



อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาอบอ่อนที่มีผลต่อความแข็งของเหล็กคาร์บอน
ต่ำที่ผ่านการเชื่อม

EFFECT OF ANNEALING TEMPERATURE AND TIME ON THE
HARDNESS OF WELDING LOW-CARBON STEELS

นายณัฐพล คงอินทร์ รหัส 48365170

นายเกรียงไกร โยเหลา รหัส 48365408

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ.....13/ก.ค. 2553.....
เลขทะเบียน.....17054896.....
เลขเรียกหนังสือ.....ฟร.....
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๓๓2 ๒

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2552



ใบรับรองโครงการวิศวกรรม

หัวข้อโครงการวิจัย อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาอบอ่อนที่มีผลต่อความแข็งแรงของเหล็ก
คาร์บอนต่ำที่ผ่านการเชื่อม

ผู้ดำเนินงานวิจัย นายณัฐพล คงอินทร์ รหัส 48365170
นายเกรียงไกร โยเหลา รหัส 48365408

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ชวลีพรย์ ป่าไร่

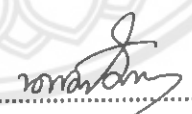
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

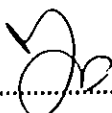
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม

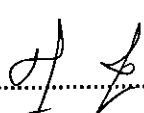
ปีการศึกษา 2552

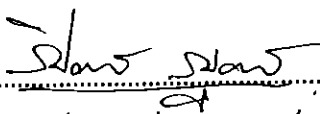
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ


.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์ชวลีพรย์ ป่าไร่)


.....กรรมการ
(ดร.นพวรรณ ไม้ทอง)


.....กรรมการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ปียนันท์ บุญพยัคฆ์)

หัวข้อโครงงานวิจัย	อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาอบอ่อนที่มีผลต่อความแข็งของเหล็กคาร์บอนต่ำที่ผ่านการเชื่อม			
ผู้ดำเนินงานวิจัย	นายฉัฐพล	คงอินทร์	รหัส	48365170
	นายเกรียงไกร	โยเหลา	รหัส	48365408
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ชวลีพรีย์ ป่าไร่			
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ			
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ			
ปีการศึกษา	2552			

บทคัดย่อ

ในกระบวนการเชื่อมโดยทั่วไปนิยมใช้ความร้อนเพื่อใช้ในการเชื่อมประสานของโลหะ ซึ่งความร้อนจะได้อาจจากการอาร์คด้วยกระแสไฟฟ้าและผลจากความร้อนก็เกิดผลเสียตามมา เช่น เกิดความเครียดสูง เนื่องจากการเชื่อมจะให้ความร้อนเฉพาะจุด ทำให้เกิดการบิดคดของโลหะแตกต่างกัน และทำให้ความเหนียวของวัสดุลดลง ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยการเชื่อมได้ฟลักซ์จากนั้นนำชิ้นงานไปอบอ่อนเพื่อทำลายความเครียดภายในชิ้นงานโดยทำการอบที่ อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30, 45 และ 60 นาที จากนั้นทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อพื้น บริเวณกระแทบร้อน บริเวณเนื้อเชื่อม และบริเวณแนวหลอมละลาย ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Light Microscope : LM) และทดสอบความแข็งแบบรีออคเวลสเกล B ผลปรากฏว่า ที่เวลาการอบอ่อนเท่ากันเมื่ออุณหภูมิการอบอ่อนสูงขึ้น ค่าความแข็งลดลง นอกจากนี้บริเวณแนวยังพบว่าแนวหลอมละลายซึ่งเกรนมีลักษณะเรียวยาว (Columnar grain) พบการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) โดยที่อุณหภูมิการอบอ่อนต่ำมีอัตราการเกิดผลึกใหม่ต่ำกว่า อัตราเกิดผลึกใหม่ เมื่ออบที่อุณหภูมิสูง

จากผลการทดลองพบว่าหากต้องการลดความแตกต่างความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมในบริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณกระแทบร้อน ควรนำชิ้นงานเชื่อมทำการอบอ่อนไม่สมบูรณ์โดยการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาในการอบ 60 นาที

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีซึ่งได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำอย่างดียิ่งจากอาจารย์ ชูสิทธิ์ ปาไร่ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร และขอขอบคุณคุณครูช่างในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมที่คอยช่วยเหลือแนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการต่างๆ พร้อมทั้งชี้แนะแนวทางแก้ไข ทำให้ปริญญาบัตรบรรลุผลในระยะเวลาการศึกษาได้

ผู้จัดทำจึงใคร่ขอขอบคุณอาจารย์และผู้ที่มีส่วนร่วมช่วยเหลือทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วยผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่นำไปศึกษาต่อและผู้สนใจพัฒนาตัวเองต่อไป



คณะผู้ดำเนิน โครงการวิศวกรรม

นายณัฐพล คงอินทร์

นายเกรียงไกร โยเหลา

มีนาคม 2553

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการวิศวกรรม.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....	1
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....	2
1.5 ขอบเขตการทำโครงการ.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	2
1.8 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น.....	4
2.1 เหล็กกล้า.....	4
2.2 การเชื่อม.....	9
2.3 กรรมวิธีทางความร้อน.....	14
2.4 โครงสร้างจุลภาค.....	23
2.5 การทดสอบความแข็ง.....	26
2.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	33
3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	33
3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบ โครงสร้างจุลภาค.....	34
3.3 ขั้นตอนการทดสอบความแข็ง.....	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	36
4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ผ่านการอบอ่อน.....	36
4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อน.....	38
4.3 การทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบรีออสเกล B.....	53
4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวหลอมละลาย.....	64
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	68
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	68
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	69
เอกสารอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก ก.....	71
ภาคผนวก ข.....	73
ภาคผนวก ค.....	79
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	93

สารบัญตาราง

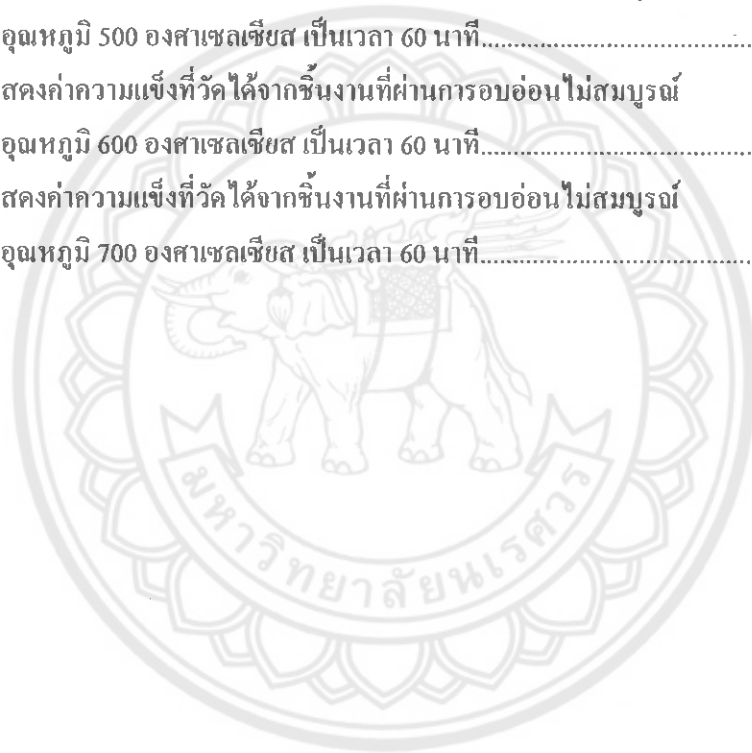
ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน.....	3
2.1 แสดงค่าการเกิดผลึกใหม่และอุณหภูมิตั้งการหลอมตัว.....	20
4.1 อักษรย่อของบริเวณและ โครงสร้างจุลภาคที่พบภาพหลังการเชื่อมไฟฟ้า.....	36
4.2 แสดงการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส.....	39
4.3 แสดงการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในเวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส.....	41
4.4 แสดงการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส.....	43
4.5 แสดงการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมภายหลัง การอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที.....	45
4.6 แสดงการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมภายหลัง การอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที.....	47
4.7 แสดงการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมภายหลัง การอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที.....	49
4.8 แสดงการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมภายหลัง การอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที.....	51
4.9 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ในเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส.....	54
4.10 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ในเวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส.....	55
4.11 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ในเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส.....	56

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 แสดงค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที.....	58
4.13 แสดงค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที.....	60
4.14 แสดงค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที.....	61
4.15 แสดงค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที.....	62
4.16 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวหลอมละลาย ที่กำลังขยาย 100 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ในเวลาและอุณหภูมิที่ต่างกัน.....	66
ก.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีโดยทั่วไปของลวดเชื่อม โลหะ (เปอร์เซ็นต์)	72
ก.2 แสดงคุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อม ไฟฟ้า.....	72
ก.3 แสดงขนาดของลวดเชื่อมและช่วงกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม.....	72
ข.1 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์.....	74
ข.2 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	74
ข.3 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	75
ข.4 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	75
ข.5 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	75
ข.6 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที.....	76
ข.7 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที.....	76

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.8 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที.....	76
ข.9 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที.....	77
ข.10 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที.....	77
ข.11 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที.....	77
ข.12 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที.....	78
ข.13 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที.....	78



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภูมิสมมูลเหล็กคาร์บอน.....	5
2.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนต่างๆ	
ก. เฟอร์ไรต์ 0.0 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน	
ข. เฟอร์ไรต์ + เฟอร์ไรต์ 0.40 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอน	
ค. เฟอร์ไรต์ 0.77เปอร์เซ็นต์ คาร์บอน	
ง. เฟอร์ไรต์ + ซีเมนไตท์ที่ขอบเกรน 1.4 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน	
จ. ออสเทนไนต์	6
2.3 แสดงตัวอย่างชิ้นส่วนและผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโลหะในกลุ่มเหล็ก โดยตัวเลขระบุถึงเปอร์เซ็นต์คาร์บอนของเหล็ก.....	7
2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในเหล็กกับปริมาณ โครงสร้างจุลภาค (เฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์ และซีเมนไตท์) ที่จะปรากฏในเหล็กนั้น รวมทั้งสมบัติเชิงกล และ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนนั้นๆ	8
2.5 แสดงถึงวิธีการเริ่มต้นอาร์กแบบเคาะ.....	10
2.6 แสดงถึงวิธีการเริ่มต้นอาร์กแบบขีด	11
2.7 แสดงขั้นตอนการแข็งตัวและการเกิดผลึกกิ่งไม้ของแนวเชื่อม	11
2.8 แนวการเย็นตัวของแนวเชื่อม	12
2.9 แสดงการเชื่อมที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมและบริเวณใกล้เคียง.....	13
2.10 แสดงการเกิดผลกระทบของการขึ้นรูปเย็นด้วยความต้านทานแรงดึง ความแข็งความเหนียว และขนาดเกรน.....	16
2.11 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 75 เท่า โดยแสดงให้เห็นสภาพต่างๆ ของการเกิด ผลึกใหม่และการ โดของขนาดเกรนของทองเหลือง	
ก. ผ่านการขึ้นรูปเย็นมา 33 เปอร์เซ็นต์	
ข. เริ่มเกิดผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 วินาที จะเห็นเกรนขนาดเล็กเกิดขึ้น	
ค. การเกิดผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 วินาที	
ง. การเกิดผลึกใหม่โดยสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 วินาที	
จ. การ โดของเกรนเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส	
ฉ. การ โดของเกรนเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส.....	17

สารบัญรูป (ต่อ)

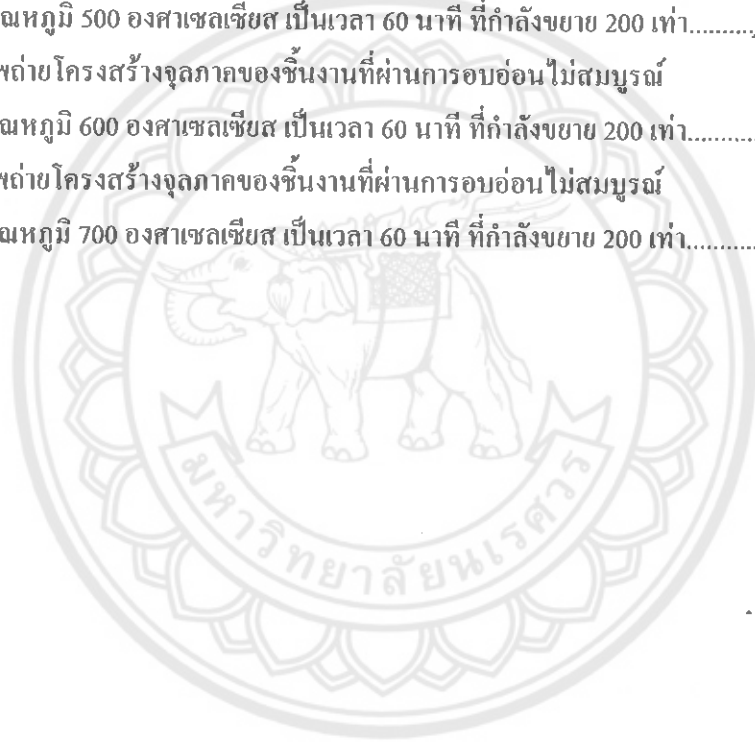
รูปที่	หน้า
2.12 อิทธิพลของอุณหภูมิในการอบอุ่นที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึง และ การยืดตัวของทองเหลืองผสม และขนาดของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเกิดการเรียงตัวใหม่การเกิดผลึกใหม่และการ โคของขนาดเกรน.....	18
2.13 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิในการเกิดผลึกใหม่กับเปอร์เซ็นต์ในการขึ้นรูปเย็น แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์ในการขึ้นรูปเย็นต่ำสุดที่สามารถทำให้เกิดผลึกใหม่.....	19
2.14 แสดงการเกิดการ โคของขอบเกรน โดยการแพร่ของอะตอม.....	21
2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของขนาดเกรนและระยะเวลาในการเกิด การ โคของขนาดเกรนของทองเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆ.....	22
2.16 ลักษณะ โครงสร้างเฟอร์ไรต์.....	23
2.17 ลักษณะ โครงสร้างซีเมน ไทต์แบบตาข่าย.....	24
2.18 แสดง โครงสร้างเฟิร์ลไลท์ในเหล็กกล้าส่วนผสม 0.75 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน.....	25
2.19 ลักษณะ โครงสร้างมาร์เทน ไซด์.....	25
2.20 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล.....	26
2.21 ขนาดของแรงกดที่กระทำต่อผิวทดสอบ.....	27
2.22 ลักษณะของกล้องจุลทรรศน์แบบที่ใช้ลำแสงจากหลอดไฟ.....	28
2.23 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบที่ใช้ลำแสงจากหลอดไฟ.....	29
2.24 ลักษณะลำแสงสะท้อนกลับไปยังเลนส์ขยายทำให้เกิดภาพ โครงสร้างของชิ้นงาน.....	30
2.25 ลักษณะการหุ้มชิ้นตรวจสอบด้วยเรซิน.....	31
2.26 ลักษณะแนวทางการจัดชิ้นตรวจสอบสลัดเป็นตาราง.....	32
3.1 แสดงบริเวณจุดทดสอบในการทดสอบความแข็ง.....	34
4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการอบอุ่นไม่สมบูรณ์กำลังขยาย 200 เท่า.....	37
4.2 แสดงตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมไฟฟ้าแบบลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	
A. บริเวณเนื้อพื้น	
B. บริเวณกระทบร้อน	
C. บริเวณกลางเนื้อเชื่อม	
D. บริเวณกระทบร้อน	
E. บริเวณเนื้อพื้น.....	53
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลัง การอบอุ่นไม่สมบูรณ์ในเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส.....	54

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์ในเวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส.....	55
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์ในเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส.....	57
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมภายหลัง การอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที.....	59
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมภายหลัง การอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที.....	60
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมภายหลัง การอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที.....	61
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมภายหลัง การอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที.....	63
ข.1 แสดงตำแหน่งวัดค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์.....	74
ค.1 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ที่ยังไม่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ กำลังขยาย 200 เท่า.....	80
ค.2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	81
ค.3 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	82
ค.4 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	83
ค.5 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	84
ค.6 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที กำลังขยาย 200 เท่า.....	85
ค.7 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	87
ค.9 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	88
ค.10 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	89
ค.11 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	90
ค.12 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	91
ค.13 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	92



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

โดยทั่วไปในการใช้งานสำหรับการเชื่อม โครงสร้างเหล็กและเหล็กแผ่นบางๆ ในงานสร้างเรือ รถไฟ และยานยนต์ ที่ทำด้วยเหล็กเหนียวหรือเหล็กคาร์บอนต่ำ แต่เมื่อมีการเชื่อมทำให้บริเวณเชื่อม มีปริมาณคาร์บอนสูงเนื่องมาจากการรวมตัวกันของคาร์บอนในเนื้อเหล็กกับลวด คือการให้ความร้อนจากลวดเชื่อมให้เกิดการอาร์กของเหล็กส่งผลให้เกิดการหลอมละลายของเหล็ก เมื่อเย็นตัวลง ทำให้บริเวณรอยเชื่อมกับเนื้อพื้น โลหะมีความแตกต่างของอุณหภูมิภายนอกผิวและภายในผิว ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคทำให้เหล็กที่ผ่านการเชื่อมแข็ง เปราะ และมีความต้านทานต่อการแตกร้าวได้ต่ำ หรือเรียกว่า ความเครียดตกค้าง ซึ่งไม่เหมาะกับการนำไปใช้งาน ดังนั้นเพื่อให้ ชิ้นงานเหมาะสมต้องนำชิ้นงานดังกล่าวไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อน โดยใช้วิธีการอบอ่อนโดยเลือกวิธีการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ (Incomplete Annealing)

สำหรับกระบวนการอบอ่อนไม่สมบูรณ์นี้ เป็นกระบวนการที่ทำให้ความแข็งของเหล็กลดลงในขณะที่ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็ง อาทิเช่น อุณหภูมิและเวลาในการอบชุบแน่นอนว่าถ้าการทำการอบชุบในวิธีดังกล่าวมีผลต่อดัชนีและเวลาในการทำให้ชิ้นงานเหมาะสมกับการใช้งานในงานอุตสาหกรรม และเป็นการลดต้นทุนในการศึกษาวิธีการนี้ให้เหมาะสมกับขนาดความหนาและขนาดของเหล็กได้

ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ โดยทำการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคและความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาโครงสร้างของชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากการอบอ่อนไม่สมบูรณ์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาความแข็งของชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากการอบอ่อนไม่สมบูรณ์

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

- 1.3.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมของเหล็กคาร์บอนต่ำภายหลังจากการอบอ่อนไม่สมบูรณ์
- 1.3.2 ความแข็งของชิ้นงานเชื่อมของเหล็กคาร์บอนต่ำภายหลังจากการอบอ่อนไม่สมบูรณ์

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

ผลของอุณหภูมิและเวลาในการอบอ่อนต่อ โครงสร้างและความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมของเหล็กคาร์บอนต่ำภายหลังการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์

1.5 ขอบเขตการทำโครงการ

- 1.5.1 การอบอ่อนที่ใช้ในโครงการ คือ การอบอ่อนไม่สมบูรณ์
- 1.5.2 ชิ้นงานในการทดลองคือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ขนาด 2x1/4x1 นิ้ว
- 1.5.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อน 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส
- 1.5.4 เวลาในการอบชิ้นงาน 30, 45 และ 60 นาที
- 1.5.5 เชื่อมชิ้นงาน โดยใช้วิธีการเชื่อมลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

- 1.6.1 สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร
- 1.6.2 ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- 1.6.3 อาคารปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

กรกฎาคม 51 - มกราคม 52

1.8 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.6.1 จัดทำข้อเสนอโครงการ
- 1.6.2 ศึกษาหาข้อมูล
- 1.6.3 ศึกษาโครงสร้างจุลภาค
- 1.6.4 นำมาวิเคราะห์และทดสอบความแข็ง
- 1.6.5 ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- 1.6.6 สรุปผลการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
1.จัดทำข้อเสนอโครงการ	←→						
2.ศึกษาหาข้อมูล	←→						
3.ศึกษาโครงสร้างจุลภาค			←→				
4.นำมาวิเคราะห์และทดสอบความแข็ง				←→			
5.ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง						←→	
6.สรุปผลการดำเนินงาน							←→



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

ในบทนี้จะอธิบายให้เห็นหลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการอ้างอิงการทดลอง โดยแบ่งเป็นหัวข้อ ดังนี้

- 2.1 เหล็กกล้า
- 2.2 การเชื่อม
- 2.3 กรรมวิธีทางความร้อน
- 2.4 โครงสร้างจุลภาค
- 2.5 ทดสอบความแข็ง
- 2.6 ทดสอบโครงสร้างจุลภาค

2.1 เหล็กกล้า

เนื่องจากเหล็กบริสุทธิ์มีกำลังต่ำเกินกว่าที่จะนำไปใช้งานวิศวกรรมได้ จึงมีการเติมธาตุผสม (Alloying elements) เข้าไปในเนื้อเหล็ก เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการตามนิยามนั้น เราแบ่งเหล็กออกเป็น เหล็กกล้าและเหล็กหล่อ โดยอาศัยปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ กล่าวคือ เหล็กกล้าคือเหล็กที่มีคาร์บอนไม่เกิน 2.0 เปอร์เซ็นต์ ถ้ามีคาร์บอนมากกว่านั้นจะเป็นเหล็กหล่อ สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเหล็กกล้า โดยทั่วไปแล้วเหล็กกล้าจะอยู่ในรูปของ เหล็ก+คาร์บอน+ธาตุผสม+สารมลทิน ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนในเหล็กกล้านั้นจะมีตั้งแต่ 0.05 ถึง 1.40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เมื่อเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนสูงขึ้น กำลังวัสดุ (Strength) และความแข็ง (Hardness) ของเหล็กกล้าจะเพิ่มขึ้น แต่ความเหนียว (Ductility) ของเหล็กกล้านั้นจะลดลง

เราอาจจำแนกเหล็กกล้าออกไปเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ เหล็กกล้าคาร์บอน (Plain carbon steels) และเหล็กกล้าผสม (Alloy steels)

2.2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Plain carbon steels)

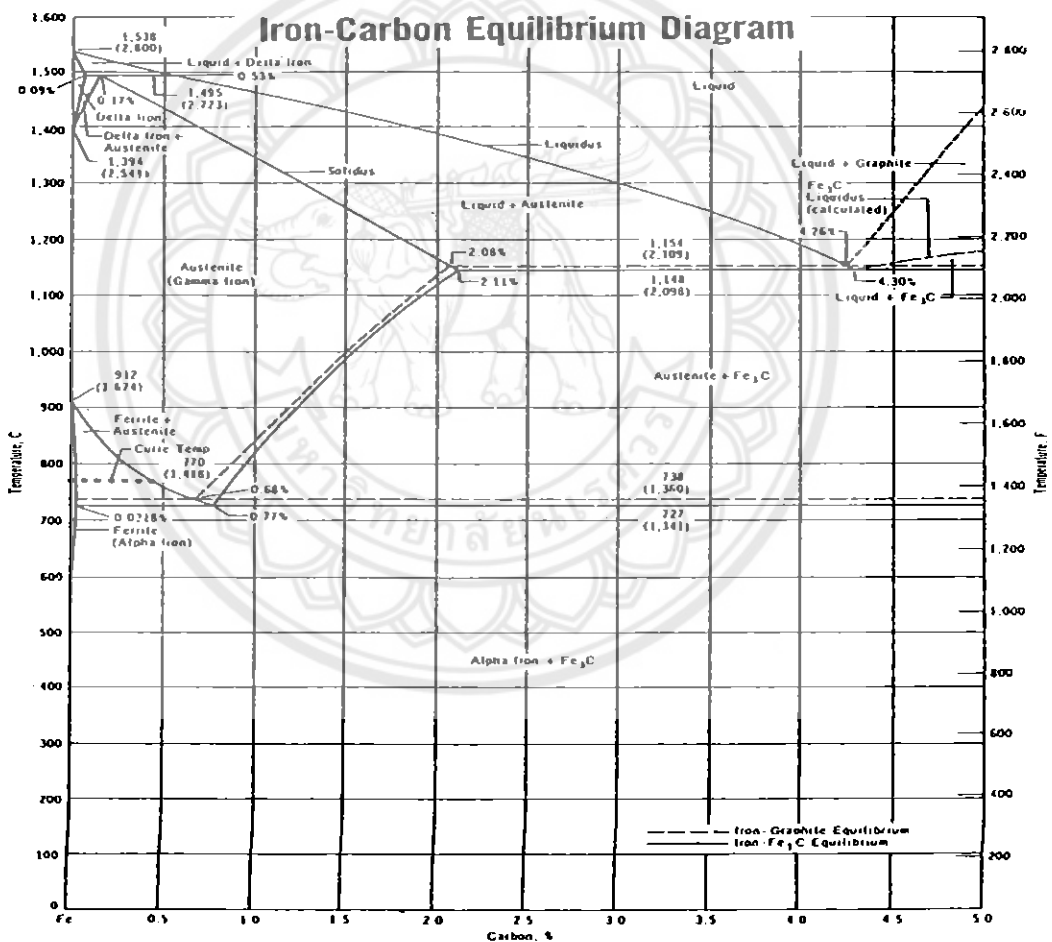
เหล็กกล้าคาร์บอน คือเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นธาตุผสมหลักและมีปริมาณธาตุผสมอื่นๆ อยู่ในปริมาณน้อย ตามนิยามของ AISI (American Iron and Steel Institute) จำกัดปริมาณธาตุผสมไว้ดังนี้ แมงกานีสไม่เกิน 1.65 เปอร์เซ็นต์ ซิลิคอนไม่เกิน 0.60 เปอร์เซ็นต์ ทองแดงไม่เกิน 0.60 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณของฟอสฟอรัสรวมกับกำมะถันไม่เกิน 0.05 เปอร์เซ็นต์ เราถือได้ว่า เฉพาะธาตุคาร์บอนเท่านั้นที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเหล็กกล้าชนิดนี้ ธาตุผสมในเหล็กกล้าประเภทนี้นอกจากคาร์บอนแล้วจะมีซิลิคอนและแมงกานีส ส่วนกำมะถันและฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปของสารมลทิน เราแบ่งชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนตามเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่อยู่ในเนื้อเหล็กดังนี้คือ

2.2.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) คาร์บอน < 0.25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

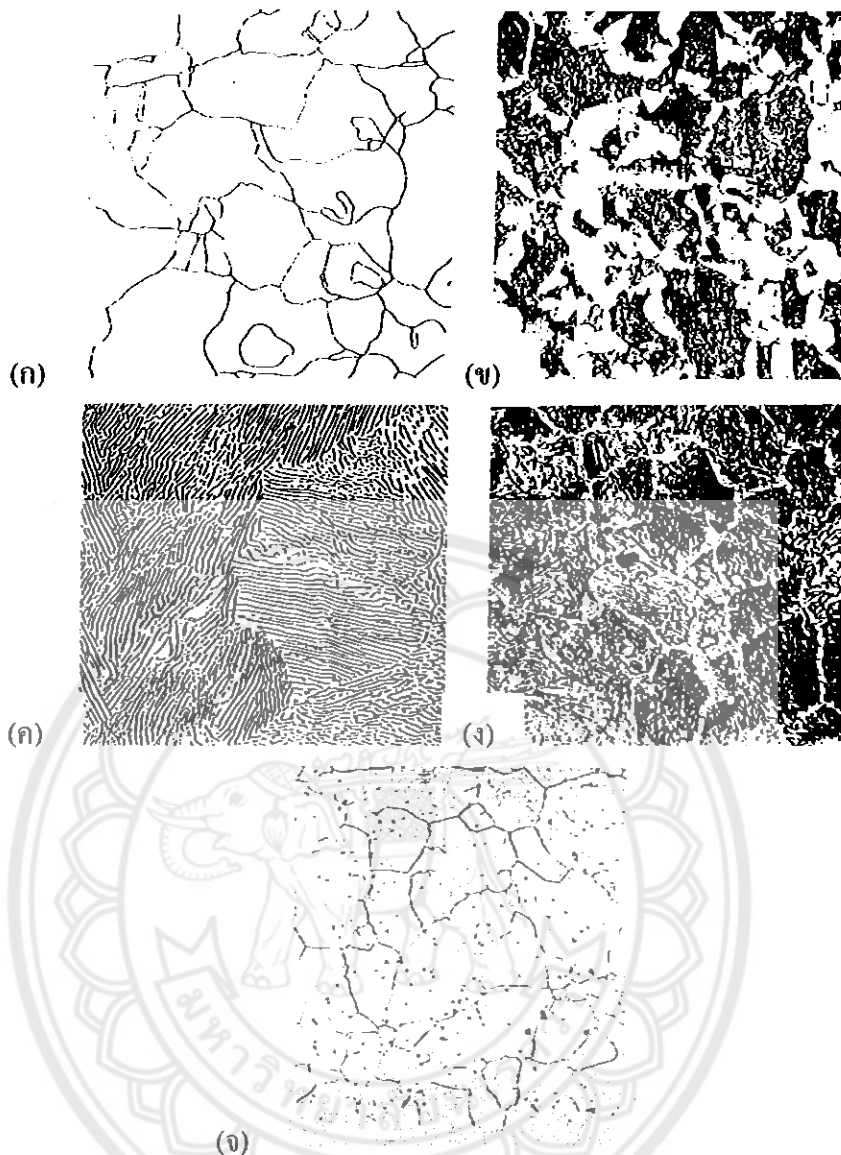
2.2.1.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel) $0.25 \leq$ คาร์บอน > 0.45 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

2.2.1.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel) $0.45 \leq$ คาร์บอน > 1.50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนจะขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่เป็นหลัก และสามารถพิจารณาได้จากแผนภูมิสมดุลของเหล็กกล้าคาร์บอนดังในรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนต่างๆ กัน



รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลเหล็กกล้าคาร์บอน [1]



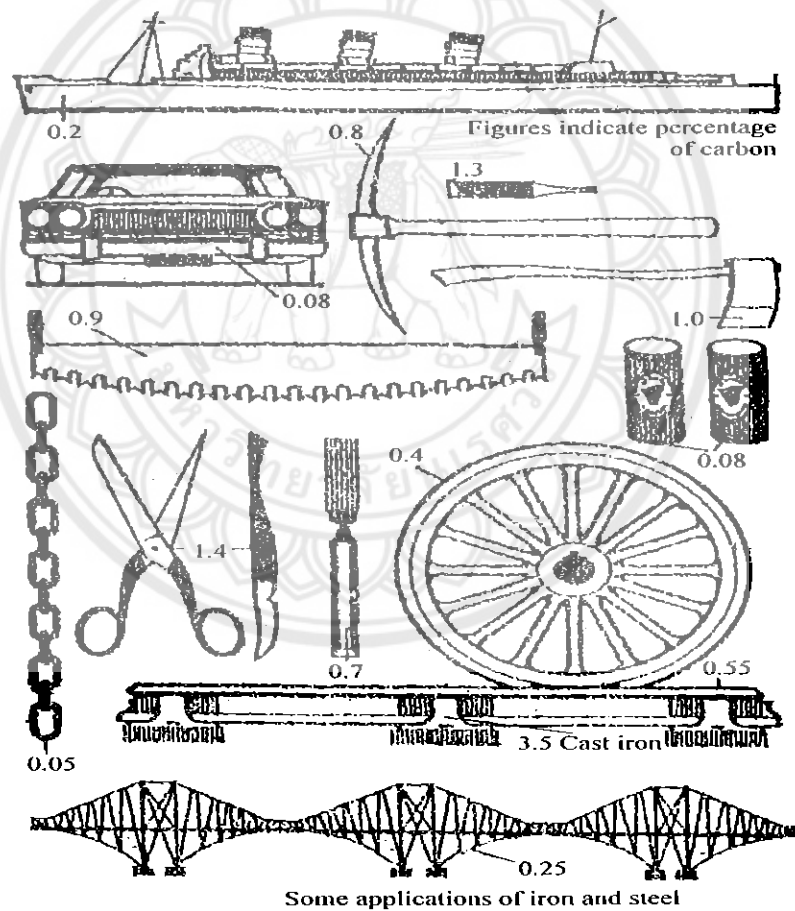
รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนต่างๆ [1]

- (ก) เฟอไรต์ 0.0 เปอร์เซนต์คาร์บอน
- (ข) เฟอไรต์ + เฟอร์ไรต์ 0.40 เปอร์เซนต์คาร์บอน
- (ค) เฟอร์ไรต์ 0.77 เปอร์เซนต์คาร์บอน
- (ง) เฟอร์ไรต์ + ซีเมนไตท์ที่ขอบเกรน 1.4 เปอร์เซนต์คาร์บอน
- (จ) ออสเทนไนต์

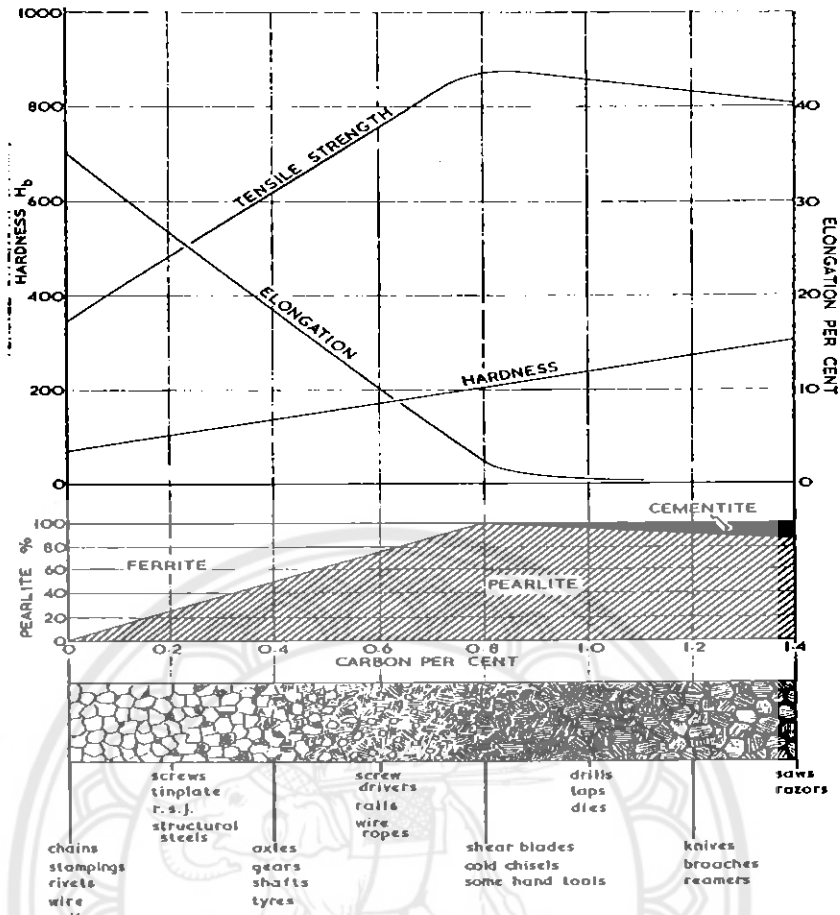
เราอาจแบ่งประเภทเหล็กกล้าคาร์บอน โดยอาศัยลักษณะ โครงสร้างจุลภาคก็ได้ กล่าวคือ เหล็กกล้าที่มีเปอร์เซนต์คาร์บอน 0.77 เปอร์เซนต์ จะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์อย่างเดียว เราเรียกเหล็กประเภทนี้ว่า Eutectoid steels สำหรับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนต่ำกว่า 0.77 เปอร์เซนต์ เราเรียกว่า Hypoeutectoid steels (โครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยโปรยูเทคตอยด์เฟอไรต์กับเฟอร์ไรต์

ไลต์) และเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนสูงกว่า 0.77 เปอร์เซ็นต์ เราเรียกว่า Hypereutectoid steels (โครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยโปรยูเทคตอยด์ซีเมนไตท์กับเฟอไรต์ไลต์)

คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนจะขึ้นตรงกับประเภทและปริมาณของโครงสร้างจุลภาคภายในเนื้อเหล็กนั้นๆ เฟอไรต์มีกำลังวัสดุและความแข็งไม่สูงนักแต่มีความเหนียว ซีเมนไตท์มีความแข็งสูงแต่เปราะ เฟอไรต์ไลต์มีกำลังวัสดุสูงและสามารถยึดตัวได้ดีภายใต้แรงดึง และท้ายสุดออกสเทนไนต์มีกำลังวัสดุต่ำ นิ่ม สามารถรีดให้เข้ารูปได้ง่าย เป็นต้น ส่วนประเภทและปริมาณของโครงสร้างจุลภาคจะขึ้นกับส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้านั้นๆ รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างการใช้งาน โลหะประเภทเหล็ก โดยระบุเปอร์เซ็นต์คาร์บอนของเหล็กที่นำไปทำชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ ส่วนรูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนกับปริมาณของโครงสร้างจุลภาคแต่ละชนิด (เฟอไรต์ เฟอไรต์ไลต์ และซีเมนไตท์) ในเหล็กและสมบัติเชิงกล



รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างชิ้นส่วนและผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโลหะในกลุ่มเหล็ก โดยตัวเลขระบุถึงเปอร์เซ็นต์คาร์บอนของเหล็ก [1]



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในเหล็กกับปริมาณ โครงสร้างจุลภาค (เฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์ไลต์ และซีเมนไต์) ที่จะปรากฏในเหล็กนั้น รวมทั้งสมบัติเชิงกลและ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนนั้นๆ [1]

2.2.2 เหล็กกล้าผสม (Alloy steels)

เหล็กกล้าที่ไม่จัดเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน จะจัดเป็นเหล็กกล้าผสมทั้งหมด ซึ่งนอกจาก ซิลิคอนและแมงกานีสแล้ว ธาตุผสมในเหล็กกล้าประเภทนี้ยังมีทองแดง นิกเกิล โครเมียมและ โมลิบดีนัม เป็นต้น อีกด้วย คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าผสมนอกจากจะขึ้นกับปริมาณของ คาร์บอนเหมือนดังเหล็กกล้าคาร์บอนแล้ว ยังขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของธาตุผสมที่อยู่ในเนื้อ เหล็กกล้า ตลอดจนกระบวนการอบชุบ (Heat treatment) ที่ให้กับเหล็กกล้านั้นๆ เราจะใช้เหล็กกล้า ผสมแทนที่เหล็กกล้าคาร์บอน เมื่อเราต้องการชิ้นงานที่มีสมบัติเชิงกลหรือคุณสมบัติด้านอื่นๆ เช่น คุณสมบัติด้านการทนทานต่อความร้อน และความทนทานต่อการกัดกร่อน เป็นต้น ซึ่งเหล็กกล้า คาร์บอนไม่สามารถให้คุณสมบัติที่เราต้องการนั้นได้ [1]

2.2 การเชื่อม

การเชื่อม เป็นขบวนการที่ใช้สำหรับต่อวัสดุ ส่วนใหญ่เป็น โลหะและพลาสติก โดยให้รวมตัวเข้าด้วยกัน ปกติใช้วิธีทำให้ชิ้นงานหลอมละลายและการเพิ่มเนื้อ โลหะเติมลงในแอ่งหลอมละลายของวัสดุที่หลอมเหลว เมื่อเย็นตัวรอยต่อจะมีความแข็งแรง บางครั้งใช้แรงดันร่วมกับความร้อนหรืออย่างเดียว เพื่อให้เกิดรอยเชื่อม ซึ่งตรงข้ามกับการบัดกรีอ่อนและการบัดกรีแข็งซึ่งไม่มีการหลอมละลายของชิ้นงานชิ้นงาน มีแหล่งพลังงานหลายอย่างสำหรับนำมาใช้ในการเชื่อม เช่น การใช้ความร้อนจากเปลวแก๊ส การอาร์คโดยใช้กระแสไฟฟ้า ลำแสงเลเซอร์ การใช้ไอเล็กตรอน การเสียดสี และการใช้คลื่นเสียง เป็นต้น ในอุตสาหกรรมมีการนำมาใช้ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น การเชื่อมในพื้นที่โล่ง พื้นที่อับอากาศ การเชื่อมใต้น้ำ การเชื่อมมีอันตรายเกิดขึ้นได้ง่าย จึงควรมีความระมัดระวังเพื่อป้องกันอันตราย เช่น ที่เกิดจาก กระแสไฟฟ้า ความร้อน สะเก็ดไป คว้นเชื่อม แก๊สพิษ รังสีอาร์ค ชิ้นงานร้อน และฝุ่นละออง

ในยุคเริ่มแรกจนถึงศตวรรษที่ 19 มีการใช้งานเฉพาะการเชื่อมทูป (Forge Welding) เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อ โลหะ เช่น การทำดาบในสมัยโบราณ วิธีนี้รอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงสูงและโครงสร้างของเนื้อรอยเชื่อมมีคุณภาพอยู่ในระดับที่น่าพอใจ แต่มีความล่าช้าในการนำมาใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม หลังจากนั้นได้มีการพัฒนามาสู่การเชื่อมอาร์คและการเชื่อมโดยใช้เปลวแก๊ส ออกซิเจนและหลังจากนั้นมีการ เชื่อมแบบความดันตามมา เทคโนโลยีการเชื่อม ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในศตวรรษที่ 20 ซึ่งอยู่ในช่วงสงคราม โลกครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 เทคโนโลยีการเชื่อมแบบใหม่ ๆ ได้มีการเร่งพัฒนาเพื่อรองรับต่อการสู้รบในช่วงเวลานั้น เพื่อทดแทนการต่อโลหะแบบเดิม เช่นการใช้หมุดย้ำซึ่งมีความล่าช้าอย่างมาก ขบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) เป็นขบวนการหนึ่งที่เกิดขึ้นมาในช่วงนั้นและกระทั่งปัจจุบัน ยังคงเป็นกรรมวิธีที่ใช้กันมากที่สุดในประเทศไทยและประเทศกำลังพัฒนาทั้งหลายความร้อนจากการเชื่อมที่มีผลกระทบต่อเกรนเหล็กและคุณสมบัติทางกลของเหล็กหลังจากผ่านกระบวนการเชื่อมและการขึ้นรูปเย็นแล้วเหล็กมีความแข็งแรงในแนวเชื่อมดังนั้นในบริเวณข้างแนวรอยเชื่อมมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน [2]

2.2.1 การเชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

การเชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) หรือที่เรามักเรียกกันว่า ก้นเชื่อมรูป บางตำรามักเรียกกันว่า Manual Metal Arc (MMA) หรือ Stick welding การเชื่อมแบบนี้ลวดเชื่อมจะมีฟลักซ์หุ้มภายนอกแกนลวด และกระแสไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านแกนลวดเชื่อมไปยังส่วนปลายกระแสไฟฟ้าที่มีทั้งชนิดกระแสตรง (DC) และชนิดกระแสสลับ (AC) การเลือกใช้งานควรเป็นไปตามคำแนะนำของผู้ผลิตลวดเชื่อม โดยปกติจะมีพิมพ์ไว้ข้างกล่องลวด โดยจะมีการชี้บ่ง เช่น ยี่ห้อ เกรดของลวดเชื่อม ขนาด ความยาวลวด ชนิดกระแสไฟฟ้าที่แนะนำให้ใช้งานในแต่ละท่าเชื่อม และ

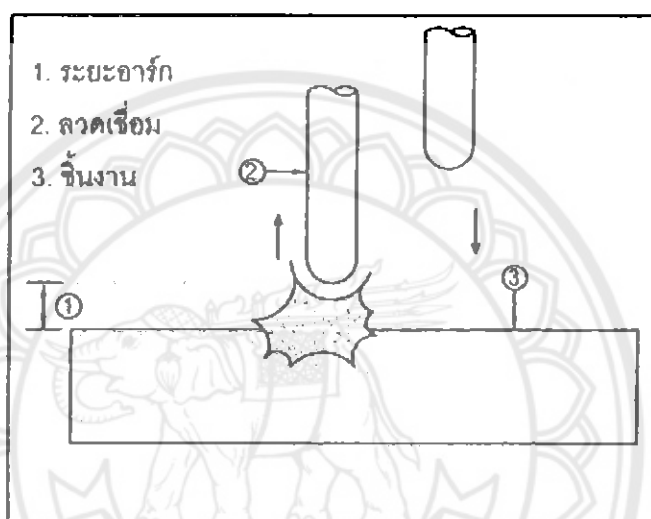
ชนิดปลั๊กสัฟุ่ม เป็นต้น กระแสไฟจะถูกส่งผ่านแหล่งจ่าย โดยทั่วไปจะเป็นเครื่องเชื่อม การเริ่มต้นเชื่อมสำหรับลวดเชื่อมหุ้มปลั๊กส์ทำได้ 2 วิธี ดังนี้

วิธีที่ 1 วิธีเคาะหรือวิธีแตะลวดเชื่อมซึ่งมีวิธีการปฏิบัติดังนี้

2.2.1.1 ถीलวดเชื่อมให้อยู่ในตำแหน่งตั้งฉากกับชิ้นงาน

2.2.1.2 กดลวดเชื่อมลงไปเคาะหรือแตะบนแผ่นเหล็กเบาๆ แล้วรีบยกขึ้น โดยเร็วเมื่อเกิดการอาร์ก และให้ลวดเชื่อมเคลื่อนที่ไปข้างหน้าประมาณ 2-3 มิลลิเมตร

2.2.1.3 ปฏิบัติตามลำดับขั้นตอนอย่างต่อเนื่อง และหลายครั้งจนเกิดความชำนาญ



รูปที่ 2.5 แสดงถึงวิธีการเริ่มต้นอาร์กแบบเคาะ [3]

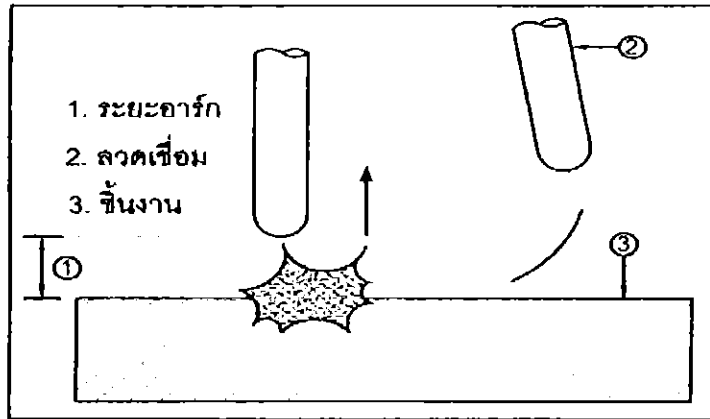
วิธีที่ 2 วิธีขีด หรือวิธีเขี่ยลวดเชื่อม ซึ่งมีวิธีการปฏิบัติดังนี้

2.2.1.4 ถीलวดเชื่อมในลักษณะเอียงไปตามแนวที่จะเชื่อม

2.2.1.5 คั่วลวดเชื่อมให้ปลายแตะกับชิ้นงานแล้วยกขึ้นอย่างรวดเร็ว

2.2.1.6 เมื่อเกิดการอาร์กแล้วต้องให้ระยะอาร์กถูกต้อง โดยลดระยะอาร์กลงอย่างช้าๆ

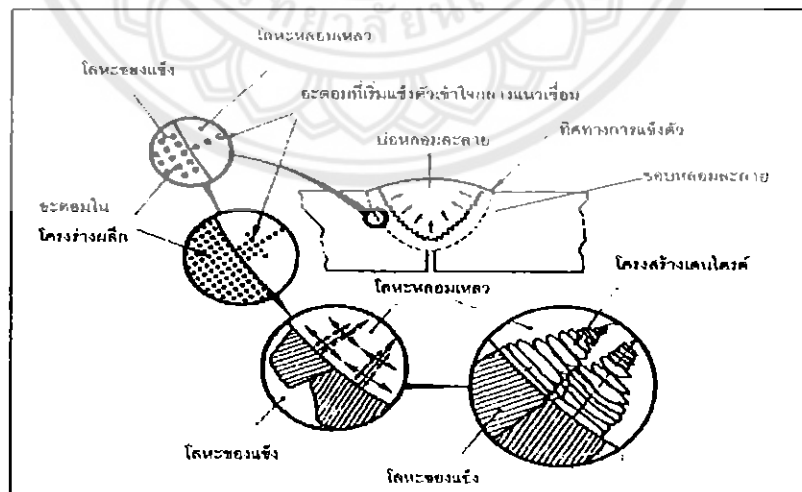
2.2.1.7 ปฏิบัติตามขั้นตอนอย่างต่อเนื่องและหลายครั้งจนเกิดความชำนาญ



รูปที่ 2.6 แสดงถึงวิธีการเริ่มต้นอาร์กแบบขีด [3]

2.2.2 อัตราการแข็งตัว (Solidification Rate)

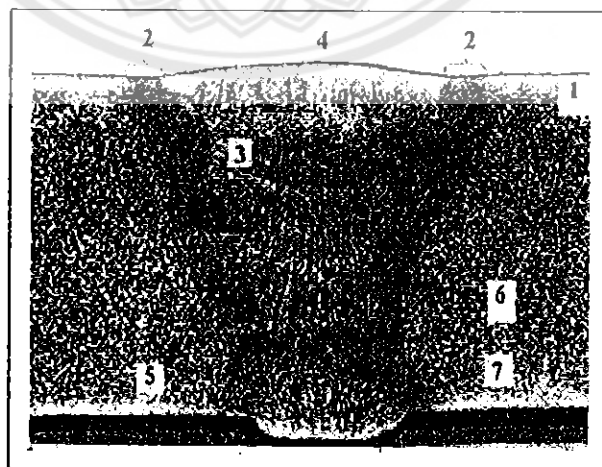
การแข็งตัวของโลหะเชื่อมอย่างต่อเนื่องจะให้โครงสร้างทางโลหะวิทยาที่แตกต่างกันไปส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลด้วย เวลาในการแข็งตัวของเนื้อโลหะแปรผันตามความร้อนเข้าเมื่อเชื่อมโลหะจะเกิดการหลอมละลายรวมกันระหว่างโลหะงาน (Base metal) กับโลหะเติม (Filler metal) เกิดบ่อหลอมละลาย (Weld pool) แล้วเกิดการแข็งตัวเป็นโลหะเชื่อม (Weld metal) บริเวณที่สัมผัสกับโลหะงานจะเกิดการแข็งตัวของรอยเชื่อม เกิดลักษณะประหนึ่งชุนเนื้อแนวเชื่อมลงในโลหะงานที่อยู่โดยรอบ ขณะแข็งตัวความร้อนจะถ่ายเทจากรอยเชื่อมทำให้เกิด โครงสร้างเดนไดรต์ของแนวเชื่อมเติบโตห่างยาว พุ่งเข้าหาใจกลางแนวเชื่อม แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงขั้นตอนการแข็งตัวและการเกิดผลึกกิ่งไม้ของแนวเชื่อม [4]

ขณะหลอมเหลวโลหะเชื่อมจะละลายก๊าซได้มากกว่าในสถานะของแข็งตัว ก๊าซจะหนีออกมาภายนอก ถ้าอัตราการเย็นตัวเร็วเกินไปก๊าซจะหนีออกไม่ทัน จึงเป็นโพรงก๊าซอยู่ภายใน

แนวเชื่อม ซึ่งคล้ายกับการเกิดโพรงก๊าซในงานหล่อ แต่มีลักษณะการแข็งตัวแตกต่างกัน ระหว่างงานเชื่อมกับงานหล่อ คือ อัตราการเย็นตัวและเวลาในการแข็งตัวเร็วกว่างานหล่อมมาก และเวลาในการหลอมน้อย ดังนั้นจึงมีก๊าซละลายในน้ำโลหะเชื่อมน้อย หลังจากเย็นตัวแล้วจึงไม่มีโอกาสเกิดโพรงก๊าซขนาดใหญ่ การควบคุมบรรยากาศขณะเชื่อมได้ด้วยสแลกหรือก๊าซปกคลุมผิวแนวเชื่อมที่ได้จากฟลักซ์ที่หุ้มลวดเชื่อม สแลกจะป้องกันก๊าซไม่ให้ละลายเข้าไปในแนวเชื่อม โดยทั่วไปนั้นมักจะเกิดการแยกตัวของโครงสร้าง และธาตุผสมบางชนิดซึ่ง เมื่อโครงสร้างเค้นไคร้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน จะทำให้เกิดแนวที่อ่อนแอที่สุด เพราะโลหะเชื่อมมีทิศทางแข็งตัวด้วยความยาวของแนวเชื่อม และมีสารมลทินรวมตัวตามใจกลางแนวเชื่อมเพียงเล็กน้อย โลหะผสมที่แข็งตัวช้าอาจจะเกิดแยกตัวของธาตุผสม (Coring) บางชนิด ปกติมักจะเกิดได้ง่ายในโลหะนอกกลุ่มเหล็กและเหล็กกล้าไร้สนิม การแก้ไข Coring ทำได้โดยให้แนวเชื่อมเย็นตัวเร็ว หรืออบชุบหลังการเชื่อม การแก้ไขการหดตัวของงานเชื่อม โดยควบคุมบ่อหลอมละลายให้แข็งตัวต่อเนื่องในทิศทางเดียวกัน เพื่อให้โลหะเชื่อมที่หลอมเหลวป้อนเต็มส่วนที่หดตัวตลอดเวลา ขณะแข็งตัวปกติรอยเชื่อมมักจะแข็งตัวจากกลางไปหาส่วนบนแนวเชื่อม ความร้อนบริเวณด้านล่างแนวเชื่อมจะถ่ายเทไปยังโลหะงานเร็วกว่า แนวเชื่อมจึงไม่ค่อยเกิดตำหนิเนื่องจากการหดตัว แต่บางครั้งอาจจะพบโพรงหดตัวที่บริเวณใจกลางแนวเชื่อม โดยเฉพาะบริเวณที่หุคแนวเชื่อม มักจะหดตัวและแตกร้าวมอบ อัตราการแข็งตัวของงานเชื่อมเร็วมาก จึงเป็นวิธีการยากที่จะศึกษาการแข็งตัวของกรรมวิธีการเชื่อม เช่นเดียวกับการแข็งตัวของกรรมวิธีการหล่อโลหะ ถ้าหากเชื่อมถูกวิธีแนวเชื่อมจะมีความแข็งแรง (Strength) และความเหนียว (Ductility) ตามต้องการ รอยบกพร่องจะเกิดขึ้นต่อเมื่อสภาวะการเชื่อมไม่เหมาะสม การควบคุมแนวเชื่อมให้สมบูรณ์ได้ด้วยการเลือกลวดเชื่อมและกรรมวิธีการเชื่อมให้เหมาะสม



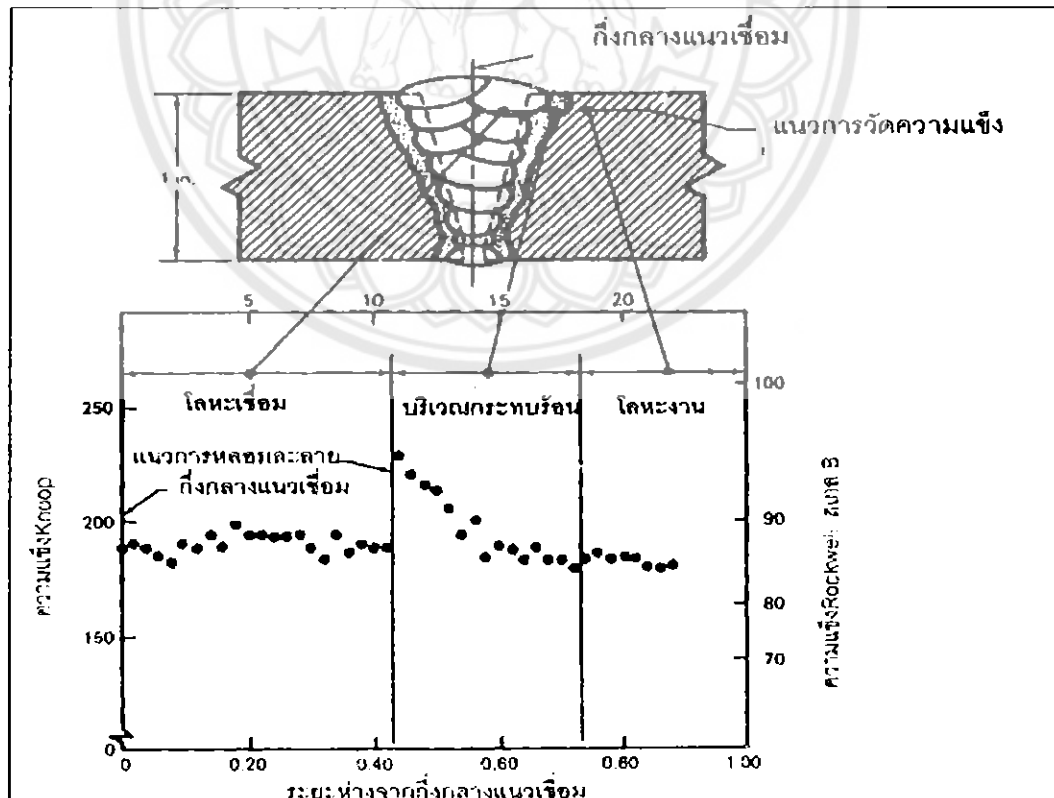
รูปที่ 2.8 แนวการเย็นตัวของแนวเชื่อม [4]

จากรูปที่ 2.8 สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. โลหะงาน
2. บริเวณกระทบร้อน
3. ขอบแนวเชื่อม
4. แนวเชื่อมปกคลุมด้านบน
5. แนวเชื่อมชั้นต่างๆ ที่มีเกรนละเอียด
6. ชั้นของแนวเชื่อมที่หนาจะทำให้เกิดเกรนละเอียด
7. แนวเชื่อมปกคลุมด้านล่างมีเกรนหยาบ

อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเขตต่างๆ ของแนวเชื่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากอัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็วซึ่งเหมือนกับการชุบแข็งตลอดแนวเชื่อมเขตต่างๆ ของแนวเชื่อมจะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงบริเวณแคบๆ เกิดขึ้นบริเวณขอบทั้งสองของแนวเชื่อม [4]

เมื่อเดินแนวเชื่อมเพียงแนวเล็กๆ จะมีแนวโน้มทำให้เกิด โครงสร้างพื้นฐานในแนวเชื่อม ถัดไปทำให้โครงสร้างบริเวณถัดไปมีปริมาตรเล็กมาก จนกระทั่งทำการเชื่อมซ้ำๆ กันหลายแนว ในกรณีเชื่อมโลหะงานนานๆ จะเหมือนกับการทำกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) ซ้ำๆ กันหลายครั้งซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติความแข็งของแนวเชื่อม ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงการเชื่อมที่มีผลกระทบต่อความแข็งของแนวเชื่อมและบริเวณใกล้เคียง [4]

2.3 กรรมวิธีทางความร้อน

กรรมวิธีทางความร้อน หรือเรียกสั้นๆ ว่า การอบชุบ หมายถึง การรวมเอา การทำให้ร้อน การทำให้เย็น เวลา และการประยุกต์ ใส่เข้าไปใน โลหะหรือโลหะผสมในสภาพที่ยังเป็นของแข็ง แล้ว ทำให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติให้ได้ตามที่ต้องการ
2. มีความอ่อนตัวสูงขึ้นรูปได้ง่าย
3. มีความแข็งสูงเพื่อทนการเสียดสี
4. มีความเหนียวใช้งานที่แรงกระแทกและบิดตัวสูงได้ทนทาน

หลักการ

เผาให้ร้อนแล้วปล่อยให้เย็นตัวที่อัตราต่างๆ กัน โดยอาศัยสมบัติของเหล็กที่สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบผลึก (Allotropy) ได้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงทำให้เราสามารถควบคุมสมบัติของเหล็กให้เปลี่ยนไปตามความต้องการใช้ การอบชุบที่นิยมใช้ มีดังนี้

1. Annealing การอบอ่อนหรือการให้อ่อนตัวสูง
2. Normalizing การอบปกติ
3. Tempering การอบคืนตัว
4. Hardening การชุบแข็ง

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ต้องการคลายความเครียดเหลือค้างภายหลังจากเชื่อมชิ้นงานดังนั้น จึงเลือกวิธีการทำการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ (Incomplete Annealing) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการทำอบอ่อน จากวิธีหลักทั้งหมด 2 วิธี ดังนี้

2.3.1 การอบอ่อนหรือการอบให้อ่อนตัวสูง (Annealing)

คือ การอบเพื่อให้เหล็กอ่อนลง (Softening) หรือเพื่อทำให้เหล็กเหนียวขึ้น (Toughening) วัตถุประสงค์ของการอบอ่อนต้องการให้โลหะนั้นอ่อนตัวลง ทั้งนี้เพื่อให้โลหะเหล่านั้นขึ้นรูปง่าย และลดความเครียดอันเนื่องมาจากการชุบแข็งหรือผ่านกระบวนการขึ้นรูปต่างๆ เช่น การเชื่อม การขึ้นรูปร้อน การขึ้นรูปเย็นหรือการหล่อเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติไม่ติบางประการ เช่น เหล็กที่ผ่านการเชื่อมทำให้เหล็กร้อนบางจุดการขยายตัวเมื่อถูกความร้อนและการหดตัวเมื่อถูกปล่อยให้เย็นมักทำให้มีความเครียดเหลือค้างทำให้เหล็กมีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้น เหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold working) หรือการหล่อมาแล้วจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นไม่สม่ำเสมอสูญเสียความเหนียวทำให้การกลึงหรือไสได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำคลายความแข็งของเหล็กเพื่อกลึงไสได้สะดวก มี 2 วิธี คือ

ก. Full Annealing การอบอ่อนอย่างสมบูรณ์

ข. Incomplete Annealing หรือ Process Annealing การอบอ่อนไม่สมบูรณ์

2.3.1.1 กรรมวิธีการทำการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full Annealing)

วิธีการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์นี้ถ้าเป็นเหล็กที่มีส่วนผสมของคาร์บอนต่ำ คือ เหล็กประเภท เหล็ก Hypo-eutectoid เฝ้าให้มีอุณหภูมิเหนือเส้น A_{c1} ประมาณ 30-50 องศาเซลเซียส ไม่เลยเส้น A_{cm} เมื่ออบเหล็กถึงอุณหภูมิดังกล่าว เหล็กจะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นออสเทนไนต์ เนื่องจากการอบอ่อนชนิดนี้จุดประสงค์ต้องการให้ชิ้นงานอ่อนตัวลงทั้งชิ้น ดังนั้นจึงต้องทำให้เหล็กทั้งชิ้นเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นออสเทนไนต์ทั้งชิ้นก่อน เวลาในการอบจึงขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงาน ก็จะต้องใช้เวลาในการอบประมาณ 30-60 นาที ต่อความหนาของชิ้นงาน 25 มิลลิเมตร และเมื่ออบชิ้นงานได้ตามต้องการแล้วจึงปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงอย่างช้าๆ อัตราการเย็นตัวดังกล่าวจึงมักปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวภายในเตาอบ

สิ่งที่จะเกิดขึ้น เมื่อเหล็กถูกปล่อยให้เย็นช้าๆ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในก็จะกลับสู่สภาพใกล้เคียงสมดุล โครงสร้างที่เป็นอยู่ก่อนการอบอ่อนซึ่งอาจจะเป็น มาร์เทนไซด์ เบนไนท์ หรือซอร์ไบต์ สำหรับเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์จะเปลี่ยนเป็นเฟอไรต์ โล้ท์หรือเฟอร์ไรท์ สำหรับเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์จะเป็นเฟอไรต์ โล้ท์และซีเมนไทต์ หรือถ้าเป็นเหล็กยูเทคตอยด์ ภายหลังจากการอบก็จะ ได้เฟอไรต์ โล้ท์เพียงอย่างเดียวเท่านั้นทำให้ความแข็งแรงลดลงกลายเป็นเหล็กอ่อนนุ่ม

มีความมุ่งหมาย ทำให้ความแข็งแรงลดลงกลายเป็นเหล็กอ่อนนุ่มเพื่อสะดวกในการกลึงไสเพื่อทำให้เหล็กมีคุณสมบัติด้านไฟฟ้าและแม่เหล็กให้สม่ำเสมอ

2.3.1.2 การอบอ่อนไม่สมบูรณ์ (Incomplete Annealing หรือ Process Annealing)

เผาเหล็กให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าเส้น A_{c1} เล็กน้อย 500 - 650 องศาเซลเซียส เมื่อต้องการขจัด Stress-relief อบเหล็กทิ้งไว้ในเตาไว้เวลานานพอสมควรเพื่อให้เหล็กร้อนทั่วถึงกันปล่อยให้เย็นในอากาศ

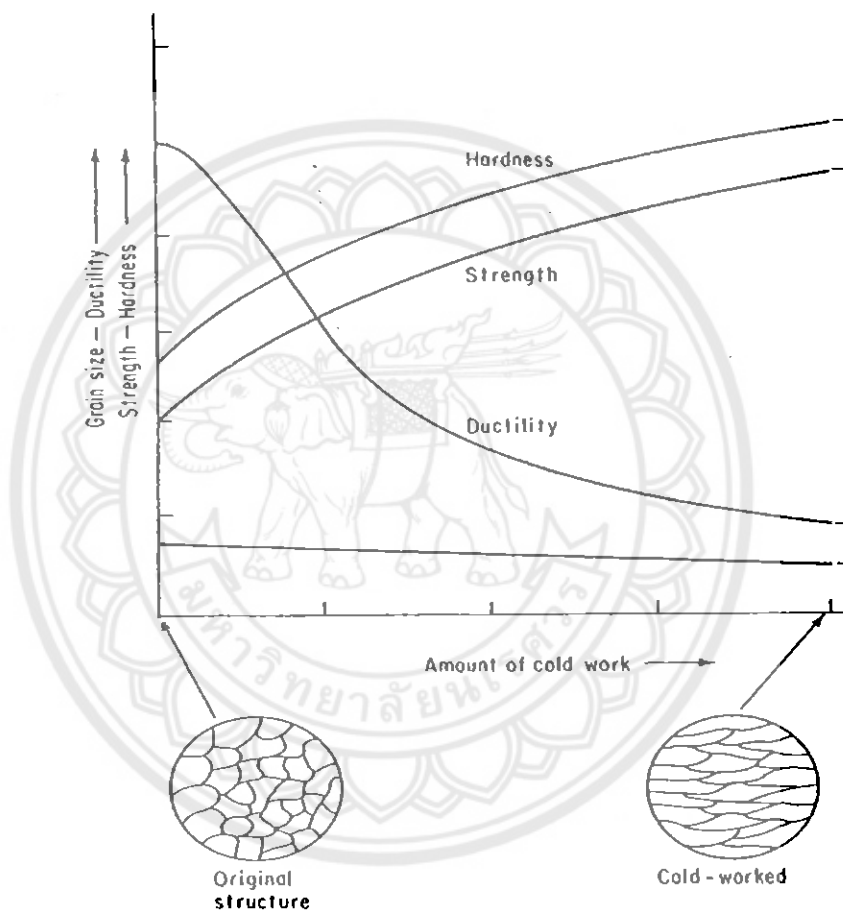
สิ่งที่จะเกิดขึ้น วิธีนี้ความแข็งแรงของเหล็กจะลดลงเล็กน้อยเพราะ โครงสร้างของเหล็กแต่เดิมไม่เปลี่ยนแปลงมากนักแต่ความเครียดที่มีอยู่จะถูกทำลายหมดไป

มีความมุ่งหมาย เพื่อทำลายความเครียดภายในให้หมดไป เช่น เหล็กที่ถูกรีดหรือตีขึ้นรูปมาต้องผ่านการ Annealing เพื่อให้ความต้านทานแรงกระทำน้อยลง [5]

การอบอ่อนนั้น แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (Recovery) การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) และการโตขึ้นของขนาดเกรน (Grain growth) ใหม่ซึ่งโดยทั่วไปเป็นคุณสมบัติที่เราไม่ต้องการ เพราะจะทำให้ความแข็งแรงลดลง

ก. การจัดเรียงตัวใหม่ (Recovery)

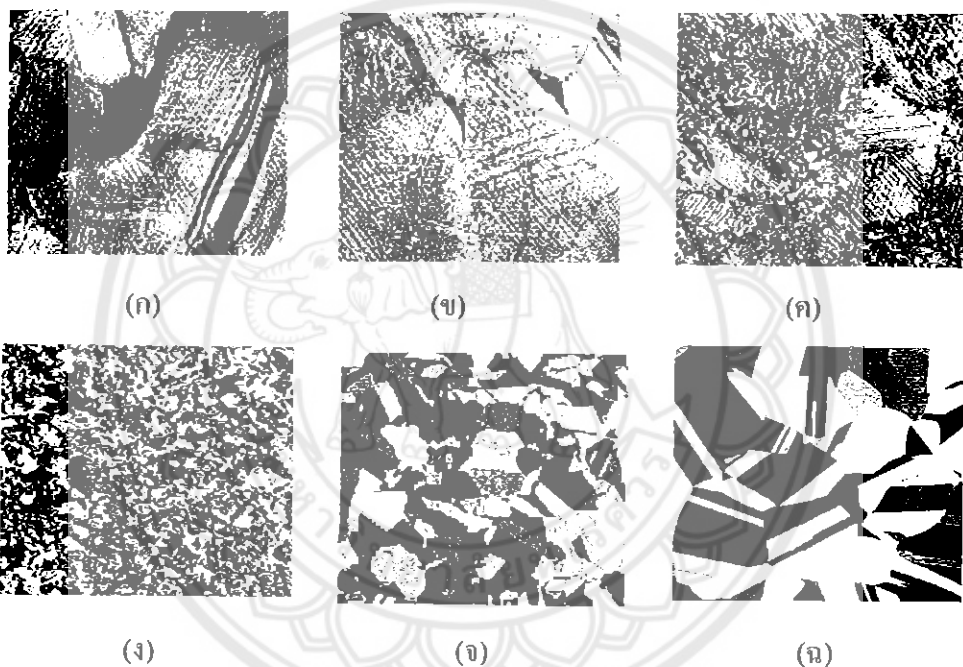
ในช่วงการเกิดการจัดเรียงตัวใหม่จะเกิดอยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำ ความเครียดภายในโลหะจะถูกทำให้ลดลงบางส่วน โดยการจัดเรียงตัวของดิสโลเคชันเป็นผลให้ดิสโลเคชันมีจำนวนลดลงทำให้ความเครียดลดลงไปบางส่วน และมีผลให้สมบัติทางกายภาพบางอย่างเช่น สมบัติทางไฟฟ้า เปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยจะถูกเปลี่ยนกลับไปเหมือนสภาพก่อนทำการขึ้นรูปเย็น แต่ความแข็งแรงและความแข็งแรงยังคงมีค่าเท่าเดิม ซึ่งยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงในชั้นตอนนี้



รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดผลกระทบของการขึ้นรูปเย็นด้วยความต้านทานแรงดึงความแข็งแรง ความเหนียว และขนาดเกรน [6]

ข. การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization)

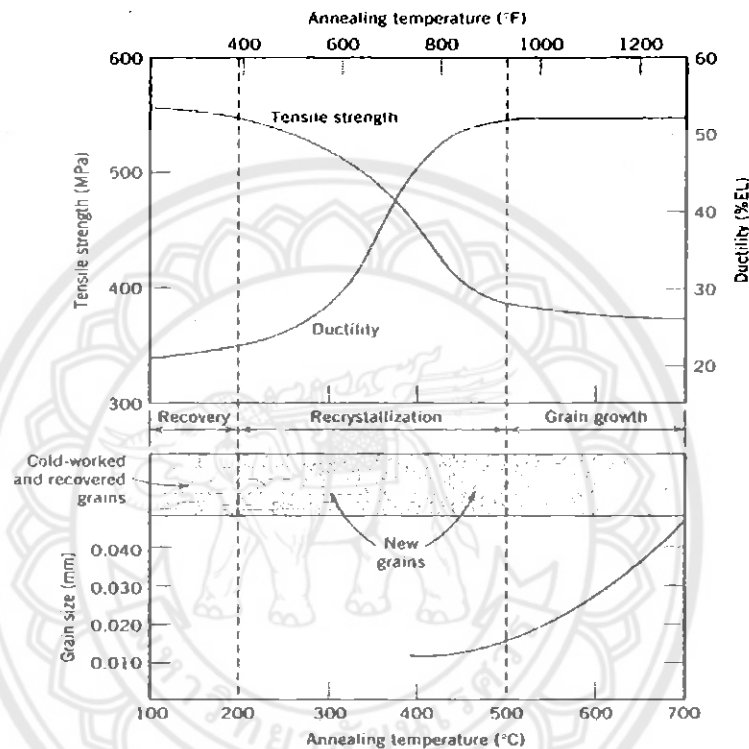
หลังจากเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เสร็จสิ้นลงเกรนของโลหะยังคงอยู่ในสภาพที่มีความเครียดสูงอยู่ การเกิดผลึกใหม่นั้นจะเกิดอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าการจัดเรียงตัวใหม่ ทำให้เกิดเกรนใหม่ที่ปราศจากความเครียด (Strain free) ขึ้นมา ซึ่งจะมีจำนวนดิสโลเคชันที่น้อย มีคุณสมบัติเหมือนกับสภาพก่อนทำการขึ้นรูปเย็น (Precold work) เกรนที่เกิดขึ้นมาใหม่นี้จะเกิดจากนิวเคลียสขนาดเล็กๆ ที่เกิดขึ้นที่บริเวณที่มีพลังงานศักย์ (Potential energy) สูง เช่น ที่บริเวณของขอบเกรน เป็นต้น ซึ่งจะเริ่มขยายตัวขึ้นเรื่อยๆ จนแทนที่เกรนเดิมจนหมด ดังจะแสดงให้เห็นในรูปแบบที่ 2.11(ก) ถึง 2.11(ข)



รูปที่ 2.11 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 75 เท่า โดยแสดงให้เห็นสภาพต่างๆ ของการเกิดผลึกใหม่และการโตของขนาดเกรนของทองเหลือง [6]

- (ก) ผ่านการขึ้นรูปเย็นมา 33 เปอร์เซ็นต์
- (ข) เริ่มเกิดผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 วินาที จะเห็นเกรนขนาดเล็กเกิดขึ้น
- (ค) การเกิดผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 วินาที
- (ง) การเกิดผลึกใหม่โดยสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 วินาที
- (จ) การโตของเกรนเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส
- (ฉ) การโตของเกรนเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

หลังจากการเกิดผลึกใหม่แล้วคุณสมบัติทางกลที่ได้จากการขึ้นรูปเย็นจะเปลี่ยนไปโดยจะมีคุณสมบัติเหมือนกับที่ยังไม่ได้ทำการขึ้นรูปเย็นซึ่งจะมีความอ่อนและมีการยืดตัว (Ductility) ที่สูงขึ้น ความแข็งและความแข็งแรงลดลงกระบวนการการเกิดผลึกใหม่จะขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอัตราการเกิดผลึกใหม่จะสูงขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.11(ก) ถึง 2.11(ง)

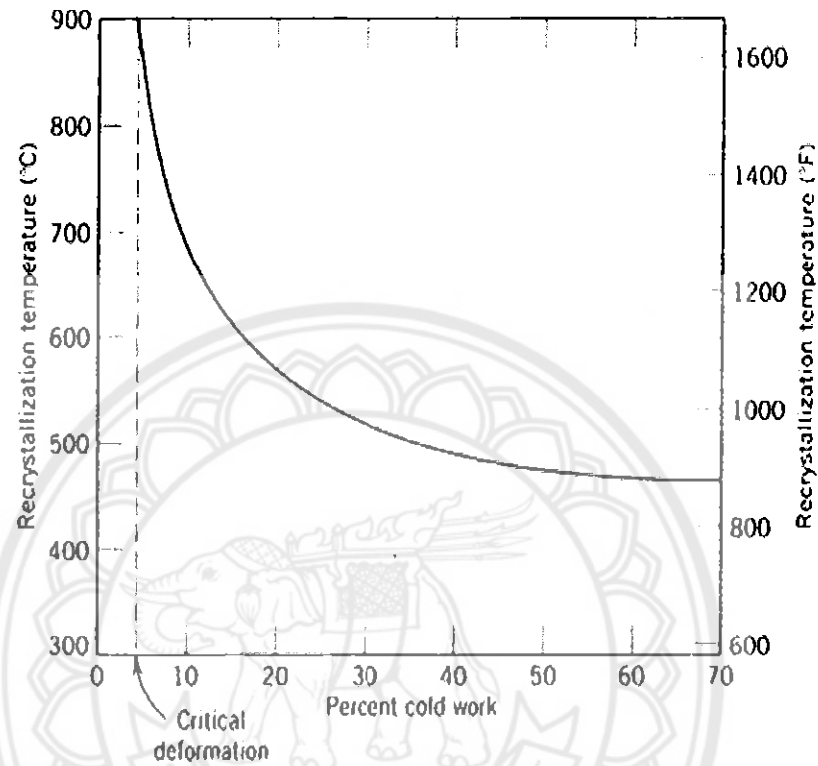


รูปที่ 2.12 อิทธิพลของอุณหภูมิในการอบอ่อนที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวของทองเหลืองผสม และขนาดของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเกิดการเรียงตัวใหม่ การเกิดผลึกใหม่และการโตของขนาดเกรน [6]

ผลจากอุณหภูมิแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.12 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงและการยืดตัวที่อุณหภูมิห้องของทองเหลืองผสม โดยแสดงการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรง และการยืดตัว เมื่ออุณหภูมิในการอบเปลี่ยนไป ซึ่งใช้เวลาในการอบ 1 ชั่วโมง

การเกิดผลึกใหม่ของโลหะใดๆ จะมีอุณหภูมิที่ใช้แตกต่างกันไป โดยอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่สามารถทำให้เกิดผลึกใหม่เรียกว่า อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization temperature) ซึ่งจะเป็นอุณหภูมิที่ทำให้เกิดกระบวนการการเกิดผลึกใหม่ภายใน 1 ชั่วโมง ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 1/3 - 1/2 เท่าของอุณหภูมิลอมเหลวของโลหะชนิดนั้นๆ แต่ก็ยังขึ้นอยู่กับอีกหลายปัจจัยด้วยกันรวมถึงจำนวนครั้งในการขึ้นรูปเย็น (Cold work) ความบริสุทธิ์ของ

โลหะผสม และการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ในการขึ้นรูปเย็น (Percentage of cold work) ก็มีผลต่ออัตราการเกิดผลึกใหม่ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ที่ต่ำลง ดังที่แสดงในรูปที่ 2.13 สำหรับเปอร์เซ็นต์ในการขึ้นรูปที่ต่ำเกินไปก็ไม่สามารถที่จะทำให้เกิดผลึกใหม่ได้



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิในการเกิดผลึกใหม่กับเปอร์เซ็นต์ในการขึ้นรูปเย็นแสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์ในการขึ้นรูปเย็นต่ำสุดที่สามารถทำให้เกิดผลึกใหม่ [6]

การเกิดผลึกใหม่โลหะบริสุทธิ์จะเกิดได้เร็วกว่าโลหะผสม ดังนั้นการเติมธาตุผสมเข้าไป จึงทำให้ต้องเพิ่มอุณหภูมิในการเกิดผลึกใหม่สำหรับอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ที่ใช้กับโลหะบริสุทธิ์จะมีค่าประมาณ $0.3T_m$ และโลหะผสมบางชนิดอาจสูงถึง $0.7T_m$ เมื่อ T_m คืออุณหภูมิในการหลอมตัวของโลหะชนิดนั้นๆ โดยจะแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าการเกิดผลึกใหม่และอุณหภูมิในการหลอมตัว (Recrystallization and melting temperature for various metals and alloys) [6]

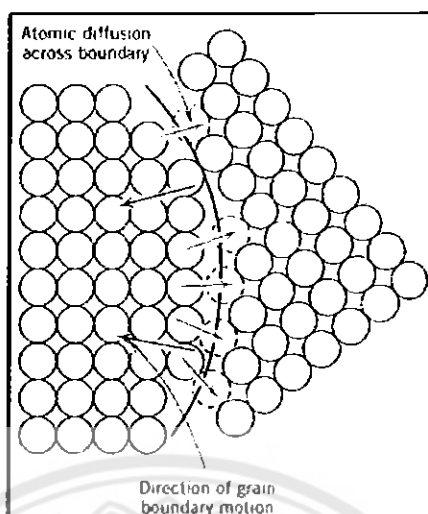
Metal	Recrystallization temperature		Melting temperature	
	องศาเซลเซียส	องศาฟาเรนไฮต์	องศาเซลเซียส	องศาฟาเรนไฮต์
Lead	-4	25	327	620
Tin	-4	25	232	450
Zinc	10	50	420	788
Aluminum (99.999 wt เปอร์เซ็นต์)	80	176	660	1220
Copper (99.999 wt เปอร์เซ็นต์)	120	250	1085	1985
Brass (60 Cu-40 Zn)	475	887	900	1652
Nickel (99.999 wt เปอร์เซ็นต์)	370	700	1455	2651
Iron	450	840	1538	2800
Tungsten	1200	2200	3410	6170

สำหรับการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่เกิดผลึกใหม่เราเรียกระบวนการนี้ว่าการขึ้นรูปร้อน (Hot working) ซึ่งสมบัติต่างๆ เช่น การยึดตัว ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการขึ้นรูป เพราะไม่เกิดความเครียด (Strain hardening)

ค. การโตของขนาดเกรน (Grain growth)

หลังจากการเกิดผลึกใหม่เสร็จสิ้นลงเกรนที่เกิดขึ้นมาใหม่จะมีสภาพที่ปราศจากความเครียด (Strain free grain) เมื่อให้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization temperature) จะทำให้เกรนที่เกิดขึ้นมาใหม่มีการขยายขนาดให้โตขึ้น โดยปรากฏการณ์นี้เราเรียกว่าการโตของขนาดเกรน

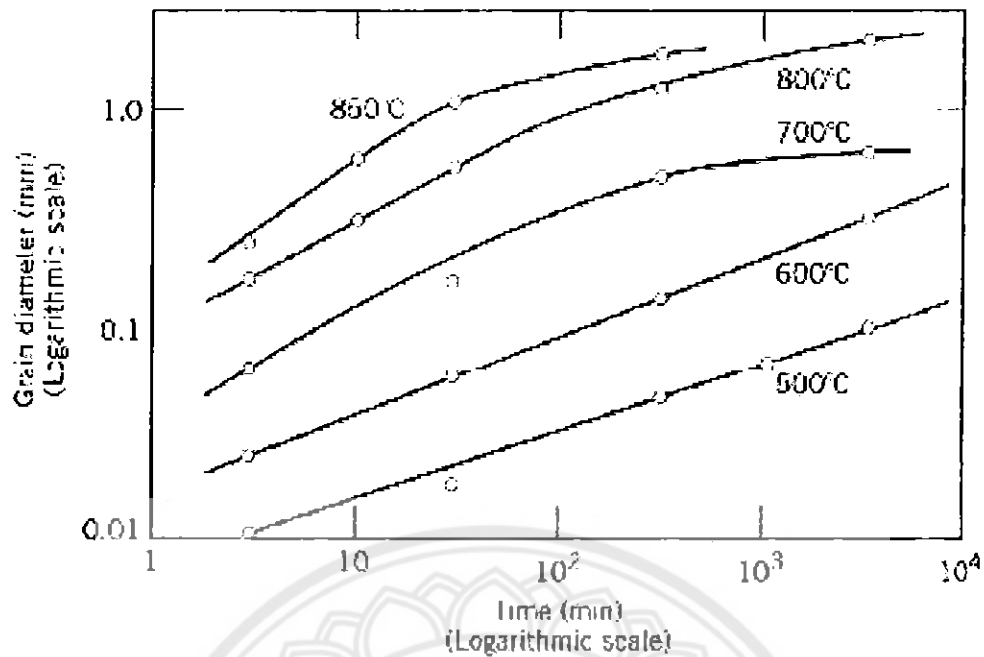
การโตของขนาดเกรนไม่จำเป็นต้องเกิดภายหลังจากการเกิด การเรียงตัวใหม่ การเกิดผลึกใหม่และการ โตของขนาดเกรนอาจจะเกิดขึ้น ได้กับ โลหะที่เป็นพหุผลึก (Polycrystalline) ทุกชนิดและเซรามิกส์ด้วย



รูปที่ 2.14 แสดงการเกิดการโตของขอบเกรน โดยการแพร่ของอะตอม [6]

การโตของขนาดเกรนเกิดขึ้นโดยการเคลื่อนตัวของขอบเกรนออกไป ไม่เพียงแต่เกรนจะสามารถขยายใหญ่ขึ้นได้เองแล้ว ยังสามารถไปรวมกับเกรนข้างๆ ทำให้เกิดเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่าเดิมขึ้นไปอีก โดยขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการอบนานขึ้น การเคลื่อนที่ของขอบเกรนที่ขยายออกมา สามารถเกิดขึ้นได้โดยการแพร่ของอะตอมจากขอบเกรนหนึ่งสู่อีกขอบเกรนหนึ่ง โดยทิศทางของการเคลื่อนที่ของขอบเกรนจะตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.14

ขนาดของเกรนจะขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิในการอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งแสดงถึงผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อขนาดเกรนของทองเหลืองผสม โดยสังเกตได้ว่า ในช่วงอุณหภูมิต่ำๆ กราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง การเกิดการโตของขนาดเกรนจะเกิดได้อย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิที่ใช้สูงขึ้น ทำให้อัตราการแพร่สูงขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากกราฟจะโค้งสูงขึ้น [6]



รูปที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของขนาดเกรนและระยะเวลาในการเกิดการโตของขนาดเกรนของทองเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆ [6]

คุณสมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้องของเกรนที่มีความละเอียดจะมีความแข็งแรงที่สูงกว่าเกรนที่หยาบกว่า สามารถอธิบายได้จากทฤษฎีของคิสโลเคชั่นเพราะในขอบเกรน (Grain boundary) จะเป็นตัวขัดขวางการเลื่อนไถล (Slip) ของคิสโลเคชั่นทำให้เกิดการทับถมของคิสโลเคชั่นบนระนาบการเลื่อน (Slip plan) ใกล้เคียงกับขอบเกรน ถ้าจะทำให้เกิดการเลื่อนไถล (Slip) ต่อไปก็จะต้องใช้แรงมากขึ้น ถ้าโลหะมีขนาดของเกรนเล็กนั้นคือมีขอบเกรนมาก ก็จะมีผลทำให้การเคลื่อนที่ของคิสโลเคชั่นยากขึ้นหรือต้องใช้ความเค้นสูงชันนั่นเอง ดังนั้นโลหะที่มีเกรนละเอียดก็จะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าเกรนที่หยาบกว่า [7]

2.4 โครงสร้างจุลภาค

การศึกษาแผนภูมิสมมูลของเหล็กกับคาร์บอนมีความสำคัญมากเพราะคุณสมบัติของเหล็กที่ใช้ในงานวิศวกรรมเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็ก และการที่จะเข้าใจถึงคุณสมบัติต่างๆ ของเหล็กได้ดี ย่อมต้องเข้าใจเรื่องของแผนภูมิสมมูลของเหล็กกับคาร์บอนเป็นหลัก ในการศึกษาแผนภูมินี้จะต้องทำความเข้าใจความหมายของศัพท์ที่เกี่ยวข้องเสียก่อนดังต่อไปนี้

2.4.1 เฟอไรต์ (Ferrite)

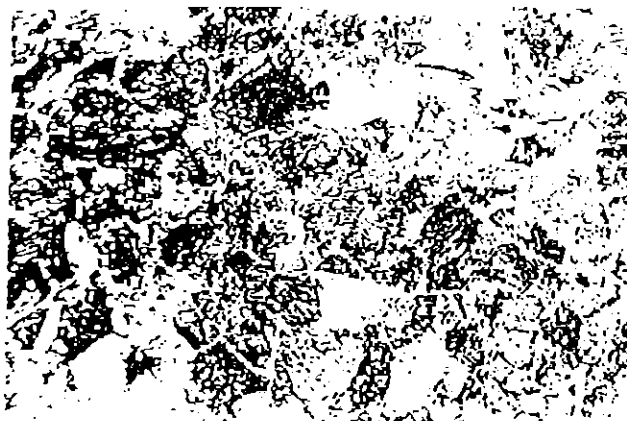
เฟอไรต์ คือสารละลายในสภาพของแข็งของเหล็กกับคาร์บอน ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิธรรมดาถึงประมาณ 723 องศาเซลเซียส ซึ่งคาร์บอนละลายในเหล็กมากที่สุดที่ 0.025 เปอร์เซ็นต์ บางครั้งเฟอไรต์ว่าเหล็ก (Iron) เฟอไรต์เป็นชื่อที่มาจากภาษาละติน เรียกว่า เฟอรัม (Ferrum) แปลว่า เหล็ก โครงสร้างที่ประกอบด้วยเหล็กค่อนข้างบริสุทธิ์ มีคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกิน 0.05 เปอร์เซ็นต์ มีการวางตัวอะตอมแบบ BCC (Body Centered Cubic) เป็นสารแม่เหล็ก มีคุณสมบัติทั่วๆ ไปคือ อ่อนเหนียว และไม่แข็ง



รูปที่ 2.16 ลักษณะ โครงสร้างเฟอไรต์ [8]

2.4.2 ซีเมนไตท์ (Cementite)

เมื่อปริมาณคาร์บอนในระบบเหล็กกับคาร์บอนมีมากกว่าที่มันจะละลายในเฟอไรต์ หรือออสเทนไนต์ได้หมดคาร์บอนที่เหลือจะจับตัวกับเหล็ก เกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound) ระหว่างเหล็กกับคาร์บอน โดยมีคาร์บอนผสมอยู่ 6.67 เปอร์เซ็นต์ มีสูตร Fe_3C มีความแข็งสูงแต่จะเปราะแตกหักได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระแทก



รูปที่ 2.17 ลักษณะ โครงสร้างซีเมนไทต์แบบตาข่าย [8]

2.4.3 เฟอร์ไรต์ (Pearlite)

เฟอร์ไรต์ คือ โครงสร้างเหล็กกล้าคาร์บอนยูเต็คตอยด์ ซึ่งเกิดการรวมตัวสลัป 2 เฟส คือ เฟอร์ไรต์กับซีเมนไทต์ โดยทั่วไปจะมีคาร์บอนอยู่มากถึง 0.80 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนจะเป็นโครงสร้างของเฟอร์ไรต์มากที่สุดทั้งก่อน เพราะผลจากการเกิดปฏิกิริยาของยูเต็คตอยด์ที่เกิดขึ้นที่สถานะสมดุลที่อุณหภูมิ 723 องศาเซลเซียส ซึ่งมีเฟอร์ไรต์ 0.02 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับซีเมนไทต์ 6.67 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน

เฟอร์ไรต์ มาจากคำว่า (Pearl) ซึ่งแปลว่าไข่มุก เนื่องจากเมื่อส่องดู โครงสร้างจุลภาคที่มีกำลังขยาย 500 เท่า จะมองเห็นรูปร่างและวาวคล้ายไข่มุก ลักษณะที่พบมากคือเป็นแถบยาวๆ บางๆ เป็นกลุ่มก้อนสีดำ

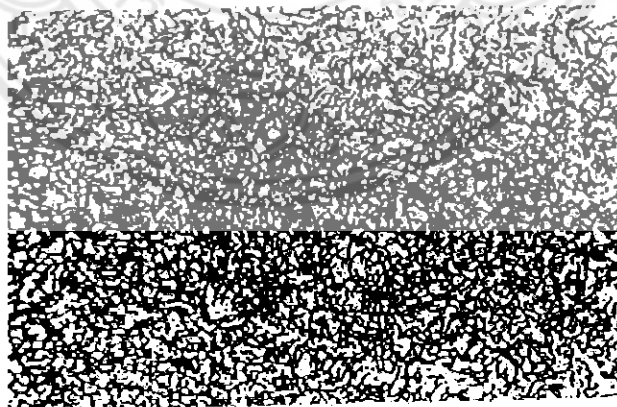
ถ้าส่วนผสมคาร์บอนเป็นเหล็กกล้ายูเต็คตอยด์นำมาให้ความร้อนในเตาอบสูงกว่าเส้น A_1 ก็ได้ โครงสร้างออสเทนไนต์แล้วทำให้เย็นอย่างช้าๆ ในเตาออสเทนไนต์ก็จะกลายเป็นเฟอร์ไรต์ทั้งหมดลักษณะเป็นมันวาวคล้ายไข่มุก ในการกักตุนพบว่าเฟอร์ไรต์จะถูกกักตุนได้ง่ายกว่า ซึ่งบริเวณนั้นจะมองเห็นเป็นชั้นๆ สีดำ และมีเฟอร์ไรต์เป็นสีขาวๆ เป็นแถบกว้าง



รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างเฟิร์ลไลท์ในเหล็กกล้าส่วนผสม 0.75 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน [8]

2.4.4 โครงสร้างมาร์เทนไซต์

มาร์เทนไซต์ คือ โครงสร้างจุลภาคซึ่งไม่มีในแผ่นภูมิสมดุลงเหล็กคาร์บอน และได้จากการนำเอาชิ้นงานที่ได้จะเป็นเหล็กกล้าไฮโปไคคตอยด์ ซึ่งมีโครงสร้างภายในเป็นเฟอร์ไรต์กับเฟิร์ลไลต์มาอบเผาแช่ไว้ในอุณหภูมิสูงเกินเส้น A_1 จนถึงเส้น A_3 และบวกเพิ่มอีกประมาณ 30-50 องศาเซลเซียส โครงสร้างภายในเนื้อโลหะก็จะเปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์นำเอาออกมาจากเตา แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มน้ำ น้ำมัน แต่ที่นิยมกันมากคือการจุ่มลงในน้ำ โครงสร้างก็จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ได้ตามที่ต้องการและคือนำไปทำการอบคลายเทมเปอร์เพื่อลดความเปราะในการนำไปใช้ ก่อนทำเทมเปอร์มาร์เทนไซต์นี้ เหมาะกับงานที่ทำส่วนอะไหล่ที่ต้องการให้ทนต่อการเสียดสีและทนต่อการสึกหรอได้ดี



รูปที่ 2.19 ลักษณะ โครงสร้างมาร์เทนไซต์ [8]

15059896

ปง.

ภา 342 ๑

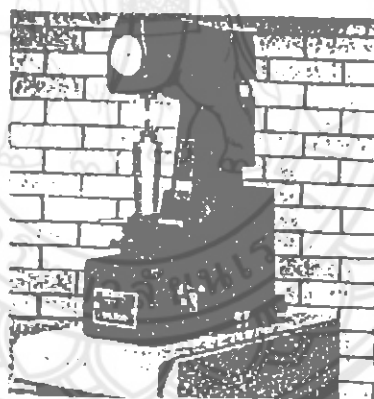
2552

2.5 การทดสอบความแข็ง

เป็นการวัดความต่อต้าน (Resistance) ของโลหะที่จะต้องเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic deformation) การทดสอบความแข็งของวัสดุนั้นใช้วิธีกดวัสดุที่มีลักษณะแข็งกว่า เช่น เหล็กแข็ง ทั้งสแตนเลสสตีล เพชร เป็นต้น โดยทำเป็นรูปร่างๆ กัน เช่น ทำเป็นรูปกลม พีระมิด โคน หรือกรวย เมื่อกดตัวกด (Indenter) ลงไปในวัสดุ ที่ทดสอบเป็นมุม 90 องศา ลงไปอย่างช้าๆ แล้ววัดรอยวัดที่เกิดขึ้น โดยการเลือกหัวกดนั้นจะขึ้นอยู่กับรูปร่างหัวกดและน้ำหนักที่ใช้ ความแข็งของโลหะจะมีค่าเท่าไรขึ้นอยู่กับความยากง่ายของการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุนั้น

การตรวจสอบความแข็งมีหลายวิธี เช่น

1. การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)
 2. การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล (Rockwell Hardness Test)
 3. การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vicker Hardness Test)
 4. การทดสอบความแข็งแบบชอร์ (Shore Hardness Test)
- แต่ในที่นี้จะขอกล่าวโดยละเอียดเฉพาะเครื่องทดสอบแบบร็อกเวล (Rockwell Hardness Test)



รูปที่ 2.20 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล [8]

2.5.1 การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล

การทดสอบแบบร็อกเวลนี้ วัดได้จากความลึกที่ปรากฏบนผิวทดสอบ อันเกิดจากการกดของหัวกด (Indenter) มาตรฐาน และวัดความแข็งของชิ้นงานได้หลายสเกล เช่น สเกล A, B, C, D, E, F, G, H, K และ L เป็นต้น แต่มีการวัดบางสเกลเท่านั้นที่นิยมใช้ ซึ่งสเกลเหล่านั้น คือ สเกล C และสเกล B

การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล C (HRC) ใช้วัดความแข็งของเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็ง โดยการใช้หัวกดรูปทรงกรวยทำด้วยเพชรมีมุมยอดเท่ากับ 120 องศา

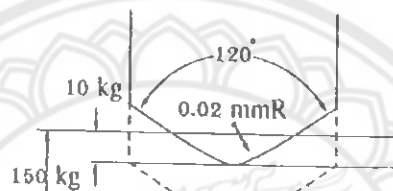
การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล B (HRB) ใช้วัดความแข็งของเหล็กกล้าทั่วไปโดยใช้หัวกดแบบลูกบอลเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16, 1/8, 1/4 และ 1/2 นิ้ว

สำหรับแรงกดที่ใช้ในการกดหัวนั้นจะประกอบด้วยแรง 2 แรงคือ

1. แรงกดตาม

2. แรงกดนำ หมายถึง แรงที่ใช้กดให้หัวกดสัมผัสผิวทดสอบ แรงกดนำนี้จะมีขนาดไม่มากนัก โดยจะมีขนาดผิวเพียง 10 กิโลกรัม เท่านั้น

แต่สำหรับแรงกดตามนั้นหมายถึง แรงที่ใช้ในการกดหัวกดเพื่อให้เกิดรอยกดบนผิวทดสอบจะมีขนาดเท่ากับ 140 กิโลกรัม ขนาดของแรงกดนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่จะทำการทดสอบ



รูปที่ 2.21 ขนาดของแรงกดที่กระทำต่อผิวทดสอบ [8]

2.5.2 ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล

การทดสอบความแข็งวิธีนี้มีขั้นตอนการปฏิบัติที่ไม่ซับซ้อนสามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย ดังนี้

2.5.2.1 วางชิ้นงานลงบนแป้นทดสอบกดหัวลูกบอลลงบนผิวทดสอบด้วยแรงกดนำ 10 กิโลกรัม จากนั้นตั้งนาฬิกาที่เครื่องไปที่เลขศูนย์

2.5.2.2 ตั้งแรงกดตามชนิดของโลหะที่ทำการทดสอบ โดยการดูจากตารางแรงกดแล้วลบด้วยแรงกดนำ ซึ่งแรงกดเพิ่มนี้จะทำให้หัวลูกบอลกดบนชิ้นงานทดสอบ

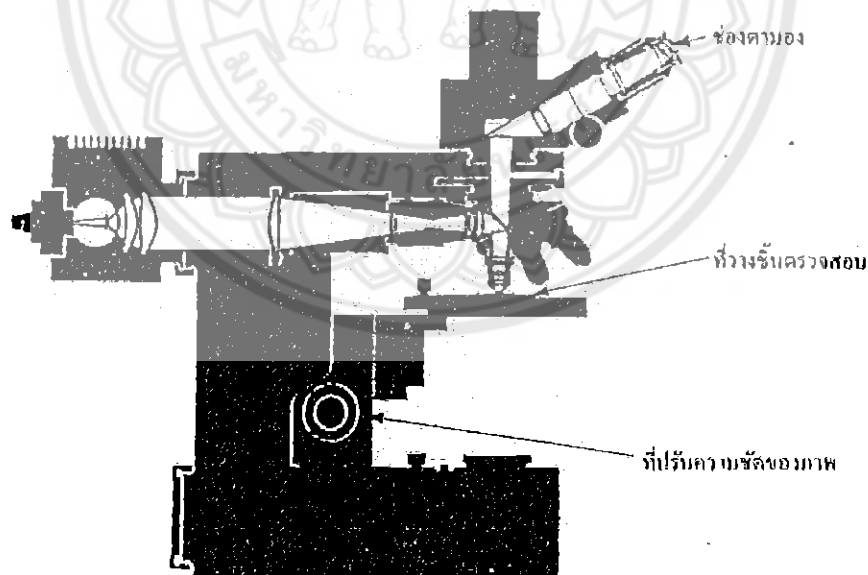
2.5.2.3 นำแรงกดเพิ่มออกทำให้เหลือแรงกดนำแต่เพียงอย่างเดียว หลังจากนั้นเข็มนาฬิกาจะดอยกลับและหยุด เราจึงอ่านค่าความแข็งที่ตำแหน่งเข็มนาฬิกานั้นหยุดอยู่ ซึ่งอ่านได้อ่านค่าดังนี้ เช่น 40 HRC หมายถึงความแข็งแบบร็อกเวล 40 ด้วยสเกล C และ 85 HRB หมายถึง ความแข็งแบบร็อกเวล 85 ด้วย สเกล B

การทดสอบความแข็งแรงวิธีนี้มีหลักการทดสอบที่ต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้

- ก. ควรตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องค้ำยันแห่งทดสอบ (Test Block) ทุกครั้งก่อนการทำงาน
- ข. ชิ้นงานที่ทำการทดสอบควรทำความสะอาดและขนานกันสองด้าน
- ค. รอดคบนผิวทดสอบควรห่างกันอย่างน้อย 3 มิลลิเมตร
- ง. ควรวัดค่าความแข็งแรงอย่างน้อย 3 จุด แล้วนำค่าที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ย จะได้เป็นค่าความแข็งแรงที่ถูกต้อง
- จ. ค่าความแข็งแรงที่อ่านได้บนสเกลเป็นค่าที่นำไปใช้ได้เลยจึงมีความรวดเร็วในการทดสอบ
- ฉ. ชิ้นงานที่ทำการทดสอบควรมีความหนาไม่น้อยกว่า 10 เท่า ของรอยคดบนผิวทดสอบ

2.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

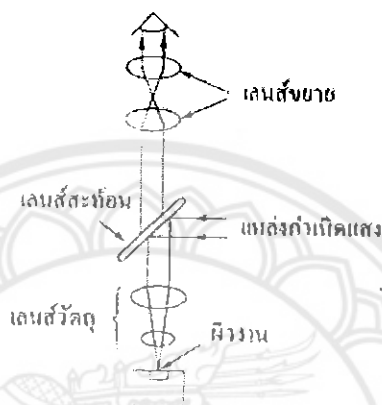
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค กระทำได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง ถ้าเป็นกล้องที่ใช้แสงจากหลอดไฟจะให้กำลังขยายไม่เกิน 2000 เท่า แต่ถ้าเป็นกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนจะสามารถให้กำลังขยายได้สูงถึง 100,000 เท่า หรือมากกว่านี้



รูปที่ 2.22 ลักษณะของกล้องจุลทรรศน์แบบที่ใช้ลำแสงจากหลอดไฟ [8]

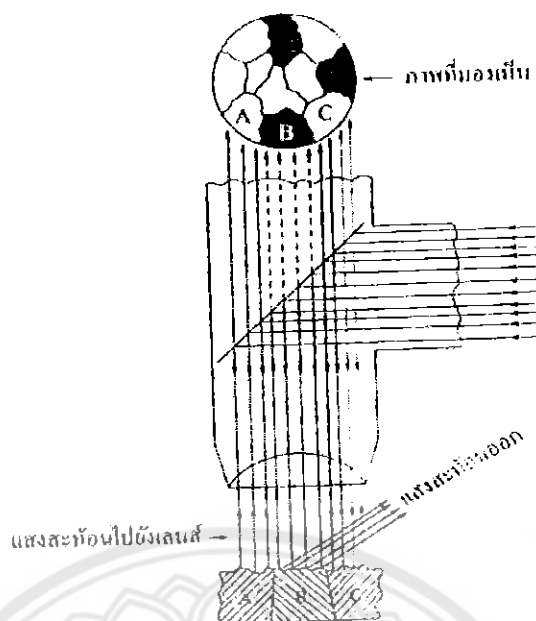
2.6.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์นั้นจะมีหลักการทำงานที่คล้ายคลึงกันไม่ว่าจะเป็นกล้องจุลทรรศน์แบบใดก็ตาม โดยหลักการทำงานด้วยการปล่อยแสงจากแหล่งกำเนิดไปยังชิ้นตรวจสอบ ทำให้แสงที่ตกกระทบลงบนผิวงานที่เรียบและตั้งฉากกับลำแสงจะสะท้อนได้ดีกว่า โดยแสงจะสะท้อนกลับเข้าไปยังเลนส์ขยาย และเข้าสู่สายตาของผู้ตรวจสอบ ทำให้เห็นภาพดังกล่าวมีขนาดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 2.23 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบที่ใช้ลำแสงจากหลอดไฟ [8]

แต่ถ้าลำแสงจากจุดกำเนิดแสงตกกระทบลงบนผิวงานที่ไม่เรียบและไม่ตั้งฉากกับลำแสง การสะท้อนจะไม่ดีเท่าที่ควร โดยที่จะมีแสงบางส่วนสะท้อนกลับไปยังเลนส์ขยายและเข้าสู่สายตาของผู้ตรวจสอบหรือในบางครั้งอาจไม่มีการสะท้อนเข้าตาผู้ตรวจสอบเลย จึงทำให้ผู้ตรวจสอบเห็นเป็นสีดำ ดังรูปที่ 2.24

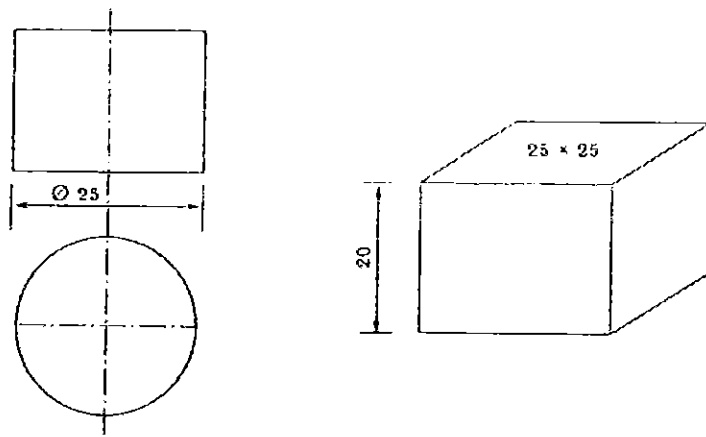


รูปที่ 2.24 ลักษณะลำแสงสะท้อนกลับไปยังเลนส์ขยายทำให้เกิดภาพโครงสร้างของชิ้นงาน [8]

2.6.2 การเตรียมชิ้นตรวจสอบเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคนั้นควรตัดให้เพิ่มพื้นที่หน้าตัด และการตัดดังกล่าวต้องหลีกเลี่ยงให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้ก็เพราะว่าความร้อนดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าตัดนั้นเกิดการทำให้การเปลี่ยนแปลงทำให้การตรวจสอบนั้นเกิดข้อผิดพลาด

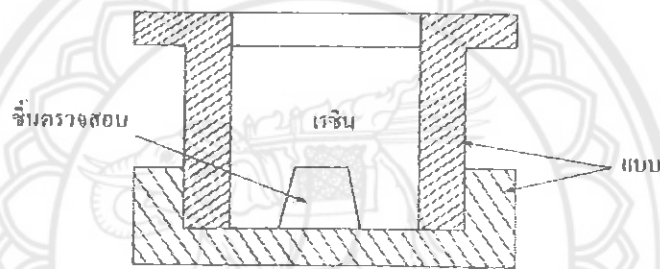
สำหรับขนาดของชิ้นตรวจสอบควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร หรือ 1 นิ้ว และมีความสูงไม่น้อยกว่า 15 มิลลิเมตร แต่ถ้าเป็นทรงสี่เหลี่ยมควรมีขนาด 25 x 25 x 20 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อให้การขัดผิวกระทำได้ง่าย แต่ถ้าชิ้นตรวจสอบมีขนาดเล็กมากก็ควรหุ้มชิ้นตรวจสอบด้วยเรซิน โดยให้หน้าตัดของชิ้นตรวจสอบอยู่ภายนอกเรซิน และขนาดของเรซินนั้นก็ควรมีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นตรวจสอบที่ได้กล่าวแล้ว [8]



ชั้นตรวจสอบทรงกระบอก

ชั้นตรวจสอบทรงเหลี่ยม

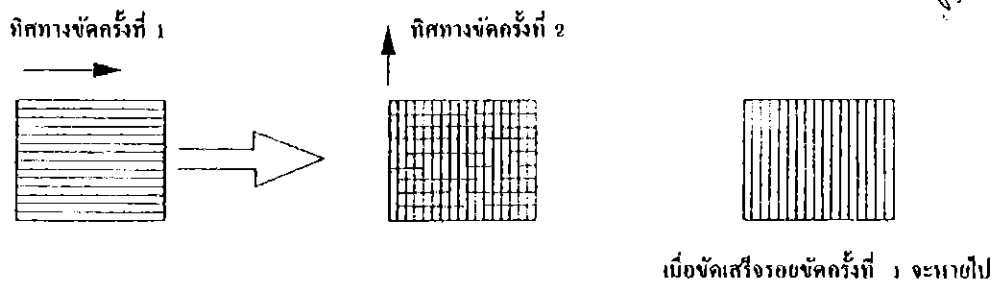
รูปที่ 8.15 ลักษณะและขนาดของชั้นตรวจสอบ



รูปที่ 2.25 ลักษณะการหุ้มชั้นตรวจสอบด้วยเรซิน [8]

หลังจากชั้นตรวจสอบที่มีขนาดตามต้องการแล้วจะต้องดำเนินการขั้นตอนต่อไป เพื่อให้สามารถนำชั้นตรวจสอบนั้นไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ ขั้นตอนในลำดับต่อไปนั้นจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.2.1 การขัดผิวชั้นตรวจสอบ ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิกอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 220, 320, 400 และขัดจนถึงเบอร์ 600 ตามลำดับในการขัด ควรวางกระดาษทรายลงบนกระดาษหนาเรียบและขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะที่ขัดนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ผงโลหะ และซิลิกอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไปควรขัดชิ้นงานตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย



รูปที่ 2.26 ลักษณะแนวทางการขัดขึ้นตรวจสอบสลับเป็นตาราง [8]

2.6.2.2 การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวชิ้นงานขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่มาจากอะลูมินา และแมกนีเซียม หรืออาจจะใช้กากเพชรขัดผิวของชิ้นงานตรวจสอบที่มีความแข็งแรงสูงมาก โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.05 – 0.3 ไมครอน การขัดด้วยผงขัดนี้จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยการนำผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมัน

2.6.2.3 การกัดด้วยน้ำยา (Etching) ชิ้นตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนั้นจะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นจะถูกนำไปกัดด้วยน้ำยา ซึ่งจะเป็นน้ำยาอะไรนั้นต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการตรวจสอบ เช่น ถ้าเป็นเหล็กก็จะใช้กรดไนตริกร้อยละ 2 – 4 ผสมกับแอลกอฮอล์

2.6.2.4 การตรวจสอบ โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อชิ้นตรวจสอบถูกกัดด้วยน้ำยาเรียบร้อยแล้ว ซึ่งผู้ตรวจสอบจำเป็นต้องศึกษาขั้นตอนการทำงานของกล้องจุลทรรศน์ปฏิบัติตามขั้นตอนดังนี้

ก. วางชิ้นงานที่ตรวจสอบบนที่วางของกล้องจุลทรรศน์ ที่วางชิ้นตรวจสอบนี้สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงและเคลื่อนที่ไปทางซ้าย-ขวาได้ ทั้งนี้เพื่อการปรับชิ้นตรวจสอบให้ตรงกับเลนส์วัตถุ และยัง เป็นการปรับระยะชัดเจนของภาพอีกด้วย

ข. เปิดสวิตซ์และปรับความเข้มของแสงตามต้องการ

ค. ปรับระยะชัดเจนของภาพ ซึ่งสามารถปรับได้ 2 ระบบคือ การปรับหยาบ จะสามารถปรับระยะชัดของภาพได้อย่างรวดเร็วแต่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้สำหรับการปรับละเอียดนั้นจะได้ภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้นภายหลังการปรับหยาบและไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้เลย

ง. เมื่อต้องการหยุดการทำงาน ให้ปิดสวิตซ์และนำชิ้นตรวจสอบออกจากที่วางควรวางไม่ให้ชิ้นตรวจสอบกระทบกับเลนส์วัตถุ เพราะอาจจะทำให้เลนส์นั้นมีรอยเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้มองภาพไม่ชัด

บทที่ 3

วิธีดำเนินโครงการงาน

3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.1.1 การเตรียมการเชื่อมชิ้นงานทดสอบ

3.1.1.1 นำเหล็กเหนียวมาตัดขนาดให้ได้ขนาด $2 \times \frac{1}{4} \times 2$ นิ้ว

3.1.1.2 เลือกรูปเชื่อมขนาด 26 มิลลิเมตร ความยาว 350 มิลลิเมตร ปรับกระแสไฟฟ้าให้ไปอยู่ที่ 95 แอมแปร์ จากนั้นวางแผ่นชิ้นงานลงบนโต๊ะเชื่อมเลือกรูปเชื่อมให้ห่างจากแผ่นชิ้นงานประมาณ $1/8 - 5/32$ นิ้ว

3.1.1.3 ทำการเชื่อม โดยให้ความเร็วในการเดินแนว 250 มิลลิเมตรต่อนาที

3.1.1.4 เมื่อได้ชิ้นงานดังกล่าวแล้วทำการตกแต่งผิวบริเวณแนวรอยเชื่อมเพื่อทำการทดสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบหาความแข็งของชิ้นงาน

3.1.2 ขั้นตอนการอบชุบของชิ้นงาน

นำชิ้นงานมาทำการอบชุบที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที ที่ต่างกัน โดยที่จำนวนชิ้นงานที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 13 ชิ้นแบ่งเป็น

3.1.2.1 ชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านกระบวนการ Annealing จำนวน 1 ชิ้น

3.1.2.2 ชิ้นงานที่สำหรับกระบวนการอบอ่อนชิ้นงานเป็นเวลา 30 นาที ทั้งหมด 4 ชิ้น

โดยแบ่งออกเป็นดังนี้

ทำการ Annealing ที่ 400 องศาเซลเซียส จำนวน 1 ชิ้น

ทำการ Annealing ที่ 500 องศาเซลเซียส จำนวน 1 ชิ้น

ทำการ Annealing ที่ 600 องศาเซลเซียส จำนวน 1 ชิ้น

ทำการ Annealing ที่ 700 องศาเซลเซียส จำนวน 1 ชิ้น

3.1.2.3 ชิ้นงานที่สำหรับกระบวนการอบอ่อนชิ้นงานเป็นเวลา 45 นาที ทั้งหมด 4 ชิ้น

โดยแบ่งออกเป็นดังนี้

ทำการ Annealing ที่ 400 องศาเซลเซียส จำนวน 1 ชิ้น

ทำการ Annealing ที่ 500 องศาเซลเซียส จำนวน 1 ชิ้น

ทำการ Annealing ที่ 600 องศาเซลเซียส จำนวน 1 ชิ้น

ทำการ Annealing ที่ 700 องศาเซลเซียส จำนวน 1 ชิ้น

3.1.2.4 ชิ้นงานที่สำหรับกระบวนการอบอ่อนชิ้นงานเป็นเวลา 60 นาที ทั้งหมด 4 ชิ้น โดยแบ่งออกเป็นดังนี้

- ทำการ Annealing ที่ 400 องศาเซลเซียส จำนวน 1 ชิ้น
- ทำการ Annealing ที่ 500 องศาเซลเซียส จำนวน 1 ชิ้น
- ทำการ Annealing ที่ 600 องศาเซลเซียส จำนวน 1 ชิ้น
- ทำการ Annealing ที่ 700 องศาเซลเซียส จำนวน 1 ชิ้น

3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบโครงสร้างจุลภาค

3.2.1 นำเหล็กที่ผ่านการเชื่อมแล้วมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 320, 600, 800 และ 1,000 แล้วทำการขัดมันด้วยจานขัดสั๊กหลอดและผงที่ใช้ขัดด้วยอะลูมินา

3.2.2 ถัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารละลายกรดไนตริก 2 เปอร์เซ็นต์

3.2.3 นำชิ้นงานไปทดสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ แล้วทำการบันทึกภาพเพื่อการนำไปเปรียบเทียบต่อไป

3.3 ขั้นตอนการทดสอบความแข็ง

3.3.1 นำชิ้นงานไปตกแต่งให้ขนานกันทั้งสองด้าน

3.3.2 ทำการทดสอบความแข็งในบริเวณโลหะพื้น บริเวณกระทะร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อม บริเวณจุดละ 3 จุด ดังรูปที่ 3.1 แล้วทำการบันทึกค่าที่ได้ เพื่อทำการเปรียบเทียบต่อไป



รูปที่ 3.1 แสดงบริเวณจุดทดสอบในการทดสอบความแข็ง

ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแรงหรือกเวล มีขั้นตอนการปฏิบัติ ดังนี้

3.3.2.1 วางชิ้นงานลงบนแป้นทดสอบกดหัวลูกบอลลงบนผิวทดสอบด้วยแรงกดนำ 10 กิโลกรัม จากนั้นตั้งนาฬิกาที่เครื่องไปที่เลขศูนย์

3.3.2.2 ตั้งแรงกดตามชนิดของโลหะที่ทำการทดสอบ โดยการดูจากตารางแรงกดแล้วลบด้วยแรงกดนำ ซึ่งแรงกดเพิ่มนี้จะทำให้หัวลูกบอลกดบนชิ้นงานทดสอบ

3.3.2.3 นำแรงกดเพิ่มออกทำให้เหลือแรงกดนำแต่เพียงอย่างเดียว หลังจากนั้นเข็มนาฬิกาจะถอยกลับและหยุด เราจึงอ่านค่าความแข็งที่ตำแหน่งเข็มนาฬิกานั้นหยุดอยู่ ซึ่งอ่านได้อ่านค่าดังนี้ เช่น 40 HRC หมายถึงความแข็งแรงหรือกเวล 40 ด้วยสเกล C และ 85 HRB หมายถึง ความแข็งแรงหรือกเวล 85 ด้วย สเกล B

การทดสอบความแข็งวิธีนี้มีหลักการทดสอบที่ต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้

- ก. ควรตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องด้วยแท่งทดสอบ (Test Block) ทุกครั้งก่อนการทำงาน
- ข. ชิ้นงานที่ทำการทดสอบควรทำความสะอาดและขนานกันสองด้าน
- ค. รอยกดบนผิวทดสอบควรห่างกันอย่างน้อย 3 มิลลิเมตร
- ง. ควรวัดค่าความแข็งอย่างน้อย 3 จุด แล้วนำค่าที่ได้ ไปหาค่าเฉลี่ยจะได้เป็นค่าความแข็งที่ถูกต้อง
- จ. ค่าความแข็งที่อ่านได้บนสเกลเป็นค่าที่นำไปใช้ได้เลยจึงมีความรวดเร็วในการทดสอบ
- ฉ. ชิ้นงานที่ทำการทดสอบควรมีความหนาไม่น้อยกว่า 10 เท่าของรอยกดบนผิวทดสอบ

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ผลการตรวจสอบชิ้นงานเชื่อมของเหล็กคาร์บอนต่ำที่ทำการอบชุบตามขั้นตอนที่กำหนดไว้ในบทที่ 3 ได้ผลการทดสอบ โครงสร้าง และผลการทดสอบความแข็ง ดังนี้

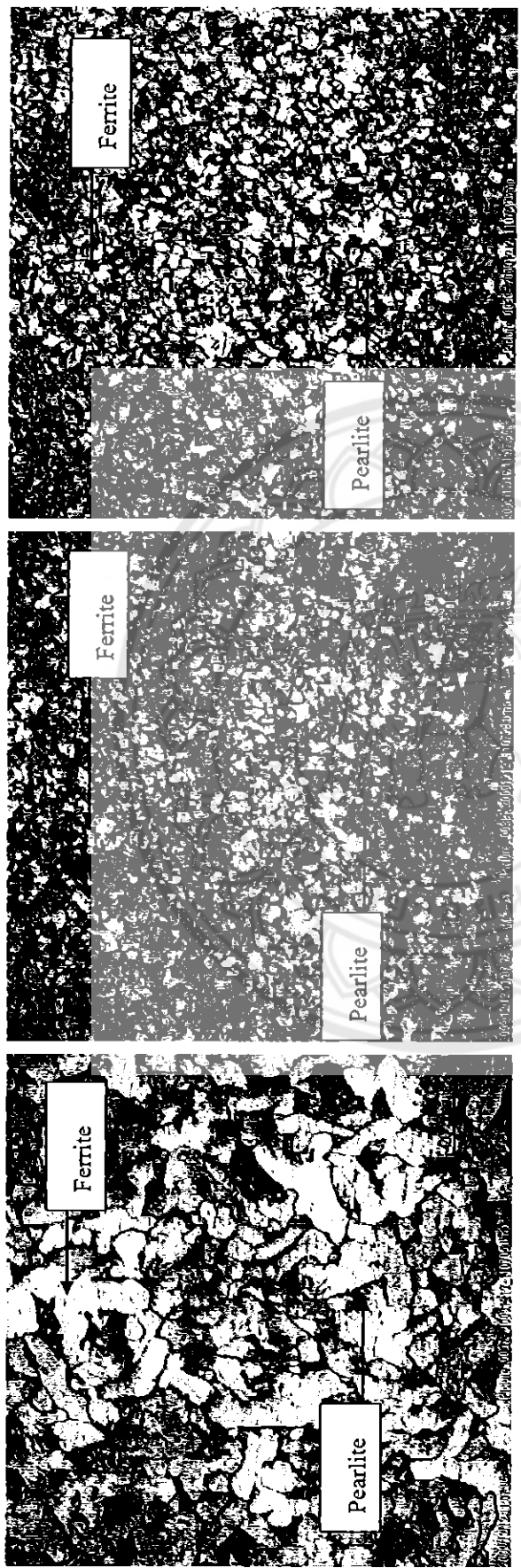
4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ผ่านการอบอ่อน

เพื่อความเข้าใจง่ายในการอธิบายบริเวณ โครงสร้างและความหมายในบริเวณแนวรอยเชื่อมได้ กำหนดสัญลักษณ์ตามตารางที่ 4.1 คือ BM แทน โลหะพื้น, WM แทน เนื้อเชื่อม, FL แทน แนวการหลอมละลาย และ HAZ แทน บริเวณกระทบร้อน

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อของบริเวณและ โครงสร้างจุลภาคที่พบภาพหลังการเชื่อมไฟฟ้า

สัญลักษณ์ที่ใช้	ความหมาย
BM	โลหะพื้น (Base Metal)
WM	เนื้อเชื่อม (Weld Metal)
FL	แนวการหลอมละลาย (Fusion Line)
HAZ	บริเวณกระทบร้อน (Heat Affect Zone)

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบอ่อนถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงที่กำลังขยาย 200 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยรูป 4.1(ก) แสดง โครงสร้างจุลภาคบริเวณ โลหะพื้น รูป 4.1(ข) แสดง โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อน และรูป 4.1(ค) แสดง โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม โดยบริเวณต่างๆ ประกอบด้วย โครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ ซึ่งเกรนในบริเวณ โลหะพื้นมีขนาดใหญ่กว่าบริเวณกระทบร้อนและบริเวณเนื้อเชื่อม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากบริเวณกระทบร้อนอยู่ใกล้แนวรอยเชื่อม จึงได้รับความร้อนอันเนื่องมาจากการเชื่อมแล้วเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว [4]



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์ กำลังขยาย 200 เท่า

- (ก) ภาพบริเวณเนื้อพื้น
- (ข) ภาพบริเวณกระทะความร้อน
- (ค) ภาพบริเวณเนื้อเชื่อม

4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อน

การเปรียบเทียบผลการทดลองแบ่งเป็น 2 กรณี คือ

1. เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบอ่อนไม่สมบูรณ์โดยกำหนดให้เวลาในการอบชิ้นงานคงที่ แต่ใช้อุณหภูมิในการอบชิ้นงานต่างกัน
2. เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบอ่อนไม่สมบูรณ์โดยกำหนดให้อุณหภูมิในการอบชิ้นงานคงที่ แต่ใช้เวลาในการอบชิ้นงานต่างกัน

4.2.1 เปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบอ่อนไม่สมบูรณ์โดยกำหนดให้เวลาในการอบชิ้นงานคงที่ แต่ใช้อุณหภูมิในการอบชิ้นงานต่างกัน

4.2.1.1 เปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส

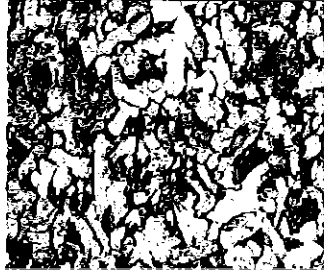
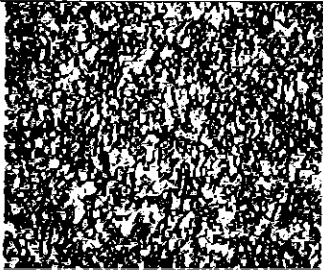
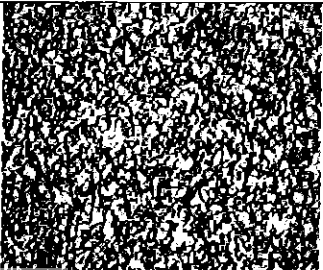
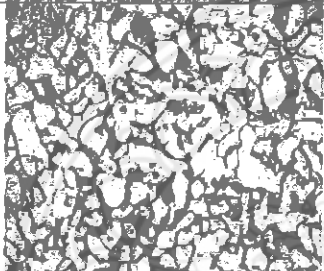
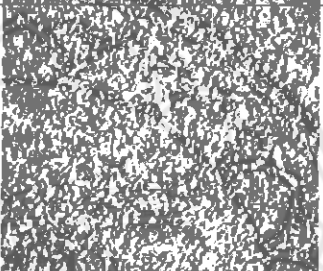

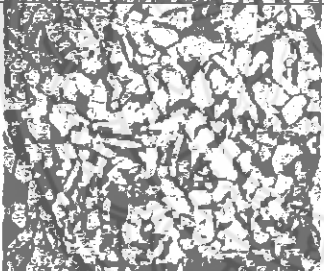
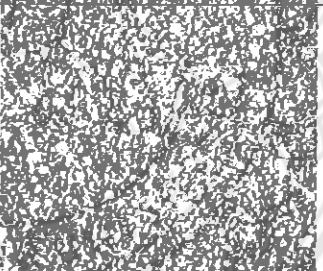
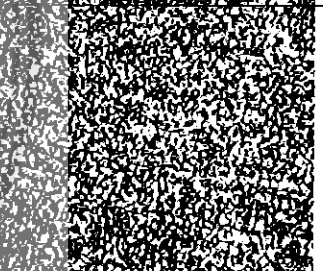
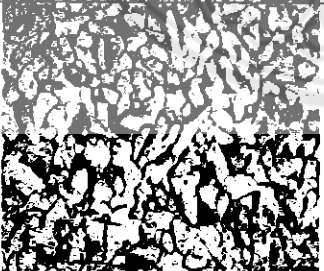
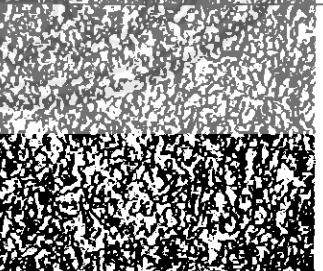
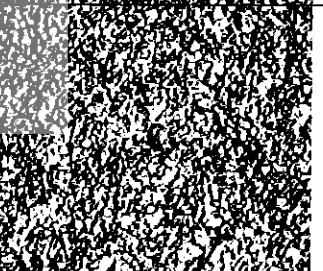

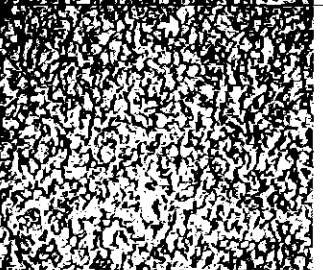
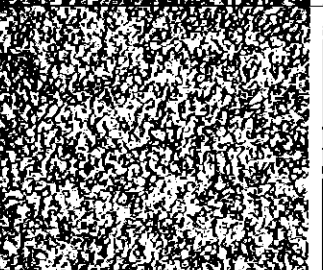
จากการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่กล้าขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมที่ยังไม่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์กับชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิต่างกัน คือ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 (ภาพประกอบภาคผนวกรูปที่ ก.1 - ก.5) ชิ้นงานทุกชิ้นงานมีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย โครงสร้างเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ ทั้งในบริเวณเนื้อพื้น บริเวณกระทบร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อม พบว่า

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อพื้น ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนทั้ง 4 ชั้น ขนาดของเกรนมีขนาดเกรนหยาบ ทั้งนี้เกิดเนื่องจากไม่ถูกกระทบด้วยความร้อนจากการทำการเชื่อมของชิ้นงาน ส่งผลทำให้ขนาดของเกรนไม่มีการเปลี่ยนแปลง

โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อน ชิ้นงานที่ผ่านอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส จะมีขนาดของเกรนละเอียด โดยที่ขนาดของเกรนคล้ายกับเกรนของชิ้นงานที่ยังไม่ได้ผ่านการอบอ่อน ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะมีขนาดเกรนที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยที่ขนาดเกรนเริ่มมีขนาดหยาบมากขึ้นเมื่อเทียบกับ 2 ชิ้นงานแรก และชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีขนาดเกรนในบริเวณกระทบร้อนใหญ่ที่สุด

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม ชิ้นงานที่ผ่านอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรนซึ่งจะมีขนาดของเกรนละเอียด โดยที่ขนาดของเกรนคล้ายกับเกรนของชิ้นงานที่ยังไม่ได้ผ่านการอบอ่อน และชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดของเกรน ซึ่งเกรนจะมีขนาดใหญ่มากที่สุด

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส

	BM	HAZ	WM
0 องศา เซลเซียส			
400 องศา เซลเซียส			
500 องศา เซลเซียส			
600 องศา เซลเซียส			
700 องศา เซลเซียส			

4.2.1.2 เปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส

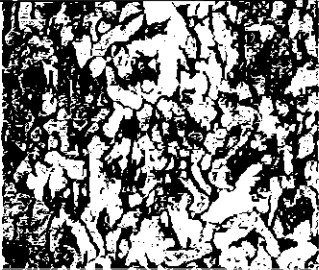
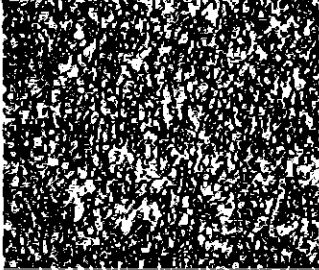
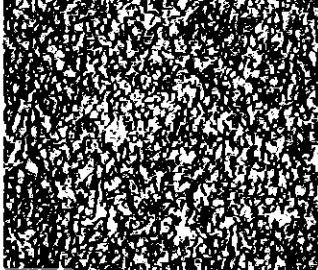
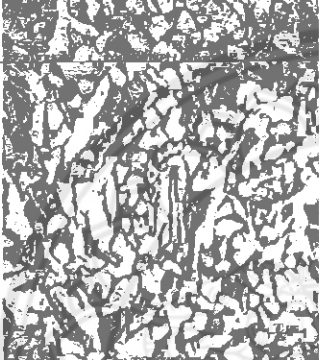
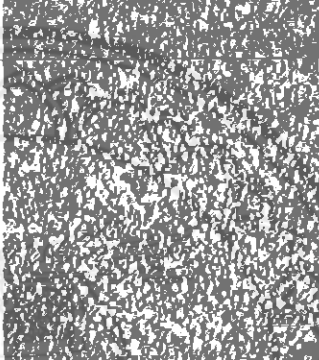
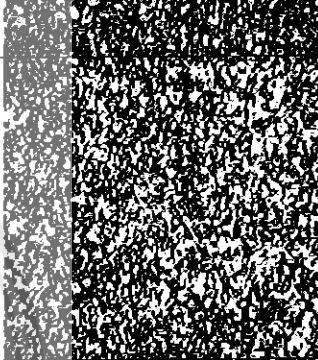
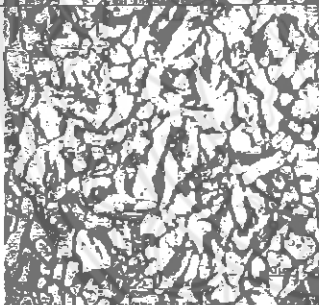
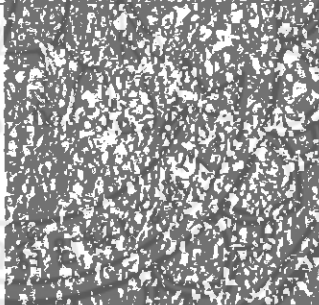
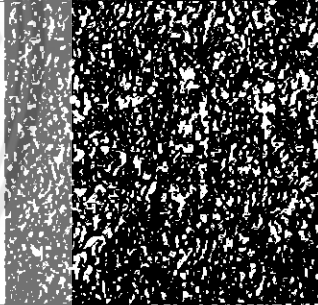
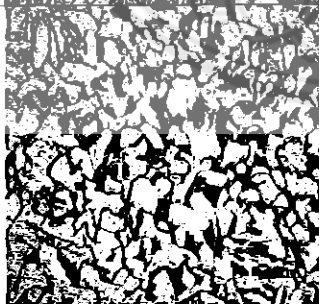
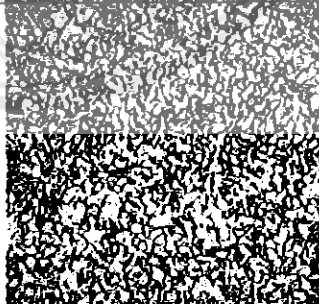
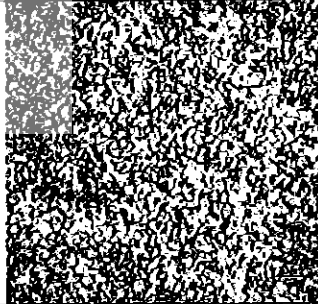

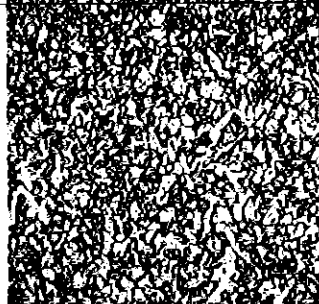
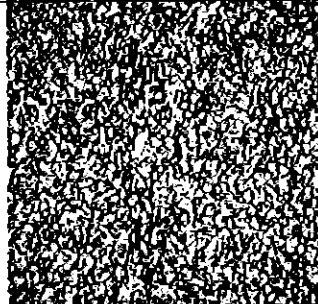
จากการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมที่ยังไม่ผ่านการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์กับชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์เป็นเวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิต่างกัน คือ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังตารางที่ 4.3 (ภาพประกอบภาคผนวกรูปที่ ค.6 - ค.9) ชิ้นงานทุกชิ้นมีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย โครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ ทั้งในบริเวณเนื้อพื้น บริเวณกระทบร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อม พบว่า

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อพื้น ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนทั้ง 4 ชั้น ขนาดของเกรนมีขนาดเกรนค่อนข้างหยาบ ทั้งนี้เกิดเนื่องจากไม่ถูกกระทบด้วยความร้อนจากการทำการเชื่อมของชิ้นงาน ส่งผลทำให้ขนาดของเกรนไม่มีการเปลี่ยนแปลง

โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อน ชิ้นงานที่ผ่านอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะมีขนาดของเกรนละเอียด โดยที่ขนาดของเกรนคล้ายกับเกรนของชิ้นงานที่ยังไม่ได้ผ่านการอบอ่อน ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดของเกรน โดยที่ลักษณะของเกรนขนาดใหญ่ปะปนกับเกรนละเอียด และในส่วนชิ้นงานที่ผ่านอบอ่อนที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดของเกรน ซึ่งเกรนจะมีขนาดเกรนใหญ่และหยาบมากขึ้นตามลำดับ

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม ชิ้นงานที่ผ่านอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรน เป็นขนาดของเกรนละเอียด โดยที่ขนาดของเกรนคล้ายกับเกรนของชิ้นงานที่ยังไม่ได้ผ่านการอบอ่อน และในส่วนชิ้นงานที่ผ่านอบอ่อนที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดของเกรน ซึ่งเกรนจะมีขนาดเกรนใหญ่และหยาบมากขึ้น แต่ในชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส นั้นมีขนาดของเกรนใหญ่มากกว่าชิ้นงานที่ผ่านอบอ่อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และมีขนาดเกรนใหญ่ที่สุด

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในเวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส

	BM	HAZ	WM
0 องศา เซลเซียส			
400 องศา เซลเซียส			
500 องศา เซลเซียส			
600 องศา เซลเซียส			
700 องศา เซลเซียส			

4.2.1.3 เปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส

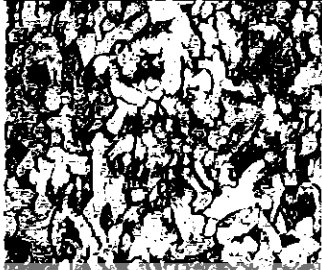
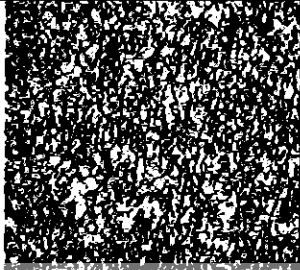
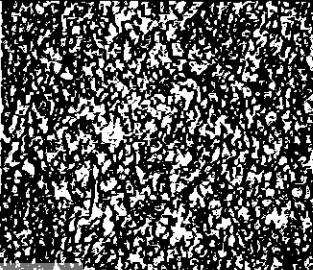
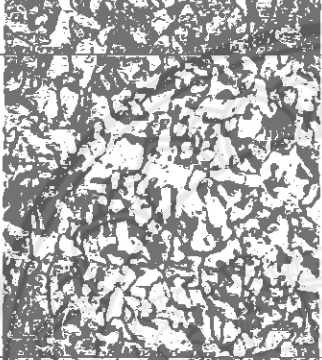
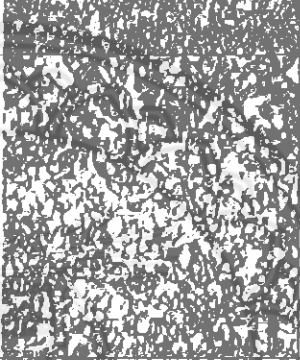
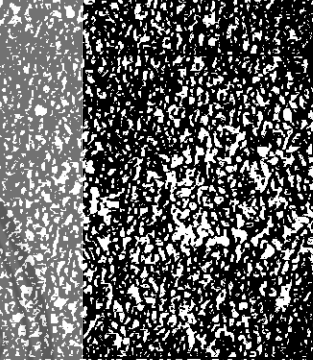
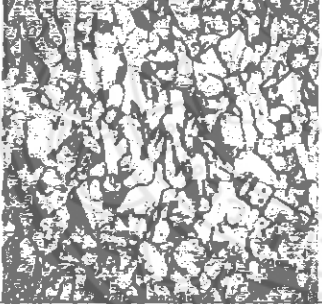
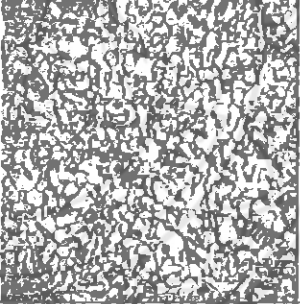
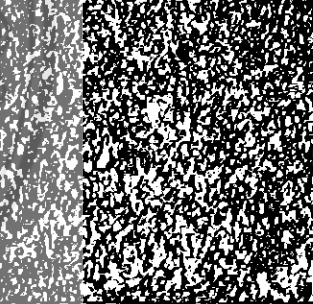
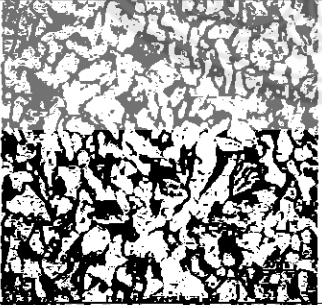
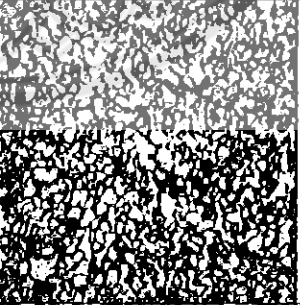
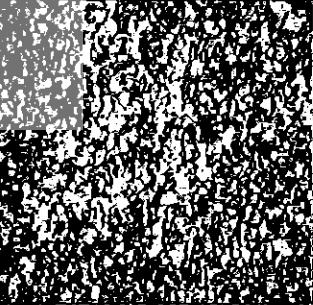

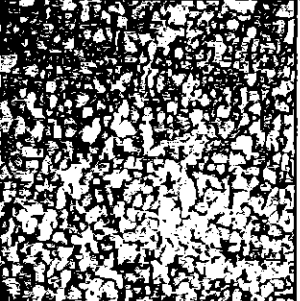
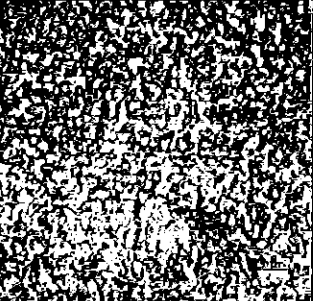
จากการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมที่ยังไม่ผ่านการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์กับชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์เป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิต่างกัน คือ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังตารางที่ 4.4 (ภาพประกอบภาคผนวกรูปที่ ก.10 - ก.13) ชิ้นงานทุกชิ้นมีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย โครงสร้างเฟอร์ไรต์ และเฟิร์ล ไลต์ ทั้งในบริเวณเนื้อพื้น บริเวณกระแทกร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อม พบว่า

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อพื้น ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขนาดของเกรนมีขนาดเกรนหยาบคล้ายกับชิ้นงานที่ยังไม่ได้ผ่านการอบอ่อน ทั้งนี้เกิดเนื่องจากไม่ถูกกระทบด้วยความร้อนจากการทำการเชื่อมของชิ้นงาน ส่งผลทำให้ขนาดเกรนไม่มีการเปลี่ยนแปลง และชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดของเกรนเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ยังไม่ได้ผ่านการอบอ่อน ซึ่งเกรนจะมีขนาดเกรนใหญ่มากขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ส่งผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนหยาบมากขึ้น

โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระแทกร้อน ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรน โดยมีขนาดเกรนใหญ่ปะปนกับเกรนละเอียด และชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดของเกรน ซึ่งเกรนจะมีขนาดเกรนใหญ่มากขึ้นตามลำดับ โดยพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส นั้นมีขนาดของเกรนหยาบมากที่สุด

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะมีขนาดของเกรนละเอียด ไม่มีเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ยังไม่ได้ผ่านการอบอ่อน ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงพบเกรนปะปนกับเกรนละเอียด ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบเกรนขนาดใหญ่มากขึ้น และชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีขนาดของเกรนใหญ่ที่สุด

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส

	BM	HAZ	WM
0 องศา เซลเซียส			
400 องศา เซลเซียส			
500 องศา เซลเซียส			
600 องศา เซลเซียส			
700 องศา เซลเซียส			

จากการทดลองในกรณีเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์ โดยกำหนดให้เวลาในการอบชิ้นงานคงที่ แต่ใช้อุณหภูมิในการอบชิ้นงานต่างกัน จะพบได้ว่า ชิ้นงานทุกชิ้นมีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย โครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ ทั้งในบริเวณเนื้อพื้น บริเวณกระทบริ้น และบริเวณเนื้อเชื่อม พบว่า

โครงสร้างจุลภาคของทุกชิ้นงานมีขนาดเกรนละเอียดสูงสุดบริเวณเนื้อเชื่อม รองลงมาคือบริเวณกระทบริ้น และบริเวณเนื้อพื้นมีขนาดเกรนหยาบมากที่สุด นอกจากนี้จะเห็นว่า ขนาดของเกรนบริเวณเนื้อพื้น ไม่เปลี่ยนแปลงของเกรนมากนัก เนื่องจากบริเวณดังกล่าวไม่ได้รับความร้อนจากการเชื่อม ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวไม่มีความเครียดภายใน บริเวณกระทบริ้น และบริเวณเนื้อเชื่อม มีแนวโน้มของขนาดเกรน โตขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอบเพิ่มขึ้น [9]

4.2.2 เปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์ โดยกำหนดให้อุณหภูมิในการอบชิ้นงานคงที่ แต่ใช้เวลาในการอบชิ้นงานต่างกัน

4.2.2.1 เปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที


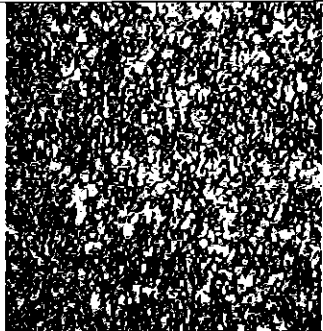
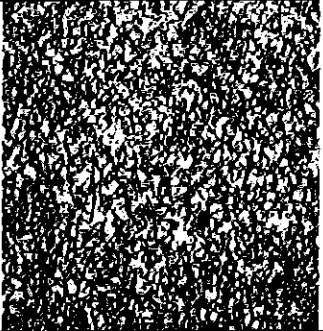
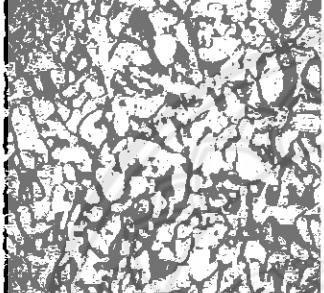
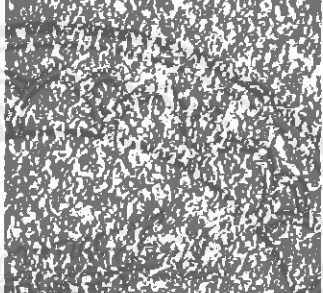
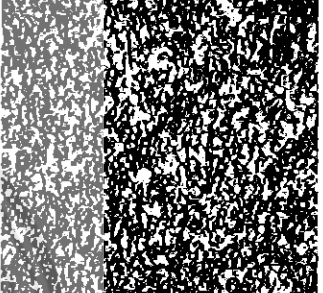
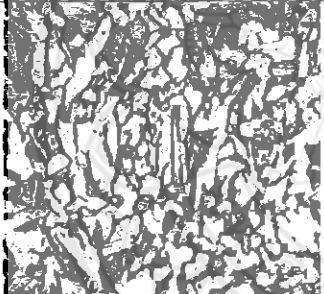
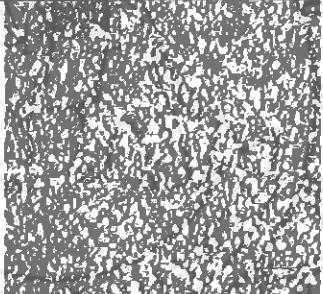
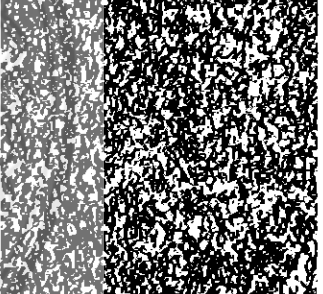

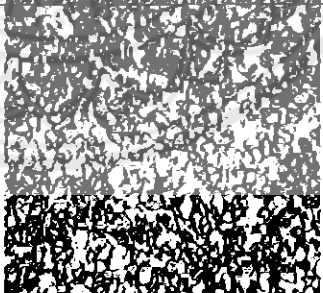
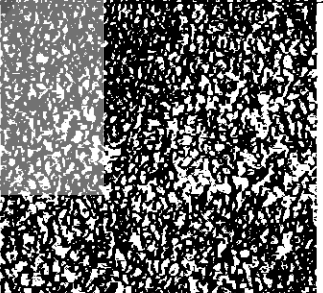
จากการเปรียบเทียบจากการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมที่ยังไม่ผ่านการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์กับชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ในเวลาต่างกัน คือ 30, 45 และ 60 นาที ได้ดังตารางที่ 4.5 (ภาพประกอบภาคผนวกรูปที่ ก.2, ก.6 และ ก.10) ชิ้นงานทุกชิ้นมีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย โครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ ทั้งในบริเวณเนื้อพื้น บริเวณกระทบริ้น และบริเวณเนื้อเชื่อม พบว่า

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อพื้น ของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนทั้ง 3 ชิ้น ขนาดของเกรนมีขนาดค่อนข้างหยาบ ทั้งนี้เกิดเนื่องจากการ ไม่ถูกกระทบด้วยความร้อนจากการทำการเชื่อมของชิ้นงาน ส่งผลทำให้ขนาดของเกรน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ

โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบริ้น ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 30 และ 45 นาที มีขนาดเกรนละเอียด โดยที่ขนาดเกรนคล้ายกับเกรนของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบอ่อน แต่ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 60 นาที มีขนาดเกรนหยาบและใหญ่มากขึ้น

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 30, 45 และ 60 นาที จะมีขนาดของเกรนละเอียด คล้ายกับเกรนของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบอ่อน

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่กำลงขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม้สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที

	BM	HAZ	WM
0 นาที			
30 นาที			
45 นาที			
60 นาที			

4.2.2.2 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที


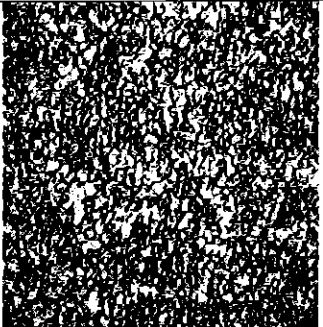
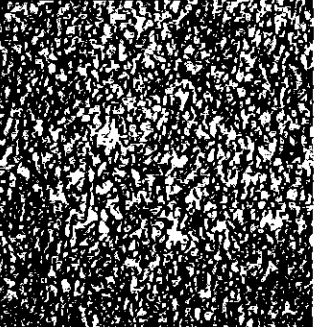
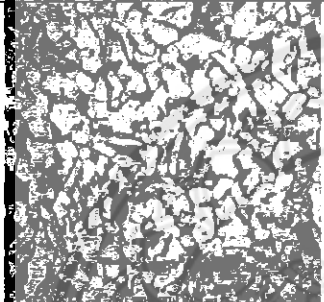
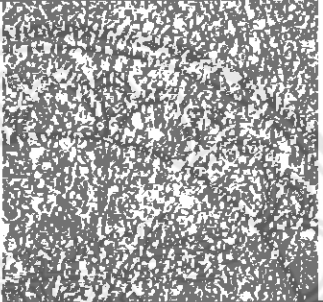
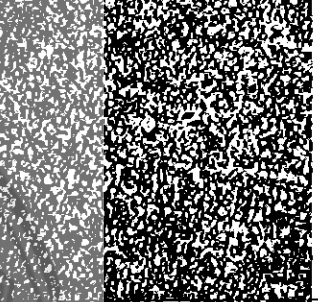
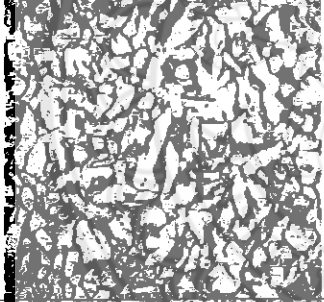
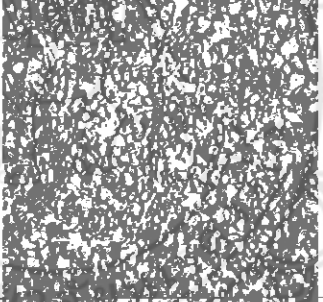
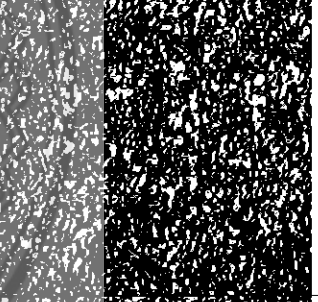
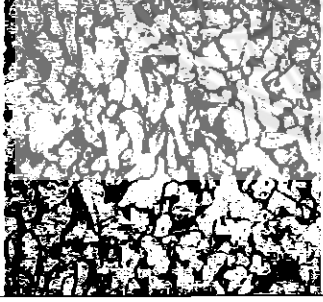
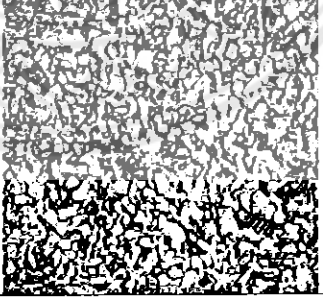
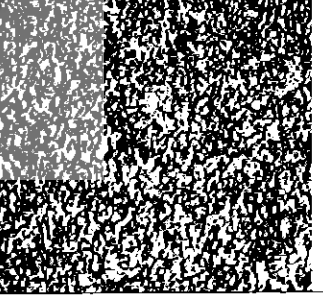
จากการเปรียบเทียบจากการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคที่กล้าขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมที่ยังไม่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์กับชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในเวลาต่างกัน คือ 30, 45 และ 60 นาที ได้ดังตารางที่ 4.6 (ภาพประกอบภาคผนวกรูปที่ ค.3, ค.9 และ ค.11) ชิ้นงานทุกชิ้นมีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ ทั้งในบริเวณเนื้อพื้น บริเวณกระทบร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อม พบว่า

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อพื้น ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 30 และ 45 นาที ขนาดของเกรนมีขนาดค่อนข้างหยาบ ทั้งนี้เกิดเนื่องจากการไม่ถูกกระทบด้วยความร้อนจากการทำการเชื่อมของชิ้นงาน ส่งผลทำให้ขนาดของเกรนไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 60 นาที มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรนใหญ่เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ยังไม่ได้ผ่านการอบอ่อน ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ส่งผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนใหญ่

โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อน ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 30 นาที มีขนาดเกรนละเอียด โดยที่ขนาดของเกรนคล้ายกับเกรนของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบอ่อน ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 45 และ 60 นาที มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรนใหญ่ขึ้น โดยชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 60 นาที มีขนาดเกรนใหญ่มากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 45 นาที

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 30 และ 45 นาที จะมีขนาดของเกรนละเอียด คล้ายกับเกรนของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบอ่อน ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 60 นาที มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดของเกรน ซึ่งเกรนจะมีขนาดเกรนใหญ่ขึ้น

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที

	BM	HAZ	WM
0 นาที			
30 นาที			
45 นาที			
60 นาที			

4.2.2.3 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที


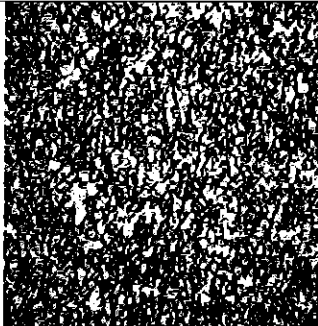
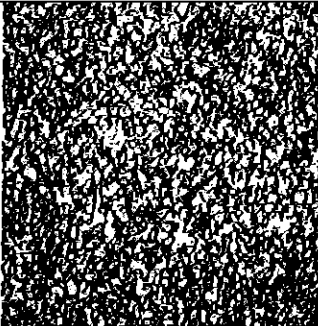
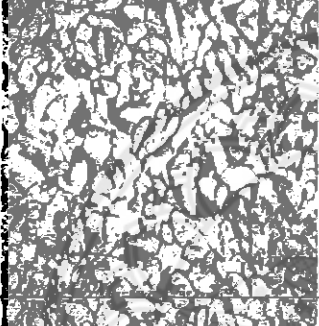
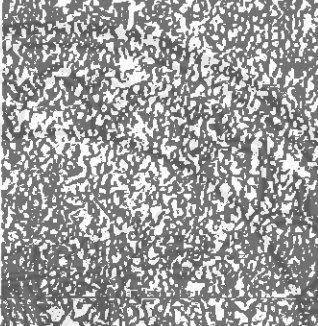
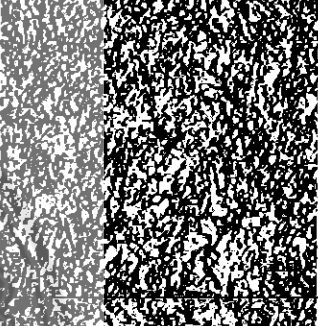
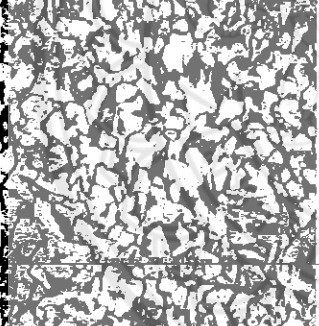
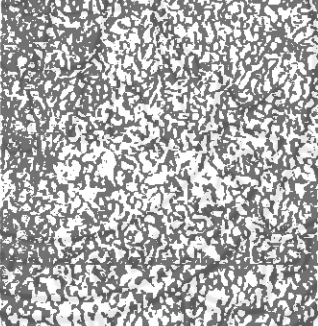
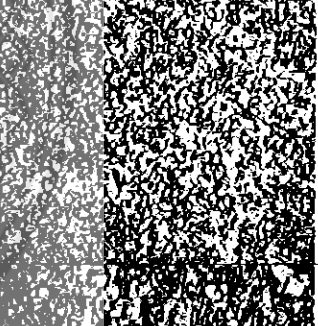
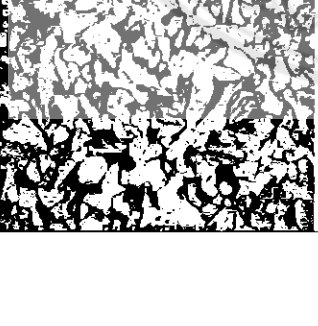
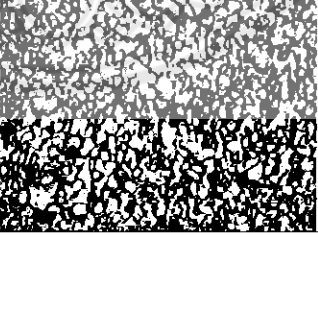
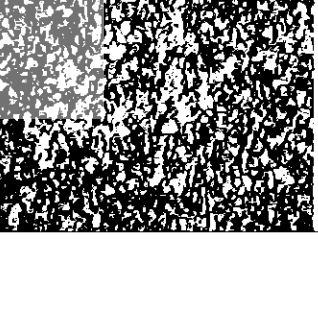
จากการเปรียบเทียบจากการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคที่ก้ำกัวยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์กับชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในเวลาต่างกัน คือ 30, 45 และ 60 นาที ได้ดังตารางที่ 4.7 (ภาพประกอบภาคผนวกรูปที่ ค.4, ค.8 และ ค.12) ชิ้นงานทุกชิ้นมีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ ทั้งในบริเวณเนื้อพื้น บริเวณกระทบริออน และบริเวณเนื้อเชื่อม พบว่า

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อพื้น ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 30 และ 45 นาที ขนาดของเกรนมีขนาดค่อนข้างหยาบ ทั้งนี้เกิดเนื่องจากการไม่ถูกกระทบด้วยความร้อนจากการทำการเชื่อม ส่งผลทำให้ขนาดของเกรนไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในขณะที่เดียวกันชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 60 นาที มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรน จะมีขนาดเกรนใหญ่มากขึ้น

โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบริออน ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 30, 45 และ 60 นาที จะมีขนาดของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไปโดยที่มีขนาดเกรนใหญ่มากขึ้นตามลำดับของเวลาอบอ่อน โดยที่ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 60 นาที มีขนาดของเกรนใหญ่มากที่สุด

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 30 นาที ไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรนคล้ายกับเกรนของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบอ่อน ในขณะเดียวกันชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 45 และ 60 นาที มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดของเกรน ซึ่งเกรนจะมีขนาดเกรนใหญ่มากขึ้น โดยที่ขนาดเกรนของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 60 นาที มีขนาดเกรนใหญ่กว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 45 นาที

ตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่กล้าลงขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที

	BM	HAZ	WM
0 นาที			
30 นาที			
45 นาที			
60 นาที			


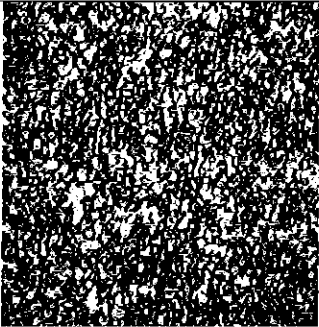
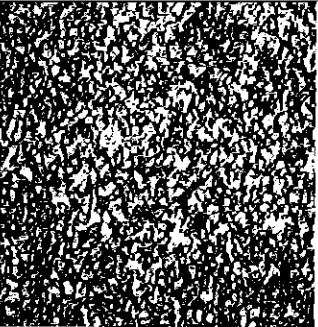
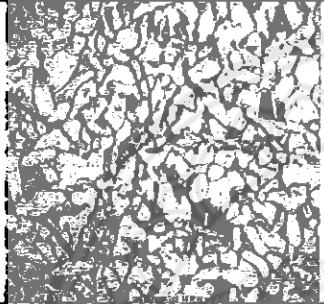
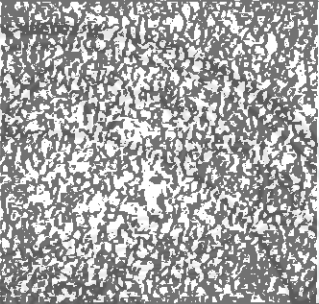
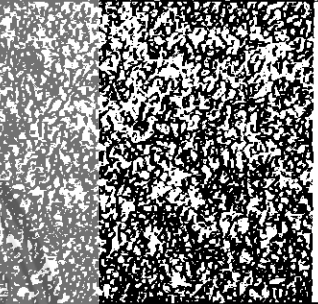
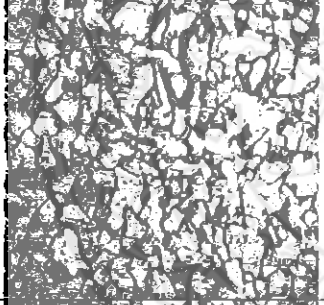
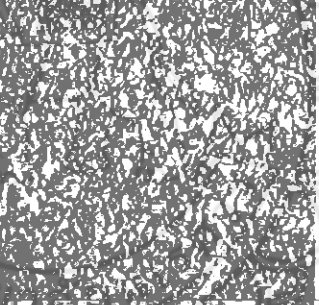
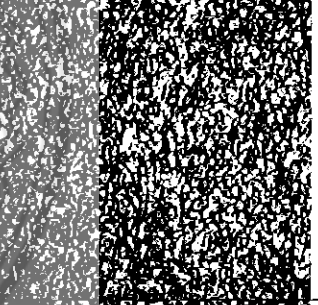
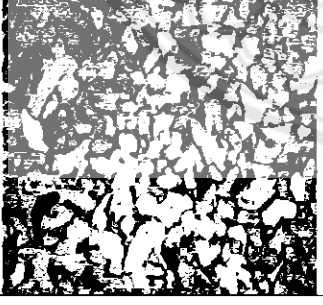
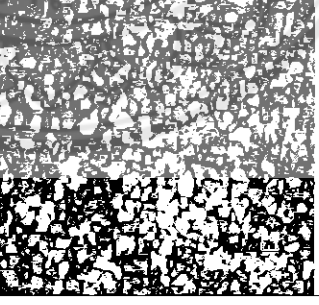
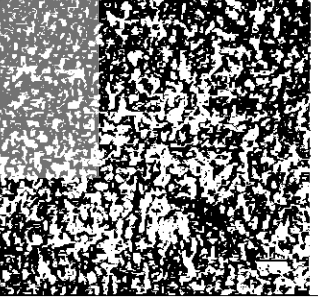
4.2.2.4 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที

จากการเปรียบเทียบจากการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่าของชิ้นงานเชื่อมที่ยังไม่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์กับชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ในเวลาต่างกัน คือ 30, 45 และ 60 นาที ได้ดังตารางที่ 4.8 (ภาพประกอบภาคผนวกรูปที่ ค.5, ค.9 และ ค.13) ชิ้นงานทุกชิ้นมีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ ทั้งในบริเวณเนื้อพื้น บริเวณกระตบร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อม พบว่า

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อพื้น ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนทั้งหมด พบว่า ขนาดของเกรนมีขนาดค่อนข้างหยาบ ทั้งนี้เกิดเนื่องจากการไม่ถูกกระทบด้วยความร้อนจากการทำการเชื่อมของชิ้นงาน ส่งผลทำให้ขนาดของเกรนไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ และชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 60 นาที มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดของเกรน ซึ่งเกรนจะมีขนาดเกรนใหญ่มากขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบอ่อน

โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระตบร้อนและบริเวณเนื้อเชื่อม ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 30, 45 และ 60 นาที มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดของเกรน ซึ่งเกรนจะมีขนาดเกรนใหญ่มากขึ้นตามลำดับของเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน โดยพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 60 นาที มีขนาดของเกรนใหญ่มากที่สุด

ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที

	BM	HAZ	WM
0 นาที			
30 นาที			
45 นาที			
60 นาที			

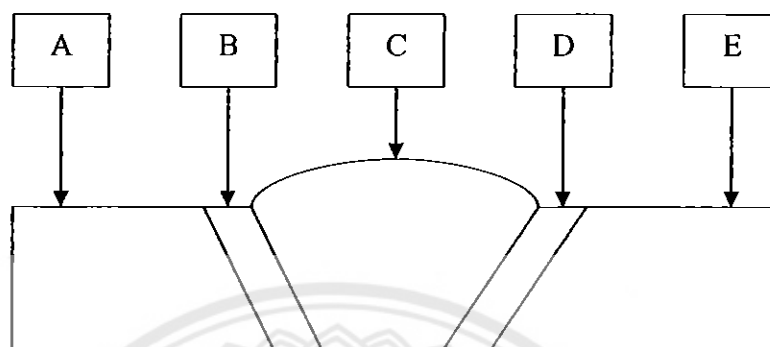
จากการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบอ่อนไม่สมบูรณ์กำหนดให้อุณหภูมิในการอบชิ้นงานคงที่ แต่ใช้เวลาในการอบชิ้นงานต่างกัน จะพบได้ว่า

โครงสร้างจุลภาคของทุกชิ้นงานมีขนาดเกรนละเอียดสูงสุดบริเวณเนื้อเชื่อม รองลงมาคือบริเวณกระทบบร้อน และบริเวณเนื้อพื้น มีขนาดเกรนหยาบมากที่สุด นอกจากนี้จะเห็นว่า ขนาดของเกรนบริเวณเนื้อพื้น ไม่เปลี่ยนแปลงของเกรนมากนัก เนื่องจากบริเวณดังกล่าวไม่ได้รับความร้อนจากการเชื่อม ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวไม่มีความเครียดภายในบริเวณนี้ บริเวณกระทบบร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อม มีแนวโน้มของขนาดเกรนโตขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอบเพิ่มขึ้น [9]



4.3 การทดสอบความแข็งแรงด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบรีอกลเวสเกล B

ทำการทดสอบทั้งหมด 5 แนวคือแนว A, B, C, D และ E ทดสอบแนวละ 3 จุดแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยตามตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานดังนี้



รูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมไฟฟ้าแบบลวดเชื่อมหุ้มฟลักส์

- บริเวณเนื้อพื้น
- บริเวณกระทบบร้อน
- บริเวณกลางเนื้อเชื่อม
- บริเวณกระทบบร้อน
- บริเวณเนื้อพื้น

การเปรียบเทียบผลการทดลองแบ่งเป็น 2 กรณี คือ

- เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์ โดยกำหนดให้เวลาในการอบชิ้นงานคงที่ แต่ใช้อุณหภูมิในการอบชิ้นงานต่างกัน
- เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์ โดยกำหนดให้อุณหภูมิในการอบชิ้นงานคงที่ แต่ใช้เวลาในการอบชิ้นงานต่างกัน

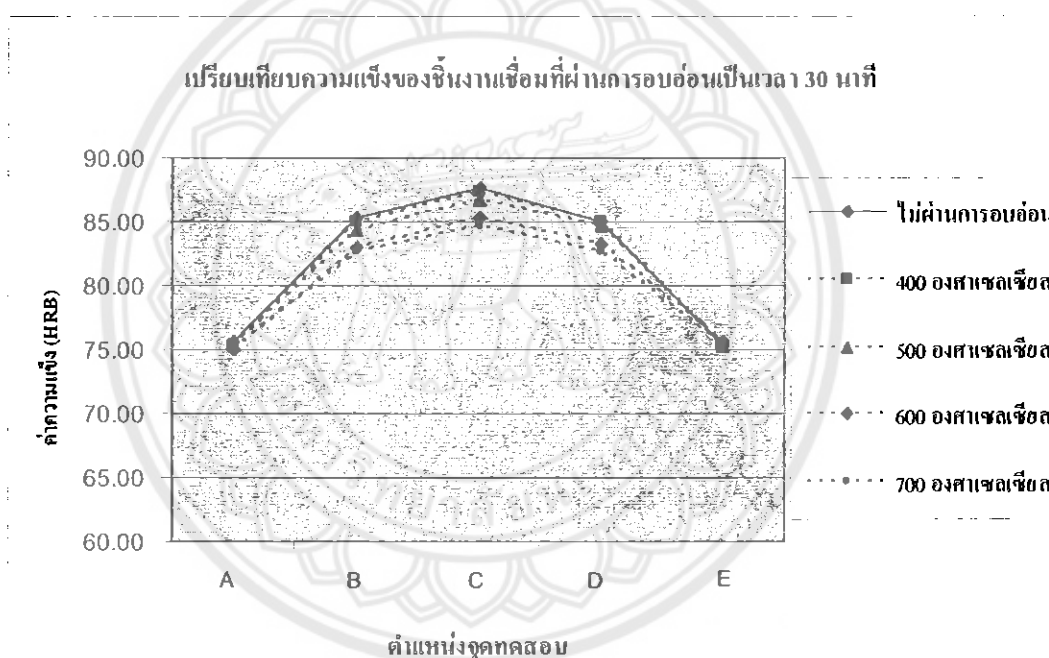
4.3.1 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์ โดยกำหนดให้เวลาในการอบชิ้นงานคงที่ แต่ใช้อุณหภูมิในการอบชิ้นงานต่างกัน

4.3.1.1 เปรียบเทียบความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 30 นาที

ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามรูปที่ 4.2 ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิต่างกัน แสดงได้ดังตารางที่ 4.9 เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกับตำแหน่งที่ทำการทดสอบความแข็งแรงบนชิ้นงานจะได้แผนภาพดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าความแข็ง (HRB)				
	A	B	C	D	E
ไม่ผ่านการอบชุบ	75.67	85.33	87.67	85.00	75.33
400	75.33	85.00	87.33	85.00	75.33
500	75.33	84.33	86.67	84.67	75.33
600	75.00	83.00	85.33	83.33	75.67
700	75.00	82.67	84.67	82.67	75.33



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส

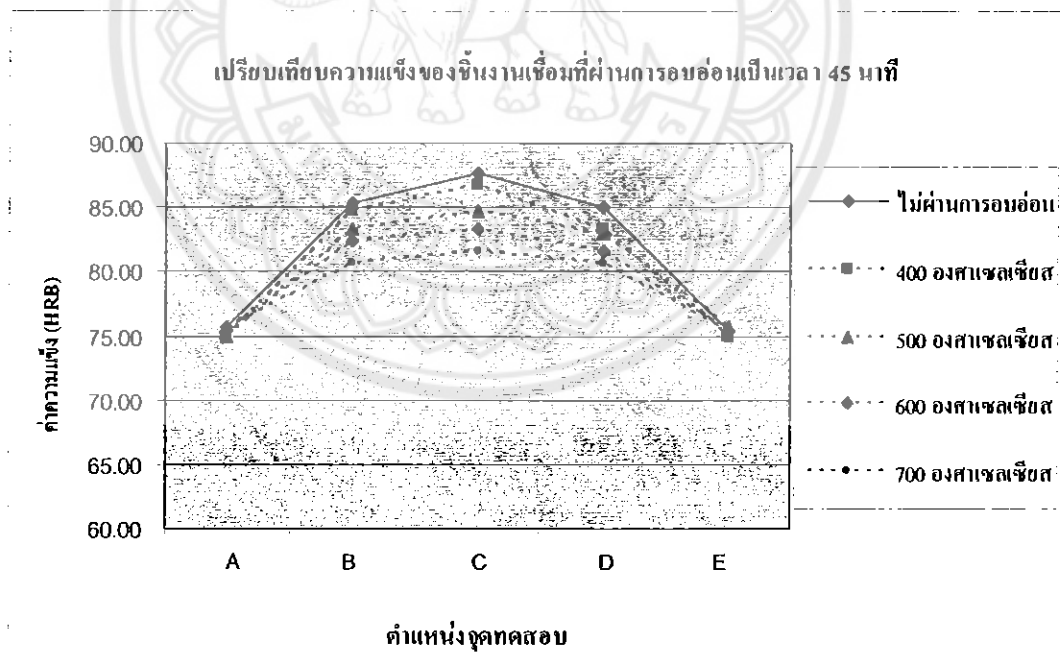
จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่า ชิ้นงานทุกชิ้นความแข็งแรงเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง HAZ และจะมีค่าสูงที่สุดเมื่ออยู่ที่ตำแหน่งกลางรอยเชื่อม โดยชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์มีความแข็งแรงมากที่สุดตามด้วยชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 องศาเซลเซียส และชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีความแข็งต่ำที่สุดซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิต่างกัน ในหัวข้อ 4.2.1

4.3.1.2 เปรียบเทียบความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 45 นาที

ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามรูปที่ 4.2 ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในเวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิต่างกัน แสดงได้ดังตารางที่ 4.9 เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกับตำแหน่งที่ทำการทดสอบความแข็งแรงบนชิ้นงานจะได้แผนภาพดังรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในเวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าความแข็งแรง(HRB)				
	A	B	C	D	E
ไม่ผ่านการอบชุบ	75.67	85.33	87.67	85.00	75.33
400	75.00	84.67	86.67	83.33	75.00
500	75.00	83.33	84.67	83.00	75.67
600	75.33	82.33	83.33	81.67	75.33
700	75.67	80.67	81.67	80.67	75.33



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในเวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส

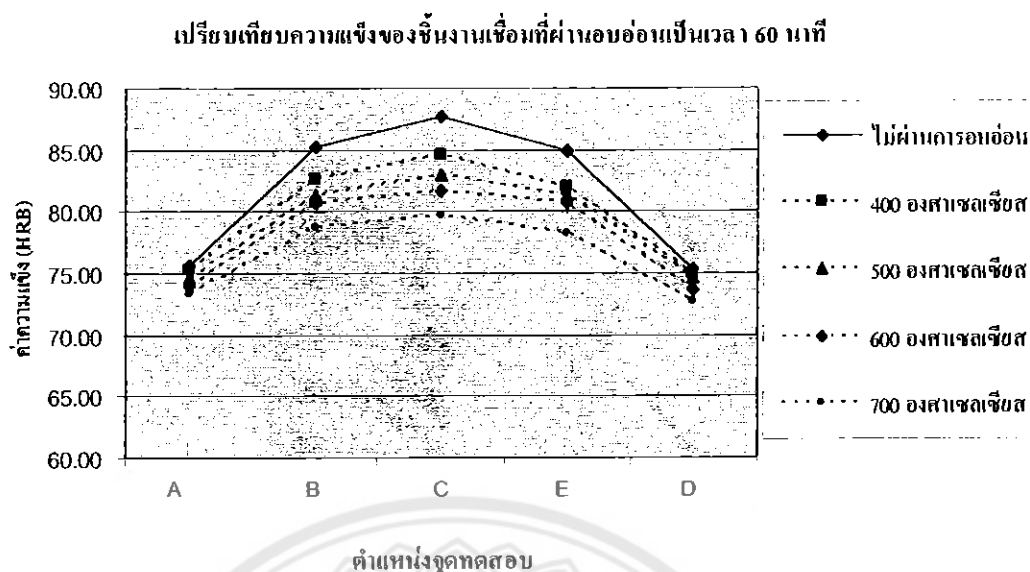
จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่า ความแข็งเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง HAZ และจะมีค่าสูงที่สุดเมื่ออยู่ที่ตำแหน่งกลางรอยเชื่อมเช่นกัน และจากการทดสอบความแข็งนี้ทำให้ทราบว่า ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์มีความแข็งมากที่สุดตามด้วยชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 องศาเซลเซียส และชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีความแข็งต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 45 นาทีที่อุณหภูมิต่างกันในหัวข้อ 4.2.2

4.3.1.3 เปรียบเทียบความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 60 นาที

ค่าความแข็งเฉลี่ย ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามรูปที่ 4.2 ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิต่างกัน แสดงได้ดังตารางที่ 4.10 เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับตำแหน่งที่ทำการทดสอบความแข็งบนชิ้นงานจะได้แผนภาพดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าความแข็ง (HRB)				
	A	B	C	D	E
ไม่ผ่านการอบชุบ	75.67	85.33	87.67	85.00	75.33
400	75.33	82.67	84.67	82.00	75.00
500	74.67	81.33	83.00	81.33	74.67
600	74.00	80.67	81.67	80.67	73.67
700	73.33	78.67	79.67	78.33	72.67



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์ในเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่า ความแข็งเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง HAZ และจะมีค่าสูงที่สุดเมื่ออยู่ที่ตำแหน่งกลางรอยเชื่อม และจากการทดสอบความแข็งนี้ทำให้ทราบว่า ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์มีความแข็งมากที่สุด ตามด้วยชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 องศาเซลเซียส และชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีความแข็งต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในหัวข้อ 4.2.3

จากการเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ โดยกำหนดให้เวลาในการอบชิ้นงานคงที่ แต่ใช้อุณหภูมิในการอบชิ้นงานต่างกัน พบว่า ค่าความแข็งของทุกชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดบริเวณเนื้อเชื่อม รองลงมาคือบริเวณกระทบร้อน และบริเวณเนื้อพื้นมีค่าความแข็งน้อยที่สุด นอกจากนี้จะเห็นว่า ค่าความแข็งบริเวณเนื้อพื้น ไม่เปลี่ยนแปลงความแข็งมากนัก เนื่องจากบริเวณดังกล่าวไม่ได้รับความร้อนจากการเชื่อม ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวไม่มีความเครียดภายในบริเวณ ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีที่ว่า การทำ Stress-relief annealing มีความมุ่งหมายเพื่อทำลายความเครียดภายในลดลง มีผลทำให้ความแข็งของชิ้นงานลดลง ค่าความแข็งบริเวณกระทบร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อม มีแนวโน้มของค่าความแข็งลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบ [9]

4.3.2 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบอ่อนไม่สมบูรณ์โดยกำหนดให้อุณหภูมิในการอบชิ้นงานคงที่ แต่ใช้เวลาในการอบชิ้นงานต่างกัน

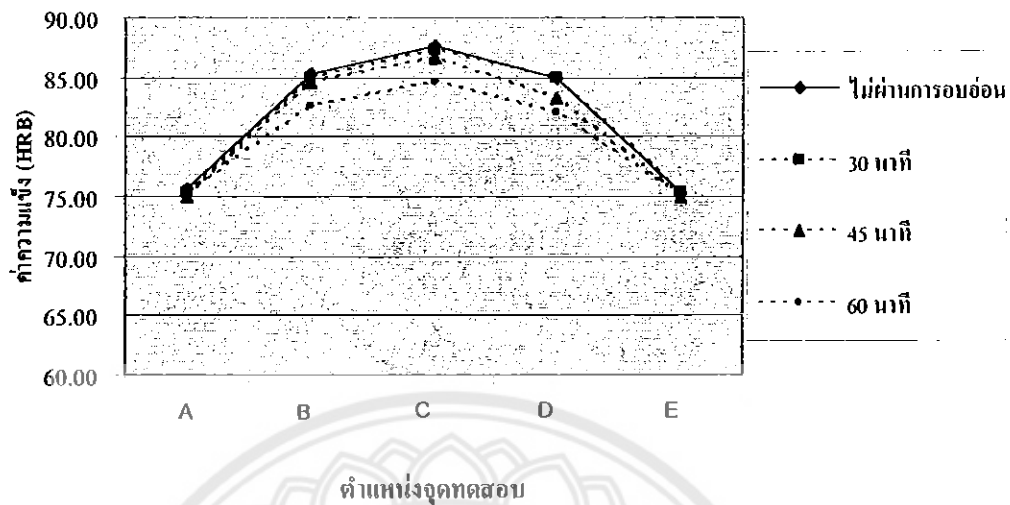
4.3.2.1 เปรียบเทียบความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามรูปที่ 4.2 ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ในเวลาต่างกัน แสดงได้ดังตารางที่ 4.11 เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกับตำแหน่งที่ทำการทดสอบความแข็งแรงบนชิ้นงานจะได้แผนภาพ ดังรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที

เวลา (นาที)	ค่าความแข็งแรง (HRB)				
	A	B	C	D	E
ไม่ผ่านการอบชุบ	75.67	85.33	87.67	85.00	75.33
30	75.33	85.00	87.33	85.00	75.33
45	75.00	84.67	86.67	83.33	75.00
60	75.33	82.67	84.67	82.00	75.00

เปรียบเทียบความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที

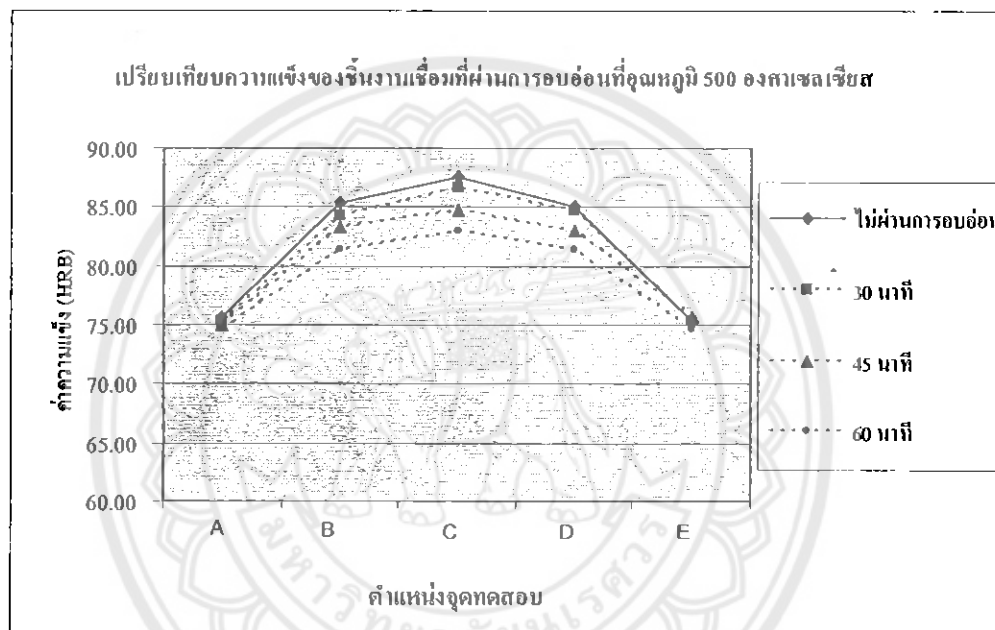
จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่า ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง HAZ และจะมีค่าสูงที่สุดเมื่ออยู่ที่ตำแหน่งกลางรอยเชื่อม และจากการทดสอบความแข็งแรงนี้ทำให้ทราบว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบ มีความแข็งแรงที่สุด ตามด้วยชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 30 นาที, 45 นาที และชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 60 นาที มีค่าความแข็งแรงน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ในหัวข้อ 4.2.4

4.3.2.2 เปรียบเทียบความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามรูปที่ 4.2 ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในเวลาต่างกัน แสดงได้ดังตารางที่ 4.12 เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกับตำแหน่งที่ทำการทดสอบความแข็งแรงบนชิ้นงานจะได้แผนภาพ ดังรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที

เวลา (นาที)	ค่าความแข็งแรง(HRB)				
	A	B	C	D	E
ไม่ผ่านการอบชุบ	75.67	85.33	87.67	85.00	75.33
30	75.33	84.33	86.67	84.67	75.33
45	75.00	83.33	84.67	83.00	75.67
60	74.67	81.33	83.00	81.33	74.67



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที

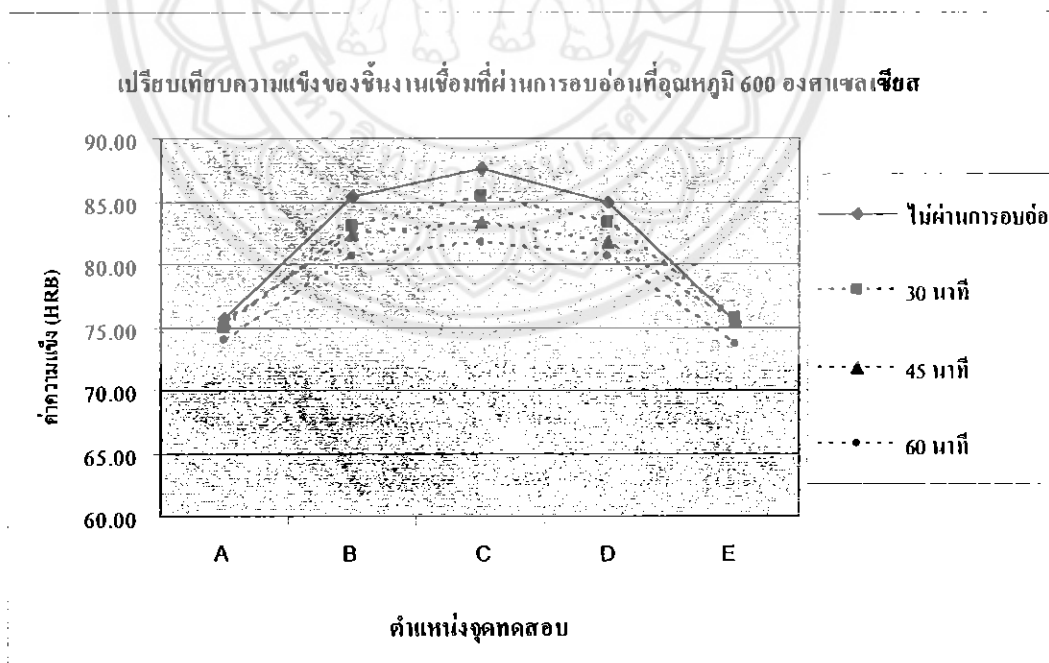
จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งกระทบริ้น และจะมีค่าสูงที่สุดเมื่ออยู่ที่ตำแหน่งกลางรอยเชื่อม และจากการทดสอบความแข็งแรงนี้ทำให้ทราบว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบอ่อนมีความแข็งแรงมากที่สุด ตามด้วยชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 30 นาที, 45 นาที และชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 60 นาที มีค่าความแข็งแรงน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในหัวข้อ 4.2.5

4.3.2.3 เปรียบเทียบความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามรูปที่ 4.2 ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในเวลาต่างกัน แสดงได้ดังตารางที่ 4.13 เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกับตำแหน่งที่ทำการทดสอบความแข็งแรงบนชิ้นงานจะได้แผนภาพ ดังรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที

เวลา (นาที)	ค่าความแข็งแรง (HRB)				
	A	B	C	D	E
ไม่ผ่านการอบชุบ	75.67	85.33	87.67	85.00	75.33
30	75.00	83.00	85.33	83.33	75.67
45	75.33	82.33	83.33	81.67	75.33
60	74.00	80.67	81.67	80.67	73.67



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่า ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งกระแทกร้อน และจะมีค่าสูงที่สุดเมื่ออยู่ที่ตำแหน่งกลางรอยเชื่อม และจากการทดสอบความแข็งนี้ทำให้ทราบว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบ มีความแข็งมากที่สุด ตามด้วยชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 30 นาที, 45 นาที และชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 60 นาที มีค่าความแข็งน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในหัวข้อ 4.2.6

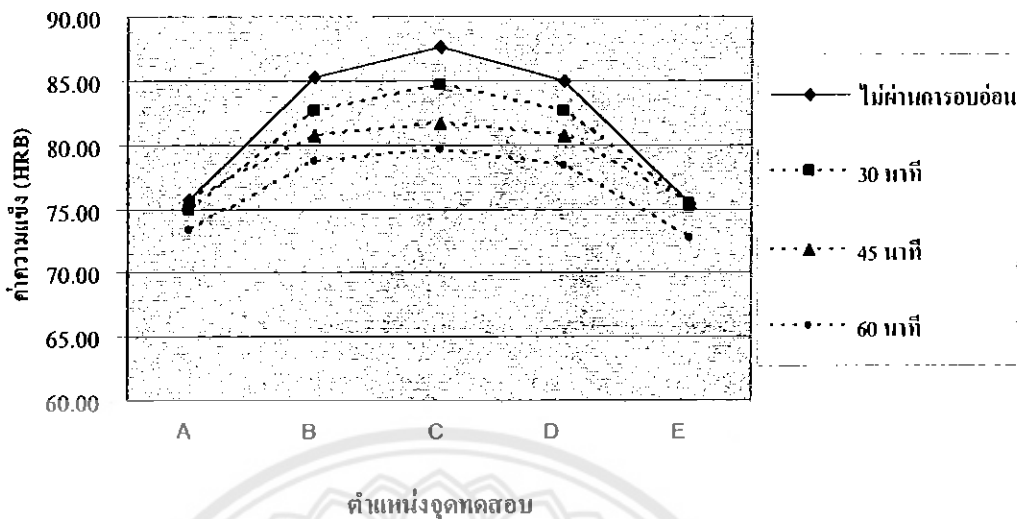
4.3.2.4 เปรียบเทียบความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

ค่าความแข็งเฉลี่ย ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามรูปที่ 4.2 ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ในเวลาต่างกัน แสดงได้ดังตารางที่ 4.14 เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับตำแหน่งที่ทำการศึกษาทดสอบความแข็งบนชิ้นงานจะได้แผนภาพ ดังรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที

เวลา (นาที)	ค่าความแข็ง (HRB)				
	A	B	C	D	E
ไม่ผ่านการอบชุบ	75.67	85.33	87.67	85.00	75.33
30	75.00	82.67	84.67	82.67	75.33
45	75.67	80.67	81.67	80.67	75.33
60	73.33	78.67	79.67	78.33	72.67

เปรียบเทียบความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่า ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งกระทร้อน และจะมีค่าสูงสุดเมื่ออยู่ที่ตำแหน่งกลางรอยเชื่อม และจากการทดสอบความแข็งนี้ทำให้ทราบว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบ มีความแข็งมากที่สุด ตามด้วยชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในเวลา 30 นาที, 45 นาที และชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 60 นาที มีค่าความแข็งน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ในหัวข้อ 4.2.7

จากการทดลองในกรณีเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบอ่อนไม่สมบูรณ์โดยกำหนดให้อุณหภูมิในการอบชิ้นงานคงที่ แต่ใช้เวลาในการอบชิ้นงานต่างกัน จะเห็นได้ว่า ค่าความแข็งของทุกชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดบริเวณเนื้อเชื่อม รองลงมาคือ บริเวณกระทร้อน และบริเวณเนื้อพื้นมีค่าความแข็งน้อยที่สุด นอกจากนี้จะเห็นว่า ค่าความแข็งบริเวณเนื้อพื้น ไม่เปลี่ยนแปลงความแข็งมากนัก เนื่องจากบริเวณดังกล่าวไม่ได้รับความร้อนจากการเชื่อม ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวไม่มีความเครียดภายในบริเวณ ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีที่ว่า การทำ Stress-relief annealing มีความมุ่งหมายเพื่อทำลายความเครียดภายในลดลงมีผลทำให้ความแข็งของชิ้นงานลดลง ค่าความแข็งบริเวณกระทร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อม มีแนวโน้มของค่าความแข็งลดลงเมื่อเวลาการอบเพิ่มขึ้น [9]

4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวหลอมละลาย

จากการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 100 เท่า ของชิ้นงานเชื่อมที่ยังไม่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์กับชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์เป็นเวลา 30, 45 และ 60 นาที และในอุณหภูมิต่างกัน คือ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 4.12

4.4.1 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวหลอมละลายของชิ้นงานที่ทำการอบอ่อนเป็นเวลาเท่ากัน แต่ใช้อุณหภูมิต่างกัน พบว่า

4.4.1.1 ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์นั้น บริเวณแนวหลอมละลายเกรนจะมีลักษณะเรียวยาว (Columnar grain) และเป็นเกรนขนาดใหญ่ ทั้งนี้คาดว่า เกิดเนื่องจากการหลอมละลายของเนื้อพื้นที่กับเนื้อเชื่อม และเกิดการเย็นตัว โดยมีการถ่ายเทความร้อนจากรอยเชื่อมทำให้เกิดโครงสร้างเกรนลักษณะเกรนเรียวยาว (Columnar grain)

4.4.1.2 จากการพิจารณาชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์เป็นเวลา 30 นาที พบว่า ในอุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส เกรนลักษณะเรียวยาว เริ่มเปลี่ยนเป็นเกรนขนาด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 600 และ 700 องศาเซลเซียส ไม่พบลักษณะเกรนเรียวยาว (Columnar grain) แสดงว่า มีการเกิดผลึกใหม่ในบริเวณแนวหลอมละลายโดยเริ่มเกิดตั้งแต่อุณหภูมิตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียส แต่ไม่สมบูรณ์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 500 องศาเซลเซียส การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) มีมากขึ้น และเกิดสมบูรณ์เมื่อใช้อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส

4.4.1.3 จากการพิจารณาชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์เป็นเวลา 45 นาที พบว่า ในอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ปรากฏเกรนลักษณะเกรนเรียวยาว (Columnar grain) เล็กน้อย เกรนส่วนใหญ่เป็นเกรนที่มีขนาดละเอียดอาจเกิดเนื่องจากอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ใช้ในการอบอ่อนน้อยเกินไป ในขณะที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ปรากฏเกรนลักษณะของเกรนเรียวยาว (Columnar grain) น้อยกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 600 และ 700 องศาเซลเซียส ไม่พบเกรนลักษณะของเกรนเรียวยาว (Columnar grain) แต่มีการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) มากขึ้นและเกิดอย่างสมบูรณ์

4.4.1.4 จากการพิจารณาชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์เป็นเวลา 60 นาที พบว่า ในอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ยังคงปรากฏลักษณะของเกรนเรียวยาว (Columnar grain) อย่างเพียงเล็กน้อย ในขณะที่อุณหภูมิ 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส ไม่พบเกรนลักษณะของเกรนเรียวยาว (Columnar grain) แสดงว่า มีการเกิดผลึกใหม่ในแนวหลอมละลายโดยเริ่มเกิดตั้งแต่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แต่ไม่สมบูรณ์ และมีการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) มากขึ้นและเกิดสมบูรณ์เมื่อใช้อุณหภูมิ 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส

4.4.2 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวหลอมละลายของชิ้นงานที่ทำการอบอ่อนในอุณหภูมิเท่ากัน แต่ใช้เวลาต่างกัน พบว่า

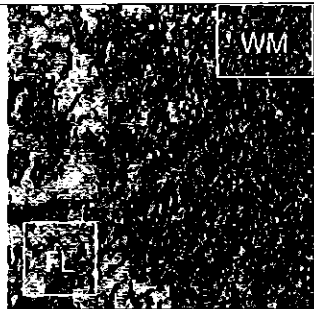
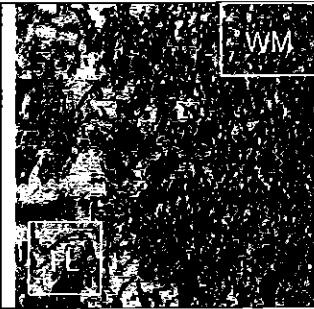
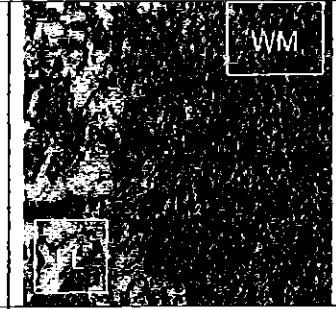
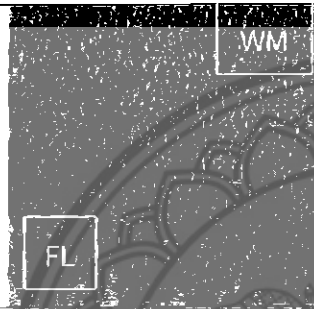
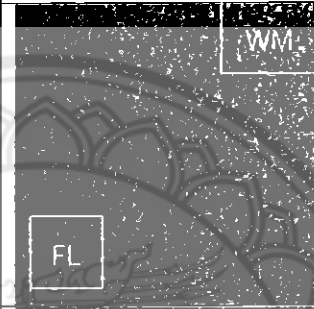
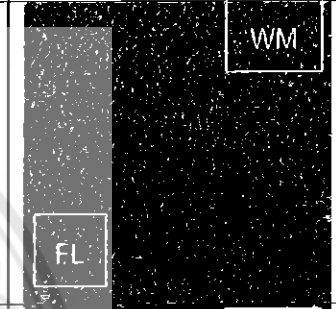
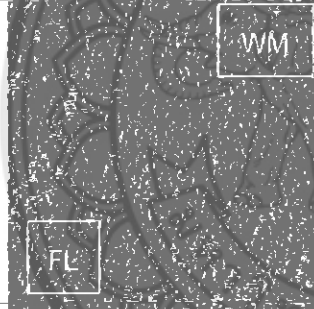
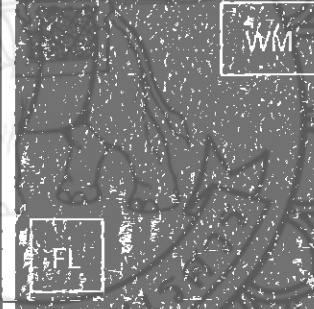
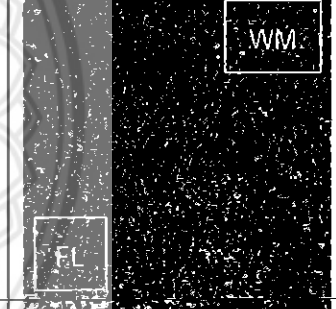
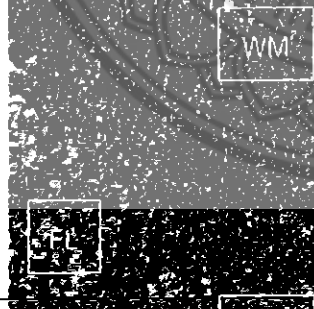
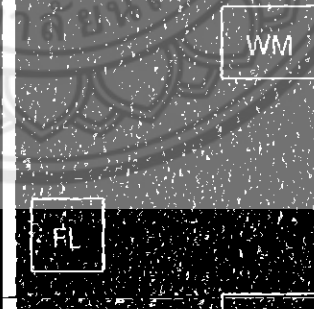
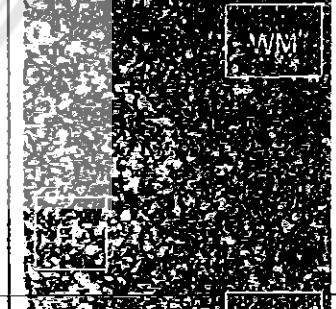

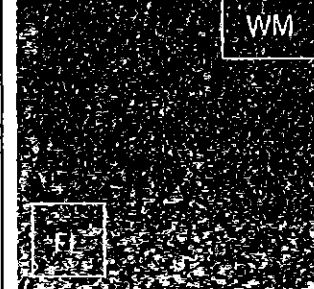
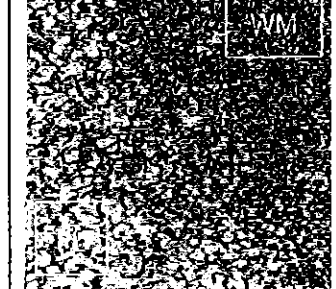
4.4.2.1 จากการพิจารณาชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่า ในเวลา 30 และ 45 นาที พบว่า มีเกรนลักษณะเรียวยาว เริ่มเปลี่ยนเป็นเกรนขนาดเล็ก อาจเกิดเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนน้อยเกินไป เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 60 นาที จะเห็นว่า มีเกรนเล็กละเอียดมากขึ้นแต่ยังปรากฏว่าเกรนขนาดใหญ่ปะปนอยู่ ซึ่งคาดว่าอาจเป็นส่วนของเกรนลักษณะเกรนเรียวยาว (Columnar grain) ที่ยังเกิดผลึกใหม่อย่างไม่สมบูรณ์

4.4.2.2 จากการพิจารณาชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่า ในเวลา 30 นาที ปรากฏเกรนลักษณะเกรนเรียวยาว (Columnar grain) เล็กน้อย เกรนส่วนใหญ่เป็นเกรนที่มีขนาดละเอียดอาจเกิดเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนน้อยเกินไป ในขณะที่เวลา 45 นาที ปรากฏเกรนลักษณะของเกรนเรียวยาว (Columnar grain) น้อยกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 30 นาที เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 60 นาที ไม่พบเกรนลักษณะเกรนเรียวยาว (Columnar grain) มีการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) มากขึ้นและเกิดอย่างสมบูรณ์

4.4.2.3 จากการพิจารณาชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่า ในเวลา 30 นาที ยังคงปรากฏลักษณะเกรนเรียวยาว (Columnar grain) เพียงเล็กน้อย แต่ไม่สมบูรณ์ อาจเกิดเนื่องจากเวลา 30 นาที ที่ใช้ในการอบอ่อนน้อยเกินไป แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการอบอ่อนเป็น 45 และ 60 นาที มีการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) มากขึ้นและเกิดสมบูรณ์

4.4.2.4 จากการพิจารณาชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่า ในเวลา 30, 45 และ 60 นาที ไม่พบเกรนลักษณะเกรนเรียวยาว (Columnar grain) แสดงว่า มีการเกิดผลึกใหม่ในแนวหลอมละลายโดยเริ่มเกิดตั้งแต่เวลา 30 นาที และมีการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) มากขึ้นและเกิดสมบูรณ์เมื่อเพิ่มเวลาในการอบเป็น 45 และ 60 นาที

ตารางที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวหลอมละลายที่กำลังขยาย 100 เท่า
ของชิ้นงานเชื่อมภายหลังการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์ในเวลาและอุณหภูมิที่ต่างกัน

ชิ้นงานที่ ไม่ได้ ผ่านการ อบอ่อน			
	30 นาที	45 นาที	60 นาที
400 องศา เซลเซียส			
500 องศา เซลเซียส			
600 องศา เซลเซียส			
700 องศา เซลเซียส			

จากการเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวหลอมละลายของชิ้นงานเชื่อม ภายหลังการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ พบว่า

ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนนี้ทำให้โครงสร้างบริเวณแนวหลอมละลายเกิดการเปลี่ยนแปลงคือเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) ขึ้นมาแทนเกรนลักษณะเกรนเรียวยาว (Columnar grain) โดยที่อุณหภูมิต่ำอัตราการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) จะต่ำกว่าอัตราการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) ที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นที่อุณหภูมิต่ำจึงต้องอาศัยเวลามากกว่าที่อุณหภูมิสูงจึงจะเกิด ผลึกใหม่ (recrystallization) อย่างสมบูรณ์



บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 คุณสมบัติทางโครงสร้างจุลภาค

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแบบเชื่อมหุ้มฟลักซ์แล้วมาทำการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ นั้นอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในการอบชุบมีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค กล่าวคือ

เมื่อเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบอ่อนไม่สมบูรณ์เป็นระยะเวลาเท่ากัน แต่ใช้อุณหภูมิต่างกัน พบว่าบริเวณกระแทกร้อนและบริเวณเนื้อเชื่อม มีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอบเพิ่มขึ้น ในขณะที่บริเวณเนื้อพื้นไม่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรน

เมื่อเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในอุณหภูมิเท่ากัน แต่ใช้ระยะเวลาต่างกัน พบว่า บริเวณกระแทกร้อนและบริเวณเนื้อเชื่อม พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีขนาดของเกรน ที่มีแนว ไน้มขนาดเกรนใหญ่ขึ้นเมื่อเวลาการอบเพิ่มขึ้น และในบริเวณเนื้อพื้นไม่พบการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรน

โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวหลอมละลายภายหลังการเชื่อมมีลักษณะเกรนลักษณะเรียวยาว (Columnar grain) เมื่อนำชิ้นงานเชื่อมมาอบอ่อนไม่สมบูรณ์เป็นเวลาและอุณหภูมิต่างๆ กัน พบว่าโครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) โดยที่การอบที่อุณหภูมิต่ำอัตราการเกิดผลึกใหม่จะช้ากว่าการอบที่อุณหภูมิสูง

5.1.2 ความแข็งของชิ้นงาน

ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแบบเชื่อมหุ้มฟลักซ์ จะมีความแข็งเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งบริเวณกระแทกร้อน และจะมีค่าความแข็งสูงเมื่ออยู่ที่ตำแหน่งกลางรอยเชื่อม และจากการทดสอบความแข็ง พบว่า

ค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบอ่อนไม่สมบูรณ์เป็นระยะเวลาเท่ากัน แต่ใช้อุณหภูมิต่างกัน พบว่า ค่าความแข็งบริเวณเนื้อพื้น บริเวณกระแทกร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อมมีแนวโน้มนลดลงตามอุณหภูมิการอบที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการอบชิ้นงานสูงมากขึ้นมีผลต่อการคลายความเครียดทำให้ความแข็งของชิ้นงานลดลงตามไปด้วย

ค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ทำการอบอ่อนไม่สมบูรณ์เป็นระยะเวลาต่างกัน แต่ใช้อุณหภูมิต่างกัน พบว่า ค่าความแข็งบริเวณเนื้อพื้น บริเวณกระแทกร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อมมี

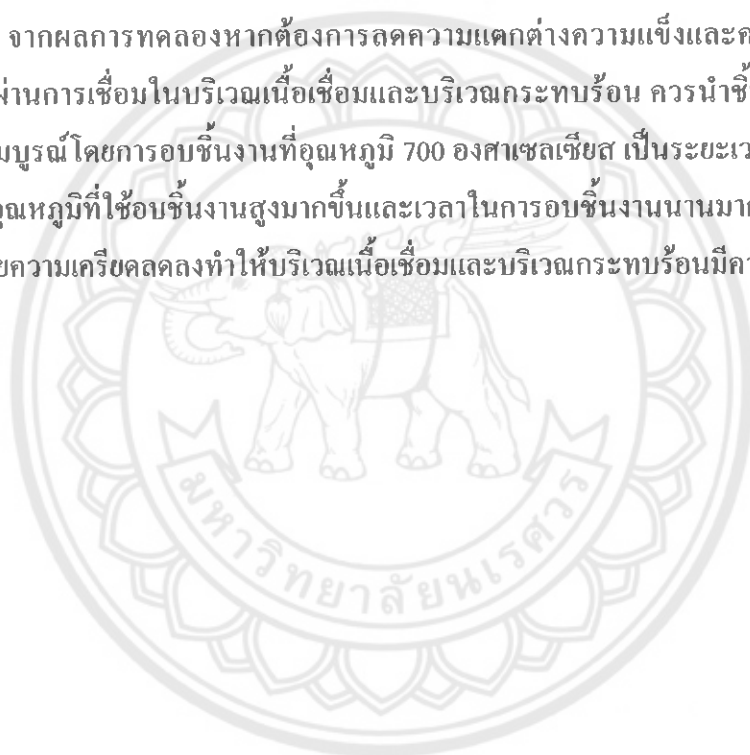
แนวโน้มลดลงตามเวลาการอบที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาการอบชิ้นงานนานมากขึ้นมีผลต่อการคลายความเครียดทำให้ความแข็งของชิ้นงานลดลงเช่นกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในชิ้นงานเกิดฟองอากาศอยู่ในชิ้นงานเนื่องด้วยการเชื่อมที่ไม่ดีเท่าที่ควร ส่งผลทำให้ชิ้นงานมีความแข็งไม่มีความสม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงาน ดังนั้นในการเชื่อมแต่ละครั้งต้องไม่เชื่อมห่างจากชิ้นงานมากเกินไปและเร็วจนเกินไป เพราะจะทำให้เกิดฟองอากาศเข้าไปในแนวรอยเชื่อม

5.2.2 อาจมีการศึกษาสมบัติด้านความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มเติมเพื่อศึกษาความแข็งแรงของชิ้นงานต่อไป

5.2.3 จากผลการทดลองหากต้องการลดความแตกต่างความแข็งและคลายความเครียดของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมในบริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณกระแทกร้อน ควรนำชิ้นงานเชื่อมทำการอบอ่อนไม่สมบูรณ์โดยการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาในการอบ 60 นาที เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้อบชิ้นงานสูงมากขึ้นและเวลาในการอบชิ้นงานนานมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีการคลายความเครียดลดลงทำให้บริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณกระแทกร้อนมีความแข็งลดลง



เอกสารอ้างอิง

- [1] เหล็กกล้า. /สืบค้นเมื่อ 13 สิงหาคม 2552/ <http://www.elecnet.chandra.ac.th/>
- [2] การเชื่อมโลหะ. /สืบค้นเมื่อ 4 กันยายน 2551/ <http://th.wikipedia.org/wiki/>
- [3] เทคนิคการเชื่อม. /สืบค้นเมื่อ 13 สิงหาคม 2552/ <http://www.supradit.com/>
- [4] อัตราการเย็นตัว. /สืบค้นเมื่อ 13 สิงหาคม 2552/ <http://www.pirun.ku.ac.th>
- [5] รศ.มนัส สติรจินดา. (2537). วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [6] Effect of cold working on tensile strength, hardness, ductility and grain size. /สืบค้นเมื่อ 15 สิงหาคม 2551/ <http://images.google.co.th/imgres?imgurl=http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/coldwork.jpg>
- [7] เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชา Physical Metallurgy I, "The grain size", ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [8] ชวลิต เชียงกุล. (2547). โลหะวิทยา (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [9] ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติทางโลหะวิทยาในเหล็กโครงสร้าง. /สืบค้นเมื่อ 20 มกราคม 2553/ <http://library.kmutnb.ac.th/projects/ind/MDT/mdt0004t.html>
- [10] ลวดเชื่อมไฟฟ้า KOBE RB-26. /สืบค้นเมื่อ 20 มกราคม 2553/ <http://www.psogas.com/>



1. ลักษณะการใช้งานของลวดเชื่อมไฟฟ้า

ลวดเชื่อม RB-26 เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดไดตาเนียมสูง ซึ่งสามารถเชื่อมในท่าตั้ง-ลากลงได้ถึงแม้จะใช้ลวดเชื่อมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโตถึง 5.0 มิลลิเมตร ลวดเชื่อม RB-26 ให้การอาร์คที่นิ่งเรียบมีสะเก็ดไฟเชื่อมน้อย ทำให้ผิวยรอยเชื่อมที่ได้มีความเรียบสวยงามเป็นมันวาว เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการเชื่อมงาน โครงสร้างเบาๆ ซึ่งเน้นการเชื่อมในท่าตั้ง-ลากลง นอกจากนั้นยังเหมาะสำหรับการเชื่อมเหล็กแผ่น เนื่องจากการซึมลึกที่ไม่สูงมากนัก [10]

2. ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมโลหะ

ตารางที่ ก.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีโดยทั่วไปของลวดเชื่อมโลหะ (เปอร์เซ็นต์)*

Fe	C	Si	Mn	P	S
99.228	0.08	0.30	0.37	0.012	0.010

*ข้อมูลจาก บริษัท พี.เอส. โอ.ผลิตภัณฑ์แก๊ส จำกัด

3. คุณสมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะเชื่อม

ตารางที่ ก.2 แสดงคุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อมไฟฟ้า*

YP (Yield point) (MPa)	TS (tensile strength) (MPa)	EI (Percentage Elongation)
450	510	25

*ข้อมูลจาก บริษัท พี.เอส. โอ.ผลิตภัณฑ์แก๊ส จำกัด

4. ขนาดลวดเชื่อมและช่วงกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม

ตารางที่ ก.3 แสดงขนาดของลวดเชื่อมและช่วงกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม*

ขนาดลวด (mm.)	1.6	2.0	2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
ความยาว (mm.)	250	300	350	350	400	400	450
กระแสไฟฟ้า (A)	20-45	65	95	125	170	220	280

*ข้อมูลจาก บริษัท พี.เอส. โอ.ผลิตภัณฑ์แก๊ส จำกัด



ผลการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องความแข็งระบบแบบร็อกเวลสเกล B
(Rockwell Scale B Hardness Test)



รูปที่ ข.1 แสดงตำแหน่งวัดค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำภายใต้การอบอ่อนไม่สมบูรณ์

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ (HRB)

ตำแหน่ง	A	B	C	D	E
1	75	85	87	85	75
2	76	85	88	85	75
3	76	86	88	85	76
ค่าเฉลี่ย	75.67	85.33	87.67	85.00	75.33
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.47	0.47	0.47	0.00	0.47

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (HRB)

ตำแหน่ง	A	B	C	D	E
1	76.00	85.00	87.00	85.00	75.00
2	75.00	85.00	87.00	85.00	75.00
3	75.00	85.00	88.00	85.00	76.00
ค่าเฉลี่ย	75.33	85.00	87.33	85.00	75.33
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.47	0.00	0.47	0.00	0.47

ตารางที่ ข.3 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (HRB)

ตำแหน่ง	A	B	C	D	E
1	75	85	87	85	75
2	76	85	88	85	75
3	76	86	88	85	76
ค่าเฉลี่ย	75.67	85.33	87.67	85.00	75.33
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.47	0.47	0.47	0.00	0.47

ตารางที่ ข.4 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (HRB)

ตำแหน่ง	A	B	C	D	E
1	75	83	86	84	76
2	75	83	85	83	76
3	75	83	85	83	75
ค่าเฉลี่ย	75.00	83.00	85.33	83.33	75.67
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00	0.00	0.47	0.47	0.47

ตารางที่ ข.5 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (HRB)

ตำแหน่ง	A	B	C	D	E
1	75	83	85	83	75
2	75	83	85	82	75
3	75	82	84	83	76
ค่าเฉลี่ย	75.00	82.67	84.67	82.67	75.33
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00	0.47	0.47	0.47	0.47

ตารางที่ ข.6 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที (HRB)

ตำแหน่ง	A	B	C	D	E
1	75	85	87	84	75
2	75	85	87	83	75
3	75	84	86	84	75
ค่าเฉลี่ย	75.00	84.67	86.67	83.67	75.00
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00	0.47	0.47	0.47	0.00

ตารางที่ ข.7 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที (HRB)

ตำแหน่ง	A	B	C	D	E
1	75	84	84	83	76
2	75	83	85	83	76
3	75	83	85	83	75
ค่าเฉลี่ย	75.00	83.33	84.67	83.00	75.67
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00	0.47	0.47	0.00	0.47

ตารางที่ ข.8 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที (HRB)

ตำแหน่ง	A	B	C	D	E
1	76	82	83	81	75
2	75	83	83	82	75
3	75	82	84	82	76
ค่าเฉลี่ย	75.33	82.33	83.33	81.67	75.33
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47

ตารางที่ ข.9 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที (HRB)

ตำแหน่ง	A	B	C	D	E
1	76	81	82	81	76
2	76	81	82	81	75
3	75	80	81	80	75
ค่าเฉลี่ย	75.67	80.67	81.67	80.67	75.33
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47

ตารางที่ ข.10 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที (HRB)

ตำแหน่ง	A	B	C	D	E
1	75	83	85	82	75
2	75	83	85	82	75
3	76	82	84	82	75
ค่าเฉลี่ย	75.33	82.67	84.67	82.00	75.00
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.47	0.47	0.47	0.00	0.00

ตารางที่ ข.11 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที (HRB)

ตำแหน่ง	A	B	C	D	E
1	75	82	83	82	74
2	75	81	83	81	75
3	74	81	83	81	75
ค่าเฉลี่ย	74.67	81.33	83.00	81.33	74.67
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.47	0.47	0.00	0.47	0.47

ตารางที่ ข.12 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที (HRB)

ตำแหน่ง	A	B	C	D	E
1	74	80	82	81	73
2	74	81	82	81	74
3	74	81	81	80	74
ค่าเฉลี่ย	74.00	80.67	81.67	80.67	73.67
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00	0.47	0.47	0.47	0.47

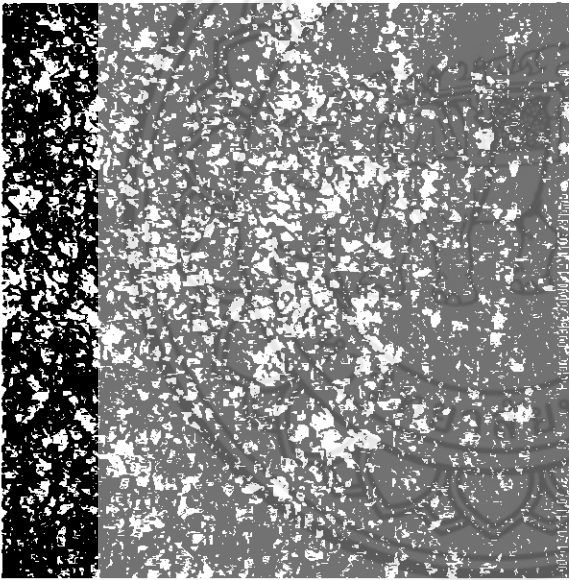
ตารางที่ ข.13 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อน ไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที (HRB)

ตำแหน่ง	A	B	C	D	E
1	73	78	80	79	73
2	73	79	80	78	73
3	74	79	79	78	72
ค่าเฉลี่ย	73.33	78.67	79.67	78.33	72.67
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47

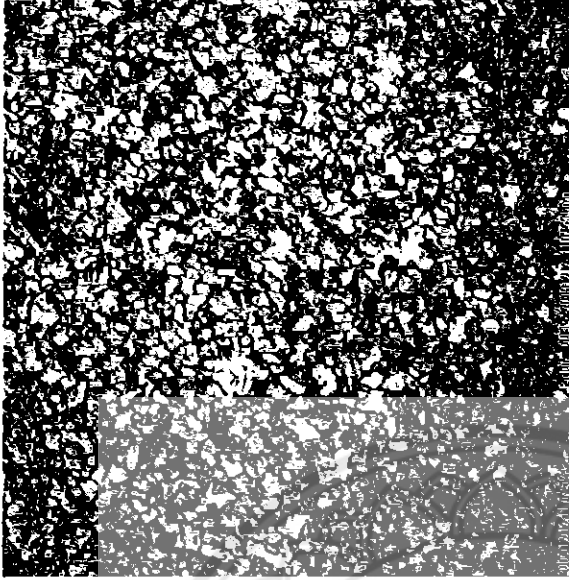




(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ ค.1 ภาพถ่ายโครงสร้างภาคของชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ กำลังขยาย 200 เท่า

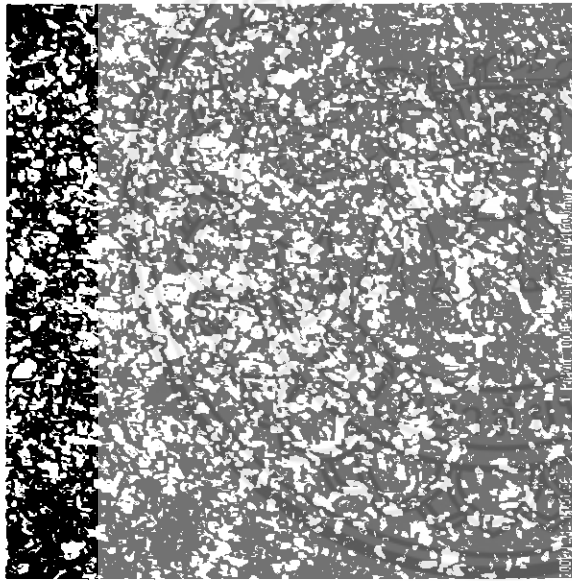
(ก) ภาพบริเวณเนื้อพื้น

(ข) ภาพบริเวณกระทบความร้อน

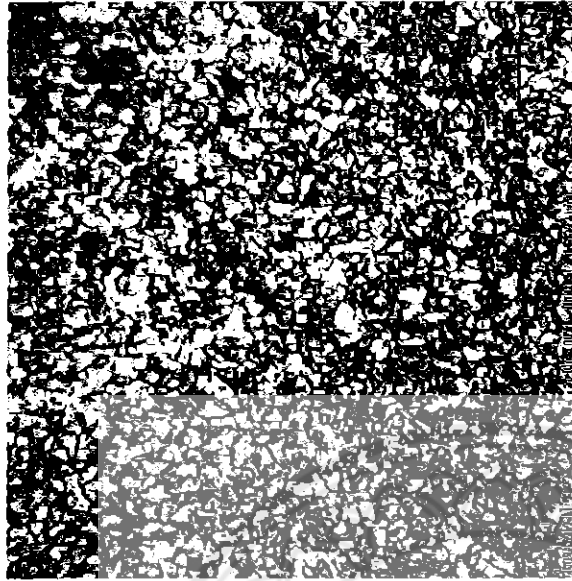
(ค) ภาพบริเวณเนื้อเชื่อม



(ก)



(ข)



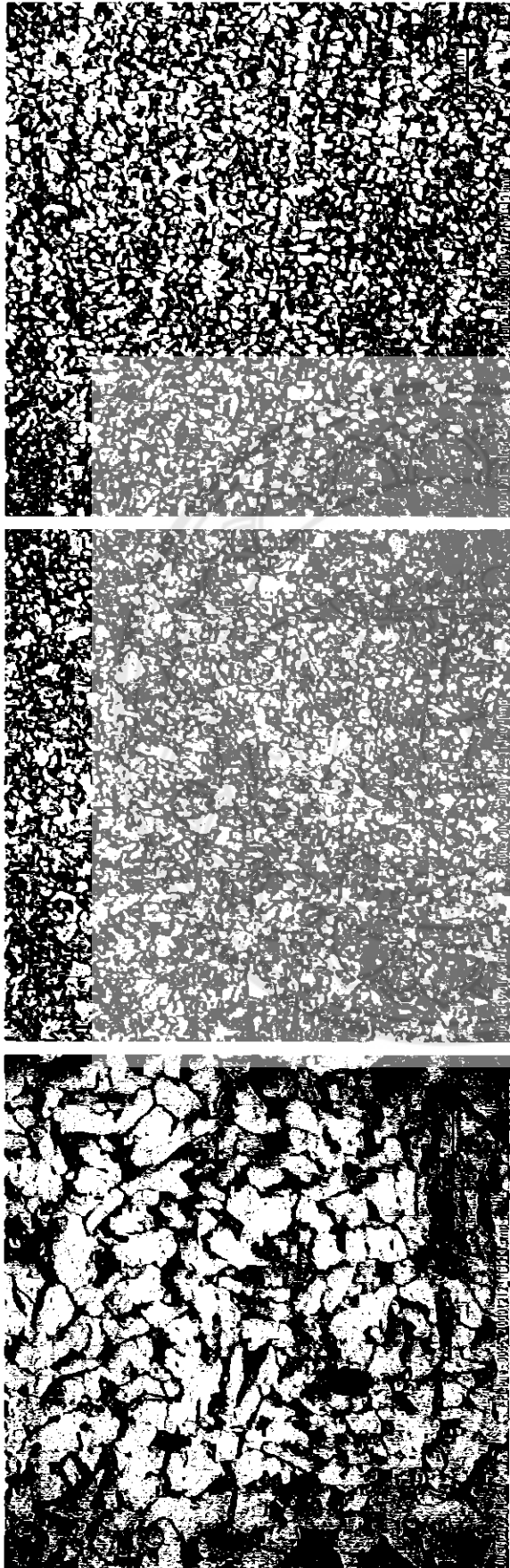
(ค)

รูปที่ ค.2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีที่กำลังขยาย 200 เท่า

(ก) ภาพบริเวณเนื้อฟัน

(ข) ภาพบริเวณกระดูกพรุน

(ค) ภาพบริเวณเนื้อเชื่อม



(ก)

(ข)

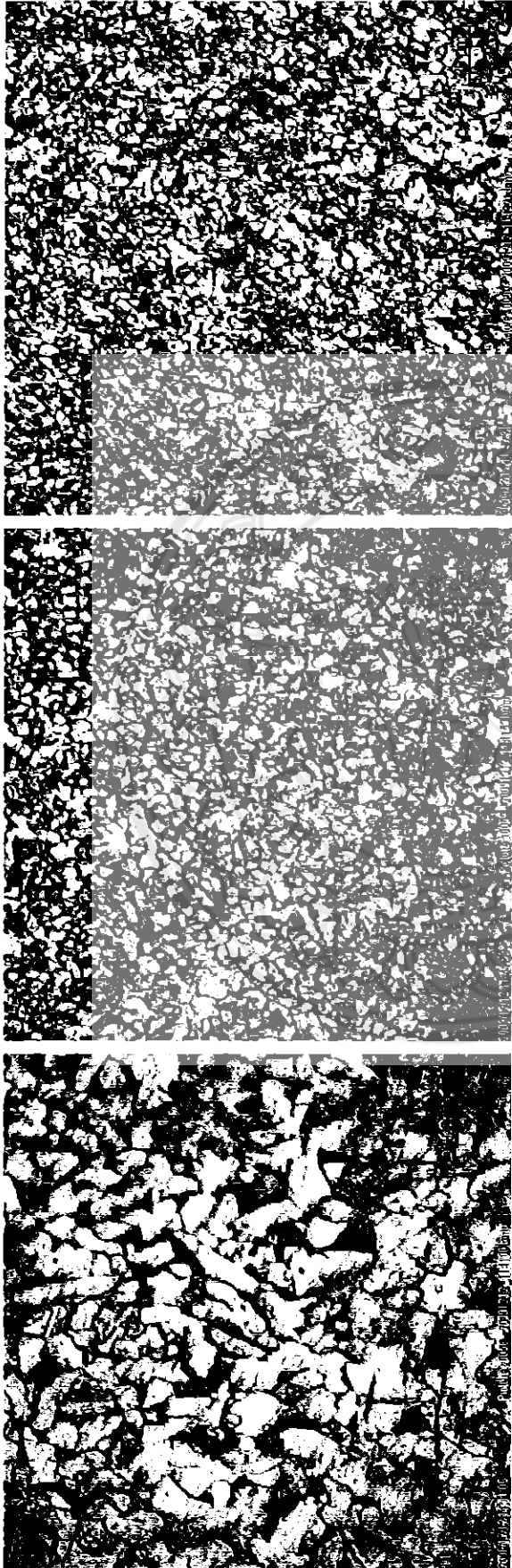
(ค)

รูปที่ ค.3 ภาพถ่ายโครงสร้างจุดภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีที่กำลังขยาย 200 เท่า

(ก) ภาพบริเวณเนื้อพื้น

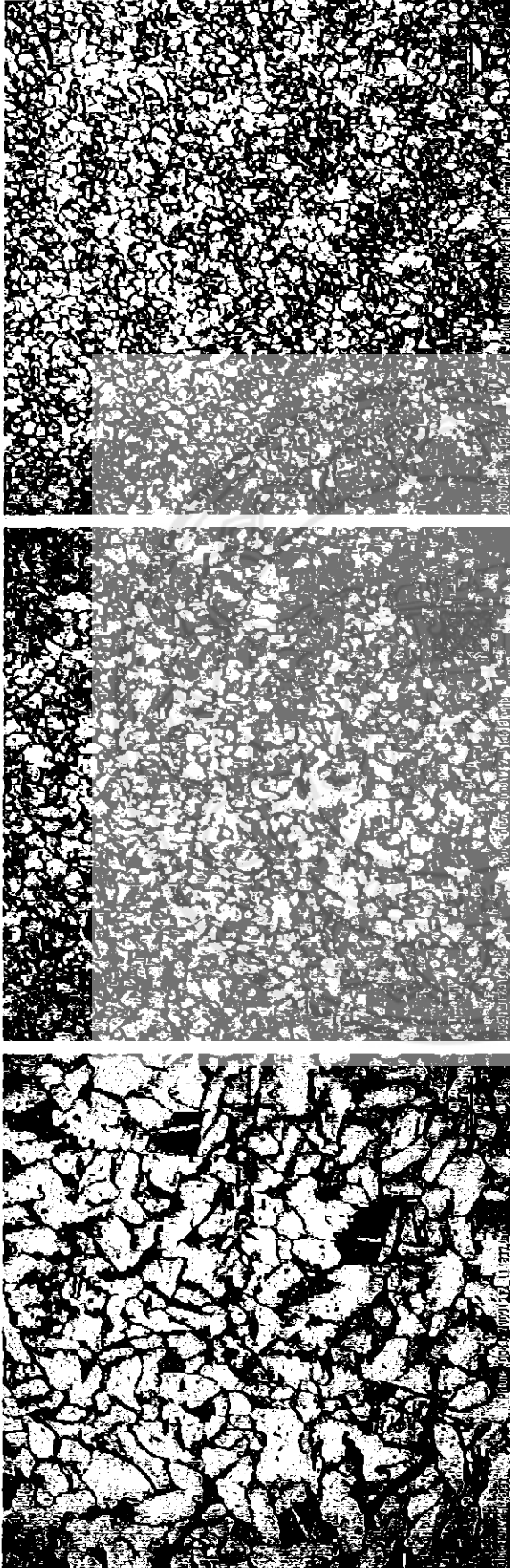
(ข) ภาพบริเวณกระแทบร้อน

(ค) ภาพบริเวณเนื้อเชื่อม



รูปที่ ค.4 ภาพถ่ายโครงสร้างภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลาที่กำลังขยาย 200 เท่า

(ก) ภาพบริเวณเนื้อพื้น
 (ข) ภาพบริเวณกระเทปร้อน
 (ค) ภาพบริเวณเนื้อเชื่อม



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ ค.5 ภาพถ่ายโครงสร้างภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีที่กำลังขยาย 200 เท่า

(ก) ภาพบริเวณเนื้อพื้น

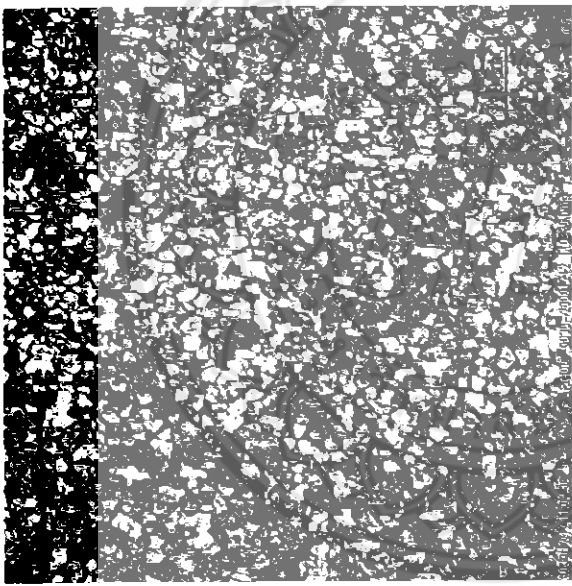
(ข) ภาพบริเวณกระเทาะ

(ค) ภาพบริเวณเนื้อเชื่อม

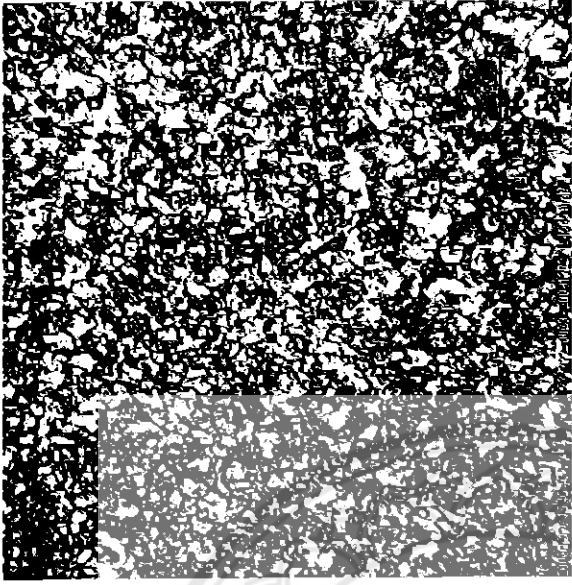


(ก)

รูปที่ ค.6 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที กำลังขยาย 200 เท่า



(ข)



(ค)

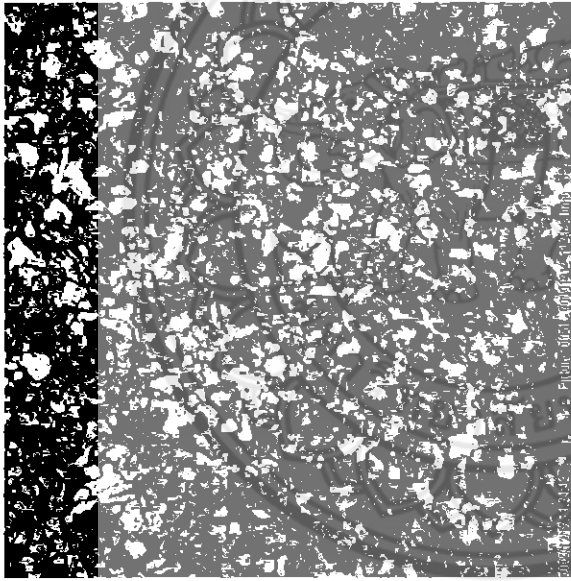
(ก) ภาพบริเวณเนื้อพื้น

(ข) ภาพบริเวณกระเทปร้อน

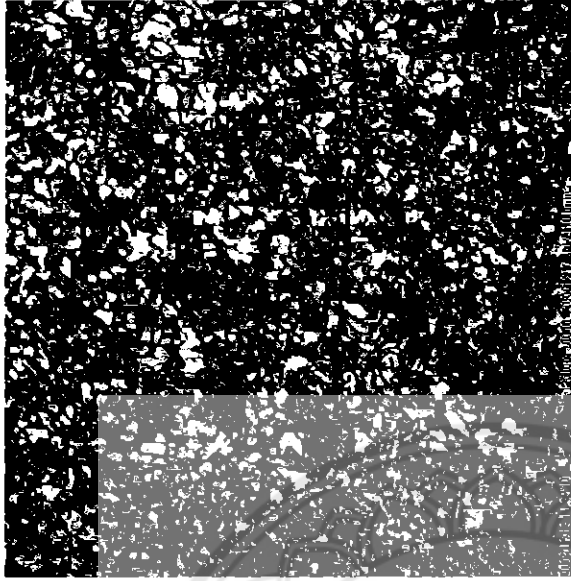
(ค) ภาพบริเวณเนื้อเชื่อม



(ก)



(ข)



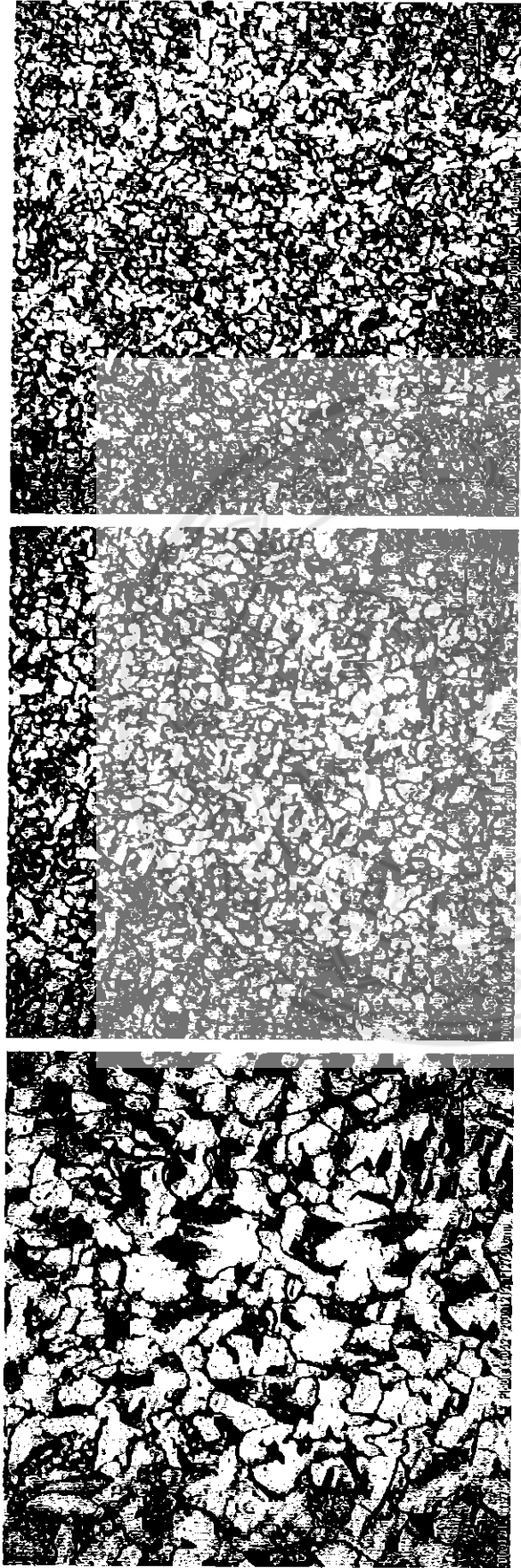
(ค)

รูปที่ ค.7 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาทีที่กำลังขยาย 200 เท่า

(ก) ภาพบริเวณเนื้อพื้น

(ข) ภาพบริเวณกระทาบร้อน

(ค) ภาพบริเวณเนื้อเชื่อม



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ ค.8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาทีที่กำลังขยาย 200 เท่า

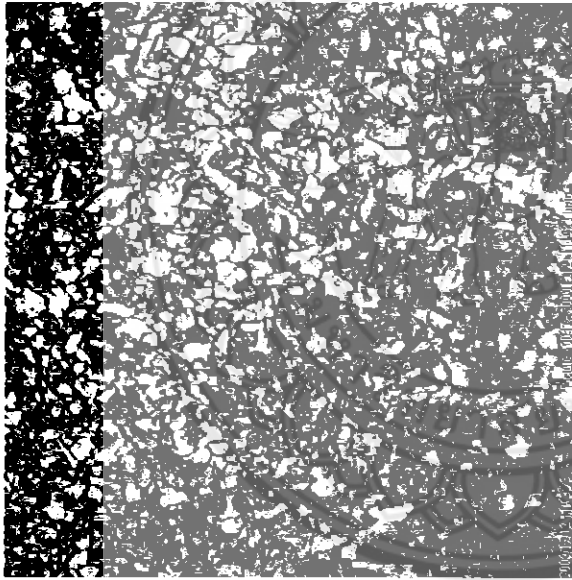
(ก) ภาพบริเวณเนื้อพื้น

(ข) ภาพบริเวณกระหะบร่อน

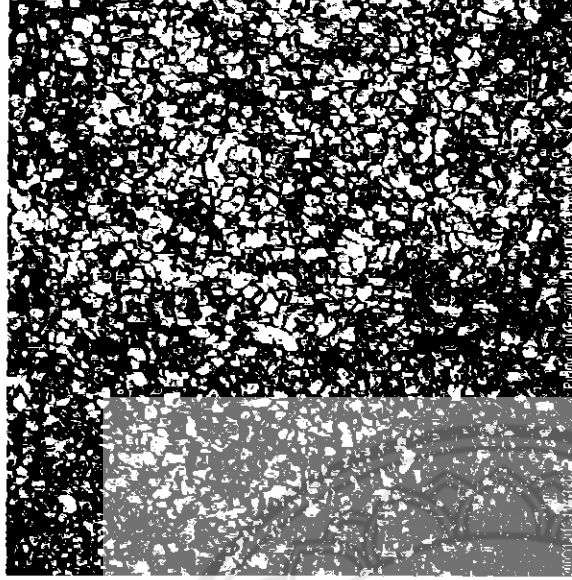
(ค) ภาพบริเวณเนื้อเชื่อม



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ ๓.๑ ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในสัมนุรณที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาทีที่กำลังขยาย 200 เท่า

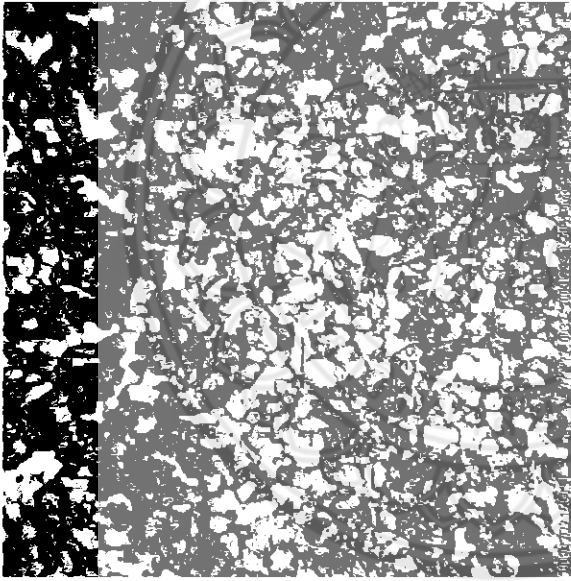
(ก) ภาพบริเวณเนื้อพื้น

(ข) ภาพบริเวณกระหน่ำร้อน

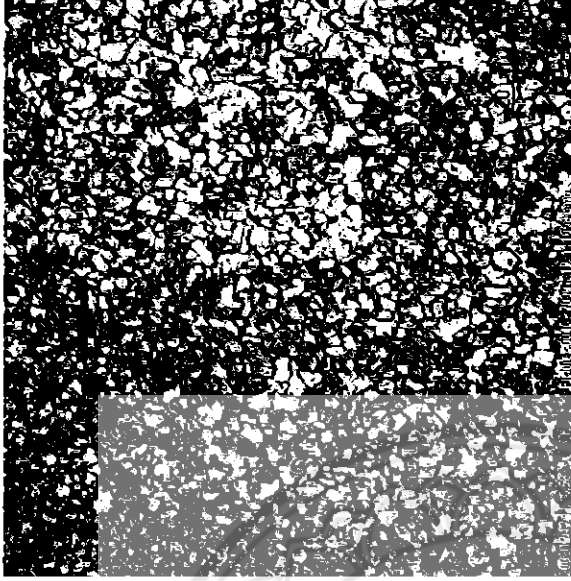
(ค) ภาพบริเวณเนื้อเชื่อม



(ก)



(ข)



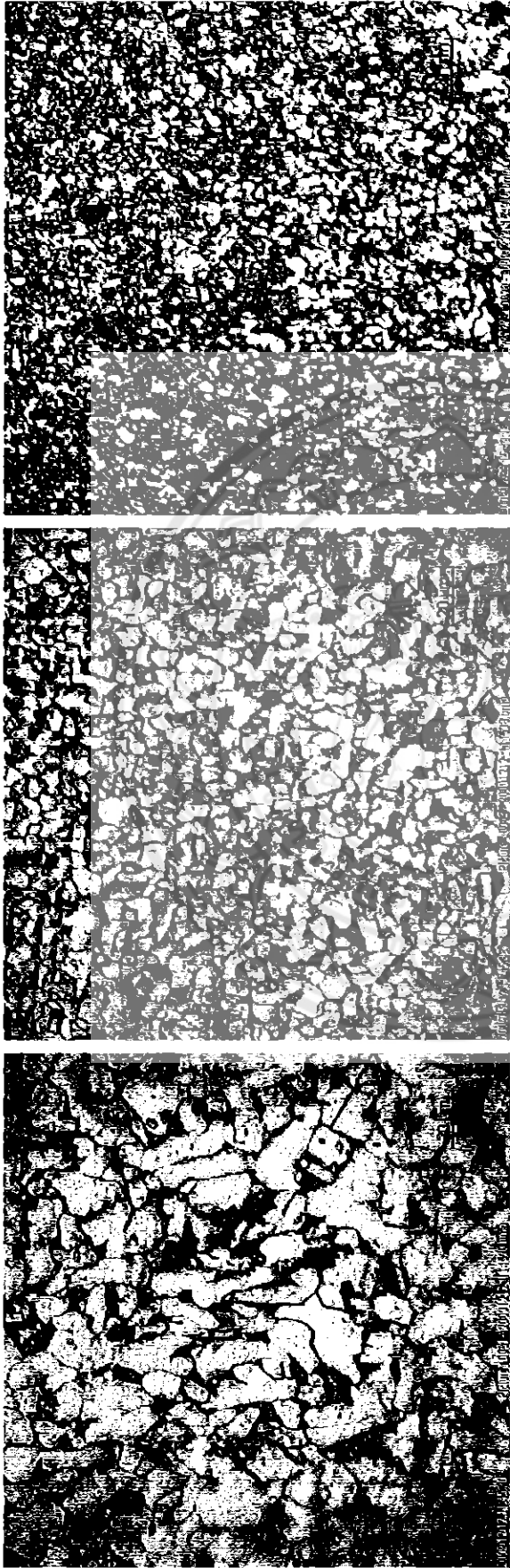
(ค)

รูปที่ ค.10 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาทีที่กึ่งกลางขบย 200 เท่า

(ก) ภาพบริเวณเนื้อพื้น

(ข) ภาพบริเวณกระเทปร้อน

(ค) ภาพบริเวณเนื้อเชื่อม



(ก)

(ข)

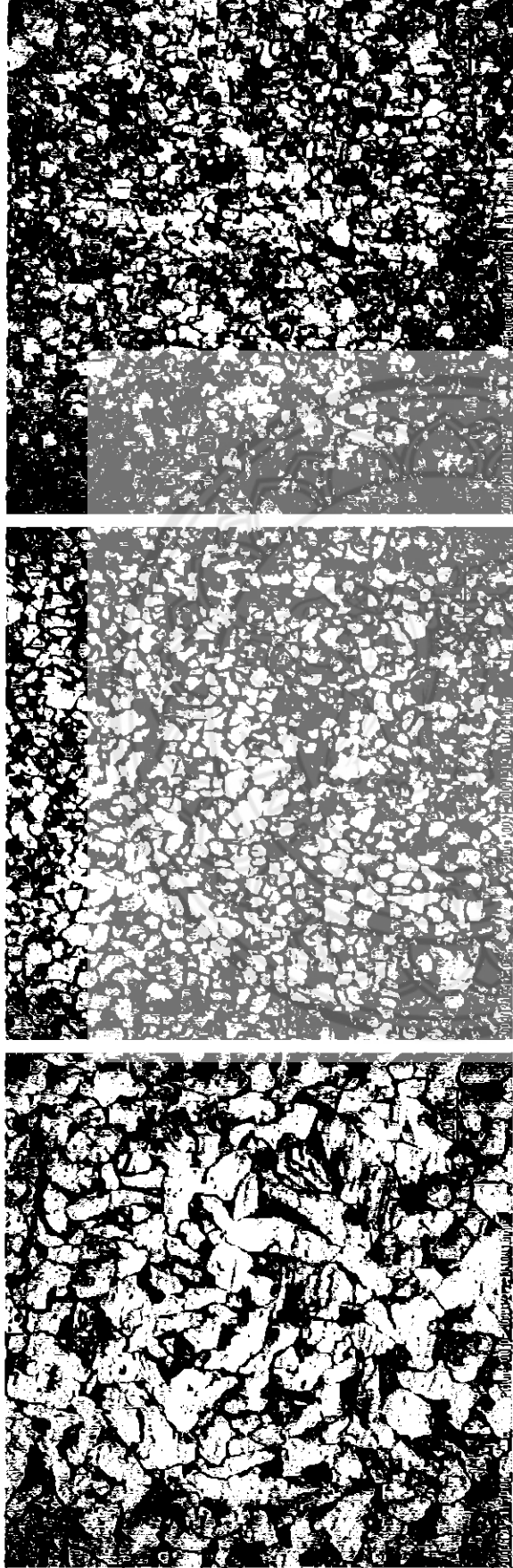
(ค)

รูปที่ ค.11 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาทีที่กำลังขยาย 200 เท่า

(ก) ภาพบริเวณเนื้อฟ้น

(ข) ภาพบริเวณกระหน่ำร้อน

(ค) ภาพบริเวณเนื้อเชื่อม



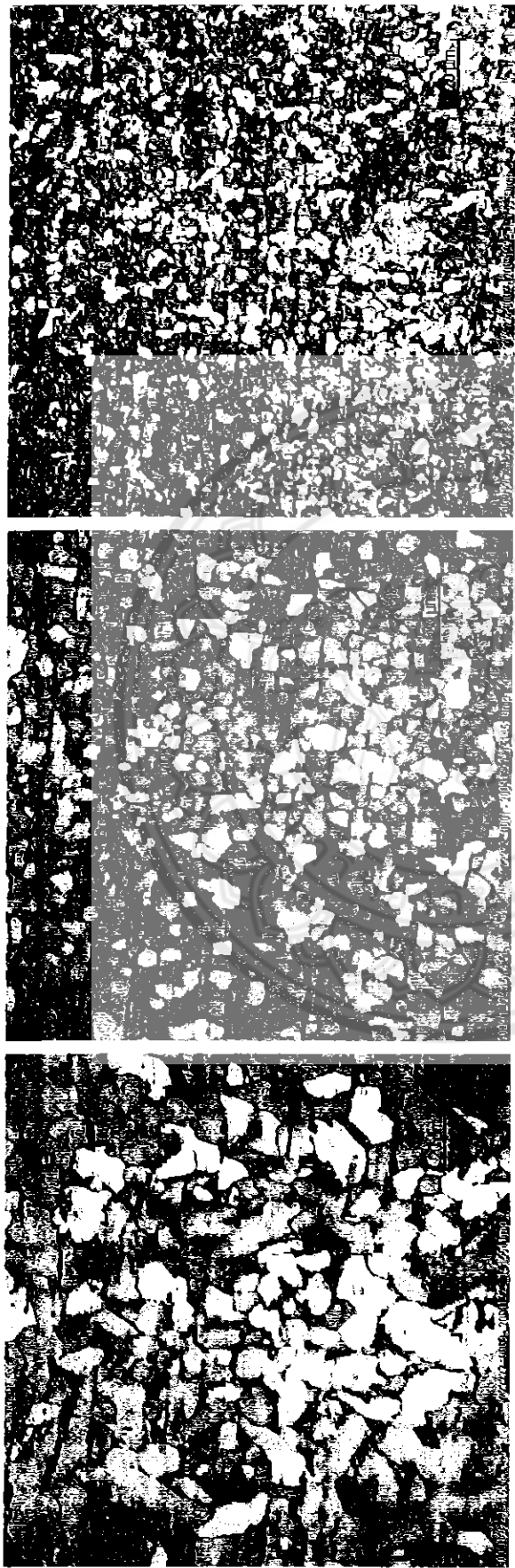
(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ ค.12 ภาพถ่ายโครงสร้างภาคของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 200 นาที

- (ก) ภาพบริเวณเนื้อพื้น
- (ข) ภาพบริเวณกระหน่ำร่อน
- (ค) ภาพบริเวณเนื้อเชื่อม



(ก) ภาพถ่ายโครงสร้างภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาทีที่กำลังขยาย 200 เท่า

(ข) ภาพบริเวณเนื้อพื้น

(ค) ภาพบริเวณกระหะบร้อน

(ค) ภาพบริเวณเนื้อเชื่อม

