

การศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงกระแทกของรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน
AISI1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ที่กระแสนเชื่อมอาร์กถวดหุ้มฟลักซ์
แตกต่าง

COMPARATIVE STUDY OF IMPACT STRENGTH OF AISI1015
CARBON STEEL AND AISI304 STAINLESS STEEL BUTT JOINT
PRODUCED BY VARIOUS SHIELDED METAL ARC WELDING
CURRENTS

ณัฐวีร์ สอกจะบก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**การศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงกระแทกของรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน
AISI1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ที่กระแทงเชื่อมอาร์กวดหุ้มฟลักซ์**

แตกต่าง

ณัฐวีร์ สอกจะบก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**COMPARATIVE STUDY OF IMPACT STRENGTH OF AISI1015
CARBON STEEL AND AISI304 STAINLESS STEEL BUTT JOINT
PRODUCED BY VARIOUS SHIELDED METAL ARC WELDING
CURRENTS**

NATTHAVEE SOKJABOKG

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
PROGRAM IN MANUFACTURING ENGINEERING**

FACULTY OF ENGINEERING

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

ACADEMIC YEAR 2014

**COPYRIGHT OF RAJAMANGALA UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY THANYABURI**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงกระแทกของรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ที่กระแสเชื่อมอาร์กสวดหุ้มฟลักซ์แตกต่าง

Comparative Study of Impact Strength of AISI1015 Carbon Steel and AISI304 Stainless Steel Butt Joint Produced by Various Shielded Metal Arc Welding Currents

ชื่อ - นามสกุล

ว่าที่ร้อยตรีณัฐวีร์ สอกจะบงก

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.

ปีการศึกษา

2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....

ประธานกรรมการ

(อาจารย์ชื่อยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.)


.....

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชิต จันทรมณี, Ph.D.)


.....

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย คีอัสกุล, D.Eng.)


.....

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 23 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงกระแทกของรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ที่กระแสเชื่อมอาร์กทวดหุ้มฟลักซ์แตกต่าง
ชื่อ – นามสกุล	ว่าที่ร้อยตรีณัฐวีร์ สอกจะบงก
สาขาวิชา/วิชาเอก	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

การเชื่อมรอยต่อชนวัสดุต่างชนิดมีความนิยมและถูกนำมาใช้งานในโครงสร้างรถยนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากรอยต่อชนิดนี้ทำให้ได้โครงสร้างที่ยืดหยุ่น ลดต้นทุนการผลิต และลดน้ำหนักรวมของรถยนต์ลง ด้วยเหตุนี้การเตรียมข้อมูลการเชื่อมรอยต่อวัสดุต่างชนิดที่ทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูงจึงมีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กทวดหุ้มฟลักซ์และเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI1015 กับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304

แผ่นวัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 แผ่นวัสดุรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดความหนา 10 มม. ความกว้าง 75 มม. ความยาว 150 มม. ปลายแผ่นวัสดุที่ประกอบเป็นรอยต่อชนถูกบากร่องตัววีมุม 60 องศา ความสูงของราก 1 มม. และมีช่องว่างระหว่างรากรอยต่อ 2.4 มม. รอยต่อชนถูกยึดแน่นในอุปกรณ์การจับยึดและทำการเชื่อมด้วยการเชื่อมอาร์กทวดหุ้มฟลักซ์ ตัวแปรการเชื่อม คือ ทวดเชื่อมรองพื้น 3 ชนิด กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์ รอยต่อที่ผ่านการเชื่อมถูกนำมาทำการตรวจสอบเพื่อหาค่าสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ

ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การเชื่อมรอยต่อชนแบบไม่มีชั้นรองพื้นให้ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงกว่าการเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้น การเพิ่มกระแสเชื่อมส่งผลทำให้ความแข็งแรงกระแทกลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างแขนเดนไดรท์ทุติยภูมิในโลหะเชื่อม สภาวะที่ให้ค่าแข็งแรงกระแทกสูงสุด 112 จูล คือ การเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้น กระแสเชื่อมที่ 100 แอมแปร์ และทวดเชื่อม E312 เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของรอยต่อชนพบว่าโลหะเชื่อมมีค่าสูงสุดและสูงกว่าโลหะฐาน AISI304 และ AISI1015 ตามลำดับ

คำสำคัญ: เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก รองพื้น

Thesis Title	Comparative Study of Impact Strength of AISI1015 Carbon Steel and AISI304 Stainless Steel Butt Joint Produced by Various Shielded Metal Arc Welding Currents
Name - Surname	Acting Sub Lt. Natthavee Sokjabokg
Program/Major Subject	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Kittipong Kimapong, Ph.D.
Academic Year	2014

ABSTRACT

Dissimilar metals butt joint is introduced in an automobile structure because this joint could produce a flexible joint, decrease production cost and decrease gross weight of structure. So, a preparation of dissimilar materials joint welding for producing a high strength joint is continuously studied and developed. This research aimed to effect study of shielded metal arc welding (SMAW) parameter on mechanical properties of AISI1015 carbon steel and AISI304 stainless steel butt joint.

Material plate used in this experiment was AISI1015 carbon steel and AISI304 stainless steel. Materials plate dimension in rectangular dimension was 10 mm thick, 75 mm wide, and 150 mm, long. Material plate end was prepared to be a 60° of single V groove, 1 mm of root face, and 2.4 mm of root opening. A butt joint was welded by SMAW with 3 types of buffering electrode and a welding current of 80-120 A. The welded joint was investigated for mechanical properties and microstructure.

The summarized results are as follows. The non-buttering SMAW dissimilar metals butt joint produced the higher impact strength than that of the buttering SMAW dissimilar metals butt joint. Increase of the welding current affected to decrease the impact strength, decrease the weld metal hardness and increase the secondary dendrite arm spacing of the weld metal. The optimized welding parameter that showed the maximum impact strength of 112 J was the non-buttering SMAW, the welding current of 100 A and E312 electrode. When compare the hardness along the cross section of the joint, it was found that the weld metal showed the highest hardness and was higher than that of AISI304 and AISI1015 base metal, respectively.

Keywords: low carbon steel, austenitic stainless steel, buttering

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความสำเร็จอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล ดร.ชัยยะ ปรานีตพลกรัง คณะกรรมการสอบ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาดลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ บุคลากรของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

ขอขอบคุณ วิทยาลัยเทคนิคชัชวาท คณะจารย์-ครูวิทยาลัยเทคนิคสระบุรี คณะจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (สุพรรณบุรี) ที่สนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ และให้ความช่วยเหลือ ตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบคุณ ผู้ทรงคุณวุฒิและคณะจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะวิชาการจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบุชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และ ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ณัฐวีร์ ศอกจะบก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(11)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	14
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	16
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	16
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน.....	18
2.2 เหล็กกล้าไร้สนิม.....	19
2.3 การเชื่อมโลหะ.....	22
2.4 ชนิดของรอยต่อ.....	25
2.5 การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อม.....	26
2.6 การตรวจสอบทางโลหะวิทยา.....	29
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	36
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	38
3.3 การทดสอบสมบัติทางกล.....	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	50
4.1 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนเชื่อมแบบไม่รองพื้น.....	50
4.2 สมบัติของรอยต่อชนเชื่อมแบบไม่รองพื้น	56
4.3 ลักษณะการพังทลายของรอยต่อชนเชื่อมแบบไม่รองพื้น	57
4.4 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนเชื่อมแบบไม่รองพื้น.....	58
4.5 ความแข็งของรอยต่อชนเชื่อมแบบไม่รองพื้น	63
4.6 การเปรียบเทียบสมบัติของรอยต่อชนเชื่อมแบบรองพื้น (Buttering).....	67
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	77
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	77
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	78
บรรณานุกรม	79
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก ลักษณะการพังทลายของชั้นทดสอบแรงกระแทกเชื่อมแบบไม่รองพื้น.....	84
ภาคผนวก ข ลักษณะการพังทลายของชั้นทดสอบแรงกระแทกเชื่อมแบบรองพื้น	87
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	90
ประวัติผู้เขียน	109

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าตาม AISI และ ASME	19
ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีและกลสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	21
ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มความแข็งโดยการตกผลึก..	22
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุเชื่อม (wt.%)	36
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (wt.%)	38



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 ภาพรวมกระบวนการผลิตน้ำตาล	14
ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอน ความแข็ง และความแข็งแรง	18
ภาพที่ 2.2 หลักการพื้นฐานในการเชื่อมโลหะ.....	22
ภาพที่ 2.3 รูปแบบของกระบวนการเชื่อม	23
ภาพที่ 2.4 การเชื่อมอาร์กกลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	24
ภาพที่ 2.5 ชนิดของรอยต่อ.....	25
ภาพที่ 2.6 การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy V Notch: CVN).....	26
ภาพที่ 2.7 ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E23-00	26
ภาพที่ 2.8 การวิเคราะห์รอยแตกหัก	27
ภาพที่ 2.9 ลักษณะหวักดทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส	28
ภาพที่ 2.10 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	29
ภาพที่ 2.11 อำนาจแยกแยะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	29
ภาพที่ 2.12 ขั้นตอนการหล่อเรซินและการขัดกระดาษทราย.....	30
ภาพที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการทดลอง	35
ภาพที่ 3.2 ขนาดชิ้นงานทดลอง.....	36
ภาพที่ 3.3 การออกแบบขั้นตอนการเชื่อมอาร์กกลวดหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding : SMAW).....	37
ภาพที่ 3.4 เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง.....	38
ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการเชื่อมโลหะต่างชนิด	39
ภาพที่ 3.6 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนเชื่อม	40
ภาพที่ 3.7 ลักษณะชิ้นงานเชื่อม.....	40
ภาพที่ 3.8 เครื่องตัดชิ้นงานมีระบบหมุนเวียนน้ำหล่อเย็น	41
ภาพที่ 3.9 ขั้นตอนการตัดแบ่งชิ้นงานทดสอบ	41
ภาพที่ 3.10 ขั้นตอนทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E23-00 Type C บากร่องแบบ U-Notch.....	42
ภาพที่ 3.11 เครื่องทดสอบแรงกระแทก.....	42
ภาพที่ 3.12 ขั้นตอนการขัดกระดาษทราย.....	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 3.13	ขั้นตอนการกัศกรดโครงสร้าง	45
ภาพที่ 3.14	กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอแบบซุม (Stereo Microscopes)	46
ภาพที่ 3.15	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	46
ภาพที่ 3.16	ตำแหน่งตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	47
ภาพที่ 3.17	ตำแหน่งการวัดขนาดระยะห่างระหว่างเดนไดรต์	47
ภาพที่ 3.18	เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส (Micro Vickers).....	48
ภาพที่ 3.19	ระยะการทดสอบความแข็ง	48
ภาพที่ 3.20	ตำแหน่งตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....	49
ภาพที่ 3.21	เครื่องตรวจสอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	49
ภาพที่ 4.1	ผิวแนวเชื่อมรอยต่อชนแบบไม่รองรับของลวด E307 กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์	51
ภาพที่ 4.2	โครงสร้างมหภาคเชื่อมรอยต่อชนแบบไม่รองรับของลวด E307 กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์	51
ภาพที่ 4.3	ผิวแนวเชื่อมรอยต่อชนแบบไม่รองรับของลวด E308 กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์	52
ภาพที่ 4.4	โครงสร้างมหภาคเชื่อมรอยต่อชนแบบไม่รองรับของลวด E308 กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์	52x
ภาพที่ 4.5	ผิวแนวเชื่อมรอยต่อชนแบบไม่รองรับของลวด E309 กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์	54
ภาพที่ 4.6	โครงสร้างมหภาคเชื่อมรอยต่อชนแบบไม่รองรับของลวด E309 กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์	54
ภาพที่ 4.7	ผิวแนวเชื่อมรอยต่อชนแบบไม่รองรับของลวด E312 กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์	55
ภาพที่ 4.8	โครงสร้างมหภาคเชื่อมรอยต่อชนแบบไม่รองรับของลวด E312 กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์	55
ภาพที่ 4.9	ความสัมพันธ์ความแข็งแรงกระแทกระหว่างกระแสเชื่อมกับลวดเชื่อม.....	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.10 การเปรียบเทียบลักษณะการพังทลายค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดที่กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ ของทุกๆลวดเชื่อม (ก) E307 (ข) E308 (ค) E309 (ง) E312.....	58
ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาค (ก) เหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015, (ข) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 (F = เฟอร์ไรต์, P = เพิร์ลไลต์ และ Gb = ขอบเกรน).....	58
ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E307 และกระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ แบบไม่รองพื้น (F1 = เส้นแบ่งเขตการหลอมละลาย, Wz = บริเวณโลหะเชื่อม).....	59
ภาพที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E308 และกระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ แบบไม่รองพื้น (F1 = เส้นแบ่งเขตการหลอมละลาย, Wz = บริเวณรอยเชื่อม).....	60
ภาพที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E309 และกระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ แบบไม่รองพื้น (F1 = เส้นแบ่งเขตการหลอมละลาย, Wz = บริเวณรอยเชื่อม).....	62
ภาพที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E312 และกระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ แบบไม่รองพื้น (F1 = เส้นแบ่งเขตการหลอมละลาย, Wz = บริเวณรอยเชื่อม).....	63
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและตำแหน่งการทดสอบที่ลากผ่านโลหะเชื่อม ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E307 แบบไม่รองพื้น.....	64
ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและตำแหน่งการทดสอบที่ลากผ่านโลหะเชื่อม ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E308 แบบไม่รองพื้น.....	65
ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและตำแหน่งการทดสอบที่ลากผ่านโลหะเชื่อม ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E309 แบบไม่รองพื้น.....	65
ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและตำแหน่งการทดสอบที่ลากผ่านโลหะเชื่อม ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E312 แบบไม่รองพื้น.....	66
ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกกับกระแสเชื่อมและลวดเชื่อมของ รอยต่อชนแบบรองพื้น	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

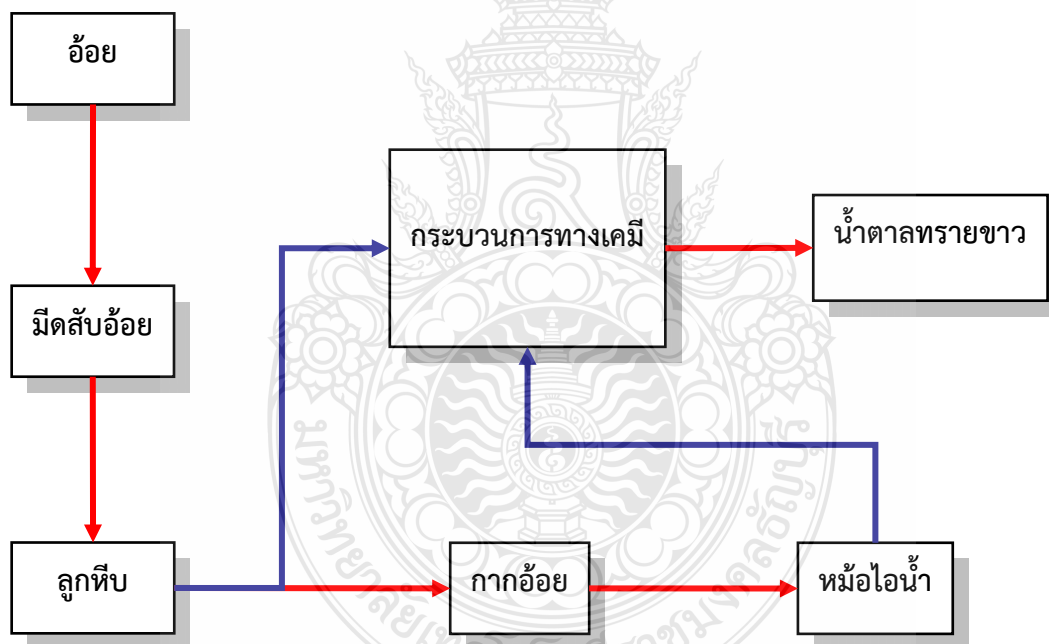
	หน้า
ภาพที่ 4.21 การเปรียบเทียบรูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบที่ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงและต่ำ ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวด E307, E308 และ E312 แบบรองพื้น	68
ภาพที่ 4.22 การเปรียบเทียบลักษณะระยะห่างระหว่างเดนไดรท์ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวด E307, E309 และ E312 ที่กระแสเชื่อมต่างๆ แบบรองพื้น	69
ภาพที่ 4.23 เปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคระยะห่างระหว่างเดนไดรท์ที่มีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E307, E308 และ E312 แบบรองพื้น...	71
ภาพที่ 4.24 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อเชื่อมด้วยลวดเชื่อม E308 (W = ความกว้างผิวหน้ารอยเชื่อม) แบบรองพื้น	72
ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของแรงกระแทกและกระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์ ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E308 แบบรองพื้น	73
ภาพที่ 4.26 โครงสร้างมหัศจรรย์รอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบรองพื้น (ก) กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ และ (ข) กระแสเชื่อม 80 แอมแปร์	73
ภาพที่ 4.27 ภาพขยายตำแหน่งการพังทลาย (OM) ในรูปที่ 4.26 แบบรองพื้น	74
ภาพที่ 4.28 (ก) บริเวณตำแหน่งพังทลายตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (ข) กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ และ (ค) กระแสเชื่อม 80 แอมแปร์	75
ภาพที่ 4.29 ผลการทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ของรอยเชื่อมต่อชน AISI1015 - AISI304	76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล เป็นอุตสาหกรรมสำคัญในการช่วยยกระดับชีวิตความเป็นอยู่ของเกษตรกรชาวไร่อ้อยในประเทศไทย เนื่องจากอุตสาหกรรมนี้ใช้วัตถุดิบภายในประเทศ 100 เปอร์เซ็นต์ ในการผลิตน้ำตาล ซึ่งในที่นี้ คือ อ้อย ที่ได้จากไร่อ้อยที่กระจายอยู่ทั่วประเทศ โดยมีปริมาณของอ้อยที่ส่งเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำตาลสูงถึง 68.5 ล้านตัน ในปีการผลิต 2552/53 [1] ในการผลิตน้ำตาลทรายขาวออกสู่ตลาด อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลมีภาพรวมการผลิตน้ำตาล ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1.1 ภาพรวมกระบวนการผลิตน้ำตาล

อ้อยที่เกษตรกรได้ทำการเก็บเกี่ยว ถูกส่งเข้าสู่กระบวนการผ่านรางเลื่อนที่ทำหน้าที่ส่งถ่ายอ้อยสดไปยังหน่วยมิดสับอ้อยเพื่อให้มีขนาดที่เหมาะสม ก่อนส่งถ่ายผ่านรางเลื่อนเข้าสู่กระบวนการหีบอ้อยที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ออกมาแบ่งเป็นสองอย่าง คือ น้ำอ้อยและกากอ้อย น้ำอ้อยที่ได้ถูกส่งผ่าน

ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าสู่กระบวนการทางเคมี เพื่อให้ได้น้ำตาลทรายขาวที่มนุษย์ใช้ในการบริโภค ขณะที่อีกหนึ่งผลิตภัณฑ์ของการหีบอ้อยคือ กากอ้อย นั้นถูกส่งผ่านโดยรางเลื่อนเข้าสู่หม้อไอน้ำและใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้พลังงานของการคั้นน้ำในหม้อไอน้ำ เพื่อให้เกิดไอน้ำและส่งผ่านเข้าสู่กระบวนการทางเคมีในการผลิตน้ำตาลต่อไป พิจารณาการส่งถ่ายอ้อยในกระบวนการผลิตพบว่า อ้อยถูกส่งถ่ายผ่านรางเลื่อนที่ผลิตมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนดังแสดงในภาพที่ 1 และด้วยปริมาณการผลิตที่มีมากต่อปีของอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลแล้ว เหล็กกล้าทั้งสองชนิดต้องถูกทำให้เชื่อมยึดถาวรให้เข้ากันอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถทนทานต่อแรงกระทำและไม่เกิดการพังทลาย

กระบวนการเชื่อมยึดเหล็กกล้าทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันในวงการอุตสาหกรรมมีหลายประเภท แต่เมื่อพิจารณาในการเชื่อมงาน โครงสร้างแล้วอาจมีวิธีการเชื่อมที่ได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้ 2 วิธีการคือ การเชื่อมอาร์กหลอดหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW) หรือการเชื่อมไฟฟ้า และการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม ซึ่งกระบวนการเชื่อมทั้งสองมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาตามลักษณะการเชื่อมงาน โครงสร้างแล้วพบว่า การเชื่อมอาร์กหลอดหุ้มฟลักซ์มีความเหมาะสมมากกว่า เนื่องจากการเชื่อมงาน โครงสร้างนั้นต้องมีการเปลี่ยนตำแหน่งการเชื่อมเสมอ ถ้าหากประยุกต์ใช้การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมในการเชื่อมงาน โครงสร้างอาจมีความเหมาะสมน้อยกว่า เพราะวัสดุเครื่องเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมนั้นประกอบด้วยอุปกรณ์ประกอบการเชื่อมหลายชิ้น ทำให้ลำบากในการเคลื่อนย้ายตามตำแหน่งการเชื่อมที่กำหนด ด้วยเหตุนี้จึงตั้งสมมติฐานว่ากระบวนการเชื่อมอาร์กหลอดเชื่อมหุ้มฟลักซ์นี้ สามารถทำให้เกิดรอยต่อที่มีประสิทธิภาพของการเชื่อมรอยต่อเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิมได้

ที่ผ่านมามีงานวิจัยรายงานผลของการเชื่อมอาร์กหลอดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่มีผลการทดลองสำคัญ เช่น การเชื่อมอาร์กหลอดเชื่อมหุ้มฟลักซ์รอยต่อเหล็กกล้าไร้สนิมมาเทนซิงคิกและออสเทนเนติก ด้วยลวดเชื่อมหลายชนิด [2] การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดิฟเฟอแลนซ์เข้ากับเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยการเชื่อมอาร์กหลอดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เกรด E2209 และ E309 [3] การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก 310 เข้ากับอินโคเนล 657 โดยการเชื่อมอาร์กหลอดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ [4] การเชื่อมวัสดุต่างชนิด โดยทำการเชื่อมโลหะนิกเกิลผสมกับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 โดยมีการเติม Ti ลงไปในโลหะเชื่อมขณะทำการเชื่อม เพื่อศึกษาผลกระทบต่อความสามารถในการเชื่อม โครงสร้างและสมบัติทางกลของรอยต่อ [5] โดยการทดลองส่วนใหญ่เน้นทำการศึกษาเปรียบเทียบการเพื่อหาชนิดลวดที่เหมาะสมในการเชื่อมรอยต่อวัสดุต่างชนิด โดยรอยต่อหนึ่งด้านประกอบไปด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างน้อย และได้ผลการทดลองที่เป็นข้อแนะนำในการนำลวดเชื่อมไปใช้ต่อไป [2-5] อย่างไรก็ตามมีรายงานผลการ

ทดลองบางตัวที่แสดงข้อมูลสำคัญในการเชื่อมอาร์กโลหะเชื่อมหุ้มฟลักซ์รอยต่อต่างชนิดที่รอยต่อประกอบด้วยแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมนั้น ควรทำการเชื่อมเสริมชั้นผิวด้านที่ไม่ใช่เหล็กกล้าไร้สนิมด้วยโลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมก่อน หลังจากนั้นจึงนำมาต่อกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อทำการเชื่อมต่อไป [6, 7]

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมา การศึกษาและพัฒนาการเชื่อมอาร์กโลหะเชื่อมหุ้มฟลักซ์รอยต่อเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ที่ต้องมีการสร้างชั้นช่วยเชื่อมก่อนการเชื่อมจริงลงในร่องบากขึ้นงานเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทำการเตรียมข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลได้ทันที และที่ผ่านมามีพบว่าการเชื่อมต่อเหล็กทั้งสองนี้โดยการเชื่อมอาร์กโลหะเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ ต้องมีการสร้างชั้นผิวก่อนการเชื่อมไม่มีการรายงานไว้ในงานวิจัยและอุตสาหกรรมการผลิต ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้ตั้งสมมติฐานในการเชื่อมอาร์กโลหะเชื่อมหุ้มฟลักซ์รอยต่อเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ด้วยการสร้างชั้นผิวก่อนการเชื่อม และทำการศึกษาค่าตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดสมบัติของรอยต่อเกณฑ์ที่มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน ที่คาดว่าจะทำให้เกิดประโยชน์ในการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI1015 กับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304

1.2.2 ศึกษาและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI1015 กับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW) ในการเชื่อมขึ้นงานทดลอง

1.3.2 ก่อนทำการเชื่อมรอยต่อชนทำราระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI1015 กับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI340 ความหนา 10 มม. บากร่องตัววี 60 องศา

1.3.3 ที่ร่องบากด้านเหล็กกล้าคาร์บอน ทำการเชื่อมเสริมชั้นผิวด้วยโลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม และไม่เชื่อมเพื่อทำการเปรียบเทียบ

1.3.4 ศึกษาสมบัติทางกลด้วยวิธีการทดสอบแรงกระแทก และความแข็งไมโครวิกเกอร์

1.3.5 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและมหภาค

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 แก้ปัญหาในการดำเนินงานของหน่วยงานที่ทำการวิจัย โดยการเพิ่มศักยภาพการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์รอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

1.4.2 ป้อนองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป โดยการพัฒนาองค์ความรู้พื้นฐานของการเชื่อมวัสดุต่างชนิดในภาคอุตสาหกรรมเกษตร

1.4.3 บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจเพื่อนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ โดยการจัดเตรียมข้อมูลวิธีการและผลการทดลองเบื้องต้นที่สามารถนำเสนอให้แก่ภาคอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล และสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อทำการผลิตได้ทันที

1.4.4 เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต โดยคาดว่าผลการทดลองที่ได้จะเป็นหนึ่งทางเลือกในการใช้เป็นข้อมูลพิจารณาการใช้กรรมวิธีการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์วัสดุต่างชนิด เพื่อลดเวลาการทำารทดลอง เพื่อให้ได้ตัวแปรการเชื่อมที่มีความเหมาะสมต่อไปและทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีประสิทธิภาพสูงที่มีต้นทุนการผลิตต่ำลง

บทที่ 2

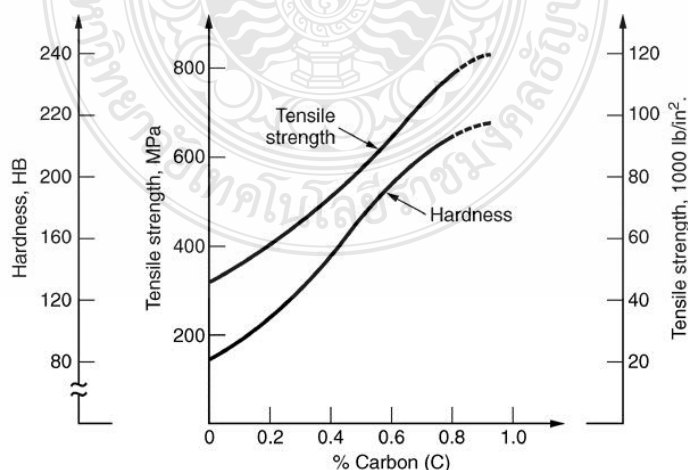
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน [8]

กิตติพงษ์[8] ได้นำเสนอเรื่องราว คือ โลหะผสมที่มีธาตุผสมหลัก คือ เหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนเป็นธาตุผสมรอง ปริมาณของคาร์บอนที่เติมลงไปเหล็กส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงและความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนดังแสดงในภาพที่ 2.1 กล่าวคือ ปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงและความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเลือกชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนไปใช้งานต้องพึงระวังและเลือกชนิดให้เหมาะสม

การแบ่งชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนแบ่งออกได้หลายวิธีการ โดยหนึ่งในวิธีการคือ การแบ่งตามปริมาณของคาร์บอนในเหล็กกล้าสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- 1) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 0.20 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะการใช้งานคือ ใช้ในการทำชิ้นส่วนโลหะแผ่นในการประกอบรถยนต์ ทำรางรถไฟ ทำเส้นลวด เป็นต้น
- 2) เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ที่มีปริมาณคาร์บอนระหว่าง 0.20-0.50 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะการใช้งานคือ ผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักร ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ เพลาลูกเบี้ยว เพลาช้อเหวี่ยง เป็นต้น
- 3) เหล็กกล้าคาร์บอนสูง ที่มีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 0.50 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะการใช้งานคือ ผลิตสปริง เครื่องมือตัด ไขควง ชิ้นส่วนทนการขัดสี เป็นต้น



ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอน ความแข็ง และความแข็งแรง [8]

นอกจากนั้นได้มีกำหนดระบบการแบ่งกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนตามสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าของอเมริกา โดยกำหนดตัวเลข 4 ตัว เช่น 10XX เลข 10 หมายถึงเหล็กกล้าคาร์บอน ขณะที่ตัวเลขสองตัวสุดท้าย XX หมายถึง ปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในเหล็กกล้าคาร์บอน ตัวอย่างของเหล็กกล้าคาร์บอน เช่น 1020 มีปริมาณคาร์บอน 0.2 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างของเหล็กกล้าคาร์บอน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าตาม AISI และ ASME [9]

AISI-SAE Number	%C	%Mn	%Si	%Ni	%Cr	Other
1020	0.18-0.23	0.30-0.60				
1040	0.37-0.44	0.60-0.90				
1060	0.55-0.65	0.60-0.90				
1080	0.75-0.88	0.60-0.90				
1095	0.90-1.03	0.30-0.50				
1140	0.37-0.44	0.70-1.00				0.08-0.13% S
4140	0.38-0.430	0.75-1.00	0.15-0.30		0.80-1.10	0.15-0.25% Mo
4340	0.38-0.430	0.60-0.80	0.15-0.30	1.65-2.00	0.70-0.90	0.20-0.30% Mo
4620	0.17-0.22	0.45-0.65	0.15-0.30	1.65-2.00		0.20-0.30% Mo
52100	0.98-1.10	0.25-0.45	0.15-0.30		1.30-1.60	
8620	0.18-0.23	0.70-0.90	0.15-0.30	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25% Y
9260	0.56-0.64	0.75-1.00	1.80-2.20			

2.2 เหล็กกล้าไร้สนิม [10]

เหล็กกล้าผสมสูงที่เติมธาตุโครเมียมลงไปมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ เพื่อจุดประสงค์หลักเพื่อป้องกันการเกิดการกัดกร่อน (Corrosion) ในเหล็กกล้า โครเมียมในเหล็กกล้าจะก่อให้เกิดฟิล์มบางๆของโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) เคลือบที่ผิวป้องกันไม่ให้ออกซิเจนสัมผัสกับผิวหน้าของเหล็ก จึงไม่เกิดการกัดกร่อนขึ้น นอกจากนั้นจากการเติมโครเมียมสูงทำให้ความแข็งแรงและความเหนียวเนื่องจากแรงดึงขึ้น การแบ่งชนิดของเหล็กกล้าสนิมสามารถแบ่งออกได้เป็นดังนี้

2.2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel)

ประกอบด้วย 18 เปอร์เซ็นต์ Cr และ 8 เปอร์เซ็นต์ Ni ส่วนมาก คือ กลุ่ม 3XX หรือ 2XX มีสมบัติที่ไม่เป็นแม่เหล็กคือ ไม่ดูดติดแม่เหล็ก มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยม เนื่องจากมีความสามารถในการยึดตัวเนื่องจากแรงดึงสูงสุดในบรรดาเหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าชนิดนี้สามารถเพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากการแปรรูปได้ (Work Hardening) การใช้งานกับชิ้นส่วนที่ต้องการเปลี่ยนรูปร่าง เช่น อุปกรณ์ในครัวเรือน อ่างล้างหน้า หรือชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ต้องการความต้านทานการกัดกร่อน ตัวอย่างของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ส่วนผสมทางเคมี และกลสมบัติ ดังตารางที่ 2.2

2.2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic Stainless Steel)

ประกอบด้วย 14 ถึง 27 เปอร์เซ็นต์ โครเมียม คาร์บอนต่ำ และไม่มีนิกเกิล ดูดติดแม่เหล็กมีความเหนียวเนื่องจากแรงดึงต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยการขึ้นรูปร้อนหรือเย็น (Work Hardening) แต่ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยการอบชุบ กลุ่มของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกนี้ คือ กลุ่ม 405, 403 และ 446 การใช้งานทั่วไปยกเว้นงานที่ไม่ได้เป็นการใช้งานโครงสร้าง เช่น เครื่องครัว หรือชิ้นส่วนเครื่องยนต์ เป็นต้น

2.2.3 เหล็กกล้าสนิมมาเทนซิติก (Martensitic Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้มีปริมาณคาร์บอนสูง ซึ่งเป็นผลในการเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง (Heat Treatment) ปริมาณโครเมียม 18 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่มีนิกเกิล มีความแข็งแรง แข็ง ความต้านทานความล้าสูง มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนต่ำกว่า 2 รูปแบบข้างต้น การใช้งาน เช่น การทำมีดผ่าตัด ชิ้นส่วนเครื่องครัว ชิ้นส่วนเดอบ ชิ้นส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ตัวอย่างของเหล็กกล้าไร้สนิมมาเทนซิติก ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีและกลสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม [11]

ชนิด	ส่วนผสมทางเคมี (%)					ความแข็งแรงสูงสุด (MPa)	%การยืด ตัว
	Cr	Ni	C	Mn	อื่นๆ		
เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก							
301	17.0	7.0	0.15	2.0	-	620	40
302	18.0	8.0	0.15	2.0	-	515	40
304	18.0	8.0	0.08	2.0	-	515	4
309	23.0	13.0	0.15	2.0	-	515	
316	17.0	12.0	0.08	2.0	2.5	515	
เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก							
405	13.0	-	0.08	1.0	-	415	20
430	17.0	-	0.12	1.0	-	415	20
เหล็กกล้าไร้สนิมมาเทนซิติค							
403	12	-	0.15	1	-	485	20
403 ^b	12	-	0.15	1	-	825	12
416	13	-	0.15	1	-	485	20
416 ^b	13	-	0.65	1	-	965	10
440	17	-	0.65	1	-	725	20
440 ^b	17	-	0.65	1	-	1790	5

หมายเหตุ^b คือ การอบชุบด้วยความร้อน

2.2.4 เหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มความแข็งตกผลึก (Precipitation Hardening Stainless Steel)

มีส่วนผสมโครเมียมประมาณ 1.7 เปอร์เซ็นต์ และนิกเกิล 7 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้มีการเติมธาตุผสมอื่นๆ เช่น ทองแดง ไททาเนียม และโมลิบดีนัม เพื่อทำให้เกิดการตกผลึกในโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งจะทำให้เกิดการเพิ่มความแข็งแรงและความแข็ง และความต้านทานการกัดกร่อนจะคงสภาพเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การใช้งานส่วนใหญ่มักใช้ในอุตสาหกรรมอากาศยาน ตัวอย่างของเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มความแข็งโดยการตกผลึก ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มความแข็งโดยการตกผลึก [10]

ชนิด	17-4 PH	17-7 PH	PH 15-7 Mo	17-10 P
C	0.04	0.07	0.07	0.12
Mn	0.40	0.70	0.70	0.75
Si	0.50	0.40	0.40	0.50
Cr	16.50	17.00	15.00	17.00
Ni	4.25	7.00	7.00	10.50
Mo	-	-	2.25	-
ธาตุอื่นๆ	0.25Cb,3.60Cu	1.15Al	1.15Al	0.28P
ความแข็งแรง (MPa)	1034	869	869	613
ความแข็งร็อกเวล	C33	B85	B88	B82

2.2.5 เหล็กกล้าไร้สนิมดิฟเฟอแลนซ์ (Duplex Stainless Steel)

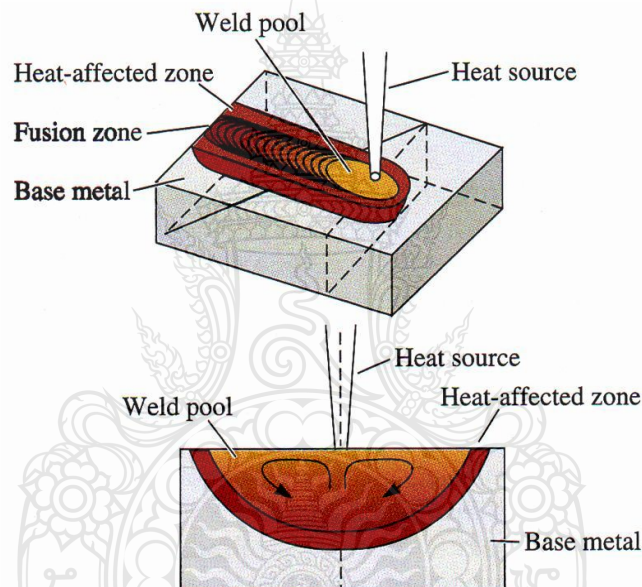
เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่รวมเอาโครงสร้างออสเทนไนต์และเฟอร์ไรต์ เข้าด้วยกันในปริมาณที่เท่ากัน ความต้านทานการเกิดการกัดกร่อนอยู่ในระดับเดียวกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติก และทำให้เกิดการปรับปรุงการเกิดการกัดกร่อนและแตกร้าวจากความเค้น (Stress Corrosion Cracking) การใช้งานใช้สำหรับการผลิตอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและโรงงานปรับสภาพน้ำ

2.3 การเชื่อมโลหะ

2.3.1 นิยามการเชื่อมโลหะ [10]

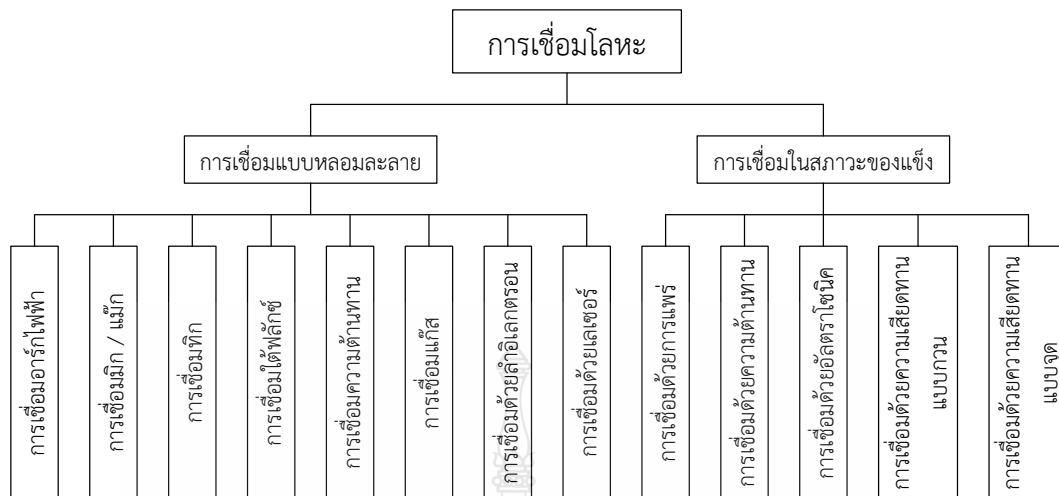
กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และคณะ กล่าวว่า การเชื่อมโลหะคือ การต่อชิ้นโลหะเข้าด้วยกันโดยอาศัยความร้อนในการหลอมละลายรอยต่อระหว่างโลหะสองชิ้นให้หลอมละลายเข้าด้วยกันและเปลี่ยนเป็นโลหะชิ้นเดียวกัน โดยขณะที่โลหะที่บริเวณรอยต่อเกิดการหลอมละลายเข้าด้วยกันนั้น

อาจเติมโลหะผสมบางตัวในลักษณะที่เรียกว่าลวดเชื่อม (Filler Metal) ลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติบางตัวในแนวเชื่อมให้ดีขึ้น ตัวอย่างการเชื่อมโลหะอย่างง่าย ดังภาพที่ 2.2 ความร้อนจากแหล่งจ่ายความร้อน (Heat Source) ถูกส่งผ่านไปที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะสองแผ่น (Base Metals) ทำให้เกิดการหลอมละลายรวมกันที่บริเวณบ่อเชื่อม (Weld Pool) และเมื่อเคลื่อนที่แหล่งให้ความร้อนไปตามแนวรอยต่อจะทำให้เกิดแนวเชื่อมขึ้น โดยบริเวณบ่อเชื่อมหรือพื้นที่หลอมละลาย (Fusion Zone) นี้จะก่อให้เกิดการแข็งตัวเป็นแนวเชื่อมที่มีโครงสร้างแตกต่างจากโลหะหลักในการเชื่อมพื้นที่สำคัญอีกพื้นที่ที่มีความสำคัญ คือ พื้นที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (Heat Affected Zone) พื้นที่นี้อยู่ถัดออกไปจากพื้นที่การหลอมละลายเป็นพื้นที่ๆ ไม่มีการหลอมละลาย แต่ความร้อนที่เกิดจากพื้นที่หลอมละลายทำให้โครงสร้างบริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลง และส่งผลทำให้สมบัติของโลหะเปลี่ยนแปลงไป



ภาพที่ 2.2 หลักการพื้นฐานในการเชื่อมโลหะ [10]

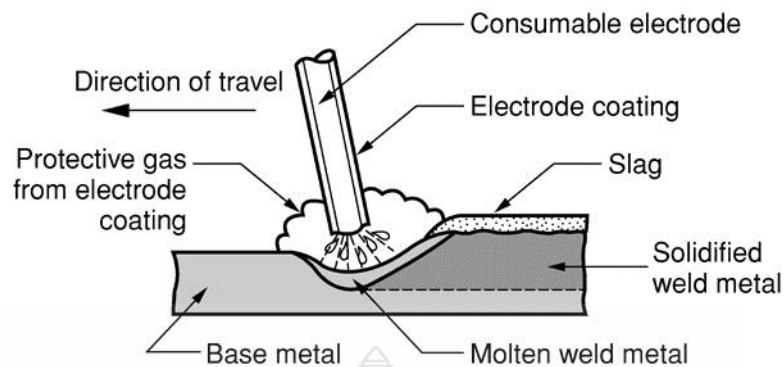
เทคโนโลยีการเชื่อมในปัจจุบันได้แบ่งการเชื่อมออกเป็น 2 กลุ่ม ดังภาพที่ 2.3 คือ การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion Welding) และการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) การเชื่อมแบบหลอมละลาย หรือบางครั้งเรียกว่า การเชื่อมหลอมละลายแบบดั้งเดิม (Conventional Fusion Welding) ความหมายของการเชื่อมแบบหลอมละลายนี้มีลักษณะเดียวกันดังอธิบายในภาพที่ 2.2 การเชื่อมหลอมละลายสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายวิธี ขณะที่การเชื่อมในสถานะของแข็ง คือ การเชื่อมในสถานะที่โลหะหลักไม่เกิดการหลอมละลาย แต่อาศัยความร้อนที่เกิดจากแรงทางกลทำให้โลหะเกิดการเชื่อมประสานกัน



ภาพที่ 2.3 รูปแบบของกระบวนการเชื่อม [10]

2.3.2 การเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding)

ภาพที่ 2.4 แสดงการอธิบายความหมายของการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กล่าวคือ สมมติให้ลวดเชื่อม (Consumable Electrode) และชิ้นงาน (Base Metal) ต่อเข้ากับเครื่องเชื่อม ทำให้ชิ้นงานและลวดเชื่อมแสดงตัวเป็นขั้วบวกและลบ เมื่อลวดเชื่อมเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ชิ้นงานใน ระยะที่เหมาะสม ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างลวดเชื่อมและชิ้นงาน และกระแสไฟฟ้าไหล ผ่านช่องว่างเล็กๆ ขึ้น ลักษณะนี้เรียกว่า เกิดการอาร์ก (Arc) การอาร์กที่เกิดขึ้นส่งผลทำให้เกิดความร้อนสะสมที่ชิ้นงานและลวดเชื่อม จนถึงระยะเวลาหนึ่งทำให้เกิดการหลอมละลาย โลหะที่อยู่ใน แกนกลางของลวดเชื่อมหลอมเข้าเติมในชิ้นงานส่วนหลอมละลาย (Molten Weld Metal) ทำให้เกิดแนว เชื่อมขึ้น โดยทั่วไปลวดเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานนี้มีโลหะผงพอกหุ้มรอบๆ แกนเหล็ก สารพอก หุ้มนี้คือ ผงโลหะวิทยาที่ต้องการเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติของโลหะเชื่อมตามต้องการ และขณะเดียวกัน มีส่วนผสมของสารทำให้เกิดแก๊สปกคลุมไม่ให้โลหะหลอมเหลว ทำปฏิกิริยากับบรรยากาศภายนอก เมื่อทำการเคลื่อนลวดเชื่อมไปในทิศทางที่กำหนัด (Direction Of Travel) ทำให้เกิดแนวเชื่อม ขึ้น ขณะที่สารพอกหุ้มและสารทำให้เกิดแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับมลทินในบ่อ หลอมละลายและลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของแนวเชื่อม เรียกว่า ชี้ตะกรัน (Slag) และปกคลุมแนวเชื่อม จนกว่าจะทำการกำจัดออก ทำให้ได้แนวเชื่อมโลหะตามต้องการ



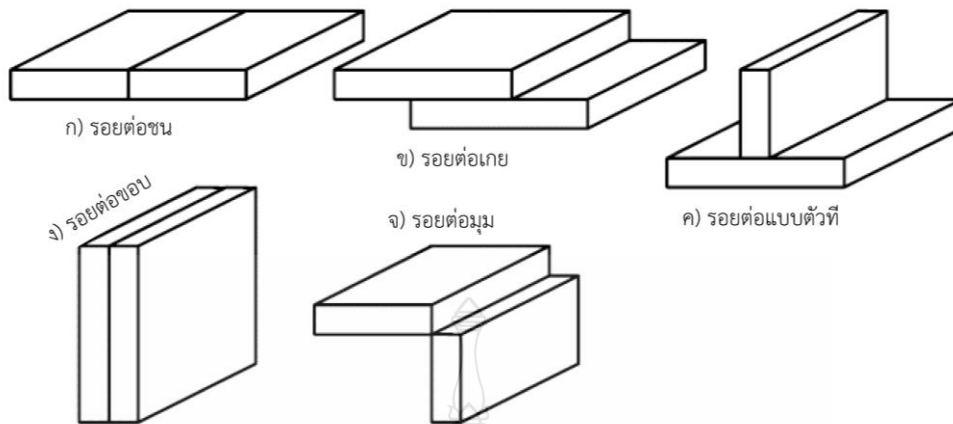
ภาพที่ 2.4 การเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ [8]

2.3.3 การเชื่อมโลหะต่างชนิด (Welding Dissimilar Metals) [12]

การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติกกับเหล็กกล้าคาร์บอนในการเชื่อมรอยต่อของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติกกับเหล็กกล้าคาร์บอนหรือเหล็กกล้าผสมต่ำจะต้องใช้อุณหภูมิต่ำหรือปานกลางหรือไม่เกินประมาณ 700 องศาฟาเรนไฮต์ โดยทั่วไปจะใช้ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมที่ส่วนผสมของเหล็กกล้าผสมสูง เพื่อป้องกันการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ในการเชื่อมกับเหล็กกล้าคาร์บอน และในขณะเดียวกันเป็นการป้องกันความเค้นตกค้างของเพอร์ไรต์เพื่อป้องกันการเกิดร้าวขณะร้อน (Hot Crack) วิธีการเชื่อมรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิม วิธีการนี้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในการเชื่อมต่อเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิมชิ้นส่วนท่อลำเรียงเหล็กกล้าคาร์บอนหรือเหล็กกล้าผสมต่ำ โดยทำการเชื่อมรองพื้นซ้อนทับแนวเชื่อมทำการเชื่อมทางด้านผิวเหล็กกล้าคาร์บอนและจะต้องมีความหนาพอสมควรที่จะเชื่อมลวดเติมและไม่ส่งผลกระทบต่อทางด้านโลหะชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน (Base Metal)

2.4 ชนิดของรอยต่อ

2.4.1 พื้นฐานของรอยต่องานเชื่อมหลอมละลายในงานอุตสาหกรรมได้แก่ เช่น รอยต่อชน รอยต่อเกลย รอยต่อรูปแบบตัวที่ รอยต่อขอบ และรอยมุม เป็นต้น ดังภาพที่ 2.5



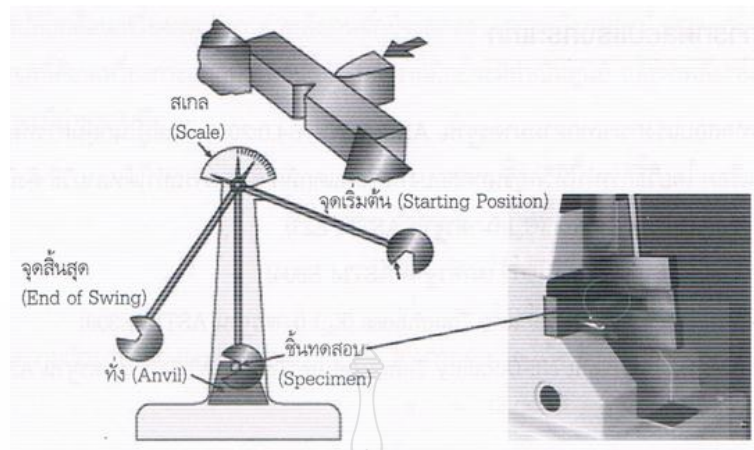
ภาพที่ 2.5 ชนิดของรอยต่อ [9]

2.5 การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อม

2.5.1 การทดสอบแรงกระแทกแนวเชื่อม [13]

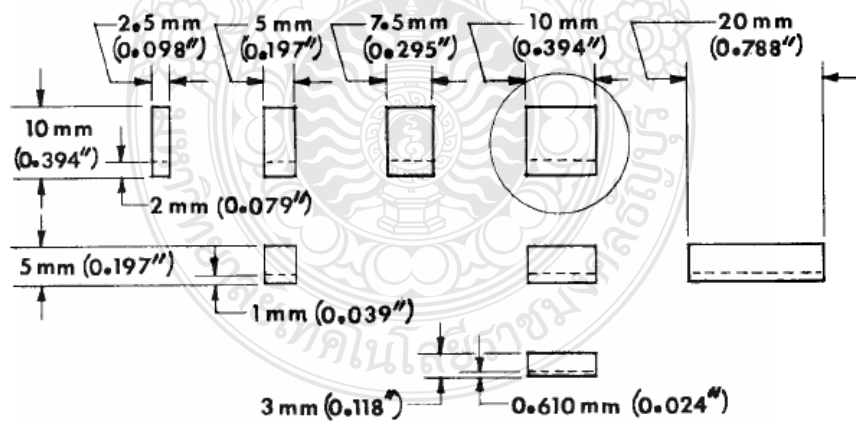
ซูชาติ คิ้วสงค์ ได้อธิบายหลักการทดสอบแรงกระแทกของชิ้นงานเชื่อมเบื้องต้น คือ เป็นกรรมวิธีที่ใช้แรงพลศาสตร์ (Dynamic Load Test) เพื่อวัดความเหนียวแน่น (Toughness) ของวัสดุ ชิ้นงานเชื่อม หรือเนื้อโลหะเชื่อม ในงานเชื่อมพอกผิวแข็ง งานเชื่อมรอยต่อของเหล็กกล้าคาร์บอน เป็นต้น

1) การทดสอบกระทำโดยวิธีการเหวี่ยงตีขึ้นทดสอบเพียงครั้งเดียวด้วยเครื่องทดสอบ ซึ่งสามารถยกข้อดีและนำข้อบกพร่องที่ตำแหน่งเดิมได้โดยอัตโนมัติ ดังภาพที่ 2.6 และทำการวัดความสามารถในการดูดซับพลังงานของแรงกระแทก (Energy Absorbed) และเปอร์เซ็นต์การแตกหักเนื่องจากแรงเฉือน (Percent Shear Fracture) และการขยายตัวด้านข้าง (Lateral Expansion) ของชิ้นทดสอบหลังการแตกหัก



ภาพที่ 2.6 การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy V Notch: CVN) [13]

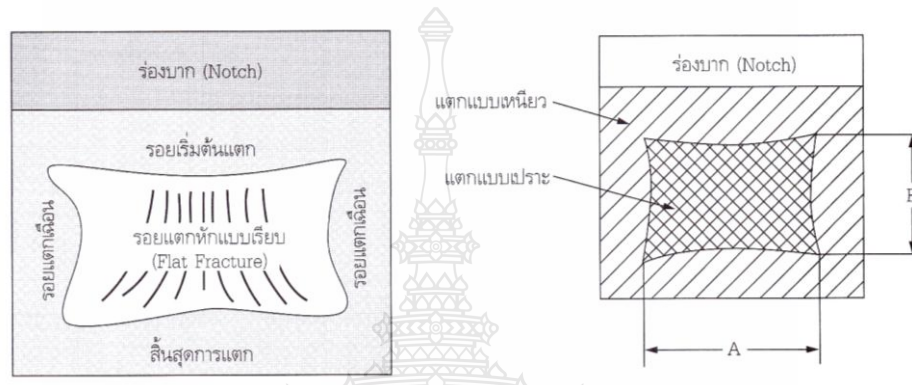
2) การกำหนดขนาดมิติของรูปทรงชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกโดยจะอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบแรงกระแทก ASTM E23-00 หน้าที่ 27 กล่าวคือ ชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน (Standard Size Specimen) จะมีขนาดความกว้าง ความยาวของหน้าตัด 10 x 10 มม. ในขณะที่ชิ้นงานทดสอบการเชื่อมมีขนาดความหนาไม่ถึง 10 มม. จะทำลดขนาดชิ้นทดสอบให้เล็กลงหรือเรียกว่า ชิ้นทดสอบขนาดย่อ (Sub-Sized Specimen) โดยมีขนาดตัวอย่างดังนี้ เช่น 10 x 7.5 มม. ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E23-00 [13]

3) ตัวแปรที่เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อแรงกระแทกในขณะที่ทำการทดสอบ ได้แก่ ความเร็วในการตีทดสอบ ขนาดมิติของรูปทรงชิ้นงานทดสอบ อุณหภูมิในการทดสอบ

4) ลักษณะการแตกหักของวัสดุขึ้นทดสอบที่ทำการทดสอบแรงกระแทกมีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท ได้แก่ การแตกหักแบบเหนียวโดยมีค่าการดูดซับพลังงานสูง ขณะที่การแตกหักแบบเปราะมีค่าการดูดซับพลังงานต่ำกว่าการแตกหักแบบเหนียว นอกจากนั้นยังสามารถวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ของรอยแตกหักจากแรงเฉือน (Percent Shear Fracture) และการขยายตัวด้านข้าง (Lateral Expansion) เพื่อมานำประกอบกับแรงทดสอบกระแทกหลักการตรวจสอบ ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การวิเคราะห์รอยแตกหัก [13]

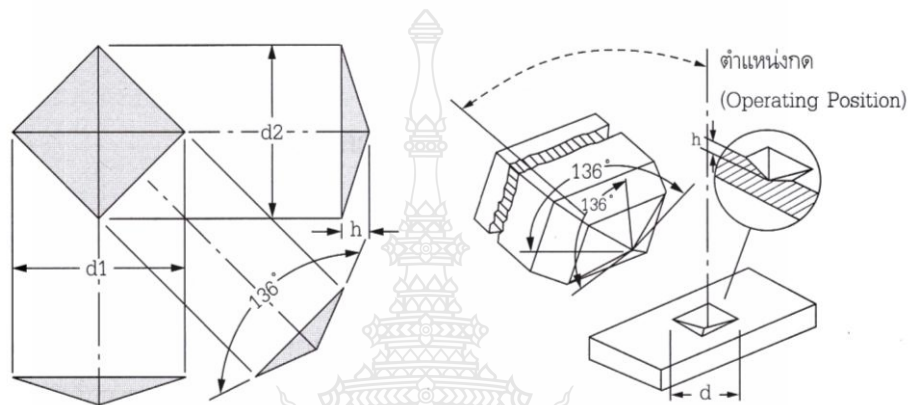
2.5.2 การทดสอบความแข็ง

กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ [9] ได้อธิบายหลักการทดสอบความแข็งเป็นการทดสอบเพื่อวัดความต้านทานการเกิดรอยขีดข่วนหรือรอยกดบนผิววัสดุด้วยวัสดุที่มีความแข็งมากกว่า ขณะที่ชูชาติ ด้วงสงค์ [13] ได้เขียนบรรยายอธิบายหลักการ คำว่า ความแข็งจุลภาค (Micro-Hardness) เป็นขนาดของรอยกดที่เกิดขึ้นจากการทดสอบขนาดเล็กมากในการทดสอบความแข็งจุลภาคทั่วไปใช้แรงกดที่ 1 กรัมแรง (gf) ถึง 2 กิโลกรัมแรง (kgf) หรือไม่เกิน 1 กิโลกรัมแรง (kgf) โดยทำการขนาดรอยกดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย ตั้งแต่ 100 ถึง 500 เท่า เป็นต้น

การแบ่งแยกประเภทของการทดสอบความแข็งจุลภาคสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- 1) การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส (Micro Vickers Test)
- 2) การทดสอบความแข็งจุลภาคแบบนูป (Micro-Knoop Test)
- 3) การทดสอบความแข็งแบบอัลตราโซนิกไมโครวิกเกอร์ส (Ultrasonic Micro-Vicker Test)

ในบทนี้ขออธิบายเฉพาะการทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส โดยชูชาติ
 ด้วงสงค์ ได้อธิบายหลักการทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์สคือ หัวกดทดสอบเป็นรูปทรง
 พีระมิดฐานสี่เหลี่ยมมีมุมแหลม 136 องศา โดยทดสอบกดลงบนผิวของวัสดุใช้แรงกดทดสอบตั้งแต่
 1 กรัมแรง (gf) ถึง 2 กิโลกรัมแรง (kgf) และการวัดขนาดของรอยกดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้
 แสงที่มีกำลังขยายตั้งแต่ 100 ถึง 500 เท่า ดังภาพที่ 2.9



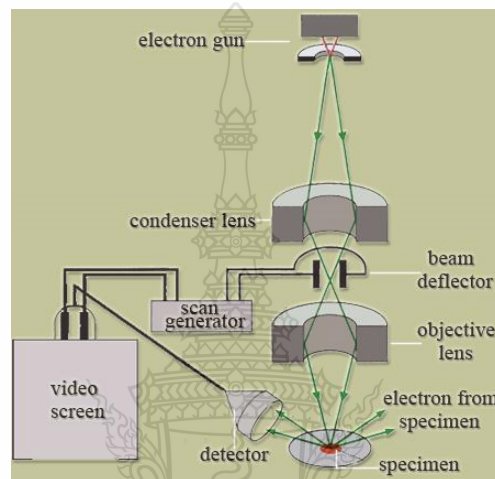
ภาพที่ 2.9 ลักษณะหัวกดทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส [13]

2.6 การตรวจสอบทางโลหะวิทยา

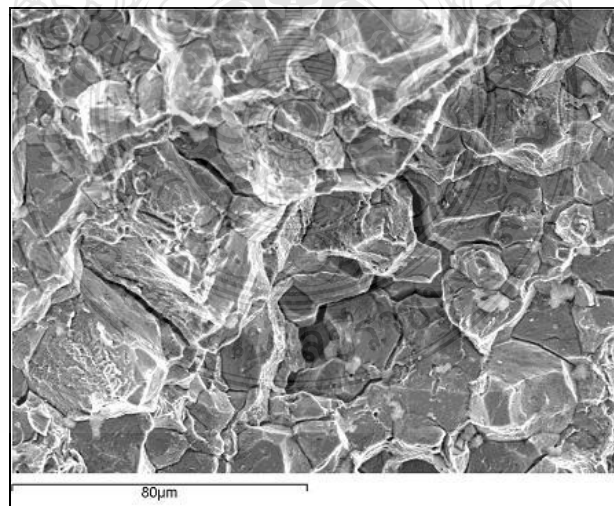
2.6.1 ในเว็บไซต์ <http://www.nano.kmitl.ac.th/> [14] ได้อธิบายหลักการตรวจสอบด้วย
 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope : SEM) คือ การสร้างภาพ
 ทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้
 จากเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดนี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง
 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาพื้นฐานและรายละเอียดของ
 ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์หน้าตัดของโลหะและ
 วัสดุเป็นต้น

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดจะประกอบด้วย
 แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้
 จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี
 (Condenser Lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำ
 อิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมี

ขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกวาดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย ดังภาพที่ 2.10 และ 2.11



ภาพที่ 2.10 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [14]

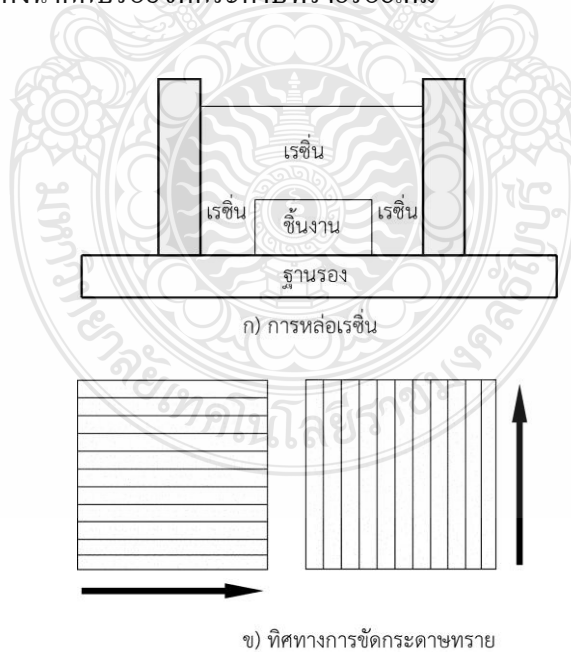


ภาพที่ 2.11 อ่างน้ำแยกแยะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [14]

ข้อดีของเครื่องกลึงจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกวาดคือ ภาพโครงสร้างที่เห็นจากเครื่องกลึงจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกวาดจะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ อีกทั้งวิธีการใช้งานเครื่องกลึงจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกวาดจะมีความรวดเร็วและใช้งานง่าย

2.6.2 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

การเตรียมชิ้นงานตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบนั้นควรตัดให้เกิดพื้นที่หน้าตัด และการตัดดังกล่าวต้องหลีกเลี่ยงให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้ก็เพราะความร้อนดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าตัดนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้การตรวจสอบนั้นเกิดการผิดพลาดเกิดขึ้นได้ ขนาดของชิ้นงานตรวจสอบควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 25 มม. หรือ 1 นิ้ว และความสูงไม่น้อยกว่า 15 มม. แต่ถ้าเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าต้องมีขนาด 25 x 25 x 20 มม. ทั้งนี้เพื่อให้การขัดผิวกระทำได้อย่างง่ายดาย แต่ถ้าชิ้นตรวจสอบมีขนาดเล็กมากก็ควรหุ้มชิ้นตรวจสอบด้วยเรซิน โดยให้หน้าตัดของชิ้นตรวจสอบอยู่ด้านล่างของนอกรีซินเพื่อที่จะทำการกลึงปาดหน้าผิวหน้าให้มีความสม่ำเสมอและเป็นระนาบเดียวกัน โดยขนาดของเรซินนั้นก็ควรมีขนาดใหญ่กว่าหรือใกล้เคียงกับชิ้นตรวจสอบ ดังภาพที่ 2.12 (ก) และ 2.12 (ข) แสดงทิศทางและวิธีการขัดกระดาษทราย โดยทำการขัดกระดาษทรายไปในทิศทางแนวเดียวกัน จากนั้นทำการขัดขวางตั้งฉากกับรอยขัดกระดาษทรายรอยเดิม



ภาพที่ 2.12 ขั้นตอนการหล่อเรซินและการขัดกระดาษทราย [10]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 Kacar and Baylan [2] ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและสมบัติจลจรอยต่อชนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมมาเทนซิติคและเออสเทนดิก โดยการเชื่อมอาร์กวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และใช้ลวดเชื่อมในการเชื่อม 2 ชนิด คือ ลวดเชื่อม E2209-17 และ E308L-16 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มม. ตัวแปรการเชื่อมกำหนดใช้ตามข้อบ่งใช้ของผู้ผลิตลวดเชื่อม และก่อนการเชื่อมชิ้นงานถูกให้ความร้อนที่ 200 องศาเซลเซียส แล้วทำการเชื่อมทันที ชิ้นงานเชื่อมที่ได้ถูกนำมาทำการทดสอบความแข็งแรงดึง ความแข็ง ความต้านทานการกระแทก การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E2209-17 ซึ่งเป็นลวดเหล็กกล้าไร้สนิมคิวเพล็กซ์มีค่าต่ำกว่าลวดเชื่อม E308L-16 เล็กน้อย ค่าความแข็งเกรงของโลหะเชื่อมมีค่าที่ยอมรับได้แม้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ ความแข็งของโลหะเชื่อมมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากอัตราการเย็นตัวที่เร็ว ความต้านทานการกัดกร่อนมีค่าต่ำ พื้นที่กระแทกร้อนถูกสารกัดกร่อนอย่างรุนแรง การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าลวดเชื่อมทั้งสองสามารถเชื่อมรอยต่อโลหะทั้งสองได้

2.7.2 Bala-Srinivasan et al. [3] ทำการศึกษาการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมคิวเพล็กซ์เข้ากับเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยการเชื่อมอาร์กวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เกรด E2209 และ E309 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.15 มม. และมีตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วยกระแสเชื่อม 110-120 แอมแปร์ แรงดันเชื่อม 22-24 โวลต์ ความเร็วเชื่อม 120-150 มม./นาที ผลการทดลองพบว่า ความแข็งและความต้านทานแรงกระแทกของโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E2209 มีค่าสูงกว่าโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E309 โลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E309 นั้นมีค่าความต้านทานการกัดกร่อนต่ำแสดงการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting Corrosion) สูงขณะที่โลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วย E2209 แสดงการเกิดฟิล์มพาสซีฟป้องกันการกัดกร่อนได้ดีผลการทดลองสรุปว่า ถึงแม้ลวดเชื่อม E309 มีความเหมาะสมต่อการเชื่อมรอยต่อของเหล็กกล้าทั้งสองมากกว่าเนื่องจากความสะดวกในการเลือกกระแสเชื่อมแต่ในผลการทดลองนี้พิสูจน์ว่าลวดเชื่อม E2209 นั้นมีความเหมาะสมมากกว่า

2.7.3 Naffakh et al. [4] ทำการศึกษาการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออกสเตนดิก 310 เข้ากับอินโคเนล 657 โดยการเชื่อมอาร์กวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โดยใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ 4 ชนิด ที่มีอินโคเนลเห็นโลหะผสมหลักประกอบด้วยลวดเชื่อม อินโคเนล 82 อินโคเนล A อินโคเนล 617 และลวด 310 โดยการพิจารณาเปรียบเทียบค่าการทดสอบการแตกร้าขณะร้อน (Hot Cracking) และสมบัติทางกลของโลหะเชื่อมสำหรับการทดสอบการแตกร้าขณะร้อนลวดเชื่อมอินโคเนล A แสดงค่าแนวโน้มในการแตกร้าขณะร้อนน้อยที่สุด ขณะที่การทดสอบความแข็งแรงดึงขึ้นทดสอบเกิดการพังทลายที่ด้าน

ของโลหะที่มีความแข็งแรงต่ำกว่า คือ อินโคเนล 657 รอยต่อที่เชื่อมด้วยอินโคเนล A แสดงค่าความแข็งแรงและความสามารถในการยึดตัวสูงสุด ซึ่งทดสอบความแข็งแรงดึงส่วนใหญ่เกิดการพังทลายแบบเหนียว (Ductile Pattern) แต่ลวดเชื่อมอินโคเนล 617 แสดงการพังทลายแบบผสม คือเหนียวและเปราะผลการทดลองสรุปว่า ในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอินโคเนล 657 และเหล็กกล้าไร้สนิม 310 ลวดเชื่อมที่มีความเหมาะสมในการใช้เชื่อมมากที่สุด คือ ลวดเชื่อมอินโคเนล A

2.7.4 Lee et al. [5] ทำการศึกษาการเชื่อมวัสดุต่างชนิด โดยทำการเชื่อมโลหะนิกเกิลผสมกับเหล็กกล้าไร้สนิม 304L โดยมีคาร์บอน Ti ลงไปในโลหะเชื่อมขณะทำการเชื่อมเพื่อศึกษาผลกระทบต่อความสามารถในการเชื่อมโครงสร้างและสมบัติทางกลของรอยต่อ โดยการใช้การเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์รอยต่อในการทดลองคือรอยต่อชนบากร่องตัววีในการเชื่อมทำการเชื่อมแบ่งออกเป็นแนวเชื่อมสามชั้น และแต่ละชั้นทำการเชื่อมแนวเดียว (Single Pass) เท่านั้น ในการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของไททาเนียมทำได้โดยการเพิ่มส่วนผสมทางเคมีโดยการใช้ผงโลหะเฟอโรไททาเนียมในลวดเชื่อมผลการทดลองพบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณไททาเนียมทำให้โครงสร้างจุลภาคบริเวณหลอมละลายมีการเปลี่ยนแปลงจากกิ่งเดนไดรต์เป็นเดนไดรต์ที่มีความสมมาตรอักษิแอกซ์ (Equiaxed Dendrite) ความยาวของช่องว่างระหว่างแขนเดนไดรต์ปฐมภูมิ (Primary Dendrite Arm Spacing: PDAS) มีค่าลดลง นอกจากนั้นทำให้ปริมาณเฟสอลูมินัมไททาเนียมออกไซด์ และปริมาณเฟสที่มีปริมาณนีโอเบียมสูงลดลง ความแข็งของพื้นที่หลอมละลายมีความแข็งลดลง การเพิ่มปริมาณไททาเนียมทำให้เกิดการเพิ่มรอยละการยึดตัวของโลหะเชื่อม ถึงแม้ว่าค่าความแข็งแรงจะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตามหากมีปริมาณไททาเนียมสูงถึง 0.91 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลง นอกจากนั้นทำให้ค่าความสามารถในการเชื่อมลดลง

2.7.5 Lee et al. [6] ทำการศึกษาเพื่อหาค่าการพังทลายจากการเกิดความล้า (Fatigue) และการเกิดการคืบตัว (Creep) ของรอยต่อเชื่อมมีกรรอยต่อชนเหล็กกล้าผสม 9Cr-1Mo และเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยในการเชื่อมต้องมีการเชื่อมชั้นผิวที่ด้านของเหล็กกล้าผสม 9Cr-1Mo ก่อนด้วยลวดเชื่อมที่ใช้เป็นโลหะเชื่อมก่อนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมตัวเดียวกัน ซึ่งงานที่ได้นำมาทำการทดสอบความล้าคืบตัว (Creep Fatigue Testing) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และให้แรงคงที่ 30 เมกกะปาสกาล (MPa) ผลการทดลองที่ได้ถูกนำไปทำการเปรียบเทียบกับรอยต่อที่เป็นโลหะชนิดเดียวพบว่ารอยต่อวัสดุต่างชนิดนั้นมีค่าการพังทลายที่วิกฤตกว่า คือทนต่อความล้าคืบตัวที่ค่าต่ำกว่า

2.7.6 Das et al. [7] ทำการศึกษาความสามารถในการเชื่อมของรอยต่อชนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค 304L และเหล็กกล้าไร้สนิม 403 โดยการเชื่อมทิก (GTAW) โดยการใช้ลวดเชื่อม

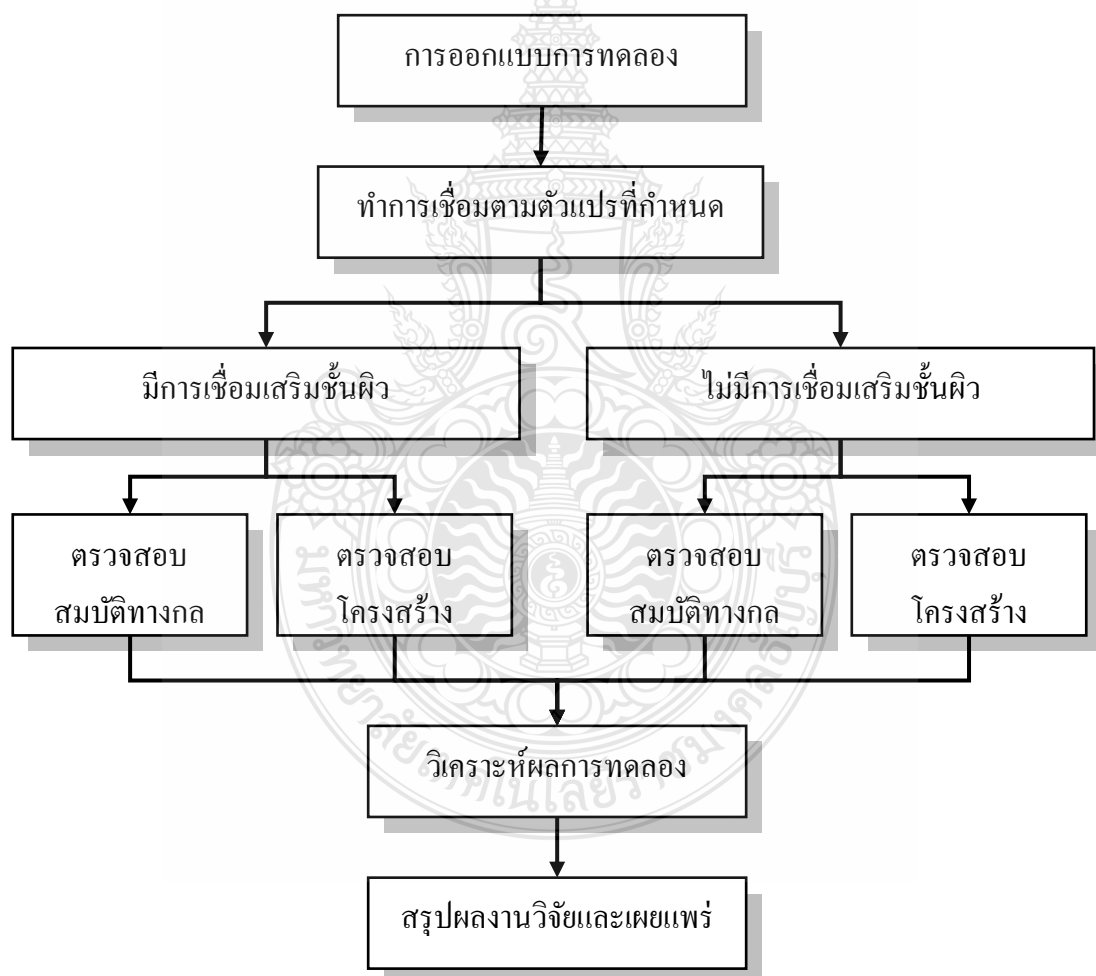
ERNiCr-3 โดยการเชื่อม 2 รูปแบบ คือ การเชื่อมแนวบัพเฟอิด้านเหล็กกล้าไร้สนิม 403 อีกแบบการเชื่อมแนวบัพเฟอิด้านเหล็กกล้าไร้สนิม 403 พร้อมทำการอบหลังการเชื่อม (Post-Weld Heat-Treatment) ผลการทดลองพบว่า พื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม 403 มีความเหนียวและสามารถยึดตัวคล้ายกับด้านที่ทำการอบหลังการเชื่อมผลการทดลองระบุว่า หากทำการเชื่อมลักษณะนี้ไม่จำเป็นต้องทำการอบชุบหลังการเชื่อมเพราะว่ากระบวนการเชื่อมที่ออกแบบนั้นมีวัฏจักรความร้อนที่ส่งผลคล้ายการอบชุบให้แก่ชิ้นงานแล้ว



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยโครงการ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติของรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 และเหล็ก กล้าไร้สนิม AISI304 ที่เชื่อมด้วยการเชื่อมอาร์กกดหุ้มฟลักซ์ของชิ้นส่วนลำเลียงอ้อย ลักษณะรอยต่อเป็นแบบรอยต่อชนทำราบ ทำการเชื่อมรองพื้นบนเหล็กกล้าคาร์บอนก่อนทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม E308 จากนั้นนำชิ้นงานเชื่อมไปทดสอบสมบัติทางกลและตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา การวิจัยครั้งนี้มีขั้นตอนในการดำเนินการดังนี้

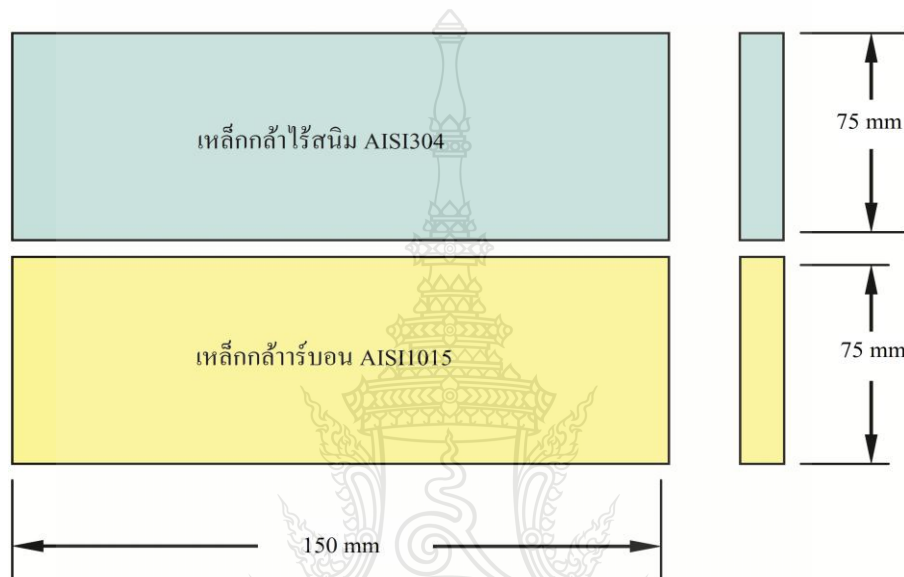


ภาพที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการทดลอง

3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 มีความหนา 10 มม. ความกว้าง 75 มม. ความยาว 150 มม. ดังภาพที่ 3.2 และส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 3.1

3.1.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 มีความหนา 10 มม. ความกว้าง 75 มม. ความยาว 150 มม. ดังภาพที่ 3.2 และส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.2 ขนาดชิ้นงานทดลอง

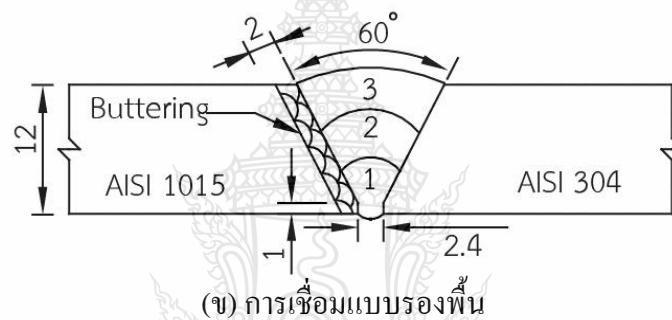
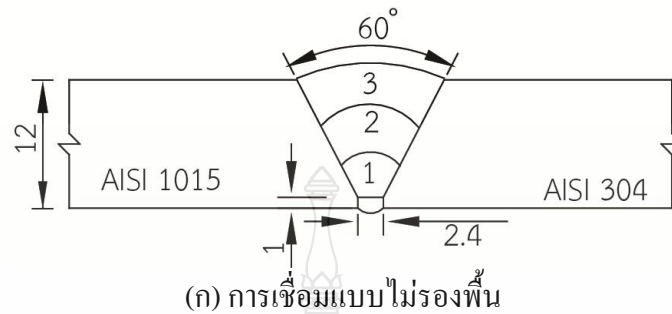
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุเชื่อม (wt.%)

วัสดุ	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
AISI1015	0.17	0.23	0.54	0.01	0.05	-	-
AISI304	0.03	0.65	1.67	0.043	0.025	18.84	8.74

3.1.3 การออกแบบรอยต่อ

ลักษณะรอยต่อเป็นแบบรอยต่อชนทำราบโดยบากร่องวีมุมรวม 60 องศา [15] ทำการเชื่อมแบบไม่รองพื้น (Non-Buttering) และทำการเชื่อมแบบรองพื้น (Buttering) ด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ E309 บนวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 ด้วยกระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ และบากร่องวีอีกครั้งให้เนื้อเชื่อมรองพื้นหนา 2 มม. ด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ โดยมีความสูงของหน้าฐาน (Root

Face) 1 มม. [2] มีระยะห่างของรอยต่อชิ้นงาน (Root Opening) 2.4 มม. ดังภาพที่ 3.3 และทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ E308 จำนวน 3 ชั้น [5, 16] และทำการทดสอบสมบัติต่อของรอยเชื่อมต่อไป



ภาพที่ 3.3 การออกแบบขั้นตอนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding : SMAW)

3.1.4 ลวดเชื่อม

การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมใช้ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลองเป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ตามมาตรฐาน AWS A5.4 E307, E308, E309 และ E312 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มม. ทำการเชื่อมแบบไม่รองพื้น ส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 3.2 และใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ E308 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มม. ตามมาตรฐาน AWS A5.4 E309 ทำการเชื่อมรองพื้น ลวดเชื่อมหุ้ม ฟลักซ์ E309 ส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (wt.%)

ลวดเชื่อม	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
E307	0.07-0.15	≤1.0	5.0-7.0	≤0.035	≤0.025	17.5-19.5	7.5-9.5
E308	0.03	0.70	1.10	0.025	0.011	18.9	9.9
E309	0.03	0.65	1.10	0.020	0.013	23.2	13.2
E312	0.12	0.90	1.0	-	-	29.0	9.0

3.1.5 เครื่องเชื่อม

เครื่องเชื่อมที่ใช้เชื่อมมีเครื่องหมายทางการค้า ยี่ห้อ KEMPPi Master TIG AC-DC 2500 ดังภาพที่ 3.3 เป็นเครื่องเชื่อมทิก (TIG) ระบบอินเวอร์เตอร์สามารถเชื่อมได้ทั้ง ระบบการเชื่อมทิก (TIG) และการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ (MMA) และในการทดลองนี้จะเลือกใช้การเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ (MMA) ในการเชื่อมชิ้นงานทดลอง



ภาพที่ 3.4 เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

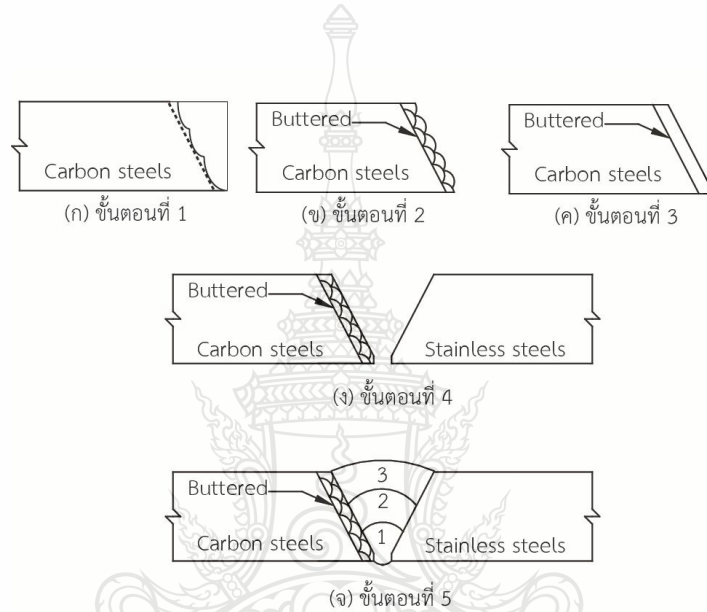
3.2.1 ขั้นตอนออกแบบการเตรียมชิ้นงานเชื่อมแบบรองพื้น

- 1) ขั้นตอนที่ 1 ทำการบากมุมเอียง 60 องศา ทางด้านแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับการเชื่อมรอยต่อชน ดังภาพที่ 3.5 (ก)
- 2) ขั้นตอนที่ 2 ทำการเชื่อมรองพื้นซ้อนทับแนวโดยใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ E309 ดังภาพที่ 3.5 (ข)

3) ขั้นตอนที่ 3 ทำการเจียรระโนผิวรอยเชื่อมรองพื้นเพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการและลดความเครียด (Stress Relieving) ดังภาพที่ 3.5 (ค)

4) ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบขนาดบากมุมรอยต่อให้ได้ตามที่ออกแบบการเชื่อม ดังภาพที่ 3.5 (ง)

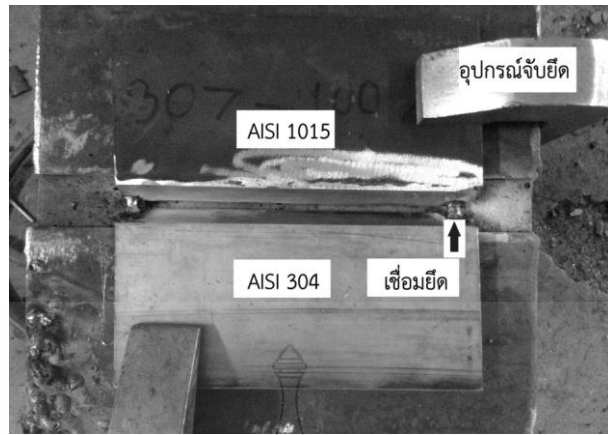
5) ขั้นตอนที่ 5 ทำการเชื่อมรอยต่อชนแบบมีชั้นรองพื้นระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 กับเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 จำนวน 3 ชั้น ดังภาพที่ 3.5 (จ)



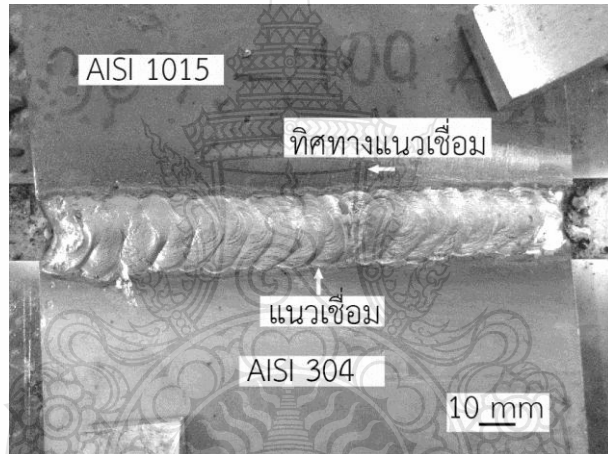
ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการเชื่อมโลหะต่างชนิด

3.2.2 การเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อม

นำชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 กับเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 ที่ผ่านการเชื่อมรองพื้นมาแล้วและเตรียมขนาดตามที่กำหนดเช็ดทำความสะอาดด้วยอะซิโตนนำมาใส่บนอุปกรณ์จับยึดจากนั้นขันยึดให้แน่น และทำการเชื่อมยึดหัวและท้าย ดังภาพที่ 3.5 จากนั้นทำการปรับตั้งตัวแปรการเชื่อม โดยกำหนดกระแสเชื่อมไว้ที่ 5 ระดับ 80, 90, 100, 110 และ 120 แอมแปร์ กำหนดชั้นของแนวเชื่อม 3 ชั้น (Layers) ดังภาพที่ 3.7 แล้วนำมาทำการเชื่อมเพื่อนำตัวแปรมาทำการเปรียบเทียบทดสอบหาสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 ที่ผ่านการเชื่อมแบบต่อชน



ภาพที่ 3.6 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนเชื่อม



ภาพที่ 3.7 ลักษณะชิ้นงานเชื่อม

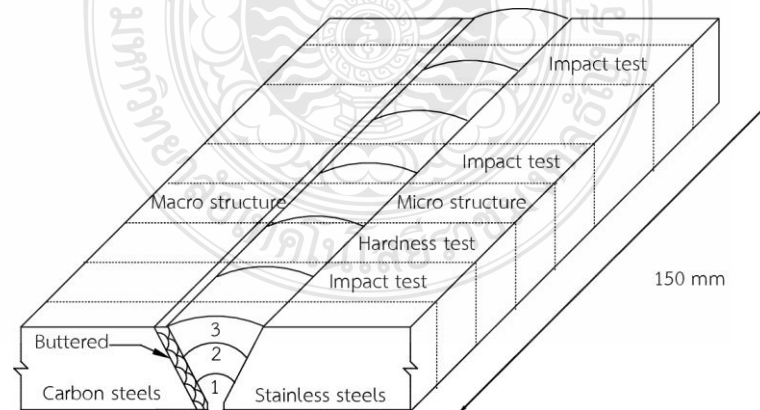
3.2.3 ขั้นตอนการออกแบบการตัดแบ่งชิ้นงานทดสอบ

การออกแบบการตัดแบ่งชิ้นงานทดสอบหลังจากทำการเชื่อมรอยต่อชนระหว่างเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 กับเหล็กกล้าคาร์บอน โดยจะทำตัดแบ่งชิ้นงานเชื่อมด้วยเครื่องตัดชิ้นงานมีระบบหมุนเวียนน้ำหล่อเย็น ดังในภาพที่ 3.8 เพื่อทำการทดสอบสมบัติทางกลของแนวเชื่อมและโครงสร้างทางโลหะวิทยา เริ่มต้นการตัดแบ่งชิ้นงานจะทำการตัดในทิศทางตั้งฉากกับแนวเชื่อมและตัดชิ้นงานส่วนขอบด้านใดด้านหนึ่งทิ้งแล้วตัดจะทำการตัดแบ่งชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก (Impact Test) ทั้งหมด 3 ชั้น โดยตำแหน่งการตัด มี 3 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งเริ่มต้นแนวเชื่อม ตำแหน่งตรงกลางแนวเชื่อม และตำแหน่งสิ้นสุดการเชื่อม ดังในภาพที่ 3.9 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงจะทำการ

ตัดใกล้ๆ กับชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก ดังในภาพที่ 3.9 และชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยา ประกอบไปด้วย การตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคและ โครงสร้างจุลภาคจะใช้ชิ้นทดสอบชิ้นเดียวกัน โดยจะทำการตัดแบ่งชิ้นงานเชื่อมตรงตำแหน่งระหว่างชิ้นงานตัดแบ่งทดสอบความแข็งกับชิ้นงานตัดแบ่งทดสอบแรงกระแทก ดังในภาพที่ 3.9 การตัดแบ่งชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงกระแทกของแนวเชื่อมควรจะต้องตัดให้อยู่ในตำแหน่ง 3 จุดที่กล่าวมาข้างต้น เหตุผลเพราะว่าดูแนวโน้มค่าเฉลี่ยของรอยเชื่อมว่าจะสามารถรับกระแทกได้เท่าไร ส่วนชิ้นงานทดสอบความแข็งและ โครงสร้างโลหะวิทยาในการตัดแบ่งชิ้นทดสอบอาจจะคลาดเคลื่อนผิดตำแหน่งได้บ้างหลังจากตัดแบ่งได้ชิ้นงานเรียบร้อยแล้วนำไปทดสอบในหัวข้อที่ 3.3



ภาพที่ 3.8 เครื่องตัดชิ้นงานมีระบบหมุนเวียนน้ำหล่อเย็น

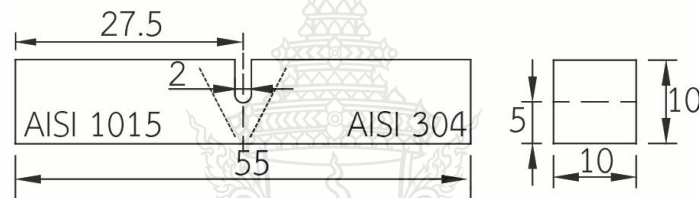


ภาพที่ 3.9 ขั้นตอนการตัดแบ่งชิ้นงานทดสอบ

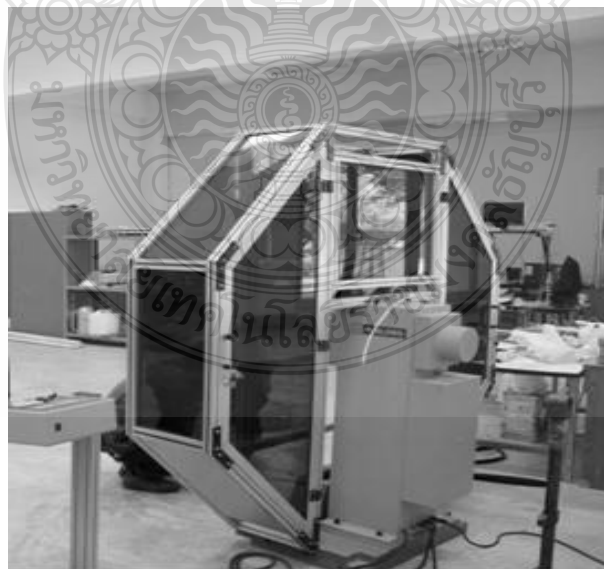
3.3 การทดสอบสมบัติทางกล

3.3.1 การทดสอบแรงกระแทก

ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมทำการตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงานมีระบบหมุนเวียนน้ำหล่อเย็น ดังภาพที่ 3.8 ทำการกัดชิ้นทดสอบแรงกระแทกด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ ตามมาตรฐาน ASTM E23-00 Type C บากร่องแบบ U-Notch บริเวณ โลหะเชื่อม [17] ดังภาพที่ 3.10 และทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกเครื่องหมายการค้า CBD-300 Pendulum (Impact Testing Machine) ดังภาพที่ 3.11 โดยใช้ความเร็วในการกระแทก (Impact Speed) 5.2 เมตร/วินาที และน้ำหนักในการกระแทก (Impact Load) 350 จูล โดยทำการตีรอยเชื่อมจนแนวเชื่อมขาดหรือหนีออกจากกัน และทำการบันทึกวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงกระแทก



ภาพที่ 3.10 ชิ้นทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E23-00 Type C บากร่องแบบ U-Notch



ภาพที่ 3.11 เครื่องทดสอบแรงกระแทก

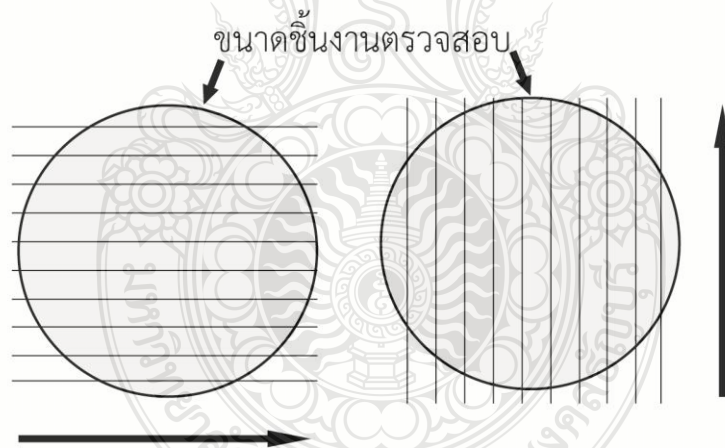
3.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอแบบซุม (Stereo Microscopes) ที่มีกำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่า นำชิ้นงานส่วนที่ผ่านการตรวจสอบมาตัดแบ่งชิ้นส่วนตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงานมีระบบหมุนเวียนน้ำหล่อเย็นชิ้นงานขณะทำการตัด ดังภาพที่ 3.8 นำชิ้นงานหล่อตัวเรือนอะลูมิเนียมด้วยเรซิน ดังภาพที่ 2.12 ทำการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำ ตั้งแต่เบอร์ 360-1200 ตามลำดับ ดังภาพที่ 3.12 (ก) จากนั้นจะนำไปขัดผิวด้วยผงขัดผงเพชร (Diamond) ที่มีขนาดตั้งแต่ 1-3 ไมครอน บนงานขัดผ้าสักหลาด ดังภาพที่ 3.12 (ข) ทิศทางการขัดกระดาษและผ้าสักหลาด ดังภาพที่ 3.12 (ค) แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดและเช็ดทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ เป่าแห้งด้วยลม ดังภาพที่ 3.13 (ค) และทำการกัดกรดประกอบด้วยเอทานอล (95 เปอร์เซ็นต์) 100 มล. กรดไนตริก 1-5 มล. ดังภาพที่ 3.13 (ก) โดยใช้สาลิจุ่มสารกัดกรดโครงสร้างที่ผ่านการผสมแล้วทำการเช็ดทาสารกัดโครงสร้างลงบนชิ้นงานเบาๆ ประมาณ 10 วินาที ในขั้นตอนนี้ควรใช้แรงในการทาสารกัดกรดลงบนชิ้นงานให้น้อยที่สุดเพื่อป้องกันการเกิดรอยขีดขูดจากการเช็ดทาสารกัดโครงสร้างลงบนชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.13 (ข) จากนั้นล้างกรดด้วยน้ำและเอทานอลและเช็ดทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ เป่าแห้งด้วยลมจนแห้ง ดังภาพที่ 3.13 (ค) และทำการตรวจสอบดูจุดบกพร่องบริเวณแนวเชื่อม (Weld Zone) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอแบบซุม (Stereo Microscopes) ดังภาพที่ 3.14



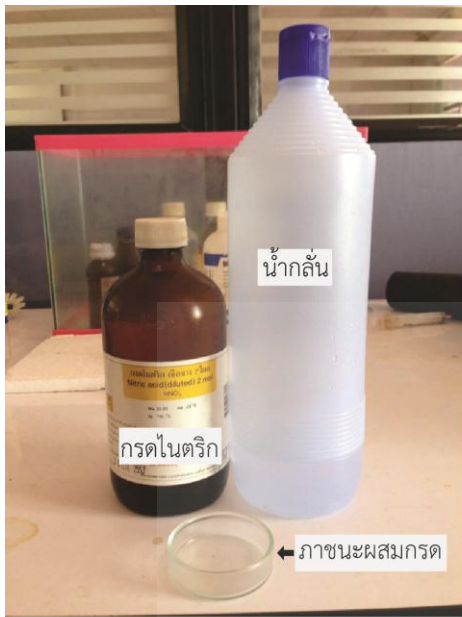
(ก) ขั้นตอนการขัดกระดาษทราย

(ข) ขั้นตอนการขัดมันด้วยผ้าสักหลาด

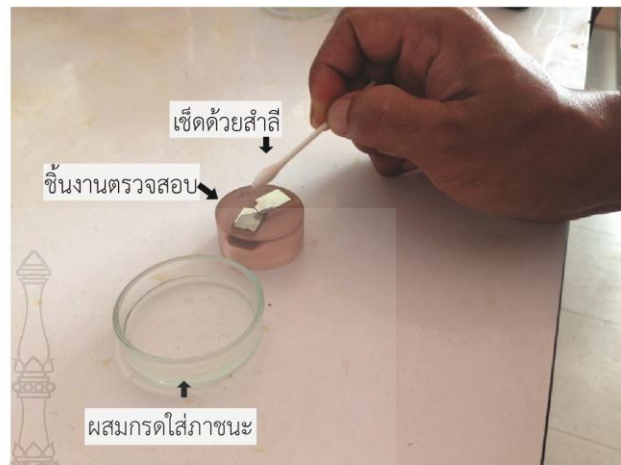


(ค) ทิศทางการขัดกระดาษทราย

ภาพที่ 3.12 ขั้นตอนการขัดกระดาษทราย



(ก) สารกักกรดโครงสร้าง

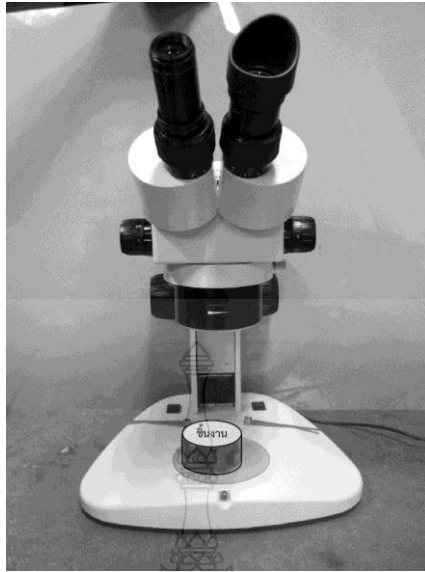


(ข) วิธีการกักกรดชิ้นงาน



(ค) เป่าชิ้นงานตรวจสอบด้วยลม

ภาพที่ 3.13 ขั้นตอนการกักกรดโครงสร้าง



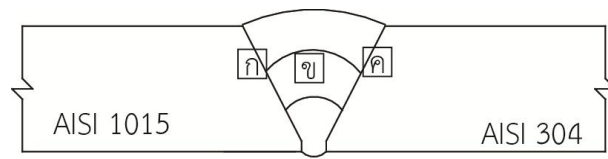
ภาพที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอแบบซูม (Stereo Microscopes)

3.3.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

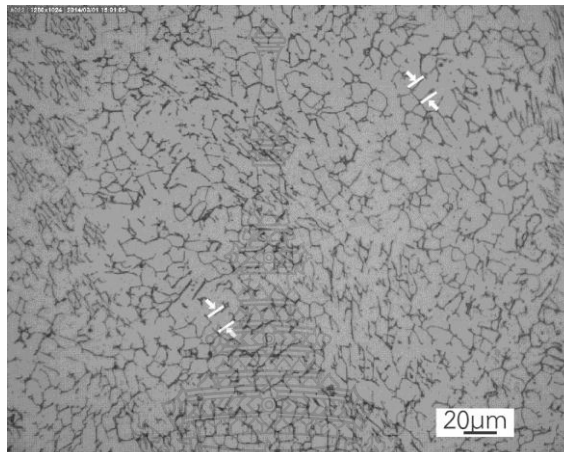
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) เครื่องหมายการค้า Zeiss รุ่น AX10 Imager A1m ที่กำลังขยาย 50-500 เท่า ดังภาพที่ 3.15 โดยนำชิ้นงานส่วนที่ตรวจโครงสร้างมหภาคมาตรวจดูโครงสร้างจุลภาคเพื่อดูการกระจายตัวลักษณะของโครงสร้างเดนไดรต์ บริเวณแนวเชื่อม (Weld Zone) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน ดังภาพที่ 3.16 และทำการวัดขนาดระยะห่างระหว่างเดนไดรต์ ดังภาพที่ 3.17 และทำการการบันทึกผลและวิเคราะห์ในบทต่อไป



ภาพที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



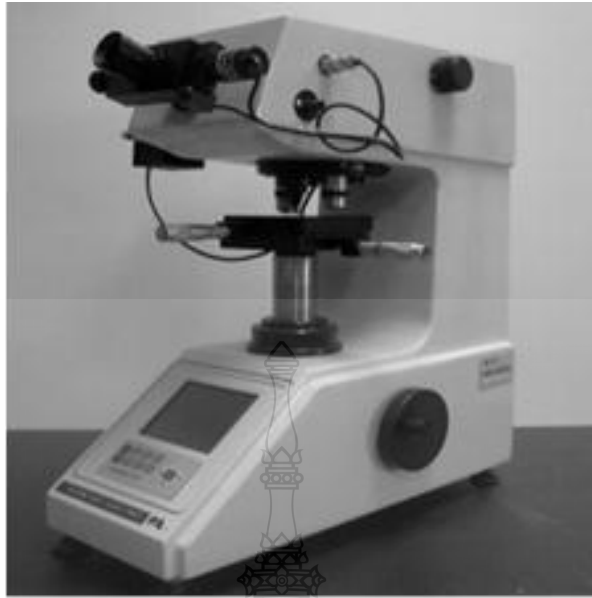
ภาพที่ 3.16 ตำแหน่งตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค



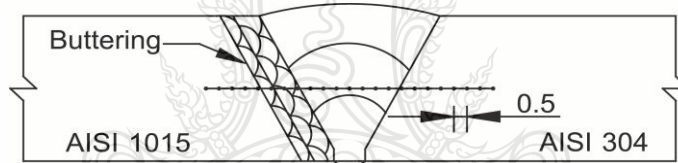
ภาพที่ 3.17 ตำแหน่งการวัดขนาดระยะห่างระหว่างเดนไดรต์

3.3.4 การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส

ขั้นตอนนี้ขึ้นงานตรวจสอบถูกเตรียมเพื่อให้สามารถนำชิ้นตรวจสอบนั้นไปทำการทดสอบความแข็งได้โดยนำไปขัดด้วยกระดาษทรายน้ำตั้งแต่เบอร์ 360-1200 ตามลำดับ เพื่อให้ชำระสิ่งสกปรกออกให้หมดและทำให้ผิวรอยกดมีความมันวาวมากที่สุด เพื่อป้องกันการวัดขนาดของผิวรอยกดความแข็งผิดพลาดซึ่งเกิดจากการขัดกระดาษทรายไม่เรียบ โดยแสดงขั้นตอนการขัดกระดาษ ดังภาพที่ 3.12 และขัดจนถึงกระดาษทรายเบอร์สุดท้ายล้างด้วยน้ำและเช็ดทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ เป่าแห้งด้วยลมและทำการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E92-82 [18] โดยใช้การทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส (Micro Vickers) เครื่องหมายการค้า Controls Digital รุ่น DM 2 สามารถอ่านผลการทดสอบจากเครื่องโดยตรงเป็นตัวเลขดิจิทัล ดังภาพที่ 3.18 โดยใช้เครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์สกดลากผ่านเป็นเส้นตรงขวางแนวเชื่อมทางด้านวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 ผ่านบริเวณรอยเชื่อมมาทางด้านวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 มีระยะห่างของรอยกด 0.5 มม. โดยใช้แรงในการกด 10 กิโลกรัมแรง (kgf) และเวลาในการกดแช่ 10 วินาที ดังภาพที่ 3.19



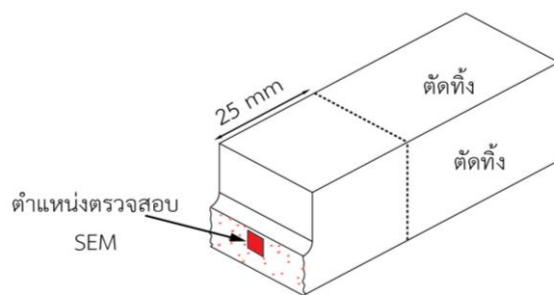
ภาพที่ 3.18 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส (Micro Vickers)



ภาพที่ 3.19 ระยะการทดสอบความแข็ง

3.3.5 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope : SEM)

นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านทดสอบแรงกระแทกมาทำการตัดให้มีขนาดกว้างยาวไม่เกิน 25 x 25 มม. โดยใช้เครื่องตัดชิ้นงานที่มีระบบหมุนเวียนน้ำหล่อเย็นขณะทำการตัดเพื่อให้ได้ขนาดของชิ้นตรวจสอบตามข้อกำหนดของเครื่องตรวจสอบแล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการตัดลดขนาดนำไปตรวจบริเวณที่พังทลาย ตำแหน่งตรวจสอบ ดังภาพที่ 3.20 และทำตรวจสอบด้วยกำลังขยายของตำแหน่ง การตรวจสอบตั้งแต่ 15-200,000 เท่า ด้วยเครื่องตรวจสอบจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดรุ่นJSM-5410LV ดังภาพที่ 3.21 เพื่อดูความแตกต่างของการพังทลาย



ภาพที่ 3.20 ตำแหน่งตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



ภาพที่ 3.21 เครื่องตรวจสอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

บทที่ 4

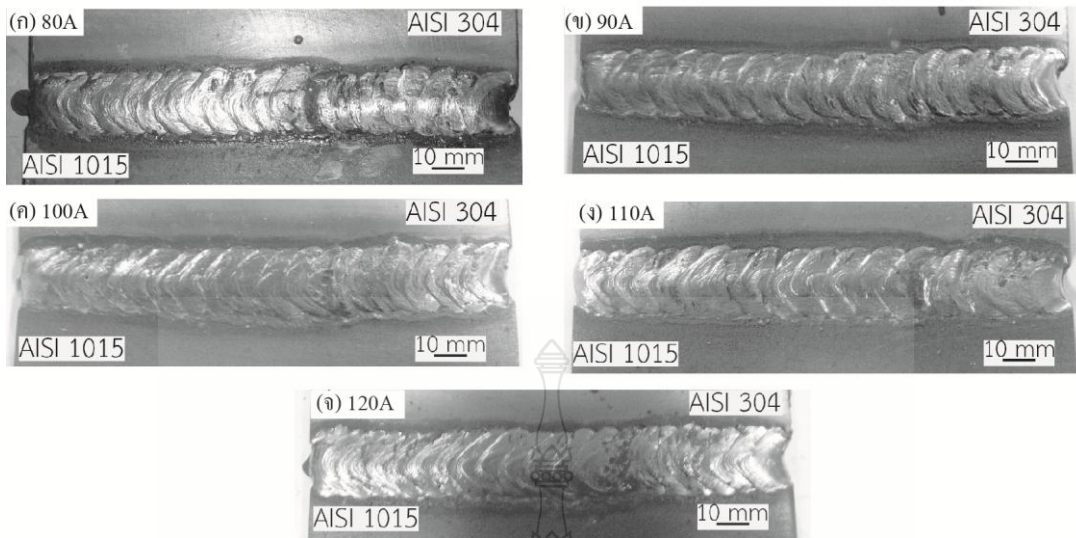
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การดำเนินการเชื่อมอาร์กหลอดหุ้มฟลักซ์รอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ชั้นส่วนลำเลียงอ้อย ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

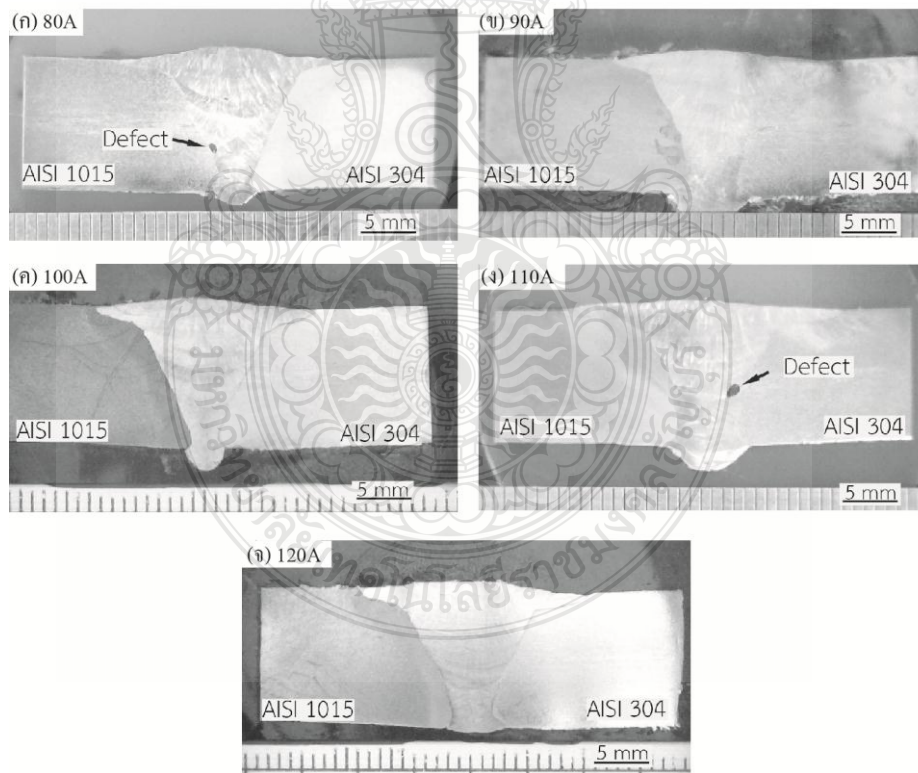
4.1 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนเชื่อมแบบไม่รองพื้น

4.1.1 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนเชื่อมแบบไม่รองพื้นของลวด E307

ภาพที่ 4.1 ผิวหน้าแนวเชื่อมรอยต่อชนในการเชื่อมแบบไม่รองพื้นของลวดเชื่อม E307 ที่กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์ ผลการตรวจสอบด้วยตาเปล่าพบว่า แนวเชื่อมที่ได้ทำการเชื่อมโดยช่างเชื่อมมีความสมบูรณ์ไม่พบจุดบกพร่องใดๆ เช่น ตามด หรือ โพรงอากาศบนผิวหน้าแนวเชื่อม รอยต่อชนที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่มีค่าต่ำ ลักษณะของเกล็ดผิวหน้าแนวเชื่อมมีรูปร่างโค้งมนขณะที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่เพิ่มสูงขึ้น 100-120 แอมแปร์ ลักษณะของเกล็ดผิวหน้าแนวเชื่อมมีรูปร่างโค้งแหลมดังภาพที่ 4.1 (ก)-(จ) ขณะภาพที่ 4.2 แสดงการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนการเชื่อมแบบไม่รองพื้นของลวด E307 พบว่า การเชื่อมที่กระแสเชื่อมเริ่มที่ 80 แอมแปร์ พบจุดบกพร่องเป็นลักษณะวงกลมทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 ดังภาพที่ 4.2 (ก) ขณะที่ทำการเชื่อมที่กระแส 90 แอมแปร์ และ 100 แอมแปร์ ผิวหน้าตัดรอยเชื่อมต่อชนไม่พบจุดบกพร่อง ดังภาพที่ 4.1 (ข) และ (ค) และเมื่อเพิ่มกระแสเชื่อมที่ 110 และ 120 แอมแปร์ พบว่า ความสูงของผิวเชื่อมมีค่าแนวโน้มลดต่ำลงและไม่พบจุดบกพร่องที่กระแสเชื่อม 120 แอมแปร์ ดังภาพที่ 4.2 (จ) แต่ที่กระแสเชื่อม 110 แอมแปร์ พบจุดบกพร่องทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ดังภาพที่ 4.2 (ง) ซึ่งจุดบกพร่องมีลักษณะคล้ายกับกระแสเชื่อมที่ 80 แอมแปร์ ภาพที่ 4.2 (ก) สาเหตุจากการเกิดจุดบกพร่องทางผู้วิจัย คาดว่าเกิดเม็ดโลหะ (Spatter) [19] หรือการป้อนกระแสเข้าไปในบริเวณรอยเชื่อมน้อยหรือต่ำและตัวแปรในการเชื่อม เช่น กระแสเชื่อม แรงดันไฟฟ้า ความเร็วในการเดินเชื่อม ระยะอาร์กของลวดเชื่อม [20]

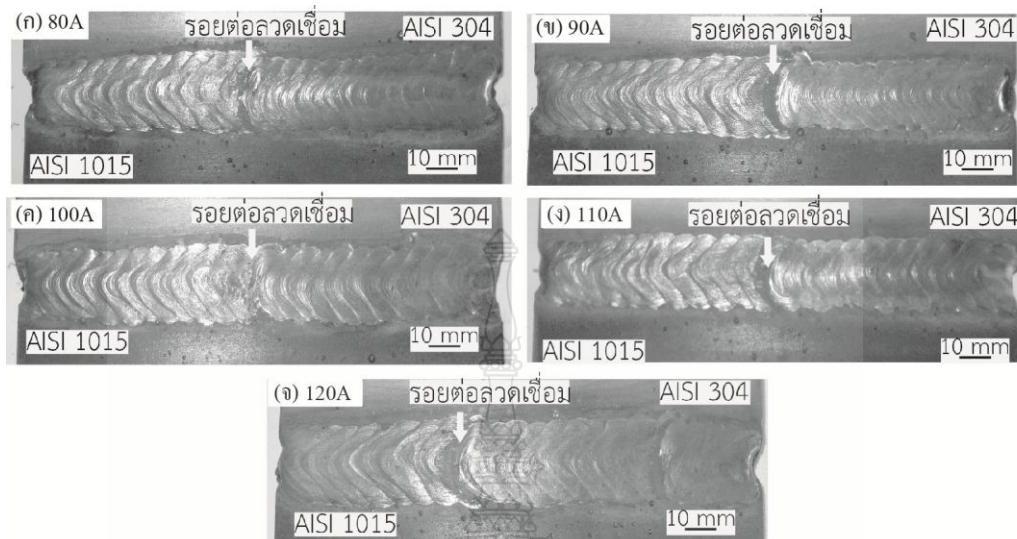


ภาพที่ 4.1 ผิวแนวเชื่อมรอยต่อชนแบบไม่รองพื้นของลวด E307 กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์

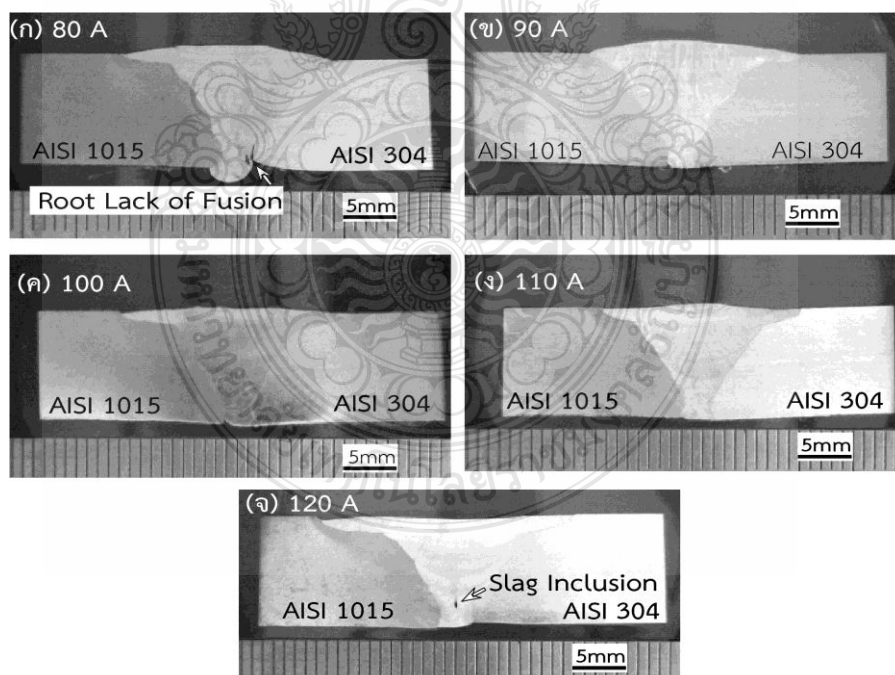


ภาพที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคเชื่อมรอยต่อชนแบบไม่รองพื้นของลวด E307 กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์

4.1.2 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนเชื่อมแบบไม่รองพื้นของลวด E308



ภาพที่ 4.3 ผิวแนวเชื่อมรอยต่อชนแบบไม่รองพื้นของลวด E308 กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์

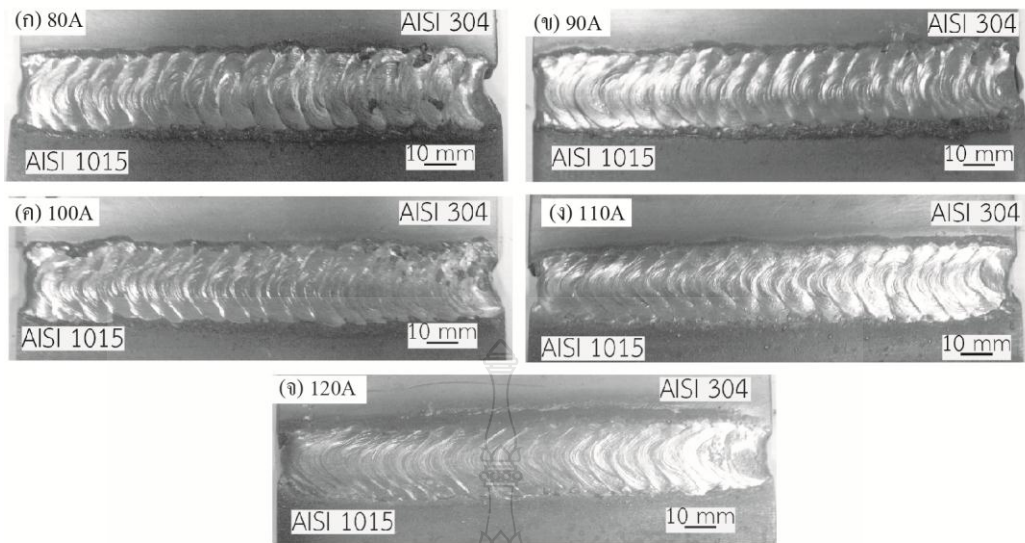


ภาพที่ 4.4 โครงสร้างมหภาคเชื่อมรอยต่อชนแบบไม่รองพื้นของลวด E308 กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์

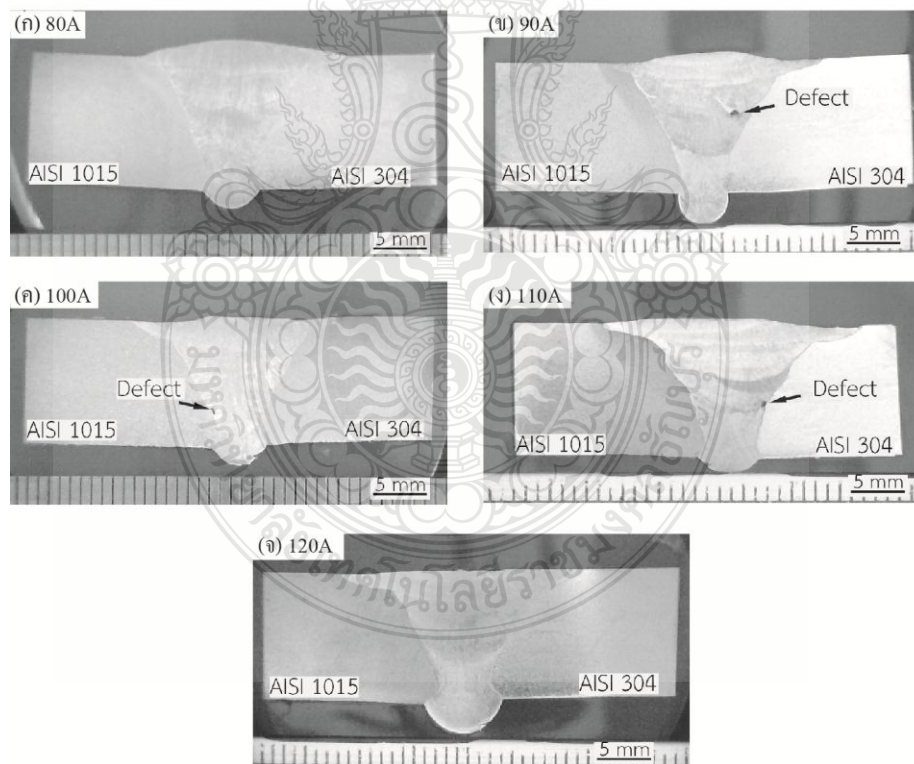
ผลการตรวจสอบด้วยตาเปล่าผิวหน้าแนวเชื่อมรอยต่อชนในการเชื่อมแบบไม่รองพื้นของ ลวดเชื่อม E308 ที่กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์ ดังภาพที่ 4.3 พบว่า แนวเชื่อมที่ได้ทำการเชื่อมโดย ช่างเชื่อมมีความสมบูรณ์ ไม่พบจุดบกพร่องใดๆ แต่พบรอยต่อแนวเชื่อมที่เกิดการเปลี่ยนลวดเชื่อม E308 บริเวณตรงกลางแนวเชื่อมทุกสภาวะกระแสเชื่อม ดังภาพที่ 4.3 (ก) - (จ) และเมื่อเปรียบเทียบกับ ลวดเชื่อม E307 พบว่า ลักษณะเกล็ดของลวด E308 ผิวหน้าแนวเชื่อมมีรูปร่างโค้งแหลมกว่า และภาพ ที่ 4.4 แสดงผลการตรวจโครงสร้างมหภาคที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์ เพื่อจุดประสงค์ ในการตรวจสอบความสมบูรณ์ของโลหะเชื่อมพบว่า ที่กระแสเชื่อม 80 แอมแปร์ พบจุดบกพร่องการ หลอมไม่ติดบางส่วน (Lack Of Fusion) ของรอยเชื่อมที่ไม่ติดกันระหว่างโลหะเชื่อมกับโลหะชิ้นงาน ตรงฐานเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก AISI304 ดังภาพที่ 4.4 (ก) มีขนาดของจุดบกพร่อง กว้างเฉลี่ย 0.198 มม. และยาวประมาณ 1.975 มม. ดังภาพที่ 4.2 (ข) - (ง) อย่างไรก็ตามเมื่อเชื่อมด้วย กระแสที่มีค่าสูง คือ 120 แอมแปร์ ที่แนวเชื่อมแรกแนวแรกเกิดการฝังในของสแลก (Slag Inclusion) ที่ ทำการเชื่อมขึ้น ดังภาพที่ 4.4 (จ) ขนาดของสแลกฝังในนี้มีค่าความกว้าง 0.359 มม. ยาว 1.051 มม.

4.1.3 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนเชื่อมแบบไม่รองพื้นของลวด E309

ภาพที่ 4.5 ผลการตรวจสอบด้วยตาเปล่าผิวหน้าแนวเชื่อมรอยต่อชนในการเชื่อมแบบ ไม่รองพื้นของลวดเชื่อม E309 ที่กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์ พบว่า แนวเชื่อมที่ทำการเชื่อมโดยช่าง เชื่อมมีความสมบูรณ์ไม่พบจุดบกพร่องใดๆ แต่ผิวหน้าแนวเชื่อมมีความคล้ายกับลวดเชื่อม E307 คือ เมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นลักษณะเกล็ดผิวหน้าแนวเชื่อมมีความโค้งแหลมขึ้นดังภาพที่ 4.5 ภาพที่ 4.6 แสดงการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนเชื่อมแบบไม่รองพื้นของลวด E309 พบว่า บริเวณผิวหน้ารอยเชื่อมด้านมีความนูนสูงที่กระแสเชื่อม 80 แอมแปร์ และบริเวณหน้าตัดรอยต่อชนมี ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมไม่พบจุดบกพร่อง เช่น โพรงแก๊ส (Blowhole) สแลกฝังใน (Slag Inclusion) ดังภาพที่ 4.6 (ก) และเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น 90-110 แอมแปร์ ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมมีแนวโน้มความสูงของผิวหน้ารอยเชื่อมลดลงตามกระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้น และยังพบจุดบกพร่องทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ดังภาพที่ 4.6 (ข) และ (ง) ขณะที่โครงสร้าง จุลภาคที่เชื่อมด้วยกระแส 100 แอมแปร์ ดังภาพที่รูป 4.6 (ค) มีจุดบกพร่องเกิดขึ้นทางด้านเหล็กกล้า คาร์บอน AISI1015 แต่การเกิดจุดบกพร่องของลวดเชื่อมชนิด E309 มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ จุดบกพร่องของลวดเชื่อมชนิด E307 ในภาพที่ 4.2 (ก) และ (ง)

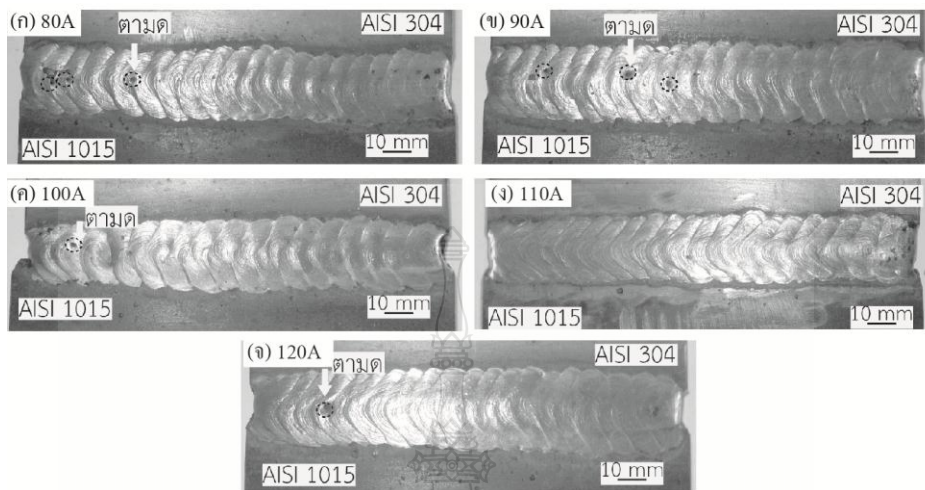


ภาพที่ 4.5 ผิวแนวเชื่อมรอยต่อชนแบบไม่รองพื้นของลวด E309 กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์

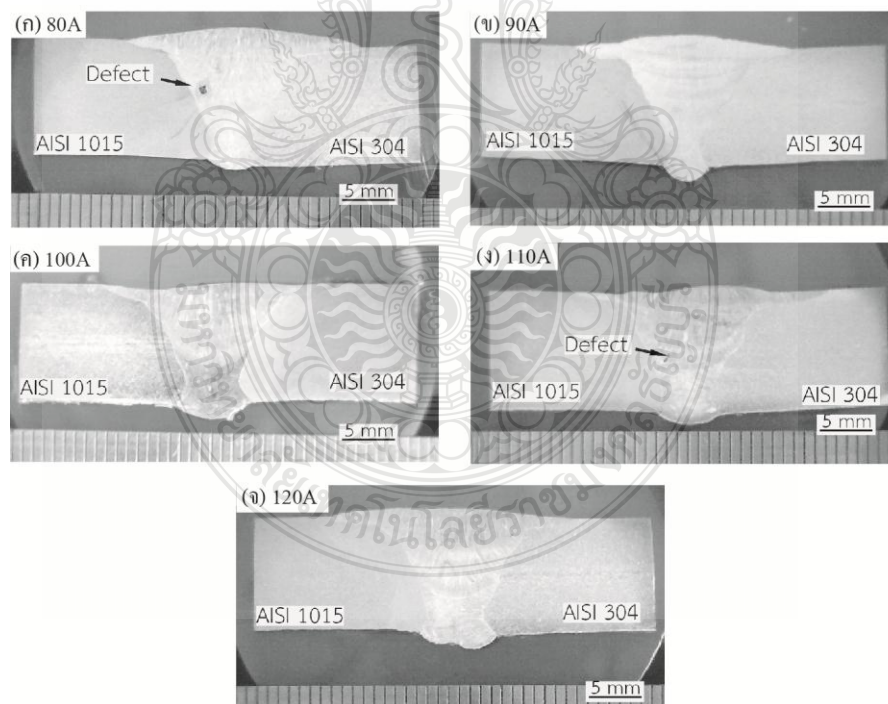


ภาพที่ 4.6 โครงสร้างมหภาคเชื่อมรอยต่อชนแบบไม่รองพื้นของลวด E309 กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์

4.1.4 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนเชื่อมแบบไม่รองพื้นของลวด E309



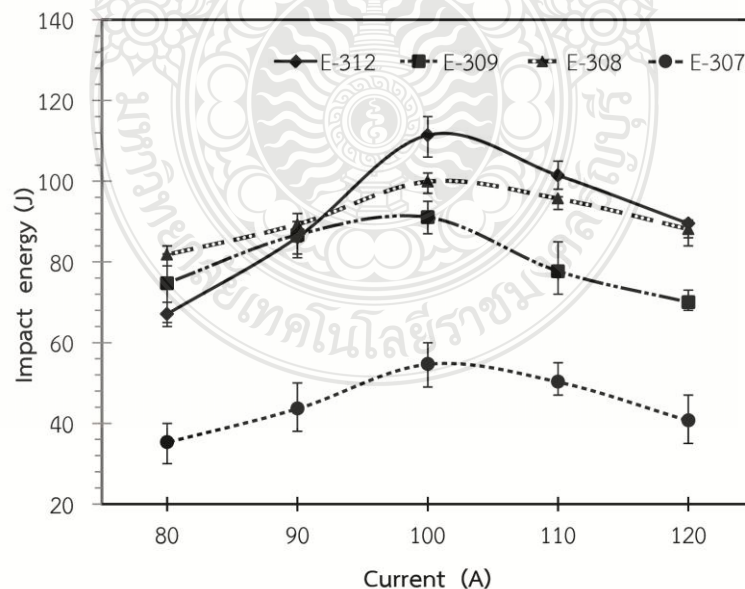
ภาพที่ 4.7 ผิวแนวเชื่อมรอยต่อชนแบบไม่รองพื้นของลวด E312 กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์



ภาพที่ 4.8 โครงสร้างมหภาคเชื่อมรอยต่อชนแบบไม่รองพื้นของลวด E312 กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์

ภาพที่ 4.7 แสดงผลการตรวจสอบด้วยตาเปล่าผิวหน้าแนวเชื่อมรอยต่อชนในการเชื่อมแบบไม่รองพื้นของลวดเชื่อม E312 ที่กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์ พบว่า แนวเชื่อมที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่ำ 80-90A ดังภาพที่ 4.7 (ก) และ (ข) พบจุดบกพร่องตามคบนผิวหน้าแนวเชื่อมปริมาณหลายจุดบนผิวหน้าแนวเชื่อมขณะที่เพิ่มกระแสเชื่อมสูงขึ้น 100-120 แอมแปร์ จุดบกพร่องตามคมีปริมาณลดลง ดังภาพที่ 4.7 (ค) - (จ) เมื่อเปรียบเทียบจุดบกพร่องตามคกับรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวด E307, E308 และ E309 พบว่า ไม่ปรากฏจุดบกพร่องตามคบนผิวหน้าแนวเชื่อมทั้ง 3 ชนิด และภาพที่ 4.8 แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวด E312 แบบไม่รองพื้นพบว่า ที่กระแสเชื่อมต่ำ 80-90 แอมแปร์ ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมมีความนูนสูงและพบจุดบกพร่องบนผิวหน้ารอยเชื่อมทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 ดังภาพที่ 4.8 (ก) ขณะที่รอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแส 90 แอมแปร์ ดังภาพที่ 4.8 (ข) ไม่พบจุดบกพร่องใดๆภาคตัดแนวเชื่อม เมื่อเพิ่มกระแสเชื่อมสูงที่ 100-120 แอมแปร์ ลักษณะความนูนของผิวหน้ารอยเชื่อมลดลงและพบจุดบกพร่องที่กระแสเชื่อม 110 แอมแปร์ บริเวณทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอน ขนาดของจุดบกพร่องมีขนาดเล็กกว่ากระแสเชื่อมที่ 80 แอมแปร์ ดังภาพที่ 4.8 (จ) ขณะที่กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ และ 120 แอมแปร์ ไม่พบจุดบกพร่องแต่อย่างใดในรอยเชื่อม

4.2 ความแข็งแรงกระแทกของรอยต่อที่เชื่อมแบบไม่รองพื้น

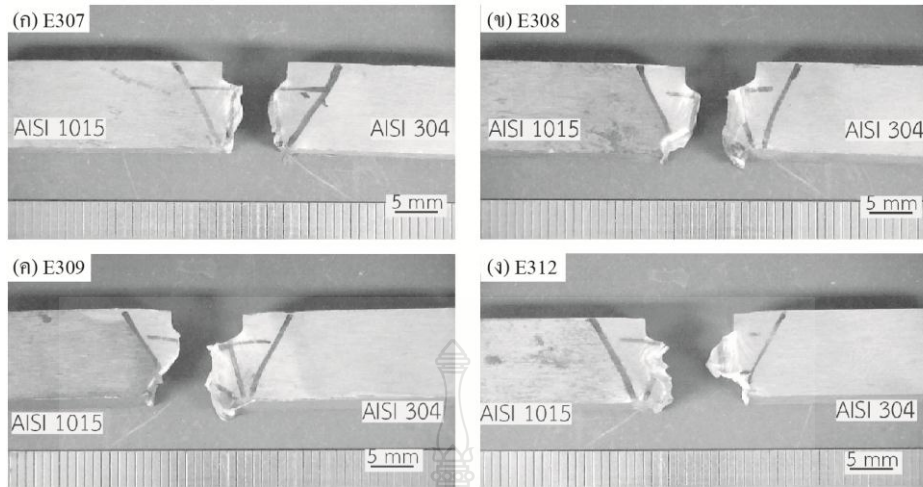


ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ความแข็งแรงกระแทกระหว่างกระแสเชื่อมกับลวดเชื่อม

ภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกและกระแสเชื่อมของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E307, E308, E309 และ E312 พบว่า ที่กระแสเชื่อมเริ่มต้น 80 แอมแปร์ ค่าความแข็งแรงกระแทกของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวด E308 มีค่าความแข็งแรงสูงกว่ารอยต่อที่เชื่อมด้วยลวด E307, E309 และ E312 ขณะที่ความแข็งแรงกระแทกของรอยต่อที่เชื่อมที่ใช้ลวด E307 มีความแข็งแรงกระแทกต่ำสุดของลวดเชื่อมทั้ง 4 ชนิด ที่กระแสเชื่อม 80 แอมแปร์ ขณะที่ทำการเพิ่มกระแสเชื่อมเป็น 90-100 แอมแปร์ พบว่า ค่าความแข็งแรงกระแทกของแนวเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามกระแสเชื่อมที่สูงขึ้นลวดเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกของแนวเชื่อมสูงที่กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ คือรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E312 มีค่าความแข็งแรงกระแทกประมาณ 112 จูล แต่พบว่า ที่กระแสเชื่อม 90 แอมแปร์ ค่าความแข็งแรงกระแทกของแนวเชื่อมที่ใช้ลวดเชื่อม E308, E309 และ E312 มีค่าความแข็งแรงกระแทกของแนวเชื่อมมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงประมาณ 80-90 จูล ขณะที่ลวดเชื่อม E307 มีค่าความแข็งแรงกระแทกของแนวเชื่อมต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับลวดเชื่อม E308, E309 และ E312 และเมื่อทำการเพิ่มกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นที่เป็น 110-120 แอมแปร์ พบว่า ค่าความแข็งแรงกระแทกของแนวเชื่อมมีแนวโน้มลดลงของลวดเชื่อมทั้ง 4 ชนิด

4.3 รูปแบบการพังทลายของรอยต่อชนเชื่อมแบบไม่รองรับ

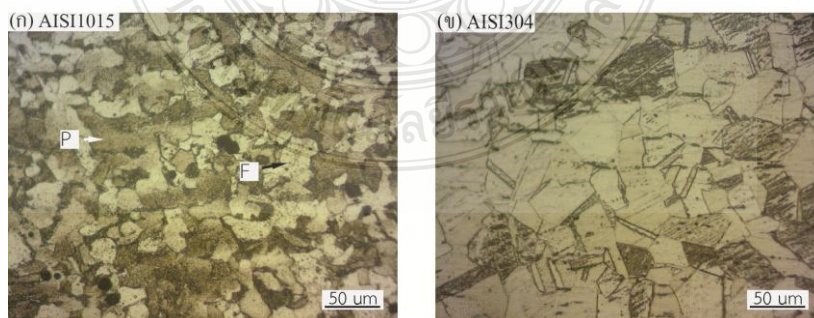
ภาพที่ 4.10 แสดงผลการตรวจสอบเปรียบเทียบลักษณะการพังทลายบริเวณด้านข้างรอยต่อ โดยทำการเปรียบเทียบชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดของลวดเชื่อมทั้ง 4 ชนิด พบว่า รูปแบบการพังทลายเริ่มเกิดขึ้นตรงกลางมุมบากร่อง U notch ทั้ง 2 และทิศทางการแตกหักวิ่งผ่านทางด้านบนลงสู่ด้านล่างผ่านเส้นหลอมละลาย (Fusion line) ขอบเขตรอยต่อแนวเชื่อมทางโลหะชิ้นงานทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jang, Hong et al. [21] ในการจำลองการแตกหักทดสอบแรงกระแทกบากร่องวีด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีทิศทางรอยแตกหักไปในทิศทางโลหะชิ้นงาน (Base Metal) และบริเวณกระทบร้อน (Heat Affect Zone : HAZ) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณารอยพังทลายชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงลักษณะการพังทลายเกิดการฉีกขาดที่รุนแรงกว่า ดังภาพที่ 4.10 (ข), (ค) และ(ง) ขณะที่ชิ้นงานทดสอบที่ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกต่ำลักษณะการพังทลายชิ้นงานไม่ขาดหลุดออก ดังภาพที่ 4.10 (ก) ลักษณะการพังทลายฉีกขาดซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกระแทก ดังภาพที่ 4.9 ส่วนรอยฉีกตัวแปรอื่นของลวดเชื่อมทั้ง 4 ชนิด ดังภาคผนวก ก



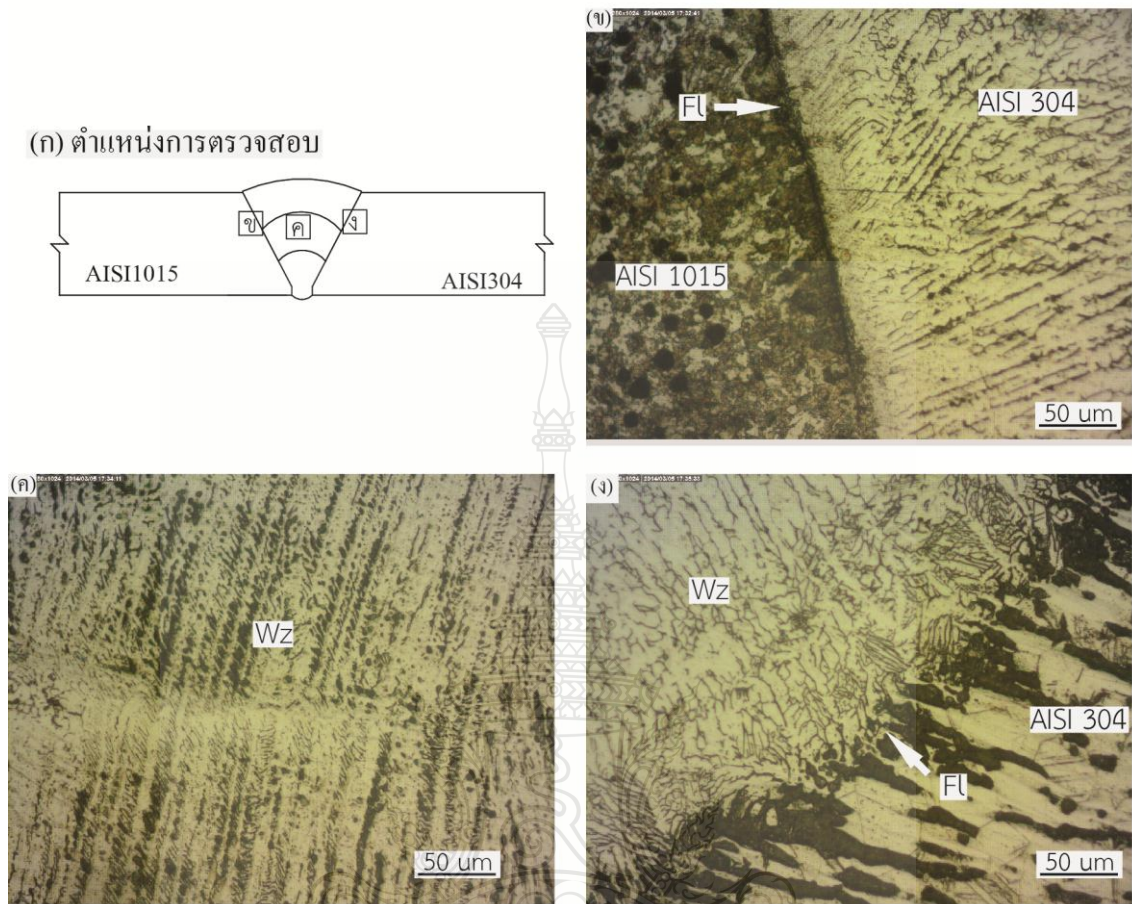
ภาพที่ 4.10 การเปรียบเทียบลักษณะการพังทลายค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดที่กระแทกเชื่อม 100 แอมแปร์ ของทุกๆลวดเชื่อม (ก) E307 (ข) E308 (ค) E309 (ง) E312

4.4 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนเชื่อมแบบไม่รองพื้น

ภาพที่ 4.11 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ผลการตรวจสอบพบว่า โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอน ประกอบด้วยเฟสเพิร์ลไลต์ที่เข้มและเฟสเฟอร์ไรต์สีขาวดังแสดงด้วยลูกศร P และ F [22] ในภาพที่ 4.11 (ก) เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม ดังภาพที่ 4.11 (ข) พบลักษณะของเฟสเคลต้าเฟอร์ไรต์ที่ผ่านการรีดขึ้นรูปมีลักษณะเป็นแผ่นรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมผืนผ้า [23-25] กระจายทั่วทั้งพื้นที่หลักของการตรวจสอบ



ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาค (ก) เหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015, (ข) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 (F = เฟอร์ไรต์, P = เพิร์ลไลต์ และ Gb = ขอบเกรน)

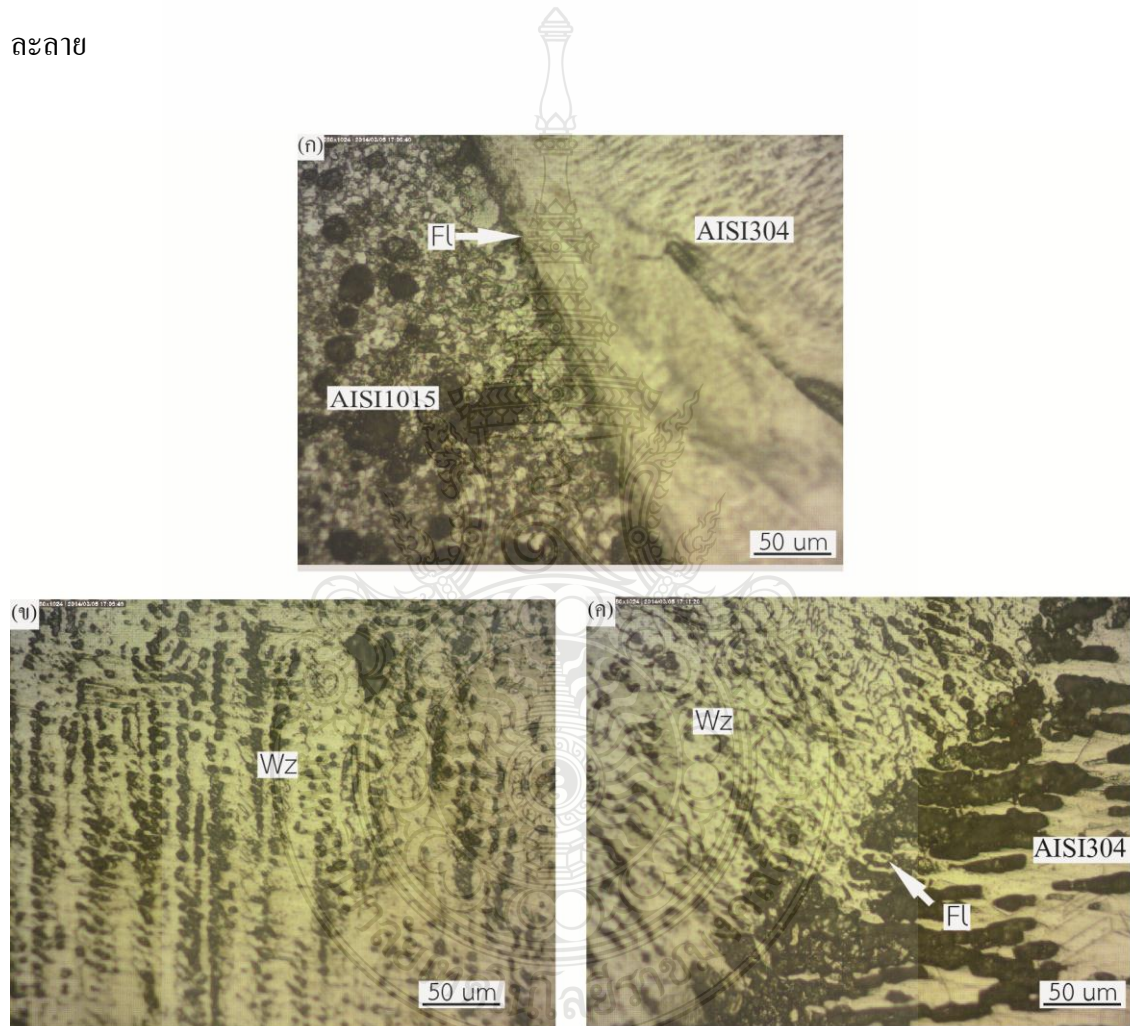


ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E307 และกระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ แบบ ไม่รองพื้น (Fl = เส้นแบ่งเขตการหลอมละลาย, Wz = บริเวณ โลหะเชื่อม)

ภาพที่ 4.12 (ก) แสดงโครงสร้างภาตดรอยต่อที่ประกอบด้วยเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะเชื่อมที่กึ่งกลางของรอยต่อ การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในที่นี้ทำการตรวจสอบที่บริเวณเส้นแบ่งเขตการหลอมละลาย (Fl) ระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนและบริเวณโลหะเชื่อมดังตำแหน่ง (ข) ในรูป 4.12 (ก) พื้นที่โลหะเชื่อม (Wz) ดังตำแหน่ง (ค) ในภาพที่ 4.12 (ก) และบริเวณเส้นแบ่งเขตการหลอมละลายระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและพื้นโลหะเชื่อมดังตำแหน่ง (ง) ในภาพที่ 4.12 (ก) พื้นที่โลหะเชื่อมดังภาพที่ 4.12 (ค) แสดงการก่อตัวของเดนไดรท์ที่มีความเล็กละเอียดกว่าเดนไดรท์ที่เกิดที่เส้นแบ่งขอบเขตการหลอมละลายด้านเหล็กกล้าคาร์บอนและพื้นที่โลหะเชื่อมดังภาพที่ 4.12 (ง) ทิศทางการเรียงตัวของเดนไดรท์มีทิศทางจากด้านล่างมุ่งสู่ด้านบนซึ่งเป็นทิศทางที่

ขนาดกับการถ่ายภาพความร้อนและความแตกต่างจากเดนไดรต์ที่ก่อตัวใกล้เส้นแบ่งขอบเขตการหลอมละลาย ดังภาพที่ 4.12 (ข) และ (ค)

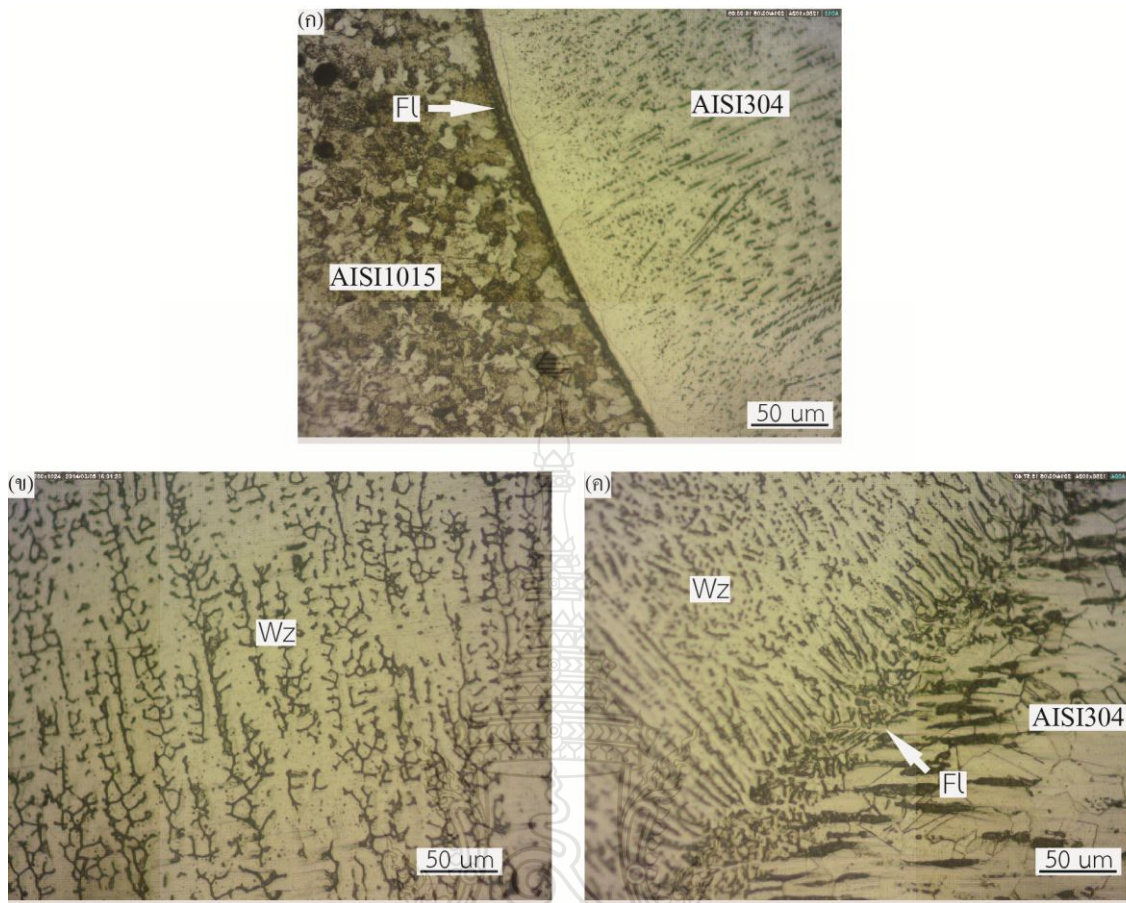
เส้นการแบ่งขอบเขตการหลอมละลายด้านเหล็กกล้าไร้สนิมและพื้นที่โลหะเชื่อม ดังภาพที่ 4.12 (ง) มีขนาดเส้นแบ่งเขตการหลอมละลายที่ใหญ่กว่าขนาดของเดนไดรต์ที่มีขนาดเล็กและละเอียดมากเมื่อตำแหน่งการตรวจสอบเข้าใกล้เส้นแบ่งเขตการหลอมละลาย นอกจากนี้ขนาดของเกรนเหล็กกล้าไร้สนิมมีขนาดเล็กและสั้นลงเมื่อตำแหน่งการตรวจสอบเข้าใกล้เส้นแบ่งเขตการหลอมละลาย



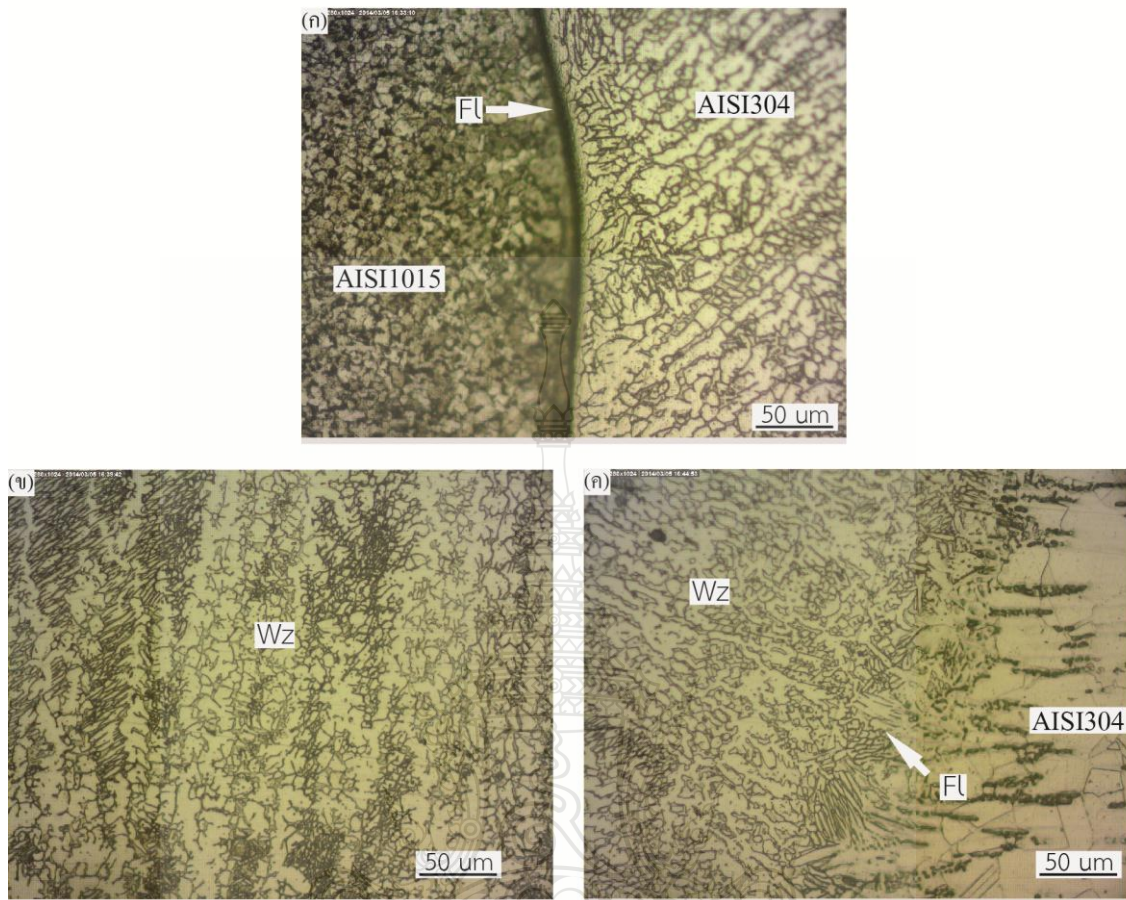
ภาพที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E308 และกระแสเชื่อม 100 แอมแปร์แบบไม่รองพื้น (FL = เส้นแบ่งเขตการหลอมละลาย, Wz = บริเวณรอยเชื่อม)

ภาพที่ 4.13 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ และ ลวดเชื่อม E308 แบบไม่รองพื้นพบ โครงสร้างจุลภาคบริเวณทางด้านรอยต่อระหว่างบริเวณรอยเชื่อม กับเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิมมีการหลอมละลายของลวดเชื่อม E308 ติดกันสมบูรณ์ โดย ไม่ทำให้เกิดจุดบกพร่องระหว่างรอยต่อหรือเส้นแบ่งเขตการหลอมละลาย ดังภาพที่ 4.13 (ก) และ(ค) และที่บริเวณ โลหะเชื่อมลักษณะของ โครงสร้างเดนไดรท์ที่มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ดังภาพที่ 4.13 (ข) การไม่พบจุดพร่องในรอยต่อของโลหะและการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของโครงสร้างเดนไดรท์ คาดว่าส่งผลต่อความแข็งแรงกระแทกสูงและประกอบกับสวนผสมทางเคมีของรอยต่อที่เชื่อมด้วย ลวดเชื่อม E308

ขณะที่รูป 4.14 แสดงการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E309 ที่กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ ที่ให้ผลการทดสอบความแข็งแรงกระแทกสูงสุดพบว่า บริเวณ รอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนกับ บริเวณ โลหะเชื่อม ดังรูป 4.14 (ก) อินเทอร์เฟซมีขนาดกว้างกว่า รอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E307 และขนาดเกรนของเหล็กกล้าคาร์บอนมีลักษณะคล้ายกันแต่ขนาด ของโครงสร้างเดนไดรท์ทางด้าน โลหะเชื่อมบริเวณ ใกล้เส้นแบ่งเขตการหลอมละลายมีขนาดสั้นกว่าเมื่อ เปรียบเทียบกับรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E307 ดังภาพที่ 4.2 (ก) ขณะที่รูป 4.14 (ข) แสดงตำแหน่ง การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณ โลหะเชื่อมพบว่า ลักษณะโครงสร้างของเดนไดรท์มีขนาด ใหญ่กว่ารอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E307 ขณะที่บริเวณทางด้าน โลหะเชื่อมกับเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่า บริเวณเส้นแบ่งเขตการหลอมละลายมีการหลอมละลายสมบูรณ์ไม่พบจุดบกพร่องและลักษณะของ เดนไดรท์มีลักษณะเส้นตรงซึ่งแตกต่างกับรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E307



ภาพที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E309 และกระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ แบบไม่รองพื้น (Fl = เส้นแบ่งเขตการหลอมละลาย, Wz = บริเวณรอยเชื่อม)



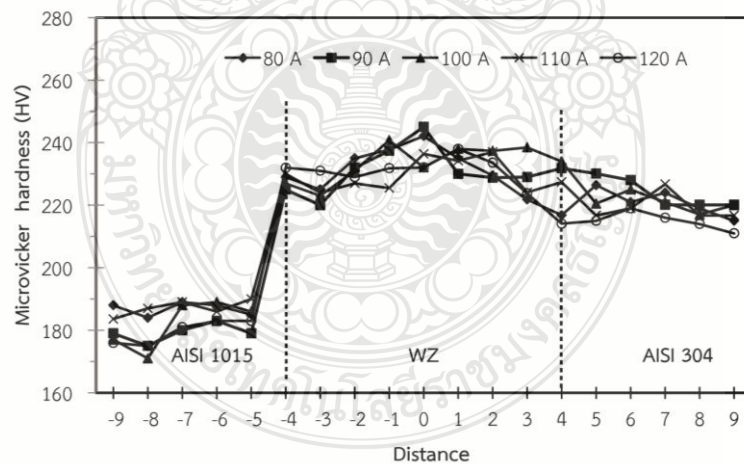
ภาพที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E312 และกระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ แบบไม่รองพื้น (FL = เส้นแบ่งเขตการหลอมละลาย, Wz = บริเวณรอยเชื่อม)

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E312 พบว่า โครงสร้างจุลภาคทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอนกับโลหะเชื่อม ดังภาพที่ 4.15 (ก) แสดงเดนไดรต์ของโลหะเชื่อมใกล้เส้นแบ่งเขตการหลอมละลายมีลักษณะเรียงตัวไม่เป็นทิศทางเดียวกันขณะที่บริเวณโลหะเชื่อมทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิมกับโลหะเชื่อม ดังภาพที่ 4.14 (ค) เดนไดรต์มีการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบเช่นเดียวกันเมื่อเปรียบกับรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E307 และ E309

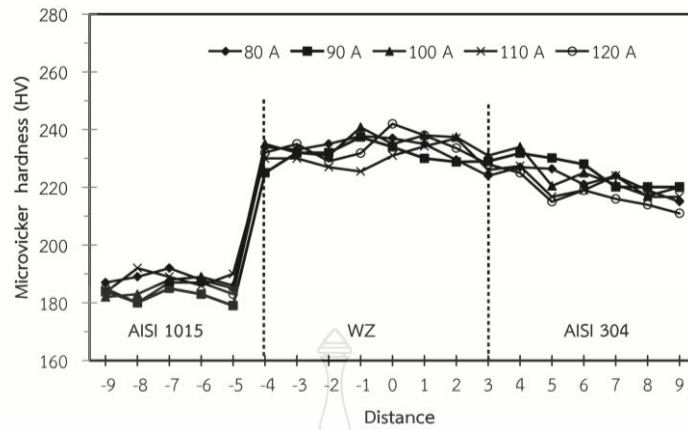
4.5 ความแข็งของรอยต่อชนเชื่อมแบบไม่รองพื้น

ภาพที่ 4.16 แสดงผลการทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบโครงสร้างมหภาคที่ลากผ่านโลหะเชื่อมทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอนมาที่ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม ค่าแนวโน้มความแข็งที่ได้ของการ

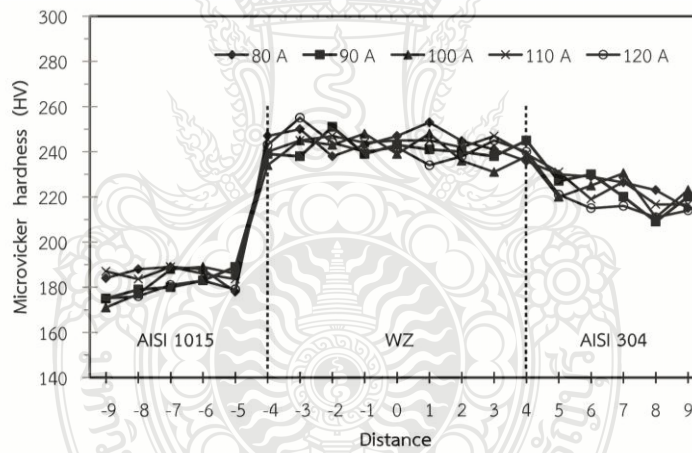
ทดสอบพบว่า รอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสที่แตกต่างกันของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E307 แสดงค่าความแข็งที่คล้ายกัน กล่าวคือ ค่าความแข็งของโลหะฐานด้านเหล็กกล้าคาร์บอนมีค่าต่ำสุดในบริเวณพื้นที่ทำการตรวจสอบความแข็งมีค่าประมาณ 170 HV และค่าความแข็งด้านเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าความแข็งประมาณ 210 HV เมื่อตำแหน่งการวัดค่าความแข็งเข้าสู่พื้นที่ที่กระทบร้อน ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะฐานทั้งสองด้าน ค่าความแข็งของพื้นที่ที่กระทบร้อนมีค่าสูงสุดที่เส้นหลอมละลาย (Fusion line) ซึ่งเป็นเส้นแบ่งพื้นที่หลอมละลายและพื้นที่ที่กระทบร้อน ความแข็งโลหะเชื่อมของรอยต่อมีค่าความแข็งสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ต่างๆ ของรอยต่อ การเกิดความแข็งสูงสุดเกิดขึ้นเป็นการเติมโลหะผสมที่เป็นส่วนผสมในลวดเชื่อมเพื่อเพิ่มสมบัติต่างๆ ของโลหะเชื่อม Wu, Lu et al.[26] ได้อธิบายว่า สาเหตุเกิดการได้รับความความร้อนซ้ำ การเชื่อมหลายชั้นหรือการเชื่อมซ้อนแนว (Multi-pass) โครงสร้างโลหะที่เกิดการแข็งตัวทำให้ค่าความแข็งสูงขึ้นได้ เมื่อเปรียบเทียบความแข็งของลวดเชื่อมแต่ละชนิดพบว่า ความแข็งของโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวด E312 มีความแข็งสูงสุดบริเวณโลหะเชื่อมมีค่าความแข็งประมาณ 260-270 HV ดังภาพที่ 4.19 และเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวด E309 และ E307 ดังภาพที่ 4.18 และ 4.16 มีค่าความแข็งบริเวณโลหะเชื่อมประมาณ 230-250 HV และ 220-240 HV แต่ที่ค่าความแข็งของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E308 ดังภาพที่ 4.17 มีค่าความแข็งใกล้เคียงกับรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวด E307



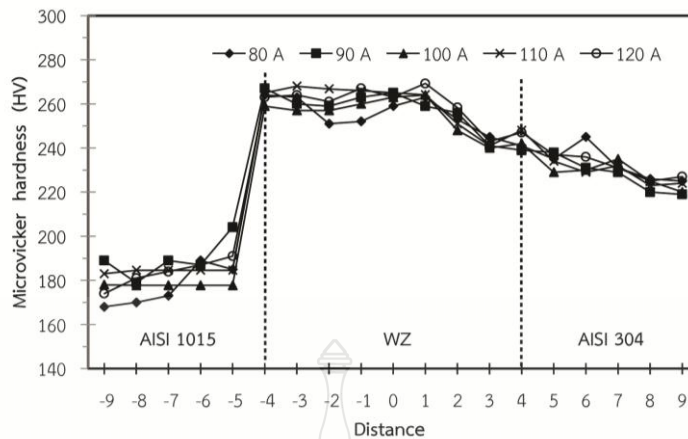
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและตำแหน่งการทดสอบที่ลากผ่านโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E307 แบบไม่รองพื้น



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและตำแหน่งการทดสอบที่ลากผ่านโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E308 แบบไม่รองพื้น



ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและตำแหน่งการทดสอบที่ลากผ่านโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E309 แบบไม่รองพื้น



ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและตำแหน่งการทดสอบที่ลากผ่าน โลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E312 แบบไม่รองพื้น

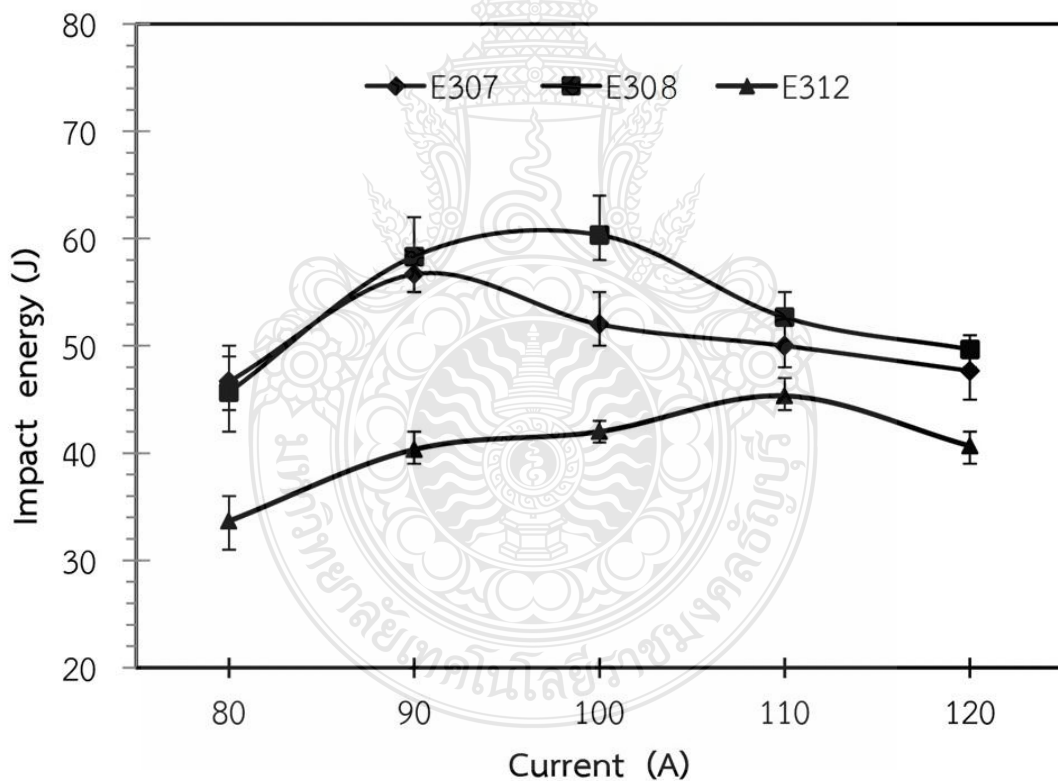
เมื่อพิจารณาส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมพบว่า ความแข็งที่เพิ่มขึ้นคาดว่าเกิดจากการเพิ่มปริมาณของโครเมียมและคาร์บอนที่มีสูงกว่าในลวดเชื่อม E312 ส่งผลทำให้โลหะเชื่อมมีการก่อตัวของโครเมียมคาร์ไบด์ในแนวเชื่อมและส่งผลทำให้ค่าความแข็งของโลหะเชื่อมสูง การเพิ่มปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ในเนื้อโลหะเชื่อมที่สามารถส่งผลทำให้ความแข็งของโลหะเพิ่มขึ้นเกิดขึ้นได้ในโลหะเชื่อมตัวอื่นๆ เช่น ในเหล็กกล้าผสม 4140 ที่รายงานให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความแข็งของโลหะเชื่อมเมื่อตำแหน่งการทดสอบมีเฟสที่ประกอบด้วยโลหะโครเมียมและคาร์ไบด์สูง [27] และเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมทางเคมีของธาตุโครเมียมและคาร์บอน

การเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุผสมที่ก่อให้เกิดความแข็งในเนื้อโลหะเชื่อมคือ โครเมียมที่เกิดการกระจายตัวในเนื้อโลหะทำให้ค่าความแข็งของโลหะมีค่าสูง เกิดการก่อตัวของโครเมียมคาร์ไบด์และอาจก่อให้เกิดโครงสร้างมาเทนไซต์ในรอยต่อโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนดิกได้ [28] หากมีการพิจารณาการกระจายตัวของโครเมียมในเนื้อโลหะอาจพบได้ว่า โครเมียมสามารถทำให้ค่าดูดซับพลังงานของรอยต่อโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นได้ [29] และเมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมตรงตำแหน่งร่องบากของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E307 กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ ซึ่งเป็นสภาวะที่แสดงค่าการดูดซับพลังงานที่ต่ำกว่า และรอยต่อที่เชื่อมด้วย E312 กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ ซึ่งเป็นสภาวะแสดงค่าการดูดซับพลังงานที่สูงกว่าในการทดลองนี้ ลักษณะของเดนไดรท์ที่ก่อตัวขึ้นในโลหะเชื่อม มีทิศทางที่พุ่งขึ้นด้านบนของผิวเชื่อมเช่นเดียวกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบขนาดความกว้างของ

เคนไดร์ทพบว่า เคนไดร์ทของชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม E312 นั้นให้ขนาดของเคนไดร์ทที่มีความโตมากกว่าและความสามารถในการรับแรงได้ดีกว่า

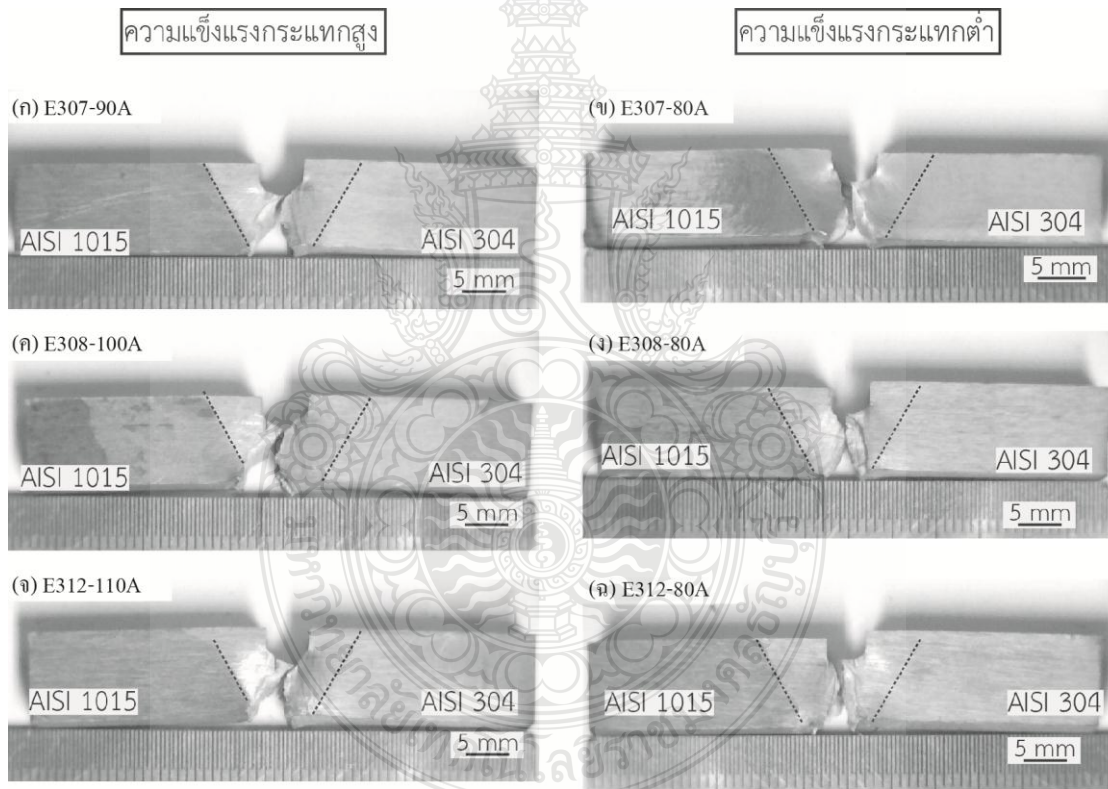
4.6 การเปรียบเทียบสมบัติของรอยต่อชนเชื่อมแบบรองพื้น (Buttering)

การทดสอบหาสมบัติรอยต่อชนการเชื่อมแบบรองพื้น (Buttering) ระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 กับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 โดยทำการทดลองเชื่อมหาค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดของลวดเชื่อมทั้ง 3 ชนิด ประกอบด้วย ลวด E307, E308 และ E312 และกระเชื่อม 80-120 แอมแปร์ เพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงกระแทกและนำค่าความแข็งแรงกระแทกที่ดีที่สุดของลวดเชื่อมมาทำการเชื่อมแบบรองพื้นโดยใช้ลวด E309 มาทำการเชื่อมเสริมชั้นและใช้กระแส 80-100 แอมแปร์ ผลการทดลองเชื่อมหาค่าตัวแปรที่ดีที่สุดโดยมีดังนี้



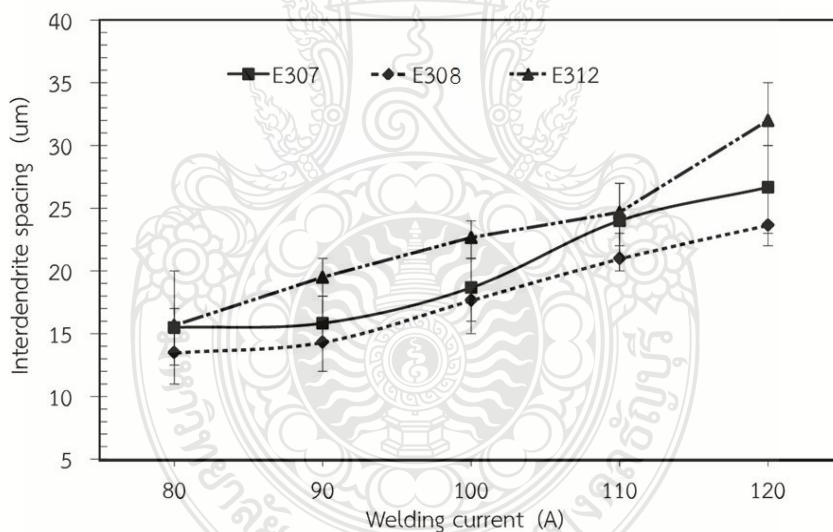
ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกกับกระแสเชื่อมและลวดเชื่อมของรอยต่อชนแบบรองพื้น

ภาพที่ 4.20 แสดงความความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกของรอยต่อที่เชื่อมด้วย กระแส 80-100 แอมแปร์ และลวดเชื่อม 3 ชนิด พบว่า ในการเริ่มต้นใช้กระแสเชื่อมที่ 80 แอมแปร์ ของลวดเชื่อมที่แตกต่างกันพบว่า รอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E307 ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกต่ำ ประมาณ 34 จูล เมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E308 และ E312 ที่ให้ค่าความ แข็งแรงกระแทกใกล้เคียงกันที่ค่าประมาณ 46 จูล ขณะที่ใช้กระแสเชื่อมที่เพิ่มสูงขึ้น 90-100 แอมแปร์ ค่าความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามกระแสเชื่อมที่เพิ่มสูง แต่ที่กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ รอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E308 ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดประมาณ 60 จูล ขณะที่เมื่อเพิ่มกระแสเชื่อม 110-120 แอมแปร์ พบว่า ค่าความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง ดังนั้น จึงทำการเลือกลวดเชื่อม E308 ที่กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ นำไปทำการเชื่อมรองพื้น



ภาพที่ 4.21 การเปรียบเทียบรูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบที่ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกสูง และต่ำ ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวด E307, E308 และ E312 แบบรองพื้น

ภาพที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบ การพังทลายของชั้นทดสอบความแข็งแรง กระแทกที่ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงและต่ำของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้ง 3 ชนิด พบว่า ชั้นทดสอบแรงกระแทกที่ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกต่ำของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวด E307, E308 และ E312 การพังทลายของชั้นทดสอบเกิดขึ้นที่บากร่องตัวยู วังลงสู่ด้านล่าง หรือฐานแนวเชื่อมมีลักษณะ เป็นแนวเส้นตรง ดังภาพที่ 4.21 (ข), (ง) และ (ฉ) ซึ่งแตกต่างจากชั้นทดสอบที่มีค่าความแข็งแรง กระแทกสูง จุดเริ่มต้นของการพังทลายมีลักษณะเกิดขึ้นตรงบริเวณร่องบากตัวยูและมีทิศทางการร้าว ขาด วังเฉียงทำมุมทะแยงประมาณ 45 องศา ด้านบนลงสู่ด้านล่างมาทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอนและ ลักษณะการร้าวของชั้นทดสอบที่ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่ค่า ความแข็งแรงกระแทกต่ำพบว่า การร้าวมีลักษณะที่เสียหายหรือรุนแรงกว่า ดังภาพที่ 4.21 (ค), (ค) และ(จ) เมื่อสังเกตกับกราฟค่าความสัมพันธ์ความแข็งแรงกระแทกระหว่างกระแสเชื่อมกับลวดเชื่อม ดังภาพที่ 4.21 พบว่า มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันส่วนลักษณะการพังทลายร้าวในตัวอย่างอื่น จะแสดงไว้ในภาคผนวก ข

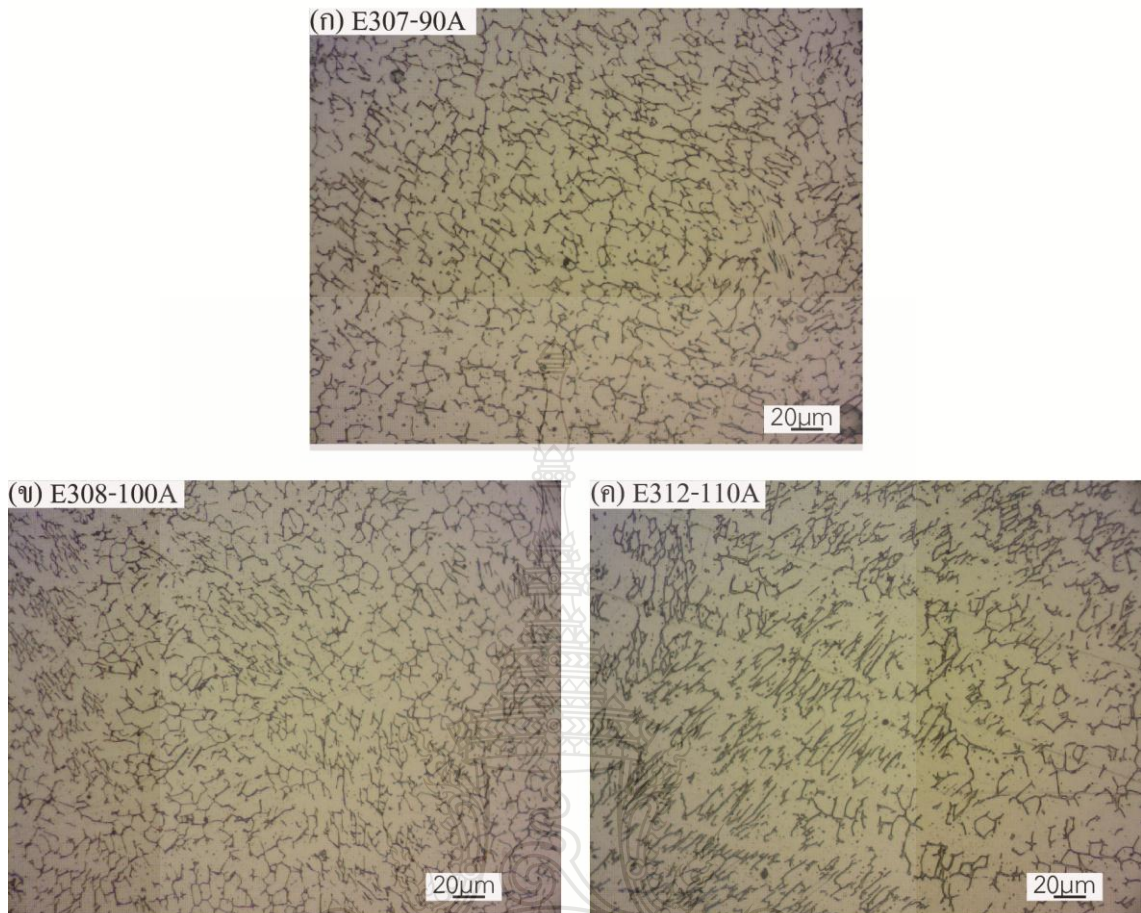


ภาพที่ 4.22 การเปรียบเทียบลักษณะระยะห่างระหว่างเดนไดรต์ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวด E307 E309 และ E312 ที่กระแสเชื่อมต่างๆ แบบรองพื้น

ภาพที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างเดนไดรต์ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวด E307, E308 และ E312 ที่กระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์ พบว่า ขนาดระยะห่างระหว่างเดนไดรต์

ที่กระแสน้ำเริ่มต้น 80 แอมแปร์ ของลวดเชื่อมทั้ง 3 ชนิด มีขนาดของระยะห่างระหว่างเดนไดรต์มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 13-16 ไมโครเมตร และเมื่อเพิ่มกระแสเชื่อมที่ 90 แอมแปร์ พบว่า ระยะห่างระหว่างเดนไดรต์ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวด E307 และ E312 มีขนาดของระยะห่างระหว่างเดนไดรต์สูงกว่ารอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E308 และเมื่อทำการเพิ่มกระแสเชื่อมสูงขึ้นที่ 100-120 แอมแปร์ พบว่า ค่าระยะห่างระหว่างเดนไดรต์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นของลวดเชื่อมทั้ง 3 ชนิด แต่พบว่า รอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E308 มีค่าระยะห่างระหว่างเดนไดรต์ต่ำกว่ารอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E307 และ E312 อย่างไรก็ตามการที่รอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E308 มีขนาดระยะห่างระหว่างเดนไดรต์ที่ต่ำกว่าเล็กน้อย โลหะเชื่อมคาดว่าอาจส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกระแทกสูงและสอดคล้องกับงานวิจัย Kumar And Shahi [30] ที่ทำการศึกษาค่าผลกระทบของความร้อนที่ป้อนเข้าในการเชื่อมอาร์กแท่งทั้งสะเตนเลสสตีลกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ผลการทดลองพบว่า เมื่อความร้อนที่ป้อนเพิ่มสูงขึ้นขนาดความยาวของเดนไดรต์บริเวณ โลหะเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและระยะห่างระหว่างเดนไดรต์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเช่นกันแต่จะให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำเมื่อความร้อนที่ป้อนเข้าสูงขึ้นอย่างขนาดความยาวของเดนไดรต์บริเวณ โลหะเชื่อมของลวดเชื่อมทั้ง 3 ชนิด ที่มีค่าความแข็งแรงกระแทกสูง ประกอบไปด้วยรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E307 ที่กระแสเชื่อม 90 แอมแปร์ ดังภาพที่ 4.23 (ก) และรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E308 ที่กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ และรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E312 ที่กระแสเชื่อม 110 แอมแปร์ ดังภาพที่ 4.23 (ข) และ (ค)



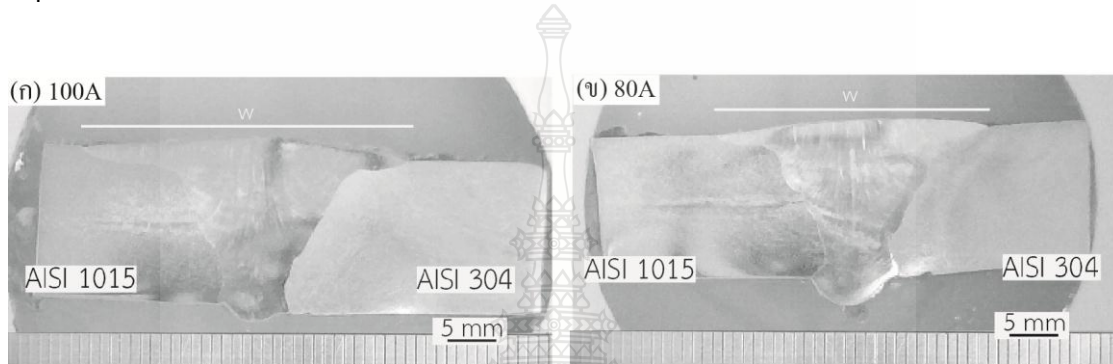


ภาพที่ 4.23 เปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคระยะห่างระหว่างเดนไดรต์ที่มีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E307, E308 และ E312 แบบรองพื้น

4.6.1 สมบัติของรอยต่อชนเชื่อมแบบรองพื้น (Buttering) ลวดเชื่อม E309

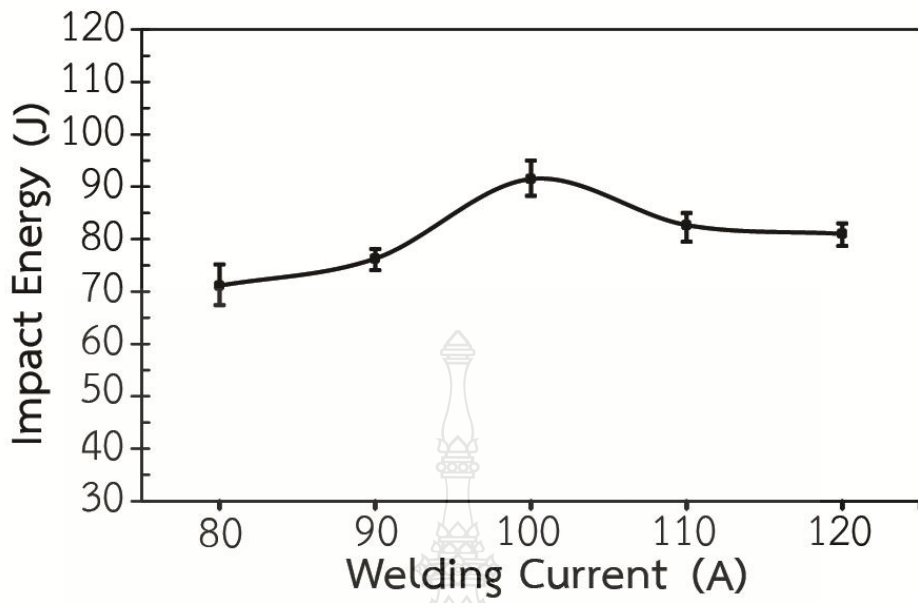
ภาพที่ 4.24 แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E308 รองพื้นด้วยลวด E309 และเชื่อมด้วยกระแส 80-120 แอมแปร์ ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคพบร่องบากตัววีของชิ้นทดสอบมีการละลายเข้ากันอย่างสมบูรณ์ของโลหะเชื่อมและโลหะงานทั้งสองด้าน ไม่พบจุดบกพร่องต่างๆ เช่น ตามด (Pore) โพรงแก๊ส (Blowhole) การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Lack of fusion) ดังภาพที่ 4.24 (ก) สำหรับกระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ และภาพที่ 4.24 (ข) กระแสเชื่อม 80 แอมแปร์ ที่มีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดและต่ำสุด การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคในรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 90, 110 และ 120 แอมแปร์ ไม่พบจุดบกพร่องต่างๆ แต่พบว่า ในการเชื่อมที่มีกระแสเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นค่าความกว้างของผิวหน้ารอยเชื่อมมีความกว้างแนวโน้มสูงขึ้นตามกระแส

เชื่อม ขณะที่การเชื่อมที่ใช้กระแสเชื่อมต่ำพบว่า ค่าความกว้างของผิวหน้ารอยเชื่อมมีค่าต่ำซึ่งสังเกตการวัดขนาดผิวหน้ารอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงกระแสแตกสูงและต่ำมีค่าความกว้างประมาณ 33 และ 27 มม. ดังภาพที่ 4.24 (ก) และ (ข) แสดงบริเวณการวัดขนาดในรูปโครงสร้างมหภาคด้วยสัญลักษณ์ W คือ ความกว้างของผิวหน้ารอยเชื่อมที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kumar and Shahi [30] ที่ทำการเพิ่มความร้อนที่ป้อนเข้าเพิ่มสูงส่งผลต่อความกว้างแนวเชื่อมในการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304

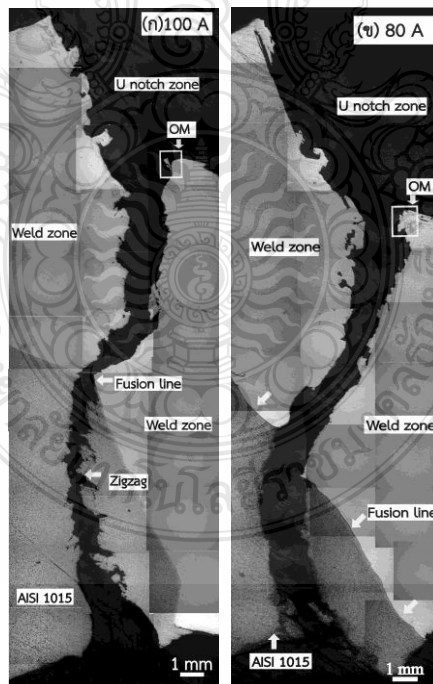


ภาพที่ 4.24 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อเชื่อมด้วยลวดเชื่อม E308 (W = ความกว้างผิวหน้ารอยเชื่อม) แบบรองพื้น

ภาพที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแสแตกและกระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์ รอยต่อที่ทำการเชื่อมรองพื้นด้วยลวดเชื่อม E309 ที่กระแสเชื่อม 100 A และใช้ลวดเชื่อม E308 เชื่อมเสริมชั้นรอยต่อชนจำนวน 3 ชั้น ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงกระแสแตกพบว่า ที่กระแสเชื่อมเริ่มต้น 80 แอมแปร์ มีค่าความแข็งแรงกระแสแตกประมาณ 70 จูล ขณะที่ทำการเพิ่มกระแสเชื่อมสูงขึ้น 90 แอมแปร์ พบว่าค่าความแข็งแรงกระแสแตกมีค่าความแข็งแรงกระแสแตกเพิ่มสูงขึ้นและมีแนวโน้มค่าความแข็งแรงกระแสแตกสูงขึ้นและค่าความแข็งแรงกระแสแตกสูงสุดที่กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ มีค่าความแข็งแรงกระแสแตกประมาณ 92 จูล และเมื่อเพิ่มกระแสเชื่อมสูงขึ้นที่ 110-120 แอมแปร์ พบว่า ค่าความแข็งแรงกระแสแตกมีแนวโน้มลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srinivasan และ Balasubramanian [31] ที่ทำการเพิ่มความร้อนที่ป้อนเข้าเพิ่มสูงขึ้นในการเชื่อมโลหะแก่สปกคลุมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคโดยมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงกระแสแตกของรอยต่อแนวเชื่อมมีค่าความแข็งแรงกระแสแตกมีแนวโน้มลดลง

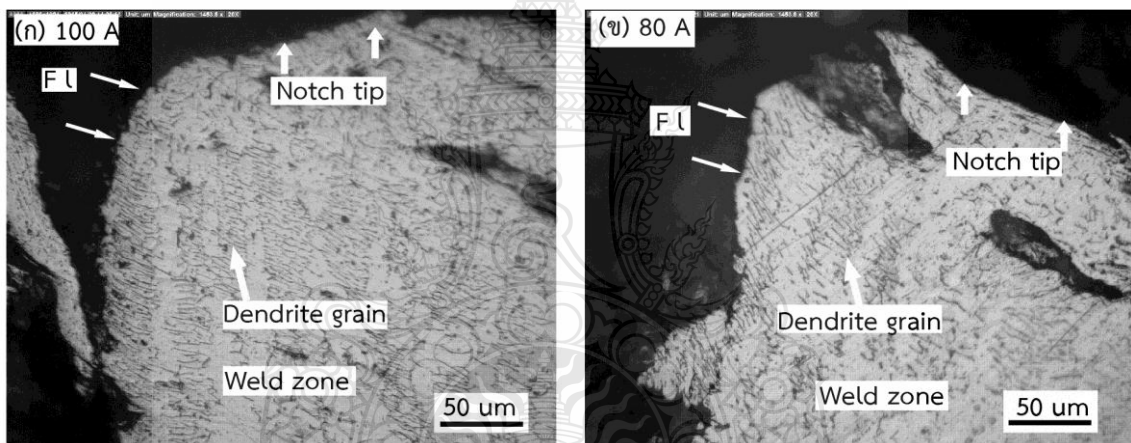


ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของแรงกระแทกและกระแสเชื่อม 80-120 แอมแปร์ ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E308 แบบร่องฟัน



ภาพที่ 4.26 โครงสร้างมหภาครอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบร่องฟัน (ก) กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ และ (ข) กระแสเชื่อม 80 แอมแปร์

ภาพที่ 4.26 แสดงผลการตรวจสอบลักษณะการพังทลายบริเวณด้านข้างรอยเชื่อม โดยเปรียบเทียบชิ้นงานที่มีค่าแรงกระแทกสูงสุดกับความแข็งแรงกระแทกต่ำสุดของรอยต่อที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E308 แบบรองพื้นพบว่า ลักษณะการพังทลายจุดเริ่มต้นเกิดขึ้นมุมบากร่อง U notch ทั้ง 2 และทิศทางการแตกหักวิ่งผ่านเส้นหลอมละลาย (Fusion line) ขอบเขตรอยต่อแนวเชื่อมทางโลหะ ชิ้นงานทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 ดังลูกศรชี้ และพบรอยฉีกขาดมีลักษณะสลับฟันปลา (Zigzag) ที่ชิ้นงานทดสอบมีค่าแรงกระแทกสูงบริเวณเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 ดังลูกศรสีแดงชี้ ดังภาพที่ 4.26 (ก) ขณะที่ชิ้นทดสอบที่มีค่าแรงกระแทกต่ำ ดังภาพที่ 4.26 (ข) ไม่พบรอยฉีกขาดลักษณะสลับฟันปลา (Zigzag) ที่บริเวณเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jang, Hong et al.[21] ในการจำลองการแตกหักทดสอบแรงกระแทกบากร่องวีด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีทิศทางรอยแตกหักไปในทิศทางโลหะชิ้นงานและบริเวณกระแทกร้อน

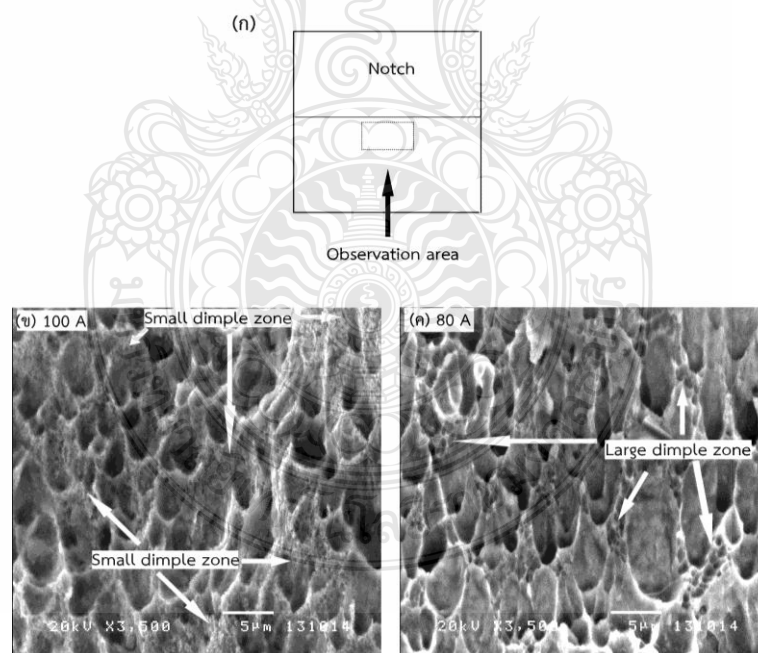


ภาพที่ 4.27 ภาพขยายตำแหน่งการพังทลาย (OM) ในภาพที่ 4.26 แบบรองพื้น

ภาพที่ 4.27 แสดงตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของการพังทลายของ ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกมีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงและต่ำ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light optical microscope : OM) พบว่า ตำแหน่งการพังทลาย (Fracture location) มีลักษณะเป็นมุมตั้งฉากกับแนวพังทลายเกิดขึ้นใกล้กับเกรนเดนไดรต์เป็นแนวยาวบนลงล่างตามแนวเกรนเดนไดรต์ ดังภาพที่ 4.27 (ก) ขณะที่ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแส 80 แอมแปร์ ที่มีค่าความแข็งแรงกระแทกต่ำที่จุดตรวจสอบบริเวณ (ข) ลักษณะตำแหน่งการพังทลายมีลักษณะคล้ายมุมแหลมจากบนลงล่างรอยพังทลายผ่านเกรนเดนไดรต์บางตำแหน่ง ดังภาพที่ 4.27 ตำแหน่งการพังทลายที่มุมแตกต่างกัน ผู้วิจัย

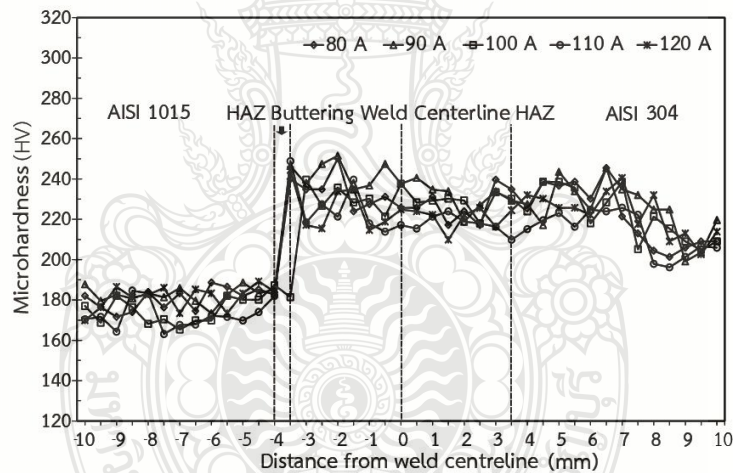
คาดว่าผลต่อค่าแรงกระแทกของขึ้นทดสอบและคล้ายกับงานวิจัยของ Dong, Zhang et al [32] ที่แสดงค่ามุมการพังทลายการทดสอบแรงดึงเฉือนที่ต่างกันมีผลต่อความเครียดเพิ่มขึ้น

ภาพที่ 4.28 แสดงบริเวณตำแหน่งพังทลายตรวจสอบรอยเชื่อมของชิ้นงานทางด้าน เหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 แสดงจุดตรวจสอบตั้งพื้นที่สี่เหลี่ยมเส้นปะด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope :SEM) ดังภาพที่ 4.28 (ก) ชิ้นงานที่มี ค่าแรงกระแทกสูงกับค่าความแข็งแรงกระแทกต่ำสุดพบว่า ที่กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ มีค่าความ แข็งแรงกระแทกสูง ดังภาพที่ 4.28 (ข) พบพื้นที่รูปร่างคล้ายสามเหลี่ยมสลับพื้นปลาและมีบริเวณรอย บุ่มขนาดเล็ก (Small Dimples Zone) เป็นรูปร่างกลมหรือวงรีปริมาณมาก ดังนั้นการเกิดรอยบุ่มที่มี ขนาดเล็กส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกระแทกสูง ดังภาพที่ 4.25 และคล้ายกับงานวิจัยของ Qinglei, Yajiang et al. [33] ขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับ ภาพที่ 4.28 (ค) ชิ้นงานทดสอบที่มีค่าแรงกระแทกต่ำที่ กระแสเชื่อม 80 แอมแปร์ พบพื้นที่รูปร่างคล้ายสามเหลี่ยมปลายแหลมสลับพื้นปลาแต่มีรอยบุ่ม ขนาดใหญ่ (Large Dimples Zone) เป็นรูปร่างกลมหรือวงรีบางส่วนอยู่ในบริเวณพื้นที่รูปสามเหลี่ยม ปลายแหลมดังลูกศรชี้



ภาพที่ 4.28 (ก) บริเวณตำแหน่งพังทลายตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (ข) กระแสเชื่อม 100 แอมแปร์ และ (ค) กระแสเชื่อม 80 แอมแปร์

ภาพที่ 4.29 แสดงผลการทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์บริเวณหน้าตัดของแนวเชื่อมรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก AISI304 โดยเชื่อมรองพื้น (Buttering) ทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 ดังภาพที่ 4.29 พบว่า ค่าความแข็งบริเวณเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก AISI304 โลหะขึ้นงานค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นใกล้เคียงกับบริเวณกระทร้อนทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก AISI304 และค่าความแข็งมีแนวโน้มสูงใกล้เคียงกับบริเวณโลหะเชื่อม (Weld Metal : WM) อยู่ในช่วงระหว่าง 210-250 HV แต่ที่บริเวณพื้นที่เชื่อมรองพื้น (Buttering) ใกล้เคียงกับบริเวณกระทร้อนทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 ที่จุดทดสอบตำแหน่ง -3 ถึง ตำแหน่งทดสอบที่ -4 ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดต่ำลงใกล้เคียงกับโลหะขึ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 Wu, Lu et al. [26] และ Jafarzadegan, Abdollah-zadeh et al. [34] อย่างไรก็ตาม โลหะขึ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 มีค่าความแข็งต่ำกว่าโลหะขึ้นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก AISI304



ภาพที่ 4.29 ผลการทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ของรอยเชื่อมต่อชน AISI1015 - AISI304

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การดำเนินการวิจัยโครงการ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติของรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ที่เชื่อมด้วยการเชื่อมอาร์กทวิฟลักซ์ของชิ้นส่วนลำเลียงอ้อย ลักษณะรอยต่อเป็นแบบรอยต่อชนท่าราบ และนำชิ้นงานเชื่อมไปทดสอบสมบัติทางกล และตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การเชื่อมอาร์กทวิฟลักซ์ด้วยลวดเชื่อมที่แตกต่างกัน โดยทำการเชื่อมรอยต่อชนระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ซึ่งการเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้นจะให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าการเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้น

5.1.2 การเชื่อมแบบรองพื้นด้วยลวดเชื่อม E309 โดยทำการเชื่อมรอยต่อชนระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 มีค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงสุดเท่ากับ 92 จูล

5.1.3 ความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าสูงสุดที่บริเวณโลหะเชื่อม เกิดการก่อตัวของโครงสร้างเดนไดรต์ และความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อมมีค่าใกล้เคียงกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก AISI304

5.1.4 การเพิ่มขึ้นของกระแสเชื่อมส่งผลต่อมีขนาดของระยะห่างระหว่างเดนไดรต์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามกระแสเชื่อม

5.1.5 การแตกหักพังทลายของชิ้นทดสอบที่มีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงลักษณะการพังทลายมีทิศทางตั้งฉากกับแนวพังทลาย

5.1.6 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดพบว่า ความแข็งแรงกระแทกสูงส่งผลต่อขนาดรอยรุ่มที่เล็กกว่าชิ้นงานทดสอบที่มีค่าความแข็งแรงกระแทกต่ำมีรอยรุ่มมีขนาดใหญ่

5.2 ข้อเสนอแนะ

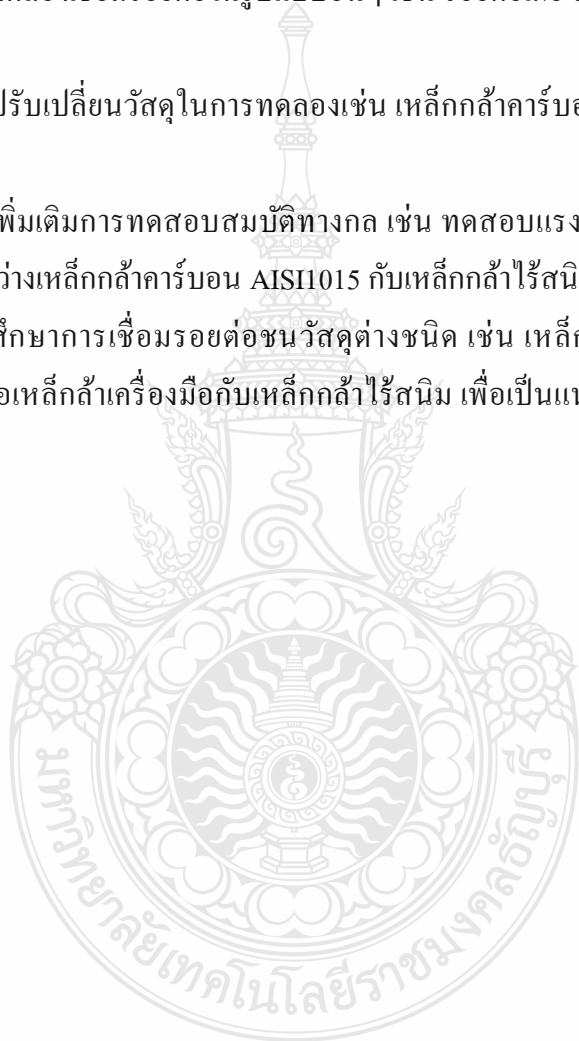
ข้อเสนอแนะในการทดลองศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 พบปัญหาในระหว่างการทดลองเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและศึกษาค้นคว้าต่อไป จึงได้รวบรวมปัญหาและข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อแนวทางในการศึกษาเพิ่มเติม

5.2.1 ควรทดลองเชื่อมรอยต่อในรูปแบบอื่นๆ เช่น รอยต่อเกย รอยต่อแบบตัวที รอยต่อมุม และรอยต่อขอบ

5.2.2 ลองปรับเปลี่ยนวัสดุในการทดลองเช่น เหล็กกล้าคาร์บอนสูง เช่น AISI1045 และ AISI1050

5.2.3 ควรเพิ่มเติมการทดสอบสมบัติทางกล เช่น ทดสอบแรงดึง เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลรอยต่อชนระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก AISI304

5.2.4 ควรศึกษาการเชื่อมรอยต่อชนวัสดุต่างชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดอื่นๆ หรือเหล็กกล้าเครื่องมือกับเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนารอยต่อชนวัสดุต่างชนิด



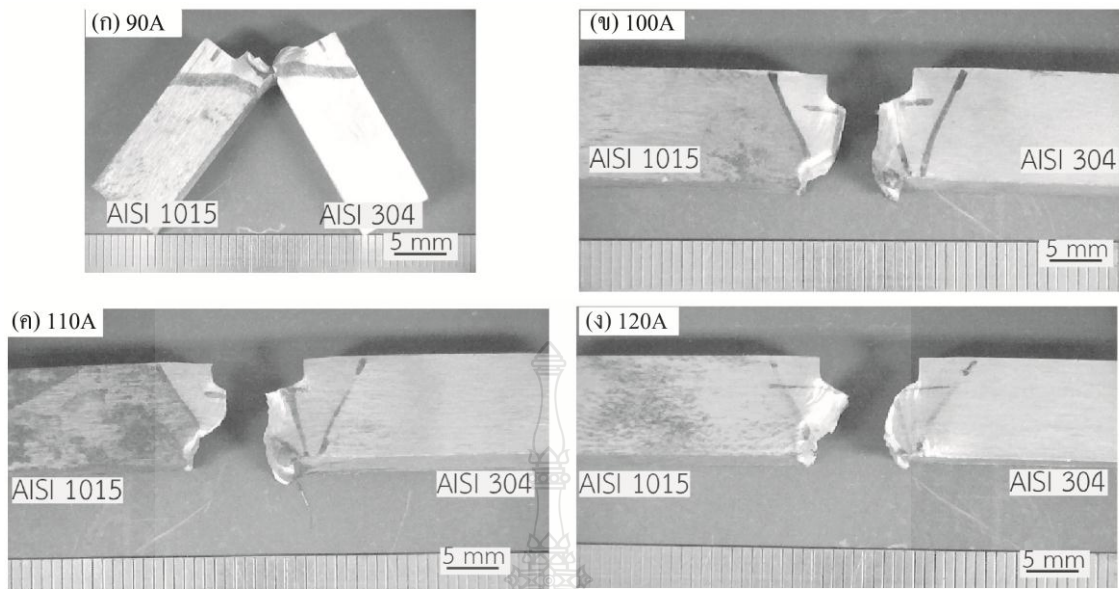
ภาคผนวก



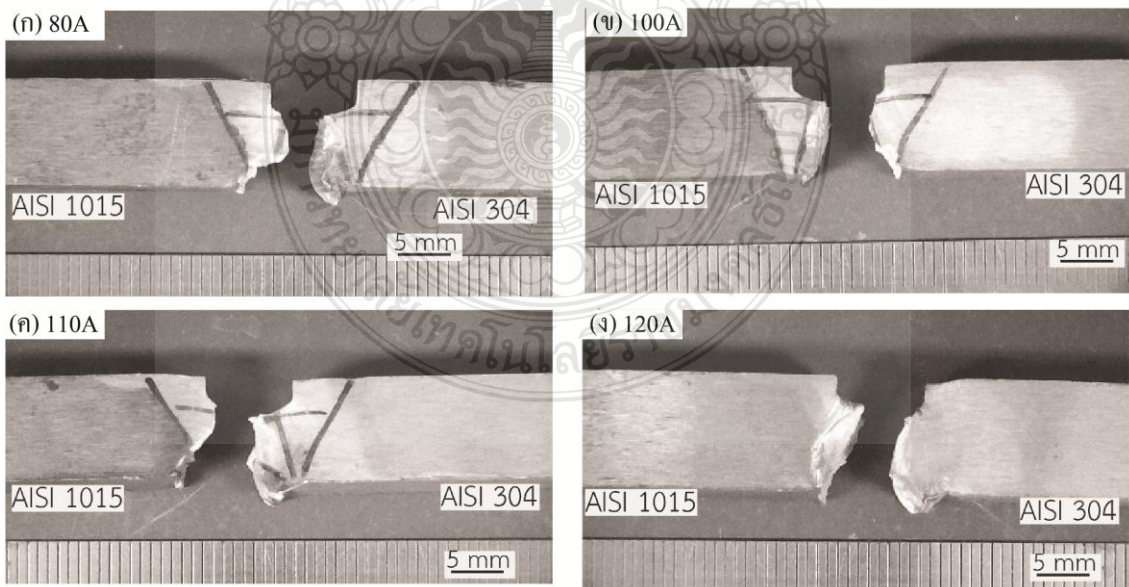
ภาคผนวก ก

ลักษณะการพังทลายของชั้นทดสอบแรงกระแทกเชื่อมแบบไม่รองรับพื้น

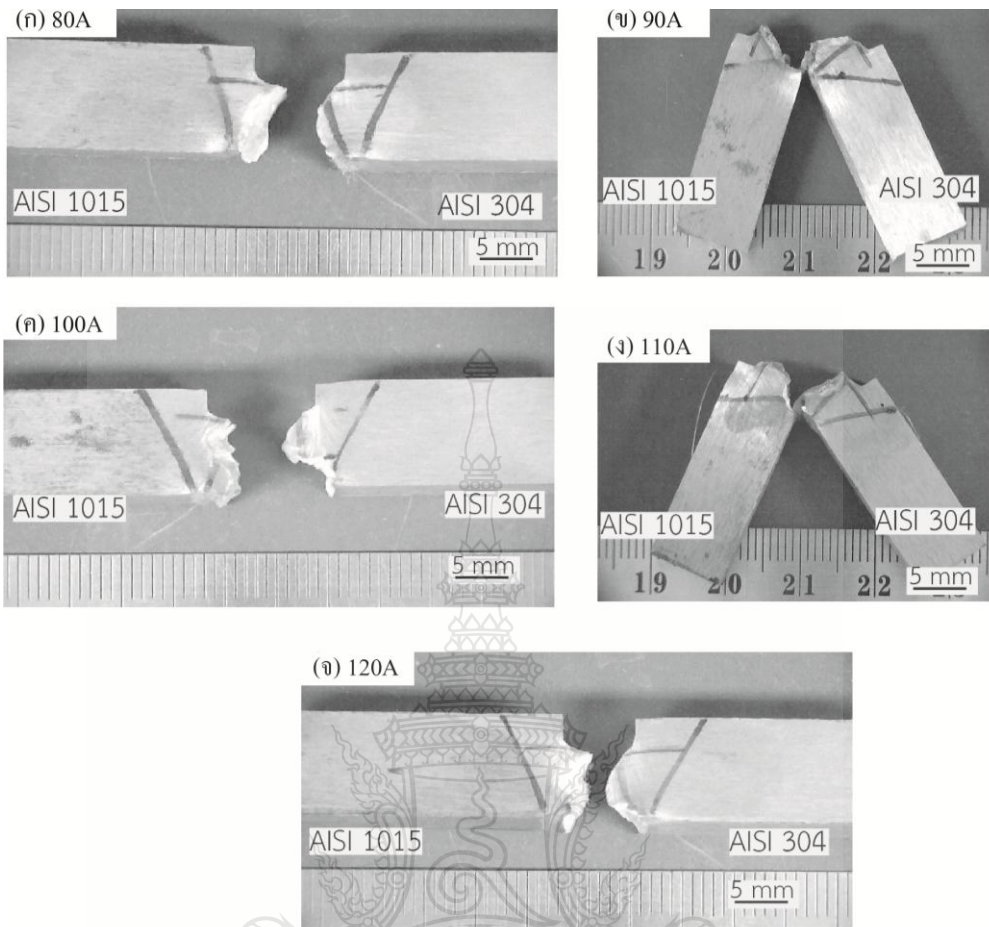




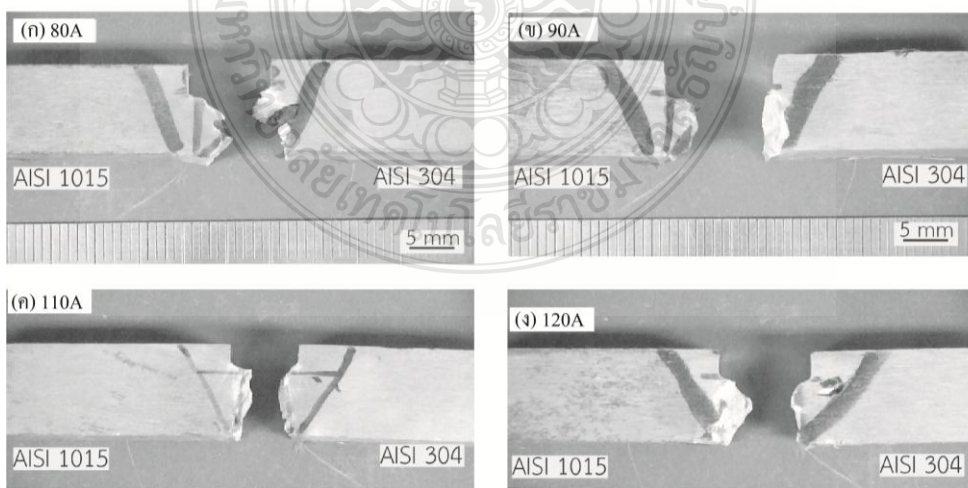
ภาพผนวกที่ ก.1 ลักษณะการพังทลายของลวดเชื่อม E307 เชื่อมแบบไม่รองพื้น




ภาพผนวกที่ ก.2 ลักษณะการพังทลายของลวดเชื่อม E308 เชื่อมแบบไม่รองพื้น



ภาพผนวกที่ ก.3 ลักษณะการพังทลายของลวดเชื่อม E309 เชื่อมแบบไม่รองพื้น

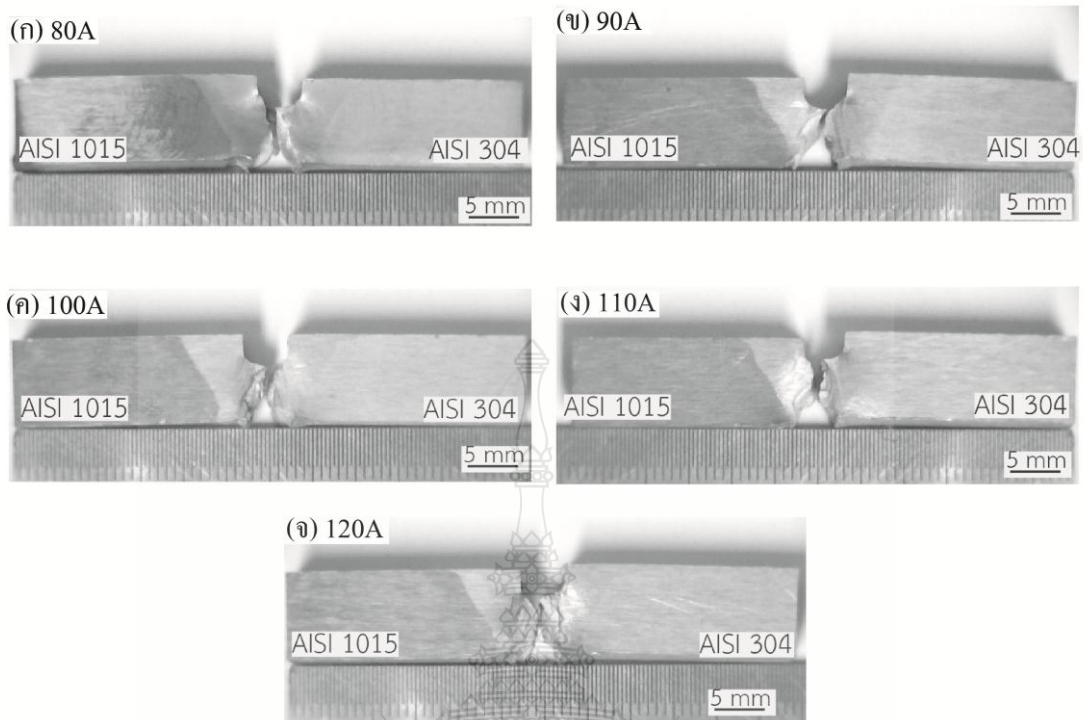


ภาพผนวกที่ ก.4 ลักษณะการพังทลายของลวดเชื่อม E312 เชื่อมแบบไม่รองพื้น

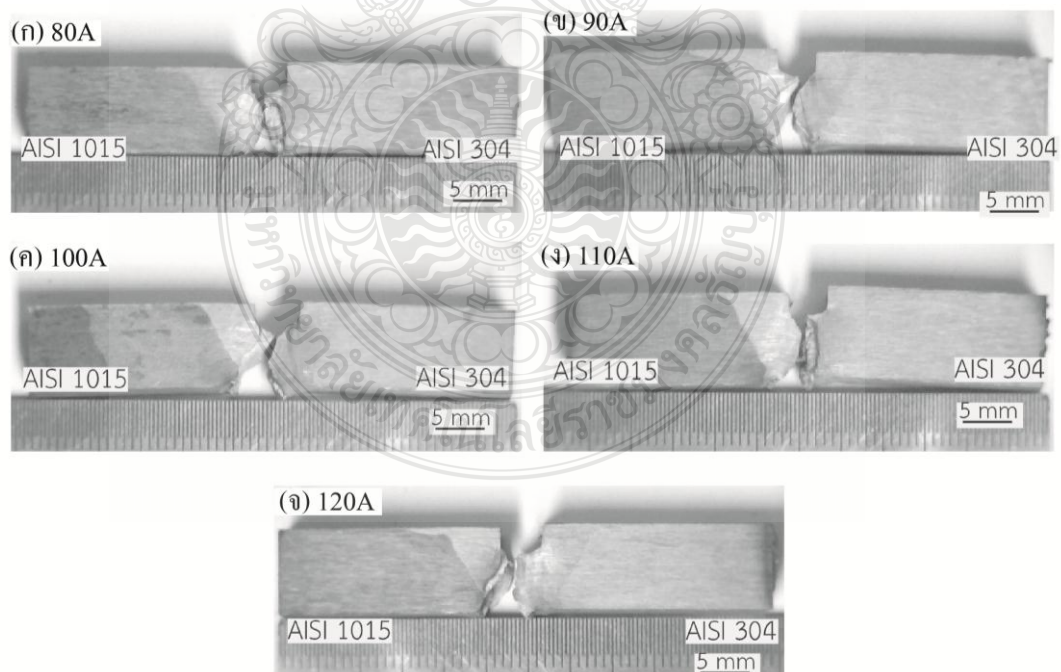


ภาคผนวก ข

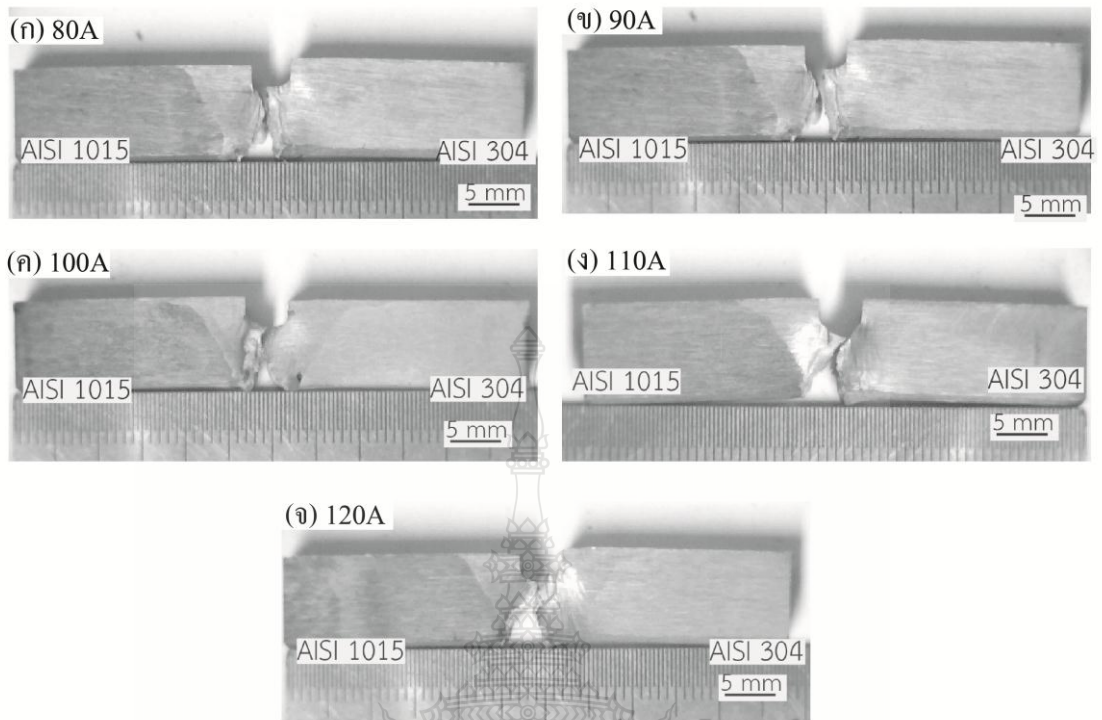
ลักษณะการพังทลายของหินทดสอบแรงกระแทกเชื่อมแบบรองพื้น



ภาพผนวกที่ ข.1 ลักษณะการพังทลายของลวดเชื่อม E307 เชื่อมแบบรองพื้น



ภาพผนวกที่ ข.2 ลักษณะการพังทลายของลวดเชื่อม E309 เชื่อมแบบรองพื้น



ภาพผนวกที่ ข.3 ลักษณะการพังทลายของลวดเชื่อม E312 เชื่อมแบบรองพื้น





ภาคผนวก ก
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

Program Brochure and Abstracts of **RSU** 

รวมบทคัดย่อ
การประชุมวิชาการระดับชาติ
มหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2558
24 เมษายน 2558

THAI
LAND

แพทยศาสตร์ วิทยาศาสตร์กายภาพ
และวิทยาศาสตร์สุขภาพ
วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
สถาปัตยกรรมศาสตร์และศิลปะและการออกแบบ
มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์
วิจัยพัฒนาการเรียนการสอน
วิจัยสถาบัน

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	I
สารจากอธิการบดี	II
สารจากรองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ	III
คณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2558	IV
คณะกรรมการจัดทำ Proceedings of RSU National Research Conference 2015	VI
คณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2558	VIII
รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณานิพนธ์ต้นฉบับ	IX
กำหนดการประชุมวิชาการ	XXVI
บรรยายพิเศษ “พุทธศาสตร์การปฏิรูปประเทศไทยใต้พลวัตประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน”	XIX
โปรแกรมการนำเสนอภาคบรรยายและโปสเตอร์	XXVII
บทคัดย่อการนำเสนอภาคบรรยาย	
กลุ่มแพทยศาสตร์ วิทยาศาสตร์กายภาพ และวิทยาศาสตร์สุขภาพ	3
กลุ่มวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี	32
กลุ่มสถาปัตยกรรมศาสตร์และศิลปะและการออกแบบ	54
กลุ่มมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์	77
กลุ่มวิจัยพัฒนาการเรียนการสอน	167
กลุ่มวิจัยสถาบัน	199
บทคัดย่อการนำเสนอภาคโปสเตอร์	210
ดัชนีผู้แต่ง	215
แผนผังห้องการนำเสนอผลงานภาคบรรยาย ชั้น 1	220
แผนผังห้อง Auditorium และห้องฉายภาพยนตร์ ชั้น 2	220
แผนผังการนำเสนอผลงานภาคโปสเตอร์ ชั้น 2	221
แผนผังห้องการนำเสนอผลงานภาคบรรยาย ชั้น 3	221
แผนผังห้องการนำเสนอผลงานภาคบรรยาย ชั้น 4	222
แผนผังห้องการนำเสนอผลงานภาคบรรยาย ชั้น 5	222

คำนำ

หนังสือรวมบทความประกอบการประชุมวิชาการเล่มนี้จัดทำขึ้นเพื่อแสดงกำหนดการ ตารางเวลา การจัดการประชุมวิชาการ การสัมมนาวิชาการและรวมบทความวิจัยที่นำเสนอภาคบรรยายและภาคโปสเตอร์ในงานประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยรังสิต เรื่อง “ปฏิรูปประเทศไทยภายใต้พลวัต AEC” การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี ๒๕๕๘ ในครั้งนี้ได้รับความสนใจและการตอบรับอย่างดียิ่งจากนักวิจัย บุคลากร มหาวิทยาลัยรังสิต และจากสถาบันอุดมศึกษา รวมถึงหน่วยงานภาคเอกชนจากภายนอกมหาวิทยาลัย ร่วมส่งผลงานวิจัยเข้าร่วมนำเสนอในภาคบรรยายและภาคโปสเตอร์ซึ่งแบ่งการนำเสนอเป็น ๖ กลุ่มประกอบด้วย กลุ่มแพทยศาสตร์ วิทยาศาสตร์กายภาพและวิทยาศาสตร์สุขภาพ จำนวน ๒๘ เรื่อง กลุ่มวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี จำนวน ๒๐ เรื่อง กลุ่มสถาปัตยกรรมศาสตร์และศิลปะและการออกแบบ จำนวน ๒๒ เรื่อง กลุ่มมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ จำนวน ๓๕ เรื่อง กลุ่มวิจัยพัฒนาการเรียนการสอน จำนวน ๓๐ เรื่อง และกลุ่มวิจัยสถาบัน จำนวน ๕ เรื่อง และการนำเสนอภาคโปสเตอร์ จำนวน ๕ เรื่อง รวม ๑๕๓ เรื่อง คณะผู้จัดทำหนังสือรวมบทความประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี ๒๕๕๘ (Program Brochure and Abstracts of RSU National Research Conference 2015) หวังเป็นอย่างยิ่งว่าบทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในหนังสือนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการ รวมทั้งก่อให้เกิดองค์ความรู้และการขยายผลงานวิจัยใหม่ๆ เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาประเทศที่ยั่งยืนต่อไป

ขอขอบคุณคณะกรรมการทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการจัดทำหนังสือเอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติ หนังสือกำหนดการ และหนังสือรวมบทความ หากมีข้อผิดพลาดประการใดคณะผู้จัดทำขออภัยไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุสรณ์ ธรรมใจ ประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์จันทร์ อยู่แพทย์ บรรณาธิการ

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณานิพนธ์ต้นฉบับ

- | | |
|--|--------------------------------|
| 1. นายสัตวแพทย์ ดร.วิวัฒน์ ชัยชนะศิริวิทยา | กรมปศุสัตว์ |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.พรพรรณราย ทพยะประภา | ข้าราชการบำนาญ |
| 3. ศาสตราจารย์ ดร.สมบุรณ์ ธนาสุภวัฒน์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.กัญญิกัทธิ นิธิโรจน์ธนัท | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร.จินตวีร์ คล้ายสังข์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 6. รองศาสตราจารย์ ดร.ยศนันต์ มีมาก | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 7. รองศาสตราจารย์ ดร.สงศรี กุลปรีชา | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 9. รองศาสตราจารย์ เกษักร ดร.รุทธ์ สุทธิศรี | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณพล จันทร์หอม | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภวรรณ ตันติเวชกุล | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิยม ชำรงอนันต์สกุล | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไสรลา กนกพานนท์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 14. อาจารย์ ดร.จันทิมา อังคพณิชกิจ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 15. อาจารย์ ดร.จิรบุญย์ ทัศนบรรจง | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 16. อาจารย์ ดร.เอี่ยมพร พิทักษ์วรรณ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 17. อาจารย์ ดร.ยุพา ชิดทอง | บริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด |
| 18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกษมสันต์ พิพัฒน์ศิริศักดิ์ | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |
| 19. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทรกร สังขปรีชา | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |
| 20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ร้อยคำรองเอกหญิง ดร.มัลลิกาผลอนันต์ | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |
| 21. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรวุฑ กิจกุล | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |
| 22. อาจารย์ ดร.ไกรฤกษ์ ปิ่นแก้ว | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |
| 23. รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิวัฒนา จิตตลดากร | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชูดา วิจิตรจามรี | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 25. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทิยา หาญสุภลักษณ์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 26. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เทพ วิไลพันธ์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 27. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรทิพย์ สิริสุนทรลักษณ์ | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 28. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เมื่อนมาศ ลีลสัตยกุล | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 29. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภารัตน์ สารสว่าง | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 30. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พรหมบุญ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 31. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิษฐ์ พรหมมินทร์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาพนธ์ต้นฉบับ (ต่อ)

- | | |
|--|--|
| 32. รองศาสตราจารย์ ดร.ศศิวิมล มีอำพล | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 33. อาจารย์ ดร.จินตนา สิริวราชัย | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 34. อาจารย์ ดร.พิบูล เอกวงราษฎร์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 35. อาจารย์ ดร.ไพฑูรย์ เจตธีรังชัย | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 36. อาจารย์ ดร.วารุณี ถิ่นน ไชคดี | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 37. รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิศักดิ์ อุปริงค์ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 38. รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร.ธีระศักดิ์ คำรุ่งเรือง | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 39. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กณิศ สีลสัตย์ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 40. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลวดี อภิชาติบุตร | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 41. รองศาสตราจารย์ ดร.มาลีวัล เลิศสาครศิริ | มหาวิทยาลัยเซนต์หลุยส์ |
| 42. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ผกาวัลี พุ่มสุทัศน์ | มหาวิทยาลัยเซนต์หลุยส์ |
| 43. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณี ละออปกนิม | มหาวิทยาลัยเซนต์หลุยส์ |
| 44. รองศาสตราจารย์ ดร.ไพบุลย์ เกียรติโกมล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 45. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพยา จินตโกวิท | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 46. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทลี พรชาดิวิทย์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 47. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิพร บุญส่ง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 48. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดาพร กุณพลบุตร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 49. อาจารย์ ดร.อรวิทย์ อุปลั้มภานนท์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 50. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เจษฎา กิจเกิดแสง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร |
| 51. อาจารย์ ดร.วิษณุ เทียบจตุรัส | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร |
| 52. อาจารย์ ดร.มงคลกร ศรีวิชัย | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธนาชัยราช |
| 53. รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ บุญทาวน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 54. รองศาสตราจารย์ ดร.จรัญ มะลูลิม | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 55. รองศาสตราจารย์ กิตติ สิริพิลลภ | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 56. รองศาสตราจารย์ ภาวดี สมภักดิ์ | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 57. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปกป้อง ศรีสนิท | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 58. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พจนา รูปแก้ว | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 59. อาจารย์ ดร.เกรียงไกร วัฒนาศาสตร์ | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 60. อาจารย์ ดร.จันทิมา อังคพนิชกิจ | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 61. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตินัน บุญภาพ คอมมอน | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| 62. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลย์พร รัตนเศรษฐ | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| 63. รองศาสตราจารย์ ดร.นิรัช สุขสังข์ | มหาวิทยาลัยนเรศวร |

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณานิพนธ์ต้นฉบับ (ต่อ)

64. อาจารย์ ดร.อิสราวุธ ประเสริฐสังข์	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
65. รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ประเสริฐ หกสุวรรณ	มหาวิทยาลัยบูรพา
66. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เสฐียร เหลืองอลงกต	มหาวิทยาลัยบูรพา
67. อาจารย์ ดร.ปรัชญา แก้วแก่น	มหาวิทยาลัยบูรพา
68. อาจารย์ ดร.ภัทราวดี มากมี	มหาวิทยาลัยบูรพา
69. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ วรรณภา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
70. ศาสตราจารย์ ดร.พีรพรรณ ตันอารีย์	มหาวิทยาลัยมหิดล
71. รองศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมพร องค์กรโสภณ	มหาวิทยาลัยมหิดล
72. รองศาสตราจารย์ ดร.โยธิน แสงวงศ์	มหาวิทยาลัยมหิดล
73. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูเบศร์ สมุทรจักร	มหาวิทยาลัยมหิดล
74. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ เลิศลิทธิชัย	มหาวิทยาลัยมหิดล
75. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จรัมพร ให้อำยอง	มหาวิทยาลัยมหิดล
76. ศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง ละอองทอง วัชรภักย์	มหาวิทยาลัยรังสิต
77. ศาสตราจารย์ พลอากาศโท พูนลาภ เอี่ยมเจริญ	มหาวิทยาลัยรังสิต
78. รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ ทองเลิศ	มหาวิทยาลัยรังสิต
79. รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา เกิดดี	มหาวิทยาลัยรังสิต
80. รองศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา จันทร์ประเสริฐ	มหาวิทยาลัยรังสิต
81. รองศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา สุริยะพรหม	มหาวิทยาลัยรังสิต
82. รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพร สุวรรณกุล	มหาวิทยาลัยรังสิต
83. รองศาสตราจารย์ ดร.ทัศนีย์ ปัญจานนท์	มหาวิทยาลัยรังสิต
84. รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระศักดิ์ พัชรวิภาส	มหาวิทยาลัยรังสิต
85. รองศาสตราจารย์ ดร.พินิจ งามสม	มหาวิทยาลัยรังสิต
86. รองศาสตราจารย์ ดร.ภิรมย์ จันทาวร	มหาวิทยาลัยรังสิต
87. รองศาสตราจารย์ ดร.จุฬา ผลสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยรังสิต
88. รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณวิมล อารยะปราชญ์	มหาวิทยาลัยรังสิต
89. รองศาสตราจารย์ ดร.วัลย์พร นันทสุภวัฒน์	มหาวิทยาลัยรังสิต
90. รองศาสตราจารย์ ดร.วิมล ชอบชื่นชม	มหาวิทยาลัยรังสิต
91. รองศาสตราจารย์ ดร.สิริมา กิจวัฒน์ชัย	มหาวิทยาลัยรังสิต
92. รองศาสตราจารย์ นันทชัย ทองแป้น	มหาวิทยาลัยรังสิต
93. รองศาสตราจารย์ ปกรณ์ พรหมวิทักษ์	มหาวิทยาลัยรังสิต
94. รองศาสตราจารย์ ยุพกนิษฐ พ่วงวีระกุล	มหาวิทยาลัยรังสิต
95. รองศาสตราจารย์ เขียวลักษณ์ พิมายนอก	มหาวิทยาลัยรังสิต

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณานิพนธ์ต้นฉบับ (ต่อ)

- | | |
|---|-------------------|
| 96. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกพร ฉายะบุระกุล | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 97. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โกวิท รพีพิศาล | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 98. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย จิตรเหล่าอาพร | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 99. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงทิพย์ เจริญรุทข์ เพื่อน โษติ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 100. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนวรรณ อัครไพบูลย์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 101. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤพนธ์ ไชยศ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 102. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญศรีศรี สุขเขียว | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 103. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุษบา พิพิธพร | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 104. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปณมาพร สุกปลั่ง | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 105. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร โดสงวน | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 106. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยสุดา มา้ว | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 107. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พินดา สามพรานไพบูลย์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 108. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพิมล ชุติศิลป์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 119. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัฒน์ พิสิษฐเกษม | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 110. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพียงจันทร์ จริ่งจิตร | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 111. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล เทียนประเทืองชัย | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 112. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุจาภา แห่งเกษร | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 113. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราพร ลักษณะม้าย | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 114. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลย์ภรณ์ นาคพันธุ์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 115. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ตระกูลสุน | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 116. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิวรรณ์ ปานะสิทธิพันธ์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 117. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฑฒ์ ลากเจริญ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 118. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริกุล จันทร์สว่าง | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 119. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชนก กุ้อำไพ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 120. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เล็กเจริญ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 121. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.सानนท์ จิมมณี | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 122. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธ์ เจริญทรัพย์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 123. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 124. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารยา มุ่งชำนาญกิจ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 125. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภาพร นามวงศ์พรหม | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 126. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุบล สรรพชัยพงษ์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณานิพนธ์ต้นฉบับ (ต่อ)

- | | |
|--|-------------------|
| 127. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ร้อยคำราวจ โทหญิง คร.อัครวารรณ ทองมี | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 128. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ญาณวุฒิ สุพิชญางกูร | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 129. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธรรมศักดิ์ เอื้อรักสกุล | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 130. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประเสริฐ ศิริรณานันตรี | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 131. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพ.พิศิษฐ์ นามจันทรา | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 132. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริวรรณ วาสกรี | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 133. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เสมมา สอนประสม | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 134. พลอากาศโท สุกฤต อริยะปรีชา | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 135. อาจารย์ ดร.กฤษณา ศรีแก้ว | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 136. อาจารย์ ดร.กัญ อนันตสมบุรณ์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 137. อาจารย์ ดร.กัญจน์นิดา สุชาวีอินทร์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 138. อาจารย์ ดร.กัลยรัตน์ หล่อมณีนพรัตน์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 139. อาจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 140. อาจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ ใหม่เจริญบุญกุล | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 141. อาจารย์ ดร.ฉลอรัง งามมาลัยชลมารค | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 142. อาจารย์ ดร.ฉัตรวิญญู อดุลสิงห์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 143. อาจารย์ ดร.เฉลิมพร เอ็นเอียด | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 144. อาจารย์ ดร.ชิตสุดา ชัยศักดิ์กาญจนา | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 145. อาจารย์ ดร.ชุลีรัตน์ เจริญพร | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 146. อาจารย์ ดร.ฉกมล จันทร์สม | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 147. อาจารย์ ดร.ดวงฤทัย ศรีแดง | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 148. อาจารย์ ดร.ธีระ เฉลิมเกียรติยศ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 149. อาจารย์ ดร.นครเทพ พิทยศุภราชภูรี | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 150. อาจารย์ ดร.นริศรา ภาควิธี | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 151. อาจารย์ ดร.น้ำอ้อย กักตังศ์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 152. อาจารย์ ดร.นิภา กิมสูงเนิน | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 153. อาจารย์ ดร.นันทวล วิเศษสรรพ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 154. อาจารย์ ดร.ปิยภรณ์ ชูชีพ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 155. อาจารย์ ดร.พัชรา สุนทรฐิติเจริญ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 156. อาจารย์ ดร.พินิจ มนต์ปิติ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 157. อาจารย์ ดร.ไพกานท์ รักษาสุทธิพันธ์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 158. อาจารย์ ดร.มณีเพ็ญ อภิบาลศรี | มหาวิทยาลัยรังสิต |

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณานิพนธ์ต้นฉบับ (ต่อ)

159. อาจารย์ ดร.รัชชก ขำศิริ	มหาวิทยาลัยรังสิต
160. อาจารย์ ดร.รัตพงษ์ สอนสุภาพ	มหาวิทยาลัยรังสิต
161. อาจารย์ ดร.วรุฒม์ เอมอุดม	มหาวิทยาลัยรังสิต
162. อาจารย์ ดร.วันทิกา เกรื่อนน้ำคำ	มหาวิทยาลัยรังสิต
163. อาจารย์ ดร.ศรัณย์ ธิตลัทธิน	มหาวิทยาลัยรังสิต
164. อาจารย์ ดร.ศรีสมร พุ่มสะอาด	มหาวิทยาลัยรังสิต
165. อาจารย์ ดร.สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ	มหาวิทยาลัยรังสิต
166. อาจารย์ ดร.สัญญาพงศ์ ลิ้มประเสริฐ	มหาวิทยาลัยรังสิต
167. อาจารย์ ดร.สันติ กิจลือเกียรติ	มหาวิทยาลัยรังสิต
168. อาจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ จันทวงษ์โส	มหาวิทยาลัยรังสิต
169. อาจารย์ ดร.สุพัฒน์ มูลสิน	มหาวิทยาลัยรังสิต
170. อาจารย์ ดร.สุภัตรา ประดับพงศ์	มหาวิทยาลัยรังสิต
171. อาจารย์ ดร.สุภัตรา วัฒนสาธิตอาภา	มหาวิทยาลัยรังสิต
172. อาจารย์ ดร.สุพินดา เลิศฤทธิ	มหาวิทยาลัยรังสิต
173. อาจารย์ ดร.สุมาลี สว่าง	มหาวิทยาลัยรังสิต
174. อาจารย์ ดร.สุรพล ศรีวิทยา	มหาวิทยาลัยรังสิต
175. อาจารย์ ดร.อรพินท์ จิตตวิสุทธิกุล	มหาวิทยาลัยรังสิต
176. อาจารย์ ดร.อาภา หวังเกียรติ	มหาวิทยาลัยรังสิต
177. อาจารย์ ว่าที่ร้อยตรี ดร.ภุรีพัฒน์ ชาญกิจ	มหาวิทยาลัยรังสิต
178. อาจารย์ เสรี จังส์ไพจิตร	มหาวิทยาลัยรังสิต
179. อาจารย์ต่อศักดิ์ อุทัยไขฟ้า	มหาวิทยาลัยรังสิต
180. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา อินทะกุล	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
181. อาจารย์ ดร.สุภชานัน ศรีเอี่ยม	มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
182. ศาสตราจารย์ พลตรี ทนตแพทย์ รังษิต บุญเต็ม	มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น
183. อาจารย์ ดร.พุมวิทย์ บุญนาค	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
184. อาจารย์ ดร.ราชันย์ บุญธิมา	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
185. รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยากร หวังมหาพร	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
186. รองศาสตราจารย์ ดร.สกนธ์ ภู่งามดี	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
187. อาจารย์ ดร.อนุพงศ์ อวิรุทธา	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
188. รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิทธิ์ ด้านกิตติกุล	มหาวิทยาลัยศิลปากร
189. รองศาสตราจารย์ ดร.นรินทร์ รัตนจันทร์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
190. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยยศ ไพวิทยศิริธรรม	มหาวิทยาลัยศิลปากร

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณานิพนธ์ต้นฉบับ (ต่อ)

- | | |
|--|--|
| 191. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุลย์จิรา ชิริเวทย์ | มหาวิทยาลัยศิลปากร |
| 192. อาจารย์ ดร.สิทธิเศรษฐ์ พลเวียง | มหาวิทยาลัยศิลปากร |
| 193. รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ จินดาบุรุษย์ | มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช |
| 194. รองศาสตราจารย์ ดร.สมคิด พรหมจ้อย | มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช |
| 195. รองศาสตราจารย์ สมพิศ สุขแสน | มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช |
| 196. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนวิภา วงจุรีระ | มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช |
| 197. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สังวรณ์ ังคระโท | มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช |
| 198. เรือเอก ดร.อภิสิทธิ์ ทรงบัณฑิตย์ | มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช |
| 199. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.น้ำฝน อัสวเมธิน | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| 200. อาจารย์ ดร.ภาสกร เชื้อสวย | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| 201. อาจารย์ ดร.มานะ ตรีรยาภิวัฒน์ | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| 202. อาจารย์ ดร.ลลิตา หงษ์รัตนวงศ์ | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| 203. อาจารย์ ดร.อัศวิน ปสุธรรม | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| 204. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรพินท์ สีขาว | มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ |
| 205. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วาที่ร้อยตรี ธนวิศิษฎ์ มณฑุทธิไพศาล | มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย |
| 206. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เกสัชกรหญิง ดร. สุภารัตน์ จันทร์เหลือง | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 207. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาดา คุปตานนท์ | โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรังสิต |
| 208. รองศาสตราจารย์ ดร.วัลย์ลักษณ์ อัศวินวงศ์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 209. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกร สงคราม | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 210. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ลือพงษ์ ลือนาม | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 211. อาจารย์ ดร.ปณายู ไชยรัตนานนท์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 212. อาจารย์ ดร.อุกฤษฏ์ วัชรฤทัย | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 213. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ ลือนาม | สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ |
| 214. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัทธริยา หลีกเพชร | สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ |
| 215. อาจารย์ ดร.พัชรวรรณ นุชประยูร | สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ |

การศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงกระแทกของรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่กระแสเชื่อมอาร์กโลหะผสมฟลักซ์แตกต่าง

Comparative of Impact Strength of Butt Joint between AISI1015 Carbon Steel and AISI304 Stainless Steel Produced by Different Shielded Metal Arc Welding Currents

ณัฐวีร์ สอกจะบก^{1*} สุริยา ประสมทอง² เจษฎา แก้ววิชิต³ และกิตติพงษ์ กิมะพงษ์

Natthavee Sokjabok^{1*} Suriya Plasomthong² Jesada Kaewwichit³ and Kittipong Kimapong³

^{1*} นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อําเภอลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

² อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ สุพรรณบุรี 72130

³ อาจารย์ประจำ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อําเภอลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

^{1*} Graduate student in Master of Engineering (Industrial Engineering), Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Pathumthani 12110

² Lecturer in Master of Engineering (Industrial Engineering), Faculty of Industrial Education, Rajamangala University Suwanaphumi, Supanburi 72130

³ Lecturer in Master of Engineering (Industrial Engineering), Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Pathumthani 12110

* Corresponding author, E-mail: Natthavee.so@gmail.com

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของบทความนี้คือการศึกษาความแข็งแรงกระแทกของรอยต่อชนระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ที่ถูกทำการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมอาร์กโลหะผสมฟลักซ์ที่กำหนด รอยต่อชนบากร่องวีมุมรวม 60 องศา และแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนถูกเชื่อมเสริมแนวร่องพื้นด้วยลวดเชื่อม AWS-E309 และรอยต่อร่องวี 60 องศาถูกเชื่อมอาร์กโลหะผสมฟลักซ์ด้วยลวดเชื่อม AWS-E308 และกระแสเชื่อมระหว่าง 80-120 A ซึ่งงานเชื่อมถูกนำไปทำการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาค ความแข็งแรงกระแทก ลักษณะการพังทลาย และความแข็งแรงของรอยเชื่อม ผลการทดลองโดยมีสรุปดังนี้ 1) การเพิ่มขึ้นของกระแสเชื่อมส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง 2) สภาวะการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดประมาณ 92 J คือ กระแสเชื่อม 100 A 3) ลักษณะการพังทลายพบรอยบวมขนาดเล็กมีผลต่อค่าความแข็งแรงกระแทกสูง 4) ความแข็งบริเวณโลหะเชื่อมมีแนวโน้มสูงเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะฐาน

คำสำคัญ: เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก รองพื้น

Abstract

Objective of this paper was to study the impact strength of butt joints between AISI1015 carbon steel and AISI304 stainless steel that were welded by various welding current of shielded metal arc welding. Faying area of the butt joint was machined 60° V-groove and the butter layer was produced using AWS E309 electrode with a shielded metal arc welding at carbon steel side. AWS-E308 electrode was applied as a welding material to produce a shielded weld arc weld between the 60° V-groove faying surfaces of the butt joint with a welding current of 50-120 A. Welded butt joint was prepared and investigated for macrostructure, impact strength, fracture characteristic and hardness. The summarized results are as follows; 1) increasing the welding current affected to decreased the impact strength. 2) optimum welding current that showed maximum impact strength of 92 J was at 100 A. 3) fractured characteristic showed a small dimple pattern that affected to increase impact strength. 4) the hardness of weld metal tended to be higher than that of the base metal.

Keywords: Low carbon steel, austenitic stainless steel, buttering

1. บทนำ

ปัจจุบันรอยต่อโลหะต่างชนิดมีความต้องการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากรอยต่อโลหะต่างชนิดมีข้อได้เปรียบสามารถให้สมบัติทางกลที่ดี และสามารถถูกนำไปใช้กับงานที่กว้างขวางกว่า (Anawa and Olabi, 2008, Paventhan, Lakshminarayanan et al. 2012, Javadi and Najafabadi, 2013) อย่างไรก็ตามในการนำรอยต่อวัสดุต่างชนิดไปใช้งาน ปัญหาในการต่อวัสดุต่างชนิดด้วยวิธีการเชื่อมหลอมละลายเข้าด้วยกันมักเกิดขึ้นโดยมีสาเหตุมาจาก เช่น ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุที่แตกต่างกัน ความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์ทางความร้อน ความยากลำบากการให้ความร้อนก่อนการเชื่อม และรูปแบบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนในรอยเชื่อม (Sarkari Khorrani et al. 2014) ตัวอย่างการใช้งานรอยต่อวัสดุที่ทำให้เกิดการประหัดโดยที่สมบัติของรอยต่อไม่ส่งผลต่อระบบการผลิต เช่น

รอยต่อวัสดุต่างชนิดของชุดลำเลียงอ้อยในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลที่ถูกออกแบบให้มีชิ้นส่วนของเหล็กกล้าไร้สนิมในส่วนที่สัมผัสกับอ้อยเพื่อป้องกันการเกิดสนิมเมื่อโลหะสัมผัสกับอ้อย อย่างไรก็ตามในส่วนที่เป็นโครงสร้างรับแรงของชุดลำเลียงหากออกแบบและสร้างด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมราคาค่าใช้จ่ายค่าวัสดุอาจสูงขึ้นได้ ดังนั้นจึงมีการนำเอาเหล็กกล้าคาร์บอนมาทดแทนในส่วนการรับแรงเพราะไม่ต้องกังวลถึงการเกิดสนิมในกระบวนการผลิตด้วยเหตุนี้การศึกษาและพัฒนากระบวนการเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dissimilar metal welding : DMW) จึงได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้รอยต่อมีความสามารถในการใช้งานที่กว้างขวางมากขึ้น และทำให้เกิดการประหัดในการผลิต

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและพัฒนาวิธีการเชื่อมรอยต่อวัสดุต่างชนิดที่น่าสนใจที่สามารถนำไปเป็น

แนวคิดในการเชื่อมอาร์กโลหะผสมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิมที่น่าสนใจ เช่น การเชื่อมอาร์กโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิมมาแทนซิกติกและออสเทนเนติกด้วยโลหะผสมหลายชนิด (Kaçar and Baylan 2004) หรือการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมคิวเพล็กซ์เข้ากับเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยการเชื่อมอาร์กโลหะผสมเกรด E2209 และ E309 (Srinivasan et al. 2006) หรือการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก 310 เข้ากับอินโคเนล 657 โดยการเชื่อมอาร์กโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิม (Nafikh et al. 2009) หรือการเชื่อมวัสดุต่างชนิดโดยทำการเชื่อมโลหะนิกเกิลผสมกับเหล็กกล้าไร้สนิม 304L โดยมีการเติม Ti ลงไปในโลหะเชื่อมขณะทำการเชื่อมเพื่อศึกษาผลกระทบต่อความสามารถในการเชื่อมโครงสร้างและสมบัติทางกลของรอยต่อ (Lee et al., 2004) โดยการทดลองส่วนใหญ่เน้นทำการศึกษาเปรียบเทียบการเพื่อหาชนิดโลหะที่เหมาะสมในการเชื่อมรอยต่อวัสดุต่างชนิด

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมา คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาอิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์กโลหะผสมเหล็กกล้าที่มีผลต่อความแข็งแรงกระแทกของรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเชื่อมรอยต่อวัสดุต่างชนิดในอุตสาหกรรมที่มีการใช้รอยต่อของโลหะทั้งสองในการผลิตต่อไป

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ศึกษาความแข็งแรงกระแทกของรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่กระแสเชื่อมอาร์กโลหะผสมแตกต่างกัน
2. ศึกษาและเปรียบเทียบรอยแตกหักของรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่กระแสเชื่อมอาร์กโลหะผสมแตกต่างกัน

3. อุปกรณ์และวิธีการ

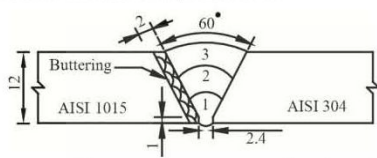
วัสดุทดลองเชื่อมใช้เหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก AISI 304 ตัดให้มีขนาดกว้าง 75 mm ยาว 150 mm หนา 12 mm ใช้โลหะเชื่อมหุ้มฟลักซ์ E309 เชื่อมรองพื้น และเชื่อมด้วยโลหะผสมฟลักซ์ E308 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 mm สมบัติทางเคมีดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ, โลหะเชื่อมรองพื้น E309 และโลหะผสม E308 (wt%)

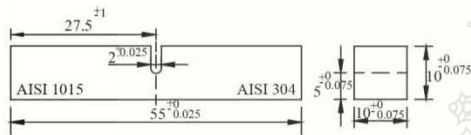
ธาตุผสม	AISI 1015	AISI 304	E309	E308
%C	0.17	0.03	0.06	0.03
%Si	0.23	0.65	0.70	0.70
%Mn	0.54	1.67	1.20	1.10
%P	0.01	0.043	0.02	0.025
%S	0.05	0.025	0.012	-
%Cr	-	18.84	24.2	18.9
%Ni	-	8.74	-	-
%Mo	-	-	-	-
%V	-	-	-	-

ใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะผสมเหล็กกล้า (Shielded Metal Arc Welding : SMAW) โดยช่างเชื่อมที่ผ่านการสอบวัดฝีมือจากสถาบันพัฒนาฝีมือและแรงงาน กระทรวงแรงงานและสวัสดิการสังคมในระดับที่ 1 เชื่อมด้วยกระแส 80-120 A โดยปากร่องวีรูมรวม 60 องศา (Mosneaga et al., 2002) ทำการเชื่อมรองพื้น (buttering) ด้วยโลหะผสมฟลักซ์ E309 บนวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 ด้วยกระแสเชื่อม 100 A และปากร่องวีรูมอีกครั้งให้เนื้อเชื่อมรองพื้นหนา 2 mm ด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ โดยมีความสูงของหน้าฐาน (root face) 1 mm (Kaçar and Baylan, 2004) มีระยะห่างของรอยต่อชิ้นงาน (root opening) 2.4 mm

แสดงดังรูปที่ 1 และทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ E308 จำนวน 3 ชั้น (Lee et al. 2004) และทำการทดสอบสมบัติต่อของรอยเชื่อมต่อไป



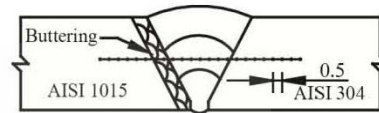
รูปที่ 1 แผนภาพขั้นตอนการออกแบบการเชื่อมโลหะต่างชนิด (หน่วย: mm)



รูปที่ 2 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E23-00 Type C (หน่วย: mm)

ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมถูกทำการตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงานมีระบบหมุนเวียนน้ำหล่อเย็นและทำการกัดชิ้นทดสอบแรงกระแทกด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ ตามมาตรฐาน ASTM E23-00 Type C บากร่องแบบ U-Notch บริเวณโลหะเชื่อม (Mukherjee and Pal, 2012) แสดงดัง รูปที่ 2 และทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก (impact testing machine) โดยใช้ความเร็วในการกระแทก (impact speed) 5.2 m/mim และน้ำหนักในการกระแทก (impact Load) 350 J บันทึกวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงกระแทกการทดสอบความแข็งทำการตัดชิ้นงานทดสอบตั้งฉากกับแนวเชื่อมและขัดกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 240-1200 และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 92 โดยใช้เครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์กดผ่านเป็นเส้นตรงขวางแนวเชื่อมทางด้านวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 ผ่านบริเวณรอยเชื่อมมาทางด้านวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 มีระยะห่างของรอยกด 0.5 mm โดยใช้

แรงในการกด 100 gf และเวลาในการกดแช่ 10 วินาที ดัง รูปที่ 3

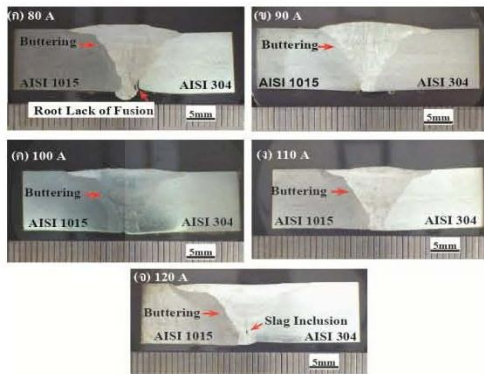


รูปที่ 3 ตำแหน่งทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM E92 (หน่วย: mm)

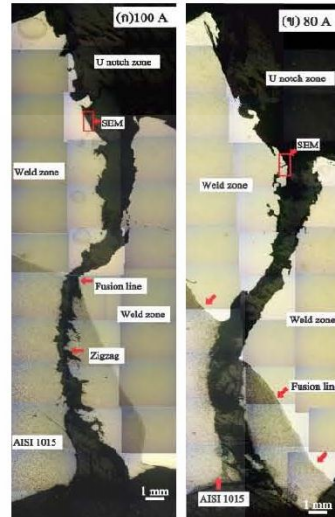
การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและการพังทลาย นำชิ้นงานทดสอบทำการขัดกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 240-1200 และผงเพชรขนาด 1 mm และทำการกัดกรดโครงสร้างมหภาค (macroetching) ด้วยสารละลายที่ประกอบด้วยไฮโดรคลอริก (HCL) ปริมาณ 50 mL และน้ำกลั่น(H₂O) ปริมาณ 50 mL ตามมาตรฐาน ASTM E 340 ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงกระแทกถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาว (Scanning Electron Microscope : SEM)

4. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

รูปที่ 4 แสดงผลการตรวจโครงสร้างมหภาคที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 80-120 A เพื่อจุดประสงค์ในการตรวจสอบความสมบูรณ์ของโลหะเชื่อม พบว่าที่กระแสเชื่อม 80 A พบจุดบกพร่องการหลอมไม่ติดบางส่วน (lack of fusion) ของรอยเชื่อมที่ไม่ติดกันระหว่าง โลหะเชื่อมกับโลหะชิ้นงานตรงฐานเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 แสดงดัง รูปที่ 4 (ก) มีขนาดของจุดบกพร่องกว้างเฉลี่ย 0.198 mm และยาวประมาณ 1.975 mm แสดงในรูปที่ 4 (ข)-(ง) อย่างไรก็ตามเมื่อเชื่อมด้วยกระแสที่มีค่าสูง คือ 120 A ที่แนวเชื่อมแรกแนวแรก เกิดการฝังในของสแลก (slag inclusion) จากการเชื่อมขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4 (จ) ขนาดของสแลกฝังในนี้มีค่าความกว้าง 0.359 mm ยาว 1.051 mm

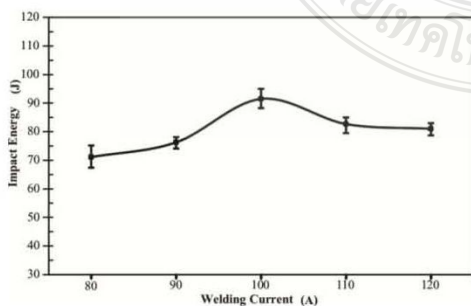


รูปที่ 4 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่กระแสต่างๆ (ก) 80 A (ข) 90 A (ค) 100 A (ง) 110 A และ (จ) 120 A



รูปที่ 6 โครงสร้างมหภาครอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก (ก) กระแสเชื่อม 100 A และ (ข) กระแสเชื่อม 80 A

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกและกระแสเชื่อมต่างๆ ผลการทดสอบพบว่า ที่กระแสเชื่อมเริ่มต้น 80 A มีค่าความแข็งแรงกระแทกต่ำซึ่งสอดคล้องกับการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคดังแสดงใน รูปที่ 4 (ก) ที่พบจุดบกพร่องการหลอมไม่ติดบางส่วน ขณะที่ให้กระแสเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นที่ 90 A พบว่าค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และมีแนวโน้มสูงขึ้นและค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดที่กระแสเชื่อม 100 A มีค่าความแข็งแรงกระแทกประมาณ 92 J และเมื่อเพิ่มกระแสเชื่อมสูงขึ้นที่ 110-120 A พบว่าค่าความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง



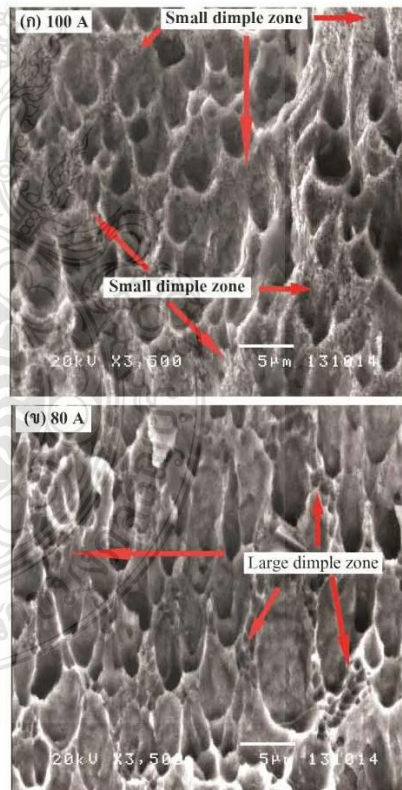
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของแรงกระแทกและกระแสเชื่อม

รูปที่ 6 แสดงผลการตรวจสอบลักษณะการพังทลายบริเวณด้านข้างรอยเชื่อม โดยเปรียบเทียบชิ้นงานที่มีค่าแรงกระแทกสูงสุดกับความแข็งแรงกระแทกต่ำสุด พบว่า ลักษณะการพังทลายจุดเริ่มต้นเกิดขึ้นมุมบากร่อง U notch ทั้ง 2 และทิศทางการแตกหักวิ่งผ่านเส้นหลอมละลาย (fusion line) ขอบเขตรอยต่อแนวเชื่อมทางโลหะชิ้นงานทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 แสดงดังลูกศรชี้ และพบรอยฉีกขาดมีลักษณะสลับฟันปลา (zigzag) ที่ชิ้นงานทดสอบมีค่าแรงกระแทกสูงบริเวณเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 แสดงดังลูกศรสีแดงชี้ดัง รูปที่ 6 (ก) ขณะที่ชิ้นทดสอบที่มีค่าแรงกระแทกต่ำแสดงดัง รูปที่ 6 (ข) ไม่พบรอยฉีกขาดลักษณะสลับฟันปลาที่บริเวณเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Jang et al., 2008) ในการจำลองการแตกหักทดสอบแรงกระแทกบากร่องวีด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีทิศทางรอยแตกหักไปในทิศทางโลหะชิ้นงาน (base metal) และบริเวณกระทบร้อน (Heat Affect Zone : HAZ)

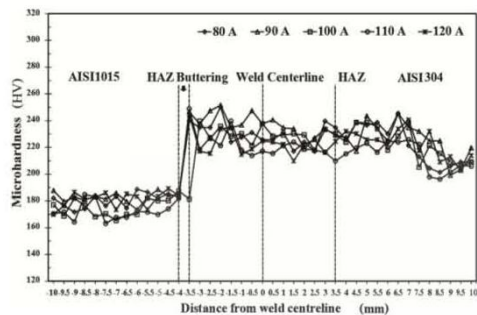
รูปที่ 7 แสดงการตรวจสอบรอยแตกหัก บริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 แสดงจุดตรวจสอบคังลูกศรสีแดง รูปที่ 7 (ก) (ข) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope :SEM) ชิ้นงานที่มีค่าแรงกระแทกสูงกับค่าความแข็งแรงกระแทกต่ำสุด พบว่า ที่กระแสเชื่อม 100 A ที่มีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงแสดงดังรูปที่ 7 (ก) พบพื้นที่รูปร่างคล้ายสามเหลี่ยมสลับพื้นปลาและบริเวณรอยนูนขนาดเล็ก (small dimples zone) เป็นรูปวงกลมหรือวงรีปริมาณมาก ดังนั้นผู้วิจัยคาดว่าเกิดการรอยนูนที่มีขนาดเล็กส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกระแทกสูงดัง รูปที่ 5 และ (Qinglei et al. 2011) ได้อธิบายการเกิดรอยนูนรูปวงกลมหรือวงรี เป็นลักษณะการพังทลายแบบเหนียว (ductile) ขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับ รูปที่ 7 (ข) ชิ้นงานทดสอบที่มีค่าแรงกระแทกต่ำที่กระแสเชื่อม 80 A พบพื้นที่รูปร่างคล้ายสามเหลี่ยมปลายแหลมสลับพื้นปลาแต่มีรอยนูนขนาดใหญ่ (large dimples zone) เป็นรูปวงกลมหรือวงรีบางส่วนอยู่ในบริเวณพื้นที่รูปร่างคล้ายสามเหลี่ยมปลายแหลมแสดงดังลูกศรสีแดง

รูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบความแข็งไมโครวิเคอร์บริเวณหน้าตัดของแนวเชื่อมรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก AISI 304 โดยเชื่อมรองพื้น (Buttering) ทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 ดังรูปที่ 8 พบว่า ค่าความแข็งบริเวณเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก AISI 304 โลหะชั้นงานค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ใกล้เคียงกับบริเวณกระพร้อน ทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก AISI 304 และค่าความแข็งมีแนวโน้มสูงใกล้เคียงกับบริเวณโลหะเชื่อม (Weld Metal : WM) อยู่ในช่วงระหว่าง 210-250 HV แต่ที่บริเวณพื้นที่เชื่อมรองพื้น ใกล้เคียงกับบริเวณกระพร้อน ทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 ที่จุดทดสอบตำแหน่ง -3 ถึง ตำแหน่ง

ทดสอบที่-4 ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดต่ำลงใกล้เคียงกับโลหะชั้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 (Wu, et al. 2014) ได้อธิบายว่าสาเหตุเกิดจากการได้รับความร้อนซ้ำ จากการเชื่อมหลายชั้น (Multi-layer) และเชื่อมซ้อนแนว (multi-pass) และ Jafarzadegan, et al. (2013) ได้อธิบายสาเหตุความแตกต่างของความแข็งเนื่องจากการมีอยู่ของปริมาณเฟอร์ไรต์และเฟลลไรต์กับความแข็งที่แตกต่างกัน และบริเวณพื้นที่เชื่อมรองพื้น อย่างไรก็ตาม โลหะชั้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 มีค่าความแข็งต่ำกว่าโลหะชั้นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก AISI 304



รูปที่ 7 ลักษณะรอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) กระแสเชื่อม 100 A และ (ข) กระแสเชื่อม 80 A



รูปที่ 8 ผลการทดสอบความแข็งแบบ ไมโครวิกเกอร์ของรอยเชื่อมต่อชน AISI 1015- AISI304

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความแข็งแรงกระแทกของรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค AISI 304 ที่มีผลต่อกระแสเชื่อมอาร์กลดหัวพลาสมาสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงของกระแสเชื่อมต่ำหรือสูงเกินไปส่งผลต่อจุดบกพร่องบริเวณรอยเชื่อมรอยของต่อ
2. การเพิ่มขึ้นของกระแสเชื่อมส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง สภาวะการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดประมาณ 92 J คือ กระแสเชื่อม 100 A
3. การพังทลายที่มีความแข็งแรงกระแทกสูงมีรอยรุมขนาดเล็กและรอยแตกหักมีลักษณะ สลับฟันปลาขณะที่ความแข็งแรงกระแทกต่ำมีรอยรุมมีขนาดใหญ่และความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อมมีค่าใกล้เคียงกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค AISI 304

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

การ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิสุพรรณบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์อำนวยความสะดวก อุปกรณ์เครื่องมือเครื่องจักรในการทำวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- Anawa, E. M. and A. G. Olabi (2008). "Using Taguchi method to optimize welding pool of dissimilar laser-welded components." *Optics & Laser Technology* 40(2): 379-388.
- Jafarzadegan, M., A. Abdollah-zadeh, A. H. Feng, T. Saeid, J. Shen and H. Assadi (2013). "Microstructure and Mechanical Properties of a Dissimilar Friction Stir Weld between Austenitic Stainless Steel and Low Carbon Steel." *Journal of Materials Science & Technology* 29(4): 367-372.
- Jang, Y. C., J. K. Hong, J. H. Park, D. W. Kim and Y. Lee (2008). "Effects of notch position of the Charpy impact specimen on the failure behavior in heat affected zone." *Journal of Materials Processing Technology* 201(1-3): 419-424.
- Javadi, Y. and M. A. Najafabadi (2013). "Comparison between contact and immersion ultrasonic method to evaluate welding residual stresses of dissimilar joints." *Materials & Design* 47(0): 473-482.
- Kaçar, R. and O. Baylan (2004). "An investigation of microstructure/property relationships in dissimilar welds between martensitic and austenitic stainless steels." *Materials & Design* 25(4): 317-329.

- Lee, H. T., S. L. Jeng, C. H. Yen and T. Y. Kuo (2004). "Dissimilar welding of nickel-based Alloy 690 to SUS 304L with Ti addition." *Journal of Nuclear Materials* 335(1): 59-69.
- Mosneaga, V. A., T. Mizutani, T. Kobayashi and H. Toda (2002). "Impact Toughness of Weldments in Al-Mg-Si Alloys." *Materials Transactions* Vol. 43(No. 6): 1381 - 1389.
- Mukherjee, M. and T. K. Pal (2012). "Influence of Heat Input on Martensite Formation and Impact Property of Ferritic-Austenitic Dissimilar Weld Metals." *Journal of Materials Science & Technology* 28(4): 343-352.
- Naffakh, H., M. Shamanian and F. Ashrafizadeh (2009). "Dissimilar welding of AISI 310 austenitic stainless steel to nickel-based alloy Inconel 657." *Journal of Materials Processing Technology* 209(7): 3628-3639.
- Paventhan, R., P. R. Lakshminarayanan and V. Balasubramanian (2012). "Optimization of Friction Welding Process Parameters for Joining Carbon Steel and Stainless Steel." *Journal of Iron and Steel Research, International* 19(1): 66-71.
- Qinglei, J., L. I. Yajiang, W. Juan and Z. Lei (2011). "Characterization on strength and toughness of welded joint for Q550 steel." *Bulletin of Materials Science* 34(1): 161-167.
- Sarkari Khorrani, M., M. A. Mostafaei, H. Pouraliakbar and A. H. Kokabi (2014). "Study on microstructure and mechanical characteristics of low-carbon steel and ferritic stainless steel joints." *Materials Science and Engineering: A* 608: 35-45.
- Srinivasan, P. B., V. Muthupandi, W. Dietzel and V. Sivan (2006). "An assessment of impact strength and corrosion behaviour of shielded metal arc welded dissimilar weldments between UNS 31803 and IS 2062 steels." *Materials & Design* 27(3): 182-191.
- Wu, Q., F. Lu, H. Cui, X. Liu, P. Wang and X. Tang (2014). "Role of butter layer in low-cycle fatigue behavior of modified 9Cr and CrMoV dissimilar rotor welded joint." *Materials & Design* 59: 165-175.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ว่าที่ร้อยตรีณัฐวีร์ สอกจะบก
วัน เดือน ปีเกิด	26 กันยายน 2527
ที่อยู่	63/4 หมู่ 5 ตำบลแม่ลา อำเภอนครหลวง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13260
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการทำความเย็นและการปรับอากาศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ประสบการณ์การทำงาน	เจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ บริษัท ไคกันอินดัสทรีส์ (ประเทศไทย) จำกัด พ.ศ. 2550 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	08-6762-7162
อีเมล	Natthavee.so@gmail.com

