

อิทธิพลกระบวนการเชื่อมมิกต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 309

A study of the influence of MIG welding process on the microstructure and mechanical properties of stainless steels AISI 309

พงศกร แพรพันธ์¹, เลขา หมื่นสา¹, บัญชา เทียกโฮม¹, ชานนท์ มุลวรรณ², ประยูร สุรินทร์³
สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ⁴

¹ นักศึกษานิติศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

² อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต ; ie.engineer@kbu.ac.th

³ อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

⁴ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์หลักในการศึกษาอิทธิพลกระบวนการเชื่อมมิกต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 309 โดยประกอบด้วย อัตราส่วนผสมของแก๊สคลุม, กระแสเชื่อม, ความเร็วเดินแนวเชื่อม ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในทุกกระแสเชื่อมโดยใช้กระแสเชื่อม 3 ระดับ คือ 180, 190 และ 200 แอมแปร์ (A) ที่กระแส 200A ให้แนวเชื่อมที่มีความสมบูรณ์และการซึมลึกที่ดีที่สุด ที่กระแส 200A ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมเป็นแบบเดนไดรต์ ทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรง ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมในการเชื่อมมิกของเหล็กกล้าไร้สนิม ใช้แก๊สปกคลุม Ar 80%+CO₂ 20% อัตราความเร็วในการเชื่อม 400 มิลลิเมตร/นาที พบว่าที่กระแส 200A ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดที่ 190.93 HV

คำสำคัญ : การเชื่อมมิก, โครงสร้างจุลภาค, เหล็กกล้าไร้สนิม

Abstract

The objective of this research was to study influence parameters affecting to MIG welding for Micro Structure and mechanical property of austenitic stainless steel grade AISI 309. These have the mixture of gas shield welding current and the welding speed. The main results are as follows. Welding testing 3 level 180 ,190 and 200 A , The conclusions are the macro structure in each welding currents at 200A ,The welding is complete as best penetration. The feature of micro structure junction as dendrite and that made the weld strength. The properly weld variable for the gas metal arc welding repetition of stainless steel by using gas shield Ar 80%+CO₂ 20% The welding speed at 400 mm./min. As the welding currents 200A , Let the value of maximum average hardness as 190.93 HV.

Keywords : Metal Inert Gas (MIG) welding, Micro Structure, Stainless steel.

1. บทนำ

ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์สถานีงานห้อนุ่นวัตถุดิบ (Preheater) มีการใช้วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมในการทำผนังเตาเผา หลากหลายเกรด และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 309 เป็นวัสดุที่นิยมเลือกใช้ในช่วงขั้นตอนการห้อนุ่นวัตถุดิบ มีการให้ความร้อนกับวัตถุดิบและลำเลียงจากห้อนุ่นไปยังเตาเผา (Rotary Kiln) ซึ่งทำให้เกิดการกระแทกและเสียดสีระหว่างอิฐทนไฟกับผนังห้อนุ่น ทำให้ผนังห้อนุ่นเกิดปัญหารอยแตกร้าวที่เป็นโครงสร้างในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ การบำรุงรักษาการเปลี่ยนผนังห้อนุ่นทั้งหมดมีต้นทุนสูง เนื่องจากการสั่งซื้อชิ้นส่วนใหม่ทั้งหมดและใช้ระยะเวลาบำรุงรักษา 15-30 วันต่อหนึ่งห้อนุ่น เพื่อลดต้นทุนในการบำรุงรักษาจึงทำการศึกษาและกำหนดทางเลือกในการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding) [1] แทนการเปลี่ยนชิ้นส่วนทั้งชิ้น

สภาพปัญหาในกระบวนการที่เกิดการกระแทกและเสียดสีระหว่างอิฐทนไฟกับผนังห้อนุ่น ที่มีการใช้ผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าไร้สนิมเนื่องจากมีลักษณะพิเศษที่แตกต่างจากวัสดุอื่น เช่น สามารถใช้งานภายใต้อุณหภูมิสูง มีความแข็งแรงและเหนียว ทนต่อการกัดกร่อนเมื่อเทียบกับโลหะหรือวัสดุชนิดอื่น ง่ายต่อการเชื่อมและการขึ้นรูปจึงทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมใช้ในงานอุตสาหกรรมเช่นอุตสาหกรรมอาหาร โรงไฟฟ้า โรงงาน เคมีอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเคมี จึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ดังนั้นจึงทำการศึกษาค่าอิทธิพลตัวแปรที่มีอุณหภูมิต่อกระบวนการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 309 ด้วยกระบวนการเชื่อมโลหะแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุมต่อสมบัติของรอยต่อของเหล็กกล้าไร้ สนิมออสเทนนิติก AISI 309 ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมและบริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (HAZ : Heat Affected Zone) และคุณสมบัติทางกลที่มีผลต่อค่าการรับแรงดึงและค่าความแข็งแรงที่เหมาะสม เนื่องจากมีคุณภาพต่อแนวเชื่อมสูงจากการเชื่อมที่ต่อเนื่องมีค่าความร้อนป้อนเข้าภายในชิ้นงานต่ำและมีความแม่นยำในการควบคุมน้ำโลหะรวม [2]

เพื่อศึกษาผลที่จะเกิดกับงานเชื่อมโดยพิจารณาจากโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของวัสดุ ทั้งนี้เพื่อเป็นข้อมูลในการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนที่ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 309สามารถนำไปเป็นแนวทางการซ่อมบำรุงสำหรับอุตสาหกรรมเตาเผาในอุตสาหกรรม ผลิตปูนซีเมนต์ต่อไป

2. การดำเนินงานโครงการ

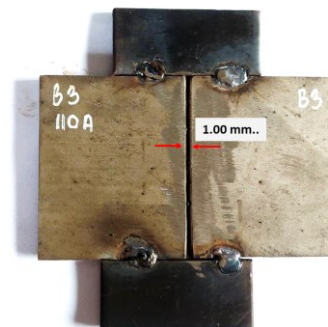
2.1 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีก่อนเชื่อมใช้เครื่อง Spectro lab Lav M12

2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคก่อนเชื่อมใช้เครื่อง Inverted Microscope Tester (ZEISS)

2.3 การเตรียมชิ้นงาน

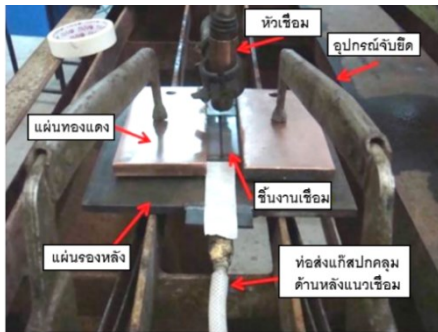
2.3.1 การกำหนดกระแสไฟในการเชื่อม 3 ค่าคือ 180 ,190 และ 200 แอมแปร์ (A) และทำการเชื่อมด้วย ลวดเชื่อม AWS A5.9 : ER308 LSi ขนาด0.80 มิลลิเมตร (ม.ม.) ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 400 ม.ม. ต่อนาที โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar 80%+CO₂ 20% ที่อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 12 ลิตร/นาที

2.3.2 ชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีขนาด 65 x 80 x 3 ม.ม. ทำการบากชิ้นงานให้ได้ตามมาตรฐาน AWS D1.1D1.1 M:2600 และนำชิ้นงานเชื่อมยึดบริเวณหัวท้ายของรอยต่อด้วยแผ่นยึดที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ กว้าง 20 ม.ม. ยาว 50 ม.ม.หนา 3 ม.ม.



ภาพที่ 1 ลักษณะการเชื่อมยึดหัวท้ายชิ้นงาน

2.3.3 เครื่องเชื่อม Fronius รุ่น Vario Star 457



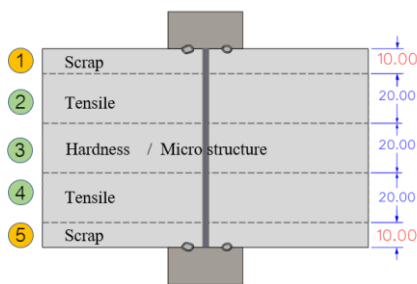
ภาพที่ 2 ลักษณะการจับยึดชิ้นงานเชื่อม

2.3.4 ลวดเชื่อมมิก AWS A5.9 : ER308 LSi

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมมิก

ER308LSi Chemical Composition (%) of melts analysis									
Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
Specification	Max 0.030	0.65-1.00	1.00-2.50	Max 0.030	Max 0.030	9.00-11.00	9.00-22.00	Max 0.75	Max 0.75
Heat No. B3201400	0.017	0.86	1.95	0.018	0.009	10.02	19.77	0.01	0.01

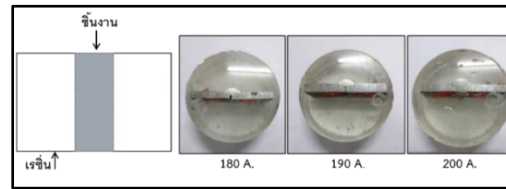
2.3.5 การตัดชิ้นงานทดสอบ



ภาพที่ 3 ลักษณะการตัดชิ้นงานทดสอบ

จากภาพที่ 3 ชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาหลังเชื่อมโดยใช้กล้องไมโครสโคปกำลังขยายสูง เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างและโครงสร้างจุลภาค โดยนำชิ้นงานเชื่อมมาตัดเป็นชิ้น ตามมาตรฐาน DIN 50351 โดยแบ่งชิ้นงานออกเป็น 3 ชิ้น ชิ้นงานทดสอบที่ 2 และ 4 นำไปทดสอบแรงดึง ชิ้นงานทดสอบที่ 3 ชิ้นนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบความแข็ง

2.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคก่อนเชื่อมโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope, Hitachi SU3500 Energy Dispersive Spectroscopy, Ametex E2041-C2B



ภาพที่ 4 ชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างแนวเชื่อม จากภาพที่ 4 เตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างหลังจากนำชิ้นงานเชื่อมมาตัดให้ได้ตามขนาดกำหนด ทำมาส์ตังโดยการนำเรซินมาหล่อทับชิ้นงานเพื่อใช้จับยึด โดยนำชิ้นงานเข้าเครื่องขัดก่อนนำไปกัดกรดและนำไปส่องดูโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องไมโครสโคปกำลังขยายสูง

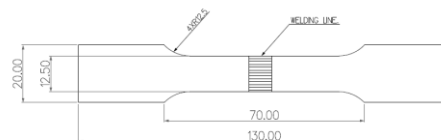
2.5 การตรวจสอบความแข็ง

2.5.1 การตรวจสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ใช้

เครื่อง STRUERS/Duramin-5 Type 05656242 serial

2.5.2 การตรวจสอบความแข็งแรงดึงใช้เครื่อง

Universal Testing Machine Model : AG-100KNI M2



ภาพที่ 5 ชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้าง จากภาพที่ 5 ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงเพื่อหาค่าแรงดึงสูงสุดตามมาตรฐานการทดสอบ โดยลักษณะใช้ชิ้นงานภาคตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

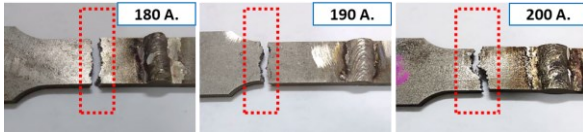
3. ผลวิจัย

3.1 ส่วนผสมทางเคมี

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมี AISI 309

ชื่อตัวอย่างธาตุ	AISI309(วัสดุทำเตา)	AISI309(Standard)
C%	0.25	0.20
Si%	1.70	1.00
Mn%	0.53	2.00
P%	0.02	0.05
S%	0.14	0.03
Cr%	20.25	22.00
Mo%	0.12	—
Ni%	10.18	12.00
Al%	0.05	—
Cu%	0.10	—
Ti%	0.02	—
V%	0.07	—
W %	0.06	—

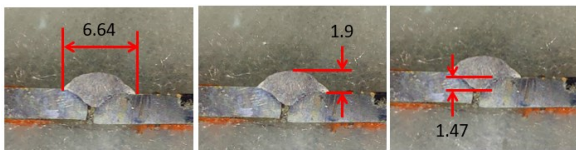
3.2 ตำแหน่งการแตกหัก



ภาพที่ 6 ตำแหน่งการแตกหัก

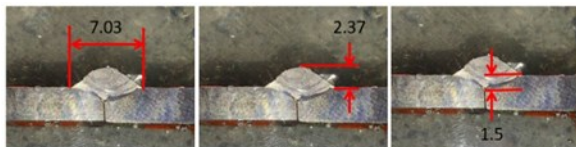
จากภาพที่ 6 ผลการทดสอบแรงดึงจากชิ้นงานที่กระแสไฟ 180 ,190และ200A พบว่าตำแหน่งขาดของชิ้นงานทดสอบขาดบริเวณเนื้อวัสดุ หมายความว่าแนวเชื่อมมีความแข็งแรงดึงมากกว่าเนื้อวัสดุ

3.3 ระยะซึมลึกของแนวเชื่อม



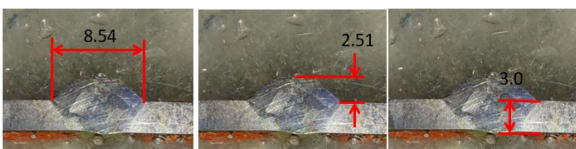
ภาพที่ 7 การซึมลึกของแนวเชื่อมกระแส 180A

จากภาพที่ 7 การวิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะ พบว่า กระแสเชื่อมที่แตกต่างกันส่งผลต่อลักษณะของแนวเชื่อม โดยที่กระแสไฟ 180 A แนวเชื่อมเล็กนูน การหลอมละลายต่ำ มีลักษณะการการหลอมละลายน้อย ควบคุมการหลอมละลายยาก เนื่องจากกระแสไฟในการเชื่อมต่ำ



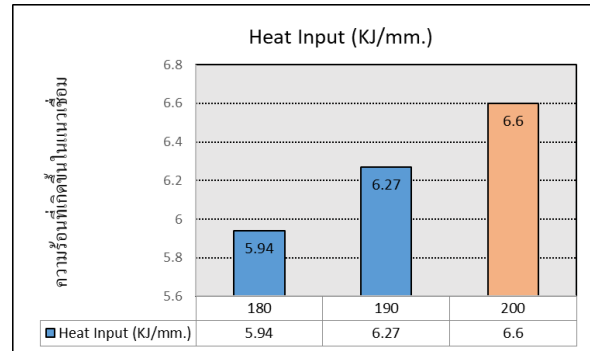
ภาพที่ 8 การหลอมละลายในแนวเชื่อมกระแส 190A

จากภาพที่ 8 ที่กระแสไฟ 190 A ลักษณะแนวเชื่อมนูนสูง การหลอมละลายในแนวเชื่อมใกล้เคียงกับแนวเชื่อมของกระแส 180A



ภาพที่ 9 การซึมลึกของแนวเชื่อมกระแส 200A

จากภาพที่ 9 ที่กระแสไฟ 200 A ลักษณะรอยเชื่อมและการหลอมละลายมากกว่ากระแสไฟ180 และ190A การหลอมละลายและอัตราการเติมลดสูง สามารถควบคุมการอาร์กและการเติมเนื้อโลหะได้อย่างเหมาะสม อันเนื่องมาจากอัตราการเร็วและปริมาณกระแสไฟที่สัมพันธ์กัน [3]

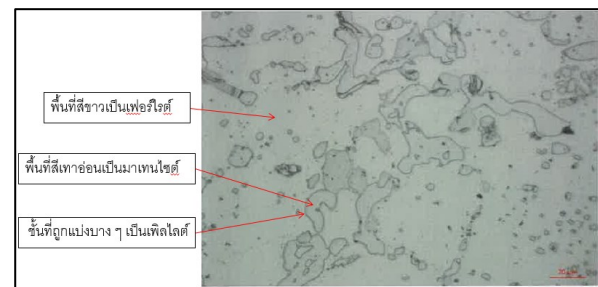


ภาพที่ 10 ค่าความร้อนในแนวเชื่อม

จากภาพที่ 10 แสดงถึงความสัมพันธ์ของ Heat Input และขนาดความกว้าง ความสูงและการหลอมละลายในแนวเชื่อมกระแสไฟเชื่อม 200 A มีปริมาณความร้อนในแนวเชื่อมที่ 6.60 KJ/mm. ส่งผลให้แนวเชื่อมมีการหลอมละลายดี ที่สุด

3.4 โครงสร้างจุลภาค

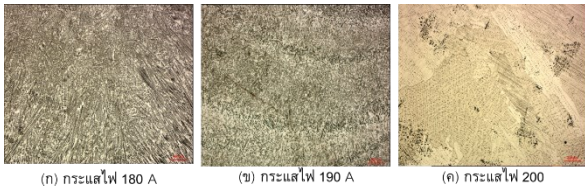
3.4.1 โครงสร้างจุลภาคก่อนเชื่อม



ภาพที่ 11 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กไร้สนิม AISI 309

จากภาพที่ 11 ผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด AISI 309 มีโครงสร้างหลัก (Matrix) เป็นออสเทนไนท์ มีระบบผลึกเป็น Face Centered Cubic (FCC) ซึ่งมีคุณลักษณะที่สำคัญคือ มีความเหนียวสูง ที่แม่เหล็กดูดไม่ติด [4]

3.4.2 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม จากการตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

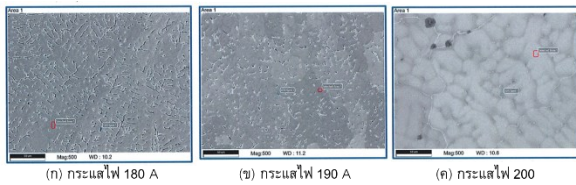


ภาพที่ 12 แนวเชื่อมจาก กล้อง OM กำลังขยาย 200 เท่า



ภาพที่ 13 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม (Weld zone)

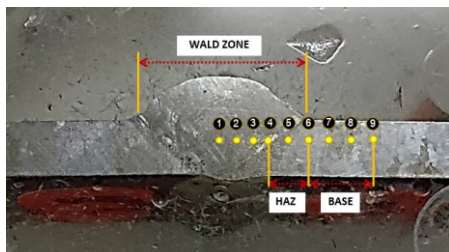
3.4.3 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง



ภาพที่ 14 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม กล้อง SEM

จากภาพที่ 14 บริเวณแนวเชื่อมของกระแสไฟ 180 ,190 และ 200A ประกอบด้วยเฟสของเฟสเกลตาเฟอร์ไรท์กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างเหล็กออสเทนไนท์

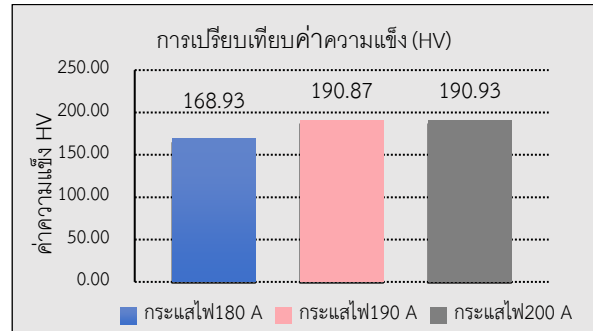
3.5 ความแข็งของแนวเชื่อม



ภาพที่ 15 ตำแหน่งการทดสอบแบบวิกเกอร์

จากภาพที่ 15 ชิ้นงานที่นำมาทำการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ โดยตำแหน่งที่ 1-4 เป็น Wald zone ตำแหน่งที่ 5 เป็น Heat affect zone ตำแหน่งที่ 7-9 เป็น Base metal

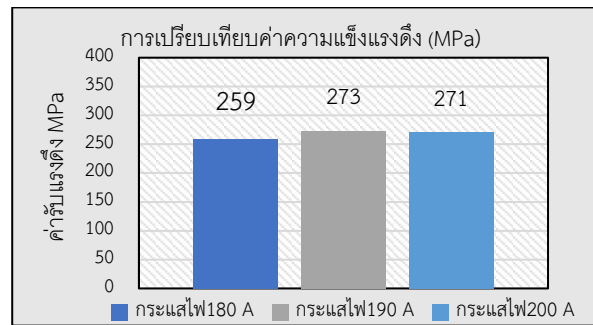
3.6 ความแข็งในแนวเชื่อม



ภาพที่ 16 ความแข็งในแนวเชื่อม

จากภาพที่ 16 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมที่กระแสไฟ 190A มีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุด มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 226.6 HV

3.7 ความแข็งแรงดึง



ภาพที่ 17 ความแข็งแรงดึง

จากภาพที่ 17 ความแข็งแรงดึงของกระแสไฟ 180A มีแรงดึงที่ 259 MPa ความแข็งแรงดึงของกระแสไฟ 190A มีค่าความแข็งแรงดึงที่ 273 MPa ความแข็งแรงดึงของกระแสไฟ 200A มีค่าความแข็งแรงดึงที่ 271 MPa

4. อภิปรายผล

4.1 การแตกหัก

จากการทดสอบรอยแตกหักพบขึ้นทดสอบแตกหักบริเวณชิ้นงานด้านเนื้อวัสดุ มีผลมาจากจุดเสียในชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยการหล่อขึ้นรูปเป็นไปตามทฤษฎี [5]

4.2 การหลอมละลายในแนวเชื่อม

ตัวแปรของกระแสไฟเชื่อมส่งผลต่อการละลายลึกลงของรอยเชื่อมโดยสังเกตจากค่าของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจากการอาร์กในกระแสไฟเชื่อม ในกระแสไฟ 180A ชิ้นงานเชื่อมที่ใช้ค่าความร้อนในงานเชื่อม 5.94 KJ/mm. ได้ค่าการละลายลึกลงเท่ากับ 1.47 mm. ในกระแสไฟ 200A ชิ้นงานเชื่อมที่ใช้ค่าความร้อนในงานเชื่อม 6.6 KJ/mm. ได้ค่าการละลายลึกลงเท่ากับ 3.0 mm.

4.3 โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมเดิม (Base metal) ประกอบด้วย ออสเทนไนต์และเฟอร์ไรต์ ภายหลังจากการเชื่อม ใช้กระแสไฟเชื่อม 180A โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพื้นขาวเป็นโครเมียมคาไบต์ เกรนสีขาวเป็นออสเทนไนต์ เดลต้าเฟอร์ไรต์จะมีลักษณะจุดดำๆอยู่ใกล้ๆเส้นขอบเกรน ยิ่งใช้กระแสไฟต่ำจะมีเกรนเล็ก ถ้ายิ่งใช้กระแสไฟสูง เดลต้าเฟอร์ไรต์จะยิ่งมีเกรนขนาดใหญ่และมีจำนวนมาก การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมเดิม ประกอบด้วย ออสเทนไนต์และเฟอร์ไรต์ ภายหลังจากการเชื่อม ใช้กระแสไฟเชื่อม 200A โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพื้นขาวเป็นโครเมียมคาไบต์ เกรนสีขาวเป็นออสเทนไนต์ เดลต้าเฟอร์ไรต์จะมีลักษณะจุดดำๆอยู่ใกล้ๆเส้นขอบเกรน ยิ่งใช้กระแสไฟต่ำจะมีเกรนเล็ก เดลต้าเฟอร์ไรต์

4.4 สมบัติเชิงกลของเนื้อเชื่อม (Base metal)

4.4.1 ความแข็งแรงของแนวเชื่อม ผลการทดลองพบว่ากระแสไฟ 180A มีค่าความแข็งแรงดึงที่ 176.9 MPa กระแสไฟ 190 A มีค่าความแข็งแรงดึงที่ 199 MPa และกระแสไฟ 200 A มีค่าความแข็งแรงดึงที่ 198.8 MPa

4.4.2 ความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม ผลการทดลองพบว่ากระแสไฟ 180A มีค่าความแข็งแรงดึงที่ 308.06

MPa กระแสไฟ 190 A มีค่าความแข็งแรงดึงที่ 255.5 MPa และ กระแสไฟ 200 A มีค่าความแข็งแรงดึงที่ 267.25 MPa

5. สรุปผลการวิจัย

1) ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงาน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และแนวเชื่อมไม่มีการแตกหักหรือเสียหาย ชิ้นงานมีการแตกหักที่เนื้อวัสดุ เนื่องจากค่าความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมมากกว่าของ Base metal สรุปได้ว่าแนวเชื่อมสามารถต้านทานแรงดึงได้

2) คุณสมบัติของแนวเชื่อมทั้ง 3 กระแส 180 , 190 และ 200A ให้ค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกันและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคคล้ายกัน ซึ่งไม่มีผลต่อคุณสมบัติแนวเชื่อมสามารถเลือกใช้กระแสใดก็ได้ในการวิจัยครั้งนี้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะทำงานที่ให้ความร่วมมือและช่วยเหลือกันเป็นอย่างดีตลอดการดำเนินโครงการวิจัย ที่ร่วมกันทำ ผ่านอุปสรรคต่าง ๆ จนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณความดีของการทำโครงการฉบับนี้ แต่ บิดา มารดา ที่ได้อบรมสั่งสอน และเป็นกำลังใจให้อย่างดี ตลอดจนครูอาจารย์ที่ตั้งใจประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ขอขอบคุณผู้เขียนหนังสือ บทความ และเอกสารที่นำมาใช้ในการอ้างอิงในการทำโครงการ รวมทั้งขอขอบคุณหน่วยงานและบุคคลอีกหลาย ๆ ท่านที่ไม่ได้เอียนนามไว้ ณ ที่นี้ด้วย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ฉัตรทอง ไสแสง, "อิทธิพลของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304," กรุงเทพฯ, 2548
- [2] ภักดี ดำเนินผล การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมมิกต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล เหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก เกรด AISI 304 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2552

- [3] ไพบูลย์ หาญมนต์, การศึกษาอิทธิพลความร้อนในงานเชื่อมที่มีผลต่อการหลอมลึก ความกว้าง ความสูงและบริเวณกระแทกร้อน ของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม โดยกระบวนการเชื่อมมิกมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2552
- [4] ยอดเปรม ภูกำเนิด, การศึกษาอิทธิพลของแก๊สคลุมการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมต่อสมบัติรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 และเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2557
- [5] หนังสือหล่อโลหะ โดย ดร.ทริส สุตะบุตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ศูนย์ธัญบุรี และ ดร.เคนยิจิอิว่า มหาวิทยาลัยโตเกียว
- [6] อรศิริ จันท์เมือง, "การศึกษามลกระทบของก๊าซที่ใช้สำหรับกระบวนการเชื่อม MIGกรณีศึกษา : การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI เบอร์ 304," กรุงเทพฯ, 2551.
- [7] สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, "รายงานการผลิตน้ำตาลทรายของโรงงานน้ำตาลทั่วประเทศ," <http://www.ocsb.go.th>, 12 สิงหาคม 2555.
- [8] D.R. Askeland and P.P. Phule, Science and Engineering of Materials.Singapore:Cengage Learning, 2006.
- [9] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ประจักษ์ อ่างบุญตา และบุญส่ง จงกลณี, "รายงานวิจัยประจำปีงบประมาณ 2552 เรื่อง โครงสร้างจุลภาคและสมบัติของรอยเชื่อมวัสดุด้วยเทคโนโลยีการเชื่อมแบบใหม่," กรุงเทพมหานคร สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ 2552.
- [10] ยงยุทธ ดุลยกุล นภิสพร มีมลคล และประภาส เหมืองจันทร์บุรี, "การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกระแสเชื่อมและส่วนผสมของแก๊สคลุมที่แตกต่างกันโดยกรรมวิธีการเชื่อมแม็ก," คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา, 2551.
- [11] W. R. Osório, J. E. Spinelli, N. Cheung, and A. Garcia, "Secondary dendrite arm spacing and solute redistribution effects on the corrosion resistance of Al-10% Sn and Al-20% Zn alloys," Materials Science and Engineering: A, vol. 420, pp. 179 - 186, 3/25/ 2006.
- [12] A. Iron and S. I. C. o. S. S. Producers, Welding of Stainless Steels and Other Joining Methods: Committee of Stainless Steel Producers, American Iron and Steel Institute, 1979.
- [13] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ "ศิริชัย ต่อสกุล , อนินท์ มีมนต์ และนรพร กลั่นประชา, วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: เซนเจจเลนนิ่ง, หน้า 328-337,," ed, 2550.
- [14] ชูชาติ ด้วงสงค์, การทดสอบงานเชื่อมแบบทำลายสภาพ, 3 ed. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น) กทม, 2555.
- [15] วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง. Scanning Eletron Microscopy (SEM) [Online].
- [16] ตรีเนตร ซึ่งสัมพันธ์เจริญ, 2548, อิทธิพลที่เกิดจากระยะยื่นของลวดเชื่อมที่มีผลต่ออัตราการ หลอมละลายและการหลอกของการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม, วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการเชื่อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [17] ยงยุทธ ดุลยกุล, "การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกระแสเชื่อมและส่วนผสม ของ แก๊สคลุมที่แตกต่างกันโดยกรรมวิธีการเชื่อมแม็ก," วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2551.
- [18] H. Naffakh, M. Shamanian, and F. Ashrafzadeh, "Dissimilar welding of AISI 310 austenitic stainless steel to nickel-based alloy Inconel 625," Journal of

- Materials Processing Technology, vol. 209, pp. 3628-3639, 4/1/ 2009.
- [19] H. T. Lee, S. L. Jeng, C. H. Yen, and T. Y. Kuo, "Dissimilar welding of nickel-based Alloy 690 to SUS 304L with Ti addition," Journal of Nuclear Materials, vol. 335, pp. 59-69, 10/1/ 2004.
- [20] H.-Y. Lee, S.-H. Lee, J.-B. Kim, and J.-H. Lee, "Creep-fatigue damage for a structure with dissimilar metal welds of modified 9 Cr-1 Mo steel and 316L stainless steel," International Journal of Fatigue, vol. 29, pp. 1868-1879, 9// 2007.
- [21] C. R. Das, A. K. Bhaduri, G. Srinivasan, V. Shankar, and S. Mathew, "Selection of filler wire for and effect of auto tempering on the mechanical properties of dissimilar metal joint between 403 and 304L(N) stainless steels," Journal of Materials Processing Technology, vol. 209, pp. 1428-1435, 2/1/ 2009.
- [22] A. K. Lakshminarayanan, K. Shanmugam, and V. Balasubramanian, "Effect of Autogenous Arc Welding Processes on Tensile and Impact Properties of Ferritic Stainless Steel Joints," Journal of Iron and Steel Research, International, vol. 16, pp. 62-16, 1// 2009.
- [23] A. International, "ASTM E92-82 Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials " in Section 3 - Metals Test Methods and Analytical Procedures, ed. West Conshohocken: ASTM International 2003.
- [24] M. Jovanovic and G. Rihar, "Analysis of Ultrasonic Indications in Lack of Fusion Occurring in Welds," ECNDT Poster 213, vol. Poster 213, pp. 1-8, 2006.
- [25] X. Jia, J. Xu, Z. Liu, S. Huang, Y. Fan, and Z. Sun, "A new method to estimate heat source parameters in gas metal arc welding simulation process," Fusion Engineering and Design, vol. 89, pp. 40-48, 1// 2014.
- [26] S. Kumar and A. S. Shahi, "Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints," Materials & Design, vol. 32, pp. 3617-3623, 6// 2011.
- [27] R. Unnikrishnan, K. S. N. S. Idury, T. P. Ismail, A. Bhaduria, S. K. Shekhawat, R. K. Khatirkar, et al., "Effect of heat input on the microstructure, residual stresses and corrosion resistance of 304L austenitic stainless steel weldments," Materials Characterization, vol. 93, pp. 10-23, 7// 2014.
- [28] M. Jafarzadegan, A. Abdollah-zadeh, A. H.Feng, T. Saeid, J. Shen, and H. Assadi, "Microstructure and Mechanical Properties of a Dissimilar Friction Stir Weld between Austenitic Stainless Steel and Low Carbon Steel," Journal of Materials Science & Technology, vol. 29, pp. 367-372, 4//
- [29] M. Mirzaei, R. Arabi Jeshvaghani, A. Yazdipour, and K. Zangeneh-Madar, "Study of welding velocity and pulse frequency on microstructure and mechanical properties of pulsed gas metal arc welded high strength low alloy steel," Materials & Design, vol. 51, pp. 709-713, 10// 2013.
- [30] A. R. Galvis E and W. Hormaza, "Characterization of failure modes for different welding processes of AISI/SAE 304

- stainless steels," Engineering Failure Analysis, vol. 18, pp.1791-1799, 10// 2011.
- [31] สุรัชชัย ทอนสูงเนิน 1 , สันติรัฐ นันสะอาง 1 , สิทธิชัย แก้วเกื้อกุล 1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ในการเชื่อม Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) ระหว่าง เหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก (AISI 304) กับ เหล็กกล้าสแตนเลสดูเพล็กซ์(AISI 2205)
- [32] T. A. Barnes and I. R. Pashby, "Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles: Part I — solid and liquid phase welding," Journal of Materials Processing Technology, vol. 99, pp. 62-71, 3/1/ 2000.