

โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกแข็งโครเมียมสูงบนผิวทรงกระบอก  
เหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S45C ด้วยการเชื่อมอาร์กลวดไส้ฟลักซ์

MICROSTRUCTURE OF HIGH CHROMIUM HARD-FACED WELD  
METAL ON JIS-S45C CARBON STEEL CYLINDRICAL SURFACE  
BY FLUX CORED WIRE ARC WELDING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกแข็งโครเมียมสูงบนผิวทรงกระบอก  
เหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S45C ด้วยการเชื่อมอาร์กหลอดไส้ฟลักซ์

บรรณกฤต แจ้ประยูร


วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี


หัวข้อวิทยานิพนธ์	โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกแข็งโครเมียมสูงบนผิวทรงกระบอกเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S45C ด้วยการเชื่อมอาร์กทวดไส้ฟลักซ์ Microstructure of High Chromium Hard-faced Weld Metal on the Cylindrical Surface of JIS-S45C Carbon Steel by Flux Cored Wire Arc Welding
ชื่อ - นามสกุล	นายบรรณกฤต แจ็งประยูร
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทร์มณี, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ระพี กาญจนะ, D.Eng.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)  
วันที่ 12 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2563

หัวข้อวิทยานิพนธ์	โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกแข็งโครเมียมสูงบนผิวทรงกระบอก เหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S45C ด้วยการเชื่อมอาร์กลวดไส้ฟลัก
ชื่อ-นามสกุล	นายบรรณกฤต แจ้งประยูร
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2562

## บทคัดย่อ

เทคนิคการเชื่อมเชื่อมเป็นหนึ่งในวิธีการสำคัญในหลายงานอุตสาหกรรมที่สามารถประยุกต์ในการปรับปรุงสมบัติทางกลของพื้นผิวที่เสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรในพื้นที่เฉพาะและส่งผลทำให้เกิดการลดต้นทุนการผลิต ด้วยเหตุนี้การเตรียมข้อมูลตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมที่สามารถทำให้เกิดสมบัติทางกลที่มีค่าสูงกว่าสำหรับชิ้นส่วนเฉพาะจึงมีความต้องการและดำเนินการในงานอุตสาหกรรมเหล่านั้น จุดประสงค์หลักในการวิจัย นี้ คือ การศึกษาตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมที่มีผลต่อสมบัติของโลหะเชื่อมพอกแข็ง และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อม

วัสดุในการทดลอง คือ เหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S45C ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 135 มิลลิเมตร ความหนาของผนังเท่ากับ 25 มิลลิเมตร และความยาวเท่ากับ 100 มิลลิเมตร กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมที่ไม่มีการใช้แก๊สคลุมแนวเชื่อมถูกใช้ในการสร้างชิ้นโลหะเชื่อมพอกแข็งในการศึกษาครั้งนี้ ขณะเดียวกันลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ที่มีปริมาณโครเมียมสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางลวดเชื่อม 1.6 มิลลิเมตรถูกใช้เป็นโลหะเติมในกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม ตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วยกระแส 150-250 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่ออนาที จำนวนชั้นในการเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น เมื่อทำการเชื่อมเสร็จชิ้นงานเชื่อมถูกนำมาทำการศึกษาสมบัติของโลหะเชื่อมที่ประกอบด้วย ความแข็ง ความต้านทานการสึกหรอ โครงสร้างมหภาค และโครงสร้างจุลภาค

ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การเพิ่มกระแสเชื่อมส่งผลทำให้ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของโลหะเชื่อมพอกแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น การเกิดลักษณะนี้เนื่องจากการเกิดเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ในโลหะเชื่อมที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมและจำนวนชั้นพอกแข็งเพิ่มขึ้น ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดความแข็งสูงสุด 874.20 HV และการสูญเสียน้ำหนักต่ำสุด 0.244 เปอร์เซ็นต์ คือ กระแสเชื่อม 190 แอมแปร์ และโลหะเชื่อม 3 ชั้น

**คำสำคัญ:** การเชื่อมอาร์กลวดไส้ฟลักซ์ โลหะเชื่อมพอกแข็ง โครงสร้างจุลภาค

<b>Thesis Title</b>	Microstructure of High Chromium Hard-faced Weld Metal on JIS-S45C Carbon Steel Cylindrical Surface by Flux Cored Wire Arc Welding
<b>Name – Surname</b>	Mr. Bannakit Chaengprayoon
<b>Program</b>	Manufacturing Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Kittiphong Kimapong, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2019

## ABSTRACT

Repair welding technique is one of the important approaches to various industries in which this approach can be applied to improve a mechanical property of a damaged surface of a machine part in a specific area, and also results in the reduction of production cost. For this reason, a preparation of optimized welding process parameters, that can produce a higher mechanical property for a specific part, is required and performed in those industries. This research aims to study the effects of gas metal arc welding process parameters on a hard-faced weld metal property and to study the relationship between a mechanical property and the microstructure of weld metals.

Materials used in this experiment were cylindrical JIS-S45C carbon steel, which had an outer diameter of 135 millimeters, a wall thickness of 25 millimeters, and a length of 100 millimeters. A gas metal arc welding (GMAW) process with no shielded gas was selected for producing a hard-faced weld metal layer in this experiment. Meanwhile, a flux-cored wire with high chromium and a wire diameter of 1.6 millimeters was applied to produce a filler metal in GMAW process. Welding process parameters were a welding current of 150–250 amperes, a welding speed of 150 millimeters per minute, and a hard-faced weld metal of 1-3 layers. After the weld metals were successfully produced, the weld metals were investigated for weld properties consisting of hardness, wear resistance, macrostructure, and microstructure.

The results from this experiment can be summarized as follows. The increase of the welding current affected the increase of hardness and wear resistance of the hard-faced weld metal. This was attributed to the formation of a chromium carbide phase in

the weld metal which tended to increase when the welding current and the number of hard-faced weld metal layers were increased. The optimum welding parameters which produced the maximum hardness of 874.20 HV and the minimum weight loss of 0.244% was the welding current of 190 amperes and the weld metal of 3 layers.

**Keywords:** flux-cored arc welding, hard-faced weld metal, microstructure



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความอนุเคราะห์เป็นอย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระพี กาญจนะ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทรมณี ผู้ทรงคุณวุฒิที่ กรุณาให้คำชี้แจงตลอดจนช่วยเหลือและแก้ไขข้อบกพร่อง เพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้ มีความสมบูรณ์ทางผู้จัดทำวิทยานิพนธ์จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมาไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ใน สาขาวิศวกรรมการผลิต ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบ ทางด้านเครื่องมือเครื่องจักรสำหรับศึกษางานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ผู้ที่ให้ความรักและเป็นกำลังใจในการเรียน การศึกษา ในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

บรรณกฤต แจ่มประยูร



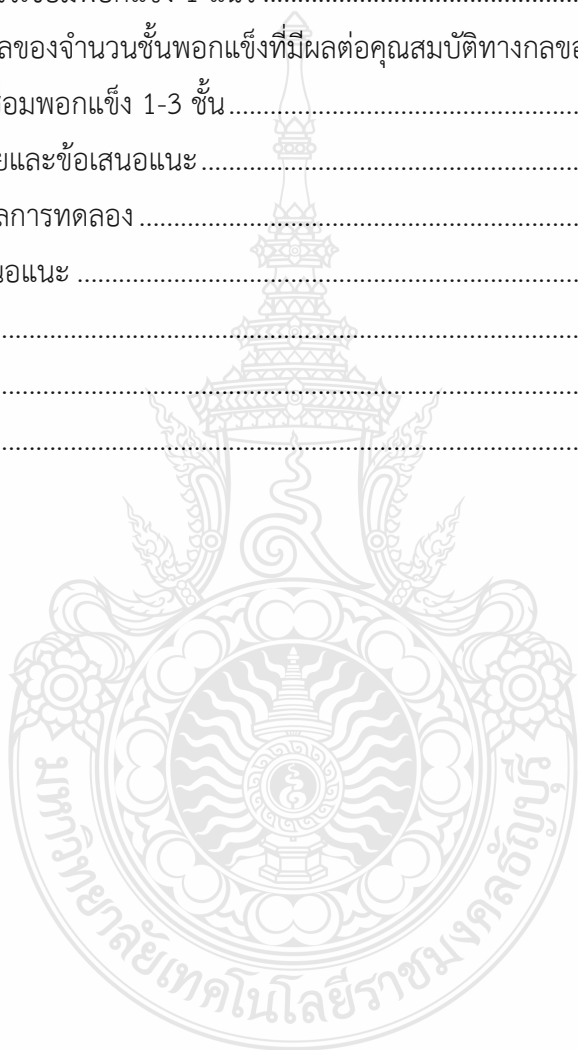
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	(4)
กิตติกรรมประกาศ .....	(6)
สารบัญ.....	(7)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญภาพ .....	(10)
บทที่ 1 บทนำ .....	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	16
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	16
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง .....	18
2.2 กระบวนการเชื่อม .....	21
2.3 ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง .....	27
2.4 การควบคุมคุณภาพของการพอกผิวโลหะ.....	34
2.5 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา .....	35
2.6 การทดสอบหาสมบัติทางกล .....	38
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	42
3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	43
3.2 การกำหนดตัวแปรการทดลอง .....	45
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง .....	46
3.4 ขั้นตอนการตัดชิ้นงานทดสอบ.....	47
3.5 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา .....	48
3.6 การทดสอบสมบัติทางกล .....	51



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	54
4.1 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์กลดได้ฟลักซ์ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกล ของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 แนว .....	54
4.2 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกแข็งที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของ แนวเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น.....	71
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	86
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	86
บรรณานุกรม.....	88
ภาคผนวก.....	92
ประวัติผู้เขียน.....	107



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าตาม AISI และ ASME.....	19
ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์และส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้ามาตรฐาน JIS G4051 .....	20
ตารางที่ 2.3 ประเภทของโลหะเติมลวดเชื่อมมาตรฐานเยอรมัน DIS 8555.....	31
ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ MF-6-GF-60GP .....	33
ตารางที่ 2.5 การเลือกใช้ระดับอุณหภูมิในการอุ่นงาน (Pre-heat) ที่แปรผันกับค่า CE.....	34
ตารางที่ 2.6 การให้ความร้อนก่อนการเชื่อมและระหว่างชั้นแนวเชื่อม โดยพิจารณาจาก CE.....	35
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S45C (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) .....	43
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก).....	43
ตารางที่ 3.3 การออกแบบตัวแปรการเชื่อม .....	45



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 รถเกี่ยวและนวดข้าว.....	14
รูปที่ 1.2 ลูกโรลเลอร์ของรถเกี่ยวและนวดข้าว .....	15
รูปที่ 2.1 การจัดกลุ่มกระบวนการเชื่อมของ American welding society.....	21
รูปที่ 2.2 กระบวนการเชื่อมลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ โดยการสร้างแก๊สปกป้องขึ้นเอง (FCAW-SS) .....	23
รูปที่ 2.3 กระบวนการเชื่อมลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ โดยการใช้แก๊สปกป้องจากภายนอก (FCAW-GS).....	23
รูปที่ 2.4 การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบลัดวงจร .....	24
รูปที่ 2.5 การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบหยุด.....	24
รูปที่ 2.6 การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบละออง.....	25
รูปที่ 2.7 การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบฟลักซ์.....	25
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟเชื่อมกับความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม .....	26
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟเชื่อมกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าในการอาร์ก.....	26
รูปที่ 2.10 ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับเชื่อมพอกผิวแข็ง.....	33
รูปที่ 2.11 กล้องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	38
รูปที่ 2.12 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์สำหรับงานทางโลหะวิทยา .....	38
รูปที่ 2.13 ลักษณะรอยกดของการทดสอบแบบวิกเกอร์ .....	39
รูปที่ 2.14 เครื่องทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 .....	39
รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินการวิจัยของตัวแปรการเชื่อมพอกผิวแข็ง .....	42
รูปที่ 3.2 รูปร่างของชิ้นงานทดสอบ (หน่วย: มิลลิเมตร) .....	43
รูปที่ 3.3 เครื่องเชื่อมมิก/แม็กที่ใช้ในการทดลอง.....	44
รูปที่ 3.4 เตาอบชิ้นงานทดลอง.....	44
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์จับยึดและควบคุมความเร็วในการเชื่อม.....	45
รูปที่ 3.6 มุมและทิศทางในการเชื่อม .....	46
รูปที่ 3.7 รูปแบบแนวเชื่อม.....	46
รูปที่ 3.8 รูปแบบการเชื่อมพอกแข็ง .....	47
รูปที่ 3.9 การออกแบบการตัดชิ้นงานทดสอบสมบัติรอยเชื่อม .....	48

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.10 เครื่องขัดแบบจานหมุน .....	49
รูปที่ 3.11 การวัดขนาดแนวเชื่อมระดับมหภาค .....	49
รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์ (Micro Capture).....	49
รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical micro scope).....	50
รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) .....	51
รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ส.....	51
รูปที่ 3.16 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 แนว .....	52
รูปที่ 3.17 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น.....	52
รูปที่ 3.18 การทดสอบการสึกหรอด้วยล้ออย่างขัดสี.....	53
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 แนว กระแสเชื่อมที่ 150-250 แอมแปร์.....	55
รูปที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 แนว กระแสเชื่อมที่ 150-250 แอมแปร์...	56
รูปที่ 4.3 รูปร่างและขนาดของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 แนว กระแสเชื่อมที่ 150-250 แอมแปร์....	57
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาพของแนวเชื่อมพอกแข็ง กระแสเชื่อมที่ 150 แอมแปร์.....	58
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาพของแนวเชื่อมพอกแข็ง กระแสเชื่อมที่ 170 แอมแปร์.....	60
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาพของแนวเชื่อมพอกแข็ง กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์.....	61
รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาพของแนวเชื่อมพอกแข็ง กระแสเชื่อมที่ 210 แอมแปร์.....	62
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาพของแนวเชื่อมพอกแข็ง กระแสเชื่อมที่ 230 แอมแปร์.....	63
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาพของแนวเชื่อมพอกแข็ง กระแสเชื่อมที่ 250 แอมแปร์.....	64
รูปที่ 4.10 ขนาดเกรนของโครงสร้างเดนไดรต์ กระแสเชื่อมที่ 150-250 แอมแปร์ .....	65
รูปที่ 4.11 ตำแหน่งการทดสอบความแข็ง .....	66
รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็ง กระแสเชื่อมที่ 150-250 แอมแปร์....	67
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบความแข็งและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 150-250 แอมแปร์ .....	68
รูปที่ 4.14 ตำแหน่งการทดสอบและผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะ เชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 150 แอมแปร์ .....	69

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.15 ตำแหน่งการทดสอบและผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อม พอกแข็ง 1 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์.....	69
รูปที่ 4.16 ตำแหน่งการทดสอบและผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อม พอกแข็ง 1 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 250 แอมแปร์.....	69
รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงปริมาณบริเวณโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น ตำแหน่งที่ 1 .....	70
รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงปริมาณบริเวณโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น ตำแหน่งที่ 2 .....	71
รูปที่ 4.19 ลักษณะทางกายภาพของผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์.....	72
รูปที่ 4.20 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ .....	73
รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ .....	74
รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ .....	75
รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ .....	76
รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ .....	77
รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ .....	78
รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ .....	79
รูปที่ 4.27 ตำแหน่งการทดสอบและผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของบริเวณด้านล่าง ของโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ .....	81
รูปที่ 4.28 ตำแหน่งการทดสอบและผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของบริเวณด้านบน ของโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ .....	81
รูปที่ 4.29 ตำแหน่งการทดสอบและผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของบริเวณด้านบน ของโลหะเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ .....	81
รูปที่ 4.30 ตำแหน่งการทดสอบและผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของบริเวณด้านบน ของโลหะเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ .....	82
รูปที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงปริมาณบริเวณโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ ตำแหน่งที่ 1.....	82

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงปริมาณบริเวณโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น กระแสน้ำที่ 190 แอมแปร์ ตำแหน่งที่ 2.....	83
รูปที่ 4.33 ผลการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น กระแสน้ำที่ 190 แอมแปร์.....	84
รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบความแข็งและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายของแนวเชื่อม พอกแข็ง 1-3 ชั้น กระแสน้ำที่ 190 แอมแปร์ .....	85



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การใช้เครื่องจักรกลเกษตรเข้ามาทดแทนการใช้แรงงานในการทำนามีปริมาณเพิ่มมากขึ้น มีสาเหตุหลักที่ชาวนามีพฤติกรรมการปลูกข้าวแบบเพื่อใช้บริโภคในครัวเรือนเป็นการปลูกข้าวเพื่อขาย และสร้างรายได้ให้แก่ครัวเรือน เนื่องจากประเทศไทยมีการส่งออกข้าวในปริมาณสูงสามารถทำรายได้ให้ชาวนาไทยได้ในปริมาณสูงต่อปี [1] การปลูกข้าวเพื่อขายสร้างรายได้ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลทำให้วิธีการในการปลูกข้าวและทำนาของชาวนาไทยเปลี่ยนแปลงไปจากการการใช้แรงงานคนเปลี่ยนเป็นการใช้เครื่องจักรเกษตร เช่น รถไถ เครื่องปักดำต้นข้าว และเครื่องเกี่ยวและนวดข้าว เป็นต้น การใช้เครื่องจักรเกษตรอาจส่งผลดีทำให้เวลาในการผลิตเมล็ดข้าวเปลือกลดลง แต่ราคาค่าใช้จ่ายในการผลิตสามารถเพิ่มขึ้นได้นอกจากนั้นในการใช้งานเครื่องจักรเกษตร เช่น การใช้เครื่องเกี่ยวและนวดข้าวดังภาพที่ 1.1 เมื่อมีการใช้งานเป็นเวลายาวนานในท้องนาชุดการขับเคลื่อนรถเกี่ยวและนวดข้าวที่มีการสัมผัสกันตลอดเวลาของโช้ตึนตะขาบและลูกโรลเลอร์ที่ใช้เป็นตัวประกอบตีนตะขาบบังเกิดการเสียหายหรือสึกหรอขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถเกี่ยวและนวดข้าวลดลง เมื่อปัญหานี้เกิดขึ้นช่างซ่อมบำรุงเครื่องเกี่ยวและนวดข้าวจะทำการซ่อมเครื่องเกี่ยวและนวดข้าวโดยการเปลี่ยนเอาลูกโรลเลอร์เก่าออกที่ชำรุดออกไปและทำการเปลี่ยนลูกโรลเลอร์ใหม่ที่มีราคาสูงเข้าไปแทนที่เพื่อให้สามารถใช้เครื่องเกี่ยวและนวดข้าวได้ทันที ขณะเดียวกันลูกโรลเลอร์ที่เสียหายก็จะถูกทิ้งเป็นของเสียโดยที่ไม่มีการนำกลับมาใช้ใหม่ทำให้ปริมาณลูกโรลเลอร์ที่เสียหายนั้นมีปริมาณสูงขึ้นทุกฤดูกาลการเก็บเกี่ยว



รูปที่ 1.1 รถเกี่ยวและนวดข้าว



รูปที่ 1.2 ลูกโรลเลอร์ของรถเกี่ยวและนวดข้าว

ปัญหาการเพิ่มปริมาณลูกโรลเลอร์ที่ชำรุดทำให้มีแนวคิดในการนำเอาลูกโรลเลอร์ที่ชำรุดกลับมาใช้งาน หนึ่งในวิธีการซ่อมที่สามารถปรับปรุงและยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนอย่างมีประสิทธิภาพ คือ การเชื่อมซ่อม (welding repair) โดยการเชื่อมพอกผิวแข็งซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการเชื่อมซ่อมผิวหน้าของชิ้นงานที่เกิดการสึกหรอ สามารถสร้างเสริมเนื้อโลหะเพิ่มความแข็งและความต้านทานการสึกหรอให้กับโลหะชิ้นงานได้ การเชื่อมพอกผิวแข็งนั้นสามารถใช้เทคนิคในการเชื่อมได้หลายเทคนิค เช่น การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding: GMAW) การเชื่อมอาร์กหลอดหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW) การเชื่อมอาร์กหลอดไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding: FCAW) การเชื่อมอาร์กพลาสมา (Plasma Arc Welding: PAW) การเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุม (Gas Tungsten Arc Welding: GTAW) การเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding: SAW) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การเลือกวิธีการเชื่อมพอกผิวแข็งควรพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุและความสามารถนำไปใช้งาน รวมทั้งวิธีการเชื่อมที่มีความแตกต่างกันก็จะให้ประสิทธิภาพในการเชื่อม อัตราการซึมลึก และรวมถึงต้นทุนในการเชื่อมด้วย ดังนั้นเห็นว่าการเชื่อมอาร์กหลอดไส้ฟลักซ์มีความเหมาะสมเป็นวิธีการเชื่อมที่เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเชื่อมอื่น ๆ ที่กล่าวมานั้นไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีการปฏิบัติงานในการเชื่อมแบบอัตโนมัติได้ สามารถทำการเชื่อมได้รวดเร็วและต่อเนื่อง ที่ผ่านมามีการเชื่อมอาร์กพอกผิวแข็งวัสดุหลายชนิด และให้คุณสมบัติของผิวพอกแข็งดังต้องการ

ดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาข้างต้นพบว่า หากมีการเชื่อมซ่อมโดยวิธีการสร้างชั้นพอกแข็งบนพื้นผิวโค้งทรงกระบอกสมมติคล้ายลูกโรลเลอร์ของตีนตะขาบรถเกี่ยวและนวดข้าวเพื่อจุดประสงค์ในการเพิ่มความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของลูกโรลเลอร์ เพื่ออาจจะส่งผลทำให้อายุการใช้งานของลูกโรลเลอร์เพิ่มขึ้น และทำให้ราคาต้นทุนรวมของการผลิตข้าวลดต่ำลงเนื่องจากการนำลูกโรลเลอร์กลับมาใช้ใหม่ ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมพอกแข็งด้วยการเชื่อมอาร์กหลอดไส้ฟลักซ์ที่มีผลต่อสมบัติของโลหะ เช่น ความแข็ง ต้านทานการสึกหรอ อันอาจทำให้เกิด



การประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการเก็บเกี่ยวผลผลิตข้าวและลดต้นทุนรวมในการผลิตข้าวในอนาคตต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลตัวแปรเชื่อมพอกแข็งด้วยการเชื่อมอาร์กหลอดไส้ฟลักซ์ที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมบนผิวโค้งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง JIS S45C

1.2.2 ศึกษาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของชั้นพอกแข็งบนผิวโค้งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง JIS S45C

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 135 มิลลิเมตร ความหนา 25 มิลลิเมตรและความยาว 100 มิลลิเมตร

1.3.2 การเชื่อมอาร์กด้วยหลอดไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding: FCAW) โดยใช้ลวดเชื่อมพอกผิวแข็งตามมาตรฐาน DIN 8555: MF-6-GF-60-GP ในการเชื่อมชิ้นงานทดลอง โดยประยุกต์ให้เป็น การเชื่อมแบบอัตโนมัติ

1.3.3 การเชื่อมพอกผิวแข็งเดินบนชิ้นงาน 1 แนวและ 1-3 ชั้น

1.3.4 ตัวแปรการเชื่อม

1.3.4.1 กระแสไฟเชื่อม 150 170 190 210 230 และ 250 แอมแปร์

1.3.4.2 ความเร็วเดินเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที

1.3.5 ศึกษาโครงสร้างโลหะวิทยา

1.3.5.1 โครงสร้างจุลภาค

1.3.5.2 โครงสร้างมหภาค

1.3.6 ศึกษาสมบัติทางกล

1.3.6.1 ทดสอบความแข็ง

1.3.6.2 ทดสอบความสึกหรอ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพิ่มศักยภาพการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับอิทธิพลของจำนวนชั้นและแนวเชื่อมพอกแข็งที่มีผลต่อความเสียหายและสมบัติทางกลของโลหะพอกแข็งผิววัสดุลูกโรลเลอร์รถเกี่ยวและนวดข้าว

1.4.2 เป็นความรู้ในการวิจัยต่อไป โดยการพัฒนางค์ความรู้พื้นฐานของอิทธิพลของจำนวนชั้นและอิทธิพลแนวเชื่อมพอกแข็ง ที่มีผลต่อความเสียหายของลูกโรลเลอร์

1.4.3 เป็นพื้นฐานความรู้แก่ภาคธุรกิจเพื่อนำไปสู่การผลิตทางเชิงพาณิชย์ โดยการจัดเตรียมข้อมูล วิธีการ และการทดลองเบื้องต้น ที่สามารถนำไปเสนอแก่ภาคอุตสาหกรรมการซ่อมบำรุงเครื่องจักรกลการเกษตรได้ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการซ่อมบำรุงได้ทันที

1.4.4 เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต โดยคาดหวังว่าการทดลองที่ได้จะเป็นหนึ่งในทางเลือกในการใช้เป็นข้อมูลที่จะพิจารณาการใช้อิทธิพลของจำนวนชั้นและแนวเชื่อมพอกแข็งที่มีผลต่อความเสียหายและสมบัติทางกลพอกแข็งผิววัสดุลูกโรลเลอร์รถเกี่ยวและนวดข้าว การเลือกใช้ตัวแปรในการเชื่อมต่าง ๆ เพื่อให้ได้ตัวแปรการเชื่อมที่มีความเหมาะสมต่อไปและทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีประสิทธิภาพสูงและมีต้นทุนการผลิตต่ำ



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

การแบ่งกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) [2] เหล็กกล้าที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมมีหลายประเภท สามารถแบ่งประเภทของเหล็กกล้าออกเป็นหลายกลุ่ม เช่น ตามลักษณะโครงสร้างที่ปรากฏและประเภทของธาตุผสม เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นโลหะผสมที่ประกอบด้วยธาตุเหล็กและคาร์บอน (C) เป็นส่วนผสมหลักซึ่งโดยปกติแล้วมักจะมีธาตุแมงกานีส (Mn) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) และฟอสฟอรัส (P) ผสมอยู่เพียงเล็กน้อย ซึ่งทางสมาคม (American iron and steel Institute: AISI) ได้กำหนดเหล็กกล้าชนิดนี้จะมีส่วนผสมของแมงกานีส (Mn) ไม่เกิน 1.65 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกอน (Si) ไม่เกิน 0.6 เปอร์เซ็นต์และทองแดง (Cu) ไม่เกิน 0.6 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่น ๆ ซึ่งธาตุต่าง ๆ เหล่านี้จะมีปริมาณน้อยมากธาตุผสมเหล่านี้มีปริมาณน้อยมากจะติดมากับเนื้อเหล็กตั้งแต่เริ่มการผลิตเหล็กจากสินแร่เหล็กชนิดนี้เป็นวัสดุช่างที่มีคุณสมบัติทางความแข็งแรง (Strength) และความเหนียว (Ductility) โดยเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของคาร์บอนที่มีอยู่ในเหล็กทำให้เหมาะที่จะเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมของลักษณะทั่วไปเหล็กกล้าคาร์บอนสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ตามปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเนื้อเหล็ก นอกจากนี้ความสามารถในการเชื่อมของเหล็กกล้าเหล่านี้ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่เป็นสำคัญ ส่วนธาตุอื่น ๆ ที่ผสมอยู่จะมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เหล็กกล้าคาร์บอนสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทหลักๆที่สำคัญคือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอน (C) ต่ำกว่า 0.2 เปอร์เซ็นต์ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel) มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอน (C) มากกว่า 0.2 เปอร์เซ็นต์แต่ต่ำกว่า 0.7 เปอร์เซ็นต์ และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel) มีส่วนผสมของคาร์บอนตั้งแต่ 0.7-1.6 เปอร์เซ็นต์

อย่างไรก็ตามการแบ่งแยกชนิดของเหล็กโดยใช้แผนภาพสมดุลเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์นั้นเป็นการแบ่งแยกโดยการยึดเอาโครงสร้างจุลภาคเป็นหลัก ซึ่งเป็นวิธีการที่ค่อนข้างลำบากสำหรับวิศวกรการนำไปใช้งานจริง ด้วยเหตุนี้สมาคมเหล็กและเหล็กกล้าแห่งอเมริกา (American iron and steel institute: AISI) และสมาคมวิศวกรเครื่องกลแห่งอเมริกา (American society of mechanical engineering: ASME) จึงได้คิดค้นระบบในการแบ่งกลุ่มเหล็กกล้าในการนำไปใช้งานโดยการกำหนดตัวเลขขึ้นมาใช้ในการเรียก 4 ตัวให้ตัวเลขสองตัวแรกหมายถึงธาตุผสมหลักในเหล็กกล้า นั้น ขณะที่ตัวเลขสองตัวสุดท้ายหมายถึง ถึงปริมาณคาร์บอนในเหล็ก เช่น ตัวอย่าง เหล็กกล้า AISI1040 คือ เหล็กกล้าคาร์บอน (ตัวเลข 10) ที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 0.4% (ตัวเลข 40) เหล็กกล้า SAE10120 คือ เหล็กกล้าคาร์บอน (ตัวเลข 10) ที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 1.2% (ตัวเลข 120) เป็นต้น ตัวอย่างของเหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าตาม AISI และ ASME [3]

เกรด	%C	%Mn	%Si	%Ni	%Cr	Other
1020	0.18-0.23	0.30-0.60	-	-	-	-
1040	0.37-0.44	0.60-0.90	-	-	-	-
1060	0.55-0.65	0.60-0.90	-	-	-	-
1080	0.75-0.88	0.60-0.90	-	-	-	-
1095	0.90-1.03	0.30-0.50	-	-	-	-
1140	0.37-0.44	0.70-1.00	-	-	-	0.08-0.13% S
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.15-0.30	-	0.80-1.10	0.15-0.25% Mo
4340	0.38-0.43	0.60-0.80	0.15-0.30	1.65-2.00	0.70-0.90	0.20-0.30% Mo
4620	0.17-0.22	0.45-0.65	0.15-0.30	1.65-2.00	-	0.20-0.30% Mo
52100	0.98-1.10	0.25-0.45	0.15-0.30	-	1.30-1.60	-
8620	0.18-0.23	0.70-0.90	0.15-0.30	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25% Y
9260	0.56-0.64	0.75-1.00	1.80-2.20	-	-	-

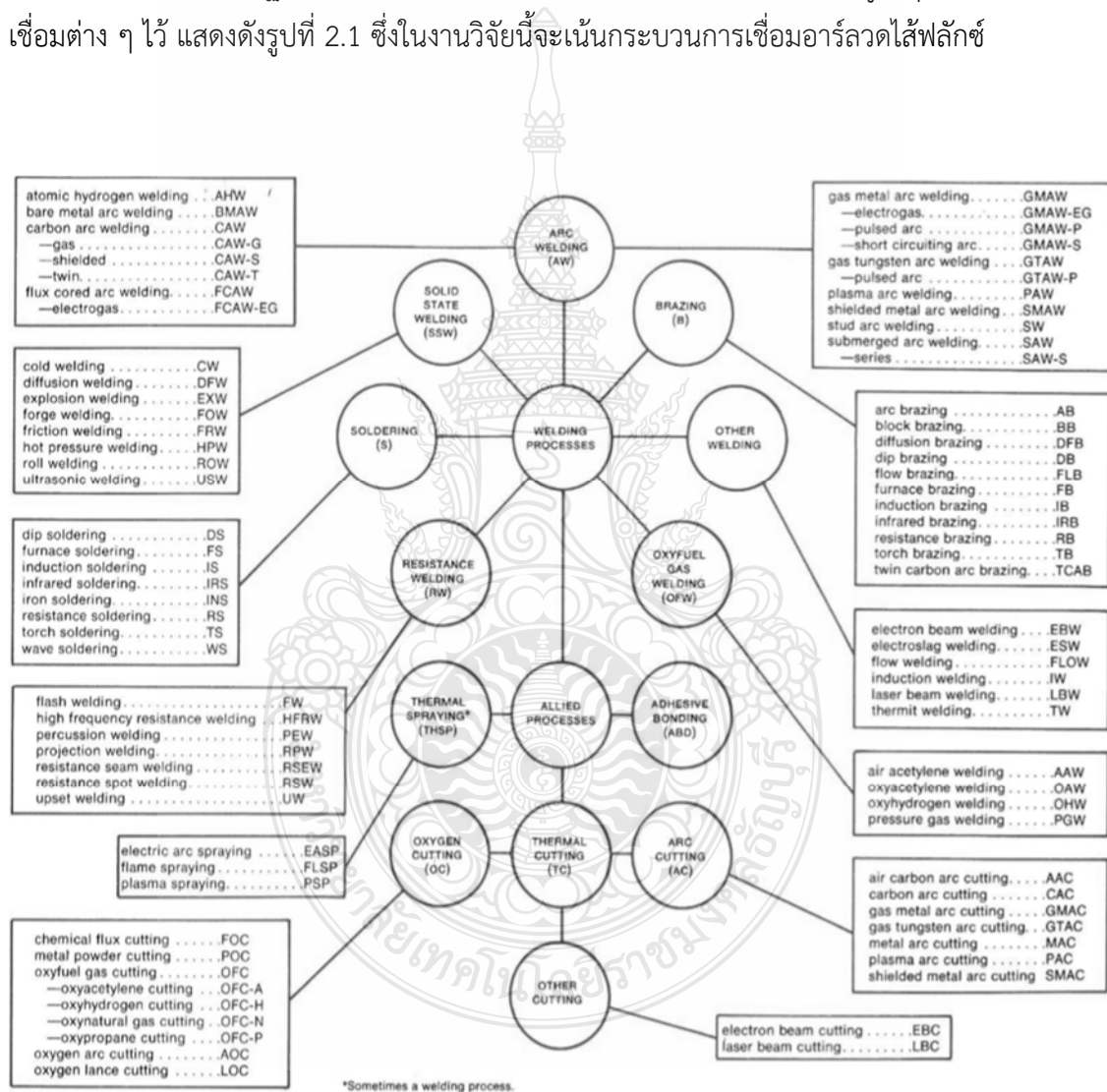
ในอุตสาหกรรมไทย การใช้งานเหล็กกล้าคาร์บอนอาจคุ้นเคยกันกับมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่นซึ่งกำหนดให้เหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับโครงสร้างเครื่องจักรซึ่งผลิตจากการขึ้นรูปร้อน เช่น การรีดร้อน หรือการตีขึ้นรูปร้อน หลังจากนั้นนำไปทำการตัด การขึ้นรูป และการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน เรียกลักษณะนี้ว่าเหล็กกล้า เหล็กกล้าแบ่งกลุ่มออกเป็น 23 กลุ่มและมีสัญลักษณ์ของเหล็กกล้า ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ส่วนผสมจากเป้าหมาย สารมลทินต่าง ๆ เช่น Cu Ni Cr Ni+Cr สำหรับกลุ่ม S09CK S15CK S20CK มีปริมาณไม่เกิน 0.25% 0.20% 0.30% และ Cu Ni Cr และ Ni+Cr สำหรับกลุ่มอื่น ๆ ไม่ควรเกิน 0.30% 0.20% 0.20% และ 0.35% เหล็กกล้า 3 กลุ่ม คือ S09SK S15K และ S20CK ใช้สำหรับจุดมุ่งหมายในการทำชุบผิวแข็งด้วยคาร์บอน (Case hardening) เหล็กกล้าควรทำการผลิตจากแท่งอินกอทเหล็กกล้าคิล (Killed steel ingot) และทำการรีดหรือตีขึ้นรูปจากแท่งอินกอทที่อัตราส่วนการตีขึ้นรูปไม่น้อยกว่า 4S [4] ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์และส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้ามาตรฐาน JIS G4051 [5]

สัญลักษณ์	ส่วนผสมทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)				
	C	Si	Mn	P	S
S10C	0.08-0.13	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S12C	0.10-0.15	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S15C	0.13-0.18	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S17C	0.15-0.20	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S20C	0.18-0.23	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S22C	0.20-0.25	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S25C	0.22-0.28	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S28C	0.25-0.31	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S30C	0.27-0.33	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S33C	0.30-0.36	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S35C	0.32-0.38	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S38C	0.35-0.41	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S40C	0.37-0.43	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S43C	0.40-0.46	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S45C	0.42-0.48	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S48C	0.45-0.51	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S50C	0.47-0.53	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S53C	0.50-0.56	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S55C	0.52-0.53	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S58C	0.55-0.61	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S09CK	0.07-0.12	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S15CK	0.55-0.61	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S20CK	0.55-0.61	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.

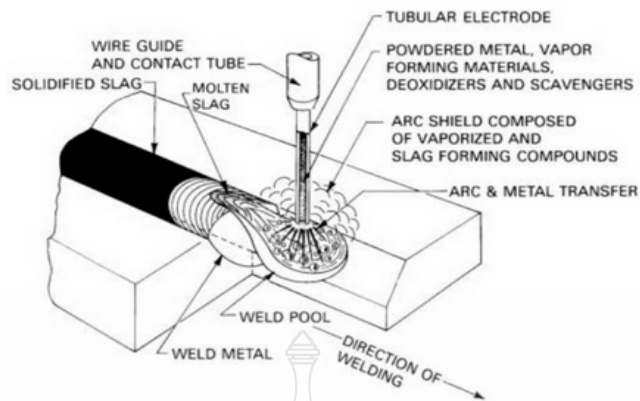
## 2.2 กระบวนการเชื่อม

กระบวนการเชื่อม [6] เป็นกระบวนการต่อโลหะหรือโลหะที่ทำให้โลหะนั้นที่เกิดจากการผสมผสานเข้าด้วยกันของเนื้อโลหะหรือเนื้อโลหะ โดยการให้ความร้อนที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิการเชื่อม และเมื่ออุณหภูมิสูงพอจะทำให้วัสดุอ่อนหรือหลอมละลายเนื้อวัสดุเข้าด้วยกัน การผสมผสานโลหะเข้าด้วยกันสามารถแบ่งการกระทำได้หลาย ๆ วิธี ซึ่งอาจจะมีการใช้หรือไม่ใช้แรงดันก็ได้และจะใช้หรือไม่ใช้ลวดเชื่อมก็ได้ สมาคมการเชื่อมของสหรัฐอเมริกา (American welding society: AWS) ได้ทำแผนภูมิสรุปแบ่งกระบวนการเชื่อมต่าง ๆ ไว้ แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเน้นกระบวนการเชื่อมอาร์ลวดไส้ฟลักซ์

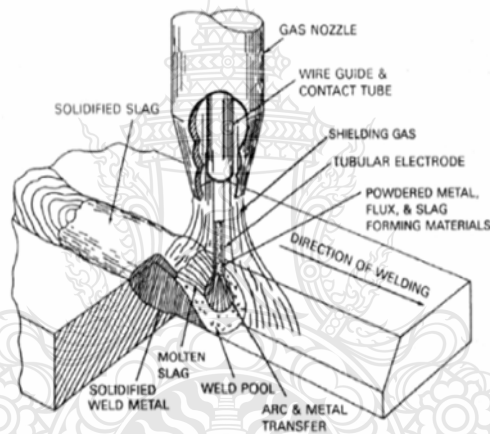


รูปที่ 2.1 การจัดกลุ่มกระบวนการเชื่อมของ American welding society [6]

2.2.1 การเชื่อมลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux cored wire arc welding: FCAW) [7, 8] มีชื่อเรียกตามมาตรฐาน AWS (American welding society) คือ การเชื่อมด้วยแก๊สปกคลุม (Gas metal arc welding: GMAW) เป็นกระบวนการเชื่อมอาร์กแบบหลอมเหลว โดยใช้ลวดอิเล็กโทรดเป็นม้วนเชื่อมอาร์กได้อย่างต่อเนื่องบนโลหะชิ้นงาน ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการอาร์กจะทำการหลอมละลายลวดเชื่อมกับโลหะชิ้นงานรวมตัวเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ในกระบวนการเชื่อมนี้สามารถใช้สารปกป้องที่มาจากฟลักซ์ที่ถูกบรรจุอยู่ในแกนท่อลวดอิเล็กโทรดซึ่งสามารถใช้แก๊สปกป้อง (Shielding gas) จากภายนอกมาใช้ร่วมหรือไม่ใช้ก็ได้ ลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ผลิตจากแถบแผ่นเหล็กกล้าบางและถูกม้วนขึ้นรูปเป็นท่อกวางภายในท่อกวางจะบรรจุฟลักซ์ที่ทำจากวัสดุหลายชนิดเข้าไว้ เมื่อนำไปเชื่อมทำการเชื่อมฟลักซ์ที่อยู่ภายในลวดก็จะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นสแลกทำหน้าที่ปกคลุมผิวหน้ารอยเชื่อม โดยลักษณะเด่นที่สำคัญของกระบวนการเชื่อมลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์เหนือกว่ากระบวนการเชื่อมอื่นก็คือ ฟลักซ์จะถูกเก็บบรรจุไว้อย่างมิดชิดภายในแกนท่อลวดเชื่อมอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นคุณสมบัติพิเศษของกระบวนการเชื่อมนี้ที่สามารถทำให้คุณภาพของการเชื่อมดีเยี่ยมเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการพัฒนาลวดเชื่อมชนิดนี้ขึ้น กระบวนการเชื่อมลวดไส้ฟลักซ์จะมีวิธีการแตกต่างกันอยู่ 2 รูปแบบในการทำหน้าที่ปกป้องคลุมเปลวอาร์กและบ่อหลอมละลายเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศในบรรยากาศ เช่น ออกซิเจนและไนโตรเจนจากบรรยากาศเข้าไปทำปฏิกิริยา วิธีการแรกคือ การสร้างแก๊สปกป้องขึ้นเอง (Self shielded flux cored arc welding: FCAW-SS) ได้จากการเกิดควันหรือไอระเหยขณะเกิดการหลอมละลายของฟลักซ์ได้รับความร้อนจากเปลวอาร์กทำหน้าที่เป็นแก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลายและเปลวอาร์กไว้เอง แสดงดังรูปที่ 2.2 ส่วนวิธีที่สองคือ ใช้แก๊สปกป้องจากภายนอก (Gas shielded flux cored arc welding: FCAW-GS) ปล่อยให้แก๊สลงปกคลุมพร้อมกับการใช้แก๊สปกป้องที่สร้างขึ้นเองจากฟลักซ์ปกคลุมบ่อหลอมละลายขณะกำลังทำการเชื่อมเพื่อป้องกันไม่ให้ให้อากาศเข้าไปทำปฏิกิริยา แสดงดังรูปที่ 2.3 กระบวนการเชื่อมอาร์กลวดไส้ฟลักซ์เป็นกระบวนการเชื่อมอาร์กกึ่งอัตโนมัติ ซึ่งมีเครื่องเชื่อมและมีชุดควบคุมการบ่อนลวดเชื่อมแบบอัตโนมัติการใช้ประโยชน์ของทั้งกรรมวิธีของกระบวนการเชื่อมลวดไส้ฟลักซ์ อาจจะซ้ำซ้อนกันบ้าง แต่อย่างไรก็ตามสมรรถนะที่จำกัดของแต่ละกรรมวิธีก็สามารถนำไปใช้ให้เหมาะสมกับงานแต่ละงานได้ สำหรับกระบวนการเชื่อมชนิดนี้นิยมนำไปใช้เชื่อมกับเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) เหล็กกล้าผสมต่ำ (Alloy steel) เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) และเหล็กหล่อ (Cast iron) การเลือกใช้แต่ละกรรมวิธีของการเชื่อมลวดไส้ฟลักซ์จะแตกต่างกันไปตามชนิดของลวดอิเล็กโทรด ในส่วนของสมบัติทางกลจะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของรอยต่อเชื่อมและการออกแบบของรอยต่อ โดยทั่วไปแล้วกรรมวิธีแบบสร้างแก๊สปกป้องขึ้นเอง จะนิยมนำไปใช้แทนกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยมือ แต่ถ้าเป็นกรรมวิธีแบบใช้แก๊สปกป้องภายนอก สามารถนำไปใช้แทนกระบวนการเชื่อมมิกและแม็กได้บ้างในบางโอกาส สำหรับข้อดีข้อเสียของกระบวนการเชื่อมนี้สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ แต่ก็ต้องเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมอื่นที่ต้องการประเมินประโยชน์ที่จะได้รับ



รูปที่ 2.2 กระบวนการเชื่อมลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ โดยการสร้างแก๊สปกป้องขึ้นเอง (FCAW-SS) [7]



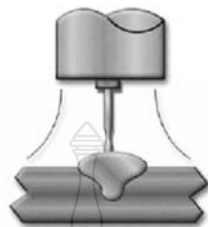
รูปที่ 2.3 กระบวนการเชื่อมลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ โดยใช้แก๊สปกป้องจากภายนอก (FCAW-GS) [7]

2.2.2 การส่งถ่ายน้ำโลหะ (Metal transfer) การส่งถ่ายน้ำโลหะ หมายถึง การที่ลวดเชื่อมได้รับความร้อนจนเกิดการหลอมตัวมีลักษณะคล้ายกับหยดน้ำแล้วหลุดออกจากปลายลวดเชื่อมผ่านการอาร์กเข้าสู่บริเวณการหลอมละลายของโลหะชิ้นงาน ซึ่งการส่งถ่ายน้ำโลหะได้นั้นจะเกิดจากแรงกระทำต่อหยดโลหะที่ปลายลวดเชื่อม โดยมีปฏิกริยารวมกันระหว่างแรงและส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม ชนิดของแก๊สคลุม กระแสไฟเชื่อม แรงดันเชื่อม ขนาดของลวดเชื่อมและแรงที่กระทำต่อหยดโลหะ การส่งถ่ายน้ำโลหะสามารถแบ่งออกได้ 3 ลักษณะ คือ

2.2.2.1 การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบลัดวงจร (Short circuit) การส่งถ่ายน้ำโลหะนี้จะเกิดขึ้นเมื่อปลายลวดเชื่อมและโลหะชิ้นงานถูกทำให้เกิดการอาร์กและมีอุณหภูมิสูงพอที่จะหลอมปลาย

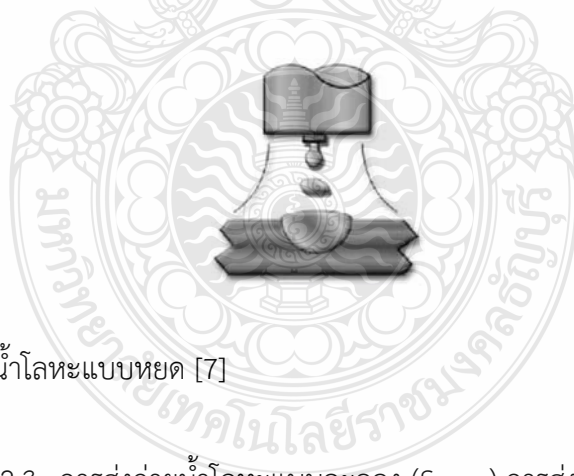


ลวดเชื่อมให้มีลักษณะเป็นหยดโลหะขนาดเล็ก ขณะเดียวกันลวดเชื่อมก็จะถูกป้อนเข้าสู่บริเวณที่มีการหลอมละลายด้วยอัตราเร็วสูงทำให้หยดโลหะบนปลาย ลวดเชื่อมสัมผัสกับบริเวณที่มีการหลอมละลายก่อนจะแยกออกจากปลายลวดเชื่อม ดังแสดงรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบลัตวงจร [7]

2.2.2.2 การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบหยด (Globular) การส่งถ่ายน้ำโลหะนี้จะเริ่มเมื่อปลายลวดเชื่อมถูกหลอมเป็นหยดโลหะและเกิดการก่อตัว เพิ่มขนาดใหญ่ขึ้นกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมประมาณ 1.5 หรือ 2 เท่า ก่อนจะหลุดจากปลายลวดเชื่อมแล้ว การส่งถ่ายน้ำโลหะผ่านการอาร์กเข้าสู่บริเวณที่มีการหลอมละลายด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิว ซึ่งจะทำให้อัตราการเติมเนื้อโลหะมากและมีความร้อนสูงกว่าการถ่ายโอนแบบลัตวงจร แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบหยด [7]

2.2.2.3 การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบละออง (Spray) การส่งถ่ายน้ำโลหะนี้จะเริ่มขึ้นเมื่อปลายลวดเชื่อมถูกหลอมแล้วก่อตัวเป็นหยดโลหะขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อม หยดโลหะจะรีวเล็กลงตรงส่วนที่อยู่ระหว่างปลายลวดเชื่อมและหยดโลหะนี้จะถูกแยกตัวหรือถูกบีบให้หลุดออกจากปลายลวดเชื่อมด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบละออง [7]

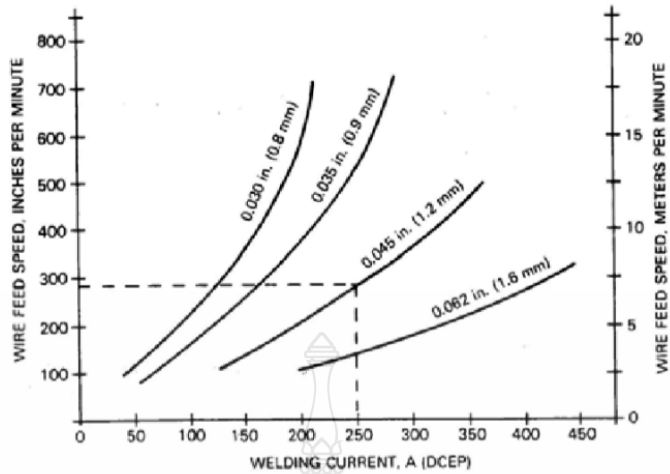
2.2.2.4 การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบพัลส์ (Pulse Spray Transfer) การส่งถ่ายน้ำโลหะนี้จะเกิดขึ้นเมื่อกระแสพัลส์ถึงระดับสูงสุดหลังจากถ่ายโอนหยดโลหะแล้วกระแสจะลดลงต่ำสุดตามที่ตั้งไว้ กระแสต่ำช่วยคงให้การอาร์กเกิดอยู่ตลอดเวลา ช่วงจังหวะนี้การถ่ายโอนโลหะไม่เกิดขึ้น การพัลส์ของกระแสส่งแล้วต่ำลงจะมีผลต่อการควบคุมปริมาณความร้อนเข้าสู่งานเชื่อมโดยความร้อนเฉลี่ยต่ำกว่า การถ่ายโอนแบบละออง จึงเหมาะกับการเชื่อมงานในทุกตำแหน่งท่าเชื่อม งานบิตตัวน้อย สามารถใช้ลวดเชื่อมขนาดใหญ่ได้และการถ่ายโอนหยดโลหะผ่านการอาร์กยังคงเป็นหยดขนาดเล็กอยู่ แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบพัลส์ [7]

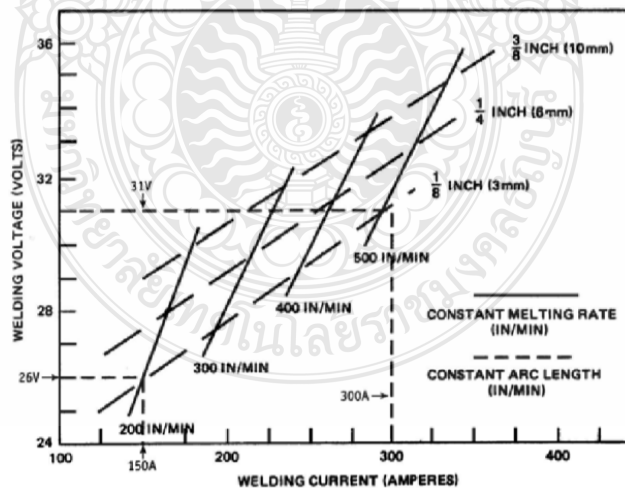
2.2.3 ตัวแปรของการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดไส้ฟลักซ์ที่สำคัญและมีผลต่อการหลอมละลายลึก (Penetration) รูปร่างทางเรขาคณิตของแนวเชื่อม (Bead geometry) และคุณภาพโดยรวมของแนวเชื่อม มีดังนี้

2.2.3.1 กระแสไฟเชื่อม (Welding Current) คือ กำลังไฟฟ้าที่เครื่องเชื่อมผลิตออกมาและนำไปใช้ในการเชื่อม ซึ่งจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมกล่าวคือ ถ้าปรับความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมให้สูงขึ้นกระแสไฟเชื่อมก็จะสูงขึ้นด้วย แต่ถ้าปรับความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมให้ต่ำลงกระแสไฟเชื่อมก็จะต่ำลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟเชื่อมกับความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม [7]

2.2.3.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในการอาร์ก (Arc voltage) เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการอาร์กในขณะทำการเชื่อม ถ้าระยะการอาร์ก (Arc length) คงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าในการอาร์กก็จะคงที่ด้วย แต่แรงเคลื่อนไฟฟ้าในการอาร์กจะมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟเชื่อมกล่าวคือ ถ้ากระแสไฟเชื่อมสูงขึ้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าในการอาร์กก็จะสูงขึ้นด้วย แต่ถ้ากระแสไฟเชื่อมต่ำลง แรงเคลื่อนไฟฟ้าในการอาร์กก็จะต่ำลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟเชื่อมกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าในการอาร์ก [7]

2.2.3.3 ความเร็วในการเชื่อม (Travel speed) เป็นความเร็วที่อาร์กเกิดขึ้นตลอดตามแนวยาวของชิ้นงาน ความเร็วเชื่อม กระแสเชื่อม และแรงดันอาร์กมีผลต่อความร้อนที่ให้กับงานเชื่อม ความเร็วเชื่อมมีผลต่อรูปร่างแนวเชื่อมและการซึมลึก

2.2.3.4 ขนาดของลวดเชื่อม (Electrode size) จะมีผลต่อรูปร่างของแนวเชื่อมเนื่องจากลวดเชื่อมที่มีขนาดโตจะต้องใช้กระแสไฟเชื่อมขั้นต่ำมากกว่าลวดเชื่อมที่มีขนาดเล็กเพื่อใช้สำหรับการส่งถ่ายน้ำโลหะ

## 2.3 ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง

ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง [9, 10] สามารถเลือกใช้ตามลักษณะเฉพาะที่มาตรฐานลวดเชื่อมกำหนดไม่ว่าจะเป็น ลวดเชื่อมพอกผิวแข็งตามมาตรฐานของประเทศอเมริกาใช้ ANSUAWS A5.13-80 มาตรฐานของ ญี่ปุ่นใช้ JIS Z 3326-1991 มาตรฐานของประเทศเยอรมันนี้ใช้ DIN 8555 Part I November 1983 ซึ่งแต่ละมาตรฐานก็แบ่งการใช้งานเป็นกลุ่มของโลหะที่ใช้งาน ที่แตกต่างกัน หรือใกล้เคียงกัน ในโครงการวิจัยอุตสาหกรรมนี้จะขอกกล่าวถึงลวดเชื่อมพอกผิวแข็งตามมาตรฐานของประเทศเยอรมันนี้ โดยมาตรฐานดังกล่าวได้แบ่งลักษณะของลวดเชื่อมพอกผิวแข็งตามลักษณะการเชื่อม แบ่งกลุ่ม ประเภทของเนื้อแนวเชื่อมได้ดี แบ่งประเภทของโลหะเติม แบ่งระดับความแข็ง และลักษณะการเขียน สัญลักษณ์เพื่อนำไปใช้งาน ดังนี้

มาตรฐานลวดเติมที่ใช้สำหรับพอกผิวของเยอรมัน (DIN 8555 Part I November 1983) มาตรฐาน ลวดเชื่อมเติมประกอบด้วยเส้นลวด (Filler rods) แท่งลวด (Filler rods) ลวดอิเล็กโทรด (Wire electrodes) และลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์ (Cover electrode) ซึ่งลวดเติมทำด้วยเหล็กกล้าไม่ผสมเหล็กกล้าผสม โลหะผสมแข็ง โลหะแข็งและโลหะผสมนอกกลุ่มเหล็กที่ใช้สำหรับพอกผิวโลหะเหล็ก

2.3.1 การแบ่งประเภทลวดเติม Rod และ Wire แบ่งประเภทตามส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และไส้ฟลักซ์ จะแบ่งประเภทตามสมบัติเคมีของเนื้อเชื่อม

2.3.1.1 โลหะเติมประเภทที่มีปริมาณเหล็กสูง แบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้

1) Alloy group 1 โลหะเติมกลุ่มนี้ใช้สำหรับเชื่อมพอกผิวเหล็กกล้าไม่ผสมหรือเหล็กกล้าผสมต่ำหรือบริเวณที่ไม่ต้องการความแข็งของเนื้อเชื่อมพิเศษ ในกรณีเนื้อเชื่อมจะไม่สามารถต้านทานการสึกหรอ และเนื้อ เชื่อมยังสามารถกลึงแต่งด้วยเครื่องจักร ได้อีกด้วย การนำไปใช้งาน: การเชื่อมพอกเนื้อเชื่อมอ่อน การเติมเนื้อและการเชื่อมรองพื้น

2) Alloy group 2 ในโลหะเติมกลุ่มนี้มีความต้านทานการสึกหรอดีกว่าโลหะผสมกลุ่ม 1 เพราะว่าโลหะเติมกลุ่มนี้มี โครงสร้างพื้นฐานแข็งกว่าและประกอบด้วยคาร์ไบด์ในเนื้อเชื่อม โดยปกติแล้วไม่สามารถกลึงแต่งเนื้อเชื่อมด้วยเครื่องจักรได้ การนำไปใช้งาน: ใช้เชื่อมพอกล้อวิ่ง

3) Alloy group 3 โลหะเติมกลุ่มนี้โดยทั่วไปต้องการเนื้อเชื่อมที่มีความแข็งสูงที่อุณหภูมิสูง โดยปกติเนื้อเชื่อมจะมีธาตุ W Cr และในบางครั้งจะผสม Mo Ni V และ Co อีกด้วย โดยทั่วไปเนื้อเชื่อมมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ เนื้อเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนมาแล้วสามารถกลึงแต่งด้วยเครื่องจักรได้มีความแข็งขณะร้อน (Red hardness) จนถึงอุณหภูมิ 500 องศา การเชื่อมต้องให้ความร้อนก่อนเชื่อมและให้เย็นตัวช้า ๆ เพื่อป้องกันการแตกร้าว การนำไปใช้งาน: เครื่องมือใช้งานที่อุณหภูมิสูง (Hot Working) เป็นต้น

4) Alloy group 4 โลหะเติมกลุ่มนี้มีส่วนผสมของธาตุคล้ายกับเหล็กไฮสปีด (High speed steel) เนื้อเชื่อมมีส่วนผสมของธาตุ W Mo Cr และ V และในหลายกรณีจะเติมธาตุ C ลงไปด้วย การกลึงแต่งด้วยเครื่องจักรจะทำได้เฉพาะเนื้อเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนแล้วเท่านั้น ยกเว้นจะกลึงแต่งด้วยการเจียรระโน การชุบแข็งไม่มีความจำเป็น แต่ความแข็งจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีการ Temper เนื้อเชื่อม 1 หรือ 2 ครั้ง การให้ความร้อนก่อนและหลังเชื่อมต้องทำตามคู่มือของผู้ผลิตการนำไปใช้: เครื่องมือตัด Mandrels ไขมีดตัด คมดอกเจาะ เป็นต้น

5) Alloy group 5 โลหะเติมกลุ่มนี้มีส่วนผสมโครเมียมสูง 5-30 เปอร์เซ็นต์ และมีคาร์บอนไม่เกิน 0.2 เปอร์เซ็นต์ เนื้อเชื่อมมีความแข็ง เพิ่มขึ้นด้วยการมีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ การเชื่อมพอกกระทำได้บนโลหะที่มีส่วนผสมคล้ายกันและบนเหล็กกล้าโครงสร้างที่มีความแข็งแรงต่ำอีกด้วย โลหะเติมชนิดนี้ไม่อาจกลึงแต่งด้วยเครื่องจักรได้เสมอไป การให้ความร้อนก่อนและหลังเชื่อมกระทำตามคู่มือจากผู้ผลิต การนำไปใช้งาน: เชื่อมพอกผิวงานต่อต้านการเกิดสเกล (บรรยากาศแก๊สที่มีกำมะถัน) และเมื่อมี โครเมียมผสม 12 เปอร์เซ็นต์ หรือมากกว่าและยังจะป้องกันการเกิดสนิมอีกด้วย ได้แก่ งานชิ้นส่วนวาล์ว ชิ้นส่วนของเตา เป็นต้น

6) Alloy group 6 โลหะเติมกลุ่มนี้คล้ายกับกลุ่มที่ 5 แต่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่สูง มีความแข็งสูงกว่า 500 HB และมี ความต้านทานต่อการเกิดสนิมต่ำเนื้อเชื่อมมีความแข็งในอากาศ (Air hardening) และการทำงานทำได้ เฉพาะการเจียรระโนเท่านั้น การเชื่อมควรให้ความร้อนก่อนเชื่อม 200-300°C การนำไปใช้: เครื่องมือตัด ไขตัดและลูกรีดสำหรับการรีดเย็น เป็นต้น

7) Alloy group 7 โลหะเติมชนิดนี้มีเนื้อเชื่อมคล้ายเหล็กกล้าแมงกานีส และยังมีธาตุอื่น ๆ ประกอบอีกดัง ตาราง 2.3 เนื้อเชื่อมนี้เหมาะกับการใช้งานประเภทที่ต้องการความแข็งเพิ่มขึ้นจากการใช้งาน (Work hardening) คือ จะต้องมีความแข็งแรงทำจึงจะเกิดความแข็งหรือความแข็งแรงจากการใช้งาน ความแข็งเริ่มจาก 180 จนถึง 550 HB แต่ไม่เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความต้านทานต่อการสึกหรอจากการเสียดสี เนื้อเชื่อมโดยปกติจะไม่กลึงแต่งด้วยเครื่องจักร ชิ้นงานที่นำมาในขณะที่เชื่อมจะต้องรักษาอุณหภูมิให้เย็นเท่าที่จะเป็นไปได้ความเหนียว (Toughness) การนำไปใช้งาน: เชื่อมเสริมผิวในกรณีพื้นที่ใหญ่ ได้แก่ แผ่นกันสึก เป็นต้น

8) Alloy group 8 โลหะเติมกลุ่มนี้เนื้อเชื่อมมีความเหนียวสูงกว่ากลุ่ม 7 ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นจากการใช้งาน (Work hardening) ได้ดี มีความต้านทานต่อการเกิดสนิมไม่ต้องทำการอบชุบ กลึงแต่งด้วยเครื่องจักรได้ การนำไปใช้งาน: ส่วนประกอบของพื้นบดหินที่รับภาระไม่รุนแรง รางรถไฟ และชิ้นส่วนของกังหัน เป็นต้น

9) Alloy group 9 โลหะเติมกลุ่มนี้มีส่วนผสมเทียบเท่าลวดเชื่อม Ni Cr ออสเทนไนต์สามารถใช้เชื่อมกับเหล็กกล้าชนิดเดียวกันเหล็กโครเมียมและเหล็กกล้าโครงสร้างทั่วไป เนื้อเชื่อมมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนดี เนื้อเชื่อมสามารถทำการขึ้นรูปเย็นและมีความเหนียวสูงยังสามารถกลึงแต่งด้วยเครื่องจักรได้ การนำไปใช้งาน: ใช้เชื่อมพอกงานที่ทนต่อการกัดกร่อน เป็นต้น

10) Alloy group 10 เนื้อเชื่อมที่ได้จากลวดเชื่อมกลุ่มนี้คล้ายกับเหล็กกล้าโครเมียมที่เพิ่มคาร์บอนและจะเกิดขึ้นหรือไม่เกิดการก่อตัวของคาร์ไบด์ก็ได้ ปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ 2-7 เปอร์เซ็นต์ ส่วนโครเมียมไม่เกิน 40 เปอร์เซ็นต์ เนื้อเชื่อมจะมีคาร์ไบด์แทรกอยู่ในโครงสร้างออสเทนไนต์ ความแข็งของเนื้อเชื่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอน แต่จะไม่เพิ่มด้วยการอบชุบด้วยความร้อน เนื้อเชื่อมจะกลึงแต่งได้ด้วยการเจียรระโนเท่านั้น ถ้าให้ความร้อนเชื่อมจะช่วยลดความไวต่อการแตกร้าว เนื้อเชื่อมทนต่อการสึกหรอ การนำไปใช้งาน: ใช้สำหรับการเชื่อมซ่อมงานในเหมืองแร่และโรงงานเหล็กเชื่อมพอกชิ้นส่วนจักร ก่อสร้าง เครื่องจักรกลเกษตรและพื้นบดโลหะผง เป็นต้น

### 2.3.1.2 โลหะเติมที่มีปริมาณเหล็กต่ำแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้

1) Alloy group 20 โลหะเติม Co-Cr มีความต้านทานต่อการสึกหรอ การกัดกร่อนและการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงดี สมบัติเด่นอีกประการหนึ่งคือคงความแข็งที่อุณหภูมิสูงซึ่งสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงไม่เกิน 600 องศา การเชื่อมจะต้องให้ความร้อนก่อนเชื่อม 400-600 องศา และหลังจากนั้นให้เป็นตัวช้า ๆ และไม่จำเป็นต้องการอบชุบด้วยความร้อน การนำไปใช้งาน: งานประกอบทุกชนิด บ่าวาล์วไอเสียของเครื่องยนต์สันดาปภายในบ่าวาล์ว เครื่องจักรไอน้ำ เพล่าปั๊มและชิ้นงานที่มีการกัดกร่อนและการเซาะกร่อนรุนแรง (Erosion) เป็นต้น

2) Alloy group 21 สมบัติของเนื้อเชื่อมที่ได้จากโลหะเติมกลุ่มนี้ ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของโครเมียมคาร์ไบด์และทังสเตนคาร์ไบด์ โดยปกติจะนำผงโลหะโครเมียมคาร์ไบด์และทังสเตนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปเป็น Rod หรือ Core wire เพื่อนำมาเชื่อมเนื้อเชื่อมมีความสามารถต้านทานการสึกหรอดี ส่วนความเหนียวขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของคาร์ไบด์ที่ผสมอยู่ในวัสดุพื้นที่ทำหน้าที่ยึดเกาะ การเชื่อมจะต้องให้ความร้อนก่อน เชื่อม 400-600 องศา และไม่ต้องทำการอบชุบด้วยความร้อน การนำไปใช้งาน: เครื่องมือและชิ้นส่วนเครื่องจักรที่นำไปใช้กับงานขุดหิน ดอกเจาะและสกรูอัด สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น

3) Alloy group 22 เนื้อเชื่อมที่ได้จากโลหะเติม Ni-Cr-B มีความต้านทานต่อการสึกหรอที่เกิดจากการขัดสีของโลหะ และ มีความแข็งที่อุณหภูมิสูง ความแข็งที่อุณหภูมิห้องเพิ่มขึ้น

เมื่อเพิ่มปริมาณ C Cr และ B คือความแข็ง ตั้งแต่ 30-60 HRC เนื้อเชื่อมสามารถใช้งานกับอุณหภูมิสูง จนถึง 50 องศา การเชื่อมจะต้องให้ความร้อน ก่อนเชื่อม 400 องศา และไม่ต้องทำการอบชุบด้วยความร้อน การนำไปใช้งาน: วาล์ว สกรูเกลียวหนอน พลาซึมคอนกรีตเหลว เป็นต้น

4) Alloy group 23 โลหะเติมชนิด Ni-Cr-Mo มีสมบัติในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ๆ ได้ดี การเพิ่มความแข็งแรงทำได้โดยการอบชุบด้วยความร้อนที่ถูกต้อง การนำไปใช้งาน: เครื่องมือสำหรับงานขึ้นรูปร้อน หน้าสัมผัสของบ่าวาล์วในอุตสาหกรรมเคมีและใช้เชื่อมเสริมใบมีดตัดงานที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น

### 2.3.1.3 โลหะเติมนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous filler metals) แบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้

1) Alloy group 30 โลหะเติมกลุ่มนี้เป็นโลหะผสมทองแดง-ดีบุก ประกอบด้วย ดีบุก 6-12 เปอร์เซ็นต์ และฟอสฟอรัส 0.5 เปอร์เซ็นต์ ความแข็งของเนื้อเชื่อมพอกอยู่ระหว่าง 60-130 HB และขึ้นอยู่กับปริมาณผสมของ Sn โลหะผสมกลุ่มนี้คือ ความต้านทานต่อการสึกหรอแบบการไถลระหว่างผิวสูง (Sliding wear) มีความต้านทานต่อการสลายเกลือและกรด การนำไปใช้งาน: เปลือกแบริ่งเพลลา เกจวาล์ว วาล์วเสื่อหุ้ม เฟืองหนอนและเฟืองเฉียง เป็นต้น

2) Alloy Group 31 โลหะเติมกลุ่มนี้มีอลูมิเนียมผสมหลัก 5-15% สำหรับเนื้อโลหะผสม 2 ธาตุ จะมีความแข็ง 100-200 HB และมีความต้านทานต่อการกัดกร่อน สมบัติทางกล ความต้านทานต่อการกัดกร่อนและสมบัติต่อการนำไปทำงานขึ้นกับปริมาณของธาตุผสมที่เติมลงไป ได้แก่ Fe N และ Mn การนำไปใช้งาน: เครื่องกรองน้ำ เครื่องเคมีและตัวระบายความร้อน เป็นต้น

3) Alloy group 32 โลหะเติมกลุ่มนี้เป็นโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล ที่ประกอบด้วยนิกเกิล 5-45 เปอร์เซ็นต์ เหล็กผสมจนถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์ และแมงกานีสผสมจนถึง 3.5 เปอร์เซ็นต์ ความแข็งสูงขึ้นไปจนถึง 160 HB เนื้อเชื่อมมีความต้านทานต่อความเค้น (Stress) การกัดกร่อน (Corrosion) การแตกร้าว (Cracking) โดยเฉพาะต้านทานต่อน้ำทะเล การนำไปใช้งาน: เครื่องกลั่นน้ำ ท่อน้ำทะเล คอนเดนเซอร์และตัวระบายความร้อน เป็นต้น

2.3.2 สัญลักษณ์ลวดเชื่อม สัญลักษณ์ลวดเชื่อมมุ่งหวังเพื่อให้ความสะดวกในการเลือกการใช้ลวดเติม และยังบ่งชี้ถึงสมบัติของ ผิวเนื้อเชื่อมที่ได้หลังจากการเชื่อม โดยสัญลักษณ์ลวดเชื่อมแบ่งได้ดังนี้

#### 2.3.2.1 รหัสเกี่ยวกับโลหะเติม เป็นรหัสแสดงกระบวนการเชื่อม

- G = การเชื่อมแก๊ส
- E = การเชื่อมอาร์คด้วยมือ
- MF = Metal-Arc Welding ใช้ลวดไส้ฟลักซ์
- TIG = การเชื่อม TIG
- MSG = Metal Shielding Gas Welding
- UP = การเชื่อมใต้ฟลักซ์

### 2.3.2.1 รหัสแสดงกลุ่มของธาตุผสม ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ประเภทของโลหะเติมลวดเชื่อมมาตรฐานเยอรมัน DIS 8555 [9]

กลุ่มโลหะผสม	ชนิดของโลหะเติมหรือเนื้อเชื่อม
1	เหล็กกล้าไม่ผสมมีคาร์บอนสูงขึ้นไปจนถึง 4% หรือเหล็กกล้าผสมต่ำที่มีคาร์บอนสูงจนถึง 0.4% และธาตุผสมอื่น ๆ รวมกันไม่เกิน 5% ได้แก่ ธาตุ Cr Mn Mo Ni
2	เหล็กกล้าไม่ผสมมีคาร์บอนผสมมากกว่า 0.4% หรือเหล็กกล้าผสมต่ำมีคาร์บอนมากกว่า 0.4% และธาตุผสมอื่น ๆ รวมกันไม่เกิน 5% ได้แก่ ธาตุ Cr Mn Mo Ni
3	โลหะผสมที่มีสมบัติของเหล็กกล้าใช้งานร้อน (Hot working)
4	โลหะผสมที่มีสมบัติของ High speed steel
5	โลหะผสมที่มีโครเมียมมากกว่า 5.0% และคาร์บอนผสมต่ำไม่เกิน 0.2%
6	โลหะผสมที่มีโครเมียมมากกว่า 5% และมีคาร์บอนผสมสูงประมาณ 0.2%-2.0%
7	โลหะแมงกานีส (ออสเทนไนต์) แมงกานีส 11%-18% คาร์บอนมากกว่า 0.5% และนิกเกิลไม่เกิน 3.0%
8	Cr-Ni-Mn (ออสเทนไนต์)
9	เหล็กกล้า Cr-Ni (มีความต้านทานต่อสนิม กรดและความร้อน)
10	เหล็กกล้าผสมคาร์บอนสูงและโครเมียมสูง โดยไม่ผสมคาร์ไบด์
20	โลหะผสมโคบอลต์หลัก ธาตุผสม Cr-W อาจเติมหรือไม่เติม Ni Mo
21	โลหะผสมคาร์ไบด์ในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ อัดโลหะผง หล่อหรือแกนลวด
22	โลหะผสมนิกเกิลหลัก ธาตุผสม Cr Cr-B
23	โลหะผสมนิกเกิลหลัก ธาตุผสม Mo อาจผสมหรือไม่ผสมโครเมียม

รหัสอักษรระบุกรรมวิธีการผลิตโลหะเติมกำหนดด้วยสัญลักษณ์ต่อไปนี้

- GW = การรีด  
 Go = การหล่อ  
 GZ = การดึงลดขนาด  
 GS = การอัดด้วยโลหะผง  
 GF = แกนลวดมีไส้  
 UM = แกนลวดมีฟลักซ์หุ้มภายนอก



2.3.3 สมบัติของธาตุผสม [11] ในลวดเชื่อมพอกแข็งสมบัติที่สำคัญของวัสดุที่มีอยู่ในลวดเชื่อมพอกแข็งแต่ละชนิดคือ ต้องมีความแข็งและทนต่อการสึกหรอตลอดจนมีความเหนียวพอสมควร ขึ้นรูปหรือตกแต่งผิวได้ง่าย ซึ่งสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับธาตุผสมต่าง ๆ ที่เติมลงไป ในวัสดุลวดเชื่อมพอกแข็งธาตุผสมต่าง ๆ เหล่านี้มีผลทำให้เกิดโครงสร้างแบบต่าง ๆ เช่น มาร์เทนไซต์ ออสเทนไนท์ คาร์ไบด์ โครงสร้างที่เกิดขึ้นหลังจากการเชื่อมพอกแข็งนั้น จะทำให้วัสดุบางชนิดที่หลอมรวมกับออสเทนไนท์จะช่วยให้เพิ่มความแข็ง เมื่อนำเหล็กเหล่านั้นไปชุบแข็ง ธาตุบางชนิดจะทำให้เกิดคาร์ไบด์ ซึ่งสามารถเพิ่มความต้านทานการสึกหรอ การเลือกลวดเชื่อมพอกแข็งเพื่อนำมาใช้ดีที่สุดนั้นต้องมีความรู้เรื่องสมบัติของธาตุต่าง ๆ ที่เติมและผลที่เกิดขึ้น สรุปได้ดังนี้

2.3.3.1 คาร์บอน (C) โดยทั่วไปไม่จัดว่าเป็นธาตุผสม แต่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่งในเหล็กกล้าและมีผลอย่างมากต่อสมบัติของเหล็ก สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของเหล็กขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนคือ ความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่อคาร์บอนเพิ่ม ความเหนียวและความยืดหยุ่นจะลดลง ทนแรงกระแทกได้น้อยแต่ทนต่อการสึกหรอได้ดี ตัดแต่งได้ยากขึ้น ความสามารถในการเชื่อมลดลง

2.3.3.2 โครเมียม (Cr) โครเมียมในเหล็กกล้าคาร์บอนจะช่วยเพิ่มความแข็งขณะที่ความเหนียวและการทนต่อแรงกระแทกลดลง ความสามารถในการชุบแข็งและความต้านทานการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียม หากใช้ร่วมกับทั้งสแตนจะให้ผลมากขึ้น

2.3.3.3 ทังสเทน (W) ทังสเทนเมื่อผสมลงในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางจะทำให้เหล็กมีความสามารถในการทำให้แข็งดีขึ้นเล็กน้อย มีสมบัติใกล้เคียงกับโครเมียมเมื่อใช้ปริมาณมากจะทำให้เกิดคาร์ไบด์ซึ่งแข็งสูงสุด ทนทานต่อการกัดกร่อนและความต้านทานต่อการสึกหรอได้ดีที่สุด

2.3.3.4 นิกเกิล (Ni) ช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความแข็ง ทนทานต่อการกัดกร่อน ความต้านทานแรงกระแทกและความสามารถในการชุบแข็งโดยลดความเหนียวทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณที่แทรกเข้าไปในเนื้อเหล็กธาตุชนิดนี้ไม่ค่อยได้ใช้โดยลำพังมักใช้ร่วมกับโครเมียมและโมลิบดีนัม เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งตลอดจนยังไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน

2.3.3.5 โมลิบดีนัม (Mo) มีสมบัติคล้ายทังสเทน แต่ให้ผลมากเป็นสองเท่า ช่วยเพิ่มความสามารถและความลึกในการชุบแข็ง ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงและความแข็งแรงจากการอบคืนตัวได้ เช่นเดียวกับโครเมียม ช่วยให้เกิดการจับตัวของคาร์ไบด์อย่างแน่นหนาและเป็นธาตุที่ช่วยไม่ให้เกิดการแตกร้าวได้ง่าย ตลอดจนใช้ทำชิ้นงานอื่น ๆ ที่ต้องการความต้านทานความร้อนและต้านทานการกัดกร่อนได้ดี

2.3.3.6 วาเนเดียม (V) ช่วยใหม่เม็ดเกรนมีความละเอียดและแน่น เพิ่มความสามารถในการชุบแข็งและความแข็งเมื่อได้รับความร้อน ใช้ร่วมกับโครเมียมหรือทังสเตนทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นตลอดจนให้รูปแบบของคาร์ไบด์ที่แข็งแรง

2.3.3.7 แมงกานีส (Mn) สมบัติคล้ายนิกเกิลมีความแข็งแต่เปราะและช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งมีความต้านทานการสึกหรอและการเสียรูปในระหว่างการอบชุบด้วยความร้อน

2.3.3.8 ไนโอเบียม (Nb) เมื่อนำไนโอเบียมผสมกับเหล็กจะทำให้เหล็กนั้นไม่เกิดสนิมและทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี อีกทั้งยังทำให้เพิ่มความแข็งแรงและทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

2.3.3.9 โบรอน (B) โบรอนเมื่อนำมาผสมเหล็ก จะทำให้เหล็กที่ถูกหลอมละลายและปล่อยให้เย็นตัวเกิด นิวเคลียสของเฟอร์ไรต์ได้ช้าและการเปลี่ยนแปลงไปเป็นเฟสออสเทนไนต์ก็ค่อนข้างช้าด้วยเช่นกัน แต่ยังคงเพิ่มความสามารถในการทำให้แข็ง นอกจากนี้โบรอนยังช่วยดึงโครเมียมรวมตัวกับคาร์บอนเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ได้อีกด้วย

2.3.4 ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux cored wire) สำหรับพอกผิวแข็งเป็นลวดเชื่อมตามมาตรฐาน DIN 8555: MF 6-GF-60GP ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร ส่วนผสมทางเคมีแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ MF-6-GF-60GP

ธาตุ	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
MF 6-GF-60GP	Balance	0.54	0.76	2.31	0.01	0.02	7.92	0.51	0.32



รูปที่ 2.10 ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับเชื่อมพอกผิวแข็ง

## 2.4 การควบคุมคุณภาพของการพอกผิวโลหะ

การควบคุมคุณภาพของการพอกผิวโลหะ [10] สิ่งที่จะควรพิจารณาอย่างระมัดระวังต่อมาก็คือ การผสมของเนื้อโลหะและอัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อม ทั้งนี้เพื่อที่จะก่อให้เกิดแนวเชื่อมที่พอกผิวนั้น มีคุณสมบัติที่ทนต่อการเสียดสีและการกระแทกได้ตามที่ต้องการ ซึ่งการผสมของโลหะพอกผิวเข้ากับโลหะ ขึ้นงาน (Base Metal) นอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของเนื้อโลหะผสมและกรรมวิธีการเชื่อมแล้วยังจะขึ้นอยู่กับ ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ ปัจจัยทางด้านเทคนิคอื่น ๆ ของคุณภาพงานเชื่อมพอกผิวนั้น ซึ่งได้แก่ การเตรียมผิวขึ้นงาน การให้ความร้อนก่อนเชื่อมพอกผิว การพอกเพิ่มชั้นผิว รูปแบบของการเชื่อม การผสม และอัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อม เป็นต้น ดังมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 การเตรียมผิวงาน เพื่อการพอกผิวโลหะนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อขจัดไขมัน จารบี ผง ผุ่นละอองและสนิม เพื่อให้ผิวสะอาดให้ปราศจากสิ่งสกปรกต่าง ๆ เหล่านั้น การขจัดไขมัน จารบี ผง ผุ่นละอองและสนิม ทำได้โดยการล้างออกด้วยสารละลายชนิดต่าง ๆ จะทำได้โดยการใช้แปรงลวด หรือใช้กระดาษทราย นอกจากการขจัดสิ่งสกปรกแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงรอยแตก ร้าว รอยแยกของ ผิวงานนั้น ๆ ด้วยอีกทั้งการพิจารณาถึงการเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการจับยึดของโลหะพอกผิวกับผิวงาน ในการเตรียมผิวงานในกรณีนี้ทำได้โดยการใช้การเชื่อมเซาะ (Arc gouging) เพื่อขจัดรอยแตก การเซาะร่อง เพิ่มพื้นที่ผิวการจับยึด เพื่อขจัดผิวเชื่อมพอกเก่าที่มีอยู่หรือเพื่อขจัดผิวงานที่แข็งออกไปก่อนที่จะทำการเชื่อม พอกผิวนั้น

2.4.2 การให้ความร้อนก่อนเชื่อมและการควบคุมความร้อนที่ผิวก่อนการเชื่อมแนวต่อไป การให้ความร้อนก่อนเชื่อมพอกผิวและการควบคุมความร้อนที่ผิวก่อนการเชื่อมแนวต่อไปนั้นสิ่งที่จะต้องนำมาพิจารณาเบื้องต้นคือชนิดของวัสดุที่จะทำการเชื่อมพอกผิวแข็งเช่นวัสดุเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน ปานกลาง เหล็กกล้าคาร์บอนสูง เหล็กกล้าผสมสูง ซึ่งมีความสามารถในการเชื่อมต่ำ เป็นต้น ทั้งนี้การให้ ความร้อนก่อนเชื่อมและการควบคุมความร้อนที่ผิวนั้นเพื่อป้องกันการแตกร้าวได้แนวเชื่อม ซึ่งการพิจารณา ว่าวัสดุใดจำเป็นต้องให้ความร้อนก่อนเชื่อมหรือไม่ โดยพิจารณาจากค่า Carbon Equivalents โดยนำ ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมมาพิจารณา จาก  $CE (\%) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{S}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{5}$  และนำค่าที่ได้มาพิจารณาจากตารางที่ 2.3 และ 2.4

ตารางที่ 2.5 การเลือกใช้ระดับอุณหภูมิในการอุ่นงาน (Pre-heat) ที่แปรผันกับค่า CE [10]

ค่า Carbon equivalent: CE	ระดับอุณหภูมิในการอุ่นงาน
0.02-0.45%	พิจารณาเลือก (อุ่น/ไม่อุ่น)
0.45-0.60%	200-400 °F (94-205 °C)
สูงมากกว่า 0.60%	400-700 °F (205-372 °C)

**ตารางที่ 2.6** การให้ความร้อนก่อนการเชื่อมและระหว่างชั้นแนวเชื่อม โดยพิจารณาจาก CE [10]

Type of steel	Carbon equivalents	Preheat and interpass temperature
Carbon Steel Low	0.3 Maximum	100 Maximum
Alloy Steel	Over 0.3 to 0.4 Maximum	100 Maximum
	Over 0.4 to 0.5 Maximum	150 Maximum
	Over 0.5 to 0.6 Maximum	200 Maximum
	Over 0.6 to 0.7 Maximum	250 Maximum
	Over 0.7 to 0.8 Maximum	300 Maximum
	Over 0.8	350 Maximum
High Cr Steel	Non-Applicable	400 Maximum
13% Mn Steel	Non-Applicable	No Preheat, Interpass: Fast Cooling
Cr-Ni Stainless Steel	Non-Applicable	No Preheat, Interpass: 150 Maximum

## 2.5 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การตรวจสอบในระดับมหภาคและการตรวจสอบในระดับจุลภาค

2.5.1 การตรวจสอบในระดับมหภาค (Macroscopic examination) [12] เป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาของตัวอย่างชิ้นงานโดยใช้กำลังขยายต่ำกล่าวคือ เมื่อเตรียมชิ้นงานโดยการขัดหยาบ ขัดละเอียด ขัดเงา (Polishing) และกัดกรด (Etching) แล้วสามารถตรวจสอบได้โดยตาเปล่า (Visual inspection) หรืออาจใช้กำลังขยายได้ไม่เกิน 10 เท่า จุดประสงค์ของการตรวจสอบเพื่อดูความสมบูรณ์ของบริเวณของแนวเชื่อม ลักษณะความแตกต่างของรูปร่างของแนวเชื่อม การแบ่งชั้นของแนวเชื่อม การหลอมละลายของชิ้นงาน ความกว้างและความลึกบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อน (Heat affect zone: HAZ) ตลอดจนรูปแบบของจุดบกพร่องต่าง ๆ ของแนวเชื่อม สำหรับน้ำยากัดผิวชิ้นงานเพื่อใช้ในเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาคในงานวิจัยนี้ได้กำหนดตามมาตรฐาน ASTM E407-99 [13]

2.5.2 การตรวจสอบในระดับจุลภาค (Microscopic examination) [14] เป็นการตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นงานโลหะโดยใช้กำลังขยายที่สูงขึ้นกล่าวคือ ตั้งแต่ 10 เท่าเป็นต้นไป ซึ่งอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างในระดับจุลภาคคือ กล้องจุลทรรศน์สำหรับงานทางโลหะวิทยา (Metallurgical microscope) หรือกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยจะมีกำลังขยายอยู่ระหว่าง 10-1,000 เท่า จุดประสงค์ของการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเพื่อตรวจสอบ

การกระจายตัวและลักษณะของเกรนโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal: WM) บริเวณพื้นที่  
กระทบร้อน (Heat affect zone: HAZ) และบริเวณเนื้อโลหะเดิม(Base metal)

2.5.2.1 การเตรียมชิ้นงานเพื่อนำชิ้นงานไปทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย  
กล้องจุลทรรศน์มีขั้นตอนดังนี้

1) การตัดชิ้นงานตัวอย่าง การตัดชิ้นงานที่จะนำมาตรวจสอบโครงสร้างด้วย  
กล้องจุลทรรศน์ ขณะตัดต้องไม่ให้ชิ้นงานร้อน การตัดที่นิยมใช้กันมาก เช่น เลื่อยมือ เครื่องเลื่อย ซึ่งเป็น  
วิธีที่ประหยัดและง่าย ชิ้นงานที่จะนำมาตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์นิยมเรียกกันว่า ชิ้นงาน  
ทดสอบหรือชิ้นงานตัวอย่าง (Specimens)

2) การทำเรือนชิ้นงานตัวอย่าง โดยนำชิ้นงานที่เตรียมไว้ไปทำตัวเรือน  
(Mounting) หุ้มชิ้นงานด้วยอัดเบเกไลท์ (Bagelite) หรือหล่อด้วยเรซินทั้งนี้ก็เพื่อความสะดวกในการจับถือ  
และการเตรียมชิ้นงานในขั้นตอนการขัดดูโครงสร้างก็จะสามารถทำได้สะดวกและรวดเร็วขึ้น

3) การขัดด้วยกระดาษทราย (Grinding) เป็นการปรับระนาบผิวขัดให้ได้  
ระดับเรียกว่า เป็นการขัดหยาบหรือปรับระนาบ และเป็นการขัดให้ผิวหน้าให้เรียบ เรียกว่า เป็นการขัด  
ละเอียด ในกรณีชิ้นงานทดสอบผิวหน้าไม่เรียบและเอียงอีกทั้งเป็นการลดความลึกของรอยขีดข่วนให้น้อยลง  
จนกระทั่งไม่มีรอยขีดข่วนบนผิวหน้างาน ถ้าผิวงานไม่เรียบมีรอยและเอียงจะทำให้การตรวจสอบด้วย  
กล้องจุลทรรศน์ได้ภาพที่ไม่ถูกต้องและคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง การขัดด้วยกระดาษทรายชิ้นงาน  
จะต้องทำการลบมุมลบเหลี่ยมก่อนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกระดาษทรายขาดในระหว่างการทำการขัด การขัด  
เริ่มต้นด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80-150 ในกรณีชิ้นงานทดสอบผ่านการตัดด้วยเลื่อยมือหรือเครื่องเลื่อยและ  
ขัดกระดาษทรายเบอร์150-180 ในกรณีชิ้นงานทดสอบผ่านการตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงานทดสอบ (Cutoff  
machine) การขัดด้วยกระดาษทรายมักขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ต่าง ๆ จากหยาบไปจนกระทั่งละเอียด  
ที่สุด คือ เบอร์ 80 240 320 400 600 800 1000 และ 1,200 ตามลำดับ การขัดด้วยกระดาษทรายไม่  
ควรขัดข้ามเกินสองเบอร์ เช่น ชั้นแรกขัดด้วยเบอร์ 180 ต่อไปขัดด้วยเบอร์ 400 เป็นต้น เพราะทำให้เวลา  
ในการขัดนานและรอยขีดข่วนไม่หมดการขัดด้วยกระดาษทราย ควรใช้แรงในการขัดที่พอเหมาะไม่ควรใช้แรง  
กดมากเกินไปจะทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนผิวหน้างานลึกเกินไปมีขนาดไม่สม่ำเสมอ เศษผงขัดอาจฝังอยู่ในรอยขัด  
และระนาบผิวขัดเอียงหรือบิดเบี้ยวได้ ถ้าใช้แรงกดน้อยจะทำให้การขัดซ้ำในการขัดจะใช้วิธีการขัดเปียก  
(Wet grinding) โดยให้น้ำไหลผ่านกระดาษทรายตลอดเวลา เพราะน้ำจะช่วยพัดเอาเศษผงขัดออกไปจาก  
ผิวหน้าและช่วยหล่อเย็นไม่ให้ผิวชิ้นงานทดสอบร้อน วิธีการขัดกระทำโดยจับชิ้นงานทดสอบให้ด้าน  
ผิวหน้าที่ขัดจะหันลงมาจากกระดาษทราย แล้วกดชิ้นงานด้วยแรงกดที่เท่ากันทุกด้าน เพื่อให้ผิวขัดได้  
ระนาบเดียวกันอย่างทั่วถึง รอยขัดไปในทิศทางเดียวกัน และรอยขัดมีขนาดใกล้เคียงกัน เมื่อเปลี่ยน  
กระดาษทรายแต่ละเบอร์ทิศทางการขัดต้องทำมุมกับรอยขัดของกระดาษทรายเบอร์เก่า 45-90 องศา

ทุกครั้งและขัดในทิศทางเดียวกันตลอดจนกว่าจะเปลี่ยนเบอร์ใหม่ จนกระทั่งตรวจสอบผิวขัดไปทางเดียวกัน ไม่มีรอยตัดผ่านใด ๆ การตรวจสอบอาจตรวจสอบด้วยตาเปล่าหรือกล้องจุลทรรศน์ การขัดด้วยกระดาษทรายแต่ละเบอร์ เมื่อขัดเสร็จจะต้องล้างชิ้นงานและล้างมือให้สะอาด เพื่อป้องกันไม่ให้เศษผงขัดจากชิ้นต้นไปถึงขั้นต่อไปซึ่งจะละเอียดขึ้นเรื่อย ๆ วิธีการขัดกระทำได้ 2 วิธี คือ การขัดมือ (Hand grinding) และการขัดด้วยเครื่องอาจเป็นเครื่องขัดแบบสายพาน จานขัด แลปปีง (Lapping) และการขัดอัตโนมัติ (Automatic grinding)

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

(1) ผงขัดชนิดออกไซด์ (Oxide polishing: OP) ได้แก่ อลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ ( $MgO_3$ ) ผงขัดออกไซด์เป็นที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป โดยเฉพาะ อลูมิเนียมออกไซด์ และอลูมินากับแมกนีเซียมออกไซด์ เพราะมีความเหนียวและนุ่มไม่ทำให้ผิวชิ้นงานเสียหายและเกิดรอยขีดข่วน

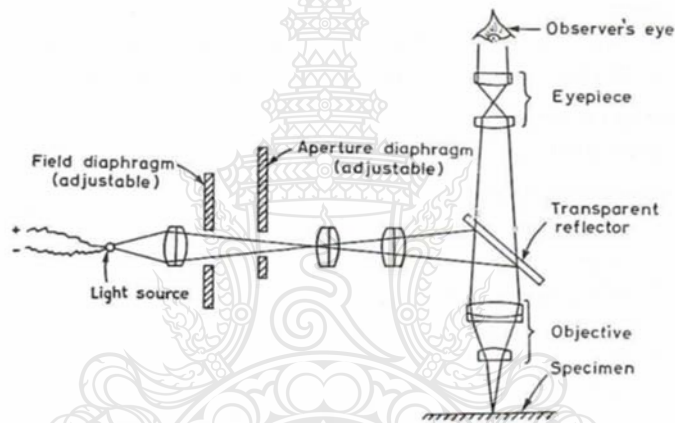
(2) ผงขัดชนิดอลูมิเนียมออกไซด์ หรือมักเรียกกันว่า อลูมินาเป็นวัสดุที่มีความแข็งประมาณ 9 โมลัสเกล ใช้สำหรับขัดโลหะแข็งแบ่งได้ 2 ชนิด คือ ชนิดอัลฟาอลูมินา (Alpha alumina) มีขนาด 0.3-15  $\mu m$  มีความแข็งสูงใช้สำหรับขัดมันหยาบหรือขัดมันก่อนกับชนิดแกมมาอลูมินา (Gamma alumina) มีขนาด 0.3-5  $\mu m$  มีความแข็งปานกลางและต่ำกว่าชนิดอัลฟาอลูมินา ใช้สำหรับขัดมันละเอียดหรือขัดมันขั้นสุดท้าย

(3) ผงขัดชนิดเพชร (Diamond polishing: DP) เป็นผงขัดที่มีอำนาจในการขัดสูงทำให้ขัด ได้เร็วและได้ระนาบดี สามารถใช้ขัดวัสดุได้ทุกชนิด

2.5.2.2 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดมันไปกัดกรดหรือกัดขึ้นรอย (Etching reagent) ให้เหมาะสมเพื่อให้สามารถจำแนกแยกแยะและวิเคราะห์โครงสร้างที่มีอยู่ในชิ้นงานนั้น ๆ แล้วศึกษาโครงสร้างดังกล่าวโดยการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



รูปที่ 2.11 กล้องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค [14]

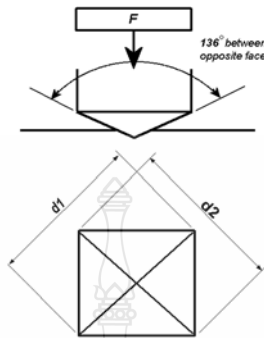


รูปที่ 2.12 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์สำหรับงานทางโลหะวิทยา [14]

## 2.6 การทดสอบหาสมบัติทางกล

2.6.1 การทดสอบความแข็ง [15] การทดสอบความแข็งวัสดุจุลภาค (Micro Hardness Test) ในการทดสอบความแข็งจุลภาคขนาดของรอยกดที่เกิดขึ้นจากการทดสอบขนาดเล็กมากในการทดสอบความแข็งจุลภาคทั่วไปใช้แรงกดที่ 1 กรัม (gmf) ถึง 1 กิโลกรัม โดยทำการขนาดรอยกดด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยายตั้งแต่ 100 เท่าถึง 500 เท่าเป็นต้น การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์คือ หัวกดทดสอบเป็นรูปทรงพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมมีมุมแหลม 136 องศา โดยทดสอบกดลงบนผิวของวัสดุใช้แรงกดทดสอบ ตั้งแต่ 1 กรัมถึง 1 กิโลกรัม (kgf) และการวัดขนาดของรอยกดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่มีกำลังขยายตั้งแต่ 100 เท่าถึง 500 เท่า กระบวนการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์เป็นการทดสอบโดยการกดด้วยหัวกดที่ทำจากเพชร (Diamond indenter) ที่มีรูปร่างเหมือนพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม ทำมุมกับด้านตรงข้าม 136 องศา กดลงไปบริเวณผิวชิ้นงานด้วยแรงคงที่ปกติจะใช้เวลาในการกดไหลค้ำไว้

10-15 วินาที รูปที่ 2.14 เส้นทแยงมุมทั้งสองของหัวกดเพชรจะทำให้เกิดรอยที่ผิวของวัสดุหลังจากที่เอาโหลตออกและใช้กล้องจุลทรรศน์วัดขนาดของรอยเพื่อนำไปคำนวณค่าความแข็ง



รูปที่ 2.13 ลักษณะรอยกดของการทดสอบแบบวิกเกอร์ [15]

2.6.2 การทดสอบการสึกหรอ [16] การทดสอบการสึกหรอแบบล้อยาง (Dry sand rubber wheel test) ตามมาตรฐาน ASTM G 65 ที่เป็นไปตามขั้นตอนการทดสอบ A (Procedure A) ซึ่งเป็นการทดสอบการสึกหรอจากการเสียดสี (Abrasive wear test) ในการทดสอบทำได้โดยการปล่อยทรายให้ทรายไหลผ่านระหว่างล้อยางที่กำลังหมุนและสัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงานทดสอบ ทำให้ผิวหน้าชิ้นงานทดสอบเกิดการสึกหรอ ทรายที่นำมาทดสอบมีขนาด 212 ถึง 300 ไมโครเมตร ก่อนการทดสอบต้องนำทรายไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้อยางหมุนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อยางเท่ากับ 228.6 มิลลิเมตร และหนา 12.7 มิลลิเมตร ล้อยางหมุนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที อัตราการป้อนทรายเท่ากับ 300 ถึง 400 กรัมต่อนาที ภาระโหลตที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบเท่ากับ 130 นิวตัน



รูปที่ 2.14 เครื่องทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65



## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาอิทธิพลตัวแปรในงานเชื่อม ที่มีผลต่อสมบัติทางโลหวิทยาและสมบัติทางกลของรอยต่อวัสดุต่าง ๆ เช่น

2.7.1 Chatterjee and Pal [17] ทำการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกแข็งเหล็กหล่อสีเทา ASTM เกรด 2500 การทดลองทำการเปลี่ยนแปลงชนิดของลวดเชื่อมรองพื้น 3 ชนิด และใช้ลวดเชื่อมพอกแข็ง 5 ชนิด ผลการทดลองพบว่า การอุ้งงาน จำนวนชั้นของการเชื่อมและอัตราส่วน Cr/C ในลวดเชื่อมพอกผิว ส่งผลต่อความยาวของการแตกร้าวที่พื้นผิวต่อพื้นที่และความแข็งแรงการเกาะยึดของชั้นรองผิวและผิวชั้นงานหรือผิวชั้นงานและชั้นพอกแข็ง ความแข็งแรงการเกาะยึดที่มีความแข็งแรงสูงสุดคือ การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมพอกแข็งที่มีนิกเกิลสูงและไม่มีชั้นรองผิว

2.7.2 Selvi et al. [18] ทำการเชื่อมพอกแข็งด้วยวิธีการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์บนวงแหวนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ A216-WCB ด้วยลวดเชื่อม E410 E430 และ Modified E340 ที่ผ่านการอบที่ 200 องศา เวลา 2 ชั่วโมง การเชื่อมเป็นการเชื่อมแนว 3 ชั้น และไม่มีการสายแนวเชื่อม ชั้นงานเชื่อมที่ได้ถูกนำไปทำการทดลองการสึกกร่อน ทดสอบความแข็ง และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค พบว่าความแข็งของแนวเชื่อมทำให้อัตราการสึกกร่อนเพิ่มขึ้น และลวดเชื่อม Modified E340 ให้การสึกกร่อนน้อยที่สุด ปริมาณโครเมียมที่เพิ่มขึ้นทำให้เม็ดเกรนมีขนาดละเอียดเพิ่มขึ้น มีความเป็นเกรนคอลลัมน์เพิ่มขึ้น และลดปริมาณและขนาดของเกรนหยาบลง

2.7.3 Balakrishnan et al. [19] ทำการศึกษาการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้า AISI 4340 ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่ 900°C ชั้นงานชุบแข็งถูกขึ้นรูปเป็นร่องวีคูล์และทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม 3 ชนิด 2 แบบ แบบที่ 1 คือลวดเชื่อม E307-16 ชั้นที่ 2 คือลวดเชื่อม E11018-M และชั้นที่ 3 คือลวดเชื่อม E307-16 และแบบที่ 2 คือ ชั้นที่ 1 คือลวดเชื่อม E307-16 ชั้นที่ 2 คือ ลวดเชื่อม E11018-M และชั้นที่ 3 คือลวดเชื่อมพอกแข็ง E Fe Cr-A7 พบว่าการเชื่อมด้วยการมีชั้นรองพื้นก่อนการเชื่อมพอกแข็งทำให้ชั้นงานง่ายต่อการเชื่อมและให้ค่าความแข็งสูงและสม่ำเสมอ

2.7.4 Coronado et al. [20] ทำการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมที่มีตัวประสานภายใน (Flux cored arc welding: FCAW) แบบเดินแนวเดียวไม่มีการสายลวดเชื่อมบนพื้นผิวเหล็กกล้า A36 แผ่นโลหะที่ผ่านการเชื่อมถูกนำไปทำการตรวจสอบหาอัตราการสึกกร่อนตาม ASTM G65 และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ผลการทดลองพบว่าผิวพอกแข็งการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมที่มีตัวประสานภายในแสดงความต้านทานการต้านการสึกกร่อนสูงกว่าผิวพอกแข็งการเชื่อมอาร์ก ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ผิวพอกแข็งชนิด B การเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมที่มีตัวประสานภายในแสดงความต้านทานการต้านการสึกกร่อนสูงสุดในการทดลองนี้ เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของพื้นหลักยูเทคติกและเฟสคาร์ไบด์ที่มีปริมาณไททานเนียมสูงที่ทำหน้าที่ยับยั้งการสึกกร่อน ผิวพอกแข็งชนิด D ของการเชื่อมอาร์ก ลวดเชื่อม

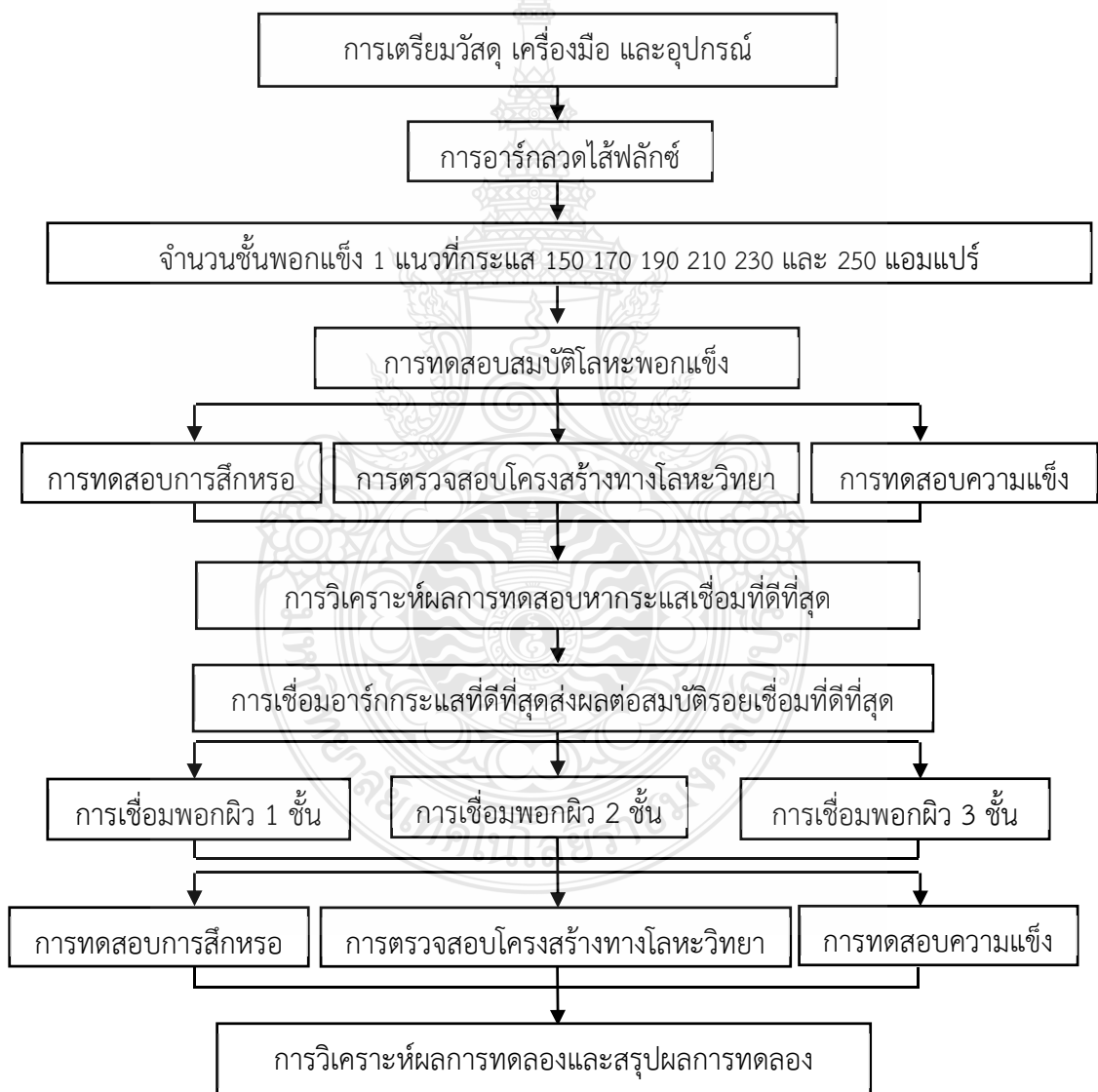
หุ้มฟลักซ์แสดงการสีกร่อนสูงสุด การทดลองแสดงให้เห็นว่าความแข็งและความต้านทานการสีกร่อนไม่มีความสัมพันธ์กัน การเกิดลักษณะนี้เนื่องจากเฟสคาร์ไบด์และพื้นหลักมีความสำคัญต่อการสีกร่อนมากกว่าความแข็งของผิวพอกแข็ง



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาแนวเชื่อมอาร์กอลวดไส้ฟลักซ์บนพื้นผิวโค้งเหล็กกล้าในการเชื่อมชิ้นงานทดสอบ โดยประยุกต์ให้เป็นการเชื่อมพอกผิวแข็งดินแนวนบนเหล็กคาร์บอน JIS-S45C จากนั้นนำชิ้นงานเชื่อมไปเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลและโครงสร้างโลหะวิทยาของชั้นพอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S45C การวิจัยครั้งนี้มีขั้นตอนในการดำเนินการดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินการวิจัยของตัวแปรการเชื่อมพอกผิวแข็ง

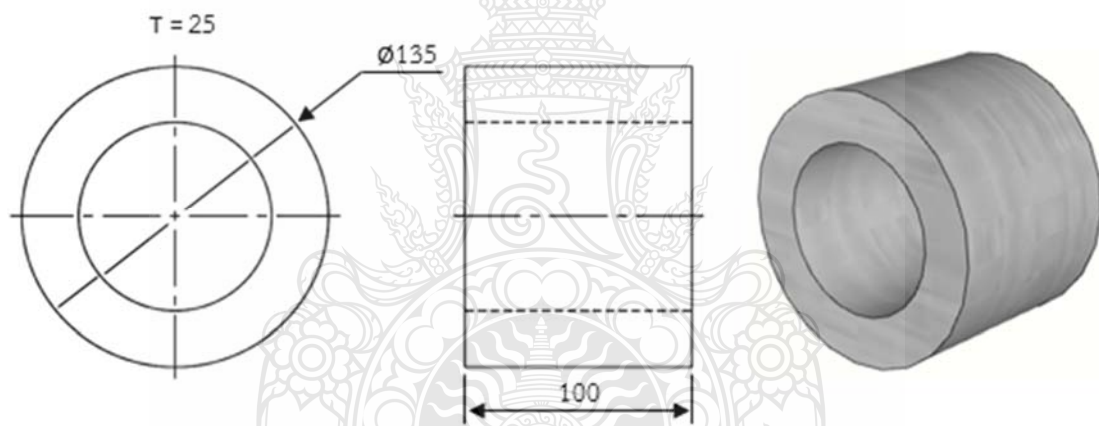
### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

#### 3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางตามมาตรฐาน JIS-S45C ที่มีส่วนผสมทางเคมีโดยการตรวจวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะ (Optical emission spectrometry: OES) แสดงดังตารางที่ 3.1 วัสดุมีลักษณะเป็นทรงกระบอกโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 135 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตรและหนา 25 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S45C (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

ธาตุ	Fe	C	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	Al	W
S45C	Balance	0.47	0.24	0.02	0.02	0.03	0.35	0.02	0.01	0.08



รูปที่ 3.2 รูปร่างของชิ้นงานทดสอบ (หน่วย: มิลลิเมตร)

#### 3.1.2 ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux cored wire)

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ สำหรับพอกผิวแข็งเป็นลวดเชื่อมตามมาตรฐาน DIN 8555: MF 6-GF-60GP ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร แสดงส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

ธาตุ	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
MF 6-GF-60GP	Balance	0.54	0.76	2.31	0.01	0.02	7.92	0.51	0.32

### 3.1.3 เครื่องเชื่อม

เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมแบบระบบอินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Fronius รุ่น Transpuls Synergic 2700 Alu-Edition ซึ่งควบคุมตัวแปรการเชื่อมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ และซอฟต์แวร์ของเครื่องเชื่อม สามารถปรับตัวแปรในการเชื่อมได้โดยตรงจากหน้าจอของเครื่องเชื่อม ในการทดลองครั้งนี้จะเลือกใช้เครื่องเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมแต่ใช้ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ในการทดลอง ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องเชื่อมมิก/แม็กที่ใช้ในการทดลอง

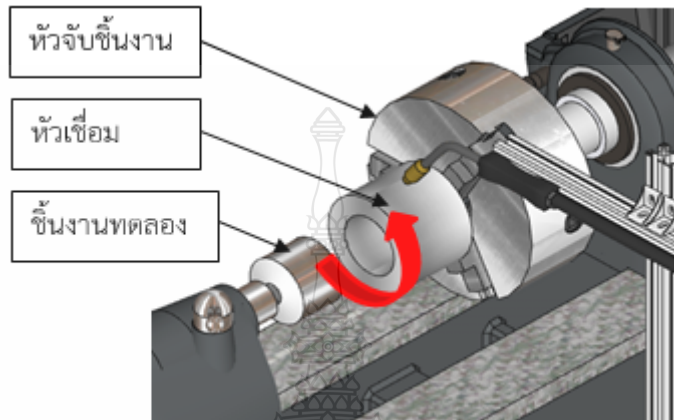
### 3.1.4 เตาอบชิ้นงานทดลอง

เตาอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถปรับตั้งค่าการใช้งานของชุดควบคุมแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ การตั้งค่าอุณหภูมิและการตั้งค่าเวลา สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0-1200 องศาเซลเซียส สำหรับการอบเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S45C ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที ทำการอุ่นวัสดุทดลองก่อนทำการเชื่อม ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เตาอบชิ้นงานทดลอง

3.1.5 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ถูกออกแบบเพื่อสำหรับจับยึดชิ้นงานทรงกระบอก หลักการทำงาน ใช้จับชิ้นงานสามารถหมุนรอบแกนด้วยความเร็วคงที่ที่สามารถปรับทิศทางการหมุนได้ ส่วนชุดหัวเชื่อม ถูกยึดติดอยู่บนชุดปฏิบัติการ ซึ่งสามารถกำหนดมุมและปรับระยะอาร์กให้คงที่ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์จับยึดและควบคุมความเร็วในการเชื่อม

### 3.2 การกำหนดตัวแปรการทดลอง

การทดลองในครั้งนี้ศึกษาปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ในการเชื่อม คือ กระแสไฟเชื่อม ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม อุณหภูมิในการอุ่นและอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม จะมีผลต่อคุณสมบัติของแนวเชื่อม พอกแข็งลักษณะทางกายภาพโครงสร้างโลหะวิทยาและสมบัติทางกลต่อแนวเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กคาร์บอน JIS-S45C อย่างไร ซึ่งได้กำหนดปัจจัยที่ทำการศึกษาที่จะทำการศึกษาได้ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การออกแบบตัวแปรการเชื่อม

ตัวแปรการเชื่อม	ค่ากำหนด
1. ลักษณะรอยเชื่อม	ทำราบ (ชิ้นงานเคลื่อนที่)
2. ลวดเชื่อม	ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร
3. อุณหภูมิในการอุ่น	250 องศาเซลเซียส
4. กระแสไฟเชื่อม	150-250 แอมแปร์
5. ความเร็วเดินแนวเชื่อม	150 มิลลิเมตรต่อนาที
6. อุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม	150 องศาเซลเซียส
5. หัวเชื่อม	เอียงหัวเชื่อม 17-19 องศา [21]

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.3.1 ขั้นตอนการเชื่อม การเชื่อมจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) การทดลองเชื่อมเพื่อศึกษาอิทธิพลของกระแสเชื่อมที่มีต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม เลือกกระแสเชื่อมที่เหมาะสมจากการทดสอบสมบัติทางกลของแนวเชื่อมมาทำการเชื่อมพอกแข็ง 2) การเชื่อมพอกแข็งเพื่อศึกษาอิทธิพลของจำนวนชั้นพอกแข็งที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม

3.3.1.1 การทดลองเชื่อมเพื่อศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟเชื่อมที่มีต่อสมบัติของแนวเชื่อม การเชื่อมชิ้นงานทดลอง นำชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยด้วยการกลึงและสร้างขอบเขตบนผิวเหล็กกล้าเสร็จแล้ว ไปทำการอุ่น (Preheat Temperature) ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เพื่อจะช่วยลดอัตราการสูญเสียความร้อนของแนวเชื่อมลงในขณะเชื่อมและยังลดการเกิดรอยแตกร้าว (Crack) จากความเค้น จากนั้นทำการเชื่อมชิ้นงาน โดยใช้กระแสเชื่อมที่ 150-250 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที โดยทำการเชื่อมแบบยึดหัวเชื่อมคงที่ หัวเชื่อมทำมุมกับชิ้นงานเชื่อม 17-19 องศา และเดินแนวเชื่อมจำนวน 1 แนว ตลอดความยาวของเส้นรอบวง ดังรูปที่ 3.7

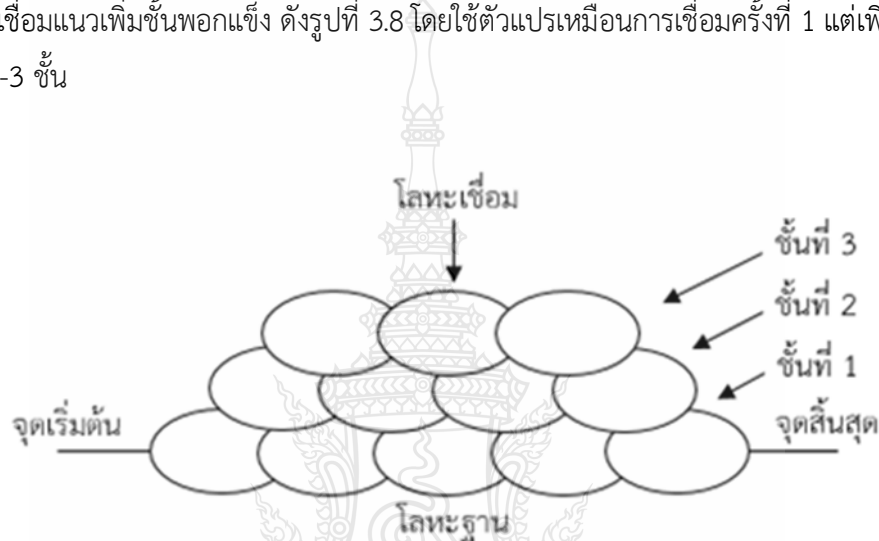


รูปที่ 3.6 มุมและทิศทางในการเชื่อม



รูปที่ 3.7 รูปแบบแนวเชื่อม

3.3.1.2 การเชื่อมพอกแข็งเพื่อศึกษาอิทธิพลของการเพิ่มขึ้นผิวของแนวเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม หลังจากทำการทดลองเชื่อมเพื่อศึกษาอิทธิพลของกระแสเชื่อมที่มีต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อมและทำการทดสอบสมบัติทางกลเรียบร้อยแล้ว เลือกสภาวะการเชื่อมที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกลของแนวเชื่อมเชื่อม นำชิ้นงานทดลองเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S45C ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยด้วยการกลึงและสร้างขอบเขตบนผิวเหล็กกล้าเสร็จแล้ว ไปทำการอุ่น (Preheat Temperature) ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานทดลองเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S45C ที่ผ่านกระบวนการอุ่นแล้ว มาเชื่อมแนวเพิ่มขึ้นพอกแข็ง ดังรูปที่ 3.8 โดยใช้ตัวแปรเหมือนการเชื่อมครั้งที่ 1 แต่เพิ่มจำนวนชั้นพอกแข็ง 1-3 ชั้น

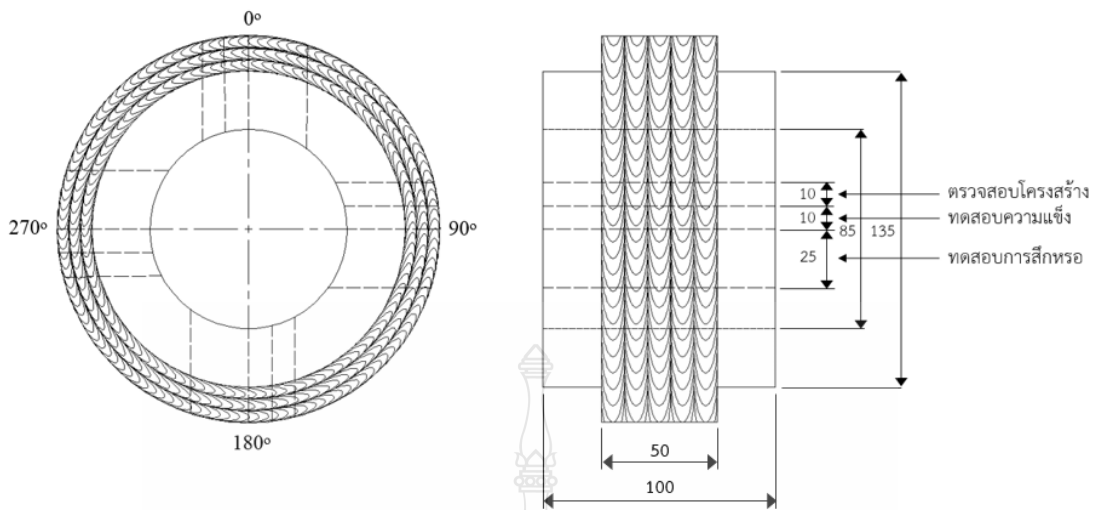


รูปที่ 3.8 รูปแบบการเชื่อมพอกแข็ง

### 3.4 ขั้นตอนการตัดชิ้นงานทดสอบ

ขั้นตอนการตัดชิ้นงานทดสอบ นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมพอกแข็ง มาทำการตัดแบ่งเพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ทดสอบสมบัติทางกล ด้วยเครื่องตัดชิ้นงาน (Cutting machine) โดยทำการตัดชิ้นงานทดสอบ โดยทำการแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ชั้นที่ 1 นำไปตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค ขนาด  $10 \times 50 \times 25$  มิลลิเมตร ชั้นที่ 2 นำไปทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ส์ ขนาด  $10 \times 50 \times 25$  มิลลิเมตร และชั้นที่ 3 นำไปทดสอบความสึกหรอด้วยล้อตามมาตรฐาน ASTM G65 ขนาด  $25 \times 50 \times 25$  มิลลิเมตร โดยจะแบ่งชิ้นงานออกเป็น 4 ส่วนตามมุมในการทดสอบที่กำหนดตามมาตรฐาน ASME IX QW-426.5 (b) [22] คือ มุม  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  และ  $270^\circ$  ดังรูป 3.9





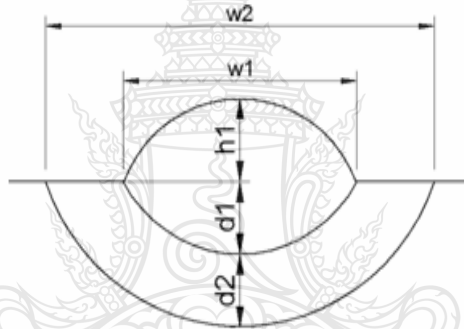
รูปที่ 3.9 การออกแบบการตัดชิ้นงานทดสอบสมบัติรอยเชื่อม

### 3.5 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

3.5.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S45C ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมพอกแข็งแล้ว นำมาทำการตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงานทดสอบ เพื่อนำมาศึกษาลักษณะทางกายภาพทางโลหะวิทยา โดยนำชิ้นงานมาทำการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำตั้งแต่เบอร์ 80-1,200 และขัดละเอียดด้วยผงเพชร (Diamond) ที่มีขนาด 1 ไมครอน ด้วยเครื่องขัดผ้าสักหลาดจนชิ้นงานมีความใสคล้ายกระจกแล้วล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วเช็ดทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ทำให้แห้งด้วยการเป่าลมร้อน จากนั้นนำชิ้นงานนี้ไปกัดชิ้นด้วยสารละลาย 5% ไนตรัล ตามมาตรฐาน ASTM E407-99 [13] โดยการใช้สำลีจุ่มลงในสารละลายแล้วทาลงบนบริเวณผิวหน้าชิ้นงานทิ้งไว้ 5-60 วินาที หลังจากนั้นล้างชิ้นงานด้วยแอลกอฮอล์ทำให้แห้งด้วยการเป่าลมร้อนและนำชิ้นงานมาส่องดูโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอแบบซูม (Micro capture) ดังรูปที่ 3.12 เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ตลอดจนข้อบกพร่องต่าง ๆ



รูปที่ 3.10 เครื่องขัดแบบจานหมุน

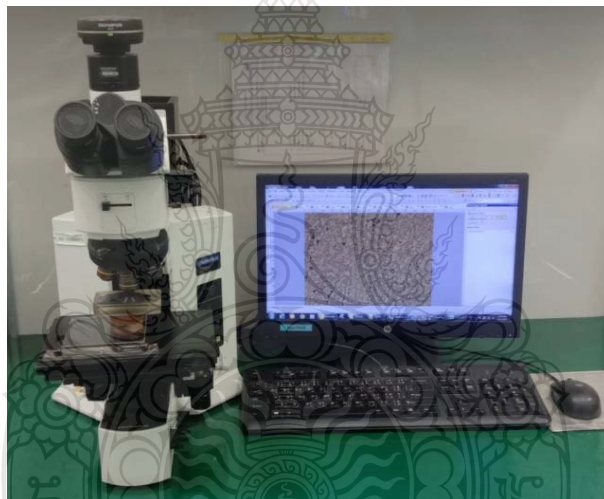


รูปที่ 3.11 การวัดขนาดแนวเชื่อมระดับมหภาค



รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์ (Micro Capture)

3.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชั้นเชื่อมพอกแข็ง เหล็กกล้าคาร์บอน JIS S45C ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Micro Scope) ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX51 มีกำลังขยาย 50-1,000 เท่า ดังแสดงรูปที่ 3.13 นำชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคมาทำขัดด้วยกระดาษทรายน้ำตั้งแต่เบอร์ 80-1,200 และขัดละเอียดด้วยผงเพชร (Diamond) ที่มีขนาด 1 ไมครอน ด้วยเครื่องขัดผ้าสักหลาดจนชิ้นงานมีความใสคล้ายกระจกแล้วล้างด้วยน้ำสะอาด แล้วใช้ทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ทำให้แห้งด้วยการเป่าลมร้อน จากนั้นนำชิ้นงานนี้ไปกัดขึ้นด้วยสารละลาย 5% ไนตรัส ตามมาตรฐาน ASTM E407-99 [13] โดยการใช้สำลีจุ่มลงในสารละลายแล้วทา ลงบนบริเวณผิวหน้าชิ้นงานทิ้งไว้ 5-60 วินาที หลังจากนั้นล้างชิ้นงานด้วยแอลกอฮอล์ทำให้แห้งด้วยการ เป่าลมร้อนและนำชิ้นงานมาตรวจดูโครงสร้างจุลภาคบริเวณตำแหน่งต่าง ๆ ของชั้นเชื่อมพอกแข็ง ทำการบันทึกและวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป



รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical micro scope)

3.5.2.1 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด (SEM) นำชิ้นงาน ตัวแปรการเชื่อมที่ดีที่สุด มาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด (Scanning electron microscope: SEM) ดังรูปที่ 3.14 เพื่อทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคและตรวจสอบบริเวณตำแหน่ง ด้านบนของโลหะเชื่อมพอกแข็งและตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometer: EDS) ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม



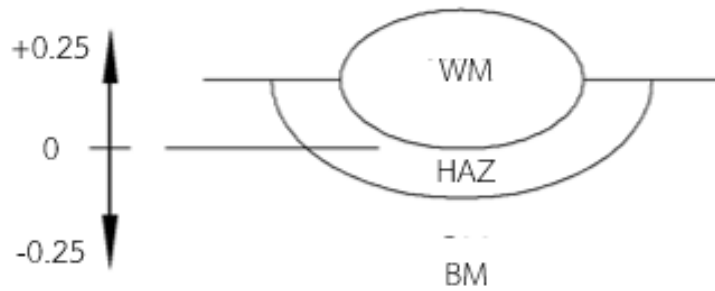
รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

### 3.6 การทดสอบสมบัติทางกล

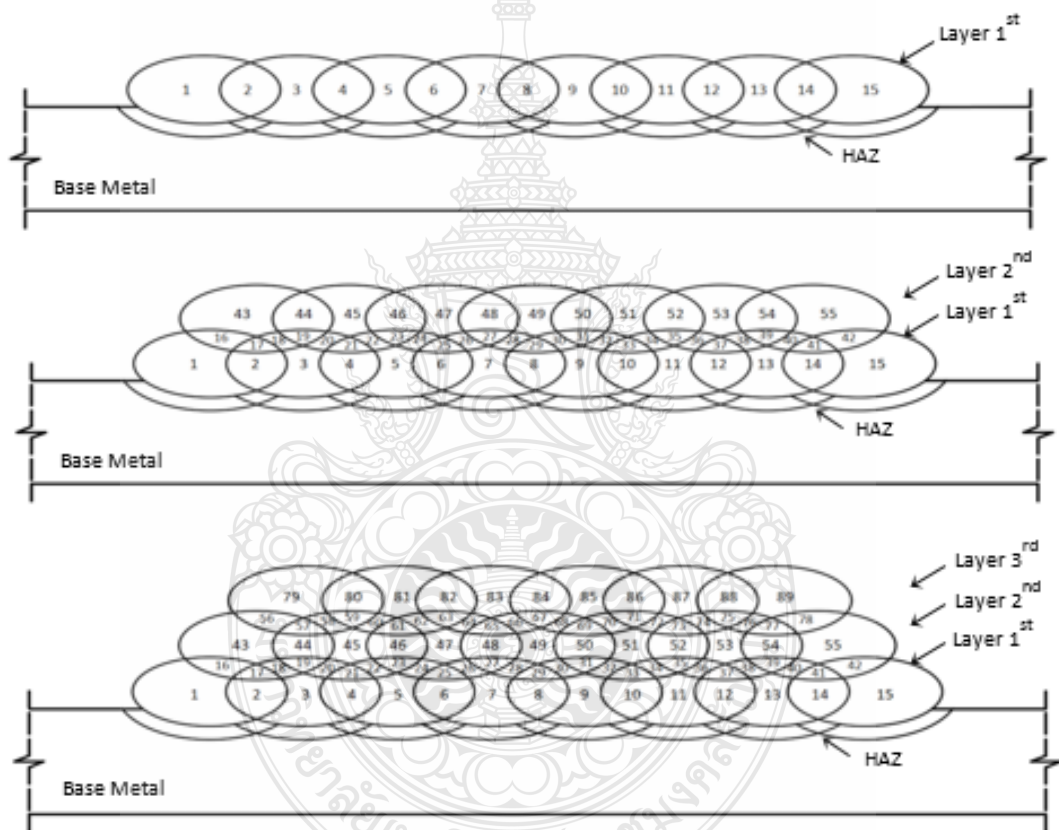
3.6.1 การทดสอบความแข็ง (Microhardness testing) นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคแล้วมาทดสอบความแข็งระดับจุลภาคด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส รุ่น Matsuzawa MXT-70 ดังรูปที่ 3.15 โดยทดสอบตามตำแหน่งที่กำหนดไว้ รูปที่ 3.16 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 แนว รูปที่ 3.17 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น โดยจะทำการทดสอบความแข็งเฉพาะบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมพอกแข็งตามตำแหน่งที่กำหนด โดยใช้แรงกด 300 กรัม เป็นเวลา 10 วินาที ระยะห่างระหว่างจุด 0.25 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM E384-17 [16]



รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ส



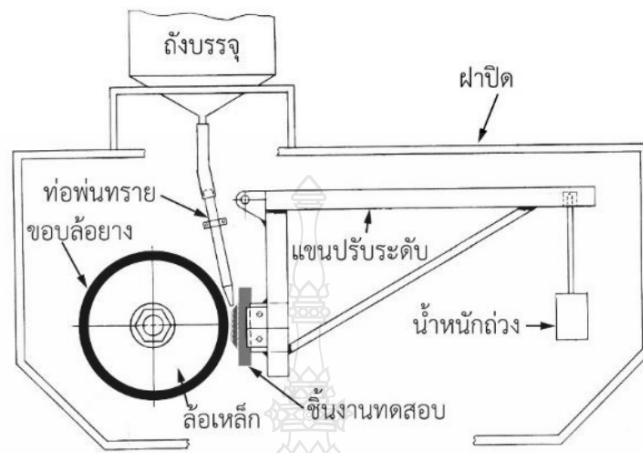
รูปที่ 3.16 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 แนว



รูปที่ 3.17 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น

3.6.2 การทดสอบการสึกหรอ (Wear resistance) เป็นการทดสอบการสึกหรอแบบล้อวางขัดสี โดยใช้ทรายและล้อยางเป็นตัวสัมผัสกับชิ้นงานที่ทดสอบและทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์มวลที่สูญเสียไป โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM G65 ทำการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ความเร็วรอบของล้อขัดที่ 200 รอบต่อนาที

อัตราการไหลของทรายที่ 300-400 กรัมต่อนาที ทรายที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดที่ 212-300 ไมโครเมตร และใช้เวลาในการทดสอบที่ 30 นาทีต่อชิ้น น้ำหนักที่ใช้ในการกดชิ้นงาน 130 นิวตัน ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การทดสอบการสึกหรอด้วยล้อย่างขัดสี



## บทที่ 4

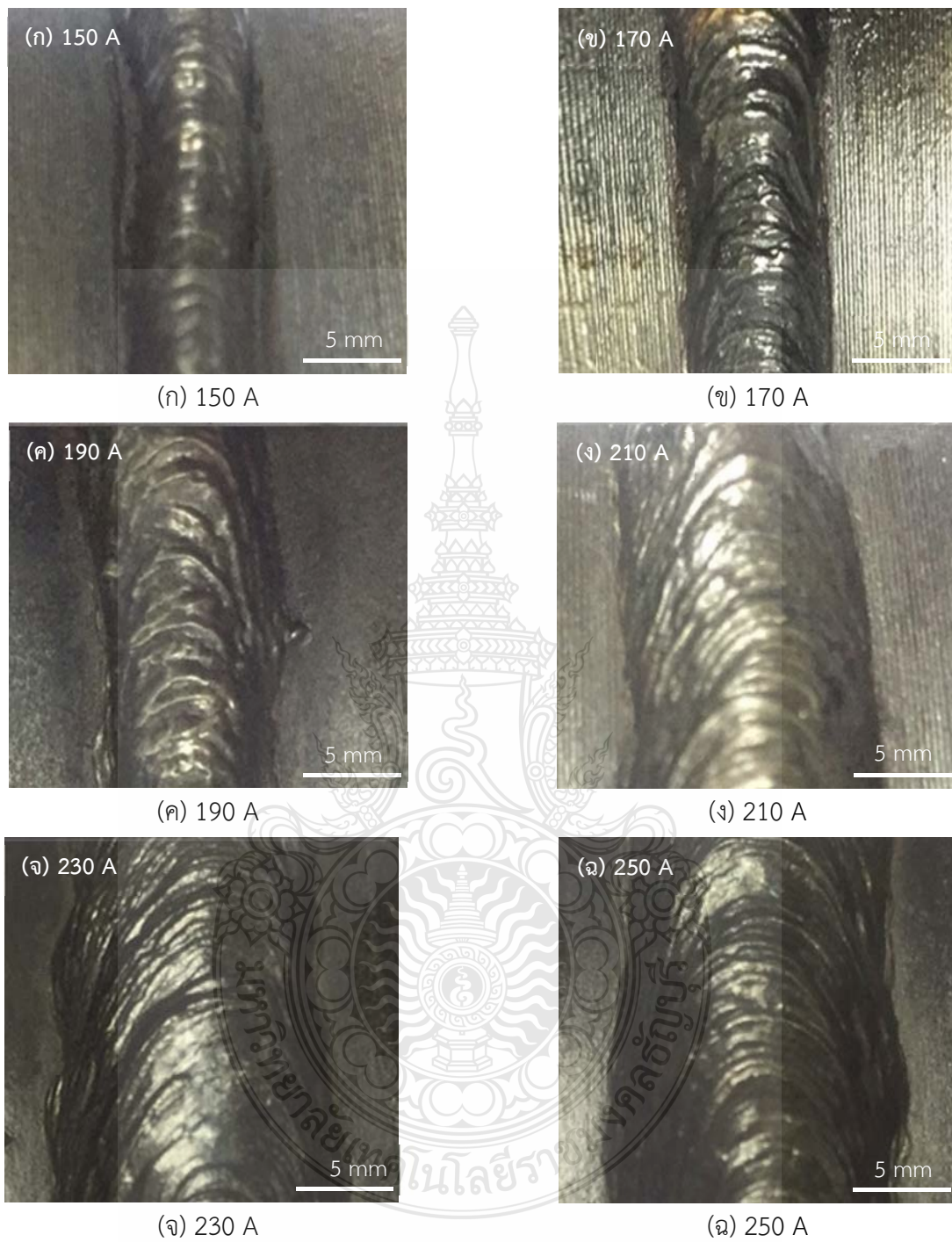
### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการศึกษาการอิทธิพลตัวแปรเชื่อมพอกแข็งบนผิวเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S45C ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กถวดไส้ฟลักซ์ โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังนี้ กระแสไฟเชื่อม 150-250 แอมแปร์ ถวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ MF-6-GF-60GP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร สำหรับการพอกผิวแข็งกำหนดความเร็วในการเดินเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที หัวเชื่อมทำมุมเอียง 17-19 องศา การเชื่อมแบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น จำนวนชั้นพอกแข็ง 1 แนวและ 1 ชั้น เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างทางโลหะวิทยา คุณสมบัติทางกลของผลทดสอบความแข็งและความต้านทานการสึกหรอ สำหรับหาตัวแปรกระแสเชื่อมสถานะที่ดีที่สุดไปเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น เพื่อนำแนวเชื่อมที่ได้ไปเปรียบเทียบโครงสร้างทางโลหะวิทยา คุณสมบัติทางกลด้วยผลการทดสอบความแข็งและผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอที่มีผลต่อสมบัติของแนวเชื่อม เพื่อที่หาตัวแปรจำนวนชั้นพอกแข็งที่เหมาะสมที่สุดในเชื่อมพอกแข็งบนผิวเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S45C ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

#### 4.1 อิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์กถวดไส้ฟลักซ์ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 แนว

##### 4.1.1 ลักษณะทางกายภาพผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 แนว

รูปที่ 4.1 แสดงผิวหน้าของแนวเชื่อมพอกแข็งที่ทำการเชื่อมพอกแข็งด้วยการเชื่อมอาร์กถวดไส้ฟลักซ์ด้วยกระแสเชื่อม 150-250 แอมแปร์ ผลการตรวจสอบด้วยตาเปล่า พบว่าผิวหน้าแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ไม่มีจุดบกพร่องใด ๆ เช่น สแลกฝังในแนวเชื่อม (Slag inclusion) รอยแตกร้าว (Crack) ตามดหรือโพรงอากาศ (Porosity) อย่างไรก็ตามชั้นงานเชื่อมที่ได้พบว่ามีเม็ดโลหะ (Spatter) ที่กระเด็นออกจากบ่อหลอมละลายอยู่บริเวณระหว่างแนวเชื่อม

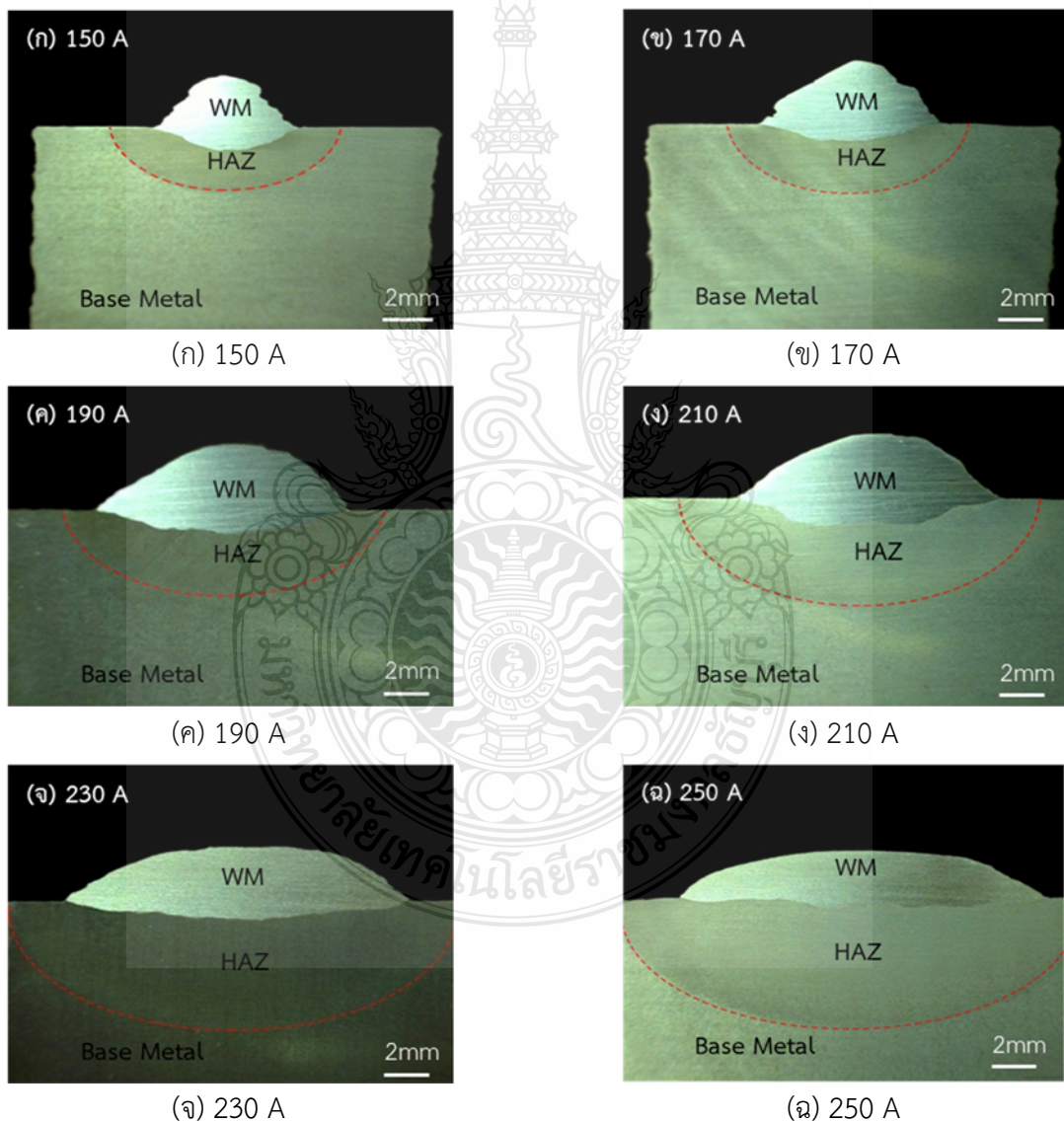


รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 แนว กระแสเชื่อมที่ 150-250 แอมแปร์



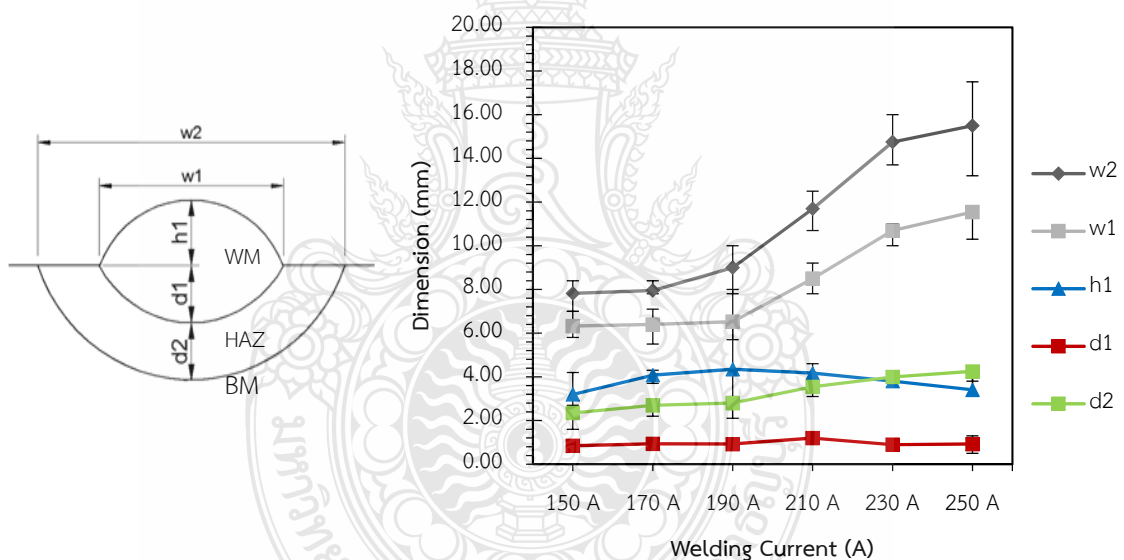
#### 4.1.2 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 แนว

รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพอกแข็งที่ตัดขวางทิศทางการเดินแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150-250 แอมแปร์ ผลการตรวจสอบด้วยภาพถ่ายกำลังขยายต่ำพบว่า แนวเชื่อมที่ได้ส่วนใหญ่มีความสมบูรณ์ของโลหะเชื่อมปราศจากจุดบกพร่องต่าง ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นบริเวณโลหะฐาน (Base metal: BM) บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) บริเวณเส้นหลอมละลายระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นกระทบร้อน (Fusion line: FL) และบริเวณโลหะเชื่อม (Weld metal: WM)



รูปที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 แนว กระแสเชื่อมที่ 150-250 แอมแปร์

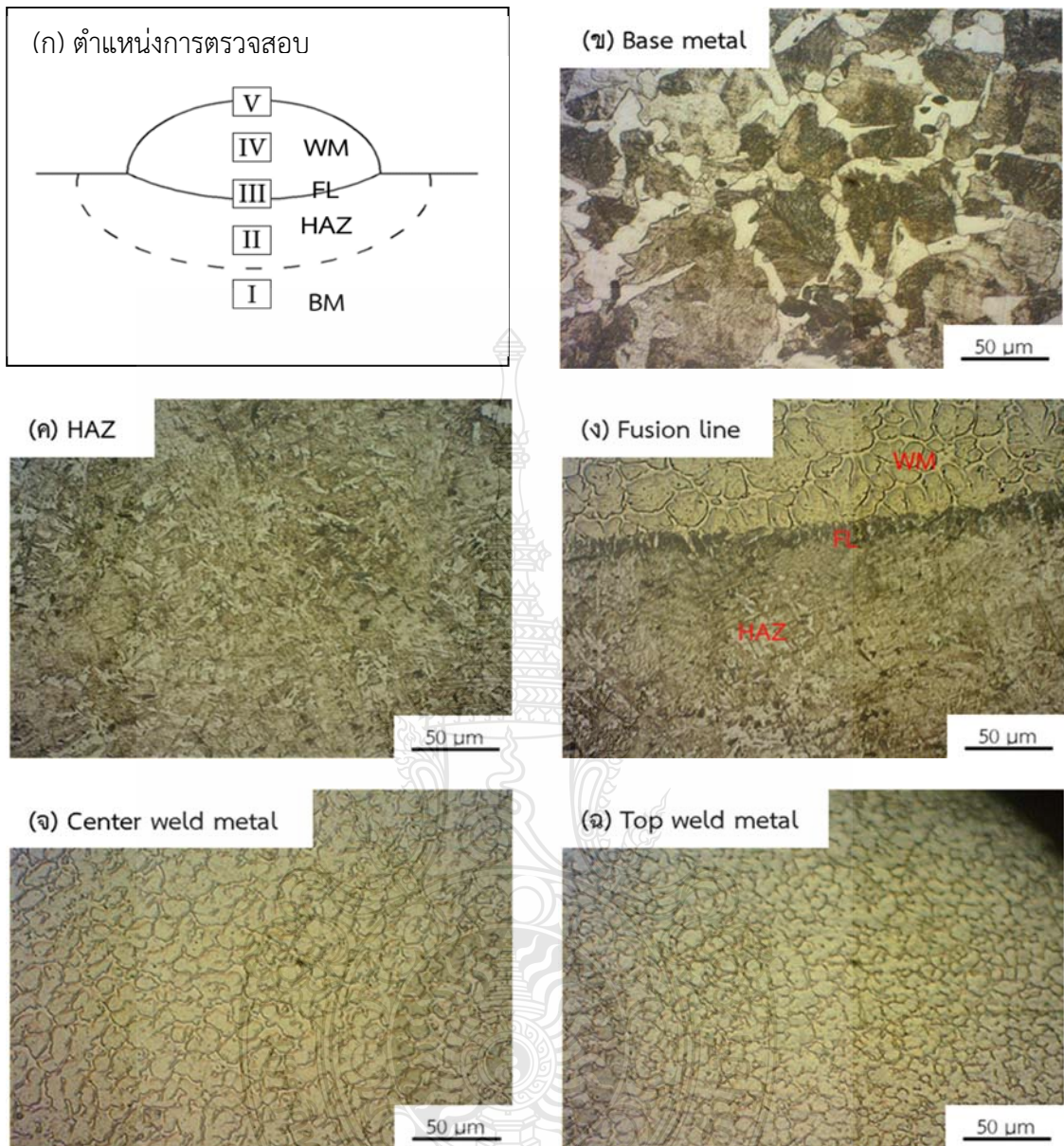
การเปรียบเทียบมิติแนวเชื่อมพอกแข็งเพื่อทำให้ทราบถึงความแตกต่างของรูปร่างของแนวเชื่อมพอกแข็งที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่ 150-250 แอมแปร์ โดยทำการวัดขนาดความกว้างของแนวเชื่อม (Weld width:  $w_1$ ) ระยะการหลอมลึก (Reinforcement:  $d_1$ ) ความนูนของแนวเชื่อม (Penetration:  $h_1$ ) ความกว้างของบริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (Width of heat affected zone:  $w_2$ ) ความลึกของบริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (Depth of heat affected zone:  $d_2$ ) ผลการวัดและการเปรียบเทียบขนาดรูปร่างบริเวณต่าง ๆ ของแนวเชื่อมพอกแข็ง แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่า เมื่อเพิ่มกระแสเชื่อมสูงขึ้น ความกว้างของแนว ( $w_2$ ) เชื่อมมีขนาดเพิ่มขึ้น ระยะการหลอมลึก ( $d_1$ ) มีขนาดเพิ่มขึ้นและลดลงตามลำดับ ความนูนของแนวเชื่อม ( $h_1$ ) มีขนาดเพิ่มขึ้นและลดลงตามลำดับ และความกว้างบริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน ( $w_2$ ) และความลึกบริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน ( $d_2$ ) มีขนาดเพิ่มขึ้น โดยความกว้างของแนวเชื่อม ระยะการหลอมลึก และความนูนของแนวเชื่อมแสดงถึงความสามารถในการหลอมละลายและการเติมโลหะเชื่อมลงบนพื้นผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน



รูปที่ 4.3 รูปร่างและขนาดของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 แนว กระแสเชื่อมที่ 150-250 แอมแปร์

#### 4.1.3 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง

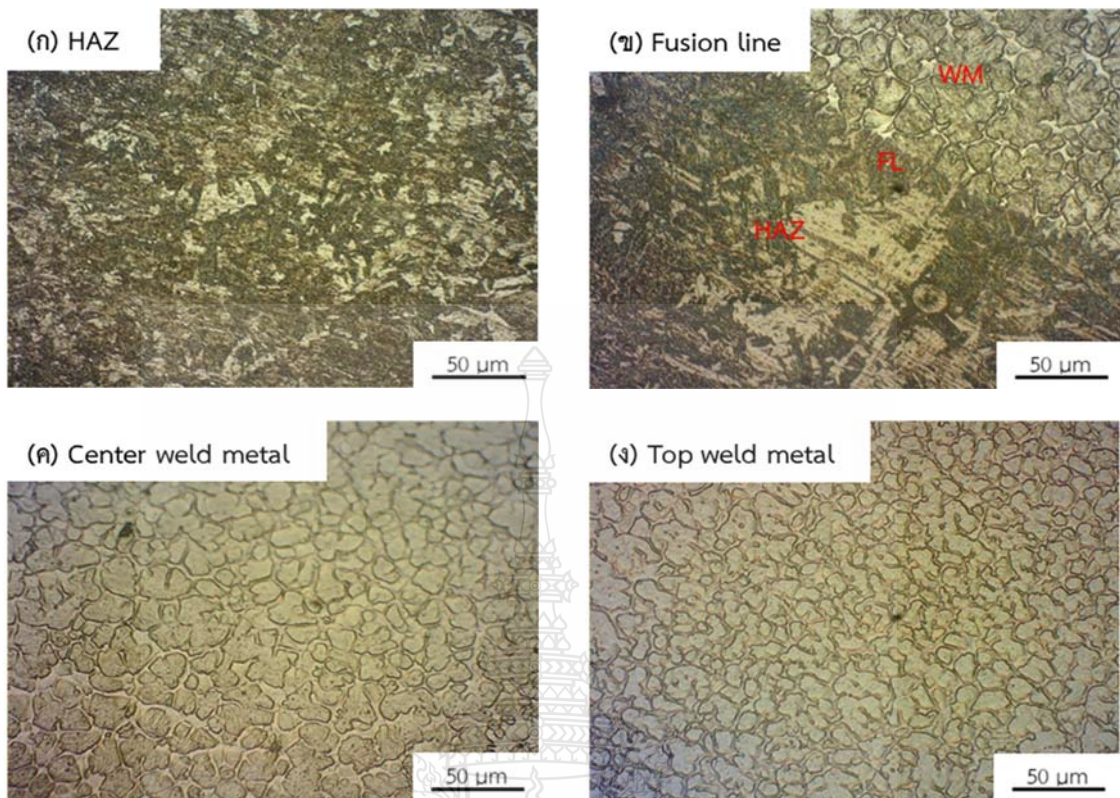
โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็งพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างบริเวณโลหะฐาน (Base metal) พื้นที่ที่กระทบร้อน (Heat affected zone) เกรนเส้นหลอมละลาย (Fusion line) บริเวณกึ่งกลางของโลหะเชื่อม (Center weld metal) และบริเวณด้านบนของโลหะเชื่อม (Top weld metal) ดังรูปที่ 4.4 (ก)



รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง กระแสเชื่อมที่ 150 แอมแปร์

รูปที่ 4.4 (ก) แสดงรูปจำลองโครงสร้างมหภาคโลหะเชื่อมบนผิวเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S45C ที่แบ่งขอบเขตบริเวณพื้นที่เชื่อมออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ พื้นที่โลหะฐาน (Base metal: BM) พื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) และโลหะเชื่อม (Weld metal: WM) โดยตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็งกำหนดให้มีการตรวจสอบ 5 ตำแหน่งประกอบด้วย ตำแหน่ง I โลหะฐาน ตำแหน่ง II ตำแหน่งพื้นที่กระทบร้อน ตำแหน่ง III ตำแหน่งเส้นหลอมละลาย ตำแหน่ง IV ตำแหน่งกึ่งกลางโลหะเชื่อมและตำแหน่ง V ตำแหน่งด้านบนของโลหะเชื่อม

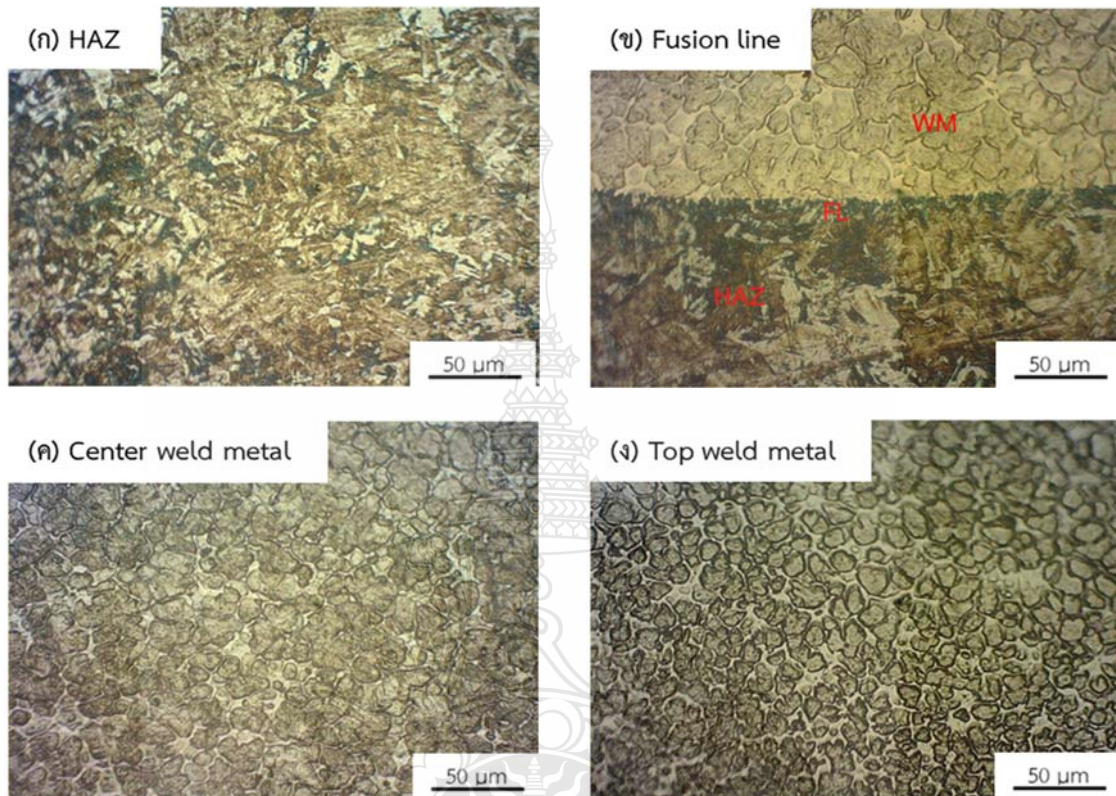
รูปที่ 4.4 (ข) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S45C มีลักษณะเกรนหยาบขนาดใหญ่ประกอบด้วยโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite: P) เมื่อถูกกรดกัดจะเกิดความลึกมากกว่าจะเห็นเป็นพื้นที่สีเข้ม และโครงสร้างเฟอร์ไรท์ (Ferrite: F) เมื่อถูกกรดกัดจะเกิดความลึกน้อยกว่าจะเห็นเป็นพื้นที่สีขาว โครงสร้างเฟอร์ไรท์มีลักษณะการต่อกันจนคล้ายกับการเกิดของเกรนล้อมรอบโครงสร้างเพิร์ลไลต์ ซึ่งเป็นโครงสร้างโลหะฐานบริเวณที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนจากการเชื่อมหรือได้รับความร้อนแต่ อุณหภูมิที่ได้รับไม่สูง (Unaffected zone) เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งการตรวจสอบเข้าใกล้บริเวณโลหะเชื่อมและทำการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่ได้ดังรูปที่ 4.4 (ค) โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน พบว่าโครงสร้างเฟอร์ไรท์และโครงสร้างเพิร์ลไลต์ที่มีเกรนละเอียดขนาดเล็กลงกว่าบริเวณโลหะฐาน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในช่วงสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายจากอิทธิพลความร้อนและเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว มีลักษณะของการจัดเรียงผลึกขึ้นใหม่ (Refining grain) จากอิทธิพลของความร้อนส่งผลทำให้โครงสร้างเพิร์ลไลต์และโครงสร้างเฟอร์ไรท์มีขนาดเล็กลงและการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างหลักเพิร์ลไลต์ [23] การเกิดลักษณะนี้ส่งผลทำให้โลหะในพื้นที่กระทบร้อนมีความแข็งแรงและความแข็งเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.4 (ง) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณเส้นหลอมละลาย (Fusion Line: FL) ที่เป็นเส้นแบ่งขอบเขตระหว่างโลหะฐานบริเวณพื้นที่กระทบร้อนกับโลหะเชื่อมออกจากกันหรือบริเวณที่เกิดการหลอมละลาย เมื่อทำการตรวจสอบบริเวณพื้นที่กระทบร้อนที่ติดกับบริเวณเส้นหลอมละลายพบว่า โครงสร้างเฟอร์ไรท์และโครงสร้างเพิร์ลไลต์มีเกรนหยาบจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบกว่าโครงสร้างจุลภาคในพื้นที่กระทบร้อนที่ใกล้กับโลหะฐาน ซึ่งเกิดจากได้รับความร้อนสูงกว่าช่วงอุณหภูมิวิกฤติจนใกล้ถึงจุดหลอมละลาย โดยอุณหภูมิที่ได้รับจะสูงกว่าอุณหภูมิที่ Refined zone ทำให้เกิดการเย็นตัวช้ากว่าส่งผลทำให้ขนาดเกรนหยาบ [23] บริเวณถัดมาบริเวณเส้นหลอมละลาย พบพื้นที่การรวมตัวกันระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐานเป็นชั้นแคบ ๆ เมื่อทำการตรวจสอบบริเวณถัดมาในพื้นที่โลหะเชื่อมเหนือเส้นหลอมละลายโครงสร้างจุลภาคที่ได้ พบโครงสร้างบริเวณโลหะเชื่อมมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) รูปร่างค่อนข้างกลมมีความแตกต่างจากโครงสร้างจุลภาคของโลหะฐาน เนื่องจากลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมทางเคมีของโครเมียมสูงจึงอาจทำให้เกิดโครงสร้างอื่น ๆ ที่ไม่ใช่โครงสร้างเฟอร์ไรท์และโครงสร้างเพิร์ลไลต์ที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนทั่วไป ดังรูปที่ 4.4 (จ) เมื่อตำแหน่งการตรวจสอบเข้าใกล้บริเวณด้านบนของโลหะเชื่อมดังรูปที่ 4.4 (ฉ) ขนาดเกรนมีแนวโน้มลดลงและเมื่อทำการวัดขนาดของเกรนที่เกิดขึ้น เกรนมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 16.593 ไมโครเมตร เนื่องจากบริเวณพื้นที่นี้มีการขยายความร้อนอย่างรวดเร็วทำให้การเย็นตัวเกิดอย่างรวดเร็วและผลที่เกิดขึ้นทำให้สมบัติทางกลของโลหะเชื่อม เช่น ความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้นได้



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง กระแสเชื่อมที่ 170 แอมแปร์

รูปที่ 4.5 (ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระทบร้อนของชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 170 แอมแปร์ พบว่ากระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์และโครงสร้างเพอร์ไรท์มีเกรนละเอียดและมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างหลักเฟอร์ไรต์จนกระทั่งถึงบริเวณเส้นหลอมละลายดังรูปที่ 4.5 (ข) ก่อนเข้าสู่บริเวณโลหะเชื่อมบริเวณพื้นที่กระทบร้อนที่ติดกับบริเวณเส้นหลอมละลาย พบว่าโครงสร้างเพอร์ไรท์และโครงสร้างเฟอร์ไรต์มีเกรนหยาบจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบมีทิศทางการเติบโตของเกรนในทุกทิศทาง ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคพื้นที่กระทบร้อนและบริเวณเส้นหลอมละลายกับกระแสเชื่อมที่ 150 แอมแปร์ ดังรูปที่ 4.4 (ง) พบว่า ที่กระแสเชื่อมต่ำโครงสร้างเพอร์ไรท์และโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่ได้มีขนาดเกรนละเอียดมากกว่าและมีความสม่ำเสมอ เนื่องจากเกรนเติบโตอย่างรวดเร็ว อัตราการเติบโตของเกรนจะมีเวลาจำกัดทำให้เกรนมีขนาดเล็ก เมื่อทำการตรวจสอบบริเวณถัดมาพื้นที่โลหะเชื่อมเหนือเส้นหลอมละลายที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่ 170 แอมแปร์ โครงสร้างจุลภาคที่ได้ พบว่า โครงสร้างบริเวณโลหะเชื่อมมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) รูปร่างค่อนข้างกลมก่อตัวขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบขนาดของเกรนกับกระแสเชื่อมที่ 150 แอมแปร์พบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่ไม่แตกต่างกันมากดังรูปที่ 4.5 (ค)

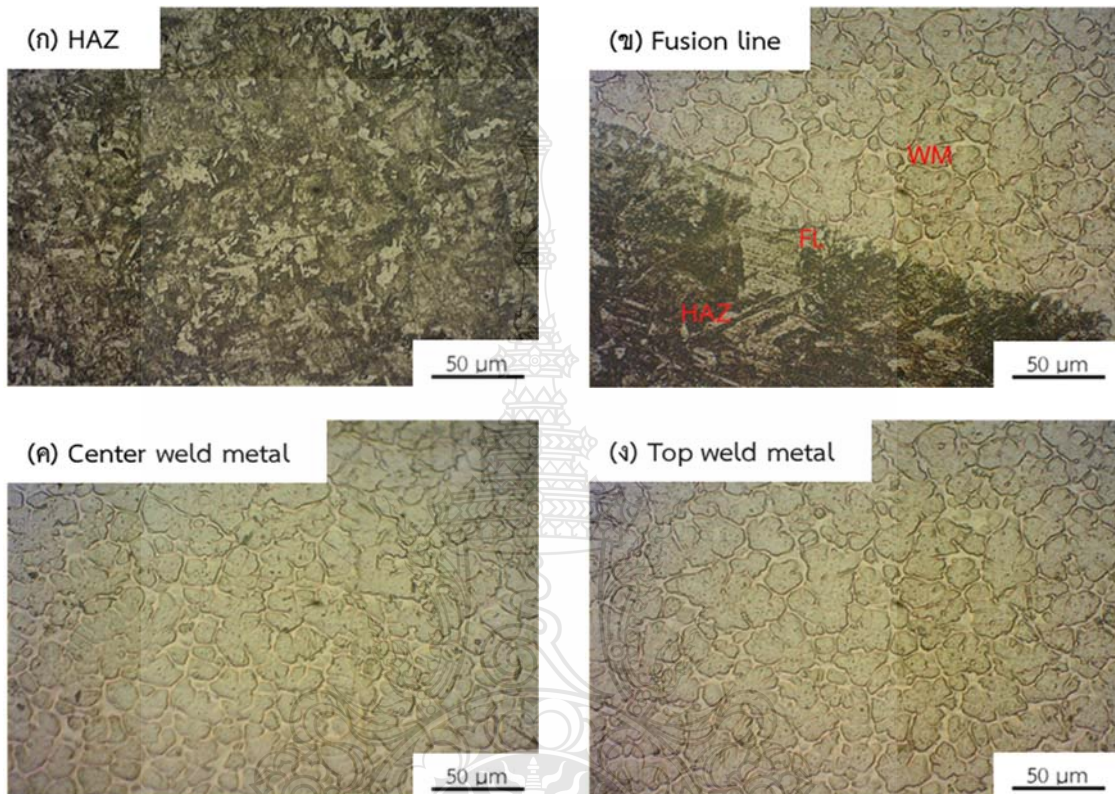
อย่างไรก็ตามเมื่อเข้าใกล้บริเวณด้านบนของโลหะเชื่อมดังรูปที่ 4.5 (ง) ขนาดเกรนมีแนวโน้มลดลง และเมื่อทำการตรวจสอบที่ตำแหน่งด้านบนของโลหะเชื่อมโดยการวัดขนาดของเกรนที่เกิดขึ้น เกรนมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 16.185 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาพของแนวเชื่อมพอกแข็ง กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์

รูปที่ 4.6 (ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่ที่กระทบร้อนของชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 190 แอมแปร์ พบว่ากระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้โครงสร้างเพิร์ลไลต์ และโครงสร้างเฟอร์ไรต์มีเกรนมีละเอียดและมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างหลักเพิร์ลไลต์จนกระทั่งถึงบริเวณเส้นหลอมละลายดังรูปที่ 4.6 (ข) ก่อนเข้าสู่บริเวณโลหะเชื่อมพื้นที่ที่กระทบร้อนที่ติดกับบริเวณเส้นหลอมละลาย พบว่าโครงสร้างเฟอร์ไรต์และโครงสร้างเพิร์ลไลต์มีเกรนหยาบจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบมีทิศทางการเติบโตของเกรนในทุกทิศทาง เมื่อทำการตรวจสอบบริเวณถัดมาในพื้นที่โลหะเชื่อมเหนือเส้นหลอมละลายที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ โครงสร้างจุลภาคที่ได้ พบว่าโครงสร้างโลหะเชื่อมมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) รูปร่างค่อนข้างกลมก่อตัวขึ้น รูปที่ 4.6 (ค) พบว่าขนาดเกรนมีขนาดของเม็ดเกรนมีขนาดที่ไม่แตกต่างกันมากกับกระแสเชื่อมที่ 150 และ 170 แอมแปร์

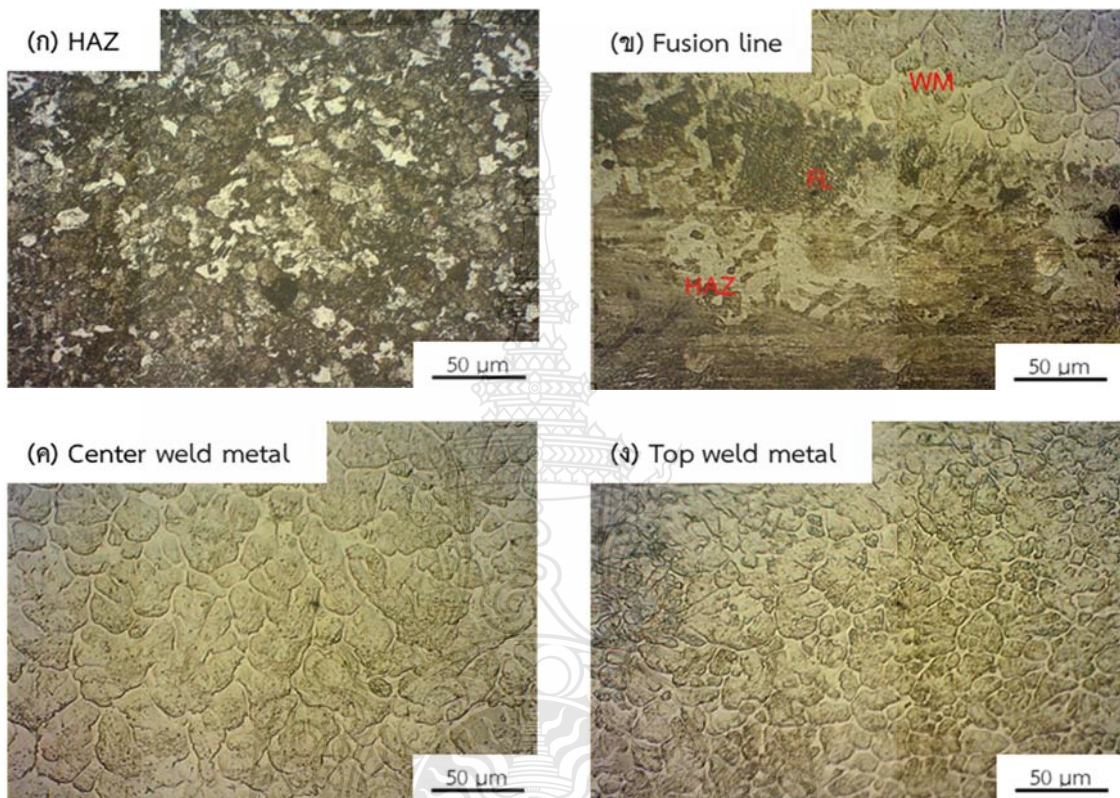
อย่างไรก็ตามเมื่อเข้าใกล้บริเวณด้านบนของโลหะเชื่อมดังรูปที่ 4.6 (ง) ขนาดเกรนมีแนวโน้มลดลงและเมื่อทำการตรวจสอบที่ตำแหน่งด้านบนของโลหะเชื่อม โดยการวัดขนาดของเกรนบริเวณโลหะเชื่อมเกรนมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15.931 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดเล็ก และละเอียดสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง กระแสเชื่อมที่ 210 แอมแปร์

รูปที่ 4.7 (ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่ที่กระทบร้อนของชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 210 แอมแปร์พบว่า กระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์และโครงสร้างเพอร์ไรท์มีเกรนละเอียดและมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างหลักเฟอร์ไรต์ จนกระทั่งถึงบริเวณเส้นหลอมละลายดังรูปที่ 4.7 (ข) ก่อนเข้าสู่บริเวณโลหะเชื่อมพื้นที่ที่กระทบร้อนที่ติดกับบริเวณเส้นหลอมละลายพบว่า โครงสร้างเพอร์ไรท์และโครงสร้างเฟอร์ไรต์มีเกรนหยาบจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบมีทิศทางการเติบโตของเกรนในทุกทิศทาง เมื่อทำการตรวจสอบบริเวณถัดมาบริเวณโลหะเชื่อมเหนือเส้นหลอมละลายที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่ 210 แอมแปร์ โครงสร้างจุลภาคที่ได้ พบว่าโครงสร้างโลหะเชื่อมมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) รูปร่างค่อนข้างกลมก่อตัวขึ้น รูปที่ 4.7 (ค) พบว่าขนาดเกรนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกับขนาดเกรนของโลหะเชื่อมของกระแสเชื่อม

150-190 แอมแปร์ เนื่องจากอิทธิพลความร้อนของกระแสเชื่อมมีความแตกต่างกันในด้านความร้อนขาเข้า (Heat input) ซึ่งกระแสเชื่อมที่สูงค่าความร้อนขาเข้าสูงส่งผลให้เกิดจากอัตราการเย็นตัวช้าเกรนที่ได้จะมีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามเมื่อเข้าใกล้บริเวณด้านบนของโลหะเชื่อมดังรูปที่ 4.7 (ง) ขนาดเกรนมีแนวโน้มลดลง และเมื่อทำการวัดขนาดของเกรนที่เกิดขึ้นเกรนมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 23.712 ไมโครเมตร

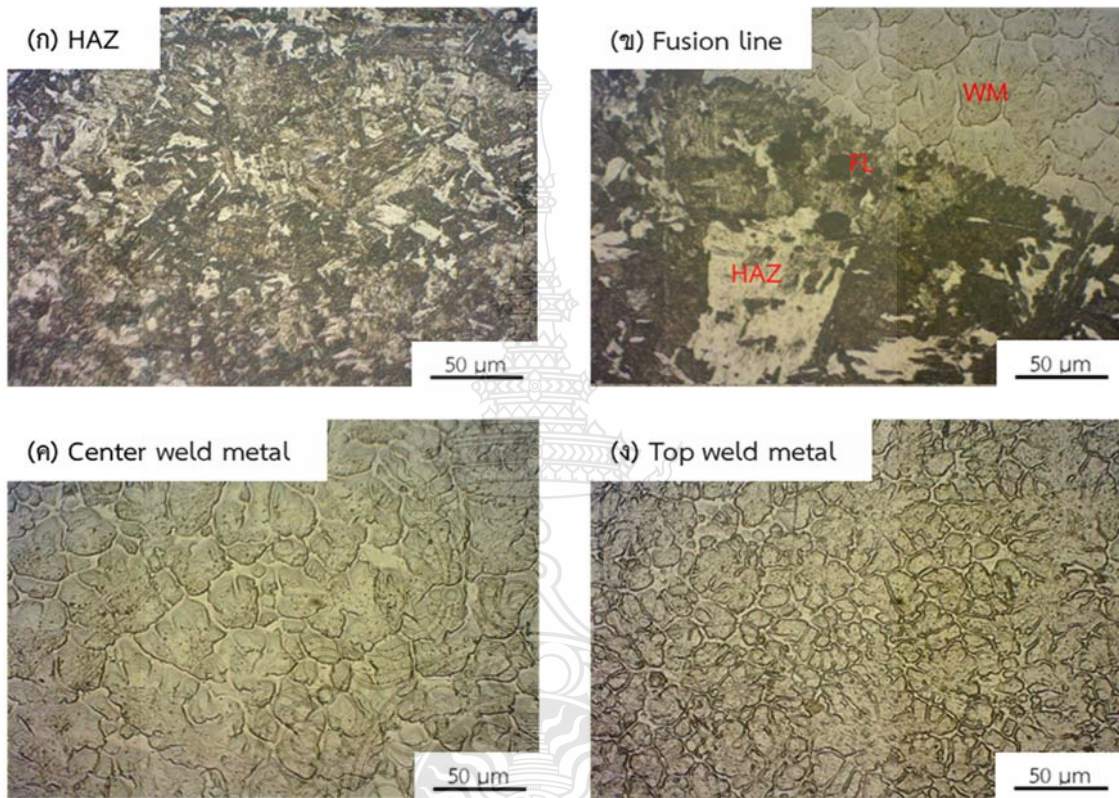


รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง กระแสเชื่อมที่ 230 แอมแปร์

รูปที่ 4.8 (ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระทบร้อนของชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 230 แอมแปร์ พบว่ากระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้โครงสร้างเพิร์ลไลต์และโครงสร้างเฟอร์ไรต์มีเกรนละเอียดและมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างหลักเพิร์ลไลต์ จนกระทั่งถึงบริเวณเส้นหลอมละลายดังรูปที่ 4.8 (ข) ก่อนเข้าสู่บริเวณโลหะเชื่อมพื้นที่ที่กระทบร้อนที่ติดกับบริเวณเส้นหลอมละลายพบว่า โครงสร้างเฟอร์ไรต์และโครงสร้างเพิร์ลไลต์มีเกรนหยาบจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบมีทิศทางการเติบโตของเกรนในทุกทิศทาง เมื่อทำการตรวจสอบบริเวณถัดมาในพื้นที่บริเวณโลหะเชื่อมเหนือเส้นหลอมละลายที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่ 230 แอมแปร์ โครงสร้างจุลภาคที่ได้ พบว่าโครงสร้างโลหะเชื่อมมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) รูปร่างค่อนข้างกลมก่อตัวขึ้น พบว่าขนาดเกรนมี



แนวโน้มนุ่มเพิ่มสูงขึ้นดังรูปที่ 4.8 (ค) เมื่อทำการเปรียบเทียบกับขนาดเกรนของโลหะเชื่อมของกระแสเชื่อม 150-210 แอมแปร์ เกรนที่ได้มีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามเมื่อเข้าไปใกล้บริเวณด้านบนบนของโลหะเชื่อมมีแนวโน้มนุ่มขนาดเกรนเล็กลงทำการตรวจสอบที่ตำแหน่งด้านบนบนของเนื้อโลหะเชื่อมดังรูปที่ 4.8 (ง) และเมื่อทำการวัดขนาดของเกรนที่เกิดขึ้น เกรนมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 27.317 ไมโครเมตร



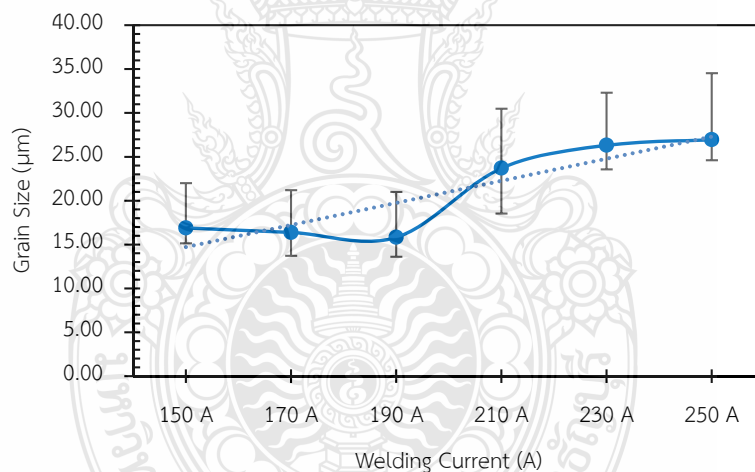
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาพของแนวเชื่อมพอกแข็ง กระแสเชื่อมที่ 250 แอมแปร์

รูปที่ 4.9 (ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่ที่กระแทกของชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 250 แอมแปร์พบว่า กระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์และโครงสร้างเพอร์ไรท์มีเกรนละเอียดและมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างหลักเฟอร์ไรต์ จนกระทั่งถึงบริเวณเส้นหลอมละลายดังรูปที่ 4.9 (ข) ก่อนเข้าสู่บริเวณโลหะเชื่อมพื้นที่ที่กระแทกที่ติดกับบริเวณเส้นหลอมละลาย พบว่าโครงสร้างเพอร์ไรท์และโครงสร้างเฟอร์ไรต์มีเกรนหยาบจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เมื่อทำการตรวจสอบบริเวณถัดมาบริเวณโลหะเชื่อมเหนือเส้นหลอมละลายที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่ 250 แอมแปร์ โครงสร้างจุลภาคที่ได้ พบว่าโครงสร้างโลหะเชื่อมมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) รูปร่างค่อนข้างกลมก่อตัวขึ้น เมื่อเปรียบเทียบขนาดของเกรนของบริเวณด้านบนบนของ

โลหะเชื่อมของกระแสเชื่อม 230 แอมแปร์ พบว่าขนาดของเกรนที่ได้มีขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 4.9 (ค) อย่างไรก็ตามเมื่อเข้าไปใกล้บริเวณด้านบนของโลหะเชื่อมมีแนวโน้มขนาดเกรนเล็กลงทำการตรวจสอบที่ตำแหน่งด้านบนของโลหะเชื่อมดังรูปที่ 4.9 (ง) เมื่อทำการวัดขนาดของเกรนที่เกิดขึ้นเกรนมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 27.671 ไมโครเมตร

#### 4.1.4 การเปรียบเทียบขนาดเกรนของโครงสร้างเดนไดรต์

รูปที่ 4.10 แสดงการตรวจสอบและเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150 170 190 210 230 และ 250 แอมแปร์ พบว่าโครงสร้างบริเวณโลหะเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างแบบเดนไดรต์ (Dendrite) รูปร่างค่อนข้างกลมจึงทำการวัดขนาดเกรน พบว่า เดนไดรต์มีขนาดของเกรนเฉลี่ย 16.593 16.185 15.931 23.712 27.317 และ 27.671 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยกระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ เดนไดรต์มีขนาดของเกรนเล็กที่สุดเฉลี่ย 15.931 ไมโครเมตร เมื่อเปรียบเทียบกระแสเชื่อมอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความแข็งที่ให้ค่าความแข็งสูงสุดเฉลี่ย 852 HV

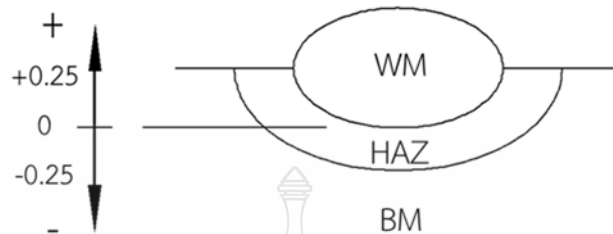


รูปที่ 4.10 ขนาดเกรนของโครงสร้างเดนไดรต์ กระแสเชื่อมที่ 150-250 แอมแปร์

#### 4.1.5 การทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็ง

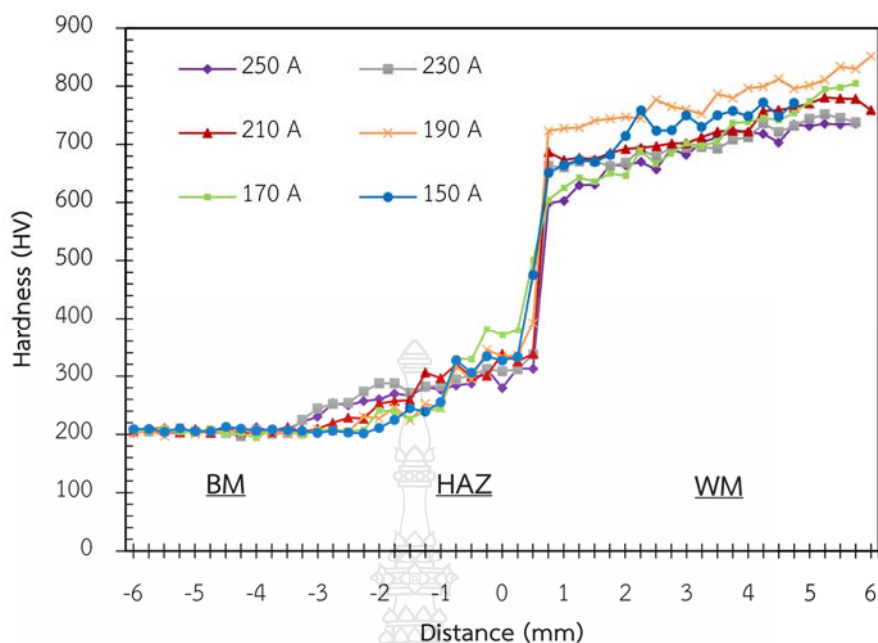
รูปที่ 4.11 แสดงค่าความแข็งในแต่ละบริเวณของแนวเชื่อมพอกแข็ง โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ใช้แรงกด 300 กรัม กดแช่เป็นเวลา 10 วินาที เว้นระยะระหว่างจุด 0.25 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM E384-17 (Vickers microhardness test) จุดเริ่มต้นสำหรับทดสอบค่าความแข็งบริเวณโลหะขึ้นงานที่ตำแหน่ง -6 ถึง 6 โครงสร้างมหภาคที่ได้สามารถแบ่งขอบเขตพื้นที่ของ

แนวเชื่อมออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ บริเวณโลหะฐาน (Base metal: BM) บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (Heat affect zone: HAZ) บริเวณโลหะเชื่อม (Weld metal: WM)



รูปที่ 4.11 ตำแหน่งการทดสอบความแข็ง

รูปที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็งที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่ 150-250 แอมแปร์ พบว่าบริเวณโลหะฐาน (Base metal: BM) มีค่าความแข็งเฉลี่ย 205 HV และความแข็งมีค่าสูงขึ้นเมื่อทำการทดสอบที่บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (Heat affect zone: HAZ) มีค่าความแข็งเฉลี่ย 393 HV เมื่อทำการทดสอบที่บริเวณบริเวณเส้นหลอมละลาย (Fusion line: FL) หรือตำแหน่งที่ 0 มิลลิเมตร ค่าความแข็งโน้มสูงขึ้น และเมื่อทำการทดสอบที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมพอกแข็ง (Weld metal: WM) มีค่าความแข็งสูงสุด โดยกระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ มีค่าความแข็งสูงสุดเฉลี่ย 852 HV สอดคล้องกับผลการวัดขนาดของเดนไดรต์มีขนาดของเกรนเล็กที่สุดเฉลี่ย 15.931 ไมโครเมตร ซึ่งสอดคล้องกับรายงานที่ว่า โครงสร้างเดนไดรต์ที่มีขนาดเกรนลดลงจะช่วยเพิ่มความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม [24, 25, 26]

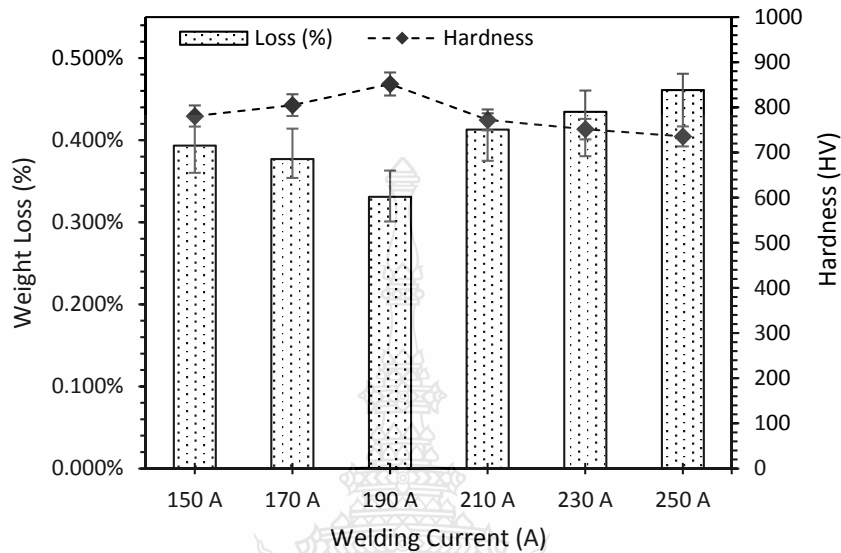


รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็ง กระแสเชื่อมที่ 150-250 แอมแปร์

#### 4.1.6 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น

รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดสอบความแข็งและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักรีดของเนื้อโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น ที่กระแสเชื่อม 150-250 แอมแปร์ การแสดงความต้านทานการสึกหรอในการทดลองนี้จะแสดงด้วยค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักรีดหาย เมื่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักรีดหายมีค่าสูงจะแสดงถึงความต้านทานการสึกหรอต่ำ ในขณะที่หากเปอร์เซ็นต์น้ำหนักรีดหายต่ำจะแสดงถึงความต้านทานการสึกหรอสูง ผลการทดลองพบว่า กระแสเชื่อมที่ 150 แอมแปร์ มีค่าความแข็งเฉลี่ย 790.82 HV และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักรีดหายเฉลี่ย 0.393 เปอร์เซ็นต์ เมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นจนถึงกระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่เปอร์เซ็นต์น้ำหนักรีดหายมีแนวโน้มลดลง ซึ่งกระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ มีค่าความแข็งสูงสุดเฉลี่ย 852 HV ขณะที่เปอร์เซ็นต์น้ำหนักรีดหายต่ำสุดเฉลี่ย 0.321 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นจนถึงกระแสเชื่อมที่ 210 230 และ 250 แอมแปร์ ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง ขณะที่เปอร์เซ็นต์น้ำหนักรีดหายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น กระแสเชื่อมที่ 210 230 และ 250 แอมแปร์ มีค่าความแข็งสูงสุดเฉลี่ย 772.18 756.35 726.58 HV และมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักรีดหาย เฉลี่ย 0.413 0.434 0.461 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักรีดหายจะแปรผกผันกับค่าความแข็ง เมื่อความแข็งที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักรีดหายลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jaswant Singh [27] ได้กล่าวว่า บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่มีความแข็งสูงจะมีความต้านทานการสึกหรอสูง

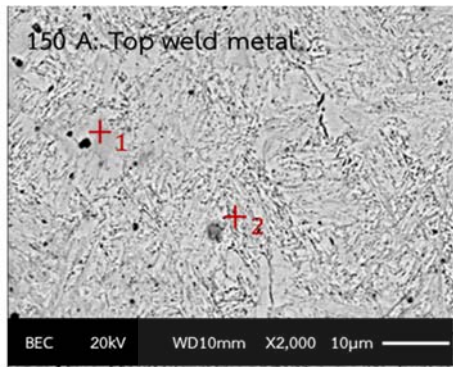
ตามไปด้วย ในขณะที่เนื้อโลหะเชื่อมที่มีความแข็งต่ำจะมีความต้านทานการสึกหรอน้อย โดยความแข็งของเนื้อโลหะเชื่อมและความต้านทานการสึกหรอซึ่งจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อม



**รูปที่ 4.13** การเปรียบเทียบความแข็งและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 150-250 แอมแปร์

#### 4.1.7 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

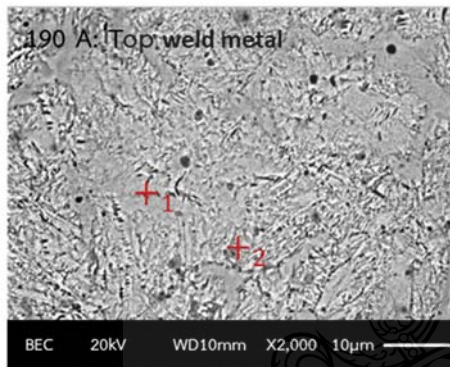
การเปรียบเทียบและวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณโลหะเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยทำการทดสอบบริเวณโลหะเชื่อมพอกแข็งจำนวน 3 ชั้น ได้แก่ กระแสเชื่อมที่ 150 แอมแปร์ กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ มีค่าความแข็งสูงสุดและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายต่ำสุดและกระแสเชื่อมที่ 250 แอมแปร์ มีค่าความแข็งต่ำสุดและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายสูงสุด เพื่อเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีของกระแสเชื่อมในสภาวะที่แตกต่าง พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีเฟสที่มีลักษณะแตกต่างกันอย่างชัดเจน เฟสสีอ่อนแสดงตำแหน่งการตรวจสอบที่ 1 และเฟสสีเข้มแสดงตำแหน่งการตรวจสอบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.14-4.16 เมื่อทำการตรวจสอบบริเวณโลหะเชื่อมพอกแข็งด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงาน (Energy Dispersive Spectroscopy: EDS) แบบ Point analysis พบว่าส่วนผสมทางเคมีประกอบด้วยธาตุหลักอยู่จำนวน 7 ธาตุ คือ คาร์บอน (C) ซิลิกอน (Si) วาเนเดียม (V) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) โมลิบดีนัม (Mo) และเหล็ก (Fe)



Main Element (wt%)

Points	C	Si	V	Cr	Mn	Mo	Fe
Point1	4.86	1.08	0.69	9.37	2.45	1.09	Bal.
Point2	1.97	1.26	0.12	6.92	1.97	0.80	Bal.

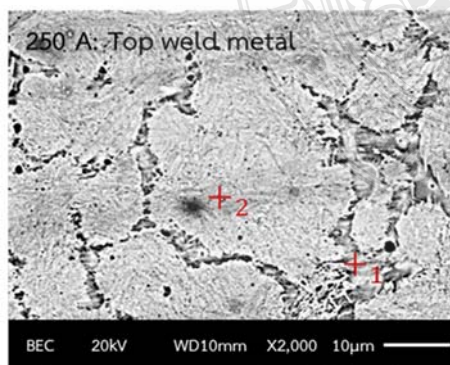
รูปที่ 4.14 ตำแหน่งการทดสอบและผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 150 แอมแปร์



Main Element (wt%)

Points	C	Si	V	Cr	Mn	Mo	Fe
Point1	5.07	1.40	0.62	11.99	2.79	2.31	Bal.
Point2	2.27	0.81	0.30	6.95	2.20	0.20	Bal.

รูปที่ 4.15 ตำแหน่งการทดสอบและผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์

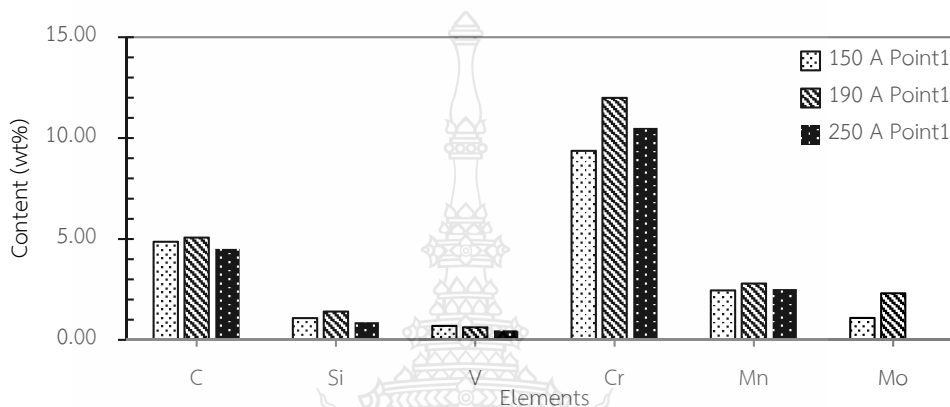


Main Element (wt%)

Points	C	Si	V	Cr	Mn	Mo	Fe
Point1	4.51	0.88	3.47	10.51	2.52	0.07	Bal.
Points	C	Si	V	Cr	Mn	Mo	Fe

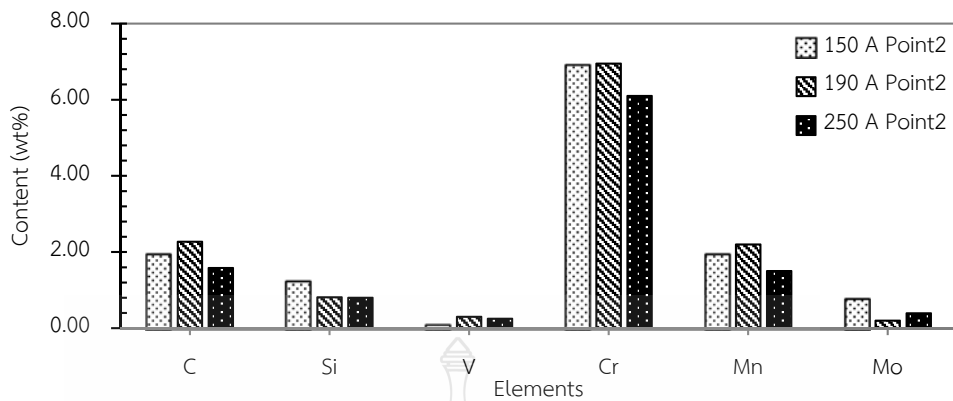
รูปที่ 4.16 ตำแหน่งการทดสอบและผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 250 แอมแปร์

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative element analysis) บริเวณโลหะเชื่อม 1 ชั้น ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่ 150 190 และ 250 แอมแปร์ พบว่า ตำแหน่งการตรวจสอบที่ 1 ของกระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ มีแนวโน้มปริมาณธาตุคาร์บอน (C) ซิลิกอน (Si) วานเดียม (V) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) โมลิบดีนัม (Mo) สูงกว่ากระแสเชื่อมที่ 150 และ 250 แอมแปร์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงปริมาณบริเวณโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น ตำแหน่งที่ 1

ในตำแหน่งการตรวจสอบที่ 2 พบว่า กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ มีแนวโน้มปริมาณธาตุโครเมียม (Cr) และแมงกานีส (Mn) สูงกว่ากระแสเชื่อมที่ 150 และ 250 แอมแปร์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งเมื่อทำพิจารณา พบว่าธาตุคาร์บอน โครเมียม และแมงกานีส เป็นธาตุที่มีอิทธิพลส่งผลให้ความแข็งและความแข็งแรงของโลหะเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kenchi Reddy และคณะ [28] ได้อธิบายเมื่อปริมาณส่วนผสมทางเคมี เช่น C Cr และ Mn เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งและความต้านทานต่อการสึกหรอของโลหะเชื่อมพอกแข็ง และ Amardeep Singh Kang และคณะ [29] ได้อธิบายถึง อิทธิพลของธาตุเกิดการรวมตัวระหว่างคาร์บอนกับโครเมียมเกิดเป็นสารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรนส่งผลให้ความแข็งและความต้านทานต่อการสึกหรอของโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งเพิ่มขึ้น



**รูปที่ 4.18** ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงปริมาณบริเวณโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น ตำแหน่งที่ 2

การศึกษาอิทธิพลของกระแสเชื่อมอาร์ลวดไส้ฟลักซ์ที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นที่กระแสเชื่อม 150-250 แอมแปร์ ความเร็วเดินเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งเกิดการเพิ่มความแข็งและความแข็งแรง เมื่อกระแสเพิ่มขึ้นจาก 150-190 แอมแปร์และลดลงเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 210-250 แอมแปร์ กระแสที่ 190 แอมแปร์ เป็นกระแสเชื่อมที่มีค่าความแข็งสูงที่สุด โดยมีค่าความแข็ง 852 HV ขณะที่การทดสอบการสึกหรอพบว่า กระแสเชื่อม 190 แอมแปร์ มีความต้านทานการสึกหรอต่ำที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหาย 0.321 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการเลือกสภาวะการเชื่อมที่กระแสเชื่อม 190 แอมแปร์ ความเร็วเดินเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที มาทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง 1-3 ชั้น เพื่อศึกษาอิทธิพลของจำนวนชั้นพอกแข็งต่อรูปร่างและคุณสมบัติทางกลของโลหะเชื่อมพอกแข็ง

## 4.2 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกแข็งที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น

### 4.2.1 ลักษณะทางกายภาพผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น

รูปที่ 4.21 แสดงผิวหน้าของแนวเชื่อมพอกแข็งด้วยการเชื่อมอาร์ลวดไส้ฟลักซ์กระแสเชื่อม 190 แอมแปร์ โดยแบ่งเป็นจำนวนชั้นต่าง ๆ ผลการตรวจสอบด้วยตาเปล่าพบว่า ผิวหน้าแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ไม่มีจุดบกพร่องใด ๆ เช่น สแลกฝังในแนวเชื่อม (Slag inclusion) รอยแตกร้าว (Crack) ตามดหรือโพรงอากาศ (Porosity) อย่างไรก็ตามชิ้นงานเชื่อมที่ได้พบว่ามีเม็ดโลหะ (Spatter) ที่กระเด็นออกจากบ่อหลอมละลายอยู่บริเวณระหว่างโลหะเชื่อม

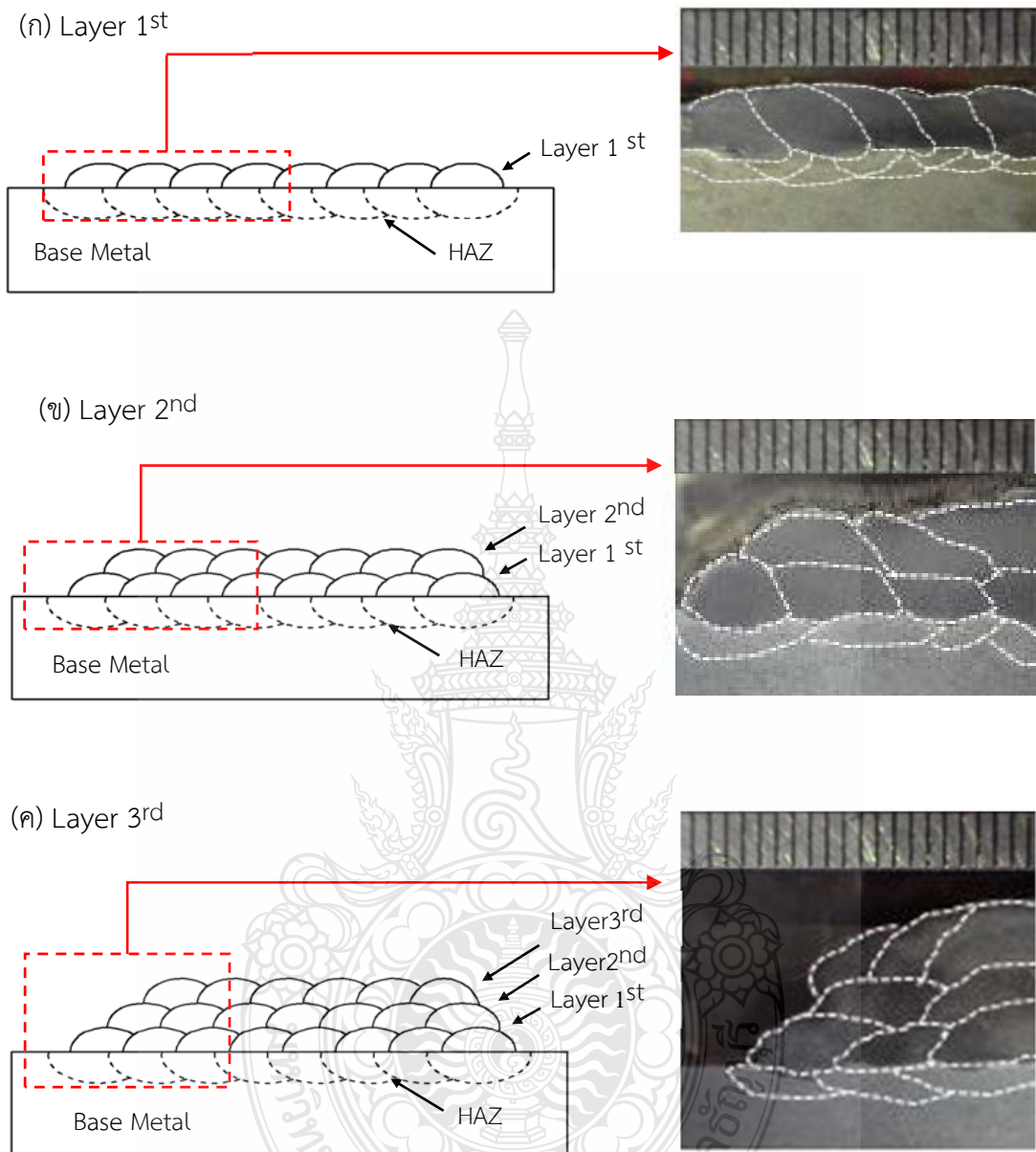




รูปที่ 4.19 ลักษณะทางกายภาพของผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์

#### 4.2.2 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น

รูปที่ 4.20 แสดงโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่ตัดขวางทิศทางการเดินแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแส 190 แอมแปร์ เชื่อมพอกแข็งจำนวน 1-3 ชั้น ผลการตรวจสอบด้วยภาพถ่ายกำลังขยายต่ำพบว่า มีการแบ่งแยกชั้นในแต่ละชั้นค่อนข้างชัดเจน บริเวณโลหะฐาน (Base metal: BM) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) บริเวณเส้นหลอมละลายระหว่างโลหะเชื่อมและพื้นกระทบร้อน (Fusion line between WM and HAZ: FL) และบริเวณโลหะเชื่อม (Weld metal: WM) โดยรูปที่ 4.20 (ก) แสดงจำนวนชั้นเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น รูปที่ 4.20 (ข) แสดงจำนวนชั้นเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น และรูปที่ 4.20 (ค) แสดงจำนวนชั้นเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น แนวเชื่อมที่ได้ส่วนใหญ่มีความสม่ำเสมอและมีความสมบูรณ์ ไม่พบจุดบกพร่องใด ๆ

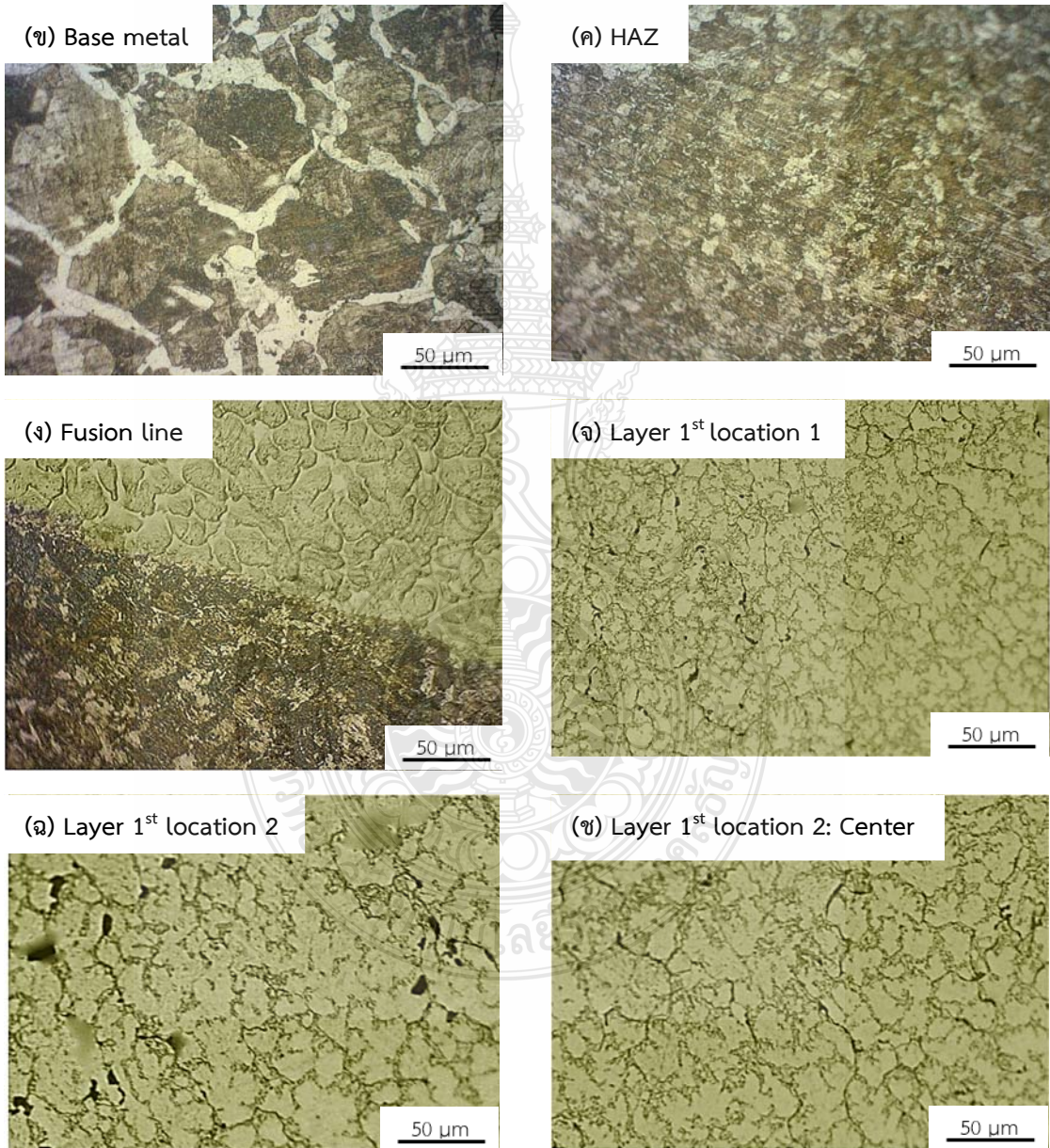
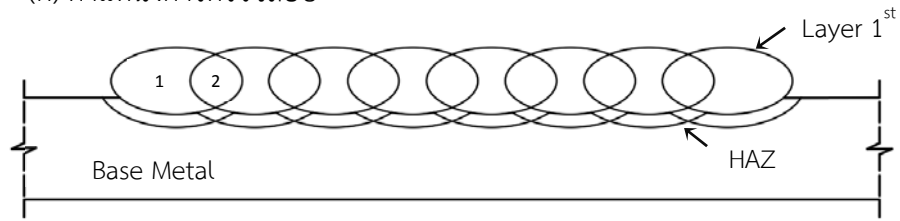


รูปที่ 4.20 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์

#### 4.2.3 โครงสร้างจุลภาค

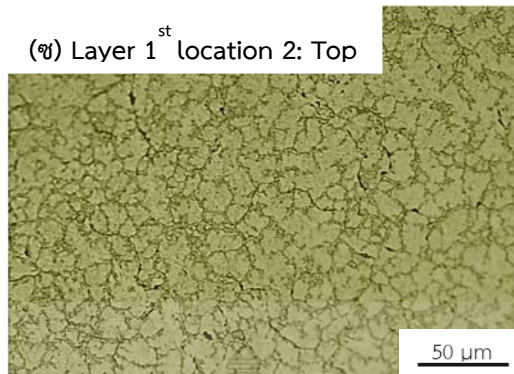
โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็งพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างบริเวณโลหะฐาน (Base metal) พื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone) เส้นหลอมละลาย (Fusion line) และโลหะเชื่อม (Weld metal) ตำแหน่งต่าง ๆ ที่กำหนด ดังรูปที่ 4.21 (ก)

(ก) ตำแหน่งการตรวจสอบ



รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์

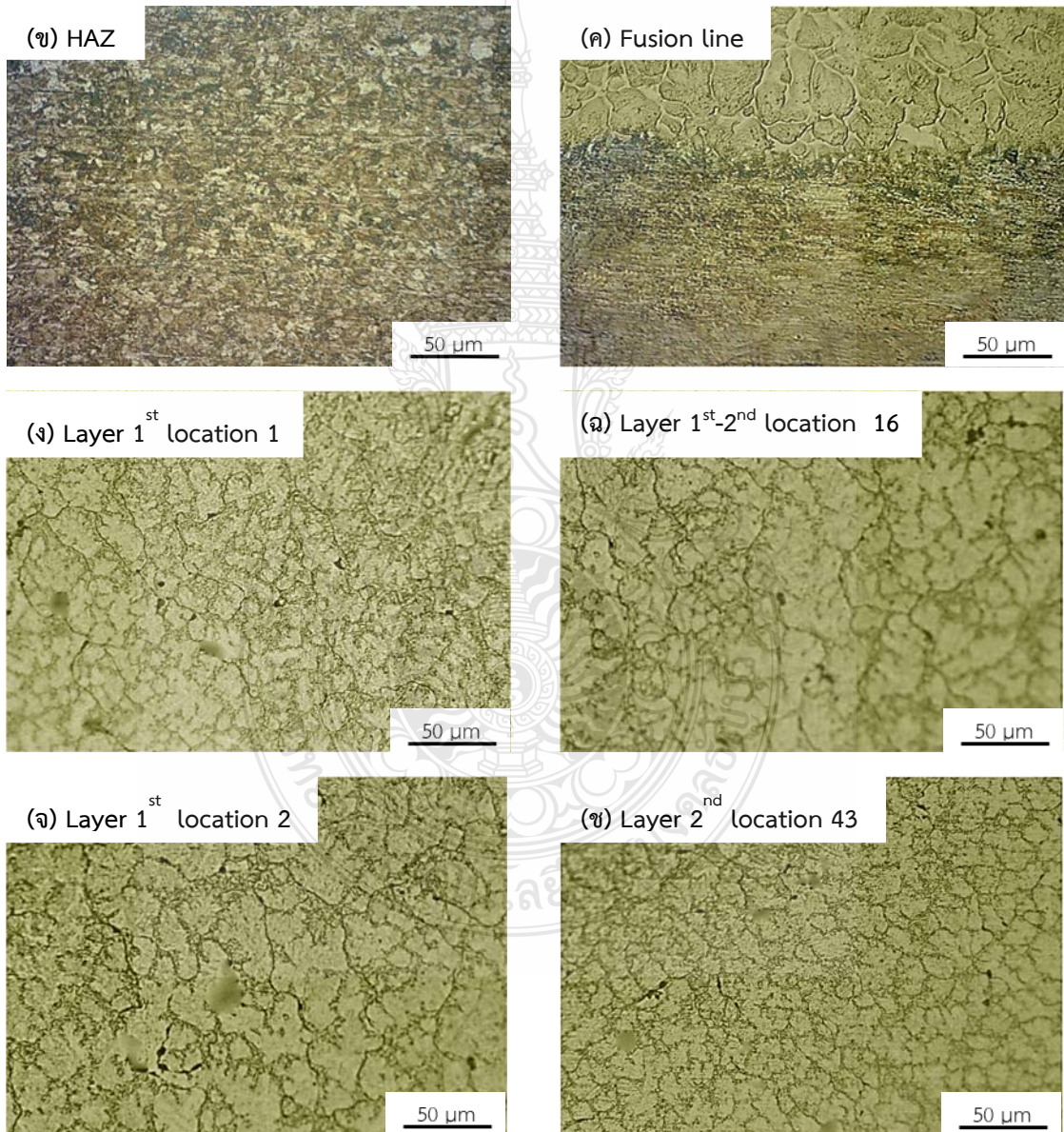
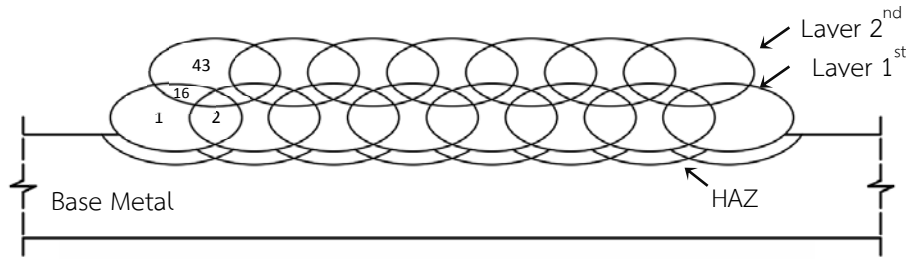
(ข) Layer 1<sup>st</sup> location 2: Top



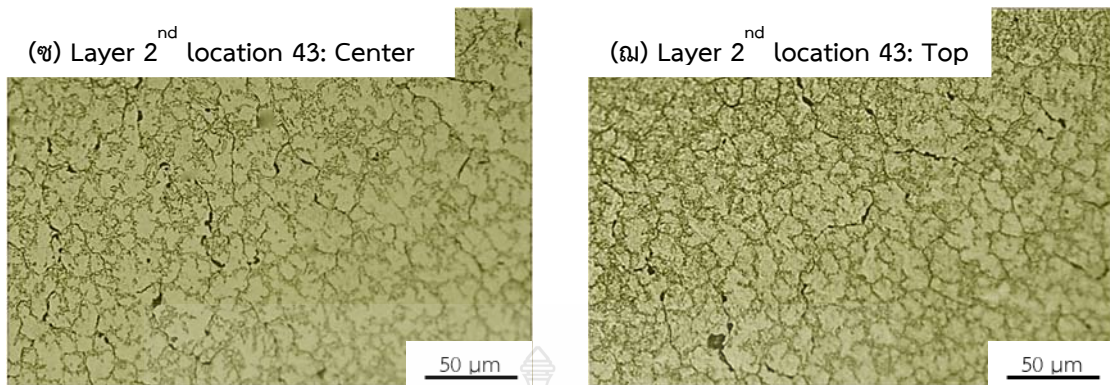
รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์

รูปที่ 4.21 (ก) แสดงรูปจำลองโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นและตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบ ดังรูปที่ 4.21 (ข) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S45C มีลักษณะเกรนหยาบขนาดใหญ่ประกอบด้วยโครงสร้างเฟิร์ลไลต์ จะเห็นเป็นพื้นที่สีเข้มและโครงสร้างเฟอร์ไรท์จะเป็นพื้นที่สีขาว ซึ่งเป็นโครงสร้างโลหะฐานบริเวณที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนจากการเชื่อมหรือได้รับความร้อนแต่อุณหภูมิที่ได้รับไม่สูง (Unaffected zone) เมื่อทำการตรวจสอบเข้าไปใกล้บริเวณโลหะเชื่อม โครงสร้างจุลภาคที่ได้ดังรูปที่ 4.21 (ค) โครงสร้างจุลภาคในพื้นที่ที่กระทบร้อน พบว่าโครงสร้างเฟอร์ไรท์และโครงสร้างเฟิร์ลไลต์มีเกรนละเอียดจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างหลักเฟิร์ลไลต์ รูปที่ 4.21 (ง) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณเส้นหลอมละลาย (Fusion Line: FL) ที่เป็นเส้นแบ่งขอบเขตระหว่างโลหะฐานบริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนกับบริเวณโลหะเชื่อมออกจากกันหรือบริเวณที่เกิดการหลอมละลาย เมื่อทำการตรวจสอบบริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนที่ติดกับบริเวณเส้นหลอมละลาย พบว่าโครงสร้างเฟอร์ไรท์และเฟิร์ลไลต์มีเกรนขนาดใกล้เคียงกันมีความสม่ำเสมอและจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ ซึ่งเกิดภายหลังจากการเชื่อมทับแนว โดยโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมแนวแรกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอันเนื่องมาอิทธิพลจากความร้อนที่เกิดจากการเชื่อมทับแนว [30] รูปที่ 4.21 (จ) โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 1 ที่ได้รับผลกระทบร้อนจากความร้อนจากการเชื่อมทับแนวมีลักษณะเกรนที่ค่อนข้างกลมและมีขนาดสม่ำเสมอ รูปที่ 4.21 (ฉ) โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 2 แสดงโครงสร้างบริเวณซ้อนทับ (Overlap) บริเวณส่วนที่ซ้อนทับกันของแนวเชื่อม พบว่าบริเวณส่วนที่ซ้อนทับกันมีเกรนหยาบขนาดใหญ่กว่าตำแหน่งที่ 1 เมื่อทำการเปรียบเทียบกัน รูปที่ 4.21 (ข) โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 2 บริเวณกึ่งกลางของโลหะเชื่อม มีลักษณะเกรนมีขนาดใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ 1 รูปที่ 4.22 (ข) โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 2 บริเวณด้านบนของโลหะเชื่อมมีลักษณะเกรนค่อนข้างกลมละเอียดและสม่ำเสมอเกินกว่าบริเวณกึ่งกลางโลหะเชื่อม

(ก) ตำแหน่งการตรวจสอบ



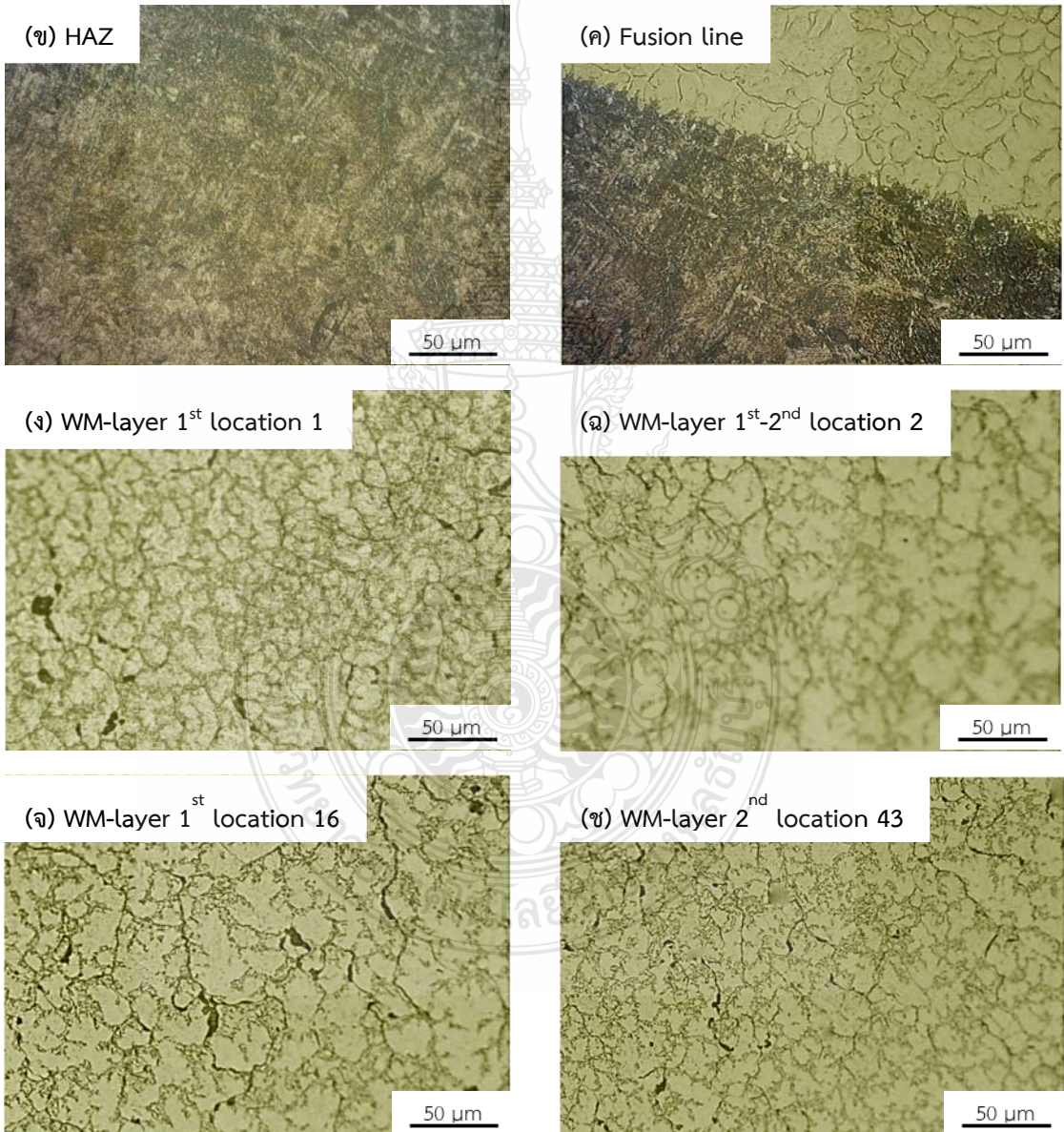
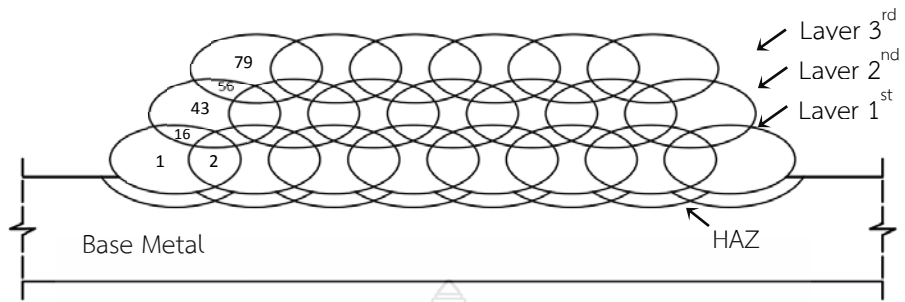
รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์



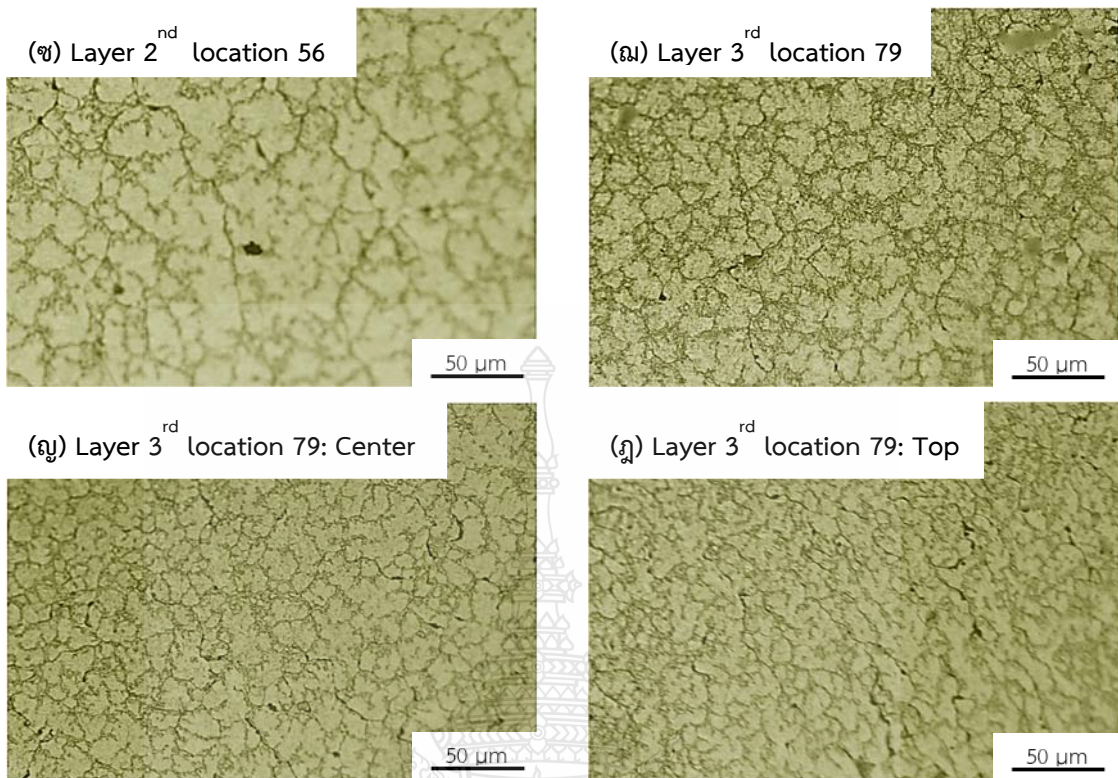
รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์

รูปที่ 4.23 (ก) แสดงรูปจำลองโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้นและตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ดังรูปที่ 4.23 (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระแทกร้อนพบว่าโครงสร้างเฟิร์ลไลต์ และโครงสร้างเฟอร์ไรท์มีเกรนมีละเอียดมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างหลักเฟิร์ลไลต์ จนกระทั่งถึงบริเวณเส้นหลอมละลายดังรูปที่ 4.23 (ค) ก่อนเข้าสู่บริเวณโลหะเชื่อมพื้นที่กระแทกร้อนที่ติดกับบริเวณเส้นหลอมละลาย พบว่าโครงสร้างเฟอร์ไรท์และโครงสร้างเฟิร์ลไลต์มีเกรนขนาดใกล้เคียงกันมีความสม่ำเสมอและจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ เมื่อทำการตรวจสอบบริเวณถัดมาบริเวณโลหะเชื่อมพอกแข็งเหนือเส้นหลอมละลายที่เชื่อม พบว่าโครงสร้างโลหะเชื่อมมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) รูปร่างค่อนข้างกลม รูปที่ 4.23 (ง) โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 1 ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนจากการเชื่อมทับแนวมีลักษณะเกรนที่ค่อนข้างกลมและมีขนาดสม่ำเสมอ รูปที่ 4.23 (จ) โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 2 แสดงโครงสร้างบริเวณซ้อนทับ (Overlap) บริเวณส่วนที่ซ้อนทับกันของแนวเชื่อม พบว่าบริเวณส่วนที่ซ้อนทับกันมีเกรนลักษณะหยาบและมีขนาดใหญ่กว่าตำแหน่งที่ 1 เมื่อทำการเปรียบเทียบกัน รูปที่ 4.23 (ฉ) โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 2 บริเวณส่วนที่เกิดการซ้อนทับกันหลังจากการเชื่อมทับแนวระหว่างชั้นที่ 1 กับชั้นที่ 2 มีลักษณะเกรนที่หยาบและมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ 2 ในชั้นที่ 1 รูปที่ 4.23 (ช) โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 2 ตำแหน่งที่ 43 มีลักษณะเกรนค่อนข้างกลมละเอียดและสม่ำเสมอเกินกว่าโครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 1 เมื่อทำการเปรียบเทียบกัน รูปที่ 4.24 (ข) โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 2 ตำแหน่งที่ 43 บริเวณกึ่งกลางของโลหะเชื่อมมีลักษณะเกรนค่อนข้างกลมละเอียดและสม่ำเสมอ รูปที่ 4.24 (ฅ) โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 2 ตำแหน่งที่ 42 บริเวณต้นบนของโลหะเชื่อมมีขนาดเกรนเล็กค่อนข้างกลมและสม่ำเสมอเกินกว่าเมื่อเทียบกับกึ่งกลางของโลหะเชื่อม

(ก) ตำแหน่งการตรวจสอบ



รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์



รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์

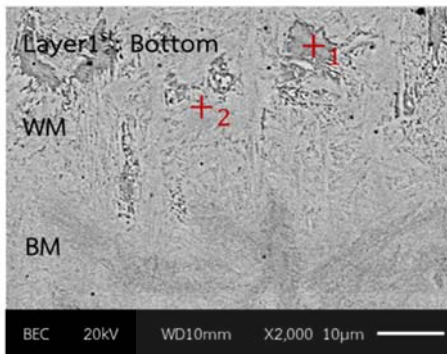
รูปที่ 4.25 (ก) แสดงรูปจำลองโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นและตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค รูปที่ 4.25 (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่กระทบร้อน พบว่าโครงสร้างเฟิร์ลไลต์และโครงสร้างเฟอร์ไรท์มีเกรนมีละเอียดมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างหลักเฟิร์ลไลต์ จนกระทั่งถึงบริเวณเส้นหลอมละลายดังรูปที่ 4.25 (ค) ก่อนเข้าสู่บริเวณโลหะเชื่อมพื้นที่กระทบร้อนที่ติดกับบริเวณเส้นหลอมละลาย พบว่าโครงสร้างเฟอร์ไรท์และโครงสร้างเฟิร์ลไลต์มีเกรนขนาดใกล้เคียงกันมีความสม่ำเสมอและจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ เมื่อทำการตรวจสอบบริเวณถัดมาในพื้นที่โลหะเชื่อมพอกแข็งเหนือเส้นหลอมละลายที่เชื่อม พบว่าโครงสร้างโลหะเชื่อมมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) รูปร่างค่อนข้าง รูปที่ 4.25 (ง) โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 1 ที่ได้รับผลกระทบร้อนจากความร้อนจากการเชื่อมทับแนวมีลักษณะเกรนที่ค่อนข้างกลมและมีขนาดสม่ำเสมอ รูปที่ 4.25 (จ) โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 2 แสดงโครงสร้างบริเวณซ้อนทับ (Overlap) บริเวณส่วนที่ซ้อนทับกันของแนวเชื่อม พบว่าบริเวณส่วนที่ซ้อนทับกันมีเกรนลักษณะหยาบและมีขนาดใหญ่กว่าตำแหน่งที่ 1 เมื่อทำการเปรียบเทียบกัน รูปที่ 4.25 (ฉ) โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 2 ตำแหน่งที่ 16 บริเวณส่วนที่เกิดการซ้อนทับกันหลังจากการเชื่อมทับแนวระหว่างชั้นที่ 1



กับชั้นที่ 2 มีลักษณะเกรนที่หยาบและมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ 2 ในชั้นที่ 1 รูปที่ที่ 4.25 (ข) โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 2 ตำแหน่งที่ 43 มีลักษณะเกรนค่อนข้างกลมละเอียดและสม่ำเสมอมากกว่าโครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 1 ตำแหน่งที่ 1 เมื่อทำการเปรียบเทียบกัน 4.26 (ข) โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 3 ตำแหน่งที่ 56 บริเวณส่วนที่เกิดการซ้อนทับกันหลังจากการเชื่อมทับแนวระหว่างชั้นที่ 2 กับชั้นที่ 3 มีลักษณะเกรนละเอียดและเล็กกว่าเมื่อเทียบกับบริเวณซ้อนทับในตำแหน่งที่ 16 ในชั้นที่ 2 รูปที่ที่ 4.26 (ฅ) โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 3 ตำแหน่งที่ 79 มีลักษณะเกรนค่อนข้างกลมละเอียดและสม่ำเสมอมากกว่าโครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 2 ตำแหน่งที่ 43 เมื่อทำการเปรียบเทียบกัน รูปที่ที่ 4.23 (ญ) โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 3 ตำแหน่งที่ 79 บริเวณกึ่งกลางของโลหะเชื่อมมีขนาดเกรนค่อนข้างกลมละเอียดและสม่ำเสมอ รูปที่ที่ 4.26 (ฎ) โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 3 ตำแหน่งที่ 79 บริเวณด้านบนของโลหะเชื่อมมีขนาดเกรนเล็กค่อนข้างกลมและสม่ำเสมอกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งกึ่งกลางของโลหะเชื่อม

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อม 1-3 ชั้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

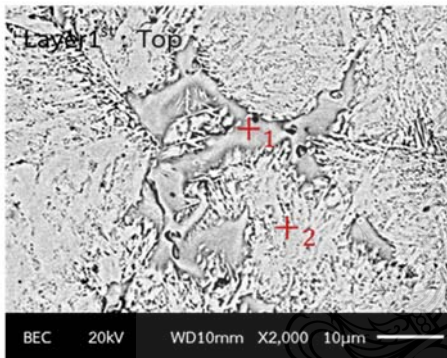
การเปรียบเทียบและวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณโลหะเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยทำการทดสอบบริเวณโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น เพื่อเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีของชั้นเชื่อมพอกแข็งที่แตกต่างกัน พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีเฟสที่มีลักษณะแตกต่างกันอย่างชัดเจน เฟสสีอ่อนแสดงตำแหน่งการตรวจสอบที่ 1 และเฟสสีเข้มแสดงตำแหน่งการตรวจสอบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.27-4.30 เมื่อทำการตรวจสอบบริเวณโลหะเชื่อมพอกแข็งด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงาน (Energy Dispersive Spectroscopy: EDS) แบบ Point analysis พบว่าส่วนผสมทางเคมีประกอบด้วยธาตุหลักอยู่จำนวน 7 ธาตุ คือ คาร์บอน (C) ซิลิกอน (Si) วาเนเดียม (V) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) โมลิบดีนัม (Mo) และเหล็ก (Fe)



Main Element (wt%)

Points	C	Si	V	Cr	Mn	Mo	Fe
Point1	4.92	0.77	0.01	6.53	2.46	0.19	Bal.
Point2	2.31	0.89	0.36	5.30	1.80	0.23	Bal.

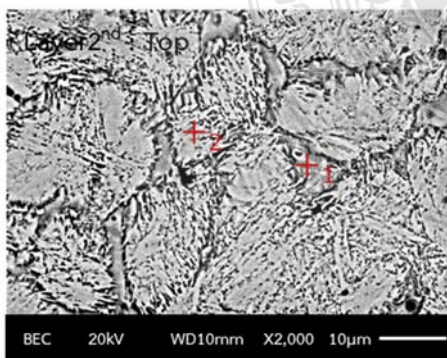
รูปที่ 4.27 ตำแหน่งการทดสอบและผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของบริเวณด้านล่างของโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์



Main Element (wt%)

Points	C	Si	V	Cr	Mn	Mo	Fe
Point1	4.92	0.99	0.46	11.40	2.38	1.20	Bal.
Point2	2.31	0.92	0.72	6.76	1.80	0.23	Bal.

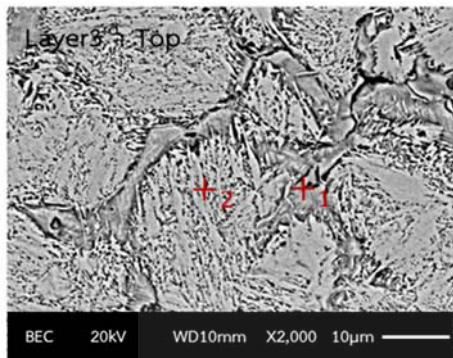
รูปที่ 4.28 ตำแหน่งการทดสอบและผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของบริเวณด้านบนของโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์



Main Element (wt%)

Points	C	Si	V	Cr	Mn	Mo	Fe
Point1	5.62	0.45	0.62	12.34	2.42	1.79	Bal.
Point2	2.63	1.00	1.25	7.08	2.09	0.22	Bal.

รูปที่ 4.29 ตำแหน่งการทดสอบและผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของบริเวณด้านบนของโลหะเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์

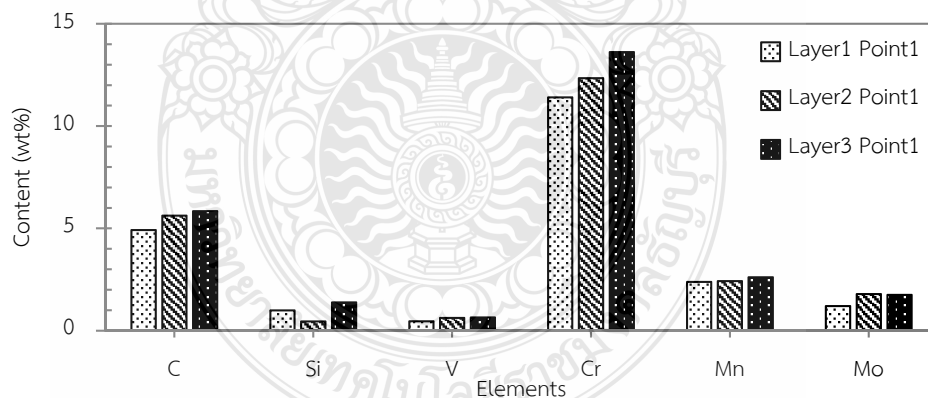


Main Element (wt%)

Points	C	Si	V	Cr	Mn	Mo	Fe
Point1	5.84	1.38	0.65	13.62	2.61	1.75	Bal.
Point2	2.85	1.02	1.44	7.28	2.11	0.44	Bal.

รูปที่ 4.30 ตำแหน่งการทดสอบและผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของบริเวณด้านบนของโลหะเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์

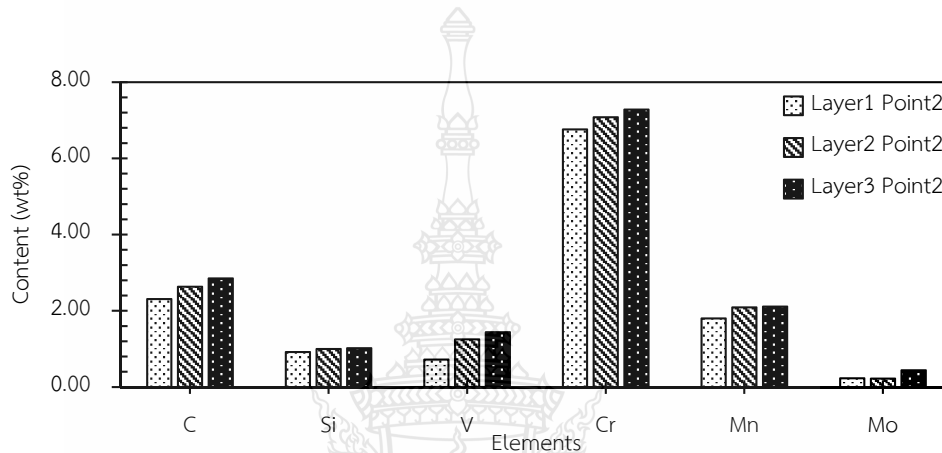
การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative element analysis) บริเวณโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ พบว่าตำแหน่งการตรวจสอบที่ 1 ของโลหะเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น มีแนวโน้มของปริมาณธาตุคาร์บอน (C) ซิลิกอน (Si) วาเนเดียม (V) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) สูงกว่าบริเวณโลหะเชื่อมพอกแข็ง 2 และ 1 ชั้น ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงปริมาณบริเวณโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ ตำแหน่งที่ 1

ในตำแหน่งการตรวจสอบที่ 2 ของโลหะเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น มีแนวโน้มของปริมาณธาตุคาร์บอน (C) ซิลิกอน (Si) วาเนเดียม (V) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) โมลิบดีนัม (Mo) สูงกว่า

บริเวณโลหะเชื่อมพอกแข็ง 2 และ 1 ชั้น ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.36 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohd. Majid และคณะ [31] ได้อธิบายปริมาณการเจือจางมีอิทธิพลอย่างมากต่อความต้านทานการสึกหรอและความแข็ง เมื่อปริมาณการเจือจางของการเชื่อมเกิดเพิ่มสูงขึ้นระหว่างโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งกับโลหะฐานจะลดคุณสมบัติที่ต้องการเช่น ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอ ในทางกลับกันความต้านทานการสึกหรอและความแข็งจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเกิดปริมาณการเจือจางที่ต่ำ เนื่องจากปริมาณการเจือจางที่เพิ่มสูงขึ้นและลักษณะของโครงสร้างจุลภาคหยาบความแข็งจะน้อยกว่าโครงสร้างจุลภาคละเอียด

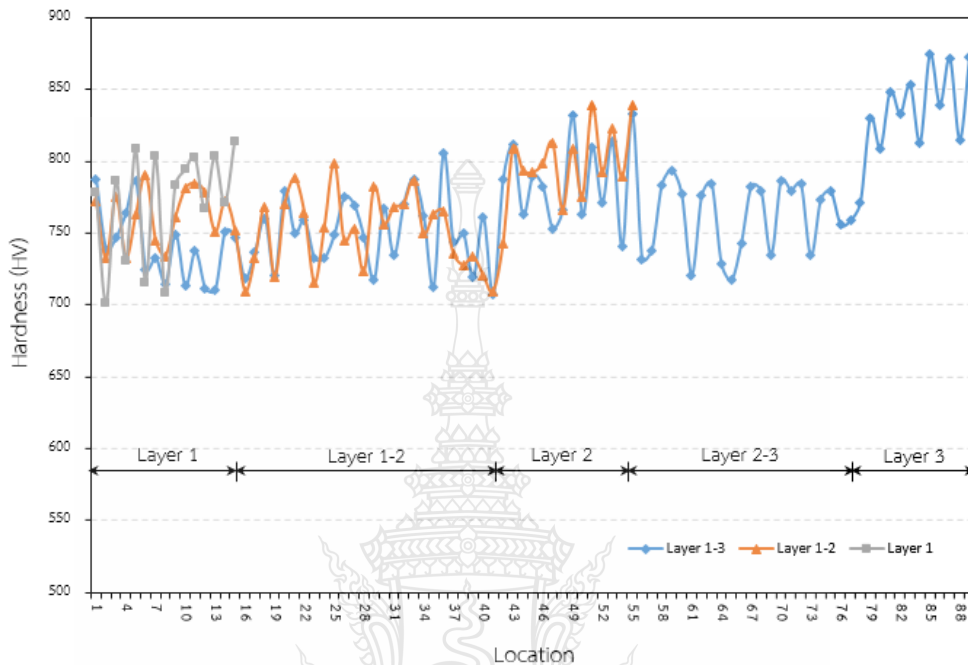


รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงปริมาณบริเวณโลหะเชื่อมชั้นพอกแข็ง 1-3 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ ตำแหน่งที่ 2

#### 4.2.5 การทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็ง

รูปที่ 4.33 การทดสอบความแข็งแนวเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ พบว่าบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น มีค่าความแข็งต่ำสุดเฉลี่ย 700.78 HV และมีค่าความแข็งสูงสุดเฉลี่ย 811.28 HV ส่วนบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น มีค่าความแข็งต่ำสุดเฉลี่ย 711.23 HV และมีค่าความแข็งสูงสุดเฉลี่ย 842.13 HV และบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น มีค่าความแข็งต่ำสุดเฉลี่ย 714.05 HV และมีค่าความแข็งสูงสุดเฉลี่ย 874.20 HV และพบว่าเมื่อจำนวนชั้นพอกแข็งเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ความแข็งของเนื้อโลหะเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Ranjit Singh และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาค้นคว้าทดลองของอิทธิพลการเชื่อมพอกผิวแข็งของธาตุ Fe-Cr-C ต่อคุณสมบัติความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คคลวดหุ้มฟลักซ์ การเชื่อมพอกผิวแข็ง 1 และ 3 ชั้น พบว่าความแข็งและความต้านทานการสึกหรอการเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มจำนวนของชั้นพอกแข็งและความแข็งลดลงเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น ความแข็งเพิ่มขึ้น 32.26 เปอร์เซ็นต์

และความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้น 79.48 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากจำนวนชั้นพอกแข็งเพิ่มขึ้นจาก 1 ชั้น เป็น 3 ชั้น

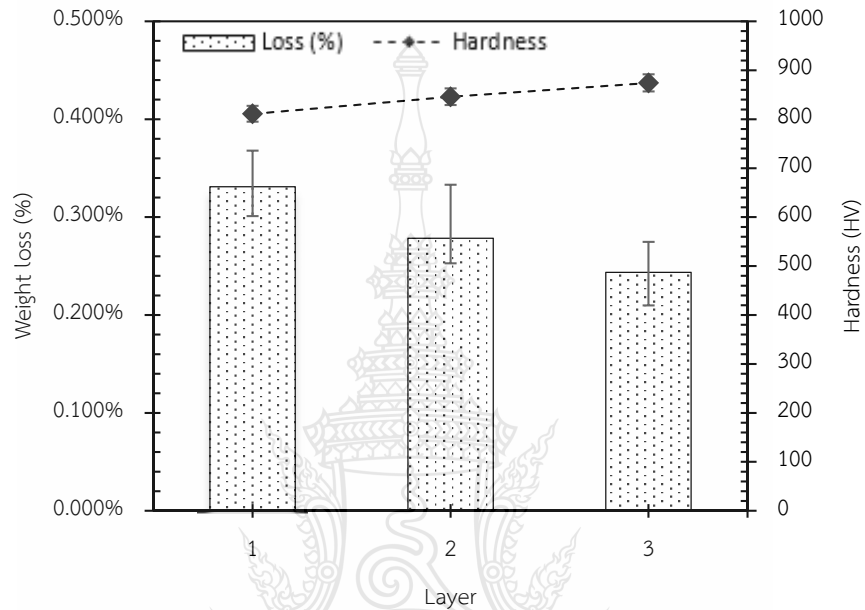


รูปที่ 4.33 ผลการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์

#### 4.2.6 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น

รูปที่ 4.34 แสดงผลการทดสอบความแข็งและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสียน้ำหนักของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 190 แอมแปร์ พบว่าเนื้อโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น มีความแข็งเฉลี่ย 811.28 HV ขณะที่เปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายเฉลี่ยเท่ากับ 0.331 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเนื้อโลหะเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น มีความแข็งเฉลี่ย 842.13 HV ขณะที่เปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายเฉลี่ยเท่ากับ 0.289 เปอร์เซ็นต์ และเนื้อโลหะเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น มีความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 874.20 HV ขณะที่เปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายเฉลี่ย 0.244 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจำนวนชั้นพอกแข็งเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ความแข็งของเนื้อโลหะเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายลดลง สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3 มีธาตุคาร์บอนและโครเมียมสูงที่สุดเนื่องจากลวดเชื่อม MF-6-GF-60GP มีปริมาณส่วนผสมโครเมียม (Cr) เป็นส่วนผสมหลัก ซึ่งเป็นธาตุที่มีอิทธิพลส่งผลทำให้ความแข็งและความแข็งแรงของโลหะเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้อิทธิพลของธาตุเกิดการรวมตัวกันระหว่างธาตุคาร์บอนและโครเมียมเกิดเป็นสารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ นิรันดร์ [33] ได้

ทำการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมพบว่า เนื้อโลหะเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดและมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายน้อยที่สุดและ อรรถกร [34] ได้กล่าวว่า ค่าความแข็งอาจจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและการสูญเสียน้ำหนักในรูปแบบของอัตราการสึกหรอที่แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งของชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งสามารถใช้ประเมินค่าความต้านทานการสึกหรอคร่าว ๆ ได้



รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบความแข็งและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น กระแสเชื่อมที่ 190 แอมแปร์

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเชื่อมอาร์กอลวดไส้ฟลักซ์พอกแข็งที่มีผลต่อสมบัติทางกลชั้นพอกแข็งบนผิวโค้งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S45C โดยใช้ตัวแปรในการเชื่อม คือ กระแสไฟเชื่อม 150 170 190 210 230 และ 250 แอมแปร์ มาทำการเชื่อม 1 แนว และ 1 ชั้น เพื่อหาตัวแปรที่ดีที่สุดจากการทดลอง จากนั้นนำตัวแปรที่ดีที่สุดมาทำการเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น จากนั้นนำแนวเชื่อมพอกแข็งที่ผ่านการเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น มาทำการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาและทดสอบสมบัติทางกลของแนวเชื่อมพอกแข็ง หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 กระแสไฟเชื่อมเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความกว้างของแนวเชื่อมและบริเวณอิทธิพลทางความร้อน (HAZ) มีขนาดเพิ่มขึ้น ขณะที่ระยะการหลอมลึกและความนูนของแนวเชื่อมพอกแข็งมีขนาดลดลง

5.1.2 การเพิ่มกระแสไฟเชื่อมส่งผลทำให้ค่าความแข็งและความต้านทานการสึกหรอมีค่าเพิ่มขึ้น สภาวะที่ให้ค่าความแข็งและความต้านทานการสึกหรอสูงที่สุด คือ กระแสไฟเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ ซึ่งมีขนาดเกรนเล็กและละเอียดที่สุด

5.1.3 เมื่อเปรียบเทียบความแข็งและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักรูพรุนของแนวเชื่อมพอก 1-3 ชั้นที่เชื่อมกระแสไฟเชื่อมที่ 190 แอมแปร์ พบว่าค่าความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่เปอร์เซ็นต์น้ำหนักรูพรุนมีแนวโน้มลดลงตามจำนวนชั้นพอกแข็งที่เพิ่มขึ้น โดยแนวเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นมีค่าความแข็งสูงสุดเฉลี่ย 874.20 HV ขณะที่เปอร์เซ็นต์น้ำหนักรูพรุนต่ำสุดเฉลี่ย 0.244 เปอร์เซ็นต์

5.1.4 การเพิ่มจำนวนชั้นพอกแข็งส่งผลทำให้เกิดการก่อตัวของโลหะคาร์ไบด์ในโลหะเชื่อมพอกแข็งที่เป็นสารประกอบที่เพิ่มความแข็งและความแข็งแรง เช่น โครเมียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นทำให้เกรนมีขนาดเล็กละเอียดมากขึ้น

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการทดสอบการสึกหรอด้วยล้ออย่างต้องทำการควบคุมอุณหภูมิในการทดสอบ เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการทดสอบต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที ทำให้เกิดความร้อนสะสมที่บริเวณล้ออย่าง เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะไม่สามารถทดสอบชิ้นงานต่อเนื่องไปได้เพราะจะส่งผลทำให้หน้าล้ออย่างเกิดการชำรุดเสียหาย ต้องทำการหยุดเพื่อระบายความร้อนก่อนทำการทดสอบ

5.2.2 ควรทดลองและเปรียบเทียบค่าความแข็งในทางสถิติด้วย เพื่อเพิ่มความชัดเจนให้กับค่าความแข็งที่ได้และเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับผลการทดลองได้

5.2.3 ในการศึกษาครั้งต่อไปสามารถเปลี่ยนแปลงลวดเชื่อมพอกผิวแข็งเป็นประเภทหรือชนิดอื่นได้ เพื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะของโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกล





## บรรณานุกรม

- [1] กรมการค้าระหว่างประเทศ, *การส่งออกข้าวประเทศไทย (Online)*, 2559, Available: [www.thaifita.com/ThaiFTA](http://www.thaifita.com/ThaiFTA) (25 สิงหาคม 2562).
- [2] มนัส สติจรจินดา, *วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก*, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรมหาวิทยาลัย, 2535.
- [3] Askeland, D. R. and Phule, P.P., *Science and Engineering of Materials*, Singapore: Cengage Learning, 2006.
- [4] Groover, M.P., *Fundamentals of Modern Manufacturing, Materials, Processes and Systems*, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [5] Japanese Standards Association, *JIS Handbook Ferrous Materials & Metallurgy*. Tokyo: Japanese standards association, 1996.
- [6] Cynthia, L. J. & Annette, O'Brien, *Welding Process, Welding Hand Book*, 9th ed. Miami: American Welding Society, 2001.
- [7] Larry, J., *Welding Principles and Applications: Flux Cored Arc Welding FCAW Equipment and Operation*, 7th ed. Boston: Cengage Learning, 2012.
- [8] คະเนย์ วรณโท, *การเชื่อมโลหะในระบบ GMAW*. กรุงเทพฯ: ที พี พริน, 2539.
- [9] ยุคล จุลอุภัย และ บรรเลง ศรีนิล, *การวิจัยและพัฒนางานเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยระบบเชื่อมไฟฟ้าด้วยมือ*. กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีวัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและการพลังงาน, 2535.
- [10] ยุคล จุลอุภัย, *การสีกหรือและเทคโนโลยีการเชื่อมซ่อม ฟันพอกผิวโลหะ*. กรุงเทพฯ: ศูนย์วิจัยพัฒนาและตรวจสอบงานเชื่อม สำนักพัฒนาเทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2536.
- [11] กรุงเทพเหล็กกล้า, *คุณสมบัติของธาตุต่าง ๆ เมื่อผสมลงไปเหล็ก* (Online), 2560, Available : [http://www.bssteel.co.th/elementadded\\_th.html](http://www.bssteel.co.th/elementadded_th.html) (25 สิงหาคม 2562).
- [12] ปานทัศน์ จำปากุล, *การตรวจสอบด้วยการดูโครงสร้างโดยวิธีการทางโลหะวิทยา* (Online), 2557, Available: <https://www.slideshare.net/champakul/2-7-33088163> (25 สิงหาคม 2562).
- [13] ASTM International, "Standard Peactice for Microetching Metals and Alloys E407-99," *Annual Book of ASTM Standard*, Vol 03-01, pp. 1-21, 1996.
- [14] ขวลิต เชียงกุล, *โลหะวิทยา*. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทยญี่ปุ่นดินแดง), 2542.

- [15] สถาบันวิจัยและพัฒนา, *การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส* (Online), 2559, Available: [www.yothin.ueuo.com/DATA/2.18.pdf](http://www.yothin.ueuo.com/DATA/2.18.pdf) (25 สิงหาคม 2562).
- [16] บันเทิง ศรีคะรัน, “สมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม” ปรินญาปรัชญาดุขฎฐิบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา, 2562.
- [17] Chatterjee, S. and Pal, T.K., “Weld Procedural Effect on The Performance of Iron Based Hardfacing Deposits on Cast Iron Substrate,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol 173, pp. 61-69, 2006.
- [18] Selvi, S. Sankaran, S.P. Srivatsavan, R., “Comparative Study of Hardfacing of Valve Seat Ring using MMAW Process,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol 207, pp. 256-362, 2008.
- [19] Balakrishnan, M., Balasubramanian, V., Madhusuhan, G.R., Sivakumar, K., “Effect of Buttering and Hardfacing on Ballistic Performance of Shielded Metal Arc Welded Armor Steel Joints.” *Materials and Design*, vol 32, pp. 469-479, 2011.
- [20] Coronado, J. J., Caicedo, H. F., Gomes, A. L. “The Effect of Welding Processes on Abrasive Wear Resistance for Hardfacing Deposits,” *Tribology International*, vol 42, pp. 745-749, 2009
- [21] V. Ulmanu, M.Badicioiu, M. Caltaru, Gh. Zecheru, Gh. Draghici, M. Minescu, et al., “Heavy-weight drill pipe hard-facing by using welding technology,” *Journal of the Balkan Tribological Association*, vol 16, No.4, pp. 510-516, 2010.
- [22] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, *Section IX Section IX, QW-462.5, Corrosion-Resistant Overlay Cladding/Hard-Facing Overlay*. New York: The American society of Mechanical engineers.
- [23] P. Srinivasan, B, V. Muthupandi, W. Dietzel and V. Sivan, “An assessment of impact strength and corrosion behavior of shielded metal arc welded dissimilar weldment between UNS 318 and IS 2062 steel,” *Material & Design* pp 182-191, 2006.
- [24] Jaswant Singh, Dinesh kumar Shukla, “Hardfacing With Saw Method on Mild Steel – A Critical Review,” *International Journal of Technical Research & Science*, ISSN No.: 2454- 2024 (online).

- [25] Rahul, Harish, K. A., & R. K. Saxena, "Effect of Cooling Rate on Microstructure of Saw Welded Mild Steel Plate (Grade C 25 as Per IS 1570)," *Journal of Modern Engineering Research (JMER)*, vol. 4, No. 1, pp. 222-228, January 2014.
- [26] Kolhe P.K, Datta C. K., "Prediction of microstructure and mechanical properties of multipass SAW" *Journal of materials processing technology*, vol 197, pp. 241–249, 2008.
- [27] Jaswant, S. & D. K. & Shukla, "Effect of Carbon, Chromium, Vanadium, Molybdenum, Manganese and Nickel on hardness and wear Resistance of Fe-Cr-C Hardfacing Alloys," *Journal of Material & Metallurgical Engineering*, vol 9, No 2, pp 163-175, 2019.
- [28] K. M. KenchiReddy, & C. T. Jayadeva., "The Effects of Welding Processes on Microstructure and Abrasive Wear Resistance for Hardfacing Deposits," *International Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 2, No 2, pp 28–34, 2012.
- [29] Amardeep S. K, Gurmeet, S. Cheema, Shivali Singla, "Wear behaviour of hardfacings on rotary tiller blades," *Procedia Engineering*, vol 97, pp. 1442 – 1451, 2014.
- [30] Aloraier, A., Ibrahim, R. & Thomson, P. "FCWA process to avoid the use of post weld heat treatment." *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, vol 83(5), pp. 394-398, 2006.
- [31] Majid, M., M. A. Akhtar, H. Arora, M. Singh, "Wear Behaviour of SMAW Hardfaced Mild Steel and Influence of Dilution Using Hardfacing Properties," *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, vol. 8, No 7, pp 1652–1661, 2017.
- [32] Ranjit, S., & S. K. Pandey, "Experimental Investigation of Effect of Fe-Cr-C based Hardfacing on Wear Properties of Mild Steel," *International, Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol 5, No 5, pp. 713-716, May 2016.
- [33] นรินทร์ พรหมเกษา, "อิทธิพลของจำนวนชั้นการเชื่อมอาร์ลวดไส้ฟลักพอกผิวแข็งต่อสมบัติของโลหะเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C," ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, 2557.

[34] อรรถกร จันทร์ชนะ. “การศึกษาอิทธิพลตัวแปรเชื่อมอาร์ลวดหุ้มฟลักซ์ที่มีผลต่อสมบัติผิวพอกแข็ง ลูกรโลเรอร์รถเกี่ยวและนวดข้าวเหล็กกล้า JIS S50C,” ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, 2557.



ภาคผนวก



ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

**KU**  
KUMHONGKORN UNIVERSITY  
COMPLEX

**KU-KPS**  
KUMHONGKORN UNIVERSITY  
KONJIT PRAJAKKARN  
SCIENCE CENTER

เกษตรกำแพงแสน ตามรอยพ่อ สานต่อศาสตร์แห่งแผ่นดิน

# Proceedings

## การประชุมวิชาการระดับชาติ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 16  
The 16<sup>th</sup> KU-KPS National Conference

ระหว่างวันที่ 3 - 4 ธันวาคม 2562  
ณ อาคารศูนย์เรียนรวม  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

### ผลงานทางวิชาการ 8 สาขา

1. พืชและเทคโนโลยีชีวภาพ
2. สัตว์และสัตวแพทย์
3. วิศวกรรมศาสตร์
4. ศึกษาศาสตร์และพัฒนศาสตร์
5. มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์
6. วิทยาศาสตร์สุขภาพและการกีฬา
7. วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม  
และความหลากหลายทางชีวภาพ
8. ส่งเสริมการเกษตร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศูนย์เรียนรวม

ผลงานวิชาการระดับชาติ  
การประชุมวิชาการเกษตรกำแพงแสน  
ประจำปี 2562

การประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของข้าวปทุมธานี	
ในเขตพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย.....	337
การประยุกต์ใช้แมนจ่าของน้ำฝน - น้ำท่า ร่วมกับการบริหารจัดการน้ำ	
เพื่อประเมินการขาดแคลนน้ำ พื้นที่ลุ่มน้ำป่าสักตอนบน.....	345
การศึกษาการขาดแคลนน้ำที่สถานีสูบน้ำอุบลรัตน์.....	355
การศึกษาการใช้น้ำของทุเรียนพันธุ์ยงยงด้วยอุปกรณ์ Sap Flow.....	365
การลดการขาดแคลนน้ำสำหรับสายพานลำเลียงได้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	
: กรณีศึกษาสถานีสูบน้ำอุบลรัตน์.....	373
การปรับแก้ประสิทธิภาพการใช้น้ำของห้องจ่ายน้ำแบบภาพสามมิติโดย ImSAT.....	383
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการชลประทาน ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาท่าบว.....	391
การวิเคราะห์รูปแบบการระเหยน้ำที่จุดคนหัวจรดที่หนองสาม บ้านใต้สถานการณ์	
จำลองความต้องการที่แปรผัน.....	405
การศึกษาการลดการสิ้นเปลืองน้ำในโรงโม่หินโดยใช้หุ่นเซ็นเซอร์จีไอ.....	415
การพัฒนากระบวนการผลิตแอมโมเนียจากเศษน้ำ สิ้นสุดถนนน้ำประปา ดินลูกรัง	
คืนสารโลกไม่ตาย และคืนน้ำสะอาด.....	423
การใช้น้ำในเครื่องรีดเมล็ดเพื่อหาโมดูลัสที่สัมพันธ์กับความชื้นเมล็ด	
ของธัญพืชชนิดย่อยผสมกับเม็ดกากถั่ว.....	433
แผนที่ความเสี่ยงเพื่อกระตุ้นการบริหารจัดการน้ำชุมชนในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียง.....	445
การปรับปรุงการทำงานในกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียเทศบาลนครขอนแก่น	
เพื่อสนับสนุนการขยายตัวของเทศบาล.....	452
บริหารความเสี่ยงในระบบเตือนภัยน้ำท่วมด้วย IoT ใช้ 4Ms.....	460
โครงสร้างอาคารของโรงรถที่เชื่อมกับเครื่องปรับอากาศแบบฝังได้ขงเหล็กกล้ากับระบบ JIS-S45C	
ด้วยกาชเชื่อมอาร์กด้วยไฟฟ้า.....	470
การปรับปรุงสถานีงานเพื่อลดความถี่ของภัยแล้งที่สถานีงาน	
พนักงานสำรวจชุมชนขึ้นส่วนวงจรถังเค็ดกรรณิก.....	482
การออกแบบและปรับปรุงสถานีงานเพื่อลดความถี่ของภัยแล้ง	
ที่สถานีงานจากการทำงานของช่างซ่อมบำรุงเครื่องจักร.....	490
การปรับปรุงสายการผลิตที่เชื่อมกับระบบอัตโนมัติสำหรับงาน.....	499
การลดความถี่ของภัยแล้งที่สถานีงานโดยใช้เทคนิคการฝังน้ำในอุตสาหกรรมแปรรูปไก่.....	508
Engineering Student Grade Prediction Using Machine Learning: A Case Study.....	515
การเลือกตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้าปลีกในภาคเหนือ.....	
ภาคตะวันออกเฉียงใต้ใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงตำแหน่ง.....	521

**โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกแข็งโครเมียมสูงบนผิวโค้งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S45C  
ด้วยการเชื่อมอาร์กฟลักซ์ไส้ฟลักซ์**

**Microstructure of High Chromium Hard-faced Weld Metal on JIS-S45C Carbon Steel Curve  
Surface by Flux-cored Arc Welding**

**บรรณกฤต แจ่มประยูร<sup>1</sup> ทวี นมัตติยะ<sup>2</sup> และ กิตติพงษ์ กิมพงษ์<sup>1</sup>**

***Bannakit Champrayoon<sup>1</sup>, Tavee namsa<sup>2</sup> and Kittipong Kimpong<sup>1</sup>***

**บทคัดย่อ**

เทคนิคการเชื่อมเป็นหนึ่งในวิธีการสำคัญในหลายงานอุตสาหกรรมที่สามารถประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงสมบัติทางกลของพื้นผิวที่เสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรในพื้นที่เฉพาะและส่งผลทำให้เกิดการลดต้นทุนการผลิต ตัวอย่างเช่น การเชื่อมเชื่อมผิวแปะการเชื่อมที่เหมาะสมที่สามารถทำได้ เกิดสมบัติทางกลที่มีค่าสูงกว่าสำหรับชิ้นส่วนเฉพาะจึงมีความต้องการและจำเป็นการในงานอุตสาหกรรมเหล่านั้น งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการศึกษาลักษณะของโลหะเชื่อมที่มีส่วนผสมโครเมียมสูงเชื่อมพอกแข็งบนผิวโค้งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S45C ด้วยการเชื่อมอาร์กฟลักซ์ไส้ฟลักซ์ โลหะเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยตัวแปรรวมเชื่อมพอกหลายถูกนำไปทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค ผลการทดลองโดยสรุปมีดังต่อไปนี้ การเพิ่มกระแสเชื่อมส่งผลทำให้ความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราส่วนผสมโครเมียมทำให้เกิดการเพิ่มปริมาณธาตุเสริมความแข็งแรง คือ โครเมียม แมงกานีส ซิลิกอน วานาเดียม และ โมลิบดีนัม ตัวแปรรวมเชื่อมที่ทำให้ได้ความแข็งสูงสุด 852 HV คือ กระแสเชื่อม 190 แอมแปร์ ความเร็วเดินเชื่อม 150 มิลลิเมตรนาที

**คำสำคัญ:** การเชื่อมอาร์กฟลักซ์ไส้ฟลักซ์, โลหะเชื่อมพอกแข็ง, โครงสร้างจุลภาค

**Abstract**

Repair welding technique is one of an important tool in various industries that can apply to improve a mechanical property of a damaged surface of a machine part in specific area and also result to reduce a production cost. Therefore, a preparation of an optimized welding process parameter that could produce a higher mechanical for a specific part was required and performed in these industries. This research aimed to study an effect of welding current on hard-faced weld metal on JIS-S45C carbon steel curve surface using a flux-cored arc welding. Welded metals that produced by various process parameters were investigated for mechanical property and microstructure. The summarized results were as follows: increase of the welding current affected to increase the hardness of the hard-faced weld metal because an increasing of the reinforced element such as Cr, Mn, Si, V,

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 12100

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajabhat University of Technology Patumburi 12100

<sup>2</sup> สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Department of Industrial Engineering and Technology, Faculty of Industrial and Technology, Rajabhat University of Technology Patumburi

Department of Industrial Engineering Technology, Faculty of Industrial and Technology, Rajabhat University of Technology Patumburi, Wang Klai Kang Won Campus



and Mo in weld metal. The welding process parameter that produced the maximum hardness of 852 HV was the welding current of 190 A and the welding current of 150 mm/min.

Keyword: Flux-cored Arc Welding, Hard-faced Weld Metal, Microstructure

E-mail address: barnakit\_c@mail.mut.ac.th

### คำนำ

ในภาคการเกษตร การศึกษาระยะนี้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการปรับปรุงพันธุ์พืชซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกิจกรรมทางการเกษตรจำนวนมาก ทำให้เกษตรกรต้องเผชิญกับปัญหาต่างๆ เช่น ค่าใช้จ่ายแรงงานที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ การระบาดของโรคของเครื่องจักรกลทางการเกษตร ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนชิ้นส่วนที่ชำรุด ประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลทางการเกษตรในการเพาะปลูกลดลงและส่งผลให้เกิดค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นเป็นต้น [Kang et al., 2017.] ซึ่งสาเหตุของประสิทธิภาพของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทางการเกษตรเกิดจากการสัมผัสเสียดสี และกระบวนการที่ชิ้นส่วนต่างๆหรือสิ่งแวดล้อมที่มีการกัดกร่อน [Kumar et al., 1999.] ตัวอย่างเช่น โบรมิเดตีดโคบอลต์ของรถยนต์ฮ้อย โบรมิเดชันบนเครื่องยนต์โรตารีไดและชุดชิ้นส่วนเครื่องยนต์ของรถแทรกเตอร์มีการชำรุดเสียหายขึ้นระหว่างใช้สอยตามกับถูกโรตอเรอร์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดปัญหาขึ้นส่วนเกิดการสึกหรอของส่วนต่างๆสำหรับการใช้ปฏิบัติงานของเครื่องจักรกลที่ขึ้นส่วนที่มีราคาต้นทุนค่อนข้างสูง หากมีการนำชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลมาที่กลับมาใช้ใหม่โดยมีการนำมาเชื่อมซ่อมและปรับปรุงส่วนที่สึกหรอจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและต้นทุนลดลงได้ และหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมคือการใช้การเชื่อมด้วยแก๊สอาร์คและกระบวนการเชื่อมโลหะผสมบนพื้นผิวของชิ้นส่วนที่สึกหรอ เพื่อมีอายุการใช้งาน เพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอโดยกรรมวิธีการเชื่อมอาร์คแบบต่างๆ เช่น การเชื่อมอาร์คโลหะปกคลุม (Shielded Metal Arc Welding: SMAW) การเชื่อมอาร์คโลหะปกคลุมแก๊ส (Gas Metal Arc Welding: GMAW) การเชื่อมอาร์คโง่งสแตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding: GTAW) และการเชื่อมอาร์คใต้น้ำ (Submerged Arc Welding: SAW) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการเลือกวิธีการเชื่อมที่ถูกต้องซึ่งต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมของวัสดุและความสามารถนำไปใช้งาน รวมทั้งยังวิธีการเชื่อมที่มีความแตกต่างกันก็จะไปประสิทธิภาพในการเชื่อม อัตราการเชื่อม อัตราการเติมเนื้อ [KenchReddy et al., 2012.] และรวมถึงต้นทุนในการเชื่อมด้วย ดังนั้นการเชื่อมด้วยวิธีที่กล่าวถึงมีอัตราเชื่อมที่ต่ำกว่าความเหมาะสมมากกว่า เป็นวิธีการเชื่อมที่เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเชื่อมอื่นๆ ที่กล่าวมานั้นไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีการปฏิบัติงานในการเชื่อมแบบอัตโนมัติได้ สามารถทำการเชื่อมได้รวดเร็วและต่อเนื่องที่ผ่านมาพบว่าการเชื่อม อาร์คโลหะผสมเชิงวัสดุศาสตร์และใช้คุณสมบัติของผิวของชิ้นส่วนที่ต้องการ

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการเชื่อมพบว่า การเชื่อมที่ขุดเจาะที่ผลิตจากเหล็ก AISI-4145 ด้วยกระบวนการเชื่อมโลหะปกคลุม โดยทำการเชื่อมแบบไม่ระเหย จำนวน 1 ชั้นเพื่อเปรียบเทียบกับข้อจุดเจาะเหล็ก AISI 4145 ที่ไม่ได้ทำการเชื่อมพอกผิวเชิง ผลการทดลองพบว่า โลหะผสมของโลหะผสมเชิงทำให้มีอัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่า [Pichay et al., 2010.] และการศึกษาเหล็กกล้า ASTM A36 ด้วยกระบวนการเชื่อมสองแบบ คือ การเชื่อมอาร์คโลหะปกคลุม และการเชื่อมอาร์คโลหะปกคลุมแบบไม่ระเหย จำนวน 1 และ 3 ชั้น ใช้โลหะเชื่อม 4 ชนิด ผลการทดลองพบว่า รอยเชื่อมของโลหะเชื่อมอาร์คโลหะปกคลุมที่มีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าเมื่อเทียบกับความแข็งที่เกิดขึ้นจากการชุบแข็งแบบกระจายที่สม่ำเสมอในโลหะเชื่อม [Coronado et al.,

2009.] และมีการศึกษาการเชื่อมโบลต์โรตารีที่ผลิตจากเหล็กแรงดึงสูง EN-14B ด้วยการเชื่อมอาร์กทั้งสมทกแก๊ส ปกคลุม แบบโถงงอพื้น จำนวน 1 ชั้น ใช้ลวดเชื่อมกลุ่มโครเมียม 4 ชนิด ผลการทดลองพบว่า อัตราการศึกษาที่ต่ำสุดที่โถงงอสมทกของลวดเชื่อมอาร์กที่มีโครเมียมสูงสุด เนื่องจากโครงสร้างโครเมียมคาร์ไบด์ [Kang et al., 2014.] และมีการศึกษาการเชื่อมโถงงอ ด้วยการเชื่อมโถงงอด้วยลวดเชื่อมโถงงอที่ผลิตจากการทดลองพบว่าอัตราการทำงานของโถงงอสูงชันกว่าโถงงอที่ไม่ได้ทำการเชื่อม [Horvat et al., 2008]

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นจึงมีจุดประสงค์ในการเชื่อมโถงงอด้วยวิธีการสร้างชั้นพอกผิวเรียบ พื้นผิวโค้งทรงกระบอกสมมติคล้ายลูกโธของเครื่องตีตะขานรถเข็นและแนวค้ำ ด้วยการใช้ลวดเชื่อมอาร์กของโลหะที่มีองค์ประกอบเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง JIS S45C เป็นโลหะที่ใช้ในการผลิตลูกโธของรถเข็นและแนวค้ำ เช่น ความแข็ง, ความต้านทานการสึกหรอและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง JIS S45C อันอาจจะทำให้เกิดการประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิต

### อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กกล้าคาร์บอน JIS S45C โดยขนาดของชิ้นงานทดลองเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 135 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 85 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร องค์ประกอบทางเคมีของโลหะฐาน แสดง Table 1 ก่อนทำการเชื่อมบนผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนจะถูกขัดละเอียดด้วยเจียรในผิวเพื่อกำจัดออกไซด์ (Oxides) และการปนเปื้อนออกไป วัสดุที่ใช้เป็นลวดเชื่อมพอกผิวแข็งใช้ลวดเชื่อมที่ผสมกับโครเมียมตามมาตรฐาน DIN 8555: MF 6-GF-60-GP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอก 1.6 มิลลิเมตร

Table 1 Chemical Composition of Carbon Steel S45C and Hardfacing Electrodes (% Weight).

Material	Standard	Chemical Composition (%)					
		C	Si	Mn	P	Cr	Mo
Medium Carbon Steel	JIS G 4051 S45C	0.47	0.24	0.7	0.02	0.35	0.01
Hardfacing Electrodes	MF 6-GF-60GP	0.544	0.761	2.305	0.021	7.917	0.509

การทดลองใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กของโลหะที่แข็ง (Flux-Cored Arc Welding: FCAW) กระบวนการเชื่อมชิ้นงานโลหะฐานจะทำการเชื่อมก่อนที่ทำการเชื่อมพอกผิวแข็งซึ่งชิ้นงานจะถูกนำไปอุ่น (Preheat Temperature) 250 - 300 องศาเซลเซียส จากนั้นจะนำชิ้นงานมาทำการขันยึดบนอุปกรณ์จับยึด โดยทำการเชื่อมจำนวนชั้นพอกผิวแข็ง 1 ชั้น การเชื่อมเป็นแบบต้นแนวบนผิวของชิ้นงานโลหะฐานแบบโถงงอด้วยลวดเชื่อมที่ศึกษาการเชื่อมพอกผิวแข็งมาศึกษา ดังแสดง Figure 1 และใช้ความเร็วเชื่อม 150 - 250 แอมแปร์ ความเร็วเดินแนว 150 มิลลิเมตรนาที

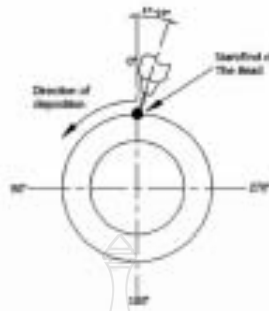


Figure 1 The welding Torch, in The Direction of The Rotation, Between 17-19°.

หลังจากเชื่อมเสร็จงานเสร็จแล้วจึงได้ถูกตัดขวางแนวเชื่อม โดยตัดชิ้นงานโลหะเชื่อมยกขึ้น เพื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาของชิ้นโลหะที่เชื่อมขึ้น ชิ้นงานที่ผ่านการตัดจะถูกนำมาวัดด้วยกระดาษทราย ตั้งแต่เบอร์ 150 ถึง 1500 และทำการขัดมันด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1-3 ไมโครเมตร ก่อนทำการกัดผิวหน้าด้วยสารละลาย 5% Nital แล้วนำไปส่องดูโครงสร้างจุลภาค และจุลภาคของการตรวจสอบ คือ การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค เพื่อศึกษากระบวนการของการเชื่อมโลหะที่เชื่อมขึ้นนำมาตรวจสอบ โครงสร้างทางจุลภาค เพื่อแสดงขอบเขตของเขตอิทธิพลของความร้อนที่โลหะฐาน (Base Metal: BM) พื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) และโลหะเชื่อม (Weld Metal: WM) จากนั้นถ่ายภาพ เพื่อนำรูปภาพของแต่ละกระบวนการนี้มาเขียนสรุปความแตกต่างของโครงสร้าง



Figure 2 Weld Bead Geometry.

(w1 : width of weld bead, w2 : width of HAZ, h1 : height of reinforcement, d1 : depth of weld, d2 : depth of HAZ.)

การทดสอบค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (Micro Vickers Hardness) นั้นกระทำที่ใช้ในการทดสอบ 300 กรัม เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 10 วินาที และระยะห่างระหว่างจุด สานมาตรฐาน ASTM E384 การทดสอบความแข็ง โดยทดสอบแบบบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน จากชั้นผิวหน้าถึง จนถึงบริเวณใต้ผิวฐาน กำหนดระยะห่างระหว่างจุดทดสอบ มีค่า 0.25 มิลลิเมตร ค่าขนาด 0.50 มิลลิเมตร คือค่าขนาด ที่เป็นระยะระหว่างโครงสร้างและโลหะเชื่อม

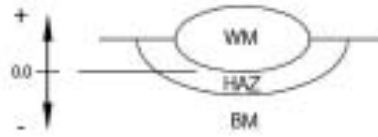


Figure 3 Hardness Testing of The Weld.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การตรวจสอบโครงสร้างเมทาล

ผลการตรวจสอบโครงสร้างเมทาลที่ แสดงลักษณะแนวเชื่อมพอกผิวแรกที่เดินแบบบนเหล็กกล้าคาร์บอน JIS- S45C จำนวน 1 แนว โดยใช้กระแสเชื่อม 150 - 250 แอมแปร์ พบว่าแนวเชื่อมมีโครงสร้างไม่พบจุดบกพร่องใดๆ เช่น พอร์ซาคาส (Porosity) สารมลทินฝังใน (Slag Inclusion) และรอยแตก (Crack) ในบริเวณแนวเชื่อมและโลหะเชื่อม

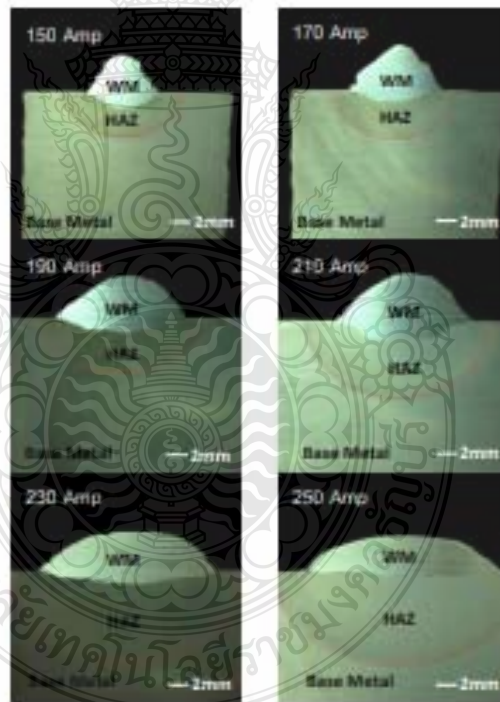


Figure 4 Microstructure of The Cross Section of The Weld.

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 3-4 ธันวาคม 2562

การเปรียบเทียบมิติแบบเชื่อมพอกแข็งเพื่อทำไม้เทียมความแตก่างของแนวเชื่อมที่ได้โดยการวัดความ  
ค่าความสูง และค่าการพอกแข็งตลอดในขณะที่ยกระดับเชื่อมที่สูงขึ้นส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีแนวโน้มค่าความลึก  
บริเวณกระทบร้อน ค่าความกว้างแนวเชื่อม และค่าความกว้างบริเวณกระทบร้อนเพิ่มขึ้นผลการวัด และการ  
เปรียบเทียบแสดงไว้ใน Figure 5

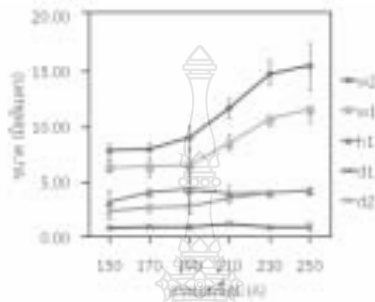


Figure 5 Comparison of The Weld Bead Geometry.

รูปที่ 5 แสดงค่าการวัดขนาดต่างๆของแนวเชื่อม พบว่าค่าความกว้างของแนวเชื่อมมีค่าแนวโน้มเพิ่มขึ้น  
เมื่อกระแสเชื่อมสูงขึ้น โดยกระแสเชื่อมที่ 250 แอมป์ ให้ค่าความกว้างสูงที่สุดเฉลี่ยที่ 11.55 มิลลิเมตร ส่วน  
กระแสเชื่อมที่ 150 แอมป์ ให้ค่าความกว้างแนวเชื่อมต่ำที่สุดเฉลี่ยที่ 6.33 มิลลิเมตร ส่วนค่าความสูงแนวเชื่อม มี  
แนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงตามลำดับ โดยกระแสเชื่อมที่ 190 แอมป์ ให้ค่าความสูงสูงขึ้นไปอยู่ที่ 4.35  
มิลลิเมตร ส่วนกระแสเชื่อมที่ 150 แอมป์ ให้ค่าความสูงต่ำที่สุดเฉลี่ยที่ 3.20 มิลลิเมตร ค่าความกว้างของ  
เขตกระทบร้อนทางความเค้น (HAZ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกระแสเชื่อมที่ 250 แอมป์ ให้ค่าความกว้างเฉลี่ยที่  
15.50 มิลลิเมตร ส่วนกระแสที่ให้ความกว้างน้อยที่สุดคือกระแส 150 แอมป์ โดยมีความสูงที่ 7.83 มิลลิเมตร  
ขณะที่ระยะการเชื่อมของแนวเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงตามลำดับ โดยกระแสที่ให้ความสูงที่สุดคือกระแสที่  
210 แอมป์ เฉลี่ยที่ 1.20 มิลลิเมตร และกระแสที่มีค่าต่ำที่สุดคือ 150 แอมป์ เฉลี่ยที่ 0.85 มิลลิเมตร ซึ่ง  
สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mindaz และคณะ (Mindaz et al., 2014) ได้ศึกษาความชื้นที่ได้จากก๊าซอาร์ก  
จะถูกแปลงมาเพื่อเชื่อมเหล็กกล้าและเชื่อม โดยมีการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของเนื้อโลหะเดิมของส่งผลไม่  
การพอกแข็งตลอด และค่าการพอกแข็งของบริเวณที่กระทบร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกระแส 250 แอมป์  
ให้ค่าสูงที่สุดเฉลี่ยที่ 4.25 มิลลิเมตร ส่วนกระแส 150 แอมป์ ให้ค่าต่ำที่สุดเฉลี่ยที่ 2.35 มิลลิเมตร

**การตรวจสอบโครงสร้างภาค**

การตรวจสอบโครงสร้างภาคบริเวณแนวเชื่อมโดยใช้กระแสเชื่อม 150 – 250 แอมป์ แสดงดัง  
Figure 6 แสดงลักษณะโครงสร้างภาคประกอบด้วยภาพที่เป็นส่วนที่การเชื่อมเป็น 3 ส่วนหลัก คือ พื้นที่  
โลหะฐาน (Base Metal: BM) พื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) และโลหะเชื่อม (Weld Metal: WM)

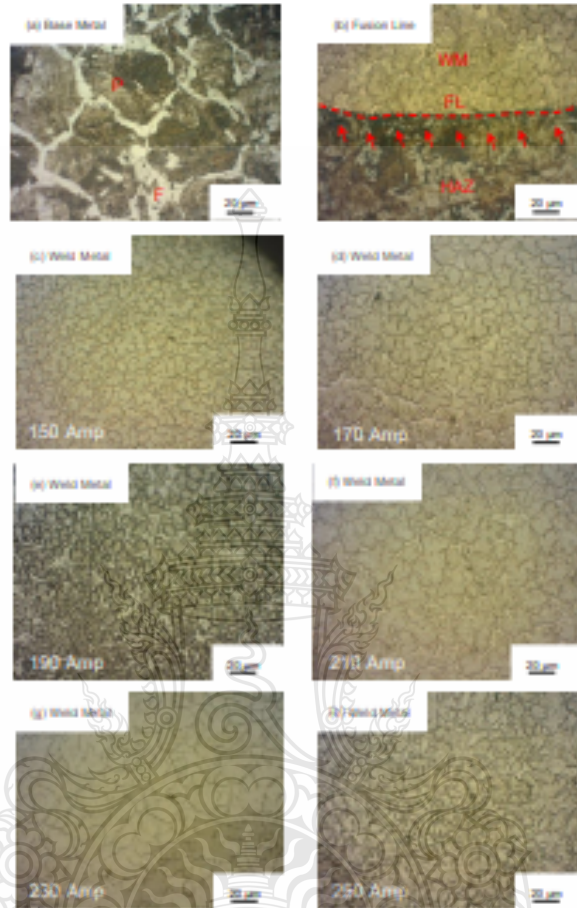


Figure 6 Microstructures of The Cross Section of The Weld.

Figure 6 (a) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอน AISI-S45C โลหะฐาน (Base Metal: BM) ประกอบด้วยพื้นที่หน้าตัดของเฟสเฟอร์ไรต์ (พื้นที่ที่เคลือบสีเงิน) และเฟสเพอร์ไลต์ (พื้นที่ที่เคลือบสีเทา) สัมประสิทธิ์เฟสเฟอร์ไรต์ต่อเฟสเพอร์ไลต์ที่สีขาวที่มีลักษณะการสลับกันคล้ายกันภายในของเกรนที่เชื่อมระหว่างโลหะฐานกับโลหะเชื่อม Figure 6 (b) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณเส้นเชื่อมโลหะฐาน (Fusion Line: FL) เป็นเส้นแบ่งแยกระหว่างโลหะฐานบริเวณพื้นที่ที่กระทบเชื่อมกับ โลหะเชื่อมออกจากกันเมื่อทำการตรวจสอบบริเวณชั้นที่เส้นเชื่อมโลหะฐานนี้ พบพื้นที่การรวมตัวกันแบบๆ ระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน ดังถูกสรุปใน Figure 6 (b) เมื่อทำการตรวจสอบบริเวณพื้นที่

กระทบร้อน โลหะฐานที่ได้รับความร้อนจากการเชื่อมทั้งสองได้รับผลกระทบจากความร้อนทำให้อิฐขนาดเล็กละเอียด และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และเมื่อทำการตรวจสอบถัดขึ้นไปในพื้นที่โลหะเชื่อมพอกแข็ง อนุพันธ์ของผลรวมหลายโครงสร้างจุลภาคที่ได้ พบว่าลักษณะโครงสร้างเป็นแบบโลหะที่มีลักษณะค่อนข้างกลม ซึ่งมีความแตกต่างจากโครงสร้างจุลภาคของโลหะฐานเนื่องจากโลหะเชื่อมเกิดจากลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมสูงจึงอาจทำให้เกิดโครงสร้างอื่นๆที่ไม่ใช่เฟสเฟอร์ไรต์และเฟสเพอไลต์ที่เป็นเฟสพื้นฐานของเหล็กกล้า คาร์บอนต่ำไป เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดของเกรนที่เกิดขึ้นดัง Figure 6 (c-h) ของแต่ละกระบวนการขนาดเกรนมีขนาดที่เล็กละเอียด เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเกรนในโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีเกรนเสียดแน่นกว่าขนาดของโลหะเชื่อมมีแนวโน้มขนาดเล็กลงเมื่อตำแหน่งการตรวจสอบเข้าใกล้พื้นที่ผิว เนื่องจากบริเวณพื้นที่นี้มีการขยายความร้อนอย่างรวดเร็วทำให้เกรนเติบโตอย่างรวดเร็ว และผลที่เกิดขึ้นทำให้สมบัติทางกลของโลหะเชื่อม เช่น ความแข็งและความต้านทานการสึกกร่อนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Merchant Samir Y. [Merchant Samir Y. 2015.] ได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของเกรนเชื่อมส่งผลโดยตรงต่อปริมาณความร้อนเข้าทำให้ อัตราการเย็นตัวและเวลาการในการแข็งตัวของโลหะเชื่อมมีค่าลดลงและเวลาแข็งตัวของโลหะเชื่อมมีค่ามากขึ้น Srdjan Mikanovic et al. [Srdjan Mikanovic et al. 2012.] ได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเย็นตัวระหว่างแกนแกนโลหะที่ทุกจุดอุณหภูมิและความแข็งโดยได้พบว่าอัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ระหว่างแกนแกนโลหะที่ทุกจุดอุณหภูมิมีค่าลดลงและค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

**การตรวจสอบความแข็ง**

ผลการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่กระบวนการเชื่อม 150-250 แอมป์รี แสดงดังใน Figure 7 โดยทำการทดสอบความแข็งจากโลหะเชื่อม (Weld Metal) ด้านบนสุดไปจนถึงโลหะฐาน (Base Metal)

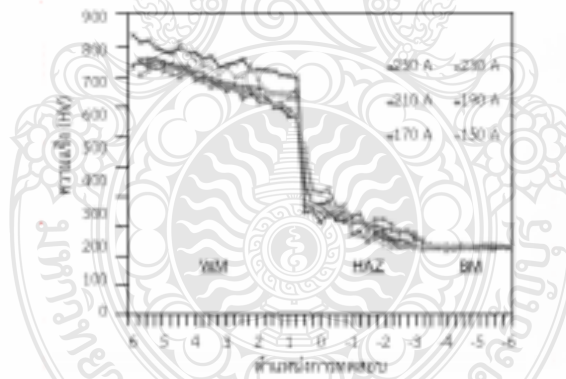


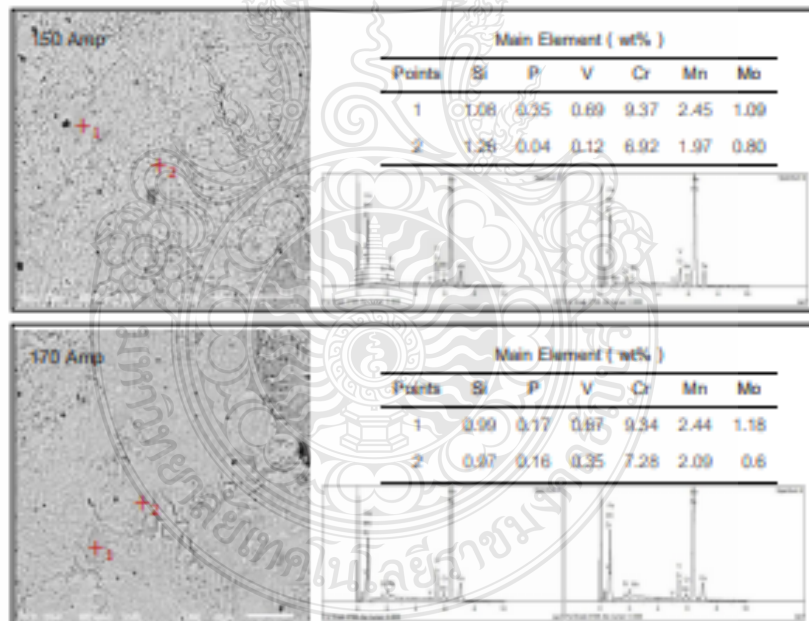
Figure 7 Comparison of The Hardness of The Welding

พบว่าโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอน AIS-S45C ทดสอบที่ตำแหน่ง -6 ถึงจุด -3.5 มีค่าความแข็งประมาณ 205 HV เมื่อทดสอบที่ตำแหน่ง -3.5 ถึงจุด 0.0 ค่าความแข็งของบริเวณกระทบร้อนมีค่าประมาณ 393 HV และ

เมื่อทดสอบค่าความแข็งเข้าสู่บริเวณแนวเชื่อมพบว่าค่าความแข็งของแนวเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นค่าความแข็งสูงสุดของการทดสอบประมาณ 852 HV ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยของ Mohd. Majid [Mohd. Majid et al., 2017.] และคณะได้ยืนยันปริมาณการเจือจางในการเชื่อมมีอิทธิพลอย่างมากต่อความต้านทานต่อการสึกกร่อนและความแข็งปริมาณการเจือจางในการเชื่อม ผลของการเจือจางที่สูงขึ้นในการผสมของโลหะผสมอลูมิเนียมเชิงกับโลหะฐาน จะลดคุณสมบัติที่ต้องการเช่นความแข็งและความต้านทานต่อการสึกกร่อนซึ่งความต้านทานการสึกกร่อนและความแข็งสูงสุดเกิดขึ้นที่ปริมาณการเจือจางที่ค่าความแข็งลดลงเมื่อมีปริมาณของการเจือจางเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณการเจือจางที่สูงขึ้น และลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมจะน้อยกว่าโครงสร้างจุลภาคของเนื้อ

**การตรวจสอบการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี**

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมของอลูมิเนียมเชิงถูกนำมาทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของการทดสอบครั้งนี้ที่ทำการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยกระแสน้ำในการเชื่อม 150-250 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 150 มิลลิเมตรต่อนาที จึงนำมวิเคราะห์ที่บริเวณที่บนโครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อมด้วยการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Qualitative) แสดงดัง Figure 8 โดยทำการตรวจสอบเพื่อทำการเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีแต่ละจุด ผลการวิเคราะห์พบว่าบริเวณธาตุที่หนักที่เติมความแข็ง คือ Si, P, V, Cr, Mn และ Mo มีปริมาณสูงสุดที่บริเวณจุดสูงสุดของแนวเชื่อม ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมต่ำกว่ากับส่วนถูกปรับปรุงไม่ได้





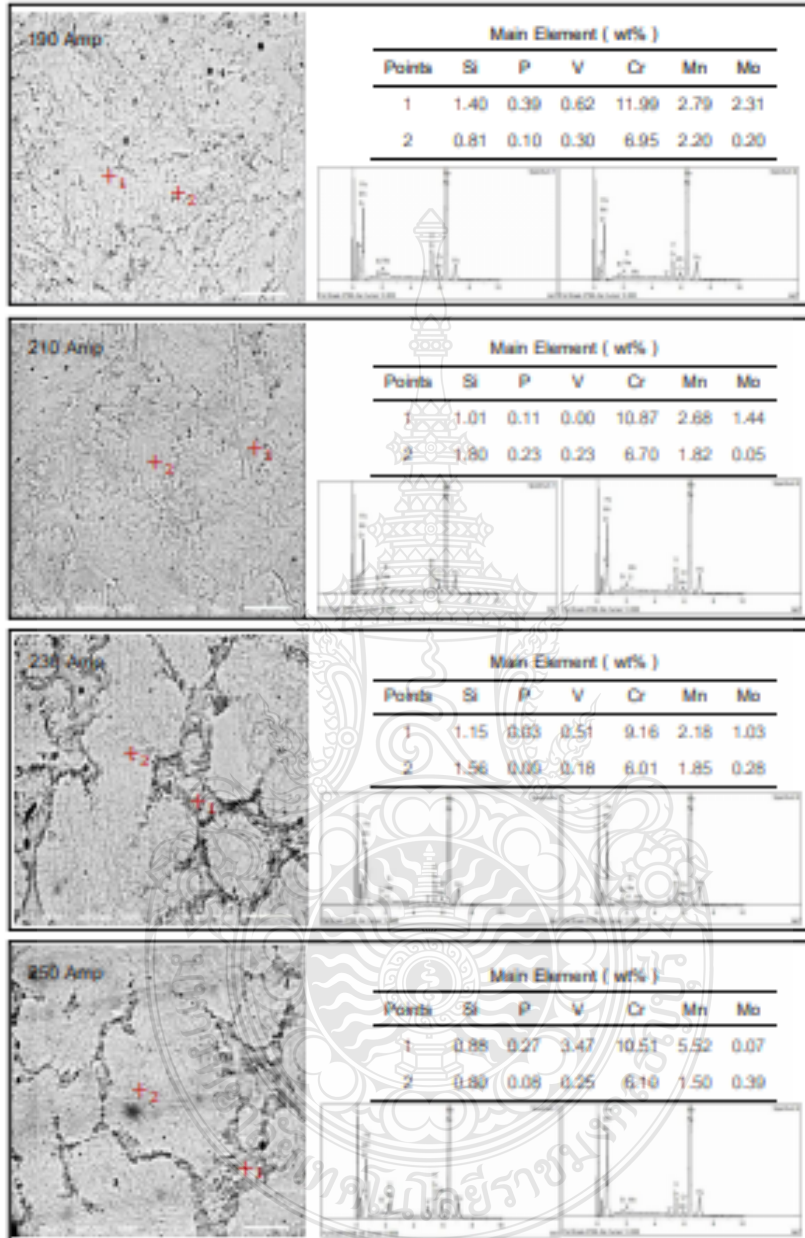


Figure 8 Microstructure of Welding, Spectrum Position and Chemical Ingredients.

Figure 8 แสดงภาพกราฟค่าแรงดึงเพื่อชี้หารขนาดเหล็กที่กระจายในพื้นที่พอสตีซิม ในโลหะผสมแข็ง ที่มีลักษณะโครงสร้างเดนไดรต์ที่มีบริเวณหัวเข็มหมุดที่เชื่อมกับด้านนอกคล้ายกับเข็ม การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของจุดที่ 1 บนพื้นที่พอสตีซิม และจุดที่ 2 เฟสสีขาวที่ทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีสูงสุดได้แก่คาร์บอน 190 แอมแปร์ (1.40 Si, 0.39 P, 0.62 V, 11.99 Cr, 2.79 Mn และ 2.31 Mo % โดยน้ำหนัก) ประกอบด้วยธาตุเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงให้แก่โลหะแข็งมากกว่า เฟสที่เชื่อมทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีสูงสุดได้แก่คาร์บอน 190 แอมแปร์ (0.81 Si, 0.10 P, 0.30 V, 6.95 Cr, 2.20 Mn และ 0.20 Mo % โดยน้ำหนัก) เมื่อพอสตีซิมขนาดเหล็กที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิวที่เชื่อมส่งผลทำให้ความแข็ง และความแข็งแรงของโลหะแข็งเพิ่มขึ้น การกระจายของพอสตีซิมขนาดเล็กตัวในพื้นที่โลหะแข็งผสมพอสตีซิม เป็นช่วงสุดท้ายให้ความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยของ KanchiReddy และคณะ [KanchiReddy et al., 2012.] ได้รายงานเมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมี เช่น Si P V Cr Mn และ Mo การเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความแข็งและความต้านทานต่อการสึกกร่อนของโลหะแข็งผสมพอสตีซิมเพิ่มขึ้น และเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Amardeep Singh Kang และคณะ [Amardeep Singh Kang et al., 2014.] ได้รายงานเมื่อเปรียบเทียบ Cr จะทำให้เกิดโครเมียมคาร์ไบด์ต่างชนิดกันส่งผลทำให้ความแข็งและความต้านทานต่อการสึกกร่อนของโลหะแข็งผสมพอสตีซิมเพิ่มขึ้น

#### สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของคาร์บอนที่ส่งผลต่อค่าความแข็งและส่วนผสมทางเคมีของการเชื่อมเหล็กด้วยโลหะแข็งผสมพอสตีซิมโครเมียมด้วยวิธีไดอะมอนด์สไลด์บนมาตรฐาน JIS-S45C ด้วยการใช้วิธีผลการทดลองดังนี้

1. คาร์บอนที่เชื่อมเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความแข็งของโลหะแข็ง นวัตกรรมเชิงลึกทางความร้อน (HAZ) และอัตราการพ่นสีของโลหะแข็งผสมพอสตีซิม
2. ผลการวิเคราะห์ที่ค่าความแข็งสูงสุดประมาณ 852 HV ที่คาร์บอน 190 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 150 มิลลิเมตร นาที
3. การเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุ Si, V, Cr, Mn และ Mo ส่งผลต่อค่าความแข็งของโลหะแข็งผสมพอสตีซิม

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงานสนับสนุนของเงินและอุปกรณ์จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตกำแพงแสนวิทยาเขตกำแพงแสน

#### เอกสารอ้างอิง

A.S. Kang, G.Singh, G.S.Cheema, "Improving wear resistance via hardfacing of cultivator shovel", Materials Today Proceedings 4 (2017) 7991–7999.

- S. Kumar, D.P. Mondal, H.K. Khaira, A.K. Jha, "Improvement in High Stress AbrasiveWear Property of Steel byHardfacing", *Journal ofMaterials Engineering and Performance*, 8(6), (1999) 711-715.
- K.M. KenchiReddy, C.T. Jayadeva, "The Effects of Welding Processes on Microstructure and Abrasive Wear Resistance for Hardfacing Deposits", *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, Vol. 2, No.2, Pp. 28-34, 2012.
- V. Ullmanu, M.Badicioiu, M. Caltan, Gh. Zecheru, Gh. Draghici, M. Minescu, et al, "Heavy-weight drill pipe hard-facing by using welding technology", *Journal of the Balkan Tribological Association*, Vol. 16, No.4, Pp. 510-516, 2010.
- Coronado, J.J.,Caicedo, H.F., Gomez, AL., 2009. "The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits", *Tribology International* 42 (2009) 745-749.
- Z. Horvat, D. Filipovic, S. Kosutic, R. Emert, "Reduction of mouldboard plough share wear by a combination technique of hardfacing", *Tribology International* 41 (2008) 778-782.
- A. S. Kang, G. S.Cheema, S.Singla,, "Wear behavior of hardfacings on rotary tiller blades", *Procedia Engineering* 97 ( 2014 ) 1442 – 1451.
- Mendez, P. F., Barnes, N., Bell, K., Borle, S. D., Gajapati, S. S., Guest, S. D., Izadi, H., Gol, A. K., Wood, G. "Welding processes for wear resistant overlays", *Journal of Manufacturing Processes*, 2014; 16(1): 4-25.
- Merchant Samir Y. 2015. "Investigation on Effect of Heat Input on Cooling Rate and Mechanical Property (Hardness) Of Mild Steel Weld Joint by MMAW Process", *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, Vol. 5, Issues 1 Pages 34-41.
- SrdjanMilenkovic et al. 2012. "Effect of the cooling rate on microstructure and hardness of MAR-M247 Ni-based super alloy", *Materials Letters*. Vol. 73, Pages 216-219.
- Mohd. Majid, M. A. Adhar, Hitesh Arora, Kapil Chawla, "Wear Behaviour of SMAW Hardfaced Mild Steel and Infence of Dilution Using Hardfacing Properties", *International Journal of Mechanical Engineering and Technology* Vol. 8, Issue 7, 2017, Pages 1652-1661.
- K.M. KenchiReddy, C.T. Jayadeva, "The Effects of Welding Processes on Microstructure and Abrasive Wear Resistance for Hardfacing Deposits", *International Journal of Industrial Engineering and Management* Vol. 2, Issue 2, 2012, Pages 28-34.
- Amardeep Singh Kang, Gurneet Singh Choema, Shival Singla, "Wear behaviour of hardfacings on rotary tiller blades", *Procedia Engineering* 97 (2014) 1442 – 1451.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายบรรณกฤต แจ้งประยูร
วัน เดือน ปีเกิด	2 กรกฎาคม 2533
ที่อยู่	45/3 ถ.สุขสมบุรณ์ ต.ประจวบคีรีขันธ์ อ.เมือง จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77000
การศึกษา	ปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ประสบการณ์การทำงาน	บริษัท แคล-คอมพ์ อีเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ตั้งแต่ พ.ศ.2557 ถึงปัจจุบัน
อีเมล	Bannakit_c@mail.rmutt.ac.th
เบอร์โทรศัพท์	097-0514818

