

อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคูลุมที่มีผลต่อรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิม  
SUS 304 และเหล็กกล้าหล่อ SCW 410

EFFECT OF GMAW PARAMETERS ON BUTT JOINT OF SUS 304  
STAINLESS STEEL AND SCW 410 CAST STEEL

กลไกร นาโควงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมที่มีผลต่อรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิม

SUS 304 และเหล็กกล้าหล่อ SCW 410

กลไกกร นาโควงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมที่มีผลต่อรอยต่อชน เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และเหล็กกล้าหล่อ SCW 410
ชื่อ – นามสกุล	นายกลไกร นาโควงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2556

### บทคัดย่อ

การลดต้นทุนการผลิตเป็นหนึ่งในวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มผลผลิตของอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ ด้วยเหตุนี้การลดต้นทุนการผลิตโดยใช้วัสดุที่ถูกกว่าแต่มีสมบัติใกล้เคียงกับวัสดุเดิมจึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ ซึ่งส่วนต่อไอเนียของรถยนต์สมัยใหม่เป็นส่วนที่มีการผลิตโดยใช้วัสดุหลายชนิดที่มีการนำเอาเหล็กกล้าหล่อมาทดแทนเหล็กกล้าไร้สนิม อย่างไรก็ตามการศึกษาเพื่อหาตัวแปรการเชื่อมที่ทำให้ได้สมบัติรอยต่อที่ดีที่สุดเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องมีการทำการศึกษา ด้วยเหตุนี้งานวิจัยที่มีจุดประสงค์ในการนำเอาเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 มาทดแทนเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ในการผลิตชิ้นส่วนต่อไอเลียของโครงสร้างรถยนต์ และทำการศึกษอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อ

วัสดุที่ใช้คือ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก SUS 304 หนา 10 มิลลิเมตร และเหล็กกล้าหล่อ SEW 410 หนา 10 มิลลิเมตร ขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร แผ่นโลหะถูกประกบกันเป็นรอยต่อชนและทำการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม ที่มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วย กระแสเชื่อม 140-220 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200-400 มิลลิเมตรต่อนาที และอัตราการไหลแก๊สปกคลุม 10-20 ลิตรต่อนาที รอยต่อชนที่ผ่านการเชื่อมด้วยตัวแปรการเชื่อมที่กำหนดถูกนำมาทำการทดสอบสมบัติทางกลและตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การเพิ่มขึ้นของกระแสในการเชื่อมและความเร็วเดินแนวเชื่อมส่งผลต่อความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมและการลดความกว้างของแนวเชื่อมและความเข้มลึกของแนวเชื่อม สภาวะการเชื่อมที่ได้ค่าความแข็งแรงกระแทกที่ดีที่สุด คือกระแสในการเชื่อม 100 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที มีค่าประมาณ 297 จูล ค่าความแข็งแรงบริเวณพื้นที่กระทบร้อนทั้งสองด้านของแนวเชื่อม และในโลหะเชื่อมทุกสภาวะนั้นมีค่าสูงกว่าโลหะหลักในการทดลองทั้งสองชนิด โครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระทบร้อนด้านรอยต่อด้านเหล็กกล้าหล่อ แสดงเม็ดเกรนมีรูปร่างสมมาตร บริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อมประกอบด้วยเดนไดรต์ละเอียด โครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม แสดงเม็ดเกรนมีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากกว่าโครงสร้างจุลภาคโลหะหลัก

**คำสำคัญ :** รอยต่อวัสดุต่างชนิด เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าหล่อ ความแข็งแรงกระแทก

<b>Thesis Title</b>	Effect of GMAW Parameters on Butt Joint of SUS 304 Stainless Steel and SCW 410 Cast Steel
<b>Name - Surname</b>	Mr.Konkrai Nakowong
<b>Program</b>	Manufacturing Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Kittipong Kimapong, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2013

## ABSTRACT

Decreasing of the processing cost is one of an effective method to increase a productivity of an automobile industry. For decreasing the process cost, some cheaper materials that show the same properties are introduced to an automobile industry. A muffler part of the recent automobile is one of the parts that is produced using a new combination of materials using cast steel to replace stainless steel. However, a study of welding parameter optimization that produced a sound joint should be investigated. Therefore, this research work aims to introduce the SCW 410 cast steel to replace SUS 304 stainless steel for producing a muffler part or car structure and to investigate the effect of welding parameters that affect to joint properties.

Materials used in this experiment were SUS 304 austenitic stainless steel and SCW 410 cast steel that had a dimension of 10 millimeters in thickness, 50 millimeters in width and 150 millimeters in length. The plates were set to be a butt joint and to weld the joint using various gas metal arc welding parameters such as welding current of 140-220 A, a traveling speed of 200-400 mm/min and gas flow rate of 10-20 l/min. The butt joints that were produced by a given welding parameter were an investigation of mechanical test and metallographic examination.

The summarized experimental results are as follows. Increasing of a welding current and a travelling speed affected to produce a sound joint and to decrease a width of a weld bead and a penetration of a weld. The optimized welding parameters that showed the impact strength of 297 J were a welding current of 180 A, a traveling speed 200 mm/min and a gas flow rate of 10l/min. The hardness of the heat affected zone and the welded metal of the joint was higher than that of the base metal. The microstructure of the heat affected zone of cast steel side showed a regular grain shape. The middle of the welded metal showed a fine dendrite structure. The microstructure of the stainless steel heat affected zone showed a regular grain that was finer than that of the base metals.

**Keywords :** dissimilar materials joint, stainless steel, cast steel, impact strength

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้จากการช่วยเหลือของผู้มีอุปการคุณ ที่ให้ข้อเสนอแนะ ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์และให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล ดร.ชัยยะ ปรานีตพลกรัง และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทรัมย์ ที่ให้คำแนะนำในการจัดทำทำให้งานสำเร็จตามวัตถุประสงค์

ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำแผนกวิชาโลหะการ วิทยาลัยเทคนิคสกลนคร ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำแผนกวิชาเทคนิคการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสกลนคร ที่ให้ความร่วมมือและอนุญาตให้ใช้อุปกรณ์ในการทดลองในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ขอคุณอาจารย์สุริยา ประสมทอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ วิทยาเขตสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้ห้องทดลองทางโลหะวิทยา ขอขอบคุณคุณเจษฎา แก้ววิจิตร ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายขอขอบคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ ภรรยา ญาติ และเพื่อน ๆ ที่คอยให้กำลังใจตลอดมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยครั้งนี้ เป็นผลมาจากความกรุณาของท่านข้างต้นผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

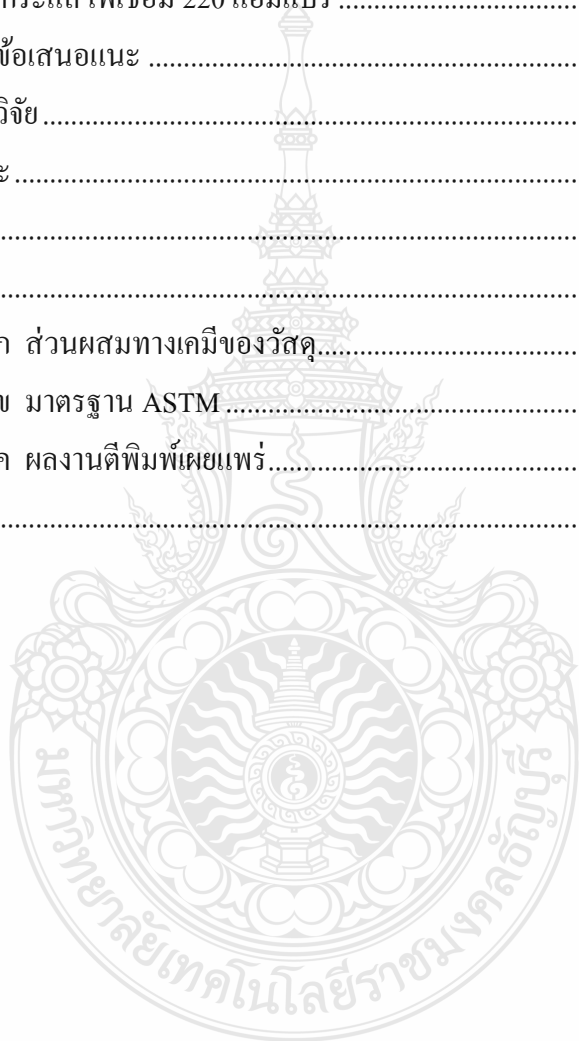
กลไกร นาโควงค์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(15)
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>16</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	16
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	18
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	18
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	18
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	19
<b>2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>20</b>
2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก.....	20
2.2 การเชื่อม GMAW.....	24
2.3 กระแสเชื่อม (Welding Current).....	28
2.4 แก๊สคลุม (Shielding Gas).....	30
2.5 ลวดเชื่อม (Electrode Wire).....	32
2.6 การทดสอบสมบัติทางกล.....	33
2.7 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา.....	34
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
<b>3 วิธีการดำเนินงาน.....</b>	<b>40</b>
3.1 การศึกษารวบรวมข้อมูล.....	40
3.2 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	40
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	43
3.4 ทดสอบและเก็บข้อมูลผลการทดลอง.....	45

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการวิจัย .....	49
4.1 อิทธิพลของกระแสไฟเชื่อม 140 แอมแปร์ .....	49
4.2 อิทธิพลของกระแสไฟเชื่อม 180 แอมแปร์ .....	68
4.3 อิทธิพลของกระแสไฟเชื่อม 220 แอมแปร์ .....	86
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	104
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	104
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	105
รายการอ้างอิง.....	106
ภาคผนวก.....	108
ภาคผนวก ก ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ.....	109
ภาคผนวก ข มาตรฐาน ASTM .....	111
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	118
ประวัติผู้เขียน .....	132



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกเกรด AISI 304 (สภาพ Annealed) .....	21





## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ส่วนประกอบท่อไอเสีย .....	17
2.1	ผลของสมบัติทางกายภาพต่อการเชื่อม .....	22
2.2	เปรียบเทียบการขยายตัวเนื่องจากความร้อนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน	23
2.3	ลักษณะของการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน .....	24
2.4	การอาร์กของการเชื่อมแบบ GMAW .....	25
2.5	การถ่ายโอนโลหะแบบต่างๆ .....	26
2.6	การถ่ายโอนโลหะแบบพัลส์ .....	28
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมกับความเร็วในการป้อนลวด .....	29
2.8	รูปแบบของกระแสเชื่อมแบบพัลส์ .....	30
2.9	ชิ้นงานมาตรฐานการทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี .....	34
2.10	ลักษณะการทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี .....	34
3.1	ขนาดของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และเหล็กกล้าหล่อ SCW 410.....	40
3.2	อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานในการเชื่อม .....	41
3.3	ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AWS.A5.9 308LSi: MIG .....	41
3.4	แก๊สปกคลุมอาร์โกชนิด 64 ที่ใช้ในการเชื่อม .....	42
3.5	อุปกรณ์ควบคุมความเร็วเดินแนวเชื่อม .....	42
3.6	เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการวิจัย.....	43
3.7	มาตรฐาน AWS D1.1/D1.1M:2006 .....	43
3.8	การจับยึดชิ้นงานในการเชื่อม .....	44
3.9	ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมความเร็วเดินแนวเชื่อม .....	44
3.10	ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นงาน .....	45
3.11	ชิ้นงานหลังจากผ่านการเชื่อม .....	45
3.12	ลักษณะชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E23 .....	46
3.13	เครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทก CBD-300 Pendulum.....	46
3.14	ระยะการทดสอบความแข็ง .....	47
3.15	เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Micro Vickers.....	47
3.16	การวัดขนาดแนวเชื่อม .....	48

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 กล้องจุลทรรศน์และอุปกรณ์บันทึกข้อมูล .....	48
4.1 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสะเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตร ต่อนาที .....	49
4.2 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสะเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม ลิตรต่อนาที .....	50
4.3 ลักษณะการพังทลายที่กระแสะเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที .....	51
4.4 โครงสร้างมหภาคที่กระแสะเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตร ต่อนาที .....	52
4.5 ค่าความแข็งที่กระแสะเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที	53
4.6 โครงสร้างจุลภาคที่กระแสะเชื่อม 140 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อ นาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที.....	54
4.7 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสะเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตร ต่อนาที .....	56
4.8 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสะเชื่อม 140 แอมแปร์อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที .....	57
4.9 ลักษณะการพังทลายที่กระแสะเชื่อม 140 แอมแปร์อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที .....	58
4.10 โครงสร้างมหภาคที่กระแสะเชื่อม 140 แอมแปร์อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตร ต่อนาที.....	59
4.11 ค่าความแข็งที่กระแสะเชื่อม 140 แอมแปร์อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตร ต่อนาที.....	60
4.12 โครงสร้างจุลภาคที่กระแสะเชื่อม 140 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม400 มิลลิเมตร ต่อนาทีอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที.....	61
4.13 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสะเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตร ต่อนาที .....	62

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที.....	63
4.15 ลักษณะการพังทลายที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที.....	64
4.16 โครงสร้างมหภาคที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที.....	65
4.17 ค่าความแข็งที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที.....	66
4.18 โครงสร้างจุลภาคที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที .....	67
4.19 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที.....	68
4.20 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที.....	69
4.21 ลักษณะการพังทลายที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที.....	70
4.22 โครงสร้างมหภาคที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที.....	71
4.23 ค่าความแข็งที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที.....	72
4.24 โครงสร้างจุลภาคที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที .....	73
4.25 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที.....	74
4.26 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที.....	75

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 ลักษณะการพังทลายที่กระแสน้ำเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที.....	76
4.28 โครงสร้างมหภาคที่กระแสน้ำเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที.....	77
4.29 ค่าความแข็งที่กระแสน้ำเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อ นาที.....	78
4.30 โครงสร้างจุลภาคที่กระแสน้ำเชื่อม 180 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที .....	79
4.31 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสน้ำเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อ นาที.....	80
4.32 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสน้ำเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อ นาที.....	81
4.33 ลักษณะการพังทลายที่กระแสน้ำเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อ นาที.....	82
4.34 โครงสร้างมหภาคที่กระแสน้ำเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อ นาที.....	83
4.35 ค่าความแข็งที่กระแสน้ำเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อ นาที.....	84
4.36 โครงสร้างจุลภาคที่กระแสน้ำเชื่อม 180 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อ นาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อ นาที .....	85
4.37 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสน้ำเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อ นาที.....	86
4.38 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสน้ำเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อ นาที.....	87
4.39 ลักษณะการพังทลายที่กระแสน้ำเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อ นาที.....	88

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.40 โครงสร้างมหภาคที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตร ต่อนาที.....	89
4.41 ค่าความแข็งที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อ นาที.....	90
4.42 โครงสร้างจุลภาคที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตร ต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที .....	91
4.43 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตร ต่อนาที.....	92
4.44 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที.....	93
4.45 ลักษณะการพังทลายที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที.....	94
4.46 โครงสร้างมหภาคที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตร ต่อนาที.....	95
4.47 ค่าความแข็งที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตร ต่อนาที.....	96
4.48 โครงสร้างจุลภาคที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตร ต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที .....	97
4.49 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตร ต่อนาที.....	98
4.50 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที.....	99
4.51 ลักษณะการพังทลายที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที.....	100
4.52 โครงสร้างมหภาคที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตร ต่อนาที.....	101

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.53 ค่าความแข็งที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตร ต่อนาที.....	102
4.54 โครงสร้างจุลภาคที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตร ต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที.....	103



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

<b>Ar</b>	Argon
<b>C</b>	Carbon
<b>CO<sub>2</sub></b>	carbon dioxide
<b>Cr</b>	Chromium
<b>GMAW</b>	Gas Metal arc Welding
<b>He</b>	Helium
<b>HV</b>	Vickers Hardness
<b>MIG</b>	Metal Inert Gas
<b>Mn</b>	Manganis
<b>Mo</b>	Molybdenum
<b>P</b>	phosphorus
<b>SCW 410</b>	Cast Steel
<b>Si</b>	Silicon
<b>SUS 304</b>	Austenitic Stainless Steel
<b>Ti</b>	Titanium

# บทที่ 1

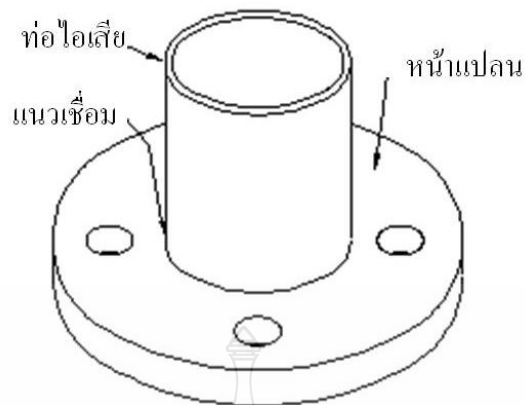
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์มีการแข่งขันทางด้านการตลาดอย่างสูง บริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนวิธีการต่างๆ เพื่อลดต้นทุนในการผลิตสินค้า โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสินค้า เช่น วัสดุดิบ หรือวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น ท่อไอเสียก็เป็นชิ้นส่วนสำคัญในโครงสร้างรถยนต์ที่มีความจำเป็นในการลดต้นทุนการผลิต โดยการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิต ซึ่งวัสดุเดิมจะเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม ในอดีตที่ผ่านมาเหล็กกล้าไร้สนิมที่นำมาใช้ในการผลิตท่อไอเสีย เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) เนื่องจากสมบัติเด่นหลายประการ สามารถใช้ได้ทั้งในสภาวะอุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง มีความสามารถในการเชื่อมดีกว่าเหล็กผสมสูงทั่วไป เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกสามารถทำการเชื่อมได้ง่ายที่สุด และเชื่อมได้โดยไม่ต้องให้ความร้อนก่อนทำการเชื่อม หรือให้ความร้อนภายหลังการทำเชื่อม แต่สิ่งที่ต้องระวัง คือ ผลของความร้อนที่สูงเกินไปทำให้เกรนหยาบและไม่ทนต่อแรงกระแทก นอกจากนี้อุณหภูมิสูงทำให้ชิ้นงานเชื่อมบิดเบี้ยวได้ [1]

วิธีการเชื่อมท่อไอเสียจะใช้กระบวนการเชื่อมด้วยไฟฟ้า (Arc Welding Process) เป็นกระบวนการหนึ่งที่ทำให้โลหะหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน โดยอาศัยความร้อนที่เกิดจากการอาร์กทางไฟฟ้า ระหว่างชิ้นงาน โลหะและลวดเชื่อม ในทางอุตสาหกรรมนิยมนำมาใช้ในการต่อวัสดุ เนื่องจากสามารถเชื่อมต่อวัสดุได้ทั้งโลหะที่อยู่ในกลุ่มเหล็กและนอกกลุ่มเหล็ก กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าที่นิยมใช้คือ การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding; GMAW) ที่มีชื่อเรียกว่า กระบวนการเชื่อม MIG (MIG Welding Process) เป็นกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าที่ใช้ลวดเชื่อมเส้นเปลือยที่มีลักษณะเป็นลวดเส้นตัน (Solid Wire) มาทำการอาร์กกับโลหะชิ้นงาน ความร้อนที่เกิดจากการอาร์กทำการหลอมละลายลวดเชื่อมและโลหะชิ้นงานเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน และใช้แก๊สคลุมบริเวณโลหะหลอมละลายของงานเชื่อม เพื่อป้องกันไม่ให้ออกซิเจนจากบรรยากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะหลอมละลาย การเชื่อมนี้ได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอย่างแพร่หลาย [2]





รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบท่อไอเสีย

รูปที่ 1.1 แสดงส่วนประกอบหลักของท่อไอเสีย ซึ่งประกอบด้วยหน้าแปลนที่มีหน้าที่ในการจับยึดเข้ากับตัวเครื่องยนต์ที่เป็นโลหะแผ่นหนาประมาณ 5-10 มิลลิเมตร และส่วนท่อไอเสียที่มีรูปร่างเป็นท่อผนังบางความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ในอุตสาหกรรมปัจจุบันของผู้ผลิตรถยนต์ในประเทศไทยพบว่า ส่วนประกอบทั้งหมดนั้นใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก SUS 304 เป็นวัสดุหลักในการผลิตดั้งเดิกล่ามาแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก SUS 304 นั้นมีข้อเสีย คือ มีราคาที่สูงทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้จากการร่วมกันพิจารณา ระหว่างผู้วิจัยและบริษัทผลิตชิ้นส่วนผลิตรถยนต์แห่งหนึ่ง ได้มีความเห็นร่วมกันในการคิดค้นหาวิธีการในการลดค่าใช้จ่ายการผลิตท่อไอเสียขึ้น โดยมีสมมติฐานการลดค่าใช้จ่าย คือ ค่าใช้จ่ายในการผลิตลดลงและคุณภาพของรอยต่อต้องเท่ากับหรือสูงกว่ารอยต่อที่ใช้อยู่ ณ ปัจจุบัน ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำหน้าแปลนจากเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก SUS 304 เป็นเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ซึ่งเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 เป็นเหล็กที่มีโครงสร้างพื้นเป็นออสเทนไนต์คล้ายคลึงกับโครงสร้างออสเทนไนต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก SUS 304 ซึ่งคาดว่าสมบัติทางกายภาพที่คล้ายกัน จะทำให้ได้โลหะเชื่อมที่มีคุณภาพใกล้เคียงกันได้ [3]

ดังนั้นเพื่อลดต้นทุนในการผลิตท่อไอเสียรถยนต์ ผู้วิจัยจึงเสนอแนวคิดในการทดแทนชิ้นส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก SUS 304 ในระบบท่อไอเสียของรถยนต์ด้วยเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 และทำการเชื่อมโลหะทั้งสองเข้าด้วยกันด้วยวิธีการเชื่อม GMAW เพื่อศึกษาตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อคุณภาพรอยเชื่อม และมีผลต่อสมบัติทางกลและ โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม ซึ่งหากสามารถได้แนวเชื่อมที่มีคุณภาพที่ยอมรับได้ จะสามารถเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุทดแทนเพื่อลดต้นทุนในการผลิต

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม ที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และเหล็กกล้าหล่อ SCW 410

1.2.2 ศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และเหล็กกล้าหล่อ SCW 410

## 1.3 สมมติฐานการวิจัย

ตัวแปรของการเชื่อม เช่น กระแสเชื่อม ความเร็วเดินแนวเชื่อม และอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และเหล็กกล้าหล่อ SCW 410

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองใช้เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร ความหนา 10 มิลลิเมตร และเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร ความหนา 10 มิลลิเมตร

1.4.2 กระแสเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมมี 3 ระดับ คือ 140 180 และ 220 แอมป์

1.4.3 อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 15 และ 20 ลิตรต่อนาที

1.4.4 ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที

1.4.5 ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการเชื่อม AWS.A5.9 308Lsi : MIG ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 มิลลิเมตร

1.4.6 อัตราการป้อนลวด 7 เมตรต่อนาที

1.4.7 ระยะของปลายท่อนำลวดถึงปลายลวดเชื่อม 10 มิลลิเมตร

1.4.8 มุมหัวเชื่อมประมาณ 90 องศา

1.4.9 แก๊สที่ใช้ปกคลุมแนวเชื่อมคือแก๊สอาร์โกน 64

1.4.10 ลักษณะของการเชื่อม แบบต่อชน ขึ้นงานบากมุมรวม 60 องศา

1.4.11 ทดสอบสมบัติทางกลของรอยเชื่อม ทางด้านการทดสอบค่าความแข็งแรงกระแทก และทดสอบค่าความแข็ง

1.4.12 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงตัวแปรของการเชื่อม ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และเหล็กกล้าหล่อ SCW 410

1.5.2 ทราบถึงตัวแปรของการเชื่อม ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และเหล็กกล้าหล่อ SCW 410



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จะมีปริมาณโครเมียมผสมอยู่ประมาณ 16-25 % โดยน้ำหนัก และมีปริมาณนิกเกิลผสมอยู่ประมาณ 8-20% โดยน้ำหนัก มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Face-Centered Cubic (FCC) ซึ่งเรียกว่าออสเทนไนต์ และจะคงลักษณะโครงสร้างนี้ไว้ในทุกอุณหภูมิ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จะเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็กได้ และไม่สามารถทำให้แข็งได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนเช่นเดียวกับกลุ่มเฟอร์ริติก ตามมาตรฐานของ America Iron and Steel Institute (AISI) ได้กำหนดไว้อยู่ในตระกูล 200 และตระกูล 300 เป็นกลุ่มที่มีความยืดหยุ่นและความเหนียวดีมาก มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดี นอกจากนั้นยังสามารถทำให้แข็งได้ด้วยวิธี Cold Work การที่โครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จะสามารถคงลักษณะเป็นออสเทนไนต์ได้ตลอดทุกอุณหภูมิ จึงจำเป็นที่ต้องมีธาตุผสมที่สามารถทำให้โครงสร้างออสเทนไนต์เสถียรในเหล็กกล้าไร้สนิมด้วย เช่น นิกเกิล ซึ่งเป็นธาตุหลัก นอกจากนั้นแล้วยังมีคาร์บอนและไนโตรเจนอีกด้วยเนื่องจากเป็นธาตุที่สามารถละลายอยู่ในโครงสร้าง fcc ได้ ตามธรรมชาติเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกสามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 กลุ่มย่อย ตามลักษณะการผสมระหว่างโครเมียมกับธาตุอื่น คือกลุ่มโลหะผสมโครเมียม-นิกเกิล (Chromium-Nickle Alloys) ได้แก่ เกรด AISI 304 และ AISI 316 และกลุ่มโลหะผสมโครเมียม-แมงกานีส-ไนโตรเจน (Chromium-Manganese-Nitrogen Alloys ) ได้แก่ เกรด AISI 201 และ AISI 241 โดยที่กลุ่มหลังนี้จะมีปริมาณนิกเกิลน้อยและจะใช้ปริมาณไนโตรเจนที่สูงเป็นตัวรักษาโครงสร้างเพิ่มความสามารถในการละลายในออสเทนไนต์ และป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ และการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนยังส่งผลให้เพิ่มความแข็งแรงแก่เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้

ธาตุผสมต่างๆ ที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมจะส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น เช่น การผสมโมลิบดีนัมลงในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 และ AISI 317 เพื่อช่วยต้านทานต่อการเกิดการกัดกร่อนในสภาพที่มีคลอไรด์ หรือในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มที่มีโครเมียมสูง เช่น AISI 309 และ AISI 310 จะใช้ในลักษณะงานในสภาพที่มีการ Oxidation และการใช้งานที่ระดับอุณหภูมิสูง ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนิกเกิลสูง เช่น กลุ่ม AISI 20Cb-3 มักจะใช้ในลักษณะงานที่เป็นกรดรุนแรงหรืองานที่ต้องการป้องกันมิให้เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) เมื่อใช้งานในระดับอุณหภูมิสูง จะมีการผสมไทเทเนียมหรือนิโอเบียม เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม AISI 347 และ AISI 321 [4] สมบัติโดยรวมของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก สามารถสรุปได้ดังนี้ [5]

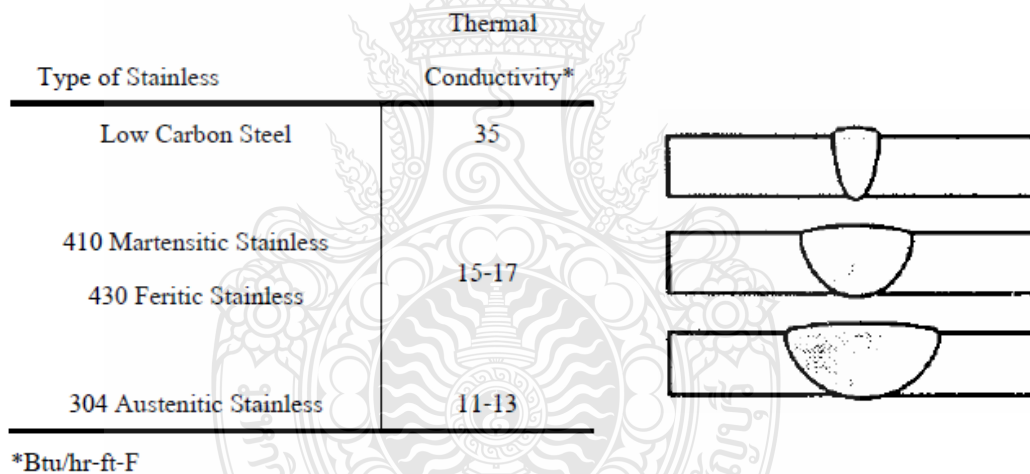
- 1) ไม่สามารถเหนียวทำให้เป็นแม่เหล็กได้
- 2) มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนทั่วไปในระดับดี
- 3) ไม่สามารถใช้กระบวนการทางความร้อนได้ (ไม่สามารถอบชุบด้วยความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งหรือความแข็งแรงได้)
- 4) สามารถทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ด้วยวิธี Cold Work
- 5) มีความยึดตัวและความเหนียวดีทั้งอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ (นิกเกิลเป็นธาตุที่ช่วยด้านสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำมาก)
- 6) มีความต้านทานต่อสิ่งดังต่อไปนี้ไม่ดี
  - (1) Stress Corrosion Cracking
  - (2) Pitting Corrosion
  - (3) Crevice Corrosion

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก เกรด AISI 304 (สภาพ Annealed) [4]

Density	(g/cm <sup>3</sup> )	8.0
Elastic modulus	(GPa)	193
Thermal conductivity @ 1000 °C	(W/m.k)	16.2
@ 5000 °C	(W/m.k)	21.5
Mean coefficient of thermal expansion from 0 °C –538 °C	(µm/m.°C)	18.4
Specific heat	(J/kg.k)	500
Electrical resistivity	(nΩ.m)	720
Magnetic permeability	(b)	1.02
Melting range	(°C)	1400-1450
Rockwell hardness (Scale B)	(HR <sub>B</sub> )	81
Yield Strength , 0.2% offset	(ksi)	35
Ultimate Tensile Strength	(ksi)	85
Elongation (2.0 inch.)	(%)	60
Reduction of area	(%)	70
Charpy V-notch Impact Strength	(J)	>325

2.1.1 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมต่อความสามารถในการเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมมีสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) ที่สำคัญและแตกต่างจากเหล็กกล้าคาร์บอนอยู่สองประการคือการนำความร้อนและการขยายตัวเนื่องจากความร้อน

2.1.1.1 การนำความร้อน เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก มีความสามารถในการนำความร้อนประมาณ 1/3 ของเหล็กกล้าคาร์บอน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยค่าการเชื่อมเดียวกัน จะพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีการนำความร้อนออกไปจากบริเวณแนวเชื่อมช้ากว่าเหล็กกล้าคาร์บอน จึงทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีการบิดตัวมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน ดังรูปที่ 2.1 และการเพิ่มธาตุผสม เช่น นิกเกิล โครเมียม หรือทองแดงลงในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก จะทำให้มีความสามารถในการนำความร้อนลดลง [4]



รูปที่ 2.1 ผลของสมบัติทางกายภาพต่อการเชื่อม

2.1.1.2 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ระหว่างการเชื่อมจะมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อน และทำให้เกิดการบิดงอของโลหะที่ทำการเชื่อมค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนจะเป็นสิ่งที่บ่งบอกว่าโลหะนั้นจะมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนและหดตัวเมื่อเย็นตัวมาน้อยเพียงใด หากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวมากก็จะมี การขยายตัวและหดตัวมากและส่งผลให้เกิดการบิดตัวมากขึ้นตามลำดับ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนประมาณ 50% ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติกและมาร์เทนซิติกจะมี

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอน ดังนั้นหากทำการปรับเปลี่ยนค่าการเชื่อมสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก เพื่อให้ได้ขนาดรอยเชื่อมใกล้เคียงกับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนหรือมาร์เทนซิติก จะพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจะมีการบิดตัวมากขึ้น ดังรูปที่ 2.2 และการเพิ่มธาตุผสม เช่น นิกเกิล หรือทองแดงลงในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก จะทำให้มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนลดลง [4]

กล่าวโดยสรุปว่า การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมจะใช้เทคนิคการเชื่อมที่แตกต่างกับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน เนื่องจากการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมนั้นจะมีโอกาสเสี่ยงต่อการบิดตัวได้สูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน ดังนั้นการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมจะต้องควบคุมปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) ให้ต่ำที่สุด โดยการใช้กระแสเชื่อมที่ต่ำ ใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็ก เดินแนวเชื่อมให้เร็วขึ้น การเชื่อมชิ้นงานที่บางกว่า 0.25 นิ้ว (6.35 มิลลิเมตร) ควรจะใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน และหากเป็นชิ้นงานที่หนาอาจจะใช้เทคนิคการเชื่อมแบบวันระยะ (Step Welding) หรืออาจใช้แผ่นโลหะที่นำความร้อนสูงประกบได้ชิ้นงานที่ทำการเชื่อม [6]

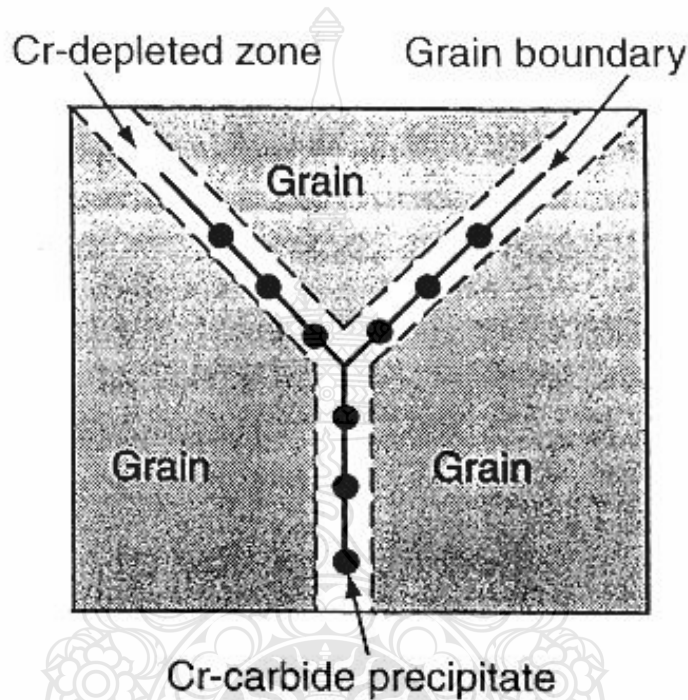
Type of Stainless	Main Coefficient of Thermal Expansion
Low Carbon Steel	6.5
410 Martensitic Stainless	6.5
430 Ferritic Stainless	
304 Austenitic Stainless	10

\*From 30-1000 °F (micro-in/in-F)

รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบการขยายตัวเนื่องจากความร้อนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน

2.1.2 การกัดกร่อนตามขอบเกรน เนื่องจากในเหล็กทั่ว ๆ ไปจะมีคาร์บอนผสมอยู่ เมื่อผสมโครเมียมลงไปโครเมียมเป็นธาตุที่รวมกับคาร์บอนได้ดีให้โครเมียมคาร์ไบด์ ด้วยเหตุนี้ปริมาณของโครเมียมในเหล็กจะลดลงต่ำกว่า 12% (ถ้าผสมโครเมียมเพียง 12 %) ทำให้เหล็กไม่มีสมบัติต้านทานการเป็นสนิมได้ โดยทั่ว ๆ ไป ผสมโครเมียมตั้งแต่ 15 - 18 % เพื่อให้มีปริมาณโครเมียมสูงกว่า 12 %

แม้ว่าจะมีโครเมียมรวมกับคาร์บอนเสียบ้างก็ตาม การเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ ส่วนใหญ่จะเกิดอยู่ตามขอบเกรน (Grain Boundary) ดังนั้น ถ้าในเหล็กมีโครเมียมต่ำกว่า 15 % อาจจะทำให้ตามบริเวณขอบเกรนของเหล็กมีโครเมียมต่ำกว่า 12 % อาจจะทำให้เหล็กเกิดการสึกกร่อนขึ้นได้ตามบริเวณขอบเกรน ซึ่งเรียกว่า Intergranular Corrosion การเกิดผุกร่อนลักษณะนี้จะเกิดตามเกรน และกินลึกลงไปเมื่อเกรนที่ถูกกัดกร่อนหลุดไปที่ละเกรน จุดที่ผิวอาจจะมองเห็นไม่มากแต่ลึกลงไปอาจจะลึกมากก็ได้ [7]



รูปที่ 2.3 ลักษณะของการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน

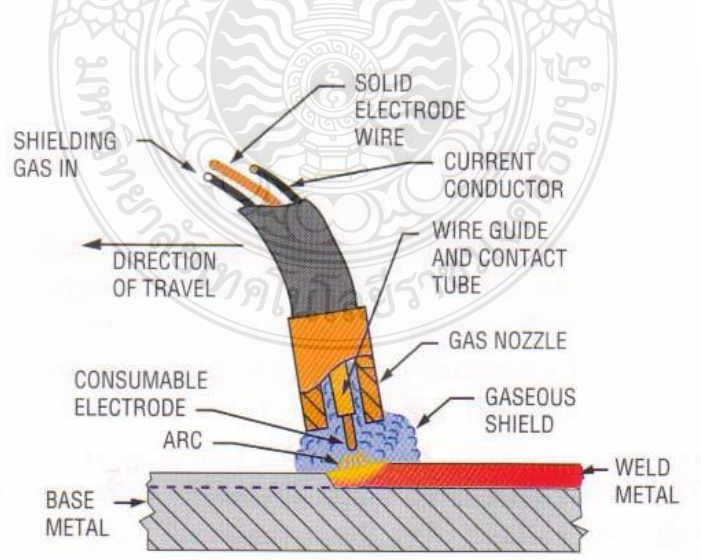
## 2.2 การเชื่อม GMAW

การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม เป็นการเรียกชื่อโดยรวมและจะใช้ชื่อแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของแก๊สคลุม เช่น การเชื่อมมิก (Metal Inert Gas Arc Welding: MIG) จะใช้แก๊สอาร์กอน (Ar) แก๊สฮีเลียม (He) หรือแก๊สผสมระหว่างอาร์กอนและฮีเลียมเป็นแก๊สคลุมขณะเชื่อม การเชื่อมแม็ก (Metal Active Gas Arc Welding: MAG) เป็นการพัฒนาโดยการนำเอาแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือแก๊สอื่นๆ มาผสมกับแก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สคลุมขณะเชื่อมส่วนการเชื่อม  $\text{CO}_2$  คือการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สคลุมขณะเชื่อมเพียงอย่างเดียว [2]



กรรมวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม ลวดเชื่อมจะถูกหลอมเหลวและเติมเนื้อโลหะเชื่อม เหมือนกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ทั่วไป เพียงแต่การเชื่อมแบบ GMAW จะใช้แก๊สคลุมขณะเชื่อมแทนการใช้ฟลักซ์ ดังนั้น จึงไม่มีสแลกปกคลุมภายหลังการเชื่อม โดยกระแสเชื่อมจากเครื่องเชื่อมจะถูกส่งไปสู่ท่อนำลวดภายในหัวเชื่อม ผ่านไปยังลวดเชื่อมสู่ชิ้นงาน ลวดเชื่อมจะทำหน้าที่เป็นตัวอาร์กและหลอมละลายรวมกับชิ้นงานเป็นการเติมเนื้อโลหะชุดป้อนลวดจะหน้าที่ขั้วดันลวดเชื่อมไปสู่การอาร์กด้วยอัตราความเร็วที่สัมพันธ์กับการหลอมละลายของลวดเชื่อมด้วยชุดควบคุมกระแสเชื่อมของเครื่องเชื่อม

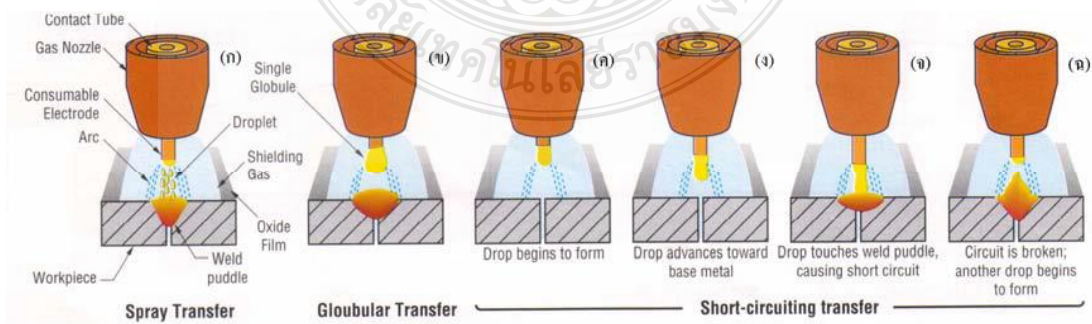
2.2.1 การอาร์ก (Arc) ในกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม ความร้อนที่หลอมลวดเชื่อมและโลหะชิ้นงานจะเกิดจากการอาร์กกระหว่างปลายลวดเชื่อมเคลื่อนที่กับชิ้นงานเชื่อมการอาร์กจะเกิดขึ้นได้เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านกลุ่มอะตอมของแก๊สที่มีประจุไฟฟ้า (Ionized Gas) โมเลกุลและอะตอมของแก๊สจะแตกตัวออกทำให้มีสภาพไม่เป็นกลาง (Ionized) เพราะสูญเสียอิเล็กตรอนไปจากประจุไฟฟ้าบวก (Positive Charge) อีออนแก๊สที่เป็นบวกจะไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ อิเล็กตรอนจะไหลจากขั้วลบไปยังขั้วบวก ปริมาณความร้อนประมาณ 95 % จะถูกส่งผ่านโดยอิเล็กตรอนและคงจะเป็นการส่งผ่านของอีออนบวก (Positive Ion) ความร้อนจากการอาร์กจะหลอมลวดเชื่อมและโลหะชิ้นงาน ปลายลวดเชื่อมส่วนที่หลอมจะถูกถ่ายโอน (Transfer) ผ่านการอาร์กเข้าสู่บ่อหลอมเหลว บริเวณกระแทกร้อนและลวดเชื่อมจะถูกปกคลุมให้พ้นจากบรรยากาศรอบนอก โดยแก๊สที่ไหลพุ่งออกจากหัวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ปริมาณความร้อนที่ได้รับจากการอาร์กของกระบวนการเชื่อมนี้จะสูงกว่าการเชื่อมอาร์กแบบอื่นๆ



รูปที่ 2.4 การอาร์กของการเชื่อมแบบ GMAW [2]

2.2.2 การถ่ายโอนโลหะ (Metal Transfer) การถ่ายโอนโลหะ หมายถึง การที่โลหะลวดเชื่อมหลอมเป็นหยดและหลุดออกจากปลายลวดเชื่อมผ่านการอาร์กเข้าสู่บ่อหลอมละลายบนโลหะชิ้นงาน ซึ่งการถ่ายโอนให้ได้หยดของโลหะจะเกิดจากแรงที่กระทำต่อหยดโลหะที่ปลายลวดเชื่อม โดยปฏิกริยารวมกันระหว่างแรงและส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม ชนิดของแก๊สคลุม กระแสเชื่อม แรงดันเชื่อม และขนาดของลวดเชื่อม โดยแรงที่กระทำต่อหยดโลหะ เช่น แรงตึงผิว (Surface Tension) พลาสมาอาร์ก (Plasma Arc) ความเร็ว (Velocity) แรงโน้มถ่วง (Gravity) แรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro Magnetic Force) และพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) จะเป็นตัวกำหนดลักษณะการถ่ายโอนน้ำโลหะที่แตกต่างกันออกไป ทำให้เกิดรูปแบบการถ่ายโอนโลหะลักษณะต่างๆ ดังนี้

1) การถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์ (Spray Transfer) กระบวนการถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์ จะเกิดจากการหลอมของปลายลวดเชื่อมเป็นหยดโลหะขนาดเล็ก วงรอบการถ่ายโอนจะเริ่มขึ้นเมื่อปลายลวดเชื่อมถูกหลอมละลายแล้วก่อตัวเป็นหยดโลหะขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อม หยดโลหะจะเรียวเล็กลงตรงส่วนที่อยู่ระหว่างปลายลวดเชื่อมและหยดโลหะนี้จะถูกแยกตัวหรือถูกบีบให้หลุดออก (Pinched-Off) จากปลายลวดเชื่อมด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า หยดโลหะถูกถ่ายโอนอย่างรวดเร็วผ่านพลาสมาอาร์กลงสู่บ่อหลอมเหลวอย่างคงที่และต่อเนื่องตลอดเวลาที่กระแสเชื่อมยังไหลผ่านลวดเชื่อมอยู่ ปริมาณหยดโลหะที่ถ่ายโอนอาจต่ำกว่าหรือสูงกว่าเป็นหลายร้อยหยดในเวลาหนึ่งวินาที กระบวนการถ่ายโอนแบบสเปรย์ต้องใช้ความเข้มของกระแสสูง เพื่อลวดเชื่อมจะได้หลอมเป็นหยดขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมอย่างรวดเร็ว หยดที่มีขนาดเล็กนี้จะไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพของการอาร์ก การไหลพุ่งของหยดโลหะจึงเป็นเส้นตรงจากศูนย์กลางปลายลวดเชื่อมสู่บ่อหลอมละลาย ทำให้กำหนดทิศทางการถ่ายโอนได้ตามต้องการ ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่งานสูงแม้ลวดเชื่อมจะมีขนาดใหญ่ก็สามารถหลอมเป็นหยดขนาดเล็กได้ทันที ส่งผลให้เกิดการหลอมลึกของแนวเชื่อมมาก แสดงในรูปที่ 2.5 (ก)



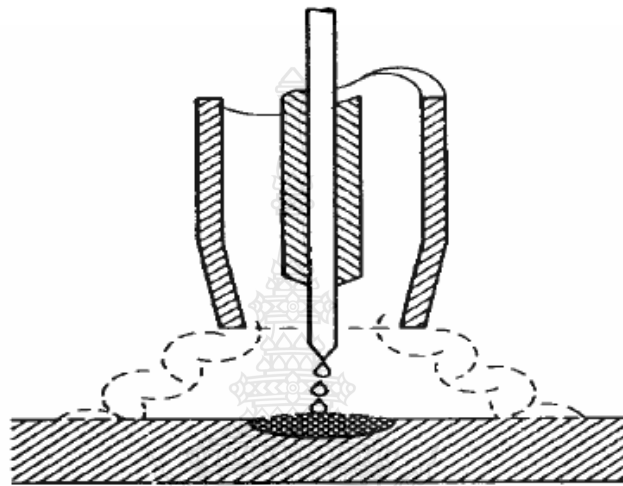
รูปที่ 2.5 การถ่ายโอนโลหะแบบต่างๆ [2]

2) การถ่ายโอนโลหะแบบหยด (Globular Transfer) วงรอบของการถ่ายโอนจะเริ่มเมื่อปลายลวดเชื่อมถูกหลอมเหลวให้เป็นหยดโลหะ จากนั้นเกิดการก่อตัวเพิ่มขนาดใหญ่ขึ้นกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมประมาณ 1.5 ถึง 2 เท่า ก่อนจะหลุดจากปลายของลวดเชื่อมแล้วถ่ายโอนผ่านการอาร์กสู่บ่อหลอมละลายด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิว ซึ่งจะทำให้อัตราการเติมเนื้อโลหะมากและมีความร้อนสูงกว่าการถ่ายโอนโลหะแบบลัดวงจร การถ่ายโอนโลหะแบบหยดสู่บ่อหลอมเหลวจะใช้แรงโน้มถ่วงมากกว่าแรงที่เกิดจากการอาร์ก ดังนั้น กระบวนการถ่ายโอนแบบนี้จึงเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการงานเชื่อมคุณภาพสูง มีขอบเขตใช้งานจำกัดเพราะปริมาณความร้อนเข้างานต่ำ สามารถทำการเชื่อมได้ดีกับงานที่อยู่ในแนวราบและแนวระดับ ใช้ระดับกระแสและแรงดันเชื่อมสูงกว่าการถ่ายโอนแบบลัดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข)

3) การถ่ายโอนแบบลัดวงจร (Short Circuit Transfer) วงรอบการถ่ายโอนจะเกิดขึ้นเมื่อปลายลวดเชื่อมและโลหะชิ้นงานถูกทำให้เกิดการอาร์กขึ้น และมีอุณหภูมิสูงพอที่จะหลอมปลายลวดเป็นหยดโลหะขนาดเล็ก ขณะเดียวกันลวดเชื่อมจะถูกป้อนเข้าสู่บ่อหลอมเหลวด้วยอัตราเร็วสูงทำให้หยดโลหะบนปลายลวดเชื่อมสัมผัสกับบ่อหลอมเหลวก่อนจะแยกออกจากปลายลวดเชื่อม ทำให้เกิดการลัดวงจรไฟฟ้า (Short Circuit) โดยที่การอาร์กจะดับไปชั่วขณะจังหวะที่ลัดวงจรอยู่นี้ กระแสจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง ปลายลวดเชื่อมที่หลอมเป็นหยดจะถูกบีบรัดออกแล้วถ่ายโอนสู่บ่อหลอมเหลวด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิว ซึ่งหยดโลหะที่ปลายลวดเชื่อมจะเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างช่องว่างปลายลวดเชื่อมกับบ่อหลอมเหลว เมื่อหยดโลหะหยดแรกหลุดจากปลายลวดเชื่อมแล้วก็จะเริ่มต้นอาร์กใหม่อีกครั้งหนึ่ง สถานะอย่างนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องกันไปอย่างรวดเร็วมาก คือ มีความถี่ของการลัดวงจรราว 20 ถึง 200 ครั้งต่อวินาที กระแสและแรงดันเชื่อมจะตั้งอยู่ในช่วงต่ำจึงมีปริมาณความร้อนเข้าสู่งานน้อย สามารถใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็กได้ งานเชื่อมบิดตัวน้อย รอยหลอมทะลุและประกายโลหะกระเด็นไม่มาก แสดงในรูปที่ 2.5 (ค)-(ง)

4) การถ่ายโอนแบบพัลส์ (Pulse Spray Transfer) เป็นกระบวนการที่พัฒนามาแทนการถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์เพราะมีข้อจำกัดการใช้งาน แต่ยังคงรักษาการถ่ายโอนที่เป็นลักษณะแบบสเปรย์อยู่ การพัลส์ของกระแสเชื่อมจากระดับต่ำสุดถึงระดับสูงสุดที่ 60 ไซเคิลต่อวินาที จังหวะการพัลส์แต่ละครั้งจะทำให้ปลายลวดเชื่อมเป็นหยดโลหะได้ 1 หยด และจะถ่ายโอนผ่านอาร์กสู่บ่อหลอมเหลวด้วยความถี่สม่ำเสมอต่อเนื่องกัน ระดับกระแสต่ำสุดจะตั้งในช่วงการถ่ายโอนแบบละออ การถ่ายโอนหยดโลหะจะเกิดขึ้นเมื่อกระแสพัลส์ถึงระดับสูงสุด หลังจากถ่ายโอนหยดโลหะแล้วกระแสจะลดลงต่ำสุดตามที่ตั้งไว้ กระแสต่ำจะช่วยคงให้การอาร์กเกิดอยู่ตลอดเวลา ช่วงจังหวะนี้การถ่ายโอนโลหะไม่เกิดขึ้น การพัลส์ของกระแสสูงแล้วต่ำลงจะมีผลต่อการควบคุมปริมาณความร้อนเข้า

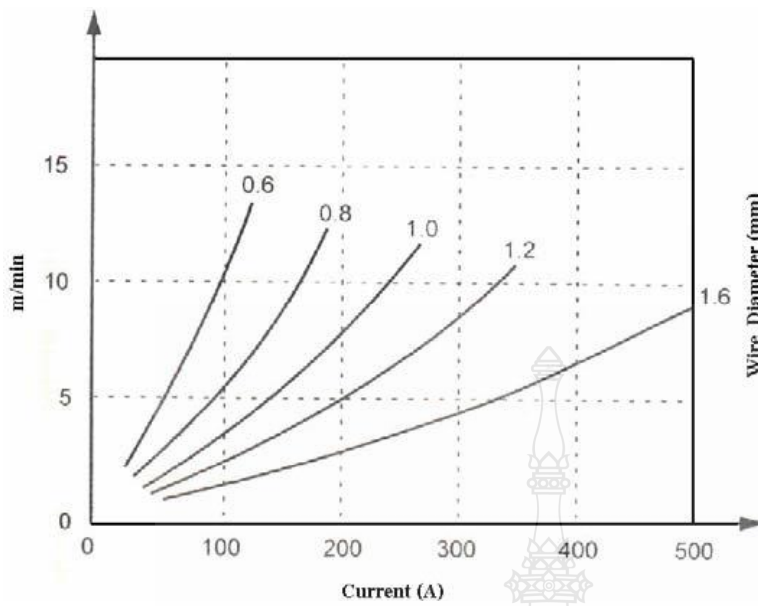
สูงงานเชื่อม โดยความร้อนเฉลี่ยจะต่ำกว่าการถ่ายโอนแบบระลอก จึงเหมาะกับการเชื่อมงานในทุกตำแหน่งท่าเชื่อม งานบิตตัวน้อย สามารถใช้ลวดเชื่อมขนาดใหญ่ได้ และการถ่ายโอนโลหะผ่านการอาร์ก ยังคงเป็นหยดขนาดเล็กอยู่ จึงประหยัดกว่าการใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็ก แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การถ่ายโอนโลหะแบบพัลส์ [2]

### 2.3 กระแสเชื่อม (Welding Current)

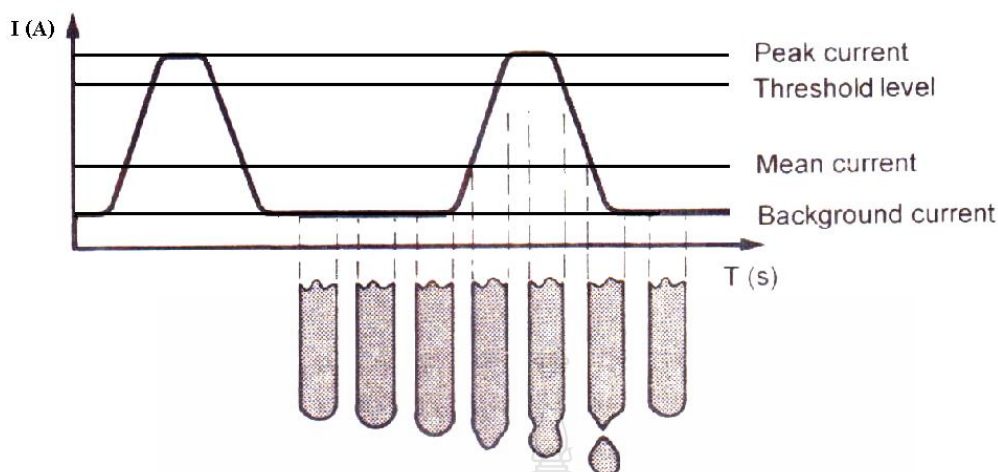
กระแสเชื่อม คือ กำลังไฟฟ้าที่เครื่องเชื่อมผลิตออกมา ซึ่งสามารถอ่านได้โดยตรงจากแอมป์มิเตอร์ของเครื่องเชื่อม ในกระบวนการเชื่อมมิก/แม็ก กระแสเชื่อมจะสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วของการป้อนลวด (Wire Feeder) ถ้าป้อนลวดเร็วขึ้นกระแสเชื่อมที่ผลิตออกมาก็จะมากขึ้นด้วย แต่ถ้าป้อนลวดช้าลงกระแสเชื่อมก็จะลดลงเช่นกัน แสดงในรูปที่ 2.7 โดยในกระบวนการเชื่อมดังกล่าว สามารถแบ่งชนิดของกระแสเชื่อม เป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภทดังนี้



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมกับความเร็วในการป้อนลวด [2]

2.3.1 กระแสเชื่อมแบบมาตรฐาน (Standard Arc Current) กระแสเชื่อมแบบมาตรฐาน เป็นลักษณะของกระแสเชื่อมโดยทั่วไป ซึ่งกระแสในขณะที่เชื่อมโดยเฉลี่ยตลอดการเชื่อมจะมีค่าคงที่ สำหรับกระบวนการเชื่อมแม่เหล็ก กระแสเชื่อมจากเครื่องเชื่อมจะถูกส่งไปสู่ท่อนำลวดภายในหัวเชื่อม ผ่านไปยังลวดเชื่อมสู่ชิ้นงาน ซึ่งการกำหนดค่ากระแสในการเชื่อม ในทางปฏิบัติจะนิยมตั้งค่ากระแสเชื่อม โดยพิจารณาจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดที่ใช้หรือความหนาของชิ้นงานเชื่อมเป็นหลัก

2.3.2 กระแสเชื่อมแบบพัลส์ (Pulsed Arc Current) กระแสเชื่อมแบบพัลส์ เป็นกระแสที่เกิดจากการเปิดปิดวงจร (Switching) ระหว่างกระแสต่ำสุดกับกระแสสูงสุด ดังนั้น ในเครื่องเชื่อมตัวเดียวจึงมีต้นกำเนิดแยกออกเป็นสองส่วน คือส่วนที่ให้กระแสต่ำสุด (Background Current) และส่วนที่ให้กระแสสูงสุด (Peak Current) เพื่อให้ได้กระแสพัลส์ที่เหมาะสม การตั้งค่ากระแสในการเชื่อม จะต้องตั้งค่ากระแสสูงสุดให้สูงกว่าระดับกระแสช่วงเปลี่ยน (Threshold Level) ของการถ่ายโอนแบบละอองและค่าของกระแสต่ำสุดต้องตั้งในช่วงการถ่ายโอนแบบหยุด ในขณะที่อาร์กช่วงกระแสค่าสูงจะเป็นการถ่ายโอนน้ำโลหะให้พุ่งเข้าสู่บ่อหลอมละลาย โลหะถูกแรงบีบรัดแยกตัวออกจากปลายลวดเชื่อมผ่านอาร์กสู่บ่อหลอมเหลวที่วงรอบพัลส์และเกิดขึ้นซ้ำๆกันอย่างต่อเนื่อง ในช่วงประมาณ 30-300 ครั้งต่อวินาที ลงสู่บ่อหลอมละลาย ส่วนช่วงกระแสค่าต่ำจะเป็นการรักษาการอาร์กให้คงที่และต่อเนื่อง ลักษณะของรูปแบบของกระแสพัลส์ แสดงใน รูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปแบบของกระแสเชื่อมแบบพัลส์ [2]

## 2.4 แก๊สคลุม (Shielding Gas)

ในกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม ขณะที่เกิดการอาร์ก อากาศที่ปกคลุมรอบๆ บริเวณการอาร์กจะถูกแทนที่ด้วยแก๊สคลุมเพื่อป้องกันไม่ให้ แก๊สไนโตรเจน ( $N$ ) แก๊สออกซิเจน ( $O_2$ ) และความชื้นในบรรยากาศเข้าไปรวมตัวกับบ่อหลอมละลายของแนวเชื่อม การเชื่อมเหล็กกล้าที่มีแก๊สออกซิเจนมากเกินไป จะทำให้แก๊สออกซิเจนรวมตัวกับคาร์บอนในเหล็กและจะอยู่ในรูปของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) ฝังอยู่ในเนื้อเหล็กทำให้เกิดเป็นรูพรุน ส่วนแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) จากไอน้ำและน้ำมันจะแทรกอยู่ในเนื้อเหล็กเกิดเป็นรูพรุนหรือเป็นสาเหตุของการแตกร้าวได้แนวเชื่อม ซึ่งจากสาเหตุของการรวมตัวของแก๊สดังกล่าวสามารถป้องกันได้โดยใช้แก๊สคลุม โดยแก๊สคลุมที่ใช้ในงานเชื่อมมี 2 กลุ่ม คือ

2.4.1 แก๊สเฉื่อย (Inert Gas) เป็นแก๊สที่ไม่เกิดปฏิกิริยารวมตัวกับสารอื่น ได้แก่ แก๊สอาร์กอน (Argon:  $Ar$ ) และแก๊สฮีเลียม (Helium:  $He$ ) หรือแก๊สอาร์กอนผสมกับแก๊สฮีเลียม แก๊สดังกล่าวสามารถใช้ได้เลยโดยไม่ต้องผสมกับแก๊สอื่น หรืออาจผสมกับแก๊สอื่นเพื่อให้แนวเชื่อมมีสมบัติที่ดีขึ้น

2.4.2 แอกทีฟแก๊ส (Active Gas) ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide:  $CO_2$ ) หรือเป็นแก๊สผสมกันระหว่างแก๊สอาร์กอนกับแอกทีฟแก๊สบางตัว เช่น แก๊สออกซิเจน แก๊สไนโตรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือแก๊สไฮโดรเจน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่การเชื่อม 3 ประการ คือ

1) การทำให้อะตอมที่มีประจุไฟฟ้าแตกตัวให้อิออน (Ionization Potential) เป็นการสร้างพลังงานที่จำเป็นในการดึงเอาอิเล็กตรอน (Electron) ออกจากอะตอมของแก๊ส (Gas Atom) การแตกตัวให้อิออน ณ อุณหภูมิของการอาร์กจะมีผลต่อการส่งถ่ายพลังงานความร้อน (Heat Energy) ไปยังบริเวณที่เกิดการอาร์กของพลังงาน (Ionization Potential) ที่สูงขึ้น ซึ่งต้องใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูง ในการทำให้อะตอมของแก๊สแตกตัวให้อิออนมาก ตัวอย่าง กรณีแก๊สฮีเลียมซึ่งมีค่า Ionization Potential 24.5 eV หมายความว่า ต้องใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า 24.5 โวลต์ ในการทำให้อะตอมของแก๊สฮีเลียมแตกตัวสูงกว่าแก๊สอาร์กอนซึ่งมีค่า Ionization Potential ที่ 15.7 eV ดังนั้น การใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สคลุมจะทำให้เริ่มต้นอาร์กได้ง่ายกว่าการใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สคลุม

2) การนำความร้อน (Thermal Conductivity) สำหรับแก๊สคลุมบางชนิดมีความสามารถในการนำความร้อนที่ต่ำ เช่น แก๊สอาร์กอน จะส่งผลทำให้การอาร์กเกิดความเข้มข้นสูงเฉพาะจุดและเป็นบริเวณแคบ ขณะที่แก๊สฮีเลียมมีคุณสมบัติในการนำความร้อนที่ดีเลิศ จึงเป็นเหตุให้เปลวอาร์กที่ได้จากการใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สคลุมสามารถแผ่ขยายกว้างและในขณะเดียวกันศูนย์กลางของเปลวอาร์กจะเจาะทะลุลงไปยังส่วนล่างของรอยเชื่อม ส่งผลทำให้แนวเชื่อมที่ใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สคลุมสามารถหลอมลึกกว่าการใช้แก๊สอาร์กอน

3) การทำปฏิกิริยากับแนวเชื่อม (Reactivity) แก๊สอาร์กอนจัดเป็นแก๊สเฉื่อย ดังนั้นจึงไม่มีการทำปฏิกิริยากับแนวเชื่อมแต่อย่างใด แก๊สที่ทำปฏิกิริยากับบ่อหลอมละลาย ได้แก่

(1) แก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen) เป็นแก๊สที่ดึงเอาคาร์บอนให้เกิดขึ้นในชั้นน้อยลง และลดออกไซด์ที่จะไปรวมตัวกับบ่อหลอมละลาย แต่อย่างไรก็ตาม แก๊สไฮโดรเจนถ้าใช้เป็นส่วนผสมของแก๊สคลุมในการเชื่อมเหล็กแข็ง (Hardened Steel) จะส่งผลเสียต่องานเชื่อม เช่น เกิดการแตกร้าวใต้แนวเชื่อม (Under Bead Cracking) ได้ง่าย

(2) แก๊สออกซิเจน (Oxygen) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) แก๊สทั้งสองจัดอยู่ในกลุ่มของแก๊สทำปฏิกิริยา (Reactive Gas) เรียกว่า Oxidizers Gas จะทำปฏิกิริยากับบ่อหลอมละลายในรูปของออกไซด์ (Oxides)

(3) แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen) เป็นแก๊สที่ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงและกระแสเชื่อมสูงจึงเกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีแต่เนื่องจากไม่ใช่เป็นแก๊สเฉื่อย ดังนั้น ในขณะเชื่อมจะทำปฏิกิริยากับเหล็กคาร์บอน (Carbon Steel)

2.4.3 สมบัติของแก๊สคลุม (Properties of Shielding Gas) โดยทั่วไป แก๊สคลุมที่นำไปใช้ในการเชื่อมจะสมบัติในการนำความร้อนและทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างแก๊สคลุมกับธาตุต่างๆ ที่ผสมอยู่ในโลหะงานและลวดเชื่อม สรุปได้ดังนี้

1) สมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) การนำความร้อนของแก๊สที่อุณหภูมิสูง การอาร์กจะมีผลต่อแรงดันอาร์ก (Arc Voltage) และพลังงานความร้อนที่จ่ายให้กับการเชื่อม กล่าวคือ ขณะที่แก๊สคลุมมีการนำความร้อนเพิ่มขึ้น แรงดันที่ใช้เชื่อมก็ต้องเพิ่มขึ้นด้วยเพื่อให้สามารถรักษาการอาร์กได้ เช่น แก๊สฮีเลียมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีการนำความร้อนสูงกว่าแก๊สอาร์กอน จึงมีการถ่ายพลังงานความร้อนให้กับงานเชื่อมมาก ดังนั้นแก๊สฮีเลียมและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จึงต้องมีแรงดันสูงเพื่อรักษาอาร์กให้สม่ำเสมอ

2) แก๊สที่จะนำมาเป็นแก๊สคลุมจะต้องเข้ากันได้และเหมาะสมกับชนิดของลวดเชื่อมและชิ้นงานเชื่อม เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สคลุมที่ผสมด้วยแก๊สออกซิเจน จะไม่ใช่เชื่อมออลูมิเนียม เพราะจะเกิดออลูมิเนียมออกไซด์ขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตามแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สผสมด้วยแก๊สออกซิเจนจะใช้กับการเชื่อมเหล็กกล้าได้ดี ในการเชื่อม GMAW แก๊สคลุมที่ผสมกับแก๊สออกซิเจนจะช่วยให้การอาร์กสม่ำเสมอ แก๊สออกซิเจนจะทำหน้าที่ Oxidizing ได้ดีกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ การใช้แก๊สออกซิเจนโดยทั่วไปจะผสมกับแก๊สอาร์กอนไม่เกิน 12 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาณ ขณะเดียวกันลวดเชื่อมที่ใช้จะต้องผสมธาตุ (Deoxidizing) ลงไปด้วยเพื่อไม่ให้เกิดรูพรุนกับรอยเชื่อม

3) รูปแบบของการส่งถ่ายน้ำโลหะจะขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊สคลุมด้วย กล่าวคือ การเลือกใช้แก๊สคลุมยังขึ้นอยู่กับรูปแบบของการถ่ายโอนโลหะและการหลอมลึก เช่นการถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์จะไม่เกิดขึ้นเมื่อใช้แก๊สคลุมที่ผสมด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาณ เพียงแต่จะเกิดการถ่ายโอนโลหะที่คล้ายกับการถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์ และเมื่อใช้แก๊สปกคลุมที่ผสมด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเปอร์เซ็นต์สูงถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาณ จะต้องใช้กระแสและแรงดันเพิ่มมากขึ้น ทำให้ไม่สามารถรักษาการอาร์กให้คงที่และสม่ำเสมอได้ ส่งผลให้แนวเชื่อมไม่เรียบและมีเม็ดโลหะเกิดขึ้นมาก

## 2.5 ลวดเชื่อม (Electrode Wire) [8]

ลวดเชื่อมเป็นหัวใจสำคัญของการเชื่อม MIG ดังนั้นจึงต้องรู้จักเลือก ใช้ลวดเชื่อมให้ถูกต้อง ลวดเชื่อมจะหลอมผ่านเปลวอาร์กไปยังบ่อหลอมละลายเกิดเป็นแนวเชื่อม ลวดเชื่อมที่ผ่านเปลวอาร์กนั้น จะทำปฏิกิริยากับแก๊สปกคลุมจึงทำให้ส่วนผสมของลวดเปลี่ยนไป และจะเป็นผลต่อคุณสมบัติทางด้านกายภาพและทางกลของเนื้อเชื่อมการเลือกลวดเชื่อมจะต้องพิจารณาองค์ประกอบต่อไปนี้



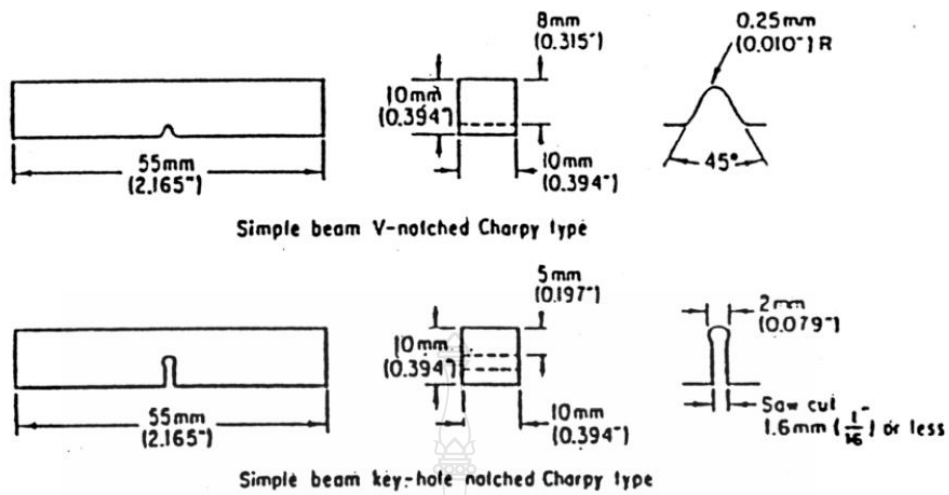
- 1) ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานที่จะนำมาเชื่อม
- 2) คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่จะนำมาเชื่อม
- 3) ชนิดของแก๊สปกคลุม
- 4) ชนิดของงานที่เชื่อมหรือข้อกำหนดการใช้งาน
- 5) ชนิดของการออกแบบรอยต่อ

## 2.6 การทดสอบสมบัติทางกล

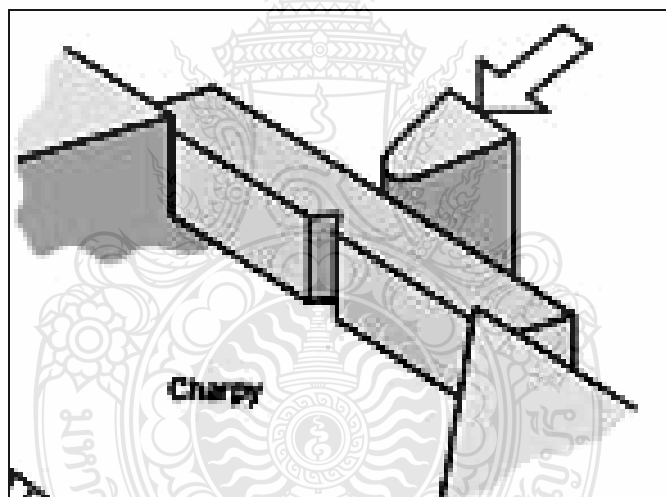
2.6.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing) วิธีการทดสอบความแข็ง โดยการวัดความแข็ง ด้วยหัวกดเพชรที่มีลักษณะเป็นรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา เป็นเวลา 5-10 วินาที สามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมากที่ค่าความแข็งประมาณ  $5 \text{ kgf/mm}^2$  จนถึงโลหะที่มีค่าความแข็งมาก ๆ ประมาณ  $1500 \text{ kgf/mm}^2$  โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ สำหรับกรณีในงานเชื่อม การทดสอบความแข็งที่นิยมใช้คือการทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vickers Test) เนื่องจากการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์สจะเหมาะสำหรับการวัดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม จุดประสงค์ของการทดสอบเพื่อหาค่าความสามารถของงานเชื่อมในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวรเมื่อถูกแรงกดจากหัวกดที่กระทำลงบนผิวของชิ้นงานทดสอบ การเตรียมชิ้นงานและวิธีการทดสอบในงานวิจัยนี้ได้กำหนดตามมาตรฐาน ASTM E92

### 2.6.2 การทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Impact Testing)

2.6.2.1 การทดสอบแบบชาร์ปี (Charpy test) เครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปีปกติจะมีขนาด 220 ปอนด์ฟุตสำหรับทดสอบโลหะ และ 4 ปอนด์ฟุต สำหรับชิ้นงานพลาสติก (ASTM E23) ลูกตุ้มประกอบด้วยแขนยึด ลูกตุ้มที่ค่อนข้างเบาแต่แข็งแรงและมีก้อนน้ำหนักติดอยู่ที่ปลาย ลูกตุ้มนี้จะเคลื่อนผ่าน ระหว่างขาตั้งเครื่องสองขา โดยมีใบมีดติดไว้ที่ขอบด้านที่จะกระแทกกับชิ้นทดสอบ ซึ่งต้อง กระแทกกับชิ้นงานบริเวณด้านหลังและเป็นส่วนที่เล็กที่สุดของร่องบาก



รูปที่ 2.9 ชิ้นงานมาตรฐานการทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี



รูปที่ 2.10 ลักษณะการทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี

## 2.7 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

โลหะทุกชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เนื่องจากอิทธิพลของธาตุต่างๆ ที่ผสมอยู่ในโลหะแต่ละชนิด ตลอดจนกระบวนการผลิต คุณสมบัติโดยธรรมชาติของโลหะนั้น และกรรมวิธีทางความร้อนที่กระทำต่อโลหะ ดังนั้น เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติบางอย่างของโลหะ การทดสอบและการตรวจสอบทางโลหะวิทยาจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ สามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือ การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macro Structure) และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscope) การตรวจสอบโครงสร้างทั้ง 2 วิธีดังกล่าว ก็เพื่อต้องการทราบอิทธิพลของธาตุผสมในโลหะที่ทำการตรวจสอบนั้นๆ อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากกระทำทางความร้อนสิ้นสุดลงด้วย และข้อมูลที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม

2.7.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure Investigation) เป็นการตรวจสอบโครงสร้างด้วยตาเปล่าหรือใช้กล้องขยายที่มีกำลังขยายไม่เกิน 50 เท่า การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาคนั้นไม่ยุ่งยาก เพราะเป็นการตรวจสอบรูพรุนภายในของโลหะ การแยกชิ้นของผลิตภัณฑ์ รอยร้าว รอยแตกหน้าตัดที่ถูกดึงจนขาด และปริมาณธาตุผสมในโลหะ การตรวจสอบด้วยวิธีนี้ จะมีวิธีการตรวจสอบอยู่หลายวิธีทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและจุดประสงค์ของการตรวจสอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคโดยวิธี Baumann เป็นการตรวจสอบการแพร่กระจายของธาตุกัมมันต์ในโลหะว่ามีมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะใช้กับเหล็กกล้าเท่านั้น โดยวิธีการตรวจสอบ ดังนี้

(1) ตัดชิ้นงานตามพื้นที่หน้าตัดที่ต้องการตรวจสอบ ด้วยเครื่องมือที่ทำให้เกิดความร้อนน้อยที่สุด ทั้งนี้เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ธาตุกัมมันต์มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลทำให้การตรวจสอบเกิดข้อผิดพลาดจากความเป็นจริง

(2) ขัดผิวหน้าตัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากซิลิกอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 220 – 320 และในขณะที่ขัดผิวควรเปิดน้ำ เพื่อไล่ผงขัดและเศษโลหะออกด้วย

(3) ล้างผิวขัดให้สะอาดปราศจากไขมัน

(4) นำกระดาษอัดรูปถ่ายตอนกลางวันจุ่มในกรดกัมมันต์เจือจาง ซึ่งประกอบด้วยกรดกัมมันต์ 5 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร โดยจุ่มนานประมาณ 2 นาที

(5) จากนั้นนำกระดาษอัดรูปออกจากกรดแล้วปล่อยให้แห้ง วางลงบนผิวขัดโดยใช้เวลาประมาณ 1 – 5 นาที

(6) ล้างกระดาษอัดรูปด้วยน้ำเปล่า แล้วนำไปแช่ในน้ำยาล้างตัวซึ่งประกอบด้วยน้ำ 1 ลิตร เกลือ 250 กรัม โดยใช้เวลาในการแช่ประมาณ 15 นาที

(7) จากนั้นนำกระดาษอัดรูปดังกล่าวไปแช่น้ำเป่านาน 30 นาที แล้วเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน เมื่อเป่าด้วยลมร้อนแล้วจนกระดาษอัดรูปแห้งแล้ว เราจะเห็นภาพการกระจายตัวของกำมะถันเป็นสีน้ำตาลแก่ปรากฏอยู่บนกระดาษอัดรูปนั้น

2) การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคโดยวิธี Fly Etching เหมาะสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ หรือเหล็กกล้าที่ผ่านการอบปกติมาแล้ว การตรวจสอบวิธีนี้จะใช้สำหรับการตรวจหาแนวเส้นใยการครากหรือแนวใยรับแรง ซึ่งเกิดจากการขึ้นรูปเย็น และกรรมวิธีทางความร้อน และมีผลต่อความแข็งแรงของโลหะนั้นๆ โดยมีวิธีการตรวจสอบ ดังนี้

- (1) ขัดผิวหน้าชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 – 1000
- (2) นำชิ้นตรวจสอบไปอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 150 – 200 เซลเซียส
- (3) กัดผิวที่ต้องการตรวจสอบด้วยกรดดินประสิวแบบเจือจาง ใช้เวลากัด 1-2 นาที
- (4) เมื่อกัดกรดตามที่กำหนดแล้ว ล้างผิวทดสอบด้วยแอลกอฮอล์แล้วเป่าให้แห้ง
- (5) ตรวจสอบความเข้มของผิว ถ้าผิวตรวจสอบช่วงใดได้รับอิทธิพลจากการขึ้นรูปเย็นหรือกรรมวิธีทางความร้อน จนเกิดเส้นใยการครากและเส้นใยรับแรง ผิวช่วงนั้นจะถูกกัดด้วยกรดเป็นสีเข้มกว่าบริเวณอื่น

3) การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคโดยวิธี Grain Flow เป็นการตรวจสอบเหล็กกล้าที่ผ่านการตีขึ้นรูป ซึ่งจะทำให้เกรนของเหล็กเกิดการไหลลื่นไปตามแนวแรงที่ดี เกรนที่ดีจะต้องมีการไหลของเกรนอย่างต่อเนื่องตามรูปร่างลักษณะของชิ้นงาน ซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานนั้นมีความแข็งแรงสูง โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

(1) ตัดชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบด้วยเครื่องมือตัดที่ไม่ก่อให้เกิดความร้อนสูง ทั้งนี้เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ธาตุกำมะถันมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลทำให้การตรวจสอบเกิดข้อผิดพลาดจากความเป็นจริง

- (2) ขัดผิวหน้าชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 – 320
- (3) นำกรดเกลือ 2 ส่วน ผสมกับน้ำ 3 ส่วน แล้วนำไปต้มให้เดือด
- (4) จุ่มชิ้นงานลงในกรดเกลือที่กำลังเดือดนานไม่เกิน 20 นาที แล้วนำชิ้นงานออกจากกรดเกลือ จากนั้นเราจะสามารถมองเห็นแนวการไหลของเกรนได้ชัดเจน

2.7.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Investigation) เป็นการตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง ถ้าเป็นกล้องที่ใช้แสงจากหลอดไฟจะให้กำลังขยายไม่เกิน 2,000 เท่า แต่ถ้าเป็นกล้องที่ใช้แสงอิเล็กตรอนจะสามารถให้กำลังขยายได้สูงถึง 100,000 เท่า หรือมากกว่านี้ โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

- 1) ตัดชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบด้วยเครื่องมือตัดที่ไม่ก่อให้เกิดความร้อนสูง ทั้งนี้เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ธาตุกัมมันตมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลทำให้การตรวจสอบเกิดข้อผิดพลาดจากความเป็นจริง
- 2) ขัดผิวหน้าตัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากซิลิกอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 220, 320, 400 และ 600 ตามลำดับ ในขณะที่ขัดผิวควรเปิดน้ำ เพื่อไล่ผงขัดและเศษโลหะออกด้วย
- 3) ขัดผิวด้วยผงขัดที่ทำมาจากผงอะลูมินา (Alumina Oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium Oxide) ที่มีขนาดตั้งแต่ 0.05 – 0.3 ไมครอน
- 4) นำชิ้นงานตรวจสอบที่ถูกขัดผิวจนเป็นมันแล้ว ไปล้างด้วยแอลกอฮอล์
- 5) ทำการกัดผิวที่ต้องการตรวจสอบด้วยน้ำยากัดชิ้นงาน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาทำการตรวจสอบ
- 6) นำชิ้นงานไปล้างด้วยแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้ง
- 7) ทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อทำการวิเคราะห์ว่าเป็นโครงสร้างชนิดใดบ้าง เพราะโครงสร้างต่างๆ ของโลหะจะมีคุณสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อรศิริ จันท์เมือง [9] ได้ทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาชนิดของแก๊สที่เหมาะสมจากการเปรียบเทียบความแข็งแรงดึง ของการเชื่อมบนเหล็กกล้าไร้สนิม ในกระบวนการเชื่อม MIG โดยใช้แก๊สปกคลุมเพื่อการเปรียบเทียบ 3 ชนิด ได้แก่ แก๊สอาร์กอน แก๊สอาร์โกซิล 50 และแก๊สอาร์โกซิล 63 พร้อมทั้งกำหนดอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมที่ 15, 20 และ 25 ลิตรต่อนาที และใช้ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AWS. A5.9 308LSi: MIG ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร โดยทำการเชื่อมบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI. เบอร์ 304 ที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร ใช้แขนกลควบคุมการเชื่อมโดยเป็นการเชื่อมแบบเดินบนชิ้นงานในตำแหน่งการเชื่อมทำราบ ชิ้นงานตัวอย่างแต่ละชิ้นมีมุมฉากเท่ากับ 30 องศา (หรือเท่ากับมุมรวม 60 องศา) ชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมด 90 ชิ้น แบ่งเป็น 30 ชิ้นต่อแก๊สปกคลุมแต่ละชนิดและใช้ตัวอย่างชิ้นงาน 10 ชิ้นต่ออัตราการไหลของแก๊สปกคลุมแต่ละระดับ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรมมินิแท็บ พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบด้วยการเชื่อมแก๊สปกคลุม 3 ชนิด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงของแก๊สอาร์โกซิล 50 เท่ากับ 607.19 MPa แก๊สอาร์โกซิล 63 เท่ากับ 600.03 MPa และแก๊สอาร์กอนมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 588.51 MPa สำหรับอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมทั้ง 3 ชนิด นั้นไม่

แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงควรใช้แก๊สอาร์โกซิด 50 และปรับอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมที่ 15 ลิตรต่อนาที ในกระบวนการเชื่อม MIG สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมต่างๆ ไป

ฉัตรทอง ไสแสง [10] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 การวิจัยเป็นการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design ที่มีพารามิเตอร์ในการศึกษา ได้แก่ กระแสเชื่อม , ความเร็วเดินแนวเชื่อม และแก๊สปกคลุม โดยทำการศึกษาทางด้าน ความแข็งแรงดึงสูงสุด , ความแข็งแรงดึงจุดคราก , อัตราการยืดตัว และ ความแข็ง โดยได้ผลการทดลองดังนี้ 1) ผลการศึกษาต่อความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile) พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง คือ ความเร็วเดินแนวเชื่อม ความสัมพันธ์คือ กระแสเชื่อม\*ความเร็วเดินแนวเชื่อม\*แก๊สปกคลุม โดยพารามิเตอร์การเชื่อมที่กระแสเชื่อม 90 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 500 มิลลิเมตรต่อนาที และปกคลุมด้วยแก๊ส Ar+5%O<sub>2</sub> จะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่มีค่าสูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 95.85 kg/mm<sup>2</sup> 2) ผลการศึกษาต่อความแข็งแรงดึงจุดคราก (Yield Point) พบว่าปัจจัยหลักทั้งสามตัวไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์ คือ กระแสเชื่อม\*ความเร็วเดินแนวเชื่อม\*แก๊สปกคลุม โดยพารามิเตอร์การเชื่อมที่กระแสเชื่อม 90 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที ปกคลุมด้วยแก๊ส Ar+3%N<sub>2</sub> มีค่าเท่ากับ 66.09 kg/mm<sup>2</sup> 3) ผลการศึกษาต่ออัตราการยืดตัว (Elongation) พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง คือพารามิเตอร์การเชื่อมทั้งสาม ความสัมพันธ์ คือ กระแสเชื่อม ความเร็วเดินแนวเชื่อม แก๊สปกคลุม โดยพารามิเตอร์การเชื่อมที่กระแส 100 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที ปกคลุมด้วยแก๊ส Ar+5%H<sub>2</sub> มีค่าเท่ากับ 20 % 4) ผลการศึกษาต่อความแข็ง (Hardness) พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง คือความเร็วเดินแนวเชื่อม และ แก๊สปกคลุม ความสัมพันธ์ คือ กระแสเชื่อม\*ความเร็วเดินแนวเชื่อม\*แก๊สปกคลุม โดยพารามิเตอร์การเชื่อมที่กระแสเชื่อม 90 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที ปกคลุมด้วยแก๊ส Ar+5%H<sub>2</sub> มีค่าเท่ากับ 278.33 HV ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile) ที่มีค่ามากที่สุดกับชิ้นงานที่มีค่าต่ำที่สุด พบว่าลักษณะโครงสร้างของ Columnar Dendrite และการโตของเกรนในบริเวณ HAZ มีความแตกต่างกันมาก กล่าวคือ ขนาดของ Columnar Dendrite จะเล็กกว่า ในกรณีของชิ้นงานที่มี Ultimate Tensile สูงกว่า และขนาดของเกรนที่โตในบริเวณ HAZ ก็โตได้น้อยกว่า ส่วนโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>) สามารถเกิดขึ้นได้กับทั้งสอง

ปริญญา แสงทอง [11] ได้ทำการศึกษาปัจจัยซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยใช้กระบวนการเชื่อม MIG โดยมีปัจจัยคือ กระแสเชื่อมมี 3 ระดับคือ 150 160 และ 170 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้ามี 3 ระดับคือ 20 22 และ 24 Volt และแก๊สอาร์กอน

มี 2 ระดับคือ ความบริสุทธิ์ของแก๊สอาร์กอน 99.990 % และความบริสุทธิ์ของแก๊สอาร์กอน 99.999 % ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อ ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดคือ กระแสเชื่อม แรงดันไฟฟ้าและแก๊สอาร์กอน ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวคือ กระแสเชื่อม แรงดันไฟฟ้าและแก๊สอาร์กอน ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดที่จุดครากคือ กระแสเชื่อม แรงดันไฟฟ้าและแก๊สอาร์กอน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

M.ONSOIEN และคณะ [12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของแก๊สไฮโดรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนสำหรับการเชื่อม GMAW ต่อลักษณะรอยเชื่อม (Bead Morphology) และคุณลักษณะของการอาร์ก (Arc Characteristic) โดยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไฮโดรเจน 1, 2, 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่า เมื่อปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ทำให้สัทธิการอาร์กและความต้านทานอาร์กเพิ่มขึ้น เนื่องจากแก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไฮโดรเจนมีประจุไฟฟ้า (Charge Carrier) น้อยกว่าแก๊สปกคลุมอาร์กอนบริสุทธิ์ และแก๊สไฮโดรเจนมีค่า Thermal Conductivity มากกว่าแก๊สอาร์กอน ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Arc Column มีขนาดเล็กลง นอกจากนี้เมื่อปริมาณแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนมีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนของความกว้างต่อรอยซึมลึกของรอยเชื่อมมีค่าลดลง

T. OGAWA, K.SUAUKI และ T.ZAIZEN [13] ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนผสมต่อการเกิดโพรง รอยร้าว (Cracking) และสมบัติการคืบ (Creep Properties) โดยการใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนบริสุทธิ์ และแก๊สอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน พบว่า เมื่อปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดปัญหาคือ 1) เกิดโพรงเพิ่มขึ้น 2) เกิดรอยแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking) เพิ่มขึ้น จากการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่า เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีโพรงเกิดขึ้น และเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม ซึ่งปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดแตกร้าวของรอยเชื่อม ในกรณีที่เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีโครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมด เนื่องจากไนโตรเจนทำให้ขนาดเกรนออสเทนไนต์เล็กลง

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินการวิจัยนี้ใช้กรรมวิธีการเชื่อม GMAW (Metal Inert Gas Arc Welding) โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 กับเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 เป็นชิ้นงานทดลองเชื่อม ลักษณะรอยต่อเป็นแบบรอยต่อชนท่าราบ การเชื่อมจะเป็นแบบอัติโนมติ จากนั้นนำชิ้นงานเชื่อมไปทดสอบสมบัติทางกล และตรวจสอบทางโลหะวิทยา การวิจัยครั้งนี้มีขั้นตอนในการดำเนินการดังนี้

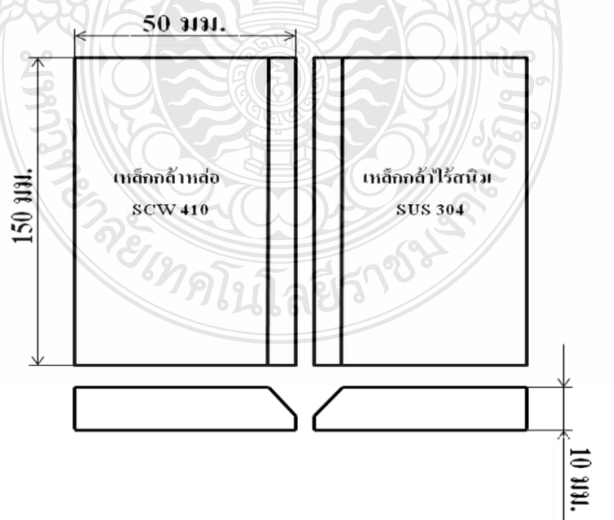
#### 3.1 การศึกษารวบรวมข้อมูล

ผู้ทำการวิจัยได้ทำการศึกษารวบรวมข้อมูลจากแหล่งข้อมูลต่างๆจาก ตำรา เอกสาร วารสาร งานวิจัย วิทยานิพนธ์ ห้องสมุดและทางอินเทอร์เน็ต ที่มีเนื้อหาที่สอดคล้องและเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ตลอดจนจากการขอคำแนะนำจากอาจารย์ที่ปรึกษา เพื่อใช้เป็นแนวทางในการทำงานวิจัย

#### 3.2 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร

3.2.2 เหล็กกล้าหล่อ SCW 410 กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 ขนาดของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และเหล็กกล้าหล่อ SCW 410



3.2.3 อุปกรณ์จับยึด ออกแบบอุปกรณ์จับยึดเพื่อทำการจับยึดขณะทำการเชื่อม โดยอุปกรณ์จับยึดทำจากเหล็กเหนียว ใช้การประกอบโดยการใส่สกรูและนัต และทำการเจียรระในผิวหน้าตลอดทั้งชิ้น เพื่อให้ได้ระดับในการวางชิ้นงาน



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานในการเชื่อม

3.2.4 ลวดเชื่อม GMAW ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลองเป็นลวดเชื่อมประเภทเปลือยตัน (Solid Wire) สำหรับเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AWS.A5.9 308LSi: MIG ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AWS.A5.9 308LSi: MIG

3.2.5 ชนิดของแก๊สปกคลุมที่ใช้ในการเชื่อม GMAW แก๊สที่ใช้ปกคลุมแนวเชื่อมใช้คือ แก๊สอาร์โกซีด 64 ประกอบด้วย 5%H+95%Ar โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สปกคลุมคือ 10 15 และ 20 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 3.4 แก๊สปกคลุมอาร์โกซีด 64 ที่ใช้ในการเชื่อม

3.2.6 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วในการเชื่อม GMAW ใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วในการเชื่อมให้คงที่ ซึ่งตัดแปลงมาจากเครื่องตัดโลหะแผ่นด้วยแก๊สทำให้การเชื่อมเป็นแบบอัตโนมัติ สามารถปรับตั้งความเร็วเดินแนวเชื่อมได้ โดยความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ใช้ในการทดลองคือ 200 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วเดินแนวเชื่อม

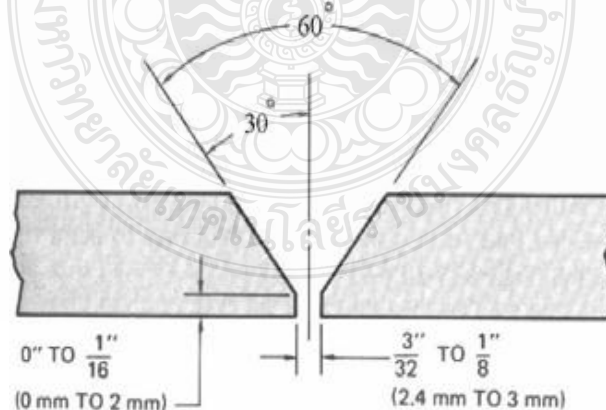
### 3.2.7 เครื่องเชื่อม GMAW ใช้เครื่องเชื่อม เครื่องหมายการค้า HOBART เชื่อมชิ้นงาน



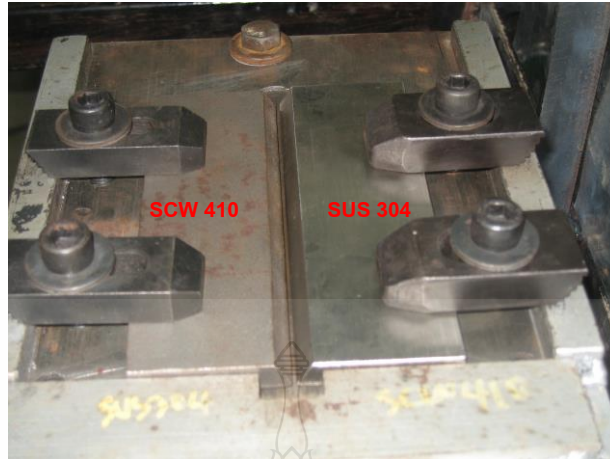
รูปที่ 3.6 เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการวิจัย

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.3.1 เตรียมชิ้นงานในการทดลอง ทำการบากชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 กับเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ให้ได้ขนาดมุม เท่ากับ 30 องศาตามกำหนดรอยต่อตามมาตรฐาน AWS D1.1/D1.1M:2006 และจับยึดชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 กับเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 บนอุปกรณ์จับยึดให้แน่น



รูปที่ 3.7 มาตรฐาน AWS D1.1/D1.1M:2006



รูปที่ 3.8 การจับยึดชิ้นงานในการเชื่อม

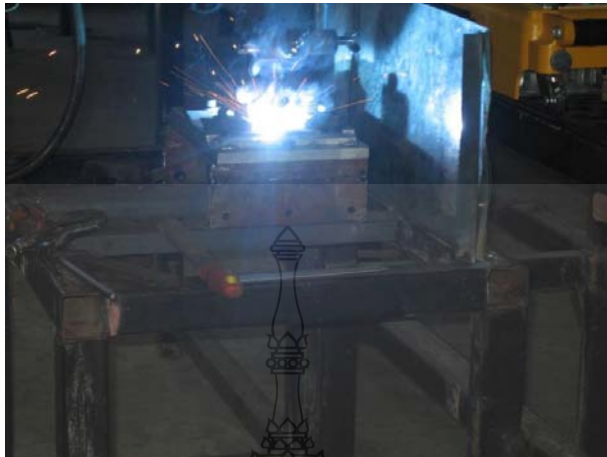
3.3.2 ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมความเร็วเดินแนวเชื่อม ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมความเร็วเดินแนวเชื่อมเข้ากับหัวเชื่อมเพื่อควบคุมความเร็วเดินแนวเชื่อมอัตโนมัติ



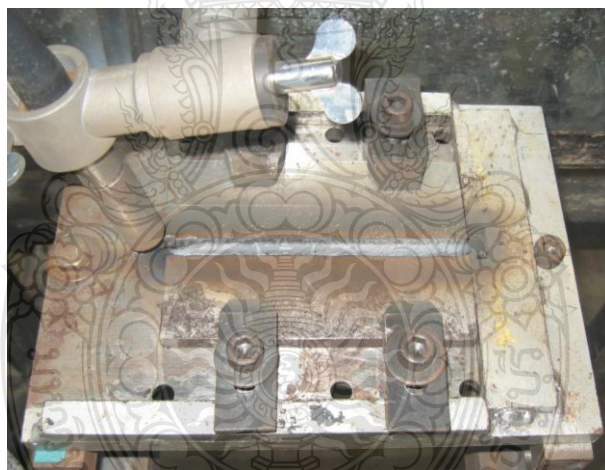
รูปที่ 3.9 ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมความเร็วเดินแนวเชื่อม

3.3.3 ปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องเชื่อม ปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ กระแสเชื่อม อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม ความเร็วเดินแนวเชื่อม ตามค่าตัวแปรที่กำหนดโดยปริมาณกระแสเชื่อม 3 ระดับ คือ 140 180 และ 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 3 ระดับ คือ 10 15 และ 20 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมมี 3 ระดับ คือ 200 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที

### 3.3.4 เชื่อมชิ้นงานทดสอบ เชื่อมชิ้นงานในท่าราบ โดยการต่อชน



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นงาน



รูปที่ 3.11 ชิ้นงานหลังจากผ่านการเชื่อม

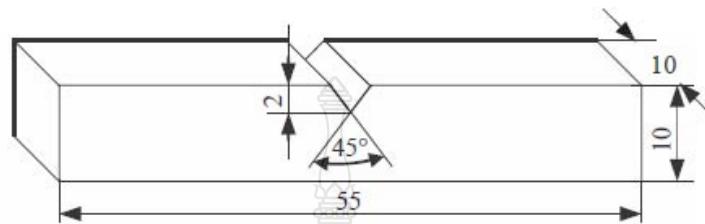
## 3.4 ทดสอบและเก็บข้อมูลผลการทดลอง

ลำดับขั้นตอนในการทดสอบและการเก็บข้อมูลผลการทดลอง สามารถลำดับขั้นตอน ดังนี้

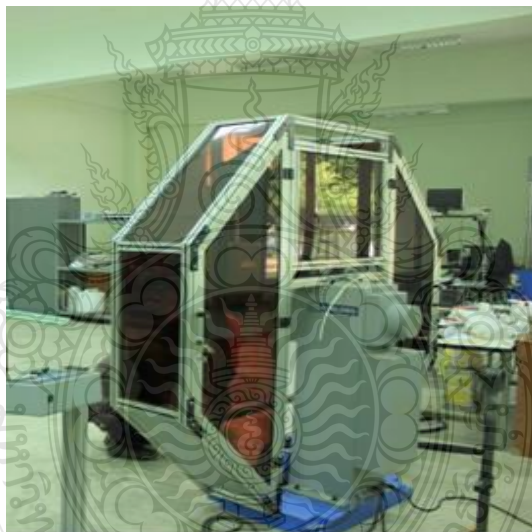
### 3.4.1 ทดสอบสมบัติทางกล

3.4.1.1 ทดสอบความแข็งแรงกระแทกชิ้นงาน นำชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้ว มาทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E23 ดังรูปที่ 3.12 จากนั้นทำการ

ทดสอบความแข็งแรงกระแทก โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทก ความเร็วในการเคลื่อนที่ (Speed) 5.2 เมตรต่อวินาที และน้ำหนักในการตี (Load Impact) 300 J โดยทำการตีรอยเชื่อมจนแนวเชื่อมขาดหรือลึกลงออกจากกัน และทำการบันทึกค่าความแข็งแรงกระแทก



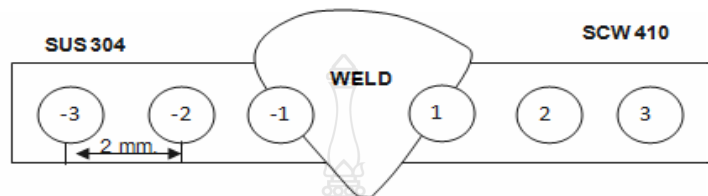
รูปที่ 3.12 ลักษณะชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E23



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทก CBD-300 Pendulum

3.4.1.2 ทดสอบความแข็งแรง ชิ้นงานตรวจสอบจะถูกเตรียมเพื่อให้สามารถนำขึ้นตรวจสอบนั้นไปทำการตรวจสอบความแข็งแรงได้ โดยนำไปขัดด้วยกระดาษทรายน้ำ ตั้งแต่เบอร์ 360 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ เพื่อให้หน้าซำระสิ่งสกปรกออกให้หมด จนถึงกระดาษทรายเบอร์สุดท้ายล้างด้วยน้ำและเช็ดทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ เป่าแห้งด้วยลมร้อนและทำการทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อมจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E92-82 [14] โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรง

แบบ Micro Vickers กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของบริเวณแนวเชื่อม (Weld Zone) บริเวณพื้นที่กระทบ ร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) และเนื้อโลหะเดิม (Base Metal) ระยะห่างของรอยกดประมาณ 2 มิลลิเมตร ทั้งสองด้าน ด้านละ 3 จุด โดยใช้แรงกด 10 กิโลกรัม (kgf) และใช้เวลาในการกดประมาณ 10 วินาที ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ระยะการทดสอบความแข็ง

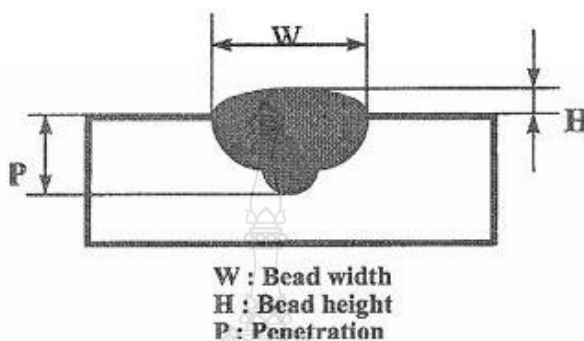


รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Micro Vickers

### 3.4.2 ตรวจสอบทางโลหะวิทยา

3.4.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Micro Scope) ที่มีกำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่า นำชิ้นงานส่วนที่ต้องการตรวจสอบมาตัดแบ่งชิ้นส่วนด้วยเครื่องตัดและหล่อเย็นชิ้นงานขณะทำการตัดและทำการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำ ตั้งแต่เบอร์ 360 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ และ

ตรวจสอบเพื่อจุดบกพร่องบริเวณแนวเชื่อม (Weld Zone) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ทำการวัดขนาดแนวเชื่อม ค่าความกว้างของแนวเชื่อม (W) ค่าความนูนของแนวเชื่อม (H) และค่าความลึกของแนวเชื่อม (P) ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การวัดขนาดแนวเชื่อม [15]

3.4.2.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม กระทำได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงกว่า 10 เท่า ถ้าเป็นกล้องที่ใช้แสงจากหลอดไฟจะให้กำลังขยายไม่เกิน 2,000 เท่า แต่ถ้าเป็นกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนจะสามารถให้กำลังขยายได้สูงถึง 100,000 เท่า หรือมากกว่านี้ จุดประสงค์ของการตรวจสอบเพื่อดูกระจายตัวและลักษณะเกรนของโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อม (WM) เขตบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (HAZ) และบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) สำหรับการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคในงานวิจัยนี้ได้กำหนดตามมาตรฐาน ASTM E 407



รูปที่ 3.17 กล้องจุลทรรศน์และอุปกรณ์บันทึกข้อมูล



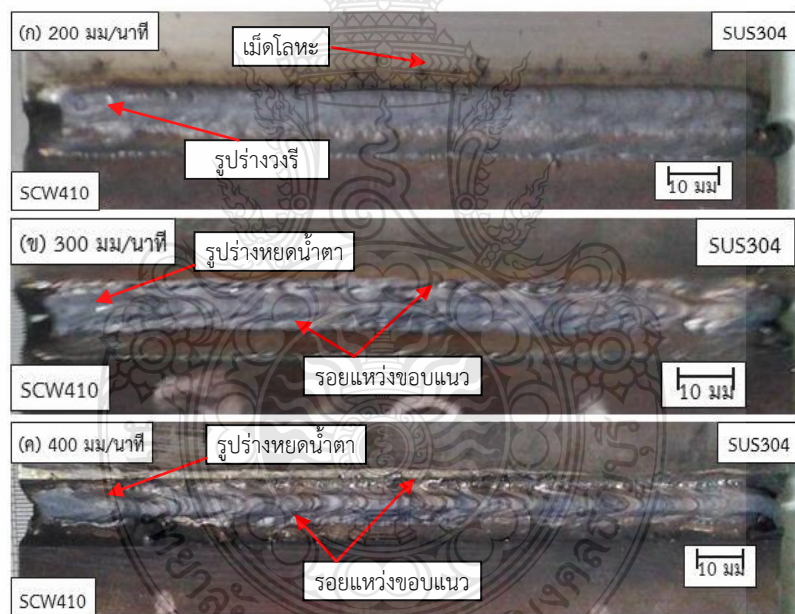
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผลการวิจัย

ผลทดลองการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของรอยเชื่อม ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 กับเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 โดยมีค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังนี้ กระแสเชื่อม 140 180 และ 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 15 และ 20 ลิตรต่อนาที และความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบดังนี้

#### 4.1 อิทธิพลของกระแสเชื่อม 140 แอมแปร์

##### 4.1.1 อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ที่มีผลต่อแนวเชื่อม



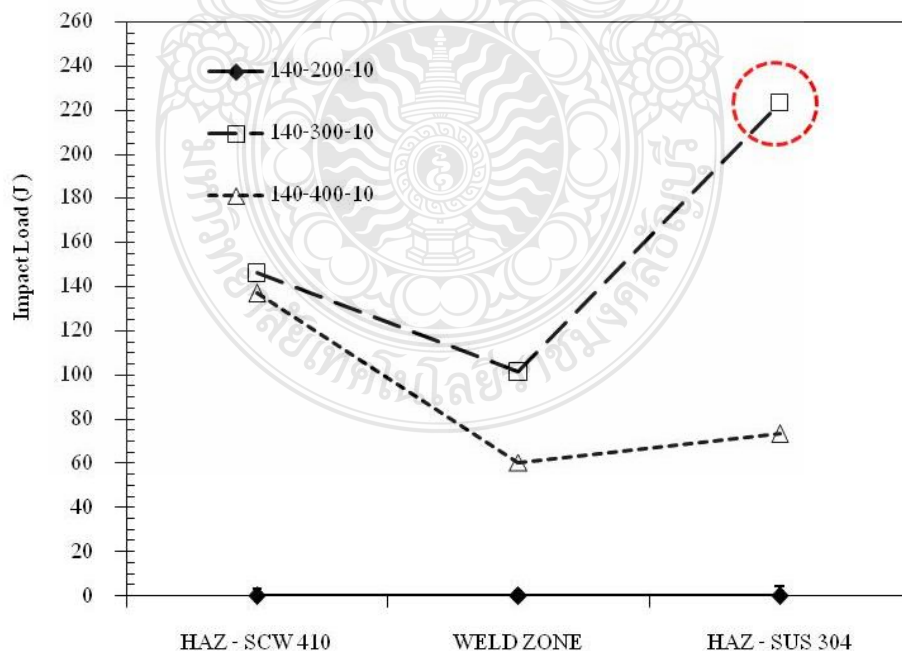
(ก) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที

(ข) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที

(ค) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที

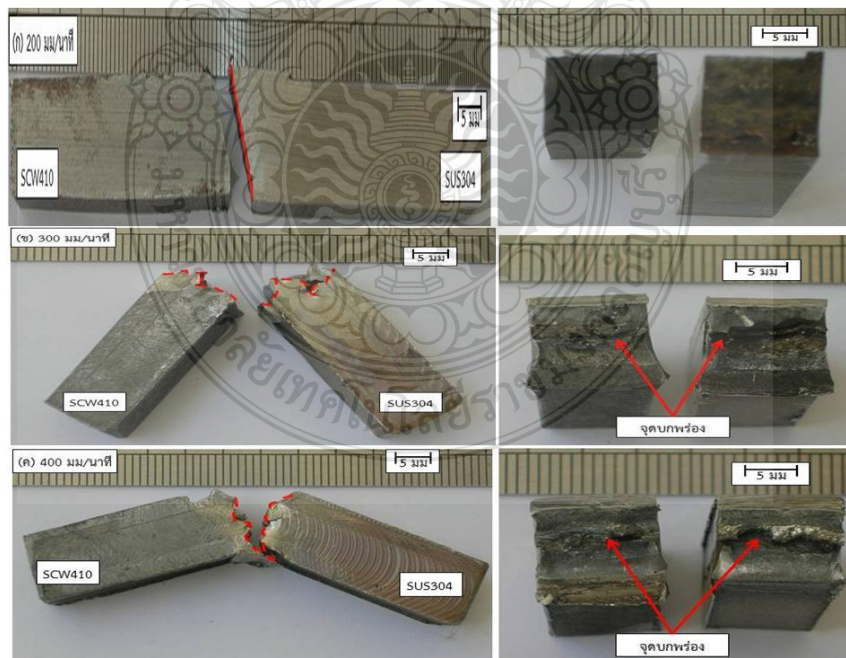
รูปที่ 4.1 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.1 แสดงพิกัดหน้าแนวเชื่อมที่กระแสะเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความนูนของแนวเชื่อม (H) ค่าความกว้างของแนวเชื่อม (W) และค่าความลึกของแนวเชื่อม (P) มีค่าลดลงและเกิดรอยแหวนขอบแนว (Undercut) และลักษณะบริเวณบ่อหลอมละลายแนวเชื่อมมีรูปร่างคล้ายหยดน้ำตา (Teardrop Shape) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมที่สูงที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.1 (ข) (ค) และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jiecai Feng Et al. [16] ที่ได้กล่าวไว้ว่า การเปลี่ยนความยาวระยะเวลาการอาร์ก ที่เพิ่มขึ้นกับอัตราความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดรอยแหวนขอบแนว (Undercut) พร้อมกันทั้ง 2 ด้าน ขณะที่พิกัดหน้าแนวเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำ คือ 200 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.1 (ก) มีเม็ดโลหะทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และการเกิดรอยแหวนขอบแนว (Undercut) นั้นหายไป และลักษณะบริเวณบ่อหลอมละลายแนวเชื่อมมีรูปร่างคล้ายวงรี (Elliptical Shape) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ต่ำ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของแนวเชื่อมนี้สัมพันธ์กับสมการทางความร้อนของการเชื่อมโดยตรงที่แสดงไว้ว่า ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความร้อนในแนวเชื่อมมีค่าลดลง ค่าความร้อนที่ลดลงทำให้การแผ่กระจายความร้อนไปบริเวณโดยรอบของแนวเชื่อมมีค่าน้อย และทำให้โลหะหลอมเหลวไม่สามารถกระจายออกไปบริเวณด้านข้างได้ แนวเชื่อมจึงมีความนูน (H) และความกว้าง (W) ของแนวเชื่อมมีค่ามากกว่า [17]



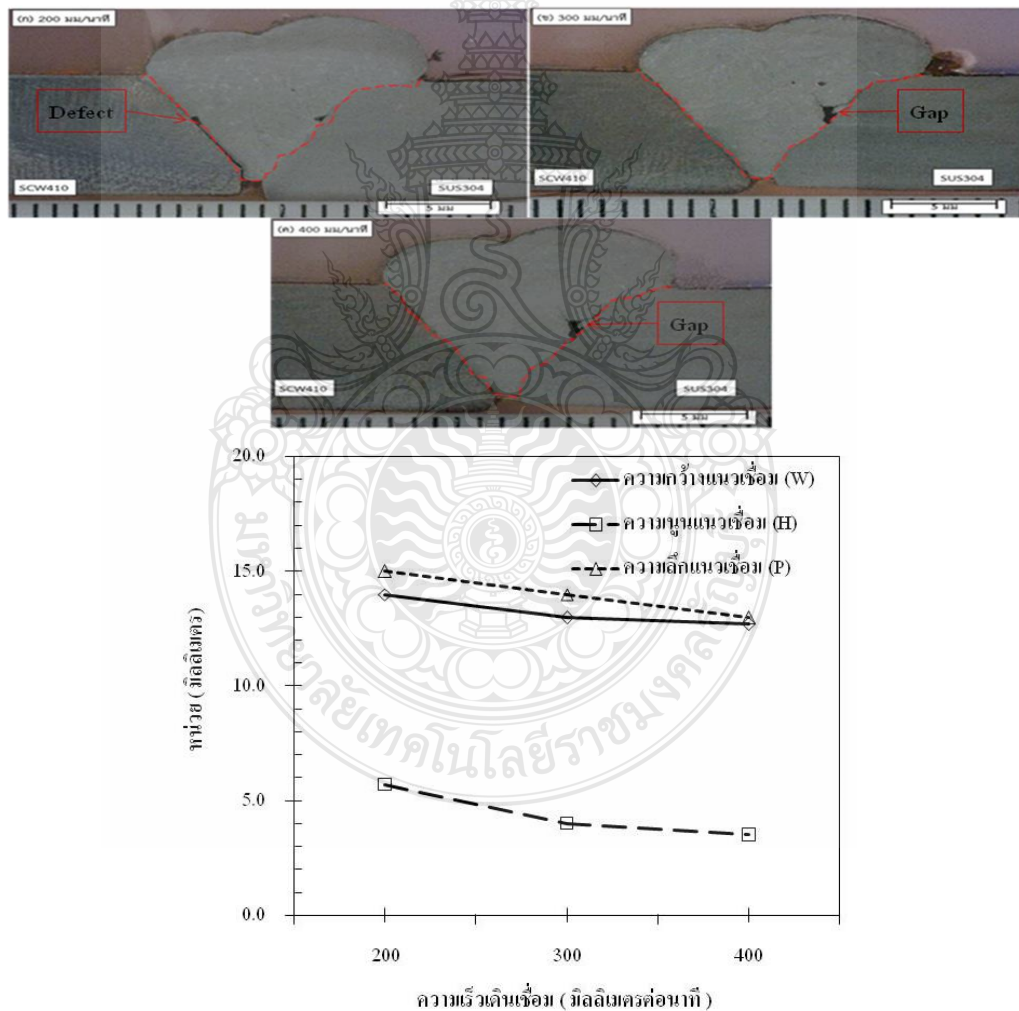
รูปที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสะเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.2 แสดงค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า ความแข็งแรงกระแทกสูงสุดของรอยต่อทุกๆ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200, 300, และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ ที่อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที บริเวณที่มีความแข็งแรงกระแทกสูงสุด คือ บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ของแนวเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 โลหะเชื่อม และสอดคล้องกับการทดสอบค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงสูงแสดงระยะการทดสอบวงกลมหมายเลข 1 บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ทางด้านแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ดังรูปที่ 4.5 และมีค่าความแข็งแรงกระแทกแนวโน้มต่ำที่สุด คือ บริเวณแนวเชื่อม (Weld Zone) สาเหตุเนื่องจากเกิดจุดบกพร่องบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.3 (ข) และ (ค) แสดงลักษณะการพังทลายและจุดบกพร่องหรือสแลกฝังใน (Slag Inclusion) ในขณะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความแข็งแรงกระแทก มีค่าเท่ากับ 0 J เนื่องจากบริเวณแนวเชื่อมเกิดการหลอมไม่สมบูรณ์ (Lack of Fusion) ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.3 (ก) ลักษณะการพังทลาย นอกจากนั้นความเร็วเดินแนวเชื่อมที่มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกระแทกของรอยเชื่อม ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดที่ได้จากการเชื่อมพบว่า มีค่าเท่ากับ 223 J ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที ดังแสดงในวงกลมเส้นประสีแดงในรูปที่ 4.2



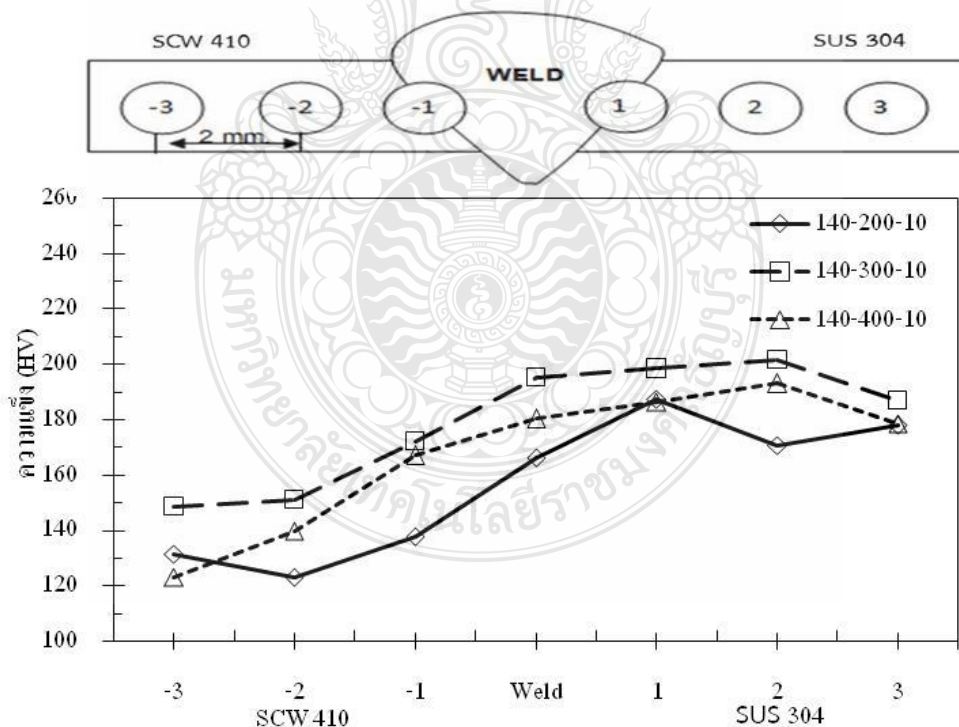
รูปที่ 4.3 ลักษณะการพังทลายที่กระแสเชื่อม 140แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการพังทลายที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า ลักษณะการพังทลายที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที จะเกิดขึ้นทางด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 มีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงเนื่องจากบริเวณโลหะเชื่อมไม่มีการผสมกับลาวาเชื่อม ดังรูปที่ 4.3 (ก) และส่งผลถึงค่าความแข็งแรงกระแทกที่ต่ำและสอดคล้องกับรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.9 ลักษณะการพังทลายของกระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ ที่อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ขณะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า บริเวณรอยพังทลายมีลักษณะเป็นรอยแตกสลับฟันปลา (Zigzag) และสังเกตพื้นที่หน้าตัดรอยพังทลายลักษณะผิวค่อนข้างหยาบ และรอยพังทลายเกิดตรงบริเวณจุดบกพร่องของแนวเชื่อม 4.3 (ข) และ (ค)



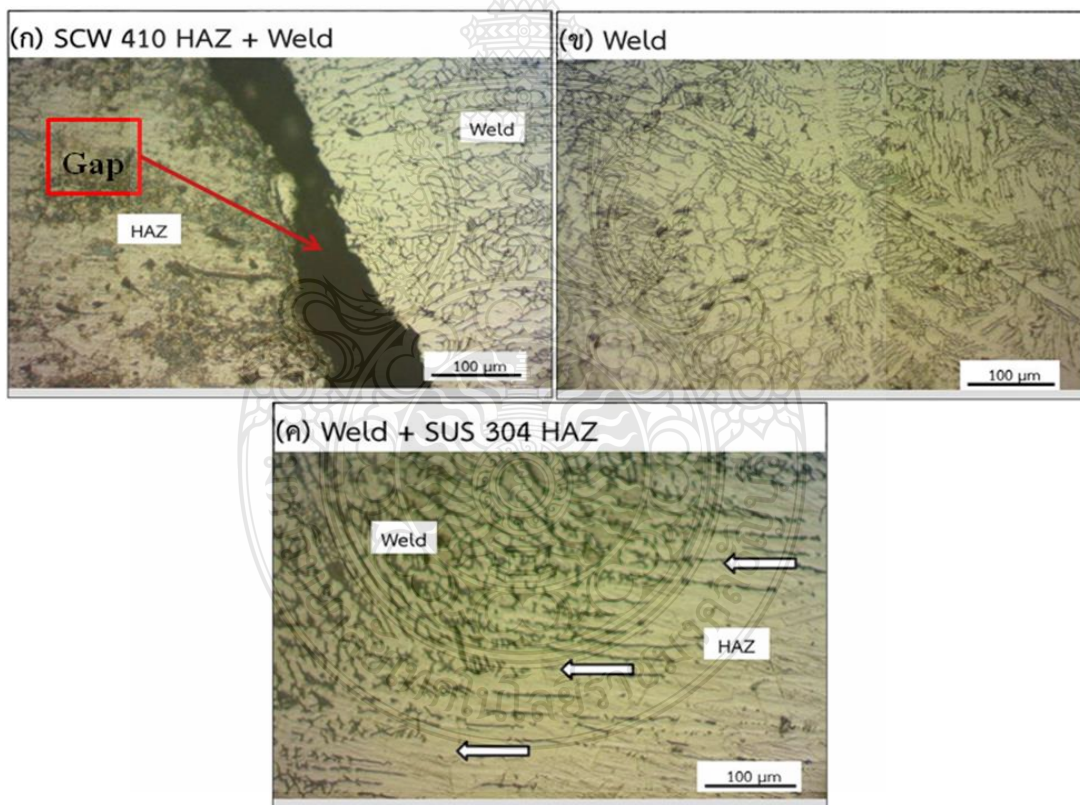
รูปที่ 4.4 โครงสร้างมหภาคที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างมหภาคที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำ พบจุดบกพร่อง (Defect) มีขนาดเล็ก และเกิดช่องว่าง (Gap) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ของแนวเชื่อมทางด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 แสดงดังรูปที่ 4.4 (ก) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกระแทกดังรูปที่ 4.2 และลักษณะการพังทลายดังรูปที่ 4.3 ขณะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที พบจุดบกพร่อง (Defect) มีขนาดใหญ่บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ของแนวเชื่อมทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ดังรูปที่ 4.4 (ข) (ค) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการพังทลายรูปที่ 4.3 (ข) (ค) และทำการวัดค่าความกว้างของแนวเชื่อม (W) ค่าความนูนของแนวเชื่อม (H) และค่าความลึกของแนวเชื่อม (P) ทำการเปรียบเทียบ พบว่า เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความกว้างของแนวเชื่อม (W) ค่าความนูนของแนวเชื่อม (H) และค่าความลึกของแนวเชื่อม (P) มีค่าลดลง ขณะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำ ค่าความกว้างของแนวเชื่อม (W) ค่าความนูนของแนวเชื่อม (H) และค่าความลึกของแนวเชื่อม (P) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังกราฟรูปที่ 4.4 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jiecai Feng Et al. [16]



รูปที่ 4.5 ค่าความแข็งที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.5 แสดงค่าความแข็งที่กระสวยเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ต่างกัน ทำการวัดในตำแหน่งกึ่งกลางความหนาของแผ่น และมีตำแหน่งตั้งแต่ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ลากผ่านโลหะเชื่อมไปที่ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ดังรูปที่ 4.5 พบว่าค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ของทั้งสองด้านของแนวเชื่อม และโลหะเชื่อมทุกสภาวะนั้นมีความแข็งสูงกว่าโลหะในการทดลองทั้งสองชนิด ค่าความแข็งมีแนวโน้มคล้ายกับค่าความแข็งแรงกระแทก กล่าวคือ บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีค่าความแข็งสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะเชื่อม และพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ที่มีค่าต่ำสุด ขณะที่บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีค่าความแข็งใกล้เคียงบริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อม

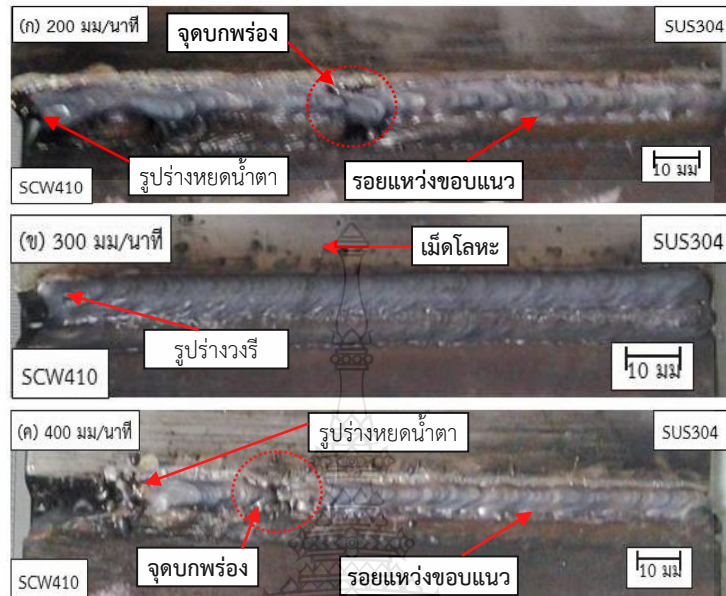


รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคที่กระสวยเชื่อม 140 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่กระแสดเชื่อม 140 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที เนื่องจากมีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดคือ 223 J พบว่า โครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ด้านรอยต่อด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 แสดงในรูปที่ 4.6 (ก) พบจุดบกพร่องเกิดช่องว่าง (Gap) เม็ดเกรนจะมีลักษณะเรียวยาวมีทิศทางเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลว การเกิดเม็ดเกรนที่ยาวมีทิศทางเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลวจากซ้ายไปขวา เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่รวดเร็วของโลหะหลอมเหลวในโลหะเชื่อมออกสู่บรรยากาศขณะที่ด้านซ้ายของเส้นเขตการหลอมเหลว คือพื้นที่ของโลหะเชื่อมที่ประกอบด้วยเดนไดรท์ของโลหะเชื่อมที่มีความละเอียดมากกว่า และเดนไดรท์มีทิศทางเข้าสู่กึ่งกลางของแนวเชื่อมที่มีความเอียงจากบนลงล่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข) และด้านซ้ายของรูปที่ 4.6 (ค) ที่มีลักษณะของเดนไดรท์ละเอียดที่มีทิศทางลากการเรียงตัวเข้าสู่กึ่งกลางจากขวาไปซ้ายของโลหะเชื่อม ด้านขวาของเขตการหลอมเหลวของโลหะเชื่อมดังแสดงด้วยลูกศรสีขาวเม็ดเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบแต่เม็ดเกรนของโลหะไม่ได้มีความกลมมนและสมมาตรเหมือนดังที่เกิดในพื้นที่กระทบร้อนของเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นทำให้ทราบเหตุผลที่บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 พื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ของเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 และบริเวณโลหะเชื่อมจึงมีค่าความแข็งแรงกระแทกแตกต่างกัน



#### 4.1.2 อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ที่มีผลต่อแนวเชื่อม



(ก) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที

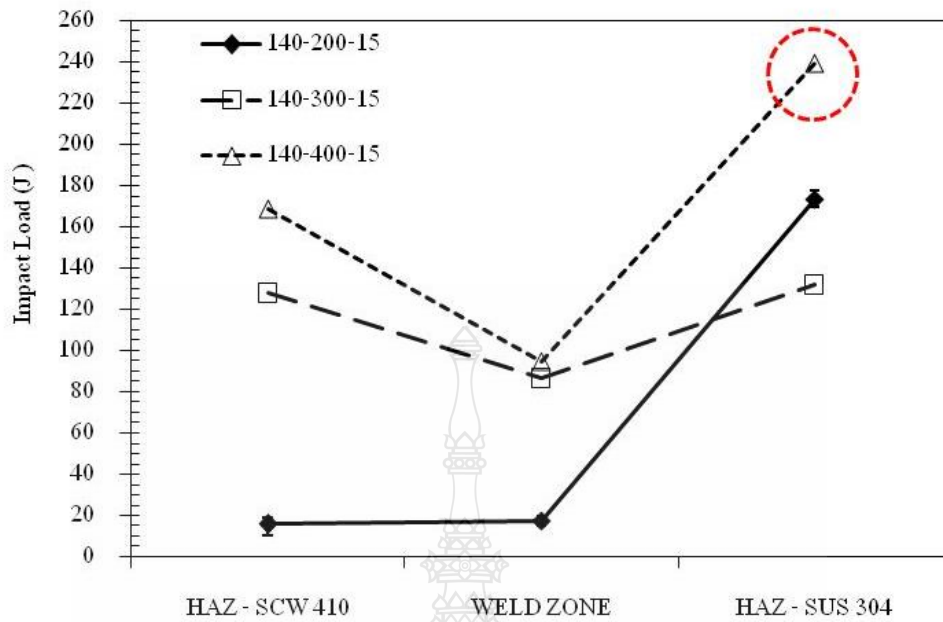
(ข) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที

(ค) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที

#### รูปที่ 4.7 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที

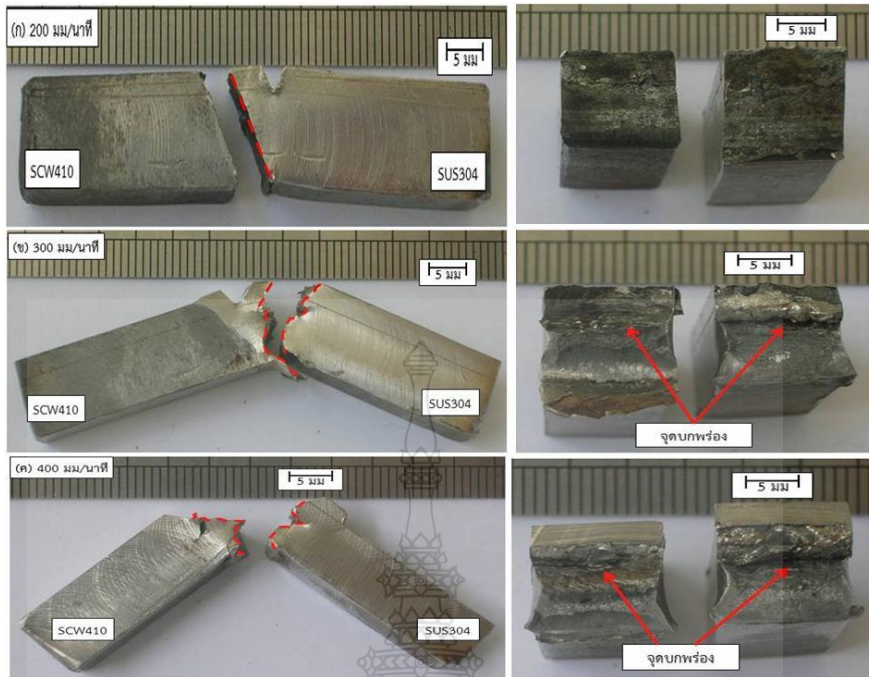
รูปที่ 4.7 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่ออัตราการไหลของแก๊สปกคลุมเพิ่มขึ้น โดยใช้ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงส่งผลทำให้ค่าความนูนของแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นและความกว้างของแนวเชื่อมมีค่าลดลงและเกิดรอยแห้วขอบแนว (Undercut) เกิดจุดบกพร่อง (Defect) บริเวณแนวเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.7 (ก) (ค) และลักษณะบริเวณบ่อหลอมละลายแนวเชื่อมมีรูปร่างคล้ายหยดน้ำตา (Teardrop Shape) ขณะที่ผิวแนวเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.7 (ข) ลักษณะบริเวณบ่อหลอมละลายแนวเชื่อมมีรูปร่างคล้ายวงรี (Elliptical Shape) การเกิดรอยแห้วขอบแนว (Undercut) และจุดบกพร่อง (Defect) นั้นหายไป แต่มีเม็ดโลหะเกิดขึ้นทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304





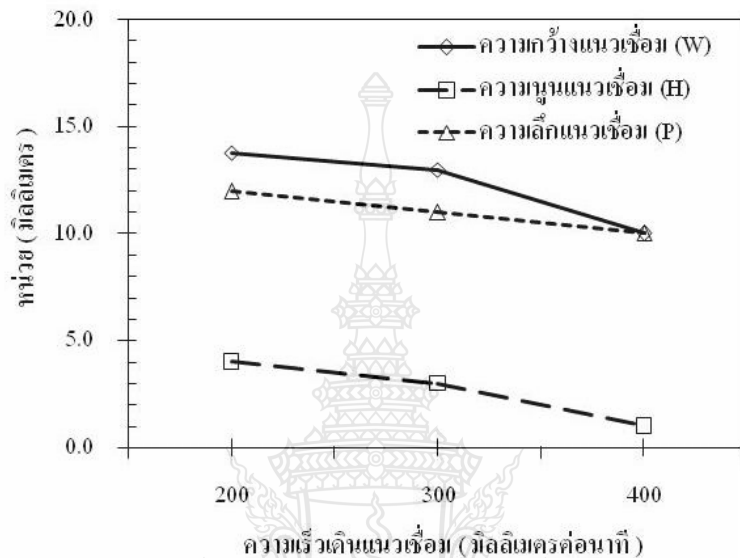
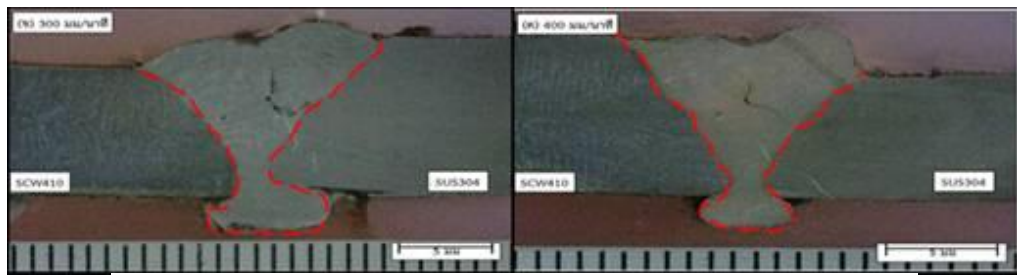
รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.8 แสดงค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า ความแข็งแรงกระแทกสูงสุดของรอยต่อทุกๆ ความเร็วเดินแนวเชื่อม บริเวณที่มีความแข็งแรงกระแทกสูงสุด คือ บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ของแนวเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 โลหะเชื่อม และสอดคล้องกับการทดสอบค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงแนวโน้มสูงบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ทางด้านแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ทุกความเร็วเดินแนวเชื่อมดังแสดงระยการทดสอบวงกลมหมายเลข 1 ดังรูปที่ 4.11 และค่าความแข็งแรงมีลักษณะคล้ายกับการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ ที่อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที นอกจากนั้นความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเปราะของรอยต่อเชื่อม ขณะที่ค่าความแข็งแรงกระแทกที่มีแนวโน้มต่ำที่สุด คือ บริเวณแนวเชื่อม (Weld Zone) สาเหตุเนื่องจากเกิดการหลอมไม่สมบูรณ์ (Lack of Fusion) ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.9 (ก) และมีจุดบกพร่องในบริเวณแนวเชื่อมหรือสแลกฝังใน (Slag Inclusion) ดังรูปที่ 4.9 (ข) (ค) ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดที่ได้จากการเชื่อมพบว่ามีค่าเท่ากับ 239 J ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ดังแสดงในวงกลมเส้นประสีแดงรูปที่ 4.8



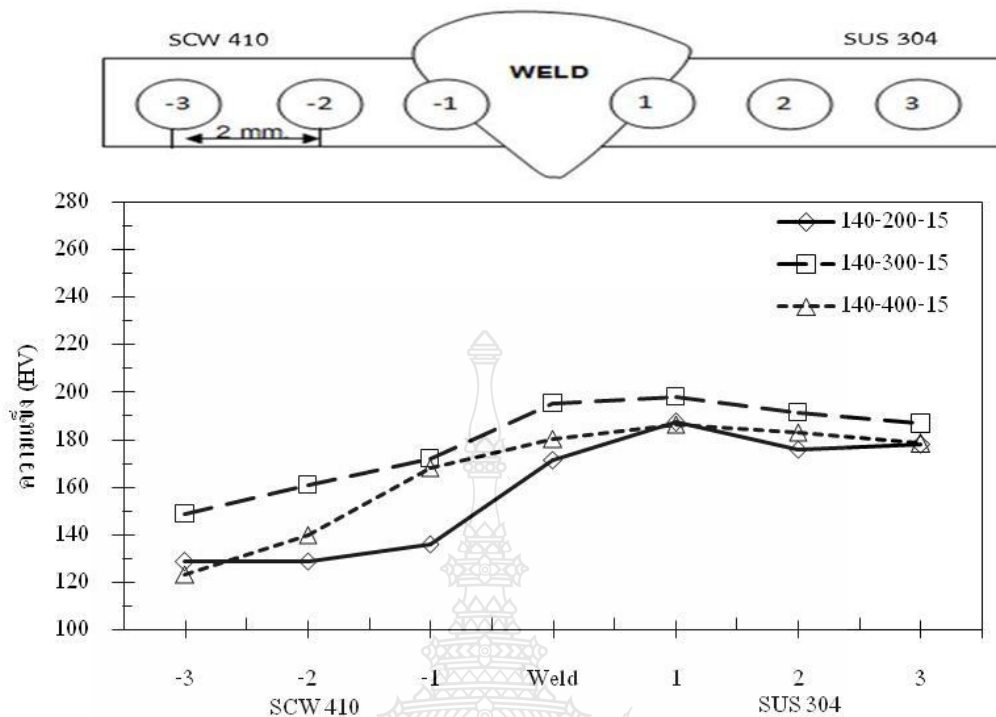
รูปที่ 4.9 ลักษณะการพังทลายที่กระแสดึง 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะการพังทลายที่กระแสดึง 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า ลักษณะการพังทลายที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที จะเกิดขึ้นทางด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 มีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงเนื่องจากบริเวณ โลหะเชื่อมไม่มีการผสมกับลวดเชื่อม บริเวณรอยพังทลายดังรูปที่ 4.9 (ก) และส่งผลถึงค่าความแข็งแรงกระแทกที่ต่ำสอดคล้องกับรูปที่ 4.8 ขณะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า บริเวณรอยพังทลายมีลักษณะเป็นรอยแตกสลับฟันปลา (Zigzag) และสังเกตเห็นที่หน้าตัดรอยพังทลายลักษณะผิวค่อนข้างหยาบ และรอยพังทลายเกิดตรงบริเวณจุดบกพร่องของแนวเชื่อม แสดงในรูปที่ 4.9 (ข) (ค) ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุด ลักษณะการแตกหักแสดงในรูปที่ 4.9 (ค)



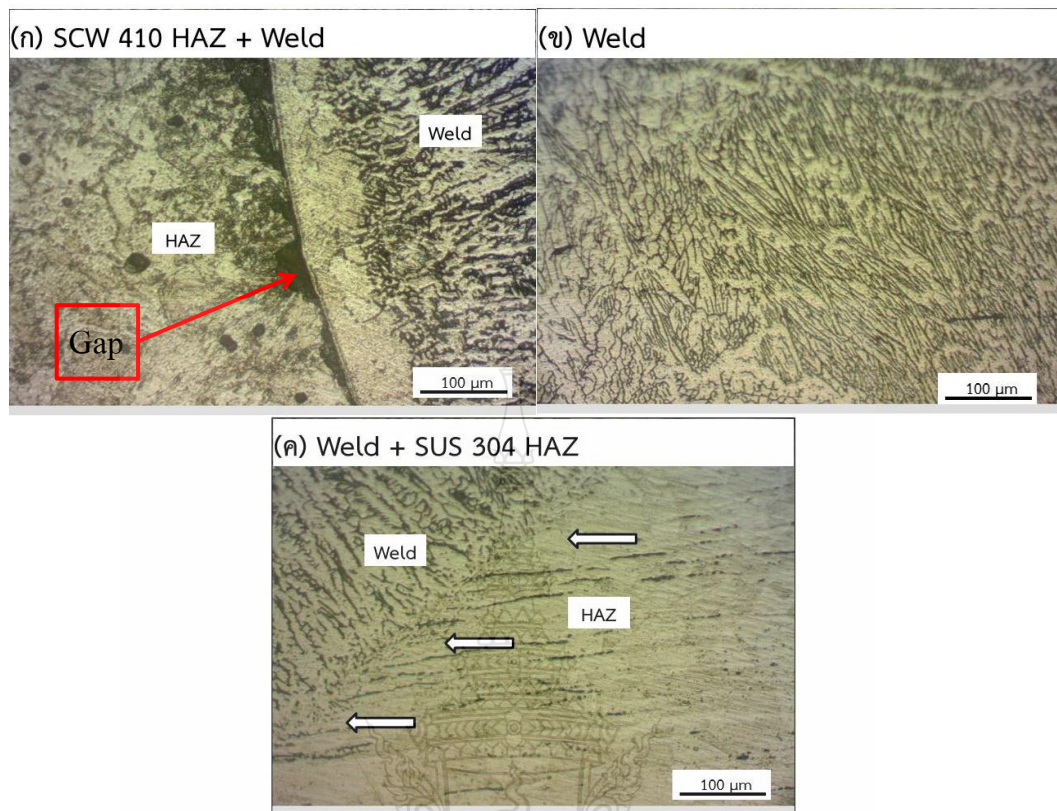
รูปที่ 4.10 โครงสร้างมหภาคที่กระแสน้ำเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างมหภาคที่กระแสน้ำเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำ พบจุดบกพร่อง (Defect) บริเวณแนวเชื่อม (Weld Zone) ดังรูปที่ 4.10 (ก) (ข) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกระแทกที่มีค่าต่ำบริเวณแนวเชื่อม ดังรูปที่ 4.8 และลักษณะการพังทลายเกิดขึ้นบริเวณแนวเชื่อมที่พบจุดบกพร่อง (Defect) ดังรูปที่ 4.9 และทำการวัดค่าความกว้างของแนวเชื่อม (W) ค่าความสูงของแนวเชื่อม (H) และค่าความลึกของแนวเชื่อม (P) ทำการเปรียบเทียบ พบว่า เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความกว้างของแนวเชื่อม (W) และค่าความสูงของแนวเชื่อม (H) ความลึกของแนวเชื่อม (P) มีค่าลดลง ขณะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำ ค่าความกว้างของแนวเชื่อม (W) ค่าความสูงของแนวเชื่อม (H) และค่าความลึกของแนวเชื่อม (P) มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงดังกราฟรูปที่ 4.10 และสอดคล้องกับกระแสน้ำเชื่อม 140 แอมแปร์ ที่อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที มีแนวโน้มเหมือนกัน ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งที่กระแสมเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที

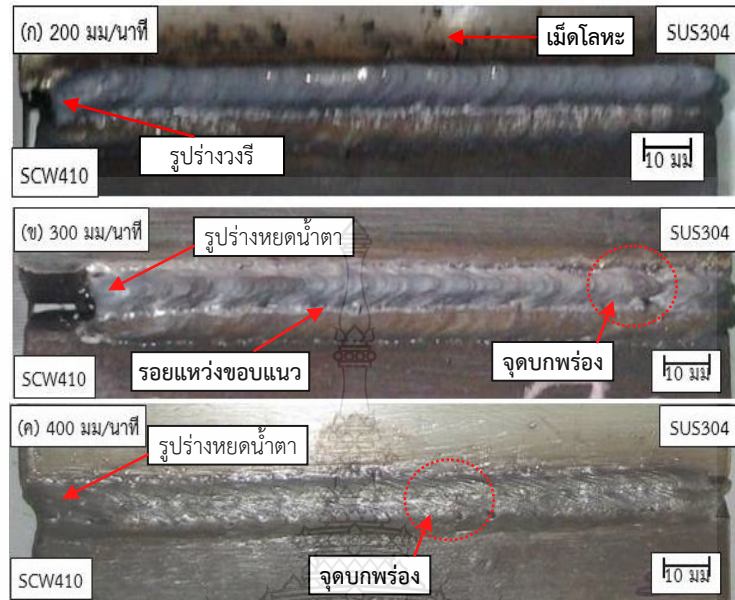
รูปที่ 4.11 แสดงค่าความแข็งที่กระแสมเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน แสดงค่าความแข็งของรอยต่อที่ทำการวัดในตำแหน่งกึ่งกลางความหนาของแผ่น และมีตำแหน่งตั้งแต่ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ลากผ่านโลหะเชื่อมไปที่ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 พบว่า ค่าความแข็งมีแนวโน้มคล้ายกับค่าความแข็งแรงกระแทกดังรูปที่ 4.8 กล่าวคือ ค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ของทั้งสองด้านของแนวเชื่อม และโลหะเชื่อมทุกสภาวะนั้นมีความแข็งสูงกว่าโลหะในการทดลองทั้งสองชนิด และบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีค่าความแข็งสูงสุดซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการพังทลายจะเกิดขึ้นบริเวณด้านทางเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ดังรูปที่ 4.9 (ข) (ค) เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะเชื่อมและพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อที่มีค่าต่ำสุด ขณะที่บริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อมมีความแข็งใกล้เคียงบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304



รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.12 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ที่แสดงค่าความแข็งแรงกระแทก 239 J พบว่า โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบจุดบกพร่อง (Defect) และเกิดช่องว่าง (Gap) เม็ดเกรนมีลักษณะเรียวยาว มีทิศทางเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลว และโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อม เม็ดเกรนมีลักษณะสมมาตร และมีทิศทางการเรียงตัวเข้าหาถึงกลางแนวเชื่อม ขณะที่โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 เม็ดเกรนมีลักษณะเรียวยาว การเรียงตัวตามลูกศรสีขาว มีทิศทางจากขวาไปซ้ายเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ค) ส่งผลให้บริเวณนี้มีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.8

#### 4.1.3 อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ที่มีผลต่อแนวเชื่อม



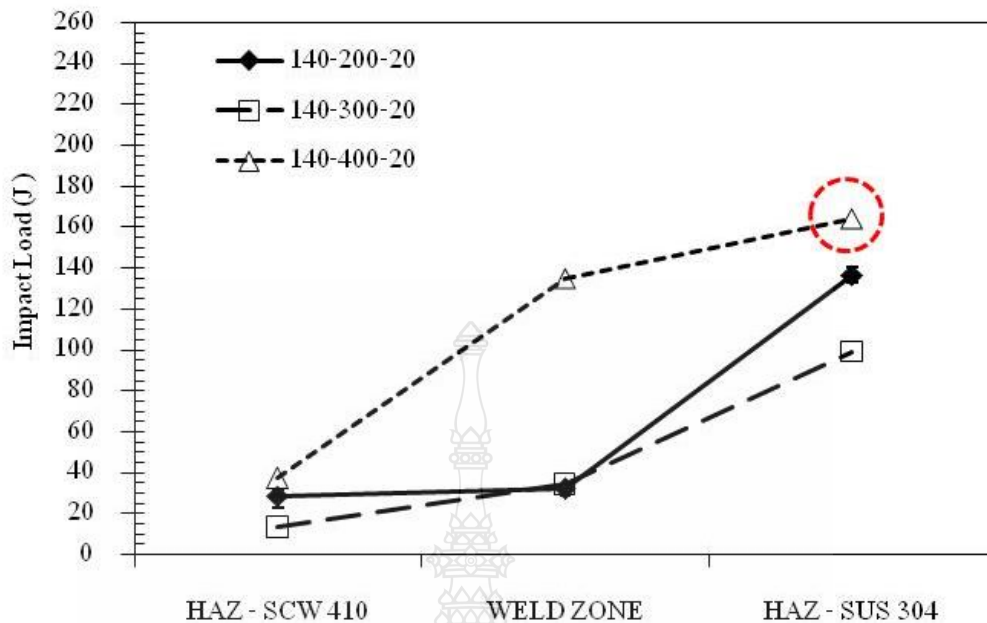
(ก) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที

(ข) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที

(ค) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที

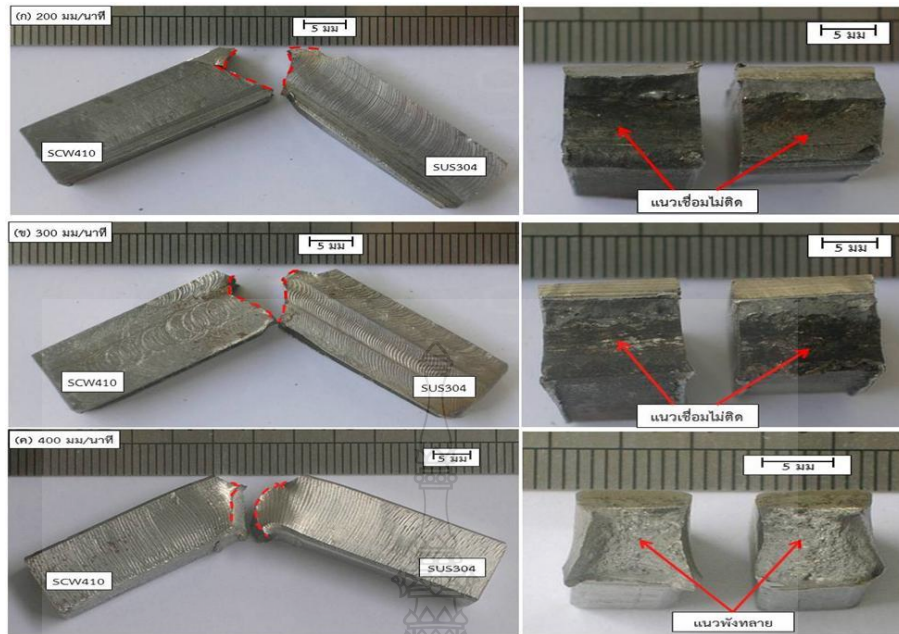
#### รูปที่ 4.13 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.13 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่ออัตราการไหลของแก๊สปกคลุมเพิ่มขึ้น และความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความสูงของแนวเชื่อมมีค่าลดลง และความกว้างของแนวเชื่อมมีค่าลดลงและเกิดรอยแห้วขอบแนว (Undercut) ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.13 (ข) และเกิดจุดบกพร่องบริเวณผิวแนวเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.13 (ข) (ค) แสดงบริเวณวงกลมเส้นประสีแดง และลักษณะบริเวณบ่อหลอมละลายแนวเชื่อมมีรูปร่างคล้ายหยดน้ำตา (Teardrop Shape) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมที่สูง ขณะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที ทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีเม็ดโลหะเกิดขึ้น และลักษณะบริเวณบ่อหลอมละลายแนวเชื่อมมีรูปร่างคล้ายวงรี (Elliptical Shape) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ต่ำ



รูปที่ 4.14 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที

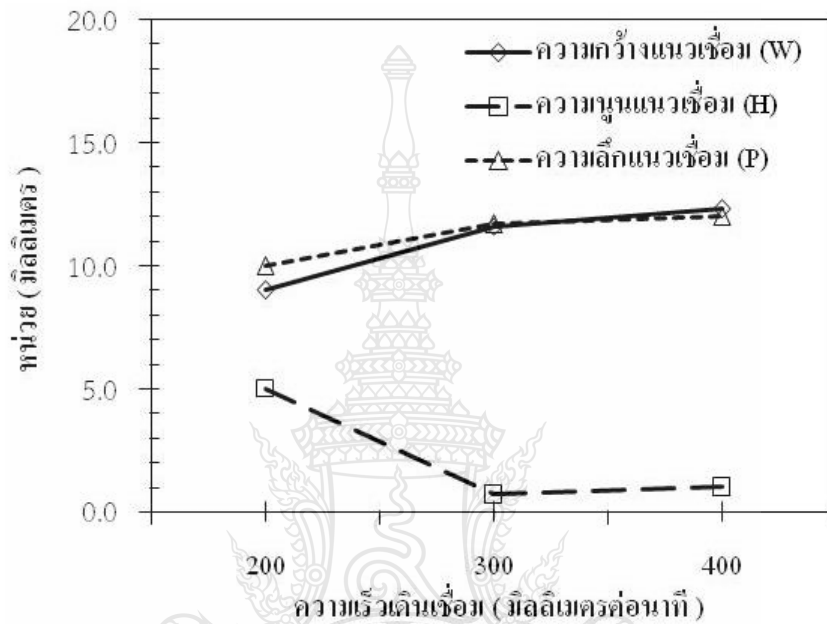
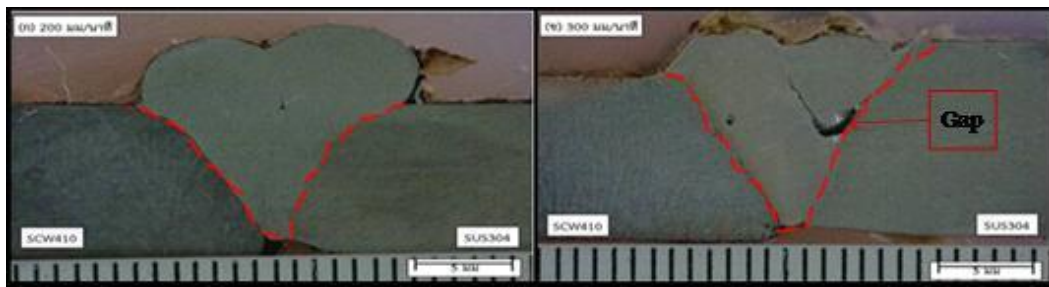
รูปที่ 4.14 แสดงค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า ความแข็งแรงกระแทกสูงสุดคือบริเวณที่มีความแข็งแรงกระแทกสูงสุด คือ บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) ของแนวเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่มีแนวโน้มค่าความแข็งแรงสูง บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) ของแนวเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ทุกความเร็วเดินแนวเชื่อม ดังแสดงระยะการทดสอบวงกลมหมายเลข 1 และ 2 ดังรูปที่ 4.17 ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดที่ได้จากการเชื่อมพบว่ามีค่าเท่ากับ 164 J ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ของแนวเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ดังแสดงในวงกลมเส้นประสีแดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.15 ลักษณะการพังทลายที่กระแสน้ำเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที

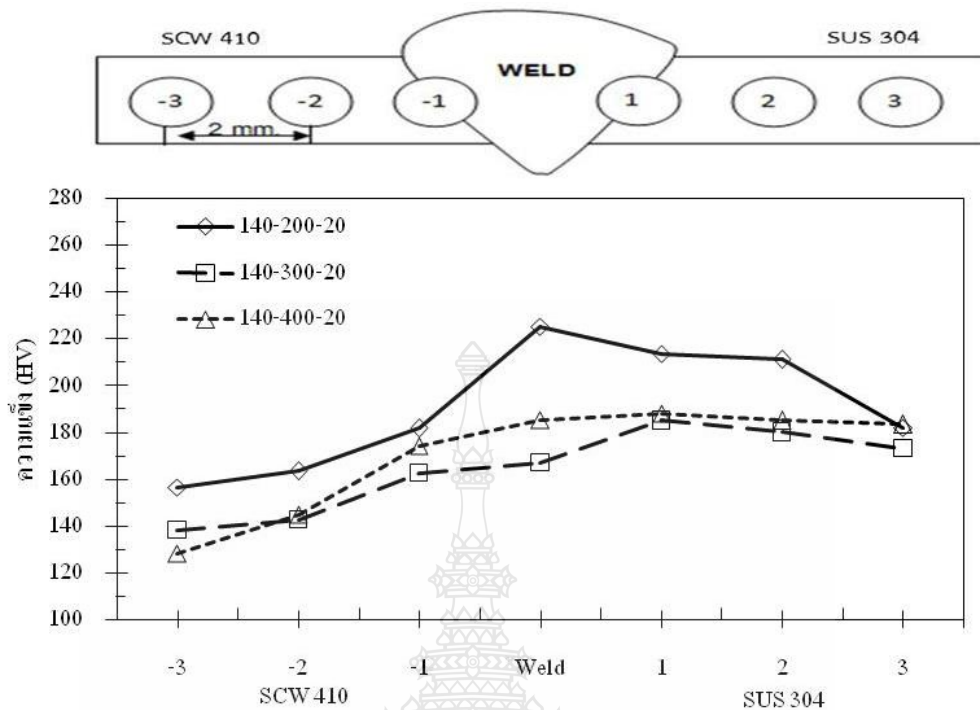
รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะการพังทลายที่กระแสน้ำเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.15 พบว่า ลักษณะการพังทลายที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที จะเกิดขึ้นทางด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 เนื่องจากแนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ไม่ติดกับเนื้อโลหะเดิมเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 บางส่วน บริเวณรอยพังทลายดังรูปที่ 4.15 (ก) (ข) และส่งผลถึงค่าความแข็งแรงกระแทกที่ต่ำบริเวณแนวเชื่อมสอดคล้องกับรูปที่ 4.14 ขณะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า บริเวณรอยพังทลายมีพื้นที่หน้าตัดของรอยแตกหักแคบลง ดังรูปที่ 4.15 (ค)





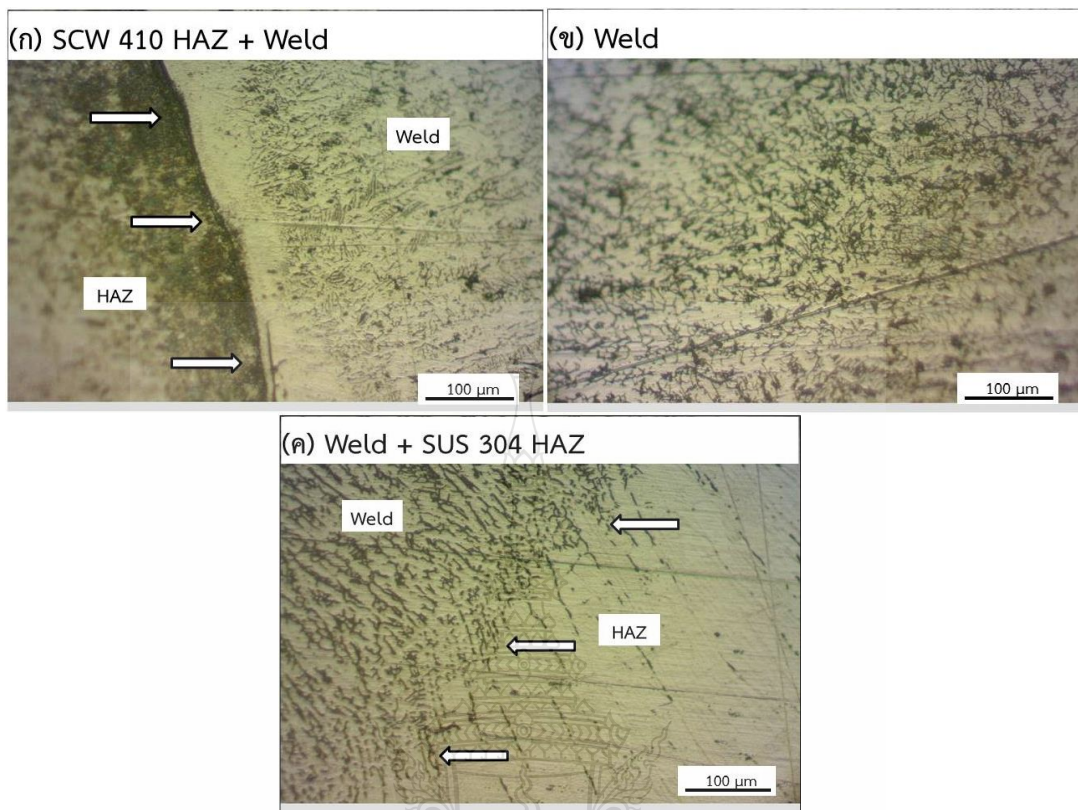
รูปที่ 4.16 โครงสร้างมหภาคที่กระแสนเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.16 แสดงโครงสร้างมหภาคที่กระแสนเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที พบจุดบกพร่อง(Defect) และเกิดช่องว่าง(Gap) บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน(Heat Affect Zone: HAZ) ของแนวเชื่อม ทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 แสดงในรูปที่ 4.16 (ข) สอดคล้องกับลักษณะการพังทลาย รูปที่ 4.15 (ข) และจากการวัดค่าความกว้างแนวเชื่อม(W) ค่าความสูงแนวเชื่อม (H) และค่าความลึกแนวเชื่อม (P) พบว่าเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่าความกว้างแนวเชื่อม (W) ค่าความลึกแนวเชื่อม (P) มีค่าเพิ่มขึ้นและค่าความสูงแนวเชื่อม (H) มีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งที่กระแสนเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.17 แสดงค่าความแข็งที่กระแสนเชื่อม 140 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ต่างกัน ทำการวัดในตำแหน่งกึ่งกลางความหนาของแผ่น และมีตำแหน่งตั้งแต่ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ลากผ่านโลหะเชื่อมไปที่ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ดังรูปที่ 4.17 พบว่า บริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อมมีค่าความแข็งใกล้เคียงกับ บริเวณพื้นที่ กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ค่าความแข็งมีแนวโน้ม คล้ายกับค่าดูดซับพลังงาน กล่าวคือ พื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าไร้ สนิม SUS 304 มีค่าความแข็งสูงสุดเมื่อเทียบกับโลหะเชื่อมและพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ที่มีค่าความแข็งต่ำสุด

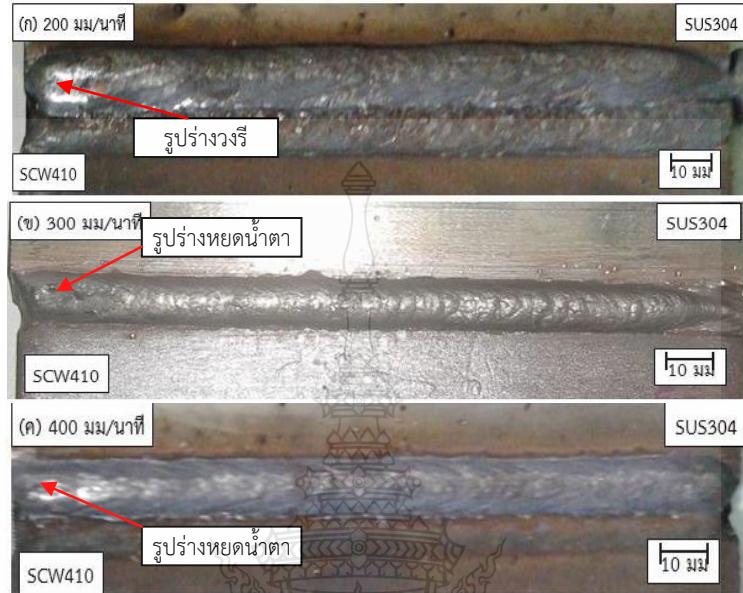


รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคที่กระแสร่วม 140 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.18 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสร่วม 140 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ที่แสดงค่าความแข็งแรงกระแทก 164 J พบว่า โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 รูปร่างเม็ดเกรนมีลักษณะกลมมนและสมมาตร มีการเรียงตัวตามลูกศรสีขาว มีทิศทางจากซ้ายไปขวาเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ก) ขณะที่โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อม ลักษณะเม็ดเกรนมีขนาดเล็ก เรียงตัวเข้าหาที่กลางแนวเชื่อม และโครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 เม็ดเกรนมีลักษณะเรียวยาว มีการเรียงตัวตามลูกศรสีขาว มีทิศทางจากขวาไปซ้ายเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ค) ส่งผลให้บริเวณนี้มีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุด ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.14

## 4.2 อิทธิพลของกระแสเชื่อม 180 แอมแปร์

### 4.2.1 อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ที่มีผลต่อแนวเชื่อม



(ก) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที

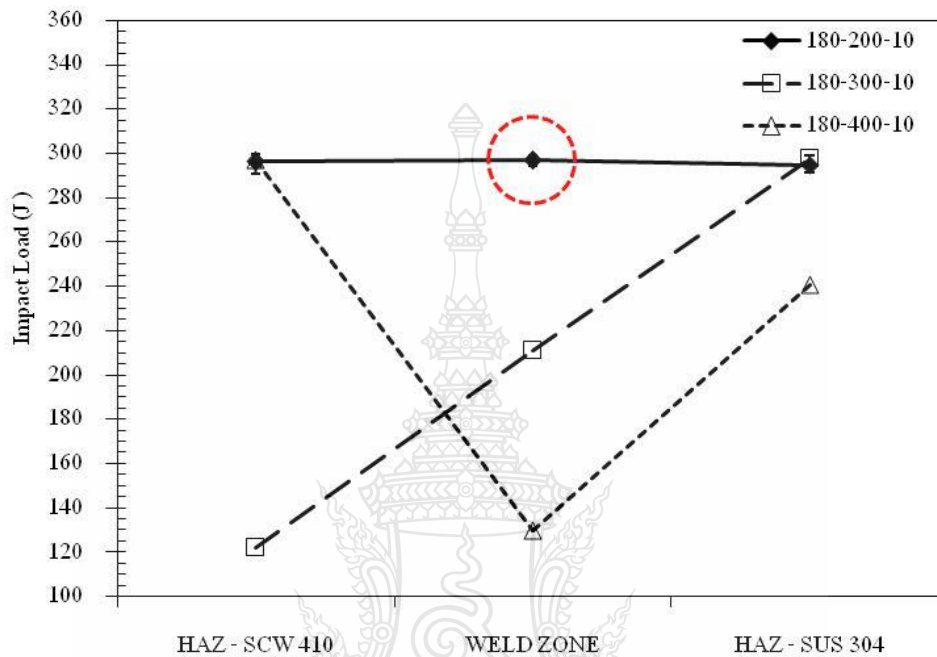
(ข) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที

(ค) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที

#### รูปที่ 4.19 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที

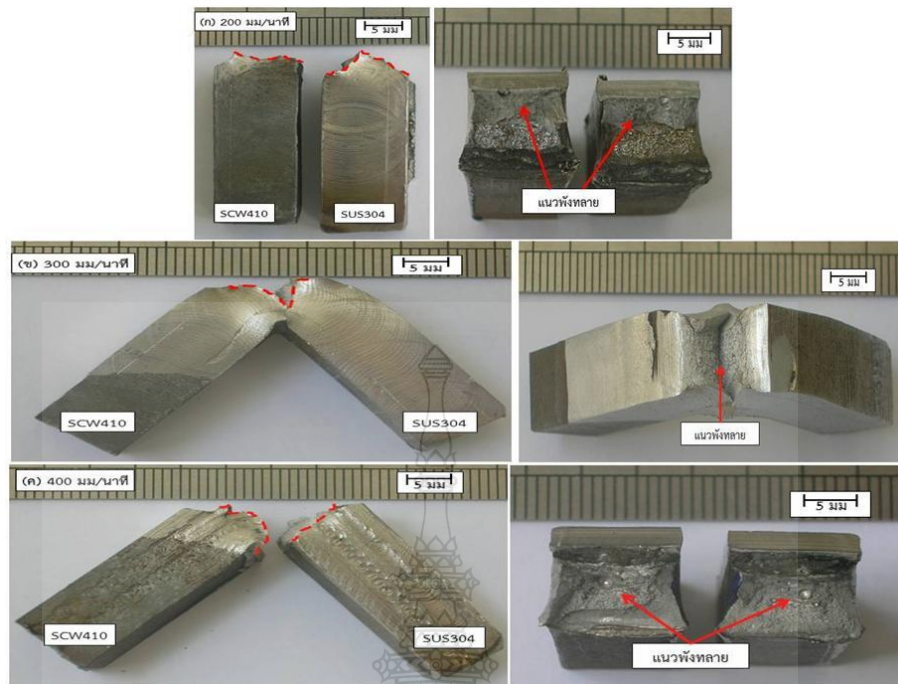
รูปที่ 4.19 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อกระแสเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความสูงของแนวเชื่อมมีค่าลดลง และความกว้างของแนวเชื่อมมีค่าลดลง และลักษณะบริเวณบ่อหลอมละลายแนวเชื่อมมีรูปร่างคล้ายหยดน้ำตา (Teardrop Shape) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมที่สูง ดังรูปที่ 4.19 (ข) (ค) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที ขณะที่ผิวแนวเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำ คือ 200 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.19 (ก) และลักษณะบริเวณบ่อหลอมละลายแนวเชื่อมมีรูปร่างคล้ายวงรี (Elliptical Shape) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยกระแสไฟ 140 แอมแปร์ ที่อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อ นาที พบว่า ความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความสูงของแนวเชื่อม (H) มีค่าเพิ่มขึ้น และความกว้างของแนวเชื่อม (W) มีค่าลดลงและเกิดรอยแหวนขอบแนว (Undercut) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย

ของ Subodh Kumar.[18] ที่แสดงผลการวัดขนาดโครงสร้างมหภาคหน้าตัดบริเวณหลอมละลายแนวเชื่อม (Fusion Zone) พบว่า เมื่อความร้อนในการเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้ความกว้างของแนวเชื่อม (W) มีค่าเพิ่มขึ้น



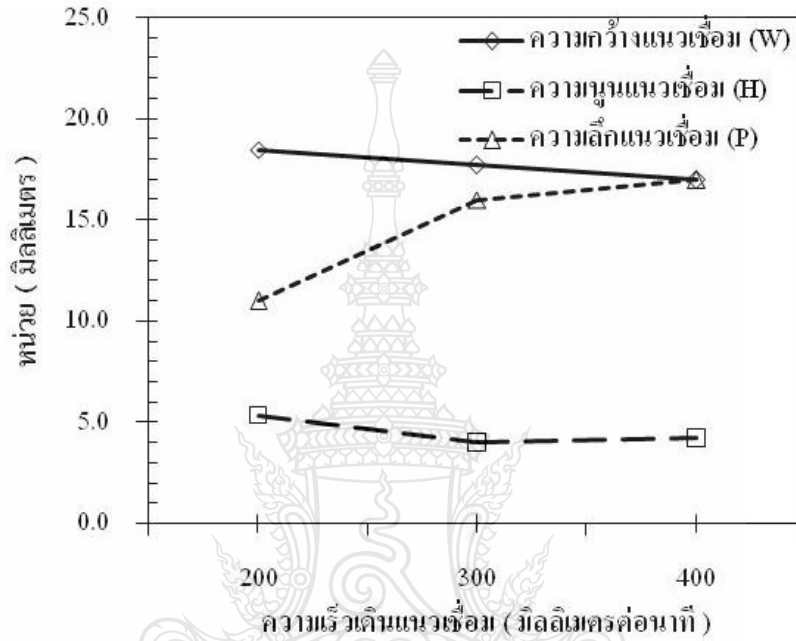
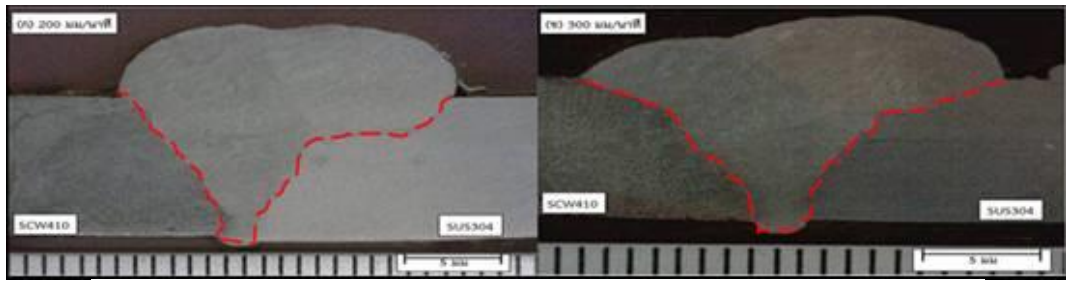
รูปที่ 4.20 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสนเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.20 ค่าความแข็งแรงกระแทกของกระแสนเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า ความแข็งแรงกระแทกสูงสุด คือ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งแรงกระแทกใกล้เคียงกันค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดคือ 296 J ดังแสดงในวงกลมเส้นประสีแดงในรูปที่ 4.20 ขณะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งแรงกระแทกแนวโน้มนุ่มสูงบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ของแนวเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 โลหะเชื่อม และมีแนวโน้มนุ่มค่าความแข็งแรงกระแทกต่ำบริเวณแนวเชื่อม (Weld Zone)



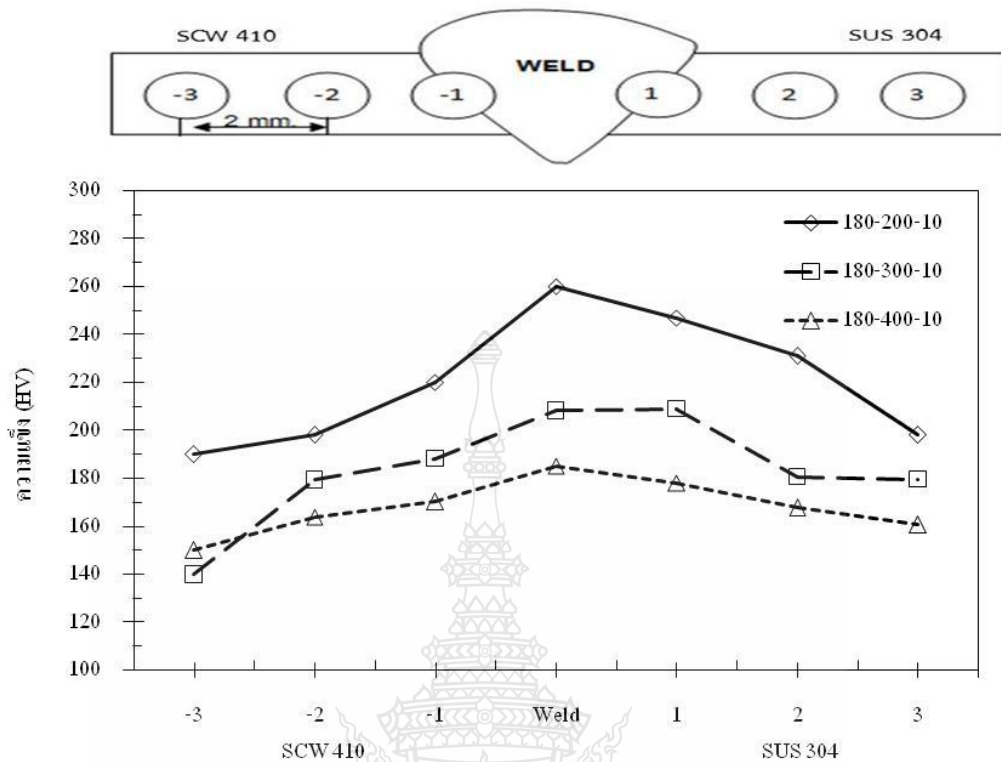
รูปที่ 4.21 ลักษณะการพังทลายที่กระแสน้ำเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.21 ลักษณะการพังทลายที่กระแสน้ำเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า ลักษณะการพังทลายที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.21 (ก) จะเกิดขึ้นเป็นลักษณะเส้นตรง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุด ดังรูปที่ 4.20 ลักษณะการพังทลายที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.21 (ข) มีลักษณะการแตกหักที่มีพื้นที่หน้าตัดแคบลง ขณะที่ลักษณะการพังทลายที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.21 (ค) มีลักษณะการแตกหักมีพื้นที่หน้าตัดไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งเกิดขึ้นบริเวณที่พบจุดบกพร่องซึ่งผลสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุด ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.22 โครงสร้างมหภาคที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที

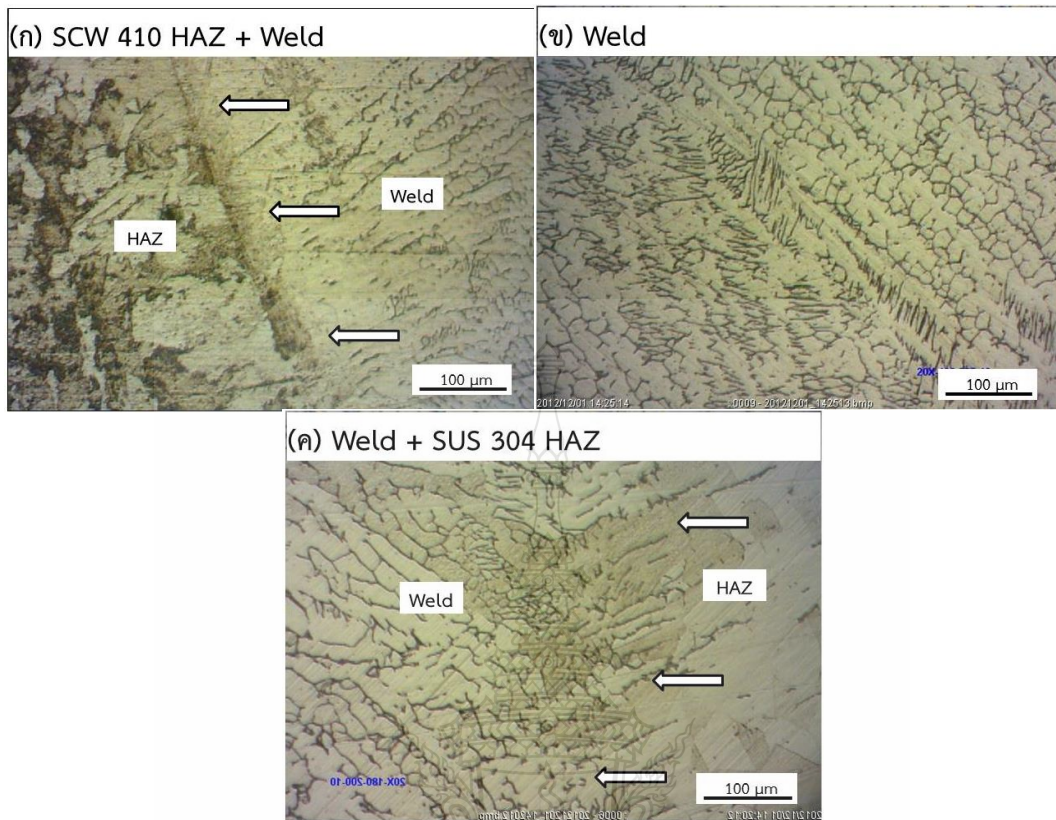
รูปที่ 4.22 โครงสร้างมหภาคที่กระแสนเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน ทำการวัดค่าความกว้างแนวเชื่อม (W) ค่าความสูงแนวเชื่อม (H) และค่าความลึกแนวเชื่อม (P) พบว่า เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นค่าความกว้างแนวเชื่อม ค่าความสูงแนวเชื่อม (H) มีค่าลดลง ขณะที่ค่าความลึก (P) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.2 สอดคล้องกับลักษณะการพังทลาย คือไม่พบจุดบกพร่อง (Defect) บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 บริเวณโลหะเชื่อมและพื้นที่ที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ดังรูปที่ 4.21(ก) และ (ข)



รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งที่กระแสร่วม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งที่กระแสร่วม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน ทำการวัดในตำแหน่งกึ่งกลางความหนาแผ่น มีตำแหน่งตั้งแต่ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ลากผ่านโลหะเชื่อมไปที่ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ดังรูปที่ 4.23 พบว่า ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความแข็งบริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อม มีค่าใกล้เคียงกับค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า มีค่าความแข็งสูงสุด ที่บริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อม เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ดังรูปที่ 4.23





รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.24 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่กระแสนเชื่อม 180 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ที่แสดงค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุด 297 J พบว่า โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 เม็ดเกรนมีลักษณะเรียวยาว มีทิศทางเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลว และโครงสร้างจุลภาคบริเวณ โลหะเชื่อม เม็ดเกรนมีการเรียงตัวตามลูกศรสีขาว มีทิศทางเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลว ตรงบริเวณเส้นเขตพื้นที่การหลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (ก) และ (ข) ขณะที่โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 เม็ดเกรนมีลักษณะเรียวยาว และมีทิศทางการเรียงตัวเข้าหาถึงกลางแนวเชื่อม มีการเรียงตัวตามลูกศรสีขาว ในทิศทางจากขวาไปซ้ายเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลว ดังรูปที่ 4.24 (ค) สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกระแทก ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.20 กล่าวคือ ลักษณะการเรียงตัวของเม็ดเกรนที่คล้ายกัน ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

#### 4.2.2 อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ที่มีผลต่อแนวเชื่อม



(ก) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที

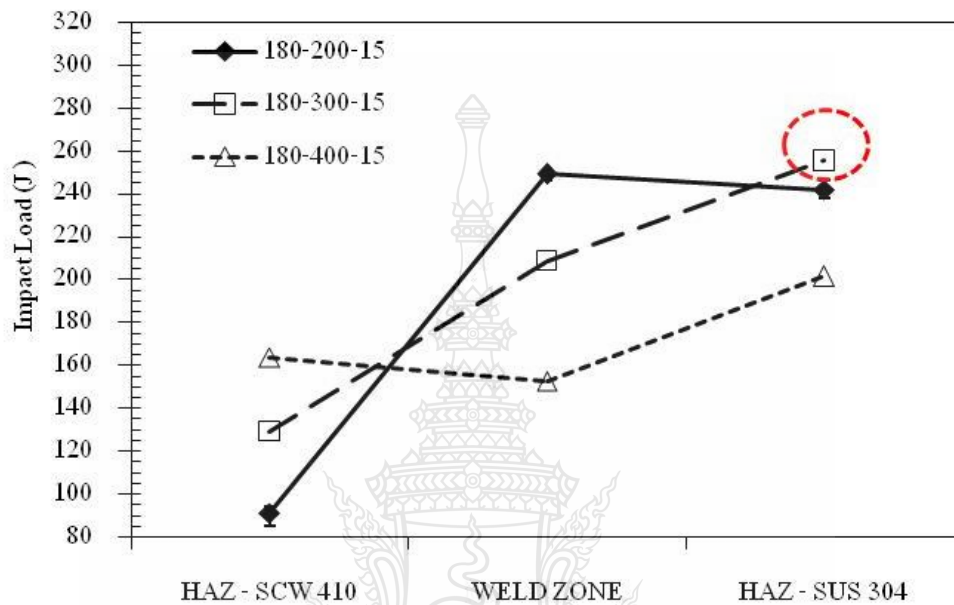
(ข) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที

(ค) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที

#### รูปที่ 4.25 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที

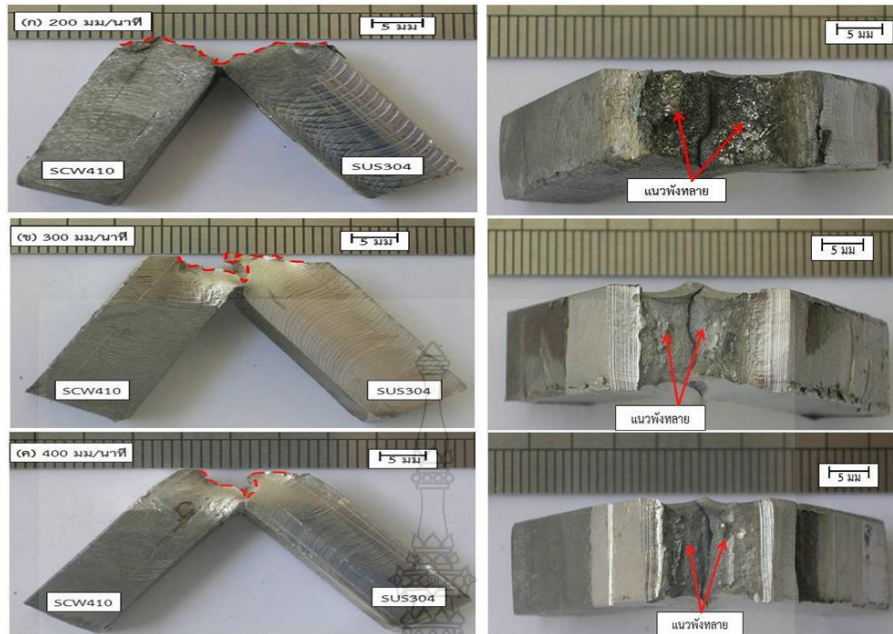
รูปที่ 4.25 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความสูงของแนวเชื่อมมีค่าลดลง และความกว้างของแนวเชื่อมมีค่าลดลงและเกิดรอยแห้วขอบแนว (Undercut) ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.25 (ข) (ค) และลักษณะบริเวณบ่อหลอมละลายแนวเชื่อมมีรูปร่างคล้ายหยดน้ำตา (Teardrop Shape) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมที่สูง ขณะที่ผิวแนวเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำ คือ 200 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.25 (ก) เกิดผิวออกไซด์ที่ผิว (Oxide Layer) ทางด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 บริเวณขอบแนวเชื่อม และลักษณะบริเวณบ่อหลอมละลายแนวเชื่อมมีรูปร่างคล้ายวงรี (Elliptical Shape) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ต่ำ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของแนวเชื่อมนี้สัมพันธ์กับสมการทางความร้อนของการเชื่อมโดยตรง ที่แสดงไว้ว่า ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความร้อนในแนวเชื่อมมีค่าลดลง ค่าความร้อนที่ลดลงทำให้การแผ่กระจายความร้อนไปบริเวณ

โดยรอบของแนวเชื่อมมีค่าน้อย และทำให้โลหะหลอมเหลวไม่สามารถกระจายออกไปบริเวณด้านข้างได้ แนวเชื่อมจึงมีความหนูนสูงกว่าและความกว้างของแนวเชื่อมมีค่ามากกว่า [19] และมีลักษณะแนวโน้มเหมือนกับรูปที่ 4.1 ที่สภาวะการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 140 แอมแปร์



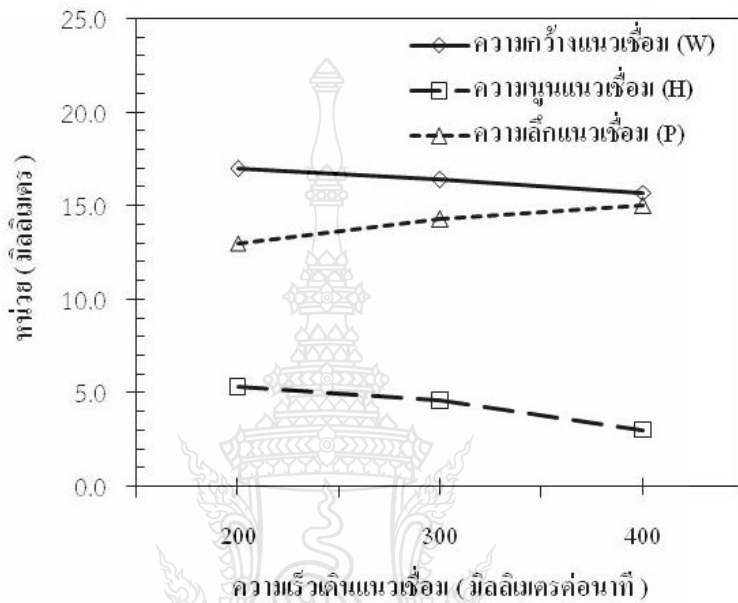
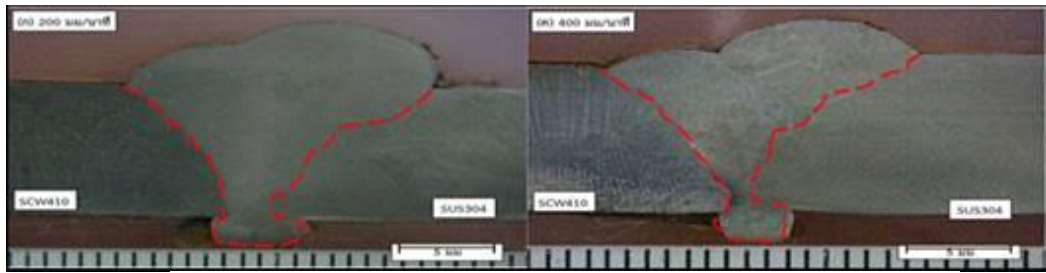
รูปที่ 4.26 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.26 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า ความแข็งแรงกระแทกสูงสุดของรอยต่อทุก ๆ ความเร็วเดินแนวเชื่อม บริเวณที่มีความแข็งแรงกระแทกสูงสุด คือ บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ของแนวเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 โลหะเชื่อม นอกจากนั้นความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงกระแทกของรอยต่อเชื่อม ค่าความแข็งแรงที่มีแนวโน้มต่ำที่สุด คือ บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดพบว่ามีค่าเท่ากับ 255 J ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ดังแสดงในวงกลมเส้นประสีแดงในรูปที่ 4.26



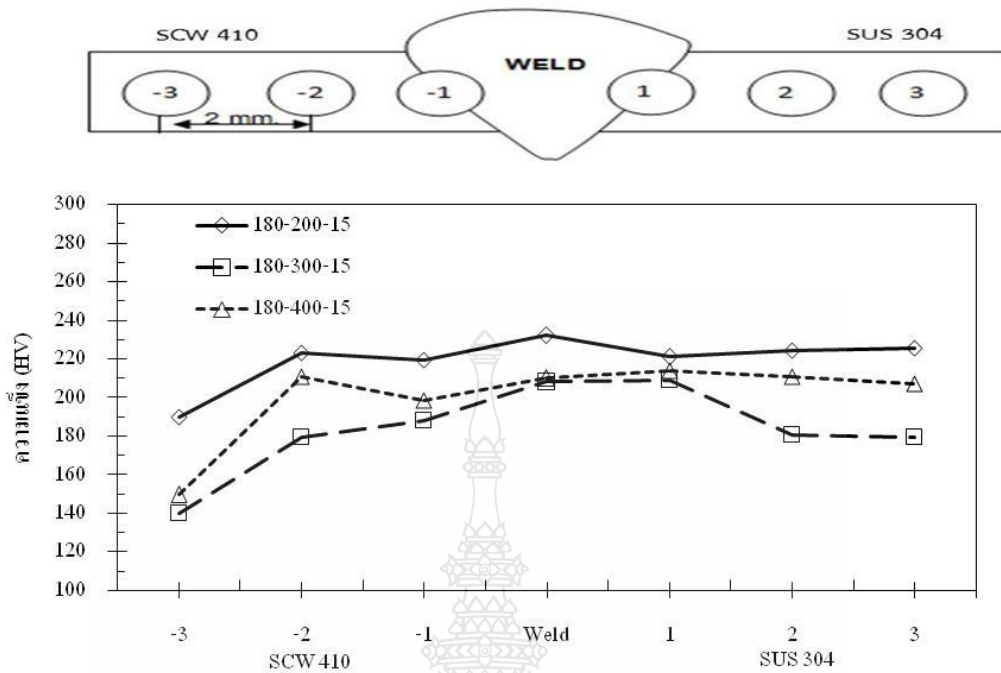
รูปที่ 4.27 ลักษณะการพังทลายที่กระแสดึง 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.27 ลักษณะการพังทลายที่กระแสดึง 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.27 พบว่า ลักษณะการพังทลายที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.27 (ก) จะเกิดขึ้นเป็นลักษณะเส้นตรงและบริเวณพื้นที่ผิวหน้าตัดมีความเป็นมันวาว ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าความแข็งแรงกระแทกที่แสดงค่าสูงสุดบริเวณแนวเชื่อม ดังรูปที่ 4.26 ขณะที่ลักษณะการพังทลายที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.27 (ข) (ค) มีลักษณะพื้นที่หน้าตัดเคบลง ซึ่งผลสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกระแทกที่มีแนวโน้มต่ำเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.26



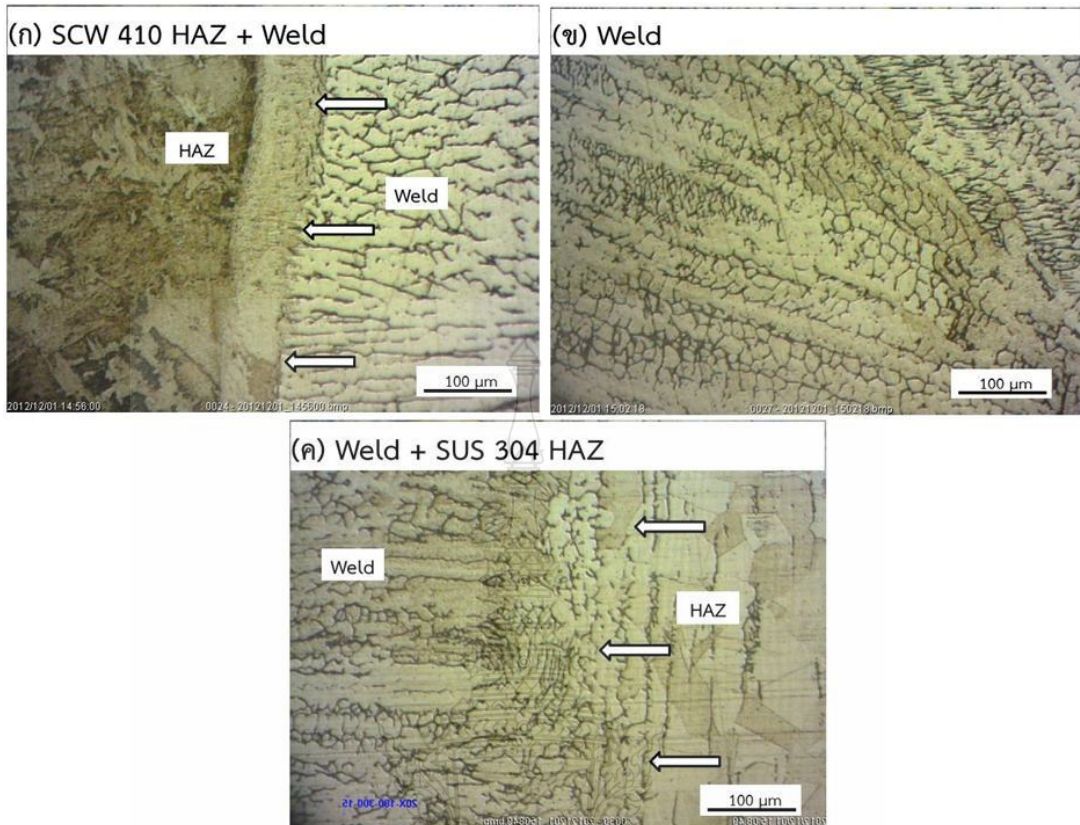
รูปที่ 4.28 โครงสร้างมหภาคที่กระแสนเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.28 แสดงโครงสร้างมหภาคที่กระแสนเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน ทำการวัดค่าความกว้างแนวเชื่อม (W) ค่าความสูงแนวเชื่อม (H) และค่าความลึกแนวเชื่อม (P) พบว่า เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นค่าความกว้างแนวเชื่อม (W) ค่าความสูงแนวเชื่อม (H) มีค่าลดลง ขณะที่ค่าความลึกแนวเชื่อม (P) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.28 คล้ายกับ โครงสร้างมหภาคของกระแสนเชื่อม 180 แอมแปร์ ที่อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.22 ลักษณะการพังทลายไม่พบจุดบกพร่อง (Defect) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 บริเวณโลหะเชื่อมและพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ดังรูปที่ 4.22 (ก) และ (ค)



รูปที่ 4.29 ค่าความแข็งที่กระแสนเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.29 ค่าความแข็งที่กระแสนเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน ทำการวัดในตำแหน่งกึ่งกลางความหนาแผ่น และมีตำแหน่งตั้งแต่ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ลากผ่านโลหะเชื่อมไปที่ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ดังรูปที่ 4.29 พบว่า ค่าความแข็งมีแนวโน้มคล้ายกับค่าความแข็งแรงกระแทกดังรูปที่ 4.26 กล่าวคือ ค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของทั้งสองด้านของแนวเชื่อม มีค่าความแข็งสูงกว่าโลหะเชื่อม และบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีค่าความแข็งสูงสุดซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการพังทลายจะเกิดขึ้นบริเวณด้านทางเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ดังรูปที่ 4.27 (ก) (ข) และ(ค) เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะเชื่อม และพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ที่มีค่าต่ำสุด



รูปที่ 4.30 โครงสร้างจุลภาคที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.30 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ที่แสดงค่าความแข็งแรงกระแทก 255 J พบว่า โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ลักษณะเม็ดเกรนหยาบและ โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อม ขนาดเกรนมีรูปร่างสมมาตร มีการเรียงตัวตามลูกศรสีขาวในทิศทางจากขวาไปซ้ายเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.30 (ก) ขณะที่โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ลักษณะเม็ดเกรนมีรูปร่างสมมาตร มีการเรียงตัวตามลูกศรสีขาว ในทิศทางจากขวาไปซ้ายเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.30 (ค) จากการเรียงตัวของเม็ดเกรนลักษณะนี้ ทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกบริเวณนี้มีค่าสูงสุด ดังกราฟรูปที่ 4.26

#### 4.2.3 อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ที่มีผลต่อแนวเชื่อม

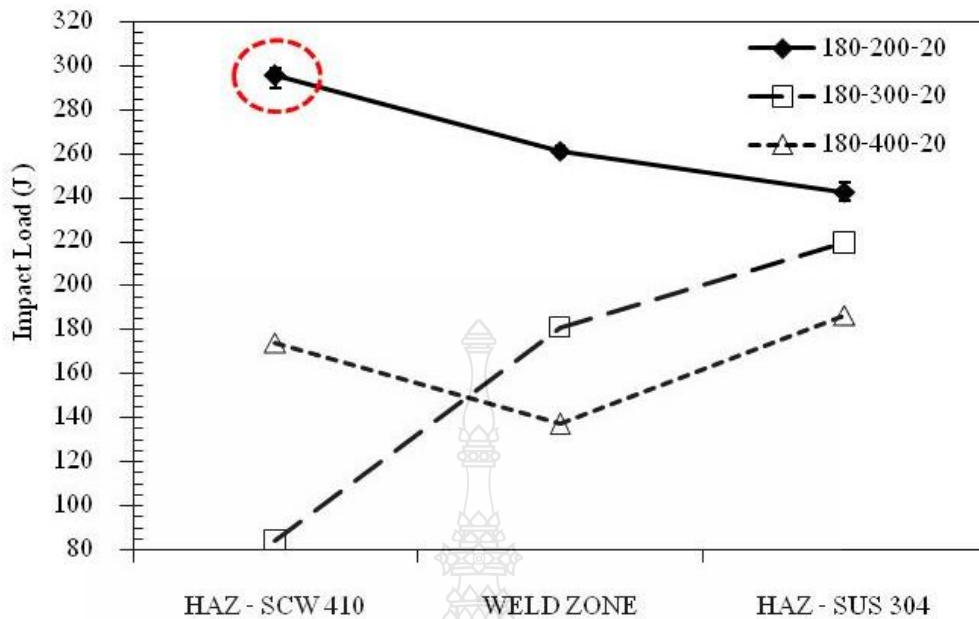


- (ก) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที
- (ข) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที
- (ค) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที

รูปที่ 4.31 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที

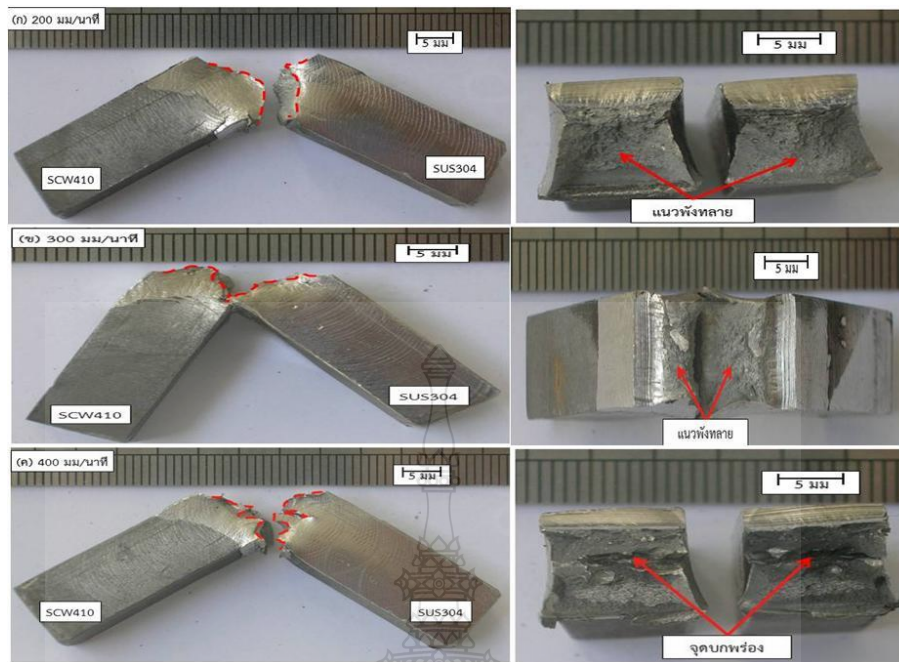
รูปที่ 4.31 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่ออัตราการไหลของแก๊สปกคลุมเพิ่มขึ้นและความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความนูนของแนวเชื่อมมีค่าลดลง และความกว้างของแนวเชื่อมมีค่าลดลงและเกิดรอยแห้วขอบแนว (Undercut) ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.31 (ค) และลักษณะบริเวณบ่อหลอมละลายแนวเชื่อมมีรูปร่างคล้ายหยดน้ำตา (Teardrop Shape) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมที่สูง ขณะที่ผิวแนวเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำ คือ 200 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.31 (ก) และ (ข) เกิดผิวออกไซด์ที่ผิว (Oxide Layer) ทางด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 บริเวณขอบแนวเชื่อม และเกิดเม็ดโลหะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที ทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และลักษณะบริเวณบ่อหลอมละลายแนวเชื่อมมีรูปร่างคล้ายวงรี (Elliptical Shape) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ต่ำ





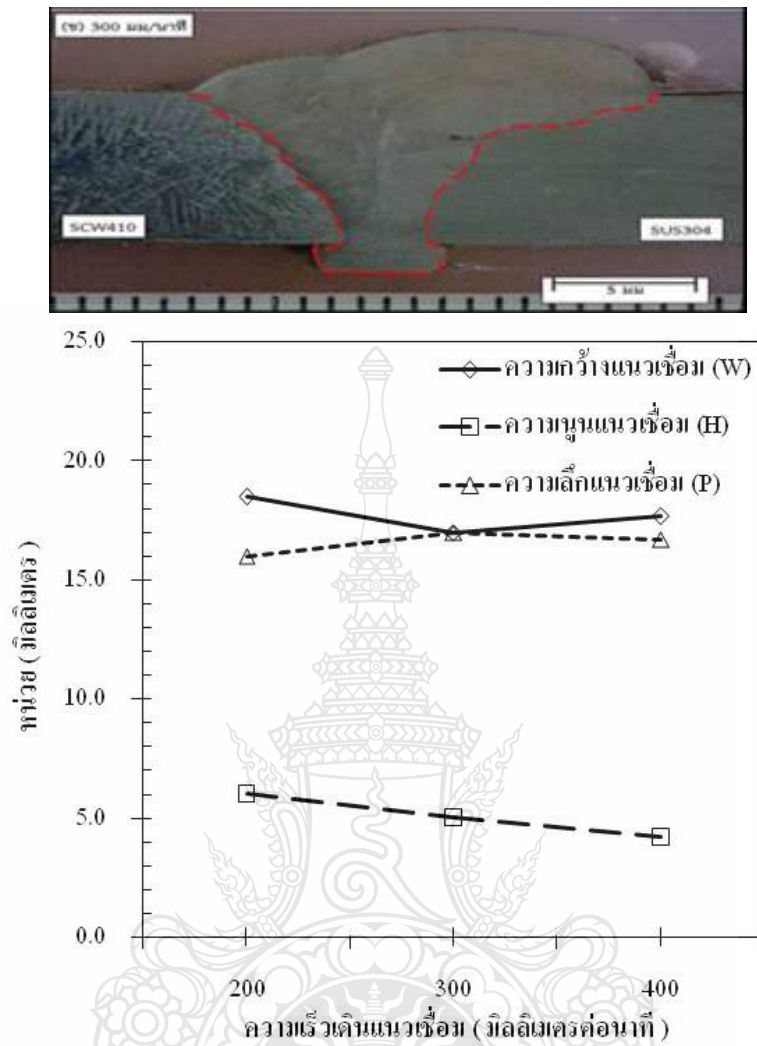
รูปที่ 4.32 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระเสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.32 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระเสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ต่างกัน พบว่า ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดของรอยต่อ อยู่ที่บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ของแนวเชื่อมด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 โลหะเชื่อม และสอดคล้องกับการทดสอบค่าความแข็งของแนวเชื่อมที่มีค่าความแข็งสูงบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ทางด้านแนวเชื่อมเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ดังกราฟรูปที่ 4.35 ขณะที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความแข็งแรงที่มีค่าต่ำที่สุด คือ พื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ทางด้านแนวเชื่อมเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 สาเหตุเนื่องจากเกิดการหลอมไม่สมบูรณ์ (Lack of Fusion) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการพังทลายดังรูปที่ 4.33 (ข) ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดที่ได้จากการเชื่อมพบว่ามีค่าเท่ากับ 295 J ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ดังแสดงในวงกลมเส้นประสีแดงในรูปที่ 4.32



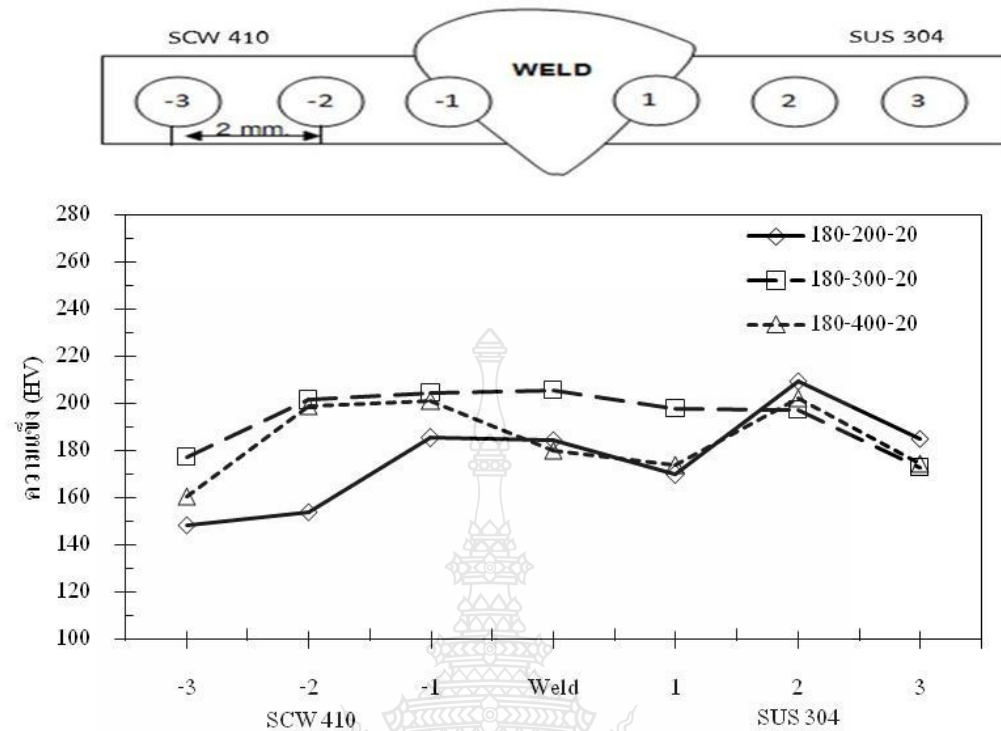
รูปที่ 4.33 ลักษณะการพังทลายที่กระแสเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.33 ลักษณะการพังทลายที่กระแสนเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า ลักษณะการพังทลายที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.33 มีลักษณะการแตกหักที่มีพื้นที่หน้าตัดแคบลง ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที บริเวณพื้นที่หน้าตัดของการพังทลายไม่พบจุดบกพร่อง สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุด รูปที่ 4.32 สังเกตจากบริเวณแนวพังทลายที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที จะเกิดขึ้นบริเวณที่พบจุดบกพร่องซึ่งเป็นสาเหตุที่ส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงกระแทกที่ต่ำสอดคล้องกับรูปที่ 4.32



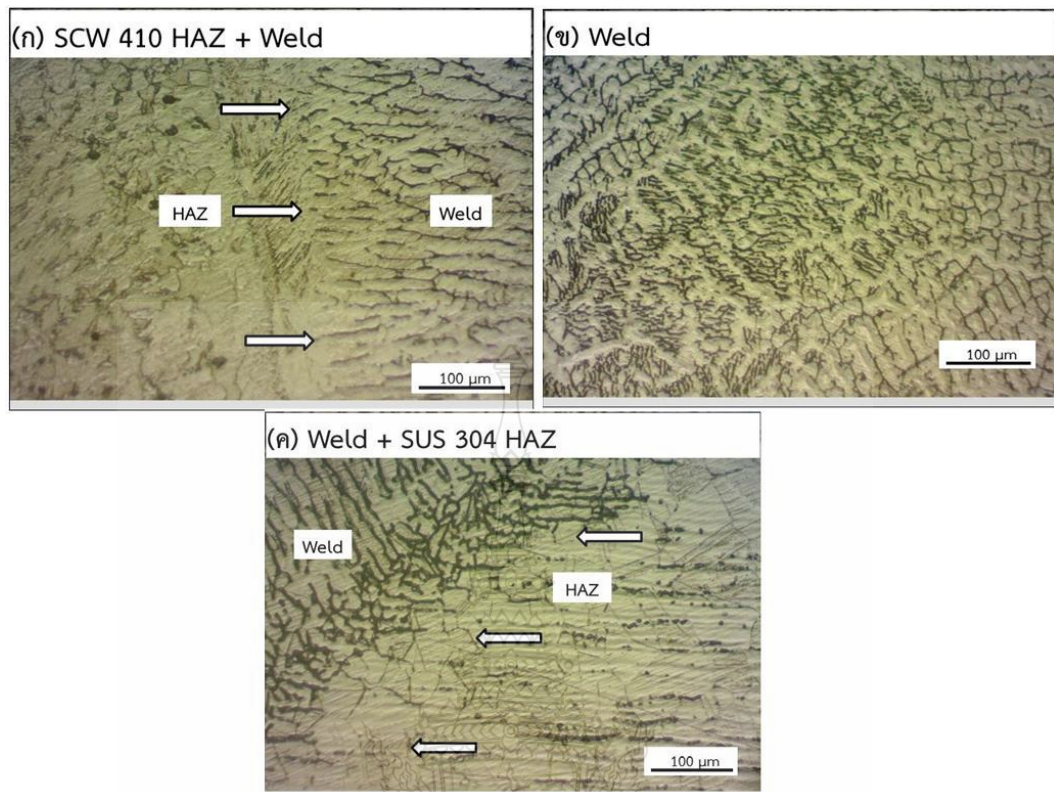
รูปที่ 4.34 โครงสร้างมหภาคที่กระแสนเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.34 แสดงโครงสร้างมหภาคที่กระแสนเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า เกิดจุดบกพร่อง (Defect) และเกิดช่องว่าง (Gap) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ทำการวัดค่าความกว้างแนวเชื่อม (W) ค่าความนูนแนวเชื่อม (H) และค่าความลึกแนวเชื่อม (P) จากกราฟรูปที่ 4.34 พบว่า เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่าความกว้างแนวเชื่อม (W) ค่าความนูนแนวเชื่อม (H) มีค่าลดลง ขณะที่ค่าความลึกแนวเชื่อม (P) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.35 ค่าความแข็งที่กระแสดเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.35 แสดงค่าความแข็งที่กระแสดเชื่อม 180 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน ทำการวัดในตำแหน่งกึ่งกลางความหนาแผ่น และมีตำแหน่งตั้งแต่ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ลากผ่านโลหะเชื่อมไปที่ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ดังรูปที่ 4.35 พบว่า ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 บริเวณโลหะเชื่อม และบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งสูงสุด บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกระทำ ดังรูปที่ 4.32

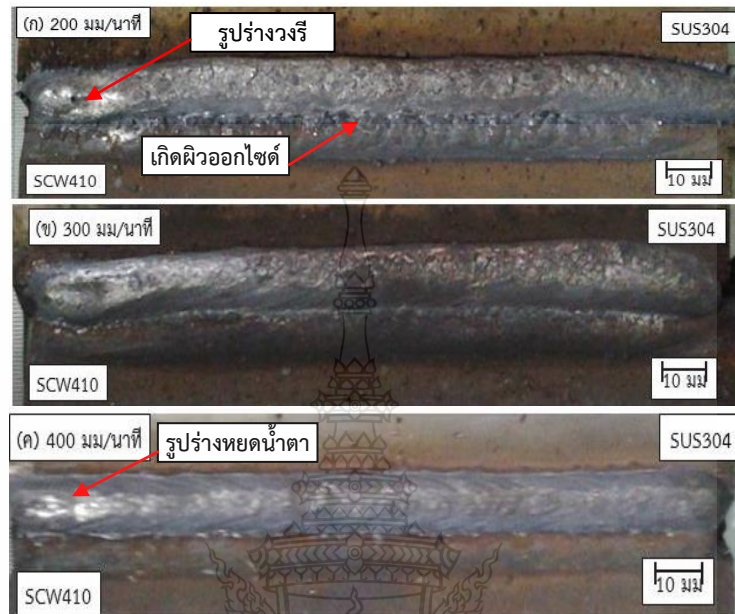


**รูปที่ 4.36** โครงสร้างจุลภาคที่กระแสนเชื่อม 180 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.36 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่กระแสนเชื่อม 180 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ที่แสดงค่าความแข็งแรงกระแทก 295 J พบว่า โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 เม็ดเกรนมีลักษณะเรียวยาว มีการเรียงตัวตามลูกศรสีขาว ในทิศทางจากซ้ายไปขวาเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.36 (ก) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกระแทก ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.32 และ โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อม เม็ดเกรนมีทิศทางการเรียงตัวเข้าหาถึงกลางแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.36 (ข) ขณะที่โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ลักษณะเม็ดเกรนมีรูปร่างสมมาตร มีการเรียงตัวตามลูกศรสีขาว ในทิศทางจากขวาไปซ้ายเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลว ดังรูปที่ 4.36 (ค)

#### 4.3 อิทธิพลของกระแสเชื่อม 220 แอมแปร์

##### 4.3.1 อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ที่มีผลต่อแนวเชื่อม



(ก) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที

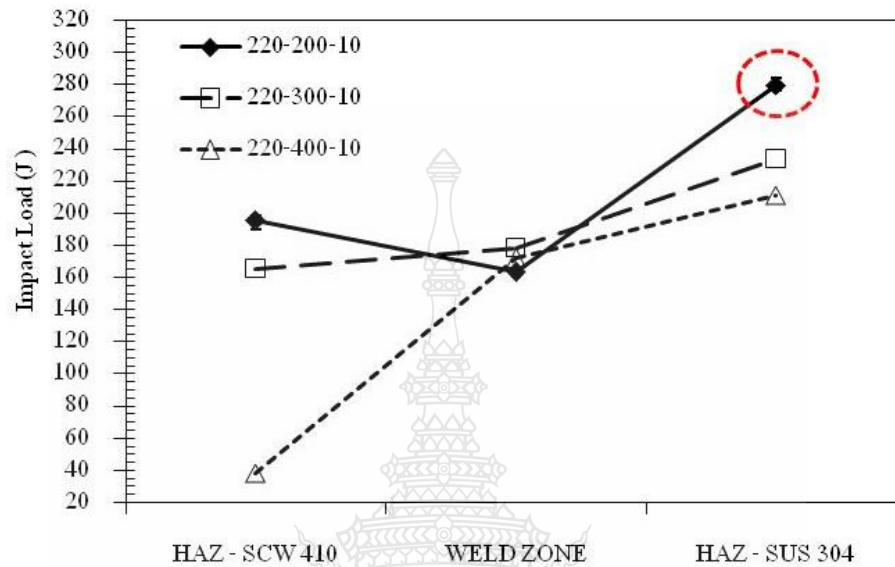
(ข) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที

(ค) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที

#### รูปที่ 4.37 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที

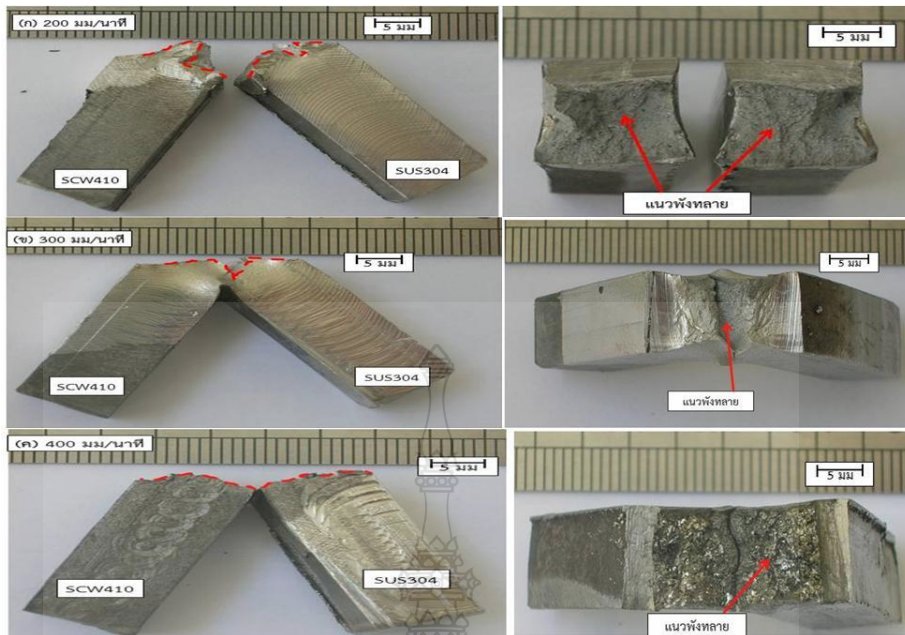
รูปที่ 4.37 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น และความเร็วเดินแนวเชื่อมลดลงบริเวณหลอมละลายของแนวเชื่อมจะมีความกว้าง และเกิดผิวออกไซด์ที่ผิว (Oxide Layer) บริเวณขอบแนวเชื่อมทางด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.37 (ก) ขณะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความนูนของแนวเชื่อมมีค่าลดลง และความกว้างของแนวเชื่อมมีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.37 (ค) และลักษณะบริเวณบ่อหลอมละลายแนวเชื่อมมีรูปร่างคล้ายหยดน้ำตา (Teardrop Shape) การเกิดผิวออกไซด์ที่ผิว (Oxide Layer) เมื่อ  $O_2$  หรือ  $CO_2$  เพิ่มมากกว่าปริมาณ 0.6 % จะเกิดชั้นออกไซด์ที่หนา และเป็นอุปสรรคในการดูดซึมออกซิเจนลงในบริเวณหลอมละลายและยับยั้งการพาความร้อนทำให้เกิดแรงดึงผิวบริเวณหลอมละลาย และลักษณะ

บริเวณบ่อหลอมละลายแนวเชื่อมมีรูปร่างคล้ายวงรี (Elliptical Shape) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ต่ำ [20]



รูปที่ 4.38 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสน้ำเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที

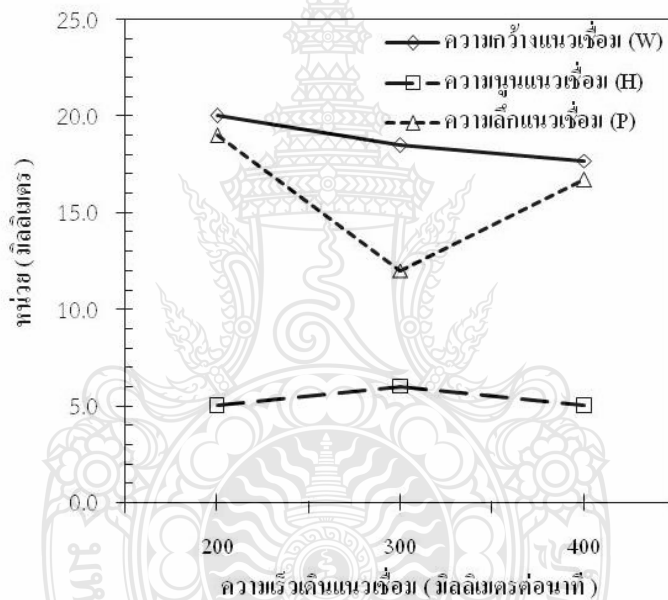
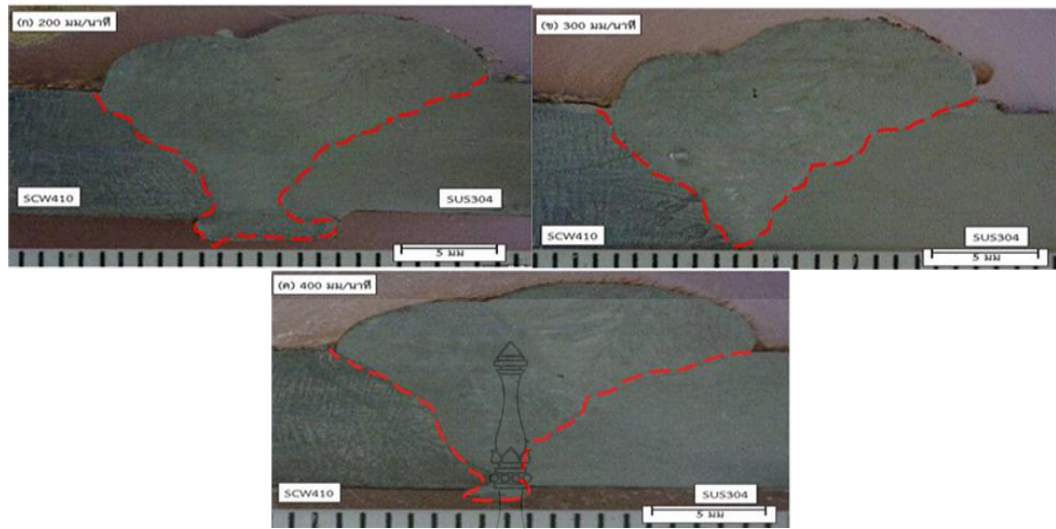
รูปที่ 4.38 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสน้ำเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า ความแข็งแรงกระแทกสูงสุดของรอยต่อทุก ๆ ความเร็วเดินแนวเชื่อม บริเวณที่มีความแข็งแรงกระแทกสูงสุด คือ บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ของแนวเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 โลหะเชื่อม และสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อม ที่มีแนวโน้มค่าความแข็งแรงสูงบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ทางด้านแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ทุกความเร็วเดินแนวเชื่อมดังแสดงระบะการทดสอบวงกลมหมายเลข 1 และ 2 ดังรูปที่ 4.41 ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดที่ได้จากการเชื่อมพบว่ามีค่าเท่ากับ 279J ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ดังแสดงในวงกลมเส้นประสีแดงในรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.39 ลักษณะการพังทลายที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.39 ลักษณะการพังทลายของกระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ ที่อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ต่างกัน พบว่า ลักษณะการพังทลายที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.39 (ก) (ข) มีลักษณะของพื้นที่หน้าตัดแคบลงขอบของชิ้นงานมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที ขณะที่การพังทลายความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที มีลักษณะบริเวณพื้นที่หน้าตัดมีความคงที่เท่าขนาดชิ้นงานเดิมและรอยแตกไม่มีลักษณะเป็นเส้น (Fibrous) ดังรูปที่ 4.39 (ค) สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกระแทกที่มีค่าต่ำสุด ดังรูปที่ 4.38

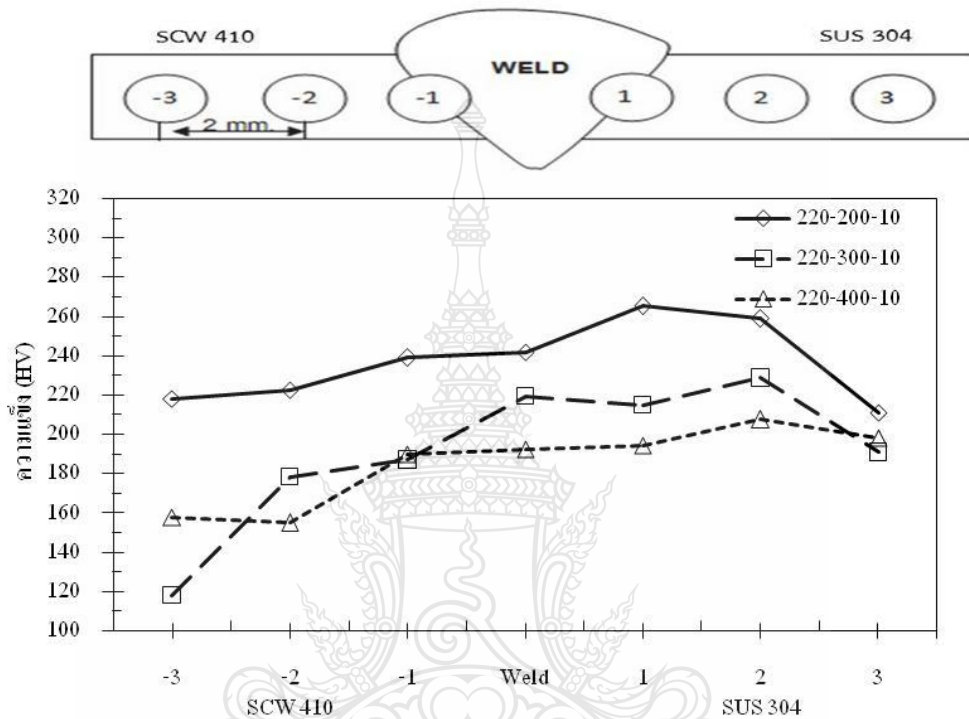




รูปที่ 4.40 โครงสร้างมหภาคที่กระแสนเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที

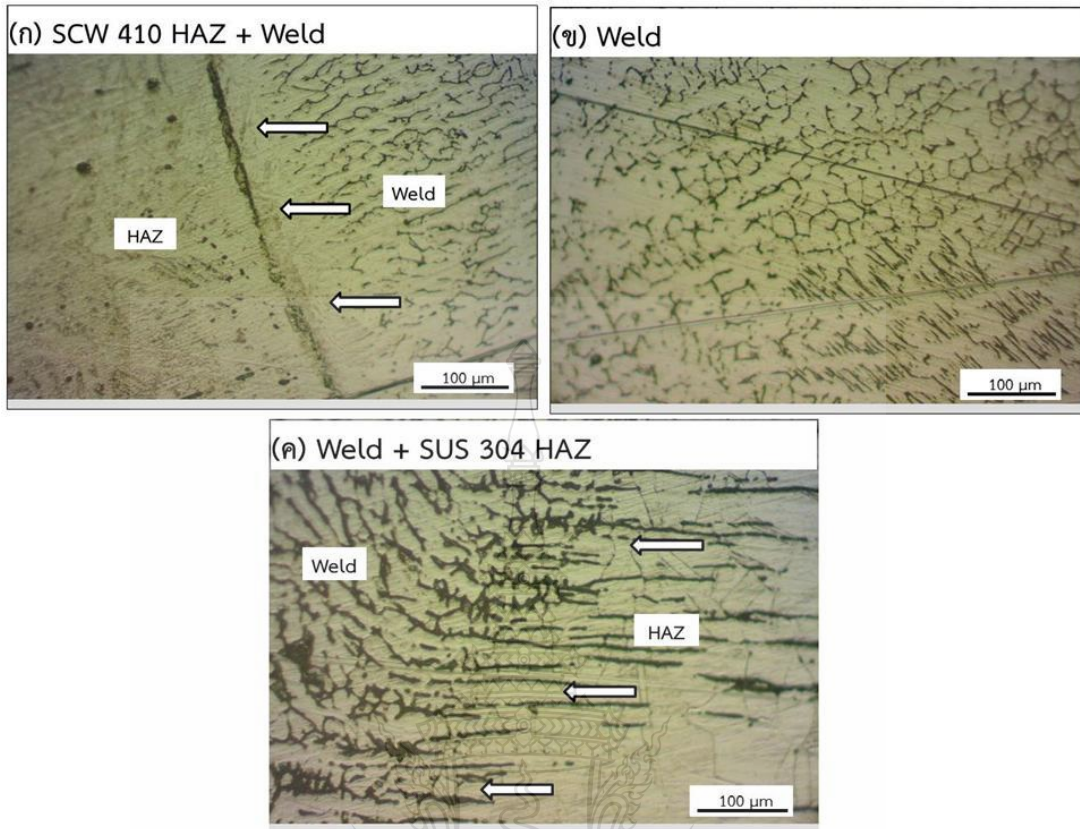
รูปที่ 4.40 แสดงโครงสร้างมหภาคที่กระแสนเชื่อม 220 แอมแปร์ ที่อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบจุดบกพร่อง (Defect) และเกิดช่องว่าง (Gap) บริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อม ดังรูปที่ 4.40 (ก) (ข) และ (ค) สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกระแทก ดังรูปที่ 4.38 กล่าวคือ บริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อมมีค่าความแข็งแรงกระแทกต่ำกว่าบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ทำการวัดค่าความกว้างแนวเชื่อม (W)

ค่าความนูนแนวเชื่อม (H) และค่าความลึกแนวเชื่อม (P) พบว่า เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่าความกว้างแนวเชื่อม (W) ค่าความนูนแนวเชื่อม (H) และค่าความลึกแนวเชื่อม (P) มีแนวโน้มลดลง ดังกราฟรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.41 ค่าความแข็งที่กระแสนเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที

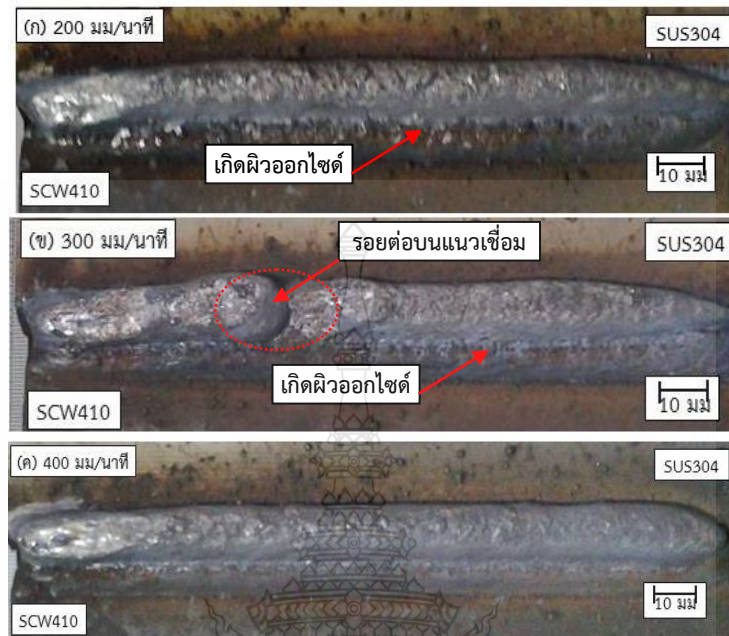
รูปที่ 4.41 แสดงค่าความแข็งที่กระแสนเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน ทำการวัดในตำแหน่งกึ่งกลางความหนาแผ่น และมีตำแหน่งตั้งแต่มด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ลากผ่านโลหะเชื่อมไปที่ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ดังรูปที่ 4.41 พบว่า ค่าความแข็งที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ตำแหน่งกึ่งกลางแนวเชื่อม มีค่าใกล้เคียงกับค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งสูงสุด บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ดังกราฟรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.42 โครงสร้างจุลภาคที่กระแสนเชื่อม 220 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.42 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่กระแสนเชื่อม 220 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ที่แสดงค่าความแข็งแรงกระแทก 279 J พบว่า โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 มีเดนไดรต์ที่มีความละเอียด มีทิศทางเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.42 (ก) และ โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อม ลักษณะเม็ดเกรนมีรูปร่างกลมมนและสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ข) ขณะที่โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 เม็ดเกรนมีลักษณะเรียวยาว ในทิศทางจากขวาไปซ้ายเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.42 (ค) สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกระแทก ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.38 กล่าวคือ บริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อม มีค่าความแข็งแรงกระแทกต่ำที่สุด เนื่องจากขนาดของเกรนมีขนาดใหญ่

#### 4.3.2 อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ที่มีผลต่อแนวเชื่อม



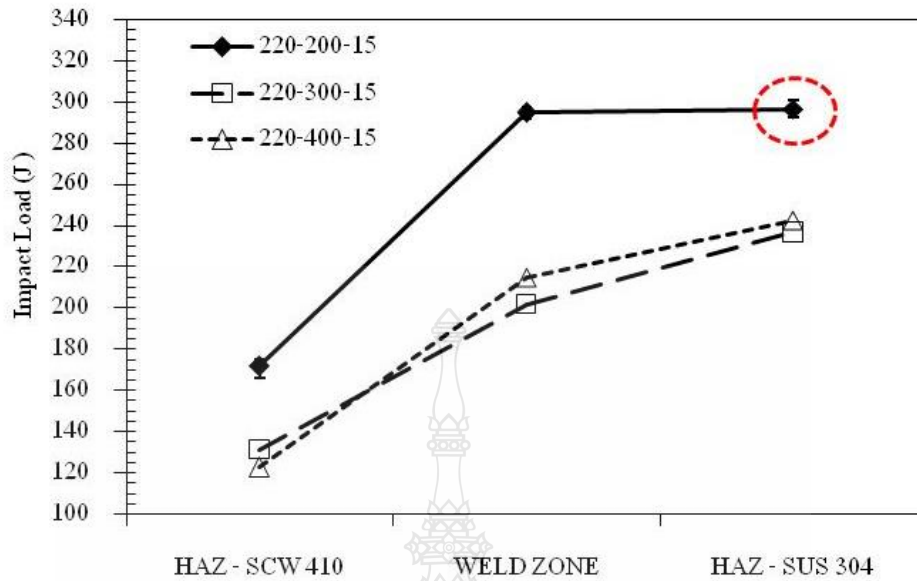
(ก) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที

(ข) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที

(ค) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที

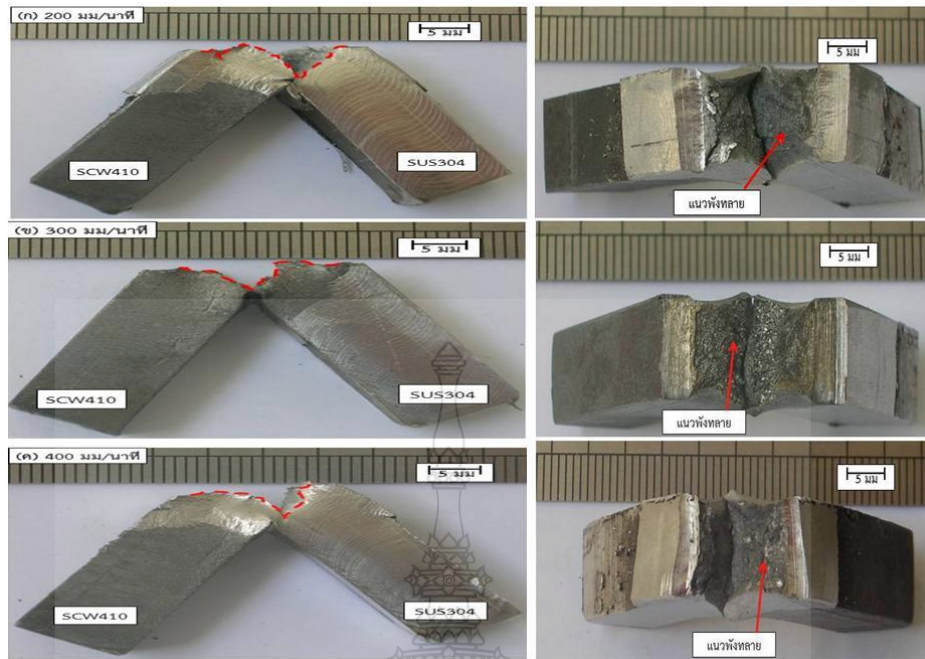
**รูปที่ 4.43** ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสน้ำเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.43 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสน้ำเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำเกิดผิวออกไซด์ที่ผิว (Oxide Layer) บริเวณขอบแนวเชื่อมทางด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.43 (ก) และ (ข) และบริเวณแนวเชื่อมรูปที่ 4.43 (ข) เกิดรอยต่อบนแนวเชื่อมดังแสดงวงกลมเส้นประสีแดง ซึ่งรอยต่อบนแนวเชื่อมเกิดจากปัญหาการหยุดการทำงานของเครื่องเชื่อม ขณะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นที่ 400 มิลลิเมตรต่อนาที เกิดเม็ดโลหะบริเวณทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ดังรูปที่ 4.43 (ค)



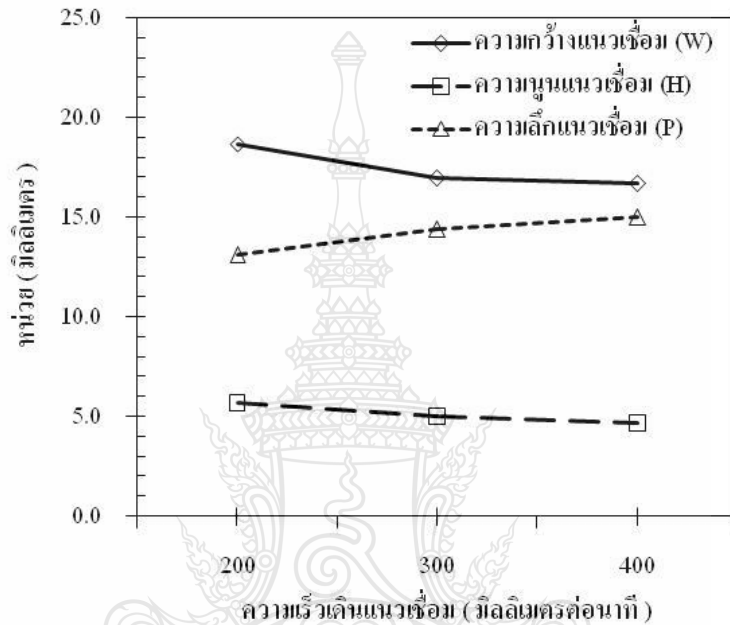
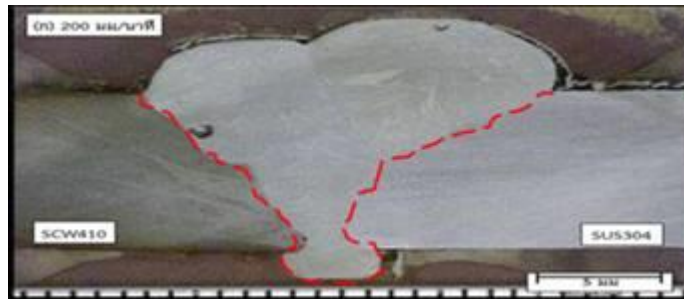
รูปที่ 4.44 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสนเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.44 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสนเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดที่ได้จากการเชื่อมพบว่ามีค่าเท่ากับ 296 J ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที ดังแสดงในวงกลมเส้นประสีแดงในรูปที่ 4.44 และแนวโน้มของค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดของรอยต่อทุกๆ ความเร็วเดินแนวเชื่อม บริเวณที่มีความแข็งแรงสูงสุด คือ บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ของแนวเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 โลหะเชื่อม และสอดคล้องกับการทดสอบค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่มีแนวโน้มค่าความแข็งแรงสูงบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ทางด้านแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ทุกความเร็วเดินแนวเชื่อม ดังแสดงระยการทดสอบวงกลมหมายเลข 1 และ 2 ดังรูปที่ 4.47



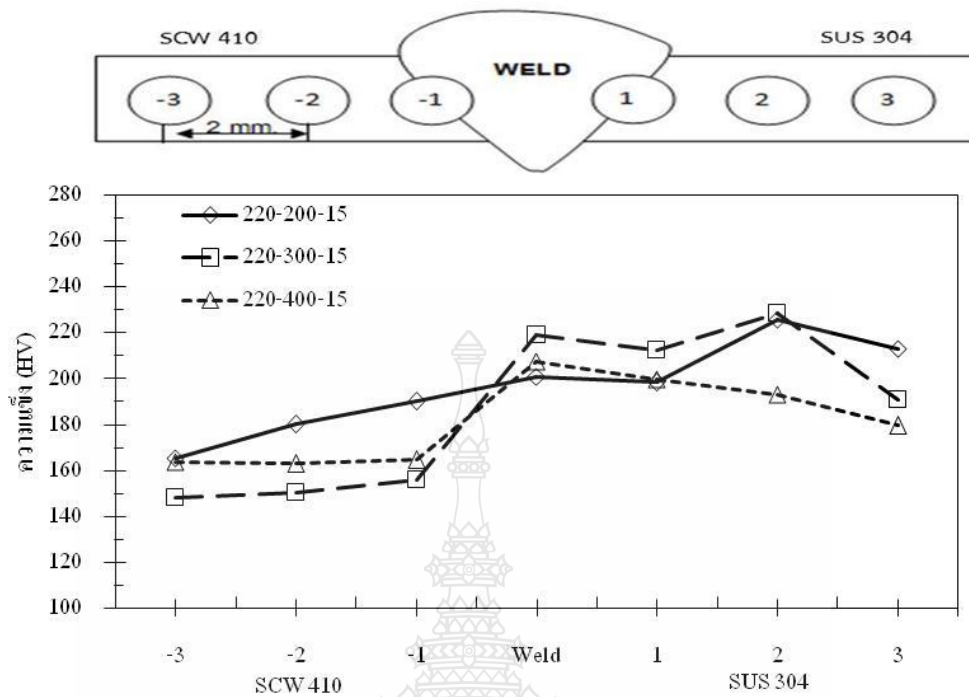
รูปที่ 4.45 ลักษณะการพังทลายที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.45 ลักษณะการพังทลายของกระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ ที่อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า ลักษณะการพังทลายที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.45 (ก) (ข) (ค) มีลักษณะการแตกหักที่มีขอบของพื้นที่หน้าตัดเป็นเส้นโค้ง ขณะที่การพังทลายจะเกิดขึ้นบริเวณทางด้านพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ทางด้านแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งดังรูปที่ 4.47 ที่แสดงค่าความแข็งของแนวเชื่อมมีแนวโน้มสูงบริเวณทางด้านพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ทางด้านแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และเป็นสาเหตุของการเริ่มต้นการพังทลาย



รูปที่ 4.46 โครงสร้างมหภาคที่กระแสนเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที

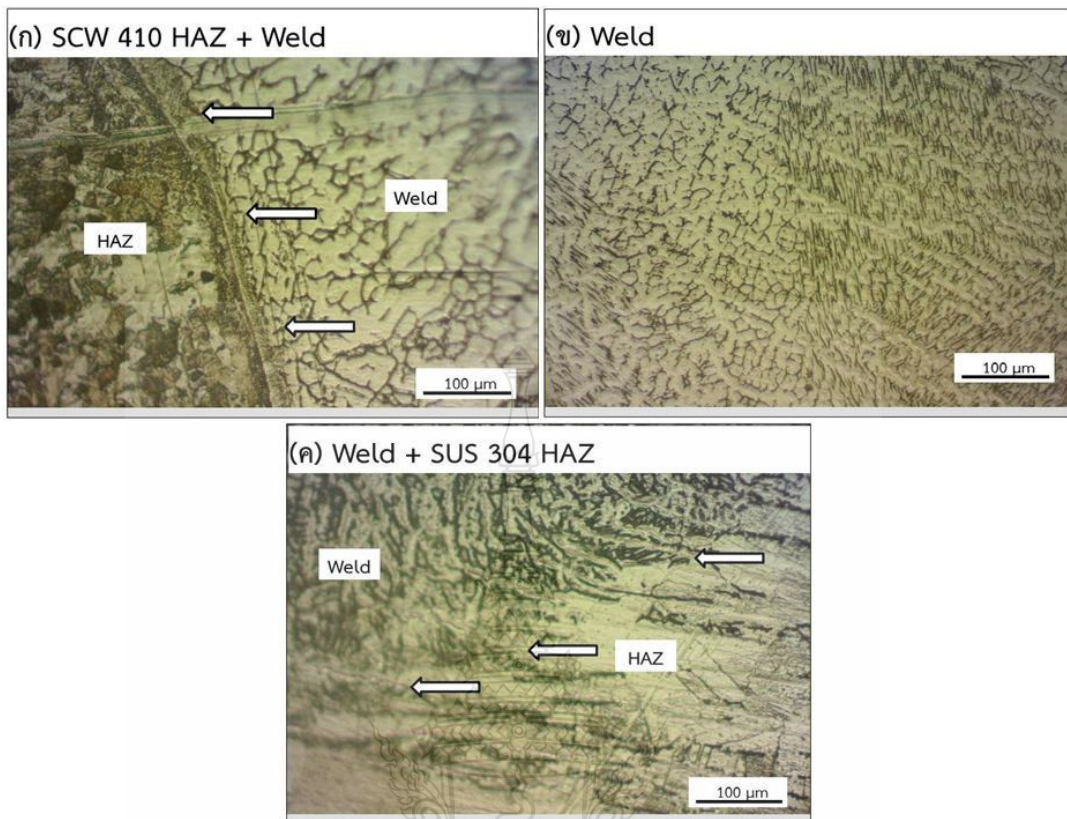
รูปที่ 4.46 แสดงโครงสร้างมหภาคที่กระแสนเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อ นาที พบจุดบกพร่อง(Defect) และเกิดช่องว่าง(Gap) บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ดังรูปที่ 4.46 (ก) และทำการวัดค่าความกว้างแนวเชื่อม (W) ค่าความสูงแนวเชื่อม (H) และค่าความลึกแนวเชื่อม (P) พบว่า เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่าความกว้างแนวเชื่อม (W) ค่าความสูงแนวเชื่อม (H) มีค่าลดลง และค่าความลึกแนวเชื่อม (P) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกระแทก กล่าวคือ ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุด ดังรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.47 ค่าความแข็งที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.47 แสดงค่าความแข็งที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน ทำการวัดในตำแหน่งกึ่งกลางความหนาแผ่น และมีตำแหน่งตั้งแต่ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ลากผ่านโลหะเชื่อมไปที่ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ดังรูปที่ 4.47 พบว่า ค่าความแข็งมีแนวโน้มคล้ายกับค่าความแข็งแรงกระแทก กล่าวคือ บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีค่าความแข็งสูงสุดเมื่อเทียบกับบริเวณ โลหะเชื่อมและพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ดังรูปที่ 4.44

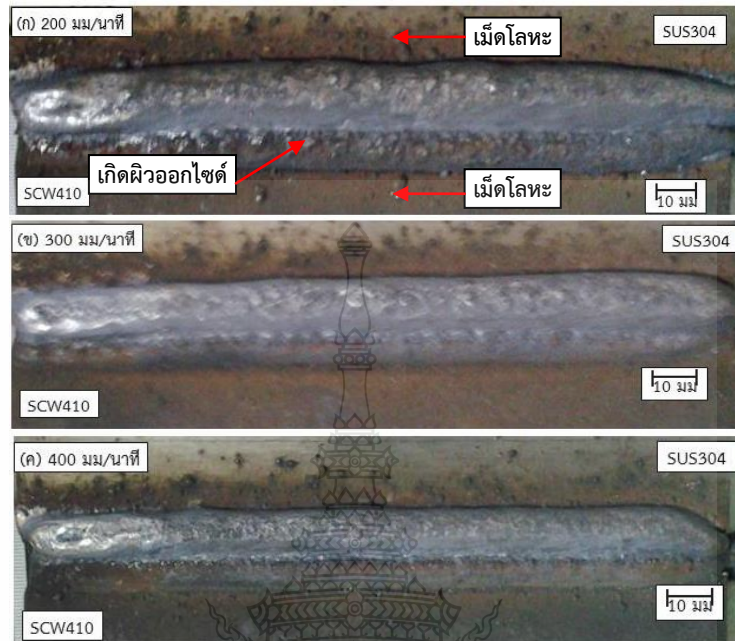




รูปที่ 4.48 โครงสร้างจุลภาคที่กระแทเชื่อม 220 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.48 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่กระแทเชื่อม 220 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที ที่แสดงค่าความแข็งแรงกระแทก 296 J พบว่า โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 เม็ดเกรนมีขนาดใหญ่ ขณะที่โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อมลักษณะเม็ดเกรนมีความละเอียด มีทิศทางการเรียงตัวเข้าหาที่กลางแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.48 (ข) และโครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 เม็ดเกรนมีลักษณะเรียวยาว มีการเรียงตัวตามลูกศรสีขาว ในทิศทางจากขวาไปซ้ายเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.48 (ค) สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกระแทก ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.44 กล่าวคือ ลักษณะการเรียงตัวเม็ดเกรน มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกมีความแตกต่างกัน

#### 4.3.3 อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ที่มีผลต่อแนวเชื่อม



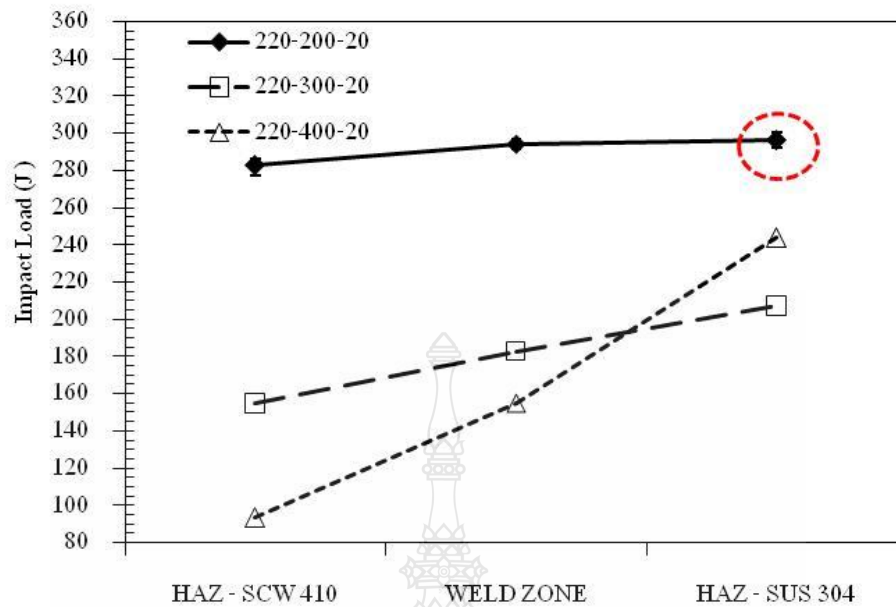
(ก) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที

(ข) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที

(ค) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่อนาที

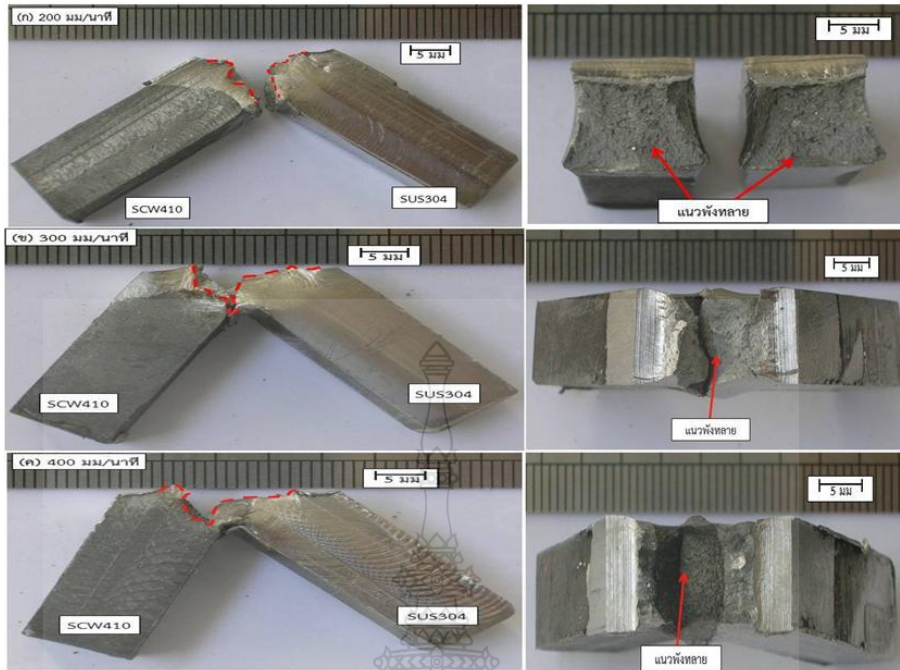
รูปที่ 4.49 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.49 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความสูงของแนวเชื่อม (H) มีค่าเพิ่มขึ้น และความกว้างของแนวเชื่อม (W) มีค่าลดลง ขณะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำเกิดผิวออกไซด์ที่ผิว (Oxide Layer) และมีเม็ดโลหะบริเวณขอบแนวเชื่อมทางด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.49 (ก) และที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นที่ 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที เกิดเม็ดโลหะบริเวณทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ดังรูปที่ 4.49 (ข) และ (ค)



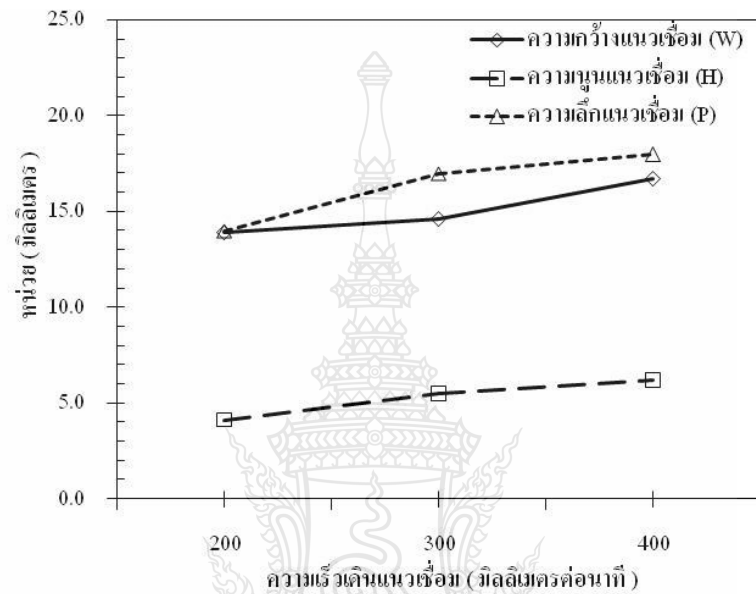
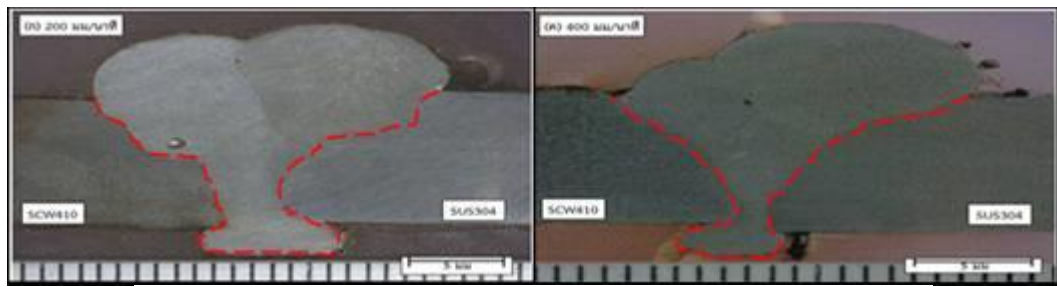
รูปที่ 4.50 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสนเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.50 แสดงค่าความแข็งแรงกระแทกที่กระแสนเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดของแต่ละความเร็วเดินแนวเชื่อม บริเวณที่มีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุด คือ บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อม ดังรูปที่ 4.53 กล่าวคือ ค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มสูง บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และค่าความแข็งแรงกระแทกที่มีค่าต่ำสุด คือ บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดที่ได้จากการเชื่อม พบว่า มีค่าเท่ากับ 296 J ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที ดังแสดงในวงกลมเส้นประสีแดงในรูปที่ 4.50



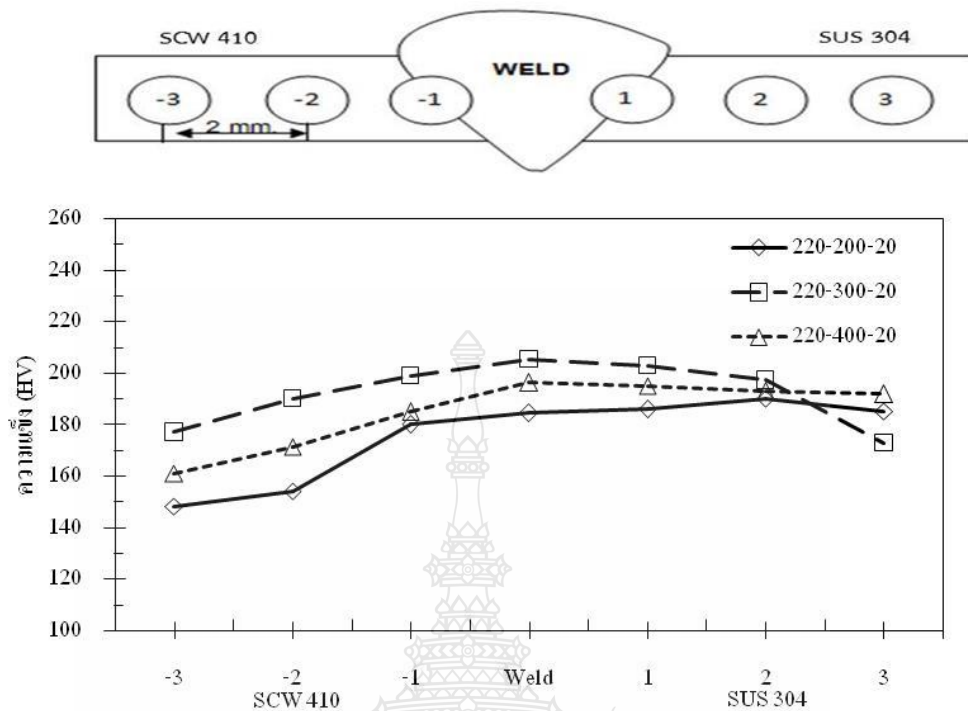
รูปที่ 4.51 ลักษณะการพังทลายที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.51 ลักษณะการพังทลายที่กระแสนเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ต่างกัน พบว่า ลักษณะการพังทลายที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.51 (ก) (ข) (ค) มีลักษณะการแตกหักที่มีขอบพื้นที่หน้าตัดเป็นเส้นโค้ง มีลักษณะเป็นเส้น (Fibrous) ดังรูปที่ 4.51 (ข) ขณะที่การพังทลายจะเกิดขึ้นบริเวณทางด้านพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ทางด้านแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งดังรูปที่ 4.53 ที่แสดงค่าความแข็งของแนวเชื่อมมีแนวโน้มสูงบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ทางด้านแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และเป็นสาเหตุของการเริ่มต้นการพังทลาย



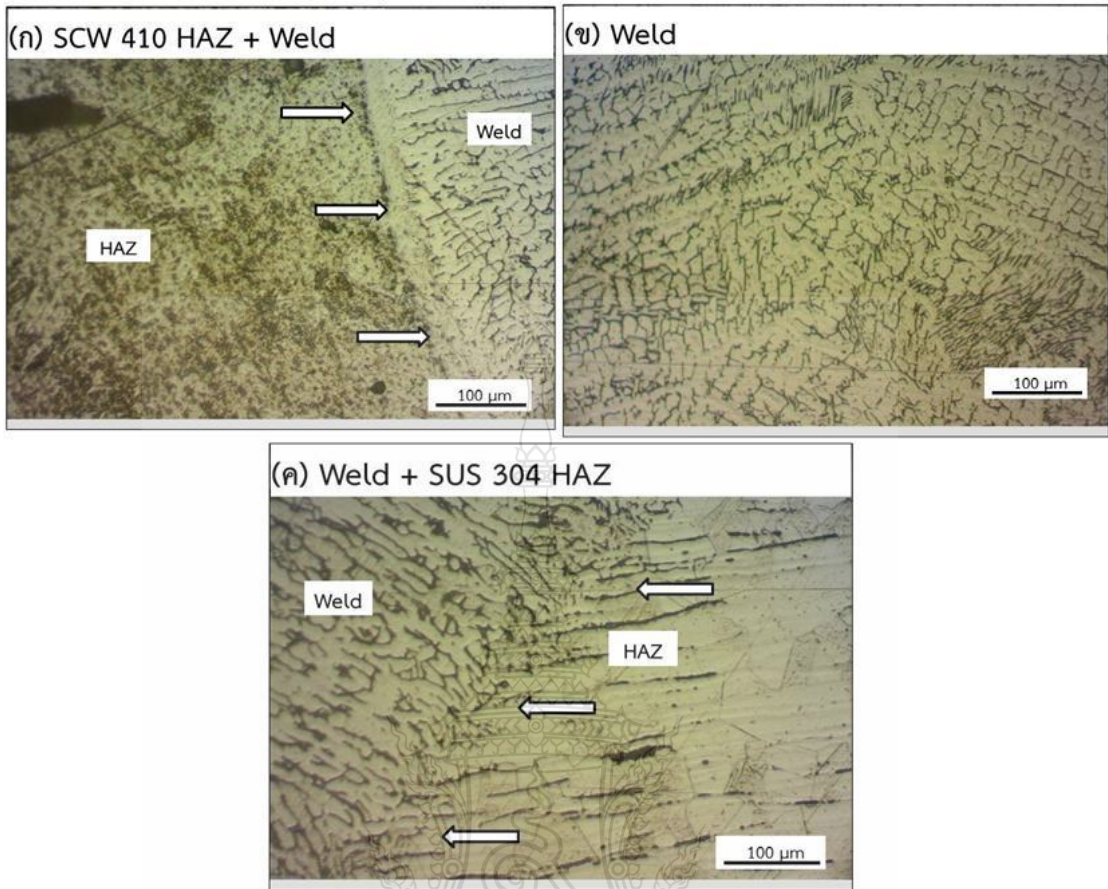
รูปที่ 4.52 โครงสร้างมหภาคที่กระแสน้ำเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.52 แสดงโครงสร้างมหภาคที่กระแสน้ำเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบจุดบกพร่อง (Defect) และเกิดช่องว่าง (Gap) บริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อม ดังรูปที่ 4.52 (ก) และ (ข) ทำการวัดค่าความกว้างแนวเชื่อม (W) ค่าความสูงแนวเชื่อม (H) และค่าความลึกแนวเชื่อม (P) พบว่า เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่าความกว้างแนวเชื่อม (W) ค่าความสูงแนวเชื่อม (H) และค่าความลึกแนวเชื่อม (P) มีค่าเพิ่มขึ้นดังกราฟรูปที่ 4.52 สอดคล้องกับลักษณะการพังทลาย ดังรูปที่ 4.51



รูปที่ 4.53 ค่าความแข็งที่กระแสรองเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.53 แสดงค่าความแข็งที่กระแสรองเชื่อม 220 แอมแปร์ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน ทำการวัดในตำแหน่งกึ่งกลางความหนาแผ่น และมีตำแหน่งตั้งแต่ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ลากผ่านโลหะเชื่อมไปที่ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ดังรูปที่ 4.29 พบว่า ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งสูงสุด บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 เมื่อเทียบกับบริเวณโลหะเชื่อมและพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 และที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 บริเวณโลหะเชื่อมและบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 มีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน ดังกราฟรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.54 โครงสร้างจุลภาคที่กระแสเชื่อม 220 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.54 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่กระแสนเชื่อม 220 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 20 ลิตรต่อนาที ที่แสดงค่าความแข็งแรงกระแทก 296 J พบว่า โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 รูปร่างเม็ดเกรนมีลักษณะกลมมนและสมมาตร ในทิศทางจากซ้ายไปขวาเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.54 (ก) โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อม รูปร่างเม็ดเกรนมีลักษณะกลมมนและสมมาตร เกรนมีขนาดใหญ่ มีทิศทางการเรียงตัวเข้าหาที่กลางแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.54 (ข) และ โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) ของด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ลักษณะเม็ดเกรนมีรูปร่างสมมาตร ในทิศทางจากขวาไปซ้ายเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.54 (ค) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกระแทก ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.50 กล่าวคือ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่คล้ายกันทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าใกล้เคียงกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุม ที่มีผลต่อรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 เชื่อมด้วยวิธีการต่อชน โดยมีตัวแปรในการทดลอง 3 ตัวแปร คือ กระแสเชื่อม 3 ระดับ ได้แก่ 140, 180, และ 220 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 3 ระดับ ได้แก่ 200, 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 3 ระดับ ได้แก่ 10, 15, 20 ลิตรต่อนาที จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมต่อค่าความแข็งแรงกระแทก

ผลการทดลองสามารถวิเคราะห์ได้ว่า กระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการหลอมละลายและการถ่ายโอนน้ำโลหะระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ความเร็วเดินแนวเชื่อมส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน และอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมช่วยให้การอาร์กมีความสมบูรณ์ จึงทำให้ตัวแปรทุกตัวแปรมีผลต่อค่าความแข็งแรงกระแทก กระแสเชื่อมที่ดีที่สุดคือ 180 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ดีที่สุดคือ 200 มิลลิเมตรนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุมที่ดีที่สุดคือ 10 ลิตรต่อนาที โดยให้ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดที่ 297 J

##### 5.1.2 อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมต่อค่าความแข็ง

ผลการทดลองสามารถวิเคราะห์ได้ว่าตัวแปรการเชื่อม มีผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อมโดยค่าความแข็ง มีความแปรผันตามตัวแปรการเชื่อม กระแสเชื่อม ความเร็วเดินแนวเชื่อม และอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม โดยส่งผลต่อความแข็งของรอยเชื่อม จากการศึกษาพบว่ากระแสเชื่อมที่ดีที่สุดคือ 180 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ดีที่สุดคือ 200 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุมที่ดีที่สุดคือ 10 ลิตรต่อนาที โดยให้ค่าความแข็งของแนวเชื่อมที่ 290 HV

##### 5.1.3 อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาค

ผลการทดลองและวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคพื้นที่บริเวณแนวเชื่อมลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ให้ค่าการดูดซับพลังงานสูงสุด จะสังเกตเห็นว่า โครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 แสดงเม็ดเกรนมีรูปร่างสมมาตร บริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อมประกอบด้วยเดนไดรต์ละเอียด โครงสร้างจุลภาคของ



พื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 แสดงเม็ดเกรนมีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากกว่าโครงสร้างจุลภาคโลหะหลัก

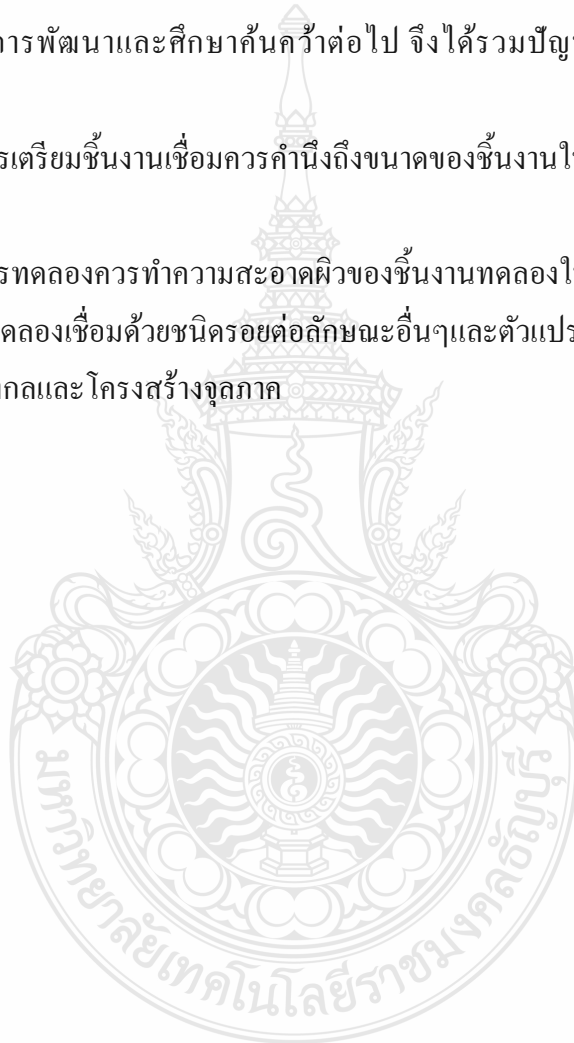
## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการทดลองศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุม ที่มีผลต่อรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 พบปัญหาในระหว่างการทดลองเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและศึกษาค้นคว้าต่อไป จึงได้รวมปัญหาและข้อเสนอแนะต่างๆ ดังต่อไปนี้

5.2.1 ในการเตรียมชิ้นงานเชื่อมควรคำนึงถึงขนาดของชิ้นงานให้สอดคล้องกับวิธีการทดสอบสมบัติทางกล

5.2.2 ในการทดลองควรทำความสะอาดผิวของชิ้นงานทดลองให้สะอาดก่อนการเชื่อม

5.2.3 ควรทดลองเชื่อมด้วยชนิดรอยต่อลักษณะอื่นๆ และตัวแปรในการเชื่อมอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค

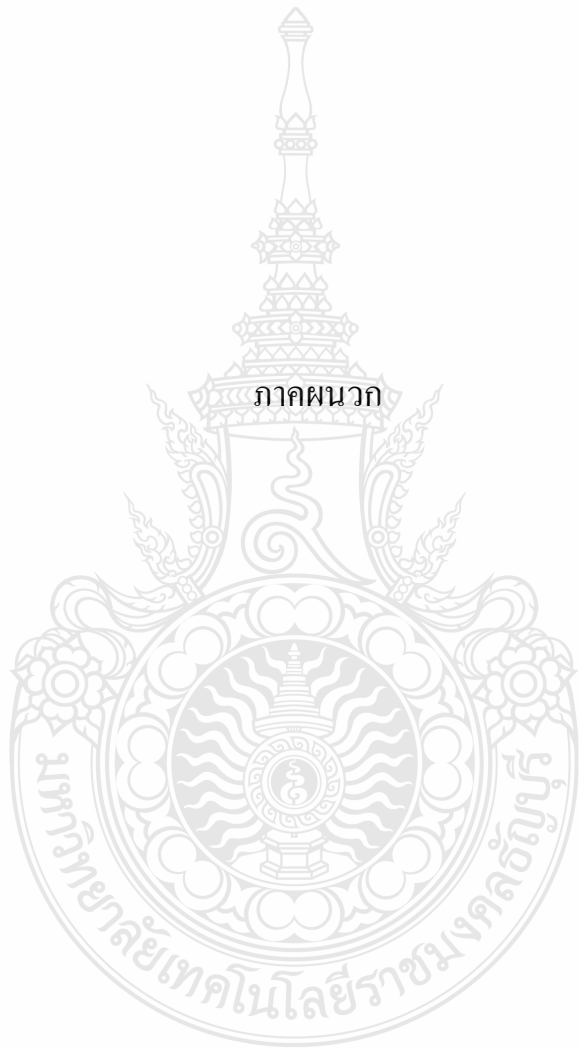


## รายการอ้างอิง

- [1] [http://www.cigweld.com.au/pages/images/techinfo/consumtech/st\\_steel.pdf](http://www.cigweld.com.au/pages/images/techinfo/consumtech/st_steel.pdf).
- [2] คณะวิศวกรรมศาสตร์ (2539). การเชื่อมโลหะในระบบ GMAW. กรุงเทพฯ : บริษัท ทีพี พรินท์ จำกัด.
- [3] The International Nickel Company. (1978). **Engineering Properties and Application of the Ni-Resists and Ductile Ni-Resists**. New York, INCo. (pp. 1-48).
- [4] David, JR., 1999, **ASM Specialty Handbook Stainless Steel**, ASM International Materials Park, Ohio USA., (pp. 3-7.)
- [5] Campbell, RD., 1999, **The Professional's Advisor on Welding of Stainless Steel**, American Welding Society, USA., (pp. 5-43.)
- [6] Heiple, CR. and Burgardt, P., 1993, **"Fluid Flow Phenomena During Welding" ASM Handbook**, Vol 6, ASM International Materials Park, Ohio USA., (pp. 19-22.)
- [7] วชิระ มีทอง, ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์, การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม และคุณสมบัติของรอยต่อ, กรุงเทพฯ, (น. 1-96.)
- [8] สถาบันพัฒนาครูอาชีวศึกษา. (2540). การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม. โรงพิมพ์สถาบันพัฒนา ครูอาชีวศึกษา. (น. 7-19).
- [9] อรศิริ จันทร์เมือง. (2551). การศึกษาผลกระทบของก๊าซที่ใช้สำหรับกระบวนการเชื่อม MIG กรณีศึกษา: การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI. เบอร์ 304. กรุงเทพฯ: (น. 1-77)
- [10] นัศรทอง ไสแสง. (2548). อิทธิพลของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304. กรุงเทพฯ: (น. 1-75).
- [11] ปริญญา แสงทอง. (2549). ผลการแปรพารามิเตอร์ การเชื่อม MIG ต่อ โครงสร้างและสมบัติของงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม. กรุงเทพฯ: (น. 1-93).
- [12] Onsoien M. Peters R. Olson D. L and Liu S. (January 2004). **Effect of Hydrogen in an argon GTAW shielding gas Arc characteristics and bead morphology**. Welding Journal. (pp. 10-15).
- [13] Ogawa T. Suzuki K. and Zaizen T. (July 2004). **The Weldability of nitrogen-containing austenitic stainless steel part II porosity cracking and creep properties**. Welding Journal 63. (pp. 213-223).

## รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [14] American National Standard.1996. **“Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials1”** Annual Book of ASTM Standard, ASTM E 92-82, Vol.03, New York.
- [15] Yang LJ et al. **The effects of process variables on the weld deposit area of submerged arc welds.** Weld J 1993;72 : 11–8
- [16] Jiecai Feng, Liqun Li, Yanbin Chen, Zhenglong Lei, Hao Qin, Ying Li. (2012). **Effects of welding velocity on the impact behavior of droplets in gas metal arc welding.** Journal of Material Processing Technology 212. (pp. 2163-2172).
- [17] Weman K. (2003). **Welding Process Handbook.** England: Woodhead Publishing Limited.
- [18] Subodh Kumar, A.S. Shahi. (2011). **Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints.** Journal Material and Design 32. (pp. 3617-3623).
- [19] George E. Dieter. (1982). **Mechanical Metallurgy SI Metric Edition**
- [20] Shanping Lu., Hidetoshi Fujii., Kiyoshi Nogi.,2004, **Marangoni convection and weld shape variations in Ar–O<sub>2</sub> and Ar–CO<sub>2</sub> shielded GTA welding.,** Journal Material Science and Engineering A 380, pp 290-297.





**ภาคผนวก ก**  
**ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ**

ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าหล่อ SCW 410



CERTIFICATE MATERIAL

TEST REPORT

**CASTOP MATRIX CO.,LTD**  
 96 Moo 6 Tambon Nongbontaeng, Amphur Bantueang, Chonburi 20170 THAILAND  
 Tel. +6638-192-588 Fax. +6638-192-590 E-Mail : info@castopmatrix.com



<http://www.castopmatrix.com>

TO: เทศบาลโนนศิลาขามกลีตงานวิสาหกิจ  
 Address: 199 ซ.3 ต.พื้งโกก อ.พื้งโคน อ.ชนบุรี 47166

Tel: FAX:

CHEMICAL ANALYSIS - SCW410

DATE	LOT NO.	HEAT NO.	RECEIVED	QTY. PCS.	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti	Co	Al	Nb	Fe	CERTIFICATE NO.	PAGE
																					20110425	1
TEST METHOD																						
SPECTROMETER																						
P/O.....																						
DESCRIPTION																						
KK01																						
25/04/2011	1				≤0.22	≤8.0	≤0.04	≤0.04	≤1.5													
					0.0189	0.3499	0.0051	0.0107	0.3907													



*Pakorn Seetan*  
 Miss. Pakpring - Seetan  
 2011-04-25

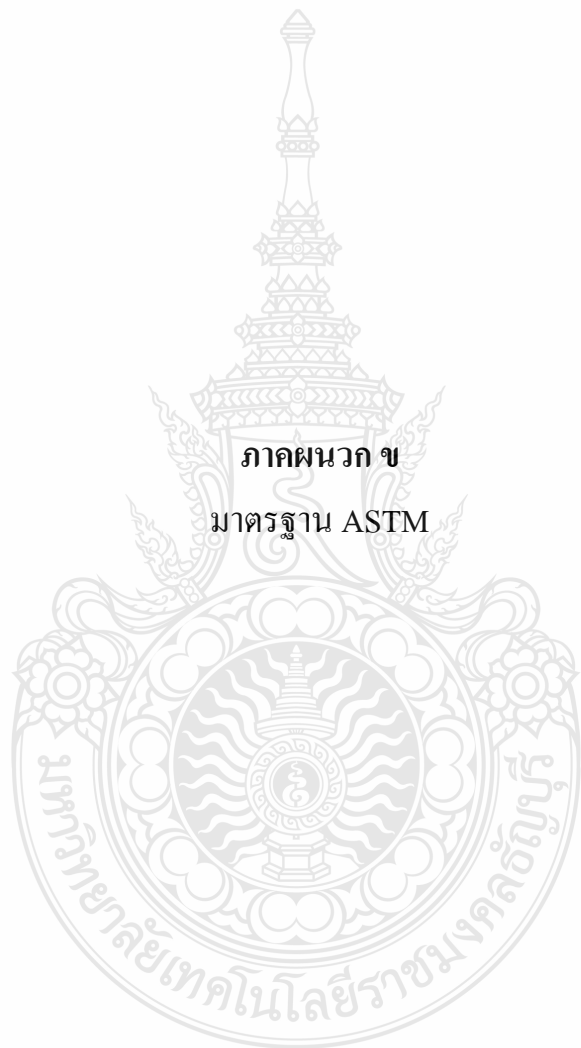
*Wanyu*  
 (Miss. Wanyaya Seitan)  
 2011-04-25

Approved By  
 Manager Director

QA Leader

Report By  
 QA Department

FR-QC-13A



ภาควิชา

มาตรฐาน ASTM

ASME E 92 – 82 (2003)<sup>e2</sup>

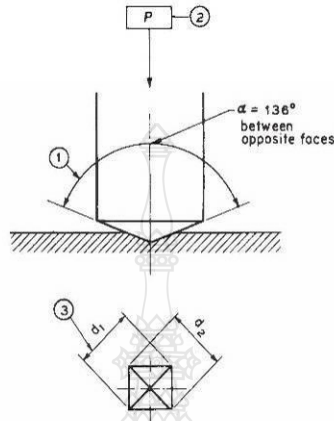


FIG. 1 Vickers Hardness Test (see Table 1)

TABLE 1 Symbols and Designations Associated with Fig. 1

Number	Symbol	Designation
1	...	Angle at the vertex of the pyramidal indenter (136°)
2	$P$	Test force in kilograms-force
3	$d$	Arithmetic mean of the two diagonals $d^1$ and $d^2$

TABLE 2 Vickers Hardness Numbers  
(Diamond, 136° Face Angle, force of 1 kgf)

Diagonal of Impression, mm	Vickers Hardness Number for Diagonal Measured to 0.0001 mm									
	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009
0.005	74 170	71 290	68 580	66 020	63 590	61 300	59 130	57 080	55 120	53 270
0.006	51 510	49 840	48 240	46 720	45 270	43 890	42 570	41 310	40 100	38 950
0.007	37 840	36 790	35 770	34 800	33 860	32 970	32 100	31 280	30 480	29 710
0.008	28 970	28 260	27 560	26 920	26 280	25 670	25 070	24 500	23 950	23 410
0.009	22 890	22 390	21 910	21 440	20 990	20 550	20 120	19 710	19 310	18 920
0.010	18 540	18 180	17 820	17 480	17 140	16 820	16 500	16 200	15 900	15 610
0.011	15 330	15 050	14 780	14 520	14 270	14 020	13 780	13 550	13 320	13 090
0.012	12 880	12 670	12 460	12 260	12 060	11 870	11 680	11 500	11 320	11 140
0.013	10 970	10 810	10 640	10 480	10 330	10 170	10 030	9 880	9 737	9 598
0.014	9 461	9 327	9 196	9 068	8 943	8 820	8 699	8 581	8 466	8 353
0.015	8 242	8 133	8 026	7 922	7 819	7 718	7 620	7 523	7 428	7 335
0.016	7 244	7 154	7 066	6 979	6 895	6 811	6 729	6 649	6 570	6 493
0.017	6 416	6 342	6 268	6 196	6 125	6 055	5 986	5 919	5 853	5 787
0.018	5 723	5 660	5 598	5 537	5 477	5 418	5 360	5 303	5 247	5 191
0.019	5 137	5 083	5 030	4 978	4 927	4 877	4 827	4 778	4 730	4 683
0.020	4 636	4 590	4 545	4 500	4 456	4 413	4 370	4 328	4 286	4 245
0.021	4 205	4 165	4 126	4 087	4 049	4 012	3 975	3 938	3 902	3 866
0.022	3 831	3 797	3 763	3 729	3 696	3 663	3 631	3 599	3 567	3 536
0.023	3 505	3 475	3 445	3 416	3 387	3 358	3 329	3 301	3 274	3 246
0.024	3 219	3 193	3 166	3 140	3 115	3 089	3 064	3 039	3 015	2 991
0.025	2 967	2 943	2 920	2 897	2 874	2 852	2 830	2 808	2 786	2 764
0.026	2 743	2 722	2 701	2 681	2 661	2 641	2 621	2 601	2 582	2 563
0.027	2 544	2 525	2 506	2 488	2 470	2 452	2 434	2 417	2 399	2 382
0.028	2 365	2 348	2 332	2 315	2 299	2 283	2 267	2 251	2 236	2 220
0.029	2 205	2 190	2 175	2 160	2 145	2 131	2 116	2 102	2 088	2 074
0.030	2 060	2 047	2 033	2 020	2 007	1 993	1 980	1 968	1 955	1 942
0.031	1 930	1 917	1 905	1 893	1 881	1 869	1 857	1 845	1 834	1 822
0.032	1 811	1 800	1 788	1 777	1 766	1 756	1 745	1 734	1 724	1 713
0.033	1 703	1 693	1 682	1 672	1 662	1 652	1 643	1 633	1 623	1 614



TABLE 4 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size No. G	$\bar{N}_A$ Grains/Unit Area		$\bar{A}$ Average Grain Area		$\bar{d}$ Average Diameter		$\bar{T}$ Mean Intercept		$\bar{N}_L$ No./mm
	No./in. <sup>2</sup> at 100X	No./mm <sup>2</sup> at 1X	mm <sup>2</sup>	μm <sup>2</sup>	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.0	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.0	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

TABLE 5 Relationship Between Magnification Used and Jeffries' Multiplier, *f*, for an Area of 5000 mm<sup>2</sup> (a Circle of 79.8-mm Diameter) (*f* = 0.0002 *M*<sup>2</sup>)

Magnification Used, <i>M</i>	Jeffries' Multiplier, <i>f</i> , to Obtain Grains/mm <sup>2</sup>
1	0.0002
10	0.02
25	0.125
50	0.5
75 <sup>A</sup>	1.125
100	2.0
150	4.5
200	8.0
250	12.5
300	18.0
500	50.0
750	112.5
1000	200.0

<sup>A</sup> At 75 diameters magnification, Jeffries' multiplier, *f*, becomes unity if the area used is 5625 mm<sup>2</sup> (a circle of 84.5-mm diameter).

where *f* is the Jeffries' multiplier (see Table 5). *N*<sub>inside</sub> is the number of grains completely inside the test circle and *N*<sub>intercepted</sub> is the number of grains that intercept the test circle. The average grain area, *A*, is the reciprocal of *N*<sub>A</sub>, that is, 1/*N*<sub>A</sub>, while the mean grain diameter, *d*, as listed on Plate III (see 10.2.3), is the square root of *A*. This grain diameter has no physical significance because it represents the side of a square grain of area *A*, and grain cross sections are not square.

11.2 To obtain an accurate count of the number of grains completely within the test circle and the number of grains intersecting the circle, it is necessary to mark off the grains on the template, for example, with a grease pencil or felt tip pen. The precision of the planimetric method is a function of the number of grains counted (see Section 19). The number of

grains within the test circle, however, should not exceed about 100 as counting becomes tedious and inaccurate. Experience suggests that a magnification that produces about 50 grains within the test circle is about optimum as to counting accuracy per field. Because of the need to mark off the grains to obtain an accurate count, the planimetric method is less efficient than the intercept method (see Section 12).

11.3 Fields should be chosen at random, without bias, as described in 5.2. Do not attempt to choose fields that appear to be typical. Choose the fields blindly and select them from different locations on the plane of polish.

11.4 By original definition, a microscopically-determined grain size of No. 1 has 1,000 grains/in.<sup>2</sup> at 100X, hence 15,500 grains/mm<sup>2</sup> at 1X. For areas other than the standard circle, determine the actual number of grains per square millimetre, *N*<sub>A</sub>, and find the nearest size from Table 4. The ASTM grain size number, *G*, can be calculated from *N*<sub>A</sub> (number of grains per mm<sup>2</sup> at 1X) using (Eq 1) in Table 6.

## 12. General Intercept Procedures

12.1 Intercept procedures are more convenient to use than the planimetric procedure. These procedures are amenable to use with various types of machine aids. It is strongly recommended that at least a manual tally counter be used with all intercept procedures in order to prevent normal errors in counting and to eliminate bias which may occur when counts appear to be running higher or lower than anticipated.

12.2 Intercept procedures are recommended particularly for all structures that depart from the uniform equiaxed form. For anisotropic structures, procedures are available either to make

Saturate a large wad of cotton held in stainless steel or nickel tongs with the etchant and sweep over the surface of the specimen. An effort should be made to wet the entire surface as soon as possible. After the initial wetting, keep the swab saturated with solution and frequently sweep over the surface of the specimen to renew the solution. When the structure has been suitably developed, rinse the specimen, either with a swab saturated with water, or better still, by pouring water over the specimen. After rinsing with hot water, blow the specimen dry with compressed air. Details of the procedure not discussed here are covered in the sections for the various metals and their alloys.

7.3 The times given in individual tabulations are only intended as guides. In fact, the progress of etching should be closely watched and etching stopped when the preferred structural details have been revealed. Specimens should be etched to develop structure. Generally, a light etch is better than a heavy etch; overetching can often lead to misinterpretation. The actual time to develop a structure properly may be quite different from the one suggested.

### 8. Specific Preparation Procedures and Recommended Solutions

#### 8.1 Aluminum:

8.1.1 The specimens can be cut using common cutting tools, hack saws, band saws, shears, abrasive cutoff wheels, etc. All these methods will cause cold work at the surface and will generate heat. The temperature rise can be enough to cause changes in structure. For these reasons sharp tools and generous lubrication are necessary for sectioning.

8.1.2 The cold-worked surface should be removed by machining the surface. Again sharp tools and copious lubrication are required. If fine detail is required, the machined surface should be ground using silicon carbide paper lubricated with water or kerosine.

8.1.3 Several of the solutions used in macroetching react vigorously with the metal and can overheat the specimen. In these cases the specimen is periodically removed from the solution, cooled in running water, and reimmersed in the etchant. This procedure is repeated until the desired degree of etching is obtained.

#### 8.1.4 Macroetchants for Aluminum and Aluminum Alloys—(Table 1).

#### 8.2 Beryllium:

8.2.1 While beryllium in the massive form is not dangerous, beryllium and its compounds in the finely divided state are extremely poisonous. (**Warning**—Before starting any work involving beryllium, a review of hazards and plans for handling should be made. A number of references on beryllium are available. Particular mention may be made of "Toxicity of Beryllium" ASD-TR-62-7-667, prepared by the Kettering Laboratory for the Air Force.)

8.2.1.1 Generally speaking, beryllium and its alloys have given difficulty in obtaining good macroetched specimens. First, beryllium is a rather brittle metal and sectioning can be difficult. Cut-off wheels with the designation C46FR70 have been the most successful. Secondly, beryllium does not grind easily; hence, specimens should be as small as possible to minimize grinding time. Grinding has been most successful with the entire sequence of wet silicon carbide papers.

8.2.1.2 The etching of fine grained metal may not always be entirely successful, and further preparation will be required. Rough polishing with 15 μm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> suspended in water is performed on a low-nap cloth. Light pressure and frequent change of cutting direction produce the best results. If further polishing is required, 1-μm green Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in tap water on synthetic suede works best.

#### 8.2.2 Macroetchants for Beryllium and Beryllium Alloys—(Table 2).

**TABLE 1 Macroetchants for Aluminum and Aluminum Alloys**

Alloy	Composition	Procedure	Comments	
All	NaOH H <sub>2</sub> O	10 g 100 mL	Immerse sample 5 to 15 min in solution heated to 60 to 70°C (140 to 160°F). Rinse in water, and remove smut in strong HNO <sub>3</sub> solution. Rinse and repeat etching if necessary.	Good general-purpose etchant, can be used on almost all aluminum alloys. Does not require fine grinding.
3XXX 4XXX 5XXX 6XXX High Si castings	HCl (concentrated) HNO <sub>3</sub> (concentrated) HF (48 %)	75 mL 25 mL 5 mL	Mix fresh before using. Use at room temperature. May be used as immersion etch or swabbed over specimen surface. Rinse specimen in warm water and dry.	Used to develop grain structure. May be diluted with 25 % water to slow down etching. Does not require fine grinding.
High purity Al 1XXX 3XXX 4XXX 5XXX 6XXX	HCl (concentrated) HNO <sub>3</sub> (concentrated) HF (48 %) H <sub>2</sub> O	45 mL 15 mL 15 mL 25 mL	Immerse specimen at room temperature until desired contrast is developed. Rinse in warm water and dry.	Tucker's etch. General purpose etch for revealing microstructure of both cast and wrought aluminum. Does not require fine grinding.
All except high Si castings	HCl (concentrated) HNO <sub>3</sub> (concentrated) HF (48 %) H <sub>2</sub> O	15 mL 5 mL 5 mL 75 mL	Same as above.	1 + 2 Tucker's. Same as above, but slower acting.
2XXX High Cu alloys	HCl (concentrated) HF (48 %) H <sub>2</sub> O	15 mL 10 mL 90 mL	May be used as an immersion etch or swabbed over the specimen surface. When desired contrast is obtained, rinse in water and remove deposits with concentrated HNO <sub>3</sub> . Rinse in warm water and dry.	Flick's reagent. Best results are obtained with a ground surface. 180 grit will suffice.

mixing, and disposing of each chemical, as well as any combinations of those chemicals.

6.1.3 Table 2 includes specific safety precautions for the mixing or use of some etchants. The user should observe each of these specific precautions.

6.2 Some basic suggestions for the handling and disposing of etchants and their ingredients are as follows:

6.2.1 When pouring, mixing, or etching, always use the proper protective equipment (glasses, gloves, apron, etc.).

6.2.2 Use proper devices (glass or plastic) for weighing, mixing, containing, and storage of solutions.

6.2.3 When mixing etchants, always add reagents to the

solvent unless specific instructions indicate otherwise.

6.2.4 When etching, always avoid direct physical contact with the etchant and specimen; use devices such as tongs to hold the specimen (and tufts of cotton, if used).

6.2.5 In general, it is good practice to work under a properly designed chemical fume hood, and it is imperative with those etchants that give off noxious odors or toxic vapors.

6.2.6 Methanol is a cumulative poison hazard. Where ethanol or methanol are listed as alternates, ethanol is the preferred solvent. Methanol should be used in a properly designed chemical fume hood.

TABLE 1 Etchants for Metals

NOTE 1—Electrolytic etchants are *italicized*.

Metal	Etchants	Uses
<b>Aluminum Base:</b>		
Pure Al	1a, 2, 3 4, 5 1b	general structure grain structure under polarized light grain boundaries and slip lines
1000 series	1a, 3, 2 4, 5 6, 7	general structure grain structure under polarized light phase identifications
2000 series	3, 2, 1a 8a, 6, 7	general structure phase identifications
3000 series	3, 1a 4, 5 8a, 6, 7	general structure grain structure under polarized light phase identifications
4000 series	3, 1a	general structure
5000 series	3, 1a, 2, 6, 8a 4, 5	general structure grain structure under polarized light
6000 series	3, 1a, 2, 6, 8a, 222 4, 5 1a, 2, 7, 6, 8a	general structure grain structure under polarized light phase identifications
7000 series	3, 1a, 2 4, 5 3b, 6	general structure grain structure under polarized light phase identifications
<b>Beryllium Base:</b>		
Pure Be	9, 10	general structure via polarized light
Be alloys	11	general structure
<b>Chromium Base:</b>	12, 13c	general structure
<b>Cobalt Base:</b>		
Pure Co	14, 15, 16, 17	general structure
Hard-facing and tool metals	18, 19, 20	general structure
High-temperature alloys	20, 18, 16, 21, 22b, 24, 25 19	general structure phase identification
<b>Columbium Base</b> (see niobium base)		
<b>Copper Base:</b>		
Pure Cu	26, 27, 28, 29, 30, 31d, 32, 33, 34b, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 8b, 210, 215 43, 28	general structure chemical polish and etch
Cu-Al (aluminum bronze)	44, 31d, 34b, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 45, 215	general structure
Cu-Be	46, 41, 45	general structure
Cu-Cr	41	general structure
Cu-Mn	41	general structure
Cu-Ni	34, 47, 48, 40, 49, 50	general structure

TABLE 1 Continued

Metal	Etchants	Uses
	188	removes stain
	72	chemical polish and etch
Ti-5 Al-2.5 Sn	189	reveals hydrides
Ti-6 Al-6 V-2 Sn	190	Stains alpha and transformed beta, retained beta remains white
Ti-Al-Zr	191	general structure
Ti-8Mn	192	general structure
Ti-13 V-11 Cr-3 Al (aged)	192	general structure
Ti-Si	193	general structure
Ti alloys	186, 187, 192, 194, 158, 132b, 1c, 67, 68, 69, 3a, 218	general structure
	11, 1c	reveals alpha case
	72, 192, 178	chemical polish and etch
	170a	outlines and darkens hydrides in some alloys
	188	removes stain
<i>Tungsten Base:</i>		
Pure W	98c, 131	general structure
As cast	132a	chemical polish prior to etching
W-Th	209	general structure
<i>Uranium Base:</i>		
Pure U	67, 69, 195, 196	general structure
U + Zr	68	general structure
U beryllides	170a	general structure
U alloys	67, 69, 195, 96	general structure
	207	carbides
<i>Vanadium Base:</i>		
Pure V	170b, 165b	general structure
	197, 198	grain boundaries
V alloys	199, 198	general structure
<i>Zinc Base:</i>		
Pure Zn	200a	general structure
Zn-Co	177	general structure
Zn-Cu	201	general structure
	203	distinguishes gamma ( $\gamma$ ) and epsilon ( $\epsilon$ )
Zn-Fe	74a	structure of galvanized sheet
Die castings	202	general structure
<i>Zirconium Base:</i>		
	66, 67, 204, 68, 69, 205	general structure
	206	electrolytic polish and etch
	71	grain structure under polarized light
	72	chemical polish and etch

TABLE 2 Numerical List of Etchants

Etchant	Composition	Procedure
1	1 mL HF 200 mL water	(a) Swab with cotton for 15 s. (b) Alternately immerse and polish several minutes. (c) Immerse 3–5 s. (d) Immerse 10–120 s.
2	3 mL HF 100 mL water	(a) Swab 10 s to reveal general structure. (b) Immerse 15 min, wash 10 min in water to form film with hatching which varies with grain orientation.
3	2 mL HF 3 mL HCl 5 mL HNO <sub>3</sub> 190 mL water	(a) Immerse 10–20 s Wash in stream of warm water. Reveals general structure. (b) Dilute with 4 parts water-colors constituents—mix fresh.
4	24 mL H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 50 mL Carbitol (diethylene glycol monoethyl ether) 4 g boric acid 2 g oxalic acid 10 mL HF 32 mL water	Electrolytic: Use carbon cathode raising d-c voltage from 0–30 V in 30 s. Total etching time 3 min with agitation. Wash and cool. Repeat if necessary.

TABLE 2 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size No. (G)	$\bar{N}_A$		$\bar{A}$		$\bar{N}_L$ or $\bar{P}_L$ ( $\text{mm}^{-1}$ )	$\bar{l}$	
	(No./in <sup>2</sup> @ 100 $\times$ )	(No./mm <sup>2</sup> @ 1 $\times$ )	(mm <sup>2</sup> )	( $\mu\text{m}^2$ )		(mm)	( $\mu\text{m}$ )
00	0.25	3.88	0.2581	258100	2.210	0.4525	452.5
0	0.50	7.75	0.1290	129000	3.125	0.3200	320.0
0.5	0.71	10.96	0.0912	91200	3.716	0.2691	269.1
1.0	1.00	15.50	0.0645	64500	4.419	0.2263	226.3
1.5	1.41	21.92	0.0456	45600	5.256	0.1903	190.3
2.0	2.00	31.00	0.0323	32300	6.250	0.1600	160.0
2.5	2.83	43.84	0.0228	22800	7.433	0.1345	134.5
3.0	4.00	62.00	0.0161	16100	8.839	0.1131	113.1
3.5	5.66	87.68	0.0114	11400	10.511	0.09514	95.1
4.0	8.00	124.00	0.00806	8060	12.500	0.08000	80.0
4.5	11.31	175.36	0.00570	5700	14.865	0.06727	67.3
5.0	16.00	248.00	0.00403	4030	17.678	0.05657	56.6
5.5	22.63	350.73	0.00285	2850	21.023	0.04757	47.6
6.0	32.00	496.00	0.00202	2020	25.000	0.04000	40.0
6.5	45.25	701.45	0.00143	1430	29.730	0.03364	33.6
7.0	64.00	992.00	0.00101	1010	35.356	0.02828	28.3
7.5	90.51	1402.90	0.000713	713	42.045	0.02378	23.8
8.0	128.00	1984.00	0.000504	504	50.000	0.02000	20.0
8.5	181.02	2805.81	0.000356	356	59.461	0.01682	16.8
9.0	256.00	3968.01	0.000252	252	70.711	0.01414	14.1
9.5	362.04	5611.61	0.000178	178	84.090	0.01189	11.9
10.0	512.00	7936.02	0.000126	126	100.001	0.01000	10.0
10.5	724.08	11223.22	0.0000891	89.1	118.922	0.008409	8.4
11.0	1024.00	15872.03	0.0000630	63.0	141.423	0.007071	7.1
11.5	1448.15	22446.44	0.0000446	44.6	168.181	0.005946	5.9
12.0	2048.00	31744.06	0.0000315	31.5	200.002	0.005000	5.0
12.5	2896.31	44892.89	0.0000223	22.3	237.844	0.004204	4.2
13.0	4096.00	63488.13	0.0000158	15.8	282.845	0.003536	3.5
13.5	5792.62	89785.77	0.0000111	11.1	336.362	0.002973	3.0
14.0	8192.00	126976.25	0.0000079	7.9	400.004	0.002500	2.5

- NOTE 1— $\bar{N}_A$  is the number of grains per unit area.
- NOTE 2— $\bar{A}$  is the average grain area.
- NOTE 3— $\bar{N}_L$  is the number of grains intercepted per unit length.
- NOTE 4— $\bar{P}_L$  is the number of grain boundary intersections per unit length.
- NOTE 5— $\bar{l}$  is the mean lineal intercept distance.
- NOTE 6— $\bar{N}_L = \bar{P}_L$  for a single phase grain structure.
- NOTE 7—The above table was calculated based upon the grain size definitions in Test Methods E 112.

TABLE 3 Grain Size Equations Relating Measured Parameters to the ASTM Grain Size, G

Determine the ASTM Grain Size, G, using the following equations:	
Equation	Units
1. $G = (3.321928 \text{ Log } \bar{N}_A) - 2.954$	$\bar{N}_A$ in $\text{mm}^{-2}$
2. $G = (6.643856 \text{ Log } \bar{N}_L) - 3.288$	$\bar{N}_L$ in $\text{mm}^{-1}$
3. $G = (6.643856 \text{ Log } \bar{P}_L) - 3.288$	$\bar{P}_L$ in $\text{mm}^{-1}$
4. $G = (-6.643856 \text{ Log } \bar{l}) - 3.288$	$\bar{l}$ in mm
5. $G = (-3.3223 \text{ Log } \bar{A}) - 2.955$	$\bar{A}$ in $\text{mm}^2$

- NOTE 1—Equations 2 and 3 are for single phase grain structures.
- NOTE 2—To convert micrometres to millimetres, divide by 1000.
- NOTE 3—To convert square micrometres to square millimetres, divide by  $10^6$ .
- NOTE 4—A calculated G value of -1 corresponds to ASTM G = 00.

14.7 For a duplex grain size distribution, the analysis is conducted as described in Appendix X2 of Test Methods E 1181.

15. Test Report

15.1 The report should document the identifying information regarding the specimen, its composition, specification

TABLE 4 95 % Confidence Interval Multipliers, t (Eq 13 and Eq 14)

No. of Fields, $n^A$	t multiplier	No. of Fields, $n^A$	t Multiplier
5	2.776	19	2.101
6	2.571	20	2.093
7	2.447	21	2.086
8	2.365	22	2.080
9	2.306	23	2.074
10	2.262	24	2.069
11	2.228	25	2.064
12	2.201	26	2.060
13	2.179	27	2.056
14	2.160	28	2.052
15	2.145	29	2.048
16	2.131	30	2.045
17	2.120	40	2.020
18	2.110	60	2.000
		$\infty$	1.960

<sup>A</sup> or, number of grains, N.

designation or trade name, customer or data requester, date of analysis, heat treatment or processing history, specimen location and orientation, etchant and etch method, analysis method, and so forth, as required.



ภาคผนวก ค  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ พิจารณาผลงานที่ร่วมนำเสนอ  
ประชุมวิชาการ มอบ.วิจัย ครั้งที่ 7

ดร.สุมาลี เจริญจิตร	ดร.สุทธิดา รักกะเปา
ดร.สุระ วุฒิพรหม	รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถรัตน์ มงคลพร
รองศาสตราจารย์สมหมาย ชินนาค	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อังคณา ทองพูน พัฒนสร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดม ทิพราช	รองศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ คำดี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒน์ ธีระพงษ์ธนากร	รองศาสตราจารย์ ดร.อำไพวรรณ ภราดรนิววัฒน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นลิน เพียรทอง	ดร.โฆสิตี แสนจิตต์
ดร.ชิดหทัย เพชรช่วย	รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร
รองศาสตราจารย์ ดร.สัมพันธ์ มูลสาร	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวรรณ องค์กรรักษา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จาวรวัฒน วงบุตดี	รองศาสตราจารย์ ดร.สุจินต์ บุรีรัตน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาดา สอนองราชกุล	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ มะโนรมย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รักเกียรติ จิตคดี	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญช์ อินทรโกเศศ
ดร.สายสมร ล้าลอง	รองศาสตราจารย์ ดร.กัมพลเกียรติ ศรีพงศ์พันธุ์
รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	ดร.จริยาภรณ์ อุ๋นวงษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒน์ ผาปจันดา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรี ทองเรือง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิรชญา มณีเนตร	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ทิรา เจริญนัย
รองศาสตราจารย์ ดร.นพมาศ สุวชาติ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตรกร โพธิ์งาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤดี หลิมไพโรจน์	รองศาสตราจารย์ ดร.จินดา ขลิบทอง
รองศาสตราจารย์เพ็ญศรี เจริญวานิช	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินตนา สละน้อย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกนก ทิพรส	รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐจาพร พิชัยณรงค์
ดร.กฤษา แก้วคง	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระ กุลสวัสดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กังวาน ยอดวิเศษศักดิ์	ดร.นันทกรณ์ อรุโสภา
ผศ.ดร.ฐิติวรรณ ศรีเจริญ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤมล ยุตาคน
รองศาสตราจารย์ ดร.ทัศน์ย์ บุญเต็ม	รองศาสตราจารย์ ดร.นิสันต์ สัตยาชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นวลฉวี แสงชัย	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุลย์จิรา ชिरเวทย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ผกาดี แก้วกันเนตร	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราณี พัฒนพิพิธไพศาล
นางพัชรี ศิริมาก	รองศาสตราจารย์ ดร.ปราณีต งามเสนห์
รองศาสตราจารย์ ดร.ภิญญาทิศา มุ่งการดี	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรียา หวังสมนึก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งรัศมี บุญดาว	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุดมินท์ มีเผ่าพันธ์
ดร.วัชรวิ เกษพิชัยณรงค์	รองศาสตราจารย์ ดร.มยุรี เนตรนภิส
ดร.วิษณุ สมิตสุวรรณค์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชชกาญจน์ ทองถาวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภพงษ์ ปิ่นเวหา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตติกร ยี่มนิรัญ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ สินธุเชาวน์	ดร.วัชร ก้องกิจกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนันท์ สายกระสุน	ดร.วรัชญา ศิลลาอ่อน



ดร.เอกภูมิ จันทรวงศ์

ดร.แคทลียา ขาปะวงษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรีชา เกรียงกรกฎ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญฤดี ตันตระกูล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนาพร ครอบธรรมชาติ

ดร.ขวัญเมือง แก้วคำเกิง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินตนา สมสวัสดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชนิศวรา เลิศอมรพงษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ สายแก้ว

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ สุทธิสา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธำมรงค์ ธรรมเมธา

รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวิวรรณ์ เศรษฐธรรม

รองศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง จุฑาเกตุ

ดร.นฤมล สิงห์ดง

ดร.ปวีร์วรรต สมนึก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปองรัตน์ รัตนภิญโญวงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รักพงษ์ เพชรคำ

รองศาสตราจารย์ ดร.วิรัช พรหมอารักษ์

ดร.สายฝน วิบูลย์สรสรรค์

รองศาสตราจารย์ ดร.สุจินต์ สิมารักษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรีย์ ศรีคำ

ดร.วิภารัตน์ แสงจันทร์

ดร.ศักดิ์ดา ชำคม

ดร.ศักดิ์ดา น้อยนาง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร จึงสุทธิวงษ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลย์ สิริมงคลรัตน์

ดร.ศุภฤกษ์ จันทร์จรัสจิตต์

ดร.สุดารัตน์ คำปลิว

รองศาสตราจารย์ ดร.สุบัณฑิต นิมิตรัน

ดร.สุพจน์ สีบุตร

รองศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณิ พรหมเทศ ศรีอำพร

ดร.สุภาณี นวกุล

ดร.สุภาพร พรไตร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาวดี แก้วระหัน

รองศาสตราจารย์ ดร.หนึ่ง เตียอำรุง

รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ ไชยกุลวัฒนา

ดร.อารีรัตน์ แซ่คู

รองศาสตราจารย์ ดร.อุดมศักดิ์ มหาวิวัฒน์

รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงไกร ไชยประการ

ดร.เพ็ชรรัตน์ ไสยสมบัติ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย

สารบัญ

	หน้า
<ul style="list-style-type: none"> <li>● การศึกษาคำที่ปรากฏร่วมกัน (Collocation) ในภาพยนตร์แนวแอ็คชั่น วรรณิภา ยุทธเสรี คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี</li> </ul>	105
<ul style="list-style-type: none"> <li>● ผลกระทบของโครงสร้างข้อมูลของประโยคย่อยภาษาอังกฤษที่ขยายต่อการจำเนื้อหาของ นักศึกษา สาขาวิชาภาษาอังกฤษ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ฐานิยา ทองไทย คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี</li> </ul>	107
<ul style="list-style-type: none"> <li>● การใช้ Process-Genre Approach เพื่อการสอนเขียนแบบ Recount สำหรับนักศึกษาชั้นปีที่ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ กันทนา รัชย์ศรี คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี</li> </ul>	109
<ul style="list-style-type: none"> <li>● การใช้การสอนการอ่านแบบโฟนิกส์พัฒนาการอ่านคำพยางค์เดียวของนักเรียนชั้นประถมศึกษา ปีที่ 4 โรงเรียนอานาวะริอา เพียงใจ ทาวะรัมย์ คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี</li> </ul>	111
<ul style="list-style-type: none"> <li>● ระบบเตือนภัยน้ำท่วมผ่านระบบส่งข้อความสั้น วรากร วงศ์สายเชื้อ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี</li> </ul>	113
<ul style="list-style-type: none"> <li>● การใช้วิธีโปรแกรมเชิงเส้นตรงจำนวนเต็มแบบไบนารีเพื่อแก้ปัญหาการจัดตารางเวลาเรียนเพื่อ ประโยชน์สูงสุด เสกสรรค์ วินยางค์กุล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเวียงชัย</li> </ul>	115
<ul style="list-style-type: none"> <li>● การทดสอบประสิทธิภาพการตรวจจับหลอดเลือดในภาพถ่ายจอประสาทตา โดยใช้วิธี โคคอลเอนโทรปีเทรสโฮลดิ้ง ชัยวุฒิ วุทธิสิทธิ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี</li> </ul>	117
<ul style="list-style-type: none"> <li>● การสร้างอุปกรณ์ตรวจสอบชิ้นงานบีมขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์โดยใช้เทคโนโลยีสร้างต้นแบบอย่าง รวดเร็ว พัชระ กัญจนกาญจน์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ</li> </ul>	119
<ul style="list-style-type: none"> <li>● อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมที่มีผลต่อความแข็งแรงกระแทกของรอยต่อชน เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 และเหล็กกล้าหล่อ SCW410 กลไกโร นาโควงศ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี</li> </ul>	121
<ul style="list-style-type: none"> <li>● พฤติกรรมเสริมสร้างสุขภาพของนักศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ เดชภณ ทองเต็ม มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ</li> </ul>	123
<ul style="list-style-type: none"> <li>● รูปแบบการพัฒนาศักยภาพของนักศึกษาเภสัชศาสตร์ ในโครงการพัฒนาแกนนำสร้างเสริมสุขภาพ จิรัฐดา คำสีเขียว คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี</li> </ul>	125
<ul style="list-style-type: none"> <li>● ปัจจัยทางคลินิกที่มีผลต่อการควบคุมระดับ International Normalized Ratio (INR) ณ คลินิกยาต้านการแข็งตัวของเลือด พีรวัฒน์ จินาทองไทย คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี</li> </ul>	127
<ul style="list-style-type: none"> <li>● ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมของสารสกัดเห็ดป่ากินได้ ในจังหวัดอุบลราชธานี สมจินตนา ทวีพานิชย์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี</li> </ul>	129

อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมที่มีผลต่อความแข็งแรงกระแทกของรอยต่อชน  
เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และเหล็กกล้าหล่อ SCW 410

Effect of GMAW Parameters on Impact Strength of SUS 304 Stainless Steel and  
SCW 410 Cast Steel

กลไกร์ นาโควงศ์<sup>1\*</sup> สุรียา ประสมทอง<sup>2</sup> กิตติพงษ์ กิมะพงศ์<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี

\*E-mail: kon\_na2526@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมที่มีผลต่อสมบัติรอยต่อชนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 กับเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 และศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมสามารถทำให้เกิดแนวเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ได้ ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งแรงกระแทกของแนวเชื่อมลดลง แต่ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของโลหะเชื่อมที่เชื่อมโดยอัตราการไหลของแก๊สที่แตกต่างกัน อัตราการไหลที่สูงขึ้นทำให้ค่าความเปราะของโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้น ตัวแปรการเชื่อมที่ให้ความแข็งแรงกระแทกสูงสุด  $295 \text{ J/cm}^2$  คือ กระแสไฟเชื่อม 180 A ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 mm/min และอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 L/min

คำสำคัญ : รอยต่อวัสดุต่างชนิด เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าหล่อ ความแข็งแรงกระแทก

Abstract

This article aimed to study the effect of gas metal arc welding parameters on SUS 304 stainless steel and SCW 410 cast steel butt joint properties in addition to investigating the microstructure of joints. The results are summarized as follows. Gas metal arc welding produces sound welds of SUS 304 stainless steel and SCW 410 cast steel. Increase in the welding speed resulted in a decrease in weld impact strength but did not change the hardness of the welds produced by different gas flow rates. Increase in gas flow rate increased weld brittleness. This study found the optimal welding parameters produced impact strength of  $295 \text{ J/cm}^2$ . These parameters were a welding current of 180 A, a welding speed of 200 mm/min and a gas flow rate of 10 L/min.

คำสำคัญ : dissimilar materials joint, stainless steel, cast steel, impact strength

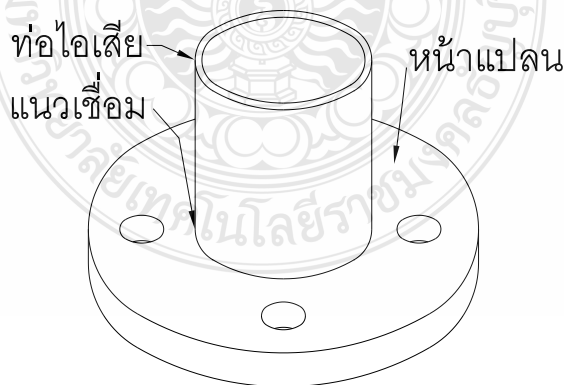
## บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์มีการแข่งขันทางการตลาดอย่างสูง บริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนวิธีการต่างๆ เพื่อลดต้นทุนในการผลิตสินค้า โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสินค้า เช่น วัสดุดิบหรือวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น ท่อไอเสียก็เป็นชิ้นส่วนสำคัญในโครงสร้างรถยนต์ที่มีความจำเป็นในการลดต้นทุนการผลิต โดยการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิต ซึ่งวัสดุเดิมจะเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม ในอดีตที่ผ่านมาเหล็กกล้าไร้สนิมที่นำมาใช้ในการผลิตท่อไอเสีย เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) เนื่องจากสมบัติเด่นหลายประการ สามารถใช้ได้ทั้งในสภาวะอุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง มีความสามารถในการเชื่อมดีกว่าเหล็กผสมสูงทั่วไป เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกสามารถทำการเชื่อมได้ง่ายที่สุด และเชื่อมได้โดยไม่ต้องให้ความร้อนก่อนทำการเชื่อม หรือให้ความร้อนภายหลังการทำเชื่อม แต่สิ่งที่ต้องระวัง คือ ผลของความร้อนที่สูงเกินไปทำให้เกรนหยาบและไม่ทนต่อแรงกระแทก นอกจากนี้อุณหภูมิสูงทำให้ชิ้นงานเชื่อมบิดเบี้ยวได้ [1]

วิธีการเชื่อมต่อท่อไอเสียจะใช้กระบวนการเชื่อมไฟฟ้า กระบวนการเชื่อมด้วยไฟฟ้า (Arc Welding Process) เป็นกระบวนการหนึ่งที่ทำให้โลหะหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน โดยอาศัยความร้อนที่เกิดจากการอาร์กทางไฟฟ้าระหว่างชิ้นงานโลหะและลวดเชื่อม ในทางอุตสาหกรรมนิยมนำมาใช้ในการต่อวัสดุ เนื่องจากสามารถเชื่อมต่อวัสดุได้ทั้ง

โลหะที่อยู่ในกลุ่มเหล็กและนอกกลุ่มเหล็ก กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าที่นิยมใช้คือ การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding; GMAW) เป็นเทคโนโลยีการเชื่อมชนิดใหม่ ที่ถูกนำมาใช้แทนกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ เนื่องจาก

สามารถทำการเชื่อมได้รวดเร็วและต่อเนื่อง ประหยัดเวลาในการทำความสะอาดเนื่องจากไม่มีสแลกปกคลุมแนวเชื่อม [2] ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าที่ใช้ลวดเชื่อมเส้นเปลือยที่มีลักษณะเป็นลวดเส้นตัน (Solid Wire) มาทำการอาร์กกับโลหะชิ้นงาน ความร้อนที่เกิดจากการอาร์กทำการหลอมละลายลวดเชื่อมและโลหะชิ้นงานเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน และใช้แก๊สคลุมบริเวณโลหะหลอมละลายของงานเชื่อม เพื่อป้องกันไม่ให้ออกซิเจนจากบรรยากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะหลอมละลาย การเชื่อมนี้ได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอย่างแพร่หลาย [3]



ภาพที่ 1. ส่วนประกอบท่อไอเสีย

ภาพที่ 1 แสดงส่วนประกอบหลักของท่อไอเสีย ซึ่งประกอบด้วยหน้าแปลนที่มีหน้าที่ในการจับยึดเข้ากับตัวเครื่องยนต์ที่เป็นโลหะแผ่นหนาประมาณ 5-10 มม. และส่วนท่อไอเสียที่มีรูปร่างเป็นท่อผนังบางความหนาประมาณ 2 มม. ในอุตสาหกรรมปัจจุบันของผู้ผลิตรถยนต์ในประเทศไทยพบว่า ส่วนประกอบทั้งหมดนั้นใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 304 เป็นวัสดุหลักในการผลิตตั้งได้กล่าวมาแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 304 นั้นมีข้อเสีย คือ มีราคาที่สูงทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้จากการร่วมกันพิจารณาระหว่างคณะผู้วิจัยและบริษัทผลิตชิ้นส่วนรถยนต์แห่งหนึ่งได้มีความเห็นร่วมกันในการคิดค้นหาวิธีการในการลดค่าใช้จ่ายการผลิตท่อไอเสียขึ้น โดยมีสมมติฐานการลดค่าใช้จ่ายคือ ค่าใช้จ่ายในการผลิตลดลงและคุณภาพของรอยต่อต้องเท่ากับหรือสูงกว่ารอยต่อที่ใช้อยู่ ณ ปัจจุบัน คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำหน้าแปลนจากเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 304 เป็นเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ซึ่งเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 เป็นเหล็กที่มีโครงสร้างพื้นเป็นออสเทนไนต์คล้ายคลึงกับโครงสร้างออสเทนไนต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 304 ซึ่งคาดว่าสมบัติทางกายภาพที่คล้ายกันจะทำให้ได้โลหะเชื่อมที่มีคุณภาพใกล้เคียงกันได้ [4] ดังนั้นเพื่อลดต้นทุนในการผลิตท่อไอเสียรถยนต์ คณะผู้วิจัยจึงเสนอแนวคิดในการทดแทนชิ้นส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 304 ในระบบท่อไอเสียของรถยนต์ด้วยเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 และทำการเชื่อมโลหะทั้งสองเข้าด้วยกันด้วยวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding; GMAW) เพื่อศึกษาตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อคุณภาพรอยเชื่อม และมีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม ซึ่งหากสามารถได้แนวเชื่อมที่มีคุณภาพที่ยอมรับได้ จะสามารถเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุทดแทนเพื่อลดต้นทุนในการผลิต

#### วัตถุประสงค์

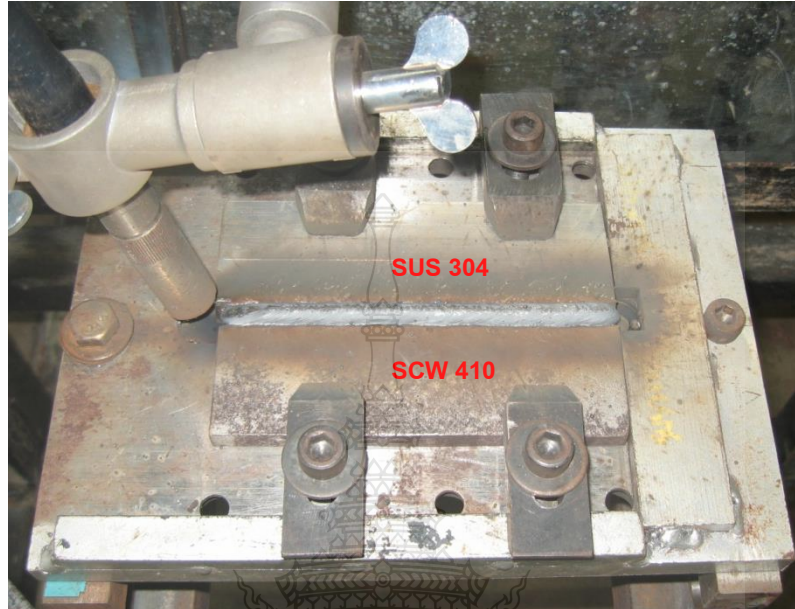
1. เพื่อศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมที่มีผลต่อสมบัติรอยต่อชนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 กับเหล็กกล้าหล่อ SCW 410
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ

#### อุปกรณ์และวิธีการ

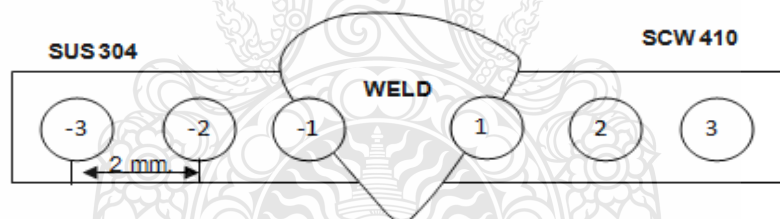
ในการทดลองใช้การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมในการเชื่อมรอยต่อชนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 กับเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ตัวแปรในการทดลองประกอบด้วยกระแสไฟเชื่อม คือ 180 A ความเร็วเดินแนวเชื่อม คือ 200 300 และ 400 mm/min อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 15 และ 20 L/min แก๊สปกคลุม คือ อาร์โกซิล 64 วัสดุที่ใช้ในการศึกษาใช้โลหะ 2 ชนิด คือ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก SUS 304 และเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ความหนา 10 มม. โดยนำวัสดุทั้งสองชนิดมาตัดให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีขนาดเท่ากัน คือ  $50 \times 150 \times 10 \text{ mm}^3$  ทำการบากหน้างานร่องวีมรวม 60 องศา

ลวดเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อม คือ ลวดเชื่อมสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม AWS.A5.9 308LSi: MIG ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 mm อัตราการป้อนลวดที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 7 m/min และระยะของปลายท่อนำลวดถึงปลายลวดเชื่อม 10 mm ชิ้นงานถูกจับยึดให้แน่นด้วยอุปกรณ์จับยึดดังแสดงในภาพที่ 2 แล้วทำการเชื่อมเดินแนวชิ้นงานด้วยเทคนิคการเดินลวดเชื่อมแบบแบ็คแฮนด์ ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมที่ตัวแปรการเชื่อมต่างๆ ถูกนำไปทำการทดสอบสมบัติทางกล คือ ความต้านทานแรงกระแทกแบบชาร์ปีที่มีการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E23 [5]

ความต้านทานแรงกระแทกแบบชาร์ปีใช้หน่วยความต้านทานแรงกระแทกคือ  $J/cm^2$  ความแข็งแบบรีอคเวลโดยมีจุดที่ทำการตรวจสอบดังแสดงในภาพที่ 3 และทำการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่ตำแหน่งต่างๆ

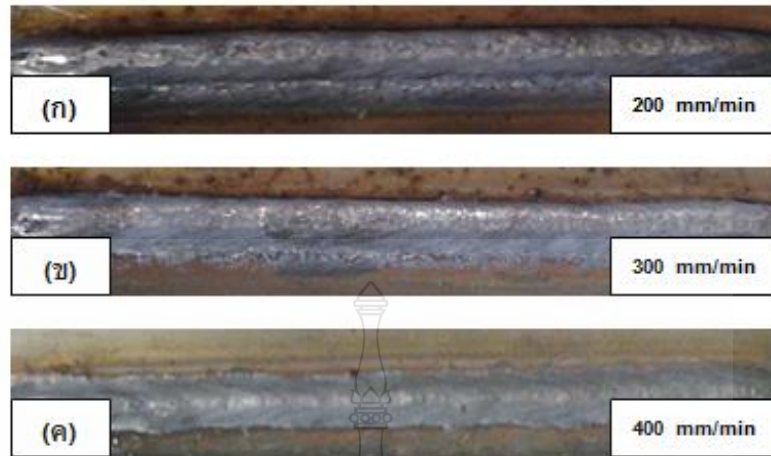


ภาพที่ 2. การจับยึดชิ้นงานในการเชื่อม



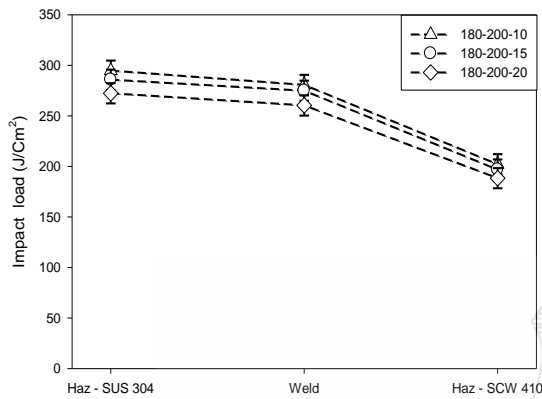
ภาพที่ 3. ตำแหน่งการทดสอบความแข็งรีอคเวล

## ผลการวิจัย

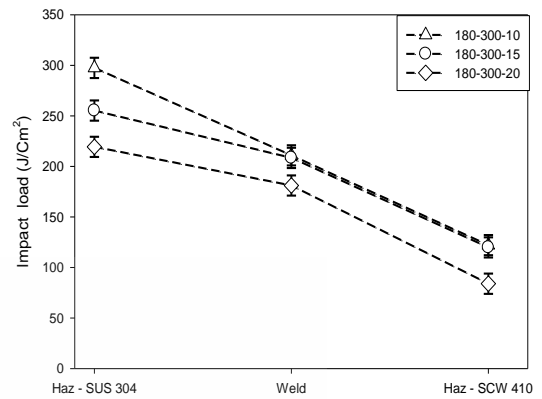


ภาพที่ 4. ผิวหน้าแนวเชื่อม ที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 180A ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ

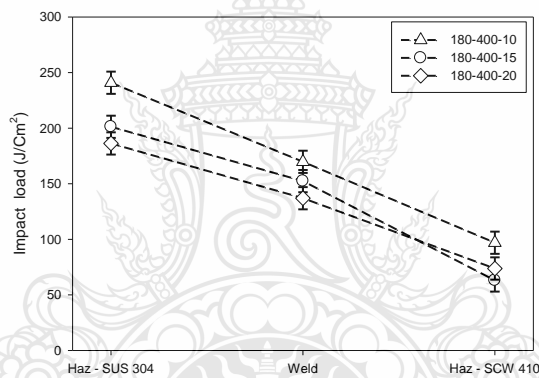
ภาพที่ 4 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 180 A ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความนูนของแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น และความกว้างของแนวเชื่อมมีค่าลดลง การเกิดรอยแหงนขอบแนว (Undercut) ที่เกิดบนผิวแนวเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำ คือ 200 mm/min นั้นหายไป การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของแนวเชื่อมนี้สัมพันธ์กับสมการทางความร้อนของการเชื่อมโดยตรง ที่แสดงไว้ว่า ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความร้อนในแนวเชื่อมมีค่าลดลง ค่าความร้อนที่ลดลงทำให้การแผ่กระจายความร้อนไปบริเวณโดยรอบของแนวเชื่อมมีค่าน้อย และทำให้โลหะหลอมเหลวไม่สามารถกระจายออกไปบริเวณด้านข้างได้ แนวเชื่อมจึงมีความนูนสูงกว่าและความกว้างของแนวเชื่อมมีค่ามากกว่า [6]



ความเร็วเดิน (ก)แนวเชื่อม 200 mm/min



(ข)ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 mm/min



ความเร็วเดิน (ค)แนวเชื่อม 400 mm/min

ภาพที่ 5. ความแข็งแรงกระแทกของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ

ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 180 A อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10-20 L/min ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200-400 mm/min ถูกนำมาทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงกระแทกแบบชาร์ปีเพื่อหาค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของรอยต่อได้ผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 5

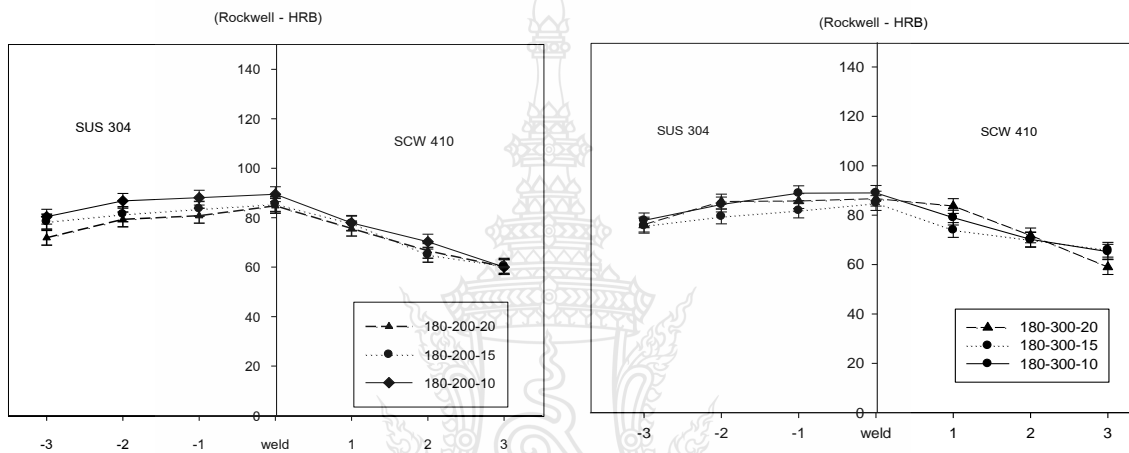
ความแข็งแรงกระแทกหรือค่าการดูดซับพลังงานของรอยเชื่อมซึ่งแสดงค่าความเหนียว (Toughness) หรือเปราะ (Brittle) ของเนื้อโลหะ พบว่า ความแข็งแรงกระแทกสูงสุดของรอยต่อทุกๆ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม และความเร็วเดินแนวเชื่อม ที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 180 A บริเวณที่มีความแข็งแรงสูงสุด คือ บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) ของแนวเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และมีค่าความแข็งแรงต่ำสุดก็คือ บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410

ปริมาณอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมส่งผลต่อความเหนียวของโลหะเชื่อม รอยต่อที่ได้รับปริมาณแก๊สปกคลุมที่ปริมาณสูงกว่าแสดงค่าความแข็งแรงกระแทก หรือความเหนียวต่ำกว่า (ความเปราะสูงกว่า) รอยต่อที่ได้รับปริมาณแก๊สปกคลุมที่ปริมาณต่ำกว่า



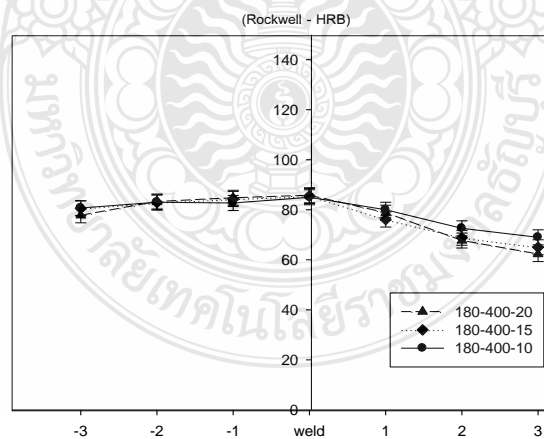
นอกจากนั้นความเร็วเดินแนวเชื่อมที่มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเปราะของรอยต่อเชื่อม ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุดที่ได้จากการเชื่อมพบว่ามีค่าเท่ากับ  $295 \text{ J/cm}^2$  ที่กระแสไฟเชื่อม 180 A อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม  $10 \text{ L/min}$  และความเร็วเดินแนวเชื่อม  $200 \text{ mm/min}$

ภาพที่ 6 แสดงค่าความแข็งของรอยต่อที่ทำการวัดในตำแหน่งกึ่งกลางความหนาของแผ่น และมีตำแหน่งตั้งแต่มุมเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ลากผ่านโลหะเชื่อมไปที่ด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่าค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระพร้อนของทั้งสองด้านของแนวเชื่อม และโลหะเชื่อมทุกสภาวะนั้นมีความแข็งสูงกว่าโลหะในการทดลองทั้งสองชนิด



(ก) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 mm/min

(ข) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 mm/min



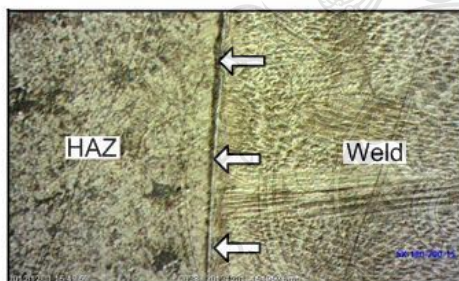
(ค) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 mm/min

ภาพที่ 6. ความแข็งรอยต่อชนที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 180 A และความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ

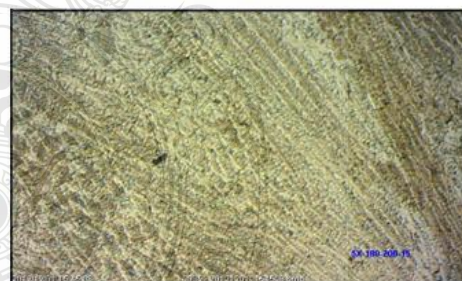
ค่าความแข็งมีแนวโน้มคล้ายค่าความแข็งแรงกระแทก กล่าวคือ บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีค่าความแข็งสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะเชื่อม และพื้นที่ที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ที่มีค่าต่ำสุด อัตราการไหลของแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมมีผลตรงกันข้ามกับผลการทดลอง การทดสอบความแข็งดังแสดงในภาพที่ 6 (ก) และ (ข) อัตราการไหลของแก๊สปกคลุมที่มีค่าสูงส่งผลทำให้ค่าความแข็งของโลหะเชื่อมและพื้นที่ที่กระทบร้อนทั้งสองด้านของแนวเชื่อมมีค่าสูงขึ้น ค่าความแข็งของโลหะเชื่อมที่เชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 และ 300 mm/min อัตราการไหลของแก๊สปกคลุมตั้งแต่ 10 ถึง 20 L/min แสดงค่าความแข็งที่แตกต่างกันประมาณร้อยละ 9 และ 4 ตามลำดับ ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของแก๊สปกคลุมเป็นสาเหตุให้แนวเชื่อมที่ใช้อัตราไหลของแก๊สปกคลุมสูงนั้นมีความเปราะเพิ่มขึ้นและส่งผลทำให้ความเปราะของโลหะเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม อัตราการไหลของแก๊สปกคลุมที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมมีค่าสูง คือ 400 mm/min ดังแสดงในภาพที่ 6 (ค) ที่แสดงว่า ค่าความแข็งของโลหะเชื่อม หรือพื้นที่ที่กระทบร้อนมีความแตกต่างกันน้อยมาก

ภาพที่ 7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 180 A ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 mm/min และอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 L/min ที่แสดงค่าความแข็งแรงกระแทก  $295 \text{ J/cm}^2$  โครงสร้างจุลภาคของพื้นที่ที่กระทบร้อนด้านรอยต่อด้านเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 แสดงในภาพที่ 7 (ก) เกรนมีความกลมมนและเป็นระเบียบมากกว่าเม็ดเกรนของโลหะหลัก SCW 410 เม็ดเกรนมีรูปร่างสมมาตรจนกระทั่งเข้าใกล้เขตการหลอมเหลวของโลหะเชื่อมดังแสดงด้วยลูกศรสีขาว เม็ดเกรนจะมีลักษณะเรียวยาวมีทิศทางเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลว การเกิดเม็ดเกรนที่ยาวมีทิศทางเข้าสู่เขตพื้นที่หลอมเหลวจากซ้ายไปขวา เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนที่รวดเร็วของโลหะหลอมเหลวในโลหะเชื่อมออกสู่บรรยากาศ

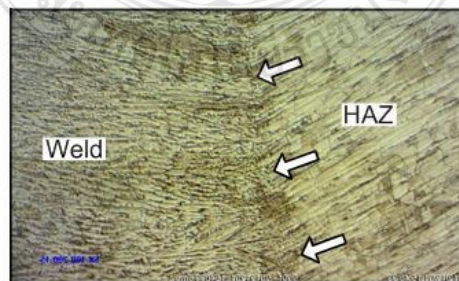
(ก) SCW 410 HAZ + Weld



(ข) Weld



(ค) Weld + SUS 304 HAZ



ภาพที่ 7. โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 180 A ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 mm/min และอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 L/min

ขณะที่ด้านซ้ายของเส้นเขตการหลอมเหลว คือพื้นที่ของโลหะเชื่อมที่ประกอบด้วยเดนไดรท์ของโลหะเชื่อมที่มีความละเอียดมากกว่า และเดนไดรท์ที่มีทิศทางเข้าสู่กึ่งกลางของแนวเชื่อมที่มีความเอียงจากบนลงล่าง ดังแสดงในภาพที่ 7 (ข) และด้านซ้ายของภาพที่ 7 (ค) ที่มีลักษณะของเดนไดรท์ละเอียดที่มีทิศทางลากการเรียงตัวเข้าสู่กึ่งกลางจากขวาไปซ้ายของโลหะเชื่อม ด้านขวาของเขตการหลอมเหลวของโลหะเชื่อมดังกล่าวแสดงด้วยลูกศรสีขาวเม็ดเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบแต่เม็ดเกรนของโลหะไม่ได้มีความกลมมนและสมมาตรเหมือนดังที่เกิดในพื้นที่ที่กระแทกของเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 นอกจากนี้ไม่พบจุดบกพร่องใดๆ บนรอยเชื่อมที่ตรวจสอบ การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นทำให้ทราบเหตุผลที่บริเวณพื้นที่ที่กระแทกของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 พื้นที่ที่กระแทกของเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 และบริเวณโลหะเชื่อมจึงมีค่าความแข็งแรงกระแทกแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเพื่อความเข้าใจที่ถูกต้องต้องทำการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างจุลภาคเชิงปริมาณต่อไป เพื่อที่สามารถเปรียบเทียบความเหมือนและความแตกต่างของโครงสร้างได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

### สรุปและอภิปรายผล

การวิจัยได้ทำการเชื่อมรอยต่อชนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 กับเหล็กกล้าหล่อ SCW 410 ด้วยการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม โดยทำการศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมที่ประกอบด้วย กระแสไฟเชื่อม ความเร็วเดินแนวเชื่อม และอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม ที่มีผลต่อความแข็งแรงกระแทก ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้

- 1) ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งแรงกระแทกของแนวเชื่อมลดลง
  - 2) ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งแรงกระแทกของแนวเชื่อมลดลง แต่ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของโลหะเชื่อมที่เชื่อมโดยอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมที่แตกต่าง
  - 3) อัตราการไหลของแก๊สปกคลุมที่สูงขึ้นทำให้ค่าความเปราะของโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้น
- ตัวแปรการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุด  $295 \text{ J/cm}^2$  คือ กระแสไฟเชื่อม 180 A ความเร็วเดินแนวเชื่อม 200 mm/min และอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 10 L/min

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Khan, I. 2007. **Welding Science and Technology**. New Delhi: New Age International (P) Limited, Publishes.
- [2] ประวัติ เต็มรัตน์ และ บวรโชค ผู้พัฒน์, 2545. **อิทธิพลของความกว้างพัลส์ต่อรูปร่างแนวเชื่อมของการเชื่อมอาร์ก โลหะแก๊สคลุมด้วยกระแสพัลส์**, วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 2, 6-7 สิงหาคม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 170-172.
- [3] คະเนย์ วรณโฑ. 2539. **การเชื่อมโลหะในระบบ GMAW**. กรุงเทพฯ: บริษัท ที พี พรินท์ จำกัด.
- [4] Celik, A. and Alsaran, A. 1999. "Mechanical and Structural Properties of Similar and Dissimilar Steel Joints." **MATERIALS CHARACTERIZATION** 43, 311–318.
- [5] ASTM Standard. 1992. **ASTM E23-2: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of metallic Materials**. Philadelphia: ASTM.
- [6] Weman, K. 2003. **Welding Process Handbook**. England: Woodhead Publishing Limited.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายกลไกร นาโควงศ์
วัน เดือน ปีเกิด	10 สิงหาคม 2526
ที่อยู่	31 หมู่ 12 ตำบลอุ่มจาน อำเภอกุสุมาลย์ จังหวัดสกลนคร 47230
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ประสบการณ์การทำงาน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
พ.ศ. 2551-ปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

