาการแข็งตัวของโลหะเชื่อมด้วยการ เพิ่มขึ้นของปริมาณความร้อนขาเข้าส่งผลให้อัตราการ เย็นตัวของโลหะเชื่อมมีค่าลดลง และเวลาแข็งตัวของ โลหะเชื่อมมีค่ามากขึ้น และ Srdjan Milenkovic et al. [20] ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการ เย็นตัว ระยะห่างแกนเดนไดรท์ทุติยภูมิ และความแข็ง โดยได้ทำการสรุปไว้ว่าเมื่ออัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ระยะห่างแกนเดนไดรท์ทุติยภูมิมีค่า น้อยลง และค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

รูปที่ 8 แสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคของโลหะ เชื่อมรอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดระหว่าง AISI304L/AISI316 ที่ผ่านการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊ส คลุมซ้ำแนวแบบไม่เติมลวดที่กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ รูปที่ 8 (ก) รอยต่อชนซ้ำแนวที่มีเหล็กกล้าไร้ สนิม AISI 304L เป็นด้านที่ผ่านการเชื่อมครั้งแรก พบว่ารอยต่อชนเดิมที่ผ่านการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊ส คลุมไม่เติมลวดที่กระแส 135 แอมแปร์ ซึ่งติดกับโลหะ ฐานด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L มีลักษณะการ หลอมลึกสมบรูณ์แต่บริเวณรอยต่อชนใหม่ซึ่งติดกับ ด้านโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 รอยเชื่อมมี ลักษณะเป็นความเว้าและความนูน โดยความเว้ามี ลักษณะเอียงจากด้านโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 ลงไปยังบริเวณฝั่งรอยต่อชนเดิม และในรูปที่

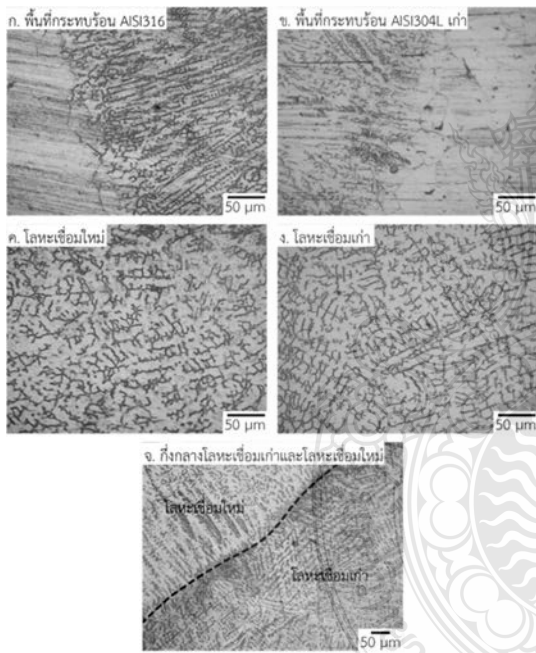
8 (ข) รอยต่อชนซ้ำแนวที่มีเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 เป็นด้านที่ผ่านการเชื่อมครั้งแรก พบว่ารอยต่อชนเดิม ที่ผ่านการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สคลุมไม่เติมลวดที่ กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ ซึ่งติดกับโลหะฐานด้าน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 มีลักษณะความเว้า และ บริเวณรอยต่อชนใหม่ซึ่งติดกับด้านโลหะฐาน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L รอยเชื่อมมีลักษณะเป็น ความเว้าและความนูน โดยความเว้ามีลักษณะเอียง จากด้านโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L ลงไป ยังบริเวณฝั่งรอยต่อชนเดิม



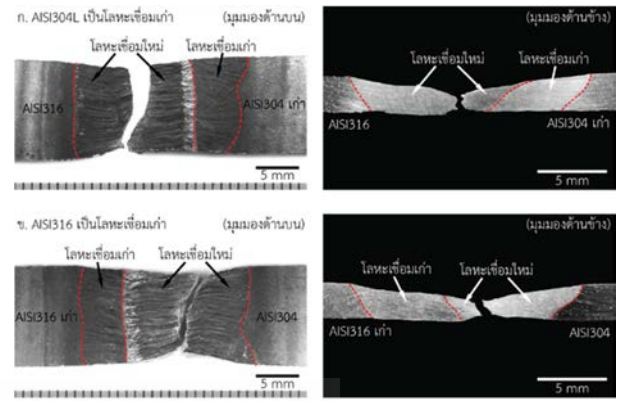
รูปที่ 8 โครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมซ้ำแนว รอยต่อชนท่อนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304L/AISI316 ที่กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์

รูปที่ 9 แสดงโครงสร้างจุลภาครอยต่อชนซ้ำแนว พบว่าที่บริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านโลหะฐาน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 เริ่มจากพื้นที่ติดกับเส้น แบ่งเขตการหลอมละลาย (Fusion line) ซึ่ง ประกอบด้วยโครงสร้างออสเทนไนท์ และ ขณะเดียวกันมีการก่อตัวของเดนไดรท์โดยมี ทิศทางจากซ้ายไปขวาเข้าสู่กึ่งกลางแนวเชื่อมเก่า และ เมื่อทำการตรวจสอบบริเวณโลหะเชื่อมเก่าพบว่า โครงสร้างประกอบด้วยโครงสร้างออสเทนไนท์มี ลักษณะเป็นเดนไดรท์ที่ละเอียดขยายตัวเข้าสู่กึ่งกลาง ของรอยเชื่อมเก่า โดยเริ่มต้นที่เส้นแบ่งเขตการหลอม ละลายติดกับบริเวณได้รับผลกระทบจากความร้อน

(HAZ) ด้านโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 ดังรูปที่ 9 (ก) ตรงบริเวณ Interface ระหว่างโลหะเชื่อมเก่าและโลหะเชื่อมใหม่สังเกตเห็นว่าโครงสร้างมีทิศทางการเรียงตัวของเดนไดรท์เข้าสู่โลหะเชื่อมแต่ละด้านดังรูปที่ 9 (จ) และตรงบริเวณโลหะเชื่อมใหม่พบว่าโครงสร้างมีลักษณะคล้ายกับพื้นที่โลหะเชื่อมเก่าซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างอสเทนไนท์มีลักษณะเป็นเดนไดรท์ที่ละเอียด ส่วนตรงบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L เริ่มจากพื้นที่ติดกับเส้นแบ่งเขตการหลอมละลาย (Fusion line) พบว่าโครงสร้างประกอบด้วยโครงสร้างอสเทนไนท์ ขณะเดียวกันมีการก่อตัวของโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr₂₃C₆) แพร่กระจายตามขอบเกรน

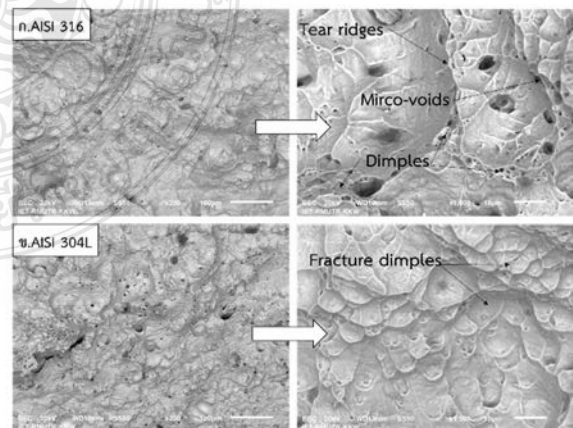


รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมซ้ำแนวของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304L/AISI316 ที่กระแสนเชื่อม 135 แอมแปร์



รูปที่ 10 ลักษณะการพังทลายของการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสกลุ่มซ้ำแนวแบบไม่เติมลวดเชื่อม

การตรวจสอบความแข็งแรงดึงของโลหะเชื่อมซ้ำแนว พบว่าการเชื่อมซ้ำระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L มีโลหะเชื่อมเก่ากับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 ที่เป็นโลหะฐานใหม่มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 600.95 MPa อัตราการยืดตัวเท่ากับ 17.31% และการเชื่อมซ้ำระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 มีโลหะเชื่อมเก่ากับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L ที่เป็นโลหะฐานใหม่ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 660.68 MPa อัตราการยืดตัวเท่ากับ 26.84% ลักษณะการพังทลายของรอยต่อชนการฉีกขาดเกิดขึ้นตรงบริเวณรอยต่อชนใหม่ทั้งรอยต่อชนที่มีโลหะฐานเดิมเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และ AISI316



รูปที่ 11 การตรวจสอบพฤติกรรมการฉีกขาด

จากรูปที่ 11 ได้แสดงถึงตำแหน่งรอยฉีกขาดจากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) พบว่ารูปที่ 11 (ก.) มีลักษณะการฉีกขาดที่เป็นรอยบุ๋ม (Dimples) ขนาดใหญ่และมีลักษณะของรอยฉีกขาดแบบช่องว่างขนาดเล็ก (Micro-voids) กระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณรอยฉีกขาดและในรูปที่ 11 (ข.) มีลักษณะการฉีกขาดที่เป็นแบบรอยบุ๋มที่เกิดจากการแตกหัก (Fracture dimples) ซึ่งมีความเว้ามากกว่ารอยบุ๋ม อีกทั้งมีขนาดและรูปร่างความลึกที่แตกต่างกัน

4. สรุป

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลกระแสเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสตีลต่อสมบัติรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L และ AISI316 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. กระแสเชื่อมมีผลต่อคุณสมบัติของรอยต่อชนต่างชนิดระหว่างโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L/AISI316
2. กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ โครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304L/AISI316 สมบูรณ์มากที่สุดเมื่อเทียบกับกระแสอื่นที่ใช้ในการทดลองเชื่อม
3. กระแสเชื่อม 135 แอมแปร์ มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 831.55 MPa อัตราการยืดตัวเท่ากับ 17.45 % และค่าความแข็งเฉลี่ยของโลหะเชื่อมเท่ากับ 184 HV
4. การเชื่อมขั้วแนวอาร์คทั้งสแตนเลสสตีลต่อต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L/AISI316 พบว่าการเชื่อมที่ใช้โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316 เป็นด้านที่ติดกับโลหะเชื่อมทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 660.68 MPa อัตราการยืดตัวเท่ากับ 26.84% และความแข็งเฉลี่ยของโลหะเชื่อมเท่ากับ 177 HV เมื่อการเชื่อมขั้วแนวที่ใช้โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L เป็นด้านที่ติดกับโลหะเชื่อมทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 600.95 MPa อัตราการยืดตัวเท่ากับ 17.46% และค่าความแข็งเฉลี่ยของโลหะเชื่อมเท่ากับ 215 HV

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2561 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์วิจัยเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร “อุตสาหกรรมน้ำผลไม้ สถานการณ์ผลิตและตลาดน้ำผลไม้ไทย” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : http://fic.nfi.or.th/foodsectordatabank-all2_detailnext.php?smid=1250 [สืบค้นเมื่อ 6 เมษายน 60].
- [2] กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. ม.ป.ป. “การผลิต-กรรมส่งเสริมอุตสาหกรรม,” [ออนไลน์]: <https://www.dip.go.th/Portals/0/cluster/มาตรฐานการผลิตอาหารอุตสาหกรรม.pdf>, [สืบค้นเมื่อ 10 มกราคม 2560].
- [3] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนานนท์. “Stainless steel/เหล็กกล้าไร้สนิม,” : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1236/stainless-steel-เหล็กกล้าไร้สนิม>, [สืบค้นเมื่อ 14 มกราคม 2560].
- [4] อธิพงศ์ ลอยชื่น. 2559. “แพทย์แนะวิธีดื่มน้ำผลไม้กล่องให้ได้คุณประโยชน์เต็ม,” [ออนไลน์]: <http://www.naewna.com/lady/217453>, [สืบค้นเมื่อ 10 มกราคม 2560].
- [5] D. Brandon, G. Kaplan and D. Wayne. 1997. Joining Processes : An Introduction. Great Britain: John Wiley & Sons, Ltd.
- [6] เกริก ผิวศิริ และธีรภัทร์ จรรย์ตชากร. 2549. การศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมทิกต่อสมบัติทางกลของรอยต่อเกลยของเหล็กกล้าไร้สนิม 304. ปรินญา นิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [7] Sajjad Gholami SHIRI1, Mohsen NAZARZADEH1, Mahmood SHARIFITABAR2 and Mehdi Shafiee AFARANI1. (2012). “Gas tungsten

- arc welding of CP-copper to 304 stainless steel using different filler materials”. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 22(2012) 2937–2942
- [8] M. Ragavendrana, N. Chandrasekharb, R. Ravikumarb, Rajesh Saxenab, M. Vasudevanb and A.K. Bhadurib. (2017) . “Optimization of hybrid laser – TIG welding of 316LN steel using response surface methodology (RSM)”. Optics and Lasers in Engineering 94(2017) 27-36
- [9] M. Shojaati and B. Beidokhti. (2017). “Characterization of AISI 304/AISI 409 stainless steel joints using different filler materials” Construction and Building Materials 147 (2017) 608–61
- [10] K. Devendranath Ramkumar, Aditya Chandrasekhar, Aditya, Kumar ,Singh ,Sharang Ahuja, Anurag Agarwal, N. Arivazhagan and Arul Maxiumus Rabel (2015). “Comparative studies on the weldability, microstructure and tensile properties of autogeneous TIG welded AISI 430 ferritic stainless steel with and without flux” Journal of Manufacturing Processes 20 (2015) 54-69
- [11] Pengfei Bai , Zhijiang Wang , Shengsun Hu and Shangwen Ma (2017) “Sensing of the weld penetration at the beginning of pulsed gas metal arc welding” Journal of Manufacturing Processes Pages 343-350
- [12] Engineering Properties of Steels, Philip D. Harvey, editor, American Society for Metals, Metals Park, OH, (1982).
- [13] Handbook of Stainless Steels, Donald Peckner and I. M. Bernstein, McGraw-Hill Book Company, New York, NY, (1977)
- [14] Metals Handbook, Howard E. Boyer and Timothy L. Gall, Eds., American Society for Metals, Materials Park, OH, 1985.
- [15] Metals Handbook, 10th ed., vol. 1, ASM International Handbook Committee., ASM International, Materials Park, OH, (1990)
- [16] Limmaneevichitr, C. (2005). Welding Metallurgy (1st ed.). Bangkok: King Mongkut's University of Technology Thonburi
- [17] ไพโรจน์ บุญเกิด. 2558. “การศึกษาตัวแปร การเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสกลุ่มต่อสมบัติของรอยต่อ ท่อต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304L/AISI316.” ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [18] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, ศักดิ์ชัย จันทศรี, และ ไพบุลย์ แยมเผื่อน. 2555. “การศึกษาเปรียบเทียบ สมบัติของรอยเชื่อมท่อไอเสียรถยนต์: การทดแทน วัสดุชิ้นส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนิติกด้วยเหล็ก เหนียวหล่อ.” ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี.
- [19] Merchant Samir Y. 2015. “Investigation on Effect of Heat Input on Cooling Rate and Mechanical Property (Hardness) Of Mild Steel Weld Joint by MMAW Process,” International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). Vol. 5, Issues 1 Pages 34-41.
- [20] Srdjan Milenkovic et al. 2012. “Effect of the cooling rate on microstructure and hardness of MAR-M247 Ni-based super alloy,” Materials Letters. Vol. 73, Pages 216-219.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นาย นฤเบศร เพียรชัยกุล
วัน เดือน ปีเกิด 3 มิถุนายน 2534
ที่อยู่ 54 หมู่ 6 ต.หนองแก้ว อ.ประจันตคาม จ.ปราจีนบุรี 25130
การศึกษา สำเร็จการศึกษาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี
ประสบการณ์ทำงาน
พ.ศ.2557-2561 บริษัท เมสัน อะคูสติคส์ แมนิวแพคเจอร์ริง จำกัด
พ.ศ.2562-ปัจจุบัน บริษัท ฟิวเจอร์ซายน์ จำกัด
เบอร์โทรศัพท์ 08-4564-3542
อีเมล narubeth012@gmail.com

