



รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าของการเชื่อมอาร์คต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็ง  
ของเหล็ก SS400

Influence of Electric Current on Microstructure and Hardness  
of SS400

นายณัฐพล โรจน์จินตางาม  
นายธนัทเสฏฐ์ วงศ์นิชทวี

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559



รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าของการเชื่อมอาร์คต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็ง  
ของเหล็ก SS400

Influence of Electric Current on Microstructure and Hardness  
of SS400

นายณัฐพล โรจน์จินตางาม

นายธนัทเสถียร วงศ์วนิชทวี

ร.พ.  
ร.น. 342 ค

2009

148523

30 ต.ค. 2560



สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการสหกิจศึกษา อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าของการเชื่อมอาร์คต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็ง  
ของเหล็ก SS400

ชื่อ-สกุล นักศึกษา นายณัฐพล โรจน์จินตางาม

นายธนัทเสฏฐ์ วงศ์วนิชทวี

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ ดร.จิตรภรณ์ วงศางาม

ชื่อ-สกุล ผู้นิเทศงาน นายสิทธิพงษ์ อินจง

ชื่อสถานประกอบการ บริษัท ทีม คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริง แอนด์ แมเนจเม้นท์ จำกัด

บทคัดย่อ

โครงสร้างหลังคาสถานีเป็นส่วนรับน้ำหนักของหลังคา ในบางครั้งพบว่าเสาสถานีรถไฟมีความยาวที่ไม่สามารถขนส่งมาเป็นชิ้นเดียวได้ จำเป็นต้องแยกตัดแยกออกเป็น 2 ส่วน จากนั้นนำมาประกอบโดยการเชื่อมหน้างานก่อสร้าง โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าของการเชื่อมอาร์คต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของรอยเชื่อมของโครงสร้างหลังคา ในการทดสอบใช้เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เกรด SS400 ทำการเชื่อมต่อชนบากรูปตัววีด้านเดียว  $60^\circ$  ทำการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ E 7016 ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 80, 100 และ 120 A ผลการทดสอบชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมไฟฟ้าด้วยกระแส การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าบริเวณกระแทกร้อน และบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 120 A และ 100 A มีโครงสร้างทางจุลภาคที่เหมือนกัน คือ เฟอร์ไรต์กับเพิร์ลไลต์ แต่ที่กระแสไฟฟ้า 100 A มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์กับเพิร์ลไลต์ที่ละเอียดกว่า ขณะที่โครงสร้างเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 80 A พบว่ามีโครงสร้างเป็นเบนไนต์ การทดสอบความแข็งพบว่า การเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 80 A จะให้ความแข็งมากกว่า 100 A ส่วนกระแสไฟฟ้า 100 A ให้ความแข็งแรงมากกว่ากระแส 120 A ทั้งบริเวณกระแทกร้อนและบริเวณรอยเชื่อมตามลำดับ

คำสำคัญ : การเชื่อมอาร์ค / การทดสอบความแข็ง / การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค / SS400 / กระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Co-operation Title:** Influence of Electric Current on Microstructure and Hardness of SS400

**Student Intern Name:** Mr.Natapol Rojjindangam

Mr.Thanutsat Wongvanittavee

**Faculty:** Engineering

**Department:** Mechanical Engineering

**Advisor Name:** Dr.Jittraporn Wongsan-Ngam

**Mentor Name:** Mr.Sitthipong Injong

**Company:** TEAM Consulting Engineering and Management Co.,Ltd.

### Abstract

The structural column is part of load the roof. Sometimes the train station's lengthy column cannot be transported in one part. It is needed to split into two parts and then assembled by welding in the front construction. This research objects to study the influence of electrical current on microstructure and mechanical properties of the weld column. In the test, using the medium carbon steel (Grade SS400) is welded with one-sided V groove 60° butt joint, with Shielded Metal Arc Welding (SMAW), with flux electrode E7016 welding current 80, 100 and 120 A. From the result, specimen is welded by arc welding. It is found by microstructural examination that heat affect zone and welding metal of the workpiece welded with current 120 A and 100 A have the same ferrite and perlite. But the current 100 A has ferrite and perlite than finely. While the structure welded the current 80 A is found bainite. And hardness test is found that welding current 80 A give a strength than welding current 120 A and then welding current 80 A give a strength than welding current 120 A respectively.

**Keyword :** Arc Welding / Hardness Test / Microstructural Examination / SS400 / Current.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยความอนุเคราะห์เป็นอย่างดีจากบุคคลหลายฝ่ายที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ คำชี้แนะ และคอยให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับการดำเนินงานต่างๆ ซึ่งผู้จัดทำขอขอบคุณ ดร.จิตราภรณ์ วงศางาม อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่คอยให้คำแนะนำเป็นอย่างดีที่ทำให้โครงการสหกิจสำเร็จลุล่วงได้ดี

ขอขอบคุณบริษัท บริษัท ทีม คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริง แอนด์ แมเนจเมนท์ จำกัด ที่ให้ความกรุณาสนับสนุน คำแนะนำ และคำชี้แนะ ที่ให้ประสบการณ์ในการทำงาน และการทำวิจัยปริญญาานิพนธ์

ขอขอบคุณพี่ศุกร ที่คอยเป็นที่ปรึกษาปัญหาต่างๆ และ ช่วยเหลือข้อมูลและชิ้นงาน ในการทำปริญญาานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน	1
1.4 กระบวนการดำเนินงานวิจัย	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ	2
1.7 งบประมาณในการดำเนินโครงการ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ประเภทของเหล็ก	5
2.2 การเลือกลวดเชื่อม	9
2.3 พื้นฐานของการเชื่อม	11
2.4 กระบวนการเชื่อม	17
2.5 ความแข็งของวัสดุ	25
2.6 แผนภูมิสมดุลเหล็ก-คาร์บอน	34
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 3	ขั้นตอนการดำเนินงาน	44
3.1	ขั้นตอนการเลือกวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	44
3.2	ขั้นตอนเตรียมชิ้นงานและการเชื่อม	45
3.3	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ	48
3.4	การทดสอบชิ้นงาน	53
บทที่ 4	ขั้นตอนการดำเนินงาน	57
4.1	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	57
4.2	ผลการทดสอบความแข็ง	66
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอ	73
5.1	สรุปผลการทดลอง	73
5.2	ข้อเสนอแนะ	74
เอกสารอ้างอิง		75
ภาคผนวก		77
ภาคผนวก ก	ตารางค่าการเปลี่ยนหน่วยความแข็ง	77
ภาคผนวก ข	ชนิดเหล็กคาร์บอนและลวดเชื่อม E7016	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ช่วงองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กหล่อที่ไม่มีธาตุอัลลอยด์ผสมอยู่	5
2.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ทั่วไป	9
2.3 ส่วนผสมทางเคมีตามมาตรฐานมอก.1227-2541 และเกณฑ์คลาดเคลื่อนของส่วนประกอบทางเคมีเมื่อวิเคราะห์ทางผลิตภัณฑ์	9
2.4 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ตามมาตรฐานมอก.	9
2.5 ส่วนผสมทางเคมีในเนื้อโลหะเชื่อม (%) และ คุณสมบัติทางกลของเนื้อโลหะเชื่อม	10
2.6 ค่าความหนาแน่นของพลังงานของกระบวนการเชื่อมแบบต่างๆ	15
2.7 จุดหลอมเหลวของโลหะชนิดต่างๆ	16
2.8 เทคนิคการทดสอบความแข็งต่างๆ	27
2.9a สเกลการวัดความแข็งรีอคเวลล์	27
2.9b ค่าสเกล Superficial บางส่วน	27
2.10 การเปลี่ยนค่าระหว่างรีอคเวลล์ และบริเนลล์ ตามชนิดของหัวกด	31
3.1 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม	47
3.2 ขั้นตอนการเชื่อมตามขอบเขตที่กำหนดไว้	47
4.1 ความสัมพันธ์ของขนาดเกรน	65
4.2 แสดงค่าเฉลี่ยของ Grain size No. , Grain Area ( $\mu\text{m}^2$ ) , Grain Diameter ( $\mu\text{m}$ ) และ Grains/Unit Area (No./mm <sup>2</sup> ) at 1X ของชิ้นงานทดสอบที่ 1-3	65
4.3 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 80 A, 100 A และ 120 A ที่ Line 1 และ Line 2	71
4.4 แสดงค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 80 A, 100 A และ 120 A ที่ Line 1 และ Line 2	72
ก-1 การแปลงหน่วยค่าความแข็งต่างๆ	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อขาวที่กำลังขยาย 100 เท่า	5
2.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเทาที่กำลังขยาย 100 เท่า	6
2.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว	7
2.4 แสดงลักษณะลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	10
2.5 (a) รอยต่อชน (b) รอยต่อมุม (c) รอยต่อเกย (d) รอยต่อชนรูปตัวที และ (e) รอยต่อขอบ	13
2.6 รอยเชื่อมมุมแบบต่างๆ	13
2.7 รอยเชื่อมร่องแบบต่างๆ	13
2.8 รอยเชื่อมจุด	14
2.9 (a) รอยเชื่อมจุด และ (b) รอยเชื่อมตะเข็บ	14
2.10 (a) รอยเชื่อมหน้าแปลน และ (b) รอยเชื่อมพอก	14
2.11 การเชื่อมอาร์ก	18
2.12 การเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์	20
2.13 การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม	21
2.14 การเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุม	22
2.15 แสดงรอยร้าวแบบต่างๆ	23
2.16 แสดงการหลอมเหลวที่ไม่สมบูรณ์	23
2.17 รูปร่างรอยเชื่อมในรูปแบบต่างๆ	24
2.18 การทดสอบทางกลในรูปแบบต่างๆสำหรับรอยเชื่อม	25
2.19 เปรียบเทียบค่าความแข็งสเกลต่างๆ	30
2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง (Hardness) กับความต้านแรงดึง (Tensile Strength) สำหรับเหล็กกล้า เหล็กหล่อ และทองแดง	32
2.21 แผนภูมิสมดุระหว่างเหล็ก และเหล็กคาร์ไบด์	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22 a) $\alpha$ -Ferrite (90x) b) ออสเตไนท์ (325x)	36
2.23 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสถานะของโลหะผสม	37
2.24 ลักษณะการเกิดภาวะการถ่วงกันตามเย็นตัว	38
2.25 การเกิด Grain และ Grain Boundary ในสภาวะการตกผลึก	39
2.26 จุลโครงสร้างของเหล็กคาร์บอนที่มีส่วนผสมยูเทคตอยด์ (0.77%C) ที่อุณหภูมิสูง และต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคตอยด์ปฏิกิริยายูเทคตอยด์	40
2.27 โครงสร้างเพอร์ไลต์ของเหล็กกล้ายูเทคตอยด์ประกอบไปด้วยชั้นของ $\alpha$ เพอร์ไรต์ (สีขาว) และ $Fe_3C$ (สีดำ) (500x)	40
2.28 จุลโครงสร้างของเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์ (มีปริมาณ C < 0.77%) ทำให้เย็นลงมาจาก ออสเตไนท์ จนอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคตอยด์	41
2.29 จุลโครงสร้างของเหล็กคาร์บอน C = 0.38% ประกอบไปด้วยเพอร์ไลต์ และ เพอร์ไรต์ (Pearite + Proeutectoid ferrite) (635x)	42
3.1 แสดงขนาดชิ้นงาน	45
3.2 แสดงการเตรียมรอยต่อของชิ้นงานในการเชื่อม	45
3.3 ลวดเชื่อมไฟฟ้าเหล็กแข็ง E7016	46
3.4 แสดงเครื่องเชื่อมไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม	46
3.5 แสดงการเชื่อมชิ้นงานที่สมบูรณ์	48
3.6 แสดงขนาดก่อนการตัดชิ้นงาน	49
3.7 แสดงขนาดการตัดชิ้นงานครั้งแรก	49
3.8 แสดงขนาดการตัดชิ้นงานครั้งสอง	50
3.9 แสดงขนาดชิ้นงานที่ตัดเสร็จสมบูรณ์	50
3.10 เครื่องเลื่อยสายพานตั้ง	51

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 กระดาดเบอร์ดต่างๆ _____	51
3.12 เครื่องขัดกระดาดทราย _____	52
3.13 เครื่องผิวชิ้นงาน _____	52
3.14 เครื่องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค _____	54
3.15 การวางขนาดชิ้นงานบนเครื่องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และตรวจสอบผ่านทางคอมพิวเตอร์ _____	54
3.16 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Vickers _____	55
3.17 แสดงตำแหน่งจุดกดบนผิวชิ้นงาน _____	55
3.18 ลักษณะการวางและการทดสอบชิ้นงาน _____	56
4.1 แสดงบริเวณที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 80 A _____	57
4.2 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 80 A _____	58
4.3 แสดงบริเวณที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 100 A _____	59
4.4 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 100 A _____	60
4.5 แสดงบริเวณที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 120 A _____	61
4.6 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120 A _____	62
4.7 การวัดขนาดเกรนด้วยวิธี Intercept บริเวณเนื้อโลหะที่กระแสไฟฟ้า 100 A _____	63
4.8 การวัดขนาดเกรนด้วยวิธี Intercept บริเวณรอยเชื่อมที่กระแสไฟฟ้า 100 A _____	64
4.9 การวัดขนาดเกรนด้วยวิธี Intercept บริเวณรอยเชื่อมที่กระแสไฟฟ้า 120 A _____	64
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง (HV0.1) กับ ระยะห่างจากแนวศูนย์กลางของรอยเชื่อม (mm) ของชิ้นงานทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 80 A _____	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง (HV0.1) กับ ระยะห่างจากแนวศูนย์กลางของรอยเชื่อม (mm) ของชิ้นงานทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 100 A	67
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง (HV0.1) กับ ระยะห่างจากแนวศูนย์กลางของรอยเชื่อม (mm.) ของชิ้นงานทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 120 A	68
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง (HV0.1) กับ ระยะห่างจากแนวศูนย์กลางของรอยเชื่อม (mm.) ของชิ้นงานทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 80 A, 100 A และ 120 A ที่ Line 1	69
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง (HV0.1) กับ ระยะห่างจากแนวศูนย์กลางของรอยเชื่อม (mm.) ของชิ้นงานทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 80 A, 100 A และ 120 A ที่ Line 2	70
ก-1 เปรียบเทียบค่าความแข็งต่างๆ	78

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ความแข็งแรงของโครงสร้างงานก่อสร้างมีความสำคัญ และต้องคำนึงถึงเสมอเนื่องจากเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยในการใช้งาน โครงสร้างหลังคาสถานีในส่วนของเสา (column) เป็นส่วนที่รับน้ำหนักของหลังคา ในบางครั้งพบว่าเสาสถานีรถไฟมีความยาวที่ไม่สามารถขนส่งมาเป็นชิ้นเดียวได้จำเป็นต้องตัดแยกออกเป็น 2 ชิ้น เพื่อความสะดวกในการขนส่ง จากนั้นนำมาประกอบโดยการเชื่อมที่หน้างานก่อนสร้างในกรณีนี้ความแข็งแรงของโครงสร้างขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของรอยเชื่อม ดังนั้นจึงเป็นที่มาของหัวข้อโครงการวิจัยที่จะทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่จะมีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยจากการสังเกตและเก็บข้อมูลในหน้างานพบว่า เงื่อนไขการเชื่อมเช่น กระแสไฟฟ้าตรง กระแสไฟฟ้าสลับ ความเร็วของการเชื่อม ประสบการณ์ช่างเชื่อม ตลอดจนความชื้นของลวดเชื่อมล้วนเป็นปัจจัยที่น่าจะมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม แต่สำหรับการทำโครงการวิจัยในส่วนสหกิจศึกษาซึ่งมีระยะเวลาทั้งหมด 4 เดือนผู้จัดทำเลยเลือกปัจจัยที่สำคัญเป็นลำดับแรกได้แก่ อิทธิพลของกระแสที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม โดยมีแผนการศึกษาวิจัยอย่างเป็นระบบโดยสังเขปต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมต่อโครงสร้างทางจุลภาคของรอยเชื่อมโดยวิธีการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

1.2.2 เพื่อศึกษาความแข็งแรงของรอยเชื่อมโดยกระบวนการทดสอบความแข็งแรง

### 1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

จำลองรอยเชื่อมโครงสร้างเสาหลังคาเหล็ก SS400 โดยเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมอาร์คด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ (Shield Metal Arc Welding ;SMAW) และรอยต่อเป็นแบบร่องตัววี (Single V Groove Weld) ตามที่ใช้ในหน้างาน โดยมีกระแสที่แตกต่างกัน 3 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 กระบวนการดำเนินงานวิจัย

- ศึกษาข้อมูล และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- ศึกษาอุปกรณ์และการใช้งาน
- ออกแบบชิ้นงานเพื่อจำลองรอยเชื่อม
- เตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อม
- ทำการเชื่อมชิ้นงาน
- การตรวจสอบและการทดสอบชิ้นงาน
- สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ
- ตรวจสอบและแก้ไข
- จัดทำรายงานวิจัย

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เป็นแนวทางในการประยุกต์ และการเลือกใช้ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของรอยเชื่อมและช่องว่างที่จะเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน

1.5.2 เกิดองค์ความรู้ที่จะปรับปรุงขั้นตอนและคุณภาพในงานเชื่อม

#### 1.6 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

การดำเนินงาน	สิงหาคม				กันยายน				ตุลาคม				พฤศจิกายน			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ศึกษาข้อมูล และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	■	■	■	■												
ศึกษาอุปกรณ์และการใช้งาน					■	■	■	■								
ออกแบบชิ้นงานเพื่อจำลองรอยเชื่อม						■	■	■								
เตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อม							■	■								
ทำการเชื่อมชิ้นงาน								■	■	■	■	■				
การตรวจสอบและการทดสอบชิ้นงาน									■	■	■	■				
สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ													■	■	■	■
ตรวจสอบและแก้ไข														■	■	■
จัดทำรายงานวิจัย															■	■

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.7 งบประมาณในการดำเนินโครงการ

- ค่าเหล็ก SS400	1,100 บาท
- ค่าลวดเชื่อม	800 บาท
- ค่าเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อม	300 บาท
- ค่าเชื่อมชิ้นงาน	250 บาท
- ค่าเตรียมชิ้นงานและการตรวจสอบโครงสร้างคุณภาพ	2,100 บาท
- ค่าจัดทำรายงาน	1,100 บาท
รวม	5,650 บาท



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ประเภทของเหล็ก

ซึ่งประเภทของเหล็กแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ โดยพิจารณาจากปริมาณของธาตุคาร์บอนที่อยู่ในเหล็ก โดยแบ่งออกเป็น

##### 2.1.1 เหล็กกล้า

เป็นโลหะผสมชนิดหนึ่ง โดยทั่วไปหมายความถึง "เหล็กกล้าคาร์บอน (carbon steel)" ซึ่งประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ เหล็ก (Fe) คาร์บอน (C) แมงกานีส (Mn) ซิลิคอน (Si) และธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อย ซึ่งเป็นโลหะที่ไม่ได้อยู่ตามธรรมชาติ แต่ถูกผลิตขึ้นและปรับปรุงจากโลหะดั้งเดิมเพื่อให้มีคุณสมบัติโดยรวมดีขึ้น คุณสมบัติทั่วไป คือ เป็นเหล็กที่ไร้สนสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี มีน้ำหนักเบา สามารถรับน้ำหนักได้มาก ไม่ฉีกขาดหรือแตกหักได้ ทนต่อแรงกระแทก

เหล็กกล้าคาร์บอน (carbon steel) เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมหลัก โดยอาจมีธาตุอื่นผสมอยู่บ้างแต่ไม่ได้เจาะจงจะผสมลงไป มักตีมาจากกรรมวิธีการถลุงและการผลิต สามารถแบ่งย่อยออกได้ 3 ประเภทโดยพิจารณาตามปริมาณของธาตุคาร์บอนที่ผสม คือ

เหล็กคาร์บอนต่ำ (low carbon steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 0.2% เหล็กชนิดนี้มีความแข็งแรงต่ำสามารถรีดหรือตีเป็นแผ่นได้ง่าย ตัวอย่างเหล็กเช่น เหล็กเส้น เหล็กแผ่นที่ใช้กันทั่วไป

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (medium carbon steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.2-0.5% เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กคาร์บอนต่ำ ใช้ทำชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลทั่วไป เหล็กประเภทนี้สามารถทำการอบชุบความร้อนได้

เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (high carbon steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่า 0.5% มีความแข็งแรงและความแข็งสูง สามารถทำการอบชุบความร้อนให้คุณสมบัติความแข็งเพิ่มขึ้นได้ ใช้ทำพวกเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆที่ต้องการผิวแข็งและความต้านทานการสึกหรอสูง

##### 2.1.2 เหล็กหล่อ

เป็นโลหะผสมประเภท ferrous ที่สามารถขึ้นรูปได้ตามที่ต้องการได้โดยการหล่อเพราะโครงสร้างที่มีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะจึงไม่สามารถขึ้นรูปด้วยการรีดหรือทางกลอื่นๆ มีส่วนผสมคาร์บอนอยู่ประมาณ 1.7-1.8% ไม่ว่าจะวิธีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4% และ ซิลิคอน 1-3% ซึ่งแตกต่างกับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนอยู่น้อยกว่า 1% บางครั้งก็อาจจะมีการเติมธาตุอัลลอยด์บางชนิดเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ

ตารางที่ 2.1 ช่วงองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กหล่อที่ไม่มีธาตุอัลลอยด์ผสมอยู่

(Source: C.F.Walton(ed), Iron Castings Handbook, Iron Castings Society, 1981.)

Element	Gray iron (%)	White iron (%)	Malleable iron (cast white) (%)	Ductile iron (%)
Carbon	2.5-4.0	1.8-3.6	2.00-2.60	3.0-4.0
Silicon	1.0-3.0	0.5-1.9	1.10-1.60	1.8-2.8
Manganese	0.25-1.0	0.25-0.80	0.20-1.00	0.10-1.00
Sulfur	0.02-0.25	0.06-0.20	0.04-0.18	0.03 max
Phosphorus	0.05-1.0	0.06-0.18	0.18 max	0.10 max

เหล็กหล่อแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามการกระจายตัวของคาร์บอนในโครงสร้าง ซึ่งแสดงอยู่ในตารางที่ 2.1 ได้แสดงส่วนประกอบคาร์บอนในเหล็กชนิดต่างๆบางส่วน

เหล็กหล่อขาว (White Cast iron) เป็นลักษณะที่มีคาร์บอนส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบหลอมเหลวในลักษณะคาร์บอนเมื่อเย็นจะกลายเป็นผลึกแกรไฟต์ โครงสร้างของเหล็กขาวไม่มีการเติมธาตุอัลลอยด์เพราะส่วนประกอบหลักเป็นเหล็กคาร์ไบด์ในเฟส pearlite ลักษณะทั่วไปของเหล็กขาวเมื่อเกิดการแตกหักชั้นที่ผิวจะเห็นเป็นสีขาวหรือผลึกใส และเพื่อให้คาร์บอนเกิดอยู่ในรูปของเหล็กคาร์ไบด์ในเหล็กหล่อขาวได้จำเป็นต้องควบคุมปริมาณคาร์บอนและซิลิคอนอยู่ในปริมาณที่ต่ำ คือ 2.5-3.0% C และ 0.5-1.5% และต้องมีอัตราในการแข็งตัวสูง คุณสมบัติทั่วไป คือ ทนต่อการสึกกร่อนและขัดสีได้ดี ปริมาณคาร์บอนมีผลต่อความแข็งแรงและทนต่อการสึกกร่อน



White Cast Iron

รูปที่ 2.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อขาวที่กำลังขยาย 100 เท่า

(ที่มา : <http://practicalmaintenance.net/?p=1611>, 22 ธ.ค. 2559)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เขียนเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กหล่อเทา (Gray Cast iron) เกิดจากการผสมคาร์บอนในโลหะมากเกินที่จะสามารถละลายในเฟส austenite ได้ จึงเกิดการตกตะกอนเป็นรูปแบบ graphite flakes เมื่อเหล็กแตกหักจะปรากฏเป็นเส้นสีเทา คุณสมบัติทั่วไปสามารถทำการกลึงได้ดี และทนต่อการสึกหรอ องค์ประกอบทั่วไปมีคาร์บอน 2.5-4% และซิลิกอน 1-3% เนื่องจากซิลิกอนทำให้แกรไฟต์ในเหล็กหล่ออยู่ตัว



Gray Cast Iron

รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเทาที่กำลัขยาย 100 เท่า  
(ที่มา :<http://practicalmaintenance.net/?p=1611>, 22 ธ.ค. 2559)

เหล็กหล่อเหนียว (Ductile Cast iron, Nodular, Spherulitic) มีลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็กหล่อเทา มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอน 3-4% และซิลิกอน 1.8-2.8% ส่วนปริมาณซิลเฟอร์และฟอสฟอรัสที่อยู่ในเหล็กหล่อเหนียวที่มีคุณภาพสูงจะมีปริมาณต่ำซึ่งมีน้อยกว่าเหล็กหล่อเทา ลักษณะโครงสร้างจะมีรูปร่างลักษณะกลมดังรูปที่ 2.3 ทำให้คุณสมบัติมีความเหนียวและไม่แตกหักง่าย ไหลได้ดี ทำสามารถนำไปใช้ในงานหล่อ งานกลึงได้ดี และทนต่อการสึกหรอ ลักษณะของแกรไฟต์จะมีลักษณะกลมในเหล็กหล่อเหนียวเกิดจากการแข็งตัวของเหล็ก เนื่องจากปริมาณซิลเฟอร์และออกซิเจนให้มีปริมาณลดลงโดยการเติมสารแมกนีเซียมลงไปโลหะก่อนหล่อแมกนีเซียมจะทำปฏิกิริยากับซิลเฟอร์และออกซิเจนทำให้ธาตุเหล่านี้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับแกรไฟต์กลมได้



Nodular Cast Iron

## รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว

(ที่มา : <http://practicalmaintenance.net/?p=1611>, 22 ธ.ค. 2559)

### 2.1.3 เหล็กกล้าผสม

ธาตุเจือที่เติมลงไปเหล็กกล้านั้นมีวัตถุประสงค์ต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. เพื่อเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง เพื่อให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์
2. เพื่อให้เกิดเป็นคาร์ไบด์ เช่น คาร์ไบด์ของทั้งสแตนเลสและวานาเดียม จะทนทานการสึกกร่อนได้ดีกว่ามาร์เทนไซต์
3. เพื่อให้ทนการกัดกร่อนได้ดี
4. เพื่อให้เกรนมีขนาดเล็ก เช่น วานาเดียม โมลิบดีนัม และไนโอเบียม ซึ่งจะเกิดเป็นคาร์ไบด์และ/หรือไนไตรต์ ซึ่งจะทำให้เกรนอสเตไนต์โตช้าลง ทำให้เกรนของเหล็กเล็กซึ่งจะเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งของเหล็ก
5. วัตถุประสงค์อื่นๆ เช่น เพิ่มความเหนียวแน่น ซิลิกอน และ แมงกานีส ทำให้เหล็กกล้ามีความแข็งแรงโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการอบชุบทางความร้อน

ธาตุเจือที่เติมลงไปอาจอยู่ได้ 2 ลักษณะคือ

1. สารละลายของแข็ง ธาตุที่ละลายในออสเตไนต์ หรือเฟอร์ไรต์ ได้ดีต้องมีขนาดใกล้เคียงกับเหล็ก ได้แก่ แมงกานีส โคบอลต์ โครเมียม นิกเกิล วานาเดียม โมลิบดีนัม ทั้งสแตนเลส ไทเทเนียม ซิลิกอน และอะลูมิเนียม
2. เกิดเป็นสารประกอบ ธาตุหลายชนิดที่ละลายในเหล็กได้ สามารถเกิดเป็นสารประกอบกับคาร์บอนไนโตรเจน หรือธาตุอื่นที่อยู่ในออสเตไนต์ เช่น อะลูมิเนียม หากในเนื้อเหล็กมีออกซิเจน อะลูมิเนียมจะเกิดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ แต่ถ้าไม่ออกซิเจนจะละลายในเฟอร์ไรต์ หรือโครเมียม จะละลายในออสเตไนต์ แต่ถ้าหากในเหล็กมีคาร์บอนมาก โครเมียม จะเกิดเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ แต่ไนโอเบียม จะไม่ละลายในออสเตไนต์ แต่จะเกิดเป็นคาร์ไบด์หรือไนไตรต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ธาตุต่อไปนี้มีแนวโน้มในการเกิดคาร์ไบด์ลดลง หรืออีกนัยหนึ่งคือแนวโน้มที่ธาตุเหล่านี้จะละลายในเฟอร์ไรต์เพิ่มขึ้นตามลำดับดังนี้ คือ โทเทเนียม วาเนเดียม โมลิบดีนัม ทังสแตน โครเมียม และแมงกานีส ธาตุส่วนใหญ่จะละลายได้ทั้งในออสเตไนต์ และเฟอร์ไรต์ เพียงแต่ขอบเขตการละลายจะแตกต่างกัน ธาตุเจือที่เกิดเป็นคาร์ไบด์ได้ง่าย จะละลายในออสเตไนต์ได้น้อย

ซิลิกอน นิกเกิล และอะลูมิเนียม จะไม่เกิดเป็นคาร์ไบด์ แต่จะมีผลทำให้คาร์บอนกลายเป็นแกรไฟต์  
ธาตุเจือในเหล็กคาร์บอนผสม

**นิกเกิล** มีขนาดอะตอมใกล้เคียงกับเหล็ก มีโครงสร้างผลึกเป็น fcc ดังนั้นละลายในออสเตไนต์ได้ 100% ทำให้ความสามารถในการชุบแข็งดีขึ้น และไม่เกิดคาร์ไบด์

นิกเกิลละลายในเฟอร์ไรต์ได้ปริมาณมาก แต่ก็มีขอบเขตการละลาย เพราะโครงสร้างผลึกต่างกันด้วย สาเหตุนี้ที่นิกเกิลละลายในเฟอร์ไรต์ได้มาก ทำให้เหล็กมีความแข็งแรงและความเหนียวแน่นที่อุณหภูมิห้องหรือต่ำกว่า

นอกจากนี้นิกเกิลทำให้อุณหภูมิ A1 ในเหล็กต่ำลง และทำให้ปริมาณคาร์บอน ณ จุดยูเทกติกต่ำลง และถ้าใส่มากๆ ทำให้ A1 ลดต่ำลงไปกว่าอุณหภูมิห้อง ทำให้เหล็กมีโครงสร้างเป็นออสเตไนต์ที่อุณหภูมิห้อง เหมือนกับที่เกิดขึ้นในเหล็กกล้าไร้สนิม

**โครเมียม** มีโครงสร้างผลึกเป็น bcc และมีขนาดใกล้เคียงกับเหล็ก ดังนั้นจึงละลายในเฟอร์ไรต์ได้ 100% ซึ่งเมื่อเกิดเป็นสารละลายของแข็งกับเฟอร์ไรต์จะทำให้เฟอร์ไรต์มีความแข็งสูงขึ้น สำหรับในออสเตไนต์ โครเมียมละลายได้บางส่วนแต่ก็มากพอที่จะทำให้ความสามารถในการชุบแข็งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดเป็นคาร์ไบด์ได้แต่ไม่มีนัย

**แมงกานีส** นอกจากแมงกานีสเติมในเหล็กกล้าเพื่อรวมตัวกับซัลเฟอร์แล้ว แมงกานีสละลายได้หมดในออสเตไนต์ และถ้ามีแมงกานีส 1.0% ทำให้ความสามารถในการชุบแข็งเพิ่มขึ้น ละลายในเฟอร์ไรต์ได้บ้างและเกิดคาร์ไบด์ได้บ้างเช่นกัน ถ้าเติมแมงกานีส > 10% จะทำให้เหล็กมีโครงสร้างเป็นออสเตไนต์ที่อุณหภูมิห้อง

**ซิลิกอน** ไม่เกิดเป็นคาร์ไบด์ แต่เป็นธาตุที่ช่วยให้เกิดแกรไฟต์ ละลายในเฟอร์ไรต์ได้บ้าง แต่ละลายในออสเตไนต์ได้น้อย เมื่อละลายในเฟอร์ไรต์จะทำให้ความแข็งแรงและความเหนียวแน่นสูงขึ้น

#### 2.1.4 เหล็กกล้าคาร์บอน SS400 (SS400 Carbon Steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ที่ใช้ในการทดลอง เป็นเหล็กกล้าชนิดคาร์บอนต่ำ เป็นเหล็กแผ่นรีดร้อน ใช้กับงานโครงสร้างทั่วไป มีคุณสมบัติในการเชื่อมตีในการเชื่อมต่อได้ง่ายในงานก่อสร้าง เช่น สะพาน เสา หรืออุตสาหกรรมการประกอบ

#### 2.1.4.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กคาร์บอน SS400

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ทั่วไป

%C	%Mn	%Si	%S	%P
0.15	0.25	0.05	0.045	0.04

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีตามมาตรฐานมอก.1227-2541 และเกณฑ์คลาดเคลื่อนของส่วนประกอบทางเคมีเมื่อวิเคราะห์ทางผลิตภัณฑ์

%C Max	%Mn Max	%S Max	%P Max
-	-	0.05	0.05

หน่วยเป็นร้อยละ

ส่วนประกอบ	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน
คาร์บอน	0.03
แมงกานีส	0.05
ฟอสฟอรัส	0.01
กำมะถัน	0.01

#### 2.4.1.2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400

มีความเหนียวสูง ด้านทางแรงกระแทกได้ไม่มาก ไม่ทนการกัดกร่อน สึกหรือ และรอยขีดข่วน สามารถขึ้นรูป การรีดหรือตีเป็นแผ่นได้ง่าย

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ตามมาตรฐานมอก.

คุณสมบัติทั่วไปของเหล็ก SS400			
Tensile Strength Min. (MPa)	Yield Strength Min. (MPa)	Elongation Min. (%)	Hardness Max. (HRB)
402	235	21	41.5

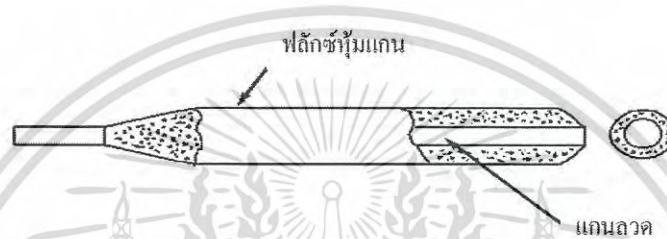
## 2.2 การเลือกหลอดเชื่อม (Selection of Electrodes)

ความแข็งแรงของรอยเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการเลือกใช้หลอดเชื่อมเหล็ก แต่หลอดเชื่อมอาจมีคุณสมบัติสำหรับการใช้งานเฉพาะที่แตกต่างกันไปตามความเหมาะสม การเลือกหลอดเชื่อมที่ถูกต้องมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณภาพและอายุการใช้งานของรอยเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 องค์ประกอบทั่วไปในการพิจารณาเลือกใช้ลวดเชื่อมอลูมิเนียม ได้แก่

- 1) เมื่อทำการเชื่อมแล้วปราศจากการแตกร้าว
- 2) ค่าความต้านทานแรงดึงและแรงดึงเฉือนของเนื้อโลหะเชื่อม
- 3) ความเหนียวของรอยเชื่อม
- 4) อุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อม
- 5) การต้านทานการกัดกร่อน



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

(ที่มา : <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/48/crystal/A06.htm>, 22 ธ.ค. 2559)

ลักษณะที่สำคัญของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ คือ ความร้อนจากการอาร์คจะหลอมละลายทั้งแกนและสารพอกหุ้มลวด ในขณะที่เดียวกันแกนลวดจะหลอมละลายเข้าไปในเนื้อชิ้นงาน ส่วนสารพอกหุ้มที่หลอมละลายจะแยกออกจากน้ำโลหะ และแข็งปกคลุมรอยเชื่อม ซึ่งก็จะหลุดออกเองหรือเคาะออกจากรอยเชื่อมภายหลังโลหะรอยเชื่อมหลอมละลายจะถูกปกป้องไม่ให้เกิดความสกปรกจากอากาศภายนอก โดยแก๊สจากสารพอกหุ้มและสแลคที่ปกคลุมรอยเชื่อม

### 2.2.2 ลวดเชื่อม E7016

ใช้เชื่อมเหล็กทนแรงดึงสูง 490 นิวตัน/มม<sup>2</sup>. เหมาะสมงานต่อเรือ งานโครงสร้าง และงานสะพาน เป็นลวดเชื่อมประเภทไฮโดรเจนต่ำ เชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม เนื้อแนวเชื่อมมีคุณสมบัติทนต่อการแตกร้าว คุณสมบัติทางกลและคุณภาพของการเอ็กซ์เรย์เป็นเยี่ยม เชื่อมในท่าเหนือหัวและท่าตั้งได้ง่ายมาก

ตารางที่ 2.5 ส่วนผสมทางเคมีในเนื้อโลหะเชื่อม (%) และ คุณสมบัติทางกลของเนื้อโลหะเชื่อม

C	Si	Mn	P	S
0.07	0.62	1.18	0.011	0.008

ความต้านแรงดึง (N/mm <sup>2</sup> )	ความเค้นคราก (N/mm <sup>2</sup> )	อัตราการยืดตัว %	ทนแรงกระแทก 2V-notch, J	
			ที่ 0°C	ที่ -20°C
550	480	32	190	170

### 2.3 พื้นฐานของการเชื่อม (Fundamentals of Welding)

การเชื่อม (Welding) หมายถึง กระบวนการเชื่อมประสานวัสดุเข้าด้วยกันโดยที่ชิ้นงานตั้งแต่สองชิ้นขึ้นไป ถูกทำให้เป็นชิ้นเดียวกันที่ผิวสัมผัสด้วยการใช้ความร้อนและ/หรือ ความดันที่เหมาะสม หลายกระบวนการเชื่อมสามารถทำได้โดยใช้ความร้อนอย่างเดียวไม่มีการใช้แรงดัน กระบวนการเชื่อมอื่นใช้ทั้งความร้อนและแรงดัน และยังมีกระบวนการเชื่อมที่ใช้แรงดันเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการรับความร้อนจากแหล่งอื่น ในบางกระบวนการเชื่อมจะมีการเติมโลหะเติมเพื่อทำการเชื่อมต่อชิ้นงานเข้าด้วยกัน ข้อดีของการเชื่อมมีหลายประการด้วยกัน เช่น ให้อายุต่อถาวรชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมกลายเป็นชิ้นเดียวกัน รอยเชื่อมอาจมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานตั้งต้นถ้าโลหะเติมมีคุณสมบัติทางกลดีกว่า การเชื่อมมีค่าใช้จ่ายน้อยเนื่องจากใช้วัสดุในการเชื่อมน้อย และการเชื่อมไม่จำเป็นต้องทำในโรงงานเท่านั้นสามารถทำหน้างานได้ ส่วนข้อด้อยของการเชื่อมมีหลายประการด้วยกัน เช่น การเชื่อมส่วนมากต้องใช้ช่างเชื่อมที่มีฝีมือซึ่งค่าแรงสูงมาก กระบวนการเชื่อมอันตรายเนื่องจากเพราะมีการใช้พลังงานสูง เนื่องจากการเชื่อมเป็นการเชื่อมต่อแบบถาวรทำให้ยากต่อการแยกชิ้นงานออกจากกัน ตรวจสอบหาความบกพร่องที่เกิดในรอยเชื่อมยาก

#### 2.3.1 ประเภทของกระบวนการเชื่อม

กระบวนการเชื่อมมีอยู่หลากหลายชนิด แต่สามารถแยกออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆได้ คือ การเชื่อมหลอม (Fusion welding) และการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid-state welding)

##### 2.3.1.1 การเชื่อมหลอม (Fusion welding)

เป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนในการหลอมละลายโลหะเติมและอาจมีการเติมโลหะเติม (Filler metal) เข้าไปด้วยเพื่อเพิ่มปริมาตรและความแข็งแรงให้กับรอยเชื่อม กระบวนการเชื่อมที่ไม่มีการเติมโลหะเติมเรียกว่า Autogenous weld ตัวอย่างกระบวนการเชื่อมหลอม เช่น

1. การเชื่อมอาร์ก (Arc welding, AW) คือกระบวนการเชื่อมที่การให้ความร้อนกับโลหะมาจากการอาร์กทางไฟฟ้า (Electric arc) บางกระบวนการมีการใช้ความดันร่วมด้วยในระหว่างการบวนการเชื่อม โดยส่วนมากจะมีการใช้โลหะเติมในการเชื่อมด้วย

2. การเชื่อมความต้านทาน (Resistance welding, RW) ใช้ความร้อนที่เกิดจากความต้านทานทางไฟฟ้าและความดันในการเชื่อมชิ้นงานเข้าด้วยกัน

3. การเชื่อมแก๊ส (Oxyfuel gas welding, OFW) เป็นการใช้แก๊สออกซิเจนผสมกับแก๊สเชื้อเพลิงทำให้เกิดเปลวไฟในการหลอมละลายโลหะเติมและโลหะเติม(Filler metal)

4. กระบวนการเชื่อมหลอมแบบอื่นๆ เช่น การเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam welding) และการเชื่อมด้วยเลเซอร์ (Laser beam welding)

### 2.3.1.2 การเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid-state welding)

เป็นกระบวนการเชื่อมวัสดุให้เป็นชิ้นเดียวกันโดยใช้ความดันเพียงอย่างเดียวหรือใช้ความร้อนและความดันรวมกัน ถ้ามีการใช้ความร้อนอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมจะต้องมีค่าต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะที่จะทำการเชื่อม โดยปกติไม่มีการใช้โลหะเติมในการเชื่อมในสภาวะของแข็ง ตัวอย่างกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็ง เช่น

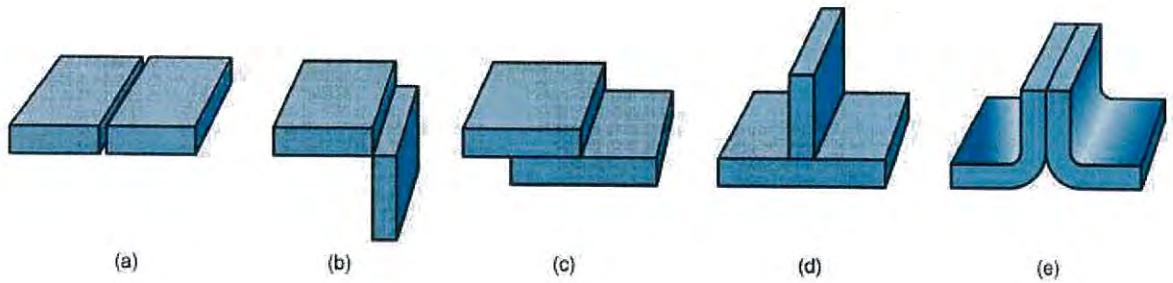
1. การเชื่อมแบบแพร่ (Diffusion welding, DFW) ผิวของชิ้นงานสองชิ้นถูกทำให้แนบสนิทกันโดยการใช้ความดันและชิ้นงานจะถูกทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ชิ้นงานเชื่อมต่อกันเนื่องจากการแพร่ในสถานะของแข็ง (Solid-state diffusion)

2. การเชื่อมเสียดทาน (Friction welding, FRW) การเชื่อมต่อกันของวัสดุเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนที่เกิดมาจากแรงเสียดทานระหว่างผิวชิ้นงานสองชิ้น

3. การเชื่อมอัลตราโซนิก (Ultrasonic welding, USW) การเชื่อมแบบนี้จะใช้ความดันที่ไม่สูงมากกดชิ้นงาน และจะทำให้เกิดการสั่นไปมาในช่วงความถี่อัลตราโซนิกในทิศทางขนานกับผิวสัมผัสของชิ้นงาน แรงกดและแรงที่เกิดจากการสั่นสะเทือนจะทำให้เกิดการเชื่อมกันในระดับอะตอมที่ผิวของชิ้นงานทั้งสอง

### 2.3.2 รอยต่อและรอยเชื่อม

ในการเชื่อมแบบต่างๆ รอยต่อ (Joints) ของการเชื่อม หมายถึง จุดรวมของขอบหรือผิวภายนอกของชิ้นงานที่ถูกเชื่อมประสานเข้าด้วยกันโดยการบวนการเชื่อมแบบใดแบบหนึ่ง ซึ่งประเภทของรอยต่อพื้นฐานมี 5 แบบ ได้แก่ รอยต่อชน (Butt joint) รอยต่อมุม (Corner joint) รอยต่อเกย (Lap joint) รอยต่อชนรูปตัวที (T-butt joint) และ รอยต่อขอบ (Edge joint) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และลักษณะของรอยเชื่อม (Welds) พื้นฐานที่เกิดขึ้นในการเชื่อมแบบต่างๆมีหลายรูปแบบเช่นเดียวกัน ได้แก่ รอยเชื่อมมุม (Fillet weld) รอยเชื่อมร่อง (Groove weld) รอยเชื่อมอุด (Plug weld) รอยเชื่อมจุด (Spot weld) รอยเชื่อมตะเข็บ (Seam weld) รอยเชื่อมหน้าแปลน (Flange weld) และ รอยเชื่อมพอก (Surfacing weld) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



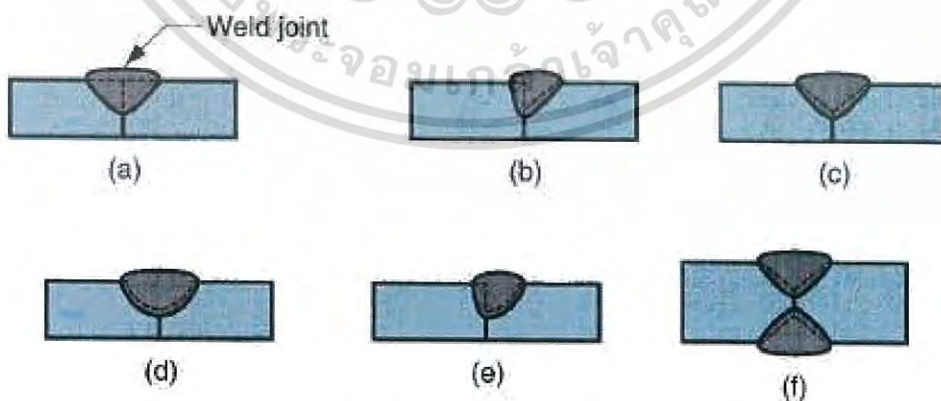
รูปที่ 2.5 (a) รอยต่อชน (b) รอยต่อมุม (c) รอยต่อเกย (d) รอยต่อชนรูปตัวที และ (e) รอยต่อขอบ

( ที่มา : Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4<sup>th</sup> edition (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010), หน้า 698 )



รูปที่ 2.6 รอยเชื่อมมุมแบบต่างๆ

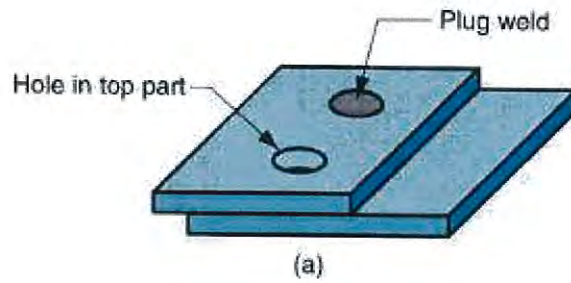
( ที่มา : Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4<sup>th</sup> edition (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010), หน้า 698 )



รูปที่ 2.7 รอยเชื่อมร่องแบบต่างๆ

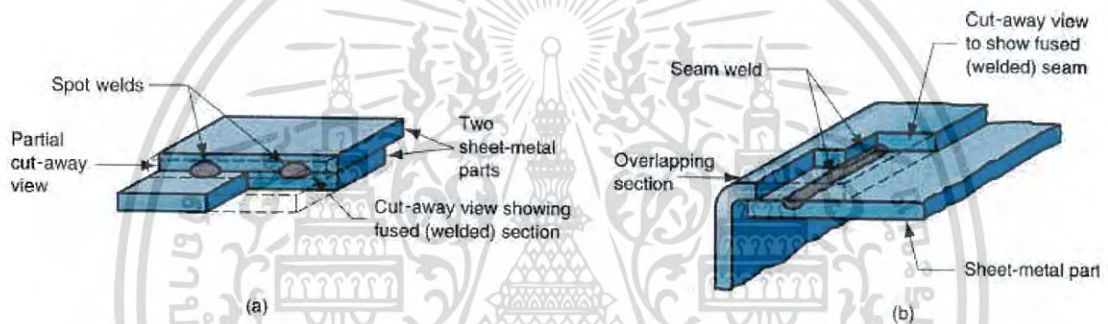
( ที่มา : Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4<sup>th</sup> edition (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010), หน้า 699 )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



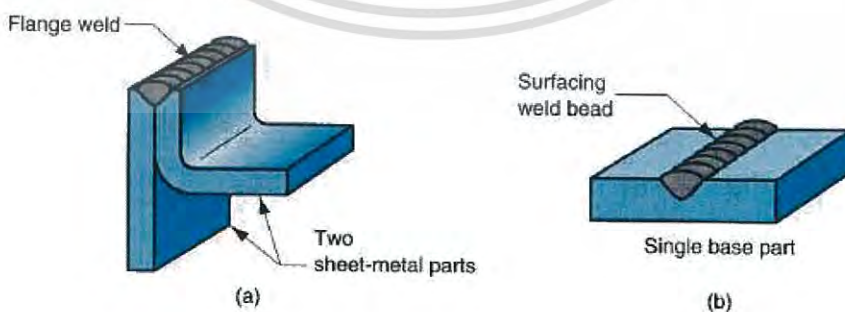
รูปที่ 2.8 รอยเชื่อมอุด

( ที่มา : Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4<sup>th</sup> edition (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010), หน้า 699 )



รูปที่ 2.9 (a) รอยเชื่อมจุด และ (b) รอยเชื่อมตะเข็บ

( ที่มา : Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4<sup>th</sup> edition (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010), หน้า 699 )



รูปที่ 2.10 (a) รอยเชื่อมหน้าแปลน และ (b) รอยเชื่อมพอก

( ที่มา : Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4<sup>th</sup> edition (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010), หน้า 700 )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้

### 2.3.3 ทฤษฎีพื้นฐานของการเชื่อม (Basics of welding)

ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะการเชื่อมประเภทการเชื่อมหลอมที่มีการใช้พลังงานความร้อนที่มีความหนาแน่นสูง (High density) ในการเชื่อมโลหะเข้าด้วยกัน เช่น การเชื่อมอาร์ก

### 2.3.4 ความหนาแน่นของพลังงาน (Power density, PD)

ความหนาแน่นของพลังงาน หรือความหนาแน่นของความร้อน (Heat density) คือ พลังงานที่ถ่ายเทลงบนชิ้นงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว การหลอมละลายของชิ้นงานและโลหะเติมจำเป็นต้องอาศัยพลังงานดังกล่าว โดยทั่วไปแล้วความหนาแน่นของพลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้เกิดการหลอมเหลวของชิ้นงานโลหะจะมีค่าประมาณ  $10 \text{ W/mm}^2$  ส่วนความหนาแน่นของพลังงานสูงสุดที่ใช้ในการเชื่อมจะมีค่าไม่เกิน  $10^5 \text{ W/mm}^2$  เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการระเหยของโลหะเกิดขึ้น ซึ่งการเชื่อมแต่ละชนิดก็จะมีค่าความหนาแน่นของพลังงานที่แตกต่างกันไป สำหรับค่าความหนาแน่นของพลังงานสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$PD = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

เมื่อ P คือ พลังงานที่มาตกกระทบพื้นผิวที่กำลังเชื่อม และ A คือ พื้นที่ที่พลังงาน P มาตกกระทบ ในความเป็นจริงแล้วการคำนวณค่าความหนาแน่นของพลังงานจะมีความซับซ้อนมากกว่าสมการนี้มากเนื่องจากสาเหตุต่างๆ เช่น การเคลื่อนที่ของแหล่งกำเนิดพลังงาน การได้รับความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม (Pre-heating และ Post-heating) และการกระจายของพลังงานที่ไม่สม่ำเสมอ ตารางที่ 2.6 แสดงค่าความหนาแน่นของพลังงานของกระบวนการเชื่อมแบบต่างๆ

ตารางที่ 2.6 ค่าความหนาแน่นของพลังงานของกระบวนการเชื่อมแบบต่างๆ

Welding Process	Approximate Power Density (W/mm <sup>2</sup> )
Oxyfuel welding	10
Arc welding	50
Resistance welding	1000
Laser beam welding	9000
Electron beam welding	10000

( ที่มา : Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4<sup>th</sup> edition (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010), หน้า 701 )

สำหรับปริมาณของความร้อนที่จำเป็นต้องใช้ในการทำให้โลหะเกิดการหลอมเหลวแบ่งออกได้สองส่วนคือ (1) ความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของโลหะจนถึงจุดหลอมเหลว และ (2) ความร้อนที่ทำให้โลหะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว ผลรวมของพลังงานสองส่วนนี้สามารถที่จะประมาณค่าได้จากสมการ

$$U_m = K T_m^2 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $U_m$  คือความร้อนที่ใช้ในการทำให้โลหะจำนวนหนึ่งหน่วยปริมาตรเกิดการหลอมเหลว  $T_m$  คือ จุดหลอมเหลวของโลหะในหน่วยของแรงคิน (Rankine) หรือเคลวิน (Kelvin) และ  $K$  คือค่าคงที่ โดยที่  $K = 1.467 \times 10^{-5}$  เมื่อ  $T_m$  อยู่ในหน่วยของแรงคิน ( $^{\circ}R = ^{\circ}F + 460$ ) และ  $K = 3.33 \times 10^{-6}$  เมื่อ  $T_m$  อยู่ในหน่วยของเคลวิน จุดหลอมเหลวของโลหะชนิดต่างๆแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 จุดหลอมเหลวของโลหะชนิดต่างๆ

Metal	Melting temperature		Metal	Melting temperature	
	K	$^{\circ}R$		K	$^{\circ}R$
Aluminum Alloys	930	1680	Steels		
Cast iron	1530	2760	Low carbon	1760	3160
Copper and alloys			Medium carbon	1700	3060
Pure	1350	2440	High carbon	1650	2960
Brass, navy	1160	2090	Low alloy	1700	3060
Bronze ( 90Cu-10 Sn)	1120	2010	Stainless steels		
Inconel	1660	3000	Austenitic	1670	3010
Magnesium	940	1700	Martensitic	1700	3060
Nickel	1720	3110	Titanium	2070	3730

( ที่มา : Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4<sup>th</sup> edition (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010), หน้า 702 )

ปัญหาที่พบจากการใช้สมการ (2.2) นี้คือ พลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่แหล่งกำเนิดความร้อน (Heat source) ไม่ได้ถูกนำไปใช้ในการทำให้โลหะเกิดการหลอมเหลว แต่จะมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น ทำให้ปริมาณของความร้อนที่ขึ้นงานโลหะได้รับมีค่าลดลง ซึ่งกระบวนการถ่ายเทความร้อนดังกล่าว ได้แก่ (1) การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนกับผิวของชิ้นงาน ซึ่งอัตราส่วนระหว่างความร้อนทั้งหมดที่ชิ้นงานได้รับต่อความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่แหล่งกำเนิดความร้อน เรียกว่า ตัวประกอบการถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer factor,  $f_1$ ) และ (2) การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการนำความร้อนจากบริเวณที่ต้องการเชื่อมไปยังบริเวณรอบๆ ซึ่งอัตราส่วนระหว่างความร้อนที่ทำให้เกิดการหลอมเหลวต่อความร้อนทั้งหมดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ชิ้นงานนั้นได้รับ เรียกว่า ตัวประกอบการหลอมเหลว (Melting factor,  $f_2$ ) ดังนั้นความร้อนสุทธิ (Net heat) สำหรับกระบวนการเชื่อมคือ

$$H_w = f_1 f_2 H \quad (2.3)$$

เมื่อ  $H$  คือ ความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่แหล่งกำเนิดความร้อน จากสมการนี้จะเห็นได้ว่าถ้าเราใช้แหล่งกำเนิดความร้อนที่มีพลังงานสูงกับการเชื่อมวัสดุที่มีการนำความร้อนต่ำก็จะทำให้ได้การเชื่อมที่มีประสิทธิภาพสูง จากสมการที่ (2) และ (3) ได้สมการสมดุลพลังงาน (Energy balance equation) สำหรับพลังงานที่ให้กับการเชื่อมและพลังงานที่ใช้ในการเชื่อมดังนี้

$$H_w = U_m V \quad (2.4)$$

เมื่อ  $V$  คือ ปริมาตรของโลหะที่ถูกหลอมละลายในการเชื่อม สำหรับกระบวนการเชื่อมส่วนใหญ่จะเป็นกระบวนการที่มีลักษณะเป็นอัตรา (Rate process) เช่น พลังงานความร้อนจะถูกให้ในอัตราหนึ่ง และรอยเชื่อมก็เกิดขึ้นในอัตราหนึ่งเช่นเดียวกัน ดังนั้นสมการที่ (4) สามารถเขียนในรูปของอัตราได้ดังนี้

$$H_{wr} = U_m V_{wr} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $H_{wr}$  คือ อัตราพลังงานความร้อนสำหรับการเชื่อม  $V_{wr}$  คือ อัตราเชิงปริมาตรของโลหะที่เกิดการเชื่อม ในกรณีของการเชื่อมแบบต่อเนื่องอัตราเชิงปริมาตรของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นเป็นผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม ( $A_w$ ) กับความเร็วในการเชื่อม ( $v$ ) ดังนั้นสมการ (2.5) สามารถเขียนได้เป็น

$$H_{wr} = U_m A_w v = f_1 f_2 H_r \quad (2.6)$$

เมื่อ  $H_r$  คือ อัตราพลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่แหล่งกำเนิดความร้อน

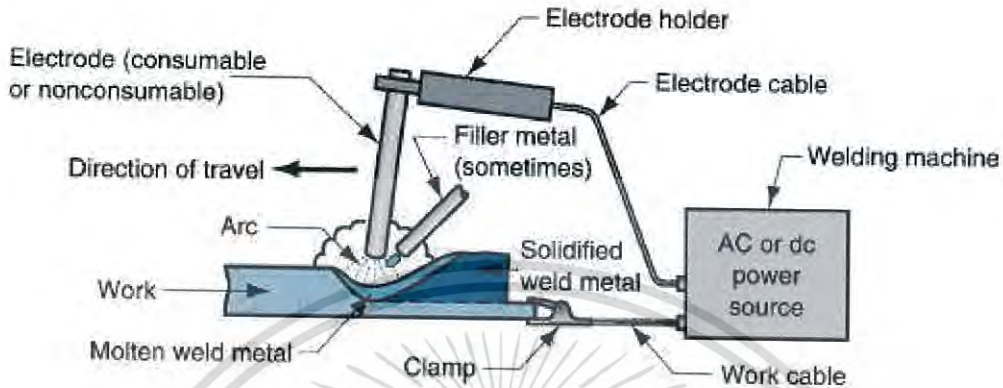
## 2.4 กระบวนการเชื่อม (Welding Processes)

กระบวนการเชื่อมสามารถแบ่งออกได้สองกลุ่มด้วยกัน คือ (1) การเชื่อมหลอม (Fusion welding) ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมที่ใช้ความร้อนทำให้ชิ้นงานโลหะที่เชื่อมเกิดการหลอมเหลวและอาจจะมีการเติมโลหะเติม (Filler metal) ลงไปในรอยเชื่อมด้วย และ (2) การเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid-state welding) เป็นกระบวนการเชื่อมประสานวัสดุให้เป็นชิ้นเดียวกันโดยไม่เกิดการหลอมเหลวของชิ้นงาน และโดยปกติแล้วจะไม่ใช้โลหะเติมในการเชื่อมสถานะของแข็งประเภทต่างๆ

### 2.4.1 การเชื่อมอาร์ก (Arc welding)

เป็นการเชื่อมหลอมชนิดหนึ่งที่มีการเชื่อมกันของโลหะเกิดขึ้นเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดจากการอาร์กทางไฟฟ้า (Electric arc) ระหว่างอิเล็กโทรด (Electrode) และชิ้นงาน ซึ่งการอาร์กทางไฟฟ้า คือ การปลดปล่อย (Discharge) ของกระแสไฟฟ้าข้ามช่องว่างเล็กๆในวงจรไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าจากการอาร์กสามารถทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงถึง  $5500\text{ }^{\circ}\text{C}$  หรือสูงกว่านั้น ซึ่งเพียงพอสำหรับการหลอมละลายโลหะทุกชนิด โลหะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 17 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหลวที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมจะเกิดจากทั้งโลหะขึ้นงานและโลหะเติม (ถ้ามีการใช้งาน) การเติมโลหะเติมลงไปรอบเชื่อมทำให้รอยเชื่อมนั้นมีปริมาตรและความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น รูปที่ 2.11 แสดงการเชื่อมอาร์ก



รูปที่ 2.11 การเชื่อมอาร์ก

( ที่มา : Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4<sup>th</sup> edition (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010), หน้า 710 )

การเชื่อมอาร์กสามารถทำได้โดยใช้คน (Manual) และใช้เครื่องจักร ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราผลผลิต (Productivity) ของการเชื่อมเป็นอย่างมาก โดยที่อัตราผลผลิตของการเชื่อมอาร์กจะวัดโดยตัวแปรที่เรียกว่า เวลาอาร์ก (Arc time) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างเวลาของการอาร์กทั้งหมดต่อเวลาทำงานทั้งหมด โดยปกติแล้ว ถ้าเป็นการเชื่อมด้วยคน เวลาอาร์กจะมีค่าประมาณ 20% และถ้าเป็นการเชื่อมด้วยเครื่องจักร เวลาอาร์กจะมีค่าประมาณ 50%

#### องค์ประกอบการเชื่อมอาร์ก

(1) แหล่งพลังงาน (Power source) พลังงานไฟฟ้าคือแหล่งพลังงานที่นิยมใช้กันมากที่สุดใน การเชื่อมอาร์ก ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรง (DC) และไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) แหล่งพลังงานที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงจะให้การอาร์กที่ดีกว่าแหล่งพลังงานที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ทำให้ได้รอยเชื่อมที่มีคุณภาพดีกว่า นอกจากนี้ยังสามารถใช้เชื่อมโลหะได้ทุกชนิด ในขณะที่แหล่งพลังงานที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับใช้เชื่อมได้เฉพาะโลหะในกลุ่มเหล็ก (Ferrous metals) แต่จะมีราคาเครื่องจักรที่ต่ำกว่า ค่าพลังงานที่ใช้ในการเชื่อมสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$H_{wr} = U_m A_w v = f_1 f_2 H_r \quad (2.7)$$

เมื่อ  $H_r = IE$  โดยที่  $I$  คือ กระแสไฟฟ้า และ  $E$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) อิเล็กโทรด (Electrodes) มีการใช้อิเล็กโทรดในการเชื่อมอาร์กอยู่ 2 ชนิดด้วยกัน คือ อิเล็กโทรดสิ้นเปลือง และอิเล็กโทรดไม่สิ้นเปลือง

2.1) อิเล็กโทรดสิ้นเปลือง (Consumable electrodes) หมายถึง อิเล็กโทรดที่มีการใช้แล้วหมดไประหว่างที่มีการอาร์ก หรือมีการเชื่อมเกิดขึ้นและตัวของอิเล็กโทรดก็จะถูกหลอมละลายรวมอยู่ในรอยเชื่อม ดังนั้นในกรณีนี้อิเล็กโทรดจึงทำหน้าที่เป็นโลหะเติมด้วย โดยทั่วไปแล้วอิเล็กโทรดชนิดนี้จะอยู่ในรูปของ แท่ง (Rods หรือ Sticks) หรือลวด (Wire) แต่การใช้อิเล็กโทรดแบบแท่งจะให้อัตราผลผลิตต่ำกว่าการใช้อิเล็กโทรดแบบลวด เนื่องจากต้องเสียเวลาในการเปลี่ยนแท่งอิเล็กโทรดใหม่บ่อยๆระหว่างการเชื่อม

2.2) อิเล็กโทรดไม่สิ้นเปลือง (Non-consumable electrodes) โดยทั่วไปแล้วอิเล็กโทรดชนิดนี้ทำมาจากทังสเตน (Tungsten) หรือในบางครั้งอาจพบว่าทำมาจากคาร์บอน (Carbon) ซึ่งวัสดุทั้งสองชนิดสามารถทนต่อการหลอมเหลวเนื่องจากการอาร์กได้ดี แต่ในทางปฏิบัติอิเล็กโทรดชนิดนี้มีการสึกกร่อนไปตามอายุการใช้งานอย่างช้าๆระหว่างกระบวนการเชื่อม ซึ่งการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดชนิดนี้จะเกิดจากการระเหยกลายเป็นไอ ในการใช้อิเล็กโทรดชนิดนี้สามารถเติมโลหะลงไปในการเชื่อมได้เช่นเดียวกัน ซึ่งปกติจะใช้โลหะเติมในรูปของลวดสำหรับกรณีนี้

(3) การปกป้องการอาร์ก (Arc Shielding) เนื่องจากการเชื่อมอาร์กเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงดังนั้นโลหะที่กำลังเชื่อมจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับ ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ในอากาศได้จำนวนมาก ปฏิกิริยาทางเคมีเหล่านี้ทำให้คุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมลดต่ำลง จึงจำเป็นต้องปกป้องการอาร์กไม่ให้สัมผัสกับอากาศ โดยปกคลุมปลายของอิเล็กโทรดส่วนที่กำลังอาร์กและรอยเชื่อมเหลวๆด้วยแก๊สบางชนิด หรือฟลักซ์ (Flux) หรือทั้งสองอย่าง แก๊สที่ใช้ปกคลุม (Shielding gases) ที่นิยมใช้กันได้แก่ อาร์กอน (Ar) ฮีเลียม (He) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ส่วนฟลักซ์นั้นเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดออกไซด์ (Oxides) หรือสารปนเปื้อน (Contaminants) กับรอยเชื่อม หรือทำหน้าที่กำจัดสารเหล่านี้ออกไปจากรอยเชื่อมในระหว่างการเชื่อมฟลักซ์จะเกิดการหลอมละลายและปกคลุมรอยเชื่อมเอาไว้และเมื่ออุณหภูมิลดลงฟลักซ์ก็จะกลายเป็นของแข็งเกาะอยู่บนผิวหน้าของรอยเชื่อม โดยปกติแล้วฟลักซ์จะมีหน้าที่หลักๆดังนี้ (1) ปกป้องการเชื่อม (2) ทำให้การอาร์กเสถียรขึ้น และ (3) ลดการกระเด็นของโลหะเหลว ในการเชื่อมอาร์กมีการใช้ฟลักซ์หลายวิธีด้วยกัน เช่น (1) เพลงบนพื้นผิวที่ต้องการเชื่อม (2) พอกไว้บนอิเล็กโทรด และ (3) ทำเป็นไส้อิเล็กโทรด วัสดุที่ใช้ทำฟลักซ์ได้แก่ ผงของเนื้อไม้ หรือ ฝ้าย และรวมกับสารเคมีอื่นๆ เช่น สารเคมีจำพวกคาร์บอเนต (Carbonate) หรือซิลิเกต (Silicate)

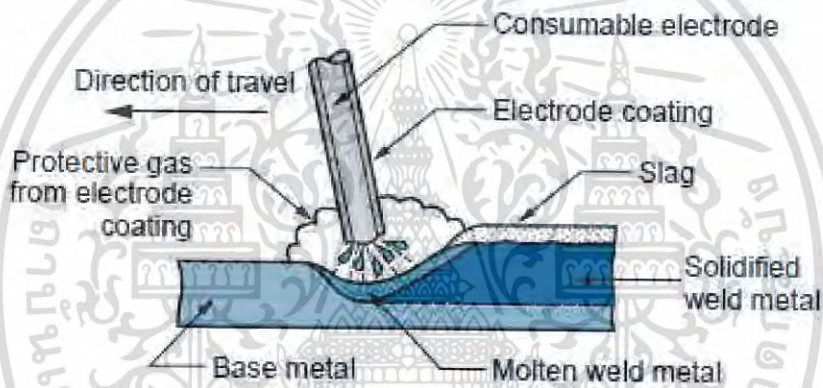
กระบวนการเชื่อมอาร์กแบบต่างๆ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงกระบวนการเชื่อมอาร์กแบบต่างๆที่มีการใช้งานกันทั่วไปในการเชื่อมโลหะ

#### 2.4.2 การเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ (Shielded metal arc welding, SMAW)

เป็นการเชื่อมอาร์กชนิดหนึ่งที่ใช้อิเล็กโทรดสิ้นเปลืองแบบที่เป็นลวดเชื่อมหุ้มด้วยสารเคมีที่ทำหน้าที่เป็นฟลักซ์และป้องกันรอยเชื่อม (Shielding) ลวดเชื่อมที่เลือกใช้จะต้องเหมาะสมกับชิ้นงานโลหะที่ต้องการเชื่อม โดยทั่วไปแล้วลวดเชื่อมที่ใช้จะมีส่วนผสมทางเคมีที่เหมือนหรือใกล้เคียงกับส่วนผสมของชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อม ปลายด้านหนึ่งของลวดเชื่อมจะไม่มีฟลักซ์หุ้มเอาไว้ใช้ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า การเชื่อมชนิดนี้จะใช้กระแสไฟฟ้า 30-300 A ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15-45 V ส่วนการเลือกใช้ตัวแปรต่างๆ (Parameters) ในการเชื่อมขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่จะเชื่อม ชนิดของลวดเชื่อม ความยาวของลวดเชื่อม และความลึกของรอยเชื่อมที่ต้องการให้เกิดขึ้น การเชื่อมแบบนี้นิยมใช้กับการเชื่อมเหล็กกล้า และพบว่ามีการใช้กับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กหล่อ และโลหะผสมของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous alloys) บางชนิด การเชื่อมด้วยวิธีนี้จะไม่ใช้กับการเชื่อมโลหะผสมของอลูมิเนียม ทองแดง หรือ ไทเทเนียม การใช้งานของการเชื่อมแบบนี้ ได้แก่ การเชื่อมในงานก่อสร้าง ท่อ เครื่องจักร หรือ เรือ รูปที่ 2.12 แสดงการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ ข้อจำกัดของการเชื่อมแบบนี้ ได้แก่ อัตราผลผลิตต่ำเนื่องจากต้องเปลี่ยนอิเล็กโทรดบ่อย นอกจากนี้ช่วงของกระแสไฟฟ้าที่ใช้งานได้มีจำกัดช่วงของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ต้องเหมาะสมกับความต้านทานหรือความยาวของอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงตลอดการเชื่อม ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้อิเล็กโทรดในลักษณะขดลวด



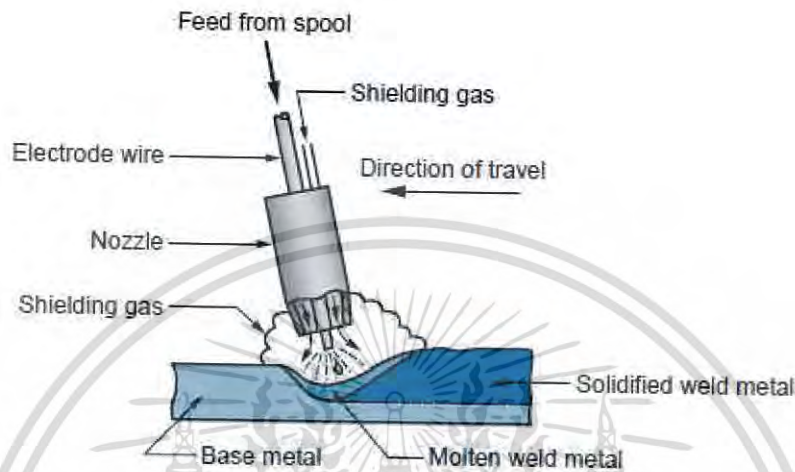
รูปที่ 2.12 การเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์

( ที่มา : Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4<sup>th</sup> edition (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010), หน้า 713 )

#### 2.4.3 การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas metal arc welding, GMAW)

การเชื่อมอาร์กชนิดนี้ใช้อิเล็กโทรดสั้นเปลือยแบบลวดเปลือย ไม่ได้หุ้มด้วยสารเคมี การปกป้องรอยเชื่อมจะใช้แก๊สชนิดใดชนิดหนึ่ง ลวดเชื่อมจะถูกป้อนอย่างต่อเนื่องเข้าไปในรอยเชื่อมโดยเครื่องป้อนอัตโนมัติดังแสดงในรูปที่ 2.13 ขนาดของลวดเชื่อมจะขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานที่กำลังเชื่อมและอัตราในการเชื่อม แก๊สที่ใช้จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่กำลังเชื่อม เช่น ถ้าเป็นการเชื่อมโลหะผสมของอลูมิเนียม (Aluminium alloys) หรือเหล็กกล้าไร้สนิม จะใช้แก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอน (Ar) หรือ ฮีเลียม (He) ถ้าเป็นการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือคาร์บอนปานกลาง (Low carbon steels หรือ Medium carbon steels) ก็จะใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) การเชื่อมชนิดนี้อาจจะรู้จักกันในชื่ออื่นด้วย เช่น การเชื่อมมิก (Metal inert gas (MIG) welding) ซึ่งหมายถึง การเชื่อมที่ใช้กับอลูมิเนียมและใช้อาร์กอนในการปกป้องรอยเชื่อม หรือการเชื่อมคาร์บอนไดออกไซด์คลุม (CO<sub>2</sub> welding) ซึ่งหมายถึง การเชื่อมเหล็กกล้าโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการไม่วากกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาใช้

ปกป้องรอยเชื่อม นอกจากนี้แก๊สผสมระหว่างแก๊สดังกล่าวข้างต้น ก็สามารถใช้กับการเชื่อมเหล็กกล้าได้ โดยทั่วไปแล้วการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมจะใช้กับการเชื่อมโลหะทั้งในและนอกกลุ่มเหล็ก ใช้กับการเชื่อมด้วยเครื่องจักรได้ดี ให้อัตราผลผลิตสูง. และให้รอยเชื่อมที่สะอาดเนื่องจากไม่มีการใช้ฟลักซ์



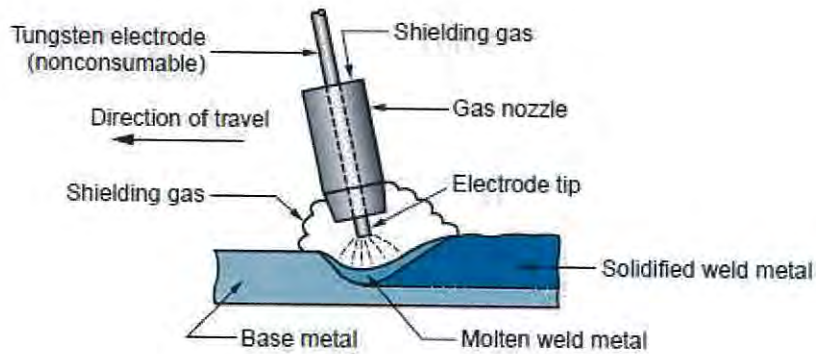
รูปที่ 2.13 การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม

( ที่มา : Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4<sup>th</sup> edition (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010), หน้า 714 )

#### 2.4.4 การเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสแก๊สคลุม (Gas tungsten arc welding, GTAW)

เป็นกระบวนการเชื่อมอาร์กที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดไม่สิ้นเปลืองที่ทำมาจากทังสแตน (Non-consumable tungsten electrode) และใช้แก๊สเฉื่อยในการปกป้องรอยเชื่อม ตัวอย่างของการเชื่อมแบบนี้ เช่น การเชื่อมทิก (Tungsten inert gas (TIG) welding) หรือการเชื่อมวิก (WIG : W = Wolfran = Tungsten) การเชื่อมชนิดนี้มีทั้งแบบใช้และไม่ใช้โลหะเติม ถ้ามีการใช้โลหะเติมในการเชื่อมชนิดนี้ โลหะเติมจะถูกป้อนเข้าไปในรอยเชื่อมเหลวโดยตรงจากขดลวดอีกขดหนึ่ง รูปที่ 2.14 แสดงการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสแก๊สคลุม อิเล็กโทรดที่นิยมใช้ในการเชื่อมแบบนี้ คือ ทังสแตน ซึ่งเป็นโลหะที่ใช้เป็นอิเล็กโทรดได้เป็นอย่างดีเนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูงมาก (3410 °C) ในการเชื่อมแบบนี้แก๊สเฉื่อยที่ใช้ ได้แก่ อาร์กอน หรือ ฮีเลียม หรือ ผสมกันระหว่างแก๊สทั้งสองชนิด การเชื่อมแบบนี้สามารถเชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิด และสามารถเชื่อมโลหะต่างชนิดกันได้ โดยทั่วไปแล้วมักจะใช้เชื่อมอลูมิเนียม หรือเหล็กกล้าไร้สนิม วัสดุที่เชื่อมด้วยวิธีนี้ยาก ได้แก่ เหล็กหล่อ ตะกั่ว และทังสแตน การเชื่อมแบบนี้ไม่นิยมใช้เชื่อมเหล็กกล้าเนื่องจากให้อัตราการเชื่อมที่ต่ำและมีต้นทุนสูงกว่าการเชื่อมแบบใช้อิเล็กโทรดสิ้นเปลือง ยกเว้นในกรณีที่ต้องการรอยเชื่อมคุณภาพสูงเท่านั้นจึงจะใช้การเชื่อมด้วยวิธีนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 การเชื่อมอาร์กทังสเทนแก๊สคลุม

( ที่มา : Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4<sup>th</sup> edition (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010), หน้า 717 )

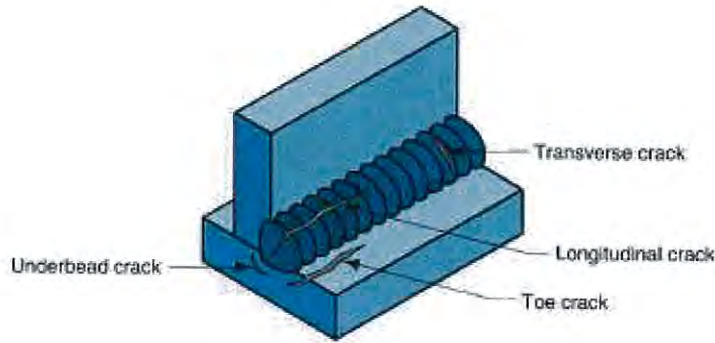
#### 2.4.5 คุณภาพของรอยเชื่อม (Weld quality)

คุณภาพของรอยเชื่อมเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม ในส่วนนี้จะกล่าวถึงคุณภาพของการเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมอาร์กเป็นหลักเนื่องจากการเชื่อมอาร์กมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง โดยหัวข้อที่จะกล่าวถึงในแง่ของคุณภาพรอยเชื่อมมีดังนี้

(1) ความเค้นตกค้างและการบิดเบี้ยว (Residual stress and distortion) ในระหว่างการเชื่อมมีการเพิ่มและลดอุณหภูมิของชิ้นงานบริเวณที่ถูกเชื่อมอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานซึ่งจะนำไปสู่ความเค้นตกค้างในรอยเชื่อมและชิ้นงาน และความเค้นตกค้างนี้ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน การลดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้อุปกรณ์จับยึด (Fixtures) การใช้อุปกรณ์ระบายความร้อน (Heat sink) การเลือกตัวแปรในการเชื่อมที่จะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวน้อยที่สุด การอุ่นชิ้นงาน (Preheat) ก่อนเชื่อม การนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมไปอบให้ความร้อนเพื่อลดความเค้น หรือการออกแบบชิ้นงานที่เชื่อมให้เหมาะสมเพื่อลดการเกิดการบิดเบี้ยว

(2) รอยร้าว (Cracks) เป็นความบกพร่องที่เกิดขึ้นกับรอยเชื่อมหรือใกล้ๆรอยเชื่อมโดยทั่วไปแล้วถ้าพบความบกพร่องชนิดนี้จะต้องทำการแก้ไข เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของเนื้อวัสดุที่เกิดจากรอยร้าวทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานหรือรอยเชื่อมลดลงเป็นอย่างมาก การเกิดขึ้นของรอยร้าวมีสาเหตุมาจากรอยเชื่อมหรือชิ้นงานมีความเปราะค่อนข้างสูงหรือไม่สามารถหดตัวได้อย่างอิสระระหว่างที่อุณหภูมิลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



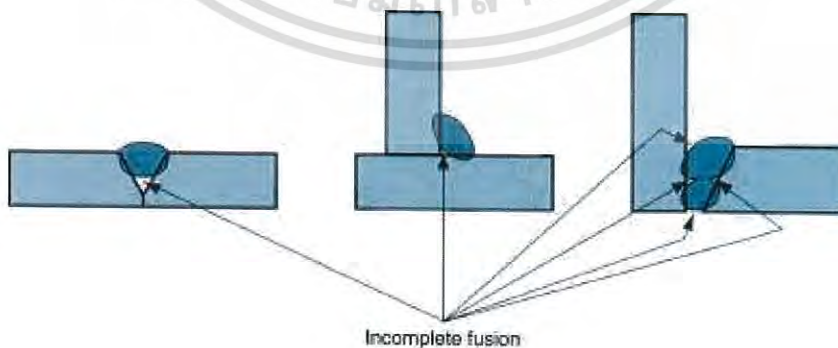
รูปที่ 2.15 แสดงรอยร้าวแบบต่างๆ

( ที่มา : Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4<sup>th</sup> edition (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010), หน้า 740 )

(3) ช่องว่าง (Cavities) เป็นความบกพร่องที่เกิดจากการที่อากาศหรือแก๊สถูกกักเอาไว้ในรอยเชื่อม ในขณะที่รอยเชื่อมยังเป็นของเหลว หรือเป็นช่องว่างที่เกิดจากการหดตัวของเนื้อโลหะในขณะที่เปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง

(4) สารฝังใน (Solid inclusions) เป็นความบกพร่องที่เกิดจากการที่มีของแข็งบางชนิดปรากฏอยู่ในรอยเชื่อม สารฝังในที่พบบ่อยที่สุด คือ สแลกฝังใน (Slag inclusions) ซึ่งเกิดจากฟลักซ์จมลงในรอยเชื่อมขณะที่เป็นของเหลว หรือเป็นสารฝังในที่เกิดจากออกไซด์ของโลหะตกลงไปในรอยเชื่อม เช่น  $Al_2O_3$  ในการเชื่อมอลูมิเนียม

(5) การหลอมเหลวที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete fusion) เกิดขึ้นเนื่องจากการเชื่อมไม่สามารถทำให้เกิดการหลอมเหลวขึ้นทั่วทั้งหน้าตัดของรอยต่อที่ต้องการเชื่อม อีกกรณีหนึ่งที่มีลักษณะคล้ายกัน คือ รอยเชื่อมหลอมตื้นเกินไป (Lack of penetration) รากของรอยเชื่อมไม่ลึกเท่ากับที่ต้องการ

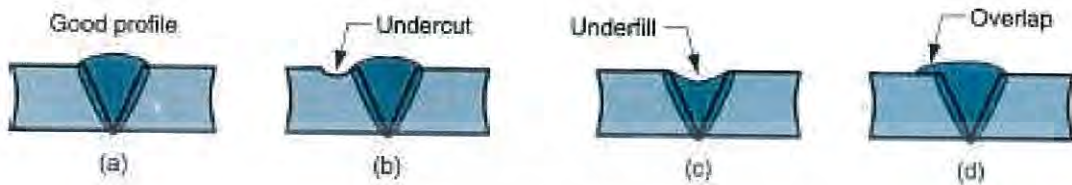


รูปที่ 2.16 แสดงการหลอมเหลวที่ไม่สมบูรณ์

( ที่มา : Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4<sup>th</sup> edition (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010), หน้า 740 )

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(6) รูปร่างที่ไม่สมบูรณ์ (Imperfect shape) เป็นรอยเชื่อมที่มีรูปร่างต่างจากที่ต้องการ รูปที่ 2.17 แสดงตัวอย่างของรูปร่างรอยเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์ในรูปแบบต่างๆเทียบกับรูปร่างของรอยเชื่อมที่สมบูรณ์ในรูปที่ 2.17(a)



รูปที่ 2.17 รูปร่างรอยเชื่อมในรูปแบบต่างๆ

( ที่มา : Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4<sup>th</sup> edition (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010), หน้า 740

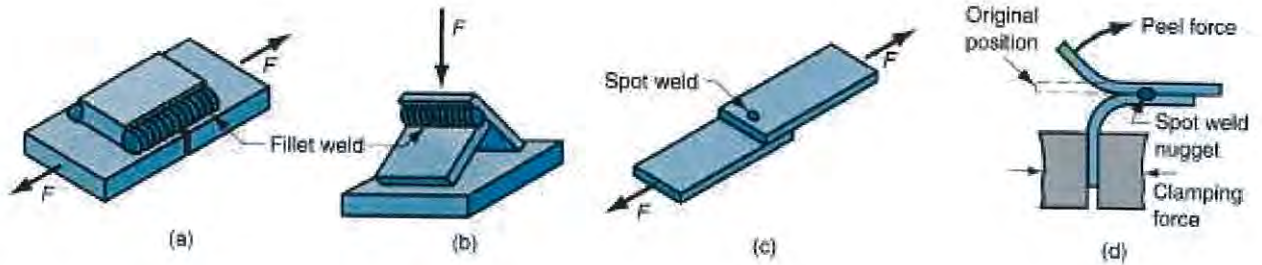
(7) ความบกพร่องชนิดอื่นๆ ที่พบบ่อยๆได้แก่ รอยขีดข่วนบนผิวชิ้นงานที่เกิดจากการอาร์กกับอิเล็กโทรดในขณะที่ทำการเชื่อม หรือเม็ดโลหะเล็กๆที่เกาะอยู่บนผิวชิ้นงานซึ่งเกิดจากการกระเด็นของโลหะเหลวในรอยเชื่อม

#### 2.4.6 วิธีการตรวจสอบและทดสอบรอยเชื่อม (Inspection and testing methods)

การตรวจสอบและทดสอบรอยเชื่อมเป็นขั้นตอนที่สำคัญในงานเชื่อมเนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของชีวิตมนุษย์ ซึ่งวิธีการตรวจสอบและทดสอบรอยเชื่อมมาสารบบแบ่งออกได้ 2 กลุ่มใหญ่ๆด้วยกัน คือ การทดสอบแบบไม่ทำลาย และการทดสอบแบบทำลาย

การทดสอบแบบทำลาย (Destructive testing) ในการทดสอบแบบทำลายรอยเชื่อมหรือชิ้นงานจะถูกทำลายระหว่างการทดสอบหรือการเตรียมชิ้นงานเพื่อการทดสอบ เช่น การทดสอบทางโลหะวิทยา หรือการทดสอบทางกลแบบต่างๆ รูปที่ 2.18 แสดงการทดสอบทางกลในรูปแบบต่างๆสำหรับรอยเชื่อมอาร์ก รูปที่ 2.18(a) แสดงการทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tension) และแรงเฉือน (Shear) ของรอยเชื่อมอาร์กตามแนวยาว (Longitudinal) รูปที่ 2.18(b) แสดงการทดสอบการทนต่อแรงกดของรอยเชื่อมตามแนวขวาง รูปที่ 2.18(c) แสดงการทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tension) และแรงเฉือน (Shear) ของรอยเชื่อมจุด รูปที่ 2.18(d) แสดงการทดสอบการทนต่อแรงดึงลอกของรอยเชื่อมจุดตามลำดับ ซึ่งการทดสอบทั้งสองวิธีเป็นการทดสอบสภาพดึงยืดได้ (Ductility) และความแข็งแรง (Strength) ของรอยเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 การทดสอบทางกลในรูปแบบต่างๆสำหรับรอยเชื่อม

( ที่มา : Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4<sup>th</sup> edition (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010), หน้า 741 )

ในการทดสอบรอยเชื่อมควรจะทำตามมาตรฐานขององค์กรต่างๆ เช่น American welding society (AWS), American society for testing and materials (ASTM), American society of mechanical engineers (ASME) หรือ องค์กรอื่นๆที่ได้รับการยอมรับในระดับชาติหรือนานาชาติ

## 2.5 ความแข็งของวัสดุ

อีกคุณสมบัติเชิงกลซึ่งอาจจะเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา คือความแข็งซึ่งเป็นตัววัดของความต่อต้านของวัสดุที่จะการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลาสติก เช่น รอยบุ่ม หรือ รอยขีดข่วน การทดสอบความแข็งในช่วงต้นอยู่บนพื้นฐานของรูปแบบของโลหะตามธรรมชาติกับขนาดโครงสร้างอย่างเดียวกันความสามารถของวัสดุโดยการเปลี่ยนแปลงให้รูปแบบมีความยืดหยุ่น คุณสมบัติและคุณภาพของดัชนีความแข็งได้รับการคิดค้นขึ้นที่เรียกว่า Mohs Scale ซึ่งอยู่ในช่วงตั้งแต่ความอ่อนระดับ 1 จนถึงความแข็งสูงสุดระดับ 10 เรียกว่า เพชร เทคนิคความแข็งเชิงปริมาณถูกพัฒนาขึ้นในช่วงที่ผ่านมาในรูปแบบหัวกดขนาดเล็ก โดยเคลื่อนที่เข้าไปในพื้นที่ผิววัสดุที่จะทดสอบโดยภายใต้เงื่อนไขการควบคุมของภาระโหลดและอัตราของการประยุกต์ใช้ ความลึกหรือขนาดของการรอยกดเป็นการวัดซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าของความแข็ง ความนุ่มของวัสดุที่มีขนาดใหญ่และเล็ก เรียกว่ารูปแบบการรอยกด และเป็นหมายเลขดัชนีความแข็ง การวัดความแข็งเป็นแค่ส่วนหนึ่งที่เกี่ยวข้องในการทดสอบซึ่งควรใช้ค่าเปรียบเทียบโดยการทดสอบเทคนิคอื่นๆที่แตกต่างกันไป การทดสอบมีรูปแบบต่างๆ เช่น ทำรูปแบบรูปกลม พีระมิต โคน หรือกรวย เมื่อหัวกดตกลงไปในวัสดุโดยทำมุม 90° ลงไปอย่างช้าแล้ววัดรอยเว้า ก็จะสามารถหาความแข็งได้จากตารางที่ 2.8 และ ตารางที่ 2.9a-2.9bแสดงรายละเอียดชนิดต่างๆของหัวกดในการทดสอบความแข็งที่ใช้กันมี 4 แบบ ได้แก่ Rockwell, Brinell, Vickers และ Knoop

การทดสอบความแข็งจะเป็นที่นิยมกว่าการทดสอบด้วยทางกลอื่นๆด้วยเหตุผลหลายประการ

1. ชิ้นส่วนหาง่ายและมีราคาไม่แพง ปกติไม่มีชิ้นตัวอย่างที่จำเป็นเตรียมการทดสอบ เพราะเครื่องทดสอบเอกสารที่มีเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติหนาเปไซประโยชน์ด้านการศึกษา มีความพร้อมในการทดสอบและราคาค่อนข้างแพง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทดสอบไม่ทำลายตัวอย่างโดยที่ตัวอย่างไม่เกิดรอยร้าว หรือเปลี่ยนรูปแบบ ซึ่งอาจจะเกิดรอยกดจากการเสียดสีรูปเล็กน้อย

3. คุณสมบัติทางกลอื่น ๆ มักจะได้รับการประเมินจากข้อมูลความแข็ง เช่น ความต้านทานแรงดึง

### 2.5.1 การทดสอบแบบ Rockwell Hardness

การทดสอบแบบรีออคเวลล์เป็นวิธีการที่พบมากที่สุดที่ใช้ในการวัดความแข็ง เพราะมีความง่ายต่อการดำเนินงานและไม่ต้องมีการมีทักษะพิเศษ ความแตกต่างหลายค่าวัดอาจนำไปใช้ในการรวมจากความเป็นไปได้ของหัวกดที่หลากหลายและแตกต่างของโหนด ซึ่งอนุญาตในการทดสอบค่าจริงของโลหะผสม (เช่นเดียวกับพอลิเมอร์) หัวกดประกอบไปด้วย ลูกเหล็กทรงกลมแข็งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16, 1/8, 1/4 และ 1/2 in. (1.588, 3.175, 6.350 และ 12.70 mm.) และเพชรรูปกรวย (Brale) ซึ่งใช้สำหรับทดสอบวัสดุที่แข็งที่สุด

ด้วยระบบนี้ค่าความแข็งได้ถูกกำหนดค่าความแข็งโดยความแตกต่างความลึกของการเจาะที่เกิดจากการประยุกต์โดยการใส่ค่าเริ่มต้นโหนดน้อยๆ จากนั้นค่อยๆเพิ่มจนถึงโหนดสูงสุด การใช้งานจากการเริ่มโหนดขนาดเล็ก จะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการทดสอบ บนพื้นฐานของโหนดเริ่มต้นถึงโหนดสุดท้ายซึ่งมีการทดสอบสองอยู่ 2 แบบ คือ Rockwell และ Superficial Rockwell สำหรับการทดสอบ Rockwell มีโหนดเริ่มต้นที่ 10 kg. ขณะที่โหนดสุดท้ายที่ 60, 100 และ 150 kg. แต่ละค่าจะถูกแทนด้วยค่าตัวอักษร หลายตัวอักษรได้ถูกบันทึกค่าตามหัวกดที่สอดคล้องกับโหนดตามตารางที่ 2.8 and 2.9a สำหรับการทดสอบ Superficial Rockwell เป็นการทดสอบชั้นผิวตื้นเท่านั้นด้วยโหนดเริ่มต้น 3 kg. ส่วนโหนดสุดท้ายที่ 15, 30 และ 45 kg. หรืออาจจะโหนดสุดท้ายมากกว่านั้น ค่าเหล่านั้นจะระบุไว้ที่ 15, 30, หรือ 45 (ขึ้นอยู่กับโหนด) ตามด้วย N, T, W, X หรือ Y ขึ้นอยู่กับหัวกด การทดสอบ Superficial Rockwell มักจะทดสอบตัวอย่างที่มีความหนาแน่น ตารางที่ 2.9b แสดงค่าสเกล Superficial บางส่วน

ตารางที่ 2.8 เทคนิคการทดสอบความแข็งต่างๆ

Table 7.5 Hardness Testing Techniques

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number <sup>a</sup>
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	Diamond cone 1/16, 1/8, 1/4, 1/2 in. diameter steel spheres			60 kg } 100 kg } Rockwell 150 kg } 15 kg } 30 kg } Superficial Rockwell 45 kg }	

<sup>a</sup> For the hardness formulas given, P (the applied load) is in kg, while D, d, d<sub>1</sub>, and l are all in mm.  
Source: Adapted from H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

ตารางที่ 2.9a สเกลการวัดความแข็งรีอคเวลล์

Table 6.6a Rockwell Hardness Scales

Scale Symbol	Indenter	Major Load (kg)
A	Diamond	60
B	1/16-in. ball	100
C	Diamond	150
D	Diamond	100
E	1/8-in. ball	100
F	1/16-in. ball	60
G	1/16-in. ball	150
H	1/8-in. ball	60
K	1/8-in. ball	150

ตารางที่ 2.9b ค่าสเกล Superficial บางส่วน

Table 6.6b Superficial Rockwell Hardness Scales

Scale Symbol	Indenter	Major Load (kg)
15N	Diamond	15
30N	Diamond	30
45N	Diamond	45
15T	1/16-in. ball	15
30T	1/16-in. ball	30
45T	1/16-in. ball	45
15W	1/8-in. ball	15
30W	1/8-in. ball	30
45W	1/8-in. ball	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในของมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อระบุ Rockwell และ ความแข็งที่ผิวโดยค่าความแข็งทั้งสองต้องระบุขนาดสัญลักษณ์ ขนาดค่า สเกลถูกกำหนดโดยสัญลักษณ์ HR ตามด้วย ระบุ12 ตามขนาดที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น 80 HBR แสดงถึงความ ความแข็ง 80 ของรีคเวลล์ บนสเกล B และ 60 HR30W แสดงถึงความแข็งผิว 60 บนสเกล 30W สำหรับแต่ ละระดับความแข็งอาจจะถึง 130 แต่อย่างไรก็ตามค่าความแข็งที่เกิน 100 หรือต่ำกว่า 20 ในสเกลอื่นๆ อาจจะ ไม่แม่นยำในการทดลอง เพราะว่า การวัดมีส่วนที่ทับซ้อนกัน ในสถานการณ์ดังกล่าวที่ดีที่สุด คือการใช้ ประโยชน์ความแข็งสูงสุดหรือความแข็งอ่อน

ความไม่แม่นยำนอกจากยังส่งผลหากชิ้นงานตัวอย่างบางเกินไป ถ้ารอยกดทำให้ขอบชิ้นงานใกล้ เกินไปหรือรอยบวม 2 รอยใกล้กันเกินไป ความหนาของชิ้นงานควรจะเป็น 10 เท่าของความลึกรอยกด ในขณะที่ ควรมีค่าความเผื่ออย่างน้อยสามเท่าเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 1 จุดรอยกด กับขอบชิ้นงานหรือจุดศูนย์กลาง ที่สองของจุดรอยกด นอกเหนือจากการทดสอบตัวอย่างที่ซ้อนกัน 1 จุด ที่อยู่ด้านหนึ่งซึ่งเป็นเรื่องที่ไม่แนะนำ นอกจากนี้ความแม่นยำขึ้นอยู่กับรอยกดที่ถูกทำให้พื้นผิวเรียบ

อุปกรณ์ที่ทันสมัยสำหรับการวัดค่าความแข็งซึ่งเป็นระบบอัตโนมัติและมีความง่ายต่อการใช้งาน ความแข็งอ่านได้โดยตรง แต่ครั้งในการวัดต้องใช้เวลาเพียงไม่กี่วินาที อุปกรณ์ทดสอบนอกจากอนุญาตเวลา ของโหลดที่กระทำ ตัวแปรนี้ยังต้องตีความข้อมูลความแข็ง

## 2.5.2 การทดสอบแบบ Brinell Hardness

ในการทดสอบบริเนลซึ่งมีความคล้ายกับการวัดของรีคเวลล์ ความแข็ง หัวกดทรงกลมที่ใช้แรงกด ไปยังผิวของโลหะที่จะทดสอบ เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกดเหล็กหล่อ (หรือ ทั้งสแตน คาร์บอน) 10 mm. (0.394 in.) โหลดมาตรฐานในช่วงระหว่าง 500 -3000 kg. โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 500 kg. ในระหว่างการทดสอบ จะต้องใช้แรงคงที่ในการทดสอบอย่างต่อเนื่องในเวลาที่กำหนด (ระหว่าง 10-30 s.) วัสดุที่มีความแข็งจำเป็นที่ ต้องใช้โหลดที่มากขึ้น ค่าความแข็งบริเนลล์ HB เป็นตัวเลขที่คำนวณจากขนาดทั้งสองของโหลด และเส้นผ่าน ศูนย์กลางของรอยกดที่เกิดขึ้น ดูตารางที่2.8 เส้นผ่านศูนย์กลางถูกวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์พิเศษที่ใช้พลังงานต่ำ ที่มีขีดบอกขนาดอยู่ที่เลนส์ตาของกล้อง จากนั้นแปลงค่าเป็น HB โดยใช้ตาราง มีเพียงสเกลเดียวที่ถูกทดสอบ ด้วยทางเทคนิคเท่านั้น

เทคนิคแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับการวัดค่าความแข็งบริเนลล์สามารถทำได้ ระบบสแกนแสง ประกอบด้วยกล้องดิจิทัลติดตั้งสำหรับการส่องได้ทั่วถึง ซึ่งช่วยให้การวางตำแหน่งของกล้องได้ดีมากกว่าการ กดแบบไม่ใช้กล้องช่วย ข้อมูลจากกล้องถูกแปลงไปยังระบบประมวลผลของคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ขนาดและ คำนวณหาค่าความแข็งบริเนลล์ สำหรับเทคนิคนี้ต้องการพื้นผิวเรียบมากกว่าคู่มือวัด

ความหนาของชิ้นงานสูงสุดเช่นเดียวกับตำแหน่งรอยกด (เทียบตรงขอบของชิ้นงาน) และระยะห่าง ของรอยกดต่ำสุด ซึ่งมีความต้องการเดียวกับการทดสอบรีคเวลล์ นอกจากนี้การทดสอบแบบรีคเวลล์จำเป็น ที่จะต้องมีพื้นผิวเรียบสำหรับกดที่พื้นผิว

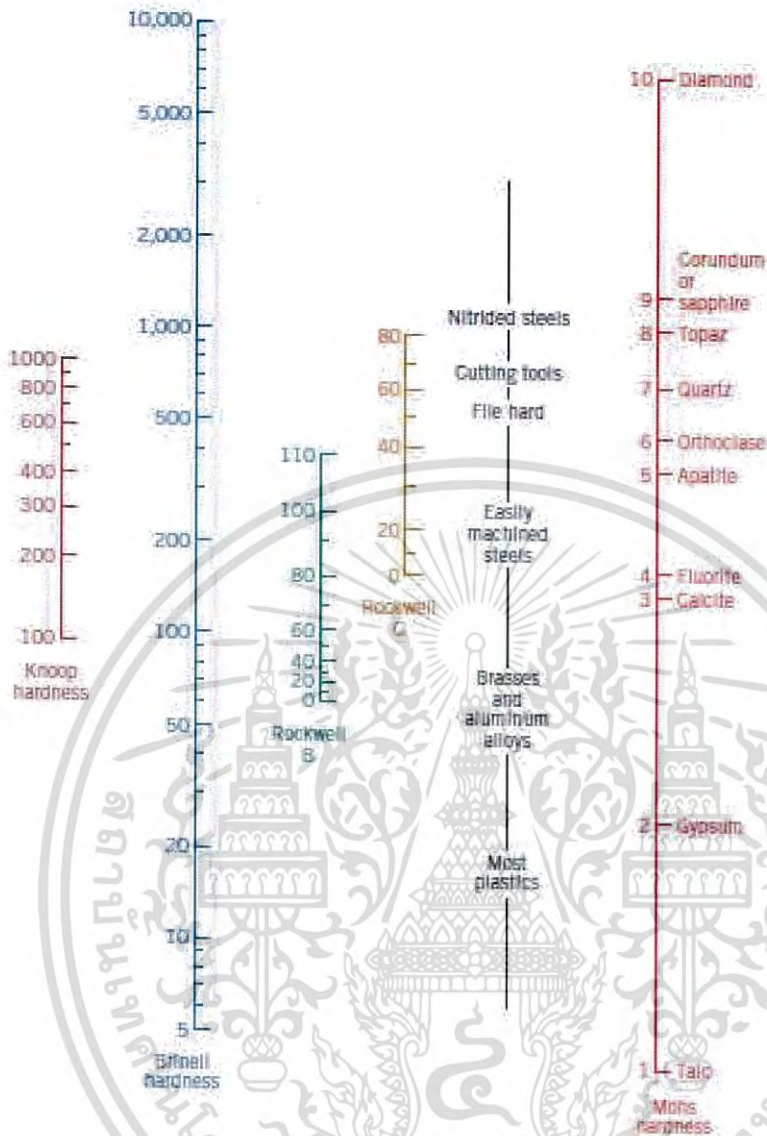
### 2.5.3 การทดสอบแบบ Knoop and Vickers Microhardness

นอกจากนี้มี 2 เทคนิค คือ การทดสอบแบบนูป (Knoop) และแบบวิกเกอร์ส (Vicker) หรือบางครั้งเรียกว่า Diamond Pyramid สำหรับการทดสอบหัตถ์เพชรขนาดเล็กมากโดยใช้แรงกดบนผิวชิ้นงาน ซึ่งปรากฏโหลดที่เกิดขึ้นน้อยกว่าแบบการทดสอบบริเนลล์และรีคเวลล์ อยู่ระหว่าง 1-1000 g. กล้องจุลทรรศน์แสดงผลที่เกิดขึ้นและวัดขนาดออกมา จากนั้นทำการแปลงค่าขนาดของรอยกดเป็นค่าความแข็ง ตารางที่ 2.8 โดยเตรียมชิ้นงานที่ถูกต้อง (ขัดหยาบด้วยกระดาษทรายและขัดละเอียดด้วยผงขัด) ให้เรียบร้อยเพื่อให้รอยกดมีความสมบูรณ์ซึ่งให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำ ค่าความแข็ง Knoop และ Vickers จะถูกกำหนดด้วยสัญลักษณ์ HK และ HR ตามลำดับ และค่าสเกลความแข็งสำหรับ 2 เทคนิคนี้มีค่าประมาณเท่ากัน Knoop และ Vickers มักถูกอ้างอิงด้วยวิธีการทดสอบความแข็งแบบจุลภาคด้วยขนาดแรงหัตถ์ ทั้งสองการทดสอบเลือกวัดด้วยความแข็งขนาดแคบๆบนชิ้นงาน นอกจากนี้ Knoop ถูกใช้ในการทดสอบวัสดุเปราะ เช่น เซรามิก เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีวิธีการทดสอบความแข็งแบบอื่นอีก แต่จะไม่นำมากล่าวในที่นี้ วิธีเหล่านี้ได้แก่ การทดสอบความแข็งจุลภาคด้วยคลื่นเสียงแบบ ultrasonic microhardness ความแข็งจลน์ (dynamic hardness – ซึ่งทดสอบด้วย Scleroscope) การทดสอบด้วยดูโรมิเตอร์ (durometer) สำหรับพลาสติกและอีลาสโตเมอร์ (ยาง) และการทดสอบความแข็งด้วยวิธีขีดข่วน (Scratch hardness)

### 2.5.4 การแปลงหน่วยความแข็ง (Hardness Conversion)

เครื่องมือที่ใช้แปลงค่าความแข็งจากหน่วยหนึ่งไปยังอีกหน่วยหนึ่งที่ต้องการ แต่เนื่องจากความแข็งไม่ได้เป็นที่ดีในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ เพราะความแตกต่างในการทดลองในแต่ละเทคนิคต่างๆ ทำให้ยังไม่มีวิธีการคิดค้นแปลงค่าความแข็งแต่ละแบบ ข้อมูลการแปลงความแข็งที่ได้ถูกพิจารณาจากการทดลองพบว่าขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและลักษณะเฉพาะ การแปลงข้อมูลที่น่าเชื่อถือที่สุดที่ใช้อยู่กับเหล็กกล้า ซึ่งบางส่วนได้ถูกแสดงข้อมูลไว้ในรูป 2.19 ครอบคลุม Knoop, Brinell และ Rockwell ทั้งสองแบบ รวมทั้ง Mohs Scale ด้วย ตารางโดยละเอียดสำหรับการแปลงค่าที่ใช้กับโลหะอื่นๆ อยู่ใน ASTM Standard E 140 “Standard Hardness Conversion Tables for Metals” แต่ข้อมูลสำหรับการเปลี่ยนค่าความแข็งจากโลหะชนิดหนึ่งไปยังอีกชนิดหนึ่งยังไม่ถูกต้องมากนัก



รูปที่ 2.19 เปรียบเทียบค่าความแข็งสเกลต่างๆ

(ที่มา : “Materials Science and Engineering : An Introduction” by William D. Callister Jr., John Wiley & Sons. )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.10 การเปลี่ยนค่าระหว่างร็อคเวลล์ และบริเนลล์ ตามชนิดของหัวกด

Brinell Hardness	Rockwell Hardness Number						Rockwell Superficial Hardness Number						Tensile Strength
	A Scale	B Scale	C Scale	D Scale	E Scale	F Scale	15-N Scale	30-N Scale	45-N Scale	15-T Scale	30-T Scale	45-T Scale	
10-mm Std. Ball 3000-kgf load	Diamond Penetrator 60-kgf load	1.588-mm 1/16" Ball 100-kgf load	Diamond Penetrator 150-kgf load	Diamond Penetrator 100-kgf load	3.175-mm 1/8" Ball 100-kgf load	1.588-mm 1/16" Ball 60-kgf load	Superficial Diamond Penetrator 30-kgf load	Superficial Diamond Penetrator 30-kgf load	Superficial Diamond Penetrator 45-kgf load	1.588-mm 1/16" Ball 15-kgf load	1.588-mm 1/16" Ball 30-kgf load	1.588-mm 1/16" Ball 45-kgf load	KSI
750	85.0	—	66.0	76.0	—	—	93.0	83.0	73.0	—	—	—	—
710	84.0	—	64.0	74.0	—	—	92.0	81.0	71.0	—	—	—	—
682	83.0	—	62.0	72.0	—	—	91.0	79.0	69.0	—	—	—	—
653	81.0	—	60.0	71.0	—	—	90.0	78.0	67.0	—	—	—	314
578	80.0	—	58.0	69.0	—	—	89.0	76.0	64.0	—	—	—	299
555	79.0	—	56.0	68.0	—	—	88.0	74.0	62.0	—	—	—	284
534	78.0	—	54.0	66.0	—	—	87.0	72.0	60.0	—	—	—	270
495	77.0	—	52.0	65.0	—	—	86.0	70.0	57.0	—	—	—	256
479	75.5	—	50.0	63.0	—	—	85.5	68.0	54.5	—	—	—	244
450	74.5	—	48.0	61.5	—	—	84.5	66.5	52.5	—	—	—	228
425	73.5	—	46.0	60.0	—	—	83.5	64.5	50.0	—	—	—	212
403	72.5	—	44.0	58.5	—	—	82.5	63.0	47.5	—	—	—	201
382	71.5	—	42.0	57.0	—	—	81.5	61.0	45.5	—	—	—	189
363	70.5	—	40.0	55.5	—	—	80.5	59.5	43.0	—	—	—	178
346	69.5	—	38.0	54.0	—	—	79.5	58.0	41.0	—	—	—	167
329	68.5	—	36.0	52.5	—	—	78.5	56.0	38.5	—	—	—	160
313	67.5	—	34.0	50.5	—	—	77.5	54.5	36.0	—	—	—	153
298	66.5	106	32.0	49.5	—	116.5	76.5	52.5	34.0	94.5	85.5	77.0	144
275	64.5	104	28.5	46.5	—	115.5	75.0	49.5	30.0	94.0	84.5	75.0	130
258	63.0	102	25.5	44.5	—	114.5	73.5	47.0	26.5	93.0	83.0	73.0	121
241	61.5	100	22.5	42.0	—	113.0	72.0	44.5	23.0	92.5	81.5	71.0	114
228	60.5	98	20.0	40.0	—	112.0	70.5	42.0	20.0	92.0	80.5	69.0	107
215	59.0	96	17.0	38.0	—	111.0	69.0	39.5	17.0	91.0	79.0	67.0	101
204	57.5	94	14.5	36.0	—	110.0	68.0	37.5	14.0	90.5	77.5	65.0	98
194	56.5	92	12.0	34.0	—	108.5	66.5	35.5	11.0	89.5	76.0	63.0	93
184	55.0	90	9.0	32.0	108.5	107.5	65.0	32.5	7.5	89.0	75.0	61.0	89
176	53.5	88	6.5	30.0	107.0	106.5	64.0	30.5	5.0	88.0	73.5	59.5	85
168	52.5	86	4.0	28.0	106.0	105.0	62.5	28.5	2.0	87.5	72.0	57.5	87
161	51.5	84	2.0	26.5	104.5	104.0	61.5	26.5	-.5	87.0	70.5	55.5	78
155	50.0	82	—	24.5	103.0	103.0	—	—	—	86.0	69.5	53.5	75
149	49.0	80	—	22.5	102.0	101.5	—	—	—	85.5	68.0	51.5	72
144	47.5	78	—	21.0	100.5	100.5	—	—	—	84.5	66.5	49.5	69
139	46.5	76	—	19.0	99.5	99.5	—	—	—	84.0	65.5	47.5	67
134	45.5	74	—	17.5	98.0	98.5	—	—	—	83.0	64.0	45.5	65
129	44.0	72	—	16.0	97.0	97.0	—	—	—	82.5	62.5	43.5	63
125	43.0	70	—	14.5	95.5	96.0	—	—	—	82.0	61.0	41.5	61
121	42.0	68	—	13.0	94.5	95.0	—	—	—	81.0	60.0	39.5	59
118	41.0	66	—	11.5	93.0	93.5	—	—	—	80.5	58.5	37.5	57
114	40.0	64	—	10.0	91.5	92.5	—	—	—	79.5	57.0	35.5	55
111	39.0	62	—	8.0	90.5	91.5	—	—	—	79.0	56.0	33.5	53
108	—	60	—	—	89.0	90.0	—	—	—	78.5	54.5	31.5	51
108	—	58	—	—	88.0	89.0	—	—	—	77.5	53.0	29.5	—
103	—	56	—	—	86.5	88.0	—	—	—	77.0	51.5	27.5	—
100	—	54	—	—	85.5	87.0	—	—	—	76.0	50.5	25.5	—
98	—	52	—	—	84.0	85.5	—	—	—	75.5	49.0	23.5	—
95	—	50	—	—	83.0	84.5	—	—	—	74.5	47.5	21.5	—
93	—	48	—	—	81.5	83.5	—	—	—	74.0	46.5	19.5	—
91	—	46	—	—	80.5	82.0	—	—	—	73.5	45.0	17.0	—

For the source of Rockwell, Brinell hardness Conversion

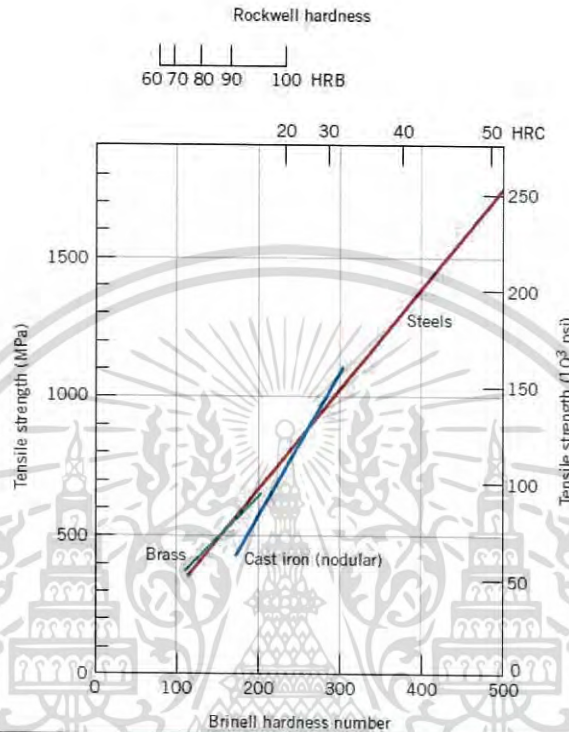
(ที่มา : <http://radiac.com/knowledgebase/rockwell-hardness-2/>, 22 ธ.ค. 2559)

2.5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง และความต้านแรงดึง

ทั้งความต้านทานแรงดึงและความแข็งเป็นตัวชี้วัดของความต้านทานของโลหะต่อการเสีรูปร่าง ดังนั้นค่าสมบัติทั้งสองแปรผันกันซึ่งกันและกันแบบหยาบ แสดงในรูปที่ 2.19 สำหรับความต้านทานแรงดึงเป็นฟังก์ชันของ HB สำหรับ เหล็กหล่อ เหล็กกล้า และทองเหลือง แต่โลหะทุกชนิดไม่มีความจำเป็นต้องมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตามรูปที่ 2.19 กฎทั่วไปของการแปลงค่า คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$TS \text{ (MPa)} = 3.45 \times HB \quad (2.8)$$

$$TS \text{ (psi)} = 500 \times HB$$



รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง (Hardness) กับความต้านแรงดึง (Tensile Strength) สำหรับเหล็กกล้า เหล็กหล่อ และทองแดง [Data taken from *Metals Handbook: Properties and Selection: Irons and Steels*, Vol. 1, 9th edition, B. Bardes (Editor), American Society for Metals, 1978, pp. 36 and 461; and *Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals*, Vol. 2, 9<sup>th</sup> edition, H. Baker (Managing Editor), American Society for Metals, 1979, p. 327.)

### 2.5.6 ข้อเปรียบเทียบการทดสอบแบบต่างๆ

#### 1) การทดสอบแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness Test)

- ใช้หัวกด 2 แบบ (ลูกบอลเหล็กกลม 1/16 หรือเป็นกรวยทำจากเพชร)
- แรงที่หัวกดมีช่วงการทดสอบตั้งแต่ 60 -150 กก.
- คำนวณค่าความแข็งจากระยะหัวกดที่ลงพื้นผิวที่ชิ้นงาน
- เมื่อให้โหลดสุดท้าย Major Load หัวกดจะไปยังเนื้อชิ้นงานเข็มหน้าปัดจะไปยังค่าค่าหนึ่ง เมื่อ

ปลด Major Load จะคืนสภาพกลับ เข็มหน้าปัดจะย้อนกลับไปหยุดค่าค่าหนึ่งจากนั้นให้อ่านหน้าปัดสุดท้าย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดี

- ทดสอบวัสดุได้เกือบทุกชนิด
- เป็นการทดสอบที่แพร่หลายสะดวกและรวดเร็วในการทดสอบ
- มีความคลาดเคลื่อนน้อย เพราะสามารถอ่านค่าโดยตรงจากเครื่องทดสอบ
- หัวกดมีขนาดเล็กมาก เพราะฉะนั้นสามารถทำให้ชิ้นงานบางลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบแบบบริเนลล์

ทดสอบแบบบริเนลล์

ข้อเสีย

- ต้องเตรียมผิวชิ้นงานให้เรียบ ไม่มีรอยขีดข่วน ผิวต้องแห้งและสะอาด เพราะสิ่งเหล่านี้ของพื้นผิวมีผลต่อการทดสอบค่าความแข็ง เนื่องจากรอยกดมีขนาดเล็กไม่ลึกมาก ซึ่งรอยกดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.2-1 mm.

## 2) การทดสอบแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)

- ใช้หัวกดลูกบอลเหล็กกล้ากลมขนาด D 10 mm. ใช้แรงกดขนาด 3000 kg.
- ใช้เวลาแช่ทิ้งไว้ 10 – 20 วินาที แล้วปลดแรงออก จากนั้นก็พบรอยกดที่เกิดขึ้น
- ค่าความแข็ง BHN สามารถคำนวณจากแรงกดของหัวกดหารด้วยพื้นที่ผิวของรอยกด

ข้อดี

- หัวกดมีขนาดใหญ่ การทดสอบวัดค่าความแข็งจะให้รอยกดที่กว้างและลึก

- สามารถทดสอบหาค่าความแข็งได้ ขณะที่ชิ้นงานทดสอบมีพื้นผิวหยาบ และไม่สม่ำเสมอ เพราะมีผลน้อยต่อการทดสอบจากโครงสร้าง

- พื้นที่ทดสอบขนาดใหญ่ ค่าที่ได้เป็นการเฉลี่ยความแข็งของหลายเฟสในบริเวณที่ทดสอบ

ข้อเสีย

- ค่าที่ได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด อาจเกิดความผิดพลาดจากการอ่านค่าของผู้ที่ทำการทดสอบได้

- ไม่สามารถทำการทดสอบชิ้นงานได้ถ้าชิ้นงานมีขนาดเล็กหรือบางมากๆ
- การทดสอบชิ้นงานความหนาต้องมีไม่น้อยกว่า 10 เท่าของความลึกรอยกด
- ระยะห่างระหว่าง 2 รอยจุดต้องห่างไม่น้อยกว่า 3 mm.

## 3) การทดสอบแบบ Knoop and Vickers Microhardness (Knoop and Vickers Microhardness

Test) นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

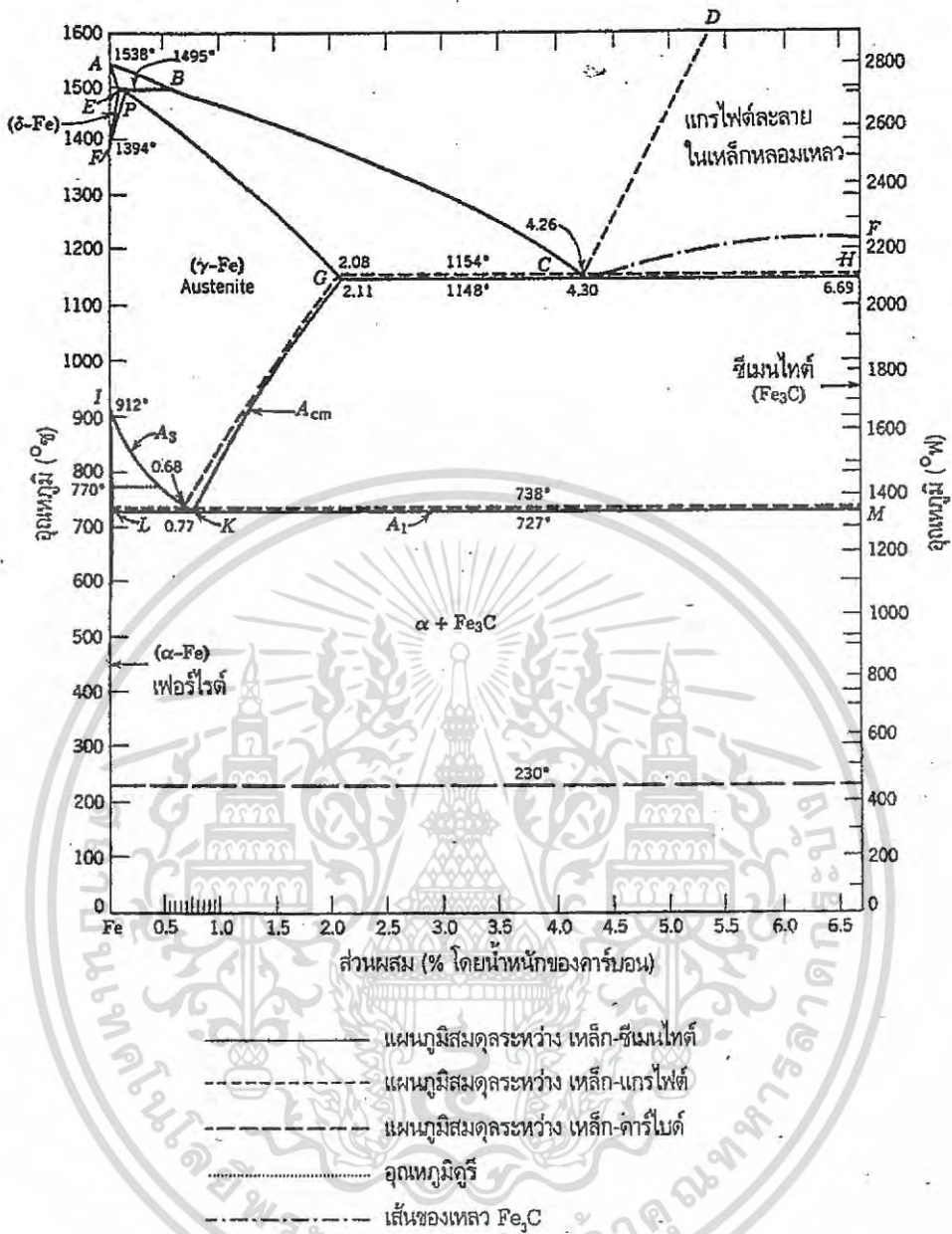
- ใช้หัวกดแบบพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมใช้แรงในการกดมากขึ้นขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุที่ทดสอบ
  - เมื่อใช้แรงกด แซ่ไว้สักพัก แล้วปลดแรงกดออก
  - ค่าความแข็ง VHN สามารถคำนวณจากแรงกดของหัวกดหารด้วยพื้นที่ผิวของรอยกด
- ข้อดี
- หัวกดมีขนาดเล็กและใช้แรงกดต่ำ และยังสามารถวัดได้ถึงระดับจุลภาคเหมาะสำหรับการทดสอบที่ใช้ความละเอียดสูง

- รอยกดมีขนาดเล็ก ทำลายชิ้นงานน้อย
  - สามารถทดสอบได้โลหะทุกชนิด โดยที่ไม่ต้องเปลี่ยนหัวกดทดสอบ
- ข้อเสีย
- ผลที่ได้คลาดเคลื่อนได้ง่าย เนื่องจากการวัดความยาวของเส้นทแยงมุมขึ้นอยู่กับผู้วัด สำหรับวัสดุบางประเภทรอยกดที่ได้เบี่ยงเบนไปจากรอยกดที่สมบูรณ์
  - พื้นผิวที่ได้จากการวัดความแข็งขนาดเล็ก ทำให้ค่าความแข็งขึ้นอยู่กับเฟสแต่ละพื้นผิว อาจจะไม่ใช่ค่าจริงของทั้งส่วนชิ้นงาน

## 2.6 แผนภูมิสมดุลงเหล็ก-คาร์บอน (The iron-carbon diagram)

โลหะผสมระหว่างเหล็ก และคาร์บอน ซึ่งรวมทั้งเหล็กหล่อ เหล็กกล้า หรืออาจเป็นเหล็กกล้าผสม เป็นโลหะที่สำคัญที่สุดในบรรดาโลหะผสมด้วยกัน แผนภาพสมดุลงของเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ เป็นส่วนหนึ่งของแผนภูมิสมดุลงของเหล็ก-คาร์บอนดังแสดงในรูปที่..

สำหรับเหล็กบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิห้องจะมีโครงสร้างเป็น bcc เรียกว่า เฟอร์ไรต์ (Ferrite,  $\alpha$ ) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 912 °C จะเปลี่ยนโครงสร้างเป็น fcc เรียกว่า ออสเตไนต์ (Austenite,  $\gamma$ ) ถ้าคงยังให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 1394°C เหล็กจะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างเป็น bcc เรียกว่า เดลตาเฟอร์ไรต์ (Delta ferrite,  $\delta$ ) และเหล็กจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1538 °C จากรูปที่ 2.20 แกนตั้งคือเหล็กบริสุทธิ์ (ปริมาณเหล็กคาร์บอน = 0%) ด้านขวาสุดเป็นเส้นตั้งฉากกับแนวนอน คือ ปริมาณคาร์บอน = 6.67% คือเฟสที่เป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound) หรือ ซีเมนไทต์ (Cementite :  $Fe_3C$ ) เหล็กที่มีคาร์บอนน้อยกว่า 6.67% ไม่มีความสำคัญเนื่องจากเหล็กเปราะมากจนไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้



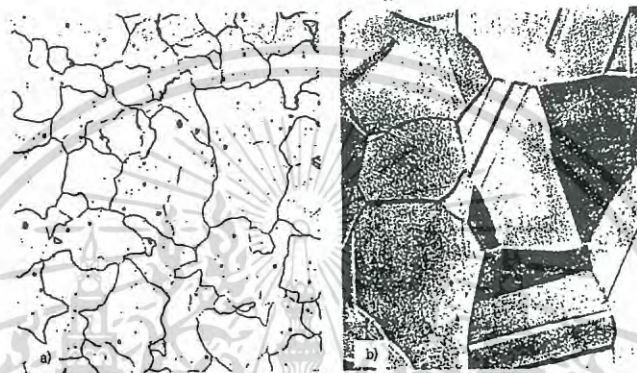
รูปที่ 2.21 แผนภูมิสมดุลระหว่างเหล็ก และเหล็กคาร์ไบด์  
(ที่มา : ศิริพร ดาวพิเศษ, "วัสดุวิศวกรรม", 2553 : หน้า 88 )

คาร์บอนที่อยู่ในเหล็กจะเกิดเป็นสารละลายของแข็ง โดยอะตอมของคาร์บอนจะเข้าไปอยู่ในที่ว่างระหว่างอะตอมในโครงผลึก

เฟอร์ไรต์ คาร์บอนสามารถละลายในเหล็กมากที่สุดเพียง 0.022% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 727°C ซึ่งน้อยมาก เนื่องจากขนาดของที่ว่างระหว่างอะตอมในโครงผลึกของเหล็กแบบ bcc เล็ก คาร์บอนเข้าไปแทรกได้ยาก ดังนั้น  $\alpha$ -Ferrite จึงนิ่ม และที่อุณหภูมिन้อยกว่า 768°C (Curie temperature) แม้เหล็กจะดูดติด ความหนาแน่นของ  $\alpha$ -Ferrite = 7.88 g/cm<sup>3</sup> รูปที่ 2.21a แสดงรูปของเฟอร์ไรต์ที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออสเตไนต์ จะเสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 727°C คาร์บอนสามารถละลายใน  $\gamma$  ได้สูงสุด = 2.11 % ที่อุณหภูมิ 1148°C ซึ่งละลายคาร์บอนได้มากกว่าดั่งนั้น  $\alpha$ -Ferrite ประมาณ 100 เท่า เนื่องจากที่ว่างระหว่างอะตอมในโครงผลึก fcc ใหญ่กว่า ดั่งนั้นคาร์บอนจึงแทรกเข้าไปได้ง่ายกว่า ออสเตไนต์ แม่เหล็กจึงดูดไม่ติด (Nonmagnetic) จุลโครงสร้างของ ออสเตไนต์ เป็นดั่งรูป 2.21b

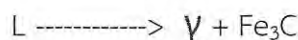
เดลต้าเฟอร์ไรต์ เสถียรที่อุณหภูมิสูงจึงไม่มีความสำคัญต่อโครงสร้างเหล็กเทาใดนัก ( $\alpha$ -Ferrite จะมีความสำคัญต่อโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิม)



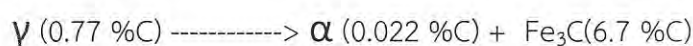
รูปที่ 2.22 a)  $\alpha$ -Ferrite (90x) b) ออสเตไนต์ (325x)  
(ที่มา : ศิริพร ดาวพิเศษ, “วัสดุวิศวกรรม”, 2553 : หน้า 89 )

ซีเมนต์ไทต์ ( $Fe_3C$ ) มีส่วนผสมทางเคมีที่แน่นอน มี 6.67%C มีสมบัติแข็ง และเปราะ ซึ่งเป็นเฟสที่เสริมความแข็งแรงให้แก่เหล็กกล้า ซีเมนต์ไทต์นี้อาจจะถือได้ว่าเป็นเฟสกึ่งเสถียร คือที่อุณหภูมิห้อง ซีเมนต์ไทต์จะคงสภาพอยู่ตลอด แต่ถ้าได้รับความร้อนสูงประมาณ 600-700°C เป็นเวลาหลายปีซีเมนต์ไทต์จะค่อยๆ เปลี่ยนเป็น  $\alpha$ -Ferrite และแกรไฟต์ อย่างไรก็ตามอัตราการสลายตัวของซีเมนต์ไทต์ช้ามาก แต่ถ้าเติมธาตุซิลิกอนลงไป เช่นในเหล็กหล่อ จะทำให้อัตราการสลายตัวของซีเมนต์ไทต์ไปเป็นแกรไฟต์เร็วขึ้น

จากรูปที่ 2.20 บริเวณที่มี 2 เฟส จะเกิดจากโลหะเหลวเกิดปฏิกิริยายูเทกติก โดยโลหะเหลวจะมีปริมาณคาร์บอน 4.3% ที่อุณหภูมิ 1148°C



แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงมาอีก  $\gamma$  จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยจะแตกตัวที่ 727°C โดยปฏิกิริยายูเทกตอยด์



ของแข็ง

ของแข็ง

ของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยานี้จะเกิดที่อุณหภูมิแน่นอน จากรูปที่ 2.20

เส้น LKM =  $A_1$  เรียกว่า เส้นอุณหภูมิวิกฤตล่าง (Lower critical temperature lines)

เส้น IK, GK =  $A_3, A_{cm}$  เรียกว่า เส้นอุณหภูมิวิกฤตบน (Upper critical temperature lines)

โลหะประเภทเหล็กสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่บนเหล็ก

1) เหล็กบริสุทธิ์  $C < 0.008\%$

2) เหล็กกล้า  $0.008\% < C < 2.11\%$  ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

- ไฮโปยูเทคตอยด์  $C < 0.77\%$

- ยูเทคตอยด์  $C = 0.77\%$

- ไฮเปอร์ยูเทคตอยด์  $0.77\% < C < 2.11\%$

3) เหล็กหล่อ  $2.11\% < C < 6.7\%$  ตามทฤษฎี (แต่เหล็กหล่อส่วนมากมี คาร์บอนไม่เกิน 4-4.5%)

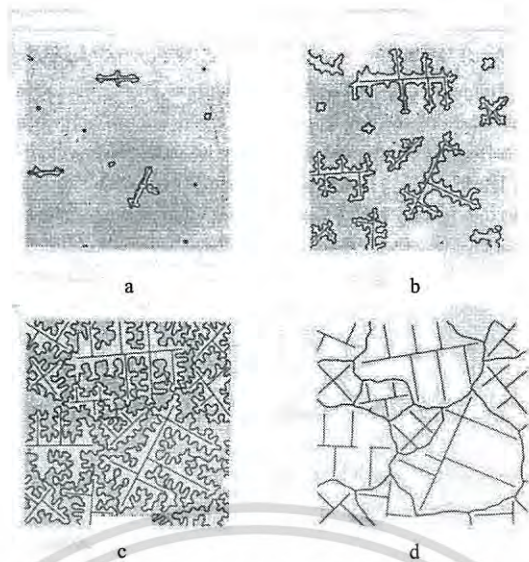
### 2.6.1 การเกิดเกรน และการตกผลึกโลหะผสม (Grain and Grain Boundary)

เมื่อโลหะผสม A และ B เริ่มแข็งตัว โลหะที่มีจุดหลอมตัวสูงกว่าย่อมแข็งตัวก่อน เมื่อโลหะที่จุดหลอมตัวสูงแข็งตัวจับเป็นเกรนหมดแล้ว โลหะที่มีจุดหลอมตัวต่ำกว่าจึงเริ่มแข็งตัวบ้าง ดังนั้นเกรนที่เกิดขึ้นของโลหะผสมจึงเป็นเกรนของโลหะที่แตกต่างกัน บางเกรนอาจสลับกันอยู่บางเกรนอาจติดกันก็ได้ ภาพแบบการจัดเรียงตัวไม่แน่นอน



รูปที่ 2.23 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสถานะของโลหะผสม

(ที่มา : <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/48/crystal/A06.htm>, 30 ธ.ค. 2559)



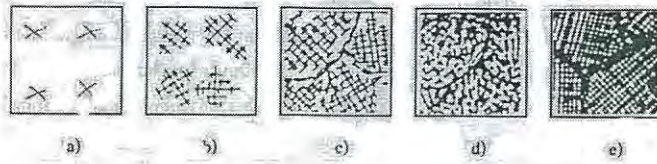
รูปที่ 2.24 ลักษณะการเกิดภาวะการเกรนตามเย็นตัว

(ที่มา : <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/48/crystal/A06.htm>, 30 ธ.ค. 2559)

ในสภาวะที่โลหะบริสุทธิ์แข็งตัว ผลึกแต่ละผลึกจะเริ่มแข็งตัวจากนิวเคลียส หรือจากจุดศูนย์กลางของผลึกก่อน นิวเคลียส คือ ผลึกเล็กๆที่ก่อตัวจากผลึกแรก ซึ่งการก่อตัวของนิวเคลียสนี้ อาจจะทำตัวขึ้นหลายๆจุดพร้อมกันและจากนั้นผลึกจะโตขึ้นเรื่อยๆ จากการจับตัวกันเพิ่มขึ้นของอะตอม ที่เข้าร่วมตัวกันตามรูปทรงของผลึกของโลหะนั้นๆ การรวมตัวกันของอะตอมจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อมๆกันกับการเย็นตัวของโลหะ ซึ่งการจับยึดตัวของอะตอมไปเรื่อยๆเช่นนี้ เรียกว่า “Dendrite” การเจริญเติบโตของ Dendrite จะแผ่ขยายออกไปเรื่อยๆจนกระทั่งโลหะนั้นแข็งตัวหมดจึงจะหยุดการเจริญเติบโต

Dendrite ต่างๆที่เกิดขึ้นนั้นเป็นอิสระไม่ขึ้นต่อกัน จะขยายตัวออกไปจนกระทั่งแขนงขยายตัวแผ่ออกไปชนกับแขนงของตัวข้างเคียง ซึ่งหมายถึงการเจริญเติบโตของผลึกสิ้นสุดลงในช่วงที่ของโลหะแข็งตัวพอดี ผลึกแต่ละผลึกจะมีขนาดไม่เท่ากันเนื่องจากการเติบโตของ Dendrite แต่ละตัวเป็นอิสระไม่ขึ้นต่อกัน

จากการที่ผลึกแต่ละผลึกไม่เท่ากัน ทำให้มีลักษณะแบ่งเขตแดนของเกรนแต่ละเกรนซึ่งเรียกว่า Grain Boundary จากรูปที่ 2.24 a) นิวเคลียสเริ่มก่อตัวเล็กๆตามตำแหน่งต่างๆ b) จากผลึกขยายตัวเป็น Dendrite ใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ c) Dendrite แต่ละตัวแผ่ขยายใหญ่จนแขนง (Tertiary Arm) ของแต่ละตัวเกือบจะชนกัน d) Dendrite แต่ละตัวแผ่ขยายใหญ่จนแขนงของแต่ละตัวชนกันผลึกเริ่มหยุดก่อตัว d) เกิดเป็น Grain Boundary บริเวณขอบผลึก



รูปที่ 2.25 การเกิด Grain และ Grain Boundary ในสภาวะการตกผลึก

(ที่มา : <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/48/crystal/A06.htm>, 30 ธ.ค. 2559)

### 2.6.2 จุลโครงสร้างของเหล็กกล้า

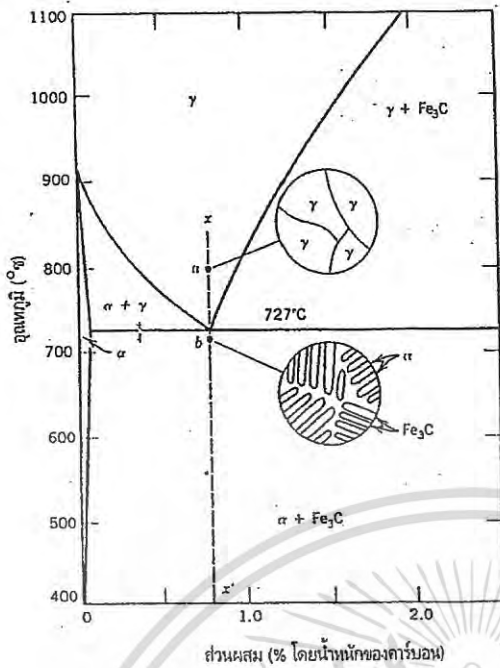
จุลโครงสร้างของเหล็กกล้าขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอน และกระบวนการทางความร้อนที่กระทำแก่เหล็กนั้นในที่นี่คำนึงถึงเฉพาะเหล็กกล้าที่เย็นตัวอย่างสมดุลคือช้ามากๆเท่านั้น จุลโครงสร้างของเหล็กกล้าชนิดต่างๆมีดังนี้

#### 2.6.2.1 เหล็กกล้ายูเทกตอยด์ (Eutectoid steels) C~0.77%

เมื่อโลหะผสมเหล็กคาร์บอนมีส่วนผสม 0.77% ทำให้เย็นจาก 800°C หรือประมาณจุด a โครงสร้างขณะนี้เป็น ออสเตไนต์ ( $\gamma$ ) ดังรูปที่ 2.21 เมื่อทำให้เย็นตัวลงมาตามเส้น xx' จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านอุณหภูมิ 727°C หรือที่จุด b ในรูป ออสเตไนต์จะกลายเป็นเฟอร์ไรต์ (C < 0.022%) และ  $Fe_3C$  (6.7%) โดยที่ทั้ง 2 เฟส จะเกิดสลับเป็นชั้นๆ (Lamellae) เนื่องจาก 2 เฟสเกิดขึ้นพร้อมๆกัน ดังนั้นคาร์บอนจึงเกิดการแพร่ได้ในระยะทางสั้นๆ ความหนาของชั้น  $\alpha:Fe_3C \sim 8:1$  โครงสร้าง  $\alpha + Fe_3C$  ที่เรียงตัวสลับกันนี้เรียกว่า เพอร์ไลต์ (Pearlite) ดังรูปที่ 2.25

สมบัติของเพอร์ไลต์ จะได้มาจากผลรวมของเฟอร์ไรต์ และซีเมนไทต์ คือ อ่อนและเหนียว ได้จาก เฟอร์ไรต์ และ แข็งจากซีเมนไทต์

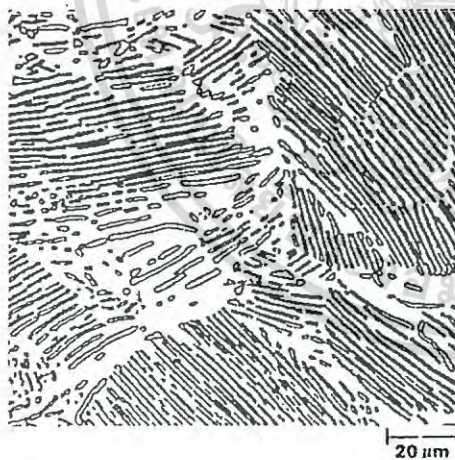
เมื่ออุณหภูมิต่ำลงมาจากจุด b จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างน้อยมาก



รูปที่ 2.26 จุดโครงสร้างของเหล็กคาร์บอนที่มีส่วนผสมยูเทคตอยด์ (0.77%C) ที่อุณหภูมิสูงและต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคตอยด์ปฏิกิริยายูเทคตอยด์ (ที่มา : ศิริพร ดาวพิเศษ, “วัสดุวิศวกรรม”, 2553 : หน้า 91 )

ปริมาณเฟอร์ไรต์ที่เกิดขึ้น =  $\frac{6.7-0.77}{6.7-0.022} \times 100 = 88.8\%$

ปริมาณของซีเมนไตต์ =  $\frac{0.77-0.022}{6.7-0.022} \times 100 = 12.2\%$



รูปที่ 2.27 โครงสร้างเพอร์ไลต์ของเหล็กกล้ายูเทคตอยด์ประกอบไปด้วยชั้นของ α เฟอร์ไรต์ (สีขาว) และ Fe<sub>3</sub>C (สีดำ) (500x) (ที่มา : ศิริพร ดาวพิเศษ, “วัสดุวิศวกรรม”, 2553 : หน้า 92 )

### 2.6.2.2 เหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์ (Hypoeutectoid steels) 0.008% < C < 0.77%

สมมติให้เหล็กกล้ามีปริมาณคาร์บอน 0.3% ทำให้เย็นตัวจากจุด c หรือที่อุณหภูมิ 875°C แสดงดังรูปที่ 2.27

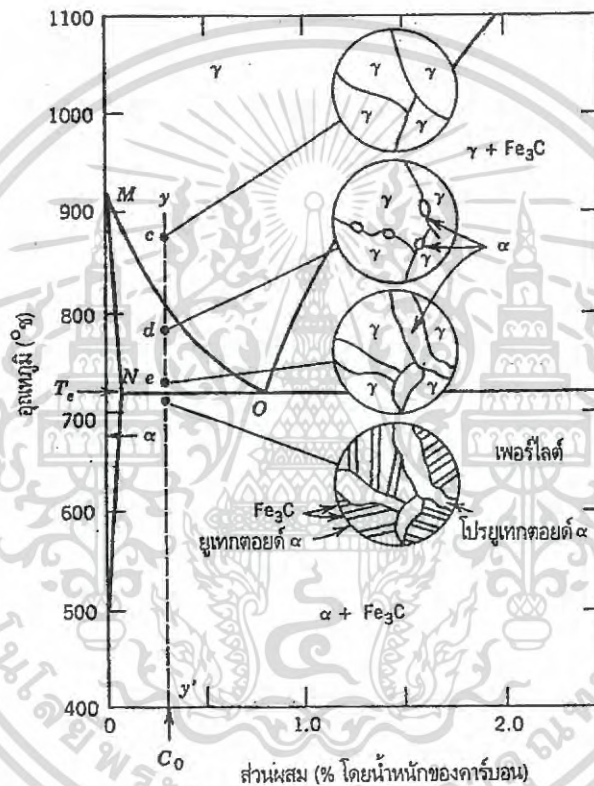
โครงสร้างเริ่มต้นเป็น γ เมื่อทำให้เย็นตัวลงตามเส้น yy' เมื่อผ่านเส้น A3 จะเริ่มมีเฟส α เกิดขึ้นที่ขอบเกรนของ γ และที่อุณหภูมินี้คาร์บอนใน α = 0.02% γ = 0.4% ำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 40 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อุณหภูมิ 775°C หรือที่จุด d

$$\text{ปริมาณเฟส } \alpha \text{ ที่เกิดขึ้น} = \frac{0.4-0.3}{0.4-0.02} \times 100 = 26.3\%$$

$$\text{ปริมาณเฟส } \gamma \text{ ที่เหลืออยู่} = \frac{0.3-0.02}{0.4-0.02} \times 100 = 73.7\%$$

และเมื่อทำให้เย็นตัวลงมาอีก เฟสของ  $\alpha$  จะมากขึ้นและปริมาณคาร์บอนใน  $\alpha$  เพิ่มขึ้นตามเส้น MN ขณะที่เฟสของ  $\gamma$  จะเล็กลงและปริมาณคาร์บอนใน  $\gamma$  เพิ่มขึ้นตามเส้น MO



รูปที่ 2.28 จุลโครงสร้างของเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์ (มีปริมาณ C < 0.77%) ทำให้เย็นลงมาจาก ออสเตไนท์ จนอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมียูเทคตอยด์ (ที่มา : ศิริพร ดาวพิเศษ, “วัสดุวิศวกรรม”, 2553 : หน้า 93 )

เมื่อเย็นตัวลงมาถึงจุด e โดยให้จุด e คือที่อุณหภูมิสูงกว่า 727°C เล็กน้อย (~728°C) ที่จุดนี้ส่วนผสมของ  $\gamma \sim 0.77\% \text{C}$  และ  $\alpha \sim 0.022\% \text{C}$  ดังนั้นเมื่อถึงอุณหภูมิ 727°C คืออุณหภูมียูเทคตอยด์ จะเกิดปฏิกิริยายูเทคตอยด์แตกตัวให้ เฟอร์ไรต์ ซึ่งก็คือ  $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$  จุลโครงสร้างของเฟอร์ไรต์ แสดงในรูปที่ 2.28

เฟอร์ไรต์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 727°C นี้เรียกว่า โปรยูเทคตอยด์  $\alpha$

$$\text{ปริมาณ } \alpha \text{ โปรยูเทคตอยด์} = \frac{0.77-0.3}{0.7-0.022} \times 100 = 62.8\%$$



รูปที่ 2.29 จุลโครงสร้างของเหล็กคาร์บอน C = 0.38% ประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์ และ เฟอร์ไรต์ (Pearite + Proeutectoid ferrite) (635x) (ที่มา : ศิริพร ดาวิเศษ, “วัสดุวิศวกรรม”, 2553 : หน้า 94 )

$$\text{ปริมาณเฟส } \gamma \text{ ที่มีส่วนผสม } 0.77\%C = \frac{0.3-0.022}{0.77-0.022} \times 100 = 37.2\%$$

ดังนั้น  $\gamma$  ซึ่งมีปริมาณ 37.2% (ของเนื้อโลหะทั้งหมด) นี้เท่านั้นที่เกิดปฏิกิริยาอุเทกตอยด์ให้เฟอร์ไรต์ซึ่งประกอบไปด้วย  $\alpha + Fe_3C$  โดยที่  $\alpha$  ที่เกิดจากปฏิกิริยาอุเทกตอยด์นี้เรียกว่า ยูเทกตอยด์  $\alpha$

$$\text{ยูเทกตอยด์ } \alpha \text{ มีปริมาณ} = \frac{6.7-0.77}{6.7-0.022} \times 100 = 35.7\%$$

$$\text{ปริมาณ } Fe_3C = \frac{0.77-0.022}{6.7-0.022} \times 100 = 1.5\%$$

โครงสร้างที่พบในกล้องจุลทรรศน์ คือ เฟอร์ไรต์ และ เฟอร์ไรต์ (โปรยูเทคตอยด์)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

[7] อมรใหญ่ มาใหญ่ ได้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยออกแบบรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 เพื่อศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อเกยเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ในการทดลองใช้วัสดุ 2 ชนิด ที่มีความหนา 3 mm. ทำการเชื่อมเกยโดยมีตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วยกระแสเชื่อม 80-120 A. ความเร็วเดินแนว 150-250 mm/min และมุมหัวเชื่อม 30-60° และทำการทดสอบด้วยการทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือน ความแข็ง และการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองการเพิ่มกระแสเชื่อม ส่งผลทำให้ค่าแรงดึงหลาย การยึดตัวของรอยต่อ และความแข็งของโลหะเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงมุมหัวเชื่อมไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อตัวแปรของการเชื่อมที่ดีที่สุดคือที่กระแส 100 A. ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 mm/min และมุมเชื่อม 45° โครงสร้างจุลภาคระยะห่างระหว่างแกนเดนไดรต์ทุติยภูมิของโครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมและความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น

[8] สุเนตร มุลทา, บัญชา เวฬุวนารักษ์ และ ฤทธิชัย สังฆทิพย์ ศึกษาอิทธิพลของปริมาณความชื้นของลวดเชื่อม E6013 ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกล โดยทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ในช่วงแรกเป็นการทดสอบการลื่นเปลี่ยนของลวดเชื่อม ด้วยสถานะของลวดเชื่อม 3 ระดับ คือลวดเชื่อมที่แกะกล่องออกมาใหม่ ลวดเชื่อมสถานะเปียกชื้น และลวดเชื่อมที่ผ่านการอบก่อนทำการเชื่อม โดยใช้กระแสไฟฟ้า 70 และ 90 แอมแปร์ ทำการเชื่อมกับแผ่นเหล็กดาหนา 5 มม. แล้วเปรียบเทียบการลื่นเปลี่ยนของลวดเชื่อมและเวลาที่ใช้ในการทำการเชื่อมต่อหนึ่งเส้น เทียบกับเวลาและสถานะของลวดเชื่อมที่ต่างกัน ผลการทดลองพบว่า แนวเชื่อมที่ได้จากการใช้กระแสไฟฟ้า 90 แอมแปร์และการอบลวดเชื่อมสามารถเชื่อมได้ง่าย ระยะการเชื่อมได้ยาวกว่า ใช้เวลาน้อยกว่าต่อลวดเชื่อมหนึ่งเส้น ลวดเชื่อมที่ได้จากการแกะกล่อง และสถานะเปียกชื้น ลองลงมาตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านเชิงกลโดยการทดสอบแรงดึง ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมด้วยการอบลวดเชื่อมจะให้ค่าแรงดึงที่สูงกว่า ลวดเชื่อมที่ได้จากการแกะกล่องและลวดเชื่อมสถานะการเปียกชื้น รองลงมาตามลำดับ

[9] วรายุทธ สุขกลั้ว, สุรียา พงษ์ประสิทธิ์ และ กิตติศักดิ์ แนบเนียน ได้ทำการศึกษาการเชื่อมเหล็กกล้าต่างชนิดระหว่าง SS400 และ S50C โดยกระบวนการ เชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ เป็นแนวทางการเลือกใช้เพื่อในมิประสิทธิภาพ และลดต้นทุนการผลิตได้ การทดสอบใช้เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เกรด S50C กับ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS 400 ทำการเชื่อมต่อชนบากร่องวีด้านเดียวด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เทียบชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอุ่นก่อนเชื่อม ผ่านการอุ่นก่อนเชื่อมที่อุณหภูมิ 250°C ที่ค่ากระแสเชื่อมแตกต่างกัน ทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและการทดสอบความแข็ง ผลการทดลองการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมจะมีความแข็งน้อยกว่าชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ได้ทำการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม บริเวณผลกระทบจากความร้อน จะมีความแข็งมากกว่าชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม ทั้งนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางสำหรับการนำวัสดุเหล็กกล้า SS400 มาทำการเชื่อมซ่อมทดแทนวัสดุ S50C ซึ่งมีต้นทุนที่สูงกว่า

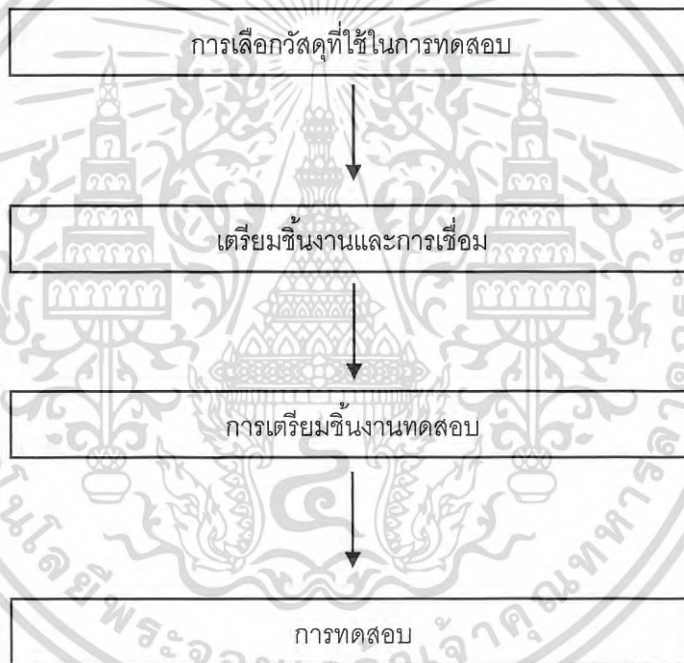
[10] พ.อ.อ.ศักดิ์ชัย จันทศรี, ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และ ผศ.สุรัตน์ ตรีวัฒนพงศ์ ทำการศึกษาการเชื่อมแก๊สเฉื่อยปกคลุมรอยต่อเหล็กคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิมในงานโครงสร้างอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล เพื่อหาอิทธิพลที่ผลต่อสมบัติของรอยเชื่อม การทดลองใช้แผ่นสี่เหลี่ยมเหล็กกล้า ss400 กับเหล็กกล้า AISI430 ถูกวางเป็นรอยต่อชนแล้วเชื่อมด้วยอาร์กโลหะก๊าซคลุม โดยมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมที่ผลต่อสมบัติของรอยเชื่อม ทดสอบความแข็งแรง(ASTM E8) ความแข็ง(ASTM E92) และโครงสร้างจุลภาค ผลการทดลองตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมที่ให้ค่าความแข็งถึง 448 MPa ที่กระแส 110 A ความเร็วเดินเชื่อม 400 mm./min. และแก๊สผสม 80%Ar+20%CO<sub>2</sub> การเพิ่มกระแสและความเร็วส่งผลความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและลดลงตามลำดับ การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค เกรนคอลลิมไนในโลหะเชื่อมเกรนหยาบในพื้นที่กระทบร้อน นอกจากนี้พื้นที่กระทบความร้อน นอกจากนั้นพบเฟสตกผลึกความแข็งสูงที่ขอบเกรนของโลหะเชื่อมและพื้นที่กระทบร้อน

### บทที่ 3

#### ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการดำเนินการทดลองได้แบ่งออกเป็นขั้นตอน เพื่อความเข้าใจและสะดวกต่อการปฏิบัติงานดังนี้

- 3.1 ขั้นตอนการเลือกวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ
- 3.2 ขั้นตอนเตรียมชิ้นงานและการเชื่อม
- 3.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ
- 3.4 การทดสอบชิ้นงาน



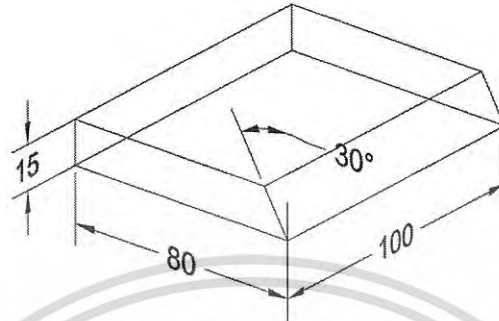
#### 3.1 การเลือกวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมและทดสอบ

##### 3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงาน SS400 มีส่วนผสมทางเคมีดังนี้

%C	%Mn	%Si	%S	%P
0.15	0.10	0.05	0.04	0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบเป็นแผ่น SS400 ความหนา 15 มม. มาตัดด้วยเครื่องตัดให้ได้ขนาดกว้าง 80 มม. ยาว 100 มม. จำนวน 6 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงขนาดชิ้นงาน

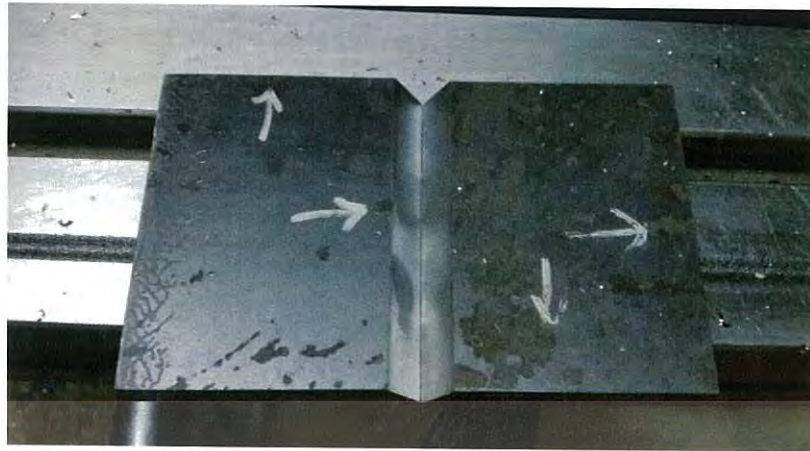
3.1.2 เลือกลวดเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อม E7016 ซึ่งเหมาะสำหรับงานเชื่อมเหล็กโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น ตึก อาคารสูง สามารถทนแรงดึงต่ำสุด 70000 psi ใช้ได้ทุกท่าเชื่อม ต้านทานการแตกร้าวได้ดี

### 3.2 การเตรียมชิ้นงานและการเชื่อม

#### 3.2.1 การเตรียมแผ่นเหล็ก

นำแผ่นชิ้นงาน SS400 ออกแบบรอยต่อโดยการเตรียมรอยต่อด้วยการบากร่องแบบ Single V Groove 60 องศา ตามรูปที่ 3.2 ตลอดความยาว 100 มม.

ทำความสะอาดงานก่อนขัดด้วยแปรงลวดสแตนเลสพร้อมกับตะไบตกแต่งชิ้นงานให้เรียบร้อย



รูปที่ 3.2 แสดงการเตรียมรอยต่อของชิ้นงานในการเชื่อม

### 3.2.2 การเตรียมลวดเชื่อม

ผู้ทดลองได้ทำการอบลวดเชื่อมไฟฟ้าเหล็กแข็ง(E7016) ขนาด  $\varnothing$  3.2 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ที่ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที



รูปที่ 3.3 ลวดเชื่อมไฟฟ้าเหล็กแข็ง E7016

### 3.2.3 กระแสที่ใช้เชื่อมและเครื่องเชื่อม

กระแสที่ใช้จะขึ้นอยู่กับขนาดของลวดเชื่อมและความหนาของชิ้นงาน ซึ่งช่วงกระแสไฟฟ้าสลับ (AC) ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 80-110 แอมป์ และความต่างศักย์ 22-26 โวลต์ ใช้ลวดเชื่อมขนาด  $\varnothing$  3.2 มม. การทดลองนี้เลือกใช้ค่ากระแส 3 ค่า โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 80, 100 และ 120 แอมป์ซึ่ง 2 ค่าแรกอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ใน และอีก 1 ค่าอยู่นอกช่วงที่กำหนดเอาไว้

ใช้การเชื่อมอาร์คโดยใช้วิธีโลหะโรดหุ้มฟลักซ์ (Shielded metal Arc Welding; SMAW) โดยใช้ลวดเชื่อมไฟฟ้า E7016 และใช้กระแสสลับแรงดันไฟฟ้า 22 โวลต์ในการเชื่อม พร้อมปรับค่ากระแส 3 ค่า ได้แก่ 80, 100, 120 แอมป์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ใช้เครื่องเชื่อมไฟฟ้า รุ่น TR300 220 V AC เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องเชื่อมไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม

### 3.2.4 การทำการเชื่อม

ทำการเชื่อมโดยเอาชิ้นงาน 2 ชิ้นต่อชนกันด้วยเครื่องเชื่อมไฟฟ้าตามรูปที่ 3.4พร้อมกับทำความสะอาดชิ้นงานให้เรียบร้อยโดยมีรายละเอียดในการเชื่อมดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม

ชิ้นงาน	กระบวนการเชื่อม	ท่าเชื่อม	ลักษณะของรอยเชื่อม	ขนาดลวดเติม Ø (มม.)	ชนิดของกระแส	จำนวนแนวเชื่อม
SS400	SMAW	ท่าราบ	Single V 60°	3.2	AC	1

ตารางที่ 3.2 ขั้นตอนการเชื่อมตามขอบเขตที่กำหนดไว้

ชิ้นงาน	Preheat(°C) /Time (min.)	Current (A)	Voltage (V)
1	400°C / 60 min.	80	22
2	400°C / 60 min.	100	22
3	400°C / 60 min.	120	22

- ทำการเชื่อมชิ้นงานชิ้นที่ 1 โดยใช้ลวดเชื่อมที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที กระแสไฟฟ้า 80 แอมป์แรงดันไฟฟ้า 22 โวลต์
- ทำการเชื่อมชิ้นงานชิ้นที่ 2 โดยใช้ลวดเชื่อมที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที กระแสไฟฟ้า 100 แอมป์แรงดันไฟฟ้า 22 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการเชื่อมชิ้นงานชั้นที่ 3 โดยใช้ลวดเชื่อมที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที กระแสไฟฟ้า 120 แอมป์ แรงดันไฟฟ้า 22 โวลต์

เมื่อทำการเชื่อมเสร็จแล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในบรรยากาศปกติ พร้อมเจียรตกแต่งให้เรียบร้อย ซึ่งจะได้ชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.5



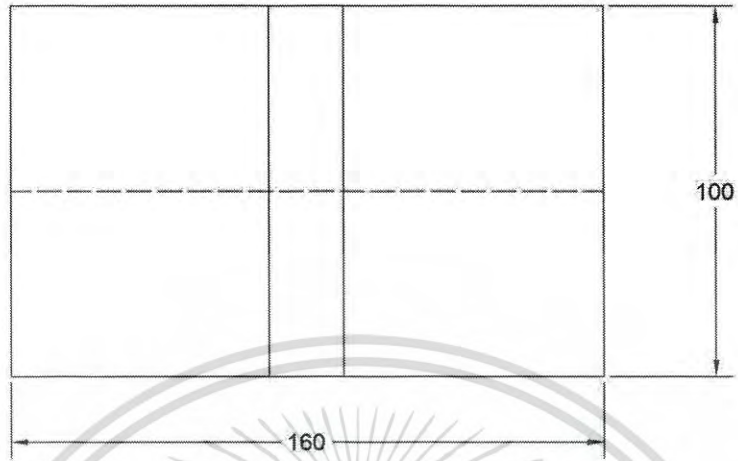
รูปที่ 3.5 แสดงการเชื่อมชิ้นงานที่สมบูรณ์

เมื่อทำการเชื่อมเสร็จสิ้นแบ่งการทดสอบเป็นการทดสอบความแข็ง (Hardness Testing) และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Micro-structural Examination)

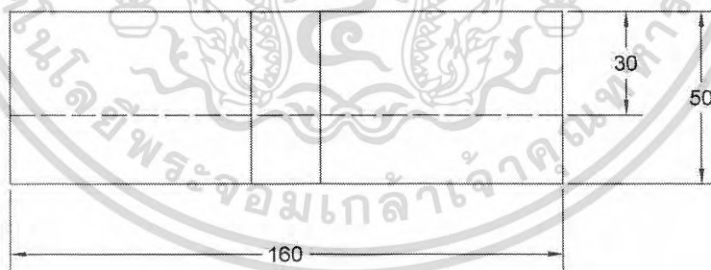
### 3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

#### 3.3.1 การตัดชิ้นงาน

เมื่อทำการเชื่อมเสร็จสิ้น ทำการตัดชิ้นงานออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆกันโดยตัดตามแนวความยาวของชิ้นงานที่ทำการเชื่อมเสร็จแล้วดังแสดงในรูปที่ 3.6 จากนั้นนำมาตัดให้ได้ความกว้าง 30 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จากนั้นนำมาตัดให้ได้ความยาว 100 มม. โดยตัดออกข้างละ 30 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ขนาดชิ้นงานที่ตัดเสร็จสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9

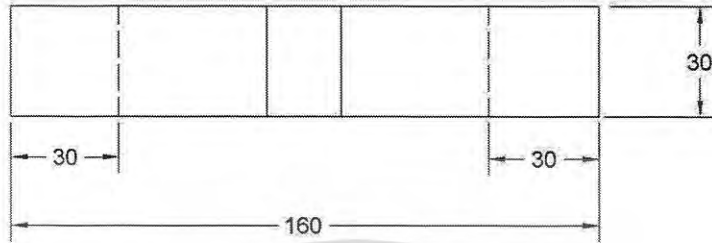


รูปที่ 3.6 แสดงขนาดก่อนการตัดชิ้นงาน



รูปที่ 3.7 แสดงขนาดการตัดชิ้นงานครั้งแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงขนาดการตัดชิ้นงานครึ่งสอง



รูปที่ 3.9 แสดงขนาดชิ้นงานที่ตัดเสร็จสมบูรณ์

นำชิ้นงานที่กำหนดเรียบบร้อยนำไปตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพานตั้งตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ จำเป็นต้องมึ่น้ำหล่อเย็นตลอดเวลา เพื่อลดความร้อนในชิ้นงานให้มากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 3.10 พร้อมกับเจียรขอบชิ้นงานเพื่อลบรอยคมให้เรียบบร้อยก่อนขึ้นขั้นตอนการขัดด้วยกระดาษทรายต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 เครื่องเลื่อยสายพานตั้ง

### 3.3.2 การขัดชิ้นงาน

ทำการขัดชิ้นงานขัดด้วยกระดาษทรายปรับระนาบผิวให้ได้ระดับ เพื่อลดความลึก กำจัดรอยขีด ข่วนบนผิวของชิ้นงานให้น้อยลงเรื่อยๆไปตามลำดับความละเอียดของกระดาษทราย โดยเริ่มใช้กระดาษทราย ตั้งแต่เบอร์ 80, 120, 320, 600 และ 1200 ตามลำดับ ซึ่งต้องขัดตามทิศทางของแนวกระดาษทรายควรใช้ แรงกดให้พอเหมาะไม่ควรใช้แรงกดมากเกินไป เพราะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวระนาบพื้นผิวได้ เกิดความไม่ สม่ำเสมอในชิ้นงาน และใช้น้ำหล่อเย็นตลอดเวลาขัด เพื่อพัดเศษขัดออกไปจากผิวหน้างานและช่วยหล่อเย็น ชิ้นงานไม่ให้เกิดความร้อนมากเกินไป



รูปที่ 3.11 กระดาษเบอร์ต่างๆ



รูปที่ 3.12 เครื่องขัดกระดาษทราย

### 3.3.3 การขัดมัน

การขัดมันชิ้นงานใช้กากเพชรขัดผิวของชิ้นงานที่มีความแข็งสูงมาก โดยใช้กากเพชรขัดผิวขนาด 3 ไมครอน การขัดรูปแบบนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายต่อการขัดกระดาษทรายก่อนหน้านี้ เพื่อกำจัดรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นจากการขัดกระดาษทรายก่อนหน้านี้ให้หมด ซึ่งจะทำให้เกิดผิวมันเงาและเรียบเป็นมันวาว

วัสดุที่ใช้ในการขัดมันประกอบด้วย ผ้าขัด ผงชนิดต่างๆ โดยสามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานแต่ละประเภท



รูปที่ 3.13 เครื่องผิวชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 การล้างชิ้นงาน

ในการเตรียมชิ้นงานการขัดแต่ละครั้งจำเป็นต้องล้างชิ้นงานทุกครั้ง เพื่อทำความสะอาดขจัดสิ่งสกปรก เศษผงเล็กๆซึ่งติดอยู่กับผิวชิ้นงานรวมถึงผงขัดที่ใช้ขัดหรือตัด และป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับเหล็กที่ก่อให้เกิดสนิมขึ้น การล้างด้วยน้ำหรือตัวทำละลายธรรมดาไม่อาจล้างสิ่งสกปรกหรือสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ออกไปจากชิ้นงานได้ ซึ่งถ้าไม่ทำการล้างชิ้นงานทุกครั้งการเตรียมชิ้นงาน อาจจะทำให้ผิวชิ้นงานเกิดความเสียหายหรือคุณภาพไม่ดีตามที่ต้องการ

ชิ้นงานที่ผ่านการขัดมันเสร็จแล้วต้องล้างผิวด้วยแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลม โดยการเป่าจากลมร้อนก่อนจึงจะเป่าลมเย็น การเป่าด้วยลมร้อนต้องระมัดระวังอย่าให้ชิ้นงานร้อนเกินไป อาจจะทำให้โครงสร้างด้านในเปลี่ยนไป

### 3.3.5 การกัดผิวชิ้นงาน

การเลือกน้ำยากัดชิ้นงานขึ้นอยู่กับชนิดโลหะและสภาวะที่ต้องการตรวจสอบ ซึ่งการทดสอบนี้ใช้น้ำยาแบบธรรมดาเป็นส่วนผสมของน้ำยากัดกรด เพื่อให้สามารถจำแนก แยกแยะ วิเคราะห์โครงสร้างได้ โดยใช้เวลาประมาณ 5 วินาที หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงเพื่อตรวจสอบหาโครงสร้างภายในต่อไป

ผิวชิ้นงานตรวจสอบที่ผ่านการขัดมัน สามารถสะท้อนแสงได้ใกล้เคียงกันตลอดแนวพื้นเรียบ ถ้าเตรียมผิวชิ้นงานไม่ดีก็ไม่สามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคได้ จะมองเห็นแต่รอยขีดข่วน รุพูน หรือหลุมจึงจำเป็นต้องกัดกรดผิวชิ้นงานโดยจำเป็นต้องเลือกส่วนผสมให้เหมาะสมกับชนิดเหล็กนี้และที่สำคัญก่อนที่กัดผิวชิ้นงานทุกครั้งจำเป็นต้องทำความสะอาดให้หมดจด ไม่มีไขมันหรือแม้แต่น้ำมัน

ส่วนผสมกรดที่ใช้ คือ ไนตริก 4% (ผสมจากกรดไนตริก 4 มล. และเอทิลแอลกอฮอล์ 96 มล.)และทำการจุ่มชิ้นงานลงในกรดที่เราผสม 5 วินาที แล้วนำชิ้นงานมาเป่าให้แห้ง จากนั้นนำชิ้นงานเตรียมทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงต่อไป

## 3.4 การทดสอบชิ้นงาน

### 3.4.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

โดยการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง Optical Microscope ดังแสดงในรูปที่ รูปที่ 3.14 เพื่อทำการเปรียบเทียบความกว้างของบริเวณแนวเชื่อม (Fusion zone) และบริเวณที่โดนความร้อน (HAZ)



รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



รูปที่ 3.15 การวางแผนงานบนเครื่องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและตรวจสอบผ่านทางคอมพิวเตอร์

ทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานทั้ง 3 กระแส เพื่อหารูปร่างของแนวเชื่อมและทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค วัดขนาดเกรน 3 ส่วน คือ บริเวณเนื้อโลหะ (Base metal) บริเวณกระพร้อน (HAZ) และบริเวณรอยเชื่อม (Fusion zone) ของชิ้นงานที่ทำการเชื่อมทั้ง 3 กระแส และบันทึกผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

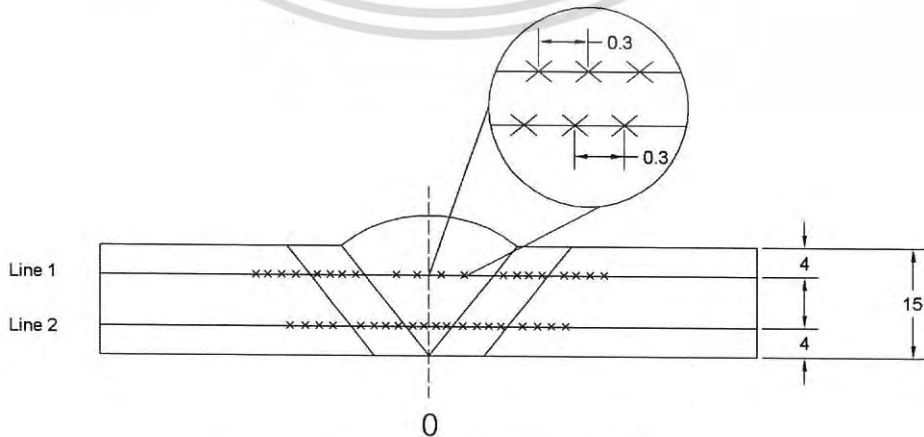
### 3.4.2 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบนี้ใช้ชิ้นงานต่อจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ในการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งของชิ้นงาน ในการทดสอบใช้เครื่องทดสอบแบบ Vickers ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งอ่านค่าเป็น HV โดยใช้หัวเพชรพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Vickers

เริ่มการทดสอบความแข็ง โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค กำหนดระบุตำแหน่งทดสอบลงบนผิวหน้าชิ้นงาน เพื่อแสดงจุดตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบความแข็งบนจุดต่างๆบนผิวหน้าชิ้นงานตามรูปที่ 3.14 โดยมีระยะห่างจากรอยกตแต่ละจุด 0.3 มม.เท่าๆกันทั้งด้านขวาซ้ายบนเส้น Line 1 และ Line 2 โดยแบ่ง 3 ส่วน คือ บริเวณเนื้อโลหะ(Base metal)บริเวณกระหีบร้อน(HAZ) และบริเวณรอยเชื่อม (Fusion zone)



รูปที่ 3.17 แสดงตำแหน่งจุดคบบนผิวชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบโดยเริ่มกดชิ้นงานทดสอบที่ 1 บน Line 1 ที่บริเวณเนื้อโลหะฝั่งขวา 4 จุด บริเวณกระทบริ้นฝั่งขวา 4 จุด บริเวณรอยเชื่อม 4 จุด บริเวณกระทบริ้นฝั่งซ้าย 4 จุด บริเวณเนื้อโลหะฝั่งซ้าย 4 จุด ตามลำดับ โดยใช้แรงกด 100 gf เป็นเวลา 15 วินาที จากนั้นทำการกดบน Line 2 ที่บริเวณเนื้อโลหะฝั่งขวา 4 จุด บริเวณกระทบริ้นฝั่งขวา 4 จุด บริเวณรอยเชื่อม 4 จุด บริเวณกระทบริ้นฝั่งซ้าย 4 จุด บริเวณเนื้อโลหะฝั่งซ้าย 4 จุดตามลำดับ โดยใช้แรงกด 100 gf เป็นเวลา 15 วินาที จากนั้นทำการกดชิ้นงานที่ 2 และ 3 ในลักษณะเดียวกันแล้วเก็บข้อมูล



รูปที่ 3.18 ลักษณะการวางและการทดสอบชิ้นงาน

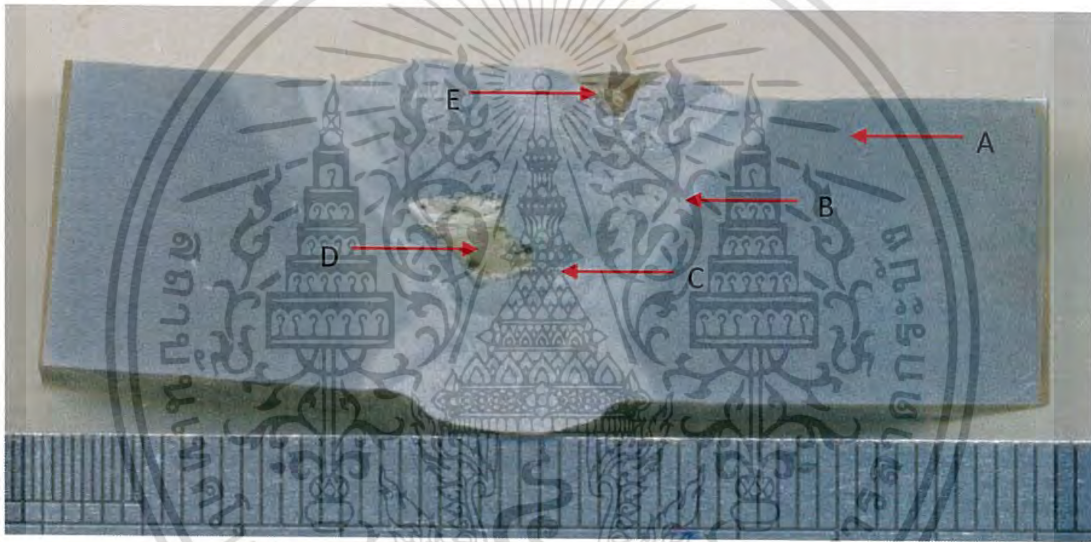
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructural Examination)

##### 4.1.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 80 A

ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบได้แบ่งออกเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณ A, B และ C ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงบริเวณที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 80 A

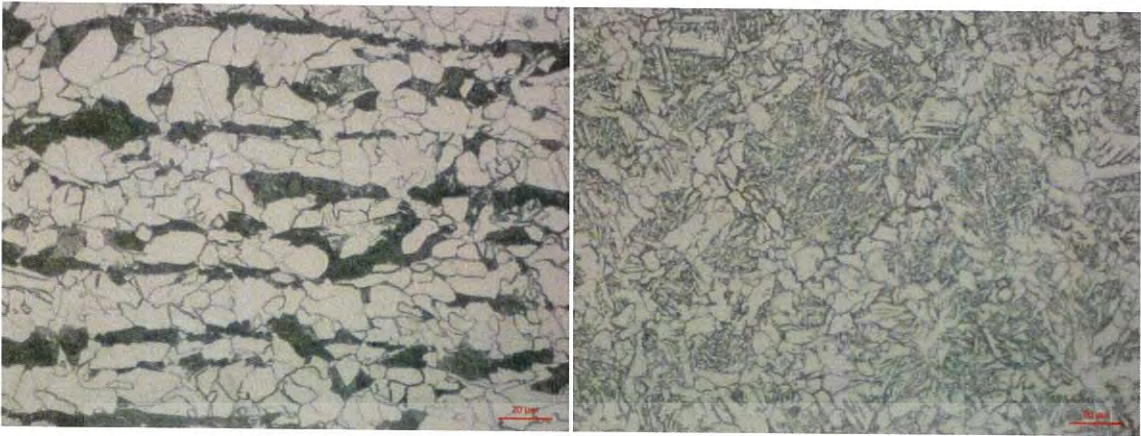
บริเวณ A คือบริเวณเนื้อโลหะ (Base metal) เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลจากความร้อนในการเชื่อม ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์กับเพิร์ลไลต์เกรนมีขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.2(ก)

บริเวณ B คือบริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone) เป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่เกิดขึ้นในการเชื่อมลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคเป็นเบนไนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2(ข)

บริเวณ C คือบริเวณรอยเชื่อม (Fusion zone) เป็นบริเวณที่เนื้อโลหะเดิมหลอมรวมกับลวดเชื่อม ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคเป็นเบนไนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2(ค)

บริเวณ D และ E คือสแลกฝังใน (Slag inclusion) เป็นบริเวณที่มีสแลกฝังตัวอยู่ในบริเวณรอยเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)



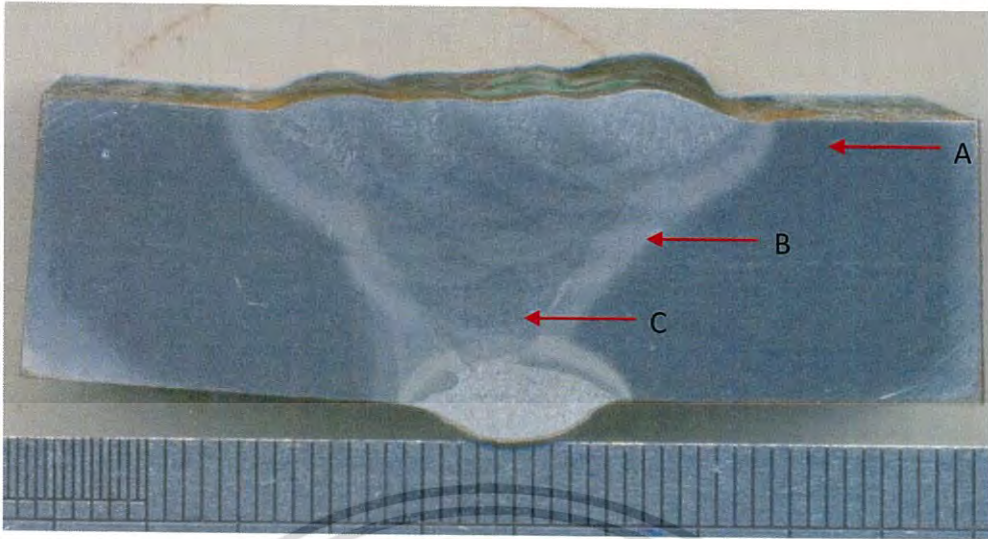
(ค)

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 80 A (ก) บริเวณ A (ข) บริเวณ B (ค) บริเวณ C ที่กำลังขยาย 500 เท่า

#### 4.1.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ใช้กระแสในการเชื่อม 100 A

ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบได้แบ่งออกเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณ A, B และ C ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



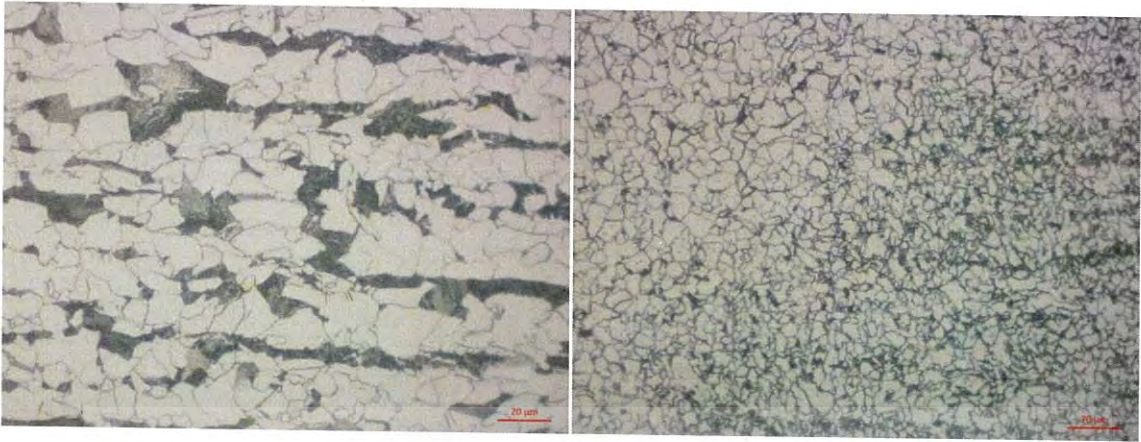
รูปที่ 4.3 แสดงบริเวณที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า

100 A

บริเวณ A คือบริเวณเนื้อโลหะ (Base metal) เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลจากความร้อนในการเชื่อม ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์กับเพิร์ลไลต์เกรนมีขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ก)

บริเวณ B คือบริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone) เป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่เกิดขึ้นในการเชื่อมลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์กับเพิร์ลไลต์เกรนมีขนาดเล็กที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ข)

บริเวณ C คือบริเวณรอยเชื่อม (Fusion zone) เป็นบริเวณที่เนื้อโลหะเดิมหลอมรวมกับสวดเชื่อม ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์กับเพิร์ลไลต์เกรนมีขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 4.4(ค)



(ก)

(ข)



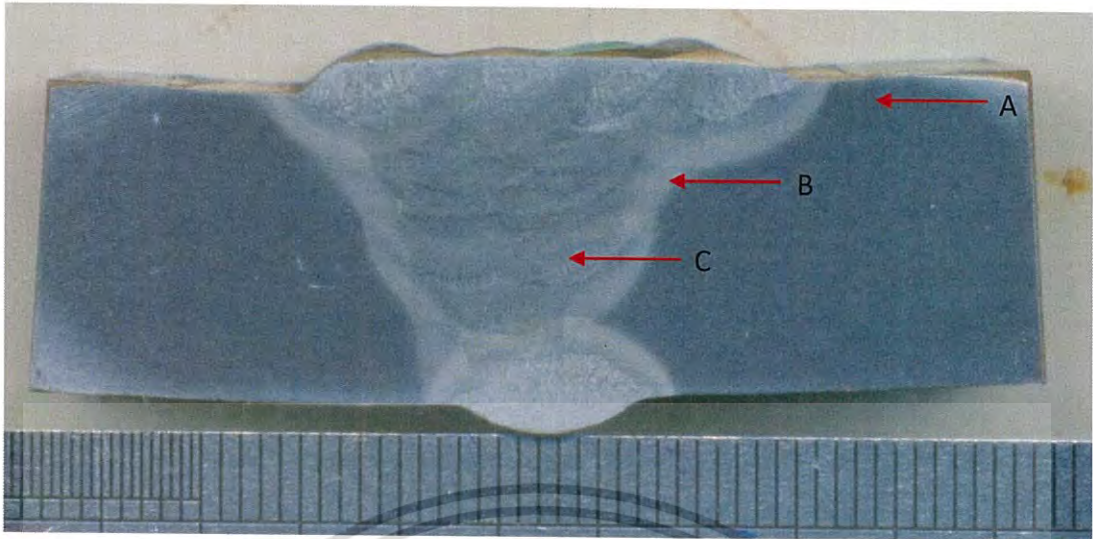
(ค)

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 100 A (ก) บริเวณ A (ข) บริเวณ B (ค) บริเวณ C ที่กำลังขยาย 500 เท่า

#### 4.1.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ใช้กระแสในการเชื่อม 120 A

ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบได้แบ่งออกเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณ A, B และ C ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



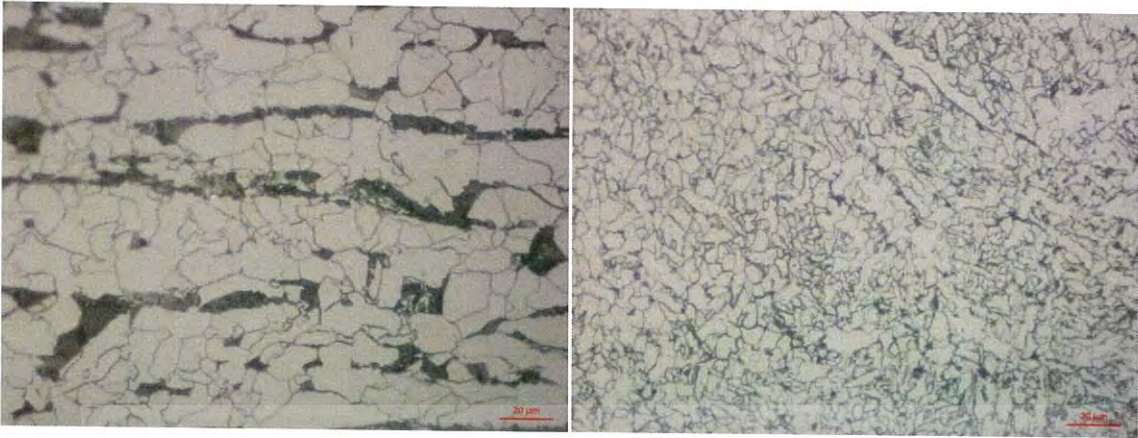
รูปที่ 4.5 แสดงบริเวณที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า

120 A

บริเวณ A คือบริเวณเนื้อโลหะ (Base metal) เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลจากความร้อนในการเชื่อม ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์กับเพิร์ลไลต์เกรนมีขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.6(ก)

บริเวณ B คือบริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone) เป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่เกิดขึ้นในการเชื่อมลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์กับเพิร์ลไลต์เกรนมีขนาดเล็กที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.6(ข)

บริเวณ C คือบริเวณรอยเชื่อม (Fusion zone) เป็นบริเวณที่เนื้อโลหะเดิมหลอมรวมกับสวดเชื่อม ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์กับเพิร์ลไลต์ เกรนมีขนาดใหญ่กว่าบริเวณกระทบร้อนเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.6(ค)



(ก)

(ข)



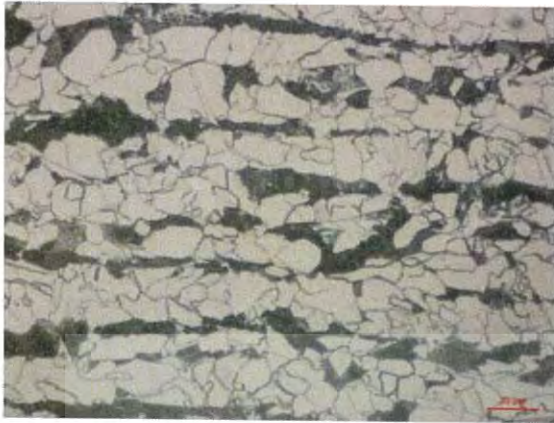
(ค)

รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120 A (ก) บริเวณ A (ข) บริเวณ B (ค) บริเวณ C ที่กำลังขยาย 500 เท่า

#### 4.1.4 ขนาดเกรน

ทำการวัดขนาดเกรนด้วยวิธี Intercept รูปแบบเส้น Combined Chord ตามมาตรฐาน ASTM E 1382 เนื่องจากบริเวณเนื้อโลหะเป็นเหล็กชนิดเดียวกันทั้ง 3 ชิ้นงานจึงทำการวัดขนาดเฉพาะชิ้นงานที่ 1 โดยมีค่า Grain size number เท่ากับ 10.87 ดังแสดงในรูปที่ 4.7

Grain Size Number  $\phi$ : 10.87



Original image

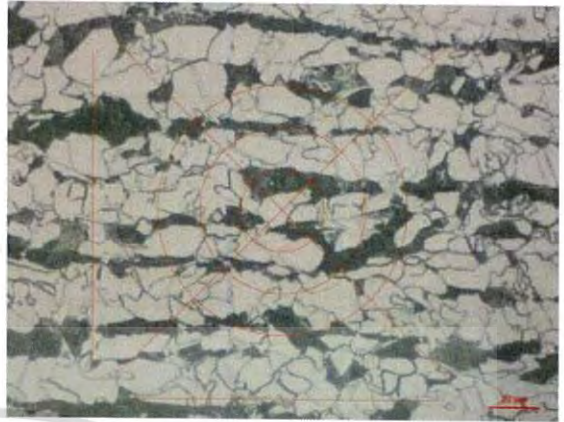


Image with Annotations

รูปที่ 4.7 การวัดขนาดเกรนด้วยวิธี Intercept บริเวณเนื้อโลหะที่กระแสไฟฟ้า 100 A

บริเวณกระทบบร้อนของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 80 A ไม่สามารถวัด Grain size number ได้เนื่องจากโครงสร้างเบนไนต์ยังเรียงตัวไม่สมบูรณ์

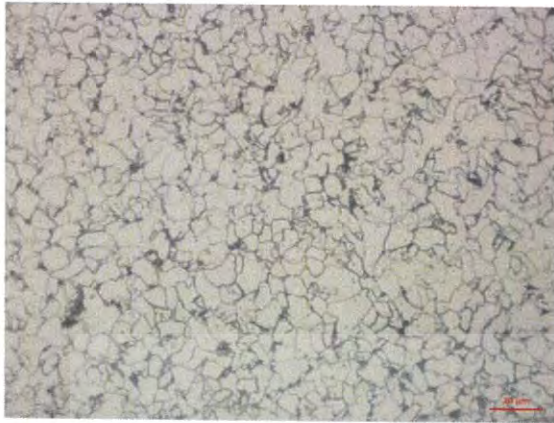
บริเวณกระทบบร้อนของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 100 A และ 120 A ไม่สามารถวัด Grain size number ได้ เนื่องจากเกรนมีขนาดเล็กมากเครื่องมือที่ใช้ในการวัดขนาดไม่สามารถวัดได้

บริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 80 A ไม่สามารถวัด Grain size number ได้ เนื่องจากโครงสร้างเบนไนต์ยังเรียงตัวไม่สมบูรณ์

บริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 100 A มีค่า Grain size number เท่ากับ 11.88 ดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Grain Size Number  $\phi$ : 11.88



Original image

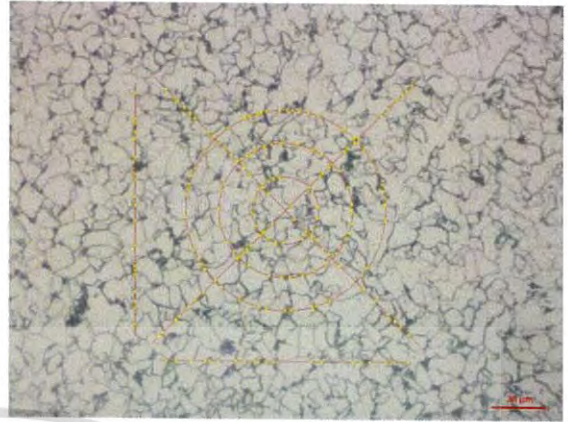
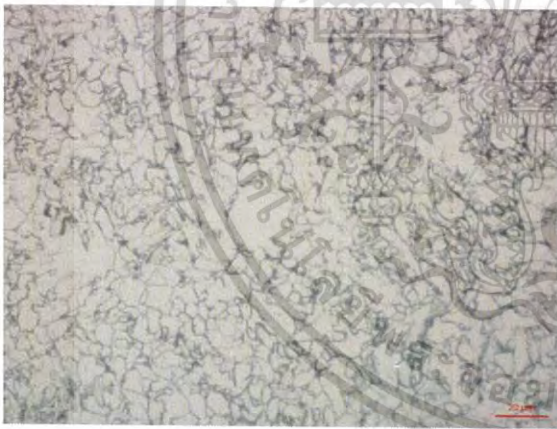


Image with Annotations

รูปที่ 4.8 การวัดขนาดเกรนด้วยวิธี Intercept บริเวณรอยเชื่อมที่กระแสไฟฟ้า 100 A

บริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120 A มีค่า Grain size number เท่ากับ 11.58 ดังรูปที่ 4.9

Grain Size Number  $\phi$ : 11.58



Original image

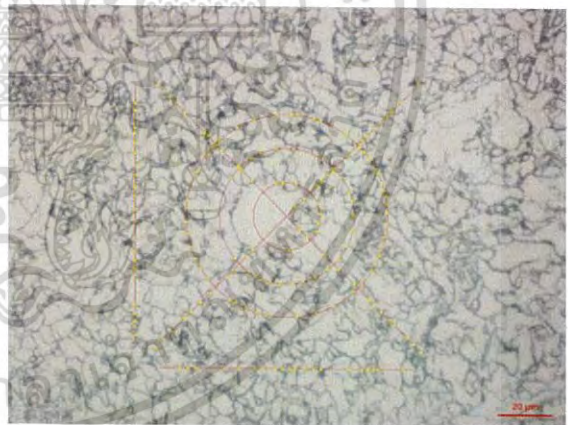


Image with Annotations

รูปที่ 4.9 การวัดขนาดเกรนด้วยวิธี Intercept บริเวณรอยเชื่อมที่กระแสไฟฟ้า 120 A

โดยทั่วไปจะบอกขนาดเกรนเป็นจำนวนเกรนต่อหน่วยพื้นที่ จากความสัมพันธ์ของ Grain size number กับ Grains/Unit Area ในตาราง Grain size relationships computed for uniform, randomly oriented, equiaxed grains ดังแสดงในตารางที่ 4.1 สามารถหา Grains/Unit Area ได้โดยการ interpolate ดังแสดงในตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของขนาดเกรน( ที่มา : ASTM E112 Table 4)

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

Grain Size No. G	$N_A$ Grains/Unit Area		$A$ Average Grain Area		$\bar{d}$ Average Diameter		$\bar{\lambda}$ Mean Intercept		$N_L$ No./mm
	No./in. <sup>2</sup> at 100X	No./mm <sup>2</sup> at 1X	mm <sup>2</sup>	μm <sup>2</sup>	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11232.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยของ Grain size No. , Grain Area (μm<sup>2</sup>) , Grain Diameter (μm) และ Grains/Unit Area (No./mm<sup>2</sup>) at 1X ของชิ้นงานทดสอบที่ 1-3

No.	Area	Average Grain Size No.	Grains/Unit Area (No./mm <sup>2</sup> ) at 1X	Average Grain Area (μm <sup>2</sup> )	Average Grain Diameter (μm)
1	Base metal	10.87	14663.3	69.8	8.3
	HAZ	-	-	-	-
	Weld	-	-	-	-
2	Base metal	10.87	14663.3	69.8	8.3
	HAZ	-	-	-	-
	Weld	11.88	29512.7	34.6	5.9
3	Base metal	10.87	14663.3	69.8	8.3
	HAZ	-	-	-	-
	Weld	11.58	23934.0	42.5	6.5

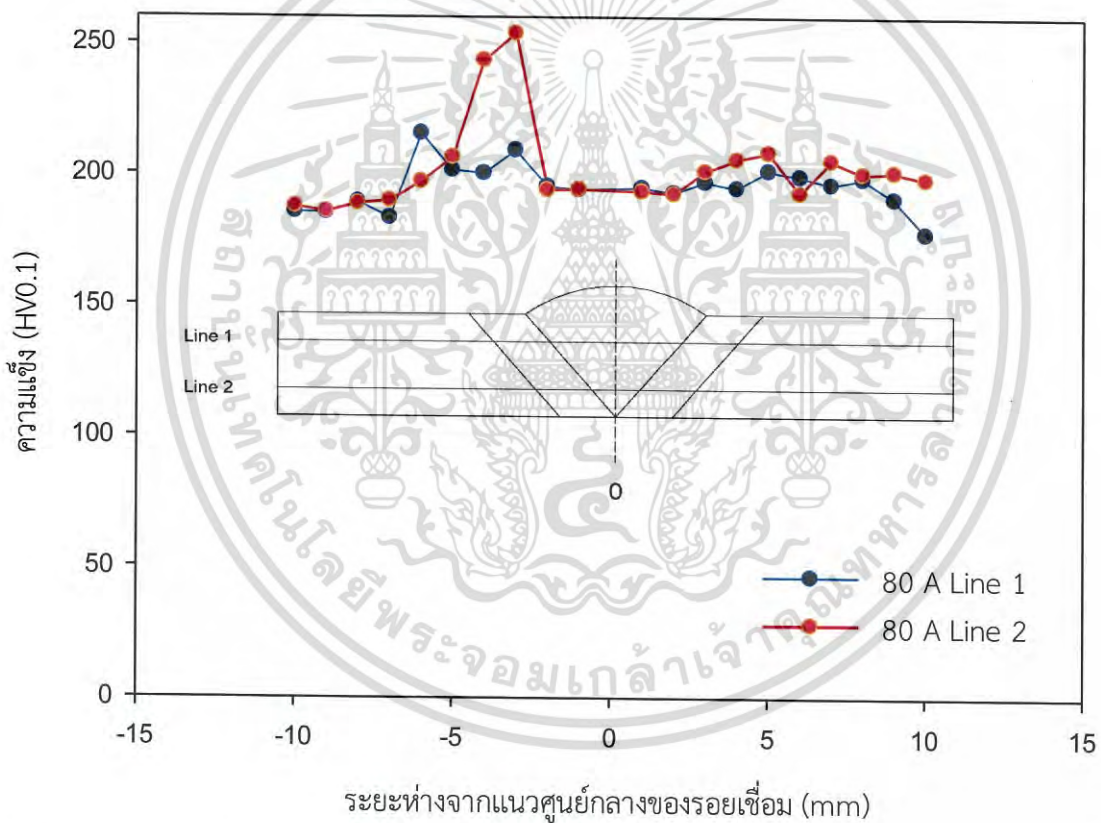
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

### 4.2.1 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 80 A

ที่ Line 1 บริเวณกระทบบร้อนมีความแข็งมากที่สุด บริเวณรอยเชื่อมมีความแข็งลดลง และบริเวณเนื้อโลหะมีความแข็งลดลงจากบริเวณรอยเชื่อมเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ ตารางที่ 4.3

ที่ Line 2 บริเวณกระทบบร้อนมีความแข็งมากที่สุด บริเวณเนื้อโลหะมีความแข็งลดลง และบริเวณรอยเชื่อมมีความแข็งลดลงจากบริเวณเนื้อโลหะเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ ตารางที่ 4.3

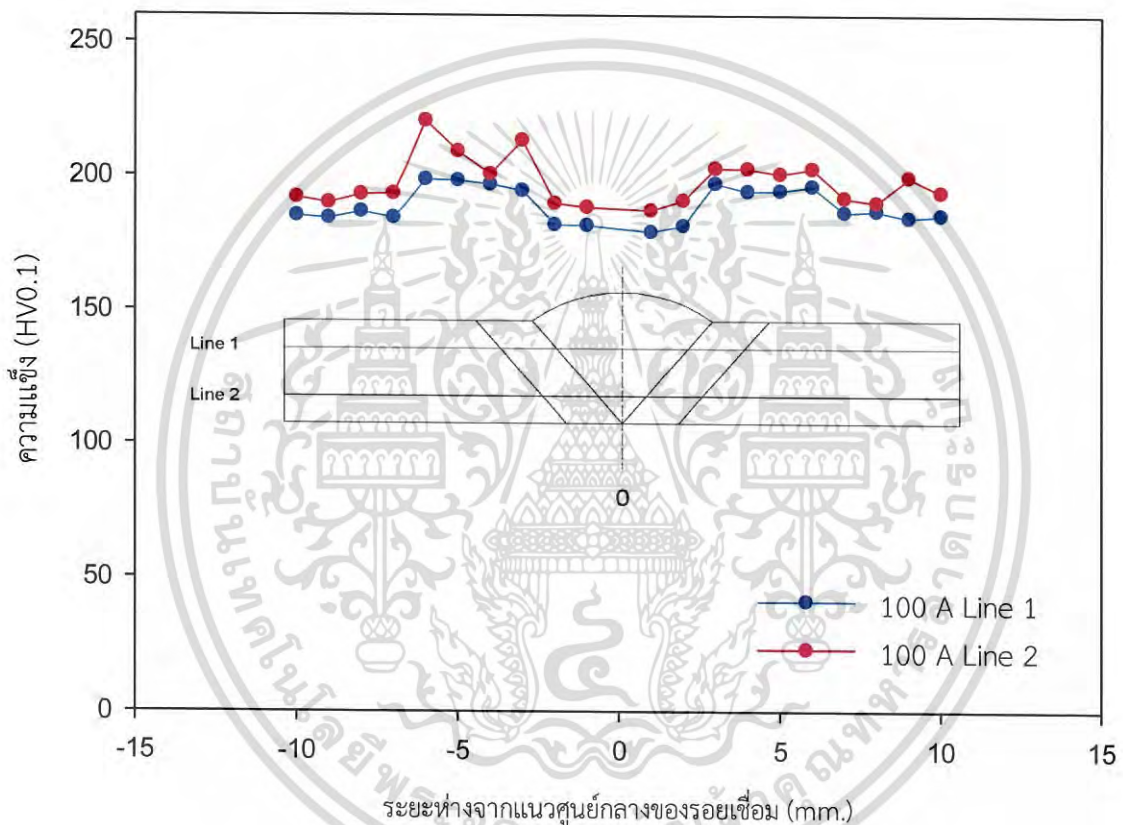


รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง (HV0.1) กับ ระยะห่างจากแนวศูนย์กลางของรอยเชื่อม (mm) ของชิ้นงานทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 80 A

#### 4.2.2 ผลการทดสอบความแข็งขึ้นของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 100 A

ที่ Line 1 บริเวณกระแทกร้อนมีความแข็งมากที่สุด บริเวณเนื้อโลหะมีความแข็งลดลง และบริเวณรอยเชื่อมมีความแข็งน้อยที่สุด ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ ตารางที่ 4.3

ที่ Line 2 บริเวณกระแทกร้อนมีความแข็งมากที่สุด บริเวณเนื้อโลหะมีความแข็งลดลง และบริเวณรอยเชื่อมมีความแข็งน้อยที่สุด ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ ตารางที่ 4.3



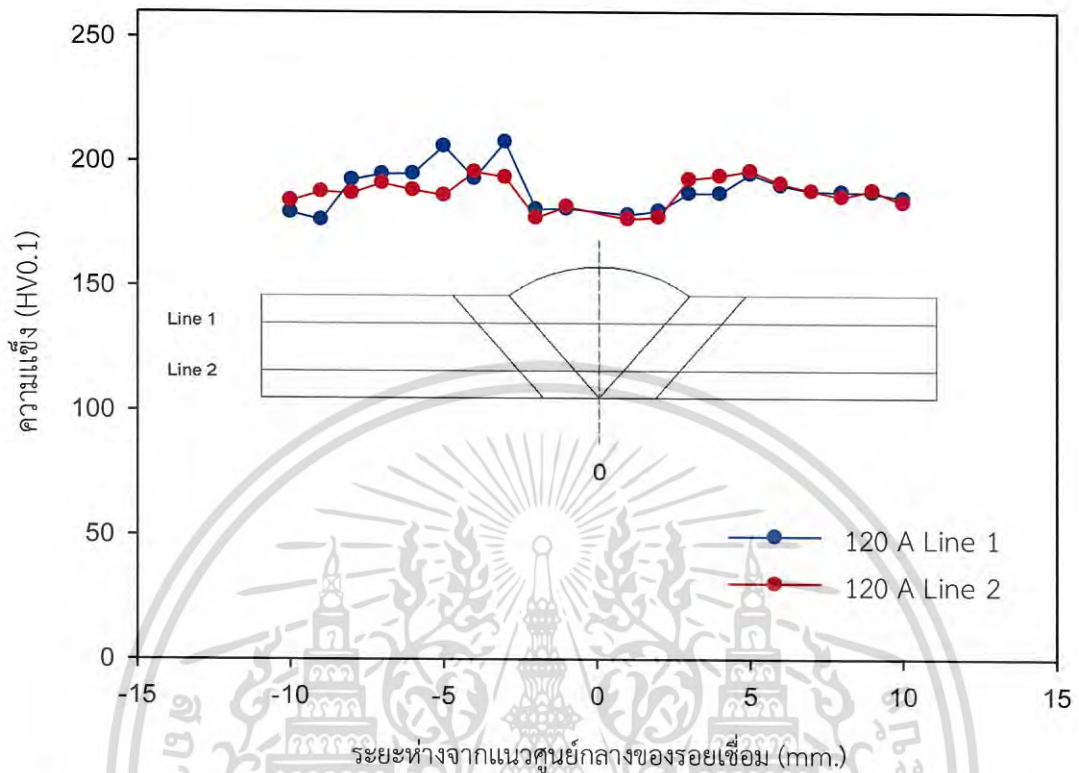
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง (HV0.1) กับ ระยะห่างจากแนวศูนย์กลางของรอยเชื่อม (mm) ของชิ้นงานทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 100 A

#### 4.2.3 ผลการทดสอบความแข็งขึ้นของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120 A

ที่ Line 1 บริเวณกระแทกร้อนมีความแข็งมากที่สุด บริเวณเนื้อโลหะมีความแข็งลดลง และบริเวณรอยเชื่อมมีความแข็งน้อยที่สุด ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ ตารางที่ 4.3

ที่ Line 2 บริเวณกระแทกร้อนมีความแข็งมากที่สุด บริเวณเนื้อโลหะมีความแข็งลดลง และบริเวณรอยเชื่อมมีความแข็งน้อยที่สุด ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ ตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

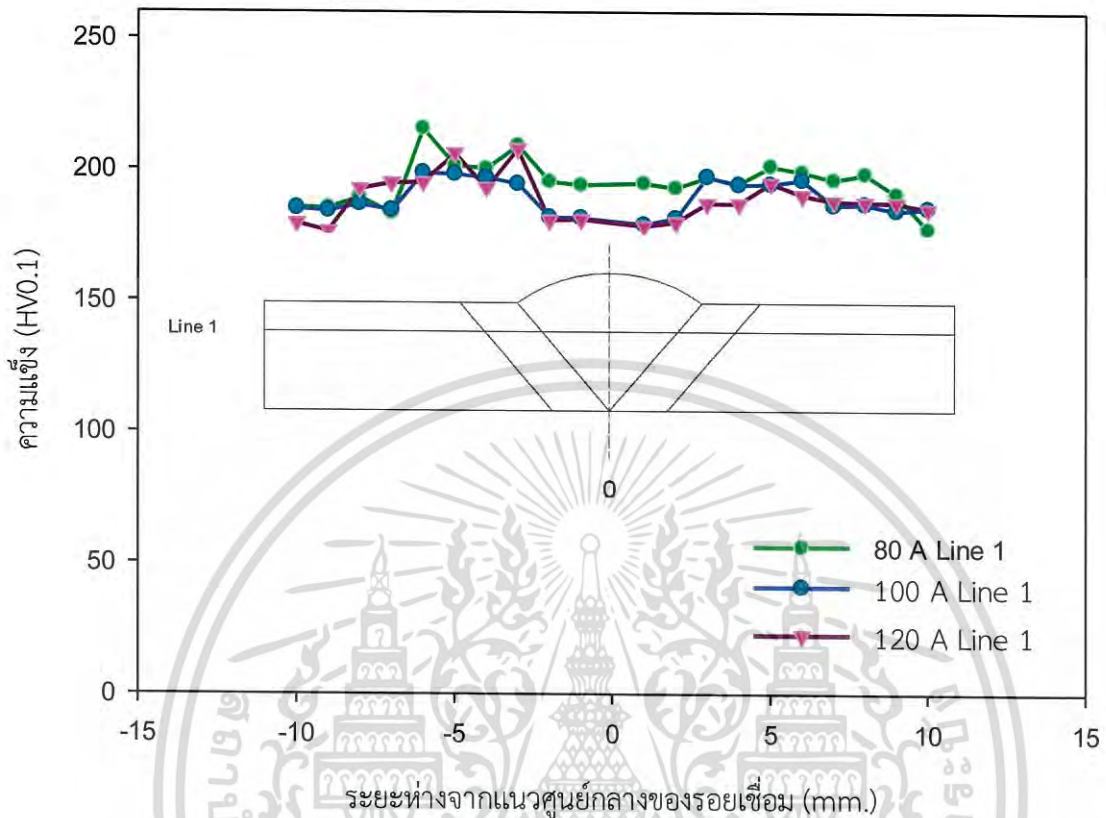


รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง (HV0.1) กับ ระยะห่างจากแนวศูนย์กลางของรอยเชื่อม (mm.) ของชิ้นงานทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 120 A

#### 4.2.4 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 80 A 100 A และ 120 A ที่ Line 1

บริเวณกระหนว้น ชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 80 A มีความแข็งมากที่สุด ชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 100 A มีความแข็งลดลง และชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120 A มีความแข็งลดลงจาก ชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 100 A เพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.13

บริเวณรอยเชื่อม ชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 80 A มีความแข็งมากที่สุด ชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 100 A มีความแข็งลดลง และชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120 A มีความแข็งลดลงจาก ชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 100 A เพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.13

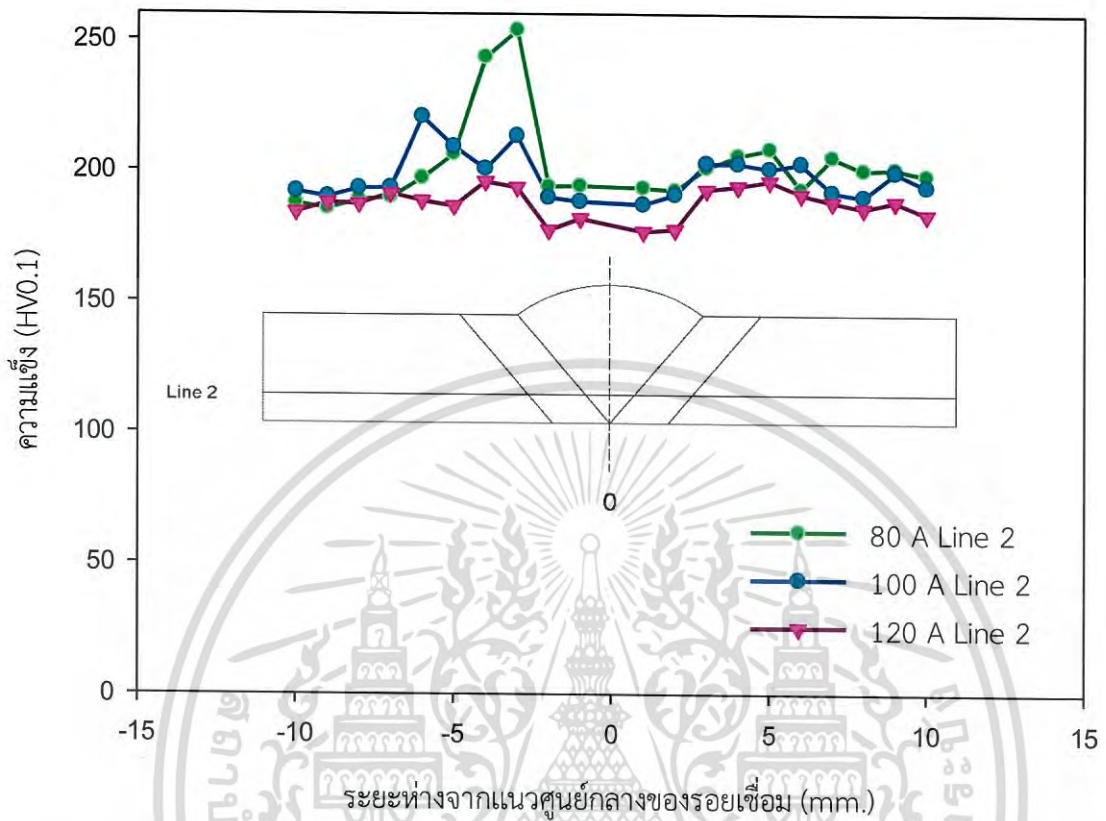


รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง (HV0.1) กับ ระยะห่างจากแนวศูนย์กลางของรอยเชื่อม (mm.) ของชิ้นงานทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 80 A, 100 A และ 120 A ที่ Line 1

#### 4.2.5 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 80 A 100 A และ 120 A ที่ Line 2

บริเวณกระหนวร้อน ชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 80 A มีความแข็งมากที่สุด ชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 100 A มีความแข็งลดลงจากชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 80 A เพียงเล็กน้อย และชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120 A มีความแข็งน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.14

บริเวณรอยเชื่อม ชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 80 A มีความแข็งมากที่สุด ชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 100 A มีความแข็งลดลง และชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120 A มีความแข็งน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง (HV0.1) กับ ระยะห่างจากแนวศูนย์กลางของรอยเชื่อม (mm.) ของชิ้นงานทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 80 A, 100 A และ 120 A ที่ Line 2

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ทำกรเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 80 A, 100 A และ 120 A ที่ Line 1 และ Line 2

ตำแหน่ง	ความแข็ง (HV0.1)					
	80 A		100 A		120 A	
	Line 1	Line 2	Line 1	Line 2	Line 1	Line 2
10	177.4	198.2	185.3	193.3	185.2	183.5
9	190.7	200.8	184.4	193.1	187.5	188.4
8	198.4	200.2	186.9	189.9	187.7	185.8
7	196.1	205.2	186.4	191.9	188.1	188.2
6	199.1	193	196.1	213.3	190.4	191.2
5	201.3	208.3	194.5	200.7	195	196.2
4	194.7	205.7	194.2	209.1	187.2	194.2
3	197	201.1	197.3	220.5	187.2	192.8
2	193	192.5	181.4	190.9	180	177.6
1	194.8	193.5	179.1	187.2	178.5	176.8
-1	194.1	194.2	181.5	188.3	181	181.8
-2	195.4	194	181.8	189.8	180.6	177.3
-3	209.1	253.7	194.5	202.8	207.8	193.6
-4	200.3	243.4	196.8	200.8	193	195.8
-5	201.5	206.3	198.2	202.8	206.1	186.4
-6	215.4	197.1	198.6	202.9	195	188.4
-7	183.1	189.7	184.3	193.9	194.8	191.2
-8	189.2	188.6	186.6	199.5	192.5	187.2
-9	185.1	185.4	184.1	190.1	176.4	187.7
-10	185.4	187.3	185	191.9	179.4	184.1

หมายเหตุ ตำแหน่งกตที่ 7 ถึง 10 และ -7 ถึง -10 คือ บริเวณเนื้อโลหะ

ตำแหน่งกตที่ 3 ถึง 6 และ -3 ถึง -6 คือ บริเวณกระแทบร้อน

ตำแหน่งกตที่ -2 ถึง 2 บริเวณรอยเชื่อม

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 80 A, 100 A และ 120 A ที่ Line 1 และ Line 2

ตำแหน่ง	ความแข็ง (HV0.1)					
	Line 1			Line 2		
	80 A	100 A	120 A	80 A	100 A	120 A
Base metal	190	186	187.7	196.5	192.4	185.2
Heat affected zone	204.8	194.9	193	205.5	207.7	193.6
Fusion zone	191.5	180	179.7	194.2	188.4	178.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 72 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปผลจากลักษณะทางกายภาพ แนวบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา และการทดสอบคุณสมบัติทางกลได้ดังนี้

##### 5.1.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

ผลการตรวจสอบพบว่า ลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะของทุกชิ้นงานเป็นเฟอร์ไรต์กับเพิร์ลไลต์ บริเวณกระทันและบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 80 A ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคเป็นเบนไนต์ ส่วนบริเวณกระทัน และบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 100 A และ 120 A มีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคเป็น เฟอร์ไรต์กับเพิร์ลไลต์ ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 100 A และ 120 A ขนาดเกรนของบริเวณรอยเชื่อมมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเกรนของบริเวณกระทัน โดยโครงสร้างเบนไนต์มีความแข็งมากกว่าโครงสร้างเพิร์ลไลต์กับเฟอร์ไรต์ ตามลำดับ

##### 5.1.2 ผลการทดสอบความแข็ง

บริเวณกระทันและบริเวณรอยเชื่อมของ Line 1 และ Line 2 เมื่อปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมเพิ่มขึ้นความแข็งจะมีค่าลดลง และความแข็งบริเวณกระทันความร้อนจะมีค่ามากกว่าบริเวณเนื้อโลหะและบริเวณรอยเชื่อมตามลำดับ

ในการเชื่อมชิ้นงาน SS400 ที่มีความหนา 15 mm โดยการเชื่อมอาร์คด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ โดยใช้ไอเล็กโตรด E7016 กระแสสลับแรงดันไฟฟ้า 22 V พบว่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมกับชิ้นงานนี้คือ 100 A และ 120 A เนื่องจากกระแสไฟฟ้า 100 A และ 120 A บริเวณกระทันและบริเวณรอยเชื่อมมีความแข็งแรงใกล้เคียงกับบริเวณเนื้อโลหะมากที่สุด ส่วนกระแสไฟฟ้า 80 A ที่บริเวณกระทันและบริเวณรอยเชื่อมพบว่าให้ความแข็งแรงมากกว่ากระแสไฟฟ้า 100 A และ 120 A แต่ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเฟอร์ไรต์กับเพิร์ลไลต์เป็นเบนไนต์

ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 100 A และ 120 A ที่บริเวณกระทันมีค่าความแข็งมากกว่าบริเวณรอยเชื่อมซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของขนาดเกรนและความแข็ง คือ ถ้าเป็นโครงสร้างเดียวกันบริเวณที่เกรนมีขนาดเล็กจะมีค่าความแข็งสูงกว่าบริเวณที่มีเกรนขนาดใหญ่กว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ผู้สนใจสามารถนำงานวิจัยไปศึกษาต่อโดยกระบวนการทดสอบแบบการทดสอบแรงดึง, การทดสอบแรงกระแทก หรือศึกษาการแพร่กระจายความร้อน เป็นต้น

5.2.2 สามารถนำหัวข้อวิจัยไปศึกษาต่อในการปรับตัวแปรอื่นๆ เช่น ความเร็วในการเดินลวดเชื่อม เป็นต้น

5.2.3 ในการทดลองที่ควบคุมตัวแปรที่ต้องการศึกษาควรทำการทดลองมากกว่า 1 ชิ้นงานแล้วนำค่าที่ได้จากการทดลองมาเฉลี่ยกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] William D. Callister Jr., “Materials Science and Engineering: An Introduction”, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1990.
- [2] Craig R. Barrett, William D. Nix and Alan S. Tetelman, “The Principles of Engineering Materials”, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 1973.
- [3] Mikell P. Groover, “Fundamentals of Modern Manufacturing : Materials, Process and Systems”, 4<sup>th</sup> Edition, John Wiley & Sons, Inc, New York, 2010.
- [4] Budynas-Nisbett, “Mechanical Engineering Design”, 8<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill, Inc., USA, 2006.
- [5] ศิริพร ดาวพิเศษ, “วัสดุวิศวกรรม Engineering Materials”, ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2553
- [6] กรรณชัย กัลยาศิริ, “กรรมวิธีการผลิต”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2550
- [7] อมรใหญ่ มาใหญ่, “การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมรอยต่อเกล็กเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และ เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304” วิชาเอกวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, 2557
- [8] สุเนตร มุลทา, บัญชา เวฬุวนารักษ์ และ ฤทธิชัย สังฆทิพย์, “การศึกษาอิทธิพลของปริมาณความชื้นของลวดเชื่อม E6013 ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกล”, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน, กรุงเทพฯ, 2555
- [9] วรายุทธ สุขกลับ, สุรียา พงษ์ประสิทธิ์ และ กิตติศักดิ์ แนบเนียน, “การเชื่อมเหล็กกล้าต่างชนิดระหว่าง SS400 และ S50C โดยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์”, สาขาวิชาเทคโนโลยีการเชื่อม ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเชื่อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ, 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] พ.อ.ศักดิ์ชัย จันทศรี, ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และ ผศ.สุรัตน์ ตรีวัฒนพงศ์, “การเชื่อมแกสเฉื่อยปกคลุมรอยต่อเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าโรสนิมในงานโครงสร้างอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล”, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, 2556
- [11] <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/48/crystal/A06.htm>



## ภาคผนวก ก

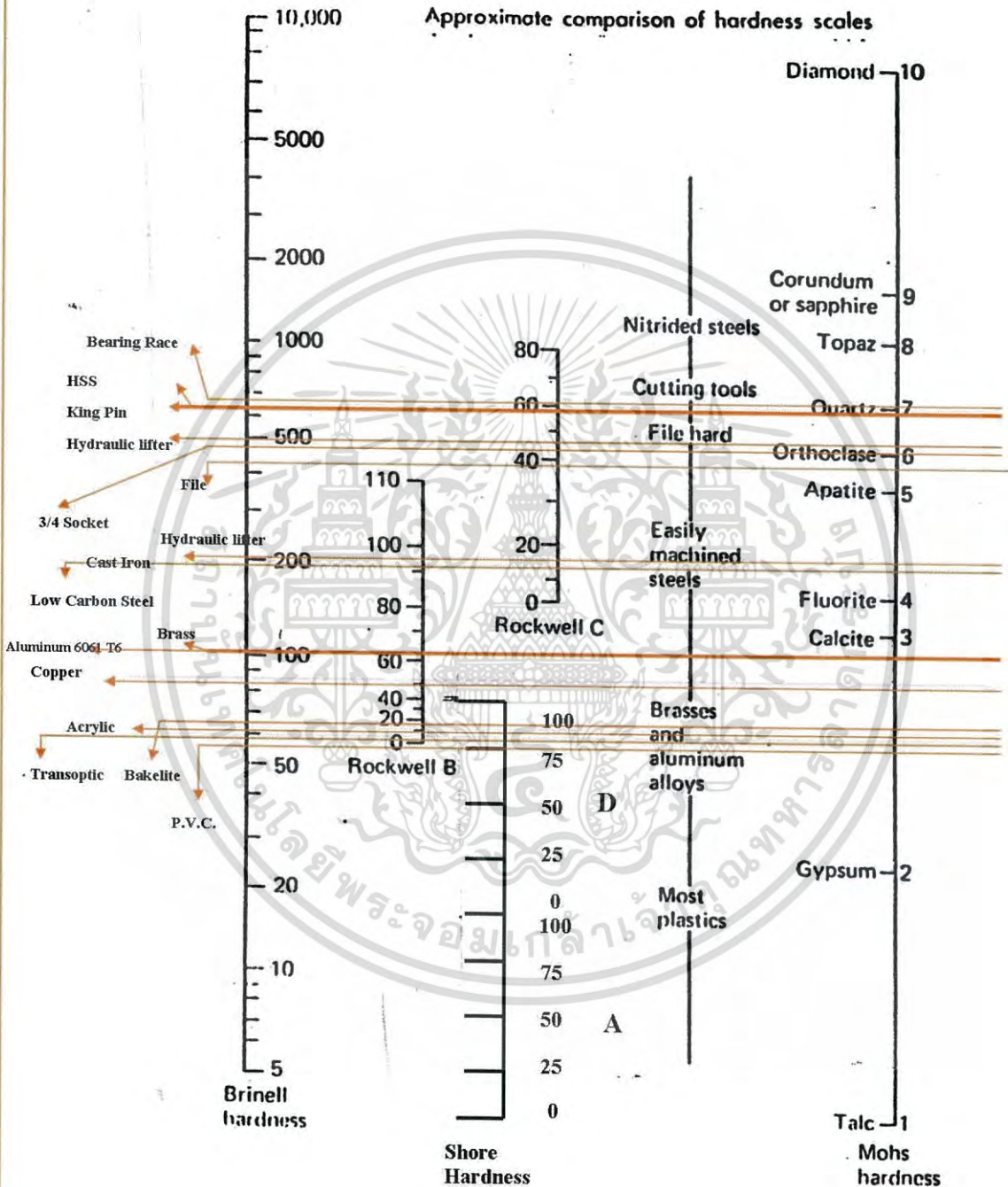
ตารางที่ ก-1 การแปลงหน่วยค่าความแข็งต่างๆ

Rockwell C Scale	Brinell Hardness	Vickers Hardness	Tensile Strength (approx.)		Rockwell C Scale	Brinell Hardness	Vickers Hardness	Tensile Strength (approx.)	
Brale Penetrator	10mm Tungsten Carbide Ball	Pyramidic Diamond			Brale Penetrator	10mm Tungsten Carbide Ball	Pyramidic Diamond		
150kgf	3,000kgf	10kgf	ksi	kg/mm <sup>2</sup>	150kgf	3,000kgf	10kgf	ksi	kg/mm <sup>2</sup>
67	-	900	-	-	43	400	423	201	141
66	-	865	-	-	42	390	412	196	138
65	739	832	-	-	41	381	402	191	134
64	722	800	-	-	40	371	392	186	131
63	705	772	-	-	39	362	382	181	127
62	688	746	-	-	38	353	372	176	124
61	670	720	-	-	37	344	363	172	121
60	654	697	-	-	36	336	354	167	118
59	634	674	329	232	35	327	345	163	114
58	615	653	319	224	34	319	336	159	112
57	595	633	307	216	33	311	327	154	109
56	577	613	297	209	32	301	318	149	105
55	560	595	288	202	31	294	310	146	102
54	543	577	279	196	30	286	302	142	99
53	525	560	269	189	29	279	294	138	97
52	512	544	262	184	28	271	286	134	94
51	496	528	253	178	27	264	279	130	92
50	481	513	245	172	26	258	272	127	89
49	469	498	238	167	25	253	266	125	88
48	455	484	231	162	24	247	260	122	85
47	443	471	224	158	23	243	254	120	84
46	432	458	218	153	22	237	248	116	82
45	421	446	212	149	21	231	243	113	80
44	409	434	206	145	20	226	238	111	78

For the source of Rockwell, Brinell and Vickers Hardness data see endnote 4.

(ที่มา : [http://lennon.csufresno.edu/~mhk03/hardness\\_1.htm](http://lennon.csufresno.edu/~mhk03/hardness_1.htm), 15 พ.ค. 59)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 เปรียบเทียบค่าความแข็งต่างๆ

(ที่มา : [http://lennon.csufresno.edu/~mhk03/hardness\\_1.htm](http://lennon.csufresno.edu/~mhk03/hardness_1.htm), 15 พ.ค. 59)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) เหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน มาตรฐานเลขที่ มอก. 1227-2537

**“ตารางที่ 11 ชั้นคุณภาพ และส่วนประกอบทางเคมีเมื่อวิเคราะห์จากบ้ำ  
(ข้อ 3.2 และข้อ 5.1)**

ชั้นคุณภาพ	ส่วนประกอบทางเคมี ร้อยละโดยน้ำหนัก				
	คาร์บอน สูงสุด	ซิลิคอน สูงสุด	แมงกานีส	ฟอสฟอรัส สูงสุด	กำมะถัน สูงสุด
SM 400	0.20	0.35	0.60 ถึง 1.40	0.035	0.035
SM 490	0.18	0.55	1.60 สูงสุด	0.035	0.035
SM 520	0.20	0.55	1.60 สูงสุด	0.035	0.035
SM 570	0.18	0.55	1.60 สูงสุด	0.035	0.035
SS 400	-	-	-	0.050	0.050
SS 490	-	-	-	0.050	0.050
SS 540	0.30	-	1.60 สูงสุด	0.040	0.040

- หมายเหตุ 1. หากวิเคราะห์จากผลิตภัณฑ์ ปริมาณธาตุต่างๆ ยอมให้มากกว่าที่กำหนดในตารางที่ 11 ได้อีกดังนี้
- |          |      |
|----------|------|
| คาร์บอน  | 0.03 |
| ซิลิคอน  | 0.05 |
| แมงกานีส | 0.05 |
| ฟอสฟอรัส | 0.01 |
| กำมะถัน  | 0.01 |
2. - หมายถึง ไม่กำหนด”

“ตารางที่ 12 ชั้นคุณภาพ ความต้านแรงดึงที่จุดคราก ความต้านแรงดึงและความยืด และความต้านการกระแทก  
(ข้อ 3.2 ข้อ 6.2.1 และข้อ 6.2.2)

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงดึง ที่จุดคราก ต่ำสุด เมกะพาสคัล		ความต้าน แรงดึง  เมกะพาสคัล	ความยืด  ต่ำสุด ร้อยละ			ความต้าน การกระแทก ต่ำสุด  จูล
	ความหนา ไม่เกิน 16 มิลลิเมตร	ความหนา เกิน 16 มิลลิเมตร		ความหนา ไม่เกิน 5 มิลลิเมตร	ความหนา 5 ถึง 16 มิลลิเมตร	ความหนา เกิน 16 มิลลิเมตร	
SM 400	245	235	400 ถึง 510	23	18	22	27
SM 490	325	315	490 ถึง 610	22	17	21	27
SM 520	365	355	520 ถึง 640	19	15	19	27
SM 570	460	450	570 ถึง 720	19	19	26	47
SS 400	245	235	400 ถึง 510	21	17	21	-
SS 490	285	275	490 ถึง 610	19	15	19	-
SS 540	400	390	540 ต่ำสุด	16	13	17	-

หมายเหตุ - หมายถึง “ไม่กำหนด”

**CLASSIFICATIONS:**

AWS A/SFA 5.5 E 7016-G

**CHARACTERISTICS:**

A medium coated, hydrogen controlled basic type electrode for welding of medium tensile and low-alloy steels. The electrode gives smooth arc, least spatter and good penetration. The deposited weld metal is of radiographic quality having excellent mechanical properties even at sub zero temp. Drying of the electrode is recommended at 300°C for 1Hr for best results.

**TYPICAL APPLICATIONS:**

- Welding of ASTM A-515Gr-55 and ASTN 516Gr.55 pressure vessel steels subjected to intermediate and lower temp applications.

TYPICAL ALL WELD METAL CHEMICAL COMPOSITION: Element	C	Mn	Si	Ni	S	P
%	0.10max	0.80-1.20	0.75max	0.50-1.0	0.03 max	0.02max

**ALL WELD MECHANICAL PROPERTIES**

N/mm<sup>2</sup>

UTS 500

YS 400

Elongation%(l=4xd) 26min

Reduction in area % 50-75

CVN Impact Value -29°C 35min

**CURRENT CONDITIONS:**

SIZE mm		2.50 X 350	3.15 X 350	4.00 X 350	5.00 X 350
CURRENT- Amps	AC/DC(+)	60-90	100-140	140-180	190-230

## ยาวาต้า แอล-55 สำหรับเหล็กทนแรงดึงสูง 490 นิวตัน/มม<sup>2</sup>


การจำแนกประเภท	มาตรฐานรับรอง
AWS A 5.1 : E7016	ABS, BV, DNV, LR, NK
JIS Z 3212 : D5016	มอก.
DIN 1913 : E 51 3 3 B(R) 10	
EN 499 : E 42 2 B 12 H5	

**การใช้งาน**  
ใช้เชื่อมเหล็กทนแรงดึงสูง 490 นิวตัน/มม<sup>2</sup> สำหรับงานต่อเรือ งานโครงสร้าง และงานสะพาน

**คุณสมบัติ**  
ยาวาต้า แอล-55 เป็นลวดเชื่อมประเภทไฮโดรเจนต่ำ เชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม เนื้อแนวเชื่อมมีคุณสมบัติทนต่อการแตกร้าว เป็นเลิศ คุณสมบัติทางกลและคุณภาพของการเอ็กซ์เรย์เป็นเยี่ยม เชื่อมในท่าเหนือหัวและทำดั่งได้ง่ายมาก

ส่วนผสมทางเคมีในเนื้อโลหะเชื่อม (%)				
C	Si	Mn	P	S
0.07	0.62	1.18	0.011	0.008

คุณสมบัติทางกลของเนื้อโลหะเชื่อม				
ความต้านแรงดึง N/mm <sup>2</sup>	ความเค้นคราก N/mm <sup>2</sup>	อัตราการยืดตัว %	ทนแรงกระแทก 2V-notch, J	
			ที่ 0°C	ที่ -20°C
550	480	32	190	170

ขนาดและช่วงกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC หรือ DC ±)					ท่าเชื่อม
ขนาด/ความยาว (มม.)	2.6/300	3.2/350	4.0/400	5.0/450	 ทุกท่าเชื่อม ยกเว้นท่าเชื่อมลงแนวตั้ง
ท่าเชื่อม	กระแสไฟ (A)				
F	70~100	100~140	150~190	190~240	
V-up, OH	60~90	80~120	110~150	130~170	

**ข้อแนะนำในการใช้งาน**

- ใช้ลวดเชื่อมที่แห้งสนิท ควรนำลวดเชื่อมที่ขึ้นไปอบที่อุณหภูมิ 300~350°C เป็นเวลา 60 นาทีก่อนใช้
- การเชื่อมกั้วถอยจะช่วยป้องกันการเกิดโพรงแก๊สในตอนเริ่มเชื่อมได้ดี ในระหว่างการเชื่อมควรระวังการระเหยอาร์กให้สม่ำเสมอ และให้ขีดขึ้นงานมากที่สุดเท่าที่จะเชื่อมได้
- ควรจะทำจัดความชื้น สนิม และน้ำมัน ออกจากชิ้นงานให้หมดก่อนเชื่อม เพื่อป้องกันการเกิดรอยร้าวและโพรงแก๊สในแนวเชื่อม