



ความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61  
โดยกระบวนการเชื่อมโลหะแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุม

โดย

นาย ธีรยุทธ กาญจนแสงทอง

คุณิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61

โดยกระบวนการเชื่อมโลหะแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุม

โดย

นาย ชีรยุทธ กาญจนแสงทอง



คุณูปนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

WELDABILITY OF SKD 61 HOT WORK TOOL STEEL  
USING GAS METAL ARC WELDING PROCESS

BY

MR. TEERAYUT KANCHANASANGTONG



A DISSERTATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE  
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY

PROGRAM IN ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

THAMMASAT UNIVERSITY

ACADEMIC YEAR 2016

COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นาย ธีรยุทธ กาญจนแสงทอง

เรื่อง

ความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61

โดยกระบวนการเชื่อมโลหะแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุม

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 16 สิงหาคม พ.ศ. 2560

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สวัสดิ์ ภาระราช)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภชัย สุรพันธ์)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิวัฒน์ มุตตามระ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย ต่อสกุล)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์)

คณบดี

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประภัสสร วังศกาญจน์)

หัวข้อคุณสมบัติ	ความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 โดยกระบวนการเชื่อมโลหะแบบอาร์คโลหะ แก๊สคลุม
ชื่อผู้เขียน	นาย ธีรยุทธ กาญจนแสงทอง
ชื่อปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภชัย สุรพันธ์
ปีการศึกษา	2559

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 โดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (Gas metal arc welding process : GMAW) โดยใช้การเชื่อมด้วยการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลว 2 แบบ คือ การถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ (Spray transfer) และการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ (Pulsed Spray transfer) ในการศึกษา และขึ้นงานทดลองแบ่งเป็น 3 สภาวะการอบชุบเหล็ก คือ เหล็กสภาพไม่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง (NHT), เหล็กสภาพผ่านกระบวนการชุบแข็ง (HT) และเหล็กสภาพผ่านกระบวนการชุบแข็งแล้วอบคลายความเครียด (HT/Temp.) โดยมีตัวแปรในการเชื่อม คือ กระแสเชื่อม และอัตราการไหลของแก๊ส ค่าความร้อนป้อนเข้าได้ถูกคำนวณในแต่ละสภาวะ ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานและทดสอบสมบัติทางกล คือ การทดสอบความแข็ง, การทดสอบความต้านทานแรงดึง, การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก ในการทดลอง

จากผลการทดลองได้ค่าตัวแปรที่ดีที่สุดของการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ (Spray transfer) และการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ (Pulsed Spray transfer) คือ อัตราการไหลของแก๊ส 13 ลิตร/นาที และกระแสเชื่อม 150 แอมแปร์ และ 190 แอมแปร์ ตามลำดับ โครงสร้างจุลภาคในทุกสภาวะการทดลองพบโครงสร้างเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้นในบริเวณแนวเชื่อมมากกว่าเนื้อโลหะหลักจากการทดสอบความแข็ง ส่วนการทดสอบความต้านทานแรงดึงให้ผลใกล้เคียงกันในทุกสภาวะการอบชุบเหล็กทั้ง 3 สภาวะ คือ 69.3 กิโลนิวตัน/ตารางมิลลิเมตร และการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกพบว่าเหล็กสภาพผ่าน

(2)

กระบวนการชุบแข็งแล้วอบคลายความเครียดให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกดีที่สุด คือ 20 จูน เป็นผลจากการให้ความร้อนในการอบคลายความเครียดส่งผลให้เกิดการปรับสภาพโครงสร้างภายในแนวเชื่อม คือ เฟสมาร์เทนไซต์ (Martensite) มีลักษณะเกรนละเอียดกระจายมากขึ้น

**คำสำคัญ:** กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม, เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61, ความสามารถในการเชื่อม, สมบัติทางกล



Dissertation Title	WELDABILITY OF SKD 61 HOT WORK TOOL STEEL USING GAS METAL ARC WELDING PROCESS
Author	Mr. Teerayut Kanchanasangtong
Degree	Doctor of Philosophy
Major Field/Faculty/University	Department of industrial engineering Faculty of engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Associate Professor Dr. Supachai Surapunt, D.Eng.
Academic Years	2016

## ABSTRACT

In this thesis, the study of weldability of SKD 61 hot work tool steel using gas metal arc welding process (GMAW) was carried out. Two types of molten metal transfers; spray and pulse were used in this study. Three conditions of heat treatments; non-hardening (NHT), hardening (HT), and hardening and tempering (HT/Temp.) were applied on specimens. The welding conditions were welding current, gas flow rate. The heat input was calculate for each condition. The microstructures of specimens were investigated by using an optical microscope, and then the mechanical properties; hardness, tensile and impact of specimens were tested.

The results showed that the best conditions of the gas metal arc welding process with the molten metal spray and pulse transfers were obtained at the gas flow rate of 13 l/min and the welding current of 150 A and 190 A, respectively. The microstructure structures of the welded specimens in all conditions showed the martensite phase, which resulted in higher hardness in the weld metal than in the base metal. Tensile strength of three conditions of heat treatments showed similar value of  $69.3 \text{ kN/mm}^2$ . The impact test of the specimen in the condition of hardening

and tempering was the best value of 20 J, which result from refining in martensite grains in the welded zone.

**Keywords:** Gas Metal Arc Welding Process, SKD 61 hot work tool steel, Weldability, Mechanical Properties





## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยคำแนะนำจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย สุรพันธ์ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่ารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และได้ให้คำปรึกษาในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเรียบร้อย รวมทั้งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สวัสดี ภาละราช, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี กรรมการวิทยานิพนธ์ ที่ได้อำนวยความสะดวกข้อมูลอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

การดำเนินการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้รับความอนุเคราะห์ด้านข้อมูล และเทคนิคการทดลองจาก อาจารย์ปิยะพงษ์ คำคุณ อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ รวมทั้งบุคคลผู้เป็นกำลังใจทุกคน ที่ได้มีส่วนร่วมในงานวิจัยชิ้นนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยความเรียบร้อยและที่ขาดไม่ได้ขอกราบขอบคุณบิดา มารดา ที่ช่วยอบรมสั่งสอนและคอยเป็นกำลังใจมาตลอด

ผู้จัดทำจึงขอแสดงความขอบคุณมาไว้ ณ ที่นี้

นาย ธีรยุทธ กาญจนแสงทอง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญตาราง	(9)
สารบัญภาพ	(11)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 วิธีการวิจัย	4
1.5 อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม	7
2.2 การถ่ายโอนโลหะหลอมเหลว	9
2.3 หน้าที่ ชนิด และสมบัติของแก๊สคลุม	12
2.4 การเลือกใช้แก๊สในการเชื่อมโลหะด้วยวิธี GMAW	13
2.5 ความร้อนที่ให้ในงานเชื่อม (Heat Input)	15

2.6	เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD61	17
2.7	วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3 วิธีการวิจัย		26
3.1	วิธีการดำเนินการวิจัย	26
3.2	ขั้นตอนการทดลอง	27
3.3	การเตรียมชิ้นงานในการทดสอบ	29
3.4	เครื่องเชื่อม GMAW	30
3.5	การคำนวณหาค่าความร้อนเข้า	32
3.6	การตรวจสอบชิ้นงานภายหลังการเชื่อม	32
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล		38
4.1	บทนำ	38
4.2	ผลการทดลอง	39
4.3	โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม	43
4.4	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction	69
4.5	การวิเคราะห์ค่าความแข็งหลังจากการเชื่อม	73
4.6	การวิเคราะห์ค่าแรงดึงหลังจากการเชื่อม	79
4.7	การวิเคราะห์การทดสอบแรงกระแทก	86
4.8	การตรวจสอบรอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM)	91
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ		94
5.1	อภิปรายผล	94
5.2	สรุปผล	98
5.3	ข้อเสนอแนะ	99

รายการอ้างอิง	100
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อกำหนดงานเชื่อม WPS	105
ภาคผนวก ข ค่าความแข็งของวัสดุ	120
ภาคผนวก ค มาตรฐาน The International Centre for Diffraction Data (ICDD)	135
ประวัติผู้เขียน	136



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินการวิจัย	5
2.1 ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของกระบวนการเชื่อม	16
2.2 สมบัติด้านกายภาพ (Physical Properties)	18
2.3 กระบวนการอบชุบความร้อน (Heat treatment)	19
3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ในการวิจัยเบื้องต้น	27
3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ในการวิจัยเบื้องต้น	28
3.3 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 (% wt)	28
3.4 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม DIN 8555 : MSG 6 GZ-60 (% wt)	28
4.1 การเชื่อมที่สภาวะการอบชุบของเหล็กทั้ง 3 สภาวะ	37
4.2 ค่า Heat Input ในการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์และความกว้างของแนวเชื่อม	38
4.3 ค่า Heat Input ในการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์และความกว้างของแนวเชื่อม	39
4.4 ค่าความกว้างของแนวเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์แต่ละการอบชุบ ค่ากระแส 150A อัตราการไหลของแก๊ส 13 L/min	40
4.5 ภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณต่างๆ เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์(HT/Temp.) กำลังขยาย 200 เท่า	48
4.6 ภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณต่างๆ เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์(HT/Temp.) กำลังขยาย 200 เท่า	56
4.7 ภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณต่างๆ เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์เปรียบเทียบทั้ง 3 สภาวะการอบชุบเหล็ก กำลังขยาย 200 เท่า	63
4.8 ค่าความแข็งแรงดึงด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์	76
4.9 ค่าความแข็งแรงดึงด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์	78
4.10 ค่าความแข็งแรงดึงด้วยสภาวะการอบชุบเหล็กต่างๆ กัน	80
4.11 ค่าการทดสอบแรงกระแทกด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์	82

4.12 ค่าการทดสอบแรงกระแทกด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์	84
4.13 ค่าการทดสอบแรงกระแทกหลังกระบวนการเชื่อม GMAW แต่ละสภาวะ	86



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	7
2.2	8
2.3	11
2.4	12
2.5	15
2.6	20
2.7	21
3.1	30
3.2	30
3.3	31
3.4	32
3.5	33
3.6	34
3.7	35
3.8	36
3.9	36
3.10	37
4.1	40
4.2	41
4.3	42

4.4	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กงานร้อน SKD 61 (กำลังขยาย 1000 เท่า)	44
	(ก) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 สภาพรีดร้อน	
	(ข) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61	
4.5	ชิ้นงาน (HT/Temp.) ภายหลังจากการเชื่อม Spray transfer กระแส 150A /13L/min	45
	โครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ (Martensite) กำลังขยาย 1000 เท่า	
4.6	โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Weld area (HT/Temp.) ที่ 150A,13 L/min	46
	กำลังขยาย 400 เท่า	
4.7	โครงสร้างจุลภาครอยต่อ Weld area กับ HAZ (HT/Temp.) ที่ 150A,13 L/min	47
	กำลังขยาย 200 เท่า	
4.8	โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ (HT/Temp.) ที่ 150A,13 L/min	48
	กำลังขยาย 400 เท่าโครงสร้างเฟอร์ไรท์ (Ferrite) และ โครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) แบบละเอียด	
4.9	โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Base metal (HT/Temp.) 150A,13 L/min	49
	กำลังขยาย 400 เท่า โครงสร้างซอไบท์ (Sorbite)	
4.10	โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Weld area (HT/Temp.) 150A,13 L/min	53
	กำลังขยาย 1000 เท่า	
4.11	โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Weld area (HT/Temp.) 170A,13 L/min	54
	กำลังขยาย 1000 เท่า	
4.12	โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Weld area (HT/Temp.) 190A,13 L/min	54
	กำลังขยาย 1000 เท่า	
4.13	โครงสร้างจุลภาค Weld area กับ HAZ 190A,13 L/min กำลังขยาย 200 เท่า	55
4.14	โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ (HT/Temp.) 190A,13 L/min	56
	กำลังขยาย 400 เท่า	
4.15	โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Base metal (HT/Temp.) 190A,13 L/min	57
	กำลังขยาย 400 เท่า	
4.16	โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Weld area เหล็ก (NHT) กำลังขยาย 1000 เท่า	60
4.17	โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Weld area เหล็ก (HT) กำลังขยาย 1000 เท่า	60
4.18	โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Weld area เหล็ก (HT/Temp.) กำลังขยาย 1000 เท่า	61



4.19	โครงสร้างจุลภาค Weld metal กับ HAZ เหล็ก (NHT) กำลังขยาย 200 เท่า	62
4.20	โครงสร้างจุลภาค Weld metal กับ HAZ เหล็ก (HT) กำลังขยาย 200 เท่า	62
4.21	โครงสร้างจุลภาค Weld metal กับ HAZ เหล็ก (HT/Temp.) กำลังขยาย 200 เท่า	63
4.22	โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ เหล็ก (NHT) กำลังขยาย 400 เท่า	64
4.23	โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ เหล็ก (HT) กำลังขยาย 400 เท่า	64
4.24	โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ เหล็ก (HT/Temp.) กำลังขยาย 400 เท่า	65
4.25	โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Base Metal เหล็ก (NHT) กำลังขยาย 400 เท่า	66
4.26	โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Base Metal เหล็ก (HT) กำลังขยาย 400 เท่า	66
4.27	โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Base Metal เหล็ก (HT/Temp.) กำลังขยาย 400 เท่า	67
4.28	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD	69
4.29	ค่าการทดสอบ XRD (Spray Transfer) บริเวณ Weld area กับบริเวณ HAZ กระแส 150A และ 210A	70
4.30	ค่าการทดสอบ XRD ของบริเวณ Weld area การถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์	71
4.31	ค่าการทดสอบ XRD ของบริเวณ Weld area สภาวะการอบชุบต่างๆ กัน	72
4.32	ตำแหน่งของการกดความแข็ง	74
4.33	การเปรียบเทียบค่าความแข็งก่อนและหลังเชื่อมที่กระแสและอัตราการไหลของแก๊ส	75
4.34	ค่าความแข็งก่อนและหลังเชื่อมด้วยการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์	77
4.35	การเปรียบเทียบค่าความแข็งก่อนและภายหลังการเชื่อมสภาวะการอบชุบต่างๆ	79
4.36	การขาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึงด้วยกระบวนการถ่ายเชื่อมแบบสเปรย์	80
4.37	ความสัมพันธ์ค่าแรงดึงกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์	81
4.38	การขาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึงด้วยกระบวนการถ่ายเชื่อมแบบพัลส์	82
4.39	ความสัมพันธ์ค่าแรงดึงกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์	83
4.40	การขาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึงด้วยกระบวนการถ่ายเชื่อมแบบสเปรย์	84
4.41	เปรียบเทียบค่าแรงดึงที่สภาวะต่างๆ กัน	85
4.42	ค่าการทดสอบแรงดึงก่อนและหลังจากการเชื่อมในสภาวะที่แตกต่างกัน	86
4.43	ชิ้นงานการทดสอบแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM A370	86
4.44	ความสัมพันธ์ค่าแรงกระแทกหลังการทดสอบแบบ Spray Transfer	87
4.45	ความสัมพันธ์ค่าแรงกระแทกภายหลังการทดสอบแบบ Pulsed Spray Transfer	89
4.46	การแตกหักด้วยวิธีการทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy-V	90
4.47	ค่าเฉลี่ยแรงกระแทกสูงสุดในแต่ละกระบวนการอบชุบ (Spray Transfer)	91

- 4.48 รอยแตกของช่วง Weld Metal ที่ผ่านกระบวนการทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy 92  
ทั้ง 3 สภาวะ
- 4.49 รอยแตกของช่วง Weld Metal ที่ผ่านกระบวนการทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy 93



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาทางอุตสาหกรรมได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็วได้มีการนำวัสดุประเภทโลหะมาใช้มากขึ้น แต่การใช้งานและการออกแบบที่ไม่ถูกต้องสามารถทำให้วัสดุเกิดการเสียหายประเภทการสึกหรอได้ หรือแม้กระทั่งในการติดตั้งวัสดุเข้าด้วยกัน เช่น การประสานในลักษณะชั่วคราวหรือแบบถาวรโดยกระบวนการเชื่อมนั้นเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก ซึ่งกระบวนการเชื่อมแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุมเป็นกระบวนการเชื่อมที่นิยมใช้ในการประกอบงานในภาคอุตสาหกรรมซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ในกระบวนการเชื่อมมีองค์ประกอบต่างๆ กัน เช่น ส่วนผสมทางเคมีและตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม (เชิดเชลง และคณะ; 2524) ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล เช่น Toughness , Impurity , Embrittlement และองค์ประกอบต่างๆ อีกมากมายที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุ

ในอุตสาหกรรมการผลิตมักใช้แม่พิมพ์ประเภทต่างๆ เช่น แม่พิมพ์ฉีดโลหะ, แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป, แม่พิมพ์ทุบขึ้นรูป, แม่พิมพ์แก้ว และแม่พิมพ์พลาสติก เป็นต้น ซึ่งในการผลิตแม่พิมพ์ดังกล่าวต้องจัดหาเหล็กที่มีความคงทนและความเที่ยงตรงในการผลิตค่อนข้างสูง ทั้งนี้เพื่อลดการสึกหรอและการแตกร้าวอันส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการผลิตแม่พิมพ์มีราคาสูง และเหล็กที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์งานร้อนที่แพร่หลาย คือ เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD61 ซึ่งจัดเป็นเครื่องมืองานร้อนประเภท Cr-Mo-V ที่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง รวมถึงเครื่องมือกลประเภทต่างๆ ซึ่งจากวิธีการใช้งานหรือการออกแบบที่ไม่ถูกต้องทำให้แม่พิมพ์เกิดการเสียหายประเภทการแตกร้าวและการสึกหรอ โดยการซ่อมแซมมักใช้วิธีการเชื่อมซึ่งนิยมใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากราคาถูกกว่าการเปลี่ยนแม่พิมพ์ทั้งชุด กระบวนการเชื่อมที่นิยมใช้กันทั่วไปจะใช่วิธีการเชื่อมแบบลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW), การเชื่อมอาร์คทังสแตนแก๊สปกคลุม (GTAW), การเชื่อมแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุม (GMAW) และการเชื่อมด้วยเลเซอร์ (LBW) โดยปัญหาส่วนใหญ่ที่พบในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD61 คือ การเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของความเสียหายประเภทความล้าในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง รวมถึงปัญหาจากการสึกหรอ [M. Vedaniet al; 2007] อันเนื่องมาจากการใช้กระบวนการทางการเชื่อมที่ไม่เหมาะสม เช่น กระแสเชื่อม, ความเร็วในการเชื่อม, การให้ความร้อนที่ใช้กับชิ้นงานก่อนการเชื่อมและการให้ความร้อนที่ใช้กับชิ้นงานภายหลังการเชื่อม เป็นต้น [อำนาจ แก้วสามัคคี; 2545, L.P. Borrego et al; 2009]

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษากระบวนการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 ด้วยกระบวนการเชื่อมโลหะแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุม (GMAW) เนื่องจากมีคุณภาพต่อแนวเชื่อมสูงจากการเชื่อมที่ต่อเนื่องมีค่าความร้อนป้อนเข้าภายในชิ้นงานต่ำและมีความแม่นยำในการควบคุมน้ำโลหะรวมถึงสามารถเชื่อมได้ทุกตำแหน่งและใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม [Smith, W.F.;1990, K. ManikyaKanti, P. Srinivasa Rao; 2008] โดยทำการการศึกษาความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 โดยกระบวนการเชื่อมโลหะแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุม เพื่อศึกษาผลที่จะเกิดกับงานเชื่อมโดยพิจารณาจากโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของวัสดุ ทั้งนี้เพื่อเป็นข้อมูลในการซ่อมบำรุงและลดค่าใช้จ่ายในการผลิต สามารถนำไปเป็นแนวทางในการเลือกใช้สำหรับอุตสาหกรรมเชื่อมเหล็กแม่พิมพ์งานร้อนต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ศึกษาความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 โดยกระบวนการเชื่อมแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ (Spray transfer) และ กระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ (Pulsed Spray transfer)
- 1.2.2 ศึกษาเปรียบเทียบผลความแตกต่างในแต่ละสภาวะการอบชุบเหล็กโดยใช้การเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ (Spray transfer)

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

เพื่อศึกษาความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 โดยกระบวนการเชื่อมแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุม และวิเคราะห์ความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD61 มีขอบเขตการศึกษาดังนี้

- 1.3.1 ใช้เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD61 ขนาด 50 x 120 x 10 mm (ตามมาตรฐาน AWS D1.1/D1.1:M) โดยศึกษาเพื่อเลือกตัวแปรที่ใช้ในการวิจัยเบื้องต้น และ ศึกษาวิเคราะห์ผลเพื่อเปรียบในแต่ละสภาวะการอบชุบเหล็ก โดยการชุบแข็งเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 ที่อุณหภูมิ 1030°C สารชุบคือ น้ำมัน ในการเชื่อมใช้แก๊สอาร์กอน 82 % และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 18 % (ตามมาตรฐาน DIN EN 439-M21) ในการเชื่อมแบบ GMAW เชื่อมด้วยการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์และการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์
- 1.3.2 เตรียมชิ้นงานโดยใช้ชุดเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติเพื่อลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากการเชื่อมโดยมีการเปรียบเทียบตัวแปรในการเชื่อมเหล็กที่ผ่านกระบวนการอบชุบดังนี้ คือ
- (1) เหล็กผ่านกระบวนการชุบแข็งและผ่านการอบคลายความเครียด ทำการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์และเปรียบเทียบกับเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์
  - (2) เหล็กสภาพปกติผ่านการรีดร้อน, เหล็กผ่านกระบวนการชุบแข็ง และเหล็กผ่านกระบวนการชุบแข็งและผ่านการอบคลายความเครียด ทำการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์  
(ใช้เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD61 เกรดเดิมในทุกการทดลอง)
- 1.3.3 การเชื่อมกำหนดตัวแปรเพื่อทำการศึกษาผลกระทบต่อการเชื่อม คือ กระแสเชื่อม และอัตราการไหลของแก๊ส
- 1.3.4 ตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม
- 1.3.5 ทดสอบสมบัติทางกลของรอยเชื่อมคือ การทดสอบความแข็ง, การทดสอบความต้านทานแรงดึง, การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก ของชิ้นงานภายหลังการเชื่อม
- 1.3.6 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD
- 1.3.7 ตรวจสอบรอยแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM)
- 1.3.8 วิเคราะห์ผล

## 1.4 วิธีการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของวิเคราะห์ความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD61 โดยกระบวนการเชื่อมแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุม
- 1.4.2 กำหนดตัวแปรเพื่อทำการศึกษาและวิเคราะห์ความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD61 โดยกระบวนการเชื่อมแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุม
- 1.4.3 ทำการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 โดยกระบวนการเชื่อมแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุม
  - 1.4.3.1 หาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD61 โดยกำหนดกระแสเชื่อม และอัตราการใช้ของแก๊ส
  - 1.4.3.2 จากการวิจัยในข้อ 1.4.3.1 จะทำให้ทราบถึงค่าตัวแปรที่เหมาะสม
  - 1.4.3.3 วิเคราะห์ข้อมูลด้วยการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค, การทดสอบความแข็ง, การทดสอบความต้านทานแรงดึง, การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก
  - 1.4.3.4 ตรวจสอบความแตกต่างและความสัมพันธ์ของผลการทดลองเพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม
  - 1.4.3.5 พิจารณาสรุปผลการทดลอง
- 1.4.4 นำค่าที่เหมาะสมจากการทดลองเบื้องต้นมาทำการเชื่อมกับเหล็กในสภาพการอบชุบเหล็กต่างๆ กัน
- 1.4.5 รวบรวมข้อมูล และ วิเคราะห์ผล

## ตารางที่ 1.1

## แผนการดำเนินการวิจัย

ลำดับ	กิจกรรม	เดือนที่						
		1-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
1	ศึกษาและค้นคว้าทฤษฎีงานวิจัย กับงานที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อม แบบอาร์คโลหะแก๊สคลุม GMAW และวัสดุ SKD61	→						
2	ออกแบบการทดลองและรวบรวม ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในด้านการเชื่อม		→					
3	ทำการทดลองและทดสอบ สมบัติต่างๆ ตามตัวแปรที่กำหนด			→				
4	วิเคราะห์ผลที่ได้เพื่อตรวจสอบ ความถูกต้อง				→			
5	สรุปผลการวิจัย					→		
6	จัดทำเล่มวิทยานิพนธ์							→

## 1.5 อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย

- 1.5.1 เครื่องเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม
- 1.5.2 กล้องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค
- 1.5.3 เครื่องทดสอบความแข็ง
- 1.5.4 เครื่องทดสอบแรงดึง
- 1.5.5 เครื่องทดสอบแรงกระแทก
- 1.5.6 เครื่องมือวิเคราะห์ส่วนผสมวัสดุ
- 1.5.7 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction : XRD)
- 1.5.8 เตาอบ

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ทราบค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD61 ด้วยการเชื่อมแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุม (GMAW) จากกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ (Spray transfer) และ กระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ (Pulsed Spray transfer)
- 1.6.2 ทราบผลเปรียบเทียบผลความแตกต่างในแต่ละสภาวะการอบชุบเหล็กโดยใช้การเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ (Spray transfer)
- 1.6.3 เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานที่มีการใช้งานในสภาวะต่างๆ กันให้เหมาะสมและแก้ปัญหาการเชื่อมที่มีการแตกร้าวได้
- 1.6.4 ได้องค์ความรู้ในการเชื่อมเหล็กกล้าผสม SKD 61 ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุม (GMAW)

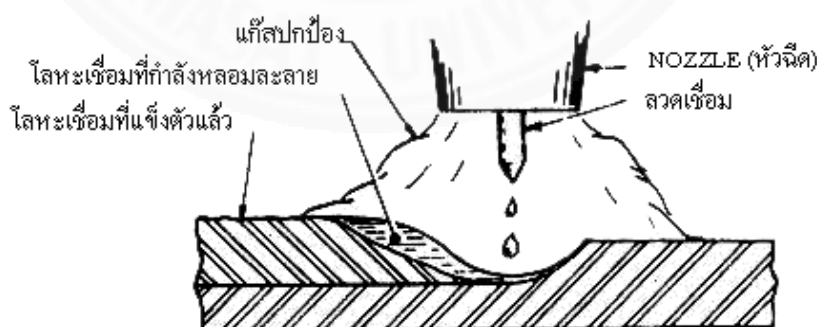


## บทที่ 2

### วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

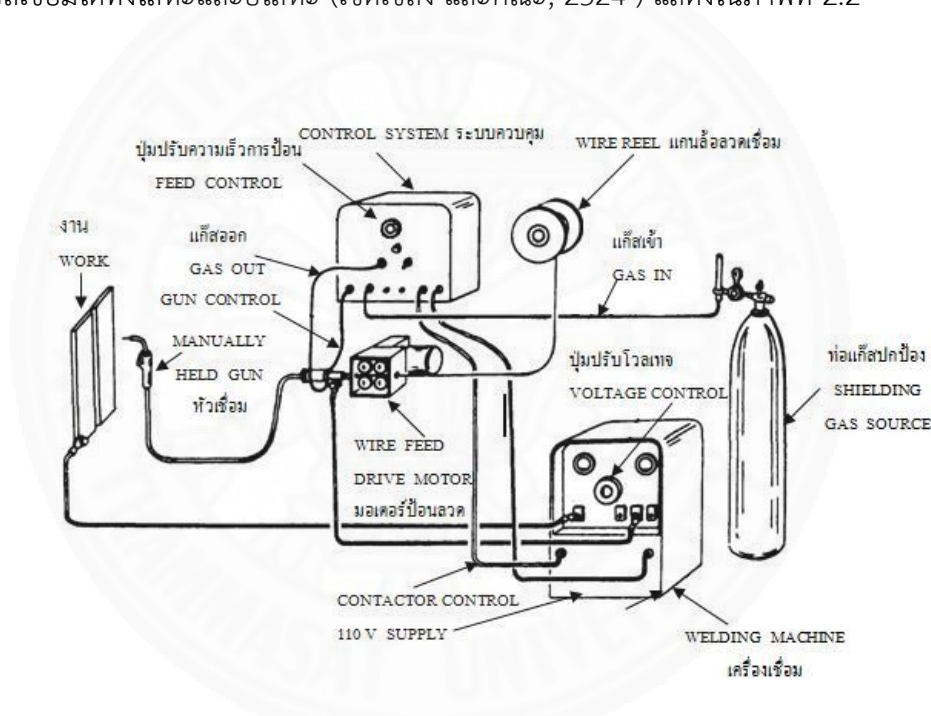
#### 2.1 กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding Process : GMAW)

การเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม หรือเรียกว่า การเชื่อมมิก (MIG : Metal Inert Gas) เป็นกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์ค ซึ่งการอาร์คเกิดขึ้นระหว่างลวดเชื่อมเปลือยที่ถูกป้อนมาอย่างต่อเนื่องกับโลหะชิ้นงาน ความร้อนจากการอาร์คทำให้ปลายลวดเชื่อมหลอมละลายเติมลงไปรวมตัวกับโลหะหลอมเหลวบนชิ้นงานได้เป็นแนวเชื่อมขณะเดียวกันบริเวณการอาร์คจะถูกคลุมด้วยแก๊สซึ่งจ่ายมาจากหัวเชื่อมเพื่อเป็นการป้องกันแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนจากบรรยากาศโดยใช้ลวดเชื่อมสิ้นเปลือง (Consumable Electrode) ขนาดเล็กจกม้วนลวด ซึ่งจะถูกป้อนผ่านหัวเชื่อมออกมาอย่างต่อเนื่องผ่านท่อนำลวดและท่อนำกระแส (Contact Tip) เมื่อปลายลวดแตะกับผิวของชิ้นงานจะเกิดการอาร์คขึ้น ความร้อนจากการอาร์คจะหลอมชิ้นงานและลวดเชื่อมเข้าด้วยกันเติมลงไปเป็นแนวเชื่อมขณะเดียวกันแก๊สเฉื่อยจากท่อจะไหลเข้าท่อจ่ายสู่หัวฉีดพุ่งออกมาคลุมบ่อหลอมละลายและบริเวณรอบปลายอาร์คเพื่อทำหน้าที่เป็นม่านป้องกันไม่ให้ออกซิเจนหรือแก๊สอื่นๆ ในบรรยากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะที่หลอมเหลว ซึ่งตามมาตรฐาน AWS จะใช้คำว่า Gas Metal Arc Welding : GMAW แต่โดยทั่วไปมักเรียกว่า การเชื่อมมิก (MIG) (เชิดเชลง และคณะ; 2524) หลักการของวิธีการเชื่อมโลหะแบบ ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 หลักการของวิธีการเชื่อมโลหะแบบ GMAW จาก วิศวกรรมกรเชื่อม. (น. 22), โดย เชิดเชลง และคณะ, 2524, กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมความรู้ด้านเทคนิค ระหว่างประเทศ.

กระบวนการเชื่อมมักนิยมใช้แพร่หลายทั้งวิธีการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ วิธีกึ่งอัตโนมัติผู้ใช้จะเป็นผู้ดำเนินการเองทั้งหมดตั้งแต่การตั้งแรงดัน, ปรับอัตราการไหลของแก๊ส และการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม ส่วนการเชื่อมแบบอัตโนมัติส่วนใหญ่จะใช้กับอุตสาหกรรมการผลิตที่มีปริมาณงานเชื่อมมากๆ เช่น ภาคอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ เป็นต้น ขนาดลวดเชื่อมที่นิยมใช้กันมีตั้งแต่ 0.8 – 3.2 mm บรรจุในม้วน การเลือกใช้จะพิจารณาตามความหนาและชนิดของชิ้นงานโลหะที่นิยมใช้กับกระบวนการเชื่อมมักได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอน อะลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม บรอนซ์ ทองแดง เป็นต้น ข้อดีของการเชื่อมมัก มีหลายประการคือ เชื่อมได้ด้วยอัตราความเร็วสูง ความร้อนไม่สะสมที่ชิ้นงานมาก ลวดเชื่อมป้อนอย่างต่อเนื่องและไม่เสียเวลาเปลี่ยน ให้การหลอมลึกที่ดีกว่าไม่ต้องขจัดสแลก (Slag) สามารถเชื่อมได้ทั้งโลหะและอโลหะ (เซตเซลง และคณะ; 2524 ) แสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ส่วนประกอบสำคัญอุปกรณ์การเชื่อมด้วย GMAW จาก *Fundamental of Professional Welding*. Dave Heiserman, <http://www.free-ed.net>

### ข้อดีของการเชื่อมโลหะด้วยวิธี MIG

- (1) ให้คุณภาพต่อแนวเชื่อมสูงในการเชื่อมโลหะและโลหะผสมเกือบทุกชนิดที่อยู่ในโรงงานอุตสาหกรรม
- (2) การทำความสะอาดภายหลังจากการเชื่อมน้อยมาก
- (3) การอาร์คและแอ่งหลอมละลายที่แนวเชื่อม สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน

- (4) การเชื่อมอาจทำได้ในทุกท่าเชื่อมซึ่งแล้วแต่ขนาดของลวดเชื่อมที่ใช้และวิธีการ (Variation)
- (5) สามารถเชื่อมได้ด้วยความเร็วสูง ทำให้ประหยัดในเรื่องของเวลาและ Low-hydrogen
- (6) ไม่มีซีฟลักหรือสแลก (Slag) จึงไม่มีปัญหาฟลักกรวมตัวกับแนวเชื่อม (Slag Inclusion)

## 2.2 การถ่ายโอนโลหะหลอมเหลว (Metal Transfer)

การถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวหมายถึง การที่ลวดเชื่อมหลอมละลายเป็นหยดและหลุดออกจากปลายลวดเชื่อมผ่านการอาร์คเข้าสู่บ่อหลอมละลายบนโลหะงาน ซึ่งการถ่ายโอนให้ได้หยดของโลหะหลอมเหลวจะเกิดจากแรงที่กระทำต่อหยดโลหะหลอมเหลวที่ปลายลวดเชื่อม โดยปฏิกริยารวมกันระหว่างแรงและส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม, ชนิดของแก๊สคลุม, กระแสเชื่อม, แรงดันเชื่อม และขนาดของลวดเชื่อมโดยมีแรงที่กระทำต่อหยดโลหะหลอมเหลว เช่น แรงตึงผิว ( Surface Tension ), พลาสมาอาร์ค ( Plasma Arc ), ความเร็ว ( Velocity ), แรงโน้มถ่วง ( Gravity ), แรงแม่เหล็กไฟฟ้า ( Electro Magnetic Force ) และพลังงานจลน์ ( Kinetic Energy ) จะเป็นตัวกำหนดลักษณะการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวที่แตกต่างกันออกไปทำให้เกิดลักษณะของการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวลักษณะต่างๆ ดังนี้

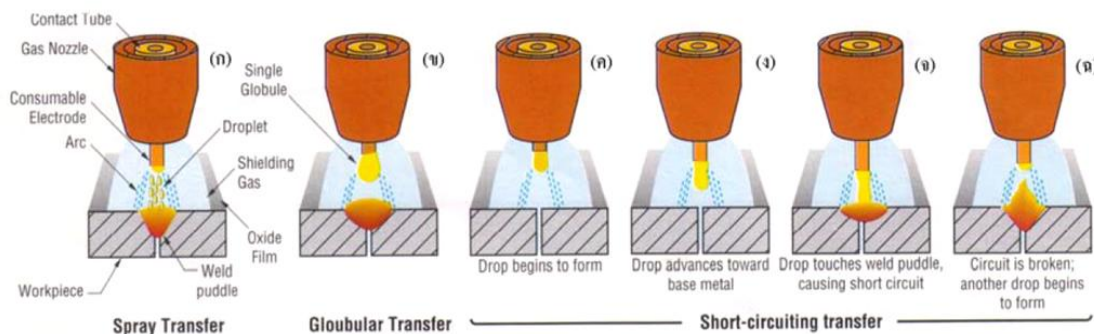
### 2.2.1 การถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ ( Spray Transfer )

กระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์จะเกิดจากการหลอมละลายของปลายลวดเชื่อมเป็นหยดโลหะหลอมเหลวขนาดเล็ก การถ่ายโอนจะเริ่มขึ้นเมื่อปลายลวดเชื่อมถูกหลอมละลายแล้วก่อตัวเป็นหยดโลหะหลอมเหลวขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเชื่อม หยดโลหะหลอมเหลวจะเรียวยเล็กตรงส่วนที่อยู่ระหว่างปลายลวดเชื่อมและหยดโลหะหลอมเหลวนี้นี้จะถูกแยกตัวให้หยดออกจากปลายลวดเชื่อมด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า หยดโลหะหลอมเหลวถูกถ่ายโอนอย่างรวดเร็วผ่านพลาสมาอาร์คลงสู่บ่อหลอมเหลวอย่างคงที่และต่อเนื่องตลอดเวลาที่กระแสเชื่อมยังไหลผ่านลวดเชื่อมอยู่ ปริมาณหยดโลหะหลอมเหลวที่ถ่ายโอนอาจต่ำกว่าหรือสูงกว่าเป็นหลายร้อยหยดในเวลาหนึ่งวินาที กระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ต้องใช้ความเข้มของกระแสสูงเพื่อลวดเชื่อมจะได้หลอมเป็นหยดขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเชื่อมอย่างรวดเร็ว การไหลพุ่งของหยดโลหะหลอมเหลวจึงเป็นเส้นตรงจากศูนย์กลางปลายลวดเชื่อมสู่บ่อหลอมละลาย ทำให้กำหนดทิศทางการถ่ายโอนได้ตามต้องการปริมาณความร้อนที่เข้าสู่งาน

สูงแม้ลวดเชื่อมจะมีขนาดใหญ่ก็สามารถหลอมเป็นหยดขนาดเล็กได้ทันที ส่งผลให้เกิดการหลอมลึกของแนวเชื่อมมาก แสดงภาพที่ 2.3ก

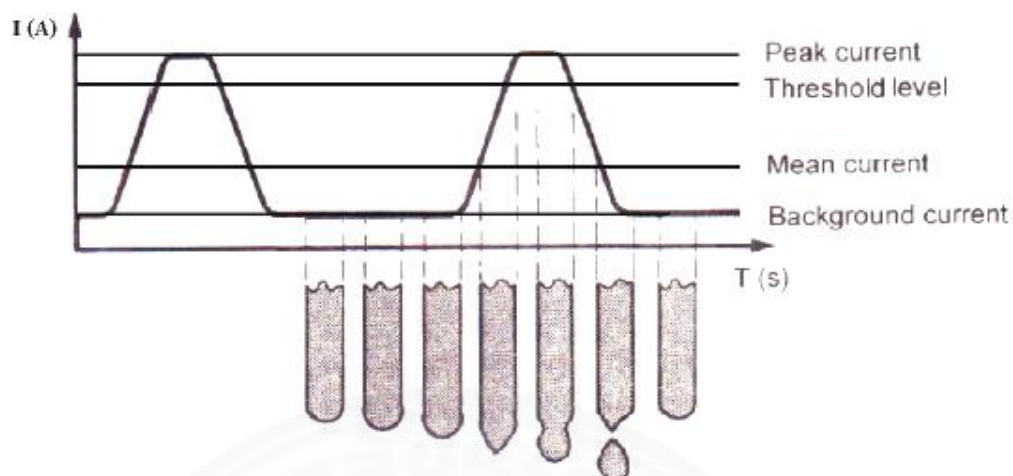
2.2.2 การถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบหยด ( Globular Transfer ) การถ่ายโอนจะเริ่มเมื่อปลายลวดเชื่อมถูกหลอมเหลวให้เป็นหยดโลหะหลอมเหลวจากนั้นจะเกิดการก่อตัวเพิ่มขนาดใหญ่ขึ้นกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเชื่อมประมาณ 1.5 ถึง 2 เท่า ก่อนที่จะหลุดจากปลายของลวดเชื่อมแล้วถ่ายโอนผ่านการอาร์คสู่บ่อหลอมละลายด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิว ซึ่งจะทำให้อัตราการเติมเนื้อโลหะมากและมีความร้อนสูงกว่าการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบลัดวงจร การถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบหยดสู่บ่อหลอมเหลวจะใช้แรงโน้มถ่วงมากกว่าแรงที่เกิดจากการอาร์ค ดังนั้นกระบวนการถ่ายโอนแบบนี้จึงเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการงานเชื่อมคุณภาพสูง มีขอบเขตใช้งานจำกัดเพราะปริมาณความร้อนต่ำ สามารถทำการเชื่อมได้ดีกับงานที่อยู่ในแนวระนาบและแนวระดับ ใช้กระแสและแรงดันเชื่อมสูงกว่าการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบลัดวงจรดังแสดงในภาพที่ 2.3ข

2.2.3 การถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบลัดวงจร ( Short Circuit Transfer ) การถ่ายโอนจะเกิดขึ้นเมื่อปลายลวดเชื่อมและโลหะชิ้นงานถูกทำให้เกิดการอาร์คขึ้นและมีอุณหภูมิสูงพอที่จะหลอมปลายลวดเป็นหยดโลหะหลอมเหลวขนาดเล็ก ขณะเดียวกันลวดเชื่อมจะถูกป้อนเข้าสู่บ่อหลอมเหลวด้วยอัตราเร็วสูงทำให้หยดโลหะหลอมเหลวนบนปลายลวดเชื่อมสัมผัสกับบ่อหลอมเหลวก่อนจะแยกออกจากปลายลวดเชื่อม ทำให้เกิดการลัดวงจรไฟฟ้า ( Short Circuit ) โดยที่การอาร์คจะดับไปชั่วขณะที่ลัดวงจรอยู่นี้กระแสจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง ปลายลวดเชื่อมที่หลอมเป็นหยดจะถูกบีบรัดออกแล้วถ่ายโอนสู่บ่อหลอมเหลวด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิว ซึ่งหยดโลหะหลอมเหลวที่ปลายลวดเชื่อมจะเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างช่องว่างปลายลวดเชื่อมกับบ่อหลอมเหลว เมื่อโลหะหลอมเหลวหยดแรกหลุดจากปลายลวดเชื่อมแล้วก็จะเริ่มต้นอาร์คใหม่อีกครั้งหนึ่ง สภาวะอย่างนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องกันไปอย่างรวดเร็วมาก คือ มีความถี่ของการลัดวงจรราว 20 ถึง 200 ครั้งต่อวินาที กระแสและแรงดันเชื่อมจะตั้งอยู่ในช่วงกระแสต่ำจึงมีปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานน้อย สามารถใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็กได้งานเชื่อมบิดตัวน้อยการหลอมทะลุและโลหะหลอมเหลวกระเด็นไม่มาก แสดงในภาพที่ 2.3 ค-ง



ภาพที่ 2.3 การถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบต่างๆ จาก *Welding Principles and Application*, 4<sup>th</sup> ed. (p. 254) By Larry Jeff ,1999, Delmar Publishers A Division of International Thomson Publishers Inc.

2.2.4 การถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ ( Pulsed Spray Transfer ) เป็นกระบวนการที่พัฒนาแทนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์เพราะมีข้อจำกัดจากการทำงานแต่ยังรักษาการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวที่เป็นลักษณะแบบสเปรย์อยู่ ใช้กระแสเชื่อมในย่านสูงและย่านต่ำสลับกันด้วยความถี่ที่กำหนดจากโปรแกรมควบคุมจากเครื่องเชื่อมหรือสามารถปรับความถี่ได้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน การถ่ายเทโลหะหลอมเหลวจากลวดเชื่อมลงสู่แนวเชื่อมจะเป็นลักษณะการถ่ายเทหยดโลหะหลอมเหลวหยดเล็กๆ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าขนาดลวดเชื่อม โดยหยดโลหะหลอมเหลวจำนวนหนึ่งหยดผ่านการอาร์คในช่วงกระแสย่านสูงของการ Pulse แต่ละครั้งกระแสและระยะเวลาของ Pulse จะต้องมีเพียงพอจึงจะทำให้ลวดเชื่อมเกิดการฟอร์มตัวและถูกกัดให้ขาดออกจากลวดเชื่อมเป็นหยดโลหะหลอมเหลวเล็กๆ ด้วยแรงจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก ส่วนกระแสน้ำต่ำจะทำหน้าที่รักษาการอาร์คให้คงอยู่และให้ความร้อนแก่ลวดเชื่อมเท่านั้น แต่ความร้อนที่ให้แก่ลวดเชื่อมในช่วงกระแสน้ำต่ำนั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้ลวดเชื่อมหลอมละลายได้ การเชื่อมแบบ Pulse เป็นการเชื่อมที่ดีสำหรับการเชื่อมแบบกระแสต่ำมีปริมาณ Spatter น้อยการหลอมลึกและลักษณะแนวเชื่อมที่ดีแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.3 รูปแบบของกระแสเชื่อมแบบพัลส์ จาก *Mig Welding Guide*, (p. 190) By Klas Weman, Gunnar Linden, 2006, Woodhead Publishing and Mancy Publishing on behalf of the Institute of Materials, Minerals & Mining.

### 2.3 หน้าที ชนิด และสมบัติของแก๊สคลุม

กระบวนการเชื่อมแบบอาร์ค (Arc Welding) หลายกระบวนการที่ต้องใช้แก๊สจากภายนอกมาช่วยคลุมขณะทำการอาร์ค ได้แก่ กระบวนการเชื่อม GTAW (TIG) , GMAW (MIG/MAG) , FCAW แบบใช้แก๊สคลุมจากภายนอกช่วย กระบวนการเชื่อมแบบ PAW และ EGW แก๊สคลุมนี้ในเมืองไทย อาจเรียกชื่อแตกต่างกันไป เช่น แก๊สคลุม , หรือเรียกว่า แก๊สปกป้อง

#### หน้าที่ของแก๊สคลุม (Function of Gas Shielded)

กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม มีหลายกระบวนการ ได้แก่ กระบวนการเชื่อม GTAW (TIG) , GMAW (MIG/MAG), FCAW ใช้แก๊สคลุมจากภายนอกช่วย , PAW และ EGW ขณะที่เกิดการอาร์ค อากาศที่คลุมรอบๆ บริเวณเกิดการอาร์คจะถูกแทนที่ด้วยแก๊สคลุมป้องกันมิให้ไนโตรเจน ออกซิเจน และความชื้นในอากาศเข้าไปรวมตัวกับบ่อหลอมละลายปกติไนโตรเจนที่มีอยู่ในเหล็กกล้าจะทำให้สมบัติทางด้านความเหนียว (Ductility) และความแข็งแรงต่อการกระแทก (Impact Strength) ของแนวเชื่อมลดลง และอาจเป็นสาเหตุให้รอยเชื่อมเกิดการแตกร้าว (Cold Crack) มีรูพรุน (Porosity) เหล็กกล้าที่มีออกซิเจนมากเกิดไป จะรวมตัวกับคาร์บอนในเหล็ก อยู่ในสภาพของแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ฝังอยู่ในเนื้อเหล็กเกิดเป็นรูพรุน ดังนั้นจึงมีการเติมธาตุอื่นๆ เข้าไปเพื่อให้รวมตัวกับออกซิเจนในลักษณะของสารประกอบฝังอยู่ภายในเนื้อเหล็กแทนการเป็นรูพรุน ส่วนไฮโดรเจนจากไอน้ำและน้ำมันก็จะแทรกอยู่ในเนื้อเหล็กหรืออลูมิเนียม ซึ่งจะมีผลให้เกิดเป็นรูพรุนหรือ

เป็นสาเหตุของการแตกร้าวดำตรอยเชื่อมขึ้นได้เช่นกัน สาเหตุของการรวมตัวดังกล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถป้องกันได้โดยใช้แก๊สคลุมซึ่งสำคัญมีอยู่ 2 กลุ่มคือ

(1) แก๊สเฉื่อย (Inert Gas) ได้แก่ แก๊สอาร์กอน (Argon : Ar) และแก๊สฮีเลียม (Helium : He) หรือแก๊สอาร์กอนและฮีเลียมผสมกัน แก๊สเหล่านี้จะไม่เกิดปฏิกิริยารวมตัวกับสารอื่น

(2) แอคทีฟแก๊ส (Active Gas) ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) หรืออาจใช้แก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับแอคทีฟแก๊สบางตัว เช่น ออกซิเจน , ไนโตรเจน , คาร์บอนไดออกไซด์ หรือไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>)

## 2.4 การเลือกใช้แก๊สในการเชื่อมโลหะด้วยวิธี GMAW

แก๊สคลุมที่เป็นแก๊สเฉื่อย คือ แก๊สอาร์กอน (Ar), ฮีเลียม (He) หรือแก๊สทั้งสองผสมกัน เปลวอาร์คจะเกิดขึ้นอย่างอิสระระหว่างปลายอิเล็กโทรดทั้งสแตนท์ที่ไม่หลอมละลายในกรณีเชื่อมทิก (TIG) หรือเปลวอาร์คเกิดอย่างอิสระระหว่างปลายอิเล็กโทรดที่หลอมละลายลงสู่โลหะชิ้นงานในกรณีเชื่อมมิก (MIG) แก๊สเฉื่อยเหล่านี้จะไม่เกิดปฏิกิริยากับสารอื่นๆ

2.4.1 แก๊สอาร์กอน (Argon) มีความหนาแน่น 1.665 kg/m<sup>3</sup> ผลิตได้จากอากาศที่มีอยู่ในบรรยากาศ 0.9 % แก๊สอาร์กอนเป็นไอออนไนส์แก๊สที่ตี มีน้ำหนักมากกว่าอากาศ สามารถผลิตได้โดยการแยกอากาศเหลว ลักษณะแก๊สจะมีในรูปแบบของแก๊สเหลวและแก๊สถัง การเก็บแก๊สอาร์กอนเหลวจะเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า -184°C เล็กน้อย สามารถใช้เป็นแก๊สคลุมได้ทั้งในสภาพบริสุทธิ์และผสมกับแก๊สอื่นๆ เพื่อให้ได้สมบัติตามความต้องการเหมาะสำหรับใช้เชื่อมโลหะเหล็กและโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ลักษณะของเปลวอาร์คที่เกิดขึ้นจะเรียบนิ่งและพุ่งเป็นลำตรงทำให้ได้แนวเชื่อมที่แคบแต่ลึก ใ้รูปร่างการหลอมลึกเหมือนแก้วไวน์ ดังแสดงในภาพที่ 2.5 ลักษณะการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวจะเป็นได้ทั้งแบบสเปรย์และแบบพัลส์ ดังนั้นจึงช่วยให้การเชื่อมไม่มีโลหะหลอมเหลวกระเด็น

2.4.2 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) มีความหนาแน่น 1.849 kg/m<sup>3</sup> เป็นแก๊สที่ให้ความร้อนได้สูงมากในบริเวณรอบนอกของเปลวอาร์ค เมื่อสัมผัสกับแกนของกระแสนจะช่วยให้เกิดพลังที่เข้มข้นสูงซึ่งมีผลทำให้เกิดการหลอมลึกได้สูง และจะเกิดการแตกตัวเมื่ออยู่ภายใต้เปลวอาร์คถึงแม้ว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นแอคทีฟแก๊สที่ให้แก๊สออกซิเจนแต่คุณภาพรอยเชื่อมที่ได้จะมีความสมบูรณ์ปราศจากรูพรุนและตำหนิ โดยปกติแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะนิยมใช้ในการเชื่อมแบบแม็กซี (MAG-C) หรือใช้ผสมกับแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สอาร์กอนเรียกว่าการเชื่อมแบบแม็กเอ็ม (MAG-M) เพื่อนำไปใช้สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนหรือเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ

เนื่องจากเป็นแก๊สที่หาง่าย ราคาถูก คุณภาพรอยเชื่อมดีและติดตั้งง่าย แต่ประสิทธิภาพของการเติมเนื้อโลหะของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะต่ำเพราะเกิดการสูญเสียไปเป็นโลหะหลอมเหลว ซึ่งจะส่งผลถึงต้นทุนรวมทั้งหมดเมื่อเชื่อมด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับงานที่ต้องการสมบัติทนต่อแรงกระแทกสูงการใช้แก๊สอาร์กอนผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเหมาะสมกว่าใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดเดียวแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแก๊สที่มีสมบัติไม่ติดไฟ ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่นและไม่มีสี นอกจากนี้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ยังหนักกว่าอากาศประมาณ 1.5 เท่า และควรใช้ระบบท่อร่วมหรือใช้มาตรวัดอัตราการไหลชนิดมีอุปกรณ์ทำความร้อนให้ความร้อนเพราะถ้าหากอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากเกินไป จะทำให้เกิดการแข็งตัวของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อุดตันอยู่ที่มาตรวัดอัตราการไหล หรือดึงเอาแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหลวออกมาจากถังบรรจุด้วย

2.4.2 แก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับคาร์บอนไดออกไซด์ การใช้แก๊สผสมระหว่างแก๊สอาร์กอนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีจุดประสงค์สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กคาร์บอนผสมต่ำ เพื่อให้การอาร์คมีความร้อนสูงทำให้กินบริเวณกว้างขึ้น การหลอมลึกมากขึ้น และสามารถช่วยลดการเกิดโลหะหลอมเหลวได้ดีกว่าใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้การผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนเล็กน้อยเข้าไปในแก๊สอาร์กอน จะทำให้ได้คุณสมบัติของการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ที่เกิดขึ้นเหมือนกับการผสมด้วยแก๊สออกซิเจนลงในแก๊สอาร์กอนจำนวนเล็กน้อย ในกระบวนการเชื่อมแบบ GMAW ที่ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมเข้าไปในแก๊สชนิดอื่น เมื่อกระแสไฟเชื่อมสูงขึ้นเล็กน้อยจะเกิดการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ที่สม่ำเสมอการอาร์คนี้ทำให้มีโลหะหลอมเหลวกระเด็นและเขม่าควันที่เกิดขึ้นในขณะที่เชื่อมน้อย ในการผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกินกว่า 25% โดยประมาณจะได้การถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ที่ไม่สม่ำเสมอและอาจเกิดเป็นการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบลัดวงจรหรือแบบหยุดแทน





ภาพที่ 2.3 รูปร่างรอยเชื่อมจากการที่ใช้แก๊สคลุมที่แตกต่างกัน จาก *Mig Welding Guide*, (p. 190) By Klas Weman, Gunnar Linden, 2006, Woodhead Publishing and Mancy Publishing on behalf of the Institute of Materials, Minerals & Mining.

## 2.5 ความร้อนที่ให้ในงานเชื่อม (Heat Input)

ในกระบวนการเชื่อมทั้งหมดจะเกี่ยวข้องกับการได้รับความร้อนและการเย็นตัวของโลหะเชื่อม ความร้อนจากการอาร์คจะหลอมละลายโลหะงานและเนื้อเชื่อมส่วนบริเวณที่ติดกับเนื้อเชื่อมจะรับความร้อนสูงมากแต่ไม่หลอมละลาย ซึ่งบริเวณนี้เรียกว่า บริเวณกระทบร้อน Heat Affected Zone (HAZ) ความร้อนและการเย็นตัวของงานเชื่อม มีอิทธิพลดังนี้

1. เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาต่อเนื้อเชื่อมและบริเวณกระทบร้อน (HAZ)
2. เกิดความเค้นและความเครียด ซึ่งนำไปสู่การแตกร้าวและการเสียรูปได้เพื่อให้เข้าใจถึงผลที่อาจเกิดขึ้นกับโลหะงานเชื่อมจึงมีความจำเป็นที่จะต้องรู้ว่าควรให้ความร้อนเท่าไรกับกระบวนการเชื่อมโลหะนั้นๆ และเย็นตัวอย่างไร เช่น ในการเชื่อมไฟฟ้าใช้กระแสเชื่อม 300 A แรงดันอาร์ค 25 V จะให้พลังงานความร้อนและแสงเท่ากับ  $300 \times 25 = 7500 \text{ J/s (Watt)}$  อัตราพลังงานทั้งหมดที่เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนให้กับชิ้นงานเรียกว่าค่าประสิทธิภาพทางความร้อนซึ่งจะเปลี่ยนไปตามกระบวนการเชื่อม จากตาราง 2.1 แสดงค่าประสิทธิภาพทางความร้อนที่ได้จากการทดลองในกระบวนการเชื่อมค่าที่ได้ขึ้นอยู่กับเทคนิคการเชื่อม (สมบุญ เต็งหงส์เจริญ; 2531)

## ตารางที่ 2.1

## ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของกระบวนการเชื่อม

กระบวนการเชื่อม	Heat Efficiency
เชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding)	90 - 99 %
เชื่อมมิก / แม็ก (Gas Metal Arc Welding)	65 - 85 %
เชื่อมฟลักซ์คอร์ (Flux Cored Arc Welding)	65 - 85 %
เชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding)	50 - 85 %
เชื่อมทิก (Gas Tungsten Arc Welding)	20 - 50 %

หมายเหตุ. จาก สมบูรณ์ เต็งหงส์เจริญ, 2531, วิศวกรรมกรรมเชื่อม, สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ, กรุงเทพฯ, หน้า 112.

ในการเชื่อมอาร์คไฟฟ้าทั้งหมด การอาร์คจะเคลื่อนที่ตามความยาวของชิ้นงานด้วยความเร็วสม่ำเสมอเพื่อให้ได้แนวเชื่อมสม่ำเสมอ ดังนั้นในการหาพลังงานที่ป้อนจะกำหนดไว้ต่อความยาวแนวเชื่อม

$$\begin{aligned} \text{Heat Input} &= \text{Energy Input} \times \text{Heat Efficiency} & (2.1) \\ &= \text{kJ/mm} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{Energy Input} = \frac{V \times A}{\text{Speed} \left( \frac{\text{mm}}{\text{min}} \right) \times 1000} \quad (2.2)$$

ค่าอัตราความร้อนป้อนเข้าที่ได้จากพลังงานที่ป้อนเข้าไปคูณด้วยประสิทธิภาพทางความร้อนของกระบวนการเชื่อมพลังงานที่ป้อนเข้าเป็นองค์ประกอบที่สัมพันธ์กับขนาดแนวเชื่อม ความกว้างบริเวณกระทบร้อน (HAZ) และอัตราการเย็นตัวช้า โดยทั่วไปพลังงานที่ป้อนเข้าสูง จะได้แนวเชื่อมใหญ่ บริเวณกระทบร้อน (HAZ) กว้าง

## 2.6 เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD61

เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนประเภท Cr-Mo-V ที่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางรวมถึงเครื่องมือต่างๆเนื่องจากการมีส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสมจากการผสมคาร์บอนประมาณ 0.4% จะช่วยให้เหล็กมีความเหนียวแกร่งสูงขณะที่ยังสามารถชุบแข็งให้มีค่าความแข็งสูงได้ด้วยเช่นกันการผสมโครเมียมประมาณ 5% จะช่วยให้เหล็กสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดีและสามารถชุบแข็งด้วยลมได้โดยมีการเปลี่ยนแปลงทางขนาดน้อยมากการผสมซิลิกอนประมาณ 1.0% จะช่วยให้เหล็กต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงได้ดีการผสมโมลิบดีนัมและวาเนเดียมจะช่วยคงความแข็งแรงไว้ที่อุณหภูมิสูงได้ดีโดยเฉพาะวาเนเดียมจะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการเสียดสีและการสึกหรอให้สูงมากขึ้นนอกจากนี้ยังมีกระบวนการผลิตแบบพิเศษเพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีเกรนเล็กละเอียดและสามารถให้สมบัติที่ดีทั้งทางด้านความแข็งแรงและความเหนียวแกร่งสูงยิ่งขึ้น

คุณลักษณะเด่น (Significant Characteristics)

- ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันดีมาก
- คงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงได้ดีมาก
- ต้านทานต่อความล้าในขณะร้อนได้ดี
- มีความเหนียวแกร่งสูงมาก
- มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูง
- ชุบแข็งง่าย มีการเปลี่ยนแปลงขนาดน้อยมาก
- มีค่าการนำความร้อนดีมาก
- ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบฉับพลัน
- สามารถระบายความร้อนด้วยน้ำได้โดยตรง
- สามารถทำไนไตรดิงเพื่อเพิ่มความแข็งผิวได้

สามารถนำไปใช้งานที่มีอุณหภูมิค่อนข้างสูงได้หลายอย่าง เช่น งานแม่พิมพ์ฉีดโลหะ งานแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะ แม่พิมพ์ทุบขึ้นรูป แม่พิมพ์แก้วและแม่พิมพ์พลาสติก สกรู และกระบอกสำหรับงานฉีดโลหะและพลาสติก ตัวปลดชิ้นงาน ใบตัดเหล็กร้อน เป็นต้นโดยมีสมบัติด้านกายภาพ ดังตารางที่ 2.2 กระบวนการอบชุบความร้อนดังตารางที่ 2.3 และขั้นตอนการชุบแข็ง CCT diagram ดังภาพที่ 2.6 - 2.7

## การเทียบเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 ตามมาตรฐานต่างๆ

มาตรฐาน	AISI : H13
มาตรฐาน	BS : BH 13
มาตรฐาน	JIS : SKD 61
มาตรฐาน	DIN : X40CrMoV51

## ตารางที่ 2.2

## สมบัติด้านกายภาพ (Physical Properties)

สมบัติ	อุณหภูมิทดสอบ			
	20°C	350°C	700°C	
การนำความร้อน/ Thermal Conductivity (W/m-K)	20°C	350°C	700°C	
สภาพบอบอ่อน	27.2	30.5	33.4	
สภาพชุบแข็งและอบคืนตัว	25.5	27.6	30.3	
สัมประสิทธิ์การยืดตัว/Modulus of elasticity (103 N/mm <sup>2</sup> )	20°C	400°C	800°C	
	224.9	213	124	
ความจุความร้อนจำเพาะที่100°C Specific heat at 100°C (J/g°C)	0.44			
ความหนาแน่น / Density(g/cm <sup>3</sup> )	7.85			
สภาพทางแม่เหล็ก /Magnetizability	มีความสามารถในการแม่เหล็ก			
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนระหว่าง 20°C ถึง	100°C	200°C	300°C	400°C
	10.9	11.9	12.3	12.7
Coefficient of thermal expansion between 20°C to (10-6m/m-K)	500°C	600°C	700°C	-
	13.0	13.3	13.5	-

หมายเหตุ. จาก บริษัท ไทย-เยอรมันสเปเชียลสตีลเซ็นเตอร์ จำกัด. เอกสารประกอบการขาย  
เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน 2344. สืบค้นจาก

<http://www.thyssenkruppmaterials.co.th/dmdocuments/2344.pdf>.

### ตารางที่ 2.3

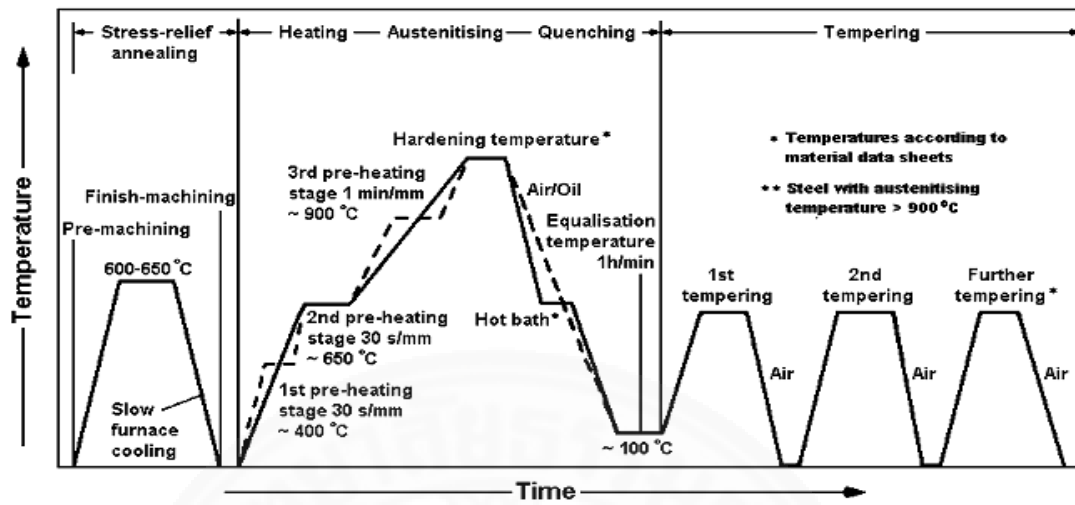
#### กระบวนการอบชุบความร้อน(Heat treatment)

การอบอ่อน	อุณหภูมิ (° C)	การเย็นตัว	ความแข็ง
	750 - 800	ในเตา	≤ 250 HB
การอบคลายความเค้น	อุณหภูมิ (° C)		การเย็นตัว
	600 - 650		อากาศ
การเผาอุ่นขึ้นงาน	ชั้นที่	อุณหภูมิ (° C)	เวลา / ความหนา
	1	400	30 sec /mm.
	2	650	30 sec /mm.
	3	900	60 sec /mm.
การชุบแข็ง	อุณหภูมิ (° C)	สารชุบ	ความแข็ง
	1020 - 1050	น้ำมัน อากาศ อ่างเกลือ	54 HRC

หมายเหตุ. จาก บริษัท ไทย-เยอรมันสเปเชียลสตีลเซ็นเตอร์ จำกัด. เอกสารประกอบการขาย  
เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน 2344. สืบค้นจาก

<http://www.thyssenkruppmaterials.co.th/dmdocuments/2344.pdf>.

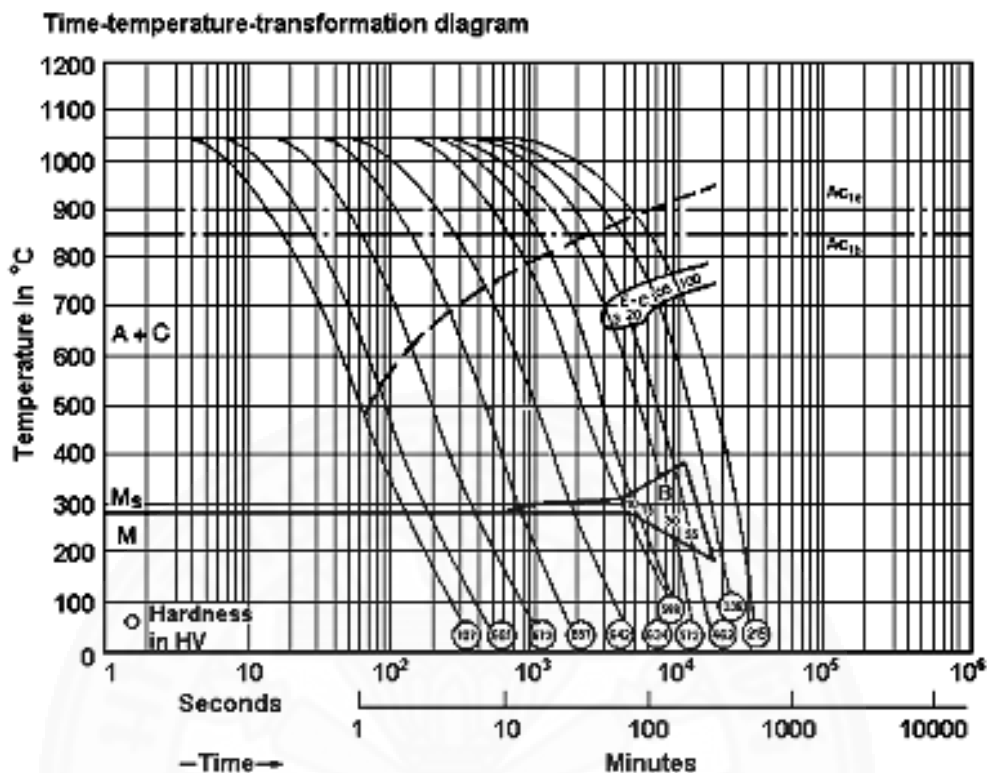
ขั้นตอนในการชุบแข็งเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61



ภาพที่ 2.6 CCT diagram ของเหล็ก SKD 61 บริษัท ไทย-เยอรมันสเปเชียลสตีลเซ็นเตอร์ จำกัด.

เอกสารประกอบการขายเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน 2344. สืบค้นจาก

<http://www.thyssenkruppmaterials.co.th/dmdocuments/2344.pdf>.



ภาพที่ 2.7 แผนภาพแสดงขั้นตอนการชุบแข็ง บริษัท ไทย-เยอรมันสเปเชียลสตีลเซ็นเตอร์ จำกัด. เอกสารประกอบการขายเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน 2344. สืบค้นจาก <http://www.thyssenkruppmaterials.co.th/dmdocuments/2344.pdf>.

## 2.7 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมวัสดุจำพวกเหล็กและวัสดุแม่พิมพ์ พบว่าได้มีการวิจัยโดยใช้เทคนิคต่างๆ เพื่อการพัฒนาการซ่อมแซมและลดปัญหาข้อบกพร่องในลักษณะต่างๆ กันดังนี้

HakanAtes และคณะ (2007) ได้ใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายปริมาณสัดส่วนของแก๊สผสมที่ใช้ในการเชื่อมด้วยวิธีอาร์คโลหะแก๊สคลุม โดยในการวิจัยได้ใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำขนาด  $450 \times 150 \times 15 \text{ mm}$  เชื่อมที่กระแส  $180 \text{ A}$   $28 \text{ V}$  ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, อาร์กอน และออกซิเจน เป็นแก๊สคลุมแนวเชื่อมที่อัตราการไหล  $15 \text{ L/min}$  ขนาดของลวดเชื่อม  $1.2 \text{ mm}$  เชื่อมที่ปริมาณสัดส่วนผสมของแก๊สต่างๆ กันและมีการทดสอบคุณสมบัติทางกลด้วย แรงดึง, การยืดตัว, ความแข็ง และความต้านทานจากแรงกระแทก พบว่าจากการทดสอบและแบบจำลอง (MLPNN) ที่มีส่วนป้อนเข้าจำนวน 3 ค่า, 2 ค่า ชั้นซ่อน และผลลัพธ์

4 ค่า ใช้ค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชันระหว่าง -1 ถึง 1 โดยผลลัพธ์จากการทำนายตัวแปรของแก๊สผสมที่ใช้ในการเชื่อมด้วยวิธีแก๊สคลุมมีประสิทธิภาพที่สามารถเชื่อถือได้เปรียบเทียบกับจากการทดลองและแบบจำลองในการช่วยทำนาย แต่ยังเป็นข้อจำกัดต่อการทำงานลักษณะอื่นๆ ที่ไม่สามารถคาดเดาได้ เนื่องจากเมื่อเปลี่ยนเป็นวัสดุประเภทอื่นๆ ก็จะส่งผลให้ค่าเปลี่ยนแปลงไปไม่สามารถใช้ได้

Gualco A และคณะ (2010) ได้วิจัยการเชื่อมพอกผิวซึ่งมีการพัฒนามีการใช้งานที่มีความสามารถต้านทานการสึกหรอ การเชื่อมพอกสามารถเชื่อมบริเวณพื้นผิวและทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของแก๊สคลุม อัตราความร้อนเข้าและการให้ความร้อนหลังจากการเชื่อม โดยวิเคราะห์จากโครงสร้างทางจุลภาคและความต้านทานการสึกหรอของวัสดุที่มีการปรับปรุงส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก martensitic ให้คล้ายคลึงกับเหล็กเครื่องมือ AISI H13 โดยใช้การเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสกับกลุ่มในการศึกษาแบ่งลักษณะการเชื่อมเป็นสี่รูปแบบด้วยพารามิเตอร์การเชื่อมที่แตกต่างกัน คือ แก๊สคลุมใช้ Ar-2% CO<sub>2</sub> และ Ar-20% CO<sub>2</sub> ในการผสม และให้อัตราความร้อนสองระดับคือ 2 และ 3 kJ/mm ภายหลังจากการเชื่อมให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สำหรับการทดสอบการสึกหรอของโลหะภายใต้เงื่อนไขของแรงที่นำมากระทำในการทดสอบ 500 N และใช้ข้อบังคับประกอบทางเคมีในการพิจารณาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงในการวิเคราะห์จากการวิจัยพบว่าไม่มีโครงสร้าง austenite ในโครงสร้างจุลภาคที่สภาวะต่างๆ กันของการเชื่อมและชิ้นงานที่ได้รับความร้อนครั้งที่สองจากการเชื่อมพอกพบที่มีความแข็งแรงเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์การตกตะกอน แต่อย่างไรก็ตามแนวเชื่อมที่สามารถต้านทานการสึกหรอที่สูงเป็นผลมาจากการให้ความร้อนภายหลังการเชื่อม พฤติกรรมการต้านทานการสึกหรอที่ดีที่สุดพบว่ามีอยู่ในกลุ่มตัวอย่างที่มีการให้อัตราความร้อนเข้าต่ำและอยู่ภายใต้ออกซิเจนต่ำสุดที่เกิดสภาวะออกซิเดชันเล็กน้อย ผลการทดลองนี้ได้ถูกอธิบายในด้านของความต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่เกิดจากเงื่อนไขที่แตกต่างกันของสภาวะการเชื่อม

Wilson Tafur Preciado และ Carlos Enrique Niño Bohorquez (2006) ได้ทำการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการซ่อมแซมโดยการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสกับเหล็กเกรด AISI P20 และ VP50IM ที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก โดยใช้ลวดเติมเกรด AWS A5.28-96 ER 80S-B2 และ AWS A5.28-96 ER 80S-B6 โดยสังเกตความแตกต่างบริเวณแนวเชื่อมและพื้นผิวงาน ที่ขนาดชิ้นงาน 150 x 150 x 12 mm เชื่อมเดินแนว 6 แนว โดยใช้ความแตกต่างของกระแสที่ 88, 106 และ 124 A อัตราการเดินแนว 2 ความเร็ว คือ 10 และ 14 cm/min พบว่าความเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงบริเวณแนวเชื่อมกับพื้นผิวงาน เกิดความแตกต่างกันน้อยมากจึงทำให้ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล จากบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ)



เป็นผลจากความเค้นตกค้าง แต่ในงานวิจัยนี้ก็ยังมีย่อจำกัดในกรณีที่เกิดข้อบกพร่องบริเวณพื้นผิวเท่านั้น

Y.C. Chen และ K. Nakata (2009) ได้ใช้กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 และศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค, การทดสอบแรงดึง และการสึกหรอ โดยทดลองเชื่อมแบบ Bead on Plate ที่ความหนาของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 ขนาด 10 mm เครื่องมือหมุนกวนเป็นโรตอนไนโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 mm หัวเครื่องมือกวนยาว 5 mm ใช้น้ำในการหล่อเย็น แรงกดที่ใช้ 30 kN หมุนด้วยความเร็วระหว่าง 200 – 800 rpm/min อัตราการเดินป้อนที่ 0.5, 1 และ 1.25 mm/sec และแก๊สอาร์กอนในการคลุม พบว่ากระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่บริเวณแนวเชื่อมจะได้โครงสร้างที่เป็นเกรนละเอียดแบบ Equiaxed Grain ซึ่งช่วยให้เกิดความแข็งแรง และกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานยังช่วยลด Heat Input ที่จะส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรง, ด้านแรงดึง และการต้านทานการสึกหรอซึ่งเป็นการแก้ไขข้อบกพร่องบริเวณพื้นผิวเช่นกัน เหมือนกับกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสและสแตนเลส

M. Vedani และคณะ (2007) ได้วิจัยเรื่องปัญหาของการเชื่อมด้วยเลเซอร์กับเหล็กเครื่องมือโดยการใช้การเชื่อมแบบพลาสมา-ไนโตรเจน บนแผ่นโครเมียมชนิด 1.2738 ซึ่งปัญหาที่พบในการเชื่อมแผ่นโครเมียมเกิดจากราต้ออกซิเจนในโครเมียมที่นำไปสู่การเกิดแตกกร้าวขณะร้อน การเกิดการแตกกร้าวที่พื้นผิวของโครเมียมจะเกิดในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) เป็นผลจากความเค้นตกค้าง โดยในการทดลองใช้แผ่นโครเมียมที่มีความหนา 25 mm ที่ผ่านการชุบและอบคืนสภาพและเชื่อมด้วยเลเซอร์แบบพัลส์ Nd-YAG ลวดเติมขนาด 0.5 mm ดูโครงสร้างทางจุลภาคและทดสอบความแข็ง พบว่าการใช้วิธีการเชื่อมแบบพัลส์ Nd-YAG ช่วยจำกัดการขยายของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ให้น้อยลงและทำให้โครงสร้างบริเวณนี้มีเกรนที่ละเอียดมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ลดการเกิดการแตกกร้าวและช่วยเพิ่มความแข็งแรง

L.P. Borrego และคณะ (2009) ได้ใช้การเชื่อมด้วยเลเซอร์แบบ Nd-YAG ในกระบวนการเชื่อมแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำให้ผลของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบและโครงสร้างบริเวณที่ทำการเชื่อมแซมเพียงเล็กน้อย โดยจากปัญหาความเสียหายของแม่พิมพ์ที่เกิดจากความสึกหรอและการแตกกร้าวจากความล้า ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุทำแม่พิมพ์ 2 ชนิด คือ เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 และ AISI P20 และดูผลของความเค้นที่ตกค้างในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ซึ่งวัสดุทำแม่พิมพ์ 2 ชนิดได้ผ่านการการชุบและอบคืนสภาพมาแล้ว และใช้ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย คือ กระแสแบบพัลส์ ที่ 6Hz ลวดเชื่อมขนาด 0.4 mm ใช้

แก๊สอาร์กอนผสมฮีเลียม 5 % ด้วยอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 0.6 L/min โดยมีการทดสอบความล้าที่  $R=0$  และ  $R=0.4$  ซึ่งจากการวิจัยพบว่าผลจากการทดสอบที่ความล้าที่  $R=0$  จากการเชื่อมด้วยเลเซอร์แบบ Nd-YAG มีการล้าต่ำกว่าที่ระดับ  $R=0.4$  อย่างมีนัยสำคัญจากเส้นโค้งของ S-N การวิจัยยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการแก้ไขข้อบกพร่องได้บริเวณพื้นผิว ตำแหน่งที่ทำการเชื่อมซ่อมแซมที่สามารถกระทำในท่าราบเท่านั้น และยังรวมถึงค่าใช้จ่ายที่มีราคาสูงในปัจจุบันในการเชื่อมด้วยเลเซอร์

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในการวิจัย, หรือใช้แบบจำลองในการทำนายผลของลักษณะแนวเชื่อม และใช้กระบวนการเชื่อมที่มีคุณภาพการเชื่อมสูงประเภทการเชื่อมด้วยเลเซอร์ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงโดยวิธีการดังกล่าวสามารถแก้ไขข้อบกพร่องในกรณีที่เกิดบริเวณพื้นผิวเท่านั้น แต่ถ้ามีข้อบกพร่องใต้พื้นผิวที่ลึกก็ไม่สามารถที่จะแก้ไขข้อบกพร่องนั้นได้ รวมไปถึงตำแหน่งที่ทำการเชื่อมซ่อมแซมที่สามารถกระทำได้ในท่าราบเท่านั้น ซึ่งผลต่างๆ จากการไม่ทราบค่าตัวแปรจากการใช้งานรวมถึงกระบวนการเชื่อมที่ไม่เหมาะสม เช่น กระแส, ความเร็วในการเชื่อม, การให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนการเชื่อม และการให้ความร้อนกับชิ้นงานภายหลังการเชื่อม เป็นต้น สามารถส่งผลกระทบต่อสมบัติของวัสดุที่นำไปสู่ข้อบกพร่องประเภทต่างๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาความสามารถทางการเชื่อม เพื่อประยุกต์ใช้กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมที่มีใช้โดยทั่วไปในอุตสาหกรรม เพื่อควบคุมตัวแปรที่มีผลต่อการเชื่อมให้ได้แนวเชื่อมที่แข็งแรงทนต่อการใช้งานสามารถช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้กับแม่พิมพ์ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องต่อไป

การเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมมีการใช้งานแพร่หลายโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมและสะดวกในการปฏิบัติงาน สามารถเชื่อมได้ทุกตำแหน่งการเชื่อมรวมถึงมีค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานที่ไม่สูงเกินไป โดยมีข้อดีของกระบวนการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม(GMAW) ดังนี้

- (1) กระบวนการเชื่อมที่มีใช้แพร่หลายโดยทั่วไปในอุตสาหกรรม
- (2) สามารถเชื่อมได้ทุกตำแหน่งท่าเชื่อม
- (3) มีอัตราการเติมลวดเชื่อมต่อเนื่องได้ดี สามารถแก้ไขข้อบกพร่องใต้พื้นผิวที่ตื้น และลึกซึ่งบางกระบวนการเชื่อมสามารถแก้ไขข้อบกพร่องเฉพาะบริเวณพื้นผิวดูตื้นๆ
- (4) มีค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับกระบวนการเชื่อมอื่นๆ

- (5) คุณภาพต่อแนวเชื่อมสูงในการเชื่อมโลหะและโลหะผสมเกือบทุกชนิดที่อยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมมีคุณภาพต่อแนวเชื่อมสูงจากการเชื่อมที่ต่อเนื่องและมีค่าความร้อนเข้า (Heat Input) ต่ำมีความแม่นยำในการควบคุมโลหะหลอมเหลวแบบสเปร์ย์และการควบคุมโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์



## บทที่ 3 วิธีการวิจัย

### 3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding : GMAW) และควบคุมความเร็วในการเชื่อมด้วยระบบกึ่งอัตโนมัติโดยมีลักษณะการเชื่อม 2 รูปแบบ คือ

3.1.1 ทำการทดลองเบื้องต้นโดยการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ (Spray transfer) ค่ากระแสไฟเชื่อม 150A, 170A, 190A และ 210A อัตราการไหลของแก๊สที่ 13 L/min และ 15 L/min จากนั้นดำเนินการทดลองโดยใช้กระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ (Pulsed Spray transfer) ในการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลกับกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ค่ากระแสไฟเชื่อม 150A, 170A, 190A และ 210A อัตราการไหลของแก๊สพิจารณาจากผลการทดลองเบื้องต้นด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ (Spray transfer) ดูผลของโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลที่ดีที่สุดในการนำมาใช้ในการทดลองในกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ (Pulsed Spray transfer) รวมถึงการนำค่ากระแสไฟเชื่อมและอัตราการไหลของแก๊สด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ (Spray transfer) เนื่องจากมีการใช้งานโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมมาใช้ในการทดลอง 3.1.2

3.1.2 นำกระแสไฟและอัตราการไหลของแก๊สที่ดีที่สุดจากการทดลองในข้อ 3.1.1 มาทำการศึกษาเปรียบเทียบผลความแตกต่างในแต่ละสภาวะการอบชุบของเหล็กโดยมีการกำหนดสภาวะการอบชุบของเหล็กเป็น 3 สภาวะ คือ

- เหล็กที่ร้อนที่ไม่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง (NHT)
- เหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง (HT)
- เหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคลายความเครียด (HT/Temp.)

โดยใช้ความเร็วในการเชื่อม 1.5mm/s ลวดเชื่อมมิก DIN 8555: MSG 6 GZ-60 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 mm และปลายของลวดเชื่อมห่างจากชิ้นงานทดสอบ 10 mm เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของชิ้นงานภายหลังจากการเชื่อม

### 3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 ตัวแปรที่ใช้ คือ กระแสเชื่อม และอัตราการไหลของแก๊ส ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ คือ ลักษณะของแนวเชื่อมรวมถึงคุณภาพของงานเชื่อมที่ได้ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากแนวเชื่อม คือ โครงสร้างจุลภาค และคุณภาพของงานเชื่อมในด้านสมบัติทางกล คือ ความแข็ง ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงกระแทก ของชิ้นงานภายหลังการเชื่อม

- เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ โดยใช้ กระแสเชื่อม 150A, 170A, 190A และ 210 อัตราการไหลของแก๊ส 13L/min และ 15 L/min (จากค่ามาตรฐานงานเชื่อม AWS และคำแนะนำการใช้งานของผู้ผลิตลวดเชื่อม) ใช้เหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคลายความเครียด (HT/Temp.) ศึกษาเลือกตัวแปรที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้นโดยใช้ตัวแปรในการเชื่อมตามตารางที่ 3.1

- เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ โดยใช้ กระแส/ อัตราการไหลของแก๊ส 150A, 170A, 190A และ 210A อัตราการไหลของแก๊สโดยพิจารณาจากผลการทดลองเบื้องต้นด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ (Spray transfer) ดูผลของโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลที่ดีที่สุดในการนำมาใช้ในการทดลองในกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ (Pulsed Spray transfer) ใช้เหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคลายความเครียด (HT/Temp.) และใช้กระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ เพื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมตามตารางที่ 3.2

- นำค่ากระแสไฟเชื่อมและอัตราการไหลของแก๊สด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ (Spray transfer) เนื่องจากมีการใช้งานโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมมาใช้ในการทดลอง เพื่อมาศึกษาเปรียบเทียบผลความแตกต่างในแต่ละสภาวะการอบชุบของเหล็กโดยใช้ความแตกต่างของสภาวะการอบชุบของเหล็กทั้ง 3 สภาวะ

ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 และส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม DIN 8555 : MSG 6 GZ-60 ดังตารางที่ 3.4 และ 3.5

## ตารางที่ 3.1

ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ในการวิจัยเบื้องต้น

ค่าตัวแปรในการเชื่อม	
กระแส (Amp.)	150A,170A, 190A และ 210A
อัตราการไหลของแก๊ส (L/min)	13 , 15
มุมของหัวลวดเชื่อม (°)	90
อัตราความเร็วในงานเชื่อม (mm/sec)	1.5
ระยะอาร์ค (mm)	10
วัสดุที่ใช้ในการทดลองในการเชื่อม	JIS SKD-61 (HT/Temp.)
แก๊สที่ใช้ในการเชื่อม	Ar 82%+CO <sub>2</sub> 18%
กระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลว	แบบสเปรย์

หมายเหตุ. จาก ค่ามาตรฐานงานเชื่อม AWS และคำแนะนำการใช้งานของผู้ผลิตลวดเชื่อม

## ตารางที่ 3.2

ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ในการวิจัยเบื้องต้น

ค่าตัวแปรในการเชื่อม	
กระแส (Amp.)	150, 170, 190, 210
อัตราการไหลของแก๊ส (L/min)	13
มุมของหัวลวดเชื่อม (°)	90
อัตราความเร็วในงานเชื่อม (mm/sec)	1.5
ระยะอาร์ค (mm)	10
วัสดุที่ใช้ในการทดลองในการเชื่อม	JIS SKD-61 (HT/Temp.)

แก๊สที่ใช้ในการเชื่อม	Ar 82%+CO <sub>2</sub> 18%
กระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลว	แบบพัลส์

หมายเหตุ. จาก ค่ามาตรฐานงานเชื่อม AWS และคำแนะนำการใช้งานของผู้ผลิตลวดเชื่อม

### ตารางที่ 3.3

ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าผสมงานร้อนSKD 61 (% wt)

c	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
0.38	0.96	0.40	0.011	0.004	4.99	0.048	1.25	0.97

### ตารางที่ 3.4

ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม DIN 8555 : MSG 6 GZ-60 (% wt)

(เลือกใช้จากส่วนผสมที่ใกล้เคียงกับลวดเชื่อมตามคำแนะนำจากผู้ผลิตลวดเชื่อม)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
0.42	2.80	0.40	-	-	8.50	-	-	-

## 3.3 การเตรียมชิ้นงานในการทดสอบ

วัสดุเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 โดยมีขนาด 50 x 120 x 10 mm (ตามมาตรฐาน AWS D1.1/D1.1 M : 2002) ดังภาพ 3.1 มีขั้นตอนดังนี้

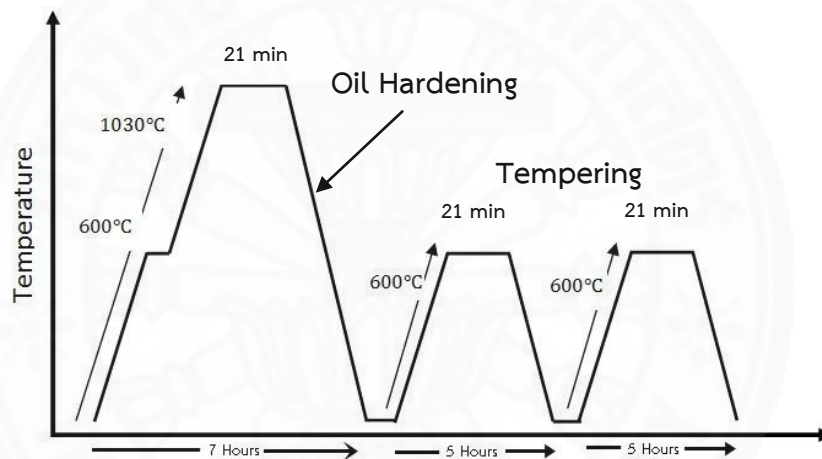
3.3.1 บากชิ้นงานร่องวี มุมรวม 60° ระยะผิวหน้าของรอยขอบชิ้นงานส่วนตรงที่ฐาน (root face) ขนาด 2 mm ระยะห่างของขอบชิ้นงานทั้งสองชิ้นที่ฐาน (root opening) ขนาด 2 mm เตรียมชิ้นงานด้วยเครื่องกัดเนื่องจากไม่มีผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงาน

3.3.2 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีสถานะดังนี้ คือ เหล็กที่ร้อนที่ไม่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง (NHT), เหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง (HT) และ เหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคลายความเครียด (HT/Temp.) โดยในกระบวนการชุบแข็งจะกระทำที่อุณหภูมิ 1030 °C เป็นเวลา 21 min สารชุบคือ น้ำมันและอบคลายความเครียดเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 จำนวน 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 21 min จากนั้นปล่อยให้เย็นในอากาศ ดังภาพ 3.2

### 3.3.3 ทำการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อม (Pre Heat) ที่อุณหภูมิ 400 °C ด้วยเตาอบ



ภาพที่ 3.1 ชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61

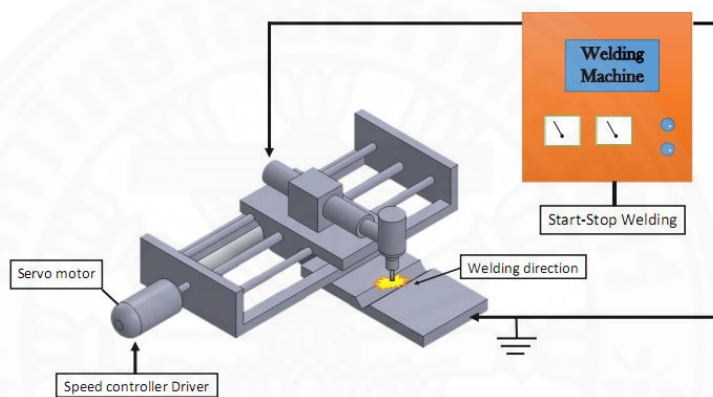


ภาพที่ 3.2 แผนภาพขั้นตอนกระบวนการทางความร้อน

### 3.4 เครื่องเชื่อม GMAW

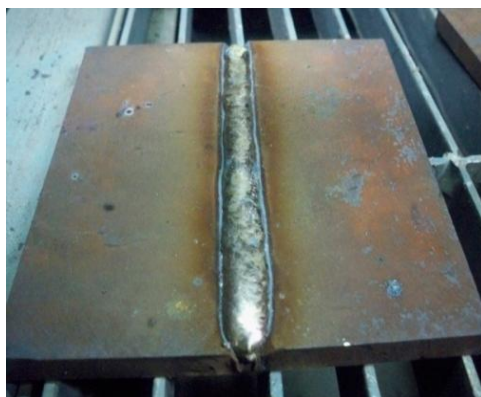
เครื่องเชื่อม GMAW ยี่ห้อ Fronnius รุ่น TransPuls Synergic 4000 เป็นเครื่องเชื่อมที่ใช้ไฟฟ้าระบบ AC/DC ระบบควบคุมโดยใช้ปุ่มสวิตช์กดที่หน้าเครื่องขับเคลื่อนลวดเชื่อมอัตโนมัติตามแนวเชื่อมเป็นเครื่องเชื่อมเทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์ ควบคุมการทำงานด้วยระบบดิจิทัล (Digital Signal Processing : DSP) จ่ายกระแสเชื่อมได้ครอบคลุมช่วง 3 – 400 Amp. สำหรับเชื่อมในโหมด Short arc, Globular และ Spray arc เลือกใช้กระแสเชื่อมได้ทั้งแบบกระแสตรงมาตรฐาน (DC Standard Current) และกระแสเชื่อมพัลส์ (Pulse Current) ต่อกับชุดควบคุมความเร็วในการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติเพื่อใช้ในกระบวนการเชื่อมทั้ง 2 รูปแบบ ตลอดการทดลอง ดังภาพ 3.3





ภาพที่ 3.3 ลักษณะอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมทดสอบ

การเชื่อมจะใช้การเชื่อมแนวทาบและควบคุมการเชื่อมด้วยระบบกึ่งอัตโนมัติทั้งหมด ดังภาพที่ 3.4 โดยจะทำการติดตั้งหัวเชื่อมกับเครื่องช่วยควบคุมความเร็วโดยมีระดับความเร็วในการเชื่อม 1.5 mm/s ศึกษาและทำการเชื่อมจำนวน 3 ชิ้น ต่อค่าของกระแสในการเชื่อมและอัตราการไหลของแก๊ส และนำชิ้นงานทำการอบคลายความเครียดจำนวน 2 ครั้งที่อุณหภูมิ 600 °C (ตามคำแนะนำของผู้ผลิตเหล็ก) เป็นเวลา 21 min จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.4 แนวเชื่อม (ก) แบบสเปรย์ (ข) แบบพัลส์

### 3.5 การคำนวณหาค่าความร้อนเข้า

สามารถคำนวณหาได้จาก

$$\text{ดังนั้นค่าความร้อนที่ป้อนเข้า} = \frac{V \times A}{\text{Speed} \times 1000} \quad (3.1)$$

V คือ แรงดันไฟที่ใช้ในการเชื่อม

A คือ กระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อม

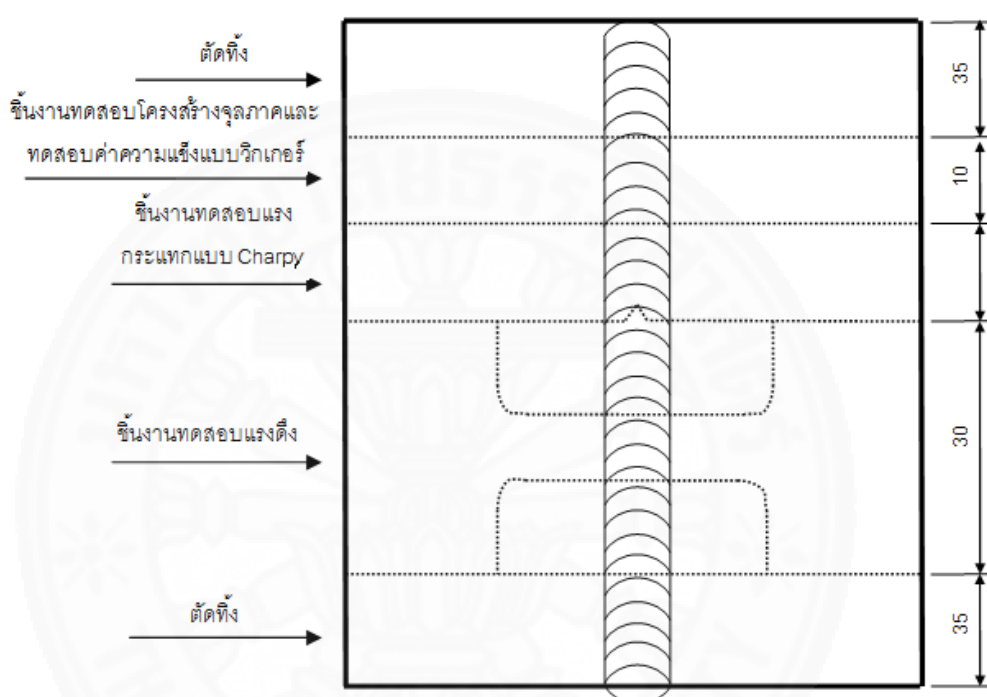
Speed คือ ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม

ดังนั้นอัตราความร้อนป้อนเข้า = พลังงานที่ป้อนเข้า  $\times$  ประสิทธิภาพทางความร้อน

### 3.6 การตรวจสอบชิ้นงานภายหลังการเชื่อม

การตรวจสอบรอยแตกร้าวด้วยน้ำยาแทรกซึมเป็นวิธีหนึ่งของการทดสอบแบบไม่ทำลาย ที่สามารถบอกถึงตำแหน่งของจุดบกพร่องที่เกิดบนผิวหน้าของวัสดุ เช่น รอยแตก และรูพรุน เป็นต้น และใช้การตรวจสอบด้วยอัลตราโซนิกในการหาจุดบกพร่องที่เกิดภายใต้ผิวของวัสดุ

3.6.1 การตัดชิ้นงานทดสอบออกเป็นส่วนๆตามแบบภาพที่ 3.5 จะใช้การตัดโดยเครื่อง Wire cut เพราะแนวเชื่อมมีความแข็งแรงสูงมากภายหลังจากการเชื่อมซึ่งการใช้เครื่อง Wire cut ตัดทำให้โครงสร้างของแนวเชื่อมไม่เปลี่ยนแปลงจากความร้อน ทำการแบ่งชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ เพื่อนำไปขัดและทดสอบแรงดึง, แรงกระแทก และทดสอบความแข็ง



ภาพที่ 3.5 แบบชิ้นงานที่ผ่านการตัดโดยเครื่อง Wire cut ในการทดลอง

3.6.2 ทำการขัดด้วยกระดาษทรายโดยการขัดให้ผ่านน้ำด้วยกระดาษทราย เบอร์ 200,300, 600, 800, 1,000, 1,200 เรียงตามลำดับ

3.6.3 จากนั้นทำการขัดมันด้วยเครื่องขัดมัน Polishing แล้วขัดด้วยกากเพชรขัดผิวของชิ้นตรวจสอบที่มีความแข็งแรงสูงมาก โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 1 micron และจะต้องขัดบนเครื่องขัดที่หุ้มด้วยผ้าสักหลาดโดยการฉีดย่นผงขัดลงบนผ้าสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมันเงา

3.6.4 ทำการกัดกรดชิ้นงานทดสอบ โดยผสมสารเคมี คือ แอลกอฮอล์ 95ml และไนตริกเข้มข้น 15 mol ปริมาณ 5ml ตามมาตรฐาน ASTM E407-70 เบอร์ 74a ใช้เวลาประมาณ 30 sec หลังจากนั้นล้างด้วยแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้ง

3.6.5 ขั้นตอนการทดสอบความแข็งการทดสอบความแข็งนั้นจะทำการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ MATSUZAWA รุ่น MMT-X7-LCD

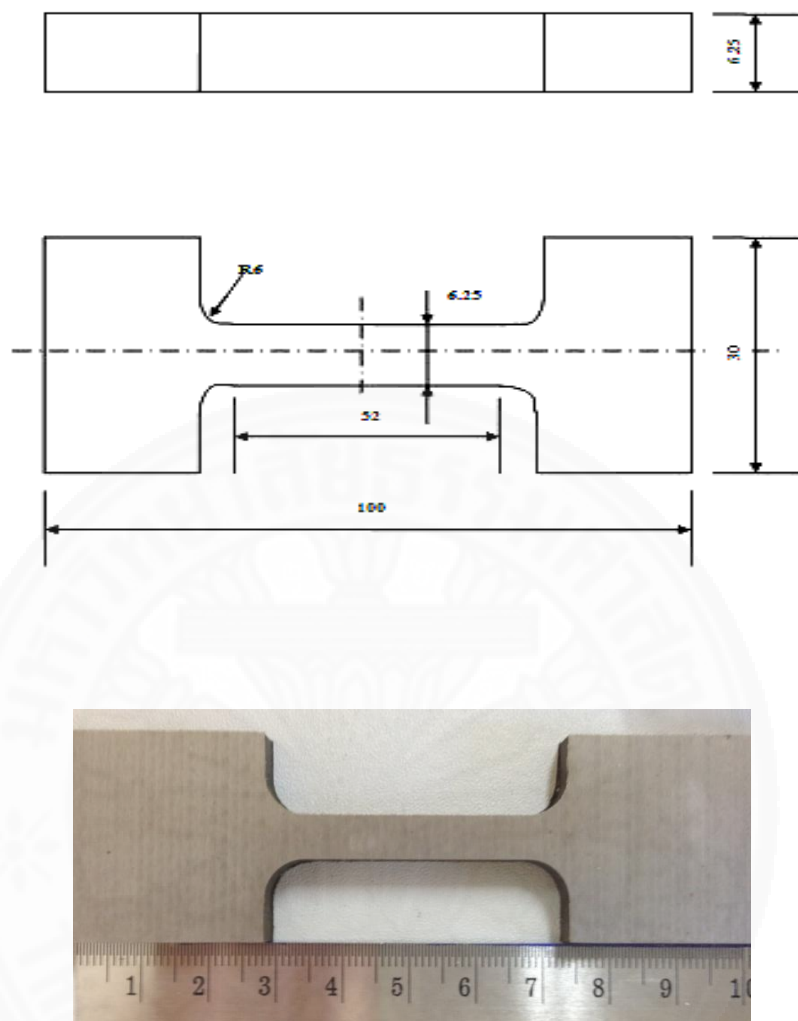
3.6.6 กำหนดระบุตำแหน่งทดสอบลงบนผิวหน้าชิ้นงานทดสอบดังแสดงในภาพที่ 3.6 เพื่อแสดงจุดตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบความแข็งโดยกดกระจายบนจุดต่างๆบนผิวหน้าชิ้นทดสอบ ดังนี้



ภาพที่ 3.6 ตำแหน่งที่เกิดทดสอบความแข็ง

3.6.7 การทดสอบความแข็งจะมีส่วนที่สัมพันธ์กัน 3 ส่วนคือ ระยะกด ความแข็ง แรงกด การทดสอบนี้ใช้เครื่องทดสอบวิกเกอร์ ใช้แรงกด 9,810 N โดยใช้เวลากดประมาณ 10 sec ตามเส้นใต้แนวเชื่อมขนานกับผิวหน้างาน จุดวัดห่างกันประมาณ 1 mm จุดที่ทำการวัดทั้งจะต้องไม่น้อยกว่า 7 จุดตามลำดับ

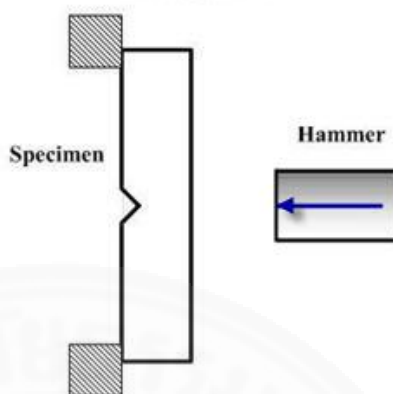
3.6.8 เตรียมชิ้นงานดังภาพที่ 3.7 เพื่อทำการทดสอบความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 M



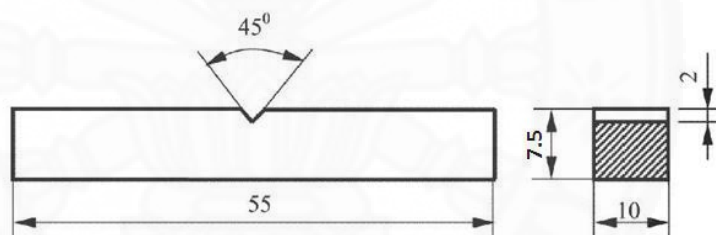
ภาพที่ 3.7 แบบชิ้นงานที่ทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง

3.6.9 การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก เป็นการวัดการส่งถ่ายพลังงานที่จำเป็นในการแตกหักของวัสดุค่าความแข็งแรงการกระแทกสามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรงแบบฉับพลัน (shock load) พลังงานการกระแทกจะสูญเสียไปในหลายลักษณะเช่น ถูกใช้ในการเสียรูปแบบยืดหยุ่นและแบบถาวรของวัสดุ และแรงเสียดทานจากการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่างๆ เป็นต้น ในการทดสอบการกระแทกจะใช้พลังงานของลูกตุ้มกระแทกให้ชิ้นทดสอบแตกหักการทดสอบที่นิยมใช้โดยทั่วไปได้แก่การทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี และแบบไอซอด (Charpy and Izod impact tests) โดยการทดสอบทั้งคู่นี้ ใส่แรงกระทำด้วยการเหวี่ยงลูกตุ้มและใช้ชิ้นทดสอบที่มีร่องบากและมีขนาดเล็ก และการทดสอบจะเป็นการใส่แรงด้วยการตั้งองการทดสอบทั้งสองแบบนี้ต่างกันที่การออกแบบชิ้นทดสอบและความเร็วของลูกตุ้มในการกระแทกชิ้นทดสอบ ในการทดสอบแบบชาร์ปีชิ้น

ทดสอบจะถูกยึดในลักษณะเป็นคานเดี่ยว (single beam) แล้วตีกระแทกที่บริเวณด้านหลังของร่องบาก ดังแสดงในภาพที่ 3.8 และภาพที่ 3.9



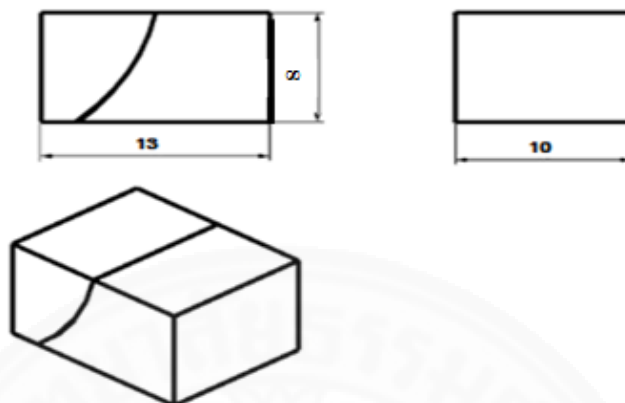
ภาพที่ 3.8 การจับยึดการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก ทดสอบความต้านทานแรงกระแทกแบบ Charpy Test ตามมาตรฐาน ASTM A370



ภาพที่ 3.9 ชิ้นงานที่ทำการทดสอบแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM E23 Type A

3.6.10 ทดสอบด้วยวิธี X-Ray Diffraction: XRD เป็นการวิเคราะห์หาลักษณะประกอบของตัวอย่างและหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างด้วยเทคนิค XRD โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูล โดยทำการทดสอบช่วงบริเวณ Weld metal และบริเวณ HAZ ของเหล็ก SKD 61 ในทุกสภาวะการทดลองเพื่อหาโครงสร้างที่เป็นมาร์เทนไซต์, ออสเทนไนต์ และคาร์ไบด์ ที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมโดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วยขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม สารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัวเปรียบเช่นเดียวกับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกันที่ทราบค่าแน่นอนโดยในเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 ใช้

ลักษณะตัวอย่างเป็นก้อน มีขนาดกว้าง 10 cm ยาว 13 cm ทั้งนี้พื้นที่ที่จะทำการทดสอบจะเป็นเพียงบริเวณเล็กๆ ประมาณ 10 mm ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบด้วยวิธี X-Ray Diffraction : XRD

3.6.11 ทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM จะแสดงลักษณะพื้นผิวของวัสดุ ขนาด และรูปร่างของอนุภาคผงหรือตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงานแสดงให้เห็นลักษณะและการกระจายของเฟสในโครงสร้างจุลภาค และสามารถวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุได้ในการทดลอง จะทำการตรวจสอบรอยแตกหักที่เกิดจากกระบวนการทดสอบแรงกระแทกช่วงบริเวณแนวเชื่อมของเหล็ก SKD 61 ในแต่ละสภาวะการทดลองว่าเกิดลักษณะการแตกหักเป็นลักษณะแบบใด ทั้งนี้เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 4.1 บทนำ

จากการทำตามขั้นตอนการทดลองที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3 โดยมีตัวแปรในการเปรียบเทียบกระแสในการเชื่อมและอัตราการไหลของแก๊ส แบ่งเป็น 2 แบบดังนี้

4.1.1 เชื่อมแบบสเปรย์ (Spray transfer) ค่ากระแสเชื่อม 150A, 170A, 190A และ 210A อัตราการไหลของแก๊สที่ 13 L/min และ 15 L/min เชื่อมแบบพัลส์ (Pulsed Spray transfer) ในการศึกษาเปรียบเทียบผลกับเชื่อมแบบสเปรย์ (Spray transfer) โดยมีค่ากระแสเชื่อม 150A, 170A, 190A และ 210A อัตราการไหลของแก๊สที่ 13 L/min (พิจารณาจากผลจากการทดลองด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ทั้งโครงสร้างจุลภาค (จากตารางที่ 4.5 ที่มีลักษณะของโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมของอัตราการไหลของแก๊สที่ 13 L/min และ 15 L/min มีความแตกต่างกันน้อยมากทางโครงสร้าง) และสมบัติทางกลด้านการทดสอบความแข็งจากภาพที่ 4.7 ผลการทดสอบแรงดึงจากภาพที่ 4.31 ซึ่งให้ค่าผลการทดลองที่มีความแตกต่างกันน้อยมาก จึงพิจารณาเลือกใช้อัตราการไหลของแก๊สที่ 13 L/min นำมาใช้ทั้งในกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์และกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ ทั้งนี้เพื่อความประหยัดและเหมาะสม จากนั้นนำค่ากระแสไฟเชื่อมและอัตราการไหลของแก๊สจากการทดลองเบื้องต้นไปใช้ในการทดลองในหัวข้อ 4.1.2

4.1.2 นำค่าที่ได้จากการศึกษาในการทดลองในหัวข้อ 4.1.1 ดังตาราง 4.1 มาเชื่อมแบบสเปรย์ (Spray transfer) เปรียบเทียบผลความแตกต่างในแต่ละสภาวะการอบชุบโดยมีการกำหนดสภาวะการอบชุบของเหล็กเป็น 3 สภาวะคือ เหล็กที่ร้อนที่ไม่ผ่านกระบวนการอบชุบ (NHT), เหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง (HT) และเหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคลายความเคียด (HT/Temp.)



## ตารางที่ 4.1

การเชื่อมที่สภาวะการอบชุบของเหล็กทั้ง 3 สภาวะ (เชื่อมแบบ Spray transfer)

ค่าตัวแปรในการเชื่อม	
กระแส (Amp.)	150A
อัตราการไหลของแก๊ส (L/min)	13
มุมของหัวลวดเชื่อม (°)	90
อัตราความเร็วในงานเชื่อม (mm/sec)	1.5
ระยะอาร์ค (mm)	10
วัสดุที่ใช้ในการทดลองในการเชื่อม	JIS SKD-61
แก๊สที่ใช้ในการเชื่อม	Ar 82%+CO <sub>2</sub> 18%

## 4.2 ผลการทดลอง (หาค่าตัวแปรเบื้องต้น)

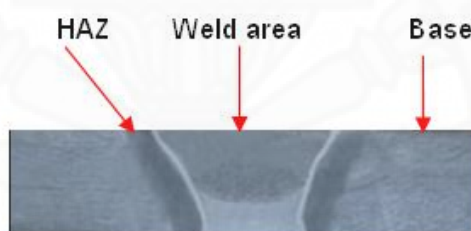
## 4.2.1 ค่าความกว้างของแนวเชื่อมในการเชื่อมแบบสเปรย์

จากการวัดขนาดความกว้างบริเวณด้านบนแนวเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมจาก 150, 170, 190 และ 210 A ซึ่งสามารถคำนวณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน (Heat input) ตามสมการที่ 3.1 มีค่าเท่ากับ 1.65, 2.24, 2.46 และ 3.08 KJ/mm ตามลำดับ ทำให้ความกว้างของแนวเชื่อมมีค่ามากขึ้นเท่ากับ 15.8, 16.1, 17.4 และ 19.6 mm ตามลำดับ โดยมีผลต่อสมบัติของชิ้นงานภายหลังจากการเชื่อมในด้านความแข็ง คือ เมื่อความกว้างของแนวเชื่อมมากจากการที่ใช้กระแสสูง ส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมทำให้โลหะมีความแข็งและเปราะเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะ โดยภาพการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ในการทดลองเบื้องต้น แสดงในภาพที่ 4.1

## ตารางที่ 4.2

ค่า Heat Input ในการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์และความกว้างของแนวเชื่อม

กระแสในการเชื่อม (Amp)	150	170	190	210
แรงดันเชื่อม (Volt)	16.5	18.7	19.4	22.0
Heat Input (KJ/mm) (คำนวณจากสมการที่ 3.1)	1.65	2.24	2.46	3.08
ความกว้างของแนวเชื่อม เฉลี่ย (mm)	15.8	16.1	17.4	19.6



ภาพที่ 4.1 ชิ้นงาน (HT/Temp.) เชื่อมแบบ Spray transfer (กระแส 150 A อัตราการไหลของแก๊ส 13 L/min)

### 4.2.2 ค่าความกว้างของแนวเชื่อมในการเชื่อมแบบพัลส์

จากการวัดขนาดความกว้างบริเวณด้านบนบนแนวเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมจาก 150, 170, 190 และ 210 A ซึ่งสามารถคำนวณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน (Heat input) ตามสมการที่ 3.1 มีค่าเท่ากับ 2.13, 2.56, 3.00 และ 4.00 KJ/mm ตามลำดับ ค่าความกว้างของแนวเชื่อมมีค่าเท่ากับ 18.0, 18.0, 18.1mm ตามลำดับส่วน 210 A ไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากชิ้นงานหลอมละลายทะลุ การเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ แสดงในภาพที่ 4.2 พบว่ามีลักษณะการถ่ายเทโลหะหลอมเหลวจากลวดเชื่อมลงสู่แนวเชื่อมเป็นลักษณะการหยดโลหะหลอมเหลวหยดเล็กๆ แบบพัลส์ แต่การถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์จะถูกถ่ายโอนอย่างรวดเร็วลงสู่แนวเชื่อมส่งผลให้เกิดการหลอมลึกของแนวเชื่อมและความกว้าง เมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบ

พัลส์มีค่าคงที่เป็นผลมาจากค่าความร้อนเข้า (Heat input) ที่ส่งผ่านจากการกระจายความร้อนเข้าไปในเนื้อเหล็กของกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์

ตารางที่ 4.3

ค่า Heat Input ในการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์และความกว้างของแนวเชื่อม

กระแสในการเชื่อม (Amp)	150	170	190	210
แรงดันเชื่อม (Volt)	25.1	26.6	27.9	28.6
Heat Input (KJ/mm) (คำนวณจากสมการที่ 3.1)	2.13	2.56	3.00	4.00
ความกว้างของแนวเชื่อม เฉลี่ย (mm)	18.0	18.0	18.1	ชิ้นงานหลอม ละลายทะลุ



ภาพที่ 4.2 ชิ้นงาน (HT/Temp.) เชื่อมแบบ Pulsed Spray transfer (กระแส 190 A อัตราการไหลของแก๊ส 13 L/min)

#### 4.2.3 ค่าความกว้างของแนวเชื่อมในการเชื่อมแบบสเปรย์ (ในแต่ละสภาวะการอบชุบเหล็ก)

จากการวัดขนาดความกว้างบริเวณด้านบนแนวเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 4.4 ที่ค่าตัวแปรกระแส/อัตราการไหลของแก๊ส 150A /13L/min ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองเบื้องต้น โดยพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลด้านการทดสอบความแข็งที่ให้ค่าความแข็งที่บริเวณแนวเชื่อมต่ำกว่ากระแสอื่นๆ จากภาพที่ 4.7 และมีค่าความแข็งใกล้เคียงกับเนื้อพื้นหลัก

รวมถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานกระแทกที่มากกว่ากระแสนอื่นๆ ในบริเวณแนวเชื่อมจากภาพที่ 4.38 มาทำการศึกษา โดยสามารถคำนวณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน (Heat input) ตามสมการที่ 3.1 มีค่าเท่ากับ 1.60 KJ/mm ในทุกสภาวะการอบชุบเหล็กมีค่าความกว้างของแนวเชื่อมมีค่าเท่ากับ 16.3, 16.4, 16.5 mm ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความกว้างของแนวเชื่อมไม่แตกต่างกัน โดยพิจารณาความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมและสมบัติทางกลในการทดสอบเปรียบเทียบแต่ละสภาวะการอบชุบของเหล็ก คือ เหล็กที่ร้อนที่ไม่ผ่านกระบวนการอบชุบ (NHT), เหล็กที่ผ่านกระบวนการอบชุบแข็ง (HT) และเหล็กที่ผ่านกระบวนการอบชุบแข็งและอบคลายความเครียด (HT/Temp.) โดยภาพชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมโดยผ่านกระบวนการกระบวนการอบชุบแข็งและอบคลายความเครียด (HT/Temp.) แสดงในภาพที่ 4.3

#### ตารางที่ 4.4

ค่าความกว้างของแนวเชื่อมผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์แต่ละสภาวะการอบชุบ ค่ากระแส 150A อัตราการไหลของแก๊ส 13 L/min

สภาวะการอบชุบ	(NHT)	(HT)	(HT/Temp.)
แรงดันเชื่อม (Volt)	16	16	16
Heat Input (KJ/mm) (คำนวณจากสมการที่ 3.1)	1.60	1.60	1.60
ความกว้างของแนวเชื่อมเฉลี่ย (mm)	16.3	16.4	16.5



ภาพที่ 4.3 ชิ้นงาน (HT/Temp.) เชื่อมแบบ Spray transfer (กระแส 150 A อัตราการไหลของแก๊ส 13 L/min)

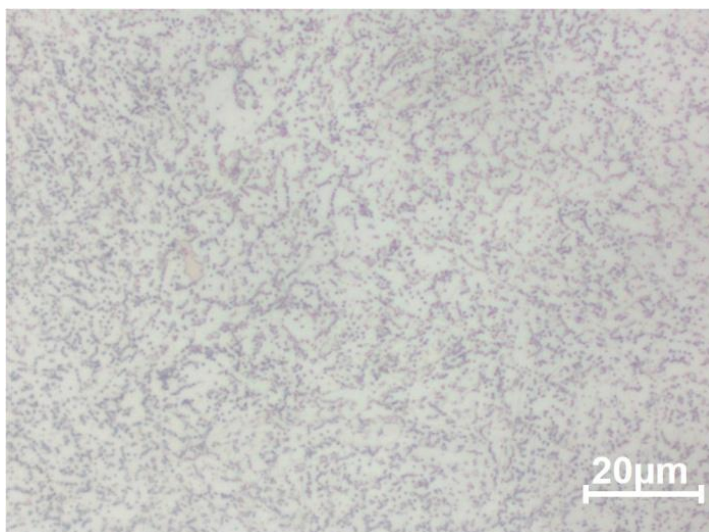
### 4.3 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม

#### 4.3.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กงานร้อน SKD 61 (HT/Temp.)

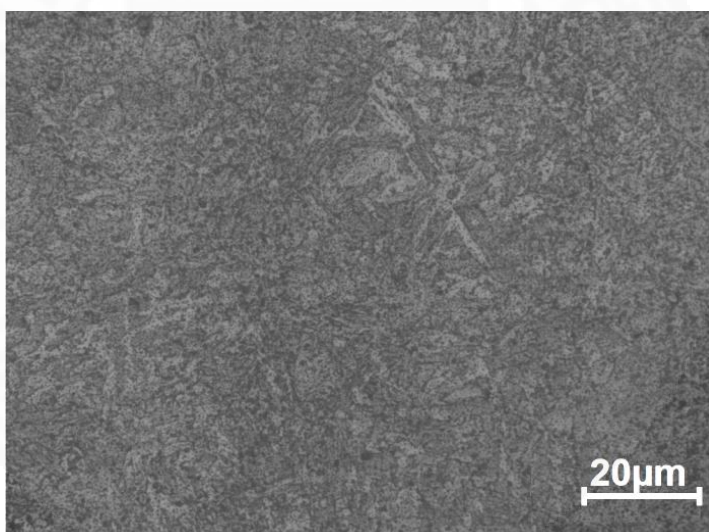
เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์

จากภาพที่ 4.4 (ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน

SKD 61 สภาพรีตร้อนก่อนการชุบแข็งพบโครงสร้างประกอบไปด้วยคาร์ไบด์ (Carbide) ทรงกลมบนพื้นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ (Ferrite) ที่เป็นสีขาว และจากภาพที่ 4.4 (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 (HT/Temp.) พบเป็นโครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (Temper Martensite) แบบหยาบที่เกิดจากการอบคลายความเครียดที่อุณหภูมิ 600 °C จำนวน 2 ครั้ง และมีโครเมียมคาร์ไบด์ลักษณะกลมฝังตัวกระจายอยู่โดยรอบบริเวณของมาร์เทนไซต์บนพื้นหลัก (matrix) ที่เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ (Ferrite) ในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน (Gualco A และคณะ, 2010) และในภาพที่ 4.5 ชิ้นงาน (HT/Temp.) ภายหลังจากการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมที่กระแส 150A อัตราการไหลของแก๊ส 13 L/min พบโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) และออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained Austenite) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนต์ (Austenite) ไปเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) มีลักษณะเฟสขนาดใหญ่จากการเปลี่ยนแปลงเฟสจากออสเทนไนต์ (Austenite) ไปเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) จากการเชื่อมที่มีลักษณะของการเย็นตัวอย่างรวดเร็วมักปรากฏในบริเวณแนวเชื่อมโดยสามารถพบได้ในวัสดุประเภทนี้ (Gualco A, 2008 และ Leshchinskiy L.K, 2001) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากออสเทนไนต์ (Austenite) ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ได้หมดอย่างสมบูรณ์ ผลมาจากการให้ความร้อนที่เป็นไปอย่างรวดเร็วจากการเชื่อมโดยพบโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) มีปริมาณ 75 % และโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained Austenite) มีปริมาณ 25 % (วัดปริมาณโครงสร้างทางจุลภาคจากซอฟต์แวร์ Materials Plus)

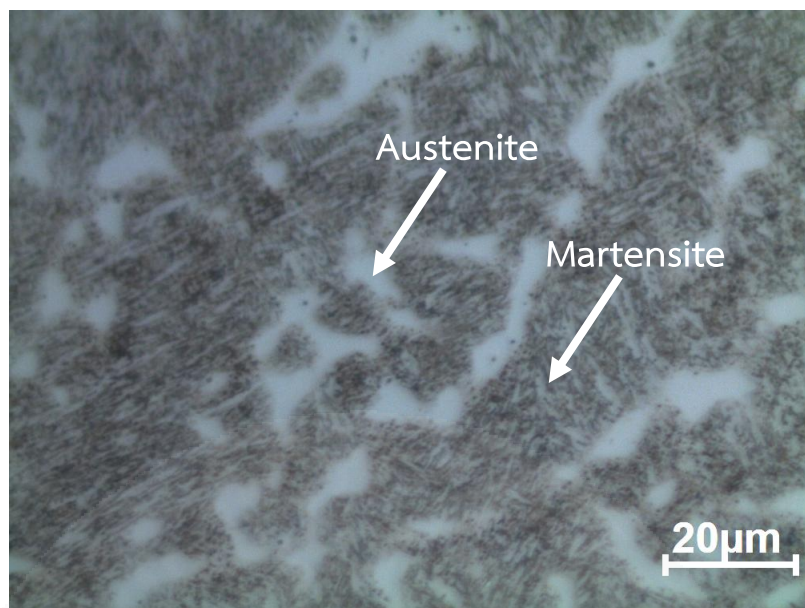


(ก)



(ข)

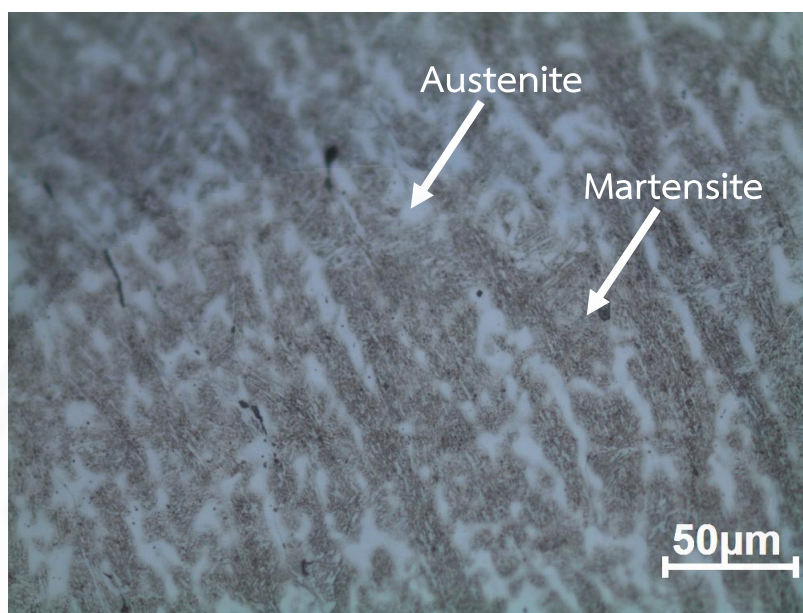
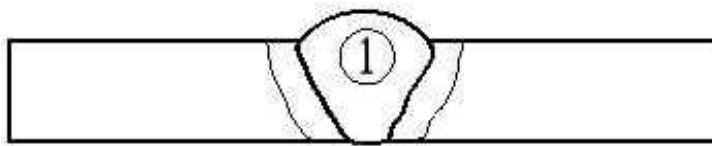
- ภาพที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก SKD 61 (กำลังขยาย 1000 เท่า)  
(ก) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 สภาวะที่รีดร้อน  
(ข) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 (HT/Temp.)



ภาพที่ 4.5 ชิ้นงาน (HT/Temp.) ภายหลังจากการเชื่อม Spray transfer กระแส 150A / 13L/min โครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ (Martensite) กำลังขยาย 1000 เท่า

#### 4.3.2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อม (Weld Metal)

โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อม (Weld Metal) ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 (HT/Temp.) จากภาพที่ 4.6 บริเวณที่ 1 พบโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยออสเทนไนต์ (Austenite) และมาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งเกิดจากการเย็นตัวขององค์ประกอบที่แตกต่างกันระหว่างเฟสของแข็งและเฟสของเหลวในบริเวณแนวเชื่อม ถึงแม้กระแสและปริมาณแก๊สปกคลุมสูงขึ้นก็ไม่มีผลต่อการเกิดโครงสร้างยูเทคติกเดนไดร์ โดยพบโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ (Martensite) มีปริมาณ 75 % และโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained Austenite) มีปริมาณ 25 % (วัดปริมาณโครงสร้างทางจุลภาคจากซอฟต์แวร์ Materials Plus)

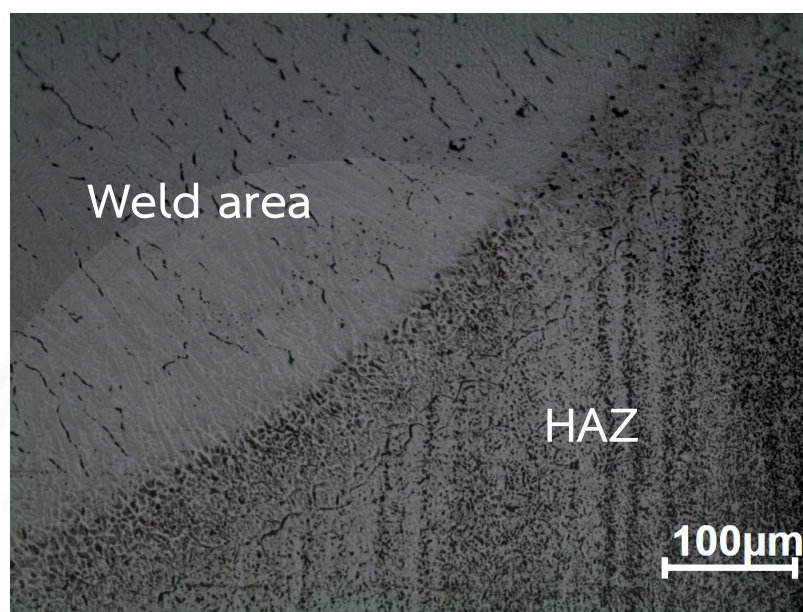


ภาพที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Weld area (HT/Temp.) ที่ 150A,13 L/min กำลังขยาย 400 เท่า

#### 4.3.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อ Weld area กับ Heat affected zone: HAZ

จากภาพที่ 4.7 บริเวณที่ 2 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะหลอมเหลว (Weld area) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 (HT/Temp.) และเมื่อนำมาตรวจดูโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมจะพบว่าโครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) และโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งพบว่ามีลักษณะของเดนไดรต์ คือ โครงสร้างที่เกิดการเย็นตัวอย่างไม่สมดุล (Non-Equilibrium) ของโลหะหลอมเหลวสู่ของแข็งในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันในแต่ละกระแสการเชื่อม

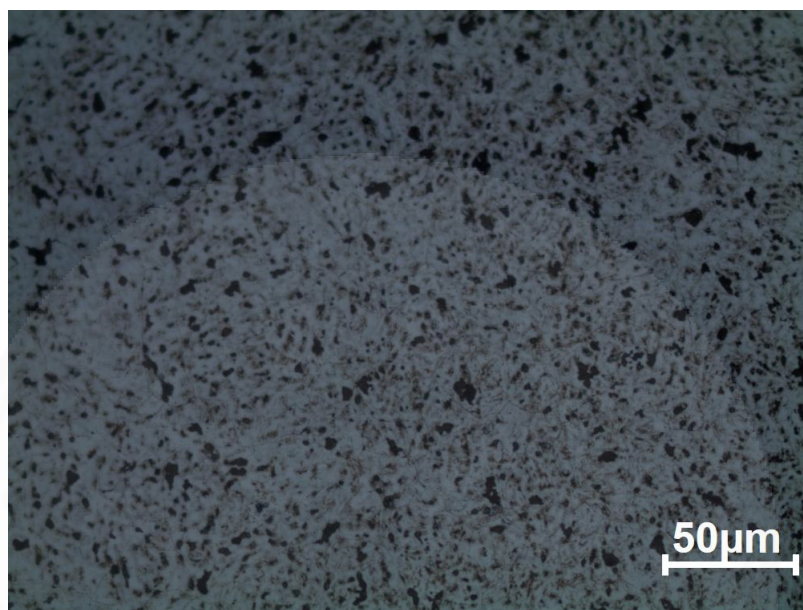




ภาพที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อ Weld area กับ HAZ (HT/Temp.)  
150A, 13 L/min กำลังขยาย 200 เท่า

#### 4.3.4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ)

โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) จากภาพที่ 4.8 บริเวณที่ 3 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 (HT/Temp.) และเมื่อนำมาตรวจดูโครงสร้างจุลภาคพบว่า มีโครงสร้างเฟอร์ไรท์ (Ferrite) โครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) เกรนละเอียดเมื่อเทียบกับบริเวณแนวเชื่อมจากภาพที่ 4.6 เนื่องจากการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจากการเชื่อมและการเย็นตัวของชิ้นงานที่เป็นไปอย่างรวดเร็วรวมถึงมีคาร์ไบด์สีขาวกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ โดยมีลักษณะของเม็ดเกรนและการกระจายตัวมากเมื่อกระแสในการเชื่อมสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าผลของกระแสในการเชื่อมมีผลต่อความร้อนที่ให้แก่ชิ้นงานทำให้บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) มีความกว้างมากขึ้น เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากการเชื่อม สังเกตจากบริเวณสีขาว คือ เฟอร์ไรท์ (Ferrite) ส่วนอัตราการไหลของแก๊สส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคน้อยมากเมื่อเทียบกับทุกกระแสการเชื่อม

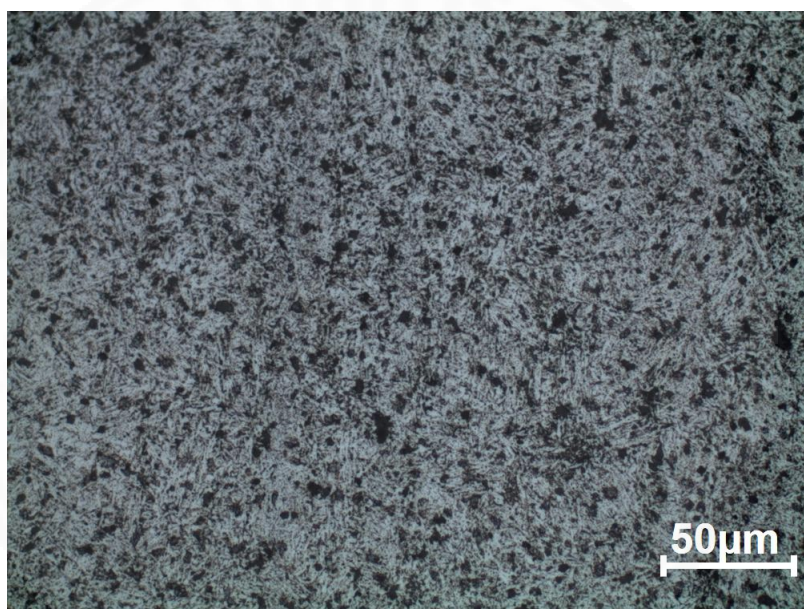


ภาพที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ (HT/Temp.) 150A,13 L/min กำลังขยาย 400 เท่า โครงสร้างเฟอร์ไรท์ (Ferrite) และ โครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) แบบละเอียด

#### 4.3.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐาน (Base metal)

จากภาพที่ 4.9 บริเวณที่ 4 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐาน (Base metal) ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 (HT/Temp.) และเมื่อนำมาตรวจดูโครงสร้างจุลภาคพบว่า มีลักษณะโครงสร้างเฟอร์ไรท์ (Ferrite) ประกอบด้วย matrix สีเข้มเป็นเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (Tempered Martensite) มีอนุภาคสารประกอบคาร์ไบด์ของธาตุผสมแทรกฝังกระจายทั่วทั้งโครงสร้าง (Gualco A และคณะ, 2010) โดยเมื่อใช้กระแสเชื่อมสูงขึ้นจะเกิดความร้อนสูงกระจายส่งไปยังเนื้องานจากการถ่ายเทความร้อน การเปลี่ยนแปลงเฟสของเหล็กพบโครงสร้างซีเมนไทต์ (Cementite) และเฟอร์ไรท์ (Ferrite) รวมตัวกันเป็นก้อนแข็งกระจายตัวอยู่ทั่ว โดยซีเมนไทต์ (Cementite) เกิดการแยกตัวและมีรูปร่างค่อนข้างกลมพบที่อุณหภูมิสูงกว่า 500°C สามารถเรียกได้ว่าเป็นโครงสร้าง ซอไบท์ (Sorbite) ซึ่งมีสมบัติด้านความแข็ง การรับแรง และการล้าตัวของโลหะ (Atlas of Microstructures of Industrial Alloy;1972) และในตารางที่ 4.5 แสดงภาพโครงสร้าง


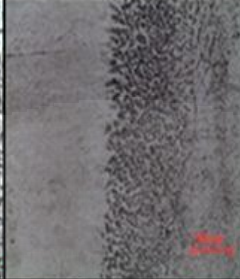



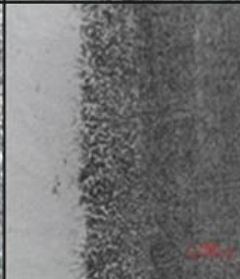

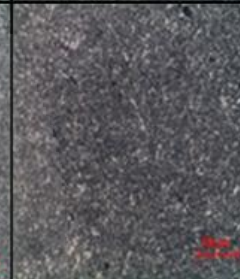
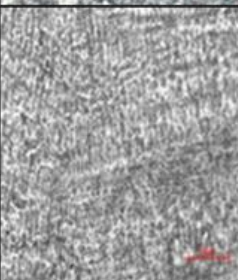
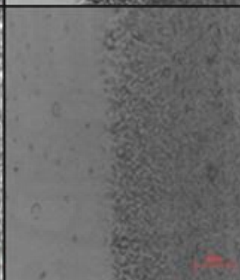

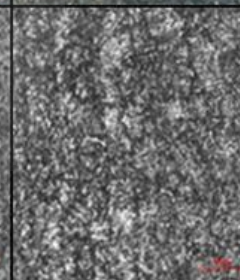
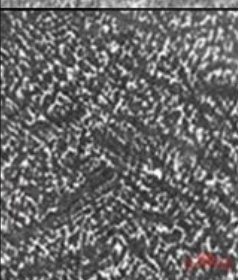
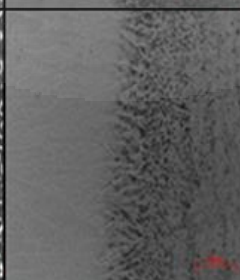
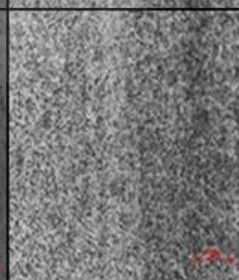
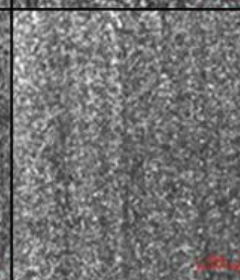
จุลภาคบริเวณต่างๆ เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ (HT/Temp.) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอัตราการไหลของแก๊สส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคน้อยมากเมื่อเทียบกับทุกกระแสนการเชื่อม



ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Base metal (HT/Temp.) 150A,13 L/min กำลังขยาย 400 เท่า โครงสร้างซอไบท์ (Sorbite)

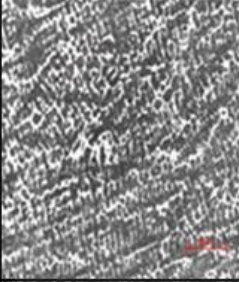
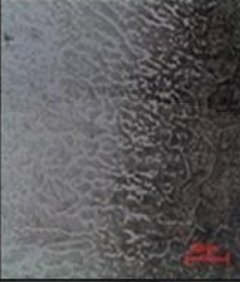
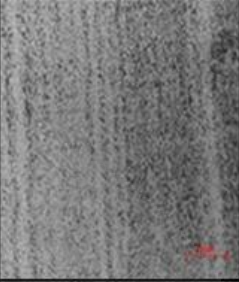
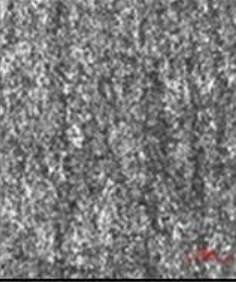
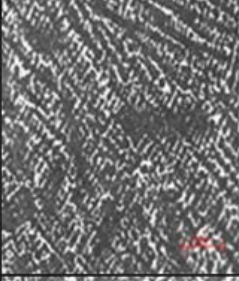
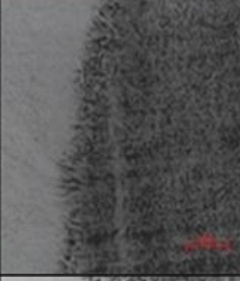
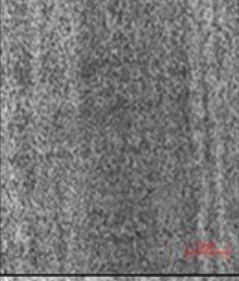
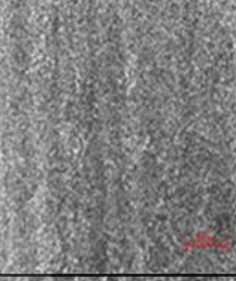
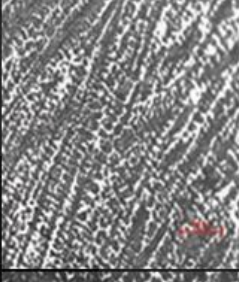
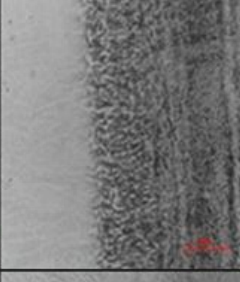
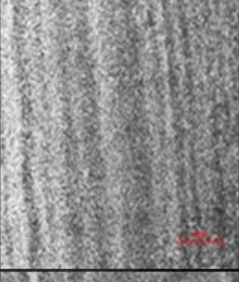
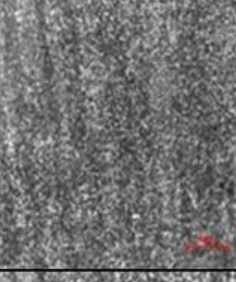
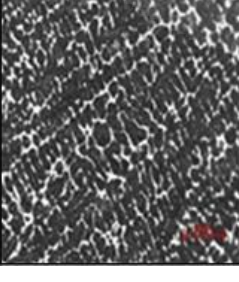
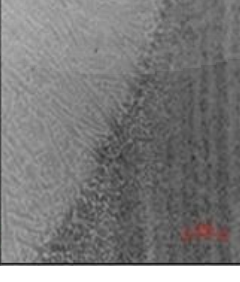
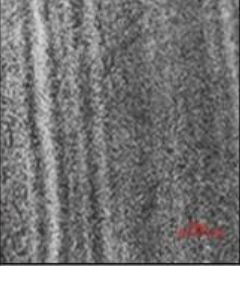
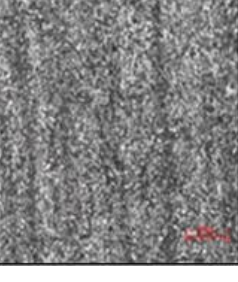
## ตารางที่ 4.5

ภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณต่างๆ เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปร์ย์ (HT/Temp.) กำลังขยาย 200 เท่า

No.	Weld metal	Weld metal/ HAZ	HAZ	Base metal
150 A 13 L/min 1.65 KJ/mm				
150 A 15 L/min 1.65 KJ/mm				
170 A 13 L/min 2.24 KJ/mm				
170 A 15 L/min 2.24 KJ/mm				

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

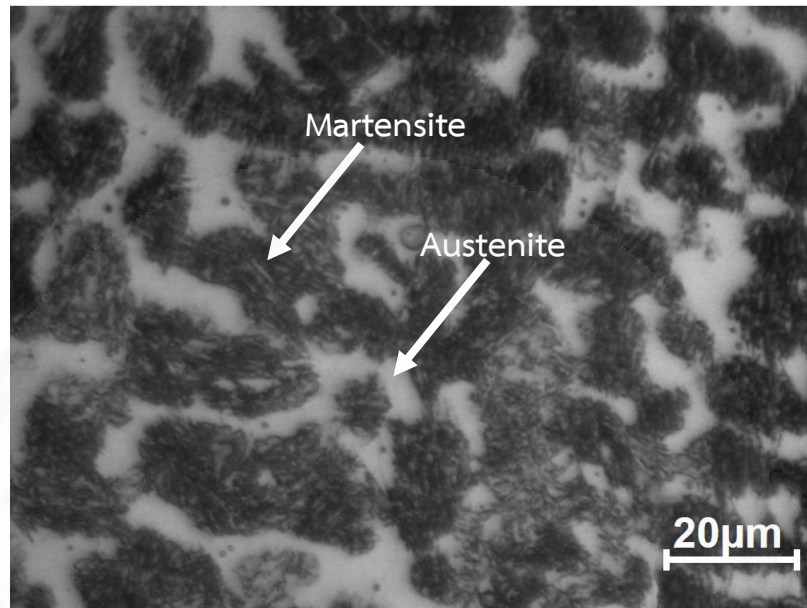
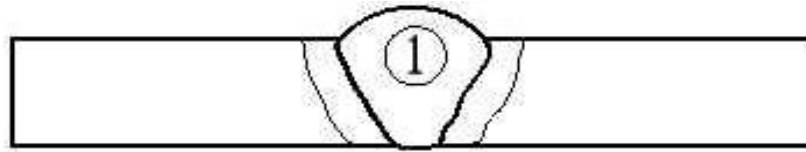
ภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณต่างๆ เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปร์ย์ (HT/Temp.) กำลังขยาย 200 เท่า

No.	Weld metal	Weld metal/ HAZ	HAZ	Base metal
190 A 13 L/min 2.46 KJ/mm				
190 A 15 L/min 2.46 KJ/mm				
210 A 13 L/min 3.08 KJ/mm				
210 A 15 L/min 3.08 KJ/mm				

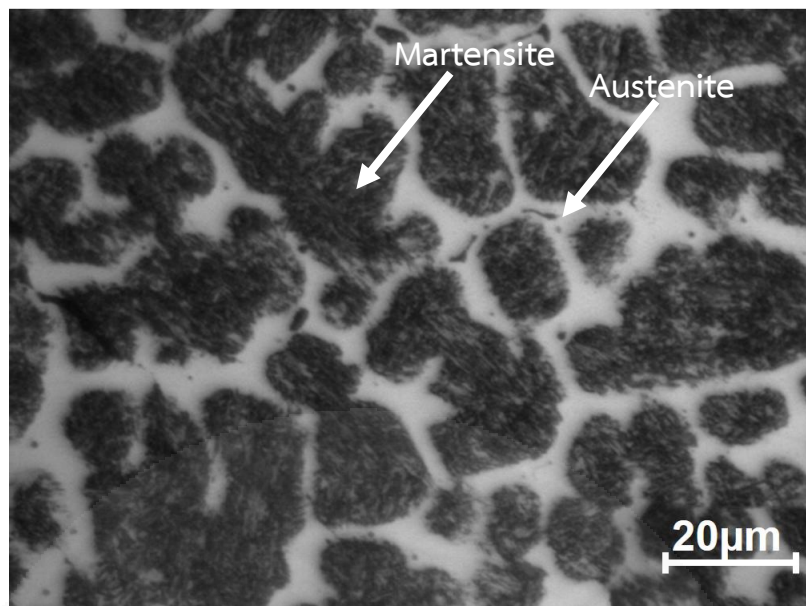
#### 4.3.6 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าผสม SKD 61 (HT/Temp.)

เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์

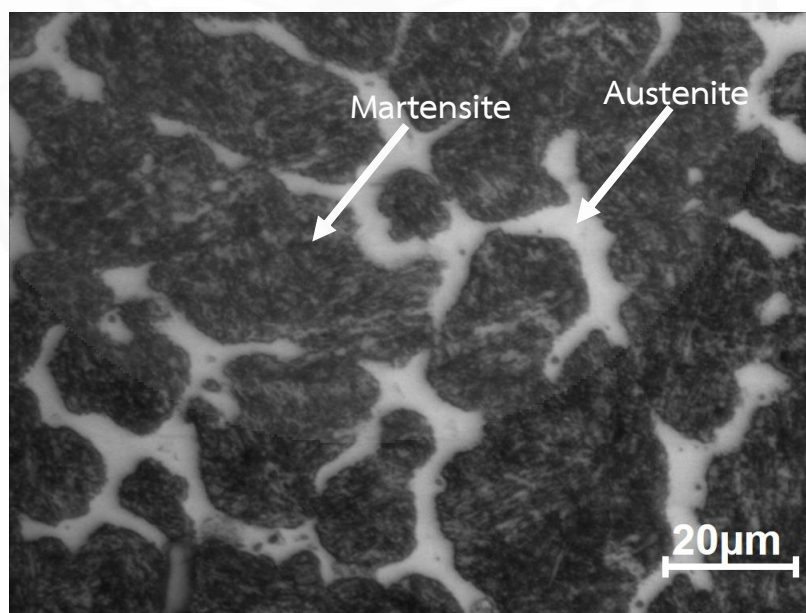
เหล็กกล้าผสม SKD 61 (HT/Temp.) เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะแบบพัลส์ จากภาพที่ 4.10 – 4.12 บริเวณที่ 1 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณ Weld area ที่กระแส 150A, 170A และ 190 A ตามลำดับ (ที่กระแส 210A ไม่สามารถทำการเชื่อมได้เนื่องจากกระแสเชื่อมที่สูงเกินไปหลอมละลายทะลุชิ้นงานทดสอบ) และเมื่อนำมาตรวจดูโครงสร้างจุลภาคพบว่า มีโครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenite) โครงสร้างมาร์เทนไซด์ (Martensite) ลักษณะกลมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนท์ (Austenite) และออสเทนไนท์ตกค้าง (Retained Austenite) ไปเป็นมาร์เทนไซด์ (Martensite) ที่มีลักษณะเฟสขนาดใหญ่ โดยสามารถพบได้ในวัสดุประเภทนี้ (Gualco A, 2008 และ Leshchinskiy L.K, 2001) เมื่อเทียบกับโครงสร้างในบริเวณเดียวกันจากการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ พบว่าเมื่อกระแสเชื่อมสูงขึ้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสจากเฟอร์ไรท์ (Ferrite) ไปเป็นออสเทนไนท์ (Austenite) ได้มากขึ้นส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่เป็นมาร์เทนไซด์ (Martensite) ขนาดใหญ่มีการจับตัวกันเป็นก้อนกลม โดยจากภาพที่ 4.10 พบโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซด์ (Martensite) มีปริมาณ 90 % และโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนท์ (Austenite) มีปริมาณ 10 % จากภาพที่ 4.11 พบโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซด์ (Martensite) มีปริมาณ 95 % และโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนท์ (Austenite) มีปริมาณ 5 % จากภาพที่ 4.12 พบโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซด์ (Martensite) ที่มีการจับตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ซึ่งต่างกับกระแสต่ำที่มีการกระจายตัวมากกว่า ซึ่งมีปริมาณ 90 % และโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนท์ (Austenite) มีปริมาณ 10 % (วัดปริมาณโครงสร้างทางจุลภาคจากซอฟต์แวร์ Materials Plus)



ภาพที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Weld area (HT/Temp.)  
150A,13 L/min ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Weld area (HT/Temp.)  
170A,13 L/min ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

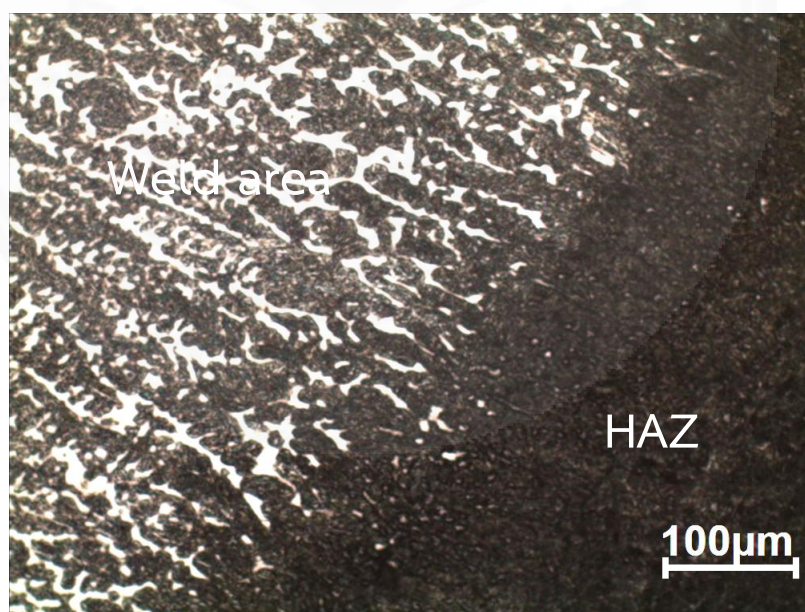


ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Weld area (HT/Temp.)  
190A,13 L/min ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



#### 4.3.7 โครงสร้างจุลภาครอยต่อ Weld area กับบริเวณ Heat Affected Zone: HAZ

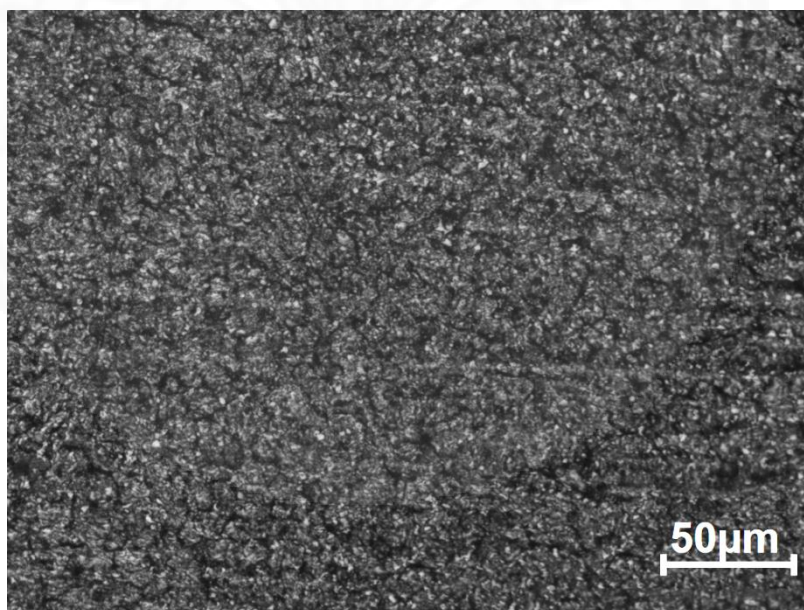
โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Weld area กับ HAZ กระแส 150A, 170A และ 190A เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ จากภาพที่ 4.13 บริเวณที่ 2 ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 (HT/Temp.) เมื่อนำมาตรวจดูโครงสร้างจุลภาคจะพบว่า มีโครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenite) และโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) และมีลักษณะของเดนไดรต์ (Dendrite) คือ โครงสร้างที่เกิดการเย็นตัวอย่างไม่สมดุล (Non-Equilibrium) ของโลหะหลอมเหลวของแข็งในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันในแต่ละกระแสการเชื่อม



ภาพที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาค Weld area กับ HAZ 190A, 13 L/min กำลังขยาย 200 เท่า

#### 4.3.8 โครงสร้างจุลภาค Heat Affected Zone: HAZ

จากภาพที่ 4.14 บริเวณที่ 3 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ กระแส 150A, 170A และ 190A อัตราการไหลของแก๊ส 13 L/min เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะ หลอมเหลวแบบพัลส์ เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 (HT/Temp.) และเมื่อนำมาตรวจดูโครงสร้างประกอบด้วยเนื้อพื้นหรือ matrix สีขาวเป็นซีเมนไตต์ทรงกลมสีขาวกระจายตัวบนพื้นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite and Globular Cementite) โดยมีลักษณะโครงสร้างใกล้เคียงกันในทุกกระแสเชื่อม

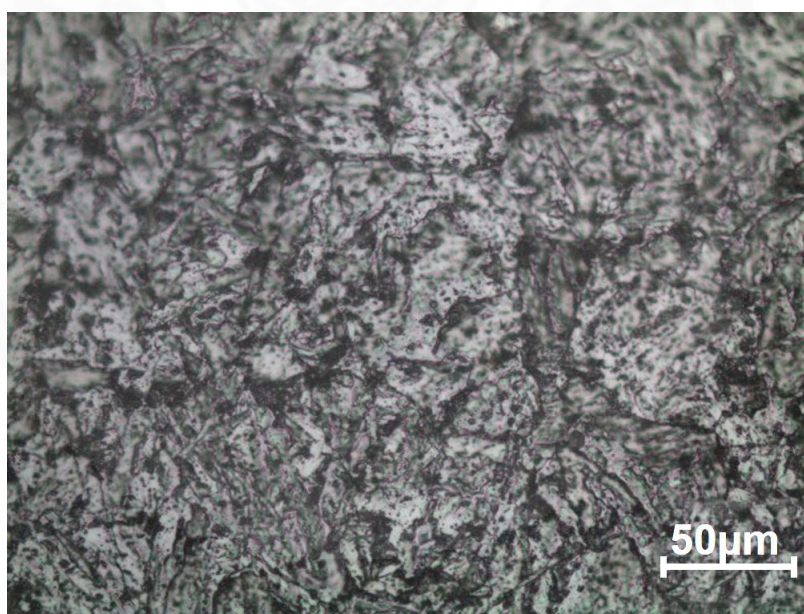


ภาพที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ (HT/Temp.) 190A, 13 L/min กำลังขยาย 400 เท่า

#### 4.3.9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Base metal

โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Base metal แต่ละกระแสของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 (HT/Temp.) จากภาพที่ 4.15 บริเวณที่ 4 เมื่อนำมาตรวจดูโครงสร้างจุลภาคจะ

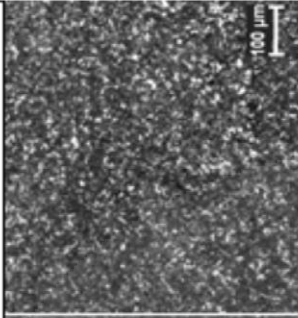
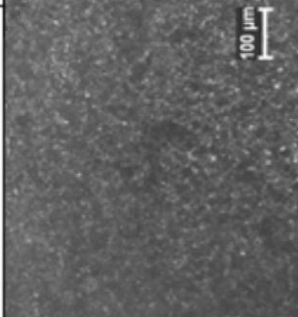
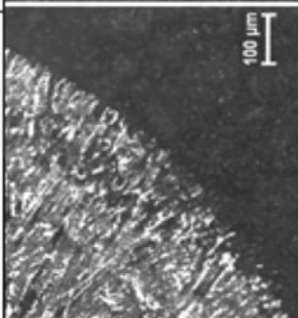

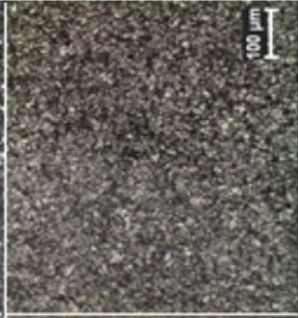




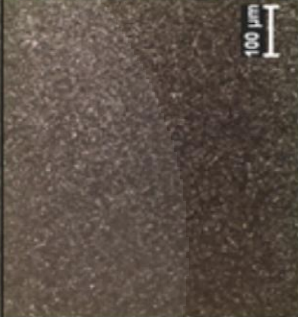
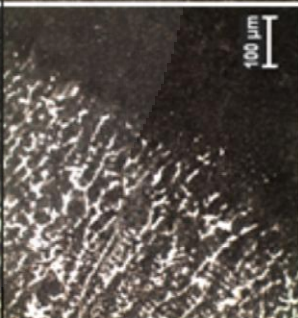
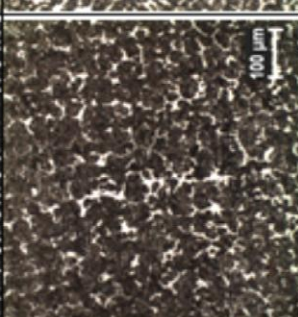
พบโครงสร้างมาร์เทนไซต์ และ ทรูไซต์ (Martensite and Troosite) อยู่โดยรอบทั้ง 3 กระแส โครงสร้างลักษณะนี้คล้ายคลึงกับโครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (Tempered Martensite) ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนท์ (Austenite) มาเป็นทรูไซต์ (Troosite) โดยเกิดจากการใช้ตัวกลางที่ใช้ น้ำมันเป็นสารชุบ (Atlas of Microstructures of Industrial Alloy;1972) และในตารางที่ 4.6 แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณต่างๆ เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะ หลอมเหลวแบบพัลส์ (HT/Temp.)



ภาพที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Base metal (HT/Temp.) 190A,13 L/min กำลังขยาย 400 เท่า

ตารางที่ 4.6

ภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณต่างๆ เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ (HT/Temp.) กำลังขยาย 200 เท่า

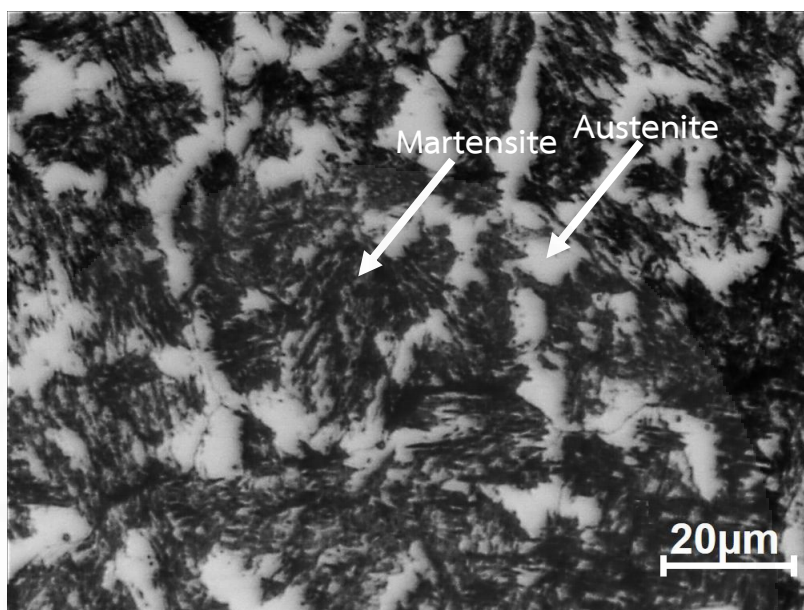
NO.	Base metal	HAZ	Weld Metal ที่ HAZ	Weld Metal
150A. 13L/min 2.13 KJ/mm				
170A. 13L/min 2.56 KJ/mm				
190A. 13L/min 3.00 KJ/mm				

#### 4.3.10 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กงานร้อน SKD 61 บริเวณ Weld area

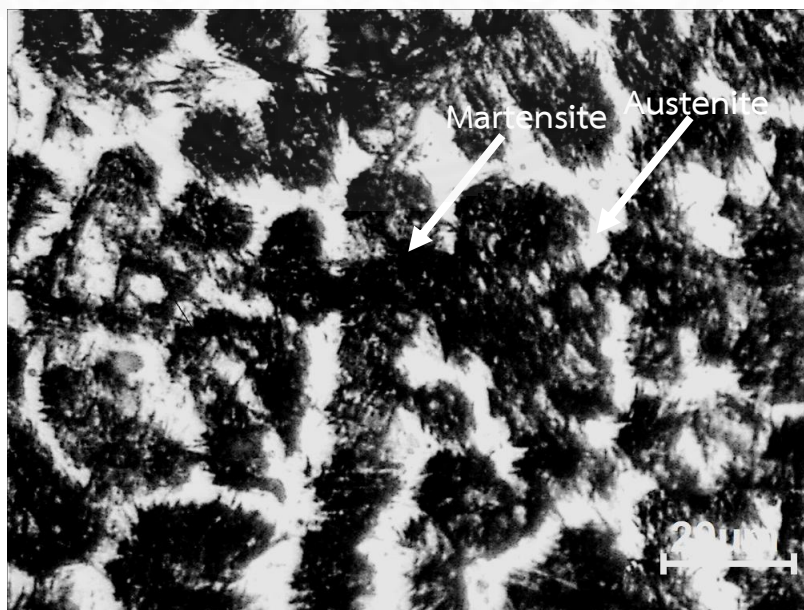
เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปิร์ย์

เพื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 สภาวะการอบชุบเหล็ก

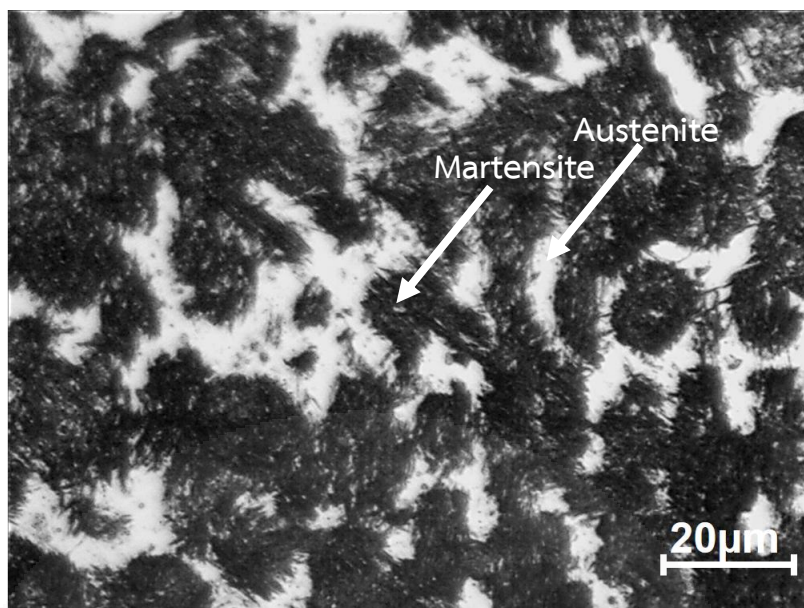
จากภาพที่ 4.16-4.18 บริเวณที่ 1 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณ Weld area ในทั้ง 3 สภาวะการอบชุบของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 คือ NHT, HT และ HT/Temp. เมื่อนำมาตรวจดูโครงสร้างจุลภาคจะพบว่ามีโครงสร้างมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์ตกค้าง (Martensite and Retained Austenite) และโครเมียมคาร์ไบด์ลักษณะกลมผสมกระจายตัว (Gualco A และคณะ, 2010) อยู่โดยรอบซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกันทั้ง 3 สภาวะการอบชุบ จากภาพที่ 4.16 (NHT) พบโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์ตกค้าง (Martensite and Retained Austenite) มีปริมาณ 95 % และโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์ (Ferrite) มีปริมาณ 4 % จากภาพที่ 4.17 (HT) พบโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์ตกค้าง (Martensite and Retained Austenite) มีปริมาณ 98% และโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์ (Ferrite) มีปริมาณ 2 % จากภาพที่ 4.18 (HT/Temp.) พบโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์ตกค้าง (Martensite and Retained Austenite) เกิดการกระจายตัวของโครงสร้างจุลภาคที่มีลักษณะละเอียดมากขึ้นต่างกับเหล็ก (HT) โดยโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์ตกค้าง (Martensite and Retained Austenite) มีปริมาณ 98 % และโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์ (Ferrite) มีปริมาณ 2 % (วัดปริมาณโครงสร้างทางจุลภาคจากซอฟต์แวร์ Materials Plus)



ภาพที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Weld area เหล็ก (NHT)  
กำลังขยาย 1000 เท่า



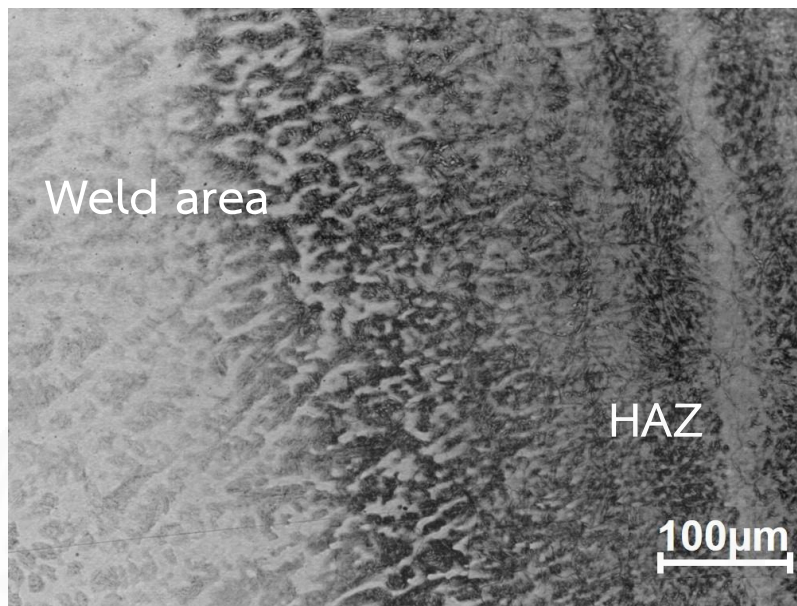
ภาพที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Weld area เหล็ก (HT) กำลังขยาย 1000 เท่า



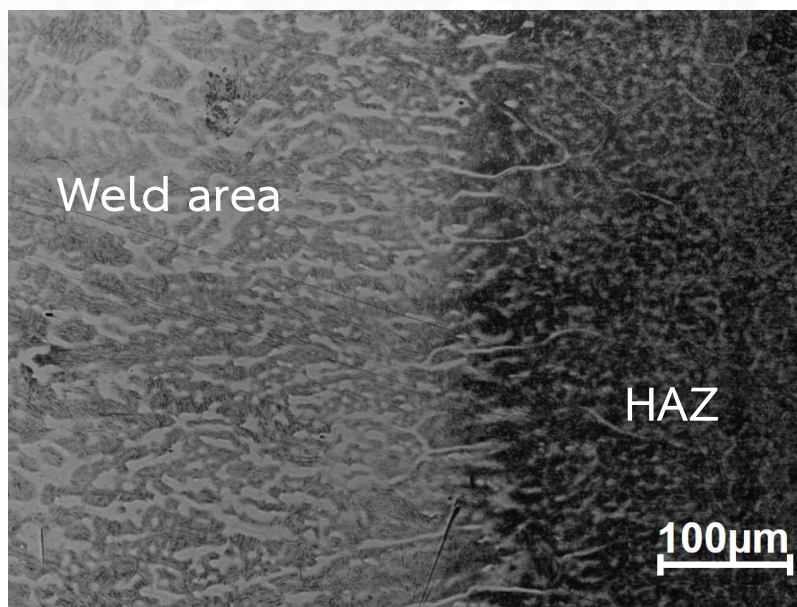
ภาพที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Weld area เหล็ก (HT/Temp.)  
กำลังขยาย 1000 เท่า

#### 4.3.11 โครงสร้างจุลภาค Weld area กับ Heat Affected Zone : HAZ

โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อของบริเวณ Weld area กับ HAZ ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 (HT/Temp.) จากภาพที่ 4.19-4.21 บริเวณที่ 2 เมื่อนำมาตรวจดูโครงสร้างจุลภาคพบว่ามีลักษณะการเย็นตัวของอะตอมอย่างรวดเร็วมีลักษณะของเดนไดรต์ คือ โครงสร้างที่เกิดการเย็นตัวอย่างไม่สมดุล (Non-Equilibrium) ของโลหะหลอมเหลวสูงของแข็งในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันในแต่ละสภาวะการอบชุบเหล็กและมีโครงสร้างที่เป็นยูเทคติกเดนไดรต์ (Eutectic Dendrite) เนื่องจากมีการเย็นตัวที่ช้ากว่าซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันในแต่ละสภาวะการอบชุบ

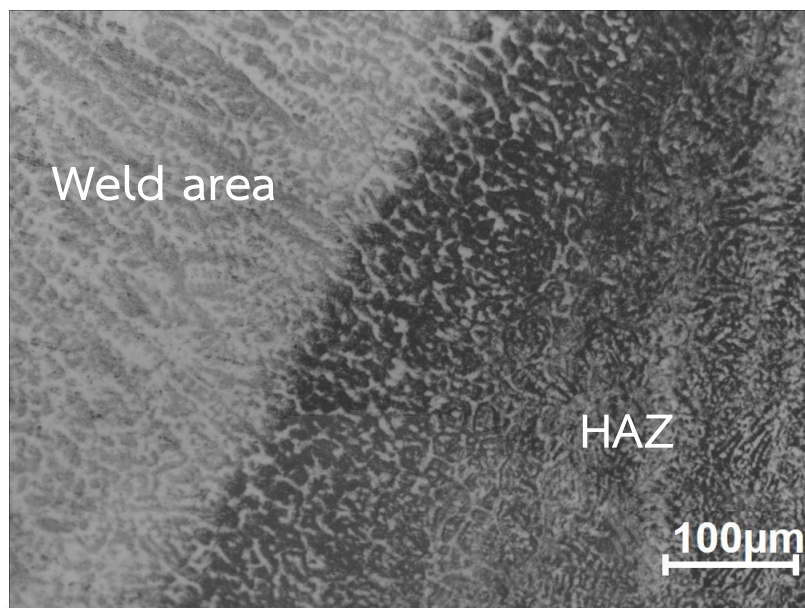


ภาพที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาค Weld metal กับ HAZเหล็ก (NHT) กำลังขยาย 200 เท่า



ภาพที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาค Weld metal กับ HAZเหล็ก (HT) กำลังขยาย 200 เท่า

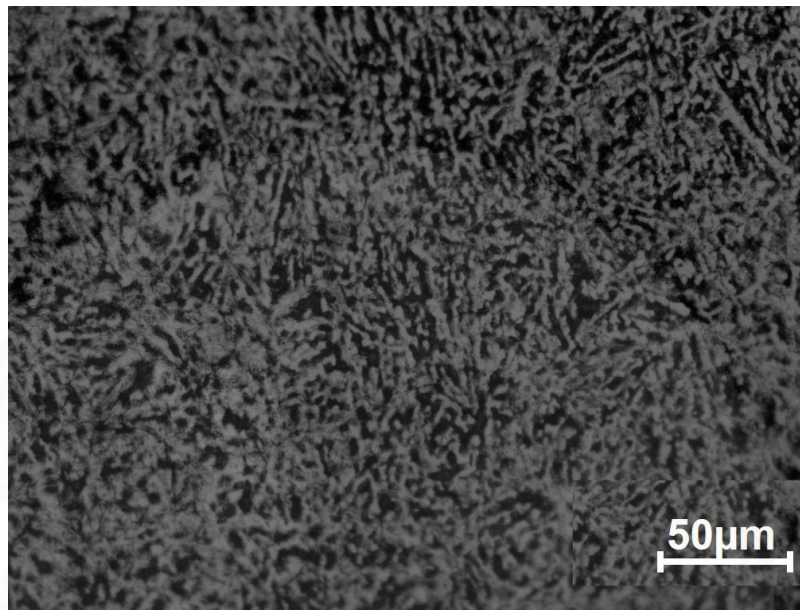




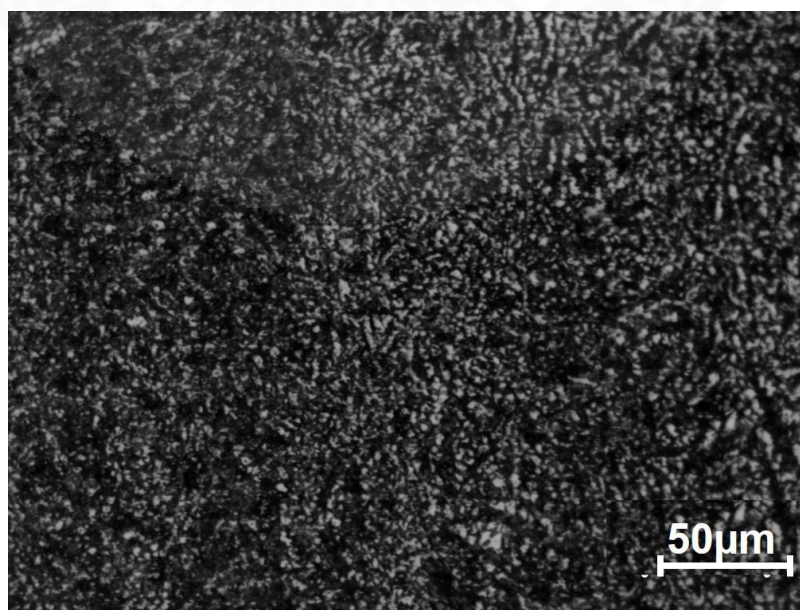
ภาพที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาค Weld metal กับ HAZ เหล็ก (HT/Temp.) กำลังขยาย 200 เท่า

#### 4.3.12 โครงสร้างจุลภาค Heat Affected Zone: HAZ

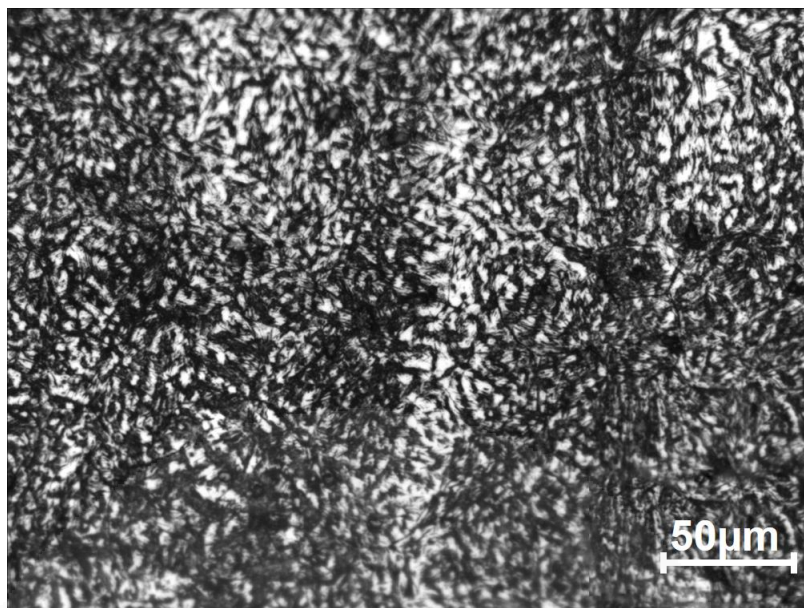
โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 (HT/Temp.) เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ จากภาพที่ 4.22-4.24 บริเวณที่ 3 เมื่อนำมาตรวจดูโครงสร้างจุลภาคจะพบโครงสร้างเฟอร์ไรท์ (ferrite) โครงสร้างมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์ตกค้าง (Martensite and Retained Austenite) และมีกระจายตัวแบบสม่ำเสมออยู่ทั่วทั้ง 3 สถานะการอบชุบ



ภาพที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ เหล็ก (NHT) กำลังขยาย 400 เท่า



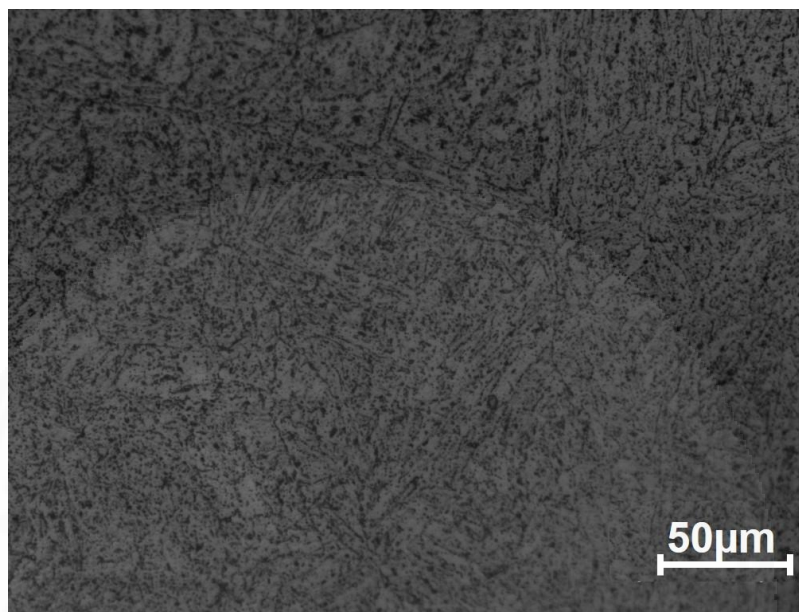
ภาพที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ เหล็ก (HT) กำลังขยาย 400 เท่า



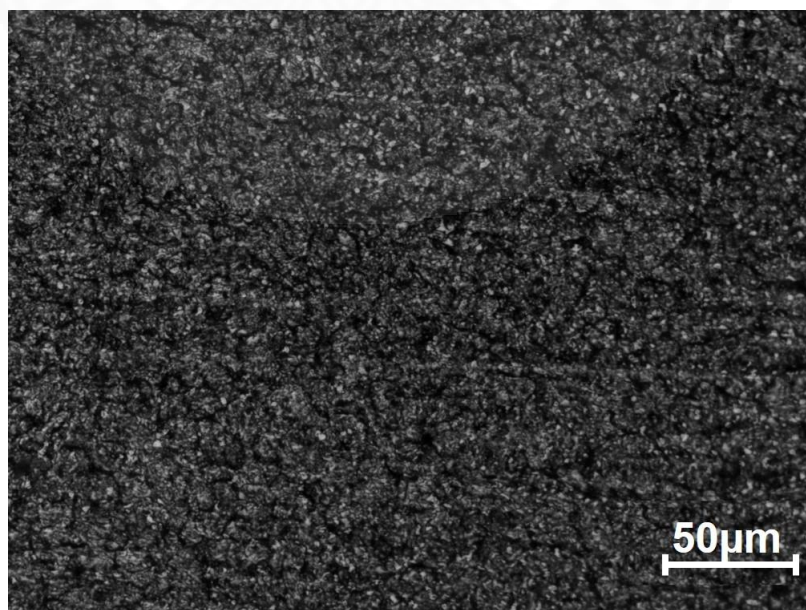
ภาพที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ เหล็ก (HT/Temp.) กำลังขยาย 400 เท่า

#### 4.3.13 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กงานร้อน SKD 61 บริเวณ Base Metal

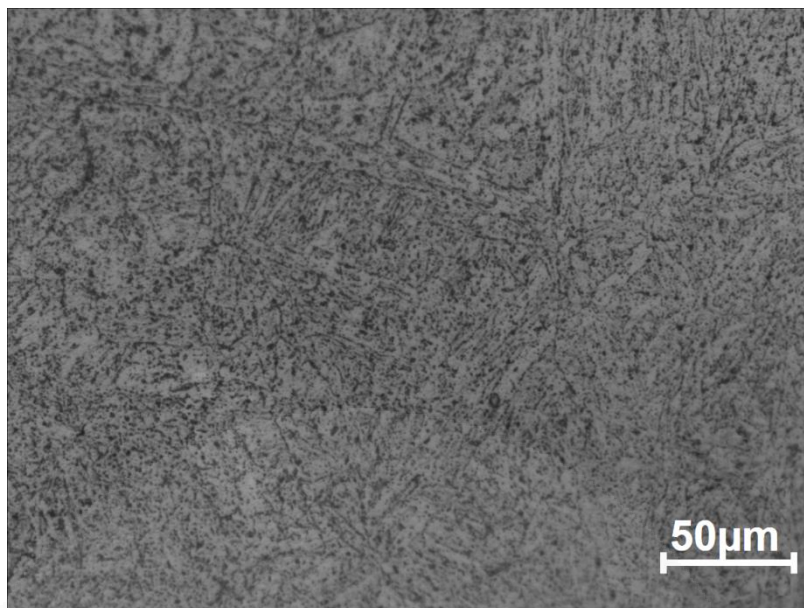
จากภาพที่ 4.25-4.27 บริเวณที่ 4 จะพบโครงสร้างจุลภาคแต่ละสภาวะการอบชุบของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 (HT/Temp.) มีลักษณะโครงสร้างประกอบด้วย matrix สีเข้มเป็น tempered martensite มีลักษณะหยาบคล้ายเข็มกระจายอยู่ทั่วอนุภาคสารประกอบคาร์ไบด์ของธาตุผสมแทรกฝังกระจายทั่วทั้งโครงสร้าง (Gualco A และคณะ, 2010) โดยเหล็ก (HT/Temp.) จะมีลักษณะคล้ายกับกระบวนการอบคลายความเครียดให้กับเนื้อเหล็ก ซึ่งส่งผลให้เนื้อเหล็กเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการเพิ่มความแข็งทุติยภูมิ (Secondary hardening) ส่งผลให้เหล็กเกิดความแข็งสูงขึ้นระหว่างการอบคลายความเครียด เกิดขึ้นเฉพาะเหล็กในกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool Steel) และเหล็กกล้าผสมสูง เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ (Austenite) ไปเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ได้สมบูรณ์ทำให้เกิดการกระจายตัวของโครงสร้าง (Atlas of Microstructures of Industrial Alloy;1972) และในตารางที่ 4.7 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณต่างๆ เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปร์ย์ (HT/Temp.)



ภาพที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Base Metal เหล็ก (NHT) กำลังขยาย 400 เท่า



ภาพที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Base Metal เหล็ก (HT) กำลังขยาย 400 เท่า

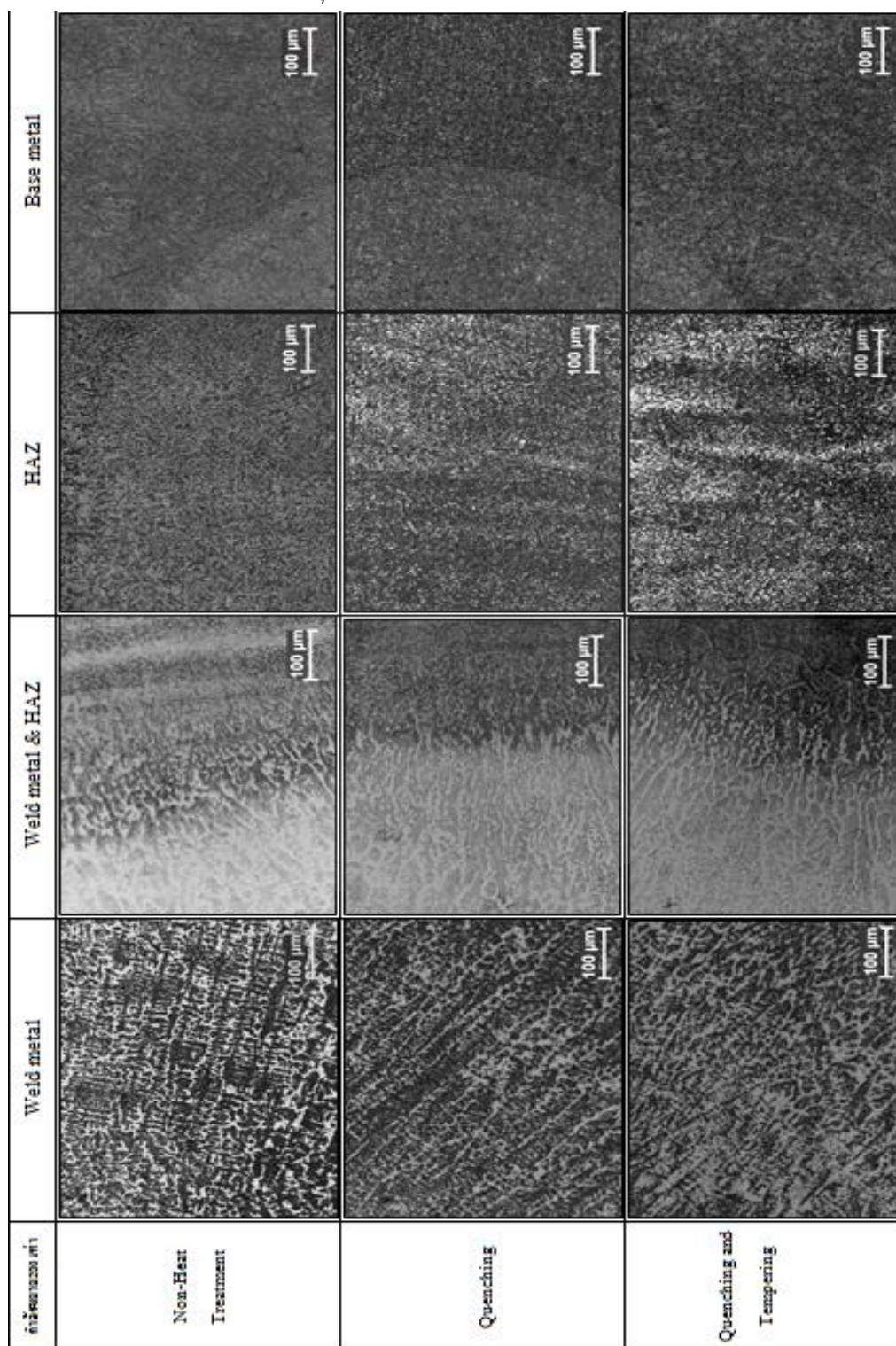


ภาพที่ 4.27 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Base Metal เหล็ก (HT/Temp.) กำลังขยาย 400 เท่า



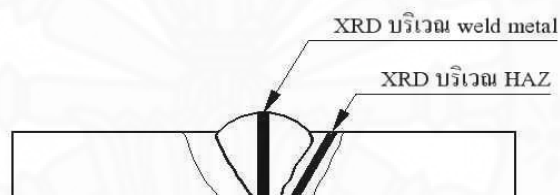
ตารางที่ 4.7

ภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณต่างๆ เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปร์ย์  
เปรียบเทียบทั้ง 3 สภาวะการอบชุบเหล็ก กำลังขยาย 200 เท่า

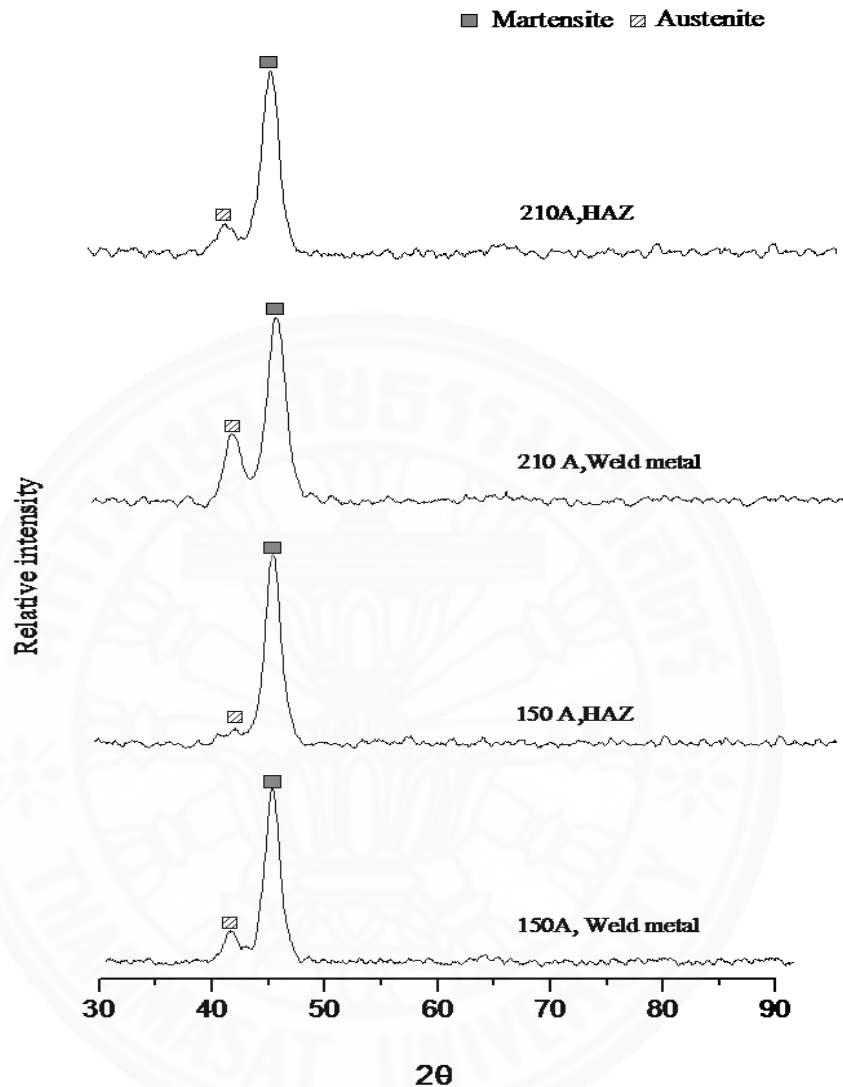


#### 4.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction

จากภาพที่ 4.28-4.29 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าในช่วงบริเวณแนวเชื่อมที่กระแส 150A และ 210A เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์มีค่าปริมาณความหนาแน่นของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่มากกว่าโครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) โดยการสังเกตจากยอดของกราฟของทั้ง 2 กระแสในการเชื่อมและจากการเทียบกับมาตรฐานของ The International Centre for Diffraction Data (ICDD) โดยการเกิดโครงสร้างที่เป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) จะเกิดที่มุม  $2\theta$  ประมาณที่ 44.183 และโครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) จะเกิดที่มุม  $2\theta$  ประมาณที่ 43.279 (จากภาคผนวก ค) ซึ่งจากการตรวจสอบบริเวณแนวเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน HAZ เกิดปรากฏการณ์กลไกการกระจายการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนสะสมเกิดโครงสร้างจากออสเทนไนต์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ ส่งผลทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นโดยมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแข็งภายหลังการเชื่อม



ภาพที่ 4.28 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

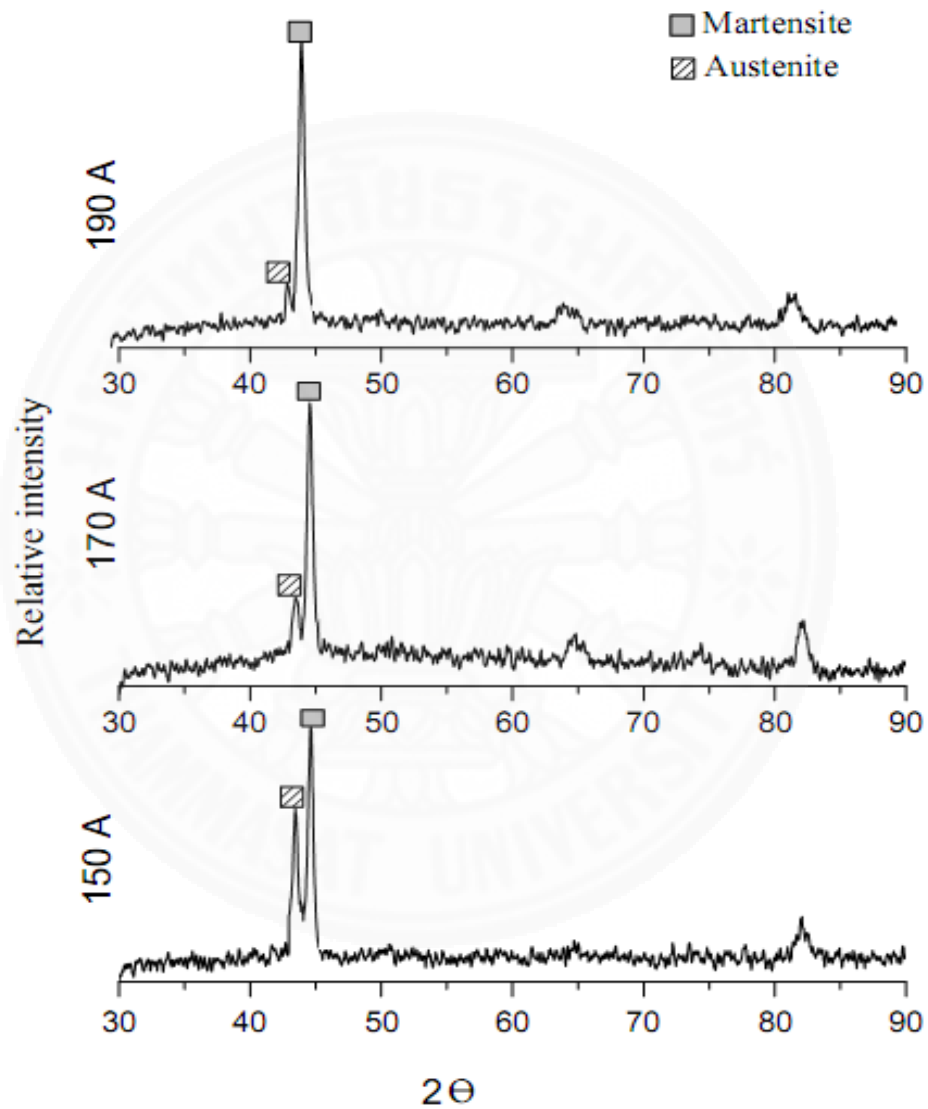


ภาพที่ 4.29 ค่าการทดสอบ XRD (Spray Transfer) บริเวณ Weld area กับบริเวณ HAZ กระแส 150A และ 210A

จากภาพที่ 4.30 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์พบว่าในช่วงบริเวณ Weld area มีปริมาณของโครงสร้างโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) โครงสร้างคาร์ไบด์ (Carbide) โครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenite) จากการเทียบกับมาตรฐานของ The International Centre for Diffraction Data (ICDD) โดยการเกิดโครงสร้างที่เป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) จะเกิดที่มุม  $2\theta$  ประมาณที่ 44.183 และโครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenite) จะเกิดที่มุม  $2\theta$  ประมาณที่ 43.279 (จากภาคผนวก ค) โดยมีปริมาณ



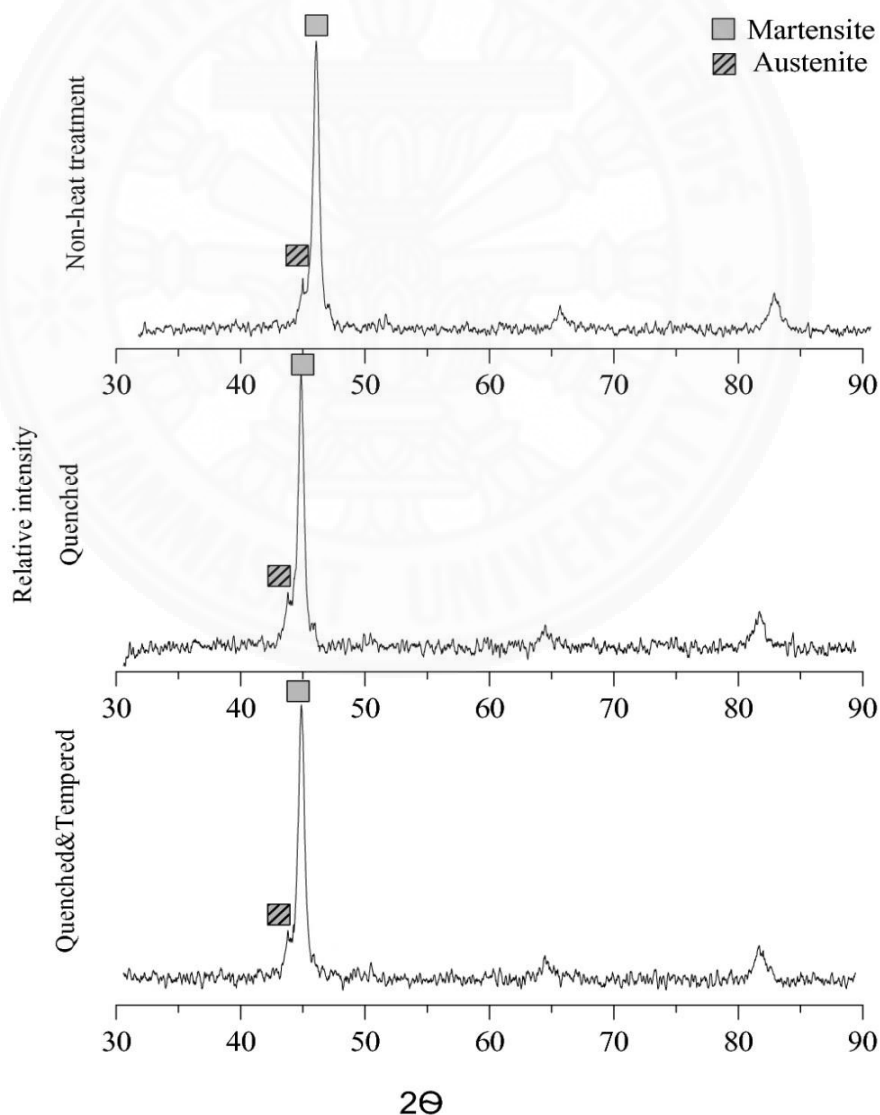
โครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) เป็นส่วนมาก และมีโครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenite) ตกผลึกอยู่เล็กน้อย โดยทั้ง 3 สภาวะการอบชุบทางความร้อนค่าปริมาณโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite)



ภาพที่ 4.30 ค่าการทดสอบ XRD ของบริเวณ Weld area การถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์

จากภาพที่ 4.31 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เปรียบเทียบผลความแตกต่างในแต่ละสภาวะการอบชุบการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปร์ย์ พบว่าในช่วงบริเวณ Weld area มีปริมาณของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) โครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenite)

โครงสร้างคาร์ไบด์(Carbide) จากการเทียบกับมาตรฐานของ The International Centre for Diffraction Data (ICDD) โดยการเกิดโครงสร้างที่เป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) จะเกิดที่มุม  $2\theta$  ประมาณที่ 44.183 และโครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenite) จะเกิดที่มุม  $2\theta$  ประมาณที่ 43.279 (จากภาคผนวก ค) โดยปริมาณโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) เป็นส่วนมากและมีปริมาณโครงสร้างออสเทนไนท์(Austenite) และโครงสร้างคาร์ไบด์ (Carbide) กระจายตัวอยู่ ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความแข็งของ Weld area คือ ที่มีปริมาณของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) อยู่มากซึ่งจะทำให้ค่าความแข็งของ Weld area แข็งมากขึ้น แต่ถ้ามีปริมาณของโครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenite) อยู่มากซึ่งจะทำให้ค่าความแข็งของ Weld area ลดลงเนื่องจากโครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenite) จะมีผลด้านความเหนียวเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.31 ค่าการทดสอบ XRD ของบริเวณ Weld area สภาวะการอบชุบต่างๆ กัน

#### 4.5 การวิเคราะห์ค่าความแข็งภายใต้การเชื่อม

##### 4.5.1 ในการทดลองเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์

จากภาพที่ 4.32 แสดงตำแหน่งของการกัดวัดค่าความแข็งซึ่งจากการเปรียบเทียบค่าความแข็งจากภาพที่ 4.33 พบว่า

##### บริเวณแนวเชื่อม

บริเวณแนวเชื่อม	ค่าความแข็งเฉลี่ย
กระแส 150A	402 HV
กระแส 170A	403 HV
กระแส 190A	517 HV
กระแส 210A	523 HV

##### บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน

บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน	ค่าความแข็งเฉลี่ย
กระแส 150A	209 HV
กระแส 170A	208 HV
กระแส 190A	222 HV
กระแส 210A	232 HV

##### บริเวณเนื้องาน

บริเวณเนื้องาน	ค่าความแข็งเฉลี่ย
กระแส 150A	342 HV
กระแส 170A	344 HV
กระแส 190A	346 HV
กระแส 210A	347 HV

จากผลการทดลองพบว่าในช่วงบริเวณแนวเชื่อม เมื่อเชื่อมที่กระแสสูงขึ้น Heat Input มากส่งผลทำให้ความร้อนจากการเชื่อมโลหะก่อให้เกิดโครงสร้างสะสมประเภทมาร์เทนไซต์

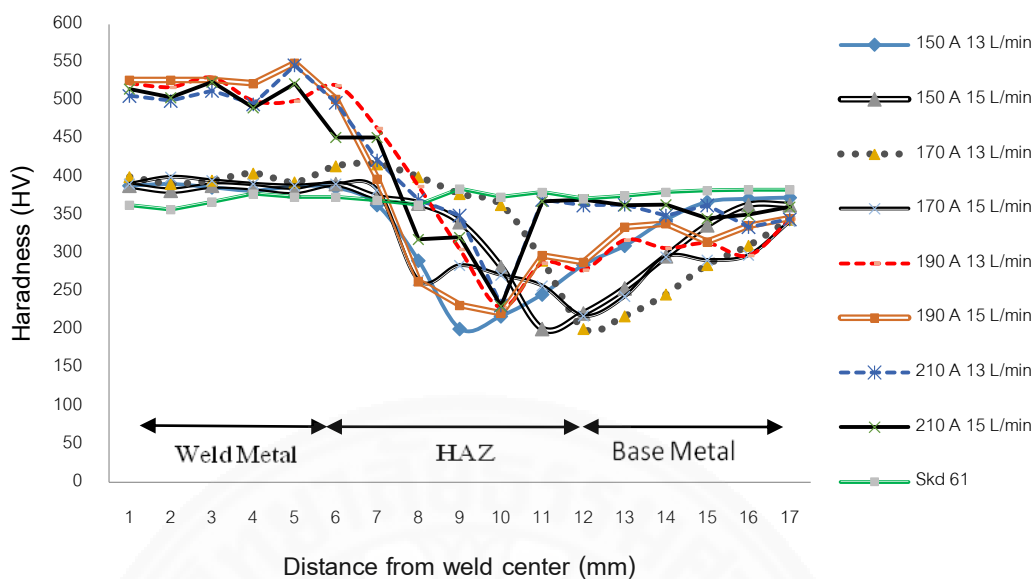
และโครเมียมคาร์ไบด์ (Gualco A และคณะ, 2010) ที่ฝังตัวในมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่สลายตัวไม่หมดจากการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนจากการเชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสออสเทนไนท์ (Austenite) ไปเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งมีผลสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคและผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จึงทำให้ค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อมมีค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากบริเวณแนวเชื่อมพบโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ (Martensite) ขนาดใหญ่กระจายโดยทั่ว จึงทำให้มีค่าความแข็งเพิ่มมากกว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน HAZ และในบริเวณเนื้อเนื้องาน (Base Metal)

บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน เนื่องจากการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจากการเชื่อมและการเย็นตัวของชิ้นงานที่เป็นไปอย่างรวดเร็ว พบว่ามีโครงสร้างเฟอร์ไรท์ (Ferrite) โครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) เกรนละเอียดกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ โดยมีลักษณะของเกรนและการกระจายตัวมากเมื่อกระแสเชื่อมสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงกว่าบริเวณแนวเชื่อม

บริเวณเนื้องาน เมื่อใช้กระแสเชื่อมสูงขึ้นจะเกิดความร้อนสูงกระจายส่งไปยังเนื้องานจากการถ่ายเทความร้อน เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของเหล็กพบโครงสร้างซีเมนไทต์ (Cementite) และเฟอร์ไรท์ (Ferrite) รวมตัวกันเป็นก้อนแข็งกระจายตัวอยู่ทั่วและเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (Tempered Martensite) โดยมีค่าเฉลี่ยความแข็งที่ใกล้เคียงกันในทุกกระแส



ภาพที่ 4.32 ตำแหน่งของการวัดความแข็ง



ภาพที่ 4.33 การเปรียบเทียบค่าความแข็งก่อนและหลังเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายไอออนโลหะแบบสเปรย์

#### 4.5.2 เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายไอออนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์

จากภาพที่ 4.34 การเปรียบเทียบค่าความแข็งพบว่า

บริเวณแนวเชื่อม

บริเวณแนวเชื่อม	ค่าความแข็งเฉลี่ย
กระแส 150A	386 HV
กระแส 170A	399 HV
กระแส 190A	401 HV

บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน

บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน	ค่าความแข็งเฉลี่ย
กระแส 150A	248 HV
กระแส 170A	250 HV
กระแส 190A	254 HV

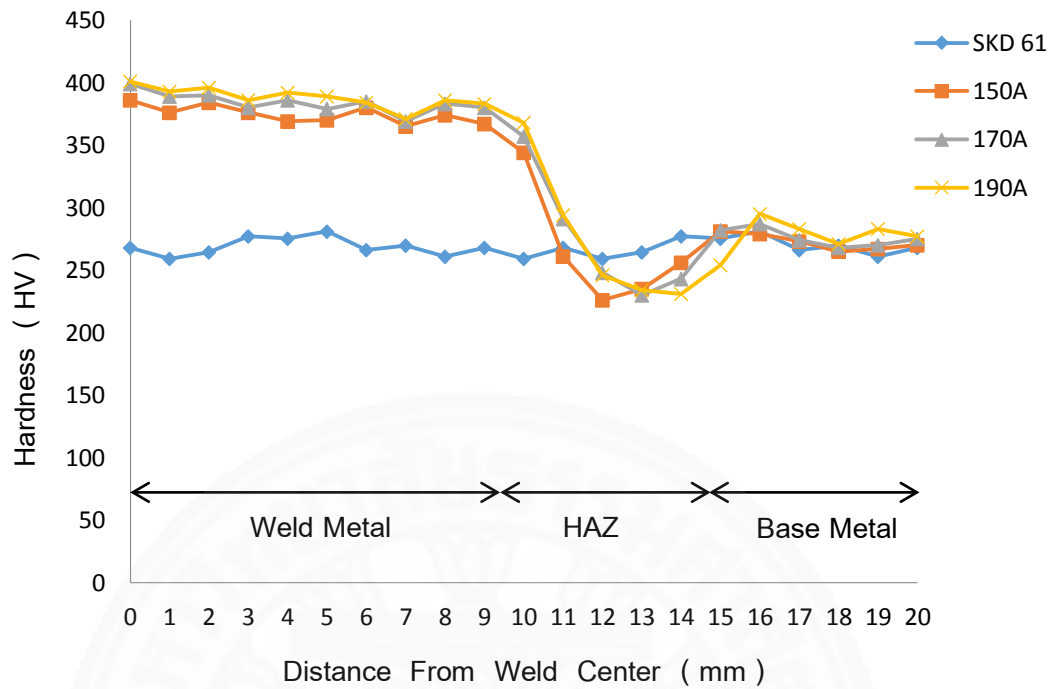
บริเวณเนื้องาน

บริเวณเนื้องาน	ค่าความแข็งเฉลี่ย
กระแส 150A	270 HV
กระแส 170A	275 HV
กระแส 190A	277 HV

จากกราฟในช่วงบริเวณแนวเชื่อมค่าความแข็งของการเชื่อมพบว่าแต่ละกระแสค่าความแข็งจะแตกต่างกันออกไปจากการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ ที่กระแส 190A มีค่าความแข็งสูงสุด 401 HV และการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ที่กระแส 150A จะมีค่าความแข็งน้อยสุด 386HV เป็นผลจากการที่มีโครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenite) โครงสร้างมาร์เทนไซด์ (Martensite) ลักษณะกลมเกิดจากการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนท์ (Austenite) ไปเป็นมาร์เทนไซด์ (Martensite) มีลักษณะเฟสขนาดใหญ่สีดำ โดยสามารถพบได้ในวัสดุประเภทนี้ (Gualco A, 2008 และ Leshchinskiy L.K, 2001) ซึ่งมีผลสอดคล้องกับโครงสร้างทางจุลภาคและผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จึงทำให้กระแส 190A มีความแข็งมากกว่าที่กระแส 150A จากการทดลองเชื่อมที่กระแส 210 A ไม่สามารถทำการเชื่อมได้เนื่องจากกระแสเชื่อมสูงเกินไปจนทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมละลายทะลุ

บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมีลักษณะของเกรนใหญ่และหายจากการที่กระแสเชื่อมสูงซึ่งมีผลให้พลังงานความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนลดลงกว่าบริเวณแนวเชื่อมและเนื้องาน โครงสร้างประกอบด้วยเนื้อพื้นหรือ matrix สีขาวเป็นซีเมนไตต์ทรงกลมสีขาวกระจายตัวบนพื้นโครงสร้างมาร์เทนไซด์ (Martensite and Globular Cementite) มีอนุภาคของธาตุผสมแทรกฝังกระจายทั่วทั้งโครงสร้าง (Gualco A และคณะ, 2010) โดยมีลักษณะโครงสร้างใกล้เคียงกันในทุกกระแสเชื่อม

บริเวณเนื้องาน เมื่อใช้กระแสเชื่อมสูงจะเกิดความร้อนสูงกระจายส่งไปยังเนื้องานจากการถ่ายเทความร้อน พบโครงสร้างมาร์เทนไซด์ และ ทรูไซต์ต์ (Martensite and Troosite) อยู่โดยรอบทั้ง 3 กระแส โดยมีค่าเฉลี่ยความแข็งที่ใกล้เคียงกันในทุกกระแส



ภาพที่ 4.34 ค่าความแข็งก่อนและหลังเชื่อมด้วยการถ่ายไอโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์

4.5.3 เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายไอโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์เพื่อเปรียบเทียบในแต่ละสภาวะการอบชุบ

จากภาพที่ 4.35 การเปรียบเทียบค่ากราฟความแข็งก่อนการเชื่อมกระบวนการอบชุบต่างกัน

สภาวะการอบชุบ	ค่าความแข็งเฉลี่ย
(NHT)	219 HV
(HT)	277 HV
(HT/Temp.)	268 HV

## บริเวณแนวเชื่อม

สภาวะการอบชุบ	ค่าความแข็งเฉลี่ย
(NHT)	390 HV
(HT)	386 HV
(HT/Temp.)	384 HV

## บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน

สภาวะการอบชุบ	ค่าความแข็งเฉลี่ย
(NHT)	192 HV
(HT)	233 HV
(HT/Temp.)	219 HV

## บริเวณเนื้องาน

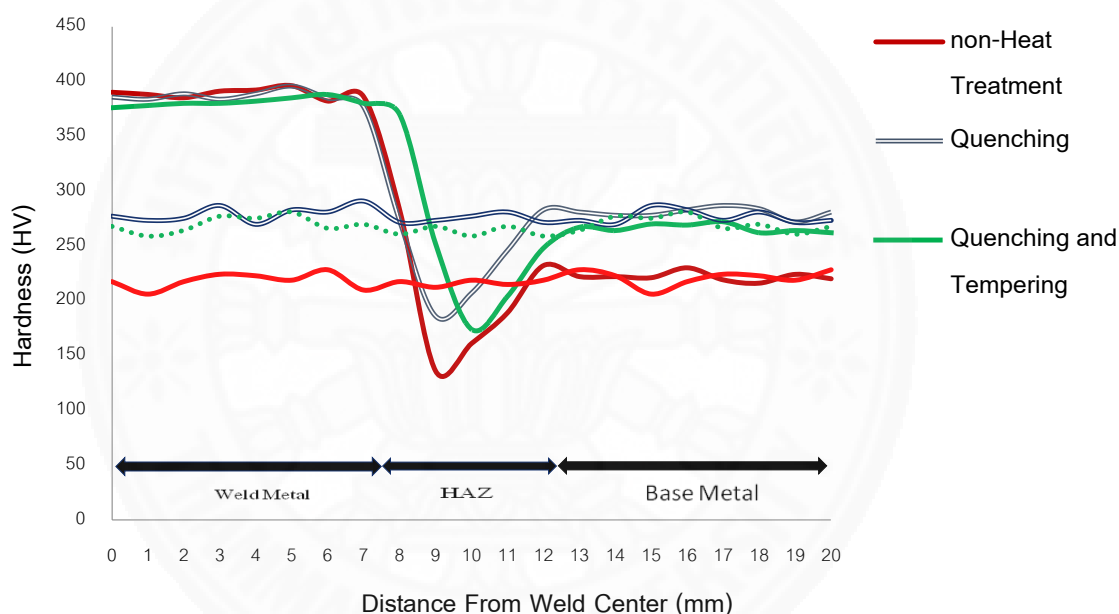
สภาวะการอบชุบ	ค่าความแข็งเฉลี่ย
(NHT)	222 HV
(HT)	281 HV
(HT/Temp.)	266 HV

จากการศึกษาผลการทดลองพบว่าเหล็ก SKD 61 ในสภาวะที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคลายความเครียดเหมาะสมกับลักษณะการเลือกใช้ในกระบวนการเชื่อม GMAW มากที่สุด เนื่องจากมีลักษณะของเม็ดเกรนโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) เป็นลักษณะกลมใหญ่และการกระจายตัวของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งมีผลสอดคล้องกับโครงสร้างทางจุลภาค และผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD โดยเป็นผลมาจากภายหลังจากการชุบแข็งเหล็กทำการอบคลายความเครียด ทำให้โครงสร้างจุลภาคออสเทนไนท์ (Austenite) และออสเทนไนท์ตกค้าง (Retained Austenite) มีเวลาในการฟอร์มตัวไปเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่มีความละเอียดมากยิ่งขึ้นส่งผลให้เกิดความเหนียวเพิ่มขึ้น



บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน มีลักษณะของเกรนและการกระจายตัวมากส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงกว่าบริเวณแนวเชื่อม พบโครงสร้างเฟอร์ไรท์ (ferrite) โครงสร้างมาร์เทนไซต์และออสเทนไนท์ตกค้าง (Martensite and Retained Austenite) และมีกระจายตัวแบบสม่ำเสมออยู่ทั่วทั้ง 3 สภาวะการอบชุบ

บริเวณเนื้องาน เกิดความร้อนกระจายส่งไปยังเนื้องานจากการถ่ายเทความร้อน โดยมีลักษณะโครงสร้างประกอบด้วย matrix สีเข้มเป็น tempered martensite มีลักษณะหยาดคล้ายเข็มกระจายอยู่ทั่วอนุภาคสารประกอบคาร์ไบด์ของธาตุผสมแทรกฝังกระจายทั่วทั้งโครงสร้าง ซึ่งบริเวณเนื้องานแต่ละสภาวะการอบชุบของเหล็กให้ค่าใกล้เคียงกับค่าความแข็งก่อนการเชื่อม

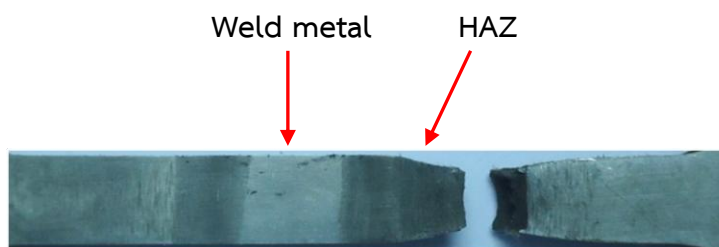


ภาพที่ 4.35 การเปรียบเทียบค่าความแข็งก่อนและภายหลังการเชื่อมสภาวะการอบชุบต่างๆ

#### 4.6 การวิเคราะห์ค่าแรงดึงหลังจากการเชื่อม

จากการขาดของชิ้นงานในภาพที่ 4.36 พบว่าเกิดการขาดที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) จะเกิดโครงสร้างของโลหะที่มีการเปลี่ยนแปลงของเกรนใหญ่และหยาดจึงทำให้สามารถรับแรงในการยึดตัวได้มากกว่ากว่าบริเวณแนวเชื่อมและบริเวณเนื้องานสังเกตได้จากผลของการทดสอบความแข็งที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) จะมีความแข็งน้อยกว่าบริเวณแนวเชื่อมและบริเวณเนื้องานซึ่งมีผล

สอดคล้องกับโครงสร้างทางจุลภาคและผลการทดสอบความแข็งแรงส่งผลให้เมื่อมีแรงมากระทำจะทำให้บริเวณดังกล่าวจะเกิดการยึดตัวจนกระทั่งขาดในที่สุด



ภาพที่ 4.36 การขาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึงด้วยกระบวนการถ่ายเชื่อมแบบสเปร์ย์

#### 4.6.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายไอออน

โลหะหลอมเหลวแบบสเปร์ย์

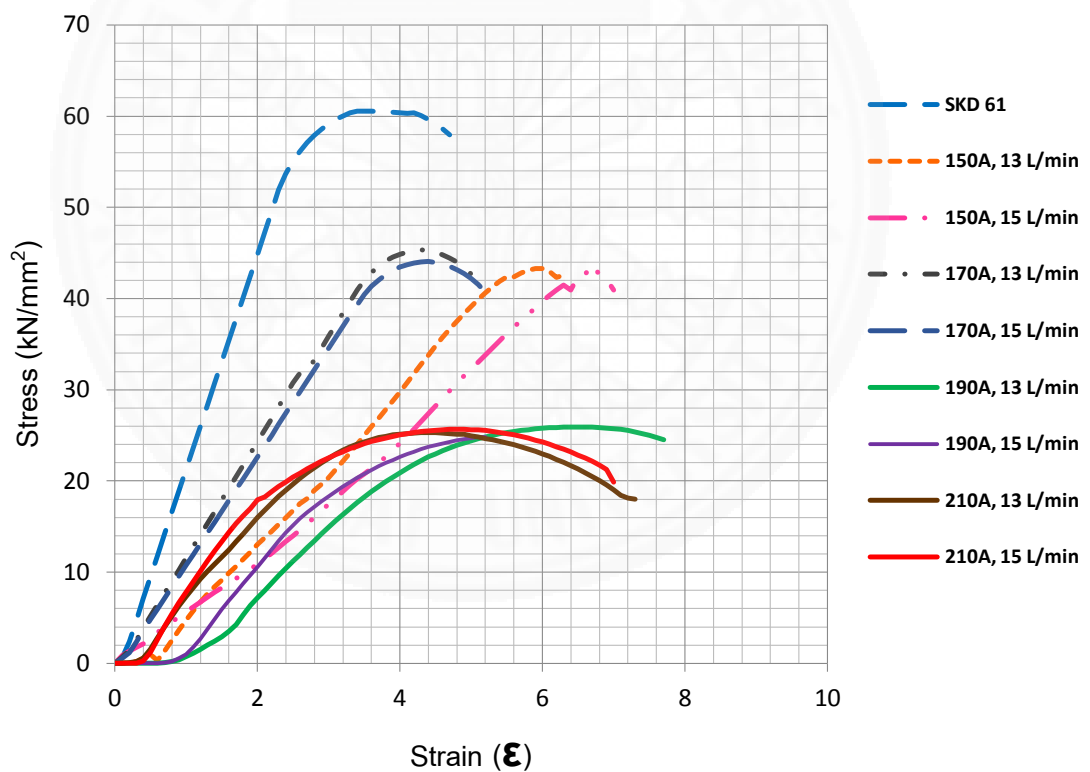
ผลการทดสอบค่าแรงดึงพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงก่อนเชื่อมมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดอยู่ที่  $60.6 \text{ kN/mm}^2$  และค่าความต้านทานแรงดึงหลังเชื่อมที่กระแส 150A มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด  $44.0 \text{ kN/mm}^2$  กระแส 170A มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด  $44.7 \text{ kN/mm}^2$  กระแส 190A มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด  $25.9 \text{ kN/mm}^2$  และกระแส 210A มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด  $25.7 \text{ kN/mm}^2$  ซึ่งพบว่าที่กระแส 170A ให้ค่าแรงดึงสูงสุด และที่กระแส 210 A จะให้ค่าแรงดึงต่ำสุด จากตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.37 ซึ่งมีความสอดคล้องกับการทดสอบความแข็งแรงที่กระแส 170A บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) มีค่าความแข็งแรงต่ำกว่ากระแสอื่นจึงส่งผลให้ค่าแรงดึงสูงสุด

ในส่วนค่าความแข็งแรงลดลงภายหลังจากการเชื่อมเป็นผลเนื่องมาจากลักษณะของโครงสร้างจุลภาคพบว่ามีโครงสร้างเฟอร์ไรท์ (Ferrite) โครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) เกรนละเอียดกว่าบริเวณแนวเชื่อม เนื่องจากผลของการเชื่อมให้ความร้อนอย่างรวดเร็วและการเย็นตัวของชิ้นงานที่เป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยมีลักษณะของเกรนขนาดใหญ่และการกระจายตัวมากส่งผลให้ยึดตัวได้ดีและมีความแข็งแรงน้อยกว่าส่งผลให้ค่าความเหนียวเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าผลของกระแสในการเชื่อมมีผลต่อความร้อนที่ให้แก่ชิ้นงาน จึงทำให้เกิดโครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (Tempered Martensite) จากการเย็นตัว ส่วนอัตราการไหลของแก๊ส 13, 15L/min ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคน้อยมากเมื่อเทียบกับทุกกระแสการเชื่อมและอัตราการไหลของแก๊ส

ตารางที่ 4.8

ค่าความแข็งแรงดึงด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์

กระแส (A)	ค่าความแข็งแรงดึง ( $\text{kN/mm}^2$ )	การยืดตัว (%)
150	44.0	4.56
170	44.7	4.58
190	25.9	4.51
210	25.7	4.76



ภาพที่ 4.37 ความสัมพันธ์ความต้านทานแรงดึงกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์

#### 4.6.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์

ผลการทดสอบค่าแรงดึงพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงก่อนเชื่อมมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดอยู่ที่  $60.6 \text{ kN/mm}^2$  และค่าความต้านทานแรงดึงหลังเชื่อมที่การถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ที่ 150A มีค่าความต้านทานแรงดึง  $24.8 \text{ kN/mm}^2$  ที่ 170A มีค่าความต้านทานแรงดึง  $25.2 \text{ kN/mm}^2$  ที่ 190A มีค่าความต้านทานแรงดึง  $25.8 \text{ kN/mm}^2$  ซึ่งพบว่าที่กระแส 190A ให้ค่าแรงดึงสูงสุด  $25.8 \text{ kN/mm}^2$  และที่ 150 A จะให้ค่าแรงดึงต่ำสุดที่  $24.8 \text{ kN/mm}^2$  จากการขาดของชิ้นงานในช่วงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ดังภาพที่ 4.38



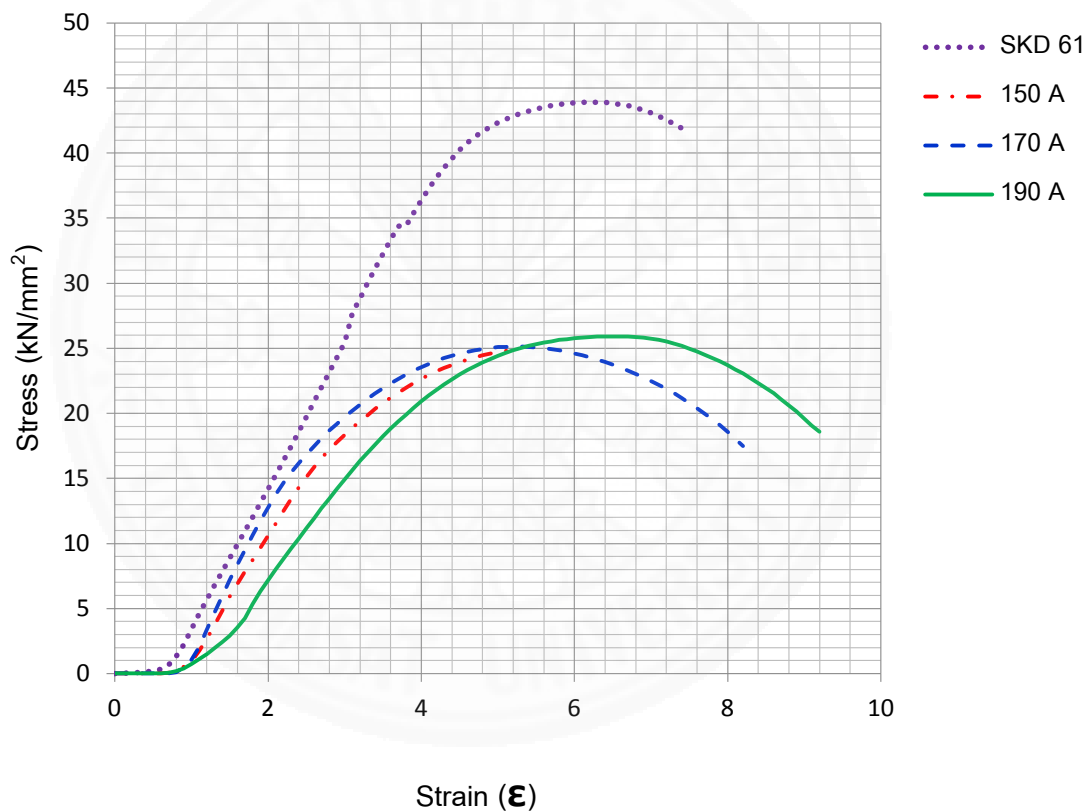
ภาพที่ 4.38 การขาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึงด้วยการเชื่อมแบบพัลส์

เนื่องจากการสังเกตจากโครงสร้างจุลภาคจะพบว่ามีการเกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) และมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่มีขนาดใหญ่จับตัวกันในแต่ละกระแสการเชื่อม จากการที่มีการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์มีผลทำให้เกิดประสิทธิภาพในการเติมเนื้อโลหะได้มาก ส่งผลให้เกิดการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ที่ช่วงกระแสสูงแต่ค่าความร้อนเข้า (Heat input) ก็จะไม่มากตาม และจากการสังเกตบริเวณจุดขาดจะขาดที่บริเวณผลกระทบจากความร้อน (HAZ) เกิดโครงสร้างของโลหะที่มีการเปลี่ยนแปลงของเกรนใหญ่และหยาบจึงทำให้สามารถรับแรงในการยึดตัวได้มากกว่ากว่าบริเวณแนวเชื่อมและบริเวณเนื่องงานสังเกตได้จากผลของการทดสอบความแข็งแรงที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าบริเวณแนวเชื่อมและบริเวณเนื่องงานจากตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.39

ตารางที่ 4.9

ค่าความแข็งแรงดึงด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์

กระแส (A)	ค่าแรงดึง ( $\text{kN/mm}^2$ )	การยืดตัว (%)
150	24.84	3.23
170	25.15	3.28
190	25.80	3.38

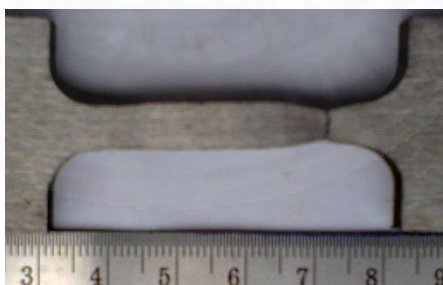


ภาพที่ 4.39 ความสัมพันธ์ความต้านทานแรงดึงกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์

4.6.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปิร์ดด้วยสภาวะการอบชุบเหล็กต่างๆ กัน

จากการขาดของชิ้นงานในภาพที่ 4.40 พบว่าเกิดการขาดที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) จะเกิด

โครงสร้างของโลหะที่มีการเปลี่ยนแปลงของเกรนใหญ่และหยาบจึงทำให้สามารถรับแรงในการยึดตัวได้มากกว่าบริเวณแนวเชื่อมและบริเวณเนื้องานซึ่งเกิดได้จากผลของการทดสอบความแข็งที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) จะมีความแข็งน้อยกว่าบริเวณแนวเชื่อมและบริเวณเนื้องานซึ่งมีผลสอดคล้องกับโครงสร้างทางจุลภาคและผลการทดสอบความแข็ง จากตารางที่ 4.10 และภาพที่ 4.41 - 4.42 แสดงผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงหลังเชื่อมเหล็กที่ไม่ผ่านกระบวนการอบชุบมีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย  $68.1 \text{ kN/mm}^2$  เหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งมีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย  $71.0 \text{ kN/mm}^2$  และเหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคลายความเครียดมีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย  $69.2 \text{ kN/mm}^2$  ซึ่งพบว่าเหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งให้ค่าแรงดึงสูงสุด และเหล็กที่ไม่ผ่านกระบวนการอบชุบจะให้ค่าแรงดึงต่ำสุด ซึ่งพบว่าทั้ง 3 สภาวะ มีผลความต้านทานแรงดึงหลังเชื่อมเฉลี่ยใกล้เคียงกัน จากการที่มีโครงสร้างจุลภาคในช่วงบริเวณกระทบร้อน (HAZ) มีลักษณะของเม็ดเกรนของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) มีกระจายตัวของโครงสร้างมากจึงส่งผลให้สมบัติทางกลด้านความต้านทานแรงดึงไม่ว่าจะผ่านกระบวนการอบชุบทางความร้อนหรือไม่ก็ตามล้วนให้ผลออกมาใกล้เคียงกันทั้ง 3 สภาวะ โดยหลังจากการเชื่อมควรให้ความร้อนหลังจากการเชื่อม (Post weld) ซึ่งส่งผลเหมือนกับเกิดการอบคลายความเครียด (Tempering) ทำให้โครงสร้างจุลภาคออสเทนไนท์ (Austenite) และออสเทนไนท์ตกค้าง (Retained Austenite) มีเวลาในการฟอร์มตัวไปเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่มีความละเอียดมากยิ่งขึ้นส่งผลให้เกิดความเหนียว

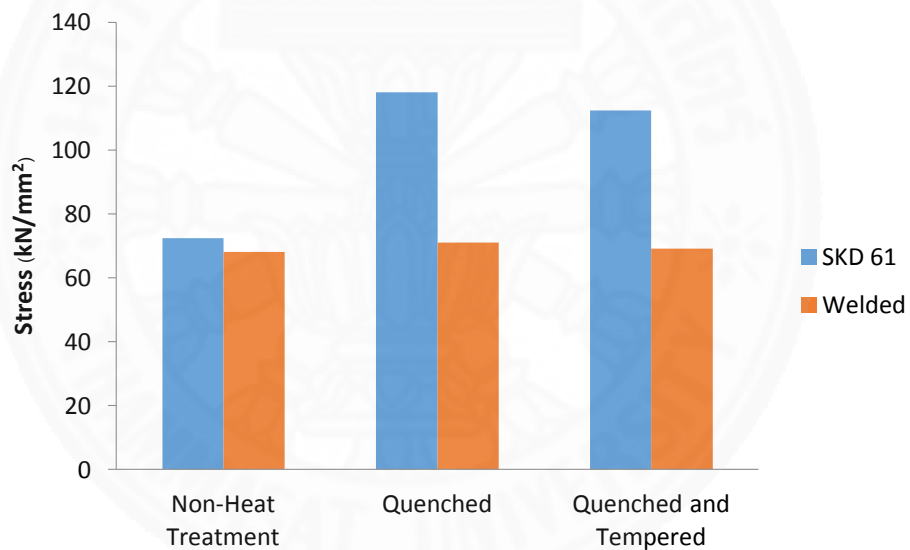


ภาพที่ 4.40 การขาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึงด้วยกระบวนการถ่ายเชื่อมแบบสเปรย์

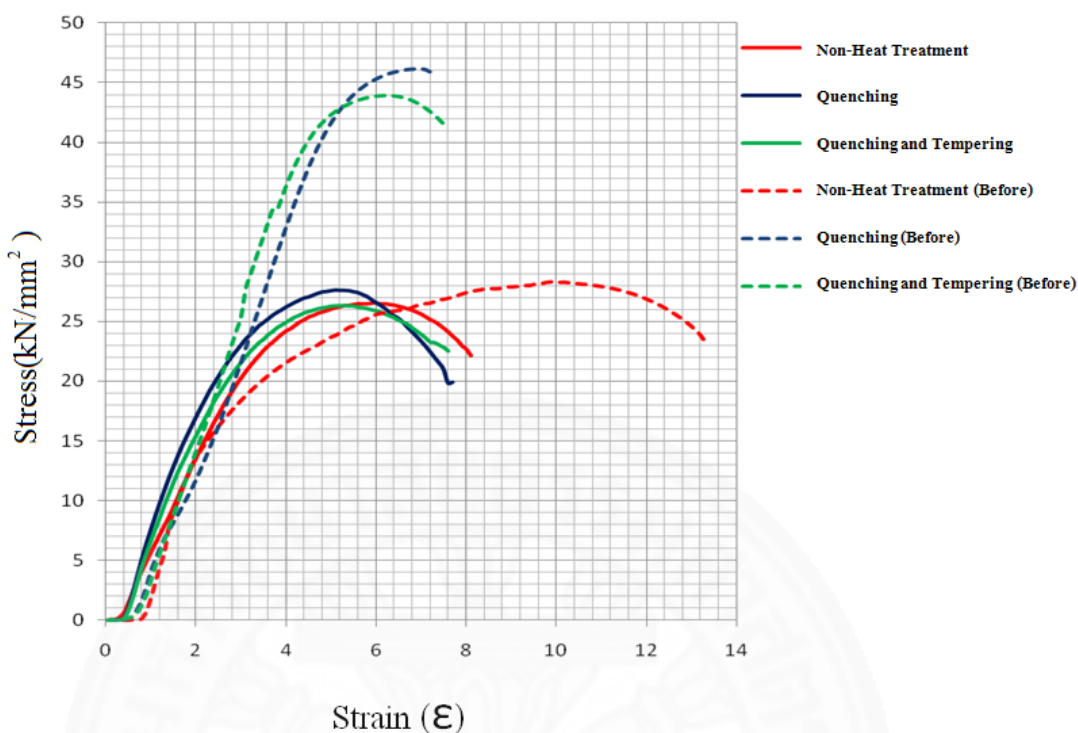
ตารางที่ 4.10

ค่าความแข็งแรงดึงด้วยสภาวะการอบชุบเหล็กต่างๆ กัน

สภาวะการอบชุบเหล็กต่างๆ กัน	ค่าแรงดึง (kN/mm <sup>2</sup> )	การยืดตัว (%)
Non-Heat Treatment	68.1	4.28
Quenched	71.0	4.18
Quenched and Tempered	69.2	4.41



ภาพที่ 4.41 เปรียบเทียบค่าแรงดึงที่สภาวะการอบชุบต่างๆ กัน



ภาพที่ 4.42 ค่าความต้านทานแรงดึงก่อนและหลังจากการเชื่อมในสภาวะการอบชุบต่างๆ

#### 4.7 การวิเคราะห์การทดสอบแรงกระแทก



ภาพที่ 4.43 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกรอยบากกลางแนวเชื่อมตามมาตรฐาน ASTM A370

4.7.1 ค่าการดูดซับพลังงานของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์

จากตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.43 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกรอยบากกลางแนวเชื่อมตามมาตรฐาน ASTM A370 และภาพที่ 4.44 แสดงค่าการทดสอบแรงกระแทกด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ กระแสเชื่อม 150 A มีค่าความต้านทานแรงกระแทกเฉลี่ย 13.9 J, 170 A มีค่าความต้านทานแรงกระแทกเฉลี่ย 10.8 J, 190 A มีค่าความ

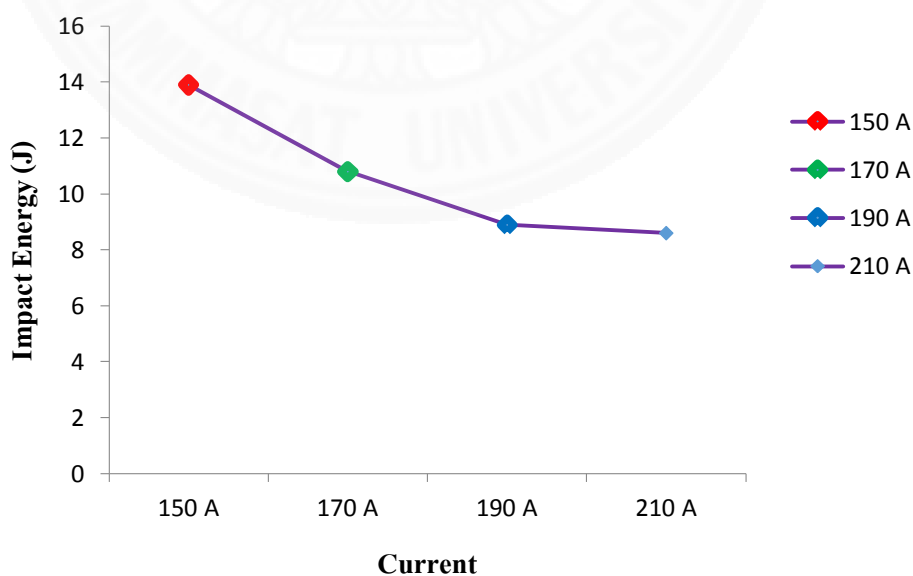


ต้านทานแรงกระแทกเฉลี่ย 8.9 J และ 210 A มีค่าความต้านทานแรงกระแทกเฉลี่ย 8.6 J โดยจากโครงสร้างจุลภาคจะพบว่ามีลักษณะโครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) และมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่มีขนาดใหญ่จับตัวกันในแต่ละกระแสการเชื่อม ส่งผลให้รับความต้านทานแรงกระแทกหลังเชื่อมได้ตามลำดับจาก 150A ไปจนถึง 210A

ตารางที่ 4.11

ค่าการทดสอบแรงกระแทกด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์

Current	ABSORB ENERGY (J)			
	1	2	3	Average
150 A	13.5	14.4	13.8	13.9
170 A	8.8	12.8	11.0	10.8
190 A	9.4	8.8	8.5	8.9
210 A	8.4	8.7	8.5	8.6



ภาพที่ 4.44 ความสัมพันธ์ค่าแรงกระแทกหลังการทดสอบแบบ Spray Transfer

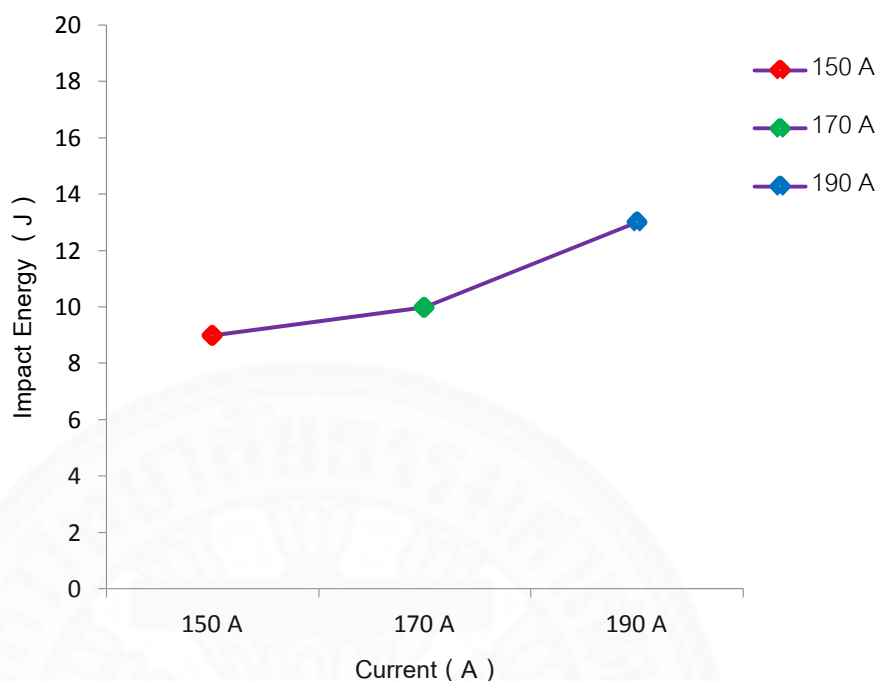
#### 4.7.2 ค่าการดูดซับพลังงานของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์

จากตารางที่ 4.12 และภาพที่ 4.45 แสดงค่าการทดสอบแรงกระแทกด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ กระแสเชื่อม 150 A มีค่าความต้านทานแรงกระแทกเฉลี่ย 9.20 J, 170 A มีค่าความต้านทานแรงกระแทกเฉลี่ย 10.93 J และ 190 A มีค่าความต้านทานแรงกระแทกเฉลี่ย 13.87 J โดยจากโครงสร้างจุลภาคจะพบว่า มีลักษณะโครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) และมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่มีขนาดใหญ่จับตัวกันในแต่ละกระแสการเชื่อมจากการที่มีการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวของการเชื่อมแบบพัลส์ มีผลทำให้เกิดประสิทธิภาพในการเติมเนื้อโลหะได้มากทำให้เกิดการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ในช่วงกระแสสูงส่งผลให้รับความต้านทานแรงกระแทกหลังเชื่อมได้ตามลำดับโดยมีผลสอดคล้องกับการตรวจสอบรอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ที่มีลักษณะของรอยแตกแบบหลุม (Dimples) แสดงให้เห็นถึงลักษณะการแตกหักแบบเหนียว

ตารางที่ 4.12

ค่าการทดสอบแรงกระแทกด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์

Current	ABSORB ENERGY (J)			
	1	2	3	Average
150 A	10.40	8.80	8.40	9.20
170 A	8.80	12.80	11.20	10.93
190 A	12.40	16.40	12.80	13.87



ภาพที่ 4.45 ความสัมพันธ์ค่าแรงกระแทกภายหลังการทดสอบแบบ Pulsed Spray Transfer

#### 4.7.3 ค่าการดูดซับพลังงานของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ (สภาวะการอบชุบเหล็กต่างๆ กัน)

จากตารางที่ 4.13 และภาพที่ 4.46, 4.47 ผลการทดสอบแรงกระแทกพบว่าเหล็กที่ไม่ผ่านกระบวนการอบชุบมีค่าความต้านทานแรงกระแทกเฉลี่ย 13.33 J เหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง มีค่าความต้านทานแรงกระแทกเฉลี่ย 14.67 J เหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคลายความเครียด มีค่าความต้านทานแรงกระแทกเฉลี่ย 20 J พบว่าเหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคลายความเครียดซึ่งเหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคลายความเครียด เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ (Martensite) จากการให้ความร้อนซ้ำส่งผลให้โครงสร้างที่ใหญ่และจับตัวกันเป็นก้อนปรับสภาพกระจายตัวมีความละเอียดมากขึ้นทำให้เกิดความเหนียวและสามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าสภาวะการอบชุบอื่นๆ โดยมีผลสอดคล้องกับการทดสอบความแข็งและการตรวจสอบรอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) โดยจากการทดลองพบว่าเหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคลายความเครียดเหมาะสมในการนำใช้งานได้ดีกว่าสภาวะการอบชุบแบบอื่นๆ เนื่องจากมีค่าความแข็งแรงในการรับ

แรงกระแทกสูงสุด เหมาะสมกับการนำไปใช้ในการเชื่อมซ่อมแซมแม่พิมพ์ที่อัดขึ้นรูปโลหะ (Press Forging Die) แม่พิมพ์ดัด (Bending Die) เป็นต้น ซึ่งจะแตกต่างจากเหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง เนื่องจากค่าความแข็งแรงในการรับแรงกระแทกได้ปานกลางจึงอาจทำให้แม่พิมพ์ที่เชื่อมเกิดการแตกหักได้ในกรณีที่ไม่ต้องการคุณสมบัติทางกลมากควรใช้เหล็กที่ไม่ผ่านกระบวนการอบชุบ ในงาน เช่น งานฉีดขึ้นรูปโลหะ พลาสติก แก้ว เป็นต้น เพื่อจะได้ลดกระบวนการทำงาน, เวลา และค่าใช้จ่าย ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ทำการซ่อมแซมด้วย

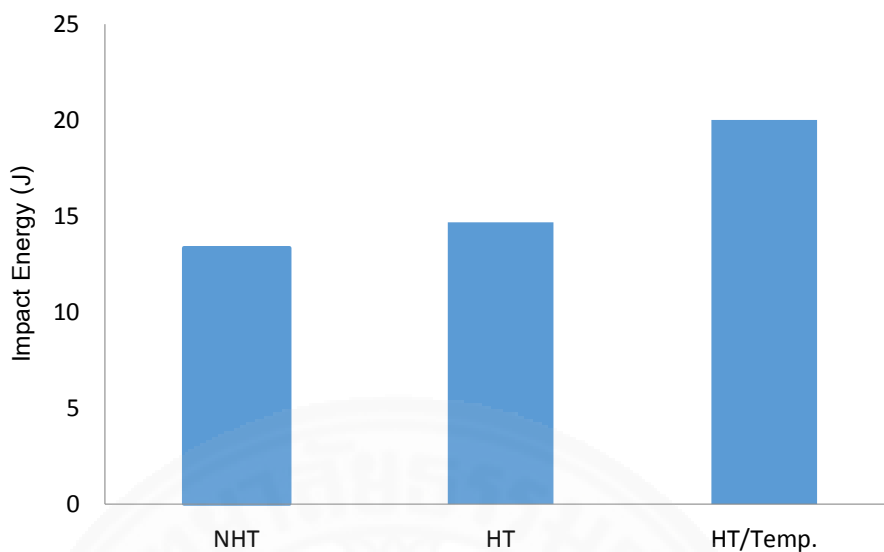


ภาพที่ 4.46 การแตกหักด้วยวิธีการทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy-V

ตารางที่ 4.13

ค่าการทดสอบแรงกระแทกหลังกระบวนการเชื่อม GMAW แต่ละสภาวะการอบชุบ

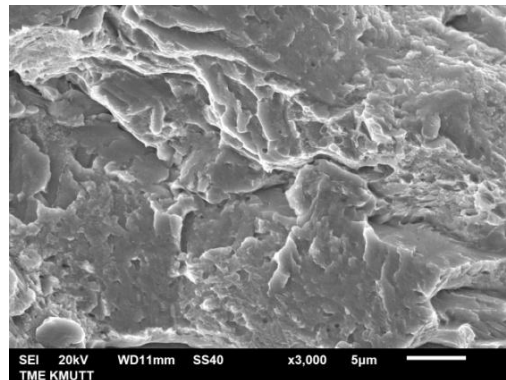
specimen	ABSORB ENERGY (J)			
	1	2	3	Average
NHT	10	16	14	13.33
HT	16	16	12	14.67
HT/Temp.	18	20	22	20



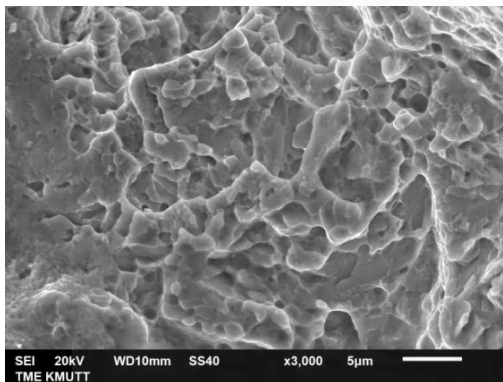
ภาพที่ 4.47 ค่าเฉลี่ยแรงกระแทกสูงสุดในแต่ละกระบวนการอบชุบ (Spray Transfer)

#### 4.8 การตรวจสอบรอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM)

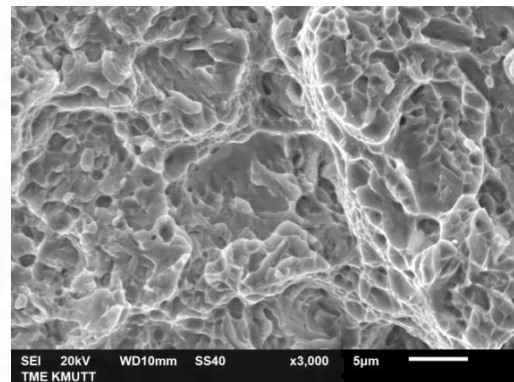
จากภาพที่ 4.48 การวิเคราะห์รอยแตกหักจากการทดสอบแรงกระแทกของเหล็ก SKD 61 เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ ในเหล็ก NHT และเหล็ก HT มีลักษณะรอยแตกเปราะ และเหล็ก HT/Temp. มีลักษณะของรอยแตกแบบหลุม (Dimples) แสดงให้เห็นถึงลักษณะการแตกหักแบบเหนียว สำหรับส่วนที่ทำการตรวจสอบ คือ รอยแตกหักบริเวณแนวเชื่อมโดยภายหลังจากการเชื่อมควรต้องให้ความร้อนหลังจากการเชื่อม (Post weld) ซึ่งส่งผลเหมือนกับเกิดการอบคลายความเครียด (Tempering) จากการให้ความร้อนซ้ำส่งผลให้โครงสร้างที่ใหญ่และจับตัวกันเป็นก้อนปรับสภาพกระจายตัวมีความละเอียดมากขึ้นทำให้เกิดความเหนียวและสามารถดูดซับพลังงานได้มากส่งผลให้เกิดความเหนียวและเกิดลักษณะการแตกหักแบบเหนียว



(ก)



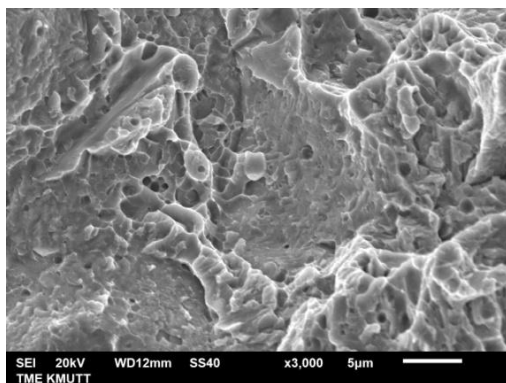
(ข)



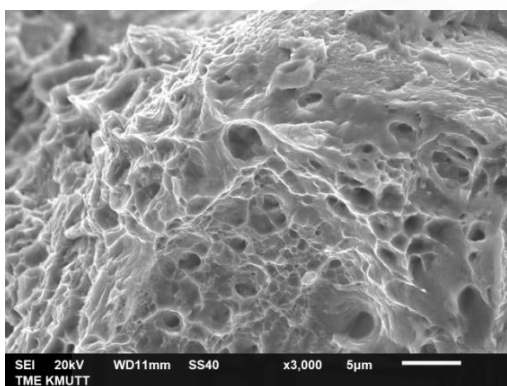
(ค)

ภาพที่ 4.48 รอยแตกของช่วง Weld Metal ที่ผ่านกระบวนการทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy ทั้ง 3 สภาวะ ก ) Non-Heat Treatment ข ) Quenched ค ) Quenched and Tempered ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

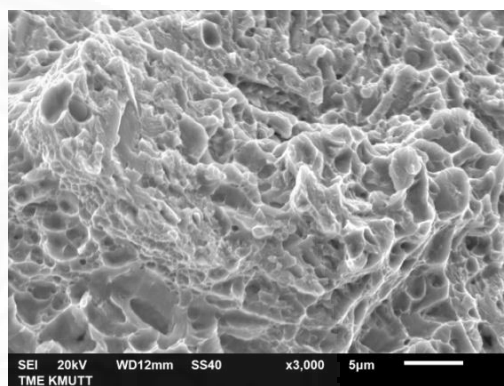
และจากภาพที่ 4.49 การวิเคราะห์รอยแตกหักจากการทดสอบแรงกระแทกของเหล็ก SKD 61 เชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ และจากการสังเกตเห็นพบว่าทั้ง 3 กระแส คือ กระแส 150 A , 170 A, 190 A พบลักษณะของรอยแตกแบบหลุม (Dimples) แสดงให้เห็นถึงการแตกหักแบบเหนียว เนื่องจากการที่มีการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวของการเชื่อมแบบพัลส์ มีผลทำให้เกิดประสิทธิภาพในการเติมเนื้อโลหะได้มากทำให้เกิดการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ของลวดเชื่อมและเนื้องานที่ช่วงกระแสสูง จากภาพที่ 4.49ค กระแส 190 A ที่มีลักษณะของรอยแตกแบบหลุม (Dimples) มากกว่ากระแสอื่นๆ แสดงให้เห็นถึงการแตกหักแบบเหนียวซึ่งส่งผลให้เนื้อเหล็กเกิดความแข็งแรงขึ้นและมีความเหนียวสำหรับส่วนที่ทำการตรวจสอบ คือ รอยแตกหักบริเวณแนวเชื่อม



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.49 รอยแตกของช่วง Weld Metal ที่ผ่านกระบวนการทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy ก) กระแส 150 A ข) กระแส 170 A ค) กระแส 190 A ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการศึกษาความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 โดยกระบวนการเชื่อมแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุมที่ความหนา 10 mm สังเกตผลกระทบที่เกิดขึ้นงานเชื่อมโดยพิจารณาจากโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของวัสดุ ทั้งนี้เพื่อลดความสูญเสียและค่าใช้จ่ายต่างๆ ในการผลิต และสามารถนำไปเป็นแนวทางปฏิบัติสำหรับอุตสาหกรรม การเชื่อมเหล็กแม่พิมพ์งานร้อนโดยกำหนดตัวแปรเพื่อทำการศึกษาผลกระทบต่อการเชื่อมอาร์คโลหะ แก๊สคลุมคือ กระแส และอัตราการไหลของแก๊ส โดย

- การทดลองเบื้องต้นทำการเชื่อมด้วยการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ และการเชื่อมด้วยการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์
- และเปรียบเทียบผลความแตกต่างในแต่ละสภาวะการอบชุบโดยมีการกำหนด สภาวะการอบชุบของเหล็กเป็น 3 สภาวะ คือ
  - เหล็กที่ร้อนที่ไม่ผ่านการชุบแข็ง (NHT)
  - เหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง (HT)
  - เหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคลายความเครียด (HT/Temp.)

#### 5.1 อภิปรายผล

การทดลองศึกษาความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 ที่ ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding ; GMAW) และ ควบคุมความเร็วในการเชื่อมด้วยระบบกึ่งอัตโนมัติโดยมีลักษณะในการเชื่อม 2 รูปแบบ คือ

- ทำการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์โดยมีตัวแปรใน การเชื่อมกระแสเชื่อม 150A, 170A, 190A และ 210A อัตราการไหลของแก๊สที่ 13 L/min และ 15 L/min จากนั้นดำเนินการวิจัยโดยใช้กระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ในการศึกษา เปรียบเทียบผลกับกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์โดยมีตัวแปรในการเชื่อมกระแส เชื่อม 150A,170A, 190A และ 210A อัตราการไหลของแก๊สที่ 13 L/min (เลือกอัตราการไหลของ แก๊สที่ 13 L/min เนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สที่ 13 L/min และ 15 L/min ผลจากการทดลอง ด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์มีความแตกต่างกันน้อยมาก จึงเลือกนำมาใช้



ในกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์) เพื่อเลือกตัวแปรเบื้องต้นใช้ในการทดลองเบื้องต้น

- นำค่าที่ได้จากการทดลองเบื้องต้น มาทำการทดลองเปรียบเทียบผลความแตกต่างในแต่ละสภาวะการอบชุบ โดยมีการกำหนดสภาวะการอบชุบของเหล็กเป็น 3 สภาวะ คือ NHT, HT และ HT/Temp.

### 5.1.1 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม

การเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์พบโครงสร้างจุลภาคที่เป็นออสเทนไนท์ตกค้างและมาร์เทนไซต์ (Retained Austenite and Martensite) เกิดจากการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วของโลหะหลอมเหลวจากอุณหภูมิสูงสู่อุณหภูมิต่ำของการเชื่อมจากออสเทนไนท์ (Austenite) ไปเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) มีลักษณะเฟสขนาดใหญ่ซึ่งข้อสังเกตเหล่านี้สอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคที่สามารถพบได้ในวัสดุประเภทนี้ (Gualco A, 2008 และ Leshchinskiy L.K, 2001) แสดงให้เห็นว่ากระแสในการเชื่อมเป็นตัวแปรที่สำคัญในการเชื่อมและสมบัติของชิ้นงานหลังจากการเชื่อม การที่ใช้กระแสสูงจะส่งผลให้โลหะมีความแข็งและเปราะเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะจากความร้อน ผลจากอัตราการไหลของแก๊สที่ 13 L/min และ 15 L/min มีความแตกต่างกันน้อยมากจากการสังเกตจากทุกกระแสและอัตราการไหลของแก๊สส่วนการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์จะให้ความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคระหว่างเนื้อเชื่อมและบริเวณกระแทกร้อนที่ชัดเจนกว่าการเชื่อมด้วยการถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์ โดยพบโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) ลักษณะกลมมนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนท์ (Austenite) ไปเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่มีลักษณะเฟสขนาดใหญ่ และคาร์ไบด์ลักษณะกลมผสมอยู่โดยรอบ (Gualco A และคณะ, 2010) โดยมีก้อนอนุภาคสารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวจากช่วงอุณหภูมิสูงจากการเชื่อมแทรกฝังตัวอยู่ใน Matrix ที่เป็น Tempered Martensite

และในการเปรียบเทียบผลในแต่ละสภาวะการอบชุบซึ่งโดยกำหนดสภาวะการอบชุบของเหล็กเป็น 3 สภาวะ คือ NHT, HT และ HT/Temp. ในเหล็ก NHT และ HT พบโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย Matrix ที่มีสีเข้มเป็น tempered martensite มีลักษณะหยาบคล้ายเข็มกระจายอยู่ทั่ว อนุภาคสารประกอบคาร์ไบด์ของธาตุผสมแทรกฝังกระจายทั่วทั้งโครงสร้าง (Gualco A และคณะ, 2010) ส่วนเหล็ก HT/Temp. มีการอบคลายความเครียดให้กับเนื้อเหล็กซึ่งจะส่งผลให้เกิดการให้ความร้อนซ้ำส่งผลให้โครงสร้างที่ใหญ่และจับตัวกันเป็นก้อนปรับสภาพกระจายตัวมีความ

ละเอียดมากขึ้นทำให้เกิดความเหนียวและเกิดการกระจายตัวของโครงสร้างจุลภาคที่มีลักษณะละเอียดมากขึ้น

### 5.1.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction

การเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ , กระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ และ เปรียบเทียบผลความแตกต่างในแต่ละสภาวะการอบชุบพบว่าในทุกสภาวะของการเชื่อมมีปริมาณความหนาแน่นของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่มากกว่าโครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenite) ในบริเวณแนวเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากร้อน (HAZ) เกิดปรากฏการณ์กลไกการกระจายการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนสะสมเกิดโครงสร้างจากออสเทนไนท์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ ส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้นโดยมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแข็งภายหลังการเชื่อม

### 5.1.3 การวิเคราะห์ค่าความแข็งหลังการเชื่อม

ในการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ พบว่ากระแสไฟมีผลต่อค่าความแข็งของวัสดุเมื่อกระแสสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากปรากฏการณ์กลไกการเปลี่ยนแปลงจากปริมาณความร้อนสะสมเกิดโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนท์ (Austenite) ไปเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราการไหลของแก๊สไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์จะมีประสิทธิภาพในการเติมเนื้อโลหะได้มากที่ช่วงกระแสสูง ทำให้เกิดการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์เกิดโครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenite) และโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) ลักษณะกลมมนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนท์ (Austenite) ไปเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่มีลักษณะขนาดใหญ่จากการตกตะกอนที่กระแสสูง ส่งผลให้เกิดความแข็งที่กระแสสูงมากกว่าที่กระแสต่ำ

ส่วนการศึกษาเปรียบเทียบผลความแตกต่างในแต่ละสภาวะการอบชุบพบว่าสภาวะของเหล็ก HT/Temp. เหมาะสมกับการเลือกใช้กระบวนการเชื่อม GMAW มากที่สุดเนื่องจากลักษณะของโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะของเม็ดเกรนมีลักษณะกลมใหญ่และมีการกระจายตัวของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) มากจึงส่งผลให้สมบัติทางกลด้านความแข็งมากขึ้นเป็นผลมาจากภายหลังการชุบแข็งเหล็กทำการอบคลายความเครียด ส่งผลให้เกิดการให้ความร้อนซ้ำส่งผลให้โครงสร้างที่ใหญ่และจับตัวกันเป็นก้อนปรับสภาพกระจายตัวมีความละเอียดมากขึ้นทำให้เกิดความเหนียวเพิ่มขึ้น

### 5.1.4 การวิเคราะห์ค่าแรงดึงหลังจากการเชื่อม

กระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ ค่าความแข็งแรงลดลงภายหลังจากการเชื่อม พบว่าเกิดการขาดที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) จะเกิดโครงสร้างของโลหะที่มีการเปลี่ยนแปลงของเกรนใหญ่และหยาบจึงทำให้สามารถรับแรงในการยึดตัวได้มากกว่าบริเวณแนวเชื่อมและบริเวณเนื้องาน โดยมีลักษณะของเกรนขนาดใหญ่และการกระจายตัวมากเมื่อกระแสในการเชื่อมสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความเหนียวลดลง แสดงให้เห็นว่าผลของกระแสในการเชื่อมมีผลต่อความร้อนที่ให้แก่ชิ้นงานทำให้เกิดโครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (Tempered Martensite) ส่วนอัตราการไหลของแก๊ส 13, 15L/min ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคน้อยมากเมื่อเทียบกับกับทุกกระแสการเชื่อมและอัตราการไหลของแก๊ส ส่วนกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ พบว่ามีลักษณะโครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenite) และมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่มีขนาดใหญ่จับตัวกันในแต่ละกระแส และจากการการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการเติมเนื้อโลหะได้มากกว่าที่กระแสสูง ส่งผลให้เกิดการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ส่งผลให้ผลการทดสอบแรงดึงออกมาใกล้เคียงกัน

การเปรียบเทียบผลในแต่ละสภาวะการอบชุบโดยกำหนดสภาวะการอบชุบของเหล็กเป็น 3 สภาวะ คือ NHT, HT และ HT/Temp. พบโครงสร้างจุลภาคในช่วงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) มีลักษณะของเกรนโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) กระจายตัวของโครงสร้างมาก ส่งผลให้สมบัติทางกลด้านความต้านทานแรงดึงไม่ว่าจะผ่านกระบวนการอบชุบทางความร้อนหรือไม่ก็ตามล้วนให้ผลออกมาใกล้เคียงกันทั้ง 3 สภาวะ โดยภายหลังจากการเชื่อมควรให้ความร้อนภายหลังจากการเชื่อม (Post weld) ซึ่งส่งผลเหมือนกับเกิดการอบคลายความเครียด (Tempering) ทำให้โครงสร้างจุลภาคออสเทนไนท์ (Austenite) และออสเทนไนท์ตกค้าง (Retained Austenite) มีเวลาในการฟอร์มตัวไปเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่มีความละเอียดมากยิ่งขึ้นส่งผลให้เกิดความเหนียว

### 5.1.5 การวิเคราะห์การทดสอบแรงกระแทก

กระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ พบว่ามีลักษณะโครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenite) และมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่มีขนาดใหญ่จับตัวกันในแต่ละกระแสการเชื่อม ส่งผลให้รับความต้านทานแรงกระแทกหลังเชื่อมได้ตามลำดับจาก 150A ไปจนถึง 210A ส่วนการเชื่อมด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์พบว่ามีลักษณะโครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenite) และมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่มีขนาดใหญ่จับตัวกันในแต่ละกระแสและจาก

การที่มีการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการเติมเนื้อโลหะได้มากช่วง กระแสสูง ทำให้เกิดการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์สามารถต้านทานแรงกระแทกหลังเชื่อมได้ดีตามลำดับ

ในสภาวะการอบชุบของเหล็กทั้ง 3 สภาวะพบว่าเหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคลายความเครียดให้ค่าแรงกระแทกสูงสุด และเหล็กที่ไม่ผ่านกระบวนการอบชุบจะให้ค่าแรงกระแทกต่ำสุด จากโครงสร้างจุลภาคพบได้ว่ามีโครงสร้างมาร์เทนไซต์, ออสเทนไนต์ และ คาร์ไบด์ ลักษณะเกือบกลมผสมกระจายตัวอยู่โดยรอบจากลักษณะดังกล่าว พบว่าเหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคลายความเครียดเหมาะกับการใช้ในกระบวนการเชื่อม GMAW มากที่สุด เนื่องจากมีค่าความแข็งแรงในการรับแรงกระแทกสูงสุด

#### 5.1.6 ตรวจสอบรอยแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM)

ทั้งกระบวนการเชื่อมด้วยการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์และด้วยการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ บริเวณรอยแตกจะมีลักษณะของรอยแตกแบบหลุม (Dimples) แสดงให้เห็นถึงลักษณะการแตกหักแบบเหนียว เนื่องจากภายหลังจากการเชื่อมจะต้องให้ความร้อนหลังจากการเชื่อม (Post weld) ซึ่งส่งผลเหมือนกับเกิดการอบคลายความเครียด (Tempering) ทำให้โครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ (Austenite) และออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained Austenite) มีเวลาในการฟอร์มตัวไปเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่มีความละเอียดและกระจายตัวมากยิ่งขึ้น จากเดิมที่มีการจับตัวเป็นลักษณะก้อนขนาดใหญ่ ส่งผลให้เกิดความเหนียวบริเวณแนวเชื่อมซึ่งส่งผลให้รับแรงกระทำได้ดี ไม่เกิดภาวะแข็งและเปราะภายหลังจากการเชื่อม

## 5.2 สรุปผล

จากการการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมและใช้การถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์พบว่าค่ากระแสที่ดีที่สุดในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD61 ด้วยการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์คือ กระแสเชื่อมที่ 150A ใช้อัตราการไหลของแก๊ส 13 L/min (เลือกอัตราการไหลของแก๊สที่ 13 L/min เนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สที่ 13 L/min และ 15 L/min จากผลการทดลองด้วยกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์ทั้งโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลมีความแตกต่างกันน้อยมาก จึงเลือกนำมาใช้ทั้งในกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์และกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ ทั้งนี้เพื่อความประหยัดและเหมาะสม) ส่วนกระบวนการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์ พบว่าค่ากระแสที่ดีที่สุดที่มีผลต่อความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD61ด้วยการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลว

แบบพัลส์คือ กระแส/อัตราการไหลของแก๊สที่ 190A/13L/min มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานมากที่สุด เนื่องจากประสิทธิภาพในการเติมเนื้อโลหะได้มากทำให้เกิดการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ในช่วงกระแสสูง

และจากการเปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติทางกลได้แก่ การทดสอบความแข็งและการทดสอบแรงกระแทกพบว่า การเชื่อมด้วยถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์มีค่าความแข็งแรงสูงกว่าการเชื่อมด้วยการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบพัลส์เป็นผลมาจากลักษณะของการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบสเปรย์มีการหลอมละลายได้สมบูรณ์มากกว่าการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์

ส่วนการทดลองหาค่าความเหมาะสมในการเชื่อมในแต่ละสภาวะของเหล็กในการอบชุบ คือ NHT, HT และ HT/Temp. พบว่าภายหลังจากการเชื่อมควรให้ความร้อนหลังจากการเชื่อม (Post weld) ซึ่งส่งผลเหมือนกับเกิดการอบคลายความเครียด (Tempering) ทำให้โครงสร้างจุลภาค ออสเทนไนต์ (Austenite) และออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained Austenite) มีเวลาในการฟอร์มตัวไปเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่มีความละเอียดมากยิ่งขึ้นส่งผลให้เกิดความเหนียวบริเวณแนวเชื่อม ส่งผลให้รับแรงกระทำได้ดีไม่เกิดภาวะแข็งและเปราะภายหลังจากการเชื่อม

- 5.2.1 กรณีที่ไม่ต้องการสมบัติทางกลมากควรใช้เหล็กที่ร้อนที่ไม่ผ่านการอบชุบแข็ง (NHT) ในการใช้งาน อาทิ เช่น งานฉีดขึ้นรูปโลหะ พลาสติก แก้ว เป็นต้น เพื่อลดกระบวนการทำงาน เวลา และค่าใช้จ่าย
- 5.2.2 เหล็กที่ผ่านกระบวนการอบชุบแข็ง (HT) เหมาะกับงานที่ต้องการค่าความแข็งแรงการรับแรงกระแทกได้ปานกลาง
- 5.2.3 เหล็กที่ผ่านกระบวนการอบชุบแข็งและอบคลายความเครียด (HT/Temp.) เหมาะกับงานที่ต้องการนำไปใช้ในการเชื่อมซ่อมแซมแม่พิมพ์ตีอัดขึ้นรูปโลหะ (Press Forging Die) แม่พิมพ์ดัด (Bending Die) เป็นต้น ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ทำการซ่อมแซมด้วย

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาด้วยการทดสอบความล้าเพื่อหาคุณสมบัติของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61 ที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมตลอดจนควรมีการวิเคราะห์ผลจากการใช้งานจริงประกอบการทดลอง

## รายการอ้างอิง

### หนังสือและบทความในหนังสือ

- เจ็ดเชลง ชิตชวนกิจ, ยงยุทธ เสริมสุธีอนุวัฒน์, อัทถกร กลั่นความดี และโตชิเอ โอกุมุระ. (2524). *วิศวกรรมการเชื่อม*. (น. 21-30). สมาคมส่งเสริมความรู้ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ. กรุงเทพฯ.
- สมบูรณ์ เต็งหงส์เจริญ. (2531). *วิศวกรรมการเชื่อม*. (น. 111-113). สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ. กรุงเทพฯ.
- อำนาจ แก้วสามัคคี. (2545). *เทคนิคการซ่อมบำรุงออกแบบแก้ไขและการตัดเชื่อมแม่พิมพ์*. (น. 109-115). สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

### สื่ออิเล็กทรอนิกส์

- บริษัท ไทย-เยอรมันสเปเชียลสตีลเซ็นเตอร์ จำกัด. เอกสารประกอบการขายเหล็กกล้ากลุ่มเครื่องมือ งานร้อน 2344. สืบค้นจาก <http://www.thyssenkruppmaterials.co.th/dmdocuments/2344.pdf>.
- Fundamental of Professional Welding*. Dave Heiserman, <http://www.free-ed.net/free-ed/Courses/05%20Building%20and%20Contruction/050205%20Welding/Welding00.asp?iNum=0806>

### Books and Book Articles

- Welding handbook fundamentals of welding*, vol. 1, 7<sup>th</sup> ed. (1981) Miami,FL: American Welding Society, p. 7–9.
- Atlas of Microstructures of Industrial Alloy*, vol. 7, 8<sup>th</sup> ed. (1972) Ohio: American Welding Society, p. 179–185.

- Smith, W.F., (1990), *Principle of Materials Science and Engineering*, 2<sup>nd</sup> ed., McGraw-Hill Companies, New York, pp. 122-125.
- Verhoven, J.D., (1975), *Fundamentals of Physical Metallurgy*, John Wiley & Sons, Canada, pp. 169-230.
- Kou, S., (2003), *Welding Metallurgy*, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley and Sons, New York, pp. 178-181.
- Klas Weman, Gunnar Linden, (2006), *Mig Welding Guide*, Woodhead Publishing and Mancy Publishing on behalf of the Institute of Materials, Minerals & Mining, pp. 187-191.
- Larry Jeffus, (1999), *Welding Principles and Application*, 4<sup>th</sup> ed., By Delmar Publishers A Division of International Thomson Publishers Inc, pp. 250-256.
- Hakan Ates, (2007), *Prediction of gas metal arc welding parameters based on artificial neural networks*, *Materials and Design* 28, pp. 2015–2023.
- K. Manikya Kanti, P. Srinivasa Rao, (2008), *Prediction of bead geometry in pulsed GMA welding using back propagation neural network*, *Journal of materials processing technology* 200, pp. 300-305.
- Wilson Tafur Preciado, Carlos Enrique Niño Bohorquez, (2006), *Repair welding of polymer injection molds manufactured in AISI P20 and VP50IM steels*, *Journal of Materials Processing Technology* 179, pp. 244–250.
- Y.C. Chen, K. Nakata, (2009), *Evaluation of microstructure and mechanical properties in friction stir processed SKD61 tool steel*, *Materials Characterization* 60, pp. 1471-1475.
- M. Vedani, B. Previtali, G.M. Vimercati, A. Sanvito, G. Somaschini, (2007), *Problems in laser repair-welding a surface-treated tool steel*, *Surface & Coatings Technology* 201, pp. 4518–4525.

- L.P. Borrego, J.T.B. Pires, J.M. Costa, J.M. Ferreira, (2009), *Mould steels repaired by laser welding*, Engineering Failure Analysis 16, pp. 596-607.
- K. Nakata, Y.G. Kim, H. Fujii, T. Tsumura, T. Komazaki, (2006), *Improvement of mechanical properties of aluminum die casting alloy by multi-pass friction stir processing*, Materials Science & Engineering A437, pp. 274-280.
- H. Khalid Rafi, G.D Janaki Ram, G. Phanikumar, K. Prasad Rao, (2010), *Microstructural evolution during friction surfacing of tool steel H13*, Materials and Design 32, pp. 82-87.
- Ahmet Durgutlu, (2004), *Experimental investigation of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas on TIG welding of austenitic stainless steel*, Materials and Design 25, pp. 19-23.
- Wilson Tafur Preciado, Carlos Enrique Nino Bohorquez, (2006), *Repair welding of polymer injection molds manufactured in AISI P20 and VP50IM steels*, Materials Processing Technology 179, pp. 244-250.
- M. Vedani, (2004), *Microstructural evolution of tool steels after Nd-YAG laser repair welding*, Journal of Materials Science 39, pp. 241-249.
- A. Aloraier, (2006), *FCAW process to avoid the use of post welding heat treatment*, Journal of Pressure vessel and piping, pp. 394-398.
- Wu W, Hwu LY, Lin Dy, Lee JL, (2000), *The relationship between alloying elements and retained austenite in martensitic stainless steel welds*, Scripta Master Vol.42, pp. 1071-1076.
- Gualco A, Svoboda H, Surian E, De Vedia L, (2008), *Effect of post-weld heat treatment on wear resistance of martensitic steel hardfacing deposits*, Soldagem Inspeção, pp. 237-244.
- Gualco A, Svoboda H, Surian E, De Vedia L, (2010), *Effect of welding procedure on wear behaviour of a modified martensitic tool steel hardfacing deposit*, Materials and Design 31, pp. 4165-4173.



Leshchinskiy L.K, Samotugin S.S, (2001), *Mechanical properties of plasma-hardened 5% chromium tool steel deposited by arc welding*, Welding Journal, pp. 25-30.

NWM Bishop, Jochen Steinbeck and Frank Sherratt.(2002). *Finite Element Based Fatigue Calculations*. RLD Ltd, Farnham, UK.



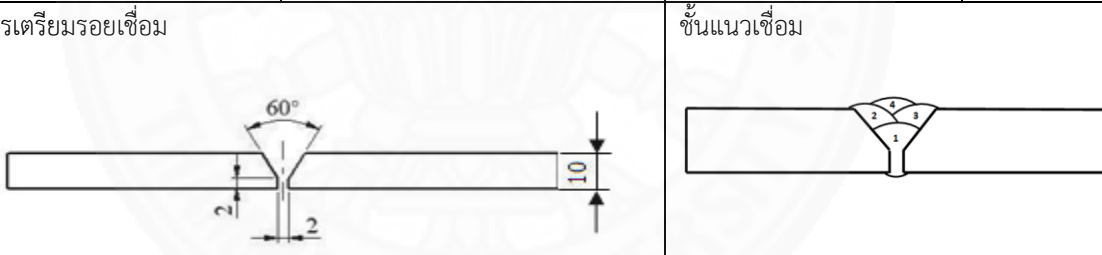


ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก**  
**(ข้อกำหนดงานเชื่อม WPS)**

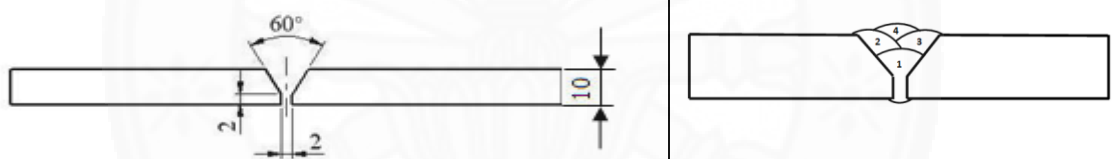
ตารางที่ 1.1

Welding Procedure Specification (WPS) 150 A, 13 L/min

บันทึกเลขที่ Record		การเตรียมรอยเชื่อม Joint preparation					
WPAR-Nr		ชนิดของรอยเชื่อม Parent work piece					
ผู้ตรวจสอบ		ความหนาของชิ้นงาน Work piece Thickness	10 mm				
สถานที่ทดสอบ Examining body	RMUTK	ตำแหน่งท่าเชื่อม Joint position	PA				
ขบวนการเชื่อม Welding Process	GMAW	ชนิดรอยต่อ Joint type	SINGLE VEE- GROOVE				
การเตรียมรอยเชื่อม							
อุณหภูมิเชื่อม	400 °C	อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	ไม่เกิน 500 °C				
Pass or Weld	Filler metal		Welding current		Travel Speed (mm/s)	Shielding gas	
	Type	Size Ø (mm)	Current(A)	Volt(V)		% mix	Volume (L/min)
1-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	150	16.5	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
2-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	155	16.6	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13

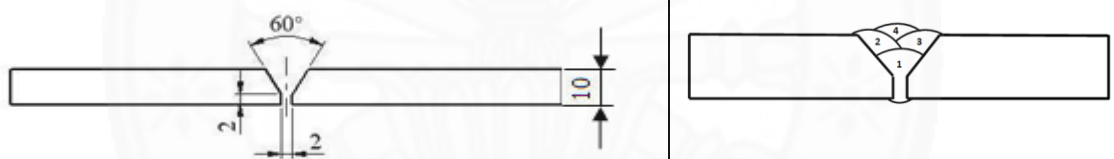
## ตารางที่ 1.2

## Welding Procedure Specification (WPS) 150 A, 15 L/min

บันทึกเลขที่ Record		การเตรียมรอยเชื่อม Joint preparation	
WPAR-Nr		ชนิดของรอยเชื่อม Parent work piece	
ผู้ตรวจสอบ		ความหนาของชิ้นงาน Work piece Thickness	10 mm
สถานที่ทดสอบ Examining body	RMUTK	ตำแหน่งทำเชื่อม Joint position	PA
ขบวนการเชื่อม Welding Process	GMAW	ชนิดรอยต่อ Joint type	SINGLE VEE- GROOVE
การเตรียมรอยเชื่อม			
อุณหภูมิก่อนเชื่อม	400 °C	อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	ไม่เกิน 500 °C
Pass or Weld	Filler metal Type Size Ø (mm)	Welding current Current(A) Volt(V)	Travel Speed (mm/s) Shielding gas % mix Volume (L/min)
1-N	DIN8555: MSG6GZ-60 1.2	150 16.5	1.5 Ar82%+CO <sub>2</sub> 18% 15
2-N	DIN8555: MSG6GZ-60 1.2	155 16.6	1.5 Ar82%+CO <sub>2</sub> 18% 15

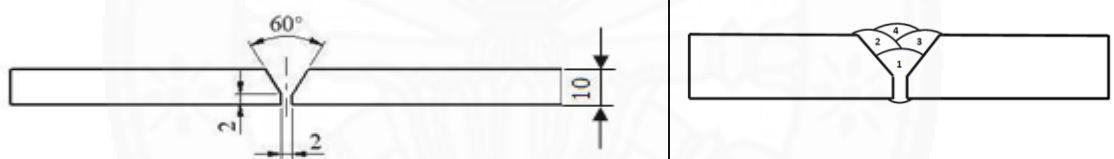
## ตารางที่ 1.3

## Welding Procedure Specification (WPS) 170A, 13 L/min

บันทึกเลขที่ Record		การเตรียมรอยเชื่อม Joint preparation					
WPAR-Nr		ชนิดของรอยเชื่อม Parent work piece					
ผู้ตรวจสอบ		ความหนาของชิ้นงาน Work piece Thickness	10 mm				
สถานที่ทดสอบ Examining body	RMUTK	ตำแหน่งทำเชื่อม Joint position	PA				
ขบวนการเชื่อม Welding Process	GMAW	ชนิดรอยต่อ Joint type	SINGLE VEE- GROOVE				
การเตรียมรอยเชื่อม	 <p>Root Opening 2 mm</p>						
อุณหภูมิก่อนเชื่อม	400 °C	อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	ไม่เกิน 500 °C				
Pass or Weld	Filler metal	Welding current		Travel Speed	Shielding gas		
	Type	Size Ø (mm)	Current(A)	Volt(V)	Speed (mm/s)	% mix	Volume (L/min)
1-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	170	18.5	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
2-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	175	18.6	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13

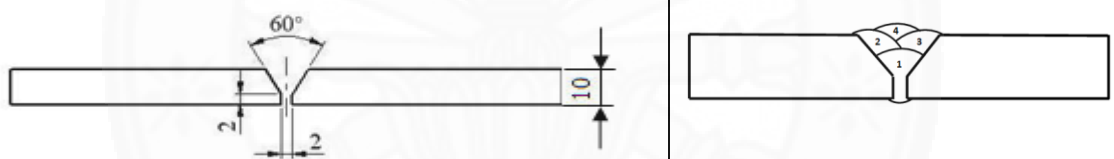
## ตารางที่ 1.4

## Welding Procedure Specification (WPS) 170 A, 15 L/min

บันทึกเลขที่ Record		การเตรียมรอยเชื่อม Joint preparation					
WPAR-Nr		ชนิดของรอยเชื่อม Parent work piece					
ผู้ตรวจสอบ		ความหนาของชิ้นงาน Work piece Thickness	10 mm				
สถานที่ทดสอบ Examining body	RMUTK	ตำแหน่งทำเชื่อม Joint position	PA				
ขบวนการเชื่อม Welding Process	GMAW	ชนิดรอยต่อ Joint type	SINGLE VEE- GROOVE				
การเตรียมรอยเชื่อม	 <p>Root Opening 2 mm</p> <p>ชั้นแนวเชื่อม</p>						
อุณหภูมิก่อนเชื่อม	400 °C	อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	ไม่เกิน 500 °C				
Pass or Weld	Filler metal	Welding current		Travel Speed	Shielding gas		
	Type	Size Ø (mm)	Current(A)	Volt(V)	Speed (mm/s)	% mix	Volume (L/min)
1-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	170	18.5	1.5	Ar82%+CO2 18%	15
2-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	175	18.6	1.5	Ar82%+CO2 18%	15

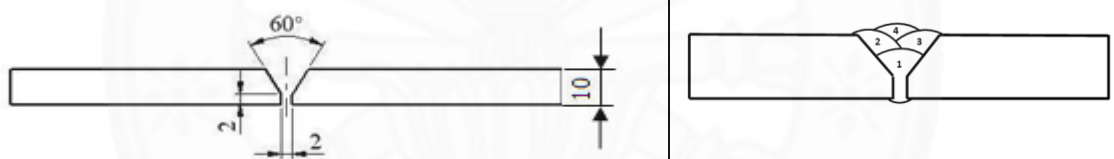
## ตารางที่ 1.5

## Welding Procedure Specification (WPS) 190 A, 13 L/min

บันทึกเลขที่ Record		การเตรียมรอยเชื่อม Joint preparation					
WPAR-Nr		ชนิดของรอยเชื่อม Parent work piece					
ผู้ตรวจสอบ		ความหนาของชิ้นงาน Work piece Thickness	10 mm				
สถานที่ทดสอบ Examining body	RMUTK	ตำแหน่งทำเชื่อม Joint position	PA				
ขบวนการเชื่อม Welding Process	GMAW	ชนิดรอยต่อ Joint type	SINGLE VEE- GROOVE				
การเตรียมรอยเชื่อม							
อุณหภูมิก่อนเชื่อม	400 °C	อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	ไม่เกิน 500 °C				
Pass or Weld	Filler metal	Welding current	Travel Speed	Shielding gas			
	Type	Size Ø (mm)	Current(A)	Volt(V)	Speed (mm/s)	% mix	Volume (L/min)
1-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	190	21.3	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
2-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	195	22	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13

## ตารางที่ 1.6

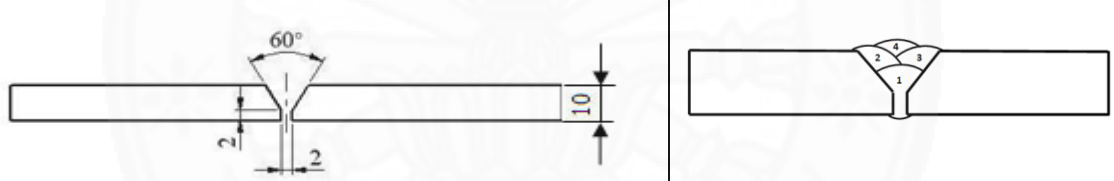
## Welding Procedure Specification (WPS) 190 A, 15 L/min

บันทึกเลขที่ Record		การเตรียมรอยเชื่อม Joint preparation					
WPAR-Nr		ชนิดของรอยเชื่อม Parent work piece					
ผู้ตรวจสอบ		ความหนาของชิ้นงาน Work piece Thickness	10 mm				
สถานที่ทดสอบ Examining body	RMUTK	ตำแหน่งทำเชื่อม Joint position	PA				
ขบวนการเชื่อม Welding Process	GMAW	ชนิดรอยต่อ Joint type	SINGLE VEE- GROOVE				
การเตรียมรอยเชื่อม							
อุณหภูมิเชื่อม	400 °C	อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	ไม่เกิน 500 °C				
Pass or Weld	Filler metal	Welding current	Travel Speed	Shielding gas			
	Type	Size Ø (mm)	Current(A)	Volt(V)	Speed (mm/s)	% mix	Volume (L/min)
1-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	190	21.3	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	15
2-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	195	22	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	15



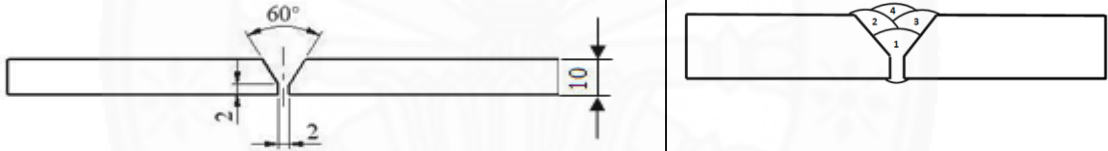
## ตารางที่ 1.7

## Welding Procedure Specification (WPS) 210 A, 13 L/min

บันทึกเลขที่ Record		การเตรียมรอยเชื่อม Joint preparation					
WPAR-Nr		ชนิดของรอยเชื่อม Parent work piece					
ผู้ตรวจสอบ		ความหนาของชิ้นงาน Work piece Thickness	10 mm				
สถานที่ทดสอบ Examining body	RMUTK	ตำแหน่งท่าเชื่อม Joint position	PA				
ขบวนการเชื่อม Welding Process	GMAW	ชนิดรอยต่อ Joint type	SINGLE VEE- GROOVE				
การเตรียมรอยเชื่อม							
อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	400 °C	อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	ไม่เกิน 500 °C				
Pass or Weld	Filler metal	Welding current	Travel Speed	Shielding gas			
	Type	Size Ø (mm)	Current(A)	Volt(V)	Speed (mm/s)	% mix	Volume (L/min)
1-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	210	25.3	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
2-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	215	26	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13

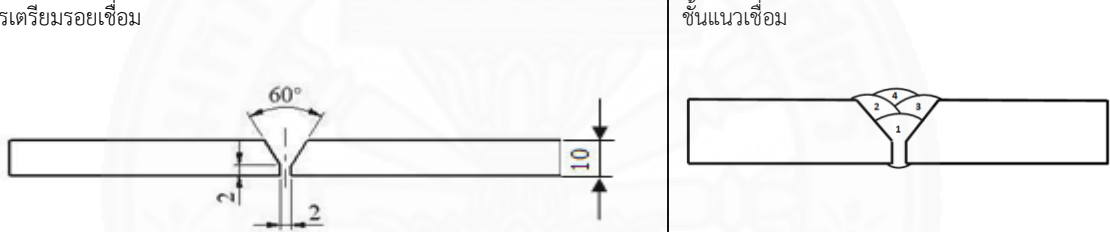
## ตารางที่ 1.8

## Welding Procedure Specification (WPS) 210 A, 15 L/min

บันทึกเลขที่ Record		การเตรียมรอยเชื่อม Joint preparation					
WPAR-Nr		ชนิดของรอยเชื่อม Parent work piece					
ผู้ตรวจสอบ		ความหนาของชิ้นงาน Work piece Thickness	10 mm				
สถานที่ทดสอบ Examining body	RMUTK	ตำแหน่งท่าเชื่อม Joint position	PA				
ขบวนการเชื่อม Welding Process	GMAW	ชนิดรอยต่อ Joint type	SINGLE VEE-GROOVE				
การเตรียมรอยเชื่อม							
อุณหภูมิก่อนเชื่อม	400 °C	อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	ไม่เกิน 500 °C				
Pass or Weld	Filler metal	Welding current	Travel Speed	Shielding gas			
	Type	Size Ø (mm)	Current(A)	Volt(V)	mm/s	% mix	Volume (L/min)
1-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	210	25.3	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	15
2-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	215	26	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	15

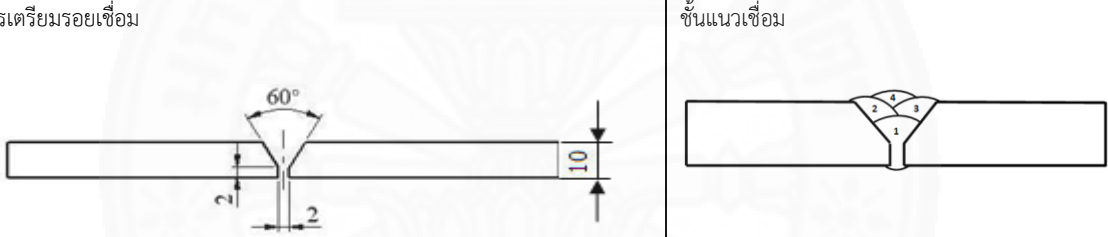
## ตารางที่ 1.9

## Welding Procedure Specification (WPS) SKD-61 สภาวะ non-Heat Treatment

บันทึกเลขที่ Record		การเตรียมรอยเชื่อม Joint preparation	
WPAR-Nr		ชนิดของรอยเชื่อม Parent work piece	
ผู้ตรวจสอบ		ความหนาของชิ้นงาน Work piece Thickness	10 mm
สถานที่ทดสอบ Examining body	RMUTK	ตำแหน่งท่าเชื่อม Joint position	PA
ขบวนการเชื่อม Welding Process	GMAW	ชนิดรอยต่อ Joint type	SINGLE VEE-GROOVE
การเตรียมรอยเชื่อม			
Root Opening 2 mm			
อุณหภูมิก่อนเชื่อม	400 °C	อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	ไม่เกิน 500 °C
Pass or Weld	Filler metal Type Size Ø (mm)	Welding current Current(A) Volt(V)	Travel Speed (mm/s) Shielding gas % mix Volume (L/min)
1-N	DIN8555: MSG6GZ-60 1.2	150 17	1.5 Ar82%+CO <sub>2</sub> 18% 13
2-N	DIN8555: MSG6GZ-60 1.2	150 17	1.5 Ar82%+CO <sub>2</sub> 18% 13
3-N	DIN8555: MSG6GZ-60 1.2	150 17	1.5 Ar82%+CO <sub>2</sub> 18% 13
4-N	DIN8555: MSG6GZ-60 1.2	150 17	1.5 Ar82%+CO <sub>2</sub> 18% 13

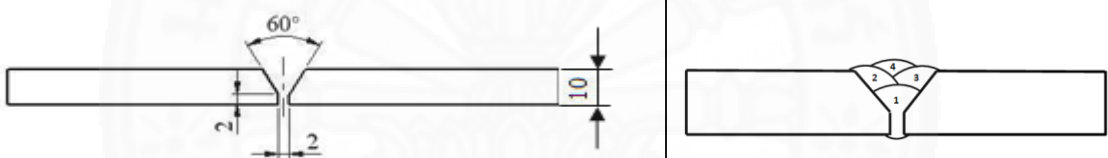
## ตารางที่ 1.10

## Welding Procedure Specification (WPS) SKD-61 สภาวะ Quenched

บันทึกเลขที่ Record		การเตรียมรอยเชื่อม Joint preparation					
WPAR-Nr		ชนิดของรอยเชื่อม Parent work piece					
ผู้ตรวจสอบ		ความหนาของชิ้นงาน Work piece Thickness	10 mm				
สถานที่ทดสอบ Examining body	RMUTK	ตำแหน่งท่าเชื่อม Joint position	PA				
ขบวนการเชื่อม Welding Process	GMAW	ชนิดรอยต่อ Joint type	SINGLE VEE- GROOVE				
การเตรียมรอยเชื่อม							
อุณหภูมิก่อนเชื่อม	400 °C	อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	ไม่เกิน 500 °C				
Pass or Weld	Filler metal	Welding current	Travel Speed (mm/s)	Shielding gas			
	Type	Size Ø (mm)	Current(A)	Volt(V)	% mix	Volume (L/min)	
1-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	150	17	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
2-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	150	17	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
3-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	150	17	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
4-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	150	17	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13

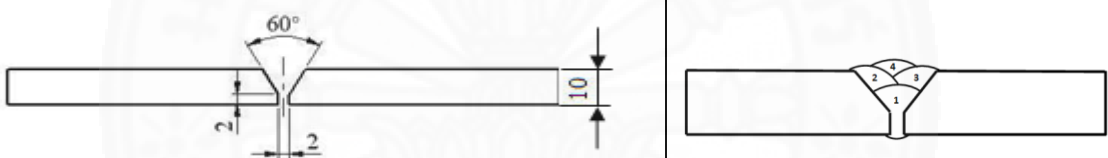
## ตารางที่ 1.11

## Welding Procedure Specification (WPS) SKD-61 สภาวะ Quenched and Tempered

บันทึกเลขที่ Record		การเตรียมรอยเชื่อม Joint preparation					
WPAR-Nr		ชนิดของรอยเชื่อม Parent work piece					
ผู้ตรวจสอบ		ความหนาของชิ้นงาน Work piece Thickness	10 mm				
สถานที่ทดสอบ Examining body	RMUTK	ตำแหน่งท่าเชื่อม Joint position	PA				
ขบวนการเชื่อม Welding Process	GMAW	ชนิดรอยต่อ Joint type	SINGLE VEE-GROOVE				
การเตรียมรอยเชื่อม							
อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	400 °C	อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	ไม่เกิน 500 °C				
Pass or Weld	Filler metal	Welding current	Travel Speed (mm/s)	Shielding gas			
	Type	Size Ø (mm)	Current(A)	Volt(V)	% mix	Volume (L/min)	
1-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	150	17	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
2-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	150	17	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
3-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	150	17	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
4-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	150	17	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13

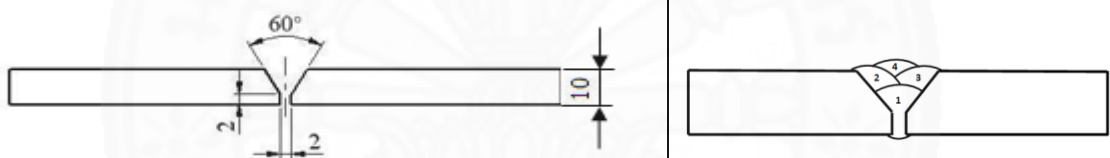
## ตารางที่ 1.12

## Welding Procedure Specification (WPS) SKD-61 (Pulse)

บันทึกเลขที่ Record		การเตรียมรอยเชื่อม Joint preparation					
WPAR-Nr		ชนิดของรอยเชื่อม Parent work piece					
ผู้ตรวจสอบ		ความหนาของชิ้นงาน Work piece Thickness	10 mm				
สถานที่ทดสอบ Examining body	RMUTK	ตำแหน่งท่าเชื่อม Joint position	PA				
ขบวนการเชื่อม Welding Process	GMAW	ชนิดรอยต่อ Joint type	SINGLE VEE- GROOVE				
การเตรียมรอยเชื่อม							
อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	400 °C	อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	ไม่เกิน 500 °C				
Pass or Weld	Filler metal	Welding current	Travel Speed (mm/s)	Shielding gas			
	Type	Size Ø (mm)	Current(A)	Volt(V)	% mix	Volume (L/min)	
1-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	150	17	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
2-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	150	17	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
3-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	150	17	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
4-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	150	17	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13

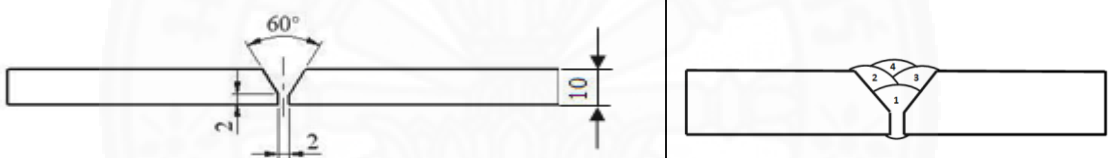
## ตารางที่ 1.13

## Welding Procedure Specification (WPS) SKD-61 (Pulse)

บันทึกเลขที่ Record		การเตรียมรอยเชื่อม Joint preparation					
WPAR-Nr		ชนิดของรอยเชื่อม Parent work piece					
ผู้ตรวจสอบ		ความหนาของชิ้นงาน Work piece Thickness	10 mm				
สถานที่ทดสอบ Examining body	RMUTK	ตำแหน่งท่าเชื่อม Joint position	PA				
ขบวนการเชื่อม Welding Process	GMAW	ชนิดรอยต่อ Joint type	SINGLE VEE- GROOVE				
การเตรียมรอยเชื่อม							
อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	400 °C	อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	ไม่เกิน 500 °C				
Pass or Weld	Filler metal	Welding current	Travel Speed (mm/s)	Shielding gas			
	Type	Size Ø (mm)	Current(A)	Volt(V)	% mix	Volume (L/min)	
1-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	170	20	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
2-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	170	20	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
3-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	170	20	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
4-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	170	20	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13

## ตารางที่ 1.14

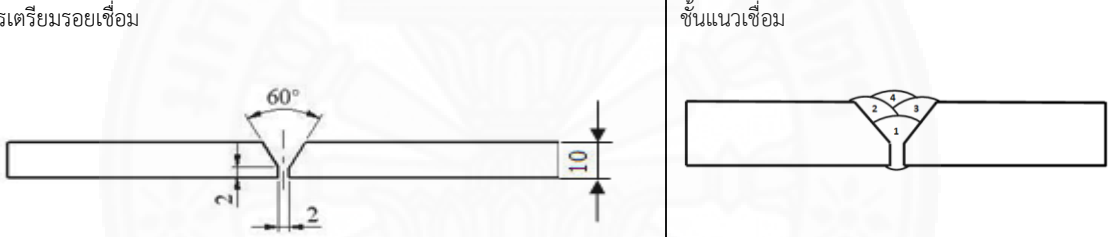
## Welding Procedure Specification (WPS) SKD-61 (Pulse)

บันทึกเลขที่ Record		การเตรียมรอยเชื่อม Joint preparation					
WPAR-Nr		ชนิดของรอยเชื่อม Parent work piece					
ผู้ตรวจสอบ		ความหนาของชิ้นงาน Work piece Thickness	10 mm				
สถานที่ทดสอบ Examining body	RMUTK	ตำแหน่งท่าเชื่อม Joint position	PA				
ขบวนการเชื่อม Welding Process	GMAW	ชนิดรอยต่อ Joint type	SINGLE VEE- GROOVE				
การเตรียมรอยเชื่อม							
อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	400 °C	อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	ไม่เกิน 500 °C				
Pass or Weld	Filler metal	Welding current	Travel Speed	Shielding gas			
	Type	Size Ø (mm)	Current(A)	Volt(V)	Speed (mm/s)	% mix	Volume (L/min)
1-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	190	22	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
2-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	190	22	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
3-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	190	22	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
4-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	190	22	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13



## ตารางที่ 1.15

## Welding Procedure Specification (WPS) SKD-61

บันทึกเลขที่ Record		การเตรียมรอยเชื่อม Joint preparation					
WPAR-Nr		ชนิดของรอยเชื่อม Parent work piece					
ผู้ตรวจสอบ		ความหนาของชิ้นงาน Work piece Thickness	10 mm				
สถานที่ทดสอบ Examining body	RMUTK	ตำแหน่งท่าเชื่อม Joint position	PA				
ขบวนการเชื่อม Welding Process	GMAW	ชนิดรอยต่อ Joint type	SINGLE VEE- GROOVE				
การเตรียมรอยเชื่อม							
อุณหภูมิก่อนเชื่อม	400 °C	อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม	ไม่เกิน 500 °C				
Pass or Weld	Filler metal	Welding current		Travel Speed	Shielding gas		
	Type	Size Ø (mm)	Current(A)	Volt(V)	(mm/s)	% mix	Volume (L/min)
1-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	210	24	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
2-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	210	24	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
3-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	210	24	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13
4-N	DIN8555: MSG6GZ-60	1.2	210	24	1.5	Ar82%+CO <sub>2</sub> 18%	13

**ภาคผนวก ข**  
**(ค่าความแข็งของวัสดุ)**

ตารางที่ 1 แสดงค่าความแข็งของวัสดุภายหลังการเชื่อมโดยวัดจากจุดศูนย์กลางของแนวเชื่อมกระแส  
เชื่อม 150A, 13 L/min

Offset (mm)	D1	D2	HV
0	97.39	97.94	388.8
1	96.83	97.94	391.0
2	97.39	98.50	386.6
3	97.94	99.06	382.2
4	97.94	97.94	387.9
5	95.16	97.39	386.3
6	97.94	100.17	363.5
7	99.06	100.73	290.6
8	138.01	133.56	201.1
9	130.22	130.78	217.7
10	121.87	123.54	246.3
11	112.97	114.08	284.9
12	109.63	109.07	310.1
13	103.51	104.08	344.3
14	101.28	99.61	367.6
15	99.61	100.17	371.6
16	99.61	99.6	373.2

ตารางที่ 2 แสดงค่าความแข็งของวัสดุภายหลังการเชื่อมโดยวัดจากจุดศูนย์กลางของแนวเชื่อมกระสวย  
เชื่อม 150A, 15 L/min

Offset (mm)	D1	D2	HV
0	98.50	96.83	388.8
1	98.50	98.50	382.2
2	97.39	97.94	388.8
3	98.50	97.39	386.6
4	98.50	98.40	381.8
5	97.39	97.39	391.0
6	98.50	100.73	373.7
7	99.61	101.84	365.5
8	102.95	104.06	341.1
9	114.08	115.20	282.2
10	138.01	133.56	201.1
11	130.22	128.55	221.5
12	120.76	120.76	254.3
13	111.30	112.41	296.4
14	105.18	104.62	337.0
15	100.73	101.28	363.5
16	100.73	101.28	363.5

ตารางที่ 3 แสดงค่าความแข็งของวัสดุภายหลังการเชื่อมโดยวัดจากจุดศูนย์กลางของแนวเชื่อมกระสวย  
เชื่อม 170A, 13 L/min

Offset (mm)	D1	D2	HV
0	95.72	96.83	400.1
1	96.83	97.94	391
2	96.27	97.39	395.5
3	95.72	95.72	404.7
4	97.39	96.83	393.2
5	94.05	95.16	414.3
6	94.6	94.05	416.8
7	96.27	96.27	400.1
8	98.5	99.61	377.9
9	100.73	101.28	363.5
10	112.41	113.53	290.6
11	136.22	135.23	201.1
12	130.22	130.78	217.7
13	121.87	123.54	246.3
14	112.97	114.08	284.9
15	109.63	109.07	310.1
16	103.51	104.06	344.3

ตารางที่ 4 แสดงค่าความแข็งของวัสดุภายหลังการเชื่อมโดยวัดจากจุดศูนย์กลางของแนวเชื่อมกระสวย  
เชื่อม 170A, 15 L/min

Offset (mm)	D1	D2	HV
0	96.83	97.84	391
1	96.27	96.27	400.1
2	96.83	96.83	395.5
3	96.83	97.94	391
4	96.83	98.5	388.8
5	96.83	97.94	391
6	94.05	93.49	393.2
7	94.05	96.27	404.7
8	97.39	99.06	384.4
9	99.06	100.73	371.6
10	102.4	101.28	357.5
11	107.96	107.96	318.2
12	140.24	140.24	188.5
13	132.45	134.67	207.9
14	126.88	128	228.3
15	121.87	122.99	247.4
16	110.19	110.19	305.4

ตารางที่ 5 แสดงค่าความแข็งของวัสดุภายหลังการเชื่อมโดยวัดจากจุดศูนย์กลางของแนวเชื่อมกระสวย  
เชื่อม 190A, 12 L/min

Offset (mm)	D1	D2	HV
0	29.84	29.95	622.4
1	29.95	30.07	617.7
2	31.52	32.08	550.1
3	30.52	30.4	599.8
4	30.51	30.74	599.6
5	29.84	30.07	619.9
6	31.3	331.52	563.8
7	33.66	33.88	487.8
8	42.63	42.74	305.3
9	49.14	49.36	229.3
10	44.09	43.87	287.6
11	45.1	44.36	278.3
12	42.18	41.51	317.7
13	42.07	43.08	306.9
14	42.52	41.73	313.5
15	43.53	42.97	297.4
16	42.62	42.74	305.3

ตารางที่ 6 แสดงค่าความแข็งของวัสดุภายหลังการเชื่อมโดยวัดจากจุดศูนย์กลางของแนวเชื่อมกระแสน้ำที่ 190A, 15 L/min

Offset (mm)	D1	D2	HV
0	29.84	29.73	627
1	29.84	29.73	627
2	29.95	29.62	627
3	29.95	29.84	622.4
4	28.83	28.83	669.3
5	30.51	30.29	601.9
6	34.67	34.53	497.3
7	40.16	38.14	362.9
8	49.59	48.35	231.9
9	50.7	49.48	221.6
10	43.53	42.97	297.4
11	43.3	44.54	288.4
12	40.72	40.84	334.5
13	42.86	43.19	300.5
14	42.07	41.96	315.1
15	42.07	43.08	306.9
16	42.86	43.19	300.5

ตารางที่ 7 แสดงค่าความแข็งของวัสดุภายหลังการเชื่อมโดยวัดจากจุดศูนย์กลางของแนวเชื่อมกระแสน้ำที่ 210A, 12 L/min

Offset (mm)	D1	D2	HV
0	30.07	30.51	606.3
1	30.51	30.4	599.8
2	30.18	30.07	613
3	29.95	30.18	615.4
4	29.06	28.72	666.5
5	30.63	30.4	597.4
6	32.87	32.42	522
7	34.1	34.67	470.5
8	40.28	39.49	349.7
9	49.14	48.8	231.9
10	38.93	38.59	370.3
11	40.16	38.14	362.9
12	39.49	38.7	363.9
13	39.38	40.39	349.7
14	38.14	40.16	362.9
15	40.72	40.84	334.5
16	40.05	40.28	344.8

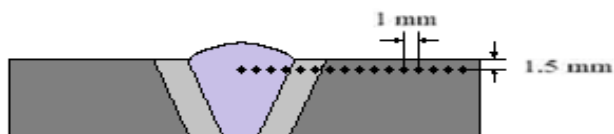


ตารางที่ 8 แสดงค่าความแข็งของวัสดุภายหลังการเชื่อมโดยวัดจากจุดศูนย์กลางของแนว เชื่อม  
กระแสเชื่อมที่ 210A, 15 L/min

Offset (mm)	D1	D2	HV
0	29.95	30.28	615.4
1	30.29	30.4	604.1
2	30.07	29.62	624.5
3	30.4	29.95	610.9
4	30.18	29.84	622.4
5	31.97	31.52	552
6	32.87	32.42	552
7	36.46	36.46	418.4
8	40.95	42.3	321
9	49.25	4.91	230.9
10	39.04	38.7	368.2
11	38.93	38.59	370.3
12	40.16	38.14	362.9
13	39.49	38.7	363.9
14	39.38	40.84	345.7
15	39.94	39.71	350.7
16	39.71	38.82	360.8

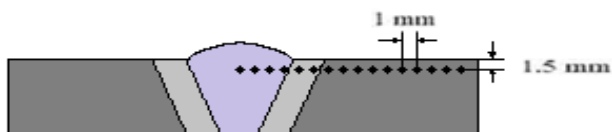
ตารางที่ 9 แสดงค่าความแข็งของวัสดุภายหลังการอบชุบเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน SKD 61

Offset (mm)	D1	D2	HV
0	101.27	100.73	363.2
1	101.84	101.84	357.5
2	100.17	100.73	367.5
3	98.5	98.61	377.9
4	99.61	99.61	373.7
5	99.61	99.61	373.7
6	100.17	100.17	369.6
7	101.28	100.73	363.5
8	97.39	99.06	384.4
9	100.17	99.06	373.7
10	98.5	99.06	380
11	100.7	99.61	371.6
12	98.5	99.7	375.5
13	97.94	99.61	380.1
14	98.5	98.5	382.2
15	98.4	98.5	383.4
16	97.39	98.6	383.5



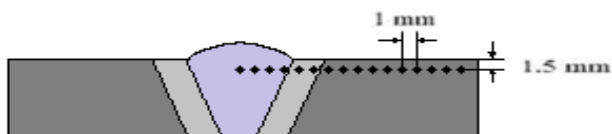
ตารางที่ ก-1 แสดงค่าความแข็งสภาวะ Non-Heat Treatment ภายหลังจากการเชื่อมโดยวัดจากศูนย์กลางแนวเชื่อม

Offset (mm)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
	D1	D2	HV	D1	D2	HV	D1	D2	HV
0	67.89	72.34	377.2	67.33	68.45	402.3	70.12	67.89	389.4
1	69.56	67.89	392.6	70.12	68.45	386.3	69.56	69	386.3
2	70.12	68.45	386.3	71.79	68.45	377.1	69	68.45	392.6
3	68.45	67.89	399	70.12	69	383.2	71.23	66.78	389.4
4	71.23	67.89	383.2	68.45	67.89	399	69.56	67.89	392.6
5	71.79	69	374.2	67.33	68.45	402.3	65.11	69	412.4
6	72.34	69.56	368.3	71.23	67.89	383.2	69.56	67.33	395.8
7	70.12	72.34	365.4	66.12	71.23	392.6	70.12	66.22	399
8	86.26	85.70	250.8	85.14	74.57	290.8	77.91	77.35	307.7
9	111.86	116.86	141.7	112.97	117.98	139	121.87	120.76	126
10	107.40	104.62	165	104.06	105.18	169.4	112.41	111.30	148.2
11	99.61	100.17	185.8	95.72	99.06	195.5	98.50	101.84	184.8
12	89.04	86.26	241.3	91.26	87.93	231	92.23	89.60	222.6
13	91.82	92.93	217.3	95.72	91.26	212.1	89.04	88.48	235.3
14	94.06	95.16	205.9	90.71	93.49	218.6	89.04	86.26	241.3
15	91.82	92.93	217.3	91.26	89.04	228.1	91.82	92.93	217.3
16	91.26	90.15	224	92.23	89.60	222.6	86.26	87.93	244.4
17	90.15	92.38	222.6	94.06	95.16	205.9	91.26	89.04	228.1
18	90.71	93.49	218.6	91.82	92.93	217.3	95.72	91.26	212.1
19	91.26	89.04	228.1	91.26	90.15	224	90.71	93.49	218.6
20	92.93	95.16	209.6	92.23	89.60	222.6	91.26	89.04	228.1



ตารางที่ ก-2 แสดงค่าความแข็งสภาวะ Quenched ภายหลังจากเชื่อมโดยวัดจากศูนย์กลางแนวเชื่อม

Offset (mm)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
	D1	D2	HV	D1	D2	HV	D1	D2	HV
0	69.56	70.12	380.1	67.33	71.23	386.3	69.56	67.89	392.6
1	70.12	69	383.2	69	68.45	392.6	67.89	72.34	377.2
2	69.56	69.56	383.2	70.12	67.89	389.4	69.56	67.33	395.8
3	70.12	68.45	386.3	72.34	66.78	383.2	67.89	71.23	383.2
4	69	68.45	392.6	69.56	67.33	395.8	72.34	67.89	377.2
5	66.78	68.45	405.6	69.56	67.89	392.6	69.56	68.45	389.4
6	67.89	69.56	392.6	69	69	389.4	71.23	69.56	374.2
7	71.79	71.23	362.6	70.12	68.45	386.3	72.34	66.78	383.2
8	81.25	83.47	273.3	69.56	69.56	383.2	82.36	83.47	269.7
9	98.50	99.61	188.9	98.50	102.48	183.7	98.50	100.73	186.8
10	95.16	97.39	200	94.60	95.16	205.9	91.82	93.49	216
11	91.26	90.159	225.3	87.93	89.60	235.3	82.92	80.69	277.1
12	79.58	79.02	294.8	82.92	79.58	280.9	81.25	83.47	273.3
13	79.02	79.02	296.9	84.59	80.69	271.5	80.69	83.47	275.2
14	81.92	81.25	275.2	81.80	82.92	273.3	81.80	79.02	286.8
15	79.58	79.02	294.8	82.36	83.47	269.7	82.36	83.47	269.7
16	81.80	80.69	280.9	78.46	82.36	286.8	81.80	80.13	282.8
17	79.02	79.02	296.9	82.36	79.58	282.8	82.92	79.58	280.9
18	78.46	82.36	286.8	84.03	80.69	273.3	79.58	80.13	290.8
19	82.36	83.47	269.7	81.92	81.25	275.2	84.59	80.69	271.5
20	81.92	81.25	275.2	79.58	79.02	294.8	81.80	82.92	273.3



ตารางที่ ก-3 แสดงค่าความแข็งสภาวะ Quenched and Tempered ภายหลังจากเชื่อมวัตจากศูนย์กลางแนวเชื่อม

Offset (mm)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
	D1	D2	HV	D1	D2	HV	D1	D2	HV
0	71.23	67.89	383.2	72.34	71.23	359.8	68.45	70.12	386.3
1	71.79	69	374.2	68.45	70.67	383.2	69.56	70.67	377.2
2	72.34	69.56	368.3	66.78	72.90	380.1	67.89	69.56	392.6
3	70.12	72.34	365.4	69	70.67	380.2	70.67	66.22	395.8
4	69.56	67.89	392.6	69.56	70.67	377.2	71.23	69.00	377.2
5	67.89	72.34	377.2	67.89	69.56	392.6	69.00	69.00	384.4
6	69.56	67.33	395.8	70.67	66.22	395.8	71.79	69.56	371.2
7	67.89	71.23	383.2	66.22	71.79	389.4	72.34	70.12	365.4
8	72.34	66.78	383.2	70.67	69.56	377.2	74.01	71.79	348.9
9	95.72	92.93	208.4	82.92	77.35	288.7	85.70	84.03	257.4
10	104.62	110.69	160.7	100.17	104.06	177.8	98.50	102.48	183.7
11	98.50	96.83	194.4	94.05	96.83	203.5	92.38	93.49	214.7
12	92.38	90.15	222.6	85.14	86.26	252.4	82.92	83.47	267.9
13	82.36	85.14	264.3	81.80	81.80	277.1	84.59	84.59	259.1
14	84.03	84.59	260.8	82.36	84.03	267.9	83.47	84.03	264.3
15	81.80	84.03	269.7	84.03	84.03	262.6	82.36	81.25	277.1
16	86.26	84.59	254.1	80.69	83.47	275.2	81.80	82.36	275.2
17	82.36	82.36	273.3	84.59	84.03	260.8	81.80	80.69	280.9
18	84.59	83.47	262.6	85.70	84.03	257.4	84.03	82.92	266.1
19	85.14	84.59	257.4	82.36	85.14	264.3	83.47	82.36	269.7
20	84.59	85.70	255.7	82.36	83.47	269.7	84.59	84.03	260.8

## ภาคผนวก ค

## มาตรฐาน The International Centre for Diffraction Data (ICDD)

Pattern : 00-044-1290		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated		
C <sub>0.055</sub> Fe <sub>1.945</sub>		<b>2<math>\theta</math></b>	<b>i</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>
Carbon Iron		44.183	100	1	0	1
<b>Also called:</b> martensite		44.803	49	1	1	0
		63.285	7	0	0	2
		65.222	12	2	0	0
		80.842	11	1	1	2
		82.164	20	2	1	1
		97.545	6	2	0	2
		99.307	3	2	2	0
		112.543	5	1	0	3
		116.390	5	3	0	1
		116.861	7	3	1	0
		135.389	4	2	2	2
		164.609	10	2	1	3
<b>Lattice :</b> Body-centered tetragonal		<b>Mol. weight =</b> 109.50				
<b>S.G. :</b> I4/mmm (139)		<b>Volume [CD] =</b> 24.01				
<b>a =</b> 2.85900		<b>Dx =</b> 7.574				
<b>c =</b> 2.93700		<b>Z =</b> 1				
		<b>I/cor =</b> 7.47				
<b>General comments:</b> Unit cell reference also gives variation of lattice parameter of austenite as a function of carbon content.						
<b>Data collection flag:</b> Ambient.						
Calvert, L., Lakes Entrance, Victoria, Australia., Private Communication (1993)						
<b>Radiation :</b> CuK $\alpha$ 1		<b>Filter :</b> Not specified				
<b>Lambda :</b> 1.54060		<b>d-sp :</b> Calculated spacings				
<b>SS/FOM :</b> F13=107(0.0094,13)						

Pattern : 00-023-0298		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
(Fe,C)		<b>2th</b>	<b>i</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>
Iron		43.473	100	1	1	1
<i>Also called:</i> Austenite		50.674	80	2	0	0
		74.679	50	2	2	0
		90.676	80	3	1	1
		95.944	50	2	2	2
		117.716	30	4	0	0
<b>Lattice</b> : Face-centered cubic		<b>Mol. weight</b> = 53.66				
<b>S.G.</b> : Fm-3m (225)		<b>Volume [CD]</b> = 46.66				
<b>a</b> = 3.60000		<b>Dx</b> = 7.639				
Z = 4						
Deleted and rejected by: Deleted by 31-619. Data collection flag: Ambient.						
Goldschmidt., Metallurgia, volume 40, page 103 (1949)						
<b>Radiation</b> : Co		<b>Filter</b> : Not specified				
<b>Lambda</b> : 1.78897		<b>d-sp</b> : Not given				
<b>SS/FOM</b> : F6= 6(0.1810,6)						

**ประวัติผู้เขียน**

ชื่อ	นาย ธีรยุทธ กาญจนแสงทอง
วันเดือนปีเกิด	1 พฤษภาคม 2517
ตำแหน่ง	อาจารย์
ทุนการศึกษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ประสบการณ์ทำงาน	2540 – ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ