



โครงการวิจัย เรื่อง

การเชื่อมแก๊สเฉื่อยปกคลุมรอยต่อเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิม  
ในงานโครงสร้างอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล  
Metal Inert Gas Welding of Carbon Steel and Stainless Steel Joint  
in Sugar Production Industry

โดย

พ.อ.อ.ศักดิ์ชัย	จันทศรี
ผศ.ดร.กิตติพงษ์	กิมะพงศ์
ผศ.สุรัตน์	ตรัยวนพงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
งบประมาณประจำปี 2556

ผู้วิจัย : พ.อ.อ.ศักดิ์ชัยจันทศรี  
ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์  
ผศ.สุรัตน์ ตรียวนพงศ์

ชื่องานวิจัย : การเชื่อมแกสเนื้อยปกคลุมรอยต่อเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิมในงาน  
โครงสร้างอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล

หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

### บทคัดย่อ

รอยต่อเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิมมีปริมาณการใช้งานเพิ่มขึ้นในงานอุตสาหกรรมเนื่องจากข้อดีของโลหะทั้งสองทำให้สามารถเพิ่มอายุการใช้งานของโครงสร้างสำคัญได้คืออย่างไรก็ตามการเชื่อมรอยต่อโลหะทั้งสองทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากความแตกต่างของสมบัติวัสดุทั้งสองชนิดทำให้เกิดจุดบกพร่องต่างๆ ในโลหะเชื่อมด้วยเหตุนี้การเชื่อมที่ทำให้เกิดแนวเชื่อมสมบูรณ์และสมบัติที่ดีควรมีการศึกษาต่อไป งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการเชื่อมรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI430 โดยการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุมและศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อ

แผ่นรีดรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI430 ถูกวางเป็นรอยต่อชนในอุปกรณ์จับยึดและเชื่อมด้วยการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุมโดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม เช่น กระแสไฟเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อม และชนิดของแก๊ส รอยต่อเชื่อมถูกนำไปทำการเตรียมขึ้นทดสอบเพื่อทดสอบสมบัติรอยต่อ เช่น ความแข็งแรง (ASTM E8) ความแข็ง (ASTM E92) และโครงสร้างจุลภาค

ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้ ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมที่ให้ค่าความแข็งแรงถึง 448 MPa คือ กระแสไฟเชื่อม 110 แอมแปร์ ความเร็วเดินเชื่อม 400 มิลลิเมตรต่ออนาที และแก๊สผสม 80%Ar + 20%CO<sub>2</sub> การเพิ่มกระแสและความเร็วเดินเชื่อมส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงถึงเพิ่มขึ้นและลดลงตามลำดับ ปริมาณแก๊สผสมที่เพิ่มขึ้นทำให้แนวเชื่อมมีคุณภาพสูงและเพิ่มค่าความแข็งแรงถึงของรอยต่อ การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมพบเกรนคอลลัมนาในโลหะเชื่อมและเกรนหยาบในพื้นที่ที่กระทบร้อนนอกจากนั้นพบเฟสตกผลึกความแข็งสูงที่ขอบเกรนของโลหะเชื่อมและพื้นที่กระทบร้อน

**คำสำคัญ :** เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าคาร์บอน การเชื่อมมิก พื้นที่กระทบร้อน

Name : FS1.Sakchai Chantasri  
Assist. Prof. Kittipong Kimapong, Ph.D.  
Assist. Prof.Surat Traiwanapong  
Research : Metal Inert Gas Welding of Carbon Steel and Stainless Steel Joint  
Title in Sugar Production Industry  
หน่วยงาน : Department of Industrial Engineering Faculty of Engineering  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi

### Abstract

The application of SS400 carbon steel and AISI430 Ferritic stainless steel joint was increased in industries because the advantage of both metals was able to increase the service life time of the important structures. However, a fusion welding of this joint was difficult because the different of materials properties could produce various defect types in the weld metal. Therefore, a fusion welding process that could produce a sound weld and good joint properties should be optimized. This research aimed to weld a butt joint of SS400 carbon steel and AISI430 ferritic stainless steel using Metal Inert Gas (MIG) welding process and to study the effect of welding parameters on joint properties.

Rolled plates in rectangular shape of SS400 carbon steel and AISI430 ferritic stainless steel were clamped in a jig to be a butt joint and welded the joint using MIG welding. The variation of the welding parameter such as welding current, welding speed and gas type were optimized. The welded joint was prepared and examined for the joint properties such as tensile strength (ASTM E8), hardness (ASTM E92) and microstructure.

The experimental results were concluded as follows. The optimized welding parameter that produced the tensile strength of 448 MPa was the welding current of 110A, the welding speed of 400 mm/min and the mixed gas of 80%Ar + 20%CO<sub>2</sub>. Increase of the welding current and speed affected to increase and decrease the tensile strength of the joint, respectively. Increase of the amount of a mixed gas type produced a better weld quality and increased the tensile strength of the joint. Microstructure investigation of the welded joint showed a columnar grain in the weld metal and a coarse grain in the heat affected zone (HAZ). The unknown hard precipitated phases were also found at the grain boundaries of the weld metal and HAZ.

**Keywords:** stainless steel, carbon steel, metal inert gas welding, heat affected zone

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยประจำปี 2556 ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สามารถดำเนินการ และบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ในการทดลอง ทำให้การทดลองสามารถดำเนินการไปได้อย่างราบรื่น

สุดท้าย คณะผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอน จนทำให้คณะผู้วิจัยมีโอกาสในการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ขอกราบขอบพระคุณทุกๆ ท่านที่มีความเกี่ยวข้องกับการทำงานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งคณะผู้วิจัยไม่ได้เอ่ยนามถึง ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบแต่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ศักดิ์ชัย จันทศรี  
กิตติพงษ์ กิมะพงศ์  
สุรัตน์ ตรัยวนพงศ์



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน SS400	4
2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI430	5
2.3 ลวดเชื่อม MIG	8
2.4 แกสปกคลุม	9
2.5 การเชื่อมอาร์กโลหะแกสคลุม	13
2.6 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา	20
2.7 อิทธิพลของความเร็วและอุณหภูมิที่มีผลต่องานเชื่อม	23
2.8 การทดสอบหาค่าการรับแรงดึง	26
2.9 การทดสอบหาค่าความแข็ง	28
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	37
3.1 วัสดุ	37
3.2 การเชื่อมทดลอง	39
3.3 การทดสอบทางกล	43
3.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา	47
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	51
4.1 อิทธิพลของกระแสเชื่อมต่อสมบัติของแนวเชื่อม	51
4.2 อิทธิพลของแกสปกคลุมต่อสมบัติของแนวเชื่อม	58
4.3 อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมต่อสมบัติของแนวเชื่อม	67
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	77
5.1 สรุปผลการทดลอง	77
5.2 ข้อเสนอแนะ	78
บรรณานุกรม	80
ภาคผนวก	82

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400	4
2.2	สมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400	4
2.3	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI430	6
2.4	สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI430	7
2.5	ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม	9
2.6	อัตราการไหลของแก๊สคลุมและระยะห่างของหัวฉีดที่เหมาะสม	13
2.7	ขนาดน้ำหนักรูที่ใช้กดแต่ละเสก	29
3.1	การออกแบบการทดลอง	42



## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะรอยเชื่อมเหล็กกล้าเมื่อใช้แกสอาร์กอน และแกสอาร์กอนผสมออกซิเจน	11
2.2	ลักษณะรอยเชื่อม และการซีมลิ๊กเมื่อใช้ แกสปกคลุมชนิดต่างๆ	12
2.3	ลักษณะของกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแกสคลุม	13
2.4	การเปรียบเทียบความยาวอาร์กที่แตกต่างกันด้วยเส้นโค้งสมบัติแรงดันและกระแสของเครื่องเชื่อมชนิดแรงดันคงที่	14
2.5	ลักษณะการถ่ายโอนน้ำโลหะทั้ง 4 แบบ	16
2.6	ลักษณะการถ่ายโอนโลหะแบบหยดขนาดใหญ่	17
2.7	การถ่ายโอนโลหะแบบลัดวงจร	18
2.8	ลักษณะกระแสและขั้นตอนการถ่ายโอนโลหะแบบพัลส์	19
2.9	ลักษณะของโครงสร้างจุลภาค	21
2.10	ลักษณะของโครงสร้างมหภาค	23
2.11	ช่วงอุณหภูมิบริเวณแอ่งหลอมละลายกระจายออกไป	23
2.12	การกระจายอุณหภูมิของการเชื่อมงานแผ่นบาง	24
2.13	การกระจายอุณหภูมิของการเชื่อมงานหนา	24
2.14	ลักษณะโครงสร้างแนวเชื่อมเมื่อแข็งตัวหลังจากการหลอมละลาย	25
2.15	แผนภูมิสมดุทธ์ของเหล็ก และเหล็กคาร์ไบด์	25
2.16	ลักษณะขึ้นทสอบภาคตัดวงกลม	26
2.17	ลักษณะขึ้นทสอบภาคตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก	26
2.18	ลักษณะขึ้นทสอบภาคตัดขวางกลมหลังจากขาด	27
2.19	ลักษณะปลายยึดขึ้นทสอบโดยการดึง	28
2.20	เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์	29
2.21	เครื่องทดสอบไมโครฮาร์ดเน็ทวิคเกอร์	30
2.22	ลักษณะการกัดและรอยกัดที่เกิดขึ้นจากหัวกดเพชรรูปทรงพีระมิด	30
3.1	แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน JIS G3101 - SS400	36
3.2	แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI430	37
3.3	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลองด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่น	37
3.4	ลักษณะชิ้นงานทดลองเมื่อตัดเรียบร้อยแล้ว	38
3.5	การเชื่อมยึดชิ้นงานหัวท้ายก่อนทำการเชื่อม	38
3.6	การเตรียมเครื่องเชื่อมสำหรับการทดลอง	39
3.7	ลักษณะเครื่องตัดแกสแบบเส้นตรงขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์	40
3.8	ลักษณะลวดเชื่อมมิก ตามมาตรฐาน AWS A 5.9 ขนาด 1.2 มม.	40
3.9	ลักษณะของถังแกสชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการปกคลุม	41
3.10	ลักษณะการจับยึดชิ้นงาน	41
3.11	ลักษณะเครื่องทดสอบแรงดึง	43
3.12	เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครฮาร์ดเน็ทวิคเกอร์	44

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.13	การตรวจสอบทางกายรูปของแนวเชื่อมก่อนนำไปทดสอบทางกล	44
3.14	ลักษณะการตัดชิ้นงานสำหรับการทดสอบ	45
3.15	ลักษณะตำแหน่งในการกดทดสอบความแข็ง	45
3.16	ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามขนาดสเกลที่กำหนด	46
3.17	ลักษณะการใช้เครื่องกัดชิ้นงานทดสอบแรงดึง	46
3.18	ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึงเมื่อผ่านการกัดด้วยเครื่องจักร	46
3.19	การหล่อเรซินชิ้นงานสำหรับการขัดตรวจสอบโครงสร้าง	47
3.20	ลักษณะของเครื่องขัดผิว	48
3.21	กล้องจุลทรรศน์ และอุปกรณ์บันทึกข้อมูล	48
4.1	การเปรียบเทียบค่าการรับแรงดึงจากปัจจัยด้านกระแสไฟ ที่กระแส 90 – 120 A	50
4.2	การเปรียบเทียบตำแหน่ง และระยะที่ชิ้นงานขาดออกจากกันโดยวัดจากกึ่งกลางแนวเชื่อมที่กระแส 90 – 120 A แกสปกคลุม Ar80% + CO <sub>2</sub> 20%	51
4.3	การเปรียบเทียบค่าความแข็งของแนวเชื่อม (Weld) จากปัจจัยด้านกระแสไฟ ที่กระแส 90 – 120 A แกสปกคลุม Ar80% + CO <sub>2</sub> 20%	52
4.4	การเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระแทกร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 จากปัจจัยด้านกระแสไฟเชื่อม ที่กระแส 90 – 120 A แกสปกคลุม Ar80% + CO <sub>2</sub> 20%	53
4.5	การเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระแทกร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 จากปัจจัยด้านกระแสไฟเชื่อม ที่กระแส 90 – 120 A แกสปกคลุม Ar80% + CO <sub>2</sub> 20%	53
4.6	การเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมและระบุตำแหน่งที่ใช้สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของกระแสเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและต่ำสุด ที่ความเร็ว 400 mm/min	55
4.7	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมที่กระแส 110 A แกสปกคลุม Ar100%	56
4.8	ลักษณะโครงสร้างแนวเชื่อมกับบริเวณพื้นที่กระแทกร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ที่กระแส 110 A แกสปกคลุม Ar100%	56
4.9	ลักษณะโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมกับพื้นที่กระแทกร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ที่กระแส 110 A แกสปกคลุม Ar100%	57
4.10	การเปรียบเทียบขนาดเกรน (Grain Size) ของแนวเชื่อม (Weld) พื้นที่กระแทกร้อน (HAZ) และเนื้อโลหะเชื่อม (Base) ที่กระแส 110 A แกสปกคลุม Ar100%	58
4.11	การเปรียบเทียบค่าการรับแรงดึงสูงสุดจากปัจจัยด้านแกสปกคลุม ที่กระแส 110 A	59
4.12	การเปรียบเทียบตำแหน่งระยะที่ชิ้นงานขาดออกจากกันโดยวัดจากกึ่งกลางแนวเชื่อมตัวแปรการเชื่อมด้านแกสปกคลุม ที่กระแส 110 A	60
4.13	การเปรียบเทียบค่าความแข็งของแนวเชื่อมจากปัจจัยด้านแกสปกคลุมที่กระแส 110 A	60



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.14	การเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ตัวแปรการเชื่อมด้านแกสปกคลุม ที่กระแส 110 A	61
4.15	การเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ตัวแปรการเชื่อมด้านแกสปกคลุม ที่กระแส 110 A	61
4.16	การเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างมหภาคแนวเชื่อมและตำแหน่งที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบที่ตัวแปรการเชื่อมด้านแกสปกคลุม ที่กระแส 110 A ความเร็ว 400 mm/min	63
4.17	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม ที่แกสปกคลุม Ar80% + CO <sub>2</sub> 20% กระแส 110 A	64
4.18	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมกับพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้ AISI 430 ที่กระแส 110 A แกสปกคลุม Ar80% + CO <sub>2</sub> 20%	65
4.19	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมกับพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอนที่แกสปกคลุม Ar80% + CO <sub>2</sub> 20% กระแส 110 A	65
4.20	การเปรียบเทียบขนาดเกรน (Grain Size) ของแนวเชื่อม(Weld) พื้นที่กระทบร้อน (HAZ) และเนื้อโลหะเชื่อม (Base) ที่แกสปกคลุม Ar80% + CO <sub>2</sub> 20% กระแส 110 A	66
4.21	การเปรียบเทียบค่าการรับแรงดึงจากปัจจัยด้านความเร็วในการเชื่อม กับชนิดของแกสปกคลุมแนวเชื่อม ที่กระแส 110 A	67
4.22	การเปรียบเทียบค่าการรับแรงดึงจากปัจจัยการเชื่อมด้านความเร็วในการเชื่อม กับกระแสเชื่อมที่แกสปกคลุม Ar80% + CO <sub>2</sub> 20%	68
4.23	การเปรียบเทียบตำแหน่งระยะที่ชิ้นงานขาดออกจากกันโดยวัดจากกึ่งกลางแนวเชื่อมที่ตัวแปรความเร็วในการเชื่อม กระแส 110 A	69
4.24	การเปรียบเทียบค่าความแข็งของแนวเชื่อม (Weld) จากปัจจัยด้านความเร็วในการเชื่อม กับแกสปกคลุมแนวเชื่อม ที่กระแส 110 A	70
4.25	การเปรียบเทียบค่าความแข็งของแนวเชื่อม (Weld) จากตัวแปรการเชื่อมด้านความเร็วในการเชื่อมกับกระแสเชื่อม ที่แกสปกคลุม Ar80% + CO <sub>2</sub> 20%	70
4.26	การเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 จากปัจจัยการเชื่อมด้านความเร็ว แกสปกคลุม Ar80% + CO <sub>2</sub> 20%	71
4.27	การเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 จากปัจจัยการเชื่อมด้านความเร็ว แกสปกคลุม Ar80% + CO <sub>2</sub> 20%	71
4.28	การเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างมหภาคแนวเชื่อม และตำแหน่งวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่ตัวแปรการเชื่อมด้านความเร็วในการเชื่อมที่แกสปกคลุม Ar80%+CO <sub>2</sub> 20% กระแส 110 A	73
4.29	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมที่ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาที แกสปกคลุม CO <sub>2</sub> 100% กระแส 110 A	74

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.30	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมกับพื้นที่กระทบด้านเหล็กกล้าไร้ AISI 430 ที่กระแสน้ำ 110 A แกสปกคลุม CO <sub>2</sub> 100%	74
4.31	ลักษณะโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมกับพื้นที่กระทบด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ที่กระแสน้ำ 110 A ความเร็ว 400 มม./นาที่ แกสปกคลุม CO <sub>2</sub> 100%	75
4.32	การเปรียบเทียบขนาดเกรน (Grain Size) ของแนวเชื่อม(Weld) พื้นที่กระทบร้อน (HAZ) และเนื้อโลหะเชื่อม (Base) ที่ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาที่ แกสปกคลุมCO <sub>2</sub> 100% กระแสน้ำ110A	76



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมการผลิตในปัจจุบันมีการนำโลหะหลายชนิดเข้ามาเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างเพื่อต้องการนำข้อดีของโลหะแต่ละชนิดมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และทำให้โครงสร้างที่มีความยืดหยุ่น สามารถรับแรงที่กระทำที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ [1] การนำเอาโครงสร้างที่ประกอบด้วยโลหะต่างชนิดไปใช้งานจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อให้เกิดความแข็งแรง การเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดสามารถทำได้ด้วยวิธีการหลายรูปแบบ เช่น การเชื่อมด้วยวิธีทางกล (Mechanical Joining) การติดยึดด้วยกาว (Adhesive) หรือการเชื่อม (Welding) เป็นต้น อย่างไรก็ตามในงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปโดยเฉพาะอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์พบว่าการเชื่อมเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดมากที่สุด โดยกรรมวิธีในการเชื่อมที่นิยมนำมาใช้คือการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding) การเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas) หรือการเชื่อมมิก (Metal Inert Gas) เป็นต้น [2]

อย่างไรก็ตามการเชื่อมวัสดุต่างชนิดนั้นเกิดขึ้นได้ค่อนข้างยากเนื่องจากวัสดุทั้งสองนั้นมีสมบัติทางกล ทางกายภาพ และทางเคมีที่แตกต่างกันส่งผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ขึ้นในเวลาทำการเชื่อม เช่น การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Expansion) ที่แตกต่างกันทำให้ยากลำบากในการควบคุมรูปร่างของชิ้นงาน จุดหลอมเหลว (Melting Temperature) ที่แตกต่างกันทำให้ความสม่ำเสมอในการหลอมละลายและการควบคุมบ่อหลอมเหลวทำได้ยาก และการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ทำให้เมื่อรอยต่อวัสดุต่างชนิดเกิดการเย็นตัว (Cooling) ลงสู่อุณหภูมิห้องทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานได้ ด้วยเหตุนี้การเลือกวิธีการเชื่อมจึงต้องพิจารณาด้วยความละเอียดเพิ่มขึ้น [1] ในอุตสาหกรรมการเกษตรในประเทศไทย เช่น ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลมีการนำวัสดุต่างชนิดเข้ามาใช้งานเพิ่มมากขึ้นเพื่อเป็นการลดราคาค่าใช้จ่าย และเหตุผลทางด้านการออกแบบทางวิศวกรรมหนึ่งในรอยต่อของวัสดุต่างชนิดที่นิยมใช้ คือ รอยต่อระหว่างเหล็กโครงสร้างและเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากต้องการความสามารถในการป้องกันการเกิดการกัดกร่อนของโลหะที่ใช้เมื่อสัมผัสกับผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล แต่หากจะใช้ทุกชิ้นส่วนเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งหมด โดยเฉพาะบริเวณโครงสร้างอาจเกิดความไม่เหมาะสมในการออกแบบได้

การเชื่อมรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิมในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลอาจแบ่งออกได้ 2 กลุ่มใหญ่ คือ การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW) และการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุม (Gas Metal Arc Welding: GMAW) แต่เนื่องจากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์นั้นมีกระบวนการเชื่อมที่ยุ่งยากกว่าด้วยเหตุนี้การเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุมจึงมีความนิยมนำมาใช้งานมากกว่า การเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุมเป็นหนึ่งในกรรมวิธีการเชื่อมที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ที่มีลักษณะเด่น คือ ถูกนำมาใช้แทนกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ซึ่งสามารถทำการเชื่อมได้รวดเร็วและต่อเนื่องประหยัดเวลาในการทำความสะอาดเพราะไม่มีแอสลคปกคลุมแนวเชื่อม [3] และเป็นกระบวนการเชื่อม

ที่มีคุณภาพสูง นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เพราะแนวเชื่อมมีความแข็งแรง เกิดข้อบกพร่องในแนวเชื่อม น้อย เมื่อใช้กระบวนการเชื่อมนี้แล้วมีผลต่อสมบัติของชิ้นงาน ต่อรอย และโครงสร้างของแนวเชื่อม

อย่างไรก็ตามการศึกษาผลกระทบเกี่ยวกับตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของโลหะเชื่อมของรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล นั้นมีผลการทดลองที่ผ่านการนำเสนอในปริมาณน้อยมาก ด้วยเหตุนี้หากมีการศึกษาเพื่อหาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมต่างๆที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมจะทำให้เกิดประโยชน์ต่องานอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคตได้เป็นอย่างดี คณะผู้วิจัยจึงมีจุดประสงค์ในการประยุกต์การเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (GMAW) ในการเชื่อมรอยต่อเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเพอร์ริติก AISI430 และทำการศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงของรอยต่อรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิม 430

1.2.2 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิม 430

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 วัสดุที่ใช้ คือ เหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และ เหล็กกล้าไร้สนิมเพอร์ริติก AISI430 หนา 3 มิลลิเมตร เชื่อมในตำแหน่งท่าราบ

1.3.2 ลวดเชื่อม ตามมาตรฐาน AWS A5.9 : ER430

1.3.3 ใช้กระบวนการเชื่อมมิก (MIG) กระแส DC เชื่อมชิ้นงานทดลอง โดยประยุกต์ให้หัวเชื่อม MIG ประกอบเข้ากับตัวตัดแก๊สแบบเส้นตรงเพื่อให้เกิดเป็นการเชื่อมแบบอัตโนมัติ (Auto)

1.3.4 ตัวแปรในการเชื่อม 3 ตัวแปร คือ กระแสไฟ , แก๊สปกคลุม และ ความเร็วหัวเชื่อม

1.3.5 กระแสเชื่อมใช้ 4 ระดับ คือ 90 , 100 , 110 และ 120 A

1.3.6 ใช้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม 3 ชนิด คือ Ar80% + CO<sub>2</sub> 20% , Ar100% และ CO<sub>2</sub>100%

1.3.7 ความเร็วในการเชื่อม 3 ระดับ คือ 350 , 400 และ 450 มม./นาที

1.3.8 มุมหัวเชื่อม 85 องศา

1.3.9 การเย็นตัวของชิ้นงานปล่อยให้เย็นตัวในอากาศหลังเชื่อมเสร็จ

1.3.10 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ตามมาตรฐาน ASTM E430

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ผลสำเร็จที่เป็นองค์ความรู้ หรือรูปแบบ หรือวิธีการในการออกแบบตัวแปรการเชื่อมมิก วัสดุต่างชนิด เพื่อทำให้เกิดค่าความแข็งแรงสูงสุด และคุณภาพแนวเชื่อมที่ดีที่สุด ที่จะนำไปสู่การวิจัยในระยะต่อไป

1.4.2 ผลสำเร็จของงานวิจัยนี้เป็นของใหม่และมีความแตกต่างจากงานที่เคยมีการวิจัยที่ผ่านมา ในการวิจัยกับวัสดุต่างชนิดที่มีการใช้งานจริงในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ในประเทศไทย ซึ่งในรายงานวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมานั้นได้ทำการวิจัยเฉพาะวัสดุหลักทั่วไปที่ไม่ใช่การเชื่อมด้านทานแบบจุดระหว่างวัสดุที่แตกต่างกัน

1.4.3 ผลสำเร็จที่ได้นี้อาจจะถูกนำไปต่อยอดการวิจัยต่อไปถึงเรื่องของ ลักษณะความร้อนที่เกิดขึ้นที่ส่งผลต่อสมบัติของรอยต่อ สมบัติของรอยต่อในความสามารถในการรับแรงรูปแบบต่างๆ หรือการคำนวณหาอายุการใช้งานของรอยต่อที่มีผลจากสภาพการใช้งานต่างๆ ที่พบในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ และชีวิตประจำวันต่อไป



## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองจำเป็นต้องนำความรู้จากหลาย ๆ ส่วนที่เกี่ยวข้องใช้ในกระบวนการวิจัย ซึ่งจำเป็นจะมีความรู้ในเรื่องต่าง ๆ เหล่านี้เพื่อที่จะทำให้การทดลอง และผลการทดลองมีความถูกต้องน่าเชื่อถือ ซึ่งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการวิจัยในครั้งนี้มีดังต่อไปนี้

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ใช้วัสดุ 2 ชนิด คือ เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI430 ซึ่งมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมการผลิต โดยเหล็กกล้าคาร์บอนจะนิยมใช้ในการทำโครงสร้างทั่วไป ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมจะเป็นวัสดุที่มีความสำคัญในการผลิตสำหรับงานที่ต้องการป้องกันการกัดกร่อนซึ่งปัจจุบันนำมาใช้เป็นจำนวนมาก โดยสมบัติและส่วนต่าง ๆ ของวัสดุที่ใช้มีดังนี้

### 2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน SS400 (SS400 Carbon Steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ที่ใช้ในการทดลอง เป็นเหล็กกล้าชนิด คาร์บอนต่ำ เป็นเหล็กแผ่นรีดร้อน มีส่วนผสมทางเคมี คือ 0.13 – 0.18% C , 0.15 – 0.35%Si , 0.5 – 0.7%Mn , 0.05% S ใช้สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป มีสมบัติในการเชื่อมที่ดี สามารถเชื่อมต่อโครงสร้างต่าง ๆ ได้ง่าย ใช้ในการก่อสร้างตึก ก่อสร้างสะพาน สร้างเรือ หรือใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ [4]

#### 2.1.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400

เหล็ก SS400 ที่ใช้ในการทดลอง เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่ต่ำไม่สามารถเพิ่มความแข็งโดยการชุบแข็งได้ โดยส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	%Ni	%Cr	%Mo	%Ti	%Nb
0.076	0.388	0.242	0.018	0.013	0.079	0.050	0.028	0.007	0.001	0.004

#### 2.1.2 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400

มีความเหนียวสูง ต้านทานแรงกระแทกได้น้อย ไม่ทนต่อการกัดกร่อนและการขีดข่วน ขึ้นรูปโดยการดัดงอได้ง่าย สำหรับค่าความต้านทาน ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400

ตามมาตรฐาน ASTM A240-05a			
YS Min/MPa	TS Min/MPa	EI Min %	Hardness Max/HRB
245	434	21%	41.5

- YS = ความแข็งแรงคราก (Yield Strength)
- TS = ความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)
- EI = ค่าการยืดตัว (Elongation)
- HRB = ค่าความแข็งหน่วยร็อกเวลสเกลบี

เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นเหล็กที่มีส่วนผสมของคาร์บอนเป็นธาตุหลัก และมีส่วนผสมของธาตุอื่น ๆ ผสมเล็กน้อย เช่น ซิลิกอน กำมะถัน ฟอสฟอรัส และแมงกานีส โดยที่เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกิน 2 % ซึ่งปริมาณของคาร์บอนที่ผสมลงไปในเหล็กจะมีผลต่อสมบัติของเหล็ก และลักษณะของการนำไปใช้งาน เพราะคาร์บอนที่ผสมลงไปในเหล็กมีผลต่อเหล็กดังนี้ คือ

- ความเหนียวของเหล็กลดลง
- ทำให้เหล็กมีความแข็งมากขึ้น
- ความสามารถในการเชื่อมลดลง
- ความเค้นแรงดึงเพิ่มมากขึ้น

ในการใช้งานได้จำแนกเหล็กกล้าคาร์บอนออกเป็น 3 ชนิด ตามส่วนผสมของคาร์บอนที่มีอยู่ในเนื้อเหล็ก เพราะจากสมบัติที่เปลี่ยนไปตามปริมาณของคาร์บอนที่ผสมในเนื้อเหล็กทำให้ในการนำไปใช้งานมีความแตกต่างกันตามสมบัติของเหล็กที่เกิดขึ้น โดยชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดมีดังนี้

- เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเหล็ก Mild Steel
- เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง
- เหล็กกล้าคาร์บอนสูง

## 2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI430 (AISI430 Ferritic Stainless Steel) [5]

เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุโครเมียม อยู่อย่างน้อย 10.5 % ตามมาตรฐานของยุโรป EN 10020 และมาตรฐานสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งสหรัฐอเมริกา AISI กำหนดส่วนผสมของธาตุโครเมียม อยู่อย่างน้อย 12% โดยจะมีส่วนผสมของธาตุอื่น ๆ นอกเหนือจากนี้หรือไม่ก็ตาม โดยมีชื่อเรียกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม หรือ สแตนเลส

โครเมียมที่ผสมในเนื้อเหล็กจะรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นฟิล์มของโครเมียมออกไซด์ เคลือบถาวรอยู่ที่ผิว ป้องกันการผุกร่อนในเนื้อเหล็ก ความหนาของการสร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์ ขึ้นอยู่กับปริมาณของโครเมียมเป็นสำคัญ สำหรับธาตุอื่น ๆ ที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อเพิ่มสมบัติทางด้านต่าง ๆ มีดังนี้

- เพิ่มสมบัติทางกลด้านต่าง ๆ ตามที่ต้องการ จะผสมธาตุ นิกเกิล (Ni) , โมลิบดีนัม (Mo) , แมงกานีส (Mn) ซึ่งธาตุเหล่านี้ไม่ส่งผลเสียต่อการเชื่อม
- เพิ่มสมบัติเชิงกล และโลหะวิทยา จะผสมธาตุ คาร์บอน (C) , ซิลิกอน (Si) , ไนโอเบียม (Nb) หรือ โคบอลต์ (Cb) และไททาเนียม (Ti) โดยการผสมธาตุเหล่านี้ต้องควบคุมปริมาณ ให้เหมาะสม

- เพิ่มสมบัติให้ง่ายต่อการตกแต่งด้วยวิธีกล เช่น งานกลึง งานไส ได้ง่าย จะผสมธาตุ กำมะถัน (S) , ฟอสฟอรัส (P) , เซเลเนียม (Se) โดยรวมกันแล้วไม่เกิน 0.03%

**2.2.1 การนำไปใช้งาน** มีการนำเหล็กกล้าไร้สนิมไปใช้งานกว้างขวางมากในอุตสาหกรรมที่ต้องการป้องกันการกัดกร่อน โดยมีการนำไปใช้งานดังนี้

- งานที่ต้องการความต้านทานการกัดกร่อน
- งานที่ต้องการการทนต่อความร้อน
- งานที่ใช้ในอุณหภูมิต่ำ
- งานที่ต้องการความแข็งแรงสูง ๆ
- งานที่ต้องการความสะอาด และป้องกันการติดเชื้อ
- ในการใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมเนื่องด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมมีหลายเกรดจำเป็นต้องเลือกให้เหมาะสมกับชนิดของงานที่ใช้ตามเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีอยู่ด้วย

**2.2.2 การแบ่งกลุ่มของเหล็กกล้าไร้สนิม** เหล็กกล้าไร้สนิมแบ่งได้ 5 กลุ่มหลัก ๆ ดังนี้

- เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic Stainless Steel)
- เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel)
- เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic Stainless Steel)
- เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกผลึก (Precipitation Hardening Stainless Steel)
- เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex Stainless Steel)

**2.2.3 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก**

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ต่ำ มีเฉพาะโครเมียมเป็นธาตุผสมหลักอยู่ประมาณ 11 – 18% ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยการชุบแข็งได้ ซึ่งได้แก่กลุ่ม 400 เช่น 430 , 409 เกรดนี้ไม่สามารถจะทำให้เป็นมาร์เทนไซด์โดยการเย็นตัว สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้แม่เหล็กดูดติด โดยส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI430

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	%Ni	%Cr	%Mo	%Ti	%Nb
0.119	0.230	0.363	0.032	0.0013	0.028	0.121	18.00	0.002	0.0061	0.44

**2.2.4 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430**

- ความหนาแน่น 7.7 g/cm<sup>3</sup>
- ค่าแรงต้านทานไฟฟ้าโอห์ม 0.60 mm<sup>2</sup>/m
- ความจุความร้อนจำเพาะ 0 – 100 °C = 460 J/Kg °C



- ค่าการนำความร้อน  $100\text{ }^{\circ}\text{C} = 26\text{ W/m }^{\circ}\text{C}$
- สัมประสิทธิ์การขยายตัว  $0 - 200\text{ }^{\circ}\text{C} = 10.5$
- ยังโมดูลัสความยืดหยุ่น  $\times 10^3 = 220\text{ N/mm}^2$
- มีความต้านทานการกัดกร่อนปานกลาง
- ขึ้นรูปได้ปานกลาง เช่น พวกภาชนะก้นตื้น
- แม่เหล็กดูดติด
- ชุบแข็งไม่ได้เนื่องจากไม่สามารถเปลี่ยนรูปโครงสร้างออสเทนไนต์ได้เมื่อถูกกระทำด้วยความร้อน

### 2.2.5 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI430

มีความเหนียวต่ำ ต้านทานแรงกระแทกได้น้อยเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรน เนื่องจากการรวมตัวของโครเมียมและคาร์บอนในช่วงอุณหภูมิ  $427 - 700$  องศาเซลเซียส เกิดสารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์ ได้ง่ายต้องแก้ไขให้ความร้อนหลังการเชื่อม และทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว หรือเพิ่มธาตุที่ทำให้ส่วนผสมของโครเมียมเสถียร ได้แก่ไททาเนียม (Ti) โคบอลต์ (Cb) หรือนีโอเบียม (Nb) เข้าไปในส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิม เพราะธาตุเหล่านี้จะรวมตัวกับธาตุคาร์บอนได้เร็วกว่าจึงเป็นการป้องกันการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์การขยายตัว ใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนแต่ค่าการนำความร้อนต่ำกว่าเหล็กผสมครึ่งหนึ่งสำหรับค่าการรับแรงต่างๆ ตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI430

ตามมาตรฐาน ASTM A240-05a			
YS Min/MPa	TS Min/MPa	EI Min %	Hardness Max/HRB
205	450	22	51

- YS = ความแข็งแรงคราก(Yield Strength)
- TS = ความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)
- EI = ค่าการยืดตัว (Elongation)
- HRB = ค่าความแข็งหน่วยร็อกเวลสเกลบี

### 2.2.6 การนำไปใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI430

- ชิ้นส่วนรถยนต์
- ประดับภายในอาคาร
- อุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรม
- งานปิโตรเคมี
- อุปกรณ์เคมี
- อุตสาหกรรมต่อเรือ

- ผลิตภัณฑ์ที่ป้องกันการกัดกร่อนและที่ใช้ในงานอุณหภูมิสูง

### 2.2.7 การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดเฟอร์ริติก

โครงสร้างสำคัญของเนื้อโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดเฟอร์ริติกประกอบไปด้วยส่วนผสมหลักของธาตุเหล็ก (Fe) + โครเมียม (Cr) + คาร์บอน (C) โดยมีส่วนผสมของโครเมียมสูง 17 – 24 % และมีส่วนผสมของธาตุที่ช่วยให้เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์เสถียร เมื่อชิ้นงานมีความร้อนสูง ดังนั้นโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดเฟอร์ริติกจึงไม่เปลี่ยนเป็นออสเตนไนต์ แต่จะคงโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรต์ทุกสภาวะอุณหภูมิจนกระทั่งจนถึงจุดหลอมละลาย เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดเฟอร์ริติกจึงไม่สามารถชุบแข็งได้ เพราะไม่สามารถผ่านขั้นตอนจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ไปเป็นโครงสร้างออสเตนไนต์และจากโครงสร้างออสเตนไนต์ไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ได้นอกจากนี้ส่วนผสมของธาตุคาร์บอน และไนโตรเจนจะมีผลทำให้เกิดโครงสร้างออสเตนไนต์เมื่อได้รับอุณหภูมิสูงจากการเชื่อม จึงจำเป็นต้องเพิ่มส่วนผสมของโครเมียมหรือธาตุที่ทำให้เกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์เสถียร เช่น อะลูมินัม โคลัมเบียม ไททาเนียม และโมลิบดีนัม โดยเฉพาะธาตุโคลัมเบียมและไททาเนียมจะช่วยให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์เสถียรที่อุณหภูมิสูงโดยจะผลักดันทำให้เกิดการรวมตัวในรูปของคาร์บอนไนไตรด์เป็นการดึงธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนออกจากสารละลาย ป้องกันการเกิดโครงสร้างออสเตนไนต์ยกเว้นชนิดที่มีส่วนผสมของโครเมียมมากกว่า 21 % ได้รับความร้อนสูงกว่า 815 °C โครงสร้างบางส่วนจะกลายเป็นออสเตนไนต์และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศส่วนที่เป็นออสเตนไนต์ก็จะแข็งตัวกลายเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ซึ่งมีสมบัติแข็งและเปราะเล็กน้อยโครงสร้างมาร์เทนไซต์นี้จะปรากฏตามขอบเกรนของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ทำให้ความเหนียวลดลงและอาจเกิดการแตกร้าวได้ง่าย แต่ปรากฏการณ์นี้จะน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดมาร์เทนซิติกโดยตรง ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดเฟอร์ริติกเมื่อผ่านการขึ้นรูปร้อน หรือการเชื่อมจะต้องแก้ปัญหาด้วยการอบอ่อน คือการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 760 – 815 °C แล้วควบคุมให้มีการเย็นตัว อย่างรวดเร็วเพื่อให้ผ่านช่วงอุณหภูมิ 427 – 760 °C ป้องกันการเกิดเกรนโตทำให้เนื้อโลหะส่วนที่เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์กลับเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์และทำให้แถบยาวของซีเมนไตต์กลายเป็นคาร์ไบด์ที่กลมเล็กๆ แทรกกระจายอยู่ทั่วไปซึ่งทำให้ความแข็งแรงลดลง

### 2.3 ลวดเชื่อม MIG

ลวดเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม จะมีลักษณะเป็นเส้นกลมตันยาวเป็นม้วนคล้ายเส้นลวดใช้ในการเชื่อมอย่างต่อเนื่อง โดยมีหลายขนาดให้เลือกใช้ โดยลวดเชื่อมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางค่อนข้างเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมแบบอื่น โดยมีขนาดตั้งแต่ 0.8 – 1.6 มม. ซึ่งเป็นขนาดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยมีขนาดเล็กสุด 0.5 มม. และโตสุด 3.2 มม. ซึ่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเชื่อมจะมีผลต่อความกว้างของแนวเชื่อม ระยะซึมลึก และอัตราการเร็วในการเชื่อม ลวดเชื่อมที่มีขนาดใหญ่จะใช้กระแสสูงและให้อัตราการเติมเนื้อโลหะมากกว่า แต่อัตราการหลอมเหลวของลวดเชื่อมจะเป็นฟังก์ชันกับความหนาแน่นของกระแส ถ้าลวดเชื่อมขนาดใหญ่ และลวดเชื่อมขนาดเล็ก ใช้กระแสไฟเชื่อมเท่ากันในการเชื่อม ลวดเชื่อมที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราการเติมเนื้อโลหะมากกว่า

เพราะมีความหนาแน่นของกระแสสูงกว่า ลวดเชื่อมมิกตามมาตรฐาน AWS A5.8 : ER430 มีส่วนผสมดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	%Ni	%Cr	%Mo	%N	%Nb
0.013	0.39	0.36	0.023	0.0037	0.098	0.30	18.00	0.05	0.012	0.49

ลวดเชื่อมหรือวัสดุประสานในงานเชื่อม มีมากมายหลากหลายชนิดให้เลือกใช้ตามความเหมาะสม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการ และวัสดุที่ใช้สำหรับงานเชื่อม ลักษณะของลวดเชื่อมมิก จะมีขนาดเล็กเป็นเส้นยาวติดต่อกันคล้ายเส้นลวดบรรจุอยู่ในม้วน ซึ่งขนาดบรรจุอยู่ที่ผู้ผลิตจะจัดทำขึ้น ลวดเชื่อมมิกจะถูกเคลือบด้วยทองแดงไว้เพื่อป้องกันการเกิดสนิม สามารถเก็บใช้งานได้นาน ลวดเชื่อมมิกเป็นลวดเชื่อมแบบสั่นเปลือง เวลาเชื่อมจะเกิดการหลอมละลายและถ่ายโอนเป็นน้ำโลหะเติมลงในแนวเชื่อม ในการใช้งานจะเลือกใช้ตามมาตรฐานของลวดเชื่อมมิก ซึ่งลวดเชื่อมมิกตามมาตรฐานสมาคมการเชื่อมของอเมริกา AWS , A5.9 , A5.18 และ ASTM กำหนดมาตรฐานไว้ดังนี้

- AWS = สมาคมการเชื่อมอเมริกา
- E = ลวดเชื่อมไฟฟ้า
- R = ชนิดของลวดเชื่อม
- XX = ค่าความเค้นแรงดึงต่ำสุด
- S = การเชื่อมแบบ Solid Wire
- X = ส่วนผสมของโลหะและชนิดของแกสปกคลุม

## 2.4 แกสปกคลุม [6]

ในกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแกสปกคลุม แกสที่ใช้ปกคลุมแนวเชื่อมจะมีผลต่อสมบัติของแนวเชื่อม และช่วยป้องกันอากาศภายนอกเข้ารวมตัวกับแนวเชื่อม ซึ่งจะส่งผลทำให้แนวเชื่อมเกิดข้อบกพร่อง เพราะบรรยากาศรอบ ๆ แนวเชื่อมจะมีส่วนประกอบของแกส ไนโตรเจน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไอน้ำ แกสเหล่านี้ถ้าเข้ารวมตัวกับแนวเชื่อมจะเป็นสาเหตุของความบกพร่องในแนวเชื่อม เช่น การเกิดรอยร้าว เกิดรูพรุน หรือเกิดฟองอากาศ ในแนวเชื่อม ทำให้คุณภาพของแนวเชื่อมต่ำ ไม่สามารถใช้ในการวิศวกรรมที่ต้องการความแข็งแรงสูงได้

นอกจากนี้แกสปกคลุมยังมีผลต่อการเชื่อมอาร์กทางด้าน อื่นๆ ด้วย เช่น การซึมลึกของแนวเชื่อม การเกิดเม็ดโลหะกระเด็น ความเสถียรของการอาร์ก การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบต่าง ๆ การใช้แกสปกคลุมเพียงชนิดเดียว ไม่สามารถทำให้เกิดการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบต่าง ๆ ได้ การเชื่อมวัสดุหรือโลหะบางชนิด หรือการถ่ายโอนน้ำโลหะบางแบบ ต้องเลือกใช้แกสปกคลุมที่เป็นแกสผสม หรือแม้แต่วัสดุชนิดเดียวกันถ้าเลือกใช้แกสผสมที่ถูกต้อง ในการปกคลุมก็จะได้ลักษณะและคุณภาพของแนวเชื่อมที่ดี กว่าการใช้แกสปกคลุมชนิดเดียว

#### 2.4.1 ชนิดของแก๊สคลุม [6]

แก๊สที่นำมาใช้ปกคลุมแนวเชื่อม สำหรับกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม แบ่งเป็น 4 ชนิด คือ

**2.4.1.1 แก๊สเฉื่อย** อาร์กอน (Ar) , ฮีเลียม (He) เหมาะกับการใช้คลุมป้องกันแนวเชื่อม ในการเชื่อมเหล็กกล้า แต่ไม่สามารถใช้ได้กับโลหะทุกชนิด จึงต้องผสมแอกทีฟแก๊ส เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ หรือออกซิเจนเข้าไป เพื่อให้การอาร์กเสถียรมีประกายโลหะจากการเชื่อมลดลง

**2.4.1.2 แอกทีฟแก๊ส** คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) หรือเป็นแก๊สผสมกันระหว่างแก๊สอาร์กอน กับแอกทีฟแก๊สบางตัว เช่น แก๊สออกซิเจน แก๊สไนโตรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือแก๊สไฮโดรเจน

**2.4.1.3 อันรีแอกทีฟแก๊ส** คือ ไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) ใช้ในการปกคลุมแนวเชื่อมสำหรับการเชื่อมทองแดง และทองแดงเจือ ให้สมบัติการเชื่อมคล้ายกับฮีเลียม แต่การซึมลึกดีกว่าอาร์กอน และการถ่ายโอนโลหะเป็นแบบหยดขนาดใหญ่ ไนโตรเจนใช้แทนฮีเลียมได้ กรณีไม่มีฮีเลียม และอาจผสมอาร์กอน จะทำให้การอาร์กเสถียรและราบเรียบ ลดความปั่นป่วนในบ่อหลอมละลาย ขณะทำการเชื่อม แก๊สผสมนี้อาจใช้เชื่อมอะลูมิเนียมเจือได้เช่นกัน

**2.4.1.4 แก๊สผสม** เช่น อาร์กอน ผสม คาร์บอนไดออกไซด์ (Ar/CO<sub>2</sub>) , อาร์กอน ผสม ออกซิเจน (Ar/O<sub>2</sub>) , อาร์กอน ผสมออกซิเจน ผสมคาร์บอนไดออกไซด์ (Ar/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>) จะนำมาใช้คลุมรอยเชื่อม เพื่อเพิ่มคุณภาพการเชื่อมและงานเชื่อมให้สูงขึ้นหรือเกิดการถ่ายโอนโลหะตามต้องการ การผสมจะใช้เครื่องผสมแก๊ส โดยแก๊สจะผสมกันก่อนจ่ายออกสู่หัวเชื่อมโดยในการผสมแบ่งออกได้ 4 อย่างคือ

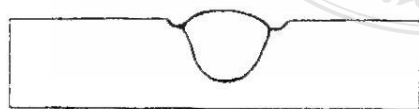
- แก๊สเฉื่อย ผสมกับแก๊สเฉื่อย
- แก๊สเฉื่อย ผสมแก๊สเฉื่อย และแอกทีฟแก๊ส
- แก๊สเฉื่อย ผสมแอกทีฟแก๊ส
- แอกทีฟแก๊สผสมกันเอง

สมบัติเด่นของแก๊สคลุมแต่ละชนิดที่มีผลต่อสมบัติรอยเชื่อม แต่ละชนิดก่อนนำมาผสมมีดังนี้

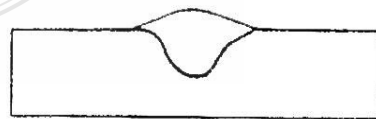
- ฮีเลียม ให้ความร้อนเปลวอาร์กสูงรอยเชื่อมจะกว้าง ระยะซึมลึกตื้น
- อาร์กอน เป็นแก๊สที่ให้ประจุบวก ได้ดีช่วยให้เปลวอาร์กและกระแสเชื่อมคงที่แนวเชื่อมกว้าง ระยะซึมลึกมากทั้งด้านข้าง และด้านล่างแนวเชื่อม
- คาร์บอนไดออกไซด์ จะให้รอยซึมลึกกว้าง และลึก ผิวหน้าแนวเชื่อมมีเกล็ดหยาบและนูน โค้งเกิดสภาพประจุบวกต่ำ ขนาดหยดโลหะไม่สม่ำเสมอ เม็ดโลหะกระเด็นมากแต่มีรัศมีการปกคลุมบริเวณบ่อหลอมละลายอย่างทั่วถึง
- ออกซิเจน ทำให้หยดน้ำโลหะกระจายเป็นฝอยมีกระแสเชื่อมต่ำขณะเกิดหยดละอองโลหะแนวเชื่อมกว้างความนูนต่ำ ผิวแนวเชื่อมเป็นเกร็ดละเอียดไม่เกิดการอาร์กกัดตัวจลและหยดโลหะมีเม็ดขนาดเล็กส่งผลให้อุณหภูมิที่บ่อหลอมเหลวสูง

ชนิดของแก๊สผสมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีดังนี้

- อีเลียม - อาร์กอน แกสผสมชนิดนี้จะให้สมบัติในการเชื่อมด้วยแกสเฉื่อยอย่างเต็มที่ โดยมีอีเลียมให้สมบัติด้านการซึมลึกดี ส่วนอาร์กอนให้การถ่ายโอนโลหะแบบละออง และการอาร์กมีความเสถียรใกล้เคียงกับการใช้อาร์กอนบริสุทธิ์ คลุมรอยเชื่อม งานเชื่อมบางชนิดถ้าใช้อีเลียมอย่างเดียวเปลวอาร์กก็จะร้อนเกินไป ถ้าเฉพาะอาร์กอนเปลวอาร์กก็ร้อนน้อยกว่า จึงนำเอาแกสทั้งสองชนิดมาผสมกันเพื่อให้ได้ผลดีต่อการเชื่อมมากที่สุด
- อาร์กอน - คาร์บอนไดออกไซด์ การผสมคาร์บอนไดออกไซด์เข้ากับอาร์กอนมีจุดประสงค์เช่นเดียวกับอาร์กอน - ออกซิเจน การผสมคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไป จะทำให้การอาร์กมีความเสถียร การถ่ายโอนโลหะจากลวดเชื่อมไปยังชิ้นงานได้ดี มีแรงเกาะยึดบ่อหลอมดีกว่า และลดประกายโลหะกระเด็นเมื่อเชื่อมโลหะที่เป็นเหล็กให้สมบัติการอาร์กดี ขณะเชื่อมบ่อหลอมละลายจะขยายออกไปถึงขอบรอยต่อ จึงไม่ทำให้เกิดรอยกินลึกที่ขอบรอยเชื่อม
- อีเลียม - อาร์กอน - คาร์บอนไดออกไซด์ แกสผสมชนิดนี้จะให้แรงเกาะยึดของบ่อหลอมเหลวดีกว่า และการถ่ายโอนโลหะเป็นแบบลัดวงจร นิยมใช้กับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ทำปฏิกิริยากับบรรยากาศได้เล็กน้อยแต่ไม่ลดความต้านทานการกัดกร่อน การผสมควรให้มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เปอร์เซ็นต์ต่ำ เพราะคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นตัวลดความเหนียวของเนื้อโลหะเชื่อมลักษณะของแนวเชื่อมที่ได้จากแกสผสมชนิดนี้จะแบนราบ ซึ่งเป็นผลดีคือไม่ต้องทำการเจียรระโนตตกแต่งแนวเชื่อมมาก จึงเหมาะกับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมหรือเชื่อมท่อ
- อาร์กอน - ออกซิเจน การผสมออกซิเจนจำนวนเล็กน้อยกับแกสอาร์กอน จะทำให้เกิดออกซิไดซ์ขึ้นแต่ไม่มากนักลวดเชื่อมที่เลือกใช้ต้องมีธาตุดีออกไซด์เซอร์ เพื่อขจัดออกซิเจนออกจากบ่อหลอมละลายป้องกันการเกิดรูพรุนของเนื้อโลหะเชื่อม การใช้อาร์กอนบริสุทธิ์จะให้สมบัติการอาร์กที่ไม่ดีเมื่อเชื่อมโลหะที่เป็นเหล็ก และลวดเชื่อมที่หลอมเหลวมีแนวโน้มต่อการไหลพุ่งไม่เป็นเส้นตรง แต่การผสมออกซิเจนปริมาณเพียงเล็กน้อย 1 - 5 % จะช่วยให้การอาร์กมีความเสถียรดี ประกายโลหะกระเด็นน้อย ตะเข็บเชื่อมมีลักษณะดีขึ้น การซึมลึกของรอยเชื่อมกว้างกว่าการใช้อาร์กอนอย่างเดียวไม่ทำให้เกิดรอยการกินลึกขอบแนวเชื่อม เมื่อเชื่อมเหล็กกล้า แต่ถ้าใช้อาร์กอนอย่างเดียวในการเชื่อมเหล็กกล้าจะเกิดรอยกินลึกที่ขอบแนวเชื่อม

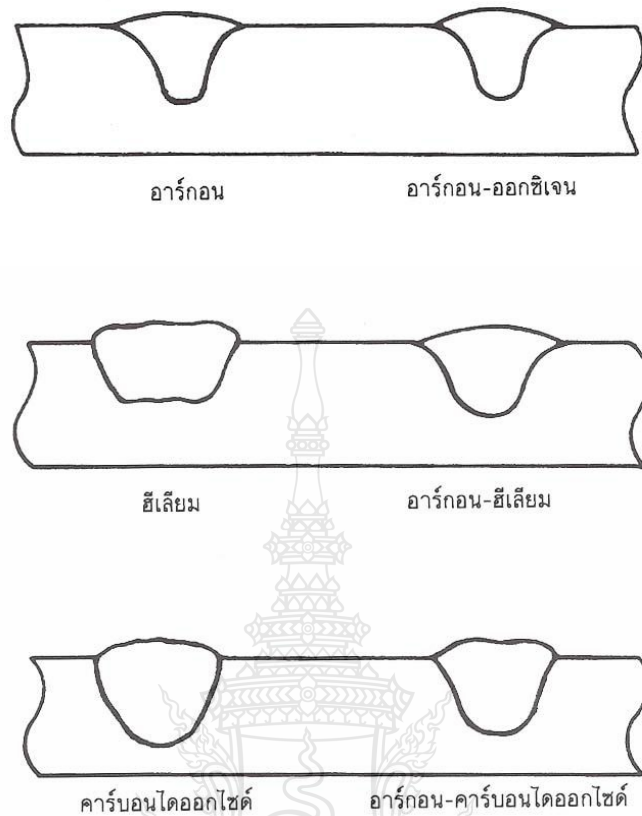


รอยกินลึกขอบแนวเชื่อม  
แกสอาร์กอนอย่างเดียว



รอยเชื่อมกว้าง  
แกสอาร์กอนผสมออกซิเจน

รูปที่ 2.1 ลักษณะรอยเชื่อมเหล็กกล้าเมื่อใช้แกสอาร์กอน และแกสอาร์กอนผสมออกซิเจน [6]



รูปที่ 2.2 ลักษณะรอยเชื่อม และการซึมลึกเมื่อใช้ แก๊สปกคลุมชนิดต่างๆ [6]

**2.4.1.5 อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม และระยะห่างของหัวฉีดยิ่ง** สำหรับการไหลของแก๊สปกคลุมและระยะห่างของหัวฉีดยิ่งนี้มีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ และความเหนียวของเนื้อโลหะเชื่อมในการเลือกใช้อัตราการไหลของแก๊สคลุมและระยะห่างของหัวฉีดยิ่งที่เหมาะสม จะพิจารณาจากค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการเชื่อม อิทธิพลของระยะห่างของหัวฉีดยิ่ง และอัตราการไหลของแก๊สคลุมมีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ และปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อมด้วย ในการปรับค่าของแก๊สปกคลุมปกติจะใช้สูตรในการคำนวณ [7] ดังนี้

$$\text{ปริมาณแก๊ส ลิตร / นาที} = 10 \times \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อม (มม.)}$$

**ตัวอย่าง**

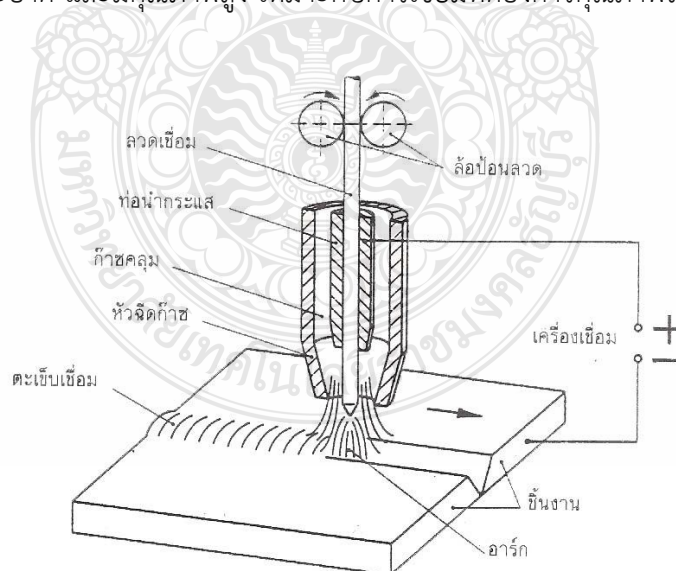
- ลวดเชื่อม = 1.0 มม.
- แทนค่า =  $10 \times 1.0$  มม.
- = 10 ลิตร / นาที

ตารางที่ 2.6 อัตราการไหลของแก๊สคลุมและระยะห่างของหัวฉีดยุติที่เหมาะสม

ขนาดลวดเชื่อม (มม.)	กระแสเชื่อม (แอมป์)	ระยะห่างหัวฉีดยุติ (มม.)	อัตราการไหลของ แก๊สคลุม (L/Min)
1.2	100 ~ 200	10 ~ 15	15 ~ 25
	200 ~ 300	15 ~ 20	20 ~ 30
1.6	200 ~ 300	15 ~ 20	20 ~ 30
	300 ~ 450	20 ~ 25	20 ~ 30

## 2.5 การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม ( Gas Metal Arc Welding : GMAW)

กระบวนการในการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมเป็นกระบวนการเชื่อมแบบลึนเปลือยลวดเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 2.3 ม้วนลวดส่งผ่านหัวเชื่อมออกมาอย่างต่อเนื่อง ผ่านท่อนำลวดและ ท่อนำกระแสจนลวดเชื่อมสัมผัสกับชิ้นงาน อาศัยการอาร์กระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน โดยมีแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมเพื่อป้องกันอากาศภายนอกเข้ามารวมตัวกับแนวเชื่อมซึ่งจะทำให้เกิดข้อบกพร่องขึ้นที่แนวเชื่อมได้ ซึ่งจะมีชื่อเรียกที่แตกต่างกันไปตามชนิดของแก๊สที่ใช้ในการปกคลุมแนวเชื่อม เช่น การเชื่อมมิก จะใช้แก๊สอาร์กอน หรือ แก๊สฮีเลียม หรือใช้อาร์กอนผสมกับฮีเลียม และการเชื่อมแมก จะใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปกคลุมแนวเชื่อม ซึ่งการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมเป็นการเชื่อมที่มีการหลอมละลายชิ้นงานและลวดเชื่อมเติมลงไปแนวเชื่อม ลักษณะคล้ายกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์แต่จะแตกต่างกันตรงที่ การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมไม่มีฟลักซ์จะใช้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อมแทน ทำให้แนวเชื่อมที่ได้มีความสะอาด และมีคุณภาพสูง เหมาะกับการเชื่อมที่ต้องการคุณภาพในงานเชื่อมสูง



รูปที่ 2.3 ลักษณะของกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม [6]

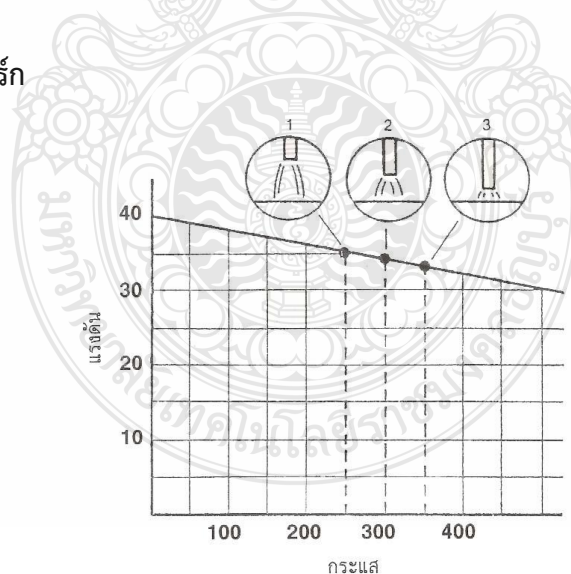
กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม สามารถเชื่อมงานได้อย่างกว้างขวางทั้งการเชื่อมโลหะที่เป็นเหล็ก และโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ตั้งแต่ชิ้นงานที่มีความบาง ไปจนถึงชิ้นงานที่มีความหนาหนา ๆ โดยลักษณะการถ่ายโอนน้ำโลหะในการอาร์ก จะขึ้นอยู่กับขนาดของลวดเชื่อม ชนิดของแก๊สที่ใช้ในการ

ปกคลุม และขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้เชื่อม องค์ประกอบที่สำคัญของกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะ แกสคลุม คืออัตราการเติมเนื้อโลหะ ลงสู่บ่อหลอมละลายได้รวดเร็วและมากกว่ากระบวนการอื่น จึงทำให้เคลื่อนหัวเชื่อมได้เร็วจึงทำให้ปริมาณความร้อนจากการอาร์กเข้าสู่งานได้น้อย จึงส่งผลกระทบต่อชิ้นงานน้อยเพราะการแผ่กระจายของความร้อนอยู่ในบริเวณแคบ ๆ ทำให้งานบิดตัวน้อยจึงสามารถเชื่อมงานบาง ๆ ได้ผลดี [6]

### 2.5.1 ความสามารถในการเชื่อม

การเชื่อมอาร์กโลหะแกสคลุม ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งวิธีการเชื่อมกึ่งอัตโนมัติ และอัตโนมัติ แต่ที่ใช้กันมากคือการเชื่อมกึ่งอัตโนมัติ โดยช่างเชื่อมจะเป็นผู้ดำเนินการเองทั้งหมดตั้งแต่การตั้งค่า แรงดัน ปรับอัตราการไหลของแกสคลุม และการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมด้วยมือ ส่วนการเชื่อมแบบอัตโนมัติไม่ค่อยนิยมเชื่อมกัน ส่วนใหญ่จะไปไปใช้กับอุตสาหกรรมการผลิตที่มีปริมาณมาก ๆ เช่น โรงงานผลิตรถยนต์ วิธีการควบคุมการเชื่อมจะเป็นแบบอัตโนมัติทั้งหมด ช่างเชื่อมเพียงทำหน้าที่สังเกตความบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมเท่านั้น กระบวนการเชื่อมนี้สามารถทำการเชื่อมได้ทุกตำแหน่งแนวเชื่อม แต่ก็ขึ้นอยู่กับขนาดลวดเชื่อมและลักษณะการถ่ายโอนโลหะด้วย กรณีใช้แกสคาร์บอนไดออกไซด์ปกคลุมแนวเชื่อม และลวดเชื่อมขนาดใหญ่ จะเชื่อมได้ดีเฉพาะตำแหน่งแนวราบและแนวระดับ การถ่ายโอนโลหะแบบละอองเหมาะกับการเชื่อมแนวราบและแนวระดับ ถ้าต้องการเชื่อมแนวเหนือศีรษะ ให้ใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็ก การเชื่อมอาร์ก ด้วยวิธีนี้จะมีปัญหาบ้างก็เฉพาะการเชื่อมแนวตั้ง แต่แก้ไขได้โดยเปลี่ยนการถ่ายโอนโลหะเป็นแบบลัดวงจร หรือพัลส์แทน

### 2.5.2 ระบบการอาร์ก



รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบความยาวอาร์กที่แตกต่างกันด้วยเส้นโค้งสมบัติแรงดันและกระแสของ เครื่องเชื่อมชนิดแรงดันคงที่ [6]

กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแกสคลุม สามารถใช้เครื่องเชื่อมชนิดกระแสคงที่ ( Constant Current ) และแรงดันคงที่ ( Constant Voltage ) ทำการเชื่อมได้ เครื่องเชื่อมชนิดแรงดันคงที่ได้รับความนิยมกับการเชื่อมอาร์กโลหะแกสคลุมมากกว่าชนิดกระแสคงที่ โดยแรงดันคงที่



จะใช้เชื่อมกับลวดเชื่อมเปลือยตัน (Solid) และลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux – Core) การปรับแรงดันจะปรับที่ปุ่มปรับของเครื่อง กระแสเชื่อมได้จากการปรับอัตราความเร็วป้อนลวดเชื่อม ถ้าลวดเชื่อมป้อนเร็วกระแสก็จะสูง ถ้าลวดเชื่อมป้อนช้ากระแสก็จะต่ำ ความยาวอาร์กก็มีความสำคัญ

อัตราการเติมเนื้อโลหะของลวดเชื่อมขึ้นอยู่กับกระแสเชื่อม หากกระแสต่ำอัตราการหลอมเหลวของลวดจะลดลง เมื่อกระแสสูงอัตราการหลอมเหลวจะเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2.4 ตรงจุดที่ 2 ความยาวอาร์ก แรงดันและกระแสจำนวนหนึ่งเป็นจุดเปรียบเทียบกับพฤติกรรมจุดอื่น ตรงจุดที่ 1 พบว่าถ้าความยาวอาร์กมาก แรงดันจะเพิ่มขึ้นจากเดิมแต่ไม่มากนัก ขณะเดียวกันกระแสจะต่ำลงทำให้อัตราหลอมเหลวของลวดลดลงเช่นกัน

### 2.5.3 การถ่ายโอนโลหะ

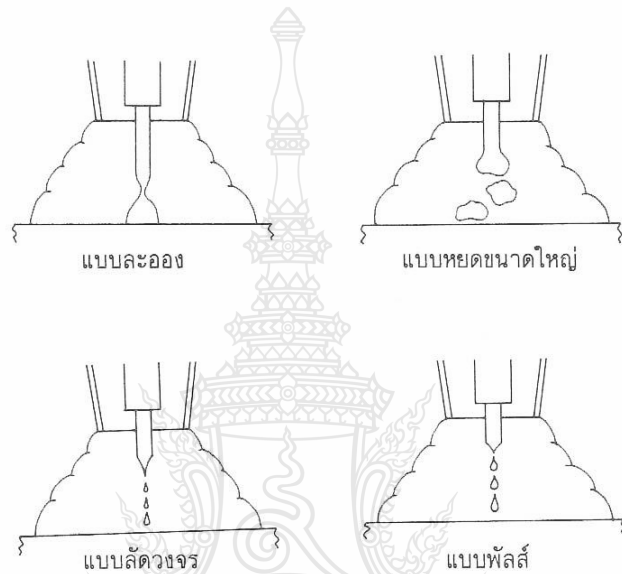
การเชื่อมอาร์กโลหะแกสคลุม เป็นกระบวนการที่มีความสามารถในการเชื่อมสูง เมื่อเทียบกับกระบวนการเชื่อมอื่น ๆ คือ เชื่อมได้ทั้งโลหะที่เป็นเหล็ก และโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ทั้งหนาและบาง เพราะมีการถ่ายโอนโลหะที่แตกต่างกันหลายแบบ การถ่ายโอนโลหะ หมายถึง การที่โลหะลวดเชื่อมหลอมเป็นหยดหลุดออกจากปลายลวดเชื่อมผ่านอาร์กเข้าสู่บ่อหลอมเหลวบนโลหะชิ้นงาน ซึ่งการถ่ายโอนของหยดโลหะเกิดจากแรงกระทำต่อหยดโลหะที่ปลายลวดเชื่อม โดยเป็นปฏิกริยาร่วมกันระหว่างแรงและส่วนผสมทางเคมี ของลวดเชื่อมชนิดของแกสคลุมกระแสเชื่อม แรงดันเชื่อมและขนาดลวดเชื่อม แรงกระทำต่อหยดโลหะมีดังนี้

- ความดันพลาสมา (จากความเสียดทานของพลาสมาเจต)
- แรงดันปลายลวดเชื่อม ทำให้หยดโลหะคอดกึ่งลง
- ความดันเนื่องจากการกลายเป็นไอของวัสดุ
- แรงจากความดันแกสที่ปลายลวดเชื่อม
- แรงแม่เหล็กไฟฟ้า
- แรงโน้มถ่วง
- แรงตึงผิว

การถ่ายโอนโลหะแบ่งออกได้ 4 แบบ คือ แบบละออง (Spray) แบบหยดขนาดใหญ่ (Globular) แบบลัดวงจร (Short Circuit) และแบบพัลส์ (Pulsed)

**2.5.3.1 การถ่ายโอนแบบละออง [6]** เกิดจากการหลอมของลวดเชื่อมเป็นหยดโลหะขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางลวดเชื่อม หยดโลหะจะเรียวเล็กลงตรงส่วนที่ต่ออยู่ระหว่างปลายลวดเชื่อม และหยดนี้จะแยกตัวหรือ ถูกกั๊กหลุดออก จากปลายลวดเชื่อมด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า หยดโลหะถูกถ่ายโอนอย่างรวดเร็ว ผ่านพลาสมาอาร์กสู่บ่อหลอมเหลวอย่างคงที่ต่อเนื่องไปไม่หยุด ตลอดเวลาที่กระแสเชื่อมยังไหลผ่านลวดเชื่อมอยู่ ปริมาณหยดโลหะที่ถ่ายโอนอาจต่ำกว่าหรือสูงกว่า เป็นหลายร้อยหยดในเวลาหนึ่งวินาที

กระบวนการถ่ายโอนแบบละอองต้องใช้ความหนาแน่นของกระแสสูง เพื่อลวดเชื่อมจะได้หลอมเป็นหยดขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเชื่อมอย่างรวดเร็ว หยดที่มีขนาดเล็กนี้ไม่มีผลต่อเสถียรภาพของการอาร์ก เช่น กรณีของการถ่ายโอนแบบหยดขนาดใหญ่แต่อย่างใด การไหลพุ่งของหยดโลหะจึงเป็นเส้นตรงจากศูนย์กลางปลายลวดเชื่อมสู่บ่อหลอมเหลวทำให้กำหนดทิศทางการถ่ายโอนได้ตามต้องการ ปริมาณความร้อนเข้าสู่งานสูงแม้ลวดเชื่อมจะมีขนาดใหญ่ ก็สามารถหลอมเป็นหยดขนาดเล็กได้ทันที ส่งผลให้เกิดการซึมลึกของรอยเชื่อมมาก



รูปที่ 2.5 ลักษณะการถ่ายโอนน้ำโลหะทั้ง 4 แบบ [6]

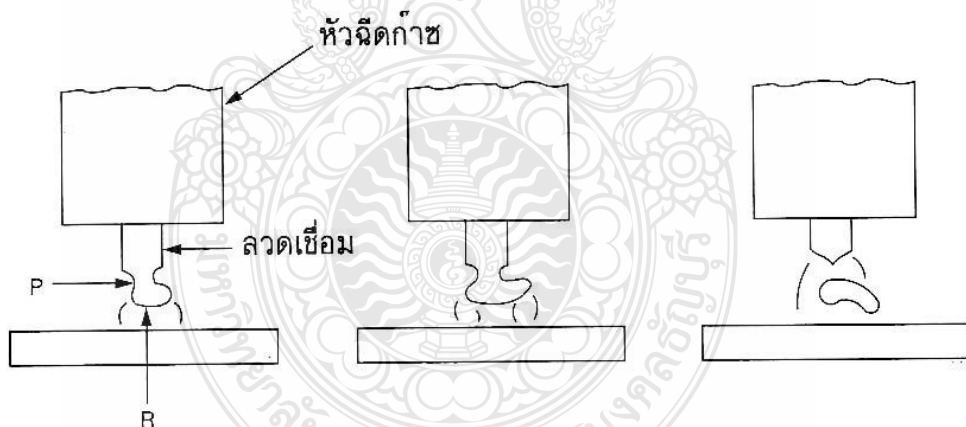
การถ่ายโอนแบบละอองใช้เชื่อมงานได้ทั้งโลหะที่เป็นเหล็ก และโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ถ้าเชื่อมโลหะที่เป็นเหล็กควรใช้แก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับออกซิเจนคลุมรอยเชื่อม แก๊สอาร์กอนจะช่วยให้หยดโลหะเป็นเม็ดกลมขนาดเล็กและเกิดแรงกัศหลุดออกจากปลายลวดเชื่อม ส่วนออกซิเจนทำให้การอาร์กมีเสถียรภาพที่ดี เกิดเม็ดโลหะกระเด็นน้อย และการซึมลึกของรอยเชื่อมเป็นวงกว้าง และป้องกันการเกิดรอยกินลึก แก๊สผสมอาร์กอนกับออกซิเจนใช้กับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ปานกลาง เหล็กกล้าเจือต่ำ เหล็กกล้ากำลังสูงและเหล็กกล้าไร้สนิม ตำแหน่งเชื่อมแนวราบและแนวระดับ

**2.5.3.2 การถ่ายโอนแบบหยดขนาดใหญ่** [6] เริ่มเมื่อปลายลวดเชื่อมถูกหลอมเป็นหยดโลหะ นี้จะก่อตัวเพิ่มขนาดใหญ่ขึ้นกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางลวดเชื่อมประมาณ 1.5 หรือ 2 เท่า ก่อนจะหลุดจากปลายลวดเชื่อมแล้วถ่ายโอนผ่านการอาร์กสู่บ่อหลอมละลายด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิว ซึ่งจะให้อัตราการเติมเนื้อโลหะมาก และความร้อนสูงกว่าการถ่ายโอนแบบลัดวงจร กระแสและแรงดันเชื่อมที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนแบบหยดขนาดใหญ่จะต่ำ แต่ก็อยู่ในช่วงที่สูงกว่าการถ่ายโอนแบบลัดวงจร กระแสและแรงดันเชื่อมที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนแบบหยดขนาดใหญ่จะต่ำ แต่ก็อยู่ในช่วงที่สูงกว่าการถ่ายโอนแบบลัดวงจร คือกระแสจะไม่เกินระดับของกระแสช่วงเปลี่ยน โดยพิสัยของกระแสช่วงเปลี่ยนจะเพิ่มจากค่าต่ำสุดขณะที่ปลายลวดเชื่อมกำลังหลอมไปถึงจุดที่มีค่าสูงสุดเพื่อชักนำให้เกิดการถ่ายโอนเหมือนแบบละออง ดังนั้นพฤติกรรมของการถ่ายโอนโลหะแบบนี้ จึงอยู่ระหว่าง

การถ่ายโอนแบบลัดวงจร และแบบล่องแต่มีขนาดหยดโลหะใหญ่กว่าแบบล่อง อัตราการถ่ายโอนโลหะต่อวินาทีที่กระแสน้ำจะมีเพียง 2 – 3 หยดเท่านั้น ขณะที่หยดโลหะขนาดเล็กจำนวนมากถูกถ่ายโอนไปแล้วตอนกระแสเพิ่มสูงขึ้น

เมื่อหยดโลหะมีขนาดโตพอแล้วก็จะแยกตัวออกจากปลายลวด ถ่ายโอนผ่านการอาร์กสลับไปหลอมละลายหยดโลหะมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ และเคลื่อนที่หมุนรอบตัวเอง เนื่องจากแรงกายภาพของการอาร์ก จึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หยดน้ำโลหะนี้กลมไม่สม่ำเสมอโดยหยดที่มีขนาดใหญ่กว่าจะไปแตะกับบ่อหลอมละลายทำให้เกิดการลัดวงจร ผ่านการอาร์กและการอาร์กจะดับไปชั่วขณะ พฤติกรรมนี้จะเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เสถียรภาพการอาร์กต่ำ การอาร์กจะรุนแรง การอาร์กผิดพลาดในบางจังหวะทำให้ระยะซีมลึกลงและเกิดการเคลื่อนการอาร์ก รอบหยดโลหะบนปลายลวดเชื่อมซึ่งเป็นเหตุให้มีเม็ดโลหะกระเด็นมากการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะขนาดใหญ่สู่บ่อหลอมละลายจะใช้แรงโน้มถ่วงมากกว่าแรงที่เกิดจากการอาร์ก ดังนั้นกระบวนการถ่ายโอนโลหะแบบหยดขนาดใหญ่จึงเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการคุณภาพงานเชื่อมสูง มีขอบเขตใช้งานจำกัดเพราะปริมาณความร้อนเข้าสู่งานต่ำ

หยดน้ำโลหะมีขนาดใหญ่และเป็นการถ่ายโอนด้วยแรงโน้มถ่วงจึงไม่เหมาะกับการเชื่อมงานที่อยู่ในตำแหน่งนอกเหนือจากแนวราบโดยเฉพาะอย่างยิ่งแนวเชื่อมเหนือศีรษะ เพราะหยดโลหะมีแนวโน้มต่อการตกลงในหัวเชื่อม จะเชื่อมได้ดีกับงานที่อยู่ในแนวราบและแนวระดับ ใช้ระดับกระแสและแรงดันเชื่อมสูงกว่าการถ่ายโอนแบบลัดวงจร

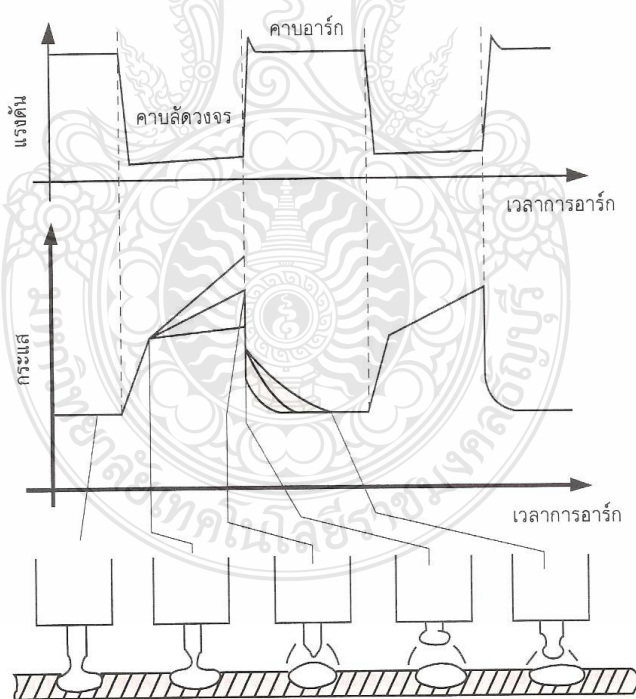


รูปที่ 2.6 ลักษณะการถ่ายโอนโลหะแบบหยดขนาดใหญ่ [6]

**2.5.3.3 การถ่ายโอนแบบลัดวงจร [6]** แบบนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายกว่าการถ่ายโอนแบบอื่น ๆ การถ่ายโอนเริ่มจากปลายลวดเชื่อมและโลหะชิ้นงานถูกทำให้เกิดการอาร์กและมีอุณหภูมิสูงพอที่จะหลอมปลายลวดเป็นหยดโลหะขนาดเล็ก ขณะเดียวกันลวดเชื่อมจะถูกป้อนเข้าสู่บ่อหลอมละลายด้วยอัตราสูง ทำให้หยดโลหะบนปลายลวดเชื่อมสัมผัสกับบ่อหลอมละลายก่อนจะแยกออกจากปลายลวดเชื่อม ซึ่งเป็นสาเหตุของการลัดวงจรไฟฟ้า การอาร์กจะดับไปชั่วขณะ จังหวะที่ลัดวงจรอยู่นี้ กระแสจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง ปลายลวดเชื่อมที่หลอมเป็นหยดจะถูกกั๊กออกและถ่ายโอนสู่บ่อหลอมละลายด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิวจากพฤติกรรมดังกล่าวหยดโลหะที่ปลายลวดจึงเปรียบเสมือนสะพานเชื่อมต่อระหว่างช่องว่างปลายลวดเชื่อมกับบ่อหลอมเหลว เมื่อหยดโลหะหยด

แรกหลุดจากปลายลวดเชื่อมแล้วก็จะเริ่มต้นอาร์กใหม่อีกครั้งขณะที่ปลายลวดเชื่อมสัมผัสกับบ่อหลอมละลายจะมีหน้าที่คล้ายกับฟิวส์ไฟฟ้า และเกิดการระเบิดเรียงต่อกันไปเพราะความหนาแน่นของกระแสสูง การระเบิดทำให้เกิดช่องว่างอาร์ก ระหว่างปลายลวดเชื่อมกับผิวโลหะชิ้นงานเมื่อเริ่มต้นอาร์กใหม่สภาวะอย่างนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องกันไปอย่างรวดเร็วมาก คือ มีความถี่ของการลัดวงจร 20 – 200 ครั้งต่อวินาที แต่ในทางปฏิบัติประมาณ 10 – 100 ครั้งต่อวินาที ซึ่งสังเกตได้จากแผ่นฟิล์มความเร็วสูงเท่านั้น กระแสและแรงดันเชื่อมจะตั้งในช่วงต่ำ จึงมีปริมาณความร้อนเข้าสู่งานน้อยสามารถใช้ลวดขนาดเล็กได้

การถ่ายโอนโลหะแบบลัดวงจร เชื่อมงานได้หลายขนาดความหนา และเหมาะสมกับการเชื่อมงานหน้าตัดบาง ถ้าใช้กระแสตรงกลับขั้วเชื่อมงานได้ทุกขนาดความหนา ใช้เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำปานกลาง เหล็กกล้าเจือต่ำกำลังสูง หรือเชื่อมอะลูมิเนียม แต่แนวเชื่อมจะเย็นตัวเร็วทำให้แกสถูกดักในบ่อหลอมละลายแนวเชื่อมเกิดรูพรุน ส่วนเหล็กนำความร้อนต่ำการเย็นตัวช้าจึงมีเวลาพอที่ฟองแกสจะลอยขึ้นสู่ผิวบ่อหลอมละลาย และระเหยหนีไปได้ สามารถเชื่อมงานได้ทุกตำแหน่งแนวเชื่อมและรอยต่อทุกแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งรอยต่อที่ประกอบไม่เรียบร้อยหรือรอยต่อชนที่มีช่องว่างระหว่างฐานรอยเชื่อมกว้าง การถ่ายโอนแบบลัดวงจรจะก่อให้เกิดสะพานเชื่อมต่อช่องว่างจึงสามารถใช้ในงานเชื่อมโลหะแผ่นหนา และเชื่อมท่อได้ดี

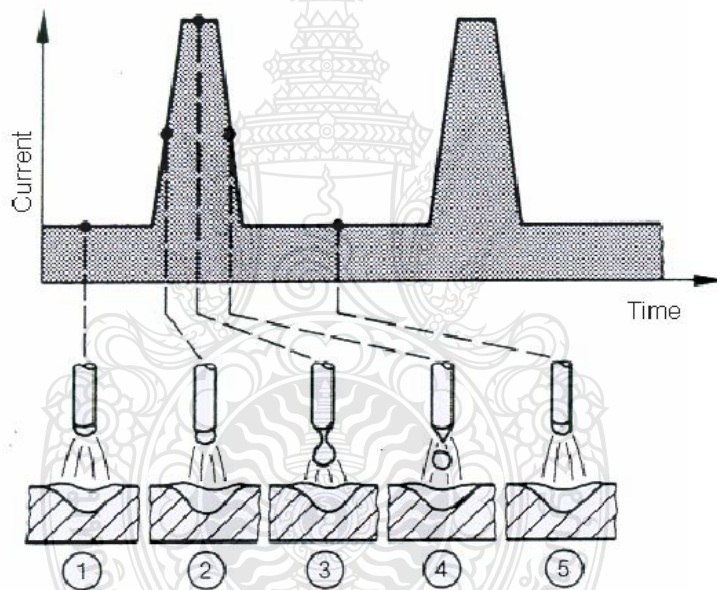


รูปที่ 2.7 การถ่ายโอนโลหะแบบลัดวงจร [6]

2.5.3.4 การถ่ายโอนแบบพัลส์ [6] เป็นการถ่ายโอนที่พัฒนามากจากการถ่ายโอนแบบละออง เพราะมีข้อจำกัดการใช้งานแต่ยังเป็นการถ่ายโอนแบบละอองอยู่ การพัลส์ของกระแสเชื่อมจากระดับ

ต่ำสุดถึงสูงสุดที่ 60 ไซเคิลต่อวินาที จังหวะการพัลส์แต่ละครั้งจะทำให้ปลายลวดเชื่อมหลอมเป็นหยดโลหะได้หนึ่งหยด แล้วถ่ายโอนผ่านอาร์กสู่บ่อหลอมเหลวด้วยความถี่สม่ำเสมอต่อเนื่องกันไป

ระดับกระแสต่ำสุดจะตั้งในช่วงการถ่ายโอนแบบละอองการถ่ายโอนหยดโลหะจะเกิดขึ้นเมื่อการพัลส์กระแสถึงระดับสูงสุด หลังจากถ่ายโอนหยดโลหะแล้ว กระแสจะลดลงต่ำสุดเท่าที่ตั่งไว้ กระแสต่ำจะช่วยคงให้การอาร์กเกิดอยู่ตลอดเวลา และการพัลส์เพิ่มขึ้นถึงระดับสูงสุดได้ ช่วงจังหวะนี้การถ่ายโอนหยดโลหะไม่เกิดขึ้น การพัลส์ของกระแสสูงและต่ำลงจะมีผลต่อการควบคุมปริมาณความร้อนเข้าสู่งานเชื่อม โดยความร้อนเฉลี่ยจะต่ำกว่าการถ่ายโอนแบบละออง จึงเหมาะกับการเชื่อมงานบางที่มีปัญหาหากการหลอมทะลุ เนื่องจากความร้อนสูง เชื่อมงานที่อยู่ในตำแหน่งแนวเชื่อมนอกเหนือมาตรฐานได้ง่าย งานบิดตัวน้อย ใช้ลวดเชื่อมขนาดใหญ่ได้ แต่การถ่ายโอนหยดโลหะผ่านอาร์กยังเป็นหยดขนาดเล็กอยู่จึงประหยัดกว่าการใช้ลวดขนาดเล็กซึ่งมีป็นหากการป้อนลวดเชื่อมด้วย



รูปที่ 2.8 ลักษณะกระแสและขั้นตอนการถ่ายโอนโลหะแบบพัลส์ [6]

การเกิดกระแสพัลส์ได้จากการบิดเปิดวงจร ระหว่างกระแสต่ำสุดกับสูงสุด ดังนั้นในเครื่องเชื่อมตัวเดียวจึงมีต้นกำลัง แยกออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่ทำให้กระแสต่ำสุด และส่วนที่ให้กระแสพัลส์สูงสุด เพื่อให้กระแสพัลส์สูงสุดต้องตั้งให้สูงกว่าระดับกระแสช่วงเปลี่ยนของการถ่ายโอนแบบละออง และกระแสต่ำสุด ตั้งในช่วงการถ่ายโอนแบบหยดขนาดใหญ่ ปลายลวดเชื่อมจะหลอมที่หัวจักรต่ำสุดเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นสูงกว่าจุดช่วงเปลี่ยน หยดโลหะจะแยกตัวออกจากปลายลวดเชื่อมผ่านอาร์กสู่บ่อหลอมเหลว หัวจักรนี้จะเกิดขึ้นซ้ำ ๆ กันอย่างต่อเนื่องขณะปฏิบัติการเชื่อม บ่อหลอมจะแข็งตัวเร็วกว่าการถ่ายโอนแบบละออง การอาร์กรุนแรงกว่าแต่ความถี่ของการถ่ายโอนลดลง

กระแสพัลส์สามารถเชื่อมได้ทั้งโลหะที่เป็นเหล็ก และโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก เพราะมีปริมาณความร้อนที่เข้าสู่งานต่ำทำให้สามารถเชื่อมงานที่มีตำแหน่งแนวเชื่อมนอกเหนือมาตรฐาน เพราะกระแส

พัลส์และบ่อหลอมละลายแข็งตัวเร็ว เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าเจือนิเกิลสูง เหล็กกล้าเจือต่ำ เหล็กกล้าไร้สนิม ทองแดง ทองแดงเจืออะลูมิเนียมและโลหะเจือชนิดอื่น ๆ เชื่อมงานบาง กับหนาปานกลางได้ดี และเชื่อมได้ทุกรอยต่อ

#### 2.5.4 การเชื่อมแบบแบ็คแฮนด์ (Black Hand)

การเชื่อมแบบแบ็คแฮนด์เป็นเทคนิคในการเชื่อมแบบนิ่งในจำนวน 2 แบบ ที่ใช้เชื่อมในกระบวนการเชื่อมเพราะในการเชื่อมมีการเชื่อมแบบแบ็คแฮนด์และโฟแฮนด์ สำหรับเทคนิคการเชื่อมแบบแบ็คแฮนด์เป็นลักษณะการเชื่อมถอยหลังคือลวดเชื่อมจะเดินหน้านำแนวเชื่อมและลวดเชื่อมจะทำมุมตรงข้ามกับแนวเชื่อม ส่วนการเชื่อมแบบโฟแฮนด์จะเป็นการเชื่อมเดินหน้าคือลวดเชื่อมทำมุมขนานกับแนวเชื่อม ถ้าดูตามลักษณะของมือจะพบว่า การเชื่อมแบบแบ็คแฮนด์คือการเดินแนวเชื่อมไปในทิศทางหลังมือ ส่วนการเชื่อมแบบโฟแฮนด์คือการเดินแนวเชื่อมไปในทิศทางหน้ามือ

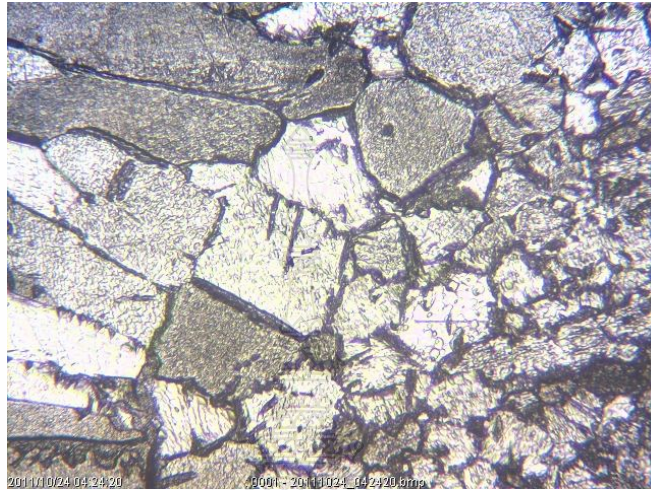
### 2.6 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

เหล็กทุกชนิดเมื่อมีอุณหภูมิเปลี่ยนไป เหล็กเหล่านี้จะมีโครงสร้างเปลี่ยนไป เช่น เหล็กบริสุทธิ์ที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 937 – 1400 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างผลึกแบบ F.C.C. ส่วนในช่วงอุณหภูมิอื่น ๆ จะมีโครงสร้างแบบ B.C.C. การเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจะทำให้ปริมาตรอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ด้วย การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยา เป็นการศึกษาโครงสร้างของโลหะภายใต้กล้องที่มีกำลังขยายสูง [8] โดยจะตรวจสอบโครงสร้างของโลหะไม่ว่าจะเป็นการเรียงตัวของอะตอม อีออน หรือโมเลกุลของสารต่าง ๆ ซึ่งสามารถตรวจสอบด้วยเครื่องมือทางโลหะวิทยาและทางฟิสิกส์มาช่วย แต่การจะตรวจสอบโครงสร้างภายในให้ละเอียดจริง ๆ จะต้องใช้รังสี X-Ray ช่วยในการตรวจสอบซึ่งจะทำให้การตรวจสอบมีความแน่นอนเพื่อวัดหาระยะระหว่างระนาบ หรือวัดระยะห่างระหว่างอะตอม หาดำหนิของผลึกโดยความกว้างของเส้นที่เกิดขึ้นในภาพ จะแสดงถึงข้อบกพร่องในผลึก ความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (Dislocation) เนื่องจากโลหะเป็นวัสดุที่บอบ การตรวจสอบขนาด รูปร่าง และการจัดเรียงตัวของผลึกจะต้องใช้วิธีการตัดชิ้นงานตามแนวที่ต้องการศึกษา แล้วนำไปขัดมัน กัดกรดตามชนิดของโลหะ โดยกรดจะกัดบริเวณขอบเกรนอย่างรุนแรงกว่าส่วนอื่น ๆ ของผลึก เพราะขอบเกรนจะมีข้อบกพร่องมากที่สุดกรดจะกัดขอบเกรนให้เป็นร่อง เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ แสงที่ตกกระทบขอบเกรนจะสะท้อนหักเหออกจากทิศทางเดิม ขอบเกรนจึงมีสีดำขณะที่เนื้อเกรนสว่าง [8]

#### 2.6.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค [8]

การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ แบบจุลภาค จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ ที่มีกำลังขยายสูง ๆ แต่โครงสร้างบางชนิด เช่นผลึกที่มีขนาดเล็กกว่า  $0.4 - 0.6 \mu\text{m}$  ไม่สามารถตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาได้ แม้ว่าจะมีกำลังขยายสูงสุดแล้วก็ตาม โดยปกติกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาค่าจะใช้ศึกษาและถ่ายภาพโครงสร้างของโลหะที่ต้องการกำลังขยายไม่เกิน 1000 – 1500 เท่า ซึ่งจะเห็นอนุภาคที่เล็กประมาณ 0.4 – 0.6 มม. ถ้าจะนำภาพไปขยายอีกก็ได้ แต่รายละเอียดคงเดิม และความชัดเจนจะด้อยลง ดังนั้นถ้าต้องการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดยิ่งขึ้น จะต้องใช้กล้อง

จุลทรรศน์อิเล็กตรอน ในการศึกษาการทำงานของกล้องแบบนี้ จะใช้ลำแสงอิเล็กตรอนความเร็วสูง และจะเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นมากกว่าแสงธรรมดา 100000 เท่า จึงเพิ่มกำลังขยายมากกว่า แสงธรรมดาอย่างมหาศาล



รูปที่ 2.9 ลักษณะของโครงสร้างจุลภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีขนาดใหญ่มาก จะต้องใช้ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ในการผลิต และควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน และทั้งระบบจะต้องทำงานอยู่ในสุญญากาศ เพื่อไม่ให้เกิดเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนปะทะกับอนุภาคอากาศ จะมีผลทำให้ทิศทางอิเล็กตรอนผิดเพี้ยนไป การบังคับควบคุมไม่แน่นอน เลนส์ของกล้องคือ ขดลวดซึ่งให้สนามแม่เหล็กกำลังสูง การปรับโฟกัสของภาพทำได้โดยการเปลี่ยนค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กบีบอิเล็กตรอนให้ไปรวม ณ จุดที่ต้องการ ซึ่งต่างจากกล้องธรรมดา จะใช้เลนส์รวมแสงและใช้วิธีปรับระยะห่างระหว่างเลนส์ เพื่อให้เกิดโฟกัส

อิเล็กตรอนจะถูกปล่อยออกจากขั้วลบ ซึ่งทำจากทังสเตน พุ่งไปยังขั้วบวกด้วยความเร็วสูง และตามทางที่ผ่านนั้นจะกระทบกับชิ้นงานทดสอบ โดยการควบคุมของเลนส์แม่เหล็กอิเล็กตรอน บางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนจะสะท้อนกลับไป ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงานลำแสงที่ผ่านการกระทบชิ้นงานจะถูกโฟกัสโดยระบบเลนส์แม่เหล็กก่อให้เกิดภาพขึ้น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถเพิ่มกำลังขยายได้สูงถึง 200000 เท่า โดยการเพิ่มเลนส์พิเศษเข้าไปกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนโดยทั่วไปจะมีกำลังขยายประมาณ 5000 – 20000 เท่า หรือมากกว่ากล้องจุลทรรศน์ธรรมดา อยู่ประมาณ 10 เท่า

การศึกษาโครงสร้างของโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา หรืออิเล็กตรอนจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของโลหะผสม แต่ไม่สามารถบอกได้ว่าอะตอมของส่วนผสมกระจายตัวเป็นอย่างไร

การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

- ขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์หยาบจนถึงเบอร์ละเอียด
- ขัดมันด้วยผงขัด หรือด้วยไฟฟ้า (อิเล็กโตรไลติก)
- ทำความสะอาดผิวงานที่ขัดเรียบร้อยแล้ว
- ทาหน้ายาลอกภาพ บนผิวงาน

- นำแผ่นพลาสติกปิดทับบนน้ำยา และใช้น้ำกดให้แน่น
- นำแผ่นพลาสติกปิดทับบนน้ำยา และใช้น้ำกดให้แน่น
- นำ Replica ไปยึดไว้กับแผ่นรองและนำไปตรวจสอบต่อไป

## 2.6.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคเป็นการศึกษาโครงสร้างที่สามารถมองด้วยตาเปล่า หรือขยายได้ไม่เกิน 50 เท่า โดยที่ผิวของชิ้นงานที่ต้องการศึกษาไม่จำเป็นต้องเตรียมอย่างดีเหมือนการศึกษาโครงสร้างจุลภาคก็ได้ การตรวจสอบแบบนี้จะใช้ตรวจสอบดูรูพรุน รอยร้าว การแยกชั้นการตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อมและผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปได้ในขณะเย็น ในการวิเคราะห์รอยแตกในลักษณะต่าง ๆ เช่น จากการทดสอบแรงดึง การตีกระแทก หรือเกิดจากความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยการใช้เลนส์ขยายส่องดูลักษณะของรอยแตกหักเป็นรอยแตกเปราะ รอยแตกเหนียว หรือตำหนิของวัสดุ เช่น ขี้ตะกรัน ผังใน วิธีการศึกษาโครงสร้างมหภาคมี 2 วิธี ได้แก่

### 2.6.2.1 การไม่ใช้สารกัด

เป็นการตรวจสอบโครงสร้างตำแหน่งที่แน่นอนตามหน้าตัดของชิ้นงาน เช่น ตำหนิได้แก่รูอากาศ รอยร้าว รอยแตก รูพรุน ผิวเกย ตัวอย่างตำหนิที่กล่าวมาแล้ว คือ ตำหนิที่เกิดจากงานที่ได้จากการรีด การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง ได้แก่ การเกิดผลึกเข็ม (Columnar Crystal) เชน ไตรท์ไนโครงสร้างงานเชื่อมหรืองานหล่อ เส้นใยการครากตัวของวัสดุที่ทำแม่พิมพ์ อิทธิพลจากความร้อนในรอยเชื่อม โชนของแข็ง และการตกผลึกใหม่ ของโครงสร้าง ความแตกต่างของส่วนผสมทางเคมี ได้แก่ การแยกตัวการไม่ละลายของฟอสฟอรัสหรือกำมะถัน และการผังตัวของสารอื่น ๆ ผิวที่เกิดจากการลดหรือเพิ่มคาร์บอน

**2.6.2.2 การใช้สารกัด** วิธีการใช้สารกัดผิวของชิ้นงานเพื่อดูโครงสร้าง แบ่งออกได้หลายวิธี ดังนี้

- วิธีของแอตเลอร์ นิยมใช้สำหรับตรวจสอบโครงสร้างรอยเชื่อมของเหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสมต่ำ หลังจากการกัดจะทำให้เห็นภาพโครงสร้างของรอยเชื่อมตามแนวตัดขวาง ซึ่งในรอยเชื่อมจะมีโชนที่เกิดจากการเชื่อมอยู่ด้วยกัน 3 โชนที่สามารถมองเห็นได้คือโชนหลอมละลายคือบริเวณที่เป็นแนวเชื่อม โชนอิทธิพลของความร้อนที่เกิดจากผลกระทบของความร้อน และโชนที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน ซึ่งมีโครงสร้างของวัสดุพื้นเดิม บริเวณหลอมละลายของแนวเชื่อม จะมีหลายชั้นแนวเชื่อม การซึมลึก รูปร่าง เม็กเกรน และขนาดของขี้ตะกรัน ผังในรูพรุน รอยร้าว ซึ่งสามารถมองเห็นได้นอกจากนี้การขยายตัวของโชนอิทธิพลของความร้อนก็จะเห็นได้อย่างชัดเจน วิธีการของแอตเลอร์ยังสามารถศึกษาโครงสร้างของเหล็กกล้าผสมสูง นิกเกิล ทองแดง ทองแดงผสมได้อีกด้วย
- วิธีของไฟร์ เหมาะกับการศึกษาการแยกตัวของเหล็กไนไตรด์ซึ่งการส่องดูโครงสร้างด้วยวิธีทางจุลภาคไม่สามารถมองเห็นได้ การแยกตัวนี้จะเกิดในกรณีที่เกิดจากการบ่ม โดยเฉพาะในตำแหน่งที่มีการขึ้นรูปขณะที่เย็นตัว จนทำให้วัสดุครากตัว ทำให้สามารถมองเห็นแนวเส้นใยของการครากตัวได้ ดังนั้นจึงสามารถศึกษาความเค้นของชิ้นส่วนตามแนวเส้นใยได้

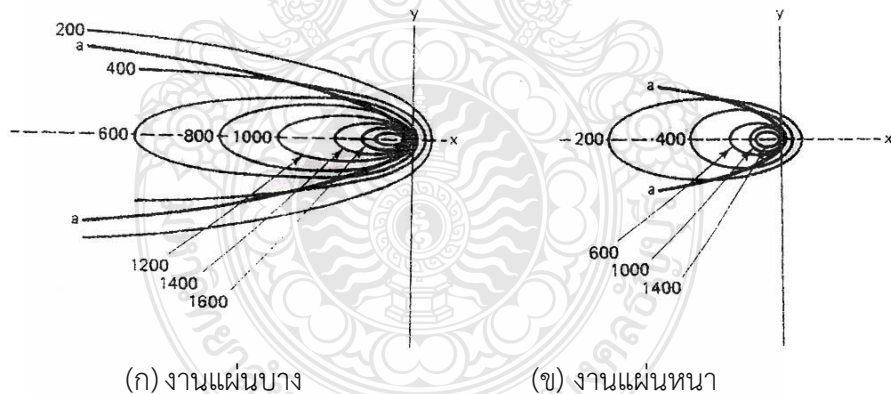


- วิธีของโลห์ริก เหมาะกับการศึกษาโครงสร้างของ อะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมผสมที่เชื่อมให้ติดกัน หรือจากเส้นใยของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยไม่ปาดผิว
- วิธีของตุ๊กเกอร์ เป็นวิธีการหาขนาดของเม็ดเกรนที่เกิดจากขบวนการตกผลึกใหม่ สำหรับอะลูมิเนียมที่ไม่มีการเตรียมผิว
- วิธีของโอเบอร์ฮอฟเฟอร์ ใช้ดูการแยกตัวของธาตุต่าง ๆ โดยเฉพาะฟอสฟอรัส ในเหล็กกล้า และสามารถมองเห็นโครงสร้างพื้นฐานอีกด้วย



รูปที่ 2.10 ลักษณะของโครงสร้างมหภาค

## 2.7 อิทธิพลของความเร็วจุดและอุณหภูมิที่มีผลต่องานเชื่อม [9]



(ก) งานแผ่นบาง

(ข) งานแผ่นหนา

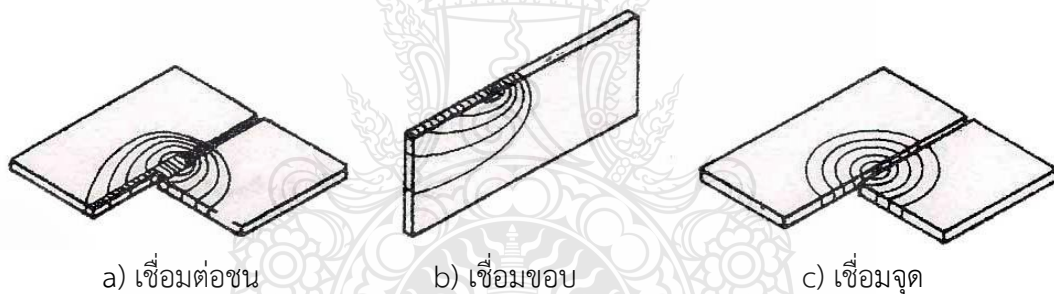
รูปที่ 2.11 ช่วงอุณหภูมิบริเวณแอ่งหลอมละลายกระจายออกไป [9]

ในกระบวนการเชื่อมที่เกิดการอาร์ค อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะสูงมาก โดยสูงถึง 5000 – 6000 องศาเซลเซียส ซึ่งบริเวณที่อยู่ถัดจากการอาร์คจะถูกทำให้ร้อนและหลอมละลาย พลังงานความร้อนที่ส่งถ่ายให้รอยเชื่อมเรียกว่าความร้อนเข้า (Heat Input) แต่ในการเชื่อมจะมีอุณหภูมิจำนวนหนึ่งที่สูญเสียไปประมาณ 50 – 90 % แล้วแต่กระบวนการที่ใช้เชื่อม ซึ่งอุณหภูมิที่หายไปคืออุณหภูมิที่ทำให้ชิ้นงานบริเวณใกล้ๆ แนวเชื่อมมีอุณหภูมิสูงขึ้นใกล้จุดหลอมละลายนอกจากนั้นก็เป็นอุณหภูมิที่สูญเสียไปจากการกระเด็นของสะเก็ดน้ำโลหะ และอุณหภูมิที่ให้ความร้อนต่อลวดเชื่อม การแผ่รังสี และการพาความร้อนให้กับอากาศบริเวณรอบ ๆ การเชื่อม ในการวิเคราะห์ผลของความร้อนต่อแนวเชื่อมจำเป็นต้องพิจารณาถึงสิ่งต่างๆ ต่อไปนี้

- อัตราความร้อนที่เกิดขึ้น
- อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้น
- ช่วงเวลา ณ อุณหภูมิ
- อัตราการเย็นตัว

องค์ประกอบเหล่านี้เป็นเรื่องยากในการพิจารณา แต่อย่างไรก็ตามสามารถวิเคราะห์หาผลที่เกิดต่อแนวเชื่อมได้โดยประมาณ

ในงานเชื่อมบริเวณแอ่งหลอมละลายที่เกิดเป็นแนวเชื่อม โดยการหลอมละลายของชิ้นงานและลวดเชื่อมจึงเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด อุณหภูมิจะแผ่กระจายออกจากแอ่งหลอมละลายห่างออกไปเรื่อย ๆ ทำให้บริเวณตั้งแต่แอ่งหลอมละลายออกไปจะมีอุณหภูมิลดหล่นลงไปจนถึงบริเวณที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนของแนวเชื่อม คือมีอุณหภูมิต่ำเท่ากับอุณหภูมิห้อง ลักษณะการกระจายของอุณหภูมินี้ อธิบายด้วยหลักการของไอโซเทอร์มอล การกระจายอุณหภูมิของแต่ละกระบวนการเชื่อม ความเร็วการเชื่อม และความหนาของชิ้นงานเชื่อม จึงมีความแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 2.11 , 2.12 และ 2.13



a) เชื่อมต่อชน                      b) เชื่อมขอบ                      c) เชื่อมจุด

รูปที่ 2.12 การกระจายอุณหภูมิของการเชื่อมงานแผ่นบาง [9]

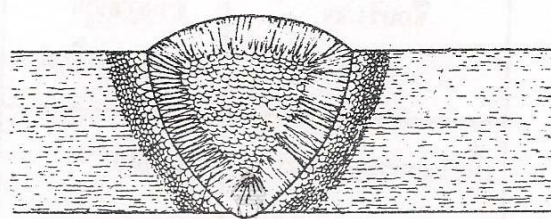


a) เดินแนว                      b) ต่อชนตัว V                      c) ต่อตัวที

รูปที่ 2.13 การกระจายอุณหภูมิของการเชื่อมงานหนา [9]

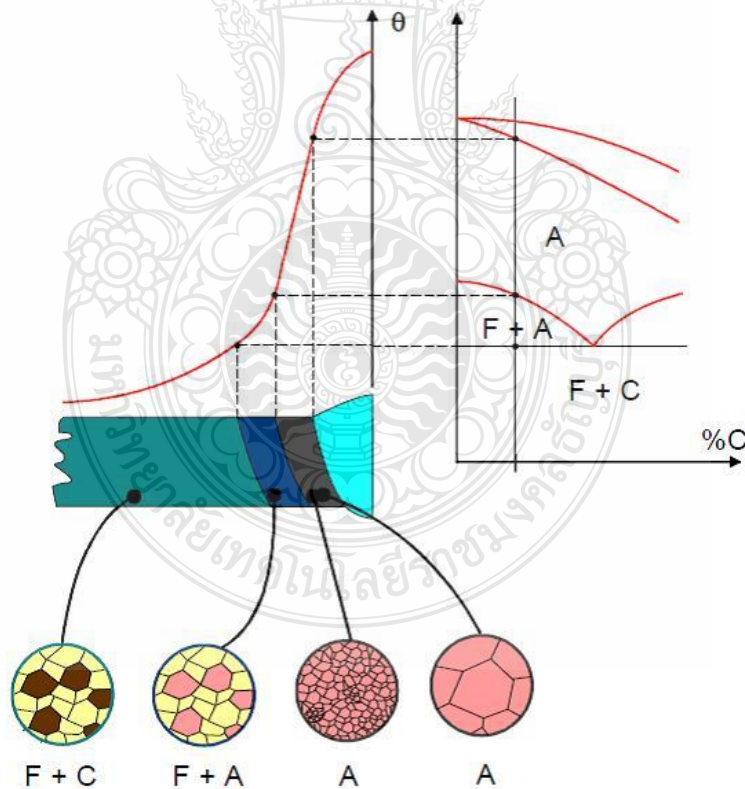
การเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยการอาร์กแบบต่าง ๆ ความร้อนจะส่งผลต่อชิ้นงาน และลักษณะของโครงสร้างทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ ขึ้น โดยผลจากความร้อนเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เชื่อมด้วยแก๊ส คือชิ้นงานได้รับผลจากความร้อนน้อยกว่า ชิ้นงานได้รับความร้อนน้อยกว่า แนวเชื่อมแคบกว่า การเย็นตัวของแนวเชื่อมก็ไวกว่า บริเวณกระแทกร้อนน้อยกว่า และลักษณะเกรนหยาบจะ

แคบกว่า ถ้าการเชื่อมมีการสลายตัวเชื่อมเป็นแนวกว้างจะทำให้แอ่งหลอมละลายมีอุณหภูมิสูงปริมาณความร้อนมาก และเมื่อเย็นตัวลงจะเกิดแรงดึงและแรงอัดเกิดขึ้นภายใน



รูปที่ 2.14 ลักษณะโครงสร้างแนวเชื่อมเมื่อแข็งตัวหลังจากการหลอมละลาย [9]

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากอุณหภูมิในกระบวนการเชื่อม อุณหภูมิบริเวณต่าง ๆ ตั้งแต่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากแนวเชื่อมไปจนถึงบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนสามารถใช้แผนภูมิสมดุลของเหล็กและเหล็กคาร์ไบด์ ( $Fe - Fe_3C$  Diagram) มาอธิบายลักษณะโครงสร้างที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของแนวเชื่อมได้ แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แผนภูมิสมดุลของเหล็ก และเหล็กคาร์ไบด์ [9]

บริเวณกระแทกร้อน(HAZ) เป็นบริเวณที่อยู่ใกล้แนวรอยเชื่อม ซึ่งมีอุณหภูมิสูงมากขณะทำการเชื่อม แต่มีอุณหภูมิไม่สูงเพียงพอที่จะเกิดการหลอมละลายเป็นเนื้อรอยเชื่อม บริเวณนี้จะได้รับความ

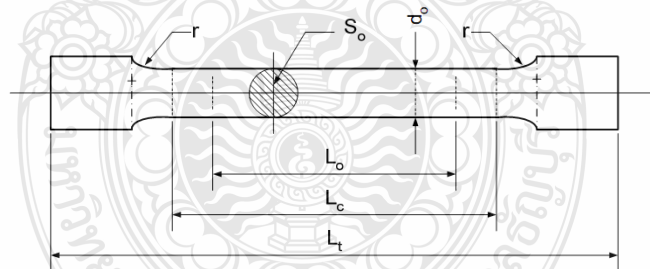
ร้อนสูงมากขณะเชื่อมและจะเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีพื้นที่หน้าตัดมาก หรือมีความหนาของชิ้นงานมาก จากการเย็นตัวที่รวดเร็วทำให้บริเวณ HAZ มีโครงสร้างที่แข็ง,เปราะ และมีความต้านทานต่อการแตกร้าวได้ต่ำ HAZ จึงเป็นบริเวณที่มีโอกาสเกิดความเสียหายได้มาก เช่นการเกิด Weld Decay หรือ การเกิด Inter Granular Corrosion

## 2.8 การทดสอบค่าการรับแรงดึง [10]

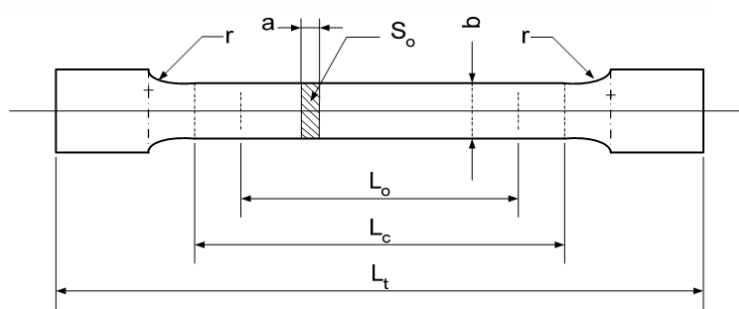
การทดสอบโดยการดึง ใช้มาตรฐาน ASTM E8 ในการทดสอบ โดยการทดสอบแรงดึงเป็นวิธีการทดสอบที่ง่ายที่สุดในทุกวิธีของการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ และนิยมทดสอบกันมาก เพราะสามารถให้ผลที่เป็นสมบัติทางกลพื้นฐานพอสมควร เช่นให้ผลเกี่ยวกับความต้านทานแรงดึง ความยืดตัว ความเหนียว ความเปราะและลักษณะการแตกหักของวัสดุ ซึ่งนับว่าจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป โดยทั่วไปการทดสอบต้องใช้แรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ดึงขึ้นทดสอบให้ยืดออก และขาดในที่สุด สำหรับการทดสอบโดยการดึงนั้น นิยมทดสอบวัสดุที่มีสมบัติเหนียวมากกว่าวัสดุเปราะ

### 2.8.1 ชิ้นทดสอบ

การทดสอบโดยการดึง จะมีลักษณะภาคตัดขวางหลายแบบอาจจะเป็นวงกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือในกรณีพิเศษอาจจะเป็นรูปอื่นก็ได้สำหรับชิ้นทดสอบที่เป็นโลหะ ส่วนมากจะเตรียมโดยการกลึงให้มีพื้นที่ภาคตัดขวางกลม หรืออาจเตรียมให้มีพื้นที่ภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมมุมฉากก็ได้ ดังรูปที่ 2.16 และ รูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 ลักษณะชิ้นทดสอบภาคตัดวงกลม [10]

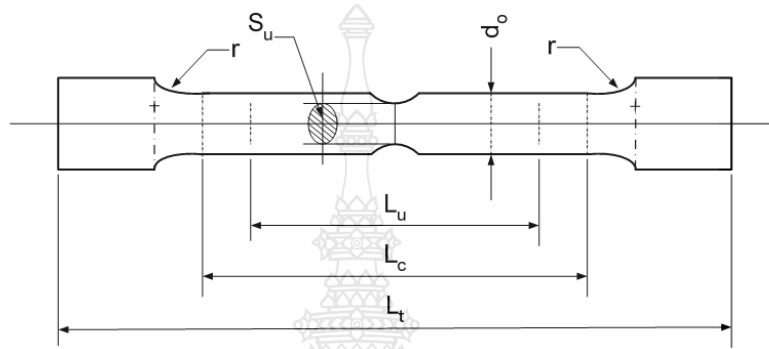


รูปที่ 2.17 ลักษณะชิ้นทดสอบภาคตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก [10]

2.8.2 ความยาวพิกัด (Gauge Length) คือความยาวระหว่างจุดที่กำหนดขึ้น 2 จุด ในส่วนที่ขนานกันของชิ้นทดสอบ เพื่อใช้หาความยืดระหว่างการทดสอบ

2.8.2.1 ความยาวพิกัด  $L_0$  หมายถึง ความยาวพิกัดก่อนการทดสอบ

2.8.2.2 ความยาวพิกัดสุดท้าย ( $L_u$ ) หมายถึง ความยาวพิกัดหลังจากชิ้นทดสอบถูกดึงให้ขาด แล้วนำส่วนที่ขาดมาวางต่อเข้าด้วยกันให้สนิทที่สุดในแนวเส้นตรงเดียวกัน ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ลักษณะชิ้นทดสอบภาคตัดขวางกลมหลังจากขาด [10]

2.8.2.3 ความยาวพิกัดสำหรับเครื่องวัดการยืด คือความยาวระหว่างจุดที่กำหนดขึ้น 2 จุด ในส่วนขนานของชิ้นทดสอบ เพื่อใช้สำหรับวัดการยืด ความยาวนี้อาจจะแตกต่างจากความยาวพิกัดเดิม ( $L_0$ ) และอาจจะมีค่าใดก็ได้ที่มากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $d$ ) หรือความกว้าง ( $b$ ) ของชิ้นทดสอบ แต่ต้องน้อยกว่าความยาวของส่วนขนาน

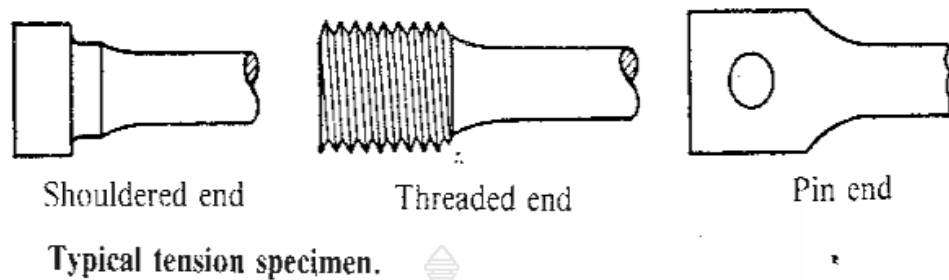
2.8.2.4 สัญลักษณ์ และความหมาย จากภาพ 2.11 , 2.12 , 2.13 จะมีสัญลักษณ์และความหมายในมาตรฐานของชิ้นทดสอบส่วนอื่น ๆ เพิ่มเติมจากที่ได้กล่าวมาแล้วดังนี้

- $a$  = ความหนาของส่วนขนานของชิ้นทดสอบ
- $L_t$  = ความยาวรวมของชิ้นทดสอบ
- $S_0$  = พื้นที่ภาคตัดขวางเดิมภายในความยาวพิกัด
- $S_u$  = พื้นที่ภาคตัดขวางน้อยที่สุดหลังจากขาด
- $r$  = รัศมีของบ่าชิ้นงานทดสอบ

### 2.8.3 ลักษณะการยึดชิ้นทดสอบ

การยึดชิ้นทดสอบโดยการดึงนั้นจะต้องยึดด้วยวิธีที่เหมาะสมว่าจะใช้อุปกรณ์ใดยึดชิ้นทดสอบ และวิธีใดจึงสะดวก ข้อสำคัญในการยึดชิ้นทดสอบก็ต้องพยายามอย่างดีที่สุดที่จะให้แรงทดสอบกระทำอยู่ในแนวแกนของชิ้นทดสอบ และจะต้องมีความแน่ใจด้วยว่าอุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบมีความแข็งแรงเพียงพอต่อแรงกระทำจนชิ้นทดสอบขาด

สำหรับวิธียึดชิ้นทดสอบมีอยู่หลายวิธี เช่น ใช้ลิ้มยึด เกลียวยึด บายึด โดยแต่ละวิธียึดชิ้นทดสอบนั้นจะต้องไม่เกิดการบิดแกว่ง หรือเกิดการตัดโค้ง ขณะที่ทำการทดสอบ ดังนั้นตรงปลายยึดชิ้นทดสอบ จึงต้องมีการเตรียมให้มีรูปร่างลักษณะยึดตามวิธีที่เหมาะสม ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ลักษณะปลายยึดขึ้นทดสอบโดยการดึง [10]

จากภาพจะเห็นว่าลักษณะปลายยึดขึ้นทดสอบจะถูกเตรียมได้หลายแบบ ดังนี้

- ปลายยึดแบบเกลียวเรียบ (Plain End)
- ปลายยึดแบบบ่า (Shouldered End)
- ปลายยึดแบบเกลียว (Pin End)
- ปลายยึดแบบเจาะรูใส่สลัก (Pin End)

อุปกรณ์สำหรับยึดขึ้นทดสอบนั้นมีอยู่หลายชนิด แต่ที่นิยมหรือสะดวกต่อการใช้และสะดวกต่อการเตรียมปลายยึดขึ้นทดสอบ นั่นคือ ลิ่มยึด การยึดด้วยวิธีใช้ลิ่มยึดนั้นเหมาะสำหรับขึ้นทดสอบที่เป็นโลหะเหนียวมากกว่าโลหะเปราะ เพราะการยึดขึ้นทดสอบโลหะเปราะจะทำให้ผิวแตกและอาจจะเกิดการดึงขาดใกล้บริเวณที่จับยึดขึ้นทดสอบก็ได้ [10]

## 2.9 การทดสอบหาค่าความแข็ง [11]

การทดสอบความแข็งของโลหะสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่นการทดสอบอย่างง่าย ทดสอบโดยใช้ตะไบเป็นเครื่องมือในการทดสอบ โดยเลือกชนิดของตะไบ ที่มีความแข็งสูงสุด โดยการจัดระดับความแข็งของตะไบแต่อันไว้ เมื่อได้ตะไบที่มีความแข็งแตกต่างกันแล้วก็นำไปทดสอบความแข็งโลหะต่างๆ ได้ โดยถ้าตะไบอันไหนตะไบขึ้นงานได้แสดงว่าชิ้นงานมีค่าความแข็งนั้น แต่การตรวจสอบด้วยวิธีนี้ก็อาจเกิดข้อผิดพลาดได้ เพราะผู้ตรวจสอบไม่มีความชำนาญ ดังนั้นจึงมีการทดสอบความแข็งด้วยวิธีอื่น ๆ เพื่อความถูกต้องของข้อมูลโดยในการวิจัยครั้งนี้ใช้การทดสอบความแข็งดังนี้

### 2.9.1 การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล

การทดสอบแบบร็อกเวลนี้ วัดได้จากความลึกที่ปรากฏบนผิวทดสอบ อันเกิดจากการกดของหัวกด ตามมาตรฐาน และวัดค่าความแข็งของชิ้นงานได้หลายสเกล เช่น A , B , C , D , E , F และ G เป็นต้น สำหรับน้ำหนักที่ใช้กดแต่ละสเกลแสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ขนาดน้ำหนักที่ใช้กดแต่ละสเกล

สเกล	หัวกด	น้ำหนักกด (kg)
A	เพชร	60
B	บอล 1/16 นิ้ว	100
C	เพชร	150
D	เพชร	100
E	บอล 1/8 นิ้ว	100
F	บอล 1/16 นิ้ว	60
G	บอล 1/16 นิ้ว	150

แต่มีการวัดบางสเกลเท่านั้นที่นิยมใช้ ซึ่งคือ สเกล C และ สเกล B โดยมีวิธีในการทดสอบดังนี้

- ตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องด้วยแท่งทดสอบ ก่อนทำการทดสอบ
- ชิ้นงานทดสอบต้องทำความสะอาดและขนานกันทั้งสองด้าน
- รอยกดบนผิวทดสอบควรห่างกันอย่างน้อย 3 มิลลิเมตร
- วัดค่าความแข็งอย่างน้อย 3 จุด แล้วนำค่าที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ย จะได้เป็นค่าความแข็งที่ถูกต้อง
- ค่าความแข็งที่อ่านได้บนสเกลเป็นค่าที่นำไปใช้ได้เลย จึงมีความรวดเร็วในการทดสอบ
- ชิ้นงานที่จะทำการทดสอบควรมีความหนาไม่น้อยกว่า 10 เท่าของรอยกดบนผิวทดสอบ



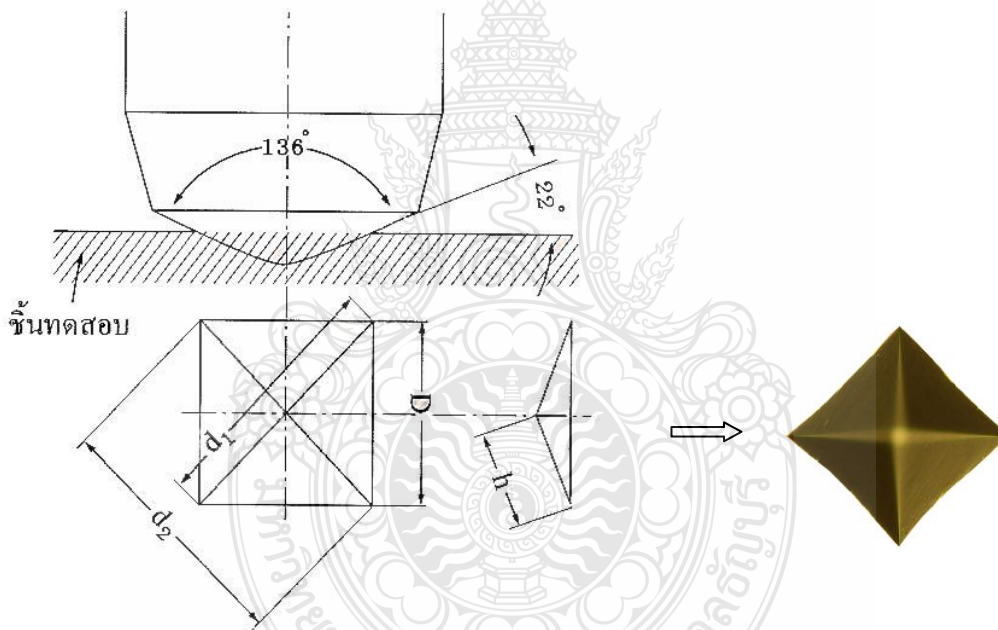
รูปที่ 2.20 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์

### 2.9.2 การทดสอบความแข็งแบบไมโครฮาร์ดเน็ตวิกเกอร์

การทดสอบความแข็งแบบนี้ มีหลักการคล้ายกับการทดสอบความแข็งแบบบริเนล แต่การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์สามารถวัดความแข็งได้อย่างถูกต้องแน่นอนกว่าแบบ บริเนล ทั้งนี้ก็เพราะว่าความแข็งที่ได้มาจากอัตราส่วนของน้ำหนักที่ใช้กดต่อพื้นที่สัมผัสกับหัวกดเพชรรูปพีระมิด



รูปที่ 2.21 เครื่องทดสอบไมโครฮาร์ดเน็ตวิกเกอร์



รูปที่ 2.22 ลักษณะการกดและรอยกดที่เกิดขึ้นจากหัวกดเพชรรูปทรงพีระมิด [11]

การทดสอบแบบวิกเกอร์นี้สามารถทดสอบความแข็งของเหล็กได้ทุกชนิดไม่ว่าจะมีขนาดหรือรูปทรงเช่นใดก็ตาม และสามารถทดสอบความแข็งของวัสดุที่มีความแข็งต่ำ จนกระทั่งมีความแข็งสูงมากๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นการทดสอบที่ให้ความละเอียดสูงทั้งนี้ก็เพราะว่าเมื่อทดสอบแล้วจะเกิดรอยกดบนชิ้นงานน้อยมาก จึงต้องนำมาขยายด้วยกล้องขยายและวัดค่าความยาวของเส้นทแยงมุมของรอยกดนั้น เมื่อทราบค่าแล้ว นำมาคำนวณหรือเปิดตารางเปรียบเทียบจึงจะทราบค่าความแข็งของชิ้นงานนั้น โดยการวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในการศึกษาวิจัยเนื่องจากสามารถวัดค่าความแข็งได้ในช่วงที่กว้างและมีหน่วยของค่าความแข็งเดียว คือ VHN ทำให้เหมาะสำหรับการทดลองวัสดุได้หลากหลายชนิด ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว การวัดความแข็งแบบ



วิกเกอร์ควรเลือกน้ำหนักกดให้เหมาะเพื่อให้เกิดรอย Pyramid ที่สมบูรณ์ จากนั้นนำขนาดของรอย บวมไปคำนวณโดยใช้สูตรในการคำนวณตาม 2.1 และ 2.2

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

กำหนดให้

A = พื้นที่รอยกดเป็น มม.<sup>2</sup>

F = แรงที่ใช้กด เป็น N

d = เส้นทแยงมุมเฉียงของรอยกด เป็น มม.

$$A = \frac{d^2}{1.584} \quad (2.1)$$

$$HV = 0.189 \times \frac{F}{d^2} \quad (2.2)$$

จากค่า d ตามหลักการทดสอบของวิกเกอร์ เราสามารถที่จะทำการอ่านค่าความแข็งจากตาราง ได้โดยตรง แรงที่ใช้ในการทดสอบ แบ่งเป็น 2 ช่วง คือ

- ช่วงสูง คือ 980 , 490 , 294 , 196 , 98 , 49 N

- ช่วงต่ำ คือ 49 , 29.4 , 19.6 , 9.8 , 4.9 , 2.94 , 1.96 N

แรงที่เลือกใช้ในการทดสอบจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรง และความหนาของชิ้นงานทดสอบ การ กำหนดค่าความแข็ง ให้เขียนค่าความแข็งใช้อักษร HV โดยค่าความแข็งจะอยู่ข้างหน้าตัวอักษร ตัวอย่างเช่น 113 HV / 10 ค่าความแข็งคือ 113 วิกเกอร์ แรงที่ใช้กด 9.8 N เวลาทดสอบ 10 วินาที

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ยงยุทธ ดุลยกุล. ได้ศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมเหล็กกล้า คาร์บอนด้วยกระแสเชื่อม และส่วนผสมของแก๊สคลูมที่แตกต่างกันโดยกรรมวิธีการเชื่อมมิก โดยใช้ แก๊สคลูมที่แตกต่างกันกับกระแสเชื่อม 2 ชนิด คือกระแสพัลส์ และกระแสมาตรฐาน เชื่อมเหล็กกล้า คาร์บอนเกรด SS400 จากการทดลองพบว่าการเชื่อมด้วยกระแสแบบมาตรฐาน ที่แก๊สคลูมทุก อัตราส่วนมีการหลอมละลายระหว่างชั้นกับเนื้อโลหะงานบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อน (HAZ) สมบูรณ์ดี แนวเชื่อมเรียบ ส่วนการเชื่อมด้วยกระแสแบบพัลส์การหลอมละลายระหว่างชั้นกับเนื้อ โลหะงานบริเวณ HAZ มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ส่วนการทดสอบทางกลพบว่าการเชื่อมด้วย กระแสแบบมาตรฐานที่แก๊สคลูมทุกอัตราส่วนจะให้ค่าความแข็งแรง และความเค้นที่จุดครากสูง กว่า การเชื่อมด้วยแก๊สคาร์บอนไอออกไซด์ 100 % ส่วนกระแสแบบพัลส์ให้ค่าความแข็งแรงใกล้เคียง กัน เปรียบเทียบกระแสเชื่อมพบว่าการเชื่อมด้วยกระแสมาตรฐาน ทุกอัตราส่วนของแก๊สคลูมจะให้ ค่าความแข็งแรงและความเค้นที่จุดครากสูงกว่า การทดสอบความแข็งพบว่า การเชื่อมด้วยกระแส ทั้ง สองชนิดให้ค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกัน [3]

ฉัตรทอง ไสแสง. ได้ศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 โดยการวิจัยได้ออกแบบค่าพารามิเตอร์ในการศึกษา ได้แก่ กระแสเชื่อม , ความเร็วในการเชื่อม และแกสปกคลุม โดยศึกษาด้านความแข็งแรงดึงสูงสุด , ความแข็งแรงดึงจุดคราก , อัตราการยึดตัว และความแข็ง โดยได้ผลการทดลองคือ 1. ผลที่มีต่อความแข็งแรงสูงสุด คือความเร็วในการเชื่อม 2. ผลที่มีต่อความแข็งแรงดึงจุดคราก พบว่าปัจจัยทั้งสามไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง 3.ผลที่มีต่อการยึดตัว พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคือ กระแส , ความเร็ว และแกสปกคลุม 4. ผลต่อความแข็งพบว่าปัจจัยที่ผลต่อความเปลี่ยนแปลงคือ ความเร็ว และแกสปกคลุม [12]

ปริญญา แสงทอง. ได้ศึกษาผลการแปรพารามิเตอร์ การเชื่อม MIG ต่อโครงสร้าง และสมบัติของงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม โดยมีปัจจัยคือกระแสไฟฟ้า 3 ระดับ คือ 150 160 และ 170 Amp. แรงดันไฟฟ้ามี่ 3 ระดับ คือ 20 22 และ 24 Volt และแกสอาร์กอน 2 ระดับ คือใช้ที่ความบริสุทธิ์ 99.990% และแกสอาร์กอนความบริสุทธิ์ 99.999% โดยปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด คือ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และแกสอาร์กอน ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว คือกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และแกสอาร์กอนค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดที่จุดคราก คือ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและแกสอาร์กอน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 [13]

ตรีเนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ. ได้ศึกษาอิทธิพลของระยะยื่นของลวดเชื่อมที่มีผลต่ออัตราการหลอมละลายในการอาร์กโลหะแกสปกคลุม โดยใช้การถ่ายโอนโลหะแบบลัดวงจร (Short Circuit Transfer) การถ่ายโอนแบบหยด (Globular Transfer) และการถ่ายโอนแบบละออง (Spray Transfer) ที่ระยะยื่นของลวดเชื่อมที่ 10-30 มม. ที่มีต่ออัตราการหลอมละลายของลวดเชื่อมในช่วงกระแสเชื่อมและแรงดันเชื่อมที่แตกต่างกันหรือสภาวะการถ่ายโอนน้ำโลหะที่แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่าระยะยื่นของลวดเชื่อมที่เพิ่มขึ้นจะเป็นผลโดยตรงต่ออัตราการหลอมละลายและค่าสโลปที่ได้จากการถ่ายโอนแบบลัดวงจร ที่ระยะยื่นของลวดเชื่อมและกระแสเชื่อมตลอดจนแรงดันเชื่อมแตกต่างกันค่าสโลปที่ได้อยู่ในช่วง 0.0116 – 0.0393 และช่วงการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยดได้ค่าสโลปที่ได้อยู่ในช่วง 0.0672 – 0.1338 และช่วงการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละอองได้ค่าสโลปที่ได้อยู่ในช่วง 0.113 – 0.1913 [14]

Danut Iordachescu. et al., (2004) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของแกสปกคลุมและตัวแปรของกรรมวิธีการเชื่อมแบบ MIG Brazing จากการทดลอง พบว่า การใช้แกสปกคลุมอาร์กอนเพียงอย่างเดียว แนวเชื่อมที่ได้จะมีลักษณะแบนเรียบ มีเกล็ดเกิดขึ้นเล็กน้อย การซึมลึกดี ไม่มีรูพรุนที่ผิวหน้าและปราศจากเม็ดโลหะ แต่ลักษณะของเปลวอาร์คจะมีความไวต่อการหักเหเนื่องจากเกิดสนามแม่เหล็กขณะทำการเชื่อม เมื่อทดลองใช้แกสปกคลุมอาร์กอนไดออกไซด์ผสมลงในแกสปกคลุมที่อัตราส่วนผสม 97.5%Ar+2.5%CO<sub>2</sub> ทำให้แนวเชื่อมเรียบและการซึมลึกดีขึ้น เปลวอาร์คมีความเสถียรภาพมากขึ้นและไม่เกิดการหักเหเนื่องจากสนามแม่เหล็กในขณะทำการเชื่อม [15]

Johnson J.A. et al., (2002) ได้ศึกษาการถ่ายโอนน้ำโลหะในกรรมวิธีการเชื่อมแบบ GMAW-P เพื่อศึกษาถึงผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และความกว้างพัลส์ของวงรอบการถ่ายโอนน้ำโลหะ โดยกำหนดให้ตัวแปรการเชื่อมของกระแสพัลส์คงที่ ใช้วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นชิ้นงานทดลองเชื่อม ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน AWS A5.18 ER70S-6 และแกสปกคลุมในขณะเชื่อม

เป็นแก๊สผสมระหว่าง 98%Ar+2%O<sub>2</sub> รอยต่อแบบเดินแนวบนชิ้นงาน ตั้งค่าตัวแปรการเชื่อมของ กระแสพัลส์จากเครื่องเชื่อมในสภาวะปกติ หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงความถี่และความกว้าง พัลส์ จากการทดลอง พบว่า ที่ค่าตัวแปรการเชื่อมในสภาวะปกติ การถ่ายโอนของหยดโลหะมี ขนาดโตกว่าลวดเชื่อมเล็กน้อยที่ความกว้างพัลส์สิ้นสุดลง และการเริ่มต้นของกระแสต่ำจะเกิดการ แตกตัวเป็นหยดขนาดเล็กก่อนและยังคงรักษาให้เป็นหยดต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดการถ่ายโอนหยด โลหะที่ความกว้างพัลส์สิ้นสุดลงในวงรอบต่อไป ส่งผลทำให้เกิดการถ่ายโอนโลหะแบบหยดที่ สม่่าเสมอ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าและความกว้างพัลส์หนึ่งเท่า การถ่าย โอนหยดโลหะมีมากขึ้นแต่ขนาดหยดโลหะจะไม่สม่่าเสมอในแต่ละวงรอบ และบางครั้งไม่เกิดการถ่าย โอนหยดโลหะในวงรอบต่อไปจึงเป็นสาเหตุทำให้การถ่ายโอนหยดโลหะมีขนาดใหญ่ขึ้น [16]

French I.E. And Bosworth M.R. (1995) ได้ศึกษาเปรียบเทียบกรรมวิธีการเชื่อมด้วย กระแสเชื่อมแบบมาตรฐานและแบบพัลส์ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบ GMAW โดยใช้ลวดเชื่อมเปลือย ไร้ชั้นเคลือบและลวดเชื่อมเคลือบฟลักซ์ ทั้งนี้ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของการเชื่อมและลักษณะแนวเชื่อม กำหนดการเชื่อมท่าระดับและท่าตั้งเชื่อมขึ้น ใช้เครื่องเชื่อมที่ไม่มีกระแสพัลส์และมีกระแสพัลส์ ควบคุมด้วยการเชื่อมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ ใช้แก๊สคลุมขณะเชื่อมเป็นแก๊สผสมระหว่าง 82%Ar+18%CO<sub>2</sub> วัสดุทดลองเชื่อมเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน จากการทดลอง พบว่า การเชื่อมโดย กรรมวิธี GMAW ด้วยเครื่องเชื่อมที่มีกระแสพัลส์ควบคุมการเชื่อมด้วยโปรแกรมของเครื่องเชื่อม ผล ของการเชื่อมสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการเชื่อมได้ดีขึ้น การซึมลึกดี แนวเชื่อมที่ได้มีสมบัติ ทางกลดีกว่าการเชื่อมด้วยกระแสมาตรฐานทั้งลวดเชื่อมเปลือยตันและลวดเชื่อมเคลือบฟลักซ์ [17]

P.K. Ghosh Lutz Dorn Shrirang Kulkarni And F.Hofmann ได้ศึกษาคุณลักษณะและ พฤติกรรมของการอาร์กในการถ่ายโอนโลหะในการเชื่อมแบบ GMAW กระแสแบบพัลส์ของเหล็กกล้า ไร้สนิม โดยใช้การถ่ายภาพวิดีโอความเร็วสูงในช่วงการเติมเนื้อโลหะของงานเชื่อมอาร์ก ศึกษา ลักษณะของเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีการวางแนวไว้ ความยาว ความตึงผิวและพฤติกรรมถ่ายโอนน้ำ โลหะจากขนาดเส้นลวด และขนาดของหยด และความเร็วของการหยด ณ เวลาต่าง ๆ พบว่าให้ความ แปรผันที่แตกต่างกันในเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดโลหะ ค่าที่กำหนด ค่าที่ได้จากการทดลองพบว่า สอดคล้องกันกับค่าทฤษฎีที่ประมาณการไว้จากสูตรทางคณิตที่รายงานไว้ก่อนหน้านี้ การเพิ่มขึ้นของ เส้นผ่านศูนย์กลางหยดโลหะ และอัตราส่วนของ  $I_b / I_p$  พบว่าเป็นผลเสียต่อความเสถียรของแก๊สปก คลุมแนวเชื่อม และลักษณะการอาร์ก โดยเฉพาะแรงดันไฟฟ้าที่มีการอาร์กสูง [18]

กรภัทร์ จุ้ยยิ้ม ได้ศึกษาผลของพารามิเตอร์การเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของ เนื้อเชื่อมและบริเวณผลกระทบร้อนในการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดระหว่าง เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 กับ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สเมทัลอาร์ค โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการศึกษา คือ กระแสไฟเชื่อม กับ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมและทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเปลือย ตาม มาตรฐาน AWS A5.9-93 เกรด GFW308L , GFW316L และ GFW430 ผลการทดลองพบว่ารอยต่อที่เชื่อมด้วย ลวดเชื่อม GFW 316L สามารถต้านแรงดึงได้สูงสุด ชิ้นงานทดสอบแรงดึงส่วนมากแตกหักที่ตำแหน่งแนวเชื่อม ด้านเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ พบว่าบริเวณผลกระทบร้อนด้านเหล็กกล้า คาร์บอนปานกลางมีความแข็งสูงสุด และเนื้อโลหะงานด้าน AISI 304 บริเวณผลกระทบร้อนที่ชิดติดกับแนวเชื่อม มีความแข็งต่ำสุด ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณผลกระทบร้อนและเนื้อเชื่อม พบว่า บริเวณ

ผลกระทบร้อนของโลหะงานทั้งสองด้านมีเกรนหยาบ การเติบโตของเกรนกระจายไปในทุกทิศทาง เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างของเนื้อโลหะงานที่ไม่ได้รับผลกระทบร้อนซึ่งมีเกรนละเอียดสม่ำเสมอและมีทิศทางของเกรนอยู่ในแนวรีด ตามการผลิตเหล็กรีดร้อน โครงสร้างจุลภาคโลหะงานด้านเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางบริเวณผลกระทบร้อนปรากฏเป็นโครงสร้างเฟิร์ลไลต์ ในส่วนของโครงสร้างจุลภาคเนื้อเชื่อม มีโครงสร้างสลับเฟอร์ไรท์ ออสเทนไนท์ และเฟิร์ลไลต์ และโครงสร้างจุลภาคโลหะงานด้านเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI304 บริเวณผลกระทบร้อนปรากฏโครงสร้างออสเทนไนท์ และไม่พบแนวโครงสร้างมาร์เทนไซต์บริเวณผลกระทบร้อน และเขตการหลอมละลายตามแนวรอยต่อเชื่อมทั้งสองด้าน [19]

บัณฑิต อมรสิน ได้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยจากการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าสเตนเลส AISI 304 กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ด้วยกรรมวิธีการเชื่อม Gas Metal Arc Welding ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณขอบเขตการหลอมละลาย บริเวณได้รับผลกระทบจากความร้อน บริเวณเนื้อโลหะงาน และสมบัติทางกล ด้านความเค้นแรงดึงสูงสุด อัตราการยืดตัว และความแข็ง ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาวิจัยประกอบด้วย ลวดเชื่อม ความเร็วและกระแสไฟ ผลการวิจัยพบว่า ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาทั้ง 3 ชนิด มีผลกระทบต่อสมบัติทางกล ด้านความเค้นแรงดึงสูงสุด อัตราการยืดตัว ความแข็งบริเวณแนวเชื่อมด้านเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและด้านเหล็กกล้าสเตนเลส ความแข็งบริเวณกระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และด้านเหล็กกล้าสเตนเลส ความแข็งบริเวณโลหะงานของเหล็กกล้าสเตนเลส อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 แต่ไม่มีผลกระทบต่อความแข็งบริเวณโลหะงาน ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค พบว่าบริเวณขอบเขตการหลอมละลาย บริเวณได้รับผลกระทบจากความร้อนทั้งสองด้านมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค เนื่องจากผลกระทบของความร้อน แต่ไม่มีผลกระทบต่อบริเวณเนื้อโลหะงาน [20]

อนุสิทธิ์ อ่ำไพบูลย์ ได้ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมของการเชื่อมแบบอาร์กโลหะแกสคลุมโดยเริ่มต้นจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล โดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ เพื่อกรองปัจจัย 5 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟ แรงดันไฟเชื่อม ความเร็วเชื่อม มุมหัวเชื่อมและแกสคลุม ให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความต้านแรงดึงของตะเข็บเชื่อมจากนั้นใช้การทดลองแบบ บ็อกซ์ – เบนเคน เพื่อวิเคราะห์หาผลตอบที่ดีที่สุด ในการศึกษาใช้เครื่องเชื่อมรุ่น Hobart รุ่น RC – 304 ใช้ลวดเชื่อมรหัส ER70S-6 ขนาด 1.0 มิลลิเมตร โดยนำชิ้นงานมาทำการเชื่อมทางตรงและทดสอบหาคุณภาพทางกล ด้วยการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง ผลการทดลองความต้านแรงดึงของตะเข็บเชื่อมที่ระดับ  $\alpha = 0.05$  พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่าง ๆ คือ กระแสไฟ เท่ากับ 220 A แรงดันไฟเชื่อมเท่ากับ 30 V ความเร็วในการเชื่อมเท่ากับ 10 นิ้วต่อนาที มุมหัวเชื่อม เท่ากับ 75 องศา และแกส CO<sub>2</sub> คลุมแนวเชื่อม เท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที ซึ่งได้ค่าแรงดึงสูงสุด คือ 8192 kgf [21]

ภาคดี ดำเนินผล ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมมิกต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลเหล็กกล้าสเตนเลสออสเทนนิติก เกรด AISI 304 ในการทดลองได้กำหนดปัจจัยการเชื่อมได้แก่ กระแสไฟเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม และแกสปกคลุม ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบไปด้วยปัจจัยละ 3 ระดับ ทำการศึกษาด้านความแข็งเปอร์เซ็นต์การยืดตัว จุดคราก ผลการศึกษาต่อค่าความแข็งพบว่าปัจจัยการร่วมระหว่างกระแสไฟเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม และแกสปกคลุม ส่งผลต่อความแข็งรอยเชื่อม โดยปัจจัยในการเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งสูงสุดคือกระแสไฟเชื่อมที่ 100 A

ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาที และแกสปกคลุมด้วย Ar85% + CO<sub>2</sub>15% มีค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 300.55 HV เปอร์เซนต์การยึดตัวพบว่า Ar85% + CO<sub>2</sub>15% ให้ค่าการยึดตัวสูงสุดที่ 56.5% การศึกษาจตุรกรากพบว่าความเร็วที่ 400 มม./นาที กระแสเชื่อม 95A แกสปกคลุม Ar84.5% + He0.5% + O<sub>2</sub>15% จะให้ค่าจตุรกรากสูงสุดที่ 925.65 N/mm<sup>2</sup> โครงสร้างจุลภาคในแนวเชื่อมพบว่าประกอบด้วยโครงสร้างออสเทนไนท์ และผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr<sub>23</sub> C<sub>6</sub>) ตามขอบเกรนกระจายทั่วบริเวณ และลักษณะโครงสร้างของ Columnar Dendrite [22]

ในการศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมมิกต่อสมบัติของรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI430 โดยกำหนดปัจจัยในการทดลองไว้ 3 ตัวแปร คือ กระแสไฟ 4 ระดับ ได้แก่ 90, 100, 110 และ 120A แกสปกคลุม 3 ชนิด คือ 80%Ar + 20%CO<sub>2</sub> , Ar100% และ CO<sub>2</sub> 100% ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 3 ระดับ คือ 350, 400 และ 450 mm/min ปัจจัยด้านกระแสไฟ แกสปกคลุม และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม มีผลต่อการหลอมละลายและการถ่ายโอนน้ำโลหะระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ตลอดจนส่งผลต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม ที่ชิ้นงานหนา 3 mm. ช่วงกระแส 90 – 120 A มีความสามารถในการเชื่อมที่แตกต่างกันโดยที่ช่วงกระแสไฟนี้สามารถควบคุมการเชื่อมได้ แกสปกคลุมทั้ง 3 ชนิดเป็นแกสที่นิยมใช้ในกระบวนการเชื่อมแบบแกสปกคลุม และสามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด ที่ความเร็ว 350 – 450 mm/min เป็นช่วงความเร็วที่นิยมใช้ในการเชื่อมที่ความหนาของชิ้นงาน 3 mm. และจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าทั้ง 3 ตัวแปรมีการนำมาใช้ในการทดลองมากที่สุด



### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัย การศึกษาอิทธิพลตัวแปรงานเชื่อมมิก ต่อสมบัติของรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด JIS G3101 - SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 เป็นการศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยา และสมบัติทางกล ที่เกิดจากตัวแปรการเชื่อม โดยการดำเนินการวิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนของการวิจัย และได้ข้อมูลเพื่อการวิจัยดังนี้

#### 3.1 วัสดุ

##### 3.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด JIS G3101 - SS400

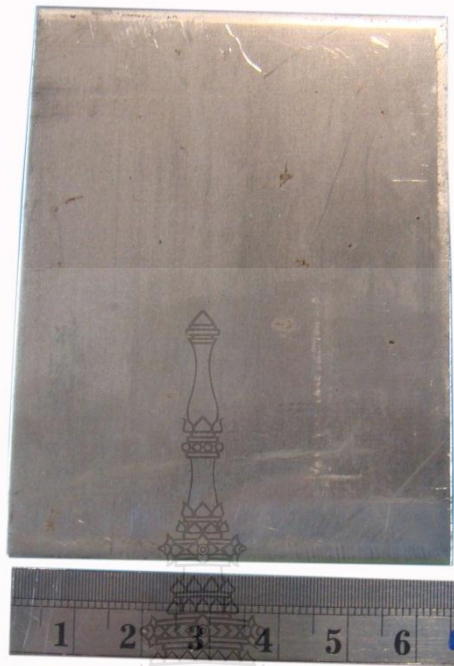
เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด JIS G3101 - SS400 เป็นวัสดุที่หาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไปโดยความหนาของเหล็กที่ใช้คือ 3 มิลลิเมตร โดยมีส่วนผสมทางเคมี คือ คาร์บอน(C) 0.13% , ซิลิกอน (Si) 0.15% และ แมงกานีส (Mn) 0.5% แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน JIS G3101 - SS400

##### 3.1.2 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก เกรด AISI 430

เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด AISI 430 หาได้ตามท้องตลาดนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมทั่วไป ความหนาที่ใช้คือ 3 มิลลิเมตร โดยมีส่วนผสมทางเคมี คือ โครเมียม (Cr) 17% คาร์บอน (C) 0.08% แสดงดังรูปที่ 3.2



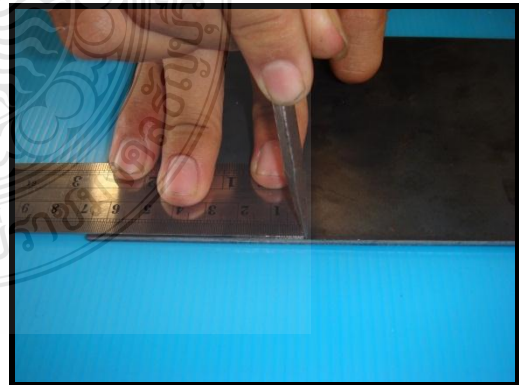
รูปที่ 3.2 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI430

### 3.1.3 การเตรียมชิ้นงาน

นำวัสดุทั้งสองชนิดที่จะใช้ในการทดลองมาตัดให้ได้ขนาด  $65 \times 80 \times 3$  มม. ด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่นแบบใบมีดโยกตัดด้วยระบบไฮดรอลิกส์ โดยก่อนการตัดต้องทำการร่างแบบให้ได้ขนาดตามที่กำหนดด้วยฟุตเหล็กและเหล็กขีด แสดงดังรูปที่ 3.3 (ก) และ (ข) แล้วนำไปตัดให้ได้ชิ้นงานตามขนาดที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 3.4

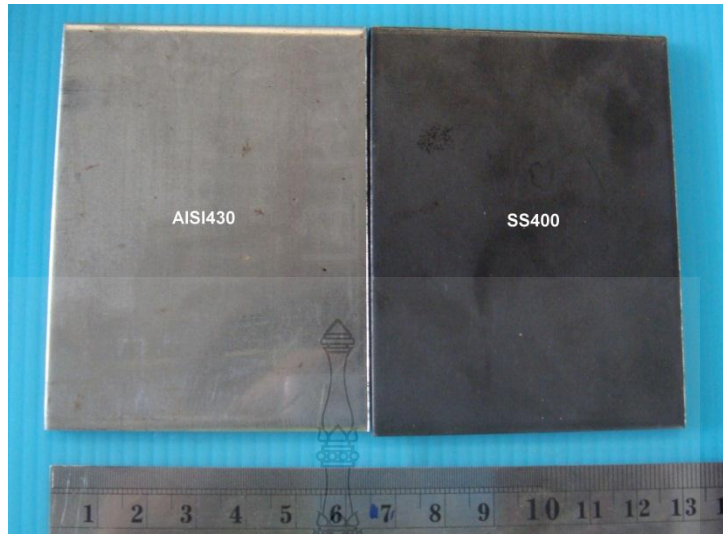


(ก) เครื่องตัดโลหะแผ่น



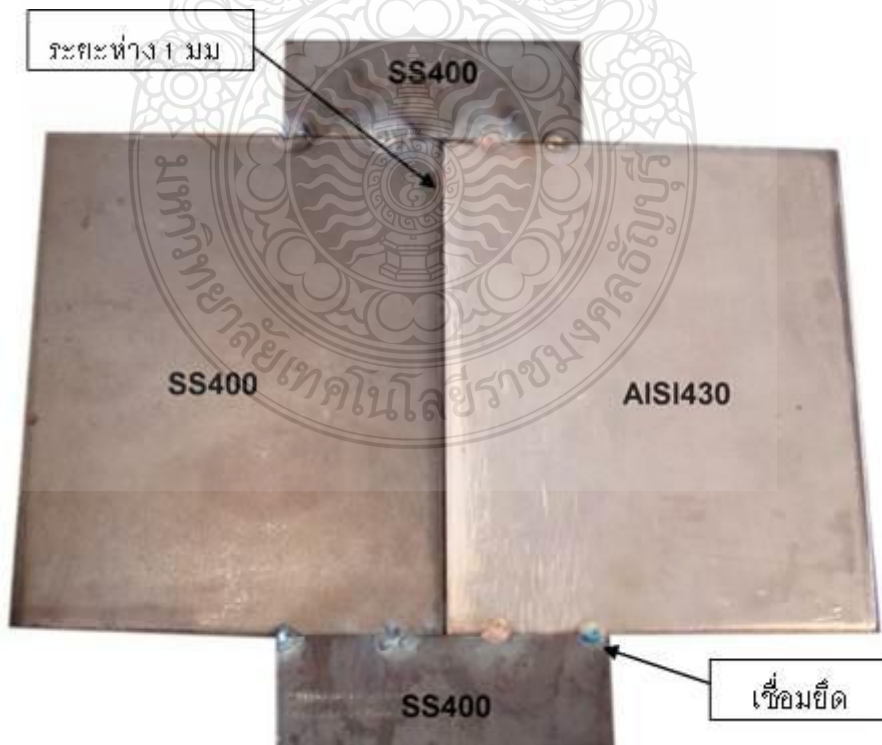
(ข) การร่างแบบ

รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลองด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่น



รูปที่ 3.4 ลักษณะชิ้นงานทดลองเมื่อตัดเรียบร้อยแล้ว

เมื่อตัดชิ้นงานให้ได้ขนาดที่ใช้ในการทดลองตามมาตรฐานที่กำหนดแล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการบากหน้างานให้ได้ตามมาตรฐาน AWS D1.1 / D1.1 M:2600 [23] เมื่อทำการบากหน้างานเรียบร้อยแล้ว นำชิ้นงานเชื่อมยึดบริเวณหัวท้ายของรอยต่อด้วยแผ่นยึดที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ กว้าง 20 มม. ยาว 50 มม. หนา 3 มม. แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การเชื่อมยึดชิ้นงานหัวท้ายก่อนทำการเชื่อม



### 3.2 การเชื่อมทอลอง

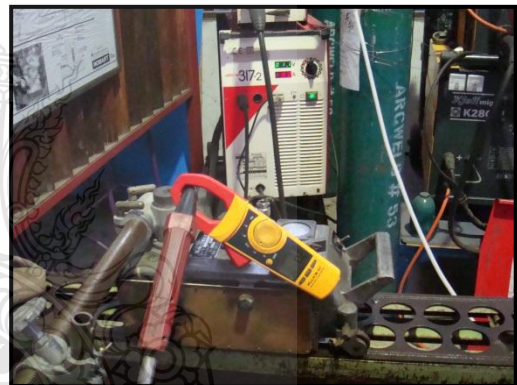
ในการทดลองครั้งนี้กระบวนการเชื่อมที่ใช้คือการเชื่อมแบบแกสปกคลุม (GMAW : Gas Metal Arc Welding) และ เพื่อให้การทดลองมีผลออกมาได้มาตรฐาน และตัวแปรการเชื่อมที่ได้ครบองค์ประกอบ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังนี้

#### 3.2.1 เครื่องเชื่อม

เครื่องเชื่อมมิก (MIG) แบบแรงดันคงที่ วัฏจักรการทำงาน 100 % ขนาด 300 แอมแปร์ สามารถปรับแต่งกระแสไฟได้ตามตัวแปรที่กำหนด จำนวน 1 เครื่อง แสดงดังรูปที่ 3.6 (ก) ก่อนทำการเชื่อมเพื่อความเที่ยงตรงของค่ากระแสไฟต้องทำการเช็คกระแสด้วยเครื่องวัดกระแส โดยใช้คลิปลิปแอมป์ จับเพื่ออ่านค่ากระแส และปรับแต่งให้ได้ค่าที่ถูกต้องก่อนการเชื่อม แสดงดังรูปที่ 3.6 (ข)



(ก) ลักษณะเครื่องเชื่อม MIG



(ข) การเช็คกระแสด้วยคลิปลิปแอมป์

รูปที่ 3.6 การเตรียมเครื่องเชื่อมสำหรับการทดลอง

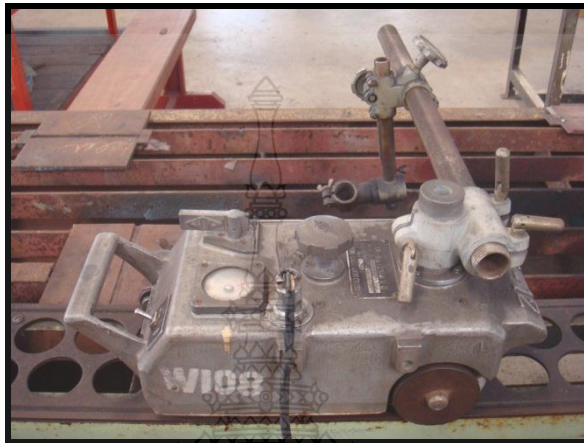
#### 3.2.2 เครื่องตัดแกสแบบเส้นตรงขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์

ลักษณะในการเชื่อมทอลองเป็นแบบต่อเนื่อง จึงจำเป็นที่จะต้องประยุกต์อุปกรณ์ในการเชื่อมทอลอง เพื่อให้การเชื่อมเป็นแบบอัตโนมัติ จึงได้นำหัวเชื่อมมิก ประกอบติดตั้งเข้ากับเครื่องตัดแกสแบบเส้นตรง แสดงดังรูปที่ 3.7

#### 3.2.3 ลวดเชื่อม

ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลองใช้ลวดเชื่อม แบบเปลือยตัน (Solid Wire ) สำหรับเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก เกรด 430 ตามมาตรฐาน AWS A5.9 : ER430 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มม. ซึ่งเป็นขนาดที่มีความเหมาะสมในการเชื่อมต่อชนบาคหน้างาน เพราะลวดเชื่อมที่มีขนาดเล็กจะให้การซึมลึกดีกว่าลวดเชื่อมที่ขนาดใหญ่กว่า เมื่อใช้กระแสไฟเชื่อมขนาดเดียวกันอีกทั้งขนาดลวดเชื่อม

จะต้องขึ้นอยู่กับขนาดความหนาของชิ้นงาน [24] ซึ่งชิ้นงานที่เลือกใช้ในการทดลองหนา 3 มม. ซึ่งมีความหนาไม่มากจึงเหมาะที่จะใช้ลวดเชื่อมที่มีขนาดเล็ก และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 ซึ่งหาได้ง่ายตามท้องตลาด 1.2 มม. ก็เหมาะกับการเชื่อมเหล็กที่มีความหนาไม่มาก ทำให้ง่ายต่อการหลอมละลายและการถ่ายโอนโลหะ ซึ่งไม่ต้องใช้กระแสไฟในการเชื่อมสูงมากนัก แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ลักษณะเครื่องตัดแก๊สแบบเส้นตรงขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์

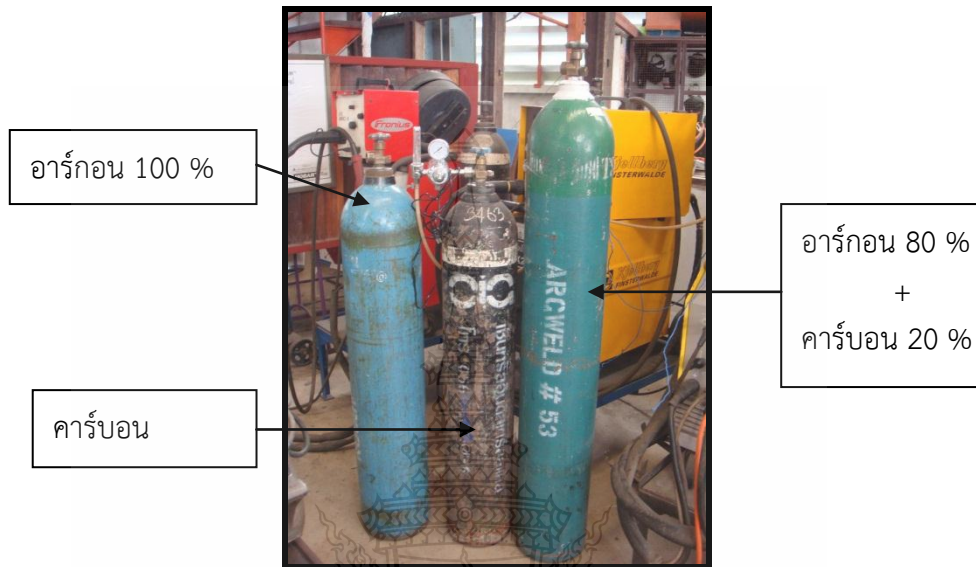


รูปที่ 3.8 ลักษณะลวดเชื่อมมิก ตามมาตรฐาน AWS A 5.9 ขนาด 1.2 มม.

#### 3.2.4 แก๊สปกคลุม

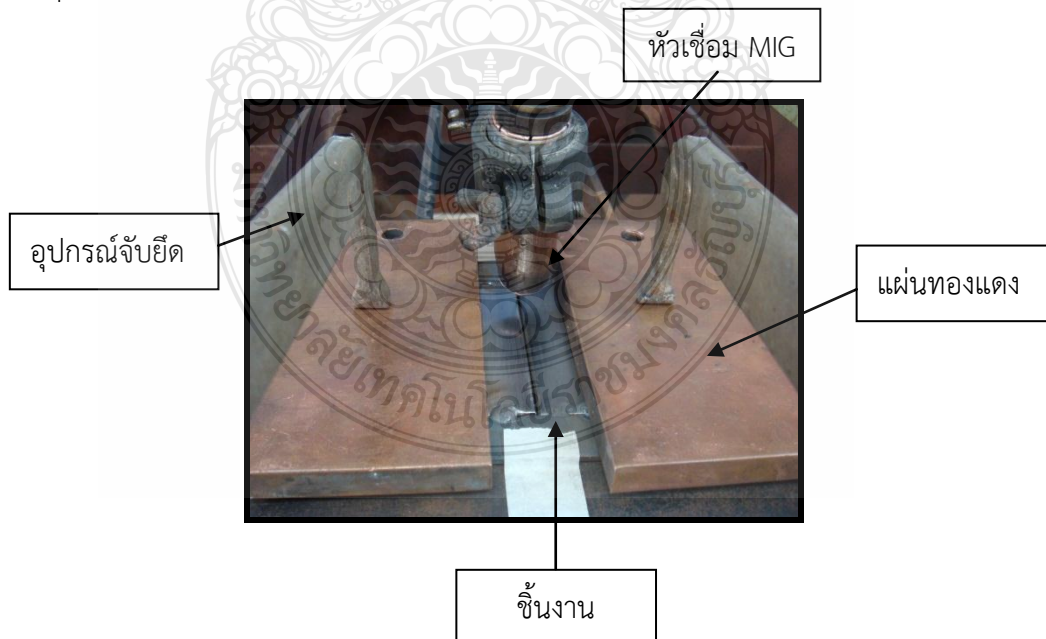
แก๊สที่เลือกใช้ในการปกคลุมแนวเชื่อม ใช้แก๊ส 3 ชนิด คือ Ar80% + CO<sub>2</sub>20% , Ar100 % , CO<sub>2</sub>100 % ในการผสมคาร์บอนไดออกไซด์เข้ากับอาร์กอนมีจุดประสงค์เช่นเดียวกับอาร์กอน ผสมออกซิเจน การการผสมคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไป จะทำให้การอาร์กมีความเสถียร การถ่ายโอนโลหะจากลวดเชื่อมไปยังชิ้นงานได้ดี มีแรงเกาะยึดบ่อหลอมเหลวดีกว่า และลดประกายโลหะกระเด็นเมื่อเชื่อมโลหะที่เป็นเหล็กให้คุณสมบัติการอาร์กดี ขณะเชื่อมบ่อหลอมเหลวจะขยายออกไปถึงขอบรอยต่อ จึงไม่ทำให้เกิดรอยกินลึกที่ขอบรอยเชื่อมซึ่งส่วนผสม Ar80% + CO<sub>2</sub>20% การถ่ายโอนน้ำ

โลหะจะเป็นแบบละออง [6] แสดงดังรูปที่ 3.9 สำหรับแกสปกคลุมในการทดลองในครั้งนี้ ใช้การผสมสำเร็จจากทางร้านผู้แทนจำหน่ายแกสเป็นผู้ผสมมาให้ ไม่ต้องใช้เครื่องผสมแกส เพราะการผสมที่ได้มาตรฐานจะทำให้การเชื่อมเสถียรกว่าการผสมด้วยเครื่อง



รูปที่ 3.9 ลักษณะของถังแกสชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการปกคลุม

### 3.2.5 อุปกรณ์จับยึด



รูปที่ 3.10 ลักษณะการจับยึดชิ้นงาน

ในการจับยึดชิ้นงานสำหรับการเชื่อมทดลองได้ออกแบบที่จับยึดชิ้นงานขึ้นมาเพื่อจับยึดชิ้นงานให้มั่นคง และมีแผ่นทองแดงรองหลังเพื่อใช้ถ่ายเทความร้อนจากชิ้นงานและมีท่อส่งแกส

สำหรับปกคลุมแนวเชื่อมด้านหลัง และใช้ตัวล็อกแผ่นทองแดงให้แน่นเพื่อยึดชิ้นงานกับแผ่นจับยึด แสดงดังรูปที่ 3.10

สำหรับอุปกรณ์จับยึดที่ได้จัดทำขึ้นมาจากวัสดุที่มีความแข็งแรงทำให้จับยึดชิ้นงานให้มีความแข็งแรงและไม่เคลื่อนย้ายขณะทำการเชื่อมทดลองโดยได้ออกแบบส่วนนำส่งแกสปกคลุมด้านหลัง ด้วยท่อเหล็กและทำการเจาะรูตามขนาดที่กำหนดไว้ สำหรับแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นแผ่นทองแดง บริษัท ขนาดความกว้าง 100 × 200 มิลลิเมตร ในการจัดวางจะวางบนชิ้นงานเชื่อมที่วางบนแผ่นรองเชื่อมที่ได้ออกแบบไว้โดยใช้แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน JIS G3101 – SS400 มาทำการเชื่อมยึดด้วยท่อส่งแกสด้านล่าง จากนั้นใช้อุปกรณ์จับยึดที่เป็นคีมล็อกแบบก้ามปูขนาดใหญ่ที่มีความแข็งแรงพอในการจับยึดชิ้นงานไม่ให้ขยับเขยื้อน ในขณะที่ทำการเชื่อมและสามารถถอดออกจากการจับยึดชิ้นงานได้อย่างสะดวกและไม่ขวางการปฏิบัติงานเชื่อม

### 3.2.6 ตัวแปรการเชื่อม

- ก. กระแสเชื่อมที่ใช้ในการทดลองใช้ 4 ระดับคือ 90 , 100 ,110 , 120 A
- ข. ความเร็วในการเชื่อมในการทดลองนี้ใช้ 3 ระดับ คือ 350 , 400 , 450 มม./นาที
- ค. แกสปกคลุม ในการทดลองนี้ใช้แกสปกคลุม 3 ชนิดคือ
  - Ar100%
  - CO<sub>2</sub>100%
  - Ar80% + CO<sub>2</sub>20%

### 3.2.7 การทดลอง

ตารางที่ 3.1 การออกแบบการทดลอง

ชนิดของแกสปกคลุม	กระแสไฟ (แอมแปร์)	ความเร็ว (มม. / นาที)		
		350	400	450
Ar80% + CO <sub>2</sub> 20%	90	A1	A5	A9
	100	A2	A6	A10
	110	A3	A7	A11
	120	A4	A8	A12
Ar100%	90	B1	B5	B9
	100	B2	B6	B10
	110	B3	B7	B11
	120	B4	B8	B12
CO <sub>2</sub> 100%	90	C1	C5	C9
	100	C2	C6	C10
	110	C3	C7	C11
	120	C4	C8	C12

เมื่อจัดเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือ ให้พร้อมสำหรับการทดลองเชื่อมแล้ว ทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ในการทดลอง ในการเชื่อมก่อนทำการเชื่อมตามตัวแปรการเชื่อมทีละตัวแปร ตามตารางการทดลองที่จัดทำขึ้น แสดงดังตารางที่ 2 และเพื่อให้ได้ค่าความเที่ยงตรงจึงทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 36 การทดลอง จะได้ 108 ชิ้นงานทดลอง

### 3.2.8 ขั้นตอนการเชื่อม

เมื่อได้ชิ้นงานทดลองและอุปกรณ์ที่จำเป็นเรียบร้อยแล้ว นำชิ้นงานมาดำเนินการดังนี้

- นำแผ่นชิ้นงานที่เชื่อมยึดหัวท้ายทำความสะอาดรอยต่อชิ้นงานด้วยแปรงลวดสเตนเลส ก่อนนำชิ้นงานวางบนแผ่นรองหลังชิ้นงานและมีแผ่นทองแดงวางประกบผิวงานด้านบน จับยึดให้แน่นด้วยอุปกรณ์จับยึดในตำแหน่งท่าราบ
- ปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องเชื่อม ตามตัวแปรที่กำหนด โดยทำการปรับกระแสไฟ , ความเร็วในการป้อนลวด ความเร็วในการเชื่อม มุมองศาหัวเชื่อม อัตราการไหลของแกสปกคลุมแนวเชื่อม , ระยะอาร์ค
- เมื่อตั้งค่าพารามิเตอร์เรียบร้อยแล้ว เปิดแกสปกคลุมด้านหลังแนวเชื่อมที่อัตรา 5 ลิตร / นาที [8]
- ทำการเชื่อมเดินแนว อัตโนมัติโดยการเริ่มต้นอาร์คจากจากแผ่นยึด จากจุดเริ่มต้นของแผ่นงานไปจนสุดชิ้นงานทดสอบ [3] โดยใช้เทคนิคการเดินแนวแบบแบ็คแฮน
- เมื่อเชื่อมเสร็จปล่อยให้ชิ้นงานให้เย็นตัวจากอากาศ ก่อนนำชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับยึด
- ทำการเชื่อมทุกตัวแปร จนครบตามกำหนด โดยในการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ตามตัวแปรนั้นๆ

## 3.3 การทดสอบทางกล

### 3.3.1 การทดสอบหาค่าการรับแรงดึง



รูปที่ 3.11 ลักษณะเครื่องทดสอบแรงดึง

ในการทดสอบจะใช้การดึงชิ้นงานทดสอบตามแนวขวางของแนวเชื่อม โดยมีการเตรียมชิ้นงานในการทดสอบตามมาตรฐาน AWS D1.1/D1.1M:2006 ให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ ก่อนนำเข้า

ทดสอบแรงดึง โดยในการดึงทดสอบเพื่อหาค่าการรับแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมที่สามารถรับได้ ความแข็งแรงที่จุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว โดยใช้เครื่องดึงมาตรฐาน แสดงดังรูปที่ 3.11

### 3.3.2 การทดสอบหาค่าความแข็ง

ใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งของชิ้นงานทดลอง ในการทดลองใช้เครื่องทดสอบแบบวิกเกอร์ส ซึ่งอ่านค่าผลการทดลองได้โดยตรง เมื่อทำการทดสอบเรียบร้อยแล้ว เพราะมีค่าตัวเลขแบบดิจิทัลให้อ่านค่าได้ชัดเจน ซึ่งหัวกดที่ใช้ทดลองเป็นหัวกดเพชร [10] แสดงดังรูปที่ 3.12 สำหรับชิ้นงานในการทดสอบใช้ชิ้นงานชิ้นเดียวกับชิ้นงานที่ใช้ดูโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครฮาร์ดเน็ตวิกเกอร์

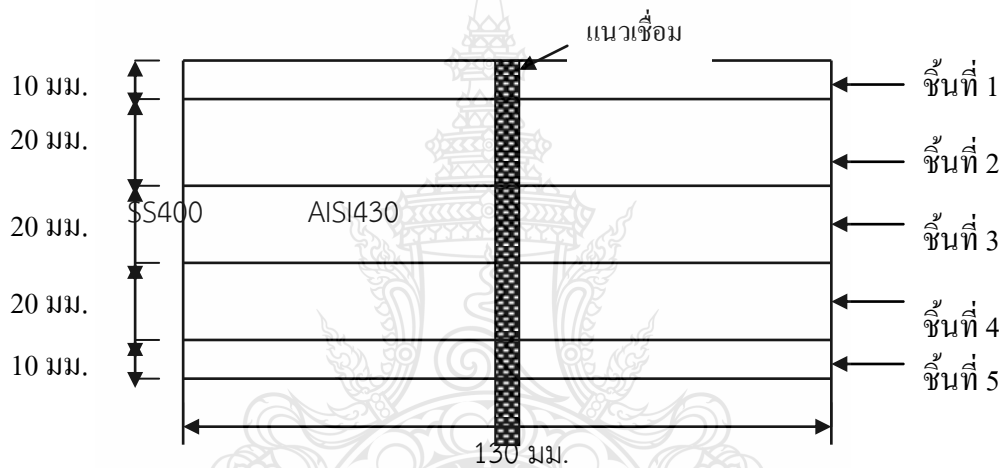
### 3.3.3 การเตรียมและเก็บข้อมูลชิ้นทดสอบ



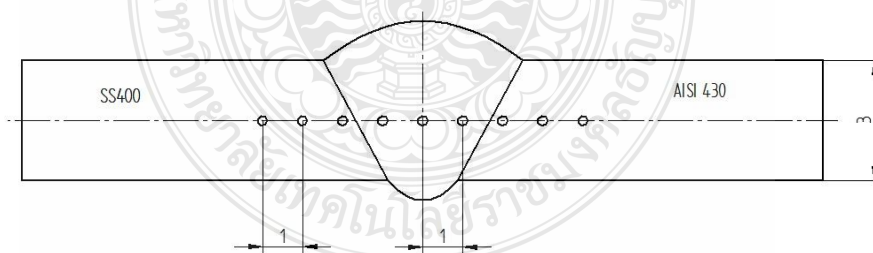
(ก) การวัดขนาดความนูนแนวเชื่อม (ข) การวัดขนาดความกว้างของแนวเชื่อม  
รูปที่ 3.13 การตรวจสอบทางกายภาพของแนวเชื่อมก่อนนำไปทดสอบทางกล

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบทางกล และการเก็บข้อมูลมีวิธีการดำเนินการดังนี้

- นำชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมมาทำการตรวจสอบทางกายภาพในเบื้องต้น โดยการวัดขนาด ความกว้างแนวเชื่อม ความนูนของแนวเชื่อม แสดงดังรูปที่ 3.13 (ก) และ (ข)
- นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม และทำให้เย็นเรียบร้อยแล้วมาทำการตัดด้วยเครื่องไมโครคัตเตอร์ ให้ได้ขนาดตามมาตรฐานกำหนด ดังแสดงดังรูปที่ 3.14
- เมื่อตัดชิ้นงานตามขนาดแล้วจะได้ชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้น
- ชั้นที่ 1 และ ชั้นที่ 5 เป็นเศษที่เหลือจากการตัดให้ทิ้งไป
- นำชิ้นงานชั้นที่ 3 ไปหล่อเรซิน หรืออัดด้วยโพลีเมอร์ และนำไปขัดผิวเพื่อทำการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค ตามมาตรฐาน ASTM E430 และนำมาทดสอบความแข็ง ตามมาตรฐาน ASTM E92 กตตามจุดที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 3.15

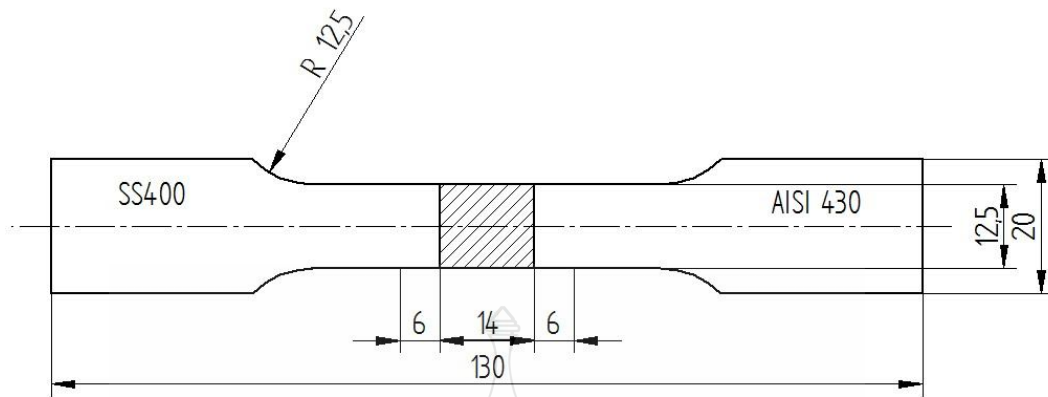


รูปที่ 3.14 ลักษณะการตัดชิ้นงานสำหรับการทดสอบ



รูปที่ 3.15 ลักษณะตำแหน่งในการทดสอบความแข็ง

- ชิ้นงานชั้นที่ 2 และ 4 นำไปรวมก่อนการสุ่มเลือกมาทดสอบแรงดึง โดยการนำชิ้นงานมาผ่าน กระบวนการโดยใช้เครื่องจักรช่วยในการทำชิ้นทดสอบแรงดึงมาตรฐานตามขนาดสเกลที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 3.16 , 3.17 และ 3.18



รูปที่ 3.16 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามขนาดสเกลที่กำหนด



รูปที่ 3.17 ลักษณะการใช้เครื่องกัดชิ้นงานทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.18 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึงเมื่อผ่านการกัดด้วยเครื่องจักร



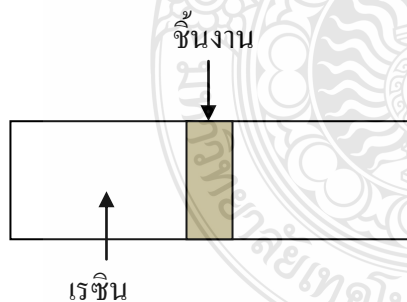
### 3.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา จะใช้การตรวจสอบ 2 รูปแบบคือ การตรวจสอบโครงสร้างแบบมหภาค และการตรวจสอบโครงสร้างแบบจุลภาค โดยใช้ชิ้นงานในการทดสอบขึ้นเดียวกัน [10]

#### 3.4.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

การเตรียมชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบต้องตัดให้เกิดพื้นที่หน้าตัด โดยในการตัดชิ้นงานจะใช้เครื่องมือโครคัตเตอร์ตัดชิ้นงานตามมาตรฐานโดยในการตัดทำการหล่อเย็นด้วยน้ำ เพื่อหลีกเลี่ยงให้เกิดความร้อนกับชิ้นงานน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพราะความร้อนจะทำให้โครงสร้างผิวหน้าตัดเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้การตรวจสอบเกิดข้อผิดพลาด โดยชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร หรือ 1 นิ้ว เพื่อให้การขัดผิวทำได้ง่าย แต่ถ้าชิ้นส่วนเล็กมาก ก็ควรจะหุ้มชิ้นงานด้วยเรซิน เพื่อใช้ในการขัดจะทำได้ง่าย โดยให้มีขนาดใกล้เคียงชิ้นงานตรวจสอบ [11]

เมื่อทำการตัดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนดแล้ว นำชิ้นงานที่ได้จากการตัดในนี้ที่จะใช้ งานชิ้นที่ 3 มาใช้ในการตรวจสอบโครงสร้าง โดยนำชิ้นงานมาหล่อเรซินโดยการหล่อจะให้ชิ้นงาน ตั้งอยู่บนสุดและล่างสุดเสมอผิวงานหล่อเรซินเพื่อเวลากัด Load ของการทดลองความแข็งจะได้เพิ่มความแม่นยำมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.19 (ก) เพื่อให้สะดวกต่อการจับยึดชิ้นงานสำหรับขัดกระดาษทราย และง่ายต่อการวางสำหรับการส่องโครงสร้าง อีกทั้งสะดวกต่อการจัดเก็บและการจับยึดชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.19 (ข)



(ก) ลักษณะการวางชิ้นงานหล่อเรซิน (ข) ชิ้นงานเมื่อหล่อเรซินเรียบร้อยแล้ว  
รูปที่ 3.19 การหล่อเรซินชิ้นงานสำหรับการขัดตรวจสอบโครงสร้าง

#### 3.4.2 การขัดชิ้นงาน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบทางโลหะวิทยา จะต้องเครื่องมือและอุปกรณ์พื้นฐานเพื่อใช้ในการทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM E430 ดังนี้

- กระดาษทราย และเครื่องขัดผิว แสดงดังรูปที่ 3.20
- แอลกอฮอล์ และ สำลี
- น้ำกรด

- ผ้าสักหลาด และ ผงขัด
- น้ำกลั่น
- กล้องจุลทรรศน์ และอุปกรณ์บันทึกข้อมูล แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 ลักษณะของเครื่องขัดผิว

การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค กระทำได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง ถ้าเป็นกล้องที่ใช้แสงจากหลอดไฟจะให้กำลังขยายไม่เกิน 2,000 เท่า แต่ถ้าเป็นกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนจะสามารถให้กำลังขยายได้สูง ถึง 100,000 เท่า หรือมากกว่านั้น



รูปที่ 3.21 กล้องจุลทรรศน์ และอุปกรณ์บันทึกข้อมูล

เมื่อทำการหล่อเรซิน และได้ชิ้นงานสำหรับใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาแล้วนำชิ้นงานที่ได้มาดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

- นำชิ้นงาน มาขัดด้วยกระดาษทราย ที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ เรียงลำดับจากเบอร์หยาบ ไปจนถึงเบอร์ละเอียด โดยเริ่มจากเบอร์ 220 , 320 , 400 จนถึงเบอร์ 1,200 ตามลำดับ ในการขัดวางกระดาษทรายลงบนจานขัดของเครื่องขัด ในขณะที่ขัดจะต้องเปิดน้ำอยู่

ตลอดเวลา เพื่อให้ น้ำชำระสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ผงโลหะ และซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไปควรขัดขึ้นตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย และในการขัดควรใช้แรงกดพอประมาณ ไม่ควรออกแรงกดมากเกินไป จะทำให้โครงสร้างของชิ้นทดสอบเกิดความบกพร่องจนทำให้การตรวจสอบโครงสร้างเกิดข้อผิดพลาด [10]

- ขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวขึ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากกากเพชรขัดผิวของชิ้นตรวจสอบที่มีความแข็งแรงสูง การขัดจะขัดด้วยผ้าสักหลาด โดยนำผงขัดเทลงบนผ้าสักหลาดแล้วขัดผิวจนมัน [8]
- การกัดด้วยน้ำยา (Etching) ชิ้นงานที่ขัดจนเป็นมันแล้วจะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไปกัดด้วยน้ำยา ซึ่งในการทดสอบนี้ใช้กรดไนตริกร้อยละ 4 ผสมกับกรดไฮโดรคลอริก [11]
- นำชิ้นงานที่ผ่านการกัดด้วยน้ำยา ตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ ขั้นตอนนี้ ชิ้นงานต้องผ่านการกัดด้วยน้ำยาเรียบร้อยแล้ว แล้วนำมาส่องด้วยกล้อง
- นำรูปที่ได้จากการถ่ายจากกล้องมาวิเคราะห์ ว่าเป็นรูปโครงสร้างชนิดใด เพราะโครงสร้างต่าง ๆ ของโลหะจะมีคุณสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน โดยที่สมบัติดังกล่าวจะเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลในการสรุปผลการทดลอง [11]



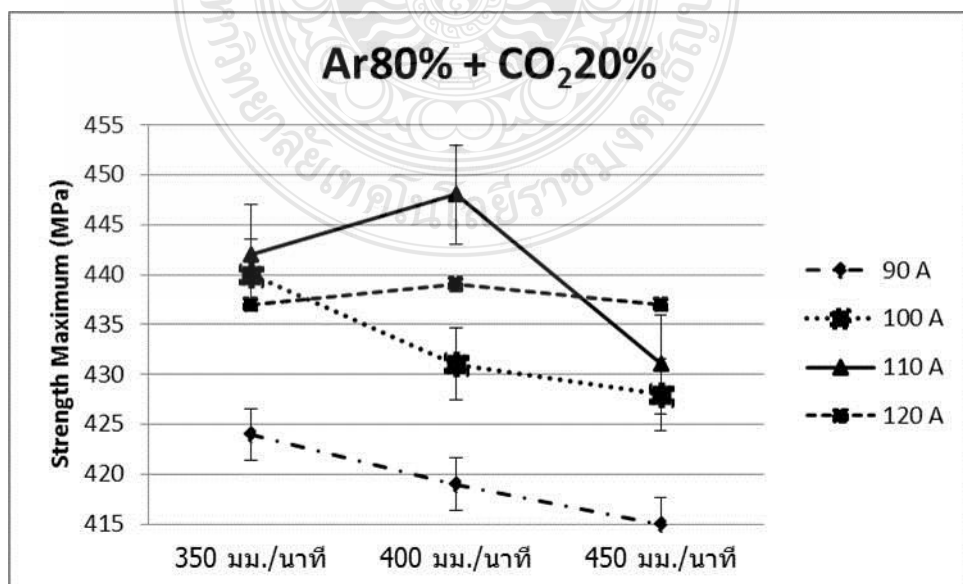
## บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

การศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุมต่อสมบัติของรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมและบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ : Heat Affected Zone) และคุณสมบัติทางกลที่มีผลต่อค่าการรับแรงดึง และค่าความแข็งที่สามารถวัดได้ โดยมีตัวแปรในการทดลอง 3 ตัวแปร คือ 1.) แก๊สปกคลุม 3 กลุ่มได้แก่ Ar100% , CO<sub>2</sub>100% และ Ar80% + CO<sub>2</sub>20% 2.) กระแสไฟ 4 ชนิด ได้แก่ 90,100,110,120 แอมป์ 3.) ความเร็ว 3 ระดับ ได้แก่ 350 , 400 , 450 มิลลิเมตร/นาที โดยทำการทดลองเชื่อมให้ครบทุกตัวแปร แล้วนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค ทดสอบหาค่าการรับแรงดึงสูงสุดของตัวแปรแต่ละชนิด และค่าความแข็งของชิ้นงาน

### 4.1 อิทธิพลของกระแสเชื่อมต่อสมบัติของแนวเชื่อม

การทดลองพบว่าตัวแปรการเชื่อมด้านกระแสไฟมีผลต่อสมบัติของแนวเชื่อม โดยวิเคราะห์จากค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงของชิ้นงานทดสอบทั้งหมด ภายใต้เงื่อนไขตัวแปรที่กำหนด แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงที่ได้ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าตัวแปรการเชื่อมด้านกระแสไฟมีผลต่ออุณหภูมิในการเชื่อมทำให้เกิดการหลอมละลายของแนวเชื่อมที่ใช้แก๊สปกคลุม และความเร็วในการเชื่อมแตกต่างกัน เมื่อนำค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงที่ได้ไปวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของแนวเชื่อม และค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมที่ได้พบว่ากระแสไฟที่ใช้เชื่อมแต่ละระดับส่งผลต่อค่าความแข็งของแนวเชื่อมอย่างชัดเจน

#### 4.1.1 วิเคราะห์ปัจจัยด้านกระแสไฟต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึง



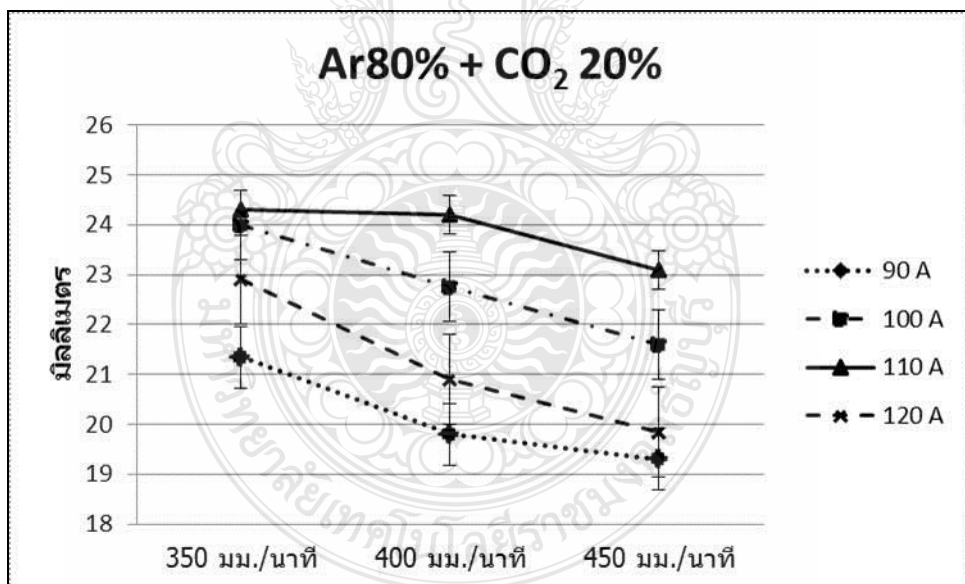
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าการรับแรงดึงจากปัจจัยด้านกระแสไฟ ที่กระแส 90 - 120 A

ผลการทดลองที่ได้พบว่า ระดับของกระแสไฟที่เชื่อมมีผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ได้จากการอาร์กของกระแสไฟเชื่อม และการหลอมละลายที่มีความสมบูรณ์ในแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน จากชิ้นงานทดลองทั้งหมด 108 ชิ้น ภายใต้ตัวแปรและข้อกำหนดในการทดลองแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้

รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าการรับแรงดึงจากปัจจัยด้านกระแสไฟ ที่กระแส 90 – 120 A พบว่ากระแสเชื่อมส่งผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงของชิ้นงานทดลอง โดยพิจารณาจากแก๊สที่ใช้ปกคลุมแนวเชื่อมคั้งคือ Ar80% + CO<sub>2</sub> 20% พบว่าที่ กระแสเชื่อม 110 A ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาที จะให้ค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดที่ 448 MPa และค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดที่ 415 MPa ได้แก่กระแสเชื่อม 90 A ที่ความเร็วในการเชื่อม 450 มม./นาที

#### 4.1.2 วิเคราะห์ปัจจัยด้านกระแสไฟต่อจุดพังทะลายและชิ้นงานขาดออกจากกัน

ผลการทดลองที่ได้พบว่า ระดับของกระแสไฟที่เชื่อมมีผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ได้จากการอาร์กของกระแสไฟเชื่อม และการหลอมละลายที่สมบูรณ์ในแนวเชื่อม ส่งผลต่อการขาดของชิ้นงานซึ่งในการทดลองจากชิ้นงานทดลองทั้งหมด 108 ชิ้น ภายใต้ตัวแปรและข้อกำหนดในการทดลองแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้



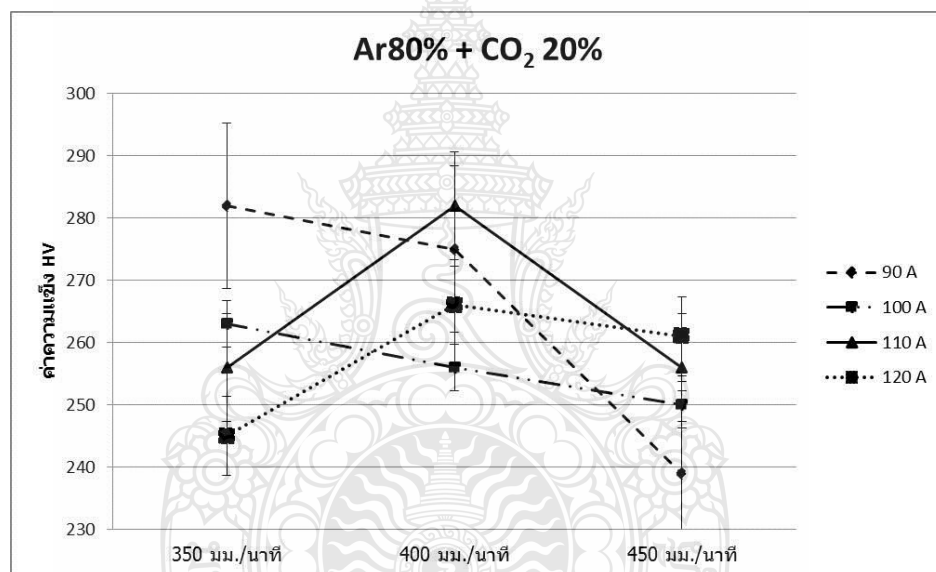
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบตำแหน่ง และระยะที่ชิ้นงานขาดออกจากกันโดยวัดจากกึ่งกลางแนวเชื่อม ที่กระแส 90 – 120 A แก๊สปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub> 20%

รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่ง และระยะที่ชิ้นงานขาดออกจากกันโดยวัดจากกึ่งกลางแนวเชื่อม ที่กระแส 90 – 120 A แก๊สปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub> 20% พบว่ากระแสเชื่อมส่งผลต่อความร้อนและการหลอมละลายทำให้ตำแหน่งที่พังทะลายและชิ้นงานขาดออกจากกันในการทดสอบแรงดึงมีระยะขาดของชิ้นงานที่ไม่เท่ากัน โดยพิจารณาที่แก๊สที่ใช้ปกคลุมแนวเชื่อมคั้งคือ Ar80% + CO<sub>2</sub> 20% พบว่าที่ กระแสเชื่อม 110 A ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาที ชิ้นงานขาด

ที่เหล็กกล้าคาร์บอน SS400 โดยระยะของการพังทลายและชิ้นงานขาดออกจากกันห่างจากแนวเชื่อม 24.2 มม. ที่กระแส 90 A ความเร็วในการเชื่อม 450 มม./นาที ระยะการขาดของชิ้นงานห่างจากแนวเชื่อม ที่ 19.4 มม. โดนพบว่าระยะการขาดไม่มีผลต่อความแข็งแรงเพราะการขาดอยู่บริเวณนอกเขต พื้นที่ที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้า SS400 แต่อิทธิพลของความร้อนมีผลต่อระยะการขาดของชิ้นงาน

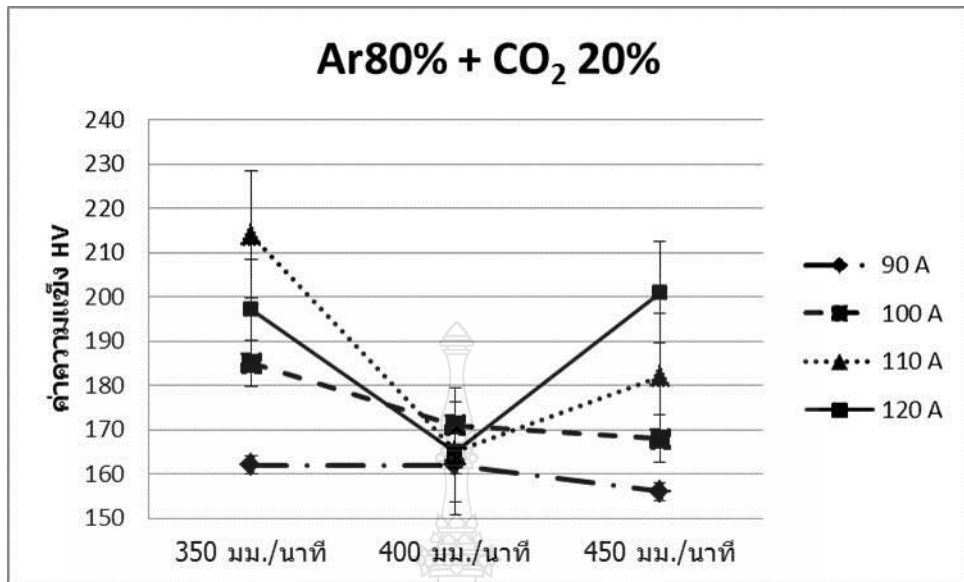
#### 4.1.3 วิเคราะห์ปัจจัยด้านกระแสไฟต่อค่าความแข็งของแนวเชื่อมและบริเวณพื้นที่กระทบร้อน

ผลการทดลองที่ได้พบว่า ระดับของกระแสไฟมีผลต่อความแข็งของแนวเชื่อมอันเนื่องมาจาก อิทธิพลของอุณหภูมิที่ได้จากการอาร์กของกระแสไฟเชื่อม และการหลอมละลายที่แตกต่างในแต่ละ กระแสไฟส่งผลต่อความแข็งของแนวเชื่อม จากชิ้นงานทดลองทั้งหมด ภายใต้ตัวแปรและข้อกำหนด ในการทดลองแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้

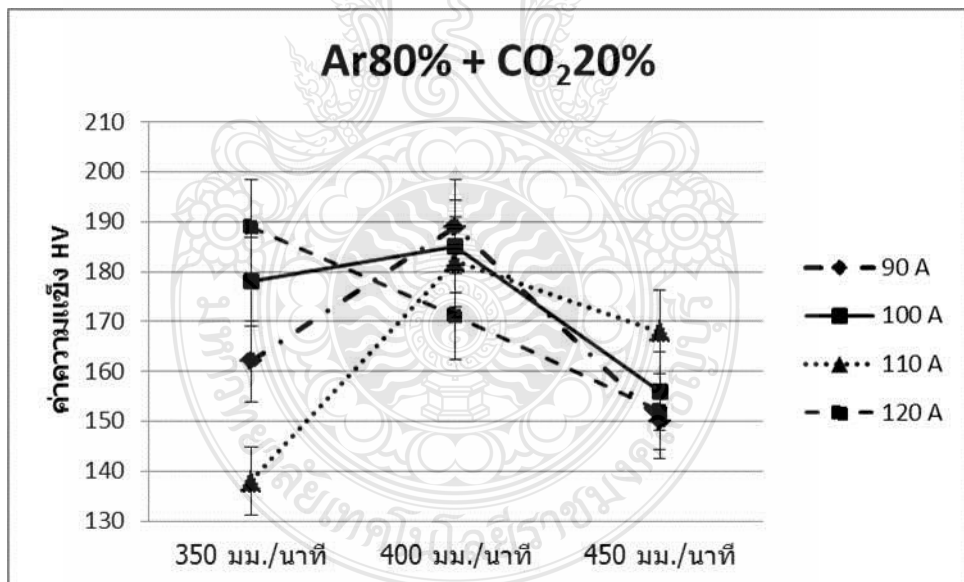


รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของแนวเชื่อม (Weld) จากปัจจัยด้านกระแสไฟ ที่กระแส 90 – 120 A แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub> 20%

รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งของแนวเชื่อมจากปัจจัยด้านกระแสไฟ ที่กระแส 90 – 120 A แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub> 20% จากการวิเคราะห์ผลของตัวแปรร่วมที่ใช้ในการเชื่อม พบว่าที่ กระแสเชื่อม 110 A ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาที จะให้ค่าความแข็งของแนวเชื่อม มากที่สุดที่ 282 HV(28 HRC) และค่าความแข็งของแนวเชื่อมต่ำสุดที่ กระแสเชื่อม 90 A ที่ ความเร็วในการเชื่อม 450 มม./นาที โดยมีค่าความแข็ง 239 HV(21 HRC) จากการวิเคราะห์จะเห็น ว่าที่กระแส 90 และ 100 A ค่าความแข็งของแนวเชื่อมจะลดลงเมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น ส่วนที่กระแส 110 และ 120 A อัตราความแข็งของแนวเชื่อมจะเป็นลักษณะระฆังคว่ำ คือเมื่ออัตรา ความเร็วในการเชื่อมต่ำความแข็งก็ต่ำ ถ้าอัตราความเร็วในการเชื่อมเหมาะสมความแข็งก็จะสูง แต่ถ้า ความเร็วในการเชื่อมสูงเกินไปความแข็งของแนวเชื่อมจะลดลง



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 จากปัจจัยด้านกระแสไฟเชื่อม ที่กระแส 90 – 120 A แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub> 20%



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 จากปัจจัยด้านกระแสไฟเชื่อม ที่กระแส 90 – 120 A แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub> 20%

รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 จากปัจจัยด้านกระแสไฟเชื่อม ที่กระแส 90 – 120 A แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub> 20% จากการวิเคราะห์ผลของตัวแปรร่วมที่ใช้ในการเชื่อม ระหว่างกระแสไฟ ความเร็วในการเชื่อม และแกสปกคลุมแนวเชื่อม ที่ส่งผลต่อความแข็งของพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 โดยพิจารณาที่แกสที่ใช้ปกคลุมแนวเชื่อมคงที่คือ Ar80% + CO<sub>2</sub> 20% พบว่าที่ กระแสเชื่อม 110 A

ความเร็วในการเชื่อม 350 มม./นาที่ จะให้ค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนมากที่สุดที่ 214 HV(96 HRB) และค่าความแข็งของพื้นที่กระทบร้อนต่ำสุดที่ กระแสเชื่อม 90 A ที่ความเร็วในการเชื่อม 450 มม./นาที่ โดยมีค่าความแข็ง 156 HV(82 HRB) โดยจากการวิเคราะห์ความแข็งทั้งหมดทุกกระแสเชื่อมพบว่า ที่ความเร็ว 400 มม./นาที่ ความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนทุกกระแสไฟเชื่อมมีความแข็งไม่แตกต่างกันมากความแข็งใกล้เคียงกัน และมีความแข็งของแนวเชื่อมน้อยเมื่อเชื่อมด้วยความเร็วต่ำ และความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการเชื่อมสูงขึ้น ส่วนที่ความเร็ว 350 และ 450 มม./นาที่

รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 จากปัจจัยด้านกระแสไฟเชื่อม ที่กระแส 90 – 120 A แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub>20% จากการวิเคราะห์ผลของตัวแปรร่วมที่ใช้ในการเชื่อม ระหว่างกระแสไฟ ความเร็วในการเชื่อม และแกสปกคลุมแนวเชื่อม ที่ส่งผลต่อความแข็งของพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 โดยพิจารณาที่แกสปกคลุมแนวเชื่อมคงที่คือ Ar80% + CO<sub>2</sub>20% พบว่าที่ กระแสเชื่อม 120 A ความเร็วในการเชื่อม 350 มม./นาที่ จะให้ค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนมากที่สุดที่ 189 HV(91 HRB) และค่าความแข็งของพื้นที่กระทบร้อนต่ำสุดที่ กระแสเชื่อม 110 A ที่ความเร็วในการเชื่อม 350 มม./นาที่ โดยมีค่าความแข็ง 138 HV (76 HRB)โดยจากการวิเคราะห์ความแข็งทั้งหมดทุกกระแสเชื่อมพบว่า ที่ความเร็ว 400 มม./นาที่ ความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนทุกกระแสไฟเชื่อมใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมาก และเมื่อพิจารณาที่กระแส 120 A ที่ให้ค่าความแข็งสูงสุด พบว่าความแข็งจะลดลงตามปริมาณของความเร็วในการเชื่อมที่สูงขึ้น และที่กระแส 110 A ที่ให้แค่การรับแรงดึงสูงสุดพบว่าความแข็งจะต่ำถ้าความเร็วในการเชื่อมต่ำ และความแข็งจะสูงถ้าอัตราความเร็วในการเชื่อมสูงขึ้น และความแข็งจะต่ำลงเมื่อความเร็วสูงเกินไป และค่าความแข็งจะลดลงเมื่อความเร็วในการเชื่อมสูงขึ้น เช่นเดียวกับกระแสเชื่อม 90 และ 100 A

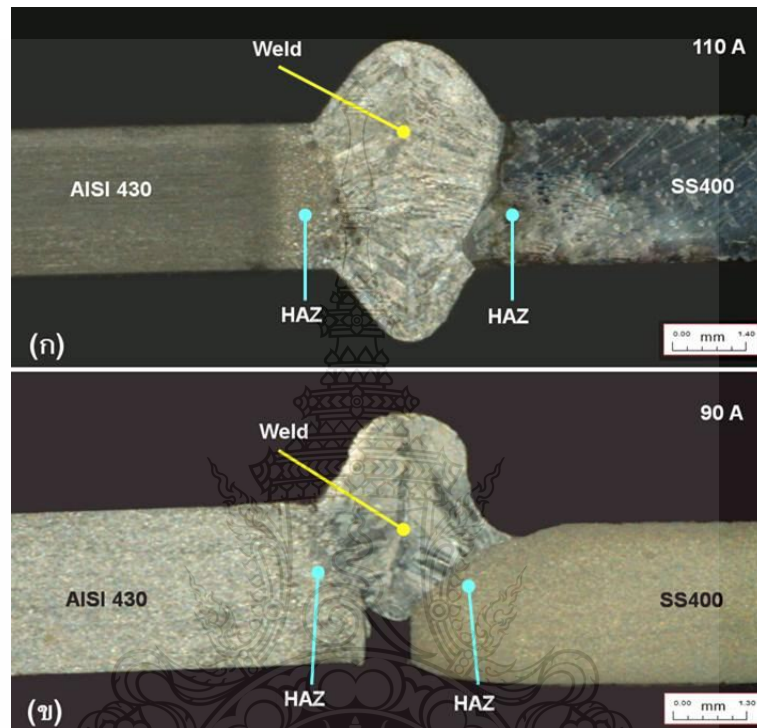
#### 4.1.4 วิเคราะห์ปัจจัยด้านกระแสไฟต่อโครงสร้างมหภาค (Macro Structure)

เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาค (Macro Structure) ของชิ้นงานที่ปัจจัยการเชื่อมด้านกระแสไฟสามารถสังเกตเห็นลักษณะความแตกต่างของเนื้อโลหะรอยเชื่อมกับเนื้อโลหะชิ้นงานที่มีลักษณะแตกต่างกัน อันเนื่องมาจากอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อม ด้านกระแสไฟที่ส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างมหภาคส่งผลต่อลักษณะของแนวเชื่อมและการซึมลึก เมื่อนำรูปโครงสร้างมหภาคของตัวแปรการเชื่อมที่ให้ค่ารับแรงดึงสูงสุด กับชิ้นงานที่ให้ค่ารับแรงดึงต่ำสุด จะเห็นถึงความแตกต่างของแนวเชื่อมและลักษณะโครงสร้างมหภาคอย่างชัดเจน จึงทำให้สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ และจากรูปมหภาคนี้ยังระบุตำแหน่งของ แนวเชื่อม (Weld) และ พื้นที่กระทบร้อน (HAZ) ของชิ้นงาน สำหรับบอกจุดในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคต่อไป

รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมและตำแหน่งที่ใช้สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของกระแสเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและต่ำสุด พบว่า รูปที่ 4.6 (ก) เชื่อมด้วยกระแส 110 A ซึ่งให้ค่ารับแรงดึงสูงสุด ลักษณะของแนวเชื่อมและการหลอมละลายและการซึมลึกระหว่างชิ้นงานทั้งสองชนิดเป็นไปอย่างสมบูรณ์ สามารถมองเห็นขอบเขตพื้นที่การหลอมละลายและเขตพื้นที่ของ HAZ ได้อย่างชัดเจน ส่วนชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแส 90 A รูปที่



4.6 (ข) ที่ให้ค่าการรับแรงดึงต่ำสุด จากการวิเคราะห์พบว่า การหลอมละลายระหว่างแนวเชื่อมกับชิ้นงานทั้งสองชนิดไม่สมบูรณ์อันเนื่องมาจากกระแสไฟที่ต่ำเกินไปส่งผลให้แนวเชื่อมไม่เกิดการซึมลึก แนวเชื่อมเล็กและนูน เกิดข้อบกพร่องขึ้นบริเวณแนวซึมลึกของชิ้นงานจึงทำให้ส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมส่งผลต่อค่าการรับแรงดึงของชิ้นงาน

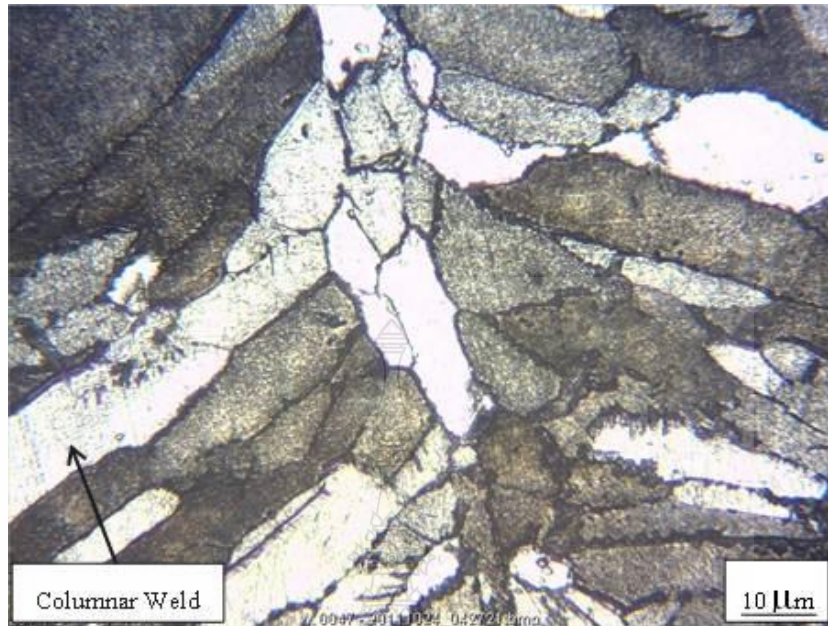


รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมและระบุตำแหน่งที่ใช้สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของกระแสเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและต่ำสุด ที่ความเร็ว 400 mm/min

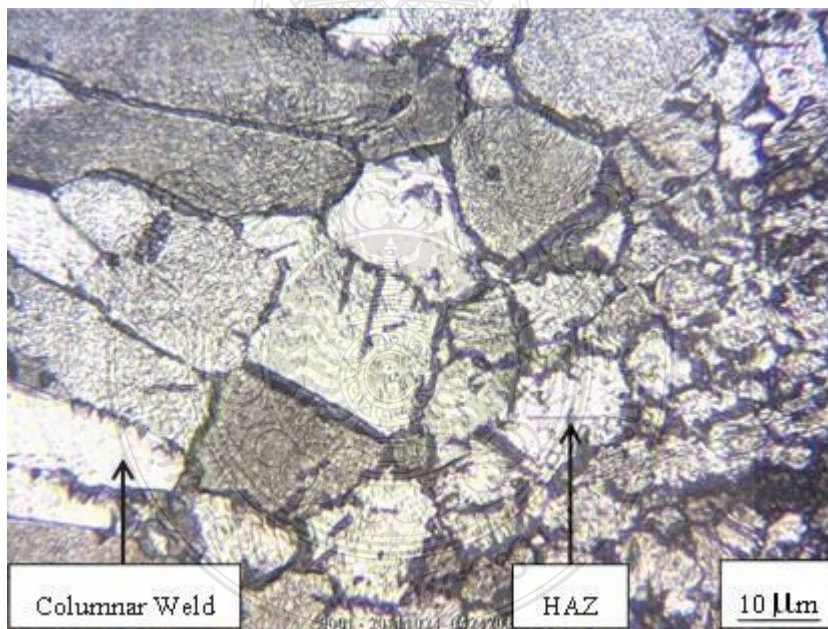
#### 4.1.4 วิเคราะห์ปัจจัยด้านกระแสไฟต่อโครงสร้างจุลภาค

ผลการทดลองที่ได้พบว่า ระดับของกระแสไฟมีผลต่อค่าการรับแรงดึงและค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ได้จากการอาร์กของกระแสไฟเชื่อม และการหลอมละลายที่แตกต่างในแต่ละกระแสไฟซึ่งส่งผลต่อลักษณะของโครงสร้างจุลภาคและขนาดของเม็ดเกรนบริเวณแนวเชื่อมและพื้นที่ที่กระทบร้อน จากชิ้นงานทดลองทั้งหมด ภายใต้ตัวแปรและข้อกำหนดในการทดลองแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้

รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม (Weld) ที่กระแส 110 A แกสปกคลุม Ar100% พบว่าโครงสร้างจุลภาคเป็นแบบ Columnar ขนาดใหญ่ วัดขนาดได้  $434.02 \mu\text{m}$  มีทิศทางของเกรนพุ่งจากขอบแนวเชื่อมเข้าหาจุดศูนย์กลางบ่อหลอมละลายบริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อม ในลักษณะตั้งฉากกับผนังของโลหะชิ้นงานเชื่อม เนื่องจากการเชื่อมใช้ความเร็วสูงจึงทำให้ต้องใช้เวลาในการแข็งตัวอย่างรวดเร็วมาก และบริเวณขอบเกรนมีลักษณะคล้ายโครเมียมคาร์ไบด์ ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) เกิดขึ้นรอบ ๆ เกรน



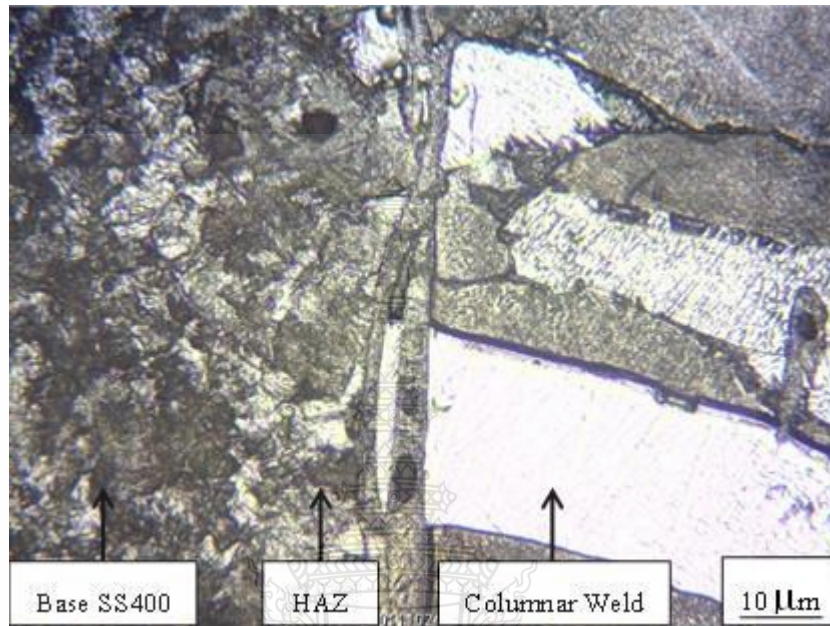
รูปที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมที่กระแส 110 A แกสปกคลุม Ar100%



รูปที่ 4.8 ลักษณะโครงสร้างแนวเชื่อมกับบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ที่กระแส 110 A แกสปกคลุม Ar100%

รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะโครงสร้างแนวเชื่อมกับบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ที่กระแส 110 A แกสปกคลุม Ar100% เมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างจุลภาคพบว่า ขนาดเม็ดเกรนจะขยายใหญ่ขึ้นมากกว่าขนาดเม็ดเกรนของเนื้อโลหะชิ้นงานเชื่อม AISI 430 อันเนื่องมาจากการเย็นตัวที่รวดเร็ว เมื่อวัดขนาดพบว่ามีความยาว 298.8  $\mu\text{m}$  แต่ขนาดเม็ดเกรนที่ได้ก็ยังคงเล็กกว่าบริเวณ

แนวเชื่อม โดยพบว่าบริเวณขอบเกรนมีลักษณะคล้ายโครเมียมคาร์ไบด์ ( $Cr_{23}C_6$ ) เกิดขึ้นตามขอบเกรนอันเนื่องมาจากอิทธิพลของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา (ฉัตรทอง,2548)

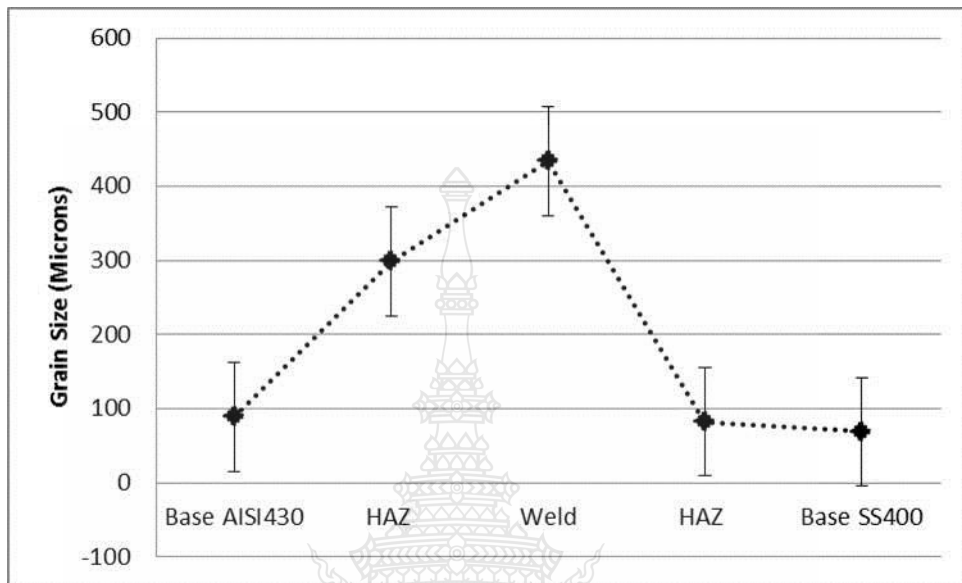


รูปที่ 4.9 ลักษณะโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมกับพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ที่ กระแส 110 A แกสปกคลุม Ar100%

รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมกับพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ที่กระแส 110 A แกสปกคลุม Ar100% เมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างจุลภาคพบว่า ขนาดเม็ดเกรนใกล้เคียงกับขนาดเม็ดเกรนของเนื้อโลหะชิ้นงานเชื่อม อันเนื่องมาจากการเย็นตัวในอุณหภูมิปกติและเมื่อเย็นตัวเม็ดเกรนสามารถกลับคืนสู่ขนาดปกติ เมื่อวัดขนาดพบว่ามีความยาว 82.4  $\mu m$  และขนาดเม็ดเกรนที่ได้เล็กกว่าบริเวณแนวเชื่อมอย่างชัดเจน โดยพบว่าบริเวณขอบแนวเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนกับแนวเชื่อมมีลักษณะคล้ายโครเมียมคาร์ไบด์ ( $Cr_{23}C_6$ ) เกิดขึ้นเป็นเส้นยาวกั้นระหว่างแนวเชื่อมกับพื้นที่กระทบร้อน อันเนื่องมาจากอิทธิพลของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาและความต่างของวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมทดลอง

รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบขนาดเกรน (Grain Size) ของแนวเชื่อม(Weld) พื้นที่กระทบร้อน (HAZ) และเนื้อโลหะเชื่อม (Base) ที่กระแส 110 A แกสปกคลุม Ar100% พบว่าปัจจัยตัวแปรในการเชื่อมด้านกระแสไฟ มีผลต่อค่าการรับแรงดึงและความแข็งแรงทำให้ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีลักษณะและขนาดของเม็ดเกรนที่แตกต่างกันโดยพบว่าลักษณะของเม็ดเกรนของพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 มีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่เล็กกว่าขนาดเม็ดเกรนของแนวเชื่อม เมื่อทำการตรวจสอบและวัดขนาดพบว่าขนาดของเม็ดเกรนบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 มีขนาดเฉลี่ยที่ 298.8  $\mu m$  บริเวณแนวเชื่อมขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยที่ 434.02  $\mu m$  และบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 มีขนาด

เม็ดเกรนเฉลี่ยที่ 82.4  $\mu\text{m}$  โดย Base Stainless Steel ขนาดเกรน (Grain Size) เฉลี่ยที่ 89.23  $\mu\text{m}$  และ Base Steel ขนาดเกรน (Grain Size) เฉลี่ยที่ 69  $\mu\text{m}$



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบขนาดเกรน (Grain Size) ของแนวเชื่อม (Weld) พื้นที่กระทบร้อน (HAZ) และเนื้อโลหะเชื่อม (Base) ที่กระแส 110 A แกสปกคลุม Ar100%

#### 4.1.5 สรุปผลการวิเคราะห์ปัจจัยด้านกระแสไฟ

ผลการทดลองที่ได้พบว่า ระดับของกระแสไฟมีผลต่อค่าการรับแรงดึง ค่าความแข็งของแนวเชื่อม และลักษณะของโครงสร้างจุลภาค อันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ได้จากการอาร์กของกระแสไฟเชื่อม และการหลอมละลายที่แตกต่าง จากชิ้นงานทดลองทั้งหมด 108 ชิ้น ภายใต้ตัวแปรและข้อกำหนดในการทดลองแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูล โดยจากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ที่กระแส 110 A เป็นกระแสที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อม เพราะเมื่อตรวจสอบค่าการรับแรงดึงพบว่า สามารถรับแรงดึงได้ 448 MPa ให้ค่าความแข็ง 282 HV(27 HRB) มากที่สุดเมื่อเทียบกับกระแสไฟเชื่อมตัวแปรอื่น ๆ และ กระแสไฟเชื่อม 90 A ไม่เหมาะกับการเชื่อมเพราะให้ค่ารับแรงดึงต่ำสุดและบางชิ้นงานทดลองขาดตรงบริเวณแนวเชื่อม อันเนื่องมาจากกระแสที่ต่ำทำให้การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ แนวเชื่อมมีความแข็งแรงน้อยกว่าชิ้นงานทดลองด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400

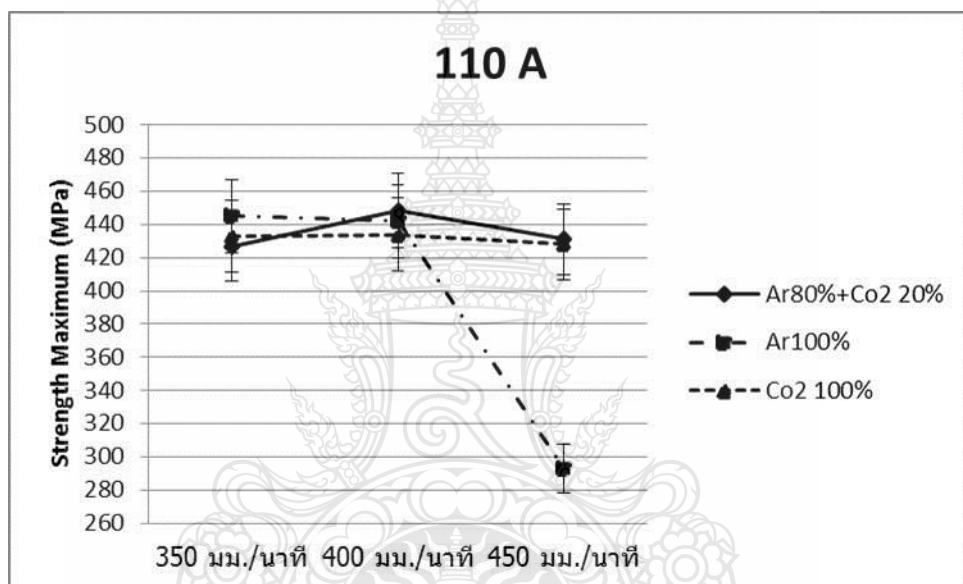
#### 4.2 อิทธิพลของแกสปกคลุมต่อสมบัติของแนวเชื่อม

การทดลองพบว่าตัวแปรการเชื่อมด้านแกสปกคลุม มีผลต่อสมบัติของแนวเชื่อม โดยวิเคราะห์จากค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึง ค่าความแข็ง และลักษณะโครงสร้างจุลภาค ของชิ้นงานทดสอบทั้งหมด 108 ชิ้น ภายใต้เงื่อนไขตัวแปรที่กำหนด แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงที่ได้ซึ่งจากการทดลองพบว่าตัวแปรการเชื่อมด้านแกสปกคลุมมีผลต่ออุณหภูมิในการเชื่อม การหลอมละลาย และการถ่ายโอนน้ำโลหะลงสู่แนวเชื่อม ที่กระแสไฟและความเร็วในการเชื่อมที่แตกต่างกัน เมื่อนำค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงที่ได้ไปวิเคราะห์

ผลเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของแนวเชื่อม และค่าความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อมที่ได้พบว่าแกสปกคลุมที่ใช้เชื่อมแต่ละชนิดมีผลต่อค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมอย่างชัดเจน

#### 4.2.1 วิเคราะห์ปัจจัยด้านแกสปกคลุมต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึง

ผลการทดลองที่ได้พบว่า ชนิดของแกสปกคลุมที่ใช้เชื่อมมีผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ได้จากการอาร์กของกระแสไฟเชื่อม และการหลอมละลายที่สมบูรณ์ในแนวเชื่อม จากชิ้นงานทดลองทั้งหมด 108 ชิ้น ภายใต้ตัวแปรและข้อกำหนดในการทดลองแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าการรับแรงดึงสูงสุดจากปัจจัยด้านแกสปกคลุม ที่กระแส 110 A

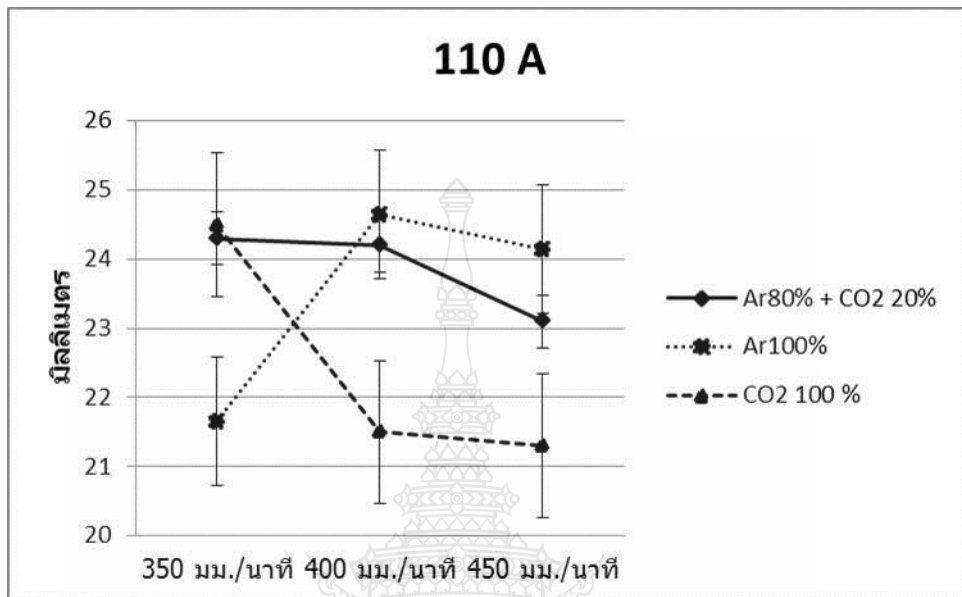
รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าการรับแรงดึงสูงสุดจากปัจจัยด้านแกสปกคลุม ที่กระแส 110 A พบว่าแกสปกคลุม Ar80%+CO<sub>2</sub>20% ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาที จะให้ค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดที่ 448 MPa และค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด ได้แก่ชิ้นงานที่ปกคลุมด้วยแกส Ar100 % ที่ความเร็วในการเชื่อม 450 มม./นาที ที่ 293 MPa

#### 4.2.2 วิเคราะห์ปัจจัยด้านแกสปกคลุมต่อจุดพังทลายและชิ้นงานขาดออกจากกัน

ผลการทดลองที่ได้พบว่า ชนิดของแกสปกคลุมมีผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ได้จากการอาร์กของกระแสไฟเชื่อม และการหลอมละลายที่สมบูรณ์ในแนวเชื่อม ส่งผลต่อการขาดของชิ้นงานซึ่งในการทดลองจากชิ้นงานทดลองทั้งหมด 108 ชิ้น ภายใต้ตัวแปรและข้อกำหนดในการทดลองแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้

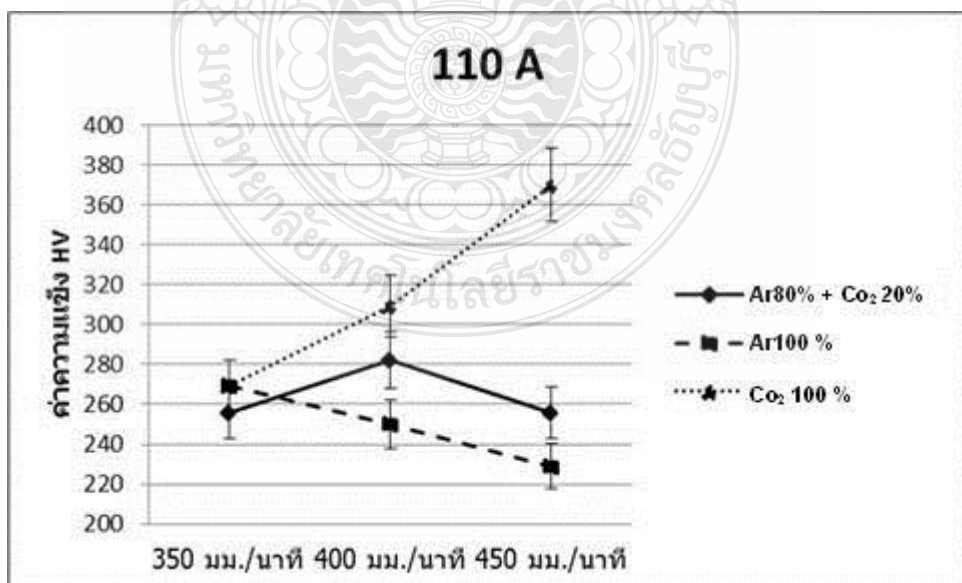
รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งระยะที่ชิ้นงานขาดออกจากกันโดยวัดจากกึ่งกลางแนวเชื่อมตัวแปรการเชื่อมด้านแกสปกคลุม ที่กระแส 110 A พบว่าแกสปกคลุม Ar100 % ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาที ชิ้นงานขาดที่เหล็กกล้าคาร์บอน SS400 โดยระยะของการพังทลายและ

ชั้นงานขาดออกจากกันห่างจากแนวเชื่อมที่สุดที่ 24.65 มิลลิเมตร และแกสปกคลุม CO<sub>2</sub>100 % ความเร็วในการเชื่อม 450 มม./นาที ระยะห่างจุดขาดใกล้แนวเชื่อมสุดที่ 21.3 มิลลิเมตร



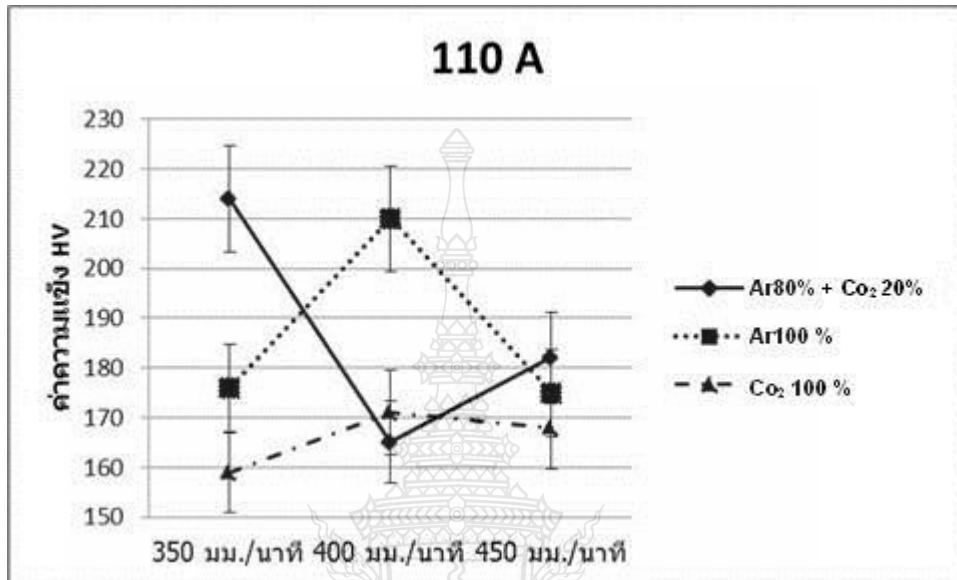
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบตำแหน่งระยะที่ชั้นงานขาดออกจากกันโดยวัดจากกึ่งกลางแนวเชื่อมตัวแปรการเชื่อมด้านแกสปกคลุม ที่กระแส 110 A

#### 4.2.3 วิเคราะห์ปัจจัยด้านแกสปกคลุมต่อค่าความแข็งแนวเชื่อมและบริเวณพื้นที่กระทบร้อน

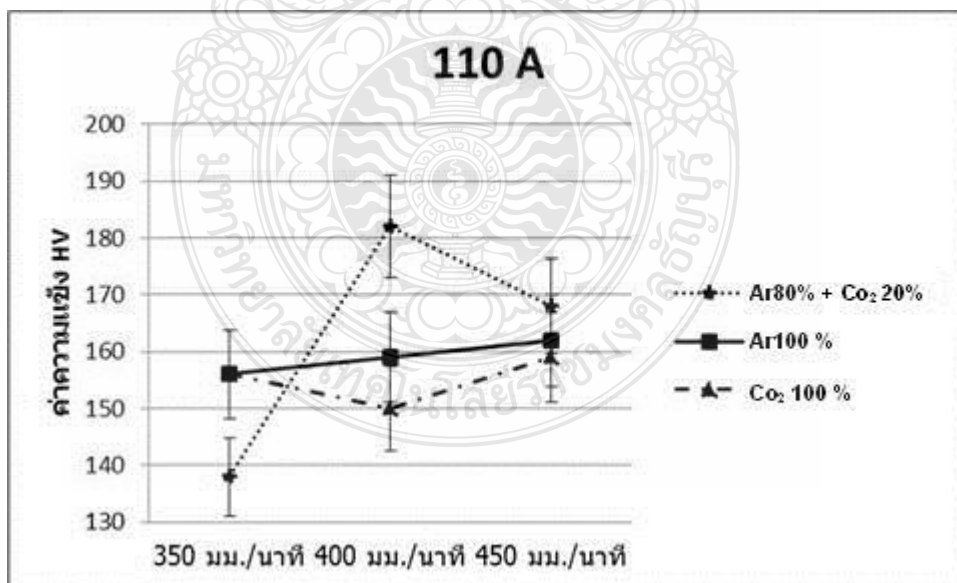


รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของแนวเชื่อมจากปัจจัยด้านแกสปกคลุม ที่กระแส 110 A

ผลการทดลองที่ได้พบว่า ของแกสปกคลุมแนวเชื่อมมีผลต่อความแข็งของแนวเชื่อมอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ได้จากการอาร์กที่เกิดจากอิทธิพลของแกสปกคลุม จากชิ้นงานทดลองทั้งหมด 108 ชิ้น ภายใต้ตัวแปรและข้อกำหนดในการทดลองแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระพร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ตัวแปรการเชื่อมด้านแกสปกคลุม ที่กระแส 110 A



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระพร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ตัวแปรการเชื่อมด้านแกสปกคลุม ที่กระแส 110 A

รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งของแนวเชื่อมจากปัจจัยด้านแกสปกคลุม ที่กระแส 110 A พบว่าแกสปกคลุม CO<sub>2</sub>100 % ความเร็วในการเชื่อม 450 มม./นาที จะให้ค่าความ

แข็งของแนวเชื่อมมากที่สุดที่ 370 HV(38 HRC) และค่าความแข็งของแนวเชื่อมต่ำสุดที่ แกสปกคลุม Ar100 % ความเร็วในการเชื่อม 450 มม./นาที่ โดยมีค่าความแข็ง 229 HV(98 HRB)

รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ตัวแปรการเชื่อมด้านแกสปกคลุม ที่กระแส 110 A พบว่า แกส Ar80% + CO<sub>2</sub>20% ความเร็วในการเชื่อม 350 มม./นาที่ จะให้ค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนมากที่สุดที่ 214 HV(96 HRB) และค่าความแข็งของพื้นที่กระทบร้อนต่ำสุดที่ แกสปกคลุม CO<sub>2</sub>100% ที่ความเร็วในการเชื่อม 350 มม./นาที่ โดยมีค่าความแข็งที่ 159 HV(83 HRB) โดยจากการวิเคราะห์ความแข็งทั้งหมดพบว่า ทุกชนิดของแกสปกคลุม ที่ความเร็ว 450 มม./นาที่ ความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนไม่แตกต่างกันมาก ความแข็งใกล้เคียงกัน ส่วนที่ความเร็ว 350 มม./นาที่

รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ตัวแปรการเชื่อมด้านแกสปกคลุม ที่กระแส 110 A พบว่าที่ แกส Ar80% + CO<sub>2</sub>20% ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาที่ จะให้ค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนมากที่สุดที่ 182 HV(89 HRB) และค่าความแข็งของพื้นที่กระทบร้อนต่ำสุดที่ แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub>20% ที่ความเร็วในการเชื่อม 350 มม./นาที่ โดยมีค่าความแข็งที่ 138 HV(76 HRB) โดยจากการวิเคราะห์ความแข็งทั้งหมดพบว่า ทุกชนิดของแกสปกคลุมจะส่งผลต่อความแข็งของพื้นที่กระทบร้อนเมื่อความเร็วเปลี่ยนแปลงไป โดยแกส Ar80% + CO<sub>2</sub>20% ความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจาก 350 เป็น 400 และจะลดลงเมื่อความเร็ว 450 มม./นาที่ ส่วนแกส Ar100% ความแข็งจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วของการเดินหัวเชื่อม

#### 4.1.4 วิเคราะห์ปัจจัยด้านแกสปกคลุมต่อโครงสร้างมหภาค (Macro Structure)

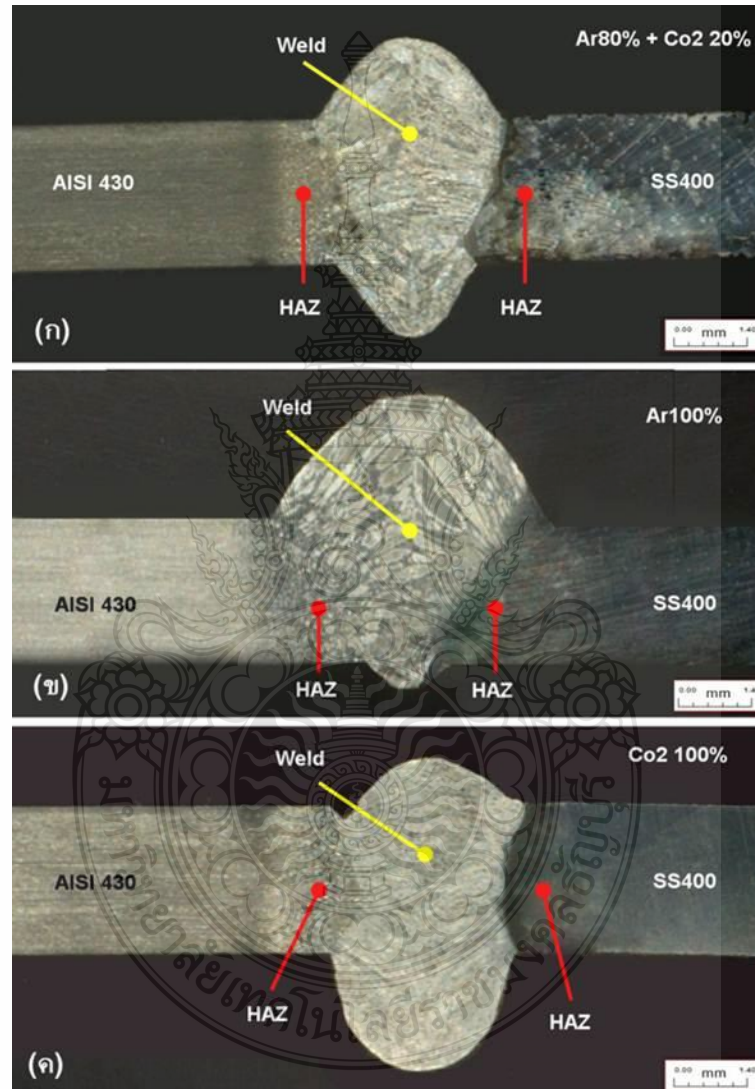
เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาค (Macro Structure) ของชิ้นงานที่ปัจจัยการเชื่อมด้านแกสปกคลุมจะเห็นถึงความแตกต่างของแนวเชื่อม และตำแหน่งที่ระบุในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างมหภาคแนวเชื่อมและตำแหน่งที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบที่ตัวแปรการเชื่อมด้านแกสปกคลุม ที่กระแส 110 A ความเร็ว 400 mm/min จากการวิเคราะห์ รูปที่ 4.16 (ก) แกสปกคลุมแนวเชื่อม Ar80% + CO<sub>2</sub>20% พบว่ามีลักษณะการหลอมละลายและแนวเชื่อมสมบูรณ์มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวแปรแกสปกคลุมชนิดอื่น เพราะแกส Ar80% + CO<sub>2</sub>20% มีความเสถียรกว่าแกสชนิดอื่น ทำให้การหลอมละลายและการเติมเนื้อโลหะเชื่อมระหว่างแนวเชื่อมกับชิ้นงานเป็นไปอย่างสมบูรณ์มีความเหมาะสมทั้งขนาดของแนวเชื่อมและขนาดของรอยซึมลึก รูปที่ 4.16 (ข) แกสปกคลุมแนวเชื่อม Ar100 % จะเห็นว่าแนวเชื่อมจะมีขนาดใหญ่ และนูน การหลอมละลายรวมตัวระหว่างแนวเชื่อมกับชิ้นงานดีเพราะใช้กระแสไฟที่เหมาะสม แต่ถ้าใช้กระแสไฟต่ำเกินไปการหลอมละลายจะไม่สมบูรณ์ไม่เกิดการซึมลึกของแนวเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4.6 (เปรียบเทียบกระแส สูง และต่ำ) และด้วยคุณสมบัติของแกสที่ให้ประจุวกรกระแสเชื่อมคงที่แนวเชื่อมกว้าง [6] จึงได้แนวเชื่อมแบบนี้ รูปที่ 4.16 (ค) แกสปกคลุมแนวเชื่อม CO<sub>2</sub> 100% การหลอมละลายและอัตราการเติมหลอดสูงจึงทำให้ลักษณะของแนวเชื่อมมีพื้นที่การหลอมละลายกว้างแต่แนวเชื่อมแบนราบ การซึมลึกสูงทำให้รอยซึมลึกนูนใหญ่ ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของแกสปกคลุมเพราะคุณสมบัติของแกส CO<sub>2</sub> ที่ทำให้การหลอมละลายและการนำความ



ร้อนได้ดีทำให้เกิดรอยกัดแหว่งที่ขอบแนวเชื่อม จากคุณสมบัติของแกส CO<sub>2</sub> ที่ให้รอยซึมลึกกว้างและลึก ลักษณะผิวหน้าแนวเชื่อมมีเกล็ดหยาบและนูน เกิดรูประจุบวท่ำ ขนาดหยดโลหะไม่สม่ำเสมอ แต่ปกคลุมแนวเชื่อมได้ทั่วถึง [6] จึงลักษณะของแนวเชื่อมดังรูป

#### 4.2.4 วิเคราะห์ปัจจัยด้านแกสปกคลุมต่อโครงสร้างจุลภาค



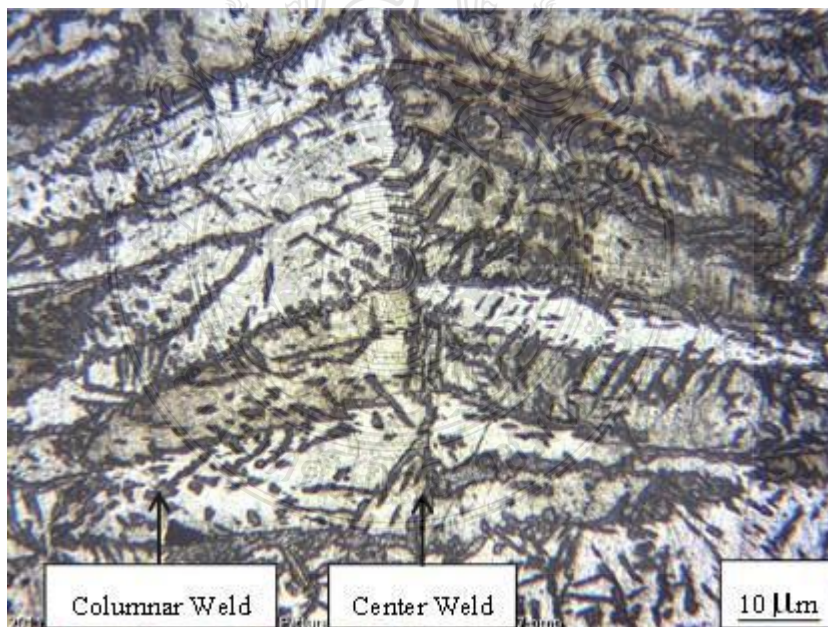
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างมหภาคแนวเชื่อมและตำแหน่งที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบที่ตัวแปรการเชื่อมด้านแกสปกคลุม ที่กระแส 110 A ความเร็ว 400 mm/min

ผลการทดลองที่ได้พบว่า ระดับของกระแสไฟมีผลต่อค่าการรับแรงดึงและค่าความแข็งของแนวเชื่อมอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ได้จากการอาร์กของกระแสไฟเชื่อม และการหลอมละลายที่แตกต่างในแต่ละกระแสไฟซึ่งส่งผลต่อลักษณะของโครงสร้างจุลภาคและขนาดของเม็ดเกรนบริเวณแนวเชื่อม

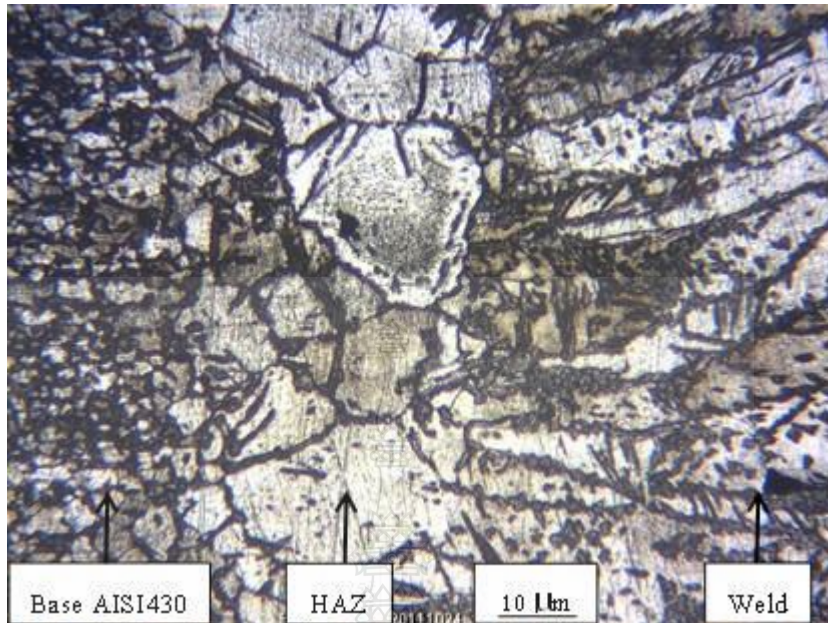
และพื้นที่ที่กระทบร้อน จากชิ้นงานทดลองทั้งหมด 108 ชิ้น ภายใต้ตัวแปรและข้อกำหนดในการทดลอง แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้

รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมที่ แกสปกคลุม Ar100% กระแส 110 A พบว่าลักษณะของโครงสร้างจุลภาคเป็นแบบ Columnar ขนาดใหญ่ โดยมีขนาดเฉลี่ยที่ 316  $\mu\text{m}$  มีทิศทางของเกรนพุ่งจากขอบแนวเชื่อมเข้าหาจุดศูนย์กลางบ่อหลอมละลายบริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อมในลักษณะตั้งฉากกับผนังของโลหะชิ้นงานเชื่อม เนื่องจากการเชื่อมใช้ความเร็วสูงจึงทำให้ต้องใช้เวลาในการแข็งตัวอย่างรวดเร็วมาก และบริเวณขอบเกรน Columnar มีลักษณะคล้ายโครเมียมคาร์ไบด์ ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) เกิดขึ้นโดยรอบ และโครเมียมคาร์ไบด์ ยังแทรกตัวในลักษณะเดนไดรต์เข้าไปในพื้นที่ Columnar ของบริเวณแนวเชื่อมทั่วไป

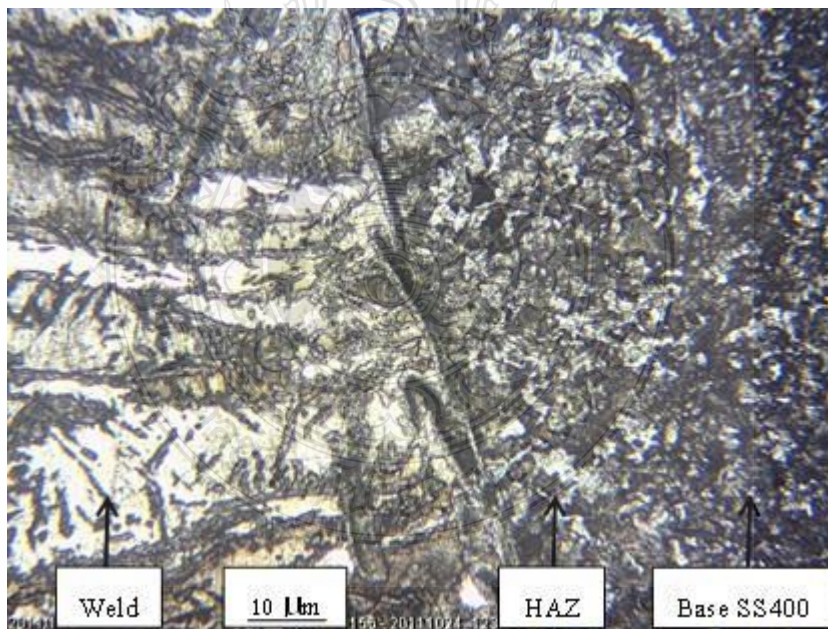
รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมกับพื้นที่ที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ที่แกสปกคลุม Ar80% +  $\text{CO}_2$ 20% กระแส 110 A เมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างจุลภาคพบว่า ขนาดเม็ดเกรนจะขยายใหญ่ขึ้นมากกว่าขนาดเม็ดเกรนของเนื้อโลหะชิ้นงานเชื่อมเพอร์ริติก AISI 430 อันเนื่องมาจากการเย็นตัวที่รวดเร็วทำให้เกรนที่ขยายจากความร้อนไม่สามารถกับคืนสู่สภาวะเดิมได้ เมื่อวัดขนาดพบว่ามีความยาว 178.56  $\mu\text{m}$  แต่ขนาดเม็ดเกรนที่ได้ก็ยังคงเล็กกว่าบริเวณแนวเชื่อม โดยพบว่าบริเวณขอบเกรนมีลักษณะคล้ายโครเมียมคาร์ไบด์ ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากอิทธิพลของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา (ฉัตรทอง,2548)



รูปที่ 4.17 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม ที่แกสปกคลุม Ar80% +  $\text{CO}_2$ 20% กระแส 110 A



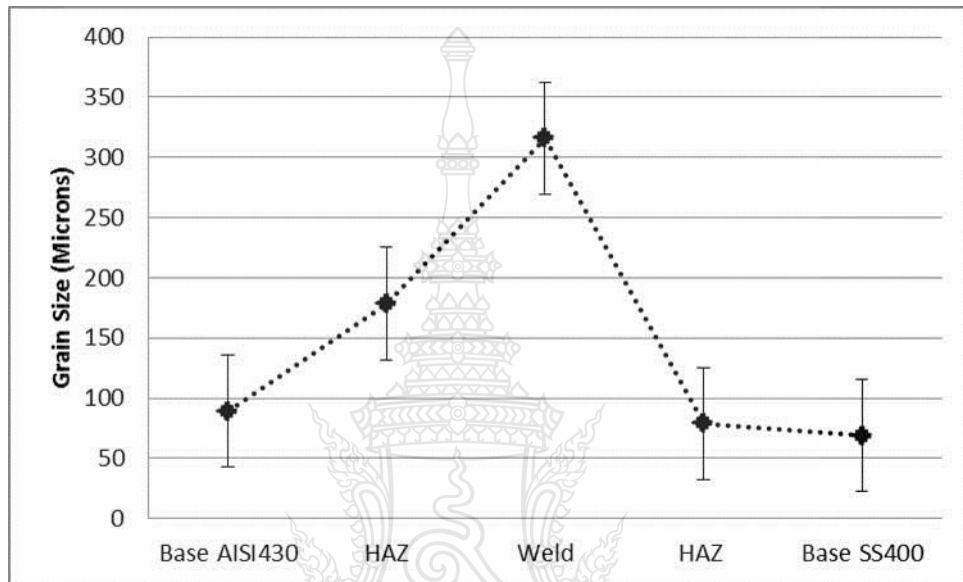
รูปที่ 4.18 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมกับพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้ AISI 430 ที่กระแส 110 A แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub>20%



รูปที่ 4.19 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมกับพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอนที่ แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub>20% กระแส 110 A

รูปที่ 4.19 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมกับพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ที่แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub>20% กระแส 110 A เมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างจุลภาคพบว่า ขนาดเม็ดเกรนใกล้เคียงกับขนาดเม็ดเกรนของเนื้อโลหะชิ้นงานเชื่อม อันเนื่องมาจาก

การเย็นตัวในอุณหภูมิปกติและเมื่อเย็นตัวเม็ดเกรนสามารถกลับคืนสู่ขนาดปกติได้ เมื่อวัดขนาดพบว่า มีขนาด 79.08  $\mu\text{m}$  และขนาดเม็ดเกรนที่ได้เล็กกว่าบริเวณแนวเชื่อมอย่างชัดเจน โดยพบว่าบริเวณ ขอบแนวเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนกับแนวเชื่อมมีลักษณะคล้ายโครเมียมคาร์ไบด์ ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) เกิดขึ้นเป็นเส้นยาวกั้นระหว่างแนวเชื่อมกับพื้นที่ที่กระทบร้อนอันเนื่องมาจากอิทธิพลของความสัมพันธ์ ระหว่างอุณหภูมิ เวลา และความต่างของวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมทดลอง



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบขนาดเกรน (Grain Size) ของแนวเชื่อม(Weld) พื้นที่กระทบร้อน (HAZ) และเนื้อโลหะเชื่อม (Base) ที่แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub>20% กระแส 110 A

รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบขนาดเกรน (Grain Size) ของแนวเชื่อม(Weld) พื้นที่กระทบร้อน (HAZ) และเนื้อโลหะเชื่อม (Base) ที่กระแส 110 A แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub>20% พบว่าปัจจัยตัวแปรในการเชื่อมด้านแกสปกคลุม มีผลต่อคุณสมบัติทางกล ด้านค่าการรับแรงดึงและค่าความแข็งทำให้ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีลักษณะและขนาดของเม็ดเกรนที่แตกต่างกันโดยพบว่าลักษณะของเม็ดเกรนของพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 มีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่เล็กกว่าขนาดเม็ดเกรนของแนวเชื่อม เมื่อทำการตรวจสอบและวัดขนาดพบว่าขนาดของเม็ดเกรน บริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 มีขนาดเฉลี่ยที่ 178.56  $\mu\text{m}$  บริเวณแนวเชื่อมขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยที่ 316  $\mu\text{m}$  และบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 มีขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยที่ 79.08  $\mu\text{m}$  โดย Base Stainless Steel ขนาดเกรน (Grain Size) เฉลี่ยที่ 89.23  $\mu\text{m}$  และ Base Steel ขนาดเกรน (Grain Size) เฉลี่ยที่ 69  $\mu\text{m}$

#### 4.2.5 สรุปผลการวิเคราะห์ปัจจัยด้านแกสปกคลุม

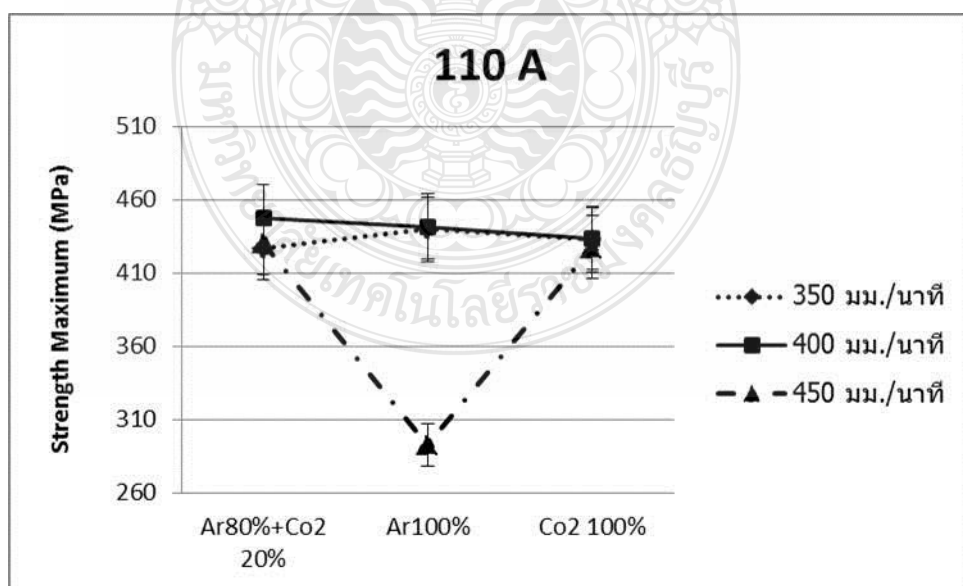
ผลการทดลองที่ได้พบว่า ชนิดของแกสปกคลุมมีผลต่อค่าการรับแรงดึง ค่าความแข็งของแนวเชื่อม และลักษณะของโครงสร้างจุลภาค อันเนื่องมาจากอิทธิพลของแกสปกคลุมที่ส่งผลต่อการถ่ายโอนน้ำโลหะ และการหลอมละลายของลวดเชื่อมและเนื้อโลหะเชื่อม จากชิ้นงานทดลองทั้งหมด 108

ขึ้น ภายใต้ตัวแปรและข้อกำหนดในการทดลองแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูล โดยจากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า แกสปกคลุมที่ให้ค่าการรับแรงดึงสูงสุดคือแกสผสมระหว่าง Ar80% + CO<sub>2</sub>20% เพราะเมื่อตรวจสอบค่าการรับแรงดึงพบว่า ชิ้นงานที่ปกคลุมด้วยแกส Ar80% + CO<sub>2</sub>20% ที่กระแส 110 A สามารถรับแรงดึงได้ 448 Mpa และแกส CO<sub>2</sub> 100% ให้ค่าความแข็งแนวเชื่อมสูงที่สุด ที่ 370 HV(38 HRC) และ แกส Ar100% ไม่เหมาะกับการปกคลุมแนวเชื่อมเพราะให้ค่ารับแรงดึงต่ำสุด ที่ 293 Mpa และบางชิ้นงานทดลองขาดตรงบริเวณแนวเชื่อม อันเนื่องมาจากกระแสที่ต่ำทำให้การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ แนวเชื่อมมีความแข็งแรงน้อยกว่าชิ้นงานทดลองด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400

#### 4.3 อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมต่อสมบัติของแนวเชื่อม

การทดลองพบว่าตัวแปรการเชื่อมด้านความเร็วของการเชื่อม มีผลต่อสมบัติของแนวเชื่อม โดยวิเคราะห์จากค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึง ค่าความแข็ง และลักษณะโครงสร้างจุลภาค ของชิ้นงานทดสอบทั้งหมด 108 ชิ้น ภายใต้เงื่อนไขตัวแปรที่กำหนด แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงที่ได้ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าตัวแปรการเชื่อมด้านความเร็วในการเชื่อม มีผลต่ออัตราการหลอมละลาย และการถ่ายโอนน้ำโลหะลงสู่แนวเชื่อม และความเร็วจะแปรผันกับขนาดของกระแสไฟที่ใช้เชื่อม เมื่อนำค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงที่ได้ไปวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกับลักษณะโครงสร้างของแนวเชื่อม และค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมที่ได้พบว่าความเร็วในการเชื่อมที่แตกต่างกันมีผลต่อการหลอมละลายและความแข็งแรงและความแข็งอย่างชัดเจน

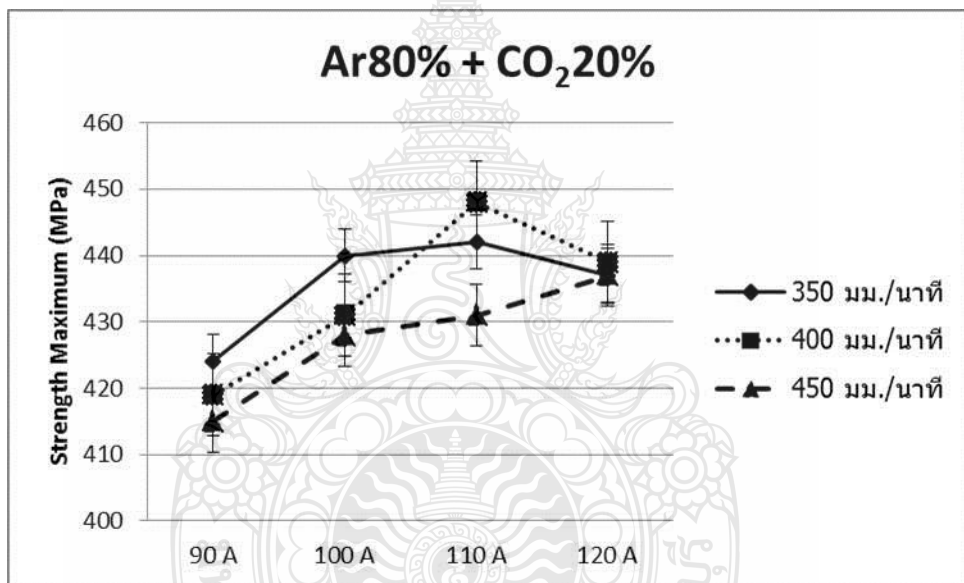
##### 4.3.1 วิเคราะห์ปัจจัยด้านความเร็วในการเชื่อมต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึง



รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบค่าการรับแรงดึงจากปัจจัยด้านความเร็วในการเชื่อม กับชนิดของแกสปกคลุมแนวเชื่อม ที่กระแส 110 A

ผลการทดลองที่ได้พบว่า ทุกระดับความเร็วในการเชื่อมมีผลต่อความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม และส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ได้จากการอาร์กของกระแสไฟเชื่อม จะแปรผันกับความเร็วในการเดินหัวเชื่อม โดยเฉพาะกระแสไฟที่สูงและต่ำ จะส่งผลโดยตรงกับการเดินหัวเชื่อม เพราะลักษณะการเติมเนื้อโลหะและการหลอมละลายที่สมบูรณ์ในแนวเชื่อม จากชิ้นงานทดลองทั้งหมด 108 ชิ้น ภายใต้ตัวแปรและข้อกำหนดในการทดลองแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้

รูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบค่าการรับแรงดึงจากปัจจัยด้านความเร็วในการเชื่อม กับชนิดของแกสปกคลุมแนวเชื่อม ที่กระแส 110 A พบว่า ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาที แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub>20% จะให้ค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดที่ 448 MPa และค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดที่ 293 MPa ได้แก่ชิ้นงานที่ปกคลุมด้วยแกส Ar100 % ที่ความเร็วในการเชื่อม 450 มม./นาที



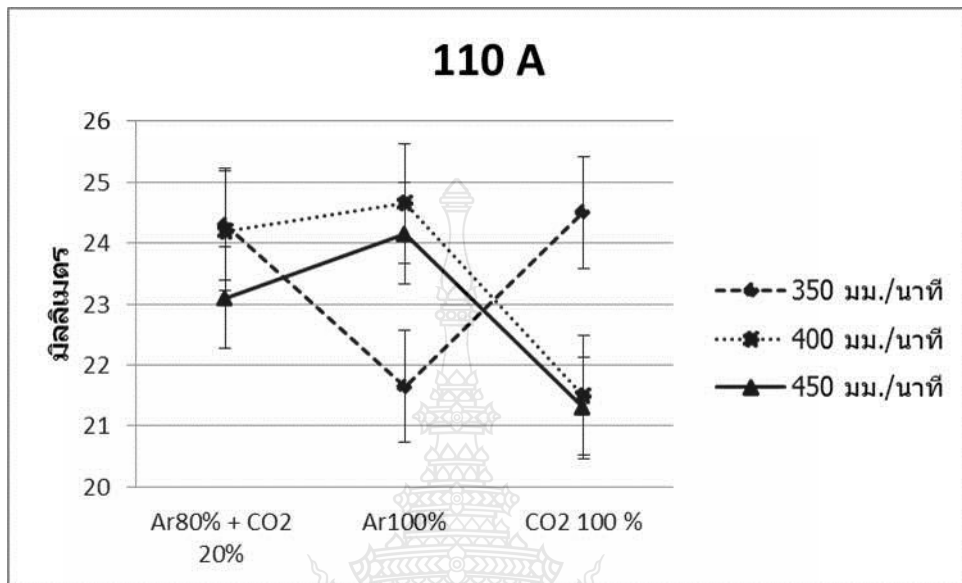
รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบค่าการรับแรงดึงจากปัจจัยการเชื่อมด้านความเร็วในการเชื่อม กับกระแสเชื่อมที่แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub>20%

รูปที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบค่าการรับแรงดึงจากปัจจัยการเชื่อมด้านความเร็วในการเชื่อม กับกระแสเชื่อม ที่แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub>20% พบว่า ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาที กระแส 110 A จะให้ค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดที่ 448 MPa และค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดที่ 415 MPa ได้แก่ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็ว 450 มม./นาที กระแส 90 A

#### 4.3.2 วิเคราะห์ปัจจัยด้านความเร็วในการเชื่อมต่อจุดพังทะลายและชิ้นงานขาดออกจากกัน

ผลการทดลองที่ได้พบว่า ความเร็วในการเชื่อมมีผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมอันเนื่องมาจากการหลอมละลายและการถ่ายเทน้ำโลหะที่แตกต่างกันในแนวเชื่อม ส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมและพื้นที่กระแทกร้อนทำให้จุดพังทะลายและการขาดของชิ้นงานซึ่งในการ

ทดลองจากชิ้นงานทดลองทั้งหมด 108 ชิ้น ภายใต้ตัวแปรและข้อกำหนดในการทดลองแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้



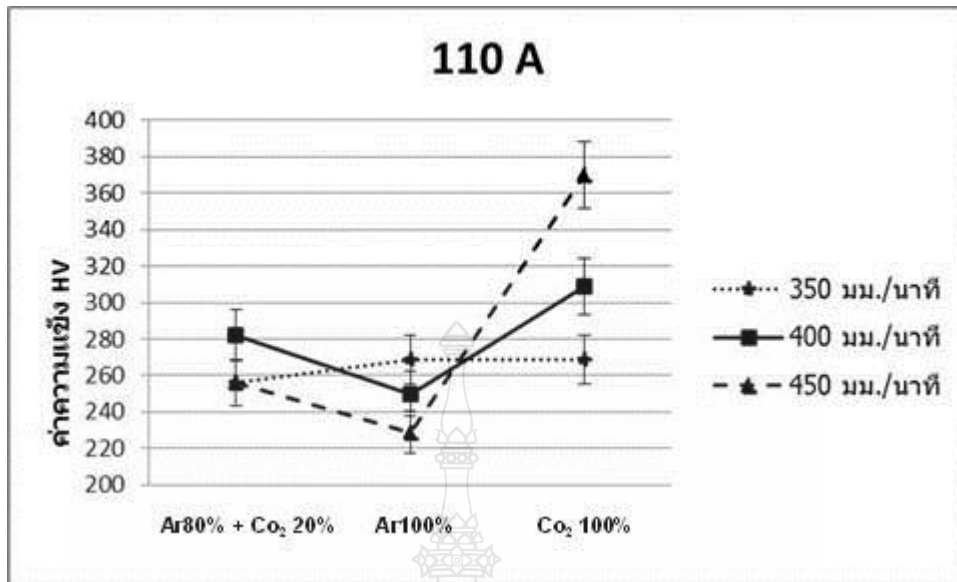
รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบตำแหน่งระยะที่ชิ้นงานขาดออกจากกันโดยวัดจากกึ่งกลางแนวเชื่อมที่ตัวแปรความเร็วในการเชื่อม กระแส 110 A

รูปที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งระยะที่ชิ้นงานขาดออกจากกันโดยวัดจากกึ่งกลางแนวเชื่อมที่ตัวแปรความเร็วในการเชื่อม กระแส 110 A พบว่า ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาที่ แกสปกคลุม Ar100 % ชิ้นงานขาดที่เหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ไม่ได้ขาดบริเวณแนวเชื่อม โดยระยะของการพังทลายและชิ้นงานขาดออกจากกันห่างจากแนวเชื่อมมากที่สุดที่ 24.65 มิลลิเมตร และความเร็วในการเชื่อม 450 มม./นาที่ แกสปกคลุม CO<sub>2</sub>100 % ระยะของการพังทลายและชิ้นงานขาดออกจากกันห่างจากแนวเชื่อมน้อยที่สุดที่ 21.3 มิลลิเมตร

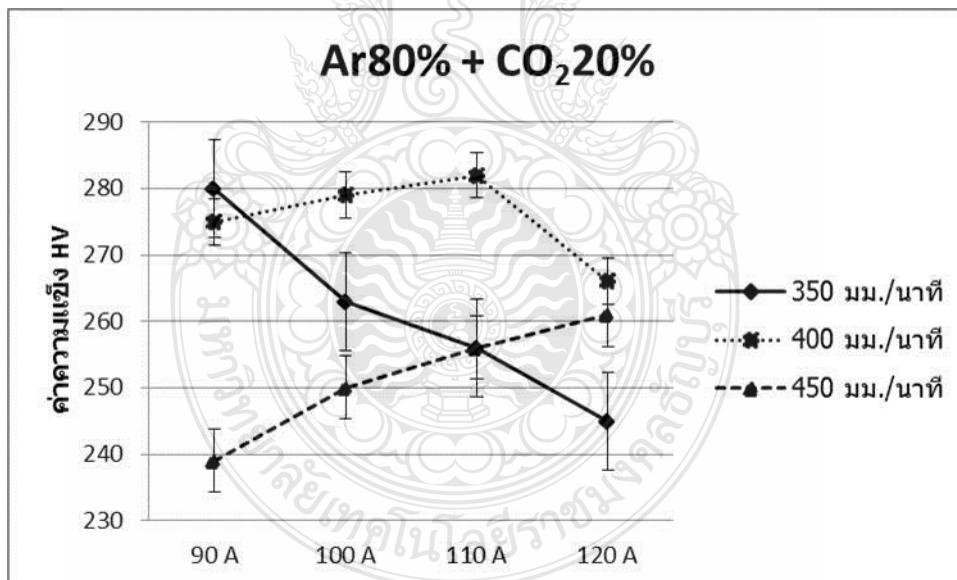
#### 4.3.3 วิเคราะห์ปัจจัยด้านความเร็วในการเชื่อมต่อค่าความแข็งของแนวเชื่อมและบริเวณพื้นที่กระทบร้อน

ผลการทดลองที่ได้พบว่า ความเร็วในการเชื่อมมีผลต่อความแข็งของแนวเชื่อมอันเนื่องมาจากการถ่ายโอนน้ำโลหะลงสู่แนวเชื่อมที่มีความเร็วที่แตกต่างกัน จากชิ้นงานทดลองทั้งหมด 108 ชิ้น ภายใต้ตัวแปรและข้อกำหนดในการทดลองแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้

รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบค่าความแข็งของแนวเชื่อมจากปัจจัยด้านความเร็วในการเชื่อม ที่กระแส 110 A พบว่าความเร็วในการเชื่อม 450 มม./นาที่ แกสปกคลุม CO<sub>2</sub>100 % จะให้ค่าความแข็งของแนวเชื่อมมากที่สุดที่ 370 HV(38 HRC) และค่าความแข็งของแนวเชื่อมต่ำสุดที่ 229 HV(98 HRB) ความเร็วในการเชื่อม 450 มม./นาที่ แกสปกคลุม Ar100 %



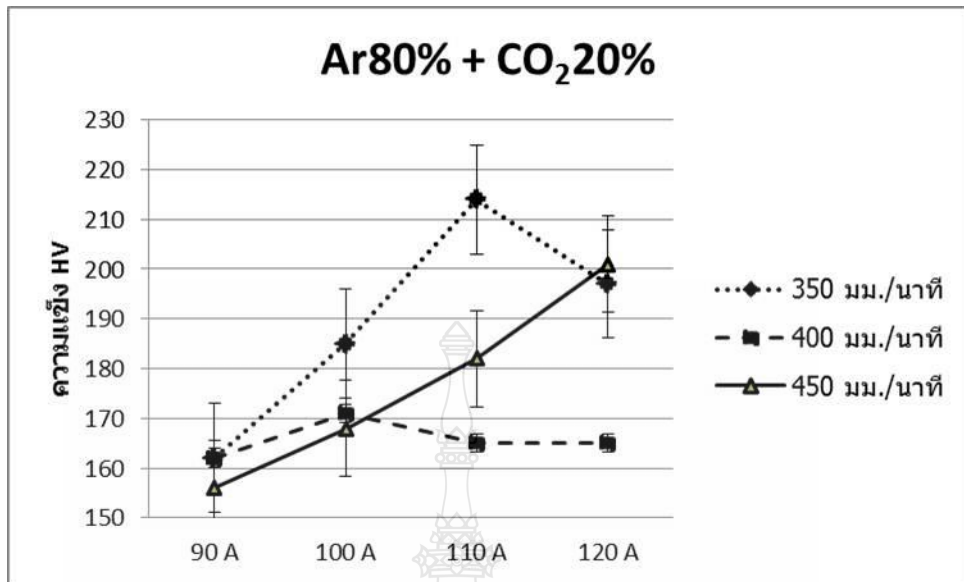
รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของแนวเชื่อม (Weld) จากปัจจัยด้านความเร็วในการเชื่อม กับแกสปกคลุมแนวเชื่อม ที่กระแส 110 A



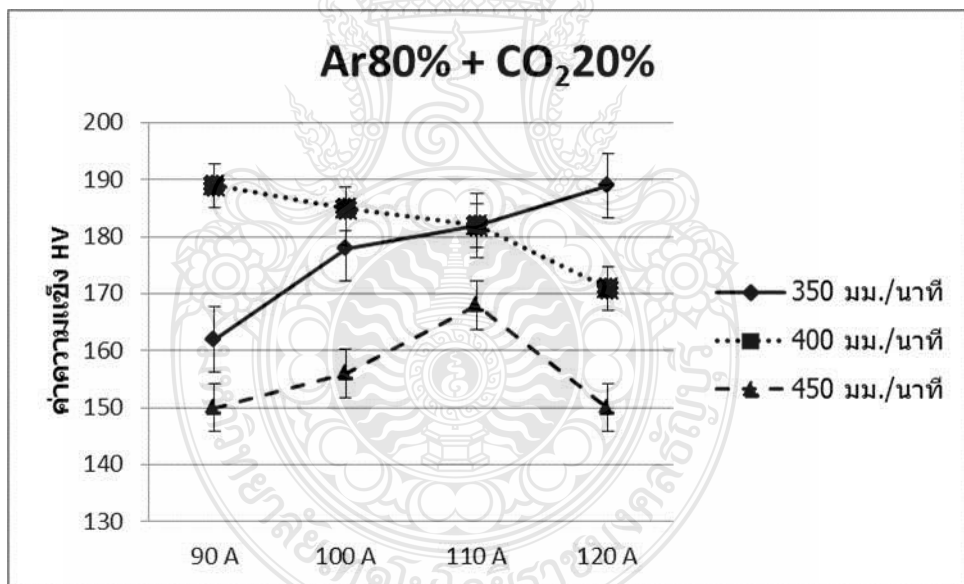
รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของแนวเชื่อม (Weld) จากตัวแปรการเชื่อมด้านความเร็วในการเชื่อมกับกระแสเชื่อม ที่แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub>20%

รูปที่ 4.25 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งจากตัวแปรการเชื่อมด้านความเร็วในการเชื่อมกับกระแสเชื่อมที่แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub>20% พบว่า ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาทื กระแส 110 A จะให้ค่าความแข็งมากที่สุดที่ 282 HV(27 HRC) และค่าความแข็งต่ำสุดที่ 239 HV(20 HRC)ได้แก่ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็ว 450 มม./นาทื กระแส 90 A





รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 จากปัจจัยการเชื่อมด้านความเร็ว แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub>20%



รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 จากปัจจัยการเชื่อมด้านความเร็ว แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub>20%

รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 จากปัจจัยการเชื่อมด้านความเร็ว แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub>20% พบว่าที่ ความเร็วในการเชื่อม 350 มม./นาที่ กระแส 110 A จะให้ค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระทบร้อนมากที่สุดที่ 214 HV(96 HRB) และค่าความแข็งของพื้นที่กระทบร้อนต่ำสุดที่ความเร็วในการเชื่อม 450 มม./นาที่ กระแส 90 A มีค่าความแข็งที่ 156 HV(82 HRB) โดยจากการวิเคราะห์ความแข็งทั้งหมดพบว่า ทุกความเร็วในการเชื่อมส่งผลต่อความแข็งของพื้นที่กระทบร้อนเมื่อกระแสเปลี่ยนแปลงไป โดยที่

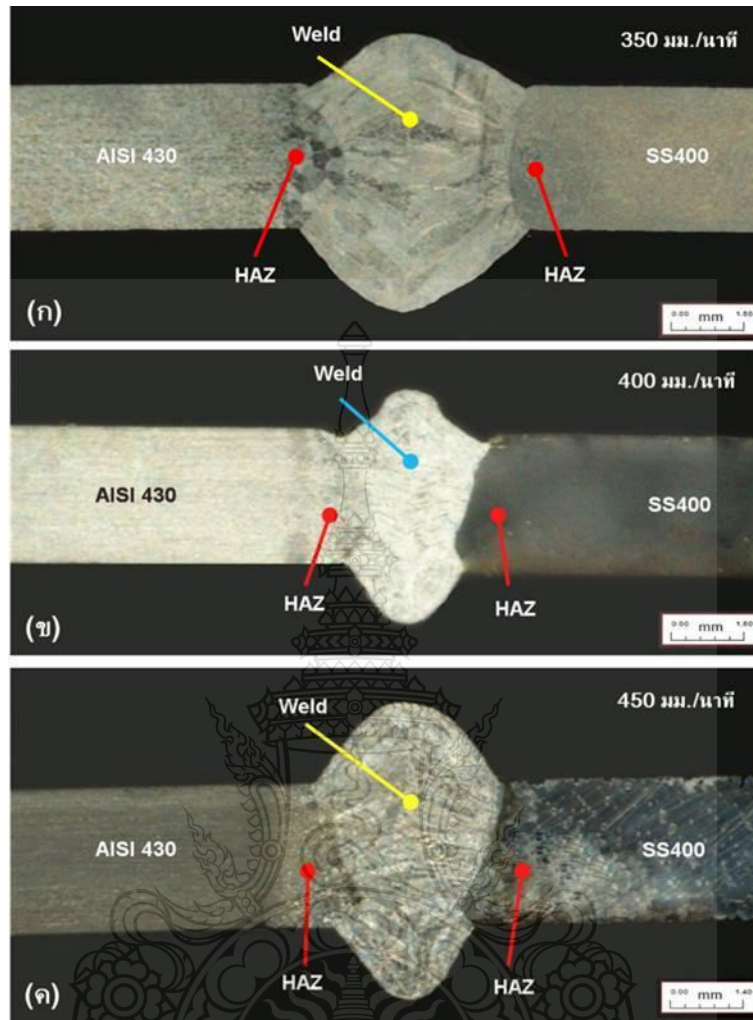
ความเร็ว 350 และ 450 มม./นาที ความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น ที่ความเร็ว 400 มม./นาที กระแสเชื่อมไม่มีผลต่อความแข็ง เพราะถึงแม้กระแสจะเพิ่มสูงขึ้นจาก 90 – 120 A แต่ความแข็งไม่ได้แตกต่างกันเท่าใด

รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระตบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 จากปัจจัยการเชื่อมด้านความเร็ว แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub>20% พบว่าที่ ความเร็วในการเชื่อม 350 มม./นาที กระแส 120 A และที่ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาที กระแส 90 A จะให้ค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กระตบร้อนมากที่สุดที่ 189 HV(91 HRB) และค่าความแข็งของพื้นที่กระตบร้อนต่ำสุดที่ความเร็วในการเชื่อม 450 มม./นาที กระแส 90 A มีค่าความแข็งที่ 150 HV(80 HRB) โดยจากการวิเคราะห์ความแข็งทั้งหมดพบว่า ทุกความเร็วในการเชื่อมส่งผลต่อความแข็งของพื้นที่กระตบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 เมื่อกระแสเปลี่ยนแปลงไป โดยที่ความเร็ว 350 มม./นาที ความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น ที่ความเร็ว 400 มม./นาที ความแข็งจะลดลงเมื่อกระแสลดลง และที่ความเร็ว 450 มม./นาที ความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 90 – 110 A และจะลดลงที่กระแส 120 A

#### 4.3.4 วิเคราะห์ปัจจัยด้านความเร็วในการเชื่อมต่อโครงสร้างมหภาค (Macro Structure)

เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาค (Macro Structure) ของชิ้นงานที่ปัจจัยการเชื่อมด้านความเร็วในการเชื่อมของชิ้นงานเปรียบเทียบความแตกต่างของแนวเชื่อม การซึมลึก และขอบเขตของแนวเชื่อมพื้นที่ของการหลอมละลายและผลของความร้อนต่อพื้นที่กระตบร้อน

รูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างมหภาคแนวเชื่อม และตำแหน่งวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ที่ตัวแปรการเชื่อมด้านความเร็วในการเชื่อม แกสปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub>20% กระแส 110 A จากการวิเคราะห์พบว่า รูปที่ 4.28 (ก) ความเร็วการเชื่อม 350 mm/min ลักษณะแนวเชื่อมกว้าง การหลอมละลายลึกดี พื้นที่การหลอมละลายกว้างขนาดแนวเชื่อมกับแนวซึมลึกใกล้เคียงกันซึ่งลักษณะที่ได้เกิดจาก กระแสไฟที่เชื่อมเหมาะสมแต่อัตราการเดินหัวเชื่อมช้าทำให้การหลอมละลายของแนวเชื่อมกว้างและแนวเชื่อมมีขนาดใหญ่ รูปที่ 4.28 (ข) ความเร็วการเชื่อม 400 mm/min ลักษณะแนวเชื่อมสมบูรณ์เกิดรอยกัดแหงที่ขอบแนวเชื่อมเล็กน้อยการซึมลึกสมบูรณ์ ซึ่งเมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึง พบว่าให้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงมากที่สุด ดังนั้นความเร็วในการเชื่อม 400 mm/min จึงเป็นความเร็วในการเชื่อมที่เหมาะสมกับการเชื่อมมากที่สุด รูปที่ 4.28 (ค) ความเร็วการเชื่อม 450 mm/min ลักษณะของแนวเชื่อมดี การหลอมละลายสมบูรณ์ความหนาแนวเชื่อมอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด ไม่เกิดการกัดแหงที่ขอบแนวเชื่อม ด้วยกระแสไฟมีความเหมาะสมและความเร็วในการเชื่อมที่เร็วทำให้ไม่เกิดรอยแหงที่ขอบงาน ส่งผลต่อแนวเชื่อมที่ออกมาสมบูรณ์ ซึ่งถึงแม้ว่าความเร็วในการเชื่อมจะสูงแต่ก็ไม่ส่งผลต่อความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมอันเนื่องมาจากกระแสไฟที่สูง บวกกับความเร็วที่มีความสัมพันธ์กันทำให้แนวเชื่อมออกมาดี จากตำแหน่งของแนวเชื่อม (Weld) พื้นที่กระตบร้อน (HAZ) ของชิ้นงานทั้งสองชนิด ตามรูปที่ 4.28 จะได้ว่าตำแหน่งในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ในหัวข้อต่อไป



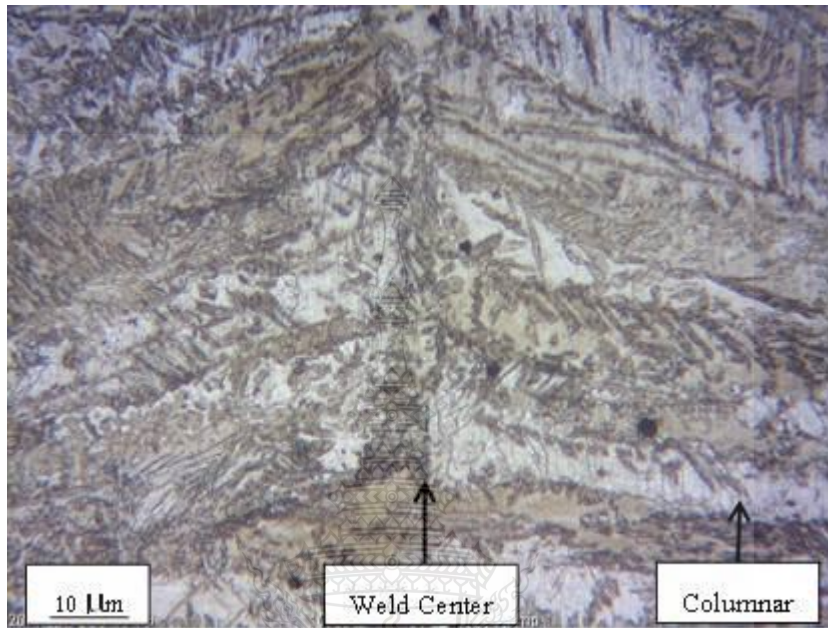
รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างมหภาคแนวเชื่อม และตำแหน่งวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่ตัวแปรการเชื่อมด้านความเร็วในการเชื่อมที่แกสปกคลุม Ar80%+CO<sub>2</sub>20% กระแส 110 A

#### 4.3.5 วิเคราะห์ปัจจัยด้านความเร็วในการเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาค

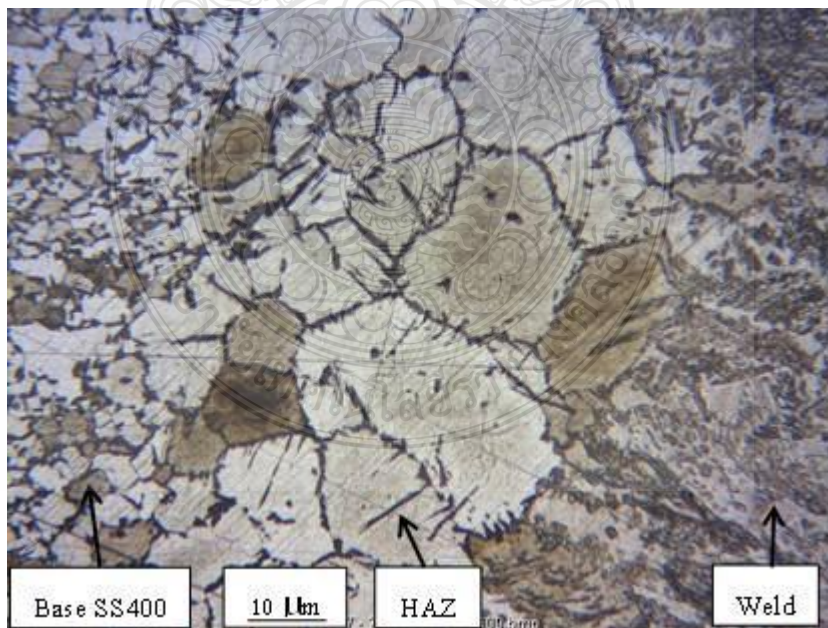
ผลการทดลองที่ได้พบว่า ระดับของกระแสไฟมีผลต่อค่าการรับแรงดึงและค่าความแข็งของแนวเชื่อมอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ได้จากการอาร์กของกระแสไฟเชื่อม และการหลอมละลายที่แตกต่างในแต่ละกระแสไฟซึ่งส่งผลต่อลักษณะของโครงสร้างจุลภาคและขนาดของเม็ดเกรนบริเวณแนวเชื่อมและพื้นที่ที่กระทบร้อน จากชิ้นงานทดลองทั้งหมด 108 ชิ้น ภายใต้ตัวแปรและข้อกำหนดในการทดลอง แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้

รูปที่ 4.29 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาที่ แกสปกคลุม CO<sub>2</sub>100% กระแส 110 A พบว่าลักษณะของโครงสร้างจุลภาคเป็นแบบ Columnar ขนาดใหญ่ โดยมีขนาดเฉลี่ยที่ 371 um มีทิศทางของเกรนพุ่งจากขอบแนวเชื่อมเข้าหาจุดศูนย์กลางบ่อหลอมละลายบริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อมในลักษณะตั้งฉากกับผนังของโลหะชิ้นงานเชื่อม เนื่องจากการเชื่อมใช้ความเร็วสูงจึงทำให้ต้องใช้เวลาในการแข็งตัวอย่างรวดเร็วมาก และบริเวณขอบเกรน Columnar มีลักษณะคล้ายโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr<sub>23</sub> C<sub>6</sub>) เกิดขึ้นโดยรอบ และ

โครเมียมคาร์ไบด์ ยังแทรกตัวในลักษณะเดนไดรต์เข้าไปในพื้นที่ Columnar ของบริเวณแนวเชื่อม  
ทั่วไป (บัณฑิต,2549)



รูปที่ 4.29 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมที่ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาที แกสปก  
คลุ่ม CO<sub>2</sub>100% กระแส 110 A



รูปที่ 4.30 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมกับพื้นที่กระทบรั้นด้านเหล็กกล้าไร้  
ที่กระแส 110 A แกสปกคลุ่ม CO<sub>2</sub>100%



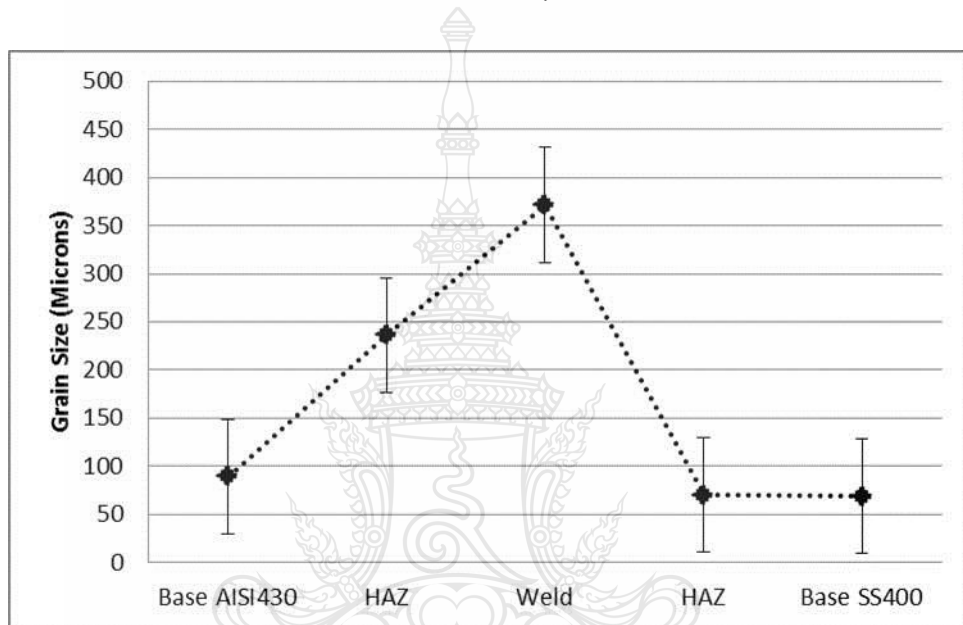
รูปที่ 4.31 ลักษณะโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมกับพื้นที่ที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ที่ กระแส 110 A ความเร็ว 400 มม./นาที แกสปกคลุม CO<sub>2</sub>100%

รูปที่ 4.30 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมกับบริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้า ไร้สนิม AISI 430 ที่ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาที แกสปกคลุม CO<sub>2</sub>100% กระแส 110 A เมื่อ พิจารณาลักษณะโครงสร้างจุลภาคพบว่า ขนาดเม็ดเกรนจะขยายใหญ่ขึ้นมากกว่าขนาดเม็ดเกรนของ เนื้อโลหะชิ้นงานเชื่อม SUS430 อันเนื่องมาจากความร้อนทำให้ขนาดของเม็ดเกรนใหญ่ขึ้น แต่การ เย็นตัวที่รวดเร็วทำให้เกรนที่ขยายจากความร้อนไม่สามารถกับคืนสู่สภาวะเดิมได้ เมื่อวัดขนาดพบว่ามี ขนาด 236  $\mu\text{m}$  แต่ขนาดเม็ดเกรนที่ได้ก็ยังคงเล็กกว่าบริเวณแนวเชื่อม โดยพบว่าบริเวณขอบเกรนมี ลักษณะคล้ายโครเมียมคาร์ไบด์ ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากอิทธิพลของความสัมพัทธ์ระหว่าง อุณหภูมิ และเวลา (ฉัตรทอง,2548)

รูปที่ 4.31 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมกับพื้นที่ที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้า คาร์บอน SS400 ที่กระแส 110 A ความเร็ว 400 มม./นาที แกสปกคลุม CO<sub>2</sub>100% พบว่า ขนาด เม็ดเกรนใกล้เคียงกับขนาดเม็ดเกรนของเนื้อโลหะชิ้นงานเชื่อม อันเนื่องมาจากการเย็นตัวในอุณหภูมि ปกติและเมื่อเย็นตัวเม็ดเกรนสามารถกลับคืนสู่ขนาดปกติได้ เมื่อวัดขนาดพบว่ามีขนาด 70.32  $\mu\text{m}$  และขนาดเม็ดเกรนที่ได้เล็กกว่าบริเวณแนวเชื่อมอย่างชัดเจน โดยพบว่าบริเวณขอบแนวเชื่อมระหว่าง เหล็กกล้าคาร์บอนกับแนวเชื่อมมีลักษณะคล้ายโครเมียมคาร์ไบด์ ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) เกิดขึ้นเป็นเส้นยาวกั้น ระหว่างแนวเชื่อมกับพื้นที่ที่กระทบร้อนอันเนื่องมาจากอิทธิพลของความสัมพัทธ์ระหว่างอุณหภูมิ เวลา และความต่างของวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมทดลอง (ฉัตรทอง,2548)

รูปที่ 4.32 แสดงการเปรียบเทียบขนาดเกรน (Grain Size) ของแนวเชื่อม(Weld) พื้นที่ที่กระทบ ร้อน (HAZ) และเนื้อโลหะเชื่อม (Base) ที่ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาที แกสปกคลุม CO<sub>2</sub>100% กระแส 110 A พบว่าปัจจัยตัวแปรในการเชื่อมด้านความเร็วในการเชื่อม มีผลต่อ คุณสมบัติทางกล ด้านค่าการรับแรงดึงและค่าความแข็ง ทำให้ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่ได้มี ลักษณะและขนาดของเม็ดเกรนที่แตกต่างกันโดยพบว่าลักษณะของเม็ดเกรนของพื้นที่ที่กระทบร้อน

ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 มีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่ที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่เล็กกว่าขนาดเม็ดเกรนของแนวเชื่อม เมื่อทำการตรวจสอบและวัดขนาดพบว่าขนาดของเม็ดเกรน บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 มีขนาดเฉลี่ยที่  $236 \mu\text{m}$  บริเวณแนวเชื่อมขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยที่  $371.22 \mu\text{m}$  และบริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 มีขนาดเม็ดเกรนเฉลี่ยที่  $70.32 \mu\text{m}$  โดย Base Stainless Steel ขนาดเกรน (Grain Size) เฉลี่ยที่  $89.23 \mu\text{m}$  และ Base Steel ขนาดเกรน (Grain Size) เฉลี่ยที่  $69 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.32 การเปรียบเทียบขนาดเกรน (Grain Size) ของแนวเชื่อม(Weld) พื้นที่กระทบร้อน (HAZ) และเนื้อโลหะเชื่อม (Base) ที่ความเร็วในการเชื่อม 400 มม./นาที แกสปกคลุม $\text{CO}_2$ 100% กระแส

110A

#### 4.3.5 สรุปผลการวิเคราะห์ปัจจัยด้านความเร็วในการเชื่อม

ผลการทดลองที่ได้พบว่า ความเร็วในการเชื่อมมีผลต่อสมบัติทางกล ส่งผลต่อค่าการรับแรงดึง ค่าความแข็งของแนวเชื่อม และลักษณะของโครงสร้างจุลภาค อันเนื่องมาจากความเร็วในการเชื่อม ส่งผลต่อการถ่ายโอนน้ำโลหะ และการหลอมละลายของลวดเชื่อมและเนื้อโลหะเชื่อม จากชิ้นงานทดลองทั้งหมด 108 ชิ้น ภายใต้ตัวแปรและข้อกำหนดในการทดลองแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูล โดยจากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ความเร็วที่ให้ค่าการรับแรงดึงสูงสุดคือ 400 mm/min จึงสรุปได้ว่าเป็นความเร็วที่ดีที่สุดในการเชื่อมชิ้นงาน

## บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุมต่อสมบัติของรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI430 ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมและบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ : Heat Affected Zone) และคุณสมบัติทางกลที่มีผลต่อการรับแรงดึง และค่าความแข็งที่สามารถวัดได้ โดยมีตัวแปรในการทดลอง 3 ตัวแปร คือ

- แก๊สปกคลุม 3 กลุ่ม ได้แก่ Ar100% , CO<sub>2</sub>100% และ Ar80% + CO<sub>2</sub>20%
- กระแสไฟที่ใช้เชื่อม 4 ระดับ ได้แก่ 90, 100, 110 และ 120 แอมป์
- ความเร็ว 3 ระดับ ได้แก่ 350 , 400 , 450 มิลลิเมตร/นาที

ผลจากการทดลองทุกตัวแปรพบว่าแต่ละตัวแปรมีผลต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานบริเวณพื้นที่กระทบร้อน และมีผลโดยตรงต่อค่าความเค้นแรงดึงของชิ้นงานเชื่อม

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

#### 5.1.1 อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมต่อสมบัติทางกลด้านความเค้นแรงดึง

ผลการทดลองสามารถวิเคราะห์ได้ว่า กระแสเชื่อมที่ดีที่สุดคือ 110 A แก๊สปกคลุมที่ดีที่สุดคือ Ar80% + CO<sub>2</sub>20% ความเร็วในการเชื่อมที่ดีที่สุดคือ 400 mm/min โดยให้ค่ารับแรงดึงสูงสุด ที่ 448 MPa ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ตัวแปรการเชื่อมดังกล่าวส่งผลต่อการหลอมละลายและการถ่ายโอนน้ำโลหะระหว่างสวดเชื่อมกับชิ้นงานและแก๊สปกคลุมช่วยให้การอาร์กมีความสมบูรณ์ จากการตรวจสอบรอยฉีกขาดพบขึ้นทดสอบ จาก 3 ตัวแปรจะแตกหักและขาดบริเวณชิ้นงานด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ซึ่งมีค่าการรับแรงดึงต่ำกว่า 450 MPa ไม่ได้ขาดบริเวณแนวเชื่อมแต่อย่างใด สอดคล้องกับ กรภัทร์ จุ้ยยิ้ม [19] ซึ่งได้ศึกษาการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 กับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง โดยตัวแปรการเชื่อม 3 ตัวแปร ซึ่งผลที่ได้คือชิ้นงานทดสอบแรงดึงส่วนมากแตกหักที่ตำแหน่งแนวเชื่อมด้านเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ซึ่งในการศึกษาพบว่ากระแสเชื่อม 110 A ซึ่งเป็นกระแสที่ให้ค่ารับแรงดึงสูงสุด โลหะงานได้รับความร้อนจากการอาร์กในปริมาณที่เหมาะสมและอัตราการหลอมละลายของสวดเชื่อมและโลหะงานเป็นไปอย่างสมบูรณ์ บวกกับความเร็วที่ใช้ 400 mm/min ที่ทำให้อัตราการเติมสวดในลักษณะหยดโลหะขนาดเล็ก ส่งผลต่อการกระจายความร้อนและเกิดการแพร่กระจายของโครเมียมบริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับรอยเชื่อม และการถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานในอุณหภูมิปกติได้ดี ส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ทำให้ยืนยันได้ว่าแนวเชื่อมมีความแข็งแรงสามารถใช้เชื่อมต่อเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI430 โดยใช้สวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI430 ในอุตสาหกรรมการผลิตที่ใช้วัสดุงานหนา 3 มม.ได้ ส่วนที่กระแส 90 และ 120 A ไม่เหมาะสม เพราะกระแสต่ำและสูงเกินไป โดย 90 A ส่งผลให้การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ ส่วน 120 A กระแสไฟสูงเกินไปเกิดการหลอมละลายมากทำให้ชิ้นงานทะลุในการเชื่อมที่ความเร็วต่ำ

### 5.1.2 อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมต่อสมบัติทางกลด้านความแข็ง

ผลการทดลองสามารถวิเคราะห์ได้ว่าตัวแปรการเชื่อม มีผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อม โดยค่าความแข็ง มีความแปรผันตามตัวแปรการเชื่อมด้านแก๊สปกคลุม ด้านกระแสไฟ และความเร็วในการเชื่อม โดยส่งผลต่อความแข็งของรอยเชื่อม ซึ่งพบว่ากระแสเชื่อมที่ดีที่สุดคือ 110 A ความเร็วในการเชื่อมที่ดีที่สุดคือ 450 มม./นาที แก๊สปกคลุมที่ดีที่สุดคือ  $\text{CO}_2$  100 % โดยให้ค่าความแข็งของแนวเชื่อมมากที่สุดที่ 370 HV(38 HRC) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าแก๊สปกคลุมที่เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อได้รับความร้อนจากกระแสเชื่อมที่สูงจะทำให้คาร์บอนรวมตัวกับโครเมียมบริเวณรอยเชื่อม ทำให้เกิดลักษณะคล้ายโครเมียมคาร์ไบด์ ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) กระจายอยู่รอบ ๆ บริเวณขอบเกรนเพราะใช้  $\text{CO}_2$  ปกคลุม เกิดขึ้นโดยทั่วทำให้เกิดความแข็งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ ภัคดี ดำเนินผล [22] ที่ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมมิกต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก ซึ่งผลที่ได้คือคาร์บอนรวมตัวกับโครเมียมกลายเป็นโครเมียมคาร์ไบด์กระจายอยู่รอบเกรนส่งผลต่อความแข็งของแนวเชื่อม ส่วนกระแสที่สูงขึ้นจะทำให้ความแข็งของแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน แต่ถ้ากระแสไฟต่ำลงสวนทางกับความเร็วในการเชื่อมที่สูงขึ้นจะทำให้ความแข็งของแนวเชื่อมลดลง

### 5.1.3 อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาค

ผลการทดลองและวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคพื้นที่บริเวณแนวเชื่อมลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ให้ค่าการรับแรงดึงสูงสุด จะสังเกตได้ว่าโครงสร้างของแนวเชื่อมเป็นเฟอร์ไรต์ ซึ่งลักษณะการแข็งตัวเป็นแบบ Columnar มีลักษณะพุ่งเข้าหากึ่งกลางแนวเชื่อม โดยอิทธิพลของความร้อนทำให้โครงสร้างมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ และเกิดลักษณะคล้ายโครเมียมคาร์ไบด์รอบ ๆ ขอบเกรนเมื่อใช้แก๊สคลุม  $\text{CO}_2$  20% และ  $\text{CO}_2$  100% เนื่องจากการเชื่อมด้วยกระแสที่สูง โลหะได้รับความร้อนที่เกิดจากการอาร์ก และความเร็วในการเชื่อมที่สูงทำให้น้ำโลหะเย็นตัวและแข็งตัวจากขอบด้านข้างของแนวเชื่อมเข้ามาที่กึ่งกลางแนวเชื่อมจึงทำให้ลักษณะโครงสร้างเป็น Columnar อย่างรวดเร็ว สอดคล้องกับ ฉัตรทอง ไสแสง [12] ที่ได้ศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่ที่กระทบร้อนพบว่าพื้นที่ด้านเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 ลักษณะเกรนมีขนาดใหญ่กว่าเม็ดเกรนของชิ้นงานเชื่อม และ Columnar ของแนวเชื่อมซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความร้อนทำให้เกิดการขยายตัวของขนาดเกรนแต่เมื่อเย็นตัวด้วยความเร็วทำให้ไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมส่งผลทำให้มีขนาดเม็ดเกรนโต และพบโครเมียมคาร์ไบด์ ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) กระจายอยู่รอบ ๆ ของเกรน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI430 ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบแก๊สปกคลุม (GMAW) ซึ่งเกิดปัญหาในระหว่างการผลิตเนื่องจากเป็นวัสดุโลหะที่ต่างชนิดกันผลที่ได้จึงต้องมีการปรับปรุงหรือใช้ในการทดลองในคราวต่อไป โดยมีข้อเสนอแนะไว้ในการศึกษาครั้งนี้



- 5.2.1 ในการทดลองต้องมีอุปกรณ์สำหรับการทดลองที่พร้อมและมีประสิทธิภาพพอถึงจะได้ผลการทดลองที่ได้มาตรฐาน
- 5.2.2 ในการทดลองศึกษาครั้งต่อไปควรทดลองเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมที่หลากหลาย และเป็นกระบวนการเชื่อมที่ใช้กันโดยแพร่หลายในปัจจุบันเพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลต่อ และโครงสร้างจุลภาคต่อตัวแปรในกระบวนการเชื่อมตัวอื่น ๆ
- 5.2.3 ในระหว่างการเชื่อมเกิดกระแสไฟไม่คงที่เนื่องจากลักษณะการใช้ไฟของโรงงานไม่สมดุลย์ เกิดไฟตก ทำให้การอาร์กของชิ้นงานเกิดข้อขัดข้องของกระแสไฟส่งผลต่อการหลอมละลายในระหว่างการอาร์กในการเชื่อม
- 5.2.4 ในการเชื่อมที่ใช้กระแสในการเชื่อมสูง แต่ความเร็วในการเชื่อมต่ำ จะทำให้เกิดการทะลุของชิ้นงานทดลองได้ เพื่อช่วยให้การทดลองไม่เกิดปัญหาควรต้องเพิ่มความหนาของหน้างานและระยะของรอยต่อให้แคบลง



## บรรณานุกรม

- [1] Branes, T.A. and Pashyby, I.R. 2000. Joining Techniques For Aluminum Spaceframes Used In Automobiles Part I-Solid And Liquid Phase Welding. J. Of Materials Processing Technology.
- [2] Brandon, D. and Kaplan, W.D. 1997. Joining Processes, An Introduction. New York. John Wiley&Sons.
- [3] ยงยุทธ ดุลยกุล , นภิสพร มีมลคล และ ประภาส เหมือนจันทร์บุรี “การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกระแสเชื่อมและส่วนผสมของแก๊สคลุมที่แตกต่างกันโดยกรรมวิธีการเชื่อมแม่เหล็ก” , มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ. สงขลา 2551.
- [4] ตารางเทียบเกรดเหล็ก บริษัท กรุงเทพเหล็กกล้า จำกัด
- [5] คู่มือการผลิตและการใช้งานสแตนเลส ฝ่ายพัฒนาธุรกิจ บริษัทไทยน็อกซ์สแตนเลส จำกัด
- [6] มานะศิษฐ์ พิมพ์สาร. คู่มือการเชื่อม มิก – แม่เหล็ก บริษัท เอ็มแอนด์อี จำกัด กรุงเทพฯ 2542
- [7] คู่มือโครงการพัฒนาทักษะงานเชื่อม MIG/MAG แผนกวิชาช่างเชื่อมโลหะ วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี ร่วมกับ บริษัท ภูสุวรรณ์อินเตอร์เทรด จำกัด และ บริษัท เลิศวิทย์แอนด์ซันส์จำกัด
- [8] เทพนารินทร์ ประพันธ์พัฒน์. 2539 โลหะวิทยาพื้นฐาน สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมอาชีพ กทม.
- [9] IS SERVICES. International Welding Technologist Module 1: Welding Processes And Equipment.
- [10] อรศิริ จันทร์เมือง. 2551 การศึกษาผลกระทบของก๊าซที่ใช้สำหรับกระบวนการเชื่อมมิกกรณีศึกษาการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI เบอร์ 304 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [11] ขวลิต เชียงกุล. 2542 โลหะวิทยา สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น) กทม.
- [12] ฉัตรทอง ไสแสง. 2548 อิทธิพลของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [13] ปริญญา แสงทอง. 2549 ผลการแปรพารามิเตอร์ การเชื่อมMIG ต่อโครงสร้าง และสมบัติของงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [14] ตรีนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ. 2547 อิทธิพลของระยะยื่นของลวดเชื่อมที่มีผลต่ออัตราการหลอมละลายในการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [15] Danut Iordachescu. et al., 2006. Influence of Shielding Gases And Process Par Ammeters on Metal Transfer and Bead Shape in MIG Brazed Joints of The Thin Zinc Coated Steel Plates. Materials & Design .
- [16] Johnson J.A. Miller. et al., 2002. Experimental Investigation of Pulse GMAW. Idaho National Engineering And Environmental Laboratory. Idaho Falls Idaho.

- [17] French I.E. And Bosworth M.R. 1995. A Comparison of Pulsed And Conventional Welding With Basic Flux Cored and Metal Cored Welding Wires. Welding Journal Vol.
- [18] P.K Ghosh Lutz Dorn Shirang Kulkarin F.Hofmann. 2009. Arc Characteriscs And Behaviour Of Metal Transfer In Pulsed Current GMA Welding
- [19] กรภัทร์ จุ้ยยิ้ม “อิทธิพลขอพารามิเตอร์การเชื่อมต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 กับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง” มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี 2549
- [20] บัณฑิต อมรสิน “การศึกษาผลกระทบบของปัจจัยจากการเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าสแตนเลส AISI 304 กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยกรรมวิธีการเชื่อม Gas Metal Arc Welding ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล” มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี 2549
- [21] อนุสิทธิ์ อ่ำไพบูลย์ “ปัจจัยที่เหมาะสมของการเชื่อมแบบอาร์คโลหะก๊าซคลุม” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น จ.ขอนแก่น 2550
- [22] ภัคดี ดำเนินผล “การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมมิก ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลเหล็กกล้า ออสเทนนิติก AISI 304” มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี 2552
- [23] มาตรฐานงานเชื่อม AWS D1.1/D1.1M:2006 American Welding Society November 29, 2005
- [24] คู่มือลวดเชื่อม YAVATA บริษัท ยาวาต้า (ประเทศไทย) จำกัด 2554



ภาคผนวก ก  
ขั้นตอนทดสอบความแข็งแรงดึง

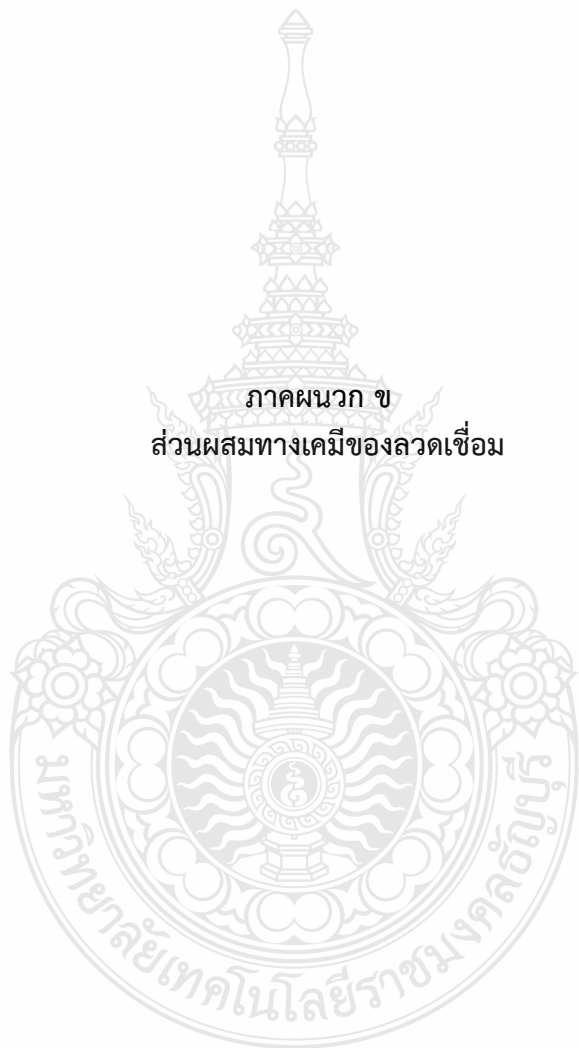


ขั้นตอนทดสอบแรงดึง

AISI430

SS400





ภาคผนวก ข  
ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม

THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY (ASIA PACIFIC) PTE LTD (Company No: 199202597G)  
 11 PANDAN CRESCENT, SINGAPORE 128467  
 Telephone: + (65) 6773 6689 Fax: + (65) 6773 6690  
 Website: www.lincolnelectric.com.sg



**TEST CERTIFICATE**

Supplied To: Laemthong Syndicate Co. Ltd. Electrode Lot No: 06311261  
 Customer Order No: LS-0030105 Core Wire Heat No: 442008  
 Quantity Ordered: 420KGS Date of Manufacture: 2005/3/11  
 Lincoln Regional Office: Singapore Size (mm): 1.2 mm X 15 KGS  
 Date of Issue: 2005/3/28 Process: GMAW

Certificate Issued By

  
 J. H. CHONG WILLIAM  
 Public Signatory

CERTIFICATE IS INVALID WITHOUT COMPLETION OF THIS SECTION

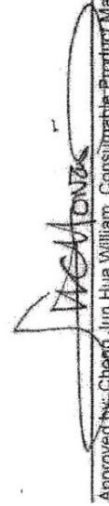
**Product: Lincoln ER430LNB**

This is to certify that the product named above and supplied on the referenced order number was tested and the results of which are shown below. Manufacturing and supply were carried out according to quality management programs meeting the requirements of ISO 9001.

Chemical Analyses of the electrode were as follows:

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	%Ni	%Cr	%Mo	%N	%Nb
0.013	0.39	0.36	0.023	0.0037	0.098	0.30	18.00	0.05	0.012	0.49

Reference Number:  
EXP-510067

  
 Approved by: Cheng Jun Hua William, Consumable Product Manager - Asia

Certificate Number:  
N430LNB12KT006AP05R1-RAL

ภาคผนวก ค  
ส่วนผสมทางเคมีวัสดุชิ้นงานทดลอง





ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400



8/27/2012 2:28:51 PM

Method: Fe-01-F  
 Comment: Orientation - F  
 Sample Name:

Element concentration

8/27/2012 2:28:37 PM

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0756	0.248	0.390	0.0184	0.0134	0.0294	0.0079	0.0513
2	0.0756	0.238	0.386	0.0183	0.0135	0.0285	0.0078	0.0497
3	0.0793	0.241	0.386	0.0193	0.0132	0.0283	0.0082	0.0498
< x > (3)	<b>0.0768</b>	<b>0.242</b>	<b>0.388</b>	<b>0.0186</b>	<b>0.0134</b>	<b>0.0287</b>	<b>0.0079</b>	<b>0.0503</b>
sd	0.0022	0.0050	0.0025	0.00054	0.00016	0.00061	0.00021	0.00093
rsd	2.8	2.1	0.7	2.9	1.2	2.1	2.6	1.9

	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0268	0.0054	0.0795	0.0044	< 0.0010	0.00069	< 0.0100	0.0156
2	0.0266	0.0051	0.0791	< 0.0040	< 0.0010	0.00074	< 0.0100	0.0155
3	0.0271	0.0052	0.0783	0.0054	< 0.0010	0.00070	< 0.0100	0.0155
< x > (3)	<b>0.0268</b>	<b>0.0052</b>	<b>0.0790</b>	<b>0.0046</b>	<b>&lt; 0.0010</b>	<b>0.00071</b>	<b>&lt; 0.0100</b>	<b>0.0155</b>
sd	0.00026	0.00015	0.00057	0.00074	0.00000	0.00003	0.00000	0.00007
rsd	1.0	2.8	0.7	16.1	0.0	4.1	0.0	0.5

	Sn	Mg	As	Zr	Bi	Ca	Ce	Sb
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0087	0.0025	0.0110	0.0021	0.0204	0.0019	< 0.0030	0.0035
2	0.0084	0.0027	0.0096	0.0020	0.0221	0.0018	< 0.0030	0.0022
3	0.0077	0.0028	0.0084	0.0022	0.0232	0.0019	< 0.0030	< 0.0020
< x > (3)	<b>0.0083</b>	<b>0.0027</b>	<b>0.0097</b>	<b>0.0021</b>	<b>0.0219</b>	<b>0.0018</b>	<b>&lt; 0.0030</b>	<b>0.0026</b>
sd	0.00052	0.00014	0.0013	0.00011	0.0015	0.00003	0.00000	0.00081
rsd	6.3	5.2	13.7	5.2	6.6	1.6	0.0	31.9

	Te	B	Zn	La	Fe		
	%	%	%	%	%		
1	0.0046	0.0014	0.0054	< 0.0010	99.0		
2	0.0043	0.0014	0.0063	< 0.0010	99.0		
3	0.0042	0.0014	0.0059	< 0.0010	99.0		
< x > (3)	<b>0.0044</b>	<b>0.0014</b>	<b>0.0059</b>	<b>&lt; 0.0010</b>	<b>99.0</b>		
sd	0.00018	0.00005	0.00044	0.00000	0.0096		
rsd	4.1	3.3	7.4	0.0	0.0		

ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI430



8/27/2012 3:21:10 PM

Method: Fe-01-F  
 Comment: Orientation - F Element concentration  
 Sample Name:

8/27/2012 3:21:01 PM

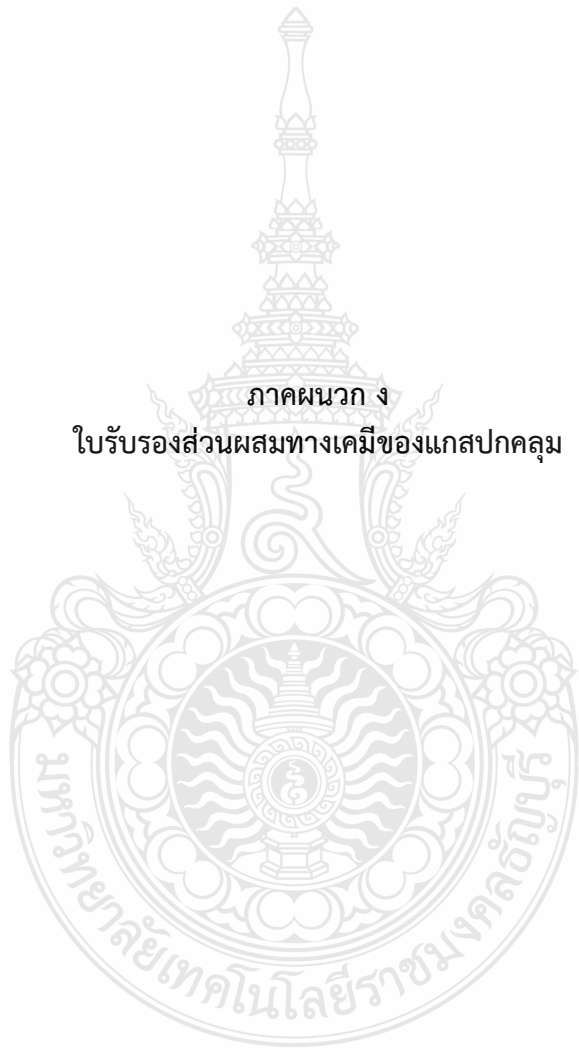
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.115	0.366	0.230	0.0335	0.0013	17.58	< 0.0020	0.124
2	0.117	0.365	0.229	0.0329	0.0013	17.59	< 0.0020	0.121
3	0.125	0.356	0.230	0.0317	0.0014	17.55	< 0.0020	0.119
< x > (3)	<b>0.119</b>	<b>0.363</b>	<b>0.230</b>	<b>0.0327</b>	<b>0.0013</b>	<b>17.57</b>	<b>&lt; 0.0020</b>	<b>0.121</b>
sd	0.0056	0.0053	0.00052	0.00095	0.00008	0.0210	0.00000	0.0024
rsd	4.7	1.5	0.2	2.9	6.0	0.1	0.0	2.0

	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0152	0.0059	0.0284	0.0454	0.0060	0.0714	< 0.0100	< 0.0040
2	0.0150	0.0060	0.0279	0.0451	0.0060	0.0709	< 0.0100	0.0042
3	0.0189	0.0060	0.0282	0.0429	0.0062	0.0725	< 0.0100	< 0.0040
< x > (3)	<b>0.0164</b>	<b>0.0060</b>	<b>0.0282</b>	<b>0.0445</b>	<b>0.0061</b>	<b>0.0716</b>	<b>&lt; 0.0100</b>	<b>0.0041</b>
sd	0.0022	0.00004	0.00021	0.0014	0.00011	0.00078	0.00000	0.00014
rsd	13.6	0.7	0.8	3.1	1.8	1.1	0.0	3.3

	Sn	Mg	As	Zr	Bi	Ca	Ce	Sb
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0026	0.0116	< 0.0015	< 0.0015	0.0080	0.00061	0.0093	< 0.0020
2	0.0014	0.0117	< 0.0015	< 0.0015	0.0082	0.00059	0.0101	< 0.0020
3	0.0018	0.0111	< 0.0015	< 0.0015	0.0063	0.00064	0.0083	< 0.0020
< x > (3)	<b>0.0019</b>	<b>0.0115</b>	<b>&lt; 0.0015</b>	<b>&lt; 0.0015</b>	<b>0.0075</b>	<b>0.00061</b>	<b>0.0092</b>	<b>&lt; 0.0020</b>
sd	0.00060	0.00033	0.00000	0.00000	0.0010	0.00002	0.00087	0.00000
rsd	31.6	2.8	0.0	0.0	13.8	3.9	9.4	0.0

	Te	B	Zn	La	Fe
	%	%	%	%	%
1	0.0058	< 0.00050	0.0212	0.0014	81.3
2	0.0059	< 0.00050	0.0216	0.0011	81.3
3	0.0058	< 0.00050	0.0206	0.0016	81.3
< x > (3)	<b>0.0058</b>	<b>&lt; 0.00050</b>	<b>0.0212</b>	<b>0.0013</b>	<b>81.3</b>
sd	0.00007	0.00000	0.00052	0.00027	0.0236
rsd	1.2	0.0	2.5	19.9	0.0

ภาคผนวก ง  
ใบรับรองส่วนผสมทางเคมีของแกสปกคลุม



รับรองส่วนผสม  
แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม

**TSG**

ISO 9001:2009 Reg. No. 2542  
Certificate No. A-1489/2542

ISO9001:2000 CERTIFIED

**CERTIFICATE OF CONFORMITY**

GAS TYPE: ARCWELD#53

CYLINDER NUMBER: ศษ ๕3 - 0209

xCOMPOSITION: 20%CO<sub>2</sub>+AR Balance

IMPURITY:

Moisture content	<u>&lt;5.0</u>	ppm(v/v)
Oxygen content	<u>-</u>	ppm(v/v)
THC content	<u>-</u>	ppm(v/v)
Others	<u>-</u>	ppm(v/v)

APPROVED BY: Hroonkeat

DATE: 16/11/10

THAI SPECIAL GAS COMPANY LIMITED  
100/38 Moo 1 T.Samkhok, A.Samkhok  
Pathumthani 12160  
Tel: 0-2593-1525 (Auto 20 Lines) Fax: 0-2593-2612-3

**TSG**

ISO 9001:2009 Reg. No. 2542  
Certificate No. A-1489/2542

ISO9001:2000 CERTIFIED

**ข้อควรระวัง**

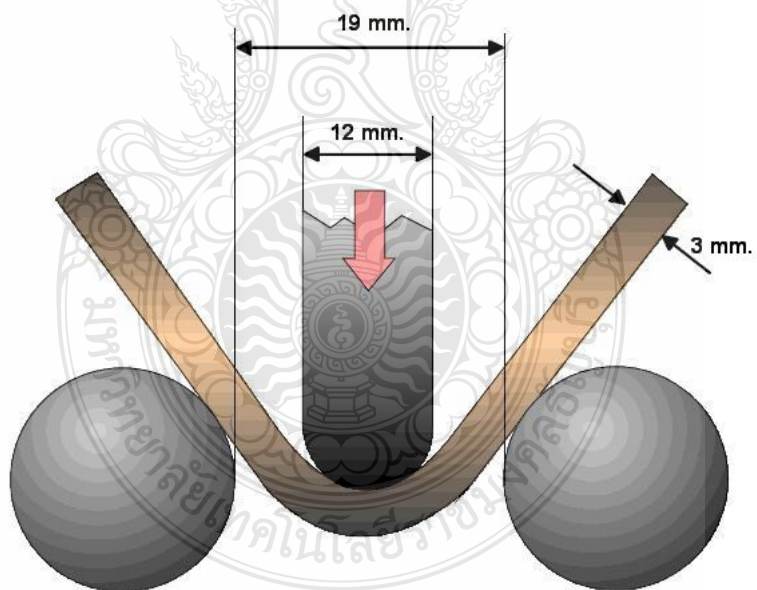
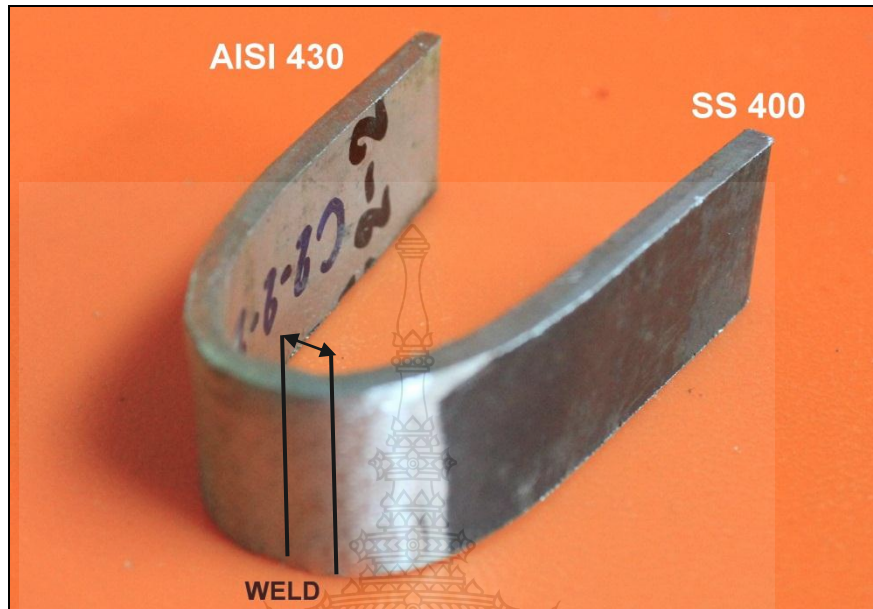
- ห้ามสูดดมก๊าซเข้าไปในปริมาณสูง อาจหมดสติได้
- เก็บท่อในที่ร่มเสมอ
- ห้ามใช้สารหล่อลื่นกับวาล์วหรือท่อ
- เปิดวาล์วช้าๆ และปิดทุกครั้งหลังใช้งาน
- ใช้ร่วมกับข้อต่อ ควรรับความดันเสมอ

THE HIGH QUALITY SUPPLIER OF  
INDUSTRIAL, ELECTRONICS AND MEDICAL GASES

THAI SPECIAL GAS COMPANY LIMITED  
100/38 Moo 1 T.Samkhok, A.Samkhok  
Pathumthani 12160  
Tel: 0-2593-1525 (Auto 20 Lines) Fax: 0-2593-2612-3



ขั้นตอนทดสอบการดัดงอ





## การประยุกต์การเชื่อมมิกในการต่อชนแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI430

### MIG Welding Application for Welding of SS400 Carbon Steel and 430 Stainless Steel Butt Joint

ศักดิ์ชัย จันทศรี<sup>1\*</sup> สุรัตน์ ตรีวัฒนพงศ์<sup>2</sup> กิตติพงษ์ กิมะพงศ์<sup>3</sup> สุวัฒน์ ภูเภา<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอธัญบุรี  
จังหวัดปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12110

<sup>4</sup>แผนกวิชาโลหะการ วิทยาลัยเทคนิคชัยนาท อำเภอเมือง  
จังหวัดชัยนาท 17000.

E-mail:Sakchai747@yahoo.co.th\*

Sakchai Chantasri<sup>1\*</sup> Surat Trivanapong<sup>2</sup> Kittipong Kimapong<sup>3</sup> Suwat Phoopao<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology ,  
Thanyaburi Pathumthani 12110

<sup>4</sup>Department of Metallurgical, Chainat Technical College, Muang Chainat 17000.

E-mail: Sakchai747@yahoo.co.th\*

#### บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อประยุกต์การเชื่อมมิกในการต่อรอยต่อชนระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI430 และศึกษาอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของรอยเชื่อม ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การเชื่อมมิกด้วยสภาวะการเชื่อมที่กำหนดสามารถทำให้เกิดแนวเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ในแนวเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดค่าความแข็งแรงสูงสุดประมาณ 400 MPa ที่กระแสไฟเชื่อม 110A ความเร็วเดินแนวเชื่อม 400 mm/min การเพิ่มกระแสไฟเชื่อมส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงของพื้นที่กระทบร้อนของแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนมีค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่กระทบร้อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะเชื่อม ผลที่เกิดขึ้นนี้ทำให้การพังทลายขึ้นทดสอบความแข็งแรงดึงเกิดขึ้นที่ด้านแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบการรวมตัวกันอย่างสมบูรณ์ระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิม และโลหะเชื่อม

**คำหลัก** เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าคาร์บอน การเชื่อมมิก

#### Abstract

This paper aims to apply MIG welding for welding the butt joint of SS400 carbon steel/ 430 stainless steel and study affecting of welding current on joint properties. The summarized results are as follows. The MIG welding on the designed conditions could produce a sound joint of SS400 carbon steel and 430 stainless steel. The optimum welding condition that produced the tensile strength of 400 MPa was the welding current of 110A and the welding speed of 400 mm/min. Increasing of the welding current



affected to decrease the tensile strength of the joint. The hardness of the heat affected zone (HAZ) of the carbon steel side was lower than that of the HAZ of the stainless steel side and the weld metal zone. Microstructure examination results showed the sound combination between the carbon steel, the stainless steel and the weld metal.

**Keywords:** Stainless Steel, Carbon Steel, MIG Welding

## 1. บทนำ

อุตสาหกรรมการผลิตในปัจจุบันมีการนำโลหะหลายชนิดเข้ามาเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างเพื่อนำข้อดีของโลหะแต่ละชนิดมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และสามารถรับแรงที่กระทำอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ [1] การเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น การเชื่อมด้วยวิธีทางกล (Mechanical joining) การติดยึดด้วยกาว (Adhesive) หรือการเชื่อม (Welding) เป็นต้น อย่างไรก็ตามในงานอุตสาหกรรมทั่วไป โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์พบว่าการเชื่อมเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดมากที่สุด โดยกรรมวิธีในการเชื่อมที่นิยมนำมาใช้คือการเชื่อมแบบความต้านทาน (Resistance spot welding) การเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas) หรือการเชื่อมมิก (Metal inert gas) เป็นต้น [2] อย่างไรก็ตามการเชื่อมวัสดุต่างชนิดนั้นเกิดขึ้นได้ค่อนข้างยากเนื่องจากวัสดุทั้งสองนั้นมีสมบัติทางกล ทางกายภาพ และทางเคมีที่แตกต่างกันส่งผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ขึ้นในเวลาทำการเชื่อม เช่น การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion) จุดหลอมเหลว (Melting temperature) ที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้การเลือกวิธีการเชื่อมจึงต้องพิจารณาด้วยความละเอียด [1] อุตสาหกรรมการเกษตรในประเทศไทย เช่น ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลมีการนำวัสดุต่างชนิดเข้ามาใช้งานเพิ่มมากขึ้นเพื่อเป็นการลดราคาค่าใช้จ่าย และเหตุผลทางด้านการออกแบบทางวิศวกรรม เนื่องจากต้องการความสามารถในการป้องกันการเกิดการกัดกร่อนของโลหะที่ใช้เมื่อสัมผัสกับผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล

การเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุมเป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม สามารถทำการเชื่อมได้รวดเร็วและต่อเนื่องประหยัดเวลาในการทำความสะอาด เพราะไม่มีแสงปกคลุมแนวเชื่อม [3] และเป็น

กระบวนการเชื่อมที่มีคุณภาพสูง นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน

อย่างไรก็ตามการศึกษาผลกระทบเกี่ยวกับตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของโลหะเชื่อมของรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลนั้นมีการทดลองที่ผ่านการนำเสนอในปริมาณน้อยมาก หากมีการศึกษาเพื่อหาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมต่างๆที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมจะทำให้เกิดประโยชน์ต่องานอุตสาหกรรมต่อไป

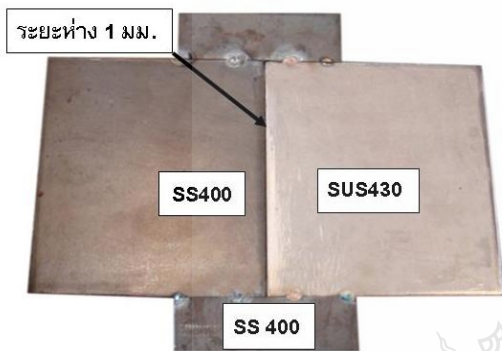
## 2. วิธีการทดลอง

การทดลองครั้งนี้ได้กำหนดตัวแปรในการทดลองทั้งหมด 3 ตัวแปร ดังนี้ กระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อม 4 ระดับ คือ 90 – 120 A ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 400 มม.ต่อนาที แก๊สปกคลุม Ar80% + CO<sub>2</sub>20% โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สปกคลุมที่ 12 ลิตร/นาที และใช้แก๊สซีลด้านหลังแนวเชื่อมที่อัตรา 5 ลิตร/นาที

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาจะใช้โลหะ 2 ชนิด คือ เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 และ เหล็กกล้าไร้สนิม เฟอร์ริติก AISI 430 ความหนา 3 มิลลิเมตร โดยนำวัสดุทั้งสองชนิดมาตัดให้ได้ชิ้นงานทดสอบ ที่มีขนาดเท่ากัน คือ 65 x 80 x 3 มม. ทำการบากหน้างานให้ได้ตามมาตรฐาน AWS D1.1 / D1.1 M:2600 เชื่อมยึดบริเวณหัวท้ายของรอยต่อด้วยแผ่นยึดที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน ต่ำ กว้าง 20 มม. ยาว 50 มม. หนา 3 มม. แสดงดังรูปที่ 1 ลวดเชื่อมเป็นชนิดลวดเปลือยตัน ตามมาตรฐาน AWS A 5.9 : ER430 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มม. ความเร็วในการป้อนตามค่าพารามิเตอร์การเชื่อม

กระบวนการเชื่อมที่ใช้ในการทดลองคือการเชื่อมแบบแก๊สปกคลุม (GMAW : Gas Metal Arc Welding) โดยใช้เครื่องเชื่อมมิก (MIG) แบบแรงดันคงที่ วัฏจักรการทำงาน 100 % ขนาด 300 แอมแปร์ ลักษณะในการเชื่อมเป็นแบบต่อเนื่อง ปรับแต่งเครื่องเชื่อม และองศา

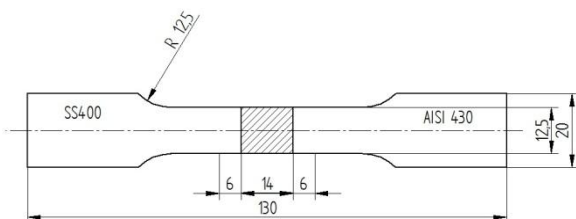
ของหัวเชื่อมตามค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด เชื่อมในตำแหน่งท่าราบ ใช้แผ่นทองแดงวางประกบชิ้นงานด้านบน จับยึดให้แน่นด้วยอุปกรณ์จับยึด แล้วทำการเชื่อมเดินแนวชิ้นงานด้วยเทคนิคการเดินลวดเชื่อมแบบแบ็คแชน ตามตัวแปรที่กำหนดให้ครบทุกตัวแปร และเพื่อให้ผลการทดลองมีระเบียบแบบแผนผลออกมาเป็นหน้าเชื่อมที่เรียบร้อย จึงสามารถทดลองทำซ้ำ และนำชิ้นงานไปทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าที่ถูกต้อง



รูปที่ 1 แสดงลักษณะการเชื่อมยึดหัวท้ายชิ้นงาน

การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างและโครงสร้างจุลภาค โดยนำชิ้นงานเชื่อมมาตัดเป็นชิ้นตามมาตรฐาน DIN 50351

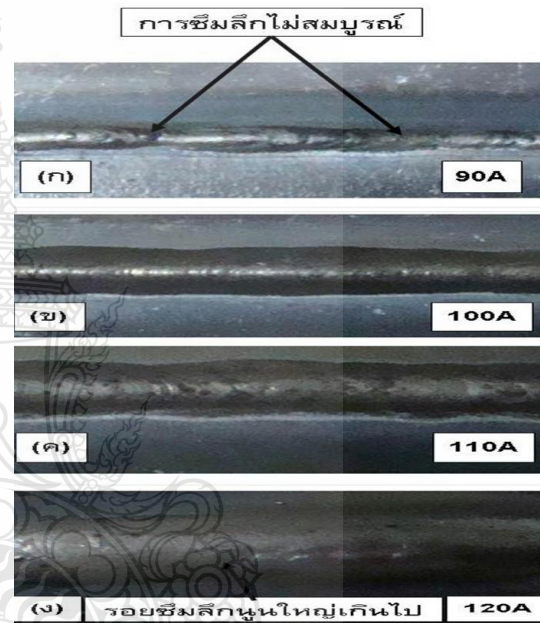
การทดสอบทางกลในการทดลองนี้ได้กำหนดการทดสอบทางกล 2 อย่าง คือ การทดสอบความแข็งใช้การทดสอบแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) โดยชิ้นงานที่ใช้ทดสอบความแข็งจะใช้ชิ้นงานอันเดียวกับชิ้นงานที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และการทดสอบแรงดึงหาค่าแรงดึงสูงสุด การทดสอบชิ้นงานที่ใช้ตามมาตรฐานการทดสอบโดยใช้ชิ้นงานภาคตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึง

### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาได้ทำการตรวจสอบสองแบบคือแบบมหภาค กับแบบจุลภาค โดยการตรวจสอบแบบมหภาค พบว่ากระแสเชื่อมที่แตกต่างส่งผลต่อลักษณะของแนวเชื่อม ทั้งขนาดความโต ระยะการซึมลึก ความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม โดยที่กระแสไฟ 90 A แนวเชื่อมเล็กนูน การหลอมละลายต่ำ มีการซึมลึกไม่สมบูรณ์ลักษณะการซึมลึกน้อย รอยซึมลึกแคบ แสดงดังรูปที่ 3 (ก) การอาร์กในการเชื่อมต่ำอัตราการเติมเนื้อโลหะน้อย



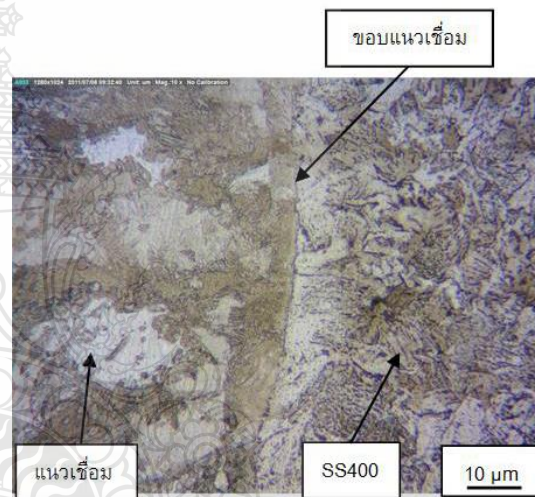
รูปที่ 3 แสดงลักษณะการซึมลึกของแนวเชื่อม

ควบคุมการหลอมละลายยาก ซึ่งแตกต่างจากรอยซึมลึกของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสไฟขนาดอื่น ในรูปที่ 3 (ข) ที่กระแส 100 A ลักษณะการซึมลึกสมบูรณ์การหลอมละลายที่ขอบงานเป็นไปในลักษณะที่สวยงามไม่มีรอยกัดแหงน ควบคุมการเชื่อมได้ง่าย ในรูปที่ 3 (ค) ที่กระแส 110 A ลักษณะรอยเชื่อมและการซึมลึกสมบูรณ์ อัตราการเติมลวดดี ควบคุมการหลอมละลายง่าย ไม่มีรอยกัดแหงนที่ขอบ เปรียบเทียบกับกระแส 100 A มีความใกล้เคียงกัน ในรูปที่ 3 (ง) ที่กระแสไฟ 120 A ลักษณะรอยเชื่อมและการซึมลึกมากเกินไป อัตราการเติมลวดสูง การเชื่อมทำได้ยาก มีรอยกัดแหงนที่ขอบของแนวเชื่อม เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของแนวเชื่อมและการซึมลึกของ

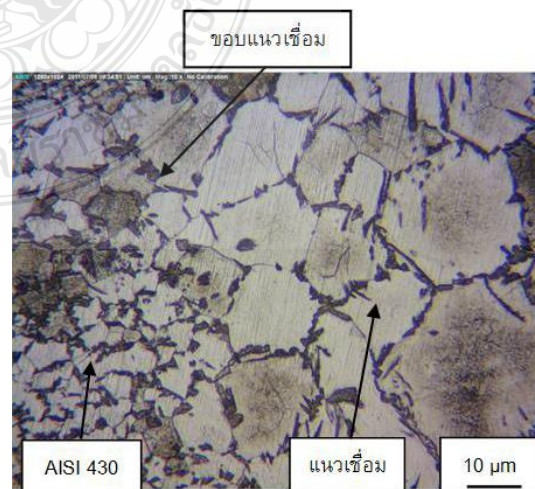
แนวเชื่อมทุกระดับกระแสไฟพบว่าลักษณะผิวและการซึมลึกที่ระดับกระแส 100 A และ 110 A มีความสมบูรณ์ที่สุดซึ่งมีความเหมาะสมในการเชื่อม

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมบริเวณกระทกร้อน (HAZ) พบว่า มีความแตกต่างของเม็ดเกรน ในบริเวณแนวเชื่อมเมื่อเทียบกับกระแสไฟแต่ละระดับพบว่า ที่กระแส 90 A ซึ่งให้ค่ารับแรงดึงต่ำสุด แนวเชื่อมมีลักษณะของเม็ดเกรนเป็นแบบเดนไดรฟ์ ซึ่งเมื่อนำโครงสร้างของแนวเชื่อมเทียบกับโครงสร้างบริเวณกระทกร้อนของเหล็ก SS400 และ AISI 430 พบว่า ลักษณะโครงสร้างแนวเชื่อมมีความหยาบมากกว่าโครงสร้างพื้นที่กระทกร้อนของชิ้นงานทั้งสองชนิด เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างพื้นที่กระทกร้อนทั้งสองฝั่งพบว่า ลักษณะเม็ดเกรนฝั่งชิ้นงาน AISI 430 มีความหยาบมากกว่า ฝั่งชิ้นงาน SS400 โดยเมื่อพิจารณาขอบของรอยเชื่อมที่ขาดเมื่อนำไปทดสอบแรงดึงพบว่าเม็ดเกรนของแนวเชื่อมกับชิ้นงานแยกกันอยู่อย่างอิสระอันเนื่องมาจากกระแสไฟที่อ่อนเกินไปทำให้การหลอมรวมกันระหว่างชิ้นงานกับแนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการฉีกขาดบริเวณนี้เมื่อได้รับแรงดึง ที่กระแสไฟ 110 A ซึ่งเป็นกระแสที่รับแรงดึงได้สูงสุดและชิ้นงานไม่ขาดบริเวณแนวเชื่อมเมื่อนำไปทดสอบแรงดึง โครงสร้างของเม็ดเกรนบริเวณแนวเชื่อมมีลักษณะเดนไดรฟ์ โครงสร้างจะหยาบกว่าโครงสร้างชิ้นงาน SS400 และ AISI 430 ซึ่งลักษณะโครงสร้างแบบนี้จะทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงาน เมื่อตรวจสอบบริเวณพื้นที่กระทกร้อนฝั่ง SS 400 จะเห็นลักษณะเม็ดเกรน เรียงตัวละเอียดกว่า AISI 430 โครงสร้างจะหยาบกว่า เมื่อพิจารณาขอบของรอยเชื่อมพบมีการแยกส่วนของเม็ดเกรนวัสดุและเม็ดเกรนแนวเชื่อมอย่างชัดเจนแต่ลักษณะการรวมตัวของเม็ดเกรนกระจายทั่วไปการหลอมรวมกันของเม็ดเกรนกลมกลืน อันเนื่องมาจากอัตราการเติมลดความเร็วในการเดินและกระแสไฟมีความเหมาะสมเมื่อนำโครงสร้างทุกระดับกระแสไฟเปรียบเทียบกันพบว่า บริเวณกระทกร้อน (HAZ) กับบริเวณแนวเชื่อมมีลักษณะของเม็ดเกรนที่แบ่งเขตของชิ้นงานที่เป็นวัสดุต่างชนิดกันอย่างชัดเจนถึงแม้จะมีการหลอมละลายของเนื้อโลหะผสมกันอย่างสมบูรณ์ก็ตามก็จะเห็นขอบแนวเชื่อมกับชิ้นงานชัดเจนทุกระดับกระแสไฟ แสดงดังรูปที่ 6 และ 7 และโครงสร้าง

บริเวณแนวเชื่อมจะเป็นลักษณะเดนไดรฟ์ ทุกกระแสไฟเช่นกัน ความแตกต่างของเม็ดเกรนบริเวณแนวเชื่อมกับชิ้นงานมีลักษณะของเม็ดเกรนที่ไม่เหมือนกันโดยแนวเชื่อมมีลักษณะเม็ดเกรนที่หยาบกว่าเม็ดเกรนของพื้นที่กระทกร้อนและโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุโลหะทั้งสองชนิด ในส่วนของการหลอมละลายของเนื้อโลหะกับลวดเชื่อมพบว่าฝั่งทางชิ้นงาน AISI 430 จะหลอมละลายรวมตัวกับแนวเชื่อมได้ดีกว่าขอบแนวเชื่อมฝั่งทางชิ้นงาน SS400 เหตุที่เป็นเช่นนั้นก็เพราะลวดเชื่อมที่ใช้เชื่อมเป็นลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 ซึ่งเป็นเกรดเดียวกับชิ้นงาน AISI 430 จึงทำให้การหลอมรวมตัวของเนื้อโลหะบริเวณของแนวเชื่อมดีกว่าฝั่งชิ้นงาน SS400



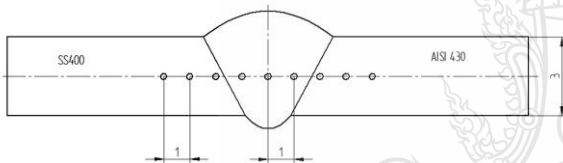
รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างขอบแนวเชื่อม SS400 กระแส 110 A แก๊ส Ar80% + Co<sub>2</sub> 20% ความเร็ว 400 mm/min



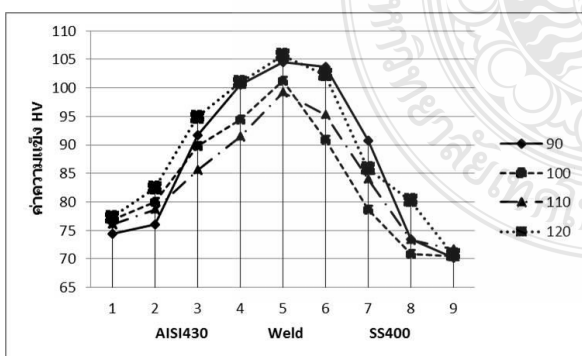
รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างขอบแนวเชื่อม AISI430 กระแส 110 A แก๊ส Ar80% + Co<sub>2</sub> 20% ความเร็ว 400 mm/min

การทดสอบสมบัติทางกลได้กำหนดการทดสอบไว้ 2 วิธีการคือ การทดสอบความแข็ง และการทดสอบแรงดึง โดยพิจารณาจากตัวแปรการเชื่อมที่ระดับของกระแสไฟที่แตกต่างกัน

การทดสอบความแข็งใช้การทดสอบแบบวิกเกอร์กิดที่บริเวณกึ่งกลางรอยเชื่อมและชิ้นงาน ดังแสดงใน รูปที่ 8 เมื่อพิจารณาผลการทดสอบทุกระแสเชื่อมพบว่ามีความแข็งบริเวณรอยเชื่อมที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความแข็งพบว่าบริเวณแนวเชื่อมให้ค่าความแข็งสูงสุด เปรียบเทียบค่าความแข็งของแต่ละพื้นที่พบว่าบริเวณ HAZ ของชิ้นงาน AISI 430 มีค่าความแข็งใกล้เคียงกับแนวเชื่อม ส่วนบริเวณ HAZ ของชิ้นงาน SS400 จะให้ค่าความแข็งน้อยกว่ารอยเชื่อมและ HAZ ของชิ้นงาน AISI 430 แต่จะให้ค่าความแข็งมากกว่าความแข็งพื้นฐานของวัสดุทั้ง 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 9

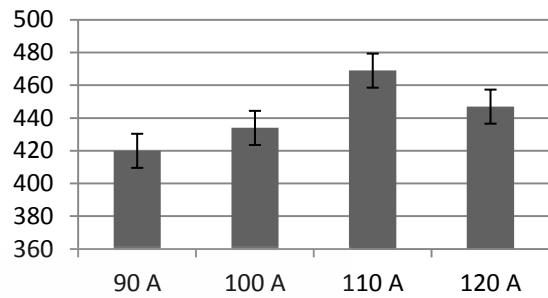


รูปที่ 6 แสดงลักษณะการกำหนดระยะและตำแหน่งจุดทดสอบ



รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่าความแข็งของกระแสเชื่อม 90 – 120 A แก๊สปกคลุม Ar80% + Co<sub>2</sub> 20% ความเร็วการเชื่อม 400 mm/min

### ค่ารับแรงดึง (Mpa)



รูปที่ 8 แสดงค่าการรับแรงดึงของชิ้นงาน ที่กระแส 90 – 120 A แก๊สปกคลุม Ar80% + Co<sub>2</sub> 20% ความเร็วในการเชื่อม 400 mm/min



รูปที่ 9 แสดงตำแหน่งการพังทลาย

การทดสอบหาค่ารับแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมเพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรง จากการตรวจสอบจุดพังทลายขาดของชิ้นงานทดสอบพบว่าที่กระแส 90 A ชิ้นงานทดสอบจะขาดบริเวณขอบแนวเชื่อม ส่วนที่กระแส 100 – 120 A ชิ้นงานจะขาดบนเหล็ก SS400 ห่างจากแนวเชื่อม 12.5 มม. ทุกระแสเชื่อม เมื่อนำค่าแรงดึงแต่ละชิ้นมาเปรียบเทียบจะได้ค่ารับแรงดึงที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยการเชื่อมด้วยกระแส 100 – 120 A แนวเชื่อมมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงาน เหล็ก SS400 เพราะการขาดของชิ้นงานทดสอบของทั้ง 3 กระแสไม่ได้ขาดที่บริเวณแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 9

#### 4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อ ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

1. จากการตรวจสอบมหภาคในทุกกระแสเชื่อมที่กระแส 110 A ลักษณะการซึมลึกบริเวณแนวเชื่อมเป็นไปอย่างสมบูรณ์การหลอมละลายของเนื้อโลหะกับลวดเชื่อมมีความเหมาะสมลักษณะผิวของรอยเชื่อมเป็นเกิร์ตสวยงาม เหมาะสำหรับการเชื่อมต่อวัสดุสองชนิดนี้ที่สุด

2. การเชื่อมด้วยกระแส 100 – 120 A แนวเชื่อมมีความแข็งแรงมากกว่าชั้นทดสอบด้านเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 เพราะจากการทดสอบแรงดึงพบว่าจุดที่เกิดการพังทลายเกิดขึ้นที่เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ไม่ได้เกิดการแตกหักที่บริเวณรอยเชื่อมแต่อย่างใด

3. กระแสไฟฟ้าส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม โดยที่กระแส 90 A พบว่าชิ้นงานทดลองเกิดการพังทลายและขาดออกจากกันตรงบริเวณขอบแนวเชื่อมและค่าความแข็งแรงที่ได้ก็ต่ำ ทำให้ไม่เหมาะกับการนำมาเชื่อม

4. จากการทดลองทุกกระแสเชื่อมพบว่ามีความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกัน โดยบริเวณแนวเชื่อมจะให้ค่าความแข็งแรงมากกว่าบริเวณอื่น และเมื่อพิจารณาความแข็งแรงบริเวณ HAZ ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก AISI 430 พบว่ามีความแข็งแรงมากกว่า บริเวณ HAZ ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และมีความแข็งแรงใกล้เคียงกับบริเวณแนวเชื่อม

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ แผนกวิชาโลหะการ วิทยาลัยเทคนิคชัยนาท คุณสุริยา ประสมทอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ วิทยาเขตสามชุก ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ และช่วยเหลือในการจัดทำงานวิจัยนี้

#### เอกสารอ้างอิง

[1] Branes, T.A. and Pashyby, I.R. 2000. Joining Techniques for Aluminum Spaceframes used in Automobiles Part I-Solid and Liquid Phase Welding. J. of Materials Processing Technology. 99: 62-71.

[2] Brandon, D. and Kaplan, W.D. 1997. Joining Processes, An introduction. New York. John Wiley&Sons.

[3] ยงยุทธ ดุลยกุล , นภิสพร มีมลคล และ ประภาส เหมืองจันทร์บุรี "การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกระแสเชื่อมและส่วนผสมของแก๊สคลุมที่แตกต่างกันโดยกรรมวิธีการเชื่อมแม่เหล็ก" , มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา 2551.

[4] อนุสิทธิ์ อ่ำไพบูลย์ "ปัจจัยที่เหมาะสมของการเชื่อมแบบอาร์คโลหะก๊าซคลุม" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น จ.ขอนแก่น 2550

[5] ภัคดี ดำเนินผล "การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมมิก ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลเหล็กกล้า ออสเทนนิติก AISI 304" มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี 2552

[6] กรภัทร์ จุ้ยยิ้ม "อิทธิพลของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 กับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง" มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี 2549

[7] บัณฑิต อมรสิน "การศึกษาผลกระทบบของปัจจัยจากการเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าสแตนเลส AISI 304 กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยกรรมวิธีการเชื่อม Gas Metal arc Welding ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล" มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี 2549

[8] V.V.Satyanarayana, G.Madhusdhan Reddy , T.Mohandas , Dissimilar metal welding of austenitic-ferrite stainless steels , Journal of materials processing technology 160 (2005) p.128-139