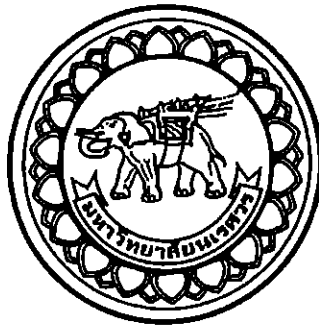




การศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างทางจุลกลศาสตร์
ทางด้านความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่เตรียมโดยกระบวนการหล่อ
แบบดั้งเดิม, แบบซูเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็น

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON MICROSTRUCTURE AND
HARDNESS PROPERTY OF HIGH CHROMIUM CAST IRON PREPARED
BY CONVENTIONAL CASTING, LOW SUPERHEAT CASTING AND
COOLING SLOPE CASTING

นายศิวณัฐ บุญเพิ่ม รหัส 50362450
นางสาววิไลลักษณ์ รอดละม้าย รหัส 50365567

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2553

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 10 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน..... 15904869
เลขเรียกหนังสือ..... 56
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๘542 ก

2553



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ การศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางด้านความแข็งแรงของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่เตรียมโดยกระบวนการหล่อแบบดั้งเดิม, แบบซูเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็น

ผู้ดำเนินโครงการ นายศิวณัฐ บุญเพิ่ม รหัส 50362450
นางสาววิไลลักษณ์ รอดละม้าย รหัส 50365567

ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์
ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์อัมพร เวียงมูล

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์ชูลีพรย์ ป่าไร่)

.....กรรมการ
(อาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์มานะ วีรวิกรม)

.....กรรมการ
(อาจารย์ณิกานต์ ธงชัย)

.....กรรมการ
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางด้านความแข็งแรงของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่เตรียมโดยกระบวนการหล่อแบบดั้งเดิม, แบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็น		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายศิวณัฐ	บุญเพิ่ม	รหัส 50362450
	นางสาววิไลลักษณ์	รอดละม้าย	รหัส 50365567
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์กฤษณา	พูลสวัสดิ์	
ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์อัมพร	เวียงมูล	
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2553		

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างทางจุลภาค ลักษณะทางสัณฐานวิทยา การเปลี่ยนแปลงเฟส และความแข็งแรงของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็น จากการศึกษาค้นคว้าทางจุลภาคในสภาพหล่อ พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็นโครงสร้างจะประกอบไปด้วยโครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ปฐมภูมิล้อมรอบด้วยยูเทกติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ โดยชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม โครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ แต่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็นให้โครงสร้างของออสเทนไนต์ปฐมภูมิที่มีลักษณะเกรนกลม และมียูเทกติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ที่มีขนาดเล็ก กระจายตัวหนาแน่น เมื่อศึกษาการเกิดเฟสของชิ้นงานในสภาพหล่อ พบว่าเกิดเฟสออสเทนไนต์, เฟสมาร์เทนไซต์ และคาร์ไบด์ชนิด $(Fe, Cr)_7C_3$ จากการวัดความแข็งมหภาคแบบวิกเกอร์สของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็นเป็นดังนี้ 482, 493 และ 501 HV₃₀ ตามลำดับ เมื่อนำไปอบตีสเตบิลไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าออสเทนไนต์ปฐมภูมิจะถูกเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์โดยมีออสเทนไนต์ตกค้างบางส่วน และมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิภายในโครงสร้างพื้นของมาร์เทนไซต์ ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็นจะเพิ่มขึ้นเป็น 698, 706 และ 688 HV₃₀ ตามลำดับ และเมื่อชิ้นงานถูกนำไปอบเทมเปอริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง คาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ตกตะกอนในมาร์เทนไซต์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีแนวโน้มเชื่อมต่อกัน นอกจากนี้ยังมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิขึ้นใหม่ที่บริเวณขอบของโครงสร้างพื้นของมาร์เทนไซต์ในระหว่าง

การอบเทมเปอริงอีกด้วย อีกทั้งยังพบว่าเกิดเฟสเฟอร์ไรต์เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของออสเทนไนต์ที่ตกค้าง ส่งผลให้ความแข็งของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบชุบเปอร์ไอท์ต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็น ภายหลังการอบผ่านไป 12 ชั่วโมงลดลงเป็น 570, 566 และ 605 HV₃₀ ตามลำดับ



กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ อาจารย์ภุชญา พูลสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และอาจารย์อัมพร เวียงมูล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการ ในการให้ความรู้ คำปรึกษา และข้อแนะนำเกี่ยวกับการค้นหาข้อมูล และแนวทางการปฏิบัติ การวิเคราะห์ต่างๆ ตลอดจนสละเวลาให้คำแนะนำทั้งภาคทฤษฎี และภาคปฏิบัติ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ที่ดีเยี่ยม และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่ง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ชูลีพรย์ ป่าไร่ อาจารย์มานะ วีรวิกรม อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์ อาจารย์ธนิกันต์ ธงชัย และอาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์ ที่กรุณาสละเวลา เป็นอาจารย์สอบโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการครั้งนี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และอบรมสั่งสอนให้ผู้จัดทำเป็นโครงการของสังคม

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือ และสถานที่ทำโครงการ

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนค่าใช้จ่ายจนสามารถเรียน และทำโครงการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาในการทำโครงการนี้จนลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ผู้ดำเนินโครงการ

ศิวณัฐ

บุญเพิ่ม

วิไลลักษณ์

รอดละม้าย

เมษายน 2554

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
สารบัญสัญลักษณ์ และอักษรย่อ.....	ฎ
 บทที่ 1 บทนำ.....	 1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....	2
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....	2
1.5 ขอบเขตการดำเนินโครงการ.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	3
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	3
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ.....	3
 บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น.....	 5
2.1 เหล็กหล่อโครเมียมสูง.....	5
2.2 กระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็ง.....	9
2.3 กรรมวิธีทางความร้อน.....	17
2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM).....	19
2.5 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD).....	21
2.6 การทดสอบความแข็ง.....	23
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	27
3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงการ.....	27
3.2 วัสดุ และอุปกรณ์.....	28
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	28
3.4 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง.....	31
3.5 จัดทำรูปเล่ม.....	31
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์.....	32
4.1 ผลการศึกษาเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักในสภาพหล่อ.....	32
4.2 ผลการศึกษาเหล็กหล่อโครเมียมสูงหลังอบตีสเตบิไลเซชัน.....	40
4.3 ผลการศึกษาเหล็กหล่อโครเมียมสูงหลังอบเทมเปอร์ริง.....	46
บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....	54
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา.....	55
5.3 ปัญหาที่พบ และวิธีการแก้ไข.....	55
เอกสารอ้างอิง.....	56
ภาคผนวก ก.....	58
ภาคผนวก ข.....	62
ภาคผนวก ค.....	69
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	73

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ.....	3
2.1 ส่วนผสม และความแข็งแรงของเหล็กหล่อโครเมียม (BS 4844).....	5
2.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อโครเมียมสูง (ASTM A-532 1975).....	6
2.3 ชนิดของโครเมียมคาร์ไบด์ และความแข็งแรง.....	7
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ใช้ในการทดลอง.....	28
4.1 ปริมาณธาตุที่ละลายอยู่ในโครงสร้างพื้นของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูป โดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำ.....	35
4.2 ปริมาณธาตุที่ละลายอยู่ในยูเทคติกคาร์ไบด์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้น รูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำ.....	38
4.3 ปริมาณธาตุที่ละลายอยู่ในตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่าน การขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำหลังผ่านการอบตีสเตเบิลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศา- เซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	51
ก.1 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน ณ บริเวณต่างๆ ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยการหล่อแบบดั้งเดิม (Conventional Casting).....	59
ก.2 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน ณ บริเวณต่างๆ ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยการหล่อแบบรางเทหล่อเย็น (Cooling Slope Casting).....	60
ก.3 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน ณ บริเวณต่างๆ ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำ (Low Superheat Casting).....	61
ข.1 การวิเคราะห์หาธาตุ ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่บริเวณโครงสร้างพื้น และบริเวณยูเทคติกคาร์- ไบด์ ในสภาพหล่อของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำ.....	63
ข.2 การวิเคราะห์หาธาตุ ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่บริเวณคาร์ไบด์ทุติยภูมิ ในเหล็กหล่อที่ผ่านการ อบตีสเตเบิลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และอบเทมเปอร์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการ หล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำ.....	64
ข.3 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูง โดย ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำ ที่ผ่านการอบตีสเตเบิลเซชัน อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	65

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.4 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูง โดย ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีตต่ำ ที่ผ่านการอบดิสเตปีไลเซชันที่ อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศา- เซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	66
ข.5 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูง โดย ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีตต่ำ ที่ผ่านการอบดิสเตปีไลเซชันที่ อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	67
ข.6 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูง โดย ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีตต่ำ ที่ผ่านการอบดิสเตปีไลเซชันที่ อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศา- เซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง.....	68
ค.1 ผลของค่าความแข็ง ในสภาพหล่อ, หลังการอบดิสเตปีไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศา- เซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และการอบดิสเตปีไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีดั้งเดิม.....	70
ค.2 ผลของค่าความแข็ง ในสภาพหล่อ, หลังการอบดิสเตปีไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศา- เซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และการอบดิสเตปีไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีซูปเปอร์ฮีตต่ำ.....	71
ค.3 ผลของค่าความแข็ง ในสภาพหล่อ, หลังการอบดิสเตปีไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศา- เซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และการอบดิสเตปีไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีวางเทหล่อเย็น.....	72

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด A356.....	9
2.2	ช่วงของอุณหภูมิที่แข็ง เพื่อใช้ในการกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่แข็ง.....	10
2.3	การเปรียบเทียบกระบวนการ Rheocasting และ Thixocasting.....	12
2.4	ช่วงอุณหภูมิที่แข็งที่ใช้ในการเทผ่านรางเท.....	13
2.5	การแข็งตัวของน้ำโลหะเมื่อเทผ่านรางเทหล่อเย็น.....	14
2.6	กระบวนการหล่อโลหะที่แข็งแบบรางเทหล่อเย็น.....	14
2.7	ภาพจาก SEM ของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก.....	15
2.8	ผลของอุณหภูมิในการอบตีสเตบิลไเซชันต่อค่าความแข็งของเหล็กหล่อที่ผสมคาร์บอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โครเมียมร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และโมลิบดีนัมร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก... ..	17
2.9	ผลของอุณหภูมิในการอบคืนตัวต่อค่าความแข็งของเหล็กหล่อที่ผสมคาร์บอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โครเมียมร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และโมลิบดีนัมร้อยละ 1.7 โดยน้ำหนัก.....	19
2.10	Bragg 's Law.....	21
2.11	เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์.....	22
2.12	ห้วงคดเพชรปลายเป็นรูปปิรามิดมุมยอด 136° ฐานสี่เหลี่ยม และรอยกด.....	23
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	27
3.2	กระบวนการอบตีสเตบิลไเซชันของเหล็กหล่อโครเมียมสูง.....	29
3.3	กระบวนการอบตีสเตบิลไเซชัน และอบเทมเปอริงของเหล็กหล่อโครเมียมสูง.....	29
4.1	โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม.....	32
4.2	โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบชุบเปอร์อิตต่ำ.....	33
4.3	โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบรางเทหล่อเย็น.....	33
4.4	การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณโครงสร้างพื้นของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบชุบเปอร์อิตต่ำ.....	35
4.5	สเปกตรัมของการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณโครงสร้างพื้นของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบชุบเปอร์อิตต่ำ.....	35
4.6	ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบชุบเปอร์อิตต่ำ.....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณโครงสร้างยูเทคติกในส่วนของคาร์ไบด์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์-ฮีทต่ำ.....	37
4.8 สเปกตรัมของการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณโครงสร้างยูเทคติกในส่วนของคาร์ไบด์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ.....	37
4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำในสภาพหล่อ.....	38
4.10 ผลของความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อ.....	39
4.11 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม หลังผ่านการอบตีสเตบิลไเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	40
4.12 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ หลังผ่านการอบตีสเตบิลไเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	41
4.13 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบบางเทหล่อเย็นหลังผ่านการอบตีสเตบิลไเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	41
4.14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำหลังผ่านการอบตีสเตบิลไเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง บริเวณโครงสร้างพื้นของมาร์เทนไซต์.....	42
4.15 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำหลังผ่านการอบตีสเตบิลไเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง บริเวณโครงสร้างพื้นหลังกัดกรดที่มีส่วนผสมของ KMnO_4 4 กรัม + NaOH 4 กรัม + น้ำ 100 มิลลิลิตร.....	43
4.16 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำหลังผ่านการอบตีสเตบิลไเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง บริเวณโครงสร้างยูเทคติก.....	43
4.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำหลังอบตีสเตบิลไเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง....	44
4.18 ผลของความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงหลังผ่านการอบตีสเตบิลไเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการอบดิสเทบิลไเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส.....	46
4.20 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำหลังผ่านการอบดิสเทบิลไเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส.....	48
4.21 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณคาร์ไบด์ทุติยภูมิของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำหลังผ่านการอบดิสเทบิลไเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	50
4.22 สเปกตรัมของการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณคาร์ไบด์ทุติยภูมิของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำหลังผ่านการอบดิสเทบิลไเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	50
4.23 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำ หลังผ่านการอบดิสเทบิลไเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง.	52
4.24 ผลของความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงหลังผ่านการอบดิสเทบิลไเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง.....	53

สารบัญสัญลักษณ์ และอักษรย่อ

- AC = สภาพหล่อ
- D = อบคัสเตปิลเซชัน ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- D-4 = อบคัสเตปิลเซชัน ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และอบเทม-
เปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- D-8 = อบคัสเตปิลเซชัน ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และอบเทม-
เปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
- D-12 = อบคัสเตปิลเซชัน ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และอบเทม-
เปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- UBE = บริษัท อุเบะอินดัสตรีส์



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ

เหล็กหล่อโครเมียมสูงเป็นเหล็กหล่อที่มีสมบัติทนทานต่อการเสียดสี และการกัดกร่อน ในประเทศไทยได้มีการใช้เหล็กหล่อโครเมียมสูงผลิตเป็นปั๊มหอยโข่งสำหรับสูบสารเหลวชั้นที่เป็น น้ำดินในอุตสาหกรรมการถลุงสังกะสี ซึ่งแต่เดิมจะนำเข้าจากต่างประเทศทำให้ต้นทุนในการผลิตสูง ดังนั้น โรงงานถลุงสังกะสีจึงต้องการลดต้นทุนในการผลิต โดยใช้ปั๊มหอยโข่งที่ผลิตขึ้นภายในประเทศ ที่ผลิตจากเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ จากการนำไปใช้งาน พบว่า ปั๊มหอยโข่ง มีอายุการใช้งานเพียง 1 สัปดาห์ เนื่องจากสารเหลวชั้นประกอบด้วยอนุภาคที่แข็ง และกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในกระบวนการแยกแร่สังกะสี ถึงแม้ว่าเหล็กหล่อโครเมียมสูงจะมีคาร์ไบด์ที่มีความ แข็งสูง แต่สมบัติความต้านทานการกัดกร่อน และการเสียดสีจะมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับ โครงสร้างพื้น ถ้าคาร์ไบด์ถูกห่อหุ้มด้วยโครงสร้างพื้นที่มีความแข็งต่ำ ก็จะทำให้คาร์ไบด์หลุดออก ได้ง่ายในระหว่างการใช้งาน ซึ่งวิธีการปรับปรุงสมบัติของเหล็กหล่อโครเมียมสูง คือกรรมวิธีทาง ความร้อน และการเติมธาตุ (มนัส, 2543)

โดยทั่วไปเหล็กหล่อโครเมียมสูงจะนิยมขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบดั้งเดิมซึ่งโครงสร้างประกอบด้วย เคนไครท์ที่ส่งผลให้สมบัติทางกลไม่ดี ในปัจจุบันมีวิธีการหล่อสมัยใหม่ที่น่าสนใจ คือการหล่อ แบบกึ่งแข็ง ที่ให้โครงสร้างมีลักษณะค่อนข้างกลมไม่เป็นเคนไครท์ ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานมีสมบัติทางกล ดีขึ้น (Poolthong et al., 2004)

ดังนั้นโครงการนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างทาง จุลภาค และสมบัติทางด้านความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่ขึ้นรูปโดย วิธีการหล่อแบบดั้งเดิมเทียบกับการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็น จากการศึกษา โครงการวิจัยนี้จะก่อให้เกิดความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมงานหล่อโลหะภายในประเทศ รวมทั้งอุตสาหกรรมเหมืองแร่ และอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ และลดต้นทุนการผลิต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษา และเปรียบเทียบผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติ ทางด้านความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบ ดั้งเดิม, แบบซูเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็น

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

1.3.1 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมเทียบกับการหล่อแบบชุบเปอร์อิตต่ำ และการหล่อแบบรางเทหล่อเย็นทั้งก่อนและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

1.3.2 สมบัติทางด้านความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมเทียบกับการหล่อแบบชุบเปอร์อิตต่ำ และการหล่อแบบรางเทหล่อเย็น ทั้งก่อนและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

1.4.1 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางด้านความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม ทั้งก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

1.4.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางด้านความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบชุบเปอร์อิตต่ำ ทั้งก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

1.4.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางด้านความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบรางเทหล่อเย็น ทั้งก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

1.4.4 เปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางด้านความแข็งของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมเทียบกับการหล่อแบบชุบเปอร์อิตต่ำ และการหล่อแบบรางเทหล่อเย็น ทั้งก่อนและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

1.5.1 วัสดุที่ใช้ คือเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักที่ผ่านการหล่อโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบชุบเปอร์อิตต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็น

1.5.2 กรรมวิธีทางความร้อนดิสเทบิลไลเซชัน ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 4 ชั่วโมง

1.5.3 กรรมวิธีทางความร้อนเทมเปอร์ริง ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง

1.5.4 ศึกษาสมบัติทางด้านความแข็ง

1.5.5 ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

1.5.6 ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค และลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1.5.7 ศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของการเกิดสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์

1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ห้องปฏิบัติการภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

มิถุนายน 2553 – เมษายน 2554

1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ

ลำดับ	การดำเนินงาน	พ.ศ.2553							พ.ศ.2554			
		มิ.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย
1	จัดทำข้อเสนอโครงการ	↔										
2	ศึกษาหาข้อมูล และ การใช้งานของ เหล็กหล่อโครเมียมสูง		↔									
3	ศึกษากรรมวิธีทาง ความร้อนของ เหล็กหล่อโครเมียมสูง			↔								
4	วางแผนลำดับขั้นตอน การดำเนินงาน				↔							

ตารางที่ 1.1 (ต่อ) ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ

ลำดับ	การดำเนินงาน	พ.ศ.2553							พ.ศ.2554			
		ม.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย
5	เตรียมชิ้นงานทดสอบ นำไปผ่านกรรมวิธีทาง ความร้อน ประกอบด้วย - อบตีสเตบิลไลเซชัน - อบเทมเปอร์ เตรียมชิ้นงานเพื่อ ศึกษาโครงสร้างทาง จุลภาคลักษณะ ลักษณะทางสัณฐาน วิทยา โครงสร้าง ผลึก					↔						
6	- ศึกษาโครงสร้าง ทางจุลภาคด้วยกล้อง จุลทรรศน์แบบแสง - ศึกษาลักษณะทาง สัณฐานวิทยาด้วย กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด - ศึกษาโครงสร้าง ผลึกด้วยเทคนิคการ เลี้ยวเบนของรังสี เอกซ์					↔						
7	ทดสอบความแข็ง								↔			
8	วิเคราะห์ และ สรุปผลการทดลอง จัดทำรายงาน								↔			

บทที่ 2

หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 เหล็กหล่อโครเมียมสูง

เหล็กหล่อโครเมียมสูงมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในงานที่ต้องการความต้านทานต่อการสึกหรอ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ และอุตสาหกรรมซีเมนต์ เพราะเหล็กหล่อโครเมียมสูงมีสมบัติการต้านทานการสึกหรอสูง ทำให้มีอายุการใช้งานยาวนาน โดยทั่วไปเหล็กหล่อโครเมียมสูงจะมีคาร์บอนระหว่างร้อยละ 2.0 – 3.0 โดยน้ำหนัก และปริมาณของโครเมียมสูงประมาณร้อยละ 10 - 30 โดยน้ำหนัก ในปัจจุบันมีการผลิตเหล็กหล่อโครเมียมสูงอยู่หลายเกรด แต่ที่นิยมผลิตมากที่สุด ได้แก่ เหล็กหล่อโครเมียมสูงชนิด 2828 คือเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนร้อยละ 2.8 โดยน้ำหนัก และมีโครเมียมผสมร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก

มาตรฐานเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่นำมากล่าว ณ ที่นี้มีเพียงสองมาตรฐาน คือ British Standard (BS 4844) และ ASTM Standard (A 532) เหล็กหล่อโครเมียมสูงของอังกฤษ แบ่งออกเป็น 5 เกรด แสดงในตารางที่ 2.1 มาตรฐานของเหล็กหล่อโครเมียมสูงของอเมริกา (ASTM) แบ่งออกเป็น 6 เกรด แสดงในตารางที่ 2.2 (มนัส, 2543)

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสม และความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียม (BS 4844)

Grade	Chemical Composition %								As-Cast Hardness (HB)
	C	Si max	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	P max	
3 A	2.4-3.0	1.0	0.5-1.5	14-17	0-2.5	0-1.0	0-1.2	0.1	450
3 B	3.0-3.6	1.0	0.5-1.5	14-17	1-3.0	0-1.0	0-1.2	0.1	500
3 C	2.2-3.0	1.0	0.5-1.5	17-22	0-3.0	0-1.5	0-1.2	0.1	450
3 D	2.4-2.8	1.0	0.5-1.5	22-18	0-1.5	0-1.0	0-1.2	0.1	400
3 E	2.8-3.2	1.0	0.5-1.5	22-28	0-1.5	0-1.5	0-1.2	0.1	400

ที่มา: มนัส (2543)

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อโครเมียมสูง (ASTM A-532 1975)

Grade	Chemical Composition %				
	C	Ni (max)	Cr	Mo	Cu (max)
12 Cr	2.4-2.8	0.5	11-14	0.5-1.0	1.2
15 Cr- Mo-Lc	2.4-2.8	0.5	14-18	1.0-3.0	1.2
15 Cr- Mo-Hc	2.8-3.6	0.5	14-18	2.3-3.5	1.2
20 Cr- Mo-Lc	2.0-2.6	1.5	18-23	1.5max	1.2
20 Cr- Mo-Hc	2.6-3.2	1.5	18-23	1.0-2.0	1.2
25 Cr	2.3-3.0	1.5	23-28	1.5max	1.2

ที่มา: มนัส (2543)

2.1.1 โครงสร้างของเหล็กหล่อโครเมียมสูง

จากการศึกษาโครงสร้างยูเทกติก (Eutectic) ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงตั้งแต่ร้อยละ 10 – 40 โดยน้ำหนัก และส่วนผสมของเหล็กที่เป็นไฮโปยูเทกติก (Hypoeutectic), ยูเทกติก และ ไฮเปอร์ยูเทกติก (Hypereutectic) ของ Yasuhiro Matsubara และคณะ (1996) พบว่าโครเมียมคาร์ไบด์ที่เป็นชนิดปฐมภูมิ (Primary) และยูเทกติกจะอยู่ในรูปของ $(Fe, Cr)_7C_3$ เป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นในเหล็กที่มีโครเมียมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะพบอยู่ในรูปของ $(Fe, Cr)_3C$ สำหรับโครเมียมคาร์ไบด์ชนิดปฐมภูมิจะมีลักษณะเป็นแท่งยาว (Rod Like) และคาร์ไบด์ชนิดยูเทกติก มีลักษณะเป็นแท่งเช่นเดียวกัน จะมีขนาดเล็กละเอียด (Fine Rod-Like) อยู่รอบๆ คาร์ไบด์ปฐมภูมิ และอยู่เป็นกลุ่ม (Colony) ยิ่งเหล็กมีปริมาณโครเมียมสูงๆ ลักษณะของยูเทกติกคาร์ไบด์จะยิ่งมีความละเอียดเพิ่มขึ้น ถ้าการกระจายตัวของโครเมียมคาร์ไบด์ทั้งชนิดปฐมภูมิ และยูเทกติกมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ จะทำให้ความต้านทานต่อการสึกหรอของเหล็กหล่อโครเมียมสูงขึ้น

ในส่วนของโครงสร้างพื้น (Matrix) จะต้องมีความแข็งสูง ซึ่งควรที่จะเป็นโครงสร้างของ มาร์เทนไซต์ หรืออาจเป็นออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained Austenite) ถ้าชิ้นงานหล่อมีความหนาหลายๆ การทำให้เหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อมีโครงสร้างพื้นเป็นมาร์เทนไซต์ หรือออสเทนไนต์จะเป็นไปได้ยาก เพราะการเย็นตัวจะช้า ทำให้โอกาสที่ได้โครงสร้างพื้นเป็นเพิร์ลไลต์มีมาก แม้จะเพิ่มปริมาณของโครเมียมให้สูงขึ้น (มนัส, 2543) (John และ บัญชา, 2542)

ในกรณีที่ชิ้นงานมีความหนาหลายๆ จะสามารถทำให้เหล็กหล่อโครเมียมสูงมีโครงสร้างพื้นเป็นมาร์เทนไซต์ หรือออสเทนไนต์ ได้สองทาง คือโดยการใช้ธาตุผสม และกรรมวิธีทางความร้อน โครงสร้างพื้นของเหล็กหล่อโครเมียมสูงควรจะเป็นแบบมาร์เทนซิติก (Martensitic Matrix) เนื่องจากโครงสร้างพื้นแบบนี้จะมีความต้านทานการขัดถู (Abrasive Resistance) สูงสุด แต่ในงานบาง

ประเภทอาจใช้โครงสร้างพื้นแบบออสเทนนิติก (Austenitic Matrix) ได้ เนื่องจากเฟสของออสเทนไนต์จะมีความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแรงกระทำ (Pearce, 1982 และ Pearce, 1984)

2.1.2 คาร์ไบต์ในเหล็กหล่อโครเมียมสูง

จากการศึกษาของ Bungardt และคณะ ปรากฏโครเมียมคาร์ไบด์อยู่ 4 ชนิด ได้แก่

2.1.2.1 $(Fe, Cr)_3C$

2.1.2.2 $(Fe, Cr)_7C_3$

2.1.2.3 $(Fe, Cr)_{23}C_6$

2.1.2.4 $(Fe, Cr)_3C_2$

ตารางที่ 2.3 ชนิดของโครเมียมคาร์ไบด์ และความแข็ง

ชนิดของโครเมียมคาร์ไบด์ และความแข็ง				
Type	Crystalline System	Lattice Constance	Specific Gravity	Hardness (HV)
$(Fe, Cr)_3C$	Rhombic	a = 4.52, b = 5.09, c = 6.74	7.67	1000
$(Fe, Cr)_7C_3$	Hexagonal	a = 6.88, b = 4.54	-	-
	Rhombic	a = 4.54, b = 6.88, c = 11.94	6.92	1400
	Rhombohedral	a = 13.98, b = 4.52	-	-
$(Fe, Cr)_{23}C_6$	F.C.C	a = 10.64	6.97	-
$(Fe, Cr)_3C_2$	Rhombic	a = 2.82, b = 5.52, c = 11.46	6.68	-

*หมายเหตุ (Fe, Cr) สามารถเขียนแทนได้ด้วย M

ที่มา: มนัส (2543)

การเกิดโครเมียมคาร์ไบด์มักขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอน และโครเมียม แต่ในเอกสารบางฉบับจะกล่าวถึงโครเมียมคาร์ไบด์เพียงแค่ 3 ชนิด ซึ่งจะไม่กล่าวถึงชนิดที่ 4 และในส่วนของชนิดที่ 3 ($M_{23}C_6$) จะมีสูตรทางเคมีที่แตกต่างกันไปเป็น M_4C โครเมียมคาร์ไบด์ทุกชนิดจะมีความแข็งอยู่ในเกณฑ์ที่สูงกว่ามาร์เทนไซต์ คือความแข็งประมาณ 1000-1800 HV₅₀ แม้ว่าความแข็งของโครเมียมคาร์ไบด์จะสูงมากก็จริง แต่สมบัติความต้านทานการสึกหรอของเหล็กจะมีมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับโครงสร้างพื้น ถ้าโครงสร้างพื้นไม่มีความแข็งสูงพอที่จะต้านทานการสึกหรอจะทำให้โครเมียมคาร์ไบด์

ที่ถูกห่อหุ้มหลุดได้ง่ายในขณะที่ใช้งาน ทำให้การสึกหรอของเหล็กจะอยู่ในอัตราสูง ดังนั้นการศึกษาเหล็กหล่อโครเมียมสูงจึงต้องพิจารณาร่วมไปกับโครงสร้างพื้น และรวมไปถึงกรรมวิธีทางความร้อนที่ทำให้ได้โครงสร้างพื้นที่มีความแข็งสูง และต้านทานการสึกหรอที่สูงด้วย (มนัส, 2543)

2.1.3 ยูเทกติกคาร์ไบด์

ชนิด และรูปร่างของยูเทกติกคาร์ไบด์ในเหล็กหล่อโครเมียมสูงจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี และอัตราการเย็นตัว จากการศึกษาของ Powell และ Laird (1992) พบว่าการเพิ่มปริมาณโครเมียม และคาร์บอนจะทำให้ยูเทกติกคาร์ไบด์ M_3C ซึ่งมีลักษณะที่ต่อเนื่องเปลี่ยนเป็นชนิด M_7C_3 ที่ไม่ต่อเนื่อง เป็นผลให้ความเหนียวสูงขึ้น

การที่จะได้โครงสร้างพื้น และคาร์ไบด์เป็นแบบใดนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอน และโครเมียมเป็นสำคัญ ดังนี้

2.1.3.1 กรณีที่มีโครเมียมอยู่ต่ำกว่าร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ยูเทกติกคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นเป็น M_3C และมีความต่อเนื่อง

2.1.3.2 กรณีที่มีโครเมียมอยู่ในช่วงร้อยละ 8-12 โดยน้ำหนัก ยูเทกติกคาร์ไบด์ M_3C จะมีความต่อเนื่องน้อยลง และมียูเทกติกคาร์ไบด์ M_7C_3 เริ่มเกิดขึ้นปนกับ M_3C ในลักษณะ M_3C ล้อมรอบ M_7C_3

2.1.3.3 กรณีที่มีโครเมียมมากกว่าร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก จะเกิดยูเทกติกคาร์ไบด์ M_7C_3 หรือยูเทกติกคาร์ไบด์ที่มีลักษณะเป็นเส้น ทำให้ลักษณะที่ต่อเนื่องนั้นลดน้อยลง และมีความแข็ง 1600 HV ในระหว่างการแข็งตัวของเหล็กหล่อชนิดนี้ ออสเทนไนต์อาจไม่เปลี่ยนแปลง หรือออสเทนไนต์บางส่วน หรือทั้งหมดอาจเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ หรือเฟอร์ไรต์ และโครเมียมคาร์ไบด์ที่ละเอียด (โครเมียมคาร์ไบด์ที่เกิดจากปฏิกิริยายูเทกตอยด์ได้โครงสร้างเฟิร์ลไลต์ ที่มีเฟอร์ไรต์ และซีเมนไทต์) ทั้งนี้โครงสร้างที่ได้จะขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว และส่วนผสม รวมทั้งขนาดของชิ้นงานต้องมีความหนาไม่มากเกินไป ซึ่งอาจทำให้ได้โครงสร้างออสเทนไนต์ตกค้าง (Pearce, 1999) (Durman and Elwell, 1985)

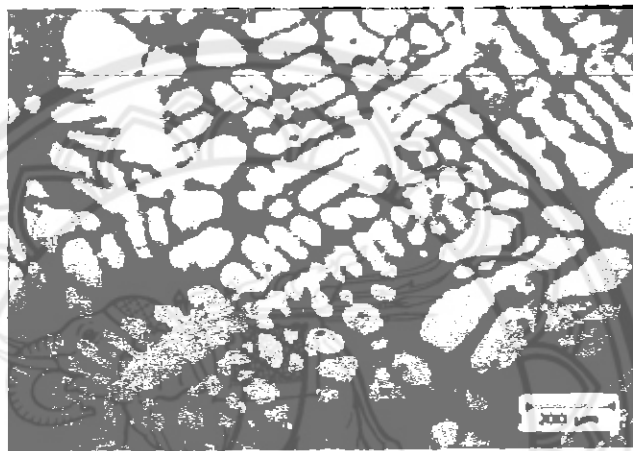
2.1.4 คาร์ไบด์ทุติยภูมิ

เหล็กหล่อโครเมียมสูงที่มีโครงสร้างเป็นแบบออสเทนไนต์มีข้อจำกัด คือมีความต้านทานการสึกหรอต่ำ ซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติโดยการอบตีสเตปโลเซชัน ทำให้เกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิตกตะกอนในโครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ ซึ่งทำให้เหล็กหล่อโครเมียมสูงที่มีโครงสร้างเป็นแบบออสเทนไนต์มีความต้านทานการสึกหรอที่สูงขึ้น ชนิดของคาร์ไบด์ทุติยภูมิขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี และอุณหภูมิในการอบตีสเตปโลเซชัน ในเหล็กหล่อที่มีโครเมียมร้อยละ 25-30 โดยน้ำหนัก จะมีคาร์ไบด์ทุติยภูมิเป็นชนิด $M_{23}C_6$ ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งขนาดเล็ก และต่อเชื่อมกัน ส่วนเหล็กหล่อที่มีโครเมียมร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก จะมีคาร์ไบด์ทุติยภูมิเป็นชนิด M_6C และ M_7C_3 ที่มีลักษณะเป็น

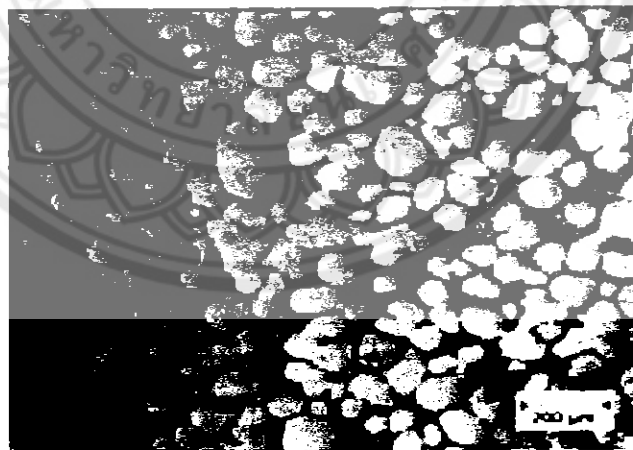
แห่ง ส่วนเหล็กหล่อที่มีโครเมียมต่ำจะมีคาร์ไบด์หุติยภูมิเป็นชนิด M_3C ที่มีรูปร่างเป็นแผ่น หรือเข็ม (Collins, 1988 และ Wiengmoon, 2005)

2.2 กระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็ง

กระบวนการหล่อโลหะแบบดั้งเดิม ทำให้มีโครงสร้างเกรนที่เป็นเดนไดรต์ (Dendrite) แสดงดังรูปที่ 2.1 ก) ซึ่งต่างกับการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งที่ทำให้มีโครงสร้างเกรนที่ไม่เป็นเดนไดรต์โดยจะทำให้โลหะมีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Globular Structure) แสดงดังรูปที่ 2.1 ข)



ก)



ข)

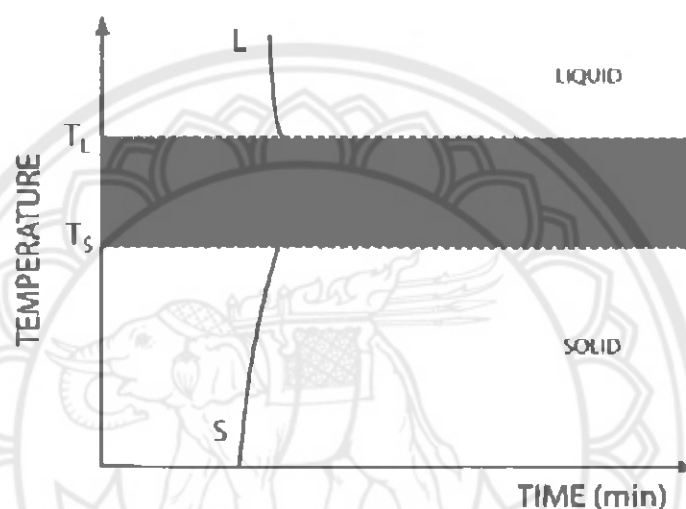
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด A356

ก) ขึ้นรูปโดยวิธีหล่อแบบดั้งเดิม

ข) ขึ้นรูปโดยวิธีหล่อแบบกึ่งแข็ง

ที่มา: รอมฎอน และคณะ (2552)

กระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็ง เป็นเทคโนโลยีสำหรับผลิตชิ้นส่วนทางวิศวกรรมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดใกล้เคียงกับโครงร่างสุดท้าย (Near Net Shape) โดยในการผลิตโลหะผสมนั้นจะผลิตอยู่ในช่วงของอุณหภูมิระหว่างเฟสของเหลว และเฟสของแข็ง แสดงดังรูปที่ 2.2 เพื่อยับยั้งการเกิดโครงสร้างเดนไดรต์ โดยจะใช้พฤติกรรมการไหลเป็นตัวกำหนดโครงสร้างทางจุลภาค ซึ่งสมบัติทางด้านการไหลตัวของน้ำโลหะในกระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็งนี้ จะส่งผลให้รูปร่างชิ้นงานที่มีขนาดใกล้เคียงโครงร่างสุดท้าย และสมบัติทางกลที่ดีขึ้น เนื่องจากโครงสร้างทางจุลภาคที่ได้มีความกลม (Poolthong, 2004)



รูปที่ 2.2 ช่วงของอุณหภูมิกึ่งแข็ง เพื่อใช้ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็ง

ที่มา: Figueredo (2001)

สมบัติของโลหะกึ่งแข็งมีหลายประการ เช่น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าโลหะเหลว โลหะเริ่มแข็งตัวบางส่วนแล้วขณะเทใส่แม่พิมพ์ มีความเค้นขณะไหลต่ำกว่าโลหะที่แข็งตัวแล้ว ทำให้ไม่ต้องใช้แรงในการขึ้นรูปมาก สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายในกระบวนการผลิต เช่น ลดการเกิดของเสียจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในขั้นตอนการหล่อโลหะลงในเบ้า และลดการเกิดโพรงหดตัว อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ด้วย

2.2.1 ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็ง

กระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็งมีข้อดี และข้อเสียของกระบวนการขึ้นรูปดังกล่าวดังต่อไปนี้

2.2.1.1 ข้อดี

ก. ชิ้นงานมีขนาดใกล้เคียงกับโครงร่างสุดท้าย

ข. โครงสร้างทางจุลภาคมีความกลม และละเอียด โดยโครงสร้างทางจุลภาคที่มีความกลมนี้มีผลทางด้านการปรับปรุงสมบัติทางกล ความแข็ง ความแข็งแรง และการยึดตัว

ค. ลดความเสียหายของแม่พิมพ์อันเนื่องมาจากความร้อน อีกทั้งยังเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์

ง. ลดค่าความเผื่อ (Tolerance) ของแม่พิมพ์ และชิ้นส่วน

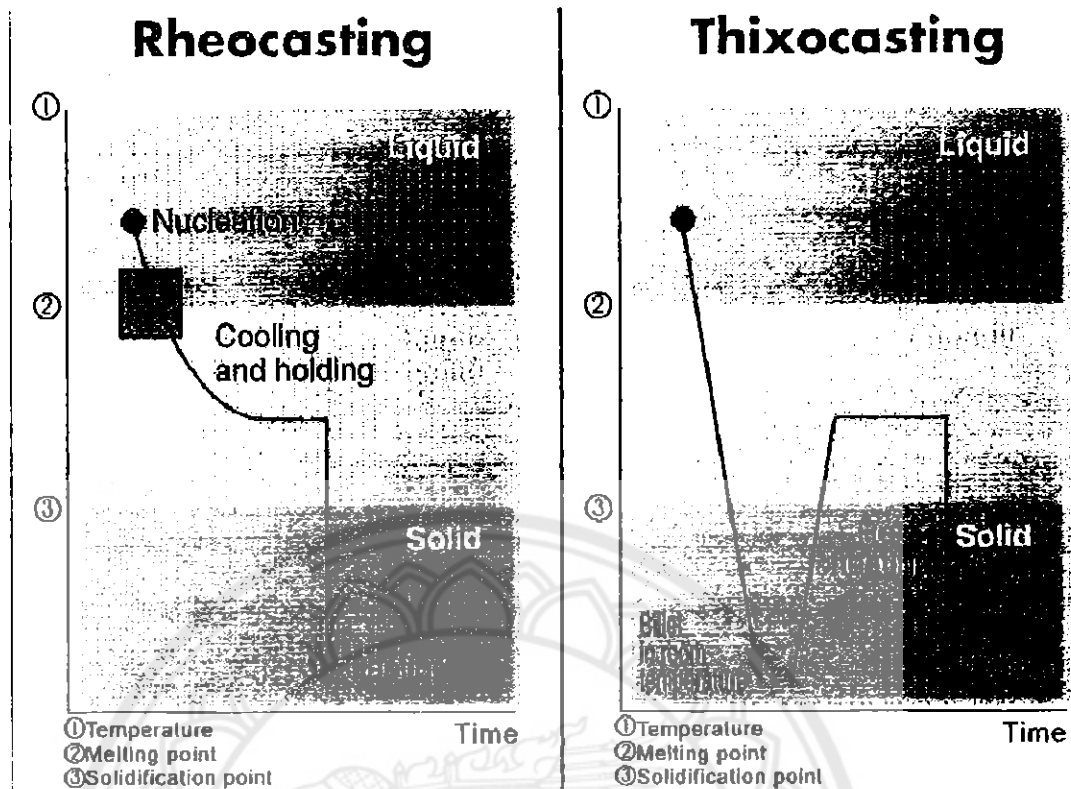
จ. ลดพลังงานในการขึ้นรูปชิ้นงาน

2.2.1.2 ข้อเสีย

ก. ยากที่จะกำจัดรูพรุนภายในชิ้นงานขณะทำการหลอม เนื่องจากน้ำโลหะมีความหนืดสูง

ข. โครงสร้างไม่เท่ากัน (Inhomogeneity) ทั่วทั้งชิ้นงาน

กระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็งแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือกระบวนการ Rheocasting แสดงดังรูปที่ 2.3 รูปทางด้านซ้าย และกระบวนการ Thixocasting แสดงดังรูปที่ 2.3 รูปทางด้านขวา ซึ่งทั้ง 2 วิธีการนี้แตกต่างกันที่กระบวนการ Thixocasting เป็นการผลิต Feedstock ที่มีโครงสร้างที่เป็นลักษณะเกรนกลมขึ้นมาก่อน จากนั้นจึงทำการให้ความร้อนอีกครั้ง (Reheating) กับ Feedstock และทำการขึ้นรูป ส่วนกระบวนการ Rheocasting เป็นการผลิตที่ปรับเปลี่ยนโครงสร้างให้มีลักษณะเกรนกลม โดยจะต้องสร้างอนุภาคของแข็งในปริมาณที่เหมาะสมในขณะที่โลหะกำลังแข็งตัว ซึ่งสามารถทำได้หลายๆ วิธี แต่ส่วนใหญ่แล้วก็จะมีการทำให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะ ในขณะที่โลหะกำลังแข็งตัว เพื่อให้มีการแตกตัวของเดนไดรต์ หรือมีการเกิดนิวเคลียสมากขึ้น นอกจากการใช้การไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะ ขณะที่โลหะกำลังแข็งตัวแล้ว การใส่สารที่เพิ่มการเกิดนิวเคลียส หรือการอบโลหะที่อุณหภูมิในช่วงกึ่งเหลวเป็นเวลานาน ก็ทำให้เกิดโลหะกึ่งแข็งได้เช่นกัน วิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่ากระบวนการ Thixocasting (Poolthong, 2004)



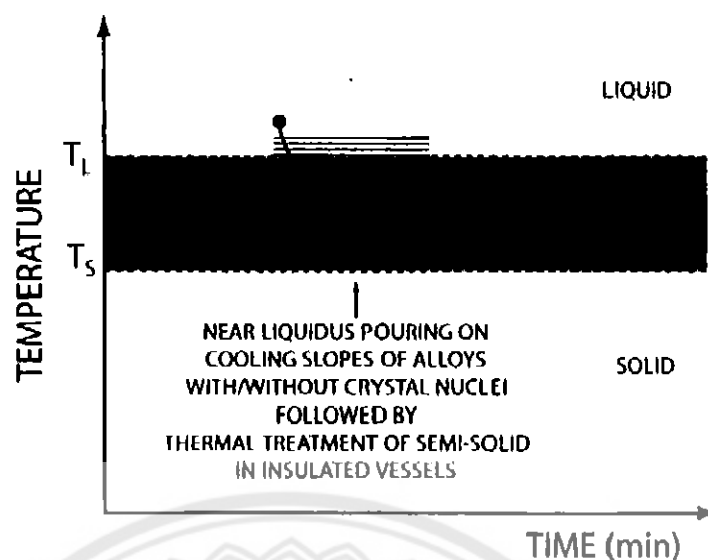
รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบกระบวนการ Rheocasting และ Thixocasting

ที่มา: Poolthong (2004)

กระบวนการ Rheocasting สามารถแบ่งวิธีการทำให้ได้โครงสร้างทางจุลภาคที่มีลักษณะเกรนกลมได้หลายวิธี เช่น การกวนด้วยแรงทางกล (Mechanical Stirring) การกวนด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Magneto Hydrodynamic Stirring Processes) การเทผ่านรางเทหล่อเย็น (Cooling Slope) การสร้างนิวเคลียสโดยใช้แท่งโลหะ (New Rheocasting Process) และกระบวนการอื่นๆ (Poolthong, 2004)

2.2.2 กระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็งแบบรางเทหล่อเย็น

การขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็งด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น เป็นกระบวนการที่อยู่ในส่วนหนึ่งของวิธี New Rheocasting Process ซึ่งได้รับการพัฒนาจากโรงงาน UBE ในประเทศญี่ปุ่น โดยเทน้ำโลหะผ่านรางเทที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลวเพียงเล็กน้อย โดยกระบวนการดังกล่าวจะแสดงช่วงอุณหภูมิกึ่งแข็งที่ใช้ในการเทผ่านรางเท แสดงดังรูปที่ 2.4



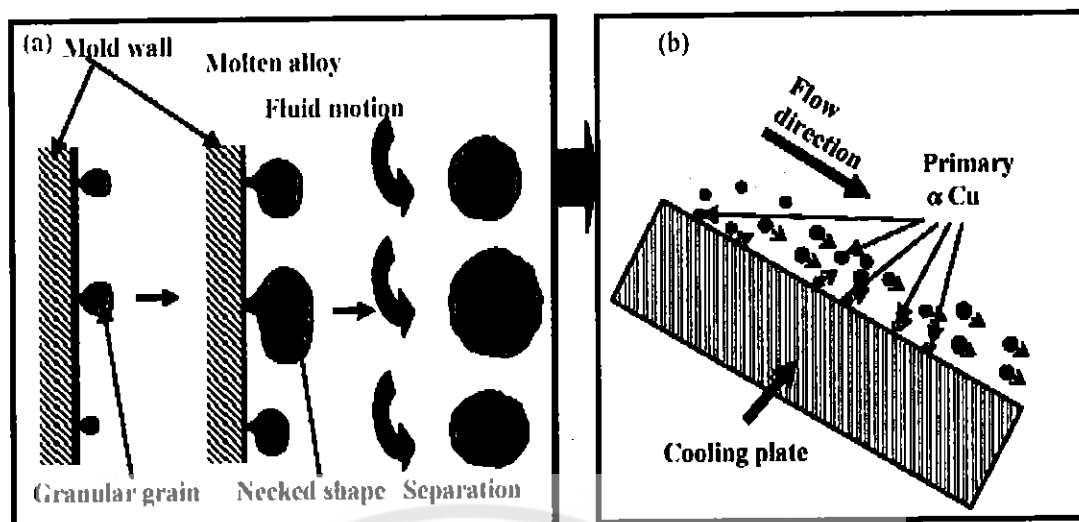
รูปที่ 2.4 ช่วงอุณหภูมิที่แข็งที่ใช้ในการเทผ่านรางเท

ที่มา: Poolthong (2004)

โดยวิธีการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็งด้วยการเทผ่านรางเทหล่อเย็นนี้ มีลำดับขั้นตอนในการพอร์มตัวเป็นโลหะกึ่งแข็ง ดังต่อไปนี้

2.2.2.1 โลหะหลอมเหลวที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวเล็กน้อย จากนั้นจึงเทผ่านรางเทหล่อเย็น

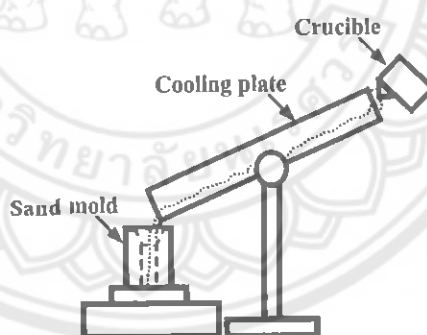
2.2.2.2 เมื่อโลหะหลอมเหลวถูกเทลงบนรางเท ที่บริเวณระหว่างผิวสัมผัสของรางเทกับน้ำโลหะหลอมเหลวความร้อนจะถูกดึงให้กับผนังของรางเท ทำให้เกิดนิวเคลียสขนาดเล็กในน้ำโลหะหลอมเหลวจำนวนมาก ส่วนของโลหะหลอมเหลวที่ไม่ติดกับผนังของรางเทจะมีอุณหภูมิสูง จึงเกิดการโตของเดนไดรต์ในทิศทางไปสู่ที่มีอุณหภูมิสูง แต่ด้วยการไหลของโลหะหลอมเหลว ทำให้เกิดความเค้นไปกระทำกับเดนไดรต์ จนทำให้เกิดการแตกหัก และการไหลของโลหะหลอมเหลวก็ยังจะทำให้เกิดการกลับไปหลอมเหลวอีกครั้ง พร้อมทั้งเกิดนิวเคลียสใหม่ควบคู่กันไป ซึ่งจะเกิดซ้ำไปซ้ำมาจึงทำให้เกิดการกระจายความร้อน และการกระจายของนิวเคลียส ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างที่ได้มีการกระจายตัวที่ดี และมีการเกิดเดนไดรต์ที่น้อยลงจากนั้นจึงลงสู่โมล แสดงดังรูปที่ 2.5 (Motegi and Tanabe, 2004)



รูปที่ 2.5 การแข็งตัวของน้ำโลหะเมื่อเทผ่านรางเทหล่อเย็น

ที่มา: Motegi and Tanabe (2004)

อย่างไรก็ตามการเทในขณะที่ยอดหลุมต่ำจะทำให้มีสัดส่วนของเฟสของแข็งสูง ทำให้การแข็งตัวของเฟสของแข็งรวดเร็วตามไปด้วย และทำให้เกิดโพรงอากาศเนื่องมาจากการที่ของแข็งแข็งตัวก่อนที่โลหะหลอมเหลวเข้าไปเติมในช่องว่าง ซึ่งจะเกิดจากน้ำโลหะมันตัวไปจับกับก๊าซ (Gas Entrapment) และจากการไหลกลิ้ง (Slurry Flow) บนรางเท (Motegi and Tanabe, 2004)



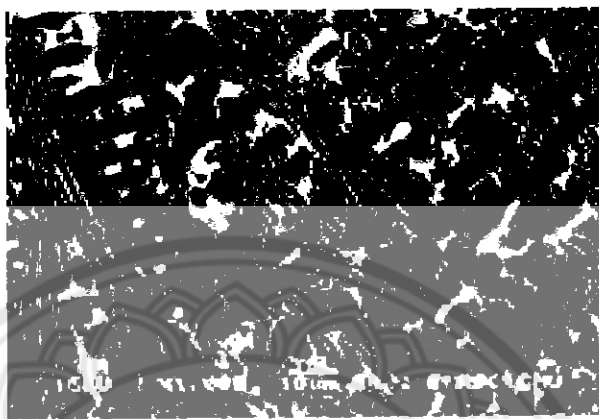
รูปที่ 2.6 กระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็งแบบรางเทหล่อเย็น

ที่มา: ญัฐพล และคณะ (2550)

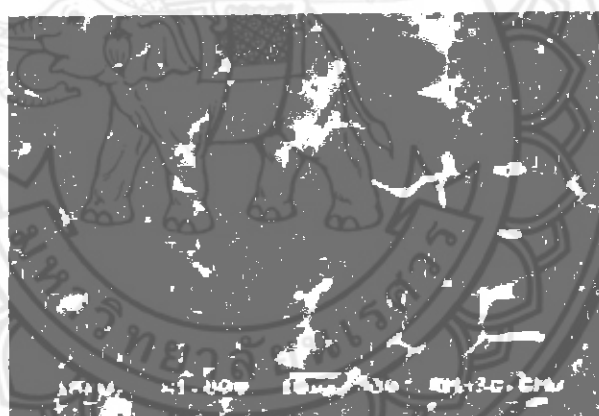
2.2.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการหล่อแบบดั้งเดิม และแบบกึ่งแข็ง โดยวิธีการหล่อแบบรางเทหล่อเย็น

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโครงสร้างเหล็กหล่อจากภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบออสเทนไนต์ปฐมภูมิ ในเหล็กหล่อแบบดั้งเดิมที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) ขณะที่การหล่อแบบกึ่งแข็งพบออสเทนไนต์ที่มีลักษณะทรงกลม แสดงดังรูปที่ 2.7 ก) และ ข) เกิดจากการที่น้ำโลหะแข็งตัวบางส่วน และได้รับแรงเฉือนจากการไหลขณะไหลผ่านรางเท

หล่อเย็น หลังจากการอบคืนตัว อบดีสเตบิไลเซชัน และอบดีสเตบิไลเซชันร่วมกับการอบคืนตัว เกิดการไพบัตถุติยภูมิภายในออสเทนไนต์ปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 2.7 ค), ง) และ จ) และสังเกตพบว่าโครงสร้างยูเทกติก ในกรณีหล่อแบบกึ่งแข็งนี้มีลักษณะเป็นกลุ่มโตออกจากศูนย์กลางตามแนวรัศมีดังที่วงกลม แสดงดังรูปที่ 2.7 จ) (ณัฐพล และคณะ, 2550)



ก)



ข)

รูปที่ 2.7 ภาพจาก SEM ของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก

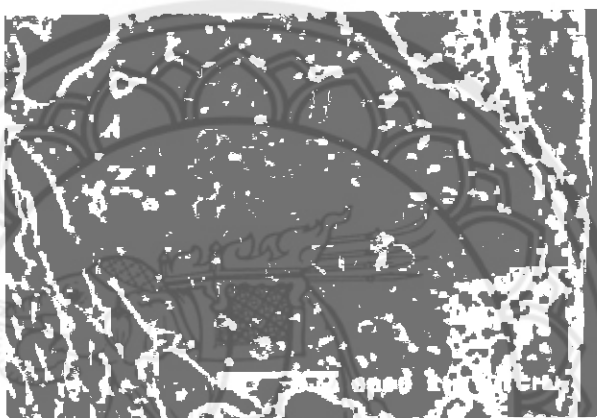
ก) สภาพหลังการหล่อแบบดั้งเดิม

ข) สภาพหลังการหล่อแบบกึ่งแข็ง

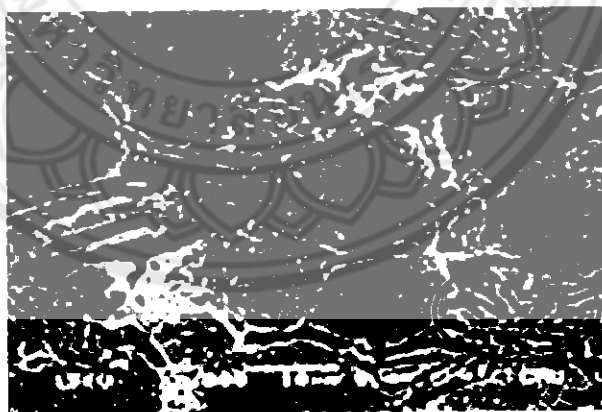
ที่มา: ณัฐพล และคณะ (2550)



ค)



ง)



จ)

รูปที่ 2.7 (ต่อ) ภาพจาก SEM ของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก

ค) หลังการอบคืนตัวของการหล่อแบบกึ่งแข็ง

ง) หลังการดีสเทบิไลเซชันของการหล่อแบบกึ่งแข็ง

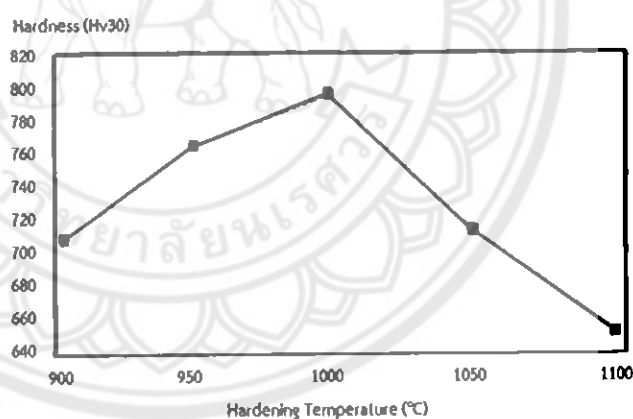
จ) หลังการดีสเทบิไลเซชันร่วมกับการอบคืนตัวของการหล่อแบบกึ่งแข็ง

ที่มา: ญัฐพล และคณะ (2550)

2.3 กรรมวิธีทางความร้อน

2.3.1 การอบตีสเทบิไลเซชัน (Destabilization)

เหล็กหล่อโครเมียมสูงจะอบที่อุณหภูมิ 950 - 1050 องศาเซลเซียส เพื่อให้คาร์บอนและโครเมียมที่ละลายอยู่ในออสเทนไนต์ (ในสภาพหล่อ) ในลักษณะเกินจุดอิ่มตัวที่ออสเทนไนต์จะยอมให้ละลายได้ การอบขึ้นนี้จะเรียกว่า ตีสเทบิไลเซชัน ทำให้คาร์บอน และโครเมียมแยกตัวออกมา รวมกันเป็นคาร์ไบด์ M_7C_3 เป็นการลดปริมาณคาร์บอนในออสเทนไนต์ทำให้ความสามารถในการชุบแข็งของออสเทนไนต์เพิ่มขึ้น กล่าวคือการลดปริมาณคาร์บอนในออสเทนไนต์ทำให้มีโอกาสเกิดเฟสเฟอไรต์น้อยลง มีโอกาสเกิดเฟสมาร์เทนไซต์มากขึ้น หลังจากการอบตีสเทบิไลเซชันความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น ผลของอุณหภูมิในกระบวนการอบตีสเทบิไลเซชันต่อความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงแสดงดังรูปที่ 2.8 เนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์หุติยภูมิในโครงสร้างมาร์เทนไซต์ โดยความแข็งมีค่าสูงสุดเมื่ออบตีสเทบิไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ชิ้นงานหล่ออาจได้รับการอบอ่อนก่อนการอบตีสเทบิไลเซชัน ซึ่งทำได้โดยการอบขึ้นงานที่อุณหภูมิ 740 - 780 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 - 8 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตา จนกระทั่งอุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส การอบอ่อนจะทำให้ได้โครงสร้างพื้นที่ย่อน เนื่องจากโครงสร้างประกอบด้วยเฟอไรต์เล็กติดคาร์ไบด์ และเฟอร์ไรต์ (มนัส, 2543) (John และ บัญชา, 2542)



รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิในการอบตีสเทบิไลเซชันต่อค่าความแข็งของเหล็กหล่อที่ผสมคาร์บอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โครเมียมร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และโมลิบดีนัมร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

ที่มา: John และ บัญชา (2542)

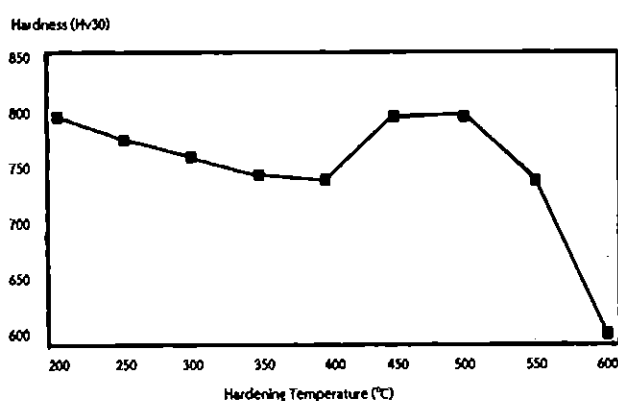
การเย็นตัวด้วยอากาศ (Air Quenching) ของงานอบจะต้องทำอย่างรวดเร็ว และทันทีจากระดับอุณหภูมิของการอบตีสเทบิไลเซชัน เพื่อป้องกันการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเฟอไรต์ ซึ่งอัตราเร็วในการเย็นตัวจากการอบชุบนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณโลหะผสมที่ใช้ ซึ่งจะต้องมีความสมดุลกัน

การเย็นตัวในอากาศสามารถเร่งให้เกิดเร็วขึ้นด้วยการใช้พัดลม และการพ่นละอองน้ำ แต่สิ่งที่สำคัญคือจะต้องเป็นการเย็นสม่ำเสมอทั่วกันทั้งชิ้นงาน และจากทุกทิศทางของงานหล่อเพื่อลดความเค้นตกค้าง และให้เกิดความเค้นน้อยที่สุด

การควบคุมส่วนผสมทางเคมีนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ชิ้นส่วนที่มีความหนา มีความสามารถในการชุบแข็งได้เพียงพอ อย่างไรก็ตาม การเติมธาตุผสมบางอย่างมากเกินไป (Over Alloying) เช่น โมลิบดีนัม, ทองแดง, แมงกานีส หรือ นิกเกิล จะทำให้ระยะเวลาในการอบตีสเตบิไลเซชันสูงขึ้น และทำให้ปริมาณออสเทนไนต์ตกค้างสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้สมรรถนะด้านความต้านทานการสึกหรอต่ำลง สำหรับการเติมธาตุผสมน้อยเกินไป (Under Alloying) อาจทำให้เกิดเฟิร์ลไลต์ ทั้งในชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบ หรือชิ้นงานหล่อที่ต้องการให้มีโครงสร้างพื้นแบบออสเทนไนติก (มนัส, 2543) (John และบัญชา, 2542)

2.3.2 การอบคืนตัว (Tempering)

หลังจากการอบตีสเตบิไลเซชันแล้วย่อมมีความเค้นภายใน ชิ้นงานจะถูกนำเข้าอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เพื่อควบคุมสมบัติความแข็งที่เกิดขึ้นในช่วงสุดท้ายก่อนที่จะนำชิ้นงานหล่อนั้นไปใช้งาน และลดความเค้นภายใน ลดระดับของการเกิดออสเทนไนต์ตกค้าง โดยจะมีการใช้การอบคืนตัวเพียงครั้งเดียว หรือสองครั้งเพื่อลดปริมาณออสเทนไนต์ตกค้างให้ต่ำกว่าร้อยละ 5-10 เพื่อหลีกเลี่ยงการหลุดล่อนของผิวชิ้นงานที่เกิดจากการเปลี่ยนเฟส ซึ่งอาจเกิดขึ้นในระหว่างการใช้งานที่ต้องรับแรงกระทำ จะทำให้ออสเทนไนต์ตกค้างที่ผิวของชิ้นงานเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ที่เกิดจากความเค้น ซึ่งในการเปลี่ยนเฟสนี้ ปริมาตรของผิวจะขยายตัวประมาณร้อยละ 4 ทำให้บริเวณดังกล่าวมีโอกาสที่จะเกิดการหลุดออกได้ง่าย ในช่วงการอบคืนตัว คาร์ไบด์ชนิดละเอียดจะมีการตกตะกอนภายในบริเวณของออสเทนไนต์ที่เหลืออยู่ ซึ่งตะกอนเหล่านี้สามารถที่จะเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ได้ในช่วงที่เหล็กหล่อโครเมียมสูงเย็นตัว ถ้าระดับของออสเทนไนต์ที่ตกค้างมีค่าสูง (ร้อยละ 30 ขึ้นไป) และอุณหภูมิที่ใช้ออบคืนตัวเพิ่มขึ้นสูงเกินไป อาจทำให้โครงสร้างออสเทนไนต์เกิดการเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างเนื้อผสมของเฟิร์ลไลต์ และเฟอร์ไรต์ พร้อมด้วยการตกตะกอนของ $M_{23}C_6$ ซึ่งจะทำให้ความแข็ง และความต้านทานการเสียดสีลดลง ผลของอุณหภูมิในกระบวนการอบคืนตัวต่อความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูง แสดงดังรูปที่ 2.9 ดังนั้นควรมีการควบคุมอย่างใกล้ชิดทั้งอุณหภูมิ และระยะเวลาซึ่งเป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่งในระหว่างการอบคืนตัว ระยะเวลาการอบคืนตัวโดยปกติ คือ 4 ชั่วโมง จะมีช่วงที่ให้ผลต่อการชุบแข็งดีที่สุด คือ 450 – 550 องศาเซลเซียส ถ้าระยะเวลาการอบคืนตัวนานเกินไปความแข็งจะลดลง เนื่องจากคาร์ไบด์ที่เกิดจะมีลักษณะหยาบ และเป็นรูปลูกบาศก์สมมาตร ซึ่งเมื่อคืนรูปจะกลายเป็นทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetragonal) แบบ Body Centered อยู่ในโครงสร้างพื้น (มนัส, 2543) (John และบัญชา, 2542)



รูปที่ 2.9 ผลของอุณหภูมิในการอบคืนตัวต่อค่าความแข็งของเหล็กหล่อที่ผสมคาร์บอน ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โครเมียมร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และโมลิบดีนัมร้อยละ 1.7 โดยน้ำหนัก

ที่มา: John และ บัญชา (2542)

2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเทคนิคเฉพาะทางที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ศึกษาโครงสร้าง และสมบัติบางประการของสสาร ค่าความชัดลึก (Spatial Resolution) สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แสง ทั้งนี้เป็นเพราะ SEM ใช้สมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้ SEM มีอำนาจแยกแยะได้ถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ ได้ ทำให้ภาพที่ได้มีความชัดลึกสูง นอกจากนี้ SEM ยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นๆ เช่น Energy-dispersive X-ray Spectrometry (EDXS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WED) เพื่อให้ข้อมูลในเชิงเคมีอีกด้วย และในโครงงานวิจัยนี้เครื่อง SEM จะติดตั้งอุปกรณ์ที่เรียกว่า EDXS เพื่อตรวจหาธาตุในตัวอย่างโดยใช้หลักการของ X-ray แสดงผลในรูปแบบของตัวเลข และกราฟ วิเคราะห์ปริมาณ และคุณภาพของโมเลกุลของธาตุ

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องที่ใช้ส่องดูวัตถุขนาดเล็กมากๆ ให้เห็นใหญ่ขึ้นได้กว่าเดิมถึงสองแสนเท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นประโยชน์มากในการศึกษาค้นคว้าทางการแพทย์ โลหะวิทยา และวิทยาศาสตร์ อื่นหลายสาขา (บัญญัติ และ ศุภกาญจน์, 2544)

2.4.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สามารถวิเคราะห์ได้ 2 ลักษณะ คือ

2.4.1.1 การดูลักษณะของพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งสามารถดูความแตกต่างของพื้นผิวโดยขึ้นอยู่กับลักษณะของ Detector ได้ โดยแบ่งเป็น

ก. ภาพที่ได้จากสัญญาณ Secondary Electron จะได้ภาพที่เป็นลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่มีความสูงต่ำ ขรุขระ ที่เกิดขึ้นจริงบนตัวอย่าง และสามารถวัดขนาดต่างๆ บนตัวอย่างนั้นได้

ข. ภาพที่ได้จากสัญญาณ Back Scattered Electron จะได้ภาพที่มีลักษณะเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ แต่ให้ความแตกต่างบนพื้นผิวของวัตถุนั้น ธาตุที่มีเลขอะตอมสูงกว่าจะมีเฟสที่สว่างกว่าธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า

2.4.1.2 การวิเคราะห์ธาตุสามารถใช้ข้อมูลได้เป็น 2 ลักษณะ คือ หาธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างว่ามีธาตุใดบ้าง โดยแสดงออกมาเป็นกราฟ และบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของธาตุนั้นๆ และสามารถบอกเป็นพื้นที่ว่าบริเวณใดมีธาตุใดอยู่บ้าง (บัญชา และศุภกาญจน์, 2544)

2.4.2 ลักษณะของตัวอย่าง และชนิดของ SEM

สำหรับ SEM แบบที่มีต้องการสภาพความเป็นสุญญากาศสูง การเตรียมตัวอย่างที่จะศึกษาต้องแห้ง ไม่มีความชื้น และไม่ปนเปื้อนสารจำพวกไฮโดรคาร์บอน (เช่น น้ำมัน) เพราะเมื่อชิ้นงานอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ความชื้น หรือสารไฮโดรคาร์บอนจะแตกตัวเป็นโมเลกุลเล็กๆ ขัดขวางเส้นทางของอิเล็กตรอนทำให้ภาพที่ได้ไม่ชัดเจนอีกทั้งโมเลกุลเหล่านี้อาจไปเกาะยังส่วนต่างๆ ของกล้อง เช่น ผิวของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เป็นเหตุให้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนมีอายุการใช้งานสั้นลง

2.4.2.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ก. การเตรียมตัวอย่างในแบบทั่วไป

ก.1 อยู่ในสถานะของแข็งทุกลักษณะ เช่น เป็นผง แผ่น หรือแท่ง ฯลฯ

ก.2 ถ้ามีขนาดใหญ่ต้องตัดส่วนที่จะดูให้เล็กอยู่ที่ประมาณ 1 ลูกบาศก์-

เซนติเมตร

ก.3 ต้องแห้งไม่มีความชื้น ไม่มีการระเหยของสารใดๆ และไม่มีการฟุ้ง

กระจายของตัวอย่าง

ก.4 ถ้าตัวอย่างมีการนำไฟฟ้าจะสามารถนำเข้าเครื่อง SEM ดูได้เลย

ก.5 ถ้าตัวอย่างไม่มีการนำไฟฟ้า หรือนำได้เพียงบางจุด จะต้องมีการ

นำไปเคลือบทอง

ข. การเตรียมตัวอย่างในแบบตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้า

ข.1 โดยทั่วไปจะเหมือนการเตรียมตัวอย่างแบบทั่วไป

ข.2 ต้องมีการเคลือบทองก็สามารถนำเข้า SEM ได้

ข.3 การใช้งานในระบบนี้จะใช้ไต่ยากกว่าแบบปกติ และเสียเวลา

มากกว่าแบบปกติดังนั้นจึงสามารถทำได้บางกรณีเท่านั้น

การเคลือบผิวหน้าชิ้นงานด้วยฟิล์มที่นำไฟฟ้าบางๆ (ประมาณ 100 อังสตรอม) ซึ่งวัสดุที่นิยมนำมาใช้เคลือบผิวได้แก่ ทอง ทองผสมแพลทินัม และคาร์บอน การเคลือบด้วยทอง หรือทองผสมแพลทินัมจะให้ภาพที่คมชัดกว่าการเคลือบด้วยคาร์บอน แต่จะทำให้ข้อมูลทางเคมีของเทคนิค EDXS บิดเบือนไปได้ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

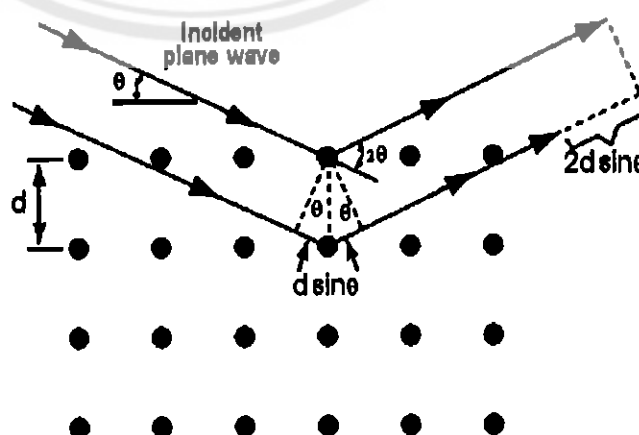
สำหรับตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าอาจไม่ต้องทำการเคลือบได้ โดยเลือกให้ความต่างศักย์น้อยๆ (ต่ำกว่า 3kV) ซึ่งภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมจะไม่เกิดการสะสมประจุที่ผิว (Charging) เนื่องจากปริมาณกระแสเข้าให้เท่ากับกระแสออก หรือเลี้ยงไปใช้ SEM แบบสุญญากาศต่ำแทน (บัญชา และ ศุภกาญจน์, 2544) (ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์, 2554)

2.5 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive Method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึก ของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ กัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุองค์ประกอบของสารตัวอย่าง

2.5.1 หลักการ และวิธีการวิเคราะห์

วัสดุที่เป็นผลึก คือวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d ซึ่งค่าระยะห่าง d จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับธรรมชาติของผลึก ในปี ค.ศ.1912 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่าเมื่อรังสีเอกซ์ ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ θ รังสีเอกซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อน θ เท่ากับมุมตกกระทบ แสดงดังรูปที่ 2.10



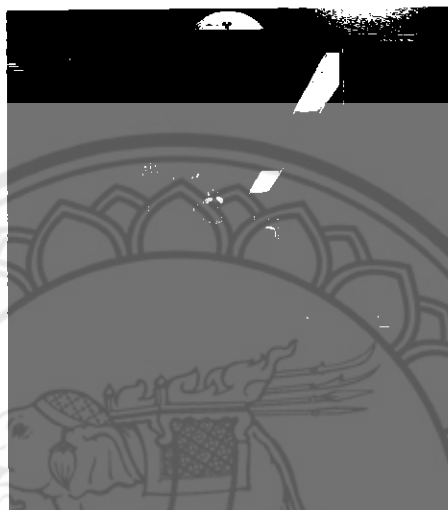
รูปที่ 2.10 Bragg 's Law

ที่มา: ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ (2554)

2.5.2 สมบัติเฉพาะของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer)

- 2.5.2.1 เพื่อศึกษา และวิเคราะห์วัสดุว่ามีสารประกอบชนิดใดบ้าง
- 2.5.2.2 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารผสมหลังทำปฏิกิริยา
- 2.5.2.3 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบ
- 2.5.2.4 สามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 1700 องศา-

เซลเซียส



รูปที่ 2.11 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์
ที่มา: ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ (2554)

2.5.3 การเตรียมตัวอย่าง สามารถทำได้ 3 วิธี ดังนี้

2.5.3.1 การเตรียมตัวอย่างแบบมาตรฐาน กรณีที่มีตัวอย่างในปริมาณมาก

- ก. นำแผ่นจับยึดชิ้นงานติดกับแผ่นแก้วด้านใดด้านหนึ่งด้วยเทปใส
- ข. บดผงตัวอย่างให้มีความละเอียดมากที่สุดผ่านตะแกรง 45 ไมโครเมตร

หรือเท่าที่บดได้ โรยลงช่องหลุมใส่ชิ้นงานใช้แผ่นแก้วกดตัวอย่างเบาๆ พอประมาณ แล้วปาดตัวอย่างที่เกินทิ้ง นำฝาหลังปิดเข้ากับที่จับยึดชิ้นงาน

ค. แกะเทปใสที่ยึดแผ่นแก้วออกแล้วนำแผ่นจับยึดชิ้นงานเสียบเข้าแกนกับยึดตัวอย่างที่เครื่อง ระวังอย่าให้นิ้วโดนบริเวณที่มีตัวอย่าง

2.5.3.2 การเตรียมตัวอย่างที่มีปริมาณน้อย

- ก. ทาจารบี (Super Grease) ลงบนแผ่นสไลด์บางๆ
- ข. โรยผงตัวอย่างลงบนสไลด์ แล้วใช้นิ้วมือเคาะด้านข้างเพื่อให้ตัวอย่างกระจายทั่วบริเวณที่ทาจารบี

ก. ใช้แผ่นสไลด์ตัดแนวตัวอย่างให้เป็นเส้นตรง แล้วนำแผ่นตัวอย่างเสียบเข้ากับแกนยึดตัวอย่างที่เครื่อง

ค. ใช้แผ่นสไลด์ตัดแนวตัวอย่างให้เป็นเส้นตรง แล้วนำแผ่นตัวอย่างเสียบเข้ากับแกนยึดตัวอย่างที่เครื่อง

2.5.3.3 การเตรียมตัวอย่างที่เป็นชิ้น

ก. ตัดตัวอย่างใหม่ขนาดความหนา 2.00 มิลลิเมตร

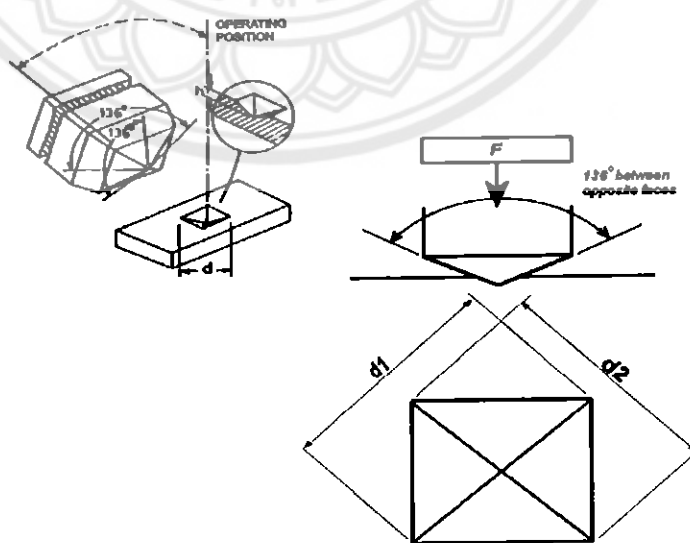
ข. ใช้ด้านหนาที่เรียบที่สุดเสียบเข้ากับแกนยึดตัวอย่างได้เลย (ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์, 2554)

2.6 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็ง เป็นการวัดความต้านทานต่อรอยกด รอยขีดขีด หรือการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation) ของวัสดุ ซึ่งความแข็งของวัสดุขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของโครงสร้างพันธะมีวิธีการทดสอบหลายวิธีที่นิยมเช่น บรินเนลล์ (Brinell Hardness Test) ร็อกเวลล์ (Rockwell Hardness Test) วิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test) และนูป (Knoop Hardness Tester) เป็นต้น วิธีการทั้งหลายนี้นิยมใช้กันทั่วไปในการทดสอบความแข็งทางวิศวกรรม และแต่ละวิธีมีกฎพื้นฐานเดียวกัน คือความแข็งวัดจากรอยกดที่เกิดขึ้นด้วยการให้น้ำหนักกดลงบนหัวกดที่ผิวของวัสดุในช่วงเวลาจำกัดโดยในการทดสอบครั้งนี้จะใช้วิธีการทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vickers Macrohardness Test)

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers Macrohardness)

การทดสอบความแข็งหัวกดเพชรปลายเป็นรูปพีระามิดมุมยอด 136° ฐานสี่เหลี่ยมกดลงบนผิววัสดุที่เรียบ แสดงดังรูปที่ 2.12 โดยใช้ น้ำหนักกดอยู่ในช่วง 1-120 kg ค่าวิกเกอร์ส แทนด้วยสัญลักษณ์ HV มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อพื้นที่รอยกด การหาค่าความแข็งวัดเส้นทแยงมุมของรอยกดแล้วนำมาแทนในสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.12 หัวกดเพชรปลายเป็นรูปปิรามิดมุมยอด 136° ฐานสี่เหลี่ยม และรอยกด
ที่มา: วีระชัย (2550)

$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \quad (2.1)$$

F = ภาระ หน่วย กิโลกรัมแรง

d = ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมทั้งสอง

HV = ความแข็งวิกเกอร์ส

เมื่อหาค่าเฉลี่ยเส้นทแยงมุมได้ ค่าความแข็งวิกเกอร์ส คำนวณได้จากสูตร แต่จะสะดวกมากขึ้นเมื่อใช้ตาราง ความแข็งวิกเกอร์ส ควรจะรายงานดังนี้ 800 HV₁₀ หมายความว่า ความแข็งวิกเกอร์ส 800 โดยใช้ภาระ 10 กิโลกรัมแรง การให้ภาระที่แตกต่างกันจะให้ค่าความแข็งที่เท่ากันบนวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งดีกว่าการเปลี่ยนสเกลด้วยวิธีทดสอบความแข็งแบบอื่น ข้อได้เปรียบของการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส คือการอ่านค่าที่แม่นยำสูง และหัวกดแบบเดียวสามารถใช้ได้กับทุกประเภทของวัสดุ และการชุบแข็งผิว แม้ว่าความแม่นยำ และการปรับเปลี่ยนได้สะดวกสำหรับการทดสอบวัสดุที่แข็งมาก และอ่อนมากภายใต้ภาระที่เปลี่ยนแปลงได้ เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์สมีราคาแพงกว่าเครื่องทดสอบความแข็งบริเนลล์ และร็อกเวลล์ (วีระชัย, 2550)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Aumporn et al.,(2009) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่มีโครเมียมร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก คาร์บอนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และโมลิบดีนัมร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการอบดิสเทเบิลไซเซชัน ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ พบว่าเกิดออสเทนไนต์ปฐมภูมิ คาร์ไบต์ (Fe, Cr)₇C₃ และมาร์เทนไซต์ จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการอบดิสเทเบิลไซเซชันที่อุณหภูมิ 1000 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ไปผ่านการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 300, 400, 450, 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศแล้วศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค พบว่าเกิดออสเทนไนต์ตกค้าง และจากการวัดสัดส่วนเชิงปริมาตรของคาร์ไบต์ทุติยภูมิ เคนไดรท์ และยูเทคติก พบว่ามีสัดส่วนโดยปริมาตรที่สูงขึ้น แล้วเมื่ออบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ ระหว่าง 500 ถึง 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศทำให้ชิ้นงานมีความแข็งประมาณ 500 - 700 HV₃₀ เมื่อทำการทดสอบการสึกหรอแบบ Pin On Disc พบว่าชิ้นงานที่ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการต้านทานการสึกหรอดีที่สุด คือชิ้นงานที่มีความแข็ง 550 HV₃₀

Toshio Haga and P.Kapranos (2002) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่แข็งของอะลูมิเนียมโดยวิธีการหล่อโลหะแบบรีโอ วัสดุที่ใช้ในการวิจัย คืออะลูมิเนียมผสม เกรด A356 วิธีที่ใช้ในการทดลอง แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ วิธีเทน้ำโลหะผ่านรางเทหล่อเย็น และเทน้ำโลหะโดยตรงลงแบบหล่อโดยเทที่อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทต่ำ การทดลองนี้ทำการเทน้ำโลหะที่อุณหภูมิ 620 และ 650

องศาเซลเซียส มุมเอียงของรางเทหล่อเย็นที่ 60 องศา กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ระยะทางที่ใช้ในการเท 250 มิลลิเมตร และเคลือบรางเทด้วยโบรอนไนไตรด์ (Boron Nitride) เทลงในแบบหล่อโดยแบบหล่อมืออุณหภูมิ 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส นำชิ้นงานที่ได้ไปผ่านกระบวนการอบชุบความร้อน T6 ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานมีลักษณะเป็นเกรนกลม มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุได้เป็นอย่างดี โดยเทน้ำที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส และแม่พิมพ์ล่างมีอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาด้านสมบัติทางกลที่สภาวะดังกล่าว พบว่าชิ้นส่วนที่ทำการหล่อโดยวิธีหล่อลงบนรางเทหล่อเย็นมีสมบัติทางกลดีกว่าการเทที่อุณหภูมิชุบเปอร์ฮีตต่ำ โดยชิ้นงานที่หล่อบนรางเทหล่อเย็นให้ความเค้นแรงดึง 310 MPa, ความเค้นจุดคราก 241 MPa และร้อยละการยืดตัวเท่ากับ 18 ส่วนชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีชุบเปอร์ฮีตต่ำให้ความเค้นแรงดึง 290 MPa, ความเค้นจุดคราก 237 MPa และร้อยละการยืดตัวเท่ากับ 12

อัมพร และคณะ (2552) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการอบชุบทางความร้อนต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมโดยการหล่อแบบดั้งเดิมและแบบกึ่งแข็ง จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานในสภาพหล่อ พบว่าชิ้นงานที่เตรียมโดยการหล่อแบบดั้งเดิม และแบบกึ่งแข็งประกอบด้วยโครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ปฐมภูมิล้อมรอบด้วยยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ แต่การขึ้นรูปแบบดั้งเดิมให้โครงสร้างของออสเทนไนต์ที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ ส่วนการขึ้นรูปแบบกึ่งแข็งให้โครงสร้างที่มีลักษณะเกรนกลม เมื่อศึกษาเฟสที่เกิดขึ้น พบว่ามีเฟสออสเทนไนต์ คาร์ไบด์ชนิด $(Fe, Cr)_7C_3$ และพบเฟสมาร์เทนไซต์เกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงของออสเทนไนต์ในระหว่างการเย็นตัวในอากาศ การทดสอบความแข็งมหภาคแบบวิกเกอร์ส พบว่าชิ้นงานทั้ง 2 มีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน โดยชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมมีความแข็ง 500 HV₃₀ ส่วนชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบกึ่งแข็งมีความแข็ง 488 HV₃₀ เมื่อทดสอบความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ส ภายในเดนไดรต์ที่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมมีความแข็ง 422 HV_{0.1} ส่วนชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบกึ่งแข็งมีความแข็ง 361 HV_{0.1} เมื่อนำไปอบติสเทปิลไฮเซชันที่อุณหภูมิ 900, 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ เมื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปทั้ง 2 วิธี เกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิภายในโครงสร้างพื้นของมาร์เทนไซต์ที่เปลี่ยนมาจากออสเทนไนต์ปฐมภูมิ ซึ่งการอบติสเทปิลไฮเซชันที่อุณหภูมิต่ำ หรือระยะเวลาสั้นเกินไป ทำให้คาร์ไบด์ทุติยภูมิมีขนาดเล็ก ถ้าอุณหภูมิสูง หรือระยะเวลานานเกินไป ทำให้คาร์ไบด์ทุติยภูมิมีขนาดใหญ่ เมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟส พบว่าเกิดเฟสออสเทนไนต์ตกค้าง เฟสมาร์เทนไซต์ และคาร์ไบด์ชนิด $(Fe, Cr)_7C_3$ จากการทดสอบความแข็งมหภาคแบบวิกเกอร์ส หลังการอบติสเทปิลไฮเซชัน พบว่าค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้น โดยชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบกึ่งแข็งมีค่าความแข็งสูงสุดประมาณ 770 HV₃₀ ส่วนแบบดั้งเดิมมีความแข็งเป็น 756 HV₃₀ เมื่ออบติสเทปิลไฮเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

15904849

ป/ร.
๗ 542 ๗ 2553

เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เมื่อทดสอบความแข็ง ภายในเดนไดรท์ความแข็งที่ดีที่สุดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธี
กึ่งแข็งมีความแข็ง $915 \text{ HV}_{0.1}$ ซึ่งสูงกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบดั้งเดิมที่มีความแข็ง $860 \text{ HV}_{0.1}$ เมื่ออบ-
ดิสเทปิลเซชันที่อุณหภูมิ 1000°C เวลา 4 ชั่วโมง

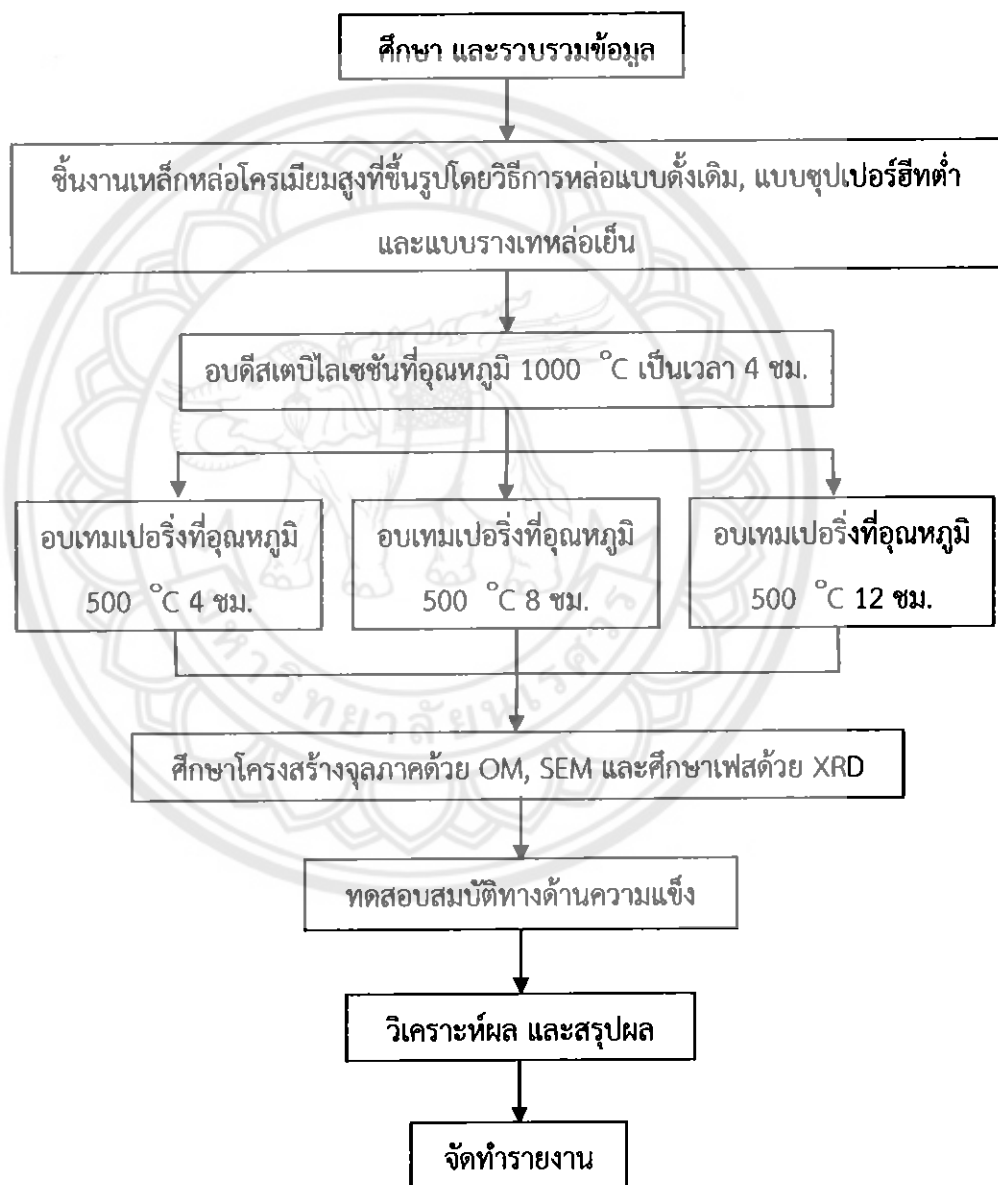


บทที่ 3

วิธีการดำเนินโครงการ

3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงการ

ในการศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางด้านความแข็งแรงของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ขั้นตอนการดำเนินงาน แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 วัสดุ และอุปกรณ์

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

เหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบชุบเปอร์ไธต์ดำ และแบบรางเทหล่อเย็น

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)									
Cr	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cu	Mo	Fe
25.56	2.44	0.735	0.911	0.029	0.041	0.120	0.080	0.02	balance

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.2.2.1 อุปกรณ์ในการเตรียมชิ้นงาน

- ก. เครื่องตัดชิ้นงาน
- ข. เตาอบอุณหภูมิสูง
- ค. เครื่องขัดโลหะ
- ง. กระดาษทรายเบอร์ 180, 320, 600 และ 1000
- จ. ผ้าสักหลาด และผงขัดเพชรขนาด 6, 3 และ 1 ไมครอน

3.2.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

- ก. กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope : OM)
- ข. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)
- ค. เครื่อง X-ray Diffractometer : XRD
- ง. เครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers Macrohardness Testing)

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

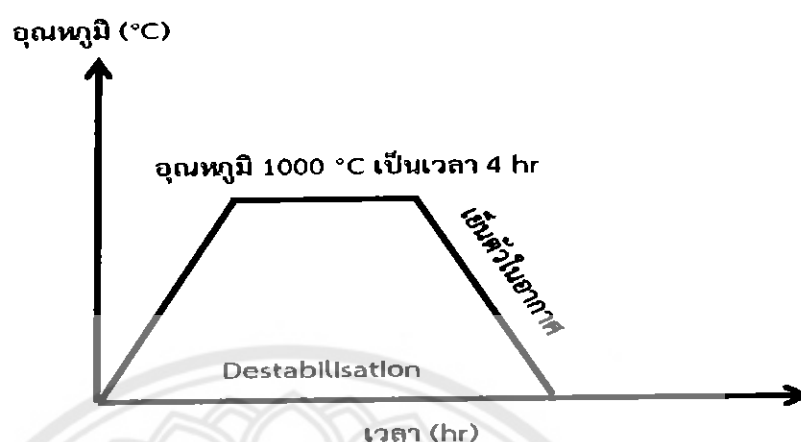
3.3.1 ศึกษา และรวบรวมข้อมูล

ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นกับปั๊มหอยโข่งที่ผลิตจากเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ใช้ในอุตสาหกรรมการถลุงสังกะสี รวบรวมศึกษาเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.3.2 กรรมวิธีทางความร้อน

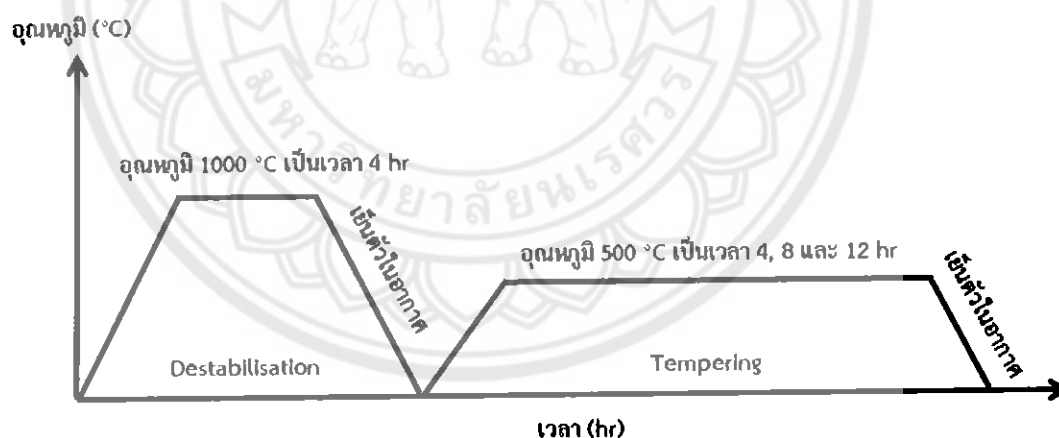
นำชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบชุบเปอร์ไธต์ดำ และแบบรางเทหล่อเย็นมาตัดแล้วมาอบในเตาอบอุณหภูมิสูงประกอบด้วย

3.3.2.1 การอบดิสเทบิไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กระบวนการอบดิสเทบิไลเซชันของเหล็กหล่อโครเมียมสูง

3.3.2.2 การอบดิสเทบิไลเซชันร่วมกับการอบเทมเปอร์ิ่งโดยอบดิสเทบิไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปอบเทมเปอร์ิ่งที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กระบวนการอบดิสเทบิไลเซชัน และอบเทมเปอร์ิ่งของเหล็กหล่อโครเมียม

3.3.3 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure)

3.3.3.1 นำชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็น ทั้งในสภาพหล่อ อบดิสเทบิไลเซชัน และอบดิสเทบิไลเซชันร่วมกับการอบเทมเปอร์ิ่งมาขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 600 และ 1000 ตามลำดับ

3.3.3.2 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายแล้วมาขัดมันด้วยผงขัดเพชรขนาด 6, 3 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ

3.3.3.3 นำชิ้นงานหลังผ่านการขัดมันมากัดผิวหน้าด้วยกรดที่มีส่วนผสมของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 10 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร และกรด HCl 50 มิลลิลิตร ทำโดยการนำชิ้นงานจุ่มลงในกรดแล้วล้างด้วยน้ำสะอาด

3.3.3.4 นำชิ้นงานหลังผ่านการกัดกรดแล้ว นำไปศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะเริ่มจากกำลังขยายต่ำไปถึงกำลังขยายสูงสุด

3.3.3.5 เมื่อเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมได้แล้ว ถ่ายภาพที่กำลังขยายต่างๆ

3.3.4 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

3.3.4.1 นำชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อ แบบซูปเปอร์ฮีทต่ำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) เพื่อใช้ในการศึกษารูปร่างของคาร์ไบด์ที่ตกตะกอนในโครงสร้างพื้น

3.3.4.2 จะนำชิ้นงานดังกล่าวมากัดด้วยกรดอีกชนิด คือกรดที่มีส่วนผสมของ KMnO_4 4 กรัม + NaOH 4 กรัม + น้ำ 100 มิลลิลิตร ที่ให้ความร้อนอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการกัดกรดเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้คาร์ไบด์ทุติยภูมิหลุดออก เพื่อใช้ในการศึกษารูปร่างของคาร์ไบด์ทุติยภูมิ

3.3.4.3 หลังจากผ่านการกัดกรดแล้วจะนำชิ้นงานไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดอีกครั้ง และถ่ายภาพชิ้นงาน

3.3.4.4 วัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) วิเคราะห์ธาตุ ณ ตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงานโดยจะเน้นที่โครงสร้างพื้น และยูเทกติกคาร์ไบด์สำหรับชิ้นงานในสภาพหล่อ ส่วนชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนจะเน้นศึกษาที่คาร์ไบด์ทุติยภูมิ

3.3.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray Diffraction : XRD

3.3.5.1 นำชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ ทั้งในสภาพหล่อ อบตีสเตบิไลเซชัน และอบตีสเตบิไลเซชันร่วมกับการอบเทมเปอร์มาขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 600 และ 1000 ตามลำดับ

3.3.5.2 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายแล้วมาขัดมันด้วยผงขัดเพชรขนาด 6 ไมครอน

3.3.5.3 หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาตัดให้มีความหนาน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร

3.3.5.4 นำชิ้นงานหลังผ่านการตัดเรียบเรียบร้อยแล้วทำความสะอาดแล้วจึงนำไปศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray Diffraction : XRD

3.3.6 ทดสอบสมบัติทางด้านความแข็ง

ในการทดสอบสมบัติทางด้านความแข็งจะใช้ชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบซูปเปอร์ฮีตต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็น ทั้งในสภาพหล่อ อบตีสเตปิลเซชัน และอบตีสเตปิลเซชันร่วมกับการอบเทมเปอร์ิ่งในการทดสอบจะใช้เครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers Macrohardness Testing)

3.3.6.1 นำชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบซูปเปอร์ฮีตต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็น ทั้งในสภาพหล่อ อบตีสเตปิลเซชัน และอบตีสเตปิลเซชันร่วมกับการอบเทมเปอร์ิ่งมาขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 600 และ 1000 ตามลำดับ

3.3.6.2 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายแล้วมาขัดมันด้วยผงขัดเพชรขนาด 6 ไมครอน

3.3.6.3 นำชิ้นงานไปวางบนฐานกดแล้วหมุนฐานขึ้นให้ชิ้นงานไปชนกับหัวกดเพชรโดยการทดสอบจะใช้แรงกด 30 กิโลกรัมแรง

3.2.6.3 หมุนฐานกดต่อไปอย่างช้าๆ จนเข็มไปอยู่กึ่งกลางของวงกลมเล็กที่อยู่บนหน้าปัด

3.3.6.4 ยกคันโยกขึ้นแล้วจึงเริ่มจับเวลาหลังจากเข็มหยุดนิ่งชิ้นงานจะถูกกดด้วยน้ำหนัก 30 กิโลกรัมแรง เป็นเวลาประมาณ 15 วินาที หลังจากนั้นยกคันโยกลงทำอย่างนี้ไปจนครบ 10 จุดในแต่ละชิ้นงาน

3.3.6.5 เมื่อกดครบจำนวนแล้วนำชิ้นงานไปวัดรอยกด และนำมาคำนวณค่าความแข็งพร้อมวาดกราฟ และคำนวณค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงาน

3.4 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้จากโครงสร้างทางจุลภาค ลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างผลึก ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ขึ้นรูปโดยการหล่อแบบดั้งเดิม แบบซูปเปอร์ฮีตต่ำ และหล่อแบบรางเทหล่อเย็น มาวิเคราะห์ และสรุปผล

3.5 จัดทำรูปเล่ม

นำข้อมูล และผลการทดสอบ มาประกอบรูปเล่มรายงาน

บทที่ 4

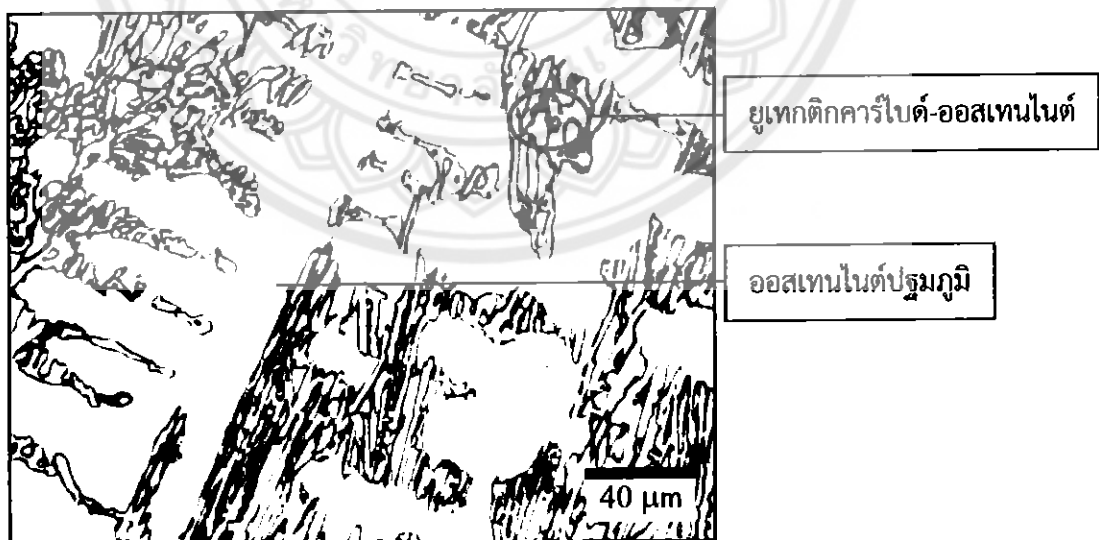
ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

4.1 ผลการศึกษาเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักในสภาพหล่อ

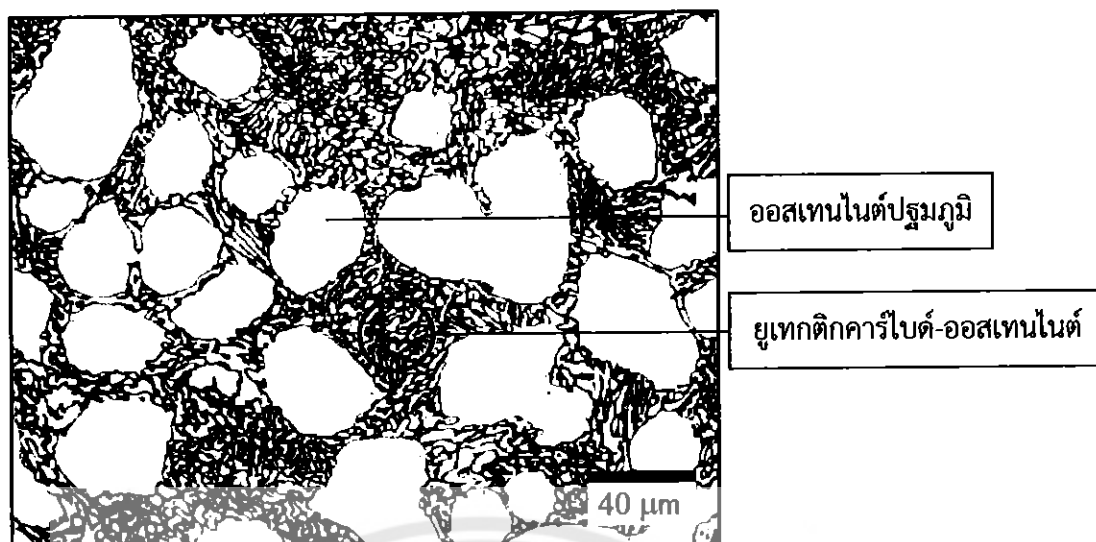
4.1.1 ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ภายหลังจากการหล่อที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบชุบเปอร์-อิทดำ และแบบวางเทหล่อเย็นโครงสร้างจะประกอบไปด้วยโครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ปฐมภูมิ ล้อมรอบด้วยยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ นอกจากนี้ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมโครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ที่ได้มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ แสดงดังรูปที่ 4.1 แต่ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบชุบเปอร์อิทดำ และแบบวางเทหล่อเย็นให้โครงสร้างของออสเทนไนต์ปฐมภูมิที่มีลักษณะเกรนกลม และมียูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ที่มีขนาดเล็ก และกระจายตัวหนาแน่น

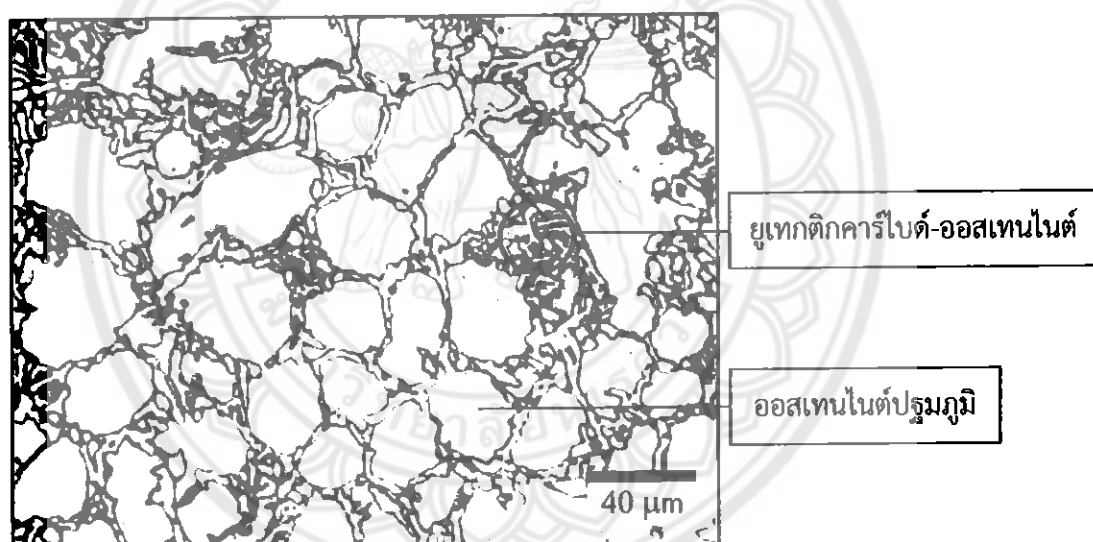
นอกจากนี้ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบชุบเปอร์อิทดำ และแบบวางเทหล่อเย็น มีโครงสร้างลักษณะเกรนกลมเหมือนกัน แต่ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบชุบเปอร์อิทดำให้ลักษณะเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบวางเทหล่อเย็น แสดงดังรูปที่ 4.2 - 4.3 (แสดงดังตารางที่ ก.1-ก.3 ภาคผนวก ก)



รูปที่ 4.1 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม



รูปที่ 4.2 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบ
ซูเปอร์ฮีทต่ำ



รูปที่ 4.3 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบ
รางเทหล่อเย็น

ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม มีโครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์-ปฐมภูมิที่เป็นเดนไดรต์ ไม่เป็นลักษณะเกรนกลมเหมือนชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็น เนื่องจากกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม จะเหน้าโลหะลงสู่แบบหล่อขณะที่น้ำโลหะเป็นของเหลวทั้งหมด ทำให้การเย็นตัวของน้ำโลหะเป็นแบบปกติ ส่งผลให้เกิดโครงสร้างแบบเดนไดรต์ โดยลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะ และการโตของของแข็งนั้นเกิดในทิศทางตรงข้ามกับการถ่ายเทความร้อนในทิศทางต่างๆ ที่ไม่เท่ากันจนเกิดเป็นรูปร่างเดนไดรต์ เมื่อบริเวณส่วนปลายของของแข็งที่เกิดเป็นเดนไดรต์มีความร้อนสะสมมากขึ้นเดน-

โคโรทจะไม่สามารถโต้ต่อไปได้อีก หรืออีกสาเหตุหนึ่งของการหยุดโตของเดนไดรต์ เนื่องจากเดนไดรต์ขยายตัวไปใกล้กับเดนไดรต์อื่นที่อยู่ข้างเคียงเกิดการแย่งอะตอมกัน ทำให้การโตของเดนไดรต์ไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ จึงทำให้ของเหลวส่วนที่เหลือเกิดเป็นโครงสร้างผสมของยูเทกติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ที่หยาบซึ่งอยู่ระหว่างแขนของเดนไดรต์ เนื่องจากแขนของเดนไดรต์มีผลทำให้การกระจายตัวของยูเทกติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การโตของยูเทกติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ยังมีผลทำให้เดนไดรต์หยุดโต เพราะยูเทกติกที่โตจะไปปิดกั้นการโตของเดนไดรต์ ส่วนชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็น โครงสร้างที่ได้มีลักษณะเกรนกลมเหมือนกัน แต่ทั้งสองกระบวนการนี้มีวิธีการขึ้นรูปที่ต่างกัน การขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ จะเหนี่ยวนำโลหะให้ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต เป็นอุณหภูมิที่น้ำโลหะเริ่มมีอนุภาคของแข็งที่เป็นนิวเคลียสเกิดขึ้น และน้ำโลหะมีอุณหภูมิต่ำ เมื่อเทลงสู่แบบการแข็งตัวจะเกิดขึ้นเร็วกว่าการหล่อแบบดั้งเดิม ทำให้นิวเคลียสไม่มีเวลามากพอที่จะเติบโตเป็นเดนไดรต์ แต่การขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบรางเทหล่อเย็นจะเหนี่ยวนำโลหะที่อุณหภูมิเทผ่านรางเททำให้มีเดนไดรต์เกิดขึ้นในระหว่างที่น้ำโลหะไหลผ่านรางเทที่บริเวณผิวหน้าของรางเทแล้วถูกแรงกระทำ ส่งผลให้กิ่งของเดนไดรต์แตกออก ทำให้ทั้งสองกระบวนการนี้มีอนุภาคของแข็ง ที่มีแนวโน้มโตขึ้นเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเกรนกลม ซึ่งเกิดขึ้นในน้ำโลหะเป็นบางส่วนก่อนเทลงสู่แบบหล่อทำให้โครงสร้างที่ได้มีลักษณะไม่เป็นเดนไดรต์ เพราะฉะนั้นเมื่อน้ำโลหะแข็งตัวจะทำให้โครงสร้างมีลักษณะเกรนกลม

4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

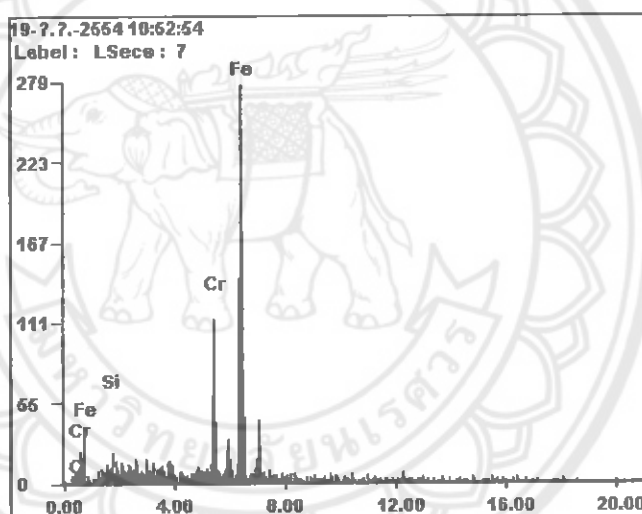
การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายสูงขึ้น ที่ตำแหน่งโครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ปฐมภูมิ ทำให้มองเห็นว่าที่บริเวณนี้มีลักษณะค่อนข้างเรียบ

เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ปฐมภูมิด้วยการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานหลังการหล่อ พบว่าที่โครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ปฐมภูมิจะประกอบด้วยธาตุเหล็ก, โครเมียม และคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 4.4 - 4.5 ซึ่งพบว่ามีธาตุเหล็กที่โครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ปฐมภูมิในปริมาณสูงกว่าธาตุอื่นๆ เนื่องจากโครงสร้างพื้นเป็นเฟสออสเทนไนต์ที่มีสารประกอบหลัก คือ เหล็ก และพบธาตุโครเมียมละลายอยู่ในโครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ปฐมภูมิ นอกจากนี้พบคาร์บอน แต่พบในปริมาณน้อย เนื่องจากเติมลงในเนื้อผสมน้อยมากเมื่อเทียบกับธาตุเหล็ก แสดงดังตารางที่ 4.1



ออสเทนไนต์ปฐมภูมิ

รูปที่ 4.4 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณโครงสร้างพื้นของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ

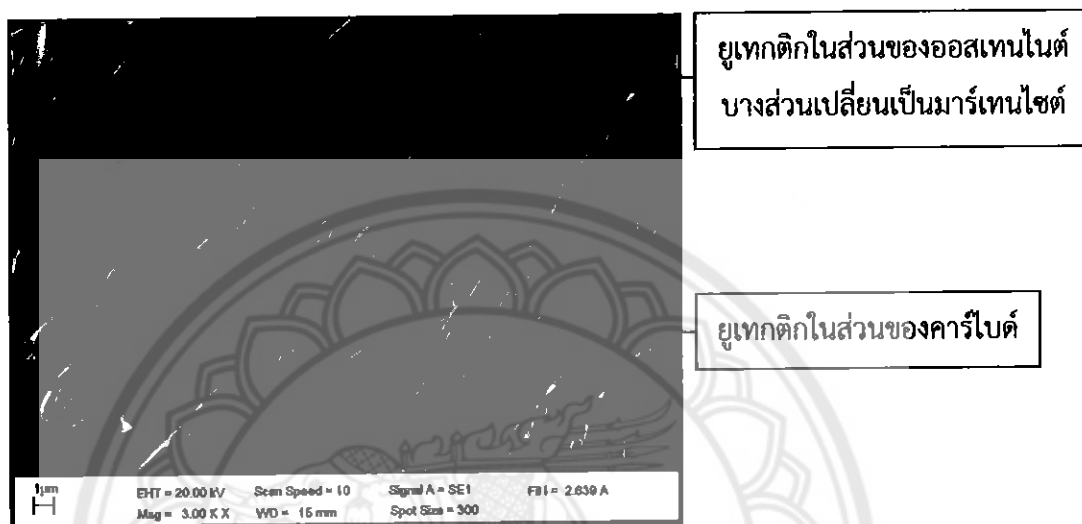


รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณโครงสร้างพื้นของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ

ตารางที่ 4.1 ปริมาณธาตุที่ละลายอยู่ในโครงสร้างพื้นของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
เหล็ก	78.23
โครเมียม	17.56
คาร์บอน	2.91
ซิลิคอน	1.29

จากนั้นได้ดำเนินการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา ที่บริเวณยูเทกติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ ทำให้มองเห็นยูเทกติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ซึ่งยูเทกติกในส่วนของคาร์ไบด์ มีลักษณะเป็นแท่งยาว เป็นแผ่น และมีความต่อเนื่องกัน นอกจากนี้ยังสามารถมองเห็นยูเทกติกในส่วนของออสเทนไนต์บางส่วนเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ในระหว่างการเย็นตัวในแบบหล่อ โดยจะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบของยูเทกติกในส่วนของออสเทนไนต์ แสดงดังรูปที่ 4.6

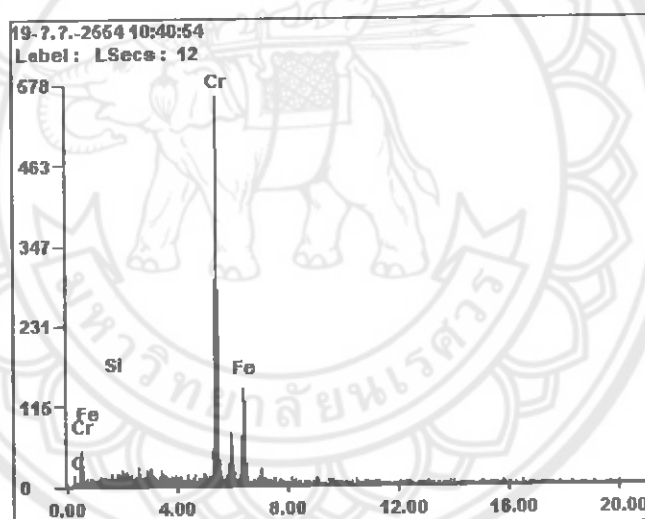


รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ

จากการใช้เทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ ศึกษาธาตุภายในชิ้นงาน หลังการหล่อที่ตำแหน่งยูเทกติกในส่วนของคาร์ไบด์จะประกอบด้วยธาตุโครเมียม, เหล็ก และคาร์บอน แต่ที่บริเวณยูเทกติกในส่วนของคาร์ไบด์ พบว่ามีธาตุโครเมียมละลายอยู่ในปริมาณสูงกว่าธาตุอื่นๆ เนื่องจากบริเวณที่ใช้ในการศึกษาเป็นส่วนของคาร์ไบด์ที่มีสารประกอบหลัก คือ โครเมียม แสดงดังรูปที่ 4.7-4.8 ส่วนธาตุคาร์บอนที่บริเวณนี้พบในปริมาณใกล้เคียงกับบริเวณโครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ปฐมภูมิ แต่ที่บริเวณยูเทกติกในส่วนของคาร์ไบด์จะมีธาตุคาร์บอนอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากกระบวนการแข็งตัวของออสเทนไนต์ปฐมภูมิ มีผลทำให้เกิดการแยกตัวของส่วนผสม โดยการผลึกธาตุอื่นออกมารวมตัวกันเป็นยูเทกติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ และธาตุโครเมียมกับคาร์บอนมักจะรวมตัวกันเกิดเป็นยูเทกติกในส่วนของคาร์ไบด์ ทำให้คาร์บอนมาละลายอยู่ภายในนี้มาก จึงทำให้คาร์บอนที่ละลายในโครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ปฐมภูมิน้อยลง ซึ่งปริมาณของธาตุต่างๆ ที่ตำแหน่งยูเทกติกในส่วนของคาร์ไบด์ แสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.7 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณโครงสร้างยูเทคติกในส่วน
ของคาร์ไบด์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซู-
เปอร์ฮีทต่ำ



รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณโครงสร้างยูเทคติก
ในส่วนของคาร์ไบด์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบ
ซูเปอร์ฮีทต่ำ

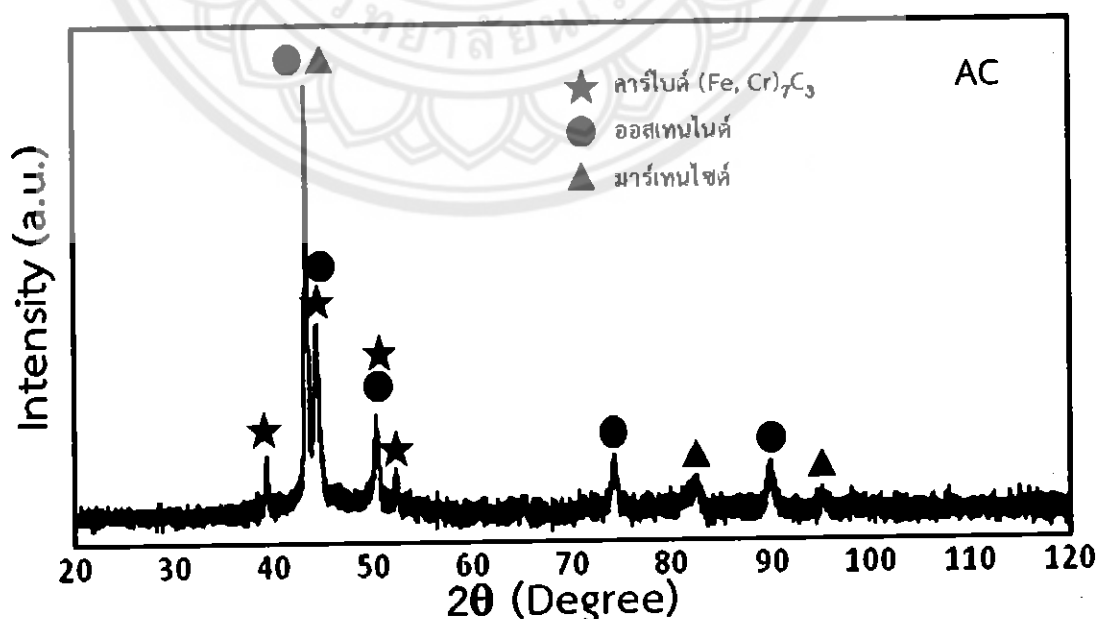
ตารางที่ 4.2 ปริมาณธาตุที่ละลายอยู่ในยูเทกติกคาร์ไบด์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำ

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
โครเมียม	53.03
เหล็ก	41.73
คาร์บอน	4.42
ซิลิคอน	0.80

จากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี ด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ ที่ตำแหน่งโครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ปฐมภูมิ และโครงสร้างยูเทกติกในส่วนของคาร์ไบด์ พบว่า ปริมาณของธาตุที่เกิดขึ้นของทั้งสองตำแหน่งจะมีปริมาณที่ต่างกัน ทำให้ทราบได้ว่าทั้งสองตำแหน่งมี เฟสที่ต่างชนิดกัน (แสดงดังตารางที่ ข.1 ภาคผนวก ข)

4.1.3 ผลการศึกษาเฟส

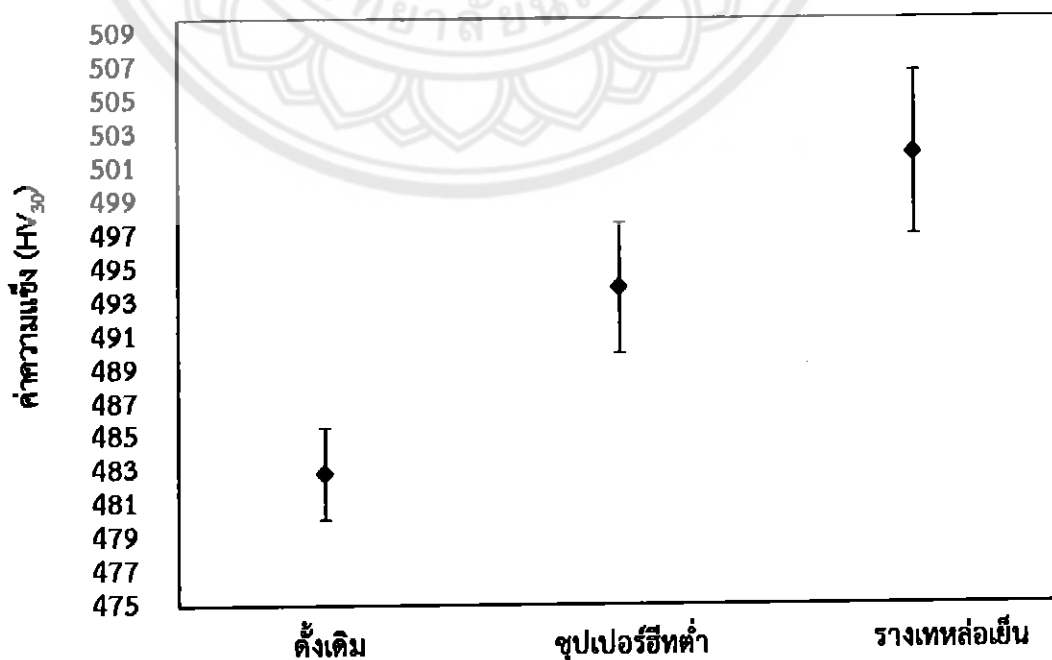
การศึกษาเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อปรากฏเฟสของออสเทนไนต์ ซึ่งเฟสออสเทนไนต์นี้จะพบในส่วนของออสเทนไนต์-ปฐมภูมิที่เกิดขึ้นเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ หรือเกรนกลมในชิ้นงาน และยูเทกติกในส่วนของออสเทนไนต์ นอกจากนี้ยังปรากฏเฟสของมาร์เทนไซต์ที่เปลี่ยนมาจากยูเทกติกในส่วนของออสเทนไนต์บางส่วน ซึ่งเกิดในระหว่างการเย็นตัวในแบบหล่อ และมียูเทกติกคาร์ไบด์ชนิด $(Fe, Cr)_7C_3$ แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำในสภาพหล่อ

4.1.4 ผลการวัดค่าความแข็ง

ผลของการศึกษาความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องวัดความแข็งระดับมหภาคแบบวิกเกอร์ส (Vickers Macrohardness Testing) การวัดค่าความแข็งจะนำชิ้นงานแต่ละชิ้นมาวัดความแข็งแบบสุ่มจำนวน 10 จุด ด้วยแรงกด 30 กิโลกรัมแรง ใช้เวลา กด 15 วินาที พบว่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็น มีความแข็งโดยเฉลี่ยเป็น 482, 493 และ 501 HV_{30} ตามลำดับ ทำให้เห็นว่าชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบรางเทหล่อเย็นจะให้ค่าความแข็งสูงสุด เนื่องจากการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบรางเทหล่อเย็นจะให้โครงสร้างที่มีลักษณะเกรนกลมที่สมมาตร ทำให้สามารถรับแรงได้เท่ากันทุกทิศทางที่กระทำ อีกทั้งโครงสร้างที่มีลักษณะเกรนกลมมีผลทำให้ยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ เช่นเดียวกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำที่ให้ความแข็งรองลงมา ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมที่มีโครงสร้างลักษณะเดนไดรท์ มีผลทำให้การรับแรงของโครงสร้างในทิศทางต่างๆ จะรับแรงได้ไม่เท่ากัน เพราะโครงสร้างแบบนี้จะไม่มีสมมาตร นอกจากนี้แขนของเดนไดรท์จะส่งผลต่อการกระจายตัวของยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ กล่าวคือ ยิ่งแขนเดนไดรท์มีขนาดใหญ่ก็จะทำให้การกระจายตัวของยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้สมบัติทางกลด้อยกว่าโครงสร้างที่มีความสมมาตร หรือโครงสร้างที่มีลักษณะเกรนกลม จึงเป็นเหตุให้มีค่าความแข็งน้อยสุด นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็นมีช่วงข้อมูลความแข็งที่ใกล้เคียงกัน แต่ชิ้นงานทั้ง 2 มีความแข็งแตกต่างไปจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมอย่างสิ้นเชิง แสดงดังรูปที่ 4.10 (แสดงดังตารางที่ ค.1 - ค.3 ภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.10 ผลของความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อ

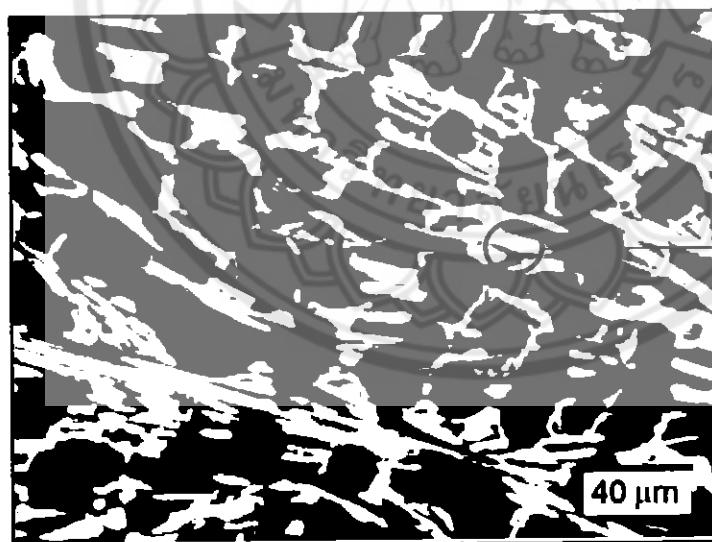
4.2 ผลการศึกษาเหล็กหล่อโครเมียมสูงหลังอบตีสเตบิไลเซชัน

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็นไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนด้วยการอบตีสเตบิไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยเตาอบอุณหภูมิสูงแล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ เพื่อดำเนินการศึกษา ดังนี้

4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน พบว่าโครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ปฐมภูมิ และยูเทคติกในส่วนออสเทนไนต์ในสภาพหล่อของชิ้นงาน ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็นมีการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกัน คือหลังผ่านการอบตีสเตบิไลเซชันโครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ปฐมภูมิ และยูเทคติกในส่วนของออสเทนไนต์ ได้เปลี่ยนจากสีขาวไปเป็นสีดำ ส่วนยูเทคติกในส่วนของคาร์ไบด์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

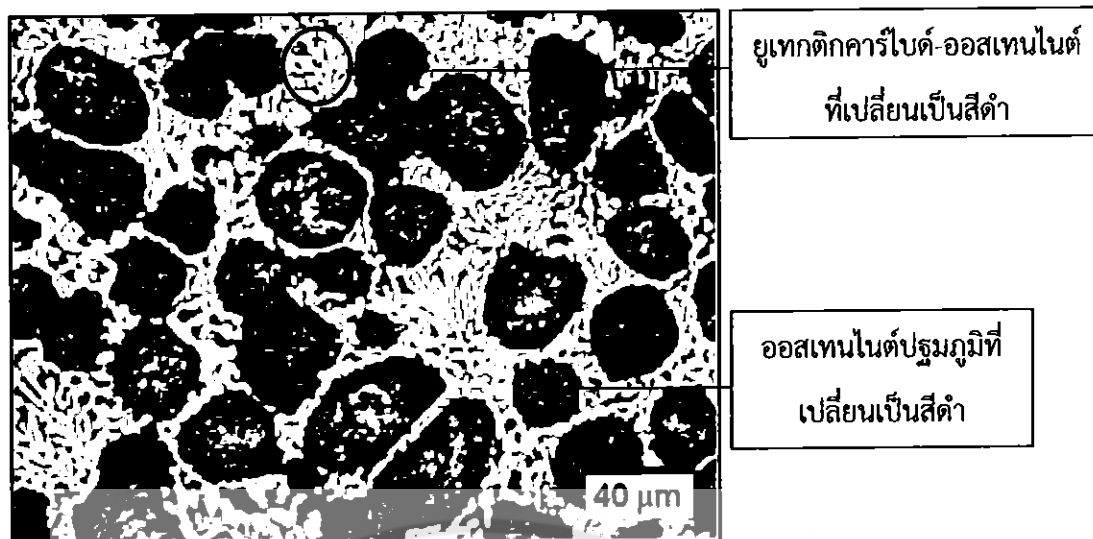
นอกจากนี้ชิ้นงานทั้ง 3 มีความแตกต่างกัน คือชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมจะเป็นสีดำเข้มทั่วโครงสร้างเดนไดรต์ แสดงดังรูปที่ 4.11 แต่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็นที่บริเวณขอบของโครงสร้างที่มีลักษณะเกรนกลมมีสีดำเข้ม ส่วนตรงกลางมีสีขาวขุ่นปนอยู่เหมือนกัน แสดงดังรูปที่ 4.12 - 4.13 (แสดงดังตารางที่ ก.1-ก.3 ภาคผนวก ก)



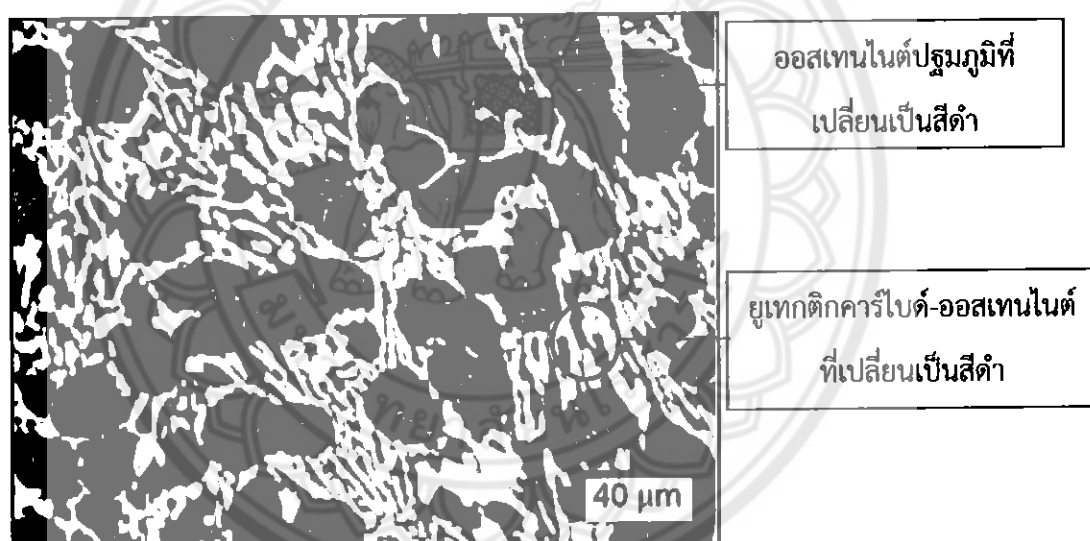
ยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์
ที่เปลี่ยนเป็นสีดำ

ออสเทนไนต์ปฐมภูมิที่
เปลี่ยนเป็นสีดำ

รูปที่ 4.11 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมหลังผ่านการอบตีสเตบิไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4.12 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีท-ต่ำลงผ่านการอบตีสเตปิลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

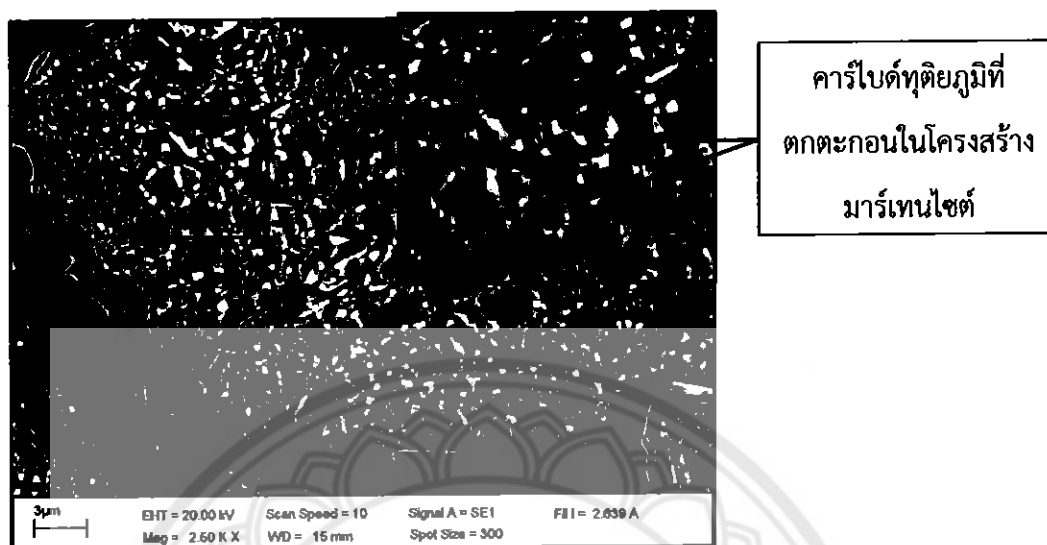


รูปที่ 4.13 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบร่างเทหล่อเย็นผ่านการอบตีสเตปิลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

4.2.2 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

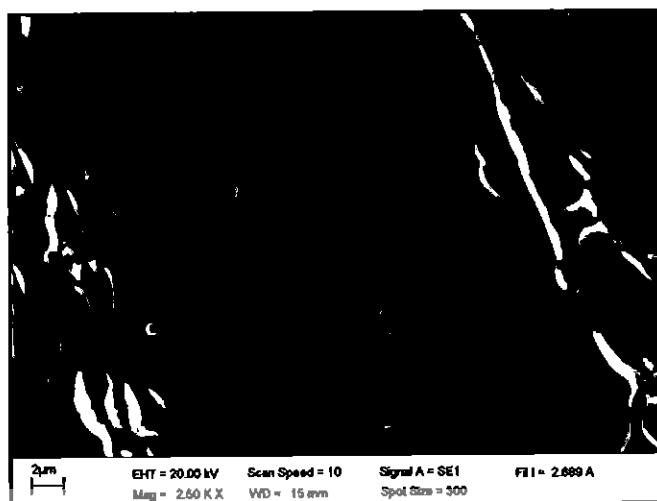
การศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหลังการอบตีสเตปิลเซชันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยจะนำชิ้นงานหลังจากผ่านการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงมาใช้ในการศึกษาต่อด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การศึกษาที่กำลังขยายสูงขึ้น ทำให้มองเห็นการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ตกตะกอนอยู่ภายในโครงสร้างพื้นที่เปลี่ยนจากออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซด์ จึงทำให้มองเห็นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงเป็นสีดำ ส่วนคาร์ไบด์ทุติยภูมิจะเป็นสีขาว โดยคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากธาตุโครเมียม และคาร์บอนที่

ละลายในลักษณะเกินจุดอิ่มตัวที่อุณหภูมิห้องจะยอมให้ละลายอยู่ได้ เมื่อผ่านการอบดิสเทบิไลเซชัน ทำให้ธาตุโครเมียม และคาร์บอนแยกตัวออกมารวมกันเป็นคาร์ไบด์ทุติยภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำหลังผ่านการอบดิสเทบิไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง บริเวณโครงสร้างพื้นของมาร์เทนไซต์

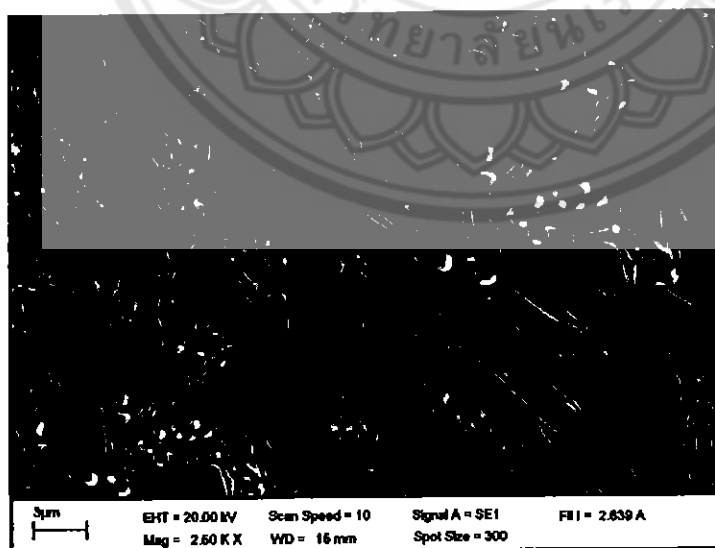
เพื่อที่จะมองลักษณะของคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงใช้กรดที่มีส่วนผสมของ KMnO_4 4 กรัม + NaOH 4 กรัม + น้ำ 100 มิลลิลิตร โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ส่งผลให้คาร์ไบด์ทุติยภูมิที่อยู่ในโครงสร้างพื้นของมาร์เทนไซต์หลุดออก ขนาดของคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่บริเวณขอบของเดนไดรท์ที่อยู่ติดกับยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์เปลี่ยนเป็น มาร์เทนไซต์จะเกิดการตกตะกอนปริมาณมาก และมีขนาดเล็ก เนื่องจากบริเวณดังกล่าวอยู่ใกล้กับ ยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ที่มีปริมาณของธาตุโครเมียม และคาร์บอนที่สูง จึงทำให้การเกิดนิวเคลียสของคาร์ไบด์ทุติยภูมิภายในโครงสร้างพื้นที่เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ที่บริเวณขอบของเดนไดรท์ซึ่งเกิดขึ้นได้มาก ทำให้การโตของนิวเคลียสไปเป็นคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่มีขนาดเล็ก แต่บริเวณกึ่งกลางของเดนไดรท์จะเกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิน้อย และมีขนาดที่ใหญ่ เนื่องจากบริเวณกึ่งกลางของเดนไดรท์จะอยู่ห่างออกไปจากยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ การเกิดนิวเคลียสของคาร์ไบด์ทุติยภูมิภายในโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่บริเวณกึ่งกลางของเดนไดรท์จะเกิดขึ้นน้อย จึงทำให้การโตของนิวเคลียสไปเป็นคาร์ไบด์ทุติยภูมิมีขนาดที่ใหญ่ แสดงดังรูปที่ 4.15



คาร์ไบด์ทุติยภูมิ
ที่หลุดออก

รูปที่ 4.15 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบ
ซูปเปอร์ฮีทต่ำหลังผ่านการอบตีสเตบิไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา
4 ชั่วโมง บริเวณโครงสร้างพื้นหลังกัฏกรตที่มีส่วนผสมของ KMnO_4 4 กรัม + NaOH 4
กรัม + น้ำ 100 มิลลิลิตร

เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งไปศึกษา ณ บริเวณยูเทกติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ที่เปลี่ยนเป็น
มาร์เทนไซต์ ปรากฏว่าที่บริเวณนี้มีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิเช่นเดียวกับที่บริเวณโครงสร้าง
พื้นที่เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ แต่จะตกตะกอนอยู่ที่ยูเทกติกในส่วนของออสเทนไนต์เปลี่ยนเป็น
มาร์เทนไซต์ ส่วนยูเทกติกในส่วนของคาร์ไบด์ที่ศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง-
กราดจะมองไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.16 (แสดงดังตารางที่ ข.3 ภาคผนวก ข)



ออสเทนไนต์ที่เปลี่ยนมา
เป็นมาร์เทนไซต์

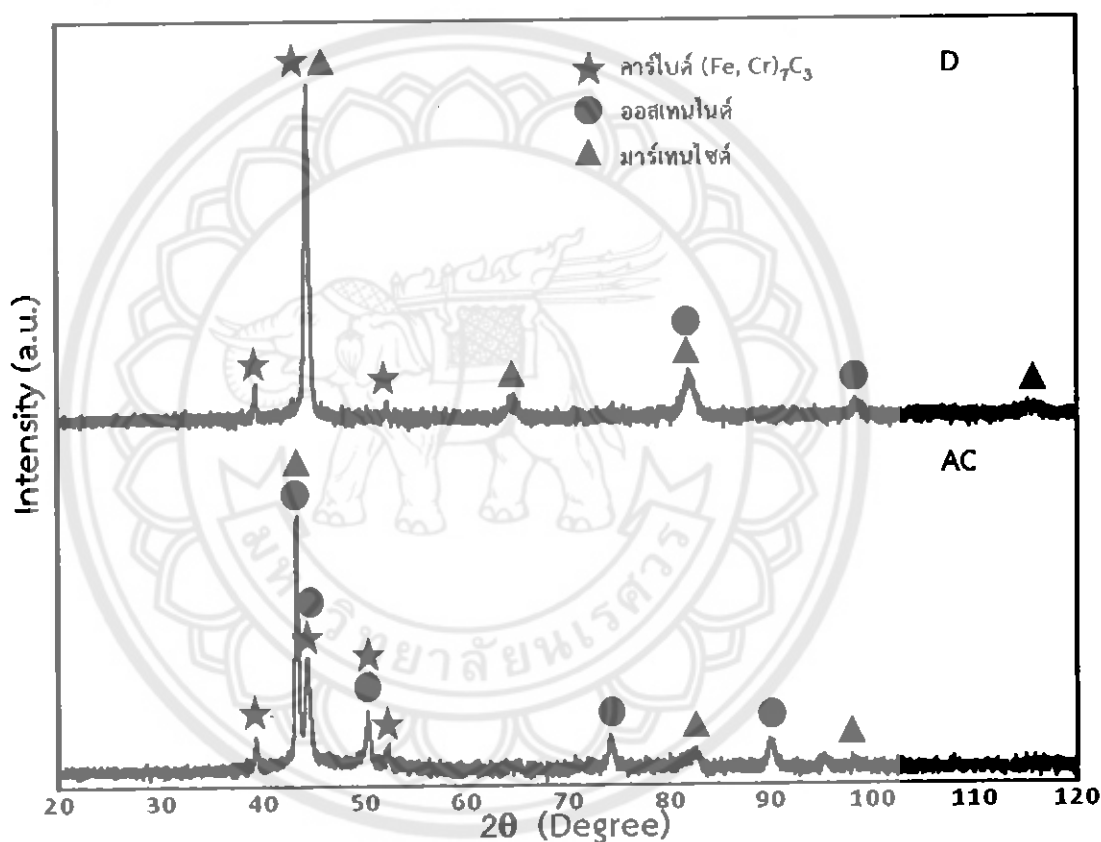
คาร์ไบด์ทุติยภูมิ

รูปที่ 4.16 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบ
ซูปเปอร์ฮีทต่ำหลังผ่านการอบตีสเตบิไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา
4 ชั่วโมง บริเวณโครงสร้างยูเทกติก

4.2.3 ผลการศึกษาเฟส

เมื่อชิ้นงานถูกนำไปผ่านการอบตีสเตบิไลเซชันจากวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าเฟสของออสเทนไนต์ก็ยังคงปรากฏขึ้นเช่นเดียวกับในสภาพหล่อรวมทั้งคาร์ไบด์ชนิด $(Fe, Cr)_7C_3$ และเฟสของมาร์เทนไซต์ก็จะปรากฏขึ้นเช่นเดียวกัน แต่ผลจากการอบตีสเตบิไลเซชันทำให้ฟิสิกของมาร์เทนไซต์เกิดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนเฟสของออสเทนไนต์จากสภาพหล่อมาเป็นมาร์เทนไซต์หลังผ่านการอบตีสเตบิไลเซชัน แสดงดังรูปที่ 4.17

จากการศึกษาทำให้เห็นได้ว่าหลังการอบตีสเตบิไลเซชันเฟสออสเทนไนต์ปฐมภูมิไม่ได้เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ทั้งหมดยังคงเหลือเฟสออสเทนไนต์ตกค้างบางส่วน (Retained Austenite)



รูปที่ 4.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำหลังอบตีสเตบิไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

4.2.4 ผลการวัดค่าความแข็ง

จากการวัดค่าความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบซูเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็น พบว่าค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปจาก 3 วิธีดังกล่าวเพิ่มขึ้นกว่าในสภาพหล่อ เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพื้นจากออสเทนไนต์ปฐมภูมิไปเป็นมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งมากกว่า และมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิภายในโครงสร้างที่เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ โดยตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิเกิดจากรวมตัว

ของธาตุเหล็ก, โครเมียม และคาร์บอน ซึ่งเป็นตะกอนที่มีความแข็งสูงกว่าโครงสร้างของมาร์เทนไซต์ เมื่อถูกห่อหุ้มด้วยโครงสร้างพื้นของมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็ง จึงทำให้ความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการอบตีสเตบิไลเซชันเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้อสเทนไนต์ที่ตกค้างบางส่วนจะทำให้ชิ้นงานมีความเค้นตกค้าง ซึ่งความเค้นที่ตกค้างนี้จะทำให้ชิ้นงานเปลี่ยนจากอสเทนไนต์ตกค้างไปเป็นมาร์เทนไซต์ได้เมื่อมีแรงมากระทำ ซึ่งอสเทนไนต์ที่ตกค้างนี้ก็จะมีส่วนเพิ่มความแข็งให้กับชิ้นงานเช่นกัน ความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบซูเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็นเป็นดังนี้ 672, 706 และ 688 HV₃₀ ตามลำดับ โดยชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้น หลังผ่านการอบตีสเตบิไลเซชันทำให้ชิ้นงานแต่ละชิ้นมีค่าความแข็งที่ต่างกันมาก ซึ่งชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำหลังผ่านการอบตีสเตบิไลเซชันจะมีค่าความแข็งสูงสุด แสดงดังรูปที่ 4.18 (แสดงดังตารางที่ ค.1 - ค.3 ภาคผนวก ค)



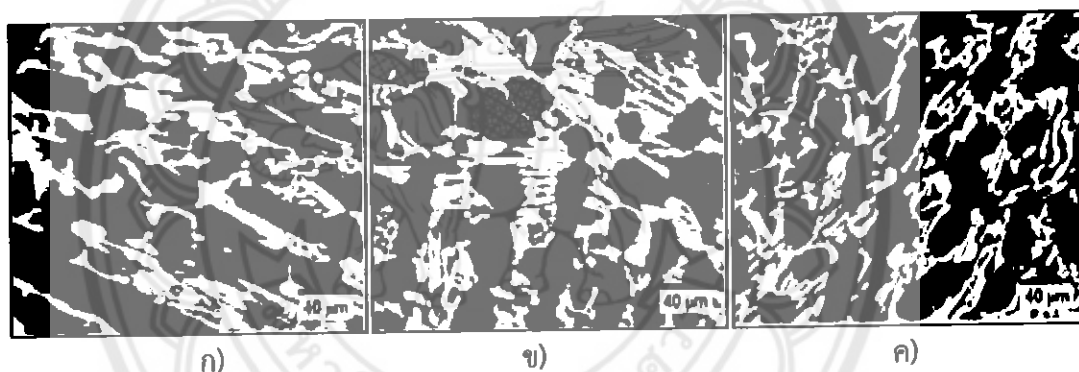
รูปที่ 4.18 ผลของความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงหลังผ่านการอบตีสเตบิไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

4.3 ผลการศึกษาเหล็กหล่อโครเมียมสูงหลังอบเทมเปอริง

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็นหลังการอบดิสเทบิลไเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และอบเทมเปอริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ เพื่อดำเนินการศึกษาดังต่อไปนี้

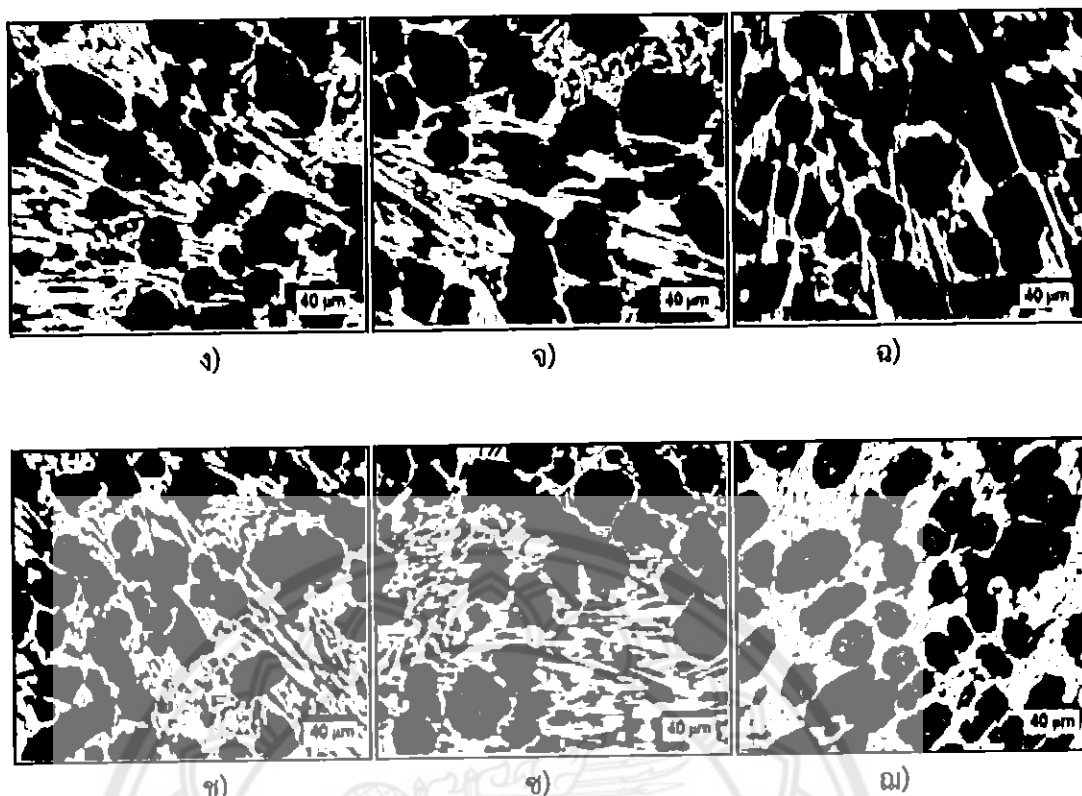
4.3.1 ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค

โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปจาก 3 วิธี เมื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคจะไม่แตกต่างไปจากชิ้นงานหลังผ่านการอบดิสเทบิลไเซชัน คือมีโครงสร้างพื้นเป็นมาร์เทนไซต์เช่นเดียวกับชิ้นงานหลังผ่านการอบดิสเทบิลไเซชัน แสดงดังรูปที่ 4.19 (แสดงดังตารางที่ ก.1 - ก.3 ภาคผนวก ก)



รูปที่ 4.19 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการอบดิสเทบิลไเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

- ก) ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมหลังผ่านการอบเทมเปอริงที่ 4 ชั่วโมง
- ข) ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมหลังผ่านการอบเทมเปอริงที่ 8 ชั่วโมง
- ค) ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมหลังผ่านการอบเทมเปอริงที่ 12 ชั่วโมง



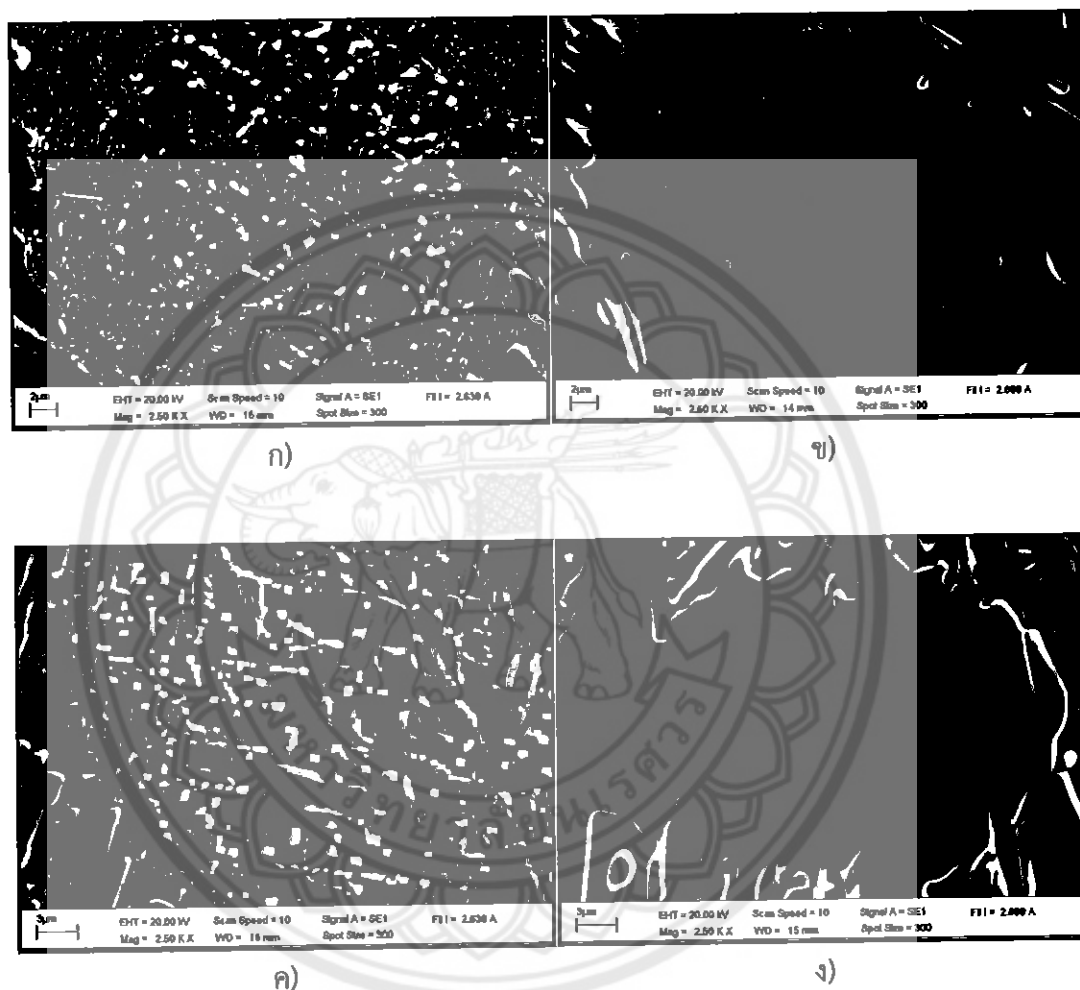
รูปที่ 4.19 (ต่อ) โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการอบคัสเตปิลไฮเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

- ง) ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำหลังผ่านการอบเทมเปอร์ที่ 4 ชั่วโมง
- จ) ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำหลังผ่านการอบเทมเปอร์ที่ 8 ชั่วโมง
- ฉ) ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำหลังผ่านการอบเทมเปอร์ที่ 12 ชั่วโมง
- ช) ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบรางเทหล่อเย็นหลังผ่านการอบเทมเปอร์ที่ 4 ชั่วโมง
- ซ) ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบรางเทหล่อเย็นหลังผ่านการอบเทมเปอร์ที่ 8 ชั่วโมง
- ณ) ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบรางเทหล่อเย็นหลังผ่านการอบเทมเปอร์ที่ 12 ชั่วโมง

4.3.2 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

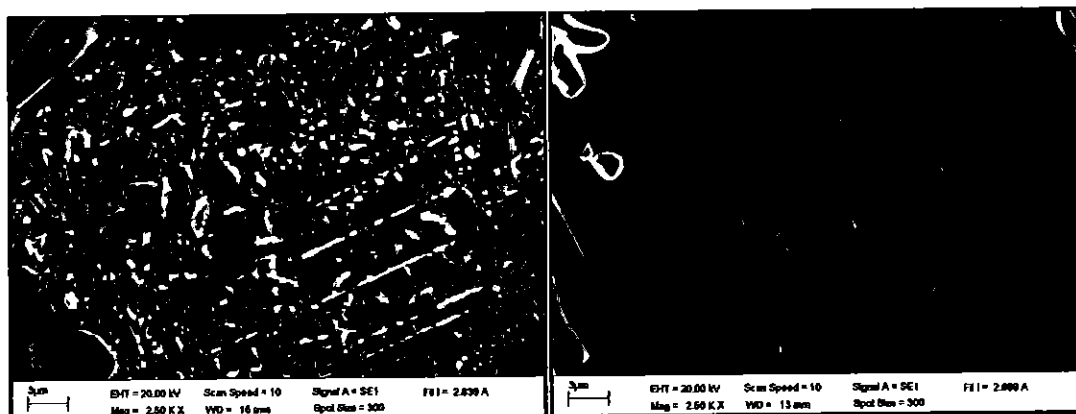
ชิ้นงานหลังจากการอบคัสเตปิลไฮเซชันมีคาร์ไบด์ทุติยภูมิตกตะกอนในโครงสร้างพื้นที่เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ เมื่อนำไปผ่านการอบเทมเปอร์ที่เวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง พบว่าคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ตกตะกอนในโครงสร้างพื้นของมาร์เทนไซต์มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยที่ขนาดของคาร์ไบด์ทุติยภูมิมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลาอบเทมเปอร์ที่นานขึ้น และคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ใหญ่ขึ้นนี้มีแนวโน้มที่เข้ามาเชื่อมติดกันเป็นแท่งยาว ซึ่งเห็นได้ชัดเจนหลังผ่านการอบเทมเปอร์นาน 12 ชั่วโมง นอกจากนี้

ยังมีคาร์ไบด์ทิตเนียมที่ตกตะกอนขึ้นมาใหม่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ ซึ่งคาร์ไบด์ทิตเนียมที่ตกตะกอนขึ้นมาใหม่นี้ ที่เวลา 4 ชั่วโมง จะมีขนาดเล็ก และมีปริมาณน้อยกว่าที่เวลา 8 และ 12 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.20 ก) - ง) ทั้งนี้สาเหตุที่คาร์ไบด์ทิตเนียมมีขนาดใหญ่ขึ้น และที่ตกตะกอนขึ้นมาใหม่มีปริมาณมากขึ้นตามเวลาที่ใช้อบเทมเปอริง เนื่องจากโครเมียม และคาร์บอนมีเวลาลานานขึ้นที่จะแยกตัวออกจากโครงสร้างพื้นมารวมตัวกันเป็นคาร์ไบด์ทิตเนียม (แสดงดังตารางที่ ข.4 - ข.6 ภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.20 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีตต่ำหลังผ่านการอบตีสเตบิไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

- ก) อบเทมเปอริงที่ 4 ชั่วโมง
- ข) อบเทมเปอริงที่ 4 ชั่วโมงกัด้วยกรดที่มีส่วนผสมของ KMnO_4 4 กรัม + NaOH 4 กรัม + น้ำ 100 มิลลิลิตร
- ค) อบเทมเปอริงที่ 8 ชั่วโมง
- ง) อบเทมเปอริงที่ 8 ชั่วโมงกัด้วยกรดที่มีส่วนผสมของ KMnO_4 4 กรัม + NaOH 4 กรัม + น้ำ 100 มิลลิลิตร



จ)

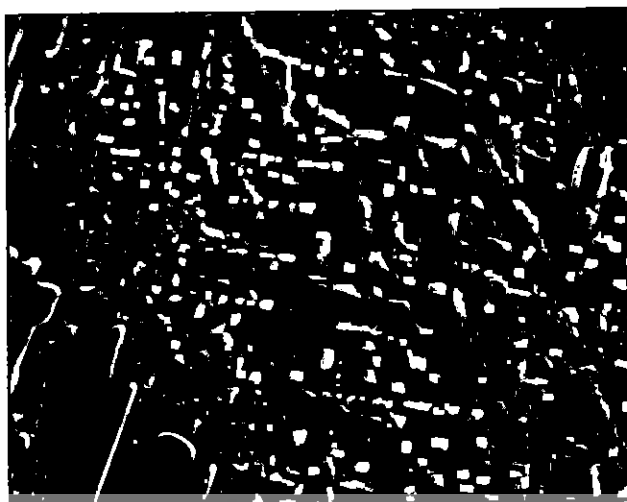
ฉ)

รูปที่ 4.20 (ต่อ) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำหลังผ่านการอบดิสเทบิไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

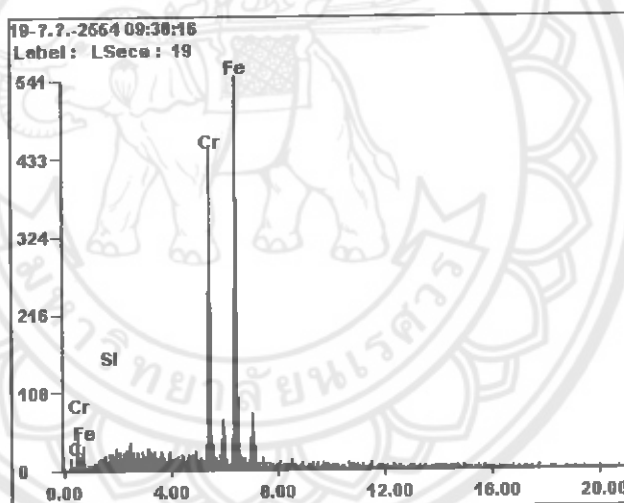
จ) อบเทมเปอร์ที่ 12 ชั่วโมง

ฉ) อบเทมเปอร์ที่ 12 ชั่วโมงกัด้วยกรดที่มีส่วนผสมของ KMnO_4 4 กรัม + NaOH 4 กรัม + น้ำ 100 มิลลิลิตร

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) ที่ตำแหน่งของคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ตกตะกอนในโครงสร้างของมาร์เทนไซต์ พบธาตุเหล็ก, โครเมียม, และคาร์บอน ปริมาณของธาตุโครเมียมที่ตำแหน่งนี้จะน้อยกว่าธาตุเหล็ก แสดงดังรูปที่ 4.21 – 4.22 และตารางที่ 4.5 ซึ่งคาร์ไบด์ทุติยภูมินี้เกิดจากธาตุเหล็ก, โครเมียม และคาร์บอน แยกตัวออกมารวมกันเป็นคาร์ไบด์ทุติยภูมิในระหว่างผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (แสดงดังตารางที่ ข.2 ภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.21 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณคาร์ไบด์ทุติยภูมิของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำหลังผ่านการอบตีเตบิลไฮเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



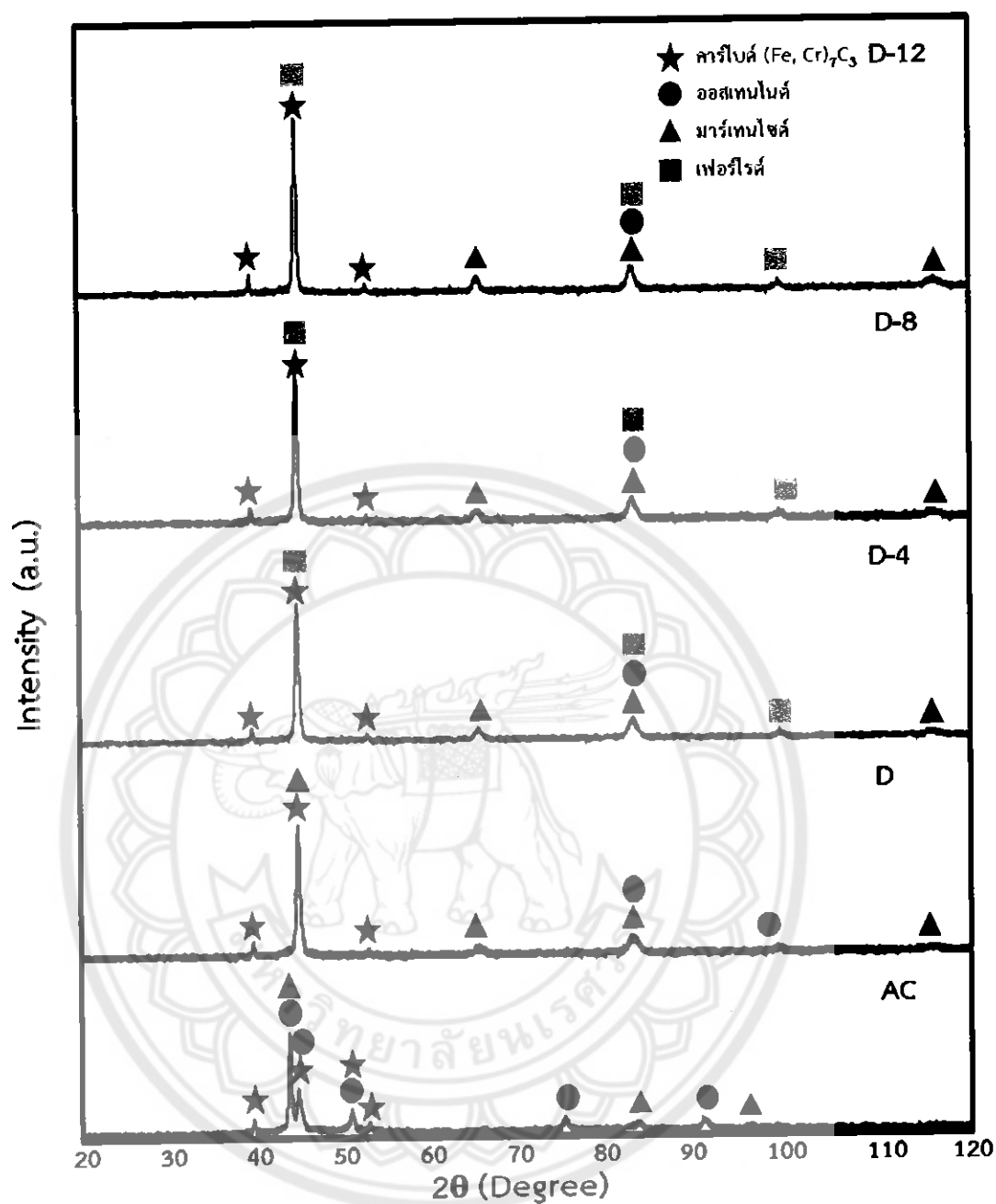
รูปที่ 4.22 สเปกตรัมของการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณคาร์ไบด์ทุติยภูมิของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อ ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูเปอร์ฮีทต่ำหลังผ่านการอบตีเตบิลไฮเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.3 ปริมาณธาตุที่ละลายอยู่ในตะกอนของคาร์ไบด์ทุตติยภูมิของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทดำหลังผ่านการอบดิสเตปีไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
เหล็ก	56.85
โครเมียม	37.07
คาร์บอน	5.19
ซิลิคอน	0.89

4.3.3 ผลการศึกษาเฟส

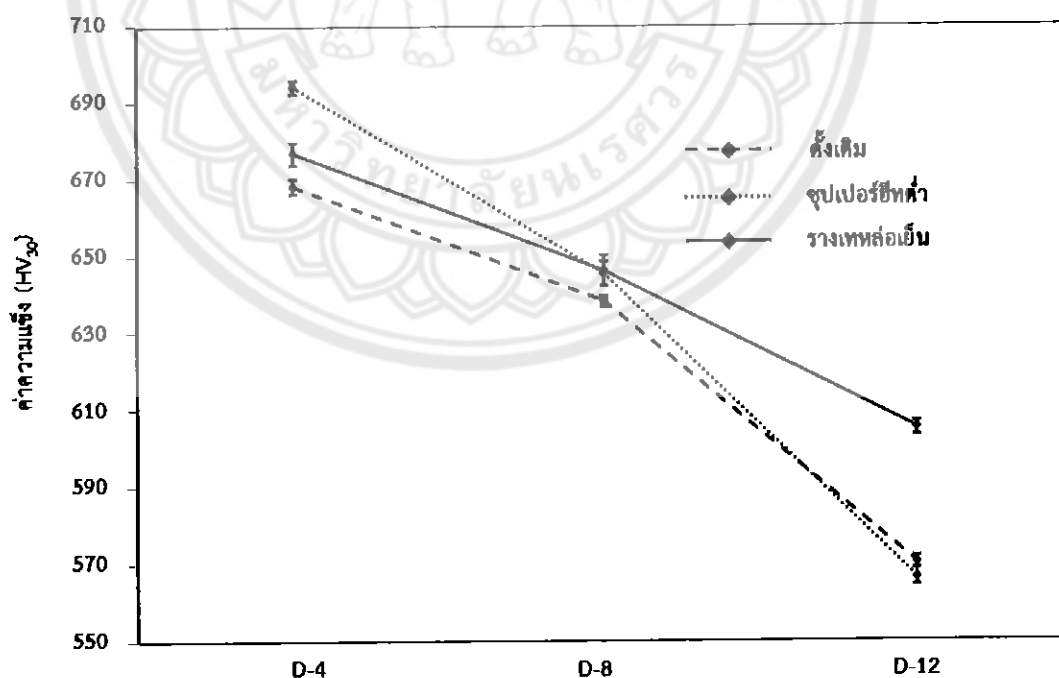
ใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในการศึกษาเฟส หลังจากการอบเทมเปอร์ พบว่าเกิดเฟสมาร์เทนไซต์ ออสเทนไนต์ และคาร์ไบด์ชนิด $(Fe, Cr)_7C_3$ นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดเฟสเฟอร์ไรต์ขึ้นมา ซึ่งเฟสของเฟอร์ไรต์นี้เกิดขึ้นมา เนื่องจากเฟสออสเทนไนต์ที่ตกค้างจากการอบดิสเตปีไลเซชันได้ถูกเปลี่ยนเป็นเฟสเฟอร์ไรต์ในขั้นตอนการอบเทมเปอร์ แสดงดังรูปที่ 4.23 จากการศึกษาเวลาในการอบเทมเปอร์ พบว่าฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นจากการอบเทมเปอร์ที่เวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง มีฟิสิกส์ใหม่เกิดขึ้นมาที่ตำแหน่งเดียวกัน



รูปที่ 4.23 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูง ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบ
 ชูเปอร์ฮีทต่ำ หลังผ่านการอบดิสเพิลโลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา
 4 ชั่วโมง ร่วมกับอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 8 และ 12
 ชั่วโมง ตามลำดับ

4.3.4 ผลการวัดค่าความแข็ง

จากการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบซูเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็น พบว่าทุกๆ กระบวนการหล่อค่าความแข็งมีแนวโน้มที่เหมือนกัน คือ ลดลงเมื่อเวลาในการอบเทมเปอร์ขึ้นขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของออสเทนไนต์ที่ตกค้างที่เกิดมาจากการอบตีสเตเบิลเซชันถูกเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่มีความแข็งที่ต่ำกว่า และยิ่งเวลาในการอบเทมเปอร์ยิ่งนานการเกิดโครงสร้างของเฟอร์ไรต์ก็จะยิ่งมากขึ้น และอีกสาเหตุหนึ่งการใช้เวลาในการอบเทมเปอร์นานจะทำให้คาร์ไบด์ทุดิยุมิภายในโครงสร้างพื้นของมาร์เทนไซต์จะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นทำให้การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอส่งผลให้ความแข็งของชิ้นงานลดลงเช่นกัน ถึงแม้ว่าจะมีคาร์ไบด์ทุดิยุมิขนาดเล็กเกิดขึ้นใหม่ก็ตาม แต่ถ้าขนาดของคาร์ไบด์ทุดิยุมิใหญ่มากก็ส่งผลที่ไม่ดีต่อสมบัติทางกล และการที่คาร์ไบด์ทุดิยุมิมีขนาดโตมากขึ้นการละลายของธาตุคาร์บอนในคาร์ไบด์ทุดิยุมิจะยิ่งมากขึ้น ทำให้ธาตุคาร์บอนภายในโครงสร้างพื้นของมาร์เทนไซต์น้อยลง ถึงแม้ว่าโครงสร้างพื้นจะเป็นมาร์เทนไซต์แต่ก็เป็นมาร์เทนไซต์ที่อ่อน ซึ่งค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบซูเปอร์ฮีทต่ำ และแบบรางเทหล่อเย็น หลังการอบเทมเปอร์เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ค่าความแข็งจะมีค่า ดังนี้ 570, 566 และ 646 HV₃₀ ตามลำดับ ซึ่งเวลาในการอบเทมเปอร์ 4, 8 และ 12 ชั่วโมง ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งต่างกันออกไปอย่างชัดเจน แสดงดังรูปที่ 4.24 (แสดงดังตารางที่ ค.1 - ค.3 ภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.24 ผลของความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงหลังผ่านการอบตีสเตเบิลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ

บทที่ 5

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กหล่อโครเมียมสูง โดยมีโครเมียมร้อยละ 25 โดยน้ำหนักที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อที่แตกต่างกันดังนี้ ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบชุบเปอร์อิตต้า และแบบรางเทหล่อเย็น ในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การเปลี่ยนแปลงเฟส และสมบัติด้านความแข็ง ทั้งชิ้นงานก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในสถานะที่ต่างกัน

5.1.1 ชิ้นงานในสภาพหล่อที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม แบบชุบเปอร์อิตต้า และแบบรางเทหล่อเย็น ประกอบด้วยโครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ปฐมภูมิล้อมรอบด้วยยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ที่ออสเทนไนต์บางส่วนเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ในระหว่างการเย็นตัวของแบบหล่อ ซึ่งชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมโครงสร้างของออสเทนไนต์ปฐมภูมิมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ แต่ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบชุบเปอร์อิตต้า และรางเทหล่อเย็นมีโครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์มีลักษณะเกรนกลม โดยที่ความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานในสภาพหล่อที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบรางเทหล่อเย็นมีค่าความแข็งเฉลี่ยมากกว่า ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบชุบเปอร์อิตต้า และแบบดั้งเดิม ตามลำดับ

5.1.2 ชิ้นงานหลังผ่านการอบตีสเตเบิลเซชัน พบว่าโครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ และยูเทคติกในส่วนของออสเทนไนต์บางส่วน เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ โดยมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิภายในโครงสร้างที่เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ ส่วนยูเทคติกในส่วนคาร์ไบด์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง หลังการอบตีสเตเบิลเซชันชิ้นงานมีความแข็งเฉลี่ยเพิ่มสูงกว่าในสภาพหล่อ โดยชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบชุบเปอร์อิตต้ามีความแข็งที่สูงกว่าแบบรางเทหล่อเย็น และแบบดั้งเดิม ตามลำดับ

5.1.3 หลังการอบเทมเปอร์িং พบว่าคาร์ไบด์ทุติยภูมิมีขนาดใหญ่ขึ้น และเกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิมากขึ้นตามเวลาที่ใช้อบเทมเปอร์িং อีกทั้งยังมีแนวโน้มเชื่อมติดกันเป็นแท่งยาว ซึ่งเห็นได้ชัดเจนหลังผ่านการอบเทมเปอร์িংเป็นเวลา 12 ชั่วโมง นอกจากนี้ความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานลดต่ำกว่าชิ้นงานหลังผ่านการอบตีสเตเบิลเซชัน พบว่าความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการอบเทมเปอร์িং ที่เวลา 12 ชั่วโมง ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบรางเทหล่อเย็นมีค่าความแข็งสูงสุด และชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมจะมีความแข็งรองลงมา ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบชุบเปอร์อิตต้ามีค่าความแข็งที่ต่ำสุด

5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 ในการอบตีสเทปีไลเซชันสามารถทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ และเวลาในการทดลองได้หลากหลาย แต่ควรใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 950 – 1050 องศาเซลเซียส

5.2.2 ในการอบเทมเปอร์ิ่งสามารถปรับเปลี่ยนเวลาในการอบให้มีช่วงเวลาที่แคบลงได้ เพื่อศึกษาอิทธิพลที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกลได้อย่างละเอียดมากขึ้น

5.2.3 ในการเลือกใช้ชิ้นงานทดสอบสามารถนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแบบกึ่งแข็งที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบอื่นๆ มาใช้ในการศึกษาได้

5.2.4 การทดสอบสมบัติทางกล สามารถทำการทดสอบเพิ่มได้โดยวิธีอื่นๆ เช่น การทดสอบแรงกระแทก และทดสอบการสึกหรอ แต่ขึ้นอยู่กับความพร้อมของเครื่องมือในการทดสอบ และการเตรียมชิ้นงาน

5.2.5 การเย็นตัวของเหล็กหล่อโครเมียมสูงหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิสูงสามารถปล่อยให้การเย็นตัวของชิ้นงานผ่านตัวกลางอื่นๆ ได้ เช่น ปล่อยให้เย็นตัวในน้ำ น้ำมัน เป็นต้น

5.2.6 ส่วนผสมของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ใช้ในการศึกษาสามารถปรับเปลี่ยนได้หลากหลาย

5.3 ปัญหาที่พบ และวิธีการแก้ไข

5.3.1 กรดที่ใช้ในการกัดชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคเป็นกรดที่มีความเข้มข้นสูง และมีกลิ่นแรงควรใช้อุปกรณ์ และที่ครอบงมทุกครั้งที่เมื่อปฏิบัติงานกัดกรด

5.3.2 การนำชิ้นงานออกจากเตาหลังการอบที่อุณหภูมิสูง พบว่าเปลวไฟจากเตามีอุณหภูมิที่สูงมาก อาจทำให้เกิดอันตรายกับผู้ปฏิบัติงานควรใช้ความระมัดระวัง และอุปกรณ์ป้องกันความร้อนทุกครั้งที่ปฏิบัติงาน

5.3.3 ในการอบชิ้นงานจะใช้เครื่องปั้นดินเผารองชิ้นงานก่อนนำเข้าเตาอบอุณหภูมิสูง จึงควรที่จะตรวจสอบจุดหลอมของเครื่องปั้นดินเผานั้นก่อนว่าทนอุณหภูมิได้มาก-น้อยเท่าไร

5.3.4 เครื่องปั้นดินเผาที่ใช้รองชิ้นงานมีความเปราะเวลาอบชิ้นงานเสร็จจะใช้ครีมเหล็กล้างครีบนครื่องปั้นดินเผาออกมา บางครั้งเครื่องปั้นดินเผาจะแตกทำให้ชิ้นงานอาจร่วงใส่ผู้ปฏิบัติงานได้ควรที่จะตรวจเช็คเครื่องปั้นดินเผาว่ามีสภาพพร้อมใช้งานหรือไม่

5.3.5 ในการตัดชิ้นงานควรยึดจับชิ้นงานให้แน่นก่อนทุกครั้ง เนื่องจากเวลายึดจับชิ้นงานที่ไม่แน่นจะทำให้ชิ้นงานเกิดขยับตัว ส่งผลให้ใบมีดเกิดการบิดตัว และเกิดการแตกหักได้

เอกสารอ้างอิง

- ณัฐพล ชุมแสง และคณะ. (2550). โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติการสึกกร่อนของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก ที่หล่อด้วย กระบวนการึงของแข็งแบบรางลาด. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- บัญชา ธนบุญสมบัติ และศุภกาญจน์ คำมณี. (2544). จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งประตูลูกโลกระดับจุลภาค. (พิมพ์ครั้งที่ 1). ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ.
- มนัส สติรจินดา. (2543). เหล็กหล่อ. (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รอมฎอน บุระพา, รังสิณี แคนยุกต์ และเจษฎา วรรณสินธ์. (2552). การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7: การพัฒนากระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นพองแก๊สขณะแข็งตัวสำหรับอะลูมิเนียมเกรด A356.
- วีระชัย ลามอ. (2550). ความแข็ง (Hardness). กรมวิทยาศาสตร์ บริการ.
- ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง. X-ray Diffractometer (XRD). สืบค้นเมื่อวันที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2553 จากเว็บไซต์ www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf
- ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. สืบค้นเมื่อวันที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2553 จากเว็บไซต์ www.kmitl.ac.th/sisc/SEM/SEMprepare.htm
- อัมพร เวียงมูล และคณะ. (2552). อิทธิพลของการอบชุบทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 25wt%Cr ที่เตรียมโดยการหล่อแบบดั้งเดิม และแบบกึ่งของแข็ง. มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- Amporn Wiengmoon, John T.H. Pearce and Torronin Chairuangsi. (2009). Effects of Destabilisation and Tempering on Microstructure and Properties of 14wt%Cr-1wt%Mo High Chromium Iron. China: Beifeng.
- Collins, A.N. (1988). High-Chromium White Cast Iron in Slurry Pump.
- Durman, R.W. and Elwell, D.W.J. (1985). Morphology of Eutectic Carbides in High Chromium White Irons. The British Foundryman.
- Figueredo, A.D. (2001). Science and Technology of Semi-Solid metal Processing, Worcester Polytechnic Institute. (PP.2.2-2.5, PP.2.9-2.11). United State.
- John. T.H. Pearce และบัญชา ธนบุญสมบัติ. (2542). เทคโนโลยี และโลหะวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูง. (พิมพ์ครั้งที่ 1). ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

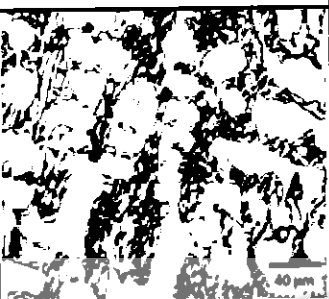
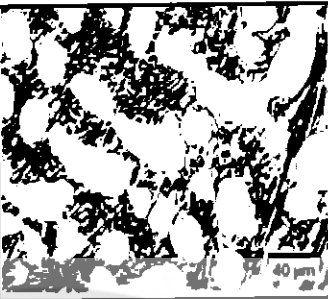
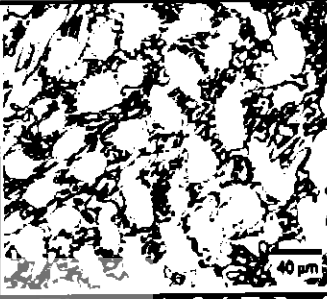
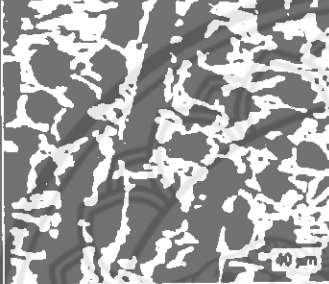
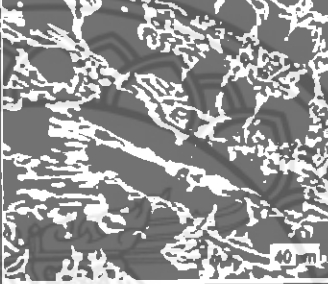
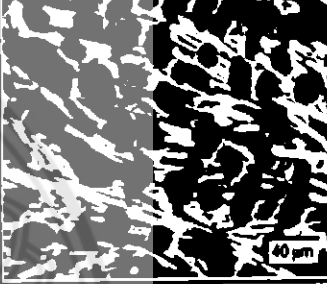
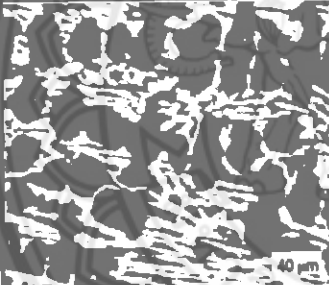
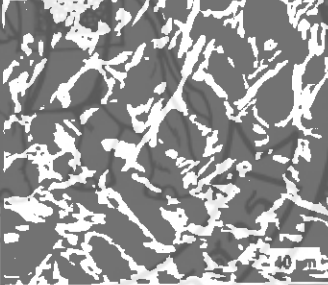
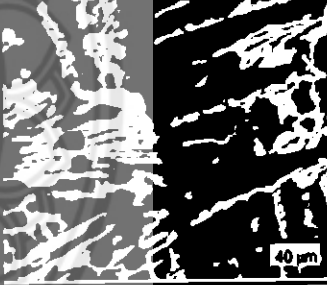
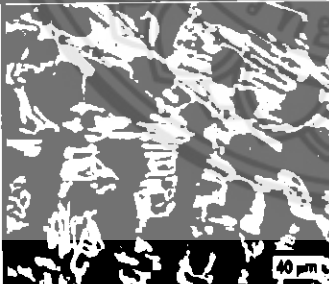
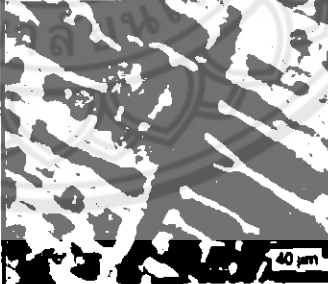
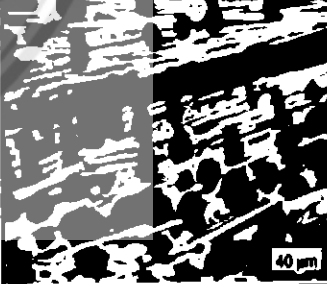
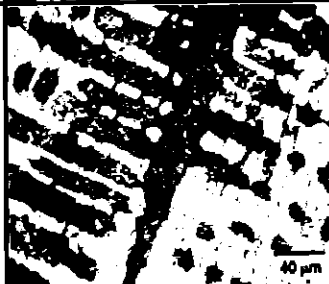
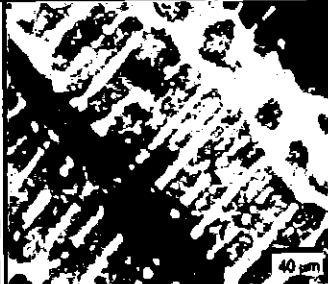
- Motegi, T. and Tanabe, F. (2004). **New Semi-Solid Casting of Copper Alloys Using and Inclined Cooling Plate, Processing of Alloy and Composite**, Limassol, Cyprus.
- Pearce, J.T.H. (1984). **Structure and Wear Performance of Abrasion Resistant Chromium White Cast Irons**. AFS Trans.
- Pearce, J.T.H. (1999). **High Chromium Irons to Resist Wear. Proceedings of The Sixth Asian Foundry Congress. (120-134)**. calcutta India
- Pearce, J.T.H.(1982). **Wear of Abrasion Resisting Meterials Ph.D Thesis**. Aston University Birmingham, England.
- Poolthong, N. (2004). **Doctor of Engineering Thesis Materials Processing Engineering Program: Semi-Solid Processing of Alloyed Cast Iron**. Nagoya University.
- Poolthong, N., Nomura H. and Takita, M. (2004). **Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of Simi-Solid Chromium Cast Iron**. Materils Transactions.
- Powell, G.L.F. and Laird li,G.(1992). **Structure, Nucleation, growth and Morphology of Secondary Carbides in High Chromium and Cr-Ni White Cast Irons**. J. Mater. Sci.
- Toshio Haga and P.Kapranos. (2002). **Journal of Materials Processing Technology: Simple Rheocasting Processes**.
- Weingmoon, A. (2005). **Microstructure of Carbides in High Chromium Cast Irons Ph.D**. Thailand: Chiang Mai University.
- Wu, H.Q., Sasaguri, N., Matsubara, Y. and Hashimoto, M. (1996). **Solidification of Malt Alloyed White Cast Iron: Type and Morphology of Carbides**. AFS Trans. (104, 103-108).

ภาคผนวก ก

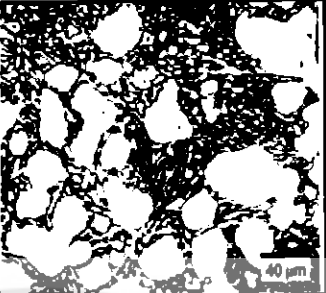
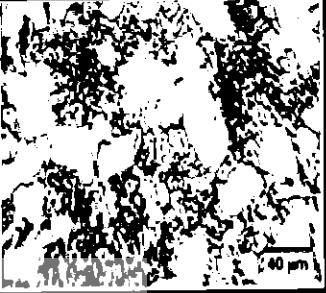
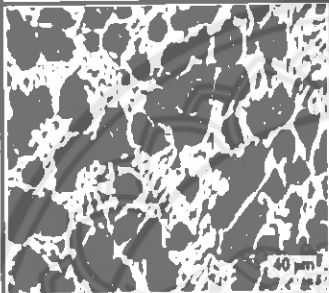
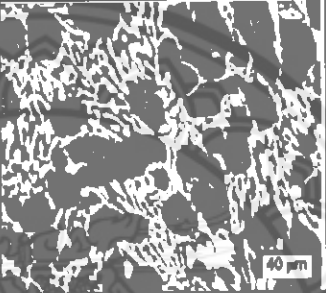
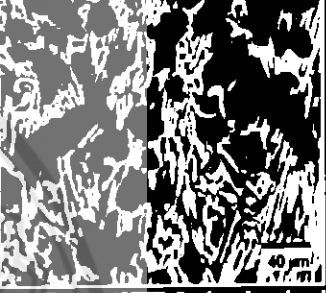
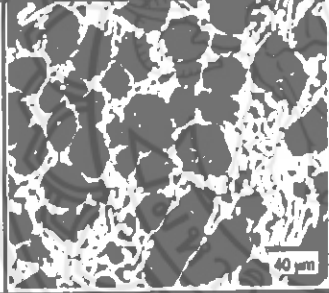
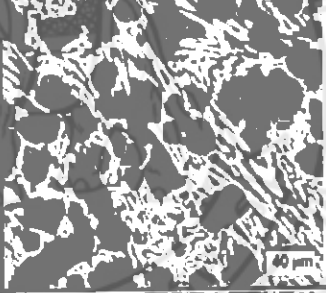
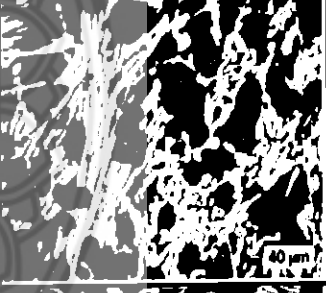
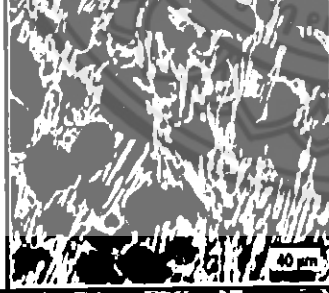
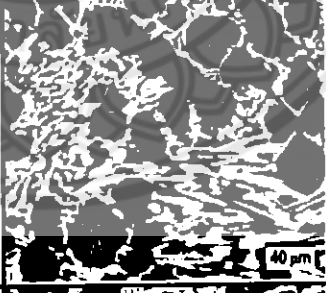
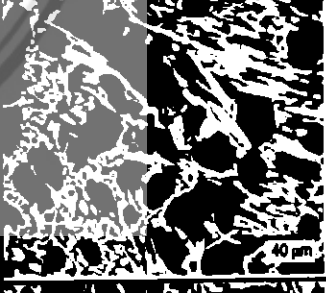
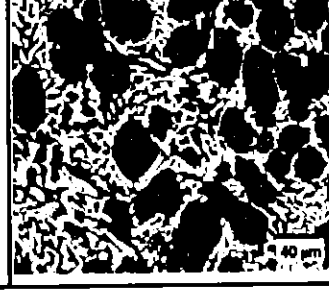
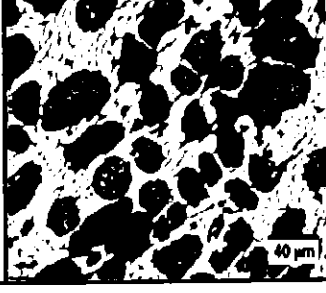
โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน
ที่ได้จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



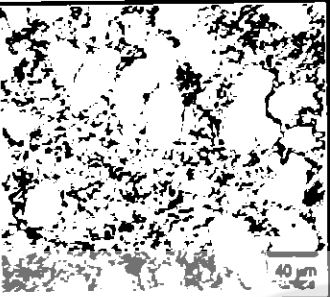
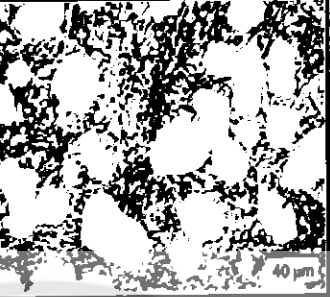
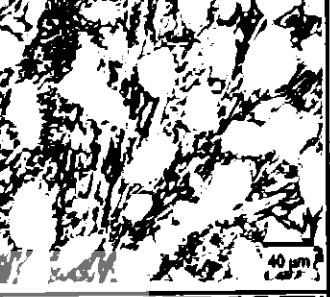
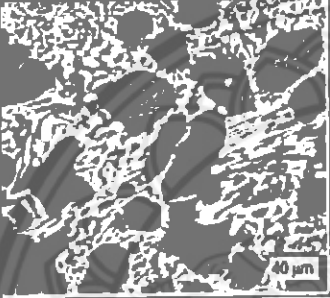
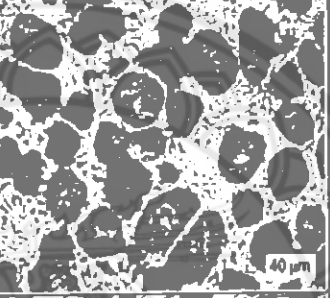
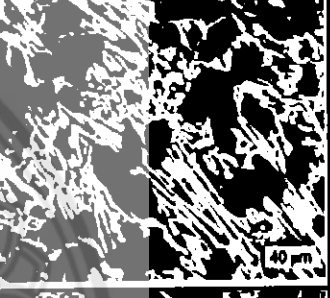
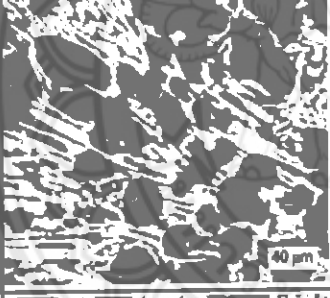
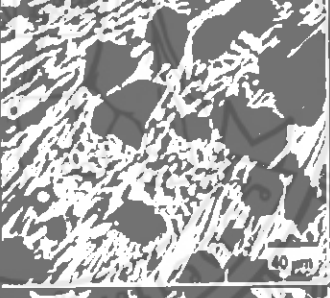
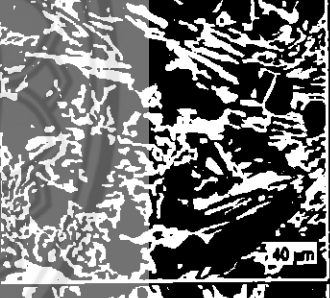
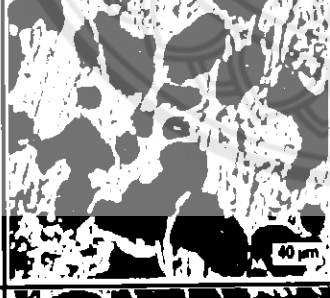
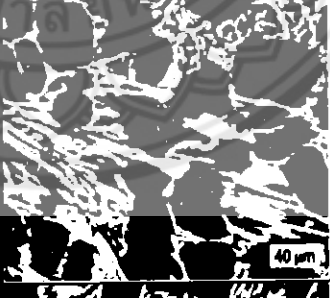
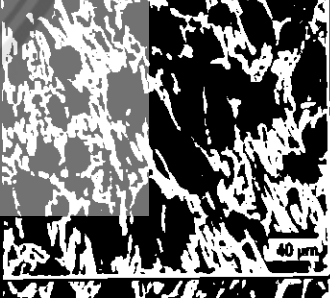
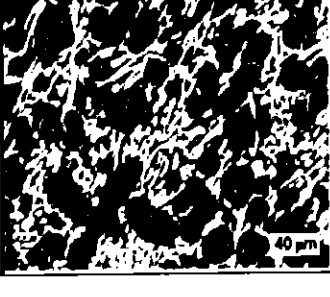
ตารางที่ ก.1 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน ณ บริเวณต่างๆ ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยการหล่อแบบดั้งเดิม (Conventional Casting)

สถานะ	ตำแหน่ง		
	ตรงกลาง	ริมใน	ริมนอก
AC			
D			
D-4			
D-8			
D-12			

ตารางที่ ก.2 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน ณ บริเวณต่างๆ ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยการหล่อแบบรางเทหล่อเย็น (Cooling Slope Casting)

สภาวะ	ตำแหน่ง		
	ตรงกลาง	ริมใน	ริมนอก
AC			
D			
D-4			
D-8			
D-12			

ตารางที่ ก.3 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน ณ บริเวณต่างๆ ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยการหล่อแบบซูเปอร์ฮีตต่ำ (Low Superheat Casting)

สภาวะ	ตำแหน่ง		
	ตรงกลาง	ริมใน	ริมนอก
AC			
D			
D-4			
D-8			
D-12			

ภาคผนวก ข

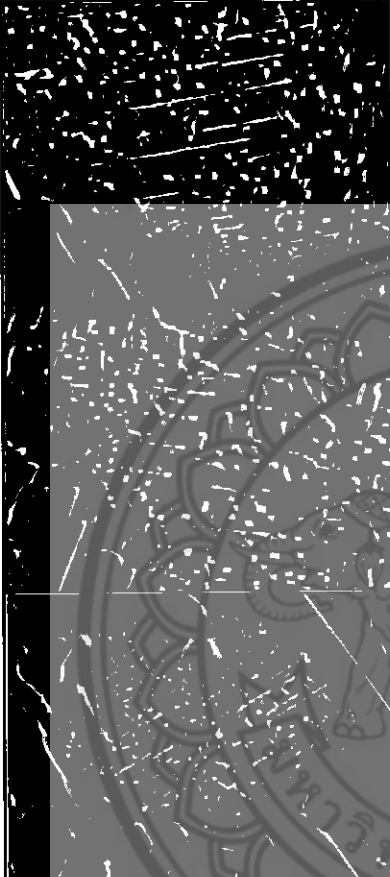
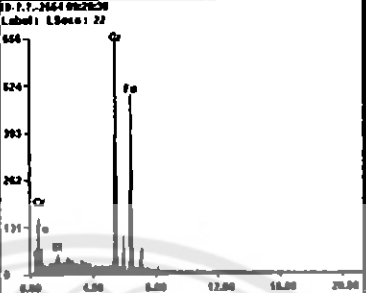
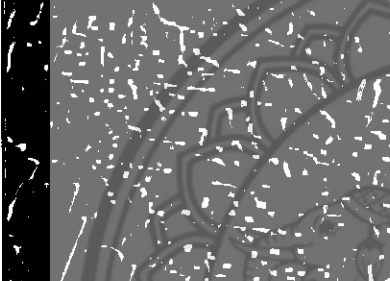
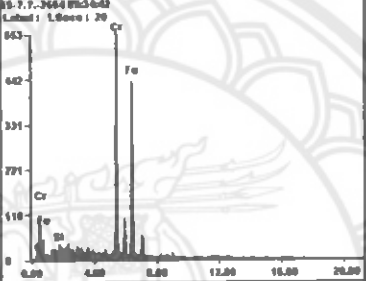
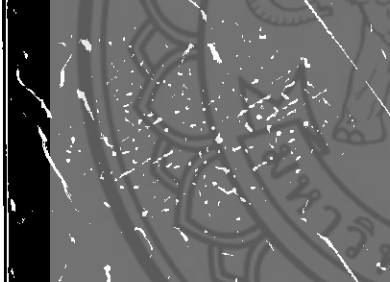
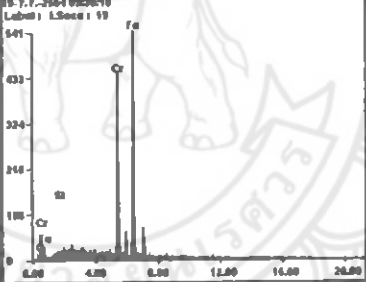
โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน
ที่ได้จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



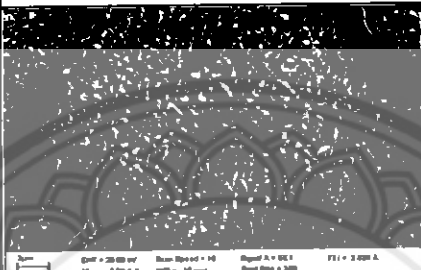
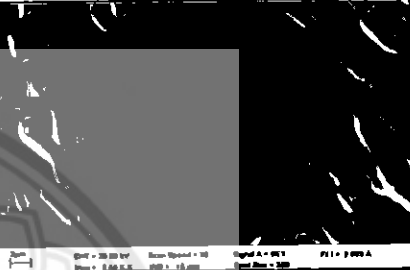
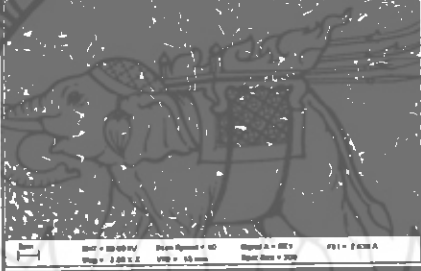
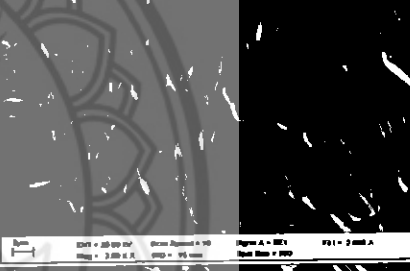
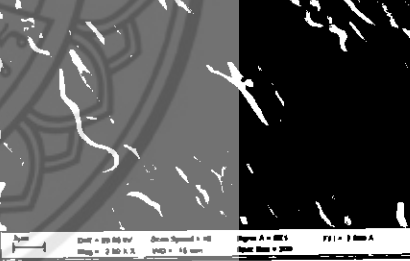
ตารางที่ ข.1 การวิเคราะห์หาธาตุ ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่บริเวณโครงสร้างพื้น และบริเวณยูเทกติก-คาร์ไบด์ ในสภาพหล่อ ของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีททำ

ตำแหน่ง	รูป	กราฟ	ปริมาณธาตุ	
			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
โครงสร้างพื้น			คาร์บอน	4.68
			ซิลิคอน	1.07
			โครเมียม	17
			เหล็ก	77.25
			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
โครงสร้างพื้น			คาร์บอน	2.26
			ซิลิคอน	1.5
			โครเมียม	18.37
			เหล็ก	77.87
			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
โครงสร้างพื้น			คาร์บอน	1.8
			ซิลิคอน	1.3
			โครเมียม	17.31
			เหล็ก	79.59
			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ยูเทกติกคาร์ไบด์			คาร์บอน	5.26
			ซิลิคอน	0.55
			โครเมียม	65.1
			เหล็ก	29.08
			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ยูเทกติกคาร์ไบด์			คาร์บอน	3.18
			ซิลิคอน	1.26
			โครเมียม	30.18
			เหล็ก	65.38
			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ยูเทกติกคาร์ไบด์			คาร์บอน	4.84
			ซิลิคอน	0.6
			โครเมียม	63.81
			เหล็ก	30.75
			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก

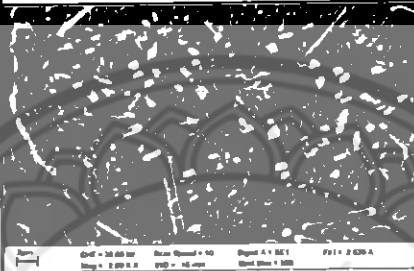
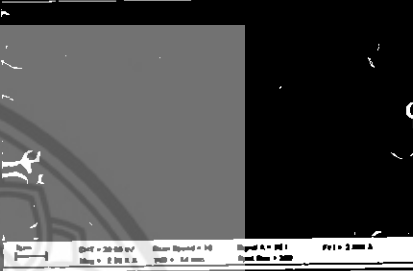
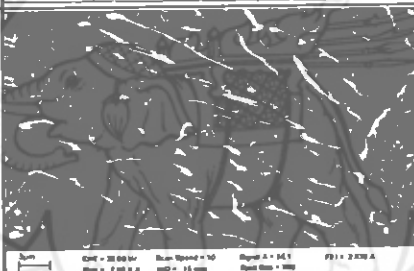
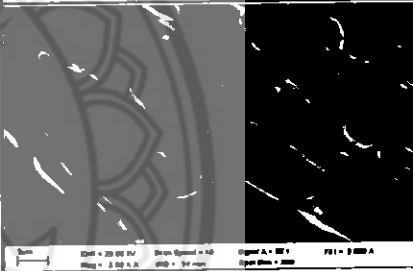
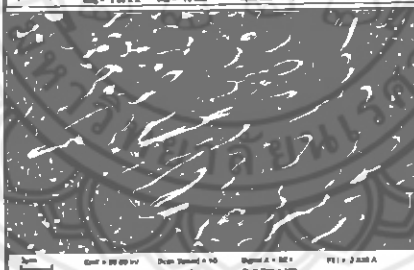
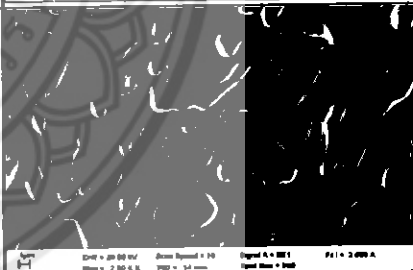
ตารางที่ ข.2 การวิเคราะห์หาธาตุ ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่บริเวณคาร์ไบด์ทุติยภูมิ ในเหล็กหล่อที่ผ่าน การอบดิสเพิลไเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และอบเทม- เปร็ง ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป โดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีตต่ำ

รูป	กราฟ	ปริมาณธาตุ	
		ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
		คาร์บอน	7.84
		ซิลิคอน	1.05
		โครเมียม	41.57
		เหล็ก	49.55
		ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
		คาร์บอน	5.13
		ซิลิคอน	0.93
		โครเมียม	40.64
		เหล็ก	53.3
		ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
		คาร์บอน	2.6
		ซิลิคอน	0.7
		โครเมียม	29
		เหล็ก	67.7
		ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก

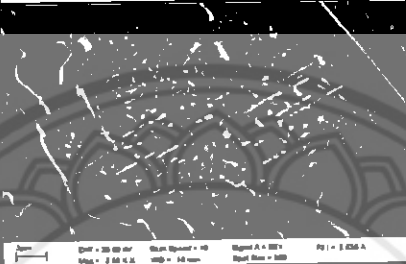
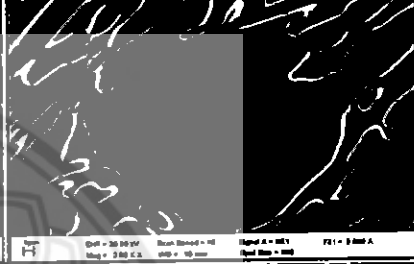
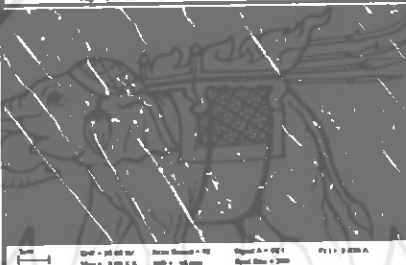
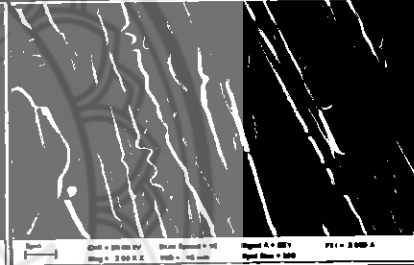
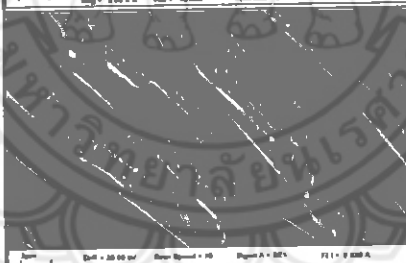
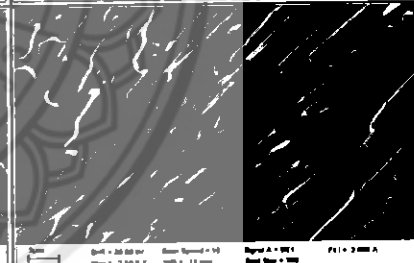
ตารางที่ ข.3 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูง โดยชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ ที่ผ่านการอบตีสเตปิลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ตำแหน่ง	วิธีการกัดกรด	
	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 4 กรัม ในน้ำกลั่น 100 ลิตร และกรด HCl 50 มิลลิลิตร แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด	KMnO_4 4 กรัม + NaOH 4 กรัม + น้ำ 100 มิลลิลิตร ให้ความร้อนอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการกัดกรดเป็นเวลา 10 นาที
โครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ ที่เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์		
ยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ ที่เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์		
		

ตารางที่ ข.4 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูง โดยชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ ที่ผ่านการอบตีสเตบิไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และอบเทมเปอริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ตำแหน่ง	วิธีการกัดกรด	
	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 4 กรัม ในน้ำกลั่น 100 ลิตร และกรด HCl 50 มิลลิลิตร แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด	KMnO_4 4 กรัม + NaOH 4 กรัม + น้ำ 100 มิลลิลิตร ให้ความร้อนอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการกัดกรดเป็นเวลา 10 นาที
โครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ ที่เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์		
		
ยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ ที่เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์		
		

ตารางที่ ข.5 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูง โดยชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ ที่ผ่านการอบตีสเตเบิลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และอบเทมเปอริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตำแหน่ง	วิธีการกัดกรด	
	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 4 กรัม ในน้ำกลั่น 100 ลิตร และกรด HCl 50 มิลลิลิตร แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด	KMnO_4 4 กรัม + NaOH 4 กรัม + น้ำ 100 มิลลิลิตร ให้ความร้อนอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการกัดกรดเป็นเวลา 10 นาที
โครงสร้างพื้นของออสเทนไนต์ ที่เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์		
ยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ ที่เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์		
		

ตารางที่ ข.6 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูง โดยชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบซูปเปอร์ฮีทต่ำ ที่ผ่านการอบตีสตีปไล่เซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และอบเทมเปอริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ตำแหน่ง	วิธีการกัดกรด	
	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 4 กรัม ในน้ำกลั่น 100 ลิตร และกรด HCl 50 มิลลิลิตร แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด	KMnO_4 4 กรัม + NaOH 4 กรัม + น้ำ 100 มิลลิลิตร ให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการกัดกรดเป็นเวลา 10 นาที
โครงสร้างพื้นของ ออสเทนไนต์ ที่เปลี่ยนเป็นมาร์ เทนไซต์		
ยูเทกติกคาร์ไบด์- ออสเทนไนต์ ที่เปลี่ยนเป็นมาร์ เทนไซต์		

ภาคผนวก ค
สมบัติทางด้านความแข็งของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทาง
ความร้อน



ตารางที่ ค.1 ผลของค่าความแข็ง ในสภาพหล่อ, หลังการอบตีสเตปโลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และการอบตีสเตปโลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีดั้งเดิม

Conventional Casting		AC	D	D-4	D-8	D-12
ความแข็ง (HV ₃₀)	1	486.36	700.03	660.39	639.56	576.58
	2	493.39	700.53	675.92	633.4	568.42
	3	481.29	695.64	662.86	644.73	562.55
	4	463.1	699.79	658.37	634.03	574.02
	5	479.07	707.45	670.84	643.43	575.3
	6	477.41	700.28	668.54	640.63	575.66
	7	490.94	694.92	668.77	632.77	564.5
	8	489.5	701.26	671.07	635.09	569.32
	9	485.51	694.67	671.3	637.43	566.99
	10	483.11	692.02	673.61	641.71	569.86
เฉลี่ย		482	698	668	638	570
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		8.67	4.43	5.78	4.35	4.90

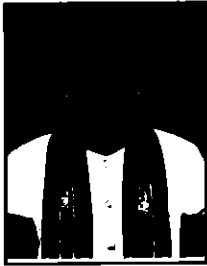
ตารางที่ ค.2 ผลของค่าความแข็ง ในสภาพหล่อ, หลังการอบตีสเตปไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และการอบตีสเตปไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธี ชูปเปอร์ฮีทต่ำ

Low Superheat Casting		AC	D	D-4	D-8	D-12
ความแข็ง (HV ₃₀)	1	480.73	709.94	693.22	652.38	566.27
	2	496.89	714.22	702.25	649.3	569.5
	3	508.52	702.49	693.22	633.19	565.92
	4	494.12	710.94	689.61	661.74	563.96
	5	507.31	686.75	699.3	644.08	565.21
	6	488.21	707.69	686.27	631.51	553.82
	7	513.26	704.71	690.81	649.08	569.32
	8	478.23	699.79	694.92	634.67	562.02
	9	484.1	705.95	699.55	646.9	581
	10	488.5	720.06	690.33	652.16	567.35
เฉลี่ย		493	706	693	645	566
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		12.26	9.01	5.07	9.73	6.81

ตารางที่ ค.3 ผลของค่าความแข็ง ในสภาพหล่อ, หลังการอบตีสเตบิไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และการอบตีสเตบิไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีวางเทหล่อเย็น

Cooling Slope Casting		AC	D	D-4	D-8	D-12
ความแข็ง (HV ₃₀)	1	505.35	691.54	688.9	652.82	610.82
	2	513.41	686.03	679.89	637.21	606.84
	3	475.2	682.25	672.45	652.16	613.42
	4	519.47	680.13	672.91	674.07	599.01
	5	511.26	673.14	663.99	636.79	607.24
	6	501.32	690.33	688.66	631.3	595.53
	7	495.57	702.49	667.63	654.37	607.64
	8	480.46	684.61	680.6	643.65	605.27
	9	520.41	699.55	684.61	637.85	606.65
	10	496.74	699.3	666.95	641.06	599.59
เฉลี่ย		501	688	676	646	605
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		15.36	9.49	9.13	12.55	5.55

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายสิวนัฐ บุญเพิ่ม
ภูมิลำเนา 67/2 หมู่ 2 ตำบลหูกวาง อำเภอบรรพตพิสัย
จังหวัดนครสวรรค์ 60180

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนนวมินทราชูทิศ
มัชฌิม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: siwanut_b@hotmail.com



ชื่อ นางสาววิลัยลักษณ์ รอดละม้าย
ภูมิลำเนา 53 หมู่ 2 ตำบลโคกสลุด อำเภอบางกระทุ่ม
จังหวัดพิษณุโลก 65110

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเฉลิมขวัญสตรี
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: wilailuk_r@windowslive.com